



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών  
Τομέας Ρευστών  
Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών

**Μοντελοποίηση Αξονικού Συμπιεστή με τη Μέθοδο  
Συσσώρευσης Βαθμίδων σε Περιβάλλον  
Αντικειμενοστραφούς Προγραμματισμού**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΔΩΔΗ ΙΟΛΗ-PENA**

**Επίβλεψη:  
Λέκτορας Ν. Αρετάκης**

**ΑΘΗΝΑ  
ΙΟΥΛΙΟΣ 2013**





# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Τομέας Ρευστών

Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών

## Μοντελοποίηση Αξονικού Συμπιεστή με τη Μέθοδο Συσσώρευσης Βαθμίδων σε Περιβάλλον Αντικειμενοστραφούς Προγραμματισμού

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΩΔΗ ΙΟΔΗ-PENA

Επίβλεψη:

Λέκτορας Ν. Αρετάκης

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύσσεται η μέθοδος συσσώρευσης βαθμίδων στο υπολογιστικό πρόγραμμα PROOSIS, για τη μοντελοποίηση αξονικού πολυβάθμιου συμπιεστή ώστε να προσδιοριστούν οι επιδόσεις και το πεδίο χαρακτηριστικών αυτού. Στη συνέχεια, το μοντέλο του συμπιεστή, ενσωματώνεται σε μοντέλο αεριοστροβίλου, και μελετώνται τα πλεονεκτήματα της εμβάθυνσης (Zooming) στη μοντελοποίηση της συνιστώσας.

Ειδικότερα, συγκρίνονται οι επιδόσεις του μοντέλου του αεριοστροβίλου που φέρει το συμπιεστή με τη μέθοδο συσσώρευσης βαθμίδων, με αυτές αντίστοιχου μοντέλου μηχανής που χρησιμοποιεί χάρτη στο συμπιεστή. Αρχικά επιλέγεται γενικός χάρτης προσαρμοσμένος στο σημείο σχεδίασης, και στη συνέχεια ο χάρτης, όπως αυτός προέκυψε από τη μέθοδο συσσώρευσης βαθμίδων. Ο τελευταίος χάρτης μορφοποιείται κατάλληλα ώστε να φέρει βοηθητικές συντεταγμένες γραμμές  $-\beta$  και να είναι συμβατός με το πρόγραμμα PROOSIS.

Τέλος, η μέθοδος συσσώρευσης βαθμίδων εφαρμόζεται για τη μοντελοποίηση απομάστευσης ποσοστού παροχής μάζας εργαζόμενου μέσου, από ενδιάμεση βαθμίδα του συμπιεστή, και μελετάται η επίδραση αυτής στο πεδίο χαρακτηριστικών του τελευταίου. Επιπροσθέτως, η μέθοδος εφαρμόζεται για τη μοντελοποίηση βλάβης σε επίπεδο βαθμίδας. Συγκρίνονται τρεις διαφορετικοί τύποι βλάβης, σχετικά με την επίδρασή τους στο πεδίο χαρακτηριστικών του συμπιεστή.

Συμπεραίνεται ότι η μοντελοποίηση του συμπιεστή με τη μέθοδο συσσώρευσης βαθμίδων οδηγεί σε πιστότερη προσομοίωση της λειτουργίας αυτού και του αεριοστροβίλου, σε σχέση με το μοντέλο της μηχανής που χρησιμοποιεί γενικό χάρτη. Η μέθοδος παρέχει τη δυνατότητα μελέτης διάφορων καταστάσεων σε επίπεδο βαθμίδας, όπως αυτό της απομάστευσης και υπό την επίδραση βλάβης.



**NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS**

School of Mechanical Engineering

Fluids Section

Laboratory of Thermal Turbomachines

**Axial Compressor modeling with the Stage Stacking Method in an  
object-oriented environment**

**DIPLOMA THESIS**

**DODI IOLI-RENA**

**Advisor:**

**Lecturer N. Aretakis**

**ABSTRACT**

In this Diploma Thesis, the stage-stacking method is developed, in the gas turbine performance simulation program PROOSIS, in order to model an axial multistage compressor, determine its performance and generate its map. The compressor model is then incorporated in a gas turbine model and the advantages of the zooming technique are studied.

In particular, the performance of such an engine model is compared with a corresponding one that uses a compressor component with a conventional map. At first, a generic, scaled at the design point, map is selected. Then, the map that was created using the stage-stacking method is used. The latter map is properly formatted in order to be compatible with PROOSIS which uses auxiliary coordinates.

Finally, the stage-stacking method is applied for modeling a varying bleed flow at an intermediate compressor stage. The effect of the varying bleed flow in the compressor map is studied. The method is also applied for modeling faults in the compressor stage. Three different types of faults are compared in correspondence with their effect on the compressor map.

In conclusion, the stage-stacking compressor model leads to a more accurate performance simulation, than the model that uses a generic map. The stage-stacking method provides the ability to study various compressor stage conditions, such as a bleed flows and faults at component and engine level.



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Από τη θέση αυτή, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Αρετάκη Νίκο, χωρίς την καθοδήγηση και πολύτιμη βοήθειά του οποίου, η εκπόνηση της παρούσης διπλωματικής εργασίας θα ήταν αδύνατη. Επιπροσθέτως, θέλω να ευχαριστήσω τον κ. Αλεξίου Αλέξη, για τις χρήσιμες υποδείξεις του καθ' όλη τη διάρκεια της μελέτης. Τέλος, ευχαριστώ τον υποψήφιο διδάκτορα, Καλαθάκη Χρήστο, για τις συμβουλές του.

Σας ευχαριστώ από καρδιάς.





Στους γονείς μου,  
που με έφεραν ως εδώ,  
και στην Ιοκάστη.



## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

<b>1</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>1.1</b>
<b>1.1</b>	<b>Μέθοδοι εκτίμησης χαρτών συμπιεστή.....</b>	<b>1.2</b>
1.1.1	Μέθοδος Ομοιότητας .....	1.2
1.1.2	Μέθοδος ‘‘σπονδυλικής στήλης’’ (Backbone Method) .....	1.3
1.1.3	Μέθοδος υπολογισμού της ροής στο Μεσημβρινό Επίπεδο (Blade Element Method) .....	1.4
1.1.4	Μέθοδος Συσσώρευσης Βαθμίδων (Stage Stacking Method).....	1.5
<b>1.2</b>	<b>Μοντελοποίηση και Προσομοίωση Αεριοστροβίλων .....</b>	<b>1.7</b>
1.2.1	GasTurb .....	1.7
1.2.2	GSP .....	1.7
1.2.3	NPSS.....	1.8
1.2.4	TEACHES .....	1.8
1.2.5	PROOSIS.....	1.9
<b>1.3</b>	<b>Δομή παρούσης Διπλωματικής Εργασίας.....</b>	<b>1.10</b>
<b>2</b>	<b>Υπολογιστικό πρόγραμμα PROOSIS .....</b>	<b>2.1</b>
<b>2.1</b>	<b>Μοντελοποίηση και Προσομοίωση Συνιστώσας στο PROOSIS.....</b>	<b>2.1</b>
2.1.1	Μοντελοποίηση Συνιστώσας - Δημιουργία Component .....	2.2
2.1.2	Καθορισμός Μαθηματικού Μοντέλου – Δημιουργία Partition.....	2.3
2.1.3	Προσομοίωση Συνιστώσας – Δημιουργία Experiment .....	2.4
<b>2.2</b>	<b>Βασικές Έννοιες και Λειτουργίες στο PROOSIS.....</b>	<b>2.5</b>
2.2.1	Η Γλώσσα προγραμματισμού EL.....	2.5
2.2.2	Θύρες (Ports) .....	2.6
	Functions .....	2.7
2.2.3	Πολύωνυμα και Inverse Statements .....	2.8
2.2.4	Οι Βιβλιοθήκες (Libraries) στο PROOSIS .....	2.8
<b>3</b>	<b>Μοντελοποίηση Βαθμίδας Αξονικού Συμπιεστή .....</b>	<b>3.1</b>
<b>3.1</b>	<b>Μοντελοποίηση με τη Μέθοδο Συσσώρευσης Βαθμίδων στο PROOSIS... </b>	<b>3.1</b>
3.1.1	Μοντελοποίηση Βαθμίδας - Δημιουργία Component .....	3.1
3.1.2	Επιλογή Οριακών Συνθηκών - Δημιουργία Partition .....	3.14
3.1.3	Προσομοίωση Συνιστώσας - Δημιουργία Experiment .....	3.16
3.1.4	Δημιουργία Συμβόλου.....	3.20

<b>4</b>	<b>Μοντελοποίηση Συμπιεστή στο PROOSIS.....</b>	<b>4.1</b>
<b>4.1</b>	<b>Συμπιεστής αεριοστροβίλου Tornado .....</b>	<b>4.1</b>
<b>4.2</b>	<b>Λιαδικασία Μοντελοποίησης.....</b>	<b>4.2</b>
4.2.1	Μοντελοποίηση Συμπιεστή – Δημιουργία Schematic .....	4.2
4.2.2	Καθορισμός Μαθηματικού Μοντέλου – Δημιουργία Partition.....	4.8
4.2.3	Προσομοίωση Συμπιεστή – Δημιουργία Experiment.....	4.9
<b>4.3</b>	<b>Δημιουργία συμβόλου συμπιεστή.....</b>	<b>4.12</b>
<b>4.4</b>	<b>Μορφοποίηση πεδίου χαρακτηριστικών συμπιεστή .....</b>	<b>4.13</b>
<b>4.5</b>	<b>Επίδραση Απομάστευσης στη λειτουργία του συμπιεστή .....</b>	<b>4.19</b>
<b>5</b>	<b>Μοντελοποίηση Αεριοστρόβιλου.....</b>	<b>5.1</b>
<b>5.1</b>	<b>Βιομηχανικός Αεριοστρόβιλος Tornado .....</b>	<b>5.1</b>
<b>5.2</b>	<b>Μοντελοποίηση Αεριοστρόβιλου .....</b>	<b>5.2</b>
5.2.1	Χρήση συμπιεστή με χάρτη.....	5.3
5.2.1.1	Χρήση γενικού χάρτη.....	5.9
5.2.1.2	Χρήση χάρτη από τη μέθοδο συσσώρευσης βαθμίδων.....	5.27
5.2.2	Ενσωμάτωση μοντέλου συμπιεστή με τη μέθοδο συσσώρευσης βαθμίδων.....	5.43
<b>6</b>	<b>Μοντελοποίηση Βλαβών Συμπιεστή .....</b>	<b>6.1</b>
<b>6.1</b>	<b>Γενικά.....</b>	<b>6.1</b>
6.1.1	Συσσώρευση επικαθήσεων (Fouling) .....	6.3
6.1.2	Αύξηση ακτινικού διακένου (Tip Clearance Increase).....	6.6
6.1.3	Μηχανική Διάβρωση Πτερυγίων (Blade Erosion).....	6.8
<b>7</b>	<b>Επίλογος.....</b>	<b>7.1</b>
<b>7.1</b>	<b>Ανακεφαλαίωση.....</b>	<b>7.1</b>
<b>7.2</b>	<b>Συμπεράσματα .....</b>	<b>7.2</b>
<b>7.3</b>	<b>Προτάσεις .....</b>	<b>7.2</b>
<b>8</b>	<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>8.1</b>

# 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σήμερα οι αεριοστροβίλοι είναι κυρίαρχες μηχανές, τόσο στην αεροπορική και ναυτική βιομηχανία με την εφαρμογή τους ως κινητήριες προωστικές μηχανές σε αεροσκάφη και πλοία, όσο και στην παραγωγή ενέργειας με τη χρήση τους σε απλούς και συνδυασμένους κύκλους. Η ανάλυση της λειτουργίας υπό διάφορες συνθήκες και η μελέτη των επιδόσεων ενός αεριοστροβίλου, κρίνονται απαραίτητες για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς αυτού και των επιμέρους συνιστωσών του.

Για το σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί διάφορα υπολογιστικά προγράμματα προσομοίωσης, μερικά εκ των οποίων δίνουν επιπλέον τη δυνατότητα μοντελοποίησης των επιμέρους συνιστωσών του αεριοστροβίλου. Ένα από αυτά, είναι το πρόγραμμα PROOSIS<sup>[1]</sup>, το οποίο χρησιμοποιείται από το Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών (ΕΘΣ/ΕΜΠ).

Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων εξαρτάται από το βάθος της μοντελοποίησης των επιμέρους συνιστωσών, και κυρίως του συμπιεστή και του στροβίλου. Η συνήθης μοντελοποίηση που εφαρμόζεται σήμερα, βασίζεται στη χρήση χαρτών επιδόσεων.

Ειδικότερα για το συμπιεστή, έχουν αναπτυχθεί διάφορες υπολογιστικές μέθοδοι εκτίμησης του πεδίου χαρακτηριστικών του, για χρήση σε προγράμματα προσομοίωσης. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος είναι η μέθοδος της ομοιότητας, όπου γίνεται χρήση ενός χάρτη όμοιου συμπιεστή με αυτόν που μελετάται, ο οποίος χάρτης είναι διαθέσιμος στην ανοικτή βιβλιογραφία. Στην περίπτωση αυτή μπορεί να προκύψουν αισθητές αποκλίσεις στα υπολογιζόμενα μεγέθη, κατά τη προσομοίωση της λειτουργίας, κυρίως σε σημεία εκτός σχεδίασης.

Για την πιστότερη προσομοίωση της λειτουργίας του συμπιεστή, έχουν αναπτυχθεί ακριβέστερες υπολογιστικές μέθοδοι όπως η μελέτη της ροής στο μεσημβρινό επίπεδο και η μέθοδος συσσώρευσης βαθμίδων. Η πρώτη από τις δύο μεθόδους, απαιτεί ως δεδομένα, γεωμετρικά μεγέθη του συμπιεστή που δύσκολα έχει στη διάθεση του ο ερευνητής. Αντίθετα η δεύτερη απαιτεί περιορισμένο αριθμό γεωμετρικών δεδομένων και γι' αυτό κρίνεται καταλληλότερη για τον προσδιορισμό του πεδίου χαρακτηριστικών.

Σκοπός της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη της μεθόδου συσσώρευσης βαθμίδων στο υπολογιστικό πρόγραμμα PROOSIS, για τη μοντελοποίηση αξονικού πολυβάθμιου συμπιεστή, και στη συνέχεια η ενσωμάτωση αυτού σε μοντέλο αεριοστροβίλου, ώστε να παρουσιαστούν τα πλεονεκτήματα της εμβάθυνσης (Zooming)<sup>[3]</sup> στη μοντελοποίηση της συνιστώσας.

Παρακάτω για λόγους πληρότητας παρουσιάζονται οι μέθοδοι εκτίμησης χαρτών συμπιεστή καθώς και τα προγράμματα προσομοίωσης αεριοστροβίλων. Τέλος παρουσιάζεται η δομή της παρούσης διπλωματικής εργασίας.

## 1.1 Μέθοδοι εκτίμησης χαρτών συμπίεσής

Για την εκτίμηση των χαρτών του συμπίεσής, χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι, είτε πειραματικές είτε υπολογιστικές, αναλόγως τις δυνατότητες που διαθέτει ο κάθε ερευνητής.

Σε πειραματικό επίπεδο ο συμπίεστής, τοποθετείται σε κατάλληλα διαμορφωμένο δοκιμαστήριο με δυνατότητα ρύθμισης της ταχύτητας περιστροφής του και της αναρροφώμενης παροχής μάζας αέρα. Ο ερευνητής επιλέγοντας την ταχύτητα περιστροφής και την αναρροφώμενη παροχή καταγράφει τις επιδόσεις του συμπίεστή δηλαδή το λόγο πίεσης και τον βαθμό απόδοσης του. Με επανάληψη της διαδικασίας για διάφορες ταχύτητες περιστροφής, καθορίζεται πειραματικά μέσω μετρήσεων το πεδίο χαρακτηριστικών του συμπίεστή. Μια τέτοια διαδικασία είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα και προϋποθέτει την ύπαρξη διαθέσιμου εξοπλισμού και χώρου. Γι αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί υπολογιστικές μέθοδοι.

Οι υπολογιστικές μέθοδοι, προσδιορίζουν αναλυτικά μέσω σχέσεων τις επιδόσεις της συνιστώσας. Με παραμετρικές αναλύσεις μπορεί να καθοριστεί το πεδίο χαρακτηριστικών. Διάφορες μέθοδοι υψηλής πιστότητας έχουν αναπτυχθεί για μοντέλα μίας διάστασης (1-D), δύο ή τριών διαστάσεων (2-D, 3-D).

Μερικές από τις πιο σημαντικές μεθόδους υπολογισμού επιδόσεων και προσδιορισμού του πεδίου χαρακτηριστικών του συμπίεστή<sup>[15]</sup>, είναι:

- Η μέθοδος ομοιότητας
- Η μέθοδος σπονδυλικής στήλης
- Η μέθοδος υπολογισμού στο μεσημβρινό επίπεδο
- Η μέθοδος συσσώρευσης βαθμίδων

Ο τρόπος με τον οποίο λειτουργούν οι υπολογιστικές μέθοδοι που αναφέρθηκαν, τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτών, αναφέρονται συνοπτικά:

### 1.1.1 Μέθοδος Ομοιότητας

Η μέθοδος της ομοιότητας<sup>[15]</sup> είναι ίσως η πιο διαδεδομένη και εύχρηστη καθώς απαιτεί ως δεδομένα τα λιγότερα στοιχεία. Για να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος δεν είναι απαιτείται γνώση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του συμπίεστή πρέπει όμως να είναι πλήρως καθορισμένο το σημείο σχεδίασης στο οποίο λειτουργεί (ταχύτητα περιστροφής, παροχή μάζας, λόγος πίεσης και ισεντροπικός βαθμός απόδοσης).

Το σημείο αυτό (σημείο αναφοράς), τοποθετείται επάνω σε ένα δεδομένο χάρτη, ενός διαφορετικού πλην όμως όμοιου συμπίεστή με αυτόν που μελετάται. Ο χάρτης του διαφορετικού όμοιου συμπίεστή έχει προκύψει από αδιαστατοποίηση γνωστών

χαρακτηριστικών καμπυλών. Με αυτό τον τρόπο ο χάρτης μετατρέπεται σε έναν που αντιπροσωπεύει το συμπίεστη που μελετάμε.

Είναι κατανοητό πως η μέθοδος αυτή είναι μεν αξιόπιστη, αλλά επιφέρει μία αβεβαιότητα στον ερευνητή καθώς ο χάρτης που χρησιμοποιείται για τους υπολογισμούς, δεν έχει προκύψει από τον συμπίεστη που μελετάται αλλά από διαφορετικό.

Η μετατροπή του αρχικού γενικού χάρτη (generic map) σε χάρτη ικανό να περιγράψει τη λειτουργία του συμπίεστη που μελετάται, απαιτεί τροποποίηση στα μεγέθη της διορθωμένης ταχύτητας περιστροφής  $N$ , της διορθωμένης παροχή μάζας  $q$ , του λόγου πίεσης  $\pi$  και του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης  $\eta$ , σύμφωνα με τις εξισώσεις:

$$\frac{N}{\sqrt{\theta}} = \frac{(N/\theta)_d}{(N/\theta)_{r,d}} \cdot (N/\theta)_r \quad (1.1)$$

$$q = \frac{q_d}{q_{r,d}} \cdot q_r \quad (1.2)$$

$$\pi = \frac{\pi_d - 1}{\pi_{r,d} - 1} \cdot [\pi_r - 1] + 1 \quad (1.3)$$

$$\eta = \frac{\eta_d}{\eta_{r,d}} \cdot \eta_r \quad (1.4)$$

Το μέγεθος  $\theta$  ισούται με το λόγο  $\frac{T}{T_{ref}}$ , όπου  $T_{ref} = 288,15$  K, θερμοκρασία τυπικής ημέρας. Ο δείκτης  $r$  αναφέρεται σε ένα σημείο λειτουργίας του γενικού αρχικού χάρτη (generic map) ενώ ο δείκτης  $d$  στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας (design point) του συμπίεστη που μελετάμε.

### 1.1.2 Μέθοδος “σπονδυλικής στήλης” (Backbone Method)

Η μέθοδος της σπονδυλικής στήλης<sup>[15]</sup> είναι παρεμφερής με τη μέθοδο της ομοιότητας. Κατά τη μέθοδο αυτή υπολογίζονται οι επιδόσεις του συμπίεστη που μελετάται από δεδομένα χαρακτηριστικά λειτουργίας άλλων όμοιων συμπίεστών. Πιο συγκεκριμένα για να καθοριστεί το πεδίο χαρακτηριστικών είναι απαραίτητη η γνώση των δεδομένων που αντιστοιχούν στη γραμμή λειτουργίας ( ‘σπονδυλική στήλη’) του κινητήρα από τον οποίο προέρχονται.

Μίας ισοταχής χαρακτηρίζεται από τρία σημεία: το σημείο λειτουργίας, το σημείο στη γραμμή πάλμωσης και το σημείο στραγγαλισμού. Αυτά τα τρία σημεία απαιτείται να είναι πλήρως καθορισμένα ως προς τη ταχύτητα περιστροφής, παροχή μάζας, λόγο πίεσης και ισεντροπικό βαθμό απόδοσης. Τα μεγέθη αυτά αδιαστοποιούνται ως προς ένα σημείο λειτουργίας, στο οποίο εμφανίζεται η μέγιστη απόδοση. Το σημείο αυτό ονομάζεται ‘‘σημείο αναφοράς’’ και οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την αδιαστατοποίηση είναι οι εξής:  $N/N_{ref}$ ,  $PR/PR_{ref}$ ,  $(\Delta T/T)/(\Delta T/T)_{ref}$   $Q/Q_{ref}$ .

Γίνεται η υπόθεση ότι το σημείο αναφοράς βρίσκεται επάνω στη γραμμή λειτουργίας. Έχοντας υπολογίσει τα μεγέθη  $PR$ ,  $Q$  και  $\Delta T/T$  στο σημείο αυτό, με τις δεδομένες αδιαστατοποιημένες παραμέτρους, προσδιορίζονται τα σημεία πάλμωσης, λειτουργίας και στραγγαλισμού για κάθε ταχύτητα περιστροφής του συμπιεστή που μελετάμε. Τα υπόλοιπα σημεία κάθε ισοταχούς υπολογίζονται με τη μέθοδο της παρεμβολής.

Η μέθοδος αυτή είναι αρκετά εύχρηστη και απλοποιημένη, φέρει όμως περιορισμούς κατά την εφαρμογή της. Αρχικά για να είναι ικανοποιητικά τα αποτελέσματα και το πεδίο που θα προκύψει να είναι αντιπροσωπευτικό του συμπιεστή που μελετάται, πρέπει οι συμπιεστές που εξετάζονται να είναι όμοιοι μεταξύ τους. Μία επιπλέον αβεβαιότητα που δημιουργείται με τη χρήση της μεθόδου, προκύπτει από την υπόθεση ότι το σημείο αναφοράς βρίσκεται επάνω στη γραμμή λειτουργίας. Σε κάθε περίπτωση οι αποκλίσεις στο νέο πεδίο χαρακτηριστικών θα είναι μικρές και οι χάρτες θα παρουσιάζουν σχετική ομοιότητα.

### **1.1.3 Μέθοδος υπολογισμού της ροής στο Μεσημβρινό Επίπεδο (Blade Element Method)**

Με τη μέθοδο αυτή<sup>[15]</sup> προσδιορίζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη της ροής από την είσοδο στην έξοδο εφαρμόζοντας τις εξισώσεις της ακτινικής ισορροπίας, με χρήση εμπειρικών σχέσεων. Αυτές έχουν προκύψει από πειραματικά δεδομένα και συνδέουν την αεροδυναμική συμπεριφορά της πτερύγωσης, ρότορα ή στάτορα, με τα γεωμετρικά της χαρακτηριστικά.

Η μέθοδος αυτή δεν είναι εύχρηστη και η εφαρμογή της αποφεύγεται καθώς απαιτεί λεπτομερή γνώση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των πτερυγώσεων. Κάτι τέτοιο είναι δύσκολο καθώς ο κατασκευαστής δεν παρέχει τέτοιου είδους πληροφορίες, ούτε δημοσιεύονται στη βιβλιογραφία. Η μέθοδος θα μπορούσε να φανεί χρήσιμη σε αρχικό στάδιο σχεδιασμού του συμπιεστή και αρχική εκτίμηση των επιδόσεων και του πεδίου χαρακτηριστικών του.



### 1.1.4 Μέθοδος Συσσώρευσης Βαθμίδων (Stage Stacking Method)

Κατά τη μέθοδο αυτή<sup>[15],[16]</sup>, οι επιδόσεις ολόκληρου του συμπιεστή εξαρτώνται από τις επιδόσεις των επιμέρους βαθμίδων. Γίνεται λοιπόν κατανοητό ότι η μοντελοποίηση κάθε βαθμίδας είναι απαραίτητη. Η λειτουργία κάθε βαθμίδας μοντελοποιείται από ένα ζεύγος καμπυλών, τις χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας, που συνδέουν τη παράμετρο φόρτισης  $\Psi$  και τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης  $\eta$  με την παράμετρο παροχής  $\Phi$ . Η παράμετρος φόρτισης αντιστοιχεί στο λόγο πίεσης που επιτυγχάνει η βαθμίδα ενώ η παράμετρος παροχής  $\Phi$  αντιστοιχεί στην παροχή μάζας. Τα δύο αυτά μεγέθη συνδέονται με τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης μέσω του συντελεστή μεταβολής θερμοκρασίας  $\zeta$ . Οι παράμετροι αυτές δίνονται από τις σχέσεις:

$$\Phi = \frac{V_a}{U} \quad (1.5)$$

$$\psi = \frac{C_p \cdot T \cdot (PR^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1)}{U^2} \quad (1.6)$$

$$\zeta = \frac{C_p \cdot \Delta T}{U^2} \quad (1.7)$$

$$\eta = \frac{\Psi}{\zeta} \quad (1.8)$$

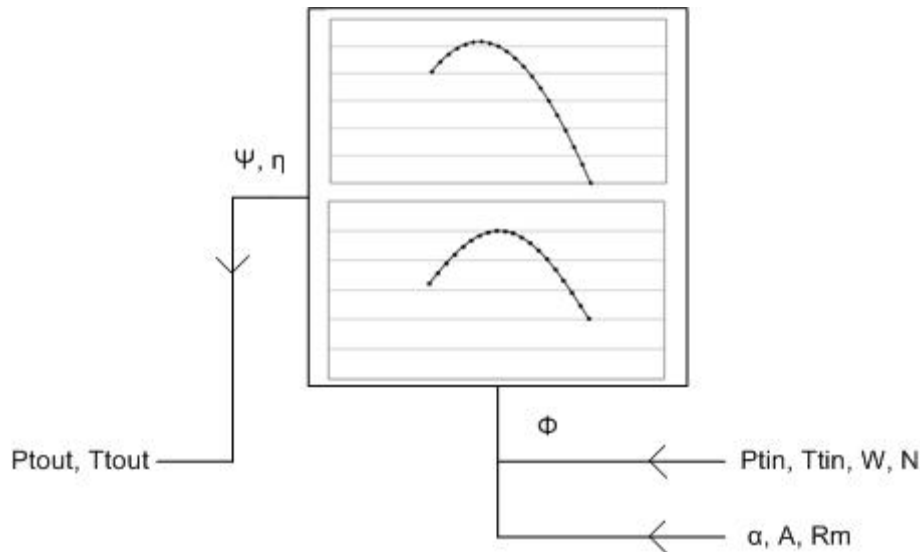
Κατά την εφαρμογή της μεθόδου, ξεκινώντας από τις συνθήκες εισόδου της βαθμίδας με δεδομένη τη γεωμετρία του καναλιού (εμβαδόν εισόδου  $A$  και μέση ακτίνα  $R_m$ ) και την απόλυτη γωνία ροής του εργαζόμενου μέσου, υπολογίζεται η παράμετρος παροχής. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τις χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας της βαθμίδας, υπολογίζεται ο λόγος πίεσης που επιτυγχάνει και ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης αυτής. Τελικά υπολογίζονται οι συνθήκες εξόδου της βαθμίδας.

Οι ολικές συνθήκες στην είσοδο της επόμενης βαθμίδας είναι ίδιες με αυτές της εξόδου της προηγούμενης και η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλες τις βαθμίδες του συμπιεστή, χρησιμοποιώντας τις χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας κάθε βαθμίδας. Συνεπώς προσδιορίζονται οι επιδόσεις ολόκληρου του συμπιεστή.

Επαναλαμβάνοντας την παραπάνω διαδικασία για διάφορες τιμές της παροχής μάζας του εργαζόμενου μέσου και της ταχύτητας περιστροφής του συμπιεστή είναι δυνατό να προσδιοριστεί ολόκληρο το πεδίο χαρακτηριστικών αυτού.

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών καμπυλών των βαθμίδων, στοιχείο απαραίτητο για την εφαρμογή της μεθόδου αυτής, απαιτεί τον προσδιορισμό των αδιάστατων χαρακτηριστικών καμπυλών, ο οποίος είναι

δύσκολος. Για αυτό το σκοπό, χρησιμοποιούνται οι γενικευμένες χαρακτηριστικές που συνδέουν τις ποσότητες  $\Psi/\Psi_{ref}$  και  $\eta/\eta_{ref}$  με τη ποσότητα  $\Phi/\Phi_{ref}$ , όπου  $\Psi_{ref}$ ,  $\eta_{ref}$  και  $\Phi_{ref}$  οι επιδόσεις της βαθμίδας στο σημείο σχεδιασμού της, δηλαδή στο σημείο όπου ο βαθμός απόδοσης παίρνει τη μέγιστη τιμή του. Με τον τρόπο αυτό, η χαρακτηριστική κάθε βαθμίδας εξαρτάται από τις τιμές που παίρνουν αυτά τα μεγέθη στο σημείο σχεδιασμού της, καθώς οι γενικευμένες χαρακτηριστικές είναι ίδιες για όλες τις βαθμίδες του συμπιεστή. Η διαδικασία με την οποία εφαρμόζεται η μέθοδος συσσώρευσης βαθμίδων παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.1.



**Σχήμα 1.1: Διαδικασία εφαρμογής της μεθόδου συσσώρευσης βαθμίδων**

Ο υπολογισμός των επιδόσεων αυτών καθώς και της απόλυτης γωνίας εισόδου της ροής κάθε βαθμίδας γίνεται μέσω διαδικασίας, η οποία καλείται Προσαρμοσμένη Μέθοδος Συσσώρευσης Βαθμίδων (Adaptive Stage Stacking Method). Κατά τη μέθοδο αυτή, λαμβάνονται από πειραματικά δεδομένα οι ολικές επιδόσεις και η γεωμετρία του συμπιεστή. Στη συνέχεια χρησιμοποιούνται καταλλήλως τροποποιημένες γενικευμένες χαρακτηριστικές ώστε να περιγράψουν ικανοποιητικά το συμπιεστή που μελετάται. Τέλος εκτιμάται η απόλυτη γωνίας εισόδου της ροής για κάθε βαθμίδα. Με αυτό τον τρόπο υπολογίζονται τα μεγέθη  $\Psi_{ref}$ ,  $\eta_{ref}$  και  $\Phi_{ref}$  και επιβεβαιώνονται οι εκτιμήσεις για τις απόλυτες γωνίες εισόδου των βαθμίδων.

Η δυσκολία στις προκαταρκτικές μελέτες για τον προσδιορισμό των απαραίτητων στοιχείων για την εφαρμογή της μεθόδου, αντισταθμίζεται από τα πλεονεκτήματα που προσφέρει. Το γεγονός της χρήσης των χαρακτηριστικών καμπυλών κάθε μεμονωμένης βαθμίδας, επιτρέπει την εκτίμηση των μεταβολών στις συνολικές επιδόσεις του συμπιεστή και κατ' επέκταση της μηχανής, όταν συμβεί μεταβολή σε μία ή περισσότερες βαθμίδες. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε αναλύσεις ευαισθησίας και

αναλύσεις βελτιστοποίησης, μελέτη αποδεσμεύσεων παροχής μάζας καθώς και για διαγνωστικούς σκοπούς.

## 1.2 Μοντελοποίηση και Προσομοίωση Αεριοστροβίλων

Για τη μοντελοποίηση και προσομοίωση αεριοστροβίλων και των επιμέρους συνιστωσών τους, έχουν αναπτυχθεί υπολογιστικά προγράμματα προσομοίωσης της λειτουργίας τους<sup>[15]</sup>. Αναφέρονται συνοπτικά τα σημαντικότερα από αυτά:

### 1.2.1 GasTurb

Η δημιουργία του προγράμματος αυτού ξεκίνησε το 1991 από τον Joachim Kurzke, στα πλαίσια της πολύχρονης εμπειρίας του στο χώρο της βιομηχανίας των αεριοστροβίλων. Το πρόγραμμα<sup>[11],[15],[19]</sup> επιτρέπει την ανάλυση της λειτουργίας μόνο προκαθορισμένων διατάξεων αεριοστροβίλων με χρήση των χαρακτηριστικών λειτουργίας για τις επιμέρους συνιστώσες τους (μοντέλα μηδενικών διαστάσεων 0-D). Οι χαρακτηριστικές λειτουργίας πρέπει να φέρουν τις βοηθητικές συντεταγμένες β (beta lines).

Το σημαντικό πλεονέκτημα του προγράμματος για την εποχή που αναπτύχθηκε ήταν η ύπαρξη εύχρηστου γραφικού περιβάλλοντος. Αντιθέτως, η γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιείται, η Borland Delphi, δεν είναι αντικειμενοστραφής (object oriented), δηλαδή δεν χρησιμοποιεί τις ικανότητες καθορισμού των ιδιοτήτων του αντικειμένου.

Μέχρι σήμερα το πρόγραμμα GasTurb έχει εξελιχθεί και προσφέρει μεταξύ άλλων και άλλα εύχρηστα εργαλεία όπως για παράδειγμα προγράμματα για καθορισμό βοηθητικών συντεταγμένων για το πεδίο χαρακτηριστικών συνιστωσών.

### 1.2.2 GSP

Το πρόγραμμα<sup>[12],[15],[19]</sup> αυτό αναπτύχθηκε από το Πανεπιστήμιου Delft (TUD) της Ολλανδίας το 1986 για τις ανάγκες του οργανισμού NLR (Aerospace Knowledge Enterprise of Netherlands), ο οποίος ασχολείται μέχρι και σήμερα με την έρευνα γύρω από την αεροπλοΐα.

Πρόκειται για ένα εργαλείο μοντελοποίησης ικανό για κάθε είδους διάταξη αεριοστροβίλου μηδενικής διάστασης (0-D) συμπεριλαμβανομένων και των εξωτερικών φορτίων όπως αντλίες, γεννήτριες κλπ. Παρέχει τη δυνατότητα καθορισμού των ιδιοτήτων των συνιστωσών (object oriented) ή τροποποίησης τους προς δημιουργία νέων, και στη συνέχεια σύνδεσης τους προς δημιουργία μοντέλου μηχανής σε ένα

εύχρηστο γραφικό περιβάλλον. Πέραν της ανάλυσης λειτουργίας ενός αεριοστροβίλου, το πρόγραμμα GSP είναι κατάλληλο για αναλύσεις ευαισθησίας, απωλειών, επιπτώσεων διάφορων δυσλειτουργιών κλπ. Χρησιμοποιεί την ίδια γλώσσα προγραμματισμού με το GasTurb, Borland Delphi.

### 1.2.3 NPSS

Το λογισμικό NPSS<sup>[13],[15],[19]</sup> (Numerical Propulsion System Simulation) αναπτύχθηκε υπό τη συνεργασία εταιρειών της αεροδιαστημικής βιομηχανίας (General Electric, Boeing, Pratt&Whitney κα) και πανεπιστημίων της Αμερικής, υπό την αιγίδα της NASA και του εξειδικευμένου εργαστηρίου της Glenn. Στόχος ήταν να υποστηρίξει τον τομέα της αεροδιαστημικής, να καταστήσει την πολιτική και στρατιωτική αεροπορία πιο ασφαλή και να υποστηρίξει στο μέλλον εφαρμογές της πυρηνικής τεχνολογίας, βιοατρικής κα.

Το πρόγραμμα βασίζεται στη συγκρότηση μοντέλου μηχανής με τη σύνδεση επιμέρους συνιστωσών, των οποίων οι ιδιότητες και ο τρόπος μοντελοποίησης έχει οριστεί από τον χρήστη (object oriented). Η καινοτομία του λογισμικού αυτού, υπήρξε η δυνατότητα διασύνδεσης συνιστωσών διαφορετικών διαστάσεων (0-D, 1-D, 2-D, 3-D). Ένα επιπρόσθετο πλεονέκτημα είναι η ταυτόχρονη ανάλυση των συνιστωσών της μηχανής εκτελώντας διαφορετικούς τύπους ανάλυσης ανά συνιστώσα (αεροδυναμική, δομική, κλπ).

### 1.2.4 TEACHES

Το πρόγραμμα TEACHES<sup>[15],[19]</sup> (Turbine Engine Advance Calculation and Health Assessment Software) αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών του Τομέα Ρευστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Πρόκειται για ένα προσαρμοστικό πρόγραμμα μοντελοποίησης αεριοστροβίλων, με μία δυναμική βιβλιοθήκη, η οποία περιλαμβάνει ένα γενικευμένο υπολογιστικό μοντέλο αεριοστροβίλων. Τα στοιχεία λειτουργίας του αεριοστροβίλου και το πεδίο χαρακτηριστικών των συνιστωσών του αποθηκεύονται σε δυαδικά (binary) αρχεία, απαραίτητα για τη λειτουργία του προγράμματος.

Μπορεί να πραγματοποιηθεί προσομοίωση της λειτουργίας μίας μηχανής για δεδομένα στοιχεία, τα οποία έχουν προκύψει από μετρήσεις ή άλλες πηγές. Επιπλέον παρέχει τη δυνατότητα αναγνώρισης βλαβών, εισαγωγής χαρακτηριστικών λειτουργίας για τις επιμέρους συνιστώσες και ανάλυση λειτουργίας σε μόνιμη και μεταβατική κατάσταση.

Παρότι είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για τις μελέτες που πραγματοποιούνται στο Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών, τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιείται ως επί

το πλείστον το υπολογιστικό πρόγραμμα μοντελοποίησης και προσομοίωσης PROOSIS, το οποίο και περιγράφεται στη συνέχεια.

### 1.2.5 PROOSIS

Το λογισμικό PROOSIS<sup>[1],[2],[14],[15],[20]</sup> (PRopulsion Object Oriented SIMulation Software) αναπτύχθηκε στα πλαίσια ευρωπαϊκών προγραμμάτων, υπό τη συνεργασία ευρωπαϊκών πανεπιστημίων, ερευνητικών ιδρυμάτων και της βιομηχανίας, κυρίως για τη προσομοίωση συστημάτων πρόωσης.

Πρόκειται για ένα περιβάλλον μοντελοποίησης και προσομοίωσης για συνεχή φυσικά συστήματα και διακριτά γεγονότα, το οποίο βασίζεται στο EcosimPro, ένα εργαλείο προσομοίωσης που αναπτύχθηκε από την Ισπανική εταιρεία Empresarios Agrupados Internacional για τη μοντελοποίηση κάθε φυσικής διεργασίας η οποία εκφράζεται από διαφορικές και αλγεβρικές εξισώσεις.

Το 2008 έγινε διαθέσιμο προς χρήση στη βιομηχανία και σήμερα είναι ένα ισχυρό εργαλείο που λαμβάνει υπόψη του τις απαιτήσεις της αεροναυτικής βιομηχανίας. Χρησιμοποιείται ευρέως τόσο στη ευρωπαϊκή βιομηχανία όσο και στην έρευνα.

Ενδεικτικά αναφέρονται Airbus, Alenia Aeronautica, Avio, MTU, Xerox Italia S.p.A, ESOCENET, Turbomecha SA, Volvo Aero Corporation, Snecma, Iberespacio, NLR, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Πανεπιστήμιο Στουτγάρδης, Πολυτεχνείο Μιλάνου, Πολυτεχνείο Τορίνο.

Το PROOSIS επιτρέπει στο χρήστη πολλών ειδών προσομοιώσεις λειτουργίας ενός αεριοστροβίλου και των υποσυστημάτων του, όπως υδραυλικά, θερμικά, μηχανικά, συστήματα ελέγχου κ.α. Πιο συγκεκριμένα, ο ερευνητής στο εξελιγμένο γραφικό περιβάλλον του λογισμικού, έχει τη δυνατότητα να διασυνδέσει επιμέρους συνιστώσες σε μία διάταξη, η οποία να αντιπροσωπεύει τη μηχανή που θέλει να μελετήσει. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να δημιουργήσει εξελιγμένα και πολύπλοκα μοντέλα μηχανών συνδέοντας βασικές συνιστώσες όπως για παράδειγμα για έναν αεριοστρόβιλο συμπιεστή, στρόβιλο, θάλαμο καύσης, ακροφύσια κλπ.

Στη συνέχεια έχοντας στη διάθεση του μία πληθώρα από εργαλεία, έχει τη δυνατότητα να κάνει προκαταρκτική διαστασιολόγηση της μηχανής και των συνιστωσών της, σχεδίαση σε ένα ή περισσότερα σημεία, ανάλυση στο σημείο σχεδίασης (design-point analysis) και εκτός του σημείου σχεδίασης (off-design analysis), παραμετρικές μελέτες, ανάλυση ευαισθησίας, βελτιστοποίηση.

Οι υπολογισμοί μπορούν να εκτελεστούν σε μόνιμη (steady) και μεταβατική (transient) λειτουργία. Επιπλέον μπορεί να συνδεθεί με άλλα προγράμματα υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD) και πεπερασμένων στοιχείων (FEA), γεγονός που το καθιστά ένα πολύ σημαντικό εργαλείο για όλο το κύκλο ζωής ενός κινητήρα από τη προκαταρκτική και τη λεπτομερή σχεδίαση μέχρι τη τεχνική υποστήριξη και συντήρηση του κινητήρα.

### 1.3 Δομή παρούσης Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα εργασία αποτελείται από επτά κεφάλαια και έχει δομηθεί ως εξής:

Στο παρόν πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία σύντομη περιγραφή του σκοπού και της δομής της παρούσης διπλωματικής εργασίας. Παράλληλα περιγράφονται οι υπολογιστικές μέθοδοι προσδιορισμού του πεδίου χαρακτηριστικών του συμπιεστή και τα εμπορικά προγράμματα μοντελοποίησης και προσομοίωσης αεριοστροβίλων και συνιστώσών τους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται εις βάθος η διαδικασία μοντελοποίησης και προσομοίωσης συνιστώσας αεριοστροβίλου στο υπολογιστικό πρόγραμμα PROOSIS. Επιπροσθέτως, περιγράφονται βασικές έννοιες του προγράμματος, χρήσιμες στα επόμενα κεφάλαια.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία μοντελοποίησης της βαθμίδας αξονικού συμπιεστή, όπως αυτή υλοποιήθηκε στο πρόγραμμα PROOSIS. Στη συνέχεια περιγράφεται η προσομοίωση αυτής.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται η δημιουργία νέας συνιστώσας συμπιεστή, από την ένωση εν σειρά βαθμίδων. Περιγράφεται η διαδικασία μοντελοποίησης με τη μέθοδο συσσώρευσης βαθμίδων και προσομοίωσης αυτού προς καθορισμό των ολικών επιδόσεων και του πεδίου χαρακτηριστικών του. Στη συνέχεια περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία μορφοποίησης του χάρτη του συμπιεστή στο πρόγραμμα Smooth C, ώστε να φέρει βοηθητικές συντεταγμένες γραμμές  $-\beta$  και να έρθει στη μορφή beta map. Τέλος περιγράφεται η μελέτη που πραγματοποιήθηκε στις επιδόσεις του συμπιεστή, στη περίπτωση απομάστευσης ποσοστού παροχής αέρα από ενδιάμεση βαθμίδα του.

Στο πέμπτο κεφάλαιο δίνεται αρχικά μία σύντομη περιγραφή του αεριοστροβίλου Tornado, καθώς αυτός αποτέλεσε το μοντέλο μελέτης στην παρούσα εργασία. Στη συνέχεια περιγράφεται η προσομοίωση του μοντέλου του αεριοστροβίλου, για διαφορετικά μοντέλα συμπιεστή. Αρχικά περιγράφεται η προσομοίωση αυτού, στον οποίο η συνιστώσα του συμπιεστή είναι μηδενικών διαστάσεων και χρησιμοποιεί ένα γενικό χάρτη (generic map). Ύστερα περιγράφεται η προσομοίωση αυτού με μοντέλο συμπιεστή μηδενικών διαστάσεων που χρησιμοποιεί το χάρτη όπως αυτός παράχθηκε από τη μοντελοποίηση του συμπιεστή με τη μέθοδο συσσώρευσης βαθμίδων (Stage Stacking Map). Τέλος, περιγράφεται η διαδικασία ενσωμάτωσης του συμπιεστή, όπως μοντελοποιήθηκε με τη μέθοδο συσσώρευσης βαθμίδων, στο μοντέλο του αεριοστροβίλου. Περιγράφεται η προσομοίωση του μοντέλου και παρατίθενται τα αποτελέσματα προς σύγκριση.

Στο έκτο κεφάλαιο περιγράφεται η μοντελοποίηση βλαβών σε επίπεδο βαθμίδας κατά μήκος του συμπιεστή. Ειδικότερα, μελετώνται τρεις διαφορετικές βλάβες, αυτή της συσσώρευσης επικαθήσεων, της αύξησης του ακτινικού διακένου και διάβρωσης

περυγίων. Παρουσιάζεται η επίδραση της βλάβης στο πεδίο χαρακτηριστικών του συμπεσθή.

Στο έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο γίνεται σύντομη ανακεφαλαίωση της παρούσης εργασίας και δίνονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την μελέτη αυτή. Επιπροσθέτως, παρουσιάζονται προτάσεις για περαιτέρω μελέτες σχετικά με το θέμα της μοντελοποίησης του συμπεσθή.





# 2

## Υπολογιστικό PROOSIS

## πρόγραμμα

Το υπολογιστικό πρόγραμμα PROOSIS αποτελεί ένα κυρίαρχο εργαλείο μοντελοποίησης αεριοστροβίλων και των συνιστωσών τους, στο χώρο της βιομηχανίας και της έρευνας. Θεωρείται περιβάλλον αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού (object-oriented environment) καθώς φέρει “αντικείμενα” (objects), τα οποία εκτελούν μια φυσική διεργασία, και στα οποία παρέχεται η δυνατότητα τροποποίησης των χαρακτηριστικών τους και ένωσης τους προς δημιουργία νέων αντικειμένων. Στην περίπτωση μελέτης αεριοστροβίλων, αντικείμενα θεωρούνται οι συνιστώσες αυτού, και τα χαρακτηριστικά που είναι δυνατόν να τροποποιηθούν είναι για παράδειγμα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, απώλειες πίεσης, ποσοστό απομάστευσης παροχής μάζας εργαζόμενου μέσου κα. Για τη δημιουργία νέου αντικειμένου (νέας συνιστώσας), το καθορισμό της φυσικής διεργασίας που θα εκτελεί και τον τρόπο με τον οποίο θα την εκτελεί, παρέχεται η δυνατότητα ανάπτυξης αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία το πρόγραμμα PROOSIS αποτέλεσε το μέσο για την επίτευξη των στόχων αυτής. Χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση αξονικού συμπιεστή, δηλαδή για τη δημιουργία νέας συνιστώσας, και το καθορισμό του μαθηματικού μοντέλου αυτού με τη μέθοδο συσσώρευσης βαθμίδων. Στόχος του κεφαλαίου αυτού είναι να περιγράψει εις βάθος τη διαδικασία μοντελοποίησης και προσομοίωσης συνιστώσας στο PROOSIS, μιας που η διαδικασία αυτή ακολουθήθηκε κατά τη εκπόνηση της εργασίας.

Στην πρώτη ενότητα του κεφαλαίου, γίνεται εκτενής αναφορά στον τρόπο με τον οποίο υλοποιείται η μοντελοποίηση και προσομοίωση συνιστώσας αεριοστροβίλου στο PROOSIS.

Στη δεύτερη ενότητα, επισημαίνονται και αναλύονται βασικές έννοιες που αφορούν λειτουργίες του προγράμματος PROOSIS, χρήσιμες στα επόμενα κεφάλαια.

### 2.1 Μοντελοποίηση και Προσομοίωση Συνιστώσας στο PROOSIS

Η μοντελοποίηση και στη συνέχεια η προσομοίωση μίας συνιστώσας στο PROOSIS<sup>[1],[2]</sup> χωρίζεται σε τρία επίπεδα. Η μοντελοποίηση πραγματοποιείται στα δύο πρώτα επίπεδα, αυτά της δημιουργίας της συνιστώσας (δημιουργία Component) και του καθορισμού του μαθηματικού μοντέλου με την επιλογή οριακών συνθηκών (δημιουργία Partition), ενώ η προσομοίωση λαμβάνει χώρα στο τρίτο επίπεδο, το επίπεδο του πειράματος (Experiment). Η διαδικασία περιγράφεται στις επόμενες υποενότητες:

### 2.1.1 Μοντελοποίηση Συνιστώσας - Δημιουργία Component

Το πιο σημαντικό στοιχείο στο λογισμικό PROOSIS είναι το Component, δηλαδή η συνιστώσα/τμήμα της μηχανής η οποία χαρακτηρίζεται από ένα συγκεκριμένο είδος θερμοδυναμικής μεταβολής. Ως αποτέλεσμα το Component περιέχει μια μαθηματική περιγραφή της αντίστοιχης πραγματικής συνιστώσας, η οποία περιγραφή μπορεί να αποτελείται από μεταβλητές, διαφορικές και αλγεβρικές εξισώσεις, αριθμητικές μεθόδους σύγκλισης κα. Για έναν αεριοστρόβιλο για παράδειγμα, Component αποτελεί ο αγωγός εισόδου, ο συμπιεστής, ο στρόβιλος, ο θάλαμος καύσης, οι άτρακτοι κλπ.

Με τη δημιουργία ενός νέου Component, ο ερευνητής πρέπει να δώσει σε αυτό την επιθυμητή ονομασία. Στη συνέχεια δημιουργείται ένα κενό αρχείο κώδικα (Source File), στο οποίο ο ερευνητής καλείται να περιγράψει μαθηματικά τη συνιστώσα που μελετά, χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού EL η οποία περιγράφεται στη συνέχεια.

Η δομή του κώδικα σε ένα Component αποτελείται από μία σειρά μπλοκ, το κάθε ένα από τα οποία περιλαμβάνει ομοειδή στοιχεία. Τα σημαντικότερα από αυτά με τη σειρά που εμφανίζονται μέσα σε ένα Component είναι τα εξής:

- **Ports.** Είναι οι θύρες με τις οποίες συνδέονται τα Components μεταξύ τους και από τις οποίες μεταδίδονται οι πληροφορίες (π.χ. θερμοδυναμικά μεγέθη) για το εργαζόμενο μέσο. Εκτενής αναφορά θα γίνει σε επόμενη παράγραφο.
- **Data.** Σε αυτό το μπλοκ ορίζονται όλα τα γνωστά μεγέθη, όπως για παράδειγμα γεωμετρικά χαρακτηριστικά.
- **Declarations (DECLS).** Όλες οι τοπικές μεταβλητές που χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση της συνιστώσας δηλώνονται σε αυτό το μπλοκ. Είναι απαραίτητο να δηλωθούν όλες οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα και δεν έχουν ήδη δηλωθεί ως Data.
- **Objects.** Σε αυτό το σημείο δηλώνονται στοιχεία που επιθυμούμε να χρησιμοποιηθούν ως αντικείμενα, για παράδειγμα ένας χάρτης με τον οποίο στη συνέχεια θέλουμε να κάνουμε πράξεις ή ένας πίνακας του οποίου τα στοιχεία θέλουμε να τροποποιούμε.
- **Initialization (INIT).** Σε αυτό το μπλοκ αρχικοποίησης απαιτείται να οριστούν διαδοχικές οδηγίες οι οποίες πρέπει να εκτελεστούν πριν την έναρξη της προσομοίωσης. Για παράδειγμα εδώ μπορεί να δοθεί εντολή για να διαβαστεί ένας πίνακας ή να δοθεί αρχική τιμή σε μία μεταβλητή που χρησιμοποιείται αργότερα στο πρόγραμμα σε κάποιο βρόχο.
- **Discrete.** Σε αυτό το μπλοκ δηλώνονται όλα τα διακριτά γεγονότα. Κατά την εκτέλεση ενός προγράμματος γίνεται κάθε χρονική στιγμή έλεγχος για διακριτά

συμβάντα και εάν εντοπιστούν ακολουθείται μία σειρά από διαδοχικές ενέργειες, η οποία επηρεάζει με λογικό τρόπο την εκτέλεση του προγράμματος.

- **Continuous.** Σε αυτό το μπλοκ αναπτύσσεται το μαθηματικό μοντέλο, το οποίο μπορεί να αποτελείται από συνεχείς μόνο μεταβλητές, διαφορικές και αλγεβρικές εξισώσεις. Η σειρά με την οποία θα ταξινομηθούν σε αυτό το μπλοκ οι εξισώσεις δεν ενδιαφέρει σε αυτό το σημείο τον ερευνητή καθώς το λογισμικό PROOSIS αποφασίζει σε επόμενο στάδιο την σειρά επίλυσης του προβλήματος.

Αφού δημιουργηθεί το Component, εκτελεστεί με το μεταγλωττιστή και δεν εντοπιστούν σφάλματα, ο ερευνητής είναι σε θέση να προχωρήσει στο επόμενο στάδιο της μοντελοποίησης, το καθορισμού του μαθηματικού μοντέλου με την επιλογή οριακών συνθηκών. Αυτό υλοποιείται με τη δημιουργία Partition, διαδικασία που περιγράφεται στην αμέσως επόμενη υποενότητα.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι ο ερευνητής μπορεί με το τέλος της δημιουργίας του Component να σχεδιάσει ένα σύμβολο που να αντιπροσωπεύσει αυτό, το οποίο θα φανεί χρήσιμο σε περίπτωση προσομοίωσης ολόκληρης μηχανής. Το σύμβολο αυτό, πλέον Component, μπορεί να ενωθεί με άλλα Components και όλα μαζί να αποτελέσουν ένα νέο Component, το οποίο να περιέχει επιπλέον μία δική του μαθηματική περιγραφή. Επιπροσθέτως, υπάρχει η δυνατότητα σύνδεσης διαφορετικών Components προς δημιουργία ενός μοντέλου μηχανής. Η σχηματική απεικόνιση ενός τέτοιου δυναμικού μοντέλου, ονομάζεται Schematic.

### **2.1.2 Καθορισμός Μαθηματικού Μοντέλου – Δημιουργία Partition**

Σε αυτό το επίπεδο καθορίζεται ο τρόπος με τον οποίο θα επιλυθεί το μαθηματικό μοντέλο που περιγράφηκε κατά τη δημιουργία του Component. Μαθηματικοί αλγόριθμοι επεξεργάζονται τις εξισώσεις συμβολικά, προτείνουν οριακές συνθήκες, αλγεβρικές μεταβλητές που εμπλέκονται σε επαναληπτικές διαδικασίες σύγκλισης, και ορίζουν τις εξισώσεις για βέλτιστο υπολογισμό αφού στο PROOSIS η σειρά και η μορφή των εξισώσεων δεν επηρεάζει τον τρόπο επίλυσης.

Σε αναδυόμενο παράθυρο (Wizard) που ανοίγει κατά τη δημιουργία ενός νέου Partition, ο ερευνητής καλείται να επιλέξει εκείνες τις οριακές συνθήκες και πιθανώς αλγεβρικές μεταβλητές, για τις οποίες είναι σε θέση να δώσει, αργότερα στο επίπεδο του πειράματος, τιμές. Το πρόγραμμα απαιτεί ένα συγκεκριμένο αριθμό αυτών ώστε να λύσει το πρόβλημα και μάλιστα προτείνει τις καταλληλότερες. Εάν ο ερευνητής δεν επιθυμεί κάποια από αυτές μπορεί, εφόσον δεν δημιουργεί αυτή η κίνηση κώλυμα στη λύση του προβλήματος, να επιλέξει κάποια άλλη μεταβλητή. Γίνεται κατανοητό πως μία μεταβλητή που έχει δηλωθεί ως Data μεταβλητή στο Component δε μπορεί να επιλεγεί σε επίπεδο Partition, καθώς της έχει ήδη δοθεί τιμή μέσα στο πρόγραμμα.

Πέραν από αυτού του είδους Partition, τα οποία ονομάζονται default, παρέχεται η δυνατότητα δημιουργία Design Partition, στο οποίο πρώτα ορίζονται παράμετροι που πρέπει να σχεδιαστούν και ύστερα οι οριακές συνθήκες και λοιπές μεταβλητές. Τέτοιες παράμετροι μπορεί να είναι λόγου χάρη το εμβαδόν εξόδου ενός ακροφυσίου.

Ένα Partition μπορεί ανά πάσα στιγμή να τροποποιηθεί. Περισσότερα από ένα Partition μπορούν να δημιουργηθούν για ένα Component αναλόγως τις ανάγκες και στόχους της μελέτης. Για κάθε ένα από αυτά μπορεί ο ερευνητής να δημιουργήσει ένα ή περισσότερα Experiments, δηλαδή πειράματα προς μελέτη της λειτουργίας του Component σε διάφορες καταστάσεις λειτουργίας. Αυτό είναι το τρίτο και τελευταίο επίπεδο μοντελοποίησης και προσομοίωσης μίας συνιστώσας.

### 2.1.3 Προσομοίωση Συνιστώσας – Δημιουργία Experiment

Σε αυτό το επίπεδο μπορούν να πραγματοποιηθούν διαφορετικά πειράματα για ένα Component. Το πρόγραμμα δίνει την επιλογή καθορισμού του πειράματος είτε μέσω αναδυόμενων παραθύρων (Wizards), είτε μέσω κώδικα που γράφεται από τον ερευνητή. Ο ερευνητής καθορίζει τα δεδομένα του προβλήματος, τα οποία όρισε στο επίπεδο του Partition, δίνοντας τους τιμές, και μελετά ένα ή πολλαπλά σημεία σχεδίασης (design point) για μόνιμη (steady) ή μεταβατική λειτουργία (transient) και λειτουργία εκτός σημείου σχεδίασης (off-design analysis).

Η δομή του κώδικα σε ένα Experiment αποτελείται από μία σειρά μπλοκ, το κάθε ένα από τα οποία περιλαμβάνει ομοειδή στοιχεία. Όπως και στο Component, υπάρχουν και στο Experiment τα μπλοκ των Declarations, Objects, Initialization με την ίδια λειτουργία. Δύο νέα μπλοκ σε αυτό το επίπεδο είναι τα παρακάτω:

- **Boundaries.** Σε αυτό το μπλοκ ορίζονται οι οριακές συνθήκες με τις τιμές τους εφόσον επιλέχθηκαν στο επίπεδο του Partition. Αυτές οι τιμές που δίνονται μπορούν να τροποποιούνται ανά πάσα στιγμή σύμφωνα με τους στόχους της μελέτης.
- **Body.** Αυτό το μπλοκ είναι το αντίστοιχο του Continuous στο Component καθώς εδώ γράφονται πιθανές εξισώσεις, αποθηκεύονται σε αρχεία τα αποτελέσματα, δηλώνονται μεταβλητές και αποτελέσματα που θέλουμε να εμφανίζονται στη γραμμή μηνυμάτων σε κάθε προσομοίωση κλπ.

Στο επίπεδο του Experiment μπορεί ο ερευνητής να αποφασίσει το είδος της ανάλυσης που θέλει να πραγματοποιήσει. Μπορεί να προβεί σε παραμετρικές και διαπαραμετρικές αναλύσεις, σε αναλύσεις ευαισθησίας, σε αναλύσεις στο σημείο σχεδίασης και εκτός σημείου σχεδίασης. Μία επιπρόσθετη δυνατότητα στο επίπεδο αυτό είναι η επιλογή προσομοίωσης σε ένα δυναμικό περιβάλλον που ονομάζεται Monitor. Σε αυτό το περιβάλλον μπορεί ο ερευνητής να δημιουργήσει διαγράμματα με τις μεταβλητές που εμπλέκονται στο Component, να εμφανίσει τα αποτελέσματα σε πίνακες

ή επάνω στη σχηματική εικόνα του Component ή ολόκληρης της μηχανής, να τοποθετήσει τα σημεία σχεδίασης και τα σημεία εκτός σχεδίασης επάνω στους χάρτες των συνιστωσών κα.

## 2.2 Βασικές Έννοιες και Λειτουργίες στο PROOSIS

Για την υλοποίηση μοντελοποίησης και προσομοίωσης συνιστώσας στο πρόγραμμα PROOSIS απαιτείται γνώση αφενός της γλώσσας προγραμματισμού που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα PROOSIS και αφετέρου διάφορες βασικές έννοιες και λειτουργίες αυτού. Στην ενότητα αυτή θα περιγραφούν γνωρίσματα της γλώσσας προγραμματισμού EL και χαρακτηριστικά του προγράμματος τα οποία απασχόλησαν την παρούσα εργασία και αναφέρονται στα επόμενα κεφάλαια.

### 2.2.1 Η Γλώσσα προγραμματισμού EL

Το PROOSIS χρησιμοποιεί τη γλώσσα προγραμματισμού EL<sup>[2]</sup> (EcosimPro Language), μία συνεχής-διακριτή γλώσσα, η οποία δίνει τη δυνατότητα της μαθηματικής μοντελοποίησης πολύπλοκων στοιχείων, τα οποία διέπονται από αλγεβρικές-διαφορικές εξισώσεις (DAE) και συνήθεις διαφορικές εξισώσεις (ODE).

Αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1970, από την πολύχρονη εμπειρία ενός μεγάλου αριθμού μηχανικών, οι οποίοι εργάζονταν στον τομέα της συνεχούς προσομοίωσης των βιομηχανικών διεργασιών και αεροδιαστημικών εφαρμογών. Σήμερα, χρησιμοποιείται επιτυχώς στη βιομηχανία και σε αεροδιαστημικές εφαρμογές για την προσομοίωση πολύπλοκων εφαρμογών. Μερικά αξιοσημείωτα παραδείγματα είναι αυτά των συστημάτων περιβαλλοντικού ελέγχου και συστήματα υποστήριξης της ζωής (ECLSS), πυραυλικών συστημάτων πρόωσης, αεροναυτικών αεριοστρόβιλων, σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η γλώσσα προγραμματισμού EL είναι κατάλληλη για τη μοντελοποίηση μεμονωμένων στοιχείων σε πολλούς διαφορετικούς κλάδους, όπως τα υγρά, τον έλεγχο, την προώθηση, ηλεκτρικά κυκλώματα, χημικές αντιδράσεις, τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ επιτρέπει τη σύνδεση των στοιχείων αυτών προς δημιουργία πιο σύνθετων που φέρουν πολύπλοκη συμπεριφορά.

Είναι γλώσσα αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού (object-oriented) και ως εκ τούτου έχει σημαντικά πλεονεκτήματα. Παρέχει κληρονομικότητα (inheritance), δηλαδή τη δυνατότητα δημιουργίας νέων συνιστωσών που να βασίζονται σε υπάρχουσες. Επιπλέον χαρακτηριστικό της είναι ο πολυμορφισμός (polymorphism), για χρήση εναλλακτικών μεθόδων και ιδιοτήτων με το ίδιο όνομα σε διαφορετικές συνιστώσες και τέλος η ενθυλάκωση (encapsulation) για κρυφή εκτέλεση των

παραπάνω. Το τελικό στάδιο του μοντέλου προσομοίωσης διατίθεται μεταφρασμένο στη γλώσσα προγραμματισμού C++ για τη χρήση και σε άλλα λογισμικά.

Ο μεταγλωττιστής (compiler) του προγράμματος ελέγχει την ορθότητα του κώδικα και αν συμβαδίζει με τους κανόνες της γλώσσας προγραμματισμού όπως για παράδειγμα ελέγχει για συντακτικά σφάλματα. Όταν εντοπιστεί σφάλμα, το πρόβλημα αναφέρεται μέσω της γραμμής μηνυμάτων στο χρήστη συνοδευόμενο από άλλες χρήσιμες πληροφορίες όπως τη γραμμή που εντοπίστηκε και επεξήγηση της αιτίας αυτού.

### 2.2.2 Θύρες (Ports)

Τα Ports είναι οι θύρες διασύνδεσης των διάφορων συνιστωσών ενός αεριοστροβίλου δηλαδή των Components. Οι θύρες είναι υπεύθυνες για την επικοινωνία των συνιστωσών με το περιβάλλον τους, καθώς και να τηρούν τους περιορισμούς και τις εξισώσεις που διέπουν μία σύνδεση. Μεταδίδουν τη πληροφορία ενός μεγέθους, η οποία μπορεί να είναι κάποιο θερμοδυναμικό μέγεθος του εργαζόμενου μέσου (παροχή μάζας, ολική θερμοκρασία και πίεση), ένα μηχανικό χαρακτηριστικό όπως η ταχύτητα περιστροφής, η ροπή αδρανείας, η τιμή ενός μεγέθους.

Μία θύρα πρέπει να είναι κατάλληλα ορισμένη ώστε να μπορεί να συνδέσει τη συνιστώσα, με μία που προηγείται ή έπεται αυτής σε μία συγκεκριμένη διάταξη συστήματος ή μηχανής. Συνεπώς οι θύρες ορίζονται ως θύρες εισόδου (IN), εξόδου (OUT) και εισόδου εξόδου (IN and OUT). Ο δυναμικός αυτός χαρακτηρισμός χρησιμεύει ως αναφορά για το πρόσημο των μεταβλητών της ροής, έτσι ώστε μία θύρα εισόδου να δηλώνει ροή εργαζόμενου μέσου και πληροφορία που εισέρχεται σε ένα Component και θύρα εξόδου ροή και πληροφορία που εξέρχεται. Επιπλέον, αποτελεί κριτήριο για την σωστή εφαρμογή των εξισώσεων σύνδεσης, καθώς με τη σύνδεση γίνεται έλεγχος για παραβιάσεις των περιορισμών σύνδεσης όπως αυτό ορίζεται από τη θύρα.

Μία δεύτερη κατηγοριοποίηση των Θυρών γίνεται με βάση τον αριθμό των συνδέσεων που μπορεί να έχει μία Θύρα. Συνεπώς μία Θύρα μπορεί να έχει πολλαπλές συνδέσεις εισόδου εξόδου (Multiple IN OUT), μονή σύνδεση εισόδου εξόδου (Single IN OUT), μονή σύνδεση εισόδου (Single IN), μονή σύνδεση εξόδου (Single OUT).

Διαφορετικοί τύποι Θυρών ορίζονται για τις διάφορες συνδέσεις, όπως Fluid Ports, Thermal Ports, Shafts Ports, Electrical Ports, Info Ports. Ενδεικτικά αναφέρονται δύο εξ αυτών, οι Fluid Ports (Single IN, Single OUT) οι οποίες μεταφέρουν πληροφορία για τις μεταβλητές απόλυτη γωνία εισόδου της ροής, ολική πίεση και θερμοκρασία, παροχή μάζας και υγρασία, λόγω άκαυστου καυσίμου αέρα και λόγω καιόμενου καυσίμου αέρα, και οι Mechanical (Mech) Ports, οι οποίες μεταφέρουν πληροφορία από το Component του άξονα σε άλλα Components, για την ταχύτητα περιστροφής, την ροπή την αδράνεια και την ολική αδράνεια. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι τα

μεγέθη που έρχονται από τις Ports δεν δηλώνονται στα μπλοκ των Data και Declarations. Είναι συνήθως γνωστά και δηλώνονται ως οριακές συνθήκες σε επίπεδο Partition ώστε να υπάρχει η δυνατότητα τροποποίησης της τιμής τους σε επίπεδο Experiment. Με αυτό τον τρόπο η ανάλυση λειτουργίας μίας συνιστώσας ή μηχανής είναι πιο εύκολη χωρίς να απαιτείται τροποποίηση των τιμών των μεγεθών στα Data μέσα στο πρόγραμμα. Στο Σχήμα 2.1<sup>[1]</sup> φαίνονται όλοι οι τύποι Θυρών (Ports):

No	Port Type	Symbol	Allowed Connections	Description
1	Fluid	◆	Single	Main flow variables (e.g. flow rate, pressure, temperature)
2	FluidInfo	◆	Single	Fluid information variables (e.g. flow rate, pressure, temperature)
3	Fuel	◆	Single	Fuel variables (e.g. fuel flow rate)
4	Heat	◆	Single	Heat flow variables
5	Info	◆	Single	Information variables
6	Liquid	◆	Single	Cooling media variables (e.g. liquid type, flow rate, temperature)
7	Mech	◆	Single In	Mechanical variables (e.g. rotational speed, torque)
8	Sas	◆	Single	Secondary air system variables (e.g. flow rate, pressure, temperature)
9	Sensor	◆	Single	Sensor variables
10	Thrust	◆	Single Out	Thrust variables
11	TwoPh1F	◆	Single	Two phase of single fluid flow variables
12	TwoPh2F	◆	Single	Two phase of two fluids flow variables

Σχήμα 2.1: Τύποι Θυρών (Ports) και είδος μεταβλητών που μεταφέρουν μεταξύ συνιστωσών

### Functions

Οι Functions στο πρόγραμμα PROOSIS είναι αρχεία κώδικα που εκτελούν διάφορες λειτουργίες και επιστρέφουν προαιρετικά μία ή περισσότερες τιμές. Μπορεί να είναι αυτόνομα αρχεία κώδικα ή να δηλώνονται στο αρχείο κώδικα ενός Component ή ενός Experiment. Μία Function καλείται από το πρόγραμμα του Component ή του Experiment ώστε να επιστραφεί με τιμή ένα μέγεθος ή να εκτελέσει υπολογισμούς που απαντώνται συχνά.

Η δομή της Function θυμίζει αυτή του Experiment καθώς περιέχει τα μπλοκ Declaration, Objects, Initialization και Body. Η διαφορά εντοπίζεται στο ότι πρέπει να δηλωθεί από την αρχή της δημιουργίας της ο τύπος της και να δοθούν αναλόγως τα ορίσματα εισόδου και εξόδου.

Οι Function χωρίζονται σε κατηγορίες αναλόγως τις λειτουργίες που εκτελούν. Έτσι στο PROOSIS υπάρχουν οι Thermal Functions, οι Fluid Functions κ.α., που απαιτούν ίδια ή διαφορετικά ορίσματα εισόδου, λύνουν διαφορετικό μαθηματικό μοντέλο και επιστρέφουν διαφορετικά μεγέθη. Για παράδειγμα οι Thermal Functions, έχουν ως ορίσματα εισόδου τα ολικά μεγέθη θερμοκρασίας και πίεσης στην είσοδο της συνιστώσας, εκτελούν υπολογισμούς και υπολογίζουν τα μεγέθη ταχύτητας, αριθμού Mach και τα στατικά μεγέθη πίεσης και θερμοκρασίας στην έξοδο της συνιστώσας.

### **2.2.3 Πολυώνυμα και Inverse Statements**

Στο πρόγραμμα PROOSIS διάφορα θερμοδυναμικά μεγέθη όπως για παράδειγμα αυτά της θερμοκρασίας, ενθαλπίας και εντροπίας συνδέονται μεταξύ τους με πολυώνυμα ώστε να γίνεται ο υπολογισμός τους ευκολότερος, εναλλακτικά των ολοκληρωμάτων με τα οποία συνδέονται και υπολογίζονται.

Για την περιγραφή των inverse statements θα χρησιμοποιηθούν ως παράδειγμα τα μεγέθη θερμοκρασίας, ενθαλπίας και συνάρτηση εντροπίας. Για δεδομένη θερμοκρασία υπολογίζεται η ενθαλπία και η συνάρτηση εντροπίας. Αυτός είναι ο ευθύς τρόπος υπολογισμού και χρησιμοποιούνται στο PROOSIS τα αντίστοιχα πολυώνυμα. Εάν είναι άγνωστη η θερμοκρασία και είναι δεδομένη η ενθαλπία ή η συνάρτηση εντροπίας τότε μέσω των πολυωνύμων μπορεί να πραγματοποιηθεί ο αντίστροφος υπολογισμός και να προσδιοριστεί η άγνωστη θερμοκρασία. Για το σκοπό αυτό, η αντίστροφη διαδικασία υπολογισμού, δηλώνεται με Inverse Statement.

### **2.2.4 Οι Βιβλιοθήκες (Libraries) στο PROOSIS**

Όλα τα παραπάνω βρίσκονται καταχωρημένα σε βιβλιοθήκες (Libraries). Κάθε βιβλιοθήκη ανάλογα με το είδος και τη διεργασία που μοντελοποιεί εμπεριέχει ως αρχεία κώδικα (Files) διαφορετικά Components, Functions, Ports, Schematics. Επιπροσθέτως, εμπεριέχονται Symbols, Partitions και Experiments για τα αντίστοιχα Components. Με τη δημιουργία μίας νέας βιβλιοθήκης με την επιθυμητή ονομασία, δημιουργείται ένα φάκελος, ο οποίος εμπεριέχει όλα τα παραπάνω αρχεία σε επεξεργάσιμη μορφή, συν τους πιθανούς χάρτες και πίνακες που χρησιμοποιούνται στη μοντελοποίηση μίας συνιστώσας. Τα Components, οι Functions και τα Ports για αεριοστροβίλους στο PROOSIS βρίσκονται αποθηκευμένα στη βιβλιοθήκη TURBO, στοιχεία της οποίας χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία.



# 3

## Μοντελοποίηση Βαθμίδας Αξονικού Συμπιεστή

Για την επίτευξη του στόχου μοντελοποίησης αξονικού συμπιεστή, πραγματοποιήθηκε μοντελοποίηση σε επίπεδο βαθμίδας αυτού, με τη μέθοδο συσσώρευσης βαθμίδων. Η λεπτομερής περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθήθηκε στο παρόν κεφάλαιο, αποσκοπεί στην δυνατότητα αναπαραγωγής της από μελλοντικούς μελετητές.

### 3.1 Μοντελοποίηση με τη Μέθοδο Συσσώρευσης Βαθμίδων στο PROOSIS

Όπως παρουσιάστηκε στο δεύτερο κεφάλαιο, η μοντελοποίηση και προσομοίωση μίας συνιστώσας στο περιβάλλον του προγράμματος PROOSIS πραγματοποιείται σε τρία επίπεδα, τη δημιουργία του μαθηματικού μοντέλου, την επιλογή οριακών συνθηκών προς λύση αυτού και τέλος τη προσομοίωση.

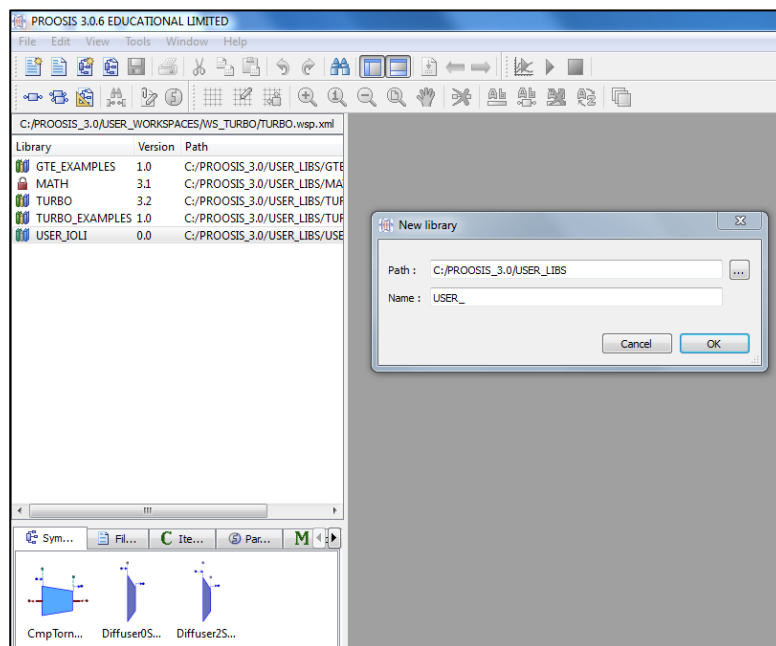
#### 3.1.1 Μοντελοποίηση Βαθμίδας - Δημιουργία Component

Για την εφαρμογή της μεθόδου συσσώρευσης βαθμίδων σε βαθμίδα αξονικού συμπιεστή, απαιτείται να θεωρηθούν τα εξής:

- Η λειτουργία της βαθμίδας περιγράφεται από τις χαρακτηριστικές καμπύλες που συνδέουν τα μεγέθη, παράμετρο φόρτισης και ισεντροπικό βαθμό απόδοσης με την παράμετρο παροχής, δηλαδή τις καμπύλες  $\Phi$ - $\Psi$  και  $\Phi$ - $\eta$ .
- Κατά την εφαρμογή της μεθόδου η ανάλυση της ροής γίνεται στη μέση ακτίνα  $R_m$  της βαθμίδας, καθώς θεωρείται ροή κατά μήκος του συμπιεστή μονοδιάστατη, ακτινικά και περιφερειακά ομοιόμορφη.
- Το εργαζόμενο μέσο είναι τέλειο αέριο και συνεπώς υπακούει στην καταστατική εξίσωση των τελείων αερίων.

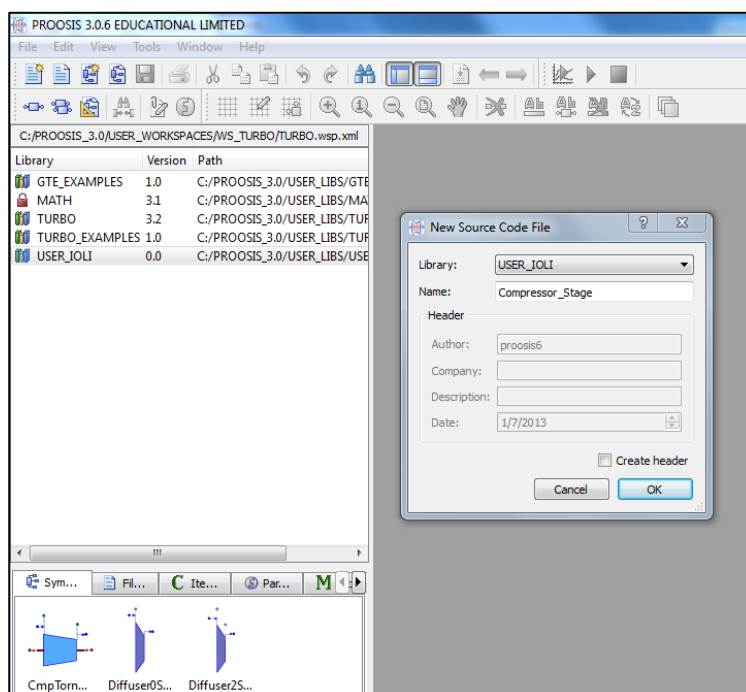
Η πορεία που ακολουθήθηκε για τη μοντελοποίηση βαθμίδας αξονικού συμπιεστή με τη μέθοδο συσσώρευσης των βαθμίδων είναι η εξής:

Στο περιβάλλον του προγράμματος PROOSIS, δημιουργήθηκε μία νέα βιβλιοθήκη (Library) με την επιθυμητή ονομασία, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1.



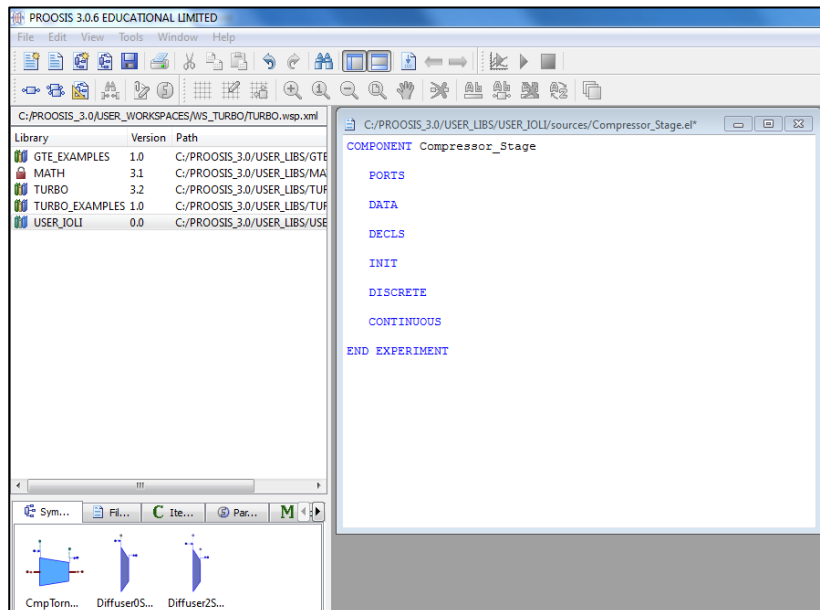
**Σχήμα 3.1: Δημιουργία νέας Βιβλιοθήκης στο υπολογιστικό πρόγραμμα PROOSIS**

Μέσα στη νέα βιβλιοθήκη, δημιουργήθηκε ένα νέο αρχείο κώδικα (Source File), όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2.



**Σχήμα 3.2: Δημιουργία νέου αρχείου κώδικα για τη περιγραφή του μαθηματικού μοντέλου της βαθμίδας (Component) στο υπολογιστικό πρόγραμμα PROOSIS**

Στο νέο αρχείο κώδικα περιγράφηκε το μαθηματικό μοντέλο της συνιστώσας βαθμίδας. Η δομή στο αρχείο κώδικα για τη νέα συνιστώσα (Component), παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3: Δομή αρχείο κώδικα της βαθμίδας στο υπολογιστικό πρόγραμμα PROOSIS

Για τη περιγραφή του μαθηματικού μοντέλου μέσα στο νέο αρχείο κώδικα πραγματοποιήθηκαν μία σειρά από ενέργειες:

- Δηλώθηκαν οι Θύρες (Ports), οι οποίες παρέχουν τη δυνατότητα σύνδεσης της βαθμίδας με άλλες συνιστώσες.
- Δηλώθηκαν τα γνωστά μεγέθη με τις τιμές τους στο μπλοκ των Data του αρχείου κώδικα.
- Προστέθηκαν οι εξισώσεις στο Continuous μπλοκ του αρχείου κώδικα, με τις οποίες υπολογίζονται οι συνθήκες στην έξοδο της βαθμίδας από αυτές της εισόδου με τη μέθοδο συσσώρευσης βαθμίδων.
- Όλες οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν στο αρχείο κώδικα, εκτός αυτών που μεταφέρονται από τις Θύρες και αυτών που είναι Data μεταβλητές, δηλώθηκαν στο μπλοκ Declarations στο αρχείο κώδικα.

Ειδικότερα, οι Θύρες (Ports) που δηλώθηκαν για τη σύνδεση της νέας συνιστώσας (νέο Component) με άλλες συνιστώσες είναι:

- Fluid Port εισόδου (IN) και εξόδου (OUT) για το καθορισμό των μεγεθών της ροής στην είσοδο και την έξοδο της βαθμίδας. Τα μεγέθη της ροής που μεταφέρονται είναι: απόλυτη γωνία ( $\alpha$ ), η παροχής μάζας ( $W$ ), οι ολικές

συνθήκες πίεσης (Pt) και θερμοκρασίας (Tt), η υγρασία (WAR), ο λόγος καιόμενου καυσίμου αέρα (FARB), ο λόγος άκαυστου καυσίμου αέρα (FARU), στην είσοδο και στην έξοδο της βαθμίδας, όπως παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

Fluid In Port	Fluid Out Port	Description
F_in.Ang	F_out.Ang	Flow Angle
F_in.Pt	F_out.Pt	Flow Total Pressure
F_in.Tt	F_out.Tt	Flow Total Temperature
F_in.WAR	F_out.WAR	Flow Water to Air ratio
F_in.FARB	F_out.FARB	Burnt Fuel Air ratio
F_in.FARU	F_out.FARU	Unburnt Fuel Air ratio
F_in.W	F_out.W	Mass flow rate

**Πίνακας 3.1: Fluid Port Μεταβλητές**

- Mechanical Port εισόδου (IN) και εξόδου (OUT) για τη μηχανική σύνδεση με την άτρακτο. Τα μεγέθη που μεταφέρονται είναι: η ταχύτητα περιστροφής (N), η ροπή (trq), η αδράνεια (inertia) και η ολική αδράνεια (inertia\_tot), όπως παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

Mech In Port	Mech Out Port	Description
Me_in.Nmech	Me_out.Nmech	Rotational Speed
Me_in.trq	Me_out.trq	Torque
Me_in.inertia	Me_out.inertia	Inertia
Me_in.inertia_tot	Me_out.inertia_tot	Overall inertia

**Πίνακας 3.2: Mechanical Port Μεταβλητές**

- FluidInfo Ports εξόδου (OUT) ώστε να μεταφέρεται η πληροφορία για τα μεγέθη της ροής από την είσοδο και έξοδο της συνιστώσας, για υπολογισμό συνολικών επιδόσεων της μηχανής. Τα μεγέθη που μεταφέρονται ως απλή πληροφορία από αυτές τις Θύρες είναι τα μεγέθη που μεταφέρονται από τις Fluid Port για την είσοδο και την έξοδο, όπως παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

FluidInfo OUT Port	FluidInfo Out Port
fInfo_in.Pt = F_in.Pt	fInfo_out.Pt = F_out.Pt
fInfo_in.Tt = F_in.Tt	fInfo_out.Tt = F_out.Tt
fInfo_in.WAR = F_in.WAR	fInfo_out.WAR = F_out.WAR
fInfo_in.FARB = F_in.FARB	fInfo_out.FARB = F_out.FARB
fInfo_in.FARU = F_in.FARU	fInfo_out.FARU = F_out.FARU

**Πίνακας 3.3: Fluid Info Port Μεταβλητές**

- Info Port εισόδου (IN), το οποίο αποτελείται από μία μεταβλητή ικανή να μεταφέρει πληροφορία για ένα δεδομένο μέγεθος. Στην περίπτωση ύπαρξης οδηγού περυγίου στην είσοδο της βαθμίδας ή περυγώσης μεταβλητής γεωμετρίας, το δεδομένο μέγεθος είναι η μεταβολή της γωνίας της ροής και η μεταβλητή που το μεταφέρει παρουσιάζεται στον επόμενο πίνακα.

<b>Info In Port</b>
IGV_in.ang

**Πίνακας 3.4: Info Port Μεταβλητή για τη μεταφορά του μεγέθους της μεταβολής της γωνίας εισόδου της ροής στη βαθμίδα λόγω οδηγών περυγίων**

Τα μεγέθη της ροής που καθορίζονται από τις Fluid και Mechanical Port στην είσοδο της βαθμίδας, υπήρξαν στη παρούσα μελέτη δεδομένα και επιλέχθηκαν ως οριακές συνθήκες για την δυνατότητα επίλυσης του μαθηματικού προβλήματος. Η επιλογή τους ως οριακές συνθήκες πραγματοποιήθηκε στο δεύτερο επίπεδο της μοντελοποίησης κατά τη δημιουργία Partition. Με αυτό τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα τροποποίησης των τιμών τους σε επίπεδο Experiment και επομένως η μελέτη της επίδρασης τους στη λειτουργία της βαθμίδας. Η δήλωση των Ports στο Component παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4.

```

COMPONENT cmpStage IS_A setFluidModel

PORTS
IN      Fluid F_in           "Inlet Main Flow Port at the Stage Inlet"
OUT     Fluid F_out          "Outlet Main Flow Port at the Stage Outlet"
IN      Mech Me_in           "Inlet Mechanical Port at the Stage Outlet"
OUT     Mech Me_out          "Outlet Mechanical Port at the Stage Inlet"
OUT     FluidInfo fInfo_in   "Outlet FluidInfo Port at the Stage Inlet"
OUT     FluidInfo fInfo_out  "Outlet FluidInfo Port at the Stage Inlet"
IN      Info IGVin           "Inlet Information Port at the Stage Inlet"
    
```

**Σχήμα 3.4: Δήλωση Θυρών (Ports) στη βαθμίδα**

Στη συνέχεια δηλώθηκαν τα γνωστά μεγέθη συνοδευόμενα από τις τιμές τους, στο μπλοκ Data του αρχείου κώδικα. Τα μεγέθη αυτά (Data μεταβλητές) παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

<b>Data</b>	<b>Description</b>
$\Phi/\Phi_{ref}-\Psi/\Psi_{ref}$ $\Phi/\Phi_{ref}-\eta/\eta_{ref}$	Γενικευμένες Αδιάστατες Χαρακτηριστικές καμπύλες Λειτουργίας της Βαθμίδας
Rh	Ακτίνα ποδός της περυγώσης του Ρότορα
Rt	Ακτίνα κεφαλής της περυγώσης του Ρότορα

SF	Συντελεστής μεταβολής της μορφής των χαρακτηριστικών καμπυλών
$\Phi_{ref}, \Psi_{ref}, \eta_{ref}$	Επιδόσεις Βαθμίδας στο σημείο σχεδίασης
$f_{\Phi}, f_{\Psi}, f_{\eta}$	Συντελεστές μεταβολής των $\Phi_{ref}, \Psi_{ref}, \eta_{ref}$ λόγω βλάβης συμπίεστή

**Πίνακας 3.5: Δεδομένα μεγέθη (Data Μεταβλητές)**

Στο Continuous μπλοκ γράφηκαν οι εξισώσεις που διέπουν το μαθηματικό μοντέλο της συνιστώσας. Ειδικότερα, η επίλυση ξεκινά από την είσοδο της βαθμίδας (θέση 1), όπου είναι δεδομένη η γεωμετρία της περύγωσης του ρότορα, δηλαδή οι ακτίνες ποδός  $R_h$  και κεφαλής  $R_t$ , και υπολογίζεται η μέση ακτίνα  $R_m$  και η διατομή εισόδου  $A$ :

$$R_m = (R_t + R_h) / 2 \quad (3.1)$$

$$A = \pi \cdot (R_t^2 - R_h^2) \quad (3.2)$$

Με γνωστή την ταχύτητα περιστροφής  $N$  υπολογίζεται η ταχύτητα της κινητής περύγωσης:

$$U_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_m \cdot N}{60} \quad (3.3)$$

Στη δεδομένη θερμοκρασία εισόδου  $T_{t1}$  υπολογίζεται η ενθαλπία  $h_{t1}$  και η συνάρτηση εντροπία  $\phi_{t1}$ , οι οποίες δίνονται από τις εξισώσεις αντίστοιχα:

$$h(T) = \int C_p(T) \cdot dT \quad (3.4)$$

$$\phi(T) = \int \frac{C_p(T) \cdot dT}{T} \quad (3.5)$$

Στο πρόγραμμα PROOSIS για τον υπολογισμό των μεγεθών θερμοκρασίας, ενθαλπίας και συνάρτηση εντροπίας, χρησιμοποιήθηκαν πολυώνυμα που συνδέουν τα μεγέθη αυτά. Ο ευθύς τρόπος είναι ο υπολογισμός της ενθαλπίας και συνάρτησης εντροπίας για δεδομένη τιμή θερμοκρασία μέσω των πολυωνύμων αυτών. Το αντίστροφο, δηλαδή υπολογισμός θερμοκρασίας από δεδομένη ενθαλπία ή συνάρτηση εντροπίας, είναι εφικτό λόγω της ύπαρξης των πολυωνύμων, και δηλώνεται στο αρχείο κώδικα με INVERSE Statement.

Για τον υπολογισμό του αριθμού Mach, της ταχύτητας και των στατικών μεγεθών στην είσοδο της βαθμίδας απαιτείται επαναληπτική διαδικασία. Για την υλοποίηση αυτής χρησιμοποιήθηκε μία Function, η οποία με δεδομένη την παροχή μάζας, την ολική πίεση και θερμοκρασία, το λόγο καιόμενου καυσίμου αέρα, την υγρασία και το εμβαδόν στην είσοδο της βαθμίδας, υπολογίζει την ταχύτητα, τον αριθμό Mach και τα στατικά μεγέθη πίεσης και θερμοκρασίας στην είσοδο της βαθμίδας. Η επαναληπτική διαδικασία που εκτελείται μέσα στη Function ξεκινά με μία αρχική τιμή για τη στατική θερμοκρασία στην είσοδο της βαθμίδας  $T_1$ , η οποία θα πρέπει να είναι μικρότερη της τιμής της ολικής θερμοκρασίας στην είσοδο της βαθμίδας  $T_{t1}$ . Στη συνέχεια υπολογίζεται η ενθαλπία  $h_1$  και η συνάρτηση εντροπίας  $\phi_1$ . Συνεπώς υπολογίζεται η στατική πίεση στην είσοδο της βαθμίδας  $P_1$  και η πυκνότητα  $\rho_1$  από τις εξισώσεις:

$$P = P_t \cdot \exp\left(\frac{\phi(T) - \phi(T_t)}{R}\right) \quad (3.6)$$

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (3.7)$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται η ταχύτητα  $V_1$  και η παροχή μάζας:

$$V = \sqrt{2 \cdot (h_t - h)} \quad (3.8)$$

$$m = \rho \cdot A \cdot V \cdot \cos a \quad (3.9)$$

Στο σημείο αυτό εάν η τιμή της παροχής μάζας διαφέρει από τη δεδομένη παροχή, επαναλαμβάνεται η παραπάνω διαδικασία για νέα τιμή της στατικής θερμοκρασίας εισόδου  $T_1$ . Η διαδικασία τερματίζεται όταν υπάρχει σύγκλιση. Εφόσον προσδιοριστεί η τελική τιμή της στατικής θερμοκρασίας  $T_1$  στην είσοδο της βαθμίδας, και επομένως η τιμή της στατικής πίεσης  $P_1$  και της ταχύτητας  $V_1$ , υπολογίζεται ο αριθμός Mach στην είσοδο της βαθμίδας ( $M_1$ ) από την εξίσωση:

$$M = \frac{V}{\sqrt{\gamma \cdot R \cdot T}} \quad (3.10)$$

Σε αυτό το σημείο είναι η πρώτη φορά που υπεισέρχεται η παροχή μάζας στους υπολογισμούς. Προτού πραγματοποιηθεί η εκτέλεση της Function, ελέγχεται η παροχή μάζας, υπό τις δεδομένες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, ώστε να πληρείται η συνθήκη της υποηχητικής ροής. Ο έλεγχος πραγματοποιείται όταν η επίλυση του προβλήματος φτάσει στο σημείο που καλείται η Function. Εφόσον δεν παρουσιαστεί

σφάλμα οι υπολογισμοί συνεχίζονται. Ο έλεγχος που πραγματοποιήθηκε, δηλώθηκε στο Discrete μπλοκ του αρχείου κώδικα της βαθμίδας, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.5.

```

DISCRETE
  WHEN (Ae <= Aecrit) THEN
    IF (stageStatus == OK) THEN
      stageStatus = MACH
    END IF
  END WHEN
  ASSERT(Ae > Aecrit) WARNING "\n\t*** stageStatus = MACH ***"

  WHEN (Phi >= Phic) THEN
    IF (stageStatus == OK) THEN
      stageStatus = CHOKe
    END IF
  END WHEN
  ASSERT (Phi < Phic) WARNING "\n\t*** stageStatus = CHOKe ***"

  WHEN (Phi <= Phis) AND (switchStallstatus == NO) THEN
    IF (stageStatus == OK) THEN
      stageStatus = STALL
    END IF
  END WHEN
  ASSERT (Phi > Phis) WARNING "\n\t*** stageStatus = STALL ***"

```

**Σχήμα 3.5: Έλεγχος ευσταθούς λειτουργίας στο Discrete μπλοκ του αρχείου κώδικα της συνιστώσας (Component) της Βαθμίδας**

Σε αυτό το σημείο έχει καθοριστεί πλήρως η ροή στην είσοδο της βαθμίδας. Στη συνέχεια υπολογίζεται η αξονική συνιστώσα της απόλυτης ταχύτητας  $V_{a1}$  και η αδιάστατη παράμετρος παροχής  $\Phi_1$ :

$$V_{a1} = V_1 \cdot \cos a_1 \quad (3.11)$$

$$\Phi_1 = \frac{V_{a1}}{U_1} \quad (3.12)$$

Σε αυτό το σημείο είναι απαραίτητο να εξασφαλιστεί η δυνατή και ευσταθής λειτουργία της βαθμίδας.

Μη δυνατή λειτουργία εμφανίζεται για παροχές μάζας, ή αντίστοιχα για τιμές της παραμέτρου παροχής  $\Phi$ , αρκετά υψηλές για δεδομένη ταχύτητα περιστροφής. Πιο συγκεκριμένα, το όριο εκείνο πέραν του οποίου η παροχή μάζας δεν είναι αποδεκτή για δυνατή λειτουργία της βαθμίδας ονομάζεται σημείο choke. Επομένως το σημείο αυτό είναι εκείνο στο οποίο εμφανίζεται η μέγιστη δυνατή παροχή μάζας για δεδομένη ταχύτητα περιστροφής.

Η ασταθής λειτουργία μπορεί να οφείλεται σε φαινόμενα περιστροφικής αποκόλλησης ή πάλμωσης και εμφανίζεται για παροχές μάζας αρκετά μικρές για δεδομένη ταχύτητα περιστροφής. Το σημείο εκείνο στο οποίο εμφανίζεται η ελάχιστη



αποδεκτή παροχή μάζας, ή αντίστοιχα η παράμετρος παροχής  $\Phi$ , για δεδομένη ταχύτητα περιστροφής, ονομάζεται stall και πέραν αυτού η βαθμίδα έρχεται σε κατάσταση stall.

Στο αρχείο κώδικα της συνιστώσας της βαθμίδας και συγκεκριμένα στο μπλοκ Discrete, πραγματοποιήθηκε έλεγχος της τιμής της παραμέτρου  $\Phi$  (Σχήμα 3.5).

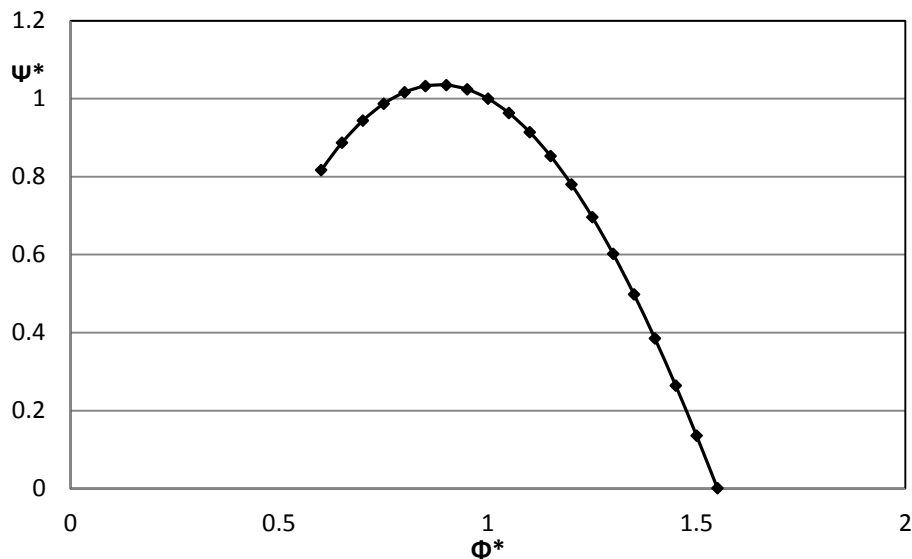
Για τιμή της παραμέτρου  $\Phi$  μεγαλύτερη ή ίση του μεγίστου  $\Phi_{\max}$ , οι υπολογισμοί τερματίζονται. Στο αρχείο κώδικα της συνιστώσας της βαθμίδας, ως  $\Phi_{\max}$  ορίστηκε το σημείο της χαρακτηριστικής καμπύλης με τη μέγιστη παράμετρο παροχής  $\Phi$ .

Για τιμή αυτής μικρότερη ή ίση του ελαχίστου  $\Phi_{\min}$ , εξετάζεται αν η λειτουργία της βαθμίδας σε κατάσταση stall είναι αποδεκτή. Εάν είναι αποδεκτή, η διαδικασία επίλυσης του προβλήματος συνεχίζεται, διαφορετικά οι υπολογισμοί τερματίζονται. Στο αρχείο κώδικα της συνιστώσας της βαθμίδας, ως  $\Phi_{\min}$  ορίστηκαν δύο σημεία: το σημείο της χαρακτηριστικής καμπύλης με τη ελάχιστη παράμετρο παροχής  $\Phi$  και το σημείο όπου εμφανίζεται το μέγιστο  $\Psi$  ( $\Psi_{\max}$ ). Για τον καθορισμό του τελευταίου δημιουργήθηκε μία Function που υπολογίζει εκείνο το  $\Phi$  για το οποίο το  $\Psi$  μεγιστοποιείται. Στο αρχείο κώδικα δηλώθηκε στο μπλοκ των Data μία λογική μεταβλητή η οποία καθορίζει το σημείο stall. Όταν η λογική μεταβλητή παίρνει την τιμή FirstPoint τότε ως σημείο stall ορίζεται το σημείο στη χαρακτηριστική καμπύλη με την ελάχιστη παροχή. Όταν η τιμή της είναι PsiMax ως σημείο stall ορίζεται εκείνο όπου η παράμετρος φόρτισης  $\Psi$  μεγιστοποιείται.

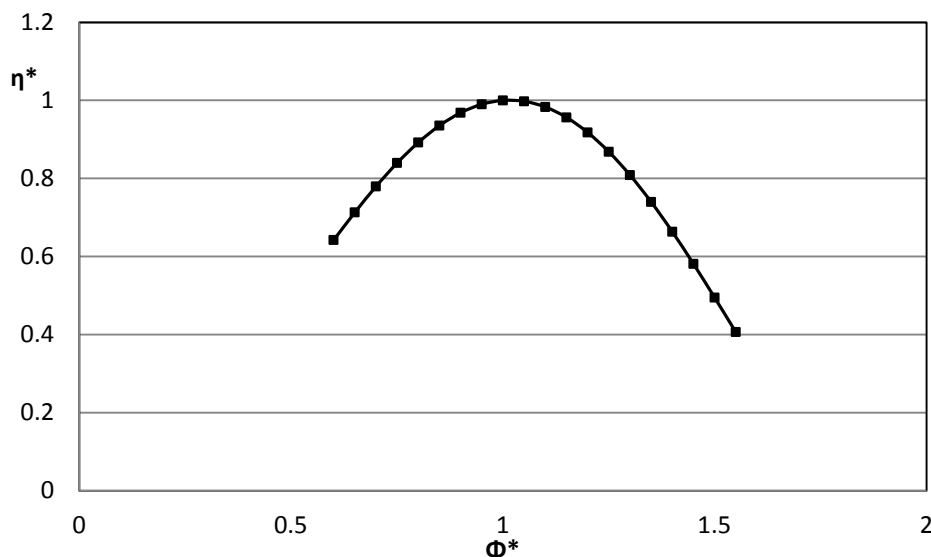
Αν και η λειτουργία της βαθμίδας σε κατάσταση stall είναι ανεπιθύμητη, αυτό μπορεί να συμβεί υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Για την προσομοίωση της κατάστασης αυτής, στο αρχείο κώδικα της βαθμίδας στο μπλοκ Data, ορίστηκε λογική μεταβλητή με τιμή μία από τις επιλογές {Stall, NoStall}. Με αυτό τον τρόπο σε μία μελέτη ενός συμπιεστή, ο οποίος θα έχει δημιουργηθεί από πολλές τέτοιες βαθμίδες στη σειρά, δίνεται η δυνατότητα επιλογής εάν και ποιές από τις βαθμίδες επιτρέπεται να λειτουργούν σε κατάσταση stall.

Για τιμή της παραμέτρου παροχής  $\Phi_1$  στην είσοδο της βαθμίδας μεταξύ των ορίων ευσταθούς λειτουργίας, είναι εφικτός ο υπολογισμός της παραμέτρου φόρτισης  $\Psi$  και του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης με μέθοδο παρεμβολής στις χαρακτηριστικές καμπύλες  $\Phi$ - $\Psi$  και  $\Phi$ - $\eta$  της βαθμίδας. Προηγήθηκε της μεθόδου παρεμβολής η τροποποίηση των δεδομένων γενικευμένων αδιάστατων χαρακτηριστικών καμπυλών ( $\Phi/\Phi_{\text{ref}}$ ,  $\Psi/\Psi_{\text{ref}}$ ) και ( $\Phi/\Phi_{\text{ref}}$ ,  $\eta/\eta_{\text{ref}}$ ) ώστε να προσδιοριστούν οι διαστατές καμπύλες  $\Phi$ - $\Psi$  και  $\Phi$ - $\eta$ . Οι δεδομένες γενικευμένες χαρακτηριστικές καμπύλες της βαθμίδας παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.6 και Σχήμα 3.7<sup>[16]</sup>.

Η τροποποίηση των γενικευμένων χαρακτηριστικών καμπυλών είναι απαραίτητη ώστε αφενός να προκύψουν οι διαστατές καμπύλες  $\Phi$ - $\Psi$  και  $\Phi$ - $\eta$  και αφετέρου το μοντέλο της βαθμίδας και μετέπειτα του συμπιεστή, να είναι πιο αξιόπιστο και να εξυπηρετεί τις ανάγκες της συγκεκριμένης μελέτης.



Σχήμα 3.6: Γενικευμένη Χαρακτηριστική καμπύλη της συνιστώσας της Βαθμίδας  $\Phi^*$  -  $\Psi^*$



Σχήμα 3.7: Γενικευμένη Χαρακτηριστική καμπύλη της συνιστώσας της Βαθμίδας  $\Phi^*$  -  $\eta^*$

Η τροποποίηση αφορά τους εξής παράγοντες:

- Εισαγωγή του συντελεστή Shape Factor (SF)<sup>[4],[8]</sup>, για μεταβολή της μορφής της καμπύλης.
- Τροποποίηση της καμπύλης λόγω οδηγών περυγίων και περυγώσεων μεταβλητής γεωμετρίας<sup>[16]</sup>.
- Εισαγωγή συντελεστών (f)<sup>[5],[6]</sup>, για μεταβολή της μορφής των χαρακτηριστικών καμπυλών λόγω ύπαρξης βλάβης σε επίπεδο βαθμίδας.
- Διαστατοποίηση των καμπυλών με τις επιδόσεις αναφοράς της βαθμίδας  $\Phi_{ref}$ ,  $\Psi_{ref}$  και  $\eta_{ref}$ <sup>[16]</sup>.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε και περιγράφηκε στο αρχείο κώδικα της συνιστώσας της βαθμίδας για την τροποποίηση των γενικευμένων χαρακτηριστικών καμπυλών είναι η ακόλουθη:

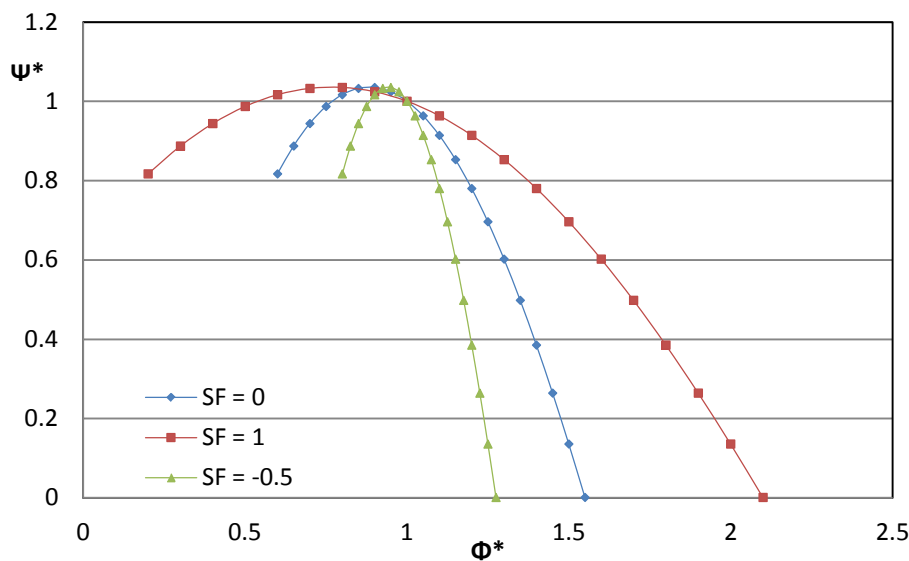
Εισήχθηκε ο συντελεστής Shape Factor (SF), για τη μεταβολή της μορφής των χαρακτηριστικών καμπυλών λειτουργίας. Αυτό επιτρέπει την προσομοίωση διαφορετικών τύπων βαθμίδας πολυβάθμιου συμπιεστή, συμπεριλαμβανομένων των υψηλών υποηχητικών και διηχητικών. Εάν συμβολιστεί με  $\Phi^*$  ο λόγος  $\Phi/\Phi_{ref}$ ,  $\Psi^*$  ο λόγος  $\Psi/\Psi_{ref}$  και  $\eta^*$  ο λόγος  $\eta/\eta_{ref}$ , τότε η εισαγωγή του SF, τροποποιεί τις καμπύλες σύμφωνα με τις εξισώσεις:

$$\Phi_{SF}^* = \Phi^* + (\Phi^* - 1) \cdot SF \quad (3.13)$$

$$\Psi_{SF}^* = \Psi^* \quad (3.14)$$

$$\eta_{SF}^* = \eta^* \quad (3.15)$$

Όπως φαίνεται από τις παραπάνω σχέσεις, ο συντελεστής SF επηρεάζει μόνο την παράμετρο φόρτισης  $\Phi$ . Στο Σχήμα 3.8 παρουσιάζεται η μεταβολή της μορφής στη γενικευμένη χαρακτηριστική καμπύλη  $\Psi^* = F_{\Psi}(\Phi^*, SF)$ .



**Σχήμα 3.8: Επίδραση SF στη μορφή της γενικευμένης χαρακτηριστικής καμπύλης της βαθμίδας**

Στη συνέχεια, για την περίπτωση που η βαθμίδα φέρει οδηγία περυσία εισόδου (IGVs) και σταθερές περυσίες μεταβλητής γεωμετρίας (VGVs), οι καμπύλες τροποποιήθηκαν περαιτέρω. Σκοπός των IGVs και VGVs είναι η αποφυγή φαινομένων ασταθούς λειτουργίας σε ταχύτητες περιστροφής μικρότερες της ονομαστικής και ο μηχανισμός λειτουργίας αυτών βασίζεται στο ότι ο στάτορας της προηγούμενης

βαθμίδα αλλάζει τη γωνία εισόδου της ροής στην επόμενη βαθμίδα. Ρυθμίζοντας τη γωνία των πτερυγώσεων αυτών αποφεύγεται η ασταθής λειτουργία βαθμίδων που ακολουθούν. Από την απόλυτη γωνία εισόδου της ροής  $a_1$  και τη γωνία που τελικά εισέρχεται η ροή λόγω της πτερύγωσης μεταβλητής γεωμετρίας  $a'_1$  προκύπτει το μέγεθος  $dr$  με το οποίο τροποποιούνται οι καμπύλες ως εξής:

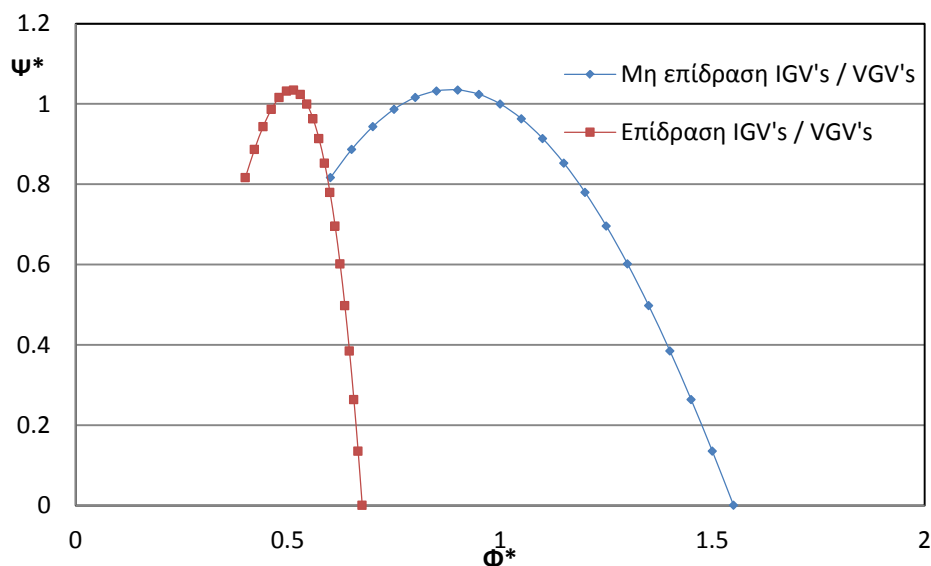
$$dr = \tan a'_1 - \tan a_1 \quad (3.16)$$

$$\Phi^* = \frac{\Phi_{SF}^*}{1 + \Phi_{SF}^* \cdot dr} \quad (3.17)$$

$$\Psi^* = \frac{\Psi_{SF}^*}{\Phi_{SF}^*} \cdot \Phi^* \quad (3.18)$$

$$\eta^* = \eta_{SF}^* \quad (3.19)$$

Στο Σχήμα 3.9 παρουσιάζεται η μεταβολή στην γενικευμένη χαρακτηριστική καμπύλη για μεταβολή γωνία από 19 σε 49.8 μοίρες.



**Σχήμα 3.9: Μεταβολή γενικευμένης χαρακτηριστικής καμπύλης της βαθμίδας λόγω οδηγών πτερυγίων και πτερυγώσεων μεταβλητής γεωμετρίας**

Τέλος για τη δυνατότητα διάγνωσης βλαβών σε επίπεδο βαθμίδας και συμπίεστή, εισήχθησαν στο αρχείο κώδικα της συνιστώσας της βαθμίδας τρεις συντελεστές που τροποποιούν καταλλήλως τις επιδόσεις  $\Phi_{ref}$ ,  $\Psi_{ref}$  και  $\eta_{ref}$ , οι οποίες χαρακτηρίζουν την

υγιή κατάσταση στο σημείο σχεδίασης ( $\Phi_{ref,healthy}$ ,  $\Psi_{ref,healthy}$ , και  $\eta_{ref,healthy}$ ), και συνεπώς τις χαρακτηριστικές καμπύλες. Οι συντελεστές ορίζονται και τροποποιούν τις καμπύλες όπως φαίνεται στις επόμενες εξισώσεις:

$$f_{\Phi} = \frac{\Phi_{ref, faulty}}{\Phi_{ref, healthy}} \quad (3.20)$$

$$f_{\Psi} = \frac{\Psi_{ref, faulty}}{\Psi_{ref, healthy}} \quad (3.21)$$

$$f_{\eta} = \frac{\eta_{ref, faulty}}{\eta_{ref, healthy}} \quad (3.22)$$

$$\Phi = \Phi^{*} \cdot f_{\Phi} \cdot \Phi_{ref} \quad (3.23)$$

$$\Psi = \Psi^{*} \cdot f_{\Psi} \cdot \Psi_{ref} \quad (3.24)$$

$$\eta = \eta^{*} \cdot f_{\eta} \cdot \eta_{ref} \quad (3.25)$$

Εφόσον οι καμπύλες τροποποιήθηκαν καταλλήλως και ήρθαν στην επιθυμητή μορφή, αποθηκεύτηκαν υπό μορφή πίνακα έτσι ώστε με γνωστή τη παράμετρο παροχής  $\Phi_1$  στην είσοδο της βαθμίδας, υπολογίστηκε με τη μέθοδο της παρεμβολής, η παράμετρος φόρτισης  $\Psi$  και ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης  $\eta$ .

Στη συνέχεια υπολογίστηκαν τα μεγέθη στην έξοδο της βαθμίδας. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίστηκε η ενθαλπία  $h_{t3is}$  και στη συνέχεια η ενθαλπία  $h_{t3}$  από τις εξισώσεις:

$$h_{t3is} = \Psi \cdot U^2 + h_{t1} \quad (3.26)$$

$$\eta = \frac{h_{t3is} - h_{t1}}{h_{t3} - h_{t1}} \quad (3.27)$$

Με δεδομένα τα μεγέθη  $h_{t_{3is}}$  και  $h_{t_3}$  υπολογίστηκαν τα αντίστοιχα μεγέθη θερμοκρασίας και συνάρτησης εντροπίας στην έξοδο της βαθμίδας  $T_{t_{3is}}$ ,  $T_{t_3}$ ,  $\varphi_{t_{3is}}$  και  $\varphi_{t_3}$ .

Στη συνέχεια, υπολογίστηκε, ο λόγος πίεσης που επιτυγχάνει η βαθμίδα, και έπειτα η ολική πίεση στην έξοδο αυτής:

$$PR = \exp\left(\frac{\varphi(T_{t_{3is}}) - \varphi(T_{t_1})}{R}\right) \quad (3.28)$$

$$P_{t_3} = P_{t_1} \cdot PR \quad (3.29)$$

Επιπροσθέτως, υπολογίστηκε η θερμοκρασιακή αύξηση και η διαφορά ενθαλπίας από την είσοδο στην έξοδο της βαθμίδας σύμφωνα με τις εξισώσεις:

$$\Delta T = T_{t_3} - T_{t_1} \quad (3.30)$$

$$\Delta h = h_{t_3} - h_{t_1} \quad (3.31)$$

Τέλος υπολογίστηκε ο πολυτροπικός βαθμός απόδοσης που επιτυγχάνεται και η ισχύς που καταναλώνεται από τις εξισώσεις:

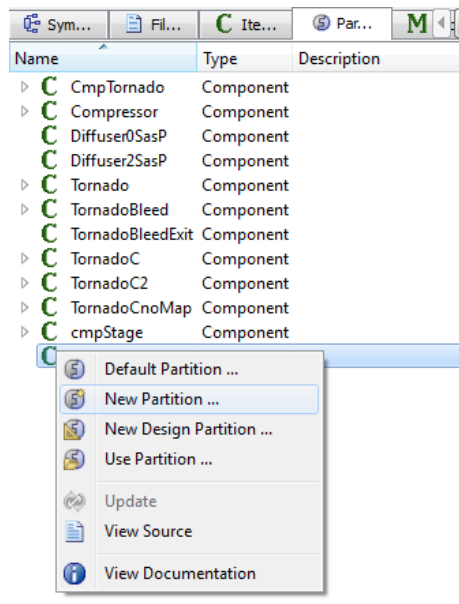
$$\eta_p = \frac{\varphi(T_{t_{3is}}) - \varphi(T_{t_1})}{\varphi(T_{t_3}) - \varphi(T_{t_1})} \quad (3.32)$$

$$pwr = W \cdot \Delta h \quad (3.33)$$

Όλες οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν στους παραπάνω υπολογισμούς στο αρχείο κώδικα της συνιστώσας της βαθμίδας, δηλώνονται ως μεταβλητές στο μπλοκ των Declarations, εάν δεν έχουν δηλωθεί ως Data ή προέρχονται από Port.

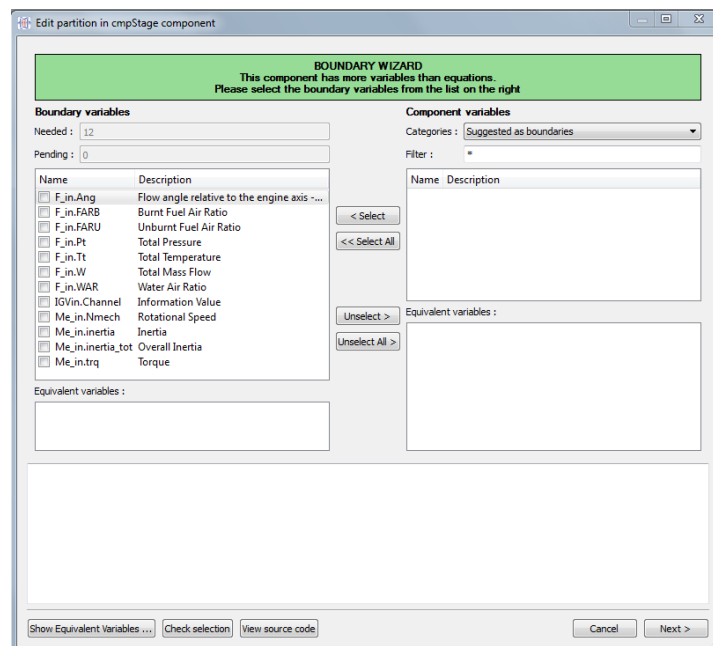
### **3.1.2 Επιλογή Οριακών Συνθηκών - Δημιουργία Partition**

Το δεύτερο στάδιο της μοντελοποίησης της βαθμίδας είναι ο καθορισμός του μαθηματικού μοντέλου. Οι εξισώσεις που εισήχθησαν στο αρχείο κώδικα της συνιστώσας της βαθμίδας, επεξεργάζονται συμβολικά από μαθηματικούς αλγόριθμους και επιλύονται τυχόν αλγεβρικοί βρόχοι. Με τη δημιουργία Partition προτείνονται οριακές συνθήκες ώστε οι εξισώσεις να ταξινομηθούν και το πρόβλημα να λυθεί όσο πιο αποτελεσματικά. Η δημιουργία νέου Partition παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.10.



Σχήμα 3.10: Δημιουργία νέου Partition προς καθορισμό του μαθηματικού μοντέλου

Αφού δημιουργήθηκε το νέο Partition με την επιθυμητή ονομασία για τη συνιστώσα της βαθμίδας, επιλέχθηκαν οι οριακές συνθήκες προς επίλυση του μαθηματικού μοντέλου οι οποίες προέρχονται από τις Fluid Port και Mechanical Port εισόδου στην είσοδο της βαθμίδας, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.11. Επιλέγονται οι οριακές συνθήκες στην είσοδο της βαθμίδας καθώς τα μεγέθη της ροής στην είσοδο είναι γνωστά και καθορίζουν το σημείο λειτουργίας αυτής.

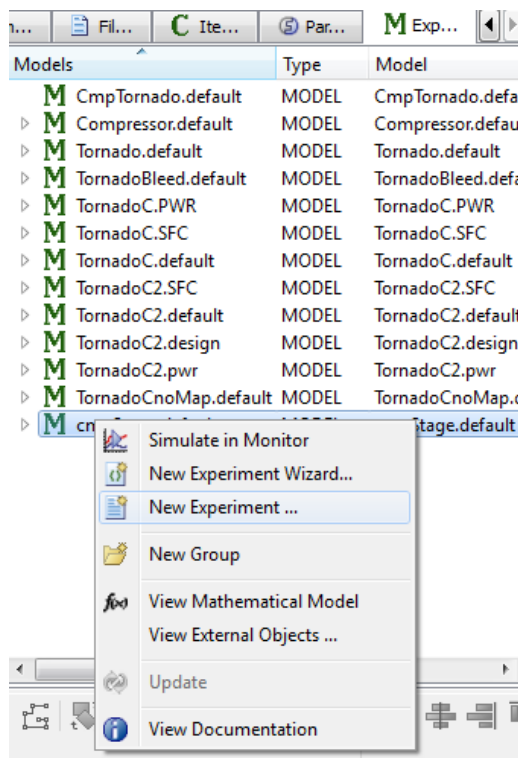


Σχήμα 3.11: Επιλογή οριακών συνθηκών σε επίπεδο Partition προς καθορισμό του μαθηματικού μοντέλου της βαθμίδας

Το μαθηματικό μοντέλο με το πέρας δημιουργίας Partition είναι πλήρως καθορισμένο και έτοιμο προς επίλυση.

### 3.1.3 Προσομοίωση Συνιστώσας - Δημιουργία Experiment

Για το συγκεκριμένο Partition, δημιουργήθηκε ένα νέο πείραμα (Experiment), όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.12.



Σχήμα 3.12: Δημιουργία νέου πειράματος (Experiment) για την προσομοίωση της βαθμίδας

Στο αρχείο κώδικα του νέου πειράματος (Experiment) που δημιουργήθηκε, δόθηκαν κατάλληλες τιμές στις μεταβλητές που επιλέχθηκαν ως οριακές συνθήκες στο επίπεδο Partition. Οι μεταβλητές αυτές δηλώθηκαν στο μπλοκ Boundaries (BOUNDS), όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.13.



```

C:/PROOSIS_3.0/USER_LIBS/USER_IOLI/experiments/cmp+stage.default/exp1/exp1.exp*
EXPERIMENT exp1 ON cmpStage.default
DECLS
OBJECTS
INIT
BOUNDS
  F_in.Ang = 19
  F_in.FARB = 0
  F_in.FARU = 0
  F_in.Pt = 101325
  F_in.Tt = 288.15
  F_in.W = 20
  F_in.WAR = 0
  Me_in.Nmech = 9500
  Me_in.inertia = 1
  Me_in.inertia_tot = 1
  Me_in.trq = 0

BODY

  -- Report results in file --
  REPORT_LIST("reportAll.rpt", "*", TRUE)

  fldMdl.read (GlobalFluidModel, "@TURBO@/maps/FluidModels/JetA_noDiss.xml")

  STEADY()

  -- Write variables --
  WRITE("\t\tAe = %g\t\tAecrit = %g\t\t", Ae, Aecrit)
  WRITE("\n\t\tPhic = %g\t\tPhis = %g\t\tPhi = %g\n", Phic, Phis, Phi)
  WRITE("\n\t\tstatusFlag = %i\n", stageStatus)

END EXPERIMENT
    
```

**Σχήμα 3.13: Δομή αρχείου κώδικα πειράματος (Experiment) και επιλογή τιμών για τις οριακές συνθήκες για την προσομοίωση της βαθμίδας**

Ο Πίνακας 3.6 παρουσιάζει τις τιμές που δόθηκαν στις οριακές συνθήκες προς επίλυση του μαθηματικού προβλήματος και προσομοίωση της βαθμίδας.

Οριακές συνθήκες	Τιμές Οριακών συνθηκών
Απόλυτη γωνία εισόδου της ροής $\alpha_1$ ( $^\circ$ )	19
Ολική πίεση εισόδου $P_{t1}$ (Pa)	101325
Ολική θερμοκρασία εισόδου $T_{t1}$ (K)	288,15
Παροχή μάζας $W$ (kg/sec)	27,9
Υγρασία $WAR$	0
Λόγος καιόμενου καυσίμου αέρα $FARB$	0
Λόγος άκαυστου καυσίμου αέρα $FARU$	0
Ταχύτητα περιστροφής $N$ (rpm)	11085
Ροπή (N·m)	0
Αδράνεια (kg/m <sup>2</sup> )	1
Ολική αδράνεια (kg/m <sup>2</sup> )	1

**Πίνακας 3.6: Τιμές οριακών συνθηκών για τη προσομοίωση της βαθμίδας**

Στο μπλοκ Body με την εντολή REPORT\_LIST αποθηκεύτηκαν τα αποτελέσματα υπό μορφή λίστας σε αρχείο, ενώ με την εντολή WRITE εμφανίζονται όσα από τα αποτελέσματα ενδιαφέρουν στη περιοχή μηνυμάτων. Στη συγκεκριμένη

μελέτη παρουσιάστηκαν τα μεγέθη  $\Phi$ ,  $\Phi_{\text{stall}}$ ,  $\Phi_{\text{choke}}$  και η διατομή στην είσοδο της βαθμίδας, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.14.

```

=====
Output  Experiment  Find in Files
=====
Begin steady-1 (Method: NR, TOLTYPE= RELTOL, TOLERANCE= 1e-006)
<INITIAL> Executing the INIT blocks of components...
Opening model in file:
C:/PROOSIS_3.0/USER_LIBS/USER_IOLI/experiments/cmp+stage.default/exp1/cmp+stage.default.exp1.win32_vc2010.dll
Experiment: exp1 Library: USER_IOLI Component: cmpStage Partition: default
User: proosis6 Date: 2013/07/01 Time: 14:56:22
Library dependency list: MATH V3.1 TURBO V3.2 USER_IOLI V0.0
Programme and Version: PROOSIS V3.0.6
TRACE: TRUE LOG: TRUE WARN: TRUE POST-PROCESS: FALSE
Begin reading symbols table...
File: C:/PROOSIS_3.0/USER_LIBS/USER_IOLI/autocode/USER_IOLI.cmp+stage.default.stab
Variables: 252
Equations: 42
End of reading symbols table
<INITIAL> Resetting variables to the initial values...
<INITIAL> Executing the INIT block of experiment...
Begin execution of experiment BODY...
Reading map file C:/PROOSIS_3.0/USER_LIBS/TURBO/maps/FluidModels/JetA_noDiss.xml ...
  Constants: 0 Tables: 1D: 0 2D: 0 3D: 5
End of reading map file
=====
Begin steady-1 (Method: NR, TOLTYPE= RELTOL, TOLERANCE= 1e-006)
<INITIAL> Executing the INIT blocks of components...
End of steady-1 (Status: OK, Max-Error:0, Runtime:0.001s, Jacob.:0, Iter.:0, Residues:0)
=====

      Ae = 0.13181
      Aecrit = 0.0828846
      Phic = 1.07214
      Phis = 0.622169
      Phi = 0.675936

      statusFlag = 1
End execution of experiment BODY

- END OF EXPERIMENT -
Writing final statistics to log file...
Total steady calls      OK: 1 NOK: 0
Total processor time: 0.024 seconds

```

**Σχήμα 3.14: Περιοχή μηνυμάτων στο αρχείο κώδικα του πειράματος (Experiment) για την εμφάνιση επιθυμητών αποτελεσμάτων της προσομοίωσης της βαθμίδας**

Το πείραμα που εκτελέστηκε είναι ένα σημείο λειτουργίας της βαθμίδας για δεδομένη ταχύτητα περιστροφής, παροχή μάζας και συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας στην είσοδο, όπως παρουσιάστηκε στο Σχήμα 3.13. Εφόσον δεν υπήρξαν σφάλματα στο κώδικα, προσομοιώθηκε το μοντέλο της βαθμίδας και με το πέρας της επίλυσης του προβλήματος, παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα. Επιλέχθηκε προσομοίωση της βαθμίδας στο περιβάλλον του Monitor, με σκοπό την παρουσίαση των επιθυμητών αποτελεσμάτων σε πίνακα. Επιδόσεις της βαθμίδας όπως η παράμετρος παροχής  $\Phi$ , η παράμετρος φόρτισης  $\Psi$ , ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης  $\eta$  και ο λόγος πίεσης που επιτυγχάνει, ο αριθμός Mach και η ταχύτητα της ροής στην είσοδο της βαθμίδας παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.15. Η ορθότητα των αποτελεσμάτων επιβεβαιώνει την επιτυχή μοντελοποίηση της βαθμίδας.

Name	Alias	Station	1
#Calculation id	--	--	steady-1
#Status	--	--	STEADY_OK
#ESI	--	--	0
Eta	--	--	0.888907879
MN (-)	--	--	0.400014133
PR	--	--	1.14049369
Phi	--	--	0.67593568
Phic	--	--	1.07213587
Phis	--	--	0.622169188
Psi	--	--	0.315374866
V (m/sec)	--	--	134.006558
Va (m/sec)	--	--	126.70569
pwr	--	--	-249334.177
trq	--	--	-250.628001

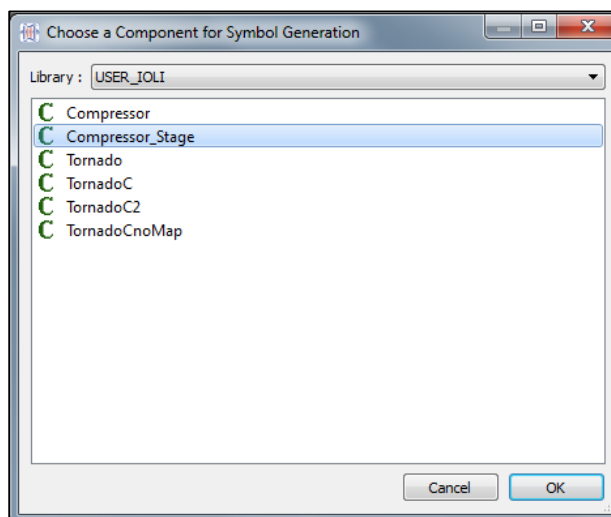
**Σχήμα 3.15: Παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοίωσης της βαθμίδας**

<b>Αποτελέσματα Προσομοίωσης</b>	<b>Τιμές Αποτελεσμάτων</b>
Φ	0.67593568
Φstall	0.622169188
Φchoke	1.07213587
Ψ	0.315374866
Αριθμός Mach εισόδου	0.4
Ταχύτητα V εισόδου	134
Αξονική ταχύτητα $V_a$ εισόδου	126.71
Λόγος πίεσης βαθμίδας PR	1.14049
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης Βαθμίδας η	0.89
Ισχύς που καταναλώνει η βαθμίδα (W)	249334
Ροπή (Nm)	250.63

**Πίνακας 3.7: Τιμές αποτελεσμάτων προσομοίωσης σε ένα σημείο λειτουργίας της βαθμίδας**

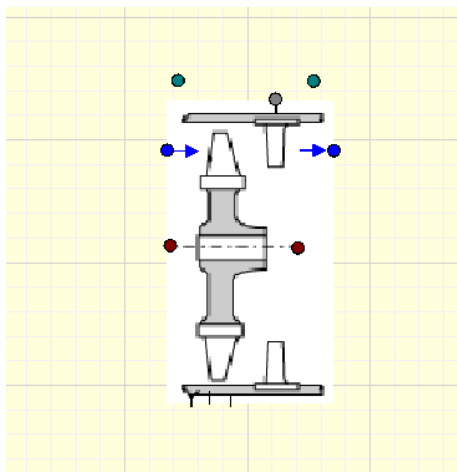
### 3.1.4 Δημιουργία Συμβόλου

Με την ολοκλήρωση της μοντελοποίησης της βαθμίδας, είναι εφικτή η χρήση αυτής ως συνιστώσας σε διατάξεις, για παράδειγμα προς δημιουργία ενός συμπιεστή. Για το σκοπό αυτό, δημιουργήθηκε ένα νέο σύμβολο (Symbol) μέσω της επιλογής δημιουργίας συμβόλου όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.16.



**Σχήμα 3.16: Επιλογή αρχείου κώδικα της Βαθμίδας στο οποίο θα αντιστοιχεί το νέο σύμβολο**

Στη συνέχεια σε ένα κενό γραφικό περιβάλλον σχεδιάστηκε η βαθμίδα, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.17.



**Σχήμα 3.17: Σύμβολο Βαθμίδας**

### **Μοντελοποίηση με τη Μέθοδο Συσσώρευσης Βαθμίδων στο PROOSIS 3.21**

Όπως φαίνεται το σύμβολο της βαθμίδας φέρει δύο Fluid Ports εισόδου εξόδου, δύο Mechanical Ports εισόδου εξόδου, δύο Fluid Info Ports εξόδου και ένα Info Port εισόδου, όπως αυτά ορίστηκαν στο μαθηματικό μοντέλο στο αρχείο κώδικα της συνιστώσας της βαθμίδας, για τη σύνδεση της με άλλες συνιστώσες και τη μεταφορά των πληροφοριών για τα διάφορα μεγέθη.



# 4

## Μοντελοποίηση Συμπιεστή στο PROOSIS

Με την ολοκλήρωση της μοντελοποίησης της βαθμίδας, επόμενος στόχος είναι η δημιουργία ενός πολυβάθμιου αξονικού συμπιεστή, ο οποίος θα αποτελείται από μία σειρά τέτοιων βαθμίδων. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ως αναφορά ο συμπιεστής του βιομηχανικού αεριοστροβίλου απλής ατράκτου Tornado.

Στην πρώτη ενότητα του κεφαλαίου γίνεται παρουσίαση των χαρακτηριστικών και των επιδόσεων του συγκεκριμένου συμπιεστή. Στη συνέχεια γίνεται περιγραφή του τρόπου μοντελοποίησης και προσομοίωσης αυτού στο περιβάλλον του υπολογιστικού προγράμματος PROOSIS. Στην τρίτη ενότητα περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία μορφοποίησης του πεδίο χαρακτηριστικών σε μορφή γραμμών  $-\beta$  για να εισαχθεί στο PROOSIS. Στην τέταρτη ενότητα παρουσιάζεται η μελέτη που πραγματοποιήθηκε στις επιδόσεις και το πεδίο χαρακτηριστικών του συμπιεστή, για την περίπτωση απομάστευσης από την έξοδο της έβδομης βαθμίδας αυτού. Τέλος περιγράφεται η δημιουργία νέου συμβόλου για το συμπιεστή που μοντελοποιήθηκε, προς χρήση αυτού σε διατάξεις αεριοστροβίλου.

### 4.1 Συμπιεστής αεριοστροβίλου Tornado

Ο αξονικός συμπιεστής του βιομηχανικού αεριοστροβίλου Tornado<sup>[10],[19]</sup> αποτελείται από 15 βαθμίδες αξονικής και υποηχητικής ροής. Φέρει οδηγία πτερύγια εισόδου ενώ στις τέσσερις πρώτες βαθμίδες υπάρχουν αρθρωτοί στάτορες μεταβλητής γεωμετρίας. Από την έξοδο της έβδομης βαθμίδας του συμπιεστή, απομαστεύεται μικρό ποσοστό αέρα, το οποίο οδηγείται σε δευτερεύοντα συστήματα του αεριοστροβίλου Tornado. Από την έξοδο αυτού απομαστεύεται ποσοστό παροχής μάζας αέρα, το οποίο οδηγείται προς ψύξη του στροβίλου. Ο Πίνακας 4.1 παρουσιάζει το σημείο σχεδίασης του συμπιεστή.

Σημείο Σχεδίασης (Design Point)	
Ταχύτητα περιστροφής N (rpm)	11085
Ανηγμένη Παροχή μάζας W (kg/sec)	27,9
Λόγος Πίεσης PR	11,92
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης $\eta$	0,80

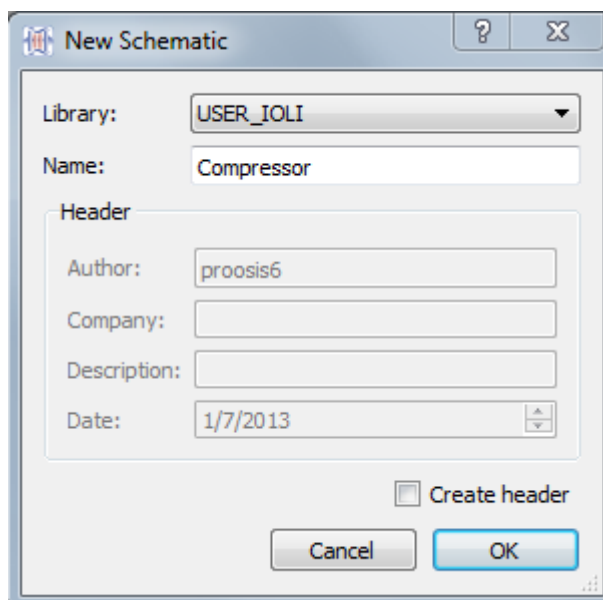
Πίνακας 4.1: Επιδόσεις του συμπιεστή του αεριοστροβίλου Tornado στο σημείο σχεδίασης

## 4.2 Διαδικασία Μοντελοποίησης

Η διαδικασία μοντελοποίησης του συμπιεστή περιλαμβάνει τη δημιουργία του σχηματικού διαγράμματος (Schematic), τη σύνθεση του μαθηματικού μοντέλου και τον καθορισμό του τελευταίου με τη δημιουργία Partition. Η προσομοίωση πραγματοποιείται με τη δημιουργία Experiment.

### 4.2.1 Μοντελοποίηση Συμπιεστή – Δημιουργία Schematic

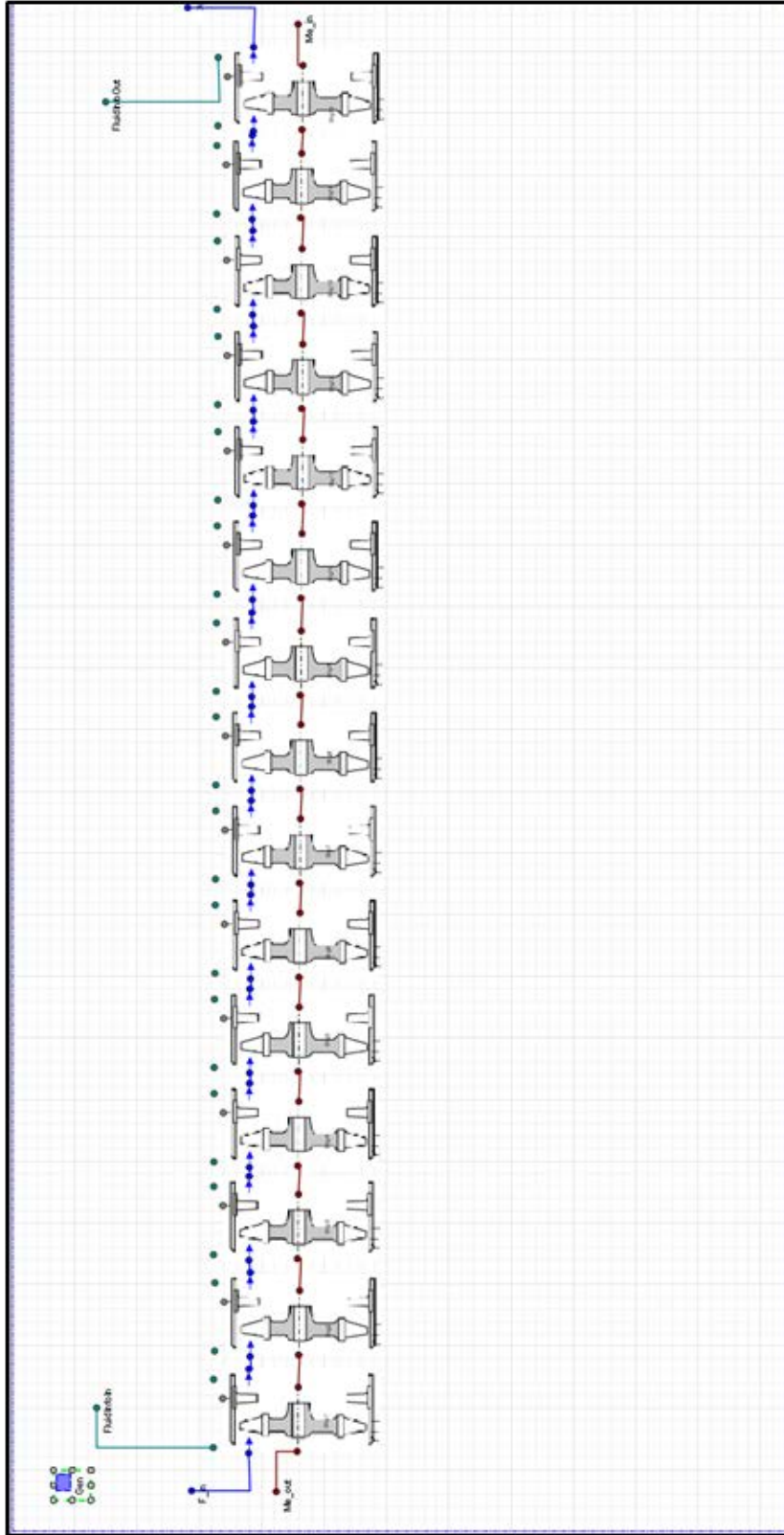
Στην ίδια βιβλιοθήκη όπου δημιουργήθηκε το μοντέλο της βαθμίδας, δημιουργήθηκε ένα νέο σχηματικό διάγραμμα (Schematic), όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1.



**Σχήμα 4.1: Δημιουργία νέου σχηματικού διαγράμματος (Schematic) για το συμπιεστή**

Στο γραφικό περιβάλλον του νέου σχηματικού διαγράμματος, τοποθετήθηκαν εν σειρά και ενώθηκαν μέσω των Θυρών (Ports) δεκαπέντε βαθμίδες, όπως αυτές μοντελοποιήθηκαν με τη μέθοδο συσσώρευσης βαθμίδων. Η διάταξη αυτή αντιπροσωπεύει έναν δεκαπενταβάθμιο συμπιεστή, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2.





Σχήμα 4.2: Σχηματικό διάγραμμα (Schematic) δεκαπενταβάθμιου συμπίεστη του από ένωση βαθμίδων εν σειρά

Για τον υπολογισμό των ολικών επιδόσεων του συμπιεστή, απαιτείται η σύνθεση ενός νέου μαθηματικού μοντέλου. Στο αρχείο κώδικα, το οποίο δημιουργείται αυτόματα με τη δημιουργία νέου σχηματικού διαγράμματος, προστέθηκαν εξισώσεις προς υπολογισμό των ολικών επιδόσεων του συμπιεστή. Στόχος είναι οι επιδόσεις αυτές με το πέρασ της προσομοίωσης του συμπιεστή να συμπίπτουν με αυτές του σημείου σχεδίασης.

Στο μοντέλο του συμπιεστή, η επίλυση του μαθηματικού προβλήματος ξεκινάει από την πρώτη βαθμίδα. Πιο συγκεκριμένα, με δεδομένα τα μεγέθη της ροής στην είσοδο του συμπιεστή, επομένως και στην είσοδο της πρώτης βαθμίδας, ξεκινά η επίλυση του μαθηματικού προβλήματος της βαθμίδας, όπως αυτό περιγράφηκε στο τρίτο κεφάλαιο. Υπολογίζονται οι συνθήκες της ροής στην έξοδο της βαθμίδας, οι οποίες είναι ταυτόχρονα συνθήκες εισόδου για τη δεύτερη βαθμίδα, καθώς οι βαθμίδες έχουν ενωθεί εν σειρά μέσω των Θυρών (Ports), από τις οποίες μεταφέρεται και η πληροφορία για τα διάφορα μεγέθη. Η επίλυση του μαθηματικού μοντέλου στη δεύτερη βαθμίδα οδηγεί στον υπολογισμό των συνθηκών της ροής στην έξοδο αυτής και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να υπολογιστούν οι συνθήκες στην έξοδο της τελευταίας βαθμίδας, στην προκειμένη περίπτωση της δέκατης πέμπτης.

Συνεπώς με δεδομένη την ολική πίεση εισόδου στη πρώτη βαθμίδα ( $P_{t1} = P_{tin}$ ) και την ολική πίεση εξόδου στη τελευταία βαθμίδα ( $P_{t15} = P_{tout}$ ), υπολογίστηκε ο λόγος πίεσης του συμπιεστή σύμφωνα με την εξίσωση:

$$PR_C = \frac{P_{t_{out}}}{P_{t_{in}}} \quad (4.1)$$

Με δεδομένο τον λόγο πίεσης και τη θερμοκρασία στην είσοδο υπολογίστηκε η συνάρτηση εντροπίας που αντιστοιχεί στην ισεντροπική θερμοκρασία εξόδου  $\varphi(T_{tis\_out})$ .

$$PR_C = \exp\left(\frac{\varphi(T_{tis\_out}) - \varphi(T_{t\_in})}{R}\right) \quad (4.2)$$

Στη συνέχεια υπολογίστηκαν τα ισεντροπικά μεγέθη θερμοκρασίας  $T_{tis\_out}$  και ενθαλπίας  $h_{tis\_out}$ . Τέλος υπολογίστηκαν ο ισεντροπικός και πολυτροπικός βαθμός απόδοσης του συμπιεστή από τις εξισώσεις:

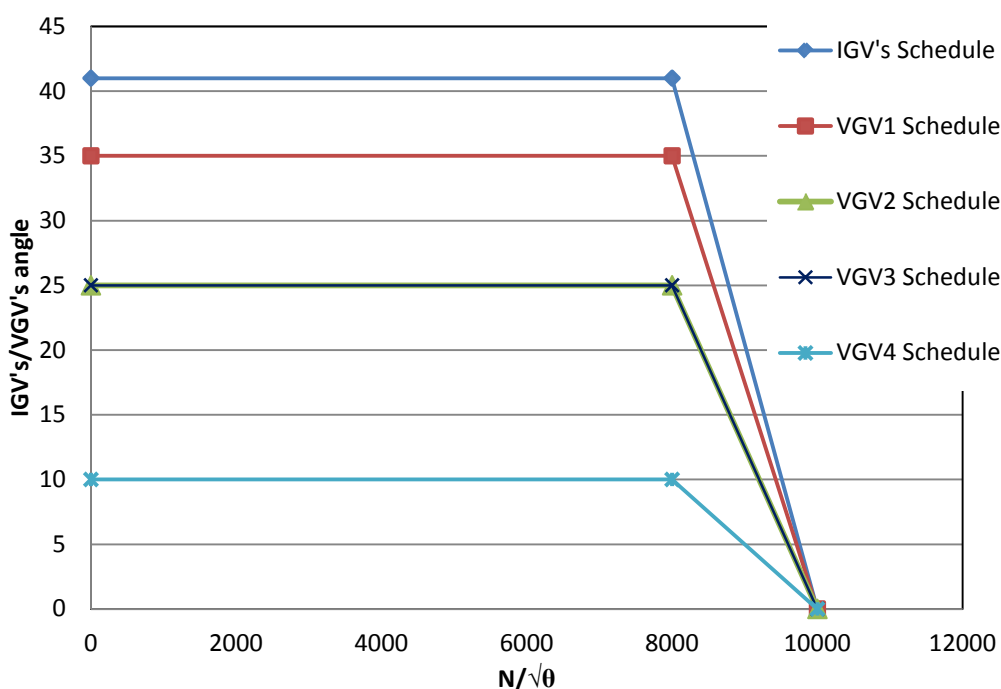
$$\eta_C = \frac{h_{tis\_out} - h_{t\_in}}{h_{t\_out} - h_{t\_in}} \quad (4.3)$$

$$\eta_{pC} = \frac{\varphi(T_{tis\_out}) - \varphi(T_{t\_in})}{\varphi(T_{t\_out}) - \varphi(T_{t\_in})} \quad (4.4)$$

Αφότου καθορίστηκε το μαθηματικό μοντέλο που υπολογίζει τις συνολικές επιδόσεις του συμπιεστή, πρέπει να προστεθεί σε αυτό ο τρόπος λειτουργίας των οδηγών πτερυγίων εισόδου (IGVs: Inlet Guide Vanes) και πτερυγώσεων μεταβλητής γεωμετρίας (VGVs: Variable Guide Vanes).

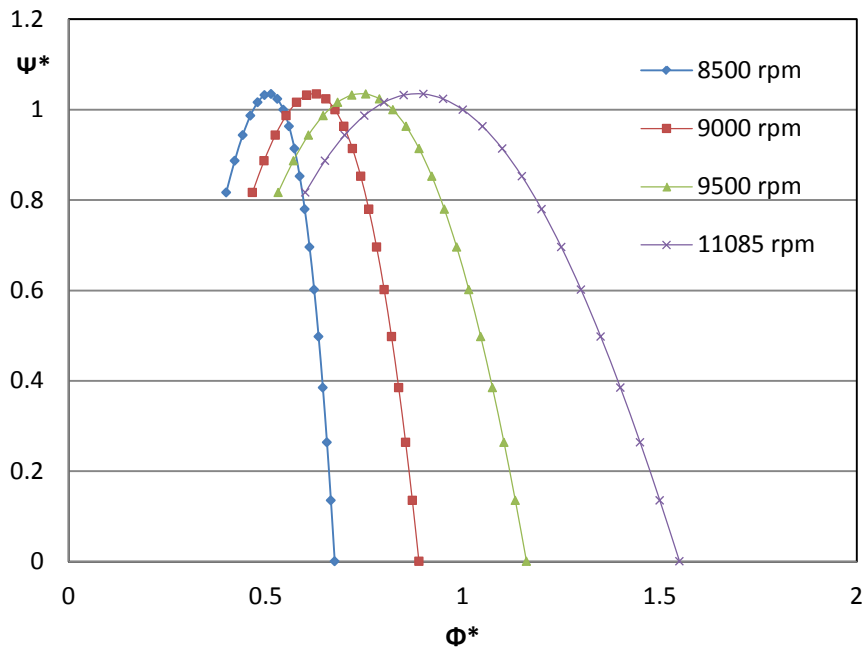
Η απόλυτη γωνία εισόδου της ροής σε κάθε βαθμίδα είναι δεδομένη, όμως το μέγεθος της μεταβολής της λόγω IGVs και VGVs, είναι συνάρτηση της ανηγμένης ταχύτητας περιστροφής. Σε έναν πολυβάθμιο συμπιεστή, για όλες τις βαθμίδες εκτός της πρώτης, η ανηγμένη ταχύτητα περιστροφής είναι άγνωστο μέγεθος. Αυτό συμβαίνει διότι οι βαθμίδες δε γνωρίζουν την ολική θερμοκρασία εισόδου της ροής στη πρώτη. Γι' αυτό το λόγο κρίνεται απαραίτητος ο καθορισμός του προγράμματος λειτουργίας αυτών των πτερυγώσεων (IGVs/VGVs schedule) σε επίπεδο συμπιεστή.

Ο συμπιεστής της μηχανής Tornado φέρει οδηγά πτερύγια εισόδου και στάτορες μεταβλητής γεωμετρίας στις τέσσερις πρώτες βαθμίδες. Το πρόγραμμα λειτουργίας αυτών παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.3. Τα IGVs και VGVs κλείνουν για διορθωμένη ταχύτητα περιστροφής από 8000 έως και 10000 rpm.

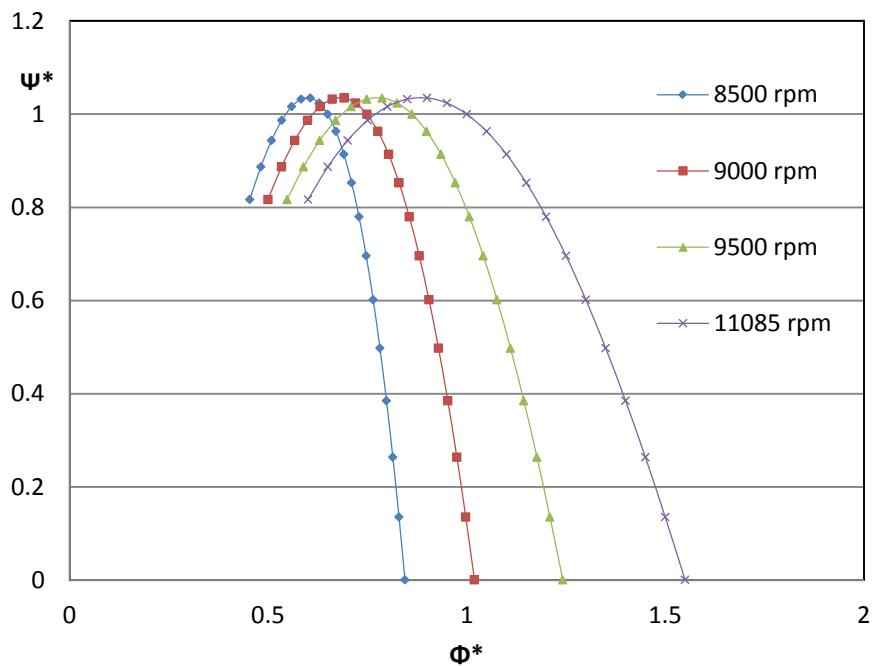


**Σχήμα 4.3: Πρόγραμμα λειτουργίας οδηγών πτερυγίων και πτερυγώσεων μεταβλητής γεωμετρίας του συμπιεστή του αεριοστρόβιλου Tornado**

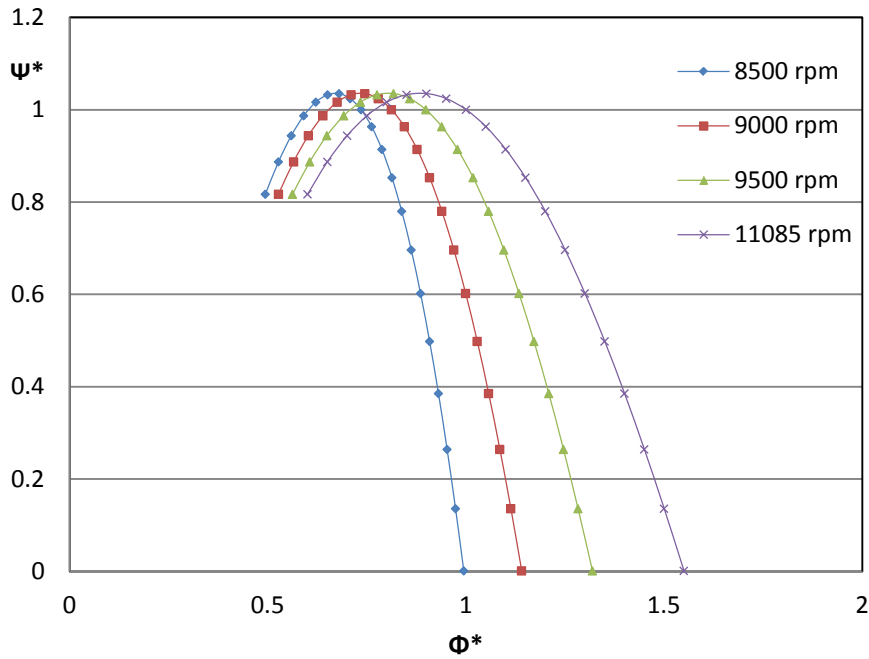
Στο Σχήμα 4.4 έως Σχήμα 4.8 παρουσιάζεται η μεταβολή της γενικευμένης χαρακτηριστικής καμπύλης των πέντε πρώτων βαθμίδων λόγω επίδρασης των IGVs και VGVs για ταχύτητες περιστροφής μεταξύ των ορίων 8000 και 10000 rpm σε σύγκριση με την ταχύτητα περιστροφής σχεδίασης 11085 rpm.



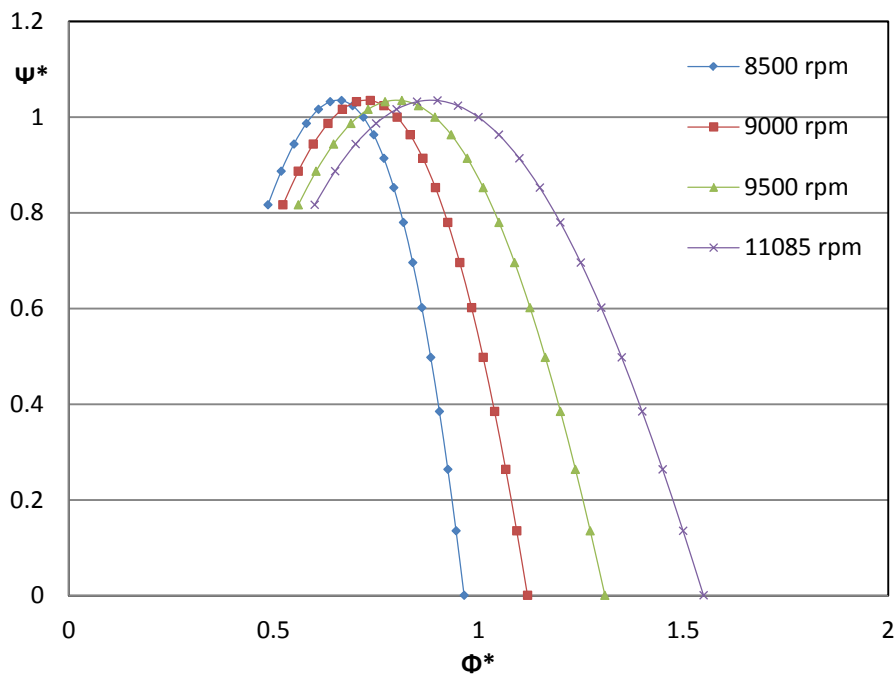
Σχήμα 4.4: Μεταβολή γενικευμένης χαρακτηριστικής καμπύλης της πρώτης βαθμίδας του συμπιεστή λόγω επίδρασης IGVs για διάφορες ταχύτητες περιστροφής



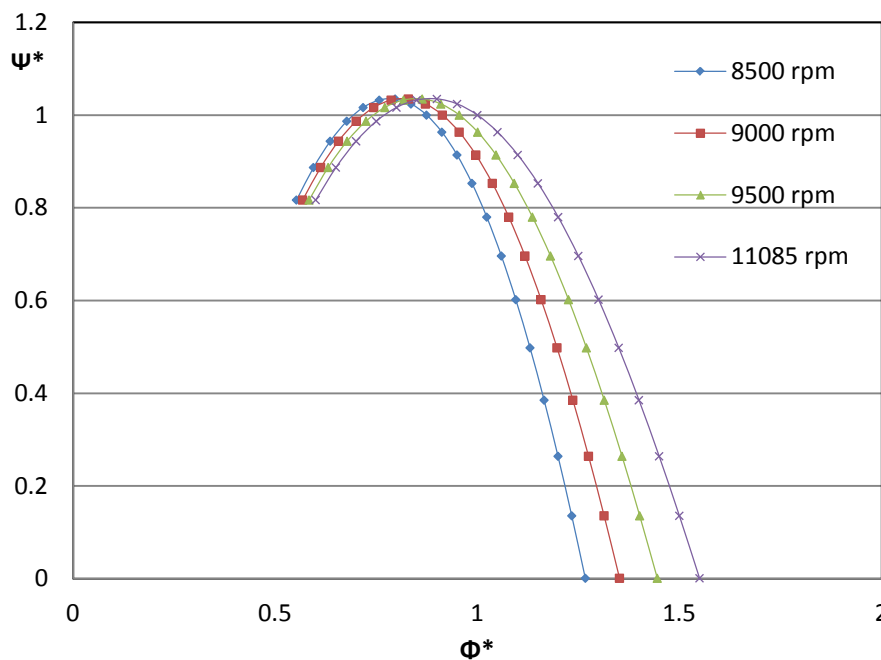
Σχήμα 4.5: Μεταβολή γενικευμένης χαρακτηριστικής καμπύλης της δεύτερης βαθμίδας του συμπιεστή λόγω επίδρασης VGVs για διάφορες ταχύτητες περιστροφής



Σχήμα 4.6: Μεταβολή γενικευμένης χαρακτηριστικής καμπύλης της τρίτης βαθμίδας του συμπιεστή λόγω επίδρασης VGVs για διάφορες ταχύτητες περιστροφής



Σχήμα 4.7: Μεταβολή γενικευμένης χαρακτηριστικής καμπύλης της τέταρτης βαθμίδας του συμπιεστή λόγω επίδρασης VGVs για διάφορες ταχύτητες περιστροφής



Σχήμα 4.8: Μεταβολή γενικευμένης χαρακτηριστικής καμπύλης της πέμπτης βαθμίδας του συμπιεστή λόγω επίδρασης VGVs για διάφορες ταχύτητες περιστροφής

#### 4.2.2 Καθορισμός Μαθηματικού Μοντέλου – Δημιουργία Partition

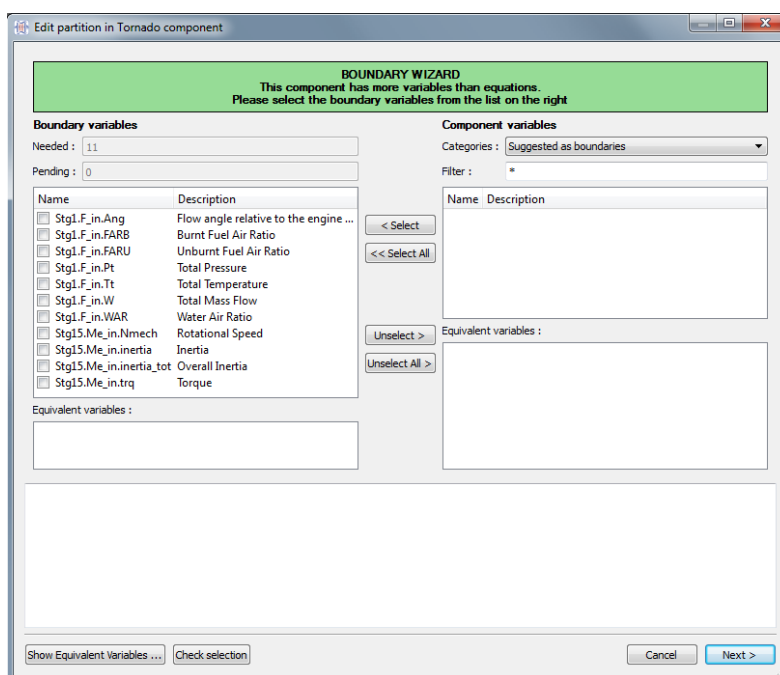
Η δυνατότητα λύσης του μαθηματικού προβλήματος απαιτεί τη γνώση των συνθηκών της ροής στην είσοδο του συμπιεστή. Συνεπώς, προκειμένου να επιτευχθεί ο καθορισμός του μαθηματικού μοντέλου με την επιλογή των οριακών συνθηκών, δημιουργήθηκε ένα νέο Partition στο οποίο επιλέχθηκαν ως οριακές συνθήκες οι μεταβλητές της ροής στην είσοδο του συμπιεστή, οι οποίες προέρχονται από τη Fluid Port εισόδου, και ταυτίζονται με τις μεταβλητές εισόδου της πρώτης βαθμίδας. Επιπλέον επιλέχθηκαν οι μεταβλητές που προέρχονται από την Mechanical Port. Ο Πίνακας 4.2 παρουσιάζει τις μεταβλητές που επιλέχθηκαν ως οριακές συνθήκες για τη λύση του μαθηματικού προβλήματος του συμπιεστή.

Μεταβλητές	Περιγραφή
$\alpha$	Απόλυτη γωνία εισόδου της ροής
$P_{t\ in}$	Ολική πίεση εισόδου
$T_{t\ in}$	Ολική θερμοκρασία εισόδου
$W$	Παροχή μάζας
$WAR$	Υγρασία
$FARB$	Λόγος καίωμένου καυσίμου αέρα
$FARU$	Λόγος άκαυστου καυσίμου αέρα
$N$	Ταχύτητα Περιστροφής

Trq	Ροπή
Inertia	Αδράνεια
Inertia_tot	Ολική αδράνεια

**Πίνακας 4.2: Οριακές συνθήκες για την επίλυση του μαθηματικού προβλήματος του συμπιεστή**

Στο Σχήμα 4.9 παρουσιάζεται η δημιουργία νέου Partition που πραγματοποιήθηκε με σκοπό το καθορισμό του μαθηματικού μοντέλου και την επιλογή των οριακών συνθηκών.



**Σχήμα 4.9: Επιλογή οριακών συνθηκών κατά τη δημιουργία νέου Partition για την επίλυση του μαθηματικού προβλήματος του συμπιεστή**

### 4.2.3 Προσομοίωση Συμπιεστή – Δημιουργία Experiment

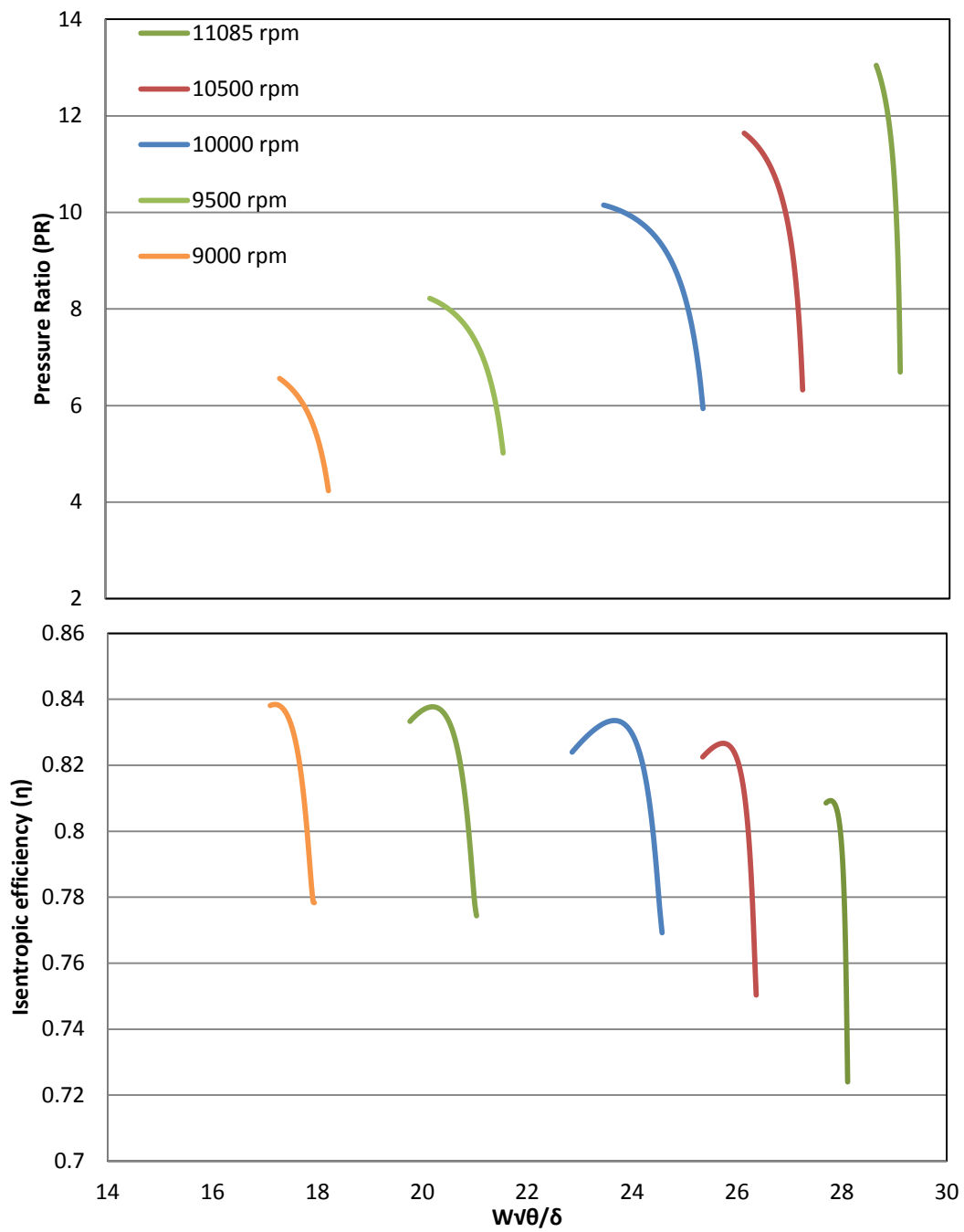
Με το πέρας της δημιουργίας του μοντέλου του συμπιεστή, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση με κύριο σκοπό την παραγωγή του πεδίου χαρακτηριστικών. Για τον προσδιορισμό του τελευταίου απαιτείται ο υπολογισμός του λόγου πίεσης και του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης για ένα εύρος τιμών παροχής μάζας και για δεδομένες ταχύτητες περιστροφής. Το εύρος των τιμών παροχής μάζας πρέπει να εξασφαλίζει ευσταθή λειτουργία, επομένως πρέπει αρχικά να εντοπιστούν τα όρια αυτού του εύρους.

Δημιουργήθηκε ένα νέο Experiment στο οποίο εκτελέστηκαν διαδοχικά οι εξής εργασίες:

- Κάλεσμα μίας Function για τον καθορισμό, σε κάθε ταχύτητα περιστροφής, των σημείων της ελάχιστης και μέγιστης παροχής μάζας, στα οποία ο συμπιεστής έχει επέλθει σε κατάσταση stall και choke αντίστοιχα.
- Προσομοίωση του συμπιεστή στο εύρος παροχής μάζας, στο οποίο λειτουργεί ευσταθώς, προς υπολογισμό του λόγου πίεσης και ισεντροπικού βαθμού απόδοσης που επιτυγχάνει. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε για όλες τις ταχύτητες περιστροφής.

Το πεδίο χαρακτηριστικών του συμπιεστή που υπολογίστηκε επιβεβαιώθηκε με το πεδίο χαρακτηριστικών που προέκυψε από τα αποτελέσματα παλαιότερης μελέτης<sup>[16]</sup> του συμπιεστή του αεριοστρόβιλου Tornado. Η μοντελοποίηση είχε πραγματοποιηθεί σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran 77. Στο Σχήμα 4.10 παρουσιάζεται το πεδίο χαρακτηριστικών όπως προέκυψε από τη μοντελοποίηση του συμπιεστή με τη μέθοδο συσσώρευσης βαθμίδων.



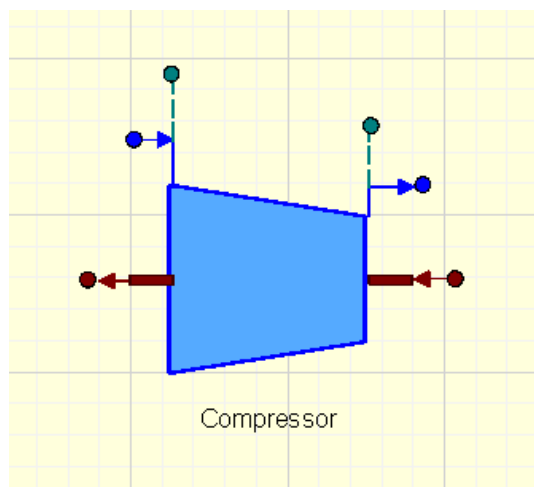


Σχήμα 4.10: Πεδίο χαρακτηριστικών καμπυλών του συμπιεστή

### 4.3 Δημιουργία συμβόλου συμπίεστή

Το μοντέλο του συμπίεστή που δημιουργήθηκε από την ένωση των δεκαπέντε βαθμίδων εν σειρά, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί ως αυτούσια συνιστώσα σε διατάξεις αεριοστροβίλων. Για την επίτευξη του στόχου αυτού, δημιουργήθηκε ένα νέο σύμβολο που αντιπροσωπεύει το συμπίεστή.

Κατά τη δημιουργία νέου συμβόλου επιλέχθηκε το αρχείο κώδικα της συνιστώσας, στο οποίο το σύμβολο αντιστοιχίζεται, και στη συνέχεια σχεδιάστηκε με χρήση των εργαλείων σχεδίασης που παρέχει το πρόγραμμα PROOSIS. Προστέθηκε άτρακτος στην οποία τοποθετήθηκαν οι Μηχανικές Θύρες εισόδου και εξόδου (Mechanical Ports) για τη μεταφορά των μηχανικών μεγεθών. Η Mechanical Port εισόδου τοποθετήθηκε στη δεξιά πλευρά του συμπίεστή, καθώς θεωρούμε ότι σε μία διάταξη μηχανής ο στρόβιλος κινεί αυτόν. Οι Fluid και Fluid Info Ports εισόδου και εξόδου, τοποθετήθηκαν στην είσοδο και έξοδο του συμπίεστή αντίστοιχα, για μεταφορά των μεταβλητών και πληροφοριών της ροής. Τα παραπάνω Ports που τοποθετήθηκαν στο συμπίεστή, επιτρέπουν τη δυναμική σύνδεση αυτού, με άλλες συνιστώσες. Το νέο σύμβολο απεικονίζεται στο Σχήμα 4.11.

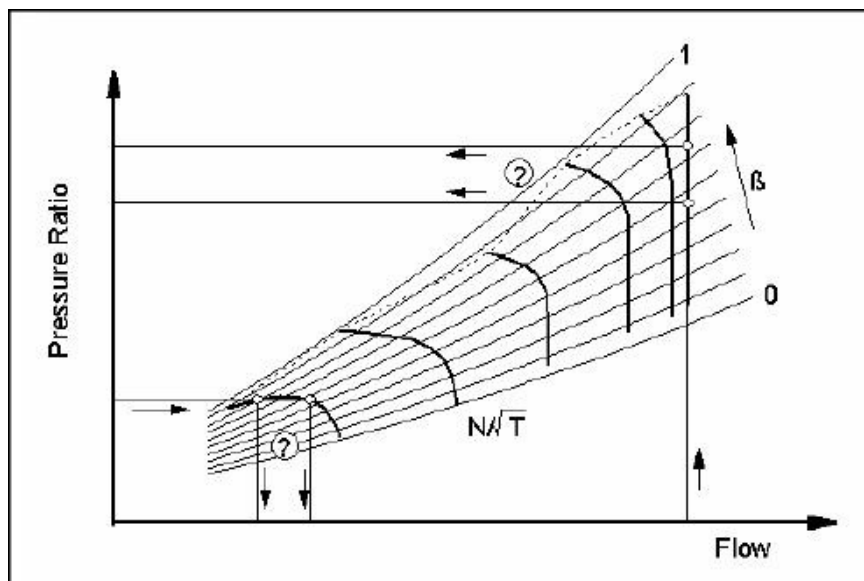


Σχήμα 4.11: Δημιουργία συμβόλου του συμπίεστή στο πρόγραμμα PROOSIS

#### 4.4 Μορφοποίηση πεδίου χαρακτηριστικών συμπιεστή

Το πεδίο χαρακτηριστικών ενός συμπιεστή, όπως αυτό που παράχθηκε από τη μοντελοποίηση της συνιστώσας του συμπιεστή με τη μέθοδο συσσώρευσης βαθμίδων, για να χρησιμοποιηθεί σε υπολογιστικά μοντέλα αεριοστρόβιλων, πρέπει να έρθει στη μορφή Beta Map<sup>[9]</sup>. Εκτός των συντεταγμένων παροχής μάζας και λόγου πίεσης, ο χάρτης πρέπει να φέρει επιπλέον βοηθητικές συντεταγμένες οι οποίες ονομάζονται γραμμές  $\beta$  ( $\beta$ -lines). Οι γραμμές αυτές στην περίπτωση του συμπιεστή είναι γραμμές λόγου πίεσης – παροχής μάζας, οι οποίες δημιουργούνται έτσι ώστε κάθε μία να έχει μοναδικό σημείο τομής με κάθε ισοταχή. Η γραμμή  $-\beta$  που αντιστοιχεί στις μικρότερες πιέσεις λαμβάνει τιμή  $\beta=0$ , ενώ η γραμμή που αντιστοιχεί στις μεγαλύτερες πιέσεις λαμβάνει την τιμή  $\beta=1$ .

Για δεδομένη ταχύτητα περιστροφής και παροχή μάζας στις υψηλές στροφές, ο προσδιορισμός του λόγου πίεσης είναι αδύνατος καθώς οι ισοταχές είναι σχεδόν κατακόρυφες. Αντίστοιχα συμβαίνει και στις χαμηλές στροφές, όπου οι ισοταχές είναι σχεδόν οριζόντιες, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.12<sup>[9]</sup>.



**Σχήμα 4.12: Αδυναμία προσδιορισμού λόγου πίεσης και παροχής μάζας στις υψηλές και χαμηλές στροφές του πεδίου χαρακτηριστικών**

Το πλεονέκτημα που προσφέρουν οι συντεταγμένες αυτές, έγκειται στο ότι με γνωστή ταχύτητα περιστροφής και την τιμή της γραμμής  $-\beta$ , ορίζεται ένα μοναδικό σημείο στη χαρακτηριστική λειτουργίας της συνιστώσας. Συνεπώς τα σημεία λειτουργίας στα οποία η χαρακτηριστική είναι σχεδόν κατακόρυφη με γνωστή τη τιμή της γραμμής  $-\beta$  και τη ταχύτητα περιστροφής είναι δυνατόν να υπολογιστούν μονοσήμαντα.

Για το καθορισμό των συντεταγμένων γραμμών  $-\beta$  στο πεδίο χαρακτηριστικών που παράχθηκε με τη μέθοδο συσσώρευσης βαθμίδων, χρησιμοποιήθηκε το εμπορικό πρόγραμμα Smooth C, το οποίο είναι ένα εργαλείο ικανό να παράγει χαρακτηριστικά ενός συμπίεστη από δεδομένα στοιχεία μετρήσεων. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η εξής:

Τα αποτελέσματα από τη προσομοίωση του συμπίεστη για το προσδιορισμό του πεδίου χαρακτηριστικών, δηλαδή τα ζεύγη τιμών παροχή μάζας – λόγος πίεσης και παροχή μάζας – ισεντροπικός βαθμός απόδοσης για κάθε ταχύτητα περιστροφής, μορφοποιήθηκαν και αποθηκεύτηκαν σε αρχείο κειμένου υπό συγκεκριμένη μορφή που ορίζει το πρόγραμμα.

Ειδικότερα, στο αρχείο αυτό η πρώτη γραμμή αποτελείται από δύο στήλες, στην πρώτη εκ των οποίων ορίζεται ο τύπος του χάρτη ανάλογα με τη συνιστώσα στην οποία αναφέρεται. Για παράδειγμα ο χάρτης συμπίεστη δηλώνεται με τον αριθμό 1. Στη δεύτερη στήλη της πρώτης γραμμής εισάγεται σχόλιο, το περιεχόμενο του οποίου απαιτείται να είναι ο τίτλος του χάρτη.

Στη δεύτερη γραμμή υπάρχουν επίσης δύο στήλες. Στην πρώτη στήλη δηλώνεται το πλήθος των ισοταχών καμπυλών του χάρτη, ενώ στη δεύτερη δηλώνεται αν ο χάρτης είναι διορθωμένος σε συνθήκες αναφοράς (Relativized, Non-Relativized).

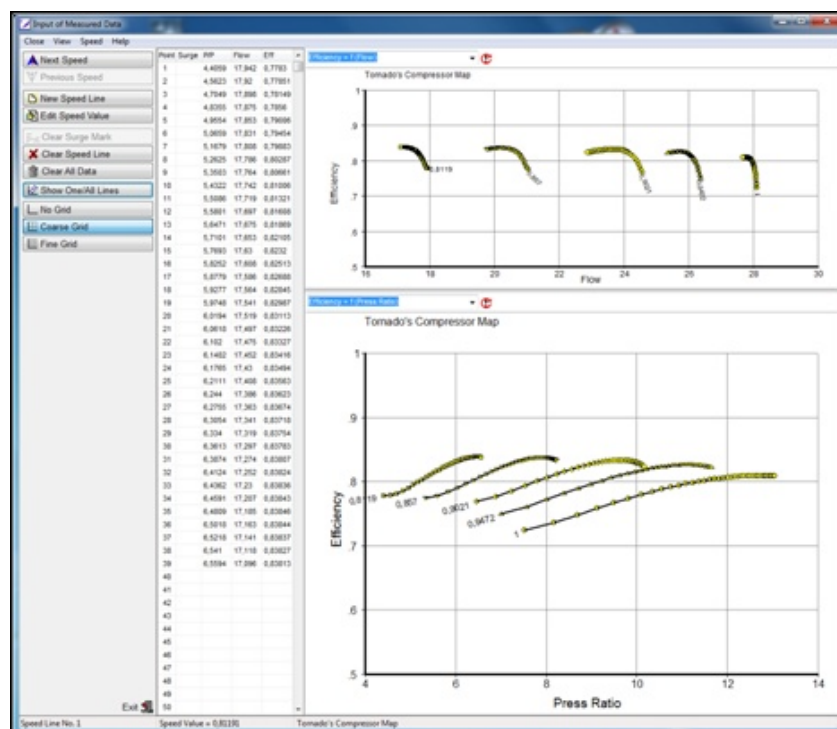
Η τρίτη γραμμή αποτελείται από τρεις στήλες. Στην πρώτη δηλώνεται η ταχύτητα περιστροφής, ανηγμένη ως προς τη ταχύτητα περιστροφής στο σημείο σχεδίασης, της πρώτης ισοταχούς. Στη δεύτερη δηλώνεται το πλήθος των σημείων για τη χάραξη της ισοταχούς, και στην τρίτη δηλώνεται αν θα δοθεί και το σημείο πάλμωσης (αν δοθεί τότε δηλώνεται ο αριθμός 1, διαφορετικά ο αριθμός 0).

Στις επόμενες γραμμές δηλώνονται τα σημεία της ισοταχούς, το πλήθος των οποίων δηλώθηκε νωρίτερα. Σε τρεις στήλες, δίνονται πρώτα τα αποτελέσματα του λόγου πίεσης, στη συνέχεια στη δεύτερη στήλη η παροχή μάζας και στη τρίτη ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης. Όταν παρατεθεί όλο το πλήθος των αποτελεσμάτων για τη πρώτη ισοταχή καμπύλη, δηλώνεται η δεύτερη ταχύτητα περιστροφής και το νέο πλήθος σημείων γι' αυτή. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου δηλωθούν όλα τα σημεία των ισοταχών καμπυλών. Στο Σχήμα 4.13 παρουσιάζεται ένα μέρος του αρχείου που δημιουργήθηκε υπό τη μορφή που ορίζει το πρόγραμμα Smooth (Measured Data File).

1 Tornado's Compressor Map		
5 Non-Relativized Map		
0.811908007	39	1
4.405900002	17.94199944	0.778299987
4.562300205	17.92000008	0.778509974
4.704899788	17.89800072	0.781490028
4.835499763	17.87500000	0.785600007
4.955399990	17.85300064	0.790059984
5.065899849	17.83099937	0.794539988
5.167900085	17.80800056	0.798829973

Σχήμα 4.13: Απαραίτητη μορφή αρχείου μετρήσεων για την εισαγωγή τους στο πρόγραμμα Smooth C

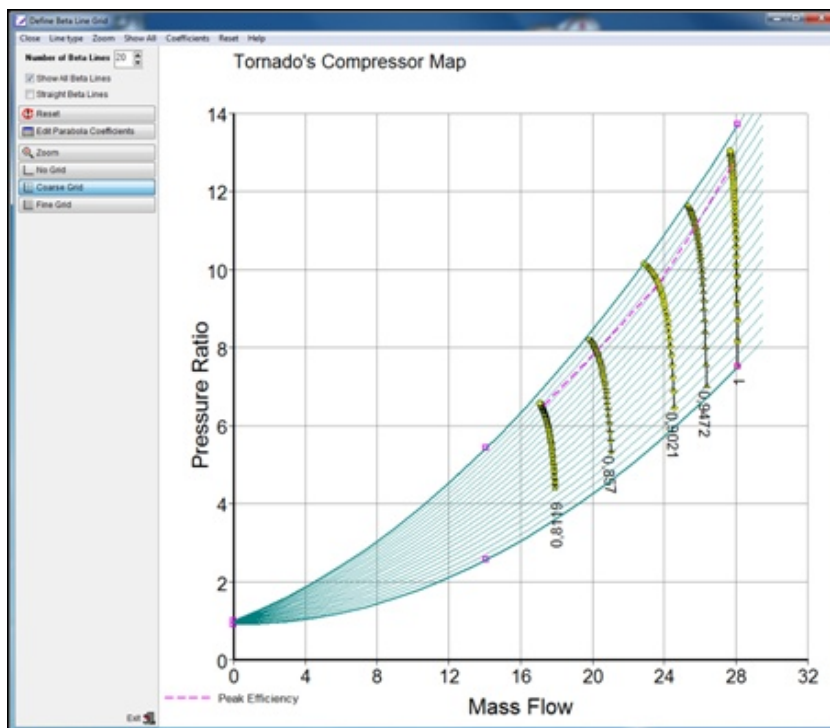
Στην συνέχεια αφότου εισήχθηκε στο πρόγραμμα (Read Measured Data), ελέγχθηκε οπτικά για τυχόν σφάλματα (Edit Measured Data). Το πεδίο χαρακτηριστικών όπως ελέγχθηκε στο πρόγραμμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.14.



Σχήμα 4.14: Επεξεργασία πεδίου χαρακτηριστικών καμπυλών συμπίεσής στο πρόγραμμα Smooth C

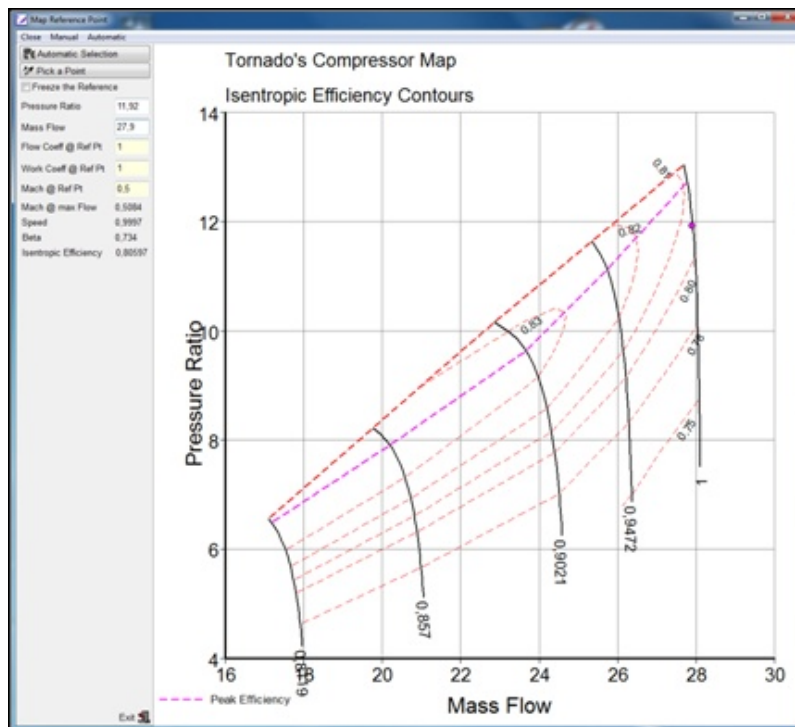
Αφότου ολοκληρώθηκε ο έλεγχος και η επεξεργασία του πεδίου χαρακτηριστικών, ακολούθησε ο καθορισμός του πλέγματος των συντεταγμένων γραμμών  $-\beta$ . Επιλέχθηκαν γραμμές  $-\beta$  παραβολικού τύπου και ρυθμίστηκαν κατά τέτοιο

τρόπο οι συντελεστές των παραβολών, ώστε μεταξύ της πρώτης  $\beta=0$  και τελευταίας  $\beta=1$  παραβολής να περικλείονται όλα τα σημεία των ισοταχών χαρακτηριστικών καμπυλών. Ο καθορισμός των συντεταγμένων γραμμών  $-\beta$  παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.15.



**Σχήμα 4.15: Καθορισμός βοηθητικών συντεταγμένων γραμμών  $-\beta$  στο πεδίο χαρακτηριστικών του συμπιεστή**

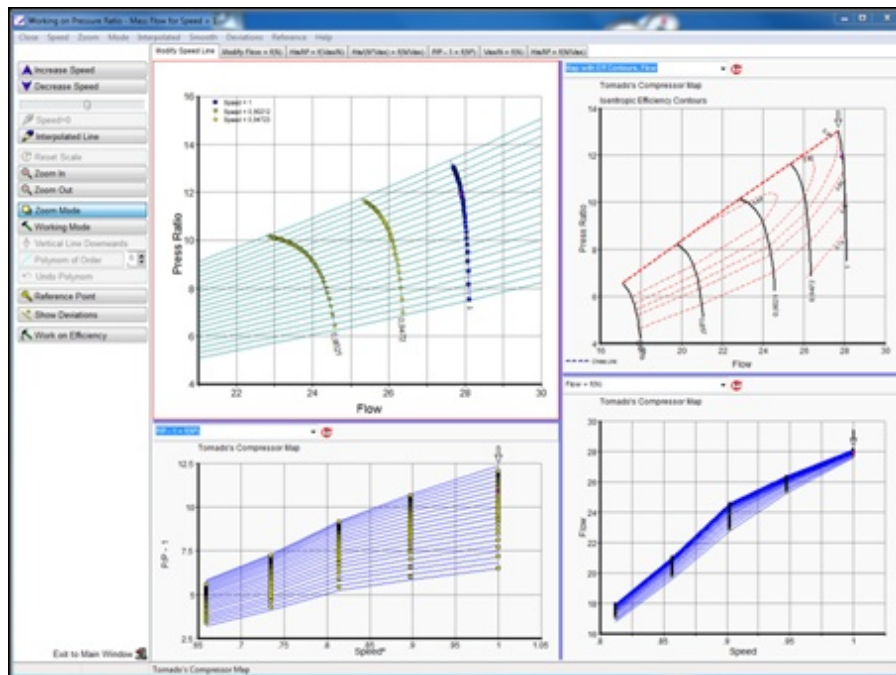
Στη συνέχεια απαιτείται η εισαγωγή του σημείου λειτουργίας του συμπιεστή επάνω στο χάρτη. Το σημείο αυτό ονομάζεται σημείο αναφοράς (Reference Point) και δίνεται χειροκίνητα ή επιλέγεται αυτόματα από το πρόγραμμα. Το σημείο σχεδίασης του συμπιεστή που μελετάται, τοποθετήθηκε ως σημείο αναφοράς επάνω στο χάρτη, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.16.



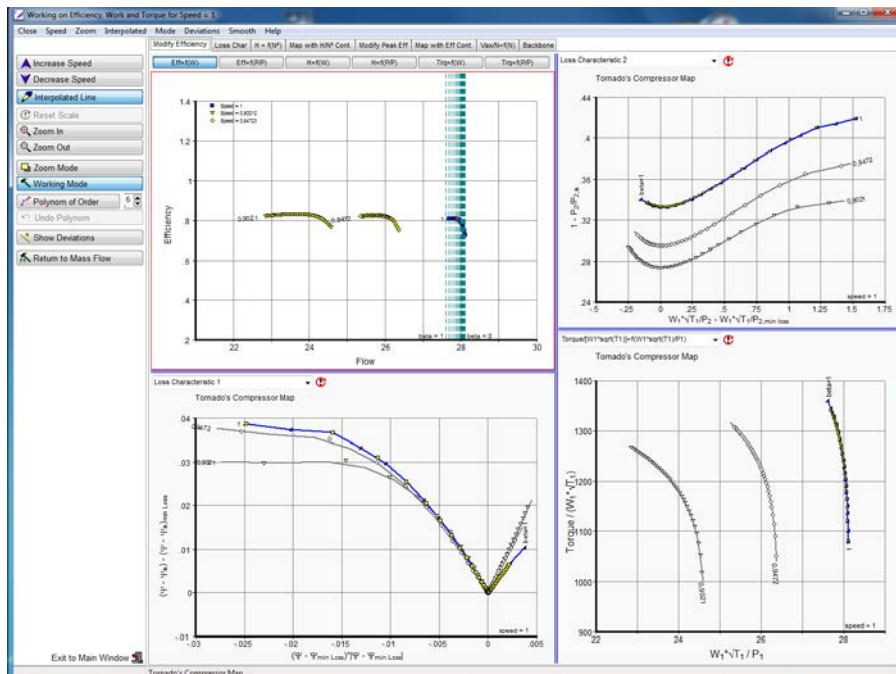
Σχήμα 4.16: Καθορισμός σημείου αναφοράς του συμπιεστή επάνω στο χάρτη

Επόμενο βήμα είναι η εξομάλυνση του χάρτη. Αυτό σημαίνει έλεγχο και επεξεργασία μία προς μία των ισοταχών καμπυλών του χάρτη και διάφορων καμπυλών που έχουν προκύψει από το αρχείο αποτελεσμάτων, για παράδειγμα καμπύλη ταχύτητα περιστροφής – παροχή μάζας. Αυτό το βήμα είναι απαραίτητο καθώς τα στοιχεία που έχουν εισαχθεί στο αρχείο είναι πιθανό να μην έχουν προκύψει από προσομοίωση συνιστώσας αλλά από μετρήσεις ή ψηφιοποίηση. Σε μία τέτοια περίπτωση υπάρχει πιθανότητα μερικά σημεία να μην βρίσκονται επάνω στην ισοταχή ή ακόμα να μην υπάρχουν αρκετά σημεία ώστε η ισοταχής που τα διαπερνά να μην προσεγγίζει με αξιοπιστία την πραγματική. Η δυνατότητα εξομάλυνσης του χάρτη που παρέχει το πρόγραμμα Smooth C αφορά την εισαγωγή περισσότερων σημείων για καλύτερη προσέγγιση των ισοταχών καμπυλών, τη μετακίνηση μερικών σημείων για την επαναφορά τους επάνω στην ισοταχή καμπύλη κα. Στην συγκεκριμένη εργασία τα αποτελέσματα που αποθηκεύτηκαν στο αρχείο, το οποίο εισήχθη στο πρόγραμμα Smooth C, έχουν προκύψει από την προσομοίωση του συμπιεστή, όπως μοντελοποιήθηκε με τη μέθοδο συσσώρευσης βαθμίδων, για το επιθυμητό εύρος και πλήθος σημείων παροχής μάζας. Μία πρώτη απεικόνιση του πεδίου χαρακτηριστικών, όπως παρουσιάστηκε στο Σχήμα 4.10, δείχνει πως οι ισοταχείς καμπύλες είναι φυσιολογικές. Επομένως στο στάδιο αυτό, στο πρόγραμμα Smooth C, πραγματοποιήθηκε ένας τυπικός εποπτικός έλεγχος, αρχικά στις χαρακτηριστικές καμπύλες που συνδέουν παροχή μάζας και λόγο πίεσης και στη συνέχεια στις καμπύλες που συνδέουν παροχή μάζας και ισεντροπικό βαθμό απόδοσης. Το περιβάλλον

επεξεργασίας και ελέγχου του πεδίο χαρακτηριστικών παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.17 και 4.18.



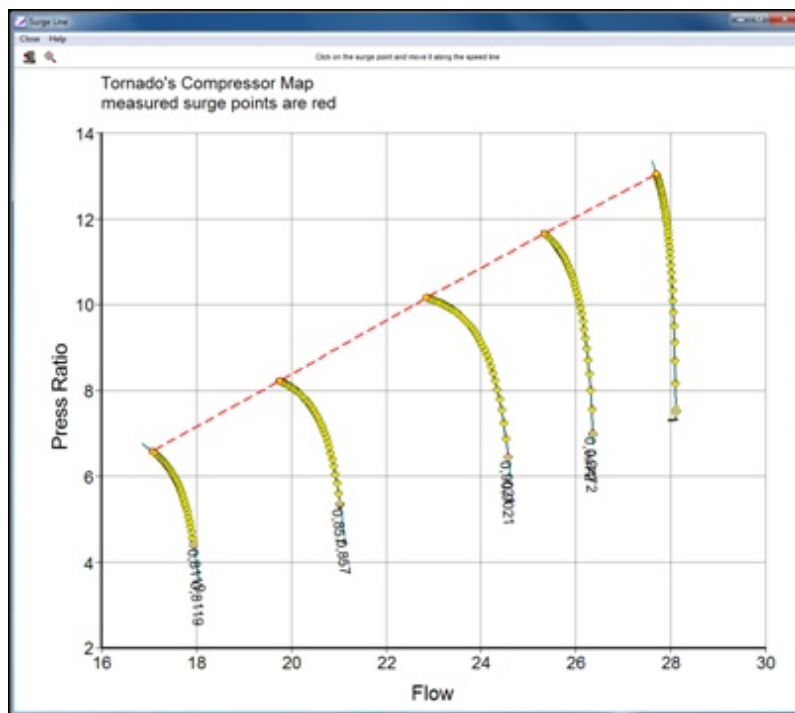
Σχήμα 4.17: Επεξεργασία και έλεγχος χαρακτηριστικών καμπυλών παροχής μάζας-λόγου πίεσης στο πρόγραμμα Smooth C



Σχήμα 4.18: Επεξεργασία και έλεγχος χαρακτηριστικών καμπυλών παροχής μάζας-ισεντροπικού βαθμού απόδοσης στο πρόγραμμα Smooth C



Με το τέλος της διαδικασίας εξομάλυνσης του χάρτη, αποθηκεύτηκε ως νέο αρχείο (Smooth Data File). Στη συνέχεια ελέγχθηκε η γραμμή πάλμωσης, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.19.



Σχήμα 4.19: Έλεγχος γραμμής πάλμωσης του πεδίου χαρακτηριστικών στο πρόγραμμα Smooth C

Με τον έλεγχο της γραμμής πάλμωσης η διαδικασία μετατροπής του αρχικού πεδίου χαρακτηριστικών σε χάρτη μορφής beta map που φέρει συντεταγμένες γραμμές – β, έχει ολοκληρωθεί. Ο χάρτης εξήχθη από το πρόγραμμα σε μορφή Beta Map που ήταν και αρχικός σκοπός. Στη συνέχεια για να είναι το αρχείο συμβατό με το πρόγραμμα PROOSIS και να είναι δυνατή η χρήση του ως δεδομένο σε συνιστώσα συμπιεστή μετατράπηκε σε xml μορφή, μέσω εφαρμογής που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

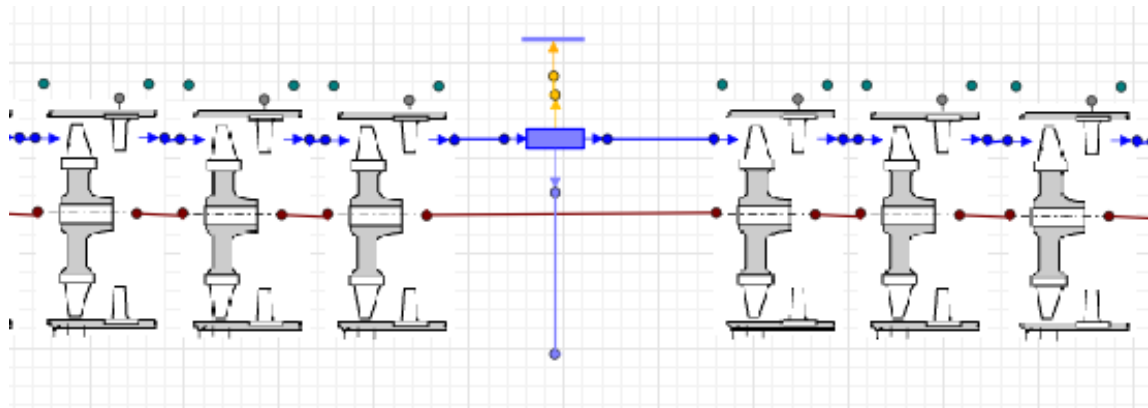
#### 4.5 Επίδραση Απομάστευσης στη λειτουργία του συμπιεστή

Η μοντελοποίηση του συμπιεστή με τη μέθοδο συσσώρευσης βαθμίδων, παρέχει τη δυνατότητα μελέτης της συνιστώσας και των επιδόσεων της, μεταξύ άλλων και για την περίπτωση απομάστευσης παροχής μάζας αέρα από ενδιάμεση βαθμίδα. Στα πλαίσια της παρούσης εργασίας, μελετήθηκε η περίπτωση απομάστευσης ποσοστού παροχής μάζας από την έβδομη βαθμίδα. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού, προστέθηκε στο σχηματικό διάγραμμα (Schematic) του συμπιεστή, ένας αγωγός εισόδου, η είσοδος του

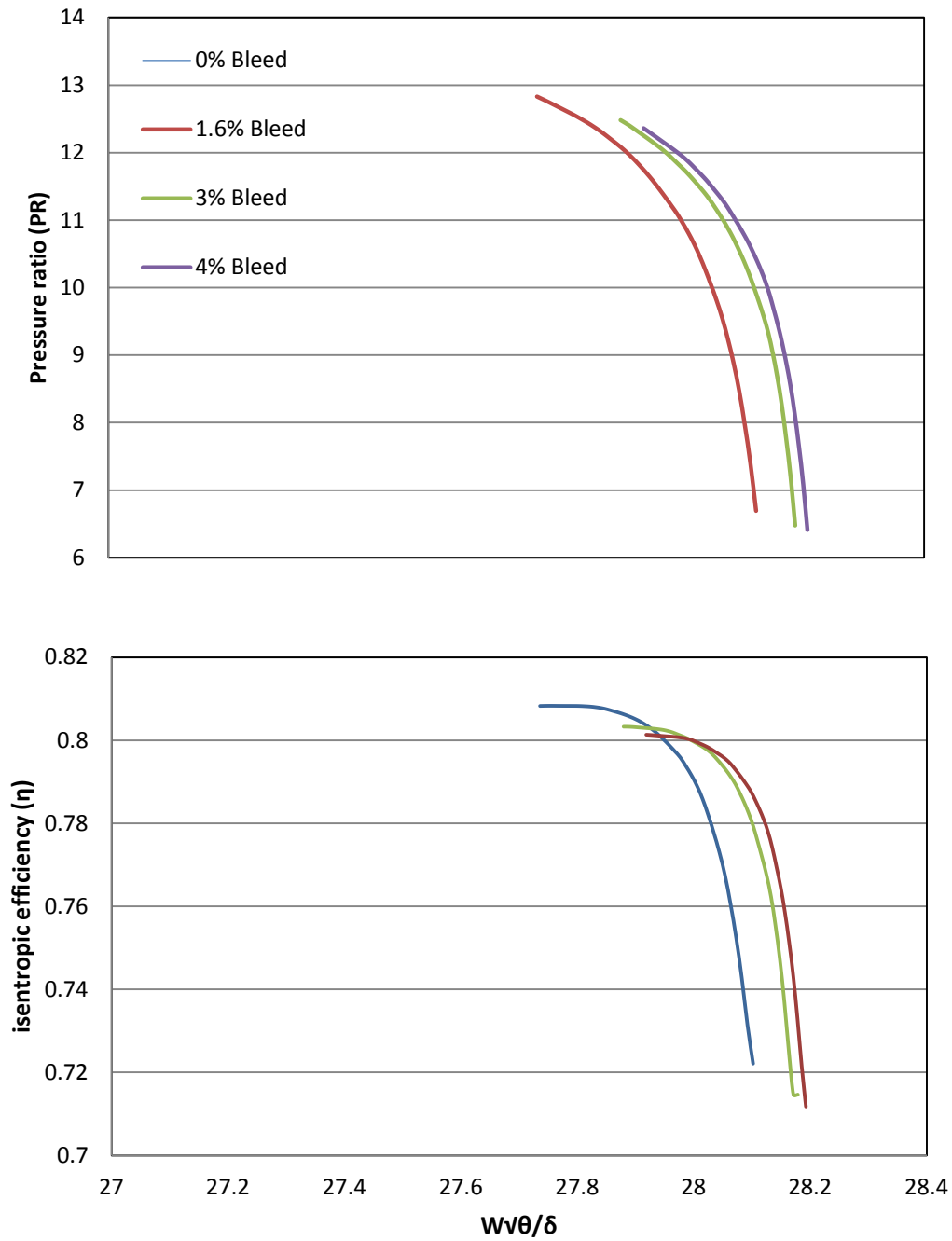
οποίου ενώθηκε με την έξοδο της έβδομης βαθμίδας, ενώ η έξοδος αυτού ενώθηκε με την είσοδο της όγδοης βαθμίδας, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.20.

Στα χαρακτηριστικά (attributes) του αγωγού εισόδου, δηλώθηκαν μηδενικές απώλειες πίεσης και ποσοστό απομαστευόμενης παροχής 1,6% της ολικής. Για το καθορισμό και την επίλυση του μαθηματικού προβλήματος δημιουργήθηκε ένα νέο Partition, στο οποίο επιλέχθηκαν οι ίδιες οριακές συνθήκες όπως προηγουμένως. Για τη προσομοίωση του νέου συμπιεστή δημιουργήθηκε ένα νέο πείραμα (Experiment), από το οποίο παράχθηκε το νέο πεδίο χαρακτηριστικών. Στη συνέχεια επαναλήφθηκε προσομοίωση του συμπιεστή για ποσοστό απομαστευόμενης παροχής μάζας 3% και 4%. Στο Σχήμα 4.21 παρουσιάζεται για τη ταχύτητα περιστροφής σχεδίασης 11085 rpm, η μεταβολή του λόγου πίεσης και του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης συναρτήσει της παροχής μάζας για τα διάφορα ποσοστά απομάστευσης.

Για αύξηση του ποσοστού απομάστευσης, παρατηρείται για ίδια τιμή παροχή μάζας, αύξηση του λόγου πίεσης και του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης και μετατόπιση της ισοταχούς προς μεγαλύτερες παροχές. Αυτό συμβαίνει διότι μειώνεται η παροχή μάζας και συνεπώς η παράμετρος παροχής  $\Phi$  για τις βαθμίδες μετά την έβδομη. Κατά συνέπεια η βαθμίδα μετακινείται στη καμπύλη της ισοταχούς προς μεγαλύτερο λόγο πίεσης. Τα όρια ευσταθούς λειτουργίας αλλάζουν, ώστε ο συμπιεστής έρχεται σε κατάσταση stall και choke για μεγαλύτερες τιμές της παροχής μάζας.

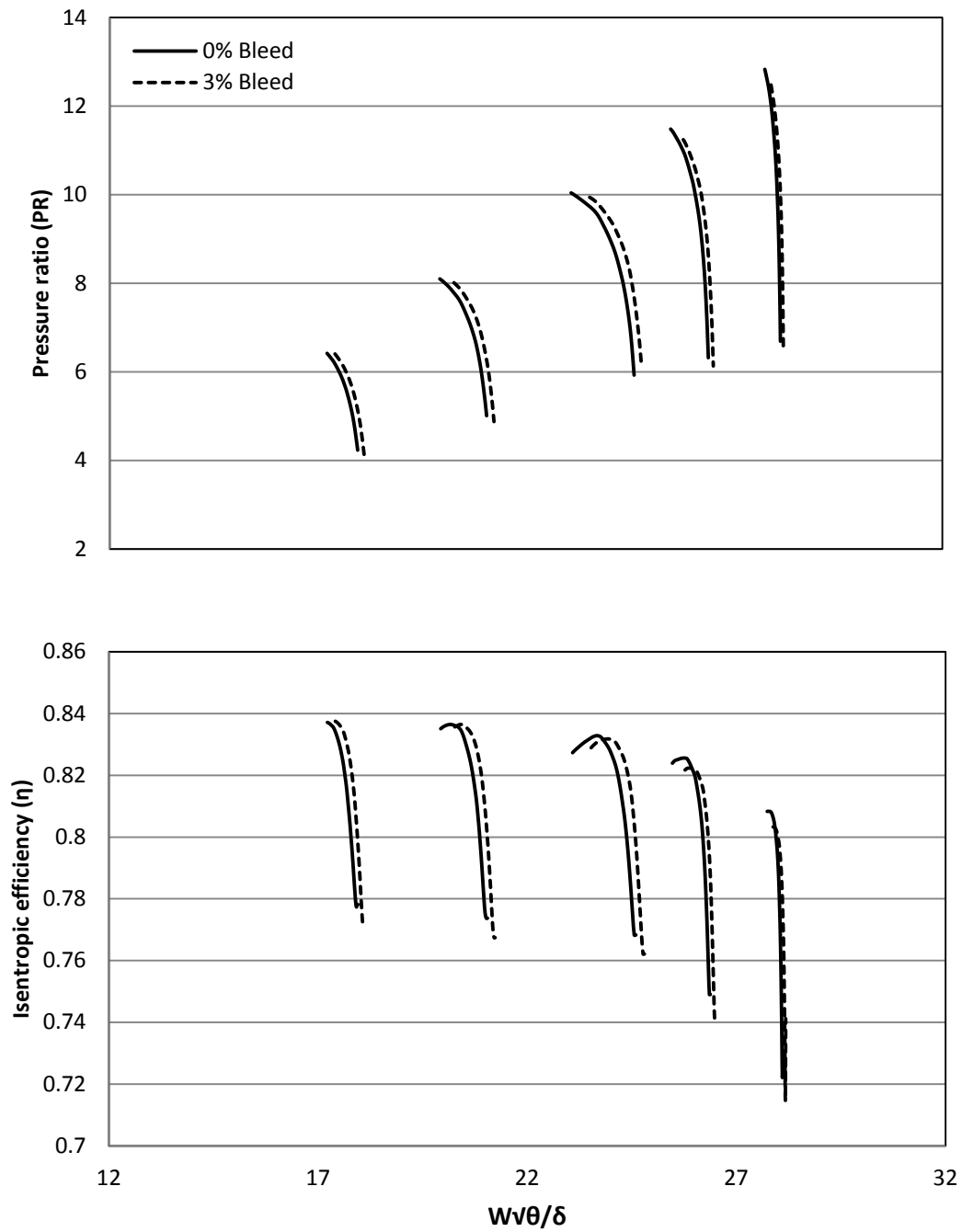


Σχήμα 4.20: Σχηματικό διάγραμμα συμπιεστή με απομάστευση σε ενδιάμεση βαθμίδα



**Σχήμα 4.21: Μεταβολή χαρακτηριστικής καμπύλης για αυξανόμενα ποσοστά απομάστευσης από την έξοδο της έβδομης βαθμίδας του συμπιεστή στη ταχύτητα περιστροφής σχεδίασης 11085 rpm**

Στο Σχήμα 4.22 παρουσιάζεται το πεδίο χαρακτηριστικών του συμπιεστή χωρίς απομάστευση και για ποσοστό απομάστευσης 3% από την έξοδο της έβδομης βαθμίδας.



Σχήμα 4.22: Πεδίο χαρακτηριστικών καμπυλών του συμπιεστή για ποσοστό απομάστευσης 0 και 3% από την έξοδο της έβδομης βαθμίδας

# 5

## Μοντελοποίηση Αεριοστρόβιλου

Με την ολοκλήρωση της μοντελοποίησης της συνιστώσας του συμπιεστή με τη μέθοδο συσσώρευσης βαθμίδων, όπως αυτή περιγράφηκε στο τέταρτο κεφάλαιο, επόμενος στόχος είναι η ενσωμάτωση αυτής σε διάταξη αεριοστρόβιλου. Σκοπός της ενέργειας αυτής είναι η δυνατότητα μοντελοποίησης ολόκληρης της μηχανής με υψηλότερης ευκρίνειας (1-D) μοντέλο συμπιεστή. Στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής εργασίας η διάταξη στην οποία ενσωματώθηκε ο συμπιεστής είναι αυτή του αεριοστρόβιλου Tornado.

Στη πρώτη ενότητα γίνεται περιγραφή του αεριοστρόβιλου Tornado, καθώς παρατίθενται τα γενικά χαρακτηριστικά και οι παράμετροι επιδόσεων της μηχανής και των συνιστωσών της. Στη δεύτερη ενότητα γίνεται περιγραφή της μοντελοποίησης και προσομοίωσης του αεριοστρόβιλου Tornado στο σημείο σχεδίασης, στο περιβάλλον του PROOSIS. Επιπροσθέτως, πραγματοποιήθηκε ανάλυση εκτός σημείου σχεδίασης.

### 5.1 Βιομηχανικός Αεριοστρόβιλος Tornado

Ο βιομηχανικός αεριοστρόβιλος Tornado<sup>[10],[19]</sup> σχεδιάστηκε το 1977 από την Ruston Gas Turbines Limited, σήμερα γνωστή με το όνομα Alstom και κομμάτι της European Gas Turbines Limited. Κατασκευάστηκε και εγκαταστάθηκε για πρώτη φορά το 1981.

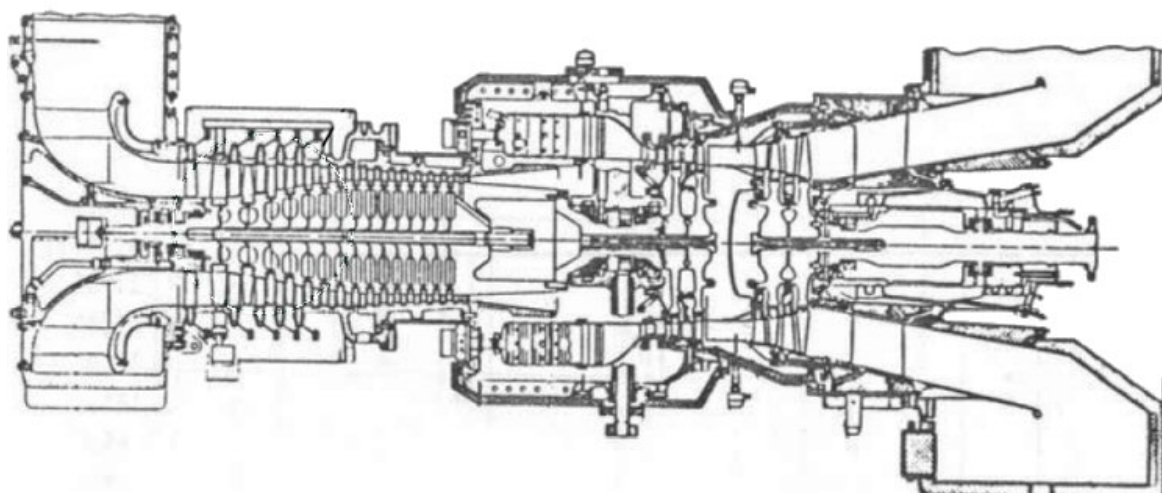
Είναι αεριοστρόβιλος αξονικής ροής, διπλής ατράκτου, με δυνατότητα λειτουργίας και ως αεριοστρόβιλος απλής, με συνένωση των δύο ατράκτων, διάταξη που απαντάται συχνότερα. Χρησιμοποιείται για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης και αυτής της συμπαραγωγής, και για μηχανικά φορτία.

Αποτελείται από τις εξής κύριες συνιστώσες: αγωγό εισόδου, συμπιεστή, θάλαμο καύσης, στρόβιλο, δύο διαχύτες και δύο αναμείκτες. Ο Πίνακας 5.1 παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά της λειτουργίας του αεριοστρόβιλου.

Στο Σχήμα 5.1<sup>[10]</sup> παρουσιάζεται σκαρίφημα της διάταξης του αεριοστρόβιλου Tornado.

<b>Επιδόσεις</b>	
Ισχύς Εξόδου	5,67 MW
Παροχή Μάζας Αέρα	27,9 kg/sec
Λόγος Πίεσης Συμπίεστη	11,92
Στροφές Συμπίεστη	11085 rpm
Θερμοκρασία Εισόδου στο Στρόβιλο (TIT)	1263 K
Θερμοκρασία Εξόδου Καυσαερίων (EGT)	757 K

**Πίνακας 5.1: Επιδόσεις Αεριοστρόβιλου Tornado**



**Σχήμα 5.1: Σκαρίφημα της διάταξης του αεριοστρόβιλου Tornado**

## 5.2 Μοντελοποίηση Αεριοστρόβιλου

Σε ένα μοντέλο αεριοστρόβιλου, η εμβάθυνση (Zooming)<sup>[3]</sup> στη μοντελοποίηση των συνιστωσών με στόχο την αύξηση της ευκρίνειας, δηλαδή η αντικατάσταση τους με μοντέλα διαστάσεων μεγαλύτερης ακρίβειας, οδηγεί σε πιστότερη προσομοίωση της λειτουργίας της μηχανής.

Στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής εργασίας, μελετήθηκε το μοντέλο του αεριοστρόβιλου Tornado για διαφορετική ευκρίνεια (fidelity) της συνιστώσας του συμπίεστη, διατηρώντας την ευκρίνεια στις λοιπές συνιστώσες της μηχανής.

Αρχικά, το μοντέλο της μηχανής μελετήθηκε με χρήση χάρτη στο συμπίεστη. Ειδικότερα, δημιουργήθηκαν δύο μοντέλα του αεριοστρόβιλου Tornado:

- Στο πρώτο μοντέλο που δημιουργήθηκε, ο χάρτης που χρησιμοποιήθηκε στο συμπιεστή είναι ένας γενικός χάρτης (generic map), ο οποίος αντιστοιχεί σε όμοιο πολυβάθμιο υψηλής πίεσης συμπιεστή.
- Στο δεύτερο μοντέλο ο χάρτης που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτός που παράχθηκε από τη μοντελοποίηση του συμπιεστή με τη μέθοδο συσσώρευσης βαθμίδων, όπως περιγράφηκε στο τέταρτο κεφάλαιο. Ο χάρτης αυτός περιγράφει τη λειτουργία του συγκεκριμένου συμπιεστή της συγκεκριμένης μηχανής.

Στη συνέχεια, στο μοντέλο της μηχανής αφαιρέθηκε ο συμπιεστής που χρησιμοποιεί χάρτη, και ενσωματώθηκε ο συμπιεστής όπως μοντελοποιήθηκε με τη μέθοδο συσσώρευσης βαθμίδων. Ο συμπιεστής σε αυτό το μοντέλο είναι υψηλότερης ευκρίνειας από ότι αυτός στα δύο μοντέλα που χρησιμοποιούν χάρτη.

### 5.2.1 Χρήση συμπιεστή με χάρτη

Το πρώτο επίπεδο μοντελοποίησης της μηχανής είναι η δημιουργία σχηματικού διαγράμματος (Schematic) στο οποίο τοποθετήθηκαν και ενώθηκαν μέσω των Θυρών (Ports), οι συνιστώσες από τις οποίες αποτελείται. Ο Πίνακας 5.2 παρουσιάζει τις συνιστώσες που χρησιμοποιήθηκαν.

Συνιστώσες	Components
Γενικό στοιχείο	General
Αγωγός εισόδου	Inlet Duct
Συμπιεστής	Compressor
Διαχύτης με 2 απομαστεύσεις	Diffuser2
Θάλαμος καύσης	Burner
Αναμείκτης με 2 επιστροφές	RMX1
Αναμείκτης με 1 επιστροφή	RMX2
Διαχύτης	Diffuser0
Άτρακτος	Shaft
Τέλος ατράκτου	Shaft End
Αρχή ατράκτου	Shaft Start
Κέλυφος συμπιεστή	Casing
Κέλυφος στρόβιλου	Casing
Στοιχείο Υπολογισμού Συνολικών Επιδόσεων	Monitor

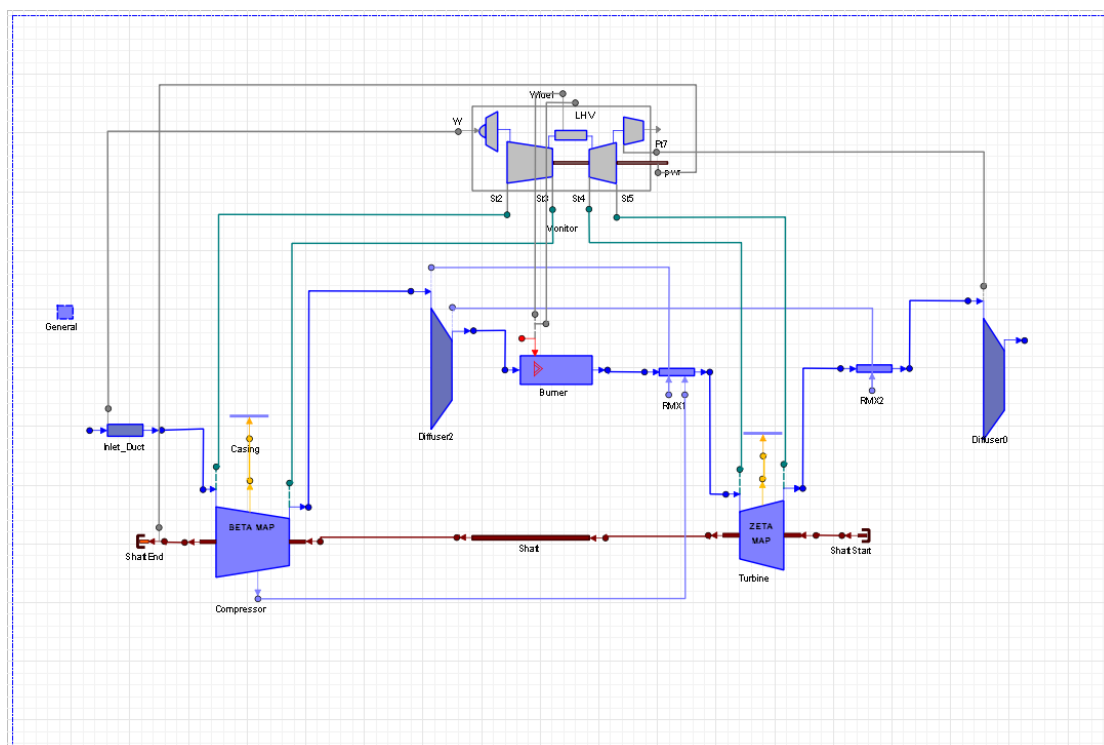
Πίνακας 5.2: Συνιστώσες που χρησιμοποιήθηκαν στη διάταξη του βιομηχανικού αεριοστρόβιλου Tornado στο πρόγραμμα PROOSIS

Όλες οι συνιστώσες, εκτός από τους δύο διαχύτες και τον αγωγό εισόδου, προέρχονται από τη βιβλιοθήκη Turbo του προγράμματος PROOSIS. Τα μοντέλα του αγωγού εισόδου και των δύο διαχύτων έχουν προκύψει από προηγούμενη μελέτη<sup>[19]</sup> στον αεριοστρόβιλο Tornado.

Ειδικότερα, ο συμπιεστής και ο στρόβιλος είναι μηδενικών διαστάσεων (0-D) και τα μοντέλα τους χρησιμοποιούν χάρτη. Ο χάρτης που χρησιμοποιήθηκε στο συμπιεστή υπήρξε αντικείμενο της παρούσης μελέτης. Σε αντίθεση ο χάρτης που χρησιμοποιήθηκε στο στρόβιλο, ο οποίος είναι ένας γενικός χάρτης (generic map), δεν είναι αντικείμενο μελέτης της παρούσης εργασίας και επομένως παρέμεινε ο ίδιος στα διάφορα μοντέλα του αεριοστρόβιλου Tornado που μελετήθηκαν.

Τα κελύφη προστέθηκαν στις συνιστώσες συμπιεστή και στρόβιλου για τη παγίδευση των θερμικών απωλειών. Επιπλέον, προστέθηκε ένα Monitor για την επίβλεψη και τη δυνατότητα υπολογισμού των συνολικών επιδόσεων της μηχανής, και ένα γενικό στοιχείο (General) προς καθορισμό κοινού εργαζόμενου μέσου για όλη την μηχανή.

Στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζεται το νέο σχηματικό διάγραμμα του αεριοστρόβιλου Tornado.

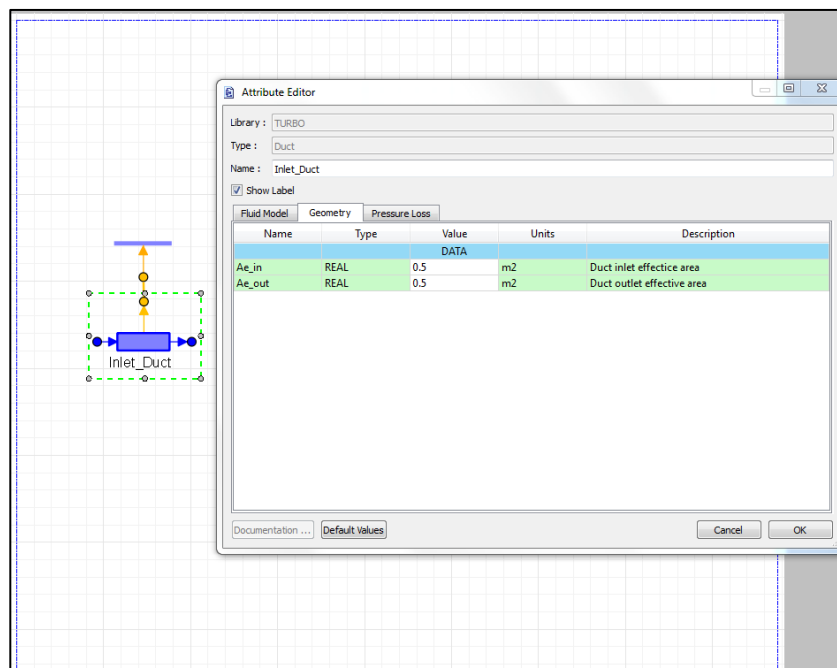


Σχήμα 5.2: Σχηματικό διάγραμμα (Schematic) βιομηχανικού αεριοστρόβιλου Tornado στο περιβάλλον του προγράμματος PROOSIS



Στη διάταξη του αεριοστρόβιλου, ποσοστό της παροχής μάζας απομαστεύεται από την έξοδο του συμπιεστή και από το διαχύτη (Diffuser2), και διοχετεύεται στον 1<sup>ο</sup> αναμείκτη (RMX1). Ένα δεύτερο ποσοστό παροχής μάζας απομαστεύεται από το διαχύτη (Diffuser2), και διοχετεύεται στο 2<sup>ο</sup> αναμείκτη (RMX2).

Σε κάθε μία από τις συνιστώσες είναι απαραίτητος ο καθορισμός βασικών χαρακτηριστικών τους όπως για παράδειγμα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, απώλειες πίεσης, ποσοστό απομάστευσης από και προς τη συνιστώσα κλπ. Τα χαρακτηριστικά των συνιστωσών της διάταξης στο πρόγραμμα PROOSIS καθορίζονται μέσω ενός αναδυόμενου παραθύρου για κάθε μία από τις συνιστώσες, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.3.



**Σχήμα 5.3: Παράδειγμα καθορισμού χαρακτηριστικών (attributes) των συνιστωσών σε διάταξη αεριοστρόβιλου στο πρόγραμμα PROOSIS**

Τα χαρακτηριστικά των συνιστωσών καθορίστηκαν βάση αποτελεσμάτων προηγούμενης μελέτης<sup>[19]</sup> στον αεριοστρόβιλο Tornado. Ο Πίνακας 5.3 παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά των συνιστωσών.

<b>Χαρακτηριστικά Συνιστωσών (Attributes) διάταξης αεριοστρόβιλου Tornado</b>		
<b>Γενικό στοιχείο (General)</b>		
Fluid model	Επιλογή εργαζόμενου μέσου	Αέρας με καύσιμο κηροζίνη
<b>Αγωγός Εισόδου (Inlet Duct)</b>		
Ae_in	Εμβαδόν εισόδου (m <sup>2</sup> )	0.728
Ae_out	Εμβαδόν εξόδου (m <sup>2</sup> )	0.728
cvol	Συντελεστής απωλειών πίεσης	0.65
<b>Συμπιεστής (Compressor)</b>		
Nmech	Ταχύτητα περιστροφής στο σημείο σχεδίασης (rpm)	11085
W_bleed	Συνάρτηση απομάστευσης της ροής εισόδου	{0.016}
h_Bld	Θέση απομάστευσης σε σχέση με το λόγο ενθαλπίας	{1}
<b>Διαχύτης (Diffuser2)</b>		
Ae_in	Εμβαδόν εισόδου (m <sup>2</sup> )	0.025
Ae_out	Εμβαδόν εξόδου (m <sup>2</sup> )	0.052
PRc	Συντελεστής ανάκτησης πίεσης	0.65
Wbleed	Συνάρτηση απομάστευσης της ροής εισόδου από την είσοδο του διαχύτη	{0.01}
Wbleed	Συνάρτηση απομάστευσης της ροής εισόδου από την έξοδο του διαχύτη	{0.01}
<b>Θάλαμος Καύσης (Burner)</b>		
Eff_in	Συντελεστής απόδοσης	0.99
dPqP_in	Λόγος απωλειών πίεσης	0.034
<b>Αναμείκτης (RMX1)</b>		
Ae	Εμβαδόν διατομής (m <sup>2</sup> )	0.3197
<b>Στρόβιλος (Turbine)</b>		
A_out	Εμβαδόν εξόδου (m <sup>2</sup> )	0.36
<b>Αναμείκτης (RMX2)</b>		
Ae	Εμβαδόν διατομής (m <sup>2</sup> )	0.031
<b>Διαχύτης (Diffuser0)</b>		
Ae_in	Εμβαδόν εισόδου (m <sup>2</sup> )	0.319
Ae_out	Εμβαδόν εξόδου (m <sup>2</sup> )	1.288
PRc	Συντελεστής ανάκτησης πίεσης	0.58

**Πίνακας 5.3: Καθορισμός χαρακτηριστικών συνιστωσών (attributes) διάταξης αεριοστρόβιλου Tornado στο πρόγραμμα PROOSIS**

Αφότου ολοκληρώθηκε η δημιουργία του σχηματικού διαγράμματος του αεριοστρόβιλου Tornado και προσδιορίστηκαν τα χαρακτηριστικά των συνιστωσών από τις οποίες αποτελείται, πραγματοποιήθηκε προσαρμογή των χαρτών του συμπιεστή και του στροβίλου στο σημείο σχεδίασης.

Η προσαρμογή των χαρτών στο σημείο σχεδίασης (Scaling) είναι μία τεχνική που χρησιμοποιείται προκειμένου να προσδιοριστούν χάρτες επιδόσεων συμπιεστή ή στροβίλου, από διαθέσιμους που περιγράφουν τις επιδόσεις όμοιων συνιστωσών με διαφορετικές όμως επιδόσεις. Κατά βάση, το σημείο σχεδίασης της συνιστώσας που μελετάται “τοποθετείται” στον γενικό χάρτη, και συνεπώς αλλάζει η κλίμακα του ώστε να ικανοποιεί τη λειτουργία αυτής. Συγκεκριμένα, το σημείο σχεδίασης τοποθετείται στην τομή της σχεδιαστικής διορθωμένης ταχύτητας περιστροφής (NcRdes) και της αδιάστατης βοηθητικής συντεταγμένης του χάρτη BETA ή ZETA (αντίστοιχο μέγεθος για το στρόβιλο των βοηθητικών συντεταγμένων γραμμών  $-\beta$  του χάρτη του συμπιεστή). Από την αλλαγή κλίμακας στο χάρτη προκύπτουν συντελεστές που δείχνουν κατά πόσο τροποποιήθηκαν διάφορα μεγέθη, για παράδειγμα λόγος πίεσης, παροχή μάζας. Αυτοί οι συντελεστές ονομάζονται διορθωτικοί συντελεστές και μπορούν, αφότου προσδιοριστούν, να χρησιμοποιηθούν και σε άλλα μοντέλα μηχανών για τον ίδιο συμπιεστή ή στρόβιλο.

Στο πρόγραμμα PROOSIS χρησιμοποιούνται διάφοροι διορθωτικοί συντελεστές<sup>[1],[19]</sup>, ώστε να προσαρμόζεται ο γενικός χάρτης στις επιδόσεις της συνιστώσας που μελετάται. Οι συντελεστές αυτοί είτε καθορίζονται από προηγούμενες μελέτες είτε υπολογίζονται μέσω ανάλυσης στο σημείο σχεδίασης. Αυτοί οι συντελεστές είναι:

- Συντελεστές κλίμακας (Scalars) και Αθροιστές (Adders) (Πίνακας 5.4).

Συντελεστές κλίμακας (Scalars)	Αθροιστές (Adders)	Μέγεθος που διορθώνεται
s_NcRdes_in	a_NcRdes_in	Διορθωμένη ανηγμένη ταχύτητα περιστροφής
s_mapWc_in	a_mapWc_in	Διορθωμένη παροχή μάζας
s_mapEff_in	a_mapEff_in	Ισεντροπικός Βαθμός απόδοσης
s_mapPR_in		Λόγος πίεσης
s_mapDhqT_in		Αύξηση ενθαλπίας

**Πίνακας 5.4: Συντελεστές κλίμακας και αθροιστές**

- Οι συντελεστές αυτοί τροποποιούν το γενικό χάρτη, έτσι ώστε η λειτουργία του συμπιεστή να αναπαράγεται με ακρίβεια. Η τροποποίηση γίνεται σύμφωνα με τις εξισώσεις:

$$W_C = W_{Cmap} \cdot s_{map} W_{C\_in} \cdot s_{adap} W_{C\_in} + a_{map} W_{C\_in} + a_{adap} W_{C\_in} \quad (5.1)$$

$$eff = eff_{map} \cdot s_{map} Eff_{in} \cdot s_{adap} Eff_{in} + a_{map} Eff_{in} + a_{adap} Eff_{in} \quad (5.2)$$

$$NcRdes = (NcRdesMap \cdot s_{NcRdes\_in} + a_{NcRdes\_in}) \cdot s_{gam} Nc \quad (5.3)$$

$$PR = (PRmap - 1) \cdot s_{map} PR_{in} + 1 \quad (5.4)$$

- Συντελεστές προσαρμογής (Adaptation factors). Χρησιμοποιούνται για διαγνωστικούς σκοπούς και δείχνουν κατά πόσο η λειτουργία μίας συνιστώσας παρεκκλίνει από την υγιή λειτουργία λόγω βλάβης ή φθοράς. Επίσης χρησιμοποιούνται για την προσαρμογή των παραμέτρων λειτουργίας των συνιστωσών ενός μοντέλου μηχανής, σε δεδομένα μετρήσεων (Πίνακας 5.5).

Συντελεστές προσαρμογής (Adaptation factors)		Μέγεθος που διορθώνεται
s_adaptWc_in	a_adaptWc_in	Διορθωμένη παροχή μάζας
s_adaptEff_in	a_adaptEff_in	Ισεντροπικός Βαθμός απόδοσης

Πίνακας 5.5: Συντελεστές προσαρμογής

- Διορθωτικοί συντελεστές (Correction factors). Χρησιμοποιούνται για επιπρόσθετη ακρίβεια στους υπολογισμούς καθώς λαμβάνουν υπόψη τον αριθμό Reynolds και την επίδραση του ισεντροπικού εκθέτη (Πίνακας 5.6).

Διορθωτικοί συντελεστές (Correction factors)	Μέγεθος που διορθώνεται
s_ReEff	Ισεντροπικός Βαθμός απόδοσης
s_ReWc	Διορθωμένη παροχή μάζας
s_gamWc	Διορθωμένη παροχή μάζας
s_gamEff	Διορθωμένη παροχή μάζας
s_gamPR	Λόγος πίεσης
s_gamDhqT	Αύξηση ενθαλπίας

Πίνακας 5.6: Διορθωτικοί συντελεστές

- Συντελεστές μεταβλητής γεωμετρίας οδηγών πτερυγίων εισόδου. Χρησιμοποιούνται για τη διόρθωση στη λειτουργία της συνιστώσας υπό την επίδραση των οδηγών πτερυγίων εισόδου (IGVs) (Πίνακας 5.7).

Συντελεστές μεταβλητής γεωμετρίας	Μέγεθος που επηρεάζεται λόγω IGVs
s_IGV_Wc	Διορθωμένη παροχή μάζας
s_IGV_eff	Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης
s_IGV_Yvar	Αύξηση ενθαλπίας ή (PR-1)

Πίνακας 5.7: Συντελεστές μεταβλητής γεωμετρίας οδηγών πτερυγίων εισόδου

### 5.2.1.1 Χρήση γενικού χάρτη

Με την ολοκλήρωση της δημιουργίας του σχηματικού διαγράμματος του αεριοστρόβιλου και τον καθορισμό των χαρακτηριστικών των συνιστωσών του, μελετήθηκε η χρήση γενικού χάρτη στο συμπιεστή.

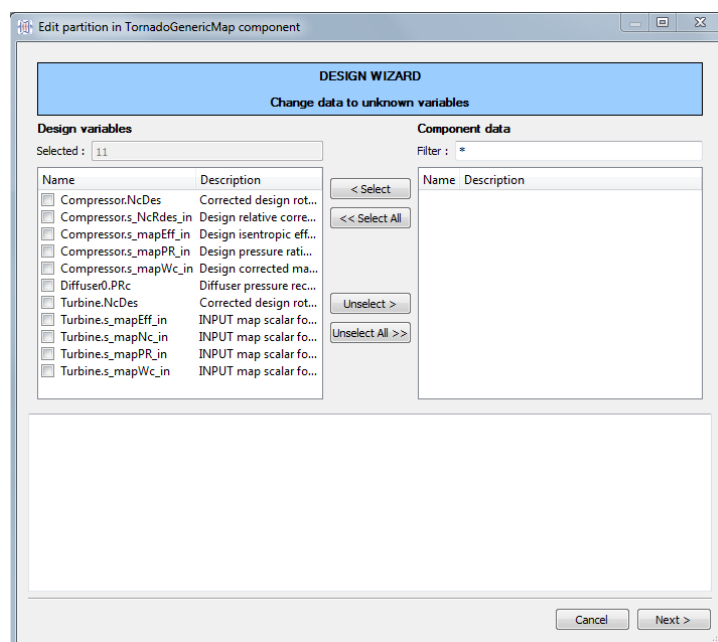
Για την προσαρμογή των χαρτών συμπιεστή και στροβίλου στο σημείο σχεδίασης, ήταν απαραίτητος ο προσδιορισμός μόνο των συντελεστών κλίμακας (Scalars). Για τον υπολογισμό τους πραγματοποιήθηκε ανάλυση στο σημείο σχεδίασης, με τη δημιουργία Design Partition.

Ειδικότερα, δημιουργήθηκε ένα νέο Design Partition, στο οποίο επιλέχθηκαν ως μεταβλητές σχεδιασμού (Design Variables), οι συντελεστές κλίμακας, οι διορθωμένες στροφές στο σημείο σχεδίασης του συμπιεστή και του στροβίλου και η ανάκτηση πίεσης στην έξοδο του διαχύτη (Diffuser0) (Πίνακας 5.8). Οι συγκεκριμένοι συντελεστές θα προσαρμόσουν το χάρτη στο σημείο σχεδίασης για αυτό και καθορίζουν την παροχή μάζας, το λόγο πίεσης τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης και τις στροφές.

Μεταβλητές σχεδιασμού (Design Variables)	
Compressor	NcDes
Compressor	s_NcRdes_in
Compressor	s_mapWc_in
Compressor	s_mapEff_in
Compressor	s_mapPR_in
Turbine	NcDes
Turbine	s_Nc_in
Turbine	s_mapWc_in
Turbine	s_mapEff_in
Turbine	s_mapPR_in
Diffuser0	PRc

Πίνακας 5.8: Μεταβλητές σχεδιασμού

Στο Σχήμα 5.4 παρουσιάζεται η επιλογή των μεταβλητών σχεδιασμού κατά τη δημιουργία Design Partition.



Σχήμα 5.4: Επιλογή μεταβλητών σχεδιασμού

Στη συνέχεια, επιλέχθηκαν οι οριακές συνθήκες για το καθορισμό και την επίλυση του μαθηματικού προβλήματος. Οι μεταβλητές που επιλέχθηκαν ως οριακές συνθήκες είναι οι συνθήκες της ροής στην είσοδο της μηχανής (είσοδος του αγωγού εισόδου (Inlet Duct)), η ταχύτητα περιστροφής, το σημείο σχεδίασης για το συμπιεστή και το στρόβιλο, η παροχή καυσίμου στο θάλαμο καύσης, οι επιδόσεις της μηχανής και η στατική πίεση εξόδου από το διαχύτη (Diffuser0). (Πίνακας 5.9).

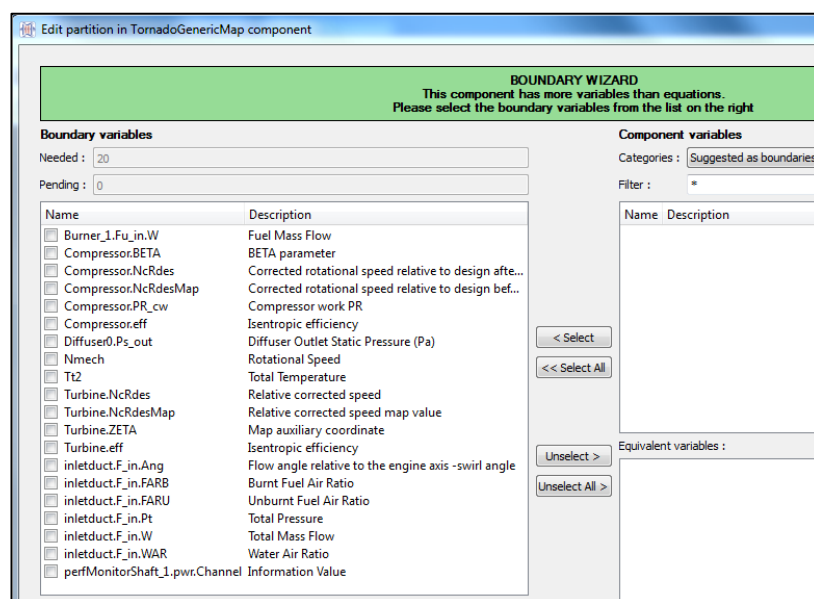
Ο χάρτης της συνιστώσας δείχνει πως μεταβάλλεται ο λόγος πίεσης συναρτήσει της παροχής για διάφορες ταχύτητες περιστροφής και ισηντροπικούς βαθμούς απόδοσης. Επομένως οι οριακές συνθήκες που επιλέχθηκαν βοηθούν στο καθορισμό του σημείου λειτουργίας.

Οριακές Συνθήκες (Boundary Variables)		
Inlet Duct	Ang	Συνθήκες ροής στην είσοδο της μηχανής
Inlet Duct	Pt	
Inlet Duct	Tt	
Inlet Duct	W	
Inlet Duct	WAR	
Inlet Duct	FARB	
Inlet Duct	FARU	

Compressor	PR	Σημείο Λειτουργίας του Συμπιεστή
Compressor	eff	
Compressor	NcRdes	
Compressor	NcRdesMap	
Compressor	BETA	
Compressor	Nmech	Ταχύτητα περιστροφής
Turbine	eff	Σημείο Λειτουργίας του Στροβίλου
Turbine	NcRdes	
Turbine	NcRdesMap	
Turbine	ZETA	
Diffuser0	Ps_out	Στατική πίεση εξόδου στο διαχύτη
Burner	Wf	Παροχή καυσίμου
Tornado	pwr	Ισχύς Tornado

Πίνακας 5.9: Οριακές συνθήκες προς καθορισμό και επίλυση του μαθηματικού μοντέλου

Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται η επιλογή των οριακών συνθηκών.



Σχήμα 5.5: Επιλογή οριακών συνθηκών κατά τη δημιουργία Design Partition

Με το πέρας της δημιουργίας του Design Partition, ο αεριοστρόβιλος προσομοιώθηκε στο σημείο σχεδίασης με σκοπό τον καθορισμό των συντελεστών κλίμακας και προσαρμογή στο σημείο σχεδίασης του χάρτη του συμπιεστή και του στροβίλου. Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκε ένα νέο Experiment, στο οποίο δόθηκαν κατάλληλες τιμές στις οριακές συνθήκες (Πίνακας 5.10).

Τιμές Οριακών Συνθηκών στο Experiment		
Inlet Duct.Ang	0°	Συνθήκες ροής στην είσοδο της μηχανής
Inlet Duct.Pt	101325 Pa	
Inlet Duct.Tt	288.15 K	
Inlet Duct.W	27.81 kg/sec	
Inlet Duct.WAR	0	
Inlet Duct.FARB	0	
Inlet Duct.FARU	0	
Compressor.PR	11.92	Σημείο Λειτουργίας του Συμπιεστή
Compressor.eff	0.8058	
Compressor.NcRdes	1	
Compressor.NcRdesMap	1	
Compressor.BETA	0.65	
Compressor.Nmech	11085 rpm	Ταχύτητα περιστροφής
Turbine.eff	0.894175589	Σημείο Λειτουργίας του Στροβίλου
Turbine.NcRdes	1	
Turbine.NcRdesMap	1	
Turbine.ZETA	0.695094379	
Diffuser0.Ps_out	101325 Pa	Στατική πίεση εξόδου στο διαχύτη
Burner.Wf	0.461874 kg/sec	Παροχή καυσίμου
Tornado.pwr	5.67 MW	Ισχύς Tornado

**Πίνακας 5.10: Τιμές οριακών συνθηκών**

Στο Σχήμα 5.6 παρουσιάζεται το αρχείο κώδικα του Experiment που δημιουργήθηκε για τη προσομοίωση του αεριοστροβίλου Tornado, και οι τιμές που δόθηκαν στις οριακές συνθήκες.



```

C:/PROOSIS_3.0/USER_LIBS/USER_JOLI/experiments/+tornado+gen...
EXPERIMENT exp1 ON TornadoGenericMap.design
DECLS
OBJECTS
INIT
BOUNDS
-- Set equations for boundaries --
inletduct.F_in.Ang = 0
inletduct.F_in.FARB = 0
inletduct.F_in.FARU = 0
inletduct.F_in.Pt = 101325
inletduct.F_in.Tt = 288.15
inletduct.F_in.W = 27.8065207
inletduct.F_in.WAR = 0
Compressor.PR_cw = 11.9230095
Compressor.eff = 0.805833138
Compressor.NcRdes = 1
Compressor.NcRdesMap = 1
Compressor.BETA = 0.65
Nmech = 11085
Turbine.eff = 0.894175589
Turbine.NcRdes = 0.999835575
Turbine.NcRdesMap = 0.999835575
Turbine.ZETA = 0.695094379
Diffuser0.Ps_out = 101325
Burner_1.Fu_in.W = 0.461874
perfMonitorShaft_1.pwr.Channel = 5.672824*10**6

BODY
-- report results in file reportAll.rpt
REPORT_TABLE("reportAll.rpt", "*",TRUE)
STEADY()

END EXPERIMENT

```

Σχήμα 5.6: Αρχείο κώδικα Experiment για τον υπολογισμό των συντελεστών κλίμακας

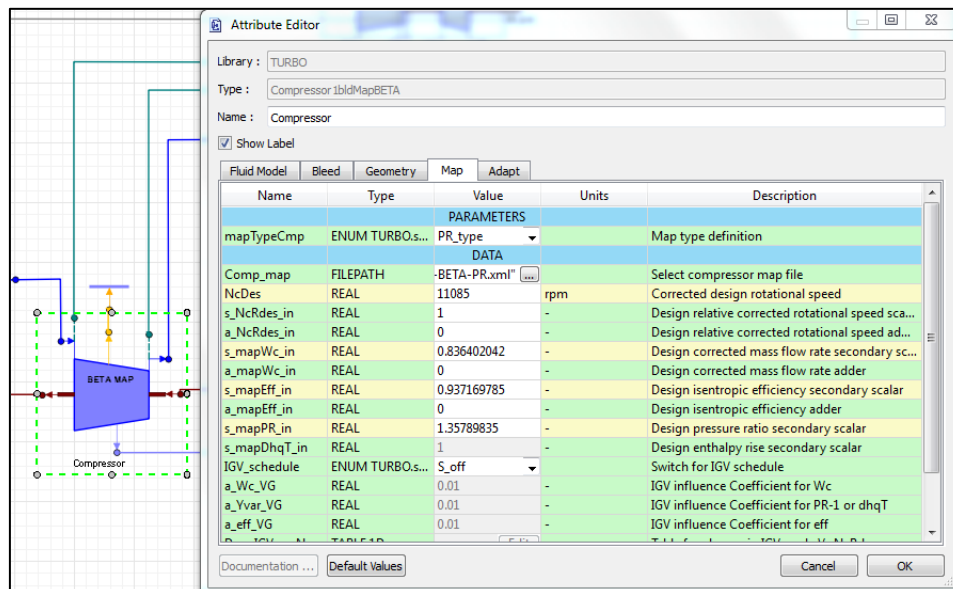
Ο Πίνακας 5.11 παρουσιάζει τα αποτελέσματα του υπολογισμού των συντελεστών κλίμακας.

Μεταβλητές σχεδιασμού (Design Variables): Αποτελέσματα		
Compressor	NcDes	11085 rpm
Compressor	s_NcRdes_in	1
Compressor	s_mapWc_in	0.836402042
Compressor	s_mapEff_in	0.937169785
Compressor	s_mapPR_in	1.35789835
Turbine	NcDes	5296.10714 rpm
Turbine	s_Nc_in	1
Turbine	s_mapWc_in	1.03262488
Turbine	s_mapEff_in	1.0295307
Turbine	s_mapPR_in	2.38503493
Diffuser0	PRc	0.5799

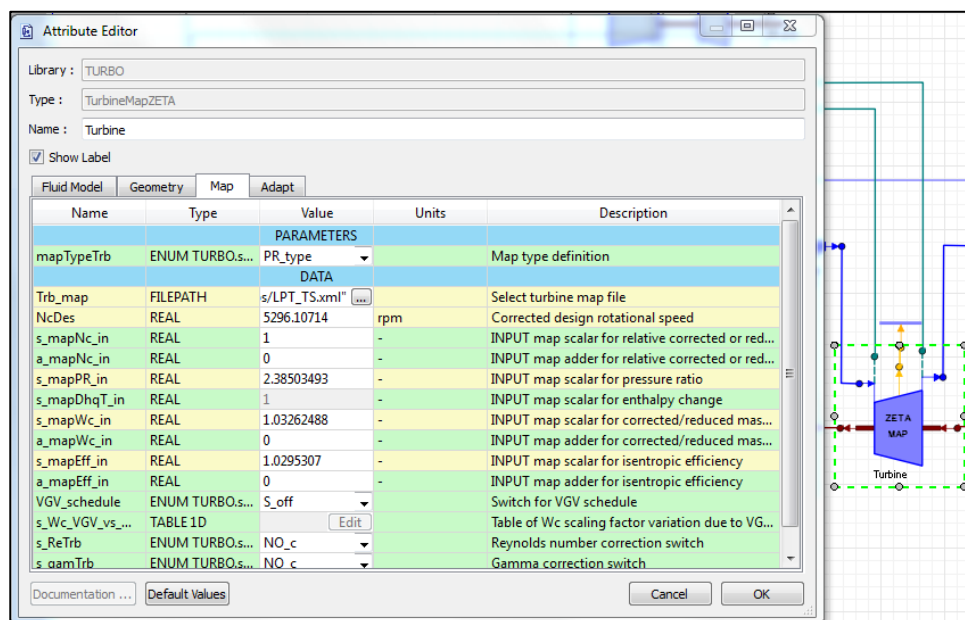
Πίνακας 5.11: Αποτελέσματα μεταβλητών σχεδιασμού: συντελεστές κλίμακας

Οι συντελεστές κλίμακας προστέθηκαν στα χαρακτηριστικά των συνιστωσών (Attributes) στο σχηματικό διάγραμμα (Schematic) του αεριοστροβίλου Tornado, με σκοπό να έρθουν οι γενικοί χάρτες σε μορφή που να ικανοποιεί τη λειτουργία των δύο συνιστωσών.

Στο Σχήμα 5.7 και Σχήμα 5.8 παρουσιάζεται η εισαγωγή των συντελεστών κλίμακας στα χαρακτηριστικά των συνιστωσών συμπιεστή και στροβίλου με σκοπό την στο σημείο σχεδίασης (Schematic) των δύο χαρτών, στο περιβάλλον του προγράμματος PROOSIS.



Σχήμα 5.7: Εισαγωγή των συντελεστών κλίμακας στα χαρακτηριστικά του συμπιεστή



Σχήμα 5.8: Εισαγωγή των συντελεστών κλίμακας στα χαρακτηριστικά του στροβίλου

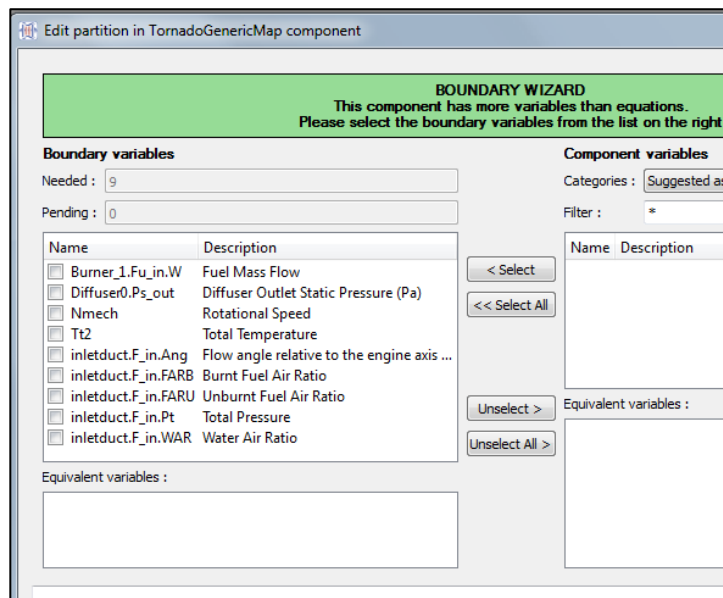
Με το πέρας της διαδικασίας προσαρμογής των χαρτών στο σημείο σχεδίασης, είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί προσομοίωση ικανοποιητική για τη λειτουργία του αεριοστροβίλου Tornado. Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκε ένα νέο Partition, στο

οποίο επιλέχθηκαν οι οριακές συνθήκες για την επίλυση του μαθηματικού μοντέλου. Τα μεγέθη που επιλέχθηκαν ως οριακές συνθήκες είναι οι συνθήκες της ροής στην είσοδο της μηχανής (είσοδος στον αγωγό εισόδου (Inlet Duct)), η ταχύτητα περιστροφής συμπιεστή, η παροχή καυσίμου στο θάλαμο καύσης και η στατική πίεση εξόδου της ροής από τη μηχανή (έξοδος από το διαχύτη (Diffuser0)) (Πίνακας 5.12).

Οριακές συνθήκες (Boundaries Variables)	
Inlet Duct	Ang
Inlet Duct	Pt
Inlet Duct	Tt
Inlet Duct	WAR
Inlet Duct	FARB
Inlet Duct	FARU
Compressor	Nmech
Burner	Wf
Diffuser0	Ps_out

Πίνακας 5.12: Οριακές συνθήκες για τη προσομοίωση του μοντέλου του αεριοστρόβιλου

Στο Σχήμα 5.9 παρουσιάζεται η επιλογή των οριακών συνθηκών σε επίπεδο Partition.



Σχήμα 5.9: Επιλογή οριακών συνθηκών σε επίπεδο Partition προς καθορισμό του μαθηματικού μοντέλου του αεριοστρόβιλου

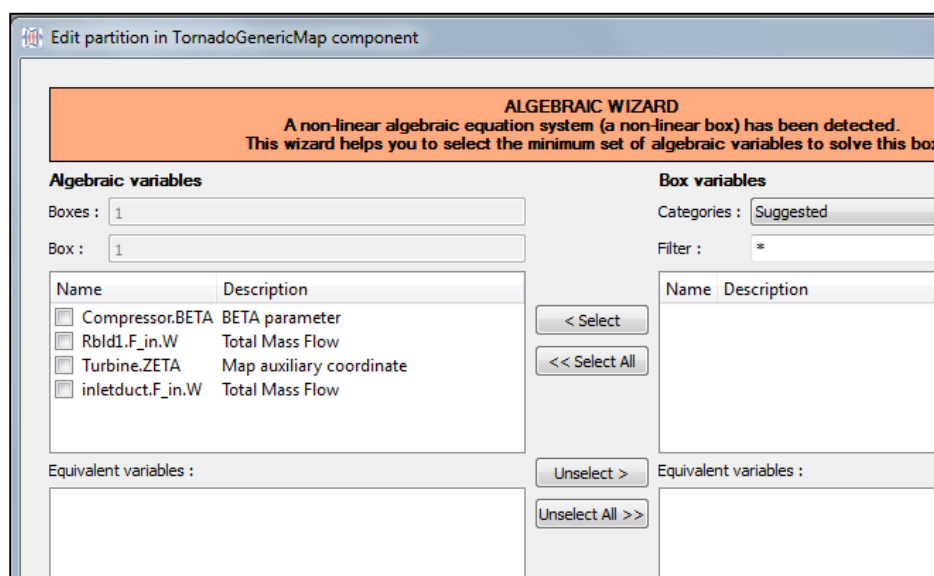
Στην συνέχεια επιλέχθηκαν στο Partition τρεις ακόμη μεταβλητές, απαραίτητες ώστε να επιλυθεί το μη γραμμικό σύστημα εξισώσεων, το οποίο εντοπίστηκε στο μαθηματικό μοντέλο. Σε επίπεδο Experiment οι τιμές που δίνονται σε αυτές τις αλγεβρικές μεταβλητές (algebraic variables) είναι μία αρχική εκτίμηση, ενώ η τελική

τους τιμή υπολογίζεται με το πέρας της προσομοίωσης. Αυτές είναι η παροχή μάζας στην είσοδο της μηχανής και οι αδιάστατες βοηθητικές συντεταγμένες του συμπιεστή και του στροβίλου BETA και ZETA (Πίνακας 5.13).

Αλγεβρικές Μεταβλητές (Algebraic Variables)	
Inlet Duct	W
Compressor	BETA
Turbine	ZETA

Πίνακας 5.13: Αλγεβρικές μεταβλητές προς επίλυση του μη γραμμικού συστήματος εξισώσεων στο μαθηματικό μοντέλο

Στο Σχήμα 5.10 παρουσιάζεται η επιλογή των αλγεβρικών μεταβλητών.



Σχήμα 5.10: Επιλογή αλγεβρικών μεταβλητών προς επίλυση του μη γραμμικού συστήματος εξισώσεων στο μαθηματικό μοντέλο

Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν δύο νέα πειράματα (Experiments) για το συγκεκριμένο Partition. Στο πρώτο πείραμα πραγματοποιήθηκε προσομοίωση στο σημείο σχεδίασης της μηχανής. Ο Πίνακας 5.14 παρουσιάζει τις μεταβλητές και τις τιμές που δόθηκαν.

Τιμές Οριακών συνθηκών (Boundaries Variables)	
Inlet Duct.Ang	0°
Inlet Duct.Pt	101325 Pa
Inlet Duct.Tt	288.15 K
Inlet Duct.WAR	0
Inlet Duct.FARB	0
Inlet Duct.FARU	0
Compressor.Nmech	11085 rpm
Burner.Wf	0.461874 kg <sub>f</sub> /sec
Diffuser0.Ps_out	101325 Pa
Αρχικές Τιμές Αλγεβρικών Μεταβλητών (Algebraic Variables)	
Inlet Duct.W	27 kg/sec
Compressor.BETA	0.5
Turbine.ZETA	0.5

Πίνακας 5.14: Τιμές οριακών συνθηκών για προσομοίωση του μοντέλου του αεριοστρόβιλου στο σημείο σχεδίασης

Στο Σχήμα 5.11 παρουσιάζεται το αρχείο κώδικα Experiment που δημιουργήθηκε για τη προσομοίωση του μοντέλου του αεριοστρόβιλου.

```

C:/PROOIS_3.0/USER_LIBS/USER_IOLI/experiments/+tornado+generic+...
EXPERIMENT exp1 ON TornadoGenericMap.default
DECLS
OBJECTS
INIT
  -- Initial values for Algebraics Variables --
  Compressor.BETA = 0.5
  Turbine.ZETA = 0.5
  inletduct.F_in.W = 27

BOUNDS
  -- Set equations for Boundaries --

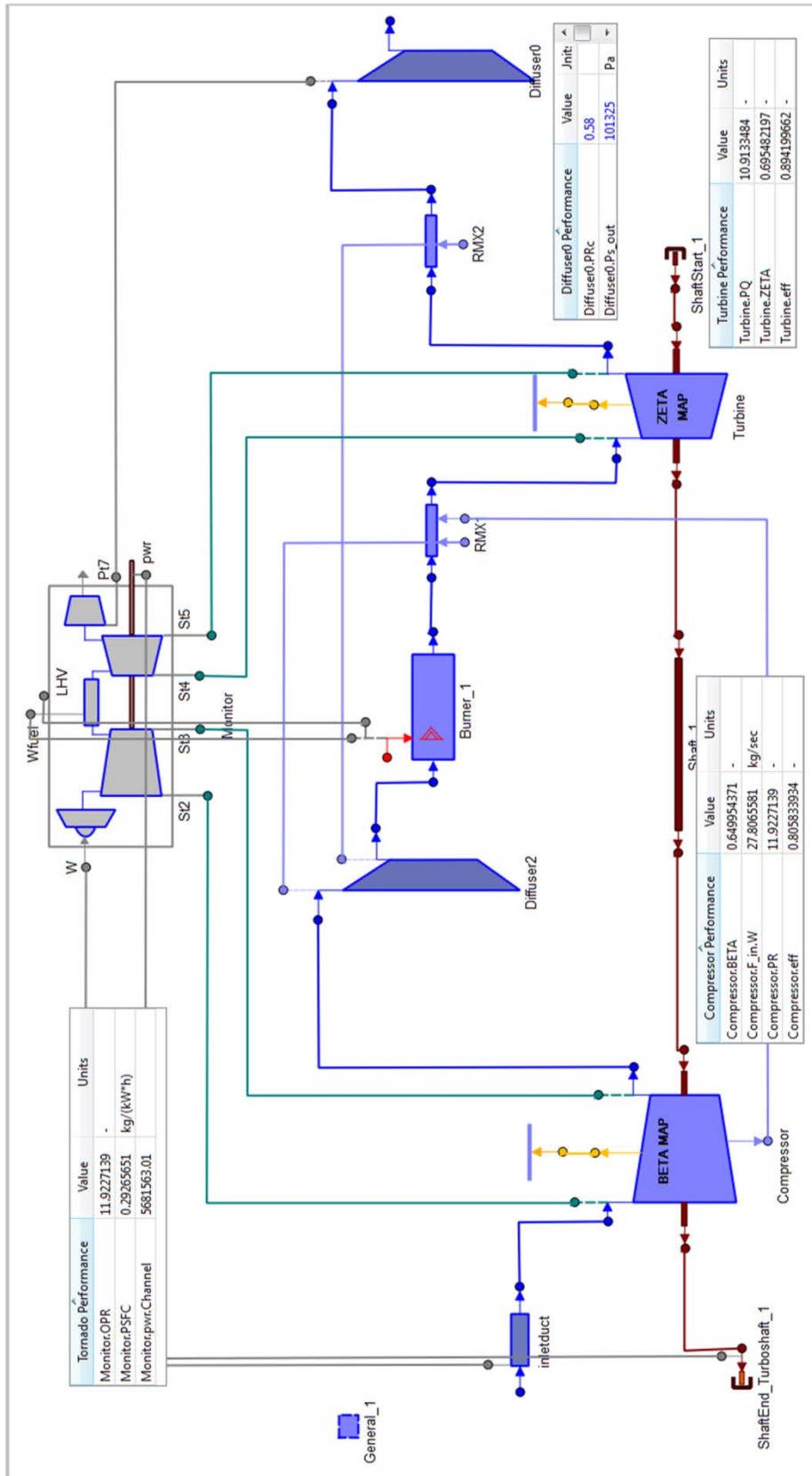
  inletduct.F_in.Ang = 0
  inletduct.F_in.Pt = 101325
  inletduct.F_in.Tt = 288.15
  inletduct.F_in.FARB = 0
  inletduct.F_in.FARU = 0
  inletduct.F_in.WAR = 0
  Nmech = 11085
  Burner_1.Fu_in.W = 0.461874
  Diffuser0.Ps_out = 101325

BODY
  -- report results in file reportAll.rpt
  REPORT_LIST("reportAll.rpt", "*", TRUE)
  STEADY()
END EXPERIMENT

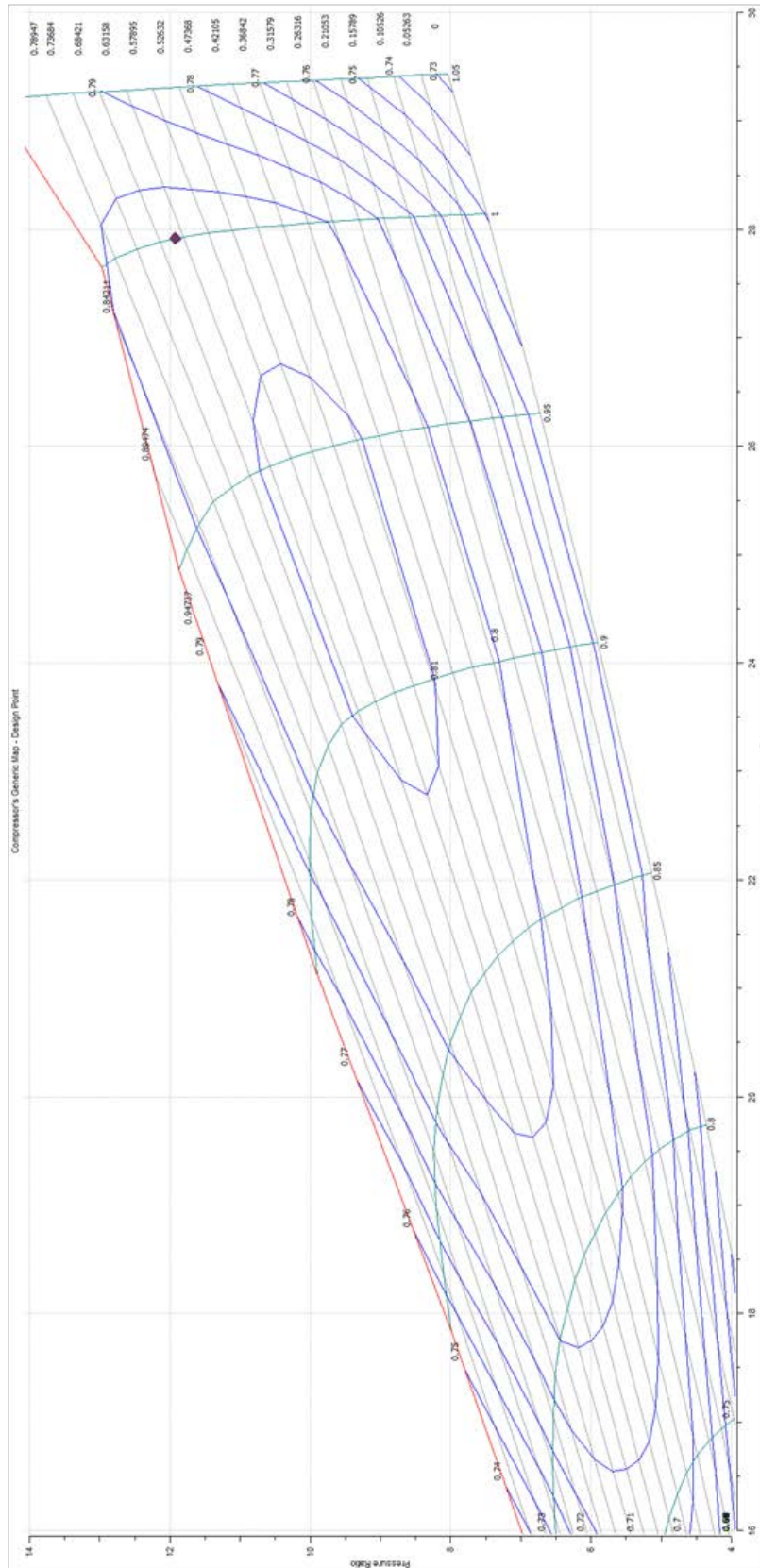
```

Σχήμα 5.11: Αρχείο κώδικα Experiment για τη προσομοίωση του μοντέλου του αεριοστρόβιλου στο σημείο σχεδίασης

Από την προσομοίωση του μοντέλου του αεριοστρόβιλου στο σημείο σχεδίασης, προέκυψαν οι συνολικές επιδόσεις της μηχανής, καθώς και αυτές των συνιστωσών της. Στο Σχήμα 5.12 παρουσιάζονται οι επιδόσεις των σημαντικότερων συνιστωσών και οι ολικές επιδόσεις του αεριοστρόβιλου, όπως η ειδική κατανάλωση καυσίμου (PSFC), ο ολικός λόγος πίεσης (OPR) και η ισχύς (PWR). Το σημείο σχεδίασης για τις συνιστώσες συμπίεστή και στρόβιλου παρουσιάζεται επάνω στους χάρτες των συνιστωσών στο Σχήμα 5.13 και στο Σχήμα 5.14 αντίστοιχα. Στο δεύτερο πείραμα για το μοντέλο του αεριοστρόβιλου Tornado, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της λειτουργίας σε σημεία εκτός του σημείου σχεδίασης (off-design analysis). Στο νέο Experiment πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση κατά την οποία για εύρος τιμών της παροχής καυσίμου από 0.25 έως 0.5 (kg<sub>f</sub>/sec), και σταθερή ταχύτητα περιστροφής, υπολογίζονται οι επιδόσεις του αεριοστρόβιλου. Η ανάλυση εκτός σημείου σχεδίασης παρουσιάζεται στους χάρτες του συμπίεστή και του στρόβιλου στο και στο Σχήμα 5.16 αντίστοιχα.

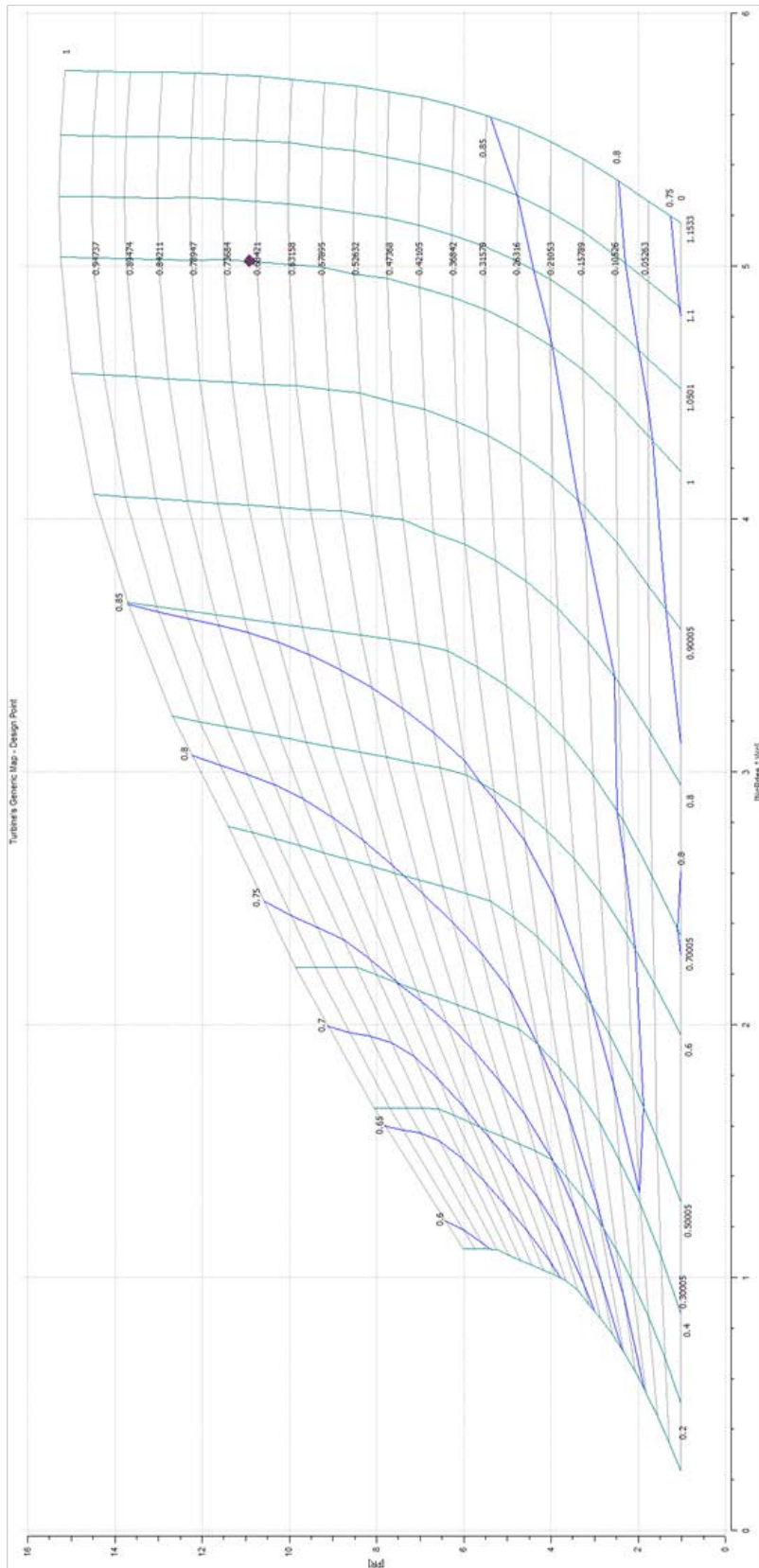


Σχήμα 5.12: Επιδόσεις αεριοστρόβιλου και συνιστωσών στο σημείο σχεδίασης

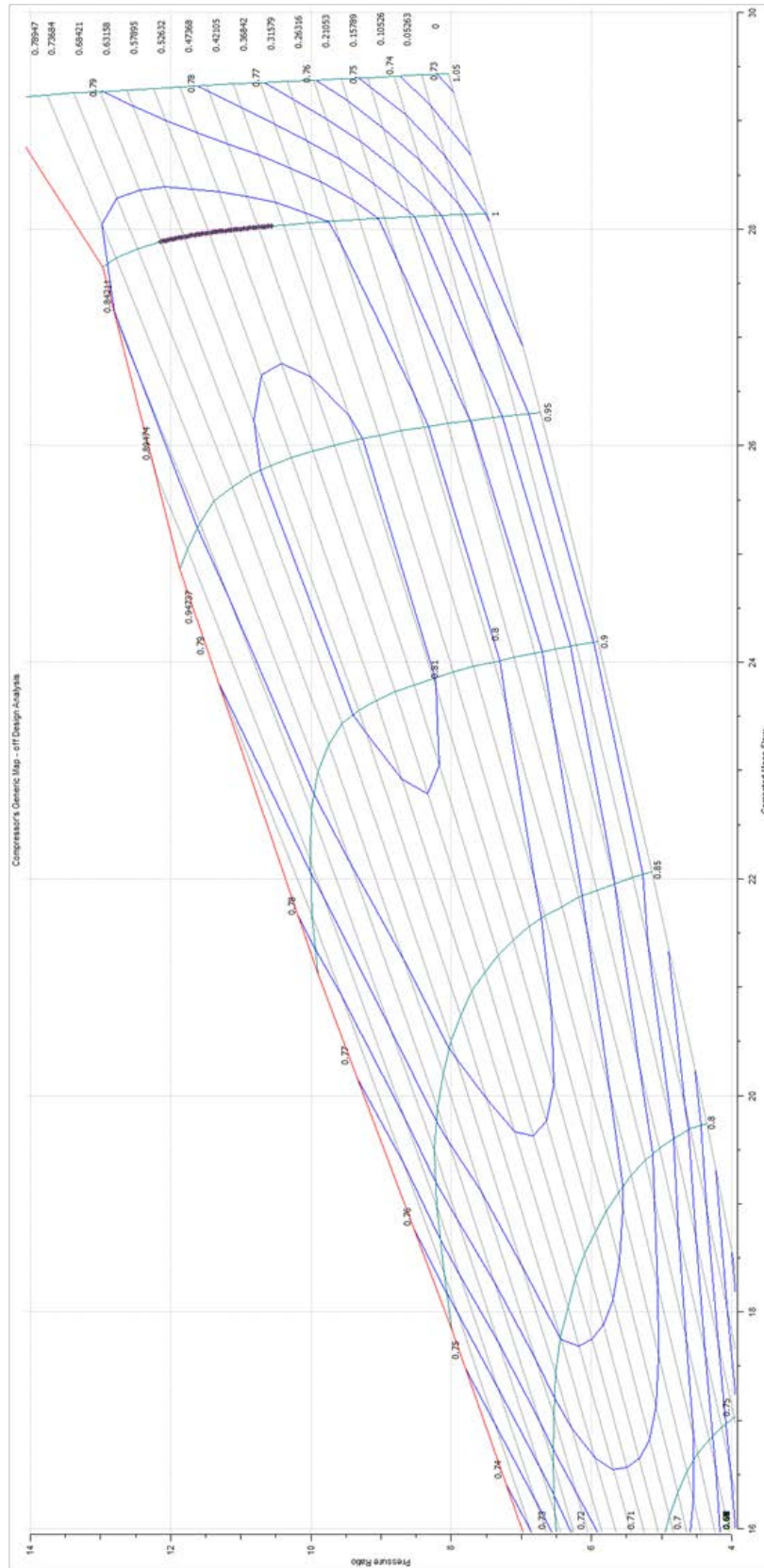


Σχήμα 5.13: Σημείο Σχεδίασης επάνω στο χάρτη του Συμπιεστή

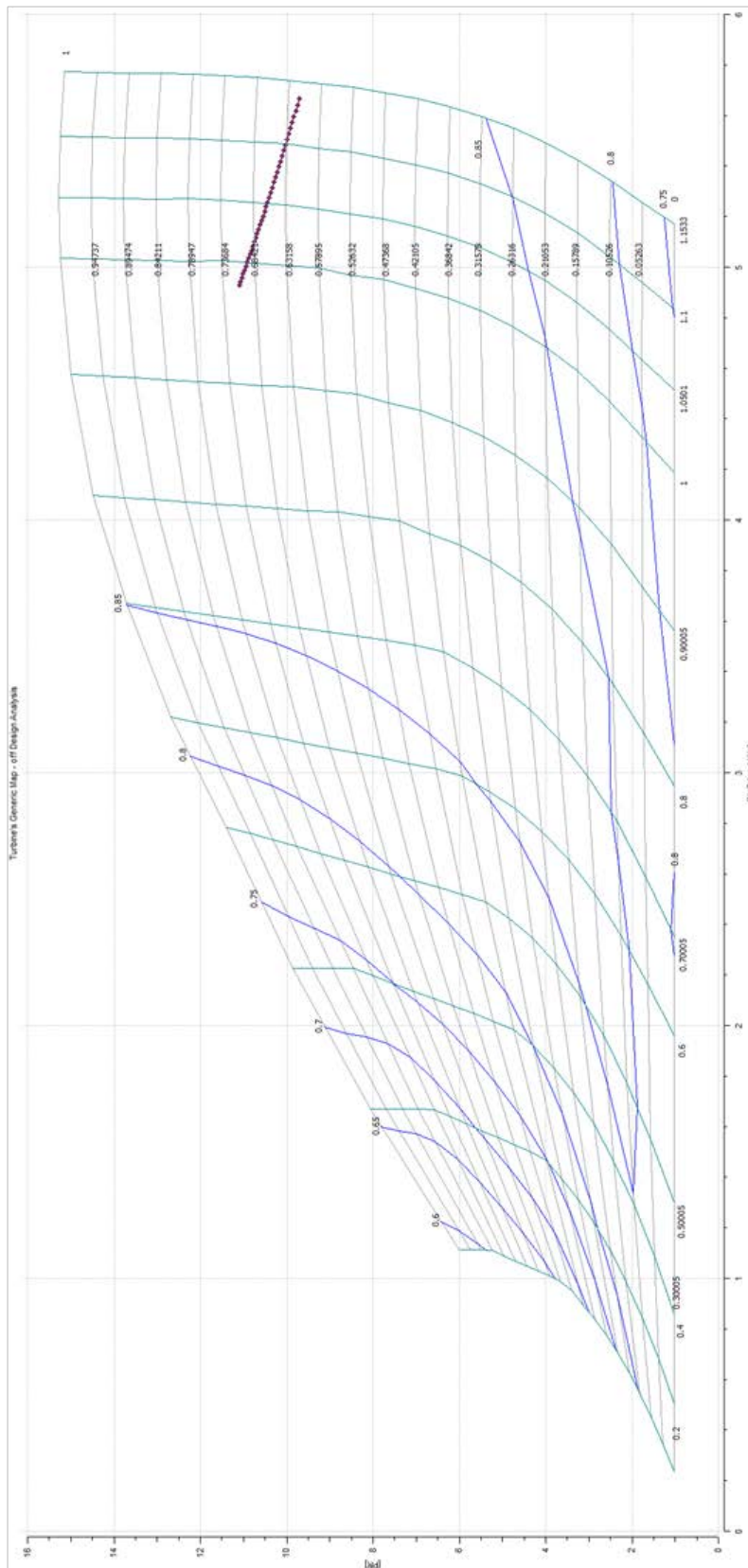




Σχήμα 5.14: Σημείο Σχεδίασης επάνω στο χάρτη του Στροβίλου



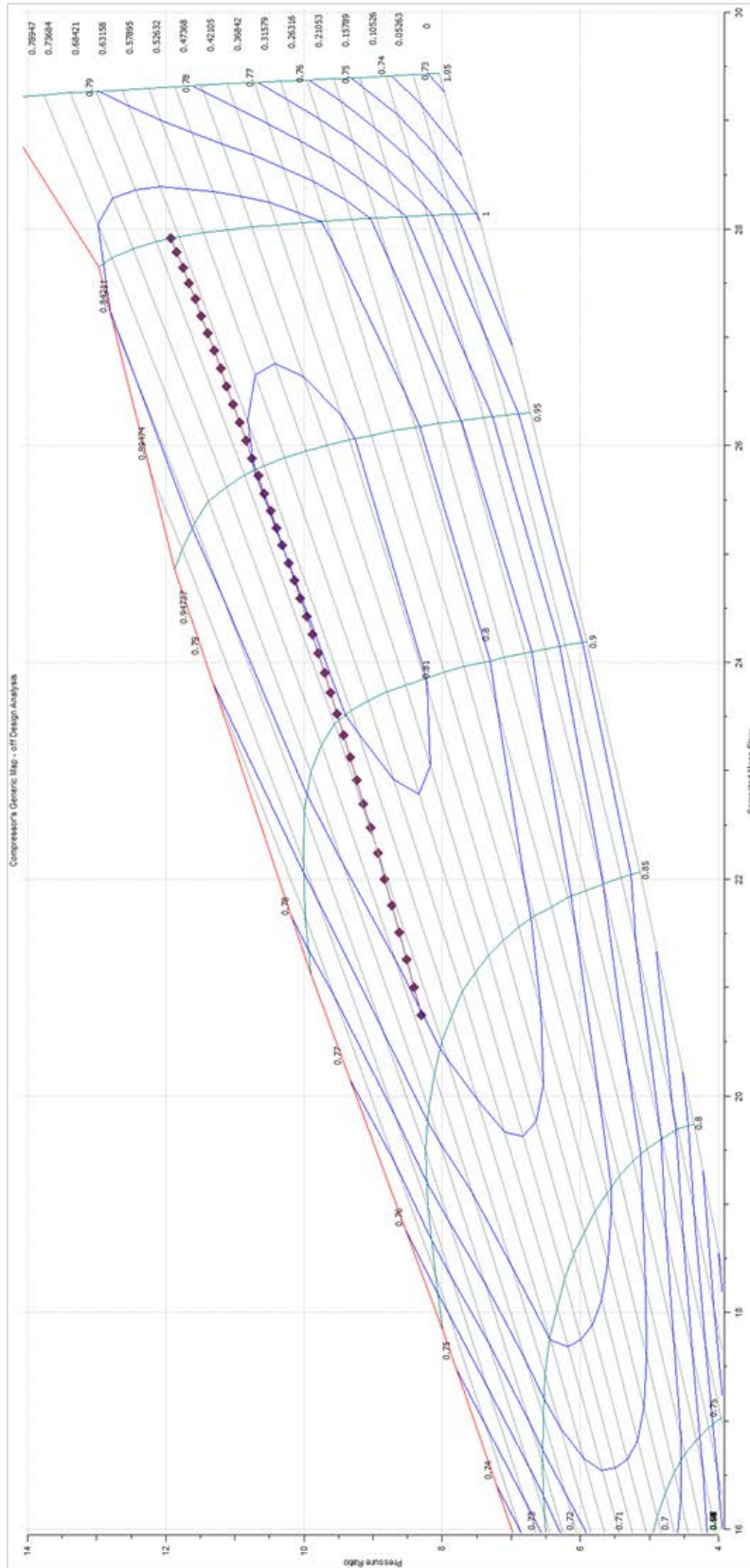
Σχήμα 5.15: Γραμμή Λειτουργίας για σταθερές στροφές επάνω στο χάρτη του Συμπιεστή



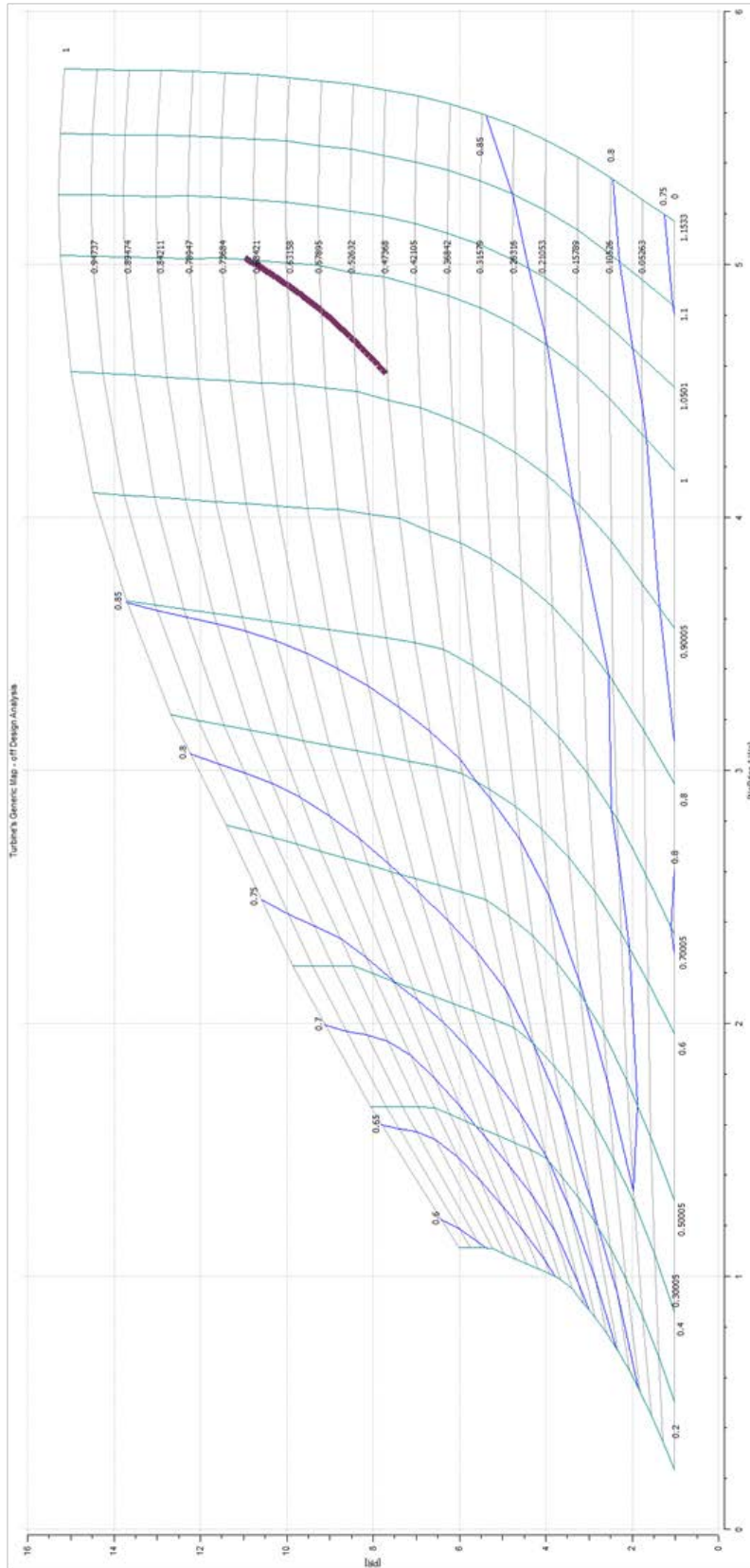
Σχήμα 5.16: Γραμμή Λειτουργίας για σταθερές στροφές επάνω στο χάρτη του Στροβίλου

Τέλος για την περίπτωση που ο αεριοστρόβιλος δεν χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αλλά για την κίνηση μηχανικού φορτίου, για παράδειγμα την κίνηση μιας προπέλας, πραγματοποιήθηκε ανάλυση εκτός σημείου λειτουργίας (off-Design Analysis), για μη σταθερές διορθωμένες στροφές συναρτήσει της ισχύος. Η ισχύς είναι ανάλογη των διορθωμένων στροφών εις τον κύβο.

Δημιουργήθηκε ένα όμοιο Partition με αυτό που παρουσιάστηκε παραπάνω, με τη διαφορά ότι επιλέχθηκε η ισχύς αντί της παροχής καυσίμου ως οριακή συνθήκη και προστέθηκε στις αλγεβρικές μεταβλητές ο λόγος καυσίμου αέρα. Στην συνέχεια, δημιουργήθηκε ένα νέο Experiment για την προσομοίωση της λειτουργίας της μηχανής. Η ανάλυση εκτός σημείου σχεδίασης παρουσιάζεται για το συμπιεστή και το στρόβιλο στο Σχήμα 5.17 και Σχήμα 5.18 αντίστοιχα.



Σχήμα 5.17: Γραμμή Λειτουργίας για μη σταθερές στροφές επάνω στο χάρτη του Συμπίεστη



Σχήμα 5.18: Γραμμή Λειτουργίας για μη σταθερές στροφές επάνω στο χάρτη του Στροβίλου

### 5.2.1.2 Χρήση χάρτη από τη μέθοδο συσσώρευσης βαθμίδων

Στο δεύτερο μοντέλο του αεριοστρόβιλου που μελετήθηκε, στη θέση του γενικού χάρτη του συμπιεστή, τοποθετήθηκε ο χάρτης που προέκυψε από τη μέθοδο συσσώρευσης βαθμίδων. Για τον χάρτη αυτό δεν πραγματοποιήθηκε προσαρμογή στο σημείο σχεδίασης (Scaling), καθώς ο χάρτης αντιστοιχεί στον συγκεκριμένο συμπιεστή. Ο χάρτης που χρησιμοποιήθηκε στο στρόβιλο στο νέο μοντέλο του αεριοστρόβιλου, είναι ο ίδιος που χρησιμοποιήθηκε και στο πρώτο μοντέλο. Συνεπώς, πραγματοποιήθηκε εκ νέου προσαρμογή του χάρτη, όχι μόνο για να περιγράψει ικανοποιητικά τη λειτουργία του στρόβιλου της μηχανής, αλλά και να είναι δυνατή η σύζευξη του με το συμπιεστή με το νέο χάρτη.

Γι' αυτό το σκοπό, δημιουργήθηκε ένα νέο Design Partition, στο οποίο επιλέχθηκαν ως μεταβλητές σχεδιασμού (Design Variables), οι συντελεστές κλίμακας μόνο για το χάρτη του στρόβιλου, η διορθωμένη σχεδιαστική ταχύτητα περιστροφής NcDes, και η ανάκτηση πίεσης στην έξοδο της μηχανής (έξοδος του διαχύτη (Diffuser0)) PRc. Ο Πίνακας 5.15 παρουσιάζει τα μεγέθη που επιλέχθηκαν ως μεταβλητές σχεδιασμού.

Μεταβλητές σχεδιασμού (Design Variables)	
Turbine	NcDes
Turbine	s_Nc_in
Turbine	s_mapWc_in
Turbine	s_mapEff_in
Turbine	s_mapPR_in
Diffuser0	PRc

Πίνακας 5.15: Μεταβλητές σχεδιασμού

Στη συνέχεια επιλέχθηκαν οι οριακές συνθήκες προς καθορισμό και επίλυση του μαθηματικού μοντέλου. Οι μεταβλητές που επιλέχθηκαν είναι οι συνθήκες της ροής στην είσοδο της μηχανής (είσοδο του αγωγού εισόδου (Inlet Duct)), το σημείο λειτουργίας για το συμπιεστή και το στρόβιλο, τη παροχή καυσίμου στο θάλαμο καύσης, οι επιδόσεις της μηχανής και η στατική πίεση εξόδου από το διαχύτη (Diffuser0) (Πίνακας 5.16).

Οριακές Συνθήκες (Boundary Variables)		
Inlet Duct	Ang	Συνθήκες ροής στην είσοδο της μηχανής
Inlet Duct	Pt	
Inlet Duct	Tt	
Inlet Duct	WAR	
Inlet Duct	FARB	
Inlet Duct	FARU	

Compressor	PR	Σημείο Λειτουργίας του Συμπιεστή
Compressor	NcRdes	
Turbine	eff	Σημείο Λειτουργίας του Στροβίλου
Turbine	NcRdes	
Turbine	NcRdesMap	
Turbine	ZETA	
Diffuser0	Ps_out	Στατική πίεση εξόδου στο διαχύτη
Burner	Wf	Παροχή καυσίμου
Tornado	pwr	Ισχύς Tornado

Πίνακας 5.16: Οριακές Συνθήκες

Στην συνέχεια επιλέχθηκαν δύο ακόμη μεταβλητές, απαραίτητες ώστε να επιλυθεί το μη γραμμικό σύστημα εξισώσεων, το οποίο εντοπίστηκε στο μαθηματικό μοντέλο της μηχανής. Αυτές είναι η διορθωμένη παροχή μάζας και η ολική πίεση στην είσοδο του συμπιεστή (Πίνακας 5.17).

Αλγεβρικές Μεταβλητές (Algebraic Variables)	
Compressor	Wc
Compressor	Pt_in

Πίνακας 5.17: Αλγεβρικές μεταβλητές

Με το πέρας της δημιουργίας του Design Partition, ο αεριοστρόβιλος προσομοιώθηκε στο σημείο λειτουργίας με σκοπό τον καθορισμό των συντελεστών κλίμακας και εκτίμηση του χάρτη του στροβίλου. Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκε ένα νέο Experiment, στο αρχείο κώδικα του οποίου, δόθηκαν οι κατάλληλες τιμές στις οριακές συνθήκες (Πίνακας 5.18).

Τιμές Οριακών Συνθηκών στο Experiment		
Inlet Duct.Ang	0°	Συνθήκες ροής στην είσοδο της μηχανής
Inlet Duct.Pt	101325 Pa	
Inlet Duct.Tt	288.15 K	
Inlet Duct.WAR	0	
Inlet Duct.FARB	0	
Inlet Duct.FARU	0	
Compressor.PR	11.92	Σημείο Λειτουργίας του Συμπιεστή
Compressor.NcRdes	1	
Turbine.eff	0.8942	Σημείο Λειτουργίας του Στροβίλου
Turbine.NcRdes	1	
Turbine.NcRdesMap	1	



Turbine.ZETA	0.695094379	
Diffuser0.Ps_out	101325 Pa	Στατική πίεση εξόδου στο διαχύτη
Burner.Wf	0.461874 kg <sub>f</sub> /sec	Παροχή καυσίμου
Tornado.pwr	5.67 MW	Ισχύς Tornado
<b>Αρχικές Τιμές Αλγεβρικών Μεταβλητών στο Experiment</b>		
Compressor.Pt_in	101325 Pa	
Compressor.Wc	27	

Πίνακας 5.18: Τιμές Οριακών συνθηκών

Από την προσομοίωση προέκυψαν οι συντελεστές κλίμακας για την προσαρμογή στο σημείο σχεδίασης (Scaling) του χάρτη του στροβίλου (Πίνακας 5.19).

<b>Μεταβλητές σχεδιασμού (Design Variables): Αποτελέσματα</b>		
Turbine	NcDes	5295.23633
Turbine	s_Nc_in	1
Turbine	s_mapWc_in	1.03263119
Turbine	s_mapEff_in	1.02952168
Turbine	s_mapPR_in	2.38496436
Diffuser0	PRc	0.579999899

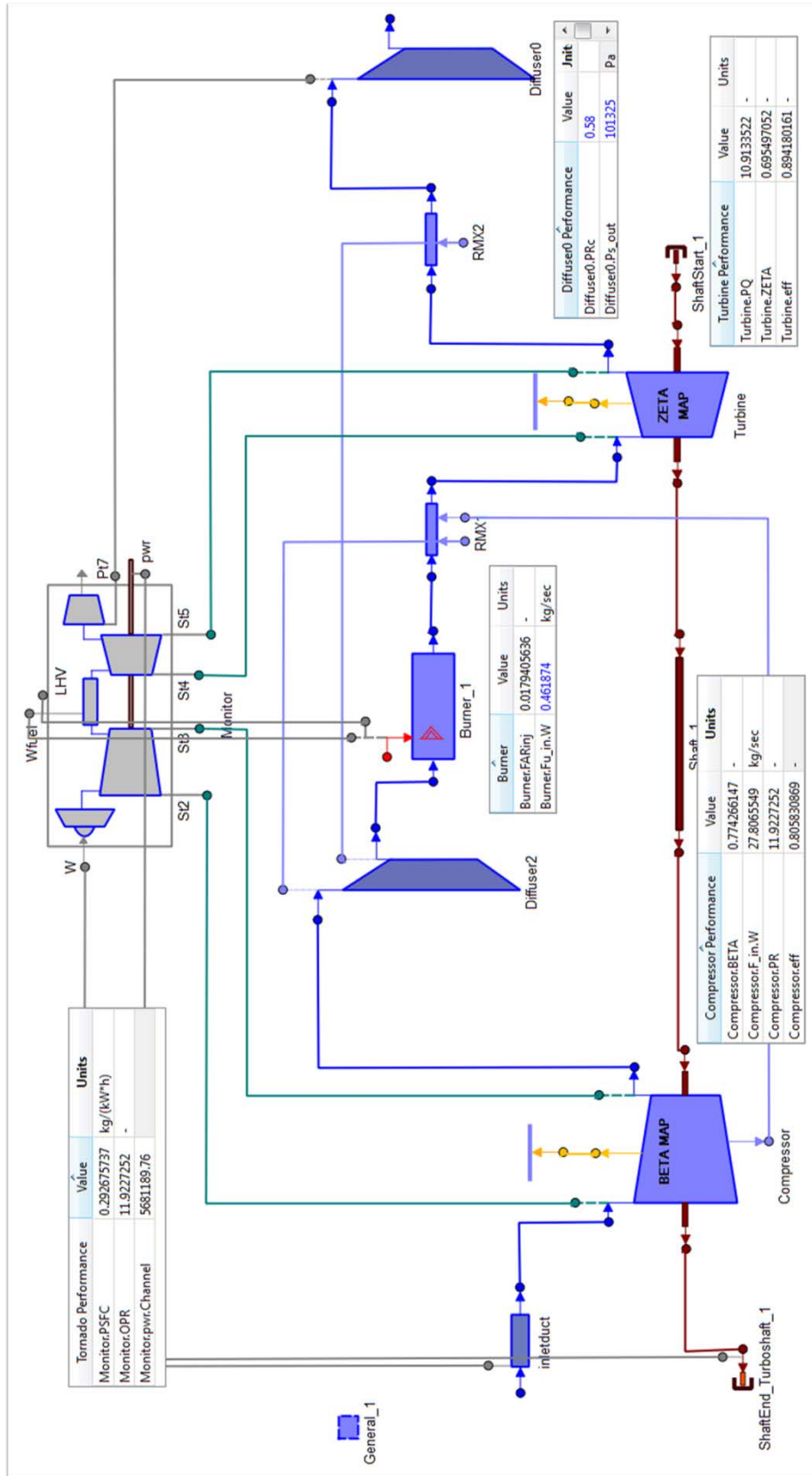
Πίνακας 5.19: Αποτελέσματα μεταβλητών σχεδιασμού: συντελεστές κλίμακας

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί, ότι παρόλο που ο στρόβιλος, σε αυτό το μοντέλο αεριοστρόβιλου, χρησιμοποιεί τον ίδιο γενικό χάρτη με αυτό στο προηγούμενο μοντέλο, οι συντελεστές κλίμακας διαφέρουν. Η απόκλιση είναι μικρή, όμως υπάρχει καθώς σε αυτό το μοντέλο ο στρόβιλος, συνεργάζεται με συμπιεστή που χρησιμοποιεί διαφορετικό χάρτη από αυτόν που χρησιμοποιούσε στο προηγούμενο.

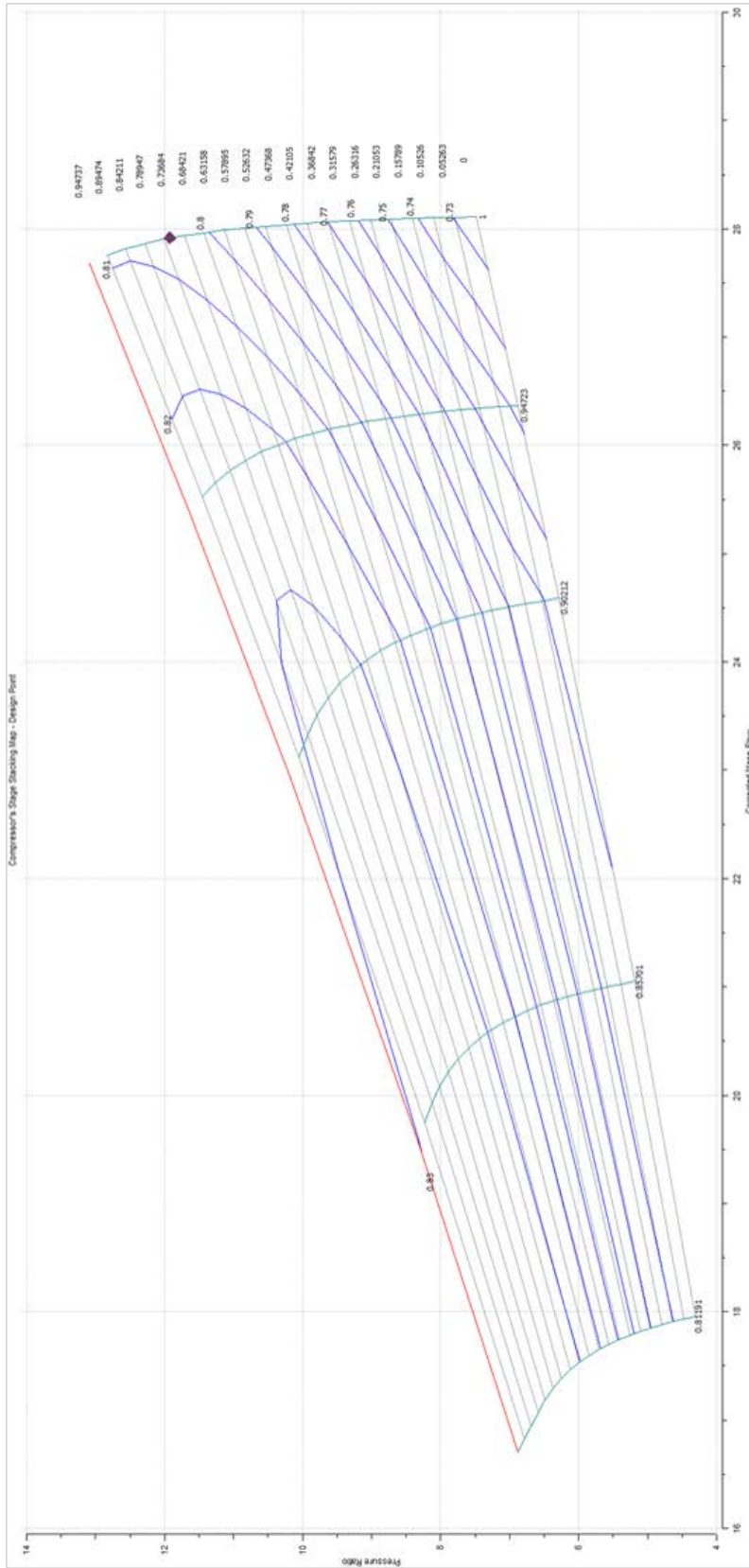
Οι συντελεστές κλίμακας προστέθηκαν στα χαρακτηριστικά (Attributes) της συνιστώσας του στροβίλου στο σχηματικό διάγραμμα (Schematic) του αεριοστρόβιλου, με σκοπό να έρθει ο γενικός χάρτης σε μορφή που να ικανοποιεί τη λειτουργία του.

Στη συνέχεια ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία, όπως στο προηγούμενο μοντέλο. Επαναλήφθηκαν τα ίδια πειράματα (Experiments), τόσο για σταθερές όσο και για μεταβλητές στροφές. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.19 έως Σχήμα 5.25.

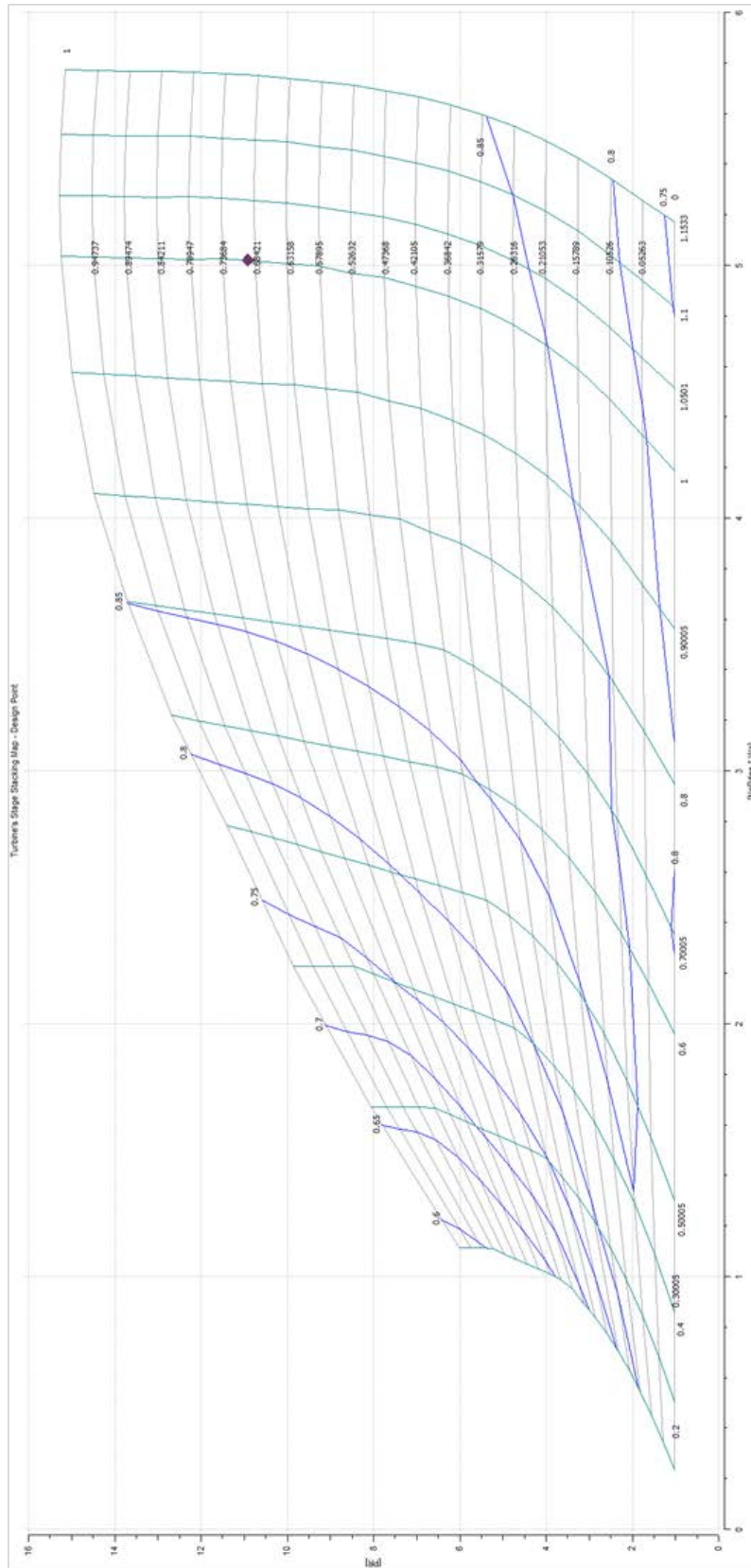
Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 5.19 παρουσιάζονται οι συνολικές επιδόσεις της μηχανής επάνω στο σχηματικό διάγραμμα αυτής. Το Σχήμα 5.20 και το Σχήμα 5.21 παρουσιάζει το σημείο σχεδίασης για τις συνιστώσες συμπιεστή και στροβίλου αντίστοιχα, επάνω στους χάρτες αυτών.



Σχήμα 5.19: Επιδόσεις αεριοστρόβιλου και συνιστωσών στο σημείο σχεδίασης

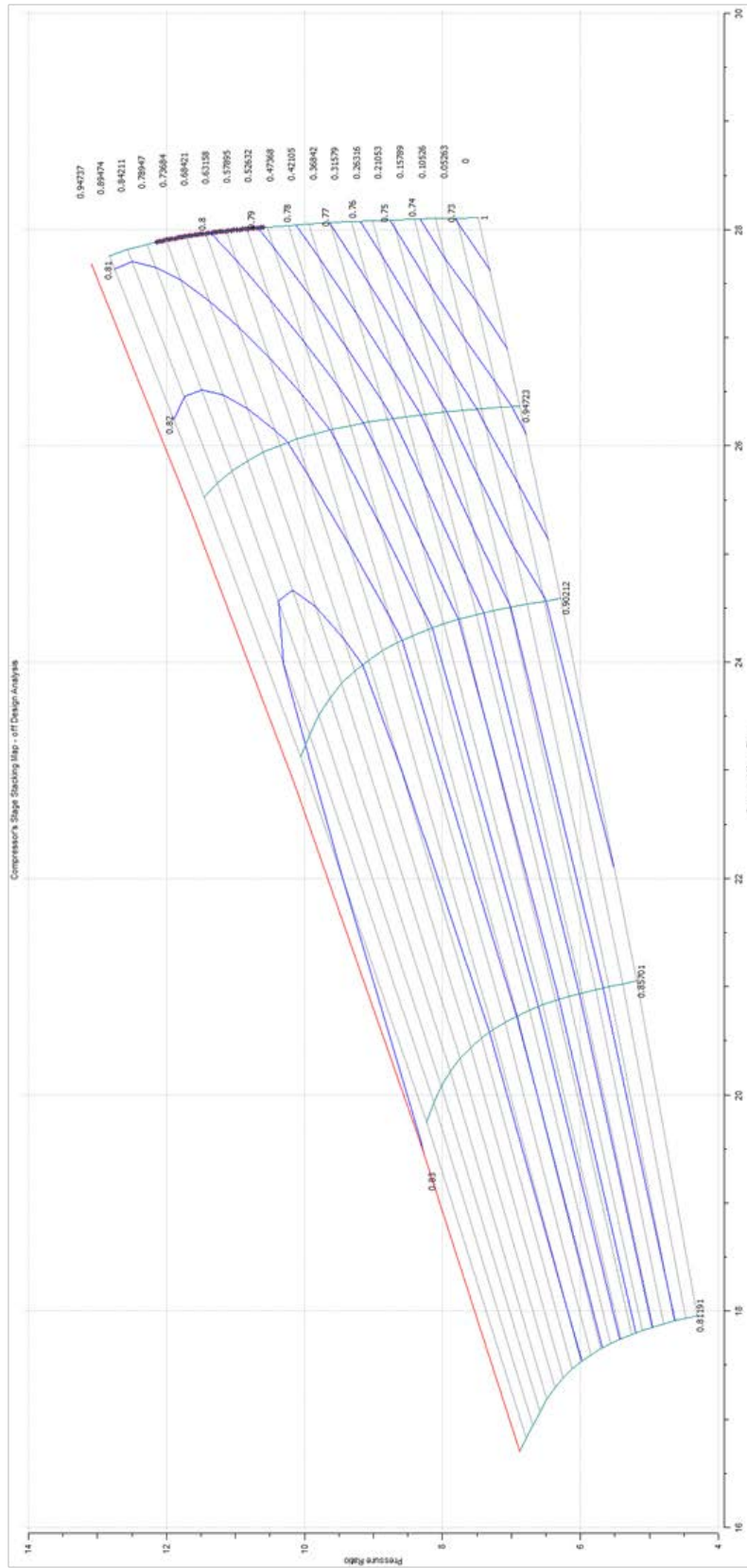


Σχήμα 5.20: Σημείο Σχεδίασης επάνω στο χάρτη του Συμπιεστή

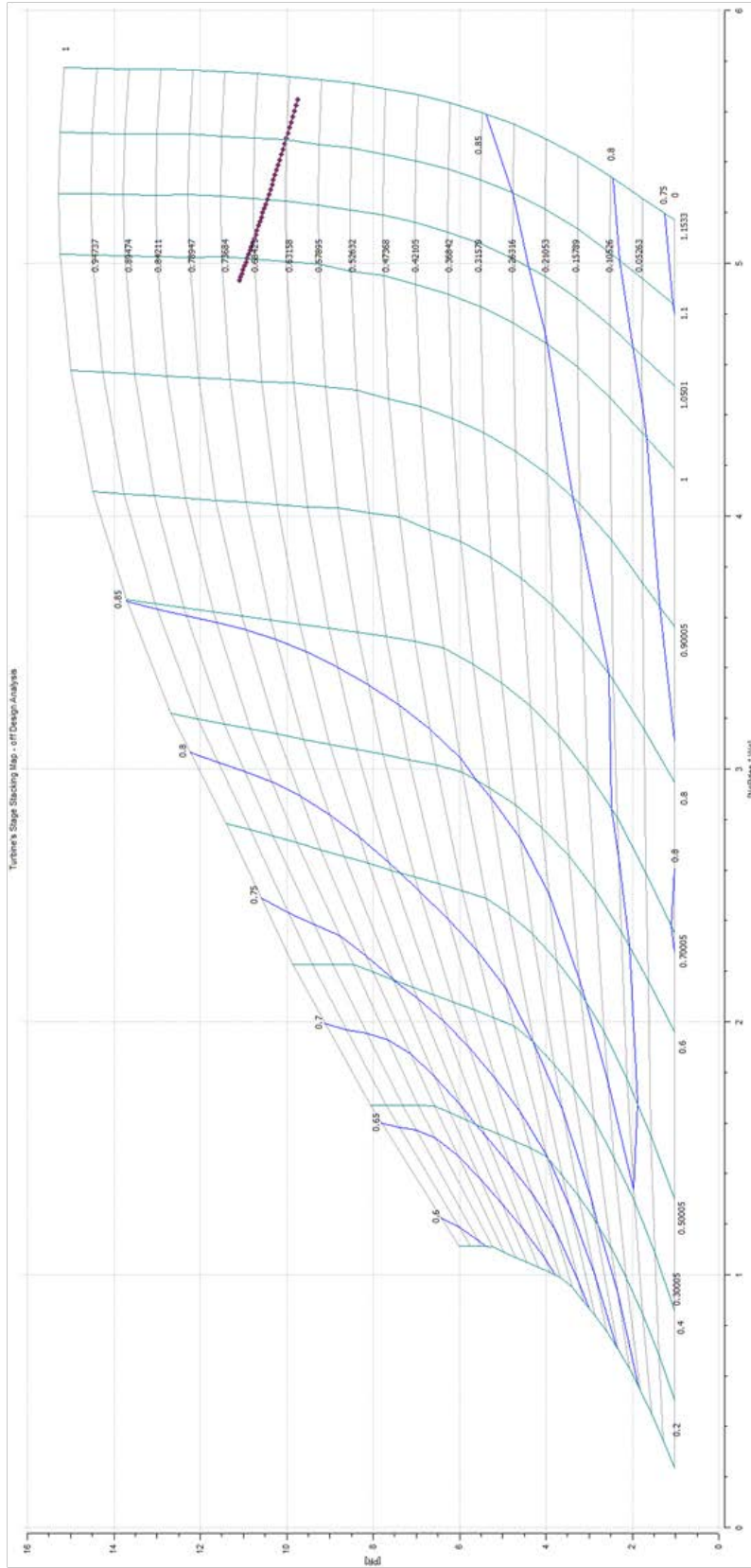


Σχήμα 5.21: Σημείο Σχεδίασης επάνω στο χάρτη του Στροβίλου

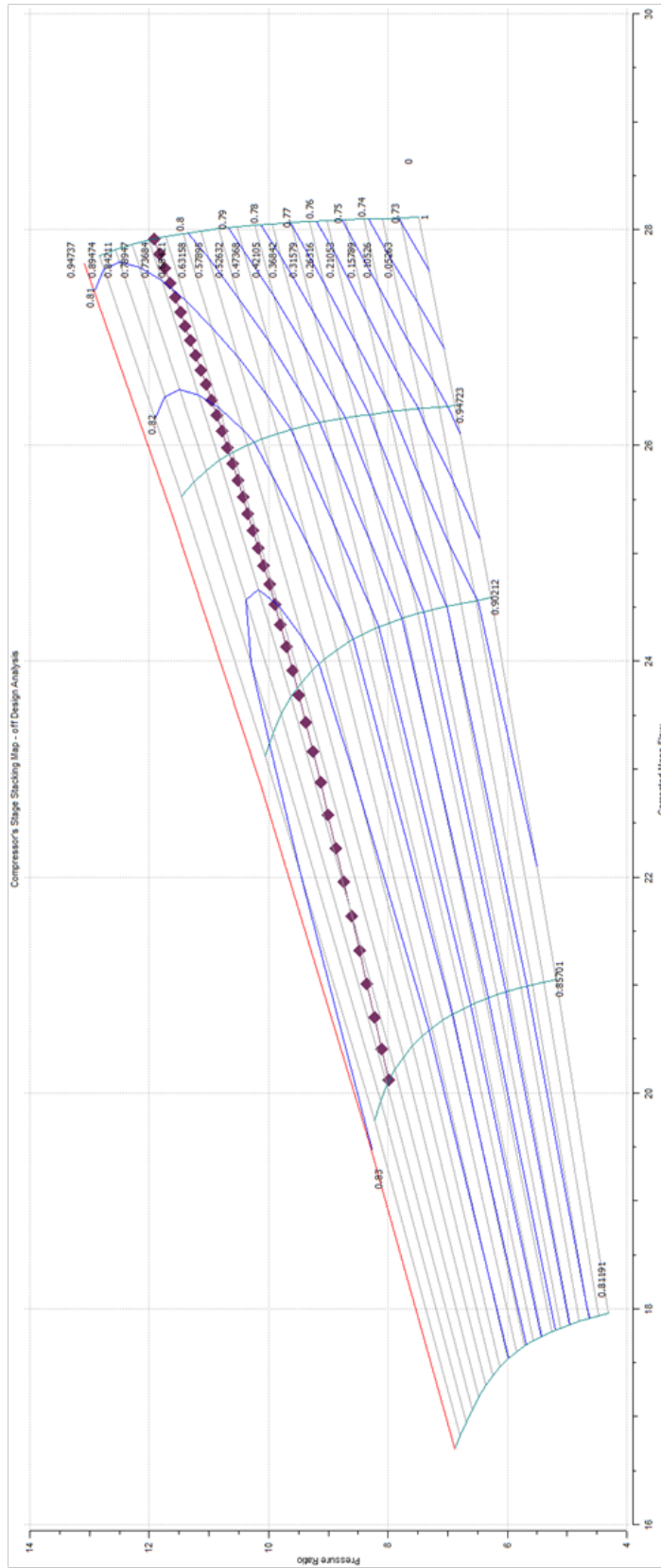
Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της λειτουργίας σε σημεία εκτός του σημείου σχεδίασης (off-design analysis), αρχικά για σταθερές διορθωμένες στροφές και μεταβολή της παροχής καυσίμου, και στη συνέχεια για μη σταθερές με μεταβολή της ισχύος. Τα Partition και Experiments, που δημιουργήθηκαν για το σκοπό αυτό, είναι όμοια με αυτά που δημιουργήθηκαν κατά τη μελέτη του μοντέλου της μηχανής με χρήση γενικού χάρτη στη συνιστώσα του συμπιεστή. Η ανάλυση εκτός σημείου σχεδίασης, παρουσιάζεται στους χάρτες του συμπιεστή και του στροβίλου στο Σχήμα 5.22 έως Σχήμα 5.25.



Σχήμα 5.22: Γραμμή Λειτουργίας για σταθερές στροφές επάνω στο χάρτη του Συμπιεστή

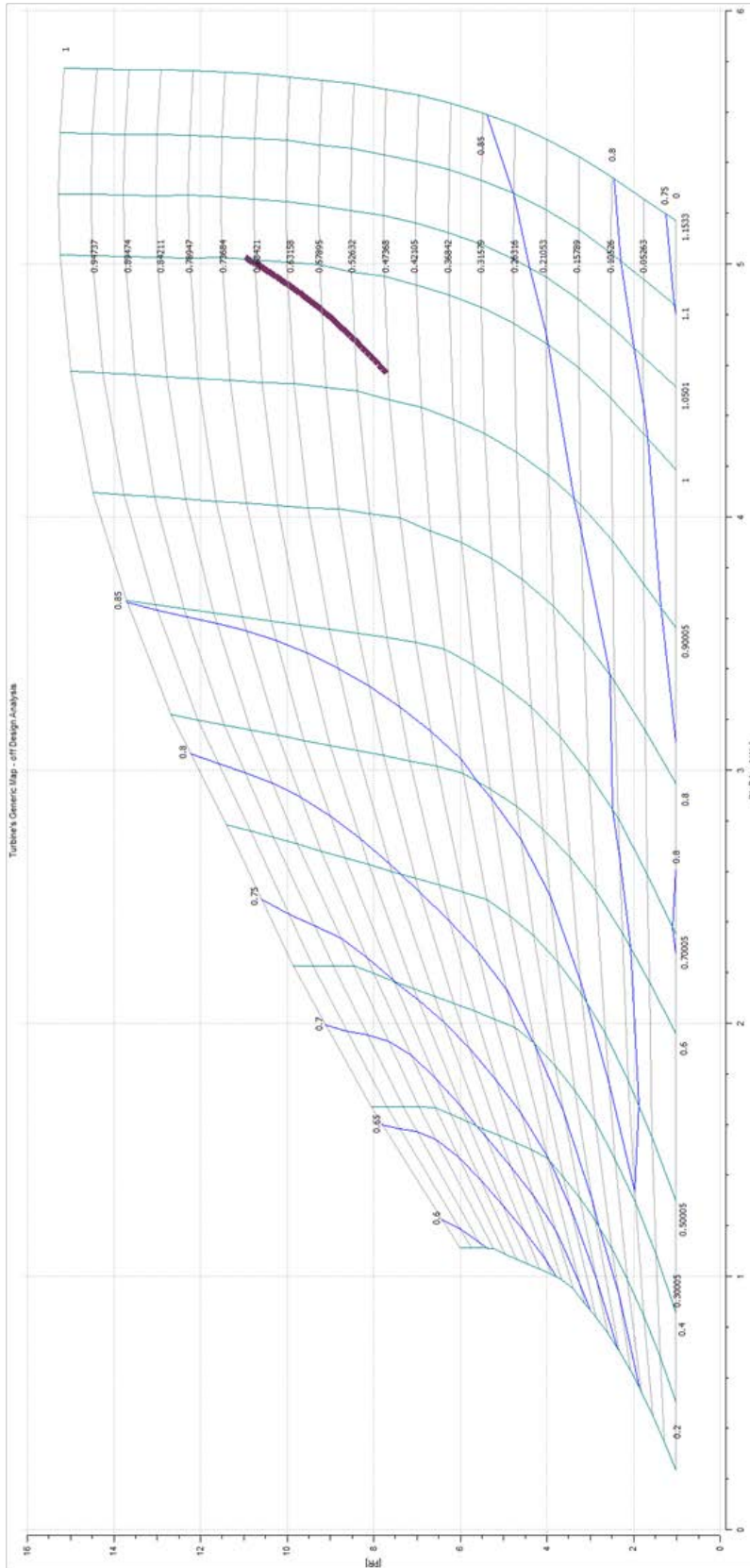


Σχήμα 5.23: Γραμμή Λειτουργίας για σταθερές στροφές επάνω στο χάρτη του Στροβίλου



Σχήμα 5.24: Γραμμή Λειτουργίας για μη σταθερές στροφές επάνω στο χάρτη του Συμπιεστή





Σχήμα 5.25: Γραμμή Λειτουργίας για μη σταθερές στροφές επάνω στο Χάρτη του Στροβίλου

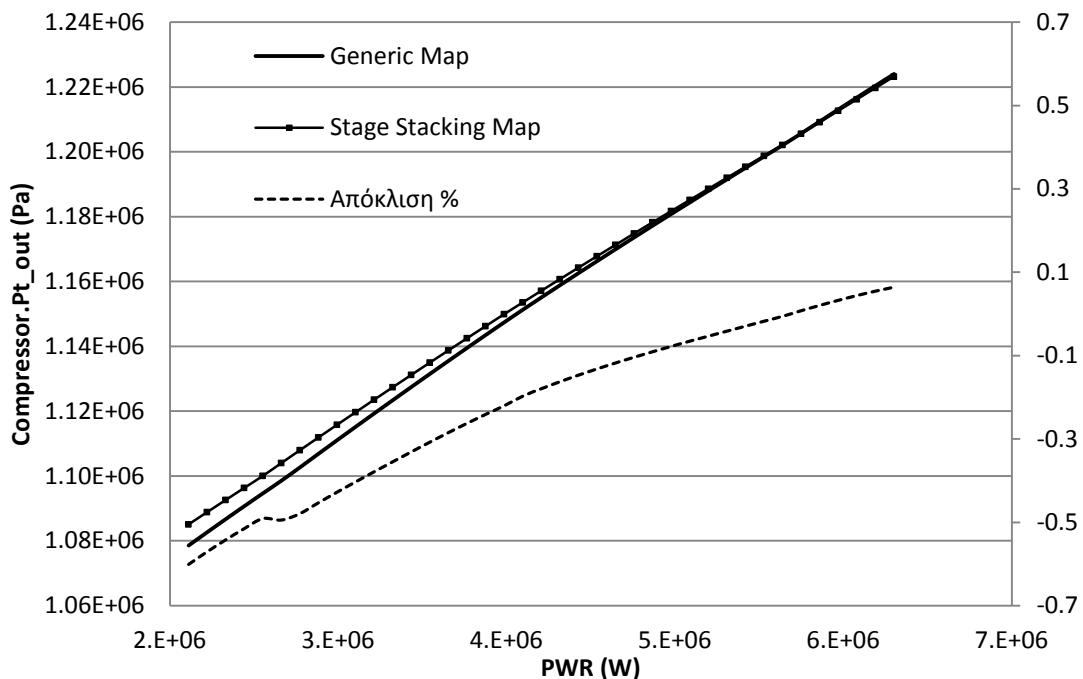
Σε αυτό το σημείο επισημαίνεται ότι ο γενικός χάρτης του συμπιεστή έχει διαφορετική μορφή από τον χάρτη που προέκυψε από τη μέθοδο συσσώρευσης βαθμίδων. Το γεγονός αυτό επιφέρει αποκλίσεις στα υπολογιζόμενα μεγέθη. Στο Σχήμα 5.26 έως Σχήμα 5.35 παρουσιάζονται οι μεταβολές των μεγεθών:

- της ολικής πίεσης και της θερμοκρασίας εξόδου του συμπιεστή,
- της ολικής θερμοκρασίας εισόδου και εξόδου του στροβίλου,
- της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (SFC),

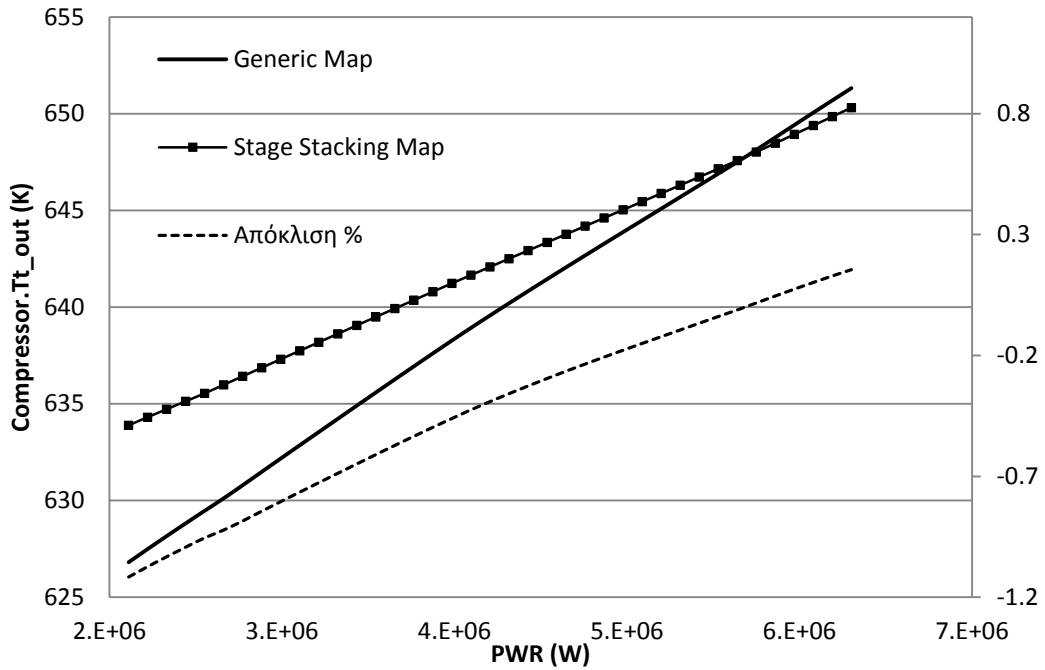
συναρτήσει της ισχύος για σταθερές και μεταβλητές στροφές. Στα διαγράμματα συγκρίνονται οι μεταβολές αυτές για το μοντέλο του αεριοστροβίλου που χρησιμοποιεί γενικό χάρτη στο συμπιεστή, και για αυτό που χρησιμοποιεί το χάρτη όπως προέκυψε από τη μέθοδο συσσώρευσης βαθμίδων.

Παρατηρείται ότι, για σταθερές στροφές, οι αποκλίσεις γίνονται μεγαλύτερες σε χαμηλό φορτίο, όσο δηλαδή το σημείο λειτουργίας απομακρύνεται από το σημείο σχεδίασης. Ενδεικτικά, η υψηλότερη απόκλιση εμφανίζεται στην ειδική κατανάλωση καυσίμου όπου αγγίζει το 2.1%. Οι αποκλίσεις αυτές γίνονται ακόμη μεγαλύτερες για μεταβλητές στροφές. Η υψηλότερη απόκλιση εμφανίζεται στην πίεση εξόδου του συμπιεστή όπου αγγίζει το 4.3%.

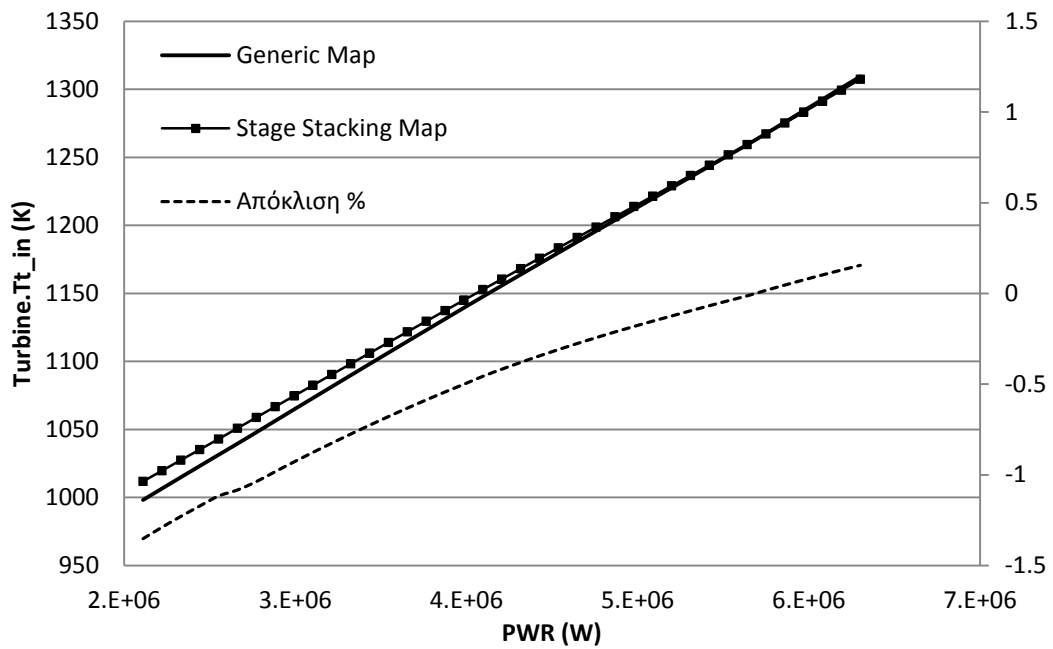
### Σταθερές στροφές



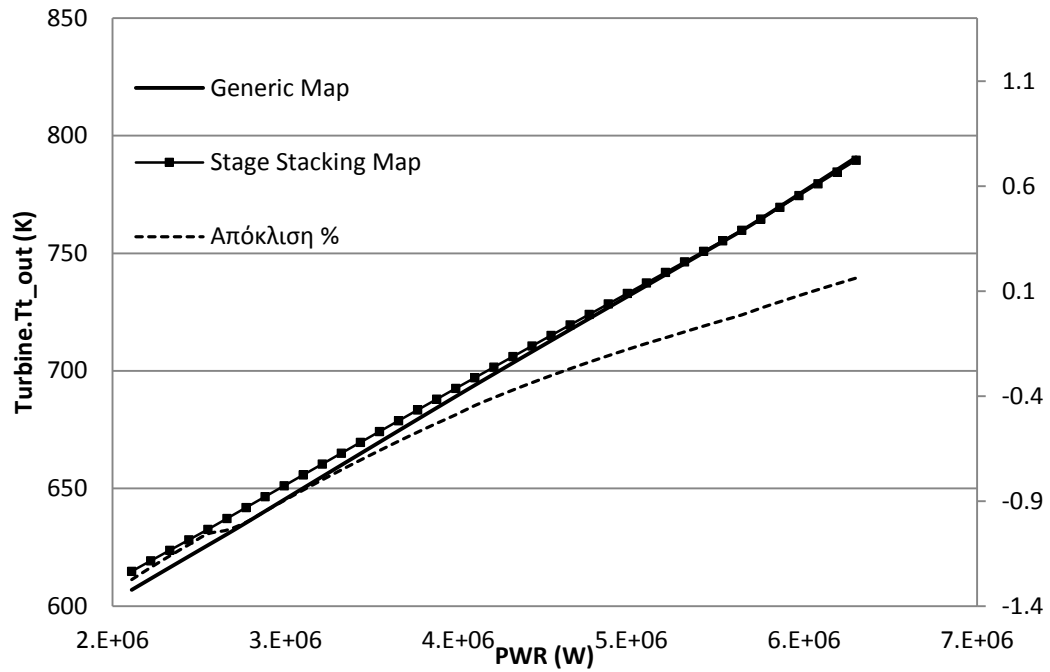
Σχήμα 5.26: Μεταβολή ολικής πίεσης στην έξοδο του συμπιεστή συναρτήσει της ισχύος για σταθερές στροφές



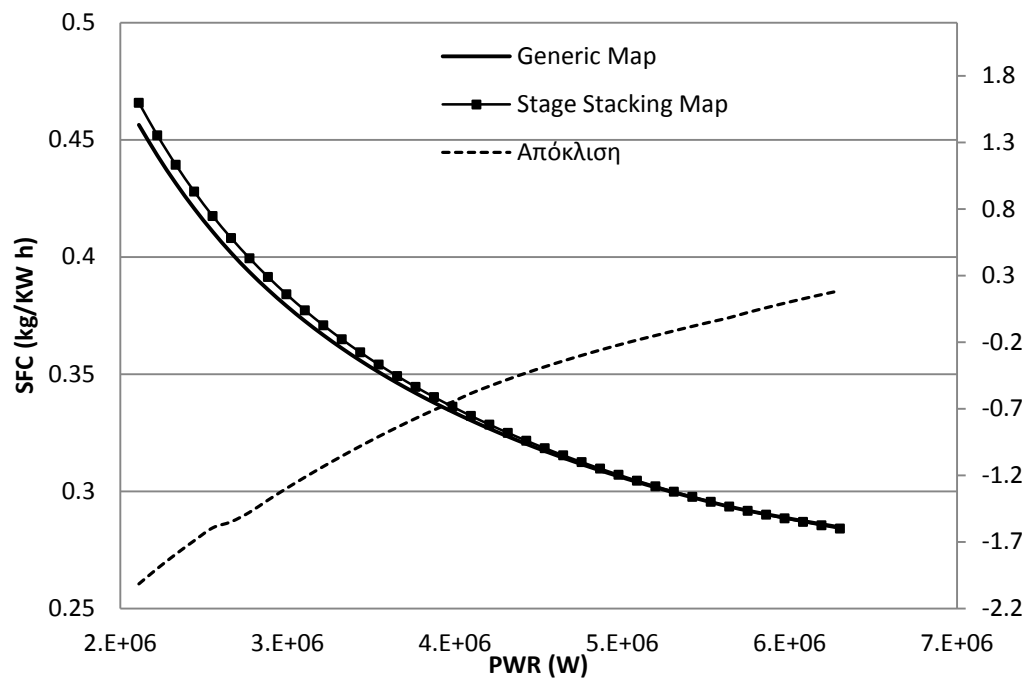
Σχήμα 5.27: Μεταβολή ολικής θερμοκρασίας στην έξοδο του συμπιεστή συναρτήσει της ισχύος για σταθερές στροφές



Σχήμα 5.28: Μεταβολή ολικής θερμοκρασίας στην είσοδο του στρόβιλου (TIT) συναρτήσει της ισχύος για σταθερές στροφές

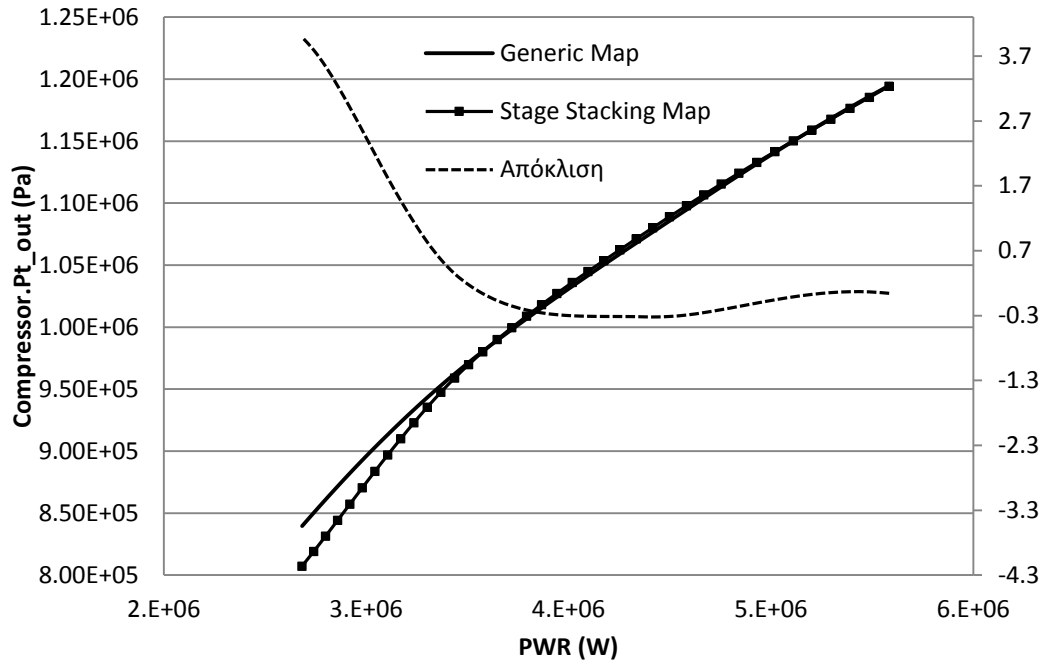


Σχήμα 5.29: Μεταβολή ολικής θερμοκρασίας στην έξοδο του στροβίλου συναρτήσει της ισχύος για σταθερές στροφές

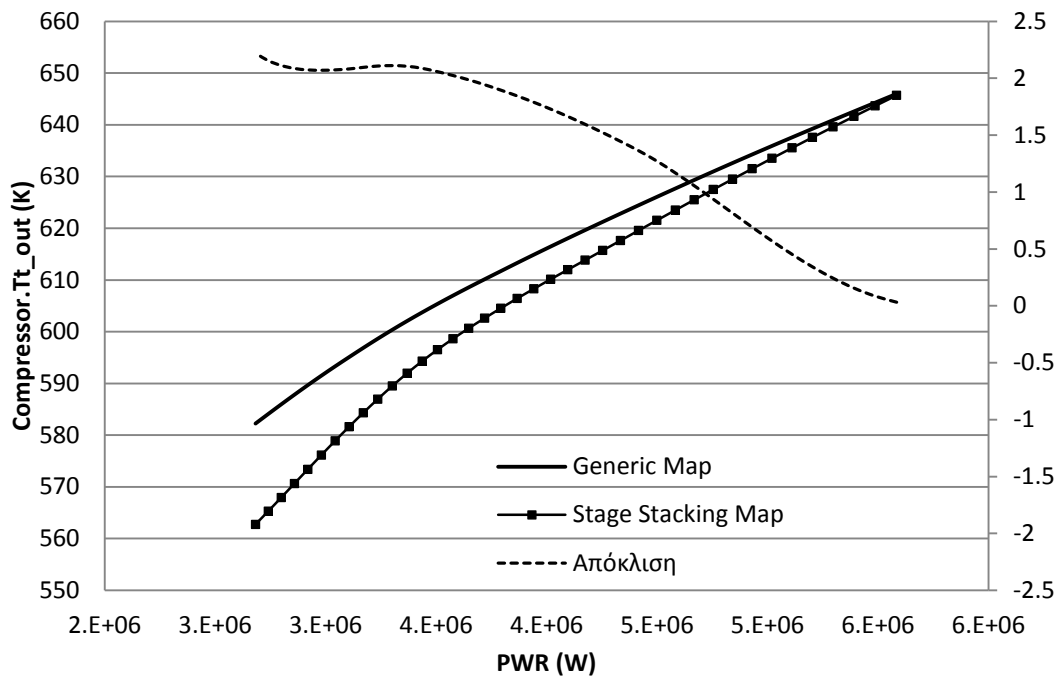


Σχήμα 5.30: Μεταβολή ειδικής κατανάλωσης καυσίμου συναρτήσει της ισχύος για σταθερές στροφές

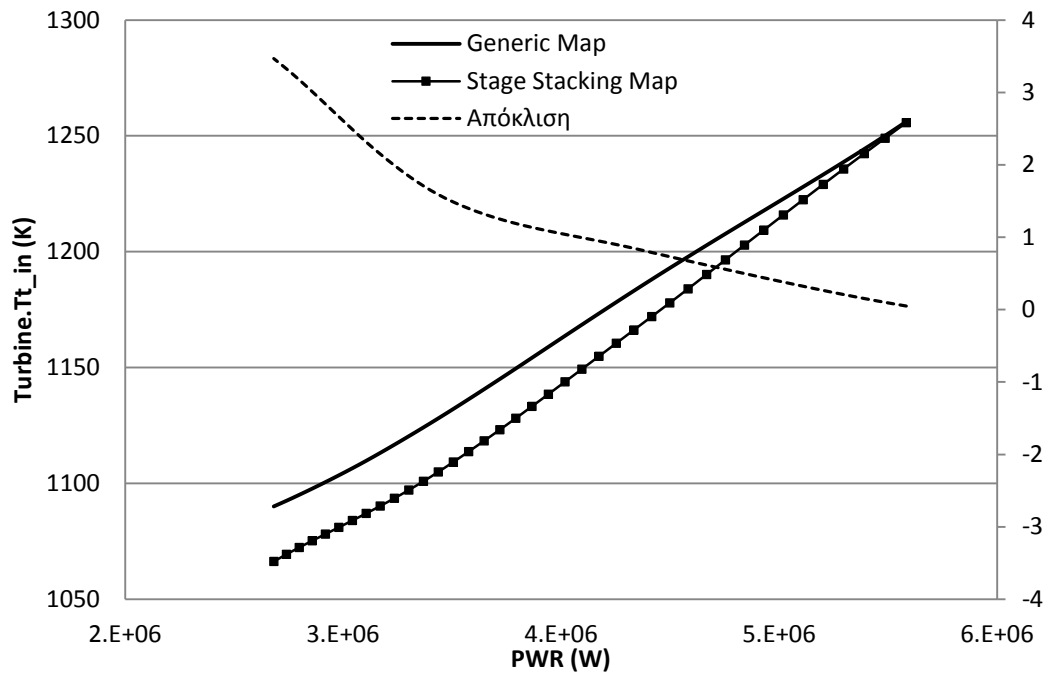
Μεταβλητές στροφές



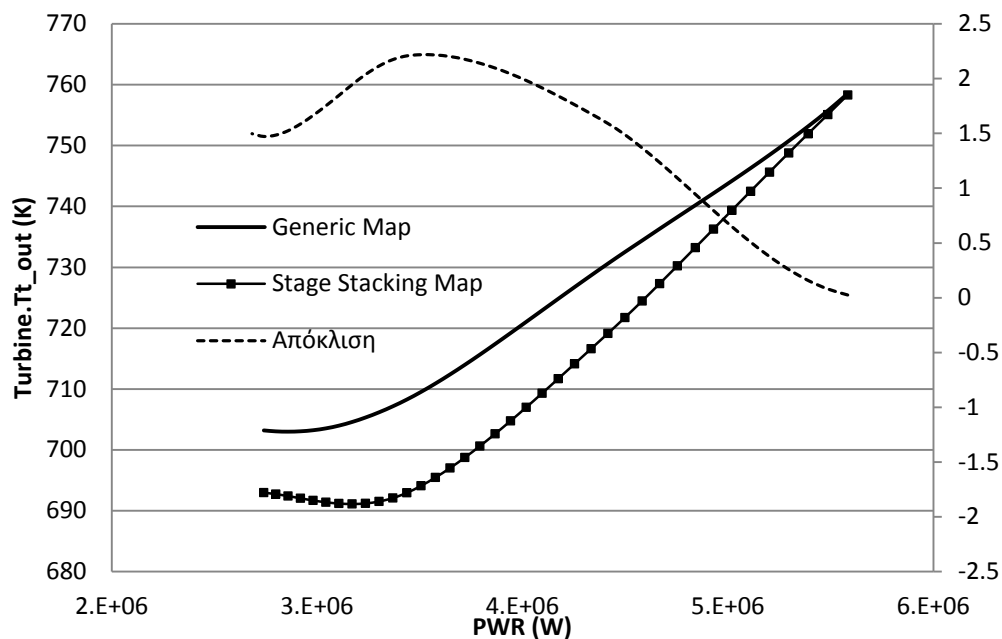
Σχήμα 5.31: Μεταβολή ολικής πίεσης στην έξοδο του συμπιεστή συναρτήσει της ισχύος για μεταβλητές στροφές



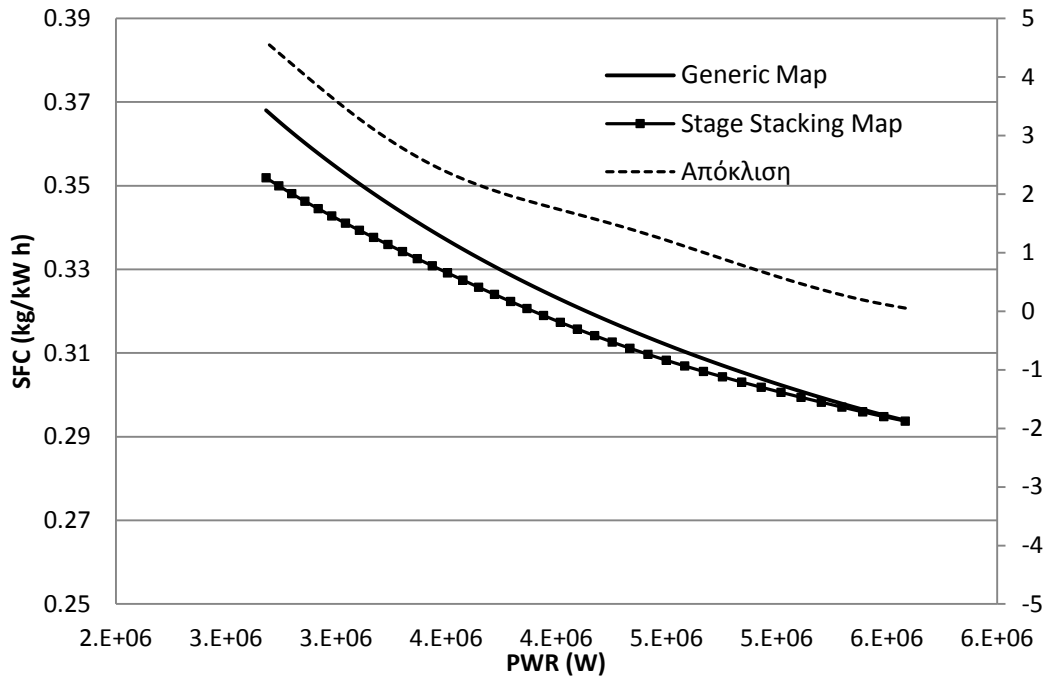
Σχήμα 5.32: Μεταβολή ολικής θερμοκρασίας στην έξοδο του συμπιεστή συναρτήσει της ισχύος για μεταβλητές στροφές



Σχήμα 5.33: Μεταβολή ολικής θερμοκρασίας στην είσοδο του στροβίλου (ΤΙΤ) συναρτήσει της ισχύος για μεταβλητές στροφές



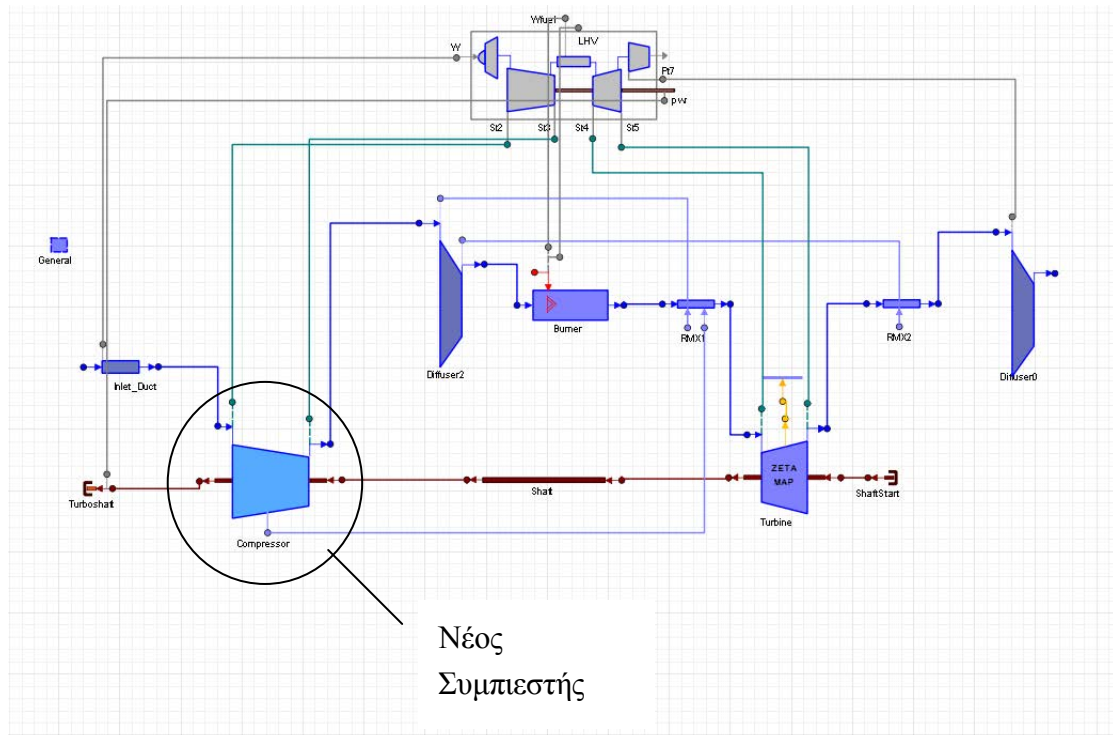
Σχήμα 5.34: Μεταβολή ολικής θερμοκρασίας στην έξοδο του στροβίλου συναρτήσει της ισχύος για μεταβλητές στροφές



Σχήμα 5.35: Μεταβολή ειδικής κατανάλωσης καυσίμου συναρτήσει της ισχύος για μεταβλητές στροφές

### 5.2.2 Ενσωμάτωση μοντέλου συμπιεστή με τη μέθοδο συσσώρευσης βαθμίδων

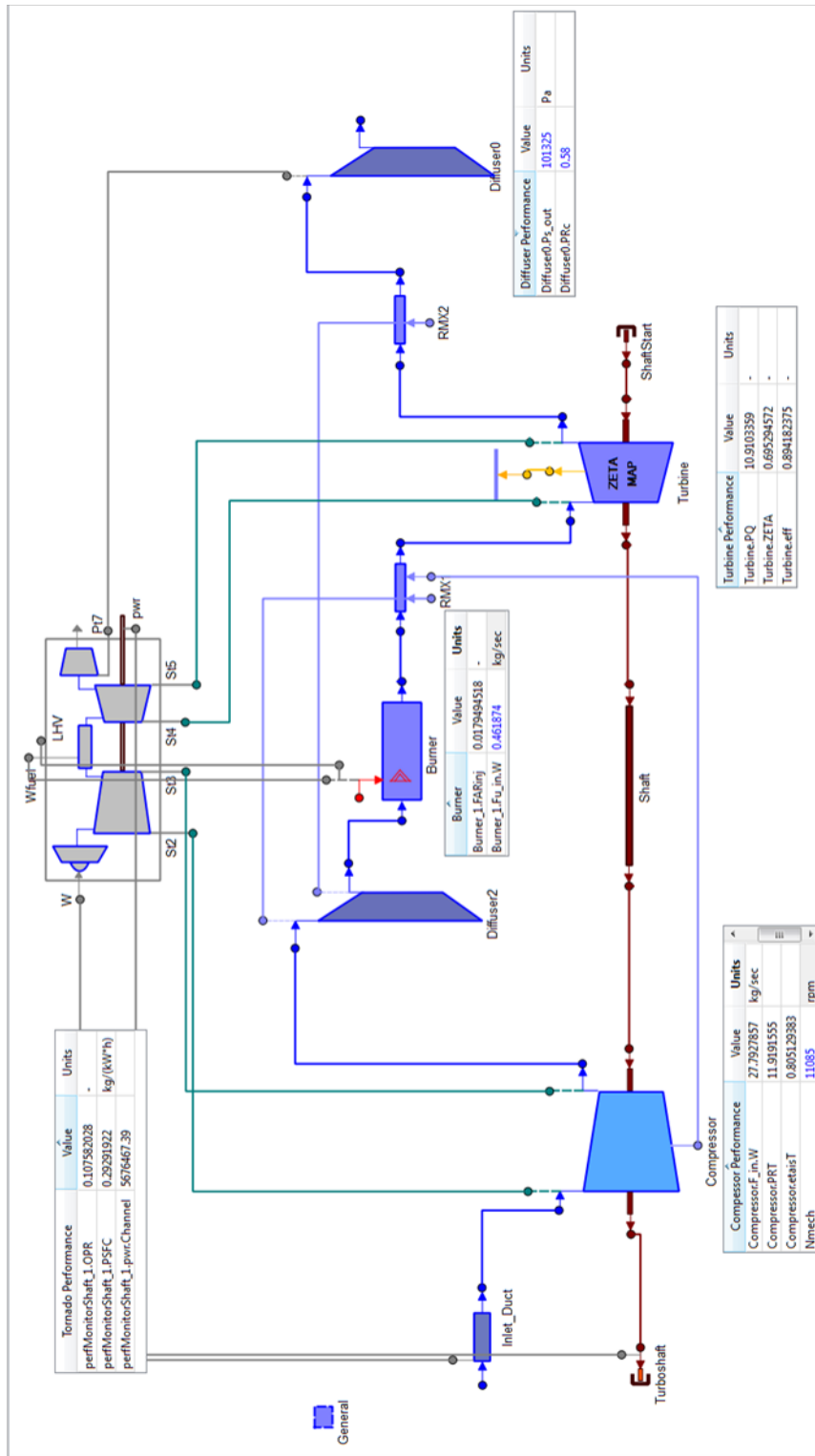
Στο μοντέλο του αεριοστροβίλου αφαιρέθηκε η συνιστώσα του συμπιεστή που έφερε χάρτη και ενσωματώθηκε ο συμπιεστής με τη μέθοδο συσσώρευσης βαθμίδων. Οι λοιπές συνιστώσες της διάταξης του αεριοστροβίλου καθώς και τα χαρακτηριστικά τους (attributes), παρέμειναν ίδια με αυτά των μοντέλων της μηχανής που μελετήθηκαν προηγουμένως. Στο Σχήμα 5.36 παρουσιάζεται η νέα διάταξη αεριοστροβίλου.



Σχήμα 5.36: Νέα διάταξη αεριοστροβίλου

Ο χάρτης του στροβίλου δεν απαιτεί εκ νέου προσαρμογή στο σημείο σχεδίασης καθώς η σύζευξη εξακολουθεί να είναι με συμπιεστή μοντελοποιημένο με τη μέθοδο συσσώρευσης βαθμίδων. Για τον καθορισμό και την επίλυση του μαθηματικού μοντέλου δημιουργήθηκε ένα όμοιο default Partition με το προηγούμενο μοντέλο μηχανής. Η διαφορά εντοπίζεται στις αλγεβρικές μεταβλητές, όπου δεν απαιτήθηκε η επιλογή της μεταβλητής BETA για το συμπιεστή. Από τη προσομοίωση του αεριοστροβίλου στο σημείο σχεδίασης προκύπτουν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.37.





Σχήμα 5.37: Επιδόσεις αεριοστρόβιλου και συνιστωσών στο σημείο σχεδίασης

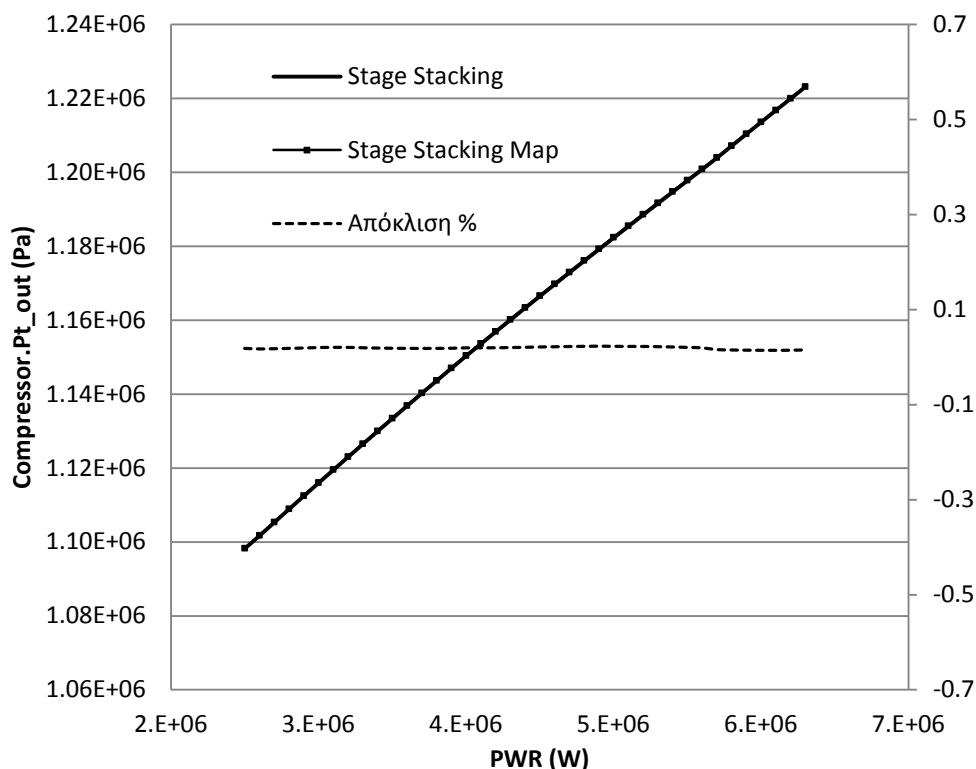
Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της λειτουργίας του αεριοστρόβιλου εκτός τους σημείο σχεδίασης (off design analysis). Συγκεκριμένα για σταθερή ταχύτητα περιστροφής, πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση για δεδομένο εύρος τιμών παραγόμενης ισχύος. Επαναλήφθηκε η παραμετρική ανάλυση για μεταβλητές στροφές. Στο Σχήμα 5.38 έως Σχήμα 5.47 παρουσιάζονται οι μεταβολές των μεγεθών:

- της ολικής πίεσης και της θερμοκρασίας εξόδου του συμπιεστή,
- της ολικής θερμοκρασίας εισόδου και εξόδου του στροβίλου,
- της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (SFC),

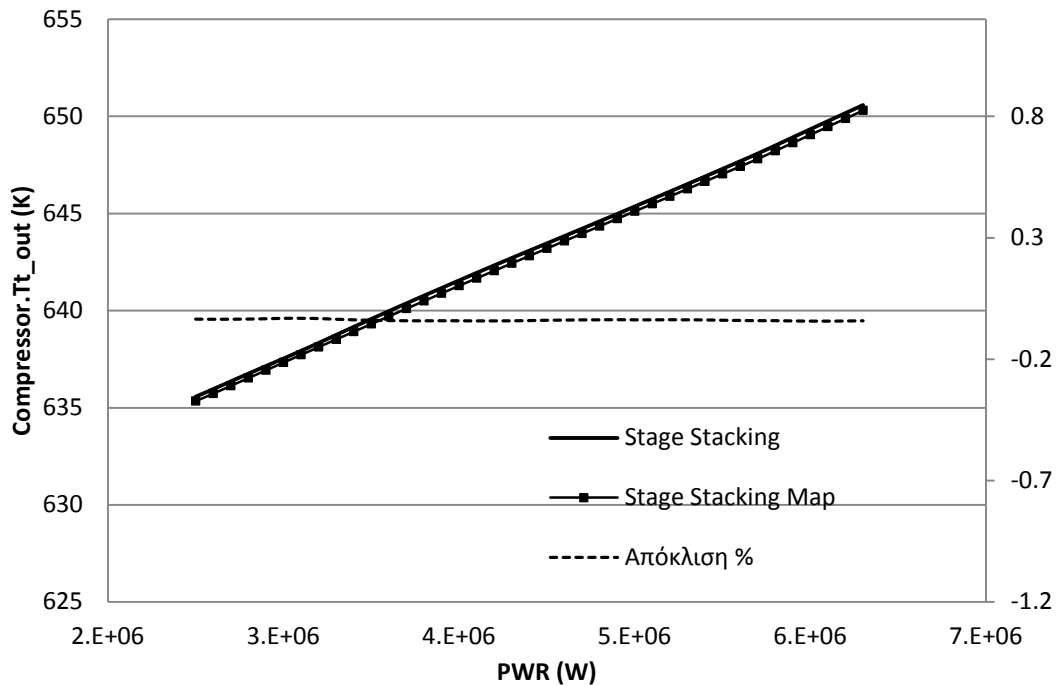
συναρτήσει της ισχύος για σταθερές και μεταβλητές στροφές. Στα διαγράμματα συγκρίνονται οι μεταβολές αυτές για το μοντέλο του αεριοστρόβιλου που χρησιμοποιεί το συμπιεστή με τη μέθοδο συσσώρευσης βαθμίδων, και για αυτό που χρησιμοποιεί το χάρτη όπως προέκυψε από τη μέθοδο συσσώρευσης βαθμίδων.

Παρατηρείται ότι, για σταθερές στροφές, οι αποκλίσεις είναι σχεδόν μηδενικές. Ενδεικτικά, η υψηλότερη απόκλιση εμφανίζεται στην θερμοκρασία εξόδου του συμπιεστή όπου αγγίζει το 0.22%. Οι αποκλίσεις παρουσιάζουν μικρή αύξηση για μεταβλητές στροφές. Η υψηλότερη απόκλιση εμφανίζεται στην πίεση εξόδου του συμπιεστή όπου αγγίζει το 0.7%.

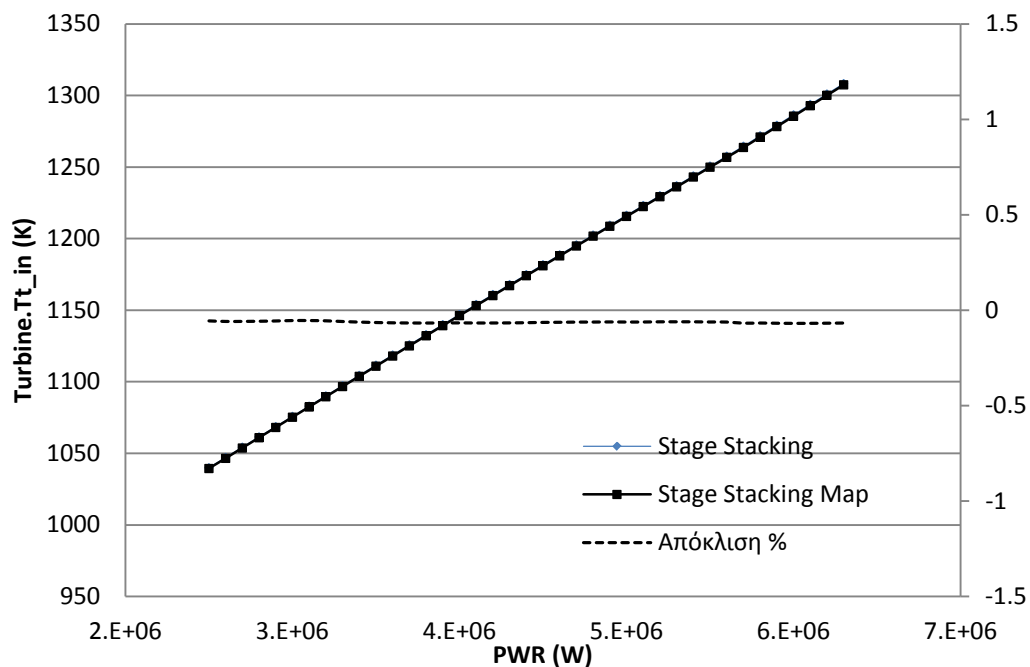
### Σταθερές στροφές



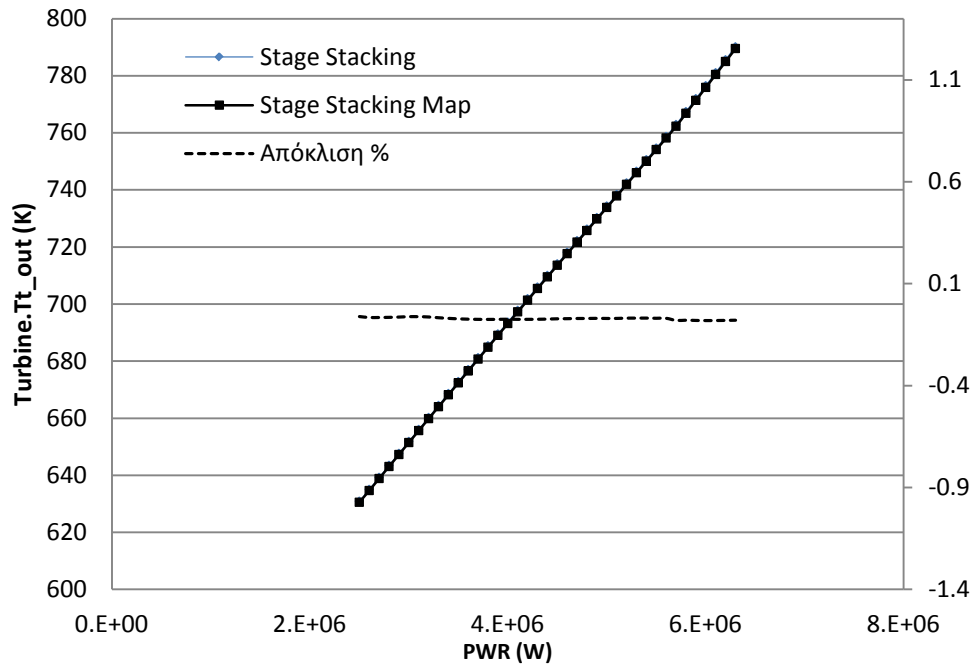
Σχήμα 5.38: Μεταβολή ολικής πίεσης στην έξοδο του συμπιεστή συναρτήσει της ισχύος για σταθερές στροφές



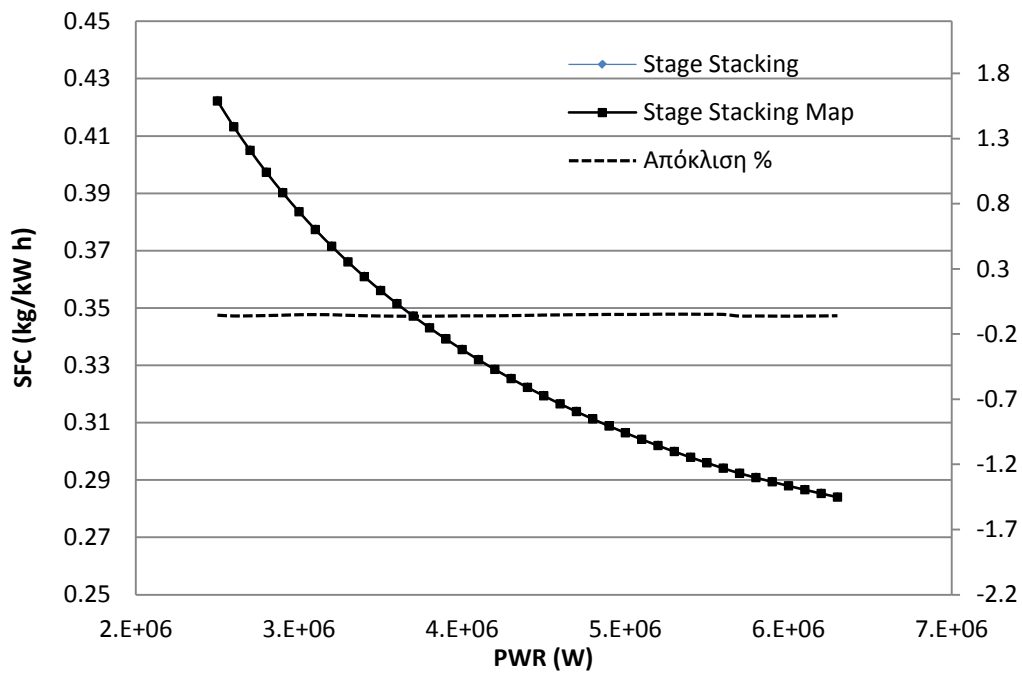
Σχήμα 5.39: Μεταβολή ολικής θερμοκρασίας στην έξοδο του συμπιεστή συναρτήσει της ισχύος για σταθερές στροφές



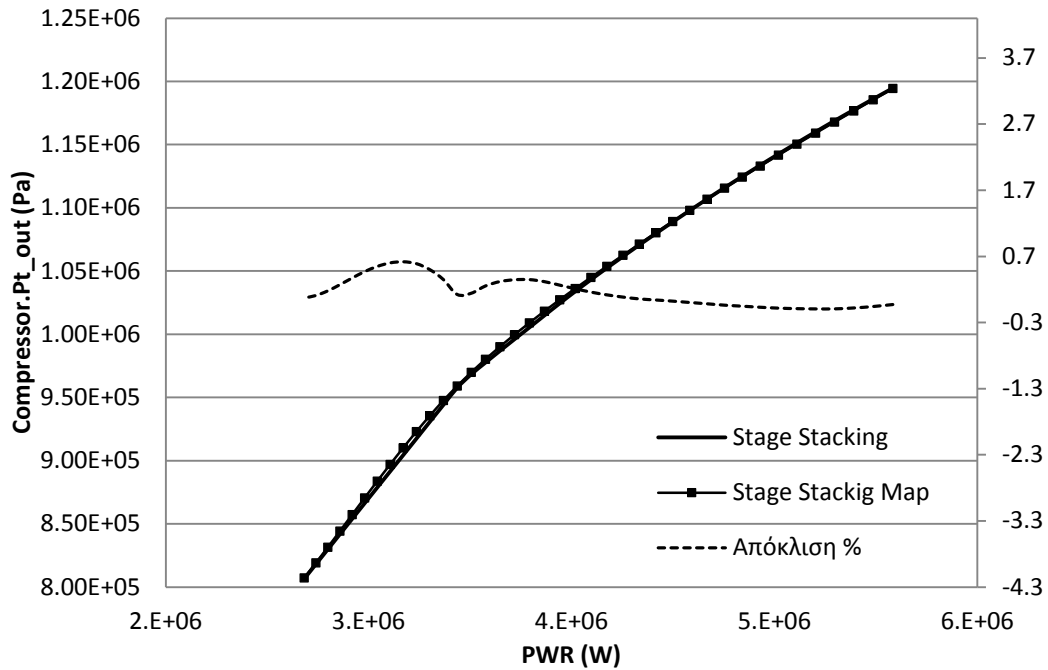
Σχήμα 5.40: Μεταβολή ολικής θερμοκρασίας στην είσοδο του στροβίλου (TIT) συναρτήσει της ισχύος για σταθερές στροφές



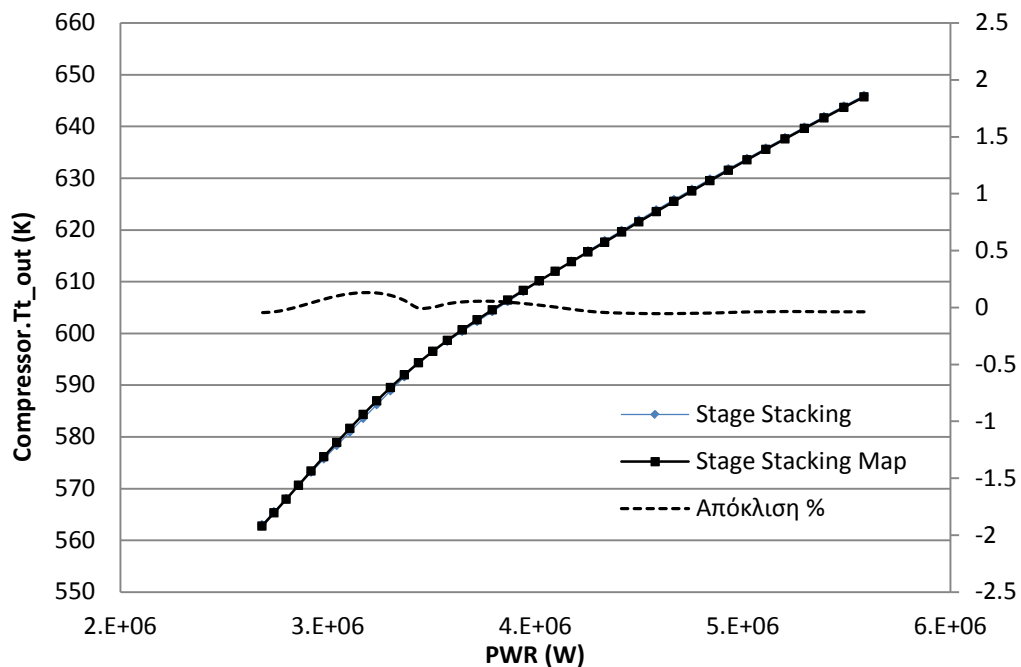
Σχήμα 5.41: Μεταβολή ολικής θερμοκρασίας στην έξοδο του στροβίλου συναρτήσει της ισχύος για σταθερές στροφές



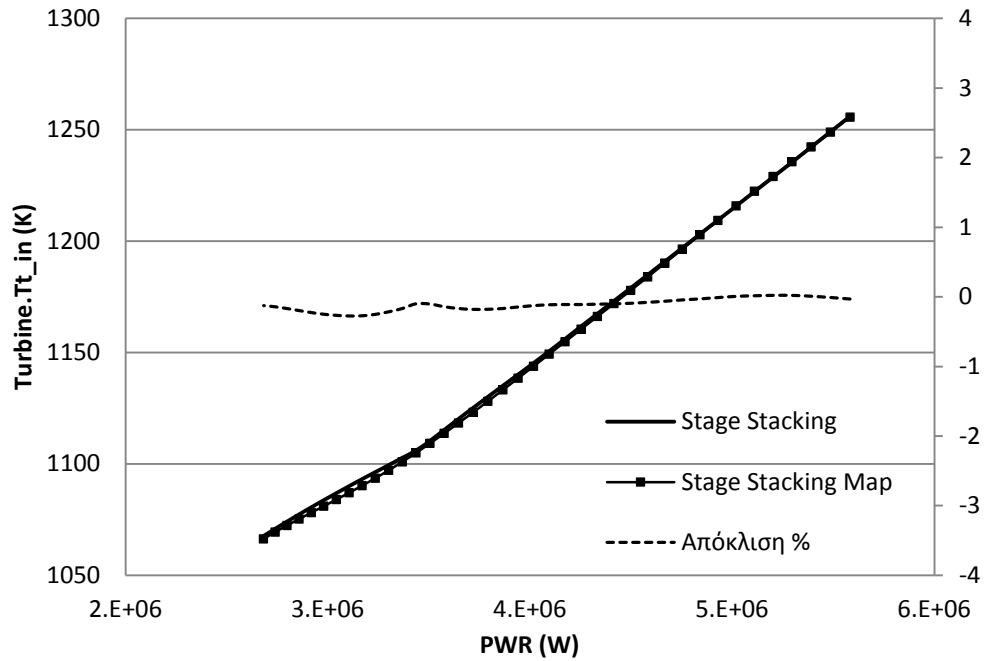
Σχήμα 5.42: Μεταβολή ειδικής κατανάλωσης καυσίμου συναρτήσει της ισχύος για σταθερές στροφές

Μεταβλητές στροφές

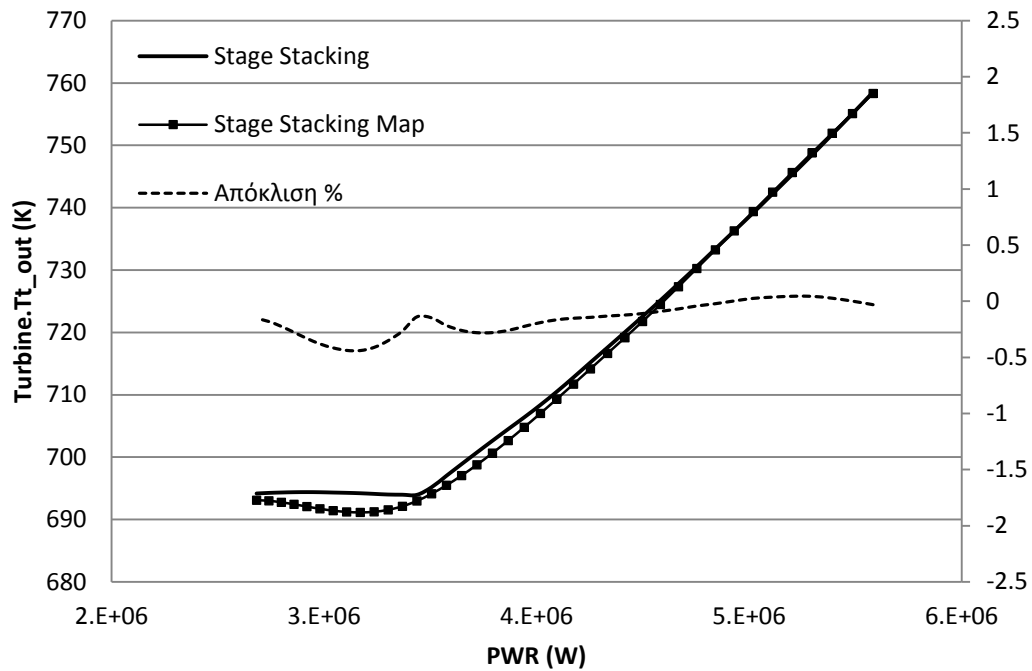
Σχήμα 5.43: Μεταβολή ολικής πίεσης στην έξοδο του συμπιεστή συναρτήσει της ισχύος για μεταβλητές στροφές



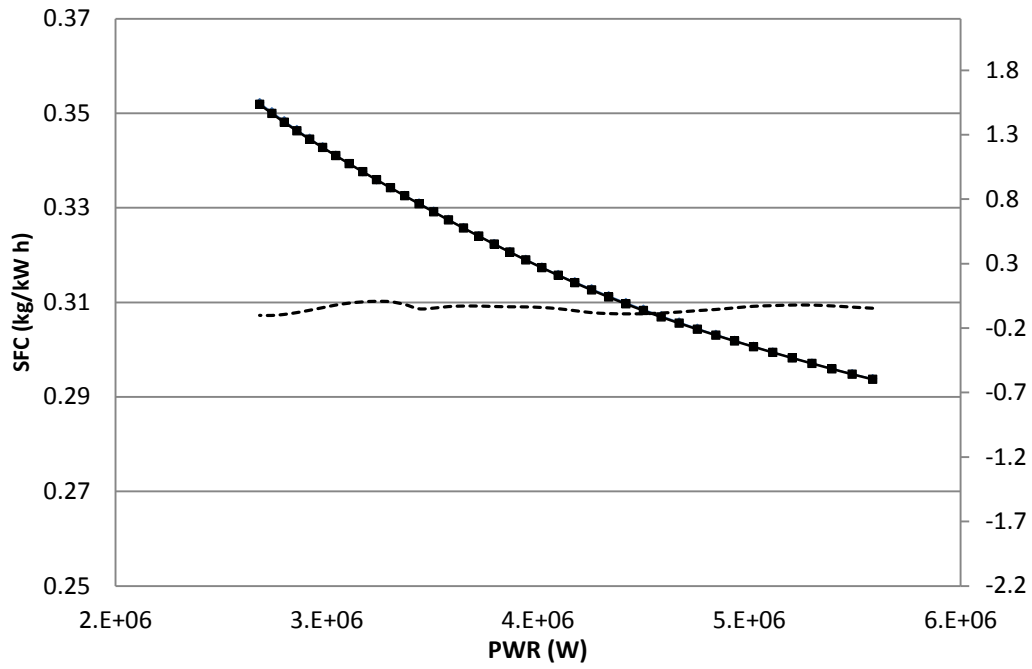
Σχήμα 5.44: Μεταβολή ολικής θερμοκρασίας στην έξοδο του συμπιεστή συναρτήσει της ισχύος για μεταβλητές στροφές



Σχήμα 5.45: Μεταβολή ολικής θερμοκρασίας στην είσοδο του στροβίλου (ΤΙΤ) συναρτήσει της ισχύος για μεταβλητές στροφές



Σχήμα 5.46: Μεταβολή ολικής θερμοκρασίας στην έξοδο του στροβίλου συναρτήσει της ισχύος για μεταβλητές στροφές



Σχήμα 5.47: Μεταβολή ειδικής κατανάλωσης καυσίμου συναρτήσει της ισχύος για μη σταθερές στροφές





# 6

## Μοντελοποίηση Βλαβών Συμπιεστή

Η εμφάνιση βλάβης στο συμπιεστή και η επιδείνωση της λειτουργίας του είναι σύνηθες φαινόμενο και αποτελεί βασική αιτία για την επιδείνωση των επιδόσεων ολόκληρης της μηχανής του αεριοστροβίλου. Ως πρώτη κύρια συνιστώσα σε μία διάταξη αεριοστροβίλου, έρχεται πρώτη σε επαφή με τον αναρροφώμενο αέρα και επομένως είναι πιθανό επικαθήσεις από τα στοιχεία του αέρα να προκαλέσουν βλάβες.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η μοντελοποίηση βλαβών συμπιεστή σε επίπεδο βαθμίδας κάτι το οποίο είναι δυνατόν λόγω της χρήσης της μεθόδου συσσώρευσης βαθμίδων. Συγκεκριμένα, μελετώνται τρεις διαφορετικές βλάβες, ενώ συγκρίνονται από πλευράς επίδρασής τους στο πεδίο χαρακτηριστικών του συμπιεστή αλλά και στις συνολικές επιδόσεις της μηχανής.

### 6.1 Γενικά

Σε έναν πολυβάθμιο αξονικό συμπιεστή, η ύπαρξη βλάβης τροποποιεί τις επιδόσεις  $\Phi_{ref}$ ,  $\Psi_{ref}$ ,  $\eta_{ref}$ , της κάθε βαθμίδας ανάλογα το είδος, το μέγεθος και την κατανομή αυτής κατά μήκος του συμπιεστή. Οι συντελεστές τροποποίησης (modification factors)<sup>[5],[6]</sup> των επιδόσεων αυτών συνδέουν τις επιδόσεις στην υγιή κατάσταση της βαθμίδας, δηλαδή στη περίπτωση μη ύπαρξης βλάβης, με αυτές στην περίπτωση βλάβης:

$$f_{\Phi} = \frac{\Phi_{ref\ faulty}}{\Phi_{ref\ healthy}} \quad (6.1)$$

$$f_{\Psi} = \frac{\Psi_{ref\ faulty}}{\Psi_{ref\ healthy}} \quad (6.2)$$

$$f_{\eta} = \frac{\eta_{ref\ faulty}}{\eta_{ref\ healthy}} \quad (6.3)$$

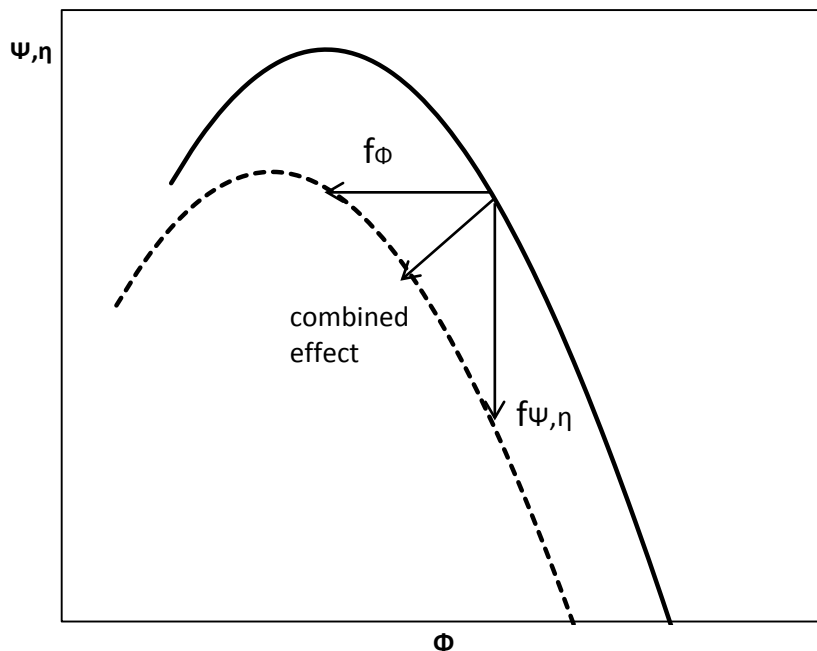
Για τον ορισμό των συντελεστών τροποποίησης λαμβάνονται υπόψη η βαρύτητα και η κατανομή της βλάβης. Ειδικότερα, για κάθε βαθμίδα με βλάβη οι συντελεστές τροποποίησης δίνονται από τις εξισώσεις<sup>[5],[6]</sup>:

$$f_{\phi_i} = [1 - S \cdot N_i \cdot (1 - M_{\phi_i})] \quad (6.4)$$

$$f_{\psi_i} = [1 - S \cdot N_i \cdot (1 - M_{\psi_i})] \quad (6.5)$$

$$f_{\eta_i} = [1 - S \cdot N_i \cdot (1 - M_{\eta_i})] \quad (6.6)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις ο συντελεστής  $S$  δηλώνει τη βαρύτητα της βλάβης και παίρνει τιμές στο σύνολο  $Se[0,1]$ . Η τιμή 1 δηλώνει μέγιστη βαρύτητα της βλάβης. Ο συντελεστής  $N_i$  δείχνει την κατανομή της βλάβης κατά μήκος του συμπιεστή και παίρνει τιμές στο σύνολο  $Ne[0,1]$ , όπου η τιμή 1 αναφέρεται στη βαθμίδα με τη μέγιστη βαρύτητα βλάβης. Και για τους δύο συντελεστές η τιμή μηδέν δηλώνει υγιή κατάσταση βαθμίδας. Ο συντελεστής  $M_{\phi,\psi,\eta}$  δηλώνει τη κατεύθυνση και το μέγεθος του μετασχηματισμού της αντίστοιχης επίδοσης  $\Phi_{ref}$ ,  $\Psi_{ref}$ ,  $\eta_{ref}$ , της κάθε βαθμίδας στους δύο άξονες για τη μέγιστη σοβαρότητα βλάβης. Στο Σχήμα 6.1<sup>[5]</sup> παρουσιάζεται πως μετατοπίζεται η χαρακτηριστική καμπύλη της βαθμίδας για επίδραση των συντελεστών τροποποίησης σε περίπτωση βλάβης.



Σχήμα 6.1: Μεταβολή ειδικής κατανάλωσης καυσίμου συναρτήσει της ισχύος για μη σταθερές στροφές για τα δύο μοντέλα του αεριοστρόβιλου

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε μοντελοποίηση βλαβών κατά μήκος του συμπιεστή με χρήση των εξισώσεων (6.1) έως (6.6). Ειδικότερα μελετήθηκαν οι εξής βλάβες:

- Συσσώρευση επικαθήσεων (Fouling)
- Αύξηση ακτινικού διακένου (Tip Clearance Increase)
- Διάβρωση πτερυγίου (Blade Erosion)

Σε κάθε περίπτωση μελετήθηκε πώς μεταβάλλεται το πεδίο χαρακτηριστικών του συμπιεστή και η ειδική κατανάλωση καυσίμου συναρτήσει τις ισχύος για μη σταθερές στροφές.

### 6.1.1 Συσσώρευση επικαθήσεων (Fouling)

Η βλάβη στο συμπιεστή είναι πιθανό να οφείλεται σε συσσώρευση επικαθήσεων (Fouling), η οποία με τη σειρά της μπορεί να εμφανίζεται εξαιτίας διαφόρων παραγόντων<sup>[5],[6]</sup>. Βασικός παράγοντας, είναι η αναρρόφηση ακαθαρσιών του αέρα, η οποία οδηγεί στη συσσώρευση και επικάθηση αυτών στις ελεύθερες επιφάνειες που περνά το εργαζόμενο μέσο όπως πτερυγώσεις, κελύφη, κ.α. Ως αποτέλεσμα τροποποιείται η γεωμετρία των αεροτομών. Ένας ακόμη παράγοντας που οδηγεί στη συσσώρευση επικαθήσεων είναι οι διαρροές λαδιού από δευτερεύοντα συστήματα, οι οποίες αναμιγνύονται με τα αναρροφώμενα στοιχεία και επικάθονται στις επιφάνειες των πτερυγώσεων. Ως αποτέλεσμα επέρχεται επιδείνωση της αεροδυναμικής συμπεριφοράς των πτερυγώσεων και μείωση της ενεργής διατομής όπου περνάει το εργαζόμενο μέσο.

Ο Πίνακας 6.1 παρουσιάζει την κατανομή που χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση της συσσώρευσης επικαθήσεων κατά μήκος του συμπιεστή<sup>[5],[6]</sup>.

Βαθμίδα	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$N_i$	1	0,42	0,09	0,026	0,032	0,013	0	0	0	0	0	0	0	0	0

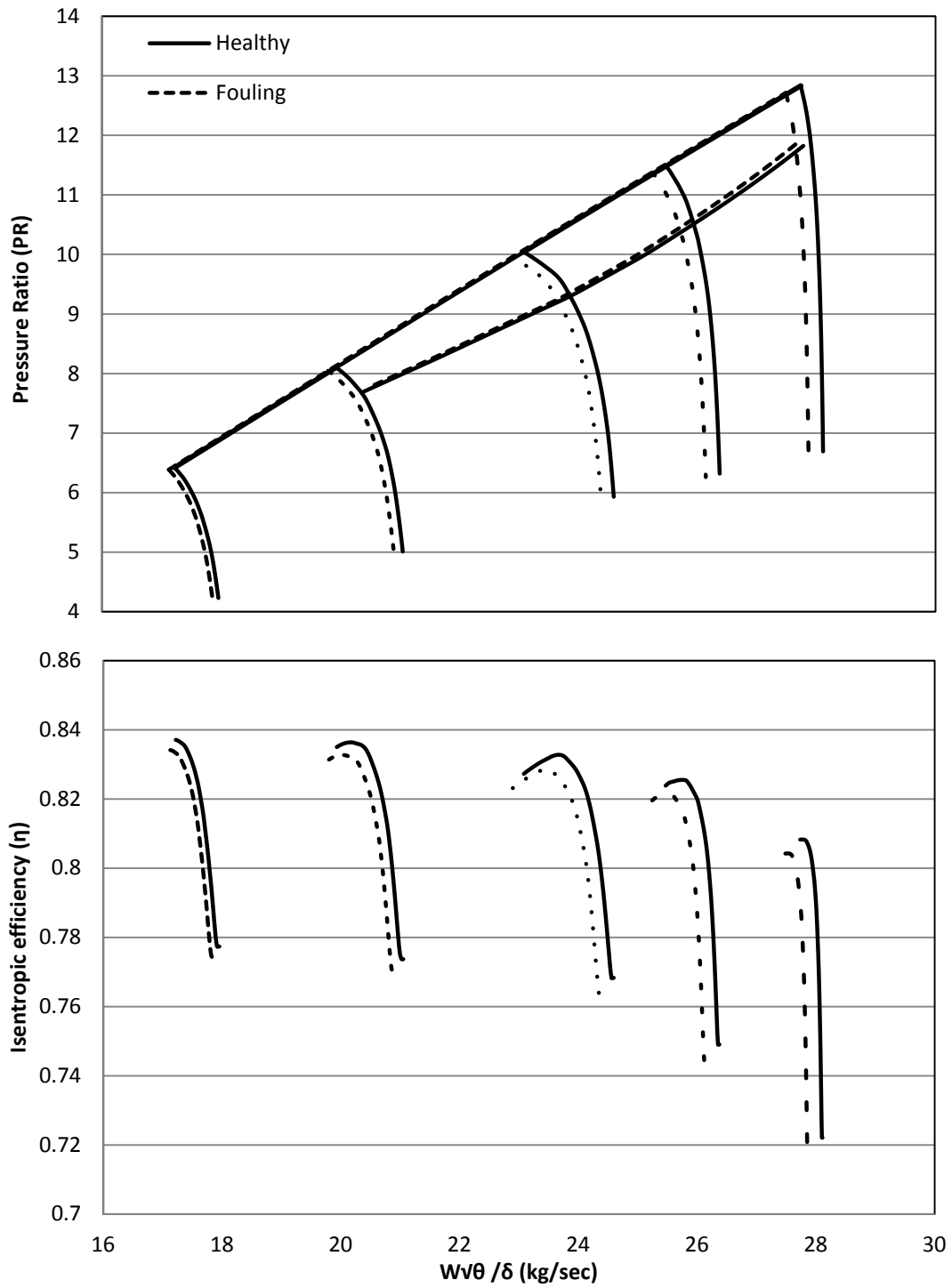
**Πίνακας 6.1: Συντελεστές κατανομής για συσσώρευση επικαθήσεων στο συμπιεστή**

Ο πίνακας Πίνακας 6.2 παρουσιάζει τους συντελεστές τροποποίησης  $M_i$  των χαρακτηριστικών καμπυλών για τις παραμέτρους  $\Phi, \Psi$  και  $\eta$ , για βλάβη από συσσώρευση επικαθήσεων<sup>[5],[6]</sup>.

	$\Phi_{ref, faulty} / \Phi_{ref}$	$\Psi_{ref, faulty} / \Psi_{ref}$	$\eta_{ref, faulty} / \eta_{ref}$
$M_i$	0,979	0,9755	0,9645

**Πίνακας 6.2: Συντελεστές τροποποίησης για συσσώρευση επικαθήσεων στο συμπιεστή**

Πραγματοποιήθηκε προσομοίωση του συμπιεστή για το χειρότερο δυνατό σενάριο, δηλαδή βαρύτητα βλάβης  $S=1$  (100% συσσώρευση επικαθήσεων), και παράχθηκε το νέο πεδίο χαρακτηριστικών. Στο Σχήμα 6.2 παρουσιάζεται η μεταβολή του πεδίου χαρακτηριστικών του συμπιεστή με αναφορά το πεδίο χαρακτηριστικών στην υγιή κατάσταση (Healthy). Η συσσώρευση επικαθήσεων μειώνει την ικανότητα του συμπιεστή να αναρροφήσει παροχή αέρα και επομένως έρχεται σε κατάσταση stall και choke σε μικρότερες παροχές. Παρόλα αυτά η γραμμή πάλμωσης δεν μεταβάλλεται αισθητά. Η γραμμή λειτουργίας μετατοπίζεται σε υψηλότερους λόγους πίεσης για σταθερή τιμή παροχής μάζας. Ως αποτέλεσμα μειώνεται το περιθώριο πάλμωσης. Ο ισεντροπικός βαθμός μειώνεται και επομένως δεν επιτυγχάνονται οι επιδόσεις της συνιστώσας.



Σχήμα 6.2: Επίδραση συσσώρευσης επικαθίσεων στο πεδίο χαρακτηριστικών του συμπιεστή και τη γραμμή λειτουργίας

### 6.1.2 Αύξηση ακτινικού διακένου (Tip Clearance Increase)

Η αύξηση του ακτινικού διακένου αποτελεί συνήθης βλάβη και είναι αποτέλεσμα μεταξύ άλλων της κακής ευθυγράμμισης του άξονα του συμπιεστή και της υπαρξής φθοράς των εδράνων αυτού<sup>[5],[6]</sup>.

Ο Πίνακας 6.5 παρουσιάζει την κατανομή που χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση της αύξησης του ακτινικού διακένου κατά μήκος του συμπιεστή<sup>[5],[6]</sup>.

Βαθμίδα	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$N_i$	0,199	0,215	0,251	0,29	0,345	0,384	0,433	0,492	0,547	0,615	0,703	0,758	0,825	0,903	1

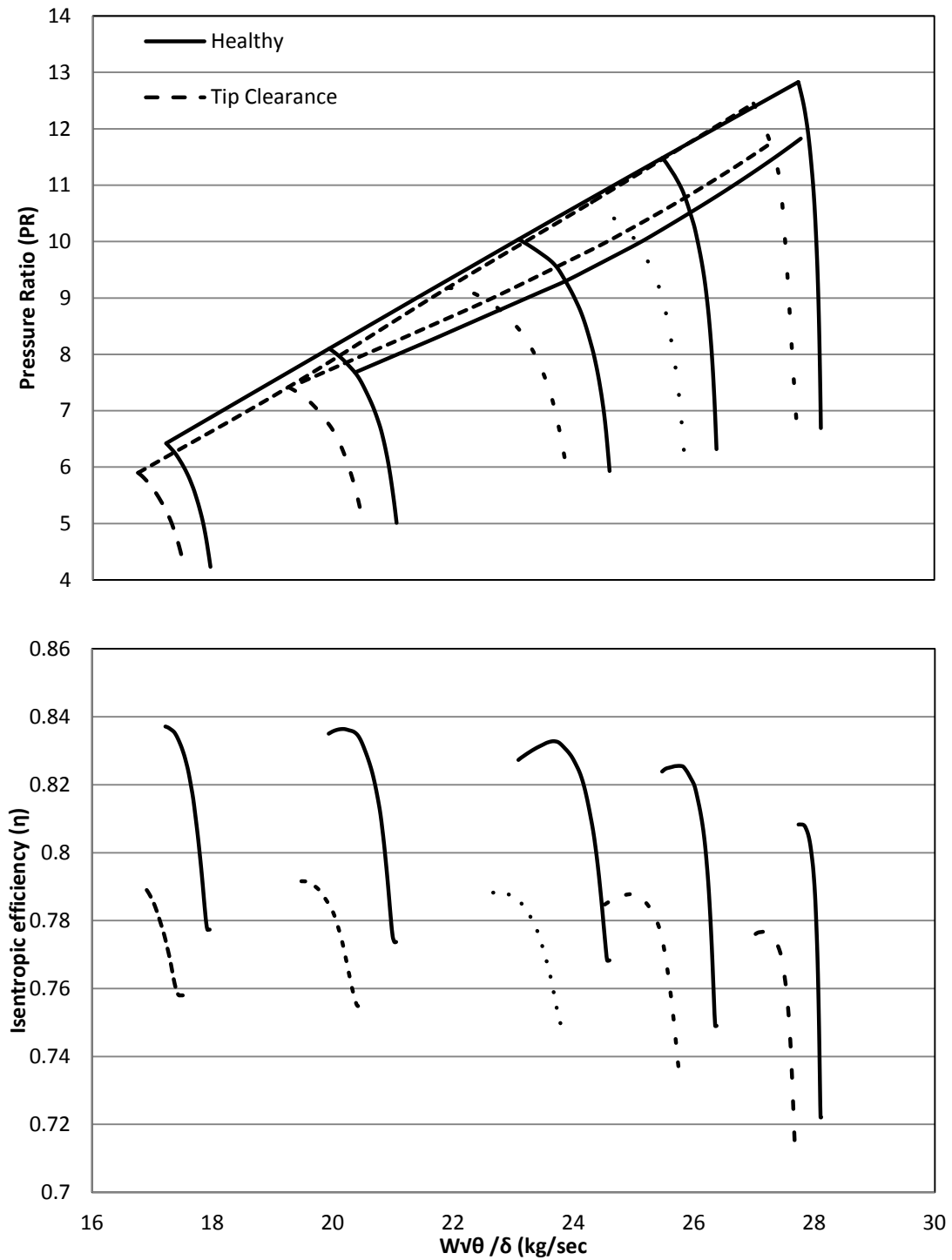
**Πίνακας 6.3: Συντελεστές κατανομής για αύξηση ακτινικού διακένου στο συμπιεστή**

Ο Πίνακας 6.4 παρουσιάζει τους συντελεστές τροποποίησης  $M_i$  των χαρακτηριστικών καμπυλών για τις παραμέτρους  $\Phi, \Psi$  και  $\eta$ , για βλάβη λόγω αύξησης του ακτινικού διακένου<sup>[5],[6]</sup>.

	$\Phi_{ref, faulty} / \Phi_{ref}$	$\Psi_{ref, faulty} / \Psi_{ref}$	$\eta_{ref, faulty} / \eta_{ref}$
$M_i$	0,965	0,931	0,928

**Πίνακας 6.4: Συντελεστές τροποποίησης για αύξηση ακτινικού διακένου στο συμπιεστή**

Πραγματοποιήθηκε προσομοίωση του συμπιεστή για βαρύτητα βλάβης  $S=1$  (100% αύξηση ακτινικού διακένου), και παράχθηκε το νέο πεδίο χαρακτηριστικών. Στο Σχήμα 6.3 παρουσιάζεται η μεταβολή του πεδίου χαρακτηριστικών του συμπιεστή με αναφορά το πεδίο χαρακτηριστικών στην υγιή κατάσταση (Healthy). Ο συμπιεστής έρχεται σε κατάσταση stall και choke για μικρότερες παροχές μάζας ενώ αποτυγχάνει να φτάσει σε υψηλότερους λόγους πίεσης για την ίδια παροχή μάζας. Συνεπώς η γραμμή πάλμωσης μετατοπίζεται προς τα κάτω. Σε συνδυασμό με την μετατόπιση της γραμμής λειτουργίας προς τα πάνω το περιθώριο πάλμωσης μικραίνει και ο βαθμός απόδοσης μειώνεται σημαντικά, και ο συμπιεστής κινδυνεύει με μη ευσταθή λειτουργία.



Σχήμα 6.3: Επίδραση αύξησης ακτινικού διακένου στο πεδίο χαρακτηριστικών του συμπιεστή και τη γραμμή λειτουργίας

### 6.1.3 Μηχανική Διάβρωση Πτερυγίων (Blade Erosion)

Η αναρρόφηση σκόνης και μικρών στερεών σωματιδίων, όπως για παράδειγμα άμμος, οδηγεί στην πρόσκρουση αυτών στα πτερύγια. Ως αποτέλεσμα υλικό αφαιρείται από την επιφάνεια τους, η μορφή τους αλλάζει με μείωση του μήκους της χορδής και αύξηση του ακτινικού διακένου. Αυτό οδηγεί μείωση του βαθμού απόδοσης και του περιθωρίου πάλμωσης<sup>[5],[6]</sup>.

Το φαινόμενο της διάβρωσης έχει παρατηρηθεί στο ακροπτερύγιο των πτερυγώσεων και πιο συχνά στο πίσω μέρος του συμπιεστή λόγω φυγόκεντρων δυνάμεων που προκαλούν τη μετακίνηση των στερεών σωματιδίων προς την εξωτερική διάμετρο. Η χορδή τους γίνεται τραχιά και χάνεται το αεροδυναμικό σχήμα. Το ύψος του πτερυγίου είναι κρίσιμη παράμετρος στη βαρύτητα της βλάβης κατά μήκος τους συμπιεστή, καθώς η αφαίρεση υλικού γίνεται σημαντική με μείωση του ύψους του πτερυγίου.

Ο Πίνακας 6.5 παρουσιάζει την κατανομή που χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση της διάβρωσης των πτερυγίων κατά μήκος του συμπιεστή<sup>[5],[6]</sup>.

Βαθμίδα	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$N_i$	1	0,967	0,639	0,470	0,301	0,195	0,195	0,205	0,224	0,232	0,232	0,329	0,459	0,578	0,70

**Πίνακας 6.5: Συντελεστές κατανομής για διάβρωση των πτερυγίων στο συμπιεστή**

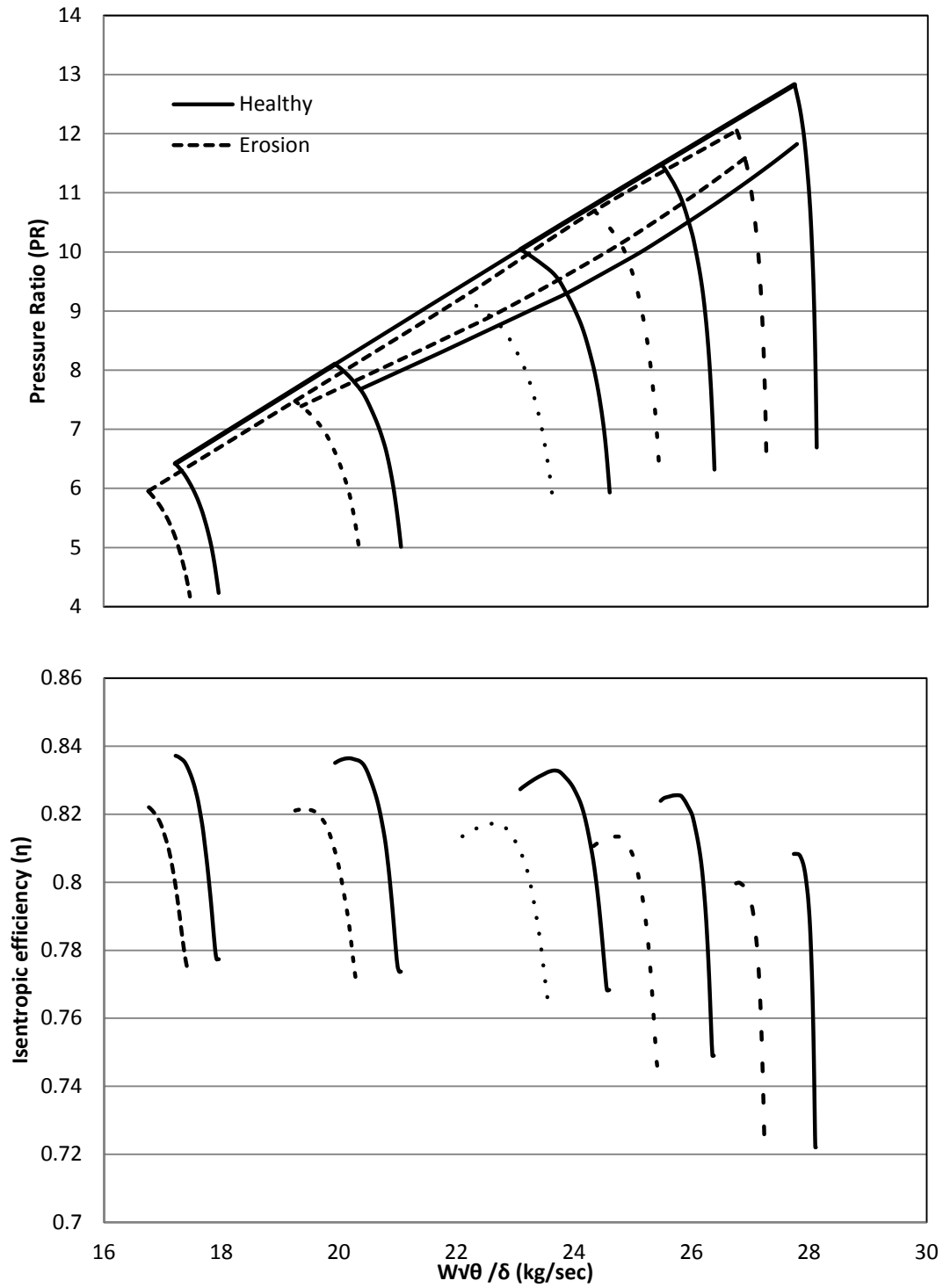
Ο Πίνακας 6.6 παρουσιάζει τους συντελεστές τροποποίησης  $M_i$  των χαρακτηριστικών καμπυλών για τις παραμέτρους  $\Phi, \Psi$  και  $\eta$ , για βλάβη από διάβρωση πτερυγίων<sup>[5],[6]</sup>.

	$\Phi_{ref, faulty} / \Phi_{ref}$	$\Psi_{ref, faulty} / \Psi_{ref}$	$\eta_{ref, faulty} / \eta_{ref}$
$M_i$	0,97072	0,8991	0,96663

**Πίνακας 6.6: Συντελεστές τροποποίησης για διάβρωση των πτερυγίων στο συμπιεστή**

Όπως φαίνεται από την κατανομή της βλάβης, οι πρώτες και τελευταίες βαθμίδες καταπονούνται από διάβρωση στα πτερύγια επομένως σε αρκετά χαμηλές και υψηλές στροφές η γραμμή πάλμωσης μετατοπίζεται αισθητά. Η μετατόπιση του νέου πεδίου χαρακτηριστικών με αναφορά την υγιή κατάσταση του συμπιεστή παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.4. Ο συμπιεστής έρχεται σε κατάσταση stall και choke για μικρότερες παροχές μάζας και επιτυγχάνει μικρότερους λόγους πίεσης κυρίως στις χαμηλές στροφές. Η γραμμή λειτουργίας μετατοπίζεται προς τα πάνω, συνεπώς πλησιάζει τη γραμμή πάλμωσης. Το περιθώριο πάλμωσης μικραίνει και ο συμπιεστής γίνεται λιγότερο αποδοτικός καθώς ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης μειώνεται.





Σχήμα 6.4: Επίδραση διάβρωσης πτερυγίων στο πεδίο χαρακτηριστικών του συμπιεστή και τη γραμμή λειτουργίας



# 7

## Επίλογος

### 7.1 Ανακεφαλαίωση

Η έρευνα που πραγματοποιείται στο Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών, στοχεύει, μεταξύ άλλων, στη μοντελοποίηση αεριοστροβίλων και ανάπτυξη μεθόδων διαγνωστικής για τη μελέτη βλαβών στις στροβιλοσυνιστώσες. Η συνεισφορά της παρούσης διπλωματικής εργασίας υπήρξε και στους δύο τομείς. Πραγματοποιήθηκε μοντελοποίηση αξονικού συμπιεστή με τη μέθοδο συσσώρευσης βαθμίδων στο υπολογιστικό πρόγραμμα PROOSIS και ενσωμάτωση αυτού σε μοντέλο αεριοστροβίλου.

Για την επίτευξη του σκοπού της παρούσης διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν τα ακόλουθα:

- Αναπτύχθηκε κώδικας για τη μοντελοποίηση βαθμίδας αξονικού συμπιεστή, στο περιβάλλον του υπολογιστικού προγράμματος PROOSIS. Δημιουργήθηκε η συνιστώσα βαθμίδας στο PROOSIS.
- Μοντελοποιήθηκε πολυβάθμιος αξονικός συμπιεστής με τη μέθοδο συσσώρευσης βαθμίδων. Αναπτύχθηκε κώδικας για τον προσδιορισμό των ολικών επιδόσεων του συμπιεστή και τη παραγωγή του πεδίου χαρακτηριστικών του. Δημιουργήθηκε νέα συνιστώσα συμπιεστή στο PROOSIS. Μελετήθηκε το πεδίο χαρακτηριστικών για την περίπτωση απομάστευσης ποσοστού παροχής μάζας εργαζόμενου μέσου από ενδιάμεση βαθμίδα του συμπιεστή.
- Μορφοποιήθηκε κατάλληλα το πεδίο χαρακτηριστικών του συμπιεστή, όπως παράχθηκε από τη μοντελοποίηση αυτού με τη μέθοδο συσσώρευσης βαθμίδων, ώστε να φέρει βοηθητικές συντεταγμένες γραμμές  $-\beta$ . Η διαδικασία αυτή υλοποιήθηκε στο πρόγραμμα Smooth C και ήταν απαραίτητη προκειμένου να εισαχθεί ο χάρτης στο πρόγραμμα PROOSIS.
- Ενσωματώθηκε ο συμπιεστής σε μοντέλο αεριοστροβίλου. Πραγματοποιήθηκε σύγκριση μοντέλου αεριοστροβίλου που κάνει χρήση γενικού χάρτη (Generic Map), με αντίστοιχο μοντέλο που κάνει χρήση του χάρτη που παράχθηκε από την παρούσα μέθοδο (Stage Stacking Map).
- Πραγματοποιήθηκε σύγκριση του μοντέλου του αεριοστροβίλου που κάνει χρήση του χάρτη που παράχθηκε από την παρούσα μέθοδο (Stage Stacking Map), με αντίστοιχο μοντέλο, στο οποίο ενσωματώθηκε η ίδια η μέθοδος συσσώρευσης βαθμίδων.
- Αναπτύχθηκε κώδικας για τη μοντελοποίηση βλαβών κατά μήκος του συμπιεστή και προσδιορισμό του νέου πεδίου χαρακτηριστικών του. Πραγματοποιήθηκε σύγκριση του τελευταίου αναφορικά με αυτό στην υγιή κατάσταση του συμπιεστή.

## 7.2 Συμπεράσματα

Τα κυριότερα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την εκπόνηση της παρούσης εργασίας είναι τα εξής:

- Η μοντελοποίηση του συμπεσθή με τη μέθοδο συσσώρευσης βαθμίδων, οδηγεί σε πιστότερη προσομοίωση της λειτουργίας αυτού και του αεριοστροβίλου. Η χρήση γενικού χάρτη, προσαρμοσμένο στο σημείο σχεδίασης, στο συμπεσθή, αναφορικά με το χάρτη που περιγράφει τη λειτουργία της συγκεκριμένης συνιστώσας, φέρει αισθητές αποκλίσεις στις επιδόσεις του αεριοστροβίλου σε ανάλυση εκτός σημείου σχεδίασης.
- Η ανάπτυξη της μεθόδου συσσώρευσης των βαθμίδων για τη μοντελοποίηση του συμπεσθή:
  1. παρέχει τη δυνατότητα μοντελοποίησης απομάστευσης ποσοστού παροχής μάζας εργαζόμενου μέσου από ενδιάμεση βαθμίδα, και τη μελέτη της επίδρασης αυτής στο πεδίο χαρακτηριστικών του συμπεσθή και τις ολικές επιδόσεις του αεριοστροβίλου. Το τελευταίο δεν είναι εφικτό όταν γίνεται χρήση χάρτη
  2. επιτρέπει τη μοντελοποίηση βλαβών διαφορετικής βαρύτητας σε επίπεδο βαθμίδας συμπεσθή
  3. επιτρέπει το σχεδιασμό του συμπεσθή, δηλαδή δημιουργία του μοντέλου από μετρήσεις ολικών επιδόσεων αυτού
- με την εισαγωγή της μεθόδου συσσώρευσης βαθμίδων στο πρόγραμμα PROOSIS, επιτυγχάνεται κοινός τρόπος μοντελοποίησης. Για παράδειγμα, είναι εφικτή η επιλογή κοινού εργαζόμενου μέσου για όλες τις συνιστώσες του αεριοστροβίλου, ίδια ακρίβεια σύγκλισης στους μαθηματικούς αλγόριθμους, κλπ. Με τη χρήση ενός εξωτερικού κώδικα, θα έπρεπε να προσαρμόζει ο ερευνητής αυτόν στις απαιτήσεις του μοντέλου στο PROOSIS. Πλέον η μοντελοποίηση αεριοστροβίλου μπορεί να πραγματοποιηθεί σε ένα επίπεδο.

## 7.3 Προτάσεις

Η μοντελοποίηση της συνιστώσας του συμπεσθή με τη μέθοδο συσσώρευσης βαθμίδων παρέχει τη δυνατότητα για επεκτάσεις και περεταίρω μελέτες. Ειδικότερα προτείνονται:

- **Μελέτη φαινομένων μεταφοράς θερμότητας για δεδομένη γεωμετρία του δίσκου πτερυγίων ανά βαθμίδα**

Η μεταβατική λειτουργία του αεριοστροβίλου, για παράδειγμα η επιτάχυνση με αλλαγή στην ταχύτητα περιστροφής, οδηγεί σε διαστολή των πτερυγίων με μεγαλύτερο ρυθμό από την αντίστοιχη διαστολή των κελυφών. Ως αποτέλεσμα το ακτινικό διάκενο μειώνεται. Η μελέτη της επίδρασης στο βαθμό απόδοσης του συμπιεστή και επομένως όλου του αεριοστροβίλου παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

- **Ελεγχόμενη έγχυση νερού**

Η ελεγχόμενη έγχυση νερού, δηλαδή υγρασία εργαζομένου μέσου διάφορη του μηδενός, συνηθίζεται στους βιομηχανικούς αεριοστροβίλους για καλύτερη συμπίεση με αποτέλεσμα να υπάρχει απαίτηση λιγότερης ισχύος, άρα και αυξημένη παραγωγή ισχύος.

- **Βελτιστοποίηση του προγράμματος των οδηγών πτερυγίων και πτερυγώσεων μεταβλητής γεωμετρίας**

Η μελέτη του βέλτιστου προγράμματος των πτερυγώσεων μεταβλητής γεωμετρίας με σκοπό να επιτευχθεί ο επιθυμητός βαθμός απόδοσης ή αντίστοιχα η ειδική κατανάλωση καυσίμου, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Αντίστοιχα προτείνεται η μελέτη των βέλτιστων γωνιών που συστρέφεται τη ροή λόγω των πτερυγώσεων αυτών.



# 8

## Βιβλιογραφία

### Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

[1]: A. Alexiou, T. Tsalavoutas: Introduction to Gas Turbine Modelling with PROOSIS, 2011, Empresarios Agrupados Internacional, 1<sup>st</sup> Edition.

[2]: Empresarios Agrupados Internacional: EL Manual (Modelling Language), 2012

[3]: A. Alexiou, E. H. Baalbergen, O. Kogenhop, K. Mathioudakis, P. Arendsen, 2007. “Advanced Capabilities for Gas Turbine Engine Performance Simulations”, ASME Paper - GT2007-27086

[4]: P. R. Spina, 2007. “Gas Turbine Performance Prediction by using Generalized Performance Curves of Compressor and Turbine Stages”, ASME Paper - GT2002-30275.

[5]: N. Aretakis, I. Roumeliotis, K. Mathioudakis, 2010. “Performance Model ‘Zooming’ for in-depth Component Fault Diagnosis”, ASME Paper - GT2002-23262.

[6]: I. Roumeliotis, N. Aretakis, K. Mathioudakis, E. A. Yfantis, 2012. “Modelling and Assessment of Compressor Faults on Marine Gas Turbines”, ASME Paper - GT2012-69740.

[7]: C. Rodriguez, D. Sanchez, R. Chacartegui, A. Munoz, G. S. Martinez, 2013. “Compressor Fouling: A Comparison of Different Fault Distributions using a ‘Stage-Stacking’ Technique”, ASME Paper - GT2013-94010.

[8]: R. K. Bhargava, M. Bianchi, F. Melino, A. Peretto, P. R. Spina, 2008. “Influence of Compressor Performance Maps Shape on Wet Compression”, ASME Paper - GT2008-50761.

[9]: J. Kurzke, Smooth C 8.2: Preparing Compressor Maps for Gas Turbine Performance Modelling, Germany 2009.

[10]: Gas Turbine World, Industrial & Marine Gas Turbine Engines of the World, 1985-86.

[11]: <http://www.gasturb.de/>

[12]: <http://www.gspteam.com/>

[13]: <http://www.swri.org/npss/>

[14]: <http://www.ecosimpro.com/>

### Ελληνική Βιβλιογραφία

- [15]: Κ. Μ. Μαθιουδάκης: Λειτουργία Αεροπορικών Κινητήρων. Εκδόσεις ΕΜΠ. Αθήνα 2007.
- [16]: Α. Δ. Τσαλαβούτας: Διπλωματική Εργασία: Προσδιορισμός Αδιάστατων Χαρακτηριστικών Βαθμίδων πολυβάθμιου Αξονικού Συμπιεστή από δεδομένα συνολικών επιδόσεων. Αθήνα 1993.
- [17]: Κ. Μ. Μαθιουδάκης: Διαγνωστική Αεριοστροβίλων. Εκδόσεις ΕΜΠ. Αθήνα 2007.
- [18]: Κ. Δ. Παπαηλίου, Κ. Μ. Μαθιουδάκης, Κ. Χ. Γιαννάκογλου : Εισαγωγή στις Θερμικές Στροβιλομηχανές. Εκδόσεις ΕΜΠ. Αθήνα 1997.
- [19]: Μ. Κ. Γκόλια: Διπλωματική Εργασία: Επέκταση Βιβλιοθηκών πλατφόρμας PROOSIS και Εφαρμογή για Μοντελοποίηση Βιομηχανικών Αεριοστροβίλων. Αθήνα 2012.
- [20]: Θ. Παΐταζόγλου : Διπλωματική Εργασία: Βελτίωση του Μοντέλου του Εργαζόμενου Μέσου Αεριοστροβίλου με χρήση Λογισμικού Χημικής Ισορροπίας σε Περιβάλλον Αντικειμενοστραφούς Προγραμματισμού. Αθήνα 2012.