



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

**Υπολογιστική προσομοίωση της ροής κατά την  
αλληλεπίδραση κινητής και σταθερής πτερύγωσης  
στις στροβιλομηχανές**

Διπλωματική Εργασία  
του

**Πάρι Χ. Παπακωνσταντίνου**

Επιβλέπων: Κ.Χ. Γιαννάκογλου  
Καθηγητής ΕΜΠ

Οκτώβριος 2011



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

**Υπολογιστική προσομοίωση της ροής κατά την αλληλεπίδραση κινητής και σταθερής πτερύγωσης στις στροβιλομηχανές**

Διπλωματική Εργασία  
**Πάρι Χ. Παπακωνσταντίνου**

Επιβλέπων: Κ.Χ. Γιαννάκογλου, Καθηγητής ΕΜΠ

Οκτώβριος 2011

Το Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών του ΕΜΠ έχει μακρά παράδοση στην ανάπτυξη λογισμικού Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (είτε οικείου είτε ανοικτού κώδικα) το οποίο διαχειρίζεται συμπιεστές και ασυμπίεστες ροές, ατρίβεις ή συνεκτικές, χρονικά μεταβαλλόμενες ή μόνιμες. Η παρούσα εργασία χρησιμοποιεί το πακέτο λογισμικού Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής ανοικτού κώδικα OpenFOAM, το οποίο είναι γενικής χρήσης, ώστε με κατάλληλες τροποποιήσεις να μπορέσει να εφαρμοστεί σε περυγώσεις στροβιλομηχανών, και πιο συγκεκριμένα σε προβλήματα αλληλεπίδρασης κινητής και σταθερής πτερύγωσης. Μέχρι πρότινος, τέτοιου είδους προβλήματα προσεγγίζονταν είτε με επίλυση της ροής χωριστά για κάθε πτερύγωση της βαθμίδας, είτε με περιφερειακή μεσοποίηση των ροϊκών μεγεθών στη διεπιφάνεια αλληλεπίδρασης (mixing plane), είτε λαμβάνοντας στιγμιότυπα της κινητής πτερύγωσης (“frozen” rotor) προκειμένου να ληφθεί υπόψη η αλληλεπίδραση αλλά παράλληλα να μειωθεί το υπολογιστικό κόστος. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται παρεμβολή των μεταβλητών της ροής σε πραγματικό χρόνο με ταυτόχρονη κίνηση του πλέγματος της κινητής πτερύγωσης. Η μέθοδος αυτή είναι ακριβέστερη αλλά και ακριβότερη από τις προαναφερθείσες, αφού η ροή είναι μη-μόνιμη, το χρονικό βήμα κίνησης του πλέγματος είναι πολύ μικρό, ενώ σε κάθε επανάληψη γίνεται η παρεμβολή των ροϊκών μεταβλητών από το κινούμενο πλέγμα στο ακίνητο και αντίστροφα. Στην αρχική της φάση, η παρούσα εργασία, ασχολείται με τη γένεση πλέγματος σε 3D περυγώσεις ενώ, στη συνέχεια, προσαρμόζει ορισμένα γενικής χρήσεως εργαλεία του OpenFOAM προκειμένου να εφαρμοστούν για την επιβολή συνθηκών περιφερειακής περιοδικότητας. Έμφαση, δίνεται στον τρόπο που υλοποιείται η επικοινωνία των πλεγμάτων της κινητής και της σταθερής πτερύγωσης. Ως εκ τούτου παρουσιάζονται δυο εφαρμογές προσομοίωσης της ροής σε βαθμίδα αξονικού συμπιεστή, προκειμένου να γίνει εμφανής ο τρόπος λειτουργίας και η επιτυχής επικοινωνία των δυο πλεγμάτων. Παρά το σχετικά υψηλό κόστος τέτοιου είδους προσομοιώσεων, η διαδικασία επίλυσης της ροής επιταχύνεται σημαντικά με χρήση παράλληλης επεξεργασίας.



**NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS  
SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING  
FLUID SECTION  
LABORATORY OF THERMAL TURBOMACHINES  
PARALLEL CFD & OPTIMIZATION UNIT**

**Numerical prediction of flows associated with Rotor-Stator-Interaction  
problems in turbomachinery**

Diploma Thesis

**Paris C. Papakonstantinou**

Advisor: K.C. Giannakoglou, Professor NTUA

October 2011

The Parallel CFD & Optimization Unit of the Lab. of Thermal Turbomachines of NTUA has a long tradition in developing CFD software – either in-house or open source- that can handle compressible and incompressible flows, either viscous or inviscid, steady or unsteady. This diploma thesis uses OpenFOAM, an open source generic purpose CFD software, in order to simulate the flow in turbomachinery problems, by laying emphasis to rotor-stator-interaction problems. So far, it was fairly standard to simulate each component separately, but since there are strong interactions between the components, especially between stator and rotor, many attempts have been made lately to introduce this interaction into the computation by different coupling procedures. In order to lower the computing cost, these simulations are usually performed steady state by applying an averaging procedure in the circumferential direction (“mixing plane”) or quasi-steady where the rotor and stator are modeled at a fixed position relative to each other (“frozen rotor”), while rotational terms are included in the moving frames though transient effects are neglected. In this thesis, a real-time interpolation scheme is used for the flow variables between the rotor and stator flow domains, combined with mesh rotation. The latter method, while engaging more computational resources comparing to other methods, takes into consideration both the interaction and unsteady effects, and increases accuracy. The current thesis also emphasizes in mesh generation for flow domains around 3D blades by expanding/generalizing an in-house software. Moreover, it uses general purpose utilities (or utilities implemented with respect to turbomachinery problems) of OpenFOAM in order to maintain peripheral periodicity in flow domains, while focusing on the process used for the communication of the meshes. Finally, a case of an axial compressor stage is presented in order to demonstrate the success of the interpolation method. The computational cost of the simulation is significantly reduced by parallel processing.



## **Αντί Προλόγου**

Με την ευκαιρία της περάτωσης της παρούσας εργασίας, που σηματοδοτεί και την ολοκλήρωση των προπτυχιακών σπουδών μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές και ειλικρινείς μου ευχαριστίες προς όλους όσους βοήθησαν στην προσπάθειά μου αυτή. Πρώτο από όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας Κ. Γιαννάκογλου, για την καθοδήγηση και τις γνώσεις που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας. Επιπλέον, τους Δρ. Δ. Παπαδημητρίου και Δρ. Α. Ζυμάρη καθώς και τον υποψήφιο διδάκτορα Ε. Παπουτσή για τις πολύτιμες συμβουλές τους, το χρόνο που μου διέθεσαν, την ευχάριστη ατμόσφαιρα και την υπομονή τους.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τους συναδέλφους και φίλους μου Αίγλη και Διονύση για την αμέριστη συμπαράστασή και στήριξή τους όλο αυτό το διάστημα. Τελευταία, αλλά εξίσου ένθερμα, ευχαριστώ την οικογένειά μου Βικτωρία, Σοφία, Ίλια, Παρασκευά και Χρήστο για όλα αυτά που τόσο απλόχερα μου προσφέρουν τα τελευταία 23 χρόνια.





# Περιεχόμενα

<b>Περιεχόμενα</b>	<b>ix</b>
<b>Κατάλογος Σχημάτων</b>	<b>xi</b>
<b>Κατάλογος Πινάκων</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Σκοπός- Αντικείμενο- Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
1.1 Υπολογιστική Ρευστοδυναμική σε βαθμίδα Στροβιλομηχανής . . . . .	2
1.2 OpenFOAM . . . . .	4
1.2.1 Ιστορία . . . . .	4
1.2.2 Χαρακτηριστικά . . . . .	5
1.2.3 Εκτελέσιμα αρχεία του OpenFOAM . . . . .	5
1.2.4 Case . . . . .	6
1.3 Μοντελοποίηση της Τύρβης . . . . .	7
1.4 Δομή της Εργασίας . . . . .	8
<b>2 Εξισώσεις Ροής</b>	<b>11</b>
2.1 Εξισώσεις Μέσης Ροής Σταθερής Πτερύγωσης . . . . .	11
2.2 Εξισώσεις Μέσης Ροής Κινητής Πτερύγωσης . . . . .	12
2.3 Χρησιμοποιούμενο Μοντέλο Τύρβης . . . . .	13
<b>3 Γένεση του Πλέγματος</b>	<b>15</b>
3.1 Γενικά για Πλέγματα . . . . .	15
3.2 Προυπάρχον Λογισμικό . . . . .	16
3.3 Προσωπική Συμβολή . . . . .	21
3.4 Εγχειρίδιο Χρήσης . . . . .	24
3.5 Αποτελέσματα . . . . .	29
<b>4 Σχετικά Εργαλεία του πακέτου OpenFOAM για εφαρμογές σε πτερυγώσεις στροβιλομηχανών</b>	<b>35</b>
4.1 Εργαλείο <b>ggi</b> του OpenFoam . . . . .	37
4.2 Εργαλείο <b>cyclicGgi</b> του OpenFoam . . . . .	47
4.3 Εργαλείο <b>overlapGgi</b> του OpenFoam . . . . .	51
4.4 Εργαλείο <b>mergeMeshes</b> του OpenFoam . . . . .	54
4.5 Εντολές <b>setSets- setsToZones</b> . . . . .	55
4.6 Περιστροφική Κίνηση του Πλέγματος . . . . .	55

<b>5 Εφαρμογή</b>	<b>59</b>
5.1 Αποτελέσματα για Τυρβώδη ροή σε βαθμίδα αξονικού συμπιεστή . . . .	69
<b>6 Συμπεράσματα</b>	<b>73</b>
6.1 Συνεισφορά της παρούσας διπλωματικής εργασίας . . . . .	74
6.2 Προτάσεις για μελλοντική εργασία . . . . .	75
<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>77</b>

## Κατάλογος Σχημάτων

3.1	Λογικό Διάγραμμα Ροής της παλαιότερης έκδοσης του κώδικα . . . .	18
3.2	Λογικό Διάγραμμα Ροής της παλαιότερης έκδοσης του κώδικα . . . .	20
3.3	Λογικό Διάγραμμα Ροής της παλαιότερης έκδοσης του κώδικα . . . .	22
3.4	Πάνω: Πλέγμα χωρίς Μεταφορά της πληροφορίας Sorenson στα άκρα του χωρίου ροής. Κάτω: Πλέγμα με Μεταφορά της πληροφορίας Sorenson στα άκρα του χωρίου ροής. . . . .	25
3.5	Πάνω: Πλέγμα Laplace. Κάτω: Πλέγμα Sorenson με καθετότητα των πλεγματικών γραμμών στα άκρα και καθορισμένη πρώτη απόσταση από το όριο. . . . .	26
3.6	Πάνω: Υπολογισμός κλήσης με χρήση του μέσου όρου 5 σημείων PIN και 5 σημείων META το LE. Κάτω: Υπολογισμός κλήσης με χρήση του μέσου όρου των σημείων που βρίσκονται περίπου στο 10 % της χορδής PIN και META το LE. . . . .	27
3.7	Πάνω: Πλέγμα Laplace. Κάτω: Πλέγμα με καθετότητα των πλεγματικών γραμμών στα άκρα και καθορισμένη πρώτη απόσταση από το όριο. . . . .	28
3.8	Πάνω: Πλέγμα χωρίς πύκνωση στην καθ' ύψος διεύθυνση. Κάτω: Πλέγμα με πύκνωση στην καθ' ύψος διεύθυνση. . . . .	29
3.9	Πλέγμα γύρω από σταθερή πτερύγωση συμπιεστή που δημιουργήθηκε με το turboGen3D . . . . .	30
3.10	Πλέγμα γύρω από σταθερή πτερύγωση συμπιεστή που δημιουργήθηκε με το turboGen3D . . . . .	31
3.11	Πλέγμα γύρω από κινητή πτερύγωση συμπιεστή που δημιουργήθηκε με το turboGen3D . . . . .	32
3.12	Πλέγμα γύρω από κινητή πτερύγωση συμπιεστή που δημιουργήθηκε με το turboGen3D . . . . .	33
3.13	Πλέγμα γύρω από κινητή πτερύγωση συμπιεστή που δημιουργήθηκε με το turboGen3D . . . . .	34
4.1	Αριστερά: Χρήση του ggi σε γραμμική πτερύγωση. Δεξιά: Χρήση του ggi σε πλήρως επικαλυπτόμενες επιφάνειες[1]. . . . .	37
4.2	Πεπερασμένος Όγκος. Η γραμμοσκιασμένη οριακή επιφάνεια του κελιού στο εξής ονομάζεται πρόσωπο. ( $P$ - κέντρο κελιού, $N$ - κέντρο γειτονικών κελιών, $S_f$ διάνυσμα κάθετο στην επιφάνεια με μέτρο την επιφάνεια σε $m^2$ .) . . . . .	38

4.3	Οι παράγοντες στάθμισης λαμβάνονται ως ποσοστό της τομής των δυο προσώπων ως προς την επιφάνεια του κυρίου. . . . .	40
4.4	Αριστερά: Πρωτεύον Επιφανειακό πλέγμα. Με μπλέ (σκούρο) φαίνεται η πρωτεύουσα πλευρική επιφάνεια μιας υπολογιστικής κυψέλης. Δεξιά: Δευτερεύον επιφανειακό πλέγμα. . . . .	41
4.5	Ορισμός του Περιβάλλοντος Πλαισίου γύρω από την κύρια πλευρική επιφάνεια μιας υπολογιστικής κυψέλης. . . . .	42
4.6	Εύρεση δευτερευουσών πλευρικών επιφανειών που πιθανώς γειτνιάζουν με την κύρια πλευρική επιφάνεια της υπο μελέτης υπολογιστικής κυψέλης. . . . .	43
4.7	Θεώρημα Διαχωριστικών Αξόνων . . . . .	43
4.8	Σχηματικά ο αλγόριθμος των Sutherland-Hodgman[2] . . . . .	44
4.9	Προβλήματα με τεμνόμενες επιφάνειες των προς επικοινωνία προσώπων . . . . .	45
4.10	Επεξήγηση του χωρίου ροής που χρησιμοποιείται ως παράδειγμα στο παρόν κεφάλαιο. Με μαύρο ( σκούρο) χρώμα φαίνονται τα ονόματα των patches ενώ με μπλέ ( ανοιχτό) τα αντίστοιχα patches με τα οποία επικοινωνούν. . . . .	48
4.11	Κατανομή Ταχυτήτων σε επιφάνειες με περιφερειακή περιοδικότητα .	51
4.12	Σχηματισμός ολόκληρης της περιφερειακής διεπιφάνειας . . . . .	52
4.13	Επικοινωνία των επιφανειών. Το πάνω τμήμα κάθε σχήματος δείχνει την εγκάρσια κατανομή ταχυτήτων στην είσοδο του στάτορα, ενώ η κάτω επιφάνεια την αντίστοιχη κατανομή ταχυτήτων στην έξοδο του ρότορα . . . . .	54
5.1	Πάνω: Αεροτομή της κινούμενης περύγωσης πάνω στον άξονα της μηχανής. Κάτω: Αεροτομή της ακίνητης περύγωσης. . . . .	60
5.2	Προοπτικό σχήμα με τις αεροτομές των δυο περυγίων. Με πράσινο (ανοικτό) χρώμα φαίνεται η κινούμενη περύγωση - μπορεί κανείς να διακρίνει τη συστροφή του περυγίου- ενώ με κόκκινο (σκούρο) η ακίνητη. . . . .	61
5.3	Κατανομές ταχυτήτων στη βαθμίδα σε 4 διαδοχικά διαφορετικά στιγμιότυπα. . . . .	70
5.4	Κατανομές στατικής πίεσης με ισοτασικές γραμμές πάνω στο τοίχωμα της κινητής περύγωσης, της σταθερής και του άξονα της μηχανής σε 4 διαδοχικά στιγμιότυπα. . . . .	71
5.5	Κατανομές της τυρβώδους συνεκτικότητας στα τοιχώματα σε 4 διαδοχικά στιγμιότυπα. . . . .	72
5.6	Σχηματισμός της διεπιφάνειας επικοινωνία μεταξύ κινητής και σταθερής περύγωσης σε 4 διαδοχικά στιγμιότυπα. . . . .	72

# Κατάλογος Πινάκων

5.1 Συνοπτικά οι οριακές συνθήκες για την εφαρμογή με στρωτή ροή. . . .	67
5.2 Πρόσθετες οριακές συνθήκες για τις μεταβλητές της τύρβης. . . . .	67



# Κεφάλαιο 1

## Σκοπός- Αντικείμενο- Εισαγωγή

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η υπολογιστική προσομοίωση της αεροδυναμικής αλληλεπίδρασης μεταξύ της κινητής και σταθερής πτερύγωσης μιας στροβιλομηχανής (Rotor- Stator Interaction) για ασυμπίεστη ροή. Η αριθμητική προσομοίωση είναι βασική παράμετρος στο σχεδιασμό των στροβιλομηχανών, ωστόσο μέχρι πρόσφατα η συνήθης πρακτική ήταν η ροή να επιλύεται χωριστά για κάθε συνιστώσα της βαθμίδας. Τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης όμως, είναι ιδιαίτερα έντονα μεταξύ ρότορα και στάτορα. Ως εκ τούτου διαφορετικά μοντέλα σύζευξης έχουν προταθεί είτε με περιφερειακά μέσες τιμές των ροϊκών μεταβλητών είτε με κόμβο προς κόμβο παρεμβολή, ώστε να περνάει η πληροφορία σε πραγματικό χρόνο. Η πολυπλοκότητα της ροής σε βαθμίδα στροβιλομηχανής κάνει την προσομοίωση ιδιαίτερα ακριβή, αφού απαιτεί πολύ μικρά χρονικά βήματα για την επίλυση των μη μόνιμων χαρακτηριστικών της ροής. Ακόμα, η μοντελοποίηση ολόκληρης της μηχανής περιφερειακά πολλαπλασιάζει το κόστος τόσο σε μνήμη όσο και σε υπολογιστική ισχύ. Έτσι γίνεται απαγορευτική για βιομηχανικές εφαρμογές. Το τμήμα που καθυστερεί τον κώδικα στις περισσότερες περιπτώσεις, είναι αυτό της επικοινωνίας των δύο πλεγμάτων, αφού η σύνδεση της διεπιφάνειας μεταξύ του ακίνητου πλέγματος του στάτορα και του κινούμενου του ρότορα, γίνεται για κάθε χρονικό βήμα.

Για την επίλυση της ροής χρησιμοποιήθηκε πακέτο ανοιχτού κώδικα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής OpenFoam καθώς και οικείοι κώδικες για τη γένεση πλέγματος και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Η επίλυση της ροής χωριστά σε κάθε συνιστώσα έχει γίνει στο παρελθόν από το ΕΘΣ/ΕΜΠ είτε με οικείους κώδικες είτε με λογισμικό ανοιχτού κώδικα. Στην παρούσα διπλωματική η έμφαση δίνεται στην γένεση των τριδιάστατων πλεγμάτων των δύο πτερυγίων καθώς και στον τρόπο που η πληροφορία περνάει από το κινούμενο πλέγμα στο ακίνητο και το αντίστροφο. Ακόμα προκειμένου να αποφευχθεί το μεγάλο κόστος της προσομοίωσης ολόκληρης της μηχανής χρησιμοποιείται πρώτη φορά, για το εργαστήριο, περιφερειακή περιοδικότητα χωρίς να απαιτείται αντιστοιχία κόμβο προς κόμβο καθώς και αντίστοιχη περιοδικότητα για τη διεπιφάνεια επικοινωνίας των δύο πλεγμάτων ενώ η ροή επιλύεται παράλληλα σε αρκετούς επεξεργαστές. Στο πλαίσιο της διπλωματικής χρειάστηκε να τροποποιηθεί ένας οικείος κώδικας γένεσης πλέγματος γύρω από

τριδιάστατες γεωμετρίες πτερυγίων και επιπρόσθετα να γίνει η μετατροπή του πλέγματος σε μορφή αναγνώσιμη από το πακέτο ανοιχτού κώδικα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (ΥΡΔ) OpenFoam. Τονίζεται ότι η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στη διερεύνηση των δυνατοτήτων του εν λόγω λογισμικού, ως προς την εφαρμογή του σε προβλήματα ροής, που αφορούν αεροδυναμική αλληλεπίδραση κινητής και σταθερής πτερυγώσης, ενώ λιγότερη έμφαση δίνεται στη φυσική σημασία των αποτελεσμάτων -που ούτως ή άλλως προέκυψαν δοκιμαστική εφαρμογή. Πραγματοποιείται όλη εκείνη η δουλειά υποδομής, ώστε να ευρεθεί μια διαδικασία σχηματισμού των μελλοντικών εφαρμογών, να αποσαφηνιστούν τυχόν δυσνόητα τμήματά της και εν τέλει να παγιωθεί, ώστε στο μέλλον να μπορεί να χρησιμοποιηθεί απρόσκοπτα σε πραγματικές εφαρμογές.

## 1.1 Υπολογιστική Ρευστοδυναμική σε βαθμίδα Στροβιλομηχανής

Παρακάτω δίνονται γενικές κατευθυντήριες οδηγίες σχετικά με την εφαρμογή της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής σε ενιαία βαθμίδα στροβιλομηχανής - όπως εφαρμόστηκε και στην παρούσα διπλωματική. Κατά την επιλογή του είδους της προσομοίωσης, ο μηχανικός έχει να επιλέξει μεταξύ μιας πληθώρας παραμέτρων. Αφενός καλείται να αποφασίσει για τη χωρική διάσταση της προσομοίωσης. Οι 2D προσομοιώσεις χρησιμοποιούνται για μια πρώτη προσέγγιση της λύσης και ενδέχεται να δώσουν λογικά αποτελέσματα για εφαρμογές σε μηχανές με μακριά και πολλά πτερύγια ή σε στροβίλους χαμηλής πίεσης. μια καλύτερη προσέγγιση της λύσης χωρίς υπερβολική αύξηση του υπολογιστικού κόστους γίνεται με τις ψεύδο- 3D (quasi- 3D) προσομοιώσεις. Είναι 2D προσομοιώσεις, στις εξισώσεις των οποίων προστίθενται όροι πηγής, ώστε να λαμβάνεται υπόψη η αλλαγή στην ενεργή διατομή ροής λόγω γεωμετρίας ή λόγω ανάπτυξης του οριακού στρώματος. Τέλος, οι 3D προσομοιώσεις είναι αναγκαίες σε φαινόμενα που η δευτερεύουσα ροή είναι σημαντική και η ανάπτυξη του οριακού στρώματος ταχεία όπως σε συμπιεστές ή μηχανές με λίγα πτερύγια. Επίσης, αναγκαία είναι σε περιπτώσεις που απαιτείται υψηλή ακρίβεια όπως στον προσδιορισμό της θέσης ενός κύματος κρούσης. Ακόμη ένα καθοριστικό στοιχείο μιας προσομοίωσης αφορά το αν η ροή θα είναι συνεκτική ή ατριβής. Για προσκολλημένες ροές που όμως το οριακό στρώμα δεν παίζει σημαντικό ρόλο (οι κλίσεις ταχύτητας είναι πολύ μικρότερες από τις κλίσεις της πίεσης) στη διαμόρφωση της ροής η μη- συνεκτική ροή δίνει ορθολογικά αποτελέσματα όσον αφορά την κατανομή της πίεσης και τη φόρτιση του πτερυγίου. Η προσομοίωση συνεκτικής ροής είναι αναγκαία για να προλεχθούν απώλειες, δευτερεύουσες ροές και αποκολλήσεις. Ωστόσο, ο λόγος πλέον που ο μηχανικός θα επιλέξει να χρησιμοποιήσει ατριβή ροή στην προσομοίωση δεν έχει να κάνει με τους υπολογιστικούς πόρους και το κόστος, αλλά με το γεγονός πως δε χρειάζεται να ανησυχεί για την πύκνωση του πλέγματος κοντά στα στερεά όρια, τις τιμές του  $y^+$  και τα σφάλματα λόγω μοντελοποίησης της τύρβης.

Ακολουθεί μια σύντομη ιστορική ανασκόπηση για την πορεία της υπολογιστικής



προσομοίωσης της χρονικά μεταβαλλόμενης ροής σε σχετικά προβλήματα καθώς και παρουσίαση των σύγχρονων τάσεων επί του θέματος. Η υπολογιστική προσομοίωση της μη-μόνιμης ροής, ξεκίνησε με τη δουλειά του Erdos[3] για ατριβή, 2Δ ροή σε συμπιεστή στροβιλομηχανής. Η πρώτη προσομοίωση για 3Δ ροή πραγματοποιήθηκε από τους Koya and Kotake[4]. Όμοια με τον κώδικα του Erdos, το λογισμικό των Koya και Kotake χρησιμοποιούσε phase-lagged[5] περιοδικά όρια, που σημαίνει ότι το επερχόμενο όριο λαμβάνει τις τιμές του προηγούμενου ορίου με διαφορά φάσης που αντιστοιχεί σε χρόνο μιας περιόδου. Η χρήση των συνθηκών αυτών βελτιώθηκε στην πορεία από τον Giles[6] με την πρόταση της μεθόδου time-inclination και εν τέλει με τη μέθοδο του He "shape correction method", η οποία βασίζεται σε σειρές Fourier. Οι πρώτες οριακές συνθήκες χωρικής περιοδικότητας, καθώς και το πρώτο μοντέλο που χρησιμοποιούσε τις εξισώσεις Navier Stokes, εισήχθησαν με την εργασία του Rai[7] το 1985. Έκτοτε, πολλοί είναι οι κώδικες που έχουν αναπτυχθεί είτε 2Δ είτε 3Δ, για ασυμπίεστες και συμπιεστές ροές. Οι επικρατούσες τάσεις επί του θέματος, προκειμένου να λάβουν υπόψη τη χρονικά μεταβαλλόμενη ροή, προτείνουν ολοκλήρωση στο χρόνο των χωρικά διακριτοποιημένων εξισώσεων. Η μέθοδος Backward Difference Formula (BDF)[8] ή Πίσω Διαφορών προελαύνει ολόκληρο το σύστημα των εξισώσεων, σε πραγματικό χρόνο, χρησιμοποιώντας ένα πεπλεγμένο σχήμα χρονοπροέλασης έως την σύγκλιση σε περιοδικά μόνιμη ροή. Ενδεικτικά, για τυπικές ταχύστροφες στροβιλομηχανές, η σύγκλιση επέρχεται μετά από χρόνο 5-6 περιόδους. Αντίστοιχη είναι η μέθοδος του Χρονικού Φάσματος (Time Spectral Method[9]), η οποία είναι μια υψηλής ακρίβειας μέθοδος χρονικής ολοκλήρωσης και έχει επιδείξει αξιόλογη οικονομία σε υπολογιστικό κόστος συγκρινόμενη με την μέθοδο των Πίσω Διαφορών, ωστόσο χρησιμοποιείται μόνο για περιοδικά μόνιμα προβλήματα. Ουσιαστικά, χρησιμοποιεί ανάλυση Fourier και λύνει απευθείας τη μόνιμη περιοδική κατάσταση, αγνοώντας τη μεταβατική φάση. Ο αλγόριθμος επιλύει τις πλήρως μη-γραμμικές κατά Reynolds εξισώσεις Navier-Stokes και ως εκ τούτου λαμβάνει υπόψη τα μη-μόνιμα χαρακτηριστικά της ροής. Στο ίδιο μοτίβο κινείται και η χρήση της μεθόδου Αρμονικής Ισορροπίας [10], αποκλειστικά για περιοδικά προβλήματα. Στις μεθόδους αυτές, οι μεταβλητές ροής λογαριάζονται ως επαλληλία ενός χρονικά μόνιμου και ενός χρονικά μη-μόνιμου όρου. Η χρονικά μεταβαλλόμενη διαταραχή ανάγεται στην αρμονική της μορφή και το μέτρο/φάση της επιλύονται στη δεδομένη συχνότητα. Μια τελευταία αναφορά σχετίζεται με την πρόταση των Ekici και Hall [11] πάνω στη μέθοδο της Αρμονικής Ισορροπίας. Η ειδοποιός διαφορά ως προς την παραδοσιακή Harmonic Balance Method είναι ότι μόνο ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων επιλύεται για κάθε σειρά πτερυγίων.

Οι προαναφερθείσες μέθοδοι στην ανωτέρω παράγραφο, διατηρούν, σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό, τα μη-μόνιμα χαρακτηριστικά της ροής διατηρώντας, όμως παράλληλα σε υψηλά επίπεδα το χρόνο επίλυσης. Χρησιμοποιώντας χαμηλής τάξεως σχήματα, επιτυγχάνεται επιτάχυνση της επίλυσης. Σε αυτήν την περιοχή εμπίπτει και το mixing plane[12]) μία μέθοδος που πρωτοδιατυπώθηκε το 1979 και έκτοτε αποτελεί την κύρια μέθοδο για το σχεδιασμό στροβιλομηχανών στη βιομηχανία. Οι τιμές που εισέρχονται ως είσοδοι στο στάτορα είναι οι περιφερειακά μέσες τιμές των ροϊκών μεγεθών στην έξοδο

του ρότορα στο χρόνο μιάς περιόδου. Ασφαλώς αυτό εξομαλύνει κάθε χρονικά μεταβαλλόμενο χαρακτηριστικό της ροής, αλλά και πάλι δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Αντίστοιχα, έχει προταθεί η μέθοδος του "παγωμένου" ρότορα, επίσης χρονικά μόνιμη. Η κινούμενη και ακίνητη περύγωση βρίσκονται σταθερές σε μια σχετική θέση μεταξύ τους και με έναν μετασχηματισμό, ώστε να ληφθεί υπόψη η επίδραση της περιστροφικής κίνησης του ρότορα, επιλύεται η ροή. Προφανώς το πεδίο ροής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη θέση των δύο συνιστωσών της βαθμίδας και ως εκ τούτου η μέθοδος της διεπιφάνειας επικοινωνίας δίνει καλύτερα αποτελέσματα. Τέτοιες μέθοδοι αγνοούν πλήρως τα χρονικά μεταβαλλόμενα χαρακτηριστικά της ροής. Οι μέθοδοι BDF, Χρονικού Φάσματος και Πεδίου Συχνότητας να μην λαμβάνουν υπόψη τους τη μη-μονιμότητα, αλλά χρησιμοποιούν άλλες παραδοχές για να μειώσουν το κόστος.

## 1.2 OpenFOAM

Στην παράγραφο που ακολουθεί δίνεται μια γενική εικόνα για λογισμικό Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική.

### 1.2.1 Ιστορία

Το αρτικόλεξο OpenFOAM αντιπροσωπεύει το πλήρες όνομα του πακέτου Open Source Field Operation And Manipulation. Ξεκίνησε ως FOAM το 1993 στο Imperial College του Λονδίνου σαν συνεργασία των Henry Weller και Hrvoje Jasak. Το κίνητρο ήταν να δημιουργηθεί εκ του μηδενός ένας συμπαγής κώδικας Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής χωρίς τις αγκυλώσεις των προηγούμενων λογισμικών γραμμένων σε Fortran, οι οποίοι συντάχθηκαν την περίοδο που η επιστημονική κοινότητα ανακάλυπτε την Υπολογιστική Ρευστοδυναμική και μάθαινε από τα σφάλματά της. Ο κώδικας με την ονομασία FOAM παρέμεινε κλειστός μέχρι το Δεκέμβριο του 2004 οπότε και δόθηκε η πρώτη έκδοση με ανοιχτό κώδικα. Έκτοτε χρησιμοποιείται ευρέως σε μεγάλες βιομηχανίες και πανεπιστήμια ανά τον κόσμο. Καθημερινά υπάρχουν συνεισφορές, διορθώσεις και βελτιώσεις από μέλη της προγραμματιστικής κοινότητας εμπλουτίζοντας έτσι το περιεχόμενο και τις δυνατότητές του. Το γεγονός αυτό, ωστόσο, οδήγησε στη δημιουργία διαφορετικών εκδόσεων. Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε η έκδοση OpenFOAM-1.6-ext με έμφαση στις στροβιλομηχανές. Η έκδοση αυτή δεν είναι παγωμένη αλλά ανανεώνεται συνεχώς. Ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στην επίσημη ιστοσελίδα <sup>1</sup> ή στο αντίστοιχο forum <sup>2</sup>

---

<sup>1</sup><http://www.openfd.co.uk/>

<sup>2</sup><http://www.cfd-online.com/Forums/openfoam/>

### 1.2.2 Χαρακτηριστικά

- Είναι λογισμικό ανοικτού κώδικα. Έτσι ο χρήστης μπορεί να το τροποποιεί σύμφωνα με τις απαιτήσεις του προβλήματός του. Ακόμα οι χρήστες μπορούν να συνεισφέρουν στον κώδικα, προσθέτοντας δικά τους κομμάτια, διορθώσεις και ιδέες, αυξάνοντας έτσι την ταχύτητα ανάπτυξης του πακέτου Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής.
- Το γεγονός ότι είναι γραμμένο σε μια γλώσσα αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού, όπως η  $C++$ , δίνει πολύ μεγάλη ευελιξία και δυνατότητες. Κάθε εφαρμογή, εργαλείο ή επιλύτης του OpenFOAM είναι μεταγλωτισμένο ξεχωριστά ως βιβλιοθήκη επιτρέποντας έτσι τη δυναμική σύνδεσή τους για τη δημιουργία εκτελέσιμων.
- Χρησιμοποιεί τη Μέθοδο Πεπερασμένων Όγκων για την επίλυση του εκάστοτε προβλήματος.
- Η λύση της πινακοποιημένης εξίσωσης αποθηκεύεται στο κέντρο των κελιών. Ενώ διαχειρίζεται μη-δομημένα πλέγματα αποτελούμενα από πολυεδρικά στοιχεία.
- Η λύση είναι "διαχωρισμένη" (segregated), που σημαίνει ότι για κάθε διαφορετική εξίσωση του συστήματος που διέπει το πρόβλημα, ξεχωριστοί πίνακες δημιουργούνται για την επίλυσή του, σε αντίθεση με το να δημιουργηθεί ένας ενιαίος πίνακας για όλο το σύστημα διαφορικών εξισώσεων. Έτσι, ο κώδικας διατηρεί τη γενικότητά του, πληρώνοντας όμως το τίμημα της πιο αργής επεξεργασίας.
- Η επίλυση των ροϊκών εξισώσεων γίνεται με αλγόριθμο διόρθωσης πίεσης (SIMPLE, PISO, ICO, ...) .
- Επιτρέπει παράλληλη επεξεργασία σχεδόν σε όλα τα εργαλεία του χρησιμοποιώντας το σχήμα MPI (Message Passing Interface). Ως εκ τούτου δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να δημιουργήσει μεγάλες και πολύπλοκες προσομοιώσεις με μικρό κατά το δυνατό υπολογιστικό κόστος.
- Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα η επιλογή και αλλαγή των σχημάτων αριθμητικής επίλυσης που χρησιμοποιούνται να πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

### 1.2.3 Εκτελέσιμα αρχεία του OpenFOAM

Στο OpenFOAM υπάρχουν δύο τύποι εκτελέσιμων αρχείων: οι επιλύτες solvers και τα εργαλεία utilities. Οι επιλύτες εκτείνονται σε ένα εντυπωσιακό εύρος, από στοιχειώδεις ροές (potentialFoam) μέχρι επίλυση οικονομικών προβλημάτων (financialFOAM). Βέβαια η έμφαση δίνεται κυρίως σε εφαρμογές ρευστομηχανικής και μάλιστα στην παρούσα διπλωματική με την επίλυση της ροής σε βαθμίδα

στροβιλομηχανής. Οι αντίστοιχοι επιλύτες που δοκιμάστηκαν αναλύονται σε επόμενο κεφάλαιο. Τα εργαλεία είναι εκτελέσιμα που διευκολύνουν το χρήση στην προ-επεξεργασία (pre-processing) και στη μετ-επεξεργασία (post-processing). Η πρό-επεξεργασία αναφέρεται στις διαδικασίες πριν την επεξεργασία της ροής, όπως στη δημιουργία χωρίου ροής, πλεγματοποίηση, έλεγχος πλέγματος, κίνηση πλέγματος, μετατροπή πλέγματος σε μορφή αναγνώσιμη από το OpenFOAM και άλλα. Στις διαδικασίες μετά-επεξεργασίας περιλαμβάνονται υπολογισμός δευτερογενών μεγεθών της ροής, οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων, παρουσίαση και ανάλυση.

### 1.2.4 Case

Κάθε περίπτωση προβλήματος (case) στο OpenFOAM έχει αντίστοιχη δομή. Η βασική και απαραίτητη αυτή δομή απεικονίζεται σχηματικά παρακάτω:

- **0/**
- **constant/**
  - **polyMesh/**
    - \* points
    - \* cells
    - \* faces
    - \* boundary
  - ...Properties (...RASProperties, transportProperties,...)
  - ...Dict (dynamicMeshDict,...)
- **system/**
  - fvSolution
  - fvSchemes
  - Άλλα λεξικά (dictionaries) για εργαλεία (Utilities). (decomposeParDict, createPatchDict, controlDict,... )
- Ο κατάλογος **0/** περιέχει αρχεία με την αρχικοποίηση και τις οριακές συνθήκες των ροϊκών μεγεθών (**/U**, **/p**, **/k**, **/ω**, **/nut**). Σε κάθε ένα από τα αρχεία αυτά ορίζεται ο τύπος οριακής συνθήκης για κάθε οριακή επιφάνεια του πλέγματος (patch). Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει οριακή συνθήκη τύπου Dirichlet, Neumann και άλλες πιο εξειδικευμένες σε συγκεκριμένες εφαρμογές, όπως λ.χ. είσοδος της ροής με συστροφή σε βαθμίδα στροβιλομηχανής (swirlInletVelocity). Ο χρήστης προτρέπει να ανατρέξει στο εγχειρίδιο χρήσης του OpenFOAM <sup>3</sup> προκειμένου να διερευνήσει όλες τις επιλογές του.

<sup>3</sup><http://www.openfoam.com/docs/user/case-file-structure.php>

- Ο κατάλογος **constant/** περιέχει λεξικά με τις ιδιότητες του ρευστού (transportProperties), το μοντέλο τύρβης που θα χρησιμοποιηθεί (RASProperties) και τον υποκατάλογο **polyMesh/** που περιέχει τις πληροφορίες του πλέγματος.
- Ο υποκατάλογος **polyMesh/** περιέχει την data structure του πλέγματος. Το αρχείο points περιέχει τις συντεταγμένες όλων των κόμβων του πλέγματος, το αρχείο **/cells** περιέχει όλες τις υπολογιστικές κυψέλες καθώς και τα σημεία από τα οποία αυτές αποτελούνται, το αρχείο **/faces** περιέχει όλες τις οριακές επιφάνειες κάθε υπολογιστικής κυψέλης καθώς και από ποιούς κόμβους αυτές αποτελούνται. Τέλος, το αρχείο **/boundary** στο οποίο ορίζεται ο τύπος κάθε οριακής επιφάνειας του πλέγματος (patch) (τοιχος, ατριβής τοίχος, συμμετρία, κ.λ.π.). Ομοίως ο χρήστης παραπέμπεται στο εγχειρίδιο χρήσης, για περαιτέρω πληροφορίες. Να σημειωθεί ότι τα παραπάνω αρχεία δημιουργούνται αυτόματα κατά τη διαδικασία της πλεγματοποίησης - ή της μετατροπής του πλέγματος σε μορφή αναγνώσιμη από το OpenFOAM - και δεν τα δημιουργεί ο χρήστης, εκτός, ίσως, από το **/boundary** όπου χρειάζεται να παρέμβει με το χέρι (Βλ. Παρ. 4.2 όπου ο χρήστης πρέπει να τροποποιήσει αρκετά το αρχείο).
- Τέλος, στον κατάλογο **system/**, το αρχείο fvSolution επιλέγει τους επιλύτες για τα διάφορα μεγέθη της ροής, το αρχείο fvSchemes τα σχήματα διακριτοποίησης των διαφορικών εξισώσεων ενώ τα διάφορα λεξικά ρυθμίζουν τα αντίστοιχα εργαλεία. Συγκεκριμένα το decomposeParDict καθορίζει τον τρόπο διάσπασης του χωρίου ροής προς παράλληλη επεξεργασία και το controlDict ρυθμίζει τη συχνότητα και την ακρίβεια αποθήκευσης των λύσεων, το χρόνο έναρξης της επίλυσης και άλλα.

### 1.3 Μοντελοποίηση της Τύρβης

Τύρβη είναι η κατάσταση της ροής η οποία χαρακτηρίζεται από φαινομενικά τυχαίες και χαοτικές 3D κινήσεις μικρών και μεγάλων στροβίλων. Χαρακτηρίζεται χαοτική λόγω της μεγάλης χρονικής και χωρικής μεταβλητότητάς της, η τύρβη όμως δεν είναι χαοτική. Η σύγχρονη άποψη της επιστημονικής κοινότητας υποστηρίζει ότι η δημιουργία των στροβίλων έχει καθαρά ντετερμινιστικό χαρακτήρα. Ως εκ τούτου για τη μελέτη της και τη μοντελοποίησή της εισάγονται στατιστικές μέθοδοι ανάλυσης. Οι λόγοι που κάνουν τη μελέτη της τύρβης τόσο ουσιαστική, είναι αφενός ότι επηρεάζει κατά πολύ την εντροπία της ροής, το ρυθμό μεταφοράς μάζας και ενέργειας, τις δυνάμεις που δέχεται ένα σώμα από το ρευστό. Στα υπολογιστικά μοντέλα ροής που χρησιμοποιούνται, οι εξισώσεις είναι σχεδόν πάντα λιγότερες από τους αγνώστους, οπότε εμφανίζεται το πρόβλημα να "κλείσει" το σύστημα με την προσθήκη εξισώσεων. Ασφαλώς, εξαιρούνται οι περιπτώσεις στρωτών ροών ή περιπτώσεις που το χρησιμοποιούμενο μοντέλο είναι της Ευθείας Αριθμητικής Προσομοίωσης Direct Numerical Simulation. Δηλαδή, στη συντριπτική πλειοψηφία των εφαρμογών που

άπτονται στο πεδίο του μηχανικού, η ακριβής επίλυση της ροής είναι ανέφικτη. Παρά την ανεπάρκεια όμως των γνώσεών του, ο μηχανικός οφείλει να προσφέρει στην κοινωνία τη λύση του εφικτού. Έτσι, κρίνεται αναγκαία η μοντελοποίηση της τύρβης. Για την υπολογιστική επίλυση της ροής χρησιμοποιούνται τέσσερις προσεγγίσεις - με κριτήριο το πως μοντελοποιείται η τύρβη.

- **RANS**: Reynolds Averaged Navier Stokes. Στηρίζεται στην παραδοχή ότι η ταχύτητα της ροής διαχωρίζεται στη μέση τιμή και στις διαταραχές γύρω από αυτήν. από τις εξισώσεις RANS υπολογίζεται η μέση ταχύτητα και ενώ οι διαταραχές μοντελοποιούνται.
- **LES**: Large Eddy Simulation. Οι μεγάλες δίνες επιλύονται από τις εξισώσεις ενώ οι μικρές μοντελοποιούνται.
- **DES**: Detached Eddy Simulation. Είναι ένα υβριδικό μοντέλο όπου κοντά στο στερεό όριο χρησιμοποιεί μοντέλο RANS ενώ πιο μακριά LES.
- **DNS**: Direct Numerical Simulation. Ευθεία αριθμητική επίλυση της ροής χωρίς μοντελοποίηση της τύρβης. Εξαιρετικά ακριβής και ακριβή προσέγγιση.

Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκαν οι εξισώσεις RANS και πιο συγκεκριμένα το μοντέλο τύρβης δύο εξισώσεων  $k - \epsilon$  [13]. Τα τυρβώδη χαρακτηριστικά της ροής λαμβάνονται υπόψη με την προσθήκη δύο εξισώσεων μεταφοράς. Οι δυο μεταβλητές που προστίθενται είναι η τυρβώδης κινητική ενέργεια  $k$  και ο ρυθμός καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας  $\epsilon$ . Ουσιαστικά η μεταβλητή  $k$  εκφράζει την ενέργεια που περιέχει η τύρβη, ενώ η μεταβλητή  $\epsilon$  την ένταση της τύρβης.

## 1.4 Δομή της Εργασίας

Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά τα θέματα που θίγει η παρούσα διπλωματική εργασία, κατηγοριοποιημένα ανά κεφάλαιο:

- Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται οι εξισώσεις ροής που χρησιμοποιούνται για την επίλυση προβλημάτων με ροϊκή αλληλεπίδραση κινούμενης-σταθερής πτερύγωσης.
- Στο κεφάλαιο 3 αναλύεται το οικείο λογισμικό γένεσης πλέγματος, το οποίο βελτιώνεται και γενικεύεται στην παρούσα διπλωματική. Πρόκειται για έναν κώδικα (**turboGen3D**) δημιουργίας δομημένου υπολογιστικού πλέγματος με επίλυση ελλειπτικών εξισώσεων με όρους πηγής, γύρω από 3D πτερυγώσεις στροβιλομηχανών.
- Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο καθώς και οδηγίες χρήσης που αφορούν τα σχετικά εργαλεία του OpenFOAM που είναι απαραίτητα προκειμένου να επιτευχθεί η ροϊκή σύζευξη των χωρίων ροής

της κινητής και της σταθερής περύγωσης. Αυτά αφορούν την αριθμητική παρεμβολή των ροϊκών μεγεθών ανάμεσα στα δύο χωρία, την επικοινωνία των περιφερειακά περιοδικών επιφανειών, την κίνηση του πλέγματος καθώς και το συνδεδετικό λογισμικό που εξασφαλίζει τη λειτουργία τους.

- Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η δοκιμαστική εφαρμογή με την οποία επιβεβαιώνεται η ορθή λειτουργία των προαναφερθέντων σχετικών εργαλείων του OpenFOAM. Παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της επίλυσης τυρβώδους ροής σε βαθμίδα αξονικού συμπιεστή.
  - Στο κεφάλαιο 6 συνοψίζονται τα βασικά στοιχεία της διπλωματικής εργασίας και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με τα ερωτήματα που τίθενται στην αρχή. Τέλος, προτείνονται εργασίες σε συναφή θέματα, στα οποία το παρόν αποτελεί ένα καλό εφελτήριο.
-





# Κεφάλαιο 2

## Εξισώσεις Ροής

Η εφαρμογή που δοκιμάστηκε στην παρούσα εργασία αφορά μη-μόνιμη, τριδιάστατη, ασυμπίεστη στρωτή και τυρβώδη ροή νευτόνιου ρευστού χωρίς μετάδοση θερμότητας. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν λαμβάνουν τις κατά Reynolds χρονικά μέσες τιμές των ροϊκών μεγεθών (RANS: Reynolds Averaged Navier Stokes) και στην περίπτωση της τυρβώδους ροής χρησιμοποιούν το μοντέλο τύρβης δύο εξισώσεων  $K - \epsilon$ .

### 2.1 Εξισώσεις Μέσης Ροής Σταθερής Πτερύγωσης

Για την ακίνητη πτερύγωση, οι εξισώσεις που διέπουν τη ροή είναι οι ακόλουθες:

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot (\vec{u} \cdot \vec{u}) - \nabla \cdot ((\nu + \nu_t) \cdot \nabla \cdot \vec{u}) = 0 \quad (2.2)$$

όπου με

- $\vec{u}$  συμβολίζεται το διάνυσμα της ταχύτητας,
- $p$  είναι η στατική πίεση διαιρεμένη με τη σταθερή πυκνότητα,
- $\nu$  είναι η κινηματική συνεκτικότητα του ρευστού η οποία θεωρείται σταθερή,
- $\nu_t$  είναι η τυρβώδης κινηματική συνεκτικότητα του ρευστού,

Οι εξισώσεις της ροής μαζί με τις οριακές συνθήκες του προβλήματος συνιστούν τις εξισώσεις κατάστασης. Σε προβλήματα εσωτερικών ροών οι οριακές συνθήκες που πρέπει να επιβληθούν και οι οποίες συμπληρώνουν τις εξισώσεις 2.1, 2.2 είναι οι εξής:

(α) στην είσοδο του πεδίου, Dirichlet συνθήκη για κάθε συνιστώσα της ταχύτητας και μηδενική Neumann για τη στατική πίεση,

(β) στην έξοδο του πεδίου, μηδενική Neumann συνθήκη για την ταχύτητα και μηδενική Dirichlet για την πίεση

(γ) στα στερεά τοιχώματα, μηδενική Dirichlet για την ταχύτητα (συνθήκη μη-ολίσθησης και μη-εισχώρησης) και μηδενική Neumann για την πίεση.

## 2.2 Εξισώσεις Μέσης Ροής Κινητής Πτερύγωσης

Η εξίσωση διατήρησης της μάζας σε όγκο ελέγχου που κινείται μαζί με το σύστημα αναφοράς, είναι:

$$\nabla' \cdot \vec{u}' = 0 \quad (2.3)$$

Στην παραπάνω εξίσωση για την απόκλιση  $\text{div}$  χρησιμοποιήθηκε το σύμβολο  $\nabla$ . Ο τόνος χρησιμοποιείται για να συμβολίσει μεταβολές ως προς το κινούμενο σύστημα αναφοράς. Δηλαδή,

$$\nabla' = \left( \frac{\partial}{\partial x'}, \frac{\partial}{\partial y'} \right) \quad (2.4)$$

Αντίστοιχα, για την εξίσωση διατήρησης της ορμής σε κινούμενο σύστημα για νευτώνιο ρευστό, είναι:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{u}'}{\partial t} + \nabla' \cdot (\vec{u}' \cdot \vec{u}') &= -[\vec{b}_o + \frac{\partial \vec{\Omega}}{\partial t} \times \vec{r}' + 2(\vec{\Omega} \times \vec{u}') + \vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{r}')] \\ -gradp + \nu \Delta' \vec{u}' & \end{aligned} \quad (2.5)$$

όπου με

- $\vec{r}'$  το διάνυσμα θέσης ενός σωματιδίου ως προς το κινούμενο σύστημα,
- $\vec{\Omega}$  το διάνυσμα της ταχύτητας περιστροφής,
- $\vec{b}_o$  η απόλυτη γωνιακή επιτάχυνση της αρχής των αξόνων του κινούμενου συστήματος αναφοράς,
- $\vec{\Omega} \times \vec{r}'$  η κεντρομόλος επιτάχυνση ,
- $2(\vec{\Omega} \times \vec{u}')$  η επιτάχυνση Coriolis.

Στην ειδική περίπτωση σταθερής ταχύτητας περιστροφής  $\vec{\Omega}$ , όπως στην δοκιμαστική περίπτωση που αναλύεται στο κεφάλαιο 5, είναι:

$$\frac{\partial \vec{\Omega}}{\partial t} = 0 \quad (2.6)$$

και ακόμη η αρχή του συστήματος αναφοράς παραμένει ακίνητη ή κινείται με σταθερή ταχύτητα, οπότε  $\vec{b}_o = 0$ . Τότε η εξίσωση 2.5 γίνεται:

$$\frac{\partial \vec{u}'}{\partial t} + \nabla' \cdot (\vec{u}' \cdot \vec{u}') = -[2(\vec{\Omega} \times \vec{u}') + \vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{r}')] - gradp + \nu \Delta' \vec{u}' \quad (2.7)$$

## 2.3 Χρησιμοποιούμενο Μοντέλο Τύρβης

Τις εξισώσεις κατάστασης του προβλήματος, συμπληρώνουν οι εξισώσεις του μοντέλου τύρβης υψηλών αριθμών Reynolds  $k - \epsilon$ . Οι τελευταίες δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$v_i \frac{\partial k}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{P_{r_k}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] - P_k + \epsilon = 0 \quad (2.8)$$

$$v_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{P_{r_\epsilon}} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] - c_1 f_1 P_k \frac{\epsilon}{k} + c_2 f_2 \frac{\epsilon^2}{k} = 0 \quad (2.9)$$

όπου  $k$  είναι η τυρβώδης κινητική ενέργεια,  $\epsilon$  είναι η καταστροφή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας και  $P_k$  η παραγωγή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας, η οποία δίνεται από την έκφραση

$$P_k = \tau_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = \nu_t \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \quad (2.10)$$

Η τυρβώδης συνεκτικότητα  $\nu_t$  υπολογίζεται από τη σχέση 2.11

$$\nu_t = c_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (2.11)$$

οι σταθερές του μοντέλου είναι ίσες με  $c_\mu = 0.09, f_1 = 1, f_2 = 1, c_1 = 1.44, c_2 = 1.92, P_{r_k} = 1.0, P_{r_\epsilon} = 1.3$



## Κεφάλαιο 3

# Γένεση του Πλέγματος

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας τροποποιήθηκε και βελτιώθηκε προϋπάρχον οικείο λογισμικό γένεσης πλέγματος. Πρόκειται για ένα γενέτη τριδιάστατων δομημένων πλεγμάτων γύρω από πτερυγώσεις στροβιλομηχανών. Όπως αναφέρθηκε και πιο πριν, το λογισμικό OpenFOAM διαχειρίζεται μη-δομημένα πλέγματα, αλλά ουσιαστικά δεν περιορίζεται από αυτό: αντιμετωπίζει όλα τα πλέγματα ως μη-δομημένα. Στην παρούσα εργασία προτιμήθηκε η δημιουργία δομημένου πλέγματος λόγω του γεγονότος ότι υπήρχε προϋπάρχον σχετικό λογισμικό και εμπειρία από το ΕΘΣ/ΕΜΠ. Η παλαιότερη έκδοση του κώδικα έχει τη δυνατότητα να φτιάχνει Λαπλασιανό πλέγμα τύπου H για γραμμικές πτερυγώσεις (linear cascade), για περιφερειακές (peripheral cascade), για στρεβλές κινούμενες πτερυγώσεις, ακόμα και για πτερυγώσεις σε μηχανές μικτής ροής. Στην περίπτωση που το πτερύγιο είναι γραμμικό, τα πλέγματα στην κορυφή και τη ρίζα Λαπλασιανά, που όμως η πρώτη απόσταση από το όριο είναι καθορισμένη και σταθερή σε όλο το πλέγμα ενώ η διεύθυνση που ενώνει τους δύο πρώτους κόμβους - μετρώντας από το όριο του χωρίου, είναι κάθετη σε αυτό. Ο κώδικας γενικεύτηκε ώστε να μπορεί να διαχειριστεί ορισμένες δυσμενείς καταστάσεις, να δέχεται μεγαλύτερο εύρος επιλογών από το χρήστη και να δίνει πλέγματα καλύτερης ποιότητας. Στις παραγράφους που ακολουθούν αναλύεται η παλαιότερη έκδοση του κώδικα, η συμβολή και οι τροποποιήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθώς και ένα ολοκληρωμένο εγχειρίδιο κατανόησης για τη μετέπειτα χρήση και εξέλιξή του.

### 3.1 Γενικά για Πλέγματα

Οι μερικές διαφορικές εξισώσεις που διέπουν την κίνηση ενός ρευστού, δεν έχουν αναλυτική λύση παρά μόνο σε πολύ απλοϊκές περιπτώσεις. Προκειμένου, λοιπόν, να αναλυθεί η ροή σε πραγματικά προβλήματα του μηχανικού ο χώρος κατακερματίζεται σε μικρότερα χωρία απλού σχήματος και οι αντίστοιχες διακριτοποιημένες εξισώσεις λύνονται σε καθένα από τα χωρία αυτά με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, των πεπερασμένων όγκων ή των πεπερασμένων διαφορών. Κάθε τέτοιο διακριτό χωρίο ονομάζεται κελί. Οι οριακές του επιφάνειες μέσω των

οποίων επικοινωνεί με τα γειτονικά του κελιά ή με το περιβάλλον ονομάζονται όψεις, πλευρικές επιφάνειες ή πρόσωπα (προκειμένου να υπάρχει συνέπεια με την ορολογία του OpenFOAM που αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο). Η βασική κατηγοριοποίηση των πλεγμάτων γίνεται με βάση το σχήμα των κελιών τους (εξάεδρα, τετράεδρα, πρίσματα, κ.λ.π.) και με βάση τον τρόπο σύνδεσης των κελιών τους σε δομημένα, μη-δομημένα και υβριδικά. Η ειδοποιός διαφορά μεταξύ των δύο πρώτων κατηγοριών έγκειται στο ότι στα δομημένα πλέγματα κάθε κόμβος μπορεί να παρασταθεί από τρεις αριθμούς (στη γενική 3D περίπτωση) που δηλώνουν την αύξουσα σειρά που έχει ο δεδομένος κόμβος στις τρεις διευθύνσεις. Έτσι η συνδεσιμότητα των κελιών είναι αυτονόητη, γλιτώνοντας μνήμη και υπολογιστικό κόστος. Η τελευταία κατηγορία είναι ο συνδυασμός των δύο καθώς κάποια τμήματα του πλέγματος είναι δομημένα και κάποια μη-δομημένα.

Η πλεγματογένεση καταναλώνει ένα σημαντικό τμήμα του χρόνου σε μια μελέτη με χρήση υπολογιστικής ρευστομηχανικής, αφού δεν υπάρχει ενιαία μεθοδολογία που να μπορεί να εφαρμοστεί σε όλες τις περιπτώσεις ροής. Ενδεικτικά αναφέρονται η πλεγματογένεση με επίλυση ελλειπτικών μερικών διαφορικών εξισώσεων, οι μέθοδοι Προελαύνοντος Μετώπου (Advancing Front Methods[14]) και η τριγωνοποίηση κατά Delaunay[15] για τα μη-δομημένα.

Στην υπολογιστική ρευστοδυναμική η ποιότητα του πλέγματος καθορίζει σε μεγάλο βαθμό και την ποιότητα της λύσης της ροής. Τα χαρακτηριστικά που απαιτούνται από ένα ποιοτικό πλέγμα είναι τα ακόλουθα :

- Πυκνότητα. Πρέπει να είναι αρκετά πυκνό στα σημεία όπου υπάρχουν μεγάλες κλίσεις των ροϊκών μεγεθών. Το μέγεθος όμως του πλέγματος είναι καθοριστικός παράγοντας για το υπολογιστικό κόστος μιας προσομοίωσης. Έτσι η πυκνωση ενός καλού πλέγματος οφείλει να είναι προσεκτικά διανεμημένη. Στο σημείο αυτό έγκειται και το μεγάλο πλεονέκτημα των μη-δομημένων πλεγμάτων, αφού επιτρέπουν τοπική πυκνωση χωρίς να επηρεάζουν τα κελιά που βρίσκονται μακρύτερα.
- Ομαλότητα. Είναι ζητούμενο το πλέγμα να είναι ομαλό ως προς το μέγεθος των κελιών καθώς και ως προς τις πλεγματικές γραμμές. Ασυνέχειες, μεγάλες κλίσεις των πλεγματικών γραμμών και μεγάλες διαφοροποιήσεις στα μεγέθη γειτονικών κελιών καταστρέφουν την ποιότητα του πλέγματος. Ως εμπειρικός κανόνας είναι καλό ο λόγος του μεγέθους δυο γειτονικών κελιών, να μην ξεπερνάει το 1.25.
- Ορθογωνιότητα. Είναι επιθυμητό τα κελιά του πλέγματος να είναι κατά το δυνατόν ορθογώνια. Τα αντικριστά πρόσωπα του κελιού αλληλοαναιρούν τα αριθμητικά σφάλματα και περιορίζουν την αριθμητική διάχυση.

## 3.2 Προυπάρχον Λογισμικό

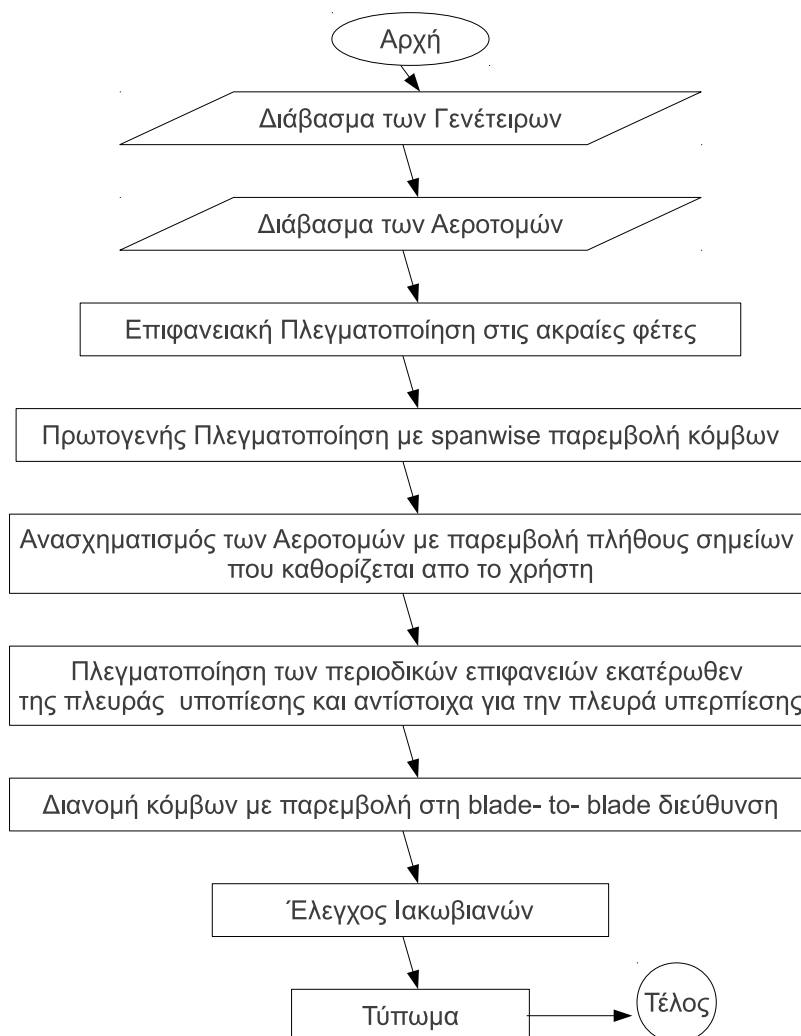
Η βασική ιδέα του υπάρχοντος κώδικα είναι να δημιουργεί δύο επιφανειακά Λαπλασιανά πλέγματα - στη ρίζα του περυγίου και στην κορυφή του αντίστοιχα-

και στη συνέχεια τα ενώνει παρεμβάλλοντας στην καθ' ύψος διεύθυνση όσα σημεία ορίζει ο χρήστης. Το επιφανειακό πλέγμα είναι προσαρμοσμένο στη γεωμετρία του ορίου και προέρχεται από ένα πρωτογενές πλέγμα με την επίλυση ενός συστήματος διαφορικών εξισώσεων ελλειπτικού τύπου. Οι θέσεις των οριακών κόμβων είναι εξ αρχής δεδομένες (οριακές συνθήκες τύπου Dirichlet) ενώ οι θέσεις των ενδιάμεσων κόμβων μεταβάλλονται επαναληπτικά μέχρι ικανοποίησης του συστήματος των διαφορικών εξισώσεων. Ως εκ τούτου προτού ξεκινήσει η επίλυση των διαφορικών εξισώσεων, απαιτείται το περίγραμμα του πλέγματος καθώς και ένα πρωτογενές-πρόχειρο πλέγμα. Το λογισμικό αποτελείται από δυο εκτελέσιμα αρχεία, το πρώτο αφορά τη διαχείριση των δεδομένων και το δεύτερο την καθεαυτή επιφανειακή πλεγματογένεση.

Για τη λειτουργία του κώδικα, απαιτούνται από το χρήστη τέσσερα αρχεία δεδομένων. Το πρώτο αρχείο με το υποχρεωτικό όνομα `profile.curve`, περιέχει από 2 έως 12 αεροτομές, τα σημεία των οποίων είναι δοσμένα με ωρολογιακή φορά σε καρτεσιανές συντεταγμένες. Ακόμα δύο αρχεία με ονόματα `Hub` και `Shroud` τα οποία ορίζουν τις γενέτειρες του άξονα περιστροφής και του κελύφους της μηχανής αντίστοιχα. Η πρώτη στήλη είναι αδιάφορη για το πρόγραμμα, η δεύτερη στήλη εισάγει την αξονική απόσταση ενώ η τρίτη στήλη την ακτίνα. Τέλος, ένα αρχείο εισόδου `ini3D` με μεταβλητές που καθορίζουν την ποιότητα του πλέγματος, οι παράμετροι του οποίου αναλύονται παρακάτω.

Στο (Σχ.3.1) φαίνεται το διάγραμμα ροής του κώδικα και στη συνέχεια επεξηγείται κάθε τμήμα του.

- Αρχικά ο κώδικας διαβάσει τις γενέτειρες του κελύφους και του άξονα της μηχανής αντίστοιχα. Προσθέτει δύο σημεία ακόμα στην αρχή και στο τέλος της κάθε γενέτειρας, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού της παραγώγου της καμπύλης με χρήση κεντρικών διαφορών ακόμη και στα ακραία σημεία. Επιπρόσθετα υπολογίζεται το μήκος που βρίσκεται το σημείο επάνω στη γενέτειρα, μετρούμενο από το πρώτο σημείο αυτής. Το τελευταίο γίνεται προς αποφυγήν ατυχούς περίπτωσης όπου έχουμε στροβιλομηχανή μικτής ροής ή ακτινικής. Στην οριακή περίπτωση παραπάνω από ένα σημεία να έχουν ίδια αξονική συντεταγμένη, συνεπώς χρειαζόμαστε ένα μέγεθος που να προσδιορίζει σε ποιο σημείο της μηχανής βρισκόμαστε. Τέλος, ελέγχεται εάν ο αριθμός των σημείων των δύο γενέτειρων, άξονα και κελύφους, είναι ίδιος.
- Οι αεροτομές διαβάζονται κυκλικά από την γεωμετρική ακμή εκφυγής, μέσω της γεωμετρικής ακμής πρόσπτωσης και πάλι στην ακμή εκφυγής οι κόμβοι της οποίας είναι διπλογραμμένοι. Οι συντεταγμένες των αεροτομών τοποθετούνται σε ένα διδιάστατο πίνακα ενώ δημιουργούνται ακόμα δύο αρχεία `airfoil.shroud` και `airfoil.hub` για τα προφίλ του πτερυγίου στο κέλυφος και στον άξονα.
- Μετά τη γένεση του επιφανειακού πλέγματος στον άξονα και στο κέλυφος της μηχανής, δημιουργείται ένα αρχικό πλέγμα. Οι κόμβοι του αρχικού αυτού



Σχήμα 3.1: Λογικό Διάγραμμα Ροής της παλαιότερης έκδοσης του κώδικα

πλέγματος διανέμονται με μια καθ' ύψος του πτερυγίου γραμμική παρεμβολή μεταξύ των δύο πλεγματικών επιφανειών.

- Προκειμένου να δημιουργηθούν ξανά οι αεροτομές, ελέγχεται η φορά σάρωσης της κάθε αεροτομής. Ο κώδικας είναι σε θέση να διαχειριστεί είτε ωρολογιακή είναι ανθρωλογιακή φορά σάρωσης. Προτού γίνει η αναδιανομή των σημείων πάνω στην αεροτομή, χρησιμοποιείται ένα τέχνασμα - το οποίο εμφανίζεται πολλές φορές στον κώδικα: Η υπορουτίνα που αναδιανέμει και παρεμβάλλει τα σημεία σε μια τριδιάστατη καμπύλη, απαιτεί ως όρισμα τρεις μονοδιάστατους πίνακες, έτσι σε κάθε περίπτωση που οι πίνακες συντεταγμένων είναι διδιάστατοι γίνεται μεταφορά των δεδομένων σε τρεις μονοδιάστατους προσωρινούς πίνακες, πραγματοποιείται η παρεμβολή και γίνεται ακόμα μια μεταφορά πίσω στους αρχικούς διδιάστατους πίνακες. Στη

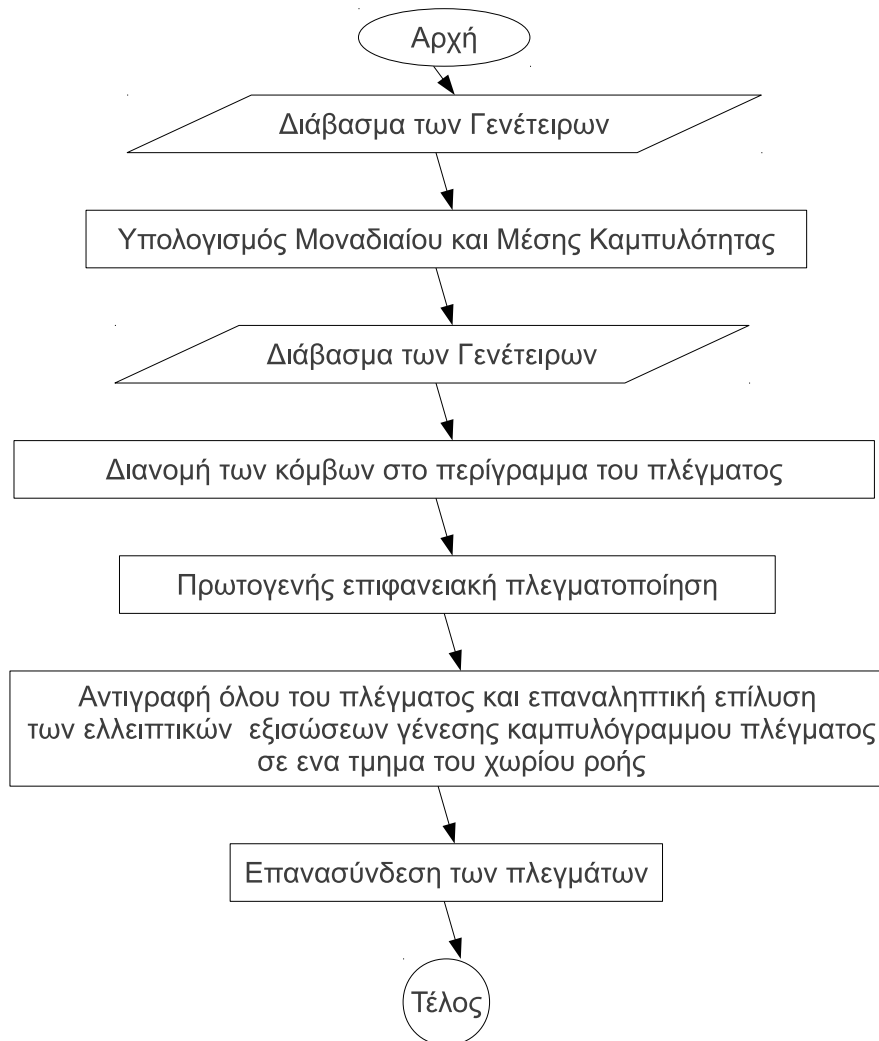


συνέχεια γίνεται ακόμη μία παρεμβολή σημείων κατά τη διεύθυνση του ύψους του πτερυγίου.

- Για λόγους ποιότητας του πλέγματος ο κώδικας δεν επιλύει τις εξισώσεις Sorenson για όλο το χωρίο ροής, παρά μόνο για μια μικρή περιοχή που εκτείνεται εκατέρωθεν του πτερυγίου. Έτσι, στις περιοδικές επιφάνειες το πλέγμα δημιουργείται ξεχωριστά. Επιλύονται οι εξισώσεις γένεσης καμπυλόγραμμων πλεγμάτων για τις περιοδικές επιφάνειες στην πλευρά υποπίεσης - οι οποίες εκτείνονται από τον άξονα έως το κέλυφος της μηχανής, μπροστά και πίσω από το πτερύγιο- και το προκείμενο πλέγμα 'στρέφεται' γύρω από τον άξονα κατά το βήμα, ώστε να δημιουργηθούν και οι αντίστοιχες περιοδικές επιφάνειες στην πλευρά υπερπίεσης. Στη συνέχεια παρεμβάλλει ενδιάμεσα σημεία μεταξύ των αντίστοιχων περιοδικών επιφανειών.
- Τέλος, πραγματοποιείται έλεγχος μέσω του υπολογισμού των Ιακωβιανών κάθε εξάεδρου και τυπώνεται το πλέγμα.

Η καθεαυτή διαδικασία γένεσης του πλέγματος περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω. Ούτως ή άλλως είναι ξεχωριστό εκτελέσιμο αρχείο.

- Ο κώδικας διαβάσει τη γενέτειρα στην επιφάνεια της οποίας θα πραγματοποιηθεί η γένεση του πλέγματος. Προσθέτει δυο ακόμα φανταστικούς κόμβους και υπολογίζει το μήκος πάνω στη γενέτειρα στο οποίο βρίσκεται κάθε σημείο.
- Υπολογίζεται το μοναδιαίο διάνυσμα της επιφάνειας καθώς και τη μέση καμπυλότητά της, στοιχεία που θα χρειαστούν αργότερα κατά την επίλυση των ελλειπτικών εξισώσεων γένεσης καμπυλόγραμμων συντεταγμένων.
- Διαβάζονται οι συντεταγμένες των κόμβων της αεροτομής για τη συγκεκριμένη γενέτειρα από το αρχείο εισόδου `profile.curve`. Ακόμα, εντοπίζεται ο αύξων αριθμός ενός σημείου που βρίσκεται κοντά στην ακμή πρόσπτωσης της ροής και αποτελεί ένα πρώτο σημείο που καθορίζει τη συνολική πλεγματογένεση. Στο εξής το - χάρη συντομίας- το σημείο αυτό θα ονομάζεται πρωτεύον σημείο ή "σημείο πρόσπτωσης". Το αντίστοιχο σημείο της γεωμετρικής ακμής εκφυγής θα ονομάζεται "σημείο εκφυγής". Τέλος, εντοπίζεται και η φορά αποθήκευσης των κόμβων της αεροτομής.
- Ανάλογα με την φορά αποθήκευσης κόμβων της αεροτομής, στρέφεται είτε η πλευρά υποπίεσης είτε η πλευρά υπερπίεσης, έτσι ώστε στο κάτω μέρος να βρίσκονται οι κόμβοι της πλευράς υποπίεσης. Στη συνέχεια, εντοπίζεται το κοντινότερο σημείο της γενέτειρας στο "σημείο πρόσπτωσης" της αεροτομής και αντικαθίσταται από το ίδιο το πρωτεύον σημείο, ώστε να ταυτίζονται. Οι γενέτειρα στη συνέχεια πυκνώνεται εκ νέου στο τμήμα μέχρι πριν το σημείο πρόσπτωσης. Για τη δημιουργία των περιοδικών επεκτάσεων του



Σχήμα 3.2: Λογικό Διάγραμμα Ροής της παλαιότερης έκδοσης του κώδικα

χωρίου ροής, χρησιμοποιείται ένα πολυώνυμο τετάρτου βαθμού  $(R * \phi)(s)$ . Για την εύρεση των συντελεστών του, απαιτείται να διέρχεται από το σημείο πρόσπτωσης, να ακολουθεί τη γωνία υποδοχής της ροής, να διέρχεται από καθορισμένο σημείο στην είσοδο και να έχει εκεί μηδενική κλίση. Ο υπολογισμός της γωνίας υποδοχής της ροής γίνεται με την εύρεση της κλίσης της ευθείας που ενώνει το "σημείο πρόσπτωσης" με το μέσο όρο των σημείων που βρίσκονται 8 κόμβους πριν και 8 κόμβους μετά από αυτό. Το σημείο από το οποίο απαιτείται να διέρχεται το πολυώνυμο στην είσοδο καθορίζεται ως σημείο τομής της γραμμής εισόδου της ροής με την ευθεία που διέρχεται από το "σημείο πρόσπτωσης" και έχει κλίση ίση με το  $1/4$

της ανωτέρω υπολογισμένης γωνίας υποδοχής της ροής. Καθώς τα παραπάνω μεταβάλλονται δραστικά από περίπτωση σε περίπτωση, στη νέα έκδοση έχουν γενικευτεί. Ακολούθως, η περιοδική επέκταση στρέφεται κατά το βήμα, ώστε να δημιουργηθεί το αντίστοιχο όριο του χωρίου. Με δεδομένα τα αρχικά σημεία των περιοδικών γραμμών, διανέμονται οι εσωτερικοί κόμβοι της εισόδου στη δεδομένη ακτίνα χρησιμοποιώντας γεωμετρική πρόοδο. Αντίστοιχη διαδικασία πραγματοποιείται για την κατασκευή των περιοδικών ορίων κατάντι του περυγίου.

Συνοπτικά το προς επίλυση σύστημα διαφορικών παίρνει τελικά τη μορφή:

$$g^{11} \frac{\partial^2 x}{\partial \xi^2} + 2g^{12} \frac{\partial x^2}{\partial \xi \partial \eta} + g^{22} \frac{\partial^2 x}{\partial \eta^2} + f_1 \frac{\partial x}{\partial \xi} + f_2 \frac{\partial x}{\partial \eta} = 2\mu N_x \quad (3.1)$$

$$g^{11} \frac{\partial^2 y}{\partial \xi^2} + 2g^{12} \frac{\partial y^2}{\partial \xi \partial \eta} + g^{22} \frac{\partial^2 y}{\partial \eta^2} + f_1 \frac{\partial y}{\partial \xi} + f_2 \frac{\partial y}{\partial \eta} = 2\mu N_y \quad (3.2)$$

$$g^{11} \frac{\partial^2 z}{\partial \xi^2} + 2g^{12} \frac{\partial z^2}{\partial \xi \partial \eta} + g^{22} \frac{\partial^2 z}{\partial \eta^2} + f_1 \frac{\partial z}{\partial \xi} + f_2 \frac{\partial z}{\partial \eta} = 2\mu N_z \quad (3.3)$$

όπου  $g^{ij}$  είναι ο ανταλλοίωτος μετρικός τανυστής. Το  $\mu$  είναι η μέση καμπυλότητα και το  $N_r$  το κάθετο διάνυσμα στην επιφάνεια. Το δεξί μέλος των εξισώσεων αφορά την απαίτηση οι νέες θέσεις των κόμβων να βρίσκονται πάνω στην επιφάνεια, καθώς πρόκειται για επιφανειακή και όχι επίπεδη πλεγματοποίηση. Οι συντελεστές  $f_1$  και  $f_2$  είναι οι όροι πηγής. Η φυσική σημασία των όρων αυτών είναι να επιβάλλουν επιπλέον ιδιότητες στο πλέγμα. Στον πλεγματοποιητή **turboGen3D** λαμβάνουν κατάλληλη μορφή ώστε το πλέγμα να είναι ορθογωνικό στο όριο και να έχει δεδομένη και σταθερή την πρώτη απόσταση από το όριο. Έτσι οι όροι αυτοί υπολογίζονται από τις εξισώσεις:

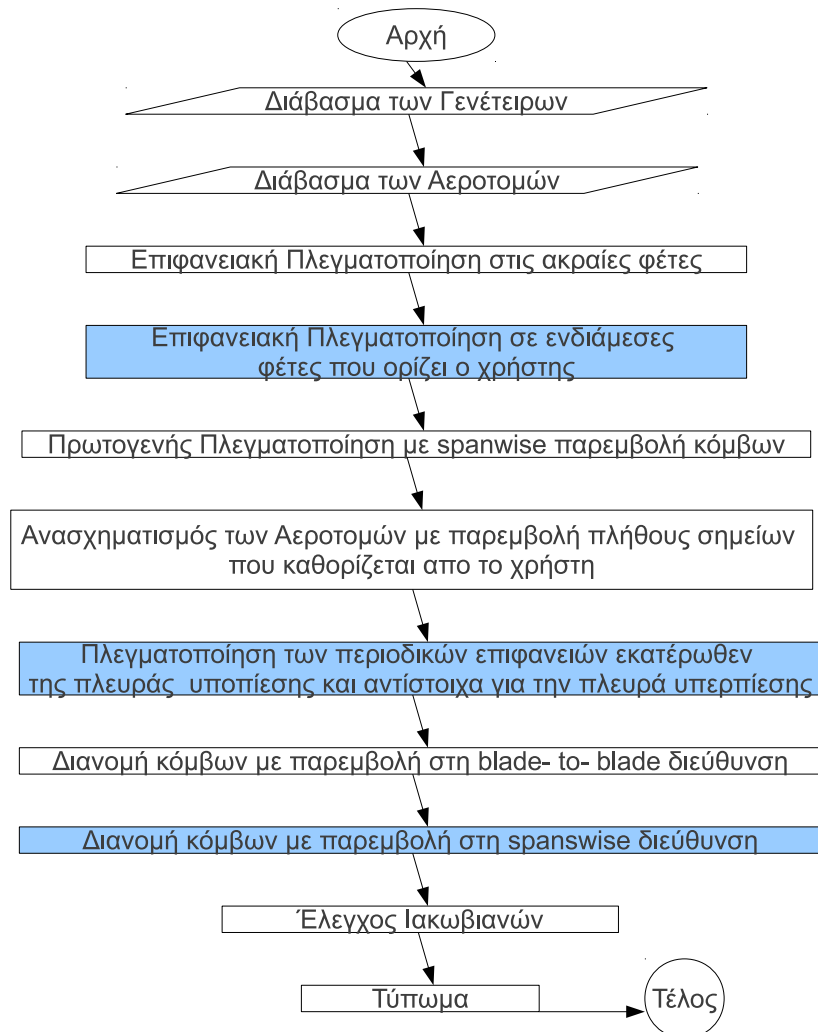
$$f^1(\xi, \eta) = f^1(\xi, 1) \exp(-a\eta) + f^1(\xi, \eta_{max}) \exp(-a(\eta_{max} - \eta)) \quad (3.4)$$

$$f^2(\xi, \eta) = f^2(\xi, 1) \exp(-a\eta) + f^2(\xi, \eta_{max}) \exp(-a(\eta_{max} - \eta)) \quad (3.5)$$

### 3.3 Προσωπική Συμβολή

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι παρεμβάσεις στον κώδικα που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Στο σχήμα 3.3 φαίνεται το διάγραμμα ροής της νέας έκδοσης, ενώ στη συνέχεια αναλύονται οι περισσότερο λεπτομερειακές τροποποιήσεις.

1. Στη νέα έκδοση ο κώδικας παρεμβάλλει και στις δυο γενέτειρες τον ίδιο αριθμό σημείων. Έτσι αίρεται ο περιορισμός ισότητας του αριθμού σημείων της γενέτειρας και ο έλεγχος αίρεται. Ακόμη στα αρχεία εισόδου των γενέτειρων `hub.curve` και `shroud.curve` απαιτούνται μόνο δύο στήλες δεδομένων: η ακτίνα και η αξονική απόσταση.



Σχήμα 3.3: Λογικό Διάγραμμα Ροής της παλαιότερης έκδοσης του κώδικα

2. Ο τρόπος εισαγωγής των αεροτομών έχει αλλάξει. Πλέον η θέση του κόμβου που αντιστοιχεί στο "σημείο πρόσπτωσης" δίνεται εξωτερικά, από το χρήστη. Στην πρώτη γραμμή του αρχείου `profile.curve` δίνεται ο αριθμός των αεροτομών, στη δεύτερη ο αριθμός των σημείων κάθε αεροτομής και στην τρίτη η θέση του πρωτεύοντος σημείου. Ανάμεσα στις αεροτομές δεν υπάρχουν κενές γραμμές, ενώ η απαίτηση ο πρώτος κόμβος να γράφεται ξανά στο τέλος συνεχίζει να υφίσταται.
3. Ο τρόπος που γίνεται η επιφανειακή πλεγματοποίηση έχει αλλάξει σε μεγάλο βαθμό.
  - (α) Η παλαιότερη έκδοση του κώδικα ήταν προσαρμοσμένη στη γένεση πλέγματος γύρω από περύγιο συμπιεστή όπου η ροή εισερχόταν αξονικά και εξερχόταν ακτινικά. Έτσι ο σχηματισμός των περιοδικών προεκτάσεων

γινόταν με ένα πολυώνυμο  $\phi(s)$  για την ανάντι προέκταση και  $R(s)$  για την κατάντι, όπου η ανεξάρτητη μεταβλητή  $s$  είναι το διάστημα που διανύει κάποιος προχωρώντας κατά μήκος της γενέτειρας του πτερυγίου. Πλέον, το πολυώνυμο είναι της μορφής  $(R*\phi)(s)$  ώστε να μπορεί να αντεπεξεχθεί στη γενικότερη περίπτωση μηχανής μικτής ροής.

- (β) Ο υπολογισμός της κλίσης του πολυωνύμου που δημιουργεί της ανάντι και κατάντι περιοδικές προεκτάσεις γίνεται με την εύρεση της κλίσης της ευθείας που ενώνει το "σημείο πρόσπτωσης" με το μέσο όρο των σημείων που βρίσκονται περίπου στο 10% του μήκους χορδής μετά το "σημείο πρόσπτωσης" και 10% του μήκους χορδής πριν από αυτό. Αντίστοιχα ισχύουν για την γεωμετρική ακμή εκφυγής του πτερυγίου. Η παραπάνω γενίκευση επιτρέπει ο κώδικας να είναι ευέλικτος για μεγάλο εύρος πλεγμάτων - αναφορικά με το μέγεθος τους και το επίπεδο πύκνωσης πάνω στην αεροτομή. (Σχήμα 3.6)
- (γ) Κατά το σχηματισμό του πολυωνύμου ο κώδικας προσδιορίζει μέσω της υπορουτίνας `angle` το μεσημβρινό επίπεδο στο οποίο βρίσκονται τα σημεία απ' όπου θα διέλθει το πολυώνυμο. Η υπορουτίνα αυτή, λαμβάνει ως εισόδους τις καρτεσιανές συντεταγμένες του σημείου και επιστρέφει τη γωνία που βρίσκεται περί τον άξονα της μηχανής εντός του διαστήματος  $[0, 2\pi]$ . Ωστόσο στην οριακή περίπτωση, που οι γωνίες είναι κοντά στο  $2\pi$  ενδεχομένως η μια εκ των δύο να επιστραφεί στο  $[0, \pi/2]$  και έτσι το πολυώνυμο να κάνει άσκοπες και ανεπιθύμητες περιστροφές. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε με έναν περιορισμό στη διαφορά των δυο γωνιών αλλά και στην απόλυτη τιμή τους, ώστε να μην ξεπερνά τις 180 μοίρες.
- (δ) Πλέον η επιλογή του χωρίου που θα λυθούν οι εξισώσεις δεν είναι προκαθορισμένο. Εκ των προτέρων - για λόγους ποιότητας πλέγματος- υπήρχε η αναγκαιότητα οι ελλειπτικές εξισώσεις να λύνονται σε ένα περιορισμένο χώρο γύρω από το πτερύγιο και όχι σε όλο το χωρίο ροής. Ο χρήστης επιλέγει πόσα σημεία πριν το "γε και πόσα σημεία μετά το TE θα εκτείνεται το χωρίο όπου θα επιλυθούν οι ελλειπτικές εξισώσεις γένεσης του πλέγματος.
- (ε) Τέλος, η σημαντικότερη - ίσως- παρέμβαση που έγινε στον κώδικα, αφορά το είδος του παραγόμενου πλέγματος. Μέχρι πρότινος τα δημιουργούμενα επιφανειακά πλέγματα ήταν Λαπλασιανά. Στη νέα έκδοση του `turboGen3D` το επιφανειακό πλέγμα είναι ομαλοποιημένο, όπως το αντίστοιχο Λαπλασιανό, στο εσωτερικό του, αλλά ακόμη στο όριο υπάρχει ορθογωνικότητα των πλεγματικών γραμμών και η πρώτη πλεγματική γραμμή έχει καθορισμένη και σταθερή απόσταση από το αντίστοιχο όριο καθ' όλο το μήκος της. Μετά τη γένεση του πρώτου "πρόχειρου" πλέγματος, το πλέγμα διορθώνεται μέχρις συγκλίσεως των ελλειπτικών εξισώσεων με όρους πηγής. (Σχήματα 3.5, 3.7)

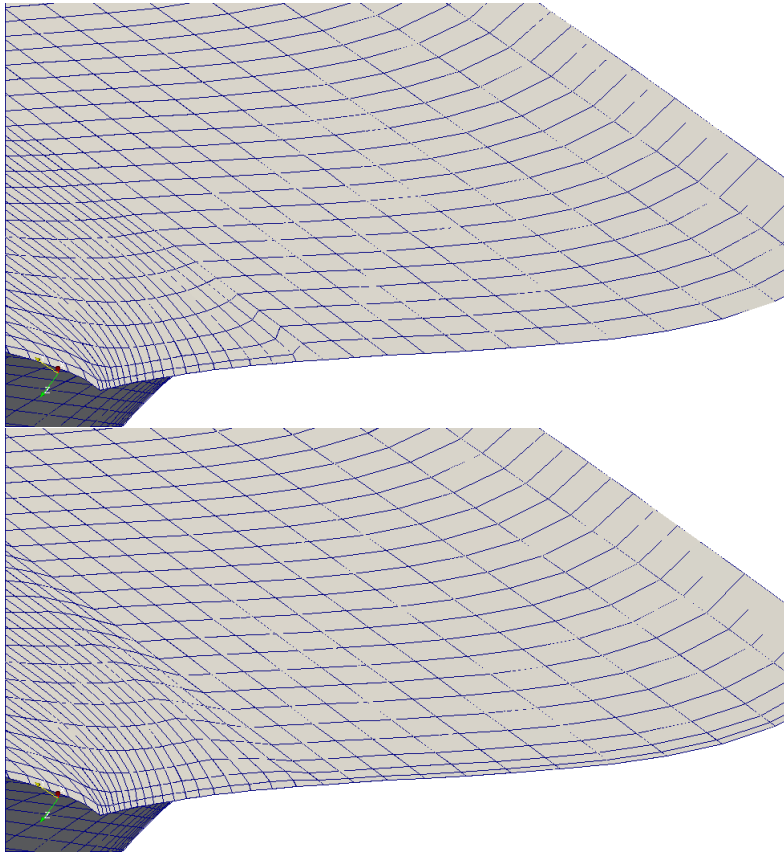
4. Το πλέγμα στην υπολειπόμενη επιφάνεια εκατέρωθεν του περυγίου, κατά τη δημιουργία του, λαμβάνει υπόψη τον τρόπο που είναι διανεμημένοι οι κόμβοι στο πλέγμα Sorrenson με τη μεταφορά της πληροφορίας καθετότητας και πύκνωσης. Έτσι η σύνδεση των πλεγμάτων και η μετάβαση από το ένα στο άλλο είναι περισσότερο ομαλή. (Σχήμα 3.4)
5. Μετά τη γέννεση επιφανειακού πλέγματος στο hub και στο shroud του περυγίου, πραγματοποιείται επιφανειακή πλεγματοποίηση και σε ενδιάμεσο ύψος περυγίου σε μία ή περισσότερες ενδιάμεσες επιφάνειες. Ο χρήστης καθορίζει πόσες και ποιες θα είναι οι ενδιάμεσες αυτές επιφάνειες στο αρχείο εισόδου.
6. κατά τη δημιουργία του πρωτογενούς χωρικού πλέγματος πλέον η καθ' ύψος παρεμβολή γίνεται με splines. Η μέχρι πρότινος χρήση γραμμικής παρεμβολής δημιουργούσε προβλήματα στην καθ' ύψος σύνδεση περισσότερων από δύο πλεγματικών επιφανειών.
7. Η ανακατανομή και πύκνωση κατά βούληση του χρήστη στη spanwise διεύθυνση δίνει μεγάλη ελευθερία για τη ρύθμιση της ποιότητας του πλέγματος, χωρίς να αυξάνει υπερβολικά τον αριθμό των κόμβων. (Σχήμα 3.8)
8. Τέλος, το αρχείο εισόδου ini3D έχει τροποποιηθεί και εμπλουτιστεί. Προστέθηκαν επιλογές που καθορίζουν σε πόσες και ποιες επιφάνειες θα γίνει επιφανειακή πλεγματοποίηση, πόσοι κόμβοι πριν και μετά το περύγιο θα ορίζουν το κομμάτι στο οποίο η πλεγματοποίηση θα γίνει με επίλυση των ελλειπτικών εξισώσεων, κάθε πόσες επαναλήψεις θα γίνεται ο επανυπολογισμός και ενημέρωση των όρων πηγής.

### 3.4 Εγχειρίδιο Χρήσης

Στην παρούσα παράγραφο, εξηγούνται βασικές μεταβλητές που εμφανίζονται στον κώδικα, δίνονται γενικές οδηγίες χρήσεως του πλεγματοποιητή καθώς και παρατηρήσεις- προτάσεις για δυσμενείς περιπτώσεις.

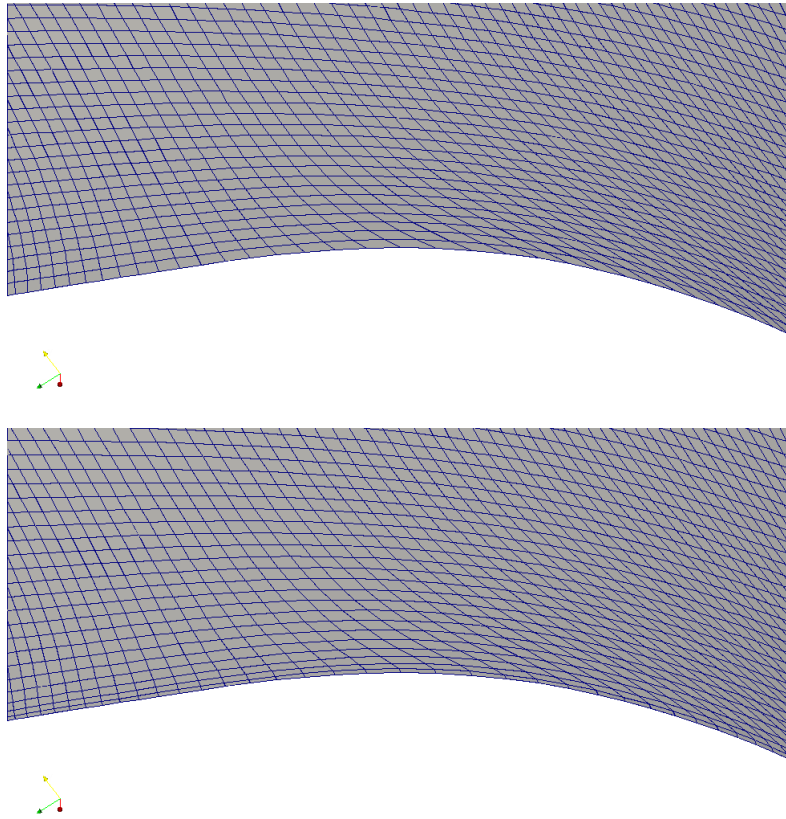
Παρακάτω παρατίθεται το νέο αρχείο εισόδου **ini3D**:

25	number of blades
33 51 29	node numbers: Before, along, after airfoil
0.90d0 1.05d0 1.1d0	geopro ratio (along i)
45	nodes number blade- to- blade (jt)
1.d0	geopro ratio
15000	iterations (of 3D gen)
-15.d0	stopping criterion (log10 of residual)
.3d0	alfa MSIP



Σχήμα 3.4: Πάνω: Πλέγμα χωρίς Μεταφορά της πληροφορίας Sorenson στα άκρα του χωρίου ροής. Κάτω: Πλέγμα με Μεταφορά της πληροφορίας Sorenson στα άκρα του χωρίου ροής.

1000	stretch and switch to Sorenson
25	3D grid dimension spanwise
2	total number of airfoil surfaces to be solved
1 2	airfoils in ascending order. First & Last airfoil always written
1	1 for Geosimple or 2 for Robertson Scheme
0.05	parameter of Robertson scheme
20	number of nodes ahead of LE to be Sorenson'ed
14	number of nodes after TE to be Sorenson'ed
0.1d0	relaxation factor
400	update source terms in Sorenson
40.d0	decay
0.2d0	om
0.5d0	plim
0.2	posdis



Σχήμα 3.5: Πάνω: Πλέγμα Laplace. Κάτω: Πλέγμα Sorenson με καθετότητα των πλεγματικών γραμμών στα άκρα και καθορισμένη πρώτη απόσταση από το όριο.

Αντίστοιχα οι πρώτες γραμμές του νέου αρχείου εισόδου **profile.curve**:

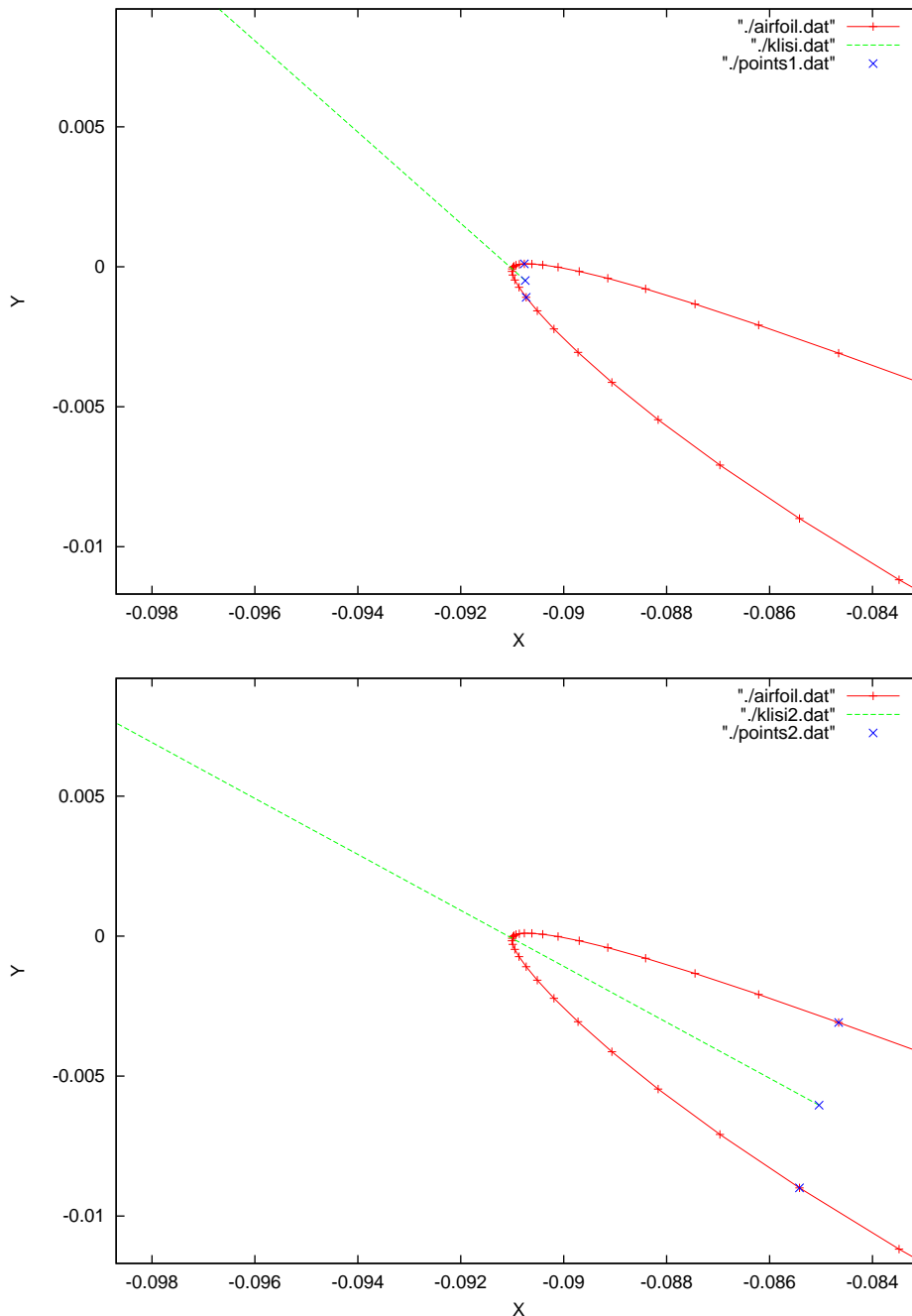
8	number of airfoils given
76	number of points in each airfoil
38	leading edge point

```
.113285552 .00892566553 -.0255374721
.11327218 .00909380136 -.0260087191
.      .      .
.      .      .
.      .      .
```

Εδώ πρέπει να τονιστεί η αναγκαιότητα το πρώτο σημείο της αεροτομής να είναι γραμμένο ξανά στην τελευταία σειρά και οι αεροτομές να χωρίζονται από μια κενή γραμμή.

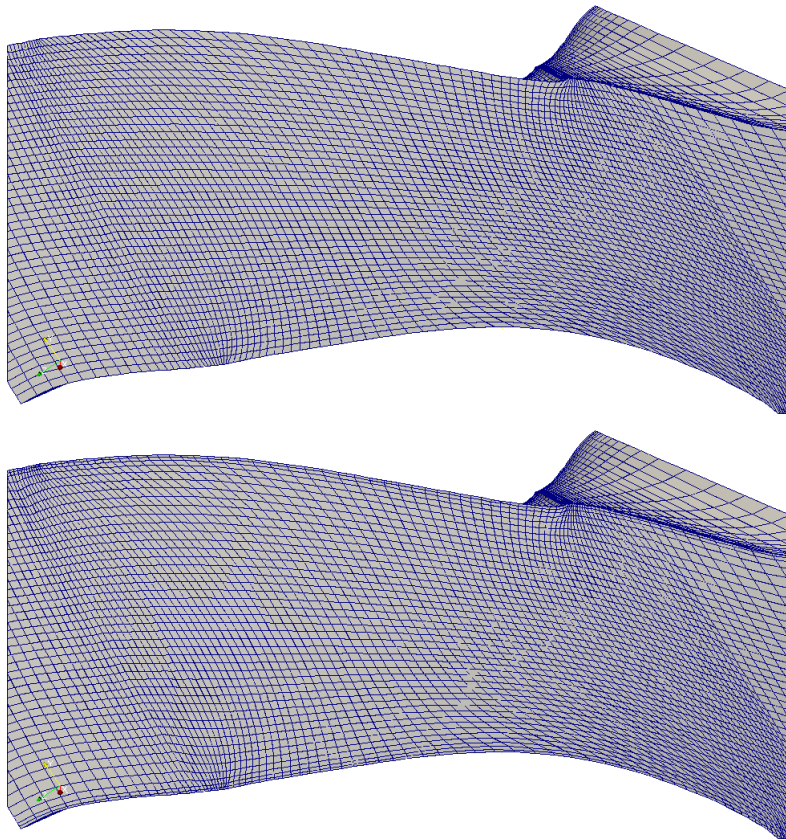
- Για την καλύτερη σύγκλιση του κώδικα, συνίσταται η επίλυση των ελλειπτικών εξισώσεων με όρους πηγής να ξεκινά αφού έχει συγκλίνει σε ικανοποιητικό βαθμό η επίλυση του λαπλασιανού πλέγματος.





Σχήμα 3.6: Πάνω: Υπολογισμός κλήσης με χρήση του μέσου όρου 5 σημείων ΠΙΝ και 5 σημείων ΜΕΤΑ το LE. Κάτω: Υπολογισμός κλήσης με χρήση του μέσου όρου των σημείων που βρίσκονται περίπου στο 10 % της χορδής ΠΙΝ και ΜΕΤΑ το LE.

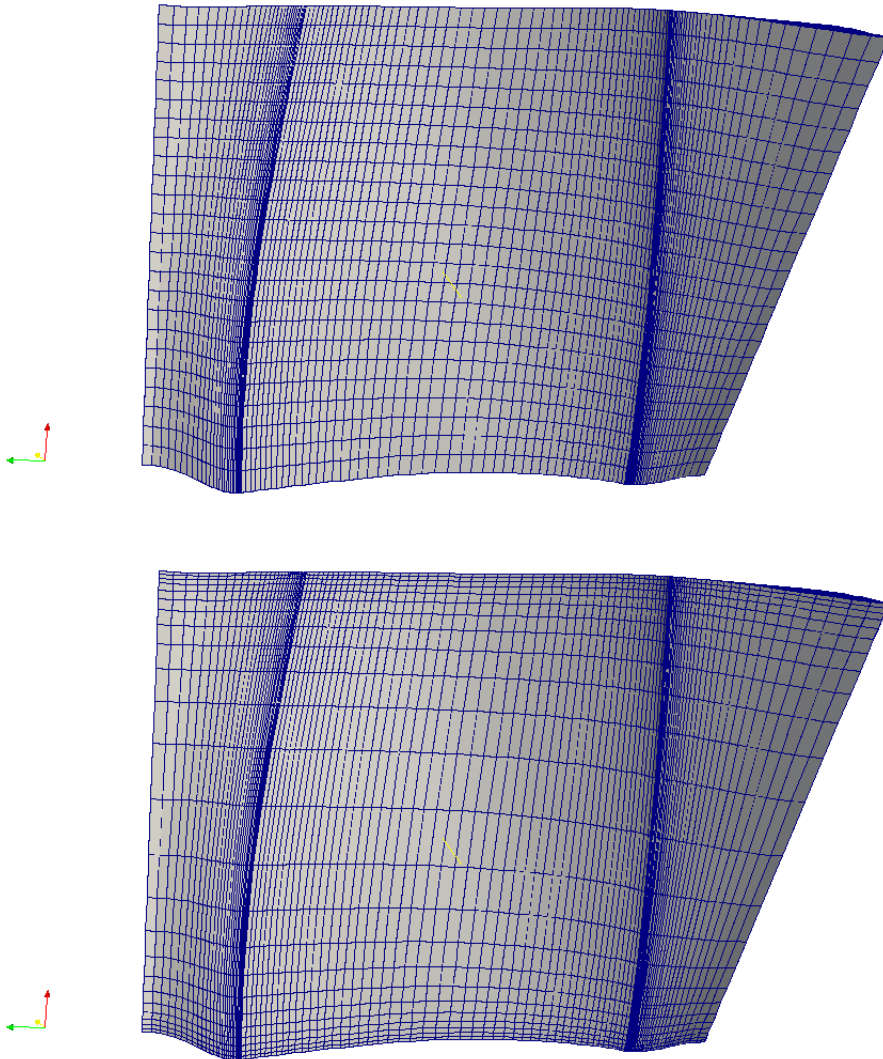
- Η μεταβλητή του αρχείου εισόδου με όνομα `posdis` εκφράζει το ποσοστό της απόστασης του πρώτου κόμβου από το όριο σε σχέση με την αντίστοιχη απόσταση στο Λαπλασιανό πλέγμα. Είναι καθοριστικός παράγοντας τόσο για την ποιότητα του πλέγματος, όσο και για το αν ο κώδικας θα συγκλίνει ή όχι.



Σχήμα 3.7: Πάνω: Πλέγμα Laplace. Κάτω: Πλέγμα με καθετότητα των πλεγματικών γραμμών στα άκρα και καθορισμένη πρώτη απόσταση από το όριο.

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα ρύθμισης μεταβάλλοντας την `posdis` παράλληλα με τον αριθμό των κόμβων (`jt`) κατά της `blade- to- blade` διεύθυνση.

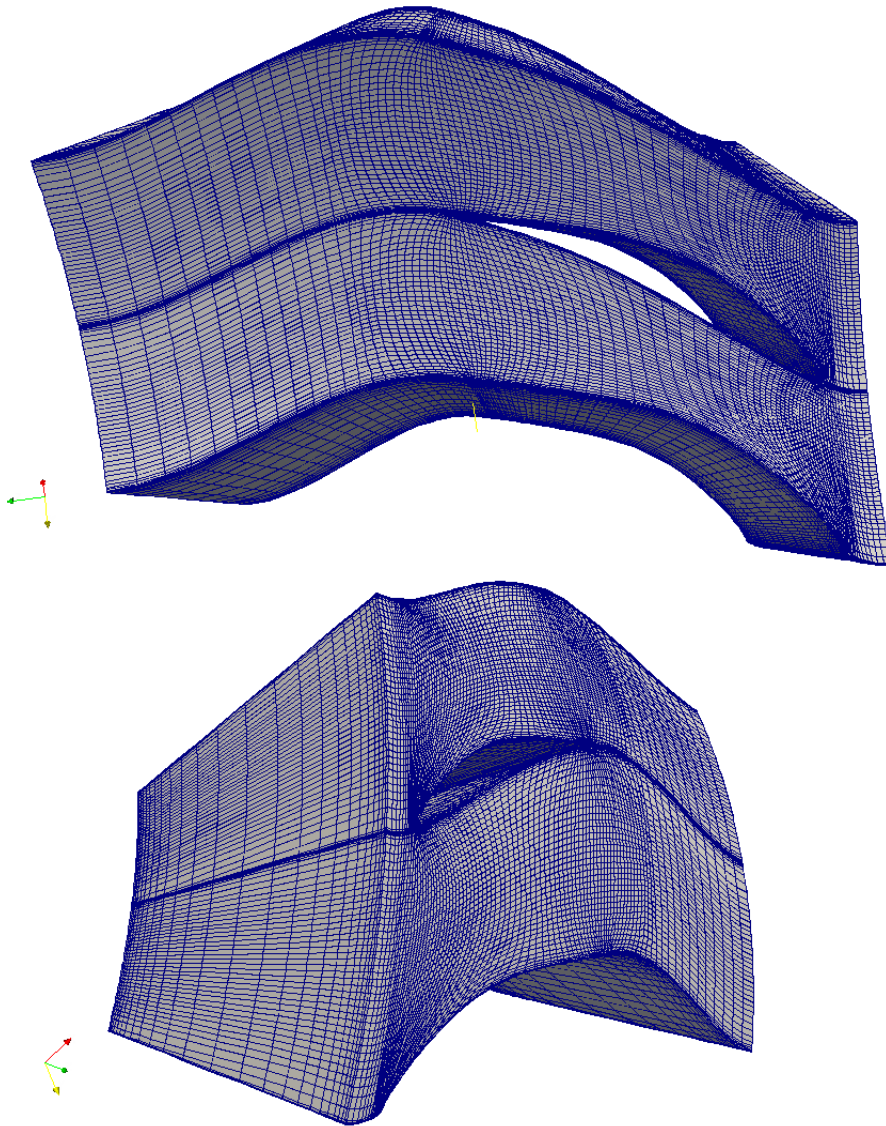
- Ακόμα, αλληλοεξαρτώμενα είναι τα μεγέθη που καθορίζουν το χωρίο όπου θα γίνει η επίλυση των ελλειπτικών εξισώσεων με όρους πηγής και αυτών που καθορίζουν τους κόμβους του πλέγματος πριν και μετά το πτερύγιο. Σε περίπτωση που οι εξισώσεις επιλυθούν πολύ κοντά εκατέρωθεν του πτερυγίου, το πλέγμα εμφανίζει μη-ορθογωνιότητες ενώ στην περίπτωση που επιλυθούν πολύ μακριά, εμφανίζονται απότομες μεταβολές στο μέγεθος των γειτονικών κελιών.
- Οι ενδιάμεσες επιφάνειες στις οποίες επιθυμεί ο χρήστης να δημιουργηθεί πλέγμα πρέπει να δίνονται με αύξουσα σειρά ενώ οι πρώτη και τελευταία επιφάνεια (που δημιουργούνται πάντα) πρέπει πάντα να δηλώνονται στο αρχείο εισόδου.



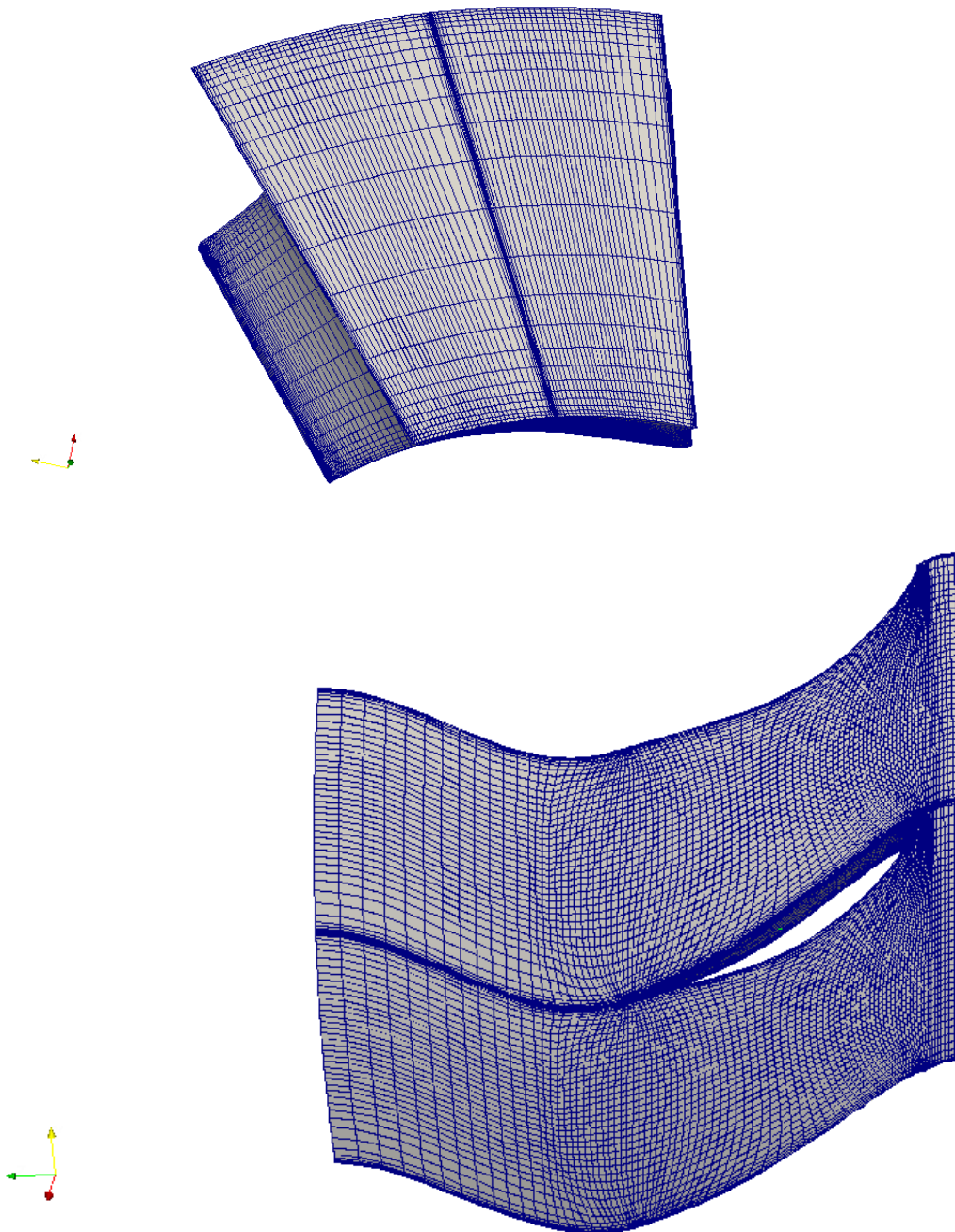
Σχήμα 3.8: Πάνω: Πλέγμα χωρίς πυκνωση στην καθ' ύψος διεύθυνση. Κάτω: Πλέγμα με πυκνωση στην καθ' ύψος διεύθυνση.

### 3.5 Αποτελέσματα

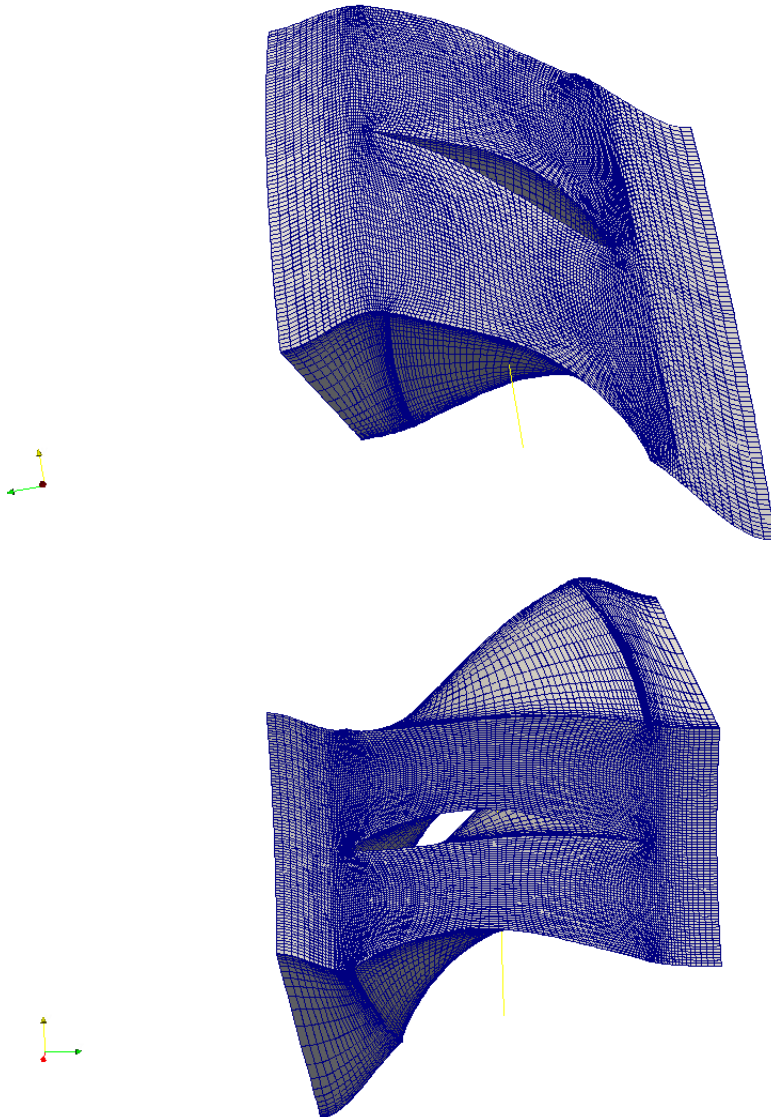
Παρακάτω παρατίθενται εικόνες από τη γένεση πλέγματος γύρω περυγώσεις στροβιλομηχανών.



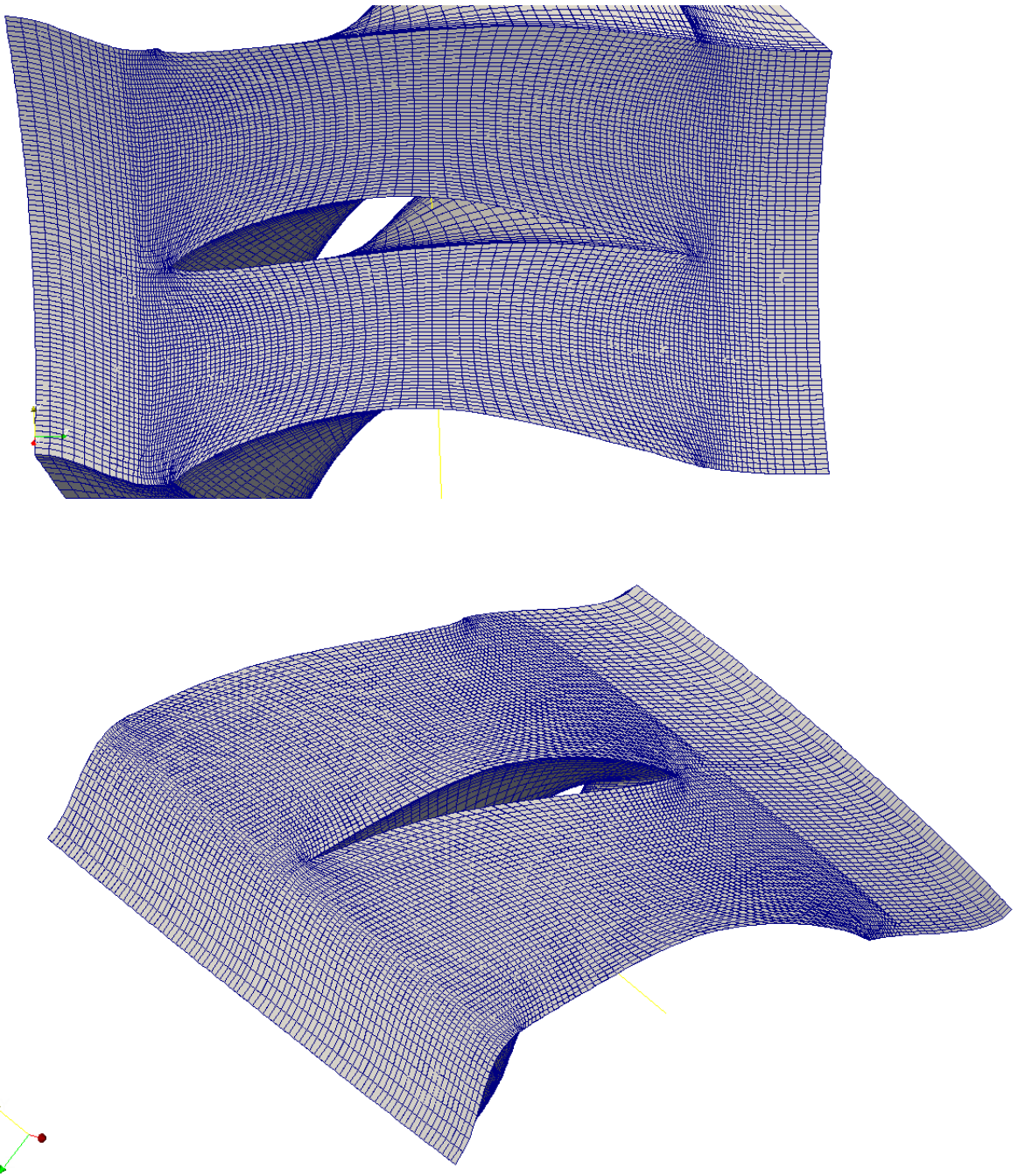
Σχήμα 3.9: Πλέγμα γύρω από σταθερή πτερόγωση συμπίεστη που δημιουργήθηκε με το turboGen3D



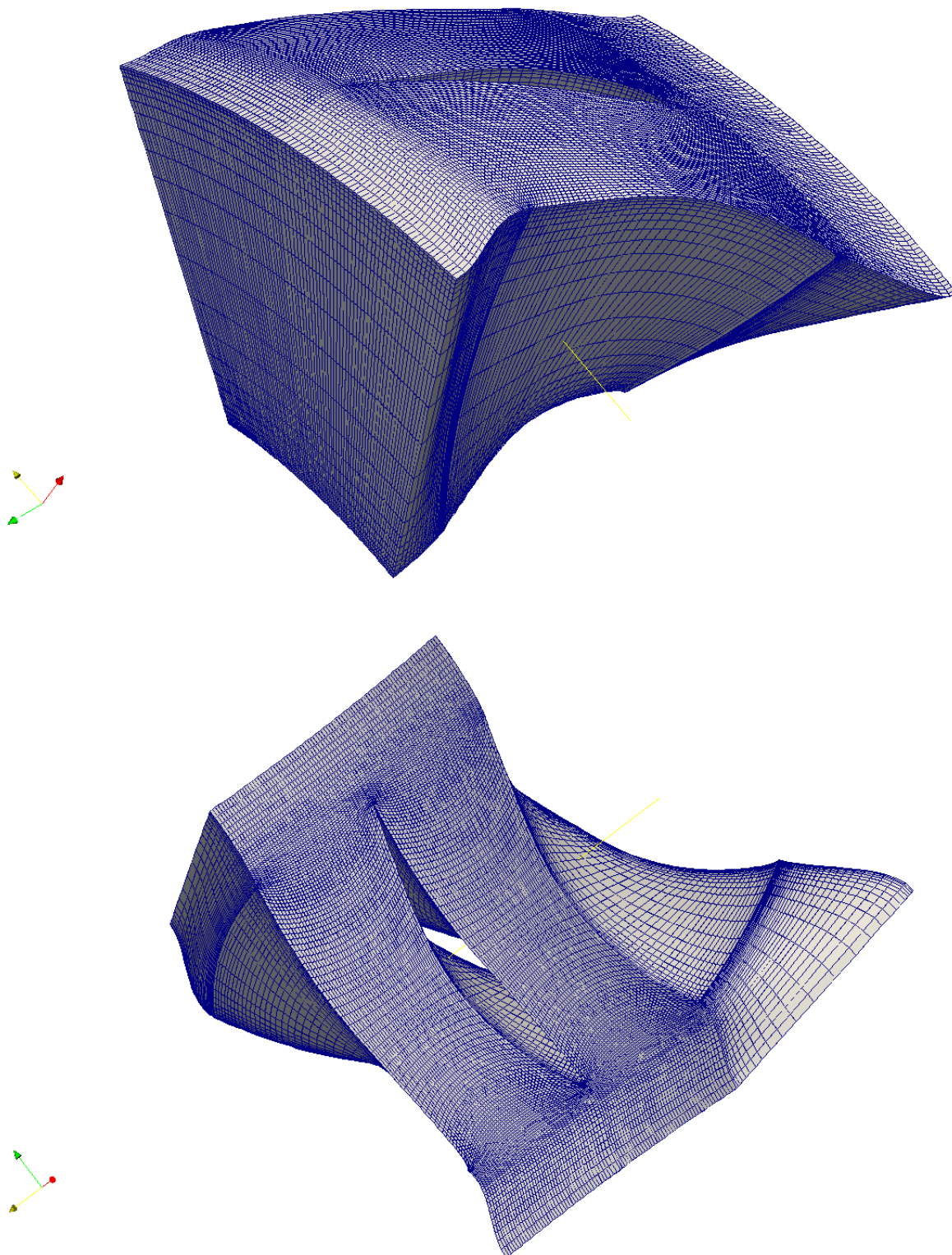
Σχήμα 3.10: Πλέγμα γύρω από σταθερή πτερύγωση συμπίεστη που δημιουργήθηκε με το turboGen3D



Σχήμα 3.11: Πλέγμα γύρω από κινητή πτερύγωση συμπίεστή που δημιουργήθηκε με το turboGen3D



Σχήμα 3.12: Πλέγμα γύρω από κινητή περύγωση συμπιεστή που δημιουργήθηκε με το turboGen3D



Σχήμα 3.13: Πλέγμα γύρω από κινητή περύγωση συμπιεστή που δημιουργήθηκε με το turboGen3D



## Κεφάλαιο 4

# Σχετικά Εργαλεία του πακέτου OpenFOAM για εφαρμογές σε πτερυγώσεις στροβιλομηχανών

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 1 το OpenFOAM ξεκίνησε με έμφαση στην επίλυση της ροής σε χωρία εξωτερικής αεροδυναμικής. Ωστόσο, πρόσφατα ξεκίνησε μια προσπάθεια από διάφορα εργαστήρια και εταιρείες να τροποποιηθεί κατάλληλα ώστε να αντεπεξέρχεται στις πρόσθετες απαιτήσεις που παρουσιάζει η υπολογιστική προσομοίωση της ροής σε πτερυγώσεις στροβιλομηχανών. Στο παρόν κεφάλαιο αναλύονται τα επιπλέον εργαλεία του OpenFOAM που είναι απαραίτητα, πέραν του επιλύτη της ροής, προκειμένου να προσομοιωθεί υπολογιστικά η ροή σε βαθμίδα στροβιλομηχανής. Τα εργαλεία αυτά αφορούν κυρίως συνένωση πλεγμάτων (**mergeMeshes**) - όπως, λόγω χάρη, του πλέγματος της σταθερής και της κινητής πτερυγωσης, επικοινωνία πλεγματικών επιφανειών (**ggi, cyclicGgi, overlapGgi**) [16] και κίνηση του πλέγματος. Εξηγείται αναλυτικά ο τρόπος χρήσης τους (αρχεία εισόδου, σύνταξη, κ.τ.λ.) αλλά και ο τρόπος που υλοποιούνται στο OpenFOAM. Στόχος είναι να δοθεί στον αναγνώστη μια ολοκληρωμένη εικόνα για καθένα από τα εργαλεία και να υπάρχει σχετική εξοικείωση με αυτά, καθώς είναι απαραίτητα για την κατανόηση των εφαρμογών του κεφαλαίου 5. Ως παραπροϊόν της ανάλυσης, προκύπτουν χρήσιμες παρατηρήσεις και σχόλια για την αντιμετώπιση προβλημάτων κατά τη χρήση των εργαλείων αυτών.

Η προσομοίωση της ροής σε πτερυγώσεις στροβιλομηχανών προϋποθέτει την επιβολή συνθηκών περιοδικότητας της ροής στα αντίστοιχα περιδικά όρια του πλέγματος κάθε πτερύγωσης. Προκειμένου να εξασφαλιστεί η περιοδικότητα, πρέπει να υπάρχει επικοινωνία μεταξύ επιφανειών οι οποίες απέχουν κατά το βήμα της πτερύγωσης. Το OpenFOAM, μέχρι την έκδοση 1.5, μπορεί να διαχειριστεί την επικοινωνία περιδικών πλεγματικών επιφανειών γραμμικών πτερυγώσεων, που μάλιστα με μεταφορά κατά το βήμα της πτερύγωσης ταυτίζονται κόμβο-προς-κόμβο. Στην έκδοση 1.5 γίνεται για πρώτη φορά η προσθήκη του εργαλείου **ggi** και πλέον η περιοδικότητα στη γραμμική πτερύγωση μπορεί να εξασφαλιστεί και χωρίς την

πλήρη ταύτιση των οριακών πλεγματικών επιφανειών. Τέλος, με την προσθήκη του εργαλείου cyclicGgi στην έκδοση 1.6-ext γίνεται εφικτή η περιοδικότητα σε περιφερειακή πτερύγωση.

Μια ακόμη ιδιαιτερότητα της ροής σε στροβιλομηχανές είναι οι διεπιφάνειες επικοινωνίας διαδοχικών χωρίων κινούμενων και ακίνητων πτερυγώσεων. Σε μια τέτοιου είδους εφαρμογή, η σχετική θέση των δυο επιφανειών μεταβάλλεται σε κάθε χρονικό βήμα και, συνακόλουθα, η επικοινωνία τους δεν μπορεί να βασίζεται σε μια κόμβο προς κόμβο αντιστοιχία, αφού στη γενική περίπτωση οι κόμβοι των δυο επιφανειών δεν ταυτίζονται. Χρειάζεται ένα είδος παρεμβολής ή περιφερειακής μεσοποίησης (peripheral averaging) των ροϊκών μεγεθών. Είναι σύνηθες τα δύο χωρία ροής να μην αλληλοεπικαλύπτονται πλήρως είτε λόγω διαφορετικού βήματος είτε λόγω μετακίνησης του χωρίου της κινούμενης πτερύγωσης. Το εργαλείο overlapGgi (έκδοση 1.6-ext) ικανοποιεί την ανάγκη αυτή χρησιμοποιώντας το σχήμα παρεμβολής GGI.

Οι ιδιαιτερότητες αυτές των στροβιλομηχανών, οδήγησαν στη δημιουργία ενός συνόλου εργαλείων για το πακέτο λογισμικού ανοιχτού κώδικα OpenFOAM υπό την καθολική ονομασία Γενική Πλεγματική Παρεμβολή (General Grid Interpolation) ή συντομογραφικά GGI. Να σημειωθεί εδώ ότι, πολλές φορές, το ίδιο συναντάται και ως Γενική Πλεγματική Διεπιφάνεια (General Grid Interface). Ουσιαστικά αναφέρονται στο ίδιο σχήμα παρεμβολής το οποίο γίνεται πάνω στη διεπιφάνεια.

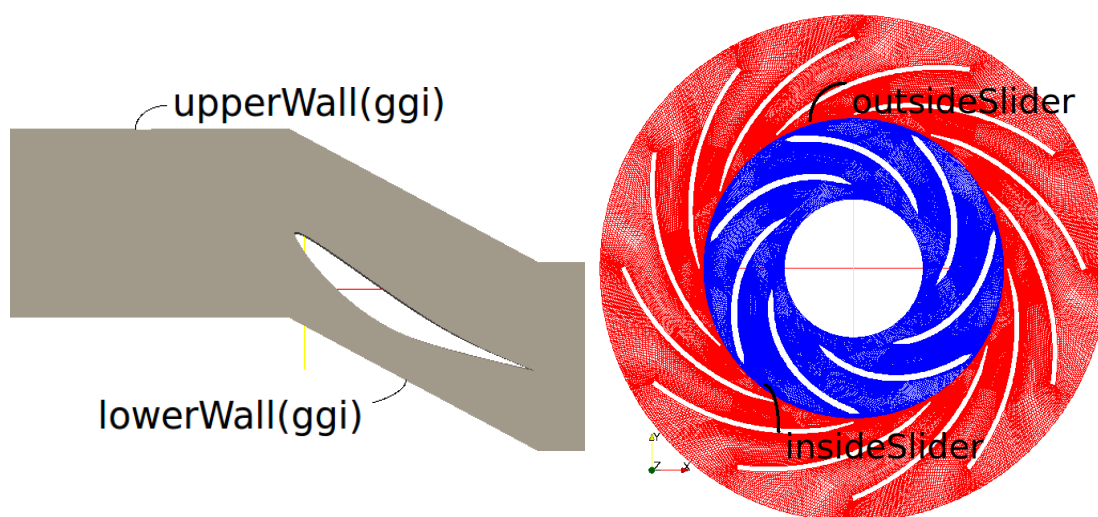
Για την καλύτερη κατανόηση της ακόλουθης ανάλυσης υπενθυμίζεται στον αναγνώστη η βασική δομή των 3 καταλόγων που απαιτούνται για οποιαδήποτε υπολογιστική προσομοίωση στο **OpenFoam**. Περισσότερο αναλυτική περιγραφή εμπεριέχεται στο κεφάλαιο 1.

- **0/**
- **constant/**
  - **polyMesh/**
    - \* points
    - \* cells
    - \* faces
    - \* boundary
  - ...Properties (...RASProperties, transportProperties,...)
  - ...Dict (dynamicMeshDict,...)
- **system/**
  - fvSolution
  - fvSchemes

- Άλλα λεξικά (dictionaries) για εργαλεία (Utilities). (decomposeParDict, createPatchDict, controlDict,... )

## 4.1 Εργαλείο **ggi** του OpenFoam

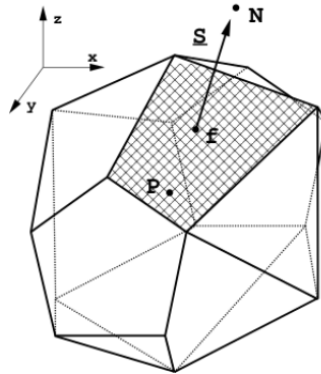
Το **ggi** ως εργαλείο χρησιμοποιείται για τη σύζευξη δυο οριακών πλεγματικών επιφανειών - των οποίων οι κόμβοι δεν ταυτίζονται- σε μια ενιαία διεπιφάνεια, η οποία έχει τη δυνατότητα να παρεμβάλλει τις ροϊκές πληροφορίες μεταξύ των εκατέρωθεν επιφανειών. Μία τέτοια περίπτωση είναι η επικοινωνία των περιοδικών επιφανειών που απέχουν κατά το βήμα σε γραμμική πτερύγωση ή η επικοινωνία δύο επιφανειών με πλήρη αλληλοκάλυψη ( Σχ. 4.1). Το ένα από τα δυο πλέγματα ορίζεται ως κύριο (**master**) και το άλλο ως δευτερεύον (**slave**) ή σκιάδες (**shadow**). Το βασικό πλεονέκτημα του αλγορίθμου προέρχεται από την άρση της απαίτησης για τοπολογικές τροποποιήσεις των δυο πλεγμάτων στη διεπιφάνεια. Αντ' αυτού χρησιμοποιείται παρεμβολή με χρήση σταθμισμένων παραγόντων οι οποίοι μεταφέρουν την πληροφορία εκατέρωθεν, εξασφαλίζοντας τη συνέχεια της ροής στο σύνολο της επιφάνειας αθροιστικά. Η εκτίμηση των σταθμικών παραμέτρων βασίζεται στον τρόπο που τέμνονται οι επιφάνειες των κελιών του δευτερεύοντος πλέγματος (faces ή πλευρικές επιφάνειες) όταν προβάλλονται στις αντίστοιχες του κύριου. Κατά συνέπεια, το παραπλήσιο μέγεθος των κελιών των δυο πλεγμάτων σε μια περιοχή κοντά στις προς επικοινωνία επιφάνειες είναι βασική απαίτηση για να υπολογιστούν σωστά οι ανωτέρω παράμετροι. Στο εξής ο όρος **ggi** θα αναφέρεται στο εργαλείο του OpenFoam ενώ ο όρος **GGI** στον αλγόριθμο υλοποίησης.



Σχήμα 4.1: Αριστερά: Χρήση του **ggi** σε γραμμική πτερύγωση. Δεξιά: Χρήση του **ggi** σε πλήρως επικαλυπτόμενες επιφάνειες[1].

Παρακάτω αναλύεται ο τρόπος με τον οποίον υλοποιείται το σχήμα της παρεμβολής **GGI** [17] στο πακέτο **OpenFoam**.

Ο όρος πρόσωπο χρησιμοποιείται - ως απευθείας μετάφραση του αγγλικού όρου face - για να δηλώσει την οριακή επιφάνεια ενός στοιχείου πεπερασμένου όγκου (Σχ. 4.2). Ο όρος patch περιγράφει μια οριακή πλεγματική επιφάνεια - όχι απαραίτητα επίπεδη- που αποτελείται από ένα σύνολο οριακών προσώπων. Όλες οι ονοματισμένες επιφάνειες στο σχήμα 4.10 αναφέρονται σε patches.



Σχήμα 4.2: Πεπερασμένος Όγκος. Η γραμμοσκιασμένη οριακή επιφάνεια του κελιού στο εξής ονομάζεται πρόσωπο. ( $P$  - κέντρο κελιού,  $N$  - κέντρο γειτονικών κελιών,  $S_f$  διάνυσμα κάθετο στην επιφάνεια με μέτρο την επιφάνεια σε  $m^2$  .)

Οι εξισώσεις που καθορίζουν τις τιμές των μεταβλητών της ροής μεταξύ του master patch και slave patch προέρχονται από τη βασική λογική διακριτοποίησης της μεθόδου πεπερασμένων όγκων. Ουσιαστικά εκφράζουν ότι η συντηρητική διακριτοποίηση των εξισώσεων πάνω στη διεπιφάνεια επιτυγχάνεται με τη χρήση της σταθμισμένης παρεμβολής, στην ακόλουθη μορφή:

- Για τις τιμές των μεταβλητών ροής από την κύρια στη δευτερεύουσα επιφάνεια :

$$\phi_{S_i} = \sum_n W_{M_n to S_i} * \phi_{M_n} \quad (4.1)$$

- Για τις τιμές των μεταβλητών ροής από τη δευτερεύουσα στην κύρια επιφάνεια :

$$\phi_{M_j} = \sum_m W_{S_m to M_j} * \phi_{S_i} \quad (4.2)$$

Ο τρόπος υπολογισμού των σταθμικών παραγόντων  $W$  φαίνεται παρακάτω (Εξ. 4.9) Από την απαίτηση της συντηρητικότητας της διακριτοποίησης, προκύπτουν οι ακόλουθοι περιορισμοί:

$$\sum W_{M_n to S_i} = 1.0 \quad (4.3)$$

$$\sum W_{S_m to M_j} = 1.0 \quad (4.4)$$

$$W_{M_n to S_i} * |S_{M_n}| = W_{S_m to M_j} * |S_{S_m}| = |S_{M to S}| \quad (4.5)$$

Η εξίσωση 4.5 προκύπτει από την απαίτηση το τμήμα της επικάλυψης σε κάθε πλευρική επιφάνεια να ισουται με την τομή των δύο πλευρικών επιφανειών.

Με την επιπλέον απαίτηση

$$\text{An } W_{M_n to S_i} > 0 \implies W_{S_i to M_n} > 0 \quad (4.6)$$

που σημαίνει ότι αν τέμνεται η κύρια πλευρική επιφάνεια με τη δευτερεύουσα τότε και η δευτερεύουσα θα τέμνεται με την κύρια.

Στη γενική περίπτωση όμως:

$$W_{M_n to S_i} \neq W_{S_i to M_n} \quad (4.7)$$

όπου

$\phi_S$  : ροϊκή μεταβλητή της δευτερεύουσας επιφάνειας

$\phi_M$  : ροϊκή μεταβλητή κύριας επιφάνειας

$i$  : i-οστό τμήμα της δευτερεύουσας επιφάνειας

$j$  : j-οστό τμήμα της κύριας επιφάνειας

$n$  : αριθμός γειτνιαζόντων κύριων προσώπων κελιών για το i-οστό δευτερεύον πρόσωπο

$m$  : αριθμός γειτνιαζόντων δευτερευουσών προσώπων κελιών για το j-οστό κύριο πρόσωπο

$W_{M to S}$  : σταθμικός παράγοντας που επιβάλλεται στην κύριο-προς-δευτερεύον παρεμβολή

$W_{S to M}$  : σταθμικός παράγοντας που επιβάλλεται στην δευτερεύον-προς-κύριο παρεμβολή

$|S_M|$  : μέτρο της επιφάνειας του κύριου προσώπου

$|S_S|$  : μέτρο της επιφάνειας του δευτερεύοντος προσώπου

$|S_{\cap M to S}|$  : τομή των ανωτέρω επιφανειών

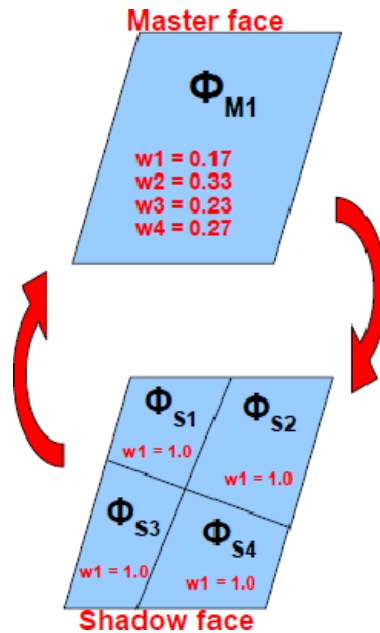
Η εκτίμηση των σταθμικών αυτών παραμέτρων παίζει τον πιο καθοριστικό ρόλο στην επιτυχία της επικοινωνίας μεταξύ των πλεγμάτων και πραγματοποιείται με γνώμονα τη γεωμετρική τομή των εκατέρωθεν επιφανειών - προβαλλόμενες η μία στην άλλη.

Η τιμή του σταθμικού όρου συνάγεται από την εξ. 4.9 η οποία βασίζεται αποκλειστικά στην επιφάνεια του προσώπου και στην τομή του κύριου με το δευτερεύον πρόσωπο. Για το κύριο πρόσωπο, είναι:

$$W_{M to S_i} = \frac{|S_{\cap M to S}|}{|S_{M_n}|} \quad (4.8)$$

$$W_{S to M_j} = \frac{|S_{\cap S to M}|}{|M_{S_m}|} \quad (4.9)$$

και αντίστοιχα για το δευτερεύον. Ουσιαστικά οι σταθμικοί όροι του αλγορίθμου



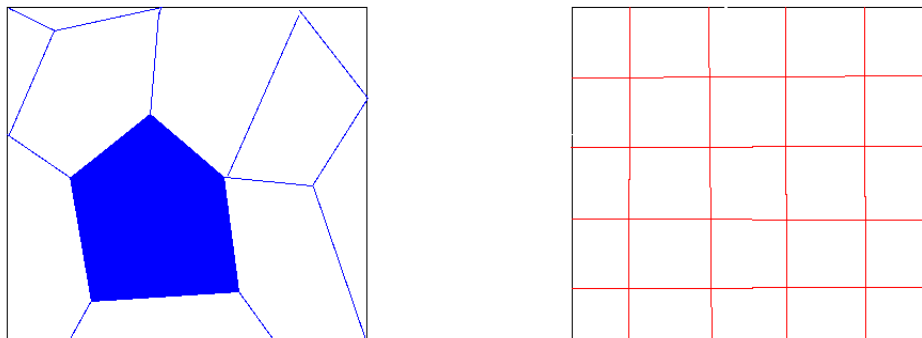
Σχήμα 4.3: Οι παράγοντες στάθμισης λαμβάνονται ως ποσοστό της τομής των δυο προσώπων ως προς την επιφάνεια του κυρίου.

**GGI** είναι το ποσοστό της αλληλοεπικαλυπτόμενης επιφάνειας μεταξύ των δυο προσώπων ως προς την επιφάνεια του κυρίου ή του δευτερεύοντος (Σχ. 4.3). Ωστόσο, ο υπολογισμός δεν είναι τόσο απλός. Απαιτείται να προηγηθεί μια αποδοτική διαδικασία εύρεσης και τομής των αντίστοιχων προσώπων.

Συνοπτικά η διαδικασία έχει ως εξής:

- Ορισμός του Περιβάλλοντος Πλαισίου γύρω από το κύριο πρόσωπο ( Σχ. 4.5)
- Εύρεση δευτερευουσών προσώπων που πιθανώς γειτνιάζουν με το κύριο ( Σχ. 4.6)
- Επιβεβαίωση των γειτνιαζόντων δευτερευουσών προσώπων με χρήση του Θεωρήματος Διαχωριστικών Αξόνων ( Σχ. 4.7)
- Ορισμός και υπολογισμός της κάθε τομής κύριου και δευτερεύοντος προσώπου με χρήση του αλγορίθμου Sutherland - Hodgman ( Σχ. 4.8)
- Υπολογισμός των σταθμικών παραγόντων με την προαναφερθείσα διαδικασία

Ο καθορισμός της "γειτονιάς" (neighbourhood) για κάθε πρόσωπο του κύριου πλέγματος, ανάγεται στην εύρεση των δευτερευόντων προσώπων που τέμνουν το δεδομένο κύριο πρόσωπο. Χωρίς να χρησιμοποιηθεί εκ των προτέρων η τοπολογία των δυο πλεγμάτων, το πρόβλημα εύρεσης αυτό έχει βαθμό πολυπλοκότητας  $O(n^2)$  άρα αναμένεται να έχει υψηλό υπολογιστικό κόστος εκτός αν χρησιμοποιηθούν "έξυπνοι" αλγόριθμοι. Το πρόβλημα επιλύεται "έξυπνα" με τη χρήση βελτιστοποιημένης εύρεσης και ελέγχων ταχείας απόρριψης (quick-reject

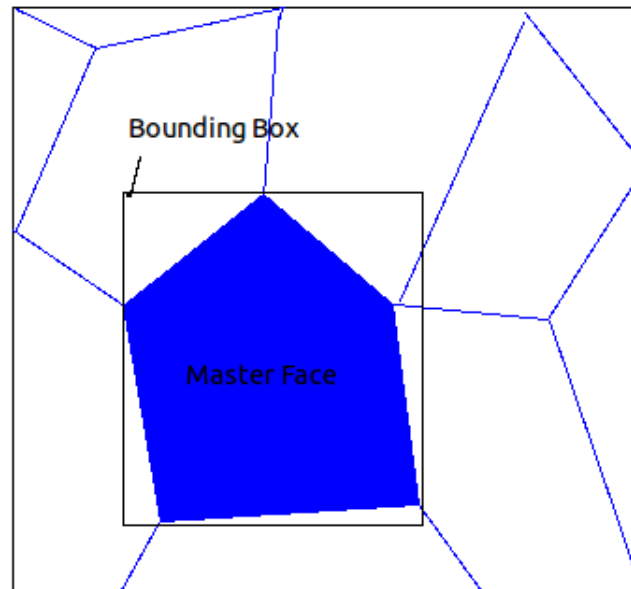


Σχήμα 4.4: Αριστερά: Πρωτεύον Επιφανειακό πλέγμα. Με μπλέ (σκούρο) φαίνεται η πρωτεύουσα πλευρική επιφάνεια μιας υπολογιστικής κυψέλης. Δεξιά: Δευτερεύον επιφανειακό πλέγμα.

tests).

Ένας πρωτογενής τέτοιος έλεγχος επιτυγχάνεται με το σχήμα απόρριψης όλων των δευτερεύουσων προσώπων που δεν ανήκουν σε μια περιοχή γύρω από το κύριο πρόσωπο. Προκειμένου να ευρεθούν αυτά, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος του **Περιβάλλοντος Πλαισίου** (Bounding Box). Πρόκειται για ένα "κουτί" το οποίο περιβάλλει την προς εξέταση πλευρική επιφάνεια. Μάλιστα, οι πλευρές του "κουτιού" αυτού επιλέγονται να είναι ανά δύο παράλληλες στους τρεις άξονες αντίστοιχα, τότε το πλαίσιο ονομάζεται **AABB (Axis Aligned Bounding Box)**. Τα AABB περιβάλλουν, αρκετά καλά, αντικείμενα με παραπλήσιο σχήμα και χρησιμεύουν για τον έλεγχο τομής αντικειμένων τα οποία ακουμπούν το ένα στο άλλο. Ο έλεγχος τομής δύο κουτιών τους είναι απλός καθώς απαιτεί έλεγχο των προβολών (ευθύγραμμα τμήματα) τους στους τρεις άξονες αντίστοιχα. Έχουν το μειονέκτημα όμως ότι αν το αντικείμενο που περιβάλλουν περιστραφεί τότε πρέπει να επαναυπολογιστούν.

Τα υποψήφια γειτνιάζοντα πρόσωπα που προκύπτουν από την παραπάνω διαδικασία, στη συνέχεια, υποβάλλονται σε ένα ακόμη τέτοιου είδους έλεγχο. Καθώς το τελευταίο αυτό φιλτράρισμα που επιβάλλεται, είναι 2D, είναι προαπαιτούμενη η προβολή όλων των πιθανών γειτονικών προσώπων, στο επίπεδο του κύριου προσώπου. Ωστόσο, η απαίτηση αυτή σε περιπτώσεις με έντονες γεωμετρικές ασυνέχειες, δίνει αρκετά μεγαλύτερο αριθμό υποψήφιων γειτνιαζόντων προσώπων και ως εκ τούτου ο αλγόριθμος καθίσταται ακριβός. Έτσι επιβάλλεται από το χρήστη μια ανοχή ως προς τη διεύθυνση διανυσμάτων της επιφάνειας των πιθανών γειτονικών πλευρικών επιφανειών, αφού είναι αναμενόμενο τα διανύσματα των επικαλυπτόμενων πλευρικών επιφανειών να έχουν παραπλήσια διεύθυνση. Ακολούθως, πραγματοποιείται η προβολή των υποψηφίων στο επίπεδο του κύριου προσώπου και εφαρμόζεται η τελευταία διαλογή με τη χρήση του **Θεωρήματος**



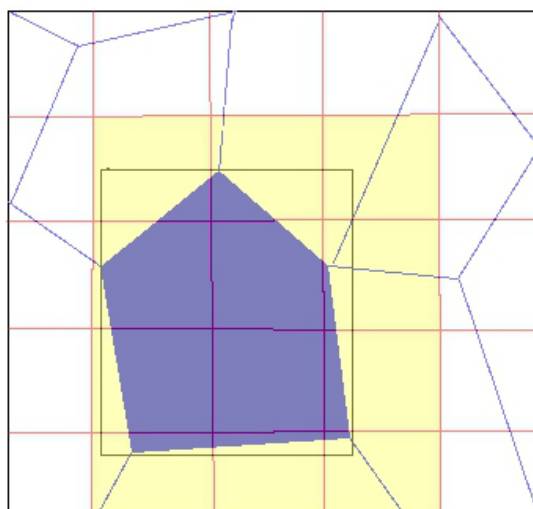
Σχήμα 4.5: Ορισμός του Περιβάλλοντος Πλαισίου γύρω από την κύρια πλευρική επιφάνεια μιας υπολογιστικής κυψέλης.

**Διαχωριστικών Αξόνων (Separating Axis Theorem)** ([18]). Σύμφωνα με αυτό δύο κυρτά σχήματα δεν επικαλύπτονται αν και μόνο αν υπάρχει άξονας στον οποίο οι προβολές τους δεν επικαλύπτονται ( Σχ. 4.7).

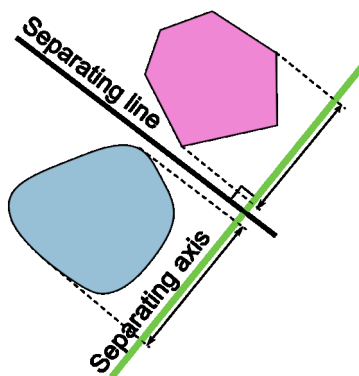
Αφού εντοπιστούν τα γειτνιάζοντα δευτερεύοντα πρόσωπα, ακολουθεί η τομή των κοινών τμημάτων (με το κύριο) με χρήση του αλγορίθμου των Sutherland-Hodgman ( Σχ. 4.8) ο οποίος εξηγείται παρακάτω. Είναι αρκετά γενικός, απλός, γρήγορος και έχει τη δυνατότητα να διαχειρίζεται μεγάλο εύρος περιπτώσεων για οποιοδήποτε πλέγμα κυρτών πολύεδρων.

Ο **αλγόριθμος των Sutherland-Hodgman** [2] ξεκινά με την εύρεση όλων των κορυφών του προς τομή πολυγώνου. Η πλευρά του πολυγώνου τομής επεκτείνεται επ' άπειρο και αποκόπτεται το τμήμα του σχήματος που ανήκει στο εξωτερικό ημιεπίπεδο της πλευράς αυτής. Πλέον, η νέα κορυφή του υποκείμενου πολυγώνου, είναι η τομή της ευθείας που προέκυψε από την πλευρά του πολυγώνου τομής, και της πλευράς του αρχικού πολυγώνου. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλες τις πλευρές του πολυγώνου τομής. Αφού εντοπιστούν όλες οι νέες κορυφές ενώνονται μεταξύ τους σύμφωνα με τις πλευρές του αρχικού σχήματος.





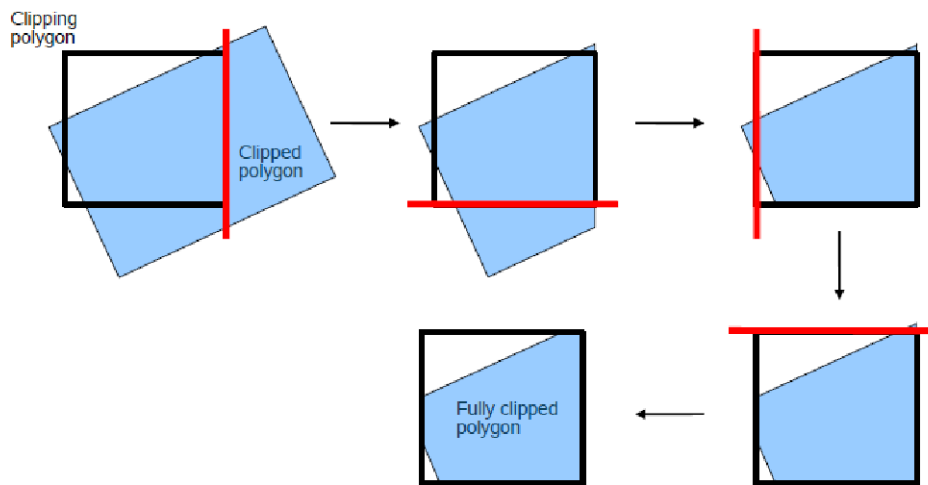
Σχήμα 4.6: Εύρεση δευτερευουσών πλευρικών επιφανειών που πιθανώς γειτνιάζουν με την κύρια πλευρική επιφάνεια της υπο μελέτης υπολογιστικής κυψέλης.



Σχήμα 4.7: Θεώρημα Διαχωριστικών Αξόνων

Τέλος, υπολογίζονται οι παράγοντες στάθμισης και, στο τέλος, οι τιμές των ροϊκών μεταβλητών στις δύο επιφάνειες.

Ένα ακόμη ενσκήπτον πρόβλημα σχετίζεται με την επίδραση της ποιότητας της διακριτοποίησης σε κυλινδρικά χωρία και, γενικότερα, σε χωρία ροής σε στροβιλομηχανές. Λόγω της διακριτοποίησης του χώρου τα πρόσωπα στα οποία πρέπει να γίνει η παρεμβολή των ροϊκών μεγεθών ενδέχεται να μη βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο, αλλά να τέμνονται. Μάλιστα κάποια τμήματα του κυρίου πλέγματος βρίσκονται στο δευτερεύον και αντίστροφα. Τυπικό είναι το παράδειγμα του σχήματος 4.9 όπου απεικονίζει την επαφή δυο κυλίνδρων με ίδια ακτίνα από διαφορετικά πλέγματα. Στην περίπτωση αυτή, καταλήγουμε σε μια παραβίαση των



Σχήμα 4.8: Σχηματικά ο αλγόριθμος των Sutherland-Hodgman[2]

εξισώσεων 4.3,4.4 και 4.5, που σημαίνει απώλεια πληροφορίας και ενδεχόμενη ασυνέχεια των ροϊκών μεγεθών. Το τέχνασμα που χρησιμοποιείται στο σημείο αυτό είναι μια διόρθωση στις τιμές των σταθμικών όρων, ώστε το άθροισμά τους να δίνει μονάδα. Οι διορθώσεις αυτές πραγματοποιούνται με γνώμονα τις αρχικές -εσφαλμένες- τιμές των σταθμικών παραγόντων. Ως εκ τούτου σταθμίζεται ακόμη και η διόρθωση των παραγόντων.

Παρακάτω δίνονται αναλυτικές οδηγίες σχετικά με το τί θα πρέπει ακόμα να τροποποιήσει ο χρήστης σε σχέση με τα όσα έχουν αναφερθεί στο κεφάλαιο 1 προκειμένου να χρησιμοποιήσει το ggi. Για την καλύτερη κατανόηση χρησιμοποιείται το παράδειγμα του σχήματος 4.1 β.

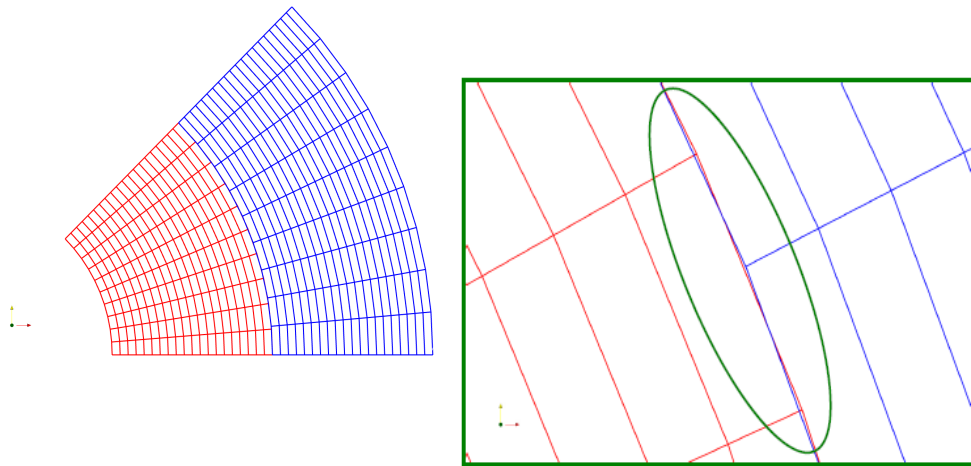
Τα αρχεία στα οποία πρέπει να επέμβει είναι:

1. **case/system/decomposeParDict**
2. **case/constant/polyMesh/boundary**
3. **case/0/U** , **case/0/p** ,**case/0/k** ..

Για το αρχείο **case/system/decomposeParDict**, είναι (παρατίθεται ολόκληρο το αρχείο):

```
FoamFile
{
version          2.0;
format          ascii;
class           dictionary;
object         decomposeParDict;
}
```

```
// * * * * *
```



Σχήμα 4.9: Προβλήματα με τεμνόμενες επιφάνειες των προς επικοινωνία προσώπων

```
//  
  
//- Keep owner and neighbour on same processor for faces in zones:  
// preserveFaceZones ();  
  
//- Keep owner and neighbour on same processor for faces in patches:  
// preservePatches ();  
  
globalFaceZones  
{  
  insideZone  
  outsideZone  
}; // Those are the names of the face zones  
//that correspond to any type of ggi connection  
  
numberOfSubdomains 4; // The problem will be decomposed  
//in 4 different processors  
  
method metis;
```

```
metisCoeffs  
{  
processorWeights  
(  
1  
1  
1  
1  
);  
}
```

όπου η διαφοροποίηση έγκειται στο λήμμα **globalFaceZones** όπου γράφονται όλες οι ζώνες κελιών που επικοινωνούν με το σχήμα *ggi* (ή κάποιο παράγωγό του *overlapGgicyclicGgi*). Η διαδικασία σχηματισμού των ζωνών αυτών περιγράφεται στην παράγραφο 4.5 του παρόντος κεφαλαίου.

Το αρχείο εισόδου **case/constant/polyMesh/boundary** που αφορά τον τύπο των οριακών επιφανειών του χωρίου για τις αντίστοιχες *ggi* επιφάνειες γράφεται ως εξής - για τα υπόλοιπα *patches* παραμένει ως έχει σύμφωνα με τα όσα γράφηκαν στο κεφάλαιο 1 :

```
insideSlider  
{  
type ggi;  
nFaces 352;  
startFace 181736;  
shadowPatch outsideSlider;  
}
```

```
outsideSlider  
{  
nFaces 308;  
startFace 188808;  
type ggi;  
shadowPatch insideSlider;  
}
```

```
// ***** //
```

Εδώ, *insideSlider* και *outsideSlider* είναι τα *patches* στα οποία θα εφαρμοστεί η παρεμβολή κατά GGI (Σχ. 4.1 β) .

Τέλος, για όλες τις οριακές συνθήκες ( λόγου χάρη της ταχύτητας) **case/0/U** τα λήμματα των αντίστοιχων *ggi patches* διαμορφώνονται ως εξής:

```
insideSlider
```

---

```

{
type ggi;
}
outsideSlider
{
type ggi;
}
// ***** //

```

## 4.2 Εργαλείο **cyclicGgi** του OpenFoam

Το **cyclicGgi** αποτελεί μια παραλλαγή του **ggi** και απαντά στην ανάγκη επιβολής της περιφερειακής περιοδικότητας σε περύγωση στροβιλομηχανής - το **ggi** όπως προαναφέρθηκε εφαρμόζεται μόνο για περιοδικότητα σε γραμμική περύγωση ή σε περιπτώσεις που οι δυο επιφάνειες ταυτίζονται γεωμετρικά (Σχ. 4.1). Εφαρμόζεται μεταξύ των περιφερειακά περιοδικών επιφανειών και ουσιαστικά αποτελεί συνδιασμό της αλγορίθμου Γενικής Πλεγματικής Παρεμβολής με στροφή της επιφάνειας και των ροϊκών μεγεθών κατά το βήμα της περύγωσης, ώστε να επέλθει σύμπτωση με την αντίστοιχη περιοδική της επιφάνεια. Όπως και το **ggi** δεν απαιτεί τα δυο επιφανειακά οριακά πλέγματα να ταυτίζονται κόμβο προς κόμβο.

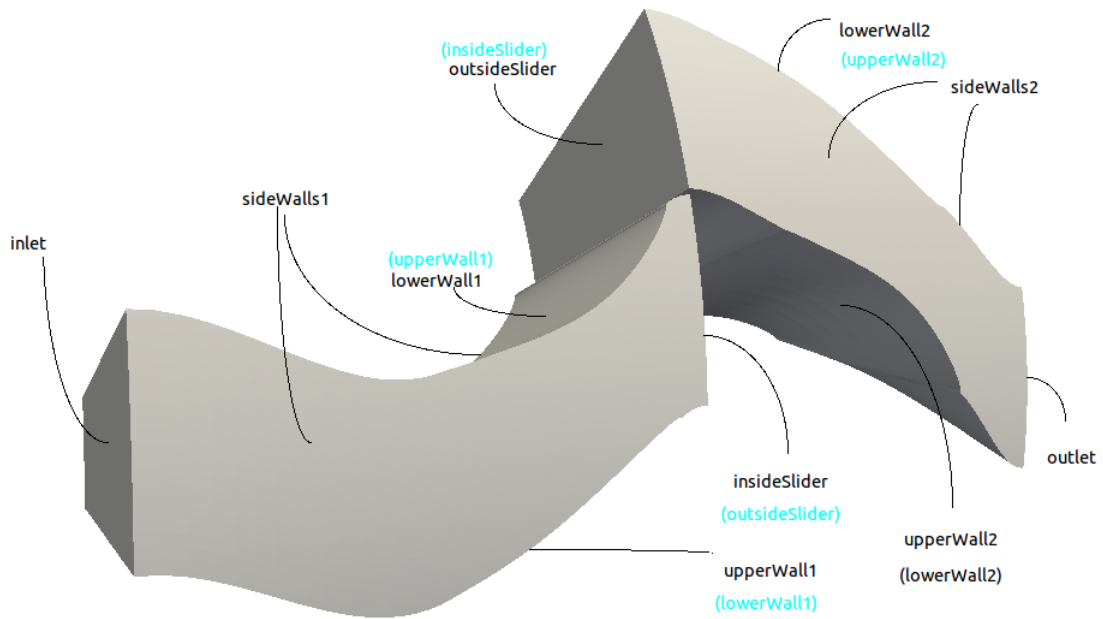
Όσον αφορά την υλοποίησή του στο **OpenFoam**, αρχικά δημιουργείται μια μετασχηματισμένη επιφάνεια - προκειμένου να υπάρχει πλήρης ταύτιση των επιφανειών, ακολουθεί η στροφή των διανυσματικών και τανυστικών μεγεθών και τέλος πραγματοποιείται ο υπολογισμός των σταθμικών όρων με χρήση του βασικού σχήματος παρεμβολής **GGI** ως ανωτέρω.

Τα αρχεία εισόδου που δίνονται τόσο για το **cyclicGgi** όσο και για το **overlapGgi** ως παραδείγματα του παρόντος κεφαλαίου προέρχονται από την ίδια εφαρμογή προκειμένου ο αναγνώστης να βλέπει ξεκάθαρα τις αντιστοιχίες ( Σχ. 4.10). Στο σχήμα απεικονίζεται μια εφαρμογή αλληλεπίδρασης κινητής με σταθερή περύγωση σε αξονικό συμπιεστή με περιφερειακή περιοδικότητα, όπου το **lowerWall1** επικοινωνεί με το **upperWall1** (περιφερειακά περιοδικές επιφάνειες της κινούμενης περύγωσης) μέσω του **cyclicGgi** και το **lowerWall2** με το **upperWall2** για την ακίνητη περύγωση αντίστοιχα. Τέλος, το **patch insideSlider** επικοινωνεί με το **patch outsideSlider** μέσω του **overlapGgi** (Βλ. παράγραφο 4.3).

Ομοίως θα πρέπει να τροποποιηθούν αρχεία :

1. **case/system/decomposeParDict**
2. **case/constant/polyMesh/boundary**
3. **case/0/U , case/0/p , case/0/k ..**

Για το αρχείο **case/system/decomposeParDict**, είναι (γράφεται μόνο το τμήμα του αρχείου που πρέπει να προστεθεί):



Σχήμα 4.10: Επεξήγηση του χωρίου ροής που χρησιμοποιείται ως παράδειγμα στο παρόν κεφάλαιο. Με μαύρο ( σκούρο) χρώμα φαίνονται τα ονόματα των patches ενώ με μπλέ ( ανοιχτό) τα αντίστοιχα patches με τα οποία επικοινωνούν.

```

globalFaceZones
(
lowerWall1Zone
upperWall1Zone
lowerWall2Zone
upperWall2Zone
); // Those are the names of the face zones
//that correspond to any type of ggi connection
    
```

Το αντίστοιχο αρχείο εισόδου **case/constant/polyMesh/boundary** διαμορφώνεται ακολούθως ( Βλ. σχήμα 4.10):

```

upperWall2
{
type cyclicGgi;
nFaces 504;
startFace 189928;
shadowPatch lowerWall2;
zone upperWall2Zone;
bridgeOverlap true;
rotationAxis (0 0 1);
}
    
```

```
rotationAngle 14.4;  
separationOffset (0 0 0);  
}
```

```
lowerWall2  
{  
type cyclicGgi;  
nFaces 504;  
startFace 189424;  
shadowPatch upperWall2;  
zone lowerWall2Zone;  
bridgeOverlap true;  
rotationAxis (0 0 1);  
rotationAngle -14.4;  
separationOffset (0 0 0);  
}
```

```
lowerWall1  
{  
type cyclicGgi;  
shadowPatch upperWall1;  
zone lowerWall1Zone;  
bridgeOverlap true;  
rotationAxis (0 0 1);  
rotationAngle -14.4;  
separationOffset (0 0 0);  
nFaces 1440;  
startFace 619680;  
}
```

```
upperWall1  
{  
type cyclicGgi;  
shadowPatch lowerWall1;  
zone upperWall1Zone;  
bridgeOverlap true;  
rotationAxis (0 0 1);  
rotationAngle 14.4;  
separationOffset (0 0 0);  
nFaces 1440;  
startFace 621120;  
}
```

```
// ***** //  


---


```

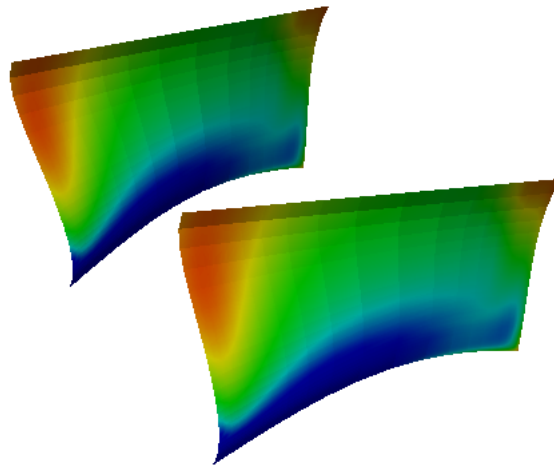
- Στο λήμμα **nFaces** αναφέρεται ο αριθμός προσώπων από τα οποία αποτελείται το εν λόγω **patch**. Ο αριθμός αυτός προκύπτει κατά τη διαδικασία γένεσης του πλέγματος και ΔΕΝ τον ορίζει ο χρήστης. (Βλ. Κεφ. 1)
- Στο λήμμα **startFace** δηλώνεται ο αύξων αριθμός του πρώτου προσώπου που ανήκει στο **patch**. Ομοίως ο αριθμός αυτός προκύπτει κατά τη διαδικασία γένεσης του πλέγματος και ΔΕΝ τον ορίζει ο χρήστης. (Βλ. Κεφ. 1)
- Στο λήμμα **shadowPatch** δηλώνεται με ποιά σκιά επιφάνεια θα επικοινωνήσει το προκείμενο **patch**. Ορίζεται από τον χρήστη.
- Στο λήμμα **zone** δηλώνεται ποιά ζώνη προσώπων σχετίζεται με το προκείμενο **patch**. Ορίζεται από τον χρήστη.
- Στο λήμμα **rotationAxis** δηλώνεται ο άξονας της μηχανής. Εδώ, δηλώνεται ότι η στροβιλομηχανή περιστρέφεται γύρω από τον άξονα των z. Ορίζεται από τον χρήστη. ( Στη γενικότερη περίπτωση, ο άξονας γύρω από τον οποίο θα πρέπει να στραφεί η προκείμενη επιφάνεια για να συμπίσει με τη σκιά της. )
- Στο λήμμα **rotationAngle** δηλώνεται η γωνία σε μοίρες που θα πρέπει να στραφεί η προκείμενη επιφάνεια για να συμπίσει με τη σκιά της γύρω από τον άξονα περιστροφής. Λόγου χάρη εδώ δηλώθηκαν 14.4 μοίρες που αντιστοιχούν σε  $360/14.4 = 25$  πτερύγια. Ορίζεται από τον χρήστη.
- Το λήμμα **bridgeOverlap** λαμβάνει τιμή "αληθή" (true) αν μετά τη στροφή, οι αντίστοιχες επιφάνειες ταυτίζονται πλήρως, ενώ λαμβάνει τιμή "ψευδή" false)σε κάθε άλλη περίπτωση. Να σημειωθεί εδώ ότι τα αποτελέσματα της επικοινωνίας δεν είναι καθόλου ασφαλή σε περίπτωση που το **bridgeOverlap** είναι ψευδής, παρά μόνο στην περίπτωση που ο αριθμός των μή επικαλυπτόμενων προσώπων είναι πολύ μικρός. Ομοίως ορίζεται από τον χρήστη.

Αντίστοιχα για το αρχείο εισόδου **case/O/U**, είναι :

```
upperWall2
{
type cyclicGgi;
}
lowerWall2
{
type cyclicGgi;
}
upperWall1
{
```



```
type cyclicGgi;  
}  
lowerWall1  
{  
type cyclicGgi;  
}
```

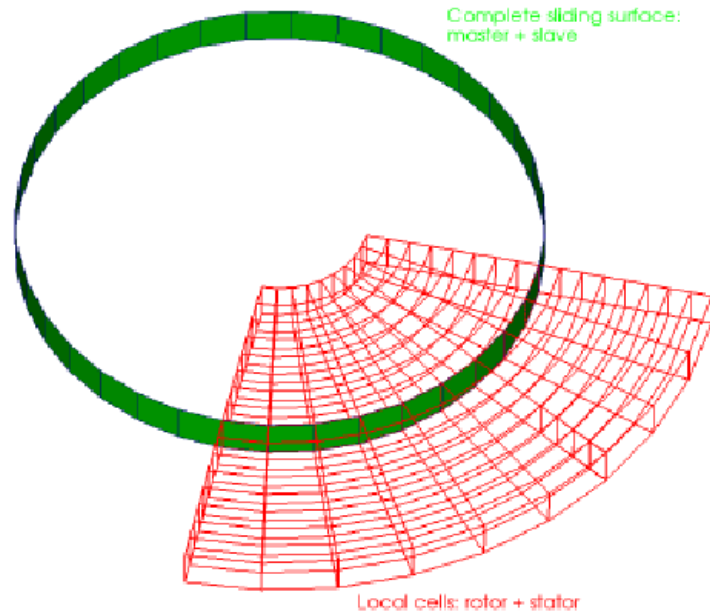


Σχήμα 4.11: Κατανομή Ταχυτήτων σε επιφάνειες με περιφερειακή περιοδικότητα

### 4.3 Εργαλείο **overlapGgi** του OpenFoam

Το **overlapGgi** χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις περιφερειακά ολισθαίνουσας διεπιφάνειας (Σχ. 4.12) όπου οι δυο προς επικοινωνία επιφάνειες δεν αλληλοκαλύπτονται γεωμετρικά. Εφαρμόζεται μεταξύ των δυο συνιστωσών της ολισθαίνουσας διεπιφάνειας και φροντίζει ώστε με κατάλληλη αντιγραφή προς εαυτόν να σχηματίζει ολόκληρη την περιφερειακή διεπιφάνεια και οι δυο συνιστώσες να αλληλοκαλύπτονται ( Σχ. 4.12). Στη συνέχεια, τα μεγέθη ροής μετασχηματίζονται κατάλληλα ώστε να αρμόζουν στην περιφερειακή επιφάνεια και οι τιμές τους παρεμβάλλονται με το γενικό αλγόριθμο του **GGI**. Κάθε στιγμή υπολογίζονται τα μεγέθη του πεδίου ροής μόνο στο τμήμα της περιφερειακής επιφάνειας που εμπλέκεται στην άμεση επικοινωνία των δυο πλεγμάτων. Σε περίπτωση που υπάρχει

πλήρης αλληλοκάλυψη δε χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί το **overlapGgi** αλλά αρκεί το **ggi**. Ομοίως και εδώ θα πρέπει να τροποποιηθούν αρχεία :



Σχήμα 4.12: Σχηματισμός ολόκληρης της περιφερειακής διεπιφάνειας

1. **case/system/decomposeParDict**
2. **case/constant/polyMesh/boundary**
3. **case/0/U** , **case/0/p** , **case/0/k** ..

Για το αρχείο **case/system/decomposeParDict**, είναι (γράφεται μόνο το τμήμα του αρχείου που πρέπει να προστεθεί):

```
globalFaceZones  
(  
insideZone  
outsideZone  
); // Those are the names of the face zones  
//that correspond to any type of ggi connection
```

Στο αντίστοιχο αρχείο εισόδου **case/constant/polyMesh/boundary** προστίθενται αντιστοίχως ( Βλ. σχήμα 4.10):

```

insideSlider
{
type overlapGgi;
nFaces 352;
startFace 181736;
rotationAxis (0 0 1);
bridgeOverlap true;
nCopies 25;
shadowPatch outsideSlider;
zone insideZone;
}
outsideSlider
{
type overlapGgi;
nFaces 308
startFace 188808;
shadowPatch insideSlider;
zone outsideZone;
bridgeOverlap true;
rotationAxis (0 0 1);
nCopies 25;
}

// ***** //
Τέλος, για το αρχείο εισόδου case/0/U, είναι :

```

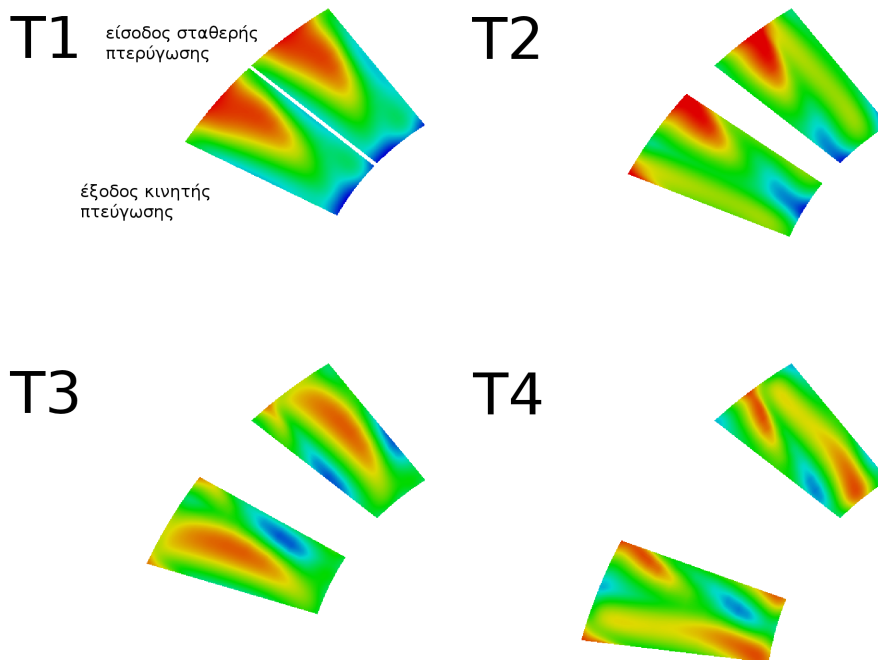
```

outsideSlider
{
type overlapGgi;
}
insideSlider
{
type overlapGgi;
}

```

Οι έννοιες των λημμάτων είναι αντίστοιχες με αυτές του **cyclicGgi**. Εδώ εμφανίζεται ακόμη το λήμμα **nCopies**. Πρόκειται για τον αριθμό που το χωρίο θα αντιγραφεί προς εαυτόν, ώστε να καλύψει ολόκληρη την περιφερειακή επιφάνεια. Στην προκείμενη εφαρμογή είναι ο αριθμός των πτερυγίων. Σε περίπτωση που οριστεί αριθμός που δεν εξασφαλίζει τη δημιουργία του πλήρους δακτυλιοειδούς χωρίου, το **overlapGgi** δε λειτουργεί. Στο σχήμα 4.13 απεικονίζεται η επικοινωνία των επιφανειών με την προσδευτική κίνηση του ρότορα. Το πάνω τμήμα κάθε σχήματος δείχνει την εγκάρσια κατανομή ταχυτήτων στην είσοδο της ακίνητης πτερύγωσης,

ενώ η κάτω επιφάνεια την αντίστοιχη κατανομή ταχυτήτων στην έξοδο της κινούμενης πτερύγωσης. Οι κατανομές στις δυο επιφάνειες προφανώς δεν ταυτίζονται, αφού κατά την επικοινωνία των επιφανειών λαμβάνεται υπόψη η σχετική θέση των πτερυγώσεων.



Σχήμα 4.13: Επικοινωνία των επιφανειών. Το πάνω τμήμα κάθε σχήματος δείχνει την εγκάρσια κατανομή ταχυτήτων στην είσοδο του στάτορα, ενώ η κάτω επιφάνεια την αντίστοιχη κατανομή ταχυτήτων στην έξοδο του ρότορα

#### 4.4 Εργαλείο mergeMeshes του OpenFoam

Το **overlapGgi** προκειμένου να λειτουργήσει απαιτεί ένα ενιαίο 3D πλέγμα χωρισμένο σε δυο τμήματα - στα όρια των οποίων εφαρμόζεται η επικοινωνία με το **overlapGgi**. Η σύνδεση αυτή γίνεται με την εντολή **mergeMesh**. Να σημειωθεί πως η εντολή αυτή δεν εξασφαλίζει τη φυσική επικοινωνία των δυο χωρίων, απλώς τα συγχωνεύει στον ίδιο κατάλογο. Δηλαδή, το αρχείο που περιέχει τα όρια του ενιαίου χωρίου **case/constant/polyMesh/boundary** θα περιέχει αθροιστικά τα όρια και των δυο συνενωθέντων πλεγμάτων. Για τη λειτουργία της απαιτεί δυο καταλόγους καθένας εκ των οποίων περιέχει το προς ένωση πλέγμα στην τυπική μορφή αρχείων του **OpenFoam**. Η σύνταξη της εντολής γίνεται με τον ακόλουθο τρόπο:

**> mergeMesh dir1 case1 dir2 case2**

όπου dir1,dir2 οι κατάλογοι στους οποίους βρίσκονται οι υποκατάλογοι case1 και case1 αντίστοιχα, και case1,case2 οι υποκατάλογοι που περιέχουν τα προς συνένωση πλέγματα.

Το νέο πλέγμα αποθηκεύεται στο φάκελο case1 σε έναν υποφάκελο με όνομα την επόμενη χρονική στιγμή, σύμφωνα με το αρχείο **case/system/controlDict**.

Να σημειωθεί ότι η εντολή αυτή δεν λειτουργεί για 2Δ ή ψευδο-3Δ πλέγματα στην τρέχουσα έκδοση του OpenFoam 1.6-ext.

## 4.5 Εντολές **setSets- setsToZones**

Προκειμένου να ομαδοποιηθούν τα πρόσωπα που θα κινούνται και τα πρόσωπα που θα εμπλέκονται στην επικοινωνία της διεπιφάνειας κατά GGI, είναι απαραίτητες κάποιες ακόμη εντολές που προηγούνται της διαδικασίας διάσπασης του χωρίου ροής προς παράλληλη επεξεργασία. Οι ζώνες προσώπων αυτές όπως προαναφέρθηκε, είναι απαραίτητο να βρίσκονται ολόκληρες σε κάθε επεξεργαστή. Απαιτείται, λοιπόν, ένα αρχείο **setBatch** το οποίο δημιουργείται από το χρήστη, τοποθετείται μέσα στον κατάλογο της εφαρμογής και έχει την ακόλουθη μορφή :

```
faceSet insideZone new patchToFace insideSlider
faceSet outsideZone new patchToFace outsideSlider
faceSet lowerWall1Zone new patchToFace lowerWall1
faceSet lowerWall2Zone new patchToFace lowerWall2
faceSet upperWall1Zone new patchToFace upperWall1
faceSet upperWall2Zone new patchToFace upperWall2
quit
```

όπου - λόγου χάρη- **insideZone** θα είναι η ζώνη κελιών που δημιουργείται από το patch **insideSlider**. Αφού δημιουργηθεί το παραπάνω αρχείο, η σειρά των εντολών που ακολουθεί είναι :

```
>setSet -batch setBatch
>regionCellSets
>setsToZones -noFlipMap
```

## 4.6 Περιστροφική Κίνηση του Πλέγματος

Στο **OpenFOAM** δίνονται διαφορετικές επιλογές για την κίνηση του πλέγματος [19, 20], η οποία ενδέχεται να περιέχει τοπολογικές αλλαγές, αλλαγές στο όριο, προσθαφαιρέσεις κελιών ή και απλή κίνηση του πλέγματος ως συμπαγές στερεό. Για την εφαρμογή που παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο, χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη **turboFvMesh** [21] η οποία είναι εστιασμένη στην περιστροφή του πλέγματος σε χωρίο ροής γύρω από κινούμενες πτερυγώσεις στροβιλομηχανών. Η βιβλιοθήκη αυτή χρησιμοποιεί έναν επιλύτη για τον προσδιορισμό των νέων θέσεων των σημείων, που προκύπτουν από τις θέσεις την προηγούμενη χρονική στιγμή. Ο επιλύτης ουσιαστικά λύνει την εξίσωση κίνησης στο όριο του πλέγματος και στη συνέχεια χρησιμοποιεί τη λύση για να ενημερώσει τη νέα θέση του σημείου. Μάλιστα καθώς η συγκεκριμένη βιβλιοθήκη απευθύνεται αποκλειστικά

σε εφαρμογές στροβιλομηχανών, δε χρειάζεται η εξίσωση κίνησης του ορίου - αφού είναι πάντα η ομαλή κυκλική κίνηση- αλλά ο προσδιορισμός κάποιων παραμέτρων της κίνησης που αναλύονται παρακάτω όπως φορά και ταχύτητα περιστροφής. Η κίνηση του ενός ορίου θα επηρεάσει όλα τα σημεία του πλέγματος. Αν η κίνηση του ορίου εξαρτάται από το χρόνο ή από τη λύση το **turboFvMesh** δεν επαρκεί.

Η χρήση των βιβλιοθηκών που καθορίζουν την κίνηση ή τροποποίηση του πλέγματος, γίνεται μέσω ενός αρχείου εισόδου (dictionary) με το όνομα **dynamicMeshDict**, που βρίσκεται στον κατάλογο **case/constant/**. Παρακάτω αναλύονται οι διαθέσιμες επιλογές για το **dynamicMeshDict** σε συνδιασμό με χρήση της βιβλιοθήκης **turboFvMesh**.

Αρχικά επιλέγεται η βιβλιοθήκη που θα χρησιμοποιηθεί.

**FoamFile**

```
{
version 2.0;
format ascii;
class dictionary;
object dynamicMeshDict;
}
```

```
// * * * * *
//
```

**dynamicFvMesh turboFvMesh;**

Ακολουθούν οι επιλογές για το σύστημα συντεταγμένων, όπου ορίζεται η μορφή των συντεταγμένων (καρτεσιανές, κυλινδρικές, σφαιρικές), το κέντρο της κυκλικής τροχιάς, η διεύθυνση και η φορά του άξονα της κίνησης. Τέλος, καθορίζεται η ταχύτητα περιστροφής σε στροφές ανά λεπτό (RPM) για κάθε ζώνη κελιών (cellZones).

**turboFvMeshCoeffs**

```
{
coordinateSystem
{
type cylindrical;
origin (0 0 0);
axis (0 0 1);
direction (1 0 0);
}
}
```

**rpm**

```
{
```

```

cellRegion0 -901.45;
}

slider
{
upperWall1Zone -901.45;
lowerWall1Zone -901.45;
insideZone -901.45;
}
}
// ***** //
όπου

```

- **type** είναι ο τύπος των συντεταγμένων. Η βιβλιοθήκη **turboFvMesh** χρησιμοποιεί μόνο κυλινδρικές συντεταγμένες.
- **origin** είναι το κέντρο της κυκλικής κίνησης (ίδιο για όλες τις ζώνες κελιών).
- **axis** ο άξονας περιστροφής.
- **direction:** καθορίζει σε συνδιασμό με το πρόσημο των στροφών τη φορά περιστροφής του πλέγματος.
- Στα λήμματα **rpm** και **slider** (ονόματα που επιλέγονται από το χρήστη) καθορίζονται οι ζώνες (βλ. **cellRegion0**, **upperWall1Zone**, **lowerWall1Zone**, **insideZone**) και η αντίστοιχη ταχύτητα περιστροφής σε στροφές ανά λεπτό - εδώ -901.45 RPM.
- **type**
  - Το κέντρο της κυκλικής κίνησης είναι ίδιο για όλες τις ζώνες κελιών.
  - Η βιβλιοθήκη **turboFvMesh** δεν έχει επιλογή για καρτεσιανές συντεταγμένες.





# Κεφάλαιο 5

## Εφαρμογή

Στην παρούσα διπλωματική δοκιμάστηκε μια ενδεικτική εφαρμογή ασυμπίεστης ροής σε βαθμίδα αξονικού συμπιεστή, προκειμένου να επιβεβαιωθεί η ορθή λειτουργία των προαναφερόμενων εργαλείων. Υπενθυμίζεται σε αυτό το σημείο ότι ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας αυτής, είναι η διερεύνηση των δυνατοτήτων του πακέτου OpenFOAM και η αποκρυστάλλωση της διαδικασίας που είναι απαραίτητη για να "στηθούν" τέτοιου είδους εφαρμογές στο μέλλον. Η έμφαση δίνεται σε όλη αυτή τη δουλειά υποδομής και όχι στη φυσική σημασία των αποτελεσμάτων - ούτως ή άλλως ο κώδικας δεν πιστοποιείται με σύγκριση πειραματικών δεδομένων.

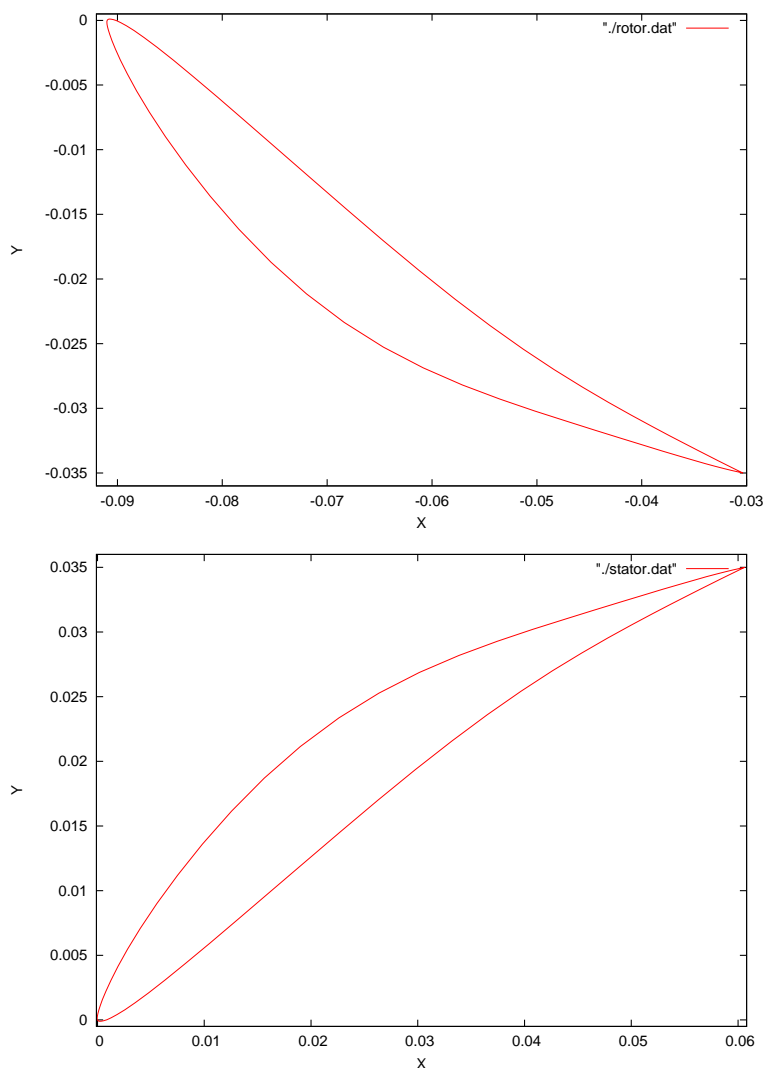
Η προκαταρκτική μονοδιάστατη ανάλυση έδωσε τα παρακάτω μεγέθη. Η γωνία υποδοχής της ροής είναι στις 45 μοίρες για το ρότορα, η αξονική ταχύτητα  $V = 10m/s$ , η γωνιακή συχνότητα  $\omega = 94.4rad/s$  και οι στροφές  $n = 901.45RPM$ . Η περιφερειακή συνιστώσα της ταχύτητας είναι  $U = \omega \cdot R = 10.38m/s$ . Η γωνία εξόδου της ροής από το πτερύγιο του ρότορα, ακολουθεί τη γωνία μετάλλου (περί τις 22 μοίρες) και η γωνία εισόδου της ροής για την ακίνητη πτερύγωση προκύπτει στις 30.9 μοίρες. Η ροή είναι ασυμπίεστη και ως εκ τούτου η αξονική συνιστώσα της ταχύτητας παραμένει σταθερή σε κάθε σημείο της βαθμίδας, κατά τη μονοδιάστατη ανάλυση.

Το υπολογιστικό πλέγμα δημιουργήθηκε με τον πλεγματοποιητή 3Dturbogen του ΜΠΥΡΔ&Β/ΕΜΠ (βλ. Κεφ. 3). Παρακάτω περιγράφεται η επεξεργασία της εφαρμογής πριν την προσομοίωση της ροής, από την αρχική αεροτομή ως το σχηματισμό του πλέγματος.

Οι αρχικές αεροτομές στο "πόδι" του πτερυγίου φαίνονται στο σχήμα 5.1. από τις αεροτομές αυτές, με τη βοήθεια ενός κώδικα που αναπτύχθηκε σε Fortran, παράγονται 8 νέες αεροτομές σε διάφορες ακτινικές θέσεις του πτερυγίου (δηλαδή οι αεροτομές "πατάνε" πάνω σε κυλινδρική επιφάνεια), προκειμένου να δημιουργηθεί το αρχείο εισόδου που απαιτεί ο γενέτης πλέγματος 3Dturbogen του ΜΠΥΡΔ&Β/ΕΜΠ. Μάλιστα για την κινούμενη πτερύγωση (ρότορας) στις αεροτομές προσδίδεται συστροφή, ώστε σε κάθε ακτινική θέση το πτερύγιο να υποδέχεται ομαλά τη ροή, ενώ αντίστοιχα οι αεροτομές της κινούμενης πτερύγωσης στρέφονται, ώστε να συμφωνούν με τη γωνία εισόδου της ροής που προέκυψε από τη μονοδιάστατη

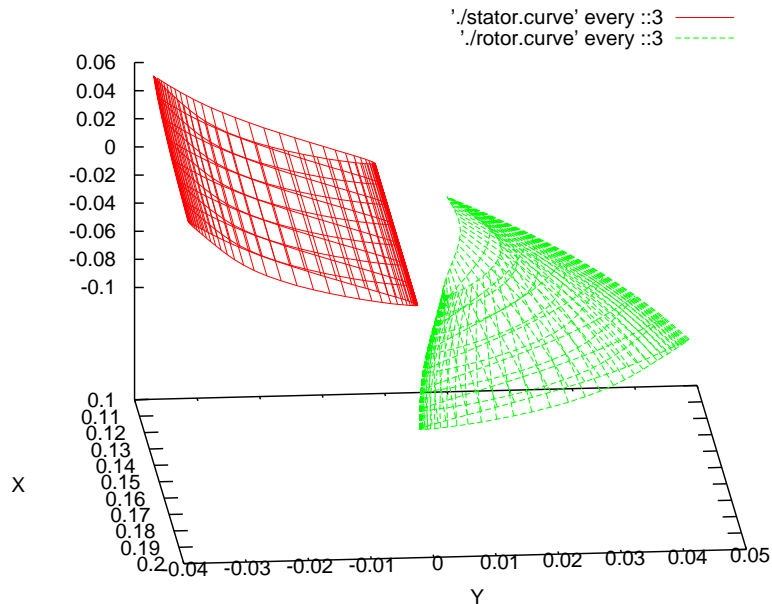
ανάλυση παραπάνω. Το αποτέλεσμα φαίνεται στο σχήμα 5.2.

Το πλέγμα που παράγεται σε κάθε περίπτωση αποθηκεύεται σε δυο αρχεία **geo.hyb**



Σχήμα 5.1: Πάνω: Αεροτομή της κινούμενης πτερύγωσης πάνω στον άξονα της μηχανής. Κάτω: Αεροτομή της ακίνητης πτερύγωσης.

και **geo.nod**. Ωστόσο, είναι σε μορφή αναγνώσιμη μόνο από το λογισμικό του εργαστηρίου (δηλ. σε μορφή .hyb και .nod). Ακολουθεί η μετατροπή των πλεγμάτων σε μορφή gmesh με χρήση του οικείου λογισμικού Itt2gmesh το οποίο λαμβάνει ως είσοδο τα αρχεία **geo.hyb** και **geo.nod** και πλέον το πλέγμα βρίσκεται σε ένα αρχείο meshRotor.msh και meshStator.msh για κάθε συνιστώσα της βαθμίδας αντίστοιχα. Προκειμένου να ονοματιστούν οι οριακές επιφάνειες του πλέγματος ανάλογα με τον τύπο τους, στο τέλος καθενός .msh αρχείου προστίθενται τα ονόματα που θα αντιστοιχούν στα διαφορετικά logfr. Τα logfr είναι αριθμοί που προσδίδονται σε κάθε κόμβο προκειμένου να το χαρακτηρίσουν ως προς το είδος του ορίου στο οποίο ανήκει (λ.χ. το logfr "3" αντιστοιχεί σε τοίχο, ενώ το logfr "4" στην είσοδο του χωρίου



Σχήμα 5.2: Προοπτικό σχήμα με τις αεροτομές των δυο περυγίων. Με πράσινο (ανοικτό) χρώμα φαίνεται η κινούμενη περυγώση - μπορεί κανείς να διακρίνει τη συστροφή του περυγίου- ενώ με κόκκινο (σκούρο) η ακίνητη.

ροής). Σε κάθε γραμμή γράφεται το  $\log_{fr}$  - που προέκυψε από τον 3DturboGen- και δίπλα το αντίστοιχο όνομα που επιθυμεί ο χρήστης να έχει το συγκεκριμένο patch. Στη δεύτερη γραμμή, ο αριθμός δηλώνει τον αριθμό των οριακών επιφανειών του πλέγματος που θα ονομαστούν (6 στην προκειμένη περίπτωση). Για το αρχείο meshRotor.msh που αντιστοιχεί στο ρότορα, είναι:

**\$PhysicalNames**

**6**

**2 "sideWalls1"**

**3 "rotor"**

**6 "lowerWall1"**

**7 "upperWall1"**

**4 "inlet"**

**5 "insideSlider"**

**\$EndPhysicalNames**

Ενώ για το αρχείο meshStator.msh που αντιστοιχεί στο στάτορα, είναι:

**\$PhysicalNames**

**6**

```

2 "sideWalls2"
3 "stator"
6 "lowerWall2"
7 "upperWall2"
4 "outsideSlider"
5 "outlet"
$EndPhysicalNames

```

Μετά την προσθήκη των ονομάτων, το αρχείο .msh τοποθετείται σε ένα κατάλογο με την τυπική δομή του OpenFOAM -όπως αυτή περιγράφεται στο κεφάλαιο 1. Με την εντολή:

```
>gmshToFoam mesh.msh
```

το πλέγμα μετατρέπεται σε μορφή OpenFOAM. Η διαδικασία πραγματοποιείται τόσο για την κινούμενη περύγωση, όσο και για την ακίνητη. Εν τέλει, προκύπτουν δυο κατάλογοι (rotor/ και stator/), στην τυπική τους μορφή, εκ των οποίων ο ένας περιέχει το πλέγμα του ρότορα και ο άλλος το πλέγμα του στάτορα. Συνοπτικά, έχουμε:

- rotorStator/
  - \* rotor/
  - \* stator/

Τα δυο πλέγματα πρέπει να συνενωθούν σε ένα (βλ. παρ. 4.4). Έτσι, από το κατάλογο **rotorStator/** δίνεται η εντολή:

```
>mergeMeshes ./ rotor/ ./ stator/
```

και τα δυο πλέγματα συνενώνονται σε ένα και το ενιαίο πλέγμα αποθηκεύεται στον υποκατάλογο **rotorStator/rotor/1/**. Το πλέγμα (υποκατάλογος **rotorStator/rotor/1/polyMesh/**) μεταφέρεται στον υποκατάλογο **rotorStator/rotor/constant/**.

Στη συνέχεια πρέπει να τροποποιηθεί το αρχείο **rotorStator/rotor/constant/polyMesh/boundary** το οποίο περιέχει πλέον και τις 12 οριακές επιφάνειες (6 από το πλέγμα του ρότορα και ακόμη 6 από το πλέγμα του στάτορα). Επειδή το πλέγμα εισήχθει και δεν δημιουργήθηκε από λογισμικό του OpenFOAM, όλες οι οριακές επιφάνειες είναι τύπου "κενό" (patch) και ως εκ τούτου. Σε κάθε κύριο λήμμα (για κάθε μια από τις 12 οριακές επιφάνειες) διατηρείται το λήμμα **nFaces** και **startFace**. Το λήμμα **type** τροποποιείται ανάλογα με τον τύπο της οριακής πλεγματικής επιφάνειας (λ.χ. **"wall"**, **"slip"**, **"patch"**, **"symmetryPlane"**, **"ggi"** κ.α.). Τα patches τύπου ggi (και τα παράγωγά του) χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής κατά τη συνταξή τους και ο αναγνώστης παραπέμπεται στο αντίστοιχο κεφάλαιο 4 για περισσότερες πληροφορίες. Το αρχείο **rotorStator/rotor/constant/polyMesh/boundary** για τη συγκεκριμένη εφαρμογή (case) παρατίθεται παρακάτω:

**12**

---

```
(
sideWalls1
{
type symmetryPlane;
nFaces 9680;
startFace 605488;
}
rotor
{
type wall;
nFaces 2400;
startFace 615168;
}
inlet
{
type patch;
nFaces 1056;
startFace 617568;
}
insideSlider
{
type overlapGgi;
rotationAxis (0 0 1);
bridgeOverlap true;
nCopies 25;
shadowPatch outsideSlider;
zone insidezone;
nFaces 1056;
startFace 618624;
}
lowerWall1
{
type cyclicGgi;
shadowPatch upperWall1;
zone lowerWall1zone;
bridgeOverlap true;
rotationAxis (0 0 1);
rotationAngle -14.4;
separationOffset (0 0 0);
nFaces 1440;
startFace 619680;
}
upperWall1
{
```

---

```
type cyclicGgi;
shadowPatch lowerWall1;
zone upperWall1zone;
bridgeOverlap true;
rotationAxis (0 0 1);
rotationAngle 14.4;
separationOffset (0 0 0);
nFaces 1440;
startFace 621120;
}
sideWalls2
{
type symmetryPlane;
nFaces 7568;
startFace 622560;
}
stator
{
type wall;
nFaces 2400;
startFace 630128;
}
outsideSlider
{
type overlapGgi;
shadowPatch insideSlider;
zone outsidezone;
bridgeOverlap true;
rotationAxis (0 0 1);
nCopies 25;
nFaces 1056;
startFace 632528;
}
outlet
{
type patch;
nFaces 1056;
startFace 633584;
}
lowerWall2
{
type cyclicGgi;
shadowPatch upperWall2;
zone lowerWall2zone;
```

---

```

bridgeOverlap true;
rotationAxis (0 0 1);
rotationAngle -14.4;
separationOffset (0 0 0);
nFaces 864;
startFace 634640;
}
upperWall2
{
nFaces 864;
type cyclicGgi;
shadowPatch lowerWall2;
zone upperWall2zone;
bridgeOverlap true;
rotationAxis (0 0 1);
rotationAngle 14.4;
separationOffset (0 0 0);
startFace 635504;
}
)

```

Στη συνέχεια καθορίζονται τα αρχεία που περιέχονται στον υποκατάλογο **rotorStator/rotor/0/** και αφορούν τις οριακές συνθήκες (**U**/,**p**/,**k**/, **epsilon**/,**nut**/). Στους πίνακες 5.1 και 5.2 φαίνονται όλες οι οριακές συνθήκες για όλα τα patches συνοπτικά, χρησιμοποιώντας ορολογία OpenFOAM, ενώ παρατίθεται ενδεικτικά και το αρχείο **rotorStator/rotor/0/U** για λόγους πληρότητας. Τα υπόλοιπα αρχεία είναι αντίστοιχης δομής.

```

dimensions [0 1 -1 0 0 0 0];
internalField uniform (0 0 10);
boundaryField
{
sideWalls1
{
type symmetryPlane;
}
rotor
{
type movingWallVelocity;
value uniform (0 0 0);
}
inlet
{
type fixedValue;
value uniform (0 0 10);
}
}

```

```
insideSlider
{
type overlapGgi;
}
lowerWall1
{
type cyclicGgi;
}
upperWall1
{
type cyclicGgi;
}
sideWalls2
{
type symmetryPlane;
}
stator
{
type fixedValue;
value uniform (0 0 0);
}
outsideSlider
{
type overlapGgi;
}
outlet
{
type zeroGradient;
}
lowerWall2
{
type cyclicGgi;
}
upperWall2
{
type cyclicGgi;
}
}
```

---



<b>Patches</b>	<b>U</b>	<b>p</b>
<b>inlet</b>	(0 0 10)	zerogradient
<b>outlet</b>	zerogradient	0
<b>lowerWall1</b>	cyclicggi	cyclicggi
<b>upperWall1</b>	cyclicggi	cyclicggi
<b>lowerWall2</b>	cyclicggi	cyclicggi
<b>upperWall2</b>	cyclicggi	cyclicggi
<b>stator</b>	(0 0 0)	zerogradient
<b>rotor</b>	(0 0 0)	zerogradient
<b>insideSlider</b>	overlapGgi	overlapGgi
<b>insideSlider</b>	overlapGgi	overlapGgi
<b>sideWalls1</b>	symmetryPlane	symmetryPlane
<b>sideWalls2</b>	symmetryPlane	symmetryPlane

Πίνακας 5.1: Συνοπτικά οι οριακές συνθήκες για την εφαρμογή με στρωτή ροή.

<b>Patches</b>	<b>k</b>	<b>epsilon</b>	<b>nut</b>
<b>inlet</b>	0.01 <sup>1</sup>	0.001 <sup>2</sup>	calculated
<b>outlet</b>	inletOutlet	inletOutlet	calculated
<b>lowerWall1</b>	cyclicggi	cyclicggi	cyclicggi
<b>upperWall1</b>	cyclicggi	cyclicggi	cyclicggi
<b>lowerWall2</b>	cyclicggi	cyclicggi	cyclicggi
<b>upperWall2</b>	cyclicggi	cyclicggi	cyclicggi
<b>stator</b>	kqRWallFunction	epsilonWallFunction	nutWallFunction
<b>rotor</b>	kqRWallFunction	epsilonWallFunction	nutWallFunction
<b>insideSlider</b>	overlapGgi	overlapGgi	overlapGgi
<b>insideSlider</b>	overlapGgi	overlapGgi	overlapGgi
<b>sideWalls1</b>	symmetryPlane	symmetryPlane	symmetryPlane
<b>sideWalls2</b>	symmetryPlane	symmetryPlane	symmetryPlane

[1]Ο τύπος της οριακής συνθήκης γράφεται turbulentIntensityKineticEnergyInlet.

[2]Ο τύπος της οριακής συνθήκης γράφεται turbulentMixingLengthDissipationRateInlet.

Πίνακας 5.2: Πρόσθετες οριακές συνθήκες για τις μεταβλητές της τύρβης.

Κατόπιν αυτού πρέπει να δημιουργηθούν οι ζώνες των κελιών που θα επικοινωνούν μέσω cyclicGgi ή overlapGgi (Βλ. παρ. 4.5). Αυτό πραγματοποιείται με τις εντολές:

```
>setSet -batch setBatch
>regionCellSets
>setsToZones -noFlipMap
```

όπου το αρχείο **setBatch** είναι το ακόλουθο:

```
faceSet insideZone new patchToFace insideSlider
faceSet outsideZone new patchToFace outsideSlider
faceSet lowerWall1Zone new patchToFace lowerWall1
faceSet lowerWall2Zone new patchToFace lowerWall2
faceSet upperWall1Zone new patchToFace upperWall1
faceSet upperWall2Zone new patchToFace upperWall2
quit
```

Τέλος, συντάσσεται το αρχείο **rotorStator/rotor/system/decomposeParDict** προκειμένου να γίνει η διάσπαση του χωρίου ροής προς παράλληλη επεξεργασία.

```
globalFaceZones
(
insideZone
outsideZone
lowerWall1Zone
lowerWall2Zone
upperWall1Zone
upperWall2Zone
);
numberOfSubdomains 6;
```

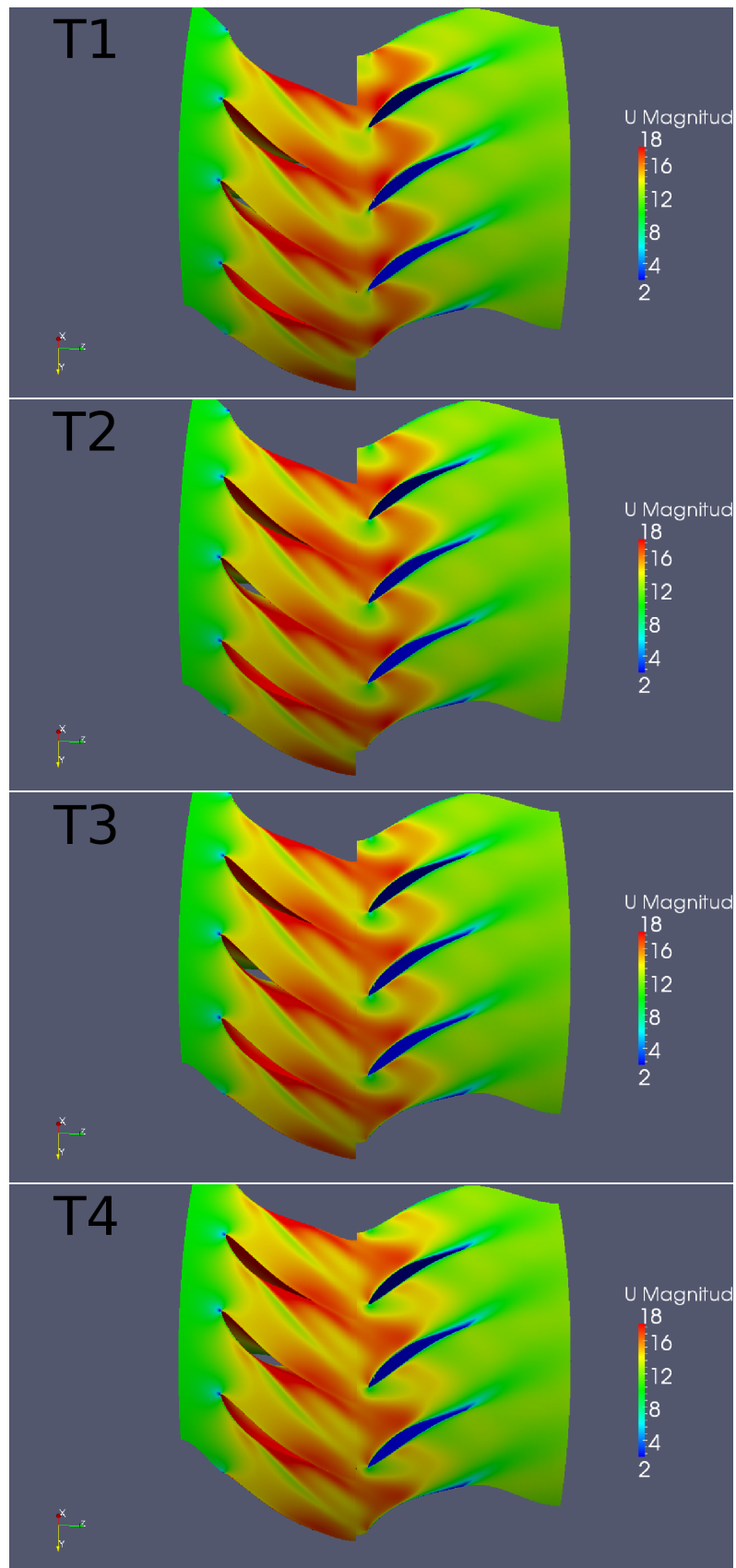
Σημειώνεται εδώ ότι η συγκεκριμένη εφαρμογή δεν ήταν δυνατό να διασπαστεί σε άλλο πλήθος επεξεργασιών εκτός των 6, καθώς υπάρχουν ακόμη προβλήματα με την παράλληλη επεξεργασία.

Κατόπιν αυτού, από τον κύριο κατάλογο της εφαρμογής (**rotorStator/rotor/**) δίνεται η εντολή:

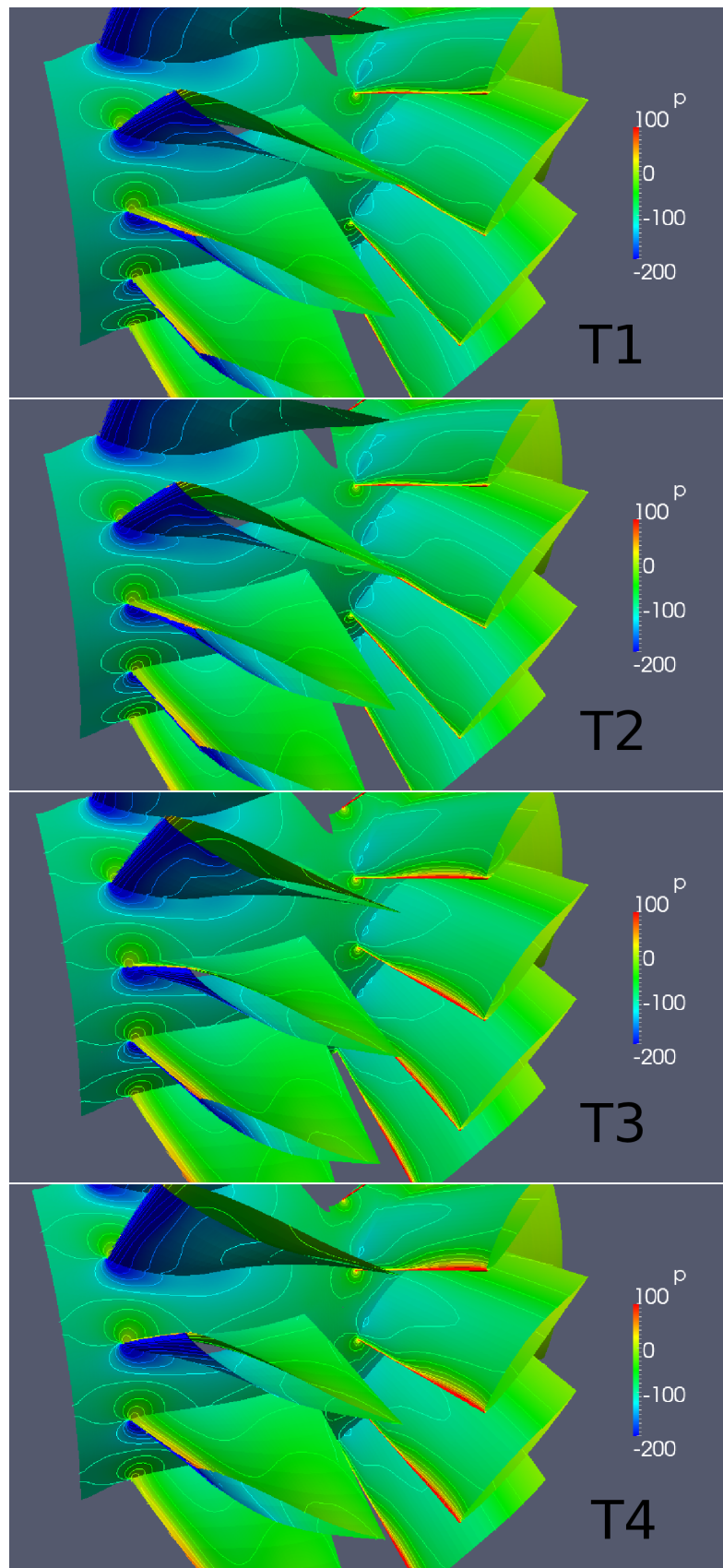
```
mpirun -np 6 turbDyMFoam -parallel >logfile &
```

## 5.1 Αποτελέσματα για Τυρβώδη ροή σε βαθμίδα αξονικού συμπιεστή

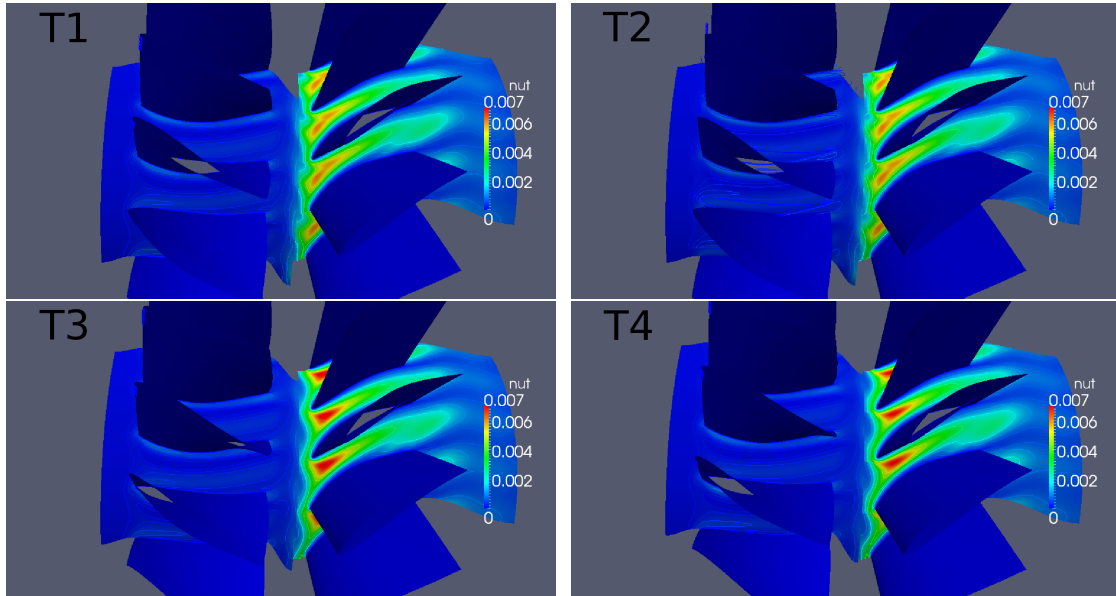
Ακολουθούν εικόνες από τα αποτελέσματα των μεταβλητών ροής για ασυμπίεστη ροή στη βαθμίδα αξονικού συμπιεστή. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μετά από μια πλήρη περιστροφή της κινητής περύγωσης. Στο σχήμα 5.3 παρουσιάζονται τέσσερα διαδοχικά στιγμιότυπα της κατανομής της ταχύτητας κατά το πέρασμα ενός περυγίου της κινητής περύγωσης μπροστά από το αντίστοιχο περύγιο της σταθερής. Η σταθερή περύγωση αντιλαμβάνεται τις αλλαγές του πεδίου ταχυτήτων, λόγω της κίνησης του ρότορα, ενώ το πεδίο στο κινούμενο πλέγμα δεν αλλάζει πολύ. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μονιμότητα της ροής γύρω από την κινητή περύγωση έχει αποκατασταθεί. Οι όποιες διακυμάνσεις οφείλονται αποκλειστικά στην αλληλεπίδρασή του με το στάτορα. Αντίστοιχο με το πεδίο ταχυτήτων προκύπτει το πεδίο της πίεσης. Οι μικρές χρονικές διακυμάνσεις της πίεσης πάνω στο τοίχωμα της κινούμενης περύγωσης οφείλονται και πάλι στην αλληλεπίδραση των περυγώσεων. Η ανάπτυξη της τυρβώδους συνεκτικότητας επάγεται κατά κύριο λόγο στην είσοδο της σταθερής περύγωσης (5.5). Επισημαίνεται ότι ο κώδικας του OpenFOAM, από μια τιμή του  $y+$  και κάτω δεν υπολογίζει καθόλου το  $\nu_t$ , αλλά το θέτει ίσο με το 0. Αυτός είναι και ο λόγος που ένα μεγάλο μέρος του πεδίου της φαίνεται μηδενική η ένταση της τύρβης. Τέλος, στο σχήμα 5.6 παρουσιάζεται η λειτουργία σχηματισμού της διεπιφάνειας επικοινωνίας, η οποία εξασφαλίζει την προσομοίωση ολόκληρης της στροβιλομηχανής με αναγωγή της γεωμετρίας προσομοίωσης σε ένα περύγιο της σταθερής και ένα περύγιο της κινητής.



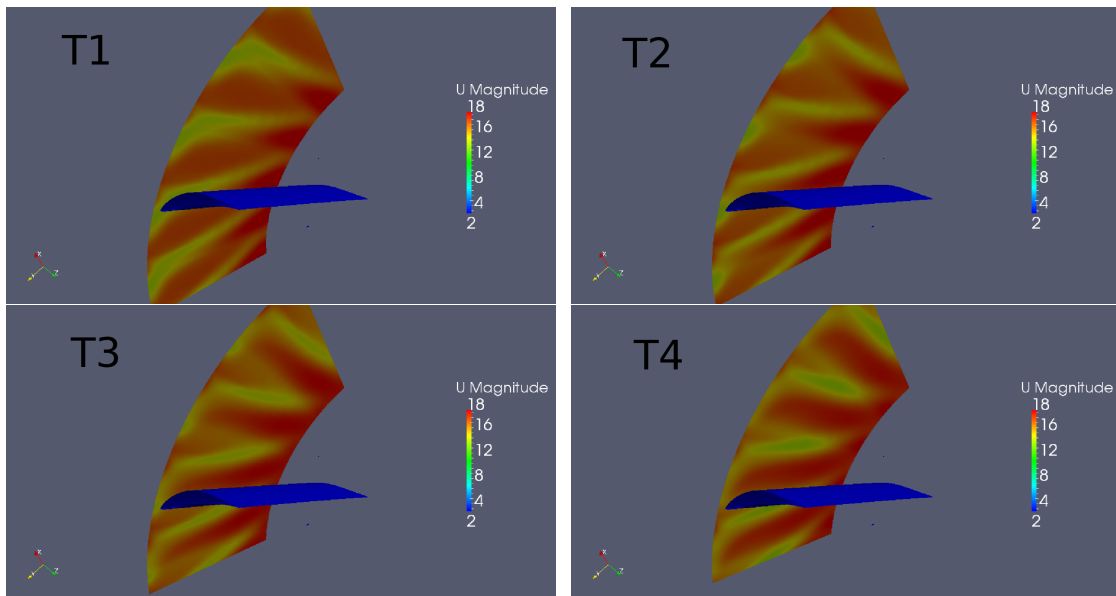
Σχήμα 5.3: Κατανομές ταχυτήτων στη βαθμίδα σε 4 διαδοχικά διαφορετικά στιγμιότυπα.



Σχήμα 5.4: Κατανομές στατικής πίεσης με ισοτασικές γραμμές πάνω στο τοίχωμα της κινητής περύγωσης, της σταθερής και του άξονα της μηχανής σε 4 διαδοχικά στιγμιότυπα.



Σχήμα 5.5: Κατανομές της τυρβώδους συνεκτικότητας στα τοιχώματα σε 4 διαδοχικά στιγμιότυπα.



Σχήμα 5.6: Σχηματισμός της διεπιφάνειας επικοινωνία μεταξύ κινητής και σταθερής περύγωσης σε 4 διαδοχικά στιγμιότυπα.

# Κεφάλαιο 6

## Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε στόχο αφενός τη διερεύνηση των δυνατοτήτων του πακέτου ΥΡΔ γενικής χρήσης OpenFOAM σε προβλήματα ροών σε στροβιλομηχανές με έμφαση στην αλληλεπίδραση κινητής και σταθερής πτερυγώσης και αφετέρου την πραγματοποίηση όλων των εργασιών υποδομής, προκειμένου να λειτουργήσει. Στην αρχική της φάση, εστιάστηκε στην ανάπτυξη/εξέλιξη προϋπάρχοντος οικείου λογισμικού για γένεση πλέγματος γύρω από 3Δ πτερυγώσεις στροβιλομηχανών με συστροφή, μιας και ο πλεγματοποιητής (snappyHexMesh) που παρέχει το λογισμικό OpenFOAM δεν έχει τη δυνατότητα γένεσης πλέγματος γύρω από 3Δ πτερυγώσεις. Το λογισμικό αυτό βελτιώθηκε και γενικεύτηκε, ώστε αφενός να παράγει καλύτερης ποιότητας πλέγματα και αφετέρου να διαχειρίζεται μεγαλύτερο εύρος περιπτώσεων. Στη συνέχεια, δοκιμάστηκαν απλοποιημένες εφαρμογές κινούμενων χωρίων ροής και διάφορα σχήματα παρεμβολής για τη διεπιφάνεια επικοινωνίας των πλεγμάτων, προκειμένου να γίνει κατανοητός ο τρόπος λειτουργίας και χρήσης διάφορων εργαλείων του OpenFOAM και να επιλεγούν εκείνα που - με κατάλληλες τροποποιήσεις - θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε προβλήματα ροών σε στροβιλομηχανές με έμφαση στην αλληλεπίδραση κινητής και σταθερής πτερυγώσης. Τέλος, συντάχθηκαν δυο απλές εφαρμογές ροής σε βαθμίδα αξονικού συμπιεστή προκειμένου να γίνει εμφανής η επιτυχής προσομοίωση της ροής. Στη συνέχεια συνοψίζονται τα βασικά στοιχεία της διπλωματικής εργασίας μαζί με τα αποτελέσματα που εξήχθησαν στα προηγούμενα κεφάλαια της παρούσας εργασίας.

Η χρήση ενός πακέτου ΥΡΔ γενικής χρήσης σε εφαρμογές σε στροβιλομηχανές παρουσιάζει αρκετά εμπόδια, τα οποία όμως είναι αντιμετωπίσιμα. Τα εμπόδια αυτά αφορούν τις ιδιαίτερες απαιτήσεις για την πλεγματοποίηση σε χωρία εσωτερικής αεροδυναμικής με περιοδικές επιφάνειες, τη διαχείριση διεπιφανειών επικοινωνίας διαδοχικών χωρίων κινητών και σταθερών πτερυγώσεων, διαφορετικό βήμα πτερυγώσεων, κινούμενο πλέγμα, περιφερειακά περιοδικές επιφάνειες και άλλα. Η πλεγματοποίηση για εσωτερική αεροδυναμική γύρω από 3Δ πτερύγια δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί με το γενέτη πλέγματος snappyHexMesh του OpenFOAM. Όσον αφορά της διεπιφάνειας επικοινωνίας των δυο πλεγμάτων, στην έκδοση 1.6-ext του OpenFOAM, προστέθηκε το εργαλείο overlapGgi το

οποίο όχι μόνο φροντίζει για την ροϊκή σύζευξη των δυο οριακών πλεγματοειδών επιφανειών, αλλά ακόμα επιτυγχάνει, με την προσομοίωση ενός μόνο περυγίου για κάθε περύγωση, να λάβει υπόψη του τη συμπεριφορά ολόκληρης της μηχανής, ενώ διαχειρίζεται και περιπτώσεις όπου κινητή και σταθερή περύγωση έχουν διαφορετικό βήμα. Το θέμα της περιφερειακής περιοδικότητας επιλύθηκε ομοίως στην τρέχουσα έκδοση 1.6- ext. Το εργαλείο cyclicGgi αναλαμβάνει να στρέψει κατάλληλα τα τανυστικά και διανυσματικά μεγέθη προκειμένου να πληρούνται οι συνθήκες περιφερειακής περιοδικότητας. Τέλος, όσον αφορά την επίλυση της ροής σε περιστρεφόμενα χωρία, στην ίδια έκδοση, με χρήση συγκεκριμένων επιλυτών (icoDyMFoam, pimpleDyMFoam, turbDyMFoam) σε συνδυασμό με το λεξικό dynamicMeshDict υπάρχει η δυνατότητα επίλυσης της ροής με κίνηση του πλέγματος. Ασφαλώς, τα παραπάνω εργαλεία χρειάζονται συμπληρωματικό λογισμικό προκειμένου να λειτουργήσουν σωστά.

Συμπερασματικά, η προσομοίωση -παρά τις δυσκολίες- αντιλαμβάνεται σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό το φυσικό φαινόμενο (ποιοτική σύγκριση, αφού το λογισμικό δεν έχει πιστοποιηθεί). Ωστόσο, καθώς είναι μια πολύ νέα προσθήκη, εμφανίζονται προβλήματα σχετικά με την παράλληλη επεξεργασία -και ως εκ τούτου το υπολογιστικό κόστος.

## 6.1 Συνεισφορά της παρούσας διπλωματικής εργασίας

Η συνεισφορά της παρούσας διπλωματικής ανάγεται σε δύο επίπεδα :

1. Οικείο λογισμικό γένεσης πλέγματος. Η παρούσα διπλωματική συνέβαλε στη βελτίωση του προϋπάρχοντος οικείου λογισμικού πλεγματογένεσης κατά τους ακόλουθους τρόπους (αναλυτικότερα στο κεφάλαιο 3):
  - Άρθηκε ο περιορισμός ισότητας του αριθμού σημείων της γενέτειρας του hub και της γενέτειρας του shroud και ο έλεγχος παραλείπεται.
  - Απλοποιήθηκε ο τρόπος εισαγωγής των αεροτομών και των γενέτειρων.
  - Ο τρόπος που γίνεται η επιφανειακή πλεγματοποίηση και το ίδιο το πλέγμα έχει βελτιωθεί.
  - Ο σχηματισμός των περιοδικών προεκτάσεων μπροστά και πίσω από το περύγιο γίνεται στο επίπεδο  $(R * \phi)(s)$  ώστε να μπορεί να αντεπεξέλθει στη γενικότερη περίπτωση μηχανής μικτής ροής.
  - Γενικεύτηκε υπολογισμός της κλίσης του πολυωνύμου που δημιουργεί της ανάντι και κατάντι περιοδικές προεκτάσεις.
  - Ο χρήστης, πλέον, επιλέγει πόσα σημεία πριν το "γεωμετρικό σημείο πρόσπτωσης" και πόσα σημεία μετά το "γεωμετρικό σημείο εκφυγής" θα εκτείνεται το χωρίο όπου θα επιλυθούν οι ελλειπτικές εξισώσεις γένεσης του πλέγματος.



- Τέλος, στο επιφανειακό πλέγμα επιβλήθηκε ορθογωνικότητα των πλεγματικών γραμμών στο όριο και η πρώτη πλεγματική γραμμή έχει καθορισμένη και σταθερή απόσταση από το αντίστοιχο όριο καθ' όλο το μήκος της.
2. Σχετικά με το λογισμικό ΥΡΔ ανοιχτού κώδικα OpenFOAM, συντελέστηκε ένα μεγάλο τμήμα των εργασιών υποδομής για τη χρήση του λογισμικού σε προβλήματα αεροδυναμικής αλληλεπίδρασης κινητής και σταθερής πτερύγωσης σε στροβιλομηχανές. Πραγματοποιήθηκε μια πρώτη απόπειρα για την επίλυση της ροής σε τέτοιου είδους προβλήματα, δοκιμάστηκαν, επιλέχθηκαν και συνδέθηκαν τα κατάλληλα εργαλεία του πακέτου για την επίλυση του παραπάνω τύπου προβλημάτων και εξήχθησαν χρήσιμα συμπεράσματα για τη μετέπειτα λειτουργία του και εξέλιξή του.

## 6.2 Προτάσεις για μελλοντική εργασία

Στη συνέχεια παρατίθενται ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω ενασχόληση και έρευνα στις θεματικές περιοχές της παρούσας διπλωματικής.

- Ως πρωταρχικής σημασίας εργασία είναι η προσομοίωση της ροής σε υπαρκτή βαθμίδα στροβιλομηχανής - στην οποία έχουν γίνει πειραματικές μετρήσεις- και η πιστοποίηση του λογισμικού σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα πειραματικά δεδομένα.
- Με μικρές προσθήκες είναι εφικτή η προσομοίωση πολυβάθμιας στροβιλομηχανής.
- Ακόμα, ενδιαφέρον παρουσιάζει η υπολογιστική προσομοίωση της ροής με έμφαση στην αλληλεπίδραση ρότορα- ρότορα σε στροβίλους διπλής κινητής πτερύγωσης.
- Καθώς το ΕΘΣ του ΕΜΠ έχει μεγάλη εμπειρία στην ανάπτυξη συζυγών μεθόδων για βελτιστοποίηση αεροδυναμικών μορφών, προτείνεται η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας της κινητής και της σταθερής πτερύγωσης, λαμβάνοντας υπόψη τη μεταξύ τους αλληλεπίδραση.
- Τέλος, προτείνεται η επέκταση-τροποποίηση των υπάρχοντων σχετικών εργαλείων του OpenFOAM, προκειμένου να αντιμετωπισθούν τα μειονεκτήματα που σχετίζονται με την παράλληλη επεξεργασία και το αρκετά υψηλό υπολογιστικό του κόστος.



# Βιβλιογραφία

- [1] O. Petit, M. Page, M. Beaudoin, and H. Nilsson: *The ERCOFTAC Centrifugal Pump OpenFOAM Case-Study*. In 3rd IAHR International Meeting of the Workgroup of Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems, pages 523–532, 2009.
- [2] I. Sutherland and G. W. Hodgman: *Reentrant Polygon Clipping*. Communications of the ACM, vol. 17, 1974.
- [3] J. I. Erdos, E. Alzner, and W. McNally: *Numerical Solution of Periodic Transonic Flow through a Fan Stage*. AIAA Journal 15, pp. 1559-1568, 1977.
- [4] M. Koya and S. Kotake: *Numerical Analysis of Fully Three-Dimensional Periodic Flows Through a Turbine Stage*. ASME Paper 85-GT-57, 1985.
- [5] J.P. Chen and J.W. Barter: *Comparison of time-accurate calculations for the unsteady interaction in turbomachinery stage*. AIAA-98-3292, 1998.
- [6] M.B. Giles: *Calculation of unsteady wake rotor interaction*. AIAA Journal of Propulsion and Power, 4(4):356-362, 1998.
- [7] M. M. Rai and S. Kotake: *Navier-Stokes Simulation of Rotor-Stator Interaction Using Patched and Overlaid Grids*. AIAA Paper 85-1519, 1985.
- [8] A. Jameson: *Time dependent calculations using multigrid, with applications to unsteady flows past airfoils and wings*. (91-1596), 1998.
- [9] E. Van der Weide, A. Gopinath, and A. Jameson: *Turbomachinery applications with the time spectral method*. AIAA paper 05-4905, 17th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, 2005.
- [10] L. He and W. Ning: *Efficient approach for analysis of unsteady viscous flows in turbomachines*. AIAA Journal 36(11):2005-2012, 1998.
- [11] K. Ekici and K.C. Hall: *Nonlinear analysis of unsteady flows in multistage turbomachines using the harmonic balance technique*. AIAA paper 06-0422, AIAA 44th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2006.
- [12] J. Denton and U. Singh: *"Time Marching Methods for Turbomachinery Flow Calculations"*. VKI Lecture Series 1979-7, von Karman Institute, 1979.

- 
- [13] F.R. Menter: *Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications*. AIAA Journal, vol. 32, pp. 269-289, 1994.
- [14] J. Peraire, M. Vahdati, K. Morgan, and O.C. Zienkiewicz: *Adaptive Remeshing for Compressible Flow Computations*. Journal of Computational Physics 72, 449-466, 1987.
- [15] D. T. Lee and B. J. Schachter: *Two Algorithms for Constructing a Delaunay Triangulation*. Int. J. Computer Information Sci. 9, 219-242, 1980.
- [16] M. Beaudouin and H. Jasak: *Development of a General Grid Interface for turbomachinery simulations with OpenFOAM*. Open Source CFD International Conference, 2008.
- [17] H. Nilsson, M. Page, M. Beaudoin, B. Gschaider, and H. Jasak: *The OpenFOAM Turbomachinery working-group and conclusions from the Turbomachinery session of the third OpenFOAM workshop*. IAHR: 24th Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Foz do Iguassu, Brazil, 2008.
- [18] S. Gottschalk: *Separating axis theorem*. Tech. Rep. TR96-024, Dept. of Computer Science, UNC Chapel Hill, 1996.
- [19] H. Jasac: *Dynamic Mesh Handling in OpenFOAM*. 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA Paper, 2009.
- [20] H. Jasac and Z. Tukovi: *Automatic MeshMotion for the Unstructured Finite Volume Method*. Transactions of FAMENA, 30(2):1-18, 2007.
- [21] O. Petit: *Different ways to treat rotating geometries*. PhD thesis, Report for the PhD course in OpenFOAM at Chalmers TH (Göteborg, Sverige), 2008.
-