



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Εργαστήριο Θερμοδυναμικής & Θερμικών Μηχανών



Διπλωματική Εργασία

# Λεπτομερής σχεδιασμός συμπιεστή ΚΚΚ3HD454 με χρήση του λογισμικού ANSYS- CFX

## Detailed Design of Automotive Compressor ΚΚΚ3HD454 by use of ANSYS-CFX Software

Συντάκτες:

Ζαμπός Αχιλλέας

Ζαρμακούπης Ιωάννης

Επιβλέπων Καθηγητής:

Σταματέλλος Αναστάσιος

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του Διπλώματος  
Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος, Μάρτιος 2017

© 2017 Ζαμπός Αχιλλέας, Ζαρμακούπης Ιωάννης

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων των συγγραφέων (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

## Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής

Δρ. Αναστάσιος Σταματέλλος

(Επιβλέπων)

Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής

Δρ. Ερρίκος Σταπουντζής

Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων  
Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής

Δρ. Νικόλαος Ανδρίτσος

Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	viii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	ix
ABSTRACT .....	x
ΛΙΣΤΑ ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΩΝ .....	xi
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
1.1 Ιστορικά στοιχεία για την στροβιλοϋπερπλήρωση.....	1
1.2 Χρήση των στροβιλοϋπερπληρωτών στα σύγχρονα αυτοκίνητα - Πλεονεκτήματα/Μειονεκτήματα .....	3
1.3 Η ιστορία της εταιρίας Steyr .....	3
1.3.1 Φορτηγά της σειράς 90 και το μοντέλο 1390 .....	5
1.4 Εισαγωγικές πληροφορίες για τους ακτινικούς συμπιεστές .....	6
2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ MATCHING ΣΤΡΟΒΙΛΟΎΠΕΡΠΛΗΡΩΤΩΝ .....	8
2.1 Μαζική παροχή αέρα .....	9
2.2 Σημαντικά στοιχεία για τον κινητήρα εσωτερικής καύσης Steyr WD 610.60 .....	10
2.3 Ο λόγος εμβαδού-ακτίνας.....	11
2.3.1 Επιρροή του λόγου A/R στους συμπιεστές .....	12
2.3.2 Επιρροή του λόγου A/R στους στροβίλους.....	12
2.4 Σύνοψη .....	13
3 ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ (PRELIMINARY DESIGN) .....	14
3.1 Προσδιορισμός σημείου λειτουργίας συμπιεστή.....	14
3.1.1 Υπολογισμός Τριγώνου Ταχυτήτων Εξόδου .....	15
3.1.2 Υπολογισμός Τριγώνου Ταχυτήτων Εισόδου .....	17
3.1.3 Υπολογισμός Παραμέτρων Λειτουργίας .....	18
3.1.4 Διάγραμμα ροής του προκαταρκτικού σχεδιασμού (Preliminary design flowchart) .....	20
3.2 Αποτελέσματα του προκαταρκτικού σχεδιασμού .....	21
3.2.1 Τρίγωνα Ταχυτήτων Εισόδου .....	21
3.2.2 Τρίγωνο Ταχυτήτων Εξόδου .....	21
3.3 Προκαταρκτικός σχεδιασμός πτερυγίων με χρήση του Vista CCD .....	22
3.3.1 Καθήκον και αεροδυναμικά δεδομένα.....	23

3.3.2	Ιδιότητες εργαζόμενου μέσου .....	24
3.3.3	Εισαγωγή γεωμετρικών στοιχείων .....	25
3.3.4	Αποτελέσματα .....	26
3.4	Σύγκριση αποτελεσμάτων Excel και CCD .....	30
3.5	Συμπεράσματα από τον προκαταρκτικό σχεδιασμό .....	31
4	ΛΕΠΤΟΜΕΡΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ (ANSYS TURBOGRID).....	33
4.1	Εισαγωγή γεωμετρίας .....	33
4.1.1	Blade Editor .....	33
4.2	Δημιουργία Πλέγματος .....	34
4.2.1	Προσδιορισμός γεωμετρίας (Geometry Object).....	35
4.2.2	Προσδιορισμός Τοπολογίας (Topology Set Object).....	44
4.2.3	Εισαγωγή παραμέτρων πλέγματος (Mesh Data Object).....	46
4.2.4	Επίπεδα (Layers Object) .....	53
4.2.5	Εξαγωγή Πλέγματος (3D Mesh Object).....	55
4.2.6	Mesh Analysis Object .....	56
5	PRE-PROCESSING: ANSYS CFX-PRE .....	59
5.1	Εισαγωγή στο CFX-Pre .....	59
5.1.1	Το γραφικό περιβάλλον του CFX-Pre .....	59
5.2	Συνοριακές Συνθήκες στο CFX-Pre .....	61
5.3	Turbo Mode.....	62
5.3.1	Basic Settings .....	63
5.3.2	Component Definition .....	64
5.3.3	Physics Definition .....	65
5.3.4	Interface Definition .....	67
5.3.5	Boundary Definition .....	68
5.4	Solver .....	71
5.4.1	Solution Units .....	71
5.4.2	Solver Control .....	71
5.4.3	Output Control .....	73
5.5	Ανακεφαλαίωση.....	74

6	ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΤΗΣ ΡΟΗΣ: ANSYS CFX-SOLVER .....	75
6.1	Βασικές αρχές θεωρίας CFX-Solver .....	75
6.1.1	Κυρίαρχες εξισώσεις .....	75
6.2	Μοντέλα τύρβης.....	77
6.2.1	Στατιστικά μοντέλα τύρβης (Statistical turbulence models).....	78
6.2.2	Eddy viscosity turbulence models .....	79
6.2.3	Reynolds stress turbulence models.....	81
6.3	Διακριτοποίηση και Επίλυση (Discretization and Solution).....	81
6.3.1	Αριθμητική διακριτοποίηση .....	82
6.3.2	Στρατηγική επίλυσης – The Coupled Solver .....	84
6.4	CFX-Solver Manager .....	87
6.4.1	Ορισμός επίλυσης (Define Run) .....	88
6.4.2	Γραφήματα Υπολοίπων (Residual Plots) .....	90
6.4.3	Αρχείο Αποτελεσμάτων (Out File).....	93
6.4.4	CFX-Solver Results File.....	95
7	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ: ANSYS CFD-Post.....	96
7.1	Δυνατότητες και γραφικό περιβάλλον CFX-Post .....	96
7.2	Εντολές ANSYS CFD-Post .....	97
7.2.1	Δημιουργία νέας εντολής.....	97
7.2.2	Locator Objects.....	97
7.2.3	Graphic Objects .....	99
7.2.4	Παράθυρο λεπτομερειών (Details View) .....	100
7.3	Αναφορά αποτελεσμάτων (Report) .....	101
7.4	Εξαγωγή και επεξεργασία αναφοράς .....	101
7.4.1	Centrifugal Compressor Rotor Report και σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	101
8	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΧΑΡΤΗ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ (COMPRESSOR MAP).....	110
8.1	Χαρακτηριστικά του χάρτη.....	110
8.1.1	Άξονες του γραφήματος.....	110
8.1.2	Γραμμή πάλμωσης (Surge Line) .....	110
8.1.3	Γραμμή Στραγγαλισμού (Choke Line).....	111
8.1.4	Καμπύλες λειτουργίας.....	112

8.1.5	Ισοϋψείς καμπύλες βαθμού απόδοσης .....	113
8.2	Παραγωγή του χάρτη λειτουργίας μέσω πειραμάτων .....	113
8.2.1	Ηλεκτροκινητήρας, Κιβώτιο ταχυτήτων .....	113
8.2.2	Σωλήνας εισαγωγής, ακροφύσιο εισαγωγής .....	113
8.2.3	Σωλήνας εξαγωγής, Βαλβίδα Ελέγχου (Control Valve) .....	114
8.2.4	Απαραίτητες μετρήσεις .....	114
8.3	Παραγωγή του χάρτη λειτουργίας μέσω του υπολογιστικού πακέτου Ansys .....	115
8.3.1	Πρώτο μενού του CFX-Pre Turbo Mode .....	115
8.3.2	Δεύτερο μενού του CFX-Pre Turbo Mode .....	116
8.3.3	Εύρεση των σημείων λειτουργίας του χάρτη .....	117
8.3.4	Χάρτης λειτουργίας .....	121
9	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ .....	124
9.1	Επισκόπηση της εργασίας .....	124
9.2	Συμπεράσματα .....	125
9.3	Προτάσεις για βελτίωση του σχεδιασμού του συμπιεστή .....	125
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	127
A.	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α .....	129
B.	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β .....	133

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικώς, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον επιβλέποντα καθηγητή μας, Δρ. Αναστάσιο Σταματέλλο, για την ευκαιρία που μας έδωσε να εκπονήσουμε την διπλωματική μας εργασία πάνω σε έναν τόσο ενδιαφέροντα τομέα. Οι συμβουλές και η καθοδήγηση που μας προσέφερε συνέβαλαν τα μέγιστα στο να διεκπεραιωθεί η εργασία με τον πιο ομαλό τρόπο. Του είμαστε ευγνώμονες για το γεγονός ότι αναπτύξαμε μαζί του μία σχέση πέραν της τυπικής σχέσης φοιτητή-καθηγητή, όπως επίσης και για τις αμέτρητες συζητήσεις που είχαμε μαζί του.

Στη συνέχεια, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον Απόστολο Γκούντα, υποψήφιο διδάκτορα του Εργαστηρίου Θερμοδυναμικής & Θερμικών Μηχανών, για την υπερπολύτιμη συμβολή του στην εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, χρωστάμε απέραντη ευγνωμοσύνη στην αγαπητή μας καθηγητή, Αναστάσιο Σταμάτη, για την πίστη που έδειξε σε εμάς, όπως επίσης και για το γεγονός ότι μας μετέδωσε την αγάπη του για το αντικείμενο των Στροβιλομηχανών.



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο λεπτομερής σχεδιασμός του φυγοκεντρικού συμπιεστή “KKK3HD454” με τη χρήση του λογισμικού “ANSYS CFX”, καθώς επίσης και η παραγωγή του χάρτη λειτουργίας του. Στόχοι της διπλωματικής εργασίας ήταν η εις βάθος κατανόηση της λειτουργίας των συμπιεστών και του ρόλου τους σε έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης. Ένας άλλος στόχος ήταν η εξοικείωση με τη διαδικασία σχεδιασμού ενός συμπιεστή και η αναγνώριση των κρίσιμων σημείων της διαδικασίας.

Το αρχικό στάδιο του σχεδιασμού περιλαμβάνει τον προκαταρκτικό σχεδιασμό του συμπιεστή, κατά τον οποίον γίνεται επίλυση αναλυτικών μαθηματικών τύπων. Για το σκοπό αυτό έγινε χρήση του λογισμικού “Microsoft Excel 2013”. Στη συνέχεια, για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό “ANSYS Vista CCD”, το οποίο ειδικεύεται στον προκαταρκτικό σχεδιασμό ακτινικών συμπιεστών. Η τριδιάστατη γεωμετρία πάνω στην οποία θα πραγματοποιηθεί η προσομοίωση της ροής υπό σταθερές συνθήκες προέκυψε αυτόματα μέσω των αποτελεσμάτων του “ANSYS Vista CCD” με τη χρήση του προγράμματος “ANSYS Design Modeler”. Η πλεγματοποίηση του όγκου ελέγχου του συμπιεστή πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του προγράμματος “ANSYS TurboGrid”, όπου ακολούθησε βελτίωση της ποιότητας του αρχικού πλέγματος. Η διαδικασία ορισμού των συνοριακών συνθηκών και της φυσικής του προβλήματος περιλαμβάνει τη χρήση του προγράμματος προεπεξεργασίας “ANSYS CFX-Pre”, όπου επιλέχθηκαν προσεκτικά οι κατάλληλες συνθήκες ροής (συνοριακές συνθήκες, μοντέλο τύρβης, μοντέλο μεταφοράς θερμότητας). Εκτός των προαναφερθέντων, στο “ANSYS CFX-Pre” ρυθμίστηκαν επίσης παράμετροι σχετικές με την κατάσταση του επιλύτη. Η τμηματοποίηση και η επίλυση του προβλήματος πραγματοποιείται με τη χρήση του “ANSYS CFX-Solver”. Με την ολοκλήρωση της προσομοίωσης της ροής ακολούθησε η οπτικοποίηση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων μέσω ποσοτικών και ποιοτικών γραφημάτων. Για το λόγο αυτό έγινε χρήση του “ANSYS CFD-Post”.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση της ροής μέσω της παραπάνω διαδικασίας ήταν ικανοποιητικά, με τα αμφίβολα σημεία να σχολιάζονται στην αντίστοιχη ενότητα. Πιο συγκεκριμένα, ο λόγος πίεσης του συμπιεστή βρέθηκε 1.93, ενώ ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης βρέθηκε 87.94%, τιμές που είναι λογικές για αντίστοιχους φυγοκεντρικούς συμπιεστές.

Το τελευταίο κομμάτι της εργασίας αφορούσε την εύρεση σημείων του χάρτη λειτουργίας του συμπιεστή. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν οι νόμοι ομοιότητας των στροβιλομηχανών, ώστε να γίνει εφικτή η μετακίνηση σε διάφορες γειτονικές χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας του συμπιεστή. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν γειτονικά σημεία πάνω στην κάθε χαρακτηριστική καμπύλη. Τα συγκεκριμένα σημεία υπολογίστηκαν προσεγγιστικά, μεταβάλλοντας κατάλληλα την μαζική παροχή αέρα και την στατική πίεση εξόδου του ρότορα.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ήταν εντός λογικών ορίων, γεγονός που επιβεβαιώνει την ύπαρξη των αντίστοιχων σημείων εντός του πραγματικού χάρτη λειτουργίας του συμπιεστή.

## ABSTRACT

The subject of this thesis is the detailed design of automotive compressor “KKK3HD454” by use of ANSYS-CFX Software, as well as the generation of its performance map. The goals of this thesis included the deep understanding of the way that centrifugal compressors work and their role in Internal Combustion Engines. Furthermore, another important goal was to get acquainted with the process of designing a centrifugal compressor, and the detection of the crucial parts of the procedure.

The initial stage of the design comprises the preliminary design of the centrifugal compressor, during which analytical math equations are solved with the use of “Microsoft Excel 2013”. For the verification of the results of the preliminary analysis, there was use of “ANSYS Vista CCD” software, a program which is specialized in preliminary design of radial compressors. The 3D solid model was exported by “ANSYS Design Modeler”, exploiting the upstream results. The following program that was used was TurboGrid, the aim of which is the mesh generation of the control volume, as well as the improvement of the mesh quality. The next step includes the pre-processing of the simulation, which takes place in “ANSYS CFX-Pre” software. The latter comprises the definition of well-posed boundary conditions, the Physics of the problem (turbulence model, heat transfer model), and the modeling of the appropriate solver parameters. “ANSYS CFX-Solver” was responsible for the partitioning and the solution of the flow simulation. Upon completion of the simulation, “ANSYS CFD-Post” was used in order to visualize and assess the obtained results. These results were in the form of qualitative and quantitative graphs.

The results that occurred from the aforementioned procedure were mainly satisfactory. More specifically, the pressure ratio of the compressor was found 1.93, while the isentropic efficiency was found 87.94%. Both of these results are reasonable for similar centrifugal compressors. Any questionable results are discussed in each section.

The last part of this thesis was concerned with finding points in the compressor’s performance map. The affinity laws were used in order to find new points in the compressor map, that are placed in other characteristic curves. Moreover, there was an attempt to simulate adjacent points in each of these characteristic curves. Those points were found in approximation, by changing the mass flow rate and the outlet static pressure accordingly.

The results of this procedure were reasonable, as a fact that confirms the existence of these points in the actual compressor performance map.

## ΛΙΣΤΑ ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΩΝ

$A$	Διατομή
$(A/F)_{st}$	Στοιχειομετρικός λόγος αέρα-καυσίμου
$c$	Απόλυτη ταχύτητα
$c_{p,air}$	Ειδική θερμοχωρητικότητα αέρα υπό σταθερή πίεση
$c_r$	Ακτινική συνιστώσα απόλυτης ταχύτητας
$c_u$	Περιφερειακή συνιστώσα απόλυτης ταχύτητας
$D$	Διάμετρος ρότορα
$h$	Στατική ειδική ενθαλπία
$h_{tot}$	Ολική ειδική ενθαλπία
$H$	Ύψος πτερυγίου
$m$	Παροχή μάζας
$M$	Αριθμός Mach
$n_{is}$	Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης
$n_{th}$	Θερμικός βαθμός απόδοσης κινητήρα
$n_v$	Βαθμός πλήρωσης κινητήρα
$N_c$	Αριθμός στροφών ρότορα
$N_e$	Αριθμός στροφών μέγιστης ισχύος κινητήρα
$p$	Πίεση (γενική μορφή)
$p_{abs}$	Απόλυτη πίεση
$P$	Στατική πίεση
$P_0$	Ολική πίεση
$P_c$	Ισχύς συμπιεστή
$P_e$	Ισχύς κινητήρα
$P_{e,max}$	Μέγιστη ισχύς κινητήρα
$PR_c$	Λόγος πιέσεων συμπιεστή
$q$	Ογκομετρική παροχή αέρα
$R$	Ακτίνα ρότορα
$R_0$	Παγκόσμια σταθερά ιδανικών αερίων

$R_{air}$	Σταθερά ιδανικών αερίων για τον αέρα
$t$	Χρόνος
$t_b$	Πάχος πτερυγίων
$T$	Στατική θερμοκρασία
$T_0$	Ολική θερμοκρασία
$T_{in}$	Θερμοκρασία αέρα στην εισαγωγή του κινητήρα
$u$	Περιφερειακή ταχύτητα
$u_i$	Χρονικά μεταβαλλόμενος όρος ταχύτητας ρευστού
$U$	Διάνυσμα ταχύτητας
$U_i$	Ταχύτητα ρευστού
$\bar{U}_i$	Σταθερή συνιστώσα ταχύτητας ρευστού
$v$	Ταχύτητα (γενική μορφή)
$V_d$	Όγκος εμβολισμού κινητήρα
$w$	Σχετική ταχύτητα
$z_i$	Πλήθος ενδιάμεσων πτερυγίων (splitter vanes)
$z_o$	Πλήθος κύριων πτερυγίων (main vanes)

## Ελληνικά Σύμβολα

$\alpha$	Γωνία ροής
$\alpha_0$	Ταχύτητα ήχου
$\beta$	Γωνία πτερυγίου
$\gamma$	Ισεντροπικός εκθέτης
$\Delta P$	Διαφορά πίεσης
$\lambda$	Περίσσεια αέρα
$\mu$	Δυναμικό ιξώδες
$\pi$	Αριθμός $\pi$
$\rho_0$	Ολική πυκνότητα (πραγματική)
$\rho'_0$	Ολική πυκνότητα (επαναληπτική διαδικασία)
$\rho$	Στατική πυκνότητα
$\sigma$	Συντελεστής ολίσθησης

$\tau$	Τανυστής τάσεων
$\Phi$	Συντελεστής ροής
$\Psi$	Συντελεστής φόρτισης
$\omega$	Γωνιακή ταχύτητα ρότορα

## Δείκτες

1	Είσοδος ρότορα
2	Έξοδος ρότορα
3	Έξοδος συμπιεστή (έξοδος διαχύτη)
$a$	Αέρας
αρχ/τελ	Αρχικό σημείο λειτουργίας/τελικό σημείο λειτουργίας
$f$	Καύσιμο
$in$	Εισαγωγή κινητήρα
$i/o$	Είσοδος / έξοδος συμπιεστή
$m$	Μέσο εύρος πτερυγίου
$hub$	Βάση πτερυγίου
$tip$	Άκρη πτερυγίου

## Συντομογραφίες

$LHV$	Κατώτερη θερμογόνος δύναμη
$MW$	Μοριακό βάρος αερίου

# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αντικείμενο της παρούσης εργασίας είναι ο λεπτομερής σχεδιασμός ενός υπάρχοντος ακτινικού συμπιεστή στροβιλοϋπερπληρωτή του φορτηγού Steyr της σειράς 1390 (Εικόνα 1-7). Πρόκειται για τον συμπιεστή της Εικόνα 1-1.



Εικόνα 1-1 Φυγοκεντρικός συμπιεστής KKK3HD454

Η διαδικασία του εξ αρχής σχεδιασμού μίας συσκευής που ήδη είναι υπαρκτή, έχει το πλεονέκτημα ότι παρακολουθούμε και επαληθεύουμε σε όλα τα στάδια την αντίστοιχη διαδικασία που έκανε ο κατασκευαστής (reverse engineering) με αποτέλεσμα να κατανοούμε σε βάθος τη λειτουργία του και ενδεχόμενα να το βελτιώνουμε ή να το προσαρμόζουμε σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Πρόκειται για διαδικασία που εφαρμόζεται κατά κόρον στην αυτοκινητοβιομηχανία, και στη βιομηχανία γενικότερα.

## 1.1 Ιστορικά στοιχεία για την στροβιλοϋπερπλήρωση

Η ιδέα της υπερπλήρωσης γεννήθηκε από τους Gottlieb Daimler (1885) και Rudolf Diesel (1896) παρέχοντας συμπιεσμένο αντί για ατμοσφαιρικό αέρα σε μηχανές εσωτερικής καύσης. Με αυτήν την τεχνική, η μέγιστη ισχύς της μηχανής αυξήθηκε, ενώ παράλληλα μειώθηκε η ειδική κατανάλωση. Το 1925 ο Ελβετός Alfred Büchi ήταν ο πρώτος που

τοποθέτησε στροβιλοϋπερπληρωτή (turbocharger) σε μηχανή εσωτερικής καύσεως και πέτυχε μία αύξηση ισχύος της τάξης του 40%. Αυτή ήταν η απαρχή της χρήσης των στροβιλοϋπερπληρωτών από την αυτοκινητοβιομηχανία.

Αρχικά, τα turbochargers βρήκαν εφαρμογή σε μηχανές πολύ μεγάλου κυβισμού, π.χ. μηχανές πλοίων. Όσον αφορά στην αυτοκινητοβιομηχανία, οι στροβιλοϋπερπληρωτές εμφανίστηκαν σε φορτηγά. Το πρώτο φορτηγό με στροβιλοϋπερπληρωτή κατασκευάστηκε το 1938 από την εταιρία Swiss Machine Works Saurer.

Τα πρώτα επιβατικά αυτοκίνητα με turbocharger ήταν τα Chevrolet Corvair Monza και Oldsmobile Jetfire. Τα παραπάνω έκαναν την εμφάνισή τους το 1962 και 1963 αντίστοιχα, ωστόσο αποσύρθηκαν σύντομα διότι έπασχαν σε θέματα αξιοπιστίας.



*Εικόνα 1-2 Η υπερπληρούμενη Chevrolet Corvair*



*Εικόνα 1-3 Το υπερπληρούμενο Oldsmobile Jetfire*

Ωστόσο, το πραγματικό ορόσημο στην ιστορία των στροβιλοϋπερπληρωτών δεν ήρθε από τα δύο παραπάνω αυτοκίνητα, αλλά το 1978 από την Mercedes-Benz με το μοντέλο 300 SD. Με χαμηλές εκπομπές ρύπων και υψηλή απόδοση του κινητήρα, το 300 SD γνώρισε μεγάλη εμπορική επιτυχία και καθιέρωσε το turbo στα επιβατικά οχήματα.

## 1.2 Χρήση των στροβιλοϋπερπληρωτών στα σύγχρονα αυτοκίνητα - Πλεονεκτήματα/Μειονεκτήματα

Το downsizing (μείωση κυβισμού) είναι επί της ουσίας η χρήση μηχανών εσωτερικής καύσης μικρού κυβισμού οι οποίες έχουν την ισχύ μεγαλύτερων μηχανών παλαιάς τεχνολογίας. Το downsizing είναι αποτέλεσμα των προσπαθειών της αυτοκινητοβιομηχανίας να υπάρχουν πιο αποδοτικοί και λιγότερο ρυπογόνοι κινητήρες.

Οι στροβιλοϋπερπληρωτές έχουν συμβάλει τα μέγιστα για την υλοποίηση του downsizing. Με τη χρήση τους σε έναν κινητήρα μικρού κυβισμού, η ισχύς και η ροπή αυξάνονται σε σημαντικό βαθμό. Αυτό το γεγονός έχει ως αποτέλεσμα την δυνατότητα να χρησιμοποιούνται υπερπληρούμενοι κινητήρες μικρού κυβισμού οι οποίοι είναι πολύ αποδοτικοί και έχουν χαμηλές εκπομπές ρύπων.

Σε σύγκριση με έναν ατμοσφαιρικό κινητήρα ίδιας ισχύος, ένας υπερπληρούμενος κινητήρας καταναλώνει λιγότερο καύσιμο. Αυτό συμβαίνει διότι ο υπερπληρωτής εκμεταλλεύεται την ενθαλπία που έχουν τα καυσαέρια, οπότε συμβάλλει στην αύξηση της συνολικής αποδοτικότητας του κινητήρα. Παράλληλα, επειδή οι υπερπληρούμενοι κινητήρες έχουν μικρότερο όγκο εμβολισμού, αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχουν λιγότερες απώλειες λόγω τριβής και θερμικές απώλειες. Επίσης, ο λόγος της ισχύος προς το βάρος, δηλαδή (kilowatt ωφέλιμης ισχύος / kg) κινητήρα, είναι σημαντικά μεγαλύτερος στους υπερτροφοδοτούμενους κινητήρες.

Η απόδοση ενός υπερπληρούμενου κινητήρα σε μεγάλο υψόμετρο είναι σημαντικά μεγαλύτερη σε σχέση με έναν ατμοσφαιρικό. Λόγω της χαμηλότερης πίεσης του αέρα σε μεγάλα υψόμετρα, η απώλεια ισχύος ενός ατμοσφαιρικού κινητήρα είναι σημαντική. Αντιθέτως, η απόδοση του υπερπληρωτή βελτιώνεται σε μεγάλο υψόμετρο λόγω του ότι υπάρχει μεγάλη διαφορά πίεσης μεταξύ του περιβάλλοντος και ανάντη του συμπιεστή. Ως εκ τούτου, οι υπερτροφοδοτούμενοι κινητήρες έχουν αμελητέα απώλεια ισχύος.

Τέλος, λόγω του μικρού μεγέθους των υπερτροφοδοτούμενων κινητήρων ο θόρυβος που παράγεται είναι σημαντικά λιγότερος, ενώ ο ίδιος ο στρόβιλος λειτουργεί ως ένας επιπλέον σιγαστήρας μειώνοντας την ενθαλπία των καυσαερίων.

## 1.3 Η ιστορία της εταιρίας Steyr

Η Steyr-Daimler-Puch ήταν ένας μεγάλος όμιλος εταιριών του οποίου η βάση βρισκόταν στο Steyr της Αυστρίας. Η εταιρία, αρχικά γνωστή ως Josef und Franz Werndl & Co ιδρύθηκε το 1864 ως κατασκευάστρια τυφεκίων. Το 1894 άρχισε να παράγει μοτοσυκλέτες, ενώ το 1920 παρουσίασε και το πρώτο της αυτοκίνητο, το εξακύλινδρο Steyr Type II (12/40).





*Εικόνα 1-4 Steyr Type II (12/40)*

Κατά τη διάρκεια του Β Παγκοσμίου Πολέμου η Steyr προσανατολίστηκε στην παραγωγή στρατιωτικών οχημάτων, όπως το Raupenschlepper Ost (RSO), του οποίου ο κινητήρας σχεδιάστηκε από τον Ferdinand Porsche, που εργαζόταν στη Steyr εκείνη την εποχή. Εκτός των στρατιωτικών οχημάτων, κατά την διάρκεια του Β Παγκοσμίου Πολέμου η Steyr κατασκεύαζε και τυφέκια, πολυβόλα όπλα και κινητήρες αεροσκαφών.



*Εικόνα 1-5 Raupenschlepper Ost*

Μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, η Steyr ασχολήθηκε με την κατασκευή φορτηγών και λεωφορείων τα οποία είχαν κινητήρες Diesel. Επίσης, εκείνη την περίοδο η Steyr ασχολήθηκε και με την παραγωγή τρακτέρ αλλά και επιβατηγών αυτοκινήτων. Το 1987 άρχισε ο σταδιακός κατακερματισμός της Steyr-Daimler-Puch AG, μιας και κάποια μέρη της γραμμής παραγωγής εξαγοράστηκαν με σκοπό τον σχηματισμό ξεχωριστών εταιριών. Κάποιες από αυτές τις εταιρίες είναι οι:

- Steyr Nutzfahrzeuge AG για την κατασκευή φορτηγών
- Steyr Bus GmbH για την κατασκευή λεωφορείων
- Steyr Landmaschinentechnik AG για την κατασκευή τρακτέρ

### 1.3.1 Φορτηγά της σειράς 90 και το μοντέλο 1390

Η σειρά 90 της Steyr έκανε την εμφάνισή της το 1968. Όλα τα φορτηγά της σειράς 90 είχαν κινητήρες diesel τους οποίους εξέλιξε και κατασκεύαζε η ίδια η Steyr. Οι εν λόγω κινητήρες ήταν εξακύλινδροι με κυβισμό 6 και 8.1 lt, ενώ υπήρχε και ένας οκτακύλινδρος κινητήρας με κυβισμό 12 lt.



*Εικόνα 1-6 Steyr 1490, ένα από τα φορτηγά της σειράς 90*

Το μοντέλο του οποίου μελετάται ο συμπιεστής είναι το 1390. Το 1390 παρουσιάστηκε το 1971 και έφερε τον μικρότερο κινητήρα της σειράς (εξακύλινδρος με κυβισμό 6 lt). Το όνομα του συγκεκριμένου κινητήρα είναι WD 610.60 και η ισχύς του με την βοήθεια του υπερπληρωτή έφτανε τα 110.3 kW. Το 1978 σταμάτησε η παραγωγή των φορτηγών της σειράς 90 καθώς αντικαταστάθηκε από την σειρά 91.



Εικόνα 1-7 Steyr 1390, το φορτηγό του οποίου μελετάται ο συμπιεστής

#### 1.4 Εισαγωγικές πληροφορίες για τους ακτινικούς συμπιεστές

Οι ακτινικοί συμπιεστές είναι συσκευές οι οποίες χρησιμοποιούνται για μεταφέρουν ενέργεια από έναν περιστρεφόμενο άξονα σε ένα ρευστό, το λεγόμενο εργαζόμενο μέσο. Οι ακτινικοί συμπιεστές έχουν μία ευρεία γκάμα εφαρμογών στην βιομηχανία. Πιο συγκεκριμένα, εκτός από την αυτοκινητοβιομηχανία, οι συμπιεστές χρησιμοποιούνται στους αεριοστρόβιλους, στην χημική βιομηχανία, στα διυλιστήρια και στην μεταφορά φυσικού αερίου. Στους αεριοστρόβιλους, χρησιμοποιείται ο θερμοδυναμικός κύκλος Brayton. Στον κύκλο Brayton, μία απαραίτητη συσκευή είναι ο συμπιεστής, ο οποίος μπορεί να είναι είτε ακτινικός είτε αξονικός για την συγκεκριμένη εφαρμογή. Στην χημική βιομηχανία, χρησιμοποιείται για να συμπιέζει αέρια προϊόντα πυρόλυσης (διεργασία κατά την οποία σύνθετα οργανικά μόρια διασπώνται σε πιο απλά μόρια) όπως το αιθάνιο. Στην μεταφορά φυσικού αερίου οι συμπιεστές χρησιμοποιούνται για να είναι αρκετά μεγάλη η πίεση του φυσικού αερίου στους σωλήνες, ώστε να είναι δυνατή η μεταφορά του.

Οι ακτινικοί συμπιεστές απαρτίζονται από 4 μέρη:

1. **Εισαγωγή:** Στους φυγοκεντρικούς συμπιεστές, η εισαγωγή αποτελείται συνήθως από έναν σωλήνα. Σε κάποιες περιπτώσεις, υπάρχουν οδηγία πτερύγια εισόδου, ούτως ώστε να κατευθύνουν την ροή καταλλήλως προς το επόμενο μέρος του συμπιεστή, την κινητή πτερύγωση.
2. **Κινητή πτερύγωση:** Η κινητή πτερύγωση είναι και το πιο σημαντικό κομμάτι του ακτινικού συμπιεστή, καθώς μέσω αυτής μεταφέρεται ενέργεια προς το εργαζόμενο ρευστό. Η κινητή πτερύγωση μπορεί να έχει αρκετές παραλλαγές. Το κέλυφος του συμπιεστή μπορεί είτε να περιστρέφεται μαζί με τα πτερύγια, είτε να είναι σταθερό, όπως στην περίπτωση του στροβιλοϋπερπληρωτή. Επίσης, μία κινητή πτερύγωση μπορεί είτε να έχει μόνο πτερύγια τα οποία εκτείνονται από την είσοδο του συμπιεστή μέχρι την έξοδο, είτε να έχει επιπροσθέτως πτερύγια τα οποία καταλήγουν μεν στην έξοδο της πτερωτής, ωστόσο δεν ξεκινάνε από την είσοδο της.

Αυτά τα πτερύγια ονομάζονται “Splitter Blades” και χρησιμοποιούνται συχνά στους ακτινικούς συμπιεστές. Τα “Splitter Blades” τοποθετούνται για να καθοδηγούνε την ροή στην έξοδο της κινητής πτερύγωσης. Επίσης, επειδή η ακμή προσβολής των “Splitter Blades” δεν βρίσκεται στην είσοδο της πτερωτής, δεν δυσχεραίνεται η ροή στην είσοδο, με αποτέλεσμα να μπορούν να επιτευχθούν μεγαλύτερες μαζικές παροχές [15] [22] [31].

3. **Διαχύτης:** Ο διαχύτης παίζει σημαντικό ρόλο στους ακτινικούς συμπιεστές, καθώς εκεί μειώνεται η κινητική ενέργεια του εργαζόμενου μέσου για να αυξηθεί η στατική του πίεση. Οι διαχύτες μπορεί να έχουν σταθερή πτερύγωση, είτε να μην διαθέτουν πτερύγια.
4. **Εξαγωγή:** Η εξαγωγή του συμπιεστή μπορεί να έχει αρκετές μορφές. Στους στροβιλοϋπερπληρωτές, η εξαγωγή του συμπιεστή αποτελείται από έναν σωλήνα ο οποίος έχει κατεύθυνση προς την εισαγωγή του κινητήρα. Σε άλλες εφαρμογές, η εξαγωγή του κινητήρα μπορεί να αποτελείται από έναν συλλέκτη, στον οποίο να συσσωρεύεται το υψηλής πίεσης εργαζόμενο μέσο.

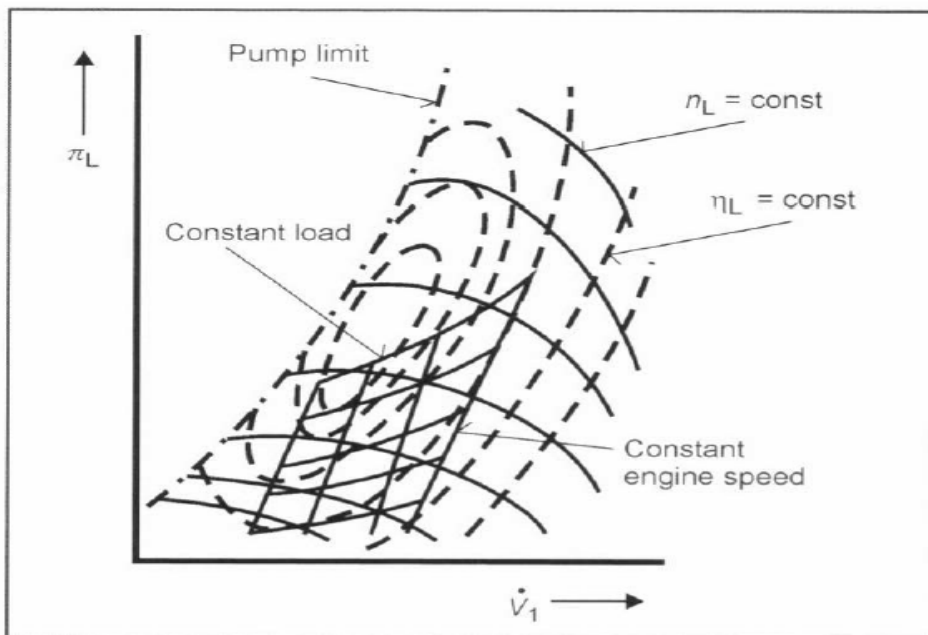
## 2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ MATCHING ΣΤΡΟΒΙΛΟΥΠΕΡΠΛΗΡΩΤΩΝ

Η διαδικασία αντιστοίχισης ενός στροβιλοϋπερπληρωτή στον εμβολοφόρο κινητήρα που θα υποστηρίξει έχει εξελιχθεί με το πέρασμα του χρόνου, από καθαρά πειραματική διαδικασία [18], σε μία διαδικασία που αξιοποιεί τις δυνατότητες των σύγχρονων υπολογιστών και του εξειδικευμένου λογισμικού.

Ο σκοπός της αντιστοίχισης (matching) ενός στροβιλοϋπερπληρωτή σε έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης είναι στην ουσία η επιλογή ενός συμπιεστή ο οποίος θα είναι σε θέση να παρέχει αρκετή ποσότητα αέρα σε υψηλή πίεση στον κινητήρα εσωτερικής καύσης. Είναι επιθυμητή η επιλογή ενός συμπιεστή ο οποίος έχει τον μέγιστο βαθμό απόδοσης σε όλο το φάσμα των στροφών του εμβολοφόρου κινητήρα.

Για να εξεταστεί εάν ένας συμπιεστής είναι κατάλληλος για να τροφοδοτήσει έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης, πρέπει να υπάρχει ένα διάγραμμα του κινητήρα το οποίο απεικονίζει την μαζική παροχή του αέρα σε σχέση με τις στροφές (rpm) του κινητήρα, και ένα δεύτερο διάγραμμα το οποίο είναι ο χάρτης λειτουργίας του συμπιεστή. Σκοπός αυτής της σύγκρισης των δύο διαγραμμάτων είναι ο κινητήρας να λειτουργεί σε όλο το φάσμα των στροφών του μέσα στα όρια του χάρτη του συμπιεστή. Είναι πολύ σημαντικό να αποφευχθεί η λειτουργία του συμπιεστή κοντά σε περιοχές όπως η Choke Line και η Surge Line. Ιδανικά, ο χάρτης του κινητήρα θα βρίσκεται σε περιοχές όπου ο βαθμός απόδοσης του συμπιεστή είναι ο μέγιστος δυνατός.

Στην Εικόνα 2-1 φαίνεται η υπέρθεση του χάρτη του κινητήρα (engine map) πάνω στο χάρτη του συμπιεστή (compressor map) [28]. Η διαδικασία αυτή ξεκινά από τους χάρτες μόνιμης λειτουργίας κινητήρα – στροβιλοσυμπιεστή, και καταλήγει στην βελτιστοποίηση της μεταβατικής συμπεριφοράς (επιταχύνσεις) [28].



Εικόνα 2-1 Συνδυασμός χάρτη κινητήρα και χάρτη λειτουργίας συμπιεστή

## 2.1 Μαζική παροχή αέρα

Μία πολύ σημαντική παράμετρος η οποία επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την διαστασιολόγηση του στροβιλοϋπερπληρωτή είναι η μαζική παροχή του αέρα. Η μαζική παροχή του αέρα στον εμβολοφόρο κινητήρα πρέπει είτε να είναι ήδη γνωστή, ή να υπολογιστεί μέσω μαθηματικών σχέσεων. Παρακάτω, παρουσιάζεται μία μέθοδος για τον υπολογισμό της παροχής του αέρα.

Για να είναι δυνατός ο υπολογισμός της μαζικής παροχής αέρα, πρέπει να είναι γνωστές κάποιες παράμετροι του εμβολοφόρου κινητήρα, οι οποίες είναι:

- Ο όγκος εμβολισμού ( $V_d$ )
- Η μέγιστη ισχύς ( $P_{e,max}$ )
- Ο αριθμός στροφών που επιτυγχάνεται η μέγιστη ισχύς ( $N_e$ )
- Η Κατώτερη θερμογόνο δύναμη του καυσίμου ( $LHV$ )
- Ο Θερμικός Βαθμός Απόδοσης του κινητήρα ( $n_{th}$ )
- Ο Βαθμός Πλήρωσης του κινητήρα ( $n_v$ )
- Ο στοιχειομετρικός Λόγος Αέρα/Καυσίμου ( $(A/F)_{st}$ )
- Η Περίσσεια Αέρα ( $\lambda$ )
- Σταθερά ιδανικών αερίων του αέρα ( $R_{air}$ )
- Θερμοκρασία του αέρα στην Εισαγωγή του κινητήρα ( $T_{in}$ )

Γνωρίζοντας τα παραπάνω στοιχεία για τον εμβολοφόρο κινητήρα, υπολογίζουμε την παροχή του καυσίμου  $m_f$  από την εξίσωση (2-1):

$$m_f = \frac{P_{e,max}}{n_{th} \cdot LHV} \quad (2-1)$$

Αφού υπολογιστεί η μαζική παροχή του καυσίμου, είναι δυνατός ο υπολογισμός της μαζικής παροχής του αέρα, που είναι και το ζητούμενο της συγκεκριμένης παραγράφου (εξίσωση (2-2)):

$$m_a = m_f \cdot \lambda \cdot (A/F)_{st} \quad (2-2)$$

Επιπλέον του υπολογισμού της παροχής του αέρα, είναι πολύ σημαντικό για το matching του στροβιλοϋπερπληρωτή με τον εμβολοφόρο κινητήρα να υπολογιστεί η πυκνότητα του αέρα στην έξοδο του συμπιεστή, σημείο το οποίο ταυτίζεται με την εισαγωγή του κινητήρα. Γνωρίζοντας την πυκνότητα του αέρα στο συγκεκριμένο σημείο, μπορεί να υπολογιστεί η στατική πίεση, συνεπώς έμμεσα μπορεί να υπολογιστεί και ο λόγος πιέσεων (Pressure Ratio) που απαιτείται να έχει ο συμπιεστής. Η πυκνότητα υπολογίζεται από την εξίσωση (2-3) [26]:

$$\rho_{a,in} = \frac{2 \cdot 60 \cdot m_a}{n_v \cdot V_d \cdot N_e} \quad (2-3)$$

Τέλος, η στατική πίεση μπορεί να υπολογιστεί από την καταστατική εξίσωση (εξίσωση (2-4)):

$$P_3 = \rho_{a,in} \cdot R_{air} \cdot T_{in} \quad (2-4)$$

Στην παρούσα εργασία η μαζική παροχή δεν ήταν γνωστή, ωστόσο δεν υπολογίστηκε με την παραπάνω μέθοδο αλλά υπολογίστηκε με την βοήθεια των προγραμμάτων Excel και Vista CCD, στο πλαίσιο της εύρεσης του ονομαστικού σημείου λειτουργίας του συμπιεστή.

## 2.2 Σημαντικά στοιχεία για τον κινητήρα εσωτερικής καύσης Steyr WD 610.60

Στον Πίνακα 2-1, παρουσιάζονται τα δεδομένα του κινητήρα Steyr WD 610.60, ενώ στον Πίνακα 2-2, άλλες χρήσιμες παράμετροι για τον υπολογισμό της λειτουργίας του συμπιεστή.

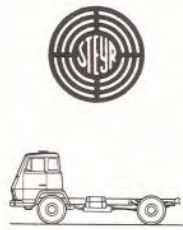
Πίνακας 2-1 Δεδομένα κινητήρα Steyr WD 610.60

Όγκος Εμβολισμού	$V_d =$	0.006	$m^3$
Bore	$B =$	0.105	$m$
Stroke	$S =$	0.115	$m$
Ισχύς	$P_e =$	110	$kW$

Πίνακας 2-2 Εισαγωγή θερμοδυναμικών στοιχείων του κύκλου

Αριθμός Στροφών Μέγιστης Ισχύος	$N_e =$	2500.000	$rpm$
Κατώτερη Θερμογόνος Δύναμη Καυσίμου	$LHV =$	43200.000	$kJ/Kg$
Θερμικός Βαθμός Απόδοσης Κινητήρα	$n_{th} =$	0.370	
Βαθμός Πλήρωσης Κινητήρα	$n_v =$	0.750	
Στοιχειομετρικός Λόγος Αέρα/Καυσίμου	$(A/F)_{st} =$	14.500	
Περίσσεια Αέρα	$\lambda =$	1.400	
Σταθερά ιδανικών αερίων για τον αέρα	$R_{air} =$	287.000	$J/Kg \cdot K$
Θερμοκρασία Αέρα (Εισαγωγή Κινητήρα)	$T_{in} =$	353.000	$K$

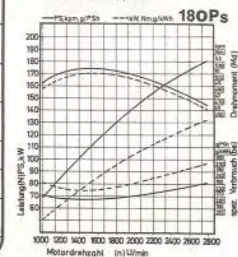
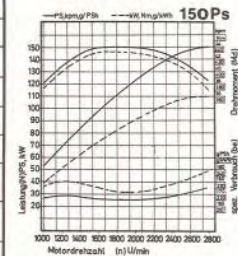
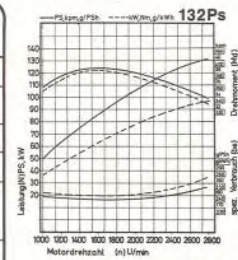
Τα παραπάνω δεδομένα πάρθηκαν από ένα έγγραφο της κατασκευάστριας εταιρίας Steyr. Το έγγραφο αυτό, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-2, περιέχει χρήσιμες πληροφορίες τόσο για τον κινητήρα WD 610.60, αλλά και για άλλους κινητήρες της εταιρίας.



In diesem Prospekt sind folgende LKW-Typen enthalten:

790.132/O36	890.150/N50
790.132/F41	890.150/N56
790.132/N48	890.150/K32
790.132/K32	
790.150/F41	1390.150/O38/6x2
790.150/N48	1390.150/O44/6x2
790.150/O36/4x4	
790.150/K32/4x4	990.180/O46
	990.180/F53
890.132/O38	990.180/K34
890.150/O38	990.180/K37
890.150/F44	990.180/K35/4x4
	990.180/K38/4x4

FAHRZEUG-TYPENREIHE	790.132 890.132	790.150 790.150/4x4 890.150/1390.150	990.180 990.180/4x4
MOTOR			
Hersteller	STEYR-DAIMLER-PUCH AG		
Motor-Typ	WD 610.00 WD 610.19	WD 610.69 WD 610.70 WD 610.60	WD 614.01 WD 614.20
Arbeitsverfahren	Diesel 4-Takt - Direkteinspritzung		
Abgasturbolader	ohne	mit	ohne
Nettoleistung nach DIN 70020 bei 2800 U/min.	132PS(97,1kW)	150PS(110,3kW)	180PS(132,5kW)
Max.Drehmoment kpm (Nm) bei U/min.	39(383,8)/1600	44(432)/ 1700	52(510)/1400
Bohrung/Hub mm	105/115	105/115	120/120
Gesamthubraum cm <sup>3</sup>	5976	5976	8143
Verdichtungsverhältnis	17,0 : 1	17,0 : 1	16,8 : 1
Mittl. Kolbengeschwindigkeit m/s	10,7	10,7	11,2
Zylinderanzahl u. -anordnung	6-Reihe	6-Reihe	6-Reihe
Abnehmbare Zylinderköpfe	3 doppelte	3 doppelte	6 einzelne
Kurbelgehäuse: Grauguß mit trock. auswechselbaren Zylinderbüchsen	x	x	x
Kolben: Leichtmetall-Ringträger- Kolben (Ringanzahl)	3 Verdichtungs- 2 Ölabbstreifringe	3 Verdichtungs- 2 Ölabbstreifringe	3 Verdichtungs- 2 Ölabbstreifringe
Kurbelwelle: Stahl geschmiedet mit Schwingungsdämpfer	x	x	x
Schmiersystem: Druckumlauf- schmierung mit Ölkühler	x	x	x
Kühlsystem: Langzeitfüllung durch Thermostat geregelt	x	x	x
Visco-Lüfter	-	-	x
Starthilfe: Startpilot	-	-	x
Ansaugluftreinigung	Ölbadiuftfilter	Ölbadiuftfilter	Ölbadiuftfilter

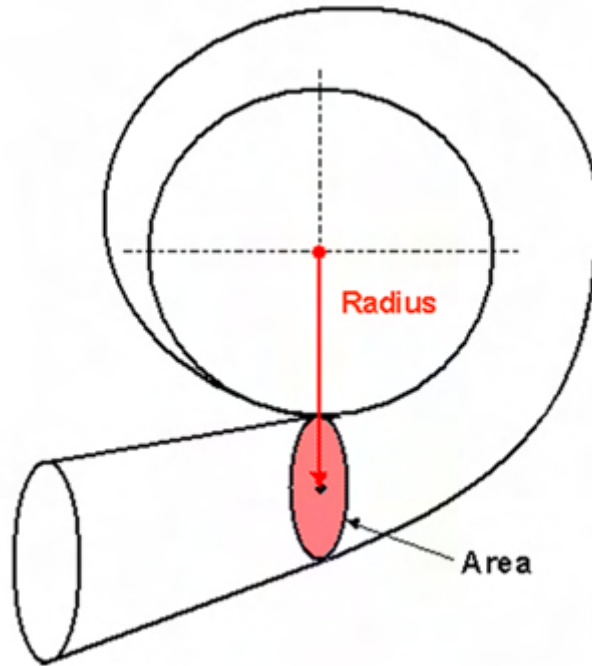


Εικόνα 2-2 Στοιχεία για κινητήρες της Steyr

### 2.3 Ο λόγος εμβαδού-ακτίνας

Ένα μέγεθος το οποίο παίζει σημαντικό ρόλο στην αντιστοίχιση ενός στροβιλοϋπερπληρωτή με έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης είναι ο λόγος A/R. Ο λόγος A/R είναι ένα γεωμετρικό χαρακτηριστικό των housings τόσο του συμπιεστή όσο και του στροβίλου. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2-3, ο λόγος A/R στους στροβίλους είναι ο λόγος της διατομής του σωλήνα με τον οποίο εισέρχονται τα καυσαέρια από τον κινητήρα στον στρόβιλο, προς την ακτίνα του κύκλου ο οποίος έχει κέντρο το κέντρο του ρότορα και ως ακτίνα το κέντρο της επιφάνειας A.





Εικόνα 2-3 Λόγος A/R

Σε αντίθεση με τους στροβίλους, στους συμπιεστές το μόνο που αλλάζει σχετικά με τον λόγο A/R είναι το γεγονός ότι η διατομή A αφορά τον σωλήνα της εξαγωγής και όχι της εισαγωγής.

### 2.3.1 Επιρροή του λόγου A/R στους συμπιεστές

Η συμπεριφορά του κινητήρα εσωτερικής καύσης επηρεάζεται σε μικρό βαθμό με την αλλαγή του λόγου A/R του συμπιεστή. Ωστόσο, οι συμπιεστές που έχουν μικρό λόγο πίεσης και χρησιμοποιούνται κυρίως σε εμπορικά οχήματα, συνηθίζεται να έχουν σχετικά μεγάλο λόγο A/R, ενώ οι συμπιεστές που έχουν μεγάλο λόγο πίεσης και έχουν αγωνιστικές εφαρμογές, συνηθίζεται να έχουν μικρό λόγο A/R [12].

### 2.3.2 Επιρροή του λόγου A/R στους στροβίλους

Σε αντίθεση με το A/R στους συμπιεστές, στους στροβίλους ο συγκεκριμένος λόγος παίζει πολύ σημαντικό ρόλο. Όταν ένας στρόβιλος έχει μικρό λόγο A/R, σημαίνει ότι τα καυσαέρια έχουν μεγάλη ταχύτητα λόγω της μικρής διατομής. Αυτό το γεγονός έχει ως συνέπεια να μεγαλώνει η γωνία ροής  $\alpha_2$  και να εισέρχονται τα καυσαέρια στον στρόβιλο περισσότερο εφαπτομενικά. Εξαιτίας του γεγονότος ότι τα καυσαέρια έχουν μεγάλη ταχύτητα, η μέγιστη ισχύς του στροβίλου επιτυγχάνεται όταν ο κινητήρας εσωτερικής καύσης έχει χαμηλές στροφές (rpm). Ωστόσο, όταν ο κινητήρας βρίσκεται σε υψηλές στροφές επειδή τα καυσαέρια εισέρχονται εφαπτομενικά, μειώνεται η μαζική παροχή στον στρόβιλο και έτσι αυξάνεται η πίεση στην εξαγωγή του κινητήρα με αποτέλεσμα να δυσχεραίνεται η ροή της γόμωσης και άρα να μειώνεται η μέγιστη ισχύς του κινητήρα. Από τα παραπάνω, βγαίνει το συμπέρασμα ότι ένας στρόβιλος ο οποίος έχει μικρό λόγο A/R, χρησιμοποιείται κυρίως σε εμπορικά οχήματα καθώς έχει καλύτερη συμπεριφορά όταν ο κινητήρας έχει χαμηλές στροφές. Αντίστοιχα, όταν ένας στρόβιλος έχει μεγάλο λόγο A/R τα καυσαέρια έχουν

μικρότερη ταχύτητα και άρα εισέρχονται με μικρότερη γωνία ροής, δηλαδή πιο ακτινικά. Αυτό το γεγονός έχει ως αποτέλεσμα ο στρόβιλος να μπορεί να διαχειριστεί μεγαλύτερη μαζική παροχή καυσαερίων ενώ παράλληλα είναι μικρότερη η πίεση στην εξαγωγή του κινητήρα. Ωστόσο, το μειονέκτημα του μεγάλου A/R είναι η μειωμένη ισχύς του στροβίλου όταν ο κινητήρας δουλεύει σε χαμηλές στροφές. Από τα παραπάνω, μπορεί να βγει το συμπέρασμα ότι οι στρόβιλοι που έχουν μεγάλο λόγο A/R βρίσκουν εφαρμογή στον χώρο των αγωνιστικών οχημάτων, όπου απαιτείται από τον κινητήρα να έχει υψηλή μέγιστη ισχύ σε υψηλές στροφές.

## 2.4 Σύνοψη

Συνοψίζοντας το κεφάλαιο, παρατέθηκε μία μέθοδος μέσω της οποίας μπορούν να υπολογιστούν στοιχεία τα οποία είναι πολύ χρήσιμα για την αντιστοίχιση ενός υπερπληρωτή σε έναν κινητήρα. Επίσης, έγινε μία ανάλυση για το πως επηρεάζουν δύο παράμετροι (η μαζική παροχή του αέρα και ο λόγος A/R) την διαδικασία του matching. Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η αντιστοίχιση ενός κατάλληλου στροβιλοϋπερπληρωτή είναι μία πολύπλοκη διαδικασία η οποία παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην απροβλημάτιστη λειτουργία και συμπεριφορά του εμβολοφόρου κινητήρα.

### 3 ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ (PRELIMINARY DESIGN)

Κατά τον προκαταρκτικό σχεδιασμό έγινε προσπάθεια εύρεσης των αεροθερμοδυναμικών μεγεθών του ρότορα με τη χρήση αναλυτικών τύπων, όταν αυτός βρίσκεται στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας του (59000 rpm). Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα “Microsoft Excel”, του οποίου τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις εικόνες του ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Α. Η διαδικασία επίλυσης των αναλυτικών τύπων παρουσιάζεται αναλυτικά στις επόμενες ενότητες.

#### 3.1 Προσδιορισμός σημείου λειτουργίας συμπιεστή

Ο Πίνακας 3-1 παρουσιάζει θερμοδυναμικά στοιχεία του εργαζόμενου μέσου, καθώς και γεωμετρικά στοιχεία του ρότορα του συμπιεστή.

Ο Πίνακας 3-2 παρουσιάζει το σημείο λειτουργίας που επιλέγεται για τον συμπιεστή με βάση τον προσδιορισμό δύο παραμέτρων λειτουργίας του στροβιλοϋπερπληρωτή (στροφές, παροχή αέρα).

Πίνακας 3-1 Δεδομένα συμπιεστή και εργαζόμενου μέσου

Θερμοχωρητικότητα	$C_p =$	1005.000	$J/Kg \cdot K$
Σταθερά ιδανικών αερίων για τον αέρα	$R_{air} =$	287.000	$J/Kg \cdot K$
Ισεντροπικός εκθέτης	$\gamma =$	1.400	
Στατική πίεση εισόδου	$P_1 =$	101325.000	$Pa$
Στατική πυκνότητα εισόδου	$\rho_1 =$	1.200	$kg/m^3$
Αριθμός πτερυγίων (main vanes)	$Z_i =$	6	
Αριθμός πτερυγίων (intervanes)	$Z_o =$	6	
Πάχος πτερυγίων στην έξοδο	$t_b =$	0.001	$m$
Διάμετρος	$D =$	0.094	$m$
Μήκος ρότορα	$L =$	0.036	$m$
Είσοδος	$R_{1,tip} =$	0.031	$m$
	$R_{i,hub} =$	0.011	$m$
Γωνίες πτερυγίου	$\beta_{1,h} =$	0.52	$rad$
	$\beta_{1,m} =$	0.79	$rad$
	$\beta_{1,t} =$	1.05	$rad$
Έξοδος	$H_{2,tip} =$	0.008	$m$
	$H_{2,hub} =$	0.001	$m$
Γωνία πτερυγίου	$\beta_2' =$	0.000	$rad$

Πίνακας 3-2 Επιλογή ονομαστικού σημείου λειτουργίας

Στροφές Συμπιεστή	$N_c =$	59000	$rpm$
Μαζική Παροχή Αέρα	$m =$	0.2	$kg/s$

Όλα τα παραπάνω γεωμετρικά στοιχεία του ρότορα του συμπιεστή είτε μετρήθηκαν ή υπολογίστηκαν προσεγγιστικά (π.χ. οι γωνίες πτερυγίου  $\beta_{1,h}, \beta_{1,m}, \beta_{1,t}$ ). Έτσι, επιλέγοντας ένα σημείο λειτουργίας για το συμπιεστή στις 59000 rpm και με τη βοήθεια των σχέσεων που παρουσιάζονται παρακάτω, είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε τα τρίγωνα ταχυτήτων εισόδου και εξόδου, καθώς και όλα τα θερμοδυναμικά στοιχεία του συμπιεστή για το συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας που επιλέχθηκε [27].

- Η γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  υπολογίστηκε από την Εξίσωση (3-1):

$$\omega = \frac{2\pi \cdot N_c}{60} \quad (3-1)$$

- Η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα  $u_2$  υπολογίστηκε από την Εξίσωση (3-2):

$$u_2 = \omega \cdot \frac{D}{2} \quad (3-2)$$

### 3.1.1 Υπολογισμός Τριγώνου Ταχυτήτων Εξόδου

Το τρίγωνο ταχυτήτων εξόδου ενός φυγοκεντρικού συμπιεστή στη γενική του περίπτωση φαίνεται στην Εικόνα 3-1:



Εικόνα 3-1 Τρίγωνο ταχυτήτων εξόδου φυγοκεντρικού συμπιεστή

Η διαδικασία επίλυσης του τριγώνου εξόδου προϋποθέτει μία επαναληπτική διαδικασία δοκιμής και σφάλματος, η οποία περιλαμβάνει την υπόθεση της ολικής πυκνότητας  $\rho_{03}$ .

Για το τρίγωνο ταχυτήτων εξόδου επιλέγεται συντελεστής ολίσθησης κατά Wiesner για ακτινικά πτερύγια στην έξοδο, ο οποίος εκφράζεται από την Εξίσωση (3-3):

$$\sigma = 1 - \frac{1}{(z_o + z_i)^{0.7}} = \frac{c_{u2}}{u_2} \quad (3-3)$$

Αρχική υπόθεση για την ολική πυκνότητα εξόδου:  $\rho_{03} = \rho_3$

Οι σχέσεις που χρησιμοποιούνται για την επίλυση του τριγώνου είναι οι εξής:

Η κάθετη στη διατομή εξόδου ταχύτητα  $c_{r2}$ , υπολογίστηκε από την Εξίσωση (3-4):

$$c_{r2} = \frac{m_a}{\rho_{03} \cdot A_2} \quad (3-4)$$

όπου  $A_2$ : η διατομή εξόδου του ρότορα, η οποία δίνεται από την Εξίσωση (3-5):

$$A_2 = (\pi \cdot D - (z_i + z_o) \cdot t_b) \cdot (H_{2,tip} - H_{2,hub}) \quad (3-5)$$

Η ταχύτητα  $c_{u2}$  υπολογίστηκε από τον συντελεστή ολίσθησης από την Εξίσωση (3-3).

Η απόλυτη ταχύτητα εξόδου  $c_2$  υπολογίστηκε από την Εξίσωση (3-6):

$$c_2 = \sqrt{c_{u2}^2 + c_{r2}^2} \quad (3-6)$$

Η σχετική ταχύτητα εξόδου  $w_2$  υπολογίστηκε από την Εξίσωση (3-7):

$$w_2 = \sqrt{(u_2 - c_{u2})^2 + c_{r2}^2} \quad (3-7)$$

Η απόλυτη γωνία εξόδου της ροής,  $a_2$ , υπολογίστηκε από την Εξίσωση (3-8):

$$c_{r2} = c_2 \cdot \cos a_2 \quad (3-8)$$

Η σχετική γωνία εξόδου,  $\beta_2$ , υπολογίστηκε από την Εξίσωση (3-9):

$$c_{r2} = w_2 \cdot \cos \beta_2 \quad (3-9)$$

Η ολική θερμοκρασία εξόδου από τον συμπιεστή,  $T_{03}$ , υπολογίστηκε από την Εξίσωση (3-10):

$$T_{03} = T_3 + \frac{c_2^2}{2 \cdot c_{p,air}} \quad (3-10)$$

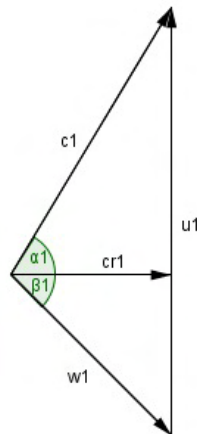
Τέλος, η επανάληψη κλείνει με τον υπολογισμό της ολικής πυκνότητας,  $\rho'_{03}$ , στην έξοδο του συμπιεστή, από την Εξίσωση (3-11):

$$\frac{\rho'_{03}}{\rho_3} = \left(\frac{T_{03}}{T_3}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \quad (3-11)$$

Επιστρέφοντας στην Εξίσωση (3-4), αντικαθιστούμε όπου  $\rho_{03} = \rho'_{03}$ , έως ότου να συγκλίνει η τιμή της ολικής πυκνότητας εξόδου του συμπιεστή.

### 3.1.2 Υπολογισμός Τριγώνου Ταχυτήτων Εισόδου

Λόγω του γεγονότος ότι η γωνία πτερυγίου  $\beta_1$  αλλάζει όσο κατευθυνόμαστε ακτινικά προς τα έξω, υπολογίζουμε το τρίγωνο ταχυτήτων σε τρεις διαφορετικές θέσεις του πτερυγίου (hub, mean, tip). Βέβαια, όπως είναι άλλωστε αναμενόμενο, οι σχέσεις που χρησιμοποιούνται είναι οι ίδιες και γι' αυτόν το λόγο ο υπολογισμός θα γίνει μονάχα μία φορά για την περίπτωση του mean. Το τρίγωνο ταχυτήτων εισόδου ενός φυγοκεντρικού συμπιεστή στη γενική του περίπτωση φαίνεται στην Εικόνα 3-2:



Εικόνα 3-2 Τρίγωνο ταχυτήτων εισόδου φυγοκεντρικού συμπιεστή

Όπως και προηγουμένως, για τον υπολογισμό του τριγώνου ταχυτήτων εισόδου, απαιτείται μία επαναληπτική διαδικασία δοκιμής και σφάλματος. Η επίλυση του τριγώνου στηρίζεται στις επόμενες σχέσεις.

Αρχική υπόθεση για την ολική πυκνότητα εισόδου:  $\rho_{01} = \rho_1$

Η κάθετη στη διατομή εισόδου ταχύτητα  $c_{r1,m}$ , υπολογίστηκε από την Εξίσωση (3-12):

$$c_{r1,m} = \frac{\dot{m}_a}{\rho_{01} \cdot A_1} \quad (3-12)$$

όπου  $A_1$ : η διατομή εισόδου του ρότορα, η οποία δίνεται από την Εξίσωση (3-13):

$$A_1 = \pi \cdot (R_{1,tip}^2 - R_{1,hub}^2) \quad (3-13)$$

Η περιστροφική ταχύτητα εισόδου  $u_{1,m}$  δίνεται από την Εξίσωση (3-14):

$$u_{1,m} = \omega \frac{(R_{1,tip} + R_{1,hub})}{2} \quad (3-14)$$

Η σχετική ταχύτητα εισόδου  $w_{1,m}$  υπολογίστηκε από την Εξίσωση (3-15):

$$c_{r1,m} = w_{1,m} \cdot \cos(\beta_{1,m}) \quad (3-15)$$

Η ταχύτητα  $c_{u1,m}$  υπολογίστηκε από την Εξίσωση (3-16):

$$c_{u1,m} = u_{1,m} - w_{1,m} \cdot \sin(\beta_{1,m}) \quad (3-16)$$

Η απόλυτη ταχύτητα εισόδου  $c_{1,m}$  υπολογίστηκε από την Εξίσωση (3-17):

$$c_{1,m} = \sqrt{c_{u1,m}^2 + c_{r1,m}^2} \quad (3-17)$$

Η γωνία εισόδου της ροής  $a_{1,m}$  υπολογίστηκε από την Εξίσωση (3-18):

$$c_{r1,m} = c_{1,m} \cdot \cos(a_{1,m}) \quad (3-18)$$

Η ολική θερμοκρασία εισόδου  $T_{01}$  υπολογίστηκε από την Εξίσωση (3-19):

$$T_{01} = T_1 + \frac{c_{1,m}^2}{2 \cdot c_{p,air}} \quad (3-19)$$

Η ολική πυκνότητα εισόδου  $\rho'_{01}$  υπολογίστηκε από την Εξίσωση (3-20):

$$\rho'_{01} = \rho_1 \cdot \left(\frac{T_{01}}{T_1}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \quad (3-20)$$

Με το τέλος της 1<sup>ης</sup> επανάληψης, επιστρέφουμε στην Εξίσωση (3-12) και αντικαθιστούμε όπου  $\rho_{01} = \rho'_{01}$ . Οι επαναλήψεις συνεχίζονται έως ότου να συγκλίνει η τιμή της πυκνότητας εισόδου.

Η παραπάνω διαδικασία υπολογισμού ακολουθείται επίσης και για τα τρίγωνα εισόδου για hub και για tip.

### 3.1.3 Υπολογισμός Παραμέτρων Λειτουργίας

Οι ολικές πιέσεις εισόδου και εξόδου του συμπιεστή υπολογίστηκαν από την Εξίσωση (3-21):

$$P_0 = P \cdot \left(\frac{T_0}{T}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (3-21)$$

Ο λόγος πίεσης της βαθμίδας του συμπιεστή υπολογίστηκε από την Εξίσωση (3-22):

$$PR_c = \frac{P_{03}}{P_{01}} \quad (3-22)$$

Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης της βαθμίδας υπολογίστηκε από την Εξίσωση (3-23):

$$n_{is} = \frac{\left(\frac{P_{03}}{P_{01}}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}{\frac{T_{03}}{T_{01}} - 1} \quad (3-23)$$

Η ισχύς του συμπιεστή υπολογίστηκε από την Εξίσωση (3-24):

$$P_c = m_a \cdot c_{p,air} \cdot (T_{03} - T_{01}) \quad (3-24)$$

Οι αδιάστατοι συντελεστές ροής,  $\Phi$ , και φόρτισης βαθμίδας,  $\Psi$ , υπολογίστηκαν από την Εξίσωση (3-25) και την Εξίσωση (3-26), αντίστοιχα:

$$\Phi = \frac{4 \cdot m_a}{\rho_{01} \cdot \pi \cdot D^2 \cdot u_2} \quad (3-25)$$

$$\Psi = \frac{c_{p,air} \cdot (T_{03} - T_{01})}{u_2^2} \quad (3-26)$$

Οι αδιάστατοι αριθμοί Mach για τις διάφορες ταχύτητες, υπολογίστηκαν από την Εξίσωση (3-27):

$$M = \frac{v}{\alpha_0} \quad (3-27)$$

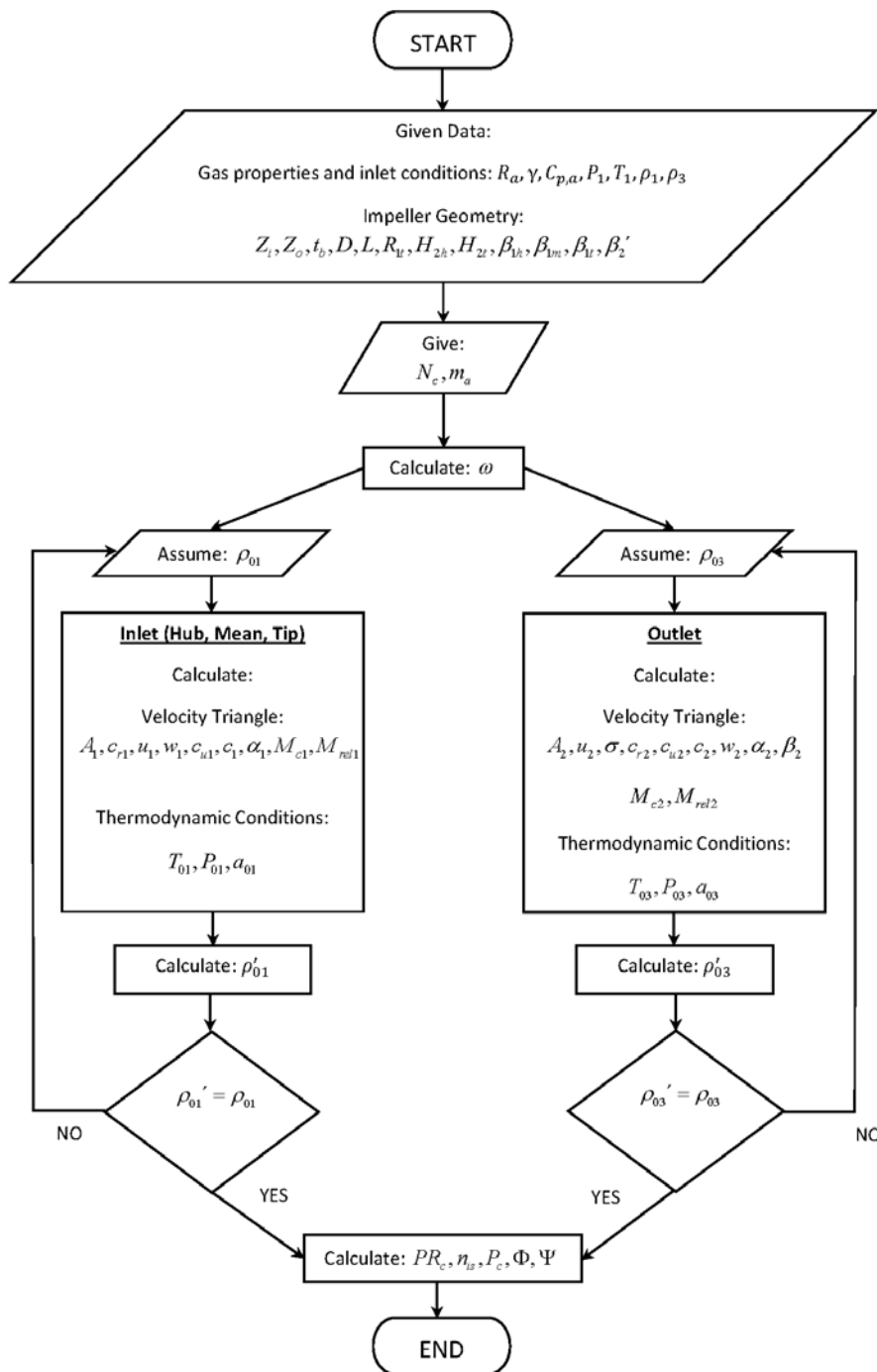
όπου  $v$ : ταχύτητα και  $\alpha_0$ : ταχύτητα του ήχου που δίνεται από την Εξίσωση (3-28):

$$\alpha_0 = \sqrt{\gamma \cdot R_{air} \cdot T_0} \quad (3-28)$$



### 3.1.4 Διάγραμμα ροής του προκαταρκτικού σχεδιασμού (Preliminary design flowchart)

Η μεθοδολογία που παρουσιάστηκε και αναλύθηκε στις υποενότητες 3.2.1, 3.2.2 και 3.2.3 για τον προσδιορισμό του σημείου λειτουργίας με τη βοήθεια του Excel, απεικονίζεται συνοπτικά στο διάγραμμα ροής που ακολουθεί (Διάγραμμα 3-1).



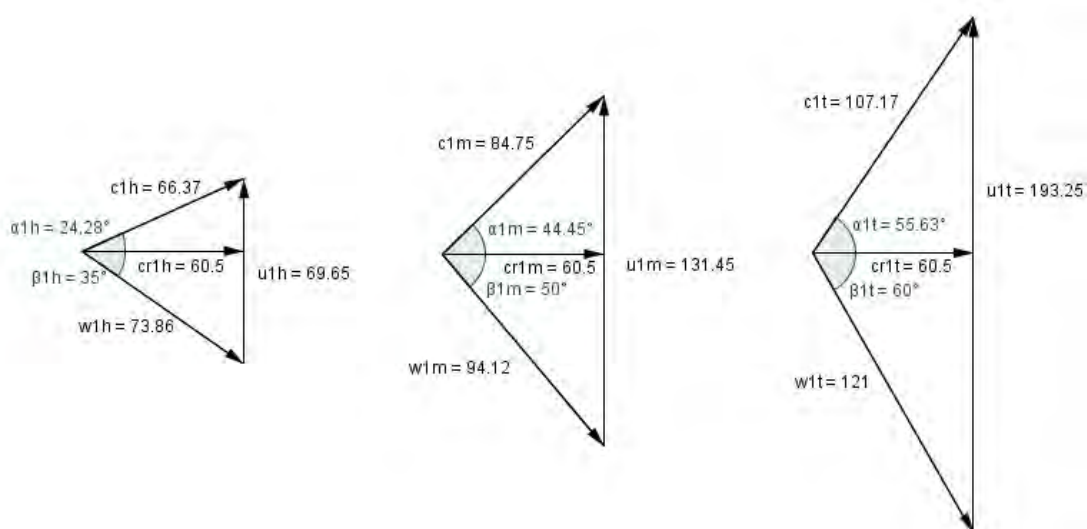
Διάγραμμα 3-1 Διάγραμμα ροής προκαταρκτικού σχεδιασμού

## 3.2 Αποτελέσματα του προκαταρκτικού σχεδιασμού

### 3.2.1 Τρίγωνα Ταχυτήτων Εισόδου

Όπως ήδη αναφέρθηκε, τα τρίγωνα ταχυτήτων υπολογίστηκαν σε τρεις διαφορετικές θέσεις για κάθε πτερυγίο, καθώς η ροή διαφοροποιείται από τη βάση του πτερυγίου προς τα επάνω. Οι τρεις θέσεις στις οποίες υπολογίστηκαν τα τρίγωνα είναι η βάση του πτερυγίου (hub), το μέσο του πτερυγίου (mean) και τέλος το ανώτερο σημείο του (tip). Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να εξαχθούν αυτά τα αποτελέσματα ήταν το Excel MS, στο οποίο εισήχθησαν οι αναλυτικές σχέσεις που παρουσιάστηκαν παραπάνω.

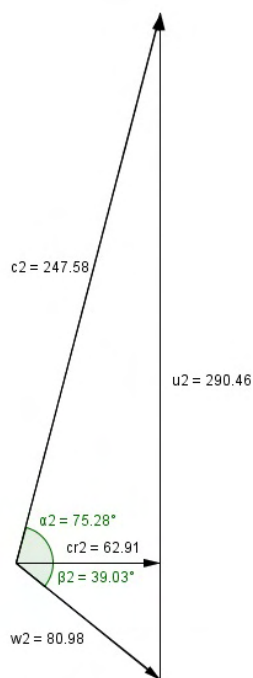
Στην Εικόνα 3-3 παρουσιάζονται τα υπολογισμένα τρίγωνα ταχυτήτων.



Εικόνα 3-3 Τρίγωνα ταχυτήτων εισόδου (hub, mean, shroud)

### 3.2.2 Τρίγωνο Ταχυτήτων Εξόδου

Στην Εικόνα 3-4 παρουσιάζεται το τρίγωνο ταχυτήτων της εξόδου του συμπιεστή.



Εικόνα 3-4 Τρίγωνο εξόδου του συμπιεστή

### 3.3 Προκαταρκτικός σχεδιασμός πτερυγίων με χρήση του Vista CCD

Για την επαλήθευση (validation) των αποτελεσμάτων του Excel που βασίστηκαν στις αναλυτικές σχέσεις που περιγράφηκαν παραπάνω, χρησιμοποιήθηκε το Vista CCD, το οποίο αποτελεί εξειδικευμένη συνιστώσα του ANSYS. Το Vista CCD χρησιμοποιείται για την διεξαγωγή Preliminary Design φυγοκεντρικών συμπιεστών. Ο χρήστης έχει την δυνατότητα είτε να μοντελοποιήσει έναν ήδη υπάρχοντα συμπιεστή (όπως έγινε στην περίπτωση της παρούσας εργασίας) είτε να κάνει μονοδιάστατο (1D) σχεδιασμό ενός καινούριου συμπιεστή.

Η διαδικασία περιλαμβάνει την εισαγωγή γεωμετρικών στοιχείων του συμπιεστή, καθώς και άλλα αεροθερμодυναμικά στοιχεία, για το σημείο λειτουργίας που υποτέθηκε εξαρχής. Πιο συγκεκριμένα, η εισαγωγή των δεδομένων χωρίζεται σε 3 τομείς ούτως ώστε το πρόγραμμα να είναι φιλικό προς τον χρήστη. Στον πρώτο τομέα εισάγεται το καθήκον του συμπιεστή καθώς και αεροδυναμικά δεδομένα, στον δεύτερο οι ιδιότητες του εργαζόμενου μέσου και στον τρίτο τομέα εισάγονται γεωμετρικά στοιχεία του συμπιεστή.

Από τη διαδικασία που ακολουθήθηκε στο πρόγραμμα Excel, προέκυψαν ως αποτελέσματα ο λόγος πίεσης, η μαζική παροχή, η ολική θερμοκρασία και η ολική πίεση στην είσοδο, καθώς και άλλα στοιχεία. Τα περισσότερα στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου για το πρόγραμμα Vista CCD, ούτως ώστε να υπάρξει επαλήθευση του preliminary design που διεξήχθη με το πρόγραμμα Excel. Πιο συγκεκριμένα, στις εικόνες 3-5, 3-6 και 3-8 φαίνονται τρία στάδια του προγράμματος Vista CCD τα οποία δείχνουν την είσοδο των δεδομένων που κάνει ο χρήστης.

### 3.3.1 Καθήκον και αεροδυναμικά δεδομένα

Αρχικώς, πρέπει να οριστεί το καθήκον του συμπιεστή. Το καθήκον του συμπιεστή περιλαμβάνει τον λόγο των πιέσεων, τη μαζική παροχή και την περιστροφική ταχύτητα. Ο λόγος πίεσης είναι 1.692, η μαζική παροχή είναι 0.2 kg/s ενώ ο ρότορας περιστρέφεται με 59000 rpm. Τα παραπάνω δεδομένα αποτελούν το σημείο λειτουργίας το οποίο έχει ήδη επιλεγθεί.

Στη συνέχεια υπάρχει το παράθυρο Inlet Stagnation Conditions. Η ολική θερμοκρασία εισόδου είναι 298.57K, ενώ η ολική πίεση στην είσοδο ισούται με 105687.149Pa.

Το παράθυρο Inlet Gas Angle αναφέρεται στην γωνία  $\alpha$  της ροής στην είσοδο του συμπιεστή. Ο χρήστης προσδιορίζει τη συγκεκριμένη γωνία στο μέσο της ακμής προσβολής. Ωστόσο, η γωνία μεγαλώνει από το hub στο shroud. Το μοντέλο το οποίο συμφωνεί με τα αποτελέσματα του προγράμματος Excel είναι το γραμμικό, με συντελεστή κλίσης της ευθείας 1.49.

Στο πλαίσιο Incidence at shroud ο χρήστης επιλέγει την γωνία πρόσπτωσης στο shroud (κέλυφος). Η τιμή που έχει δοθεί είναι 1.5 μοίρες και αποτελεί μια λογική εκτίμηση αυτού του μεγέθους.

Όσον αφορά στην ισεντροπική απόδοση του συμπιεστή, επιλέχθηκε να εισαχθεί η απόδοση που βρέθηκε από το πρόγραμμα Excel, δηλαδή  $\eta_{is} = 78.2\%$ . Η ισεντροπική απόδοση του ρότορα, όπως και ο παράγοντας έργου (power input factor), επιλέχθηκε να τα υπολογίσει το ίδιο το πρόγραμμα.

The screenshot displays the 'Duty and Aerodynamic Data' configuration window, which is divided into several sections:

- Duty:** Overall pressure ratio (1.692), Mass flow (0.2 kg/s), and Rotational speed (59000 rpm).
- Inlet stagnation conditions:** Temperature (298.57 K) and Pressure (105687.149 Pa).
- Inlet gas angle:** RMS angle (44.45 deg), Radial distribution (linear variation of Vw), and Vw ratio (1.49).
- Incidence at shroud:** User specify (1.5 deg) or Calculate from choke margin (0.9).
- Stage efficiency:** Correlation or User specify (Polytropic 0.83, Isentropic 0.782).
- Efficiency correlations:** Casey-Robinson, Reynolds number correction, and Tip clearance and shroud correction.
- Impeller isentropic efficiency:** Link to stage or User specify (0.862).
- Power input factor:** Correlation or User specify (1.04).
- Other aerodynamic data:** Merid. velocity gradient (1) and Relative velocity ratio (0.669).

Εικόνα 3-5 Καθήκον και αεροδυναμικά δεδομένα

### 3.3.2 Ιδιότητες εργαζόμενου μέσου

Στο παράθυρο Gas properties, το οποίο αναφέρεται στις ιδιότητες του εργαζόμενου μέσου, επιλέχθηκε ο αέρας, ο οποίος στη συγκεκριμένη περίπτωση θεωρείται ως ιδανικό αέριο. Στο σημείο αυτό θα ήταν χρήσιμο να αναφερθεί ότι το πρόγραμμα Vista CCD έχει δυνατότητα αντί αέρα, να χρησιμοποιήσει μία πληθώρα ρευστών ως εργαζόμενο μέσο. Πιο συγκεκριμένα, στην Εικόνα 3-7 φαίνονται όλα τα ρευστά τα οποία μπορεί ο χρήστης να επιλέξει.

The screenshot shows the 'Gas properties' dialog box with the following settings:

- Gas properties model: Ideal gas
- Select material: Air
- User specified properties:
  - Gas constant: 287,053 J/kg K
  - Gamma: 1,4
  - Viscosity: Sutherland (air)
  - $\mu$ : 1,789e-005 Pa s
  - $\nu$ : 1,480e-005 m<sup>2</sup>/s
  - Critical pressure: 3758000 Pa
  - Critical temperature: 132,3 K
  - Critical specific volume: 0,002857 m<sup>3</sup>/kg
  - Acentric factor: 0,033
- Cp polynomial coefficients:
  - Minimum temperature: 100 K
  - Maximum temperature: 1000 K
  - Equation:  $C_p = 1,161482e+003 + (-2,368819e+000)T + 1,485511e-002 T^2 + (-5,034909e-005) T^3 + 9,928569e-008 T^4 + (-1,111097e-010) T^5 + 6,540196e-014 T^6 + (-1,573588e-017) T^7$
  - Lower temperature range: 100 K to 1000 K
  - Upper temperature range: 1000 K to 1000 K

Εικόνα 3-6 Ιδιότητες εργαζόμενου μέσου

Σε περίπτωση που ο χρήστης θέλει να χρησιμοποιήσει ένα ρευστό το οποίο δεν υπάρχει στην βιβλιοθήκη του προγράμματος, υπάρχει η επιλογή της εισαγωγής ενός νέου ρευστού, εάν επιλέξει Specify properties. Επιλέγοντας το specify properties, ο χρήστης πρέπει να καταχωρήσει στο πρόγραμμα τις βασικές ιδιότητες του ρευστού που επιθυμεί να χρησιμοποιήσει. Οι ιδιότητες που πρέπει να καταχωρήσει ο χρήστης βρίσκονται στην Εικόνα 3-6 στο παράθυρο "User specified properties".

Duty and Aerodynamic Data      Gas properties      Geometry      Results

Gas properties model: Real gas

Select material: Air       Specify properties

User specified properties:

Gas constant: 28  
Gamma: 1.4  
Viscosity:  $\mu$  1,  $\nu$  1

Material list: Air, CarbonDioxide, Hydrogen, Methane, Nitrogen, Oxygen, Parahydrogen, Propylene, R123, R125, R134a, R141b, R142b, R245fa, Water

Critical pressure: 3758000 Pa  
Critical temperature: 132.3 K  
Critical specific volume: 0,002857 m<sup>3</sup>/kg  
Acentric factor: 0,033

Temperature polynomial coefficients:

Minimum temperature: 100 K      Maximum temperature: 1000 K

$= 1,161482e+003 + -2,368819e+000 T + 1,485511e-002 T^2 + -5,034909e-005 T^3$

Εικόνα 3-7 Ρευστά τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση ενός συμπιεστή

### 3.3.3 Εισαγωγή γεωμετρικών στοιχείων

Duty and Aerodynamic Data      Gas properties      Geometry      Results

**Inducer**

**Hub**  
Diameter: 22,54 mm  
 Vane inlet angle: 35 deg  
 Beta from tan  
 Beta from sin  
Vane normal thickness: 1 mm

**Shroud**  
Diameter calc: Specify diameter  
Diameter: 62,56 mm  
Vane inlet angle: 60 deg  
Vane normal thickness: 0,5 mm

**Leading edge**  
Location on shroud: 0 %M  
 Normal to hub  
Angle of inclination: 0 deg

**Diffuser**  
 Vaned       Vaneless

**Impeller shroud and clearance geometry**  
 Unshrouded       Shrouded

**Axial tip clearance**  
 Tip clearance/vane height: 0,02  
 Tip clearance: 0 mm

**Axial length ratio**  
 Automatic       User specify: 0,39

**Other impeller geometry**  
Main vanes: 6  
Intervanes: 6  
Backsweep angle: 0 deg  
Rake angle: 0 deg  
Vane roughness: Machined finish

Εικόνα 3-8 Δεδομένα Γεωμετρίας

Το τελευταίο παράθυρο για εισαγωγή δεδομένων είναι αυτό της γεωμετρίας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-8. Στο πρώτο πλαίσιο, που ονομάζεται hub, ορίζεται η διάμετρος στην είσοδο του συμπιεστή, η γωνία  $\beta$  των πτερυγίων, καθώς και το πάχος των πτερυγίων στη θέση του hub.

Το δεύτερο πλαίσιο ονομάζεται shroud και ορίζεται η διάμετρος του κελύφους, το πάχος των πτερυγίων στο κέλυφος.

Το τρίτο πλαίσιο ονομάζεται Leading Edge (ακμή προσβολής). Σε αυτό το πλαίσιο υπάρχει η επιλογή Location on shroud, η οποία εκφράζει το που ξεκινάει η ακμή φυγής στον ρότορα, ως ποσοστό επί τις εκατό του μεσημβρινού μήκους κατά μήκος του κελύφους (shroud).

Το τέταρτο πλαίσιο αφορά στον διαχύτη, όπου επιλέγεται ένας διαχύτης χωρίς πτερύγια.

Στο πέμπτο πλαίσιο (impeller shroud and clearance geometry) επιλέγουμε έναν ρότορα ο οποίος δεν έχει κέλυφος (unshrouded) και ορίζεται η απόσταση μεταξύ του ρότορα και του σταθερού κελύφους.

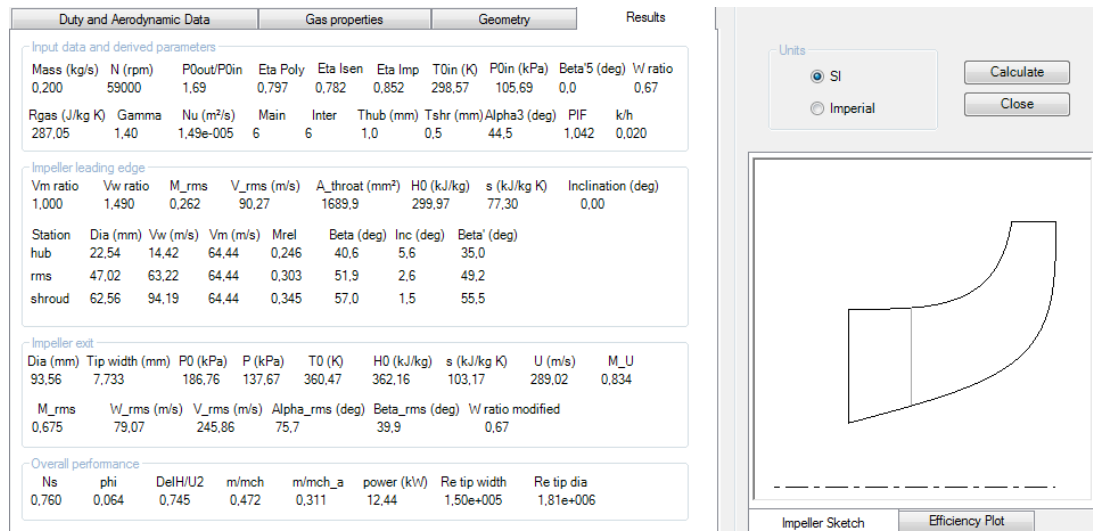
Στο έκτο πλαίσιο (Axial Length Ratio) ορίζεται ο λόγος  $L/D$ , όπου  $L$ : το μήκος του συμπιεστή κατά την διεύθυνση του άξονά του και  $D$ : η διάμετρος του ρότορα.

Στο τελευταίο πλαίσιο, το οποίο ονομάζεται Other impeller Geometry, εισάγεται ο αριθμός των Main Vanes (κυρίως πτερύγια) και ο αριθμός των Intervanes. Επίσης ορίζεται το backsweep angle, δηλαδή η γωνία  $\beta$  των πτερυγίων στην έξοδο του ρότορα. Τέλος, στο vane roughness επιλέγεται εάν έχει γίνει κάποια επιφανειακή κατεργασία στον ρότορα ή εάν η επιφάνεια του είναι ακατέργαστη.

### 3.3.4 Αποτελέσματα

Τελευταίο παράθυρο είναι αυτό των αποτελεσμάτων. Μία πρώτη άποψη για το σχήμα και την μορφή των πτερυγίων του συμπιεστή παίρνουμε από το σκαρίφημα που περιέχει τον διδιάστατο σχεδιασμό των πτερυγίων. Στο αριστερό του μέρος, το συγκεκριμένο παράθυρο χωρίζεται σε τέσσερα πλαίσια, ούτως ώστε να είναι πιο ευανάγνωστα τα αποτελέσματα. Τα τέσσερα πλαίσια είναι τα ακόλουθα:

- Input data and derived parameters
- Impeller leading edge
- Impeller exit
- Overall performance



Εικόνα 3-9 Αποτελέσματα

### 3.3.4.1 1ο Πλαίσιο: Παράμετροι εισόδου και εξόδου (Input data and derived parameters)

Σε αυτό το πλαίσιο γίνεται μια σύνοψη των πιο σημαντικών παραμέτρων που έχουν προηγουμένως εισαχθεί. Στους παρακάτω πίνακες (3-3, 3-4, 3-5, 3-6) υπάρχει επεξήγηση για το όνομα της κάθε παραμέτρου καθώς και οι μονάδες που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα.

Πίνακας 3-3 Παράμετροι εισόδου και εξόδου (ANSYS Vista CCD)

Συνοτομογραφία	Παράμετρος	Μονάδες
<i>Mass</i>	Μαζική Παροχή	<i>Kg/s</i>
<i>N</i>	Περιστροφική ταχύτητα	<i>rpm</i>
<i>P0out/P0in</i>	Λόγος των ολικών πιέσεων	-
<i>Eta Poly</i>	Πολυτροπικός Βαθμός Απόδοσης του συμπιεστή	-
<i>Eta Isen</i>	Ισεντροπικός Βαθμός Απόδοσης του συμπιεστή	-
<i>T0in</i>	Ολική Θερμοκρασία Εισόδου	<i>K</i>
<i>P0in</i>	Ολική Πίεση Εισόδου	<i>kPa</i>
<i>Beta'5</i>	Γωνία β στην έξοδο (Backsweep Angle)	<i>deg</i>
<i>W ratio</i>	Λόγος των σχετικών ταχυτήτων: $\frac{v_w(rms)}{v_w(shroud)}$	-
<i>Rgas</i>	Σταθερά των αερίων	<i>J/(kg · K)</i>
<i>Gamma</i>	Λόγος των ειδικών θερμοτήτων	-
<i>Nu</i>	Κινηματικό Ιξώδες	<i>m<sup>2</sup>/s</i>
<i>Main</i>	Αριθμός των κύριων πτερυγίων	-
<i>Inter</i>	Αριθμός των Βοηθητικών Πτερυγίων	-
<i>Thub</i>	Πάχος του ρότορα στο hub	<i>mm</i>
<i>Tshr</i>	Πάχος του ρότορα στο shroud	<i>mm</i>



$\alpha$	Γωνία α της ροής στην είσοδο	<i>deg</i>
$PIF$	Παράγοντας έργου	-
$k/h$	Λόγος του διάκενου στο ακροπτερύγιο προς το ύψος των πτερυγίων στην έξοδο	-

### 3.3.4.2 2<sup>ο</sup> Πλαίσιο: Ακμή προσβολής ρότορα (Impeller Leading Edge)

Στο συγκεκριμένο πλαίσιο προβάλλονται τα κυριότερα αεροδυναμικά και γεωμετρικά στοιχεία σε τρία σημεία της ακτίνας στην είσοδο του ρότορα: Στη βάση (hub), στην μέση (RMS) και στο κέλυφος (shroud).

Πίνακας 3-4 Πλευρά προσβολής ρότορα (ANSYS Vista CCD)

Συνομογραφία	Παράμετρος	Μονάδες
$V_m$ ratio	Λόγος των ταχυτήτων κατά την μεσημβρινή διεύθυνση στην είσοδο του ρότορα	-
$M_{rms}$	Μέσος αριθμός Mach στην είσοδο του συμπιεστή	-
$V_{rms}$	Μέση απόλυτη ταχύτητα στην είσοδο του συμπιεστή	<i>m/s</i>
$A_{throat}$	Επιφάνεια κάθετη στη ροή, στην είσοδο του συμπιεστή	<i>mm<sup>2</sup></i>
$H_0$	Ολική Ενθαλπία στην είσοδο του συμπιεστή	<i>kJ/kg</i>
$s$	Ειδική εντροπία στην είσοδο του συμπιεστή	<i>kJ/kg · K</i>
<i>Inclination</i>	Γωνία κλίσης της ακμής προσβολής	<i>deg</i>
<i>Dia</i>	Διάμετρος	<i>mm</i>
$V_m$	Ταχύτητα κατά την μεσημβρινή διεύθυνση	<i>m/s</i>
$M_{rel}$	Σχετικός Αριθμός Mach	-
$\beta$	Σχετική γωνία της ροής	<i>deg</i>
$\beta_{inc}$	Γωνία πρόσπτωσης	<i>deg</i>
$\beta'$	Γωνία β του πτερυγίου	<i>deg</i>

### 3.3.4.3 3<sup>ο</sup> Πλαίσιο: Έξοδος ρότορα (Impeller exit)

Στο συγκεκριμένο πλαίσιο προβάλλονται τα κυριότερα αεροδυναμικά και γεωμετρικά στοιχεία στην έξοδο του ρότορα.

Πίνακας 3-5 Έξοδος ρότορα (ANSYS Vista CCD)

Συνομογραφία	Παράμετρος	Μονάδες
<i>Dia</i>	Διάμετρος	<i>mm</i>
<i>Tip width</i>	Απόσταση μεταξύ της βάσης και του κελύφους στην έξοδο του ρότορα	<i>mm</i>

$P_0$	Ολική Πίεση στην έξοδο του ρότορα	$kPa$
$P$	Στατική Πίεση στην έξοδο του ρότορα	$kPa$
$T_0$	Ολική θερμοκρασία στην έξοδο του ρότορα	$K$
$H_0$	Ολική ενθαλπία στην έξοδο του ρότορα	$kJ/kg$
$S$	Ειδική εντροπία στην έξοδο του ρότορα	$kJ/(kg \cdot K)$
$U$	Περιφερειακή ταχύτητα πτερυγίου στην έξοδο του ρότορα	$m/s$
$M_U$	Αριθμός Mach των πτερυγίων στην έξοδο του ρότορα	-
$M_{rms}$	Αριθμός Mach στην έξοδο του ρότορα	-
$V_{rms}$	Μέση απόλυτη ταχύτητα στην έξοδο του ρότορα	$m/s$
$W_{rms}$	Μέση σχετική ταχύτητα στην έξοδο του ρότορα	$m/s$
$Alpha_{rms}$	Μέση απόλυτη γωνία $\alpha$ στην έξοδο του ρότορα	$deg$
$Beta_{rms}$	Μέση σχετική γωνία $\beta$ στην έξοδο του ρότορα	$deg$

#### 3.3.4.4 4<sup>ο</sup> Πλαίσιο: Συνολική Απόδοση

Στο συγκεκριμένο πλαίσιο υπάρχουν στοιχεία για τον συμπίεστή τα οποία είναι γενικοί δείκτες της συνολικής απόδοσης.

Πίνακας 3-6 Συνολική απόδοση (ANSYS Vista CCD)

Συνομογραφία	Παράμετρος	Μονάδες
$N_s$	Αδιάστατη ειδική ταχύτητα, η οποία δίνεται από τον τύπο $N_s = \omega \cdot \frac{Q^{1/2}}{\Delta h^{3/4}}$ , όπου $\omega$ είναι η περιστροφική ταχύτητα, $Q$ είναι η ογκομετρική παροχή και $\Delta h$ είναι η διαφορά πίεσης ανάμεσα στην είσοδο και την έξοδο, εκπεφρασμένη σε m στήλης νερού	-
$\Phi$	Συντελεστής ροής	-
$DelH/U2$	Συντελεστής φόρτισης	-
$m/mch$	Choke ratio	-
$m/mch_a$	Annulus choke ratio	-
$power$	Ισχύς του συμπίεστή	$kW$
$Re\ tip\ width$	Αριθμός Reynolds χρησιμοποιώντας ως χαρακτηριστικό μήκος το στοιχείο Tip width	-
$Re\ tip\ dia$	Αριθμός Reynolds χρησιμοποιώντας ως χαρακτηριστικό μήκος τη διάμετρο του συμπίεστή στην έξοδο	-

### 3.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων Excel και CCD

Στους παρακάτω πίνακες (3-7, 3-8, 3-9) γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που πάρθηκαν από τα δύο προγράμματα, το Vista CCD και το Microsoft Excel. Για να είναι πιο ευανάγνωστοι οι πίνακες και οι συγκρίσεις να είναι πιο άμεσες, για κάθε παράμετρο των πινάκων, υπάρχει το σύμβολό της, η τιμή η οποία ελήφθη από το πρόγραμμα Excel, η τιμή η οποία ελήφθη από το πρόγραμμα Vista CCD, οι μονάδες μέτρησης της παραμέτρου, καθώς και η απόκλιση μεταξύ των τιμών του Excel και του Vista CCD. Κάποια στοιχεία του πίνακα είναι κενά, καθώς δεν υπήρχε δυνατότητα υπολογισμού τους με το πρόγραμμα Vista CCD.

Πίνακας 3-7 Γεωμετρία

Παράμετρος	Σύμβολο	Excel	CCD Software	Μονάδες Μέτρησης	Απόκλιση %
Διάμετρος	$D$	0.094	0.09356	$m$	-0.468
Εύρος καναλιού στην Έξοδο	$t$	0.007	0.00773	$m$	+10.429
Ακτίνα Εισόδου (hub)	$R1hub$	0.011	0.01127	$m$	+2.455
Ακτίνα Εισόδου (tip)	$R1tip$	0.031	0.03128	$m$	+0.903
Διατομή Εισόδου	$A1$	0.0026731	0.0026735	$m^2$	+0.015
Διατομή Εξόδου	$A2$	0.00184	0.00216	$m^2$	+17.391
Απόλυτη γωνία ροής (έξοδος)	$\alpha 2$	77.78	75.7	$deg$	-2.674
Σχετική γωνία εξόδου	$\beta 2$	39.03	39.9	$deg$	+2.229

Πίνακας 3-8 Ταχύτητες

Παράμετρος	Σύμβολο	Excel	CCD Software	Μονάδες Μέτρησης	Απόκλιση %
Εφαπτομενική ταχύτητα ρότορα στην είσοδο (mean)	$u_1$	131.46		$m/s$	
Σχετική ταχύτητα στην είσοδο (mean)	$w_1$	94.12		$m/s$	
Απόλυτη ταχύτητα στην είσοδο (mean)	$c_1$	84.76	90.27	$m/s$	+6.503

Εφαπτομενική ταχύτητα ρότορα στην έξοδο	$u_2$	290.39	289.02	$m/s$	-0.471
Σχετική ταχύτητα στην έξοδο	$w_2$	80.98	79.07	$m/s$	-2.347
Απόλυτη ταχύτητα στην έξοδο	$c_2$	247.52	245.86	$m/s$	-0.669

Πίνακας 3-9 Αδιάστατα Μεγέθη

Παράμετρος	Σύμβολο	Excel	CCD software	Απόκλιση (%)
Συντελεστής Ροής	$\phi$	0.08	0.064	-20.252
Συντελεστής Φόρτισης	$\psi$	0.738	0.745	+0.975
Απόλυτος αριθμός Mach στην είσοδο (mean)	$M_{c1,m}$	0.24	0.262	+7.066
Περιστροφικός αριθμός Mach στην είσοδο (mean)	$M_{u1,m}$	0.38		
Σχετικός αριθμός Mach στην είσοδο (mean)	$M_{rel1,m}$	0.27	0.303	+11.5
Απόλυτος αριθμός Mach στην έξοδο	$M_{c2}$	0.65	0.675	+3.941
Περιστροφικός αριθμός Mach στην έξοδο	$M_{u2}$	0.76	0.834	+9.303
Σχετικός αριθμός Mach στην έξοδο	$M_{rel2}$	0.21		

### 3.5 Συμπεράσματα από τον προκαταρκτικό σχεδιασμό

Όπως μπορεί να παρατηρήσει κάποιος, σε καίρια σημεία του προκαταρκτικού σχεδιασμού υπήρξε αρκετά ικανοποιητική σύγκλιση των αποτελεσμάτων μεταξύ του προγράμματος Excel και του προγράμματος Vista CCD.

Πιο συγκεκριμένα, από τα γεωμετρικά στοιχεία του συμπιεστή, είναι σημαντικό που η διατομή εξόδου που βρέθηκε από το Vista CCD έχει απόκλιση μικρότερη από 0.5% σε σχέση με την διατομή που ορίστηκε στο πρόγραμμα Excel. Αντιθέτως, μεγαλύτερη απόκλιση στα

αποτελέσματα των δύο προγραμμάτων παρατηρείται στην διατομή εξόδου (17.39%), λόγω του γεγονότος ότι στο Vista CCD ο συμπιεστής βρέθηκε να έχει μεγαλύτερο εύρος καναλιού.

Όσον αφορά τις ταχύτητες, αξιοσημείωτο είναι ότι τα δύο προγράμματα είχαν απόκλιση μικρότερη του 1% στην απόλυτη ταχύτητα στην έξοδο ( $c_2$ ), ενώ η μεγαλύτερη απόκλιση ήταν στην απόλυτη ταχύτητα στην είσοδο ( $c_1$ ), της τάξης του 6.5%.

Τέλος, στα αδιάστατα μεγέθη, η μεγαλύτερη σύγκλιση ανάμεσα στα δύο προγράμματα παρατηρήθηκε στον συντελεστή φόρτισης  $\Psi$ , όπου είχαν διαφορά μικρότερη του 1%, ενώ ο συντελεστής ροής  $\Phi$  είχε την μεγαλύτερη απόκλιση, καθώς ήταν 20% μικρότερος στο Vista CCD από το Excel.

Οι παραπάνω αποκλίσεις μπορεί να οφείλονται σε διάφορους παράγοντες. Αρχικά, δεν υπήρχαν τα ακριβή δεδομένα για την γεωμετρία του συμπιεστή και αυτό οδήγησε σε υποθέσεις οι οποίες είχαν απόκλιση από την πραγματικότητα. Ωστόσο, οι αποκλίσεις μπορεί να οφείλονται και σε διαφορετικές εξισώσεις τις οποίες μπορεί να χρησιμοποιεί στο παρασκήνιο το πρόγραμμα Vista CCD σε σχέση με τις εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα Excel.

## 4 ΛΕΠΤΟΜΕΡΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ (ANSYS TURBOGRID)

Απαραίτητη προϋπόθεση για την ανάλυση της ροής στα πτερύγια του συμπιεστή, είναι η δημιουργία ενός τριδιάστατου πλέγματος στον όγκο ελέγχου του ρότορα. Η «ποιότητα» του πλέγματος είναι ένα ζήτημα που απαιτεί σημαντικό χρόνο και προσοχή, καθώς αποτελεί έναν πολύ ευαίσθητο παράγοντα όσον αφορά την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, αλλά ακόμα και το χρόνο σύγκλισης. Συνεπώς, ένα μη ικανοποιητικά τοποθετημένο πλέγμα μπορεί να έχει ως απόρροια μη ασφαλή αποτελέσματα, μεγάλο χρόνο σύγκλισης ή ακόμα και καθόλου σύγκλιση.

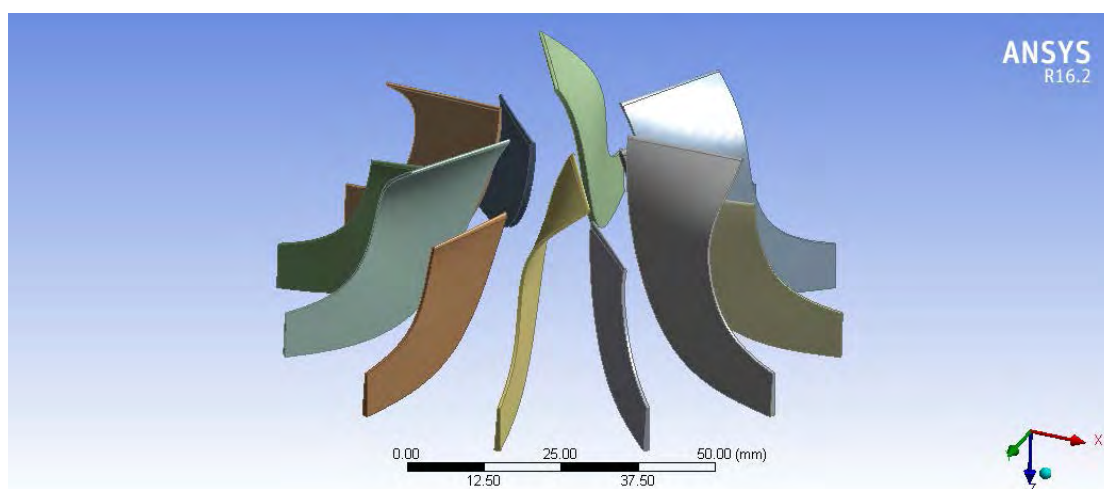
Έτσι με τη βοήθεια του Ansys TurboGrid είναι κανείς σε θέση να δημιουργήσει ένα υψηλής «ποιότητας» εξαεδρικό πλέγμα, πάνω στην ήδη γνωστή γεωμετρία του ρότορα, όπως αυτή έχει προκύψει από το Ansys Blade Modeler, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλύσει πολύπλοκα προβλήματα ροής στον τομέα των στροβιλομηχανών.

### 4.1 Εισαγωγή γεωμετρίας

Τα αποτελέσματα του αρχικού σχεδιασμού που πραγματοποιήθηκε στο ANSYS Vista CCD εισάγονται αυτόματα στο Blade Editor. Το Blade Editor που αποτελεί ένα μέρος του Blade Modeler, χρησιμοποιεί συγκεκριμένες δυνατότητες του σχετικές με τον τομέα των στροβιλομηχανών. Επίσης το Blade Modeler παρέχει πρόσβαση στο Design Modeler, ένα εργαλείο μοντελοποίησης CAD γεωμετριών, έχοντας ως σκοπό τη δημιουργία, τροποποίηση και προσομοίωση τριδιάστατων γεωμετριών.

#### 4.1.1 Blade Editor

Το Blade Editor (ANSYS Design Modeler) παράγει αυτόματα ένα ολοκληρωμένο τριδιάστατο CAD μοντέλο της γεωμετρίας των πτερυγίων, ώστε αυτά να υπακούν στα αποτελέσματα του αρχικού σχεδιασμού του Vista CCD. Η τριδιάστατη γεωμετρία φαίνεται στην Εικόνα 4-1.



Εικόνα 4-1 Blade Editor - 3D CAD Blade Geometry

Τα εργαλεία του Design Modeler δίνουν την δυνατότητα στο χρήστη να καθορίσει και να μεταβάλλει τα χαρακτηριστικά της γεωμετρίας των πτερυγίων. Για παράδειγμα, με τον κατάλληλο χειρισμό ενός συνόλου σημείων ελέγχου (control points), μπορεί να μεταβληθεί η κατανομή της γωνίας των πτερυγίων (blade angle) και το πάχος τους (blade thickness) κατά μήκος της μέσης γραμμής κυρτότητας (mean camberline), ξεκινώντας από την ακμή προσβολής (leading edge) και καταλήγοντας στην ακμή φυγής (trailing edge) του πτερυγίου. Η διαδικασία αυτή μπορεί να επαναληφθεί σε όλο το εύρος του πτερυγίου από το hub έως το shroud (spanwise). Έτσι είναι δυνατός ο πλήρης και ευέλικτος χειρισμός της γεωμετρίας του τριδιάστατου πτερυγίου.

Όπως θα αναφερθεί και στις ενότητες 4.2.1.2 και 4.2.1.3, η γεωμετρία των πτερυγίων, του hub και του shroud του ρότορα μεταφέρεται αυτόματα στο ANSYS TurboGrid με τη μορφή καμπυλών (curve files). Αυτές οι καμπύλες μπορούν να εξαχθούν χειροκίνητα από το ANSYS Design Modeler μέσω της επιλογής “ExportPoints”.

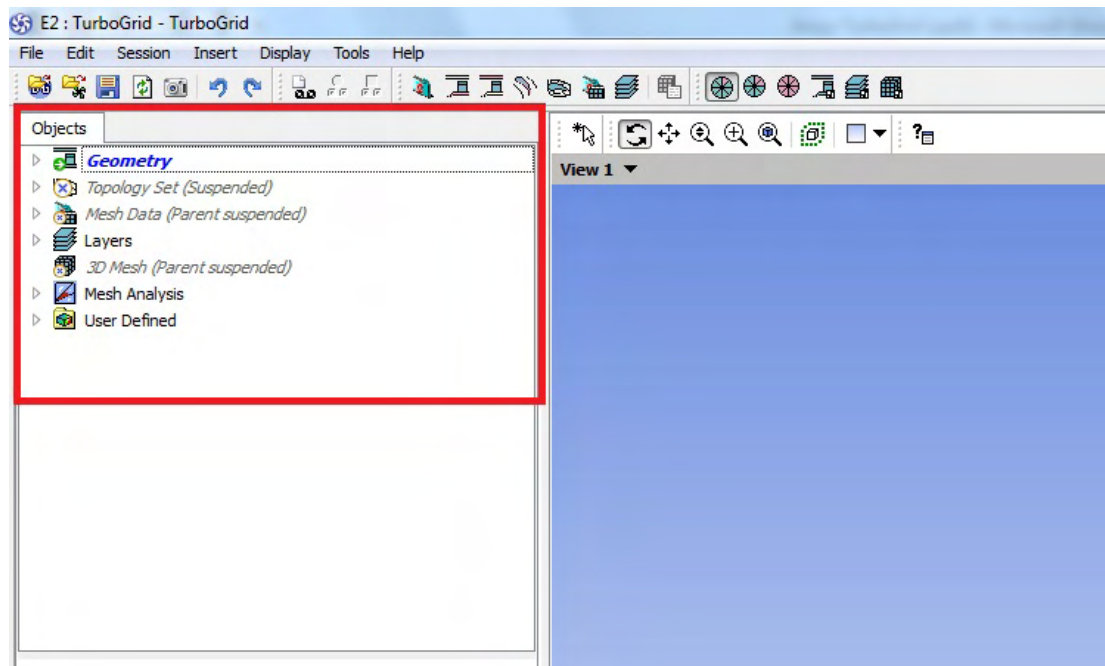
Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας η γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε για την πλεγματοποίηση είναι η ίδια με αυτή που εξήχθη αυτόματα από το Design Modeler χωρίς περαιτέρω αλλαγές της γεωμετρίας.

## 4.2 Δημιουργία Πλέγματος

Η δημιουργία του πλέγματος αποτελείται από τα επόμενα βήματα [3]:

- Προσδιορισμός γεωμετρίας (Geometry Object)
- Προσδιορισμός της τοπολογίας (Topology Set Object)
- Εισαγωγή παραμέτρων πλέγματος (Mesh Data Object)
- Τροποποίηση των επιλογών του Layers για βελτίωση του πλέγματος (Layers Object)
- Εξαγωγή πλέγματος (3D Mesh Object - Mesh Generation)
- Έλεγχος για τυχόν σφάλματα στο πλέγμα (Mesh Analysis Object)
- Διόρθωση σφαλμάτων

Τα βήματα που αναφέρθηκαν προηγουμένως παρουσιάζονται αναλυτικότερα στη συνέχεια. Οι αντίστοιχες δυνατότητες, όπως αυτές εμφανίζονται στο Ansys TurboGrid, φαίνονται στην Εικόνα 4-2 μέσα στο κόκκινο περίγραμμα.



Εικόνα 4-2 Περιβάλλον Ansys TurboGrid

## 4.2.1 Προσδιορισμός γεωμετρίας (Geometry Object)

Η ενότητα της γεωμετρίας χωρίζεται στις επόμενες υποενότητες ως εξής:

- Machine Data
- Hub & Shroud
- Blade Set
- Low & High Periodic
- Inlet & Outlet
- Outline

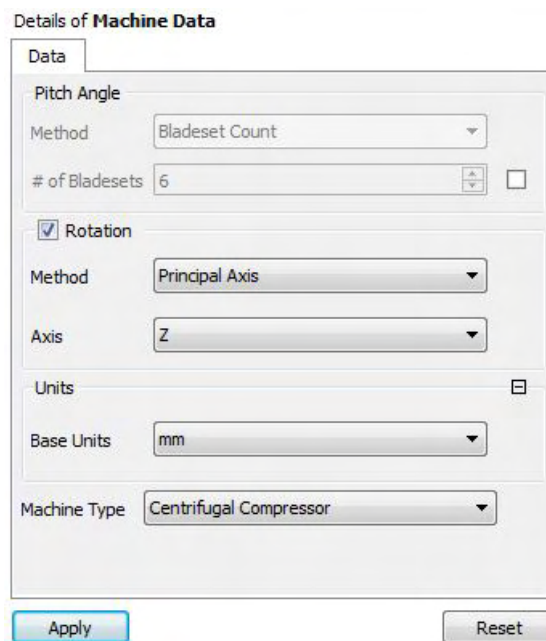
### 4.2.1.1 Machine Data Object

Αυτή η υποενότητα περιέχει γεωμετρικά στοιχεία τα οποία εφαρμόζονται σε ολόκληρο το συμπιεστή, όπως για παράδειγμα τη θέση του άξονα περιστροφής ή τον τύπο της στροβιλομηχανής. Η τελευταία επιλογή δίνει τη δυνατότητα στο TurboGrid να επιλέξει την κατάλληλη διάταξη του πλέγματος γύρω από το πτερύγιο καθ' όλο το εύρος του.

Είναι πολύ σημαντικό να προσδιοριστούν οι μονάδες μέτρησης ανάλογα με την κλίμακα της στροβιλομηχανής. Αν για παράδειγμα οι μονάδες είναι σε (mm), ενώ η διάμετρος της υπό εξέταση στροβιλομηχανής είναι της τάξης των 10m, τότε παραβιάζεται το εύρος των αριθμών που μπορούν να αποθηκευτούν. Το εύρος αυτό είναι μεταξύ των αριθμών 1 και 500.

Στην Εικόνα 4-3 απεικονίζεται η υποενότητα Machine Data με τις ρυθμίσεις που επιλέχθηκαν για το συμπιεστή.





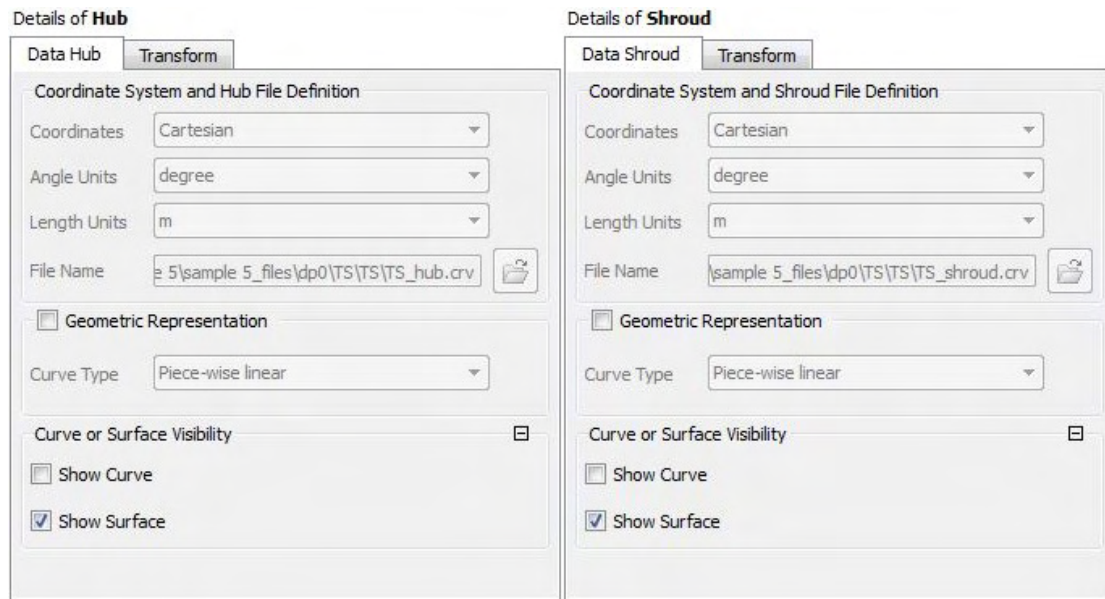
Εικόνα 4-3 Geometry Object - Machine Data

#### 4.2.1.2 Hub & Shroud Objects

Τα γεωμετρικά δεδομένα του συμπιεστή (hub, shroud, main blade, splitter blade) στα πλαίσια της παρούσας εργασίας εισάγονται αυτόματα στο Ansys TurboGrid μέσω του Ansys BladeModeler με τη μορφή καμπυλών (curve files). Αυτές οι καμπύλες αποτελούνται από ένα πλήθος σημείων και η απεικόνιση των καμπυλών μπορεί να γίνει με δύο διαφορετικούς τρόπους. Όπως αποδεικνύεται και οι δύο μέθοδοι λειτουργούν το ίδιο ικανοποιητικά στην περίπτωση του φυγοκεντρικού συμπιεστή, οπότε η αλλαγή της από την προεπιλεγμένη τιμή (Bspline) έχει μικρή σημασία [2]. Παρόλα αυτά, υπάρχει η δυνατότητα αλλαγής της μεθόδου της γεωμετρικής απεικόνισης των hub και shroud. Αυτές οι μέθοδοι είναι οι επόμενες:

- Bspline, η μέθοδος αυτή που είναι και η προεπιλεγμένη από το Ansys TurboGrid, δημιουργεί την καμπύλη (curve) ενώνοντας τα σημεία με μια ομαλά αναπτυσσόμενη γραμμή.
- Piece-Wise Linear, η μέθοδος σε αντιδιαστολή με την προηγούμενη, ενώνει κάθε σημείο με το επόμενο του με ευθεία γραμμή. Η συγκεκριμένη μέθοδος θα πρέπει να αποφεύγεται στην περίπτωση που η καμπύλη αποτελείται από πολύ λίγα σημεία.

Στην υποενότητα αυτήν δίνεται επίσης η δυνατότητα εμφάνισης ή απόκρυψης της καμπύλης και της αντίστοιχης επιφάνειας, αλλά και αλλαγής του προσανατολισμού των στοιχείων (Transform Tab). Όλα τα προαναφερθέντα απεικονίζονται στην Εικόνα 4-4.



Εικόνα 4-4 Geometry Object - Hub/Shroud

#### 4.2.1.3 Blade Set Object

Η γεωμετρική απεικόνιση των επιφανειών των δύο πτερυγίων (main/splitter blade) γίνεται αυτόματα από το Ansys TurboGrid χρησιμοποιώντας μία διαδικασία δύο βημάτων. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει τα εξής:

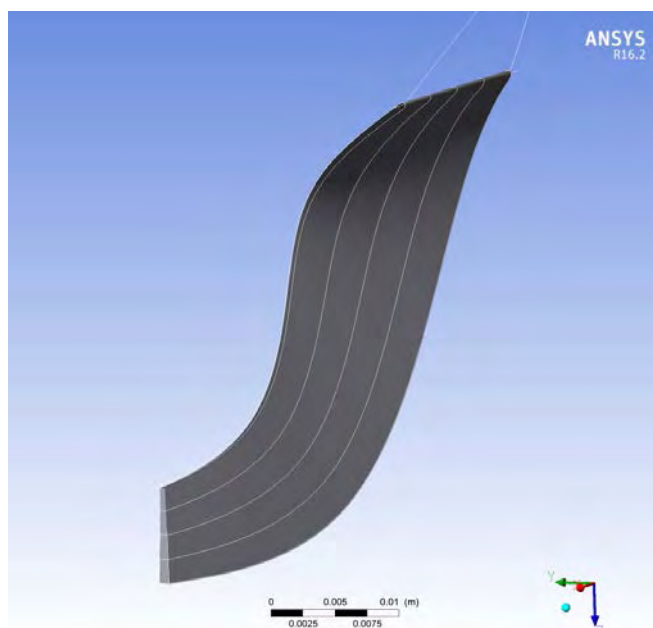
- Δημιουργία των καμπυλών (curves) των πτερυγίων, οι οποίες έχουν εξαχθεί αυτόματα από το Ansys BladeModeler με τη λειτουργία ExportPoints.
- Κατασκευή των επιφανειών (faces) με σάρωση όλων των καμπυλών.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι καμπύλες αποτελούνται από ένα σύνολο σημείων. Για την καλύτερη κατανόηση της μεθόδου με την οποία κατασκευάζεται η επιφάνεια του πτερυγίου, παρατίθεται η Εικόνα 4-5 που απεικονίζει την επιφάνεια του κύριου πτερυγίου (Main Blade), καθώς και τις καμπύλες που το διατρέχουν.

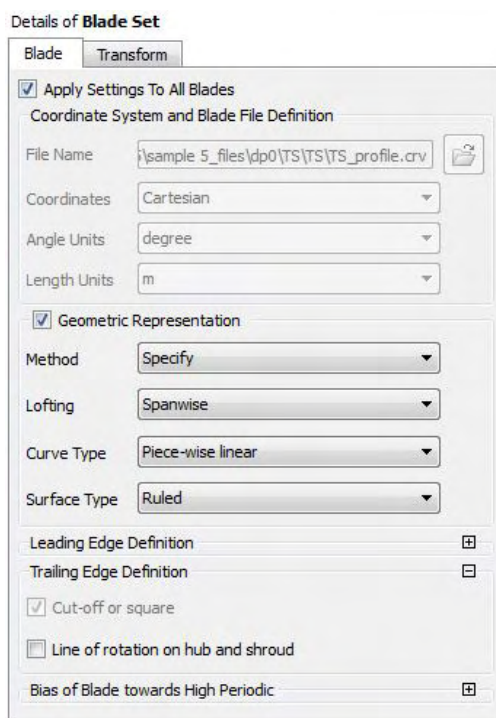
Στην υποενότητα αυτήν και συγκεκριμένα στην καρτέλα “Blade” (Εικόνα 4-6), ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει τη μέθοδο με την οποία πραγματοποιείται η γεωμετρική απεικόνιση του πτερυγίου, είτε και στα δύο πτερύγια ταυτόχρονα, είτε στο καθένα ξεχωριστά. Για την παρούσα εργασία επιλέχθηκε ο ταυτόχρονος καθορισμός, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-6. Οι επιλογές που είναι διαθέσιμες, είναι οι εξής:

- **Method**, όπου πέραν των δύο προκαθορισμένων επιλογών (BladeModeler, Flank Milled), υπάρχει και η δυνατότητα “specify”, που δίνει την ελευθερία στον χρήστη να καθορίσει ανεξάρτητα τις επιλογές Lofting, Curve Type και Surface Type.

Με την επιλογή BladeModeler ορίζονται αυτόματα τα Lofting, Curve Type και Surface Type στις τιμές Spanwise, Bspline και Ruled αντίστοιχα, ενώ με την επιλογή Flank Milled, στις τιμές Streamwise, Piece-wise Linear και Ruled αντίστοιχα. Στη συνέχεια περιγράφονται αναλυτικά οι μέθοδοι απεικόνισης.



Εικόνα 4-5 Γεωμετρική απεικόνιση κύριου περυγίου

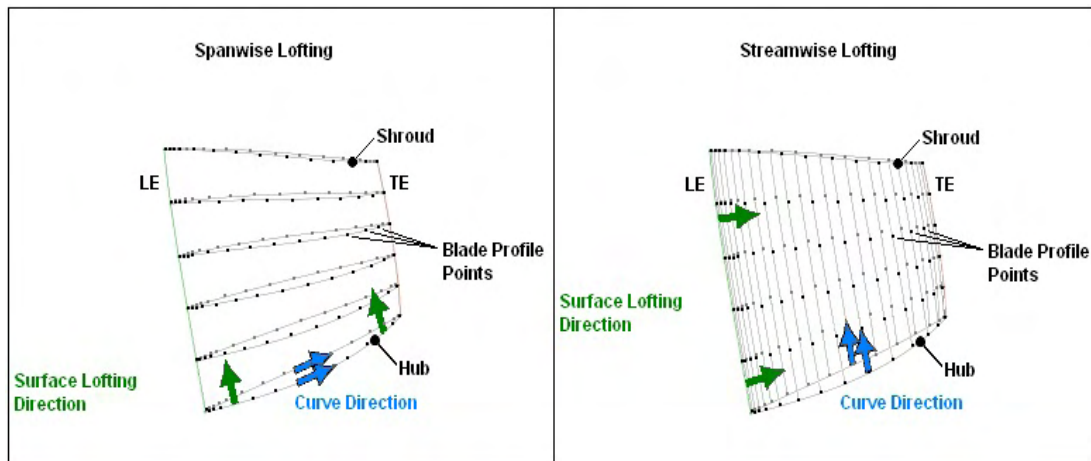


Εικόνα 4-6 Geometry Object - Blade Set – Blade Tab

- **Lofting**, που περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο το Ansys TurboGrid σαρώνει τις καμπύλες πάνω στο περύγιο ή πιο συγκεκριμένα την κατεύθυνση κατά την οποία σαρώνει. Οι διαθέσιμες επιλογές είναι οι εξής:

- Streamwise, όπου η σάρωση συμβαίνει κατά την κατεύθυνση της ροής του αέρα.
- Spanwise, όπου η σάρωση συμβαίνει κατά το εύρος του πτερυγίου, δηλαδή ξεκινώντας από το hub και καταλήγοντας στο shroud.

Στην Εικόνα 4-7 παρουσιάζεται γραφικά η διαφορά ανάμεσα στις δύο μεθόδους σάρωσης (Lofting).



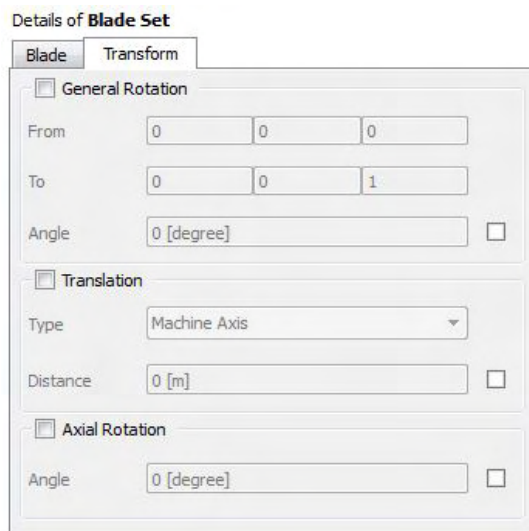
Εικόνα 4-7 Διαφορές μεθόδων Lofting

- **Curve Type**, που περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο κατασκευάζονται οι καμπύλες των πτερυγίων (curves) μέσα από ένα πλήθος σημείων (εκφρασμένα στο γνωστό σύστημα συντεταγμένων). Οι δυνατές επιλογές, όπως αυτές περιεγράφηκαν και προηγουμένως στην υποενότητα Hub & Shroud, είναι οι Piece-wise linear και Bspline.
- **Surface Type**, που περιγράφει τον τρόπο με τον οποίον σαρώνεται το πλήθος των καμπυλών, ώστε να δημιουργηθούν οι επιφάνειες των πτερυγίων. Οι δυνατές επιλογές, είναι:
  - Ruled, όπου η επιφάνεια δημιουργείται σαρώνοντας τις καμπύλες με τέτοιο τρόπο, ώστε κάθε σημείο της καμπύλης να ενώνεται με το αντίστοιχο της επόμενης μέσω ενός ευθύγραμμου τμήματος. Από την περιγραφή είναι φανερό ότι η μέθοδος αυτή είναι η αντίστοιχη της Piece-wise linear για τις καμπύλες, μόνο που στην περίπτωση των επιφανειών υπάρχουν δύο διαστάσεις.
  - Bspline, όπου όπως και στην περίπτωση των καμπυλών, η επιφάνεια δημιουργείται ενώνοντας κάθε σημείο της καμπύλης με το αντίστοιχο της επόμενης, μέσω ενός καμπυλόγραμμου τμήματος. Έτσι και εδώ, το αποτέλεσμα θα είναι «φτωχό» στην περίπτωση που το πτερύγιο χαρακτηρίζεται από μικρό αριθμό καμπυλών.

Επίσης, κάτι που είναι σημαντικό να αναφερθεί, ώστε να αποφευχθούν λάθη, είναι ο συντελεστής "Bias of Blade towards High periodic". Ο τελευταίος κυμαίνεται από 0 έως 1, με

τις τιμές κοντά στο 0 να απομακρύνουν την αρχική περιοδική επιφάνεια (high periodic) από το ζεύγος πτερυγίων, φέρνοντας άρα την τελική περιοδική επιφάνεια (low periodic) πιο κοντά. Αυτό εγκυμονεί τον κίνδυνο το πτερύγιο να τμήσει μία από τις περιοδικές επιφάνειες, κάτι που σαφέστατα είναι απαγορευτικό. Αντίστοιχα, τιμές κοντά στο 1, έχουν την αντίθετη επίδραση.

Όπως και προηγουμένως έτσι και δω, δίνεται η δυνατότητα αλλαγής του προσανατολισμού των πτερυγίων μέσω της καρτέλας “Transform”. Οι δυνατότητες αλλαγής (περιστροφή, μετατόπιση) φαίνονται στην Εικόνα 4-8.



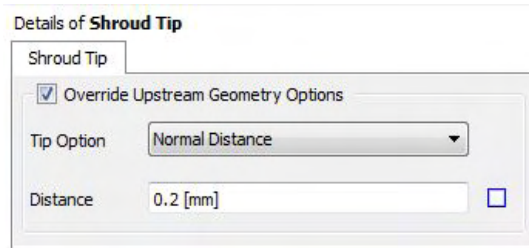
Εικόνα 4-8 Geometry Object - Blade Set - Transform Tab

#### 4.2.1.4 Hub Tip & Shroud Tip Objects

Στην πλειοψηφία των στροβιλομηχανών εσωτερικής ροής, παρατηρείται ένα απειροελάχιστο διάκενο (συγκριτικά πάντα με το μέγεθος της πτερωτής). Αναλόγως την εφαρμογή, αυτό το διάκενο (tip) μπορεί να βρίσκεται είτε στη μέγιστη (Shroud) είτε στην ελάχιστη (Hub) διάμετρο. Ο λόγος για τον οποίον αυτό το διάκενο είναι τόσο μικρό είναι η αποφυγή αποκόλλησης της ροής σε εκείνο το σημείο του πτερυγίου.

Οι επιλογές που δίνει το Ansys TurboGrid στο χρήστη ποικίλουν ανάλογα με το αν το διάκενο χαρακτηρίζεται από σταθερή (Normal Distance) ή μεταβλητή τιμή (Normal Variable Distance) και τον τρόπο με τον οποίον αυτό μεταβάλλεται. Για τον παρόν συμπίεστη επιλέχθηκε σταθερό διάκενο, σύμφωνα με τη γεωμετρία του, στη μέγιστη διάμετρο του (Shroud Tip) ίσο με 0.2mm, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-9, ενώ στην Εικόνα 4-11 γίνεται εμφανές το διάκενο στο Shroud στη μεσημβρινή όψη του πτερυγίου (Meridional View).

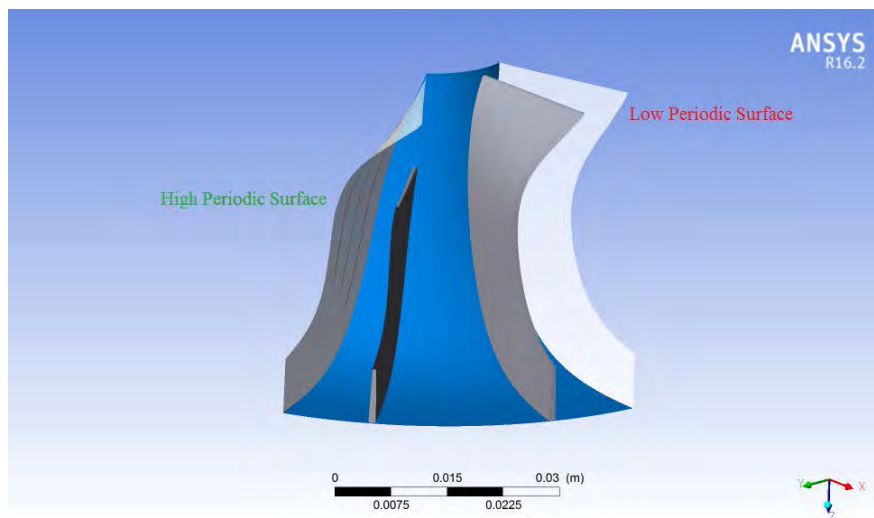
Η επιλογή “Override Upstream Geometry Options” αγνοεί και αντικαθιστά οποιοσδήποτε αλλαγές στη γεωμετρία που έγιναν πριν από το Ansys TurboGrid. Αυτό εξυπηρετεί στο να αποφευχθεί πιθανό λάθος, όπου ο χρήστης όρισε δύο φορές διάκενο.



Εικόνα 4-9 Geometry Object - Shroud Tip

#### 4.2.1.5 Low & High Periodic Objects

Η αρχική περιοδική επιφάνεια (Low Periodic Surface) είναι μια επιφάνεια που εκτείνεται από τον είσοδο μέχρι την έξοδο του συμπιεστή και από το hub έως το shroud του στην πλευρά του πλέγματος με τις μικρότερες τιμές  $\theta$  (Theta values). Οι τιμές του  $\theta$  καθορίζονται από τον άξονα περιστροφής του συμπιεστή και από τον κανόνα του δεξιού χεριού. Έτσι, η τελική περιοδική επιφάνεια (High Periodic Surface) θα βρίσκεται στην αντίθετη πλευρά της αρχικής μέσα στο κανάλι της ροής (passage), δηλαδή στις μεγάλες τιμές  $\theta$ . Στην Εικόνα 4-10 μπορεί κανείς να διακρίνει αυτές τις επιφάνειες, με το κόκκινο χρώμα να συμβολίζει την “low periodic” και το πράσινο την “high periodic”.



Εικόνα 4-10 Periodic Surfaces

#### 4.2.1.6 Inlet & Outlet Objects

Η υποενοότητα “Inlet” ορίζει μία επιφάνεια, η οποία καθορίζει το σχήμα του πλέγματος του καναλιού της ροής (Passage Mesh) κατά τη μεσημβρινή διεύθυνση (Meridional View) στο σημείο της εισόδου της ροής. Αντίστοιχα, η υποενοότητα “Outlet” ασχολείται με το αντίπερα άκρο του πλέγματος του καναλιού, όπου βρίσκεται η έξοδος της ροής από το ρότορα.

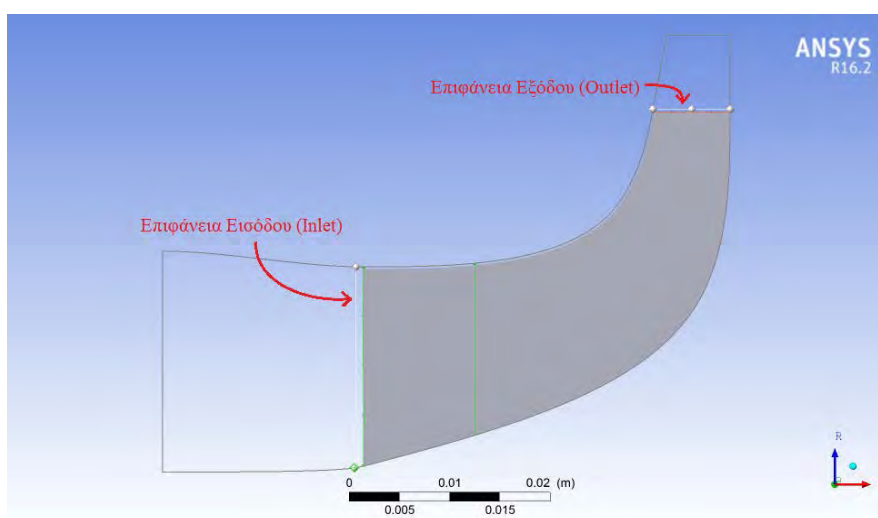
Τα άκρα του καναλιού της ροής (upstream/downstream end of the passage) αποτελούν ταυτόχρονα και τα όρια του συνολικού πλέγματος. Βέβαια, στην περίπτωση που ενεργοποιηθεί η επιλογή “Inlet/Outlet Domain” που βρίσκεται στην ενότητα “Mesh Data” (αναφέρεται στη συνέχεια), τότε τα άκρα του καναλιού εκπροσωπούν μία διεπιφάνεια ανάμεσα στην είσοδο/έξοδο του ρότορα και το πλέγμα του καναλιού της ροής.

Οι επιφάνειες αυτές στη μεσημβρινή τους όψη φαίνονται στην Εικόνα 4-11 με τις λευκές γραμμές και οι τρόποι με τους οποίους αυτές καθορίζονται “Interface Specification Method”, παρουσιάζονται αναλυτικά στη συνέχεια. Οι σημαντικότερες από αυτές είναι οι ακόλουθες:

#### ➤ Parametric

Η επιλογή αυτή, που είναι και η προεπιλογή από το Ansys TurboGrid, δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να προσδιορίσει παραμετρικά τις θέσεις της εισόδου και εξόδου, επιλέγοντας τα αντίστοιχα σημεία στο hub και στο shroud του ρότορα. Η τιμή του συντελεστή κυμαίνεται από 0 έως 1, με τις χαμηλές τιμές να φέρνουν την επιφάνεια πιο κοντά στο πτερύγιο, ενώ οι υψηλές τιμές να απομακρύνουν την επιφάνεια έως κάποια μέγιστη τιμή (fully extend).

Ένα σύνηθες πρόβλημα που μπορεί να παρουσιαστεί, προκύπτει όταν η τιμή του συντελεστή οριστεί ίση με το 0. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την εξαγωγή σφάλματος, λόγω του ότι ενδέχεται η επιφάνεια εισόδου ή εξόδου να τέμνει κάποιο από τα πτερύγια [3].



Εικόνα 4-11 Μεσημβρινή Όψη Πτερυγίου (Meridional View)

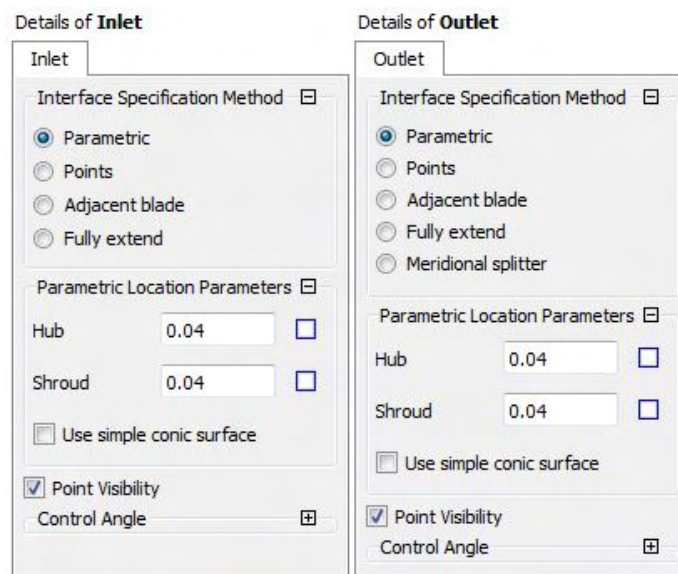
#### ➤ Points

Επιλέγοντας αυτήν τη δυνατότητα, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τουλάχιστον δύο σημεία (hub & shroud), τα οποία θα χαρακτηρίζουν την επιφάνεια, μεταβάλλοντας κατάλληλα τις αξονικές ή/και τις ακτινικές συντεταγμένες αυτών των σημείων. Επιπλέον, δίνεται η δυνατότητα αυτόματης εισαγωγής των σημείων από το Ansys TurboGrid, ενεργοποιώντας την επιλογή “Automatically generate required intermediate points”.

### ➤ Fully Extend

Με την επιλογή αυτή, όλα τα σημεία της επιφάνειας εισόδου/εξόδου μεταφέρονται στα άκρα του καναλιού της ροής, δηλαδή όσο το δυνατόν πιο μακριά από τα πτερύγια. Σκοπός αυτού είναι να αποφευχθεί το πτερύγιο να τμήσει την διεπιφάνεια της εισόδου/εξόδου.

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής επιλέχθηκε η είσοδος και η έξοδος του ρότορα να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στα πτερύγια (Parametric με συντελεστή ίσο με 0.04), όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 4-12. Η επιλογή αυτή εξυπηρετεί στο Ansys CFX-Pre, ώστε να δηλωθεί η επιφάνεια (domain) μετά τα πτερύγια ως “Counter rotating”. Η παραπάνω διαδικασία περιγράφεται αναλυτικότερα σε επόμενο κεφάλαιο.

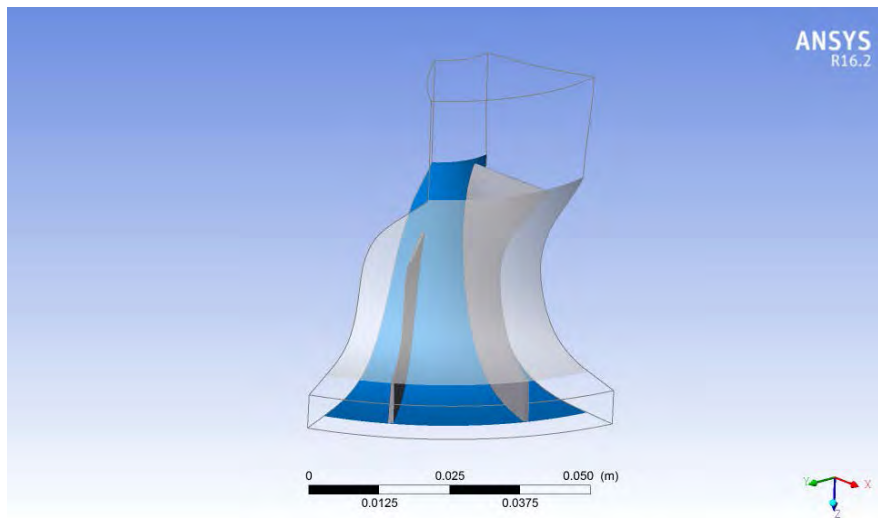


Εικόνα 4-12 Geometry Object - Inlet/Outlet

#### 4.2.1.7 Outline Object

Η υποενότητα αυτή εμφανίζει ένα πλήθος καμπυλών στο εξωτερικό περίγραμμα της γεωμετρίας. Αυτές περιλαμβάνουν τα περιγράμματα των hub και shroud του συμπιεστή, καθώς και τη μέγιστη επέκταση (Full Extend) τους, ανεξάρτητα από το που έχουν τοποθετηθεί οι επιφάνειες εισόδου και εξόδου του ρότορα του συμπιεστή, όπως μπορεί κανείς να παρατηρήσει στην Εικόνα 4-13.





Εικόνα 4-13 Outline του όγκου ελέγχου του ρότορα (γκρίζα γραμμή)

## 4.2.2 Προσδιορισμός Τοπολογίας (Topology Set Object)

Η τοπολογία του πλέγματος είναι μια διάταξη από μεγαλύτερα (κύρια) στοιχεία (Topology Blocks) που λειτουργούν ως πλαίσιο στην τοποθέτηση των στοιχείων του πλέγματος (Mesh Elements). Η τοπολογία επηρεάζει τον τρόπο με τον οποίο θα δημιουργηθεί το πλέγμα, καθώς επίσης και την «ποιότητα» του.

### 4.2.2.1 Σχετικά με την τοπολογία

Τα κύρια στοιχεία της τοπολογίας (Topology Blocks) αντιπροσωπεύουν τμήματα του πλέγματος που διατηρούν ένα τακτικό μοτίβο από εξαεδρικά στοιχεία (hexahedral elements). Όλα τα κύρια στοιχεία συνδέονται με τα γειτονικά τους χωρίς την ύπαρξη διακένων και άρα έχουν κοινές ακμές (edges) και κοινούς κόμβους (nodes). Ακολουθώντας την παραπάνω λογική, το πλέγμα ολοκληρώνεται σε όλον τον όγκο ελέγχου του ρότορα.

Το ίδιο το Ansys TurboGrid μέσω της αυτόματης επιλογής “ATM Optimized” δομεί την τοπολογία καθ’ όλο το εύρος του πτερυγίου με τέτοιο τρόπο, ώστε να ελαχιστοποιεί τη μέγιστη λοξότητα (maximum skewness) των κύριων στοιχείων του πλέγματος. Παρόλα αυτά θα πρέπει η τοπολογία να εξεταστεί και από τον ίδιο το χρήστη, τουλάχιστον στις θέσεις του hub και του shroud, καθώς η ποιότητα του πλέγματος είναι άμεσα εξαρτώμενη από τη λοξότητα.

Η τοπολογία βέβαια διαφέρει σημαντικά κινούμενοι από το hub προς το shroud. Γι’ αυτό το λόγο μέσω της ενότητας “Layers” μπορεί να γίνει ορατή η διδιάστατη τοπολογία σε κάποιο σημείο του εύρους του πτερυγίου. Στη συνέχεια περιγράφεται αναλυτικότερα αυτή η διαδικασία (Layers Object), καθώς επίσης και ο τρόπος με τον οποίον ο χρήστης μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα του πλέγματος.

#### 4.2.2.2 Δυνατότητες Τοπολογίας

Το Ansys TurboGrid παρέχει στον χρήστη δύο κύριες μεθόδους (placement methods in topology definition) για τη δημιουργία της τοπολογίας του πλέγματος. Αυτές είναι:

##### ➤ **ATM Optimized**

Με τη μέθοδο αυτή, που προτιμήθηκε για την παρούσα εργασία, το Ansys TurboGrid επιλέγει αυτόματα τη μέθοδο τοποθέτησης της τοπολογίας, δημιουργώντας ένα υψηλής ποιότητας πλέγμα, αφήνοντας στο χρήστη ελάχιστο φόρτο.

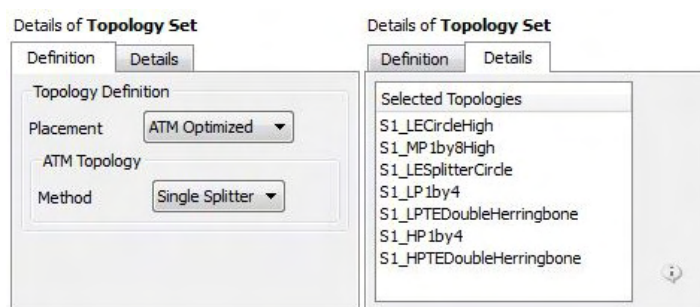
##### ➤ **Traditional**

Η μέθοδος αυτή προσφέρει στο χρήστη τη δυνατότητα να ελέγχει και να μεταβάλλει ο ίδιος την τοπολογία μέσω των σημείων τομής των κύριων στοιχείων (Control Points), γεγονός που προφανώς δίνει μία πολύ καλύτερη εποπτεία του πλέγματος και γι' αυτό άλλωστε προτιμάται ακόμα σε αρκετές περιπτώσεις. Βέβαια, απαιτείται περισσότερος χρόνος για το «στήσιμο» του πλέγματος συγκριτικά με την αυτόματη τοπολογία (ATM Optimized). Για λόγους λιτότητας δε θα αναφερθούν περαιτέρω στοιχεία για τη συγκεκριμένη μέθοδο.

Με την επιλογή της αυτόματης τοπολογίας δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει το κατάλληλο πακέτο (topology family), με το οποίο θα δημιουργηθεί η αυτόματη τοπολογία. Στην περίπτωση που αυτή η οικογένεια είναι ήδη γνωστή (στη παρούσα εργασία “single splitter”), θα ήταν καλό να προτιμηθεί αντί της αυτόματης επιλογής.

Επίσης στην καρτέλα “details” και μόνο αφού έχει επιλεγεί η αυτόματη τοπολογία, μπορεί κανείς να εξετάσει τις τοπολογίες στα διάφορα σημεία του ρότορα, με τις μπλε ενδείξεις να συμβολίζουν τους κόμβους (topology nodes), ενώ οι πράσινες τις ακμές (topology edges). Τα πτερύγια περιγράφονται με την κόκκινη γραμμή.

Οι επιλογές που έγιναν για το συγκεκριμένο συμπιεστή φαίνονται στην Εικόνα 4-14.



Εικόνα 4-14 Topology Set Object - Definition/Details Tab

Να σημειωθεί πως την πρώτη φορά που δημιουργείται το πλέγμα, όλες οι διεργασίες βρίσκονται σε κατάσταση αναστολής (Suspend Object Updates). Έτσι στο σημείο που ο χρήστης έχει ορίσει την τοπολογία του πλέγματος, πρέπει να απενεργοποιήσει αυτήν την επιλογή (δεξιά κλικ στην ενότητα “Topology Set” – Κλικ στην επιλογή “Suspend Object Updates”), ώστε να μπορέσει να δημιουργηθεί η τοπολογία.

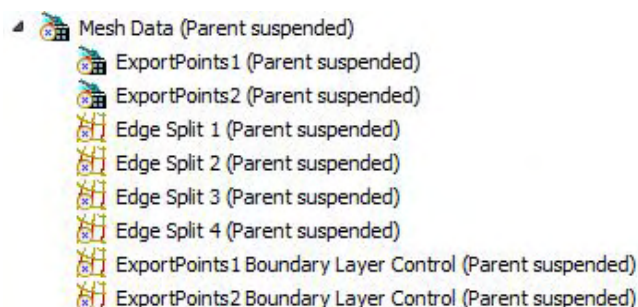
### 4.2.3 Εισαγωγή παραμέτρων πλέγματος (Mesh Data Object)

Η ενότητα του “Mesh Data Object” περιέχει ρυθμίσεις που επηρεάζουν ολόκληρο το πλέγμα. Οι υποενότητες κάτω από αυτήν που αναφέρονται στα δύο περύγια ξεχωριστά μπορούν να μεταβάλλουν τις ιδιότητες του πλέγματος μόνο στις αντίστοιχες περιοχές. Επίσης, όπως θα αναφερθεί και στη συνέχεια, κάνοντας το πλέγμα πιο πυκνό (fine) ή πιο αραιό (coarse) σε συγκεκριμένες περιοχές του ρότορα, δημιουργεί επιπλέον υποενότητες κάτω από το “Mesh Data Object”, που ονομάζονται “Edge Split” και ρυθμίζουν το πλέγμα σε εκείνες τις περιοχές. Τα παραπάνω απεικονίζονται στην Εικόνα 4-15.

#### 4.2.3.1 Ρυθμίσεις ενότητας Mesh Data

Οι δυνατότητες που δίνει το Ansys TurboGrid όσον αφορά τις ιδιότητες του πλέγματος χωρίζονται σε κατηγορίες (Tabs), αναλόγως την περιοχή ρότορα με την οποία ασχολείται. Έτσι, ο διαχωρισμός γίνεται ως εξής:

- Mesh Size Tab
- Passage Tab
- Hub Tip & Shroud Tip Tabs
- Inlet/Outlet Tab



Εικόνα 4-15 Mesh Data Object

Στις παρακάτω εικόνες (Εικόνα 4-17, Εικόνα 4-18) φαίνονται όλα τα στοιχεία των παραμέτρων του πλέγματος που επιλέχθηκαν για τον συγκεκριμένο συμπιεστή.

##### 4.2.3.1.1 Mesh Size Tab

- **Συνολική Πυκνότητα Πλέγματος**

Η πυκνότητα του πλέγματος, δηλαδή το πλήθος των στοιχείων του (elements) και των κόμβων του (nodes), καθορίζεται από τον χρήστη με τους παρακάτω τρόπους:

- **Lock Mesh Size**

Με αυτή τη λειτουργία ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να διατηρήσει το μέγεθος του πλέγματος στην ίδια τάξη μεγέθους. Παραδείγματος χάρη, αυτό μπορεί να φανεί χρήσιμο στην περίπτωση που ο χρήστης θέλει να συγκρίνει μικρές αλλαγές στη γεωμετρία.

- **Method**

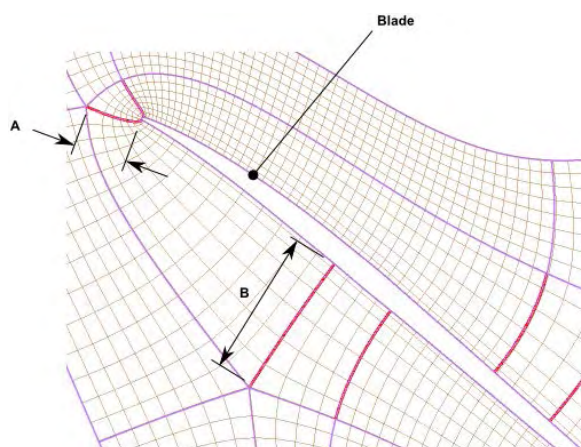
Η λειτουργία αυτή ελέγχει την πυκνότητα του πλέγματος με τους παρακάτω τρόπους:

- **Target Passage Mesh Size (# of nodes)**, όπου κανείς μπορεί να ορίσει ένα προκαθορισμένο μέγεθος πλέγματος στο κανάλι της ροής, ανάμεσα στις διαθέσιμες επιλογές είτε να ορίσει ο ίδιος αυτό το μέγεθος πλέγματος. Έτσι το μέγεθος πλέγματος μένει ανεπηρέαστο από τυχόν μετέπειτα αλλαγές.
- **Global Size Factor (Μόνο για ATM Topology)**, όπου μεταβάλλοντας τον συντελεστή μεταβάλλεται το συνολικό μέγεθος του πλέγματος με μη γραμμικό τρόπο. Οποιοσδήποτε μετέπειτα αλλαγές αφήνουν αμετάβλητο το συντελεστή, αλλά μπορεί να αλλάξουν το μέγεθος του πλέγματος.

➤ **Boundary Layer Refinement Control**

Στα πλαίσια της πλεγματοποίησης, ο όρος οριακό στρώμα (boundary layer), χρησιμοποιείται για να περιγράψει τα κύρια στοιχεία (main topology blocks) κατά μήκος των δύο πλευρών των πτερυγίων. Βέβαια, το πάχος αυτών των σημείων ποικίλλει ανάλογα με την περιοχή πάνω στην επιφάνεια του πτερυγίου, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4-16. Το Ansys TurboGrid προκειμένου να διατηρήσει μια ομαλή μετάβαση από τα στοιχεία του οριακού στρώματος σε αυτά του καναλιού της ροής (Passage Mesh), χρησιμοποιεί διάφορους συντελεστές διαστολής (Expansion Rates).

Επίσης, το ύψος της πρώτης σειράς στοιχείων ακριβώς δίπλα από το πτερύγιο (First Element Offset), καθώς και το πλήθος των στοιχείων κατά μήκος της περιοχής του οριακού στρώματος παραμένουν σταθερά γύρω από το προφίλ του πτερυγίου. Άρα, οι μεταβολές στο ύψος των στοιχείων του οριακού στρώματος γύρω από την αεροτομή δε μπορούν να συμβούν παρά μόνο με μεταβολή του συντελεστή διαστολής.



Εικόνα 4-16 Περιοχή οριακού στρώματος – διαφορές πάχους στοιχείων

- **Method**

Παρόλα αυτά με τη λειτουργία αυτή, ο χρήστης είναι σε θέση να επιλέξει ποια ιδιότητα θα μεταβάλλει, επιλέγοντας ανάμεσα στις επόμενες:

- **Proportional to Mesh Size**

Η επιλογή αυτή ελέγχει το πλήθος των στοιχείων κατά μήκος της περιοχής του οριακού στρώματος σε αναλογία πάντα με τις τιμές των συντελεστών “Factor Base” και “Factor Ratio”. Με αύξηση των συντελεστών αυτών, παρατηρείται αύξηση στο πλήθος των στοιχείων, ενώ με μείωση παρατηρείται αντίστοιχη μείωση.

- **First Element Offset**

Η επιλογή αυτή ελέγχει το ύψος της πρώτης σειράς στοιχείων ακριβώς δίπλα από το πτερύγιο.

- **Cutoff Edge Split Factor**

Ο συντελεστής αυτός μεταβάλλει την πυκνότητα του πλέγματος μόνο στην ακμή προσβολής και στην ακμή φυγής του πτερυγίου, θεωρώντας τις ως περιοχές όπου η ροή είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη και άρα η πλεγματοποίηση τους απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή. Με αύξηση του συντελεστή παρατηρείται πύκνωση του πλέγματος.

- **Target Maximum Expansion Rate**

Ενεργοποιώντας την επιλογή “Target Maximum Expansion Rate”, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να ορίσει ένα μέγιστο συντελεστή διαστολής. Έτσι, το Ansys TurboGrid, προκειμένου να αποφύγει τιμές του συντελεστή εκτός του οριοθετημένου εύρους, μεταβάλλει άλλες ιδιότητες του πλέγματος, ανάλογα με τη μέθοδο που επιλέχθηκε στο “Boundary Layer Refinement Control > Method”, όπως για παράδειγμα το πλήθος των στοιχείων του οριακού στρώματος ή/και το ύψος της πρώτης σειράς στοιχείων ακριβώς δίπλα από το πτερύγιο (First Element Offset).

- **Near Wall Element Size Specification**

Ο όρος “Near Wall Node Spacing” περιγράφει την απόσταση μεταξύ μίας οποιασδήποτε επιφάνειας (blade, hub) και της 1<sup>ης</sup> «στρώσης» (Layer) του πλέγματος. Η μέθοδος με την οποία θα προσδιοριστεί αυτή η απόσταση καθορίζεται από το χρήστη και μπορεί να είναι μία από τις ακόλουθες:

- **Absolute**, που δίνει τη δυνατότητα να οριστεί άμεσα το διάκενο Near Wall Node Spacing. Η επιλογή αυτή είναι η προεπιλεγμένη από το πρόγραμμα και είναι αυτή που επιλέχθηκε για τα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

- **y+**, η οποία δε θα αναπτυχθεί για λόγους συντομίας.

- **Five-Edge Vertex Mesh Size Reduction**

Ένα πλέγμα που είναι κατασκευασμένο με τη μέθοδο ATM, περιέχει πολλές φορές κόμβους που οποίους καταλήγουν πέντε ακμές (five-edge vertex). Έτσι, κατά τη δημιουργία του

πλέγματος, το Ansys TurboGrid απομακρύνει το πλέγμα από αυτούς τους κόμβους, κάνοντας έτσι τα τριγύρω στοιχεία πιο ορθογώνια, έχοντας ως αποτέλεσμα μεγαλύτερα στοιχεία σε εκείνα τα σημεία του πλέγματος. Επιλέγοντας συντελεστή μικρότερο του 1.0, το πλέγμα έρχεται πιο κοντά στον κόμβο με τις πέντε ακμές, θυσιάζοντας έτσι την ορθογωνικότητά τους.

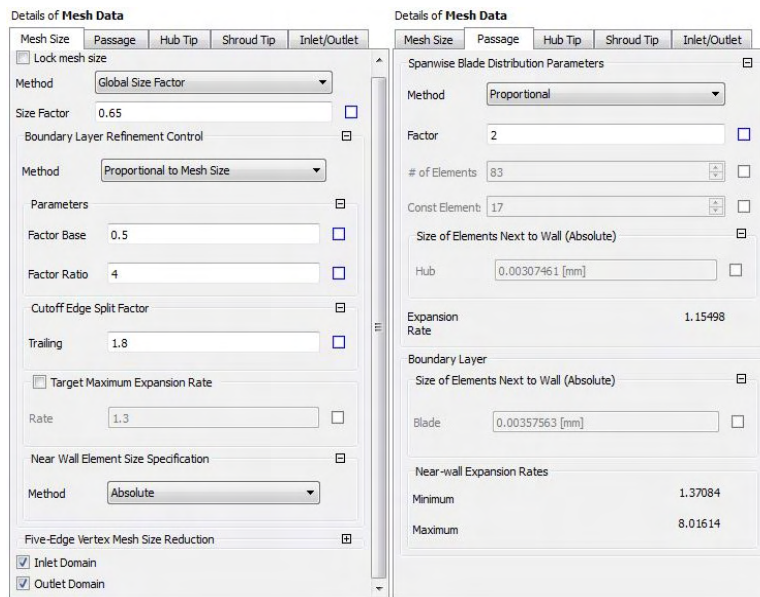
- **Inlet/Outlet Domains**

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως στην ενότητα 4.2.1.6, οι επιλογές Inlet/Outlet Domain καθορίζουν αν η είσοδος/έξοδος του ρότορα θα είναι μέρος του πλέγματος. Οι ρυθμίσεις που επηρεάζουν το πλέγμα σε εκείνες τις περιοχές βρίσκονται στην ενότητα 4.2.3.1.4.

#### 4.2.3.1.2 Passage Tab

Σε αυτήν την καρτέλα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4-17, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να καθορίσει την κατανομή των στοιχείων του πλέγματος κατά μήκος του εύρους του πτερυγίου μέσω της επιλογής “Spanwise Blade Distribution Parameters > Method”. Οι επιλογές που δίνονται περιγράφονται στη συνέχεια:

- **Proportional**, που αποτελεί την προεπιλεγμένη μέθοδο από το πρόγραμμα και είναι διαθέσιμη μόνο στην περίπτωση της αυτόματης τοπολογίας (ATM topology). Με αυτή τη μέθοδο το Ansys TurboGrid υπολογίζει αυτόματα το πλήθος και την κατανομή των στοιχείων του πλέγματος στη διεύθυνση του εύρους του πτερυγίου, με τέτοιο τρόπο, ώστε ο μέσος λόγος του στοιχείου (average element aspect ratio = ύψος στοιχείου στη διεύθυνση του εύρους προς μήκος του στοιχείου), περίπου στη μέση του εύρους, να είναι ίσος με τον λόγο διαστάσεων του πτερυγίου διαιρεμένο από τον συντελεστή “Proportional Factor”. Έτσι, αυξάνοντας ή μειώνοντας τον συντελεστή αυτόν, έχουμε πύκνωση ή αραιώση του πλέγματος αντίστοιχα. Λόγω της πολυπλοκότητας της ροής στα σημεία hub και shroud, η μέθοδος αυτή φροντίζει να πυκνώνει σταδιακά το πλέγμα όσο κατευθύνεται προς αυτές τις περιοχές.
- **Element Count and Size**, που δίνει τη δυνατότητα προσδιορισμού του πλήθους των στοιχείων κατά μήκος του εύρους του πτερυγίου (# of elements), καθώς και το αν η κατανομή θα είναι ομοιόμορφη ή μη, με την ρύθμιση “const. element” να προσδιορίζει τα ομοιόμορφα κατανεμημένα στοιχεία.
- **Boundary Layer**, που ρυθμίζει την κατανομή του πλέγματος για τρεις περιοχές του πτερυγίου: το οριακό στρώμα στο hub, στο shroud/tip και στην περιοχή ενδιάμεσα των δύο προηγουμένων.
- **Uniform**, όπου ο χρήστης προσδιορίζει το πλήθος των στοιχείων (όλα τα στοιχεία έχουν το ίδιο μέγεθος) κατά μήκος του εύρους του πτερυγίου με την κατανομή τους να είναι ομοιόμορφη.



Εικόνα 4-17 Mesh Data Object – Mesh Size & Passage Tabs

#### 4.2.3.1.3 Hub Tip & shroud Tip Tabs

Οι καρτέλες αυτές είναι διαθέσιμες μονάχα όταν υπάρχουν οι αντίστοιχες γεωμετρίες. Όπως και προηγουμένως, περιέχουν ρυθμίσεις που καθορίζουν την κατανομή του πλέγματος σε αυτές τις περιοχές. Οι ρυθμίσεις που επιλέχθηκαν στα πλαίσια της εργασίας φαίνονται στην Εικόνα 4-18.

Με τη ρύθμιση “Shroud Tip Distribution Parameters”, ο χρήστης ελέγχει την κατανομή των στοιχείων του πλέγματος στην διεύθυνση του εύρους του περυγίου, στο διάκενο ανάμεσα στο περύγιο και το κέλυφος (housing) του συμπιεστή. Οι διαθέσιμες μέθοδοι παρουσιάζονται στη συνέχεια:

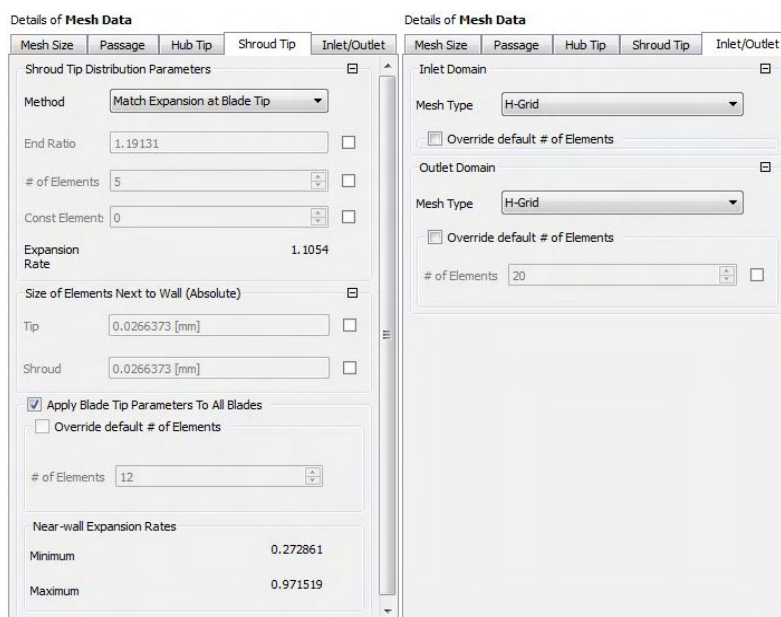
- **Match Expansion at Blade Tip**, που είναι η προεπιλεγμένη μέθοδος και αυτή που επιλέχθηκε για την εργασία, ορίζει τον ίδιο συντελεστή διαστολής (Expansion Rate) με αυτόν που χρησιμοποιήθηκε κατά μήκος του εύρους του περυγίου και θα προσαρμόσει το μέγεθος των στοιχείων με το αντίστοιχο πρώτο στοιχείο του περυγίου.
- **Element Count and Size**, όπως αναλύθηκε παραπάνω στην παράγραφο 4.2.3.1.2.
- **Uniform**, όπως αναλύθηκε παραπάνω στην παράγραφο 4.2.3.1.2.

#### 4.2.3.1.4 Inlet/Outlet Tab

Οι περιοχές του πλέγματος που αντιστοιχούν στην είσοδο και έξοδο του ρότορα (inlet & outlet domains) ελέγχονται από τις καμπύλες (curves) του hub και shroud, καθώς και από τις ενότητες “Inlet & Outlet Objects”.

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί, οι ρυθμίσεις είναι διαθέσιμες μονάχα στην περίπτωση που ενεργοποιηθούν οι επιλογές “Inlet & Outlet Domain” στην καρτέλα “Mesh Size”. Στα πλαίσια

της εργασίας, οι αντίστοιχες ρυθμίσεις έμειναν στις προεπιλεγμένες τους τιμές, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-18.



Εικόνα 4-18 Mesh Data Object - Shroud Tip & Inlet/Outlet Tabs

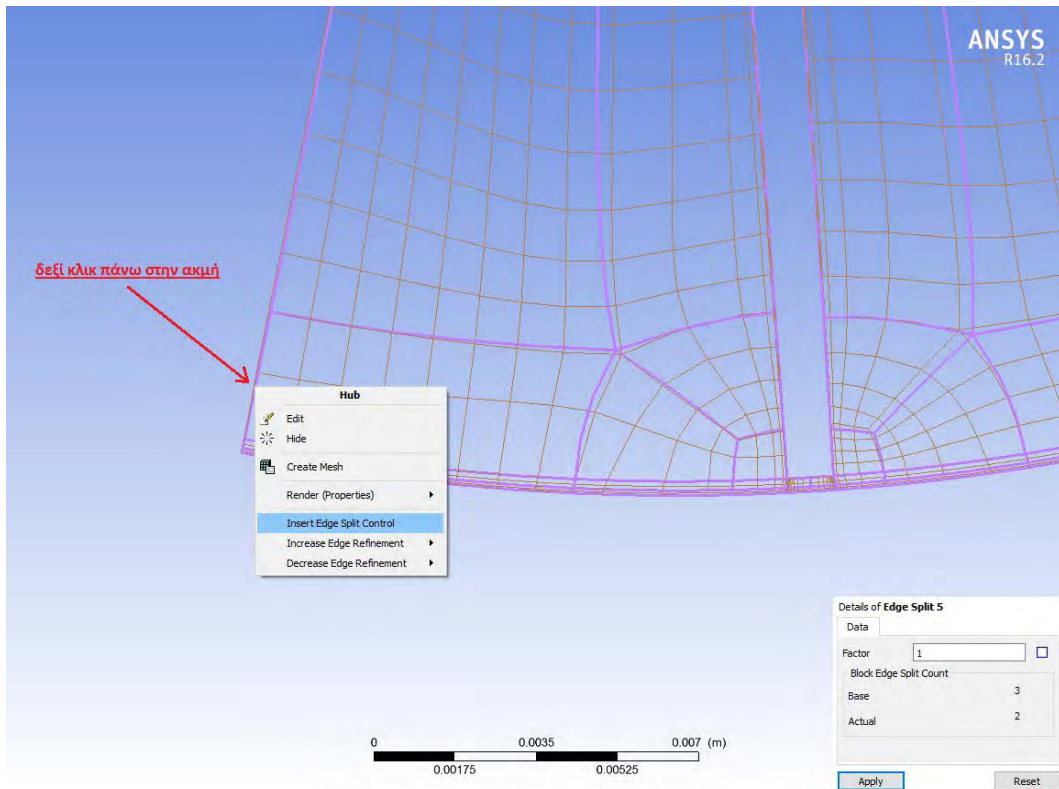
#### 4.2.3.1.5 Μεταβολή πυκνότητας πλέγματος σε συγκεκριμένη ακμή (topology edge)

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ελέγξει το πλήθος των στοιχείων του πλέγματος κατά μήκος μίας ακμής που επιλέγει ο ίδιος. Οι ακμές αυτές εμφανίζονται στην ενότητα “Layers” του Ansys TurboGrid, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-22. Βέβαια, εξαιτίας της διαδικασίας που ακολουθείται για την πύκνωση ή αραιώση, η κατανομή του πλέγματος καθορίζεται αυτόματα από το πρόγραμμα. Μπορεί κανείς να αυξήσει ή να μειώσει το πλήθος των στοιχείων σε μία δεδομένη ακμή της τοπολογίας του πλέγματος, ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα:

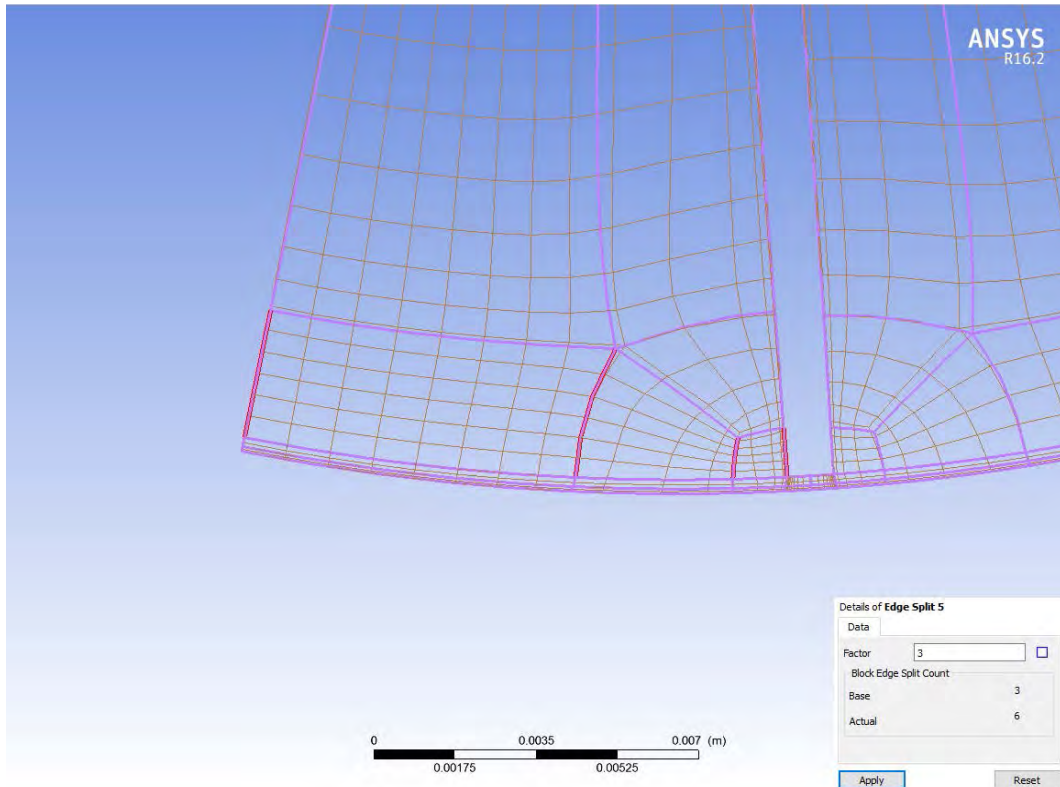
- Δεξί κλικ πάνω στην επιθυμητή ακμή.
- **Insert Edge Split Control:** Η επιλογή αυτή δημιουργεί μία υποενότητα με όνομα “Edge Split” κάτω από την ενότητα Mesh Data, μέσω της οποίας μπορεί ο χρήστης να ελέγξει το πλήθος των αντίστοιχων στοιχείων, απλά μεταβάλλοντας την τιμή του συντελεστή “Edge Split Factor”. Προφανώς, με αύξηση του συντελεστή, αυξάνονται και τα στοιχεία του πλέγματος, ενώ με μείωση του συντελεστή, μειώνονται.
- **Increase Edge Refinement:** Η επιλογή αυτή δίνει τη δυνατότητα να αυξηθεί ο συντελεστής “Edge Split Factor” κατά ένα προκαθορισμένο ποσοστό. Στην περίπτωση που δεν έχει δημιουργηθεί από τον χρήστη η υποενότητα “Edge Split”, τότε με τη χρήση αυτής της επιλογής, δημιουργείται αυτόματα από το πρόγραμμα.
- **Decrease Edge Refinement:** Αντίστοιχα με προηγουμένως, με τη διαφορά ότι ο συντελεστής “Edge Split Factor” μειώνεται.



Επιπλέον, η υποενότητα “Edge Split” μπορεί να διαγραφεί στην περίπτωση που αποβεί μη χρήσιμη. Όλα τα προηγούμενα γίνονται ευκολότερα σαφή μέσα από τις εικόνες στη συνέχεια (Εικόνα 4-19, Εικόνα 4-20), όπου παρουσιάζει την προαναφερθείσα διαδικασία στο hub του ρότορα του συμπιεστή κοντά στην έξοδό του.



Εικόνα 4-19 Μεταβολή πλήθους στοιχείων σε συγκεκριμένη ακμή της τοπολογίας (πριν)



Εικόνα 4-20 Μεταβολή πλήθους στοιχείων σε συγκεκριμένη ακμή της τοπολογίας (μετά)

Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς, στην Εικόνα 4-19 η πυκνότητα του πλέγματος είναι αυτή που έχει δοθεί αυτόματα από το πρόγραμμα. Με τη δημιουργία της υποενοότητας “Edge Split 5” (Εικόνα 4-19) για την επιλεγμένη ακμή (ακμές με κόκκινο χρώμα στην Εικόνα 4-20) και μεταβολή του συντελεστή από 1 σε 3, παρατηρείται η πύκνωση του πλέγματος και άρα αύξηση του πλήθους των στοιχείων, όπως άλλωστε φαίνεται και στην Εικόνα 4-20.

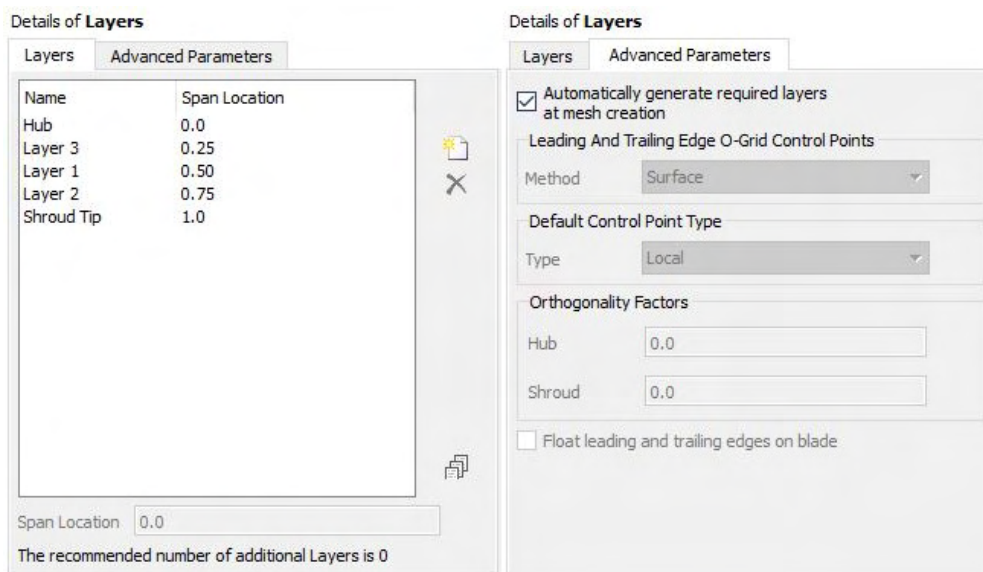
#### 4.2.4 Επίπεδα (Layers Object)

Στο Ansys TurboGrid το πλέγμα εμφανίζεται πάνω στις επιφάνειες του ρότορα, κάτι το οποίο γίνεται για λόγους ευκολίας. Βέβαια, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η πλεγματοποίηση γίνεται σε ολόκληρο τον όγκο ελέγχου και άρα εκτείνεται σε όλο το εύρος των πτερυγίων. Κάτι τέτοιο όμως, όπως είναι άλλωστε προφανές, θα δυσκόλευε σε μεγάλο βαθμό την επεξεργασία του πλέγματος. Λύση σε αυτό το πρόβλημα έρχεται να δώσει η χρήση των επιπέδων (Layers).

Ένα επίπεδο (Layer) ουσιαστικά δείχνει την τοπολογία του πλέγματος για ένα δεδομένο εύρος, δηλαδή μία δεδομένη απόσταση από το hub του ρότορα προς το shroud. Η προσθήκη επιπλέον επιπέδων βελτιώνει τη δημιουργία του τριδιάστατου πλέγματος προσαρμόζοντας την τοπολογία στην αντίστοιχη γεωμετρία πριν δημιουργηθεί το πλέγμα. Επιπλέον δημιουργείται από το πρόγραμμα μία καμπύλη «οδηγός» που καθοδηγεί το πλέγμα από το hub έως το shroud. Έτσι, απορρέει ένα πλέγμα καλύτερης ποιότητας και δίνει πολύ καλύτερη εποπτεία του πλέγματος στο χρήστη.

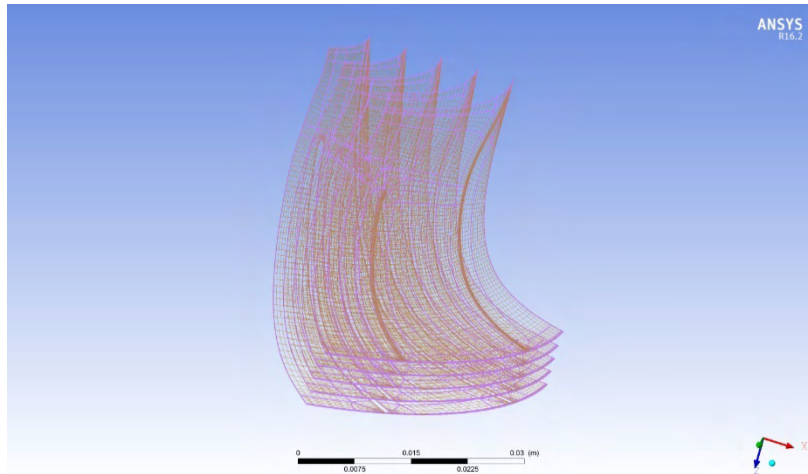
Η προσθήκη επιπλέον επιπέδων γίνεται με τους εξής τρόπους:

- Δεξί κλικ στην ενότητα “Layers” και Insert-Layer(s) Automatically. Έτσι, το πρόγραμμα προσθέτει αυτόματα ένα επίπεδο ή επίπεδα σε εύρος που θεωρεί ότι είναι κύριας σημασίας στη βελτίωση της ποιότητας του πλέγματος.
- Διπλό κλικ στην ενότητα “Layers” και ο χρήστης έχει τη δυνατότητα μέσω της καρτέλας “Layers” να εισάγει μόνος του τα επίπεδα που επιθυμεί στο εύρος που επιθυμεί, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-21.
- Διπλό κλικ στην ενότητα “Layers” και ενεργοποίηση της ρύθμισης “Automatically generate required layers at mesh creation” στην καρτέλα “Advanced Parameters” (Εικόνα 4-21). Έτσι το πρόγραμμα θα προσθέσει αυτόματα τα επίπεδα κατά τη δημιουργία του πλέγματος, όπως θα αναφερθεί στη συνέχεια στην υποενότητα 4.2.5.



Εικόνα 4-21 Layers Object – Layers & Advanced Parameters

Εξ ορισμού το πρόγραμμα δημιουργεί δύο επίπεδα, ένα στο hub του ρότορα και ένα στο shroud. Μία πολύπλοκη γεωμετρία, όπως άλλωστε είναι και ένας φυγοκεντρικός συμπιεστής, συνήθως απαιτεί περισσότερα από τα ήδη υπάρχοντα επίπεδα. Έτσι στην εργασία χρησιμοποιήθηκαν τρία επιπλέον επίπεδα που βρίσκονται στο 25%, 50%, 75% του εύρους hub-shroud, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4-22. Όλα τα επιπλέον επίπεδα εμφανίζονται κάτω από την ενότητα “Layers”.

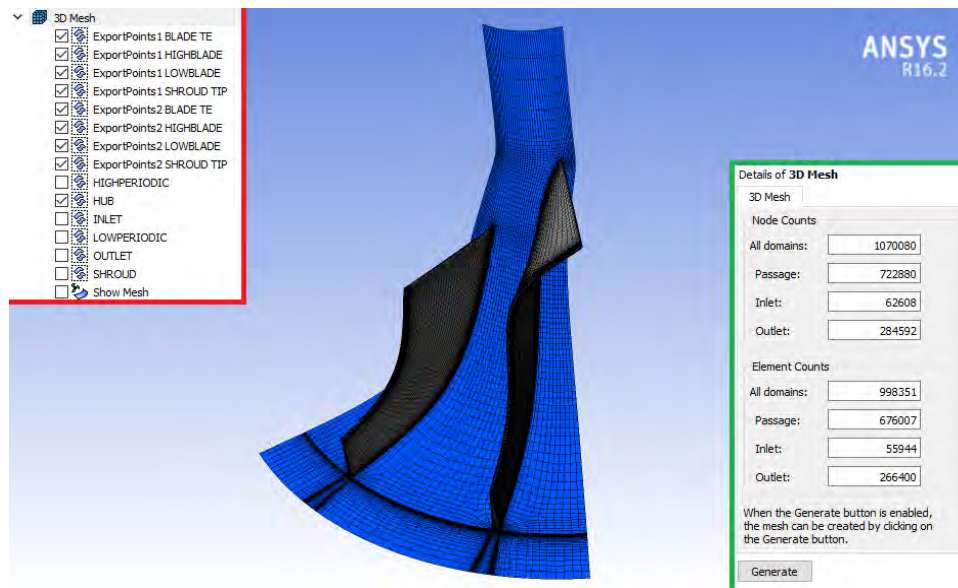


Εικόνα 4-22 Επίπεδα σε εύρος 0, 25, 50, 75, 100 (%)

#### 4.2.5 Εξαγωγή Πλέγματος (3D Mesh Object)

Η 1<sup>η</sup> εξαγωγή του πλέγματος ή η ανανέωση του πραγματοποιείται μέσω της ρύθμισης “3D Mesh” (δεξί κλικ > Create Mesh) είτε μέσω της επιλογής “Create Mesh” στην εργαλειοθήκη γρήγορης πρόσβασης.

Μετά την εξαγωγή του πλέγματος εμφανίζονται κάτω από την επιλογή “3D Mesh” τα τμήματα του πλέγματος, όπως φαίνεται στο κόκκινο περίγραμμα της Εικόνα 4-23. Με την ενεργοποίηση αυτών των ρυθμίσεων εμφανίζονται στην οθόνη τα ανάλογα τμήματα του πλέγματος για πιθανή περαιτέρω επίβλεψη του πλέγματος. Στην Εικόνα 4-23 είναι εύκολο να διακρίνει κανείς τις ευαίσθητες περιοχές του ρότορα όπου το πλέγμα χρειάζεται ιδιαίτερη μεταχείριση λόγω της πολυπλοκότητας της ροής. Οι περιοχές αυτές (είσοδος – έξοδος ρότορα, ακραία σημεία πτερυγίων) φαίνονται πιο σκούρες εφόσον το πλέγμα είναι πιο πυκνό.



Εικόνα 4-23 3D Mesh Object – Mesh Generation

Με διπλό κλικ στην επιλογή “3D Mesh” (Εικόνα 4-23 στο πράσινο περίγραμμα) ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιβλέψει το πλήθος των κόμβων (nodes) και των στοιχείων (elements) του πλέγματος στην είσοδο του ρότορα (inlet), στο κανάλι της ροής (passage), καθώς και στην έξοδο του (outlet).

## 4.2.6 Mesh Analysis Object

Η ενότητα “Mesh Analysis” προσφέρει εργαλεία στο χρήστη που αποσκοπούν στην επίβλεψη της ποιότητας του πλέγματος, δίνοντας στατιστικά στοιχεία του υπό εξέταση πλέγματος. Η ανάλυση αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί μονάχα αφού εξαχθεί το πλέγμα.

### 4.2.6.1 Στατιστικά Πλέγματος (Mesh Statistics)

Τα διαθέσιμα στατιστικά στοιχεία, όπως αυτά εμφανίζονται στην Εικόνα 4-24, ενεργοποιούνται με διπλό κλικ πάνω στην επιλογή “Mesh Analysis” και είναι τα εξής:

- Minimum Face Angle
- Maximum Face Angle
- Element Volume Ratio
- Edge Length Ratio
- Connectivity Number

Mesh Measure	Value	% Bad	
Minimum Face Angle	34.5051 [degree]	0.0000	✓
Maximum Face Angle	152.644 [degree]	0.0000	✓
Maximum Element Volume Ratio	16.1352	0.0000	✓
Minimum Volume	3.42318e-16 [m^3]	0.0000	✓
Maximum Edge Length Ratio	875.393	0.0000	✓
Maximum Connectivity Number	10	0.0000	✓

Εικόνα 4-24 Mesh Analysis Object - Mesh Statistics

Οι τιμές των στατιστικών στοιχείων του πλέγματος που βρίσκονται εκτός των ορίων που έχει θέσει αυτόματα το ANSYS TurboGrid απεικονίζονται με κόκκινο χρώμα. Με επιλογή της αντίστοιχης κατηγορίας και στη συνέχεια κλικ στην επιλογή “Display”, ο χρήστης μπορεί να εμφανίσει τις προβληματικές περιοχές πάνω στο πλέγμα με σκοπό να ελαττώσει ή ακόμα και να εξαλείψει πλήρως τα σφάλματα στο πλέγμα.

#### 4.2.6.2 Όρια Πλέγματος (Mesh Limits)

Η υποενότητα αυτή περιέχει τα αποδεκτά όρια για τα στατιστικά στοιχεία του πλέγματος. Επειδή συνήθως οι προεπιλεγμένες τιμές είναι ορθές, χάριν ευκολίας παραλήφθηκε η αλλαγή τους. Παρόλα αυτά, στη συνέχεια περιγράφονται επιγραμματικά τα όρια και η σημασία τους. Η ταξινόμηση έγινε με βάση τη σημαντικότητα τους στην ποιότητα του πλέγματος.

- **Minimum Volume:** Εκφράζει τον ελάχιστο όγκο του στοιχείου που μπορεί να εμφανιστεί στο τριδιάστατο πλέγμα. Χρησιμοποιείται για να αποτρέψει την εμφάνιση αρνητικών όγκων στον όγκο ελέγχου. Το ελάχιστο όριο πρέπει να ικανοποιείται ώστε το πλέγμα να μπορεί να θεωρηθεί λειτουργικό.
- **Maximum/Minimum Face Angle:** Εκφράζει τη μέγιστη/ελάχιστη γωνία που σχηματίζουν όλες οι επιφάνειες (faces) που εφάπτονται με έναν κόμβο. Για κάθε επιφάνεια υπολογίζεται η γωνία που σχηματίζουν οι δύο ακμές που εφάπτονται με τον κόμβο και επιστρέφεται η μέγιστη/ελάχιστη τιμή. Η τιμή αυτή λειτουργεί ως ένα μέτρο της λοξότητας (skewness) του πλέγματος. Σε περίπτωση που τα όρια έχουν ξεπεραστεί κατά πολύ, θα ήταν πρόπον να διορθωθούν οι τιμές στο μέγιστο δυνατό βαθμό. Βέβαια μια μικρή απόκλιση από τα προτεινόμενα όρια δεν είναι απαγορευτική.
- **Edge Length Ratio:** Εκφράζει το λόγο της μεγαλύτερης προς τη μικρότερη ακμή μίας επιφάνειας (face) και υπολογίζεται για τις δύο ακμές που εφάπτονται στον κόμβο. Η τιμή μπορεί να θεωρηθεί ένα μέτρο του λόγου “aspect ratio” (παράγραφος 4.2.3.1.2). Μία προβληματική τιμή του λόγου “Edge Length” μπορεί να διορθωθεί με αύξηση του πλήθους των στοιχείων στο εύρος hub – shroud του πτερυγίου. Τιμές γύρω από την προεπιλεγμένη (100 στοιχεία) είναι συνήθως επιτρεπτά.

- **Element Volume Ratio:** Εκφράζει το λόγο του μέγιστου προς τον ελάχιστο όγκο του στοιχείου που εφάπτεται στον κόμβο. Η τιμή που επιστρέφεται δίνει ένα μέτρο του τοπικού συντελεστή διαστολής (Local Expansion Factor). Ανάλογα με το πλέγμα, ενδέχεται να μην υπάρχει η δυνατότητα βελτίωσης της προβληματικής τιμής.
- **Connectivity Number:** Εκφράζει το πλήθος των στοιχείων που εφάπτονται με έναν κόμβο. Η τιμή που επιστρέφεται είναι η μέγιστη και υπολογίζεται για κάθε στοιχείο. Μεγάλες τιμές του “connectivity number” ενδέχεται να επιβραδύνουν την επίλυση του προβλήματος σε δομημένα πλέγματα (structured mesh). Αντιθέτως, κάτι τέτοιο δε συμβαίνει σε μη δομημένα πλέγματα (unstructured mesh).

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας, παρουσιάστηκαν σφάλματα στα στατιστικά πλέγματος, τα οποία στη συνέχεια εξαλείφθηκαν με κατάλληλη πύκνωση του πλέγματος στις επίμαχες περιοχές και αλλαγή των παραμέτρων του (4.2.3.1).

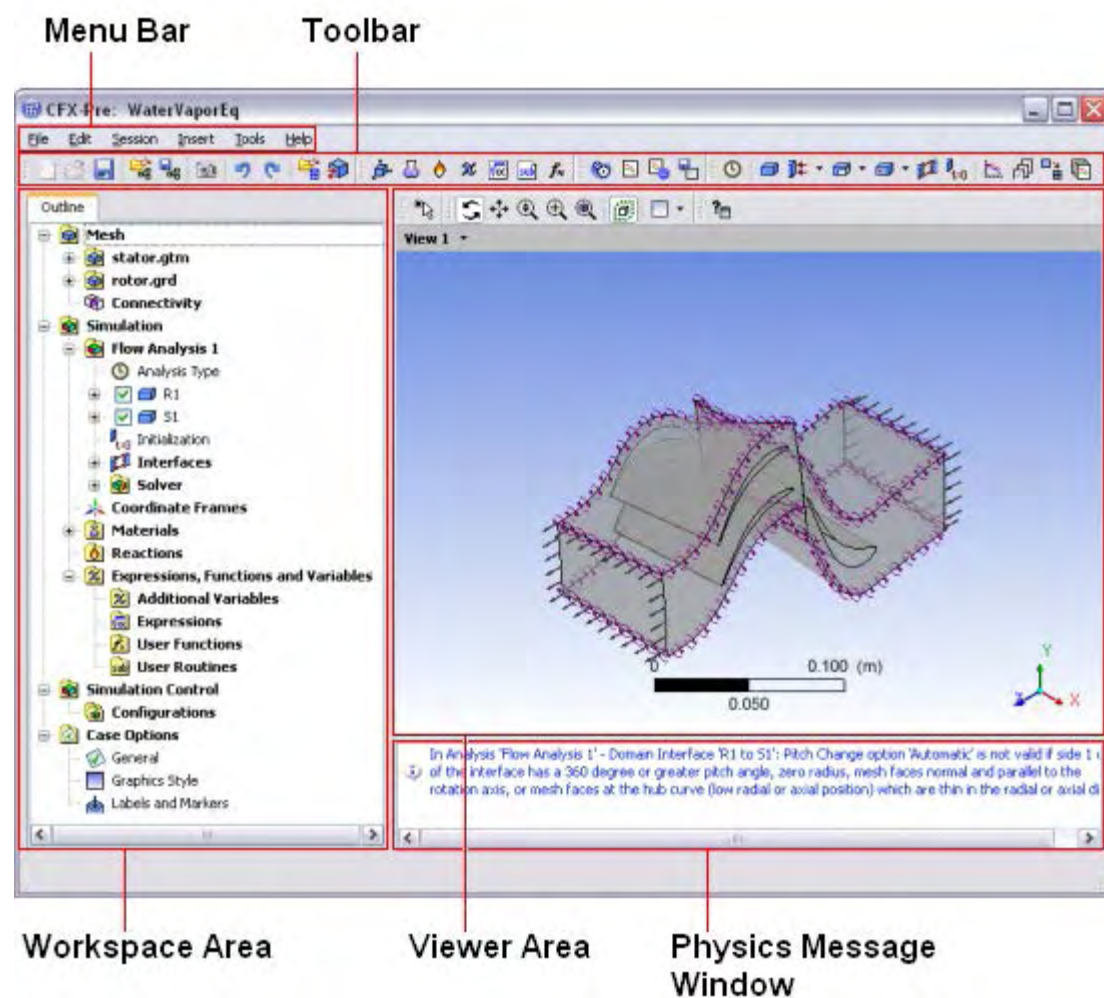
## 5 PRE-PROCESSING: ANSYS CFX-PRE

### 5.1 Εισαγωγή στο CFX-Pre

Το CFX-Pre είναι το πρόγραμμα στο οποίο ορίζονται από την σκοπιά της φυσικής τα προβλήματα που λύνει το Ansys CFX. Αρχικά, εισάγεται το πλέγμα στο CFX-Pre, το οποίο στην συγκεκριμένη μελέτη μορφοποιήθηκε με το πρόγραμμα TurboGrid, ενώ στην συνέχεια επιλέγονται τα φυσικά μοντέλα τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση. Το CFX-Pre είναι το τελευταίο στάδιο πριν την επίλυση του προβλήματος με το πρόγραμμα CFX-Solver.

#### 5.1.1 Το γραφικό περιβάλλον του CFX-Pre

Το γραφικό περιβάλλον του CFX-Pre απαρτίζεται από πέντε μέρη, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-1.



Εικόνα 5-1 Παράδειγμα γραφικού περιβάλλοντος του CFX-Pre



### **1) Viewer Area:**

Στην Viewer Area απεικονίζονται οι γεωμετρίες και τα πλέγματα τα οποία έχουν ήδη εισαχθεί προηγουμένως. Στην συγκεκριμένη περιοχή επίσης, απεικονίζονται οι συνοριακές συνθήκες τις οποίες επιβάλλει ο χρήστης. Η δυνατότητα της οπτικοποίησης αυτών των πληροφοριών είναι πολύ σημαντική διότι ο χρήστης αποκτάει μια πιο σφαιρική άποψη του προβλήματος το οποίο καλείται να λύσει.

### **2) Physics Message Window**

Καθ' όλη την διάρκεια χρήσης του προγράμματος, το CFX-Pre ελέγχει όλες τις ενέργειες τις οποίες κάνει ο χρήστης. Το CFX-Pre έχει την δυνατότητα να ελέγχει εάν τα φυσικά μοντέλα που εισάγει ο χρήστης είναι συνεπή, συγκρίνοντας τον με στοιχεία τα οποία υπάρχουν ήδη στις βιβλιοθήκες του προγράμματος. Συνεπώς, όταν το πρόγραμμα εντοπίσει μια ασυνέπεια η οποία αφορά το κομμάτι της Φυσικής που διέπει την εκάστοτε προσομοίωση, τότε εμφανίζεται ένα μήνυμα με κόκκινα γράμματα για να υποδείξει στον χρήστη το σφάλμα που υπάρχει.

Συνήθως υπάρχουν δύο περιπτώσεις κατά τις οποίες το CFX-Pre εμφανίζει στην οθόνη ότι υπάρχει σφάλμα.

- a) Το CFX-Pre έχει ορίσει αρκετές ρυθμίσεις τις οποίες έχει προεπιλέξει. Ωστόσο, εάν ο χρήστης προσπαθεί να εκτελέσει μία προσομοίωση η οποία δεν μπορεί να έχει τις προεπιλεγμένες ρυθμίσεις, τότε το CFX-Pre επεμβαίνει και δίνει πληροφορίες στον χρήστη αναφορικά με το ποιες ρυθμίσεις πρέπει να αλλάξει. Τέτοιου είδους σφάλματα προκύπτουν συχνά στις ρυθμίσεις της τύρβης όπου η επιλογή του σωστού μοντέλου τύρβης είναι καθοριστικής σημασίας για την προσομοίωση, αλλά και του Solver, και συγκεκριμένα στο χρονικό βήμα όπου πρέπει να επιλέγεται προσεκτικά από τον χρήστη.
- b) Κατά την τροποποίηση ενός ήδη υπάρχοντος μοντέλου. Αρκετές φορές ο χρήστης αλλάζει κάποιες παραμέτρους της προσομοίωσης χωρίς συντεταγμένο τρόπο και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να παρουσιάζονται ασυνέπειες οι οποίες αφορούν το κομμάτι της Φυσικής της προσομοίωσης.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι εάν δεν παρουσιάζονται σφάλματα στο Physics Message Window, τότε ο χρήστης είναι έτοιμος να περάσει στο επόμενο στάδιο της προσομοίωσης το οποίο είναι η εκκίνηση του Solver.

### **3) Workspace Area**

Το μεγαλύτερο κομμάτι των παραμέτρων που μπορεί να τροποποιήσει ο χρήστης βρίσκεται στο αριστερό μέρος της οθόνης σε δένδροειδή μορφή. Μέσω της δένδροειδούς μορφής, υπάρχει μία ορθή δομή των παραμέτρων, αφού αυτές χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες. Κάποιες από αυτές τις κατηγορίες είναι το grid (περιέχει κυρίως ρυθμίσεις για την εισαγωγή του στο CFX-Pre) και το simulation (περιέχει ρυθμίσεις για τις συνοριακές συνθήκες, για τον Solver καθώς και τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση).

Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο μέρος του Workspace Area είναι το menu Outline. Εκεί υπάρχει η δένδροειδής δομή με την συντριπτική πλειοψηφία των παραμέτρων οι οποίες επηρεάζουν την προσομοίωση.

### **4) Menu Bar**

Το menu bar παρέχει την δυνατότητα στον χρήστη να έχει πρόσβαση στις περισσότερες λειτουργίες του CFX-Pre. Πιο συγκεκριμένα, σε αυτή την περιοχή υπάρχουν έξι υπομενού τα οποία περιέχουν τις αντίστοιχες λειτουργίες.

➤ File Menu

Από αυτό το μενού ο χρήστης έχει την δυνατότητα να εκτελεί λειτουργίες που σχετίζονται με τον φάκελο της προσομοίωσης, όπως να σώζει και να ανοίγει φακέλους από τον σκληρό του δίσκο.

➤ Edit Menu

Δίνει στον χρήστη την δυνατότητα να μπει σε ένα νέο μενού το οποίο λέγεται Options και περιέχει τις προεπιλεγμένες ρυθμίσεις τις οποίες μπορεί να αλλάξει ο χρήστης. Επίσης, από το Edit Menu ο χρήστης μπορεί να εκτελέσει τις λειτουργίες Redo και Undo.

➤ Session Menu

Μέσα στο Session Menu υπάρχουν τρεις επιλογές: New Session, Start Recording και Stop Recording. Ένα Session στο CFX-Pre είναι στην ουσία μια καταγραφή όλων των ενεργειών που έχει κάνει ο χρήστης. Αυτή η καταγραφή αποθηκεύεται σε έναν φάκελο και ο χρήστης μπορεί να ανατρέξει σε αυτήν όποτε είναι αναγκαίο.

➤ Insert Menu

Μέσω αυτού του menu ο χρήστης έχει την δυνατότητα να δημιουργήσει καινούρια αντικείμενα στην προσομοίωση, όπως συνοριακές συνθήκες, ακόμα και καινούρια domains (να ορίσει δηλαδή καινούριες περιοχές που δεν προϋπήρχαν).

➤ Tools Menu

Το συγκεκριμένο menu παρέχει διάφορα εργαλεία στον χρήστη τα οποία χρησιμοποιούνται κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Το εργαλείο το οποίο χρησιμοποιήθηκε εκτενώς στο πλαίσιο αυτής της εργασίας είναι το turbo mode, για το οποίο θα υπάρξει πιο λεπτομερής ανάλυση στην συνέχεια του κεφαλαίου.

➤ Help Menu

Το Help menu δίνει στον χρήστη την δυνατότητα να έχει πρόσβαση στην διαδικτυακή βοήθεια που παρέχει η εταιρία. Μέσω του Help Menu ο χρήστης έχει πρόσβαση σε tutorials, εγχειρίδια προγραμμάτων και άλλο υλικό το οποίο μπορεί να φανεί χρήσιμο.

## 5) **Toolbar**

Το toolbar παρέχει στον χρήστη εύκολη πρόσβαση στις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες λειτουργίες του CFX-Pre. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το Toolbar περιέχει λειτουργίες οι οποίες υπάρχουν ήδη σε κάποιο menu του CFX-Pre, ωστόσο προς διευκόλυνση του χρήστη απεικονίζονται οι πιο σημαντικές σε αυτό το μέρος της οθόνης.

## 5.2 Συνοριακές Συνθήκες στο CFX-Pre

Συνοριακές Συνθήκες πρέπει να υπάρχουν σε κάθε περιοχή του όγκου ελέγχου που συνορεύει με μια άλλη. Στο CFX-Pre υπάρχουν πέντε είδη συνοριακών συνθηκών, ενώ για τον ρόλο του κάθε τύπου θα ακολουθήσει επεξήγηση:

- 1) **Inlet:** Μία συνοριακή συνθήκη εισαγωγής (inlet) χρησιμοποιείται όταν η ροή κατευθύνεται προς το εσωτερικό του όγκου ελέγχου της προσομοίωσης. Υπάρχουν

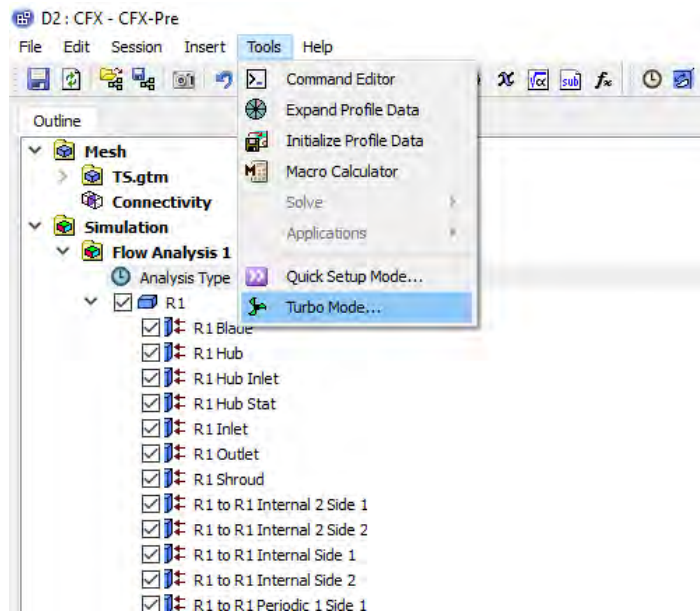
διαφορετικοί τρόποι να οριστεί η συγκεκριμένη συνοριακή συνθήκη. Ο χρήστης μπορεί να ορίσει είτε την κάθετη ταχύτητα στο σύνορο, είτε την μαζική παροχή η οποία περνάει από το σύνορο, είτε την ολική πίεση ή την στατική πίεση στο σύνορο. Επίσης, για την επίλυση των εξισώσεων μεταφοράς θερμότητας πρέπει να ορίζεται και η θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου (στατική ή ολική).

- 2) **Outlet:** Μία συνοριακή συνθήκη εξόδου (outlet) χρησιμοποιείται όταν η ροή κατευθύνεται προς το εξωτερικό του όγκου ελέγχου της προσομοίωσης. Υπάρχουν διαφορετικοί τρόποι να οριστεί η συγκεκριμένη συνοριακή συνθήκη. Ο χρήστης μπορεί να ορίσει είτε την κάθετη ταχύτητα στο σύνορο, είτε την μαζική παροχή η οποία περνάει από το σύνορο, είτε την ολική πίεση ή την στατική πίεση στο σύνορο. Σε αντίθεση με την συνθήκη Inlet, στην συνθήκη Outlet δεν χρειάζεται ο ορισμός της θερμοκρασίας.
- 3) **Opening:** Όταν ο χρήστης γνωρίζει ότι σε ένα σύνορο υπάρχει ροή και στις δύο κατευθύνσεις ή δεν γνωρίζει με βεβαιότητα την κατεύθυνση της ροής, τότε η κατάλληλη συνοριακή συνθήκη είναι το Opening. Ο χρήστης μπορεί να ορίσει είτε το διάνυσμα της ταχύτητας στο σύνορο, είτε την ολική πίεση ή την στατική πίεση στο σύνορο. Εάν ο χρήστης αποφασίσει να ορίσει την στατική ή την ολική πίεση, τότε το πρόγραμμα απαιτεί να οριστεί και η κατεύθυνση της ροής. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας δεν χρησιμοποιήθηκε αυτού του είδους η συνοριακή συνθήκη.
- 4) **Wall:** Τα τοιχώματα είναι στερεά τα οποία δεν μπορεί να διαπεράσει ένα ρευστό, ενώ στις πιο ρεαλιστικές προσομοιώσεις ισχύει η συνθήκη μη ολίσθησης. Σε αντίθεση με τα ρευστά, τα τοιχώματα μπορούν να είναι διαπερατά στην ροή θερμότητας ή να είναι αδιαβατικά ανάλογα με τις ανάγκες της προσομοίωσης.
- 5) **Symmetry Plane:** Αρκετά συχνά, όπως και στην περίπτωση της παρούσας εργασίας, ένα πρόβλημα έχει το χαρακτηριστικό να είναι συμμετρικό. Η συμμετρία χρησιμοποιείται με έναν έξυπνο τρόπο στο πρόγραμμα CFX-Pre, καθώς ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει πολύ λιγότερους υπολογιστικούς πόρους λύνοντας ένα μέρος του μοντέλου της προσομοίωσης αντί για ολόκληρο το μοντέλο. Αυτού του είδους οι συμμετρίες (γύρω από ένα επίπεδο) δηλώνονται στο πρόγραμμα μέσω των διεπιφανειών περιοδικότητας (Periodic Interface).

### 5.3 Turbo Mode

Όπως προαναφέρθηκε, στα πλαίσια αυτής της εργασίας, το Turbo Mode αποδείχτηκε ένα εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο του CFX-Pre, καθώς η εξειδίκευση του στις προσομοιώσεις στροβιλομηχανών απλούστευσε αρκετές πτυχές της εργασίας.

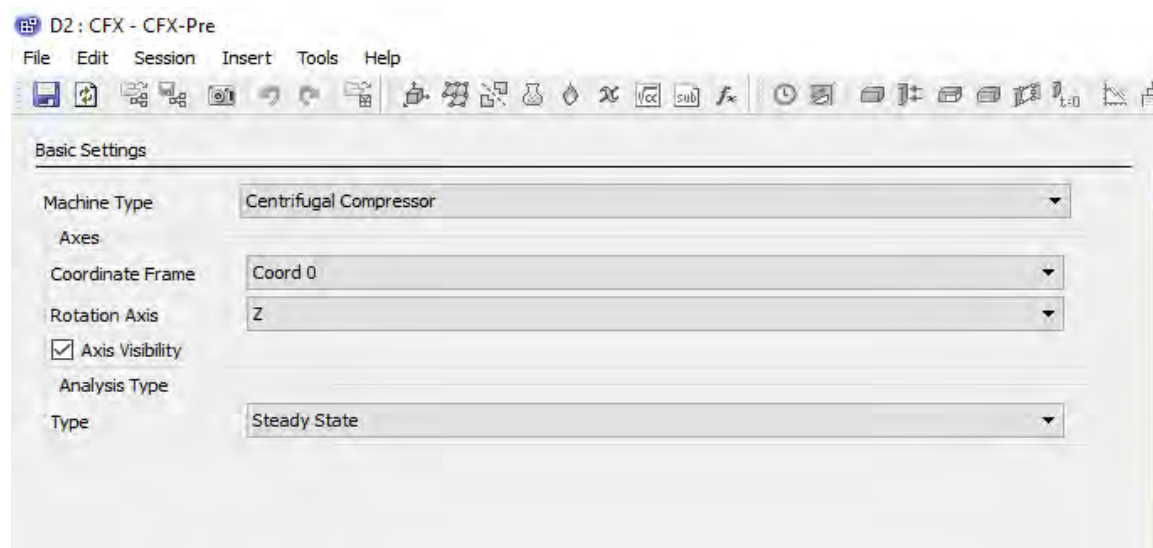
Για να ξεκινήσουμε να χρησιμοποιούμε το Turbo Mode, πρέπει να επιλέξουμε το Tools Menu, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-2.



Εικόνα 5-2 Εκκίνηση Turbo Mode

### 5.3.1 Basic Settings

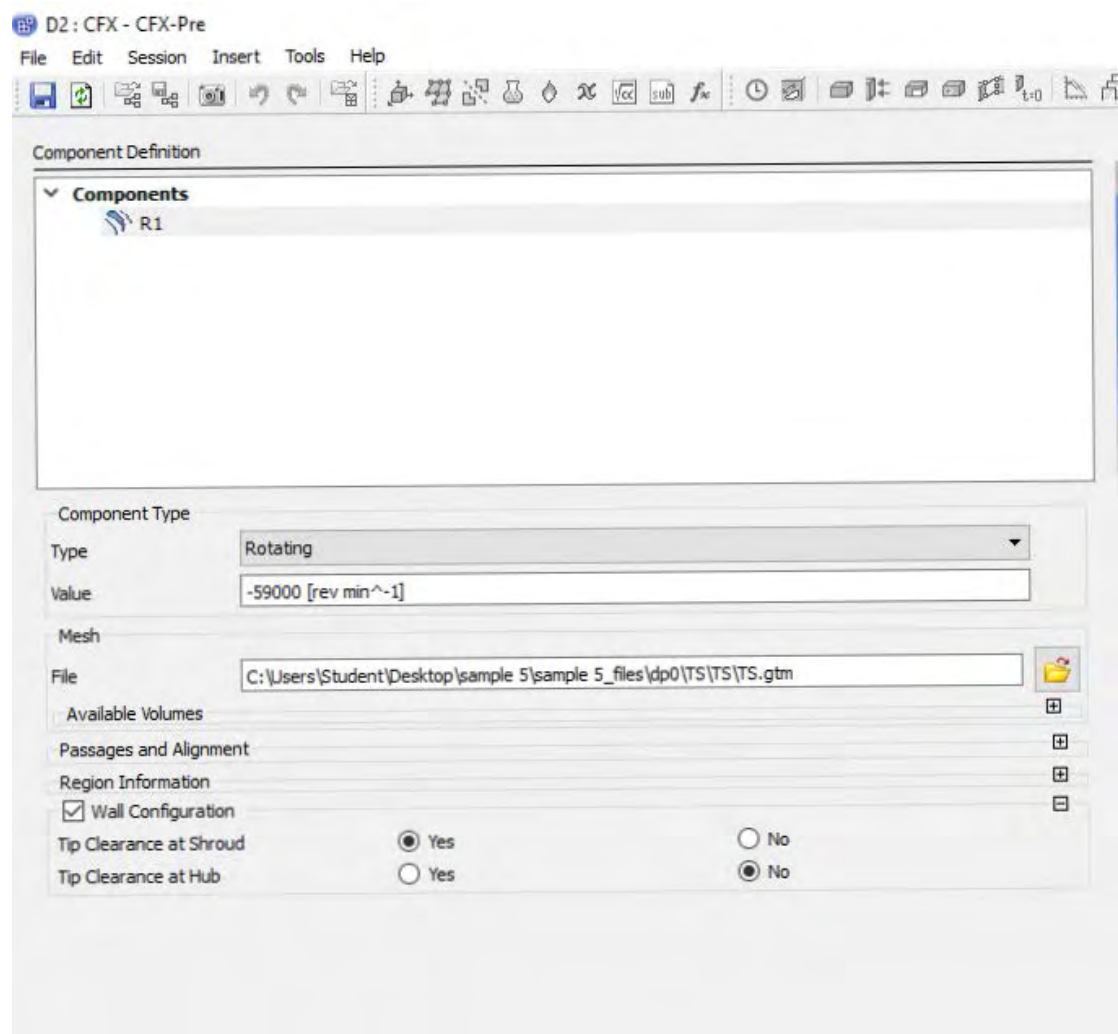
Αφού ξεκινήσει το Turbo Mode, εμφανίζεται το πρώτο παράθυρο (Εικόνα 5-3), το οποίο ονομάζεται Basic Settings και ο χρήστης πρέπει να επιλέξει τα βασικά στοιχεία της προσομοίωσης. Το πρώτο πράγμα που ζητείται από τον χρήστη είναι να δώσει τον τύπο της στροβιλομηχανής. Για την συγκεκριμένη εργασία, επιλέχθηκε ο φυγοκεντρικός συμπιεστής. Η επόμενη επιλογή αφορά τον άξονα περιστροφής του συμπιεστή, όπου επιλέγεται ο άξονας z όπως φαίνεται από την Τελευταία επιλογή είναι αυτή του τύπου της ανάλυσης, εάν είναι μεταβατική η κατάσταση λειτουργίας του συμπιεστή ή σταθερή, όπου επιλέχθηκε η σταθερή κατάσταση.



Εικόνα 5-3 Πρώτη καρτέλα του Turbo Mode

### 5.3.2 Component Definition

Η δεύτερη καρτέλα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-4 ονομάζεται Component Definition. Επιλέγοντας το domain R1, ο χρήστης οδηγείται σε ένα menu, όπου η πρώτη ρύθμιση που πρέπει να κάνει είναι να δηλώσει ότι περιστρέφεται ο όγκος ελέγχου, ενώ η δεύτερη ρύθμιση είναι η περιστροφική ταχύτητα του. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι η περιστροφική ταχύτητα ισούται με  $-59000 \text{ rpm}$  διότι ο συμπιεστής περιστρέφεται περί τον αρνητικό άξονα z. Στην συνέχεια, δηλώνεται το αρχείο πλέγματος που θα χρησιμοποιηθεί για την παρούσα προσομοίωση. Τα δύο επόμενα menu, τα οποία ονομάζονται Passages and Alignment και Region Information περιέχουν ρυθμίσεις οι οποίες δεν χρειάστηκαν αλλαγή σε σχέση με τις προεπιλογές. Το τελευταίο menu της καρτέλας Component Definition ονομάζεται Wall Configuration και ο χρήστης ρυθμίζει το εάν υπάρχει διάκενο στο Hub και στο Shroud. Είναι προφανές για τον συγκεκριμένο συμπιεστή ότι δεν υπάρχει διάκενο στο Hub του διότι το Hub με τα πτερύγια είναι ένα ενιαίο κομμάτι. Αντιθέτως, στο shroud του συμπιεστή υπάρχει ένα διάκενο το οποίο είναι πολύ σημαντικό να μην αγνοηθεί.



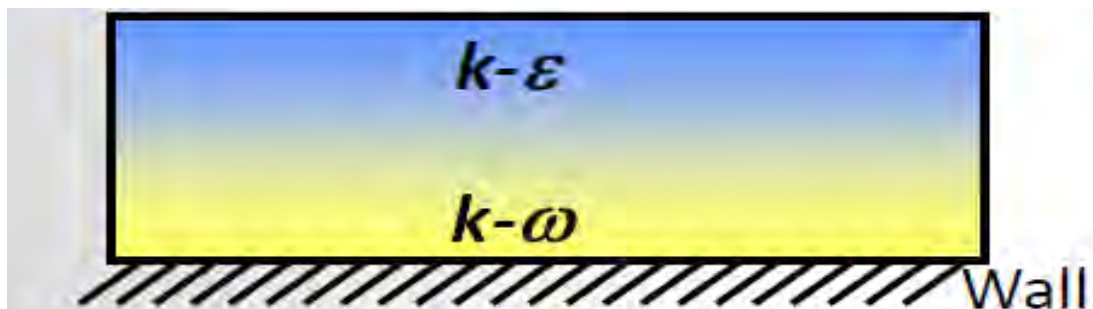
Εικόνα 5-4 Καρτέλα Component Definition

### 5.3.3 Physics Definition

Η τρίτη καρτέλα του Turbo Mode ονομάζεται Physics Definition. Η πρώτη ρύθμιση που πρέπει να κάνει ο χρήστης αφορά το εργαζόμενο μέσο της προσομοίωσης. Στην συγκεκριμένη εργασία, επιλέχθηκε ο αέρας με την παραδοχή ότι είναι ιδανικό αέριο. Η πίεση αναφοράς ορίστηκε στις 0 atm. Όσον αφορά στην ρύθμιση Heat Transfer, επιλέγουμε Total Energy, για να ληφθούν υπ' όψη όλοι οι τρόποι μετάδοσης θερμότητας.

Στη συνέχεια ο χρήστης καλείται να επιλέξει το μοντέλο τύρβης που θα χρησιμοποιηθεί στην προσομοίωση. Εκτενέστερη αναφορά στα μοντέλα τύρβης θα γίνει στην υποενότητα 6.2. Υπάρχουν τρεις επιλογές [4]:

- 1) Μοντέλο k-ε: Το συγκεκριμένο μοντέλο δεν είναι κατάλληλο για ροές όπου υπάρχει αποκόλληση της ροής, για ροές όπου το ρευστό περιστρέφεται και για ροές πάνω από καμπύλες επιφάνειες.
- 2) Μοντέλο k-ω: Το συγκεκριμένο μοντέλο είναι καταλληλότερο σε σχέση με το μοντέλο k-ε όσον αφορά τις ροές με αποκόλληση, τις ροές όπου ο αριθμός Reynolds είναι μεταβατικός και τις ροές όπου υπάρχει πρόσκρουση.
- 3) Μοντέλο Shear Stress Transport (SST): Το μοντέλο k-ω είναι πιο αξιόπιστο κοντά στο οριακό στρώμα μιας ροής, ενώ το μοντέλο k-ε είναι πιο αξιόπιστο σε ελεύθερες ροές. Το μοντέλο SST προσπαθεί να χρησιμοποιήσει τα δύο προαναφερθέντα μοντέλα ανάλογα με το που αποδίδουν καλύτερα. Έτσι, όπως φαίνεται και από την Εικόνα 5-5, στο μοντέλο SST κοντά στα τοιχώματα χρησιμοποιείται το μοντέλο k-ω ενώ μακριά από τα τοιχώματα χρησιμοποιείται το μοντέλο k-ε.



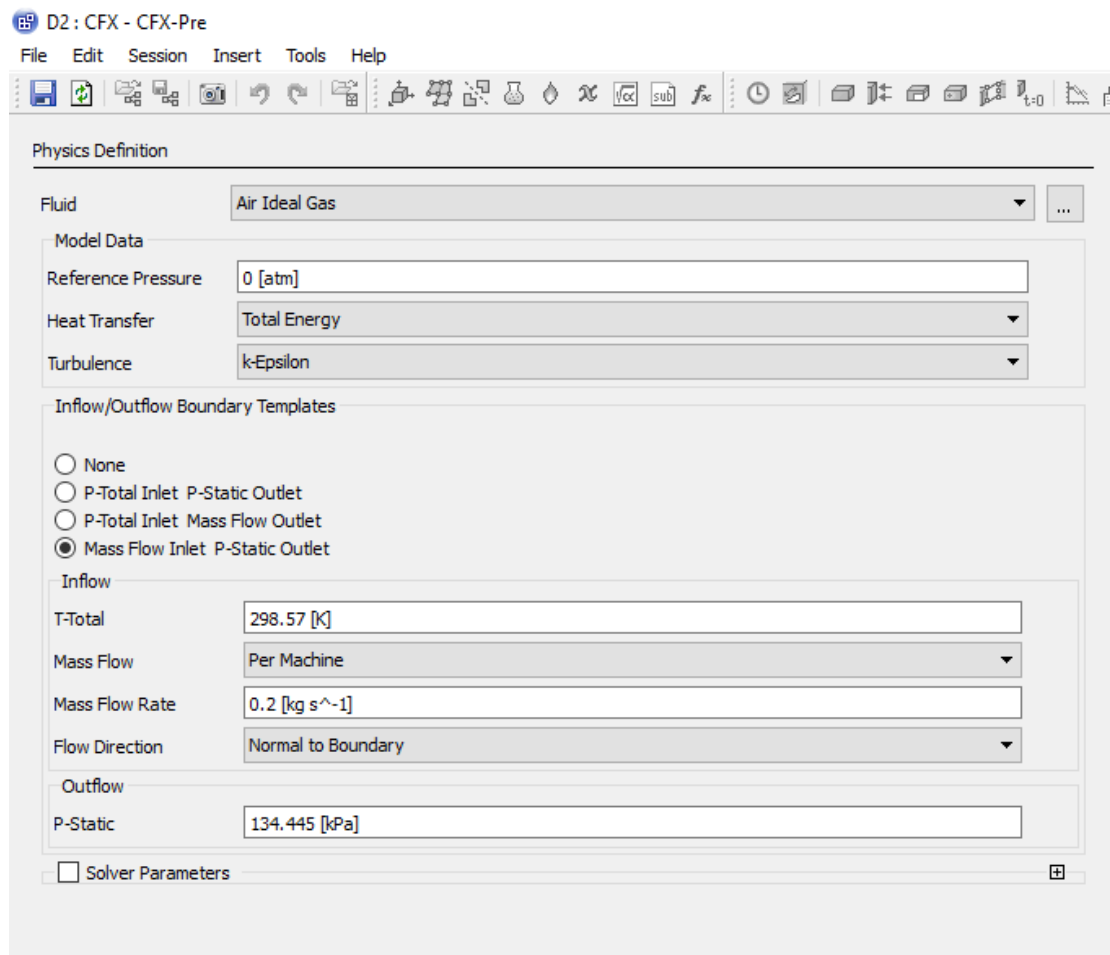
Εικόνα 5-5 Μοντέλο SST

Από τα παραπάνω κάποιος θα μπορούσε να βγάλει το συμπέρασμα ότι τα πιο κατάλληλα μοντέλα είναι το k-ω και το SST, ενώ το k-ε είναι το λιγότερο κατάλληλο. Ωστόσο, στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας, τα μοντέλα k-ω και SST παρουσίασαν πολλά προβλήματα οπότε χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο k-ε.

Μετά από τον ορισμό του μοντέλου της τύρβης, ακολουθεί ο ορισμός των συνοριακών συνθηκών. Το Turbo Mode αφήνει τον χρήστη να επιλέξει μεταξύ τριών συνδυασμών από συνοριακές συνθήκες:

- 1) Mass Flow Inlet P-Static Outlet: Πρόκειται για τον πιο ευσταθή συνδυασμό συνοριακών συνθηκών για προσομοίωση που υπάρχει μία είσοδος και μία έξοδος για το εργαζόμενο μέσο.
- 2) P-Total Inlet Mass Flow Outlet: Ο συγκεκριμένος συνδυασμός είναι αρκετά εύρωστος και παρουσιάζει αρκετά αξιόπιστα αποτελέσματα.
- 3) P-Total Inlet P-Static Outlet: Πρόκειται για τον πιο αναξιόπιστο συνδυασμό συνοριακών συνθηκών σε σχέση με τους προηγούμενους δύο και θα είναι προτιμητέο να μην χρησιμοποιείται σε προσομοιώσεις όπου υπάρχει μία είσοδος και μία έξοδος για το ρευστό.

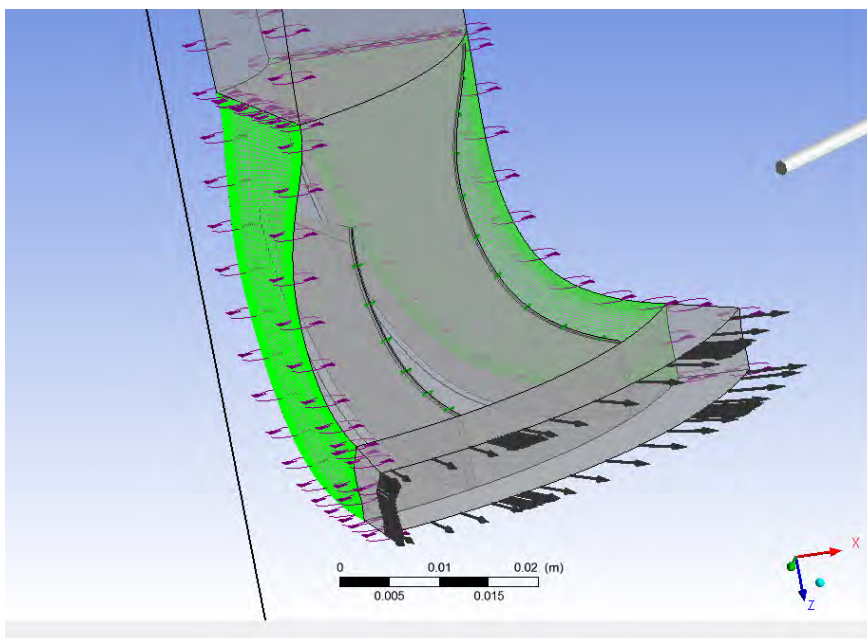
Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε ο πρώτος συνδυασμός συνοριακών συνθηκών ως πιο ευσταθής και πιο αξιόπιστος σε σχέση με τους άλλους δύο. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5-6, η ολική θερμοκρασία είναι 298.57 K, η μαζική παροχή στην είσοδο είναι 0.2 kg/s, ενώ η ολική πίεση στην έξοδο είναι 134.445 kPa.



Εικόνα 5-6 Physics Definition

### 5.3.4 Interface Definition

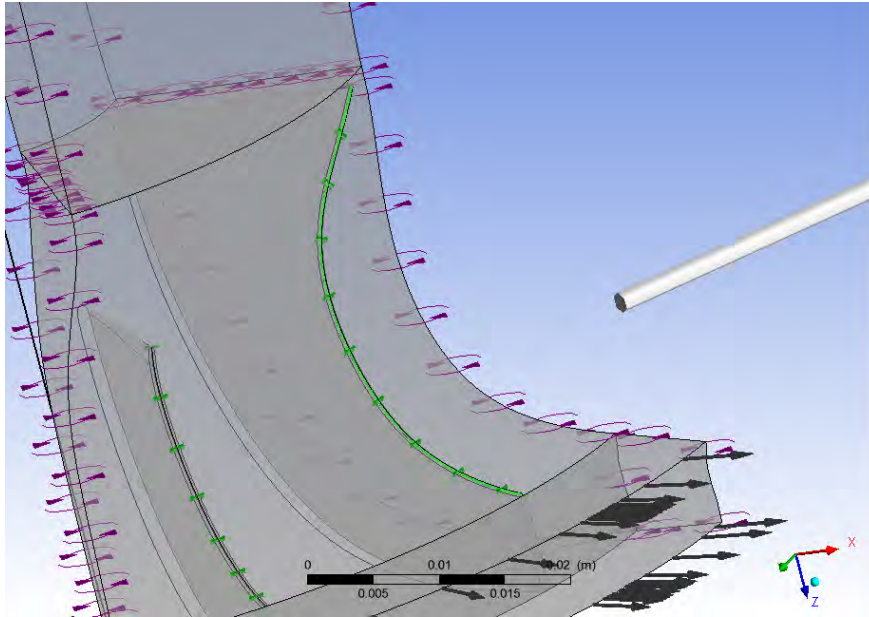
Οι διεπιφάνειες (interfaces) αποτελούν ένα χρήσιμο εργαλείο του CFX-Pre. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν για δύο σκοπούς. Ο πρώτος σκοπός που χρησιμοποιήθηκαν οι διεπιφάνειες ήταν για να δηλώσουμε την περιοδικότητα του χωρίου που μελετήθηκε. Για λόγους εξοικονόμησης υπολογιστικών πόρων, προτιμήθηκε να μην μελετηθούν όλα τα ζεύγη των πτερυγίων του συμπιεστή αλλά μόνο ένα ζεύγος πτερυγίων του. Συνεπώς, δηλώνοντας τις διεπιφάνειες όπου υπάρχει περιοδικότητα, είναι εφικτό να μελετηθεί μόνο ένα ζεύγος πτερυγίων. Ο δεύτερος σκοπός που χρησιμοποιήθηκαν οι διεπιφάνειες ήταν για ληφθεί υπ' όψη το διάκενο ανάμεσα στα πτερύγια και το Shroud. Όταν υπάρχουν πολύ μικρά διάκενα όπου υπάρχει ροή ρευστού, υπάρχει ο κίνδυνος το πρόγραμμα να θεωρήσει ότι υπάρχει ένα συνεχές στερεό, κάτι που θα οδηγήσει σε εσφαλμένα αποτελέσματα. Γι' αυτόν τον λόγο μέσω των διεπιφανειών δηλώθηκε ότι υπάρχει ροή ανάμεσα στα πτερύγια και το Shroud.



Εικόνα 5-7 Με πράσινο χρώμα διακρίνονται οι διεπιφάνειες οι οποίες ορίζουν περιοδικότητα.

Στην Εικόνα 5-8 απεικονίζεται με μια πράσινη γραμμή η διεπιφάνεια η οποία χρησιμοποιείται για να δηλωθεί το διάκενο ανάμεσα στο πτερύγιο και το Shroud.



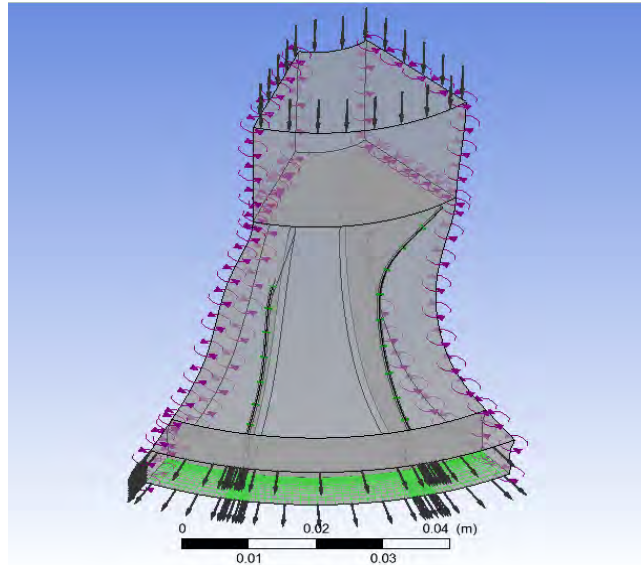


Εικόνα 5-8 Interface Διάκενου

### 5.3.5 Boundary Definition

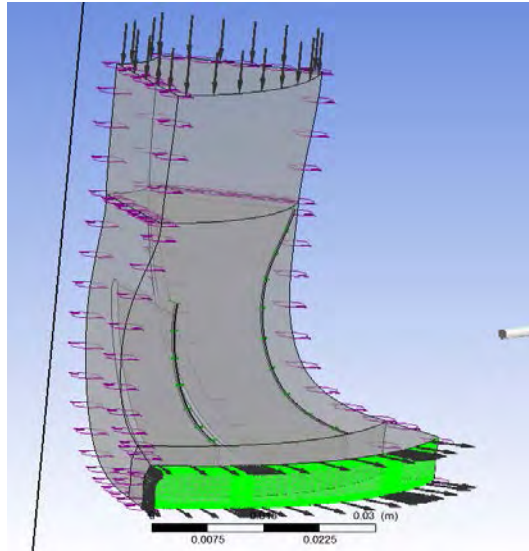
Οι συνοριακές συνθήκες στο Turbo Mode βρίσκονται στην προτελευταία καρτέλα που ο χρήστης πρέπει να συμπληρώσει. Επειδή το πλέγμα το οποίο έχει εισαχθεί στο CFX-Pre προέρχεται από το TurboGrid, το Turbo Mode ορίζει αυτόματα τα μέρη του συμπιεστή και τις επιφάνειες εισόδου και εξόδου του αέρα, ωστόσο δίνει στον χρήστη την δυνατότητα να πραγματοποιήσει μετατροπές τις οποίες επιθυμεί. Στην περίπτωση του συγκεκριμένου συμπιεστή, υπάρχουν επτά συνοριακές συνθήκες, οι οποίες περιγράφονται παρακάτω.

- 1) **R1 Blade:** Η συγκεκριμένη συνοριακή συνθήκη αφορά τα πτερύγια του συμπιεστή. Ο τύπος της συνοριακής συνθήκης είναι τοίχωμα, όπου ισχύει η συνθήκη μη ολίσθησης.
- 2) **R1 Hub:** Η συγκεκριμένη συνοριακή συνθήκη αφορά την βάση του συμπιεστή (Hub) και είναι το περιστρεφόμενο τοίχωμα που εδράζονται τα πτερύγια. Ο τύπος της συνοριακής συνθήκης είναι τοίχωμα και ισχύει η συνθήκη μη ολίσθησης.
- 3) **R1 Hub Inlet:** Η συγκεκριμένη συνοριακή συνθήκη αφορά το κομμάτι του συμπιεστή που βρίσκεται ακριβώς πάνω από το Hub (προηγούμενη συνοριακή συνθήκη). Το συγκεκριμένο τοίχωμα δεν περιστρέφεται, οπότε στο πρόγραμμα ορίζεται ως Counter Rotating Wall.
- 4) **R1 Hub Stat:** Η συγκεκριμένη συνοριακή συνθήκη αφορά το Hub, και βρίσκεται στην έξοδο του συμπιεστή μετά τα πτερύγια (ακολουθώντας την ροή του αέρα). Το συγκεκριμένο μέρος δεν περιστρέφεται οπότε στο πρόγραμμα ορίστηκε ως Counter Rotating Wall.



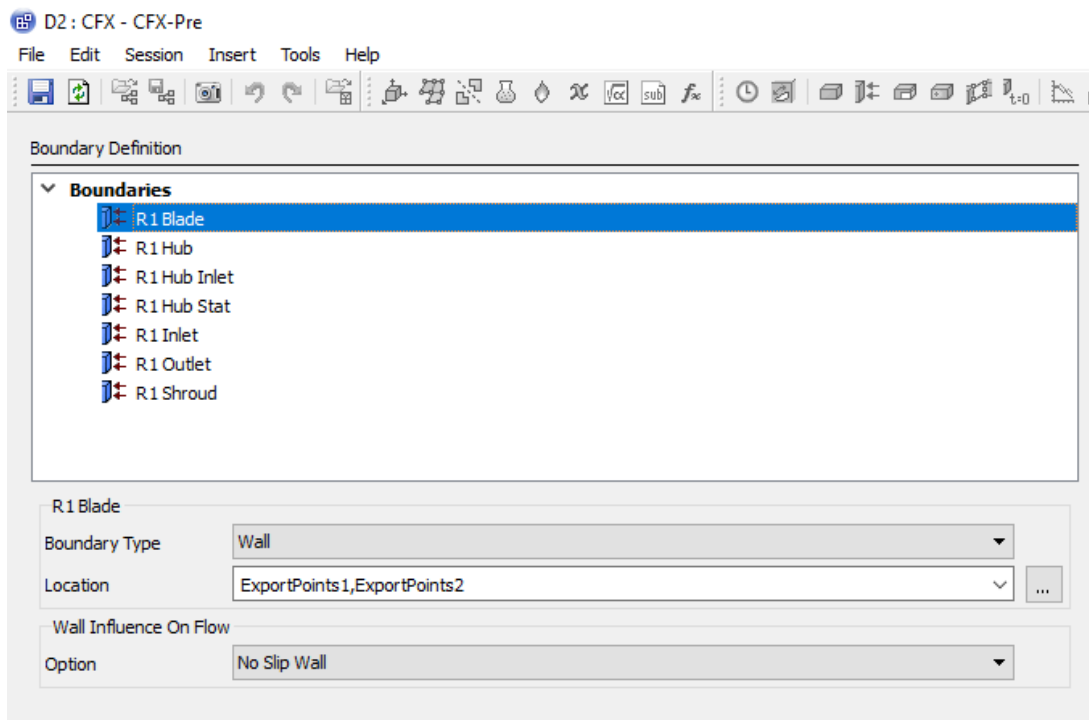
Εικόνα 5-9 Με πράσινο χρώμα απεικονίζεται η επιφάνεια στην οποία ισχύει η συνοριακή συνθήκη R1 Hub Stat

- 5) **R1 Inlet:** Η συγκεκριμένη συνοριακή συνθήκη αφορά την επιφάνεια από την οποία εισέρχεται ο αέρας στον όγκο ελέγχου. Γι' αυτόν τον λόγο, ο τύπος της συνοριακής συνθήκης ορίζεται ως Inlet. Επίσης, εμφανίζεται η μαζική παροχή (0.2kg/s) και η ολική θερμοκρασία του αέρα (298.57 K), στοιχεία τα οποία είχαν οριστεί στην καρτέλα Physics Definition.
- 6) **R1 Outlet:** Η συγκεκριμένη συνοριακή συνθήκη αφορά την επιφάνεια από την οποία εξέρχεται ο αέρας από τον ρότορα. Συνεπώς, στην ρύθμιση Boundary Type, ο χρήστης πρέπει να επιλέξει Outlet, ενώ εμφανίζεται και η Στατική πίεση (134.445 kPa) η οποία είχε οριστεί στην καρτέλα Physics Definition. Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η συνοριακή συνθήκη outlet, που αντιπροσωπεύει το σύνορο από το οποίο εξέρχεται ο αέρας από τον όγκο ελέγχου, δεν συμπίπτει με την έξοδο του αέρα από τον συμπιεστή. Η έξοδος του αέρα από τον συμπιεστή βρίσκεται μετά τον διαχύτη και όχι μετά τον ρότορα, όπως αφήνεται να εννοηθεί με την συνοριακή συνθήκη outlet.



Εικόνα 5-10 Με πράσινο χρώμα απεικονίζεται η επιφάνεια στην οποία ισχύει η συνοριακή συνθήκη R1 Outlet

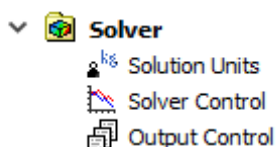
- 7) **R1 Shroud:** Η συγκεκριμένη συνοριακή συνθήκη αφορά το κέλυφος του συμπιεστή (shroud). Στους φυγοκεντρικούς συμπιεστές το Shroud είναι ένα τοίχωμα το οποίο δεν περιστρέφεται, οπότε ο χρήστης στην ρύθμιση Boundary Type πρέπει να επιλέξει Wall ενώ στην ρύθμιση Wall Influence On Flow πρέπει να επιλέξει Counter Rotating Wall.



Εικόνα 5-11 Καρτέλα Boundary Definition

## 5.4 Solver

Αφού έχουν ορισθεί οι συνοριακές συνθήκες και οι υπόλοιπες παράμετροι στο Turbo Mode, στο δέντρο του Workspace Area είναι αναγκαίο να γίνουν κάποιες ρυθμίσεις για το πρόγραμμα το οποίο έπεται του CFX-Pre, το CFX-Solver. Οι ρυθμίσεις του Solver βρίσκονται κάτω από τις ρυθμίσεις των διεπιφανειών (interfaces), όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-12.



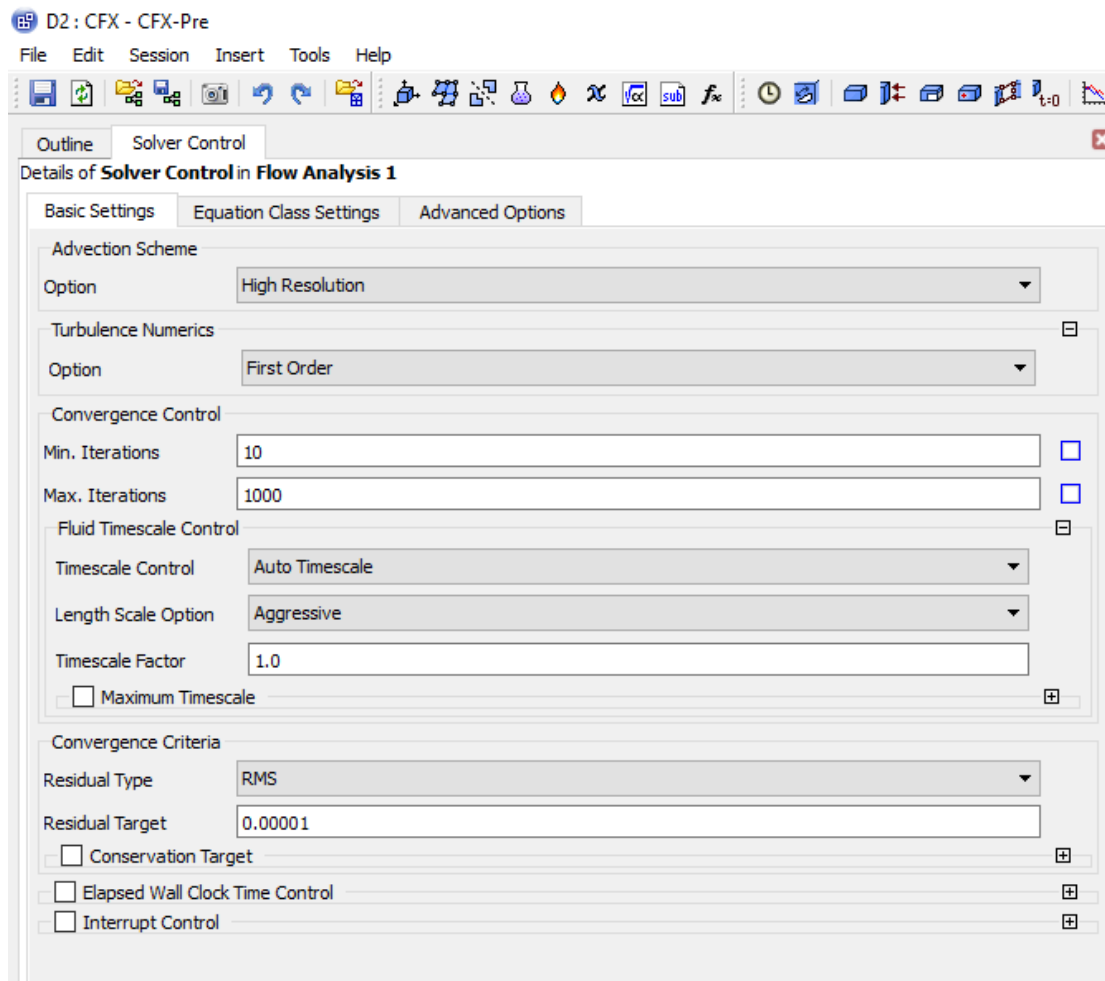
Εικόνα 5-12 Ρυθμίσεις του Solver

### 5.4.1 Solution Units

Στο μενού Solution Units, ο χρήστης μπορεί να ρυθμίσει το σύστημα μονάδων το οποίο θα ακολουθηθεί στο πρόγραμμα CFX-Solver. Στην παρούσα εργασία, οι μονάδες της μάζας είναι τα kilograms, οι μονάδες μήκους είναι τα millimeters, οι μονάδες του χρόνου είναι τα seconds, ενώ οι μονάδες της θερμοκρασίας είναι τα Kelvin. Τέλος, για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του προβλήματος, οι μονάδες γωνίας είναι τα radians ενώ οι μονάδες στερεάς γωνίας είναι τα steradians.

### 5.4.2 Solver Control

Η δεύτερη ομάδα ρυθμίσεων που αφορούν το πρόγραμμα Solver, ονομάζεται Solver Control. Περιέχει 3 παράθυρα ρυθμίσεων το Basic Settings, το Equation Class Settings και το Advanced Options, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5-13.



Εικόνα 5-13 Γραφικό περιβάλλον του Solver Control

Στο παράθυρο Basic Settings υπάρχουν οι βασικές και πιο ουσιαστικές ρυθμίσεις του Solver. Για την ρύθμιση Advection scheme υπάρχουν τρεις επιλογές [7]:

- 1) **Upwind**: Όπου οι όροι μεταφοράς στις εξισώσεις Navier-Stokes έχουν ακρίβεια 1<sup>ης</sup> τάξης. Μπορεί η ευστάθεια αυτού του σχήματος να είναι ικανοποιητική, ωστόσο λόγω της ακρίβειας 1<sup>ης</sup> τάξης, το σχήμα αυτό αρκετές φορές παρουσιάζει αριθμητική διάχυση (numerical diffusion).
- 2) **High Resolution**: Με αυτή τη ρύθμιση, ο αλγόριθμος αποφασίζει το που θα εφαρμόσει σχήματα μεγαλύτερης ακρίβειας και που μικρότερης με ένα εργαλείο το οποίο ονομάζει Blend Factor. Όπου δεν υπάρχουν μεγάλες κλίσεις της ταχύτητας, το Blend Factor παίρνει τιμές κοντά στο 1.0 για μεγαλύτερη ακρίβεια. Ωστόσο, κοντά στα τοιχώματα και σε περιοχές όπου η ταχύτητα αλλάζει δραματικά, το Blend Factor παίρνει τιμές κοντά στο 0 για να είναι ευσταθές το σχήμα. Στα πλαίσια της διπλωματικής, προτιμήθηκε αυτή η επιλογή, λόγω της αυτοματοποίησης του αλγορίθμου.
- 3) **Specified Blend Factor**: Με αυτήν την επιλογή, σε αντίθεση με την επιλογή High Resolution, ο χρήστης επιλέγει χειροκίνητα το Blend Factor. Σε αυτό το σημείο καλό θα ήταν να γίνει η υπενθύμιση ότι όταν το Blend Factor είναι κοντά στο 0, το σχήμα τείνει να γίνει το Upwind, το οποίο έχει χαμηλή ακρίβεια, ενώ όταν το Blend Factor είναι κοντά στο 1, το σχήμα έχει υψηλότερη ακρίβεια με κόστος όμως την αστάθεια.

Μετά την ρύθμιση για τους όρους μεταφοράς, σειρά έχουν τα αριθμητικά σφάλματα της τύρβης, όπου στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής ορίστηκαν να είναι 1<sup>ης</sup> τάξης. Οι εξισώσεις τύρβης χρησιμοποιούν σχήματα με ακρίβεια 1<sup>ης</sup> τάξης, ανεξαρτήτως της προηγούμενης ρύθμισης (Advection Scheme). Ωστόσο, η τακτική αυτή μπορεί να καταπατηθεί από τον χρήστη, επιλέγοντας το σχήμα High Resolution [7].

Στην συνέχεια, ο χρήστης έχει την δυνατότητα να ορίσει τον ελάχιστο και τον μέγιστο αριθμό επαναλήψεων που θα τρέξει ο αλγόριθμος, ασχέτως της σύγκλισης. Για την συγκεκριμένη εργασία επιλέχθηκαν οι 10 επαναλήψεις ως ελάχιστο και οι 1000 ως μέγιστο. Υπάρχουν λίγες πιθανότητες να υπάρχει σύγκλιση μετά τις 1000 επαναλήψεις, οπότε αν το πρόγραμμα δεν φτάσει σε σύγκλιση μετά από 1000 επαναλήψεις, ο αλγόριθμος σταματάει και ως αποτελέσματα αποθηκεύονται αυτά της τελευταίας επανάληψης.

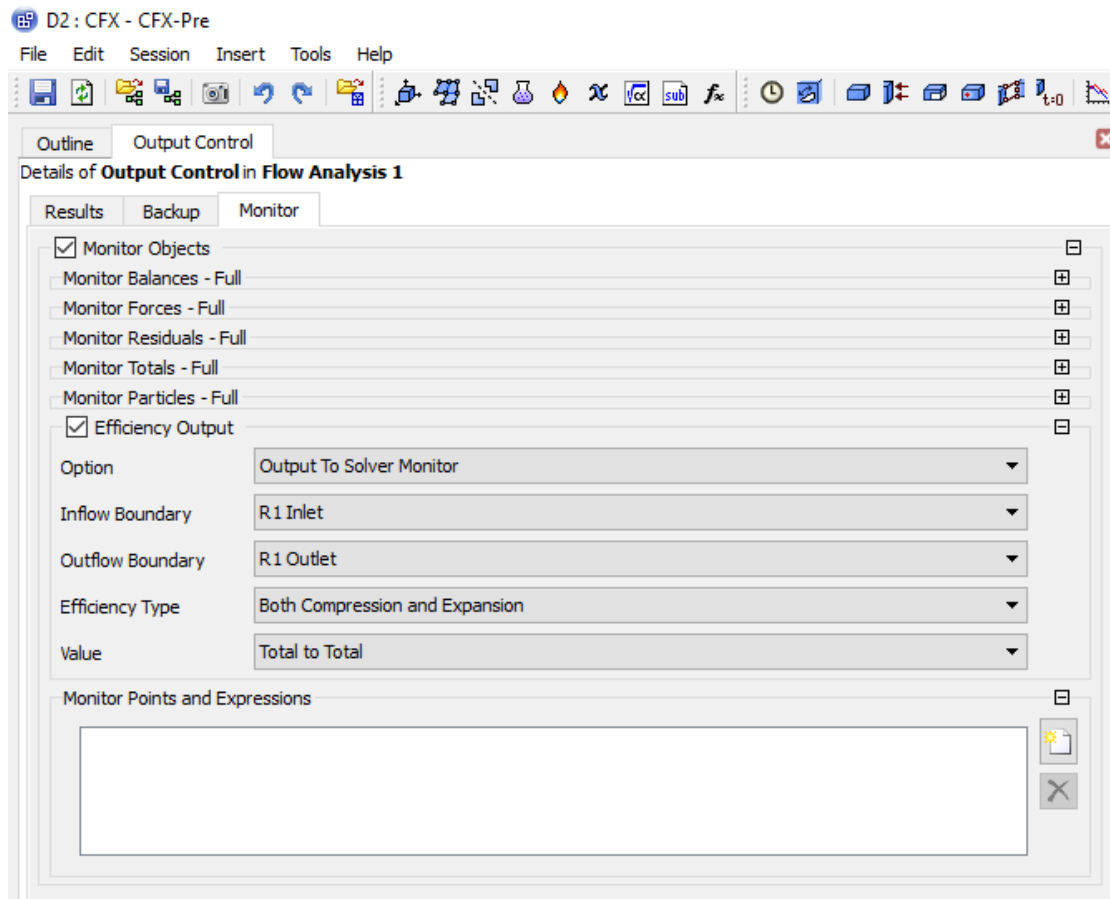
Για την ρύθμιση Timescale Control, επιλέχθηκε η προεπιλογή του CFX-Pre, που είναι το Auto Timescale. Μετά το Timescale Control, έπεται η ρύθμιση Length Scale Option, όπου χρήστης ρυθμίζει ένα χαρακτηριστικό μήκος, για τον λόγο L/U. Επιλέχθηκε το Aggressive διότι λαμβάνει υπόψιν όλο το μέγεθος του όγκου ελέγχου.

Πέραν των άλλων ρυθμίσεων, ο χρήστης έχει την δυνατότητα να αποφασίσει και για τα κριτήρια της σύγκλισης του CFX-Solver. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε ως κριτήριο σύγκλισης να είναι όταν τα μέσα υπόλοιπα (RMS Residuals) να είναι μικρότερα του  $10^{-5}$ . Πρέπει να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα είναι αξιόπιστα ακόμα και όταν τα RMS Residuals είναι μικρότερα του  $10^{-4}$ , που είναι και η προεπιλεγμένη τιμή του προγράμματος.

Τα υπόλοιπα δύο παράθυρα (Equation Class Settings και Advanced Options), περιείχαν ρυθμίσεις οι οποίες ήταν εκτός των στόχων της διπλωματικής εργασίας.

### 5.4.3 Output Control

Σε αυτό το παράθυρο ο χρήστης μπορεί να κάνει ρυθμίσεις οι οποίες αφορούν τα αποτελέσματα τα οποία βγάζει το πρόγραμμα CFX-Solver, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-14.



Εικόνα 5-14 Γραφικό περιβάλλον του Output Control

Το παράθυρο Output Control περιέχει τρεις καρτέλες: (Results tab, Backup tab, Monitor tab). Από τα παραπάνω, οι περισσότερες αλλαγές έγιναν στην καρτέλα “Monitor”. Στη συγκεκριμένη καρτέλα ο χρήστης μπορεί να ρυθμίσει ποια μεγέθη θα εμφανίζονται στην οθόνη του CFX-Solver κατά την διάρκεια της επίλυσης του προβλήματος. Πρέπει να τονιστεί ότι είναι εξαιρετικά σημαντικό κομμάτι της προσομοίωσης η παρακολούθηση διαφόρων μεγεθών, καθώς διότι ο χρήστης έχει την δυνατότητα να ελέγχει την προσομοίωση όσο αυτή ακόμα εκτελείται.

## 5.5 Ανακεφαλαίωση

Συνοψίζοντας το κεφάλαιο 5, έγινε μία λεπτομερής ανάλυση του γραφικού περιβάλλοντος που έχει το πρόγραμμα CFX-Pre. Η προσοχή εστιάστηκε στους πέντε τομείς που είναι χωρισμένο το CFX-Pre και στην οργάνωσή που έχουν ούτως ώστε να είναι φιλικά προς τον χρήστη. Στην συνέχεια υπήρξε ανάλυση του εργαλείου που χρησιμοποιήθηκε σε μεγάλο βαθμό κατά την διάρκεια της παρούσας εργασίας, του Turbo Mode. Το Turbo Mode διευκολύνει σημαντικά τις προσομοιώσεις των στροβιλομηχανών, καθώς είναι ένα εξειδικευμένο εργαλείο του CFX-Pre. Αφού ολοκληρωθούν όλες οι απαραίτητες ενέργειες στο πρόγραμμα CFX-Pre, τα αποτελέσματα αυτής της προεπεξεργασίας εισάγονται στο πρόγραμμα CFX-Solver, το οποίο είναι υπεύθυνο για την επίλυση των εξισώσεων που διέπουν την προσομοίωση.

## 6 ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΤΗΣ ΡΟΗΣ: ANSYS CFX-SOLVER

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται επιγραμματικά τα σημαντικότερα στοιχεία της θεωρίας πίσω από τη λειτουργία του Ansys CFX-Solver και των μεθόδων αντιμετώπισης της τυρβώδους ροής, καθώς και μια αναλυτική περιγραφή του γραφικού περιβάλλοντος και των λειτουργιών του Ansys CFX-Solver, όπως αυτό χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας.

### 6.1 Βασικές αρχές θεωρίας CFX-Solver

Σε αυτήν την υποενότητα παρουσιάζονται οι γενικές μορφές των μαθηματικών εξισώσεων που χρησιμοποιεί το Ansys CFX για τη μοντελοποίηση της ροής, καθώς και της μεταφοράς θερμότητας και μάζας [5]. Για λόγους απλότητας αποφεύγεται η εκτενέστερη περιγραφή των μαθηματικών μοντέλων, διότι ξεφεύγει από τους στόχους της εργασίας και θα απαιτούσε προχωρημένες μαθηματικές γνώσεις πάνω στην υπολογιστική ρευστοδυναμική (CFD) από τον αναγνώστη.

#### 6.1.1 Κυρίαρχες εξισώσεις

Οι εξισώσεις που επιλύονται από το Ansys CFX είναι οι ασταθείς εξισώσεις Navier-Stokes (unsteady Navier-Stokes equations in their conservation form) [5] [30].

##### 6.1.1.1 Εξισώσεις μεταφοράς

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι εξισώσεις διατήρησης μάζας, ορμής και ενέργειας στη γενική τους μορφή. Για τυρβώδεις ροές, όπως άλλωστε είναι και η ροή στο ρότορα του συμπιεστή, οι εξισώσεις αυτές επιλύονται κατά μέσο όρο οδηγώντας στην προσθήκη επιπλέον όρων. Αξίζει να αναφερθεί ότι οι όροι αυτοί περιγράφονται από μοντέλα τύρβης που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την κατάλληλη ανάλυση της τυρβώδους ροής και των συνεπειών της. Μερικά από τα μοντέλα περιγράφονται στη συνέχεια στην ενότητα 6.2.

Οι εξισώσεις διατήρησης μάζας, ορμής και ενέργειας στη γενική τους μορφή γράφονται ως εξής (εξισώσεις (6-1) έως (6-5)) :

➤ **Εξίσωση συνέχειας**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (6-1)$$

➤ **Εξισώσεις ορμής**

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \times \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{S}_M \quad (6-2)$$



Όπου ο τανυστής τάσης,  $\tau$ , περιγράφεται από την εξίσωση (6-3):

$$\tau = \mu(\nabla\mathbf{U} + (\nabla\mathbf{U})^T - \frac{2}{3}\delta\nabla \cdot \mathbf{U}) \quad (6-3)$$

➤ **Εξίσωση Ενέργειας**

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\mathbf{U} \cdot \tau) + \mathbf{U} \cdot \mathbf{S}_M + \mathbf{S}_E \quad (6-4)$$

όπου  $h_{tot}$  είναι η ολική ενθαλπία, η οποία σχετίζεται με τη στατική ενθαλπία  $h(T, p)$  μέσω της εξίσωσης (6-5):

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2}\mathbf{U}^2 \quad (6-5)$$

Ο όρος  $\nabla \cdot (\mathbf{U} \cdot \tau)$  παριστάνει το έργο λόγω των ιξωδών τάσεων (viscous stresses) και αποκαλείται όρος ιξώδους έργου (viscous work term). Αυτός περιγράφει την παραγωγή θερμότητας στο ρευστό λόγω των ιξωδών δυνάμεων και στις περισσότερες περιπτώσεις είναι αμελητέος.

Ο όρος  $\mathbf{U} \cdot \mathbf{S}_M$  παριστάνει το έργο λόγω ορμής εξωτερικών παραγόντων.

### 6.1.1.2 Καταστατικές Εξισώσεις

Οι εξισώσεις μεταφοράς που περιγράφηκαν στην προηγούμενη υποενότητα πρέπει να συνοδεύονται από καταστατικές εξισώσεις για την πυκνότητα και την ενθαλπία, ώστε το σύστημα να μπορεί να θεωρηθεί κλειστό (closed system). Στην πιο γενική τους περίπτωση, οι εξισώσεις αυτές έχουν την εξής μορφή:

$$\rho = \rho(p, T) \quad (6-6)$$

$$dh = \left. \frac{\partial h}{\partial T} \right|_p dT + \left. \frac{\partial h}{\partial p} \right|_T dp = c_p dT + \left. \frac{\partial h}{\partial p} \right|_T dp \quad (6-7)$$

$$c_p = c_p(p, T) \quad (6-8)$$

Η μορφή των εξισώσεων αλλάζει ανάλογα με το είδος του προβλήματος (ιδιότητες ρευστού, υλικού, κλπ.). Συνεπώς, ανάλογα με το αν το ρευστό θεωρηθεί ως ιδανικό ή πραγματικό, συμπιεστό ή μη συμπιεστό, οι καταστατικές εξισώσεις περιγράφονται από κατάλληλα μοντέλα. Για λόγους συντομίας θα περιγραφεί στη συνέχεια μόνο η περίπτωση του ιδανικού αερίου, όπως άλλωστε έχει θεωρηθεί και το εργαζόμενο μέσο στην περίπτωση μας (ατμοσφαιρικός αέρας ως ιδανικό αέριο).

Για ένα ιδανικό αέριο, η πυκνότητα υπολογίζεται από το νόμο των ιδανικών αερίων, όπου το  $c_p$  μπορεί να θεωρηθεί ως συνάρτηση μονάχα της θερμοκρασίας:

$$\rho = \frac{MW \cdot p_{abs}}{R_0 T} \quad (6-9)$$

$$dh = c_p dT \quad (6-10)$$

$$c_p = c_p(T) \quad (6-11)$$

όπου  $w$ : μοριακό βάρος αέρα,  $p_{abs}$ : απόλυτη πίεση και  $R_0$ : παγκόσμια σταθερά των αερίων.

## 6.2 Μοντέλα τύρβης

Οι τυρβώδης ροές αποτελούνται από διακυμάνσεις του πεδίου ροής συναρτήσει του χώρου και του χρόνου. Είναι ένα ιδιαίτερα πολύπλοκο φαινόμενο, λόγω του ότι είναι τριδιάστατο και ασταθές. Παρόλα αυτά πρέπει να ληφθεί πολύ σοβαρά υπόψη στην ανάλυση, καθώς μπορεί να έχει εξαιρετικά σημαντικές συνέπειες στα χαρακτηριστικά της ροής. Η τυρβώδης ροή παρατηρείται όταν οι αδρανειακές δυνάμεις του ρευστού γίνονται αρκετά σημαντικές συγκριτικά με τις ιξώδεις δυνάμεις και γενικά χαρακτηρίζεται από υψηλό αριθμό Reynolds.

Κατ' αρχήν, οι εξισώσεις Navier-Stokes περιγράφουν τόσο τις στρωτές όσο και τις τυρβώδεις ροές χωρίς την ανάγκη επιπλέον στοιχείων. Παρόλα αυτά, τυρβώδεις ροές που χαρακτηρίζονται από ρεαλιστικούς αριθμούς Reynolds εμφανίζουν μεγάλο εύρος στα χαρακτηριστικά τους (turbulent length, time scales) και γενικά παρουσιάζουν μεγέθη (length scales) πολύ μικρότερης τάξης μεγέθους συγκριτικά με το μικρότερο πεπερασμένο όγκο του πλέγματος που μπορεί πρακτικά να χρησιμοποιηθεί για αριθμητική ανάλυση. Ανάλυση τέτοιων ροών με τη μέθοδο DNS (Direct Numerical Simulation) θα απαιτούσε υπολογιστική ισχύ της οποίας η τάξη μεγέθους θα ήταν σημαντικά μεγαλύτερη ακόμα και από την υπολογιστική ισχύ που θα είναι διαθέσιμη στο προβλεπόμενο μέλλον.

Έτσι, για να εκτιμηθούν σε ικανοποιητικό βαθμό οι επιδράσεις της τύρβης στη ροή, αναπτύχθηκαν μέθοδοι επίλυσης που βασίζονται σε μοντέλα τύρβης (turbulence models). Τα μοντέλα αυτά σχεδιάστηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να μην απαιτούν πύκνωση του πλέγματος σε απαγορευτικό βαθμό και ανάλυση DNS.

Ενημερωτικά, η προσομοίωση DNS (Direct Numerical Simulation) λύνει τις εξισώσεις Navier-Stokes χωρίς τη χρήση μοντέλων τύρβης. Κάτι τέτοιο προφανώς δε σημαίνει πως αγνοεί την ύπαρξη της τυρβώδους ροής, αλλά ο υπολογισμός της λαμβάνει μέρος σε ολόκληρο το εύρος των μεγεθών της τύρβης και όχι με τη χρήση κάποιας μέσης τιμής, όπως θα δούμε στη συνέχεια στην ενότητα 6.2.1. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάγκη τεράστιας υπολογιστικής ισχύς.

Στη συνέχεια περιγράφονται ορισμένα από αυτά τα μοντέλα.

### 6.2.1 Στατιστικά μοντέλα τύρβης (Statistical turbulence models)

Για μικρές χρονικές κλίμακες επίλυσης των εξισώσεων, αλλά ταυτόχρονα πολύ μεγαλύτερες από τις χρονικές κλίμακες των διακυμάνσεων της τύρβης, οι τυρβώδεις ροές μπορούν να χαρακτηριστούν από δύο όρους. Ο ένας είναι σταθερός και αποτελεί έναν μέσο όρο, ενώ ο δεύτερος είναι μία χρονικά κυμαινόμενη τιμή ή αλλιώς, διακύμανση. Για παράδειγμα η ταχύτητα του ρευστού  $U_i$  μπορεί να περιγραφεί σύμφωνα με την προηγούμενη θεωρία από την εξίσωση (6-12):

$$U_i = \bar{U}_i + u_i \quad (6-12)$$

όπου  $u_i$ : χρονικά μεταβαλλόμενος όρος και  $\bar{U}_i$ : σταθερός όρος που υπολογίζεται από την εξίσωση (6-13):

$$\bar{U}_i = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} U_i dt \quad (6-13)$$

όπου  $\Delta t$ : μία κλίμακα χρόνου μεγαλύτερη σε σχέση με τις χρονικές κλίμακες των διακυμάνσεων της τύρβης.

Γενικά, τα μοντέλα τύρβης τροποποιούν τις αρχικές ασταθείς εξισώσεις Navier-Stokes εισάγοντας σταθερούς μέσους όρους και χρονικά κυμαινόμενους όρους για την παραγωγή των εξισώσεων RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes). Οι εξισώσεις RANS αντιπροσωπεύουν τις μέσες τιμές των μεγεθών της ροής, ενώ ταυτόχρονα μοντελοποιούν τις επιδράσεις της τυρβώδους ροής χωρίς την ανάγκη ανάλυσης των διακυμάνσεων της τύρβης. Μοντέλα τύρβης που βασίζονται στις εξισώσεις RANS είναι γνωστά ως στατιστικά μοντέλα τύρβης (Statistical Turbulence Models), λόγω της διαδικασίας που ακολουθείται για την παραγωγή των μέσων τιμών και κατ' επέκταση των εξισώσεων RANS.

Η προσομοίωση των εξισώσεων RANS μειώνει σημαντικά το υπολογιστικό φορτίο συγκριτικά με μία προσομοίωση DNS. Παρόλα αυτά, η διαδικασία που ακολουθείται για την παραγωγή των εξισώσεων RANS εισάγει επιπλέον άγνωστους όρους που περιέχουν γινόμενα των χρονικά κυμαινόμενων μεγεθών. Αυτοί οι επιπλέον όροι λέγονται τυρβώδεις τάσεις ή τάσεις Reynolds (turbulent/Reynolds stresses) και ο υπολογισμός τους είναι δύσκολος. Αξίζει να αναφερθεί ότι αντίστοιχοι όροι εμφανίζονται και στην τροποποιημένη εξίσωση ενέργειας (Reynolds averaged energy equation) και ονομάζονται Reynolds flux.

Για να επιτευχθεί επάρκεια (closure) στο σύστημα των εξισώσεων, δηλαδή ο αριθμός των εξισώσεων να είναι ίσος με το πλήθος των αγνώστων, οι τάσεις Reynolds (Reynolds stresses) και ο Reynolds flux πρέπει να μοντελοποιηθούν από επιπλέον εξισώσεις που περιέχουν γνωστά μεγέθη. Ο τύπος του μοντέλου τύρβης καθορίζεται από το είδος των εξισώσεων που χρησιμοποιήθηκαν ώστε να επιτευχθεί επάρκεια στο σύστημα. Τα μοντέλα αυτά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ευρέως σε δύο ομάδες:

- Eddy viscosity models
- Reynolds stress models

## 6.2.2 Eddy viscosity turbulence models

Τα μοντέλα αυτά βασίζονται στη θεωρία ότι η τύρβη αποτελείται από μικρές δίνες, οι οποίες διαρκώς δημιουργούνται και διαλύονται. Επιπλέον γίνεται η υπόθεση ότι οι δίνες αυτές έχουν τάσεις Reynolds ανάλογες με τις κλίσεις της μέσης ταχύτητας.

Τα μοντέλα τύρβης ανάλογα με το πλήθος των επιπλέον εξισώσεων που χρησιμοποιούνται ώστε να επιτευχθεί επάρκεια (closure) χωρίζονται στις παρακάτω τρεις κατηγορίες:

- The Zero Equation Model in ANSYS CFX
- Two Equation Turbulence Models
- One Equation Turbulence Models (The Eddy Viscosity Transport Model)

Το ANSYS CFX δίνει τη δυνατότητα επιλογής ανάμεσα σε τρία μοντέλα τύρβης που ανήκουν στην κατηγορία “two equation turbulence models”: k-ε (k-epsilon model), k-ω (k-omega model) και SST (shear stress transport model). Εφόσον είναι τα μόνα που θα μας απασχολήσουν, θα γίνει στη συνέχεια μία σύντομη περιγραφή αυτών των μοντέλων, ενώ τα υπόλοιπα μοντέλα θα αναφερθούν μόνο επιγραμματικά χάριν συντομίας.

### 6.2.2.1 The zero equation model in ANSYS CFX

Τα μοντέλα αυτά είναι εξαιρετικά απλά, αφού υπολογίζουν τους επιπλέον αγνώστους μέσω μιας εμπειρικής σχέσης, χωρίς την ανάγκη επίλυσης επιπρόσθετων εξισώσεων μεταφοράς. Αυτός είναι και ο λόγος που αυτά τα μοντέλα ονομάζονται “zero equation”.

### 6.2.2.2 Two equation turbulence models

Τα μοντέλα αυτά είναι τα πιο ευρέως διαδεδομένα μοντέλα τύρβης, καθώς προσφέρουν έναν λογικό συνδυασμό αριθμητικού φόρτου και υπολογιστικής ακρίβειας. Θεωρούνται πολύ πιο εξελιγμένα από τα μοντέλα “zero equation” και χρησιμοποιούν δύο ξεχωριστές εξισώσεις μεταφοράς για τον υπολογισμό της ταχύτητας και του μεγέθους της τύρβης. Αξιοσημείωτα μοντέλα “two equation” είναι τα παρακάτω:

- The k-epsilon turbulence model
- The k-omega turbulence model
- The shear stress transport turbulence model

Τα μοντέλα k-ε και k-ω συσχετίζουν τις τάσεις Reynolds με τις κλίσεις της μέσης ταχύτητας της τύρβης (mean velocity gradients) και το ιξώδες της τύρβης (turbulent viscosity). Το ιξώδες της τύρβης μοντελοποιείται ως το γινόμενο της ταχύτητας της τύρβης (turbulent velocity) και του εύρους του μεγέθους της (length scale).

Στα μοντέλα δύο εξισώσεων, η ταχύτητα της τύρβης υπολογίζεται από τη κινητική ενέργεια της τύρβης, η οποία προκύπτει από την επίλυση της εξίσωσης μεταφοράς της. Το εύρος μεγέθους της τύρβης εκτιμάται από δύο ιδιότητες του τυρβώδους πεδίου, που συνήθως είναι η κινητική ενέργεια της τύρβης και ο ρυθμός με τον οποίον καταστρέφεται (dissipation rate). Ο ρυθμός με τον οποίον καταστρέφεται η τύρβη, δηλαδή ο ρυθμός με τον οποίον μετατρέπεται η κινητική της ενέργεια σε θερμότητα προκύπτει επίσης από την επίλυση της εξίσωσης μεταφοράς της.

### 6.2.2.3 The k-epsilon turbulence model

Το μέγεθος  $k$  είναι η κινητική ενέργεια της τύρβης και καθορίζεται από τη διασπορά των διακυμάνσεων που παρουσιάζει η ταχύτητα. Οι διαστάσεις του  $k$  είναι  $(L^2T^{-2})$ , όπως για παράδειγμα,  $m^2/s^2$ . Το μέγεθος  $\epsilon$  είναι ο ρυθμός με τον οποίον εξασθενούν οι διακυμάνσεις της ταχύτητας της τύρβης (turbulence eddy dissipation) και οι διαστάσεις του είναι ίσες με τις διαστάσεις του  $k$  ανά μονάδα χρόνου  $(L^2T^{-3})$ , όπως για παράδειγμα,  $m^2/s^3$ .

Γενικά το μοντέλο  $k$ - $\epsilon$  δίνει σχετικά ακριβείς εκτιμήσεις για ένα μεγάλο πλήθος ροών γι' αυτό και είναι χρησιμοποιείται κατά κόρον. Παρόλα αυτά, θα πρέπει να αποφεύγεται η χρήση του, καθώς δεν κρίνεται κατάλληλο όταν συναντάται κάποια από τις παρακάτω περιπτώσεις:

- Ροές με αποκόλληση οριακού στρώματος
- Ροές σε περιστρεφόμενα ρευστά
- Ροές πάνω σε καμπύλες επιφάνειες

#### 6.2.2.3.1 The k-omega turbulence model

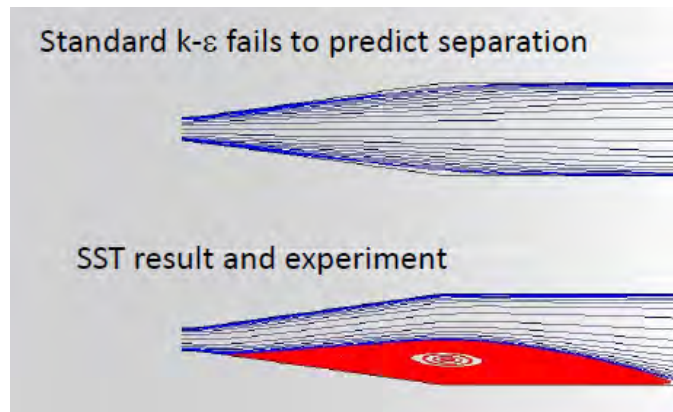
Ένα από τα πλεονεκτήματα του μοντέλου  $k$ - $\omega$  είναι η συμπεριφορά του κοντά στο τοίχωμα (near wall treatment) για υπολογισμούς με χαμηλούς αριθμούς Reynolds. Το μοντέλο αυτό σε αντίθεση με το μοντέλο  $k$ - $\epsilon$  δεν εμπεριέχει πολύπλοκες μη γραμμικές συναρτήσεις με αποτέλεσμα να καθίσταται πιο ακριβές και πιο «στιβαρό» ως μοντέλο τύρβης. Γι' αυτό άλλωστε χρησιμοποιείται ευρέως σε πολλές εφαρμογές, όπου συναντάται:

- Αποκόλληση ροής
- Μετάβαση ροής
- Χαμηλοί αριθμοί Reynolds
- Πρόσκρουση του ρευστού

#### 6.2.2.3.2 The shear stress transport turbulence model

Το μοντέλο SST, βασισμένο στη νοοτροπία του μοντέλου  $k$ - $\omega$ , λαμβάνει υπόψη του τη μεταφορά των διατμητικών τάσεων της τύρβης και δίνει εξαιρετικά ακριβή αποτελέσματα γύρω από την αποκόλληση της ροής κάτω από δυσμενείς κλίσεις πίεσης.

Γενικά, το μοντέλο SST, όπως προαναφέρθηκε και στην ενότητα 5.3.3, εκμεταλλεύεται τα θετικά στοιχεία των δύο προηγούμενων μοντέλων ( $k$ - $\epsilon$ ,  $k$ - $\omega$ ), ελέγχοντας πάντα την απόσταση από το τοίχωμα ( $k$ - $\omega$ : κοντά στο τοίχωμα,  $k$ - $\epsilon$ : μακριά από το τοίχωμα). Επίσης το μοντέλο SST αποτρέπει την υπερεκτίμηση του ιξώδους των δινών.



Εικόνα 6-1 Διαφορές των μοντέλων τύρβης  $k-\epsilon$  και SST

#### 6.2.2.4 The Eddy Viscosity Transport Model (One equation model)

Ένα πολύ απλό μοντέλο τύρβης μίας εξίσωσης είναι το “The eddy viscosity transport model” και αναπτύχθηκε από τον Menter. Προέρχεται απευθείας από το μοντέλο  $k-\epsilon$  και γι’ αυτό εναλλακτικά ονομάζεται μοντέλο  $(k - \epsilon)_{1E}$ .

### 6.2.3 Reynolds stress turbulence models

Τα μοντέλα τύρβης “Reynolds stress” βασίζονται σε εξισώσεις μεταφοράς για όλα τα στοιχεία του ταυυστή των τάσεων Reynolds και το ρυθμό εξασθένισης (dissipation rate). Αυτά τα μοντέλα δε χρησιμοποιούν την υπόθεση που έγινε για τα μοντέλα “eddy viscosity” (Ενότητα 6.2.2), αλλά επιλύουν μία εξίσωση για τη μεταφορά των τάσεων Reynolds δια μέσου του ρευστού. Οι εξισώσεις μεταφοράς του μοντέλου “Reynolds stress” επιλύονται για κάθε ξεχωριστό στοιχείο του ταυυστή Reynolds.

Ανάλογα με το είδος των εξισώσεων που επιλύονται, τα μοντέλα “Reynolds stress” κατηγοριοποιούνται στις εξής δύο κατηγορίες:

- Αλγεβρικά μοντέλα (Algebraic Reynolds stress models), όπου οι εξισώσεις μεταφοράς είναι αλγεβρικές.
- Διαφορικά μοντέλα (Differential Reynolds stress models), όπου οι εξισώσεις μεταφοράς είναι διαφορικές.

Από θεωρητικής σκοπιάς, τα μοντέλα “Reynolds stress” δείχνουν να είναι καταλληλότερα για πολύπλοκες ροές, λόγω του τρόπου που μοντελοποιούν τις ανισοτροπίες των τάσεων Reynolds. Παρόλα αυτά, η πράξη έχει δείξει πως συχνά δεν υπερτερούν των μοντέλων “two equation”, που υπακούουν στην υπόθεση “eddy viscosity hypothesis”.

## 6.3 Διακριτοποίηση και Επίλυση (Discretization and Solution)

Αυτή η ενότητα περιγράφει τον τρόπο με τον οποίον το ANSYS CFX διακριτοποιεί το πρόβλημα ώστε να το επιλύσει. Επίσης περιγράφεται επιγραμματικά η στρατηγική επίλυσης των εξισώσεων και παρουσιάζονται ορισμένα στοιχεία για τα σφάλματα κατά τη διακριτοποίηση.

### 6.3.1 Αριθμητική διακριτοποίηση

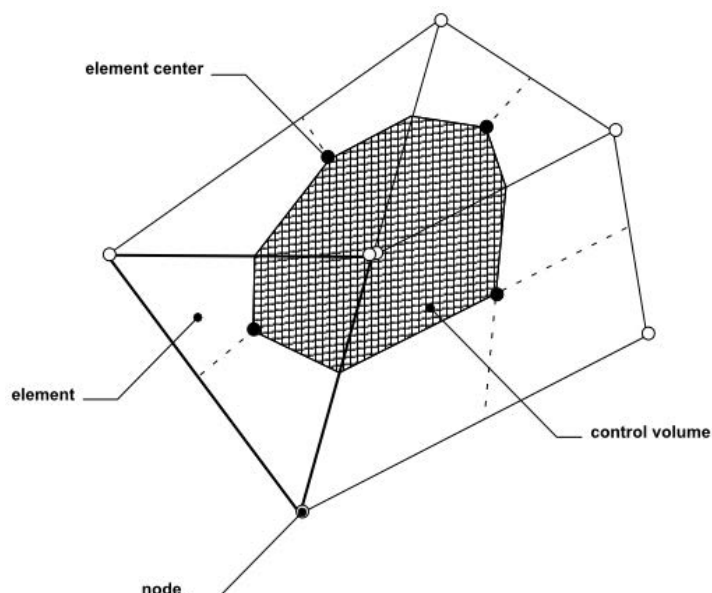
Αναλυτικές λύσεις για τις εξισώσεις Navier-Stokes μπορούν να υπάρξουν μονάχα όταν η ροή είναι εξαιρετικά απλή και ταυτόχρονα να επικρατούν ιδανικές συνθήκες. Έτσι, για να προσκομίσει κανείς λύσεις για μία πραγματική ροή πρέπει το πρόβλημα να προσεγγιστεί αριθμητικά, όπου οι εξισώσεις θα αντικαθίστανται από αλγεβρικές προσεγγίσεις που είναι σε ικανές να επιλυθούν με κάποια αριθμητική μέθοδο.

#### 6.3.1.1 Διακριτοποίηση των κυρίαρχων εξισώσεων

Η διακριτοποίηση των κυρίαρχων εξισώσεων πραγματοποιείται από το ANSYS CFX εντός δύο βημάτων:

**1° ΒΗΜΑ:** Το ANSYS CFX χρησιμοποιεί μία μέθοδο πεπερασμένων όγκων, η οποία αρχικά περιλαμβάνει τη διακριτοποίηση του όγκου ελέγχου με τη χρήση ενός πλέγματος. Το πλέγμα χρησιμοποιείται με σκοπό την κατασκευή αυτών των πεπερασμένων όγκων, οι οποίοι με τη σειρά τους χρησιμοποιούνται ώστε να αποθηκεύουν και να διατηρούν ποσότητες, όπως για παράδειγμα: μάζα, ορμή και ενέργεια. Προφανώς το πλέγμα είναι τριδιάστατο, αλλά για λόγους απλότητας η ανάλυση θα πραγματοποιηθεί σε διδιάστατο πλέγμα, όπως άλλωστε φαίνεται και στην Εικόνα 6-2.

Η Εικόνα 6-2 απεικονίζει ένα τυπικό διδιάστατο πλέγμα. Όλες οι μεταβλητές της λύσης και οι ιδιότητες του ρευστού αποθηκεύονται στους κόμβους του πλέγματος. Ένας όγκος ελέγχου (control volume), όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6-2 (σκιασμένη περιοχή), κατασκευάζεται γύρω από κάθε κόμβο του πλέγματος και ορίζεται από ακμές που ενώνουν τα κέντρα των ακμών (element edges) με τα κέντρα των γειτονικών στοιχείων (elements).



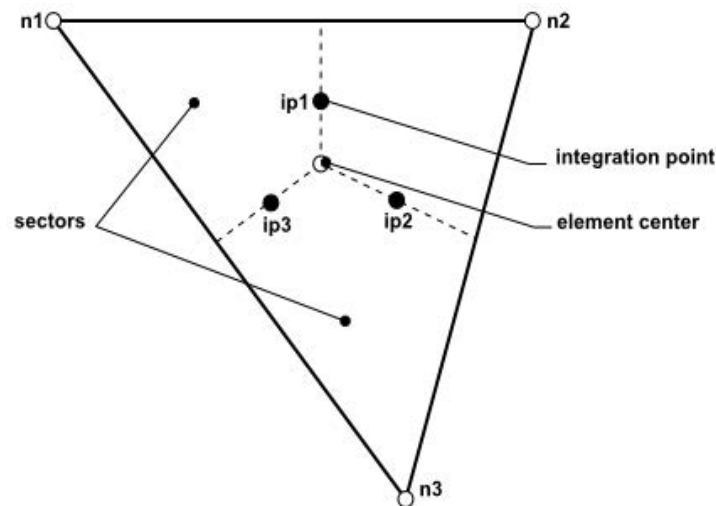
Εικόνα 6-2 Ορισμός του Όγκου Ελέγχου (Control Volume)

Οι προς επίλυση εξισώσεις ολοκληρώνονται στον όγκο ελέγχου (control volume) και με τη χρήση του θεωρήματος απόκλισης του Gauss, τα χωρικά ολοκληρώματα που εμπεριέχουν

τελεστές κλίσης ή απόκλισης μετατρέπονται σε επιφανειακά ολοκληρώματα. Επίσης αν οι όγκοι ελέγχου δεν παραμορφώνονται με την πάροδο του χρόνου, τότε τα διαφορικά μπορούν να βγουν έξω από τα χωρικά ολοκληρώματα.

**2° ΒΗΜΑ:** Το επόμενο βήμα στον αριθμητικό αλγόριθμο είναι η διακριτοποίηση των χωρικών και επιφανειακών ολοκληρωμάτων. Έστω ότι το στοιχείο του πλέγματος στην Εικόνα 6-3 είναι το υπό εξέταση στοιχείο.

Τα χωρικά ολοκληρώματα διακριτοποιούνται σε καθένα από τα τμήματα του στοιχείου (element sectors) και συμπεριλαμβάνονται στον όγκο ελέγχου που ανήκει το καθένα. Τα επιφανειακά ολοκληρώματα διακριτοποιούνται στα σημεία  $ip_n$  (integration points), τα οποία βρίσκονται στο κέντρο του κάθε επιφανειακού τμήματος του στοιχείου και στη συνέχεια διανέμονται στον γειτονικό όγκο ελέγχου (Εικόνα 6-3). Επειδή τα επιφανειακά ολοκληρώματα είναι ίσα και αντίθετα για όγκους ελέγχου που γειτονεύουν με τα ίδια σημεία  $ip_n$ , είναι βέβαιο πως τα ολοκληρώματα αυτά θα είναι τοπικά συντηρητικά.



Εικόνα 6-3 Διακριτοποίηση στο στοιχείο πλέγματος

### 6.3.1.2 The coupled system of equations

Με την εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων όγκων σε όλα τα στοιχεία του πλέγματος απορρέει ένα σετ γραμμικών εξισώσεων που αποτελείται από διακριτές εξισώσεις διατήρησης. Το σύστημα των εξισώσεων αυτών μπορεί να γραφτεί με την εξής μορφή:

$$\sum_{nb_i} a_i^{nb} \varphi_i^{nb} = b_i \quad (6-14)$$

όπου  $\varphi$ : η λύση,  $b$ : το δεξί μέρος,  $a$ : οι συντελεστές των εξισώσεων,  $i$ : ο αριθμός του υπό εξέταση κόμβου (node) ή όγκου ελέγχου (control volume),  $nb$ : “neighbor” αλλά ταυτόχρονα περιλαμβάνει και τον κεντρικό συντελεστή που πολλαπλασιάζει τη λύση στην θέση  $i$ . Ο υπό εξέταση κόμβος έχει τη δυνατότητα να γειτονεύει με οποιοδήποτε πλήθος στοιχείων, ώστε η



μέθοδος να είναι εφαρμόσιμη τόσο σε δομημένα (structured mesh) όσο και σε μη δομημένα πλέγματα (unstructured mesh). Το σετ αυτών των εξισώσεων για όλους τους όγκους ελέγχου απαρτίζει ολόκληρο το γραμμικό σύστημα. Παραδείγματος χάριν, για το σετ εξισώσεων του ζεύγους μεγεθών, μάζας-ορμής, προκύπτουν τα μεγέθη:

$$a_i^{nb} = \begin{bmatrix} a_{uu} & a_{uv} & a_{uw} & a_{up} \\ a_{vu} & a_{vv} & a_{vw} & a_{vp} \\ a_{wu} & a_{wv} & a_{ww} & a_{wp} \\ a_{pu} & a_{pv} & a_{pw} & a_{pp} \end{bmatrix}_i^{nb} \quad (6-15)$$

$$\varphi_i^{nb} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \end{bmatrix}_i^{nb} \quad (6-16)$$

$$b_i = \begin{bmatrix} b_u \\ b_v \\ b_w \\ b_p \end{bmatrix}_i \quad (6-17)$$

Η προσέγγιση του προβλήματος με τη μέθοδο “coupled” παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με μία προσέγγιση όπου οι εξισώσεις δεν λαμβάνονταν ανά ζεύγος ή ήταν διαχωρισμένες: στιβαρότητα προβλήματος, αποδοτικότητα, γενικότητα, απλότητα. Αυτά τα πλεονεκτήματα καθιστούν τον επιλύτη με τη μέθοδο “coupled” (coupled solver) ένα εξαιρετικά αποδοτικό και ισχυρό χαρακτηριστικό για οποιοδήποτε κώδικα CFD. Βέβαια, το κύριο μειονέκτημά του είναι η ανάγκη μεγάλου αποθηκευτικού χώρου για τους συντελεστές.

### 6.3.2 Στρατηγική επίλυσης – The Coupled Solver

Επιλύτες που δεν ακολουθούν τη μέθοδο “coupled” υπακούν σε μία στρατηγική, όπου αρχικά υπολογίζονται οι εξισώσεις ορμής χρησιμοποιώντας μία τυχαία εκτίμηση της πίεσης καταλήγοντας τελικά σε μία εξίσωση για τη διόρθωση της πίεσεως. Λόγω της φύσης “εκτίμηση-και-διόρθωση” του γραμμικού συστήματος, απαιτείται συνήθως ένας μεγάλος αριθμός επαναλήψεων και επιπλέον παρουσιάζεται η ανάγκη ορθής επιλογής συντελεστών χαλάρωσης για τις μεταβλητές.

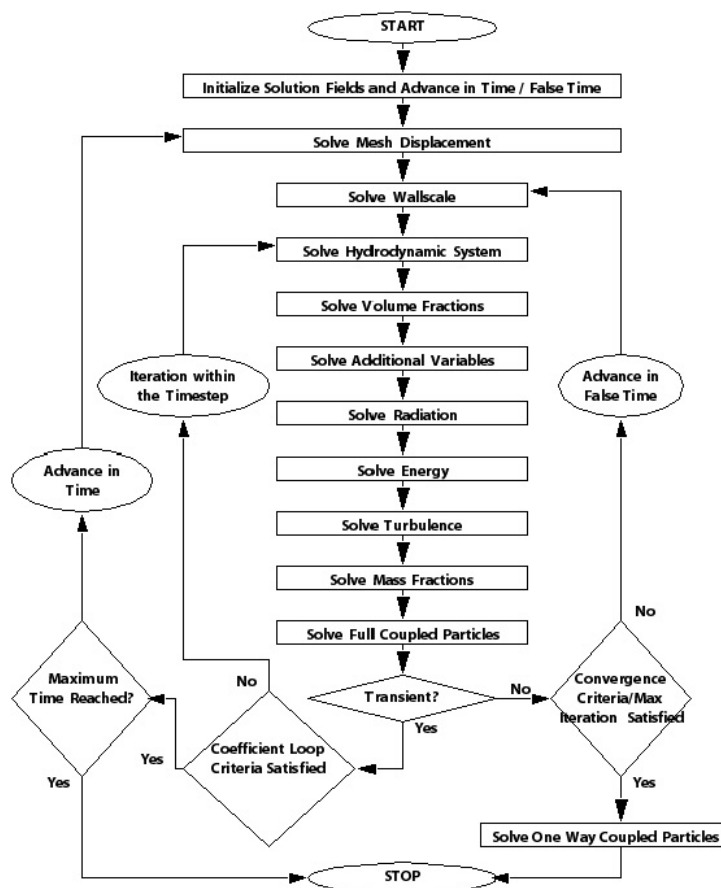
Το ANSYS CFX χρησιμοποιεί έναν επιλύτη “coupled solver”, ο οποίος επιλύει τις υδροδυναμικές εξισώσεις (για u,v,w,p) ως ένα κοινό σύστημα. Η λύση του προβλήματος χρησιμοποιεί μία πλήρως άρρητη διακριτοποίηση (fully implicit discretization) των εξισώσεων σε οποιοδήποτε χρονικό βήμα (time step). Το χρονικό βήμα λειτουργεί ως ένας καταλύτης σε προβλήματα σταθερής κατάστασης (steady-state problems), αφού μπορεί και καθοδηγεί τις εκτιμήσεις των λύσεων προς μία σταθερή κατάσταση. Κάτι τέτοιο ελαττώνει τον απαιτούμενο αριθμό επαναλήψεων για σύγκλιση της λύσης σε μία σταθερή κατάσταση.

### 6.3.2.1 Γενική λύση

Το διάγραμμα ροής της Εικόνα 6-4 απεικονίζει τη διαδικασία επίλυσης που χρησιμοποιείται από το ANSYS CFX-Solver. Η λύση του κάθε σετ εξισώσεων όπως αυτά φαίνονται στην Εικόνα 6-4, προκύπτει μέσα από δύο εντατικές αριθμητικές διαδικασίες. Για κάθε χρονικό βήμα:

1. Παραγωγή συντελεστών (Coefficient generation): Οι μη γραμμικές εξισώσεις γραμμικοποιούνται και προσαρμόζονται στον πίνακα των λύσεων  $\varphi_i^{nb}$ .
2. Επίλυση των εξισώσεων: Οι γραμμικές εξισώσεις επιλύονται χρησιμοποιώντας μία μέθοδο "Algebraic Multigrid", όπως θα αναφερθεί στη συνέχεια στην υποενότητα 6.3.2.2.1.

Κατά την επίλυση των εξισώσεων σε προβλήματα σταθερής κατάστασης ακολουθείται μία επαναληπτική διαδικασία. Το χρονικό βήμα (time-step), ή αλλιώς, η εξωτερική επανάληψη ελέγχεται από τη φυσική χρονική κλίμακα (physical time scale). Όσον αφορά τη σχέση μεταξύ εσωτερικών και εσωτερικών επαναλήψεων, μόνο μία εσωτερική επανάληψη λαμβάνει χώρα για κάθε εξωτερική επανάληψη. Να σημειωθεί ότι στην εσωτερική επανάληψη συμβαίνει η γραμμικοποίηση (linearization).



Εικόνα 6-4 ANSYS CFX-Solver flowchart

### 6.3.2.2 Επίλυση γραμμικών εξισώσεων

Η τεχνική παραγοντοποίησης που χρησιμοποιεί το ANSYS CFX για την επίλυση του διακριτού συστήματος των γραμμικοποιημένων εξισώσεων είναι τύπου “Incomplete Lower Upper” (ILU). Με την τεχνική αυτή, η ακριβής λύση των εξισώσεων προσεγγίζεται κατά τη διάρκεια πολλαπλών επαναλήψεων.

Το γραμμικό σύστημα διακριτών εξισώσεων μπορεί να γραφτεί σε μητρική μορφή ως εξής:

$$[A][\varphi] = [b] \quad (6-18)$$

όπου  $[A]$ : πίνακας συντελεστών,  $[\varphi]$ : διάνυσμα της λύσης,  $[b]$ : δεξιό μέρος της εξίσωσης

Η προαναφερθείσα εξίσωση μπορεί να λυθεί επαναληπτικά ξεκινώντας από μία προσεγγιστική λύση,  $\varphi^n$ , η οποία στη συνέχεια επιδέχεται μία διόρθωση,  $\varphi'$ , καταλήγοντας σε μία βελτιωμένη λύση,  $\varphi^{n+1}$ . Η σχέση αυτών φαίνεται στην εξίσωση που ακολουθεί:

$$\varphi^{n+1} = \varphi^n + \varphi' \quad (6-19)$$

όπου ο διορθωτικός παράγοντας  $\varphi'$  είναι το αποτέλεσμα της εξίσωσης (6-20):

$$A \varphi' = r^n \quad (6-20)$$

με το  $r^n$ : υπόλοιπο (residual), να προέρχεται από την εξίσωση (6-21):

$$r^n = b - A \varphi^n \quad (6-21)$$

Η επανειλημμένη εφαρμογή του παραπάνω αλγόριθμου τελικά θα δώσει μία λύση επιθυμητής ακρίβειας.

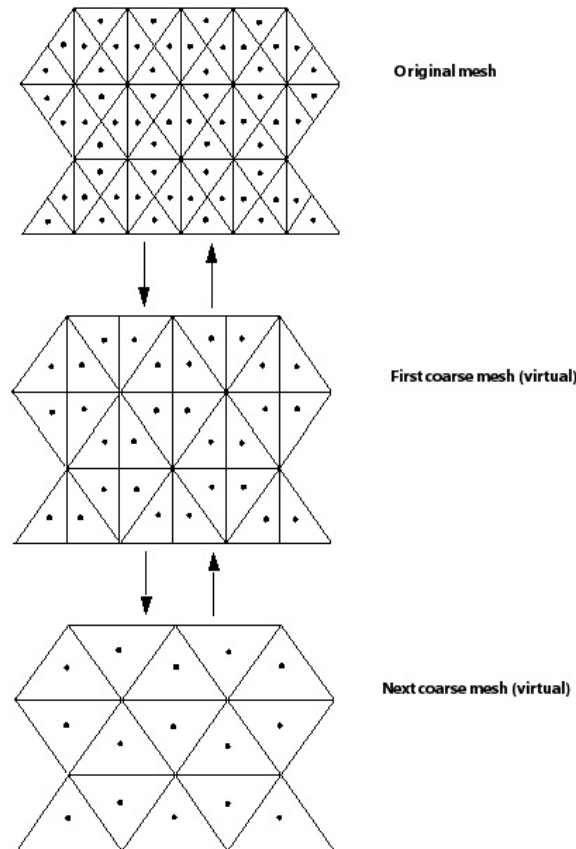
Στους επαναληπτικούς επιλύτες όπως ο ILU παρατηρείται ραγδαία μείωση της απόδοσης τους όταν ο αριθμός των στοιχείων του πλέγματος αυξάνεται. Επίσης κάτι ανάλογο συμβαίνει όταν τα στοιχεία του πλέγματος χαρακτηρίζονται από μεγάλες τιμές του λόγου “aspect ratio” (Παράγραφος 4.2.3.1.2).

#### 6.3.2.2.1 Algebraic Multigrid

Η συμπεριφορά σύγκλισης μπορεί να ενισχυθεί σε μεγάλο βαθμό μέσω της τεχνικής “Multigrid”. Η διαδικασία, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 6-5 περιλαμβάνει την πραγματοποίηση των αρχικών επαναλήψεων στο υπάρχον πυκνό πλέγμα, ενώ οι μετέπειτα επαναλήψεις λαμβάνουν χώρα σε ένα σταδιακά αραιωμένο πλέγμα. Στη συνέχεια τα αποτελέσματα μεταφέρονται στο αρχικό πυκνό πλέγμα.

Η τεχνική “multigrid” προσφέρει ένα σημαντικότερο πλεονέκτημα. Οι επαναληπτικοί επιλύτες αποδεικνύονται αποτελεσματικοί μόνο στην ελάττωση των σφαλμάτων που έχουν μήκος κύματος ανάλογο της τάξης μεγέθους των στοιχείων του πλέγματος (mesh spacing). Έτσι, ενώ τα σφάλματα μικρότερου μήκους κύματος εξαφανίζονται σχετικά γρήγορα, τα

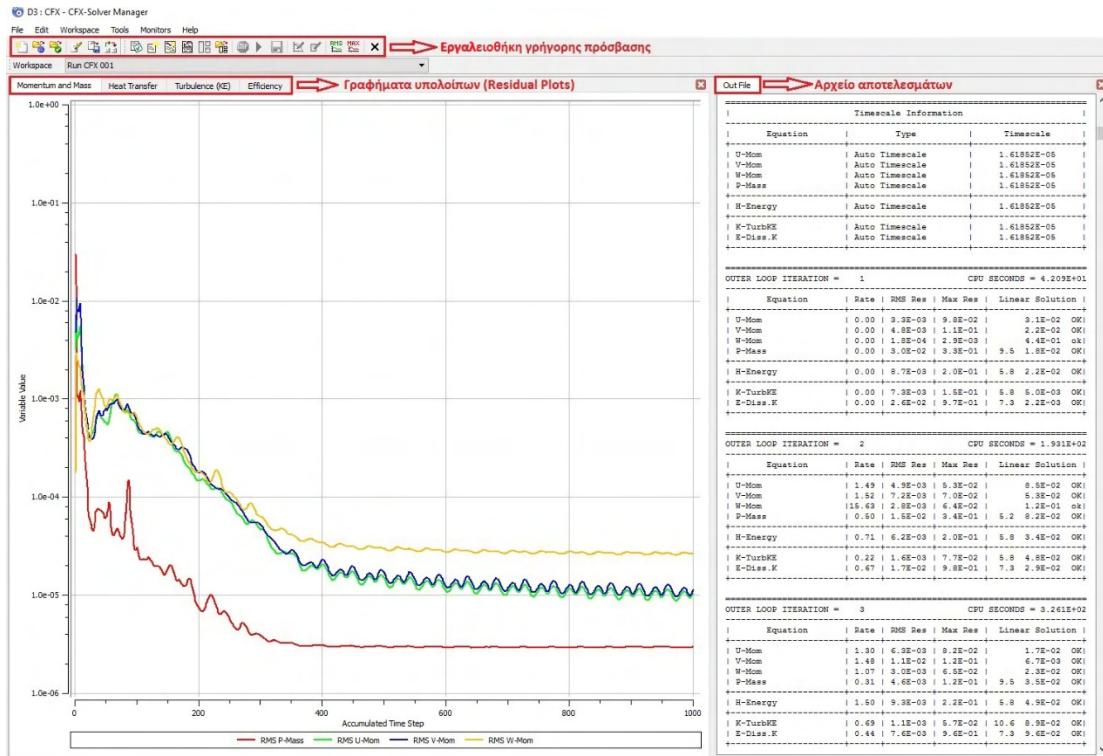
αντίστοιχα σφάλματα μήκους κύματος ανάλογο της τάξης μεγέθους του γενικότερου όγκου ελέγχου (domain size), χρειάζονται εξαιρετικά μεγάλο χρόνο για να εξαφανιστούν. Συνεπώς, δουλεύοντας σε ολοένα και πιο αραιά πλέγματα (coarser meshes), τα σφάλματα μεγάλου μήκους λαμβάνονται πλέον φαινομενικά ως σφάλματα μικρού μήκους, εφόσον τα στοιχεία του πλέγματος έχουν μεγαλώσει (increased mesh spacing). Το αποτέλεσμα είναι προφανές.



Εικόνα 6-5 Τεχνική Algebraic Multigrid

## 6.4 CFX-Solver Manager

Το CFX-Solver Manager είναι ένα γραφικό περιβάλλον του ANSYS CFX που δίνει τη δυνατότητα στη χρήστη να ορίσει ορισμένα από τα χαρακτηριστικά και παραμέτρους της επίλυσης του προβλήματος, καθώς και να βλέπει πληροφορίες για την πορεία και τα αποτελέσματα της επίλυσης. Γενικά, χρησιμοποιείται με σκοπό την επίβλεψη των διαγραμμάτων κατά τη διάρκεια της επίλυσης. Στην Εικόνα 6-6 μπορεί κανείς να δει το περιβάλλον του CFX-Solver Manager.



Εικόνα 6-6 ANSYS CFX-Solver Manager

## 6.4.1 Ορισμός επίλυσης (Define Run)

Ο ορισμός της επίλυσης του προβλήματος ξεκινάει με την εντολή “Define Run” που μπορεί να ενεργοποιηθεί από την εργαλειοθήκη γρήγορης πρόσβασης είτε μέσω της ρύθμισης “File > Define Run”. Το παράθυρο ρυθμίσεων με τις επιλογές που έγιναν στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας φαίνεται στην Εικόνα 6-7.

### 6.4.1.1 Define Run – Run Definition Tab

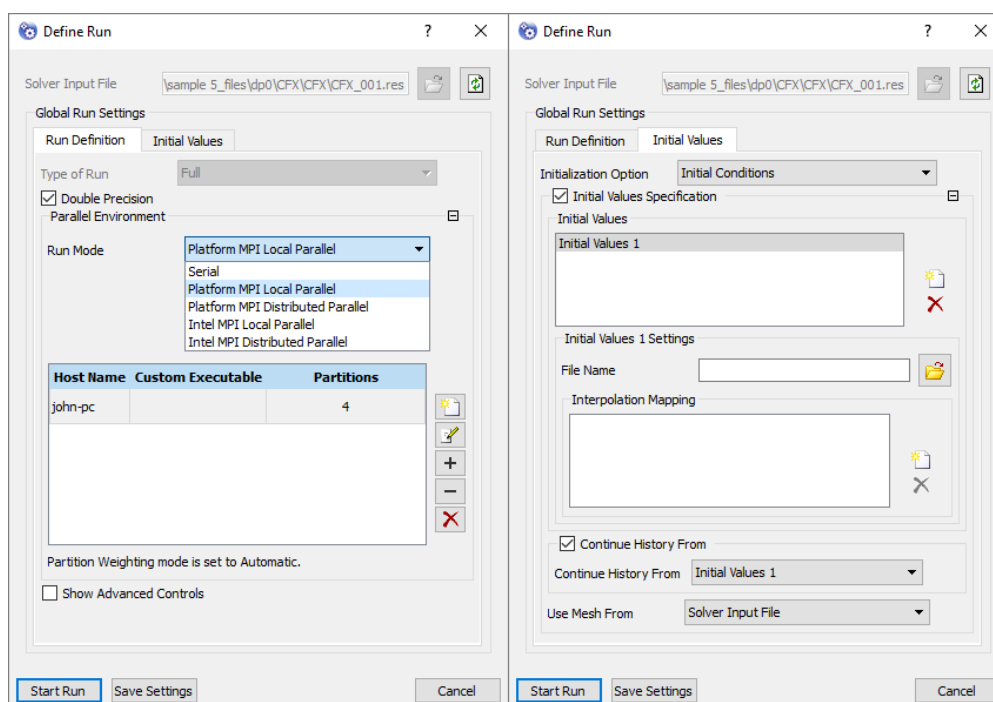
Στην καρτέλα αυτή ο χρήστης έχει τις παρακάτω δυνατότητες:

- Επιλογή επίλυσης διπλής ακρίβειας (double precision box)
- Επιλογή τρόπου επίλυσης (serial or parallel run)
- Εμφάνιση προχωρημένων ρυθμίσεων
- Αποθήκευση ρυθμίσεων
- Έναρξη επίλυσης

**Double Precision Box:** Με την ενεργοποίηση αυτής της επιλογής, ο επιλύτης είναι πλέον σε θέση να πραγματοποιεί μαθηματικές εργασίες με μεγαλύτερη ακρίβεια. Βέβαια, η μνήμη που χρειάζεται να δεσμευτεί από τον υπολογιστή για ένα δεδομένο πρόβλημα και δεδομένο μέγεθος πλέγματος διπλασιάζεται. Η διπλή ακρίβεια μπορεί να είναι αναγκαία στις περιπτώσεις που ο όγκος ελέγχου περιέχει μεγάλη ποικιλία από διαστάσεις πλέγματος, λόγους “aspect ratios” και μεγάλα εύρη πιέσεων.

**Parallel Environment - Run Mode:** Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει αν το πρόβλημα θα επιλυθεί ως μία ανεξάρτητη διαδικασία (serial run) ή χωρισμένο σε τμήματα (partitions) (parallel run), όπου τα διακριτά τμήματα επιλύονται ταυτόχρονα. Στην περίπτωση που επιλεγεί παράλληλη επίλυση, ο χρήστης επιλέγει τον αριθμό των τμημάτων (partitions) που θα διαιρεθεί το πρόβλημα, καθώς επίσης και πόσα τμήματα θα ανατεθούν ανά υπολογιστή (επιλογή distributed parallel).

**Show Advanced Controls Box:** Η επιλογή αυτή ενεργοποιεί κάποιες επιπλέον ρυθμίσεις για τον επιλύτη (solver) και τη μέθοδο τμηματοποίησης (partitioning). Βέβαια στα πλαίσια της εργασίας θα χρησιμοποιηθούν οι προεπιλεγμένες ρυθμίσεις του ANSYS CFX κι έτσι παραλείπεται η ενεργοποίηση του πεδίου “Show Advanced Controls”.



Εικόνα 6-7 Define Run Dialog Box - Run Definition Tab & Initial Values Run

#### 6.4.1.2 Define Run – Initial Values Tab

Η καρτέλα “Initial Values” χρησιμοποιείται για να καθορίσει τις αρχικές συνθήκες του προβλήματος μέσω του αρχείου αποτελεσμάτων, δίνοντας τη δυνατότητα στον επιλύτη να μειώσει κατά πολύ το χρόνο σύγκλισης, αφού έχει ένα δεδομένο πεδίο ροής από το οποίο μπορεί να ξεκινήσει τους υπολογισμούς.

Αν οι αρχικές συνθήκες δεν καθοριστούν, είτε επειδή παραλήφθηκε είτε επειδή είναι η 1<sup>η</sup> επίλυση του προβλήματος, τότε το ANSYS CFX καθορίζει τις αρχικές συνθήκες μέσω (με σειρά προτεραιότητας):

- Του ANSYS CFX-Pre από την αντίστοιχη καρτέλα όπου εισάχθηκαν

- Αυτόματης παραγωγής αρχικών συνθηκών (θα πρέπει να αποφεύγεται, καθώς ενδέχεται να μην είναι κατάλληλες για κάποιες περιπτώσεις προβλημάτων σταθερής κατάστασης (steady-state))

Στην περίπτωση που οι αρχικές συνθήκες καθοριστούν μέσω του αρχείου αποτελεσμάτων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6-7, τότε οι παραπάνω διαδικασίες δεν εκτελούνται.

**Initialization Option:** Δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει τον τρόπο εισαγωγής των αρχικών συνθηκών (μετά το πέρας της 1<sup>ης</sup> επίλυσης) με έναν από τους παρακάτω τρόπους:

- **Current Solution Data (if possible):** Ο επιλύτης λαμβάνει αυτόματα ως αρχικές συνθήκες τα αποτελέσματα της τελευταίας επίλυσης.
- **Initial Conditions:** Ο χρήστης επιλέγει χειροκίνητα τις αρχικές συνθήκες για το πρόβλημα (Initial values specification – Initial values), επιλέγοντας το κατάλληλο αρχείο αποτελεσμάτων από τις προηγούμενες επιλύσεις (Initial values settings – file name). Επίσης δίνεται η δυνατότητα διατήρησης του ιστορικού των προηγούμενων επιλύσεων (διαγράμματα υπολοίπων, χρονικά βήματα, κλπ.) με την ενεργοποίηση της επιλογής “Continue history from”. Τέλος, με τη ρύθμιση “Use mesh from”, ο χρήστης επιλέγει το πλέγμα στο οποίο θα γίνει η ανάλυση. Αν δεν πραγματοποιηθεί καμία αλλαγή στο πλέγμα ανάμεσα από τις διαδοχικές επιλύσεις, τότε οι δύο επιλογές (Solver input file & Initial values) ταυτίζονται.

## 6.4.2 Γραφήματα Υπολοίπων (Residual Plots)

Το CFX-Solver υπολογίζει τις λύσεις των εξισώσεων που αναφέρθηκαν στην ενότητα 6.1.1, λαμβάνοντας υπόψη τα κατάλληλα μοντέλα για το συγκεκριμένο πρόβλημα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Σε κάθε χρονικό βήμα της επίλυσης, η κάθε εξίσωση δεν ικανοποιείται πλήρως αφήνοντας πίσω της ένα υπόλοιπο (residual). Αυτό το υπόλοιπο εκφράζει τη διαφορά του δεξιού μέρους της εξίσωσης από το αριστερό. Στην περίπτωση που η εξίσωση ικανοποιείται πλήρως, το υπόλοιπο είναι ίσο με το μηδέν. Προφανώς κάτι τέτοιο δε σημαίνει ότι η λύση ανταποκρίνεται πλήρως στην πραγματικότητα, εφόσον οι εξισώσεις αυτές μοντελοποιούν τη φυσική του προβλήματος προσεγγιστικά.

Για να αποκτήσουν νόημα τα υπόλοιπα (residuals), ο επιλύτης κανονικοποιεί τις τιμές τους διαιρώντας τις με τα κατάλληλα μεγέθη σε κάθε χρονικό βήμα. Στη συνέχεια τα υπόλοιπα των εξισώσεων πλοτάρονται σε λογαριθμική κλίμακα (log base 10) συναρτήσει του χρονικού βήματος, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6-6 στην αριστερή πλευρά. Για να συγκλίνει ένα πρόβλημα πρέπει αυτά τα υπόλοιπα να μειώνονται με το πέρας των διαδοχικών βημάτων.

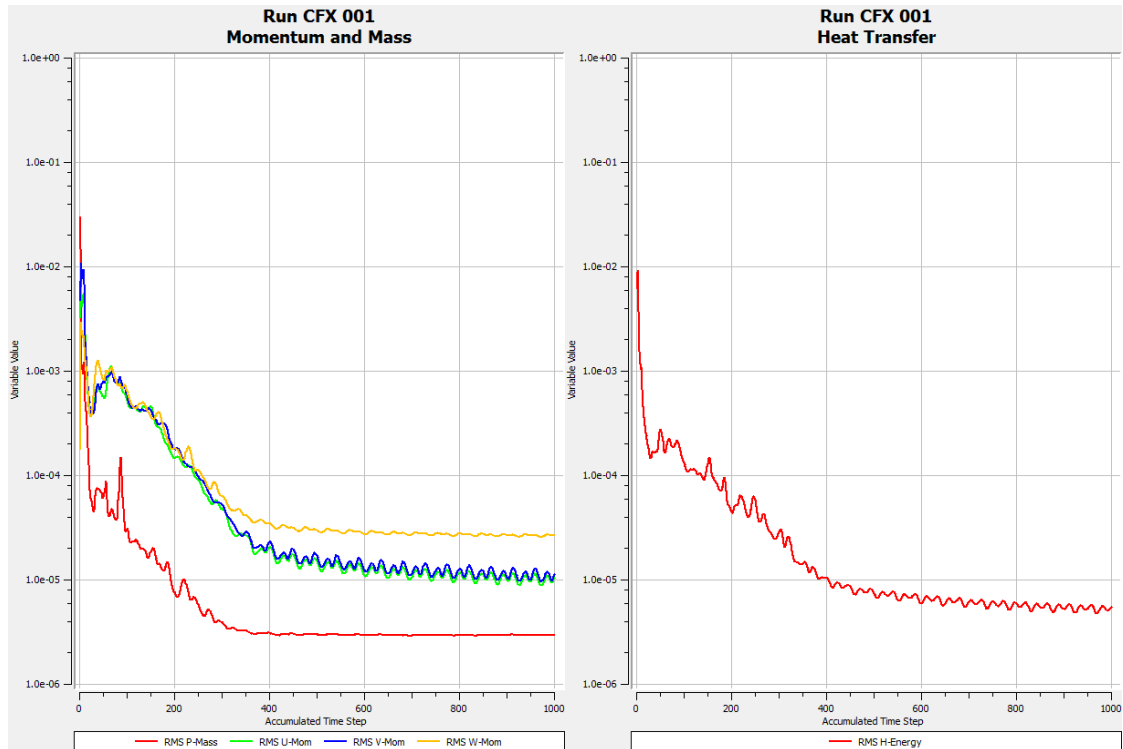
### 6.4.2.1 Αποτελέσματα σύγκλισης και η μέση τετραγωνική ρίζα (RMS)

Τα γραφήματα των υπολοίπων (residual plots) προσφέρουν στο χρήστη ένα μέτρο της ποιότητας της σύγκλισης. Μέσα σε λογικά πλαίσια, μία ικανοποιητική σύγκλιση δεν περιλαμβάνει μέγιστα υπόλοιπα (maximum residuals) μεγαλύτερα από  $5 \cdot 10^{-4}$ . Τα RMS υπόλοιπα βρίσκονται συνήθως μία τάξη μεγέθους κάτω από τα μέγιστα υπόλοιπα.

**RMS Residuals:** Υπολογίζονται ανά χρονικό βήμα, τετραγωνίζοντας τα υπόλοιπα καθ’ όλο τον όγκο ελέγχου. Στη συνέχεια υπολογίζεται ο μέσος όρος των τετραγώνων και τέλος υπολογίζεται η ρίζα του μέσου όρου.

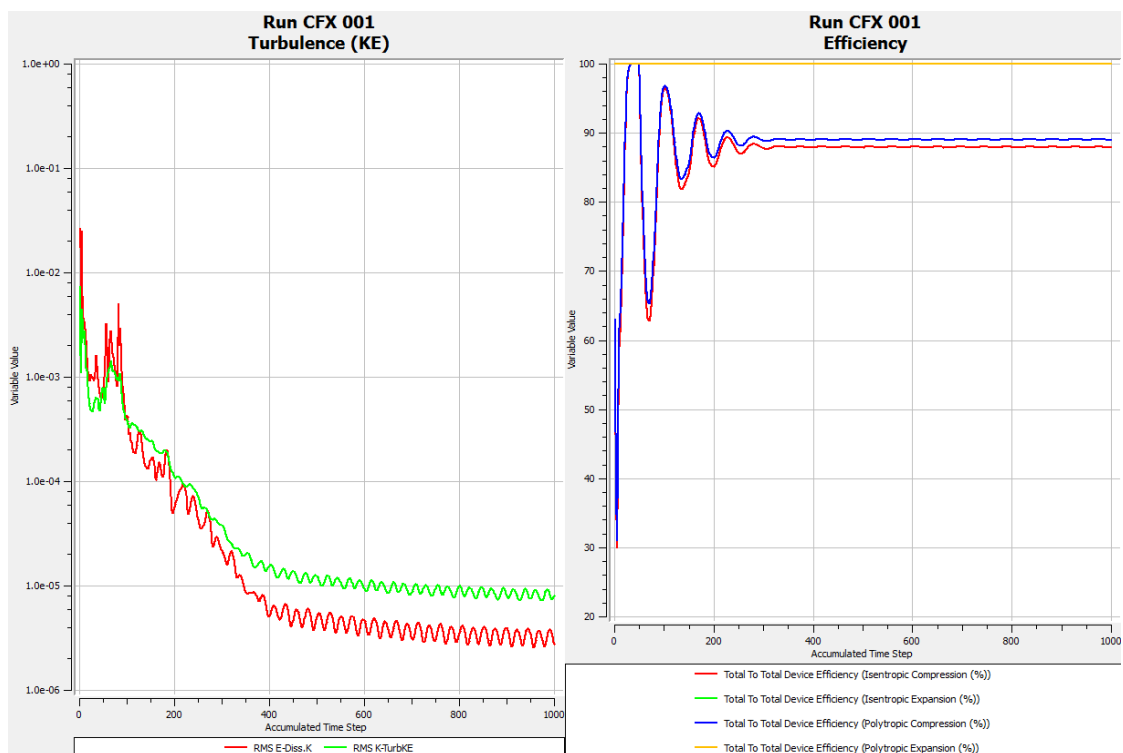
### 6.4.2.2 Τρόπος απεικόνισης των υπολοίπων

Το CFX-Solver Manager πλοτάρει τα υπόλοιπα των εξισώσεων μάζας, ορμής, ενέργειας και τύρβης, καθώς επίσης και την απόδοση του ρότορα (προεπιλογή του προγράμματος). Τα γραφήματα αυτά φαίνονται στις εικόνες 6-8 και 6-9.



Εικόνα 6-8 Momentum and Mass & Heat Transfer Residual Plots





Εικόνα 6-9 Turbulence & Efficiency Residual Plots

Όπως φαίνεται στα γραφήματα, στον κάθετο άξονα απεικονίζονται τα υπόλοιπα σε λογαριθμική κλίμακα (στο 4<sup>ο</sup> γράφημα η απόδοση) και στον οριζόντιο άξονα το χρονικό βήμα. Στο υπόμνημα των γραφημάτων αναγράφονται οι μεταβλητές που απεικονίζονται με διαφορετικό χρώμα.

Η μείωση των RMS υπολοίπων φαίνεται ξεκάθαρα στα τρία πρώτα γραφήματα με μία ταλαντωτική συμπεριφορά να παρατηρείται έντονα μετά τα 400 πρώτα χρονικά βήματα. Η συμπεριφορά αυτή είναι πιθανό να οφείλεται στην επιλογή μεγάλου χρονικού βήματος για την επίλυση [10]. Παρόλα αυτά δε θα πρέπει να απασχολήσει ιδιαίτερα το χρήστη, όταν τα υπόλοιπα είναι ήδη σε πολύ χαμηλά επίπεδα, όπως άλλωστε και στην περίπτωση της παρούσας εργασίας.

Θεωρητικά, η λύση του προβλήματος έχει συγκλίνει από τις 800 πρώτες επαναλήψεις για τα μεγέθη της ορμής, της μάζας, της ενέργειας και της τύρβης, ενώ η λύση για το βαθμό απόδοσης του συμπιεστή συγκλίνει ήδη από τις πρώτες 300 επαναλήψεις. Όλα τα παραπάνω απεικονίζονται ξεκάθαρα στις εικόνες 6-8 και 6-9. Το κριτήριο σύγκλισης, όπως προαναφέρθηκε στην υποενότητα 5.4.2 είναι  $10^{-5}$  και ικανοποιείται για όλα τα υπό επίλυση μεγέθη εκτός της  $w$ -συνιστώσας της ορμής (RMS W-Mom) (αριστερό μέρος της Εικόνας 6-8).

Μέσω της επιλογής “Workspace > New Monitor” ή μέσω της εργαλειοθήκης γρήγορης πρόσβασης “New Monitor”, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εμφανίσει γραφήματα υπολοίπων (MAX ή RMS) των επιθυμητών μεταβλητών, αν αυτές δεν εμφανίζονται ήδη αυτόματα από το πρόγραμμα.

### 6.4.3 Αρχείο Αποτελεσμάτων (Out File)

Το αρχείο αποτελεσμάτων (Out File), όπως αυτό φαίνεται στην Εικόνα 6-6, περιέχει πληροφορίες για το στήσιμο του προβλήματος (στοιχεία πλέγματος, συνοριακές συνθήκες, τμηματοποίηση (partitioning) κλπ.), την κατάσταση της λύσης όσο αυτή βρίσκεται σε εξέλιξη και τα στατιστικά της ανάλυσης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται μερικά από τα πιο αξιοσημείωτα στοιχεία του αρχείου αποτελεσμάτων.

#### 6.4.3.1 Στατιστικά Πλέγματος (Mesh Statistics)

Τα στατιστικά του πλέγματος περιλαμβάνουν για όλους τους όγκους (domains) τα παρακάτω στοιχεία:

- Διαγνωστικά της ποιότητας του πλέγματος (Mesh quality diagnostics)
- Το συνολικό πλήθος κόμβων (nodes), στοιχείων (elements) και συνοριακών επιφανειών (boundary faces) του πλέγματος
- Το κλάσμα της επιφάνειας των διεπιφανειών του πλέγματος που δεν έχουν συμπεριληφθεί στην ανάλυση

Τα διαγνωστικά της ποιότητας του πλέγματος περιλαμβάνουν μετρήσεις των χαρακτηριστικών του που χαρακτηρίζονται από τρεις τιμές: OK (good), ok (acceptable), ! (poor), όπου η εμφάνιση του τελευταίου συνήθως σχετίζεται με προβλήματα ακρίβειας και σύγκλισης.

#### 6.4.3.2 Εξισώσεις προς επίλυση (Solved Equations)

Στη λίστα αυτή περιλαμβάνονται οι εξαρτημένες μεταβλητές προς εύρεση καθώς και η εξίσωση με την οποία σχετίζονται.

#### 6.4.3.3 Ιστορικό Σύγκλισης (Convergence History)

Το ιστορικό σύγκλισης παρουσιάζει λεπτομερώς την πορεία της επίλυσης ανά χρονικό βήμα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6-10.

```

=====
OUTER LOOP ITERATION = 19                      CPU SECONDS = 2.684E+03
-----
|      Equation      | Rate | RMS Res | Max Res | Linear Solution |
-----+-----+-----+-----+-----+
| U-Mom              | 0.86 | 5.2E-04 | 4.5E-02 | 4.2E-02 OK|
| V-Mom              | 0.90 | 6.5E-04 | 6.7E-02 | 4.3E-02 OK|
| W-Mom              | 0.85 | 5.6E-04 | 5.0E-02 | 3.5E-02 OK|
| P-Mass             | 0.83 | 1.5E-04 | 3.4E-02 | 9.5 7.3E-02 OK|
-----+-----+-----+-----+
|                    |      |         |         |               |
|                    |      |         |         |               |
| ***** Notice ***** |      |         |         |               |
| A wall has been placed at portion(s) of an OUTLET |      |         |         |               |
| boundary condition (at 0.5% of the faces, 0.2% of the area) |      |         |         |               |
| to prevent fluid from flowing into the domain. |      |         |         |               |
| The boundary condition name is: R1 Outlet. |      |         |         |               |
| The fluid name is: Air Ideal Gas. |      |         |         |               |
| If this situation persists, consider switching |      |         |         |               |
| to an Opening type boundary condition instead. |      |         |         |               |
|                    |      |         |         |               |
|                    |      |         |         |               |
| H-Energy           | 0.92 | 2.8E-04 | 1.2E-02 | 5.9 8.0E-02 OK|
| K-TurbKE           | 0.85 | 7.0E-04 | 4.7E-02 | 5.9 7.5E-02 OK|
| E-Diss.K           | 0.90 | 1.0E-03 | 1.2E-01 | 7.1 3.1E-02 OK|
-----+-----+-----+-----+

```

Εικόνα 6-10 Ιστορικό σύγκλισης (Convergence History)

**Outer loop iterations/CPU seconds:** Ο αριθμός των επαναλήψεων και ο χρόνος επίλυσης, αντίστοιχα. Ο χρόνος επίλυσης (CPU seconds) αναφέρεται στο συνολικό χρόνο επίλυσης για όλα τα τμήματα (partitions) του προβλήματος. Έτσι, για να βρεθεί ο καθαρός χρόνος επίλυσης πρέπει να διαιρεθεί με τον αριθμό των τμημάτων, όπου την περίπτωση του προβλήματος ορίστηκε ίσος με 4. Όπως προαναφέρθηκε και στην παράγραφο 6.4.2.2, η λύση συγκλίνει από τις πρώτες 800 επαναλήψεις με καθαρό χρόνο επεξεργασίας ίσο με 7 ώρες και 57 λεπτά. Τα χαρακτηριστικά του H/Y στον οποίο έγινε η προσομοίωση είναι τα εξής:

- CPU: Intel Core i5-4670 3.40GHz
- RAM: 16GB DDR3 1333MHz
- OS: Windows 7 64-bit

**Rate:** Ο λόγος του υπόλοιπου (residual) ενός χρονικού βήματος προς το υπόλοιπο του προηγούμενου χρονικού βήματος. Για να επιτευχθεί σύγκλιση, ο λόγος αυτός πρέπει να είναι μικρότερος της μονάδας.

**RMS Res:** Η τιμή της μέσης τετραγωνικής ρίζας (Root Mean Square) του κανονικοποιημένου υπολοίπου.

**Max Res:** Η μέγιστη τιμή του κανονικοποιημένου υπολοίπου.

**Linear Solution:** Η επίδοση των γραμμικών (εσωτερικών) επιλυτών. Η πρώτη στήλη παριστάνει το μέσο όρο των επαναλήψεων που χρειάστηκαν οι γραμμικοί επιλύτες ώστε να πετύχουν τα κριτήρια σύγκλισης. Η δεύτερη στήλη παριστάνει τα κανονικοποιημένα υπόλοιπα των λύσεων των γραμμικών εξισώσεων. Τέλος, η τρίτη στήλη παριστάνει την επίδοση των γραμμικών επιλυτών και μπορεί να πάρει μία από τις εξής τιμές: \* (αποτυχία των γραμμικών επιλυτών), F (αποτυχία ελάττωσης των υπολοίπων), ok (η μείωση του υπολοίπου δεν ικανοποιεί τα κριτήρια σύγκλισης), OK (η μείωση του υπολοίπου ικανοποιεί τα κριτήρια σύγκλισης).

**Notice:** Όταν εμφανίζεται το συγκεκριμένο μήνυμα, το CFX-Solver τοποθετεί ένα τείχος, είτε στην είσοδο, είτε στην έξοδο του όγκου ελέγχου για να αποφευχθεί η παραβίαση των συνωριακών συνθηκών που έχουν οριστεί. Συγκεκριμένα, λόγω του ότι παρατηρήθηκε

εισαγωγή ρευστού από την έξοδο του συμπιεστή και η συνοριακή συνθήκη έχει την τιμή “Outlet”, το CFX-Solver τοποθέτησε ένα εικονικό φράγμα για να το αποτρέψει.

Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι πιθανόν λόγω ανακυκλοφοριών που παρατηρούνται στην έξοδο του συμπιεστή σε συνδυασμό με τη θέση που ορίστηκε η συνοριακή συνθήκη (πολύ κοντά στον ρότορα). Το πρόβλημα αυτό αποτρέπεται είτε με αλλαγή της συνοριακής συνθήκης σε “Opening”, όπου επιτρέπεται η αμφίδρομη πάροδος του ρευστού από την έξοδο, είτε με απομάκρυνση της εξόδου (Outlet) από τον ρότορα.

#### 6.4.4 CFX-Solver Results File

Το τελικό αρχείο που εξάγεται από το ANSYS CFX-Solver (.res file) με την ολοκλήρωση της προσομοίωσης περιέχει το χωρικό πλέγμα του μοντέλου, καθώς και τη λύση του πεδίου ροής. Το αρχείο που εξάγεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε στο CFX-Solver ως αρχικές συνθήκες της ροής προς επανάληψη της επίλυσης, είτε στο CFX-Post προς οπτικοποίηση και εξέταση των αποτελεσμάτων. Το τελευταίο αναλύεται εκτενέστερα στο κεφάλαιο 7.

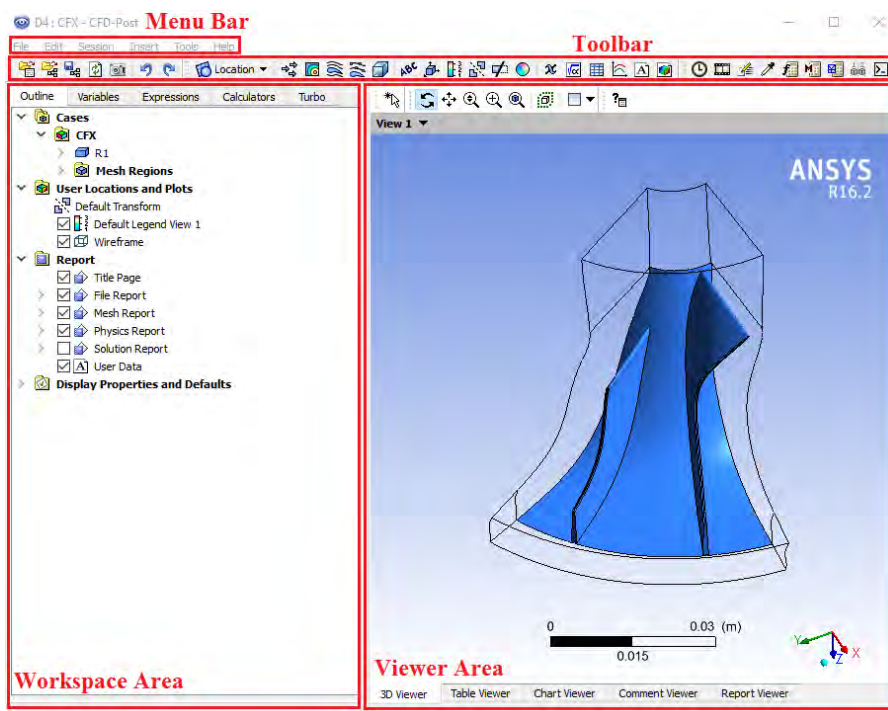
## 7 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ: ANSYS CFD-Post

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, όπως αυτά έχουν προκύψει από το ANSYS CFD-Solver, μπορούν να οπτικοποιηθούν και να αναλυθούν ποσοτικά σε κάποιο πρόγραμμα επεξεργασίας αποτελεσμάτων. Ένα από αυτά είναι το ANSYS CFD-Post. Το CFD-Post αποτελεί ένα ευέλικτο, καινοτόμο πρόγραμμα επεξεργασίας αποτελεσμάτων (postprocessor). Είναι σχεδιασμένο ώστε να προσφέρει εύκολη απεικόνιση και ανάλυση των αποτελεσμάτων CFD προσομοιώσεων.

### 7.1 Δυνατότητες και γραφικό περιβάλλον CFX-Post

Το CFX-Post περιλαμβάνει τα παρακάτω χαρακτηριστικά και δυνατότητες [8]:

- Ένα γραφικό περιβάλλον που περιλαμβάνει μία οθόνη απεικόνισης (Viewer Area) (Εικόνα 7-1) πάνω στην οποία πλοτάρονται όλα τα γραφικά αποτελέσματα που προκύπτουν από την επεξεργασία του CFD-Post.
- Πληθώρα γεωμετρικών και γραφικών λειτουργιών προς οπτικοποίηση του πλέγματος, όπως επίσης και των αεροθερμοδυναμικών στοιχείων της ροής.
- Χειροκίνητος ορισμός βαθμωτών και διανυσματικών μεταβλητών (Εικόνα 7-1 > Workspace Area > Variables Tab).
- Ειδική επεξεργασία αποτελεσμάτων για εφαρμογές σχετικές με τομέα των στροβιλομηχανών (Εικόνα 7-1 > Workspace Area > Turbo Tab).
- Βασικές λειτουργίες προβολής, πληθώρα προκαθορισμένων οπτικών γωνιών του υπό εξέταση όγκου ελέγχου (Εικόνα 7-1 > Viewer Area Toolbar).
- Εκτενείς αναφορές (reports) διαφοροποιημένες ανάλογα με το είδος της προσομοίωσης.



Εικόνα 7-1 Γραφικό Περιβάλλον ANSYS CFX-Post

## 7.2 Εντολές ANSYS CFD-Post

Το ANSYS CFD-Post υποστηρίζει μία πληθώρα εντολών που αποσκοπούν στο πλοτάρισμα ποιοτικών γραφημάτων (graphical figures) και στον καθορισμό θέσεων πάνω στον όγκο έλεγχο για ποσοτική ανάλυση (locators). Τα επιθυμητά γραφήματα, καθώς και πίνακες αποτελεσμάτων για την περίπτωση του φυγοκεντρικού συμπιεστή μπορούν να εξαχθούν αυτόματα από το πρόγραμμα μέσω της λειτουργίας “File > Report > Report Templates” (7.3). Παρόλα αυτά, ο χρήστης θα πρέπει να κατέχει κάποιες βασικές γνώσεις πάνω στις λειτουργίες (Graphic & Locator Objects) του CFD-Post, ώστε να είναι σε θέση να εξάγει με τον ελάχιστο δυνατό κόπο ένα επιθυμητό γράφημα. Έτσι, μέσα στις επόμενες υποενότητες επεξηγούνται επιγραμματικά κάποιες από τις πιο χρήσιμες εντολές.

### 7.2.1 Δημιουργία νέας εντολής

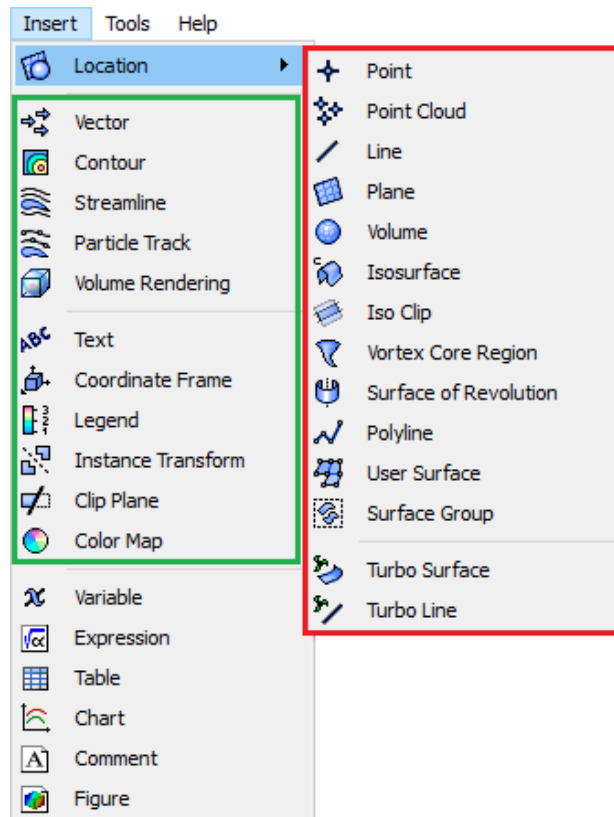
Η δημιουργία νέων εντολών μπορεί να γίνει με έναν από τους παρακάτω τρόπους:

- “Workspace Area” (Εικόνα 7-1), “δεξί κλικ στην κατηγορία User Locations and Plots > Insert > ...”
- Μπάρα μενού (menu bar) (Εικόνα 7-1), “ Insert > ... ”
- “Viewer Area”, “ δεξί κλικ πάνω σε κάποιο από τα τμήματα του όγκου ελέγχου > Insert ”. Ο τρόπος αυτός δεν είναι εφαρμόσιμος σε κάποιες από τις εντολές. Παρόλα αυτά, προτιμάται σε αρκετές περιπτώσεις για πλοτάρισμα πάνω σε επιφάνειες (planes).

Μετά την ενεργοποίηση και την εξατομίκευση τους, οι αντίστοιχες εντολές φαίνονται στην περιοχή “Workspace Area” κάτω από την κατηγορία “User Locations and Plots”.

### 7.2.2 Locator Objects

Οι “Locators” εκφράζουν περιοχές πάνω στον γνωστό όγκο ελέγχου που χρησιμοποιούνται από άλλες εντολές ώστε να εξαχθούν γραφήματα ή να υπολογιστούν τιμές. Για παράδειγμα, αν ο χρήστης επιλέξει μία ροϊκή γραμμή (streamline) να ξεκινάει από μία επιφάνεια (plane), τότε αυτή η επιφάνεια αποτελεί έναν “Locator”.



Εικόνα 7-2 ANSYS CFX-Post Objects

Μερικοί από τους σημαντικότερους “Locators”, όπως αυτοί εμφανίζονται στην εργαλειοθήκη της Εικόνα 7-1 (Toolbar > Location), είτε μέσω της επιλογής “Insert Menu > Location” (Εικόνα 7-2 εντός του κόκκινου πλαισίου) περιγράφονται συνοπτικά στη συνέχεια:

- **Point Command:** Το σημείο που παράγεται ορίζεται από συντεταγμένες στο χώρο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εντοπίσει τη θέση μέγιστων/ελάχιστων ή ενδιάμεσων τιμών κάποιας μεταβλητής.
- **Point Cloud Command:** Η εντολή αυτή παράγει ένα πλήθος (νέφος) σημείων. Τα σημεία αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το πλοτάρισμα διανυσματικών μεγεθών ή να αποτελέσουν “Locators” στην παραγωγή ροϊκών γραμμών.
- **Line Command:** Η εντολή αυτή παράγει έναν “Locator” υπό τη μορφή ευθύγραμμου τμήματος που εκφράζεται από δύο σημεία στο χώρο.
- **Plane Command:** Η εντολή αυτή παράγει μία επιφάνεια (Plane) που υπάρχει μονάχα εντός του υπολογιστικού όγκου ελέγχου.
- **Volume Command:** Η εντολή αυτή παράγει έναν όγκο που αποτελείται από ένα πλήθος στοιχείων του πλέγματος. Αυτός ο όγκος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως “Locator” για γραφικές εντολές (Graphical Objects) ή υπολογισμούς. Λόγω της εξάρτησης του όγκου από τα στοιχεία του πλέγματος, ο όγκος είναι αδύνατο να έχει τέλειο σχήμα (π.χ. τέλεια σφαίρα).
- **Isosurface Command:** Η εντολή αυτή παράγει μία επιφάνεια (isosurface) της οποίας η θέση χαρακτηρίζεται από κάποια σταθερή μεταβλητή. Για παράδειγμα, μία τέτοια επιφάνεια θα μπορούσε να αποτελείται από όλα τα σημεία της γεωμετρίας που έχουν την ίδια τιμή πίεσης (isosurface of pressure).

- **Vortex Core Region**: Η εντολή αυτή παράγει μία δίνη (Vortex). Η δίνη αυτή που χαρακτηρίζεται από κυκλικό ή σπειροειδές σχήμα, αποτελείται από ένα πλήθος ροϊκών γραμμών. Η οπτικοποίηση της βοηθάει το χρήστη να αναγνωρίσει τις περιοχές της γεωμετρίας, όπου δημιουργούνται δίνες.
- **Surface of Revolution Command**: Η εντολή αυτή παράγει μία επιφάνεια περιστροφής (Surface of revolution). Η επιφάνεια αυτή δημιουργείται μέσω της περιστροφής μίας γραμμής “Polyline” περί ενός άξονα. Η γραμμή αυτή μπορεί να είναι τόσο απλή όσο ένα ευθύγραμμο τμήμα ή τόσο πολύπλοκη όσο μία καμπύλη.
- **Polyline Command**: Η εντολή αυτή παράγει μία γραμμή “Polyline”. Η γραμμή αυτή αποτελείται από ευθύγραμμα τμήματα ενωμένα μεταξύ τους διαδοχικά.
- **Surface Group Command**: Η εντολή αυτή παράγει έναν “Locator” που αποτελείται από ένα πλήθος επιφανειακών “Locators”. Για παράδειγμα, το πλήθος των πτερυγίων του ρότορα (Blade Surface Group), αποτελούν έναν τέτοιο “Locator”.
- **Turbo Surface Command**: Οι επιφάνειες “Turbo Surfaces” είναι γραφικές εντολές (Graphic Objects) που έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν ως “Locators”.
- **Turbo Line Command**: Οι γραμμές “Turbo Lines” είναι γραφικές εντολές (Graphic Objects) που έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν ως “Locators”.

### 7.2.3 Graphic Objects

Οι γραφικές εντολές είναι διαθέσιμες μέσω της εργαλειοθήκης της Εικόνα 7-1 (Toolbar), είτε μέσω της επιλογής “Insert Menu ” (Εικόνα 7-2 εντός του πράσινου πλαισίου). Στη συνέχεια περιγράφονται επιγραμματικά οι σημαντικότερες εντολές:

- **Vector Command**: Η εντολή αυτή παράγει ένα πλήθος διανυσμάτων με σκοπό να οπτικοποιήσει την κατεύθυνση (προσανατολισμός βέλους) και το μέτρο (μήκος βέλους) μίας διανυσματικής μεταβλητής, όπως για παράδειγμα της ταχύτητας. Τα βέλη ξεκινούν από ένα πλήθος σημείων (seeds), των οποίων η θέση ορίζεται.
- **Contour Command**: Η εντολή αυτή παράγει ένα πλήθος περιγραμμάτων που αποτελούνται από διαδοχικά συνδεδεμένες γραμμές. Οι γραμμές αυτές ενώνουν σημεία που εκφράζονται από την ίδια τιμή σε κάποια μεταβλητή. Ένα γνωστό παράδειγμα αποτελούν οι ισοϋψείς γραμμές ενός γεωγραφικού χάρτη.
- **Streamline Command**: Η εντολή αυτή παράγει ένα πλήθος ροϊκών γραμμών. Οι ροϊκές γραμμές αποτυπώνουν την πορεία που θα ακολουθούσε ένα σωματίδιο του ρευστού με μηδενική μάζα διαμέσου του όγκου ελέγχου. Κάθε ροϊκή γραμμή ξεκινάει από έναν κόμβο του πλέγματος του αντίστοιχου “Locator” που έχει ορίσει ο χρήστης.
- **Particle Track Command**: Σε πολύπλοκες ροές, πολλές φορές είναι χρήσιμη η ανίχνευση της πορείας διακριτών σωματιδίων διαμέσου του όγκου ελέγχου. Η πορεία που ακολουθούν τα σωματίδια επηρεάζεται από τις ιδιότητες του ρευστού, καθώς επίσης και από τη μέση και τυρβώδη συμπεριφορά της ροής. Η εντολή “Particle Track” είναι χρήσιμη για τους παρακάτω δύο λόγους:
  - Δυνατότητα ανίχνευσης της μέσης συμπεριφοράς της ροής εντός και γύρω από πολύπλοκες γεωμετρίες.
  - Δυνατότητα απεικόνισης των τυρβωδών φαινομένων με απελευθέρωση πολλών σωματιδίων από το ίδιο σημείο.
- **Volume Rendering Command**: Η εντολή αυτή δίνει τη δυνατότητα οπτικοποίησης μίας μεταβλητής σε ολόκληρο τον όγκο ελέγχου. Κάτι τέτοιο γίνεται εφικτό μέσω της

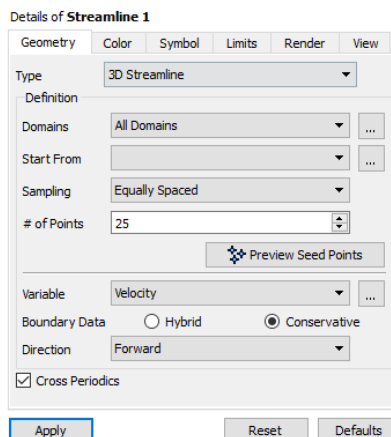


μεταβολής της διαφάνειας και του χρώματος του γραφήματος ανάλογα με την τιμή της μεταβλητής.

- **Legend Command:** Η εντολή αυτή δημιουργεί ένα χρωματικό υπόμνημα, του οποίου οι ιδιότητες (μονάδα μέτρησης, εύρος, χρώμα) καθορίζονται από το χρήστη. Το υπόμνημα χρησιμοποιείται με σκοπό να αναπαραστήσει τη σύνδεση χρωμάτων και ποσοτήτων.
- **Instance Transform Command:** Η εντολή αυτή δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να αναπαραστήσει πολλαπλές φορές με διαφορετικούς τρόπους την ήδη υπάρχουσα γεωμετρία, όπως για παράδειγμα: περιστροφή (rotation), κατοπτρισμός (reflection) κλπ.

## 7.2.4 Παράθυρο λεπτομερειών (Details View)

Το παράθυρο λεπτομερειών (Details View) εμφανίζεται στο κάτω μέρος της περιοχής “Workspace Area” της Εικόνα 7-1 κάθε φορά που επιλέγεται μία λειτουργία (Object). Έτσι δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να επεξεργαστεί τις διαθέσιμες επιλογές την αντίστοιχης λειτουργίας, ώστε να την εξατομικεύσει. Παρόλο που οι επιλογές αυτές μπορεί να διαφέρουν από λειτουργία σε λειτουργία, δεν παύουν να έχουν κάποια κοινά βασικά σημεία, τα οποία περιγράφονται συνοπτικά στη συνέχεια. Στην Εικόνα 7-3 φαίνεται το παράθυρο λεπτομερειών για τη λειτουργία απεικόνισης ροϊκών γραμμών (Streamline Object).



Εικόνα 7-3 ANSYS CFX-Post Details View

- **Geometry Tab:** Ο ορισμός της γεωμετρίας είναι μοναδικός για κάθε γραφικό αντικείμενο (graphic object). Η βασική διαδικασία περιλαμβάνει τον ορισμό του μεγέθους και της θέσης του αντικειμένου, με τις περισσότερες δυνατότητες να εξειδικεύονται στο αντίστοιχο αντικείμενο.
- **Color Tab:** Η καρτέλα αυτή δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επεξεργαστεί το χρώμα του γραφικού αντικειμένου. Το χρώμα μπορεί να είναι είτε σταθερό είτε μεταβλητό, σύμφωνα με ένα χρωματικό χάρτη (color map) της επιλογής του.
- **Symbol Tab:** Η καρτέλα “Symbol” δίνει τη δυνατότητα τροποποίησης των συμβόλων των αντικειμένων.
- **Render Tab:** Η καρτέλα αυτή ρυθμίζει τον τρόπο εμφάνισης των αντικειμένων.

- **View Tab:** Η καρτέλα αυτή χρησιμοποιείται με σκοπό να δημιουργήσει πολλαπλά αντίγραφα του αντικειμένου πάνω στον όγκο ελέγχου (instance transform). Αντίστοιχη λειτουργία περιεγράφηκε και στην 7.2.3 (Instance Transform Command).

### 7.3 Αναφορά αποτελεσμάτων (Report)

Το ANSYS CFX-Post δίνει την επιλογή αυτόματης εξαγωγής αναφοράς των αποτελεσμάτων (report) ανάλογα με τον τύπο της συσκευής. Στην περίπτωση της διπλωματικής εργασίας, η αναφορά αφορά τον ρότορα ενός φυγοκεντρικού συμπιεστή.

### 7.4 Εξαγωγή και επεξεργασία αναφοράς

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι αναφορές σχετικά με τις στροβιλομηχανές (Turbo Report Templates) εξάγονται μονάχα στην περίπτωση που το ρευστό είναι μονοφασικό (single-phase fluid) και το πρόβλημα έχει οριστεί ως πρόβλημα σταθερής κατάστασης (steady-state). Η εξαγωγή της αναφοράς είναι εφικτή με τους παρακάτω τρόπους:

- (Εικόνα 7-1) “File Menu > Report > Report Templates > Centrifugal Compressor Rotor Report”
- (Εικόνα 7-1) “Outline Tab > δεξί κλικ Report > Report Templates > Centrifugal Compressor Rotor Report”

Η αναφορά που έχει εξαχθεί είναι διαθέσιμη προς ανάγνωση και ανάλυση μέσω της επιλογής “Report Viewer” στην περιοχή “Viewer Area” της Εικόνα 7-1.

Επιπλέον επεξεργασία της αναφοράς όσον αφορά την προσθαφαίρεση στοιχείων είναι εφικτή μέσω της επιλογής “Report” στην καρτέλα “Outline”. Κάτω από την επιλογή “Report”, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει τα επιθυμητά γραφήματα, στοιχεία και αποτελέσματα που θα εμφανίζονται στην αναφορά, τσεκάροντας τις κατάλληλες επιλογές. Οποιοσδήποτε αλλαγές συμβούν πρέπει να συνοδεύονται από την επιλογή “δεξί κλικ Report > Refresh Preview”, ώστε να είναι πλέον διαθέσιμες στην εξαχθείσα αναφορά.

#### 7.4.1 Centrifugal Compressor Rotor Report και σχολιασμός αποτελεσμάτων

Στις εικόνες που ακολουθούν (Εικόνα 7-4 έως Εικόνα 7-12) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, όπως αυτά εμφανίζονται μέσω της επιλογής “Centrifugal Compressor Rotor Report”.

Αξίζει να αναφερθεί πως για λόγους λιτότητας παρουσιάζονται και σχολιάζονται μονάχα τα σημαντικότερα από τα ποσοτικά και ποιοτικά αποτελέσματα που εξάγει αυτόματα η λειτουργία “Report”. Στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β μπορεί κανείς να δει κάποια από τα λιγότερο σημαντικά ποιοτικά αποτελέσματα της ανάλυσης.

Rotation Speed	-6178.4700	[radian s <sup>-1</sup> ]
Mass Flow Rate	0.2000	[kg s <sup>-1</sup> ]
Inlet Volume Flow Rate	0.1923	[m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]
Input Power	14214.9000	[W]
Reference Radius	0.0467	[m]
Inlet Flow Coefficient	0.0765	
Exit Flow Coefficient	0.2525	
Head Coefficient	3.0829	
Work Input Coefficient	0.8542	
Total Pressure Ratio	1.9255	
Total Temperature Ratio	1.2370	
Total Isentropic Efficiency %	87.9375	
Total Polytropic Efficiency %	89.0158	

*Εικόνα 7-4 Compressor Performance Results*

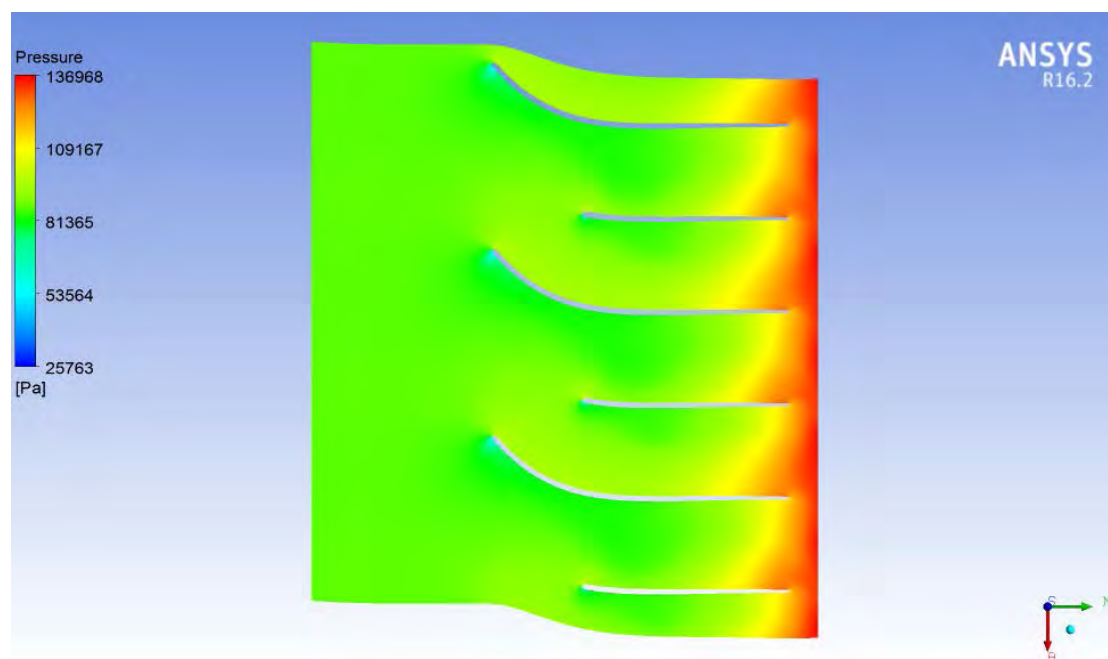
Quantity	Inlet	LE Cut	TE Cut	Outlet	TE/LE	TE-LE	Units
Density	1.0218	1.0103	1.2542	1.3480	1.2415	0.2440	[kg m <sup>-3</sup> ]
Pstatic	86976.3000	85843.9000	121693.0000	134472.0000	1.4176	35849.2000	[Pa]
Ptotal	89136.4000	88960.2000	175523.0000	171632.0000	1.9730	86562.3000	[Pa]
Ptotal (rot)	89147.7000	88631.1000	85013.2000	84435.3000	0.9592	-3617.8600	[Pa]
Tstatic	296.4860	294.4870	334.1370	344.3020	1.1346	39.6508	[K]
Ttotal	298.5720	298.8120	369.3490	369.3360	1.2361	70.5371	[K]
Ttotal (rot)	298.5830	298.5850	300.1060	301.4410	1.0051	1.5210	[K]
Hstatic	-1671.4300	-3679.5700	36145.7000	46355.4000	-9.8234	39825.3000	[J kg <sup>-1</sup> ]
Htotal	424.1680	664.8590	71512.3000	71498.9000	107.5600	70847.4000	[J kg <sup>-1</sup> ]
Rothalpy	435.0470	437.1090	1964.7700	3305.9700	4.4949	1527.6600	[J kg <sup>-1</sup> ]
Entropy	38.2190	39.9898	57.3750	63.6648	1.4347	17.3852	[J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
Mach (abs)	0.1875	0.2629	0.7232	0.5986	2.7507	0.4603	
Mach (rel)	0.4656	0.4832	0.3153	0.4347	0.6525	-0.1679	
U	146.1290	141.4280	288.4520	336.7940	2.0396	147.0230	[m s <sup>-1</sup> ]
Cm	64.7381	79.9220	72.8340	69.0822	0.9113	-7.0880	[m s <sup>-1</sup> ]
Cu	0.0668	-6.4464	-255.4710	-210.5520	39.6302	-249.0250	[m s <sup>-1</sup> ]
C	64.7386	83.6298	270.2040	224.9970	3.2309	186.5740	[m s <sup>-1</sup> ]
Distortion Parameter	1.0001	1.2910	1.0222	1.0485	0.7918	-0.2688	
Flow Angle: Alpha	-0.0683	2.3413	61.7354	67.0061	26.3681	59.3941	[degree]
Wu	146.1960	134.9830	32.9805	126.2410	0.2443	-102.0030	[m s <sup>-1</sup> ]
W	160.7580	159.1110	83.8053	146.5360	0.5267	-75.3058	[m s <sup>-1</sup> ]
Flow Angle: Beta	-69.2870	-60.2045	-23.1501	-65.8466	0.3845	37.0545	[degree]

Εικόνα 7-5 Summary Data

Το κύριο καθήκον κάθε συμπιεστή είναι η αύξηση της πίεσης του εργαζόμενου μέσου. Την παραπάνω συνθήκη έρχονται να επαληθεύσουν οι εικόνες που ακολουθούν (Εικόνα 7-6, Εικόνα 7-7) που απεικονίζουν τη μεταβολή της στατικής πίεσης του αέρα κατά το πέρασμα του ανάμεσα από τα πτερύγια.

Στην Εικόνα 7-6 (blade to blade view), απεικονίζεται η μεταβολή της στατικής πίεσης στα πτερύγια. Παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής αύξησης της στατικής πίεσης επιτυγχάνεται κοντά στην έξοδο του ρότορα. Επίσης, λόγω της περιστροφής του ρότορα (στην Εικόνα 7-6 προς την κατεύθυνση θ), η στατική πίεση στην επιφάνεια πίεσης των κύριων πτερυγίων είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της επιφάνειας αναρρόφησης, κάτι που

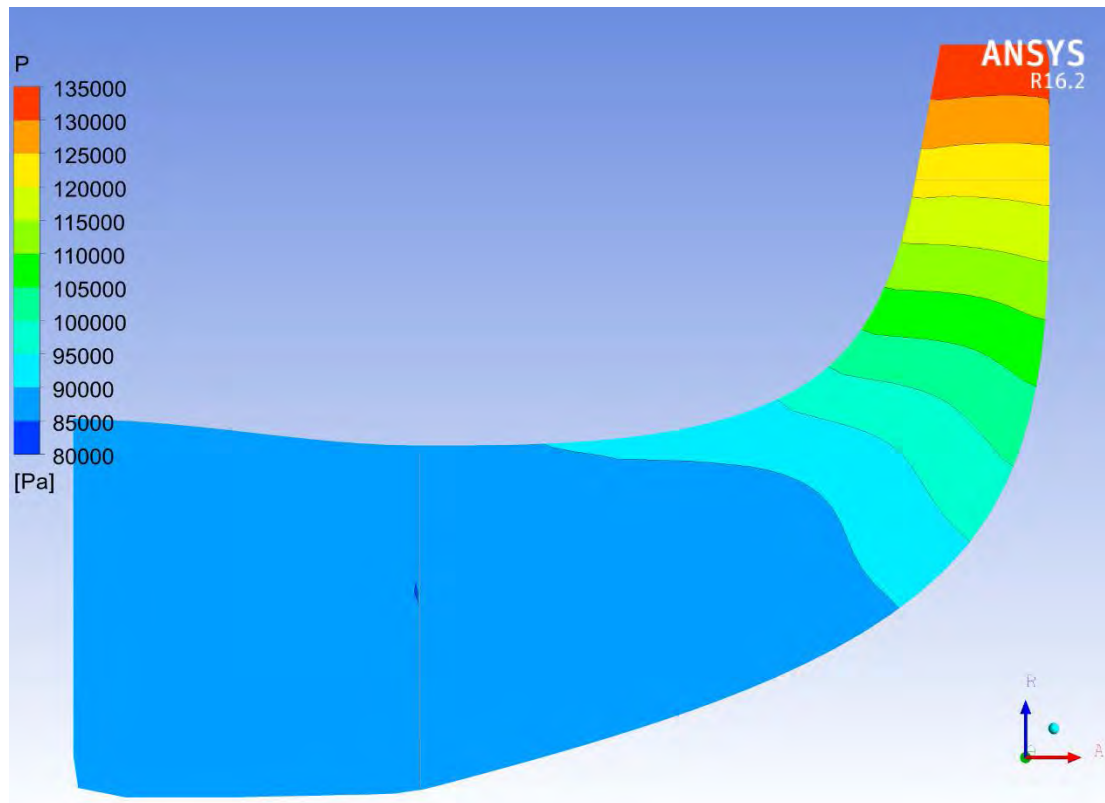
άλλωστε είναι αναμενόμενο. Επιπλέον υπάρχει και ανάκτηση πίεσης αντίστοιχης τάξης στον διαχύτη, ο οποίος δεν μοντελοποιείται στην παρούσα φάση.



Εικόνα 7-6 Διδιάστατη απεικόνιση στατικής πίεσης (blade to blade view)

Στην Εικόνα 7-7, μέσω της πλάγιας όψης του πτερυγίου (meridional view), είναι επίσης φανερή η αύξηση της στατικής πίεσης από την είσοδο στην έξοδο του ρότορα, καθώς και η διαφορά της πίεσης από το hub στο shroud. Οι γκριζες γραμμές (κάθετη και οριζόντια), υποδηλώνουν την ακμή προσβολής (leading edge) και την ακμή φυγής (trailing edge) του πτερυγίου, αντίστοιχα.

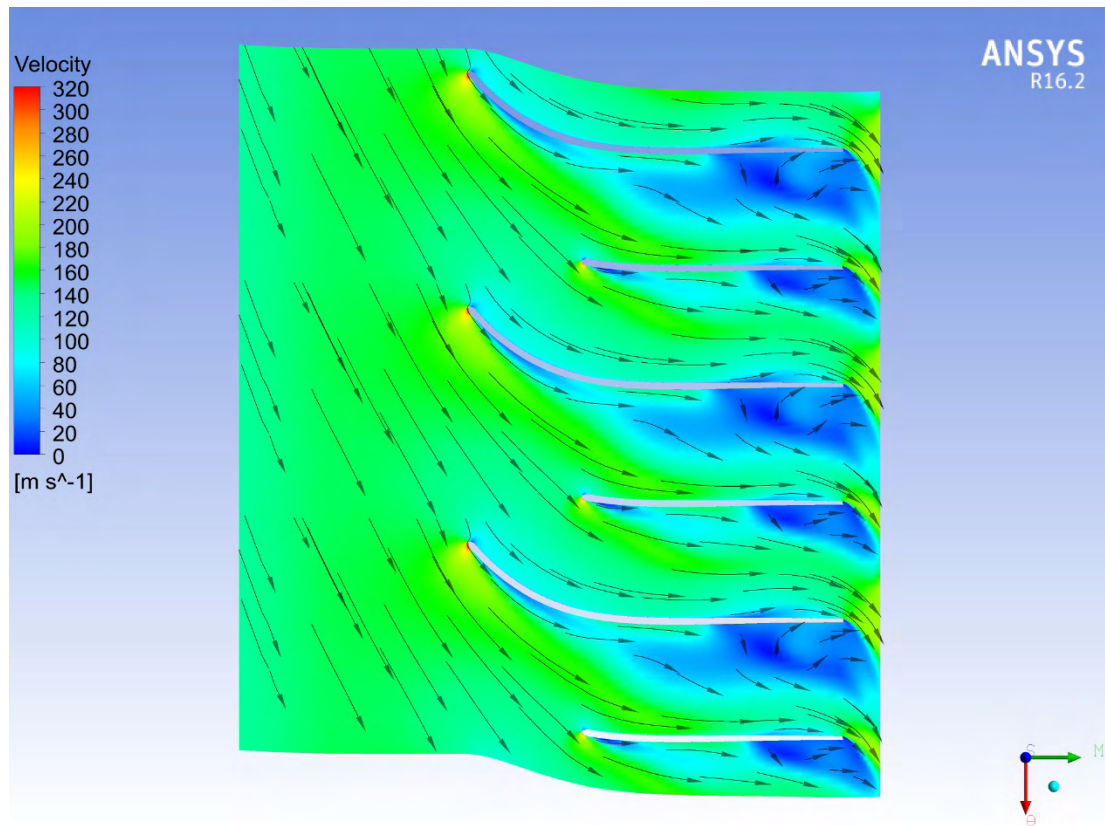
Η ταχύτητα του αέρα, όσο αυτός διασχίζει το ρότορα, απεικονίζεται στη συνέχεια με τη μορφή διανυσμάτων σε κάτοψη των πτερυγίων (blade to blade view) στην Εικόνα 7-8. Γί αυτήν την απεικόνιση, επιλέχθηκε το σχήμα που αναφέρεται στο 50% του εύρους των πτερυγίων, σαν ένας άτυπος μέσος όρος του τι συμβαίνει σε ολόκληρο το εύρος.



Εικόνα 7-7 Διδιάστατη απεικόνιση στατικής πίεσης (meridional view)

Με τη χρήση διανυσμάτων είναι σε θέση κανείς να εντοπίσει σημεία πάνω στο πέρασμα όπου αποκολλάται η ροή (ανάλογα με την κατεύθυνση του βέλους), καθώς και του μέτρου της ταχύτητας, είτε από το μήκος του βέλους, είτε από το απεικονιζόμενο χρώμα πίσω από το βέλος, όντας πάντοτε σε συμφωνία με το αντίστοιχο υπόμνημα.

Έτσι, εξετάζοντας την Εικόνα 7-8, παρατηρεί κανείς την αποκόλληση της ροής από το πτερύγιο περίπου στα 2/3 αυτού, έχοντας στη συνέχεια ως αποτέλεσμα τη δημιουργία δινών και απότομη μείωση της ταχύτητας. Η αποκόλληση της ροής πιθανόν να οφείλεται στις απώλειες λόγω ύπαρξης κενού ανάμεσα στο άνω μέρος του πτερυγίου (tip) και στο ακροπτερύγιο (shroud) (clearance losses), καθώς και στην ανάπτυξη μεγάλου πάχους οριακού στρώματος στην πλευρά αναρρόφησης του πτερυγίου. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι όσο μεγαλύτερη είναι η διάχυση ταχύτητας (velocity diffusion), τόσο πιο παχύ είναι το οριακό στρώμα της ροής και άρα οι πιθανότητες αποκόλλησης του αυξάνονται. Απόρροια της αποκόλλησης είναι η απώλεια πίεσης και κυρίως οφείλονται στην πλευρά αναρρόφησης του πτερυγίου [16]. Μία ελάφρυνση σε αυτό το πρόβλημα μπορεί να δώσει η ελαφριά κλίση του πτερυγίου στην έξοδο με αντίθετη γωνία (backswept blade), ώστε να αποτραπεί η αποκόλληση.



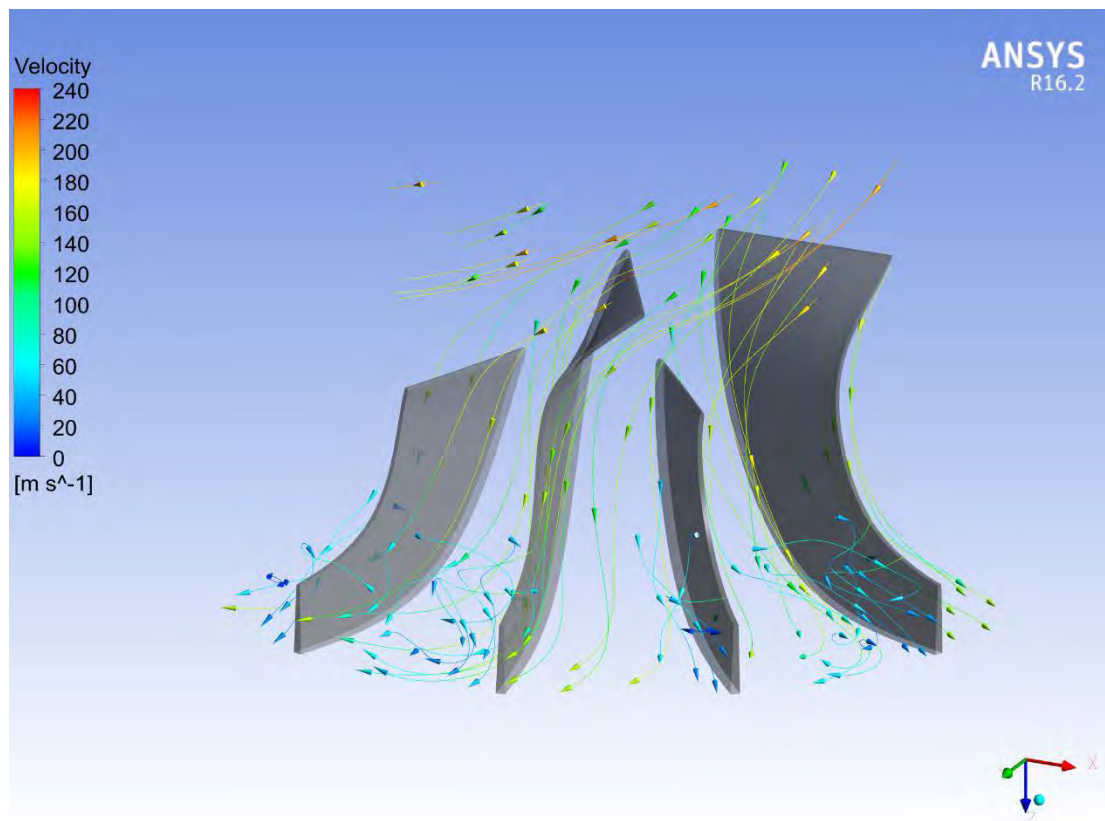
Εικόνα 7-8 Διδιάστατη διανυσματική απεικόνιση της ταχύτητας στην περρωτή (blade to blade view)

Επίσης, εύκολα παρατηρεί κανείς ότι η ταχύτητα στην επιφάνεια αναρρόφησης του πτερυγίου είναι υψηλότερη από την αντίστοιχη της πίεσης. Οι υψηλές ταχύτητες στην είσοδο προσδιορίζονται από την οριακή συνθήκη παροχής μάζας εισόδου και είναι αποτέλεσμα της υποπίεσης που δημιουργείται στην είσοδο. Το παραπάνω είναι φυσική απόρροια του νόμου του Bernoulli σε συνδυασμό με αυτά που αναφέρθηκαν προηγουμένως στην Εικόνα 7-6 για τις πιέσεις.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η τριδιάστατη απεικόνιση των ροϊκών γραμμών της ταχύτητας κατά μήκος των πτερυγίων, όπως αυτή εμφανίζεται στην Εικόνα 7-9. Συγκεκριμένα, γίνεται προσομοίωση της ροής του αέρα και της πορείας του διαμέσω των πτερυγίων.

Όλες οι προηγούμενες παρατηρήσεις, μπορούν κάλλιστα να επαληθευτούν στην Εικόνα 7-9, όπως για παράδειγμα η επιτάχυνση της ροής στην κυρτή πλευρά του πτερυγίου ή οι δίνες που δημιουργούνται κοντά στην έξοδο των πτερυγίων.

Ορισμένες μάλιστα ροϊκές γραμμές, κυρίως προς την έξοδο του πτερυγίου, περνούν πάνω από το πτερύγιο. Αυτό είναι αποτέλεσμα του απειροελάχιστου διάκενου, σε σχέση πάντα με το μέγεθος του ρότορα, που υπάρχει ανάμεσα στο ακροπτερύγιο και το κέλυφος του συμπίεστή (shroud tip clearance).



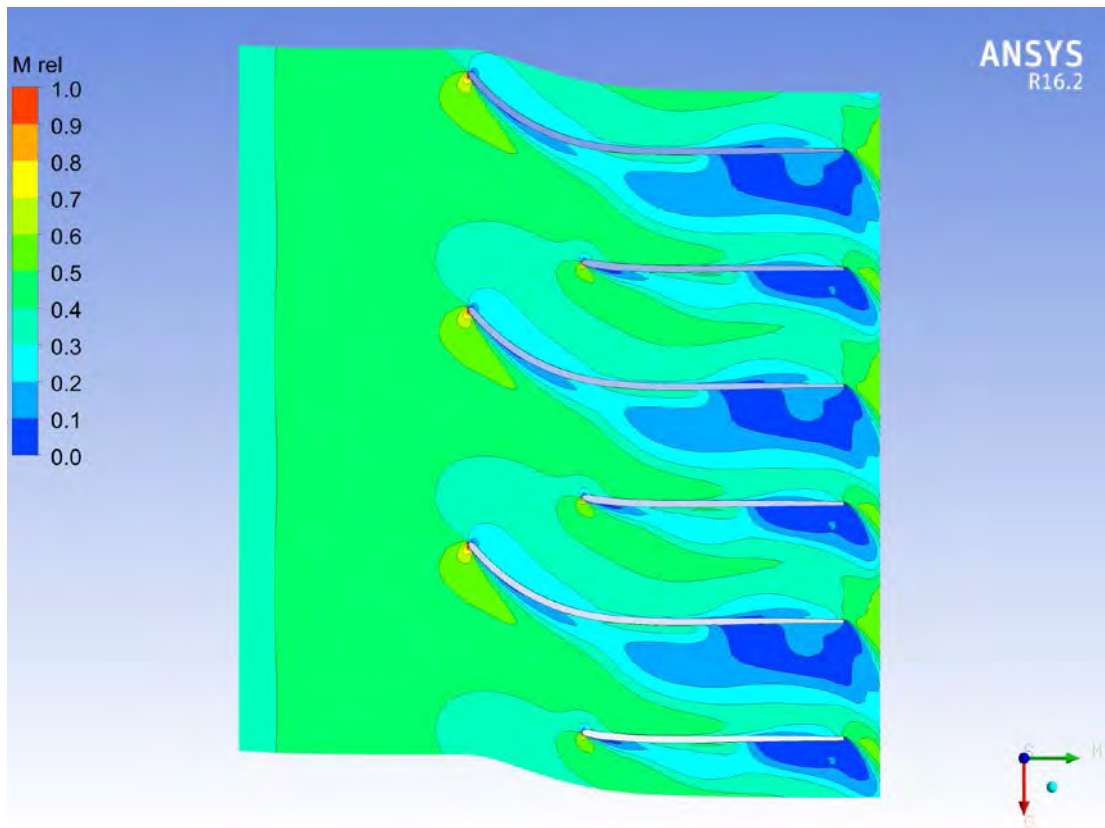
Εικόνα 7-9 Τριδιάστατη απεικόνιση ροϊκών γραμμών ταχύτητας στην περρωτή

Στις εικόνες που ακολουθούν (Εικόνα 7-10, Εικόνα 7-11), παρουσιάζονται οι κατανομές του αριθμού Mach σε κάτοψη, αλλά και σε πλάγια όψη των πτερυγίων. Οι μεταβολές του αριθμού Mach κατά μήκος των πτερυγίων είναι αντίστοιχες με αυτές της ταχύτητας, κάτι που βέβαια είναι λογικό, εφόσον υπάρχει άμεση εξάρτηση του αριθμού Mach από την ταχύτητα του αέρα και θεωρώντας επίσης ότι η θερμοκρασιακή μεταβολή (Εικόνα 7-12) δεν είναι τόσο έντονη και άρα δεν επηρεάζεται σημαντικά η ταχύτητα του ήχου.

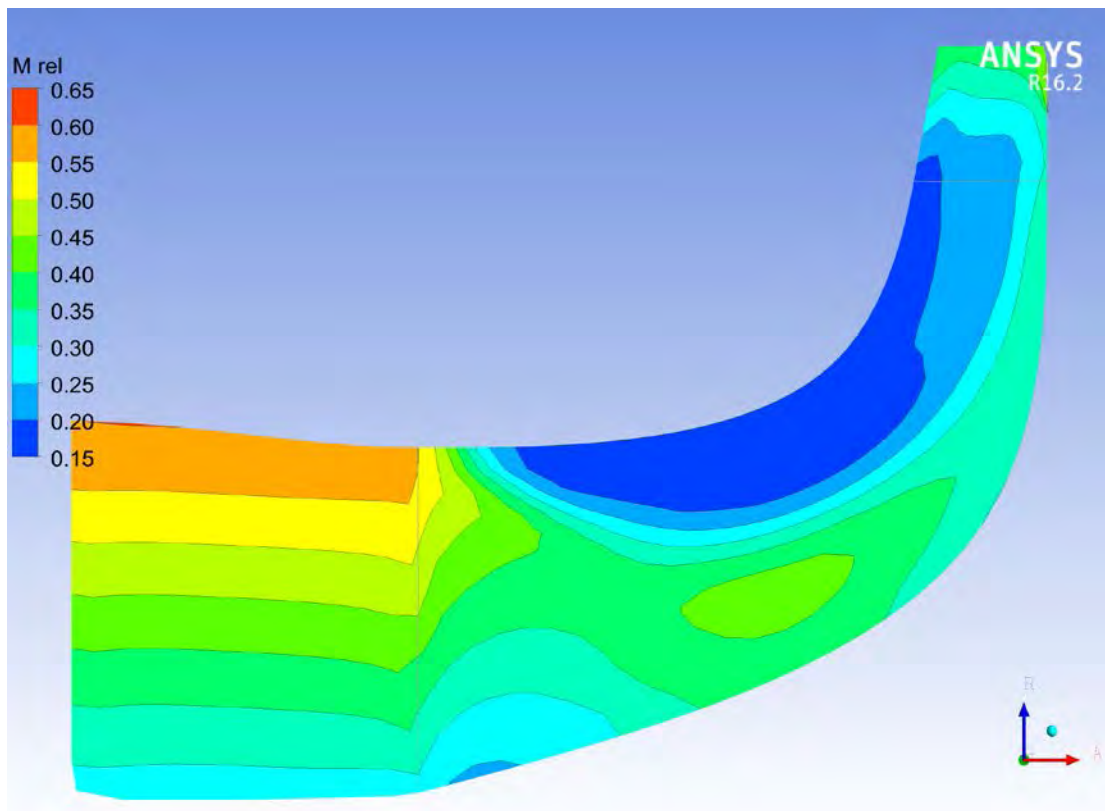
Αξιοσημείωτο για την Εικόνα 7-10 είναι να αναφερθεί ότι ελάχιστα πιο πάνω από την ακμή προσβολής, ο αριθμός Mach τοπικά προσεγγίζει την ταχύτητα του ήχου. Λόγω της διχητικής ( $Mach > 0.7$ ) ή ακόμα και υπερηχητικής ροής ( $Mach > 1$ ) μπορεί να εμφανιστούν κρουστικά κύματα. Έτσι η ραγδαία διάχυση ταχύτητας που είναι αποτέλεσμα των κρουστικών κυμάτων οδηγεί σε αύξηση του πάχους του οριακού στρώματος και άρα αύξηση των απωλειών λόγω αποκόλλησης του [14]. Εξαιρουμένης αυτής της ιδιαιτερότητας, το εύρος κινείται στα φυσιολογικά αναμενόμενα πλαίσια, με το χαμηλότερο σημείο να βρίσκεται στο σημείο δημιουργίας των δινών λόγω της αποκόλλησης της ροής, όπου ο αριθμός Mach φτάνει σε σχεδόν μηδενικές τιμές.

Στην Εικόνα 7-11 γίνεται επίσης εμφανής η μεταβολή του αριθμού Mach από το hub στο shroud, όπου συγκεκριμένα στο shroud οι μηδενικοί αριθμοί Mach επαληθεύουν τη συνθήκη μη ολίσθησης στο τοίχωμα του κελύφους, αφού το κέλυφος είναι ακίνητο.



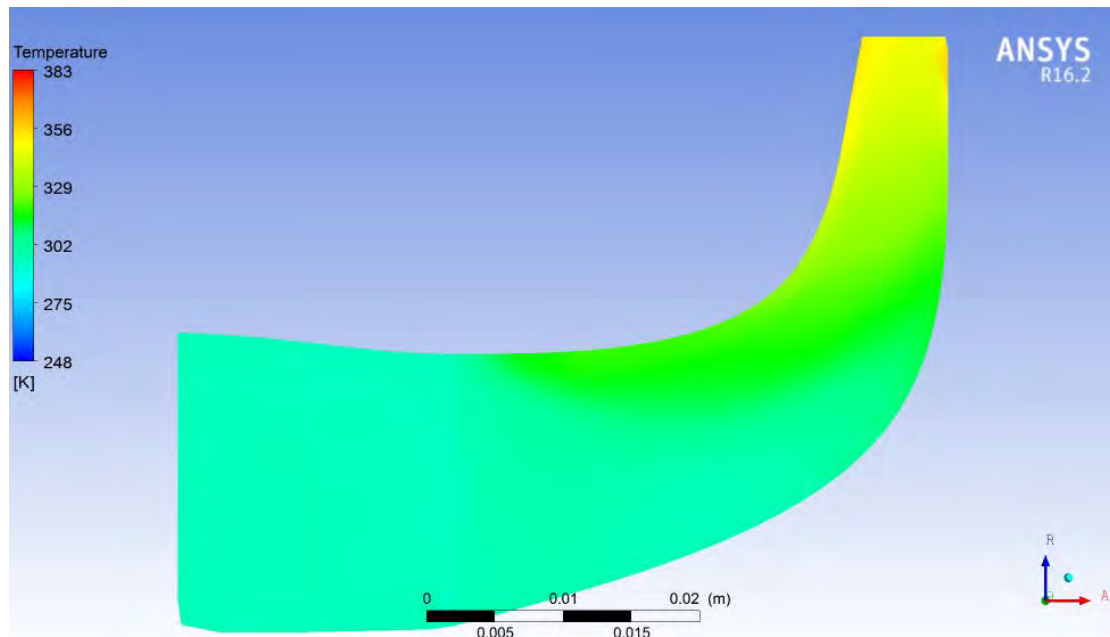


Εικόνα 7-10 Διδιάστατη απεικόνιση αριθμού Mach στην περρωτή (blade to blade view)



Εικόνα 7-11 Διδιάστατη απεικόνιση αριθμού Mach (Meridional View)

Όσον αφορά τη θερμοκρασιακή μεταβολή στο πτερύγιο, όπως αυτή εμφανίζεται στην Εικόνα 7-12, τα αποτελέσματα είναι τα αναμενόμενα. Στο ρότορα του συμπιεστή πραγματοποιείται αύξηση της ειδικής ενθαλπίας και κατ' επέκταση της θερμοκρασίας, εφόσον θεωρούμε πως η ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα παραμένει σταθερή. Όπως και στην περίπτωση της στατικής πίεσης, έτσι και στην περίπτωση της στατικής θερμοκρασίας, η μεγαλύτερη αύξηση της θερμοκρασίας παρατηρείται κοντά στα 2/3 του πτερυγίου.



Εικόνα 7-12 Διδιάστατη απεικόνιση κατανομής της στατικής θερμοκρασίας (meridional view)

## 8 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΧΑΡΤΗ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ (COMPRESSOR MAP)

Ο χάρτης λειτουργίας ενός συμπιεστή είναι ένα γράφημα μέσω του οποίου περιγράφονται συνοπτικά κάποια χαρακτηριστικά για την λειτουργία ενός συμπιεστή. Ο χάρτης λειτουργίας είναι ένα πολύ σημαντικό στοιχείο το οποίο πλαισιώνει κάθε συμπιεστή, αλλά και στρόβιλο. Μέσω των χαρτών λειτουργίας, μπορούν να εξαχθούν πολύτιμα δεδομένα, τα οποία μπορεί να χρησιμοποιήσει ένας μηχανικός για να επιλέξει τον σωστό συμπιεστή ανάλογα με την εφαρμογή.

### 8.1 Χαρακτηριστικά του χάρτη

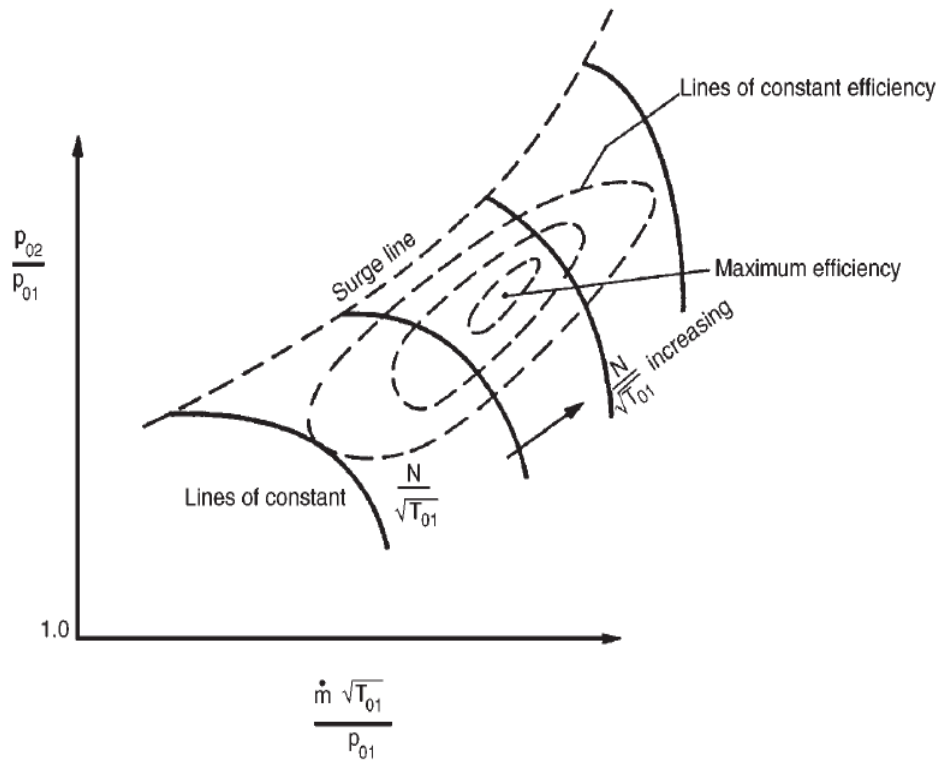
Η ορθή ανάγνωση και χρήση είναι απαραίτητη για έναν χάρτη λειτουργίας, καθώς με αυτόν τον τρόπο, κάποιος μπορεί να εξάγει αρκετά δεδομένα, τα οποία δεν είναι άμεσα προφανή. Παρακάτω, υπάρχει επεξήγηση για τα κύρια μέρη τα οποία πρέπει να γνωρίζει ο χρήστης ούτως ώστε να κατανοήσει έναν χάρτη λειτουργίας.

#### 8.1.1 Άξονες του γραφήματος

Ο κάθετος άξονας του χάρτη λειτουργίας περιλαμβάνει τον λόγο πίεσης του συμπιεστή, δηλαδή τον λόγο  $\frac{P_{03}}{P_{01}}$ . Ο οριζόντιος άξονας, απεικονίζει την ποσότητα  $\frac{\dot{m} \cdot \sqrt{T_{01}}}{P_{01}}$ . Η παραπάνω ποσότητα ονομάζεται διορθωμένη μαζική παροχή και στην ουσία αναπαριστά την μαζική παροχή αέρα του συμπιεστή.

#### 8.1.2 Γραμμή πάλμωσης (Surge Line)

Η γραμμή πάλμωσης (Surge Line) αντιπροσωπεύει όλα τα σημεία λειτουργίας του συμπιεστή, στα οποία ξεκινάει να λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της πάλμωσης. Κατά το φαινόμενο της πάλμωσης υπάρχει στιγμιαία ανακυκλοφορία του αέρα ο οποίος κατευθύνεται από την έξοδο του συμπιεστή προς την είσοδο. Παρατηρείται δηλαδή μία μακροσκοπική ταλάντωση του συνόλου της ροής. Το συγκεκριμένο φαινόμενο παρατηρείται όταν η μαζική παροχή του αέρα είναι μικρότερη από μία κρίσιμη τιμή, ενώ ταυτόχρονα υπάρχει σχετικά μεγάλη διαφορά πίεσης ανάμεσα στην είσοδο και στην έξοδο του συμπιεστή. Η λειτουργία ενός συμπιεστή κοντά στην γραμμή πάλμωσης είναι ανεπιθύμητη αφ' ενός γιατί η ροή είναι ασταθής και αφ' ετέρου γιατί ο βαθμός απόδοσης του συμπιεστή πέφτει δραματικά. Η περιοχή ασφαλούς και σταθερής λειτουργίας στον χάρτη ενός συμπιεστή βρίσκεται κάτω και δεξιά από την γραμμή πάλμωσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 8-1.



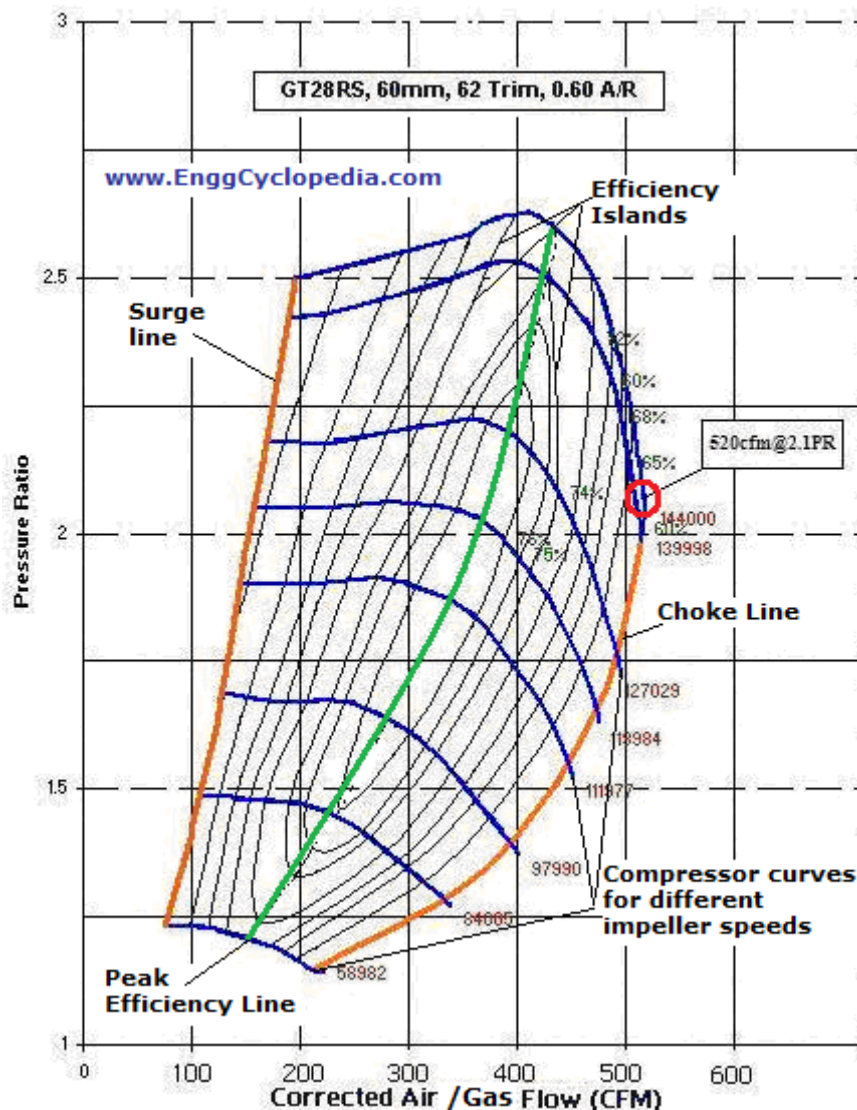
Εικόνα 8-1 Χάρτης Λειτουργίας Φυγοκεντρικού Συμπιεστή

### 8.1.3 Γραμμή Στραγγαλισμού (Choke Line)

Η Γραμμή Στραγγαλισμού (Choke Line) αντιπροσωπεύει όλα τα σημεία λειτουργίας στον χάρτη του συμπιεστή, στα οποία λαμβάνει χώρα το φαινόμενο του στραγγαλισμού της ροής. Ο στραγγαλισμός είναι ένα φαινόμενο κατά το οποίο ο συμπιεστής λειτουργεί εκτός των φυσιολογικών συνθηκών. Πιο συγκεκριμένα, το φαινόμενο του στραγγαλισμού παρατηρείται στους συμπιεστές όταν η πίεση στην έξοδό τους είναι σχετικά μικρή, ενώ η μαζική παροχή του αέρα είναι σημαντικά μεγάλη. Όσο αυξάνεται η μαζική παροχή, τόσο αυξάνεται η ταχύτητα του αέρα, μέχρι να προσεγγίσει την ταχύτητα του ήχου, η οποία για την εφαρμογή που μελετάται είναι πρακτικώς η μέγιστη. Άμεση συνέπεια της αδυναμίας αύξησης της ταχύτητας του αέρα είναι η αδυναμία αύξησης της μαζικής παροχής, με έναν δεδομένο λόγο πίεσης. Η λειτουργία ενός συμπιεστή κοντά στην Γραμμή Στραγγαλισμού είναι ανεπιθύμητη, καθώς μπορεί να προκληθούν βλάβες, ιδιαίτερα εάν ο συμπιεστής είναι αξονικός. Εκτός των βλαβών που μπορεί να προκληθούν, η λειτουργία ενός συμπιεστή κοντά στην Γραμμή Στραγγαλισμού είναι ανεπιθύμητη διότι ο βαθμός απόδοσης είναι σημαντικά μικρότερος από αυτόν του ονομαστικού σημείου λειτουργίας. Η περιοχή ασφαλούς λειτουργίας στον χάρτη ενός συμπιεστή βρίσκεται επάνω και αριστερά από την Γραμμή Στραγγαλισμού, όπως φαίνεται στην Εικόνα 8-2.

### 8.1.4 Καμπύλες λειτουργίας

Στον χάρτη λειτουργίας υπάρχουν καμπύλες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 8-1, στις οποίες διατηρείται σταθερή η ποσότητα  $\frac{N}{\sqrt{T_{01}}}$ . Επειδή η ολική θερμοκρασία εισόδου ( $T_{01}$ ) δεν αλλάζει σημαντικά σε όλο το φάσμα του χάρτη λειτουργίας, θεωρείται προσεγγιστικά ότι στις προαναφερθείσες καμπύλες διατηρείται σταθερή η περιστροφική ταχύτητα του συμπιεστή (N). Στις καμπύλες αυτές, στην Εικόνα 8-1, αναγράφεται χαρακτηριστικά: «Lines of constant  $\frac{N}{\sqrt{T_{01}}}$ ».



Εικόνα 8-2 Χάρτης Λειτουργίας Φυγοκεντρικού Συμπιεστή

### 8.1.5 Ισοϋψείς καμπύλες βαθμού απόδοσης

Ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα των χαρτών λειτουργίας των συμπιεστών είναι οι ισοϋψείς καμπύλες του βαθμού απόδοσης. Φέρουν ομοιότητα με νησιά, εξ' ου και στα αγγλικά μπορούν να βρεθούν συχνά με τον όρο «Efficiency Islands». Οι συγκεκριμένες καμπύλες είναι ομόκεντρες και συγκλίνουν προς ένα κεντρικό σημείο, στο οποίο ο βαθμός απόδοσης είναι και ο μέγιστος δυνατός. Παραδείγματα αυτών των καμπυλών φαίνονται τόσο στην Εικόνα 8-1 όσο και στην Εικόνα 8-2.

## 8.2 Παραγωγή του χάρτη λειτουργίας μέσω πειραμάτων

Στην παρακάτω παράγραφο θα περιγραφεί η πειραματική διαδικασία η οποία πρέπει να ακολουθηθεί, ώστε να παραχθεί ο χάρτης λειτουργίας ενός ακτινικού συμπιεστή. Γι' αυτόν τον λόγο, είναι απαραίτητο να γίνει αναφορά στα επιμέρους στοιχεία της πειραματικής διάταξης [17].

### 8.2.1 Ηλεκτροκινητήρας, Κιβώτιο ταχυτήτων

Η συσκευή η οποία δίνει ισχύ στον συμπιεστή, μπορεί να είναι είτε ένας στρόβιλος, όπως γίνεται στην περίπτωση του στροβιλοϋπερπληρωτή, είτε ένας ηλεκτροκινητήρας, όπως γίνεται στην εν λόγω πειραματική διάταξη. Για να ρυθμιστούν σωστά οι στροφές του ηλεκτροκινητήρα αλλά και του συμπιεστή, χρησιμοποιείται ένα κιβώτιο ταχυτήτων.

### 8.2.2 Σωλήνας εισαγωγής, ακροφύσιο εισαγωγής

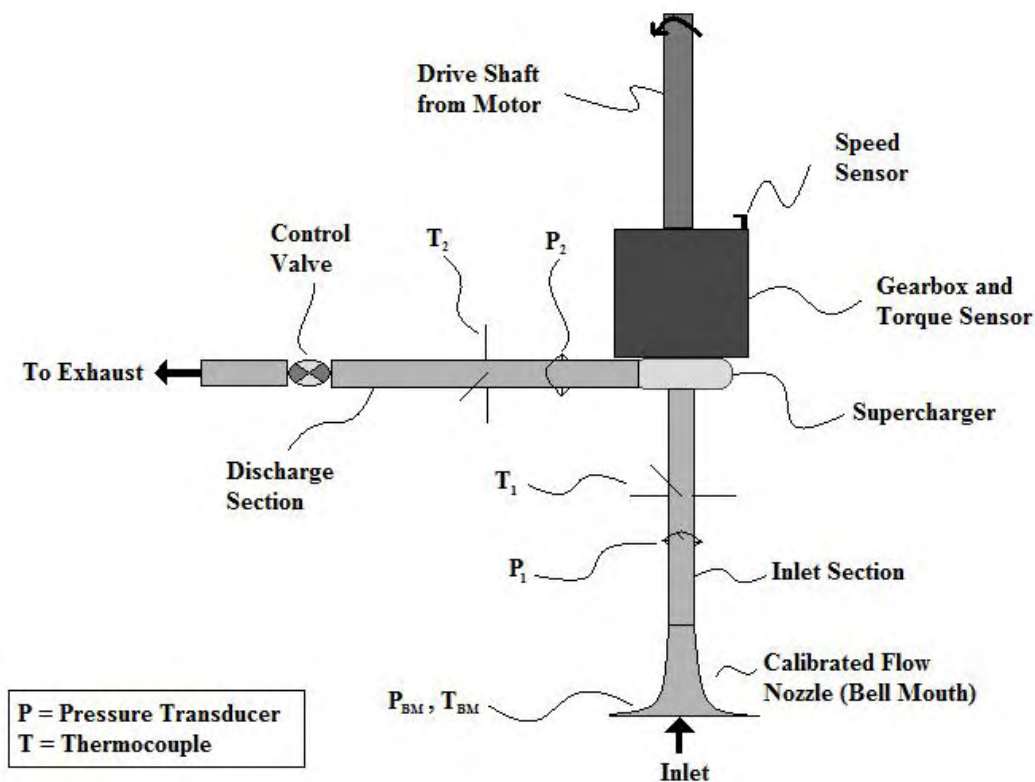
Όπως είναι εμφανές και από την Εικόνα 8-3, για να είναι στρωτή η ροή και να μην υπάρχει πτώση πίεσης στην εισαγωγή χρησιμοποιείται ένα ακροφύσιο, το οποίο τοποθετείται πριν από τον σωλήνα εισαγωγής.



Εικόνα 8-3 Ακροφύσιο Εισαγωγής

### 8.2.3 Σωλήνας εξαγωγής, Βαλβίδα Ελέγχου (Control Valve)

Για τον σωλήνα εξαγωγής είναι προτιμητέο να είναι μεταλλικός, καθώς θα πρέπει να αντέχει στην αυξημένη θερμοκρασία του αέρα, που οφείλεται στην συμπίεση που υφίσταται. Ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην πειραματική διαδικασία, παίζει η Βαλβίδα ελέγχου, η οποία είναι τοποθετημένη στον σωλήνα εξαγωγής, όπως φαίνεται στην Εικόνα 8-4. Μέσω αυτής της βαλβίδας, ο χειριστής μπορεί να ελέγξει την μαζική παροχή του αέρα, βεβαίως όσο οι ταχύτητες του αέρα στον συμπιεστή είναι αποδεκτές.



Εικόνα 8-4 Πειραματική Διάταξη για την παραγωγή χάρτη λειτουργίας

### 8.2.4 Απαραίτητες μετρήσεις

Για να είναι δυνατή η παραγωγή του χάρτη πρέπει να συλλεχθούν τα απαραίτητα πειραματικά δεδομένα. Στην παρακάτω λίστα αναγράφονται τα μεγέθη τα οποία πρέπει να μετρούνται κατά τη διάρκεια του πειράματος.

- Στροφές του άξονα του συμπιεστή (rpm)
- Η Ροπή η οποία ασκείται από τον κινητήρα στον συμπιεστή (για την εύρεση της ισχύος)
- Την πτώση πίεσης στο ακροφύσιο (για την εύρεση της μαζικής παροχής)

- Στατική θερμοκρασία στην εισαγωγή ( $T_1$ )
- Ολική θερμοκρασία στην εισαγωγή ( $T_{01}$ )
- Στατική πίεση στην εισαγωγή ( $P_1$ )
- Ολική πίεση στην εισαγωγή ( $P_{01}$ )
- Ολική θερμοκρασία στην εξαγωγή ( $T_{02}$ )
- Στατική πίεση στην εξαγωγή ( $P_2$ )
- Ολική πίεση στην εξαγωγή ( $P_{02}$ )

Έχοντας ο χρήστης τα παραπάνω δεδομένα για κάθε σημείο λειτουργίας του συμπιεστή, μπορεί με εύκολους υπολογισμούς να βρει τον λόγο πίεσης, την ισεντροπική απόδοση και την μαζική παροχή. Κατά συνέπεια, έχοντας υπολογίσει τις 3 προαναφερθείσες ποσότητες για κάθε σημείο λειτουργίας, ο χρήστης έχει όλα τα απαραίτητα στοιχεία για την παραγωγή του χάρτη λειτουργίας του συμπιεστή.

### 8.3 Παραγωγή του χάρτη λειτουργίας μέσω του υπολογιστικού πακέτου Ansys

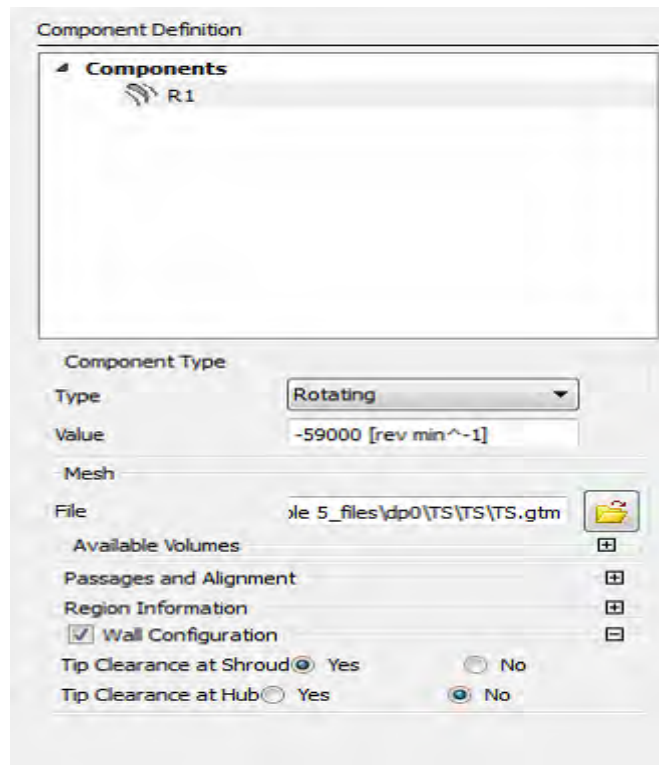
Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, έγινε μια προσπάθεια για να παραχθούν σημεία του χάρτη λειτουργίας του συμπιεστή που μελετήθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια. Δεν επιχειρήθηκε η πλήρης κατασκευή του χάρτη, διότι αυτό θα απαιτούσε πληθώρα υπολογιστικών πόρων. Παρακάτω, θα περιγραφεί η διαδικασία η οποία ακολουθήθηκε για να εξαχθούν τα σημεία στο χάρτη λειτουργίας ενώ θα παρουσιαστεί και ποια σημεία είναι αυτά.

Αρχικώς, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι στο πλαίσιο της παραγωγής του χάρτη λειτουργίας, οι τροποποιήσεις που έγιναν αφορούσαν τις συνοριακές συνθήκες και στην Φυσική του προβλήματος. Είναι ευνόητο ότι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συμπιεστή και το πλέγμα παρέμειναν αμετάβλητα, καθώς σε αντίθετη περίπτωση δεν θα μπορούσε να γίνει λόγος για τον χάρτη ενός συμπιεστή. Συνεπώς, όλες οι τροποποιήσεις έγιναν στο πρόγραμμα CFX-Pre. Πιο συγκεκριμένα, μέσω στιγμιότυπων του Turbo Mode (βλ. Κεφάλαιο 5) του προγράμματος CFX-Pre θα υπάρξει επεξήγηση επί των αλλαγών.

#### 8.3.1 Πρώτο μενού του CFX-Pre Turbo Mode

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 8-5, για την παραγωγή του χάρτη λειτουργίας είναι αναγκαίο να γίνουν προσομοιώσεις για διαφορετικές στροφές του συμπιεστή, καθώς οι στροφές είναι μια παράμετρος η οποία παίζει σημαντικό ρόλο. Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας, οι στροφές του συμπιεστή κυμάνθηκαν από 50000 rpm έως 70000 rpm. Πρέπει να σημειωθεί ότι στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας ο συμπιεστής είχε 59000 rpm.





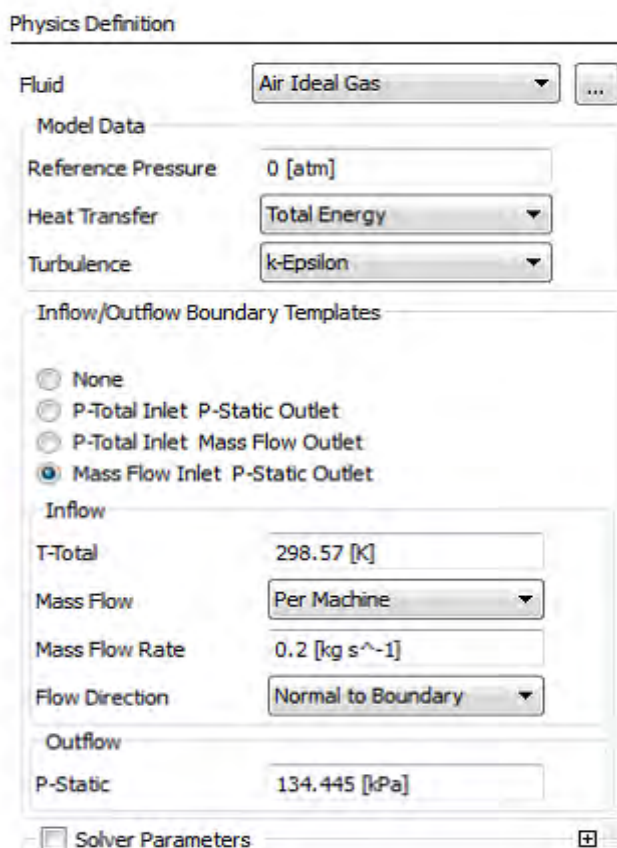
Εικόνα 8-5 Πρώτο μενού του Turbo Mode

### 8.3.2 Δεύτερο μενού του CFX-Pre Turbo Mode

Το επόμενο μενού στο οποίο έγιναν τροποποιήσεις για να παραχθεί ο χάρτης λειτουργίας είναι το Physics Definition. Στο συγκεκριμένο μενού, παραμένουν αμετάβλητες οι ρυθμίσεις για τα μοντέλα της τύρβης και της μετάδοσης θερμότητας. Επίσης, έγινε η θεώρηση ότι παραμένει σταθερή η ολική θερμοκρασία στην εισαγωγή του συμπιεστή. Στην πράξη, εφόσον η ταχύτητα του αέρα στην είσοδο μεταβάλλεται ανάλογα με το σημείο του χάρτη στο οποίο λειτουργεί ο συμπιεστής, θα αλλάξει και η ολική θερμοκρασία. Ωστόσο, οι μεταβολές αυτές είναι πολύ μικρές, με αποτέλεσμα να θεωρούνται αμελητέες.

Εν συνεχεία, οι δύο τελευταίες παράμετροι που πρέπει να οριστούν στο μενού Physics Definition είναι η μαζική παροχή και η στατική πίεση στην έξοδο του συμπιεστή. Στην

επόμενη παράγραφο, θα υπάρξει επεξήγηση για την αλληλεπίδραση μεταξύ του μεγέθους των στροφών, της μαζικής παροχής και της στατικής πίεσης.



Εικόνα 8-6 Δεύτερο μενού του Turbo Mode

### 8.3.3 Εύρεση των σημείων λειτουργίας του χάρτη

#### 8.3.3.1 Νόμοι Ομοιότητας

##### 8.3.3.1.1 Εύρεση παραμέτρων

Για την εύρεση τριών από τα σημεία λειτουργίας χρησιμοποιήθηκαν οι νόμοι ομοιότητας των στροβιλομηχανών. Οι νόμοι ομοιότητας των στροβιλομηχανών, μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε για γεωμετρικά όμοιες συσκευές, είτε για να μελετηθεί η επίδραση της αλλαγής των στροφών σε μία συσκευή. Στην παρούσα εργασία, οι νόμοι ομοιότητας χρησιμοποιήθηκαν για μελετηθεί η επίδραση της αλλαγής της περιστροφικής ταχύτητας στον συμπιεστή. Οι νόμοι ομοιότητας για την περίπτωση των φυγοκεντρικών ανεμιστήρων είναι οι εξής [23]:

$$\frac{q_{αρχ}}{q_{τελ}} = \frac{N_{c,αρχ}}{N_{c,τελ}} \quad (8-1)$$

$$\frac{\Delta P_{αρχ}}{\Delta P_{τελ}} = \left(\frac{N_{c,αρχ}}{N_{c,τελ}}\right)^2 \quad (8-2)$$

$$\frac{P_{c,αρχ}}{P_{c,τελ}} = \left(\frac{N_{c,αρχ}}{N_{c,τελ}}\right)^3 \quad (8-3)$$

Γνωρίζοντας τις στροφές στο αρχικό σημείο λειτουργίας αλλά και στο καινούριο σημείο το οποίο διερευνάται, από την εξίσωση (8-1) μπορεί να υπολογιστεί η ογκομετρική παροχή του αέρα στην είσοδο, δηλαδή το μέγεθος  $q_{τελ}$ . Επειδή η πυκνότητα του αέρα στην είσοδο του συμπιεστή μεταβάλλεται ελάχιστα όσο μεταβάλλονται οι στροφές του ρότορα, θεωρήθηκε σταθερή. Αυτό έχει ως άμεση συνέπεια την δυνατότητα υπολογισμού της μαζικής παροχής του αέρα, ούτως ώστε να οριστεί στις συνοριακές συνθήκες στο δεύτερο μενού του Turbo Mode. Από την εξίσωση (8-2) μπορεί να υπολογιστεί η διαφορά πίεσης ανάμεσα στην είσοδο και την έξοδο του συμπιεστή, για το σημείο στην καινούρια καμπύλη λειτουργίας, δηλαδή το μέγεθος  $\Delta P_{τελ}$ . Από το μέγεθος  $\Delta P_{τελ}$ , μπορεί άμεσα να υπολογιστεί η στατική πίεση στην έξοδο του ρότορα, ούτως ώστε να οριστεί στο δεύτερο μενού του Turbo Mode ως P-Static.

Ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία, βρέθηκαν σημεία για 3 καμπύλες λειτουργίας δηλαδή για 3 τιμές στροφών του συμπιεστή:

- 1) 55000 rpm
- 2) 65000 rpm
- 3) 70000 rpm

Για το πρώτο σημείο λειτουργίας, στα 55000 rpm από τους νόμους ομοιότητας, η μαζική παροχή του αέρα ισούται με 0.1864 kg/s, ενώ η στατική πίεση στην έξοδο ισούται με 128.27 kPa.

Για το δεύτερο σημείο λειτουργίας, στα 65000 rpm από τους νόμους ομοιότητας, η μαζική παροχή του αέρα ισούται με 0.2203 kg/s, ενώ η στατική πίεση στην έξοδο ισούται με 144.65 kPa.

Για το τρίτο σημείο λειτουργίας, στα 70000 rpm από τους νόμους ομοιότητας, η μαζική παροχή του αέρα ισούται με 0.2373 kg/s, ενώ η στατική πίεση στην έξοδο ισούται με 153.83 kPa.

### 8.3.3.1.2 Αποτελέσματα

Στον Πίνακα 8-1 φαίνονται συνοπτικά τα αποτελέσματα τα οποία πάρθηκαν από τις 3 προσομοιώσεις των παραπάνω σημείων λειτουργίας.

Πίνακας 8-1 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Rpm	ma (kg/s)	P3 (kPa)	PRc (-)	ηis
55000	0.186	128.269	1.782	88.40
65000	0.220	144.654	2.174	87.15
70000	0.237	153.833	2.410	86.44

Οι στήλες οι οποίες είναι σκιασμένες με γκρι χρώμα, είναι τα σημαντικότερα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, ενώ οι άσπρες στήλες είναι τα δεδομένα τα οποία πρέπει να εισαχθούν για να γίνει μια προσομοίωση, και βρέθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο.

Όπως ήταν αναμενόμενο από την μορφολογία ενός χάρτη λειτουργίας, παρατηρείται μία αύξηση του λόγου πίεσης όσο αυξάνονται οι στροφές του συμπιεστή.

### 8.3.3.2 Εύρεση σημείων σε ίδιες καμπύλες λειτουργίας

Μέσω των νόμων ομοιότητας βρέθηκαν σημεία στον χάρτη λειτουργίας τα οποία βρισκόταν σε διαφορετικές καμπύλες λειτουργίας, δηλαδή σε διαφορετικές στροφές του συμπιεστή. Παράλληλα, όμως, επιχειρήθηκε η εύρεση σημείων λειτουργίας τα οποία είναι γειτονικά στα 3 σημεία τα οποία βρέθηκαν μέσω των νόμων ομοιότητας. Το χαρακτηριστικό αυτών των γειτονικών σημείων είναι ότι βρισκόταν στην ίδια καμπύλη λειτουργίας με το εκάστοτε γειτονικό τους σημείο.

Η διαδικασία εύρεσης αυτών των σημείων δεν ήταν δυνατόν να πραγματοποιηθεί μέσω επίλυσης τύπων, όπως έγινε με τα σημεία τα οποία βρέθηκαν μέσω των νόμων ομοιότητας. Ωστόσο, βρέθηκαν προσεγγιστικά με την βοήθεια του χάρτη λειτουργίας ο οποίος εξήχθη από το πρόγραμμα προκαταρκτικού σχεδιασμού Vista CCD.

#### 8.3.3.2.1 Γειτονικά σημεία της καμπύλης λειτουργίας 55000 rpm

Το σημείο του χάρτη που βρέθηκε στην καμπύλη λειτουργίας 55000 rpm μέσω των νόμων ομοιότητας, έχει μαζική παροχή αέρα 0.1864 kg/s και λόγο πίεσης 1.7817. Έστω το όνομα αυτού του σημείου, Σημείο Α. Για την εύρεση δύο γειτονικών σημείων στην ίδια καμπύλη λειτουργίας, είναι αναγκαίο να αλλάξει στο δεύτερο μενού του Turbo Mode η μαζική παροχή του αέρα (mass flow rate) και η στατική πίεση στην έξοδο του ρότορα (P-static). Πιο συγκεκριμένα, για το πρώτο γειτονικό σημείο η μαζική παροχή μειώθηκε κατά 5% σε σχέση με αυτήν του Σημείου Α, ενώ η στατική πίεση αυξήθηκε κατά 5% σε σχέση με την αντίστοιχη του σημείου Α. Σε αυτό το σημείο είναι σκόπιμο να αναφερθεί ότι το αρχικό σχέδιο ήταν η μαζική παροχή να μειωθεί κατά 10% και η στατική πίεση να αυξηθεί κατά 10%. Ωστόσο, δεν υπήρξε σύγκλιση στην προσομοίωση, οπότε δοκιμάστηκε μία αλλαγή της τάξης του 5%, η οποία ήταν επιτυχής. Για το δεύτερο γειτονικό σημείο, η μαζική παροχή αυξήθηκε κατά 10% σε σχέση με αυτήν του Σημείου Α, ενώ η στατική πίεση μειώθηκε κατά 10% σε σχέση με την αντίστοιχη του Σημείου Α.

#### 8.3.3.2.2 Γειτονικά σημεία της καμπύλης λειτουργίας 59000 rpm

Το σημείο σχεδιασμού του χάρτη που βρίσκεται στην καμπύλη λειτουργίας 59000 rpm, έχει μαζική παροχή αέρα 0.20 kg/s και λόγο πίεσης 1.9255. Έστω το όνομα αυτού του σημείου, Σημείο Β. Για την εύρεση γειτονικών σημείων του Σημείου Β, ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία με αυτήν του Σημείου Α. Πιο συγκεκριμένα, για το πρώτο γειτονικό σημείο η μαζική παροχή μειώθηκε κατά 10% σε σχέση με αυτήν του Σημείου Β, ενώ η στατική πίεση αυξήθηκε κατά 10% σε σχέση με την αντίστοιχη του Σημείου Β. Για το δεύτερο γειτονικό σημείο, η μαζική παροχή αυξήθηκε κατά 10% σε σχέση με αυτήν του Σημείου Β, ενώ η στατική πίεση μειώθηκε κατά 10% σε σχέση με την αντίστοιχη του Σημείου Β.

#### 8.3.3.2.3 Γειτονικά σημεία της καμπύλης λειτουργίας 65000 rpm

Το σημείο του χάρτη που βρέθηκε στην καμπύλη λειτουργίας 65000 rpm μέσω των νόμων ομοιότητας, έχει μαζική παροχή αέρα 0.2203 kg/s και λόγο πίεσης 2.1737. Έστω το όνομα αυτού του σημείου, Σημείο Γ. Για την εύρεση γειτονικών σημείων του Σημείου Γ, ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία με αυτήν του Σημείου Α. Για το πρώτο γειτονικό σημείο η μαζική παροχή μειώθηκε κατά 5% σε σχέση με αυτήν του Σημείου Γ, ενώ η στατική πίεση αυξήθηκε κατά 5% σε σχέση με την αντίστοιχη του σημείου Γ. Παρομοίως με το σημείο Α, το αρχικό σχέδιο ήταν η μαζική παροχή να μειωθεί κατά 10% και η στατική πίεση να αυξηθεί κατά 10%. Ωστόσο, δεν υπήρξε σύγκλιση στην προσομοίωση, οπότε δοκιμάστηκε μία αλλαγή της τάξης του 5%. Για το δεύτερο γειτονικό σημείο, η μαζική παροχή αυξήθηκε κατά 10% σε σχέση με αυτήν του Σημείου Γ, ενώ η στατική πίεση μειώθηκε κατά 10% σε σχέση με την αντίστοιχη του Σημείου Γ.

#### 8.3.3.2.4 Γειτονικά σημεία της καμπύλης λειτουργίας 70000 rpm

Παρομοίως, για το σημείο του χάρτη που βρέθηκε στην καμπύλη λειτουργίας 70000 rpm, η μαζική παροχή αέρα ισούται με 0.2373 kg/s ενώ ο λόγος ολικών πιέσεων ισούται με 2.41. Έστω το όνομα αυτού του σημείου, Σημείο Δ. Και για το Σημείο Δ ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία με τα προηγούμενα σημεία. Για το πρώτο γειτονικό σημείο η μαζική παροχή μειώθηκε κατά 10% σε σχέση με αυτήν του Σημείου Δ, ενώ η στατική πίεση αυξήθηκε κατά 10% σε σχέση με την αντίστοιχη του Σημείου Δ. Για το δεύτερο γειτονικό σημείο, η μαζική παροχή αυξήθηκε κατά 10% σε σχέση με αυτήν του Σημείου Δ, ενώ η στατική πίεση μειώθηκε κατά 10% σε σχέση με την αντίστοιχη του Σημείου Δ.

#### 8.3.3.2.5 Αποτελέσματα για τα γειτονικά σημεία των Σημείων Α,Β,Γ,Δ

Στους παρακάτω πίνακες εμφανίζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα τα οποία πάρθηκαν από τις προσομοιώσεις για τα γειτονικά σημεία των Σημείων Α,Β,Γ,Δ.

Πίνακας 8-2 Γειτονικά Σημεία του Σημείου Α

	m (kg/s)	P3 (kPa)	PRc (-)	ηis (%)
Σημείο Α	0.186	128.270	1.782	88.40

Γειτονικό σημείο 1	0.177	134.683	1.792	87.46
Γειτονικό σημείο 2	0.205	115.442	1.763	90.02

Πίνακας 8-3 Γειτονικά Σημεία του Σημείου Β

	m (kg/s)	P3 (kPa)	PRc (-)	ηis (%)
Σημείο Β	0.200	134.472	1.926	87.94
Γειτονικό σημείο 1	0.180	147.919	1.941	85.77
Γειτονικό σημείο 2	0.220	121.025	1.900	89.45

Πίνακας 8-4 Γειτονικά σημεία του Σημείου Γ

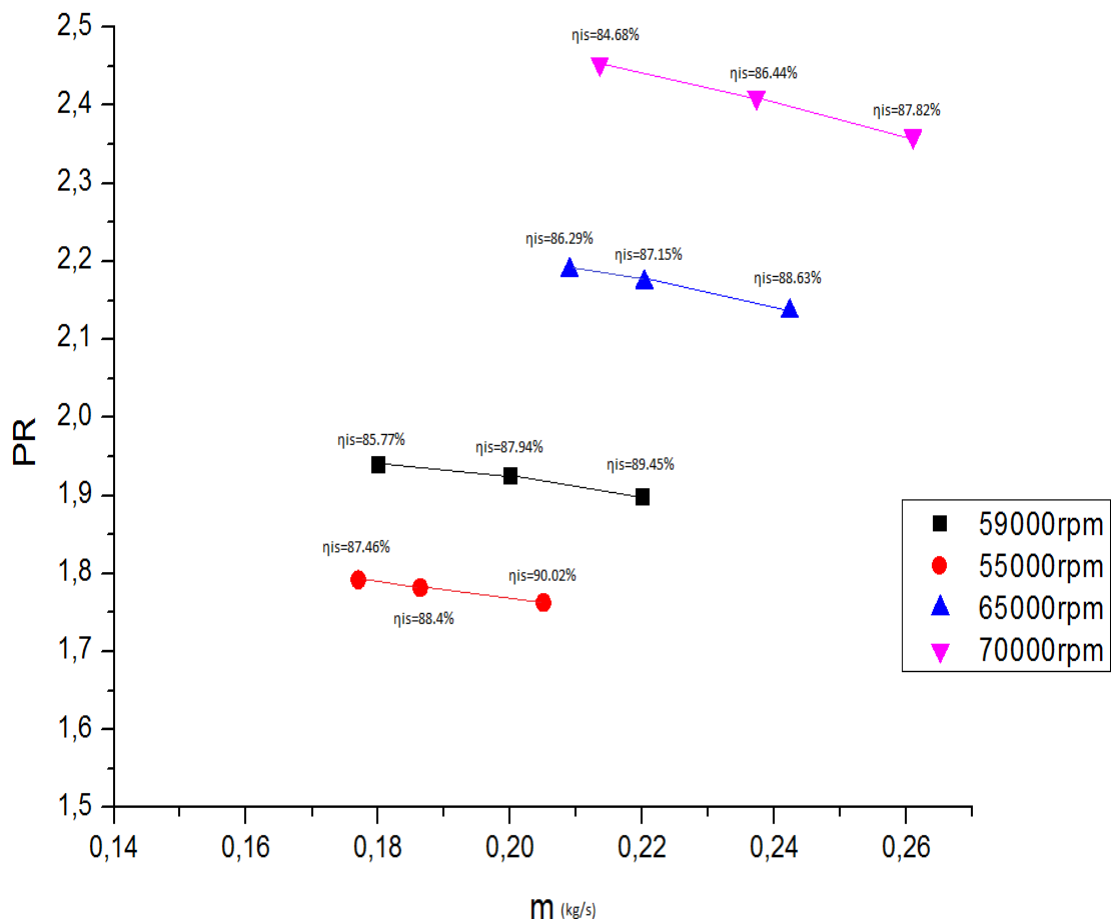
	m (kg/s)	P3 (kPa)	PRc (-)	ηis (%)
Σημείο Γ	0.220	144.654	2.174	87.15
Γειτονικό σημείο 1	0.209	151.887	2.189	86.29
Γειτονικό σημείο 2	0.242	130.187	2.136	88.63

Πίνακας 8-5 Γειτονικά σημεία του Σημείου Δ

	m (kg/s)	P3 (kPa)	PRc (-)	ηis (%)
Σημείο Δ	0.237	153.833	2.410	86.44
Γειτονικό σημείο 1	0.214	169.217	2.453	84.68
Γειτονικό σημείο 2	0.261	138.450	2.360	87.82

### 8.3.4 Χάρτης λειτουργίας

Έχοντας τα απαραίτητα δεδομένα για τα παραπάνω 12 σημεία (συμπεριλαμβανομένου και του σημείου σχεδιασμού), είναι δυνατή η παραγωγή του χάρτη λειτουργίας του συμπιεστή. Ο χάρτης λειτουργίας φαίνεται στην Εικόνα 8-7.



Εικόνα 8-7 Χάρτης λειτουργίας του συμπιεστή

Στον παραπάνω χάρτη, είναι εμφανείς οι 4 καμπύλες λειτουργίας με διαφορετικό χρώμα η κάθε μία. Τα προαναφερθέντα σημεία Α,Β,Γ,Δ είναι τα κεντρικά σημεία της κάθε καμπύλης λειτουργίας. Για μία δεδομένη καμπύλη λειτουργίας, παρατηρείται μία πτωτική τάση του λόγου πίεσης όσο αυξάνεται η μαζική παροχή του αέρα. Επίσης, όπως εύκολα μπορεί κάποιος να διακρίνει, όσο περισσότερο ανεβαίνουν οι στροφές του συμπιεστή, τόσο ανεβαίνει και ο λόγος πίεσης του συμπιεστή.

Σε αυτό το σημείο, θα ήταν χρήσιμο να αναφερθεί ότι δεν ήταν δυνατός ο υπολογισμός των ισοϋψών καμπυλών βαθμού απόδοσης, διότι τα σημεία του χάρτη λειτουργίας τα οποία βρέθηκαν, δεν επαρκούσαν για να σχηματιστούν τα λεγόμενα «νησιά» (Efficiency Islands). Για τον σχηματισμό αυτών των καμπυλών, θα απαιτούνταν ένας σημαντικά μεγαλύτερος αριθμός σημείων λειτουργίας. Το σημείο με τον μικρότερο βαθμό απόδοσης ήταν στην καμπύλη των 70000 rpm, με απόδοση 84.68%. Το σημείο αυτό, επειδή βρίσκεται προς τα αριστερά του χάρτη, ίσως να προσεγγίζει την γραμμή πάλμωσης (surge line), λόγω του μειωμένου βαθμού απόδοσης. Αντιθέτως, τον μεγαλύτερο ισεντροπικό βαθμό απόδοσης τον έχει ένα σημείο στην καμπύλη των 55000 rpm. Η απόδοση στο παραπάνω σημείο αγγίζει το 90%. Από τα παραπάνω, βγαίνει το συμπέρασμα ότι το αρχικό σημείο σχεδιασμού, στις

59000 rpm, δεν είναι το σημείο με τον μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης, οπότε αποκλείεται να είναι το κέντρο των ομόκεντρων ισοϋψών καμπυλών.

Συνοψίζοντας, πρέπει να τονιστεί ότι κάποια σημεία του παραπάνω χάρτη βρέθηκαν με προσεγγιστικές μεθόδους, οπότε μπορεί να υπάρχει απόκλιση από τον πραγματικό χάρτη λειτουργίας του συμπιεστή. Ωστόσο, στο πλαίσιο μιας μελλοντικής διπλωματικής εργασίας, μπορεί να βελτιωθεί, κυρίως στο κομμάτι του αριθμού των σημείων που βρέθηκαν.



## 9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα σημαντικότερα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, στην ενότητα 9.1 παρουσιάζεται σε μορφή πίνακα (Πίνακας 9-1) μία σύντομη επισκόπηση της εργασίας όσον αφορά το χρόνο ενασχόλησης με το κάθε στάδιο.

Στη συνέχεια (ενότητα 9.2) περιγράφονται οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τον σχεδιασμό ενός φυγοκεντρικού συμπιεστή, όπως αυτοί προέκυψαν κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

Στην ενότητα 9.3 αναφέρονται ορισμένοι από τους τρόπους με τους οποίους θα μπορούσε να βελτιωθεί ο σχεδιασμός του συμπιεστή, οι οποίοι θα μπορούσαν να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής έρευνας.

### 9.1 Επισκόπηση της εργασίας

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 9-1, το μεγαλύτερο μέρος της εργασίας αποτέλεσε ο προκαταρκτικός σχεδιασμός (preliminary design), λόγω του ότι χρησιμοποιήθηκαν δύο λογισμικά για την εκπόνηση του (Microsoft Excel, Ansys Vista CCD). Επίσης αφιερώθηκε σημαντικός χρόνος για τη συμφωνία των αποτελεσμάτων των δύο προγραμμάτων. Βέβαια, κάτι τέτοιο δε σημαίνει πως είναι και το σημαντικότερο μέρος του σχεδιασμού.

Τον παραπάνω ρόλο έρχεται να αναλάβει η πλεγματοποίηση (mesh generation) και η προεπεξεργασία του προβλήματος (φυσική και συνοριακές συνθήκες) (pre-processing). Έτσι αφιερώθηκε εξίσου σημαντικός χρόνος και για τα δύο αυτά στάδια του σχεδιασμού.

Η μοντελοποίηση του επιλύτη (solver modeling) αποτέλεσε μικρότερο μέρος της εργασίας, καθώς χρειάστηκαν μερικές δοκιμές ώστε να αποφευχθούν σοβαρά σφάλματα κατά την επίλυση του προβλήματος. Αντίστοιχο χρόνο χρειάστηκε η εξαγωγή και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων (post-processing).

Πίνακας 9-1 Επισκόπηση εργασίας

Στάδιο	Ποσοστό χρόνου που αφιερώθηκε
Preliminary design	25 %
Solid modeling	5 %
Mesh Generation	20 %
Pre-Processing	20 %
Solver modeling	15 %
Post-Processing	15 %

Τέλος, η επεξεργασία και επίβλεψη της τριδιάστατης γεωμετρίας (solid modeling) αποτέλεσε το μικρότερο μέρος της εργασίας. Έτσι αν γίνονταν βελτιώσεις στον υπάρχων σχεδιασμό, θα αφορούσαν το κομμάτι της γεωμετρίας και πιο συγκεκριμένα τις αλλαγές της γεωμετρίας των πτερυγίων, ώστε να αντιπροσωπεύουν πιο πιστά την πραγματική γεωμετρία του συμπιεστή.

## 9.2 Συμπεράσματα

Κατά τον προκαταρκτικό σχεδιασμό (preliminary design) παρουσιάστηκε σημαντική δυσκολία στη συμφωνία των αποτελεσμάτων του Excel με τα αντίστοιχα του Ansys Vista CCD. Για την εξάλειψη αυτού του προβλήματος έγινε δοκιμή διάφορων τιμών σε μεταβλητές, έως ότου να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή συμφωνία. Έτσι η τελική απόκλιση είναι της τάξης του 5%.

Αξιοσημείωτο επίσης ήταν το γεγονός ότι η τριδιάστατη γεωμετρία, όπως αυτή εξήχθη από το Ansys Design Modeler παρουσίαζε σημαντική απόκλιση όσον αφορά τη γεωμετρία των πτερυγίων. Παρόλα αυτά, τα αεροθερμοδυναμικά στοιχεία του συμπιεστή μεταξύ των δύο προσεγγίσεων του προκαταρκτικού σχεδιασμού είχαν αρκετά μικρή ποσοστιαία απόκλιση.

Όπως προαναφέρθηκε στην ενότητα 3.5, ένα μέρος των προβλημάτων που αναφέρθηκαν στις παραγράφους που προηγήθηκαν οφείλονται στη διαφορά ανάμεσα στις μαθηματικές εξισώσεις που επιλύονται από τα δύο προγράμματα. Βέβαια μεγαλύτερη βαρύτητα φέρει η απουσία των ακριβών γεωμετρικών στοιχείων του συμπιεστή, όπως επίσης και του χάρτη λειτουργίας του, μέσα από τον οποίο θα ήταν διαθέσιμο το ονομαστικό σημείο λειτουργίας. Έτσι, τα στοιχεία του συμπιεστή που δεν είναι διαθέσιμα κατά την ανάλυση θα πρέπει να ληφθούν προσεγγιστικά, αλλά με τεράστια προσοχή, καθώς επηρεάζουν καθοριστικά τα αποτελέσματα του σχεδιασμού.

Η διαδικασία εξαγωγής του πλέγματος ίσως αποτελεί το σημαντικότερο βήμα κατά την ανάλυση του συμπιεστή, καθώς ένα πλέγμα χαμηλής ποιότητας μπορεί όχι μόνο να αλλοιώσει τη λύση της προσομοίωσης, αλλά και να προκαλέσει σοβαρά σφάλματα κατά την προσομοίωση (fatal errors, no convergence). Κάτι τέτοιο σαφώς παρατηρήθηκε και στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας, γι' αυτό και αφιερώθηκε σημαντικός χρόνος για τη βελτίωση του πλέγματος.

Οι συνοριακές συνθήκες και η φυσική του προβλήματος, όπως αυτές ορίζονται από τον χρήστη μέσω του Ansys CFX-Pre αποτελούν επίσης ένα κρίσιμο σημείο του σχεδιασμού. Μη κατάλληλα τοποθετημένες συνοριακές συνθήκες προκάλεσαν σφάλματα στη διαδικασία της προσομοίωσης καθιστώντας αδύνατη τη εξαγωγή κάποιας λογικής λύσης. Συνεπώς, κατά το σχεδιασμό απαιτείται η ορθή κατανόηση της φυσικής του προβλήματος, ώστε ο χρήστης να είναι σε θέση να καταστρώσει ένα σωστά τοποθετημένο πρόβλημα (well-posed boundary conditions).

## 9.3 Προτάσεις για βελτίωση του σχεδιασμού του συμπιεστή

Όπως είναι φανερό η ανάλυση του ρότορα έγινε υπό σταθερές συνθήκες (steady state), δηλαδή επιλέχθηκε το ονομαστικό σημείο λειτουργίας του στροβιλοϋπερπληρωτή για την ανάλυση. Βέβαια κάτι τέτοιο δίνει περιορισμένη εποπτεία της πραγματικής λειτουργίας του συμπιεστή. Λύση σε αυτό το πρόβλημα δίνει η ανάλυση του ρότορα υπό μεταβατικές συνθήκες (transient state), δηλαδή υπό μεταβαλλόμενο φορτίο του ρότορα. Μία τέτοια

ανάλυση παρουσιάζει τεράστιο ενδιαφέρον και θα μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής έρευνας.

Επίσης μελλοντική βελτίωση του σχεδιασμού θα μπορούσε να αποτελέσει και η εισαγωγή του διαχύτη του συμπιεστή στην ανάλυση. Η ταυτόχρονη προσομοίωση των δύο αυτών στοιχείων θα έχει ως αποτέλεσμα μία πιο ολοκληρωμένη εικόνα της λειτουργίας του συμπιεστή. Σαφέστατα, ακόμη πιο ενδιαφέροντα αποτελέσματα θα προέκυπταν από μία ανάλυση που περιλάμβανε όλα τα στοιχεία του στροβιλοϋπερπληρωτή.

Τέλος , λόγω του ότι ο υπό εξέταση στροβιλοϋπερπληρωτής είναι διαθέσιμος και πλήρως λειτουργικός, ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα παρουσίαζε μία πειραματική μελέτη του. Έτσι δίνεται η δυνατότητα σύγκρισης των αριθμητικών αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα των πειραματικών δοκιμών, κάτι που βεβαίως θα ήταν εξαιρετικά χρήσιμο.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Adnan, H., Zahed and N. Nazih, Bayomi, *Design Procedure of Centrifugal Compressors ISESCO JOURNAL of Science and Technology* 2014. **10**.
2. ANSYS, I., *ANSYS TurboGrid Tutorials Release 16.2*. 2015.
3. ANSYS, I., *ANSYS TurboGrid User's Guide Release 16.2*. 2015.
4. ANSYS, I., *ANSYS CFX-Pre User's Guide Release 16.2*. 2015.
5. ANSYS, I., *ANSYS CFX-Solver Theory Guide Release 16.2*. 2015.
6. ANSYS, I., *ANSYS CFX-Solver Manager User's Guide Release 16.2*. 2015.
7. ANSYS, I., *ANSYS CFX-Solver Modeling Guide Release 16.2*. 2015.
8. ANSYS, I., *ANSYS CFD-Post User's Guide Release 16.2*. 2015.
9. ANSYS, I., *ANSYS CFX Reference Guide Release 16.2*. 2015.
10. ANSYS, I., *Introduction to ANSYS CFX*. 2015.
11. Aungier, R.H. *Centrifugal compressor stage preliminary aerodynamic design and component sizing*. in *ASME 1995 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition*. 1995. American Society of Mechanical Engineers.
12. Babagouda, P., et al., *Analytical and Experimental Turbocharger Matching to an off-Road Engine*. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2015.
13. Cengel, Y.A. and M.A. Boles, *Thermodynamics: an engineering approach*. Sea, 2002. **1000**: p. 8862.
14. Cengel, Y.A. and A. Ghajar, *Heat and mass transfer (a practical approach, SI version)*. 2011, McGraw-Hill Education.
15. Dick, E., *Fundamentals of turbomachines*. Vol. 109. 2015: Springer.
16. Dixon, S.L. and C. Hall, *Fluid mechanics and thermodynamics of turbomachinery*. 2013: Butterworth-Heinemann.
17. Freeman, J., Lee, *Compressor Performance Map Generation and Testing per SAE J1723*. 2011, California Polytechnic State University.
18. Heywood, J., *Internal combustion engine fundamentals*. 1988: McGraw-Hill Education.
19. Hiereth, H. and P. Prenninger, *Charging the internal combustion engine*. 2007: Springer Science & Business Media.
20. Japikse, D., *Centrifugal compressor design and performance(Book)*. Wilder, VT: Concepts ETI, Inc, 1996.

21. Kurauchi, S.K. and J.R. Barbosa. DESIGN OF A CENTRIFUGAL COMPRESSOR FOR NATURAL GAS. in *The 14th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering*, Rio de Janeiro, RJ, Brazil. 2012.
22. Moussavi, S.A., A.H. Benisi, and M. Durali, Effect of splitter leading edge location on performance of an automotive turbocharger compressor. *Energy*, 2017. **123**: p. 511-520.
23. Munson, B., D. Young, and T. Okiishi, *Fundamentals of fluid mechanics*. *Oceanographic Literature Review*. Vol. 10. 1995. 831.
24. Saravanamuttoo, H.I.H., G.F.C. Rogers, and H. Cohen, *Gas turbine theory*. 2001: Pearson Education.
25. Schiff, J., *A Preliminary Design Tool For Radial Compressors*, in *Department of Energy Sciences*. 2013, Lund University.
26. Stamatelos, A., *Internal Combustion Engines*. 2001.
27. Stamatis, A., *Turbomachines*.
28. Van Basshuysen, R. and F. Schäfer, *Internal combustion engine handbook-basics, components, systems and perspectives*. Vol. 345. 2004.
29. Walsh, P.P. and P. Fletcher, *Gas turbine performance*. 2004: John Wiley & Sons.
30. White, F.M., *Fluid mechanics*, ed. 2003, McGraw-Hill.
31. Zangeneh, M. On 3D inverse design of centrifugal compressor impellers with splitter blades. in *ASME 1998 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition*. 1998. American Society of Mechanical Engineers.

## A. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

### Δεδομένα-Παραδοχές για κινητήρα Steyr WD 610.60

#### Διαστάσεις

Όγκος Εμβολισμού	Vd =	0,006 m <sup>3</sup>
Bore	B =	0,105 m
Stroke	S =	0,115 m

#### Θερμοδυναμικά Στοιχεία

Ισχύς	Pe =	110,000 kW
Αριθμός Στροφών Μέγιστης Ισχύος	Ne =	2800,000 rpm
Κατώτερη Θερμογόνος Δύναμη Καυσίμου	LHV =	43200,000 kJ/kg
Θερμικός Βαθμός Απόδοσης Κινητήρα	n <sub>th</sub> =	0,370
Βαθμός Πλήρωσης Κινητήρα	n <sub>v</sub> =	0,750
Στοιχειομετρικός Λόγος Αέρα/Καυσίμου	(A/F) =	14,500
Περίσσεια Αέρα	λ =	1,400
R	R =	287,000 J/(kg*K)
Θερμοκρασία Αέρα (Εισαγωγή Κινητήρα)	T3 =	353,000 K

#### Αποτελέσματα

Παροχή Καυσίμου	mf =	0,007 kg/s
Παροχή Αέρα Εισόδου Κινητήρα	ma =	0,140 kg/s
Πυκνότητα Αέρα Εισόδου Κινητήρα	ρ <sub>a,i</sub> =	1,336 kg/m <sup>3</sup>
Πίεση Εισόδου Κινητήρα	P3 =	1,353E+05 Pa

#### Δεδομένα από υπόθεση

Δεδομένα από μετρήσεις, είτε ήδη γνωστά

Επαναλήψεις (εύρεση πυκνοτήτων)

Ποσοστιαίες Αποκλίσεις από Vista CCD

Εικόνα A-1 Preliminary Design (Microsoft Excel)

### Δεδομένα Αέρα

Θερμοχωρητικότητα	$C_p =$	1005,000 J/kgK
Ταχύτητα Ήχου (Είσοδος)	$a_{01} =$	346,363 m/s
Ταχύτητα Ήχου (Εξόδος)	$a_{02} =$	380,580 m/s
	$R =$	287,000 J/(kg*K)
	$\gamma =$	1,400

### Στατικά Μεγέθη

Στατική Θερμοκρασία Εισόδου	$T_1 =$	295,000 K
Στατική Θερμοκρασία Εξόδου	$T_3 =$	330,000 K
Στατική Πίεση Εισόδου	$P_1 =$	101325,000 Pa
Στατική Πίεση Εξόδου	$P_3 =$	131223,249 Pa
Στατική Πυκνότητα Αέρα Εισόδου	$\rho_1 =$	1,200 kg/m <sup>3</sup>
Στατική Πυκνότητα Αέρα Εξόδου	$\rho_3 =$	1,386 kg/m <sup>3</sup>

### Ολικά Μεγέθη

Ολική Θερμοκρασία Εισόδου	$T_{01} =$	298,57 K
Ολική Θερμοκρασία Εξόδου	$T_{03} =$	360,480 K
Ολική Πίεση Εισόδου	$P_{01} =$	105687,125 Pa
Ολική Πίεση Εξόδου	$P_{03} =$	178770,526 Pa
Ολική Πυκνότητα Αέρα Εισόδου	$\rho_{01} =$	1,237 kg/m <sup>3</sup>
Ολική Πυκνότητα Αέρα Εξόδου	$\rho_{03} =$	1,728 kg/m <sup>3</sup>

iteration	1,236678
	1,727957

### Δεδομένα Συμπιεστή

Αριθμός πτερυγίων (είσοδος)	$Z_i =$	6
Αριθμός πτερυγίων (έξοδος)	$Z_o =$	12
Πάχος πτερυγίων στην έξοδο	$t_b =$	0,001 m
Διάμετρος	$D =$	0,094 m
Μήκος Ρότορα	$L =$	0,036 m
Μαζική Παροχή Αέρα	$m =$	0,200 kg/s
Είσοδος	$R_{1tip} =$	0,031 m
	$R_{1hub} =$	0,011 m
hub to tip ratio	$R_{1hub}/R_{1tip} =$	0,360
Εξοδος	$H_{2tip} =$	0,008 m
	$H_{2hub} =$	0,001 m
hub to tip ratio	$H_{1hub}/H_{1tip} =$	0,176
Blade height ratio	$b_2/r_2 =$	0,139

### Ζητούμενα (operating point)

Γωνιακή Ταχύτητα	$\omega_c =$	6178,466 rad/s
Στροφές Συμπιεστή	$N_c =$	59000 rpm
Ισχύς	$P_c =$	12443,074 Watt
Ισεντροπικός Βαθμός Απόδοσης	$\eta_{is} =$	0,782
Λόγος Πίεσης Συμπιεστή (ολικές)	$P_{Rc} =$	1,692
Λόγος Θερμοκρασιών (ολικών)	$T_R =$	1,207
Συντελεστής Ροής	$\Phi =$	0,080
Συντελεστής Φόρτισης	$\Psi =$	0,738

Εικόνα A-2 Preliminary Design (Microsoft Excel)

TIP

ΕΙΣΟΔΟΣ (R1tip)

Διατομή	A1 =	0,003 m <sup>2</sup>	
Απόλυτη Ταχύτητα	c1t =	107,18 m/s	
Σχετική Ταχύτητα	w1t =	121,00 m/s	
Περιστροφική Ταχύτητα	u1t =	193,26 m/s	
	cr1t =	60,50 m/s	
	cu1t =	88,47 m/s	
Γωνία Ροής	α1t =	0,97 rad	55,63 °
Γωνία Πτερυγίου	β1t =	1,05 rad	60,00 °
Απόλυτος Mach	Mc1t =	0,31	
Σχετικός Mach	Mrel1t =	0,35	
Περιστροφικός Mach	Mu1t =	0,56	

ΕΞΟΔΟΣ (R2tip)

Διατομή	A2 =	0,002 m <sup>2</sup>	
<b>Ιδανικό Τρίγωνο</b>			
Απόλυτη Ταχύτητα	c2' =	297,12 m/s	
Σχετική Ταχύτητα	w2' =	62,91 m/s	
Περιστροφική Ταχύτητα	u2 =	290,39 m/s	
Γωνία ροής	α2' =	1,36 rad	77,78 °
Γωνία Πτερυγίου	β2' =	0,00 rad	0,00 °

Slip factor

κατά Wiesner	σ =	0,824	
ταχύτητα ολίσθησης	cuslip =	51,00 m/s	

Πραγματικό Τρίγωνο

Απόλυτη Ταχύτητα	c2 =	247,52 m/s	
Σχετική Ταχύτητα	w2 =	80,98 m/s	
Περιστροφική Ταχύτητα	u2 =	290,39 m/s	
	cu2 =	239,39 m/s	
	cr2 =	62,91 m/s	
Γωνία Ροής	α2 =	1,31 rad	75,28
Γωνία Πτερυγίου	β2 =	0,68 rad	39,03
Απόλυτος Mach	Mc2 =	0,65	
Σχετικός Mach	Mrel2 =	0,21	
Περιστροφικός Mach	Mu2 =	0,76	

Εικόνα A-3 Preliminary Design (Microsoft Excel)



MEAN

ΕΙΣΟΔΟΣ (R1mean)

Απόλυτη Ταχύτητα	c1m =	84,76 m/s	
Σχετική Ταχύτητα	w1m =	94,12 m/s	
Περιστροφική Ταχύτητα	u1m =	131,46 m/s	
	cr1m =	60,50 m/s	
	cu1m =	59,36 m/s	
Γωνία Ροής	α1m =	0,78 rad	44,45 °
Γωνία Πτερυγίου	β1m =	0,87 rad	50,00 °
Απόλυτος Mach	Mc1m =	0,24	
Σχετικός Mach	Mrel1m =	0,27	
Περιστροφικός Mach	Mu1h =	0,38	

HUB

ΕΙΣΟΔΟΣ (R1hub)

Απόλυτη Ταχύτητα	c1h =	66,38 m/s	
Σχετική Ταχύτητα	w1h =	73,86 m/s	
Περιστροφική Ταχύτητα	u1h =	69,66 m/s	
	cr1h =	60,50 m/s	
	cu1h =	27,30 m/s	
Γωνία Ροής	α1h =	0,42 rad	24,28 °
Γωνία Πτερυγίου	β1h =	0,61 rad	35,00 °
Απόλυτος Mach	Mc1h =	0,19	
Σχετικός Mach	Mrel1h =	0,19	
Περιστροφικός Mach	Mu1h =	0,20	

Αδιάστατα Μεγέθη

L/D	0,386
w2/w1o	0,669
cu1t/cu1m	1,490

EULER (για mean)

$$P/m = u2cu2 - u1cu1$$

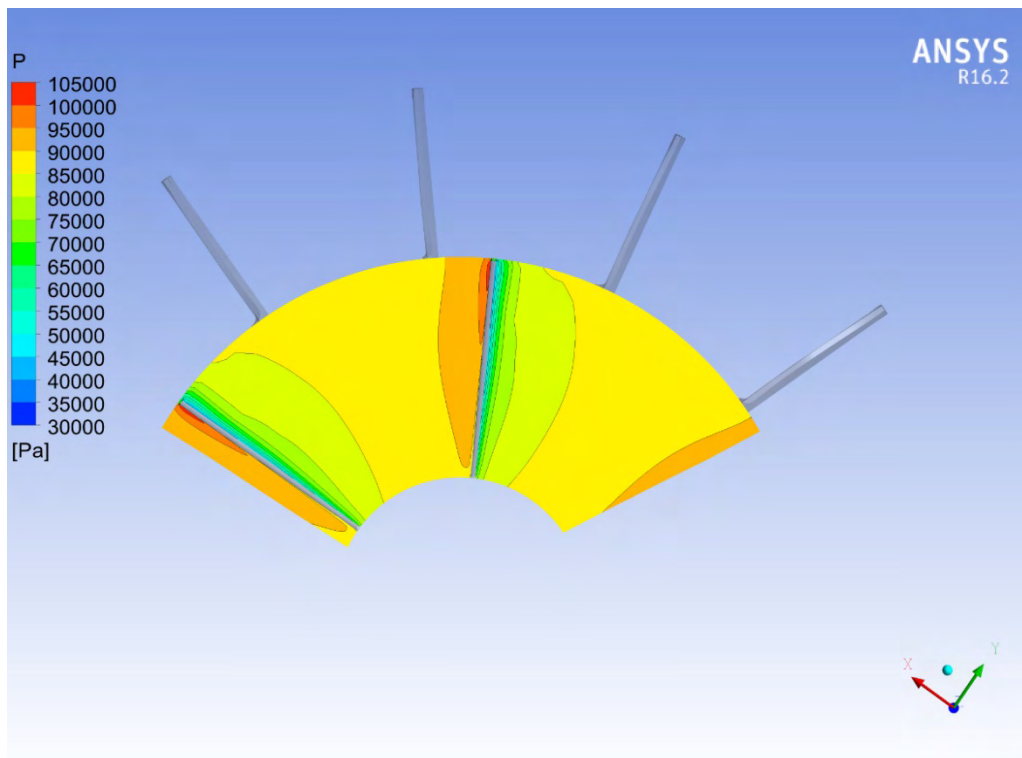
62215,37    61712,48588

Error (%)      0,81 <1%

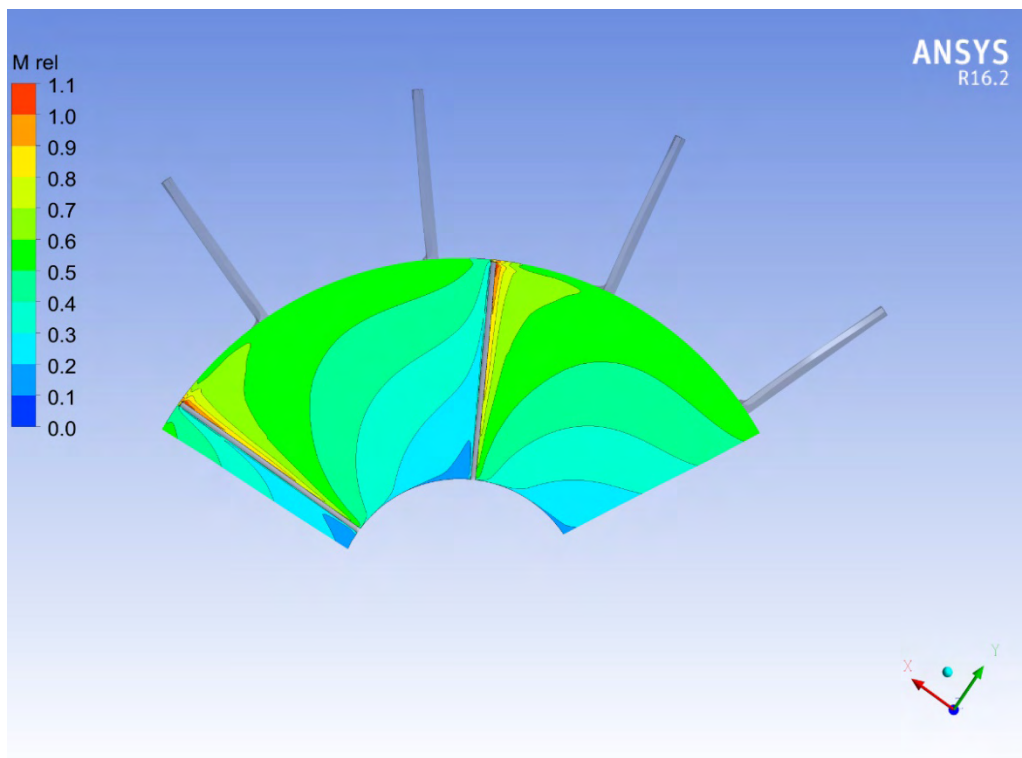
TRUE

Εικόνα A-4 Preliminary Design (Microsoft Excel)

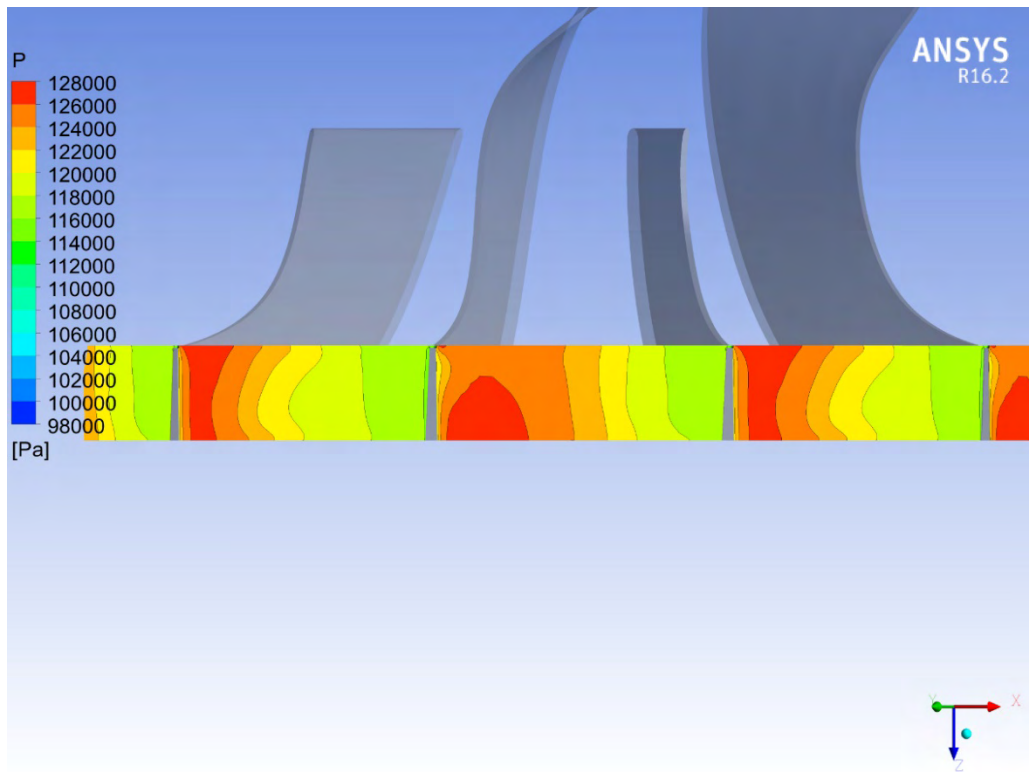
## Β. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β



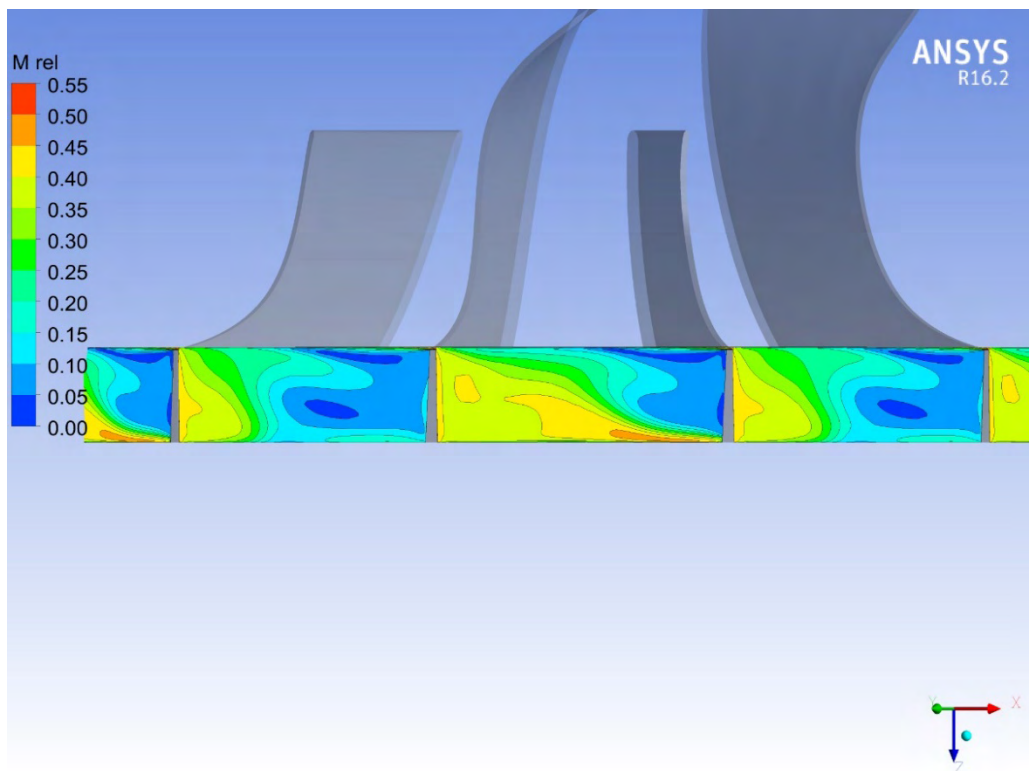
Εικόνα Β-1 Στατική πίεση στην είσοδο των πτερυγίων (κάτοψη ρότορα)



Εικόνα Β-2 Σχετικός αριθμός Mach στην είσοδο των πτερυγίων (κάτοψη ρότορα)



Εικόνα Β-3 Στατική πίεση στην έξοδο των πτερυγίων (πλάγια όψη ρότορα)



Εικόνα Β-4 Σχετικός αριθμός Mach στην έξοδο των πτερυγίων (πλάγια όψη ρότορα)