



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**

---

**ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΠΤΕΡΩΤΩΝ ΑΚΤΙΝΙΚΗΣ ΡΟΗΣ**

---

**Διατριβή που υπεβλήθη για την απόκτηση του  
Διπλώματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης**

**Υπό**

**Μάρκος Α. Λιονής**

**Επιβλέπων**

**Δρ. Ιωάννης Κ. Νικολός, Καθηγητής**

**Ρέθυμνο - Χανιά**

**2020-21**





**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**

---

**ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΠΤΕΡΩΤΩΝ ΑΚΤΙΝΙΚΗΣ ΡΟΗΣ**

---

**Υπό**

**Μάρκος Α. Λιονής**

**Εγκρίθηκε από:**

Δρ. Ιωάννης Κ. Νικολός

Καθηγητής, Επιβλέπων

---

Δρ. Ανάργυρος Ι. Δελής

Αναπληρωτής Καθηγητής

---

Δρ. Γεώργιος Αραμπατζής

Επίκουρος Καθηγητής

---

**Χανιά Ιούνιος 2021**

**Copyright** ©Markos A. Lionis , Rethymno Crete 2021

All rights reserve

## Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της συγκεκριμένης εργασίας και του κύκλου σπουδών μου για την απόκτηση του διπλώματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή κ. Ιωάννη Κ. Νικολό για την μεγάλη συνεισφορά του στην διπλωματική μου εργασία και όχι μόνο, καθώς ήταν παρών όποτε τον χρειαζόμουν, για να προσφέρει την βοήθεια του με τις αστείρευτες γνώσεις του πάνω στο θέμα.

Ευχαριστώ τους καθηγητές της εξεταστικής επιτροπής κ. Ανάργυρο Ι. Δελή και τον κ. Γεώργιο Αραμπατζή που με τίμησαν με την παρουσία τους ως μέλη της εξεταστικής επιτροπής.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένεια μου, και τους κοντινούς μου φίλους για την υποστήριξη, την αγάπη, και τις πολύτιμες στιγμές που μου χάρισαν όλα αυτά τα χρόνια. Χωρίς αυτούς τίποτα δεν θα ήταν εφικτό.

Η παρούσα διατριβή αφιερώνεται σε εκείνους!

Μάρκος Α. Λιονής

Ρέθυμνο, Ιούνιος 2021

## Περίληψη

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία είναι βασισμένη στην μεταπτυχιακή διατριβή του Johannes Schiff «A Preliminary Design Tool For Radial Compressors», καθώς και στο βιβλίο R.H. Aungier «Centrifugal Compressors, A Strategy for Aerodynamic Design and Analysis». Ο R.H. Aungier αποτελεί μια πολύ σημαντική επίδραση στην εξέλιξη και σχεδίαση των στοβιλομηχανών. Συνεπώς και η μεταπτυχιακή διατριβή του Mr.Johannes έχει βασιστεί κατά μεγάλο ποσοστό πάνω στα βιβλία του R.H Aungier.

Σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η υλοποίηση μιας αυτοματοποιημένης διαδικασίας για την σχεδίαση πτερωτών ακτινικής ροής για αεριοσυμπιεστές, καθώς και η λεπτομερής επεξήγηση της με όσο το δυνατόν πιο κατανοητό τρόπο γίνεται για τον αναγνώστη και τον χρήστη του προγράμματος. Η συμβολή της μεταπτυχιακής διατριβής του Mr.Johannes Schiff, καθώς και του βιβλίου του R.H Aungier στην συγκεκριμένη διατριβή είναι η κατανόηση των διαδικασιών και της αλληλουχίας τους εις βάθος, η μελέτη και η μερική χρήση του τυπολόγιου (Εφόσον σε αρκετά σημεία έχουν χρησιμοποιηθεί άλλες εξισώσεις ή και διαδικασίες εξαγωγής τιμών.), καθώς και στην σύγκριση αποτελεσμάτων για την επαλήθευση της διαδικασίας που δημιουργήθηκε. Η δημιουργία και η υλοποίηση του κώδικα έχει γίνει αποκλειστικά και μόνο από τον συγγραφέα, σε συνεργασία με τον Δρ. Ιωάννη Κ. Νικολό, καθώς κανένα τμήμα του κώδικα ή του τρόπου σύνταξης του δεν δίνεται από τις πηγές. Για την υλοποίηση του προγράμματος έχει χρησιμοποιηθεί η γλώσσα προγραμματισμού της «Matlab R2015a».

Στα πλαίσια της εργασίας θα αναπτυχθούν όλα τα επιμέρους βήματα για τον γεωμετρικό ορισμό της πλήμνης (Hub) και του κελύφους (Shroud), καθώς και των πτερυγίων του ρότορα, λαμβάνοντας υπόψη τις αρχές της αεροδυναμικής συμπεριφοράς των αντίστοιχων πτερωτών.

## Περιεχόμενα

|  |     |
|--|-----|
| Ευχαριστίες.....   | 1   |
| Περίληψη.....  | 2   |
| Κεφάλαιο 1° .....  | 5   |
| Εισαγωγή .....   | 5   |
| 1.1 Αναφορά στις στροβιλομηχανές-αεριοστροβίλους .....   | 5   |
| 1.2 Τύποι συμπίεστών ακτινικής ροής και τα βασικά τους δομικά του μέρη. ....   | 8   |
| 1.3 Βήματα και διαδικασίες σχεδίασης πτερωτών στροβιλομηχανών. ....  | 12  |
| Κεφάλαιο 2° .....  | 13  |
| Εισαγωγή .....   | 13  |
| 2.1 Το πρόγραμμα της Matlab.....   | 14  |
| 2.2 Εισαγωγή και εξαγωγή δεδομένων στο πρόγραμμα.....  | 17  |
| 2.3 Ιδεολογία και τρόπος λειτουργίας του προγράμματος.....   | 18  |
| Κεφάλαιο 3° .....  | 22  |
| Εισαγωγή .....   | 22  |
| 3.1 Ονοματολογία μεταβλητών εντός και εκτός του προγράμματος.....  | 22  |
| 3.2 Θερμοδυναμικά μεγέθη. ....   | 26  |
| 3.3 Τυπολόγιο βασικών εξισώσεων.....   | 29  |
| Κεφάλαιο 4° .....  | 44  |
| Εισαγωγή .....   | 44  |
| 4.1 Περιγραφή βασικών τμημάτων και αρχών της διαδικασίας σχεδίασης.....  | 44  |
| 4.2 Εισαγωγή δεδομένων και αρχική επεξεργασία. ....  | 48  |
| 4.3 Διαδικασία υπολογισμού χαρακτηριστικών εισόδου της πτερωτής.....   | 57  |
| 4.3.1 Περιγραφή της συνάρτησης <i>Inlet_Values</i> . ....  | 60  |
| 4.4 Δημιουργία περιγραμμάτων πλήμνης και κελύφους ( <i>Hub &amp; Shroud Contours</i> ). ....   | 72  |
| 4.5 Δημιουργία των σημείων με ίσες κατανομημένες αποστάσεις ( <i>Evenly Spaced Points</i> ) και των quasi-normal. ....   | 81  |
| 4.6 Υπολογισμός της κατανομής των γωνιών του πτερυγίου κατά μήκος των περιγραμμάτων πλήμνης και κελύφους ( <i>Blade angle distribution along hub and shroud contours</i> ). .... | 102 |
| 4.7 Διαδικασία υπολογισμού γωνίας απόκλισης των quasi-normals “deviation angle” και ορισμός της μέσης γραμμής ροής “mean streamline”. ....                                       | 111 |

|  |     |
|--|-----|
| 4.8 Διαδικασία υπολογισμού και ελέγχου του αριθμού των πτερυγίων. .... | 127 |
| Κεφάλαιο 5° .....  | 135 |
| 5.1 Παρουσίαση και περιγραφή αποτελεσμάτων. ....                       | 135 |
| Κεφάλαιο 6° .....  | 141 |
| 6.1 Συμπεράσματα .....   | 141 |
| Βιβλιογραφία. ....   | 142 |
| Παράρτημα Α. ....  | 144 |
| Περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς .....                                  | 144 |



## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>

### Εισαγωγή

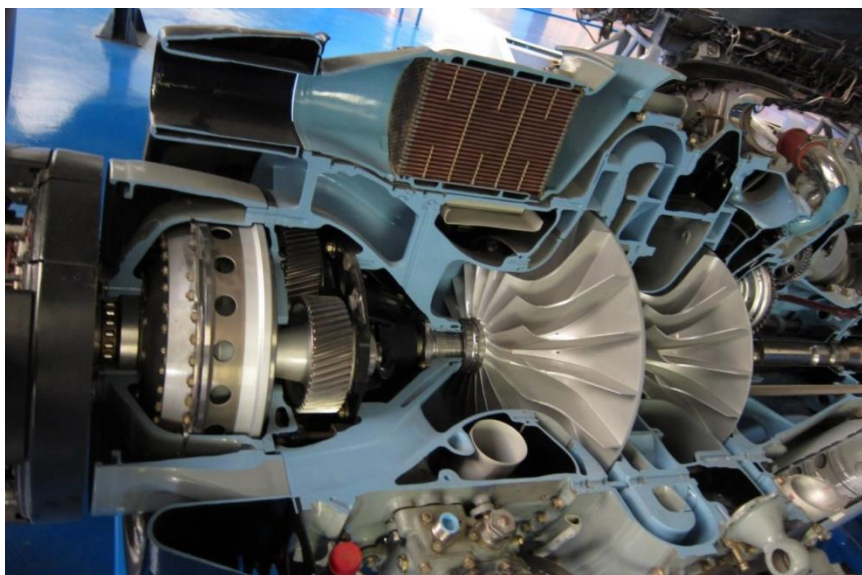
Το 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναφέρεται σε γενικές γνώσεις γύρω από τις στροβιλομηχανές και τους αεριοσυμπιεστές, οι οποίες είναι απαραίτητες για την καλύτερη κατανόηση τόσο των τμημάτων των αεριοσυμπιεστών όσο και των διαδικασιών όπου θα ακολουθήσουν στα επόμενα κεφάλαια. Επιπλέον δίνει μια μικρή εικόνα στον αναγνώστη της πλήρους διαδικασίας σχεδίασης αεριοσυμπιεστών τονίζοντας την επαναληπτικότητα και πολυπλοκότητα των διαδικασιών αυτών.

### 1.1 Αναφορά στις στροβιλομηχανές-αεριοστροβίλους

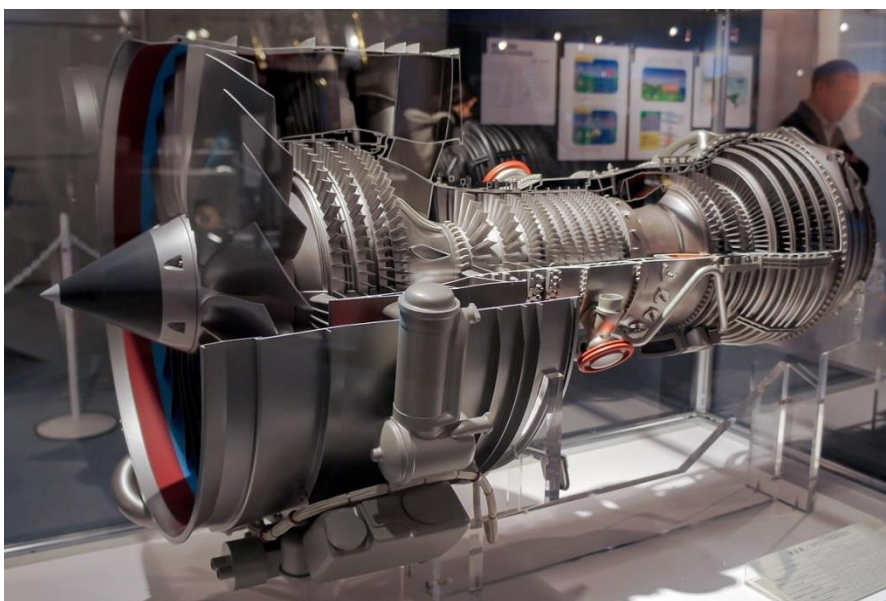
Αεριοστροβίλος ή στροβιλομηχανή θεωρείται ο τύπος κινητήρα ο οποίος έχει σχεδιαστεί να εκμεταλλεύεται-ρυθμίζει την ροή του εργαζόμενου μέσου, δηλαδή του αέρα στην προκειμένη περίπτωση, με τέτοιο τρόπο ώστε να την μετατρέπει σε ωφέλιμο έργο και ισχύ. Στόχος των στροβιλομηχανών είναι η συμπίεση του ρευστού, η ανάμειξή του με καύσιμο, η καύση του μείγματος αέρα-καυσίμου και τέλος η εκμετάλλευση της ενέργειας που προκύπτει από αυτήν την καύση.

Η χρήση των στροβιλομηχανών στις μέρες μας είναι αρκετά διαδεδομένη, σε διάφορους τομείς. Ο πιο γνωστός σε όλους μας είναι αυτός της κίνησης αεροσκαφών, ο οποίος αποτελεί και τον κλάδο με τις μεγαλύτερες επενδύσεις και διεξαγωγές ερευνών για την συνεχή εξέλιξη τέτοιων τύπων κινητήρων. Άλλα πεδία εφαρμογής των στροβιλομηχανών είναι, η κίνηση ελικοπτέρων, η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος με χρήση επίγειων αεριοστροβίλων παραγωγής ισχύος, η πρόωση πλοίων με χρήση ναυτικών αεριοστροβίλων (κυρίως σε στρατιωτικές εφαρμογές), καθώς και η κίνηση αρμάτων μάχης (Tank) .

Οι αεριοστροβίλοι χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τις στροβιλομηχανές ακτινικής ροής και τις στροβιλομηχανές αξονικής ροής. Φυσικά υπάρχουν και παραλλαγές αυτών των τύπων αεριοστροβίλων στις οποίες δεν χρειάζεται να δοθεί έμφαση στην παρούσα διπλωματική εργασία. Η διαφορά των δύο βασικών τύπων στροβιλομηχανών είναι η κατεύθυνση της ροής του αέρα κατά την συμπίεση του αλλά και καθώς διέρχεται μέσα από τον κινητήρα. Οι δύο βασικοί τύποι στροβιλομηχανών φαίνονται σε τομή στην *εικόνα 1.1.1* και *εικόνα 1.1.2* αντίστοιχα.



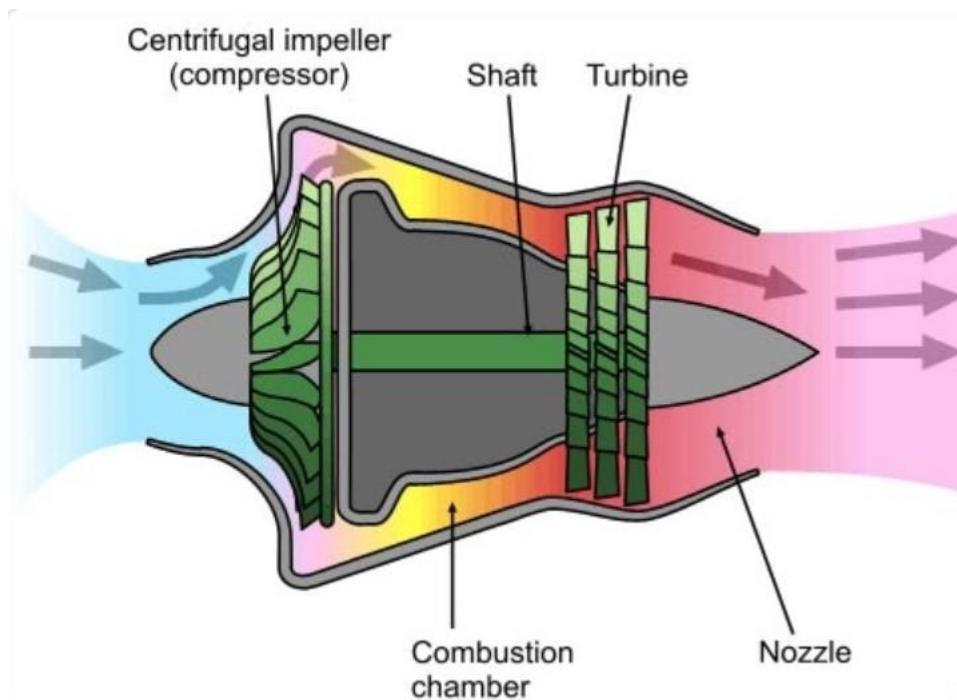
*Εικόνα 1.1.1: Τμήμα ελικοφόρου αεροστροβίλου Rolls Royce Dart με διβάθμιο συμπίεστή πλήρους ακτινικής ροής σε τομή (Πηγή: “Θερμικές και Υδροδυναμικές Μηχανές” Ιωάννης Κ. Νικολός)*



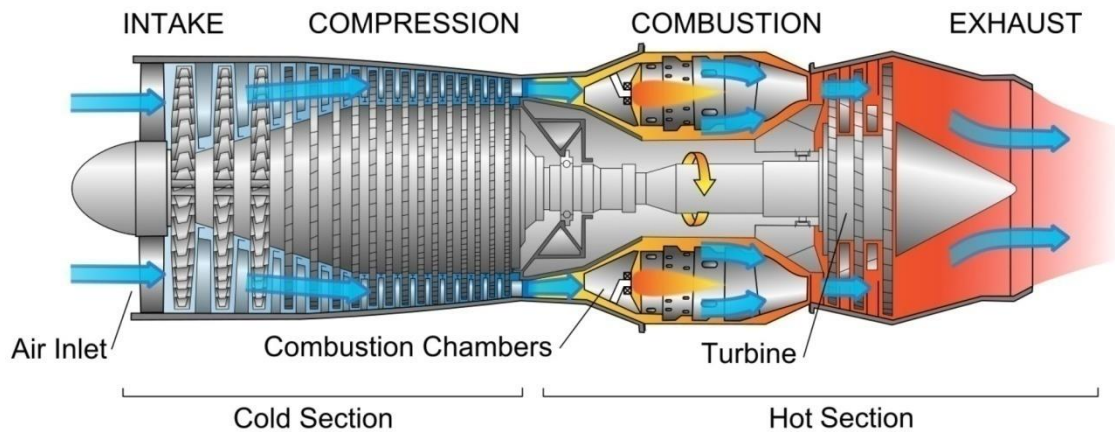
*Εικόνα 1.1.2: Μοντέλο τμήματος κινητήρα IAE V2500 Airbus πλήρους αξονικής ροής σε τομή.*

Στις στροβιλομηχανές αξονικής ροής ο αέρας εισέρχεται στον κινητήρα κατά την αξονική διεύθυνση και η ακτινική συνιστώσα της ταχύτητας του ρευστού εντός της στροβιλομηχανής παραμένει πολύ μικρή ενώ η κατεύθυνση της πορείας του αέρα παραμένει παράλληλη σε σχέση με τον κεντρικό άξονα μετάδοσης της κίνησης. Αντιθέτως σε στροβιλομηχανές πλήρους ακτινικής ροής ο αέρας εισέρχεται αξονικά στον κινητήρα, όμως στον συμπιεστή η κατεύθυνση της πορείας του αέρα αλλάζει και κινείται προς την ακτινική διεύθυνση, με πολύ μικρή αξονική συνιστώσα της ταχύτητας του ρευστού μέσα στην περρωτή. Δηλαδή το ρευστό μέσα στην περρωτή κινείται κάθετα σε σχέση με τον κεντρικό άξονα μετάδοσης της κίνησης.

Στις εικόνες 1.1.3 και 1.1.4 φαίνονται κατά αντιστοιχία των τύπων κινητήρων με τις εικόνες 1.1.1 & 1.1.2 οι κατευθύνσεις της ροής του αέρα στο εσωτερικό του κάθε τύπου κινητήρα σε απλοποιημένη μορφή.



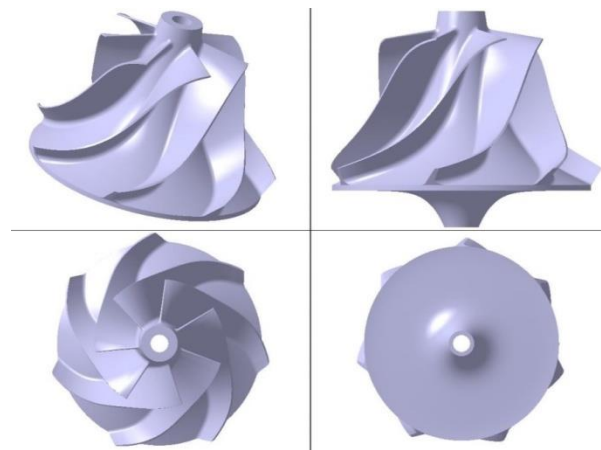
**Εικόνα 1.1.3:** Απλοποιημένο μοντέλο αναπαράστασης της ροής του αέρα σε φυγοκεντρικό κινητήρα πλήρους ακτινικής ροής(Πηγή: *Century of Flight: Turbojet Vs. Turbofan Explained by Joel N.*).



**Εικόνα 1.1.4:** Απλοποιημένο μοντέλο αναπαράστασης της ροής του αέρα σε κινητήρα πλήρους αξονικής ροής (Πηγή: “Design and Fabrication of Major Components of turbojet engine”, publication of Rolvin D.Silva ).

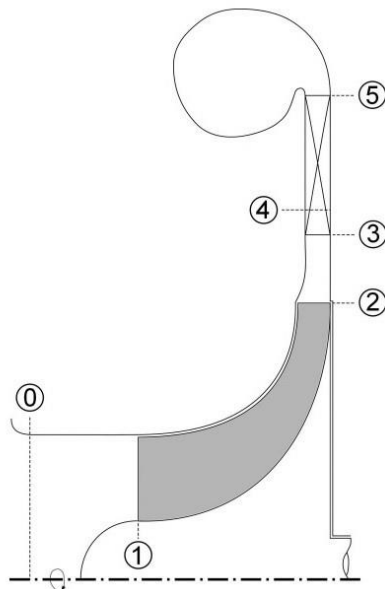
## 1.2 Τύποι συμπίεστών ακτινικής ροής και τα βασικά τους δομικά του μέρη.

Ο συμπίεστές είναι ένα από τα βασικά δομικά μέρη ενός αεριοστροβίλου και διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του αεριοστροβίλου. Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία θα σχεδιαστεί αεριοσυμπιεστής για κινητήρα πλήρους φυγοκεντρικής (ακτινικής) ροής. Ο συγκεκριμένος τύπος συμπίεστή ονομάζεται πτερωτή (impeller) και παρουσιάζεται στην **εικόνα 1.2.1**.



**Εικόνα 1.2.1:** Πτερωτή συμπίεστή ακτινικής ροής σε διάφορες γωνίες προβολής. (Πηγή: “Θερμικές και Υδροδυναμικές Μηχανές” Ιωάννης Κ. Νικολός – Μεταπτυχιακή διατριβή Ιωάννη Βαλάκου.)

Στο *σχήμα 1.2.1* φαίνεται σε μεσημβρινή τομή μια πτερωτή πάνω στην οποία αναγράφονται αριθμοί οι οποίοι προσδιορίζουν σημαντικές θέσεις κλειδιά. Με τον αριθμό « 0 » συμβολίζεται η εισαγωγή του συμπιεστή, η οποία οδηγεί το ρευστό στην θέση « 1 » όπου συμβολίζει την είσοδο του ρευστού στην πτερωτή (*Leading Edge*), της οποίας το πτερύγιο διακρίνεται με γκρι συμπαγές χρώμα. Από την θέση « 1 » μέχρι την θέση « 2 » το ρευστό βρίσκεται μέσα στην πτερωτή, ανάμεσα στα πτερύγια (*Blades*) των οποίων στόχος είναι η μεταφορά ενέργειας στο ρευστό για την αύξηση της ταχύτητας του και συνεπώς την συμπίεση του. Η θέση « 2 » ονομάζεται ακροπτερύγιο (*Tip*) ή αλλιώς ακμή εκφυγής (*Trailing Edge*) και συμβολίζει την έξοδο του εργαζόμενου μέσου από την πτερωτή και την είσοδο του στον διαχύτη (*Diffuser*) χωρίς οδηγητικά πτερύγια (*Vaneless Diffuser*), ο οποίος κυμαίνεται μεταξύ των θέσεων « 2 » και « 3 ». Η θέση « 3 » συμβολίζει την είσοδο του ρευστού σε διαχύτη με οδηγητικά πτερύγια (*Vaned Diffuser*). Η θέση « 4 » συμβολίζει μια θέση “μέσα” στα οδηγητικά πτερύγια η οποία αποτελεί κρίσιμο σημείο για αναλύσεις του συγκεκριμένου τμήματος του συμπιεστή. Η θέση « 5 » εκφράζει την έξοδο του ρευστού από τον διαχύτη, του οποίου σκοπός είναι η επιβράδυνση του ρευστού με σκοπό την αύξηση της πίεσης του. Μετά την έξοδο του ρευστού από τον διαχύτη το ρευστό εισέρχεται σε σπειροειδές κέλυφος (“κυκλικό” τμήμα μετά την θέση « 5 ») του οποίου στόχος είναι η μετατροπή της περιφερειακής κίνησης του ρευστού σε αξονική και η μετατροπή ενός τμήματος της κινητικής του ενέργειας σε πίεση.



**Σχήμα 1.2.1:** Πτερωτή πλήρως ακτινικής ροής σε μεσημβρινή τομή. (Πηγή: “A Preliminary Design Tool for Radial Compressors” Johannes Schiff.)



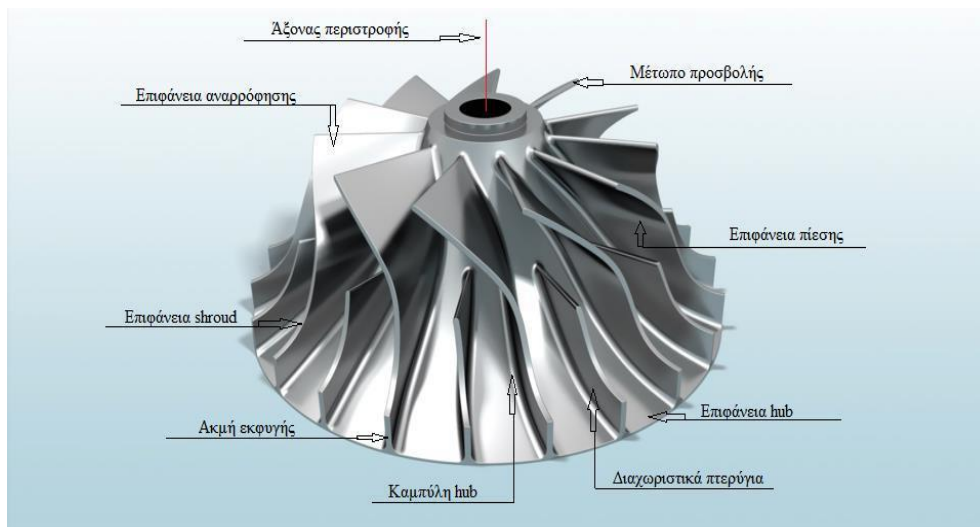
Σημαντικό ρόλο για την συνέχεια έχει η ονοματολογία διαφόρων δομικών τμημάτων της πτερωτής. Στην συγκεκριμένη διατριβή θα δοθεί μεγάλη έμφαση σε τμήματα της πτερωτής τα οποία κυμαίνονται από την θέση « 0 » έως και την θέση « 2 » με βάση το *σχήμα 1.2.1*.

Εάν θεωρηθεί ότι κινούμαστε μαζί με το ρευστό από την θέση « 0 » προς την θέση « 1 » της στροβιλομηχανής το πρώτο πράγμα που θα συναντούσαμε είναι το λεγόμενο μάτι (Eye). Το μάτι βρίσκεται μπροστά από την θέση «1» και το περίγραμμά του σχηματίζει ένα μικρό τεταρτοκύκλιο στο *σχήμα 1.2.1*. Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία το μάτι (Eye) δεν θα σχεδιαστεί. Μετά από το μάτι βρίσκεται ένα από τα βασικότερα δομικά μέρη της πτερωτής, η *πλήμνη* ή αλλιώς “Hub”. Το περίγραμμα της πλήμνης αναγράφεται στην κάτω μεριά της πτερωτής στο *σχήμα 1.2.1* και η γεωμετρία του κυμαίνεται ακριβώς από την θέση «1» έως και την θέση «2».

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι οι πτερωτές χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες με βάση κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της γεωμετρίας τους. Ένα από αυτά είναι το λεγόμενο *κέλυφος* (*Shroud*). Το κέλυφος όπως καλά το προσδιορίζει η ονομασία του είναι μια διάταξη συμπαγής με την πτερωτή η οποία “καλύπτει” τα πτερύγια. Οι πτερωτές διακρίνονται σε πτερωτές *με κέλυφος* (*Shrouded Impellers*) και πτερωτές *χωρίς κέλυφος* (*Unshrouded Impellers*). Στην *εικόνα 1.2.2* παρουσιάζεται μια πτερωτή χωρίς κέλυφος (αριστερά) και μια πτερωτή με κέλυφος (δεξιά) ενώ στην *εικόνα 1.2.3* φαίνονται τα δομικά μέρη μιας πτερωτής επάνω σε μία πτερωτή. **Η υλοποίηση της μεθοδολογίας στην εργασία αυτή γίνεται για πτερωτή χωρίς κέλυφος (*Unshrouded Impeller*).**



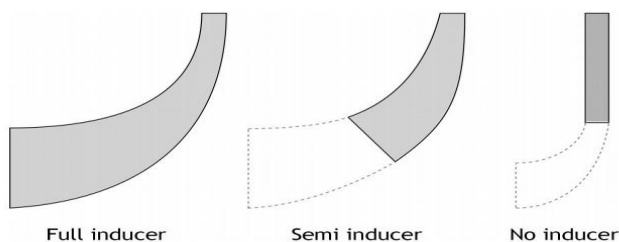
*Εικόνα 1.2.2: Αριστερά πτερωτή χωρίς κέλυφος (*Unshrouded Impeller*) και δεξιά πτερωτή με κέλυφος (*Shrouded Impeller*) (Πηγή: “*Modeling and Validation of the SR-30 Turbojet Engine*” Aalborg University).*



**Εικόνα 1.2.3 :** Αναπαράσταση δομικών μερών πτερωτής (Πηγή: Διπλωματική εργασία Χρήστου Κ. Κούβελη “Μελέτη κατασκευής ακτινικής πτερωτής αεροσυμπιεστή με φρεζάρισμα σε πέντε άξονες”).

Πρέπει να σημειωθεί ότι ακόμη και αν η πτερωτή είναι σχεδιασμένη χωρίς κέλυφος (*Unshrouded Impeller*), η πάνω μεριά του πτερυγίου συνεχίζεται να αναφέρεται σαν κέλυφος (*Shroud*). Αυτό θα γίνει αντιληπτό σε μεγάλο βαθμό στην συνέχεια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

Ένα άλλο βασικό χαρακτηριστικό το οποίο διαχωρίζει της πτερωτές σε τρεις επιπλέον υποκατηγορίες είναι ο επαγωγέας (*Inducer*). Ο επαγωγέας κοιτάζοντας το σχήμα 1.2.1 ξεκινάει από το ύψος της πλήμνης (*Hub*) στην θέση «1» και καταλήγει στο ύψος του κελύφους (*Shroud*) στην ίδια θέση. Οι τρεις υποκατηγορίες πτερωτών με βάση τον επαγωγέα είναι οι πτερωτές με πλήρη επαγωγή (*Full-Inducer*), πτερωτές με μερική επαγωγή (*Semi-inducer*) και πτερωτές χωρίς επαγωγή (*No-Inducer*). Οι τρεις αυτοί τύποι επαγωγέα φαίνονται στην εικόνα 1.2.3.



**Εικόνα 1.2.3:** Από αριστερά προς τα δεξιά φαίνονται, πτερωτή πλήρους επαγωγής, πτερωτή μερικής επαγωγής και πτερωτή χωρίς επαγωγή. (Πηγή: “A Preliminary Design Tool for Radial Compressors” Johannes Schiff.)

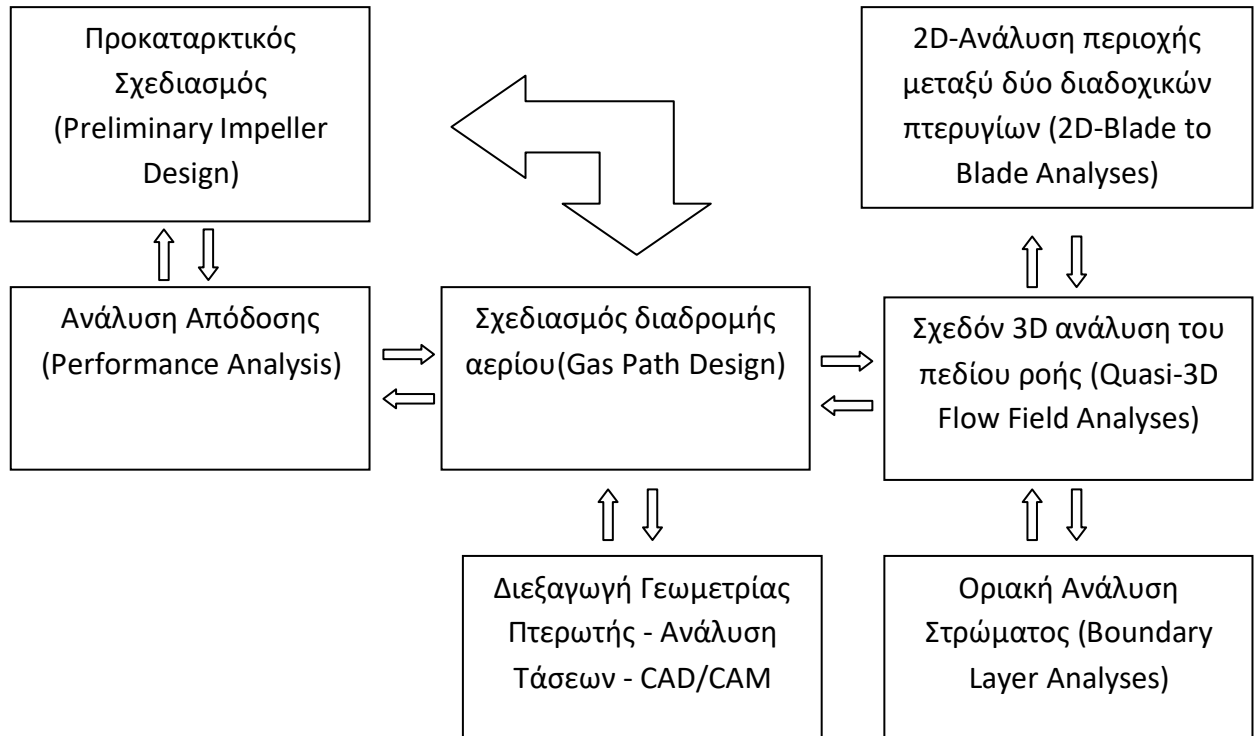
### 1.3 Βήματα και διαδικασίες σχεδίασης πτερωτών στροβιλομηχανών.

Η πτερωτή αεριοστροβίλου αποτελεί μία αρκετά πολύπλοκη σχεδιαστικά διάταξη, της οποίας η διαδικασία σχεδίασης είναι ανάλογη αυτής της πολυπλοκότητας. Η διαδικασία σχεδίασης πτερωτών χωρίζεται σε δύο βασικά διαδοχικά στάδια. Το πρώτο στάδιο το οποίο είναι και το αντικείμενο μελέτης της συγκεκριμένης διατριβής ονομάζεται *προκαταρκτικός σχεδιασμός (Preliminary Impeller Design)*. Ο προκαταρκτικός σχεδιασμός, είναι υπεύθυνος για την εύρεση-προσέγγιση συγκεκριμένων δεδομένων τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στο δεύτερο στάδιο της σχεδίασης, καθώς και για την παραγωγή διαφόρων γραφημάτων, για παράδειγμα μια αρχική προσέγγιση της μορφής της μεσημβρινής τομής της πτερωτής. Το δεύτερο στάδιο της διαδικασίας σχεδίασης πτερωτών ονομάζεται *λεπτομερής σχεδιασμός (Detailed Impeller Design)*. Ο λεπτομερής σχεδιασμός απευθύνεται σε πιο έμπειρους σχεδιαστές αεριοστροβίλων, καθώς οι αναλύσεις που γίνονται είναι περισσότερες και πιο πολύπλοκες από αυτές του προκαταρκτικού σχεδιασμού, και καθορίζουν το τελικό σχέδιο, και τα τελικά χαρακτηριστικά της πτερωτής. Τα δύο στάδια σχεδιασμού συνδέονται μεταξύ τους παρέχοντας απαραίτητα στοιχεία το ένα στο άλλο, κυρίως ο προκαταρκτικός σχεδιασμός στον λεπτομερή, ενώ για τυχόν αλλαγές ή σφάλματα στον λεπτομερή σχεδιασμό πιθανότατα να χρειαστεί η αναθεώρηση και ο επαναυπολογισμός στοιχείων μέσω του προκαταρκτικού σχεδιασμού. Ακόμη αξίζει να σημειωθεί ότι και τα δύο στάδια σχεδιασμού αποτελούν μονοδιάστατες μεθόδους ανάλυσης. Στο *γράφημα 1.3.1*, αναπαριστάται η διαδικασία του λεπτομερούς σχεδιασμού (Detailed Impeller Design Process), στο οποίο γίνεται εύκολα αντιληπτή η αλληλεξάρτηση του με τον προκαταρκτικό σχεδιασμό, αλλά και με τις υπόλοιπες διαδικασίες όπου αναγράφονται, καθώς τα βέλη και η κατεύθυνση τους συμβολίζει την παροχή δεδομένων από μια διαδικασία σε μια άλλη.

Όπως προαναφέρθηκε η συγκεκριμένη διατριβή επικεντρώνεται στην δημιουργία προγράμματος για την υλοποίηση του σταδίου του προκαταρκτικού σχεδιασμού. Ο προκαταρκτικός σχεδιασμός αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία, κατά την οποία ο χρήστης πρέπει να δίνει στο πρόγραμμα όσο το δυνατόν λιγότερα δεδομένα, και το πρόγραμμα να του επιστρέφει την βέλτιστη δυνατή λύση, καθώς και την πλήρη δισδιάστατη γεωμετρία της πτερωτής. Το σύνολο και το είδος των δεδομένων παροχής προς το πρόγραμμα περιγράφεται στα μετέπειτα κεφάλαια. Όλα τα παραπάνω σε συνδυασμό με την γεωμετρική απεικόνιση της πτερωτής, επιτρέπουν στον χρήστη να αντιληφθεί την πολυπλοκότητα αυτών των διαδικασιών, ενώ ταυτόχρονα καθιστούν



τον προκαταρκτικό σχεδιασμό (Preliminary Impeller Design) ένα σημαντικό εργαλείο σχεδιασμού για μη έμπειρους σχεδιαστές αεροσυμπιεστών.



*Γράφημα 1.3.1: Διάγραμμα Ροής Λεπτομερούς Διαδικασίας Σχεδίασης Πτερωτών*

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>

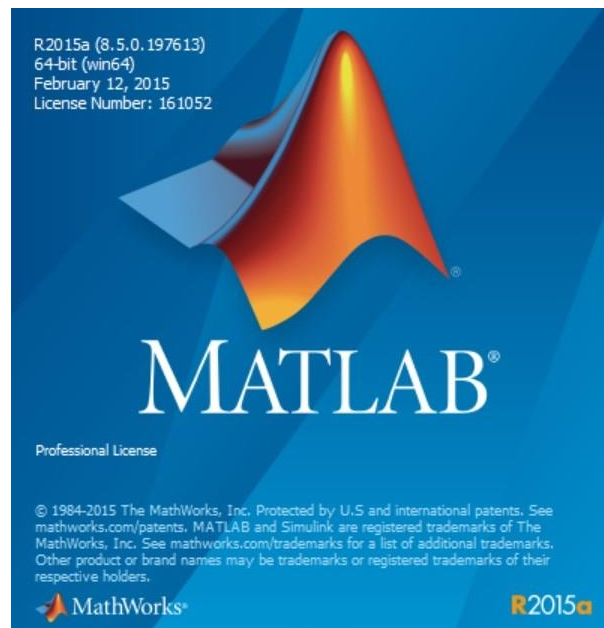
### Εισαγωγή

Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο θα γίνουν αναφορές, στο πρόγραμμα το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για την υλοποίηση της αυτοματοποιημένης διαδικασίας, στον τρόπο χρήσης του καθώς και σε απαραίτητες ενέργειες τις οποίες πρέπει να εκτελέσει ο χρήστης για την ομαλή λειτουργία του κώδικα. Ακόμη θα παρουσιαστούν οι βασικές αρχές της ιδεολογίας αλλά και του τρόπου λειτουργίας του κώδικα σε συνδυασμό με διαγράμματα ροών για γραφική απεικόνιση με στόχο την βαθύτερη κατανόηση.

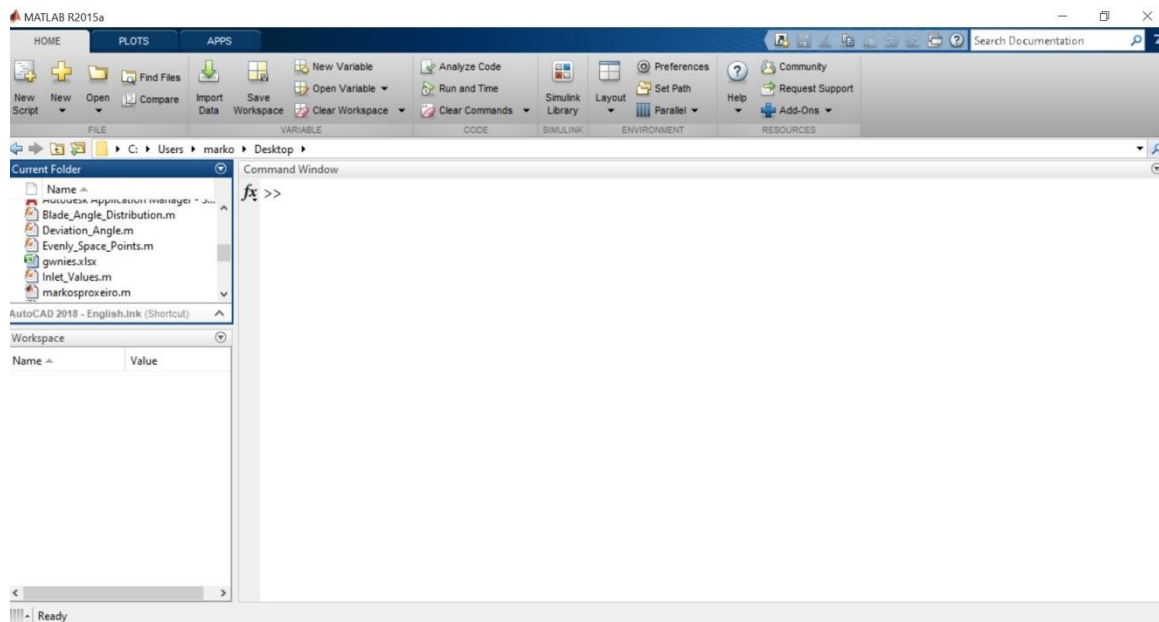
## 2.1 Το πρόγραμμα της Matlab.

Η Matlab είναι μια γλώσσα προγραμματισμού 4<sup>ης</sup> γενιάς η οποία λειτουργεί υπό περιβάλλον αριθμητικής υπολογιστικής ή αλλιώς αριθμητικής ανάλυσης. Αποτελεί εργαλείο κυρίως για την επίλυση μαθηματικών προβλημάτων. Παρόλα αυτά χρησιμοποιείται και από τους κλάδους της μηχανικής, των οικονομικών και των επιστημών αφού διαθέτει γνωστές εντολές του χώρου του προγραμματισμού, όπως η «while», η «for», η «if» και άλλες, γεγονός που την καθιστά ικανή και για προγραμματισμό. Η Matlab διαθέτει περισσότερους από 4.000.000 χρήστες παγκοσμίως.

Για την λειτουργία του προγράμματος, ο χρήστης θα πρέπει να έχει εγκαταστήσει το πρόγραμμα της Matlab στον υπολογιστή του. Η συγκεκριμένη εργασία διεξήχθη με την “*Matlab R2015a*”. Ανοίγοντας το πρόγραμμα το πρώτο πράγμα που θα αντικρίσει ο χρήστης είναι το εικονίδιο της διαδικασίας εκκίνησης του προγράμματος όπου φαίνεται στην *εικόνα 2.1.1* και μετέπειτα η επιφάνεια εργασίας του προγράμματος η οποία φαίνεται στην *εικόνα 2.1.2*.



*Εικόνα 2.1.1: Εικονίδιο εκκίνησης της Matlab R2015a.*

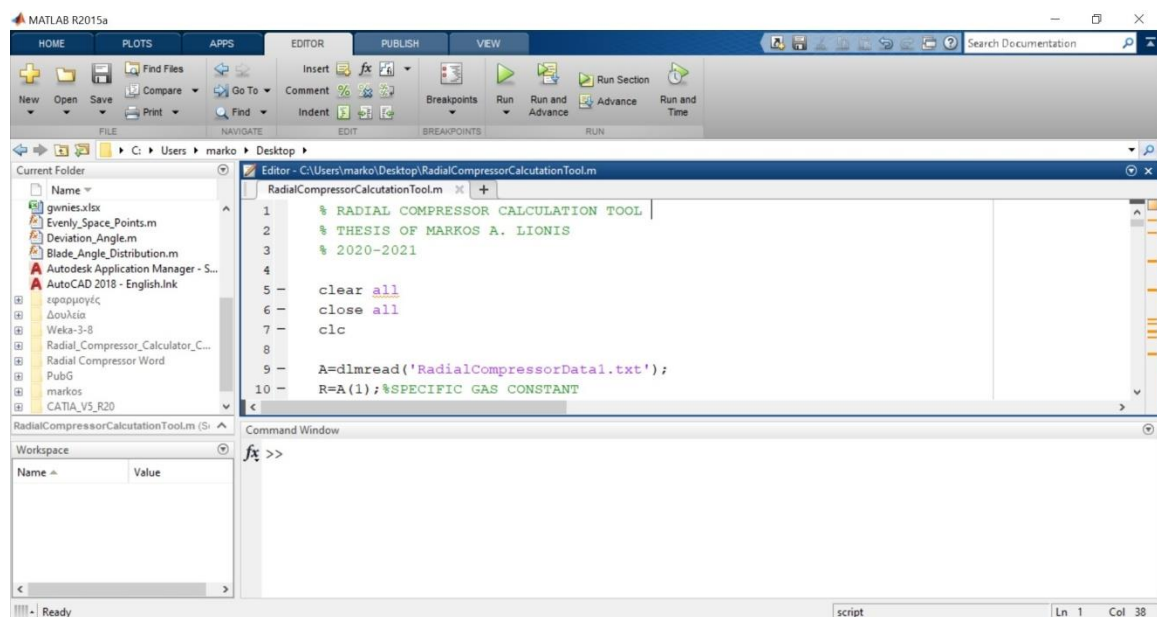


*Εικόνα 2.1.2: Η αρχικής επιφάνειας εργασίας του προγράμματος αμέσως μετά την εκκίνηση του.*

Στην επιφάνεια εργασίας του προγράμματος διακρίνονται προς το παρόν 3 κύρια παράθυρα, εκείνο του “Current Folder”, το “Workspace” και το “Command Window”. Από το παράθυρο του “Current Folder” μπορεί να επιλεγεί ποιο αρχείο χρειάζεται να ανοιχθεί με σκοπό την χρήση του. Με τα τέσσερα πρώτα μικρά εικονίδια ακριβώς από πάνω μπορεί ο χρήστης να κινηθεί προς τα εμπρός ή προς τα πίσω σε σχέση με την σειρά με την οποία έχει ανοίξει τους φακέλους, ή ακόμα να αναζητήσει αρχείο ή φάκελο που υπάρχει στον τρέχον υπολογιστή. Στο παράθυρο του “Workspace” εμφανίζονται όλα τα αποτελέσματα των μεταβλητών τις οποίες η Matlab είτε τις δέχεται σαν ορίσματα είτε τις υπολογίζει. Το παράθυρο του “Command Window” αποτελεί ένα χώρο στον οποίο εμφανίζονται αρκετά είδη δεδομένων. Ένα από τα είδη δεδομένων είναι τα σφάλματα τα οποία τυχόν υπάρχουν στο πρόγραμμα τονίζοντας το σφάλμα που υπάρχει καθώς και την γραμμή του κώδικα στην οποία είναι. Επίσης στο ίδιο παράθυρο εμφανίζονται όλα όσα έχει ζητήσει ο προγραμματιστής στο πρόγραμμα να εκτυπώσει και επιπλέον όλες εκείνες οι μεταβλητές μαζί με τις τιμές τους, στις οποίες στο τέλος της εξίσωσης για την εκχώρηση της τιμής τους δεν υπάρχει το σύμβολο του ελληνικού ερωτηματικού (;). Επιπροσθέτως στο παράθυρο του “Command window” μπορούν να εκτελεστούν πράξεις ή και να συνταχθεί κώδικας ο

οποίος όμως μετά το κλείσιμο του προγράμματος δεν θα αποθηκευτεί και θα χαθεί. Εν ολίγοις μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σαν “πρόχειρο” για γρήγορους υπολογισμούς.

Μετά το άνοιγμα ενός αρχείου (.m) της Matlab (πχ. Radial\_Compressor\_Calculator\_Tool.m) ή την δημιουργία νέου αρχείου από την εντολή “New script”, εμφανίζεται άλλο ένα παράθυρο το οποίο ονομάζεται “Editor” και φαίνεται στην εικόνα 2.1.3. Στο παράθυρο του “Editor” ο προγραμματιστής γράφει τις εντολές που θέλει να εκτελέσει το πρόγραμμα. Οι γραμμές κώδικα οι οποίες έχουν πράσινο χρώμα και το σύμβολο του ποσοστού από μπροστά (%) συμβολίζουν σχόλιο και το πρόγραμμα δεν τις λαμβάνει ως υπολογίσιμες γραμμές κώδικα και τις προσπερνάει. Το πρόγραμμα το οποίο έχει δημιουργηθεί ονομάζεται “Radial Compressor Calculation Tool” και το όνομα του αρχείου είναι “RadialCompressorCalculationTool.m”. Το πρόγραμμα που δημιουργήθηκε εκτός από τις βασικές πράξεις που εκτελεί στον κορμό του, καλεί ακόμα 3 διαφορετικές συναρτήσεις για τον υπολογισμό απαραίτητων στοιχείων. Οι συναρτήσεις αποτελούν τμήματα κώδικα, τα οποία εκτελούνται όταν τις καλεί κάποιο πρόγραμμα. Η συναρτήσεις σε ένα πρόγραμμα συμβάλλουν στην ευκολότερη διόρθωση του συγκεκριμένου τμήματος της συνάρτησης σε περίπτωση σφαλμάτων ή πιθανής αλλαγής του συγκεκριμένου τμήματος του κώδικα, στην ταχύτερη εκτέλεση του προγράμματος αφού το μέγεθος του προγράμματος μειώνεται όσο και το μέγεθος της



Εικόνα 2.1.3: Παρουσίαση επιφάνειας εργασίας κατά την διαδικασία προγραμματισμού στην Matlab.

συνάρτησης, καθώς και επειδή η συνάρτηση επιστρέφει στο πρόγραμμα μόνο τις απαραίτητες τιμές των μεταβλητών που χρειάζονται για την εκτέλεση του υπόλοιπου προγράμματος. Αυτό οδηγεί σε μικρότερη αποθήκευση τιμών μεταβλητών που δεν είναι χρήσιμες στην κύρια δομή (σώμα) του προγράμματος.

Τα ονόματα των συναρτήσεων αυτών με την σειρά που καλούνται στο πρόγραμμα είναι, *"Inlet\_Values.m"*, *"Evenly\_Spaced\_Points.m"* και *"Blade\_Angle\_Distribution.m"*. Ο ρόλος της κάθε συνάρτησης περιγράφεται σε μετέπειτα κεφάλαια.

Στην *εικόνα 2.1.3* στο επάνω μέρος του παραθύρου εμφανίζονται οι έξι καρτέλες της Matlab οι οποίες είναι το "Home", "Plots", "Apps", "Editor" και "View". Για να ξεκινήσει την λειτουργία του κάποιο πρόγραμμα στην Matlab, αρκεί ο χρήστης να επιλέξει από την καρτέλα του "Editor" την εντολή "Run" η οποία συμβολίζεται με το πλάγιο πράσινο τρίγωνο.

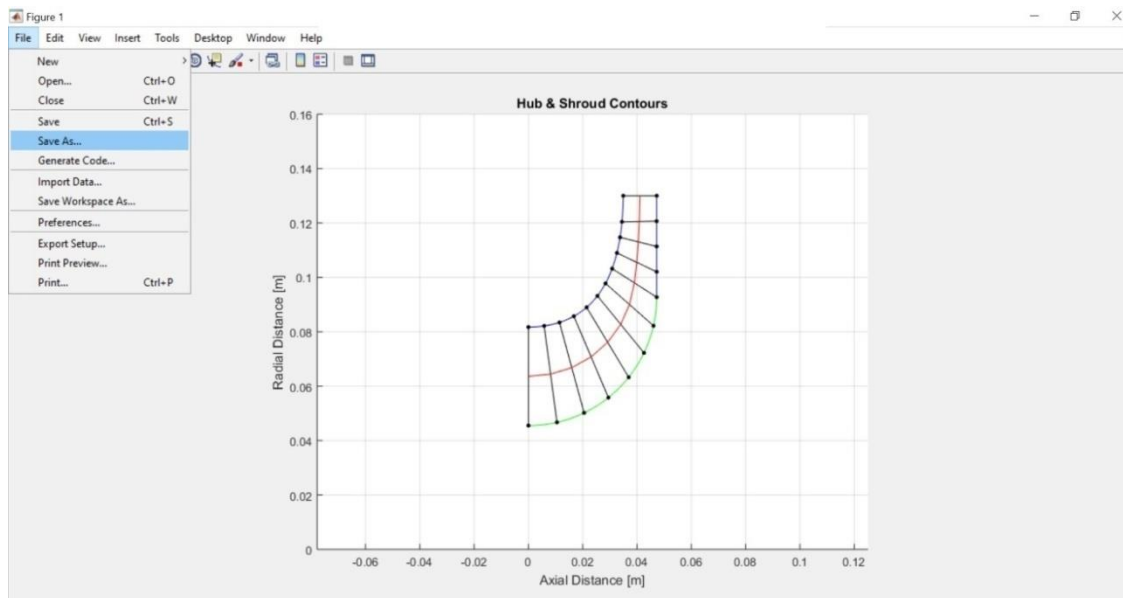
Απαραίτητο για την λειτουργία και την εκτέλεση του προγράμματος είναι ο κώδικας, και όλες οι συναρτήσεις να βρίσκονται στον ίδιο φάκελο (χώρο) με το εγκατεστημένο πρόγραμμα της Matlab. Εάν για παράδειγμα, η Matlab βρίσκεται στην επιφάνεια εργασίας (Desktop) και τα προγράμματα βρίσκονται σε άλλο φάκελο και όχι στην επιφάνεια εργασίας το πρόγραμμα δεν θα τρέξει, μέχρι να μεταφερθούν όλα στην επιφάνεια εργασίας.

## 2.2 Εισαγωγή και εξαγωγή δεδομένων στο πρόγραμμα.

Αφού όλες οι διαδικασίες την προηγούμενης ενότητας έχουν γίνει σωστά, το επόμενο βήμα είναι χρήστης να συμπληρώσει τα δεδομένα που του ζητούνται στο αρχείο excel το οποίο εμπεριέχεται μαζί με όλα τα αρχεία της Matlab. Το όνομα του excel αρχείου είναι *"Radial Compressor Data"*. Έπειτα επιλέγοντας μόνο την στήλη με τους αριθμούς και χωρίς να αλλάξει η σειρά ή η διάταξη τους, τα στοιχεία αντιγράφονται και μεταφέρονται στο ".txt" αρχείο, το οποίο ονομάζεται *"Radial\_Compressor\_Data1"* (Βρίσκεται μαζί με τα υπόλοιπα αρχεία.) όπου και γίνεται η επικόλληση τους. Το όνομα του ".txt" αρχείου δεν πρέπει να αλλάξει, διότι το πρόγραμμα δεν θα μπορεί να βρει το αρχείο και συνεπώς δεν θα μπορεί να εισάγει τα δεδομένα που εμπεριέχει. Σε περίπτωση χρήσης άλλου ".txt" αρχείου το όνομα πρέπει να παραμείνει το ίδιο ή διαφορετικά να τοποθετηθεί το ακριβές όνομα του νέου ".txt" αρχείου στην εντολή της 9<sup>ης</sup> γραμμής του κυρίως προγράμματος *"RadialCompressorCalculationTool.m"*. Σε περίπτωση αλλαγής η συγκεκριμένη εντολή

συντάσσεται ως “ `dlmread('Name_of_file.txt');` ” και η χρήση της είναι να εισάγει τα δεδομένα που υπάρχουν στο “.txt” αρχείο σε πίνακα με όνομα “A”.

Μετά το τέλος του προγράμματος τα αποτελέσματα που προκύπτουν και που πρέπει να εξάγει μια διαδικασία προκαταρκτικού σχεδιασμού παρουσιάζονται στο “Command Window”. Τα αποτελέσματα για τα οποία χρειάζεται γραφική αναπαράσταση εμφανίζονται σε ξεχωριστά παράθυρα επωνομαζόμενα “Figure”. Τα γραφήματα αυτά δίνουν την δυνατότητα στον χρήστη να τα αποθηκεύσει χωρίς να χαθούν, ακόμα και αν τρέξει το πρόγραμμα για διαφορετικά δεδομένα αυτή την φορά. Ο τρόπος αποθήκευσης ενός γραφήματος είναι ο κλασσικός τρόπος αποθήκευσης αρχείων και φαίνεται στην *εικόνα 2.2.1*.



*Εικόνα 2.2.1: Υπόδειξη τρόπου αποθήκευσης γραφήματος που προκύπτει μετά την επιτυχή ολοκλήρωση του προγράμματος και την εξαγωγή λογικών αποτελεσμάτων.*

## 2.3 Ιδεολογία και τρόπος λειτουργίας του προγράμματος.

Στην συγκεκριμένη υποενότητα θα παρουσιαστεί η γενικευμένη εικόνα της βασικής ιδεολογικής συμπεριφοράς του κώδικα, χωρίς να γίνουν αναφορές σε λεπτομέρειες των διαδικασιών αυτών, μιας και αυτές θα περιγραφτούν στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναλυτικά.

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί, οι διαδικασίες σχεδιασμού πτερωτών είναι διαδικασίες οι οποίες έχουν ως στόχο την εύρεση της βέλτιστης δυνατής λύσης, για τα δεδομένα τα οποία παρέχει ο χρήστης στο εκάστοτε πρόγραμμα. Η εύρεση βέλτιστης δυνατής λύσης ισοδυναμεί με επαναληπτική διαδικασία η οποία τερματίζει όταν η εν λόγω λύση έχει βρεθεί. Ακόμη η εύρεση της τελικής βέλτιστης δυνατής λύσης προκύπτει από την εύρεση των βέλτιστων λύσεων αρκετών άλλων παραγόντων. Επομένως είναι εύκολο κανείς να φανταστεί ότι η ιδεολογία του προγράμματος είναι η ύπαρξη πολλών διαφορετικών δομών επανάληψης, όπου συχνά η μια δομή είναι μέσα στην άλλη, και των οποίων στόχος είναι άλλες φορές η σύγκλιση και άλλες φορές η επιλογή, διαφόρων τιμών συγκεκριμένων μεταβλητών.

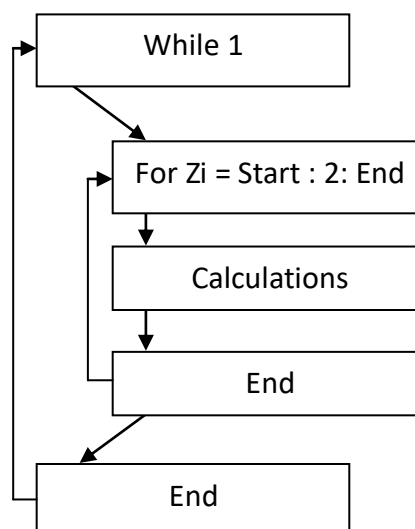
Πιο συγκεκριμένα, το πρόγραμμα αποτελείται από μια βασική δομή επανάληψης η οποία επαναλαμβάνεται μια φορά για να βρει την βέλτιστη λύση του προβλήματος, και άλλη μια φορά για κάποια συγκεκριμένα δεδομένα (πχ. *Ο αριθμός των πτερυγίων*) της βέλτιστης λύσης που βρέθηκε με την πρώτη επανάληψη. Σκοπός της δεύτερης επανάληψης της κύριας επαναληπτικής διαδικασίας είναι η εξαγωγή και η εμφάνιση των στοιχείων της βέλτιστης λύσης. Για την εισαγωγή όμως στην κύρια δομή επανάληψης θα πρέπει πρώτα ο κώδικας να έχει εισάγει όλα τα στοιχεία του “.txt” αρχείου και στην συνέχεια να κάνει κάποιους υπολογισμούς βασικών μεταβλητών οι οποίες είναι απαραίτητες για την συνέχεια.

Αφού ο κώδικας εκτελέσει τους υπολογισμούς έξω από την κύρια δομή επανάληψης μπορεί να εισέλθει σε αυτήν, στην οποία καλείται να υλοποιήσει υπολογισμούς για την εύρεση και αναπαράσταση βασικών δομικών μερών της πτερωτής όπως το περίγραμμα της πλήμνης και του κελύφους (Hub & Shroud Contours) αλλά και για την εύρεση μεγεθών όπως για παράδειγμα οι ακτίνες εισόδου, οι κατανομές των γωνιών των πτερυγίων, το ποσοστό φορτίσεων των πτερυγίων κ.α. Μια συνοπτική παρουσίαση των βασικών διαδικασιών οι οποίες ταυτόχρονα εμπεριέχουν και σημαντικές δομές επανάληψης για την εύρεση λύσης είναι:

- Εύρεση των χαρακτηριστικών στην είσοδο της πτερωτής (Inlet values calculations)
- Δημιουργία σημείων σε ίσες κατανεμημένες αποστάσεις κατά μήκος της πλήμνης και κελύφους (Evenly spaced points along hub & shroud contours).
- Εύρεση της κατανομής των γωνιών των πτερυγίων κατά μήκος της πλήμνης και κελύφους (Blade angle distribution along hub & shroud).

- Υπολογισμός της γωνίας απόκλισης των quasi-normal από τα normal (Deviation angle calculation).
- Υπολογισμός μήκους μέσης γραμμής πτερυγίου (Mean streamline length calculation).
- Εύρεση της τιμής φορτίσεως των πτερυγίων (Blade loading calculations).

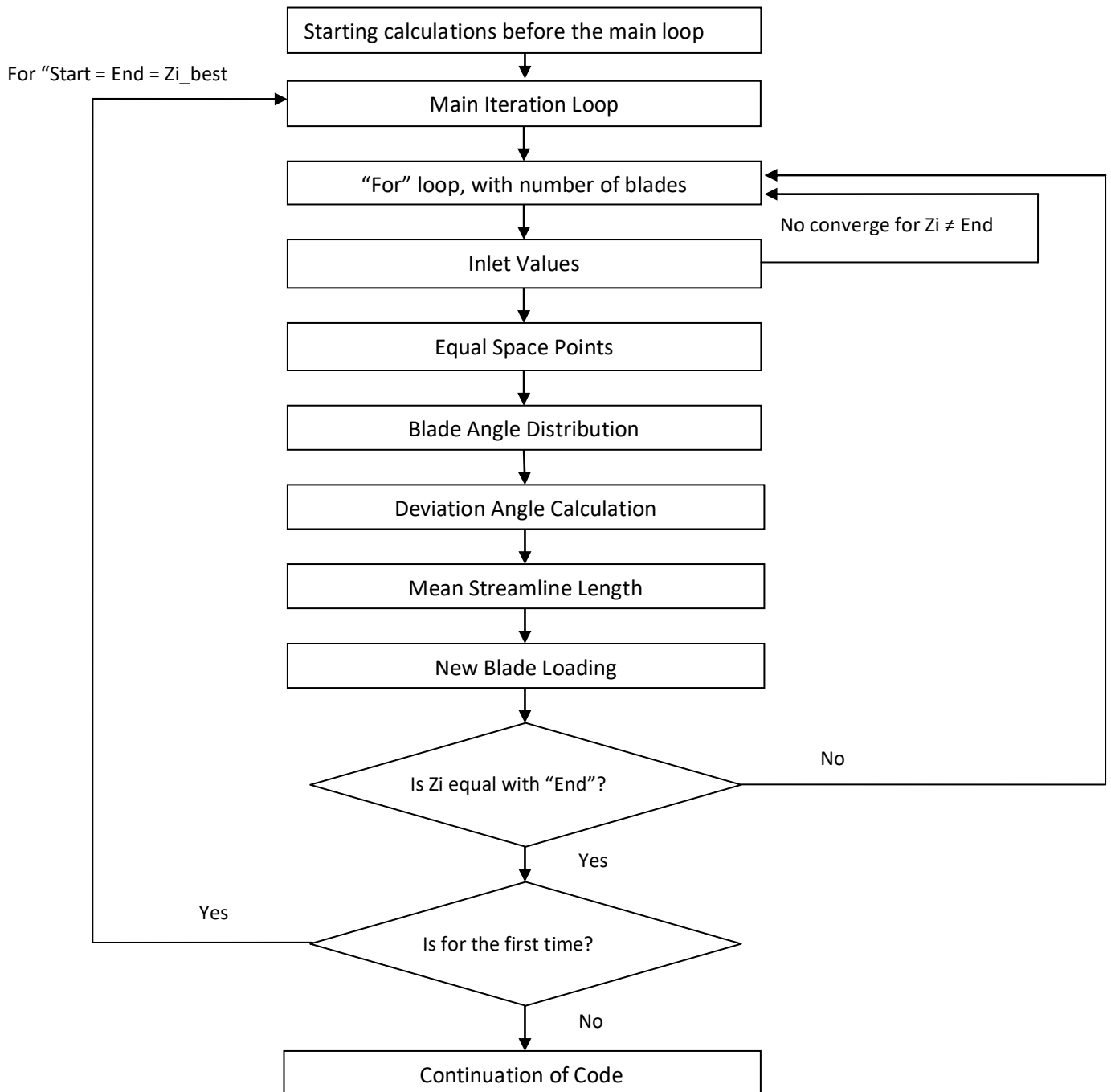
Πρέπει να σημειωθεί ότι εκτός από την βασική δομή επανάληψης (1<sup>η</sup> δομή επανάληψης που συναντάει το πρόγραμμα) στο εσωτερικό υπάρχει μια δομή επανάληψης ίδιας σημαντικότητας την οποία συναντάει ο κώδικας αμέσως μετά την εισαγωγή του στην βασική. Αυτή η εσωτερική δομή επανάληψης είναι μια δομή επανάληψης “For”, η οποία κυμαίνεται από μια αρχική τιμή επονομαζόμενη “Start” έως μια τελική τιμή με όνομα “End” και με βήμα 2 μονάδων την φορά. Δηλαδή είναι της μορφής:



Οι τιμές “Start” & “End” της επαναληπτικής δομής “For” συμβολίζουν τον αριθμό των πτερυγίων (Zi), για τις οποίες θα τρέξει το πρόγραμμα και θα βρει την βέλτιστη λύση. Το βήμα, το οποίο αντιστοιχεί στον αριθμό δύο δεν είναι τυχαίο. Ο αριθμός των πτερυγίων σε μία πτερωτή πρέπει να είναι ζυγός αριθμός, διότι έτσι αλληλοεξουδετερώνονται οι φυγοκεντρικές δυνάμεις λόγω του βάρους των πτερυγίων. Όταν όλοι οι αριθμοί πτερυγίων ελεγχθούν, επιλέγεται αυτός που δίνει την μικρότερη



φόρτιση πτερυγίων, και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μόνο για τον συγκεκριμένο αριθμό πτερυγίων για την αποθήκευση των αποτελεσμάτων. Οι παραπάνω βασικές διαδικασίες παρουσιάζονται στο παρακάτω γράφημα ροής (γράφημα 2.3.1).



*Γράφημα 2.3.1: Γράφημα ροής των βασικών διαδικασιών που εκτελεί το πρόγραμμα.*

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>

### Εισαγωγή

Το τρίτο κεφάλαιο αποτελεί κλειδί για τον χρήστη-αναγνώστη διότι σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται λεπτομερώς:

- Η ονοματολογία των μεταβλητών, καθώς και ο συμβολισμός τους στο πρόγραμμα.
- Το τυπολόγιο το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί.
- Οι παραδοχές οι οποίες πρέπει να ληφθούν.
- Η περιγραφή του σκοπού και του λόγου ύπαρξης κάθε βασικού μέρους του κώδικα όπου φαίνεται στο *γράφημα 2.3.1*.

### 3.1 Ονοματολογία μεταβλητών εντός και εκτός του προγράμματος.

Στον παρακάτω πίνακα (*Πίνακας 3.1.1*) αριστερά παρουσιάζονται τα σύμβολα όλων των μεταβλητών οι οποίες είναι απαραίτητες για την διαδικασία του προκαταρκτικού σχεδιασμού, σε συνδυασμό με τον τρόπο συμβολισμού τους μέσα στο πρόγραμμα. Δεξιά αναγράφεται το τι συμβολίζει η κάθε μεταβλητή. Ακόμη στον *πίνακα 3.1.2* και *πίνακα 3.2.3* περιλαμβάνονται και σύμβολα τα οποία χρησιμοποιούνται ως δείκτες ή ως εκθέτες και υποδηλώνουν κάποια θέση ή ιδιότητα για το μέγεθος στο οποίο χρησιμοποιούνται. Στην αριστερή στήλη του *πίνακα 3.1.1* αναγράφονται τα σύμβολα με την πραγματική τους ονοματολογία, στην μεσαία στήλη φαίνεται η αντιστοιχία του κάθε συμβόλου με την μορφή στην οποία είναι συμβολισμένο στο πρόγραμμα, ενώ στην τελευταία στήλη περιγράφεται το μέγεθος που συμβολίζει η κάθε μεταβλητή.

### Συμβολισμοί

| Θεωρητικό σύμβολο | Στον κώδικα | Επεξήγηση                      |
|-------------------|-------------|--------------------------------|
| A                 | A           | Εμβαδόν περιοχής               |
| $\alpha$          | a           | Γωνία απόλυτων ταχυτήτων.      |
| $\alpha'$         | adot        | Γωνία σχετικών ταχυτήτων.      |
| $\bar{\alpha}$    | amean       | Μέση γωνία απόλυτης ταχύτητας. |
| $\bar{\alpha}'$   | ameandot    | Μέση γωνία σχετικής ταχύτητας. |

|                       |                                       |  |
|-----------------------|---------------------------------------|--|
| $\alpha_c$            | $a_c$                                 | Συντελεστής κλίσης σημείου.  |
| $\beta$               | $b / \text{blade\_angle} / b2\_angle$ | Γωνία πτερυγίου.   |
| $\overline{\beta h}$  | bhmean                                | Γωνία της πλήμνης στο μέσο πέρασμα της πτερωτής.   |
| $\gamma$              | gamma                                 | Λόγος ειδικής θερμοχωρητικότητας αερίων για σταθερή πίεση και όγκο.  |
| $\epsilon$            | Deviation_angle                       | Γωνία απόκλισης quasi-normal από ένα normal.   |
| $\Delta Z_i$          | DZi                                   | Αξονικό μήκος πτερωτής.  |
| $\Delta W$            | DW                                    | Μέση διαφορά ταχύτητας μεταξύ πλευράς αναρρόφησης και της πλευράς πίεσης σε ένα πτερύγιο.                          |
| $Z_i$                 | Zi                                    | Αριθμός πτερυγίων πτερωτής.  |
| $\zeta$               | Zita/zita                             | Αδιάστατη μεσημβρινή απόσταση στο εσωτερικό της πτερωτής.  |
| K                     | K                                     | Συντελεστής που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της κατανομής γωνιών κατά μήκος των πτερυγίων.                     |
| Kλ                    | Kl                                    | Συντελεστής που χρησιμοποιείται για την εύρεση του tip distortion factor ( $\lambda$ ).                            |
| $\lambda$             | lamda                                 | Tip distortion factor.   |
| $\mu_p$               | mp                                    | Συντελεστής φορτίσεως .  |
| $\eta$                | yrot                                  | Αντίστοιχος περιστρεφόμενος άξονας ως προς τον άξονα $-y$ .  |
| $\sigma$              | slipfactor                            | Συντελεστής αποκλίσεως .   |
| $\rho$                | p                                     | Πυκνότητα εργαζόμενου μέσου.   |
| $\phi$                | FI                                    | Συντελεστής παροχής (Flow coefficient).  |
| $\phi_{\text{coord}}$ | fcoord                                | Γωνία περιστροφής αξόνων σε περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς.   |
| $\chi$                | xrot                                  | Αντίστοιχος περιστρεφόμενος άξονας ως προς τον άξονα $-x$ .  |
| $\omega$              | w                                     | Γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της πτερωτής.   |
| A                     | A                                     | Συντελεστής για τον υπολογισμό της κατανομής γωνιών των πτερυγίων.   |
| B                     | B                                     | Συντελεστής για τον υπολογισμό της κατανομής γωνιών των πτερυγίων.   |
| $B_2$                 | $B_2$                                 | Συντελεστής που δηλώνει τον χώρο που καταλαμβάνουν τα πτερύγια και της στένωσης που δημιουργούν. (Blockage Factor) |
| BL                    | BL                                    | Συντελεστής φόρτισης λεπίδων.  |
| b                     | b                                     | Πάχος περιοχής διέλευσης μεταξύ πλήμνης-κελύφους   |
| C                     | C                                     | Απόλυτη ταχύτητα./ Συντελεστής για τον   |

|                  |                  |   |
|------------------|------------------|---|
|                  |                  | υπολογισμό της κατανομής γωνιών των πτερυγίων.  |
| $C_n$            | $C_n$            | Κάθετη συνιστώσα της απόλυτης ταχύτητας.  |
| $C_p$            | $C_p$            | Ειδική θερμότητα υπό περιβάλλον σταθερής πίεσης.  |
| $C_v$            | $C_v$            | Ειδική θερμότητα υπό περιβάλλον σταθερού όγκου.   |
| Cycle_hub_length | Cycle_hub_length | Μήκος τεταρτοκύκλιου του περιγράμματος πλήμνης.   |
| D                | D                | Διάμετρος   |
| h                | h                | Ειδική ενθαλπία   |
| I                | I                | Συντελεστής έργου που μεταφέρεται στο ρευστό.   |
| i                | i                | Γωνία πρόσπτωσης ρευστού.   |
| $I_B$            | $I_B$            | Συντελεστής πραγματικού έργου που μεταφέρεται στα πτερύγια.   |
| $I_{par}$        | $I_{par}$        | Συντελεστής έργου που δαπανάται σε παράπλευρες απώλειες.  |
| L                | L                | Μήκος ευθύγραμμου τμήματος στο τέλος του περιγράμματος της πλήμνης.   |
| $L_B$            | $L_B$            | Μήκος μέσης γραμμής πτερυγίου.  |
| $L_s$            | $L_s$            | Μήκος μέσης γραμμής ροής πτερωτής.  |
| $I_s$            | $I_s$            | Μήκος μεμονωμένου τμήματος της μέσης γραμμής ροής.  |
| M                | Mach             | Αριθμός Mach  |
| N                | N                | Ταχύτητα περιστροφής της πτερωτής/Αριθμός σημείων με μη ίσες κατανεμημένες αποστάσεις μεταξύ τους κατά μήκος των περιγραμμάτων πλήμνης και κελύφους |
| $N_e$            | $N_e$            | Αριθμός σημείων με ίσες αποστάσεις μεταξύ τους κατά μήκος των περιγραμμάτων πλήμνης και κελύφους / Αριθμός των quasi-normals.                       |
| p                | P                | Πίεση   |
| R                | R                | Ειδική σταθερά αερίων   |
| r                | r                | Ακτίνα  |
| $R_C$            | $R_C$            | Ακτίνα κυκλικού τόξου της πλήμνης.  |
| $R_e$            | $R_e$            | Αριθμός Reynolds  |
| T                | T                | Θερμοκρασία   |
| Total_hub_length | Total_hub_length | Συνολικό μήκος περιγράμματος πλήμνης.   |
| $t_{b1}$         | $t_{b1}$         | Πάχος πτερυγίων στην είσοδο.  |
| $t_b$            | $t_b$            | Πάχος πτερυγίων στην υπόλοιπη πτερωτή.  |
| th               | th               | Γωνία περιστροφής για την δημιουργία του περιγράμματος πλήμνης.   |

|       |                            |  |
|-------|----------------------------|--|
| U     | U                          | Περιφερειακή ταχύτητα  |
| W     | W                          | Σχετική ταχύτητα   |
| x     | $x/equalxhub/equalxshroud$ | Συνιστώσα του άξονα-x σε μη περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς/<br>Συνιστώσα του άξονα-x σε μη περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς για σημείο πλήμνης/κελύφους. |
| xcp   | xcp                        | X-άξονας κεντρικού σημείου κυκλικού τόξου για την δημιουργία του περιγράμματος πλήμνης.  |
| xmean | xmean                      | Ο συντελεστής του x-άξονα για το σημείο που χωρίζει ένα quasi-normal στην μέση   |
| y     | $y/equalyhub/equalyshroud$ | Συνιστώσα του άξονα-y σε μη περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς/<br>Συνιστώσα του άξονα-y σε μη περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς για σημείο πλήμνης/κελύφους. |
| ycp   | ycp                        | Y-άξονας κεντρικού σημείου κυκλικού τόξου για την δημιουργία του περιγράμματος πλήμνης.  |
| ymean | ymean                      | Ο συντελεστής του y-άξονα για το σημείο που χωρίζει ένα quasi-normal στην μέση.  |

*Πίνακας 3.1.1*

## Δείκτες

|          |   |
|----------|---|
| 0        | Υποδηλώνει μέγεθος πριν την είσοδο στην πτερωτή ή μέγεθος ανακοπής.     |
| 1        | Υποδηλώνει μέγεθος στην διατομή εισόδου της πτερωτής.                   |
| 2        | Υποδηλώνει μέγεθος στην διατομή εξόδου της πτερωτής.                    |
| $\infty$ | Υποδηλώνει ιδεατό μέγεθος για το οποίο χρησιμοποιείται σαν δείκτης.     |
| $\Theta$ | Υποδηλώνει παράμετρο ως προς την εφαπτομενική διεύθυνση.                |
| Annular  | Μεταβλητή που αναφέρεται σε παράμετρο εκ περιστροφής.                   |
| Best     | Υποδηλώνει την καλύτερη τιμή για μια μεταβλητή με βάση κάποιο κριτήριο. |
| Blades   | Μεταβλητή που αναφέρεται στις λεπίδες.                                  |
| h        | Μεταβλητή η οποία αναφέρεται για την πλήμνη (Hub).                      |
| incr     | Υποδηλώνει ένα τμήμα της μεταβλητής που χρησιμοποιείται (increment).    |
| max      | Υποδηλώνει την μέγιστη τιμή της μεταβλητής που χρησιμοποιείται.         |
| min      | Υποδηλώνει την ελάχιστη τιμή της μεταβλητής που χρησιμοποιείται.        |
| p        | Μεταβλητή με πολυτροπική ιδιότητα.                                      |
| Passage  | Μεταβλητή που αναφέρεται σε "πέρασμα".                                  |

|            |  |
|------------|--|
| s / shroud | Μεταβλητή που αναφέρεται για το κέλυφος (Shroud).              |
| VD         | Μεταβλητή που αναφέρεται για διαχύτη χωρίς οδηγητικά πτερύγια. |
| VLD        | Μεταβλητή που αναφέρεται για διαχύτη με οδηγητικά πτερύγια.    |
| X          | Μεταβλητή που αναφέρεται για την διεύθυνση του x-άξονα.        |
| Y          | Μεταβλητή που αναφέρεται για την διεύθυνση του y-άξονα.        |

**Πίνακας 3.1.2**

## Εκθέτες

| Σύμβολο | Στον κώδικα | Επεξήγηση  |
|---------|-------------|--|
| '       | dot         | Σχετική τιμή της μεταβλητής.                       |
| -       | mean        | Μέση τιμή μεταβλητής./ Μεταβλητή στο μέσο πέρασμα. |

**Πίνακας 3.1.3**

Επίσης πρέπει να τονιστεί ότι στον κώδικα υπάρχουν αρκετές μεταβλητές οι οποίες μετρώνε είτε θέσεις σε πίνακες είτε αριθμό επαναλήψεων ή ακόμα και άλλα δεδομένα των οποίων η συμβολή τους είναι μόνο μέσα στον κώδικα. Αυτές οι μεταβλητές δεν συμπεριλαμβάνονται στους παραπάνω πίνακες λόγω του μεγάλου πλήθους τους, παρόλα αυτά θα επεξηγείτε ο ρόλος τους κατά την διάρκεια της περιγραφής της διαδικασίας στην οποία χρησιμοποιούνται.

## 3.2 Θερμοδυναμικά μεγέθη.

Ένα βασικότερα τμήματα της συγκεκριμένης διαδικασίας σχεδίασης όπου μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τα αποτελέσματα είναι αυτό των θερμοδυναμικών μεγεθών. Στην συγκεκριμένη υποενότητα θα παρουσιαστούν οι εξισώσεις των θερμοδυναμικών μεγεθών όπου χρησιμοποιήθηκαν.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η προκαταρκτική σχεδίαση αποτελεί μια μέθοδο προσέγγισης της βέλτιστης λύσης με βάση τα δεδομένα εισόδου που δίνει ο χρήστης. Όντας μεθοδολογία προσέγγισης, είναι εύλογο το εργαζόμενο μέσω (αέρας) να θεωρηθεί ως ιδανικό αέριο καθ' όλη την διάρκεια της συμπίεσης. Με βάση αυτήν την παραδοχή οι ειδικές θερμότητες " $C_v$ " και " $C_p$ " θεωρούνται σταθερές, ενώ η καταστατική εξίσωση προκύπτει :

$$p = \rho R T \quad (3.1)$$

Ο λόγος των ειδικών θερμοκρασιών υπό σταθερή πίεση και όγκο “ $\gamma$ ” θα παραμένει και αυτός σταθερός και ίσος με :

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad (3.2)$$

Ο τύπος της ειδικής ενθαλπίας “ $h$ ” καθώς και της ειδικής ενθαλπίας ανακοπής “ $h_0$ ” με βάση την παραπάνω παραδοχή προκύπτουν:

$$h = C_p T \quad (3.3)$$

και

$$h_0 = h + \frac{C^2}{2} \quad (3.4)$$

Ειδική ενθαλπία καλείται η ποσότητα ενθαλπίας η οποία αντιστοιχεί ανά μονάδα μάζας του ρευστού. Ουσιαστικά είναι το πραγματικό μέγεθος της ενθαλπίας “ $H$ ” διαιρεμένο με την παροχή μάζας “ $\dot{m}$ ”. Επιπροσθέτως όταν ο συμπιεστής λειτουργεί σε μία κατάσταση κατά την οποία όσο και να αυξηθεί η παροχή μάζας “ $\dot{m}$ ” ή αντίστοιχα η ταχύτητα περιστροφής της πτερωτής “ $N$ ”, η παροχή στην έξοδο της πτερωτής παραμένει σταθερή και δεν αυξάνεται περαιτέρω με την αύξηση των δύο πρώτων παραγόντων. Αυτό το σημείο καλείται σημείο ανακοπής (Choke point).

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (3.3) & (3.4) προκύπτει η εξίσωση (3.5) της θερμοκρασίας ανακοπής “ $T_0$ ” η οποία ισούται με :

$$T_0 = T + \frac{C^2}{2 C_p} \quad (3.5)$$

Για ισηντροπικές διαδικασίες ή διαδικασίες οι οποίες αναφέρονται στο ίδιο σημείο μπορούν να συσχετιστούν η πίεση, η πίεση ανακοπής, η θερμοκρασία και η θερμοκρασία ανακοπής στην ίδια σχέση ως :

$$\frac{p_0}{p} = \left(\frac{T_0}{T}\right)^{\left(\frac{\gamma}{\gamma-1}\right)} \quad (3.6)$$

Η ίδια σχέση μπορεί να τροποποιηθεί στην σχέση (3.7) της οποίας τα μεγέθη θερμοκρασίας και πίεσης αναφέρονται μόνο σε στοιχεία ανακοπής, ενώ στην εξίσωση συμπεριλαμβάνεται και ο πολυτροπικός βαθμός απόδοσης " $\eta_p$ ". Ακόμη πρέπει να τονιστεί ότι οι λατινικοί αριθμοί "I" "II" συμβολίζουν σημεία. Δηλαδή η συγκεκριμένη σχέση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για δύο σημεία.

$$\frac{p_{0II}}{p_{0I}} = \left(\frac{T_{0II}}{T_{0I}}\right)^{\left(\frac{\gamma^* \eta_p}{\gamma-1}\right)} \quad (3.7)$$

Από την σχέση (3.7) υπολογίζεται ο αριθμός "*Mach*", ο οποίος αποτελεί μια έκφραση της ταχύτητας η οποία συνήθως χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ταχύτητας αεροσκαφών. Αποτελεί αδιάστατο μέγεθος ισούται με :

$$M = \frac{C}{\sqrt{\gamma R T}} \quad (3.8)$$

Η μεταβολή της ενθαλπίας ανακοπής " $\Delta h_0$ " μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση (3.9) η οποία προκύπτει από το γινόμενο, του τετραγώνου της περιφερειακής ταχύτητας περιστροφής της πτερωτής στην έξοδο του συμπιεστή " $U_2^2$ " και του έργου που μεταφέρεται στο ρευστό από την πτερωτή "I" :

$$\Delta h_0 = I U_2^2 \quad (3.8)$$

Από την εξίσωση του Euler για τις στροβιλομηχανές μπορεί να βρεθεί το πραγματικό έργο το οποίο μεταφέρεται από τα πτερύγια στο ρευστό " $\Delta h_{0,blades}$ " :

$$\Delta h_{0,blades} = \omega(r_2 C_{\theta 2} - r_1 C_{\theta 1}) = U_2 C_{\theta 2} - U_1 C_{\theta 1} \quad (3.9)$$



Όπου η περιφερειακή ταχύτητα ορίζεται ως :

$$U = \omega r \quad (3.10)$$

Η προβολή της απόλυτης ταχύτητας ως προς την εφαπτομενική διεύθυνση “C<sub>θ</sub>” προκύπτει από τα τρίγωνα ταχυτήτων στην είσοδο και έξοδο της πτερωτής και η διαδικασία υπολογισμού της μαζί με σχηματική αναπαράσταση περιγράφεται στην υποενότητα 3.2.

Η πολυτροπική διαφορά της ειδικής ενθαλπίας “h<sub>p</sub>” προκύπτει από την εξίσωση (3.11)

$$\Delta h_{0p} = h_{02p} - h_{01} = C_p (T_{02p} - T_{01}) = C_p T_{01} \left( \frac{T_{02p}}{T_{01}} - 1 \right) \quad (3.11)$$

$$\Rightarrow \Delta h_{0p} = C_p T_{01} \left( \left( \frac{P_{02}}{P_{01}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} - 1 \right)$$

### 3.3 Τυπολόγιο βασικών εξισώσεων.

Στην συγκεκριμένη υποενότητα θα περιγραφούν οι βασικές εξισώσεις πέρα των θερμοδυναμικών, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στον κώδικα. Η σειρά κατά την οποία είναι τοποθετημένες δεν ταυτίζεται με την σειρά τοποθέτησης τους στον κώδικα. Η σειρά τοποθέτησης τους αναγράφεται στο τέταρτο κεφάλαιο μαζί με διαδικαστικές επεξηγήσεις με βάση τις οποίες μπήκαν οι εξισώσεις στην εν λόγω σειρά.

Απαραίτητο βήμα πριν ξεκινήσει η παρουσίαση του τυπολογίου είναι η αναφορά των δεδομένων εισαγωγής, έτσι ώστε να είναι γνωστό εκ των προτέρων ποια δεδομένα είναι γνωστά από την αρχή της διαδικασίας. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στόχος του προκαταρκτικού σχεδιασμού είναι ο χρήστης να εισάγει όσο το δυνατόν λιγότερα δεδομένα στον κώδικα. Στον κώδικα που δημιουργήθηκε θα χρειαστεί ο χειριστής να εισάγει είκοσι δεδομένα για την λειτουργία του κώδικα. Αυτά είναι :

- Ο αριθμός “Reynold” σε μονάδα μέτρησης [ $\frac{joule}{kg \text{ Kelvin}}$ ].

- Ο λόγος των ειδικών θερμοκρασιών “γ” σε αδιάστατη μορφή.
- Η ειδική θερμοκρασία υπό σταθερή πίεση “ $C_p$ ” σε μονάδα μέτρησης [ $\frac{joule}{kg\ Kelvin}$ ].
- Η θερμοκρασία ανακοπής στην είσοδο του συμπιεστή “ $T_{00}$ ” σε μονάδα μέτρησης [Kelvin].
- Η πίεση ανακοπής στην είσοδο του συμπιεστή “ $P_{00}$ ” σε μονάδα μέτρησης [Bar].
- Εάν ο διαχύτης (*Diffuser*) είναι με οδηγητικά πτερύγια ή χωρίς οδηγητικά πτερύγια (*Vaned or Vaneless Diffuser*).
- Εάν η πτερωτή διαθέτει κέλυφος ή όχι (*Shroud or Unshrouded Impeller*).
- Την ταχύτητα περιστροφής της πτερωτής “ $N$ ” σε μονάδα μέτρησης [Rpm].
- Την παροχή μάζας “ $\dot{m}$ ” σε μονάδα μέτρησης [ $\frac{Kg}{sec}$ ].
- Την ακτίνα της πτερωτής στην έξοδο “ $r_2$ ” σε μονάδα μέτρησης [m].
- Τον λόγο της ακτίνας της πλήμνης στην είσοδο προς την ακτίνα στο ακροπτερύγιο σε αδιάστατη μορφή (*Impeller inlet hub to tip ratio*).
- Την μέση σχετική γωνία στην είσοδο την πτερωτής “ $\bar{\alpha}$ ” σε μοίρες [degrees].
- Την γωνία της απόλυτης ταχύτητας στην είσοδο της πτερωτής “ $\alpha$ ” σε μοίρες [degrees].
- Την γωνία της μέσης πρόσπτωσης του ρευστού στην είσοδο “ $\bar{\tau}$ ” σε μοίρες [degrees].
- Το αδιάστατο πάχος των πτερυγίων στην είσοδο της πτερωτής “ $t_{b1}$ ”.
- Το αδιάστατο πάχος των πτερυγίων στο υπόλοιπο της πτερωτής “ $t_b$ ”.
- Την μέγιστη φόρτιση των πτερυγίων “ $BL_{max}$ ” σε αδιάστατη μορφή.
- Τον συντελεστή “ $K$ ” ο οποίος πρέπει να τεθεί ίσος με την μονάδα και είναι σε αδιάστατη μορφή.
- Τον ελάχιστο αριθμό πτερυγίων “ $Z_i$ ” τον οποίο ο χρήστης μπορεί να αποδεχτεί σαν λύση. Στο excel αναφέρεται ως “Start”.
- Τον μέγιστο αριθμό πτερυγίων “ $Z_i$ ” τον οποίο ο χρήστης μπορεί να αποδεχτεί σαν λύση. Στο excel αναφέρεται ως “Start”.

Ιδιαίτερη σημασία έχουν οι μονάδες μέτρησης των δεδομένων εισαγωγής. Σε καμία περίπτωση δεν πρέπει τα δεδομένα εισαγωγής να είναι εκφρασμένα σε άλλες μονάδες μέτρησης από αυτές όπου αναγράφονται παραπάνω αλλά και στο αρχείο excel “*Radial Compressor Data*”.

Η συγκεκριμένη διατριβή εστιάζει στην δημιουργία πτερωτής πλήρους επαγωγής (*Full Inducer*) και με διαχύτη χωρίς οδηγητικά πτερύγια (*Vaneless Diffuser*). Παρόλα αυτά θα παρουσιαστούν και μεταβλητές των οποίων ο τύπος για τον υπολογισμό τους

αλλάζει ανάλογα τα βασικά χαρακτηριστικά της πτερωτής (πχ. διαχύτης χωρίς η με οδηγητικά πτερύγια).

Ένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά του συμπιεστή είναι αυτό του συντελεστή παροχής “ $\Phi$ ” ή αλλιώς (*Flow Coefficient*). Ο συντελεστής παροχής είναι η αδιάστατη τιμή της αξονικής ταχύτητας σε κάποια θέση εντός της βαθμίδας της στροβιλομηχανής. Στον κώδικα χρησιμοποιείται ο συντελεστής παροχής στην έξοδο της πτερωτής. Για τον συγκεκριμένο τύπο πτερωτής ο οποίος σχεδιάζεται ο συντελεστής παροχής πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ των τιμών,  $0.025 < \Phi < 0.2$  , σύμφωνα με τον R.H Aungier. Ο συντελεστής παροχής υπολογίζεται από τον συνδυασμό των μεγεθών ανακοπής στην είσοδο, την ακτίνα της πτερωτής στην έξοδο του συμπιεστή καθώς και την επιθυμητή παροχή μάζας που καθορίζει ο χειριστής του κώδικα, και προκύπτει ως :

$$\Phi = \frac{\dot{m}}{\rho_{00} \pi r_2^2 U_2} \quad (3.12)$$

Όπου η ακτίνα και η παροχή μάζας είναι ήδη γνωστά από τα δεδομένα εισαγωγής, η πυκνότητα ανακοπής υπολογίζεται από τις θερμοδυναμικές εξισώσεις και η ταχύτητα στην έξοδο της πτερωτής από την σχέση (3.10) με τα στοιχεία της εξόδου ως :

$$U_2 = \omega r_2 \quad (3.13)$$

Ενώ ο υπολογισμός της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής υπολογίζεται από την σχέση (3.14) σε μονάδες μέτρησης [rad/sec] :

$$\omega = \frac{2 \pi N}{60} \quad (3.14)$$

Η επόμενη παράμετρος αναφέρεται στο έργο το οποίο μεταφέρει η πτερωτή στο ρευστό (*Work input coefficient*) “  $I$  ” και προκύπτει από τον λόγο της πραγματικής

διαφοράς της ειδικής ενθαλπίας ανακοπής από την είσοδο στην έξοδο με το τετράγωνο της περιφερειακή ταχύτητα στην έξοδο :

$$I = \frac{\Delta h_0}{U_2^2} \quad (3.15)$$

Σύμφωνα με τον R.H Aungier (2000) μπορεί επίσης το έργο το οποίο μεταφέρεται από την πτερωτή στο ρευστό μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει του συντελεστή παροχής και επιπροσθέτως να συσχετιστεί με την ύπαρξη ή όχι κελύφους στην πτερωτή, ενώ ταυτόχρονα επιτρέπει την αύξηση της ενθαλπίας. Τα παραπάνω προκύπτουν από τις εξισώσεις (3.16) & (3.17). Η σχέση (3.16) χρησιμοποιείται για πτερωτές χωρίς κέλυφος (*For unshrouded impeller*), και το έργο που μεταφέρεται στο ρευστό υπολογίζεται ως εξής :

$$I = 0.68 - \left(\frac{\Phi}{0.37}\right)^3 + \frac{0.002}{\Phi} \quad (3.16)$$

Ενώ η σχέση (3.17) χρησιμοποιείται στην περίπτωση όπου η πτερωτή είναι με κέλυφος (*For shrouded impeller*) :

$$I = 0.62 - \left(\frac{\Phi}{0.4}\right)^3 + \frac{0.0014}{\Phi} \quad (3.17)$$

Ακόμη ο R.H Aungier (2000) δίνει μια σχέση μέσα από την οποία συσχετίζει το έργο το οποίο δαπανάται σε παράπλευρες απώλειες με τον συντελεστή παροχής ( $\Phi$ ), η οποία λαμβάνει υπόψη εάν η πτερωτή είναι με κέλυφος (*Shrouded impeller*) ή χωρίς κέλυφος (*Unshrouded impeller*). Για πτερωτή χωρίς κέλυφος ισχύει η σχέση (3.18) ενώ για πτερωτή με κέλυφος ισχύει η σχέση (3.19) αντίστοιχα.

Για πτερωτή χωρίς κέλυφος (*Unshrouded impeller*) :

$$I_{par} = \frac{0.002}{\Phi} \quad (3.18)$$

Για πτερωτή με κέλυφος (*Shrouded impeller*) :

$$I_{par} = \frac{0.0014}{\Phi} \quad (3.19)$$

Με βάση τις παραπάνω εξισώσεις μπορεί να προκύψει το πραγματικό έργο το οποίο μεταφέρεται στα πτερύγια της πτερωτής " $I_B$ " ως εξής:

$$I_B = I - I_{par} \quad (3.20)$$

Άλλος ένας τρόπος κατά τον οποίο μπορεί να βρεθεί το έργο το οποίο μεταφέρεται στα πτερύγια της πτερωτής, είναι μέσω της εξίσωσης του Euler (3.9) σε συνδυασμό με την εξίσωση (3.15) και προκύπτει ως εξής:

$$I_B = \frac{\Delta h_{0,blades}}{U_2^2} = \frac{C_{\theta 2}}{U_2} - \frac{C_{\theta 1} U_1}{U_2} \quad (3.21)$$

Για τον συντελεστή φορτίσεως (*polytropic head coefficient*) " $\mu_p$ " καθώς και για τον πολυτροπικό βαθμό απόδοσης της πτερωτής " $\eta_p$ " υπάρχουν δύο εξισώσεις για κάθε συντελεστή όπου το στοιχείο διαχωρισμού τους είναι και πάλι εάν η πτερωτή είναι με κέλυφος (*Shrouded Impeller*) ή χωρίς (*Unshrouded Impeller*) και επιπλέον εάν ο διαχύτης είναι με οδηγητικά πτερύγια (*Vaned Diffuser, VD*) ή όχι (*Vaneless Diffuser, VLD*). Τα παραπάνω δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις ως εξής :

Για πτερωτή χωρίς κέλυφος :

$$\mu_{p,VD} = 0.51 + \Phi - 7.6\Phi^2 - \frac{0.00025}{\Phi} \quad (3.22)$$

$$\eta_{p,VLD} = \eta_{p,VD} - \frac{0.017}{0.04 + 5\Phi + \eta_{p,VD}^3} \quad (3.23)$$

Και για πτερωτή με κέλυφος (*Shrouded impeller*) :

$$\mu_{p,VD} = 0.59 + 0.7\Phi - 7.5\Phi^2 - \frac{0.00025}{\Phi} \quad (3.24)$$

$$\eta_{p,VLD} = \eta_{p,VD} - \frac{0.017}{0.04 + 5\Phi + \eta_{p,VD}^3} \quad (3.25)$$

Για τον συνδυασμό του συντελεστή φορτίσεως με τον πολυτροπικό βαθμό απόδοσης, αρκεί να υπολογιστούν, η διαφορά της ειδικής ενθαλπίας ανακοπής " $\Delta h_o$ ", η διαφορά της ειδικής ενθαλπίας ανακοπής για πολυτροπική διαδικασία " $\Delta h_{op}$ ", η περιφερειακή ταχύτητα στην έξοδο της πτερωτής " $U_2$ ", και στην συνέχεια να χρησιμοποιηθούν οι εξής εξισώσεις :

$$\mu_p = \frac{\Delta h_{op}}{U_2^2} \quad (3.26)$$

$$\eta_p = \frac{\Delta h_{op}}{\Delta h_o} \quad (3.27)$$

Και συνδυάζοντας τις εξισώσεις (3.26) & (3.27) προκύπτει :

$$\eta_p = \mu_p \frac{U_2^2}{\Delta h_o} \quad (3.28)$$

Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης " $\eta_i$ " της πτερωτής δεν λαμβάνει υπόψη του τις παράπλευρες απώλειες αλλά μόνο τα φαινόμενα ροής καθώς και απώλειες εντός της διόδου του ρευστού (*Fluid passage*) και ορίζεται από την σχέση (3.29).

$$\eta_i = \frac{\mu_p}{I_B} = 0.95 - \frac{0.0005}{\Phi} \quad (3.29)$$

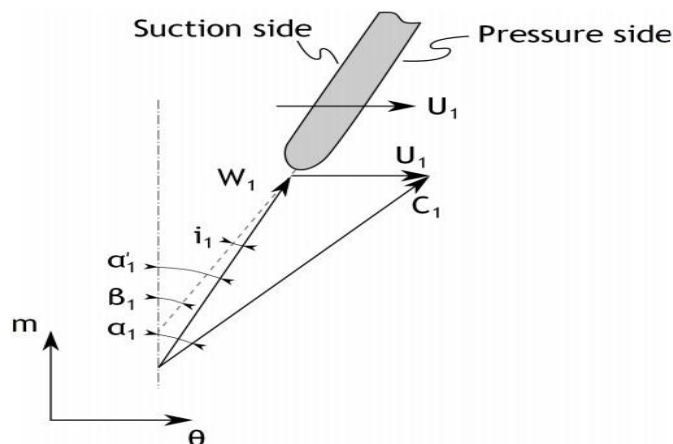
Η γωνίας της απόλυτης ταχύτητας στην έξοδο της πτερωτής “ $\alpha_2$ ” επίσης εξαρτάται από τον τύπο του διαχύτη, ενώ έχει άμεση σχέση με τον συντελεστή παροχής “ $\Phi$ ”. Για διαχύτη με οδηγητικά πτερύγια (*Vaned Diffuser*) δίνεται από την σχέση (3.30) ως :

$$\tan \alpha_2 = \frac{1}{0.26+3\Phi} \quad (3.30)$$

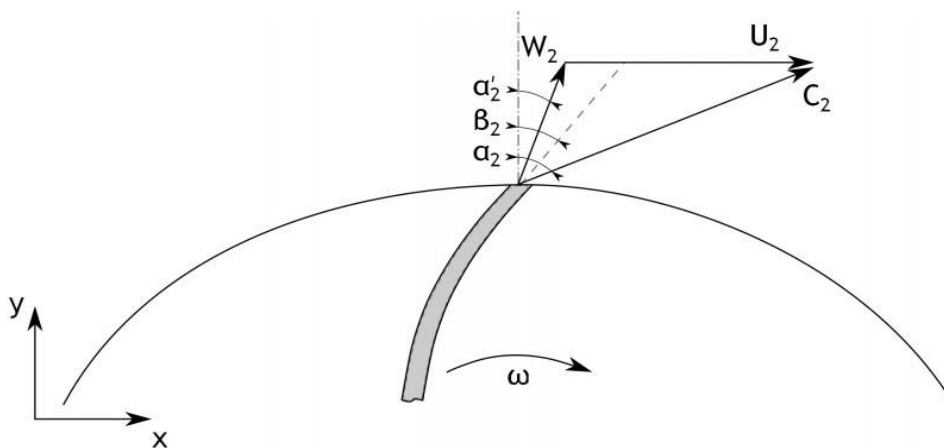
Ενώ για πτερωτή με διαχύτη χωρίς οδηγητικά πτερύγια (*Vaneless Diffuser*) καθορίζεται από την σχέση (3.31) :

$$\alpha_2 = 72^\circ - 0.5 \ln(\Phi) - 585 \Phi^2 \quad (3.31)$$

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι για τον τρόπο ορισμού των γωνιών χρησιμοποιείται το αμερικάνικο σύστημα αναφοράς. Δηλαδή ο ορισμός των γωνιών γίνεται από την κάθετη γραμμή ως προς την περιφερειακή ταχύτητα της πτερωτής. Η θετική φορά των γωνιών μετριέται σύμφωνα με τον κανόνα του δεξιού χεριού. Επιπλέον λαμβάνεται υπόψη ότι το ρευστό εισέρχεται στην πτερωτή χωρίς συστροφή και με μέση γωνία πρόσπτωσης ίση με μηδέν “ $i_1$ ”, καθώς και ότι η ροή του ρευστού ακολουθεί επακριβώς την μορφή των πτερυγίων. Έτσι είναι εύκολα κατανοητό ότι η γωνία της μέσης γραμμής του πτερυγίου “ $\beta$ ” θα ταυτίζεται με την γωνία της σχετικής ταχύτητας “ $\alpha'$ ” και στην είσοδο αλλά και στην έξοδο της πτερωτής. Στο *σχήμα 3.3.1* και *σχήμα 3.3.2* φαίνονται τα τρίγωνα ταχυτήτων στην είσοδο και στην έξοδο της πτερωτής αντίστοιχα, μαζί με τις απαραίτητες γωνίες των ταχυτήτων σύμφωνα με τις παραδοχές οι οποίες αναφέρθηκαν παραπάνω καθώς και για γωνίες απόλυτης ταχύτητας ίση με μηδέν ( $\alpha_1=0$ ) και ( $i_1=0$ ). Όμως πριν από την παρουσίαση των ιδεατών αυτών τριγώνων, θα παρουσιαστούν στην *εικόνα 3.3.1* και στην *εικόνα 3.3.2* τα τρίγωνα ταχυτήτων που προκύπτουν χωρίς την λήψη των παραπάνω παραδοχών, ούτως ώστε να γίνουν κάποια μεγέθη (πχ η γωνία πρόσπτωσης “ $i$ ”) πιο εύκολα κατανοητά.

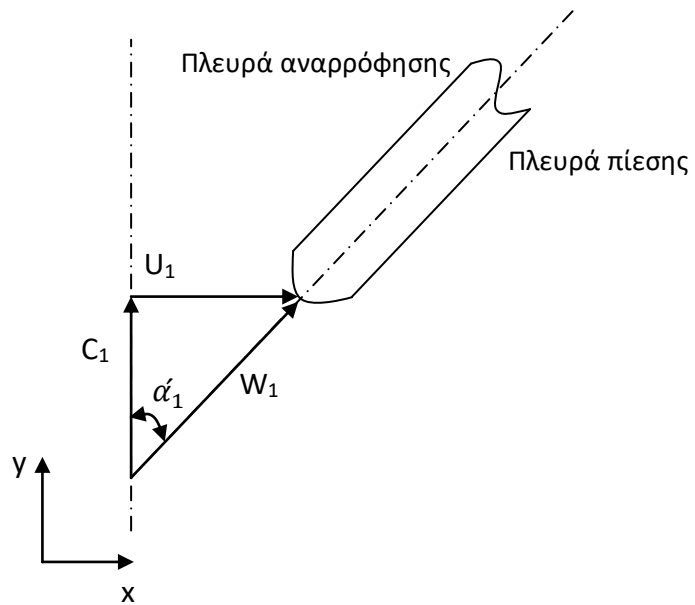


**Εικόνα 3.3.1 :** Τρίγωνο ταχυτήτων στην είσοδο της πτερωτής με γωνία πρόσπτωσης “ $i$ ” διάφορη του μηδενός. Με διακεκομμένη γραμμή φαίνεται η μέση γραμμή του πτερυγίου. (Πηγή: “A Preliminary Design Tool for Radial Compressors” Johannes Schiff.)

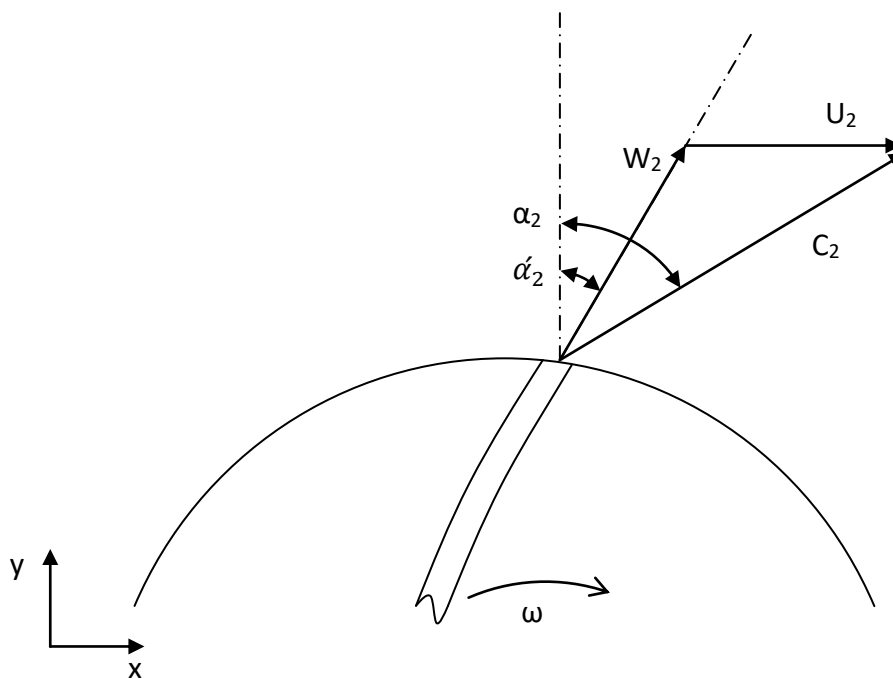


**Εικόνα 3.3.2 :** Τρίγωνο ταχυτήτων στην έξοδο της πτερωτής. Για το συγκεκριμένο σχήμα δεν έχει παρθεί η παραδοχή ότι η ροή του ρευστού ακολουθεί τα πτερύγια επακριβώς. Αυτό φαίνεται από το γεγονός ότι η γωνία της μέσης γραμμής του πτερυγίου είναι διαφορετική από την γωνία της σχετικής ταχύτητας. (Πηγή: “A Preliminary Design Tool for Radial Compressors” Johannes Schiff.)





**Σχήμα 3.3.1 :** Τρίγωνο ταχυτήτων στην είσοδο της πτερωτής για μηδενική γωνία πρόσπτωσης και μηδενική γωνία απόλυτης ταχύτητας.



**Σχήμα 3.3.2 :** Παράδειγμα τριγώνου ταχυτήτων στην έξοδο της πτερωτής, λαμβάνοντας υπόψη ότι η ροή του ρευστού ακολουθάει επακριβώς τα πτερύγια ( $\alpha'_2 = \beta_2$ ).

Γνωρίζοντας πλέον την γωνία της σχετικής ταχύτητας στην είσοδο (από δεδομένα εισαγωγής), καθώς και την γωνία της απόλυτης ταχύτητας στην έξοδο μπορούν εύκολα από τριγωνομετρικούς κανόνες να προκύψουν οι σχετικές και απόλυτες ταχύτητες. Επίσης από την παρακάτω σχέση προκύπτει η γωνία πρόσπτωσης “ $i$ ”, η οποία ορίζεται ως η διαφορά της γωνίας της σχετικής ταχύτητας “ $\alpha'$ ” και την γωνίας του πτερυγίου “ $\beta$ ”.

$$i = \beta - \alpha' \quad (3.32)$$

Εφόσον οι γωνίες και οι τιμές των γωνιών στην έξοδο έχουν βρεθεί μπορεί να υπολογιστεί και το εμβαδόν στην έξοδο της πτερωτής ως :

$$A_2 = \frac{\dot{m}}{\rho_2 C_{n2}} \quad (3.32)$$

Ένα ακόμη σημαντικό μέγεθος το οποίο χρησιμοποιείται είναι αυτό του συντελεστή αποκλίσεως (*Slip Factor*). Ο συντελεστής αποκλίσεως εκφράζει την σχέση ανάμεσα στην πραγματική εφαπτομενική ταχύτητα “ $C_{\theta 2}$ ” (ή αλλιώς την προβολή της απόλυτης ταχύτητας ( $C$ ) στην περιφερειακή ταχύτητα ( $U$ )) και στην αντίστοιχη ιδεατή εφαπτομενική ταχύτητα “ $C_{\theta 2, \infty}$ ”. Ο συντελεστής αποκλίσεως είναι ένα μέγεθος το οποίο διαθέτει πολλούς τρόπους έκφρασης. Εδώ χρησιμοποιείται ο αμερικάνικος συντελεστής απόκλισης (ή ολίσθησης) και προκύπτει ως :

$$\sigma = 1 - \frac{\sqrt{\cos \beta_2} \sin \alpha_{c2}}{Z_I^{0.7}} \quad (3.33)$$

Όπου ως “ $\alpha_{c2}$ ” ορίζεται ο συντελεστής κλίσης της πλήμνης και του κελύφους στην έξοδο της πτερωτής και ως “ $Z_I$ ” ο αριθμός των πτερυγίων. Ένας ακόμα τρόπος ο οποίος χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του συντελεστή αποκλίσεως “ $\sigma$ ” είναι της εξίσωσης (3.31), η οποία λαμβάνει υπόψη και την περιφερειακή ταχύτητα “ $U_2$ ” καθώς και την πραγματική “ $C_{\theta 2}$ ” και ιδεατή “ $C_{\theta 2, \infty}$ ” εφαπτομενική ταχύτητα.

$$\sigma = 1 - \frac{C_{\theta 2, \infty} - C_{\theta 2}}{U_2} = 1 - \frac{C_{slip}}{U_2} \quad (3.34)$$

Η ταχύτητα “ $C_{slip}$ ” εκφράζει την διαφορά μεταξύ της ιδεατής εφαπτομενικής ταχύτητας ( $C_{\theta 2, \infty}$ ) και της πραγματικής εφαπτομενικής ταχύτητας “ $C_{\theta 2}$ ”. Όταν γίνεται αναφορά ιδεατής περίπτωσης, εννοείται ότι η πτερωτή είναι μια ιδεατή πτερωτή με άπειρο αριθμό πτερυγίων. Για την περίπτωση μηδενικής παροχής (*Zero Flow*) ισχύει ότι :

$$C_{\theta 2, \infty} = C_{\theta 2} = U_2 \quad (3.35)$$

Επομένως η σχέση (3.31) γίνεται :

$$\sigma = \frac{C_{\theta 2}}{C_{\theta 2, \infty}} \quad (3.36)$$

Ο R.H Aungier στο βιβλίο του «Centrifugal Compressors, A Strategy for Aerodynamic Design and Analysis» φαίνεται να συσχετίζει το αξονικό μήκος της πτερωτής “ $\Delta_{ZI}$ ” με τον συντελεστή παροχής “ $\Phi$ ” καθώς και με τον λόγο μεταξύ της ακτίνας της πλήμνης στην είσοδο της πτερωτής με την ακτίνα στο ακροπτερύγιο, και καθορίζεται ως :

$$\Delta_{ZI} = 2 r_2 (0.014 + 0.023 \frac{r_2}{r_{1h}} + 1.58\Phi) \quad (3.37)$$

Για την εξασφάλιση ενός καλού σχεδιασμού πτερωτής πρέπει να υπολογιστούν οι κατανομές των γωνιών του πτερυγίου κατά μήκος της πλήμνης και του κελύφους (*Hub & Shroud Blade Angle Distributions*). Από το βιβλίο του R.H Aungier «*Centrifugal Compressor Stage Preliminary Aerodynamic Design and Component Sizing, ASME 1995*» προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις για τον υπολογισμό των εν λόγω κατανομών. Οι σχέσεις (3.38),(3.39) και (3.40) είναι σταθερές που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των κατανομών.

$$A = -4 (\beta_2 - \overline{\beta_h} + \beta_{1h}) \quad (3.38)$$

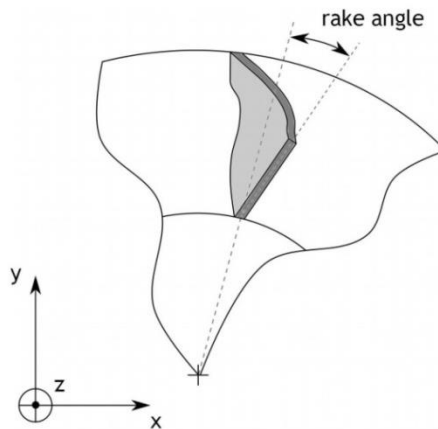
$$B = 11 \beta_2 - 16 \overline{\beta_h} + 5 \beta_{1h} \quad (3.39)$$

$$C = -6 \beta_2 + 8 \overline{\beta_h} - 2 \beta_{1h} \quad (3.40)$$

Όπου η μέση γωνία της πλήμνης ( $\overline{\beta_h}$ ) ή αλλιώς η γωνία της πλήμνης στο μέσο πέρασμα, ορίζεται ως

$$\overline{\beta_h} = 90 K + \frac{(1-K)(\beta_2 + \beta_{1h})}{2} \quad (3.41)$$

και η μεταβλητή “Κ” αποτελεί μια σταθερά με μέγιστη τιμή ίση με την μονάδα. Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της γωνίας “ $\overline{\beta_h}$ ” με σκοπό να κρατάει τις τιμές των γωνιών του μετώπου προσβολής (*Rake Angles*) σε λογικά πλαίσια. Η τιμή της σταθεράς “Κ” δεν αναγραφόταν σε καμία από τις διατριβές οι οποίες μελετήθηκαν. Έτσι μετά από δοκιμές τέθηκε ίση με 0.15. Στην εικόνα 3.3.3 αναπαριστάται η γωνία του μετώπου προσβολής.



**Εικόνα 4.1.2 :** Σχηματική παρουσίαση γωνίας μετώπου προσβολής (*Rake Angle*). (Πηγή: “A Preliminary Design Tool for Radial Compressors” Johannes Schiff.)

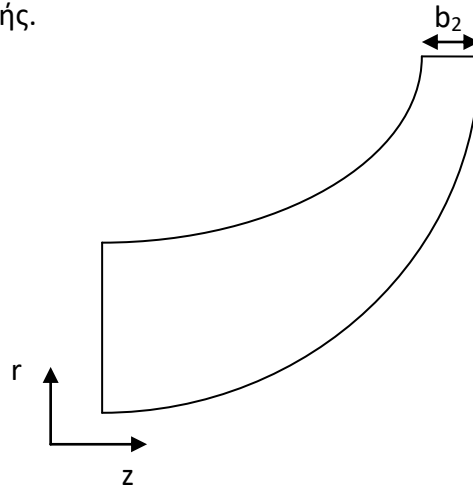
Ο λόγος χρήσης των γωνιών μετώπου προσβολής (*Rake Angles*) είναι ότι εμμέσως μειώνουν τα επίπεδα μηχανικών τάσεων στα πτερυγία καθώς δεν εμφανίζονται καμπτικές τάσεις στην ακτινική διεύθυνση των πτερυγίων. Από τις εξισώσεις (3.42) και (3.43) προκύπτουν οι κατανομές των γωνιών του πτερυγίου κατά μήκος της πλήμνης και του κελύφους για οποιοδήποτε αξονικό μήκος σε αδιάστατη μορφή ποσοστού “ζ”.

$$\beta_s = \beta_{1s} + (\beta_2 - \beta_{1s})(3\zeta^2 - 2\zeta^3) \quad (3.42)$$

$$\beta_h = \beta_{1h} + A\zeta + B\zeta^2 + C\zeta^3 \quad (3.43)$$

Οι γωνίες “ $\beta_{1s}$ ” & “ $\beta_{1h}$ ” συμβολίζουν την γωνία του πτερυγίου στην είσοδο της πτερωτής για την πλήμνη και το κέλυφος αντίστοιχα. Πρέπει να τονιστεί ότι οι παραπάνω εξισώσεις χρησιμοποιούνται για την εύρεση των γωνιών του πτερυγίου στην πλήμνη και στο κέλυφος και όχι για κάποια θέση-ακτίνα ενδιάμεσα από αυτές τις δύο χαρακτηριστικές τοποθεσίες. Για την εύρεση των γωνιών του πτερυγίου για ακτίνες μεταξύ της πλήμνης και του κελύφους ακολουθείται ένα σύνολο συγκεκριμένων διαδικασιών οι οποίες περιγράφονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 4.

Με βάση όλα όσα έχουν προηγηθεί μπορεί πλέον να υπολογιστεί και το πάχος του πτερυγίου στην ακμή εκφυγής δηλαδή μεταξύ της πλήμνης και του κελύφους στην έξοδο της πτερωτής “ $b_2$ ”. Στο σχήμα 3.3.3 παρουσιάζεται γραφικά πάχος του πτερυγίου στην έξοδο της πτερωτής.



**Σχήμα 3.3.3:** Αναπαράσταση του πάχους του πτερυγίου στην έξοδο της πτερωτής σε τομή.

Και η εξίσωση του υπολογισμού του πάχους της πτερωτής στην έξοδο ορίζεται ως :

$$b_2 = \frac{A_2}{2\pi r_2 - \frac{Z_I t_B}{\cos \beta_2}} \quad (3.44)$$

Όπου “ $t_B$ ” ορίζεται το πάχος των πτερυγίων της πτερωτής.

Το ακροπτερύγιο της πτερωτής αποτελεί ένα εξαιρετικά πολύπλοκο πεδίο ροής, στο οποίο μέχρι και σήμερα τα φαινόμενα της ροής δεν είναι πλήρως κατανοητά. Το γεγονός αυτό οδηγεί τους σχεδιαστές/επιστήμονες πολλές φορές σε αντιπαραθέσεις οι οποίες βασίζονται σε παρατηρήσεις τις οποίες έχει κάνει ο καθένας. Για παράδειγμα ο Jarikse (1996) τονίζει ότι το να ληφθεί υπόψη κατά τους υπολογισμούς των ροών ο παράγοντας της στένωσης που προκαλείται από το πάχος των πτερυγίων (*Blockage Factor*) “ $B_2$ ” είναι λάθος. Σε αντίθεση ο R.H Aungier προτείνει την χρήση ενός παράγοντα ο οποίος ονομάζεται συντελεστής παραμόρφωσης ακροπτερύγιου (*Tip Distortion Factor*) όπου συμβολίζεται με το ελληνικό γράμμα “ $\lambda$ ” και από τον οποίο εξαρτάται η γεωμετρία της πτερωτής. Ο συγκεκριμένος συντελεστής επηρεάζεται από ένα πλήθος παραγόντων, όπου μέσα σε αυτό ανήκει και ο παράγοντας της στένωσης που προκαλείται από το πάχος των πτερυγίων (*Blockage Factor*). Στην εξίσωση (3.45) φαίνεται η συμβολή της στένωσης από το πάχος των πτερυγίων “ $B_2$ ” στον υπολογισμό του παράγοντα παραμόρφωσης “ $\lambda$ ” :

$$\lambda = \frac{1}{1-B_2} \quad (3.45)$$

Ενώ ο εν λόγω παράγοντας μπορεί να υπολογιστεί και μέσω των σχέσεων (3.46) και (3.47), από τις οποίες φαίνεται η αλληλεξάρτηση του με αρκετά στοιχεία της πτερωτής όπως ο συντελεστής παροχής “ $\Phi$ ”.

$$\lambda = K_\lambda + \left(\frac{0.00175}{\Phi}\right)^2 + \frac{0.0015}{\Phi} - 0.22 \ln(\Phi) \quad (3.46)$$

Ο συντελεστής “ $K_\lambda$ ”

προκύπτει από την σχέση (3.46) ως εξής :

$$K_\lambda = 1 + (0.3 + (\frac{b_2}{L_B})^2) \frac{b_2 A_2^2 \cos^2 \beta_2}{L_B A_1^2 \cos^2 \beta_1} \quad (3.47)$$

Όπου “ $L_B$ ” ορίζεται το μήκος της μέσης γραμμής του πτερυγίου (*Mean Streamline Length*) .

Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία τα οποία λαμβάνονται υπόψη στην συγκεκριμένη διατριβή είναι ο συντελεστής φορτίσεως των πτερυγίων (*Blade Loading*). Ο συντελεστής φορτίσεως των πτερυγίων “ $BL$ ” αποτελεί και το βασικό στοιχείο με βάση το οποίο επιλέγεται η βέλτιστη λύση για τον αριθμό των πτερυγίων. Ο συντελεστής φορτίσεως θα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ κάποιων σταθερών ορίων έτσι ώστε να είναι το πεδίο ροής ευκολότερα ελεγχόμενο. Αυτά τα όρια περιορίζουν τον συντελεστή φορτίσεως σε μία μέγιστη τιμή ίση με 0.9 ( $BL_{max} = 0.9$ ) και σε μία ελάχιστη της τάξης του μηδέν ( $BL_{min} = 0$ ). Ο τρόπος για τον υπολογισμό του συντελεστή φορτίσεως των πτερυγίων τον οποίο προτείνει ο R.H Aungier φαίνεται στην εξίσωση (3.49).

$$BL = \frac{2 \Delta W}{W_1 + W_2} \quad (3.48)$$

Όπου “ $W_1$ ” και “ $W_2$ ” είναι οι σχετικές ταχύτητες στην είσοδο και στην έξοδο της πτερωτής αντίστοιχα ενώ ως “ $\Delta W$ ” ορίζεται η μέση διαφορά της ταχύτητας του ρευστού μεταξύ της πλευράς αναρρόφησης (υποπίεσης) και της πλευράς πίεσης του ίδιου πτερυγίου υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\Delta W = \frac{4 \pi r_2 U_2 I_B}{Z_I L_B} \quad (3.49)$$

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>

### Εισαγωγή

Το 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο είναι το σημαντικότερο κεφάλαιο της συγκεκριμένης διατριβής αφού σε αυτό περιγράφονται λεπτομερώς όλες εκείνες οι διαδικασίες οι οποίες ακολουθούνται και προγραμματίζονται για την ολοκλήρωση της προκαταρκτικής σχεδίασης της πτερωτής (Υποενότητα 4.1) σε συνδυασμό με την παρουσίαση τμημάτων και εντολών του κώδικα για κάθε διαδικασία (Υποενότητες 4.2 έως 4.8). Επίσης θα γίνει πιο συγκεκριμένη αναφορά σε τιμές και δεδομένα μεταβλητών τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την σχεδίαση της πτερωτής.

### 4.1 Περιγραφή βασικών τμημάτων και αρχών της διαδικασίας σχεδίασης.

Η διαδικασία σχεδίασης η οποία ακολουθήθηκε στην συγκεκριμένη διατριβή έχει χωριστεί σε συγκεκριμένα τμήματα/διαδικασίες οι οποίες έχουν ήδη αναφερθεί ονομαστικά στο δεύτερο κεφάλαιο, και παρουσιάζονται συνοπτικά στο σχήμα 2.3.1. Στην παρούσα υποενότητα θα αναλυθεί εις βάθος ο σκοπός του κάθε τμήματος.

Όπως σε κάθε πρόβλημα το *πρώτο βήμα* πάντα είναι η αξιολόγηση των δεδομένων και στην συνέχεια η αξιοποίηση τους με στόχο την εύρεση βασικών μεταβλητών, έτσι και στον κώδικα το πρώτο βήμα είναι η επεξεργασία των δεδομένων. Η επεξεργασία των δεδομένων αφορά τόσο απαραίτητες μετατροπές των μονάδων μέτρησης των δεδομένων καθώς και υπολογισμούς απαραίτητων στοιχείων στην έξοδο της πτερωτής. Αυτό το σύνολο στοιχείων απαρτίζεται από όλα τα θερμοδυναμικά μεγέθη στην έξοδο της πτερωτής, τις ταχύτητες και τις αντίστοιχες γωνίες των ταχυτήτων στην έξοδο της πτερωτής, όλα τα είδη των έργων τα οποία απαιτούνται καθώς και τον εσωτερικό βαθμό απόδοσης " $\eta$ ".

Έπειτα από αυτές τις εισαγωγικές ενέργειες ακολουθεί η διαδικασία του υπολογισμού των στοιχείων της εισόδου της πτερωτής (*Inlet Values*). Σε αυτό το στάδιο της σχεδίασης υπολογίζονται όλα τα θερμοδυναμικά μεγέθη στην είσοδο της πτερωτής, οι ακτίνες της πλήμνης " $r_{1h}$ " και του κελύφους " $r_{1s}$ ", όλες οι ταχύτητες εισόδου και οι αντίστοιχες γωνίες τους, το εμβαδόν εισόδου " $A_1$ " και επιπλέον οι γωνίες του πτερυγίου στην πλήμνη " $\theta_{1h}$ " και στο κέλυφος " $\beta_{1s}$ " στην είσοδο της πτερωτής. Για τον



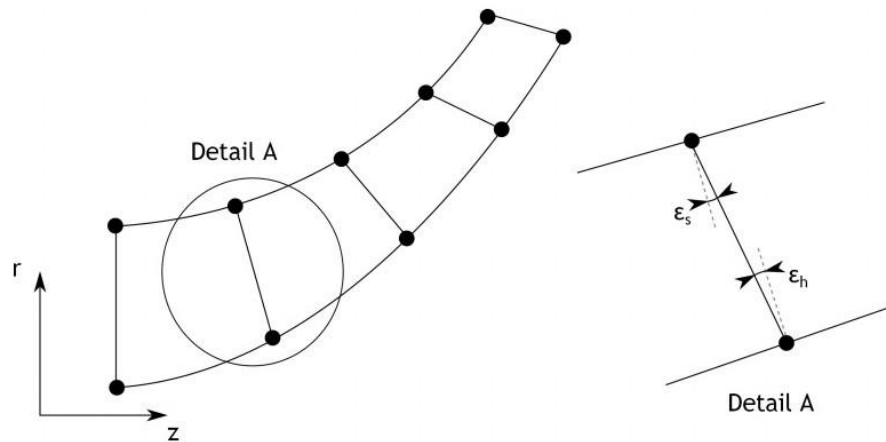
υπολογισμό αυτών των στοιχείων της πτερωτής έχει δημιουργηθεί ξεχωριστή συνάρτηση την οποία καλεί το κυρίως πρόγραμμα και ονομάζεται “*Inlet\_Values.m*”.

Το επόμενο βήμα μετά από τον υπολογισμό των μεταβλητών εισόδου είναι να δημιουργηθούν τα περιγράμματα της πλήμνης και του κελύφους (*Hub and Shroud Contours*). Ο γεωμετρικός προσδιορισμός της πλήμνης (*Hub*) αποτελείται αρχικά από ένα τόξο του οποίου η καμπυλότητα τείνει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη και από ένα ευθύγραμμο τμήμα στο τέλος του κυκλικού αυτού τόξου. Για τον γεωμετρικό προσδιορισμό του κελύφους (*Shroud*) χρησιμοποιείται καμπύλη “*Spline*” τριών σημείων ελέγχου. Τα παραπάνω περιγράμματα πρέπει να προκύπτουν/συμπίπτουν με τα στοιχεία στην είσοδο και στην έξοδο της πτερωτής (πχ. ακτίνες εισόδου-εξόδου, κέντρο κυκλικού τόξου πλήμνης, αρχικά και τελικά σημεία περιγραμμάτων, αξονικό μήκος πτερωτής κ.α.).

Αφού τα περιγράμματα της πλήμνης και του κελύφους (*Hub and Shroud Contours*) έχουν δημιουργηθεί σειρά έχει η δημιουργία των quasi-normal. Όταν μελετούνται πεδία ροών σε πτερωτές ή ακόμα και σε διαχύτες η χρήση των quasi-normal αποτελεί ένα χρήσιμο “εργαλείο” το οποίο βοηθάει στην λεπτομερή ανάλυση των ροών στο εσωτερικό της πτερωτής ή του διαχύτη, ή ακόμη και στον ακριβή προσδιορισμό δεδομένων. Τέτοια σημεία για παράδειγμα μπορεί να βρίσκονται στο πεδίο ροής ενδιάμεσα της πλήμνης και του κελύφους. Τα quasi-normal (σχεδόν κανονικά) όπως περιγράφει και η ονομασία τους πρόκειται για σχεδόν ομαλοποιημένα ευθύγραμμα τμήματα ως προς το πεδίο ροής, το οποίο ορίζουν τα περιγράμματα πλήμνης και κελύφους. Σε ιδεατές περιπτώσεις τα quasi-normal θα ήταν πλήρως ομαλοποιημένα ως προς το πεδίο ροής (*normal*) όμως αυτό είναι αδύνατον λόγω της γεωμετρίας των περιγραμμάτων της πλήμνης και του κελύφους. Στην εικόνα 4.1.1 διακρίνονται αριστερά τα quasi-normal στην μεσημβρινή τομή μιας πτερωτής και δεξιά η γωνία απόκλισης των quasi-normal στην πλήμνη “ $\epsilon_h$ ” και στο κέλυφος “ $\epsilon_s$ ” από τα ιδεατά normal τα οποία αναφέρθηκαν παραπάνω.

Όμως για την δημιουργία των quasi-normal πρέπει πρώτα να βρεθεί η σωστή θέση τοποθέτησης του κάθε quasi-normal σε κάθε ένα από τα περιγράμματα της πλήμνης και του κελύφους. Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.1.1 η θέση των quasi-normal κατά μήκος των περιγραμμάτων πλήμνης και κελύφους ορίζεται από τα μαύρα σημεία επάνω στα περιγράμματα. Οι θέσεις των σημείων είναι αυστηρά συγκεκριμένες και διαφορετικές για το περίγραμμα της πλήμνης και του κελύφους. Τα σημεία αυτά είναι κατανοημένα σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους κατά μήκος του κάθε περιγράμματος

και ονομάζονται «σημεία ίσων αποστάσεων» ή αλλιώς όπως θα χρησιμοποιηθεί περισσότερο «*Equally Spaced Points*».



*Εικόνα 4.1.1 : Γραφική αναπαράσταση quasi-normal αριστερά, και των γωνιών απόκλισης του quasi-normal με όνομα “Detail A” δεξιά.*

Πρέπει να τονιστεί ότι τα σημεία αυτά δεν είναι κατανεμημένα σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους ως προς την αξονική διεύθυνση της πτερωτής, αλλά ως προς το συνολικό μήκος του περιγράμματος πλήμνης ή κελύφους αντίστοιχα.

Για την εύρεση της θέσης των “*equally spaced points*” απαραίτητο είναι να προηγηθεί η κατανομή σημείων σε άνισες μεταξύ τους αποστάσεις (*Unevenly Spaced Points*). Η διαδικασία αυτή στοχεύει στην κατανομή σημείων σε άνισες αποστάσεις μεταξύ τους έτσι ώστε με την βοήθεια τριγωνομετρικών σχέσεων και επαναληπτικών διαδικασιών να προκύψουν οι θέσεις των ίσων κατανεμημένων σημείων (*equally spaced points*). Συνοψίζοντας την διαδικασία για την δημιουργία των quasi-normal θα πρέπει αρχικά να έχει προηγηθεί η παραγωγή των περιγραμμάτων πλήμνης και κελύφους (*Hub and Shroud Contours*), έπειτα να γίνει η κατανομή σημείων σε άνισες αποστάσεις μεταξύ τους σε κάθε περίγραμμα και τέλος να βρεθούν οι συντεταγμένες των ίσων κατανεμημένων σημείων (*Equally Spaced Points*). Η παραπάνω διαδικασία εκπονείται στον κώδικα μέσω της συνάρτησης “*Equally\_Space\_Points.m*”.

Εφόσον από τις παραπάνω διαδικασίες έχουν καθοριστεί όλοι οι απαραίτητοι παράμετροι ακολουθεί ο υπολογισμός της κατανομής των γωνιών του πτερυγίου κατά μήκος της πλήμνης και του κελύφους (*Hub and Shroud Blade Angle Distribution*). Αυτό

το στάδιο της σχεδίασης είναι απαραίτητο για την δημιουργία μιας καλής προκαταρκτικής σχεδίασης της πτερωτής και η διαδικασία ακολουθεί τα εξής βήματα :

- Προσπάθεια εύρεσης καλύτερης τιμής του συντελεστή  $K$  για τιμές από 0.15 έως και την μονάδα.
- Εύρεση της κατανομής των γωνιών του πτερυγίου κατά μήκος των περιγραμμάτων πλήμνης και κελύφους.
- Υπολογισμός των γωνιών του πτερυγίου στις θέσεις των ίσων κατανεμημένων σημείων κατά μήκος των περιγραμμάτων πλήμνης και κελύφους.
- Κατασκευή διαγραμμάτων των παραπάνω κατανομών, των οποίων οι τιμές και συνεπώς η μορφή τους θα πρέπει να συγκλίνουν μεταξύ τους. Για παράδειγμα οι γωνίες στην είσοδο και στην έξοδο της πτερωτής θα πρέπει να ταυτίζονται και στα δύο διαγράμματα.

Ο κώδικας για την εκπόνηση των παραπάνω βημάτων καλεί συνάρτηση με όνομα "*Blade\_Angle\_Distribution.m*".

Από την επόμενη διαδικασία προκύπτει ένα μέγεθος το οποίο έχει μεγάλη επιρροή στην ολοκλήρωση της σχεδίασης της πτερωτής, και αυτό είναι οι γωνίες απόκλισης (*Deviation Angles*) των quasi-normal από τα normal. Και αυτό το τμήμα της διαδικασίας σχεδίασης πτερωτών αποτελείται από μικρότερα απαραίτητα επιμέρους τμήματα. Αυτά τα τμήματα απαρτίζονται από, την υιοθέτηση ενός περιστρεφόμενου συστήματος αναφοράς σε κάθε quasi-normal (*Παράρτημα Α*), από τον υπολογισμό της κλίσης του περιγράμματος στο συγκεκριμένο σημείο που βρίσκεται το quasi-normal και έπειτα από την εύρεση της γωνίας απόκλισης "ε". Για την εύρεση των γωνιών απόκλισης χρησιμοποιήθηκε διαφορετικός τρόπος από αυτόν που χρησιμοποιεί ο Johannes Schiff στην μεταπτυχιακή του διατριβή, ο οποίος ταυτίζεται με τον τρόπο όπου ορίζει ο R.H Aungier. Για τον υπολογισμό των γωνιών απόκλισης ο κώδικας καλεί συνάρτηση η οποία ονομάζεται "*Deviation\_Angle.m*".

Τέλος ο κώδικας θα εκτελέσει κάποιες διαδικασίες μέσα στο κυρίως πρόγραμμα χωρίς να καλέσει εξωτερικές συναρτήσεις. Αυτές οι διαδικασίες αφορούν τον υπολογισμό του μήκους της μέσης γραμμής της ροής (*Mean Camberline Length*) το οποίο ταυτίζεται με το μήκος της μέσης γραμμής των πτερυγίων (*Mean Streamline Length*) μιας και η ροή θεωρείται ιδανική (*Ideal Flow*). Όταν γίνεται αναφορά σε ιδανική ροή εννοείται ότι το ρευστό ακολουθάει τα πτερύγια επακριβώς. Στην συνέχεια ακολουθεί η γραφική απεικόνιση της μεσημβρινής μορφής της μέσης γραμμής της ροής και ο υπολογισμός του συντελεστή φορτίσεως των πτερυγίων "BL" για τον συγκεκριμένο αριθμό πτερυγίων "Z".

Όλες οι παραπάνω διαδικασίες επαναλαμβάνονται για κάθε πιθανό αριθμό πτερυγίων “Z” και αποθηκεύεται ο συντελεστής φορτίσεως των πτερυγίων “BL” για τον συγκεκριμένο αριθμό πτερυγίων. Για όσους πιθανούς αριθμούς πτερυγίων η διαδικασία σχεδιασμού ολοκληρωθεί επιτυχώς περνάμε στο επόμενο βήμα το οποίο ελέγχει για ποιόν από αυτούς τους αριθμούς προκύπτει ο μικρότερος συντελεστής φορτίσεως των πτερυγίων “BL” και επιλέγεται ως βέλτιστη λύση μαζί με τα δεδομένα που τον συνοδεύουν. Σε αυτό το σημείο ολοκληρώνεται η προκαταρκτική σχεδίαση της πτερωτής, παρουσιάζοντας στον χρήστη του κώδικα όλα τα απαραίτητα δεδομένα που πρέπει να εξάγει μια διαδικασία προκαταρκτικής σχεδίασης καθώς και τα γραφήματα των γωνιών κατανομής των πτερυγίων καθώς και την μεσημβρινή προβολή της πτερωτής με την παρουσία των quasi-normal και της μέσης γραμμής ροής.

## 4.2 Εισαγωγή δεδομένων και αρχική επεξεργασία.

Όπως ήδη αναφέρθηκε στην προηγούμενη υποενότητα το πρώτο πράγμα το οποίο πρέπει να γίνει είναι η εισαγωγή των δεδομένων στον κώδικα. Αυτό θα γίνει μέσω του “.txt” αρχείου με όνομα “Radial\_Compressor\_Data1.txt” όπως ακριβώς περιγράφηκε στην ενότητα 2.2.

Με την εντολή “*dlmread('Radial\_Compressor\_Data1.txt')*” το πρόγραμμα τοποθετεί σε πίνακα με όνομα “A[i]” όλα τα δεδομένα τα οποία έχει δώσει ο χρήστης του προγράμματος. Στην συνέχεια όλα τα δεδομένα εκχωρούνται στις αντίστοιχες μεταβλητές με την συγκεκριμένη σειρά την οποία έχουν τοποθετηθεί στον πίνακα. Για αυτό τον λόγο η σειρά με την οποία τα δεδομένα εισάγονται στο αρχείο excel και έπειτα αντιγράφονται στο αρχείο “.txt” δεν πρέπει να υποβληθεί σε καμία απολύτως αλλαγή. Επίσης ταυτόχρονα με την εκχώρηση των τιμών στις μεταβλητές γίνονται και οι απαραίτητες μετατροπές των μονάδων μέτρησης. Για παράδειγμα η πίεση δίνεται από τον χρήστη σε μονάδα μέτρησης [bar] και στον κώδικα μετατρέπεται σε [Pascal] πολλαπλασιάζοντας την αρχική της μορφή με το  $10^5$ . Ακόμη κατά την εκχώρηση τιμών γίνεται απευθείας επίλυση κάποιων εξισώσεων και εκχώρηση τιμής στην άγνωστη μεταβλητή. Αυτό περιλαμβάνει την εύρεση των τιμών της ακτίνας της πλήμνης στην είσοδο “ $r_{1h}$ ”, το πάχος των πτερυγίων στην είσοδο την πτερωτής “ $t_{b1}$ ” καθώς και το πάχος των πτερυγίων στο υπόλοιπο της πτερωτής “ $t_b$ ”. Οι εξισώσεις των τριών παραπάνω μεταβλητών προκύπτουν ως εξής.

Ο χρήστης έχει δώσει την τιμή του λόγου των ακτινών της πλήμνης στην είσοδο και της ακτίνας στην έξοδο “*Inlet hub to tip radius ratio*” όπου στον κώδικα αναγράφεται σαν “*IHTRATIO*” και για την οποία ισχύει:

$$\text{Inlet hub to tip radius ratio} = \frac{r_{1h}}{r_2} \quad (4.1)$$

Και λύνοντας ως προς την ακτίνα της πλήμνης στην είσοδο της περρωτής “ $r_{1h}$ ” προκύπτει :

$$r_{1h} = r_2 \cdot (\text{Inlet hub to tip radius ratio}) \quad (4.2)$$

Ενώ τα πάχη των πτερυγίων στην είσοδο “ $t_{b1(\text{dimensionless})}$ ” αλλά και στην υπόλοιπη περρωτή “ $t_{b(\text{dimensionless})}$ ” σε αδιάστατη μορφή προκύπτουν αντίστοιχα ως :

$$\begin{aligned} t_{b1(\text{dimensionless})} &= \frac{t_{b1}}{r_2} \\ t_{b(\text{dimensionless})} &= \frac{t_b}{r_2} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Και λύνοντας ως προς τα πάχη εκφρασμένα σε μέτρα [meter] προκύπτουν:

$$\begin{aligned} t_{b1} &= r_2 t_{b1(\text{dimensionless})} \\ t_b &= r_2 t_{b(\text{dimensionless})} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Όλα τα παραπάνω φαίνονται στην *εικόνα 4.2.1* σε μορφή κώδικα της “*Matlab*” όπου στην αρχή αναγράφονται τα στοιχεία του συγγραφέα, τρεις εντολές οι οποίες κλείνουν όλα τα ανοιγμένα παράθυρα από προηγούμενες φορές που έχει τρέξει ο κώδικας και επιπλέον “καθαρίζουν” τα παράθυρα των “*Command Window*” και του “*Workspace*”.

```

1  % RADIAL COMPRESSOR CALCULATION TOOL
2  % THESIS OF MARKOS LIONIS
3  % 2020-2021
4
5  clear all
6  close all
7  clc
8
9  A=dlmread('Radial_Compressor_Data1.txt');
10 R=A(1);%SPECIFIC GAS CONSTANT
11 gamma=A(2);%SPECIFIC HEAT RATIO
12 Cp=A(3);%SPECIFIC HEAT FOR CONSTANT PRESSURE
13 T00=A(4);%STAGNATION TEMPERATURE
14 P00=(10^5)*A(5);%STAGNATION PRESSURE
15 dif.vanes=A(6);%VANED DIFFUSER ->1 , ELSE ->0
16 shroud=A(7);%UNSHROUDED IMPELLER ->1 , ELSE ->0
17 N=A(8);%ROTATING SPEED
18 m= A(9);%MASS FLOW
19 r2=A(10);%IMPELLER TIP RADIUS
20 IHTRATIO=A(11);%IMPELLER INLET HUB TO TIP RADIUS RATIO (IHTRATIO=rh1/r2)
21 almeandot=A(12);%MEAN INLET RELATIVE FLOW ANGLE  %%%%%%%%%CHECK THE POSITION OF THE ABS. AND RELATIVE ANGLES AT THE EXCEL
22 almean =A(13);%MEAN ABSOLUTE FLOW ANGLE
23 ilmean =A(14);%MEAN INLET INCIDENCE
24 DBTI =A(15);%DIMENSIONLESS BLADE THICKNESS AT INLET (DBTI=tb1/r2)
25 DBTP =A(16);%DIMENSIONLESS BLADE THICKNESS AT THE REST OF THE PASSAGE (DBTP=tb/r2)
26 Blmax =A(17);%MAXIMUM BLADE LOADING
27 K =A(18); %K PARAMETER IS SET TO A MAXIMUM OF 1
28 W =(2*pi*N)/60;%ANGULAR VELOCITY
29 U2 = W*r2;%IMPELLER TIP SPEED
30 p00=(P00)/(R*T00);%STAGNATION DENSITY AT THE INLET
31 FI =m/(p00*pi*(r2^2)*U2);%INLET FLOW COEFFICIENT
32 r1h =A(11)*r2 %INTLET HUB RADIUS
33 tb1 =r2*A(15);%BLADE THICKNESS AT THE INLET
34 tb =r2*A(16);%BLADE THICKNESS AT THE REST OF THE PASSAGE

```

**Εικόνα 4.2.1 :** Παρουσίαση αρχικού τμήματος κώδικα για την επεξεργασία των δεδομένων και την εκχώρηση αρχικών τιμών.

Επιπλέον σε αυτό το αρχικό στάδιο υπολογίζονται, η γωνιακή ταχύτητα “ $\omega$ ” από την σχέση (3.14), η περιφερειακή ταχύτητα της πτερωτής “ $U_2$ ” από την σχέση (3.13) και η πυκνότητα ανακοπής στην είσοδο του συμπιεστή “ $\rho_{00}$ ” από την σχέση (3.1) με βάση τα μεγέθη ανακοπής ως εξής:

$$p_{00} = \rho_{00} R T_{00} \quad (3.1)$$

$$\Rightarrow \rho_{00} = \frac{p_{00}}{R T_{00}} \quad (4.5)$$

Τέλος υπολογίζεται η τιμή του συντελεστή παροχής “ $\Phi$ ” από την σχέση (3.12).

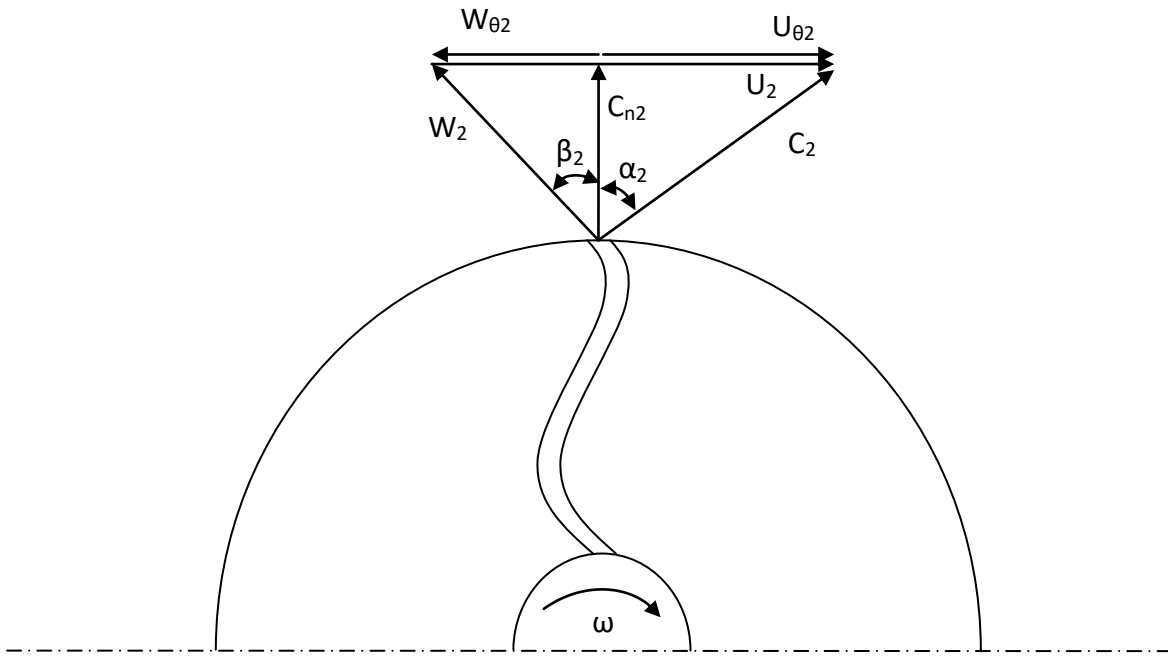
Τα αμέσως επόμενα βήματα τα οποία ακολουθούν είναι αυτά του υπολογισμού του έργου το οποίο μεταφέρει η πτερωτή στο ρευστό “I”, του έργου το οποίο δαπανάται σε παράπλευρες απώλειες “ $I_{par}$ ”, του πραγματικού έργου το οποίο μεταφέρεται στην πτερωτή “ $I_b$ ” καθώς και του εσωτερικού βαθμού απόδοσης “ $\eta_l$ ”. Για τον υπολογισμό του έργου το οποίο μεταφέρεται από τα πτερύγια στο ρευστό “I” λαμβάνεται υπόψη εάν η πτερωτή είναι με κέλυφος ή όχι. Στην περίπτωση όπου η πτερωτή είναι με κέλυφος (*Shrouded Impeller*) ο χρήστης στο αρχείο excel “Radial Compressor Data” στο στοιχείο “Shroud” θα πρέπει να πληκτρολογήσει τον αριθμό «0», ενώ στην περίπτωση όπου η πτερωτή είναι χωρίς κέλυφος (*Unshrouded Impeller*) θα πρέπει να εισαχθεί ο αριθμός «1». Έτσι με βάση τον τύπο του κελύφους και με την χρήση των εξισώσεων (3.16),(3.17),(3.18) και (3.19) προκύπτει το έργο που μεταφέρεται στο ρευστό “I” και το έργο που δαπανάται στις παράπλευρες απώλειες “ $I_{par}$ ”, ενώ από τις εξισώσεις (3.20) και (3.21) προκύπτουν αντίστοιχα το πραγματικό έργο που μεταφέρεται στην πτερωτή “ $I_b$ ” και ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης της πτερωτής “ $\eta_l$ ”.

Οι επόμενοι υπολογισμοί αφορούν τις γωνίες των ταχυτήτων στην έξοδο της πτερωτής καθώς και τον υπολογισμό των εν λόγω ταχυτήτων. Ξεκινώντας πρέπει να υπολογιστεί η γωνία της απόλυτης ταχύτητας στην έξοδο της πτερωτής “ $\alpha_2$ ”. Η γωνία αυτή προκύπτει από την χρήση των εξισώσεων (3.30) και (3.31) με την διαφορά ότι η εξίσωση (3.30) λύνεται ως προς την γωνία “ $\alpha_2$ ” :

$$\alpha_2 = \tan^{-1}\left(\frac{1}{0.26 + 3\Phi}\right) \quad (4.6)$$

$$\alpha_2 = 72^\circ - 0.5 \ln(\Phi) - 585 \Phi^2 \quad (3.31)$$

Απαραίτητο σε αυτή την διαδικασία είναι οι γωνίες αλλά και οι ταχύτητες σε κάθε σημείο να επαληθεύουν τα τρίγωνα ταχυτήτων. Έτσι στο *σχήμα 4.2.1* αναπαριστάται το τρίγωνο ταχυτήτων στην έξοδο της πτερωτής, από το οποίο προκύπτουν και οι τύποι με τους οποίους υπολογίστηκαν τα σχετικά μεγέθη ταχυτήτων και γωνιών.



**Σχήμα 4.2.1:** Τρίγωνο ταχυτήτων στην έξοδο της πτερωτής για ιδεατή ροή του ρευστού και με την σχετική ταχύτητα να ακολουθεί επακριβώς το πτερύγιο χωρίς καμία απόκλιση. Επίσης αναπαριστάται η προβολή της σχετικής και της απόλυτης ταχύτητας στην περιφερειακή.

Επειδή έχει θεωρηθεί ότι το ρευστό ακολουθάει την μορφή του πτερυγίου χωρίς να αποκλίνει από αυτήν η γωνία του πτερυγίου θα ταυτίζεται με την γωνία της σχετικής ταχύτητας. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο η γωνία της σχετικής ταχύτητας στο παραπάνω σχήμα συμβολίζεται με “ $\beta_2$ ” και όχι με “ $\alpha_2$ ”. Επίσης επειδή η ροή είναι πλήρως ακτινική η κάθετη συνιστώσα “ $\overrightarrow{C_{n2}}$ ” ταυτίζεται με την ακτινική συνιστώσα “ $\overrightarrow{C_{r2}}$ ” η οποία ταυτίζεται με την μεσημβρινή συνιστώσα “ $\overrightarrow{C_{m2}}$ ”. Άρα ισχύει

$$\overrightarrow{C_{m2}} = \overrightarrow{C_{r2}} = \overrightarrow{C_{n2}} \quad (4.7)$$

Εάν θεωρηθεί ότι η περιφερειακή ταχύτητα στην είσοδο την πτερωτής “ $U_1$ ” είναι πολύ μικρότερη της περιφερειακής ταχύτητας στην έξοδο “ $U_2$ ” σε συνδυασμό με μια μικρή γωνία απόλυτης ταχύτητας στην είσοδο “ $\alpha_1$ ”, η σχέση (3.21) μπορεί μετατρέπεται ως εξής :

$$I_B = \frac{\Delta h_{0,blades}}{U_2^2} = \frac{C_{\theta 2}}{U_2} - \frac{C_{\theta 1} U_1}{U_2} \quad (3.21)$$



$$\Rightarrow I_B = \frac{C_{\theta 2}}{U_2} \quad (4.8)$$

Έτσι από την τελευταία σχέση μπορεί να προκύψει η τιμή της εφαπτομενικής απόλυτης ταχύτητας της πτερωτής ως εξής :

$$C_{\theta 2} = I_B U_2 \quad (4.9)$$

Και με γνωστή πλέον την “ $C_{\theta 2}$ ” και την “ $U_2$ ” μπορεί εύκολα να βρεθεί η τιμή της εφαπτομενικής σχετικής ταχύτητας “ $W_{\theta 2}$ ” ως εξής :

$$W_{\theta 2} = C_{\theta 2} - U_2 \quad (4.10)$$

Μέσω τριγωνομετρικών σχέσεων και συνδυάζοντας την ταχύτητα “ $C_{\theta 2}$ ” και την γωνία της απόλυτης ταχύτητας “ $\alpha_2$ ” μπορούν να βρεθούν η κάθετη συνιστώσα της απόλυτης ταχύτητας “ $C_{n2}$ ” καθώς και η απόλυτη ταχύτητα “ $C_2$ ” στην έξοδο της πτερωτής :

$$C_{n2} = \frac{C_{\theta 2}}{\tan(\alpha_2)} \quad (4.11)$$

$$C_2 = \frac{C_{\theta 2}}{\sin(\alpha_2)} \quad (4.12)$$

Το τελευταίο βήμα για τον πλήρη προσδιορισμό του τριγώνου ταχυτήτων στην έξοδο της πτερωτής είναι ο υπολογισμός της γωνίας του πτερυγίου στην έξοδο η οποία θα είναι ίση με την γωνία τη σχετικής ταχύτητας ( $\beta_2 = \alpha_2$ ) καθώς και ο υπολογισμός της σχετικής ταχύτητας εξόδου. Τα παραπάνω προκύπτουν από τις σχέσεις (4.13) και (4.14) :

$$\beta_2 = \alpha_2 = \tan^{-1}\left(\frac{W_{\theta 2}}{C_{n2}}\right) \quad (4.13)$$

$$W_2 = \frac{W_{\theta 2}}{\sin(\beta_2)} \quad (4.14)$$

Με την ολοκλήρωση της εύρεσης των στοιχείων που απαρτίζουν το τρίγωνο ταχυτήτων στην έξοδο ακολουθεί ο υπολογισμός κάποιων συγκεκριμένων θερμοδυναμικών μεγεθών στην είσοδο και στην έξοδο της πτερωτής. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να τονιστεί ότι κατά τον προκαταρκτικό σχεδιασμό η ροή από το σημείο εισόδου στον συμπιεστή «0» έως και το σημείο εισόδου στην πτερωτή «1» παραμένει χωρίς απώλειες. Δηλαδή τα μεγέθη πίεσης, ταχύτητας, πυκνότητας και θερμοκρασίας παραμένουν σταθερά κατά την διέλευση από το σημείο «0» προς το σημείο «1». Έτσι ισχύουν :

$$T_{01} = T_{00} \quad (4.15)$$

$$p_{01} = p_{00} \quad (4.16)$$

$$\rho_{01} = \rho_{00} \quad (4.17)$$

Έπειτα από την σχέση (3.15) μπορεί εύκολα να υπολογιστεί η διαφορά της ειδικής ενθαλπίας ανακοπής “ $\Delta h_0$ ” ως εξής :

$$\Delta h_0 = I U_2^2 \quad (4.18)$$

Και από την σχέση (3.29) λύνοντας ως προς τον συντελεστή φορτίσεως προκύπτει :

$$\mu_p = \left[ 0.95 - \left( \frac{0.0005}{\Phi} \right) \right] I_b \quad (4.19)$$

Με το να είναι γνωστές οι τιμές των “ $\Delta h_0$ ” και “ $\mu_p$ ” μπορεί να οριστεί από την σχέση (3.27) ο πολυτροπικός βαθμός απόδοσης “ $\eta_p$ ” καθώς και να υπολογιστεί η διαφορά της ενθαλπίας ανακοπής υπό πολυτροπική συμπίεση “ $\Delta h_{0p}$ ” λύνοντας την σχέση (3.26) ως προς την συγκεκριμένη μεταβλητή. Και προκύπτει :

$$\Delta h_{0p} = \mu_p U_2^2 \quad (4.20)$$

Με βάση τα παραπάνω μπορούν να υπολογιστούν όλα τα θερμοδυναμικά μεγέθη στην έξοδο της πτερωτής ξεκινώντας από την εύρεση της θερμοκρασίας ανακοπής στην έξοδο της πτερωτής “ $T_{02}$ ” λύνοντας την σχέση (3.11) ως προς “ $T_{02}$ ” :

$$T_{02} = T_{01} + \frac{\Delta h_0}{C_p} \quad (4.21)$$

Και με γνωστή την θερμοκρασία ανακοπής στην έξοδο, η (3.5) επιλύεται για την εύρεση της θερμοκρασίας του ρευστού στην έξοδο της πτερωτής “ $T_2$ ”.

$$T_2 = T_{02} - \frac{C_2^2}{2 C_p} \quad (4.22)$$

Έπειτα βρίσκονται οι τιμές της πίεσης ανακοπής στην έξοδο “ $p_{02}$ ” από την σχέση (3.7), της πίεσης στην έξοδο “ $p_2$ ” από την σχέση (3.6) και της πυκνότητας του ρευστού από την σχέση (3.1). Η πίεση ανακοπής φαίνεται στην εξίσωση (4.23) και η πίεση του ρευστού στην έξοδο στην εξίσωση (4.24).

$$p_{02} = p_{01} \left( \frac{T_{02}}{T_{01}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (4.23)$$

$$p_2 = \frac{p_{02}}{\left( \frac{T_{02}}{T_2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}} \quad (4.24)$$

Ενώ η πυκνότητα αναγράφεται στην εξίσωση (4.25).

$$\rho_2 = \frac{p_2}{R T_2} \quad (4.25)$$

Και το τελευταίο βήμα για την ολοκλήρωση της συγκεκριμένης υποενότητας είναι ο υπολογισμός του αριθμού “*Mach*” από την σχέση (3.8) καθώς και η εύρεση της τιμή του εμβαδού στην έξοδο της πτερωτής (*Passage area at the exit*) από την σχέση (3.32).

Όλες οι σχέσεις από την σχέση (4.5) και μετά φαίνονται στις παρακάτω εικόνες. Στην εικόνα 4.2.2 συμπεριλαμβάνονται οι πράξεις για τον υπολογισμό των απαραίτητων έργων. Η εικόνα 4.2.3 περιλαμβάνει τον τρόπο με τον οποίο υπολογίζονται τα μεγέθη που απαρτίζουν το τρίγωνο ταχυτήτων ενώ στην εικόνα 4.2.4 φαίνεται ο τρόπος υπολογισμού των θερμοδυναμικών μεγεθών στην έξοδο της πτερωτής.

```

35 - if shroud == 0
36 -     I=0.62-((FI/0.4)^3)+(0.0014/FI);%SHROUDED IMPELLERS WORK INPUT COEFFICIENT
37 -     Ipar=0.0014/FI;%PARASITIC WORK LOSS COEFFICIENT
38 - else if shroud==1
39 -     I=0.68-((FI/0.37)^3)+(0.002/FI); %UNSHROUDED IMPELLERS WORK INPUT COEFFICIENT
40 -     Ipar=0.002/FI;%PARASITIC WORK LOSS COEFFICIENT
41 - end
42 - end
43 - Ib=I-Ipar;%BLADE WORK INPUT COEFFICIENT
44 - ni=0.95-(0.0005/FI);%INTERNAL EFFICIENCY OF THE IMPELLER
45 -

```

**Εικόνα 4.2.2 :** Παρουσίαση τρόπου υπολογισμού του εσωτερικού βαθμού απόδοσης καθώς και των απαραίτητων έργων που περιγράφηκαν σε αυτήν την υποενότητα σε μορφή κώδικα.

```

46 - %%%FROM VELOCITIE TRIANGLE %%%
47 - if dif.vanes==0 %IF I HAVE VANELESS DIFFUSER
48 -     a2= (atand(1/(0.26+3*FI)));%ABSOLUTE FLOW ANGLE AT THE EXIT
49 - else if dif.vanes==1 %IF I HAVE VANED DIFFUSER
50 -     a2= 72-0.5*log(FI)-585*(FI^2);%ABSOLUTE FLOW ANGLE AT THE EXIT
51 - end
52 - end
53 - Cth2=Ib*U2;%REGIONAL COMPONENT OF THE ABSOLUTE SPEED ON TIP TANGENTIAL VELOCITY
54 - Wth2=Cth2-U2;%RELATIVE TANGENTIAL VELOCITY AT EXIT
55 - Cn2=Cth2/tand(a2); %VERTICAL COMPONENT OF ABSOLUTE VELOCITY
56 - C2=Cth2/sind(a2);%ABSOLUTE VELOCITY IN EXIT
57 - b2angle=atand(Wth2/Cn2); %RELATIVE FLOW ANGLE OR BLADE ANGLE
58 - W2 =Wth2/sind(b2angle);%RELATIVE VELOCITIE AT THE EXIT
59 - %%%FROM VELOCITIE TRIANGLE%%%

```

**Εικόνα 4.2.3 :** Παρουσίαση σε μορφή κώδικα του τρόπου υπολογισμού των μεγεθών που συντελούν το τρίγωνο ταχυτήτων στην έξοδο της πτερωτής.

```

60
61  %%%THERMODYNAMIC CONDITIONS AT THE EXIT%%%
62  Dh0 = I*(U2^2);%SPECIFIC STAGNATION ENTHALPY DIFFERENCE
63  T01=T00; %STAGNATION TEMPERATURE AT INLET
64  P01=P00; %STAGNATION PRESSURE AT INLET
65  p01=p00; %STAGNATION DENSITY AT INLET
66  mp = (0.95-(0.0005/FI))*Ib;%POLYTROPIC HEAD COEFFICIENT
67  Dh0p =mp*(U2^2);%SPECIFIC STAGNATION ENTHALPY DIFFERENCE UNDER IDEAL POLYTROPIC COMPRESSION
68  np =Dh0p/Dh0;%POLYTROPIC EFFICIENCY
69  T02 = T01 + Dh0/Cp ;%THE STAGNATION TEMPERATURE AT THE EXIT
70  T2 = T02 - (C2^2)/(2*Cp);%TEMPERATURE AT THE EXIT
71  P02 = P01*(T02/T01)^((gamma*np)/(gamma-1));%STAGNATION PRESSURE AT THE EXIT
72  P2 = P02/((T02/T2)^(gamma/(gamma-1)));%PRESSURE AT THE EXIT
73  Mach =C2/sqrt((gamma*R*T2));%MACH NUMBER
74  p2 =P2/(R*T2);%DENSITY AT THE EXIT
75  A2 =m/(p2*Cn2);%IMPELLER EXIT AREA IN MERIDIONAL DIRECTION WITHOUT TAKING PLACE THE BLOCKAGE FACTOR
76  %%%THERMODYNAMIC CONDITIONS AT THE EXIT%%%

```

**Εικόνα 4.2.4 :** Παρουσίαση σε μορφή κώδικα του τρόπου υπολογισμού των θερμοδυναμικών μεγεθών στην έξοδο της πτερωτής.

Μέχρι στιγμής δεν έχει απαιτηθεί κάποια δομή επανάληψης για τον υπολογισμό των παραπάνω μεταβλητών. Το επόμενο βήμα είναι η εισαγωγή του κώδικα στην κύρια/βασική δομή επανάληψης.

### 4.3 Διαδικασία υπολογισμού χαρακτηριστικών εισόδου της πτερωτής.

Μετά τους υπολογισμούς της υποενότητας 4.2 ο κώδικας εισέρχεται στην βασική δομή επανάληψης αφού πρώτα εκχωρηθούν κάποιες αρχικές τιμές σε συγκεκριμένες μεταβλητές. Αυτές οι μεταβλητές αφορούν την ακρίβεια (*tolerance*) η οποία είναι της τάξης του 0.001, τον αρχικό και τελικό αριθμό πτερυγίων “Start” & “End”, την μεταβλητή ένδειξης εάν η διαδικασία βρίσκεται στην τελική επανάληψη “*Final\_rep*” καθώς και την μεταβλητή “*Best*” η οποία αυξάνεται κατά μία μονάδα όποτε βρεθεί κάποια πιθανή βέλτιστη λύση. Στην μεταβλητή “*Final\_rep*” εκχωρείτε η τιμή «0» η οποία θα αλλάξει στην τιμή «1» όταν θα έχει βρεθεί η βέλτιστη λύση με σκοπό την επανάληψη όλης της επαναληπτικής διαδικασίας μόνο για τον βέλτιστο αριθμό πτερυγίων αυτή την φορά. Οι παραπάνω διαδικασίες φαίνονται στην εικόνα 4.3.1.

```

80  ##### MAIN ITERATION LOOP#####
81
82  tolerance = 0.001;
83  final_rep = 0; %WHEN THE VALUE IS EQUAL TO 1 MEANS THAT WILL MAKE ALL THE PROCES AGAIN WITH START-END=ZI=ZI_BEST
84  best = 1; %STARTING VALUE OF BEST.EVERY TIME WHICH WILL BE FOUND A POSSIBLE SOLUTION THIS WILL BE INCREASED BY 1.
85  Start = A(19); %THEORITICALLY IS THE NUMBER OF BLADES, PRACTICALLY IS THE NUMBER OF BLADES WHICH THE LOOP WILL START T
86  End = A(20); %SAME AS ABOVE, BUT THIS IS THE 'MAXIMUM' NUMBER OF BLADES WHICH WE WANT FOR THE IMPELLER
87

```

*Εικόνα 4.3.1: Αρχικές εκχωρήσεις τιμών πριν την εισαγωγή του κώδικα στην βασική δομή επανάληψης.*

Το επόμενο βήμα είναι η εισαγωγή του κώδικα στην βασική δομή επανάληψης. Η βασική δομή επανάληψης είναι μια δομή επανάληψης τύπου “While 1” η οποία τερματίζει με την εντολή “Break”. Αμέσως μετά την επαναληπτική δομή “While 1” ο κώδικας μπαίνει στην επαναληπτική δομή “For”, η οποία για κάθε πιθανό αποδεκτό αριθμό πτερυγίων θα εκτελέσει τις διαδικασίες που ακολουθούν. Η επαναληπτική δομή “For” τερματίζει όταν ελεγχθούν όλοι οι πιθανοί αριθμοί πτερυγίων.

Με την εισαγωγή του κώδικα στην “For” καθώς και κάθε φορά που θα εισέρχεται σε αυτήν θα εκχωρείται/αλλάζει η τιμή μιας μεταβλητής με ιδιαίτερη σημασία στην ταχύτητα εκτέλεσης του προγράμματος. Αυτή η μεταβλητή ονομάζεται “Stop” και οι τιμές τις οποίες μπορεί να πάρει είναι μηδέν και ένα. Η τιμή της συγκεκριμένης μεταβλητής αλλάζει σε συγκεκριμένα σημεία κλειδιά από τα οποία μπορεί εύκολα να ερμηνευτεί εάν η διαδικασία θα καταλήξει σε πιθανό αποτέλεσμα ή θα οδηγήσει σε διαδοχικά σφάλματα και εν τέλει σε αποτυχία. Ένα παράδειγμα των εν λόγω σημείων κλειδιών είναι η διαδικασία της εύρεσης των χαρακτηριστικών εισόδου. Εάν η διαδικασία δεν συγκλίνει τότε η μεταβλητή “Stop” παίρνει την τιμή ένα (Stop = 1). Σε αυτήν την περίπτωση όπου η μεταβλητή “Stop” ισούται με την μονάδα ο κώδικας αποφεύγει να μπει σε άλλες επιμέρους διαδικασίες για τις οποίες είναι σίγουρο ότι δεν θα βρεθεί λογική ή και καθόλου λύση. Έτσι η διαδικασία γίνεται αρκετά γρηγορότερη καθώς αποφεύγονται άσκοποι υπολογισμοί καθώς και η πιθανότητα σφαλμάτων αλλά και η πιθανότητα ο κώδικας να ‘πέσει’ σε ατέρμον βρόγχο σε σημεία όπου απαιτείται σύγκλιση.

Μετά την εκχώρηση αρχικής τιμής στην μεταβλητή “Stop” ο κώδικας καλεί συνάρτηση με όνομα “Inlet\_Values”. Με την συνάρτηση αυτήν θα υπολογιστούν όλα

τα απαραίτητα μεγέθη στην είσοδο της πτερωτής. Ο τρόπος με τον οποίο στην Matlab καλείται μια συνάρτηση είναι ο εξής :

$$[Επιστρεπτέα Αποτελέσματα] = Όνομα_Συνάρτησης [Όρίσματα εισαγωγής]$$

Τα ορίσματα τα οποία δέχεται η συνάρτηση “Inlet\_Values” είναι :

- Η ακτίνα της πλήμνης στην είσοδο της πτερωτής “ $r_{1h}$ ”.
- Η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της πτερωτής “ $\omega$ ”.
- Η μέση γωνία της σχετικής ταχύτητας στην είσοδο της πτερωτής “ $\overline{\alpha_1}$ ”.
- Η μέση γωνία πρόσπτωσης του ρευστού στα πτερύγια στην είσοδο της πτερωτής “ $i_1$ ”.
- Η ειδική θερμότητα υπό περιβάλλον σταθερής πίεσης “ $C_p$ ”.
- Η πίεση ανακοπής “ $p_{o1}$ ”, η θερμοκρασία ανακοπής “ $T_{o1}$ ” και η πυκνότητα ανακοπής “ $\rho_{o1}$ ” στην είσοδο της πτερωτής.
- Ο αριθμός Reynolds “ $R$ ”, και ο λόγος από τις ειδικές θερμότητες “ $\gamma$ ”.
- Ο αριθμός των πτερυγίων στην συγκεκριμένη επανάληψη “ $Z_i$ ”.
- Η ακρίβεια “ $tolerance$ ”.
- Η παροχή μάζας “ $\dot{m}$ ”.
- Το πάχος των πτερυγίων στην είσοδο της πτερωτής “ $tb_1$ ”.

Ενώ μετά τους υπολογισμούς τους οποίους εκτελεί η συνάρτηση επιστρέφει στο κυρίως πρόγραμμα τα εξής στοιχεία :

- Το εμβαδόν στην είσοδο της πτερωτής “ $A_1 = A_{1passage}$ ”.
- Την μεταβλητή υπόδειξης προβλήματος σύγκλισης “ $Stop$ ”.
- Την ακτίνα του κελύφους στην είσοδο της πτερωτής “ $r_{1s}$ ” καθώς και την μέση ακτίνα στην είσοδο της πτερωτής “ $r_{1mean}$ ”.
- Την περιφερειακή ταχύτητα περιστροφής στην είσοδο της πτερωτής “ $U_1$ ”, την απόλυτη ταχύτητα στην είσοδο “ $C_1$ ”, την κάθετη συνιστώσα της απόλυτης ταχύτητας “ $C_{m1}$ ” καθώς και την σχετική ταχύτητα περιστροφής στην είσοδο “ $W_1$ ”.
- Τις περιφερειακές ταχύτητες στην πλήμνη “ $U_{1h}$ ” και στο κέλυφος “ $U_{1s}$ ” στην είσοδο της πτερωτής.
- Τις γωνίες των σχετικών ταχυτήτων στην πλήμνη και στο κέλυφος “ $\alpha'_{1h}$ ” & “ $\alpha'_{1s}$ ”.
- Τις γωνίες πρόσπτωσης στην πλήμνη “ $i_{1h}$ ” και στο κέλυφος “ $i_{1s}$ ” στην είσοδο της πτερωτής.
- Τις γωνίες των πτερυγίων στην πλήμνη “ $b_{h1}$ ” και στο κέλυφος “ $b_{s1}$ ” στην είσοδο της πτερωτής.
- Την κατανομή της γωνίας εισόδου στην πτερωτή “ $b_1$ ” και την κατανομή της ακτίνας εισόδου. Τα παραπάνω αναφέρονται ως προς την ακτινική διεύθυνση.

- Την θερμοκρασία του ρευστού “ $T_1$ ”, την πίεση “ $p_1$ ” και την πυκνότητα “ $\rho_1$ ” στην είσοδο της πτερωτής.

Η εισαγωγή στις δύο δομές επανάληψης καθώς και το κάλεσμα της συνάρτησης “*Inlet\_Values*” φαίνονται στην εικόνα 4.3.2. Επιπλέον στην εικόνα 4.3.2 φαίνεται και ο τρόπος υπολογισμού του αξονικού μήκους της πτερωτής μέσω της εξίσωσης (3.37) καθώς και ο υπολογισμός της ακτίνας καμπυλότητας του κυκλικού τόξου.

```

87 - while 1
88 -   for Zi=Start:2:End
89 -
90 -       stop = 0; %STOP IS A VALUE WHICH WHEN IS <0> MEANS THAT MAYBE WE CAN HAVE A SOLUTION, WHEN IS <1> MEANS THAT WE
91 -       [Al,stop,r1s,r1mean,U1,C1,W1,Cm1,U1h,U1s,alhmeandot,alsmeandot,i1h,i1s,bh1,bs1,T1,P1,p1,bi,r1] = Inlet_Values(r1
92 -
93 -       DZI=2*r2*(0.014+0.023*(r2/r1h)+1.58*FI);%AXIAL LENGTH OF THE IMPELLER
94 -       Rc = DZI;%THE RADIUS OF THE 1/4 CYCLE

```

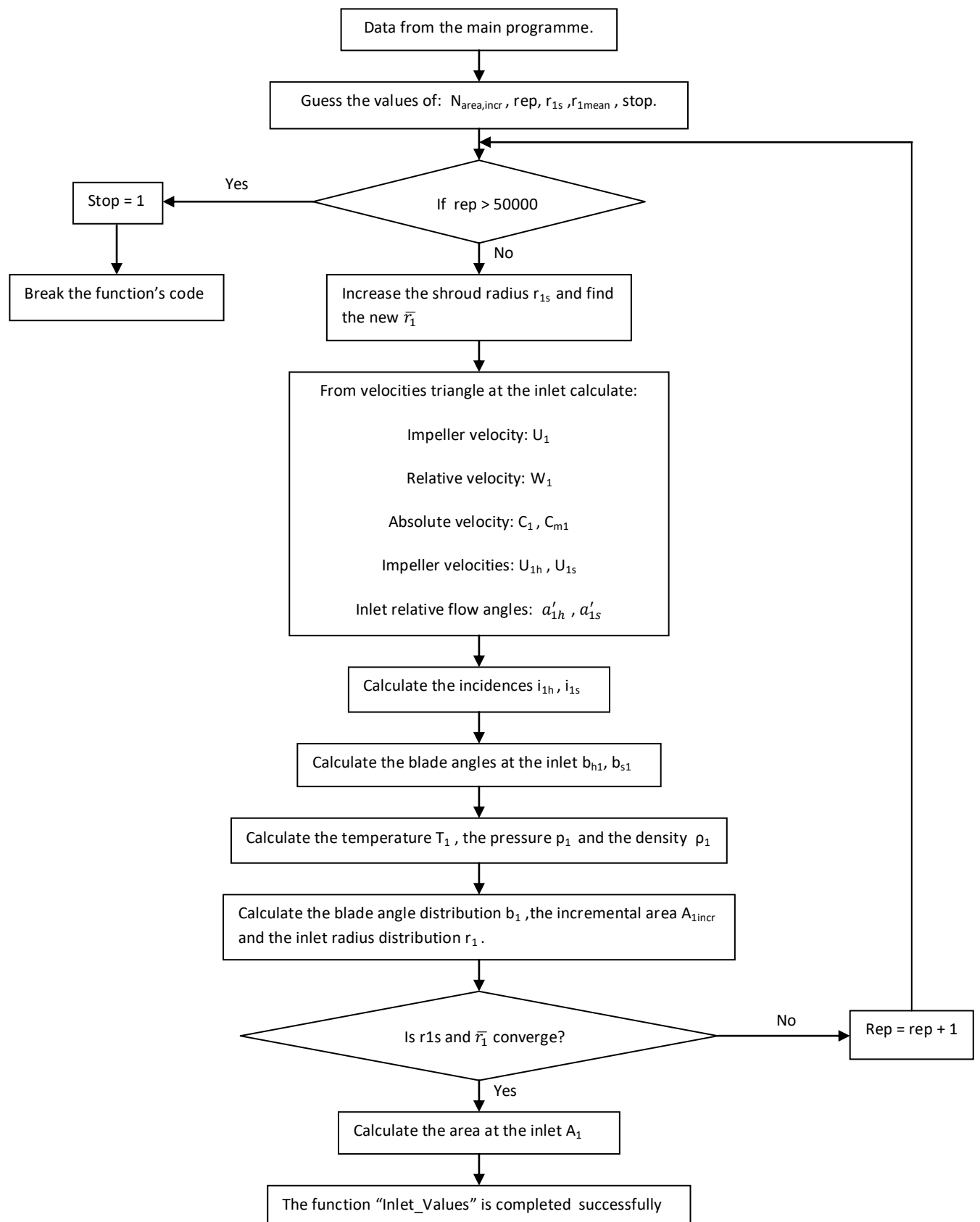
**Εικόνα 4.3.2 :** Εισαγωγή στις βασικές δομές επανάληψης και κάλεσμα της συνάρτησης “*Inlet\_Values*”.

Στην συγκεκριμένη διατριβή, ο κώδικας έχει δημιουργεί πτερωτές οι οποίες έχουν στην είσοδο γωνίες πλήμνης και κελύφους ίσες με μηδέν μοίρες “ $\alpha_{1h} = \alpha_{1s} = 0^\circ$ ” ενώ στην έξοδο οι γωνίες πλήμνης και κελύφους είναι ίσες με ενενήντα μοίρες “ $\alpha_{2h} = \alpha_{2s} = 90^\circ$ ”. Επομένως με βάση τα παραπάνω η πλήμνη θα είναι το τέταρτο τεταρτοκύκλιο κύκλου με ακτίνα ίση με το αξονικό μήκος της πτερωτής ενώ στο τέλος αυτού του τεταρτοκύκλιου θα υπάρχει ευθύγραμμο τμήμα του οποίου το μήκος υπολογίζεται παρακάτω.

#### 4.3.1 Περιγραφή της συνάρτησης *Inlet\_Values*.

Όπως ήδη έχει αναφερθεί η συνάρτηση “*Inlet\_Values*” θα υπολογίσει όλα τα απαραίτητα δεδομένα για την είσοδο της πτερωτής για κάποιο συγκεκριμένο αριθμό πτερυγίων. Η συγκεκριμένη συνάρτηση αποτελείται από μια βασική δομή επανάληψης τύπου “*While 1*” και όλες οι διαδικασίες μέσα στην συγκεκριμένη δομή επαναλαμβάνονται έως ότου υπάρξει σύγκλιση της ακτίνας του κελύφους στην είσοδο καθώς και της μέσης ακτίνας στην είσοδο. Για την βαθύτερη κατανόηση των όσων θα ακολουθήσουν το γράφημα ροής 4.3.1.1 περιγράφει την διαδικασία του υπολογισμού των απαραίτητων μεταβλητών με την συγκεκριμένη σειρά με την οποία υπολογίζονται και στον κώδικα. Για λόγους εξοικονόμησης η διαδικασία περιγράφεται στα αγγλικά.





Γράφημα 4.3.1.1 : Γράφημα ροής της συνάρτησης Inlet\_Values.

Σε κάθε συνάρτηση η οποία κατασκευάστηκε στην συγκεκριμένη διατριβή στις πρώτες γραμμές αναγράφεται σε μορφή σχόλιου ο σκοπός της συγκεκριμένης συνάρτησης καθώς και τι υπολογίζει σε γενικές γραμμές και στην συνέχεια ακολουθεί η διαδικασία ορισμού του συγκεκριμένου προγράμματος ως συνάρτηση και μετά την εντολή δήλωσης του συγκεκριμένου τμήματος κώδικα ως συνάρτηση τοποθετούνται όλες οι εξισώσεις τις οποίες θα εκτελέσει ο κώδικας. Ο τρόπος με τον οποίο δηλώνεται στην γραμμή εντολών ένα τμήμα κώδικα ως συνάρτηση είναι ο εξής :

*function* [Επιστρεπτέα Αποτελέσματα ] = Όνομα\_Συνάρτησης[Ορίσματα Εισαγωγής]

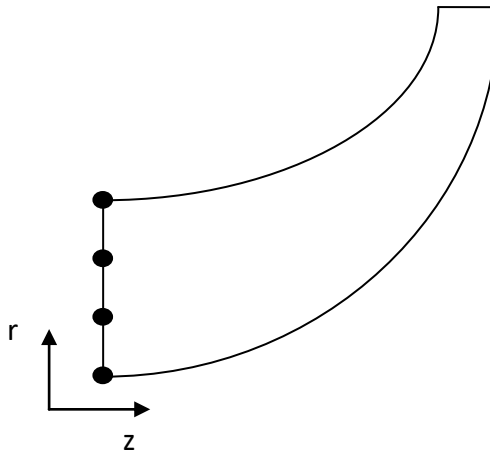
Πρέπει να τονιστεί ότι η σειρά με την οποία είναι τοποθετημένα οι μεταβλητές των επιστρεπτέων αποτελεσμάτων καθώς και των ορισμάτων εισαγωγής πρέπει να είναι ακριβώς η ίδια με αυτήν στο κυρίως πρόγραμμα από όπου καλείται και η συνάρτηση.

Όπως ήδη αναφέρθηκε η συνάρτηση *"Inlet\_Values"* ολοκληρώνεται επιτυχώς όταν υπάρξει σύγκλιση των τιμών της ακτίνας του κελύφους καθώς και της μέσης ακτίνας στην είσοδο. Για την εξαγωγή όμως αυτών των τιμών απαραίτητη προϋπόθεση είναι η είσοδος να χωριστεί σε ένα αριθμό τμημάτων ίσου εμβαδού. Αυτός ο αριθμός τμημάτων ίσου εμβαδού (*Equal Area Increments*) συμβολίζεται ως *"N<sub>area,incr</sub>"*. Με τον χωρισμό της συγκεκριμένης μεταβλητής η διαδικασία θα εξελιχθεί ως εξής. Αρχικά θα δίνεται μια αρκετά μικρή ακτίνα κελύφους *"r<sub>1s</sub>"* με την οποία η διαδικασία θα ξεκινάει να τρέχει. Αυτή η αρχική τιμή της ακτίνας του κελύφους θα είναι κατά ένα χιλιοστό «1mm» μεγαλύτερη από την ακτίνα της πλήμνης *"r<sub>1h</sub>"* στην είσοδο η οποία είναι ήδη γνωστή. Για αυτήν την τιμή της ακτίνας του κελύφους *"r<sub>1s</sub>"* ο κώδικας θα εκτελέσει ένα σύνολο πράξεων από τις οποίες θα προκύψει η κατανομή της ακτίνας του πτερυγίου στην είσοδο *"r<sub>1</sub>"* καθώς και η κατανομή της γωνίας του πτερυγίου στην είσοδο *"b<sub>1</sub>"*. Τα στοιχεία αυτών των κατανομών θα αποθηκεύονται σε αντίστοιχους πίνακες. Προφανώς το τελευταίο στοιχείο του πίνακα που αντιστοιχεί στην κατανομή της ακτίνας στην είσοδο θα πρέπει να συγκλίνει με την ακτίνα του κελύφους *"r<sub>1s</sub>"* στην είσοδο. Επίσης θα πρέπει να συγκλίνει και η νέα μέση ακτίνα που προκύπτει από το τελευταίο σημείο της κατανομής της ακτίνας στην είσοδο με αυτήν που υπολογίστηκε αρχικά. Η σύγκλιση αυτή είναι τάξης μεγέθους του χιλιοστού «1mm».

Στην περίπτωση όπου δεν υπάρχει σύγκλιση έστω και στο ένα από αυτά τα δύο μεγέθη η διαδικασία επαναλαμβάνεται αλλά αυτή την φορά με ακτίνα κελύφους στην είσοδο αυξημένη κατά ένα χιλιοστό «1mm». Με αυτόν τον τρόπο ο οποίος έχει δημιουργηθεί το πρόγραμμα με μεγάλη πιθανότητα βρίσκει την σωστή ακτίνα κελύφους και την μέση ακτίνα στην είσοδο με ακρίβεια «1mm». Παρόλα αυτά στην περίπτωση όπου δεν υπάρξει σύγκλιση σε λιγότερες από «50.000» επαναλήψεις ο κώδικας σταματάει

δίνοντας στην μεταβλητή “*Stop*” την τιμή της μονάδας «*Stop=1*» και εμφανίζει σχετικό μήνυμα στον χρήστη.

Για να αρχίσει η παραπάνω διαδικασία να υλοποιείται μέσω του κώδικα θα πρέπει αρχικά να θα δοθούν αρχικές τιμές σε ένα σύνολο μεταβλητών. Η πρώτη μεταβλητή της οποίας το όνομα είναι “*N<sub>area,incr</sub>*” αντιπροσωπεύει το σύνολο των τμημάτων ίσου εμβαδού στα οποία η είσοδος της πτερωτής θα χωριστεί ως προς την ακτινική διεύθυνση. Στην συγκεκριμένη διατριβή ο αριθμός αυτός έχει τεθεί ίσος με δεκατέσσερα “*N<sub>area,incr</sub> = 14*”. Για παράδειγμα, στο σχήμα 4.3.1.1 η είσοδος χωρίζεται σε τρία ίσα τμήματα εμβαδού, δηλαδή “*N<sub>area,incr</sub> = 3*” ενώ αποτελείται από τέσσερα σημεία τα οποία ορίζουν τα εν λόγω τμήματα.



**Σχήμα 4.3.1.1 :** Αναπαράσταση της έννοιας της μεταβλητής *N<sub>area,incr</sub>*. Με τις μαύρες κουκίδες φαίνονται τα σημεία τα οποία χωρίζουν τα τμήματα ίσου εμβαδού.

Στην συνέχεια θα τεθεί η αρχική τιμή της μεταβλητής “*rep*” ίση με το μηδέν “*rep = 0*”. Η συγκεκριμένη μεταβλητή μετράει τον αριθμό επαναλήψεων για τον οποίο εκτελείται η διαδικασία της συνάρτησης μέχρι να υπάρξει σύγκλιση. Όταν δεν έχει βρεθεί λύση σε λιγότερες από «50.000» επαναλήψεις τότε η διαδικασία θα τερματίσει εμφανίζοντας μήνυμα στον χρήστη “*rep > 50.000*”. Επίσης αρχική τιμή ίση με το μηδέν εκχωρείται και στην μεταβλητή “*Stop*” έτσι ώστε σε περίπτωση αδυναμίας εύρεσης σωστής λύσης για τις ακτίνες σε λιγότερες από «50.000» επαναλήψεις να εκχωρηθεί η τιμή της μονάδας.

Το τελευταίο βήμα πριν την εισαγωγή του κώδικα στην επαναληπτική δομή είναι η εκχώρηση αρχικών τιμών στην ακτίνα του κελύφους και στην μέση ακτίνα. Η ακτίνα του

κελύφους όπως αναφέρθηκε προηγουμένως θα έχει αρχική τιμή ίση με την ακτίνα της πλήμνης αυξημένη κατά ένα χιλιοστό.

$$r_{1s} = r_{1h} + 0.001 \quad (4.26)$$

Ενώ η αρχική τιμή της μέσης τιμής της ακτίνας στην είσοδο “ $\bar{r}_1$ ” της πτερωτής θα προκύπτει ως εξής :

$$\bar{r}_1 = \frac{r_{1s} + r_{1h}}{2} \quad (4.27)$$

Όλα τα παραπάνω μέχρι και την εξίσωση (4.27) παρουσιάζονται σε μορφή κώδικα στην εικόνα 4.3.1.2.

```

1  %THIS FUNCTION WILL CALCULATE ALL THE NECESSARY VALUES ABOUT THE INLET OF
2  %THE IMPELLER
3  function [Al,stop,r1s,rlmean,U1,C1,W1,Cm1,U1h,U1s,alhmeandot,a1smeandot,ilh,ils,bh1,bs1,T1,P1,p1,b1,r1] = Inlet_Value
4  Nareaincr = 14;
5  rep = 0;
6  r1s = r1h+0.001;
7  rlmean = (r1s+r1h)/2;
8  stop = 0;
9  while 1
10     if rep > 50000
11         fprintf('rep > 50000 \n');
12         %           Zi_incr = 1;
13         stop = 1;
14         break
15     else
16         r1s = r1s+0.0001;
17         rlmean = (r1s+r1h)/2;
18     end

```

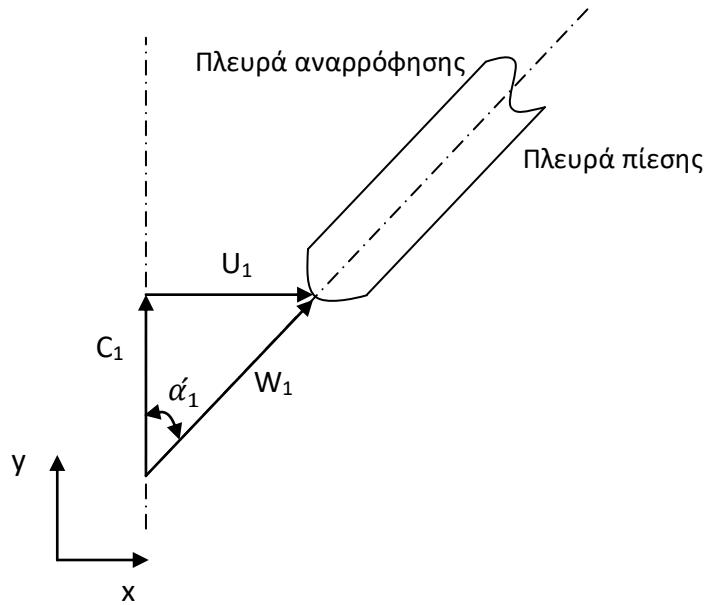
**Εικόνα 4.3.1.1 :** Παρουσίαση πρώτου τμήματος κώδικα της συνάρτησης “Inlet\_Values”.

Στην συνέχεια από το τρίγωνο ταχυτήτων στην είσοδο θα προκύψουν όλες οι απαραίτητες ταχύτητες και γωνίες των ταχυτήτων στην είσοδο της πτερωτής. Αρχικά

από την σχέση (3.10) για τα στοιχεία εισόδου προκύπτει η περιφερειακή ταχύτητα της πτερωτής στην είσοδο ως εξής :

$$U_1 = \omega r_1 \quad (4.28)$$

Στο σχήμα 4.3.1.1 φαίνεται το τρίγωνο ταχυτήτων στην είσοδο της πτερωτής.



**Σχήμα 4.3.1.1 :** Τρίγωνο ταχυτήτων στην είσοδο της πτερωτής για μηδενική γωνία πρόσπτωσης και μηδενική γωνία απόλυτης ταχύτητας.

Με βάση τις τριγωνομετρικές σχέσεις μπορεί εύκολα να προκύψει η σχετική ταχύτητα στην είσοδο της πτερωτής ως εξής :

$$W_1 = \frac{U_1}{\sin(\alpha_1')} \quad (4.29)$$

Στης συνέχεια από το πυθαγόρειο θεώρημα προκύπτει η τιμή της απόλυτης ταχύτητας.

$$C_1 = \sqrt{W_1^2 - U_1^2} \quad (4.30)$$

Λόγω της μηδενικής μέσης γωνίας πρόσπτωσης “ $i_1$ ” η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας θα ταυτίζεται με την απόλυτη ταχύτητα στην είσοδο της πτερωτής. Επομένως θα ισχύει ότι :

$$C_1 = C_{m1} \quad (4.31)$$

Με γνωστή την γωνιακή ταχύτητα “ $\omega$ ” αλλά και την ακτίνα της πλήμνης και του κελύφους στην είσοδο μπορούν εύκολα να προσδιοριστούν οι ταχύτητες της περιφερειακής διεύθυνσης στην πλήμνη και στο κέλυφος με της χρήση του τύπο (3.10) ως εξής :

$$U_{1h} = \omega r_{1h} \quad (4.32)$$

$$U_{1s} = \omega r_{1s} \quad (4.33)$$

Ενώ οι γωνίες των σχετικών ταχυτήτων στην πλήμνη και στο κέλυφος μέσω γεωμετρικών σχέσεων προκύπτουν :

$$\alpha'_{1h} = -\tan^{-1}\left(\frac{U_{1h}}{C_1}\right) \quad (4.34)$$

$$\alpha'_{1s} = -\tan^{-1}\left(\frac{U_{1s}}{C_1}\right) \quad (4.35)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι το τρίγωνο ταχυτήτων κοντά στην πλήμνη θα είναι παρεμφερή με αυτό του σχήματος 4.3.1.1 καθώς και με το τρίγωνο ταχυτήτων στο κέλυφος. Παρόλα αυτά επειδή η γωνίες μετρούνται με θετική φορά αντίθετη με της ωρολογιακής μπαίνει ένα μείων μπροστά από τους τύπους (4.34) και (4.35) έτσι ώστε να προκύπτει το σωστό πρόσημο των γωνιών αυτών. Αυτό συμβαίνει διότι ο τρόπος με τον οποίο υπολογίζεται σε αυτό το σημείο η εν λόγω γωνία δεν είναι αντιπροσωπευτικός και του πρόσημου της. Θα πρέπει η γωνίες αυτές να είναι υπό μια μικρή απόκλιση της μέσης γωνίας της σχετικής ταχύτητας η οποία δίνεται από τον χρήστη.

Όλες οι παραπάνω διαδικασίες με τα στοιχεία του τριγώνου ταχυτήτων σε μορφή κώδικα παρουσιάζονται στην *εικόνα 4.3.1.2*.

```

19      %%%% FROM TRIANGLE VELOCITY AT THE INLET%%%%
20      U1 =W*r1mean;%IMPELLER SPEED AT THE INLET
21      W1 =U1/sind((abs(almeandot)));%RELATIVE VELOCITY AT THE INLET
22      C1 = sqrt(W1^2 - U1^2);%ABSOLUTE VELOCITY AT THE INLET
23      Cm1=C1;
24      U1h =W*r1h;%IMPELLERS INLET SPEED AT THE HUB
25      alhmeandot =-atand(U1h/C1);%MEAN INLET RELATIVE FLOW ANGLE AT THE HUB
26      U1s =W*r1s;%IMPELLERS INLET SPEED AT THE SHROUD
27      alsmeandot =-atand(U1s/C1);%MEAN INLET RELATIVE FLOW ANGLE AT THE SHROUD
28      %%%% FROM TRIANGLE VELOCITY AT THE INLET%%%%

```

**Εικόνα 4.3.1.2**

Από την σχέση (4.36) μπορεί να υπολογιστεί η γωνία πρόσπτωσης συναρτήσει της γωνίας της σχετικής ταχύτητας και της γωνίας του πτερυγίου στο αντίστοιχο σημείο.

$$i = \beta - \alpha' \quad (4.36)$$

Στην περίπτωση όπου η σχέση (4.36) εφαρμοστεί ξεχωριστά για την πλήμνη και το κέλυφος τότε προκύπτει:

$$\begin{cases} i_{1h} = \beta_{1h} - \alpha'_{1h} \\ i_{1s} = \beta_{1s} - \alpha'_{1s} \end{cases} \quad (4.37)$$

Από τις εξισώσεις (4.38) και (4.39) υπολογίζονται οι γωνίες πρόσπτωσης στην πλήμνη “ $i_{1h}$ ” και του κελύφους “ $i_{1s}$ ”.

$$i_{1h} = \frac{\overline{\alpha'_1} - \alpha'_{1h} + \overline{l_1} - \left(\frac{\overline{r_1} - r_{1h}}{r_{1s} - r_{1h}}\right)(\alpha'_{1s} - \alpha'_{1h})}{1 - \frac{3}{4}\left(\frac{\overline{r_1} - r_{1h}}{r_{1s} - r_{1h}}\right)} \quad (4.38)$$

Στον κώδικα για ευκολότερη γραφή της παραπάνω εξίσωσης δημιουργούνται δύο μεταβλητές με ονόματα “ $k$ ” και “ $l$ ” και κάθε μία από αυτές ισούται με :

$$k = \left(\frac{\overline{r_1} - r_{1h}}{r_{1s} - r_{1h}}\right)(\alpha'_{1s} - \alpha'_{1h}) \quad (4.39)$$

$$l = \frac{3}{4}\left(\frac{\overline{r_1} - r_{1h}}{r_{1s} - r_{1h}}\right) \quad (4.40)$$

Και με βάση τις τελευταίες μεταβλητές η εξίσωση (4.48) μετατρέπεται ως εξής :

$$i_{1h} = \frac{\overline{\alpha'_1} - \alpha'_{1h} + \overline{l_1} - k}{1 - l} \quad (4.41)$$

Ενώ σύμφωνα με τον R.H Aungier και τον Johannes Schiff η γωνία πρόσπτωσης της πλήμνης “ $i_{1h}$ ” θα πρέπει να είναι το 25% της γωνίας πρόσπτωσης του κελύφους ( $i_{1h} = 0.25 i_{1s}$ ). Δηλαδή θα ισχύει ότι :

$$i_{1s} = 4 i_{1h} \quad (4.42)$$

Αφού έχουν βρεθεί και οι γωνίες των σχετικών ταχυτήτων στην πλήμνη “ $\alpha'_{1h}$ ” και στο κέλυφος “ $\alpha'_{1s}$ ” αλλά και οι γωνίες πρόσπτωσης στην πλήμνη και στο κέλυφος από την σχέση (4.37) λύνοντας ως προς την γωνία του πτερυγίου “ $\theta$ ” υπολογίζεται η γωνία του πτερυγίου στην πλήμνη “ $\theta_{1h}$ ” αλλά και στο κέλυφος “ $\theta_{1s}$ ”.



$$\begin{cases} \beta_{1h} = i_{1h} + \alpha'_{1h} \\ \beta_{1s} = i_{1s} + \alpha'_{1s} \end{cases} \quad (4.43)$$

Στην συνέχεια υπολογίζονται τα θερμοδυναμικά μεγέθη της θερμοκρασίας “ $T_1$ ”, της πίεσης “ $p_1$ ” και της πυκνότητας “ $\rho_1$ ” στην είσοδο της πτερωτής. Η πυκνότητα προκύπτει από την εξίσωση (4.44) ως :

$$T_1 = T_{01} - \frac{C_1^2}{2 C_p} \quad (4.44)$$

Η πίεση “ $p_1$ ” συναρτήσει της θερμοκρασίας “ $T_1$ ”, της πίεσης ανακοπής “ $p_{01}$ ” και της θερμοκρασίας ανακοπής “ $T_{01}$ ” προκύπτει από την σχέση (4.45) ως :

$$p_1 = \frac{p_{01}}{\left(\frac{T_{01}}{T_1}\right)^2} \quad (4.45)$$

Και τέλος η πυκνότητα “ $\rho_1$ ” ορίζεται από την σχέση (4.46) ως :

$$p_1 = \frac{p_{01}}{\left(\frac{T_{01}}{T_1}\right)^2} \quad (4.45)$$

Όλες οι πράξεις οι οποίες αφορούν τα θερμοδυναμικά μεγέθη στην είσοδο καθώς και τις εξισώσεις (4.36) έως (4.43) φαίνονται στην *εικόνα 4.3.1.3* σε μορφή κώδικα.

Τα επόμενα βήματα αφορούν τον προσδιορισμό της κατανομής της ακτίνας στην είσοδο “ $r_1$ ” και της γωνίας του πτερυγίου στην είσοδο “ $\beta_1$ ”. Και τα δύο μεγέθη κατανομών θα αποθηκευτούν σε πίνακες “ $r_1[i]$ ” και “ $\beta_1[i]$ ” αντίστοιχα. Ιδιαίτερη σημασία και στους δύο αυτούς πίνακες/κατανομές έχουν τα πρώτα και τα τελευταία στοιχεία. Τα πρώτα στοιχεία και στους δύο πίνακες θα πρέπει να ταυτίζονται με τα μεγέθη της πλήμνης. Αυτό θα πρέπει να ισχύει διότι η επαναληπτική διαδικασία εφαρμόζεται κατά την ακτινική διέλευση από την πλήμνη προς το κέλυφος.

```

31      %i = b - a' ,where a' here is the relative flow angle
32      %ilh = 0.25*ils
33      %ih =bh-ah' ,for the hub
34      %is =bs-as' ,for the shroud
35      k = ((r1mean-r1h)/(r1s-r1h))*(alsmeandot -alhmeandot);
36      l = 1-((3/4)*((r1mean-r1h)/(r1s-r1h)));
37      ilh = ((almeandot) + ilmean - alhmeandot - k)/l; %INCIDENCE AT THE HUB AT THE INLET
38      ils = 4*ilh; %INCIDENCE AT THE SHROUD AT THE INLET
39      bhl = ilh + alhmeandot; %BLADE ANGLE OF THE HUB AT THE INLET
40      bs1 = ils + alsmeandot; %BLADE ANGLE OF THE SHROUD AT THE INLET
41      %%% From eq. (2.20) %%%
42
43      %%%THERMODYNAMIC CONDITIONS%%
44      T1 =T01-((C1)^2/(2*Cp));%TEMPERATURE AT THE INLET
45      P1 =P01/((T01/T1)^(gamma/(gamma-1)));%PRESSURE AT THE INLET
46      p1 =P01/(R*T1);%DENSITY AT THE INLET
47      %%%THERMODYNAMIC CONDITIONS%%

```

### Εικόνα 4.3.1.3

Συνεπώς θα πρέπει και τα τελευταία στοιχεία των δύο πινάκων/κατανομών να ταυτίζονται με τα στοιχεία του κελύφους. Επομένως θα ισχύουν :

$$r_1(1) = r_{1h} \quad (4.46)$$

$$\beta_1(1) = \beta_{h1} \quad (4.47)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι το μέγεθος αυτών των πινάκων/κατανομών θα ταυτίζεται με τον αριθμό τον οποίο έχει επιλεγεί να χωριστεί η είσοδος σε ίσα ως προς το εμβαδόν τμήματα " $N_{area,incr}$ ". Επομένως μπορεί εύκολα να υπολογιστεί το εμβαδόν του κάθε τμήματος από την εξίσωση (4.48) και στην συνέχεια να ξεκινήσει μια επαναληπτική διαδικασία "For" η οποία θα τερματίζει όταν υπολογίσει την γωνία " $\theta_1[N_{area,incr}]$ " και την ακτίνα " $r_1[N_{area,incr}]$ " του τελευταίου σημείου.

$$A_{1,incr} = \frac{\dot{m}}{\rho_1 C_{m1} N_{area,incr}} \quad (4.48)$$

Με την εισαγωγή του κώδικα πρέπει να υπολογιστεί πρώτα η γωνία του πτερυγίου για το συγκεκριμένο τμήμα ίσου εμβαδού από την σχέση (4.49). Θα πρέπει όμως να

ελεγχθεί εάν η επαναληπτική δομή βρίσκεται στην πρώτη επανάληψη, διότι η τιμή της γωνίας του πτερυγίου του πρώτου στοιχείου είναι ήδη γνωστή.

$$\beta_1(i) = \frac{r_1(i) - r_{1h}}{r_{1s} - r_{1h}} (\beta_{s1} - \beta_{h1}) + \beta_{h1} \quad (4.49)$$

Αφού βρεθεί η γωνία του πτερυγίου υπολογίζεται η παράμετρος “ $\alpha$ ” η οποία χρησιμοποιείται για την εύρεση της ακτίνας του επόμενου σημείου από το οποίο βρίσκεται την συγκεκριμένη στιγμή η δομή επανάληψης. Αυτό συμβαίνει διότι σε κάθε επανάληψη πρέπει να είναι γνωστή η ακτίνα του σημείου όπου βρίσκεται η δομή επανάληψης. Δηλαδή σε κάθε επανάληψη βρίσκεται η γωνία “ $\theta_1[i]$ ” και η ακτίνα “ $r_1[i+1]$ ”. Η ακτίνα θα προκύψει από τους τύπους (4.50) και (4.51) ως εξής :

$$\alpha = \frac{Z_I t_{B1}}{2\pi \cos(\beta_1(i))} \quad (4.49)$$

$$r_1(i+1) = \alpha + \sqrt{(\alpha^2 - 2\alpha + \frac{A_{1,incr}}{\pi} + r_1(i)^2)} \quad (4.50)$$

Μετά τον υπολογισμό των κατανομών προσδιορίζεται η νέα τιμή της μέσης ακτίνας η οποία θα ταυτίζεται με την τιμή του σημείου “ $\frac{N_{area,incr}}{2} + 1$ ” του πίνακα της ακτίνας “ $r_1$ ”, και αυτό διότι έχει εισαχθεί ζυγός αριθμός ίσων ως προς το εμβαδόν τμημάτων ( $N_{area,incr} = 14$ ), άρα ο αριθμός των σημείων είναι περιττός (Αριθμός σημείων = 15).

$$\overline{r_{1,new}} = r_1(\frac{N_{area,incr}}{2} + 1) \quad (4.50)$$

Το τελευταίο βήμα είναι να ελεγχθεί εάν η τελευταία τιμή της κατανομής της ακτίνας “ $r_1(\frac{N_{area,incr}}{2} + 1)$ ” συγκλίνει με την τιμή της ακτίνας του κελύφους “ $r_{1s}$ ” καθώς και αν η νέα τιμή της μέσης ακτίνας από την σχέση (4.50) συγκλίνει με την μέση ακτίνα όπου υπολογίστηκε αρχικά “ $\overline{r_1}$ ”. Εάν ένα από τα δύο δεν συγκλίνει με ακρίβεια ίση με

“tolerance = 0.001” τότε αυξάνεται η ακτίνα του κελύφους κατά ένα χιλιοστό «1mm» και όλη η διαδικασία επαναλαμβάνεται από την αρχή μέχρι την ταυτόχρονη σύγκλιση των παραπάνω. Στην περίπτωση όπου υπάρχει ταυτόχρονη σύγκλιση και των δύο μεταβλητών τότε οι τιμές της ακτίνας του κελύφους “ $r_{1s}$ ” και της μέσης ακτίνας “ $\bar{r}_1$ ” θα γίνουν ίσες με αυτές οι οποίες υπολογίστηκαν μέσω των κατανομών και θα ακολουθήσει ο υπολογισμός της τελευταίας μεταβλητής η οποία είναι το εμβαδόν εισόδου “ $A_1$ ” από την σχέση (4.51) ως εξής :

$$A_1 = \frac{\dot{m}}{\rho_1 C_1} \quad (4.50)$$

Ο υπολογισμός όλων των παραπάνω στην μορφή του κώδικα της Matlab παρουσιάζεται στην εικόνα 4.3.1.4.

```

49 -      r1(1)= r1h; %THE RADIUS OF THE FIRTS POINT IS EQUAL TO THE RADIUS OF THE HUB AT THE INLET
50 -      b1(1)=bhl; %THE ANGLE AT THE FIRTS POINT IS EQUAL TO THE ANGLE OF THE HUB AT THE INLET
51 -      Alincr = m/(p1*Cm1*Nareaincr);
52 -
53 -      for i = 1:(Nareaincr)
54 -          if i~=1
55 -              b1(i)= ((r1(i)-r1h)/(r1s-r1h))*(bs1-bhl) + bhl;
56 -          end
57 -          a = Zi*tb1/(2*pi*cos(b1(i)));
58 -          r1(i+1)= a + sqrt(a^2 - a^2*r1(i) + Alincr/pi + r1(i)^2);
59 -      end
60 -      rlmeannew = r1((Nareaincr/2)+1);
61 -      if abs(r1s-r1(Nareaincr+1))<tolerance && abs(rlmean-rlmeannew)<tolerance
62 -          rlmean = rlmeannew;
63 -          r1s = r1(Nareaincr+1);
64 -          fprintf('The rlmean = %f and r1s = %f \n',rlmean,r1s);
65 -          break
66 -      else
67 -          rep = rep+1;
68 -      end
69 -  end
70 -  A1 = m/(p1*C1);%AREA AT THE INLET

```

Εικόνα 4.3.1.4

#### 4.4 Δημιουργία περιγραμμάτων πλήμνης και κελύφους (Hub & Shroud Contours).

Μετά τον ορισμό των χαρακτηριστικών εισόδου της πτερωτής για τον συγκεκριμένο αριθμό πτερυγίων ακολουθεί ο προσδιορισμός των περιγραμμάτων της πλήμνης και

του κελύφους (*Hub & Shroud Contours*). Ο κώδικας ο οποίος έχει δημιουργηθεί παράγει πτερωτές οι οποίες έχουν τα εξής χαρακτηριστικά :

- Η γωνία κλίσης του περιγράμματος (*Contour*) στην είσοδο τόσο στην πλήμνη “ $\alpha_{c,h,1}$ ” όσο και στο κέλυφος “ $\alpha_{c,s,1}$ ” ισούται με μηδέν.
- Η γωνία κλίσης του περιγράμματος (*Contour*) στην έξοδο και στην πλήμνη “ $\alpha_{c,h,2}$ ” αλλά και στο κέλυφος “ $\alpha_{c,s,2}$ ” ισούται με ενενήντα μοίρες «90°».
- Ύπαρξη ευθύγραμμου τμήματος στο τέλος του περιγράμματος πλήμνης. Είναι προφανές ότι η γωνία κλίσης του ευθύγραμμου τμήματος θα είναι ίση με ενενήντα μοίρες «90°».
- Με βάση την πρώτη και την τρίτη πρόταση προκύπτει ότι το πρώτο τμήμα του περιγράμματος της πλήμνης θα αποτελείται από κυκλικό τόξο το οποίο ταυτίζεται με το περίγραμμα από το τέταρτο τεταρτοκύκλιο, κύκλου με ακτίνα ίση με το αξονικό μήκος της πτερωτής.
- Το περίγραμμα του κελύφους αποτελείται από μια συνάρτηση Spline η οποία ορίζεται από τρία σημεία ελέγχου.

Για την παραγωγή οποιασδήποτε άλλης γεωμετρίας πτερωτής ο κώδικας θα πρέπει να τροποποιηθεί αναλόγως.

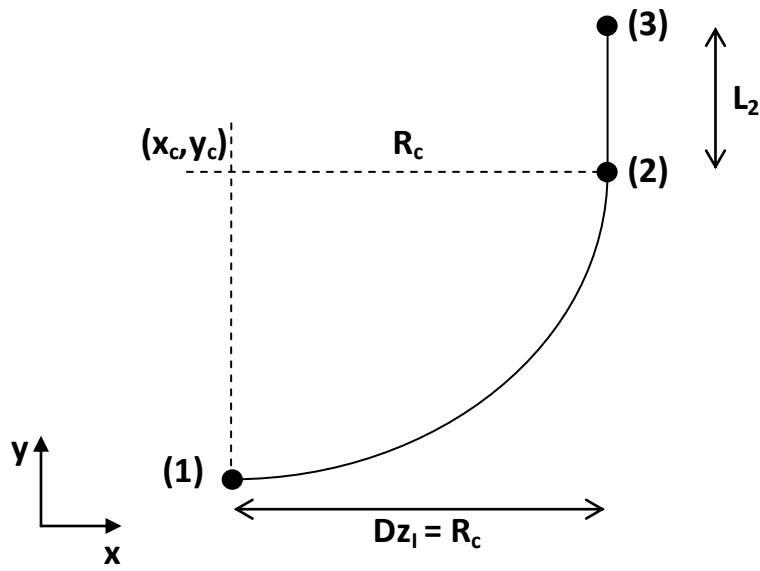
Για να δημιουργηθεί το περίγραμμα πλήμνης το πρώτο βήμα είναι να βρεθεί το αξονικό μήκος της πτερωτής από την σχέση (4.51).

$$Dz_I = 2 r_2 (0.014 + 0.023 \frac{r_2}{r_{1h}} + 1.58 \Phi) \quad (4.51)$$

Για την ακτίνα του κυκλικού τόξου του περιγράμματος της πλήμνης όπως ήδη έχει αναφερθεί θα ισχύει ότι :

$$R_c = Dz_I \quad (4.53)$$

Για αναλυτικότερη περιγραφή του περιγράμματος της πλήμνης στο σχήμα 4.4.1 φαίνονται βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά και συμβολισμοί οι οποίοι θα χρησιμοποιηθούν στην συνέχεια.



**Σχήμα 4.4.1 :** Παρουσίαση στοιχείων περιγράμματος πλήμνης.

Στο σχήμα 4.4.1 διακρίνονται τρία σημεία τα οποία είναι τοποθετημένα κατά μήκος του περιγράμματος της πλήμνης. Το σημείο «1» και το σημείο «2» ορίζουν το τεταρτοκύκλιο με ακτίνα “ $R_c$ ”, ενώ τα σημεία «2» και «3» είναι τα αρχικά και τελικά σημεία του ευθύγραμμου τμήματος που συνδέεται με το τεταρτοκύκλιο. Το κέντρο του τεταρτοκύκλιου ορίζεται από τις συντεταγμένες  $(x_c, y_c)$ . Για τα σημεία ‘ελέγχου’ του περιγράμματος ισχύουν :

$$X_2 - X_1 = R_c(\sin \alpha_{c2} - \sin \alpha_{c1}) + L_2 \cos \alpha_{c2} + L_1 \cos \alpha_{c1} \quad (4.54)$$

$$Y_2 - Y_1 = R_c(\cos \alpha_{c1} - \cos \alpha_{c2}) + L_2 \sin \alpha_{c2} + L_1 \sin \alpha_{c1} \quad (4.55)$$

Στην περίπτωση όπου υπάρχει ευθύγραμμο τμήμα στην είσοδο “ $L_1$ ” της πτερωτής ισχύει η εξίσωση (4.56) :

$$L_2 - L_1 = \frac{(Y_2 - Y_1)(\sin \alpha_{c2} - \sin \alpha_{c1}) - (X_2 - X_1)(\cos \alpha_{c1} - \cos \alpha_{c2})}{1 - \sin \alpha_{c1} \sin \alpha_{c2} - \cos \alpha_{c1} \cos \alpha_{c2}} \quad (4.56)$$

Ενώ για τις συντεταγμένες του κέντρου του κυκλικού τόξου ισχύουν :

$$X_c = X_1 + L_1 \cos \alpha_{c1} - R_c \sin \alpha_{c1} \quad (4.57)$$

$$Y_c = Y_1 + L_1 \sin \alpha_{c1} + R_c \cos \alpha_{c1} \quad (4.58)$$

Εφαρμόζοντας στις παραπάνω σχέσεις τις παραδοχές της κλίσης του περιγράμματος στην είσοδο και στην έξοδο ( $\alpha_{c,h,1} = 0^\circ$  &  $\alpha_{c,h,2} = 90^\circ$ ), την παραδοχή μη ύπαρξης ευθύγραμμου τμήματος του περιγράμματος πλήμνης στην είσοδο ( $L_1 = 0$ ) καθώς και ότι η συντεταγμένη του άξονα “X” του πρώτου σημείου τοποθετείται στο μηδέν “ $X_1=0$ ” προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα :

$$X_c = X_1 = 0 \quad (4.58)$$

$$Y_1 = r_{1h} \quad (4.59)$$

$$X_2 = X_1 + R_c \quad (4.60)$$

$$Y_c = Y_2 = R_c \quad (4.61)$$

$$X_3 = X_2 \quad (4.62)$$

$$Y_3 = Y_2 + L_2 \quad (4.63)$$

Ενώ το μήκος του ευθύγραμμου τμήματος στην έξοδο μπορεί να προκύψει εάν παρατηρηθεί το σχήμα 4.4.1 ως εξής :

$$L_2 = r_2 - Y_c \quad (4.64)$$

Αφού ολοκληρωθούν οι παραπάνω υπολογισμοί ακολουθεί η γεωμετρική παραγωγή του περιγράμματος της πλήμνης (*Hub Contour*). Για την δημιουργία του, ο

κώδικας εκτελεί βηματικά κυκλικό τόξο ακτίνας “ $R_c$ ” από  $\frac{3\pi}{2}$  έως  $2\pi$ , ενώ στο τέλος του τόξου προσθέτει το ευθύγραμμο τμήμα μήκους “ $L_2$ ”. Η εικόνα 4.4.1 παρουσιάζει την διαδικασία υπολογισμού των συντεταγμένων των σημείων ελέγχου του περιγράμματος της πλήμνης ενώ στην εικόνα 4.4.2 παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο προγραμματίζεται η παραγωγή του περιγράμματος της πλήμνης, ενώ το αντίστοιχο αποτέλεσμα σε γραφικό περιβάλλον φαίνεται στην εικόνα 4.4.3. Τέλος υπολογίζεται το συνολικό μήκος του κυκλικού τόξου του περιγράμματος της πλήμνης “ $Circle\_Hub\_L$ ” αλλά και το συνολικό μήκος της πλήμνης της πτερωτής “ $Total\_Hub\_Lenght$ ” το οποίο επίσης φαίνεται στην εικόνα 4.4.2 ως εξής :

$$Circle\_Hub\_L = \frac{2\pi R_c}{4} \quad (4.65)$$

$$Total\_Hub\_Leght = Circle\_Hub\_L + L \quad (4.66)$$

```

93 - DZI=2*r2*(0.014+0.023*(r2/r1h)+1.58*FI);%AXIAL LENGTH OF THE IMPELLER
94 - Rc = DZI;%THE RADIUS OF THE 1/4 CYCLE
95
96 - %%%% HUB CONTOUR %%%%
97 - ac1 =0; ac2 =90;%SLOPES AT THE INLET AND AT THE EXIT
98 - xcp(1)=0;% X-CONTROL-POINT (A.K.A XCP) IS THE STARTING POINT ON X-AXIS OF THE HUB CONTOUR
99 - ycp(1)=r1h;%THE STARTING POINT ON Y-AXIS OF THE HUB CONTOUR
100 - xcp(2)=Rc;%THE LAST POINT ON X-AXIS OF THE 1/4 CYCLE OF THE HUB CONTOUR
101 - ycp(2)=ycp(1)+Rc;%THE LAST POINT ON Y-AXIS OF THE 1/4 CYCLE OF THE HUB CONTOUR
102 - xcp(3)=xcp(2);%THE LAST POINT ON X-AXIS OF THE HUB CONTOUR
103 - L =r2-ycp(2);%IS THE LENGTH OF THE LINE SEGMENT
104 - ycp(3)=r2;%THE LAST POINT ON Y-AXIS OF THE HUB CONTOUR
105 - xc=xcp(1);%REPRESENTS THE CENTER ON X-AXIS OF TH 1/4 CYCLE
106 - yc=ycp(2);%REPRESENTS THE CENTER ON Y-AXIS OF TH 1/4 CYCLE

```

**Εικόνα 4.4.1 :** Παρουσίαση σε μορφή κώδικα της διαδικασίας υπολογισμού των τιμών, του αξονικού μήκους της πτερωτής και των σημείων ελέγχου του περιγράμματος της πλήμνης.

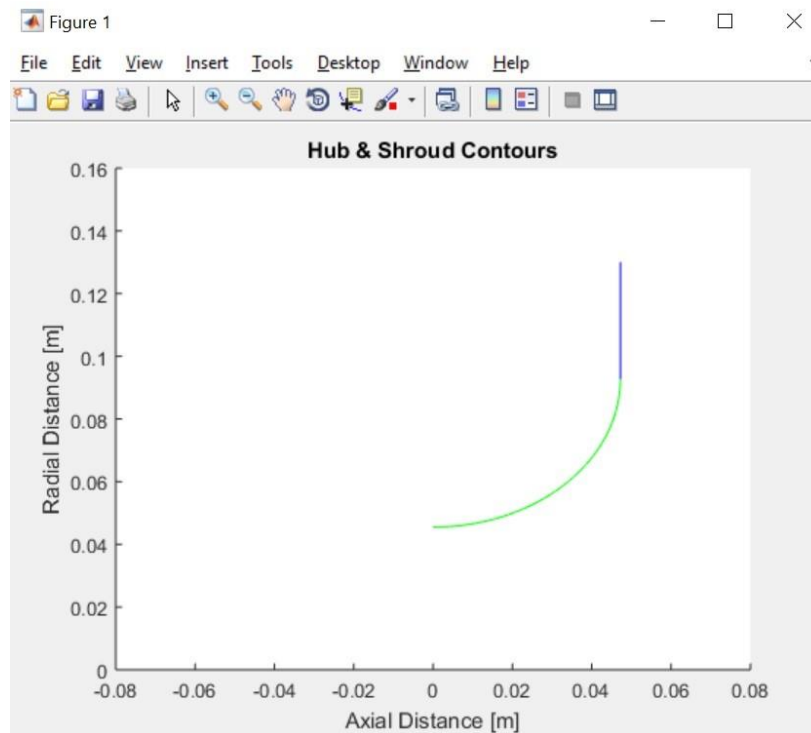


```

107 - th=3*pi/2:0.01:2*pi;%IS THE ANGLE (th) WITH HER LIMITS, WHICH IS TURN EVERY TIME FOR 0.01 DEGREES
108 - xcoord= xc+(Rc*cos(th));%X-COORDINATE EQUATION FOR THE FIGURE
109 - ycoord= yc+(Rc*sin(th));%Y-COORDINATE EQUATION FOR THE FIGURE
110 - position1=[xc+Rc,xc+Rc];%(pos1) IS A VECTOR WITH THE X-AXIS POINTS OF THE STRAIGHT LINE SEGMENT AT
111 - position2=[yc,r2];%(pos2) IS A VECTOR WITH THE Y-AXIS POINTS OF THE STRAIGHT LINE SEGMENT AT THE
112 - hold on %THIS ALLOWS MORE THAN ONE EQUATIONS GRAPHS ON THE SAME FIGURE
113 - plot(xcoord,ycoord,'g');%PLOTS THE 1/4 CYCLE WITH GREEN COLOR
114 - plot(position1,position2,'b');%PLOTS THE LINE SEGMENT AT THE END OF THE 1/4 CYCLE FOR THE HUB CONT
115 - xlabel('Axial Distance [m]');
116 - ylabel('Radial Distance [m]');
117 - title('Hub & Shroud Contours');
118 - axis([-0.08 0.08 0 0.16]);
119 - %%%% HUB CONTOUR %%%%
120
121 - Circle_hub_L = 2*pi*Rc/4 ; %THE LENGHT OF THE 1/4 CYCLE OF THE HUB CONTOUR
122 - Total_Hub_Lenght = Circle_hub_L + L; %THE TOTAL LENGHT OF THE HUB CONTOUR

```

**Εικόνα 4.4.2 :** Παρουσίαση σε μορφή κώδικα της διαδικασίας για την γραφική αναπαράσταση του περιγράμματος πλήμνης της πτερωτής καθώς και του υπολογισμού του συνολικού μήκους του εν λόγω περιγράμματος.



**Εικόνα 4.4.3 :** Παρουσίαση περιγράμματος πλήμνης. Με πράσινο χρώμα φαίνεται το κυκλικό τόξο του περιγράμματος και με μπλε χρώμα το τελικό ευθύγραμμο τμήμα.

Με την ολοκλήρωση του περιγράμματος της πλήμνης (*Hub Contour*) ακολουθεί η δημιουργία του περιγράμματος του κελύφους (*Shroud Contour*). Η δημιουργία του περιγράμματος του κελύφους αποτελεί το πολυπλοκότερο αλλά και σημαντικότερο τμήμα της προκαταρκτικής σχεδίασης και αυτό διότι καθορίζει σημαντικούς παραμέτρους όπως το εμβαδόν την πτερωτής στο μέσο πέρασμα. Η διαδικασία εύρεσης του κατάλληλου περιγράμματος κελύφους θα μπορούσε να αποτελέσει ένα κεφάλαιο μόνη της για την επεξήγηση της διαδικασίας αλλά και του κώδικα που απαιτείται για την διεκπεραίωση της.

Στην συγκεκριμένη διατριβή ενώ η δημιουργία σε κώδικα της παραπάνω διαδικασίας έφτασε σε πολύ ικανοποιητικό επίπεδο και αρκετά κοντά στην εύρεση λύσης, η πολυπλοκότητα της διαδικασίας σε πολύ μικρές λεπτομέρειες καθώς και ο μεγάλος όγκος χρόνου που απαιτούσε οδήγησε στην υιοθέτηση διαφορετικής μεθοδολογίας.

Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε απαιτεί από τον χρήστη να μαντέψει και να δοκιμάσει τις συντεταγμένες του μέσου περάσματος για το οποίο προκύπτει μια αποδεκτή λύση αλλά και γεωμετρία του περιγράμματος της πτερωτής. Οι αλλαγή των τιμών του κεντρικού σημείου ελέγχου του περιγράμματος του κελύφους γίνεται στην γραμμή 140 και 141 στο βασικό πρόγραμμα. Μετά από δοκιμές και για την προσέγγιση των τιμών όπου φαίνονται στα αποτελέσματα της διπλωματικής του Johannes Schiff οι συντεταγμένες του κεντρικού σημείου ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στην εικόνα 4.4.4.

|     |   |                              |
|-----|---|------------------------------|
| 140 | - | x = 0.026;%PASSAGE MID-POINT |
| 141 | - | y = 0.094;%PASSAGE MID-POINT |

*Εικόνα 4.4.4*

Για να ξεκινήσει η διαδικασία του ορισμού του περιγράμματος πλήμνης αρχικά βρίσκεται το μέσο εμβαδόν το οποίο δίνεται από τον τύπο (4.67).

$$A_{mid-passag e} = \frac{A_1 + A_2}{2} \quad (4.67)$$

Καθώς και το πάχος στην ακμή εκφυγής στην έξοδο της πτερωτής “ $b_2$ ”.

$$b_2 = \frac{A_2}{2\pi r_2 - \frac{Z_1 t_B}{\cos \beta_2}} \quad (4.68)$$

Στην συνέχεια ορίζονται οι τιμές των αρχικών σημείων για συντελεστές κλίσης του περιγράμματος μηδέν « $0^\circ$ » και « $90^\circ$ » αντίστοιχα ( $\alpha_{c,s,1} = 0^\circ$  &  $\alpha_{c,s,2} = 90^\circ$ ). Οι συντελεστές του κελύφους σε μορφή κώδικα συμβολίζονται ως “ $\alpha_{c4}$ ” και “ $\alpha_{c6}$ ” αντίστοιχα. Και προκύπτουν :

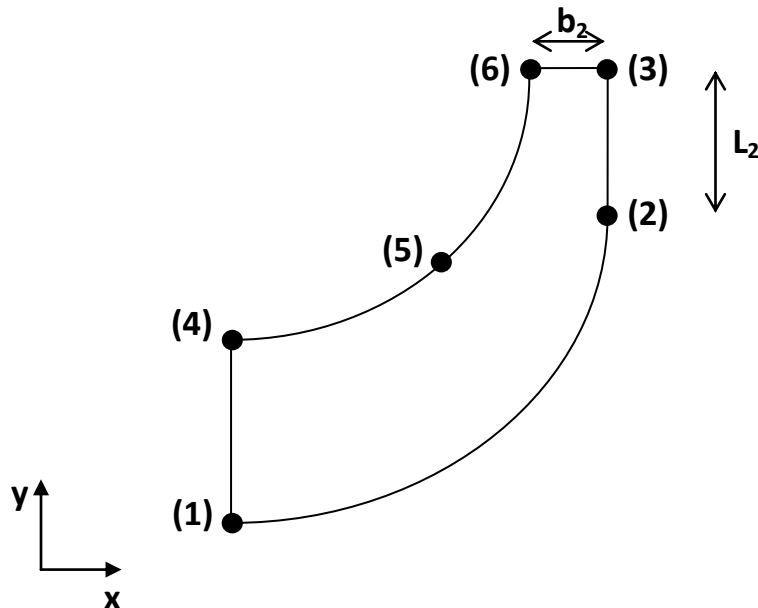
$$X_4 = X_1 \quad (4.69)$$

$$Y_4 = r_{1s} \quad (4.70)$$

$$X_6 = X_2 - b_2 \quad (4.71)$$

$$Y_6 = Y_3 \quad (4.72)$$

Οι παραπάνω σχέσεις μπορούν εύκολα να γίνουν κατανοητές κοιτάζοντας το σχήμα 4.4.2 στο οποίο φαίνεται το περίγραμμα του κελύφους μαζί με το περίγραμμα της πλήμνης.



**Σχήμα 4.4.2 :** Παρουσίαση περιγραμμάτων πλήμνης και κελύφους με τους ενδεικτικούς αριθμούς των θέσεων των σημείων ελέγχου κάθε καμπύλης.

Αφού καθοριστούν οι τιμές των συντεταγμένων των σημείων ελέγχου σειρά έχει η διαδικασία δημιουργίας της καμπύλης Spline η οποία ικανοποιεί τις παραπάνω εξισώσεις και παραδοχές. Η διαδικασία δημιουργίας της Spline θα εκτελέσει παρεμβολή για εκατό σημεία “*mpoints = 100*” σε κάθε ένα από τους δύο άξονες και στην συνέχεια θα δημιουργήσει το γραφικό περιβάλλον αναπαράστασης της καμπύλης. Στην εικόνα 4.4.5 φαίνεται σε μορφή κώδικα η διαδικασία των αρχικών υπολογισμών και του ορισμού των τιμών των συντεταγμένων, ενώ στην εικόνα 4.4.6 φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η δημιουργία της καμπύλης Spline. Τέλος στην εικόνα 4.4.7 διακρίνονται τα περιγράμματα πλήμνης και κελύφους και επιπλέον με κόκκινες κουκίδες διακρίνονται τα σημεία ελέγχου της καμπύλης Spline.

```

124 %%%% SHROUD CONTOUR %%%%
125 Amidpassage=(A1+A2)/2;%AREA AT THE MIDPASSAGE
126 b2 = A2/(2*pi*r2-((Zi*tb)/cosd(b2angle)));%WIDTH OF THE IMPELLER AT THE EXIT
127 ac4=0; ac6=90;%IS THE SLOPES OF THE SHROUD CONTOUR AT THE INLET AND EXIT OF THE IMPELLER
128 xcp(4)=xcp(1); %FIRST POINT OF THE SHOUO CONTOUR AT THE X-AXIS
129 ycp(4)=ris; %FIRST POINT OF THE SHROUD CONTOUR AT THE Y-AXIS
130 xcp(6)=xcp(2)-b2;%SECOND POINT OF THE SHROUD CONTOUR AT THE MIDDLE OF THE CONTOUR, AT THE X-AXIS
131 ycp(6)=ycp(3);%SECOND POINT OF THE SHROUD CONTOUR AT THE MIDDLE OF THE CONTOUR, AT THE Y-AXIS
132
133 %%%% SPLINE GENERATION %%%%
134 LB1= xcp(4); UB1= xcp(6); %LB1 & UB1 REFER'S TO THE X'AXIS
135 LB2= ycp(4); UB2= ycp(6); %LB2 & UB2 REFER'S TO THE Y'AXIS
136
137 %%%% BASIC POINT FOR THE RIGHT COMPLETION OF THE PROCESS %%%%
138 x = 0.026;%PASSAGE MID-POINT
139 y = 0.094;%PASSAGE MID-POINT
140 %%%% BASIC POINT FOR THE RIGHT COMPLETION OF THE PROCESS %%%%

```

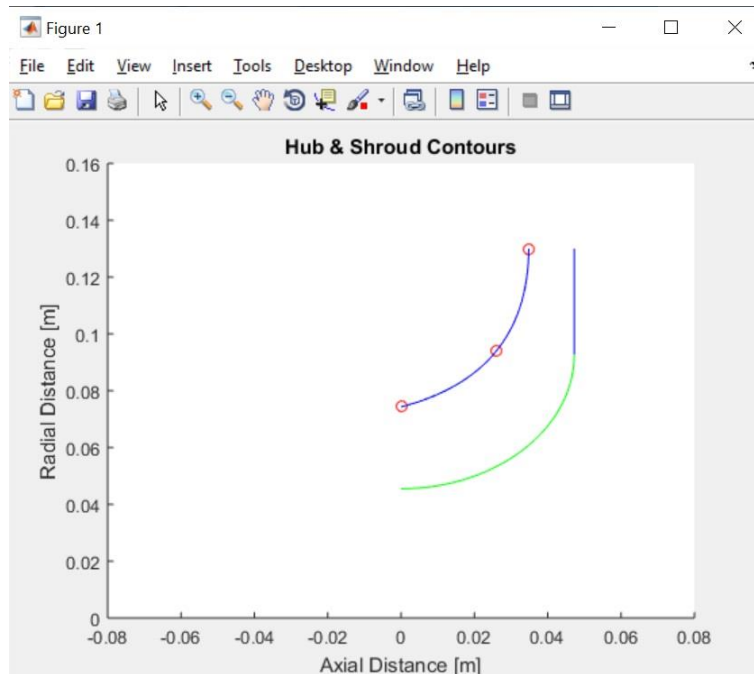
**Εικόνα 4.4.5 :** Αρχικοί υπολογισμοί και ορισμός των τιμών των συντεταγμένες των σημείων ελέγχου σε μορφή κώδικα της Matlab.

```

142 src = [LB1 LB2]; % SRC. IS THE STARTING POINT OF THE SHROUD CONTOUR
143 dest= [UB1 UB2]; %DEST. IS THE END POINT OF THE SHROUD CONTOUR
144 x = [src(1) x dest(1)];%THE THREE POINTS OF X-AXIS THROUGH WHICH THE CUBIC SPLINE CURVE WILL PASS
145 y = [src(2) y dest(2)];%THE THREE POINTS OF Y-AXIS THROUGH WHICH THE CUBIC SPLINE CURVE WILL PAS
146 t = linspace(0,1,numel(x));
147 mpoints = 100;%THIS NUMBER IS ABOUT THE NUMBER OF INTERPOLATED POINTS WE WANT FOR THE CUBIC SPLINE
148 tt = linspace(0,1,mpoints);
149 xx =spline(t,x,tt);%XX IS THE 100 INTERPOLATED X-AXIS POINTS
150 yy =spline(t,y,tt); %YY IS THE 100 INTERPOLATED Y-AXIS POINTS
151 pp = spline(xx,[ac4 yy ac6]);% PP IS THE CUBIC SPLINE WITH THE SLOPES AT THE INLET AND EXIT OF THE
152 plot(x,y,'ro');%WILL PLOT THE THREE BASIC POINT OF THE CURVE WITH RED CYRCLE
153 plot(xx,yy,'b'); %WILL PLOT THE SPLINE WITH BLUE COLOR
154 %%%% SPLINE GENERATION %%%%
155 %%%% SHROUD CONTOUR %%%%

```

**Εικόνα 4.4.6 :** Διαδικασία δημιουργίας και γραφικής αναπαράστασης της καμπύλης Spline.



*Εικόνα 4.4.7 : Παρουσίαση περιγραμμάτων πλήμνης και κελύφους. Με μπλε χρώμα φαίνεται το περίγραμμα του κελύφους και με τους κόκκινους μικρούς κύκλους διακρίνονται τα τρία σημεία ελέγχου της καμπύλης.*

#### 4.5 Δημιουργία των σημείων με ίσες κατανεμημένες αποστάσεις (Evenly Spaced Points) και των quasi-normal.

Όπως αναφέρεται και στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο το επόμενο βήμα μετά την δημιουργία των περιγραμμάτων πλήμνης και κελύφους (*Hub & Shroud Contours*) ακολουθεί η δημιουργία των σημείων σε ίσες κατανεμημένες αποστάσεις μεταξύ τους κατά μήκος των περιγραμμάτων. Η διαδικασία χωρίζεται σε δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο αφορά την εύρεση των σημείων αυτών κατά μήκος του περιγράμματος του κελύφους, ενώ το δεύτερο και απλούστερο στάδιο την εύρεση των σημείων κατά μήκος του περιγράμματος της πλήμνης. Και τα δύο στάδια απαιτούν αρχικά τον ορισμό του αριθμού των σημείων σε ίσες “ $N_e$ ” και μη “ $N$ ” κατανεμημένες αποστάσεις. Στην συγκεκριμένη διατριβή αυτοί οι αριθμοί έχουν τιμές ίσες με :

$$N = 8$$

$$N_e = 12$$

$$\sim 81 \sim$$

Για την διεκπεραίωση του πρώτου σταδίου ο κώδικας καλεί συνάρτηση η οποία ονομάζεται *“Evenly\_Spaced\_Points”*. Η συγκεκριμένη συνάρτηση παίρνει σαν ορίσματα τις εξής μεταβλητές :

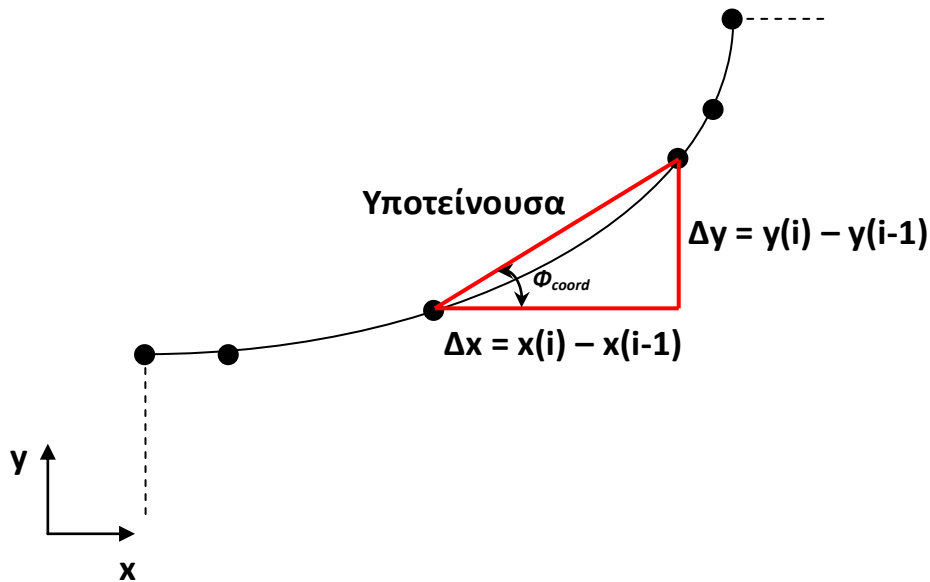
- Τις συντεταγμένες (X,Y) των σημείων που συντελούν την καμπύλη Spline του περιγράμματος του κελύφους.
- Τις συντεταγμένες του τελευταίου σημείου του περιγράμματος του κελύφους, οι οποίες είναι σε μορφή πίνακα με όνομα *“UB<sub>1</sub>”*.
- Την ακτίνα του κυκλικού τόξου της καμπύλης της πλήμνης *“R<sub>c</sub>”*.
- Τους αριθμούς των ίσων ως προς την απόσταση κατανεμημένων σημείων *“Ne”* καθώς και τον αριθμό των σημείων τα οποία δεν είναι σε ίσες κατανεμημένες αποστάσεις *“N”*.
- Τις συντεταγμένες όλων των σημείων ελέγχου των περιγραμμάτων.
- Το μήκος του ευθύγραμμου τμήματος στο τέλος του κυκλικού τόξου του περιγράμματος της πλήμνης *“L<sub>2</sub>”*.
- Το συνολικό μήκος του περιγράμματος της πλήμνης *“Circle\_hub\_L”*.

Ενώ η συνάρτηση επιστρέφει στο κυρίως πρόγραμμα τα εξής στοιχεία :

- Τις συντεταγμένες των σημείων που είναι κατανεμημένα σε άνισες αποστάσεις μεταξύ τους (*Unevenly Spaced Points*), οι οποίες συμβολίζονται ως *“r<sub>x</sub> & r<sub>y</sub>”*.
- Τις συντεταγμένες των σημείων που είναι τοποθετημένα σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους (*Evenly Spaces Points*). Οι συγκεκριμένες μεταβλητές έχουν διαφορετική ονομασία για την πλήμνη (*Hub*) και διαφορετική για το κέλυφος (*Shroud*) οι οποίες είναι (*equalxhub,equalyhub*) και (*equalxshroud,equalyshroud*) αντίστοιχα.
- Τις συντεταγμένες των σημείων τα οποία είναι τοποθετημένα σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους και ταυτόχρονα βρίσκονται επάνω στο ευθύγραμμο τμήμα στο τέλος του περιγράμματος της πλήμνης. Τα εν λόγω σημεία επιστρέφονται στο πρόγραμμα σε μορφή πίνακα με ονομασία *“L\_y”*.
- Τον αριθμό των σημείων τα οποία βρίσκονται στο ευθύγραμμο τμήμα του περιγράμματος της πλήμνης. Η μεταβλητή αυτή συμβολίζεται ως *“nlp”*.

Η συνάρτηση αρχικά θα ασχοληθεί με την δημιουργία των σημείων σε ίσες αποστάσεις κατά μήκος τη καμπύλης του περιγράμματος του κελύφους. Όμως για να εκπονηθεί η παραπάνω διαδικασία προηγείται η κατανομή σημείων σε άνισες αποστάσεις μεταξύ τους. Ο τρόπος με τον οποίο θα πραγματοποιηθεί αυτή η διαδικασία είναι ο εξής.

Αρχικά θα πρέπει να υπολογιστεί το μήκος της καμπύλης Spline του κελύφους μέσω των σημείων που είναι σε τυχαία κατανομή κατά μήκος της καμπύλης. Βρίσκοντας τις συντεταγμένες των σημείων αυτών στην συνέχεια δημιουργώντας τρίγωνα μεταξύ δύο σημείων κάθε φορά μέσω τριγωνομετρικών σχέσεων μπορεί να προσεγγιστεί το μήκος της καμπύλης “Lshroud”. Για παράδειγμα, έστω ότι επιλέγεται ο αριθμός των σημείων αυτών “N\_” να είναι ίσος με έξι ( $N_ = 6$ ). Στο σχήμα 4.5.1 φαίνεται γραφικά η ιδεολογία πίσω από την προσέγγιση του μήκους της καμπύλης Spline. Πρέπει να σημειωθεί ότι στο στάδιο υπολογισμού του μήκους της καμπύλης του περιγράμματος του κελύφους έχουν ήδη βρεθεί οι τιμές των συντεταγμένων των σημείων.



**Σχήμα 4.5.1 :** Παρουσίαση παραδείγματος του τρόπου προσέγγισης του συνολικού μήκους της καμπύλης Spline του περιγράμματος του κελύφους. Με κόκκινο χρώμα διακρίνεται το τρίγωνο το οποίο δημιουργείται μεταξύ δύο σημείων του ίδιου περιγράμματος ενώ επίσης διακρίνεται και η γωνία κλίσης της υποτείνουσας “ $\Phi_{coord}$ ”.

Με γνωστές τις τιμές των “ $\Delta x$ ” και “ $\Delta y$ ” μπορεί εύκολα να βρεθεί από πυθαγόρειο θεώρημα η τιμή του μήκους της υποτείνουσας.

$$\text{Υποτείνουσα} = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad (4.73)$$

Αθροίζοντας όλες τις τιμές οι οποίες αναφέρονται στην υποτείνουσα κάθε τριγώνου που δημιουργείται προκύπτει η προσέγγιση της τιμής του μήκους του περιγράμματος του κελύφους

$$L_{shroud} = \sum_{i=1}^{N-1} \text{Υποτείνουσα} = \sum_{i=1}^{N-1} \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad (4.74)$$

Στην πραγματικότητα όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των σημείων που κατανέμονται τυχαία κατά μήκος της καμπύλης Spline “ $N_{-}$ ” ο οποίος θα επιλεγθεί, τόσο μεγαλύτερη η ακρίβεια που θα προκύψει για το μήκος του περιγράμματος. Αυτό συμβαίνει διότι η καμπυλότητα του περιγράμματος είναι ακανόνιστη, με αποτέλεσμα σε σημεία με μεγάλη καμπυλότητα το μήκος της υποτείνουσας να μην είναι προσεγγιστικό με το μήκος του τμήματος της καμπύλης που περιλαμβάνει. Έτσι όσο μεγαλύτερος ο αριθμός των σημείων “ $N_{-}$ ” τόσο περισσότερα και μικρότερα τρίγωνα δημιουργηθούν κατά μήκος της καμπύλης με αποτέλεσμα οι αυξομειώσεις της κλίσης της καμπύλης να μην επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα του υπολογισμού του μήκους της. Στον κώδικα όπου δημιουργήθηκε ο αριθμός των σημείων αυτών ισούται με χίλια “ $N_{-} = 1002$ ”.

Όμως για την εύρεση των συντεταγμένων αυτών των χιλίων δύο σημείων υιοθετείται η ο παρακάτω τρόπος. Αρχικά δημιουργείται ένας μονοδιάστατος πίνακας χιλίων θέσεων ο οποίος αναφέρεται στις συντεταγμένες του άξονα- $x$ . Το πρώτο στοιχείο του πίνακα ταυτίζεται με την συντεταγμένη του άξονα- $x$  του πρώτου στοιχείου του περιγράμματος “ $X_c(4)$ ” και αντίστοιχα το τελευταίο σημείο του πίνακα ταυτίζεται με την τιμή της συντεταγμένης του άξονα- $x$  του τελευταίου σημείου του περιγράμματος του κελύφους “ $X_c(6)$ ”. Οι υπόλοιπες χίλιες ενδιάμεσες τιμές του πίνακα δημιουργούνται τυχαία μέσω της Matlab. Στην συνέχεια μέσω της εξίσωσης της Spline του περιγράμματος γίνεται μια παρεμβολή των σημείων αυτών του άξονα- $x$  και προκύπτουν οι αντίστοιχες τιμές του άξονα- $y$ .

Στην εικόνα 4.5.1 φαίνεται το αρχικό τμήμα της συνάρτησης “*Evenly\_Spaced\_Points*” καθώς και οι γραμμές κώδικα με τις οποίες προκύπτουν οι συντεταγμένες των σημείων που θα χρησιμοποιηθούν για την προσέγγιση του μήκους της καμπύλης Spline του περιγράμματος του κελύφους. Στην εικόνα 4.5.2 παρουσιάζεται η επαναληπτική διαδικασία που χρησιμοποιείται για την εύρεση του συνολικού μήκους της καμπύλης.



Επίσης βρίσκεται και το μήκος της υποτείνουσας “*lshroud*” η οποία αναφέρεται στην υποτείνουσα που αντιστοιχεί στα τρίγωνα που θα δημιουργηθούν μεταξύ των σημείων που τοποθετούνται σε ίσες μεταξύ τους αποστάσεις “*Evenly Spaced Points*”. Η τιμή του σταθερού αυτού μήκους προκύπτει από την σχέση (4.75), ενώ διαδικασία του υπολογισμού του φαίνεται επίσης στην εικόνα 4.5.2.

$$lshroud = \frac{Lshroud}{N_e - 1} \quad (4.75)$$

```

4 function [rx,ry,equalxshroud,equalyshroud,equalxhub,equalyhub,L_y,nlp] = evenlyspacepoints(xx,yy,UB1,R
5
6 %!!!! ALONG THE SHROUD %!!!!
7 %!!!! UNEVENLY SPACED POINTS %!!!!
8
9 % THE PROCEDURE BELOW WILL CREATE 1000 RANDOM NUMBERS BETWEEN THE
10 % XSHROUD(1) -> XSHROUD(NE). AND WILL FIND THE YSHROUD FOR THIS 1000
11 % X'S. AND THEN WILL USE THEM TO CALCULATE BY TRIGONOMETRIC FUNCTIONS THE
12 % LENGHT OF THE SHROUD CONTOUR.
13
14 N_ = 1000; %THIS IS SO BIG NYMBER BECAUSE WE WANT THE BEST PRECISION OF THE lshroud.
15 rx1 = [xcp(4) (sort(xcp(4) + (xcp(6)-xcp(4)).*rand(1,N_))) xcp(6)];% "rx" IS A VECTOR WITH ALMOST RA
16 for i=1:N_
17     ry1 = spline(xx,yy,rx1); %IS THE Y-AXIS POINTS OF THE SPLINE CURVE FOR THE RX.
18 end
19 %!!!! UNEVENLY SPACED POINTS %!!!!

```

**Εικόνα 4.5.1 :** Εισαγωγικές ενέργειες της συνάρτησης “*Evenly\_Spaced\_Points*”

```

22
23 Lshroud = 0; % IS THE STARTING VALUE OF TOTAL SHROUD LENGHT
24 for i=1:(N_-1)
25     Lshroud = Lshroud + (sqrt((rx1(i+1)-rx1(i))^2 + (ry1(i+1)-ry1(i))^2));%THE LENGTH OF THE ORIGIN.
26 end
27 lshroud = Lshroud/(Ne-1);%THE LENGHT OF THE LINE SEGMENT BETWEEN THE EVENLY DISTRUBUTED POINTS ALON

```

**Εικόνα 4.5.2 :** Διαδικασία εύρεσης του συνολικού μήκους της καμπύλης του περιγράμματος του κελύφους “*Lshroud*” καθώς και του μήκους του ευθύγραμμου τμήματος που θα παρεμβάλλεται μεταξύ των σημείων σε ίσες μεταξύ τους αποστάσεις “*lshroud*”.

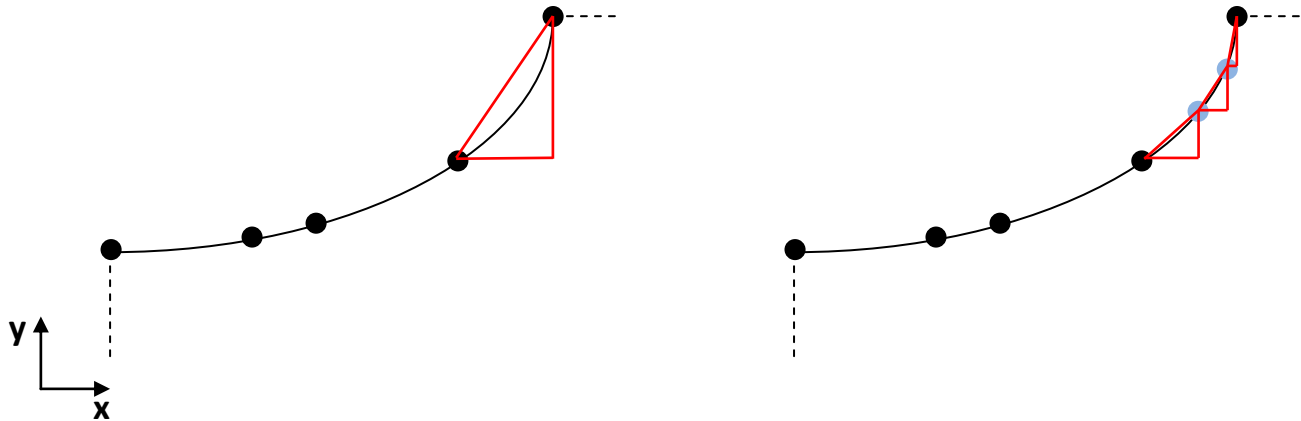
Αφού βρεθούν τα παραπάνω μήκη σειρά έχει η εύρεση των συντεταγμένων των σημείων που θα τοποθετηθούν σε άνισες μεταξύ τους αποστάσεις κατά μήκος της καμπύλης του κελύφους. Για την δημιουργία των εν λόγω σημείων θα χωριστεί το αξονικό μήκος της καμπύλης σε ίσα τμήματα με μήκος ίσο με “*chaxis*”, των οποίων οι συντεταγμένες μπορούν εύκολα να προκύψουν. Αυτές οι τιμές θα αποθηκευτούν σε πίνακα με όνομα “*r<sub>x</sub>()*”. Οι αντίστοιχες τιμές ως προς τον άξονα-*y* θα προκύψουν με την χρήση παρεμβολής της καμπύλης Spline που δημιουργήθηκε για το περίγραμμα του κελύφους. Οι τιμές αυτές θα αποθηκεύονται σε πίνακα με όνομα “*r<sub>y</sub>()*”.

Όπως ήδη έχει αναφερθεί η κλίση της καμπύλης αλλάζει μη γραμμικά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η καμπυλότητα ειδικά προς το τέλος του περιγράμματος να είναι πολύ μεγαλύτερη (σχεδόν 90°) από αυτή στην είσοδο της πτερωτής. Αυτό θα οδηγήσει σε προβλήματα κατά την προσπάθεια κατανομής των σημείων σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους. Η κατανομή των σημείων σε ίσες αποστάσεις θα γίνει με τρόπο ο οποίος έχει αρκετές ομοιότητες με τον τρόπο υπολογισμού του μήκους του περιγράμματος του κελύφους. Αυτό συμβαίνει διότι η κατανομή των σημείων θα γίνει και αυτή με την χρήση τριγωνομετρικών σχέσεων και όταν η καμπυλότητα αυξάνει απότομα το μήκος της καμπύλης κάτω από την υποτεινούσα του τριγώνου δεν είναι προσεγγιστικό με το μήκος της υποτεινούσας. Αυτό μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό κοιτάζοντας το σχήμα 4.5.1. Έτσι εάν δεν υπάρξει κάποια αλλαγή τότε τα σημεία δεν θα μπορούν τοποθετηθούν σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους, γεγονός που αποτελεί σοβαρό σφάλμα της διαδικασίας.

Από αυτό το σημείο και κάτω θα χρησιμοποιηθούν οι αγγλικές ορολογίες των σημείων που θα τοποθετηθούν σε ίσες απόστάσεις κατά μήκος των περιγραμμάτων (Evenly Spaced Points) καθώς και των σημείων που θα τοποθετηθούν σε άνισες αποστάσεις μεταξύ του κατά μήκος των περιγραμμάτων. Αυτό συμβαίνει έτσι ώστε η περιγραφή της διαδικασίας να γίνει ευκολότερα κατανοητή στον αναγνώστη.

Ο τρόπος αποφυγής του προβλήματος της απότομης αύξησης της καμπυλότητας ο οποίος δημιουργήθηκε στην συγκεκριμένη διατριβή είναι ο εξής. Αρχικά είναι γνωστό ότι οι αποστάσεις στον άξονα-*x* των “Unevenly Spaced Points” είναι ίσες και έχουν σταθερό μήκος ίσο με “*chaxis*”. Επομένως η κλίση της καμπύλης και συνεπώς της υποτεινούσας μεταξύ δύο σημείων ορίζεται από το μέγεθος της μεταβολής των σημείων στον άξονα-*y*. Έτσι αυτό που προγραμματίστηκε είναι ένας τρόπος ο οποίος ελέγχει το μέγεθος αυτής της μεταβολής (και εμμέσως της κλίσης) και όταν αυτό το μέγεθος αυξάνεται σε μη επιτρεπτό βαθμό τότε η διαδικασία προσθέτει ένα ακόμη “Unevenly Space Point” στο συγκεκριμένο σημείο. Αυτό θα οδηγήσει στον καλύτερο

έλεγχου της κλίσης του περιγράμματος και στην αύξηση της ακρίβειας της τοποθέτησης των “Evenly Spaced Points” στην συνέχεια. Για την καλύτερη κατανόηση των παραπάνω δημιουργήθηκε το σχήμα 4.5.2 στο οποίο αριστερά φαίνεται η καμπύλη χωρίς να προστεθούν επιπλέον “Unevenly Spaced Points”, ενώ δεξιά φαίνεται μετά την προσθήκη επιπλέον σημείων.



**Σχήμα 4.5.2 :** Παράδειγμα γραφικής αναπαράστασης του τρόπου αντιμετώπισης του προβλήματος της απότομης αύξησης της κλίσης της καμπύλης στο περίγραμμα του κελύφους. Με γαλάζιο χρώμα διακρίνονται τα σημεία τα οποία ο κώδικας επιλέγει να εισάγει εκεί όπου η κλίση αυξάνεται απότομα.

Στην εικόνα 4.5.3 παρουσιάζεται η διαδικασία υπολογισμού των συντεταγμένων των σημείων τα οποία τοποθετούνται σε άνισες μεταξύ τους θέσεις κατά μήκος της καμπύλης του κελύφους, ενώ στην εικόνα 4.5.4 φαίνεται η διαδικασία ελέγχου αλλά και πρόσθεσης “Unevenly Spaced Points” στην περίπτωση όπου είναι απαραίτητο.

```

31 - grid on
32 - N=8;%IS THE UNEVENLY SPACE POINTS
33 - % rx = [xcp(4) (sort(xcp(4) + (xcp(6)-xcp(4)).*rand(1,N))) xcp(6)];
34 - xaxis = UB1/(N-1); %HERE IS SEPARATES THE X-AXIS LENGHT OF THE SHROUD CONTOUR IN EQUAL SPACE WHICH
35 - rx(1)=0; %RX IS THE X-AXIS POINTS OF THE UNEVENLY SPACED POINTS ALONG THE CURVE
36 - for i=2:N
37 -     rx(i) = rx(i-1) + xaxis;
38 - end
39 - ry = spline(xx,yy,rx);%RY IS THE Y-AXIS POINTS OF THE UNEVENLY SPACED POINTS ALONG THE CURVE

```

**Εικόνα 4.5.3**

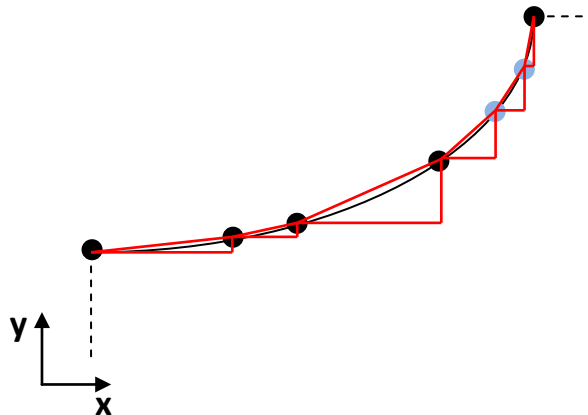
```

40 - while 1 %BECAUSE THE SLOPE OF THE SHROUD CURVE RISES AS WE GO FROM THE INLET TO DISCHARGE, MAYBE AT
41 -     if abs(ry(N-1)-ry(N))>0.01
42 -         N=N+1;
43 -         rx(N) = xcp(6);
44 -         ry(N) = ycp(6);
45 -         rx(N-1)=rx(N-2) + (rx(N-1)-rx(N-2))/2;
46 -         ry(N-1)=spline(xx,yy,rx(N-1));
47 -     else
48 -         break
49 -     end
50 - end
51 - ry = spline(xx,yy,rx);
52 - i=1;

```

**Εικόνα 4.5.4**

Με την ολοκλήρωση των παραπάνω διαδικασιών στην ουσία έχει δημιουργηθεί η παρακάτω γεωμετρία (σχήμα 4.5.3) επάνω στο περίγραμμα του κελύφους.



**Σχήμα 4.5.3 :** Παράδειγμα γεωμετρικής παρουσίασης των γεωμετριών που έχουν δημιουργηθεί μέχρι τώρα κατά μήκος του περιγράμματος του κελύφους.

Το επόμενο βήμα είναι αυτό του υπολογισμού της κλίσης της υποτείνουσας σε κάθε ένα από τα τρίγωνα τα οποία έχουν δημιουργηθεί. Η κλίση αυτή είναι ίδια με την γωνία η οποία κυμαίνεται από τον άξονα-x έως και την υποτείνουσα και υπολογίζεται ως εξής. Εάν η μεταβολή στον άξονα-x μεταξύ δύο σημείων " $\Delta x$ " είναι αρνητικός αριθμός " $\Delta x < 0$ " τότε η γωνία της κλίσης της υποτείνουσας " $\Phi_{coord}$ " προκύπτει από την εξίσωση (4.76) ως :

$$\Phi_{coord} = \cos^{-1}\left(\frac{X_2 - X_1}{\sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2}}\right) \quad (4.76)$$

Ενώ στην περίπτωση όπου η μεταβολή στον άξονα-γ είναι αρνητική “ $\Delta y < 0$ ” τότε χρησιμοποιείται η εξίσωση (4.77).

$$\Phi_{coord} = \sin^{-1}\left(\frac{Y_2 - Y_1}{\sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2}}\right) \quad (4.77)$$

Η επαναληπτική διαδικασία που απαιτείται για την εύρεση των γωνιών κλίσης κάθε υποτεινουσας φαίνεται στην εικόνα 4.5.5 σε μορφή κώδικα της Matlab.

```

54 - while 1 %HERE WILL BE CALCULATED THE SLOPE(OR ANGLE) OF EVERY LINEAR PART ALONG THE UNEVENLY SPACES
55 -     if i==N
56 -         fcoord(i)=fcoord(i-1);
57 -         break
58 -     end
59 -     if rx(i)-rx(i+1)>0 % THIS CHECK HAPPENS BECAUSE THE FCOORD CHANGES EQUATION IN CASE OF dx<0 OR dy<
60 -         fcoord(i) = acosd((rx(i+1)-rx(i))/(sqrt((rx(i+1)-rx(i))^2 + (ry(i+1)-ry(i))^2)));
61 -     else if ry(i)-ry(i+1)>0
62 -         fcoord(i) = asind((ry(i+1)-ry(i))/(sqrt((rx(i+1)-rx(i))^2 + (ry(i+1)-ry(i))^2)));
63 -     else
64 -         fcoord(i) = acosd((rx(i+1)-rx(i))/(sqrt((rx(i+1)-rx(i))^2 + (ry(i+1)-ry(i))^2)));
65 -     end
66 - end
67 - i=i+1;
68 - end

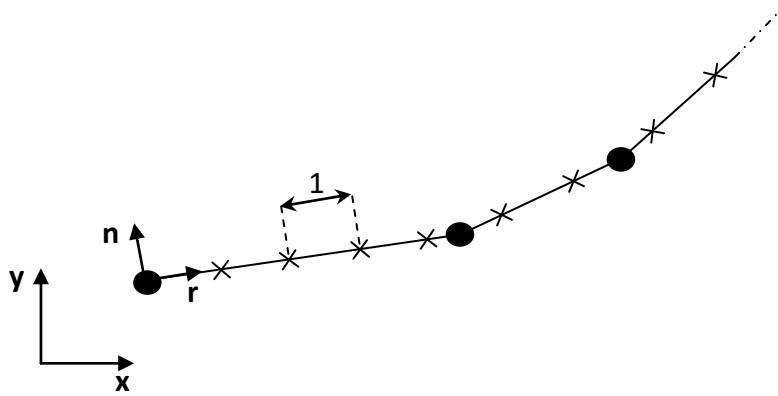
```

**Εικόνα 4.5.5 :** Παρουσίαση σε μορφή κώδικα της επαναληπτικής διαδικασίας υπολογισμού της γωνίας κλίσης της υποτεινουσας για κάθε τρίγωνο το οποίο έχει δημιουργηθεί.

Με την εύρεση των κλίσεων των υποτεινουσών η διαδικασία της κατανομής των “*Evenly Spaced Points*” μπορεί να ξεκινήσει. Πριν την περιγραφή του τρόπου με τον οποίο συντάχθηκε ο κώδικας πρέπει να προηγηθεί η περιγραφή του τρόπου και της ιδεολογίας με τον οποίο θα γίνει η εν λόγω κατανομή.

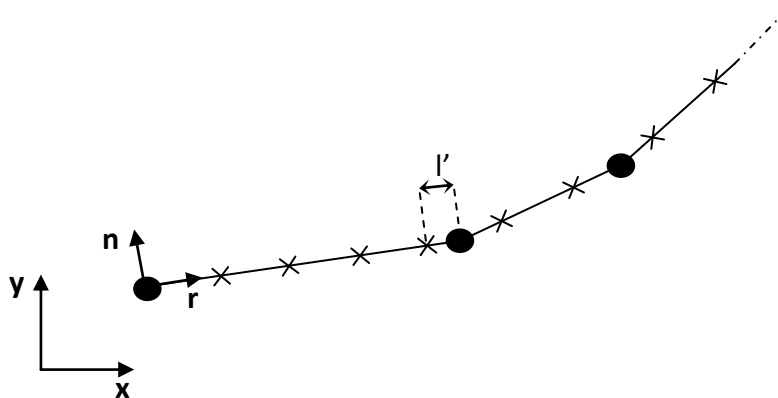
Αρχικά για την διεκπεραίωση της διαδικασίας αυτής θα πρέπει σε κάθε τρίγωνο να υιοθετηθεί ένα περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς. Ο τρόπος με τον οποίο δημιουργείται ένα περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς περιγράφεται στο παράρτημα Α'. Αφού δημιουργηθεί το περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς σε κάθε “*Unevenly*

*Spaced Point*” όπου ο άξονας-z ταυτίζεται με την υποτείνουσα του αντίστοιχου τριγώνου ξεκινάει η κατανομή των “*Evenly Spaced Points*” ως εξής. Ξεκινώντας από το μηδέν του περιστρεφόμενου συστήματος θα πρέπει κατά μήκος της υποτείνουσας να κατανεμηθούν σε ίσες αποστάσεις όσα “*Evenly Space Points*” μπορούν να χωρέσουν στο μήκος της υποτείνουσας. Η απόσταση η οποία χωρίζει κάθε “*Evenly Space Point*” με τα γειτονικά του υπολογίστηκε από της σχέση (4.75) και ισούται με “*Ishroud*”. Αφού δημιουργηθεί ένα “*Evenly Space Point*” προστίθεται από αυτό το μήκος “*Ishroud*” στον άξονα-z. Στο σχήμα 4.5.4 φαίνεται το περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς που αντιστοιχεί στην κλίση της πρώτης υποτείνουσας μιας καμπύλης καθώς και κάποια “*Evenly Spaced Points*” τα οποία έχουν τοποθετηθεί. Επιπλέον διακρίνεται και η απόσταση “*Ishroud*” μεταξύ δύο θέσεων των “*Evenly Spaced Points*” η οποία συμβολίζεται με τον αριθμό «1».



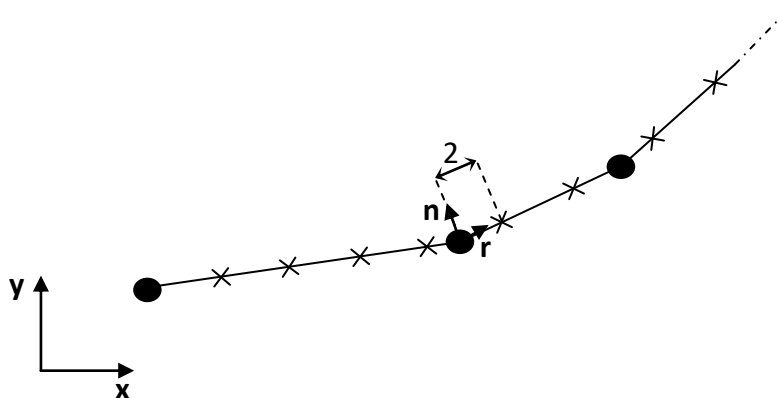
Σχήμα 4.5.4 : Παράδειγμα κατανομής των “*Evenly Spaced Points*”.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα σημεία στα οποία η κλίση αλλάζει. Αυτά τα σημεία προφανώς συντελούνται από τα “*Unevenly Spaced Points*”. Για να συνεχίσουν τα σημεία να είναι σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους χωρίς να επηρεάζει η αλλαγή της κλίσης την απόσταση μεταξύ τους θα πρέπει να βρεθεί η τιμή της παραμέτρου “*I'*”. Η παράμετρος “*I'*” αντιπροσωπεύει την απόσταση μεταξύ του τελευταίου “*Evenly Spaced Point*” για μια συγκεκριμένη κλίση και του επόμενου “*Unevenly Spaced Point*”. Σχηματικά η απόσταση αυτή αναπαριστάται στο σχήμα 4.5.5.



Σχήμα 4.5.5 : Στο παραπάνω σχήμα διακρίνεται γραφικά η απόσταση “ $l'$ ”.

Εφόσον λοιπόν στο συγκεκριμένο μήκος υποτείνουσας δεν χωράει άλλο “*Evenly Spaced Point*” βρίσκεται η τιμή της απόστασης “ $l'$ ” και στην συνέχεια υιοθετείται ένα νέο περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς το οποίο δημιουργείται για τα δύο επόμενα “*Unevenly Spaced Points*” με κλίση ίδια με αυτή της υποτείνουσας που τα συνδέει. Αφού όλα τα παραπάνω υλοποιηθούν με επιτυχία το επόμενο “*Evenly Spaced Point*” θα είναι σε απόσταση από το νέο σύστημα συντεταγμένων ίση με  $(lshroud - l')$ . Τα παραπάνω φαίνονται στο σχήμα 4.5.6 όπου η απόσταση  $(lshroud - l')$  συμβολίζεται με τον αριθμό «2» .

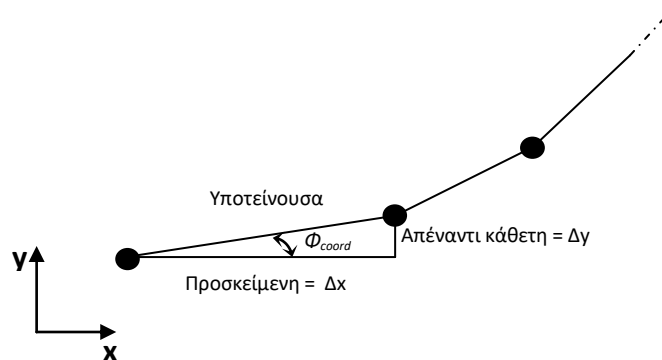


Σχήμα 4.5.6 : Σχηματική αναπαράσταση της απόστασης τοποθέτησης ενός “*Evenly Spaced Point*” στην περίπτωση της αλλαγής υποτείνουσας. Αυτή η απόσταση συμβολίζεται με τον αριθμό «2» και ισούται με  $(lshroud - l')$ .

Έτσι επαναλαμβάνοντας όλες τις παραπάνω διαδικασίες διαδοχικά μέχρι και την τελευταία υποτείνουσα ολοκληρώνεται η κατανομή των “*Equal Spaced Points*” κατά μήκος των υποτεινουσών των τριγώνων του περιγράμματος. Πρέπει να σημειωθεί ότι μέσω αυτής της διαδικασίας θα βρεθούν οι συντεταγμένες του άξονα- $x$  των σημείων αυτών, για τις οποίες μετά θα γίνει παρεμβολή στην εξίσωση Spline της καμπύλης του πτερυγίου από όπου και θα προκύψουν οι συντεταγμένες των πραγματικών “*Evenly Spaced Points*” οι οποίες θα αποτελούν ταυτόχρονα και σημεία της καμπύλης Spline του περιγράμματος του κελύφους. Αξίζει να αναφθεί ότι στα περιστρεφόμενα συστήματα αναφοράς τα οποία θα υιοθετηθούν σε κάθε υποτείνουσα δεν θα γίνει χρήση του κάθετου άξονα- $z$ . Αυτό συμβαίνει διότι η κίνηση είναι παράλληλη με κάθε υποτείνουσα η οποία ταυτόχρονα ταυτίζεται με τον άξονα- $z$  του συστήματος αναφοράς.

Όλα τα παραπάνω αφορούν την ιδεολογία για την δημιουργία της κατανομής των “*Evenly Spaced Points*”. Ο τρόπος όπου δημιουργήθηκε στην συγκεκριμένη διατριβή με τον οποίο θα γίνει η προσέγγιση των σημείων αυτών καθώς και ο υπολογισμός των συντεταγμένων τους διαφέρει εντελώς με αυτόν τον οποίο χρησιμοποιεί στην διπλωματική του εργασία ο Johannes Schiff και περιγράφεται παρακάτω.

Μέχρι στιγμής για κάθε υποτείνουσα είναι γνωστές οι τιμές της κλίσης τα υποτεινουσας η οποία ταυτίζεται με την γωνία του τριγώνου που αναφέρεται η υποτείνουσα “ $\Phi_{coord}$ ” (Δες σχήμα 4.5.1), καθώς και το μήκος των δύο κάθετων πλευρών οι οποίες είναι παράλληλες με τον άξονα- $x$  και άξονα- $y$  αντίστοιχα. Τα μήκη αυτών των πλευρών ορίζονται από τις διαφορές “ $\Delta x$ ” και “ $\Delta y$ ” αντίστοιχα μεταξύ των δύο “*Unevenly Spaced Points*” τα οποία ορίζουν το τρίγωνο. Αυτά επίσης διακρίνονται γραφικά στο σχήμα 4.5.1. Το πρώτο της διαδικασίας είναι αυτό του υπολογισμού του μήκους κάθε υποτεινουσας. Το μήκος αυτό θα υπολογιστεί μέσω τριγωνομετρικών σχέσεων ως εξής:



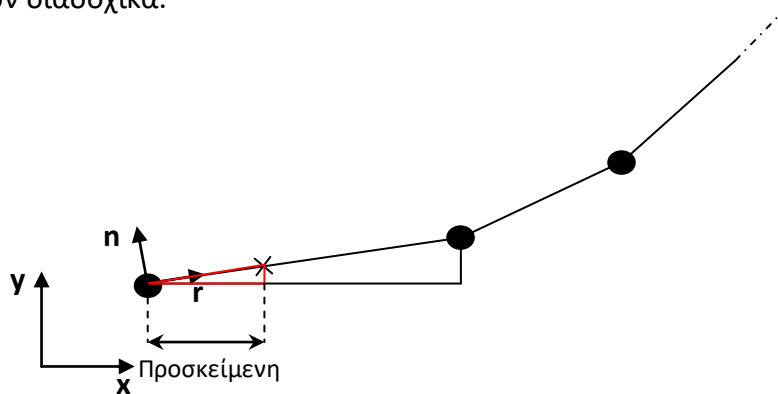
**Σχήμα 4.5.7 :** Αναπαράσταση τριγώνου μεταξύ δύο “*Unevenly Spaced Points*”



$$\text{Υποτείνουσα}_{max} = \frac{\Delta y}{\sin(\Phi_{coord})} \quad (4.78)$$

$$\text{Προσκέιμενη}_{max} = \text{Υποτείνουσα}_{max} \cos(\Phi_{coord}) \quad (4.79)$$

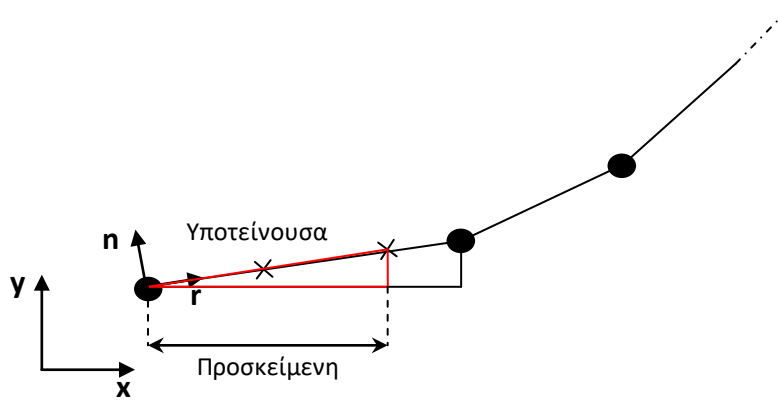
Αφού υπολογιστούν η μέγιστες τιμές της υποτείνουσας και της προσκέιμενης του ίδιου τριγώνου, τότε ακολουθεί η δημιουργία μικρότερων τριγώνων των οποίων η υποτείνουσα θα έχει την τιμή “ $n \cdot lshroud$ ” όπου το “ $n$ ” συμβολίζει τον αριθμό των μικρών τριγώνων που ήδη έχουμε δημιουργήσει. Με αυτόν τον τρόπο για δεδομένη “Υποτείνουσα<sub>max</sub>” θα είναι γνωστή η υποτείνουσα κάθε μικρότερου τριγώνου του οποίου το πρώτο σημείο θα είναι το αντίστοιχο “*Unevenly Spaced Point*” ενώ το τελευταίο θα δίνεται από το μήκος της υποτείνουσας αυτού του μικρού τριγώνου. Τα παρακάτω σχήματα δημιουργήθηκαν για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας αυτής. Με κόκκινο χρώμα διακρίνονται όλα μικρότερα τρίγωνα τα οποία θα δημιουργηθούν διαδοχικά.



Σχήμα 4.5.8 : Παρουσίαση πρώτου μικρού τριγώνου.

Στην συνέχεια αφού βρεθεί η τιμή της προσκέιμενης από τον τύπο (4.79) ο οποίος μετατρέπεται στον τύπο (4.80), ελέγχεται εάν η νέα υποτείνουσα που θα δημιουργηθεί είναι μεγαλύτερη της “Υποτείνουσας<sub>max</sub>”. Εάν δεν είναι τότε δημιουργείται το επόμενο μικρό τρίγωνο το οποίο φαίνεται στο σχήμα 4.5.9.

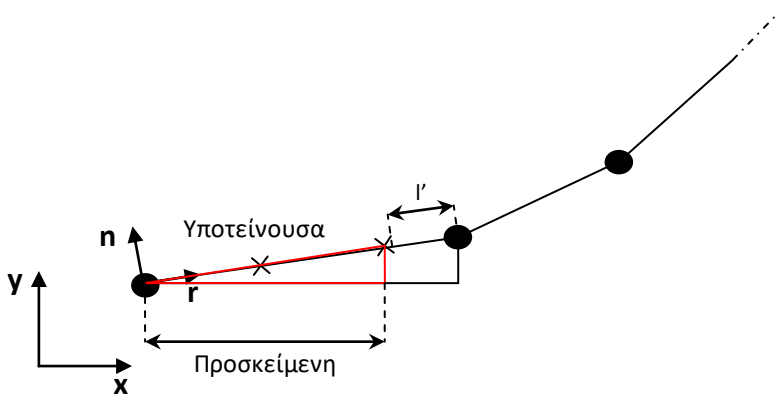
$$\text{Προσκέιμενη} = \text{Υποτείνουσα} \cos(\Phi_{coord}) = (n \cdot lshroud) \cos(\Phi_{coord}) \quad (4.80)$$



**Σχήμα 4.5.9 :** Παρουσίαση επόμενου διαδοχικού τριγώνου όπου η τιμή της υποτείνουσας ισούται με  $(2 \cdot lshroud)$ .

Αφού βρεθεί ξανά η νέα τιμή της προσκειμένης θα ελεγχθεί εάν χωράει ακόμα ένα επιπλέον σημείο κατά μήκος της ίδιας “Υποτείνουσας<sub>max</sub>”. Στην περίπτωση όπου δεν χωράει τότε υπολογίζεται το “ $l'$ ” το οποίο θα αντιστοιχεί στην διαφορά μεταξύ του μήκους της “Υποτείνουσας<sub>max</sub>” και της υποτείνουσας του τελευταίου τριγώνου που δημιουργήθηκε. Αυτή η διαφορά φαίνεται στο σχήμα 4.5.10.

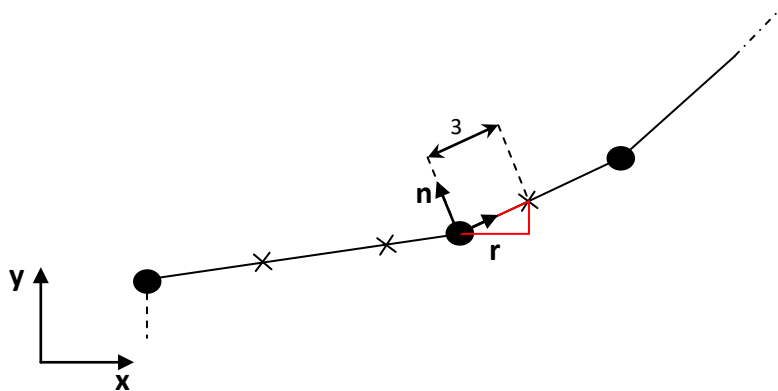
$$l' = \text{Υποτείνουσα}_{\max} - \text{Υποτείνουσα}_{\text{Τελευταίου σημείου}} \quad (4.81)$$



**Σχήμα 4.5.10**

Μετά την εύρεση της απόσταση “ $l'$ ” ακολουθεί η δημιουργία ενός νέου περιστρεφόμενου συστήματος αναφοράς το οποίο θα τοποθετηθεί στο επόμενο “Unevenly Spaced Point”. Στην συνέχεια θα δημιουργηθεί το επόμενο “Evenly Space Point” σε απόσταση ίση με  $(lshroud - l')$ . Στο σχήμα 4.5.11 αναπαριστάται το νέο

περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς καθώς και η νέα αυτή η απόσταση/υποτείνουσα με τον αριθμό 3.



**Σχήμα 4.5.11 :** Παρουσίαση τρόπου υπολογισμού απόστασης “Evenly Spaced Point” μετά την αλλαγή περιστρεφόμενου συστήματος αναφοράς, και κλίσης της υποτείνουσας.

Οι παραπάνω διαδικασίες επαναλαμβάνονται έως ότου κατανεμηθούν τόσα “Evenly Spaced Points” όσα και ο αριθμός “ $N_e$ ”. Όταν όλες οι προσκείμενες έχουν βρεθεί τότε αυτό συνεπάγεται ότι θα είναι γνωστές και όλες οι τιμές των “Evenly Spaced Points” οι οποίες αναφέρονται στον άξονα- $x$ . Έτσι, όπως ήδη αναφέρθηκε αυτές τις τιμές του άξονα- $x$  θα χρησιμοποιηθούν για την παρεμβολή στην καμπύλη Spline του περιγράμματος του κελύφους από όπου θα προκύψουν και οι αντίστοιχες τιμές ως προς τον άξονα- $y$ . Ο συνδυασμός αυτών των συντεταγμένων θα δώσει σημεία τα οποία θα ανήκουν στην καμπύλη Spline και θα είναι τοποθετημένα σε ίσες κατά μήκος της καμπύλης μεταξύ τους αποστάσεις.

Η διαδικασία προγραμματιστικά θα ακολουθήσει ακριβώς τόσο τις παραπάνω εξισώσεις οι οποίες παρουσιάστηκαν καθώς και την γενική ιδεολογία για την διεκπεραίωση της διαδικασίας. Επιπλέον θα εφαρμόσει κατάλληλους ελέγχους οι οποίοι θα βοηθούν το πρόγραμμα να αντιλαμβάνεται σε ποιο σημείο βρίσκεται ακριβώς επάνω στα περιγράμματα καθώς και το πότε αλλάζει η κλίση κάποιας από τις υποτείνουσες. Σε περίπτωση σφάλματος η διαδικασία θα οδηγηθεί στην αύξηση ή μείωση του αριθμού των “Equal Spaced Points” τα οποία θα προσπαθήσει να κατανέμει. Σε αυτήν την περίπτωση ο κώδικας αντιλαμβάνεται την διαφορά μεταξύ των σημείων τα οποία έχουν κατανεμηθεί από το πρόγραμμα αλλά και αυτών που έχουν δοθεί από τον χρήστη και εμφανίζει σχετικό μήνυμα στο “Command Window” της Matlab. Για την διεκπεραίωση όλων των παραπάνω διαδικασιών χρησιμοποιείται μια επαναληπτική δομή τύπου “For” η οποία θα κινηθεί μεταξύ του πρώτου “Unevenly

*Spaced Point*” το οποίο ταυτίζεται και με το πρώτο σημείο της καμπύλης έως και το προτελευταίο *“Unevenly Spaced Point”*.

Ξεκινώντας θα δοθούν αρχικές τιμές του άξονα- $x$  στο πρώτο και στο τελευταίο *“Evenly Spaced Point”*. Στην συνέχεια η διαδικασία εισέρχεται στην επαναληπτική διαδικασία *“For”*. Για τον πρώτο συνδυασμό *“Unevenly Spaced Points”* σημείων υπολογίζεται το μέγιστο μήκος υποτεινουσας και προσκείμενης. Το μέγιστο μήκος της υποτεινουσας θα είναι και το κριτήριο με βάση το οποίο ο κώδικας θα αντιλαμβάνεται εάν χωράει ή όχι κάποιο επιπλέον *“Evenly Spaced Point”* κατά μήκος μιας δεδομένης *“Υποτεινουσας<sub>max</sub>”* και με βάση αυτό θα πράττει αναλόγως. Επίσης στην αρχή της δομής επανάληψης υπάρχει έλεγχος ο οποίος στην περίπτωση όπου ο αριθμός των *“Evenly Spaced Points”* υπερβαίνει τον αριθμό που έχει ορίσει ο χρήστης η διαδικασία διακόπτεται και στην συνέχεια εμφανίζει αντίστοιχο μήνυμα. Τα παραπάνω φαίνονται στην εικόνα 4.5.6.

```
72      %%%% EVENLY SPACED POINTS ALONG THE SHROUD %%%%
73      i=2;
74      ypot(1) = 0; %BECAUSE IS THE STARTING POINT
75      prosk(1) = 0; %BECAUSE IS THE STARTING POINT
76      equalxshroud(1)=xcp(4);%IS THE X-AXIS POINT OF THE FIRST POINT OF EQUAL SPACED POINTS.WHICH IS THE
77      equalyshroud(1) = ycp(4);%IS THE Y-AXIS POINT OF THE EQUAL SPACED POINTS.WHICH IS THE FIRST POINT C
78      equalxshroud(Ne) = xcp(6);%THIS IS THE LAST EQUAL SPACED POINT OF THE SHROUD CURVE AT THE X-AXIS
79      equalyshroud(Ne) = ycp(6);%THIS IS THE LAST EQUAL SPACED POINT OF THE SHROUD CURVE AT THE Y-AXIS
80      for z=1:N-1
81          if i>=Ne |
82              break
83          end
84          ypotmax(z) = (ry(z+1)-ry(z))/sind(fcoord(z)); %YPOTINOYSA
85          proskmax(z) = cosd(fcoord(z))*ypotmax(z) ; %PROSKIMENH
```

Εικόνα 4.5.6.

Μετά τις εισαγωγικές αυτές ενέργειες η διαδικασία εισέρχεται σε άλλη μια εσωτερική δομή επανάληψης τύπου *“While 1”*. Στο εσωτερικό της ο κώδικας ελέγχει εάν η γωνία κλίσης στο συγκεκριμένο σημείο είναι ίση με μηδέν ( $\Phi_{coord} = 0^\circ$ ), ενενήντα ( $\Phi_{coord} = 90^\circ$ ) ή κάποια ενδιάμεση τιμή, και αναλόγως την τιμή της γωνίας αυτής χρησιμοποιεί κάποιες παραλλαγές της εξίσωσης (4.80). Στην εικόνα 4.5.7 φαίνεται η διαδικασία των εν λόγω ελέγχων, των υπολογισμών των τιμών των προσκείμενων κάθε τριγώνου καθώς και ο υπολογισμός της τιμής της συντεταγμένης του άξονα- $x$  που θα αντιστοιχεί σε κάθε *“Evenly Spaced Point”*.

```

86 - while 1
87 -     if i>Ne
88 -         fprintf('i>Ne 2\n');
89 -         break
90 -     end
91 -     if cosd(fcoord(z))== 1 %THIS MEANS THAT THE FCOORD IS 0 DEGREES => THAT SOME VALUES HAS TO CHANGE TYPE.
92 -         ypot(i) = ypot(i-1) + lshroud;
93 -         prosk(i) = 0;
94 -         equalxshroud(i) = equalxshroud(i-1) + lshroud; %IS THE X-AXIS POINT OF THE EQUAL SPACED POINTS
95 -     else if cosd(fcoord(z))== 0 %THIS MEANS THAT THE FCOORD IS 90 DEGREES,AND THE PROCEDURE IS NEAR TO THE ENI
96 -         ypot(i) = ypot(i-1) + lshroud;
97 -         prosk(i)= prosk(i-1)+ lshroud;
98 -         equalxshroud(i) = rx(z)+prosk(i);%IS THE X-AXIS POINT OF THE EQUAL SPACED POINTS
99 -     else
100 -         ypot(i) = ypot(i-1)+lshroud;
101 -         prosk(i) =cosd(fcoord(z))*ypot(i);
102 -         equalxshroud(i) = rx(z)+ prosk(i);%IS THE X-AXIS POINT OF THE EQUAL SPACED POINTS
103 -     end
104 - end

```

**Εικόνα 4.5.7.**

Στην συνέχεια ελέγχεται εάν η υποτείνουσα του ‘μικρού’ τριγώνου στο οποίο βρίσκεται η διαδικασία είναι μεγαλύτερη, μικρότερη ή ίση από την μέγιστη τιμή της υποτείνουσας τριγώνου που ορίζουν τα “*Unevenly Spaced Point*” στα οποία βρίσκεται εκείνη την στιγμή η επαναληπτική διαδικασία “*For*”. Ανάλογα το αποτέλεσμα η διαδικασία προχωράει στους κατάλληλους υπολογισμούς για τον υπολογισμό ή όχι της μεταβλητής “ *I* ” όπως περιγράφηκε νωρίτερα. Οι υπολογισμοί αυτοί σε μορφή κώδικα της Matlab φαίνονται στην εικόνα 4.5.8.

```

105 - if ypot(i) > ypotmax(z)
106 -     ldot = ypotmax(z)-ypot(i-1);
107 -     ypot(i) = lshroud-ldot;
108 -     prosk(i) = cosd(fcoord(z+1))*ypot(i);
109 -     equalxshroud(i) = rx(z+1) + prosk(i);%IS THE X-AXIS POINT OF THE EQUAL SPACED POINTS
110 -     i = i+1;
111 -     break
112 - else if ypot(i) == ypotmax(z)
113 -     i = i+1;
114 -     break
115 - else if ypot(i) < ypotmax(z)
116 -     i = i+1;
117 -     if i == Ne
118 -         break
119 -     end
120 - end
121 - end
122 - end
123 - end
124 - end

```

**Εικόνα 4.5.8.**

Το τελευταίο βήμα για τον ορισμό των “*Evenly Spaced Points*” κατά μήκος του περιγράμματος πλήμνης είναι αυτό του υπολογισμού της συντεταγμένης του άξονα-γ όπως περιγράφηκε νωρίτερα, το οποίο φαίνεται σε μορφή κώδικα στην εικόνα 4.5.9. Επίσης στην εικόνα 4.5.9 διακρίνεται και ο έλεγχος για τυχόν σφάλμα της διαδικασίας όπου στην συνέχεια θα εμφανίσει σχετικό μήνυμα στον χρήστη.

```

125 - if Ne ~= i
126 -     fprintf('something wrong happened with the number of Ne and i \n')
127 - end
128 - equalyshroud = spline(xx,yy,equalxshroud);%HERE IS CALCULATED THE Y-AXIS POINT OF THE SHROUD EQUAL SPACED POINTS.
129

```

**Εικόνα 4.5.9.**

Με την ολοκλήρωση της κατανομής σημείων σε ίσες αποστάσεις κατά μήκος του περιγράμματος του κελύφους ακολουθεί η κατανομή των σημείων αυτών κατά μήκος του περιγράμματος πλήμνης. Στην περίπτωση του περιγράμματος της πλήμνης η διαδικασία είναι αρκετά απλούστερη και αυτό διότι η γωνία του περιγράμματος μεταβάλλεται γραμμικά και το συνολικό μήκος του περιγράμματος μπορεί εύκολα να προκύψει από το άθροισμα του μήκους του κυκλικού τόξου του περιγράμματος και του ευθύγραμμου τμήματος στο τέλος του περιγράμματος. Το άθροισμα αυτό περιγράφεται με την σχέση (4.66). Με γνωστό το συνολικό μήκος αλλά και τον αριθμό των “*Evenly Spaced Points*” τα οποία ο χρήστης θέλει να κατανέμει κατά μήκος των περιγραμμάτων υπολογίζεται από την σχέση (4.81) η οριζόντια απόσταση κατά την οποία θα τοποθετηθούν τα σημεία αυτά.

$$equal\_x = \frac{Hubs\_Total\_lenght}{N_e} \quad (4.81)$$

Στην συνέχεια η μεταβλητή “*equal\_x*” θα χρησιμοποιηθεί για την εύρεση του αριθμού των “*Evenly Spaced Points*” τα οποία χωράνε ακριβώς στο μήκος του ευθυγράμμου τμήματος στο τέλος του περιγράμματος της πλήμνης “*n/p*”. Για την εύρεση του συγκεκριμένου αριθμού χρησιμοποιείται η σχέση (4.82) η οποία ορίζεται ως εξής:

$$nlp = \frac{L}{equal\_x} \quad (4.82)$$

Έπειτα ο αριθμός των σημείων όπου μένει ακόμη για να κατανεμηθούν στο υπόλοιπο του περιγράμματος (δηλαδή στο κυκλικό τόξο) θα χρησιμοποιηθεί για την εύρεση μιας γωνίας η οποία συμβολίζεται ως “*Specific\_round*”. Η γωνία αυτή αντιπροσωπεύει την περιστροφή η οποία πρέπει να διαγραφεί κάθε φορά ξεκινώντας από  $\frac{3\pi}{2}$  έως ότου συμπληρωθεί ο αριθμός των σημείων ο οποίος απαιτείται. Ο ορισμός της μεταβλητής “*Specific\_round*” γίνεται μέσω της σχέσης (4.83). Η σχέση αυτή έχει οριστεί με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να μην επιτρέπει στην διαδικασία να υπερβεί τις ενενήντα μοίρες «90°».

$$Specific\_round = \frac{\pi}{2(N_e - 1 - nlp)} \quad (4.82)$$

Έπειτα για γωνίες “*th*” οι οποίες ξεκινάνε από  $\frac{3\pi}{2}$  και καταλήγουν έως και “ $2\pi$ ” με γωνία περιστροφής κάθε φορά ίση με “*Specific\_round*” προκύπτουν από τις σχέσεις (4.83) και (4.84) οι τιμές των συντεταγμένων των “*Evenly Spaced Points*” κατά μήκος του κυκλικού τόξου του περιγράμματος πλήμνης.

$$equalxhub = x_c + R_c \cos(th) \quad (4.83)$$

$$equalyhub = y_c + R_c \sin(th) \quad (4.84)$$

Κατά την κατανομή των “*Evenly Space Points*” κατά μήκος του ευθυγράμμου τμήματος είναι κατανοητό ότι η μετακίνηση ως προς τον άξονα-*x* θα είναι μηδενική και η κατανομή των σημείων θα γίνει με την μεταβολή μόνο ως προς τον άξονα-*y* “*L\_y*”. Έτσι η μεταβολές αυτές εκφρασμένες σε συντεταγμένες προκύπτουν από τις σχέσεις (4.85)

και (4.86), όπου η πρώτη ορίζεται μόνο για το πρώτο “*Evenly Space Point*” κατά μήκος του ευθυγράμμου τμήματος ενώ η δεύτερη σχέση για τα υπόλοιπα σημεία.

$$L_{y_1} = y_c + R_c \sin(2\pi) + \frac{L}{nlp} \quad (4.85)$$

$$L_{y_i} = \frac{L}{nlp} + L_{y_{i-1}} \quad (4.86)$$

Όλα τα παραπάνω διακρίνονται στην εικόνα 4.5.10 σε μορφή κώδικα της Matlab.

```

130 %%% ALONG HUB %%%
131 % REMINDER: I ALREADY HAVE THE LENGHT OF THE CIRCULAR PART AND THE
132 % LENGHT OF THE STRAIGHT LINE SEGMENT FROM THE MAIN PROGRAMME STRUCTURE, AS Circle_hub_L & L
133 % RESPECTIVELY
134 hubs_total_lenght= Circle_hub_L + L;
135 equal_x = hubs_total_lenght/(Ne); %HERE IS REPRESENTED THE DISTANCE FROM THE EQUAL SPACED POINTS IF THE HUB CONTO
136 nlp = L/equal_x; %NUMBER OF THE POINTS WHICH CAN BE ON THE LENGTH OF THE STRAIGHT LINE AT THE EXIT
137 if fix(nlp + 1) - nlp <= 0.5 % THE NUMBER OF THE POINTS MUST BE AN INTEGER. IF THE NUMBER IS DECIMAL MUST BE CHOOSE
138     nlp = fix(nlp) + 1; %WITH FIX I TAKE THE INTEGER PART OF NLP
139 else
140     nlp = fix(nlp);
141 end
142 specific_round = pi/(2*(Ne-1-nlp)); %CALCULATES THE DEGREES OF THE EQUALLY SPACE P
143 th=3*pi/2:specific_round:2*pi; %IS THE ANGLE (th) WITH HER LIMITS, WHICH IS TURN EVERY TIME FOR 0.01 DEGREES
144 equalxhub=xc +(Rc*cos(th)); %X-COORDINATE EQUATION FOR THE FIGURE
145 equalyhub=yc +(Rc*sin(th)); %Y-COORDINATE EQUATION FOR THE FIGURE
146 L_y(1)= yc + (Rc*sin(2*pi))+ L/nlp; %THIS IS THE FIRTS POINT OF THE EQUAL SPACED POINTS ALONG THE STRAIGHT LINE S
147 for i=2:nlp
148     L_y(i) = L/nlp + L_y(i-1); %THESE ARE THE EQUAL SPACED POINTS ALONG THE STRAIGHT LINE SEGMENT OF THE HUB CONT
149 end
150 equalxhub(1)=0;

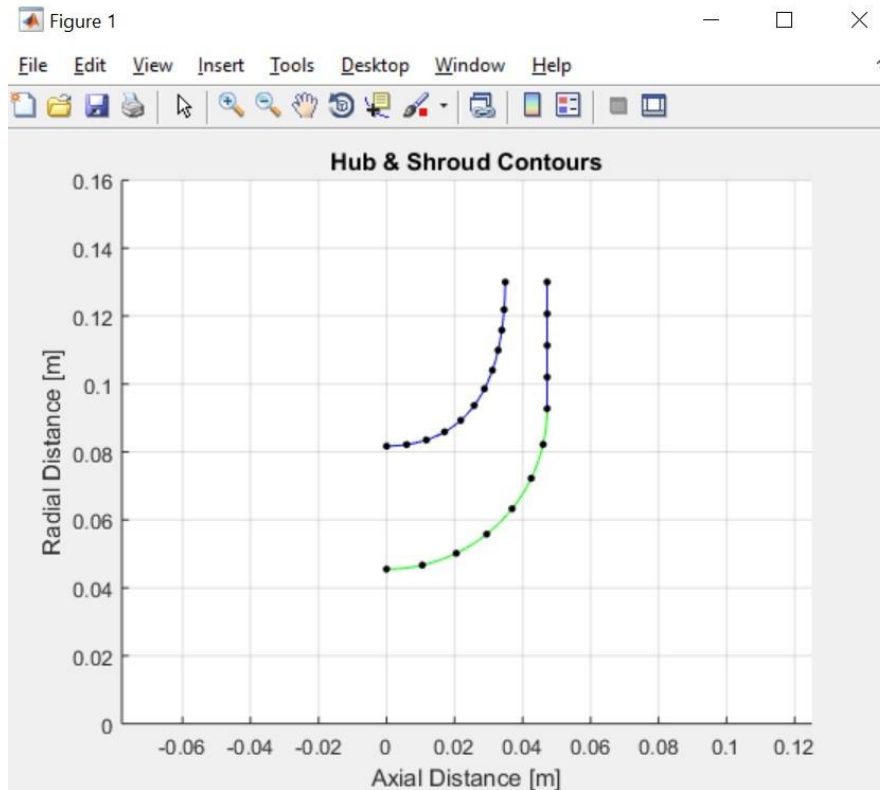
```

**Εικόνα 4.5.10.**

Στο σημείο αυτό η συνάρτηση “*Evenly\_Space\_Points*” ολοκληρώνεται και επιστρέφει τις απαραίτητες τιμές στο βασικό πρόγραμμα “*RadialCompressorCalculationTool*” το οποίο με την σειρά του δημιουργεί γραφικά τα “*Evenly Spaced Points*” κατά μήκος των περιγραμμάτων πλήμνης και κελύφους. Τα εν λόγω σημεία διακρίνονται με μαύρες τελείες κατά μήκος του περιγράμματος πλήμνης



και κελύφους στην εικόνα 4.5.11 η οποία προέρχεται από το γραφικό περιβάλλον το οποίο έχει δημιουργήσει ο αλγόριθμος ο οποίος έχει κατασκευαστεί.



**Εικόνα 4.5.11 :** Παρουσίαση των σημείων “Evenly Spaced Points” κατά μήκος των περιγραμμάτων πλήμνης και κελύφους.

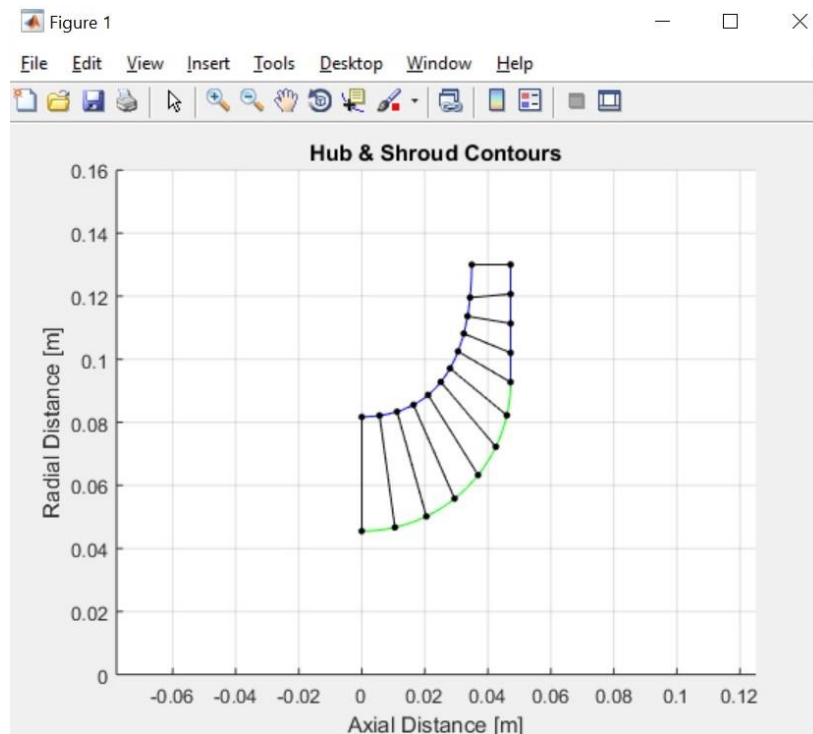
Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας κατανομής των “Evenly Space Points” ακολουθεί η γραφική απεικόνιση των “quasi-normal”. Ο κώδικας παίρνοντας από κάθε περίγραμμα τις συντεταγμένες των σημείων που είναι κατανεμημένα σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους ανά περίγραμμα συνδέει κάθε “Evenly Spaced Point” του περιγράμματος πλήμνης με το αντίστοιχο “Evenly Spaced Point” του περιγράμματος του κελύφους. Ο προγραμματισμός της διαδικασίας αυτής διακρίνεται στην εικόνα 4.5.12, ενώ το γραφικό αποτέλεσμα που προκύπτει φαίνεται στην εικόνα 4.5.13.

```

172- %%%% QUASI_NORMAL_CONNECTION %%%%
173- j=1;
174- for k=1:Ne %THIS LOOP WILL GENERATE THE QUASI-NORMALS BETWEEN THE HUB AND SHROUD CONTOURS
175-     if k~=1 && equalxhub(k-1)== Rc %THIS IF IS ABOUT THE POINTS OF THE STRAIGHT LINE SEGMENT AT THE END OF HUB CO
176-         equalxhub(k)= Rc;
177-         equalyhub(k)=L_y(j);
178-         if j > nlp %THIS REPRESENTS THAT WE CONNECT ALL THE QUASI-NORMALS ALONG THE STRAIGHT LINE SEGMENT OF HUB
179-             break
180-         else
181-             j=j+1;
182-         end
183-     end
184-     pos1 = [equalxshroud(k) equalxhub(k)]; %P1 IS A VECTOR WITH THE X-POSITIONS OF THE HUB AND SHROUD CONTOURS
185-     pos2 = [equalyshroud(k) equalyhub(k)]; %P2 IS A VECTOR WITH THE Y-POSITIONS OF THE HUB AND SHROUD CONTOURS
186-     plot(pos1,pos2,'k'); %PLOTS THE QUASI-NORMALS FROM THE HUB TO SHROUD
187- end
188- %%%% QUASI_NORMAL_CONNECTION %%%%

```

Εικόνα 4.5.12



Εικόνα 4.5.13.

4.6 Υπολογισμός της κατανομής των γωνιών του πτερυγίου κατά μήκος των περιγραμμάτων πλήμνης και κελύφους (Blade angle distribution along hub and shroud contours).

Στην υποενότητα 4.6 θα περιγραφτεί η διαδικασία η οποία δημιουργήθηκε για τον υπολογισμό της κατανομής των γωνιών του πτερυγίου κατά μήκος των περιγραμμάτων της πλήμνης και του κελύφους. Επιπλέον επιλέχθηκε να συνταχθεί προγραμματιστικά η διαδικασία της εύρεσης και αποθήκευσης των γωνιών του πτερυγίου σε κάθε σημείο στο οποίο υπάρχει ένα quasi-normal (Δηλαδή σε κάθε “Evenly Spaced Point”). Για την εύρεση των παραπάνω το κυρίως πρόγραμμα καλεί συνάρτηση με όνομα “Blade\_Angle\_Distribution”. Επιπλέον στην συνάρτηση αυτή προγραμματίζεται και η γραφική απεικόνιση των κατανομών αυτών.

Η συνάρτηση “Blade\_Angle\_Distribution” δέχεται ως ορίσματα τις παρακάτω μεταβλητές :

- Το σύνολο των συντεταγμένων οι οποίες αναφέρονται στον άξονα-γ και αφορούν τα “Evenly Spaced Points” τα οποία είναι κατανεμημένα κατά μήκος του περιγράμματος της πλήμνης. Αυτό το σύνολο συντεταγμένων συμβολίζεται ως “equalyhub”.
- Την γωνία του πτερυγίου στην έξοδο της πτερωτής “ $\beta_2$ ” ή όπως συμβολίζεται στον κώδικα “b2angle”.
- Το συνολικό μήκος του περιγράμματος της πλήμνης “Total\_Hub\_Lenght”.
- Τον αριθμό των σημείων τα οποία έχουν κατανεμηθεί σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους “ $N_e$ ”.
- Το μήκος του ευθυγράμμου τμήματος στο τέλος του περιγράμματος της πλήμνης “L”.
- Την ακτίνα του κυκλικού τόξου που απαρτίζει σε συνδυασμό με το παραπάνω ευθύγραμμο τμήμα το περίγραμμα της πλήμνης “ $R_c$ ”.
- Την ακτίνα του περιγράμματος της πλήμνης στην είσοδο της πτερωτής “ $r_{1h}$ ”.
- Την τιμή της μεταβλητής “Final\_rep”.

Ενώ επιστρέφει στο κυρίως πρόγραμμα τις τιμές των εξής μεταβλητών :

- Τις αδιάστατες τιμές της απόστασης οι οποίες υπολογίζονται κατά την κίνηση από την είσοδο της πτερωτής προς την έξοδο. Με τον συμβολισμό “Zita” εννοείται η αδιάστατη απόσταση η οποία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της κατανομής της γωνίας του πτερυγίου, ενώ με “zita” συμβολίζεται η αδιάστατη απόσταση στην οποία βρίσκονται τα “Evenly Spaced Points” ή αλλιώς τα “quasi-normals” κατά μήκος του περιγράμματος της πλήμνης.

- Τις κατανομές των γωνιών του περυγίου στην πλήμνη και στο κέλυφος “ $bh_{noqh}$ ” & “ $bs_{noqh}$ ”. Οι γωνίες αυτές αναφέρονται μόνο για τα σημεία στα οποία υπάρχει “*Evenly Spaced Point*”.
- Τις κατανομές των γωνιών του περυγίου στην πλήμνη και στο κέλυφος κατά μήκος όλου του περιγράμματος “ $bh$ ” & “ $bs$ ”.

Κατά την διαδικασία υπολογισμού της κατανομής των γωνιών του περυγίου κατά μήκος των περιγραμμάτων θα υιοθετηθεί η μέτρηση της απόστασης σε αδιάστατη μορφή. Η αδιάστατη αυτή μορφή μήκους θα εκφράζει σε ποσοστό την απόσταση που έχει διανυθεί μέχρι ένα σημείο ως προς το συνολικό μήκος του εκάστοτε περιγράμματος. Επειδή θα υπολογιστούν δύο είδη κατανομών, μια για κάθε σημείο στο οποίο υπάρχει ένα “*Evenly Spaced Point*” και μια για ένα σύνολο χιλίων σημείων κατά μήκος του περιγράμματος θα χρησιμοποιηθούν δύο εκφράσεις της αδιάστατης μορφής της απόστασης. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω για την περίπτωση της κατανομής που αναφέρεται στα “*Evenly Spaced Points*” η απόσταση θα εκφράζεται ως “ $zita(i)$ ” ενώ για την κατανομή των χιλίων σημείων κατά μήκος των περιγραμμάτων ως “ $Zita(i)$ ”.

Το πρώτο βήμα το οποίο θα εκτελέσει η συνάρτηση είναι αυτό της εύρεσης της βέλτιστης τιμής του συντελεστή “ $K$ ” ο οποίος χρησιμοποιείται για την εύρεση των γωνιών του περυγίου. Όπως αναφέρθηκε και στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο ο συντελεστής “ $K$ ” παίρνει την αρχική τιμή « $K=0.15$ ». Η τιμή του συντελεστή “ $K$ ” δεν πρέπει να υπερβαίνει την μονάδα ( $K \leq 1$ ). Σε καμία από τις βιβλιογραφίες πάνω στις οποίες έχει βασιστεί η συγκεκριμένη διατριβή δεν παρέχεται κάποια εκτίμηση της τιμής της εν λόγω μεταβλητής. Η αρχική τιμή « $0.15$ » προέκυψε μετά από εκτεταμένες δοκιμές. Παρόλα αυτά δημιουργήθηκε η διαδικασία κατά την οποία ελέγχονται όλες οι τιμές πάνω από το « $0.15$ » έως και την μονάδα, οι οποίες μπορεί να δώσουν καλύτερης ακρίβειας αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα τα οποία ελέγχονται είναι αυτά της γωνίας του περυγίου στην έξοδο της περωτής στην πλήμνη “ $bh$ ” αλλά και στο κέλυφος “ $bs$ ”. Αυτές οι τιμές θα πρέπει να συγκλίνουν μεταξύ τους και ταυτόχρονα να συγκλίνουν με την τιμή της γωνίας της σχετικής ταχύτητας η οποία βρέθηκε από το τρίγωνο ταχυτήτων στην έξοδο της περωτής “ $\beta_2$ ”. Επίσης για κάθε τιμή του “ $K$ ” θα πρέπει οι γωνίες που προκύπτουν να είναι αρνητικές. Για την τιμή του συντελεστή “ $K=0.15$ ” και για τα δεδομένα τα οποία έχουν εισαχθεί για την διεκπεραίωση του κώδικα οι γωνίες της πλήμνης και του κελύφους στην έξοδο της περωτής συγκλίνουν τουλάχιστον μέχρι και το έκτο δεκαδικό ψηφίο, ενώ οι δύο αυτές γωνίες σε σχέση με την γωνία η οποία υπολογίστηκε μέσω του τριγώνου ταχυτήτων συγκλίνουν μέχρι και το πέμπτο δεκαδικό ψηφίο.

Για να βρεθεί η βέλτιστη τιμή του συντελεστή “ $K$ ” θα ελεγχθούν μόνο τα δεδομένα στην έξοδο της πτερωτής. Συνεπώς η τιμή της αδιάστατης απόστασης “ $Zita$ ” θα τεθεί ίση με την μονάδα μιας και η διαδικασία θα εκτελεί πράξεις στο 100% του συνολικού μήκους κάθε περιγράμματος.

Για τους υπολογισμούς των γωνιών αυτών χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις (3.38),(3.39),(3.40),(3.41),(3.42) και (3.43). Οι σχέσεις αυτές καθώς και η παραπάνω διαδικασία σε προγραμματιστικό περιβάλλον της Matlab φαίνονται στην εικόνα 4.6.1 και στην εικόνα 4.6.2.

```

1  %THIS FUNCTION WILL CALCULATE THE BLADE ANGLES ALONG HUB AND SHROUD
2  %CONTOURS AS A DISTRIBUTION. ALSO WILL CALCULATE THE BLADE ANGLES ALONG THE
3  %HUB AND SHROUD AT THE POINTS WHICH THERE IS A QUASI-NORMAL.
4
5  function [Zita,zita,bhnoqn,bsnoqn,bh,bs] = Blade_Angle_Distribution(equalyhub,b2angle,bh1,bs1,Total_Hub_Lenght,Ne,L,R
6
7  %BLADE ANGLE DISTRIBUTION ALONG HUB AND SHROUD %
8  %FINDS THE CORRECT (K) %
9
10 K = 0.15; %THE STARTING VALUE OF THE PARAMETER OF K
    Zita = 1;
    i=0;

```

**Εικόνα 4.6.1:** Αρχικό τμήμα κώδικα της συνάρτησης “Blade\_Angle\_Distribution”

```

11 while 1
12     if K > 1
13         fprintf('The K is greater than 1 \n');
14         break
15     end
16     bhmean = 90*K + (((1-K)*(b2angle + bh1))/2); %BLADE ANGLE AT MID-PASSAGE ALONG THE HUB
17     A = (-4)*(b2angle - (2*bhmean) + bh1);
18     B = (11*b2angle) - (16*bhmean) + (5*bh1);
19     C = ((-6)*b2angle) + (8*bhmean) - (2*bh1);
20     bs = bs1 + ((b2angle-bs1)*(3*(Zita^2)-(2*(Zita^3)))); %BLADE ANGLE AT THE HUB ALONG THE IMPELLER
21     bh = bh1 + A*Zita + B*(Zita^2) + C*(Zita^3); %BLADE ANGLE AT THE SHROUD ALONG THE IMPELLER
22     if abs(abs(bh)-abs(bs)) < 0.03 && bh < 0 %CHECK IF THE ANGLES CONVERGE
23         if final_rep == 0
24             fprintf('The K is equal to %f and bh=%f & bs=%f \n',K,bh,bs);
25             end
26             break
27         else
28             K = K + 0.0001;
29         end
30     end
31 %FINDS THE CORRECT (K) %

```

**Εικόνα 4.6.2 :** Διαδικασία εύρεσης της βέλτιστης τιμής του συντελεστή “ $K$ ”.

Με την εύρεση της βέλτιστης τιμής του συντελεστή “ $K$ ” ακολουθεί η εύρεση της κατανομής της γωνίας του περυγίου κατά μήκος των περιγραμμάτων πλήμνης και κελύφους. Για την διεξαγωγή της παραπάνω διαδικασίας θα χρησιμοποιηθεί

επαναληπτική διαδικασία τύπου “While 1” καθώς και μια μεταβλητή κλειδί με όνομα “distance” η οποία συμβολίζει την απόσταση στην οποία βρίσκεται η επαναληπτική διαδικασία στην συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Η μεταβλητή “distance” στην συνέχεια θα διαιρείται με το συνολικό μήκος του περιγράμματος πλήμνης έτσι ώστε να προκύπτει η αδιάστατη μορφή της απόστασης “Zita(i)”. Στο τέλος κάθε επανάληψης και μέχρι η τιμή της απόστασης “Zita(i)” να γίνει ίση με την μονάδα, η τιμή της μεταβλητής “distance” θα αυξάνεται κατά ένα εκατοστό του χιλιοστού «distance = distance + 0.0001». Ουσιαστικά είναι σαν να γίνονται μικρά βήματα της τάξης του «0.0001» κάθε φορά κατά μήκος του περιγράμματος πλήμνης. Έτσι η τιμή της αδιάστατης απόστασης προκύπτει από την εξίσωση (4.87) ως εξής.

$$Zita(i) = \frac{distance}{Total\_Hub\_Lenght} \quad (4.87)$$

Ο τρόπος υπολογισμού της κατανομής των γωνιών χρησιμοποιεί τις ίδιες ακριβώς εξισώσεις με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση της βέλτιστης τιμής του συντελεστή “K”. Παρόλα αυτά υπάρχουν κάποιες διαφοροποιήσεις οι οποίες αντιπροσωπεύουν ελέγχους που αφορούν την ακρίβεια της αδιάστατης απόστασης “Zita”. Η διαδικασία εύρεσης της κατανομής των γωνιών κατά μήκος των περιγραμμάτων πλήμνης και κελύφους “Blade angle distribution along hub and shroud contours” παρουσιάζεται στην εικόνα 4.6.3.

```

33 %%%% BLADE ANGLE DISTRIBUTION ALONG THE HUB AND SHROUD %%%%
34 distance = 0;
35 k = 1;
36 while 1
37     Zita(k) = distance/(Total_Hub_Lenght); %DIMENSIONLESS DISTANCE
38     if Zita(k) > 1
39         if Zita(k)-1 > 0.001
40             fprintf('Problem with Zita on the calculation of blade angle distribution\n');
41         else
42             Zita(k)=1;
43         end
44     end
45     bs(k) = bs1 + (b2angle-bs1)*(3*(Zita(k)^2)-(2*(Zita(k)^3))); %BLADE ANGLE AT THE HUB ALONG THE IMPELLER
46     bh(k) = bh1 + A*Zita(k) + B*(Zita(k)^2) + C*(Zita(k)^3);
47     k = k+1;
48     if distance-(Total_Hub_Lenght) >= 0
49         break
50     end
51     distance = distance + 0.0001; %BECAUSE IT IS DISTRIBUTION THE DISTANCE INCREASES IN EVERY REP
52 end

```

**Εικόνα 4.6.3:** Διαδικασία εύρεσης της κατανομής των γωνιών του πτερυγίου κατά μήκος των περιγραμμάτων πλήμνης και κελύφους “Blade angle distribution along hub and shroud contours”.

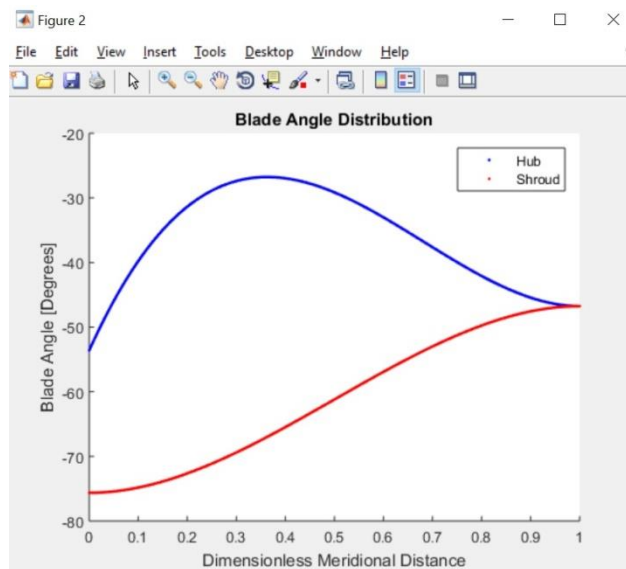
Στην εικόνα 4.6.4 διακρίνεται η κωδικοποίηση για την γραφική αναπαράσταση της κατανομής της γωνίας του πτερυγίου, ενώ στην εικόνα 4.6.5 φαίνεται η εν λόγω κατανομή. Με την μπλε συνεχόμενη γραμμή διακρίνεται η κατανομή της γωνίας του πτερυγίου κατά μήκος της πλήμνης ενώ με κόκκινο χρώμα η κατανομή της γωνίας του πτερυγίου κατά μήκος του περιγράμματος του κελύφους. Αυτό που πρέπει να τονιστεί είναι ότι οι δύο καμπύλες της κατανομής των γωνιών πρέπει να καταλήγουν στο ίδιο σημείο στο τέλος των περιγραμμάτων. Αυτό πρέπει να συμβαίνει διότι η πτερωτή θα πρέπει να επαληθεύει το τρίγωνο ταχυτήτων που ήδη έχει υπολογιστεί στην έξοδο.

```

53 - figure
54 - hold on
55 - axis normal
56 - plot(Zita,bh,'b');%PLOTS THE BLADE ANGLE DISTRIBUTION ALONG THE HUB CONTOUR
57 - plot(Zita,bs,'r');%PLOTS THE BLADE ANGLE DISTRIBUTION ALONG THE SHROUD CONTOUR
58 - xlabel('Dimensionless Meridional Distance');
59 - ylabel('Blade Angle [Degrees]');
60 - title('Blade Angle Distribution');
61 - legend('Hub','Shroud');
62 - %%% BLADE ANGLE DISTRIBUTION ALONG THE HUB AND SHROUD %%%
63
64 - %%% NUMBER OF POINTS AT THE STRAIGHT LINE SEGMENT %%%
65 - L_number_points = nlp;
66 - %%% NUMBER OF POINTS AT THE STRAIGHT LINE SEGMENT %%%

```

**Εικόνα 4.6.4:** Κωδικοποίηση που απαιτείται για την γραφική αναπαράσταση της κατανομής των γωνιών κατά μήκος των πτερυγίων.



**Εικόνα 4.6.5 :** Γραφική αναπαράσταση της κατανομής της γωνίας του πτερυγίου κατά μήκος των περιγραμμάτων πλήμνης και κελύφους. Με μπλε χρώμα διακρίνεται η κατανομή κατά μήκος της πλήμνης ενώ με κόκκινο κατά μήκος του κελύφους.

Η τελευταία διαδικασία την οποία φέρνει εις πέρας η συνάρτηση “*Blade\_Angle\_Distribution*” είναι αυτή του υπολογισμού της γωνίας του πτερυγίου σε κάθε θέση όπου υπάρχει κάποιο “*Evenly Spaced Point*”. Σε αυτή την διαδικασία οι γωνίες συμβολίζονται με τον δείκτη “*noqn*” ο οποίος προέρχεται από την συντομογραφία του “*number of quasi-normal*”. Και σε αυτό το τμήμα του κώδικα για την εύρεση των γωνιών θα χρησιμοποιηθούν οι ίδιες εξισώσεις με τα δύο προηγούμενα τμήματα ενώ θα διαφοροποιηθεί ο τρόπος με τον οποίο υπολογίζεται η αδιάστατη απόσταση “*zita*”. Η διαδικασία αυτή την φορά έχει συνταχθεί με μια δομή επανάληψης τύπου “*For*” η οποία τερματίζει όταν ελέγξει και την τελευταία θέση στην οποία υπάρχει κάποιο “*Evenly Spaced Point*”. Στο εσωτερικό της δομής επανάληψης υπάρχει μια διαδικασία ελέγχου η οποία ελέγχει εάν το σημείο για το οποίο θα βρεθεί η γωνία του πτερυγίου βρίσκεται επάνω στο ευθύγραμμο τμήμα στο τέλος του περιγράμματος της πλήμνης και ανάλογα το αποτέλεσμα καθορίζει την τιμή της αδιάστατης απόστασης. Για την εύρεση της αδιάστατης απόστασης χρησιμοποιείται ξανά μεταβλητή ίδιου σκοπού με την μεταβλητή “*distance*”, αλλά αυτή την φορά συμβολισμένη ως “*dist(noqn)*”. Στην περίπτωση όπου το σημείο βρίσκεται επάνω στο ευθύγραμμο τμήμα τότε η μεταβλητή “*dist(noqn)*” βρίσκεται από την σχέση (4.88) ενώ εάν δεν βρίσκεται επάνω στο ευθύγραμμο τμήμα από την σχέση (4.89). Επιπλέον η αδιάστατη απόσταση υπολογίζεται από την σχέση (4.90) .

$$dist(noqn) = \frac{\pi R_c(noqn - 1)}{2(N_e - L\_number\_points)} \quad (4.88)$$

$$dist(noqn) = \frac{2\pi R_c}{4} + kls\left(\frac{L}{nlp}\right) \quad (4.89)$$

$$zita(noqn) = \frac{dist(noqn)}{Total\_Hub\_Lenght} \quad (4.90)$$

Ο συντελεστής “*kl*” λειτουργεί ως μετρητής ο οποίο συμβολίζει πόσα σημεία “*Evenly Spaced Points*” έχουν τοποθετηθεί/ελεγχθεί κατά μήκους του κυκλικού τόξου του περιγράμματος της πλήμνης. Τα παραπάνω παρουσιάζονται σε μορφή κώδικα στην εικόνα 4.6.6 και 4.6.7, ενώ η κωδικοποίηση για την γραφική αναπαράσταση της



κατανομής της γωνίας του πτερυγίου στα “Evenly Spaced Points” κατά μήκος των περιγραμμάτων φαίνεται στην εικόνα 4.5.8.

```

68 %%%% BLADE ANGLES OF EVENLY SPACE POINTS ALONG THE HUB AND SHROUD CONTOUR %%%%
69 kls = 0;%COUNTS IF WE ARE IN THE STRAIGHT LINE SEGMENT
70 for noqn=1:Ne % NOQN IS (NUMBER OF QUASI NORMAL)
71     if equallyhub(noqn) <= (Rc + rlh)
72         tht(noqn)=(180/pi)*(3*pi/2 + (noqn-1)*pi/(2*(Ne-L_number_points))); %DEGREES WHICH IS ROTATED THE NOQN FR
73         dist(noqn) = Rc*(noqn-1)*pi/(2*(Ne-L_number_points)); %THE REAL DISTANCE (LENGHT) OF THE POINT NOQN ON TH
74     else
75         kls = kls+1;
76         dist(noqn) = (2*pi*Rc/4) + (kls*(L/nlp));%DIST. IS SYMBOLIZED THE LENGTH OF THE POINT
77     end
78     zita(noqn) = dist(noqn)/(Total_Hub_Lenght); % IS THE DIMENSIONAL LENGHT IN PERCENT
79     bsnogn(noqn) = bs1 + ((b2angle-bs1)*(3*(zita(noqn)^2) - (2*(zita(noqn)^3))));%BLADE ANGLE AT THE HUB ALONG TH
80     bhnogn(noqn) = bh1 + A*zita(noqn) + B*(zita(noqn)^2) + C*(zita(noqn)^3);%BLADE ANGLE AT THE SHROUD ALONG THE
81 end

```

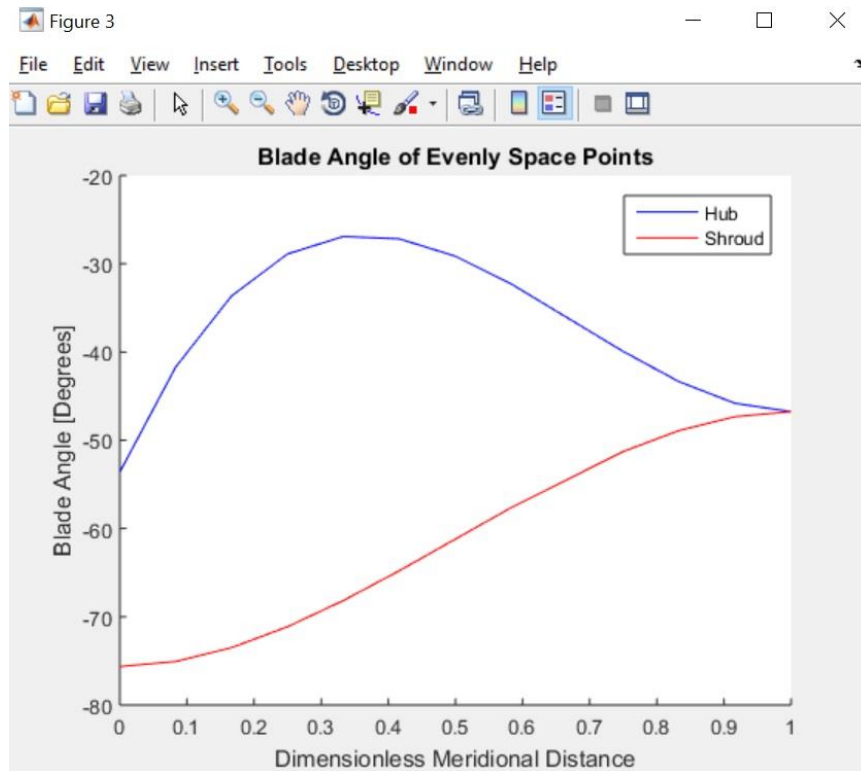
**Εικόνα 4.6.6:** Διαδικασία εύρεσης της κατανομής των γωνιών του πτερυγίου για κάθε σημείο στο οποίο υπάρχει κάποιο “Evenly Spaced Point”.

```

82 figure
83 hold on
84 plot(zita,bhnogn,'b');%PLOTS THE BLADE ANGLES ALONG THE HUB CONTOUR FOR THE EVENLY SPACED POINTS
85 plot(zita,bsnogn,'r');%PLOTS THE BLADE ANGLES ALONG THE SHROUD CONTOUR FOR THE EVENLY SPACED POINTS
86 xlabel('Dimensionless Meridional Distance');
87 ylabel('Blade Angle [Degrees]');
88 title('Blade Angle of Evenly Space Points');
89 legend('Hub','Shroud');
90 hold off
91 %%%% BLADE ANGLE DISTRIBUTION ALONG HUB AND SHROUD %%%%

```

**Εικόνα 4.6.7:** Παρουσίαση τρόπου κωδικοποίησης για την γραφική αναπαράσταση της κατανομής της γωνίας του πτερυγίου σε κάθε σημείο στο οποίο υπάρχει “Evenly Spaced Point”.



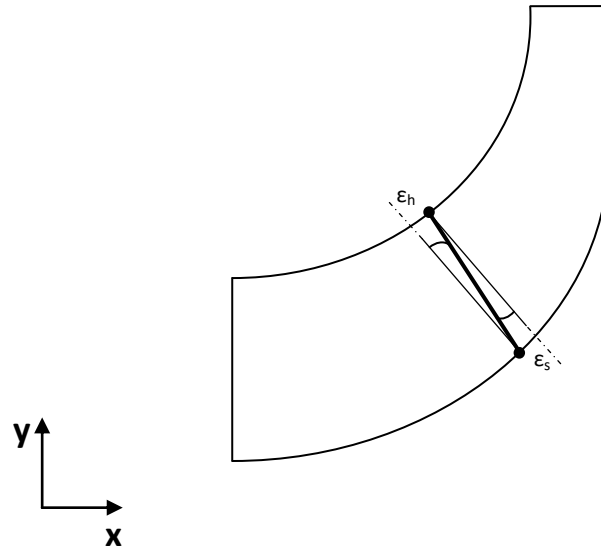
**Εικόνα 4.6.8 :** Γραφική αναπαράσταση της κατανομής της γωνίας του πτερυγίου σε κάθε σημείο στο οποίο υπάρχει “Evenly Spaced Point”. Με μπλε χρώμα διακρίνεται η κατανομή κατά μήκος της πλήμνης ενώ με κόκκινο κατά μήκος του κελύφους.

Η εικόνα 4.6.8 μοιάζει αρκετά την εικόνα 4.6.5 όμως οι δύο αυτές εικόνες διαφέρουν αισθητά ως προς την συνέχεια των καμπυλών και αυτό διότι η καμπύλες της εικόνας 4.6.5 είναι κατασκευασμένες συνολικά από χίλια σημεία. Αντιθέτως οι καμπύλες της εικόνας 4.6.8 αποτελούνται από “ $N_e$ ” σημεία η κάθε μια, όπου αυτά τα σημεία ενώνονται με ευθύγραμμα τμήματα έτσι ώστε η κατανομή να είναι πιο διακριτή οπτικά.

Σε αυτό το σημείο ολοκληρώνεται η συνάρτηση “*Blade\_Angle\_Distribution*” επιστρέφοντας στο κυρίως πρόγραμμα τις μεταβλητές που περιγράφηκαν παραπάνω και παρουσιάζοντας διαδραστικά τις καμπύλες της κατανομής της γωνίας του πτερυγίου κατά μήκος της πλήμνης και του κελύφους.

#### 4.7 Διαδικασία υπολογισμού γωνίας απόκλισης των quasi-normals “deviation angle” και ορισμός της μέσης γραμμής ροής “mean streamline”.

Όπως αναλύθηκε και στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο τα quasi-normals αποκλίνουν από τα κανονικά normals κατά μια γωνία η οποία ονομάζεται γωνία απόκλισης ή αλλιώς “deviation angle” και συμβολίζεται με το ελληνικό γράμμα “ $\varepsilon$ ”. Αυτή η γωνία απόκλισης είναι διαφορετική για κάθε quasi-normal. Επίσης ο R.H Aungier προτρέπει στην υιοθέτηση της παραδοχής ότι η γωνία απόκλισης του quasi-normal στην πλήμνη “ $\varepsilon_h$ ” είναι ίση και αντίθετη με την γωνία απόκλισης του ίδιου quasi-normal στο κέλυφος “ $\varepsilon_s$ ” και αυτό μπορεί να γίνει κατανοητό κοιτάζοντας το σχήμα 4.7.1 στο οποίο παρουσιάζεται σε ένα quasi-normal η γωνία απόκλισης.



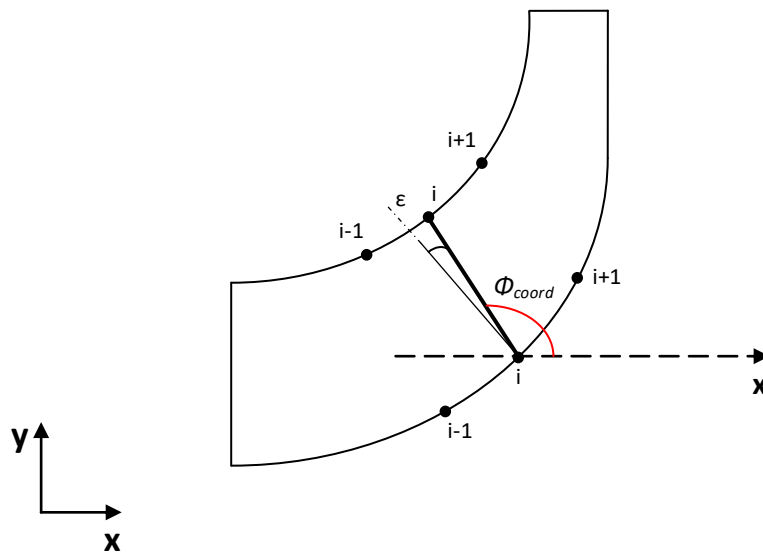
*Εικόνα 4.7.1 : Παρουσίαση γωνιών απόκλισης κατά μήκος του περιγράμματος πλήμνης “ $\varepsilon_h$ ” και κελύφους “ $\varepsilon_s$ ”.*

Έτσι με βάση τον R.H Aungier οι γωνίες απόκλισης ως εντός και εναλλάξ μεταξύ των δύο παράλληλων που σχηματίζουν οι ευθείες των normal θα είναι ίσες ως προς το μέτρο και με αντίθετο πρόσημο.

$$\varepsilon_h = -\varepsilon_s \quad (4.91)$$

Για τον υπολογισμό των γωνιών απόκλισης το κυρίως πρόγραμμα καλεί συνάρτηση με όνομα “*Deviation\_Angle*”. Ο τρόπος με τον οποίο στην συγκεκριμένη διατριβή υπολογίζεται η γωνία απόκλισης είναι διαφορετικός από αυτόν τον οποίο χρησιμοποιούν ο Johannes Schiff και ο R.H Aungier στα άρθρα στα οποία είναι βασισμένη η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία. Η συνάρτηση αποτελείται από δύο δομές επανάληψης. Και οι δύο δομές είναι τύπου “*For*” και ολοκληρώνονται όταν ελεγχθεί και το τελευταίο quasi-normal.

Ξεκινώντας στην πρώτη δομή επανάληψης θα υπολογιστεί η γωνία κλίσης του quasi-normal η οποία θα συμβολίζεται ως “ $\Phi_{coord}$ ”. Η γωνία αυτή διακρίνεται στο σχήμα 4.7.2, ενώ στην εικόνα 4.7.1 φαίνεται το αρχικό στάδιο της συνάρτησης.



**Σχήμα 4.7.2 :** Παρουσίαση γωνίας κλίσης “ $\Phi_{coord}$ ” του quasi-normal. Η γωνία διακρίνεται με το κόκκινο τόξο.

```

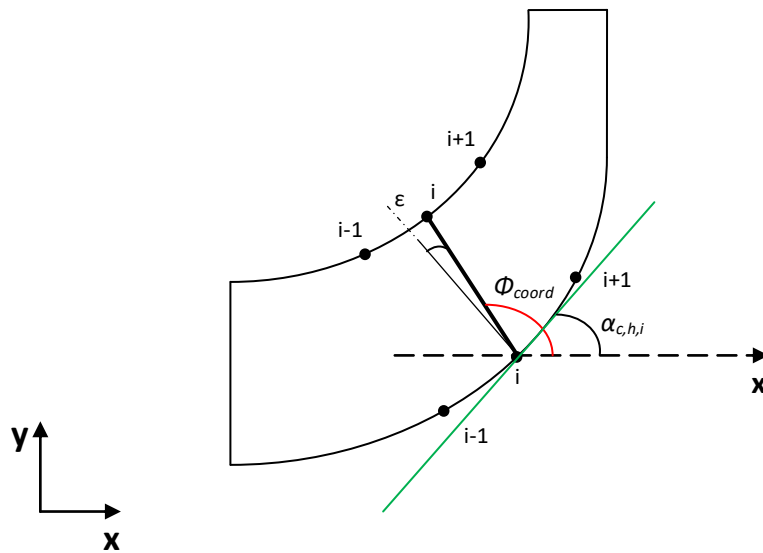
1  % THIS FUNCTION WILL CALCULATE THE DEVIATION ANGLE OF EVERY QUASI-NORM
2
3  function [deviation,ach,fcoord]=Deviation_Angle(equalxhub,equalxshroud,equalyhub,equalyshroud,Ne)
4
5  for i=1:Ne
6      if equalxshroud(i)-equalxhub(i) < 0
7          fcoord(i)= acosd((equalxshroud(i)-equalxhub(i))/(sqrt(((equalxshroud(i)-equalxhub(i))^2+((equalyshroud(i)-equalyhub(i))^2))))
8      else if equalyshroud(i)-equalyhub(i)<0
9          fcoord(i)= asind((equalyshroud(i)-equalyhub(i))/(sqrt(((equalxshroud(i)-equalxhub(i))^2+((equalyshroud(i)-equalyhub(i))^2))))
10     else
11         fcoord(i)= asind((equalyshroud(i)-equalyhub(i))/(sqrt(((equalxshroud(i)-equalxhub(i))^2+((equalyshroud(i)-equalyhub(i))^2))))
12     end
13 end

```

**Εικόνα 4.7.1:** Αρχικοί υπολογισμοί της συνάρτησης “*Deviation\_Angle*”.

Η γωνία " $\Phi_{coord}$ " υπολογίζεται μέσω των περιστρεφόμενων συστημάτων αναφοράς τα οποία περιγράφονται στο παράρτημα Α. Η διαδικασία θα γίνει μόνο για το ένα περίγραμμα, που εδώ επιλέγεται να είναι αυτό της πλήμνης. Έτσι στην συνέχεια θα υπολογιστούν οι συντεταγμένες του περιστρεφόμενου συστήματος αναφοράς για τα δεδομένα της πλήμνης. Στον κώδικα αυτά τα δεδομένα των συντεταγμένων συμβολίζονται ως " $xrothub(i)$ " και " $yrothub(i)$ " ενώ στην περιγραφή του παραρτήματος Α ως " $\chi$ " ο οριζόντιος άξονας και ως " $\eta$ " ο κάθετος άξονας.

Για τον υπολογισμό της γωνίας απόκλισης " $\varepsilon$ " θα πρέπει να πρώτα να βρεθεί η κλίση του τοπικού σημείου του περιγράμματος " $\alpha_{c,h}$ ". Για την εύρεση της τοπικής κλίσης του περιγράμματος θα χρησιμοποιηθεί μια διαδικασία κεντρικών διαφορών. Για την υλοποίηση της διαδικασίας αυτής και για το περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς που ορίζεται από το σημείο " $i$ " που διακρίνεται στο σχήμα 4.7.2 θα υπολογιστούν οι συντεταγμένες σε περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς του επόμενου σημείου στο οποίο υπάρχει quasi-normal καθώς και του προηγούμενου. Αυτά τα σημεία συμβολίζονται ως " $i+1$ " και " $i-1$ " αντίστοιχα, και διακρίνονται στο σχήμα 4.7.2. Η κλίση του τοπικού σημείο " $i$ " διακρίνεται στο σχήμα 4.7.3.



**Σχήμα 4.7.3 :** Παρουσίαση τοπικής κλίσης του σημείου " $i$ ". Με πράσινο διακρίνεται η εφαπτομένη που διέρχεται από το σημείο " $i$ " της οποίας η κλίση ταυτίζεται με του σημείου " $i$ " και ισούται με " $\alpha_{c,h,i}$ ".

Η διαδικασία για τον υπολογισμό της κλίσης του σημείου “ $i$ ” χωρίζεται σε τρία βασικά στάδια. Το πρώτο στάδιο είναι αυτό όπου το σημείο “ $i$ ” είναι το πρώτο σημείο του περιγράμματος. Σε αυτό το στάδιο δεν υπάρχει προηγούμενο σημείο στο οποίο συνδέεται κάποιο quasi-normal αλλά μόνο επόμενο. Το δεύτερο στάδιο είναι αυτό όπου το σημείο “ $i$ ” έχει και προηγούμενο αλλά και επόμενο σημείο στο οποίο συνδέεται κάποιο quasi-normal. Το τρίτο στάδιο είναι αυτό όπου το σημείο “ $i$ ” είναι το τελευταίο σημείο του περιγράμματος και συνεπώς δεν υπάρχει επόμενο σημείο σύνδεσης quasi-normal αλλά μόνο προηγούμενο.

Αυτά τα τρία στάδια δημιουργήθηκαν διότι η κλίση του σημείου “ $i$ ” προκύπτει ως η μέση τιμή της κλίσης του επόμενου και του προηγούμενου σημείου. Έτσι για το πρώτο και τελευταίο σημείο του περιγράμματος απαιτούνται διαφορετικές εκφράσεις της κλίσης από αυτές που χρησιμοποιούνται για τα ενδιάμεσα σημεία.

Για το πρώτο στάδιο θα υπολογιστούν σε περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς οι συντεταγμένες του σημείου “ $i$ ” και του σημείου “ $i+1$ ”. Στην συνέχεια θα υπολογιστεί από την εξίσωση (4.92) η κλίση μεταξύ των σημείων “ $i$ ” και “ $i+1$ ”.

$$\alpha_{c,h,2,+ \Delta n} = \cos^{-1} \left( \frac{\chi_{i+1} - \chi_i}{\sqrt{(\chi_{i+1} - \chi_i)^2 + (n_{i+1} - n_i)^2}} \right) \quad (4.92)$$

Στην περίπτωση όπου η διαφορά “ $\Delta n$ ” είναι θετική τότε ( $\Delta n > 0$ ):

$$\alpha_{c,h,i} = \alpha_{c,h,2,+ \Delta n} \quad (4.93)$$

Ενώ στην περίπτωση όπου η διαφορά “ $\Delta n$ ” είναι αρνητική τότε ( $\Delta n < 0$ ):

$$\alpha_{c,h,i} = 2\pi - \alpha_{c,h,2,+ \Delta n} \quad (4.94)$$

Για το δεύτερο στάδιο, όπου το σημείο “ $i$ ” έχει επόμενο και προηγούμενο σημείο στο οποίο συνδέεται κάποιο quasi-normal οι εξισώσεις μετατρέπονται ως εξής. Η κλίση μεταξύ των σημείων “ $i-1$ ” και “ $i$ ” υπολογίζεται από την εξίσωση (4.95).

$$\alpha_{c,h,1,+ \Delta n} = \cos^{-1} \left( \frac{\chi_i - \chi_{i-1}}{\sqrt{(\chi_i - \chi_{i-1})^2 + (n_i - n_{i-1})^2}} \right) \quad (4.95)$$

Στην περίπτωση όπου ( $\Delta n < 0$ ) τότε :

$$\alpha_{c,h,i,1,- \Delta n} = 2\pi - \alpha_{c,h,1,+ \Delta n} \quad (4.96)$$

Η κλίση μεταξύ των σημείων “ $i$ ” και “ $i+1$ ” προκύπτει ως εξής :

$$\alpha_{c,h,2,+ \Delta n} = \cos^{-1} \left( \frac{\chi_{i+1} - \chi_i}{\sqrt{(\chi_{i+1} - \chi_i)^2 + (n_{i+1} - n_i)^2}} \right) \quad (4.97)$$

Όπου στην περίπτωση που ισχύει ( $\Delta n < 0$ ) τότε :

$$\alpha_{c,h,i,2,- \Delta n} = 2\pi - \alpha_{c,h,2,+ \Delta n} \quad (4.98)$$

Με την εύρεση των κλίσεων του προηγούμενου και του επόμενου σημείου, μέσω της μέσης τιμής των δύο αυτών συντελεστών κλίσης θα προκύψει και η τιμή της κλίσης του σημείου “ $i$ ” από της σχέση (4.99).

$$\alpha_{c,h,i} = \frac{\alpha_{c,h,1,\pm \Delta n} + \alpha_{c,h,2,\pm \Delta n}}{2} \quad (4.99)$$

Τέλος στο τρίτο στάδιο της διαδικασίας θα βρεθεί η κλίση του τελευταίου σημείου του περιγράμματος. Αυτή η κλίση θα οριστεί από τα σημεία “ $i-1$ ” και “ $i$ ” και θα υπολογιστεί

μέσω των παρακάτω εξισώσεων. Στην περίπτωση όπου η μεταβολή “ $\Delta n$ ” είναι θετική τότε η κλίση βρίσκεται μέσω της σχέσης (4.100):

$$\alpha_{c,h,1,\Delta n} = \alpha_{c,h,i} = \cos^{-1}\left(\frac{\chi_i - \chi_{i-1}}{\sqrt{(\chi_i - \chi_{i-1})^2 + (n_i - n_{i-1})^2}}\right) \quad (4.100)$$

Ενώ σε περίπτωση όπου ( $\Delta n < 0$ ) τότε:

$$\alpha_{c,h,i} = 2\pi - \alpha_{c,h,1,\Delta n} \quad (4.101)$$

Με την εύρεση της τοπικής κλίσης του σημείου, ανεξάρτητα σε ποιο στάδιο ανήκει το συγκεκριμένο σημείο υπολογίζεται η μέση γωνία απόκλισης από την εξίσωση (4.102) ως εξής:

$$\varepsilon_{h,i} = \frac{3\pi}{2} - \alpha_{c,h,i} \quad (4.102)$$

Όλα τα παραπάνω σε κωδικοποιημένη μορφή διακρίνονται στις εικόνες (4.7.2),(4.7.3),(4.7.4) και (4.7.5).

```

14 - if i == 1 %FOR THE FIRST QUASI-NORMAL
15 -     xrothub(i)=equalxhub(i)*sind(fcoord(i))+equalyhub(i)*cosd(fcoord(i));%X-COORD. OF POINT OF INTEREST i IN THE
16 -     yrothub(i)=equalyhub(i)*sind(fcoord(i))+equalxhub(i)*cosd(fcoord(i));%Y-COORD. OF POINT OF INTEREST i IN THE
17 - %     xrotshroud(i)=equalxshroud(i)*sind(fcoord(i))+equalyhub(i)*cosd(fcoord(i));
18 - %     yrotshroud(i)=equalyshroud(i)*sind(fcoord(i))+equalxhub(i)*cosd(fcoord(i));%Y-COORD. OF POINT OF INTEREST
19 - xnextrot = equalxhub(i+1)*sind(fcoord(i))+equalyhub(i+1)*cosd(fcoord(i));%X-COORF. OF NEXT POINT OF INTEREST
20 - ynextrot = equalyhub(i+1)*sind(fcoord(i))+equalxhub(i+1)*cosd(fcoord(i));%Y-COORF. OF NEXT POINT OF INTEREST
21 - ach2plus = acosd((xnextrot-xrothub(i))/(sqrt((xnextrot-xrothub(i))^2 + (ynextrot-yrothub(i))^2)));%EQ. (C.3)
22 - if equalyhub(i+1)-equalyhub(i) > 0
23 -     ach2 = ach2plus;
24 - else
25 -     ach2 = 2*pi*(180/pi) - ach2plus;%EQ. (C.4)
26 - end
27 - %     ach(i)= 0;
28 -     ach(i)= (ach2);%SLOPE OF i QUASI-NORMAL AT THE HUB EQ. (C.5)

```

**Εικόνα 4.5.2:** Κωδικοποιημένη μορφή για την εύρεση της κλίσης του πρώτου σημείου του περιγράμματος.



```

29 - else if i == Ne
30 -     xrothub(i)=equalxhub(i)*sind(fcoord(i))+equalyhub(i)*cosd(fcoord(i));%X-COORD. OF POINT OF INTEREST i IN
31 -     yrothub(i)=equalyhub(i)*sind(fcoord(i))+equalxhub(i)*cosd(fcoord(i));%Y-COORD. OF POINT OF INTEREST i IN
32 -     %
33 -     %
34 -     xrotshroud(i)=equalxshroud(i)*sind(fcoord(i))+equalyhub(i)*cosd(fcoord(i));%X-COORD. OF POINT OF INTER
35 -     yrotshroud(i)=equalyshroud(i)*sind(fcoord(i))+equalxhub(i)*cosd(fcoord(i));%Y-COORD. OF POINT OF INTER
36 -     xbeforeerot = equalxhub(i-1)*sind(fcoord(i))+equalyhub(i-1)*cosd(fcoord(i));%X-COORF. FROM THE POINT BEFO
37 -     ybeforeerot = equalyhub(i-1)*sind(fcoord(i))+equalxhub(i-1)*cosd(fcoord(i));%Y-COORF. FROM THE POINT BEFO
38 -     ach2plus = acosd((equalxhub(i)-equalxhub(i-1))/(sqrt((equalxhub(i)-equalxhub(i-1))^2 + (equalyhub(i)-equ
39 -     if equalyhub(i)-equalyhub(i-1) > 0
40 -         ach1 = ach1plus;
41 -     else
42 -         ach1 = 2*pi*(180/pi) - ach1plus;%EQ. (C.2)
43 -     end
44 -     ach(i)= (ach1);%SLOPE OF i QUASI-NORMAL AT THE HUB EQ. (C.5)

```

*Εικόνα 4.7.3 : Κωδικοποιημένη μορφή για την εύρεση της κλίσης του τελευταίου σημείου του περιγράμματος.*

```

43 - else if i ~= 1 && i ~= Ne
44 -     xrothub(i)=equalxhub(i)*sind(fcoord(i))+equalyhub(i)*cosd(fcoord(i));%X-COORD. OF POINT OF INTEREST i IN THE
45 -     yrothub(i)=equalyhub(i)*sind(fcoord(i))+equalxhub(i)*cosd(fcoord(i));%Y-COORD. OF POINT OF INTEREST i IN THE
46 -     %
47 -     %
48 -     xrotshroud(i)=equalxshroud(i)*sind(fcoord(i))+equalyhub(i)*cosd(fcoord(i));%X-COORD. OF POINT OF INTEREST i
49 -     yrotshroud(i)=equalyshroud(i)*sind(fcoord(i))+equalxhub(i)*cosd(fcoord(i));%Y-COORD. OF POINT OF INTEREST i
50 -     xnextrot = equalxhub(i+1)*sind(fcoord(i))+equalyhub(i+1)*cosd(fcoord(i));%X-COORF. OF NEXT POINT OF INTEREST
51 -     ynextrot = equalyhub(i+1)*sind(fcoord(i))+equalxhub(i+1)*cosd(fcoord(i));%Y-COORF. OF NEXT POINT OF INTEREST
52 -     xbeforeerot = equalxhub(i-1)*sind(fcoord(i))+equalyhub(i-1)*cosd(fcoord(i));%X-COORF. FROM THE POINT BEFORE OF
53 -     ybeforeerot = equalyhub(i-1)*sind(fcoord(i))+equalxhub(i-1)*cosd(fcoord(i));%Y-COORF. FROM THE POINT BEFORE OF
54 -     ach1plus = acosd((equalxhub(i)-equalxhub(i-1))/(sqrt((equalxhub(i)-equalxhub(i-1))^2 + (equalyhub(i)-equalyhu
55 -     ach2plus = acosd((equalxhub(i+1)-equalxhub(i))/(sqrt((equalxhub(i+1)-equalxhub(i))^2 + (equalyhub(i+1)-equaly
56 -     if equalyhub(i)-equalyhub(i-1) > 0
57 -         ach1 = ach1plus;
58 -     else
59 -         ach1 = 2*pi*(180/pi) - ach1plus;%EQ. (C.2)
60 -     end
61 -     if equalyhub(i+1)-equalyhub(i) > 0
62 -         ach2 = ach2plus;
63 -     else
64 -         ach2 = 2*pi*(180/pi) - ach2plus;%EQ. (C.4)
65 -     end
66 -     ach(i)= 0.5*(ach1 + ach2);%SLOPE OF i QUASI-NORMAL AT THE HUB EQ. (C.5)

```

*Εικόνα 4.7.4 : Κωδικοποιημένη μορφή για την εύρεση της κλίσης των ενδιάμεσων σημείων του περιγράμματος.*

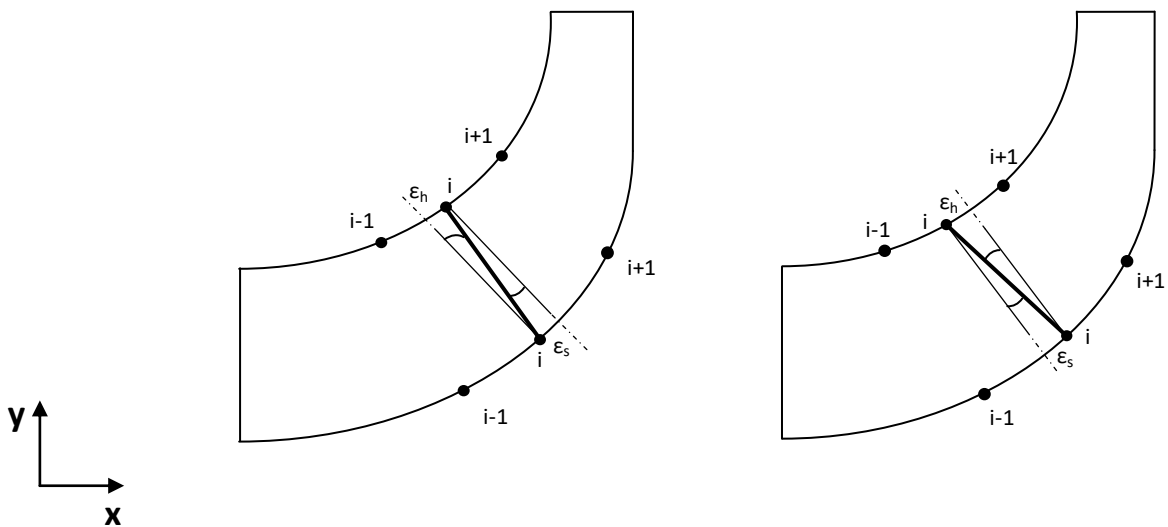
```

73  %%%% CALCULATION OF DEVIATION ANGLE MY WAY %%%%
74  for i=1:Ne
75      deviation(i) = ach(i) + 90 - fcoord(i); %IN DEGREES
76      if deviation(i) < 0 %THIS IS BECAUSE YOU DO NOT KNOW IF THE DEVIATION ANGLE IS BEFORE OR AFTER THE QUASI-NORM
77          deviation(i)=fcoord(i)-ach(i)-90;
78      end
79  end

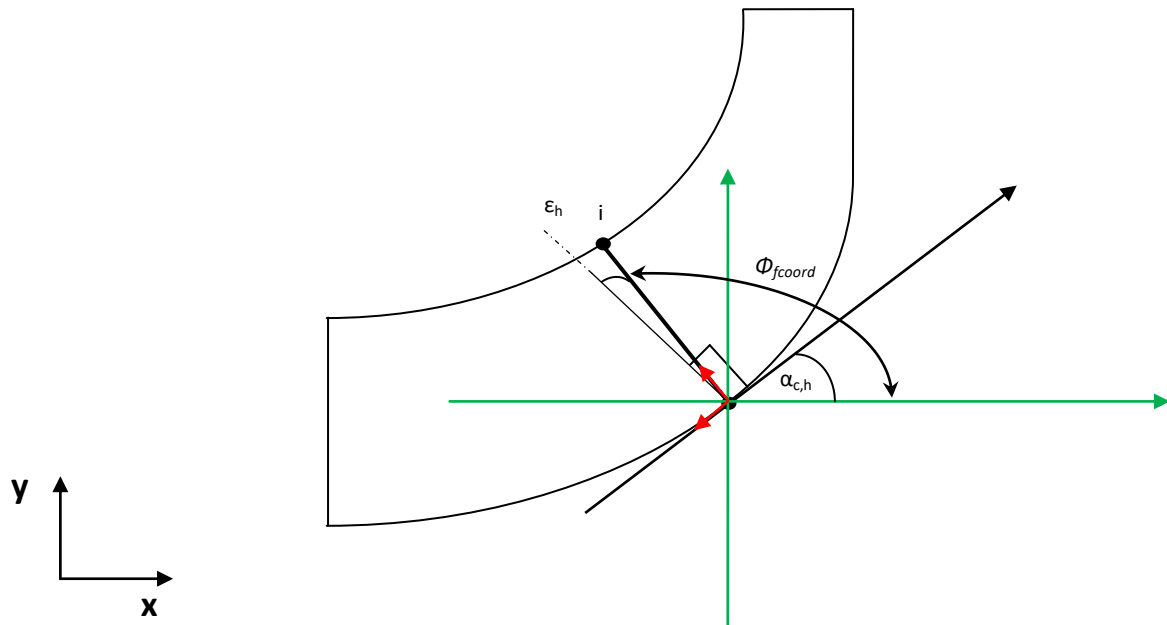
```

*Εικόνα 4.7.5: Τρόπος υπολογισμού της γωνίας απόκλισης του “i” quasi-normal.*

Παρόλο που η σχέση (4.102) δίνεται από της πηγές τις συγκεκριμένης διατριβής και δίνει έναν τρόπο υπολογισμού της γωνίας απόκλισης στην συγκεκριμένη διατριβή η γωνία απόκλισης υπολογίστηκε όπως διακρίνεται στην εικόνα 4.7.5. Κοιτάζοντας προσεκτικά τα σχήματα 4.7.5 και 4.7.6 μπορούν γεωμετρικά να προκύψουν οι τιμές της γωνίας απόκλισης. Το πρώτο πρόβλημα στο οποίο δίνει λύση ο τρόπος ο οποίος επινοήθηκε στην διατριβή αυτή είναι ότι σε περίπτωση όπου το σημείο της πλήμνης βρίσκεται σε τέτοιο γεωμετρικό τόπο ο οποίος αντιστρέφει την φορά των γωνιών απόκλισης θα βρεθεί και πάλι η τιμή της γωνίας απόκλισης με σωστό πρόσημο. Στο σχήμα 4.7.4 διακρίνεται η διαφορά στην κατεύθυνση της γωνίας απόκλισης.



*Σχήμα 4.7.4 : Σχηματική αναπαράσταση εναλλαγής κατεύθυνσης των γωνιών απόκλισης ανάλογα την γεωμετρική τοποθέτηση των “Evenly Spaced Points”.*



**Σχήμα 4.7.5:** Γεωμετρική αναπαράσταση γωνιών για την διεξαγωγή της εξίσωσης της γωνίας απόκλισης στην περίπτωση όπου βρίσκεται αριστερά από το *quasi-normal*. Με πράσινο χρώμα διακρίνονται οι άξονες  $(x,y)$  τοποθετημένοι επάνω στην αρχή του *quasi-normal*, με κόκκινο χρώμα διακρίνονται οι άξονες  $(x,h)$  του περιστρεφόμενου συστήματος αναφοράς και η εφαπτόμενη ευθεία που διέρχεται από το αρχικό σημείο του *quasi-normal* με μαύρο χρώμα.

Από το σχήμα 4.7.5 στο οποίο διακρίνεται η περίπτωση όπου η γωνία απόκλισης της πλήμνης βρίσκεται από την αριστερή πλευρά του *quasi-normal* προκύπτει από γεωμετρικές σχέσεις ότι:

$$\varepsilon = \alpha_{ci} + 90^\circ - \Phi_{coord} \quad (4.103)$$

Πρέπει να τονιστεί ότι η εφαπτομένη του σημείου είναι κάθετη ως προς το πραγματικό *normal* και όχι ως προς το *quasi-normal*. Στο σχήμα 4.7.6 διακρίνεται η περίπτωση όπου η γωνία απόκλισης της πλήμνης βρίσκεται δεξιά του *quasi-normal*. Έτσι και πάλι με γεωμετρικές σχέσεις η γωνία απόκλισης προκύπτει :

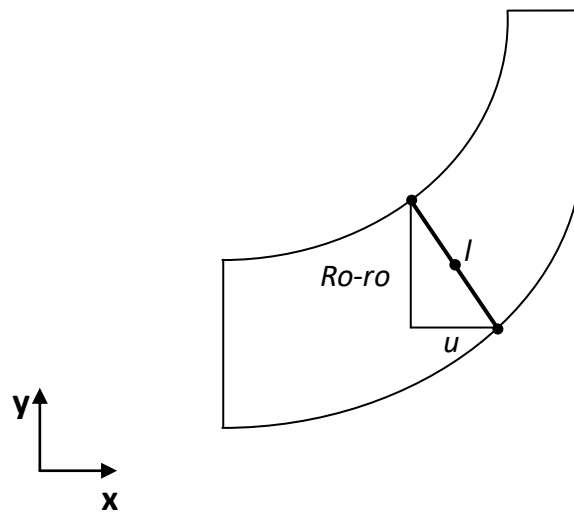


συγκεκριμένη διατριβή η εύρεση και η απεικόνιση της μέσης γραμμής ροής της πτερωτής βρίσκεται με έναν απλούστερο τρόπο ο οποίος προσεγγίζει της πραγματική γραμμή ροής.

Για την εύρεση της, θα πρέπει να προηγηθεί η εύρεση των συντεταγμένων των σημείων τα οποία χωρίζουν τα μήκη των quasi-normal στην μέση. Αυτές οι συντεταγμένες στον κώδικα ορίζονται ως “*xmean,ymean*” κατά αντιστοιχία των “ *$\bar{x}, \bar{y}$* ”.

Για την εύρεση των συντεταγμένων θα χρησιμοποιηθεί επαναληπτική διαδικασία τύπου “*For*” η οποία θα ξεκινήσει από το δεύτερο quasi-normal και θα τερματίσει όταν βρει και τις συντεταγμένες του προτελευταίου quasi-normal. Αυτό γίνεται διότι οι συντεταγμένες των μέσων για το πρώτο αλλά και το τελευταίο quasi-normal μπορούν εύκολα να βρεθούν αφού είναι εκ των προτέρων τα πάχη εισόδου και εξόδου γνωστά.

Ξεκινώντας η διαδικασία θα υπολογίσει τις τιμές των πλευρών του τριγώνου που δημιουργείται μεταξύ των “*Evenly Spaced Points*” σημείων που ορίζουν το quasi-normal. Το τρίγωνο αυτό διακρίνεται με κόκκινο χρώμα στο σχήμα 4.7.7.



**Σχήμα 4.7.7:** Παρουσίαση τριγώνου που δημιουργείται μεταξύ των σημείων που ορίζουν ένα quasi-normal.

Στο παραπάνω σχήμα ως “*ro*” συμβολίζεται η ακτίνα κατά την οποία απέχει το σημείο της πλήμνης από τον άξονα-*x*, ενώ ως “*Ro*” η αντίστοιχη ακτίνα ως προς το κέλυφος. Η υποτείνουσα της οποίας το μήκος ταυτίζεται με το μήκος του quasi-normal συμβολίζεται ως “*l*” ενώ το σημείο που συμβολίζει το μέσον του μήκους της διακρίνεται με την μαύρη κουκίδα. Η διαφορά ως προς τον άξονα-*x* “*u*” των δύο

σημείων που ορίζουν το quasi-normal βρίσκεται από τις συντεταγμένες των σημείων. Ομοίως βρίσκεται και η διαφορά κατά τον άξονα-γ η οποία συμβολίζεται ως “ $Ro-ro$ ”. Έτσι από το πυθαγόρειο θεώρημα μπορεί να βρεθεί το μήκος της υποτείνουσας “ $l$ ”.

$$l = \sqrt{(Ro - ro)^2 + u^2} \quad (4.105)$$

Στην συνέχεια θα δημιουργηθεί το τρίγωνο το οποίο αποτελείται από το αρχικό σημείο του quasi-normal καθώς και από το σημείο που ορίζει το μέσο του μήκους του quasi-normal. Το μήκος της υποτείνουσας του νέου τριγώνου θα προκύπτει ως :

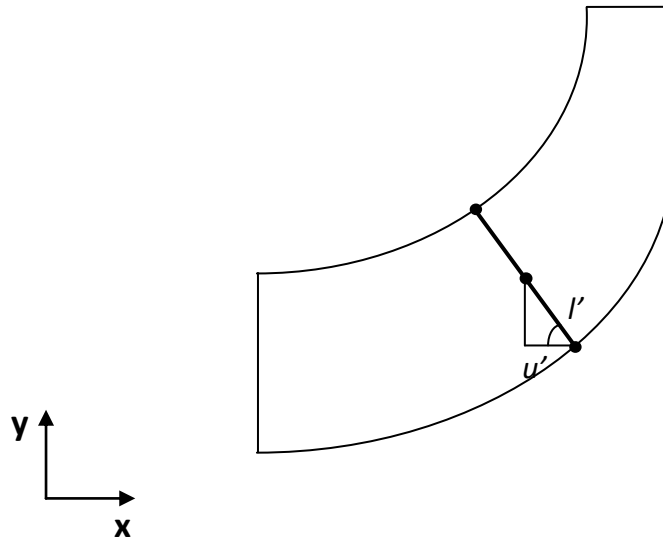
$$l' = \frac{l}{2} \quad (4.107)$$

Ενώ η διαφορά “ $u'$ ” ως προς τον άξονα-χ ως :

$$u' = l' \cos(\text{angle}(\text{noqn})) \quad (4.108)$$

Όπου ως “ $\text{angle}(\text{noqn})$ ” συμβολίζεται η γωνία του τριγώνου που διακρίνεται στο σχήμα 4.7.8 και υπολογίζεται ως :

$$\text{angle}(\text{noqn}) = 180^\circ - \Phi_{coord} \quad (4.109)$$



**Σχήμα 4.7.8 :** Σχηματική αναπαράσταση του τριγώνου που δημιουργείται μεταξύ του αρχικού σημείου του *quasi-normal* και του σημείου που χωρίζει το μήκος του στο μέσον.

Στην εικόνα 4.7.6 διακρίνονται όλοι οι παραπάνω υπολογισμοί για τον ορισμό των γεωμετρικών αυτών τόπων σε κωδικοποιημένη μορφή.

```

204 %%%% CALCULATION AND PLOT OF MEAN STREAM-LINE LENGHT %%%%
205 for noqn=2:Ne-1
206     %%%% AN EASIER WAY TO UNDERSTAND THE BELOW IS TO DRAW THE NECESSERY INFORMATIONS %%%%
207     angle(noqn)= 180 - fcoord(noqn); %IS THE ANGLE FROM THE TRIANGLE BETWEEN PI & QUASI-NORMAL. IS NEEDED BECAUSE
208     ro = equalyhub(noqn);
209     Ro = equalyshroud(noqn);
210     u = abs(equalxhub(noqn)-equalxshroud(noqn)); %PRACTICALLY IS THE ONE SIDE OF THE TRIANGLE
211     l = sqrt((Ro-ro)^2 + (u^2)); %PRACTICALLY IS THE HYPOTINOUSA.
212     %%%% THE ldot & udot WE NEED THEM BECAUSE WE WANT THE MEAN VALUES OF QUASI NORMAL %%%%
213     ldot = l/2; %IS THE HALF OF HYPOTINOUSA.
214     udot = ldot* cosd(angle(noqn)); %THE HALF OF THE ONE SIDE OF TRIANGLE
215     xmean(noqn) = equalxhub(noqn) - (ldot*cosd(angle(noqn))); %XMEAN FROM TRIGONOMETRICAL EQUASIONS
216     ymean(noqn) = equalyhub(noqn) + sqrt((ldot)^2 - (udot)^2); %YMEAN FROM TRIGONOMETRICAL EQUASIONS
217 end
218 % STARTING AND ENDING VALUES OF THE X&Y MEANS %
219 xmean(1) = equalxhub(1);
220 ymean(1) = (equalyhub(1) + (equalyshroud(1) - equalyhub(1))/2) ;
221 xmean(Ne) = equalxhub(Ne) - (b2/2) ;
222 ymean(Ne) = equalyshroud(Ne);
223 % STARTING AND ENDING VALUES OF THE X&Y MEANS %

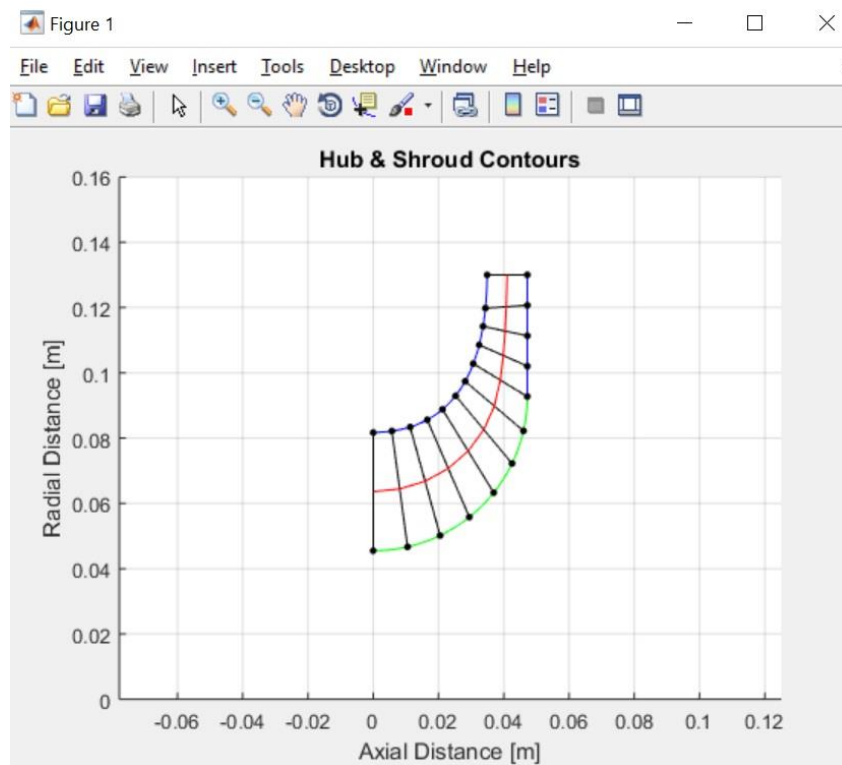
```

**Εικόνα 4.7.6:** Διαδικασία υπολογισμού των συντεταγμένων των τριγώνων που δημιουργούνται κάτω από κάθε *quasi-normal*.

Με τον ορισμό των παραπάνω τιμών για κάθε quasi-normal μπορεί πλέον να γίνει η γραφική απεικόνιση της μέσης γραμμής ροής “*Mean streamline*”. Στην εικόνα 4.7.7 διακρίνονται οι εντολές οι οποίες απαιτούνται για την γραφική αυτή αναπαράσταση και στην εικόνα 4.7.8 το αποτέλεσμα της κωδικοποίησης.

```
225 - figure(1)
226 - plot(xmean,ymean,'r','markersize',10);
```

**Εικόνα 4.7.7.**



**Εικόνα 4.7.8 :** Γραφική αναπαράσταση της μεσημβρινής τομής της πτερωτής όπου με κόκκινο χρώμα διακρίνεται η μέση γραμμή ροής του ρευστού “*Mean Streamline*” μέσα στην πτερωτή.

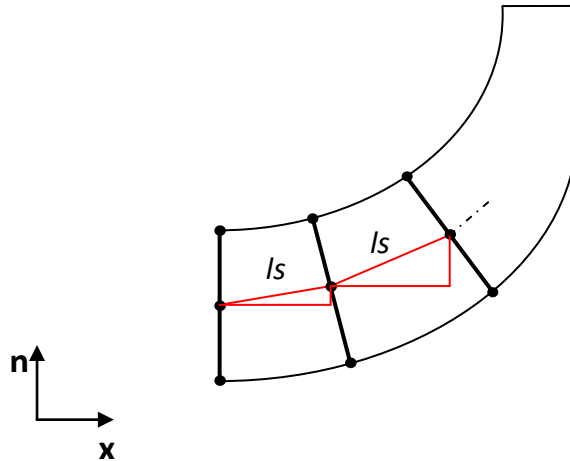


Στην συνέχεια ακολουθεί ο υπολογισμός του μήκους της μέσης γραμμής ροής του ρευστού το οποίο συμβολίζεται ως “ $L_s$ ”. Αυτό το μήκος θα υπολογιστεί ακριβώς όπως και το μήκος της καμπύλης του κελύφους. Δηλαδή θα δημιουργηθούν μικρά τρίγωνα μεταξύ των σημείων που ορίζουν το μέσον δύο quasi-normal και το ευθύγραμμο τμήμα μεταξύ τους. Στο σχήμα 4.7.9 διακρίνονται μερικά από τα εν λόγω τρίγωνα. Για κάθε ένα από αυτά τα τρίγωνα είναι γνωστές οι συντεταγμένες των σημείων του από τις προηγούμενες διαδικασίες. Έτσι μπορεί εύκολα να βρεθεί η γωνία κλίσης του πτερυγίου στο ύψος στο οποίο βρίσκεται το μέσον του quasi-normal. Αυτή η κλίση συμβολίζεται ως “ $blade\_angle(noqn)$ ”. Η γωνία κλίσης του πτερυγίου στο ύψος του μέσου του quasi-normal υπολογίζεται από την σχέση (4.49) η οποία υπενθυμίζεται ότι συντάσσεται ως:

$$\beta = \frac{r - r_{h,noqn}}{r_{s,noqn} - r_{h,noqn}} (\beta_{s,noqn} - \beta_{h,noqn}) + \beta_{h,noqn} \quad (4.49)$$

Η σχέση 4.49 για τις ονομασίες που χρησιμοποιούνται στον κώδικα καθώς και τις συντεταγμένες των σημείων θα μεταφραστεί ως :

$$blade\_angle(noqn) = \frac{y_{mean} - equalyhub}{equalyshroud - equalyhub} (b_{s,noqn} - b_{h,noqn}) + b_{h,noqn} \quad (4.49)$$



**Σχήμα 4.7.9:** Γραφική αναπαράσταση των τριγώνων που δημιουργούνται μεταξύ των σημείων που χωρίζουν τα quasi-normals στο μέσον του μήκους τους. Ως “ $l_s$ ” συμβολίζεται το μήκος της υποτείνουσας κάθε μικρού τριγώνου.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω το συνολικό μήκος της μέσης γραμμής ροής του ρευστού θα υπολογιστεί μέσω των τριγωνομετρικών σχέσεων. Όμως επειδή η κλίση του πτερυγίου αλλάζει κατά μήκος των quasi-normal, δηλαδή κατά την κίνηση από την πλήμνη προς το κέλυφος στις τριγωνομετρικές σχέσεις θα πρέπει να συμπεριληφθεί και η τιμή της μέσης γωνίας του πτερυγίου. Η μέση γωνία του πτερυγίου “*mean\_blade\_angle*” προκύπτει από την μέση τιμή της γωνίας του πτερυγίου στο “*i*” quasi-normal και στο “*i+1*”, δηλαδή:

$$mean\_blade\_angle(noqn) = \frac{blade\_angle(noqn + 1) + blade\_ange(noqn)}{2} \quad (4.110)$$

Αφού υπολογιστεί και η μέση γωνία του πτερυγίου μπορεί πλέον να βρεθεί και το μήκος της υποτείνουσας “*l<sub>s</sub>*” του μικρού τριγώνου όπου διακρίνεται στο σχήμα 4.7.8. Με την σύνταξη μιας επαναληπτικής διαδικασίας η οποία υπολογίζει και ταυτόχρονα αθροίζει αυτά τα μήκη υπολογίζεται και το συνολικό μήκος της γραμμής ροής του ρευστού. Τα μήκη των επιμέρους τριγώνων βρίσκονται από της σχέση 4.110 ως :

$$l_s = \frac{\sqrt{(xmean(noqn + 1) - xmean(noqn))^2 + (ymean(noqn + 1) - ymean(noqn))^2}}{\cos(mean\_blade\_angle(noqn))} \quad (4.111)$$

Ο κύριος λόγος για τον οποίο βρίσκεται το μήκος της μέσης γραμμής ροής της πτερωτής είναι διότι το μήκος αυτό ισούται με το μήκος της μέσης γραμμής του πτερυγίου “*Mean Camberline Length*”. Αυτά τα δύο μήκη ταυτίζονται διότι έχει παρθεί η παραδοχή ότι το ρευστό ακολουθάει επακριβώς τα πτερύγια. Έτσι στην εικόνα 4.7.8 διακρίνεται ταυτόχρονα και η μέση γραμμή των πτερυγίων, της οποίας το μήκος συμβολίζεται με “*L<sub>B</sub>*”. Όλα τα παραπάνω διακρίνονται στην εικόνα 4.7.9 σε κωδικοποιημένη μορφή στην Matlab.

```

227 - Ls = 0; %IS THE FIRST VALUE OF THE TOTAL LENGHT OF THE SPLINE CURVE
228 - for noqn=1:Ne
229 -     if noqn == Ne
230 -         blade_angle(noqn) = bhnoqn(noqn) ;
231 -     else
232 -         blade_angle(noqn) = ((ymean(noqn)-equalyhub(noqn))/(equalyshroud(noqn)-equalyhub(noqn))) * (bsnoqn(noqn)-bhno
233 -     end
234 - end
235 - for noqn = 1:Ne-1
236 -     mean_blade_angle(noqn) = (blade_angle(noqn+1) + blade_angle(noqn))/2; %IS THE BLADE ANGLE OF THE (XMEAN,YMEAN)
237 -     ls = (sqrt((xmean(noqn+1)-xmean(noqn))^2 + (ymean(noqn+1)-ymean(noqn))^2)/cosd(mean_blade_angle(noqn))) ; %EQ.
238 -     Ls = Ls + ls; %TOTAL LENGHT OF THE MEAN STREAMLINE
239 - end
240 - Lb = Ls; %THE TOTAL LENGHT OF THE MEAN STREAMLINE IS EQUAL TO THE LENGHT OF THE MEAN CAMBERLINE BECAUSE WE ASSUME
241 - %%%% CALCULATION AND PLOT OF MEAN STREAM-LINE LENGHT %%%%

```

**Εικόνα 4.7.9:** Κωδικοποιημένη μορφή διαδικασίας υπολογισμού του μήκους της μέσης γραμμής ροής της πτερωτής “mean streamline length” και του μήκους της μέσης γραμμής των πτερυγίων “mean camberline length”.

#### 4.8 Διαδικασία υπολογισμού και ελέγχου του αριθμού των πτερυγίων.

Το τελευταίο στάδιο της διαδικασίας του προκαταρκτικού σχεδιασμού είναι αυτό του υπολογισμού του αριθμού των πτερυγίων “Z”. Με την εύρεση του αριθμού των πτερυγίων ακολουθεί ο υπολογισμός κάποιων βασικών μεταβλητών από τις οποίες θα κριθεί εάν αυτός ο αριθμός των πτερυγίων είναι ο ιδανικός για τα δεδομένα τα οποία έχει εισάγει ο χρήστης.

Η ιδεολογία με βάση την οποία προγραμματίστηκαν εντολές για την εύρεση των τιμών των μεταβλητών που αναλύονται στην προηγούμενη παράγραφο λειτουργεί ως εξής. Ξεκινώντας θα δοθεί ένας αρχικός συντελεστής φορτίσεως των πτερυγίων ο οποίος θα είναι αρκετά μικρός της τάξης του «0.00001». Έπειτα με επαναληπτική διαδικασία τύπου “While 1” θα βρίσκεται ένας νέος αριθμός πτερυγίων “ $Z_{l,new}$ ”. Στην περίπτωση όπου ο νέος αριθμός πτερυγίων “ $Z_{l,new}$ ” δεν είναι ίδιος με τον αριθμό πτερυγίων όπου βρίσκεται η βασική επαναληπτική διαδικασία τότε ο συντελεστής φορτίσεως των πτερυγίων “BL” θα αυξηθεί κατά «0.00001» και η διαδικασία θα επαναληφθεί αυτή την φορά για την νέα τιμή του συντελεστή φορτίσεως των πτερυγίων. Στην περίπτωση όπου ο νέος αριθμός πτερυγίων “ $Z_{l,new}$ ” ισούται με τον αριθμό πτερυγίων της βασικής επαναληπτικής διαδικασίας τότε αποθηκεύεται η τιμή του συντελεστή φορτίσεως για την οποία είναι ίσες οι τιμές των αριθμών πτερυγίων.

Με αυτό τον τρόπο βρίσκεται με ακρίβεια στο πέμπτο δεκαδικό ψηφίο η τιμή του συντελεστή φορτίσεως.

Ξεκινώντας θα πρέπει να υπολογιστούν από τις σχέσεις (3.47) και (3.46) η τιμή του συντελεστή “ $K_\lambda$ ” και του συντελεστή παραμόρφωσης του ακροπτερύγιου “ $\lambda$ ” αντίστοιχα. Στην συνέχεια από την σχέση (3.45) θα υπολογιστεί ο συντελεστής που εκφράζει τον χώρο τον οποίο καταλαμβάνουν τα πτερύγια και την στένωση που προκαλούν (*Blockage Factor*) όπου συμβολίζεται ως “ $B_2$ ”. Οι εξισώσεις (3.47) και (3.46) θα χρησιμοποιηθούν χωρίς κάποια αλλαγή σε αντίθεση με την (3.45) η οποία θα επιλυθεί ως προς τον συντελεστή στένωσης.

$$K_\lambda = 1 + (0.3 + (\frac{b_2}{L_B})^2) \frac{b_2 A_2^2 \cos^2 \beta_2}{L_B A_1^2 \cos^2 \beta_1} \quad (3.47)$$

$$\lambda = K_\lambda + (\frac{0.00175}{\Phi})^2 + \frac{0.0015}{\Phi} - 0.22 \ln(\Phi) \quad (3.46)$$

$$B_2 = 1 - \frac{1}{\lambda} \quad (4.112)$$

Στην συνέχεια δίνεται η αρχική τιμή του συντελεστή φορτίσεως των πτερυγίων και ο κώδικας εισέρχεται στην επαναληπτική δομή. Το πρώτο βήμα της επαναληπτικής δομής είναι από την σχέση (3.48) να υπολογιστεί η τιμή της διαφοράς των σχετικών ταχυτήτων μεταξύ της πλευράς αναρρόφησης και της πλευράς πίεσης ως εξής :

$$\Delta W = \frac{BL(W_1 + W_2)}{2} \quad (4.113)$$

Και έπειτα βρίσκεται η νέα τιμή του αριθμού των πτερυγίων “ $Z_{I,new}$ ” από την εξίσωση (3.49) λύνοντας ως προς “ $Z_{I,new}$ ”.

$$Z_{I,new} = \frac{4 \pi r_2 U_2 I_B}{\Delta W L_B} \quad (4.114)$$

Στην συνέχεια ακολουθεί η στρογγυλοποίηση του αριθμού που προέκυψε από την σχέση (4.114) και η σύγκρισή του με τον αριθμό των πτερυγίων της βασικής δομής επανάληψης “Z” έτσι ώστε να αποφασιστεί εάν η επαναληπτική διαδικασία “While 1” επαναληφθεί ή όχι. Όλα τα παραπάνω σε κωδικοποιημένη μορφή διακρίνονται στην εικόνα 4.8.1.

```

243 %%%% NUMBER OF BLADES %%%%
244 K1 = 1+(0.3+(b2angle/Lb)^2)*(b2*(A2^2)*(cosd(b2angle)^2))/(Lb*(A1^2)*(cosd(almeandot)^2)); %EQ.(3.21)
245 lamda = K1 + (0.00175/FI)^2 + (0.0015/FI) - 0.22*log(FI); %TIP DISTORTION FACTOR FROM EQ.(3.20)
246 B2 = 1 - (1/lamda); %BLOCKAGE FACTOR FROM EQ.(3.19)
247 Blnew = 0.00001;
248 while 1
249     DW = Blnew*(W1+W2)/2;%IS THE DIFFERENCE OF TANGENTIAL VELOCITIES BETWEEN THE SUCTION AND PRESSURE SIDE, FROM E
250     ZInew = ((4*pi*r2*U2*Ib)/(DW*Lb));
251     if round(ZInew) - Zi == 0
252         break
253     else
254         Blnew = Blnew + 0.00001;
255     end
256     if Blnew >= 0.9
257         break
258     end
259 end
260 ZInew = round(ZInew); % THIS ROUNDING THE VALUE OF ZInew

```

**Εικόνα 4.8.1 :** Διαδικασία εύρεσης της τιμής του συντελεστή φορτίσεως για δεδομένο αριθμό πτερυγίων.

Με τον καθορισμό του συντελεστή φορτίσεως των πτερυγίων θα πρέπει να ελεγχθεί εάν ο κώδικας είχε συναντήσει κάποιο πρόβλημα σύγκλισης σε όλες τις διαδικασίες που έχουν προηγηθεί. Στην περίπτωση όπου δεν έχει προκύψει κάποιο πρόβλημα ο κώδικας θα εισέλθει στις εντολές που υπάρχουν μέσα στην δομή ελέγχου για τον υπολογισμό των παρακάτω τιμών. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να υπολογιστεί η τιμή της ιδεατής απόλυτης ταχύτητας ως προς της εφαπτομενική διεύθυνση “ $C_{\theta,2,\infty}$ ” στην έξοδο της πτερωτής. Η τιμή της ταχύτητας “ $C_{\theta,2,\infty}$ ” υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης (4.115).

$$C_{\theta,2,\infty} = U_2 - U_2 C_{n2} \tan(\beta_2) \quad (4.115)$$

Με γνωστή πλέον την τιμή της προβολής της απόλυτης ταχύτητας στην περιφερειακή διεύθυνση του ιδεατού τριγώνου ταχυτήτων μπορεί βρεθεί η τιμή του

συντελεστή ολίσθησης (*Slip Factor*) όπου συμβολίζεται ως “ $\sigma$ ”. Πρέπει να σημειωθεί ότι θα βρεθούν δύο τιμές του συντελεστή ολίσθησης. Η πρώτη τιμή είναι αυτή που περιγράφηκε παραπάνω ενώ η δεύτερη αναφέρεται στον συντελεστή ολίσθησης για μηδενική παροχή ρευστού (*Zero Flow Slip Factor*) και στον κώδικα συμβολίζεται ως “*zero\_flow\_slipfactor*”. Η τιμή του απλού συντελεστή ολίσθησης προκύπτει από την σχέση (4.116) και είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της για τον υπολογισμό του συντελεστή ολίσθησης υπό μηδενική παροχή, όπου βρίσκεται από την εξίσωση (4.117).

$$\sigma = \frac{C_{\theta 2}}{C_{\theta 2, \infty}} \quad (4.116)$$

$$zero\_flow\_slipfactor = 1 - \sqrt{\frac{\cos(\beta_2)}{Z_I^{0.7}}} \quad (4.117)$$

Λύνοντας την σχέση (3.33) ως προς την γωνία της σχετικής ταχύτητας “ $\beta_2$ ” βρίσκεται η νέα τιμή της γωνία της αυτής. Σε περίπτωση όπου δεν έχει ολοκληρωθεί η βασική δομή επανάληψης η οποία τρέχει για κάθε πιθανό αριθμό πτερυγίων, τότε η νέα τιμή της γωνίας θα χρησιμοποιηθεί για τις επόμενες επαναλήψεις. Η νέα αυτή τιμή προκύπτει ως :

$$xyz = (1 - zero\_flow\_slipfactor) \frac{Z_I^{0.7}}{\sin(\alpha_{c2})}^2 \quad (4.118)$$

$$\beta_{2,new} = \cos^{-1}(xyz) \quad (4.119)$$

Ως “xyz” χρησιμοποιείται μόνο για την ευκολότερη έκφραση της εξίσωσης (4.119) κατά την κωδικοποίηση. Μετά τον υπολογισμό της νέας τιμής της γωνίας της σχετικής ταχύτητας στην έξοδο ελέγχεται αρχικά εάν η μεταβλητή “final\_rep” έχει την τιμή μηδέν ή ένα. Στην περίπτωση όπου είναι μηδενική σημαίνει ότι δεν έχουν ελεγχθεί ακόμα όλοι οι πιθανοί αριθμοί πτερυγίων, επομένως αποθηκεύει τα αποτελέσματα του συντελεστή φόρτισης των πτερυγίων καθώς και τον αριθμό των πτερυγίων σε πίνακες με όνομα “Best\_ZI” και “Best\_BI” αντίστοιχα. Οι εν λόγω υπολογισμοί φαίνονται στην εικόνα 4.8.2 σε μορφή κώδικα.

```

261 - if stop == 0
262 -     Cth2oo = U2-(U2*Cn2*tand(b2angle));%Cth2oo IS THE IDEAL TANGENTIAL VELOCITY OR ELSE THE PROJECTION OF THE ABS(
263 -     slipfactor = Cth2/Cth2oo; %IS THE SLIP FACTOR FROM EQ.(3.26)
264 -     zero_flow_slipfactor = 1 - (sqrt(cosd(b2angle))/(Zi^0.7));%IS THE SLIP FACTOR FOR ZERO FLOW EQ.(3.25)
265 -     xyz = ((1-zero_flow_slipfactor)*(ZInew^0.7)/sind(ac2))^2 ;
266 -     b2anglenew = acosd(xyz);% THE NEW BACKSWEEP ANGLE FROM EQ.(3.25)
267 -     b2angle = -b2anglenew; %POSSIBLE THE EQ.(3.25) DOES NOT TAKE IN MIND THE SIGN OF BLADE ANGLE, FOR THIS REASON
268 -     if final_rep==0 %IF FINAL_REP = 1 MEANS THAT THE BEST SOLUTION WAS FOUND. SO IS NOT NEEDED TO CALCULATE AGAIN
269 -         Best Zi(best) = Zi;
270 -         Best Bl(best) = Blnew
271 -         best = best+1;
272 -     end
273 - end
274 - if final_rep == 0 %THIS WILL CLOSE ALL THE GRAPHS UNTIL THE SOLUTION IS FOUND => FINAL_REP = 1.
275 -     close all
276 - end
277 - end

```

**Εικόνα 4.8.2:** Διαδικασία εύρεσης της νέας τιμής της γωνίας της σχετικής ταχύτητας στην έξοδο της πτερωτής.

Επίσης στην εικόνα 4.8.2 αξίζει να αναφερθεί ότι στην γραμμή του κώδικα «277» διακρίνεται και το τέλος της δομής επανάληψης “for” η οποία είναι μια εκ των δύο βασικών δομών επανάληψης. Στην συνέχεια ο κώδικας λειτουργεί μέσα στα πλαίσια της πρώτης βασικής δομής επανάληψης “While 1” όπου ο κώδικας θα πραγματοποιήσει κάποιους απαραίτητους ελέγχους. Ο πρώτος έλεγχος αφορά το αν η μεταβλητή “final\_rep” έχει πάρει την τιμή της μονάδας. Σε αυτήν την περίπτωση η προκαταρκτική σχεδίαση της πτερωτής έχει ολοκληρωθεί και ο κώδικας μπορεί να βγει έξω από τις βασικές δομές επανάληψης. Στην περίπτωση όπου μεταβλητή “final\_rep” είναι διάφορη της μονάδας τότε ελέγχεται εάν υπάρχει κάποιο πρόβλημα με τον κώδικα και εμφανίζει σχετικό μήνυμα στον χρήστη να ελέγξει ξανά τα δεδομένα που έχει εισάγει στον κώδικα. Όταν δεν έχει συμβεί τίποτα από τα δύο παραπάνω σημαίνει ότι όλα έχουν κυλήσει ομαλά και ο κώδικας με μια επαναληπτική διαδικασία τύπου “For” θα επιλέξει την καλύτερη λύση όσον αφορά τον συντελεστή φόρτισης των πτερυγίων. Ο καλύτερη δυνατή λύση είναι εκείνη η οποία δίνει και τον μικρότερο συντελεστή φορτίσεως των πτερυγίων (minimum blade loading). Αφού βρεθεί η βέλτιστη λύση για τον συντελεστή φορτίσεως των πτερυγίων, μπορεί εύκολα να βρεθεί και ο αντίστοιχος αριθμός των πτερυγίων μιας και οι δύο αυτοί αριθμοί είναι αποθηκευμένοι σε πίνακες με ίδιες ακριβώς διαστάσεις αλλά και κατανομή. Τα παραπάνω σε κωδικοποιημένη μορφή φαίνονται στην εικόνα 4.8.3.

```

278 - if final_rep == 1
279 -     break
280 - end
281 - if numel(best)==0 %THIS MEANS THAT THE PROGRAMME DID NOT FOUND A POSSIBLE SOLUTION
282 -     fprintf('There is a problem with impeller design. Check your input data and other parameters.\n');
283 -     break
284 - else
285 -     Bl = min(Best_Bl); %WILL CHOOSE THE BEST OPTION OF BLADE LOADING => MIN_BLADE_LOADING
286 -     for i=1:(best-1) % IT IS -1 BECAUSE IT INCREASE THE BEST AND AT THE LAST REP WHICH DOES NOT COUNTS.
287 -         if Best_Bl(i) == Bl
288 -             Zi = Best_Zi(i); %CHOOSES THE EQUIVALENT Zi FOR WHICH WE HAVE THE MIN_BLADE_LOADING
289 -             break
290 -         end
291 -     end

```

**Εικόνα 4.8.3.**

Με την εύρεση της βέλτιστης λύσης η μεταβλητή “*final rep*” θα πάρει την τιμή της μονάδας. Έπειτα τα ορίσματα “*Start*” & “*End*” για τα οποία λειτουργεί η εσωτερική βασική δομή επανάληψης “*For*” θα πάρουν την ίδια τιμή η οποία αντιστοιχεί στην βέλτιστη επιλογή ως προς τον αριθμό των πτερυγίων και στην συνέχεια θα επαναλάβει όλες τις διαδικασίες οι οποίες έχουν περιγραφτεί στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο. Αυτό γίνεται έτσι ώστε να αποθηκευτούν τα δεδομένα εξόδου τα οποία δίνει η βέλτιστη λύση με σκοπό την εκτύπωση τους στο “*Command Window*” της Matlab και την μελέτη τους από τον χειριστή του προγράμματος. Τέλος ο κώδικας θα εμφανίσει σχετικά μηνύματα στον χρήστη για την ολοκλήρωση του κώδικα, καθώς και για τις μεταβλητές οι οποίες είναι απαραίτητες για τον χρήστη κατά την προκαταρκτική σχεδίαση. Στην εικόνα 4.8.4 διακρίνονται τα τελευταία βήματα στο εσωτερικό των δομών επανάληψης τα οποία περιγράφηκαν παραπάνω.

```

292 -     final_rep = 1; %HERE WE ALREADY FOUND THE BEST SOLUTION.SO THE FINAL_REP=1;
293 -
294 -     % NOW THE WHOLE PROCESS WILL RUN AGAIN BUT THIS TIME ONLY FOR THE BEST
295 -     % NUMBER OF BLADES, AND THE BEST BLADE LOADING. SO THE STARTING AND
296 -     % ENDING VALUES OF THE 'FOR' WILL BE EQUAL WITH THE BEST OPTION OF
297 -     % NUMBER OF BLADES
298 -     Start = Zi;
299 -     End = Zi;
300 -     fprintf('The design of impeller is done\n');
301 -     fprintf('And the best solution is Zi=%d with Blade_Loading=%f\n', Zi, Bl);
302 - end
303 - end
304 - %%%MAIN ITERATION LOOP %%%

```

**Εικόνα 4.8.4 :** Παρουσίαση τελευταίων εντολών οι οποίες περιλαμβάνονται στο εσωτερικό των δομών επανάληψης.



Με την έξοδο από τις βασικές δομές επανάληψης ακολουθεί η εκτύπωση των μεταβλητών όπου είναι απαραίτητες για τον χρήστη κατά της προκαταρκτική σχεδίαση. Πριν όμως από τις εντολές εκτύπωσης θα προηγηθεί ο υπολογισμός της ισχύος που απαιτείται για την κίνηση της πτερωτής καθώς και ο υπολογισμός του πάχους εισόδου. Η τιμή της ισχύος που απαιτείται υπολογίζεται από την σχέση (4.120) ως :

$$P = \dot{m} \Delta h_0 \quad (4.120)$$

Η τιμή του πάχους εισόδου προκύπτει από την διαφορά της ακτίνας του κελύφους στην είσοδο της πτερωτής με την ακτίνα της πλήμνης στο αντίστοιχο σημείο, και υπολογίζεται από την σχέση (4.121).

$$Inlet\_Hub\_To\_Tip\_Width = r_{1s} - r_{1h} \quad (4.120)$$

Στην συνέχεια ακολουθούν οι εντολές εκτύπωσης των τιμών των μεταβλητών. Οι μεταβλητές οι οποίες θα παρουσιαστούν στο “*Command Window*” είναι οι εξής :

- Ο αριθμός των πτερυγίων “ $Z_l$ ”.
- Ο συντελεστής φορτίσεως των πτερυγίων “ $BL$ ”.
- Ο συντελεστής παροχής “ $\Phi$ ”.
- Η απόλυτη ταχύτητα στην είσοδο της πτερωτής “ $C_1$ ”.
- Η σχετική ταχύτητα στην είσοδο της πτερωτής “ $W_1$ ”.
- Η μέση ακτίνα της πτερωτής στην είσοδο “ $\bar{r}_1$ ”.
- Η ακτίνα του κελύφους στην είσοδο “ $r_{1s}$ ”.
- Το πάχος της πτερωτής στην είσοδο κατά της αξονική διεύθυνση “*Inlet\_Hub\_To\_Shroud\_Width*”.
- Το πάχος στο ακροπτερύγιο “ $b_2$ ”.
- Η μέγιστη πίεση για την οποία μπορεί να λειτουργήσει η πτερωτή (Πίεση ανακοπής) “ $P_{02}$ ”.
- Η μέγιστη θερμοκρασία για την οποία μπορεί να λειτουργήσει η πτερωτή (Θερμοκρασία ανακοπής) “ $T_{02}$ ”.
- Η γωνία της απόλυτης ταχύτητας στο ακροπτερύγιο “ $\alpha_2$ ”.

- Η γωνία της σχετικής ταχύτητας στην έξοδο της πτερωτής “ $b_{2,angle}$ ”.
- Η γωνία του περυγίου στην έξοδο της πτερωτής “ $b_2$ ”.
- Η απόλυτη ταχύτητα στην έξοδο της πτερωτής “ $C_2$ ”.
- Η σχετική ταχύτητα στην έξοδο της πτερωτής “ $W_2$ ”.
- Η περιφερειακή ταχύτητα της πτερωτής στην έξοδο “ $U_2$ ”.
- Ο συντελεστής ολίσθησης για μηδενική παροχή “ $zero\_flow\_slipfactor$ ”.
- Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης της πτερωτής “ $\eta_i$ ”.
- Το μήκος της μέσης γραμμής ροή της πτερωτής “ $L_s$ ”.
- Η ισχύς που απαιτείται για την περιστροφή της πτερωτής “ $P$ ”.

Στην εικόνα 4.8.5 διακρίνονται οι εντολές για τον υπολογισμό της ισχύος και του πάχους εισόδου. Στην εικόνα 4.8.6 διακρίνονται οι εντολές που απαιτούνται για την εκτύπωση των παραπάνω στοιχείων, ενώ στην εικόνα 4.8.7 φαίνονται τα στοιχεία τα οποία εκτυπώθηκαν μετά το τρέξιμο του κώδικα.

```
308 - P = m*Dh0; %THE REQUIRED POWER WHICH IS NEEDED TO DRIVE THE COMPRESSOR
309 - Inlet_Hub_To_Shroud_Width = r1s-rlh;
```

**Εικόνα 4.8.5:** Κωδικοποιημένη μορφή υπολογισμού ισχύος και του πάχους εισόδου.

```
310 %%%% PROCEDURE FOR THE PRINT OF THE MAIN VALUES WHICH IS NEEDED FOR THE PRELIMINARY DESIGN
311 - fprintf('Inlet Flow Coefficient          FI = %f \n',FI);
312 - fprintf('Inlet Absolute Velocity        C1 = %f [m/s]\n',C1);
313 - fprintf('Inlet Mean Relative Velocity    W1 = %f [m/s]\n',W1);
314 - fprintf('Inlet Mean Radius                rlmean = %f[m] \n',rlmean);
315 - fprintf('Inlet Shroud Radius                r1s = %f [m] \n',r1s);
316 - fprintf('Inlet Hub to Shroud Width            Inlet_Hub_To_Shroud_Width = %f [m]\n',Inlet_Hub_To_Shroud_Width);
317 - fprintf('Tip Width                            b2 = %f [m]\n',b2);
318 - fprintf('Impeller Total Pressure                P02 = %f [bar]\n', (P02*(10^(-5))));
319 - fprintf('Impeller Total Temperature            T02 = %f [K]\n',T02);
320 - fprintf('Impeller Tip Absolute Flow Angle      a2 = %f [Degrees]\n',a2);
321 - fprintf('Impeller Tip Relative Flow Angle      b2angle = %f [Degrees]\n',b2angle);
322 - fprintf('Impeller Tip Blade Angle              b2 = %f [Degrees]\n',b2angle);
323 - fprintf('Impeller Tip Absolute Velocity        C2 = %f [m/s]\n',C2);
324 - fprintf('Impeller Tip Relative Velocity        W2 = %f [m/s]\n',W2);
325 - fprintf('Impeller Tip Speed                    U2 = %f [m/s]\n',U2);
326 - fprintf('Zero Flow Slip Factor                zero_flow_slipfactor = %f \n',zero_flow_slipfactor);
327 - fprintf('Impeller Internal Efficiency          ni = %f \n',ni);
328 - fprintf('Mean Streamline Length              Ls = %f [m]\n',Ls);
329 - fprintf('Axial Length of Impeller             DZI = %f [m] \n',DZI);
330 - fprintf('Power Required                      P = %f [KW]', (P*(10^(-3))));
```

**Εικόνα 4.8.6:** Εντολές για την εκτύπωση των απαραίτητων μεταβλητών.

The design of impeller is done!  
And the best solution is Zi=20 with Blade\_Loading=0.768040

*Εικόνα 4.8.7: Μήνυμα που εμφανίζεται με την επιτυχή ολοκλήρωση του κώδικα.*

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| Inlet Flow Coefficient           | FI = 0.064493                            |
| Inlet Absolute Velocity          | C1 = 67.186151 [m/s]                     |
| Inlet Mean Relative Velocity     | W1 = 134.372303 [m/s]                    |
| Inlet Mean Radius                | rlmean = 0.063588[m]                     |
| Inlet Shroud Radius              | r1s = 0.081724 [m]                       |
| Inlet Hub to Shroud Width        | Inlet_Hub_To_Shroud_Width = 0.036224 [m] |
| Tip Width                        | b2 = 0.012329 [m]                        |
| Impeller Total Pressure          | P02 = 1.524734 [bar]                     |
| Impeller Total Temperature       | T02 = 327.855073 [K]                     |
| Impeller Tip Absolute Flow Angle | a2 = 65.606736 [Degrees]                 |
| Impeller Tip Relative Flow Angle | b2angle = -46.754104 [Degrees]           |
| Impeller Tip Blade Angle         | b2 = -46.754104 [Degrees]                |
| Impeller Tip Absolute Velocity   | C2 = 176.495142 [m/s]                    |
| Impeller Tip Relative Velocity   | W2 = 106.391403 [m/s]                    |
| Impeller Tip Speed               | U2 = 238.237443 [m/s]                    |
| Zero Flow Slip Factor            | zero_flow_slipfactor = 0.898336          |
| Impeller Internal Efficiency     | ni = 0.942247                            |
| Mean Streamline Length           | Ls = 0.138494 [m]                        |
| Axial Length of Impeller         | DZI = 0.047219 [m]                       |
| Power Required                   | P = 40.054348 [KW]>>                     |

*Εικόνα 4.8.9 : Παρουσίαση των μεταβλητών που εκτυπώνονται με την επιτυχή ολοκλήρωση του κώδικα.*

## Κεφάλαιο 5°

### 5.1 Παρουσίαση και περιγραφή αποτελεσμάτων.

Στόχος της συγκεκριμένης διπλωματικής ήταν η δημιουργία ενός κώδικα ο οποίος θα αναλαμβάνει την διεκπεραίωση της προκαταρκτικής σχεδίασης πτερωτής πλήρους ακτινικής ροής. Για την επαλήθευση ότι ο κώδικας όχι μόνο τρέχει χωρίς να εμφανίσει κάποιο σφάλμα, αλλά παράγει και τα σωστά αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα εισαγωγής όπου ο Mr.Johannes Schiff χρησιμοποίησε στην δική του διπλωματική εργασία. Χρησιμοποιώντας τα ίδια δεδομένα εισόδου, τα αποτελέσματα τα οποία προκύπτουν από τον κώδικα “*Radial Compressor Calculation Tool*” που συντάχθηκε για την διεκπεραίωση της συγκεκριμένης διατριβής απέχουν ελάχιστα από τα αποτελέσματα του Mr.Johannes Schiff. Αυτό επιδεικνύει ότι ο αλγόριθμος όπου

συντάχθηκε για την συγκεκριμένη διατριβή παρ' όλες τις διαφορές ως προς την σύνταξη του είναι ακριβής και στέκει ορθολογικά, δημιουργώντας παρεμφερή αν όχι ίδια αποτελέσματα εξόδου με ένα πρόγραμμα το οποίο έχει δημιουργηθεί αποκλειστικά για την ολοκληρωμένη σχεδίαση πτερωτών όπως αυτό του Mr.Johannes Schiff. Σε αυτήν την ενότητα θα παρουσιαστούν σε εικόνες τα αποτελέσματα τα οποία προκύπτουν και από τα δύο παραπάνω προγράμματα προκαταρκτικού σχεδιασμού.

Ο κώδικας της συγκεκριμένης διατριβής δέχεται ως ορίσματα εισόδου δύο παραπάνω μεταβλητές από αυτές που ορίζει ο Mr.Johannes Schiff. Αυτές οι δύο επιπλέον μεταβλητές ορίζονται ως ο ελάχιστος "Start" και μέγιστος "End" αριθμός πτερυγίων. Τα δεδομένα εισόδου ταυτίζονται με αυτά του Mr.Johannes Schiff. Στις εικόνες 5.1 φαίνονται τα δεδομένα εισόδου του Mr.Johannes Schiff και αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στην συγκεκριμένη διπλωματική αντίστοιχα.

Λόγω της διαφοράς του τρόπου λειτουργίας μεταξύ των αλγορίθμων θα παρουσιαστούν δύο διαφορετικές εκδοχές του κώδικα όπου η μία θα τρέχει για μέγιστο αριθμό πτερυγίων ίσο με είκοσι « $Z_i = 20$ » και η άλλη για μέγιστο αριθμό πτερυγίων ίσο με « $Z_i = 24$ ». Αρχικά θα παρουσιαστεί η πρώτη εκδοχή της οποίας τα αποτελέσματα ταυτίζονται με αυτά του Mr.Johannes Schiff. Στην εικόνα 5.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την διαδικασία όπου χρησιμοποιήθηκε στην διπλωματική του Mr.Johannes Schiff ενώ στην εικόνα 5.3 τα αποτελέσματα που παράγει ο κώδικας ο οποίος δημιουργήθηκε στην συγκεκριμένη διπλωματική.

### Control Panel - Preliminary Design

**Gas properties**  
Spec. gas constant:  J/(kgK)  
Spec. heat, cp:  J/(kgK)  
Spec. heat ratio, gamma:  (-)

**Ambient conditions**  
Ambient pressure:  bar(a)  
Ambient temperature:  K

**Compressor data**  

Impeller type  
☒ Uncovered impeller  
☐ Covered impeller

Diffuser type  
☒ Vaneless diffuser  
☐ Vaned diffuser

Rotating speed:  rpm  
Inlet mass flow:  kg/s  
Impeller tip radius:  m  
Inlet hub to tip radius ratio:  (-)  
Inlet abs. flow angle:  deg  
Mean inlet rel. flow angle:  deg  
Mean inlet incidence:  deg  
Dimensionless blade thickness at inlet:  (-)  
Dimensionless blade thickness in passage:  (-)  
Maximum blade loading:  (-)

### Radial Compressor Data

- Give the following information about the impeller and diffuser.  
- This file will be used from the matlab file for other necessary calculations

**Lionis M.**

|  |           |         |
|--|-----------|---------|
| R  | [j/(kgk)] | 287     |
| Gamma  | [-]       | 1.4     |
| Cp   | [j/(kgk)] | 1005    |
| T <sub>00</sub>  | [Kelvin]  | 288     |
| P <sub>00</sub>  | [bar]     | 1.01325 |
| Vaned/Vaneless Diffuser                                      | [-]       | 0       |
| Shroud/Unshroud Impeller                                     | [-]       | 1       |
| Rotating Speed   | [rpm]     | 17500   |
| Mass flow  | [kg/sec]  | 1       |
| Impeller tip radius  | [m]       | 0.13    |
| Impeller inlet hub to tip radius ratio                       | [-]       | 0.35    |
| Mean inlet relative flow angle                               | [degrees] | -60     |
| Inlet absolute flow angle                                    | [degrees] | 0       |
| Mean inlet incidence   | [degrees] | 0       |
| Dimensionless blade thickness at inlet                       | [-]       | 0.0055  |
| Dimensionless blade thickness at the rest of passage         | [-]       | 0.011   |
| Maximum blade loading  | [-]       | 0.9     |
| K  | [-]       | 1       |
| Start (Refers to a minimum number of blades will be checked) |           | 12      |
| End (Refers to a maximum number of blades will be checked)   |           | 20      |

**Εικόνα 5.1:** Παρουσίαση δεδομένων εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν και στα δύο προγράμματα για τον προκαταρκτικό σχεδιασμό. Αριστερά διακρίνονται τα δεδομένα εισόδου στο περιβάλλον εισαγωγής που χρησιμοποιήθηκε από τον Mr.Johannes Schiff (Πηγή: Πηγή: “A Preliminary Design Tool for Radial Compressors” Johannes Schiff ). Δεξιά διακρίνονται τα δεδομένα εισόδου στο περιβάλλον εισαγωγής που δημιουργήθηκε στην συγκεκριμένη διπλωματική.

Calculation results

|                                 |           |        |   |           |     |
|---------------------------------|-----------|--------|---|-----------|-----|
| Inlet flow coefficient:         | 0.0644928 | (-)    | Impeller tip rel. velocity:                   | 106.391   | m/s |
| Inlet absolute velocity:        | 68.2936   | m/s    | Impeller tip speed:                           | 238.237   | m/s |
| Inlet mean relative velocity:   | 136.588   | m/s    | Zero flow slip factor:                        | 0.888231  | (-) |
| Inlet width (hub->shroud):      | 0.0335517 | m      | Impeller internal efficiency:                 | 0.942247  | (-) |
| Tip width (hub->shroud):        | 0.0122069 | m      | Number of impeller blades:                    | 20        | (-) |
| Impeller tip total pressure:    | 1.52861   | bar(a) | Impeller blade loading:                       | 0.880673  | (-) |
| Impeller tip total temperature: | 327.855   | K      | Impeller blade aspect ratio:                  | 0.0994747 | (-) |
| Impeller tip abs. flow angle:   | 65.6067   | deg    | Mean streamline length:                       | 0.122714  | m   |
| Impeller tip rel. flow angle:   | -46.7541  | deg    | Power required:                               | 40.0543   | kW  |
| Impeller tip blade angle:       | -34.1733  | deg    | <input type="checkbox"/> Show mean streamline |           |     |
| Impeller tip abs. velocity:     | 176.495   | m/s    |   |           |     |

**Εικόνα 5.2 :** Αποτελέσματα Mr. Johannes Schiff (Πηγή: “A Preliminary Design Tool for Radial Compressors” Johannes Schiff ).

The design of impeller is done!

And the best solution is Zi=20 with Blade\_Loading=0.768040

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| Inlet Flow Coefficient           | FI = 0.064493                            |
| Inlet Absolute Velocity          | C1 = 67.186151 [m/s]                     |
| Inlet Mean Relative Velocity     | W1 = 134.372303 [m/s]                    |
| Inlet Mean Radius                | r1mean = 0.063588[m]                     |
| Inlet Shroud Radius              | r1s = 0.081724 [m]                       |
| Inlet Hub to Shroud Width        | Inlet_Hub_To_Shroud_Width = 0.036224 [m] |
| Tip Width                        | b2 = 0.012329 [m]                        |
| Impeller Total Pressure          | P02 = 1.524734 [bar]                     |
| Impeller Total Temperature       | T02 = 327.855073 [K]                     |
| Impeller Tip Absolute Flow Angle | a2 = 65.606736 [Degrees]                 |
| Impeller Tip Relative Flow Angle | b2angle = -46.754104 [Degrees]           |
| Impeller Tip Blade Angle         | b2 = -46.754104 [Degrees]                |
| Impeller Tip Absolute Velocity   | C2 = 176.495142 [m/s]                    |
| Impeller Tip Relative Velocity   | W2 = 106.391403 [m/s]                    |
| Impeller Tip Speed               | U2 = 238.237443 [m/s]                    |
| Zero Flow Slip Factor            | zero_flow_slipfactor = 0.898336          |
| Impeller Internal Efficiency     | ni = 0.942247                            |
| Mean Streamline Length           | Ls = 0.138494 [m]                        |
| Axial Length of Impeller         | DZI = 0.047219 [m]                       |
| Power Required                   | P = 40.054348 [KW]>>                     |

**Εικόνα 5.3 :** Παρουσίαση αποτελεσμάτων για μέγιστο αριθμό πτερυγίων “Z<sub>i</sub> = 20” όπου προκύπτουν από την διαδικασία η οποία δημιουργήθηκε στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία.



Για να γίνει περισσότερο εμφανής η διαφορά των αποτελεσμάτων στον παρακάτω πίνακα 5.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και των δύο διαδικασιών.

| Μεταβλητές                | Mr. Johannes Schiff | Radial Compressor Calc. Tool |
|---------------------------|---------------------|------------------------------|
| $Z_1$                     | 20                  | 20                           |
| BL                        | 0.888231            | 0.768040                     |
| $\Phi$                    | 0.0644928           | 0.064493                     |
| $C_1$                     | 68.2936             | 67.186151                    |
| $W_1$                     | 136.588             | 134.372303                   |
| Inlet_Hub_To_Shroud_Width | 0.0335517           | 0.036224                     |
| $b_2$                     | 0.0122069           | 0.012329                     |
| $P_{02}$                  | 1.52861             | 1.524734                     |
| $T_{02}$                  | 327.855             | 327.855073                   |
| $\alpha_2$                | 65.6067             | 65.606736                    |
| $b_{2,angle}$             | -46.7541            | -45.764104                   |
| $b_2$                     | -34.1733            | -45.764104                   |
| $C_2$                     | 176.495             | 176.495                      |
| $W_2$                     | 106.391             | 106.391                      |
| $U_2$                     | 238.237             | 238.237                      |
| Zero_Flow_Slipfactor      | 0.888231            | 0.898336                     |
| $\eta_i$                  | 0.942247            | 0.942247                     |
| $L_s$                     | 0.122714            | 0.138494                     |
| P                         | 40.0543             | 40.0543                      |

**Πίνακας 5.1 :** Παρουσίασης σύγκρισης αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο διαδικασιών.

Στον πίνακα οι μονάδες μέτρησης μεταξύ των διαδικασιών είναι οι ίδιες και διακρίνονται στις εικόνες 5.3 και 5.2.

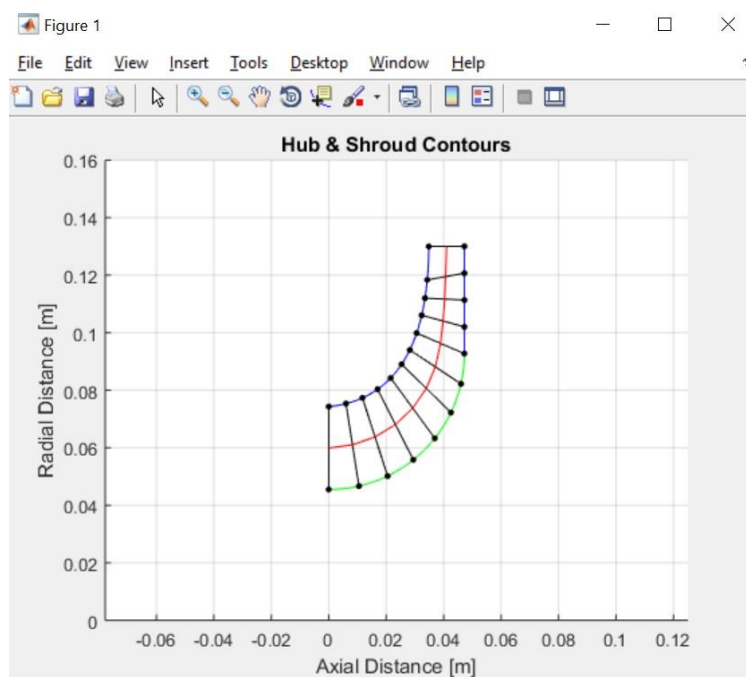
Οι διαφορές στις τιμές ευθύνονται αρχικά στους διαφορετικούς τρόπους υπολογισμού κάποιων παραγόντων καθώς και στις διαφορετικές ακρίβειες για τις οποίες έχουν τεθεί να συγκλίνουν ορισμένες διαδικασίες. Παρόλα αυτά τα αποτελέσματα διαφέρουν στο ελάχιστο έως και καθόλου σε ορισμένες περιπτώσεις ενώ ταυτόχρονα η βέλτιστες λύσεις ταυτίζονται.

Στην περίπτωση όπου στον κώδικα όπου δημιουργήθηκε στην συγκεκριμένη διπλωματική τεθεί ότι ο μέγιστος αποδεκτός αριθμός πτερυγίων είναι ίσος με “End=24” τότε η βέλτιστη λύση η οποία προκύπτει είναι για αριθμό πτερυγίων ίσο με “ $Z_1 = 22$ ”. Και τα αποτελέσματα τα οποία προκύπτουν με τα υπόλοιπα δεδομένα εισόδου ίδια παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες :

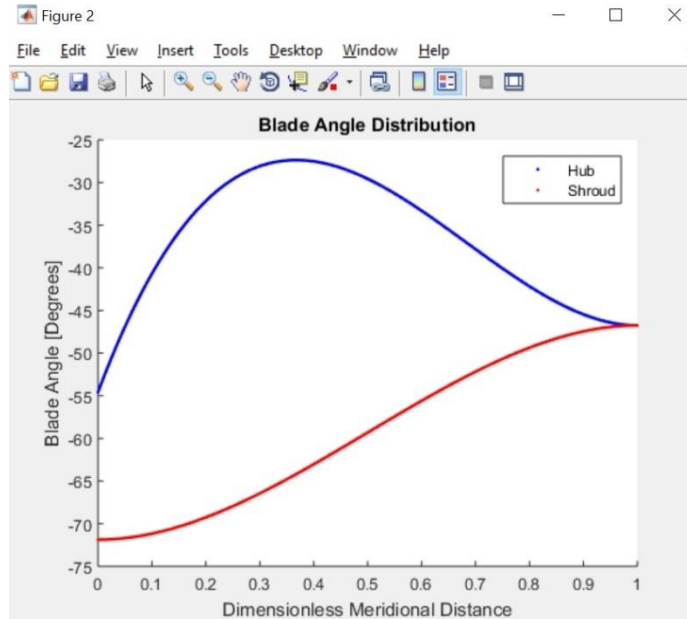
```
The design of impeller is done!
And the best solution is Zi=22 with Blade_Loading=0.714400
```

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| Inlet Flow Coefficient           | FI = 0.064493                            |
| Inlet Absolute Velocity          | C1 = 63.165563 [m/s]                     |
| Inlet Mean Relative Velocity     | W1 = 126.331126 [m/s]                    |
| Inlet Mean Radius                | r1mean = 0.059892[m]                     |
| Inlet Shroud Radius              | r1s = 0.074314 [m]                       |
| Inlet Hub to Shroud Width        | Inlet_Hub_To_Shroud_Width = 0.028814 [m] |
| Tip Width                        | b2 = 0.012396 [m]                        |
| Impeller Total Pressure          | P02 = 1.524734 [bar]                     |
| Impeller Total Temperature       | T02 = 327.855073 [K]                     |
| Impeller Tip Absolute Flow Angle | a2 = 65.606736 [Degrees]                 |
| Impeller Tip Relative Flow Angle | b2angle = -46.754104 [Degrees]           |
| Impeller Tip Blade Angle         | b2 = -46.754104 [Degrees]                |
| Impeller Tip Absolute Velocity   | C2 = 176.495142 [m/s]                    |
| Impeller Tip Relative Velocity   | W2 = 106.391403 [m/s]                    |
| Impeller Tip Speed               | U2 = 238.237443 [m/s]                    |
| Zero Flow Slip Factor            | zero_flow_slipfactor = 0.904898          |
| Impeller Internal Efficiency     | ni = 0.942247                            |
| Mean Streamline Length           | Ls = 0.139866 [m]                        |
| Axial Length of Impeller         | DZI = 0.047219 [m]                       |
| Power Required                   | P = 40.054348 [KW]>>                     |

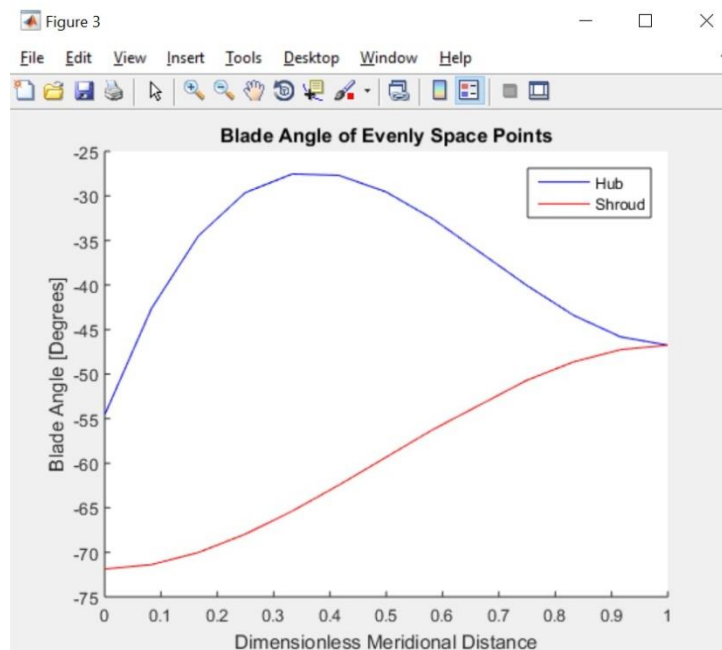
*Εικόνα 5.4 : Παρουσίαση αποτελεσμάτων για μέγιστο αποδεκτό αριθμό πτερυγίων ίσο με “End = 24”*



*Εικόνα 5.5 : Μορφή πτερυγίου βέλτιστης λύσης για μέγιστο αποδεκτό αριθμό πτερυγίων ίσο με “End = 24”.*



**Εικόνα 5.6 :** Καμπύλη κατανομής των γωνιών του πτερυγίου κατά μήκος των περιγραμμάτων πλήμνης και κελύφους για μέγιστο αποδεκτό αριθμό πτερυγίων ίσο με “End = 24”.



**Εικόνα 5.7 :** Καμπύλη κατανομής των γωνιών του πτερυγίου για τα “Evenly Spaced Points” κατά μήκος των περιγραμμάτων πλήμνης και κελύφους για μέγιστο αποδεκτό αριθμό πτερυγίων ίσο με “End = 24”.



## Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>

### 6.1 Συμπεράσματα

Με την τριβή επάνω στην συγκεκριμένη διπλωματική περισσότερο από δύο εξάμηνα το αποτέλεσμα που επήλθε είναι άκρως ικανοποιητικό. Για την κωδικοποίηση της προκαταρκτικής σχεδίασης πτερωτών ακτινικής ροής ήταν απαραίτητη αρχικά η βαθιά κατανόηση των διαδικασιών έτσι ώστε να μπορούν να κωδικοποιηθούν σωστά. Η πολυπλοκότητα ορισμένων διαδικασιών οδήγησε στο να παρθούν κάποιες παραδοχές οι οποίες προσεγγίζουν τις εν λόγω διαδικασίες. Εάν και η κωδικοποίηση αυτών των πολύπλοκων διαδικασιών έφτασε πολύ κοντά στην εύρεση λύσης, η πίεση του χρόνου δεν επέτρεπε την περαιτέρω ενασχόληση με αυτές. Παρόλα αυτά αυτές οι διαδικασίες μπορούν να βελτιωθούν μελλοντικά και ο κώδικας να γίνει ένα πλήρως αυτοματοποιημένο πρόγραμμα προκαταρκτικής σχεδίασης πτερωτών πλήρους ακτινικής ροής. Τα πεδία στα οποία μπορεί να βελτιωθεί ο κώδικας προκαταρκτικής σχεδίασης είναι τα εξής:

- Με μικρές αλλαγές στην κωδικοποίηση, οι δύο επιπλέον παράγοντες του ελάχιστου και μέγιστου αριθμού πτερυγίων τους οποίους δίνει ο χρήστης ως δεδομένα μπορούν να καταργηθούν από την διαδικασία εισαγωγής δεδομένων και να υπολογίζονται κατευθείαν μέσω του κώδικα. Η λογική πίσω από αυτό είναι ο κώδικας να σταματάει όταν βρει κάποια βέλτιστη λύση.
- Το κεντρικό σημείο της καμπύλης Spline του περιγράμματος του κελύφους θα πρέπει να βρίσκεται εξολοκλήρου από τον κώδικα χωρίς την παρέμβαση του χρήστη για την εναλλαγή τιμών. Αυτό απαιτεί μια αρκετά πολύπλοκη διαδικασία η οποία επηρεάζει εξ' ολοκλήρου τον κώδικα και τα αποτελέσματα.
- Η εύρεση του εμβადού στο μέσον πέρασμα να συνδέεται άμεσα με την επιλογή του κεντρικού σημείου της καμπύλης Spline του περιγράμματος του κελύφους που περιγράφηκε παραπάνω.
- Να γίνουν αλλαγές στα σημεία του κώδικα τα οποία επηρεάζουν τις κλίσεις των περιγραμμάτων στην είσοδο και στην έξοδο. Με αυτόν τον τρόπο ο κώδικας θα μπορεί να σχεδιάζει και πτερωτές τύπου μερικής επαγωγής “*Semi-inducer*” καθώς και πτερωτές μεικτής ροής.
- Η σύνδεση του κώδικα της Matlab με γραφικό περιβάλλον για την εισαγωγή των δεδομένων και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Δηλαδή να δημιουργηθεί ένα πρόγραμμα το οποίο θα χρησιμοποιείται εξ' ολοκλήρου μόνο αυτό για την

προκαταρκτική σχεδίαση, χωρίς την παρέμβαση του χρήστη σε αρχεία excel, txt και matlab.

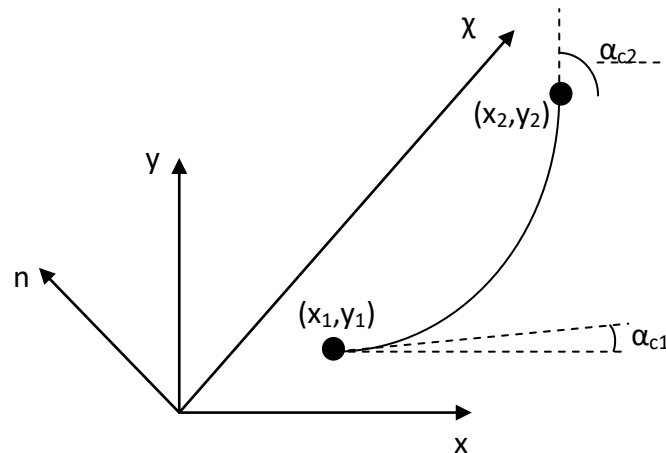
## Βιβλιογραφία.

- [1] Johannes Schiff , *“A Preliminary Design Tool for Radial Compressors”*, (Division of Thermal Power Engineering, Department of Energy Sciences, Faculty of Engineering, LTH, Lund University).
- [2] R.H Aungier , *“Centrifugal Compressors, A Strategy for Aerodynamic Design and Analysis”*, ASME 2000
- [3] Ιωάννης Κ. Νικολός, *“Θερμικές και Υδροδυναμικές Μηχανές”*, (Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Χανιά 2020).
- [4] *“Modeling and Validation of the SR-30 Turbojet Engine”*, (Aalborg University).
- [5] Rolvin D. Silva , *“Design and Fabrication of Major Components of turbojet engine”*, (Publication).
- [6] Χρήστος Κ. Κούβελης *“Μελέτη Κατασκευής Ακτινικής Πτερωτής Αεροσυμπιεστή με Φρεζάρισμα σε Πέντε Άξονες”*, (Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Χανιά 2017).
- [7] Ιωάννης Κ. Βαλάκος, *“Βελτιστοποίηση Σχεδίασης Τμημάτων Στροβιλομηχανών με Χρήση Εξελικτικών Αλγορίθμων”*, (Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Χανιά 2017, Χανιά 2006).
- [8] Joel N., *“Turbojet Vs. Turbofan Explained”*, (Century of Flight, 2-November 2020) .

## Παράρτημα Α.

### Περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς.

Κατά την δημιουργία των γεωμετρικών στοιχείων της πτερωτής πολλές φορές χρειάζεται η υιοθέτηση ενός περιστρεφόμενου συστήματος αναφοράς. Η χρήση του περιστρεφόμενου συστήματος αναφοράς γίνεται όταν χρειάζεται οι άξονες να υποστούν κάποια περιστροφή για τον ευκολότερο υπολογισμό κάποιων τιμών ή σε περιπτώσεις όπου η κλίση σε κάποιο σημείο παίρνει τιμές οι οποίες οδηγούν στην μη εξαγωγή αποτελεσμάτων όπως για παράδειγμα το " $\tan \alpha_c$ " για γωνία κλίσης ίση με " $\alpha_c = 90^\circ$ ". Έτσι περιστρέφοντας του άξονες η γωνία " $\alpha_c$ " παύει να ισούται με « $90^\circ$ » και οι υπολογισμοί μπορούν να γίνουν στο νέο αυτό σύστημα συντεταγμένων. Μετά το πέρας των υπολογισμών οι μεταβλητές όπου βρέθηκαν με κατάλληλες μετατροπές εκφράζονται ξανά στο κανονικό σύστημα αναφοράς. Το μη-περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς αποτελείται από τους άξονες  $(x,y)$ , ενώ το περιστρεφόμενο από τους  $(\chi,n)$ .



**Σχήμα Α :** Γραφική αναπαράσταση περιστροφής αξόνων. Με  $(x,y)$  διακρίνονται οι άξονες του μη-περιστρεφόμενου συστήματος αναφοράς, ενώ με  $(\chi,n)$  οι άξονες του περιστρεφόμενου συστήματος αναφοράς.

Έστω τα δύο σημεία  $(x_1, y_1)$  και  $(x_2, y_2)$  ορίζουν μια καμπύλη, της οποίας η κλίση στο σημείο  $(x_2, y_2)$  ισούται με ( $\alpha_{c2} = 90^\circ$ ). Στην περίπτωση όπου είναι απαραίτητοι κάποιοι υπολογισμοί οι οποίοι εμπεριέχουν την κλίση του σημείου  $(x_2, y_2)$  του μη-περιστρεφόμενου συστήματος αναφοράς τότε υιοθετείται ένα περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς το οποίο θα είναι υπό γωνία " $\Phi_{coord}$ " σε σχέση με το κανονικό. Ο

νέος άξονας των «χ» του περιστρεφόμενου αυτού συστήματος θα διέρχεται από τα δύο σημεία τα δύο σημεία τα οποία ορίζουν την καμπύλη. Στο σχήμα Α διακρίνεται η αυτή η περιστροφή των αξόνων. Για την βέλτιστη οπτική του σχήματος ο άξονας-χ διακρίνεται ως παράλληλος με τα σημεία.

Για τον υπολογισμό της γωνίας περιστροφής των αξόνων χρησιμοποιούνται οι σχέσεις (Α.1) και (Α.2). Για να βρεθεί η γωνία περιστροφής μέσω της σχέσης (Α.1) θα πρέπει η διαφορά “ $\Delta x = x_2 - x_1$ ” να είναι θετική ( $\Delta x > 0$ ). Αντίστοιχα για την χρήση της σχέσης (Α.2) θα πρέπει η διαφορά “ $\Delta y = y_2 - y_1$ ” να είναι θετική ( $\Delta y > 0$ ). Στην περίπτωση όπου και οι δύο διαφορές είναι θετικές μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε από τις σχέσεις (Α.1) και (Α.2). Ο λόγος των διακρίσεων αυτών μεταξύ των σχέσεων είναι διότι το πρόσημο της γωνίας καθορίζεται από τον αριθμητή των εξισώσεων (Α.1) και (Α.2). Επομένως σε περίπτωση χρήσης της λάθος εξίσωσης το πρόσημο της γωνίας (συνεπώς και το αποτέλεσμα) θα είναι λανθασμένο.

$$\sin(\Phi_{coord}) = \frac{Y_2 - Y_1}{\sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2}} \quad (A.1)$$

$$\cos(\Phi_{coord}) = \frac{X_2 - X_1}{\sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2}} \quad (A.2)$$

Με γνωστή την γωνία περιστροφής των αξόνων μπορούν να υπολογιστούν οι συντεταγμένες των σημείων που ορίζουν την καμπύλη στο περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς μέσω των εξισώσεων (Α.3) και (Α.4).

$$\chi = x \cos(\Phi_{coord}) + y \sin(\Phi_{coord}) \quad (A.3)$$

$$n = y \cos(\Phi_{coord}) - x \sin(\Phi_{coord}) \quad (A.4)$$

Το πρόβλημα της κλίσης των «90°» λύνεται με την χρήση των εξισώσεων (A.5) και (A.6) οι οποίες δίνουν την κλίση των σημείων σε περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς.

$$n_1' = \tan(\alpha_{c1} - \Phi_{coord}) \quad (A.5)$$

$$n_2' = \tan(\alpha_{c2} - \Phi_{coord}) \quad (A.6)$$

Πλέον όλοι οι υπολογισμοί μπορούν να πραγματοποιηθούν στο νέο περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς και στην συνέχεια ότι αποτέλεσμα προκύψει από αυτούς εκφραστεί ξανά στο μη-περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς μέσω των εξισώσεων (A.7) και (A.8).

$$x = \chi \cos(\Phi_{coord}) - n \sin(\Phi_{coord}) \quad (A.7)$$

$$y = n \cos(\Phi_{coord}) + \chi \sin(\Phi_{coord}) \quad (A.8)$$