



**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**Μελέτη Αεριοστροβίλων Εγκατεστημένων στην Ελλάδα
και Ανάπτυξη Λογισμικού Προσαρμογής Μοντέλου
Βιομηχανικού Αεριοστροβίλου Απλής Ατράκτου σε
Δεδομένα Λειτουργίας**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ Γ.ΚΑΛΟΓΡΙΑΔΗΣ**

**Επίβλεψη:
Επ. Καθηγητής Ν. Αρετάκης**

**ΑΘΗΝΑ
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2018**



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Τομέας Ρευστών

Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη Αεριοστροβίλων Εγκατεστημένων στην Ελλάδα και
Ανάπτυξη Λογισμικού Προσαρμογής Μοντέλου Βιομηχανικού
Αεριοστροβίλου Απλής Ατράκτου σε Δεδομένα Λειτουργίας

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ Γ.ΚΑΛΟΓΡΙΔΗΣ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πλαίσιο της εργασίας αυτής, γίνεται αρχικά αναζήτηση των βιομηχανικών αεριοστροβίλων που είναι εγκατεστημένοι στην Ελλάδα και χρησιμοποιούνται για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η αναζήτηση αυτή βασίζεται τόσο στα αρχεία του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών, όσο και στην επικοινωνία με τους υπεύθυνους μηχανικούς των εγκαταστάσεων. Στη συνέχεια, μέσω αυτής της επικοινωνίας συλλέγονται πληροφορίες για τη διάταξη των εργοστασίων, βιβλιογραφικά στοιχεία καθώς και δεδομένα λειτουργίας των αντίστοιχων αεριοστροβίλων. Με βάση τα στοιχεία αυτά γίνεται μια περιγραφή των εργοστασίων, παρουσιάζονται οι επιδόσεις και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των αεριοστροβίλων που εντοπίζονται και κατασκευάζεται χάρτης της Ελλάδας με την τοποθεσία όπου είναι εγκατεστημένοι.

Παράλληλα δημιουργείται ένα πρόγραμμα στο υπολογιστικό περιβάλλον αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού PROOSIS, μέσω του οποίου ο χρήστης μπορεί να προσαρμόσει το μοντέλο βιομηχανικού αεριοστροβίλου απλής ατράκτου σε δεδομένα λειτουργίας. Βασικό χαρακτηριστικό αυτού του προγράμματος αποτελεί η δυνατότητα που δίνεται στο χρήστη, να επεμβαίνει σε αυτό μόνο μέσω ενός εξωτερικού αρχείου εισόδου. Ταυτόχρονα, το πρόγραμμα είναι δομημένο έτσι ώστε να επιτελεί όλες τις απαραίτητες λειτουργίες για την προσομοίωση της λειτουργίας ενός αεριοστροβίλου απλής ατράκτου, ενώ για τη χρήση του προτείνεται ακολουθία βημάτων που οδηγούν στο επιθυμητό αποτέλεσμα.

Η επαλήθευση της προτεινόμενης διαδικασίας γίνεται με τη μοντελοποίηση δύο βιομηχανικών αεριοστροβίλων της General Electric. Στην πρώτη περίπτωση έχουμε τον GE 9E, που εντοπίζεται στις εγκαταστάσεις συμπαραγωγής θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας της ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΝ ΕΛΛΑΣ στον Άγιο Νικόλαο Βοιωτίας. Η δεύτερη μηχανή είναι ο GE 9FB που είναι εγκατεστημένος στο εργοστάσιο Korinthos Power της

PROTERGIA στους Αγίους Θεοδώρους. Και στις δύο περιπτώσεις τα μοντέλα που προέκυψαν προσομοιώνουν την λειτουργία των μηχανών με ακρίβεια της τάξης του $\pm 1\%$, η οποία θεωρείται ικανοποιητική εκτός από προσομοίωση και για διαγνωστικούς σκοπούς.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
School of Mechanical Engineering
Fluids Section
Laboratory of Thermal Turbomachines

DIPLOMA THESIS

Gas Turbines Operating in Greece and Software Development for
Industrial Single-shaft Gas Turbine Model Adaptation Using Operational
Data

KALOGRIDIS PANAGIOTIS

ABSTRACT

In the context of the following diploma thesis, industrial gas turbines that are installed in Greece and are used for electrical power production are initially searched for. This research is based on archives of the Laboratory of Thermal Turbomachines and communication with engineers that are occupied on power plants with gas turbines installed. Through this communication, information about the factories' configuration, technical and operational data of the according gas turbines were collected. Based on the information extracted, a description of these factories is presented, as well as performance and the technical characteristics of the gas turbines that are used and a map of Greece with their location is created.

At the same time, a program is created in the object-oriented programming environment of PROOSIS, with which a user can adapt the model of a single-shaft industrial gas turbine to operational data. A key feature of this program is the ability given to the user, to interfere with it only through an external input file. The program is also structured to perform all the necessary functions for the simulation of a single-shaft gas turbine operation, while a sequence of steps for its use is proposed that can lead to the desired result.

Validation of the proposed process is achieved by modeling two General Electric industrial gas turbines. In the first case the GE 9E model is created, which is installed in the 'ALUMINUM HELLAS' power plant in Agios Nikolaos, Viotia. The second engine is GE 9FB, which is installed in 'Korinthos Power' facilities of PROTERGIA in Agioi Theodoroi. In both cases, the final models simulate the operation of these engines with an accuracy of $\pm 1\%$, which is considered satisfactory both for simulation and for diagnostic purposes.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Από τη θέση αυτή, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Αρετάκη Νικόλαο για την ανάθεση ενός τόσο ενδιαφέροντος και απαιτητικού θέματος, καθώς και για την ουσιαστική καθοδήγηση και τις υποδείξεις του, που με βοήθησαν στην ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Θα ήθελα εξίσου να ευχαριστήσω τον συμφοιτητή μου Ρομπόκο Παύλο, για την συνεργασία που είχαμε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας μελέτης. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κυρίους Αλεξίου Αλέξιο και Καλαθάκη Χρήστο για τις πολύτιμες συμβουλές τους, και τους Κόλλια Ιωάννη και Ντόνα Κωσταντίνο για την βοήθεια τους.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω και όλους τους μηχανικούς των εργοστασίων, με τους οποίους είχα επικοινωνία και με βοήθησαν στην συλλογή σημαντικών πληροφοριών και δεδομένων για τις αντίστοιχες αεριοστροβλικές μονάδες. Ειδικότερα, ευχαριστώ τους Καραγιάννη Ν. (μηχανικός λειτουργίας στον ΘΗΣ της PROTERGIA Korinthos Power), Μαλκάζα Α. (τομεάρχης λειτουργίας στον ΘΗΣ της ΔΕΗ Λαυρίου-Κερατέας), Στόμη Π. (μηχανικός λειτουργίας στον ΘΗΣ της ΔΕΗ Λαυρίου-Κερατέας), Λουκόπουλο Σ. (τομεάρχης κοινών παροχών των διυλιστηρίων ΕΛΠΕ Ασπροπύργου), Αγιαμαρνιώτη Π. (μηχανικός λειτουργίας στον ΘΗΣ της ΔΕΗ Αλιβερίου), Καλοφωλιά Δ. (τομεάρχης λειτουργίας στον ΘΗΣ της ΔΕΗ Μεγαλόπολης Β'), Στρατηγόπουλο Π. (Διευθυντής κλάδου στον ΘΗΣ της ΔΕΗ Κομοτηνής), Χαλκιάπουλο Β. (τομεάρχης λειτουργίας στον ΘΗΣ της ΔΕΗ Χανίων).

Στην οικογένεια μου
και τους φίλους μου

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	Εισαγωγή	1.1
1.1	Σκοπός διπλωματικής εργασίας	1.2
1.2	Δομή διπλωματικής εργασίας	1.2
2	Βιομηχανικοί Αεριοστρόβιλοι στην Ελλάδα	2.1
2.1	Αεριοστρόβιλοι στην Ελλάδα	2.2
2.2	Περιγραφή αεριοστροβιλικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής	2.4
2.2.1	ΔΕΗ Ρόδος	2.4
2.2.2	ΔΕΗ Λινοπεράματα	2.5
2.2.3	ΔΕΗ Αλιβέρι	2.6
2.2.4	ΔΕΗ Λαύριο Κερατέα	2.6
2.2.5	ΔΕΗ Μεγαλόπολη Β	2.7
2.2.6	ΔΕΗ Κομοτηνή	2.8
2.2.7	ΔΕΗ Χανιά	2.8
2.2.8	ELPEDISON Θίσβη	2.9
2.2.9	ELPEDISON Θεσσαλονίκης	2.10
2.2.10	PROTERGIA Αλουμίνιον Ελλάς	2.11
2.2.11	PROTERGIA Άγιος Νικόλαος	2.11
2.2.12	PROTERGIA Κόρινθος	2.12
2.2.13	ΗΡΩΝ Θερμοηλεκτρική Θήβα	2.13
2.2.14	ΗΡΩΝ II Θήβα	2.14
2.2.15	MOTOP ΟΪΛ ΕΛΛΑΣ Δυλιστήρια Κορίνθου	2.14
2.2.16	ΕΛΠΕ Δυλιστήρια Ασπροπύργου	2.15
2.2.17	ΚΑΒΑΛΑ ΟΙΑ	2.16
2.3	Περιγραφή επιλεγμένων αεριοστροβίλων	2.17
2.3.1	General Electric 9FB	2.18
2.3.2	General Electric 9E	2.26
2.3.3	General Electric LM2500	2.31
2.3.4	General Electric LM6000	2.37
2.3.5	Alstom GT26	2.43
2.3.6	Ansaldo V64.3	2.50
2.3.7	Thomassen PG5341	2.55

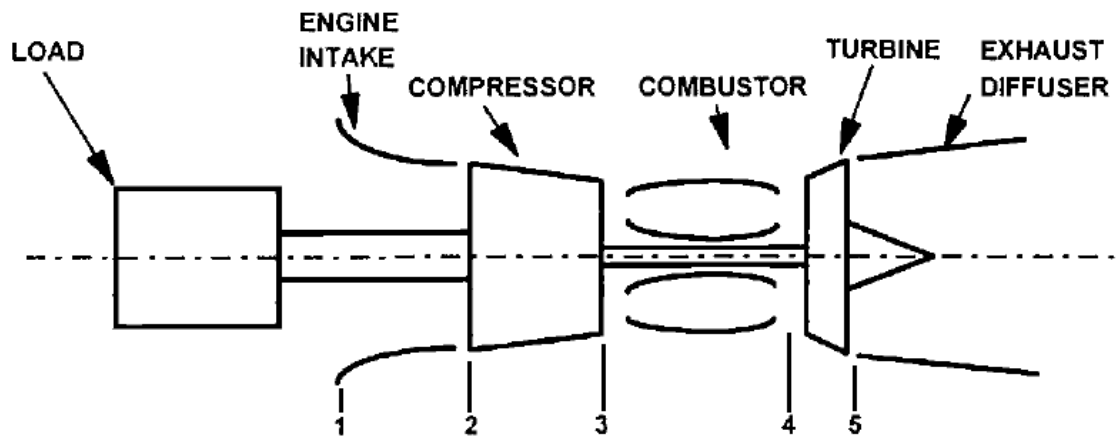
3	Περιγραφή λογισμικού	3.1
3.1	Γενικός σχεδιασμός προγράμματος	3.2
3.1.1	Δημιουργία βιβλιοθήκης	3.3
3.1.2	Δημιουργία σχηματικού	3.4
3.1.3	Δημιουργία μαθηματικού μοντέλου	3.8
3.1.4	Δημιουργία πειράματος	3.10
3.2	Πείραμα μοντέλου	3.10
3.2.1	Σκοπός και δομή πειράματος	3.10
3.2.2	Εισαγωγή αρχείων λειτουργίας	3.12
3.2.3	Ανάλυση σημείου σχεδίασης (Design Point Analysis)	3.12
3.2.4	Ανάλυση εκτός σημείου σχεδίασης (Off Design Analysis)	3.16
3.2.5	Ανάλυση εκτός σημείου σχεδίασης με προσαρμογή χαρτών	3.18
3.2.6	Βελτιστοποίηση σημείου σχεδίασης (Optimization)	3.19
3.3	Χειρισμός πειράματος για την δημιουργία μοντέλου	3.20
3.3.1	Βήμα 1 ^ο Επιλογή αρχείων λειτουργίας και εισαγωγή δεδομένων	3.21
3.3.2	Βήμα 2 ^ο Υπολογισμός σημείου σχεδίασης	3.22
3.3.3	Βήμα 3 ^ο Αξιολόγηση αποκλίσεων	3.22
3.3.4	Βήμα 4 ^ο Υπολογισμός συντελεστών προσαρμογής λόγω IGV's	3.22
3.3.5	Βήμα 5 ^ο Τοπική προσαρμογή χαρτών	3.23
3.3.6	Βήμα 6 ^ο Βελτιστοποίηση θέσης σημείου σχεδίασης στον χάρτη	3.24
3.3.7	Βήμα 7 ^ο Γενική προσαρμογή χαρτών	3.25
3.3.8	Βήμα 8 ^ο Έλεγχος χρήσης νέων χαρτών συνιστωσών	3.26
3.3.9	Προσομοίωση σημείων εκτός σχεδίασης	3.26
4	Εφαρμογή Μοντελοποίησης	4.1
4.1	General Electric 9E	4.2
4.1.1	Επιλογή δεδομένων και παραμέτρων	4.2
4.1.2	Σημείο σχεδίασης	4.9
4.1.3	Σημεία λειτουργίας εκτός σημείου σχεδίασης	4.11
4.1.4	Διόρθωση μοντέλου	4.15
4.2	General Electric 9FB	4.23
4.2.1	Επιλογή δεδομένων και παραμέτρων	4.24
4.2.2	Σημείο σχεδίασης	4.31
4.2.3	Σημεία λειτουργίας εκτός σημείου σχεδίασης	4.34
4.2.4	Διόρθωση μοντέλου	4.38

5	Ανακεφαλαίωση-Συμπεράσματα-Προτάσεις	5.1
5.1	Ανακεφαλαίωση	5.1
5.2	Συμπεράσματα	5.2
5.3	Προτάσεις	5.3
6	Βιβλιογραφία	6.1
6.1	Πίνακας Βιβλιογραφίας	6.1
7	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	7.1
7.1	Χάρτες λειτουργίας των συνιστωσών	7.1
7.1.1	Χάρτης συμπιεστή	7.1
7.1.2	Χάρτες στροβίλου	7.2
7.1.3	Συντελεστές κλίμακας των χαρτών	7.3
7.2	Υπολογισμός ισχύος	7.5
7.3	Διόρθωση μεγεθών	7.6
7.4	Αρχείο εισόδου προγράμματος	7.6
7.5	Χάρτης Αεριοστροβίλων στην Ελλάδα	7.11

Πίνακας Συμβόλων		
Σύμβολο	Μονάδες	Περιγραφή
CC	-	Συνδυασμένου κύκλου
brneff	-	Βαθμός απόδοσης καύσης
CDP	Pa	Στατική πίεση εξόδου συμπιεστή
CDT	K	Θερμοκρασία εξόδου συμπιεστή
CmpH.BETA	-	Παράμετρος βήτα χάρτη συμπιεστή
CmpH.s_inVSV.signal[1]	deg	Γωνία τοποθέτησης πτερυγίων IGVs
CPR, PR, P3Q2	-	Λόγος πίεσης συμπιεστή
D30.Wbleed	(%)	Ποσοστό απομάστευσης από τον αγωγό D30
Dp5	Pa	Διαφορά στατικής πίεσης στον αγωγό εξόδου ως προς Patm
E3	-	Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης συμπιεστή
E5	-	Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου
effTh, ηth, NTHERMAL	-	Θερμικός βαθμός απόδοσης
EGT	K	Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων
EP3	-	Πολυτροπικός βαθμός απόδοσης συμπιεστή
EP5	-	Πολυτροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου
FARB	-	Ποσοστό καυσαερίων στον αέρα
FARinj	-	Λόγος αέρα καυσίμου
FTT	K	Θερμοκρασία εγχυόμενου καυσίμου
ht	kJ/kg	Ενθαλπία
htref	kJ/kg	Ενθαλπία αναφοράς
IGVs	-	Πτερύγια μεταβλητής γεωμετρίας συμπιεστή
InEng.F_in.Ang	deg	Γωνία εισόδου της ροής στη μηχανή
InEng.F_in.FARU	-	Ποσοστό άκαυστου καυσίμου στον αέρα
LHV	kJ/kg	Ελάχιστη θερμογόνος ικανότητα
Ncor	-	Διορθωμένες στροφές
NSD	rpm	Στροφές του άξονα
Pt	Pa	Ολική πίεση
Ptcor	-	Διορθωμένη ολική πίεση
PWSD	W	Ισχύς που αποδίδει ο αεριοστροβίλος
Q1	W	Ισχύς που εισέρχεται στο συμπιεστή
Q3	W	Ισχύς που εξέρχεται από το συμπιεστή
Qexh	W	Ισχύς των καυσαερίων
QF	W	Ισχύς που προσφέρει το καύσιμο
Qonb	W	Ισχύς του αέρα απομάστευσης για το IHBV
SFC	kg/kWh	Ειδική κατανάλωση καυσίμου
ShH.pwrOT	W	Απομάστευση ισχύος από τον άξονα

sPwr	W*sec/kg	Ειδική ισχύς του συμπιεστή
TrbH.ZETA	-	Παράμετρος ζήτα χάρτη του στροβίλου
Tt	K	Ολική θερμοκρασία
Tcor	-	Διορθωμένη ολική θερμοκρασία
VSVs	-	Πτερύγια στάτορα μεταβλητής γεωμετρίας
WAR	-	Απόλυτη υγρασία
Wcor	-	Διορθωμένη παροχή
WF	kg/sec	Παροχή καυσίμου
WGAS	kg/sec	Παροχή καυσαερίων
δ	-	Παράγοντας διόρθωσης ως προς την πίεση
ηshaft	-	Μηχανικός βαθμός απόδοσης άξονα
θ	-	Παράγοντας διόρθωσης ως προς τη θερμοκρασία

Διάταξη αεριοστροβίλου απλής ατράκτου και αρίθμηση θέσεων



Δείκτες	Θέση
1	Είσοδος του αγωγού εισόδου
2	Είσοδος του συμπιεστή
3	Έξοδος του συμπιεστή
32	Είσοδος του θαλάμου καύσης
4	Είσοδος του στροβίλου
4iso	Είσοδος στροβίλου αν όλος ο αέρας ψύξης επιστρέφει στην έξοδο του Θ.Κ.
41	Είσοδος ρότορα ισοδύναμου στροβίλου
43	Έξοδος ρότορα ισοδύναμου στροβίλου
5	Έξοδος του στροβίλου
8	Έξοδος του αγωγού εξόδου

1

Εισαγωγή

Οι αεριοστρόβιλοι, ως διατάξεις παραγωγής ισχύος, έχουν αδιαμφισβήτητα καθιερωθεί τα τελευταία χρόνια. Αρχής γενομένης από την παραγωγή ώσης και την εφαρμογή τους στην πρόωση των αεροσκαφών, εξελίσσονται διαρκώς τόσο για την ελάττωση του κόστους λειτουργίας τους, όσο και για τον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Τα τελευταία πενήντα χρόνια, αυξάνεται διαρκώς και η χρήση τους σε διατάξεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Όσον αφορά στην Ελλάδα, η ηλεκτροπαραγωγή της χώρας βασίζεται σήμερα σε σημαντικό ποσοστό σε τέτοιου είδους εφαρμογές.

Έτσι η χρήση μοντέλων προσομοίωσης αεριοστροβίλων καθίσταται σημαντική για:

- επίβλεψη της λειτουργίας της μονάδας σε πραγματικό χρόνο
- διάγνωση βλαβών σε διάφορες καταστάσεις λειτουργίας
- για συγκριτική μελέτη επιδόσεων και επιλογή κατάλληλης μονάδας για μια νέα εγκατάσταση
- πρόβλεψη και βελτιστοποίηση του κόστους λειτουργίας

Αν και η πειραματική μελέτη των κινητήρων μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητική από πλευράς αποτελεσμάτων, είναι υπερβολικά δαπανηρή για τον χρήστη. Αυτό το γεγονός οδηγεί στην ανάγκη της υπολογιστικής μοντελοποίησης τους. Έτσι έχουν δημιουργηθεί αρκετά προγράμματα υπολογιστικής μοντελοποίησης αεριοστροβίλων, τόσο από κατασκευαστικές εταιρίες όσο και από ερευνητικά κέντρα. Κάποια από αυτά είναι αρκετά πολύπλοκα και απαιτούν την εμπειρία του χρήστη πάνω στην λειτουργία των αεριοστροβίλων, ενώ άλλα είναι δομημένα έτσι ώστε να παρέχουν ένα πιο φιλικό περιβάλλον εργασίας.

Η παρούσα εργασία εξετάζει την ανάπτυξη ενός λογισμικού για την προσαρμογή μοντέλου προσομοίωσης βιομηχανικών αεριοστροβίλων απλής ατράκτου σε δεδομένα λειτουργίας. Η ανάπτυξη αυτού του λογισμικού γίνεται στο υπολογιστικό πρόγραμμα αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού PROOSIS, το οποίο περιλαμβάνει όλες τις απαραίτητες συνιστώσες για την δημιουργία μοντέλων αεριοστροβίλων.

1.1 Σκοπός διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο:

1. την αναζήτηση των βιομηχανικών αεριοστροβίλων που χρησιμοποιούνται για ηλεκτροπαραγωγή στην Ελλάδα, τη συλλογή πληροφοριών και δεδομένων λειτουργίας τους και την παρουσίαση των επιδόσεων και των τεχνικών χαρακτηριστικών ορισμένων εξ' αυτών.
2. την δημιουργία ενός γενικευμένου λογισμικού προσαρμογής μοντέλου προσομοίωσης της λειτουργίας βιομηχανικών αεριοστροβίλων απλής ατράκτου σε δεδομένα λειτουργίας, την πρόταση μιας διαδικασίας για τη μοντελοποίηση μηχανών αυτής της διάταξης με τη βοήθεια του λογισμικού και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων εφαρμογής της διαδικασίας αυτής. Χρησιμοποιούμε τον όρο "γενικευμένο", επειδή επιδιώκεται η χρήση του ίδιου προγράμματος για προσομοίωση οποιασδήποτε μηχανής όμοιας διάταξης. Έτσι η μοντελοποίηση εφαρμόζεται σε δύο μονάδες αεριοστροβίλων απλής ατράκτου.

Σημειώνεται ότι η αναζήτηση και η συλλογή δεδομένων των αεριοστροβίλων έγινε σε συνεργασία με τον συμφοιτητή Παύλο Ρομπόκο. Σε ότι αφορά τη μοντελοποίηση των αντίστοιχων μηχανών, επειδή μία γενικότερη μοντελοποίηση που να περιλαμβάνει όλες τις δυνατές διατάξεις αεριοστροβίλων, ξεπερνάει κατά πολύ τα όρια μιας διπλωματικής εργασίας, επιλέχθηκαν δύο διατάξεις: απλής ατράκτου και διδύμων ατράκτων. Αντίστοιχα δημιουργήθηκαν δύο προγράμματα στα πλαίσια της συνεργασίας αυτής, τα οποία είναι όμοιας λογικής και παρουσιάζονται σε ξεχωριστές διπλωματικές εργασίες. Στην παρούσα μελέτη παρουσιάζεται το πρόγραμμα προσαρμογής μοντέλου βιομηχανικών αεριοστροβίλων απλής ατράκτου, το οποίο χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση δύο μηχανών, όπως παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 4.

1.2 Δομή διπλωματικής εργασίας

Η δομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρουσιάζεται συνοπτικά παρακάτω.

Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί την εισαγωγή της διπλωματικής εργασίας.

Το δεύτερο κεφάλαιο περιλαμβάνει βιβλιογραφικά στοιχεία για ορισμένους από τους αεριοστροβίλους που λειτουργούν στην Ελλάδα. Αρχικά δίνεται μία σύντομη περιγραφή για τις επιχειρήσεις που διαθέτουν τις αεριοστροβιλικές εγκαταστάσεις και στην συνέχεια παρουσιάζονται βασικά στοιχεία συνιστωσών και επιδόσεων ορισμένων αεριοστροβίλων.

Στο τρίτο κεφάλαιο, αρχικά παρουσιάζονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την δημιουργία του προγράμματος στο περιβάλλον του PROOSIS και στην συνέχεια αναλύονται εκτενώς οι δυνατότητες και οι λειτουργίες του. Στην συνέχεια προτείνεται μία λογική ακολουθία βημάτων, για το πώς ένας χρήστης με σχετικό υπόβαθρο μπορεί

να χρησιμοποιήσει το πρόγραμμα και τις λειτουργίες του για την μοντελοποίηση αεριοστροβίλων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μοντελοποιήσεων που πραγματοποιήθηκαν. Με βάση το πρόγραμμα που δημιουργήθηκε και τη μέθοδο που προτείνεται για την χρήση του, γίνεται προσομοίωση δύο αεριοστροβίλων, του General Electric 9E της ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΝ ΕΛΛΑΣ στον Άγιο Νικόλαο και του General Electric 9FB της PROTERGIA στο εργοστάσιο Korinthos Power. Αρχικά παρουσιάζονται τα διαθέσιμα δεδομένα λειτουργίας και στην συνέχεια τα αποτελέσματα κάθε βήματος της μοντελοποίησης έως το τελικό αποτέλεσμα.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρατίθενται η ανακεφαλαίωση, τα συμπεράσματα που προέκυψαν καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας και προτάσεις για τη βελτίωση της διαδικασίας.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η βιβλιογραφία από την οποία αντλήθηκαν πληροφορίες για την σύνταξη της διπλωματικής.

Τέλος στο παράρτημα συγκεντρώνονται πληροφορίες για τους χάρτες λειτουργίας, για τις βασικές βοηθητικές συναρτήσεις και τις εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν.

2

Βιομηχανικοί Αεριοστρόβιλοι στην Ελλάδα

Το κεφάλαιο αυτό αποτελεί μία μελέτη για τις αεριοστροβιλικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που είναι εγκατεστημένες στην Ελλάδα. Αρχικά παρατίθενται επιγραμματικά οι αεριοστρόβιλοι που βρίσκονται σε λειτουργία, ως αποτέλεσμα της κοινής μελέτης που πραγματοποιήθηκε με τον συνάδελφο Ρομπόκο Παύλο. Στην συνέχεια παρουσιάζονται με μία σύντομη περιγραφή οι επιχειρήσεις και τα εργοστάσια που έχουν εγκαταστήσει τις μηχανές αυτές. Τέλος περιγράφονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά και οι επιδόσεις ορισμένων μηχανών.

2.1 Αεριοστρόβιλοι στην Ελλάδα

Η αναζήτηση των αεριοστροβίλων και των χαρακτηριστικών τους, βασίστηκε κατά κύριο λόγο σε αρχεία του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών, στην επικοινωνία που επετεύχθη με μηχανικούς από τις αντίστοιχες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας, αλλά και σε φυλλάδια κατασκευαστών.

Επιχειρήσεις που διαθέτουν βιομηχανικούς αεριοστρόβιλους είναι κυρίως δημόσιες και ιδιωτικές εταιρίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες παράγουν ρεύμα προς πώληση, αλλά και βιομηχανίες με υψηλή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, που παράγουν ρεύμα για ιδιοκατανάλωση. Έτσι αναζητήθηκαν πληροφορίες από τον Ανεξάρτητο Διαχειριστή Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ), καθώς οι περισσότερες εταιρίες που εντάσσονται στα παραπάνω κριτήρια είναι καταχωρημένες εκεί [1] [2].

Στη συνέχεια αναζητήθηκαν εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στα μη διασυνδεδεμένα νησιά. Κυρίως αναζητήθηκαν εκείνα με μεγάλη ζήτηση σε ενέργεια, καθότι μικρότερα χρησιμοποιούν άλλες μεθόδους ηλεκτροπαραγωγής, όπως οι εμβολοφόροι κινητήρες, ανεμογεννήτριες και ηλιακοί συλλέκτες, αφού έτσι εξασφαλίζουν για μικρότερη ισχύ μεγαλύτερη ευελιξία στις μεταβολές του φορτίου. Ειδικότερα υπάρχουν εργοστάσια της ΔΕΗ στη Σορώνη της Ρόδου και στην Κρήτη στις περιοχές: Χανιά, Λινοπεράματα Ηρακλείου και Αθρινόλακκο Σητείας. Από τα τέσσερα τελευταία, όλα χρησιμοποιούν αεριοστρόβιλους πλην του εργοστασίου στον Αθρινόλακκο, όπου χρησιμοποιούνται δίχρονοι εμβολοφόροι κινητήρες και ατμοστρόβιλοι.

Τέλος με τις πληροφορίες που συλλέχθηκαν, συμπληρώθηκε ο Πίνακας 2-1 με τις επιχειρήσεις, τα εργοστάσια και τους εγκατεστημένους αεριοστρόβιλους που εντοπίζονται στην Ελλάδα. Στον πίνακα αυτό δίνεται επίσης περιγραφή που αναφέρεται στον τύπο του κυκλώματος, δηλαδή διευκρινίζεται εάν αυτό είναι ανοικτού τύπου ή συνδυασμένου κύκλου. Με βάση τον πίνακα αυτόν δημιουργήθηκε χάρτης που απεικονίζει τις αεριοστροβιλικές μονάδες στην Ελλάδα και παρουσιάζεται στο τέλος του παραρτήματος στο Σχήμα 7-3.

A/A	Εταιρεία	Εργοστάσιο	Τοποθεσία	Ον. Ισχύς (MW)	Μοντέλο	Περιγραφή
-	ΠΑΡΑΓΩΓΟΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ					
1	ΔΕΗ	ΔΕΗ	ΡΟΔΟΣ	234	Thomassen	Ανοικτού Τύπου
2	ΔΕΗ	ΔΕΗ	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	118,5	GE LM 2500	ABB GT10
3	ΔΕΗ	ΔΕΗ	ΑΛΙΒΕΡΙ	417,000	GE LM 6000	ASEA Stal GT35
4	ΔΕΗ	ΔΕΗ	ΛΑΥΡΙΟ ΚΕΡΑΤΕΑ	927,860	Alstom Model 26	Ανοικτού Τύπου
5	ΔΕΗ	ΔΕΗ	ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗ Β	811,000	Alstom (110)	Alstom (110)
6	ΔΕΗ	ΔΕΗ	ΚΟΜΟΤΗΝΗ	476,300	GE 9FB	GE 9FB
7	ΔΕΗ	ΔΕΗ	ΧΑΝΙΑ	349,17	2x ANSALDO V64	BBC 11L / Thomassen PG 5341 / Fiat TG 20
8	ELPEDIISON	ELPEDIISON ΘΙΣΒΗ	ΘΙΣΒΗ	410,000	2x ABB GT13E2 (156,6 MW)	CC
9	ELPEDIISON	ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ	ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ	400,182	ANSALDO V94.3 (SIEMENS SGT5-4000F)	CC
10	PROTERGIA	ΑΓΙΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ POWER	ΑΓΙΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ	444,5	GE 9FA	CC 2 shaft
11	PROTERGIA	ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΝ ΕΛΛΑΣ	ΑΓΙΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ	334	GE 9FB	CC
12	PROTERGIA	ΚΟΡΙΝΘΟΣ POWER	ΚΟΡΙΝΘΟΣ	436,600	GE 9E	GE 9E
13	HPQN	HPQN ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ	ΘΗΒΑ	147,508	LM 6000 (50)	CC
14	HPQN	HPQN II	ΘΗΒΑ	422,1	LM 6000 (50)	Ανοικτού Τύπου
-	ΑΥΤΟΠΑΡΑΓΩΓΟΙ					
15	ΕΛΠΕ	ΔΙΥΛΙΣΤΗΡΙΑ ΑΣΠΡΟΠΥΡΓΟΥ	ΑΣΠΡΟΠΥΡΓΟΣ	58	2x ABB GT 10A	CC
16	MOTOROIL	ΔΙΥΛΙΣΤΗΡΙΑ ΚΟΡΙΝΘΟΥ	ΑΠΟΙ ΘΕΟΔΩΡΟΙ	79	3x ASEA Stal GT35	SIEMENS SGT 500
17	ΚΑΒΑΛΑ ΟΙΛ	ΣΙΓΜΑ	ΚΑΒΑΛΑ	-	2x Sulzer Type3 S3 + ST	Ανοικτού Τύπου

Πίνακας 2-1 Λίστα εταιριών, εργοστασίων και αεριοστροβίλων στην Ελλάδα

Παρατηρείται ότι για τις ανάγκες ηλεκτροπαραγωγής μεγάλης ισχύος (100 MW και πάνω), χρησιμοποιούνται κατά κόρον διατάξεις απλής ατράκτου με τους αεριοστροβίλους της κλάσης F της General Electric να πρωταγωνιστούν, ενώ για μικρότερες ισχύεις συναντώνται και πιο σύνθετες διατάξεις αεριοστροβίλων, όπως διδύμων ατράκτων και διπλού τυμπάνου. Από αυτούς οι General Electric LM2500, General Electric LM6000 και ABB GT10 είναι αυτοί που βρίσκουν ευρεία εφαρμογή σε μικρότερα εργοστάσια των μη διασυνδεδεμένων νησιών.

2.2 Περιγραφή αεριοστροβιλικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής

Στον χώρο της ενεργειακής παραγωγής, η ΔΕΗ διαθέτει συνολικά 7 θερμικούς σταθμούς που βασίζουν την ηλεκτροπαραγωγή τους σε αεριοστροβίλους [3].

Σημαντική είναι και η συνεισφορά των ιδιωτικών εταιριών παραγωγής ενέργειας με την παρουσία τους να αυξάνεται στην Ελλάδα κατά την τελευταία δεκαετία. Τέτοιοι όμιλοι εταιριών είναι η PROTERGIA, η ELPEDISON και ο ΗΡΩΝ.

Η PROTERGIA αποτελεί τον εκπρόσωπο του ομίλου ΜΥΤΙΛΗΝΑΙΟΣ στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Διαθέτει ένα ενεργειακό χαρτοφυλάκιο δυναμικότητας άνω των 1.200 MW, που ξεπερνά το 14% του ενεργού και αδειοδοτημένου εγκατεστημένου θερμικού παραγωγικού δυναμικού της χώρας, ενώ συνολικά έχει εγκατεστημένες τρεις αεριοστροβιλικές μονάδες. [4]

Ο Όμιλος ΗΡΩΝ, εδραιωμένος από το 2000, θυγατρικός των τριών ενεργειακών εταιριών ΓΕΚ ΤΕΡΝΑ, ENGIE και QPI, δραστηριοποιείται στην παραγωγή και την προμήθεια ηλεκτρικής ενέργειας με δύο σταθμούς παραγωγής, που λειτουργούν με φυσικό αέριο και βρίσκονται έξω από τη Θήβα. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς τους είναι σχεδόν 600MW. [5]

2.2.1 ΔΕΗ Ρόδος

Για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της Ρόδου, η ΔΕΗ έχει εγκαταστήσει ένα εργοστάσιο στην περιοχή της Σορώνης, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-1. Στις εγκαταστάσεις του εργοστασίου περιλαμβάνονται τέσσερις αεριοστροβιλικές μονάδες ανοιχτού κυκλώματος, με τα αντίστοιχα μοντέλα των αεριοστροβίλων:

1. Thomassen PG5341 (General Electric MS5001)
2. General Electric TM2500
3. General Electric LM2500
4. ABB GT10



Σχήμα 2-1 ΑΗΣ Ρόδου στη Σορώνη

2.2.2 ΔΕΗ Λινοπεράματα

Το αντίστοιχο εργοστάσιο στα Λινοπεράματα Κρήτης, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-2, διαθέτει συνολικά πέντε αεριοστρόβιλους με εγκατεστημένη ισχύ περίπου 120 MW. Δύο αεριοστρόβιλοι της κατασκευάστριας εταιρίας John Brown είναι αδιευκρίνιστου τύπου, σχετικά παλαιάς τεχνολογίας και τίθενται σε λειτουργία μόνο σε περιόδους ανάγκης. Οι μηχανές αυτές λειτουργούν ως εφεδρικές αφού διαθέτουν τεχνολογία ‘Black Start’, δηλαδή σε περίπτωση πτώσης της ηλεκτροδότησης στο δίκτυο εκκινούν αμέσως με την δυνατότητα απόδοσης μέγιστου φορτίου μέσα σε λίγα λεπτά. Στις άλλες δύο μονάδες είναι εγκατεστημένοι δύο αεριοστρόβιλοι της General Electric, ο LM2500 και ο LM6000. Ο τελευταίος αεριοστρόβιλος είναι ο GT 35 της Asea-Stal, ο οποίος είναι γνωστός σήμερα ως SGT 500 δικαιωμάτων της Siemens.



Σχήμα 2-2 ΔΕΗ Κρήτης στα Λινοπεράματα

2.2.3 ΔΕΗ Αλιβέρι

Στο Αλιβέρι της Εύβοιας η ΔΕΗ διαθέτει μια μεγάλη μονάδα ηλεκτροπαραγωγής μέσω συνδυασμένου κύκλου. Ο αεριοστρόβιλος που χρησιμοποιείται είναι ο GT26 (Model 26) της Alstom. Στην έξοδο του στροβίλου είναι τοποθετημένος Λέβητας Ανάκτησης Θερμότητας, μέσω του οποίου αξιοποιείται η ενέργεια των θερμών καυσαερίων. Με αυτό τον τρόπο παράγεται ατμός υψηλής πίεσης που στη συνέχεια εκτονώνεται σε αμοστρόβιλο και αποδίδει ισχύ στον άξονα που κινεί την γεννήτρια. Συνολικά η μονάδα αυτή του συνδυασμένου κύκλου αποδίδει 431,5 MW ισχύος. Η μονάδα της ΔΕΗ στο Αλιβέρι παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-3.



Σχήμα 2-3 ΔΕΗ Εύβοιας στο Αλιβέρι

2.2.4 ΔΕΗ Λαύριο Κερατέα

Στο Λαύριο η ΔΕΗ διαθέτει συνολικά πέντε μονάδες, καθιστώντας το εργοστάσιο του Λαυρίου το μεγαλύτερο σε εγκατεστημένη αεριοστροβιλική ισχύ με ονομαστικό φορτίο τα 927,86 MW. Οι πρώτες τρεις μονάδες είναι αμοηλεκτρικοί σταθμοί, αντίστοιχοι με τις λιγνιτικές μονάδες της Μεγαλόπολης και της Πτολεμαΐδας και έχουν τεθεί εκτός λειτουργίας. Η μονάδα IV αποτελείται από 3 ίδιες μηχανές GE 9E. Η παροχή καυσαερίων και των τριών μηχανών διοχετεύεται σε ξεχωριστούς ΛΑΘ και χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού υψηλής πίεσης. Σημειώνεται επίσης ότι οι τρεις μηχανές και ο αμοστρόβιλος παράγουν ισχύ σε ξεχωριστές γεννήτριες. Η μονάδα V συνδυασμένου κύκλου, είναι η πιο σύγχρονη του Λαυρίου και αποτελείται από τον αεριοστρόβιλο GE 9FA. Ο αμοστρόβιλος της εγκατάστασης στρέφεται σε κοινό άξονα με τον αεριοστρόβιλο αποδίδοντας ισχύ στην ίδια γεννήτρια. Στο Σχήμα 2-4 παρουσιάζεται εικόνα των εγκαταστάσεων της ΔΕΗ στο Λαύριο.



Σχήμα 2-4 ΔΕΗ Λαυρίου στην Κερατέα

2.2.5 ΔΕΗ Μεγαλόπολη Β

Το εργοστάσιο της ΔΕΗ στη Μεγαλόπολη της Αρκαδίας, αποτελείται από δύο τομείς. Στον τομέα Α είναι εγκατεστημένες οι λιγνιτικές μονάδες, ενώ στον τομέα Β έχουν εγκατασταθεί αεριοστροβιλικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα συναντάμε δύο αεριοστρόβιλους 9FB της General Electric, οι οποίοι λειτουργούν σε συνδυασμένο κύκλο μέσω σύζευξης με ατμοστρόβιλους. Στο Σχήμα 2-5 παρουσιάζεται εικόνα από τις εγκαταστάσεις της ΔΕΗ στο εργοστάσιο Β στην Μεγαλόπολη. [6]



Σχήμα 2-5 ΔΕΗ Μεγαλόπολης Β

2.2.6 ΔΕΗ Κομοτηνή

Στο εργοστάσιο της Κομοτηνής, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-6, η ΔΕΗ έχει εγκαταστήσει δύο αεριοστρόβιλους GT13E2 της Alstom. Η συγκεκριμένη μηχανή κυκλοφορεί σήμερα διατηρώντας την ίδια ονομασία ως μοντέλο της General Electric. Οι αεριοστρόβιλοι λειτουργούν συνήθως σε συνδυασμένο κύκλο, ωστόσο ενδιαφέρον παρουσιάζει η δυνατότητα λειτουργίας τους και σε ανοιχτό κύκλο, όταν αυτό απαιτείται ή κρίνεται πιο ωφέλιμο. Έτσι τα καυσαέρια των δύο μηχανών οδηγούνται είτε προς εκμετάλλευση σε ξεχωριστούς ΛΑΘ (CC), είτε στο περιβάλλον με την βαλβίδα παράκαμψης bypass (SC). Στην περίπτωση του συνδυασμένου κύκλου, ο ατμός παράγεται σε τρία επίπεδα πιέσεων 100, 25, 5 bar χωρίς χρήση αναθέρμανσης και οδηγείται σε κοινό ατμοστρόβιλο για εκτόνωση. [7].



Σχήμα 2-6 ΔΕΗ Κομοτηνής

2.2.7 ΔΕΗ Χανιά

Το εργοστάσιο της ΔΕΗ στα Χανιά διαθέτει οκτώ συνολικά αεριοστρόβιλους. Συγκεκριμένα στην εγκατάσταση περιλαμβάνονται:

- Ένας BBC 11L (1969)
- Ένας Thomassen PG5341 (1985)
- Ένας Fiat TG20 (1987)
- Δύο ABB GT8 (1992)
- Δύο Ansaldo V64.3 (1998)
- Ένας GE LM2500+ (2003)

Στις παρενθέσεις αναφέρεται η χρονιά εκκίνησης της λειτουργίας κάθε αεριοστρόβιλου.

Πρέπει να σημειωθεί ότι από τους οκτώ παραπάνω αεριοστρόβιλους μόνο οι πέντε είναι σε κατάσταση λειτουργίας. Ο BBC 11L πλέον δεν λειτουργεί, ο PG 5341 είναι σε εφεδρεία από την 5/1/2005, ενώ ο TG20 χρησιμοποιείται σπάνια. Στο παρακάτω Σχήμα 2-7, παρουσιάζονται οι εγκαταστάσεις της ΔΕΗ στη πόλη των Χανίων.



Σχήμα 2-7 ΔΕΗ Κρήτης στα Χανιά

2.2.8 ELPEDISON Θίσβη

Η ELPEDISON POWER αποτελεί θυγατρική των εταιρειών: Ελληνικά Πετρέλαια, Edison και Ελλάκτωρ. Στο εργοστάσιο στη Θίσβη της Βοιωτίας, το οποίο λειτουργεί από το 2010, είναι εγκατεστημένος ένας αεριοστρόβιλος V94.3 της Ansaldo Energia. Πρόκειται για μια μηχανή υψηλών επιδόσεων που στο ονομαστικό φορτίο αποδίδει ισχύ 310 MW. Ο αεριοστρόβιλος λειτουργεί σε συνδυασμένο κύκλο, αφού είναι συνδεδεμένος σε κοινό άξονα με ατμοστρόβιλο, αποδίδοντας μαζί 410 MW ισχύος. Στο Σχήμα 2-8 φαίνονται οι εγκαταστάσεις που έχει δημιουργήσει η ELPEDISON στη Θίσβη Βοιωτίας [8].



Σχήμα 2-8 Εργοστάσιο της ELPEDISON στη Θίβη

2.2.9 ELPEDISON Θεσσαλονίκης

Το ιδιόκτητο εργοστάσιο της ELPEDISON στην Θεσσαλονίκη αποτελεί το πρώτο εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα, που ανήκει σε ιδιωτική εταιρία. Το εργοστάσιο που απεικονίζεται στο Σχήμα 2-9, λειτουργεί από το 2006 και βασίζει την ηλεκτροπαραγωγή του στην τεχνολογία του συνδυασμένου κύκλου, μέσω ενός αεριοστρόβιλου 9FA της General Electric. Σε αντίθεση με την μονάδα V του Λαυρίου, όπου λειτουργεί επίσης ένας αεριοστρόβιλος 9FA, εδώ ο αεριοστρόβιλος και ο ατμοστρόβιλος κινούν διαφορετικούς άξονες και αποδίδουν ισχύ σε ξεχωριστές γεννήτριες [8].



Σχήμα 2-9 Εργοστάσιο ELPEDISON στη Θεσσαλονίκη

2.2.10 PROTERGIA Αλουμίνιον Ελλάς

Το εργοστάσιο Αλουμίνιον Ελλάς στον Άγιο Νικόλαο Βοιωτίας, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-10 και αποτελεί το πρώτο της εταιρίας, αφού λειτουργεί από το 2008. Εκεί πραγματοποιείται συμπαραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, με δύο αεριοστρόβιλους 9E της General Electric που χρησιμοποιούν ως καύσιμο το φυσικό αέριο. Η εγκατάσταση αποδίδει συνολικά ονομαστική ισχύ σε ISO συνθήκες 334 MW. Πρόκειται για ένα εργοστάσιο με υψηλό βαθμό απόδοσης, αφού τα καυσαέρια των αεριοστρόβιλων οδηγούνται σε ΛΑΘ προς παραγωγή ατμού για περαιτέρω χρήση και κάλυψη θερμικών αναγκών στο εργοστάσιο [4].



Σχήμα 2-10 Εργοστάσιο της ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΝ ΕΛΛΑΣ στον Άγιο Νικόλαο

2.2.11 PROTERGIA Άγιος Νικόλαος

Στην ίδια περιοχή όπου βρίσκεται το εργοστάσιο παραγωγής αλουμινίου, η PROTERGIA έχει δημιουργήσει ένα σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω μιας μονάδας συνδυασμένου κύκλου. Το εργοστάσιο αυτό, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-11, πήρε το όνομα ‘‘Άγιος Νικόλαος Power’’ όταν τέθηκε σε λειτουργία τον Ιούνιο του 2011. Εκεί είναι εγκατεστημένος ένας αεριοστρόβιλος 9FB της General Electric, ο οποίος λειτουργεί με φυσικό αέριο. Ο αγωγός εξόδου του αεριοστρόβιλου είναι συνδεδεμένος με ΛΑΘ τριών επιπέδων πίεσης με δυνατότητα αναθέρμανσης. Έτσι η ενέργεια των θερμών καυσαερίων συνεισφέρει στην παραγωγή ατμού, ο οποίος με τη σειρά του εκτονώνεται σε ατμοστρόβιλο. Έτσι οι δύο μηχανές αποδίδουν συνολικά 444,48 MW (ISO συνθήκες) σε κοινή γεννήτρια, αφού βρίσκονται πάνω στον ίδιο

άξονα. Για τη συμπύκνωση του ατμού χρησιμοποιούνται αερόψυκτοι ψύκτες που παρέχει η General Electric [4].



Σχήμα 2-11 Εργοστάσιο της PROTERGIA στον Άγιο Νικόλαο

2.2.12 PROTERGIA Κόρινθος

Η τρίτη μονάδα της εταιρίας βρίσκεται στην Κορινθία, στην βιομηχανική περιοχή των Αγίων Θεοδώρων, πλησίον του διυλιστηρίου της MOTOR OIL. Η μονάδα Κόρινθος Power τέθηκε σε λειτουργία από τον Απρίλιο του 2012 και έτσι αποτελεί μια από τις πιο σύγχρονες στη χώρα. Είναι πανομοιότυπη με αυτήν του εργοστασίου Άγιος Νικόλαος Power και έχει ονομαστική ισχύ σε ISO συνθήκες 436,6 MW. Η ισχύς αυτή αποδίδεται μέσω κυκλώματος συνδυασμένου κύκλου, όπου ως αεριοστρόβιλος χρησιμοποιείται και εδώ ένας 9FB της General Electric. Ως καύσιμο η μονάδα λειτουργεί κυρίως με φυσικό αέριο. Στο Σχήμα 2-12 φαίνεται το σύγχρονο εργοστάσιο Korinthos Power. [4]



Σχήμα 2-12 Εργοστάσιο της PROTERGIA στην Κόρινθο

2.2.13 ΗΡΩΝ Θερμοηλεκτρική Θήβα

Το εργοστάσιο ΗΡΩΝ I τέθηκε σε λειτουργία το έτος 2004, για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων της περιοχής. Διαθέτει τρεις ίδιους αεριοστρόβιλους της General Electric τύπου LM6000 PC-Sprint, με κύριο καύσιμο φυσικό αέριο και εφεδρικό ελαφρύ πετρέλαιο Diesel. Η διάταξη της μονάδας είναι τύπου ανοικτού κύκλου, δηλαδή δεν αξιοποιείται η ενέργεια των θερμών καυσαερίων και η ονομαστική ισχύς του εργοστασίου σε ISO συνθήκες είναι 150 MW (3x50). Παρακάτω στο Σχήμα 2-13 παρουσιάζονται οι εγκαταστάσεις του εργοστασίου ΗΡΩΝ I [5].



Σχήμα 2-13 Εργοστάσιο ΗΡΩΝ I - Θερμοηλεκτρική

2.2.14 ΗΡΩΝ II Θήβα

Το εργοστάσιο ΗΡΩΝ II βρίσκεται ακριβώς δίπλα στο εργοστάσιο ΗΡΩΝ I και αποτελεί θερμοηλεκτρικό σταθμό συνδυασμένου κύκλου. Διαθέτει έναν αεριοστρόβιλο της General Electric τύπου PG9371FB. Είναι ο αεριοστρόβιλος που πλέον κυκλοφορεί ως GE 9FB. Η διάταξη του εργοστασίου είναι όπως ακριβώς στα εργοστάσια της Κόρινθος Power και Άγιος Νικόλαος Power, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-14. Η ονομαστική ισχύς του σταθμού σε ISO συνθήκες είναι 433 MW [5].



Σχήμα 2-14 Εργοστάσιο ΗΡΩΝ II Θήβα

2.2.15 ΜΟΤΟΡ ΟΪΛ ΕΛΛΑΣ Δωλιστήρια Κορίνθου

Τα δωλιστήρια της ΜΟΤΟΡ ΟΪΛ βρίσκονται στην βιομηχανική ζώνη των Αγίων Θεοδώρων της Κορινθίας. Λειτουργούν από το 1970 και επεκτείνονται διαρκώς σε μονάδες δύλισης πετρελαίου, με αποτέλεσμα να αυξάνονται διαρκώς οι ενεργειακές τους απαιτήσεις. Πρόκειται για μια εγκατάσταση η οποία είναι διαρκώς σε λειτουργία και άρα χρειάζεται σταθερά και υψηλά ποσά ενέργειας. Όπως εξηγήσαμε και παραπάνω, σε αυτές τις περιπτώσεις οι ιδιωτικές εταιρίες προτιμούν την κατασκευή μονάδων παραγωγής ενέργειας για ιδιοκατανάλωση (αυτοπαταγωγοί). Έτσι στη ΜΟΤΟΡ ΟΪΛ το 1985 εγκαταστάθηκαν τρεις αεριοστρόβιλοι τύπου GT 35 της εταιρίας Asea-Stal. Τα δικαιώματα κατασκευής και διαχείρισης των μηχανών αυτών αργότερα αγόρασε η Siemens, με την νέα ονομασία του μοντέλου να είναι SGT 500. Το 2001 το τμήμα παραγωγής ενέργειας επεκτάθηκε με την αγορά νέου αεριοστροβίλου SGT 500. Πλέον το δωλιστήριο διαθέτει τέσσερις GT 35 και ένα SGT 500 με συνολική εγκατεστημένη ισχύ στα 75 MW. Όλοι οι αεριοστρόβιλοι είναι ανοικτού κύκλου και λειτουργούν με αέρια καύσιμα παράγωγα του δωλιστηρίου. Στο Σχήμα 2-15 δίνεται αεροφωτογραφία των εγκαταστάσεων της ΜΟΤΟΡ ΟΪΛ στους Αγίους Θεοδώρους [9].



Σχήμα 2-15 MOTOP ΟΪΑ διυλιστήρια Κορίνθου

2.2.16 ΕΛΠΕ Διυλιστήρια Ασπροπύργου

Τα διυλιστήρια του Ασπροπύργου λειτουργούν από το 1958 και για τους λόγους που αναπτύχθηκαν στην παραπάνω παράγραφο, το 1989 εγκαταστάθηκαν δύο αεριοστρόβιλοι τύπου GT 10A της εταιρίας Sulzer Weis. Και οι δύο αεριοστρόβιλοι λειτουργούν σε συνδυασμένο κύκλο και καίνε υγρά καύσιμα, παράγωγα της διύλισης του πετρελαίου που επεξεργάζεται το διυλιστήριο. Την ενέργεια των καυσαερίων εκμεταλλεύεται μέσω ΛΑΘ μονάδα ατμοστρόβιλου με ονομαστική ισχύ 20 MW. Αξίζει να σημειωθεί ότι το συγκεκριμένο εργοστάσιο παρουσιάζει ένα ιδιαίτερα υψηλό βαθμό απόδοσης. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι γίνεται αξιοποίηση της θερμότητας που παράγεται στις διάφορες συνιστώσες του. Χαρακτηριστική περίπτωση αποτελεί το κύκλωμα χαμηλής πίεσης ατμού, όπου καταλήγει ο ατμός έπειτα από την εκτόνωση του στον ατμοστρόβιλο. Το κύκλωμα αυτό κινεί ατμό υψηλής σχετικά θερμοκρασίας ο οποίος χρησιμοποιείται για τη συναλλαγή θερμότητας και την προθέρμανση άλλων ροών του εργοστασίου. Σε ότι αφορά την ισχύ των αεριοστρόβιλων, το ονομαστικό φορτίο του καθενός είναι 19 MW, ωστόσο λειτουργούν σε χαμηλότερη ισχύ της τάξης των 15-16 MW. Οι εγκαταστάσεις των διυλιστηρίων του Ασπροπύργου παρουσιάζονται παρακάτω στο Σχήμα 2-16.



Σχήμα 2-16 ΕΛΠΕ Διυλιστήρια Ασπροπύργου

2.2.17 ΚΑΒΑΛΑ ΟΙΛ

Η ΚΑΒΑΛΑ ΟΙΛ Α.Ε. είναι η μοναδική εταιρία εξόρυξης υδρογονανθράκων στην Ελλάδα. Από το 1969 γίνονται έρευνες και γεωτρήσεις για την ανεύρεση κοιτασμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου στην παράκτια περιοχή της Καβάλας, οι οποίες διαρκούν έως το 1979, όταν η εταιρία κατασκεύασε τόσο πλωτές εξέδρες όσο και χερσαία εργοστάσια. Το 1981 εγκαινιάστηκε το εργοστάσιο ΣΙΓΜΑ, και για την κάλυψη των αναγκών του σε ενέργεια εγκαταστάθηκαν δύο αεριοστρόβιλοι Type 3/S3 κατασκευής της Sulzer Weis. Καθένας από τους αεριοστρόβιλους έχει ονομαστική ισχύ 7 MW και λειτουργεί σε διάταξη συνδυασμένου κύκλου. Πλέον λειτουργεί μόνο ο ένας αεριοστρόβιλος. Το εργοστάσιο ΣΙΓΜΑ παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-17 [10].



Σχήμα 2-17 ΚΑΒΑΛΑ ΟΪΛ Εργοστάσιο ΣΙΓΜΑ

2.3 Περιγραφή επιλεγμένων αεριοστρόβιλων

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται ορισμένοι από τους αεριοστρόβιλους του Πίνακα 2-3 και δίνονται συνοπτικά τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά και οι επιδόσεις τους σε ISO συνθήκες. Οι αεριοστρόβιλοι που περιγράφονται είναι οι εξής:

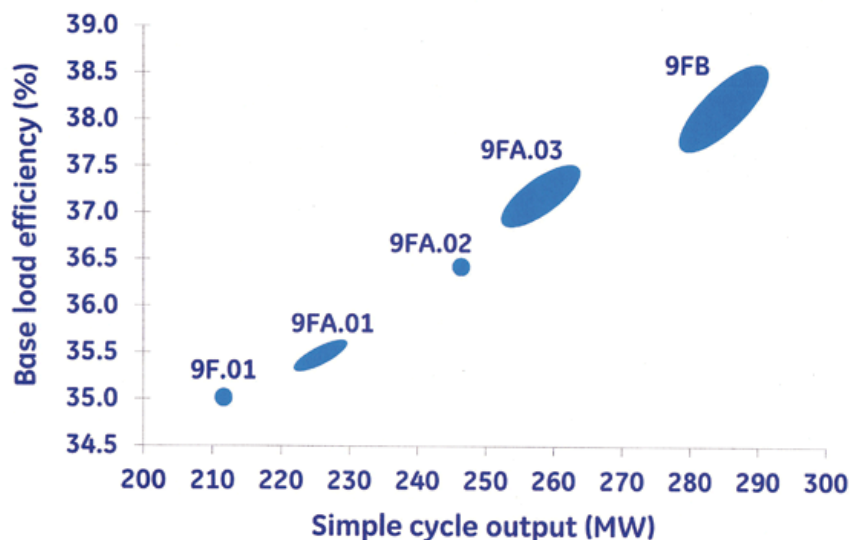
- General Electric 9FB
- General Electric 9E
- General Electric LM2500
- General Electric LM6000
- Alstom GT26
- Ansaldo V64.3
- Thomassen PG5341

Βασική βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για όλες τις μηχανές: [11] [12] [13] [14] [15] [16]

2.3.1 General Electric 9FB

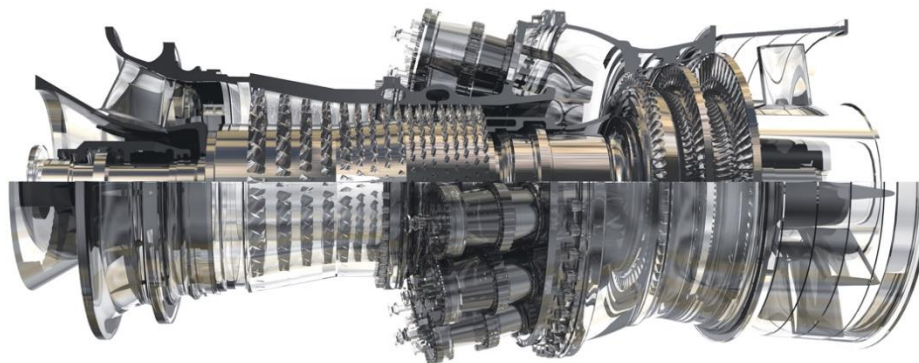
Γενική περιγραφή

Η οικογένεια των αεριοστροβίλων 9F παρουσιάστηκε στην αγορά το 1991, όταν η General Electric παρουσίασε το πρώτο αεριοστρόβιλο της σειράς με ισχύ εξόδου 212 MW και βαθμό απόδοσης περίπου 35%. Έκτοτε η εταιρία έχει προχωρήσει σε συνεχείς βελτιώσεις και αναβαθμίσεις των μηχανών της, με αποτέλεσμα να καθιερωθεί στο χώρο της παραγωγής και συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε συχνότητα 50 Hz. Χαρακτηριστικές τεχνολογίες των μηχανών αυτής της κλάσης αποτελούν οι συμπιεστές υψηλού λόγου πίεσης, το καινοτόμο σύστημα του θαλάμου καύσης για μείωση των εκπομπών (DLN) και τα συστήματα ψύξης των πτερυγίων του στροβίλου. Με αυτό το τρόπο την τελευταία εικοσαετία παρουσιάστηκαν αεριοστρόβιλοι κατηγορίας 9F με υψηλότερο βαθμό απόδοσης και μεγαλύτερη ισχύ εξόδου, όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 2-18:



Σχήμα 2-18 Εξέλιξη των μοντέλων της κλάσης F της General Electric

Ο αεριοστρόβιλος 9FB κυκλοφόρησε το 2006 ως μηχανή απλού άξονα, βαρέως φορτίου, με ιδιαίτερα υψηλό βαθμό απόδοσης, ειδικά όταν τοποθετηθεί σε συνδυασμένο κύκλο. Η αεροδυναμική του σχεδίαση βασίστηκε στο μοντέλο του 9FA, κατασκευάστηκε όμως έτσι ώστε να έχει μεγαλύτερο λόγο πίεσης και με υλικά που επιτρέπουν υψηλότερες θερμοκρασίες στον κύκλο λειτουργίας του. Το καύσιμο με το οποίο λειτουργεί είναι φυσικό αέριο, η κατώτερη θερμογόνος ικανότητα του οποίου εξαρτάται τόσο από την περιοχή στην οποία είναι εγκατεστημένος όσο και από τη χρονική στιγμή κατά την οποία μετρείται. Στο Σχήμα 2-19 General Electric 9FB δίνεται μία τομή του αεριοστροβίλου, όπου αποτυπώνονται οι βασικές συνιστώσες του:



Σχήμα 2-19 General Electric 9FB

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά λειτουργίας του σε ISO συνθήκες, παρουσιάζονται παρακάτω στον Πίνακα 2-2:

Μοντέλο	GE 9FB
Ισχύς (MW)	287,4
Θερμικός βαθμός απόδοσης (%)	37,97
Λόγος πίεσης συμπίεστή	16,9
Παροχή καυσαερίων (kg/sec)	658,83
Στροφές λειτουργίας (rpm)	3000
Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων (°C)	638,9

Πίνακας 2-2 Επιδόσεις του GE 9FB σε ISO συνθήκες

Διαφορετικές εκδόσεις των αεριοστροβίλων του μοντέλου 9FB έχουν παρουσιαστεί με τις παρακάτω ονομασίες:

9F 5-Series, 9FB, 9FB.01, 9FB.02, 9FB.03, 9371(FB), PG9371FB, MS9001(FB)

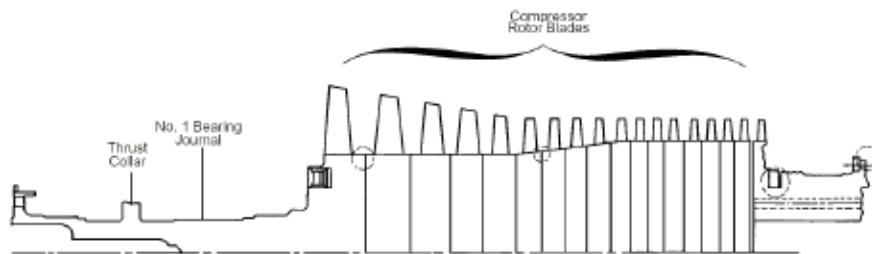
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται ορισμένα από τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά που αφορούν τις κύριες συνιστώσες του αεριοστροβίλου.

Αγωγός εισόδου:

Ο αγωγός εισόδου του αεριοστροβίλου, αποτελεί τη συνιστώσα στην οποία εντοπίζονται τα φίλτρα του αέρα. Πρόκειται για έναν αγωγό μεγάλων διαστάσεων, όπου ο αέρας φιλτράρεται και η ροή ομαλοποιείται προκειμένου να εισέλθει στον συμπίεστή υπό τις κατάλληλες συνθήκες. Στο σημείο σχεδίασης, οι απώλειες πίεσης που εντοπίζονται στον αγωγό εισόδου είναι της τάξης των 76,2 mmH₂O [17].

Συμπιεστής:

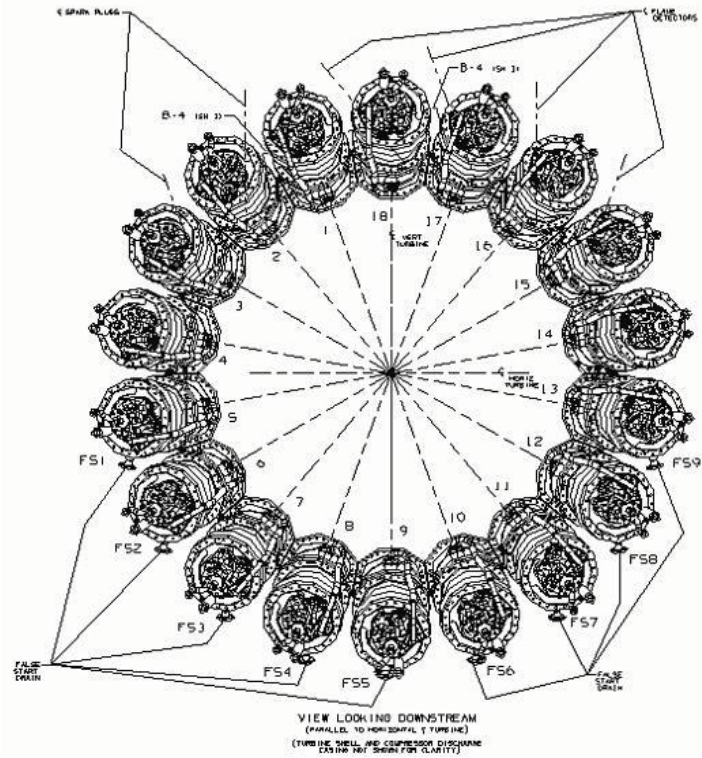
Ο 9FB διαθέτει ένα αξονικό συμπιεστή 17 βαθμίδων. Ο συμπιεστής αυτός αποτελείται από τον άξονα και το κέλυφος αντίστοιχα, μέσα στο οποίο εντοπίζονται τα μεταβλητά πτερύγια (IGVs), οι βαθμίδες και τα πτερύγια καθοδήγησης της ροής κατά την έξοδο. Τα πτερύγια τοποθετούνται σε δίσκους, οι οποίοι στη συνέχεια συναρμολογούνται σε ένα συμπαγές τμήμα, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2-20. Σημειώνεται ότι η τοποθέτηση των πτερυγίων γίνεται επιλεκτικά, με τρόπο τέτοιο ώστε να επιτυγχάνεται η καλύτερη αεροδυναμική ισορροπία του άξονα του συμπιεστή. Η θέση των μεταβλητών πτερυγίων καθορίζεται με ένα δακτύλιο ελέγχου μέσω υδραυλικού συστήματος οδήγησης. Καθ' όλη τη λειτουργία του αεριοστροβίλου, από το συμπιεστή απομαστεύεται ποσότητα αέρα για την ψύξη των πτερυγίων του στροβίλου αλλά και για προστασία από συνθήκες πάλμωσης κατά την έναρξη.



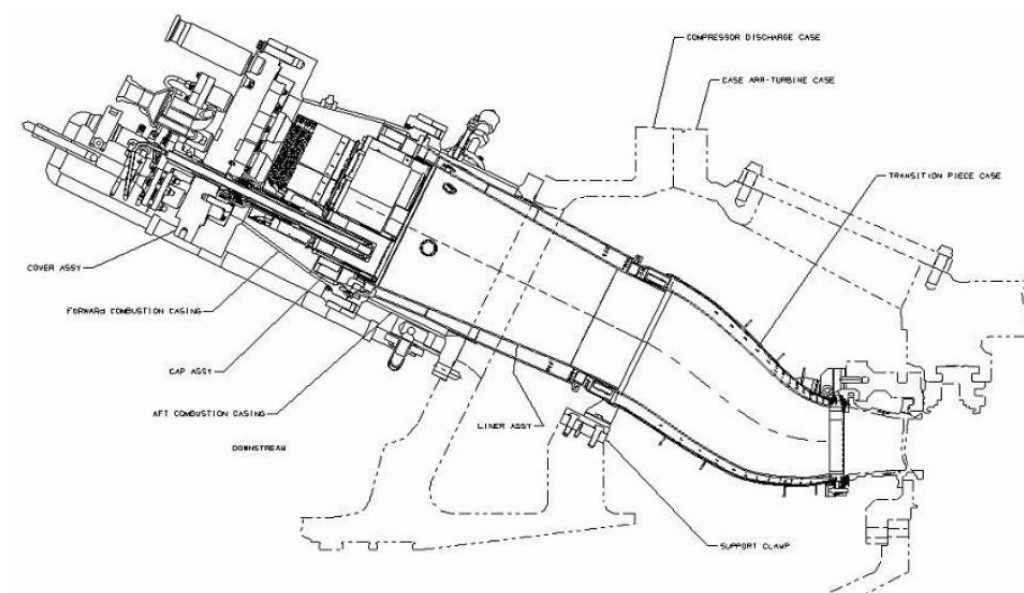
Σχήμα 2-20 Άξονας του συμπιεστή - 9FB

Θάλαμος καύσης:

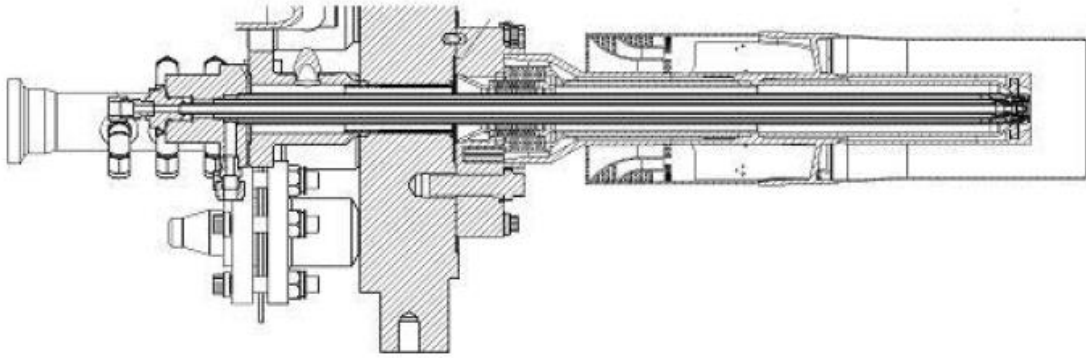
Ο θάλαμος καύσης είναι τύπου αντιρροής, με 18 καυστήρες τοποθετημένους περιφερειακά ακριβώς μετά τον αγωγό εξόδου του συμπιεστή. Η διάταξη των καυστήρων παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-21. Το καύσιμο διαχέεται σε κάθε καυστήρα μέσω 5 ακροφυσίων, σχεδιασμένων έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η κατάλληλη ανάμειξη με τον αέρα που εισέρχεται στο θάλαμο καύσης. Στο Σχήμα 2-23 δίνεται η τομή ενός τυπικού ακροφυσίου, που χρησιμοποιείται στους αεριοστροβίλους 9FB. Στο σύστημα καύσης DLN.2+ που χρησιμοποιείται (Σχήμα 2-22), επιτρέπει τη μείωση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου (NO_x) και μονοξειδίου του άνθρακα (CO) στο όριο των 30 και 12.5 mg/Nm³ (9,7 και 10.1 ppm) αντίστοιχα.



Σχήμα 2-21 Διάταξη των καυστήρων του θαλάμου καύσης – 9FB



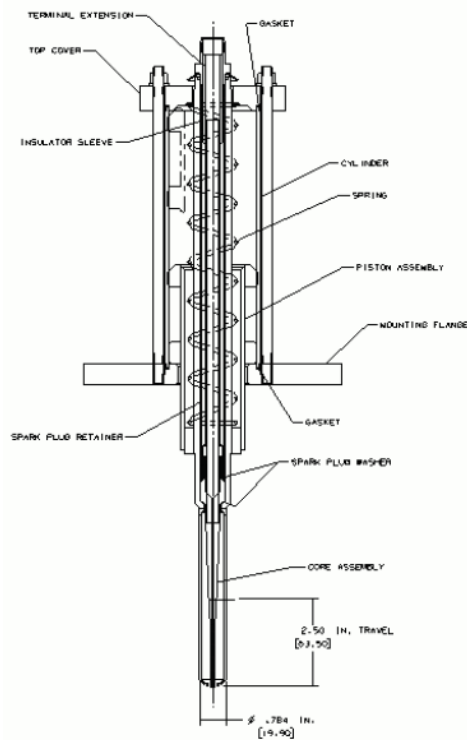
Σχήμα 2-22 Απεικόνιση του συστήματος καύσης DLN.2+ - 9FB



Σχήμα 2-23 Τομή ενός τυπικού ακροφυσίου καυσίμου - 9FB

Στο σύστημα καύσης περιλαμβάνονται επίσης οι σπινθηριστές, καθώς και οι ανιχνευτές φλόγας ή πυρκαγιάς. Οι σπινθηριστές ενεργοποιούνται κατά την έναρξη της λειτουργίας της μηχανής, μέσω συστήματος παροχής υψηλής τάσης και επιτυγχάνεται έτσι η καύση του μείγματος αέρα καυσίμου. Στο Σχήμα 2-24 δίνεται η τομή ενός τυπικού σπινθηριστή.

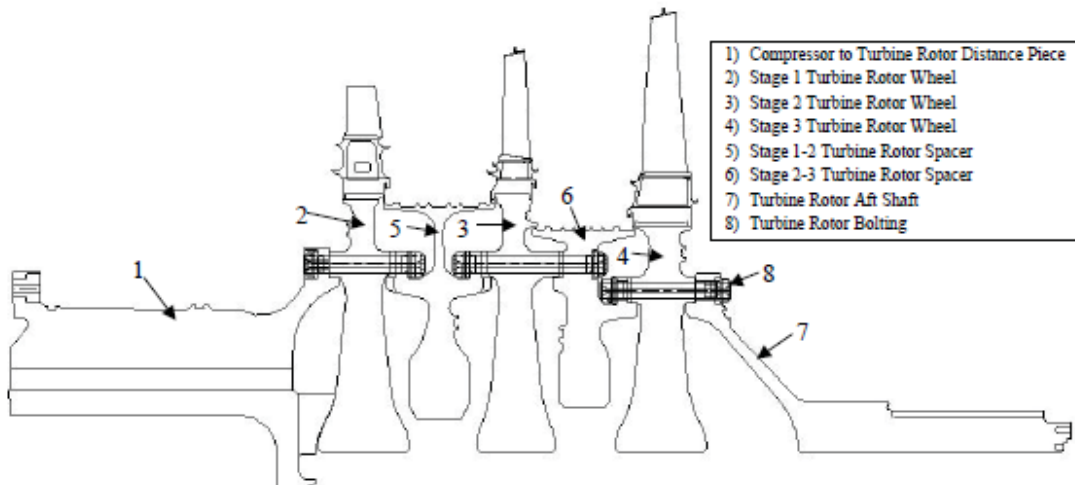
Σημειώνεται ότι το συγκεκριμένο σύστημα καύσης, είναι σχεδιασμένο για χρήση μόνο αέριων καυσίμων, λειτουργεί με πλήρη προανάμειξη σε υψηλά φορτία (>50 %), ενώ σε χαμηλότερα φορτία (<50 %) γίνεται έλεγχος της διάχυσης καυσίμου στο θάλαμο μέσω ηλεκτρονικού συστήματος.



Σχήμα 2-24 Τομή ενός σπινθηριστή του συστήματος DLN.2+ - 9FB

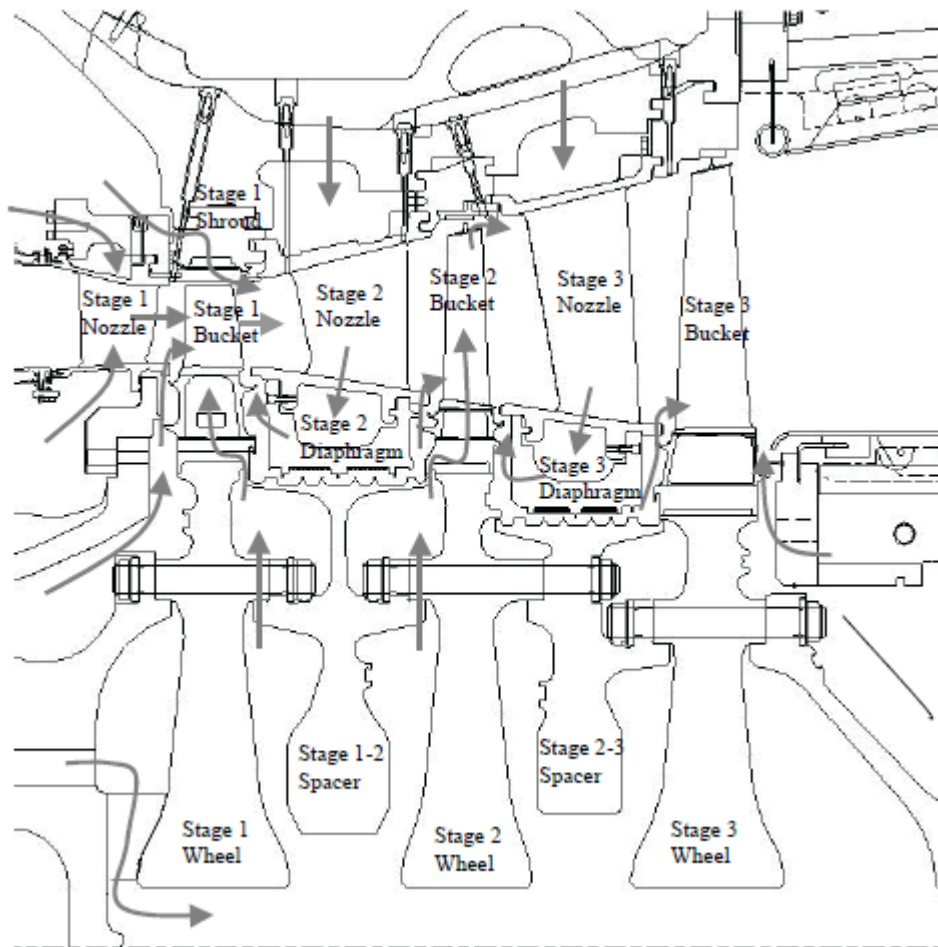
Στρόβιλος:

Η ενέργεια που παρέχει το σύστημα συμπιεστή – θαλάμου καύσης (υψηλή πίεση και θερμοκρασία), μετατρέπεται σε μηχανική μέσω ενός στροβίλου τριών βαθμίδων. Και σε αυτή τη περίπτωση, τα πτερύγια είναι τοποθετημένα σε δίσκους, οι οποίοι ενώνονται δημιουργώντας έτσι τον άξονα περιστροφής του στροβίλου, η τομή του οποίου δίνεται παρακάτω στο Σχήμα 2-25:



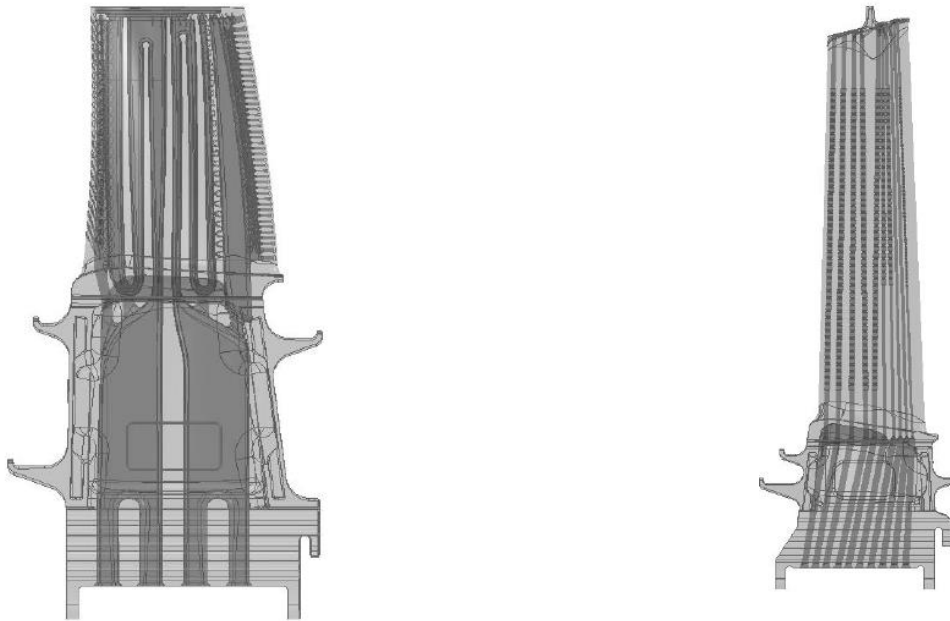
Σχήμα 2-25 Τομή άξονα του στροβίλου - 9FB

Ένα αποδοτικό σύστημα ψύξης των πτερυγίων του στροβίλου, έχει σχεδιαστεί προκειμένου οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται να διατηρούνται στα αποδεκτά επίπεδα αντοχής των υλικών, εξασφαλίζοντας έτσι μακρύτερο χρόνο ζωής. Η ψύξη γίνεται με αέρα υψηλής πίεσης, που απομαστεύεται ακτινικά από τις τελευταίες βαθμίδες του συμπιεστή και εισάγεται μέσω του άξονα του στροβίλου στο εσωτερικό των πτερυγίων του. Η πρώτη βαθμίδα ψύχεται με αέρα που διοχετεύεται κατευθείαν από την κατάθλιψη του συμπιεστή μέσω ενός λαβυρίνθου, ενώ αφού ψύξει τα πτερύγια εισάγεται στο κύριο ρεύμα των καυσαερίων που περνούν από το στρόβιλο. Ταυτόχρονα στη ψύξη του ρότορα της πρώτης βαθμίδας, επιδρά και μέρος της απομάστευσης από την 13^η βαθμίδα του συμπιεστή, το οποίο περνά μέσα από το στάτορα της 2^{ης} βαθμίδας του στροβίλου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-26. Η δεύτερη βαθμίδα ψύχεται με αέρα που απομαστεύεται από την 13^η βαθμίδα του συμπιεστή, ενώ η τρίτη βαθμίδα ψύχεται με μέρος του αέρα ψύξης που περνά από την δεύτερη βαθμίδα αντίστοιχα.



Σχήμα 2-26 Σύστημα ψύξης πτερυγίων στροβίλου - 9FB

Η ψύξη στα πτερύγια της πρώτης βαθμίδας του στροβίλου γίνεται μέσω εσωτερικής κυκλοφορίας, απευθείας πρόσκρουσης και εφίδρωσης. Στο Σχήμα 2-27 απεικονίζονται οι διαμορφώσεις στο εσωτερικό των πτερυγίων της βαθμίδας αυτής, μέσω των οποίων επιτυγχάνονται οι παραπάνω μέθοδοι ψύξης. Σε ότι αφορά την δεύτερη βαθμίδα, η ψύξη εκεί περιορίζεται μόνο στην κυκλοφορία του αέρα στο εσωτερικό των πτερυγίων, η διαμόρφωση των οποίων φαίνεται επίσης στο Σχήμα 2-27. Ο αέρας ψύξης περνά μέσα από τα πτερύγια, μέσω ειδικά διαμορφωμένων καναλιών και διοχετεύεται στο κύριο ρεύμα καυσαερίων, είτε μέσω οπών πάνω στην επιφάνεια των πτερυγίων, είτε από την κορυφή του πτερυγίου.



Σχήμα 2-27 Τομή εσωτερικού πτερυγίου 1^{ης} (αριστερά) και 2^{ης} (δεξιά) βαθμίδας στροβίλου - 9FB

Αγωγός εξόδου:

Ο αγωγός εξόδου είναι αξονικής ροής. Και σε αυτή τη περίπτωση ο αγωγός έχει αρκετά μεγάλες διαστάσεις, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η απαιτούμενη ανάκτηση στατικής πίεσης. Σε περίπτωση που ο αεριοστροβίλος λειτουργεί σε συνδυασμένο κύκλο, ο αγωγός εξόδου είναι μικρότερων διαστάσεων και συνδέεται κατάλληλα με τον Λέβητα Ανάκτησης Θερμότητας που ακολουθεί. Οι απώλειες πίεσης στον αγωγό εξόδου για το σημείο σχεδίασης του αεριοστροβίλου είναι 139,7 mmH₂O [17].

Χαρακτηριστικές διατομές:

Για την εύρεση των χαρακτηριστικών διατομών του αεριοστροβίλου, λαμβάνουμε υπόψιν την παροχή αέρα σε ISO συνθήκες που δίνεται στον Πίνακα 2-2. Με βάση την τιμή αυτή και θεωρώντας μια τυπική τιμή του αριθμού Mach στην είσοδο (Mach=0.5), υπολογίζουμε την πραγματική διατομή στην είσοδο του συμπιεστή. Στη συνέχεια από την τομή στο Σχήμα 2-19, μετράμε σε κάθε θέση την ακτίνα ποδός και κορυφής και υπολογίζουμε μια μετρούμενη θεωρητική τιμή της διατομής. Έτσι ο λόγος της μετρούμενης διατομής προς την υπολογισμένη στη θέση 2 είναι ο συντελεστής κλίμακας, μέσω του οποίου υπολογίζονται και οι υπόλοιπες διατομές, όπως φαίνεται παρακάτω στο Πίνακα 2-3:

Χαρακτηριστική θέση	2	3	4	5
Διατομή A (m ²)	3,27	0,98	2,79	5,86

Πίνακας 2-3 Χαρακτηριστικές διατομές του GE 9FB

Βιβλιογραφία ενότητας: [18] [17] [19] [20] [21] [22]

2.3.2 General Electric 9E

Γενική περιγραφή:

Οι αεριοστρόβιλοι της σειράς 9E της General Electric έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν στις πιο δύσκολες περιβαλλοντικές συνθήκες. Καλύπτουν έτσι ένα μεγάλο μέρος των βιομηχανικών διεργασιών, όπως εγκαταστάσεις άντλησης πετρελαίου και φυσικού αερίου, βιομηχανίες αλουμινίου και ατσαλιού. Ειδικότερα, ο 9E αποτελεί έναν αεριοστρόβιλο απλής ατράκτου, βαρέως τύπου που λειτουργεί τόσο σε απλό, όσο και σε συνδυασμένο κύκλο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Παρουσιάστηκε για πρώτη φορά στην αγορά με την ονομασία GE MS9001E το 1970, ως ο πρώτος αεριοστρόβιλος με ισχύ μεγαλύτερη των 100 MW παγκοσμίως. Σήμερα χαρακτηριστικό του πλεονέκτημα είναι ότι μπορεί να λειτουργήσει με 52 διαφορετικούς τύπους καυσίμων, δηλαδή σε όλο σχεδόν το εύρος των καυσίμων που χρησιμοποιούνται στον τομέα των αεριοστροβιλικών εγκαταστάσεων. Μάλιστα έχει τη δυνατότητα να αλλάζει καύσιμο ακόμη και όταν είναι σε πλήρες φορτίο λειτουργίας. Σε ότι αφορά το σύστημα καύσης, διαθέτει σύστημα DLN μέσω του οποίου οι εκπομπές φτάνουν στα 5 ppm NO_x και 25 ppm CO. Στο Σχήμα 2-28, παρουσιάζεται η τομή του αεριοστροβίλου όπου φαίνονται οι επιμέρους συνιστώσες του.



Σχήμα 2-28 General Electric 9E

Οι επιδόσεις του στο σημείο σχεδίασης, μετρημένες σε ISO συνθήκες παρουσιάζονται παρακάτω στον Πίνακα 2-4:

Μοντέλο	GE 9E
Ισχύς (MW)	126,1
Θερμικός βαθμός απόδοσης (%)	33,79
Λόγος πίεσης συμπίεστή	12,6
Παροχή αέρα (kg/sec)	417
Στροφές λειτουργίας (rpm)	3000
Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων (°C)	543

Πίνακας 2-4 Επιδόσεις του GE 9E σε ISO συνθήκες

Διαφορετικές εκδόσεις του μοντέλου 9E έχουν κυκλοφορήσει με τις παρακάτω ονομασίες:

Frame 9E, 9E, 9E 3-Series, 9141(E), 9151(E), 9161(E), 9171(E), PG9141E, PG9151E, PG9161E, PG9171E, 9E PIP, 9E AGP, 9E Syngas, 9E BFG, MS9001(E)

Στον παρακάτω Πίνακα 2-5 παρουσιάζονται συγκριτικά οι επιδόσεις των διαφορετικών εκδόσεων του αεριοστροβίλου 9E:

Χρονολογία	1980	1992	-	-
Μοντέλο	MS9001E	9E.03	9E.03	9E.04
Ισχύς (MW)	109,9	130	132	145
Θερμικός βαθμός απόδοσης (%)	32	34,6	34,6	37
Λόγος πίεσης συμπίεστη	11,8	12,9	13,1	13,3
Παροχή αέρα (kg/sec)	401,42	415,94	-	-
Στροφές λειτουργίας (rpm)	3000	3000	3000	3000
Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων (°C)	-	541,66	544	542

Πίνακας 2-5 Συγκριτικές επιδόσεις του GE 9E

Στη συνέχεια δίνονται τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά που αφορούν τις κύριες συνιστώσες του αεριοστροβίλου.

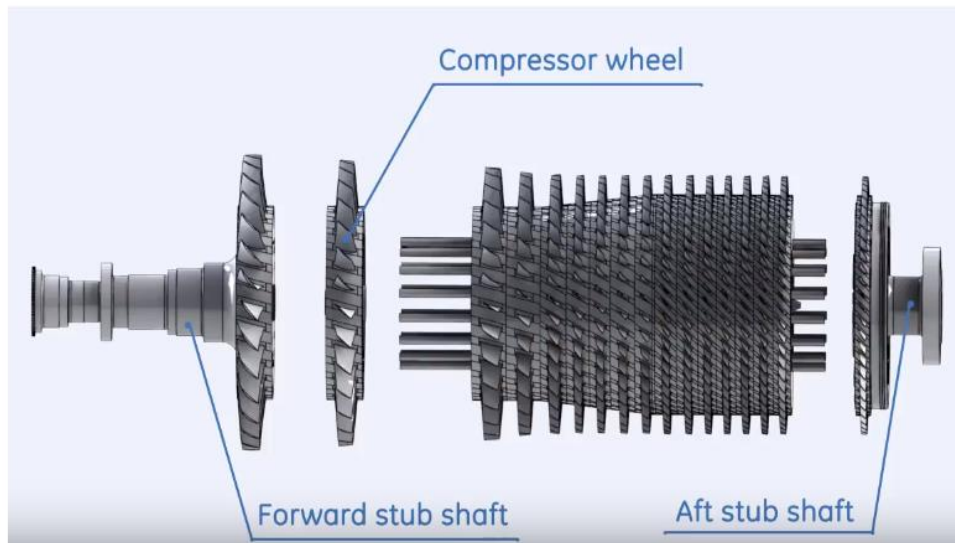
Αγωγός εισόδου:

Ο αγωγός εισόδου της μηχανής περιλαμβάνει τα φίλτρα του αέρα, το σιγαστήρα καθώς και το σύστημα προθέρμανσης του αέρα που χρησιμοποιείται όταν είναι απαραίτητο. Οδηγεί και κατευθύνει σωστά τον αέρα στην είσοδο, προκειμένου αυτός να εισέλθει στο συμπίεστη κατά την αξονική διεύθυνση. Επίσης, στα φίλτρα του αγωγού εισόδου είναι τοποθετημένοι μετρητές πίεσης, μέσω των οποίων ελέγχεται η κατάσταση των φίλτρων και ο ενδεχόμενος καθαρισμός τους. Στο τμήμα αυτό της μηχανής οι απώλειες πίεσης είναι της τάξης των 75 mm H₂O, έτσι όπως μετρήθηκαν σε πίεση 1,0120 bar και σχετική υγρασία 30%.

Συμπιεστής:

Είναι αξονικός συμπιεστής 17 βαθμίδων και η σχεδίαση του βασίστηκε σε προηγούμενους επιτυχημένους συμπιεστές της General Electric. Ο άξονας του αποτελείται από ξεχωριστούς δίσκους για κάθε βαθμίδα, οι οποίοι ενώνονται με κοχλίες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-29. Κατά την εκκίνηση της μηχανής, η σειρά των μεταβλητών πτερυγίων (IGVs) είναι σε κλειστή θέση και ταυτόχρονα λειτουργεί απομάστευση αέρα από την 11^η βαθμίδα για αποφυγή φαινομένων πάλμωσης. Απομάστευση γίνεται και στην 5^η βαθμίδα του συμπιεστή, από όπου ο αέρας χρησιμοποιείται για τη στεγανοποίηση της μηχανής. Όταν ο μετρητής της ταχύτητας περιστροφής παρουσιάσει ένδειξη του 95% της σύγχρονης ταχύτητας, τα IGVs ανοίγουν σταδιακά για τη σταθερή λειτουργία της μηχανής. Για τη συντήρηση του συμπιεστή

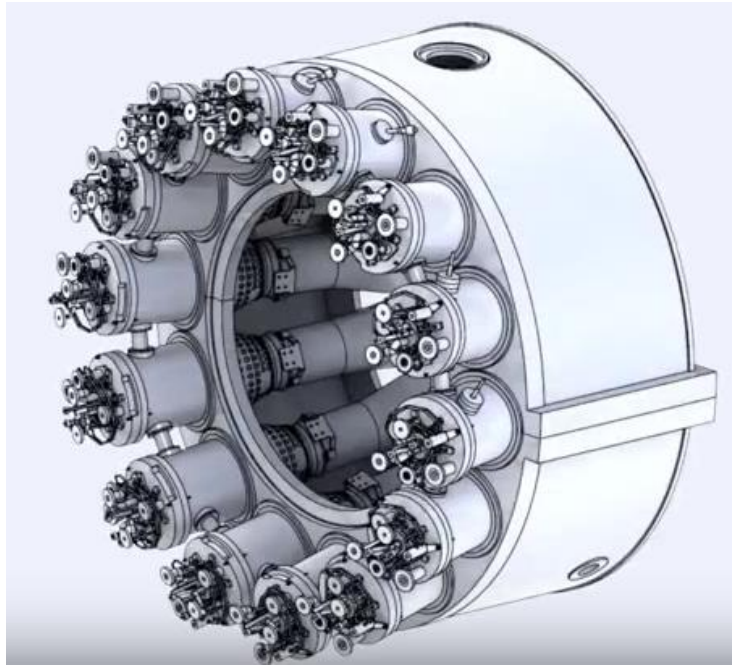
υπάρχει δυνατότητα πλυσίματος ακόμη και όταν αυτός είναι σε λειτουργία μέσω έγχυσης υγρού πλυσίματος στο μπροστινό τμήμα του.



Σχήμα 2-29 Δίσκοι και άξονας συμπιεστή - GE 9E

Θάλαμος Καύσης:

Ο θάλαμος καύσης αποτελείται από 14 καυστήρες και είναι τύπου αντιρροής. Σε κάθε έναν από τους καυστήρες, αντιστοιχεί ένας εγχυτήρας καυσίμου, ενώ το σύστημα καύσης διαθέτει συνολικά δύο σπινθηριστές με ηλεκτρόδια για έναρξη της φλόγας. Η πίεση που αναπτύσσεται στο θάλαμο καύσης έπειτα από την εκκίνηση του αεριοστροβίλου, ωθεί τα ηλεκτρόδια προς το εσωτερικό των σπινθηριστών αυτόματα και έτσι αυτά προφυλάσσονται από τις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στη ζώνη καύσης. Στο σύστημα καύσης περιλαμβάνονται επίσης οκτώ ανιχνευτές φλόγας, τέσσερις κύριοι και τέσσερις δευτερεύοντες. Το καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι συνήθως φυσικό αέριο. Ο θάλαμος καύσης μαζί με τους καυστήρες και τους εγχυτήρες καυσίμου παρουσιάζονται στο Σχήμα 2-30.



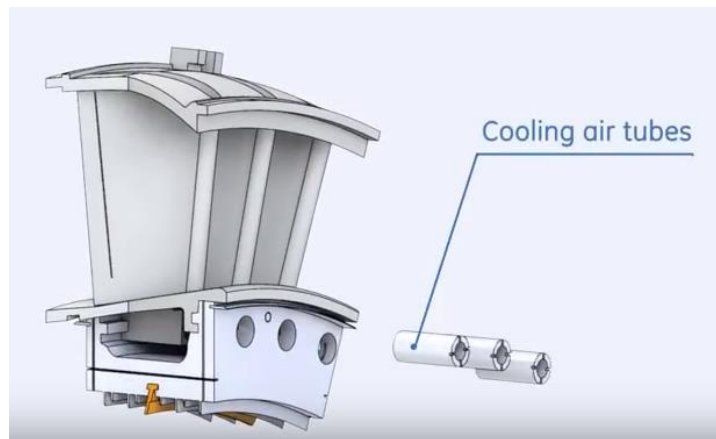
Σχήμα 2-30 Θάλαμος καύσης - GE 9E

Στρόβιλος:

Ο στρόβιλος είναι αξονικής ροής και αποτελείται από 3 διαδοχικές βαθμίδες εκτόνωσης. Από τις τρεις βαθμίδες του στροβίλου, ψύχονται μόνο η πρώτη και η δεύτερη. Η ψύξη των πτερυγίων αυτών των βαθμίδων, επιτυγχάνεται με αέρα που απομαστεύεται από το τμήμα μεταξύ της 16^{ης} και 17^{ης} βαθμίδας του συμπιεστή. Ο αέρας περνά μέσα από τον άξονα του συμπιεστή και καταλήγει στο τμήμα του στροβίλου, από όπου περνά στο εσωτερικό των πτερυγίων μέσω καναλιών τα οποία απεικονίζονται στο Σχήμα 2-32. Ο αέρας ψύξης εξέρχεται από οπές που βρίσκονται στην επιφάνεια των πτερυγίων της πρώτης βαθμίδας καθώς και από την κορυφή τους. Στην περίπτωση της δεύτερης βαθμίδας ο αέρας ψύξης εξέρχεται μόνο από την κορυφή των πτερυγίων. Σημειώνεται επίσης ότι, ο στρόβιλος μπορεί να καθαριστεί μόνο όταν είναι εκτός λειτουργίας και αυτό χρειάζεται μόνο στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται υγρά καύσιμα παράγωγα του πετρελαίου. Στο Σχήμα 2-31 παρουσιάζεται ο άξονας και οι τρεις βαθμίδες του στροβίλου.



Σχήμα 2-31 Άξονας και βαθμίδες στροβίλου – GE 9E



Σχήμα 2-32 Διαμόρφωση καναλιών ψύξης των πτερυγίων του στροβίλου - GE 9E

Αγωγός εξόδου:

Είναι το τμήμα στο οποίο περνούν τα θερμά καυσαέρια ακριβώς μετά την έξοδο τους από το στροβίλο. Στο τμήμα αυτό μειώνεται η ταχύτητα τους και ανακάτται η στατική πίεση τους αντίστοιχα, ενώ εάν πρόκειται για συνδυασμένο κύκλο, το τμήμα αυτό ενώνει την έξοδο των καυσαερίων με τον ΛΑΘ που ακολουθεί. Στην περίπτωση του 9E, ο αγωγός εξόδου είναι εξοπλισμένος με βάνες μέσω των οποίων η ροή των καυσαερίων μετατρέπεται από αξονική σε ακτινική.

Χαρακτηριστικές διατομές:

Οι χαρακτηριστικές διατομές της μηχανής υπολογίζονται με την ίδια μέθοδο που αναφέρεται στην ενότητα 2.3.1 και παρουσιάζονται παρακάτω στο Πίνακα 2-8:

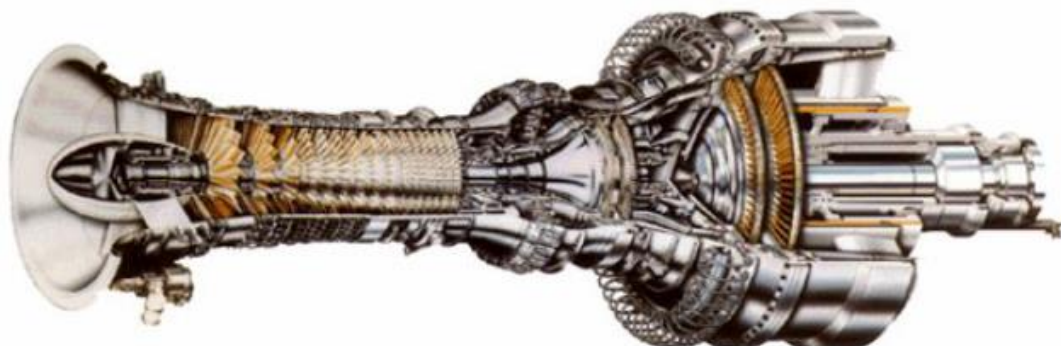
<i>General Electric 9E</i>					
Διατομές	2	3	32	4	5
	2,0005	0,6372	0,8298	1,3040	3,7491

Πίνακας 2-6 Χαρακτηριστικές διατομές GE 9E

Βιβλιογραφία ενότητας: [23] [24] [25] [26]

2.3.3 General Electric LM2500

Ο LM2500 αποτελεί έναν από τους πιο εμπορικούς αεριοστροβίλους της General Electric. Χρησιμοποιείται τόσο για παραγωγή ναυτικής πρόωσης όσο και για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όπως άλλωστε δηλώνει το προσωνύμιο του “LM”, δηλαδή “Land and Marine”. Αναλυτικότερα, είναι ένας αεριοστροβίλος διδύμων ατράκτων, ο οποίος δημιουργήθηκε στις αρχές του 1970 ως παράγωγο του αεροπορικού κινητήρα General Electric CF6 και πρόκειται για τον πιο δημοφιλή κινητήρα στην κατηγορία αεριοστροβίλων τάξεως 20-25 MW. Στο Σχήμα 2-33 παρουσιάζεται ο LM2500+ που χρησιμοποιείται για ηλεκτροπαραγωγή.



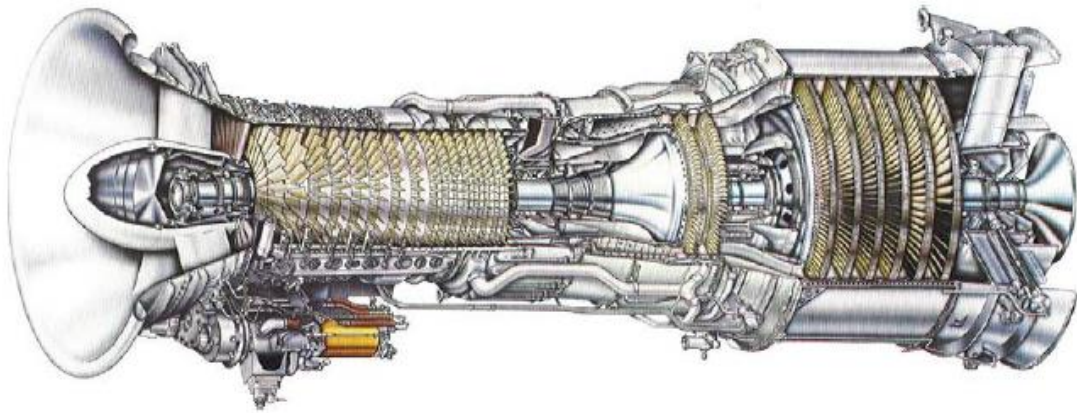
Σχήμα 2-33 LM2500+ για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Σημειώνεται ότι, στην Ελλάδα ο LM2500 χρησιμοποιείται κυρίως σε εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η χρήση του για ναυτική πρόωση εντοπίζεται σε ελληνικές φρεγάτες οι οποίες είναι εξοπλισμένες κατά κύριο λόγο με την έκδοση LM2500-30. Ενδεικτικά, στο Σχήμα 2-34 παρουσιάζονται τα ελληνικά πολεμικά πλοία που χρησιμοποιούν τον LM2500 για ναυτική πρόωση.

Όνομα Πλοίου	Μοντέλο Κινητήρα	Ισχύς (MW)	Σύστημα Προώσεως
Φ/Γ Σαλαμίς	Lm2500/30	22.3	CODOG
Φ/Γ F452 ΥΔΡΑ	Lm2500/30	22.3	CODOG
Φ/Γ Ψαρά	Lm2500/30	22.3	CODOG
Φ/Γ Σπέτσαι	Lm2500/30	22.3	CODOG
Κορβέτα 'Als@Class 100'	Lm2500	22.3	CODAG
Corsaire 14000 Αίολος Κεντέρης	Lm2500+	25	CODOG

Σχήμα 2-34 Πολεμικά πλοία που χρησιμοποιούν εκδόσεις του LM2500 για πρόωση

Στο Σχήμα 2-35 δίνεται η εικόνα της αντίστοιχης μηχανής που χρησιμοποιείται για ναυτική πρόωση:



Σχήμα 2-35 GE LM2500 για παραγωγή ναυτικής πρόωσης

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συγκριτικά οι επιδόσεις των διαφορετικών εκδόσεων του LM2500 που έχουν κυκλοφορήσει για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως:

Manufacturer	Model	EG: Electrical Generator MD: Mechanical Drive MN: Marine Propulsion	Output @ ISO [kW]	Heat Rate [kJ/kWh]	η_{th}	PR	Mass Flow [kg/s]	EGT [C]	RPM (max)
GE	LM2500+RC*	EG	36100	9756	0.37	-	96.8	507	3600
GE ENERGY	LM2500+PV-MGW(2STG)	EG	33507	8929	0.40	22.9	89.3	486	6100
GE	LM2500+RC	EG	33200	9300	0.39	-	91.6	524	3600
GE	LM2500+RD DLE	EG	32900	9322	0.39	-	91.4	525	3600
MTU	LM2500+(PK)	EG/MD	31200	9114	0.39	-	87.2	515	3600
GE	LM2500PK	EG/MN	30676	9300	0.37	23.6	87.1	514	3600
GE	LM2500PV	EG	30463	9069	0.40	22.6	84.3	499	6100
GE ENERGY	LM2500+PV-MG(2STG)	EG	30349	8577	0.42	21.5	84.3	499	6100
GE ENERGY	LM2500+PY-MGD(2STG)	EG	30057	8607	0.42	21.4	83.8	501	6100
GE	LM2500+PPR DLE	EG	30000	9686	0.37	23.1	88.7	528	3000

GE	LM2500+	EG/MD	29977.14	8937.62	0.40	22.8	-	502	6100
GE ENERGY	LM2500+PR-MGD(6STG)	EG	29921	9195	0.39	23.1	88.5	528	3000
GE	LM2500+PV	EG	29900	8936.32	0.40	21.9	-	496	6100
GE	LM2500+PK	EG	29300	9669	0.37	22.6	87.8	520	3000
GE	LM2500+PK*	EG	29300	10157	0.35	22.8	89.5	488	3000
GE ENERGY	LM2500+PR-MGW(6STG)	EG	29275	9642	0.37	22.8	89.4	488	3000
GE	LM2500PK	EG	29244	9675	0.37	22.8	87.7	519	3000
GE ENERGY	LM2500+PR-MG(6STG)	EG	29244	9177	0.39	22.6	87.8	520	3000
MTU	LM2500+(PK)	EG/MD	28900	9114	0.39	22.2	87.2	515	3600
GE	LM2500PK(60Hz)	EG	28500	9134	0.39	22.8	-	502.7	3600
GE	LM2500PK(50Hz)	EG	28440	9654	0.37	23.1	-	511.1	3000
GE	LM2500PH**	EG	27763	8775	0.41	20.2	75.9	497	3600
MTU	LM2500-PHSTIG	EG/MD	27000	8470	0.43	19.3	75.9	500	3600
GE ENERGY	LM2500STIG50	EG	26463	8673	0.42	19.4	76.0	497	3000
GE ENERGY	LM2500PE-MG	EG	23292	9315	0.39	19.1	69.4	533	3600
GE	LM2500PE*	EG	23100	10577	0.34	18.7	71.7	517	3000
GE	LM2500	EG	23265.84	9564	0.38	18.8	-	525	6500
GE ENERGY	LM2500PE-MGW	EG	23060	10041	0.36	16.5	66.5	464	3000
GE	LM2500-PE	EG	22800	9784	0.37	18.8	-	523	3600
GE	LM2500PE(60Hz)	EG	22800	10559	0.34	18.4	-	520	3600
GE	LM2500PE	EG	22719	9789	0.37	19.1	69.4	533	3600
MTU	LM2500-PE	EG/MD	22500	9600	0.38	17.9	69.0	524	3600
GE	LM2500PE	EG	22400	10146	0.35	18.2	69.8	538	3000
GE ENERGY	LM2500PE-MG	EG	22346	9630	0.37	19.8	69.7	538	3000
GE	LM2500PE	EG	22219	9789	0.37	19	69.4	533	3600
GE	LM2500PE(50Hz)	EG	21900	10857	0.33	18.6	-	530	3000
GE	LM2500PJ DLE	EG	21800	10173	0.35	17.9	68.9	535	3000
GE	LM2500PE	EG	21719	10141	0.35	18	69.8	538	3000
GE ENERGY	LM2500PJ-MGD	EG	21719	9653	0.37	17.6	68.7	533	3000

Από τις παραπάνω εκδόσεις αυτή που έχει κυριαρχήσει στην Ελλάδα είναι ο LM2500+. Οι επιδόσεις του LM2500+ στο σημείο σχεδίασης και μετρημένες σε ISO συνθήκες παρουσιάζονται ξεχωριστά στον Πίνακα 2-7:

Μοντέλο	LM2500+
Ισχύς (MW)	29,9
Θερμικός βαθμός απόδοσης (%)	40
Λόγος πίεσης συμπίεστη	22,8
Παροχή αέρα (kg/sec)	86,63
Στροφές λειτουργίας (rpm)	3600
Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων (°C)	502

Πίνακας 2-7 Επιδόσεις του LM2500+ στο σημείο σχεδίασης, σε ISO συνθήκες

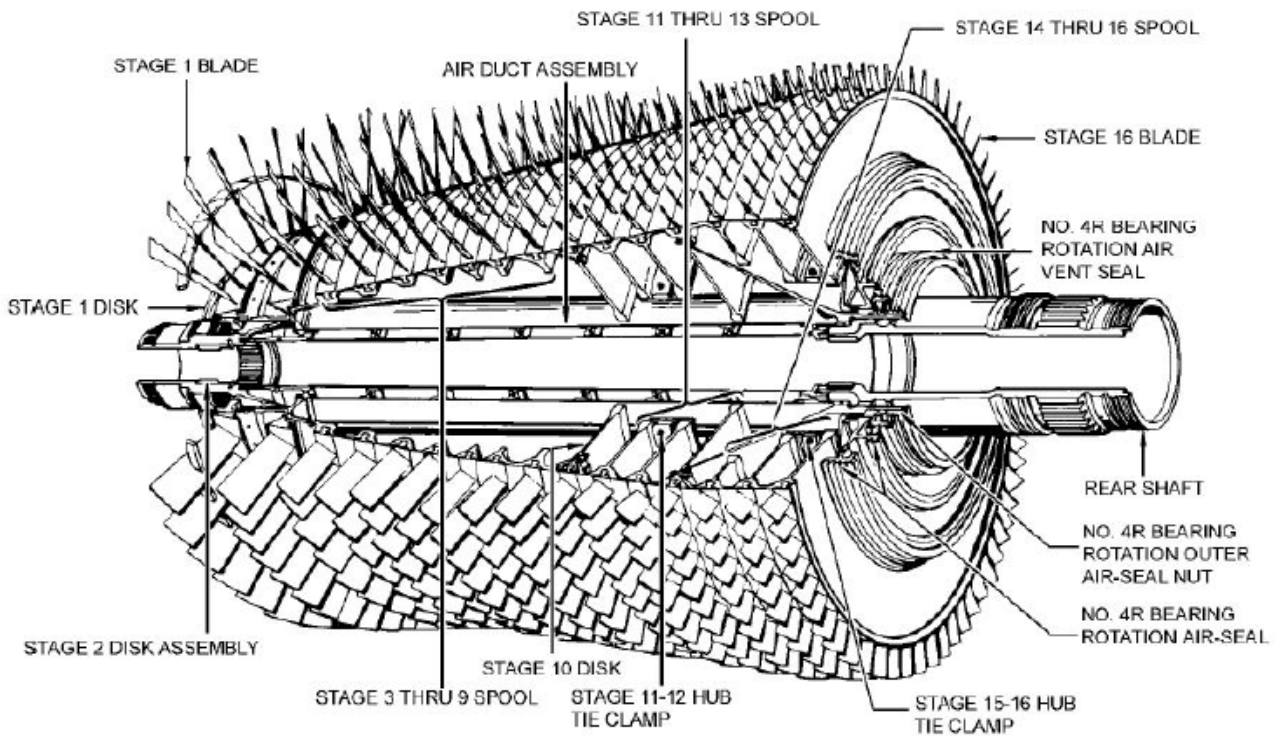
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα κυριότερα τεχνικά χαρακτηριστικά των βασικών συνιστωσών του.

Αγωγός εισόδου:

Ο αγωγός εισόδου κατευθύνει τον αέρα στην είσοδο του συμπιεστή, έτσι ώστε η ροή να είναι ομαλή και να εισέρχεται αξονικά. Ο αγωγός αυτός καταλήγει σε κατάλληλα σχεδιασμένο καμπανοειδές προστόμιο (bell mouth), στο κέντρο του οποίου είναι τοποθετημένος ένας κώνος εισαγωγής (bulletnose). Στο σώμα του προστομίου υπάρχουν οπές, μέσω των οποίων ψεκάζεται το υγρό καθαρισμού του συμπιεστή κατά τη φάση της συντήρησης.

Συμπιεστής:

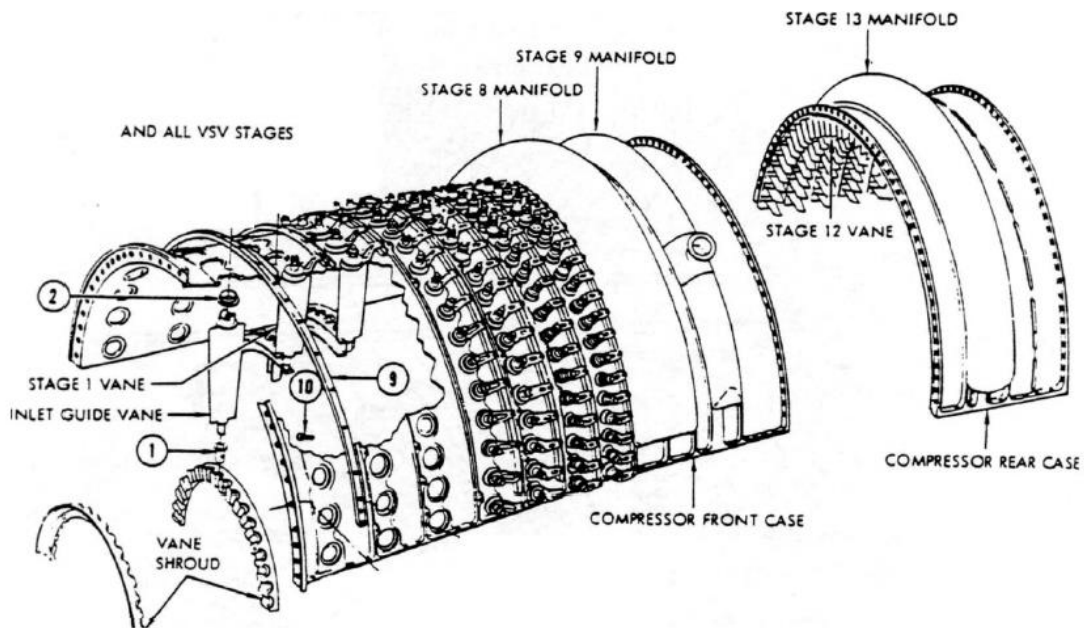
Ο συμπιεστής είναι αξονικής ροής και αποδίδει αρκετά υψηλό λόγο πίεσης. Το μοντέλο του αεριοστροβίλου LM2500 που χρησιμοποιείται για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έχει συνήθως συμπιεστή 17 βαθμίδων και στρόβιλο ισχύος με 2 βαθμίδες. Τα IGVs στην είσοδο του συμπιεστή καθώς και οι επόμενες έξι βαθμίδες διαθέτουν πτερύγια μεταβλητής γεωμετρίας (VSVs – Variable Stator Vanes). Μέσω αυτών δίνεται δυνατότητα μεταβολής της γωνίας προσανατολισμού των σταθερών πτερυγίων, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ομαλή και συνεχής ροή του αέρα προς τις τελευταίες βαθμίδες του συμπιεστή (αποφυγή stall). Στο Σχήμα 2-36 παρουσιάζεται σε τομή ο άξονας του συμπιεστή, πάνω στον οποίο η συναρμολόγηση των βαθμίδων των πτερυγίων.



LM2500-4-02

Σχήμα 2-36 Τομή συμπιεστή - GE LM2500

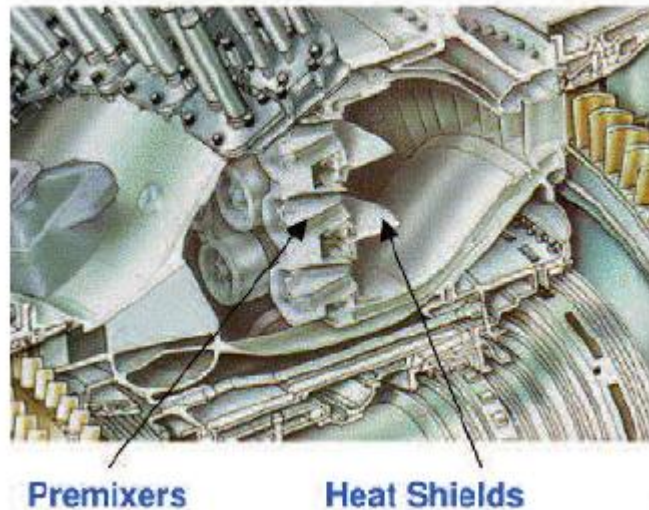
Ένα ποσοστό του συμπιεσμένου αέρα απομαστεύεται από την 8^η, 9^η και 13^η βαθμίδα αντίστοιχα. Η απομάστευση από την 8^η βαθμίδα χρησιμοποιείται για ψύξη και στεγάνωση στα έδρανα της μηχανής. Αντίστοιχα ο αέρας που απομαστεύεται από την 9^η βαθμίδα χρησιμοποιείται για ψύξη και στεγάνωση του μπροστινού μέρους του στροβίλου ισχύος. Τέλος, ο αέρας από την 13^η βαθμίδα ψύχει τη δεύτερη σειρά σταθερών πτερυγίων του στροβίλου υψηλής πίεσης, ενώ τα πτερύγια της πρώτης βαθμίδας ψύχονται με αέρα υψηλής ταχύτητας και πίεσης, που απομαστεύεται κατευθείαν από την κατάθλιψη του συμπιεστή. Η διάταξη των αγωγών του αέρα που απομαστεύεται από το συμπιεστή παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-37. Στο σχήμα αυτό μπορούμε επίσης να δούμε τις στεφάνες ρύθμισης των πτερυγίων μεταβλητής γεωμετρίας των πρώτων έξι βαθμίδων του συμπιεστή.



Σχήμα 2-37 Ρυθμιστικές στεφάνες VSVs και αγωγοί απομάστευσης αέρα LM2500

Θάλαμος Καύσης:

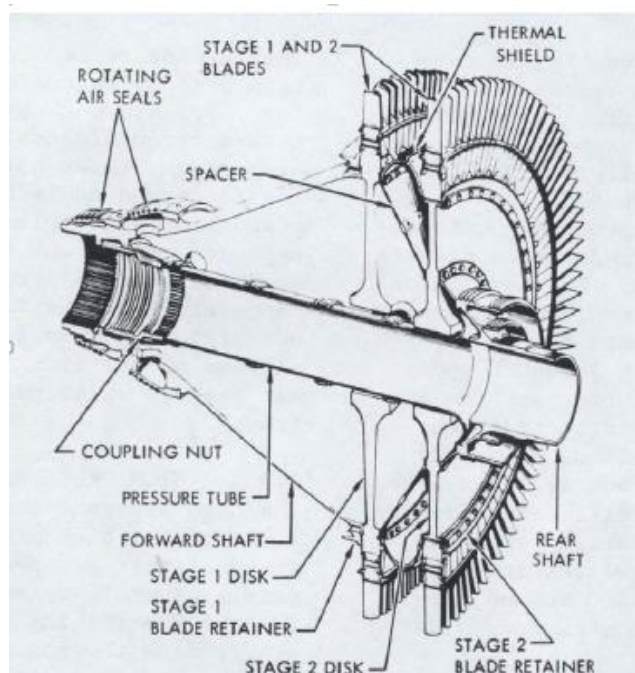
Ο LM2500 είναι διαθέτει ένα σύστημα καύσης τεχνολογίας DLE (Dry Low Emissions), το οποίο πρωτοπαρουσιάστηκε το 1995. Στόχος της σχεδίασης αυτού του συστήματος ήταν η μείωση των εκπομπών NOx στο όριο των 25ppm, χωρίς την έγχυση νερού ή ατμού μέσω της οποίας λειτουργούσαν οι προηγούμενες εκδόσεις της μηχανής. Το σύστημα χρησιμοποιεί ένα δακτυλιοειδή θάλαμο καύσης, με 30 προαναμεικτες και 75 ακροφύσια ψεκασμού του καυσίμου. Στο Σχήμα 2-38 φαίνεται η σχεδίαση και η θέση των προαναμεικτών καυσίμου του συστήματος DLE.



Σχήμα 2-38 Απεικόνιση προαναμεικτών συστήματος DLE - GE LM2500

Στρόβιλος υψηλής πίεσης:

Ο στρόβιλος υψηλής πίεσης αποτελείται από 2 βαθμίδες. Η ενέργεια των θερμών καυσαερίων μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια, η οποία διατίθεται για την κίνηση του συμπιεστή. Η ενέργεια που χρειάζεται ο συμπιεστής για να λειτουργήσει, αντιστοιχεί περίπου στα $\frac{3}{4}$ της συνολικής ενέργειας των καυσαερίων, ενώ το υπόλοιπο ποσό της διαθέσιμης ενέργειας μετατρέπεται σε ισχύ στο στρόβιλο ισχύος που ακολουθεί. Τα πτερύγια και των δύο βαθμίδων, είναι συναρμολογημένα σε δίσκους, έχουν σχεδίαση μακρού στελέχους και είναι επιχρισμένα έτσι ώστε να ανθίστανται στην διάβρωση και την οξείδωση. Η τομή του άξονα τους στρόβιλου υψηλής πίεσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-39:



Σχήμα 2-39 Τομή στρόβιλου υψηλής πίεσης - GE LM2500

Η ψύξη των κινητών πτερυγίων επιτυγχάνεται τόσο εσωτερικά μέσω συναγωγής (internal cooling), όσο και εξωτερικά με λεπτό στρώμα αέρα (film cooling). Για την πρώτη βαθμίδα ο αέρας εξέρχεται από σημεία καθ' ύψος των πτερυγίων, ενώ στη δεύτερη βαθμίδα ο αέρας εξέρχεται κατευθείαν από την κορυφή των πτερυγίων.

Στρόβιλος ισχύος:

Είναι η συνιστώσα του αεριοστρόβιλου που παράγει το ωφέλιμο έργο. Το κινητό μέρος του στροβίλου ισχύος είναι απευθείας συνδεδεμένο με τον άξονα ισχύος και αποτελείται από δύο δίσκους και ενδιάμεσους αποστάτες που συνδέονται με κοχλίες.

Αγωγός εξόδου:

Τα καυσαέρια από το στρόβιλο ισχύος εκτρέπονται μέσω ενός αγωγού κατά 90 ° και κατευθύνονται κατακόρυφα προς τα πάνω διά τον αγωγό εξαγωγής.

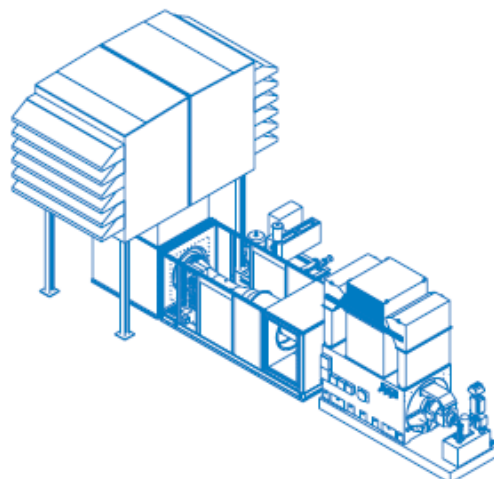
Χαρακτηριστικές διατομές:

Οι χαρακτηριστικές διατομές της μηχανής υπολογίζονται με την ίδια μέθοδο που αναφέρεται στην ενότητα 2.3.1 και παρουσιάζονται παρακάτω στο Πίνακα 2-8:

<i>General Electric LM2500</i>						
διατομές	2	3	32	4	44	5
	0,4198	0,0600	0,4762	0,2822	0,7901	0,9877

Πίνακας 2-8 Χαρακτηριστικές διατομές GE LM2500

Παρακάτω στο Σχήμα 2-40 δίνεται η εικόνα της σύγχρονης εγκατάστασης του LM2500+ μαζί με τις βασικές του διαστάσεις, έτσι όπως τις δίνει η κατασκευάστρια εταιρία:



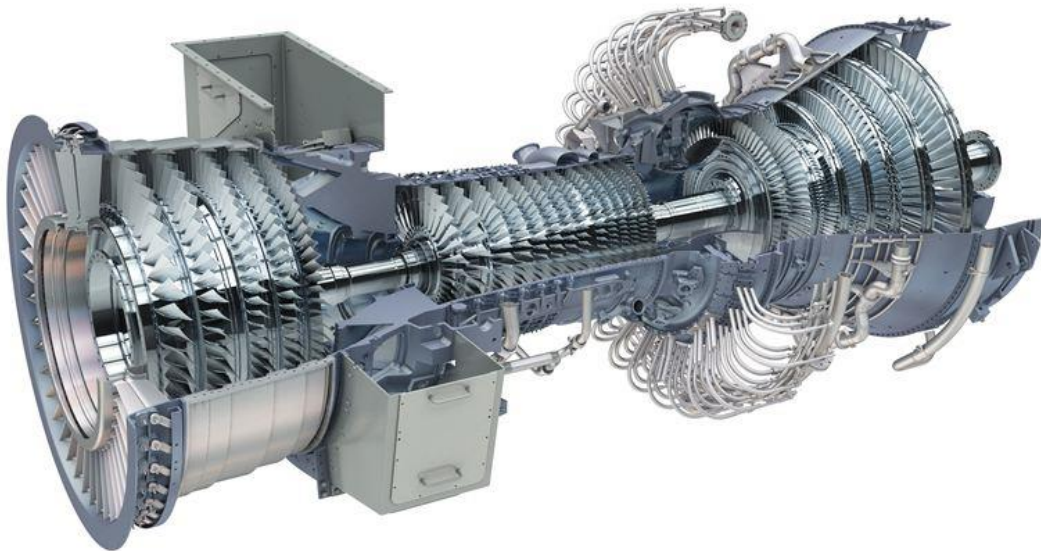
LENGTH 68'6" x WIDTH 14'9" x HEIGHT 29'5"

Σχήμα 2-40 Σύγχρονη εγκατάσταση LM2500+

Βιβλιογραφία ενότητας: [27] [28] [29] [30] [31]

2.3.4 General Electric LM6000

Η LM6000 αποτελεί μία από τις πιο πρωτοποριακές μηχανές που περιλαμβάνει η οικογένεια της General Electric. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι πρόκειται για τον πρώτο αεριοστρόβιλο, η εγκατάσταση του οποίου συνδυάζεται με την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε μπαταρίες. Ο σχεδιασμός του βασίστηκε στους αεροπορικούς κινητήρες CF6-80C2 και CF6-80E1, δηλαδή στους κινητήρες που χρησιμοποιήθηκαν σε αεροσκάφη τύπου Boeing 747,767 και των Airbus A300/A310/A33. Με βάση τις μηχανές αυτές έγιναν οι κατάλληλες μετατροπές, ώστε ο LM6000 να είναι κατάλληλος για επίγειες εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και για ναυτική πρόωση. Έτσι προέκυψε ένας αεριοστρόβιλος διπλού τυμπάνου, οι διαφορετικές εκδόσεις του οποίου καλύπτουν εύρος 45÷59 MW ισχύος, επιτυγχάνοντας 56% βαθμό απόδοσης εγκατάστασης όταν λειτουργούν σε συνδυασμένο κύκλο. Η παραγωγή ισχύος γίνεται έτσι με αρκετά μικρότερο κόστος, κάτι που σε συνδυασμό με την εύκολη και γρήγορη τοποθέτηση του ως ένα ενιαίο και προ-συναρμολογημένο σύνολο, τον καθιστά μία πολύ αποδοτική και συμφέρουσα επιλογή. Στο Σχήμα 2-41 δίνεται μια τομή του LM6000 της General Electric.



Σχήμα 2-41 General Electric LM6000

Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του LM6000 αποτελεί η τεχνολογία SPRINT (Spray Inter-Cooled Turbine), η οποία επιτρέπει την αύξηση της ισχύος εξόδου έως και 20% αναλόγως των συνθηκών περιβάλλοντος. Ως καύσιμο χρησιμοποιείται κυρίως το φυσικό αέριο, έχει όμως και την επιλογή του καυσίμου τύπου jet σε περίπτωση που δεν υπάρχει διαθέσιμο φυσικό αέριο. Συνήθεις εγκαταστάσεις στις οποίες ο LM6000 παρέχει ισχύ είναι: νοσοκομεία, αεροδρόμια, χαρτοβιομηχανίες και τσιμεντοβιομηχανίες, διωλιστήρια και πλοία.

Οι κυριότερες εκδόσεις που απαντώνται στις παραπάνω εφαρμογές είναι ο LM6000PC και ο LM6000PG, οι επιδόσεις των οποίων παρουσιάζονται σε ISO συνθήκες στον Πίνακα 2-9:

Μοντέλο	LM6000PC	LM6000PG
Ισχύς (MW)	42,428	52,403
Θερμικός βαθμός απόδοσης (%)	42,03	41,57
Λόγος πίεσης συμπίεστη	-	-
Παροχή καυσαερίων (kg/sec)	124	141
Στροφές λειτουργίας (rpm)	3600	3600
Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων (°C)	456	499

Πίνακας 2-9 Επιδόσεις του GE LM6000 σε ISO συνθήκες

Στο Πίνακα 2-10 δίνονται συγκριτικά οι επιδόσεις των διαφόρων εκδόσεων LM6000 που έχουν κυκλοφορήσει:

	Power kW	Heat Rate		No. Shafts	Pressure Ratio	Shaft Speed rpm	Exhaust Flow		Exhaust Temp.	
		Btu/kWh LHV	kJ/kWh LHV				lb/s	kg/s	°F	°C
LM6000PC SPRINT*	50041	8461	8961	2	31.0	3627	297	135	821	438
LM6000PC	42890	8173	8617	2	29.1	3627	282	128	825	441
LM6000PD SPRINT	46902	8272	8739	2	30.9	3627	292	133	834	446
LM6000PD	41711	8374	8846	2	29.3	3627	279	127	838	448
LM6000PD (liquid fuel)	40376	8452	8917	2	28.5	3627	272	123	853	456
LM2500PK	29244	9177	9675	2	22.8	3000	193	87.7	967	519
LM2500PV	30349	8577	9069	2	21.5	6100	186	84.3	931	499
LM2500PH**	26463	8673	9080	2	19.4	3000	168	76.2	932	500
LM2500PE	21719	9653	10141	2	18	3000	154	69.8	1000	538

Πίνακας 2-10 Συγκριτική παρουσίαση των επιδόσεων των εκδόσεων LM6000

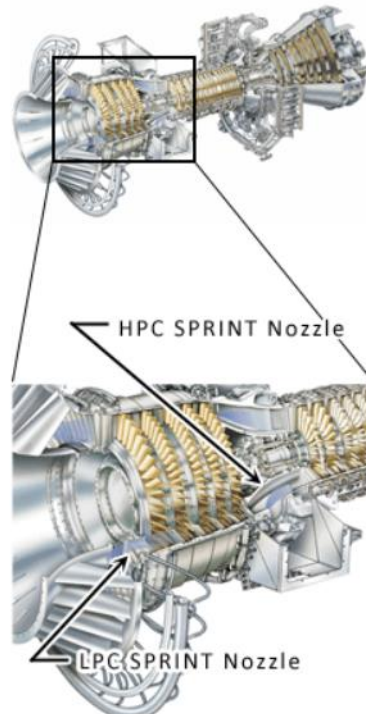
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των βασικών συνιστωσών του αεριοστρόβιλου LM6000.

Αγωγός εισόδου:

Ο αγωγός εισόδου του αεριοστρόβιλου επιτυγχάνει την ομαλοποίηση της ροής του αέρα, έτσι ώστε αυτή να είναι στρωτή και να εισέρχεται αξονικά στο συμπίεστη. Εάν λάβουμε υπ' όψη την εγκατάσταση συνολικά, στον αγωγό εισόδου περιλαμβάνονται και τα στατικά φίλτρα που απομακρύνουν τα σωματίδια από τον αέρα εισόδου καθώς και διατάξεις μείωσης του θορύβου κατά την αναρρόφηση. Στο σύνορο μεταξύ του αγωγού εισόδου και του συμπίεστη, είναι τοποθετημένα τα πτερύγια IGVs μέσω των οποίων ελέγχεται η παροχή που εισέρχεται στη μηχανή.

Συμπιεστής:

Ο συμπιεστής είναι αξονικού τύπου και αποτελείται από 19 συνολικά βαθμίδες. Από αυτές οι 5 βαθμίδες ανήκουν στο τμήμα της χαμηλής πίεσης που αποδίδει συνολικά λόγο πίεσης 2,4:1, ενώ οι υπόλοιπες 14 ανήκουν στο τμήμα της υψηλής πίεσης. Μεταξύ του συμπιεστή χαμηλής και υψηλής πίεσης παρεμβάλλονται 12 υδραυλικά ελεγχόμενες βάνες παράκαμψης της ροής του αέρα. Έτσι κατά την εκκίνηση ή την λειτουργία σε μερικό φορτίο, οι βαλβίδες αυτές ανοίγουν μερικώς και παρακάμπτουν μέρος της παροχής αέρα εξασφαλίζοντας την ομαλή λειτουργία της μηχανής. Όσον αφορά τον συμπιεστή υψηλής πίεσης, στις 5 από τις 14 βαθμίδες του υπάρχουν στάτορες μεταβλητής γεωμετρίας με σκοπό την αύξηση της απόδοσης του κατά την έναρξη και την μόνιμη λειτουργία του αεριοστρόβιλου. Συνολικά ο συμπιεστής αποδίδει λόγο πίεσης 33:1 σε αντίστοιχη παροχή 134 kg/sec. Επίσης όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, στον συγκεκριμένο αεριοστρόβιλο είναι διαθέσιμη η τεχνολογία SPRINT, μέσω της οποίας αυξάνεται η ισχύς εξόδου και ο βαθμός απόδοσης του αεριοστρόβιλου. Ειδικότερα, πρόκειται για ένα σύστημα μέσω του οποίου ψεκάζεται νερό στην είσοδο του συμπιεστή χαμηλής και υψηλής πίεσης αντίστοιχα, μέσω 24 ακροφυσίων που είναι τοποθετημένα περιφερειακά του κελύφους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-42. Επιτυγχάνεται έτσι εξατμιστική ψύξη, με αποτέλεσμα να μειώνεται η θερμοκρασία του αέρα στην έξοδο του συμπιεστή και πριν την είσοδο στο θάλαμο καύσης. Με αυτό τον τρόπο βελτιώνεται ο θερμοδυναμικός κύκλος που ακολουθεί η μηχανή και οι αντίστοιχες επιδόσεις της.



Σχήμα 2-42 Ακροφύσια ψεκασμού νερού μέσω του συστήματος SPRINT

Θάλαμος καύσης:

Το σύστημα καύσης είναι είτε τύπου SAC (Singular Annular Combustor) είτε DLE (Dry Low Emissions). Στην πρώτη περίπτωση έχουμε 30 εγχυτήρες καυσίμου περιφερειακά ενός δακτυλιοειδούς καυστήρα, μέσω των οποίων επιτυγχάνεται ομοιόμορφο προφίλ θερμότητας προς τον στρόβιλο υψηλής πίεσης. Ο αέρας διέρχεται από το θόλο στο θάλαμο καύσης και αναμιγνύεται επαρκώς με το καύσιμο, δίνοντας έτσι καθαρή καύση και χαμηλότερες εκπομπές NOx. Επίσης υπάρχει δυνατότητα περαιτέρω μείωσης των εκπομπών NOx μέσω έγχυσης νερού ή ατμού στο θάλαμο καύσης. Το σύστημα SAC εξασφαλίζει λοιπόν χαμηλή πτώση πίεσης, χαμηλή θερμοκρασία εξόδου και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Από την άλλη το σύστημα DLE ελέγχει τις εκπομπές NOx χωρίς έγχυση νερού/ατμού. Σε αυτή την περίπτωση έχουμε 30 εξωτερικούς προαναμείκτες με 75 ακροφύσια τα οποία τροφοδοτούν το θάλαμο καύσης με το μείγμα αέρα καυσίμου, επιτυγχάνονται έτσι πλήρη ομοιομορφία στην καύση. Σε κάθε περίπτωση η General Electric εγκαθιστά ειδικούς καυστήρες, ακροφύσια και μετρητές θερμοκρασίας μέσω των οποίων ελέγχονται οι εκπομπές και τα άκαυστα στοιχεία καυσίμου. Στο Πίνακα 2-11 δίνονται επιγραμματικά οι διαφορές μεταξύ των δύο διαθέσιμων συστημάτων καύσης που τοποθετούνται στους κινητήρες LM6000:

Product Offerings	Fuel	Combustor	Diluent	Power Augmentation	NOx Level
LM6000 SAC, 60 Hz	Gas, Liquid or Dual Fuel	Single Annular (SAC)	Water	None	25 ppm gas/ 42 ppm liquid
LM6000 DLE, 60 Hz	Gas	Dry Low Emissions (DLE)	None	None	15 ppm

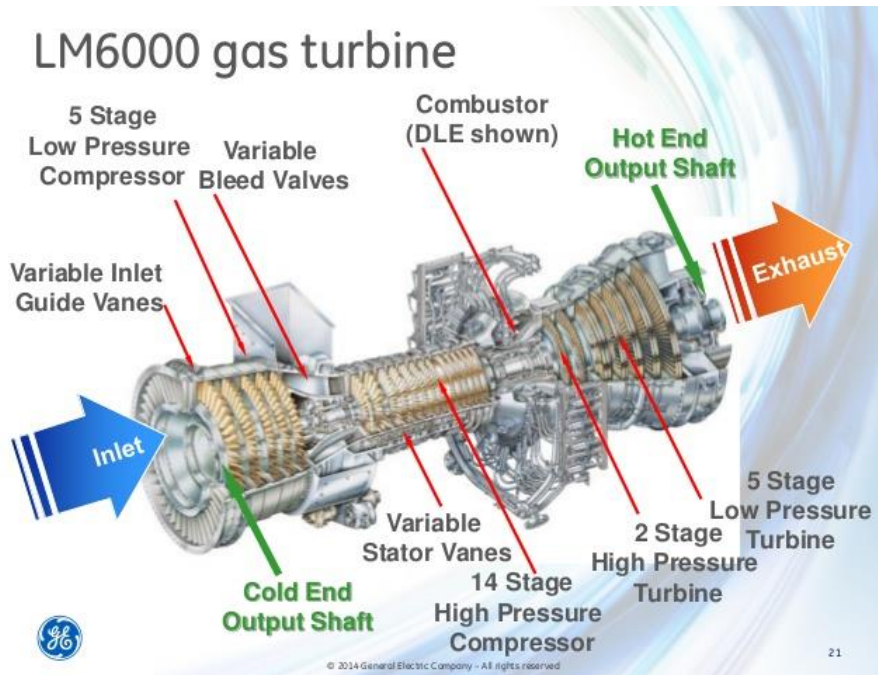
Πίνακας 2-11 Διαφορές μεταξύ των συστημάτων SAC και DLE**Στρόβιλος:**

Ο στρόβιλος είναι επίσης αξονικού τύπου και αποτελείται από 7 βαθμίδες. Το τμήμα υψηλής πίεσης απαρτίζεται από τις πρώτες 2 βαθμίδες, ενώ το τμήμα χαμηλής πίεσης συμπληρώνουν οι υπόλοιπες 5 βαθμίδες. Στο στρόβιλο υψηλής πίεσης τα πτερύγια είναι επιχρισμένα για να αντέχουν τις συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών και τοποθετούνται σε δίσκους που ενώνονται με κοχλίες. Όλο το έργο που παράγεται από το τμήμα υψηλής πίεσης χρησιμοποιείται για την κίνηση του συμπιεστή υψηλής πίεσης και την παροχή συμπιεσμένου αέρα στο θάλαμο καύσης. Από την άλλη ο στρόβιλος χαμηλής πίεσης είναι αυτός που κινεί τόσο τον συμπιεστή χαμηλής πίεσης όσο και το φορτίο (γεννήτρια).

Αγωγός εξόδου:

Τα καυσαέρια εξέρχονται από τον αεριοστρόβιλο μέσω του αγωγού εξόδου σε αξονική διεύθυνση. Από το σημείο αυτό και μετά υπάρχει δυνατότητα εκμετάλλευσης της ενέργειας των καυσαερίων μέσω λέβητα ανάκτησης θερμότητας.

Στο Σχήμα 2-43 απεικονίζονται ως σύνολο οι συνιστώσες του LM6000 που αναλύθηκαν παραπάνω:



Σχήμα 2-43 Συνιστώσες του General Electric LM6000

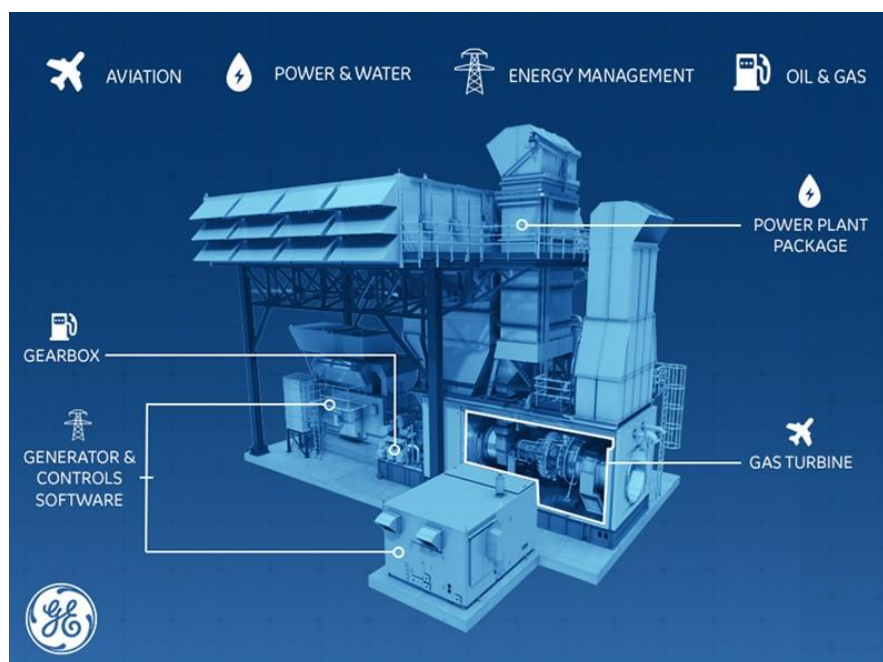
Χαρακτηριστικές διατομές:

Οι χαρακτηριστικές διατομές της μηχανής υπολογίζονται με την ίδια μέθοδο που αναφέρεται στην ενότητα 2.3.1 και παρουσιάζονται παρακάτω στο Πίνακα 2-12:

General Electric LM6000								
διατομές	2	31	32	3	4	5	6	7
	0,6269	0,3483	0,2229	0,0511	0,1811	0,2090	0,3715	1,0401

Πίνακας 2-12 Χαρακτηριστικές διατομές GE LM6000

Στο Σχήμα 2-44 απεικονίζεται η διάταξη μιας σύγχρονης εγκατάστασης του LM6000.



Σχήμα 2-44 Εγκατάσταση GE LM6000

Βιβλιογραφία ενότητας: [32] [33] [34]

2.3.5 Alstom GT26

Ο Alstom GT26 αποτελεί έναν αεριοστρόβιλο απλής ατράκτου, που απαντάται συνήθως σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας απλού ή συνδυασμένου κύκλου. Αποτελεί τον πιο εξελιγμένο, τεχνολογικά και εμπορικά, αεριοστρόβιλο κατασκευής της Alstom και η επιτυχία του αυτή οφείλεται στο ιδιαίτερο σύστημα καύσης που διαθέτει. Συγκεκριμένα, η Alstom έγινε η πρώτη και μοναδική κατασκευάστρια εταιρεία στον κόσμο, η οποία σχεδίασε και εγκατέστησε σύστημα διαδοχικής καύσης στα μοντέλα GT24 και GT26. Το σύστημα αυτό, η ανάλυση του οποίου γίνεται παρακάτω, προσφέρει αρκετά οφέλη όπως:

- Μείωση των εκπομπών NO_x, μέσω της καύσης σε δύο διαδοχικούς καυστήρες χαμηλών εκπομπών.
- Χαμηλές θερμοκρασίες εισόδου στον στρόβιλο, μη επαφή της φλόγας με το κέλυφος του θαλάμου καύσης και άρα μείωση των αναγκών συντήρησης του αεριοστρόβιλου.

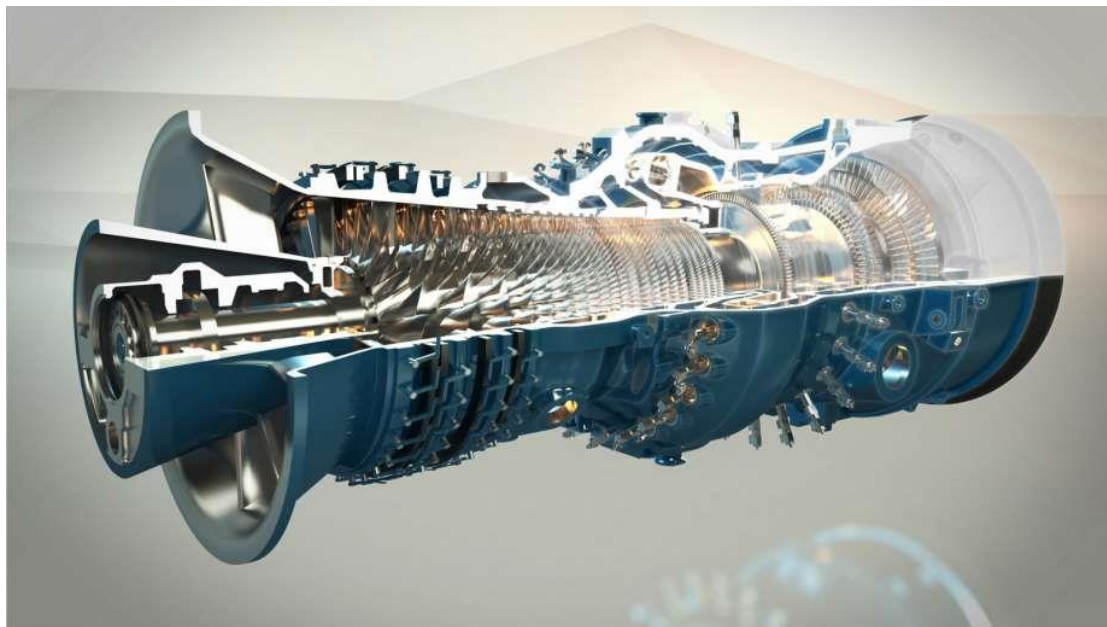
Με αυτό τον τρόπο αυξάνεται η διαθεσιμότητα και τα διαστήματα συνεχούς λειτουργίας της μηχανής προσφέροντας καλύτερη σχέση κόστους – παραγωγής.

Παράλληλα μοναδικό χαρακτηριστικό του GT26, αποτελεί η δυνατότητα της online εναλλαγής του mode λειτουργίας του, μεταξύ των επιλογών:

1. “Βελτιστοποίηση επίδοσης” για υψηλότερη ισχύ εξόδου και

2. “Βελτιστοποίηση κόστους συντήρησης” για επίτευξη κατά 30% μακρύτερων διαστημάτων λειτουργίας.

Ως καύσιμο υπάρχει η δυνατότητα χρήσης του υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG) ή άλλων συνθετικών αερίων. Η τομή του GT26 της Alstom δίνεται στο Σχήμα 2-45.



Σχήμα 2-45 Alstom GT26

Οι επιδόσεις του GT26 στο σημείο σχεδίασης του και σε ISO συνθήκες δίνονται στον Πίνακα 2-13, όπου παρουσιάζονται οι επιδόσεις της μηχανής σε τρεις διαφορετικές εκδόσεις της, έτσι ώστε να γίνεται εμφανής η εξέλιξη της.

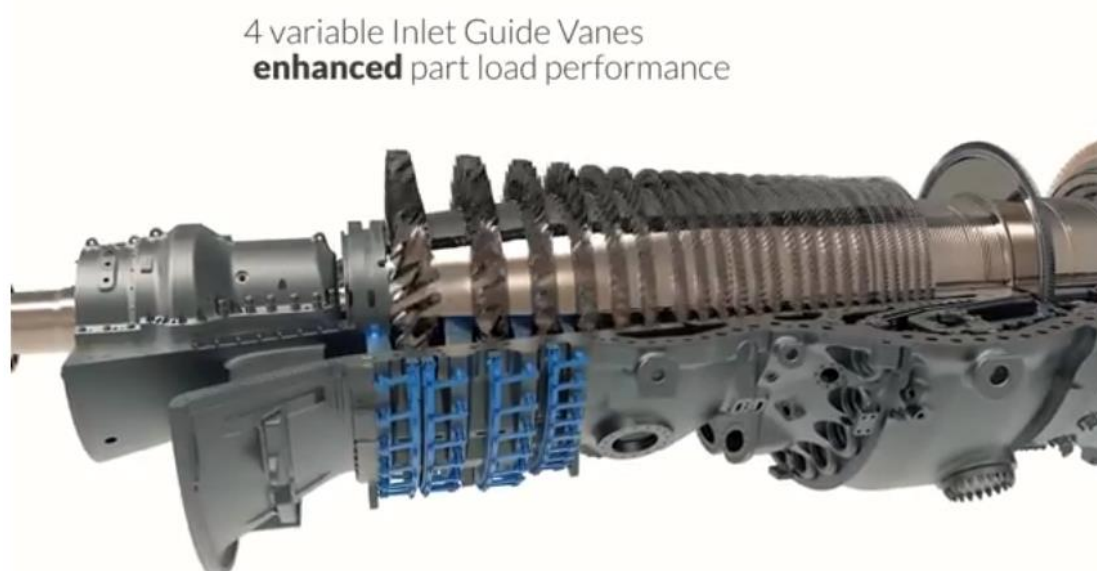
Μοντέλο	Alstom GT26		
Χρονολογία	2002	2006	2011
Ισχύς (MW)	268	281	326
Θερμικός βαθμός απόδοσης (%)	37	38,29	40,3
Λόγος πίεσης συμπίεστή	32	32,1	35
Παροχή καυσαερίων (kg/sec)	630	632	-
Στροφές λειτουργίας (rpm)	3000	3000	3000
Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων (°C)	615	615	602,7

Πίνακας 2-13 Επιδόσεις του Alstom GT26 σε ISO συνθήκες

Στη συνέχεια γίνεται μια περιγραφή των βασικών συνιστωσών του αεριοστροβίλου GT26 και αναλύονται τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά:

Συμπιεστής:

Ο συμπιεστής είναι αξονικού τύπου και αποτελείται από 22 βαθμίδες. Πρόκειται για έναν αρκετά μεγάλο αριθμό βαθμίδων μέσω των οποίων επιτυγχάνει λόγο πίεσης ίσο με 35:1. Σημειώνεται ότι τόσο ο ρότορας του συμπιεστή όσο και αυτός του στρόβιλου, είναι κατασκευασμένοι με χρήση συγκολλήσεων και όχι με συναρμογή δίσκων, όπως συμβαίνει στους περισσότερους αεριοστρόβιλους της κατηγορίας του GT26. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγονται οι διακοπές της λειτουργίας του για επισκευή δίσκων και αντικατάσταση των πτερυγίων και αυξάνεται η διαθεσιμότητα του. Επίσης, από τις 22 συνολικά βαθμίδες του συμπιεστή, οι πρώτες 4 διαθέτουν πτερύγια μεταβλητής γεωμετρίας μέσω των οποίων ρυθμίζεται η ροή του αέρα που περνά από το συμπιεστή. Ο έλεγχος της μεταβλητής γεωμετρίας γίνεται μέσω στεφάνων που είναι τοποθετημένες πάνω στο κέλυφος του συμπιεστή και ρυθμίζουν την γωνία κλίσης των σταθερών πτερυγίων μέσω υδραυλικού συστήματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-46. Με αυτόν τον τρόπο προσαρμόζεται λειτουργία της μηχανής σε χαμηλά φορτία και βελτιώνεται η απόδοση της.

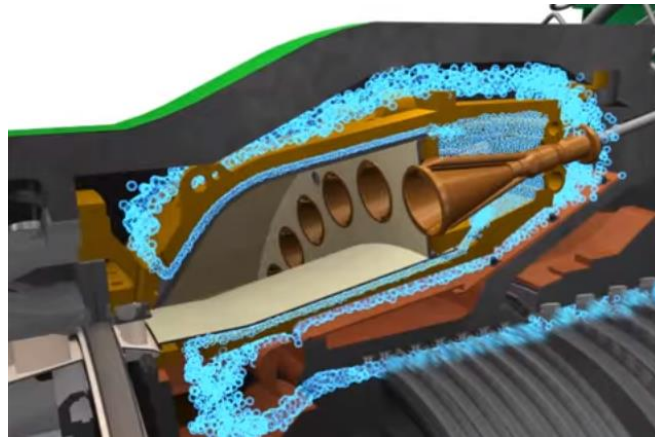


Σχήμα 2-46 Τομή συμπιεστή και ρυθμιστικές στεφάνες VSVs - Alstom GT26

Θάλαμος καύσης:

Το σύστημα διαδοχικής καύσης που διαθέτει ο GT26 σπάει την εξάρτιση υψηλής απόδοσης – υψηλής θερμοκρασίας εισόδου στο στρόβιλο. Πρόκειται για μια πιο περίπλοκη τεχνολογία που χωρίζει την καύση σε δύο στάδια, μεταξύ των οποίων παρεμβάλλεται μια βαθμίδα υψηλής πίεσης. Ο συμπιεσμένος αέρας εισάγεται στον θάλαμο καύσης δακτυλιοειδούς τύπου EV με 24 περιφερειακούς καυστήρες, όπου δημιουργείται ένα ομογενές μείγμα αέρα καυσίμου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-47. Το μείγμα αυτό τροφοδοτείται στο τμήμα της ανάφλεξης μέσω ειδικά διαμορφωμένων

κώνων που δημιουργούν τυρβώδη ροή. Η σχεδίαση αυτών των κώνων απεικονίζεται αντίστοιχα στο Σχήμα 2-48.

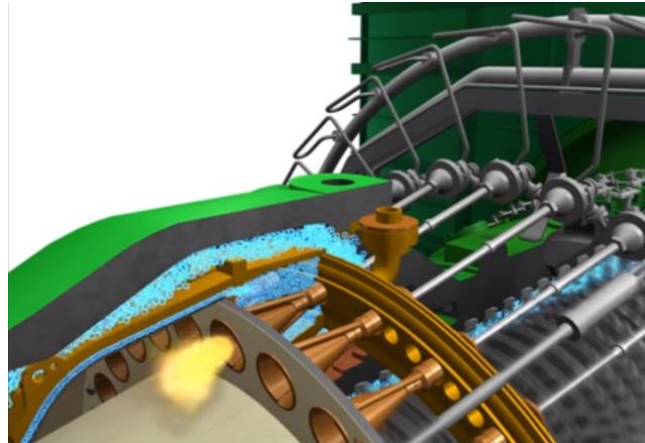


Σχήμα 2-47 Εισαγωγή του συμπιεσμένου αέρα στο πρώτο θάλαμο καύσης



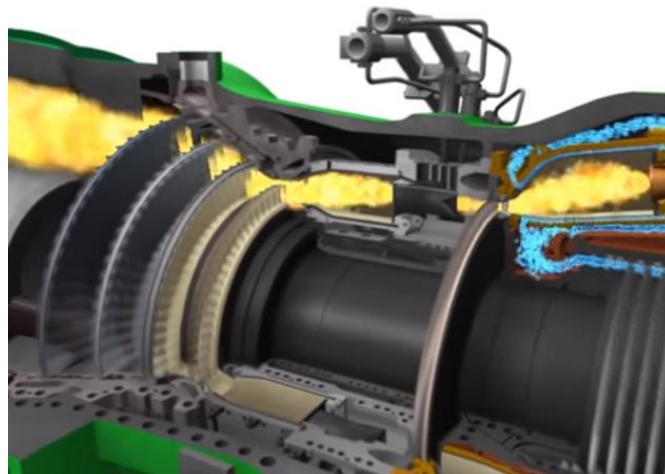
Σχήμα 2-48 Δημιουργία τυρβώδους ροής για βελτίωση της καύσης

Το μείγμα αναφλέγεται με τη βοήθεια των σπινθηριστών και δημιουργείται δακτυλιοειδής φλόγα σχετικά χαμηλής θερμοκρασίας, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2-49. Η φλόγα αυτή σταθεροποιείται στο κενό χώρο του θαλάμου καύσης, αποφεύγοντας έτσι την επαφή με το κέλυφος του. Αυτό ωφελεί στη δημιουργία μιας ομοιόμορφης θερμοκρασιακής ζώνης, αφού δεν απαιτείται η επιφανειακή ψύξη του κελύφους.



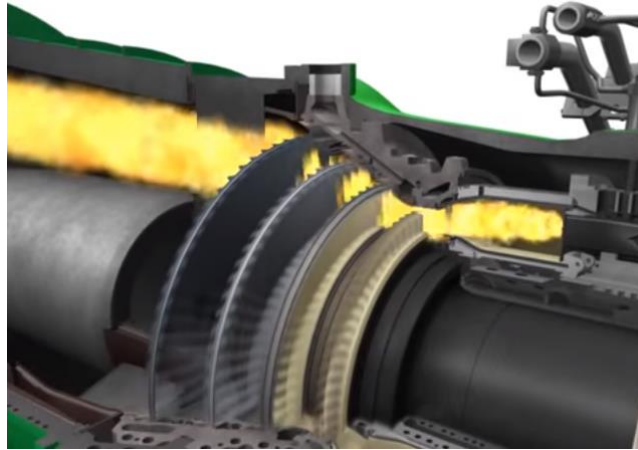
Σχήμα 2-49 Οι σπινθηριστές προκαλούν την ανάφλεξη του μείγματος

Τα καυσαέρια του πρώτου θαλάμου, έχοντας χαμηλή περιεκτικότητα σε οξυγόνο περνούν από τη βαθμίδα υψηλής πίεσης και εισάγονται στο δεύτερο θάλαμο. Το στάδιο αυτό της καύσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-50:



Σχήμα 2-50 Εκτόνωση των καυσαερίων στη βαθμίδα υψηλής πίεσης

Εκεί κατάλληλες διαμορφώσεις δημιουργούν εκ νέου τυρβώδη ροή για την πλήρη ανάμειξη του νέου μείγματος. Η φλόγα εμφανίζεται όταν το μείγμα αυτό φτάσει τη θερμοκρασία αυτανάφλεξης και έτσι το θερμό ρεύμα των καυσαερίων οδηγείται στις βαθμίδες χαμηλής πίεσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-51 .

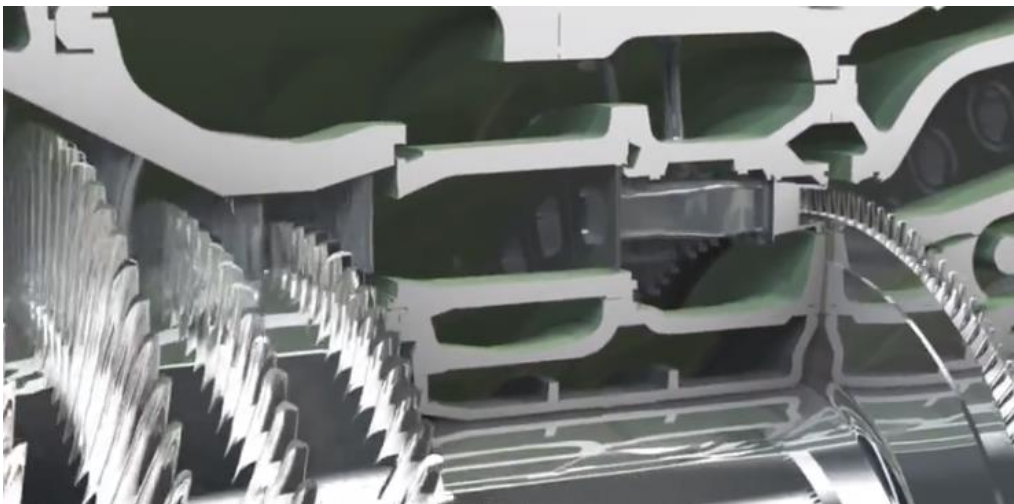


Σχήμα 2-51 Εκτόνωση των καυσαερίων στις βαθμίδες χαμηλής πίεσης

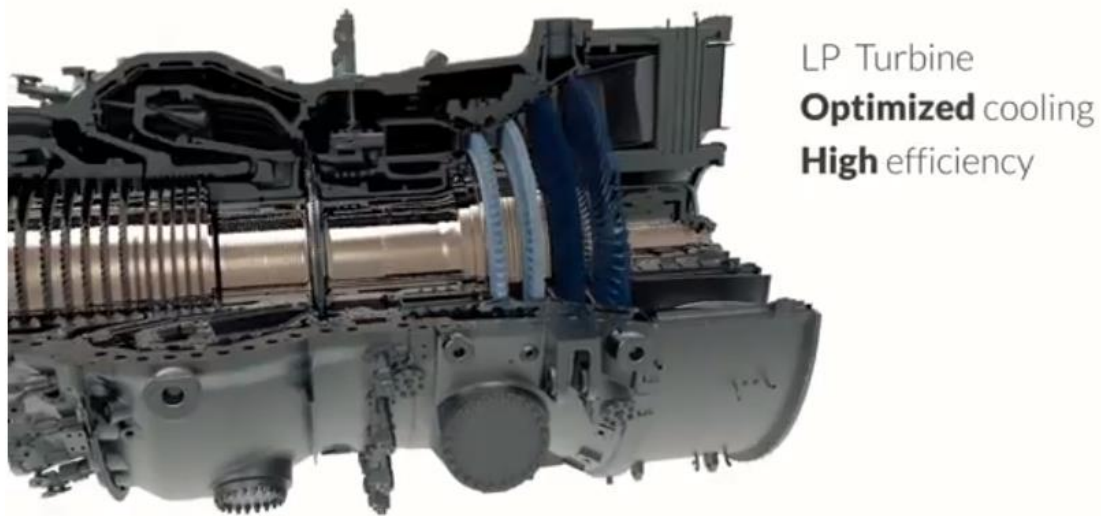
Με τη παραπάνω μέθοδο επιτυγχάνεται σαφής μείωση των εκπομπών NOx, αφού η θερμοκρασία στο πρώτο θάλαμο διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα, ενώ ο δεύτερος θάλαμος δεν συνεισφέρει σε δημιουργία οξειδίων του αζώτου. Τέλος σημειώνεται ότι στο πλήρες φορτίο συχνά η λειτουργία του δεύτερου θαλάμου καύσης περιορίζεται ή και απενεργοποιείται.

Στρόβιλος:

Μεταξύ των δύο θαλάμων καύσης παρεμβάλλεται μία βαθμίδα στρόβιλου, η οποία δέχεται ιδιαίτερα υψηλή ποσότητα ενέργειας. Για λόγους αντοχής τα πτερύγια αυτά κατασκευάζονται σε πολύ μικρές διαστάσεις, όπως χαρακτηριστικά απεικονίζονται στο Σχήμα 2-52. Τα καυσαέρια που εξέρχονται από το δεύτερο θάλαμο καύσης, εκτονώνονται στο στρόβιλο χαμηλής πίεσης ο οποίος αποτελείται από 4 βαθμίδες (Σχήμα 2-53).



Σχήμα 2-52 Πτερύγια βαθμίδας υψηλής πίεσης του στρόβιλου - Alstom GT26



Σχήμα 2-53 Βαθμίδες χαμηλής πίεσης του στροβίλου - Alstom GT26

Η ψύξη των θερμών μερών του στροβίλου επιτυγχάνεται με αέρα που απομαστεύεται από τέσσερα διαφορετικά σημεία του συμπιεστή. Ο αέρας αυτός ψύχει τη βαθμίδα υψηλής πίεσης και τις τρεις πρώτες βαθμίδες χαμηλής πίεσης του στροβίλου, μέσω ενός συνδυασμού επιφανειακής ψύξης (film cooling) και συναγωγής (convection cooling). Σημειώνεται ότι από τα τέσσερα κανάλια απομάστευσης του αέρα, τα δύο καταλήγουν απευθείας στα πτερύγια του στροβίλου, ενώ τα άλλα δύο περνούν μέσα από ψύκτες (coolers) που συμπεριλαμβάνονται στην εγκατάσταση.

Χαρακτηριστικές διατομές:

Οι χαρακτηριστικές διατομές της μηχανής υπολογίζονται με την ίδια μέθοδο που αναφέρεται στην ενότητα 2.3.1 και παρουσιάζονται παρακάτω στο Πίνακα 2-14:

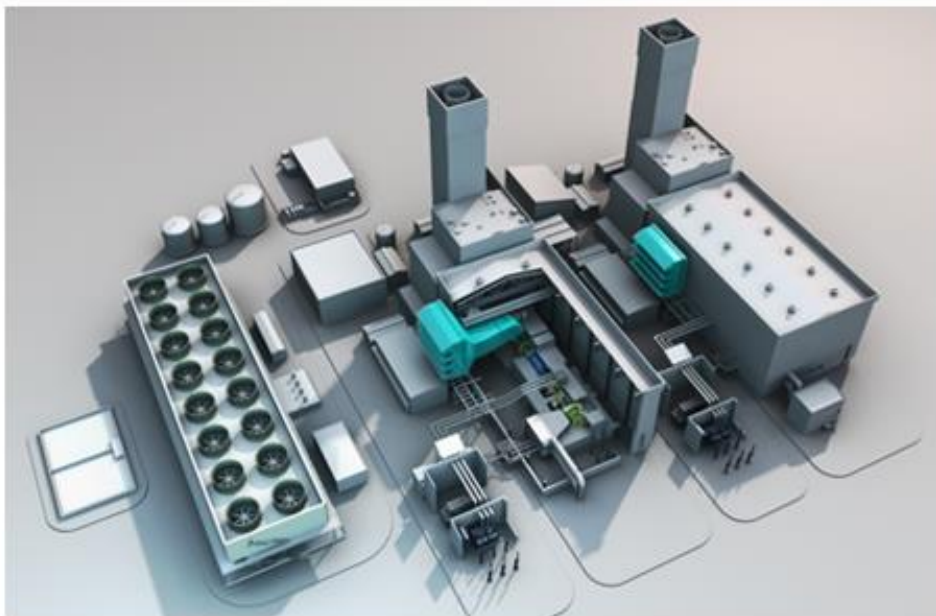
<i>Alstom GT26</i>						
διατομές	2	3	32	4	4*	5
	3,0319	0,6316	0,7698	0,8211	1,0856	4,0426

Πίνακας 2-14 Χαρακτηριστικές διατομές Alstom GT26

Στο Σχήμα 2-54 δίνεται εικόνα μιας πλήρους συναρμολόγησης ενός αεριοστροβίλου GT26 της Alstom, ενώ στο Σχήμα 2-55 δίνεται μια εικόνα της διάταξης μια σύγχρονης εγκατάστασης στο εξωτερικό.



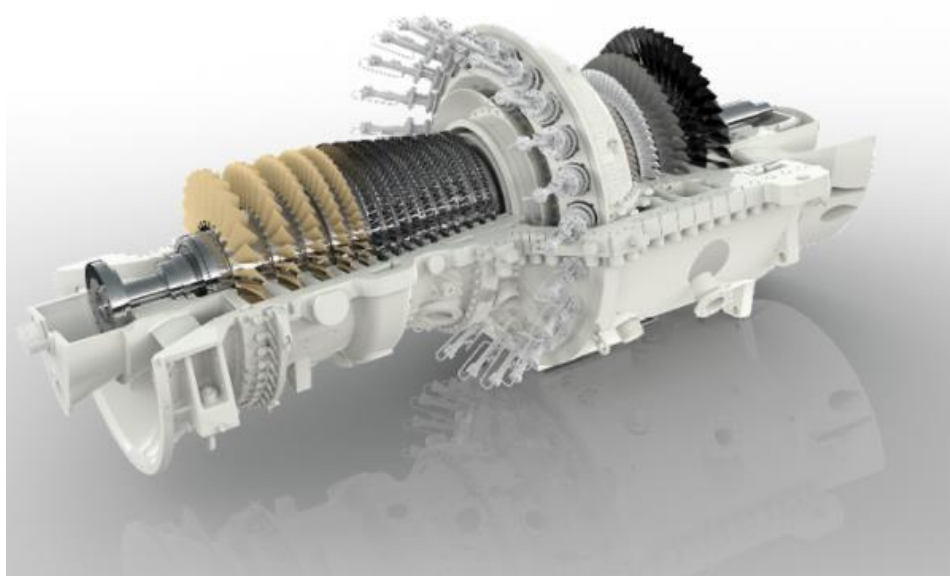
Σχήμα 2-54 Πλήρης συναρμολόγηση του αεριοστροβίλου Alstom GT26



Σχήμα 2-55 Σύγχρονη εγκατάσταση στη Βόρεια Bangkok της Ταϊλάνδης
Βιβλιογραφία ενότητας: [35] [36] [37]

2.3.6 Ansaldo V64.3

Με βάση τον επιτυχημένο αεριοστρόβιλο V94.3A, η Ansaldo κατασκεύασε σε μικρότερη κλίμακα τον V64.3 ο οποίος προσφέρει την ίδια αξιοπιστία σε ένα μικρότερο και πιο συμπαγές πακέτο. Πρόκειται για έναν αεριοστρόβιλο απλής ατράκτου, ο οποίος απαντάται σε εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας απλού ή συνδυασμένου κύκλου. Η γρήγορη εκκίνηση του επιτρέπει την λειτουργία του ακόμη και σε περιόδους όπου η ζήτηση ενέργειας είναι στο μέγιστο ή η κατάσταση του δικτύου είναι δυσχερής. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η ταχύτητα περιστροφής σχεδίασης του επιτυγχάνεται μέσα σε πέντε λεπτά, ενώ το πλήρες φορτίο αποδίδεται είκοσι λεπτά αργότερα. Το στοιχείο αυτό σε συνδυασμό με την ικανότητα του να λειτουργεί το ίδιο αποδοτικά με αέρια αλλά και υγρά καύσιμα, αλλά και οι μικρές του διαστάσεις τον καθιστούν μια ιδιαίτερα ευέλικτη και αποδοτική επιλογή για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε μικρότερης κλίμακας μονάδες. Σε ότι αφορά τις εκπομπές, αυτές κυμαίνονται στα $50 \text{ mg/Nm}^3 \text{ NO}_x$ και $30 \text{ mg/Nm}^3 \text{ CO}$ για λειτουργία με φυσικό αέριο. Εάν ως καύσιμο χρησιμοποιηθεί πετρέλαιο οι εκπομπές NO_x αυξάνονται στα 250 mg/Nm^3 . Η τιμή αυτή δύναται να μειωθεί στα 120 mg/Nm^3 εάν χρησιμοποιηθεί αναλογία 45% νερό μέσα στο καύσιμο. Η τομή του αεριοστρόβιλου V64.3 της Ansaldo παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-56.

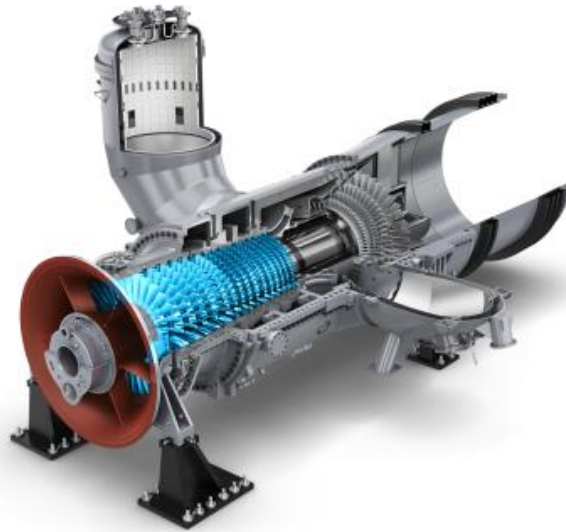


Σχήμα 2-56 Ansaldo V64.3

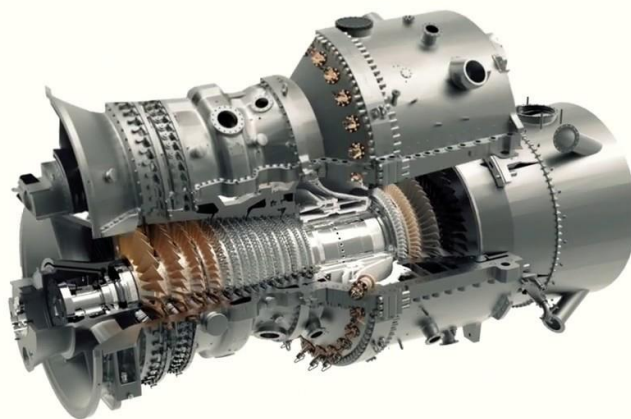
Ιστορία της μηχανής:

Η πρώτη εγκατάσταση συνδυασμένου κύκλου στην οποία συμμετείχε αεριοστρόβιλος μοντέλου V64.3 ήταν το 1996 στην Ολλανδία. Τρεις αεριοστρόβιλοι ισχύος 60 MW και ένας ατμοστρόβιλος ισχύος 180 MW συνδυάστηκαν σε εγκατάσταση με μέγιστη δυναμικότητα 339 MW. Ακόμη σημειώνεται ότι πριν το 2005, όταν η Ansaldo Energia έγινε πλέον ανεξάρτητη εταιρεία σχεδίασης, κατασκευής και παροχής των

αεριοστρόβιλων κλάσης V, ως κύρια κατασκευάστρια εταιρεία των V64.3 θεωρούνταν η Siemens. Έκτοτε η Siemens κατασκευάζει τον αεριοστρόβιλο SGT-1000(F) και η Ansaldo Energia τον AE64.3(V64.3) τον οποίο περιγράψαμε παραπάνω. Πρόκειται δηλαδή για μηχανές που προήλθαν από την ίδια σχεδίαση και πλέον κάθε εταιρεία προσθέτει νέες τεχνολογίες και βελτιώσεις στο αντίστοιχο δικό της μοντέλο. Στο Σχήμα 2-57 παρουσιάζεται ενδεικτικά σε τομή ο αεριοστρόβιλος SGT-1000F της Siemens, ενώ στο Σχήμα 2-58 δίνεται η τομή της σύγχρονης έκδοσης του V64.3 της Ansaldo, δηλαδή ο AE64.3.



Σχήμα 2-57 Siemens SGT-1000F



Σχήμα 2-58 Ansaldo AE64.3A

Οι βασικές επιδόσεις του V64.3 μετρημένες σε ISO συνθήκες παρουσιάζονται στον Πίνακα 2-15:

Μοντέλο	V64.3
Ισχύς (MW)	67,4
Θερμικός βαθμός απόδοσης (%)	34,8
Λόγος πίεσης συμπίεστη	-
Παροχή αέρα (kg/sec)	193
Στροφές λειτουργίας (rpm)	3000
Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων (°C)	591

Πίνακας 2-15 Βασικές επιδόσεις του V64.3 σε ISO συνθήκες

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των κυριότερων συνιστωσών του αεριοστροβίλου V64.3:

Αγωγός εισόδου:

Ο αέρας εισέρχεται ακτινικά, έπειτα μέσω του αγωγού εισόδου και των πτερυγίων IGVs οδηγείται αξονικά στην είσοδο του συμπίεστη. Στον αγωγό εισόδου περιλαμβάνονται φίλτρα καθαρισμού του αέρα και σύστημα μείωσης του θορύβου.

Συμπιεστής:

Ο συμπίεστής είναι αξονικού τύπου και αποτελείται από 15 βαθμίδες, μέσω των οποίων επιτυγχάνεται λόγος πίεσης της τάξης του 15,8:1 . Οι τέσσερις πρώτες βαθμίδες είναι εξοπλισμένες με πτερύγια μεταβλητής γεωμετρίας (VSVs), για ρύθμιση της ροής στα χαμηλά ή μερικά φορτία. Ο ρότορας του συμπίεστη αποτελείται από διαδοχικούς δίσκους που αντιστοιχούν σε κάθε μια βαθμίδα, οι οποίοι ενώνονται μεταξύ τους και προκύπτει ένα συμπαγές σύνολο που στηρίζεται σε δύο έδρανα εκατέρωθεν των βαθμίδων. Επίσης σημειώνεται ότι από τη 10^η βαθμίδα του συμπίεστη έως και τη τελευταία βαθμίδα του στροβίλου, η μηχανή διαθέτει διπλό κέλυφος. Το πλεονέκτημα αυτής της σχεδίασης είναι ο διαχωρισμός των θερμικών και μηχανικών φορτίων. Έτσι όλο το μηχανικό φορτίο λόγω της πίεσης λαμβάνεται από το εξωτερικό κέλυφος, στο οποίο το θερμικό φορτίο είναι χαμηλό και όλο το θερμικό φορτίο λαμβάνεται από το εσωτερικό κέλυφος υψηλής αντοχής στη θερμότητα. Από την πλευρά του συμπίεστη είναι συνδεδεμένη και η γεννήτρια της εγκατάστασης μέσω ενδιάμεσου άξονα και κιβωτίου που μειώνει την ταχύτητα περιστροφής του ρότορα της μηχανής από τις 5400 rpm στις σύγχρονες στροφές της γεννήτριας 3000 rpm. Στο Σχήμα 2-59 απεικονίζεται η σειρά των πτερυγίων IGVs στην είσοδο του συμπίεστη του V64.3.

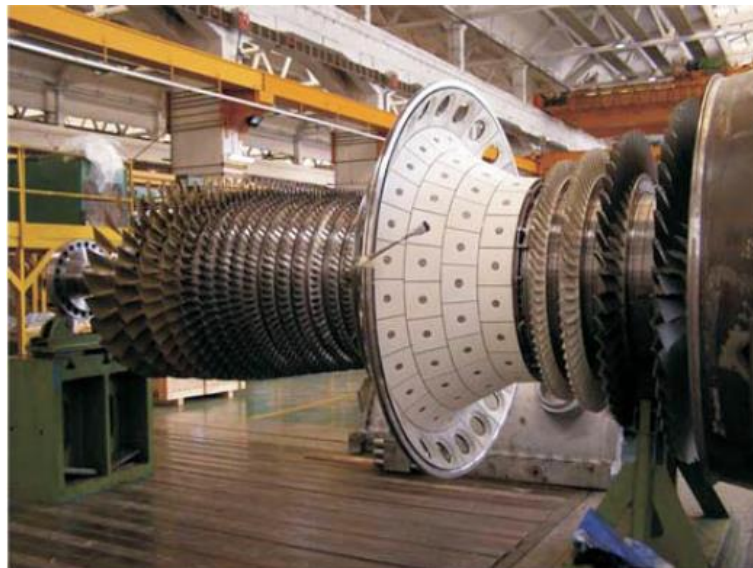


Σχήμα 2-59 Πτερύγια IGVs - Ansaldo V64.3

Θάλαμος καύσης:

Ο θάλαμος καύσης είναι δακτυλιοειδούς τύπου και διαθέτει 24 υβριδικούς καυστήρες, που λειτουργούν με προανάμιξη αέρα καυσίμου. Στο σύστημα της καύσης περιλαμβάνονται επίσης δύο ομόκεντροι στροβιλιστές, μέσω των οποίων το μείγμα αέρα καυσίμου διοχετεύεται με τυρβώδη ροή στο εσωτερικό του θαλάμου. Ο συγκεκριμένος θάλαμος καύσης που έχει σχεδιάσει η Ansaldo και ο οποίος φαίνεται στο Σχήμα 2-60, παρουσιάζει όλα τα πλεονεκτήματα της ιδανικής καύσης, δηλαδή:

- Χαμηλές εκπομπές NOx και CO
- Χαμηλή πτώση πίεσης
- Συμμετρική σχεδίαση
- Ιδανικό αριθμό και μέγεθος καυστήρων
- Συμπαγή κατασκευή με εύκολη πρόσβαση για συντήρηση



Σχήμα 2-60 Ρότορας και θάλαμος καύσης V64.3

Στρόβιλος:

Ο στρόβιλος είναι αξονικού τύπου και αποτελείται από 4 βαθμίδες εκτόνωσης. Τα πτερύγια της πρώτης βαθμίδας κατασκευάζονται σε ειδικά καλούπια χύτευσης και ως υλικό χρησιμοποιείται ένα κράμα βασισμένο στο κοβάλτιο, για αυξημένη αντοχή στις δυσμενείς θερμοκρασιακές συνθήκες. Επίσης διαθέτουν διαμορφώσεις που επιτρέπουν την ψύξη τους με αέρα που διέρχεται από το εσωτερικό τους και εξέρχεται από την επιφάνεια και την ακμή εκφυγής τους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-61. Ο αέρας ψύξης των πτερυγίων προέρχεται από απομάστευση συμπιεσμένου αέρα από το συμπιεστή και αφού ψύξει τα πτερύγια εισέρχεται στη θερμή ροή των καυσαερίων. Εξωτερικά τα πτερύγια είναι επικαλυμμένα με υλικό υψηλής αντοχής στη θερμότητα και εσωτερικά με αλουμίνιο.

**Σχήμα 2-61 Διαμορφώσεις των πτερυγίων του στροβίλου για την ψύξη μέσω αέρα**

Η δεύτερη και η τρίτη βαθμίδα διαθέτουν επίσης πτερύγια που κατασκευάζονται μέσω χύτευσης και αποτελούνται από κράμα βασισμένο στο νικέλιο.

Αγωγός εξόδου:

Ο αγωγός εξόδου είναι αξονικής διεύθυνσης, στοιχείο το οποίο διευκολύνει την εγκατάσταση του V64.3 σε συνδυασμένο κύκλο με χρήση Λέβητα Ανάκτησης Θερμότητας.

Χαρακτηριστικές διατομές:

Οι χαρακτηριστικές διατομές της μηχανής υπολογίζονται με την ίδια μέθοδο που αναφέρεται στην ενότητα 2.3.1 και παρουσιάζονται παρακάτω στο Πίνακα 2-16:

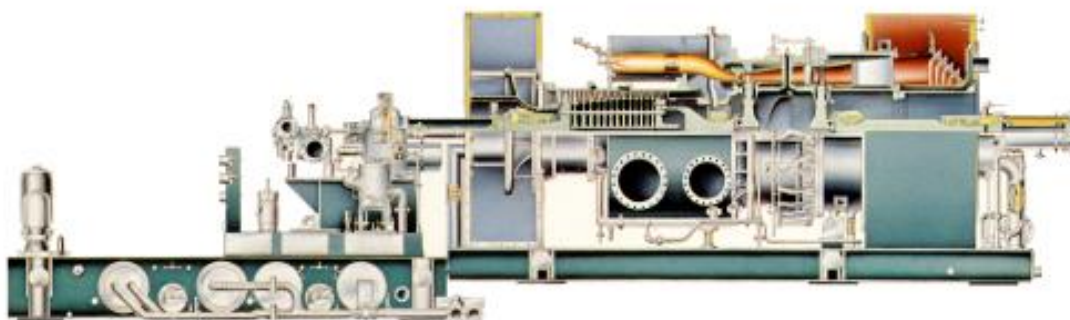
Ansaldo V64.3					
διατομές	2	3	32	4	5
	0,9259	0,2034	0,1198	0,5187	1,5278

Πίνακας 2-16 Χαρακτηριστικές διατομές Ansaldo V64.3

Βιβλιογραφία ενότητας: [38] [39] [40] [41] [42] [43]

2.3.7 Thomassen PG5341

Ο PG5341 αποτελεί έναν αεριοστρόβιλο απλής ατράκτου και αποτελεί ένα αρκετά παλιό μοντέλο αεριοστρόβιλου και έτσι τα δεδομένα που εντοπίζουμε στη βιβλιογραφία είναι περιορισμένα. Σημειώνεται ότι τη περίοδο την οποία κυκλοφόρησε, οι σύγχρονοι και επικρατέστεροι κατασκευαστές αναλάμβαναν την κατασκευή του πλήρους πακέτου της μηχανής σε συνεργασία με άλλες κατασκευαστικές. Έτσι ο PG5341, ο οποίος απεικονίζεται στο Σχήμα 2-62, μπορεί να αναφέρεται ως ένας αεριοστρόβιλος της Thomassen, αλλά με βάση τα δεδομένα που διαθέτουμε καθιερώθηκε και κυκλοφόρησε κυρίως ως MS5001P της General Electric.



Σχήμα 2-62 Thomassen PG5341

Στον Πίνακα 2-17 παρουσιάζονται οι επιδόσεις του MS5001P (PG5341) σε ISO συνθήκες:

Μοντέλο	MS5001P (Υγρό καύσιμο/Φυσικό αέριο)			
	Βασικό φορτίο		Φορτίο αιχμής	
Ισχύς (MW)	25,42	25,89	27,28	27,78
Θερμικός βαθμός απόδοσης (%)	27,9	28,2	28,2	28,4
Λόγος πίεσης συμπίεστή	10,2		-	
Παροχή αέρα(kg/s)	121,1		122,0	
Στροφές στρόβιλου (rpm)	5105			
Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων(°C)	491,1		518,8	
Καύσιμο	Υγρό καύσιμο	Φυσικό αέριο	Υγρό καύσιμο	Φυσικό αέριο

Πίνακας 2-17 Επιδόσεις PG5341 σε ISO συνθήκες

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των κυριότερων συνιστωσών του αεριοστρόβιλου:

Συμπιεστής:

Ο PG5341 είναι εξοπλισμένος με ένα αξονικό συμπιεστή 17 βαθμίδων, ο οποίος βρίσκεται μέσα σε οριζόντιο και διαιρούμενο κέλυφος και επιτυγχάνει λόγο πίεσης

10,2:1. Στο σημείο σχεδίασης η ταχύτητα περιστροφής του συμπιεστή είναι 5105 rpm, η οποία μετατρέπεται στις σύγχρονες στροφές μέσω κιβωτίου ταχυτήτων. Στην είσοδο του είναι τοποθετημένα οδηγητικά πτερύγια (IGVs), τα οποία ρυθμίζουν την εισερχόμενη παροχή αέρα στα διάφορα σημεία λειτουργίας της μηχανής. Τα οδηγητικά πτερύγια είναι συνδεδεμένα σε στεφάνη μέσω της οποίας και με τη βοήθεια υδραυλικού συστήματος ελέγχου, περιστρέφονται κατάλληλα αυξάνοντας ή μειώνοντας την διερχόμενη παροχή.

Θάλαμος καύσης:

Ο θάλαμος καύσης είναι σωληνο-δακτυλιοειδής και τύπου αντιρροής. Διαθέτει 10 καυστήρες, σε κάθε έναν από τους οποίους εντοπίζεται ένας εγχυτήρας καυσίμου. Οι εγχυτήρες καυσίμου λειτουργούν με ατμοποίηση, δηλαδή το καύσιμο ψεκάζεται στο θάλαμο καύσης και μέσω των σπινθηριστών γίνεται η έναρξη της φλόγας. Συνολικά εντοπίζονται δύο σπινθηριστές, ένας στον 8^ο καυστήρα και ένας στον 9^ο. Οι σπινθηριστές λειτουργούν με παροχή υψηλής τάσης σε ηλεκτρόδια, τα οποία έπειτα από την έναρξη της φλόγας υποχωρούν και καλύπτονται αυτόματα εξαιτίας της πίεσης που αναπτύσσεται. Παράλληλα για τον έλεγχο της φλόγας, υπάρχουν δύο ανιχνευτές στον 2^ο και στον 3^ο καυστήρα αντίστοιχα. Ως καύσιμο χρησιμοποιείται ένα μεγάλο εύρος υγρών και αέριων καυσίμων, χωρίς να επηρεάζεται ιδιαίτερα ο βαθμός απόδοσης της μηχανής.

Στρόβιλος:

Ο στρόβιλος είναι αξονικού τύπου και αποτελείται από δύο βαθμίδες. Από τις δύο βαθμίδες ψύχονται μόνο τα πτερύγια της πρώτης με αέρα που απομαστεύεται από την 10^η βαθμίδα του συμπιεστή.

Οι αγωγοί εισόδου και εξόδου του αεριοστροβίλου, δεν περιλαμβάνονται στο πακέτο της εγκατάστασης, επομένως δεν διαθέτουμε σχετικές πληροφορίες.

Βοηθητικά συστήματα:

Ο άξονας της μηχανής στηρίζεται σε δύο έδρανα: ένα περιστροφικό και ένα ωστικό – περιστροφικό. Ακόμη στην εγκατάσταση περιλαμβάνεται κιβώτιο ταχυτήτων τύπου S624 με σχέση μετάδοσης 5105/3600. Ο έλεγχος της μηχανής γίνεται μέσω πίνακα που βρίσκεται στο εσωτερικό της καμπίνας ελέγχου και είναι συνδεδεμένος με σύστημα ελέγχου Speedtronic MK II. Τέλος η εκκίνηση του αεριοστροβίλου γίνεται με τη βοήθεια μηχανής diesel 12V-7 1 –N η οποία παράγει 630 ίππους ισχύος στις 2300 rpm.

Χαρακτηριστικές διατομές:

Οι χαρακτηριστικές διατομές της μηχανής υπολογίζονται με την ίδια μέθοδο που αναφέρεται στην ενότητα 2.3.1 και παρουσιάζονται παρακάτω στο Πίνακα 2-18:

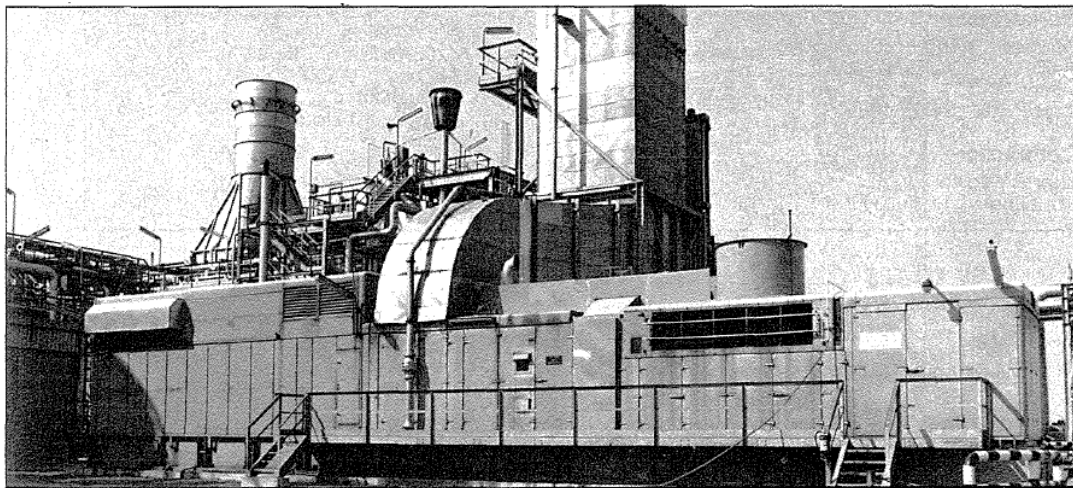
Thomassen PG5341						
διατομές	2	3	32	4	44	5
	0,5810	0,2959	0,2959	0,2367	0,9683	1,4560

Πίνακας 2-18 Χαρακτηριστικές διατομές Thomassen PG5341

Στα σχήματα Σχήμα 2-63 και Σχήμα 2-64 παρουσιάζονται εικόνες από εγκατάσταση αεροστροβίλου PG5341 της Thomassen.



Σχήμα 2-63 Εικόνες από εγκατάσταση ενός MS5001P



Σχήμα 2-64 Εικόνα εγκατάστασης ενός MS5001P

Βιβλιογραφία ενότητας: [44] [45] [46]

3

Περιγραφή λογισμικού

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η ανάπτυξη του λογισμικού για την προσαρμογή μοντέλου βιομηχανικών αεριοστροβίλων απλής ατράκτου, στο υπολογιστικό πρόγραμμα PROOSIS. Προτείνεται και αναλύεται μία γενική μέθοδος προσομοίωσης της λειτουργίας των μηχανών αυτής της διάταξης, όπου ο χρήστης έχει την δυνατότητα μέσω ενός αρχείου εισόδου να ελέγχει τις παραμέτρους, τα δεδομένα λειτουργίας που θα χρησιμοποιηθούν αλλά και τις λειτουργίες που θα εκτελεσθούν.

Αρχικά λοιπόν, περιγράφεται σταδιακά η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την δημιουργία του προγράμματος στο περιβάλλον του PROOSIS και έπειτα περιγράφεται πώς μπορεί ο χρήστης να χρησιμοποιήσει το πρόγραμμα, έτσι ώστε να δημιουργήσει το δικό του μοντέλο ενός αεριοστροβίλου.

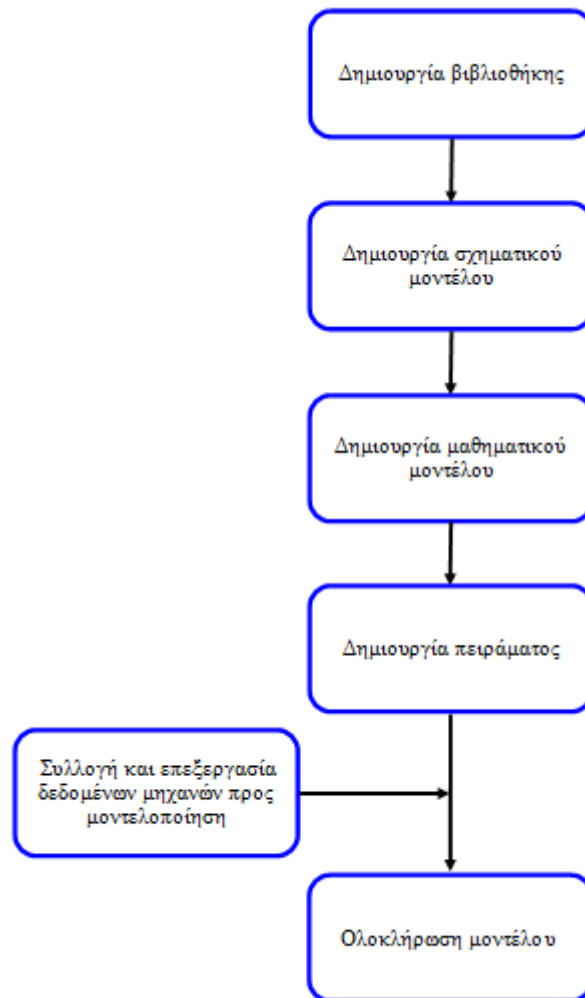
3.1 Γενικός σχεδιασμός προγράμματος

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στη παρούσα διπλωματική γίνεται μοντελοποίηση δύο αεριοστροβίλων που λειτουργούν στην Ελλάδα. Για τη μοντελοποίηση των μηχανών αυτών κατασκευάστηκε ένας κώδικας γενικευμένου χαρακτήρα μέσω του λογισμικού PROOSIS. Το PROOSIS είναι ένα ανεξάρτητο, ευέλικτο και επεκτάσιμο περιβάλλον προσομοίωσης, το οποίο χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση της λειτουργίας αεριοστροβιλικών μηχανών. Ως λογισμικό μπορεί να επιτελέσει όλων των ειδών τις προσομοιώσεις που αφορούν τους αεριοστροβίλους, ακόμη και αυτές των βοηθητικών συστημάτων που συναντώνται στις αντίστοιχες εγκαταστάσεις. Σε κάθε προσομοίωση ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εκτελέσει υπολογισμούς όπως:

- Υπολογισμός του σημείου σχεδίασης (design point)
- Υπολογισμός σημείων εκτός σχεδίασης (off design point)
- Ανάλυση ευαισθησίας γύρω από ένα σημείο λειτουργίας (sensitivity study)
- Παραμετρική μελέτη (parametric study)
- Βελτιστοποίηση ενός σημείου σχεδίασης (optimization)
- Διαγνωστική μελέτη (diagnostics)

Με αυτό τον τρόπο το PROOSIS αποτελεί ένα εργαλείο ιδιαίτερα χρήσιμο για κάθε φάση του κύκλου ζωής μιας μηχανής, από το αρχικό στάδιο σχεδίασης έως την πιστοποίηση των επιδόσεων και την συντήρηση αυτής. Η γλώσσα που χρησιμοποιεί είναι EL, μια υψηλού επιπέδου γλώσσα προγραμματισμού με αντικειμενοστραφή λειτουργία. Το πιο σημαντικό στοιχείο της γλώσσας αποτελεί το component ή αλλιώς η συνιστώσα. Αυτό περιέχει τη μαθηματική περιγραφή της πραγματικής συνιστώσας ενός αεριοστροβίλου (π.χ. συμπιεστής, στρόβιλος, θάλαμος καύσης, ακροφύσιο). Τα components επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω Ports/θυρών. Αυτές οι θύρες καθορίζουν τις μεταβλητές που εναλλάσσονται μεταξύ των συνδεδεμένων συνιστωσών. Τα components και τα αντίστοιχα Ports είναι αποθηκευμένα σε βιβλιοθήκες, τις οποίες έχουν δημιουργήσει εξειδικευμένοι διαχειριστές του λογισμικού και οι οποίες δεν είναι εφικτό να επεξεργαστούν από τον χρήστη. Ο χρήστης μπορεί ωστόσο να χρησιμοποιήσει τις βιβλιοθήκες αυτές και να δημιουργήσει ένα σχηματικό μοντέλο. Το μόνο που χρειάζεται είναι να μεταφέρει τα εικονίδια που αντιπροσωπεύουν τα components που χρειάζεται σε ένα παράθυρο σχηματικού και να τα συνδέσει με τα κατάλληλα ports. Για τη σωστή δημιουργία ενός μοντέλου ο χρήστης απαιτείται να γνωρίζει τις μαθηματικές σχέσεις που διέπουν τα components έτσι ώστε να είναι σε θέση να δημιουργήσει και να επεξεργαστεί το μαθηματικό μοντέλο. Το μαθηματικό μοντέλο ονομάζεται Partition και κατασκευάζεται με τη βοήθεια οδηγού που παρέχει το PROOSIS. Έτσι προκατασκευασμένοι αλγόριθμοι λαμβάνουν υπόψη τους τις μαθηματικές εξισώσεις του μοντέλου, λύνουν πιθανά προβλήματα που αφορούν μαθηματικές αοριστίες και προτείνουν κατάλληλες οριακές μεταβλητές. Για δεδομένο Partition, δηλαδή αφού έχει ολοκληρωθεί το μαθηματικό μοντέλο, ο χρήστης μπορεί να εκτελέσει τις λειτουργίες που αναφέρθηκαν παραπάνω, είτε μέσω του οδηγού είτε κατασκευάζοντας κώδικα σε EL.

Τα βήματα που ακολουθούνται για την δημιουργία του ζητούμενου προγράμματος φαίνονται σχηματικά παρακάτω:



Σχήμα 3-1 Ακολουθία δημιουργίας προγράμματος μοντέλου

Το βήμα που αναφέρεται στην συλλογή των δεδομένων, πρακτικά ολοκληρώθηκε κατά την αναζήτηση των αεριοστροβίλων, όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2, ενώ τα δεδομένα που συλλέχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για την μοντελοποίηση επιλεγμένων αεριοστροβίλων αναλύονται στο επόμενο. Τα βήματα του κορμού που απαιτούνται για την δημιουργία του μοντέλου στο PROOSIS αναλύονται στις ενότητες παρακάτω.


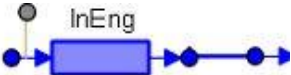
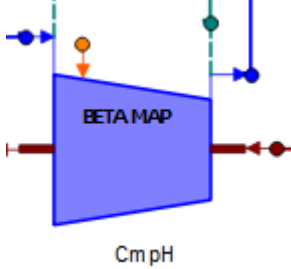
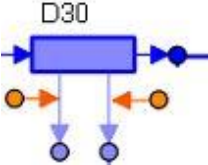
3.1.1 Δημιουργία βιβλιοθήκης

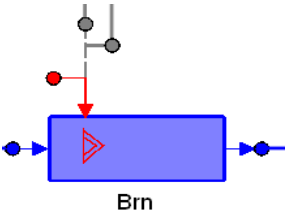
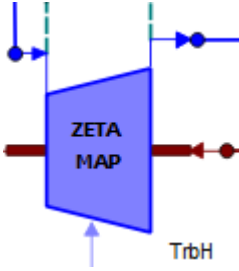

Κατά την εκκίνηση του προγράμματος PROOSIS ο χρήστης ανοίγει ένα χώρο εργασίας (workspace). Οι χώροι εργασίας δημιουργούνται έτσι ώστε να διαχωρίζονται οι βιβλιοθήκες που φορτώνει το πρόγραμμα, ανάλογα με το χρήστη που εισέρχεται σε αυτό και την εργασία που επιθυμεί να εκτελέσει. Στο χώρο εργασίας του κάθε χρήστη μπορεί να φορτώνει τόσο τις δικές του προσωπικές βιβλιοθήκες όσο και τις βασικές βιβλιοθήκες που παρέχει το λογισμικό. Η πιο βασική βιβλιοθήκη είναι η TURBO, στην οποία


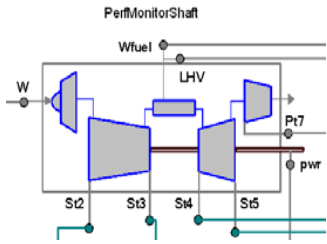
εμπεριέχονται οι συνιστώσες των αεριοστροβίλων, χάρτες λειτουργίας καθώς και συναρτήσεις υπολογισμού μεγεθών που χρησιμοποιούνται στη θεωρία μελέτης των αεριοστροβίλων. Παράλληλα ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει τη δική του βιβλιοθήκη, στην οποία αποθηκεύονται οι συνιστώσες (components) που ενδεχομένως έχει δημιουργήσει, τα σχηματικά διαγράμματα (schematics), τα μαθηματικά τους μοντέλα (partition), συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται (functions) και τα πειράματα (experiments) που αφορούν ένα μοντέλο. Στην προσωπική βιβλιοθήκη του χρήστη εντοπίζονται ακόμα αρχεία εισόδου δεδομένων, αρχεία δεδομένων χαρτών και ότι άλλο αφορά την εκτέλεση μιας προσομοίωσης της λειτουργίας ενός αεριοστροβίλου στο PROOSIS. Επομένως ότι δημιουργεί ο χρήστης μέσω του λογισμικού, αποθηκεύεται στην προσωπική του βιβλιοθήκη. Στην περίπτωση μας δημιουργήθηκε ξεχωριστή βιβλιοθήκη για τη μοντελοποίηση των βιομηχανικών αεριοστροβίλων απλής ατράκτου.

3.1.2 Δημιουργία σχηματικού

Το μοντέλο ενός αεριοστροβίλου στο περιβάλλον του PROOSIS αναπαρίσταται ως ένα σχηματικό διάγραμμα, στο οποίο εισάγονται οι επιμέρους συνιστώσες που τον αποτελούν και συνδέονται μεταξύ τους. Κάθε συνιστώσα (component) εμπεριέχει όλες τις μεταβλητές που αφορούν την λειτουργία της, δηλαδή αποτελεί τη μαθηματική αποτύπωση μιας φυσικής συνιστώσας, ενώ η σύνδεση των μεταβλητών αυτών στα όρια των συνιστωσών επιτυγχάνεται με χρήση κατάλληλων θυρών (ports). Ειδικότερα, για την δημιουργία του σχηματικού στο οποίο βασίζεται η μοντελοποίηση αεριοστροβίλων απλής ατράκτου, χρησιμοποιήθηκαν οι συνιστώσες που παρέχει η βιβλιοθήκη TURBO. Ο συμβολισμός κάθε συνιστώσας μαζί με μια περιγραφή της βασικής λειτουργίας της, δίνονται στον παρακάτω Πίνακα 3-1:

A/A	Εικόνα	Περιγραφή	Σχόλια
-		<p><u>Gen</u>: Εισάγεται στο σχηματικό για να καθορίσει το είδος του καυσίμου που περιέχεται στο καυσαέριο και τη θερμοδυναμική συμπεριφορά του.</p>	
1		<p><u>InEng</u>: Αντιστοιχεί στη φυσική συνιστώσα του αγωγού εισόδου. Λαμβάνει υπόψη τις συνθήκες εισόδου, το μοντέλο απωλειών πίεσης, τα φαινόμενα μετάδοσης θερμότητας και τις χαρακτηριστικές διατομές και υπολογίζει τις συνθήκες εξόδου του αέρα από τον αγωγό.</p>	<p>Μέσω του σχηματικού ορίζονται οι απώλειες ολικής πίεσης και οι χαρακτηριστικές διατομές.</p>
2		<p><u>CmpH</u>: Αντιστοιχεί στη φυσική συνιστώσα του συμπιεστή. Χρησιμοποιεί χάρτη με γραμμές βήτα (BETA Parameter). Υπολογίζει τα μεγέθη στην έξοδο του συμπιεστή και την ισχύ που απαιτείται για την συμπίεση.</p>	<p>Μέσω του σχηματικού καθορίζεται ο χάρτης που θα χρησιμοποιηθεί και οι συντελεστές κλίμακας που επιβάλλει η μεταβλητή γεωμετρία.</p>
3		<p><u>D30</u>: Αντιστοιχεί στον αγωγό που συνδέει το συμπιεστή με το θάλαμο κάυσης της μηχανής και διαθέτει δύο κανάλια απομάστευσης. Λαμβάνει υπόψη τις απώλειες πίεσης, τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας και τις χαρακτηριστικές διατομές και υπολογίζει τις συνθήκες εξόδου από τον αγωγό.</p>	<p>Μέσω του σχηματικού ορίζονται ποσοστά απομαστεύσεων, απώλειες πίεσης και διατομές.</p>

4	 <p style="text-align: center;">Bm</p>	<p><u>Bm</u>: Αντιστοιχεί στο θάλαμο καύσης του αεριοστροβίλου. Μέσω αυτού ορίζονται οι απώλειες πίεσης, ο βαθμός απόδοσης της καύσης, οι χαρακτηριστικές διατομές και οι θερμοδυναμικές ιδιότητες του καυσίμου που χρησιμοποιείται. Ως αποτέλεσμα δίνει τις συνθήκες εξόδου των καυσαερίων που τροφοδοτούνται προς εκτόνωση στο στρόβιλο.</p>	<p>Μέσω του σχηματικού ορίζονται οι απώλειες πίεσης, ο βαθμός απόδοσης του καυστήρα και η διατομή του.</p>
5	 <p style="text-align: center;">TrbH</p>	<p><u>TrbH</u>: Αντιστοιχεί στη φυσική συνιστώσα του στροβίλου. Χρησιμοποιεί χάρτη με γραμμές ζ (ZETA Parameter). Ως συνιστώσα υπολογίζει τα μεγέθη στην έξοδο του στροβίλου και το συνολικό έργο που παράγεται.</p>	<p>Καθορίζεται ο χάρτης που θα χρησιμοποιηθεί, η διατομή στην είσοδο της ισοδύναμης θεωρητικής βαθμίδας και η διατομή στην έξοδο του στροβίλου. Ορίζονται επίσης τα ποσοστά κατανομής της παροχής ψύξης στο στάτορα και στο ρότορα καθώς και το ποσοστό της παροχής ψύξης το οποίο παράγει έργο.</p>
6	 <p style="text-align: center;">D50</p>	<p><u>D50</u>: Αντιστοιχεί στον αγωγό εξόδου του αεριοστροβίλου και είναι αντίστοιχο component με το InEng. Και σε αυτή την περίπτωση ορίζονται οι απώλειες πίεσης, τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας και οι αντίστοιχες διατομές και έτσι υπολογίζονται οι συνθήκες εξόδου των καυσαερίων στην ατμόσφαιρά (ή στο ΛΑΘ εάν έχουμε συνδυασμένο κύκλο).</p>	<p>Μέσω του σχηματικού ορίζονται οι απώλειες ολικής πίεσης και οι χαρακτηριστικές διατομές.</p>

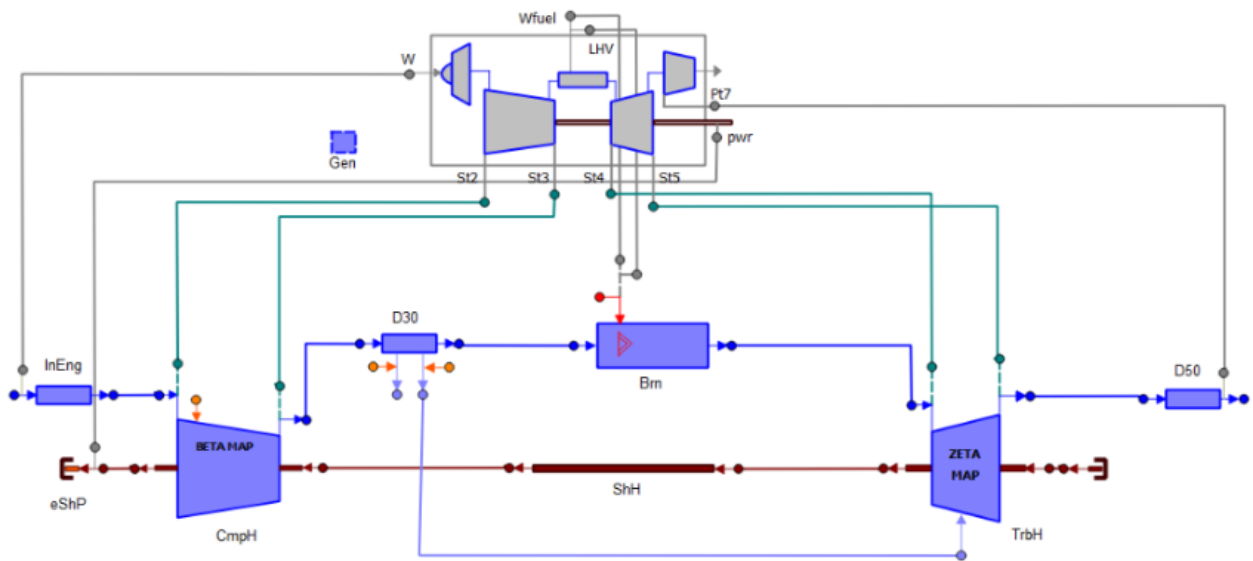
7		<p>ShH: Το component αυτό αντιστοιχεί στον άξονα του αεριοστροβίλου. Μέσω του σχηματικού υπάρχει δυνατότητα καθορισμού του μηχανικού βαθμού απόδοσης και υπολογίζεται έτσι η ροπή που προσφέρει η άτρακτος στη γεννήτρια ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής.</p>	<p>Μέσω του σχηματικού ορίζεται ο μηχανικός βαθμός απόδοσης του άξονα.</p>
8		<p>Perf: Το component αυτό αναπαριστά τον πίνακα ελέγχου του αεριοστροβίλου. Συνδέεται με όλες τις υπόλοιπες συνιστώσες, λαμβάνει τα απαραίτητα δεδομένα και τελικά υπολογίζει χαρακτηριστικά μεγέθη επιδόσεων της μηχανής όπως η ισχύς εξόδου, ο βαθμός απόδοσης και η ειδική κατανάλωση καυσίμου.</p>	

Πίνακας 3-1 Παρουσίαση των components που χρησιμοποιήθηκαν

Παρατηρήσεις:

Σημειώνεται ότι components που αντιστοιχούν σε συνιστώσες όπως η γεννήτρια, ο μειωτήρας στροφών ή άλλες διατάξεις που ενδέχεται να συμπεριλαμβάνονται στην εγκατάσταση του αεριοστροβίλου (π.χ. εναλλάκτης θερμότητας), δεν εισάγονται στο σχηματικό. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται ο γενικευμένος χαρακτήρας του προγράμματος που αναπτύσσεται.

Συνδέοντας τα παραπάνω components μεταξύ τους, δημιουργείται το σχηματικό διάγραμμα μοντελοποίησης αεριοστροβίλων απλής ατράκτου που απεικονίζεται στο Σχήμα 3-2:



Σχήμα 3-2 Σχηματικό μοντέλου

Σημαντικό είναι να τονισθεί, ότι αν και στο σχηματικό υπάρχουν τυπικές τιμές για σχεδόν όλες τις παραμέτρους που αφορούν το μοντέλο, ο χρήστης μπορεί να τις αλλάξει μέσω του αρχείου εισόδου, όπως θα αναλυθεί παρακάτω.

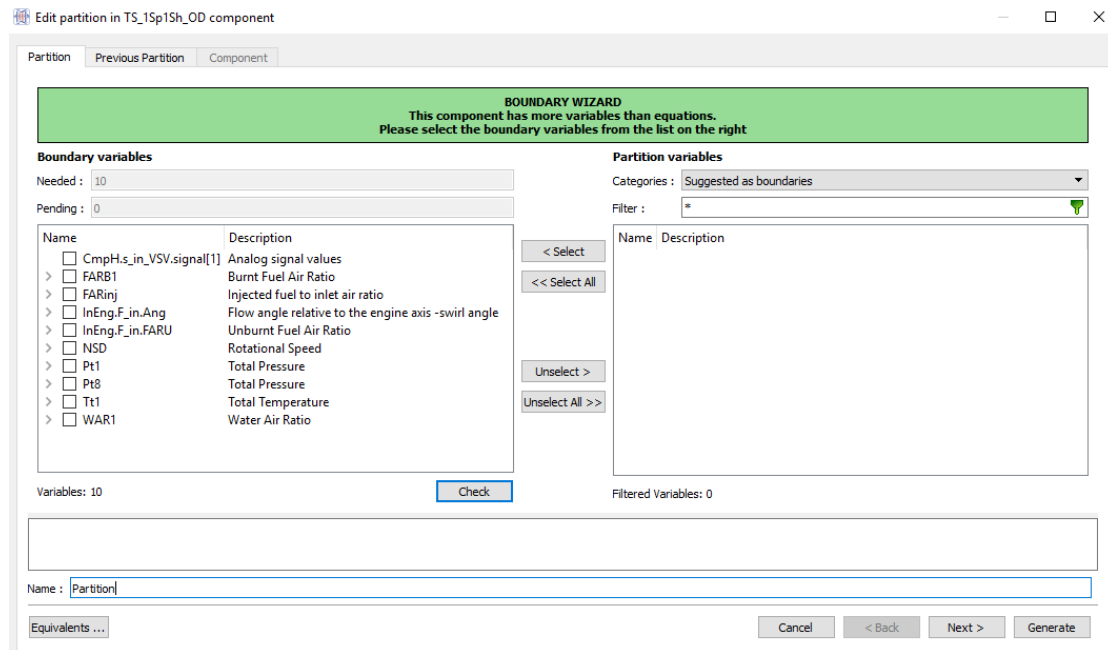
3.1.3 Δημιουργία μαθηματικού μοντέλου

Το επόμενο βήμα είναι η δημιουργία του μαθηματικού μοντέλου (partition). Το partition καθορίζεται από το σχηματικό και εκφράζει τον τρόπο της μαθηματικής επίλυσης αυτού.

Για την επίλυση του μαθηματικού μοντέλου που προκύπτει σε αυτή την περίπτωση, είναι απαραίτητη η επιλογή 10 οριακών μεταβλητών (boundary variables) και 3 αλγεβρικών (algebraic variables), η αρχικοποίηση των οποίων είναι αναγκαία για την επίλυση του προβλήματος. Οι οριακές μεταβλητές που επιλέχθηκαν, παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-3, και είναι οι εξής:

1. InEng.F_in.Ang: γωνία της ροής στην είσοδο του αγωγού εισόδου.
2. FARB1: λόγος καυσίμου / αέρα στην είσοδο του αγωγού εισόδου.
3. InEng.F_in.FARU: ποσοστό άκαυστου καυσίμου / αέρα στην είσοδο του αγωγού εισόδου.
4. WAR1: απόλυτη υγρασία στην είσοδο της μηχανής.
5. Pt1: ολική πίεση εισόδου στον αεριοστρόβιλο
6. Tt1: ολική θερμοκρασία εισόδου στον αεριοστρόβιλο
7. Pt8: ολική πίεση στην έξοδο της μηχανής
8. CmpH.s_inVSV.signal[1]: γωνία μεταβλητών πτερυγίων εισόδου IGV's
9. FARinj: λόγος καυσίμου / παροχής αέρα
10. NSD: ταχύτητα περιστροφής του άξονα του αεριοστροβίλου

Οι έξι πρώτες μεταβλητές επιλέγονται επειδή αναφέρονται στις συνθήκες εισόδου του αεριοστροβίλου και είναι πάντα διαθέσιμες. Οι μεταβλητές Pt8 και FARinj επιλέχθηκαν για καλύτερη συμπεριφορά του μοντέλου. Η μεταβλητή CmpH.s_inVSV.signal[1] καθορίζει την γωνία των IGV's του συμπιεστή και χρησιμοποιείται για την ανάλογη αλλαγή του χάρτη του. Τέλος, η μεταβλητή NSD επιλέχθηκε με την ίδια λογική με τις έξι πρώτες, αφού είναι ένα μετρήσιμο μέγεθος που αφορά την έξοδο του αεριοστροβίλου και συνδέεται άμεσα με τις στροφές της γεννήτριας και κατ' επέκταση την συχνότητα του παραγόμενου ρεύματος.

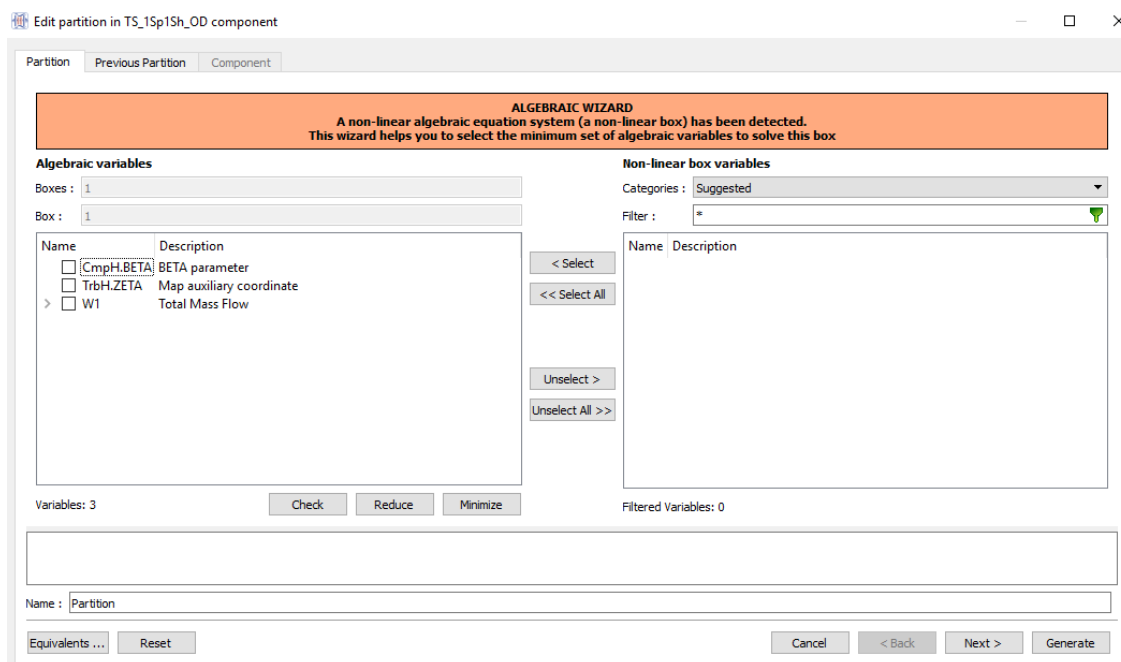


Σχήμα 3-3 Οριακές μεταβλητές μαθηματικού μοντέλου

Έπειτα οι αλγεβρικές μεταβλητές που επιλέχθηκαν είναι οι εξής:

- CmpH.BETA: ο αριθμός β των χαρακτηριστικών γραμμών « βήτα » του χάρτη του συμπιεστή
- TrbH.ZETA: ο αριθμός ζ των χαρακτηριστικών γραμμών « ζήτα » του χάρτη του στροβίλου
- W1: η παροχή εισόδου στον αεριοστροβίλο

Στο Σχήμα 3-4 παρουσιάζονται οι αλγεβρικές μεταβλητές του μαθηματικού μοντέλου όπως επιλέχθηκαν στο πρόγραμμα.



Σχήμα 3-4 Αλγεβρικές μεταβλητές μαθηματικού μοντέλου

3.1.4 Δημιουργία πειράματος

Για δεδομένο μαθηματικό μοντέλο, ο χρήστης μπορεί να ορίσει διαφορετικούς τύπους προσομοιώσεων, για μόνιμη (steady state) ή και μεταβατική λειτουργία, μέσω του πειράματος χρησιμοποιώντας τον οδηγό δημιουργίας πειράματος (wizard) ή την γλώσσα αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού EL. Μέσω του πειράματος αρχικοποιούνται τα δεδομένα και οι οριακές μεταβλητές και ο χρήστης μπορεί να ολοκληρώσει μία ή περισσότερες προσομοιώσεις, αποθηκεύοντας τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σε αρχεία μέσα στην αντίστοιχη βιβλιοθήκη. Ακόμη υπάρχει η δυνατότητα να δημιουργηθούν πολύπλοκες προσομοιώσεις με την βοήθεια των υπορουτίνων (functions), όπως επιλέχθηκε να γίνει και στην παρούσα διπλωματική. Επειδή το πείραμα αποτελεί το κύριο μέρος του προγράμματος που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας, αναλύεται εκτενώς στην επόμενη παράγραφο.

3.2 Πείραμα μοντέλου

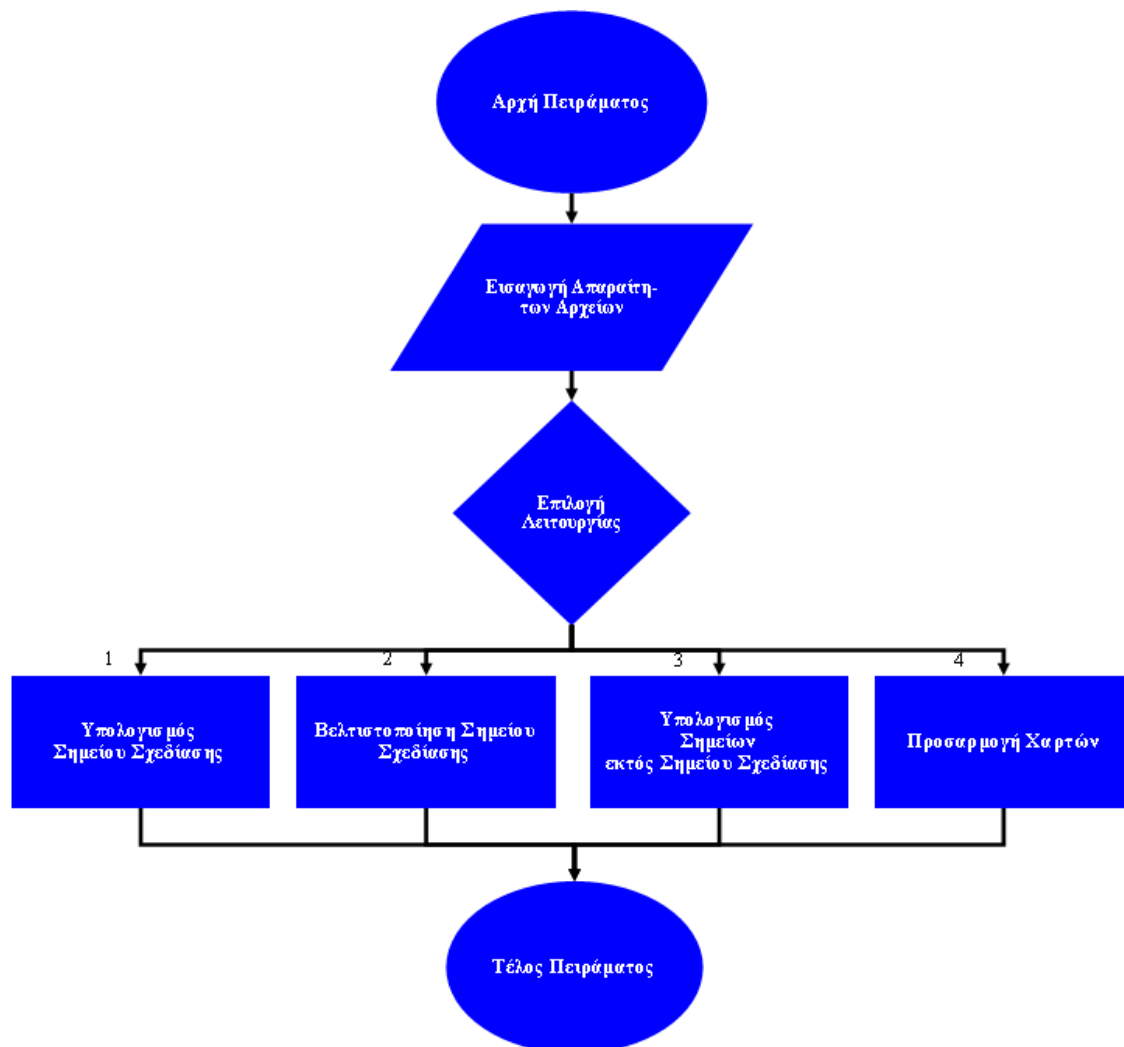
3.2.1 Σκοπός και δομή πειράματος

Το πείραμα του μαθηματικού μοντέλου προγραμματίστηκε με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να εξυπηρετεί τις εξής απαιτήσεις:

- Γενικευμένος χαρακτήρας, έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κάθε βιομηχανικό αεριοστρόβιλο απλής ατράκτου

- Έλεγχος του πειράματος από τον χρήστη μέσω εξωτερικού αρχείου εισόδου, έτσι ώστε ο χρήστης να επεμβαίνει για την μοντελοποίηση μόνο σε αυτό
- Να εκτελεί όλες τις απαραίτητες λειτουργίες, στα πλαίσια της μοντελοποίησης, ανάλογα με τις ανάγκες του χρήστη, όπως:
 1. Ανάλυση σημείου σχεδίασης (design point analysis)
 2. Βελτιστοποίηση παραμέτρων και θέσης του σημείου σχεδίασης στους χάρτες λειτουργίας, με βάση τα σημεία εκτός σχεδίασης (optimization)
 3. Υπολογισμός σημείων λειτουργίας εκτός σημείου σχεδίασης (off design analysis)
 4. Υπολογισμός σημείων λειτουργίας εκτός σημείου σχεδίασης με προσαρμογή χαρτών (map adaptation)

Με βάση τα παραπάνω δημιουργήθηκε το πείραμα, η δομή του οποίου απεικονίζεται στο παρακάτω Σχήμα 3-5:



Σχήμα 3-5 Δομή πειράματος

Τα επιμέρους στάδια εκτέλεσης του πειράματος που απεικονίζονται παραπάνω, περιγράφονται στις ενότητες που ακολουθούν.

3.2.2 Εισαγωγή αρχείων λειτουργίας

Κατά την εκτέλεση του πειράματος και πριν αρχίσει οποιαδήποτε λειτουργία, συνδέονται με το πείραμα πέντε αρχεία:

1. το αρχείο εισόδου, από όπου διαβάζονται δεδομένα λειτουργίας και παράμετροι της μηχανής
2. το αρχείο αποθήκευσης παραμέτρων, όπου αποθηκεύονται οι υπολογισμένες παράμετροι του σημείου σχεδίασης για χρήση στα σημεία εκτός σχεδίασης
3. ο χάρτης λειτουργίας του συμπιεστή
4. ο χάρτης λειτουργίας του στρόβιλου
5. το αρχείο με τις ιδιότητες του καυσίμου

Αν κάποιο από τα παραπάνω αρχεία δεν διαβαστεί σωστά, τότε το πείραμα σταματάει και δεν εκτελεί οποιαδήποτε λειτουργία.

3.2.3 Ανάλυση σημείου σχεδίασης (Design Point Analysis)

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται η πρώτη και ίσως βασικότερη λειτουργία, δηλαδή ο υπολογισμός του σημείου σχεδίασης της μηχανής. Παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία επιλογής των απαραίτητων παραμέτρων και η θεμελίωση του μαθηματικού μοντέλου του υπολογισμού. Από την ανάλυση αυτή προκύπτουν όλα τα απαραίτητα μεγέθη για την εκτός σημείου σχεδίασης προσομοίωση, όπως οι συντελεστές κλίμακας στους χάρτες λειτουργίας.

Ο υπολογισμός του σημείου σχεδίασης απαιτεί τον υπολογισμό των συντελεστών κλίμακας όλων των χαρτών των συνιστωσών, επιλέγοντας τη θέση του σημείου λειτουργίας πάνω στους χάρτες αυτούς. Η λειτουργία των χαρτών περιγράφεται στην ενότητα 7.1 του παραρτήματος. Οι συντελεστές αυτοί είναι πέντε για κάθε χάρτη και καθορίζουν:

- την διορθωμένη παροχή μάζας (s_{mapWc_in}),
- το λόγο πίεσης (s_{mapPR_in})
- τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης (s_{mapEff_in})
- τις στροφές (s_{NcRdes_in} για συμπιεστή και s_{mapNc_in} για στρόβιλο)
- και τις διορθωμένες στροφές στο σημείο λειτουργίας $NcDes$.

Επομένως και για τις δύο συνιστώσες (συμπιεστή και στρόβιλο αντίστοιχα) πρέπει να υπολογιστούν συνολικά $5 \times 2 = 10$ μεταβλητές. Αυτές παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-2:

Όνομα μεταβλητής	Συνιστώσα	Περιγραφή
CmpH.NcDes	Συμπιεστής	Διορθωμένες στροφές σημείου σχεδίασης
CmpH.s_NcRdes_in		Σχετικές διορθωμένες στροφές σε σχέση με το σημείο σχεδίασης
CmpH.s_mapEff_in		Συντελεστής κλίμακας ισεντροπικού βαθμού απόδοσης
CmpH.s_mapPR_in		Συντελεστής κλίμακας λόγου πίεσης
CmpH.s_mapWc_in		Συντελεστής κλίμακας διορθωμένης παροχής
TrbH.NcDes	Στρόβιλος	Διορθωμένες στροφές σημείου σχεδίασης
TrbH.s_mapNc_in		Συντελεστής κλίμακας διορθωμένων στροφών
TrbH.s_mapEff_in		Συντελεστής κλίμακας ισεντροπικού βαθμού απόδοσης
TrbH.s_mapPR_in		Συντελεστής κλίμακας λόγου πίεσης
TrbH.s_mapWc_in		Συντελεστής κλίμακας διορθωμένης παροχής

Πίνακας 3-2 Μεταβλητές προς υπολογισμό κατά την ανάλυση στο σημείο σχεδίασης

Οι παραπάνω μεταβλητές καθίστανται προς αλγεβρική επίλυση και συνεπώς πρέπει να ορισθούν άλλες 10 οριακές μεταβλητές. Μαζί με τις 10 του ορισμένου μαθηματικού μοντέλου, η ανάλυση στο σημείο σχεδίασης απαιτεί στο σύνολό της 20 οριακές μεταβλητές για την επίλυσή του.

Διαδικασία επίλυσης design point

Επιγραμματικά η διαδικασία έχει ως εξής:

1. Εισαγωγή δεδομένων σημείου σχεδίασης και παραμέτρων
2. Αρχικοποίηση αλγεβρικών μεταβλητών του μαθηματικού μοντέλου
3. Προσεγγιστική επίλυση του σημείου λειτουργίας, με σκοπό την αρχικοποίηση των μεταβλητών – συντελεστών προς σχεδίαση
4. Καθορισμός των 10 επιπρόσθετων οριακών μεταβλητών, εκ των οποίων 5 επιλέγονται από τον χρήστη
5. Επίλυση του σημείου σχεδίασης
6. Αποθήκευση παραμέτρων και συντελεστών προσαρμογής και κλίμακας χαρτών

Εισαγωγή δεδομένων σημείου σχεδίασης και παραμέτρων από το αρχείο εισόδου

Κατά την εισαγωγή δεδομένων και παραμέτρων καθορίζονται τα εξής:

- Οι 8 από τις οριακές μεταβλητές του μαθηματικού μοντέλου, πλην των FAR_{inj} και Pt₈, καθώς οι δύο τελευταίες θέτονται να υπολογιστούν αλγεβρικά. Σημειώνεται ότι στις οριακές μεταβλητές: γωνία εισόδου ροής, ποσοστό καυσίμου στον αέρα εισόδου συμπιεστή και ποσοστό άκαυστου καυσίμου στον αέρα εισόδου, τίθεται πάντα η τιμή 0.
- Η στατική πίεση εξόδου του στροβίλου

- Η ισχύς του αεριοστροβίλου
- Οι ιδιότητες του εγχυόμενου καυσίμου (Θερμοκρασία, πίεση και κατώτερη θερμογόνος ικανότητα)
- Οι τιμές των μεγεθών του Πίνακα 3-3, που αποτελούν μερικά από τα χαρακτηριστικά μεγέθη που δίνονται ως δεδομένα από μία εγκατάσταση.

A/A	Μεταβλητή	Συντομογραφία	Περιγραφή
1	Tt3	CDT	Θερμοκρασία εξόδου συμπιεστή
2	D30.Ps_in	CDP	Στατική πίεση εξόδου συμπιεστή
3	Tt8	EGT	Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων
4	W1	-	Παροχή αέρα στην είσοδο
5	effTh	nth	Θερμικός βαθμός απόδοσης
6	P3Q2	CPR	Λόγος πίεσης συμπιεστή
7	D30.Wbleed1	-	Ποσοστό παροχής απομάστευσης προθέρμανσης του αέρα στην είσοδο

Πίνακας 3-3 Διαθέσιμα δεδομένα σε εγκατάσταση αεριοστροβίλου απλής ατράκτου

Ακόμη εισάγονται τιμές στις παραμέτρους που αφορούν τα παρακάτω μεγέθη:

- Οι απώλειες ολικής πίεσης σε όλους τους αγωγούς
- Οι απώλειες πίεσης στο θάλαμο καύσης
- Ο βαθμός απόδοσης του θαλάμου καύσης
- Ο μηχανικός βαθμός απόδοσης του άξονα και η απομάστευση ισχύος από τον άξονα
- Η γωνία μεταβλητής γεωμετρίας εισόδου του συμπιεστή IGV και οι αντίστοιχοι συντελεστές αθροιστής κλίμακας
- Τα ποσοστά απομάστευσης κατάθλιψης του συμπιεστή καθώς και τα ποσοστά ψύξης του στροβίλου
- Οι διατομές για όλες τις θέσεις του αεριοστροβίλου
- Η θέση του σημείου σχεδίασης πάνω στον χάρτη, δηλαδή οι μεταβλητές NcRdesMap και BETA – ZETA για συμπιεστή και στρόβιλο αντίστοιχα
- Οι συντελεστές προσαρμογής απόδοσης και παροχής για κάθε συνιστώσα όπως περιγράφονται στον παρακάτω Πίνακα 3-4:

Μεταβλητή	Περιγραφή	Συνιστώσα
CmpH.s_adaptWc_in	Διορθωμένης παροχής	Συμπιεστή
CmpH.s_adaptEff_in	Ισεντροπικού βαθμού απόδοσης	
TrbH.s_adaptWc_in	Διορθωμένης παροχής	Στροβίλου
TrbH.s_adaptEff_in	Ισεντροπικού βαθμού απόδοσης	

Πίνακας 3-4 Συντελεστές προσαρμογής

Αρχικοποίηση μεταβλητών

Για τον σκοπό αυτό γίνεται υπολογισμός του κύκλου και εκτίμηση όλων των μεγεθών κατά μήκος της εξεταζόμενης μηχανής.

Εδώ συνοπτικά αναφέρουμε ότι αρχικοποιούνται οι 10 συντελεστές κλίμακας των χαρτών, όπως αυτοί δίνονται στον Πίνακα 3-2, και ακόμη 5 αλγεβρικές μεταβλητές:

1. CmpH.BETA
2. W1
3. TrbH.ZETA
4. FARinj
5. Pt8

Καθορισμός των οριακών μεταβλητών (boundary variables)

Αφού τελειώσει η αρχικοποίηση, σειρά έχει ο ορισμός των οριακών μεταβλητών. Μέσω του πειράματος δίνεται πρακτικά η δυνατότητα για εκ νέου ορισμό των οριακών μεταβλητών. Οι 20 οριακές μεταβλητές παρουσιάζονται παρακάτω:

Οκτώ από τις οριακές μεταβλητές του μαθηματικού μοντέλου:

1. InEng.F_in.Ang
2. FARB1
3. InEng.F_in.FARU
4. WAR1
5. Pt1
6. Tt1
7. CmpH.s_inVSV.signal[1]
8. NSD

Η μεταβλητή

9. D50.Ps_out

Σειρά έχουν τρεις μεταβλητές για κάθε μια συνιστώσα (συμπιεστή και στρόβιλο): οι σχετικές διορθωμένες στροφές στο σημείο σχεδίασης, οι σχετικές διορθωμένες στροφές σχεδίασης στον χάρτη και οι αριθμοί β ή ζ:

10. CmpH.NcRDes
11. CmpH.NcRDesMap
12. CmpH.BETA
13. TrbH.NcRDes
14. TrbH.NcRDesMap
15. TrbH.BETA

Υπολείπονται 5 μεταβλητές οι οποίες επιλέγονται από τον χρήστη ανάλογα με τα διαθέσιμα δεδομένα. Ειδικότερα προτείνεται ο χρήστης να δώσει τα παρακάτω πακέτα:

16. EP3 ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του συμπιεστή ή η Tt3
17. P3Q2 ο λόγος πίεσης του συμπιεστή ή D30.Ps_in
18. EP5 ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου ή Tt8
19. Οποιοσδήποτε δύο από τις:
 - a. PWSD η ισχύς του αεριοστροβίλου
 - b. WF παροχή εγχυόμενου καυσίμου
 - c. Perf.effTh θερμικός βαθμός απόδοσης
 - d. W1 παροχή αέρα στη είσοδο της μηχανής
 - e. W5 παροχή καυσαερίων της μηχανής

Επίλυση σημείου σχεδίασης

Η επίλυση γίνεται με χρήση μαθηματικής υποτρονίνας (nlsolver), που υλοποιεί τη μέθοδο Newton- Raphson για μη γραμμικά συστήματα.

Αποθήκευση παραμέτρων

Η αποθήκευση των αποτελεσμάτων γίνεται σε ένα προκαθορισμένο από το χρήστη αρχείο (DPfile).

3.2.4 Ανάλυση εκτός σημείου σχεδίασης (Off Design Analysis)

Στην ενότητα αυτή αναλύεται η διαδικασία επίλυσης σημείων λειτουργίας εκτός σημείου σχεδίασης. Παρακάτω περιγράφονται τα βήματα για την επίλυση των σημείων αυτών:

1. Εισαγωγή των δεδομένων λειτουργίας και των αποθηκευμένων παραμέτρων από την ανάλυση του σημείου σχεδίασης
2. Εναλλαγή ιδιοτήτων των συνιστωσών
3. Αρχικοποίηση των αλγεβρικών μεταβλητών
4. Καθορισμός των οριακών μεταβλητών
5. Επίλυση του σημείου λειτουργίας
6. Υπολογισμός σφάλματος

Εισαγωγή των δεδομένων λειτουργίας και των αποθηκευμένων παραμέτρων από το αρχείο επίλυσης του σημείου σχεδίασης DPfile

Στην αρχή εισάγονται τα δεδομένα λειτουργίας κάθε σημείου, όπως ακριβώς στην λειτουργία υπολογισμού του σημείου σχεδίασης. Εισάγονται επίσης και όλες οι παράμετροι που αποθηκεύτηκαν στο αρχείο DPfile. Το αρχείο αυτό αντιπροσωπεύει την

μηχανή προς μοντελοποίηση και καλείται στην αρχή της διαδικασίας, με την εντολή `RESTORE_STATE(DPFile)`.

Εναλλαγή ιδιοτήτων συνιστωσών

Στα πλαίσια της ανάλυσης εκτός σημείου σχεδίασης, οι απώλειες πίεσης των αγωγών και του θαλάμου καύσης επιλέγονται να αλλάζουν με την μεταβολή της διακινούμενης παροχής, οπότε χρησιμοποιούνται οι εντολές που φαίνονται στο Σχήμα 3-6:

```
InEng.switchdPqPd = CUSTOMdPqPd
D30.switchdPqPd = CUSTOMdPqPd
D50.switchdPqPd = CUSTOMdPqPd
Brn.switchdPqPb = CUSTOMdPqP
Brn.switcheffb = CUSTOMeff
```

Σχήμα 3-6 Εναλλαγή ιδιοτήτων παραμέτρων

Αρχικοποίηση μεταβλητών

Στην συνέχεια δίνονται τιμές στις αλγεβρικές μεταβλητές:

1. CmpH.BETA τίθεται τυπική τιμή 0,5
2. W1 η τιμή της παροχής αέρα του εξεταζόμενου σημείου
3. TrbH.ZETA τίθεται τυπική τιμή 0,5
4. FARinj τίθεται τυπική τιμή 0,02
5. Pt8 υπολογίζεται με εκτίμηση αριθμού Mach και στατικής πίεσης στην αντίστοιχη θέση
6. 7. 8. 9. Οι συντελεστές προσαρμογής χαρτών όπως περιγράφονται στον Πίνακα 3-4 παίρνουν την τιμή 1

Καθορισμός των οριακών μεταβλητών

Ο ορισμός των οριακών μεταβλητών γίνεται όπως ακριβώς στην λειτουργία design point. Επιπλέον αντί των Pt8 και FARinj, επιλέγονται οι εξής μεταβλητές:

1. PWSD η ισχύς του αεριοστροβίλου
2. D50.Ps_out η στατική πίεση εξόδου του αεριοστροβίλου

Επίλυση σημείου

Αφού ολοκληρωθούν τα παραπάνω βήματα, καλείται η συνάρτηση `nlsolver` και επιλύεται το εκάστοτε σημείο.

Υπολογισμός σφάλματος

Τέλος υπολογίζονται τα σφάλματα υπολογισμένων ορισμένων μεγεθών, σε σχέση με αυτά που εισήχθησαν και καταχωρούνται σε πίνακα, έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν στην λειτουργία της βελτιστοποίησης. Τα μεγέθη των οποίων εξετάζεται το σφάλμα είναι τα εξής:

- CDT
- CDP
- EGT
- W1
- WF
- PWSD

3.2.5 Ανάλυση εκτός σημείου σχεδίασης με προσαρμογή χαρτών

Η επόμενη λειτουργία του προτεινόμενου πειράματος, είναι η γενική προσαρμογή των χαρτών κατά την ανάλυση σημείων εκτός σχεδίασης. Δεσμεύοντας επιπλέον οριακές μεταβλητές, υπολογίζονται οι συντελεστές προσαρμογής των χαρτών. Στην ουσία με την διαδικασία αυτή, ο χρήστης είναι σε θέση να δει κατά πόσο πρέπει να μεταβληθούν οι χάρτες λειτουργίας, έτσι ώστε να επαληθεύεται το εξεταζόμενο σημείο λειτουργίας. Ακολουθεί παρόμοια λογική με αυτήν της επίλυσης του σημείου σχεδίασης, καθώς η ανάγκη υπολογισμού των συντελεστών προσαρμογής αυξάνουν και σε αυτή την περίπτωση τις οριακές μεταβλητές.

Τα βήματα που ακολουθούνται είναι ακριβώς ίδια με την προηγούμενη ενότητα εκτός του καθορισμού των οριακών μεταβλητών

Καθορισμός των οριακών μεταβλητών

Οι επιπλέον οριακές μεταβλητές επιλέγονται μεταξύ των:

1. Tt3
2. D30.Ps_in
3. Tt5
4. WF
5. W1

Πόσοι και ποιοι συντελεστές προσαρμογής θα υπολογιστούν, καθορίζονται από τον χρήστη. Αντίστοιχα επιλέγονται και ποιες από τις παραπάνω οριακές μεταβλητές θα χρησιμοποιηθούν.

Επίλυση σημείου

Τέλος καλείται η συνάρτηση `nlsolver` και επιλύεται το εκάστοτε σημείο.

3.2.6 Βελτιστοποίηση σημείου σχεδίασης (Optimization)

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται η διαδικασία βελτιστοποίησης του σημείου σχεδίασης. Για την εφαρμογή της χρησιμοποιείται η συνάρτηση `SIMPLEX` από τη βιβλιοθήκη `GTE_EXAMPLES`. Η συνάρτηση αυτή έχει ως ορίσματα:

- τον αριθμό των ανεξάρτητων μεταβλητών προς βελτιστοποίηση
- τον μέγιστο αριθμό επαναλήψεων (1000)
- το σφάλμα σύγκλισης (10^{-5})
- την επιθυμητή ακρίβεια των παραμέτρων (10^{-5})
- την συνάρτηση κόστους που ελαχιστοποιείται, η οποία επίσης ορίζεται από τον χρήστη

Μετά το πέρας της διαδικασίας επιστρέφει:

- τις τιμές των βελτιστοποιημένων παραμέτρων
- τον τελικό αριθμό των επαναλήψεων
- ένδειξη για το αν η διαδικασία ολοκληρώθηκε κάτω από τον αριθμό των ορισμένων επαναλήψεων

Λαμβάνοντας υπόψιν τα ορίσματα, δύο παράγοντες πρέπει εδώ να καθοριστούν: η συνάρτηση κόστους και ο αριθμός των παραμέτρων προς βελτιστοποίηση.

Η συνάρτηση κόστους ορίζεται από τον χρήστη, μέσω υπολογισμού του κύκλου λειτουργίας των διαθέσιμων σημείων. Ειδικότερα, σε κάθε επανάληψη βελτιστοποίησης:

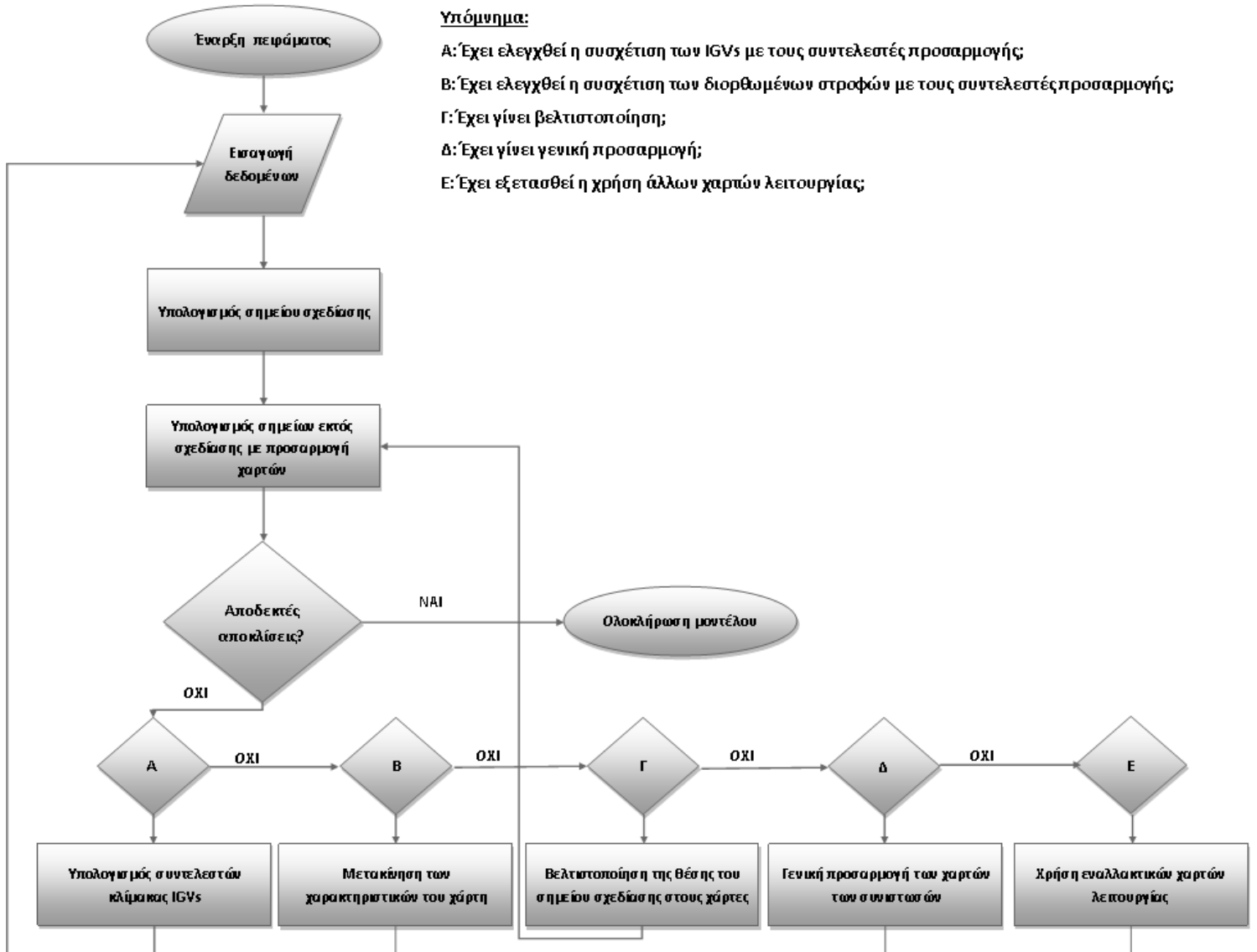
1. Υπολογίζεται το σημείο σχεδίασης με τις υπάρχουσες παραμέτρους.
2. Υπολογίζονται τα σημεία εκτός σχεδίασης και τα αντίστοιχα σφάλματα από τα μετρούμενα μεγέθη.
3. Τα τετράγωνα των σφαλμάτων αυτών προστίθενται για όλα τα υπολογισμένα σημεία και δημιουργούν έτσι την συνάρτηση κόστους προς ελαχιστοποίηση. Σημειώνεται ότι η συνάρτηση κόστους αυξάνεται με μία τιμή `penalty` όταν κάποια από τις παραμέτρους προς βελτιστοποίηση ξεπεράσει προκαθορισμένα όρια.
4. Τέλος υπολογίζονται οι νέες τιμές των παραμέτρων προς βελτιστοποίηση και η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως σύγκλισης.

Η διαδικασία αυτή μπορεί είτε να χρησιμοποιηθεί για βελτιστοποίηση αγνώστων παραμέτρων της μηχανής, όπως απώλειες πίεσης και βαθμοί απόδοσης λαμβάνοντας υπόψιν μόνο το σημείο σχεδίασης, είτε για βελτιστοποίηση της θέσης του σημείου σχεδίασης στον χάρτη. Στην δεύτερη περίπτωση λαμβάνονται υπόψιν τα σημεία εκτός

σχεδίασης και επιλέγεται η βέλτιστη θέση του σημείου σχεδίασης στο χάρτη, έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι αντίστοιχες αποκλίσεις.

3.3 Χειρισμός πειράματος για την δημιουργία μοντέλου

Στην παράγραφο αυτή εξηγείται η λογική με την οποία ο χρήστης χειρίζεται τα διαθέσιμα δεδομένα και τις λειτουργίες του πειράματος που αναλύθηκαν παραπάνω, με σκοπό την βέλτιστη δημιουργία του μοντέλου.



Σχήμα 3-7 Λογική ακολουθία μοντελοποίησης

3.3.1 Βήμα 1^ο Επιλογή αρχείων λειτουργίας και εισαγωγή δεδομένων

Στην αρχή κάθε μοντελοποίησης, ο χρήστης πρέπει να δώσει τα πέντε αρχεία που αναφέρθηκαν παραπάνω στην ενότητα 3.2.2 . Πιο συγκεκριμένα:

- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν οποιοδήποτε χάρτες λειτουργίας, αρκεί να ονομαστούν ως:
 1. mapC.xml, για συμπιεστή
 2. mapT.xml, για στρόβιλο
 3. mapF.xml , για καύσιμοκαι να αποθηκευτούν στον υποφάκελο /mars της βιβλιοθήκης.

- Πρέπει ο χρήστης να διαμορφώσει το αρχείο εισόδου. Η διαμόρφωσή αυτή περιγράφεται αναλυτικά στην ενότητα 7.4 του παραρτήματος, μαζί με παρατηρήσεις για την εισαγωγή των δεδομένων. Στο αρχείο εισόδου εισάγονται:
 1. Η λειτουργία που θα επιτελέσει το πρόγραμμα (MODE)
 2. Το σημείο λειτουργίας και τα αντίστοιχα δεδομένα λειτουργίας
 3. Ποιες οριακές μεταβλητές θα χρησιμοποιηθούν κατά την λειτουργία σημείου σχεδίασης
 4. Ποιες οριακές μεταβλητές θα χρησιμοποιηθούν κατά την λειτουργία εκτός σημείου σχεδίασης με προσαρμογή χαρτών
 5. Ποια μεγέθη θα χρησιμοποιηθούν για την βελτιστοποίηση
 6. Όλες οι παράμετροι της μηχανής στο σημείο σχεδίασης

Το αρχείο συνδέεται μέσα στον κώδικα με την τιμή της μεταβλητής INPfile. Ο χρήστης μπορεί να αλλάξει την ονομασία αυτού του αρχείου μέσα στον κώδικα, για την χρήση διαφορετικών αρχείων, ή για ευκολία να χρησιμοποιεί την ίδια ονομασία κάθε φορά (π.χ. ReadData). Σε κάθε περίπτωση το αρχείο αυτό βρίσκεται ανάμεσα στα αρχεία του πειράματος (υποφάκελος\experiments της βιβλιοθήκης) και η επεξεργασία του γίνεται είτε μέσω του PROOSIS είτε μέσω της εφαρμογής του σημειωματάριου.

Σημειώνεται ότι το αρχείο αποθήκευσης παραμέτρων του σημείου σχεδίασης DPfile, δημιουργείται αυτόματα ή αλλάζει, κάθε φορά που ολοκληρώνεται η λειτουργία σημείου σχεδίασης ή βελτιστοποίησης, και δεν χρειάζεται να δημιουργηθεί από τον χρήστη. Επίσης, όπως ακριβώς γίνεται με το INPfile, ο χρήστης μπορεί είτε να αλλάξει την ονομασία του μέσω του πειράματος, είτε να κρατήσει σταθερή ονομασία ώστε να μην επεμβαίνει στον κώδικα του πειράματος.

3.3.2 Βήμα 2^ο Υπολογισμός σημείου σχεδίασης

Αφού έχουν καταχωρηθεί οι παράμετροι της μηχανής, σειρά έχει ο υπολογισμός των συντελεστών κλίμακας των χαρτών λειτουργίας, μέσω υπολογισμού του σημείου σχεδίασης.

Επιλογή σημείου σχεδίασης

Η επιλογή του σημείου σχεδίασης μπορεί να γίνει είτε με δεδομένα που υπάρχουν στην ανοιχτή βιβλιογραφία, είτε από τα διαθέσιμα δεδομένα λειτουργίας της μηχανής για μία συγκεκριμένη περίοδο. Είναι σαφές ότι και στις δύο περιπτώσεις θα πρέπει χρησιμοποιηθούν δεδομένα που βρίσκονται κοντά στο βασικό φορτίο, αναφέρονται στις τυπικές συνθήκες (1.01325 bar ατμοσφαιρική πίεση και 288.15 K θερμοκρασία περιβάλλοντος) και ταυτόχρονα αντιστοιχούν σε μέγιστο άνοιγμα μεταβλητών πτερυγίων IGV's.

Αφού επιλεγεί το σημείο σχεδίασης, το πείραμα τίθεται σε λειτουργία υπολογισμού σημείου σχεδίασης (MODE = 1), και έτσι υπολογίζονται και αποθηκεύονται οι συντελεστές κλίμακας μαζί με τις υπόλοιπες παραμέτρους στο αντίστοιχο αρχείο DPfile.

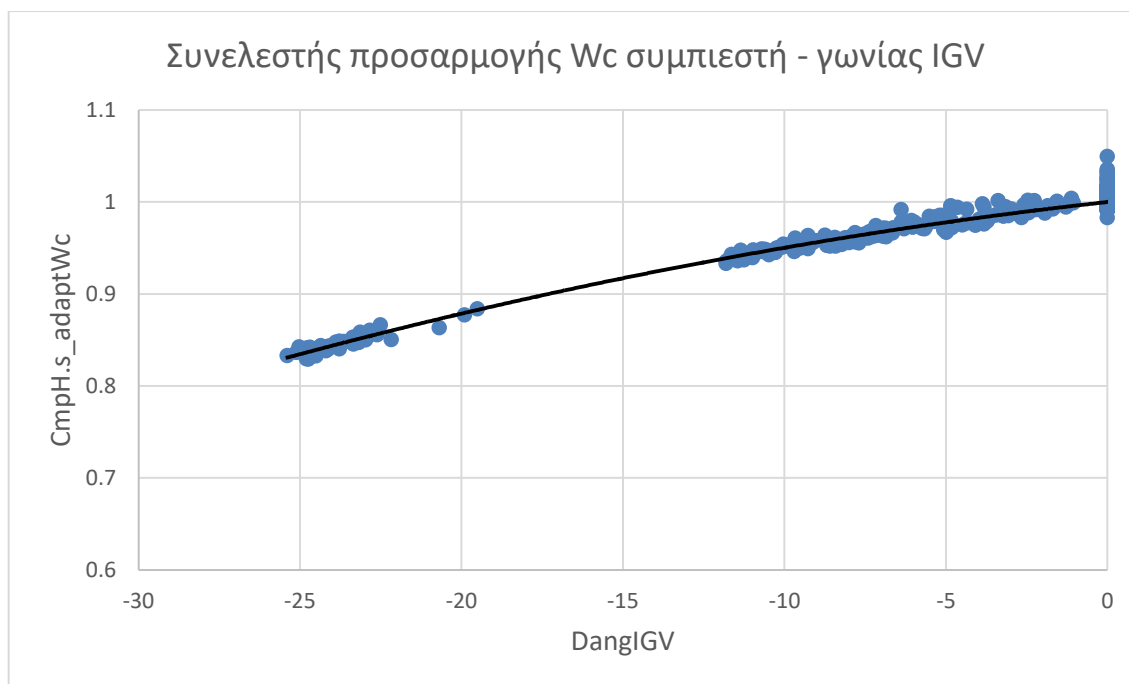
3.3.3 Βήμα 3^ο Αξιολόγηση αποκλίσεων

Στην συνέχεια, με βάση την λειτουργία υπολογισμού σημείων εκτός σχεδίασης με προσαρμογή χαρτών (MODE = 4), υπολογίζονται οι αντίστοιχοι συντελεστές προσαρμογής των χαρτών, για όλα τα επιθυμητά σημεία που περιλαμβάνονται στο αρχείο εισόδου.

Οι συντελεστές αυτοί, για μία σωστή μοντελοποίηση, πρέπει να είναι πολύ κοντά στην μονάδα ή οι αποκλίσεις τους σε σχέση με την μονάδα να είναι κοντά στο 0. Παρακάτω παρουσιάζονται τα βήματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ελαχιστοποίηση αυτών των αποκλίσεων.

3.3.4 Βήμα 4^ο Υπολογισμός συντελεστών προσαρμογής λόγω IGV's

Σε περίπτωση που ο συμπιεστής διαθέτει πτερύγια IGV's και έχουμε δεδομένα για διαφορετικές γωνίες τοποθέτησης IGV's, εξετάζεται αν υπάρχει συσχέτιση της μεταβολής της γωνίας των IGV's με τους συντελεστές προσαρμογής. Για τον σκοπό αυτό, δημιουργείται διάγραμμα του συντελεστή προσαρμογής παροχής και απόδοσης του συμπιεστή συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας των IGV's. Αν υπάρχει συσχέτιση των μεγθών, προσεγγίζονται τα σημεία με μία καμπύλη δευτέρου βαθμού που να περνά από το (1,0) και στους συντελεστές επίδρασης των IGVs δίνονται οι τιμές των συντελεστών της προκύπτουσας καμπύλης. Διαφορετικά το κομμάτι αυτό παραλείπεται και στους συντελεστές εισάγεται μηδενική τιμή. Παρακάτω στο Σχήμα 3-8 δίνεται ένα παράδειγμα του διαγράμματος συντελεστή προσαρμογής παροχής του συμπιεστή συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας IGV's:



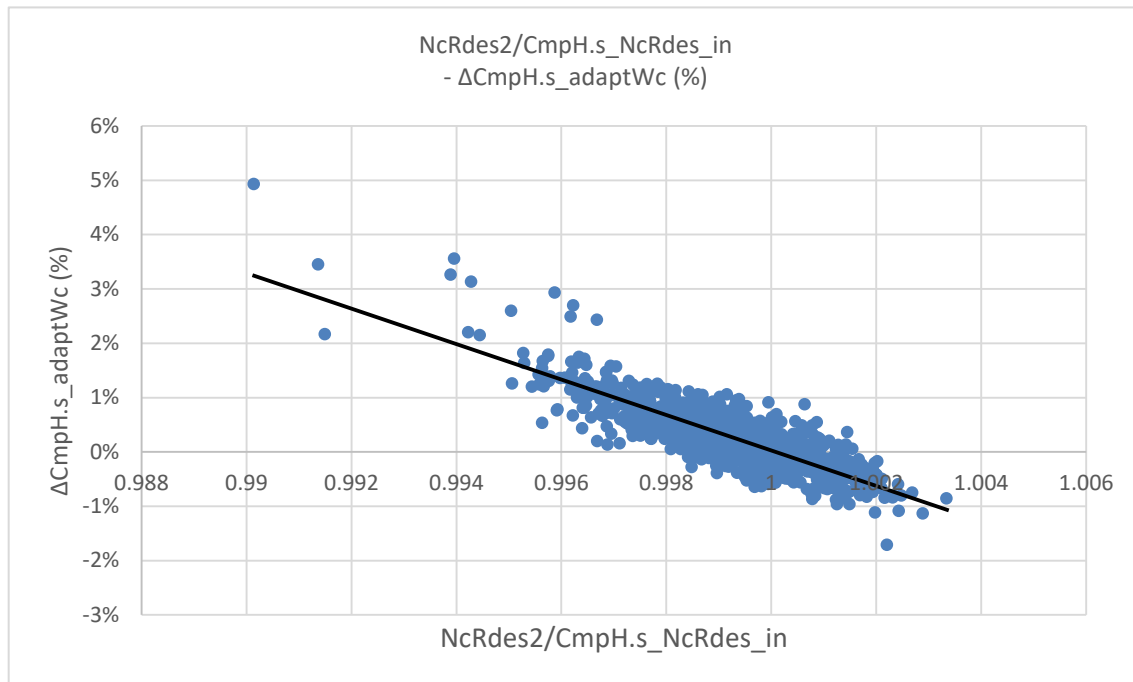
Σχήμα 3-8 Παράδειγμα διαγράμματος συντελεστή προσαρμογής παροχής του συμπίεστη συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας

Οι συντελεστές της δευτεροβάθμιας εξίσωσης αποθηκεύονται στο αρχείο εισόδου INPfile. Στην συνέχεια υπολογίζεται ξανά το σημείο σχεδίασης και εκτελούμε πάλι το βήμα 3.

3.3.5 Βήμα 5^ο Τοπική προσαρμογή χαρτών

Στην περίπτωση που οι αποκλίσεις συνεχίζουν να είναι σημαντικές και μετά την διόρθωση των IGV's, ελέγχουμε την εξάρτηση των αποκλίσεων των συντελεστών προσαρμογής σε σχέση με τις διορθωμένες στροφές του χάρτη του συμπίεστη. Με αυτόν τον τρόπο, μπορούμε να κάνουμε τοπική προσαρμογή των χαρτών, προσαρμόζοντας ουσιαστικά την απόσταση των χαρακτηριστικών έτσι ώστε να προσεγγίζονται καλύτερα τα εξεταζόμενα σημεία λειτουργίας. Ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

1. Δημιουργείται το διάγραμμα των αποκλίσεων των συντελεστών προσαρμογής παροχής του συμπίεστη, συναρτήσει του λόγου των σχετικών διορθωμένων στροφών προς την μεταβλητή CmpH.s_NcRdes_in του συμπίεστη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-9. Ο λόγος αυτός στην ουσία εκφράζει τις σχετικές διορθωμένες στροφές του αρχικού χάρτη.



Σχήμα 3-9 Παράδειγμα διαγράμματος αποκλίσεων συντελεστών προσαρμογής παροχής συμπίεστη – σχετικών διορθωμένων στροφών αρχικού χάρτη

2. Εξετάζεται η συσχέτιση των μεγεθών και τα σημεία προσεγγίζονται με γραμμική σχέση. Σημειώνεται ότι αν μία ευθεία δεν μπορεί να εκφράσει το σύνολο των σημείων, τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαδοχικές ευθείες διαφορετικών κλίσεων για διαδοχικές ομάδες σημείων
3. Με βάση το διάγραμμα επιλέγονται ποιες χαρακτηριστικές θα διορθωθούν και μέσω των γραμμών τάσης υπολογίζεται το αντίστοιχο ποσοστό διόρθωσης
4. Στο αρχείο του χάρτη πολλαπλασιάζονται οι τιμές της διορθωμένης παροχής, που αντιστοιχούν στην χαρακτηριστική προς διόρθωση, με το αντίστοιχο ποσοστό διόρθωσης και αποθηκεύεται ο νέος χάρτης

Στη συνέχεια επαναλαμβάνονται το βήμα 2 και το βήμα 3 με τον νέο χάρτη προκειμένου να ελέγξουμε αν η διόρθωση έγινε σωστά.

Αντίστοιχη διαδικασία γίνεται για τους χάρτες των στροβίλων, όπου εκεί εξετάζουμε αν υπάρχει κάποια εξάρτηση με τον λόγο πίεσης του στροβίλου. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής δεν εφαρμόστηκε τοπική προσαρμογή των χαρτών των στροβίλων.

3.3.6 Βήμα 6^ο Βελτιστοποίηση θέσης σημείου σχεδίασης στον χάρτη

Αφού έχουν ολοκληρωθεί τα δύο παραπάνω βήματα σειρά έχει η βελτιστοποίηση της θέσης του σημείου σχεδίασης στους χάρτες λειτουργίας των συνιστωσών. Το πείραμα τίθεται σε λειτουργία βελτιστοποίησης (MODE = 2).

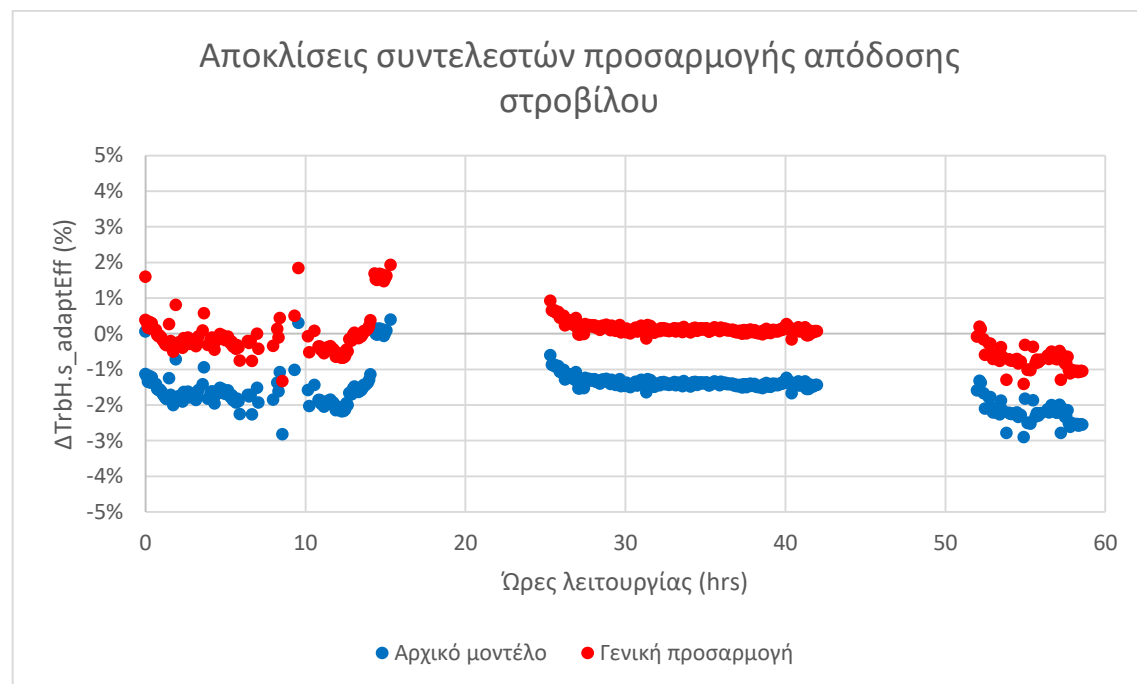
Κατά την διαδικασία του υπολογισμού, ο χρήστης τοποθετεί αυθαίρετα το σημείο σχεδίασης στις χαρακτηριστικές των στροφών (συνήθως 100%) και στο ύψος τους BETA ή ZETA (συνήθως 0,5 για συμπιεστή και στρόβιλο). Έτσι μέσω της βελτιστοποίησης, αναζητείται η βέλτιστη θέση του στον χάρτη ώστε να ελαχιστοποιούνται οι αποκλίσεις των σημείων εκτός σχεδίασης, δηλαδή οι παράμετροι BETA και ZETA για το συμπιεστή και το στρόβιλο και οι σχετικές διορθωμένες στροφές στον χάρτη. Εκτός από την βελτιστοποίηση της θέσης του σημείου σχεδίασης, θα μπορούσαμε να βελτιστοποιήσουμε και τους συντελεστές κλίμακας λόγω μεταβλητής γεωμετρίας των IGVs.

Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της βελτιστοποίησης επαναλαμβάνεται το βήμα 3.

3.3.7 Βήμα 7^ο Γενική προσαρμογή χαρτών

Έχοντας ολοκληρώσει όλα τα παραπάνω βήματα, υπάρχει πιθανότητα οι αποκλίσεις οποιωνδήποτε συντελεστών προσαρμογής να έχουν συγκεντρωθεί γύρω από μία μέση τιμή. Η τελευταία διόρθωση που μπορεί να γίνει στους χάρτες που χρησιμοποιούνται είναι η γενική προσαρμογή. Η διαδικασία αυτή πρακτικά μετατοπίζει τον χάρτη ομοιόμορφα και κατά συνέπεια οι αποκλίσεις συγκεντρώνονται πλέον στην επιθυμητή τιμή.

Στην περίπτωση της γενικής προσαρμογής ενός χάρτη, επιλέγεται το ποσοστό στο οποίο πρέπει να διορθωθεί και με βάση αυτό το ποσοστό διορθώνεται η τιμή των αρχικών συντελεστών κλίμακας του χάρτη στο αρχείο DPfile. Ένα παράδειγμα γενικής προσαρμογής χάρτη στρόβιλου παρουσιάζεται στο διάγραμμα που απεικονίζεται στο Σχήμα 3-10:



Σχήμα 3-10 Παράδειγμα διαγράμματος γενικής προσαρμογής

Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα, οι αποκλίσεις του συντελεστή προσαρμογής της απόδοσης τους στροβίλου (μπλε σημεία) βρίσκονται κατά μέσο όρο στο -1,4%, έτσι η αντίστοιχη παράμετρος συντελεστή κλίμακας που υπολογίστηκε κατά το σημείο σχεδίασης TrbH.s_mapEff_in πρέπει να αυξηθεί κατά 1,4%.

Προσοχή πρέπει να δοθεί στην περίπτωση του συμπιεστή, όπου υπάρχει πιθανότητα τα εξεταζόμενα δεδομένα να παρουσιάζουν αποκλίσεις που εκφράζουν την κλασσική σταδιακή μείωση των επιδόσεων του λόγω βρομίσματος και την επαναφορά στην υγιή κατάσταση μετά από πλύσιμο. Οι κορυφές αυτών των αποκλίσεων ουσιαστικά εκφράζουν την καλύτερη δυνατή κατάσταση του συμπιεστή και άρα η γενική προσαρμογή, ειδικά για αυτήν την περίπτωση, θα πρέπει να γίνεται έτσι ώστε αυτές οι αποκλίσεις των κορυφών να βρίσκονται όσο πιο κοντά στο 0%.

3.3.8 Βήμα 8^ο Έλεγχος χρήσης νέων χαρτών συνιστώσων

Αν οι διορθώσεις που προτείνονται στα βήματα 4 έως 7 δεν φέρουν βελτιώσεις στον περιορισμό των ζητούμενων αποκλίσεων, τότε πρέπει να εξεταστεί η χρήση νέων χαρτών και επαναλαμβάνονται όλα τα βήματα που προτείνονται.

3.3.9 Προσομοίωση σημείων εκτός σχεδίασης

Από την στιγμή που έχει προσαρμοστεί το μοντέλο της μηχανής, η λειτουργία υπολογισμού σημείων εκτός σημείου σχεδίασης μπορεί να προσομοιώσει την λειτουργία του αεριοστροβίλου σε οποιοδήποτε συνθήκες, εντός του εύρους λειτουργίας του αεριοστροβίλου. Όπως παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.2.4 ο χρήστης πρέπει να δώσει τιμές στις 10 μεταβλητές του μαθηματικού μοντέλου που ορίζει η συγκεκριμένη διαδικασία. Η γωνία εισόδου ροής, το ποσοστό καυσίμου στο εργαζόμενο μέσο και το ποσοστό άκαυστου καυσίμου στο εργαζόμενο μέσο τίθενται από τον κώδικα ίσες με 0. Έτσι ο χρήστης καλείται να συμπληρώσει τιμές στο αρχείο εισόδου για τις παρακάτω μεταβλητές:

- | | |
|------------------------|----------------------------|
| 1. Tt1 | Θερμοκρασία εισόδου |
| 2. Pt1 | Ολική πίεση εισόδου |
| 3. WAR1 ή RH | Απόλυτη ή σχετική υγρασία |
| 4. CmpH.s_inVSV.signal | Γωνία κλεισίματος των IGVs |
| 5. NSD | Στροφές της γεννήτριας |
| 6. PWSD | Ισχύς αεριοστροβίλου |
| 7. Ps8 | Στατική πίεση εξόδου |

4

Εφαρμογή Μοντελοποίησης

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η μοντελοποίηση δύο αεριοστροβίλων, μέσω της διαδικασίας που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Για την μοντελοποίηση χρησιμοποιούνται πραγματικές μετρήσεις των επιδόσεων των αεριοστροβίλων, οι οποίες προέκυψαν μέσω σχετικής έρευνας και επικοινωνίας με τους υπεύθυνους μηχανικούς των εργοστασίων, στα οποία είναι εγκατεστημένες οι μηχανές. Συγκεκριμένα μοντελοποιούνται οι αεριοστροβίλοι:

1. General Electric 9E, με δεδομένα από το εργοστάσιο της ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΝ ΕΛΛΑΣ στον Άγιο Νικόλαο Βοιωτίας,
2. General Electric 9FB, με δεδομένα από το εργοστάσιο της PROTERGIA “Korinthos Power” στους Αγίους Θεοδώρους Κορινθίας.

Η μοντελοποίηση κάθε μηχανής αναλύεται σε ξεχωριστή παράγραφο όπου, δίνονται αρχικά τα διαθέσιμα δεδομένα και στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα κάθε βήματος της προτεινόμενης διαδικασίας της παραγράφου 3.3, μέχρι το τελικό αποτέλεσμα της μοντελοποίησης.

4.1 General Electric 9E

Για την λειτουργία του αεριοστροβίλου General Electric 9E, αναζητήθηκαν δεδομένα στο αρχείο του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών. Μέσω αυτών των δεδομένων δημιουργήθηκε αρχείο με 4895 σημεία λειτουργίας της μηχανής, κατά την περίοδο 9/1/2017 με 28/7/2017. Σημειώνεται ότι, κατά την περίοδο αυτή, ο αεριοστροβίλος λειτουργούσε κυρίως κοντά στο σημείο σχεδίασης αποδίδοντας σχεδόν το πλήρες φορτίο. Δηλαδή τα δεδομένα που διαθέτουμε δεν καλύπτουν όλο το εύρος λειτουργίας της μηχανής, χωρίς όμως αυτό να επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το αποτέλεσμα της μοντελοποίησης. Στη συγκεκριμένη εγκατάσταση ως καύσιμο χρησιμοποιείται φυσικό αέριο, με κατώτερη θερμογόνο ικανότητα που εξαρτάται από την χρονική περίοδο που εξετάζουμε.

4.1.1 Επιλογή δεδομένων και παραμέτρων

Προκειμένου να περιοριστεί ο υπολογιστικό χρόνος, για τη μοντελοποίηση χρησιμοποιήθηκαν 1000 σημεία λειτουργίας από την περίοδο 29/4/2017 – 14/5/2017. Κατά την περίοδο αυτή, η θερμοκρασία περιβάλλοντος κυμαίνεται στο διάστημα [8.4,33.2] βαθμών κελσίου, και η βαρομετρική πίεση στο διάστημα [0.99,1.01] bar.

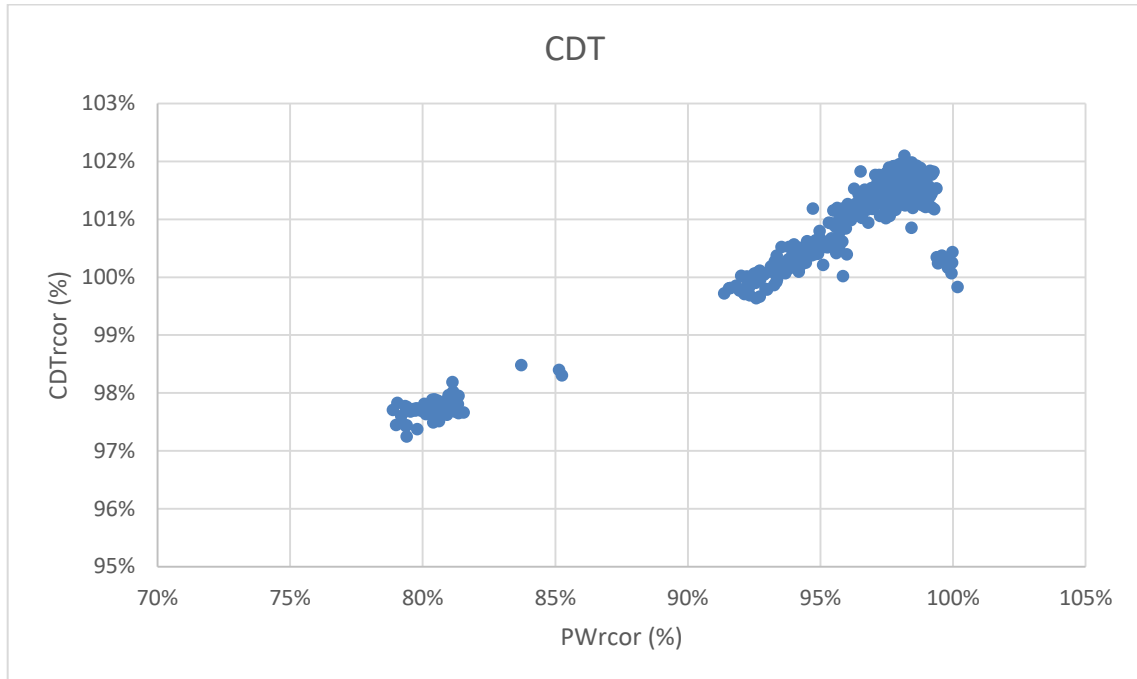
Μετρούμενα μεγέθη επιδόσεων

Τα μεγέθη τα οποία μετρούνται στην συγκεκριμένη εγκατάσταση, και για τα οποία έχουμε δεδομένα είναι τα εξής:

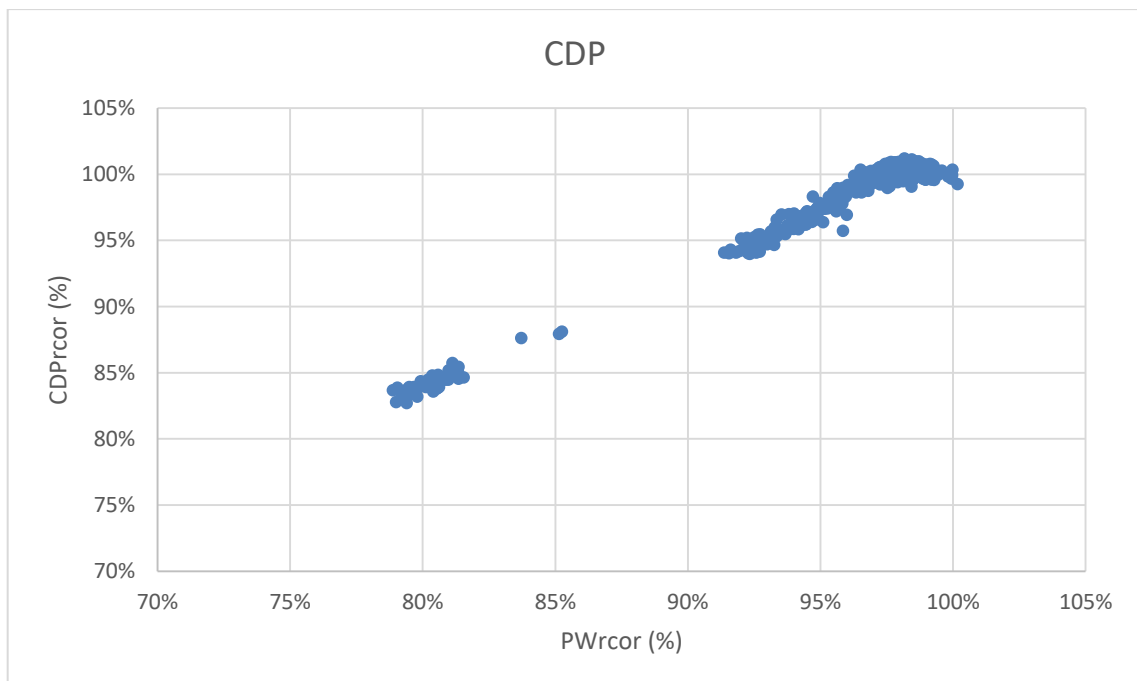
- Γωνία τοποθέτησης πτερυγίων IGVs (DangIGVs).
Η μέγιστη γωνία ανοίγματος είναι 86° , οπότε χρησιμοποιούμε την διαφορά της γωνίας τοποθέτησης με την μέγιστη.
- Ισχύς αεριοστροβίλου (PW)
- Ταχύτητα περιστροφής (NSD)
- Βαρομετρική πίεση περιβάλλοντος
- Απώλειες πίεσης στον αγωγό εισόδου
- Θερμοκρασία εισόδου στο συμπιεστή (Tt1)
- Σχετική υγρασία περιβάλλοντος (RH1)
- Στατική πίεση κατάθλιψης συμπιεστή (CDP)
- Θερμοκρασία κατάθλιψης συμπιεστή (CDT)
- Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων (EGT)
- Απώλειες πίεσης στον αγωγό εξόδου
- Παροχή καυσίμου (WF)
- Ελάχιστη θερμογόνος ικανότητα του καυσίμου (LHV)
- Θερμοκρασία του εγχυόμενου καυσίμου (FTT)
- Η θέση της βαλβίδας προθέρμανσης του αέρα εισόδου (IHBV)

Σημειώνεται ότι, ως πίεση του καυσίμου θεωρούμε την ατμοσφαιρική πίεση.

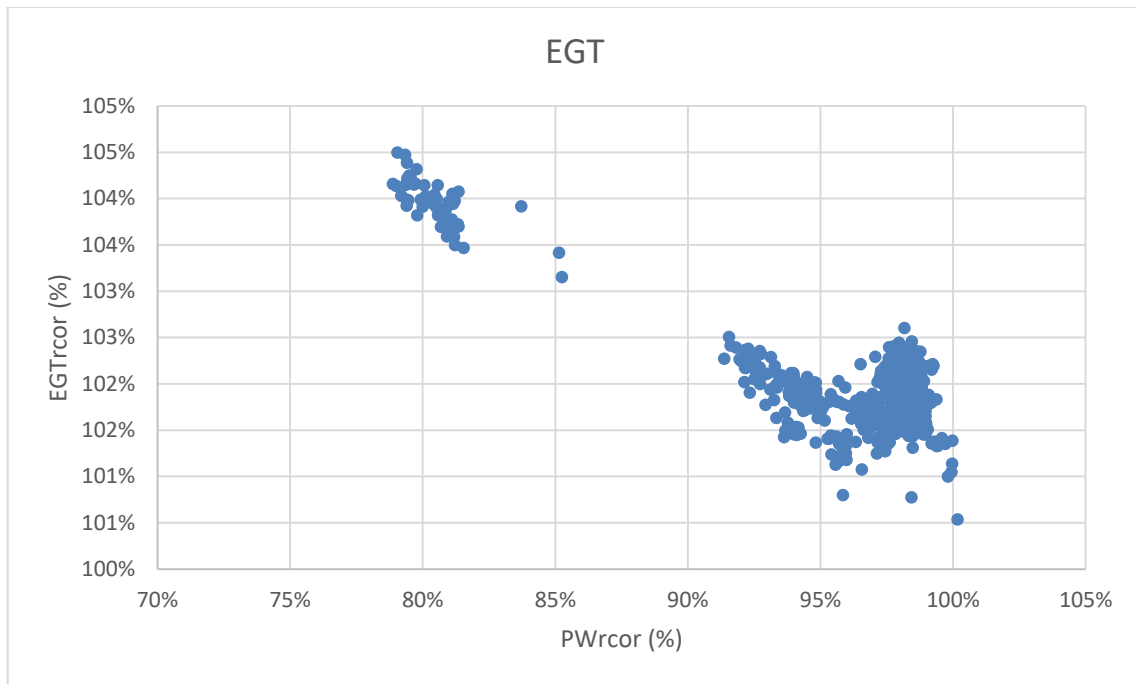
Παρακάτω παρουσιάζονται τα μετρούμενα μεγέθη που αφορούν τις επιδόσεις του αεριοτροβίλου, διορθωμένα ως προς την πίεση και την θερμοκρασία περιβάλλοντος και ορισμένα σε σχέση με το σημείο σχεδίασης, όπως αυτό δίνεται στην παράγραφο 7.3:



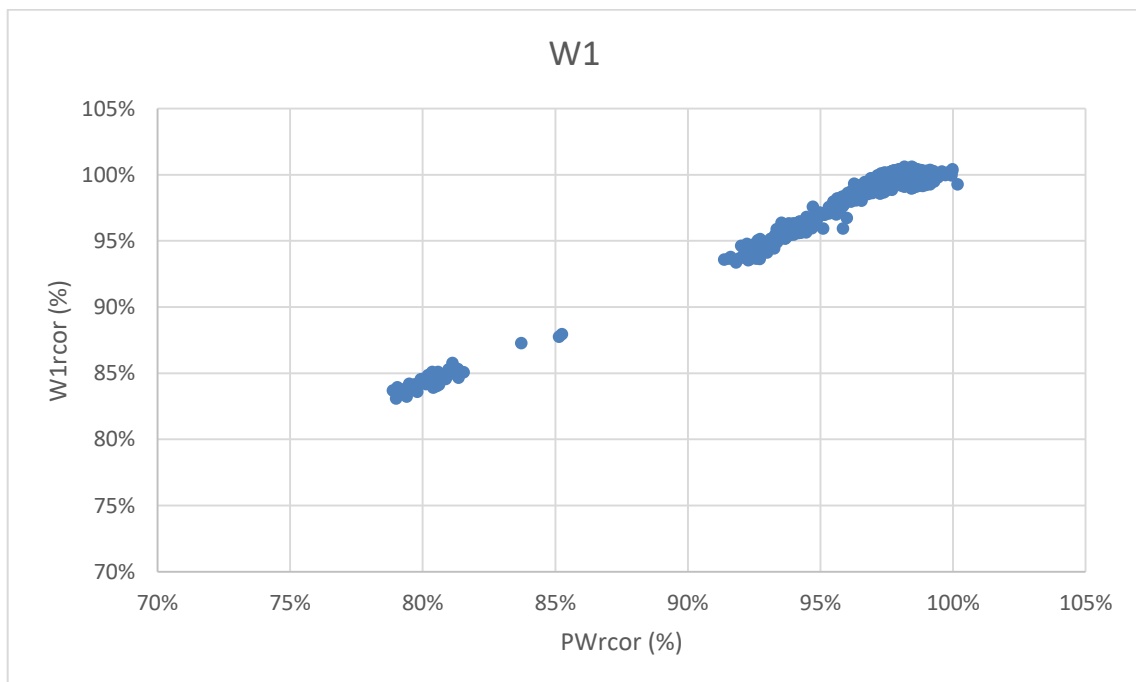
Σχήμα 4-1 Διάγραμμα διορθωμένης CDT συναρτήσει διορθωμένου φορτίου.



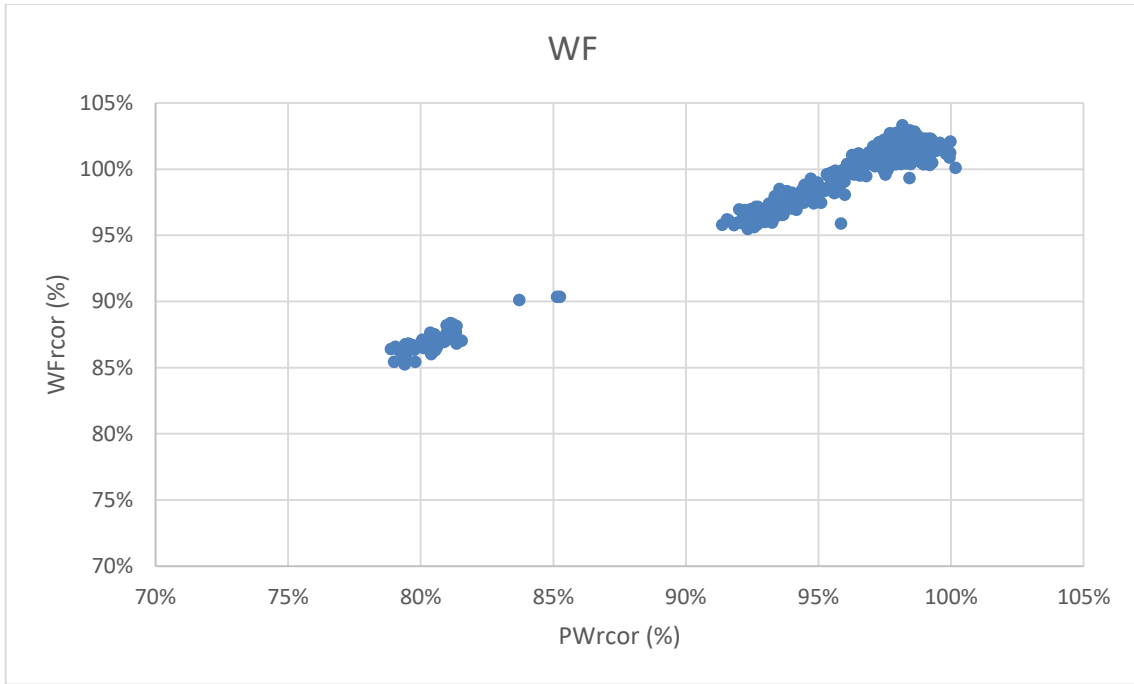
Σχήμα 4-2 Διάγραμμα διορθωμένης CDP συναρτήσει διορθωμένου φορτίου.



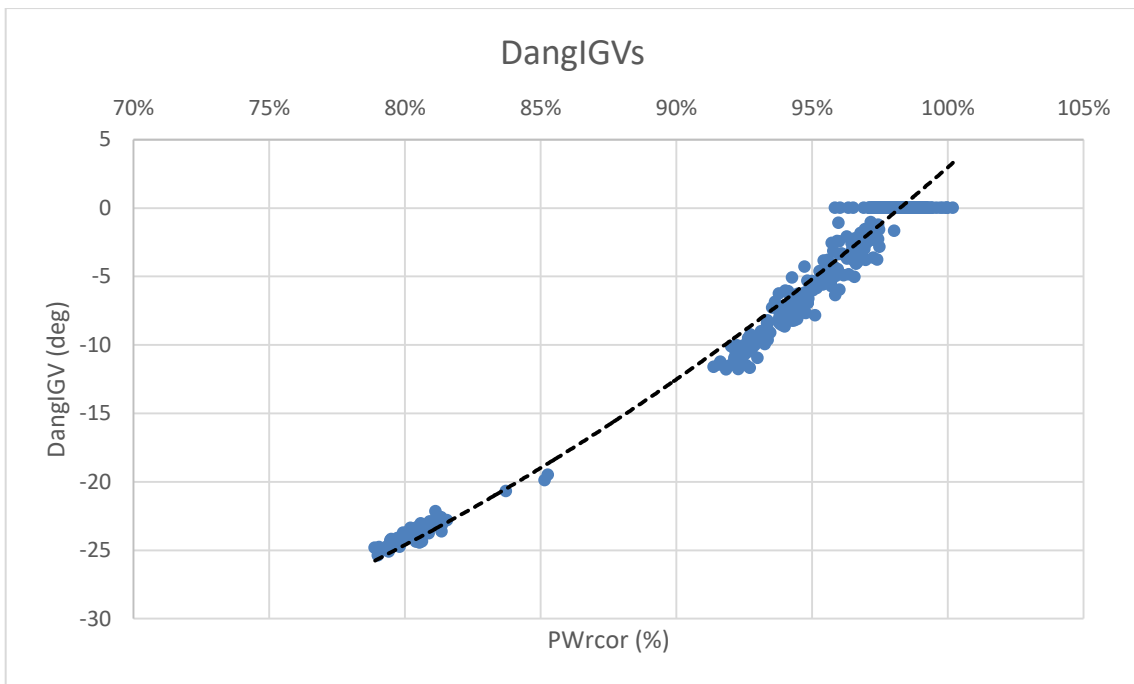
Σχήμα 4-3 Διάγραμμα διορθωμένης EGT συναρτήσει διορθωμένου φορτίου.



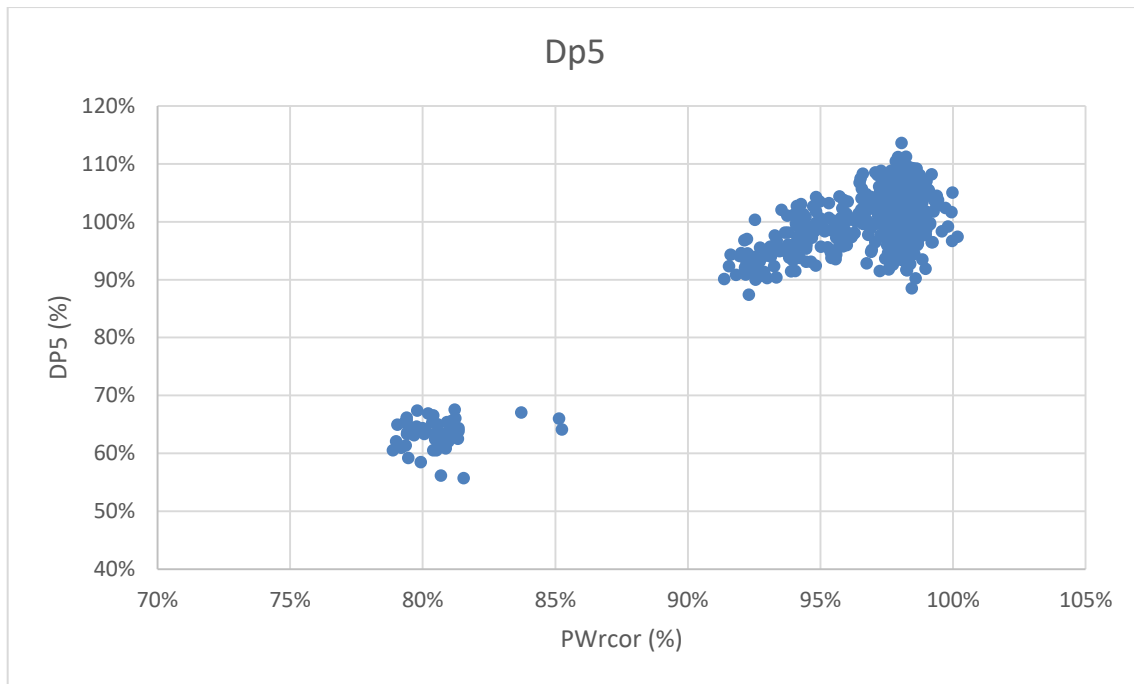
Σχήμα 4-4 Διάγραμμα διορθωμένης παροχής συναρτήσει διορθωμένου φορτίου.



Σχήμα 4-5 Διάγραμμα διορθωμένης παροχής καυσίμου συναρτήσει διορθωμένου φορτίου.

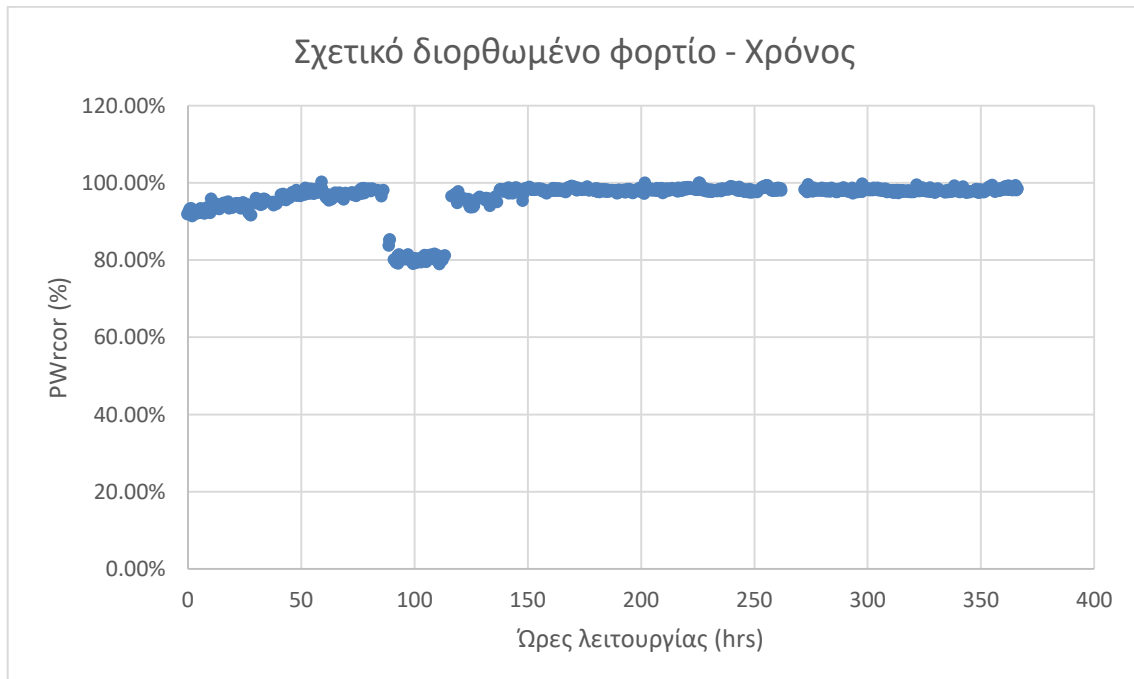


Σχήμα 4-6 Διάγραμμα θέσης IGV's συναρτήσει διορθωμένου φορτίου.

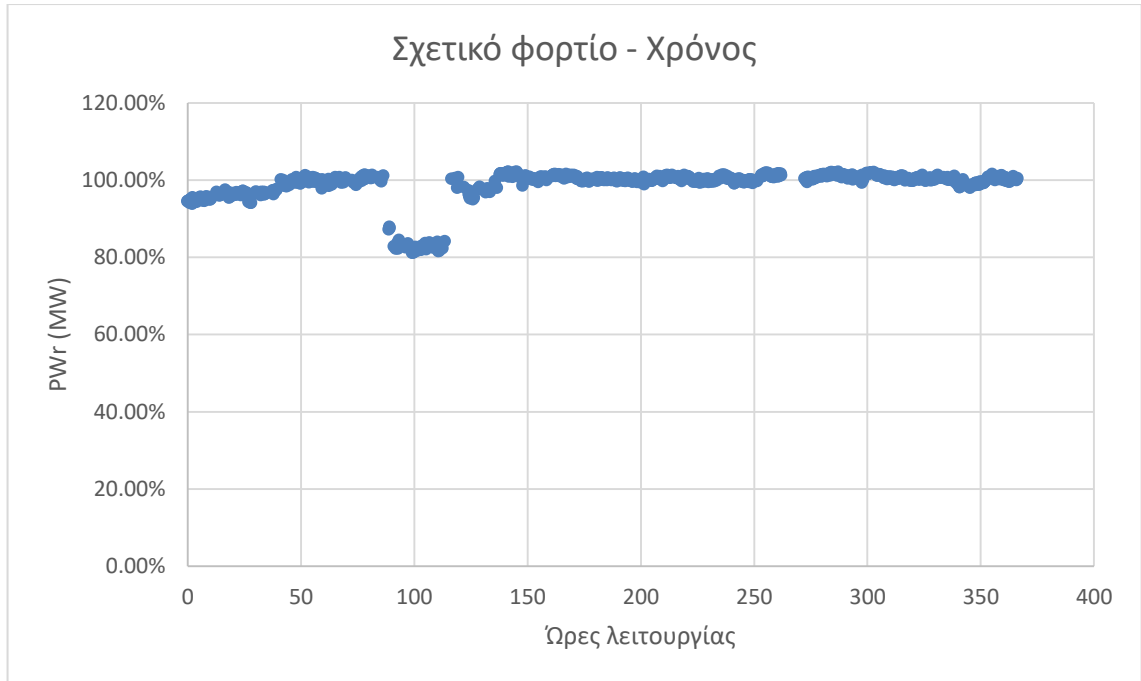


Σχήμα 4-7 Διορθωμένες απώλειες πίεσης αγωγού εξόδου συναρτήσει διορθωμένου φορτίου.

Στο Σχήμα 4-8, δίνεται διάγραμμα του σχετικού διορθωμένου φορτίου συναρτήσει των ωρών λειτουργίας, δηλαδή συναρτήσει του χρόνου. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα αυτό και στο Σχήμα 4-9, κατά την περίοδο που εξετάζουμε, ο συγκεκριμένος αεριοστρόβιλος λειτουργεί συνήθως στο 100% του φορτίου του, αποδίδοντας ισχύ κοντά στα 130 MW.



Σχήμα 4-8 Διάγραμμα σχετικού διορθωμένου φορτίου συναρτήσει των ωρών λειτουργίας



Σχήμα 4-9 Διάγραμμα σχετικού φορτίου συναρτήσει των ωρών λειτουργίας

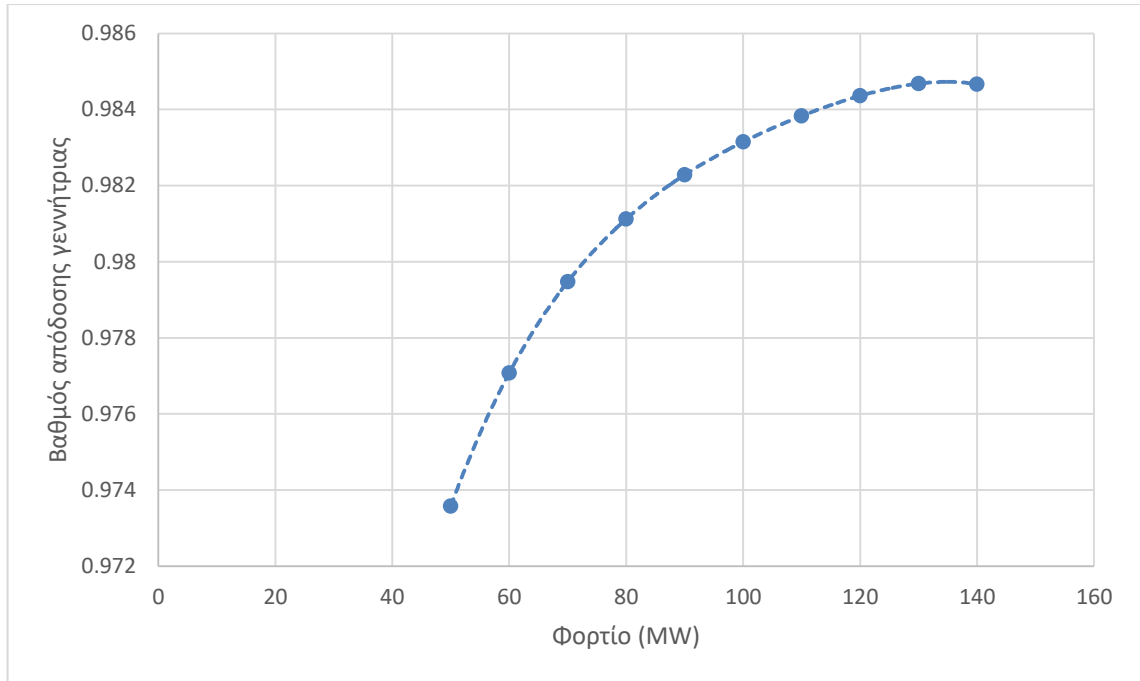
Επιλογή παραμέτρων

Στις παραμέτρους που απαιτούνται για τον υπολογισμό του σημείου σχεδίασης δόθηκαν τυπικές τιμές, όπως αυτές παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-1:

InEng.dPqP_in	0
D30.dPqP_in	0.01
Brn.dPqP_in	0.02
D50.dPqP_in	0.015
Brn.eff_in	0.999
ShH.eff	1
D30.Wbleed2	0.10
ShH.pwrOT	1400000

Πίνακας 4-1 Επιλεγμένες παράμετροι του GE 9E

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι, στα διαθέσιμα δεδομένα λειτουργίας δίνεται η τιμή της ισχύος που αποδίδει η γεννήτρια, δηλαδή έχει ληφθεί υπόψιν ο βαθμός απόδοσης της γεννήτριας. Έτσι, προκειμένου να υπολογίσουμε την πραγματική αποδιδόμενη ισχύ του αεριοστροβίλου, χρησιμοποιούμε το διάγραμμα του βαθμού απόδοσης της γεννήτριας συναρτήσει του φορτίου που δίνεται στο Σχήμα 4-10.



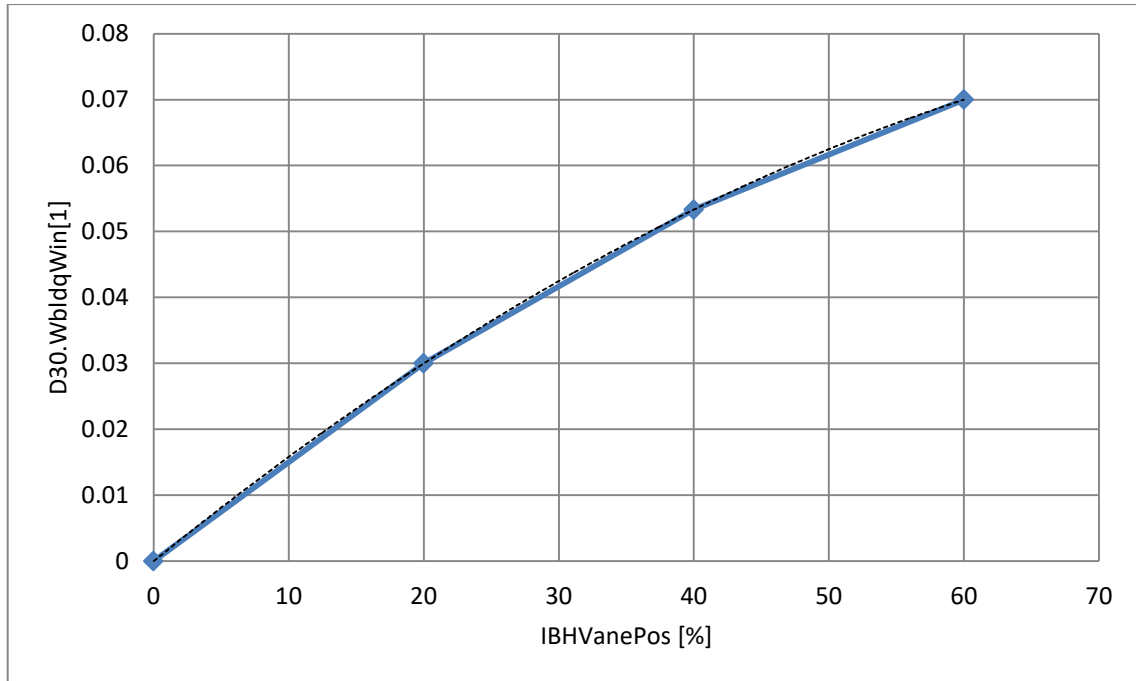
Σχήμα 4-10 Βαθμός απόδοσης της γεννήτριας συναρτήσει του φορτίου

Το παραπάνω διάγραμμα προέκυψε από ζευγάρια σημείων τα οποία παρεμβάλλει μια πολυωνμική καμπύλη τετάρτου βαθμού. Έχοντας έτσι το βαθμό απόδοσης της γεννήτριας για κάθε τιμή του φορτίου, υπολογίζουμε την ισχύ που παράγει ο αεριοστρόβιλος.

Ανάλογη διαδικασία ακολουθούμε και για τον υπολογισμό του ποσοστού της παροχής απομάστευσης για την προθέρμανση του αέρα εισόδου (inlet heating bleed), αφού έχουμε το παρακάτω πρόγραμμα ρύθμισης αυτής με τη θέση της βάνας παράκαμψης:

5			NumberofIBHVanePos		
0	20	40	60	100	IBHVanePos [%]
0	0,03	0,0533	0,07	0,07	D30.WbldqWin[1]

Από το παραπάνω πρόγραμμα προκύπτει το διάγραμμα του σχήματος Σχήμα 4-11:



Σχήμα 4-11 Διάγραμμα ποσοστού inlet heating bleed συναρτήσει της θέσης της βάνας

Σημειώνεται ότι η απομάστευση για την προθέρμανση του αέρα εισόδου (inlet heating bleed), επιλέχθηκε να μοντελοποιηθεί ως overboard bleed και έτσι το πρόγραμμα λαμβάνει υπόψιν του ως Tt1 την θερμοκρασία εισόδου του αέρα στο συμπιεστή.

4.1.2 Σημείο σχεδίασης

Ως σημείο σχεδίασης επιλέχθηκε ένα από τα σημεία λειτουργίας της εξεταζόμενης περιόδου. Το σημείο αυτό θα πρέπει να ικανοποιεί τις παρακάτω προϋποθέσεις:

1. Να έχει συνθήκες περιβάλλοντος κοντά στις τυπικές συνθήκες αναφοράς (ISO),
2. Να έχει τα πτερύγια IGVs πλήρως ανοικτά,
3. Να αποδίδει ισχύ κοντά στην ισχύ του πλήρους φορτίου,
4. Το ποσοστό του inlet heating bleed να είναι σχεδόν μηδενικό.

Στον Πίνακα 4-2 παρουσιάζεται το σημείο σχεδίασης που επιλέγουμε:

PT1 (Pa)	TT1 (K)	WAR	PW (W)	NMECH (rpm)	DP5 (Pa)	FTT (K)	DANG.IGV (deg)	CDT (K)
100959,60	283,64	0,01	132752063,27	3001,44	2961,85	342,95	0,00	620,13

CDP (Pa)	TT8 (K)	WF (K)	W1 (kg/sec)	N THERMAL (%)	CPR	WGAS (kg/sec)	D30bleed (%)	FLHV (J/kgK)
296422,10	819,88	7,82	423,01	0,34	13,18	432,36	0,00	49288032,00

Πίνακας 4-2 Σημείο σχεδίασης GE 9E

Η θέση του σημείου σχεδίασης πάνω στον χάρτη, επιλέγεται να είναι:

- Στο 100% των διορθωμένων χαρακτηριστικών στροφών των χαρτών (δηλαδή επιλέγουμε τις μεταβλητές $CmpH.NcRdes$, $TrbH.NcRdes = 1$),
- αριθμούς BETA και ZETA συμπιεστή και στροβίλου αντίστοιχα στο 0,5 (BETA=0.5 , ZETA=0.5).

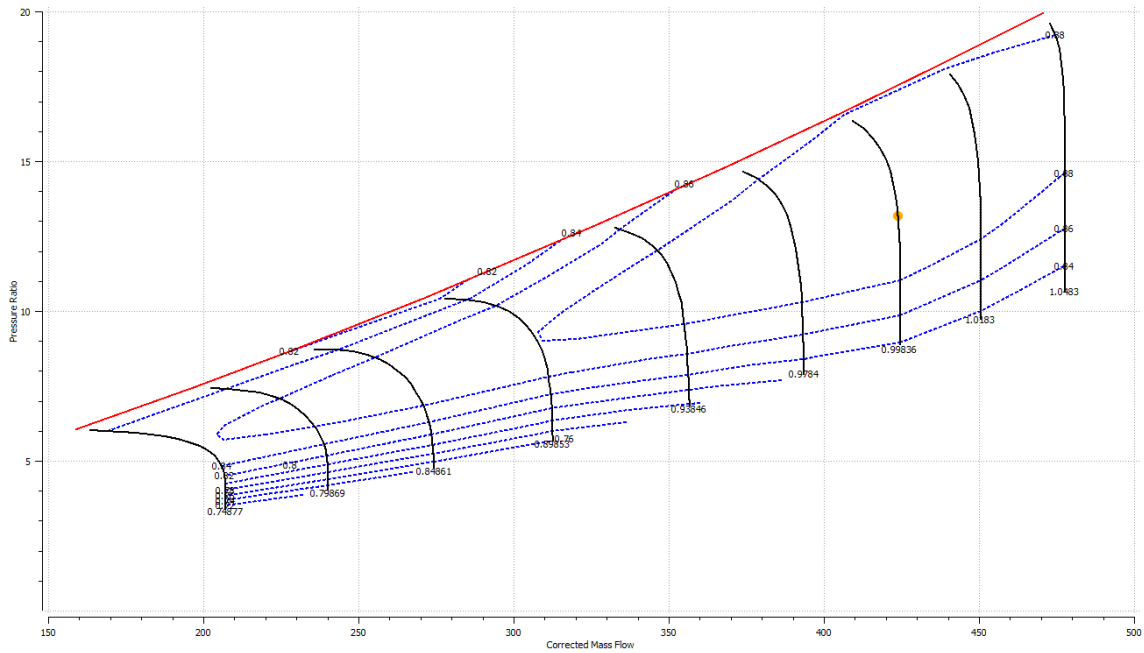
Εισάγοντας στο αρχείο εισόδου τα απαραίτητα δεδομένα και τις παραμέτρους, υπολογίζεται το σημείο σχεδίασης. Στον Πίνακα 4-3, δίνονται ορισμένα χαρακτηριστικά μεγέθη των επιδόσεων του αεριοστροβίλου, όπως βαθμοί απόδοσης, λόγοι πίεσης και ειδικά μεγέθη, ως αποτελέσματα του υπολογισμού του σημείου σχεδίασης.

E3 (-)	0,8959
E5 (-)	0,8919
EP3 (-)	0,9255
EP5 (-)	0,8575
WF (kg/s)	7,822051
Brn.FARinj (-)	0,020668
Perf.effTh (-)	0,3443
Qrate (kJ/(kWh))	10454,9827
SFC (kg/(kWh))	0,2121
sPwr (W*sec/kg)	312556,6830

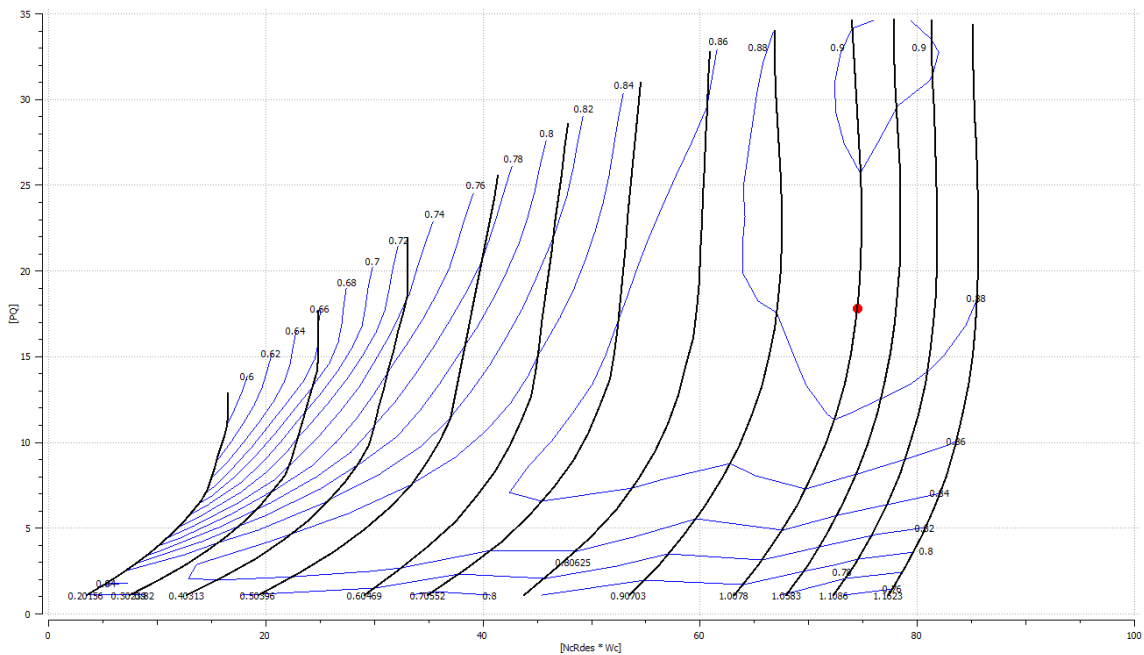
Πίνακας 4-3 Μεγέθη επιδόσεων σημείου σχεδίασης

Σημειώνεται ότι στην μοντελοποίηση του 9E, επιλέγουμε ως οριακές μεταβλητές τις: CDT, CDP, EGT, PWSD και WF, δηλαδή γίνεται μοντελοποίηση με βάση το καύσιμο. Επομένως η παροχή W1 είναι εδώ το μόνο ‘‘ελεύθερο’’ μέγεθος, που μπορεί να δείξει την ποιότητα του υπολογισμού. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η υπολογιζόμενη τιμή της W1 διαφέρει κατά 0,4074%.

Στα παρακάτω σχήματα δίνονται οι χάρτες (συμπιεστή και στροβίλου) όπως προσαρμόστηκαν κατά τον υπολογισμό του σημείου σχεδίασης:



Σχήμα 4-12 Αρχικός χάρτης και σημείο σχεδίασης συμπιεστή του GE 9E

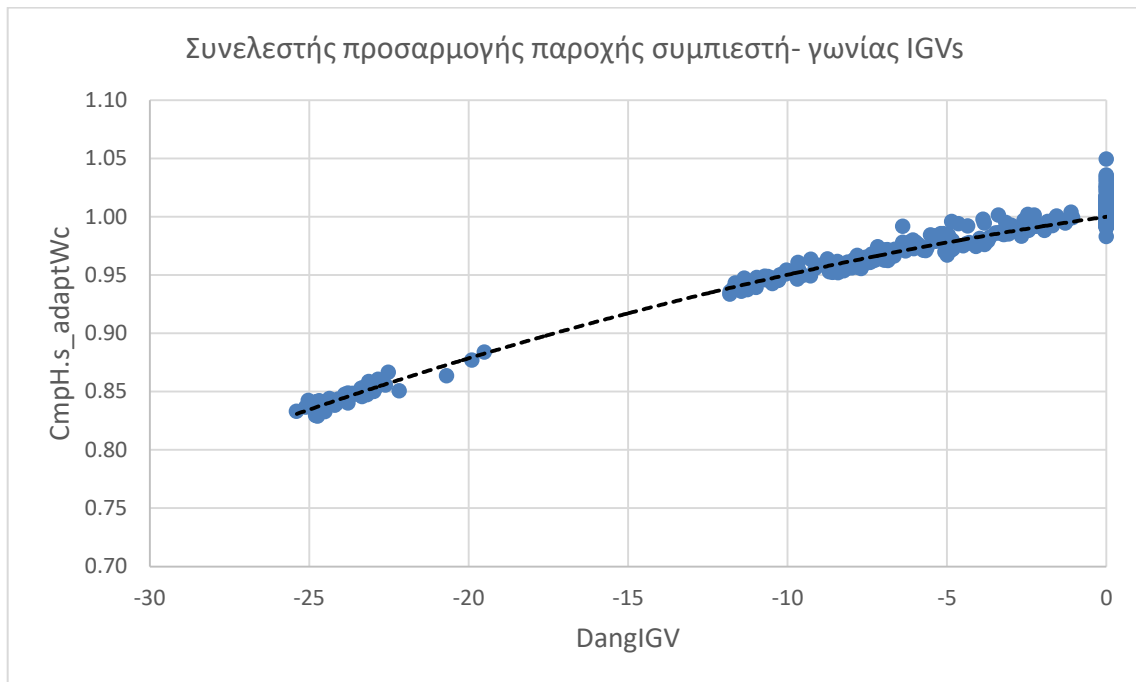


Σχήμα 4-13 Αρχικός χάρτης και σημείο σχεδίασης στροβίλου του GE 9E

4.1.3 Σημεία λειτουργίας εκτός σημείου σχεδίασης

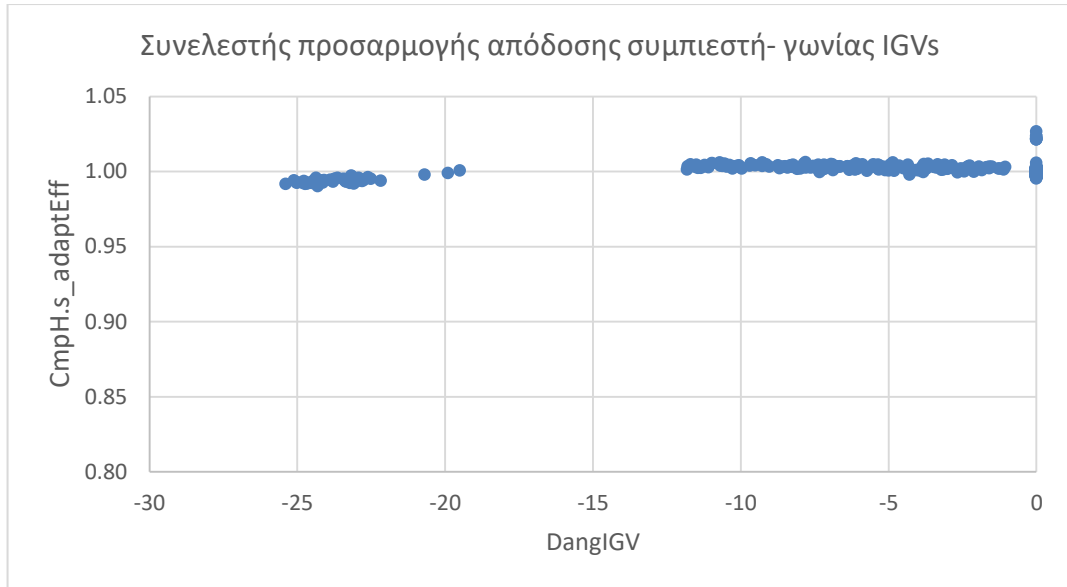
Αφού έχει υπολογιστεί το σημείο σχεδίασης, εξετάζονται έπειτα τα σημεία εκτός σχεδίασης. Αυτό που θέλουμε να δούμε είναι, το πόσο αποκλίνουν τα υπολογιζόμενα μεγέθη από τις αντίστοιχες μετρήσεις για το δεδομένο χάρτη. Οι οριακές μεταβλητές που επιλέγουμε εδώ, είναι ανάλογες με αυτές του σημείου σχεδίασης, δηλαδή χρησιμοποιούμε τις: CDT, CDP, EGT και WF. Εκτελούμε λοιπόν την λειτουργία προσαρμογής χαρτών (MODE = 4) και προκύπτουν οι συντελεστές προσαρμογής για

τους χάρτες του συμπιεστή και του στροβίλου. Παρατηρούμε ότι οι συντελεστές προσαρμογής απέχουν αρκετά από τη μονάδα, κυρίως όμως ο συντελεστής προσαρμογής παροχής του συμπιεστή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, εφόσον οι στροφές του συμπιεστή είναι σταθερές (σύγχρονες στροφές της γεννήτριας), η παροχή που διέρχεται από αυτόν καθορίζεται μόνο από την ρύθμιση της γωνίας των IGVs. Η επίδραση των IGVs, η οποία μέχρι το σημείο αυτό δεν έχει ληφθεί υπόψιν, καθορίζει ουσιαστικά τη γεωμετρία του χάρτη του συμπιεστή και εκφράζεται μέσω δύο συντελεστών. Για την εύρεση των συντελεστών αυτών δημιουργείται το διάγραμμα των συντελεστών προσαρμογής παροχής του συμπιεστή συναρτήσει της γωνίας DangIGV, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-14:



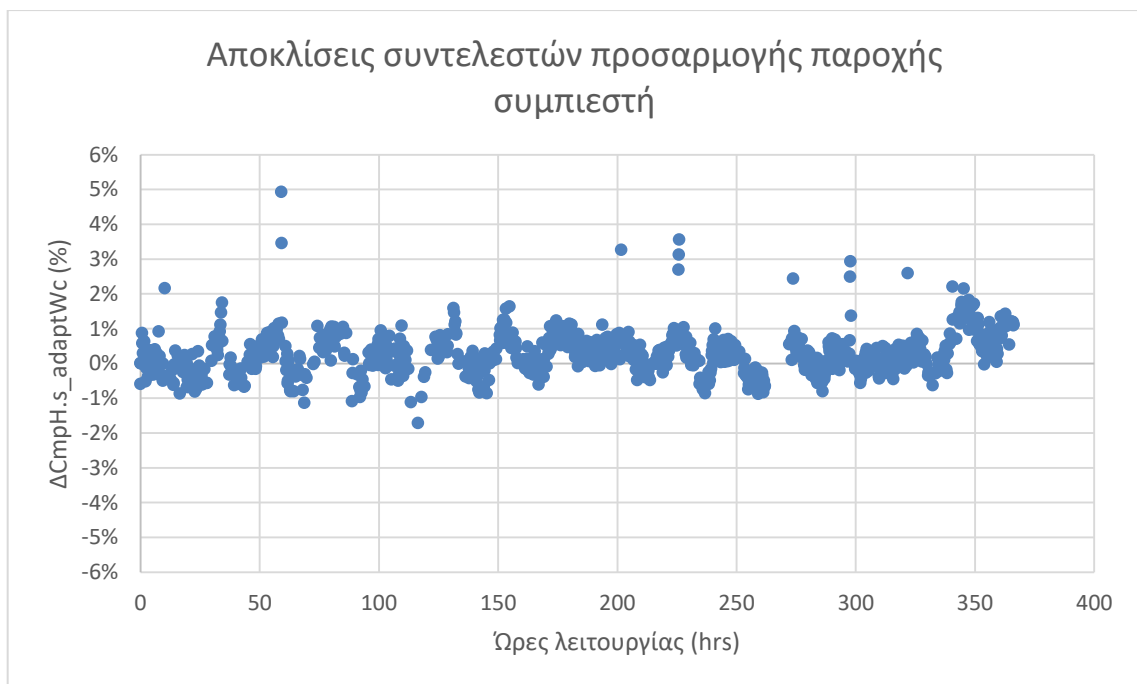
Σχήμα 4-14 Συντελεστές προσαρμογής διορθωμένης παροχής συμπιεστή συναρτήσει της γωνίας των IGVs

Οι συντελεστές του πολυωνύμου εισάγονται στο αρχείο εισόδου και υπολογίζονται ξανά οι συντελεστές προσαρμογής των χαρτών. Σημειώνεται ότι, εξετάζεται και η συσχέτιση των συντελεστών προσαρμογής απόδοσης του συμπιεστή και γωνίας των IGVs, ωστόσο δεν προκύπτει κάποια σημαντική εξάρτιση όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-15. Έτσι στους αντίστοιχους συντελεστές δίνεται η τιμή 0.

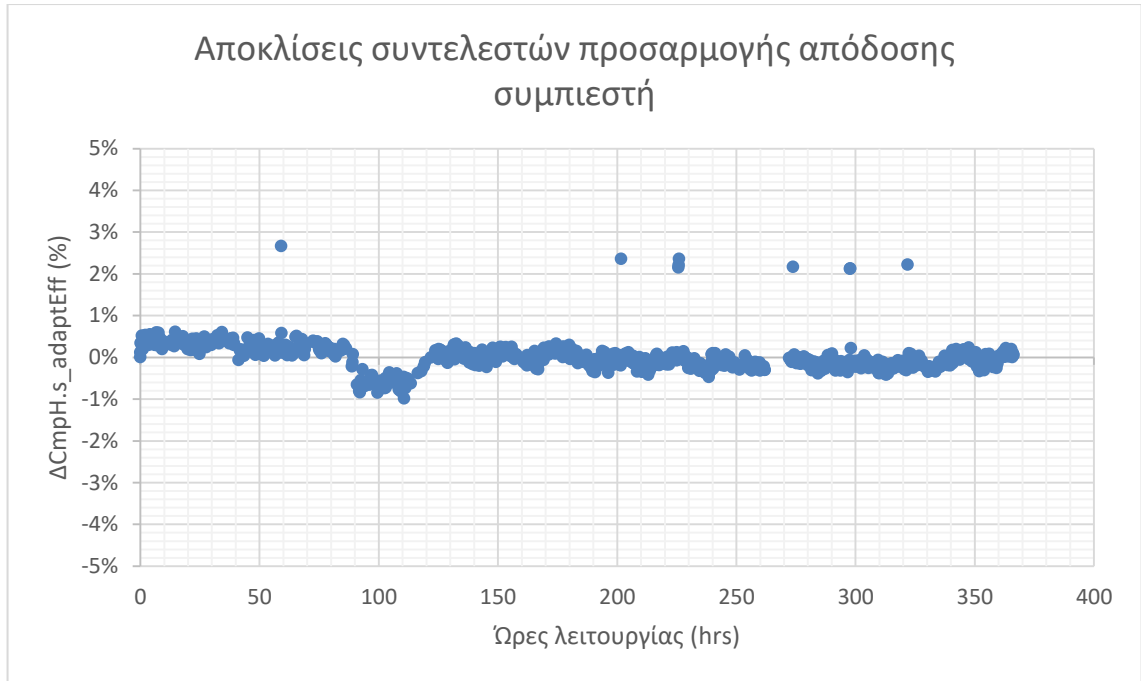


Σχήμα 4-15 Συντελεστές προσαρμογής απόδοσης συμπιεστή συναρτήσει της γωνίας των IGVs

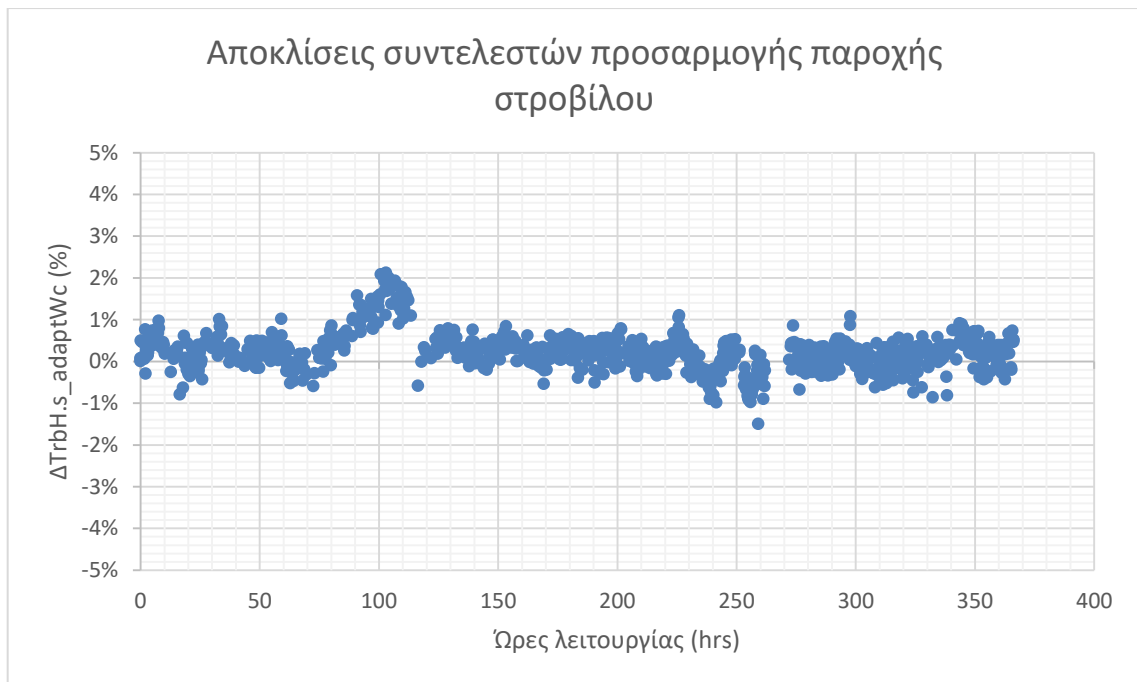
Προκύπτουν έτσι νέοι συντελεστές προσαρμογής χαρτών, κατασκευάζονται τα παρακάτω διαγράμματα και ελέγχεται εάν αυτοί είναι μέσα στο επιθυμητό εύρος αποκλίσεων.



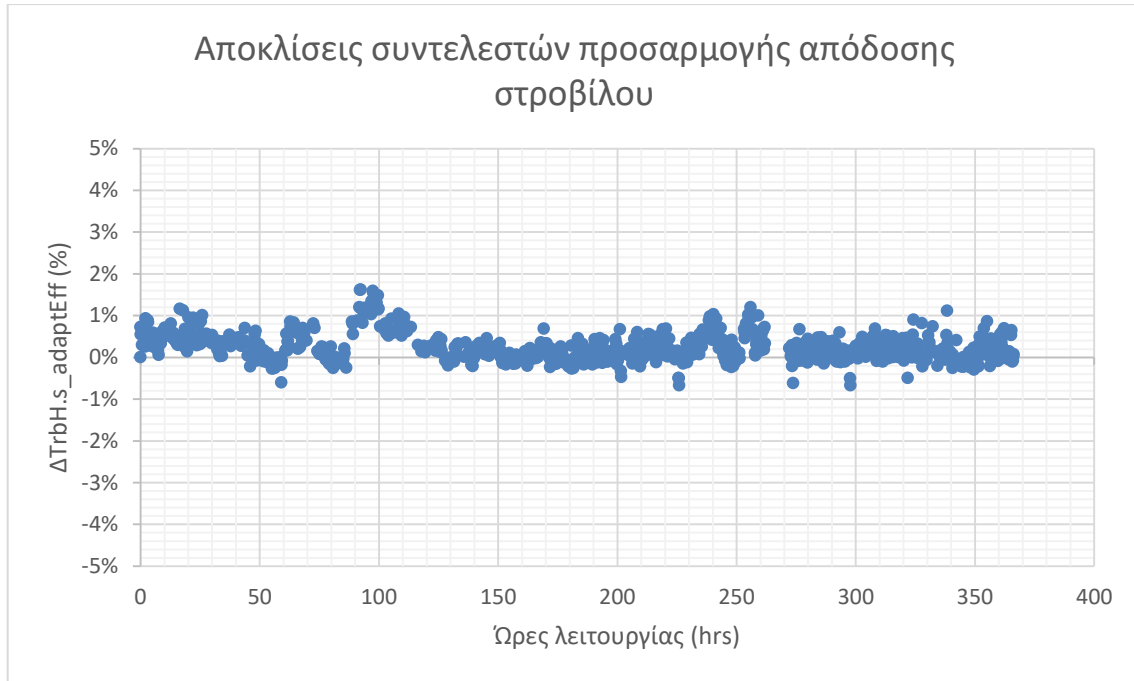
Σχήμα 4-16 Αποκλίσεις συντελεστών προσαρμογής παροχής συμπιεστή χωρίς καμία διόρθωση



Σχήμα 4-17 Αποκλίσεις συντελεστών προσαρμογής απόδοσης συμπιεστή χωρίς
καμία διόρθωση



Σχήμα 4-18 Αποκλίσεις συντελεστών προσαρμογής παροχής στροβίλου χωρίς
καμία διόρθωση

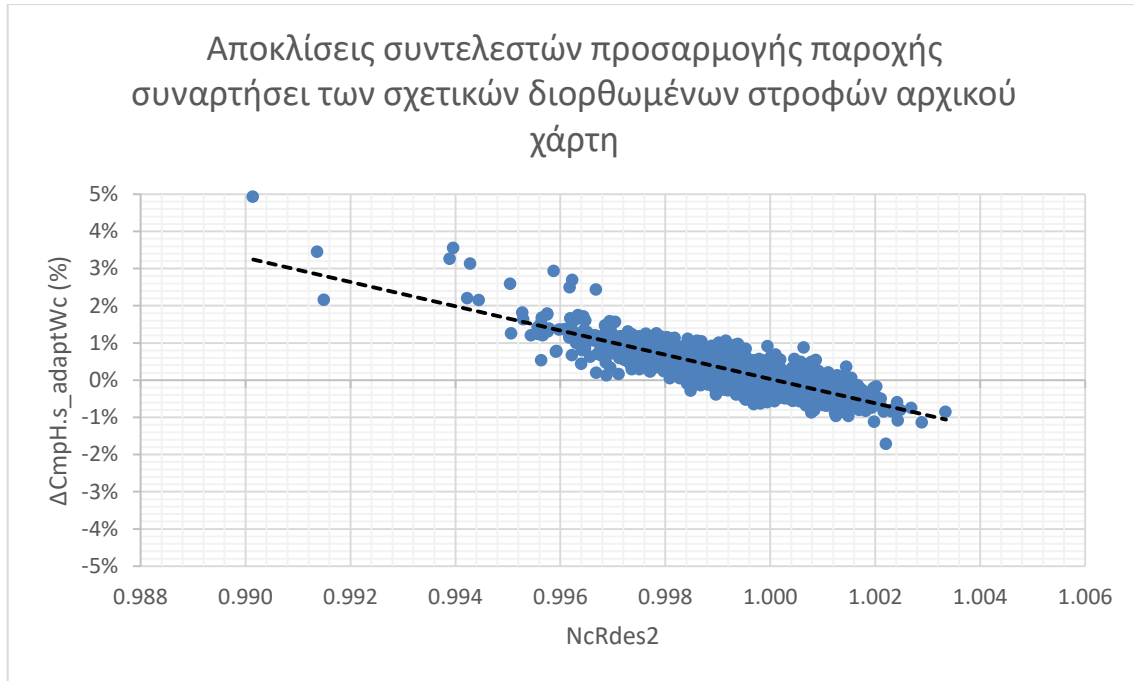


**Σχήμα 4-19 Αποκλίσεις συντελεστών προσαρμογής απόδοσης στροβίλου χωρίς
καμία διόρθωση**

Παρατηρούμε ότι οι αποκλίσεις των συντελεστών προσαρμογής παροχής του συμπιεστή αποκλίνουν από τη μονάδα σε ένα εύρος $\pm 4\%$, ενώ για τους υπόλοιπους συντελεστές οι αποκλίσεις είναι μικρότερες. Για τη μείωση του εύρους αποκλίσεων στο επιθυμητό $\pm 1\%$ εφαρμόζουμε τις διορθώσεις που αναλύονται στην επόμενη παράγραφο.

4.1.4 Διόρθωση μοντέλου

Εφόσον έχει γίνει υπολογιστεί η επίδραση των πτερυγίων IGVs, εξετάζονται εάν οι αποκλίσεις που εμφανίζονται θα περιοριστούν μέσω μιας τοπικής προσαρμογής του χάρτη του συμπιεστή. Με τον όρο “τοπική προσαρμογή” εννοούμε, την μετακίνηση μερικών χαρακτηριστικών του χάρτη, όπου αυτή είναι απαραίτητη. Το εάν υπάρχουν χαρακτηριστικές και ποιες είναι αυτές, το εξετάζουμε κατασκευάζοντας το διάγραμμα που απεικονίζεται στο Σχήμα 4-20:



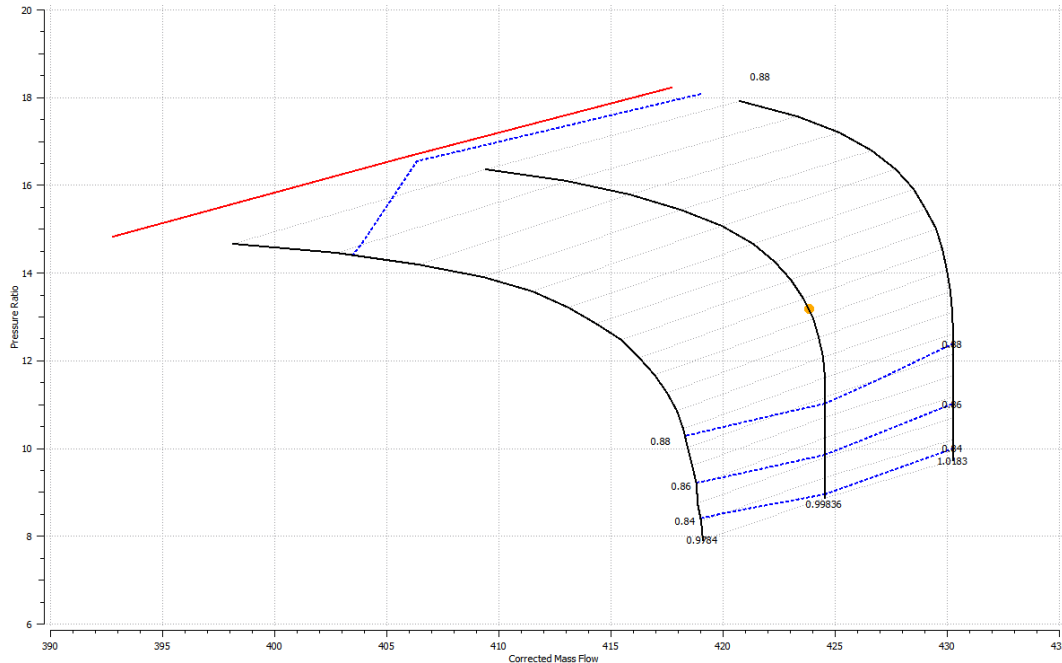
Σχήμα 4-20 Αποκλίσεις συντελεστών προσαρμογής παροχής συναρτήσεων των σχετικών διορθωμένων στροφών του αρχικού χάρτη

Από το παραπάνω σχήμα, η συσχέτιση των δύο αυτών μεγεθών είναι εμφανής και άρα χρειάζεται να εφαρμοστεί η τοπική προσαρμογή. Όπως βλέπουμε στο Σχήμα 4-20, τα εξεταζόμενα σημεία λειτουργίας, μας δίνουν πληροφορία μόνο για το εύρος [0,99,1,02] των σχετικών διορθωμένων στροφών, το οποίο αντιστοιχεί στις χαρακτηριστικές 0,98 και 1 του αρχικού χάρτη. Για την ομαλή διόρθωση του χάρτη και την διατήρηση φυσιολογικών αποστάσεων μεταξύ των χαρακτηριστικών, επιλέγεται να διορθωθεί και η χαρακτηριστική που αντιστοιχεί στο 1,02. Επειδή όμως το ποσοστό που ορίζει η γραμμική σχέση διόρθωσης φέρνει την χαρακτηριστική 1,02 σχεδόν πάνω στην 1, επιλέγεται να διορθωθεί κατά ένα μικρότερο ποσοστό, δηλαδή κατά -3,96%. Οι 0,98 και 1 διορθώνονται κατά 7,07% και 0,56% αντίστοιχα, όπως ορίζει ο Πίνακας 4-4:

Χαρακτηριστικές αρχικού χάρτη	Διόρθωση (%)
0,75	-
0,8	-
0,85	-
0,9	-
0,94	-
0,98	7,07%
1	0,56%
1,02	-5,95%
1,05	-

Πίνακας 4-4 Τοπική προσαρμογή χάρτη συμπιεστή 9E

Ο χάρτης του συμπιεστή που προκύπτει μαζί με το σημείο σχεδίασης απεικονίζεται παρακάτω στο Σχήμα 4-21:



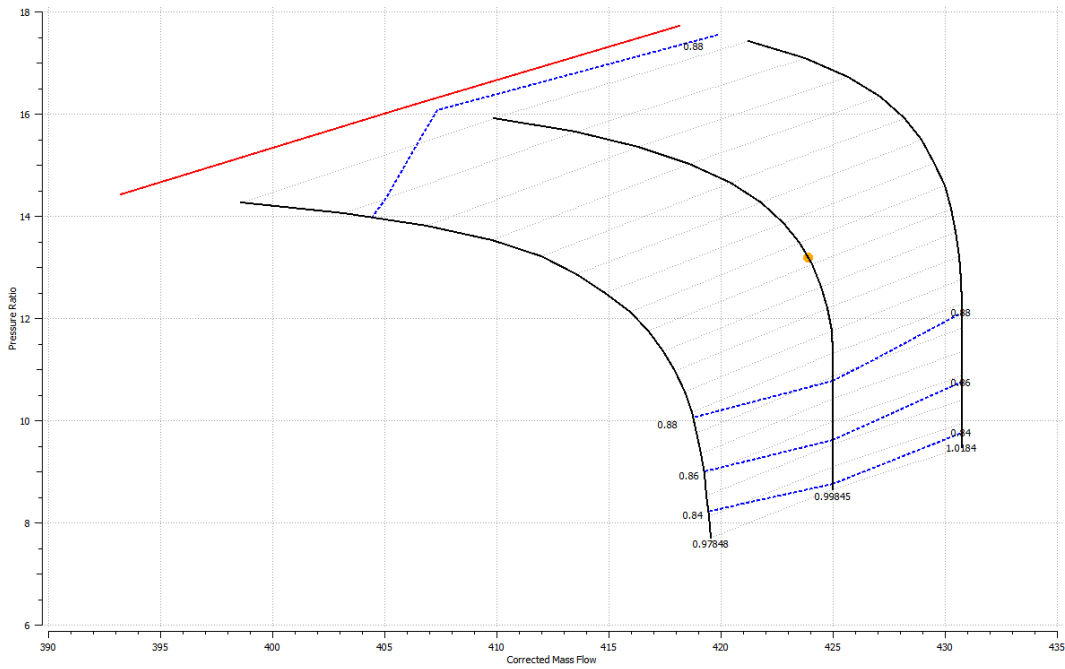
Σχήμα 4-21 Χάρτης συμπιεστή του 9E μετά την τοπική προσαρμογή

Το επόμενο βήμα της διαδικασίας είναι η βελτιστοποίηση της θέσης του σημείου σχεδίασης στους χάρτες του συμπιεστή και του στροβίλου. Για το σκοπό αυτό επιλέγουμε να αναζητηθεί η βέλτιστη θέση, μεταβάλλοντας την τιμή των παρακάτω παραμέτρων, μεταξύ των ορίων που αναφέρονται δίπλα:

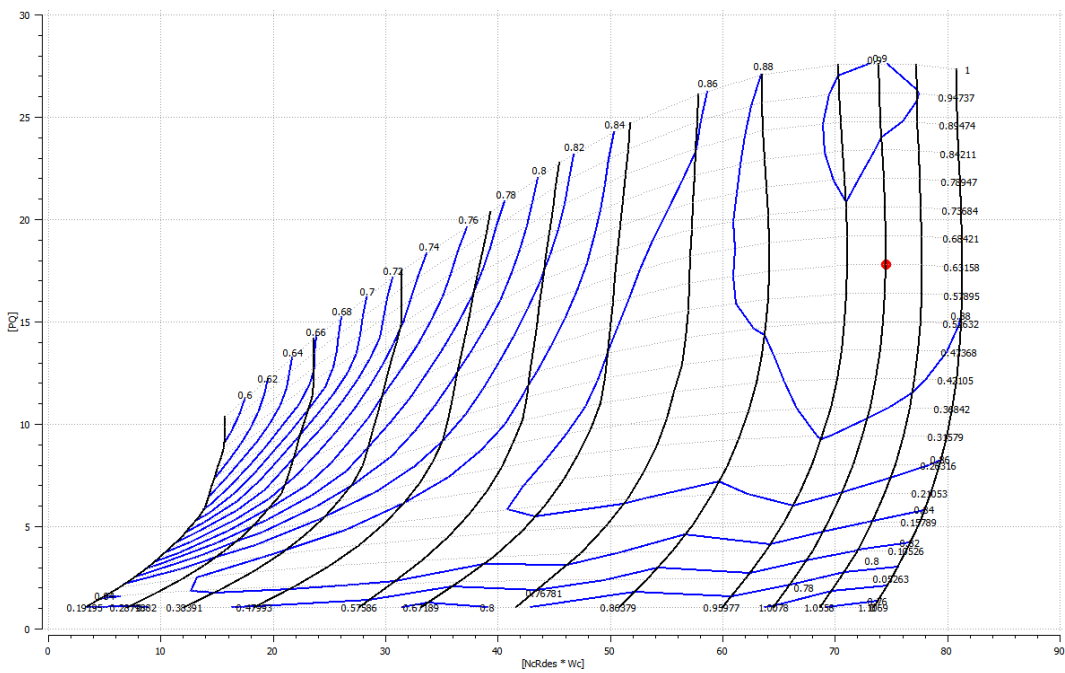
1. BETA: 0.3-0.85
2. ZETA: 0.3-0.85
3. CmpH.NcRdes: 0.98-1.02
4. TrbH.NcRdes: 0.95-1.1

Πρέπει να τονισθεί ότι, κατά την διάρκεια της λειτουργίας βελτιστοποίησης και κάθε φορά που διορθώνεται η θέση του σημείου σχεδίασης, θα πρέπει να αλλάξουν και οι αντίστοιχοι συντελεστές προσαρμογής λόγω γωνίας IGV's που υπολογίστηκαν παραπάνω. Για να μην επαναλαμβάνεται εξωτερικά αυτή η διαδικασία, και οι δύο συντελεστές τίθενται προς διόρθωση κατά την λειτουργία της βελτιστοποίησης, με όρια $\pm 20\%$ της αρχικής τους τιμής.

Το πείραμα τίθεται σε λειτουργία βελτιστοποίησης (MODE 2) και το πρόγραμμα λαμβάνει υπόψιν όλα τα σημεία λειτουργίας, για να ελαχιστοποιήσει συνολικά τα σφάλματα των οριακών μεταβλητών: CDT, CDP, EGT και WF. Όταν η διαδικασία σταματήσει, οι μεταβαλλόμενες παράμετροι έχουν πλέον τις βέλτιστες τιμές και η βέλτιστη θέση του σημείου σχεδίασης είναι πλέον αυτή που απεικονίζεται στο Σχήμα 4-22 και στο Σχήμα 4-23 αντίστοιχα:

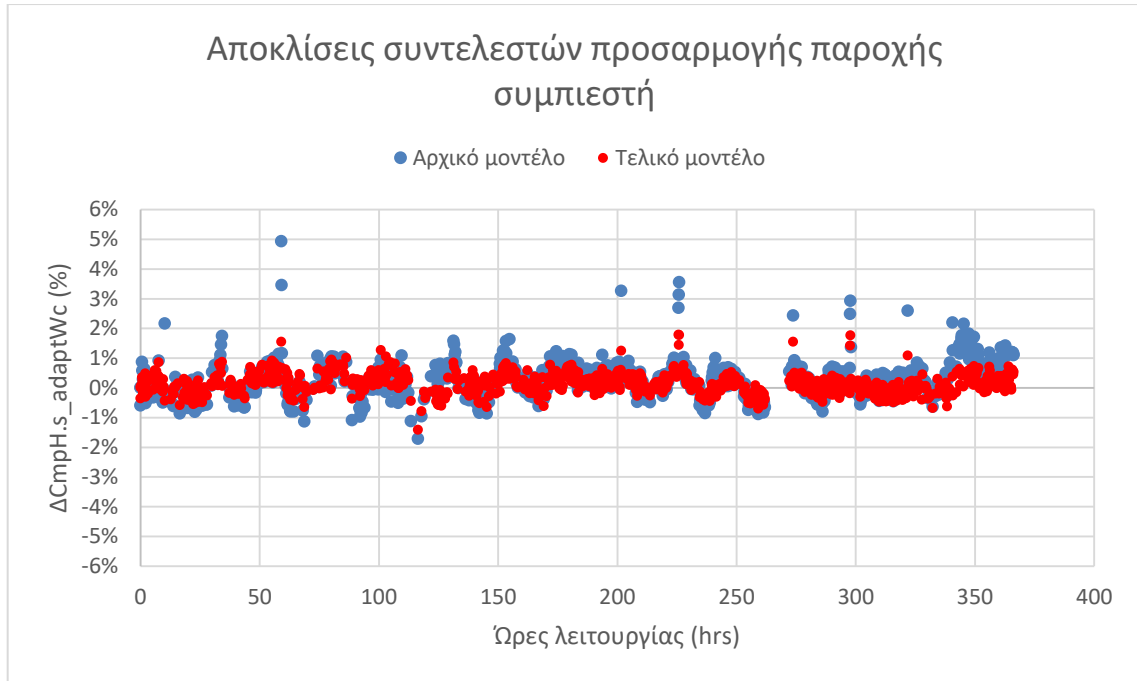


Σχήμα 4-22 Θέση του σημείου σχεδίασης μετά την βελτιστοποίηση (συμπιεστής)

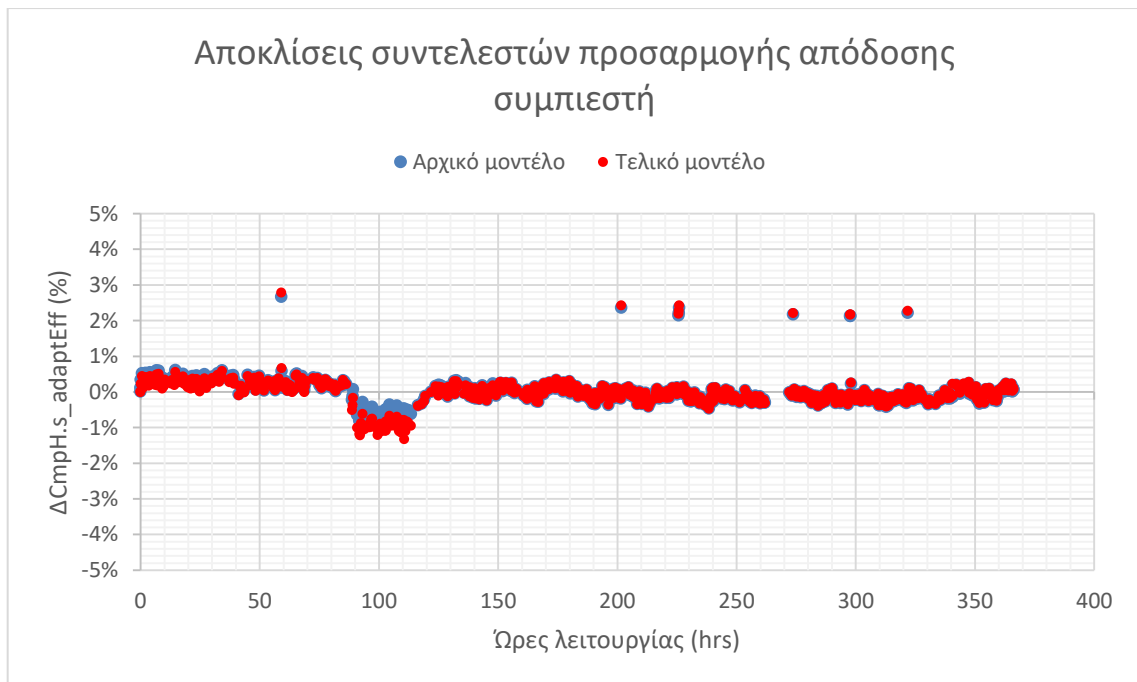


Σχήμα 4-23 Θέση του σημείου σχεδίασης μετά τη βελτιστοποίηση (στρόβιλος)

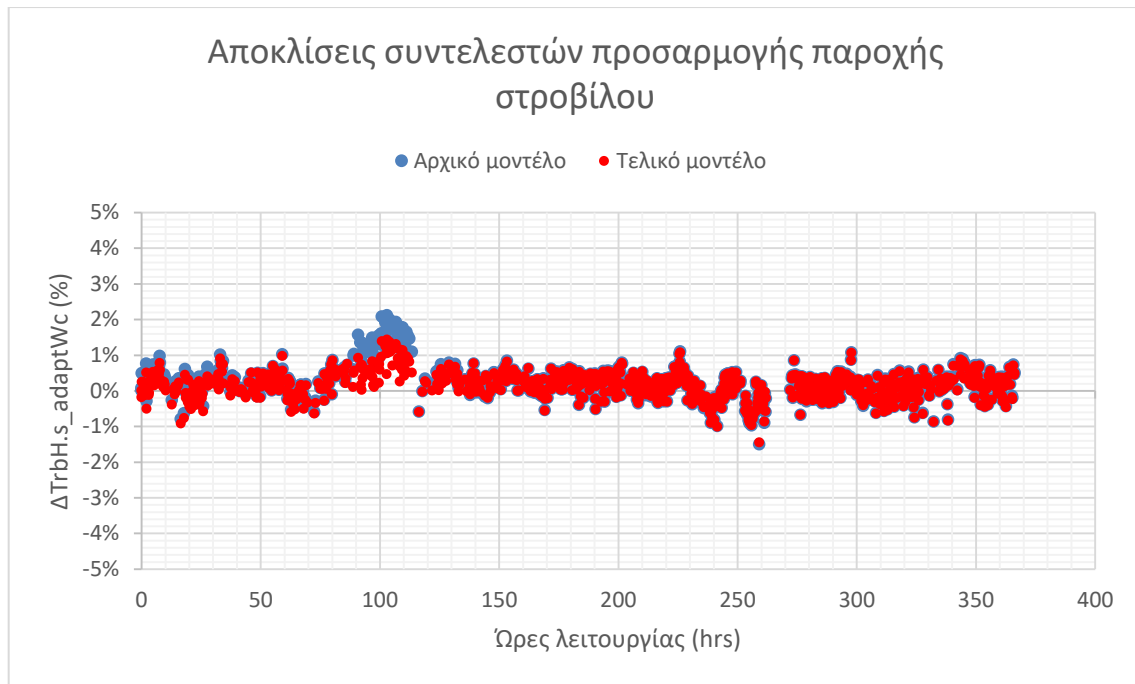
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται οι αποκλίσεις των συντελεστών προσαρμογής πριν και μετά την συνολική διόρθωση:



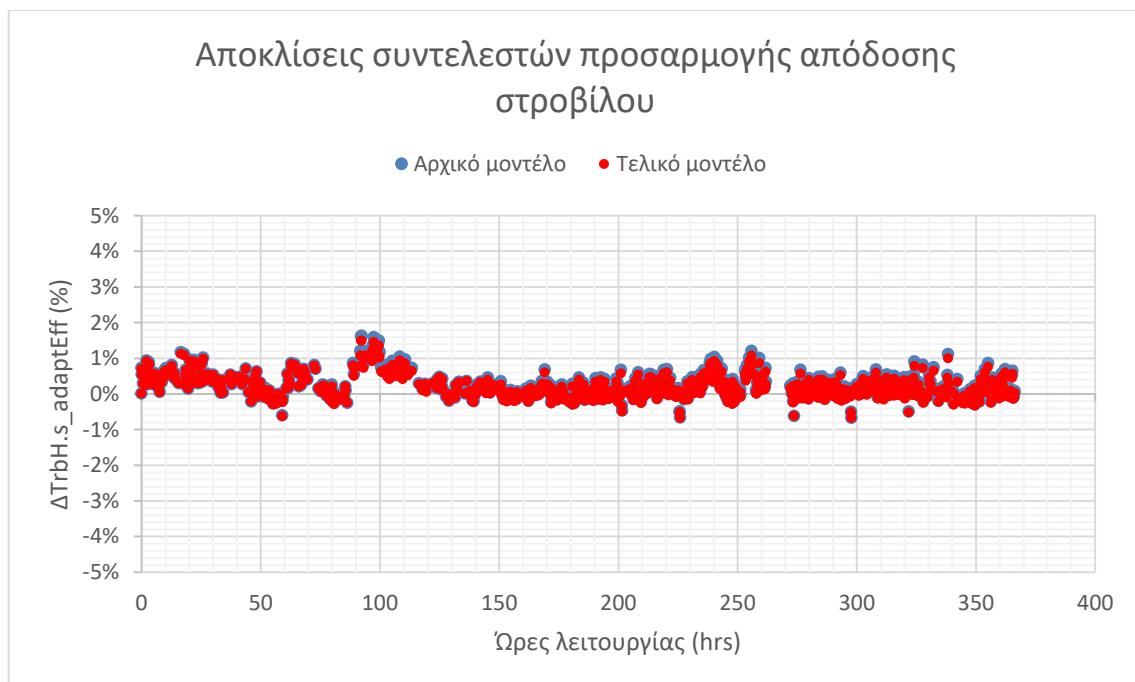
Σχήμα 4-24 Αποκλίσεις συντελεστών προσαρμογής παροχής συμπίεστη πριν και μετά την διόρθωση



Σχήμα 4-25 Αποκλίσεις συντελεστών προσαρμογής απόδοσης συμπίεστη πριν και μετά την διόρθωση

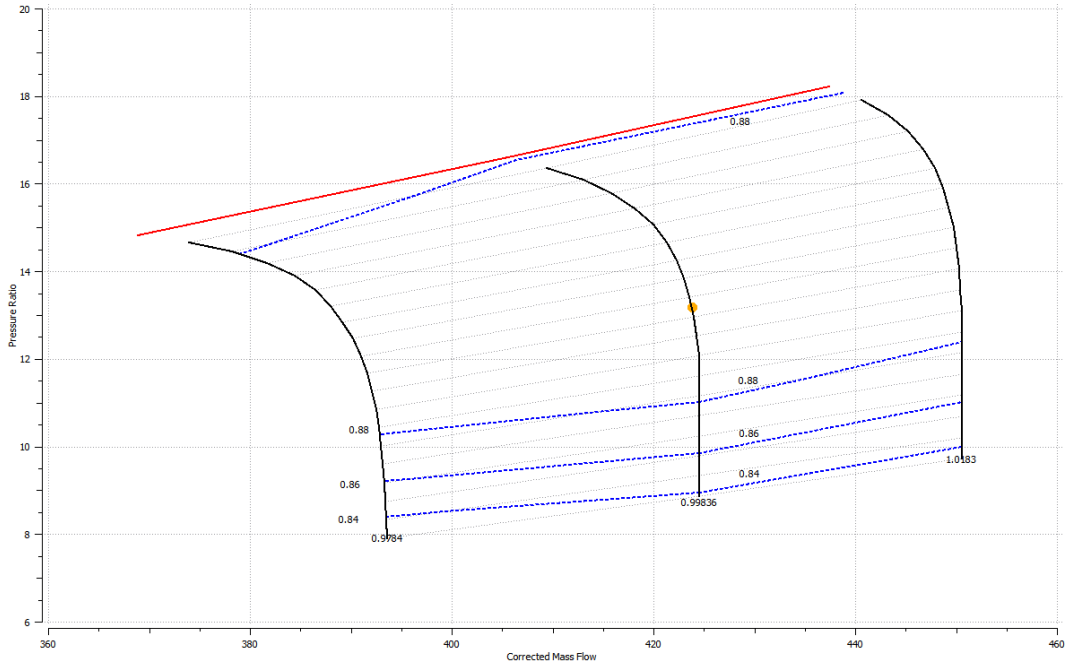


Σχήμα 4-26 Αποκλίσεις συντελεστών προσαρμογής παροχής στροβίλου πριν και μετά την διόρθωση

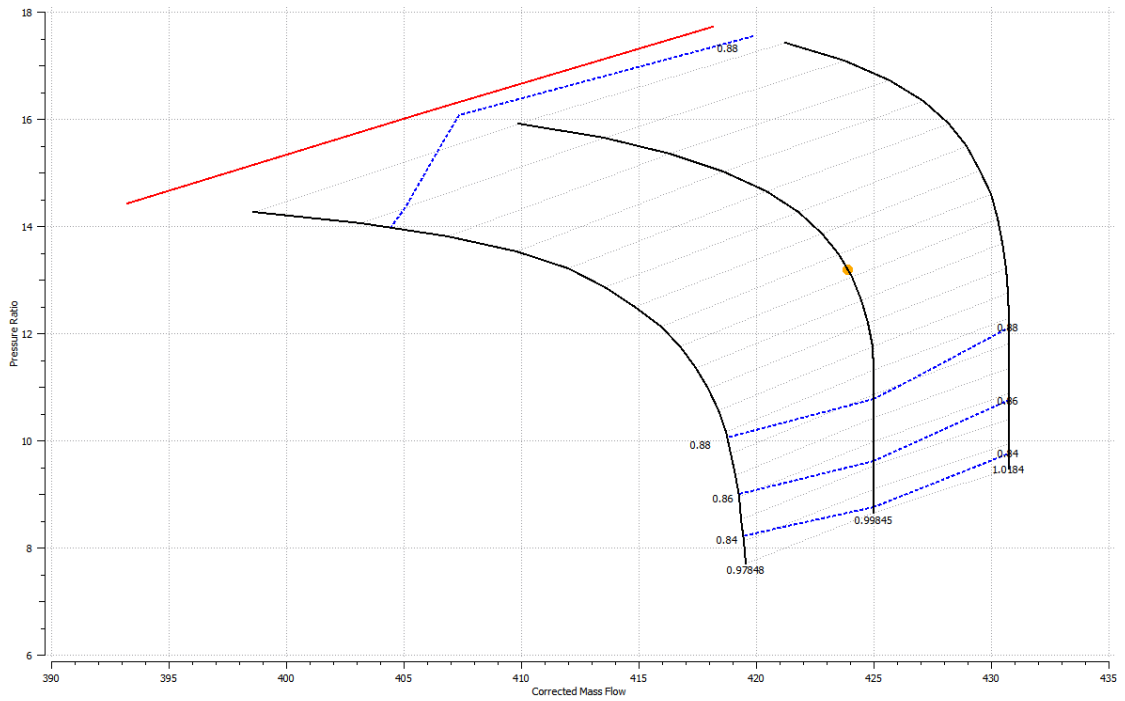


Σχήμα 4-27 Αποκλίσεις συντελεστών προσαρμογής απόδοσης στροβίλου πριν και μετά την διόρθωση

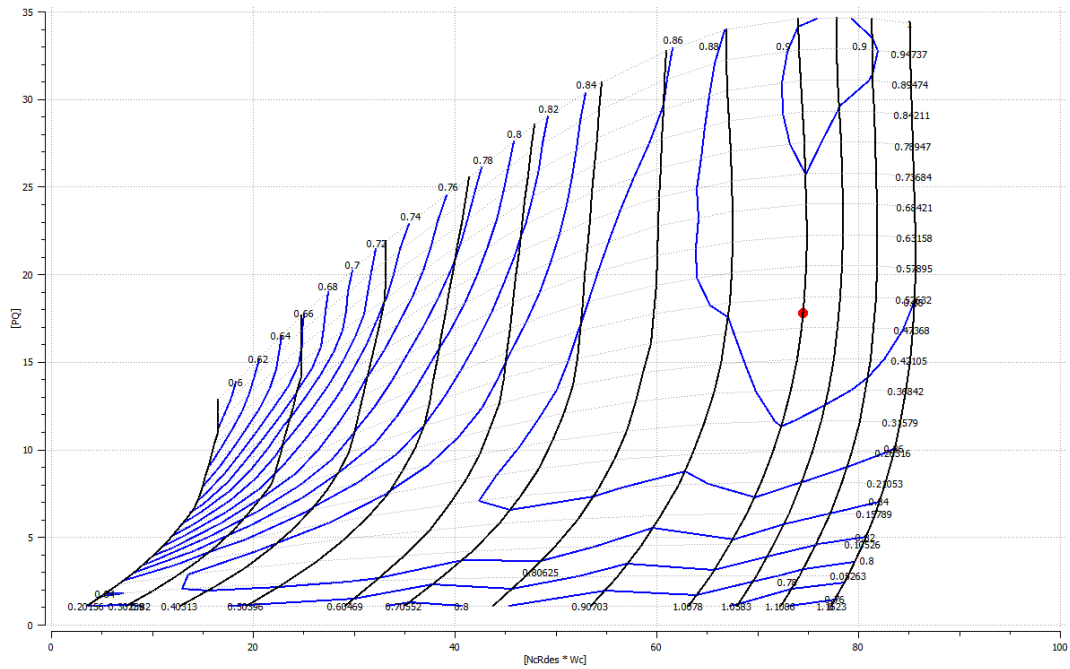
Ακόμη δίνονται συγκριτικά οι αρχικοί και τελικοί χάρτες λειτουργίας του συμπιεστή και του στροβίλου:



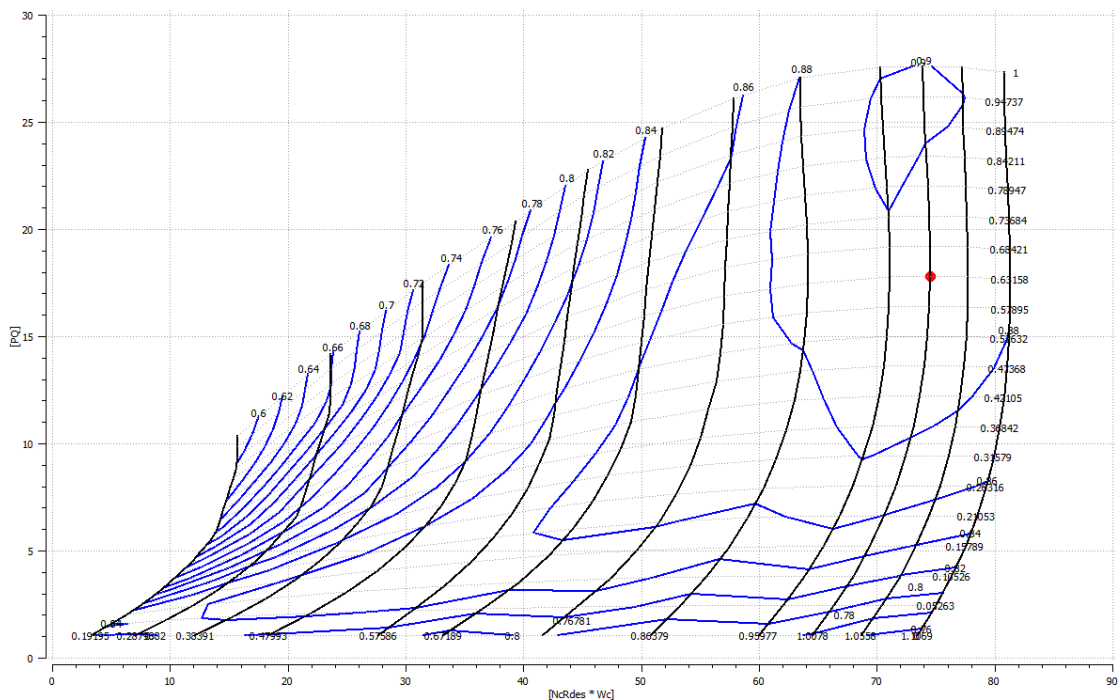
Σχήμα 4-28 Χάρτης συμπίεστή και σημείο σχεδίασης πριν τις διορθώσεις



Σχήμα 4-29 Χάρτης συμπίεστή και σημείο σχεδίασης μετά τις διορθώσεις



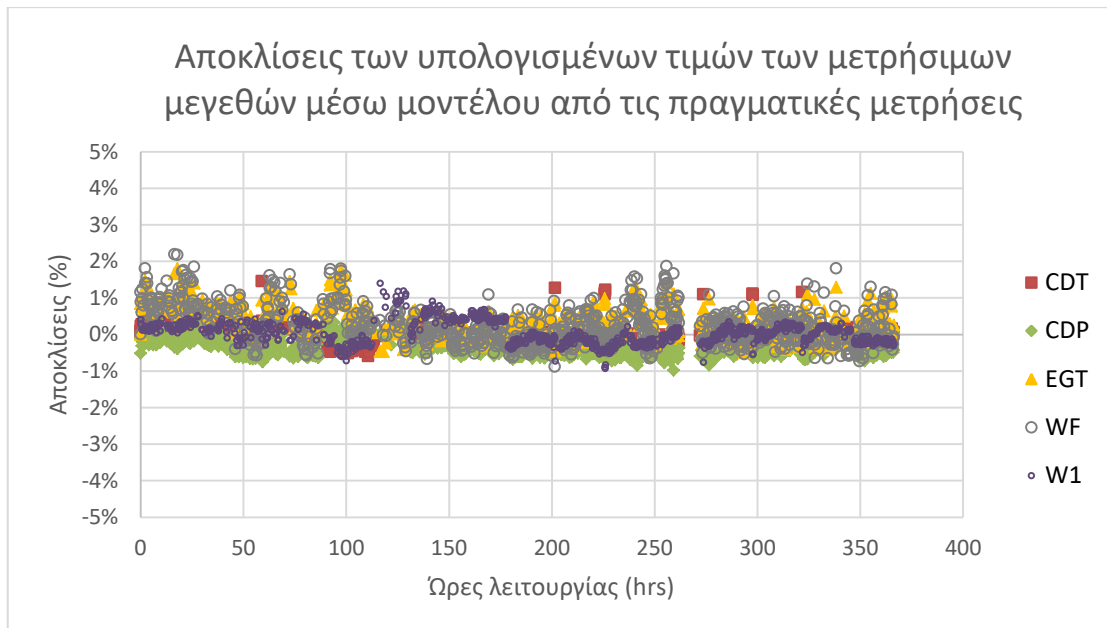
Σχήμα 4-30 Χάρτης στροβίλου και σημείο σχεδίασης πριν τις διορθώσεις



Σχήμα 4-31 Χάρτης στροβίλου και σημείο σχεδίασης μετά τις διορθώσεις

Όπως είναι εμφανές, το τελικό μοντέλο που προκύπτει έπειτα από την εφαρμογή των διορθώσεων, περιορίζει πλέον τις αποκλίσεις στο $\pm 1\%$ και άρα ο στόχος της μοντελοποίησης του 9E έχει επιτευχθεί. Μπορούμε πλέον να προσομοιάσουμε την λειτουργία του αεριοστρόβιλου και να υπολογίσουμε τα διαθέσιμα σημεία εκτός σχεδίασης. Παρακάτω στο Σχήμα 4-32, και ως αποτέλεσμα εφαρμογής της προτεινόμενης διαδικασίας σε αυτή την περίπτωση, δίνονται οι αποκλίσεις των μεγεθών

που μετρούνται σε μια εγκατάσταση από την πραγματική τους τιμή, έτσι όπως αυτές υπολογίστηκαν μέσω του μοντέλου. Το εύρος αυτών των αποκλίσεων αναδεικνύει και σε αυτή τη περίπτωση την ακρίβεια της μοντελοποίησης που εφαρμόστηκε.



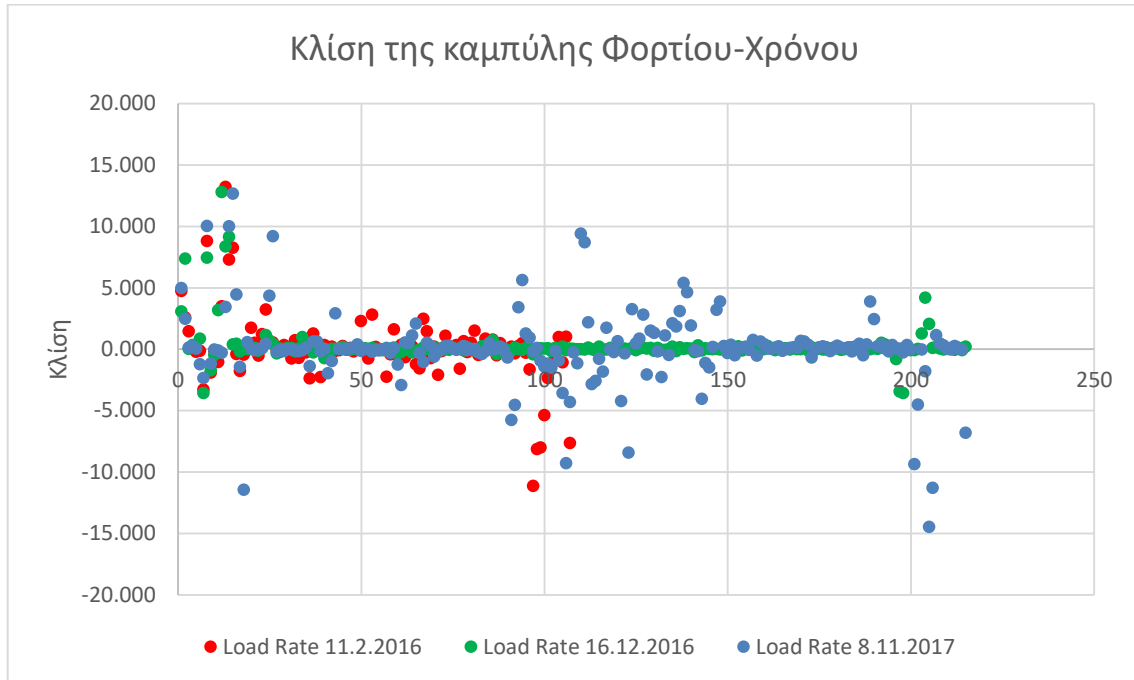
Σχήμα 4-32 Αποκλίσεις των υπολογισμένων τιμών των CDT, CDP, EGT, WF και W1 από την μετρημένη τιμή τους

4.2 General Electric 9FB

Τα δεδομένα λειτουργίας του αεριοστροβίλου General Electric 9FB, είναι μετρήσεις από το εργοστάσιο "Korinthos Power" στους Αγίους Θεοδώρους. Αφού επισκεφθήκαμε το εργοστάσιο μαζί με τον συνάδελφο Παύλο Ρομπόκο, και έπειτα από επικοινωνία με τον μηχανικό λειτουργίας κ. Καραγιάννη, δόθηκαν μετρήσεις από τρεις διαφορετικές μέρες λειτουργίας της συγκεκριμένης μηχανής. Ειδικότερα, τα διαθέσιμα δεδομένα αντιστοιχούν σε 540 σημεία λειτουργίας κατά τις ημέρες 8/11/2016, 16/12/2016 και 11/2/2017. Επίσης σημειώνεται ότι σε αυτή την περίπτωση τα δεδομένα καλύπτουν όλο το εύρος λειτουργίας του αεριοστροβίλου, από την εκκίνηση έως την ανάπτυξη πλήρους φορτίου. Τέλος, αναφέρεται ότι στην εγκατάσταση αυτή χρησιμοποιείται ως καύσιμο το φυσικό αέριο, με κατώτερη θερμογόνο ικανότητα που εξαρτάται από την χρονική περίοδο και την περιοχή που εξετάζουμε.

4.2.1 Επιλογή δεδομένων και παραμέτρων

Για την σωστή επιλογή των σημείων που είναι κατάλληλα για την κατασκευή του μοντέλου, αρχικά έγινε επιλογή αυτών που αντιστοιχούν σε φορτίο μεγαλύτερο του 50%. Στη συνέχεια εξετάστηκε ποια από αυτά αντιστοιχούν σε σταθερή και όχι μεταβατική λειτουργία. Ο διαχωρισμός των σημείων έγινε με έλεγχο της κλίσης που εμφανίζει η καμπύλη του φορτίου συναρτήσεως του χρόνου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-33:



Σχήμα 4-33 Διάγραμμα κλίσης καμπύλης φορτίου-χρόνου

Από τα συνολικά σημεία, επιλέχθηκαν για τη μοντελοποίηση, αυτά όπου η κλίση του φορτίου είναι στο $\pm 1\%$. Τελικά προέκυψαν 385 σημεία τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την μοντελοποίηση.

Μετρούμενα μεγέθη επιδόσεων

Τα μεγέθη τα οποία μετρούνται στην συγκεκριμένη εγκατάσταση, και για τα οποία έχουμε δεδομένα είναι τα εξής:

- Θερμοκρασία περιβάλλοντος.
- Θερμοκρασία εισόδου στο συμπιεστή (Tt1).
- Σχετική υγρασία περιβάλλοντος (RH1).
- Γωνία τοποθέτησης πτερυγίων IGVs (DangIGVs).

Η μέγιστη γωνία ανοίγματος είναι 86° , οπότε χρησιμοποιούμε την διαφορά της γωνίας τοποθέτησης με την μέγιστη.

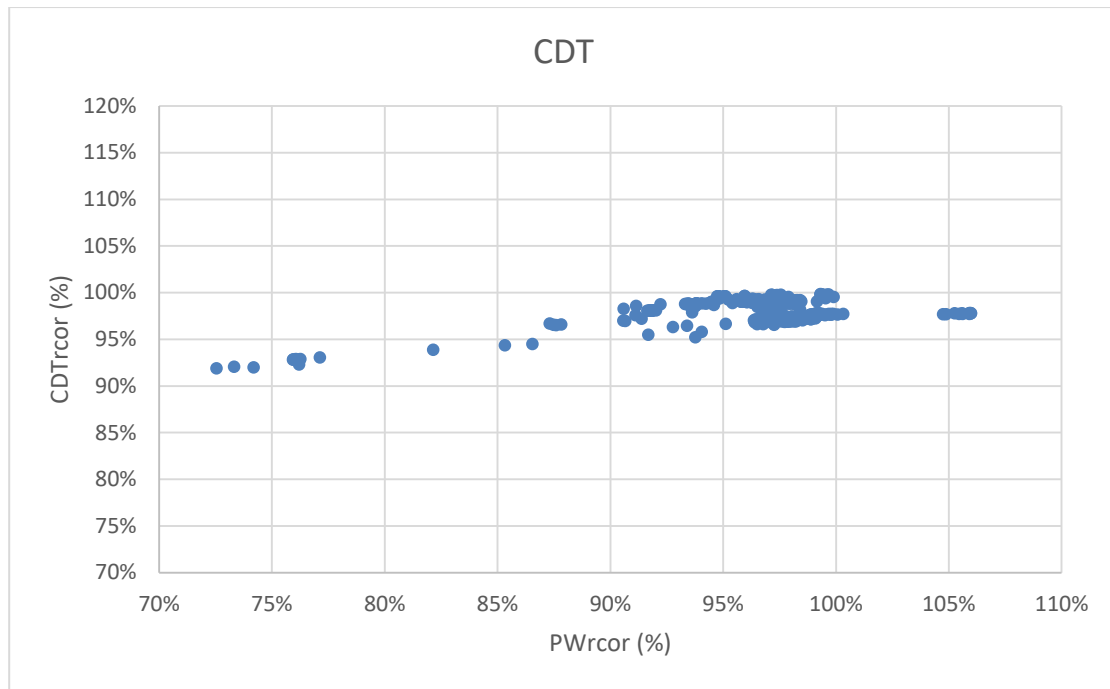
- Απώλειες πίεσης στον αγωγό εισόδου.

- Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων (EGT).
- Παροχή καυσίμου (WF).
- Στατική πίεση κατάθλιψης συμπιεστή (CDP).
- Ολική θερμοκρασία κατάθλιψης συμπιεστή (CDT).
- Παροχή αέρα (W1).
- Ισχύς αεριοστροβίλου (PW).
- Απώλειες πίεσης στον αγωγό εξόδου.
- Βαρομετρική πίεση περιβάλλοντος.
- Η θέση της βαλβίδας προθέρμανσης του αέρα εισόδου (IHBV).
- Ταχύτητα περιστροφής (NSD).
- Πίεση του εγχυόμενου καυσίμου (FPT).
- Θερμοκρασία του εγχυόμενου καυσίμου (FTT).
- Ελάχιστη θερμογόνος ικανότητα του καυσίμου (LHV).

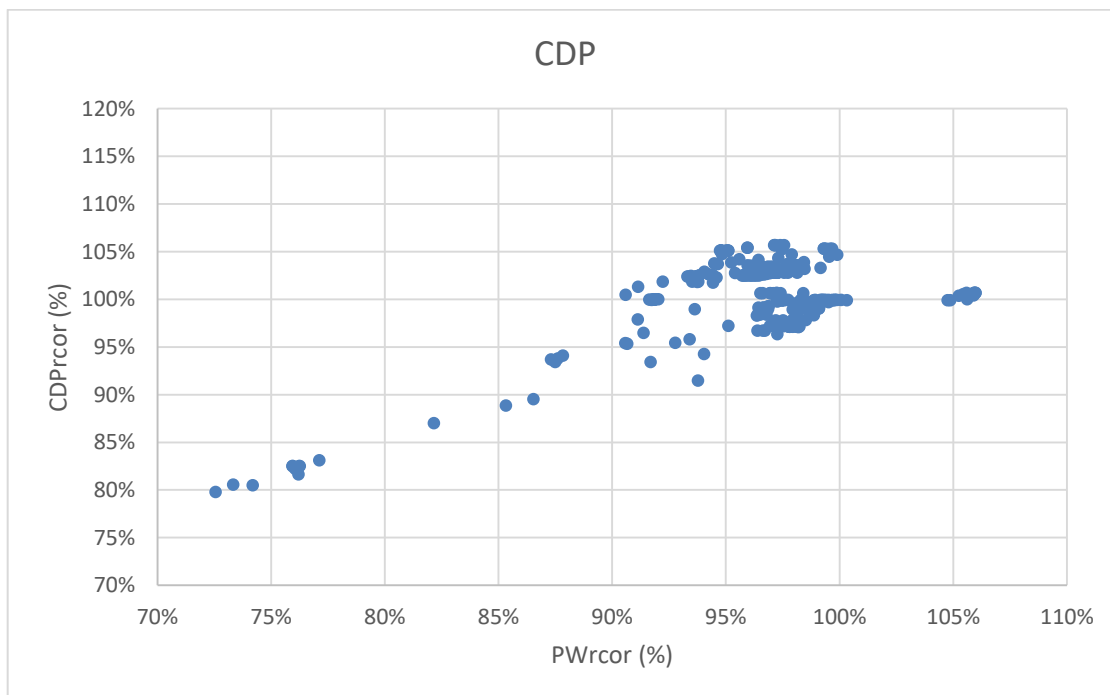
Για την πίεση εισόδου στο συμπιεστή, υπολογίζουμε την στατική πίεση στην θέση 2 λαμβάνοντας υπόψιν τις μετρήσεις της βαρομετρικής πίεσης και των απωλειών του αγωγού εισόδου. Έπειτα θεωρούμε ένα τυπικό αριθμό Mach στην είσοδο του συμπιεστή, που είναι $Mach=0.5$, και έτσι υπολογίζουμε την ολική πίεση στη θέση 2. Εφόσον λοιπόν είναι γνωστή η τιμή αυτή, το μοντέλο κατασκευάζεται θεωρώντας μηδενικές απώλειες εισόδου, αφού αυτές έχουν ήδη ληφθεί υπόψιν.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονισθεί ότι, οι μετρήσεις της ισχύος, της παροχής αέρα και της παροχής καυσίμου δεν είναι συμβατές, δηλαδή δεν ικανοποιούν τον ισολογισμό ενέργειας στον άξονα της μηχανής. Γνωρίζοντας ότι η εγκατάσταση του αεριοστροβίλου 9FB στο εργοστάσιο της Korinthos Power είναι συνδεδεμένη στον ίδιο άξονα με αμμοστρόβιλο, θεωρήσαμε ότι η παραγόμενη από τον αεριοστρόβιλο ισχύς υπολογίζεται και δεν αποτελεί κανονική μέτρηση. Με αυτή τη λογική θεωρήσαμε σωστές τις μετρήσεις της παροχής καυσίμου και αέρα, ενώ η τιμή της ισχύος υπολογίζεται εσωτερικά στον κώδικα μέσω ισολογισμού ενέργειας, ο οποίος περιγράφεται στην ενότητα 7.2 του παραρτήματος. Στο αρχείο εισόδου εισάγουμε μηδενική τιμή στην ισχύ, και η αντίστοιχη μεταβλητή λαμβάνει τιμή εσωτερικά μέσω του πειράματος, λαμβάνοντας υπόψιν τις μετρήσεις των παροχών.

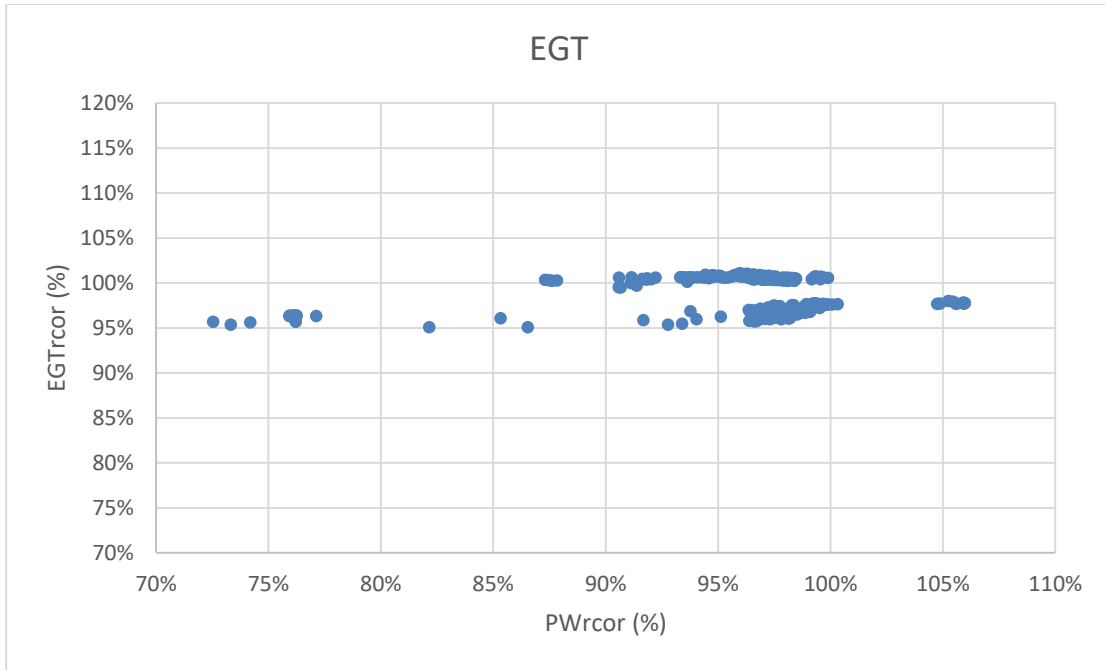
Παρακάτω παρουσιάζονται τα μετρούμενα μεγέθη που αφορούν τις επιδόσεις του αεριοστροβίλου, διορθωμένα ως προς την πίεση και την θερμοκρασία περιβάλλοντος και ορισμένα σε σχέση με το σημείο σχεδίασης, όπως αυτό δίνεται στην παράγραφο 7.3:



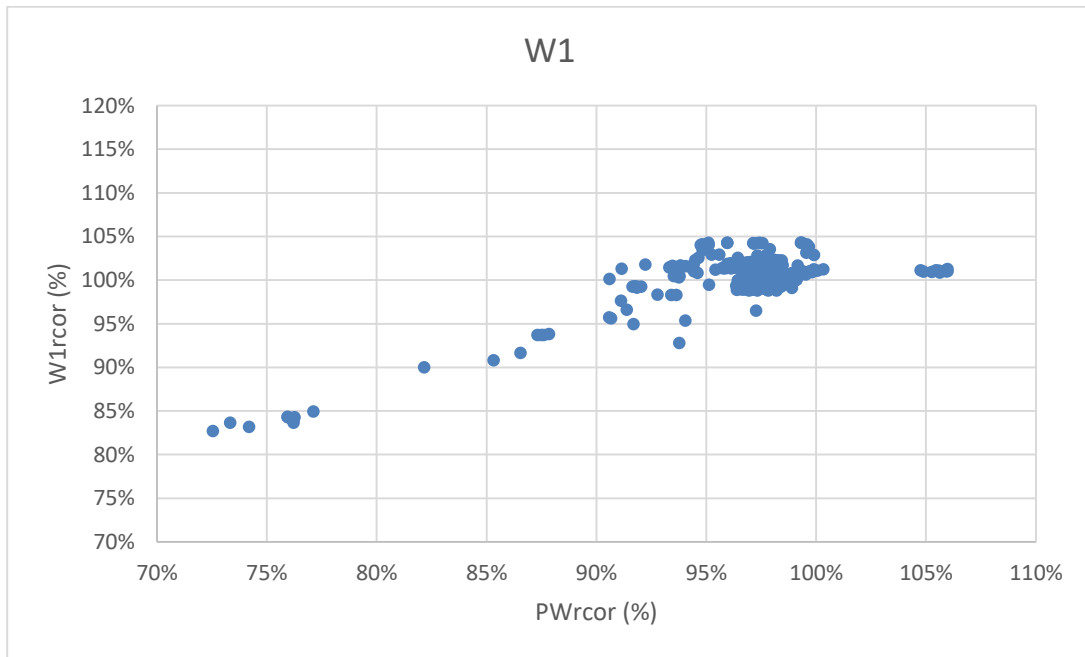
Σχήμα 4-34 Διάγραμμα διορθωμένης CDT συναρτήσει διορθωμένου φορτίου.



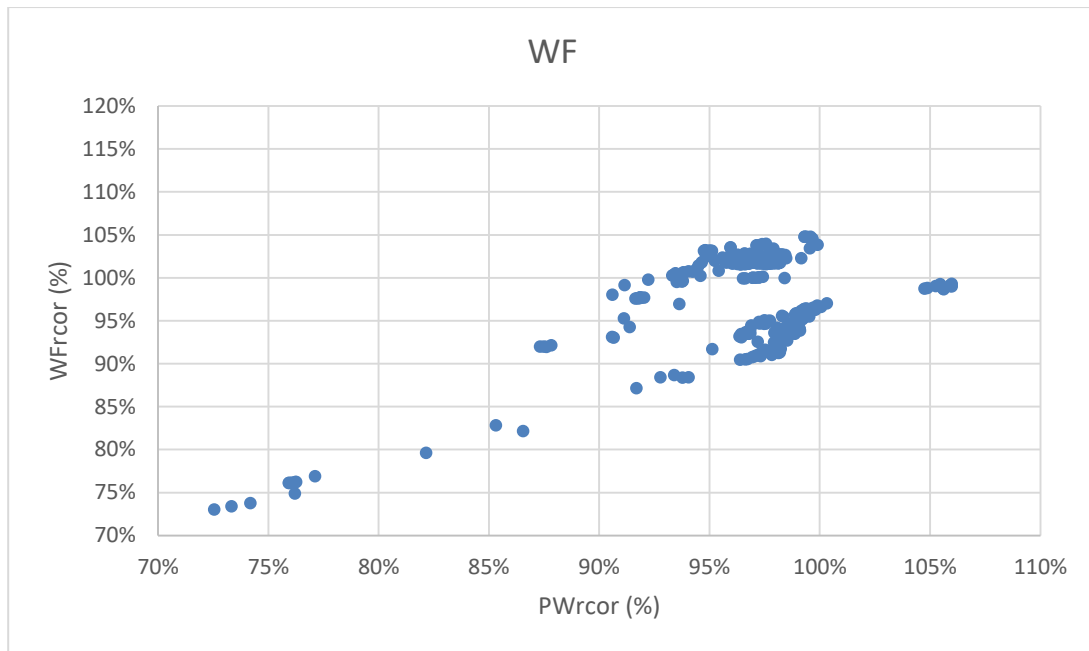
Σχήμα 4-35 Διάγραμμα διορθωμένης CDP συναρτήσει διορθωμένου φορτίου.



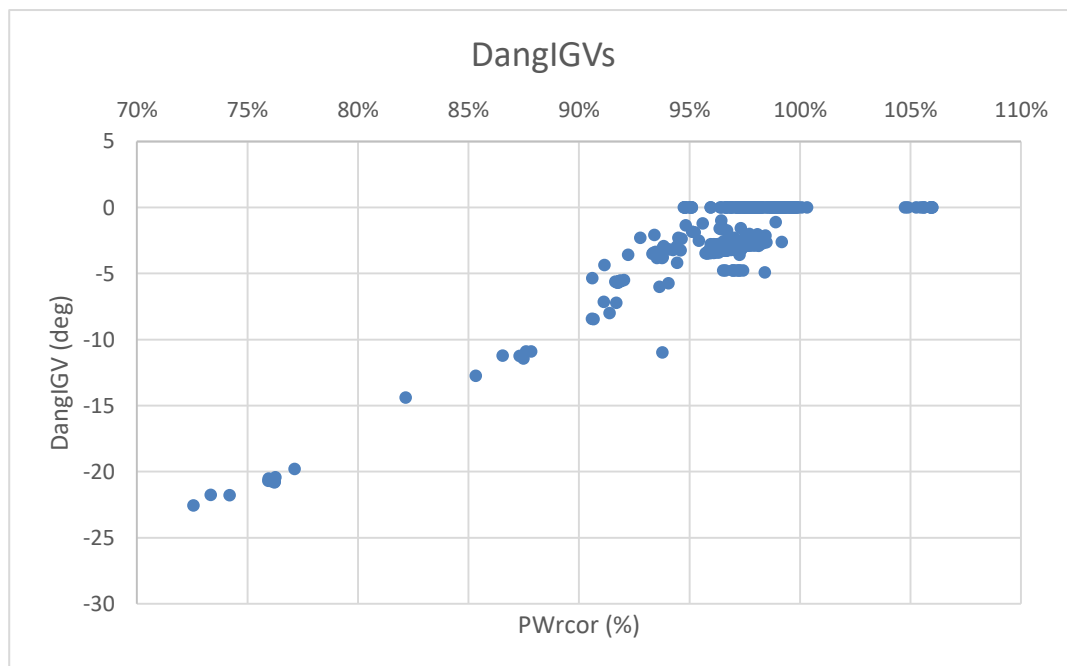
Σχήμα 4-36 Διάγραμμα διορθωμένης EGT συναρτήσει διορθωμένου φορτίου.



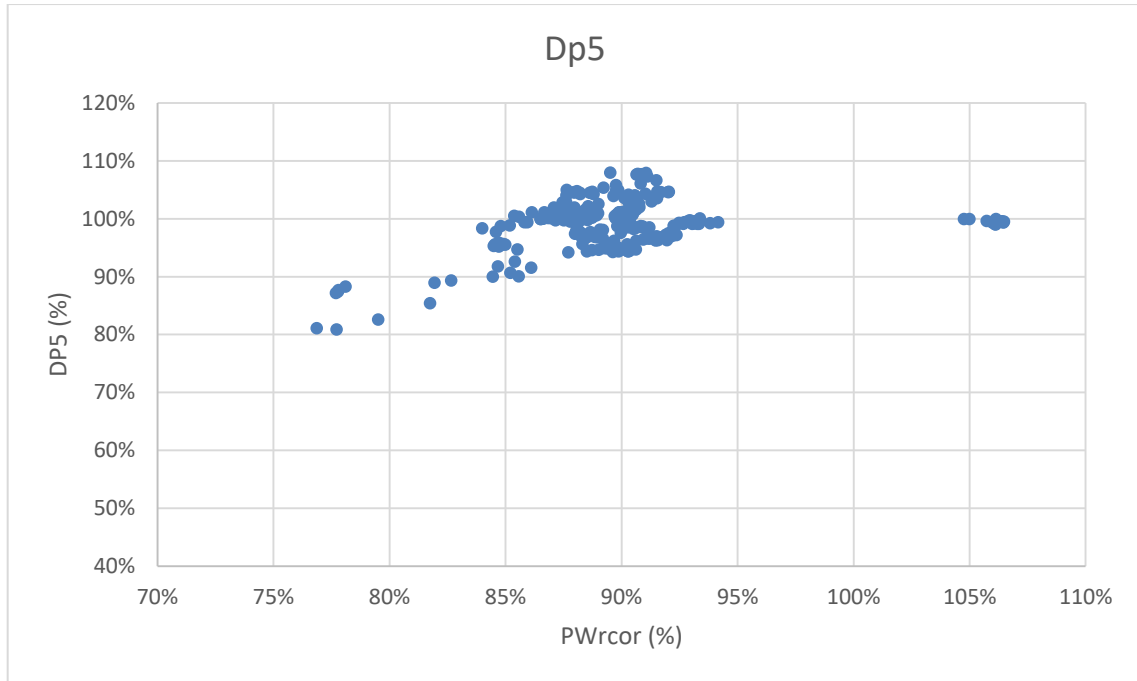
Σχήμα 4-37 Διάγραμμα διορθωμένης παροχής συναρτήσει διορθωμένου φορτίου.



Σχήμα 4-38 Διάγραμμα διορθωμένης παροχής καυσίμου συναρτήσει διορθωμένου φορτίου.

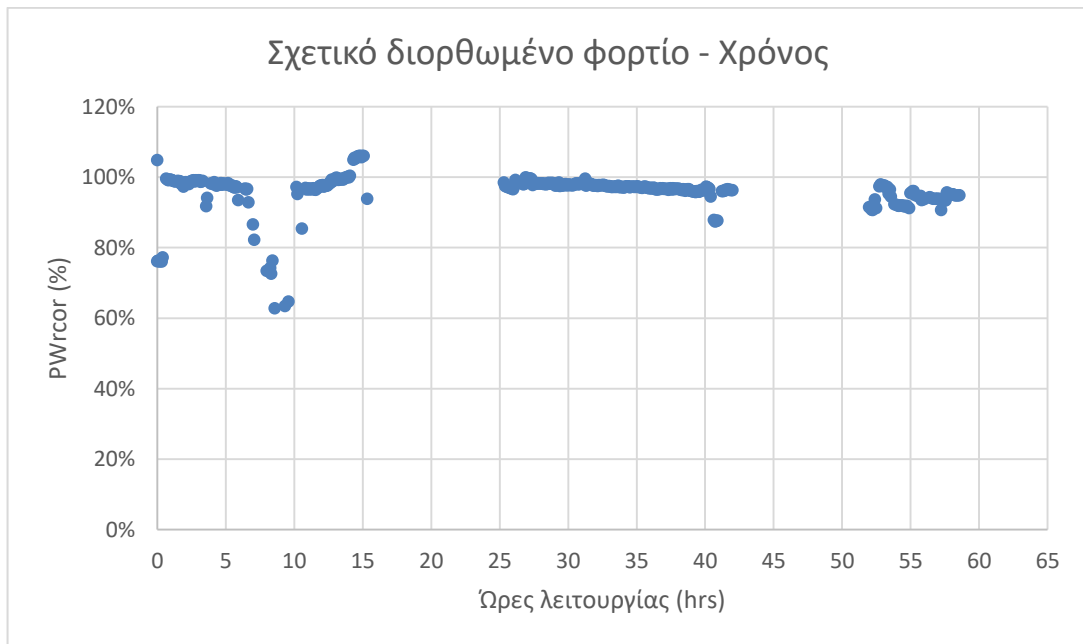


Σχήμα 4-39 Διάγραμμα θέσης IGV's συναρτήσει διορθωμένου φορτίου.

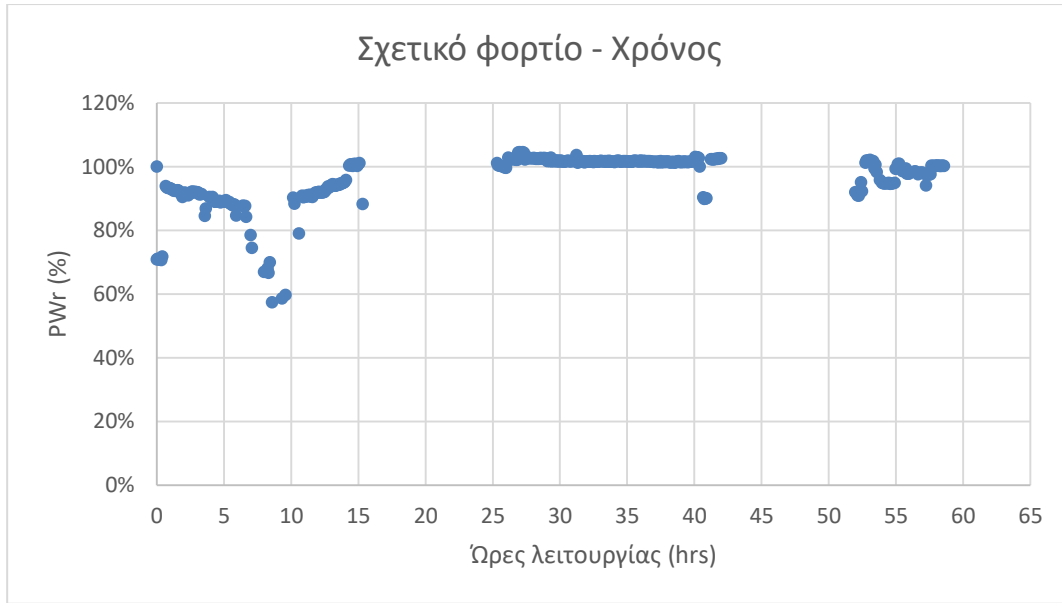


Σχήμα 4-40 Διορθωμένες απώλειες πίεσης αγωγού εξόδου συναρτήσει διορθωμένου φορτίου.

Στο Σχήμα 4-41 δίνεται το διάγραμμα του σχετικού διορθωμένου φορτίου συναρτήσει των ωρών λειτουργίας. Σημειώνεται ότι για τον διαχωρισμό των τριών ημερών που εξετάζουμε, εισάγουμε διάστημα δέκα ωρών μεταξύ αυτών. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα αυτό, ο συγκεκριμένος αεριοστρόβιλος λειτουργεί συνήθως κοντά στο 90% του φορτίου του.



Σχήμα 4-41 Διάγραμμα σχετικού διορθωμένου φορτίου συναρτήσει των ωρών λειτουργίας



Σχήμα 4-42 Διάγραμμα σχετικού φορτίου συναρτήσει των ωρών λειτουργίας

Επιλογή παραμέτρων

Οι παράμετροι που είναι απαραίτητες για τον υπολογισμό του σημείου σχεδίασης λαμβάνουν τυπικές τιμές, οι οποίες δίνονται στον Πίνακα 4-5:

InEng.dPqP_in	0
D30.dPqP_in	0.01
Brn.dPqP_in	0.02
D50.dPqP_in	0.014
Brn.eff_in	0.999
ShH.eff	0.999
D30.Wbleed2	0.14
ShH.pwrOT	1400000

Πίνακας 4-5 Επιλεγμένες παράμετροι του GE 9FB

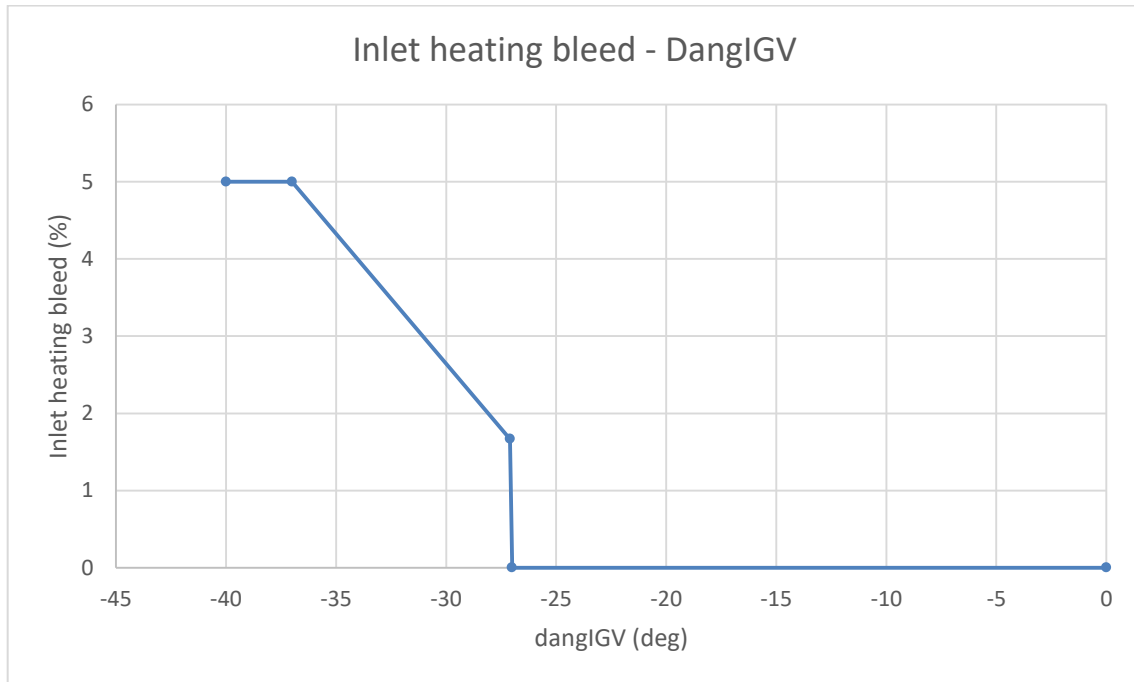
Σε αυτή την περίπτωση είναι γνωστές και οι χαρακτηριστικές διατομές του Πίνακα 4-6, όπως υπολογίστηκαν στην ενότητα 2.3.1:

Διατομές	m ²
D30.Ae_in	0.98
D50.Ae_in	5,86

Πίνακας 4-6 Γνωστές χαρακτηριστικές διατομές GE 9FB

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι, ο ισολογισμός μάζας αέρα εισόδου – καυσίμου - καυσαερίων του αεριοστροβίλου δεν επαληθεύεται, δηλαδή κάποια από

αυτές τις μετρήσεις περιέχει ένα σημαντικό σφάλμα. Έτσι για τον υπολογισμό του ποσοστού απομάστευσης για προθέρμανση του αέρα εισόδου (inlet heating bleed), χρησιμοποιήθηκε το αντίστοιχο διάγραμμα ποσοστού απομάστευσης για προθέρμανση συναρτήσει της θέσης των IGVs του αεροστροβίλου 9FA από τα δεδομένα του εργαστηρίου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-43. Και σε αυτή την περίπτωση η απομάστευση για την προθέρμανση του αέρα εισόδου μοντελοποιείται ως overboard bleed και ως Tt1 θεωρείται η θερμοκρασία στην είσοδο του συμπιεστή.



Σχήμα 4-43 Πρόγραμμα inlet heating bleed συναρτήσει διαφοράς γωνίας IGV

4.2.2 Σημείο σχεδίασης

Ως σημείο σχεδίασης επιλέχθηκε ένα από τα σημεία λειτουργίας της πρώτης μέρας (8.11.2016). Το σημείο αυτό θα πρέπει να ικανοποιεί τις παρακάτω προϋποθέσεις:

1. Να έχει συνθήκες περιβάλλοντος κοντά στις τυπικές συνθήκες αναφοράς (ISO),
2. Να έχει τα πτερύγια IGVs πλήρως ανοικτά,
3. Να αποδίδει ισχύ κοντά στην ισχύ του πλήρους φορτίου,
4. Το ποσοστό του inlet heating bleed να είναι σχεδόν μηδενικό.

PT1 (Pa)	TT1 (K)	RH1 (%)	PW (W)	NMECH (rpm)	DP5(Pa)	FPT (Pa)	FTT (K)	DANG.IGV (deg)
101439,36	295,11	56,27	287310028,2887	3000,9904	3752,12	3367031,86	473,95	0,00

CDT (K)	CDP (Pa)	TT8 (K)	WF (kg/sec)	W1 (kg/sec)	NTHERMAL (%)	CPR (-)	WGAS (kg/sec)	D30bleed1 (%)	FLHV (J/kgK)
693,89	1771052,43	922,37	14,6328	621,0036	0,3895	-	635,5979	0,00	49409389,33

Πίνακας 4-7 Σημείο σχεδίασης GE 9FB

Η θέση του σημείου σχεδίασης πάνω στον χάρτη, επιλέγεται να είναι:

- Στο 100% των διορθωμένων χαρακτηριστικών στροφών των χαρτών (δηλαδή επιλέγουμε τις μεταβλητές $CmpH.NcRdes$, $TrbH.NcRdes = 1$),
- αριθμούς BETA και ZETA συμπιεστή και στροβίλου αντίστοιχα στο 0,5 (BETA=0.5 , ZETA=0.5).

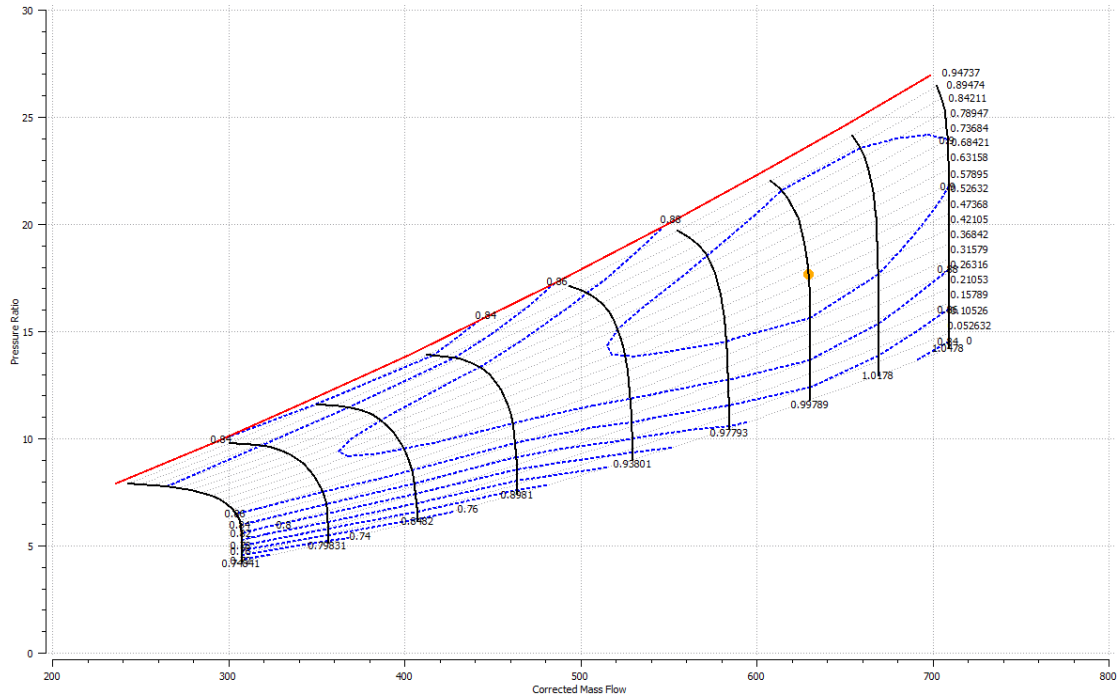
Εισάγοντας στο αρχείο εισόδου τα απαραίτητα δεδομένα και τις παραμέτρους, υπολογίζεται το σημείο σχεδίασης. Στον Πίνακα 4-8 δίνονται ορισμένα χαρακτηριστικά μεγέθη των επιδόσεων του αεριοστροβίλου, όπως βαθμοί απόδοσης, λόγοι πίεσης και ειδικά μεγέθη, ως αποτελέσματα του υπολογισμού του σημείου σχεδίασης.

E3 (-)	0,908486
E5 (-)	0,905162
EP3 (-)	0,936574
EP5 (-)	0,871293
WF (kg/s)	14,632847
Brn.FARinj (-)	0,027773
Perf.effTh (-)	0,390267
Qrate (kJ/(kWh))	9224,457240
SFC (kg/(kWh))	0,186694
sPwr (W*sec/kg)	454457,5

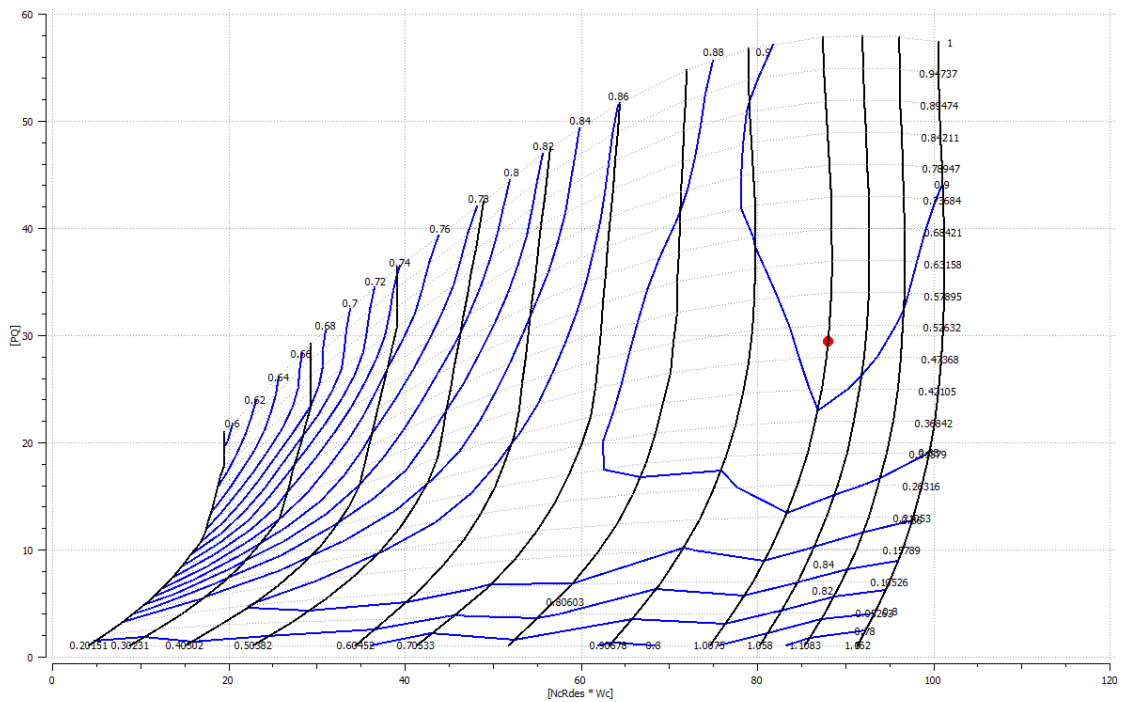
Πίνακας 4-8 Μεγέθη επιδόσεων σημείου σχεδίασης 9FB

Για την μοντελοποίηση του αεριοστροβίλου 9FB, επιλέγουμε οριακές μεταβλητές τις: CDT, CDP, EGT, PWSD και WF. Επομένως και σε αυτή την περίπτωση γίνεται μοντελοποίηση με βάση το καύσιμο. Η ακρίβεια του υπολογισμού ελέγχεται μέσω της παροχής W1, η οποία είναι το "ελεύθερο μέγεθος" στον υπολογισμό του σημείου λειτουργίας. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η υπολογιζόμενη τιμή της W1 διαφέρει κατά 0,0201%.

Στα παρακάτω σχήματα δίνονται οι χάρτες (συμπιεστή και στροβίλου) όπως προσαρμόστηκαν κατά τον υπολογισμό του σημείου σχεδίασης:



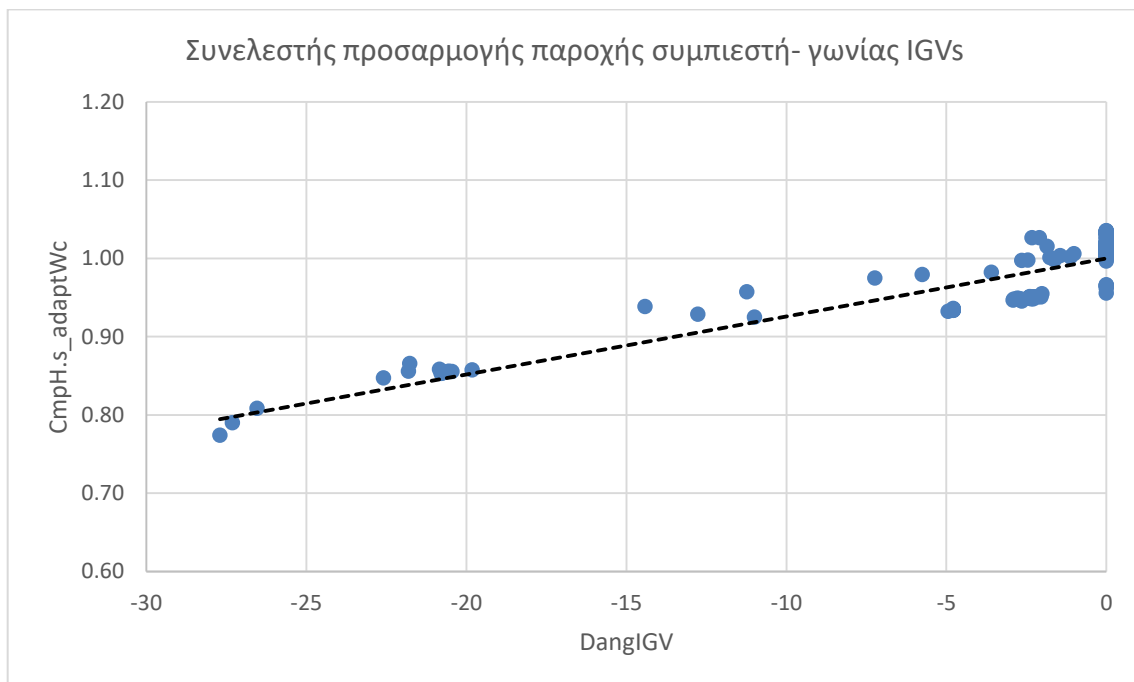
Σχήμα 4-44 Αρχικός χάρτης και σημείο σχεδίασης συμπιεστή - GE 9FB



Σχήμα 4-45 Αρχικός χάρτης και σημείο σχεδίασης στροβίλου - GE 9FB

4.2.3 Σημεία λειτουργίας εκτός σημείου σχεδίασης

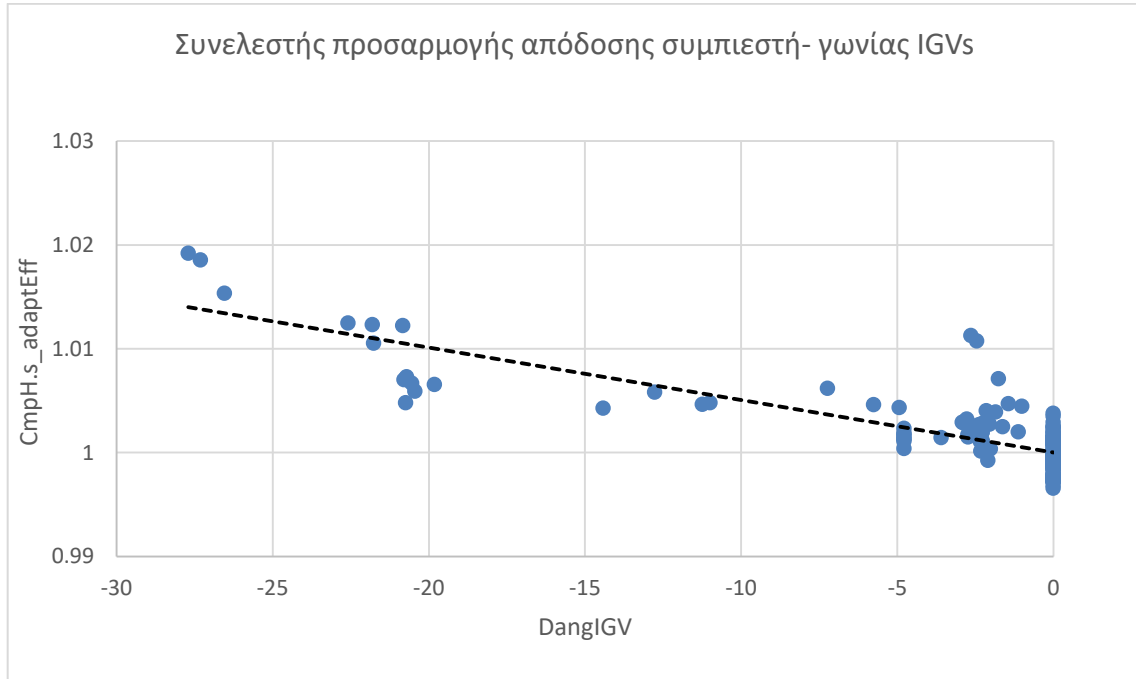
Έπειτα από τον υπολογισμό του σημείου σχεδίασης, υπολογίζονται τα σημεία εκτός σχεδίασης με προσαρμογή των χαρτών. Οι συντελεστές προσαρμογής των χαρτών που προκύπτουν, εάν εκτελέσουμε τη συγκεκριμένη λειτουργία (MODE = 4), μας δείχνουν πόσο αποκλίνουν τα υπολογιζόμενα μεγέθη από τις αντίστοιχες μετρήσεις για δεδομένους χάρτες λειτουργίας. Οι οριακές μεταβλητές που επιλέγουμε εδώ, είναι ανάλογες με αυτές του σημείου σχεδίασης, δηλαδή χρησιμοποιούμε τις: CDT, CDP, EGT και WF. Οι συντελεστές προσαρμογής που προκύπτουν απέχουν αρκετά από τη μονάδα, κυρίως όμως ο συντελεστής προσαρμογής παροχής του συμπιεστή. Όπως εξηγήσαμε και παραπάνω στην ενότητα 4.1.3, η απόκλιση αυτή οφείλεται στην επίδραση των IGVs, η οποία δεν έχει ληφθεί υπόψιν μέχρι στιγμής. Η λειτουργία των IGVs, η οποία καθορίζει την εισερχόμενη παροχή αέρα και άρα τη γεωμετρία του χάρτη του συμπιεστή, εκφράζεται μέσω δύο συντελεστών. Οι συντελεστές αυτοί αντιστοιχούν στους συντελεστές μιας πολυωνυμικής καμπύλης δευτέρου βαθμού, η οποία συνήθως προσεγγίζει τη καμπύλη των συντελεστών προσαρμογής παροχής του συμπιεστή συναρτήσει της γωνίας DangIGV. Στην περίπτωση αυτή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-46, η καμπύλη αυτή προσεγγίζεται καλύτερα με μία γραμμική σχέση επομένως ο δεύτερο συντελεστής τίθεται ίσος με το 0.



Σχήμα 4-46 Συντελεστές προσαρμογής διορθωμένης παροχής συμπιεστή συναρτήσει της γωνίας των IGVs

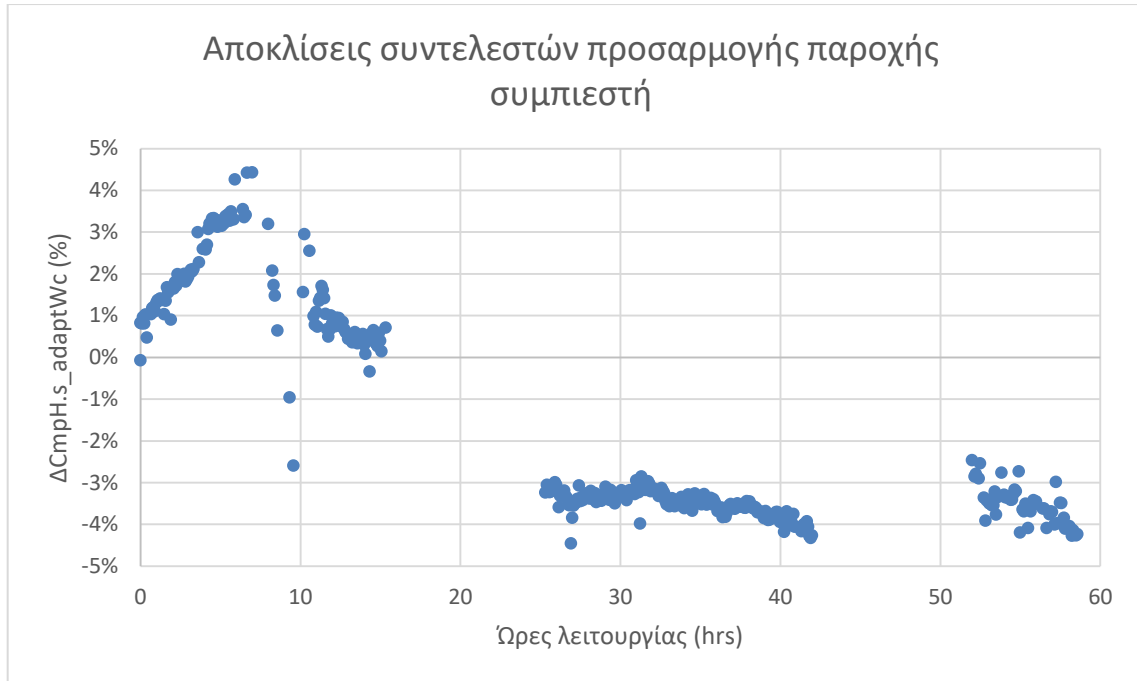
Παράλληλα, ελέγχουμε εάν τα IGVs επιδρούν και στο βαθμό απόδοσης του συμπιεστή. Όπως παρατηρούμε στο Σχήμα 4-47, υπάρχει αυτή η συσχέτιση και

εκφράζεται αντίστοιχα με μια γραμμική σχέση. Έτσι ο δεύτερος συντελεστής των IGVs που αφορά τον βαθμό απόδοσης τίθεται ίσος με το μηδέν.

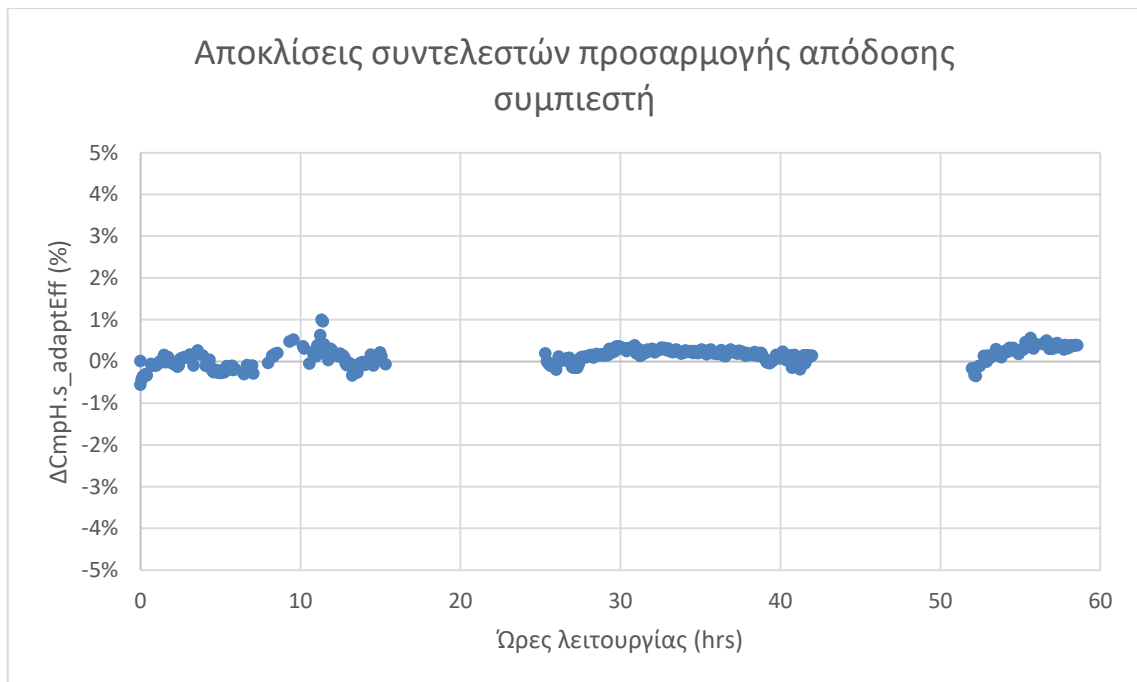


Σχήμα 4-47 Συντελεστές προσαρμογής απόδοσης συμπιεστή συναρτήσει της γωνίας των IGVs

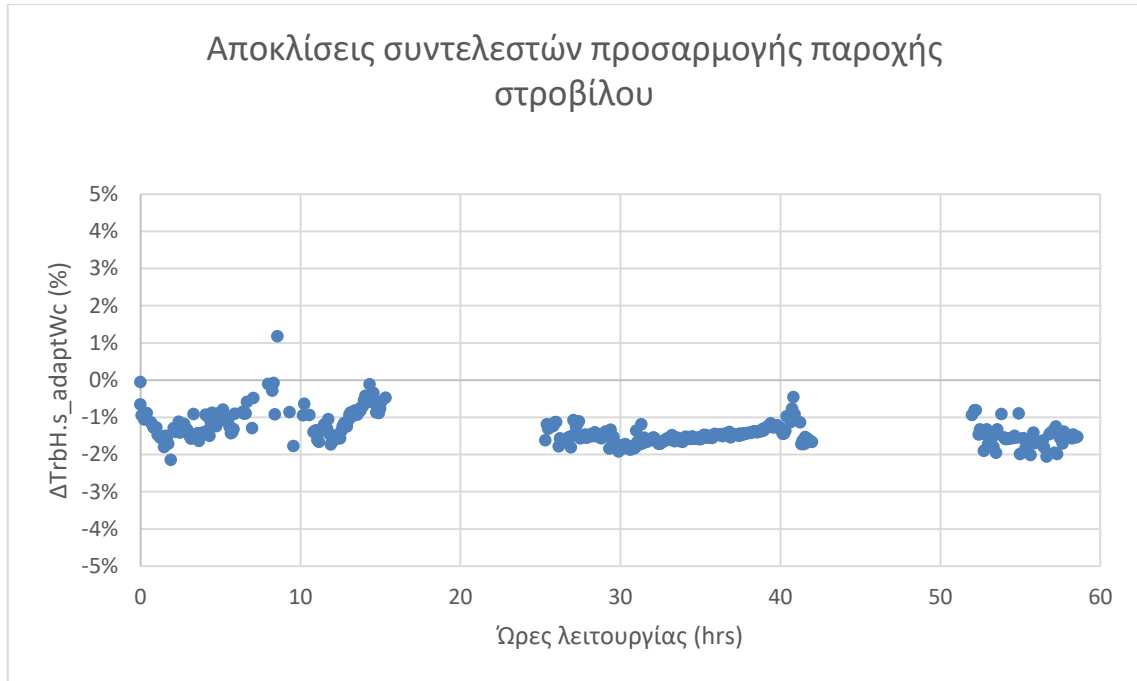
Οι συντελεστές που αφορούν τα IGVs εισάγονται στο αρχείο εισόδου, και εκτελείται εκ νέου υπολογισμός των σημείων εκτός σχεδίασης με προσαρμογή χαρτών. Στη συνέχεια ελέγχεται εάν οι νέοι συντελεστές προσαρμογής των χαρτών, οι οποίοι παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα, είναι μέσα στο επιθυμητό εύρος αποκλίσεων του $\pm 1\%$.



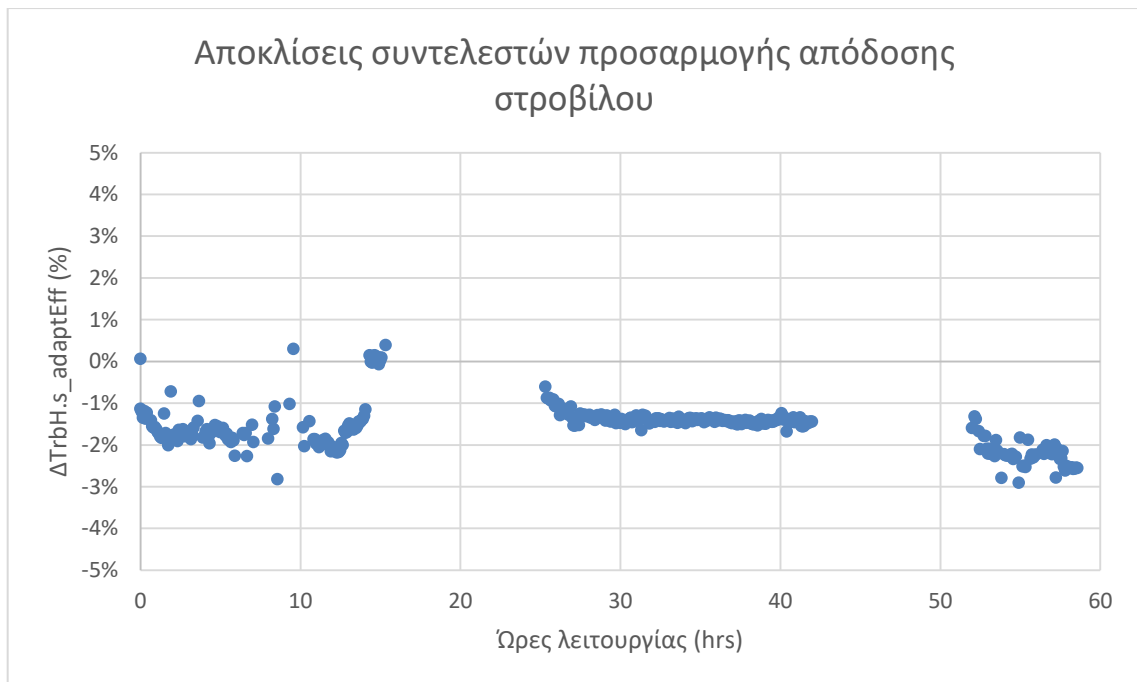
Σχήμα 4-48 Αποκλίσεις συντελεστών προσαρμογής παροχής συμπιεστή χωρίς
καμία διόρθωση



Σχήμα 4-49 Αποκλίσεις συντελεστών προσαρμογής απόδοσης συμπιεστή χωρίς
καμία διόρθωση



Σχήμα 4-50 Αποκλίσεις συντελεστών προσαρμογής παροχής στροβίλου χωρίς
καμία διόρθωση



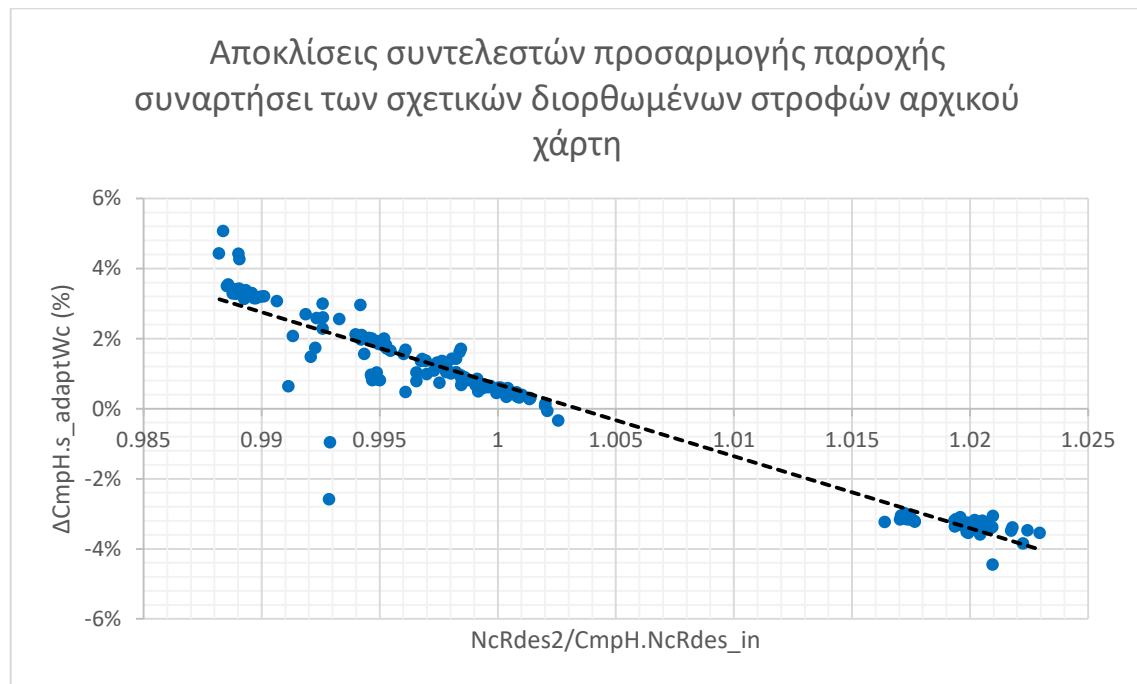
Σχήμα 4-51 Αποκλίσεις συντελεστών προσαρμογής απόδοσης στροβίλου χωρίς
καμία διόρθωση

Παρατηρούμε ότι οι μεγαλύτερες αποκλίσεις εμφανίζονται στον συντελεστή προσαρμογής παροχής του συμπιεστή, σε ένα εύρος $\pm 4.5\%$. Για τους υπόλοιπους συντελεστές οι αποκλίσεις είναι μικρότερες αλλά πάλι όχι αποδεκτές. Η μείωση του

εύρους των αποκλίσεων αυτών επιτυγχάνεται με τις διορθώσεις που προτείνονται στην επόμενη παράγραφο.

4.2.4 Διόρθωση μοντέλου

Η βασική διόρθωση που αφορά την επίδραση των IGVs έχει γίνει και πλέον εξετάζεται εάν οι αποκλίσεις που εμφανίζονται περιορίζονται μέσω μιας τοπικής προσαρμογής του χάρτη του συμπιεστή που χρησιμοποιούμε. Σε αυτή την περίπτωση γίνεται μια μετακίνηση ορισμένων χαρακτηριστικών του χάρτη, όπου αυτό κρίνεται απαραίτητο. Αυτό γίνεται κατανοητό εάν κατασκευάσουμε το διάγραμμα των αποκλίσεων των συντελεστών παροχής του συμπιεστή συναρτήσει του λόγου των σχετικών διορθωμένων στροφών του αρχικού χάρτη προς το συντελεστή κλίμακας των σχετικών στροφών του αντίστοιχα ($\Delta\text{CmpH.s_adaptWc}$ – $(\text{NcRdes2/CmpH.s_NcRdes_in})$). Το διάγραμμα αυτό δίνεται στο Σχήμα 4-52:



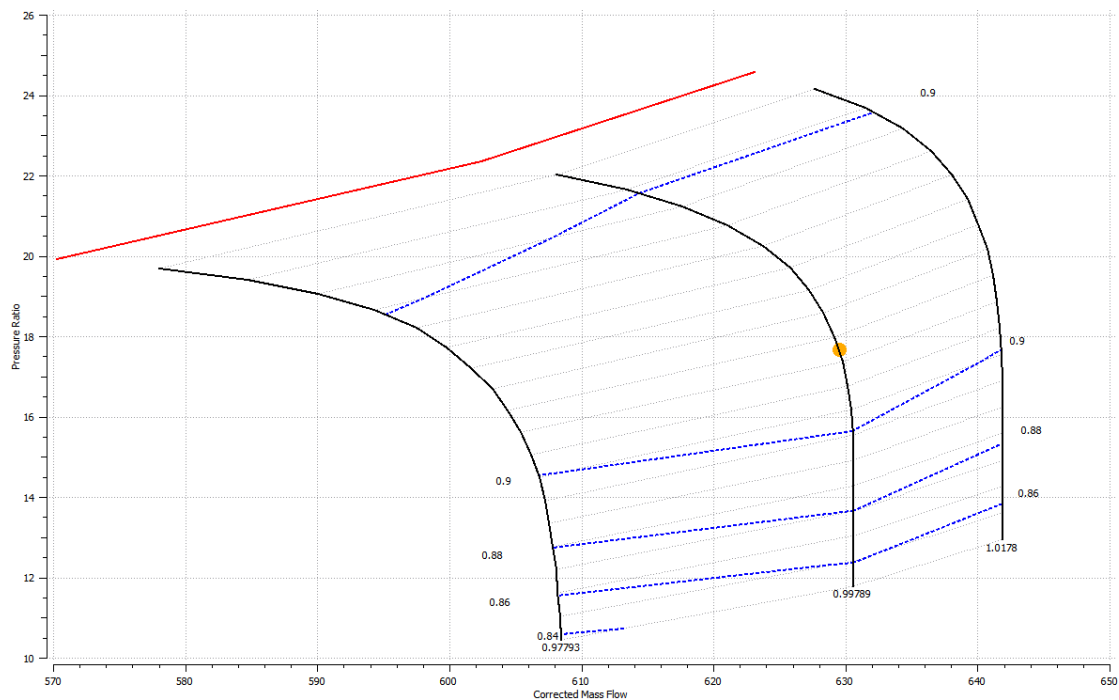
Σχήμα 4-52 Αποκλίσεις συντελεστών προσαρμογής παροχής συναρτήσει των σχετικών διορθωμένων στροφών του αρχικού χάρτη

Από το παραπάνω σχήμα, φαίνεται ότι έχουμε πληροφορία για τις χαρακτηριστικές 1 και 1,02 των σχετικών διορθωμένων στροφών. Σημειώνεται ότι παρόλο που δεν φαίνεται να έχουμε πληροφορία για την χαρακτηριστική 0,98, η ομαλή διόρθωση του χάρτη επιβάλλει να διορθωθεί και αυτή με το αντίστοιχο ποσοστό. Εφαρμόζοντας την εξίσωση της γραμμής διόρθωσης, που απεικονίζεται στο Σχήμα 4-52, στις χαρακτηριστικές του αρχικού χάρτη προκύπτει ο Πίνακας 4-9:

Χαρακτηριστικές αρχικού χάρτη	Διόρθωση (%)
0,75	-
0,8	-
0,85	-
0,9	-
0,94	-
0,98	4,81%
1	0,70%
1,02	-3,41%
1,05	-

Πίνακας 4-9 Τοπική προσαρμογή χάρτη συμπίεστή 9FB

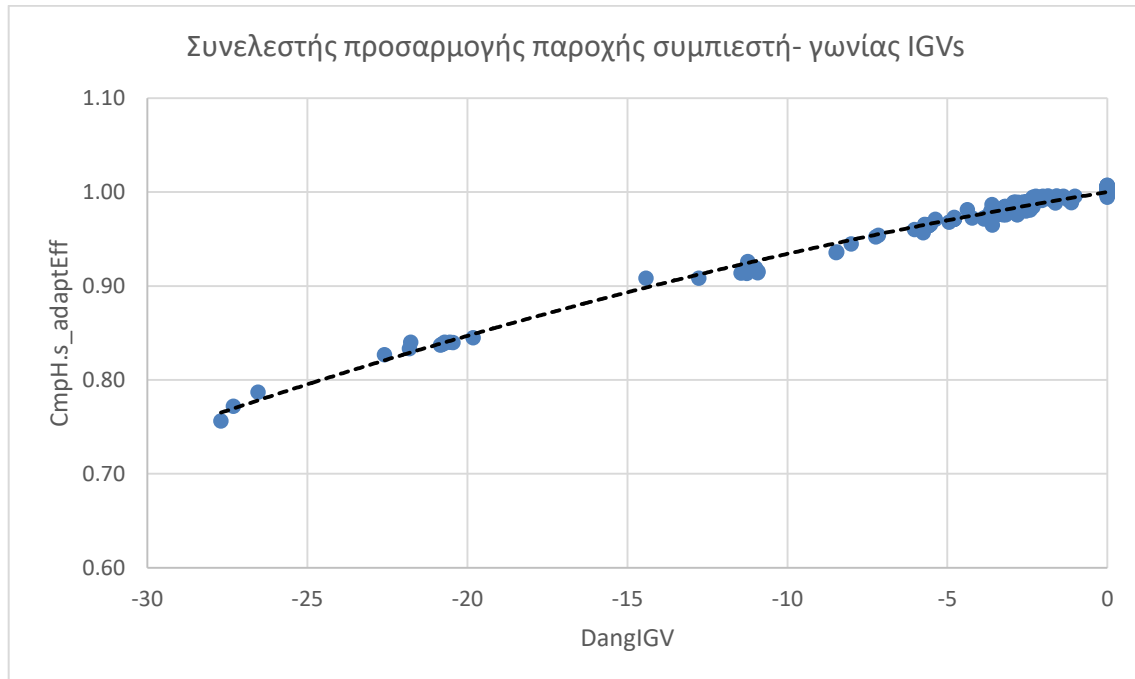
Έτσι επιλέγουμε να διορθωθούν οι χαρακτηριστικές 0,98 κατά 4,81%, 1 κατά 0,7 % και 1,02 κατά -3,41%. Ο νέος χάρτης του συμπίεστή που προκύπτει μετά την τοπική προσαρμογή μαζί με το σημείο σχεδίασης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-53:



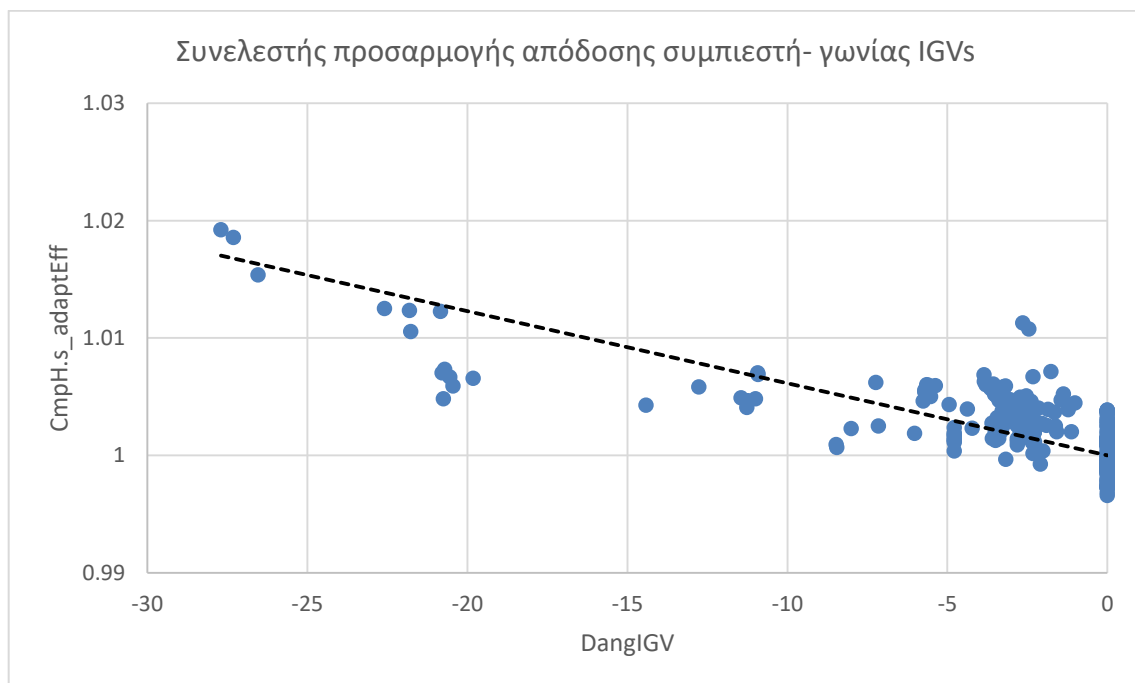
Σχήμα 4-53 Χάρτης του συμπίεστή μετά την τοπική προσαρμογή

Καθώς η συσχέτιση των συντελεστών προσαρμογής του συμπίεστή με την γωνία των IGVs στο Σχήμα 4-46 και στο Σχήμα 4-47, δεν ήταν η αναμενόμενη (συνήθως προκύπτει μια πολυωνμική καμπύλη δευτέρου βαθμού), επιλέγουμε να ελέγξουμε εκ νέου τη συσχέτιση αυτή και να διορθώσουμε τους συντελεστές των IGVs με βάση το νέο πλέον χάρτη. Υπολογίζουμε λοιπόν το σημείο σχεδίασης στο νέο χάρτη και εκτελούμε τη λειτουργία υπολογισμού σημείων εκτός σχεδίασης με προσαρμογή χαρτών χωρίς να λάβουμε υπόψιν την επίδραση των IGVs που εξετάσαμε παραπάνω. Τα διαγράμματα

των συντελεστών προσαρμογής παροχής και απόδοσης του συμπιεστή συναρτήσει των IGVs δίνονται παρακάτω στο Σχήμα 4-54 και στο Σχήμα 4-55 αντίστοιχα :

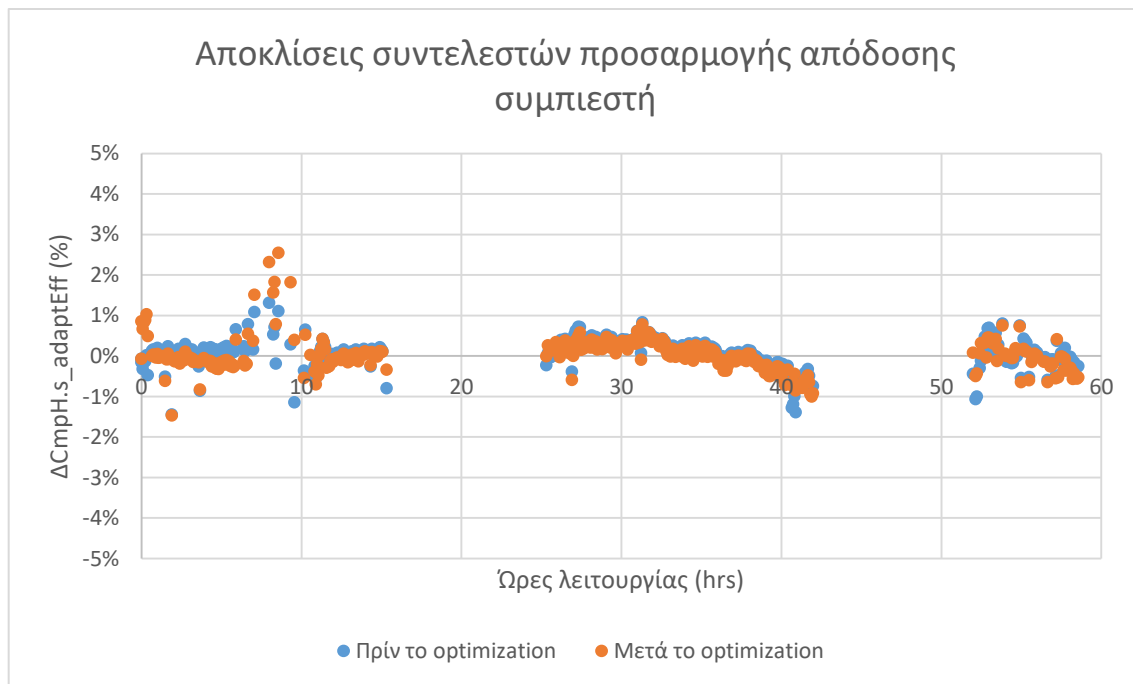


Σχήμα 4-54 Διόρθωση συντελεστών προσαρμογής παροχής συμπιεστή λόγω IGV's



Σχήμα 4-55 Διόρθωση συντελεστών προσαρμογής απόδοσης συμπιεστή λόγω IGV's

Όπως αναμενόταν προκύπτει πλέον καμπύλη δευτέρου βαθμού για την παροχή, και άρα εισάγονται οι αντίστοιχοι συντελεστές στο αρχείο εισόδου. Σε ότι αφορά την απόδοση θεωρούμε πάλι μια γραμμική συσχέτιση, άρα ο δεύτερος συντελεστής εισάγεται με την τιμή 0. Εκτελούμε πάλι την λειτουργία υπολογισμού σημείων εκτός σχεδίασης με προσαρμογή χαρτών (MODE=4), προκύπτουν νέοι συντελεστές προσαρμογής χαρτών. Οι αποκλίσεις των συντελεστών προσαρμογής του συμπιεστή είναι πλέον στο εύρος του $\pm 1\%$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-58. Αυτό υποδεικνύει ότι το μοντέλο που κατασκευάσαμε έως τώρα ενδεχομένως να μην χρειάζεται βελτιστοποίηση, αφού είμαστε ήδη σε ένα πολύ ικανοποιητικό εύρος αποκλίσεων. Αυτό επαληθεύεται και από το διάγραμμα των συντελεστών προσαρμογής παροχής του συμπιεστή μετά την δοκιμή της βελτιστοποίησης που δίνεται στο Σχήμα 4-56. Όπως βλέπουμε έπειτα από την εκτέλεση της βελτιστοποίησης, το αποτέλεσμα δεν διορθώνεται σημαντικά ενώ κάποια από τα εξεταζόμενα σημεία εμφανίζουν αισθητά μεγαλύτερες αποκλίσεις. Επομένως η βελτιστοποίηση δεν λαμβάνεται υπόψιν στο συγκεκριμένο μοντέλο.



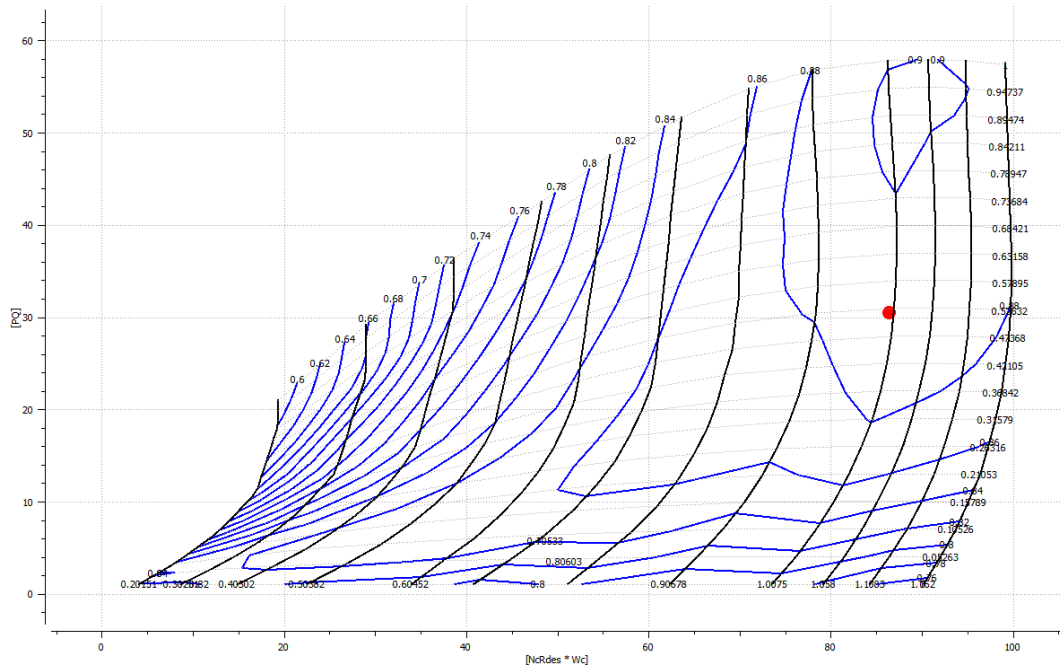
Σχήμα 4-56 Αποκλίσεις συντελεστών προσαρμογής παροχής συμπιεστή πριν και μετά την βελτιστοποίηση

Το επόμενο βήμα είναι να εξετάσουμε εάν χρειάζεται γενική προσαρμογή των χαρτών των συνιστωσών. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-50 και στο Σχήμα 4-51 οι αποκλίσεις των συντελεστών προσαρμογής του στροβίλου συγκεντρώνονται γύρω από μια μέση τιμή. Για την διόρθωση των αποκλίσεων και τον περιορισμό τους στο επιθυμητό εύρος εφαρμόζουμε γενική προσαρμογή του χάρτη του στροβίλου, μεταβάλλοντας τους συντελεστές κλίμακας του χάρτη για την παροχή και τον βαθμό απόδοσης αντίστοιχα, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4-10, και τους εισάγουμε στο αρχείο DPfile.

ΔTrbH.s_adaptWc (%) Μέσος όρος		
-0,013802819		
TrbH.s_mapWc_in	Αρχικό	18,01358862
	Τελικό	17,76495032
ΔTrbH.s_adaptEff (%) Μέσος όρος		
-0,015110439		
TrbH.s_mapEff_in	Αρχικό	1,04269281
	Τελικό	1,02693726

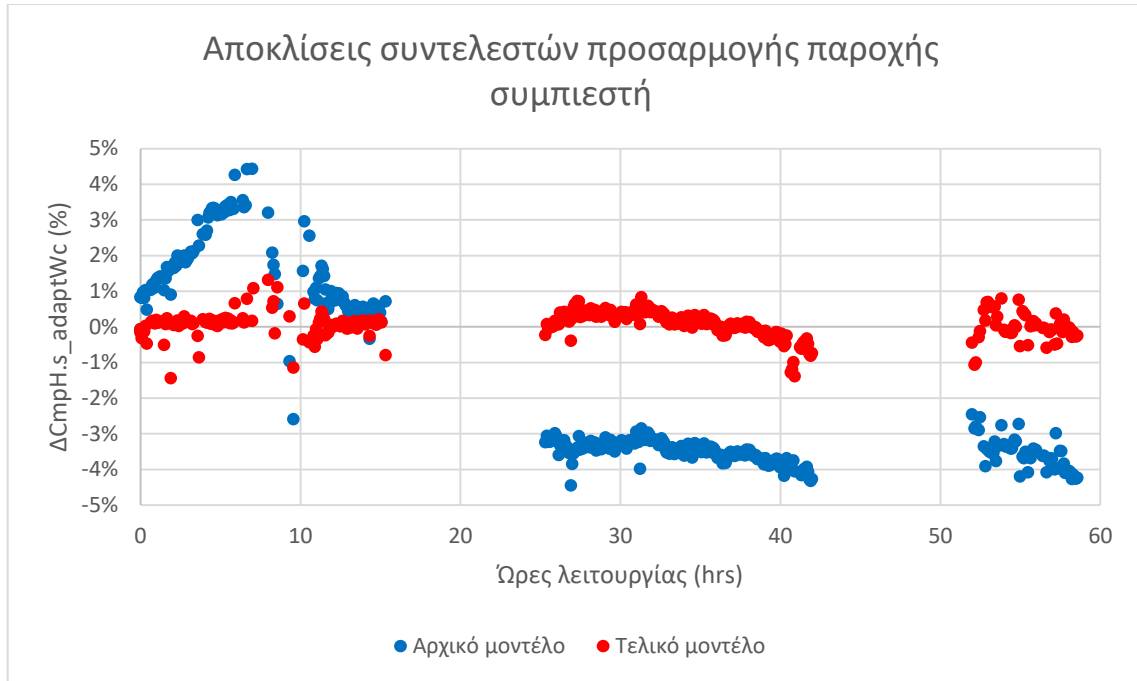
Πίνακας 4-10 Μέση τιμή συντελεστών προσαρμογής και μεταβολή των συντελεστών κλίμακας του χάρτη του στροβίλου

Ο χάρτης του στροβίλου έπεται από την γενική προσαρμογή παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:

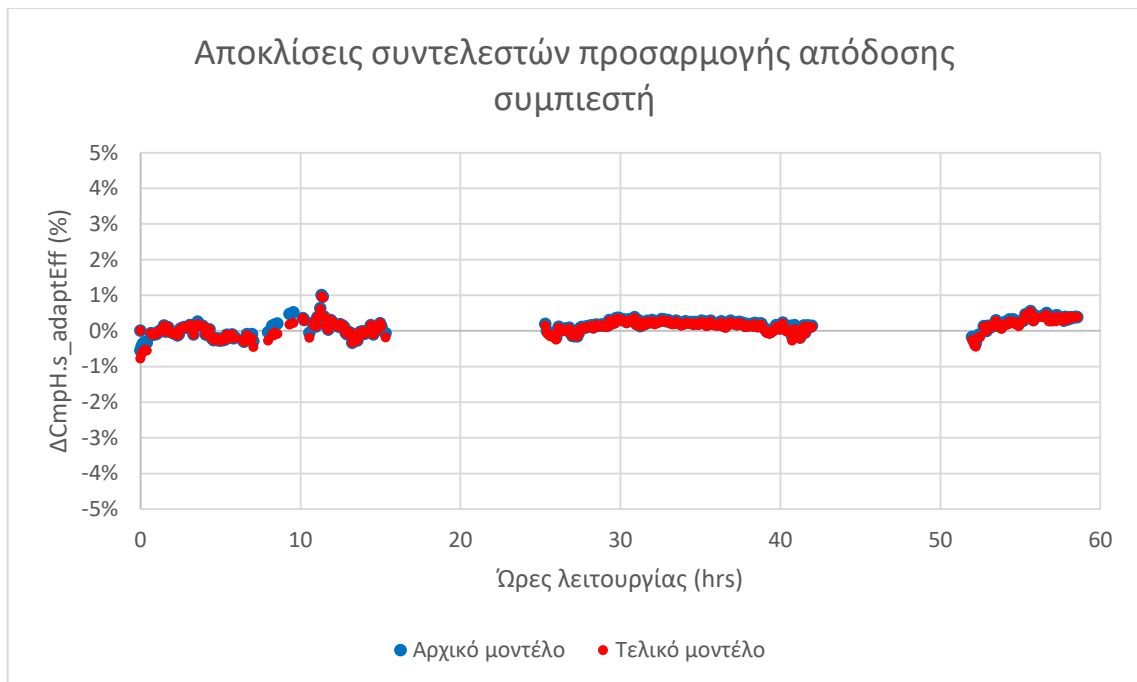


Σχήμα 4-57 Χάρτης στροβίλου και σημείο σχεδίασης μετά την γενική προσαρμογή

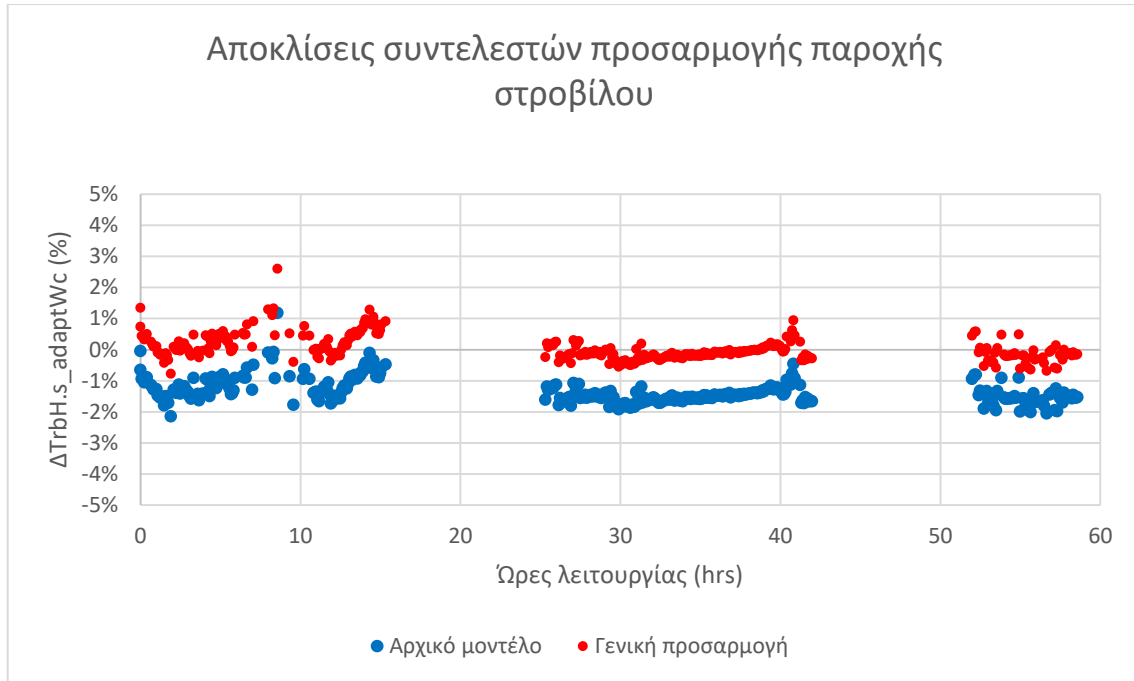
Μπορούμε έτσι να εκτελέσουμε κατευθείαν την λειτουργία υπολογισμού σημείων σχεδίασης με προσαρμογή χαρτών και να πάρουμε τους τελικούς συντελεστές προσαρμογής με τις αντίστοιχες αποκλίσεις. Τα τελικά διαγράμματα των αποκλίσεων δίνονται παρακάτω στα σχήματα παρακάτω:



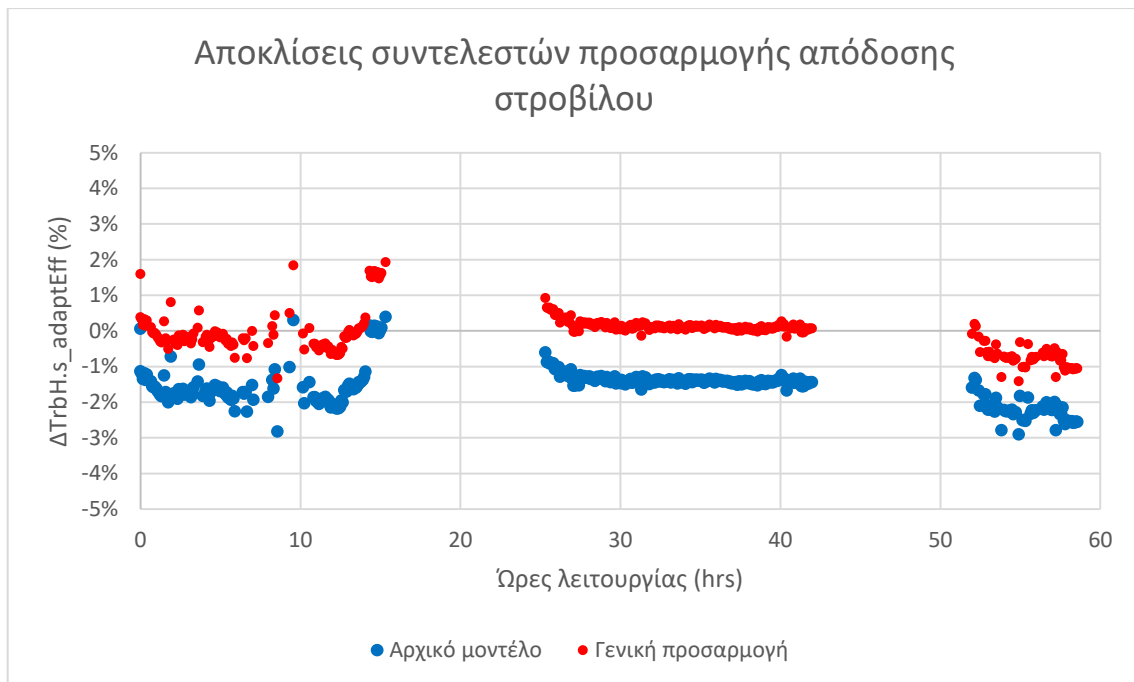
Σχήμα 4-58 Αποκλίσεις συντελεστών προσαρμογής παροχής συμπίεστη πριν και μετά την διόρθωση



Σχήμα 4-59 Αποκλίσεις συντελεστών προσαρμογής απόδοσης συμπίεστη πριν και μετά την διόρθωση

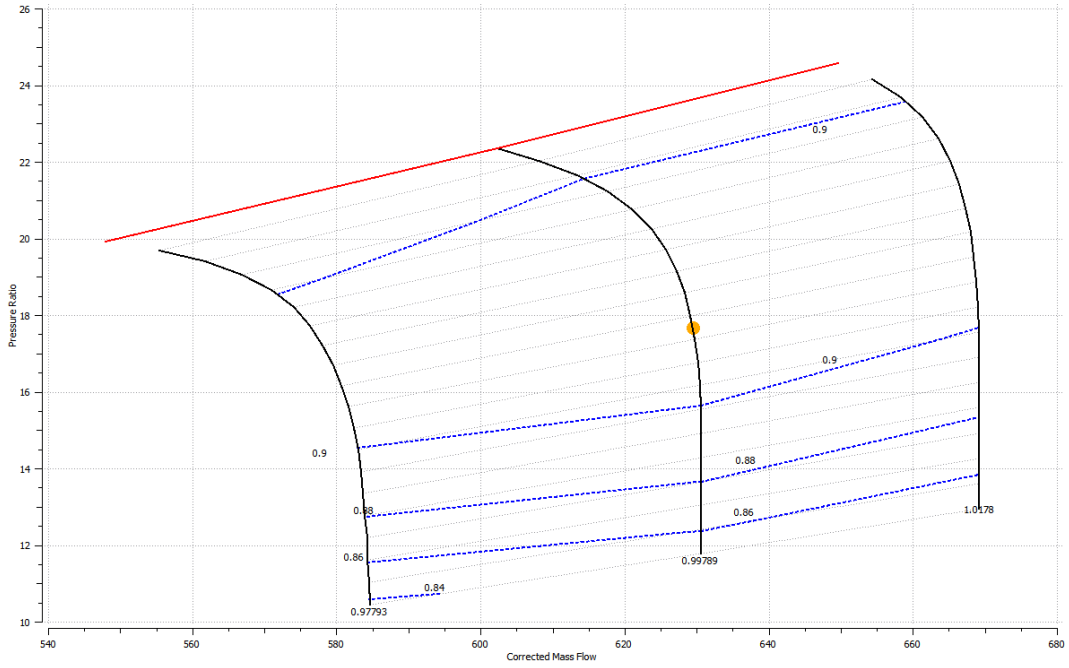


Σχήμα 4-60 Συντελεστές προσαρμογής παροχής στροβίλου πριν και μετά τη διόρθωση

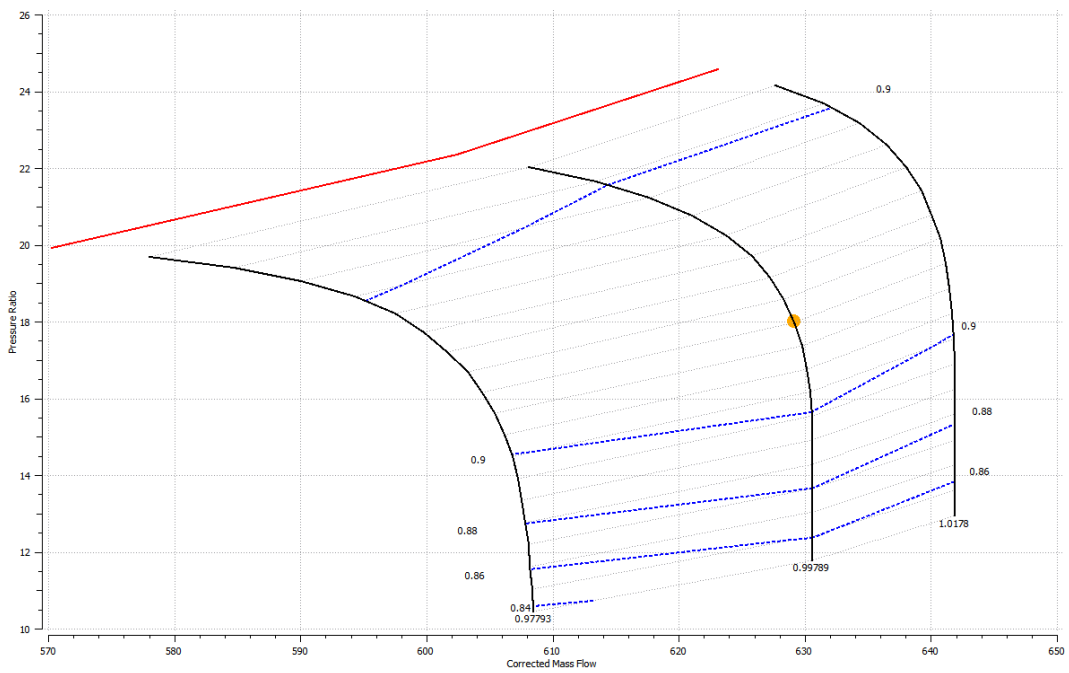


Σχήμα 4-61 Συντελεστές προσαρμογής παροχής στροβίλου πριν και μετά τη διόρθωση

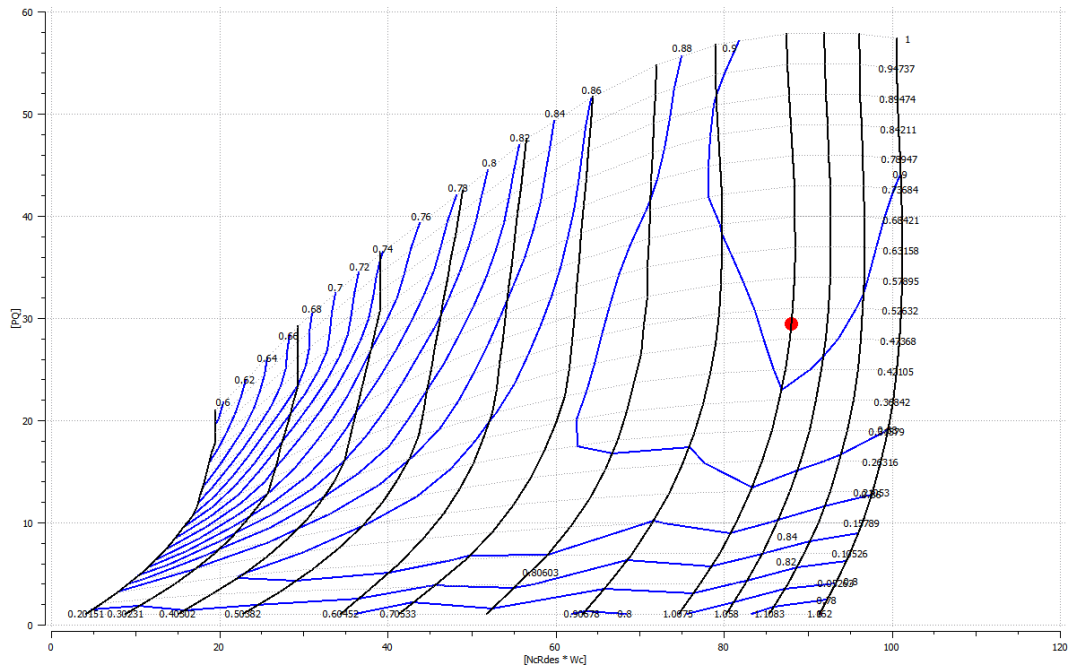
Ακόμη δίνονται συγκριτικά οι αρχικοί και τελικοί χάρτες λειτουργίας του συμπιεστή και του στροβίλου:



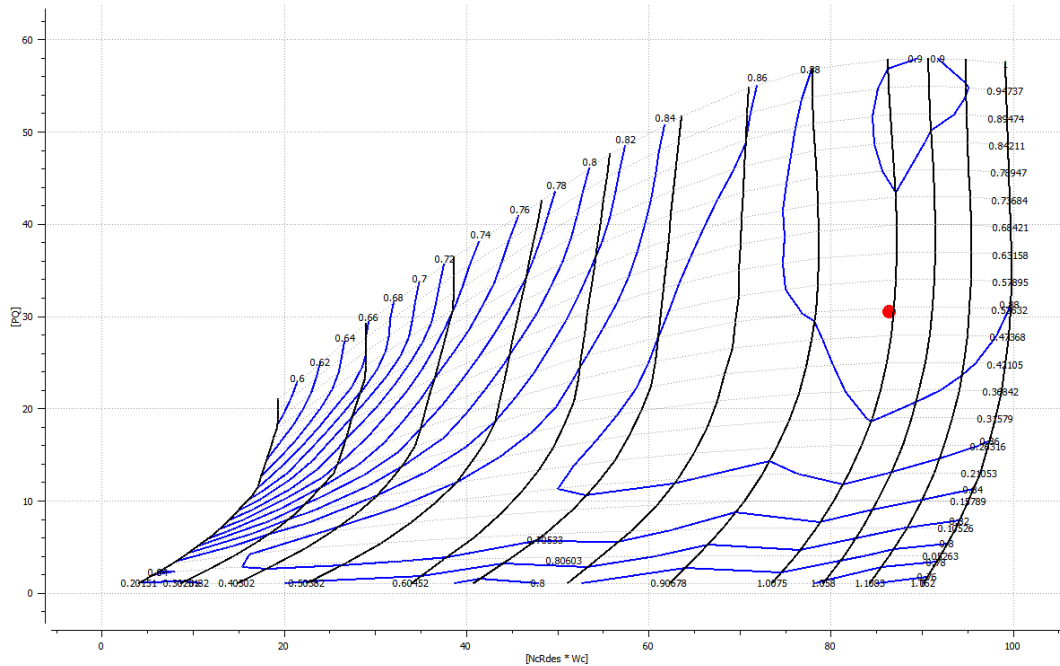
Σχήμα 4-62 Χάρτης συμπίεστή και σημείο σχεδίασης πριν τις διορθώσεις



Σχήμα 4-63 Χάρτης συμπίεστή και σημείο σχεδίασης μετά τις διορθώσεις



Σχήμα 4-64 Χάρτης στροβίλου και σημείο σχεδίασης πριν τις διορθώσεις

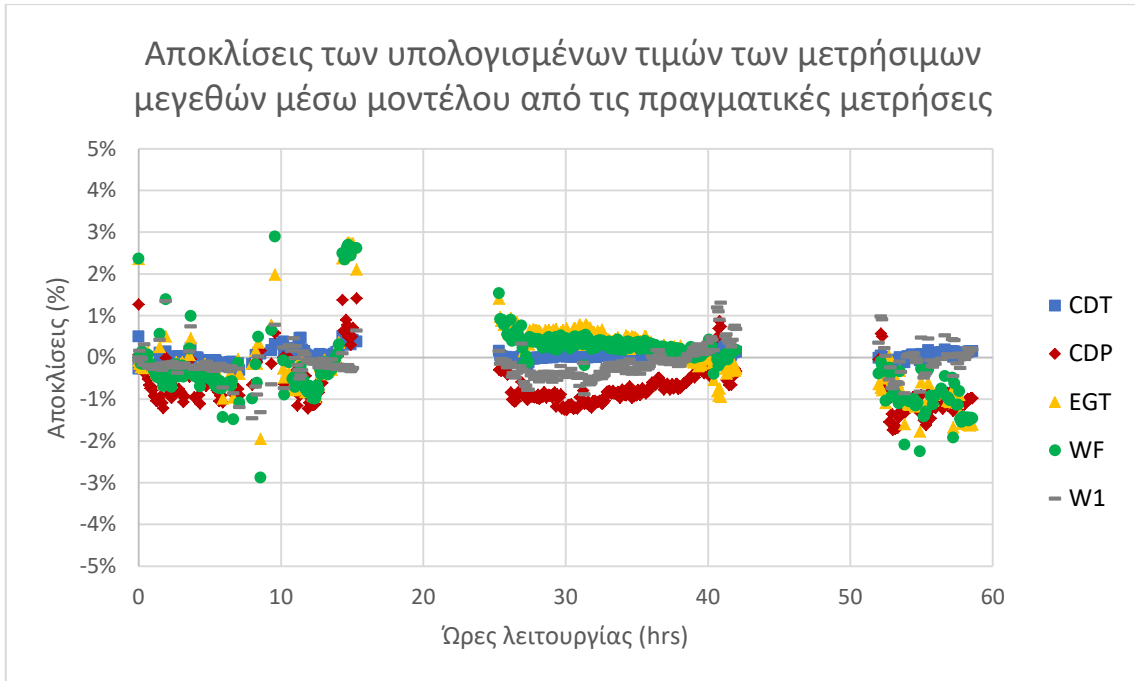


Σχήμα 4-65 Χάρτης στροβίλου και σημείο σχεδίασης μετά τις διορθώσεις

Από τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται εμφανής η διόρθωση του αρχικού μοντέλου, οι αποκλίσεις του οποίου είναι πλέον στο εύρος του $\pm 1\%$. Η ακρίβεια αυτή είναι ικανοποιητική και έτσι η μοντελοποίηση του αεριοστροβίλου 9FB έχει ολοκληρωθεί.

Μπορούμε πλέον να προσομοιώσουμε την λειτουργία του αεριοστροβίλου και να υπολογίσουμε τα διαθέσιμα σημεία εκτός σχεδίασης. Παρακάτω στο Σχήμα 4-66, και ως αποτέλεσμα εφαρμογής της προτεινόμενης διαδικασίας σε αυτή την περίπτωση, δίνονται οι αποκλίσεις των μεγεθών που μετρούνται σε μια εγκατάσταση από την

πραγματική τους τιμή, έτσι όπως αυτές υπολογίστηκαν μέσω του μοντέλου. Και σε αυτή την περίπτωση οι αποκλίσεις περιορίζονται στο εύρος του $\pm 1\%$ επαληθεύοντας τον αρχικό στόχο της διαδικασίας.



Σχήμα 4-66 Αποκλίσεις των υπολογιζόμενων τιμών των CDT, CDP, EGT, WF και W1 από την μετρημένη τους τιμή

5

Ανακεφαλαίωση-Συμπεράσματα- Προτάσεις

5.1 Ανακεφαλαίωση

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε με στόχο την μελέτη των βιομηχανικών αεριοστροβίλων που είναι εγκατεστημένοι στην Ελλάδα και την ανάπτυξη ενός προγράμματος γενικευμένου χαρακτήρα για την προσαρμογή μοντέλου προσομοίωσης της λειτουργίας βιομηχανικών αεριοστροβίλων απλής ατράκτου.

Αρχικά αναζητήθηκαν οι βιομηχανικοί αεριοστρόβιλοι που χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα. Η μελέτη αυτή, η οποία έγινε σε συνεργασία με τον συνάδελφο Παύλο Ρομπόκο, βασίστηκε τόσο στα αρχεία του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών όσο και στην επικοινωνία με τους υπεύθυνους μηχανικούς των εγκαταστάσεων. Με αυτό τον τρόπο δημιουργήθηκε ένας χάρτης στον οποίο εμφανίζεται η τοποθεσία των εργοστασίων, η επιχείρηση στην οποία ανήκουν καθώς και οι αεριοστρόβιλοι που περιλαμβάνουν. Παράλληλα και έπειτα από την επίσκεψη ορισμένων εργοστασίων, έγινε συλλογή βιβλιογραφικών στοιχείων και δεδομένων λειτουργίας των μηχανών. Με βάση αυτά τα στοιχεία και με τη βοήθεια των φυλλαδίων των κατασκευαστών, παρουσιάστηκαν τα βασικά στοιχεία επιδόσεων και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων αεριοστροβίλων.

Στη συνέχεια δημιουργήθηκε πρόγραμμα στο περιβάλλον του PROOSIS, το οποίο έχει γενικευμένο χαρακτήρα και απαιτεί την επέμβαση του χρήστη εξωτερικά, μέσω ενός αρχείου εισόδου. Το πρόγραμμα αυτό είναι δομημένο με τέτοιο τρόπο, ώστε να επιτελεί όλες τις αναγκαίες λειτουργίες που αφορούν την λειτουργία ενός αεριοστροβίλου και επιτρέπει στο χρήστη να ολοκληρώσει με άμεσο και γρήγορο τρόπο ένα αξιόπιστο μοντέλο βιομηχανικού αεριοστροβίλου απλής ατράκτου.

Η λειτουργία και τα αποτελέσματα του προγράμματος επαληθεύτηκαν με την μοντελοποίηση δύο αεριοστροβίλων απλής ατράκτου της General Electric. Συγκεκριμένα μοντελοποιήθηκε ο GE 9E που βρίσκεται στις εγκαταστάσεις της ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΝ ΕΛΛΑΣ στον Άγιο Νικόλαο και ο GE 9FB που είναι εγκατεστημένος στο εργοστάσιο της Korinthos Power στους Αγίους Θεοδώρους. Και στις δύο περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα λειτουργίας που ελήφθησαν από τα αντίστοιχα εργοστάσια. Ως χάρτες χρησιμοποιήθηκαν τυπικοί χάρτες λειτουργίας βιομηχανικών αεριοστροβίλων απλής ατράκτου, ενώ για το καύσιμο χρησιμοποιήθηκε αρχείο τυπικών ιδιοτήτων του φυσικού αερίου. Έτσι δημιουργήθηκε πρώτα ένα αρχικό μοντέλο των μηχανών και έγιναν ορισμένες διορθώσεις που συνέβαλαν στον περιορισμό των

εμφανιζόμενων αποκλίσεων. Οι διορθώσεις αυτές βασίζονται σε λειτουργίες όπως η τοπική προσαρμογή των χαρτών λειτουργίας μέσω μετακίνησης των χαρακτηριστικών των στροφών και η βελτιστοποίηση της θέσης του σημείου σχεδίασης πάνω στους χάρτες. Ακόμη εξετάζεται και η ανάγκη γενικής προσαρμογής των χαρτών, εάν οι αποκλίσεις συσσωρεύονται γύρω από μια μέση τιμή. Και στις δύο περιπτώσεις τα μοντέλα που προέκυψαν προσομοιώνουν την λειτουργία των μηχανών με ακρίβεια της τάξης του $\pm 1\%$, η οποία θεωρείται ικανοποιητική εκτός από προσομοίωση και για διαγνωστικούς σκοπούς.

5.2 Συμπεράσματα

Με βάση τα αποτελέσματα από όλα τα στάδια της εργασίας μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα:

Για την μελέτη των βιομηχανικών αεριοστροβίλων στην Ελλάδα:

- Αυτή τη στιγμή η ΔΕΗ διαθέτει επτά εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση αεριοστροβίλων, ενώ άλλα επτά ανήκουν συνολικά σε ιδιωτικές εταιρίες (PROTERGIA, ELPEDISON, ΗΡΩΝ).
- Οι αεριοστροβίλοι απλής ατράκτου είναι αυτοί που κυριαρχούν σε εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας υψηλής ισχύος και εντοπίζονται κατά κύριο λόγο στο διασυνδεδεμένο σύστημα της ηπειρωτικής χώρας. Οι αεριοστροβίλοι διδύμων ατράκτων ή διπλού τυμπάνου απαντώνται κυρίως σε μικρότερες μονάδες στα μη διασυνδεδεμένα νησιά, όπου απαιτείται περισσότερη ευελιξία στην κάλυψη του φορτίου. Τέλος αρκετά διυλιστήρια ή βιομηχανίες χρησιμοποιούν μικρές μονάδες αεριοστροβίλων για τη κάλυψη των δικών τους αναγκών σε ενέργεια.
- Σε ότι αφορά τα μοντέλα των μηχανών, οι αεριοστροβίλοι κλάσης F της General Electric είναι αυτοί που επιλέγονται κατά κόρον.
- Στις περισσότερες περιπτώσεις οι παραπάνω διατάξεις αεριοστροβίλων εντάσσονται σε εγκαταστάσεις συνδυασμένου κύκλου, έτσι ώστε να γίνεται όσο το δυνατόν πιο αποδοτική η παραγωγή ενέργειας.

Σε ότι αφορά την δημιουργία των μοντέλων προσομοίωσης συμπεραίνουμε ότι:

- Για την δημιουργία ενός αξιόπιστου μοντέλου είναι επιθυμητό τα διαθέσιμα δεδομένα λειτουργίας να καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος καταστάσεων που αφορούν:
 - i. Τις συνθήκες εισόδου του αέρα στον αεριοστροβίλο (περιβαλλοντικές συνθήκες)
 - ii. Την αποδιδόμενη ισχύ και το άνοιγμα των μεταβλητών πτερυγίων IGVs

Ταυτόχρονα κρίνεται σκόπιμο τα δεδομένα αυτά να αναφέρονται σε ένα κατά το δυνατόν σύντομο χρονικό διάστημα, έτσι ώστε η κατάσταση της ‘‘υγείας’’

της μηχανής να μην μεταβάλλεται από παράγοντες όπως επικαθίσεις σωματιδίων, που επηρεάζουν το εύρος της διακινούμενης παροχής ή την απόδοση των συνιστωσών.

- Επίσης για την δημιουργία ενός ολοκληρωμένου και αξιόπιστου μοντέλου είναι αναγκαίο οι διαθέσιμες μετρήσεις να περιλαμβάνουν τα μεγέθη που απαιτούνται για τον υπολογισμό των συντελεστών προσαρμογής των χαρτών.
- Ο χρήστης θα πρέπει να έχει την εμπειρία και να είναι σε θέση να αναγνωρίζει πιθανά σφάλματα μετρήσεων που παρουσιάζονται στα δεδομένα λειτουργίας, τα οποία μπορούν να υποβαθμίσουν την αξιοπιστία της μοντελοποίησης και να οδηγήσουν σε αμφίβολα αποτελέσματα.
- Οι χάρτες λειτουργίας που χρησιμοποιούμε κατά τη δημιουργία των μοντέλων αποτελούν τυπικούς χάρτες αεριοστροβίλων βαρέως τύπου. Η χρήση αυτών των χαρτών για την μοντελοποίηση των δύο αεριοστροβίλων οδήγησε σε ικανοποιητικό αποτέλεσμα και επομένως είναι αποδεκτή. Ωστόσο ο χρήστης μπορεί να εξετάσει και τη χρήση διαφορετικών χαρτών και να ελέγξει εάν αυτοί οδηγούν σε ένα καλύτερο αποτέλεσμα.
- Ο χειρισμός του προγράμματος που δημιουργήθηκε μέσω ενός εξωτερικού αρχείου εισόδου και άρα ο έλεγχος της λειτουργίας του μέσω του αρχείου αυτού, μειώνει αισθητά το χρόνο προσαρμογής ενός μοντέλου και οδηγεί σε γρήγορα, άμεσα και ακριβή αποτελέσματα.
- Η μοντελοποίηση δύο διαφορετικών αεριοστροβίλων μέσω της διαδικασίας που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 4, αναδεικνύει τον γενικευμένο χαρακτήρα του προγράμματος που χρησιμοποιήθηκε για το σκοπό αυτό. Δηλαδή το πρόγραμμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μοντελοποίηση της λειτουργίας αεριοστροβίλων διάταξης απλής ατράκτου που καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος ισχύος, διατηρώντας την ακρίβεια στο επιθυμητό επίπεδο.
- Τα μοντέλα των αεριοστροβίλων που εξετάστηκαν, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για την προσομοίωση διαφορετικών σημείων λειτουργίας των μηχανών όσο και για διαγνωστικούς σκοπούς αφού η ακρίβεια τους είναι της τάξης του $\pm 1\%$.

5.3 Προτάσεις

Έπειτα από την εξέταση και εφαρμογή της διαδικασίας μοντελοποίησης που παρουσιάζεται στην διπλωματική αυτή εργασία, προτείνονται τα εξής:

1. Όπως παρατηρούμε στο κεφάλαιο 4, η εφαρμογή των προτεινόμενων διορθώσεων του μοντέλου που δημιουργούμε, όπως ο υπολογισμός των συντελεστών κλίμακας των IGVs και η τοπική προσαρμογή των χαρτών λειτουργίας, πραγματοποιείται με τη βοήθεια εξωτερικού προγράμματος (πχ. Excel). Εκεί γίνεται η επεξεργασία των συντελεστών των αποκλίσεων και η

κατασκευή των αντίστοιχων διαγραμμάτων για τον έλεγχο της συσχέτισης κάποιων αποτελεσμάτων. Προτείνεται λοιπόν, αυτά τα στάδια της διαδικασίας να ενταχθούν στο πρόγραμμα, έτσι ώστε ο έλεγχος κάποιας συσχέτισης μεγεθών και η αντίστοιχη αλλαγή που αυτή επιφέρει, να γίνεται εσωτερικά και αυτοματοποιημένα.

2. Ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η προσπάθεια ένταξης μιας πέμπτης λειτουργίας στο πρόγραμμα (MODE = 5), η οποία θα εκτελούσε διαδοχικά και με προκαθορισμένη σειρά όλες τις λειτουργίες που αναφέρονται στο Σχήμα 3-5. Κάτι τέτοιο κρίνεται αρκετά δύσκολο, εφόσον η πορεία εκτέλεσης των λειτουργιών εξαρτάται από τα αποτελέσματα που προκύπτουν κάθε φορά, κατά την δημιουργία ενός μοντέλου με βάση δεδομένα λειτουργίας. Ωστόσο θα μπορούσε να οριστεί μια τυπική αλληλουχία εκτέλεσης λειτουργιών που προκύπτει αρκετά συχνά κατά την ολοκλήρωση ενός μοντέλου (π.χ IGVs, τοπική προσαρμογή, βελτιστοποίηση).
3. Η διαδικασία της βελτιστοποίησης στο πρόγραμμα που παρουσιάζεται σε αυτή την εργασία, επιτυγχάνεται με χρήση της μεθόδου Simplex. Η μέθοδος αυτή, συγκριτικά με άλλες, οδηγεί γρήγορα σε ένα αποτέλεσμα αλλά διαθέτει και αρκετά μειονεκτήματα. Το βασικότερο είναι ότι εντοπίζει το κοντινότερο ελάχιστο μιας συνάρτησης κόστους ανάλογα με την θέση έναρξης της διαδικασίας. Με αυτό τον τρόπο, έπειτα από την εκτέλεση της διαδικασίας δεν είμαστε βέβαιοι εάν έχουμε καταλήξει στο ολικό βέλτιστο αποτέλεσμα. Προτείνεται λοιπόν η εξέταση διαφορετικών μεθόδων βελτιστοποίησης και η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν σε κάθε περίπτωση.
- Η διαδικασία της μοντελοποίησης που προτείνεται, ικανοποιεί κάποιες βασικές απαιτήσεις:
 - i. Τη δημιουργία προγράμματος με γενικευμένο χαρακτήρα, για τη μοντελοποίηση οποιουδήποτε αεριοστροβίλου απλής ατράκτου
 - ii. Την δημιουργία προγράμματος στο οποίο ο χρήστης επεμβαίνει μόνο εξωτερικά, μέσω του αρχείου εισόδου

Προτείνεται λοιπόν η επέκταση αυτής της λογικής και στη μοντελοποίηση άλλων διατάξεων αεριοστροβίλων όπως:

- i. Αεριοστρόβιλοι διάταξης διπλού τυμπάνου
- ii. Αεριοστρόβιλοι με αναθέρμανση, ενδιάμεση ψύξη ή ανακόμιση θερμότητας καυσαερίων.

6

Βιβλιογραφία

6.1 Πίνακας Βιβλιογραφίας

- [1] Τσιρέκης Κ. - ΑΔΜΗΕ, Λίστα Θερμοηλεκτρικών Σταθμών Παραγωγής Ενέργειας, Αθήνα, 2017.
- [2] Ε. Κουτσούλα - ΑΔΜΗΕ, Λίστα Αυτοπαραγωγών, Αθήνα, 2017.
- [3] www.dei.gr.
- [4] www.protergia.gr.
- [5] www.heron.gr.
- [6] <http://megalopolis.gr/>.
- [7] ΔΕΗ, Εγκαταστάσεις Ηλεκτροπαραγωγής Συνδυασμένου Κύκλου, 2004.
- [8] www.elpedison.gr.
- [9] www.motoroil.gr.
- [10] www.kavalaoil.gr.
- [11] Giampaolo Gas Turbine Handbook Principles And Practices, 2006.
- [12] INDUSTRIAL & MARINE GAS TURBINE ENGINES OF THE WORLD 1985-86, 1985-86.
- [13] Gas Turbine World 2015 Performance Specs, 2015.
- [14] M. P. Boyce, Gas Turbine Engineering Handbook second edition, 2002.
- [15] Gas Turbine World, March - April 2013.
- [16] C. M. Soares, GAS TURBINES IN SIMPLE CYCLE & COMBINED CYCLE APPLICATIONS.
- [17] K. P. Specifications, «GE 9FB performance curves».
- [18] K. P. Specifications, «GE 9FB Gas Turbine Functional Description».
- [19] Π. Σ. Ζωή, Λειτουργία αεριοστροβίλων και ατμοστροβίλων - Αεριοστρόβιλος General Electric 9FB.
- [20] «<https://www.gepower.com/gas/gas-turbines/9f-05>».
- [21] «https://www.gepower.com/content/dam/gepower-pgdp/global/en_US/documents/product/gas%20turbines/Fact%20Sheet/2017-prod-specs/9f-power-plants.pdf - 9F.05».

- [22] «<http://www.powerengineeringint.com/articles/print/volume-19/issue-5/features/the-9f-platform-a-history-of-refinement.html>.».
- [23] «<https://www.gepower.com/gas/gas-turbines/9e-03>».
- [24] C. Isiadinso, «Gas Turbine 9E.03».
- [25] «Specifications for GE Frame PG9171E Gas Turbine Generator
<http://www.usgulfrading.com/uploads/products/5d87a38a813675f4f173ba25fb035b2fb2d7caf30.pdf>».
- [26] «GE FRAME 9E TURBINES PG9171-E 123MW / 50 HZ DUAL FUEL TURBINES».
- [27] Α. Παπαστελιανού, Διπλωματική Εργασία Μοντελοποίηση Αεριοστροβίλου LM2500 για χρήση Ναυτικής Πρόωσης και Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας, Αθήνα, 2014.
- [28] «<https://www.gepower.com/gas/gas-turbines/lm2500>».
- [29] «https://en.wikipedia.org/wiki/General_Electric_LM2500».
- [30] «GE LM2500 Flact Sheet 2006 - www.gepower.com».
- [31] «LM2500 Data sheets - www.gepower.com».
- [32] «LM6000 SPRINT Gas Turbine Generator Set - www.gepower.com».
- [33] «LM6000 Product Sheet - www.ge.com/marine».
- [34] R. L. CASPER and R. B. SPECTOR GE Marine & Industrial Engines - General Electric Company, The LM6000 Gas Turbine as a Mechanical Drive Power Source.
- [35] «Alstom GT24/GT26 flact sheet».
- [36] «[http://www.tfd.chalmers.se/~thgr/gasturbiner/Material_for_generating_slides/html_documents/ALSTOM%20Power%20GT24%20and%20GT26%20\(179MW%20and%20262MW\).htm](http://www.tfd.chalmers.se/~thgr/gasturbiner/Material_for_generating_slides/html_documents/ALSTOM%20Power%20GT24%20and%20GT26%20(179MW%20and%20262MW).htm)».
- [37] «<https://www.ansaldoenergia.com/Pages/GT26.aspx>».
- [38] Ansaldo Energia, «AE 64.3A Ansaldo Energia brochure».
- [39] K. Gumeni, «IMPROVEMENT AND OPERATING EXPERIENCE OF THE AE64.3A GAS TURBINE -INSTALLED IN CCPP OF VLORE».
- [40] Industrial & Marine Turbine Forecast, «Siemens SGT-1000 - Archived 5/2006».
- [41] L. Minervini Ansaldo Energia Project Engineer, ANSALDO ENERGIA V64.3A FOR RUSSIAN COMBINED CYCLE POWER PLANTS.
- [42] Sulzer, «Vanes Equivalent to Siemens V64.3A / SGT-1000F and Ansaldo AE64.3A».
- [43] «<https://www.ansaldoenergia.com/business-lines/new-units/gas-turbines/ae64-3a>».

- [44] CFAS Enterprises Inc. - After Market Utility Power Equipment Brokerage Turbine, «1 Rebuilt GE MS 5001P (PG5341) 60Hz 22,800kw Gas Turbine Generator / GTG_1255IF_Fm5P.doc - <http://CFASPower.com/Index.html>».
- [45] M. C. & N. Marcucci, GER-4171 - Performance and Reliability Improvements for MS5002 Gas Turbines.
- [46] «<http://www.ansaldothomassen.eu/about-us/>».
- [47] Alexios Alexiou - Laboratory of Thermal Turbomachines (LTT) National Technical University of Athens (NTUA), Introduction To Gas Turbine Modelling With PROOSIS second edition, 2014.
- [48] Μελέτη: Ρομπόκος Παύλος - Καλογρίδης Παναγιώτης, Επιμέλεια: Συκαρό Λήδα, Διαγραμμα Αριοστροβίλων Στην Ελλάδα, Αθήνα, 2017.
- [49] Κ. Μαθιουδάκης, Λειτουργία Αεριοστροβίλων και Ατμοστροβίλων, Αθήνα, 2007.
- [50] Κ. Μ. Κ. Γ. Κ.Δ. Παπαηλιού, Εισαγωγή στις Θερμικές Στροβιλομηχανές, Αθήνα, 2000.
- [51] Α. Δ. Τσαλαβούτας, Διδακτορική Διατριβή Ανάπτυξη Συστημάτων Παρακολούθησης Λειτουργίας Βιομηχανικών Αεριοστροβίλων, 2004.
- [52] Γ. Γεωργαλής, Διπλωματική Εργασία Μοντελοποίηση Αεροπορικού Κινητήρα Μερικής Ανάμιξης και Σύγκριση Επιδόσεων με Μετρήσεις από Πτήση, Αθήνα, 2013.
- [53] Μ. Κατσούλη, Διπλωματική Εργασία Εμβάνθυση στην Μοντελοποίηση Λέβητα Ανάκτησης Θερμότητας και Εφαρμογή σε Συνδυασμένο Κύκλο, Αθήνα, 2016.
- [54] «www.rae.gr».
- [55] «<http://www.admie.gr/>».
- [56] «https://en.wikipedia.org/wiki/Dry_Low_Emission.».
- [57] P. F. P. Walsh, Gas Turbine Performance second edition, 2004.
- [58] «<http://frame9e.blogspot.gr/>.».

7

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

7.1 Χάρτες λειτουργίας των συνιστωσών

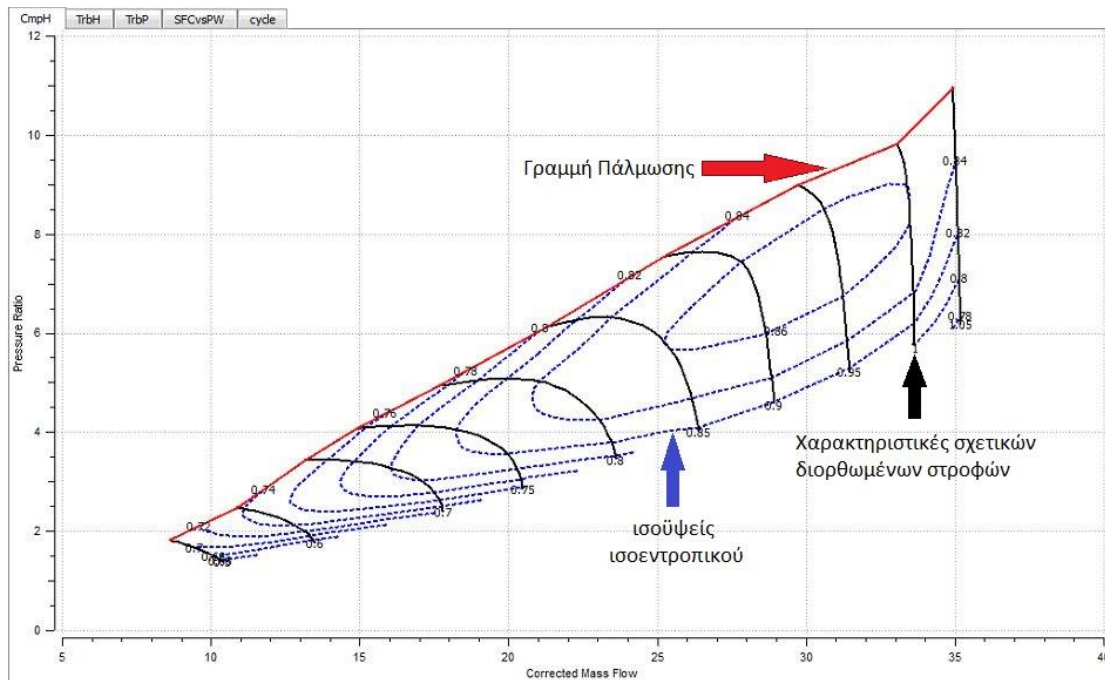
Οι χάρτες που χρησιμοποιούνται λαμβάνονται από τις βιβλιοθήκες TURBO και GTE_TURBOSHAFT. Εκεί ο χρήστης βρίσκει ποικιλία σε χάρτες συνιστωσών, που αντιστοιχούν σε συμπιεστές και στροβίλους, βιομηχανικών ή και αεροπορικών αεριοστροβίλων. Σε ότι αφορά το καύσιμο, οι χάρτες καυσίμων καλύπτουν μεγάλο εύρος των διαθέσιμων καυσίμων, όπως καύσιμα Diesel, φυσικό αέριο τυπικής σύστασης και φυσικό αέριο με 100% CH₄.

Η επιλογή των χαρτών συμπιεστή και στροβίλου εξηγείται παρακάτω.

7.1.1 Χάρτης συμπιεστή

Πρόκειται για χάρτη που παρουσιάζει τον λόγο πίεσης του συμπιεστή, συναρτήσει της διορθωμένης παροχής που διέρχεται από αυτόν. Περιλαμβάνει καμπύλες διορθωμένων στροφών (Corrected speed lines), γραμμές-β (beta-lines), ισοϋψείς καμπύλες ισεντροπικού βαθμού απόδοσης (iso-efficiency curves) και τη γραμμή πάλμωσης (surge line).

Οι γραμμές-β, που αντιστοιχούν στην παράμετρο BETA, αποτελούν νοητές γραμμές πάνω στους χάρτες και εκφράζουν το ύψος στο οποίο βρίσκεται το σημείο λειτουργίας. Επομένως, γνωρίζοντας τη ταχύτητα περιστροφής και την τιμή της γραμμής-β, ορίζεται μοναδικό σημείο στη χαρακτηριστική λειτουργίας της συνιστώσας. Παρακάτω, στο Σχήμα 7-1, φαίνεται ένας τυπικός χάρτης συμπιεστή:

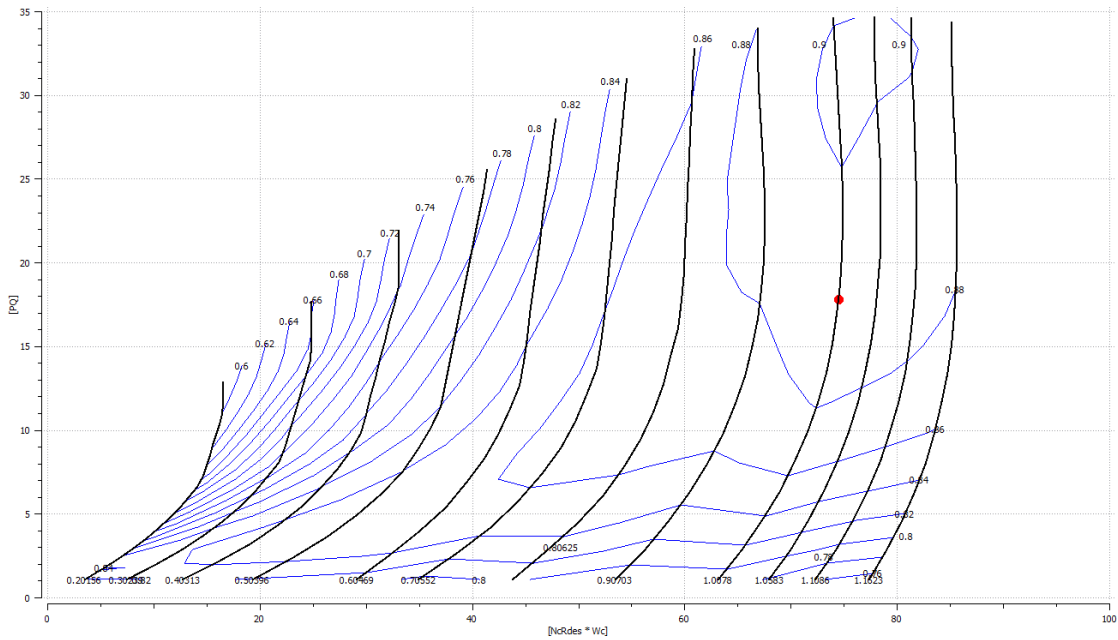


Σχήμα 7-1 Εικόνα χάρτη συμπίεστή

Με κόκκινο αναπαρίσταται η γραμμή πάλμωσης (surge line), με μαύρο οι χαρακτηριστικές σχετικών διορθωμένων στροφών και με μπλε οι ισοΰψεις του ισοεντροπικού βαθμού απόδοσης.

7.1.2 Χάρτες στροβίλου

Ο χάρτης του στροβίλου επίσης δίνει το λόγο πίεσης του, συναρτήσει της διορθωμένης παροχής. Σε αυτή την περίπτωση, η αντίστοιχη παράμετρος με την ΒΕΤΑ, είναι η παράμετρος ΖΕΤΑ, η οποία αναφέρεται σε γραμμές ζ πάνω στο χάρτη. Παρακάτω, στο Σχήμα 7-2, φαίνεται ένας τυπικός χάρτης στροβίλου που χρησιμοποιούμε.



Σχήμα 7-2 Χάρτης στροβίλου

7.1.3 Συντελεστές κλίμακας των χαρτών

Είναι συντελεστές που προσαρμόζουν τον χάρτη, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά λειτουργίας της κάθε μηχανής. Οι συντελεστές που περιέχουν το ‘.s_’ αναφέρονται σε συντελεστές κλίμακας, ενώ αυτοί που περιέχουν το ‘.a_’ αναφέρονται σε αθροιστές κλίμακας. Πιο συγκεκριμένα, οι συντελεστές αυτοί εμπεριέχονται στις σχέσεις υπολογισμού των πραγματικών μεγεθών ως εξής: [47] [27]

Για τον συμπίεστη:

$$Wc = (Wc_{map} \cdot s_{mapWc_in} \cdot s_{adaptWc_in} \cdot s_{IGV_Wc} + a_{mapWc_in} + a_{adaptWc_in}) \cdot s_{ReWc} \cdot s_{gamWc}$$

$$eff = (eff_{map} \cdot s_{mapEff_in} \cdot s_{adapt_in} \cdot s_{IGV_eff} + a_{mapEff_in} + a_{adaptEff_in}) \cdot s_{ReEff} \cdot s_{gamEff}$$

$$PRad = \left\{ s_{gamPR} \cdot \left[\left((PR_{map} - 1) \cdot s_{IGV_PR} \cdot s_{mapPR} + 1 \right)^{\frac{gam_ref-1}{gam_ref}} - 1 \right] + 1 \right\}^{\frac{gam_in}{gam_in-1}}$$

$$NcDes = (NcRDesMap \cdot s_{NcRdes_in} + a_{NcRdes_in}) \cdot s_{gamNc}$$

Για τον στρόβιλο:

$$Wc = (Wc_{map} \cdot s_{mapWc_in} \cdot s_{adaptWc_in} \cdot s_{VGV_Wc} + a_{mapWc_in} + a_{adaptWc_in}) \cdot s_{ReWc} \cdot s_{gamWc}$$

$$eff = (eff_{map} \cdot s_{mapEff_in} \cdot s_{adapt_in} + a_{mapEff_in} + a_{adaptEff_in}) \cdot s_{ReEff} \cdot s_{gamEff}$$

$$PQ = \left\{ 1 - s_{gamPR} \left[1 - \left(PR_{map} \cdot s_{mapPR} \right)^{\frac{gam_ref-1}{gam_ref}} \right] \right\}^{\frac{gam_in}{gam_in-1}}$$

$$NcDes = (NcRDesMap \cdot s_{mapNC} + a_{mapNC}) \cdot s_{gamNc}$$

Στον Πίνακα 7-1 περιγράφονται οι συντελεστές των παραπάνω εξισώσεων:

	Σύμβολα συντελεστών	Τύπος Συντελεστή
Διορθωμένη Παροχή Μάζας	s_mapWc_in	Κλίμακας
	a_mapWc_in	Αθροιστής κλίμακας
	s_adaptWc_in	Προσαρμογής
	a_adaptWc_in	Αθροιστής προσαρμογής
	s_IGV_Wc	Μεταβλητής γεωμετρίας
	s_ReWc	Διορθωτικός
	s_gamWc	Διορθωτικός
Ισεντροπικός Βαθμός Απόδοσης	s_mapEff_in	Κλίμακας
	a_mapEff_in	Αθροιστής κλίμακας
	s_adaptEff_in	Προσαρμογής
	a_adaptEff_in	Αθροιστής προσαρμογής
	s_IGV_eff	Μεταβλητής γεωμετρίας
	s_gamEff	Διορθωτικός
	s_ReEff	Διορθωτικός
Λόγος Πίεσης	s_mapPR_in	Κλίμακας
	s_gamPR	Διορθωτικός
Ανηγμένη Ταχύτητα Περιστροφής	s_NcRdes_in	Κλίμακας
	a_NcRdes_in	Αθροιστής κλίμακας

Πίνακας 7-1 Σύμβολα συντελεστών κλίμακας - διόρθωσης χαρτών

7.2 Υπολογισμός ισχύος

Για μια εγκατάσταση συνδυασμένου κύκλου υπάρχουν δύο περιπτώσεις διάταξης που συναντάμε. Στην πρώτη περίπτωση, αεριοστρόβιλος και ατμοστρόβιλος έχουν ξεχωριστούς άξονες και άρα συνδέονται σε διαφορετικές γεννήτριες. Αυτό σημαίνει ότι μέσω του συστήματος ελέγχου μπορεί να γίνει μέτρηση τόσο της ισχύος που αποδίδει ο αεριοστρόβιλος όσο και αυτής που αποδίδει ο ατμοστρόβιλος. Η διάταξη αυτή διευκολύνει την συλλογή δεδομένων για την μοντελοποίηση μιας μηχανής, αφού έχουμε πραγματική τιμή της ισχύος του αεριοστροβίλου. Στη δεύτερη περίπτωση ωστόσο, ο αεριοστρόβιλος και ο ατμοστρόβιλος συνδέονται σε κοινό άξονα και κινούν την ίδια γεννήτρια, δηλαδή έχουμε μια "single train" εγκατάσταση. Έτσι μπορεί να γίνει μέτρηση μόνο της συνολικής ισχύος που αποδίδει ο συνδυασμένος κύκλος των δύο μηχανών και συνεπώς δεν έχουμε πραγματική τιμή της ισχύος εξόδου του αεριοστροβίλου. Όπως είδαμε στο Κεφάλαιο 3, η τιμή της ισχύος είναι σημαντική τόσο για την αρχικοποίηση της συνάρτησης Run_DesignPoint όσο και ως οριακή μεταβλητή. Έχοντας όλες τις μετρήσεις που απαιτούνται, μπορούμε μέσω ενός ισολογισμού στον άξονα της μηχανής να υπολογίσουμε την ισχύ που αυτή αποδίδει με βάση τα στοιχεία αυτά. Η διαδικασία αυτή ακολουθεί την παρακάτω πορεία:

1. Λαμβάνονται υπόψιν οι τιμές της θερμοκρασίας, πίεσης και υγρασίας αναφοράς και οι ιδιότητες του καυσίμου και υπολογίζονται η ενθαλπία του εγχυόμενου καυσίμου, η ενθαλπία αναφοράς του καυσίμου και η ενθαλπία αναφοράς του αέρα.
2. Η ισχύς εισόδου στον αεριοστρόβιλο είναι:

$$Q1 = W1(ht1 - ht_{ref})$$
3. Η ισχύς εξόδου από τον αεριοστρόβιλο είναι:

$$Q3 = W1(ht3 - ht_{ref})$$
4. Η ισχύς του ρεύματος απομάστευσης προθέρμανσης είναι:

$$Q_{ovb} = W1 \times D30_{bleed1}(ht3 - ht_{ref})$$
5. Η ισχύς που προσδίδει το καύσιμο είναι:

$$Qf = Wf \times FLHV \times Brn_{eff} + Wf \times (ht_{finj} - ht_{fref})$$
6. Η ισχύς εξόδου από τον αεριοστρόβιλο είναι:

$$Q_{exh} = W8 \times (ht8 - ht_{fref})$$

Έτσι με βάση τα παραπάνω και λαμβάνοντας υπόψιν την ισχύ των παρελκόμενων και τον βαθμό απόδοσης του άξονα προκύπτει ο παρακάτω ισολογισμός:

$$PWSD = (Q1 + Qf - Q_{ovb} - Q_{exh} - ShH.pwrOT - (1 - \eta_{shaft}) \times (Q3 - Q1)) / (2 - \eta_{shaft})$$

Η διαδικασία αυτή εκτελείται τόσο κατά τον υπολογισμό του σημείου σχεδίασης, όσο και κατά τον υπολογισμό σημείων εκτός σχεδίασης όπου δεν έχουμε μέτρηση της ισχύος του αεριοστροβίλου. Σημειώνεται ότι η παραπάνω διαδικασία μπορεί να είναι αναγκαία

και σε περίπτωση που παρατηρείται κάποια ασυμβατότητα μεταξύ των μετρήσεων που έχουμε για έναν αεριοστρόβιλο.

7.3 Διόρθωση μεγεθών

Για την διόρθωση των μεγεθών χρησιμοποιούνται τα μεγέθη θ και δ που υπολογίζονται ως εξής:

$$\theta = \frac{Tt}{Tt_{ref}} \quad \text{Εξ. 7-1}$$

$$\delta = \frac{Pt}{Pt_{ref}} \quad \text{Εξ. 7-2}$$

Για την διόρθωση της ισχύος:

$$PW_{cor} = PW \frac{\theta^2}{\delta} \quad \text{Εξ. 7-3}$$

Για την διόρθωση των λοιπών μεγεθών:

$$N_{cor} = \frac{N}{\sqrt{\theta}} \quad \text{Εξ. 7-4}$$

$$W_{cor} = W \frac{\sqrt{\theta}}{\delta} \quad \text{Εξ. 7-5}$$

$$Tt_{cor} = \frac{Tt}{\theta} \quad \text{Εξ. 7-6}$$

$$Pt_{cor} = \frac{Pt}{\delta} \quad \text{Εξ. 7-7}$$

7.4 Αρχείο εισόδου προγράμματος

Στην πρώτη γραμμή του εισάγεται ο αριθμός της επιθυμητής λειτουργίας, ή όπως διαβάζεται μέσα στον κώδικα η ακέραια μεταβλητή MODE, με την δυνατότητα εισαγωγής τεσσάρων αριθμών:

1. Ανάλυση σημείου σχεδίασης
2. Βελτιστοποίηση σημείου σχεδίασης
3. Ανάλυση σημείων εκτός σημείου σχεδίασης
4. Ανάλυση σημείων εκτός σημείου σχεδίασης με προσαρμογή χαρτών

Μετά εισάγεται ο αριθμός των συνολικών σημείων λειτουργίας, ή όπως διαβάζεται μέσα στον κώδικα η ακέραια μεταβλητή NPOINTS, που θα καταχωρηθούν ανεξαρτήτως αν θα χρησιμοποιηθούν σε οποιαδήποτε λειτουργία ή όχι.

Στην συνέχεια εισάγονται τα δεδομένα των σημείων λειτουργίας κάτω από τις ονομασίες των στηλών, και δημιουργούν τον πίνακα POINT, όπως διαβάζεται στον κώδικα, με NPOINTS αριθμό γραμμών και 20 στήλες.

Σε κάθε στήλη εισάγονται τα αντίστοιχα δεδομένα.

Στήλη	Μεταβλητή	Περιγραφή	Μονάδες
1	IFLAG	Ακέραιος με τιμή 0 ή 1, ορίζει αν θα χρησιμοποιηθεί το σημείο ή όχι	-
2	PT1	Ολική πίεση εισόδου της μηχανής	Pa
3	TT1	Ολική θερμοκρασία εισόδου της μηχανής	K
4	RH	Σχετική υγρασία εισόδου της μηχανής	%
5	PW	Αποδιδόμενη ισχύς	W
6	NMECH	Στροφές άξονα	rpm
7	DP5	Πτώση στατικής πίεσης στον αγωγό εξόδου	Pa
8	FPT	Ολική πίεση εγχυόμενου καυσίμου	Pa
9	FTT	Ολική θερμοκρασία εγχυόμενου καυσίμου	K
10	DANG.IGV	Γωνία μεταβλητών πτερυγίων εισόδου IGVs	-
11	CDT	Θερμοκρασία εξόδου συμπιεστή	K
12	CDP	Στατική πίεση εξόδου συμπιεστή	Pa
13	TT8	Ολική θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων	K
14	WF	Παροχή καυσίμου	kg/s
15	W1	Παροχή αέρα στην είσοδο την μηχανής	kg/s
16	NTHERMAL	Θερμικός βαθμός απόδοσης	-
17	CPR	Λόγος πίεσης συμπιεστή	-
18	WGAS	Παροχή καυσαερίων	kg/s
19	D30.Wbleed1	Ποσοστό πρώτης απομάστευσης αγωγού D30 (inlet heating bleed)	-
20	FLHV	Κατώτερη θερμογόνο ικανότητα Καυσίμου	J/kg

Πίνακας 7-2 Μεταβλητές πίνακα POINT και περιγραφή τους

Στην πρώτη γραμμή του εισάγεται πάντα το επιθυμητό σημείο σχεδίασης, το οποίο και χρησιμοποιείται κατά λειτουργία υπολογισμού του σημείου σχεδίασης.

Στην γραμμή αμέσως μετά τον πίνακα POINT επεξηγείται ποιο πέντε αριθμοί, που αντιστοιχούν σε μεταβλητές, μπορούν να επιλεγούν ως οριακές μεταβλητές κατά την λειτουργία υπολογισμού του σημείου σχεδίασης. Η επιλογή αυτών γίνεται από το χρήστη σε αυτό το σημείο, εισάγοντας τους αντίστοιχους κωδικούς στην επόμενη

γραμμή (η σειρά τοποθέτησης τους δεν παίζει ρόλο). Στον κώδικα οι κωδικοί αυτοί διαβάζονται και καταχωρούνται στον πίνακα **IND**.

Κωδικός μεταβλητής	5	11	12	13	14	15
Μεταβλητή	PW	CDT	CDP	TT8	WF	W1

Πίνακας 7-3 Διαθέσιμες μεταβλητές που εισάγονται στο πίνακα **IND**

Αντίστοιχη λειτουργία έχει και ο επόμενος πίνακας του αρχείου **INDADAPT**, όπου ο χρήστης εισάγει σε μία γραμμή με τη σειρά:

1. Πόσοι συντελεστές προσαρμογής χαρτών θα υπολογισθούν
2. Ποιοι συντελεστές προσαρμογής χαρτών θα υπολογισθούν
3. Ποιες ισάριθμες οριακές μεταβλητές θα χρησιμοποιηθούν κατά την λειτουργία υπολογισμού εκτός σημείου σχεδίασης με προσαρμογή χαρτών

Ο παρακάτω Πίνακας 7-4 εξηγεί τους κωδικούς που αντιστοιχούν στους συντελεστές και στις οριακές μεταβλητές.

Συντελεστές	Κωδικός	Οριακή μεταβλητή	Κωδικός
CmpH.s_adaptEff_in	1	CDT	11
CmpH.s_adaptWc_in	2	CDP	12
TrbH.s_adaptEff_in	3	TT8	13
TrbH.s_adaptWc_in	4	WF	14
		W1	15

Πίνακας 7-4 Κωδικοί συντελεστών προσαρμογής και οριακών μεταβλητών

Ο παρακάτω Πίνακας 7-5 εξηγεί πώς εισάγονται οι παραπάνω κωδικοί στην αντίστοιχη γραμμή του αρχείου.

Αριθμός συντελεστών	Κωδικοί συντελεστών				Κωδικοί οριακών μεταβλητών				
4	1	2	3	4	11	12	13	14	15

Πίνακας 7-5 Παράδειγμα πίνακα εισόδου συντελεστών προσαρμογής

Ακριβώς στην από κάτω γραμμή, βρίσκεται και ο πίνακας βελτιστοποίησης **INDOPT**, όπου ο χρήστης εισάγει πόσα και ποια μεγέθη θα χρησιμοποιηθούν κατά την διαδικασία της βελτιστοποίησης. Όπως ακριβώς στον **INDADAPT**, στο πρώτο κελί εισάγεται ο αριθμός των μεταβλητών που θα συμμετάσχουν στην βελτιστοποίηση και στην συνέχεια οι κωδικοί των μεταβλητών, όπως δίνονται από τον Πίνακα 7-4 στις οριακές μεταβλητές.

Τέλος διαβάζεται ο πίνακας **PAR**, διαστάσεων 47 x 5, όπου εκεί εισάγονται οι παράμετροι της μηχανής. Στην πρώτη στήλη εισάγεται ο αριθμός 0 ή 1 ανάλογα με το αν η αλλαγή της συγκεκριμένης παραμέτρου είναι επιθυμητή κατά την λειτουργία της βελτιστοποίησης (1) ή όχι (0). Στην δεύτερη στήλη εισάγεται η τιμή της παραμέτρου, ενώ στην τρίτη και τέταρτη το ελάχιστο και μέγιστο όριο αντίστοιχα της τιμής αυτής, που επιβάλλεται στην βελτιστοποίηση. Στην τελευταία στήλη υπάρχει η ονομασία της μεταβλητής και παρακάμπτεται κατά το διάβασμα του πίνακα. Στον Πίνακα 7-6 δίνονται επίσης ορισμένες τυπικές τιμές των παραμέτρων.

Γραμμή	Παράμετρος	Περιγραφή	Τυπικές τιμές
1	InEng.dPqP_in	Απώλειες ολικής πίεσης αγωγού εισόδου	0.015
2	D30.dPqP_in	Απώλειες ολικής πίεσης αγωγού στην έξοδο του συμπιεστή	0.01
3	Brn.dPqP_in	Απώλειες ολικής πίεσης θαλάμου καύσης	0.02
4	D50.dPqP_in	Απώλειες ολικής πίεσης αγωγού εξόδου καυσαερίων	0.02– 0.035
5	Brn.eff_in	Βαθμός απόδοσης θαλάμου καύσης	0.99
6	ShH.eff	Μηχανικός βαθμός απόδοσης άξονα	0.99
7	CmpH.a_Wc_VG_a	Συντελεστής a επίδρασης παροχής χάρτη συμπιεστή λόγω IGV.	0
8	CmpH.a_Wc_VG_b	Συντελεστής b επίδρασης παροχής χάρτη συμπιεστή λόγω IGV	0
9	CmpH.a_Yvar_VG	Συντελεστής επίδρασης λόγου πίεσης χάρτη συμπιεστή λόγω IGV	0
10	CmpH.a_eff_VG_a	Συντελεστής a επίδρασης απόδοσης χάρτη συμπιεστή λόγω IGV	0
11	CmpH.a_eff_VG_b	Συντελεστής b επίδρασης απόδοσης χάρτη συμπιεστή λόγω IGV	0
12	D30.Wbleed1	Ποσοστό πρώτης απομάστευσης αγωγού εξόδου συμπιεστή (inlet heating bleed)	-
13	D30.Wbleed2	Ποσοστό δεύτερης απομάστευσης αγωγού εξόδου συμπιεστή (αν δεν είναι διαθέσιμη τίθεται 0 και υπολογίζεται αυτόματα)	-
14	TrbH.Wtw_q_Wc[1]	Ποσοστό αέρα ψύξης που παράγει έργο στο στρόβιλο	0.6
15	TrbH.Wpump_q_Wc[1]	Ποσοστό αέρα ψύξης κινητών πτερυγίων στροβίλου	0.4
16	TrbH.WNGV_q_Wc[1]	Ποσοστό αέρα ψύξης σταθερών πτερυγίων στροβίλου	0.6
17	InEng.Ae_in	Διατομή 1	-
18	InEng.Ae_out	Διατομή 2	-
19	D30.Ae_in	Διατομή 3	-
20	D30.Ae_out	Διατομή 32	-
21	Brn.Ae_in	Διατομή 32	-
22	TrbH.A_eqSoc	Διατομή 41	-
23	TrbH.A_out	Διατομή 5	-
24	D50.Ae_in	Διατομή 5	-
25	D50.Ae_out	Διατομή 8	-
26	Mach1	Mach 1	-

27	Mach2	Mach 2	-
28	Mach3	Mach3	-
29	Mach32	Mach 32	-
30	MachBrn	Mach 32	-
31	Mach41	Mach 41	-
32	Mach43	Mach 43	-
33	Mach5	Mach 5	-
34	Mach8	Mach 8	-
35	CmpH.NcRdes	Διορθωμένες σχετικές στροφές συμπίεστή	1
36	CmpH.NcRdesMap	Διορθωμένες σχετικές στροφές συμπίεστή στον χάρτη	0.98-1.02
37	CmpH.BETA	Αριθμός β συμπίεστή	0.5
38	TrbH.NcRdes	Διορθωμένες σχετικές στροφές στροβίλου	1
39	TrbH.NcRdesMap	Διορθωμένες σχετικές στροφές στροβίλου στον χάρτη	0.9-1.05
40	TrbH.ZETA	Αριθμός ζ στροβίλου	0.5
41	CmpH.effpoly	Πολυτροπικός βαθμός απόδοσης συμπίεστή	-
42	TrbH.effpoly	Πολυτροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου	-
43	CmpH.s_adaptEff_in	Συντελεστής προσαρμογής απόδοσης συμπίεστή	1
44	CmpH.s_adaptWc_in	Συντελεστής προσαρμογής παροχής συμπίεστή	1
45	TrbH.s_adaptEff_in	Συντελεστής προσαρμογής απόδοσης στροβίλου	1
46	TrbH.s_adaptWc_in	Συντελεστής προσαρμογής παροχής στροβίλου	1
47	ShH.pwrOT	Απομάστευση ισχύος από τον άξονα σε W	-

Πίνακας 7-6 Παράμετροι πίνακα PAR και περιγραφή τους

7.5 Χάρτης Αεριοστροβίλων στην Ελλάδα

Παρακάτω παρατίθεται ο χάρτης των αεριοστροβίλων στην Ελλάδα

Σχήμα 7-3 Διάγραμμα Αεριοστροβίλων στην Ελλάδα [48]

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΕΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ



ΥΠΟΜΝΗΜΑ							
ΠΑΡΑΓΩΓΟΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ				ΑΥΤΟΠΑΡΑΓΩΓΟΙ			
	ΑΛΙΒΕΡΙ	ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗ Β		ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΘΕΣΣ/ΝΙΚΗΣ		ΑΓΙΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ POWER	ΕΛΠΕ ΔΙΥΛΙΣΤΗΡΙΑ ΑΣΠΡΟΠΥΡΓΟΥ
	ΛΑΥΡΙΟ ΚΕΡΑΤΕΑ	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ		ΕΛΡΕΔΙΣΟΝ ΘΙΣΒΗ		ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΝ ΕΛΛΑΣ	ΜΟΤΟΡΟΙΛ ΔΙΥΛΙΣΤΗΡΙΑ ΚΟΡΙΝΘΟΥ
	ΚΟΜΟΤΗΝΗ	ΧΑΝΙΑ		ΗΡΩΝ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ	ΚΟΡΙΝΘΟΣ POWER	ΚΑΒΑΛΑ OIL	
	ΡΟΔΟΣ			ΗΡΩΝ II			