



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΕΘΝΙΚΗΣ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΠΕΑΕΚ  
ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΝΩΣΗ  
ΣΥΓΧΡΗΜΑΤΟΔΟΤΗΣΗ  
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ  
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΤΑΜΕΙΟ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ



Η ΠΑΙΔΕΙΑ ΣΤΗΝ ΚΟΡΥΦΗ  
Επιχειρησιακό Πρόγραμμα  
Εκπαίδευσης και Αρχικής  
Επαγγελματικής Κατάρτισης

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ**



## ΑΝΑΜΟΡΦΩΣΗ ΠΠΣ

**ΦΑΣΗ Β' – CASE STUDIES ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ  
ΣΤΗΝ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ**

Προσομοίωση μικρού αεροστροβίλου με  
εμπορικό και in house κώδικα

Συντάκτης: Διαμαντής Μπακάλης

Βόλος, Μάρτιος 2008

## Λίστα συμβόλων

<b>Σύμβολα</b>	<b>Επεξήγηση</b>
Beta	Παράμετρος που χρησιμοποιεί το GasTurb για το προσδιορισμό του ονομαστικού σημείου λειτουργίας πάνω στους χάρτες
Cp	Ειδική θερμοχωρητικότητα
E	Ισχύς που παρέχεται στο συμπιεστή
H	Ενθαλπία
$\dot{m}$	Μαζική ροή
N	Αριθμός στροφών
P	Ισχύς
p	Πίεση
PR	Λόγος πίεσης
q	Ανηγμένη παροχή
sf	Συντελεστής για την κλιμάκωση των παραμέτρων των χαρτών
T	Θερμοκρασία
w	Πραγματική παροχή
$\eta$	Απόδοση
<b>Δείκτες</b>	
0	Συνθήκες αναφοράς
1...6	Δείκτης που προσδιορίζει τη θέση στη διάταξη της μηχανής
BL	Απομάστευση
c	Προσδιορίζει τα δεδομένα του συμπιεστή
design	Ονομαστικό σημείο λειτουργίας
eff	Απόδοση
f	Καύσιμο
g	Καυσαέρια
is	Ισεντροπικά
HE	Εναλλάκτης θερμότητας
PR	Λόγος πίεσης
q	Ανηγμένη παροχή
w	Πραγματική παροχή
$\alpha$	Αέρας

## 1. Εισαγωγή

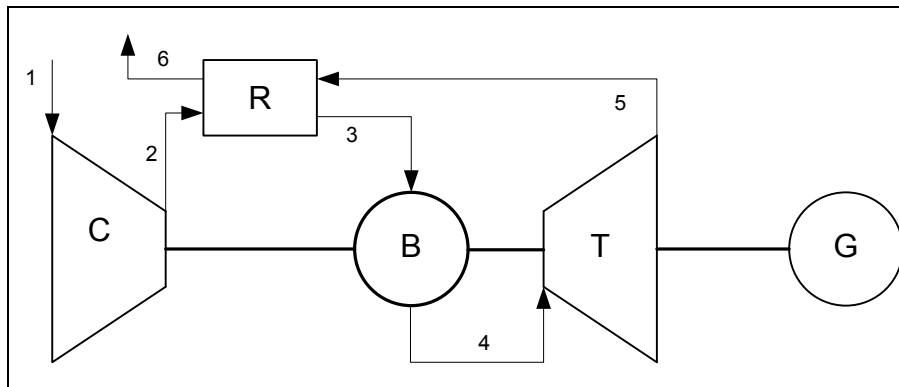
Στα πλαίσια του έργου της αναμόρφωσης του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών ανατέθηκε σε προπτυχιακό φοιτητή η προσομοίωση μικρού αεροστροβίλου με εμπορικό και in house κώδικα. Ο αεροστρόβιλος που επιλέχθηκε ήταν ο C30(HPNG) που κατασκευάζεται από την εταιρεία Capstone Turbine Corporation.

Ο λόγος που επιλέχθηκε ο συγκεκριμένος αεροστρόβιλος ήταν γιατί είχε γίνει προσπάθεια για να αγοραστεί από το εργαστήριο Θερμοδυναμικής & Θερμικών Μηχανών και έτσι ήταν γνωστά αρκετά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου αεροστρόβιλου.

Ο συγκεκριμένος αεροστρόβιλος χρησιμοποιείται σε μικρούς σταθμούς συμπαραγωγής που κατασκευάζει η παραπάνω εταιρεία και χρησιμοποιεί ως καύσιμο φυσικό αέριο.

## 2. Περιγραφή της διάταξης

Η διάταξη του αεροστροβίλου (εικόνα 1) αποτελείται από ένα συμπιεστή, προθερμαντήρα, καυστήρα, στρόβιλο και μια ηλεκτρογεννήτρια. Το στροφέιο του συμπιεστή και του στρόβιλου καθώς και ο ρότορας της ηλεκτρογεννήτριας είναι συνδεδεμένα πάνω σε ένα άξονα, ο οποίος αποτελεί και το μόνο κινούμενο μέρος της μηχανής. Παρακάτω φαίνεται ένα διάγραμμα της μηχανής, όπου με C συμβολίζεται ο συμπιεστής, με B ο καυστήρας, με T ο στρόβιλος, με G η γεννήτρια και με R ο προθερμαντήρας. Οι αριθμοί δείχνουν την πορεία του κινούμενου μέσου.



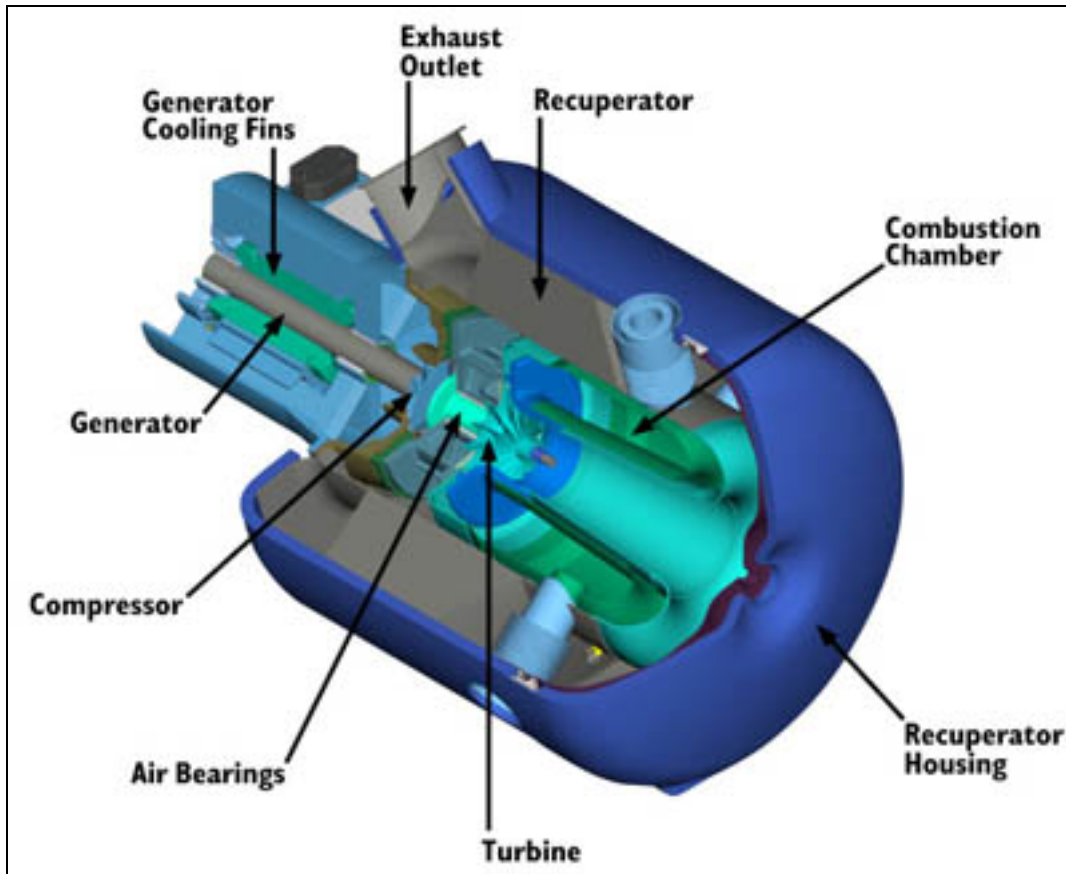
Εικόνα 1. Διάγραμμα της μηχανής.

Στην εικόνα 2 φαίνεται μια τομή της μηχανής όπου διακρίνονται τα επιμέρους τμήματα της.

Οι παράμετροι λειτουργίας της μηχανής στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας και σε συνθήκες ISO δίνονται από τον κατασκευαστή και φαίνονται στο πίνακα 1.

Περιγραφή	Σύμβολο	Τιμή
Ισχύς	P	30 kW
Βαθμός απόδοσης	$\eta$	26 %
Μαζική παροχή εξόδου	$\dot{m}_6$	0.31 kg/s
Θερμοκρασία εξόδου	$T_6$	549 K

Πίνακας 1. Παράμετροι λειτουργία στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας



Εικόνα 2. Η μηχανή σε τομή.

### 3. Περιγραφή των λογισμικών

Για την προσομοίωση του αεροστροβίλου χρησιμοποιήθηκαν το εμπορικό πακέτο GasTurb9 και ο in house κώδικας GTgeneral, σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN, που αναπτύχθηκε από τον καθηγητή Α. Σταμάτη.

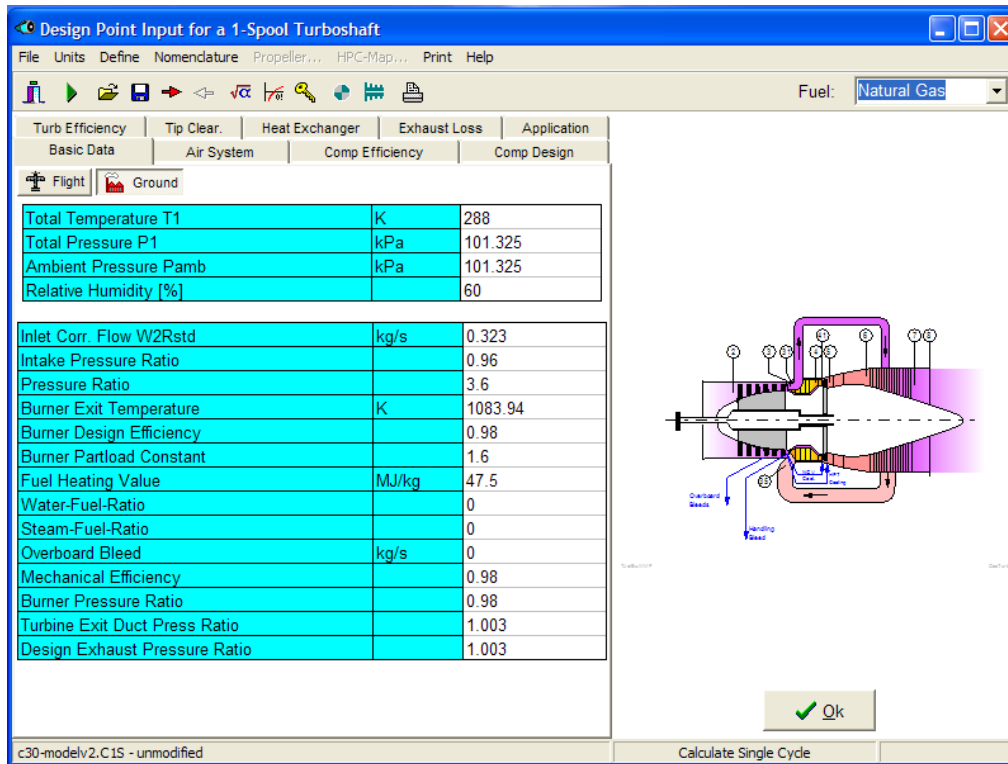
#### 3.1 Εμπορικό πακέτο GasTurb9

Το εμπορικό πακέτο GasTurb9 είναι ένα πρόγραμμα για τον υπολογισμό λειτουργικών συνιστωσών αεροστροβίλων στο σημείο λειτουργίας καθώς και εκτός αυτού. Μπορεί να προσομοιώσει τους πιο κοινούς τύπους αεροστροβίλων.

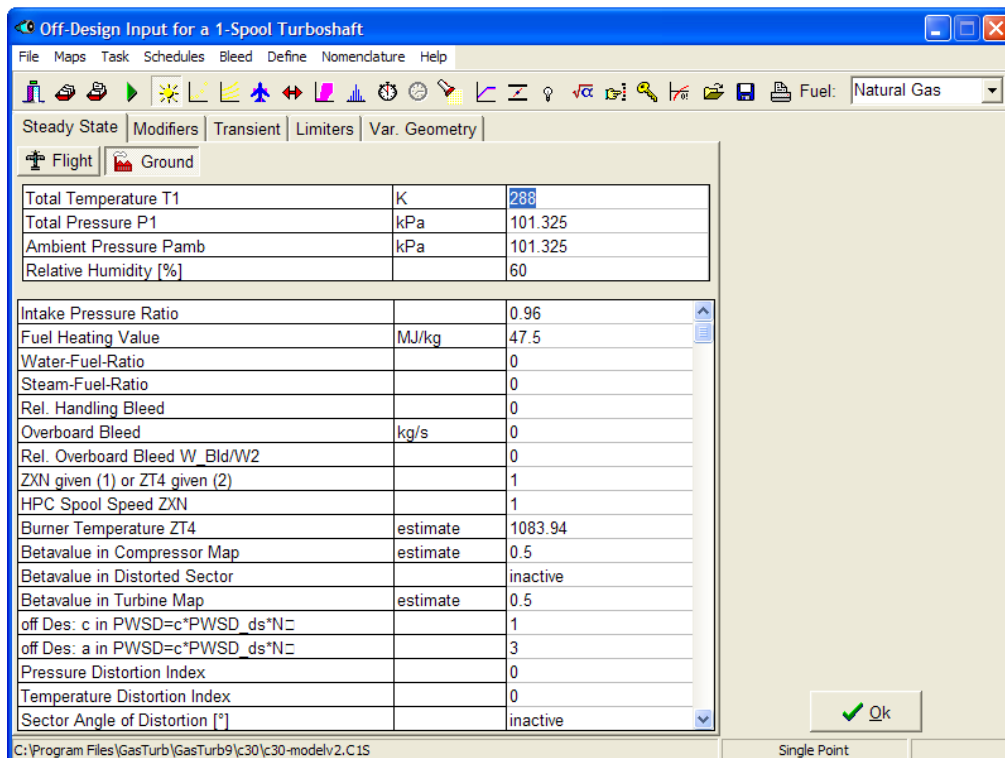
Οι λειτουργία του είναι απλή: εισάγονται πρώτα όσα δεδομένα, από τη μηχανή, είναι γνωστά στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας (design performance) και με τη βοήθεια αυτών και των επαναληπτικών μηχανισμών αναζήτησης που διαθέτει το πρόγραμμα βρίσκονται οι υπόλοιπες άγνωστοι παράμετροι του ονομαστικού σημείου λειτουργίας. Οι λειτουργίες αυτές γίνονται από το παράθυρο της εικόνας 3

Στη συνέχεια για τον υπολογισμό των επιδόσεων εκτός του σημείου λειτουργίας (off-design performance), επιλέγονται οι κατάλληλοι χάρτες για τον συμπιεστή και τον στρόβιλο (τους παρέχει το πρόγραμμα) και ορίζονται δυο παράμετροι για κάθε χάρτη, η ανηγμένη ταχύτητα  $N/\sqrt{T}$  και μια παράμετρος Beta, οι οποίες προσδιορίζουν το ονομαστικό σημείο λειτουργίας πάνω στους χάρτες. Με την βοήθεια αυτών των παραμέτρων το πρόγραμμα κάνει κλιμάκωση στους χάρτες έτσι ώστε να αντιστοιχούν

στην μηχανή για την οποία γίνεται η προσομοίωση. Όλοι οι υπολογισμοί για τις επιδόσεις εκτός του σημείου λειτουργίας γίνονται από το παράθυρο τις εικόνας 4.



Εικόνα 3. Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων κανονικού σημείου λειτουργίας στο GasTurb.



Εικόνα 4. Παράθυρο του GasTurb για υπολογισμούς εκτός του σημείου λειτουργία

### 3.2 In house κώδικας GTgeneral

Ο κώδικας GTgeneral αναπτύχθηκε για την προσομοίωση βιομηχανικών αεροστροβίλων και μπορεί να προσομοιώσει του πιο κοινούς τύπους τέτοιων μηχανών.

Η βασική ιδέα του κώδικα είναι ότι θεωρεί κάθε λειτουργική συνιστώσα της μηχανής σαν ένα όγκο ελέγχου, στον οποίο οι διεργασίες που επιτελούνται εκφράζονται με τη συσχέτιση της κατάστασης του εργαζόμενου μέσου στα όρια του όγκου αυτού. Για μονοδιάστατη θεώρηση, τα όρια αυτά είναι αντιπροσωπευτικά σημεία στις διατομές εισόδου – εξόδου της συνιστώσας. Η μεθοδολογία της προσομοίωσης στηρίζεται στη διατύπωση εξισώσεων και χρήση παραμέτρων στις οποίες δεν εμφανίζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της συνιστώσας. Για να επιτευχθεί αυτό χρησιμοποιούνται:

- Οι σχέσεις ορισμού των παραμέτρων.
- Οι συσχετίσεις των παραμέτρων της συνιστώσας που αποδίδονται γραφικά (χάρτες συνιστωσών)
- Οι εξισώσεις διατήρησης, δηλαδή τις εξισώσεις συνέχειας για το εργαζόμενο μέσο και το καύσιμο και διατήρησης της ενέργειας.
- Οι εξισώσεις συμπιεστότητας, δηλαδή τις σχέσεις των μεταβλητών κατάστασής σε κάθε διατομή.

Με βάση αυτές τις γενικές σχέσεις συγκροτείται για κάθε τύπο λειτουργικής συνιστώσας το μοντέλο της.

Για παράδειγμα οι εξισώσεις που μοντελοποιούν το συμπιεστή είναι (υιοθετώντας την αρίθμηση της εικόνας 1):

- Ο λόγος πίεσης του συμπιεστή  $PR_c$  που ορίζεται από τη σχέση

$$PR_c = \frac{p_2}{p_1} \quad (1)$$

- Η ανηγμένη παροχή που ορίζεται από τη σχέση

$$q_c = \frac{\dot{m}_1 \sqrt{T_1 / T_0}}{p_1 / p_0} \quad (2)$$

όπου  $p_0$ ,  $T_0$  οι συνθήκες αναφοράς ( $T_0 = 288.15 \text{ K}$ ,  $p_0 = 1.013 \text{ bar}$ )

- Ο ανηγμένος αριθμός στροφών  $N_c$  που ορίζεται σαν

$$N_c = \frac{N}{\sqrt{T_1 / T_0}} \quad (3)$$

- Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης  $\eta_{isc}$  που ορίζεται σαν

$$\eta_{isc} = \frac{H_{2, is} - H_1}{H_2 - H_1} \quad (4)$$

- Οι χαρακτηριστικές καμπύλες του συμπιεστή (εικόνες 11-12)
- Εάν υπάρχουν απομαστεύσεις σε ενδιάμεσες βαθμίδες η εξίσωση συνέχειας μπορεί να γραφεί κατά τον εξής τρόπο:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 - \sum_i \dot{m}_{BL,i} \quad (5)$$

όπου  $\dot{m}_{BL,i}$  η απομάστευση στη θέση  $i$ .

- Εφόσον δεν προσδίδεται καύσιμο στο συμπιεστή η εξίσωση διατήρησης του καυσίμου γράφεται:

$$\dot{m}_{f,1} = \dot{m}_{f,2} \quad (6)$$

- Η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας εκφράζεται από τη σχέση:

$$\dot{m}_2 H_2 + \sum_i \dot{m}_{BL,i} H_{BL,i} = \dot{m}_1 H_1 + E \quad (7)$$

όπου  $E$  η μηχανική ισχύς που παρέχεται στο συμπιεστή και  $H_{BL,i}$  η ενθαλπία της αντίστοιχης απομάστευσης.

Οι σχέσεις 1-7 μαζί με τους χάρτες συγκροτούν το μοντέλο του συμπιεστή. Ομοίως με ανάλογες σχέσεις μοντελοποιούνται και οι υπόλοιπες συνιστώσες της μηχανής.

Το αποτέλεσμα της μοντελοποίησης είναι ένα μη γραμμικό σύστημα εξισώσεων το οποίο λύνεται επαναληπτικά με την μέθοδο Newton – Raphson. Οι αρχικές τιμές του συστήματος εξισώσεων δίνονται έμμεσα από το χρήστη καθορίζοντας κάποιους συντελεστές με τους οποίους πολλαπλασιάζονται τα δεδομένα του ονομαστικού σημείου λειτουργίας. Δηλαδή:

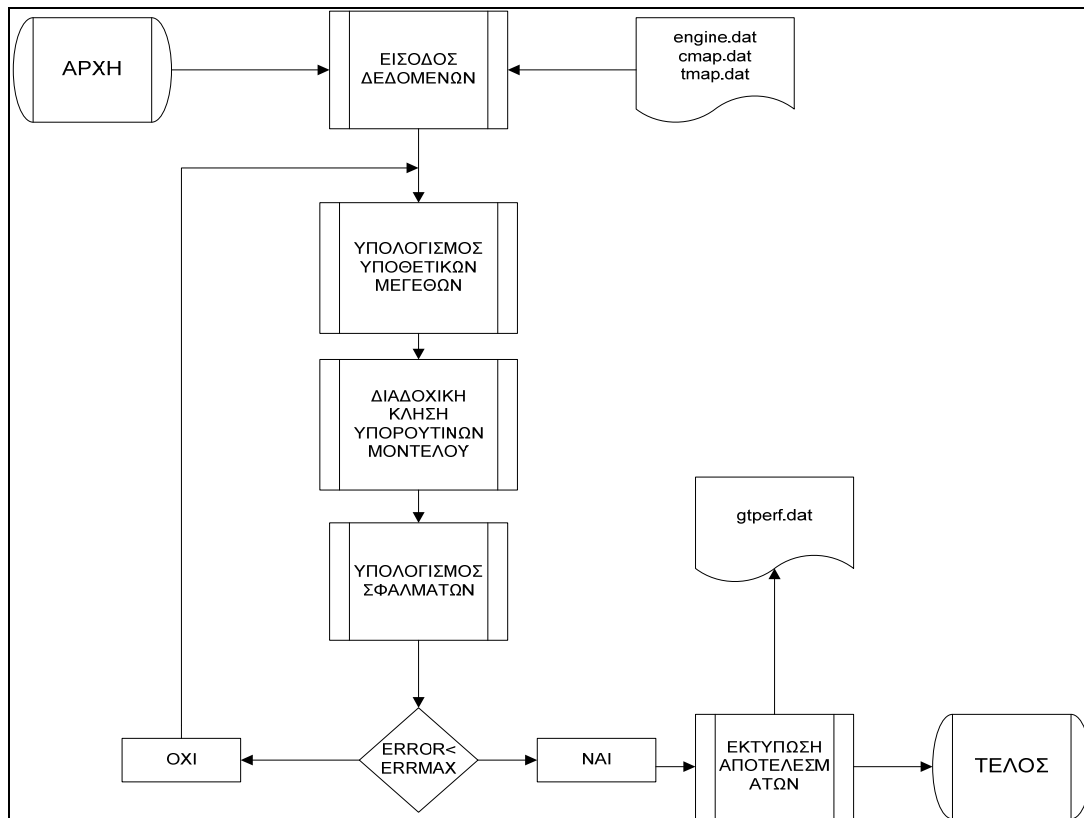
$$(\text{αρχική τιμή}) = (\text{συντελεστής}) \times (\text{τιμή στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας})$$

Για να τρέξει ο κώδικας δίνονται τα αρχεία δεδομένων *engine.dat*, *cmapp.dat* και *tmap.dat*. Το *engine.dat*, είναι το αρχείο όπου επεμβαίνουμε για το καθορισμό του ονομαστικού σημείου λειτουργίας. Τα αρχεία *cmapp.dat* και *tmap.dat* καθορίζουν τους χάρτες του συμπιεστή και του στροβίλου αντίστοιχα. Ο κώδικας GTgeneral τρέχει αφού διαβασθούν τα προηγούμενα αρχεία δεδομένων. Τα αποτελέσματα καταχωρούνται στο αρχείο *gtpperf.dat*.

Το ονομαστικό σημείο λειτουργίας υπολογίζεται από τα δεδομένα που υπάρχουν στο αντίστοιχο αρχείο εισόδου (*engine.dat*) τα οποία χρησιμοποιούνται ως αρχικές τιμές – αφού οι συντελεστές της προηγούμενης εξίσωσης έχουν την τιμή 1– για την εύρεση λύσης από τον επαναληπτικό αλγόριθμο επίλυσης του συστήματος.

Για τον υπολογισμό των παραμέτρων εκτός του ονομαστικού σημείου λειτουργίας εισάγονται μέσα στον κώδικα το επιθυμητό φορτίο και οι στροφές, και επιπλέον οι τιμές των συντελεστών που προαναφέρθηκαν.

Ένα συνοπτικό διάγραμμα ροής του κώδικα παρουσιάζεται στην εικόνα 5.



Εικόνα 5. Συνοπτικό διάγραμμα ροής του κώδικα.

### 3.2.1 Διακεκριμενοποίηση του αεροστροβίλου

Οι συνιστώσες στις οποίες χωρίζεται ο αεροστρόβιλος C30 της Capstone είναι οι παρακάτω σύμφωνα με την σειρά παρουσίας τους στην μηχανή, στην εικόνα 1:

1. Αγωγός εισόδου
2. Συμπιεστής
3. Διαχύτης
4. Εναλλάκτης θερμότητας
5. Καυστήρας
6. Στρόβιλος
7. Διαχύτης

Από τον παραπάνω διαχωρισμό του αεροστροβίλου δεν φαίνεται μετά τον τελευταίο διαχύτη να υπάρχει ξανά η συνιστώσα του εναλλάκτη θερμότητας όπως θα έπρεπε σύμφωνα με την εικόνα 1. Ο λόγος που γίνεται αυτό είναι γιατί έχει τροποποιηθεί ο κώδικας έτσι ώστε η πτώση πίεσης που προκαλείται από τον εναλλάκτη θερμότητας (θέσεις 5-6) να υπολογίζεται στον τελευταίο διαχύτη και η πτώση της θερμοκρασίας να υπολογίζεται από τη σχέση (8) κατά την εκτύπωση των αποτελεσμάτων.

$$T_6 = T_5 - \frac{\dot{m}_a C_{p_a}}{\dot{m}_g C_{p_g}} (T_3 - T_2) \quad (8)$$

όπου:  $\dot{m}_a$  : η μαζική ροή του αέρα

$\dot{m}_g$  : η μαζική ροή των καυσαερίων



$C_{p_a}$  : η θερμοχωρητικότητα του αέρα

$C_{p_g}$  : η θερμοχωρητικότητα των καυσαερίων

### 3.2.2 Υπορουτίνες που χρησιμοποιούνται

Οι βασικές υπορουτίνες που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση του αεροστροβίλου φαίνονται στην εικόνα 6.

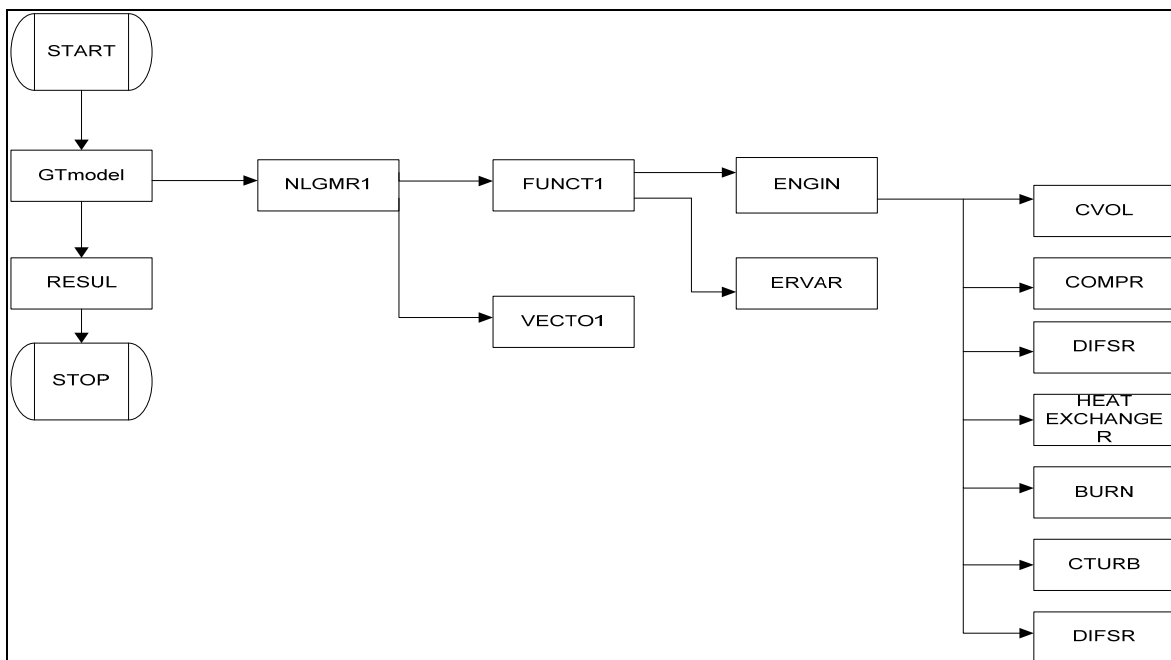
Στον κώδικα βέβαια υπάρχουν και άλλες υπορουτίνες που δε χρησιμοποιούνται στην περίπτωση μας ή δεν αναφέρονται προς αποφυγή σύγχυσης του αναγνώστη, αφού όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ο κώδικας είναι γενικός και μπορεί να προσομοιώσει του πιο κοινούς τύπους βιομηχανικών αεροστροβίλων. Η περιγραφή των υπορουτινών γίνεται στην επόμενη σελίδα.

### 3.2.3 Τροποποιήσεις

Μια τροποποίηση που έγινε στον κώδικα περιγράφηκε στην παράγραφο 3.2.1 η οποία έγινε με σκοπό τον υπολογισμό της θερμοκρασίας εξόδου από τον αεριστρόβιλο.

Μια άλλη τροποποίηση έγινε στον εναλλάκτη θερμότητας όπου με την βοήθεια της σχέσης (9) για την απόδοση του εναλλάκτη, υπολογίστηκε η θερμοκρασία εισόδου στον καυστήρα.

$$n_{HE} = \frac{T_3 - T_2}{T_5 - T_2} \Rightarrow T_3 = n_{HE} (T_5 - T_2) + T_2 \quad (9)$$



Εικόνα 6. Βασικές υπορουτίνες του κώδικα

<b>Υπορουτίνα</b>	<b>Περιγραφή</b>
GTmodel	Η υπορουτίνα αυτή λαμβάνει όλα τα δεδομένα που υπάρχουν στα αρχεία εισόδου.
NLGMR1	Η υπορουτίνα αυτή αποτελεί το βασικό κλάδο για την επίλυση του μη γραμμικού συστήματος που προκύπτει από την μοντελοποίηση των συνιστωσών του αεροστροβίλου.
FUNCT1	Η υπορουτίνα αυτή καλώντας μια σειρά άλλων υπορουτινών οργανώνει τον υπολογισμό των σφαλμάτων.
ENGIN	Η υπορουτίνα οργανώνει την σειρά καλέσματος των υπορουτινών που υπολογίζουν τα αεροθερμοδυναμικά μεγέθη σε κάθε μια από τις επιμέρους συνιστώσες που αποτελούν τον αεροστρόβιλο.
ERVAR	Η υπορουτίνα αυτή υπολογίζει τα σφάλματα παίρνοντας κατάλληλες τιμές από τα μεγέθη που υπολογίζονται στις επί μέρους συνιστώσες.
CIVOL	Η υπορουτίνα αυτή υπολογίζει τα μεγέθη που περιγράφουν την συνιστώσα που αποτελεί τον αγωγό εισόδου στο συμπιεστή.
COMPR	Η υπορουτίνα αυτή υπολογίζει τα μεγέθη που περιγράφουν την συνιστώσα του συμπιεστή.
DIFSR	Η υπορουτίνα αυτή υπολογίζει τα μεγέθη που περιγράφουν τις συνιστώσες διαχυτών που υπάρχουν στον αεριοστρόβιλο.
BURN	Η υπορουτίνα αυτή υπολογίζει τα μεγέθη που περιγράφουν την συνιστώσα του καυστήρα.
CTURB	Η υπορουτίνα αυτή υπολογίζει τα μεγέθη που περιγράφουν την συνιστώσα του στροβίλου.
HEATEXCHANGER	Η υπορουτίνα αυτή υπολογίζει τα μεγέθη που περιγράφουν την συνιστώσα του προθερμαντήρα.
VECTO1	Η υπορουτίνα αυτή καλώντας μια σειρά άλλων υπορουτινών πραγματοποιεί τον υπολογισμό νέων υποθετικών μεγεθών.
RESUL	Η υπορουτίνα αυτή εκτυπώνει τα αποτελέσματα στο αρχείο <i>gtperf.dat</i>

Πίνακας 2. Περιγραφή βασικών υπορουτινών

#### **4. Εισαγωγή δεδομένων**

Παρακάτω περιγράφεται ο τρόπος εισαγωγής των δεδομένων στα προγράμματα.

##### **4.1 Εισαγωγή δεδομένων στο πρόγραμμα GasTurb9**

Στην εικόνα 3 φαίνεται το παράθυρο εισαγωγής δεδομένων του προγράμματος GasTurb. Από εκεί εισάγονται όλα τα δεδομένα που αντιστοιχούν στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας της μηχανής για να γίνουν οι υπολογισμοί. Τα δεδομένα που επιλέχθηκαν είναι:

Total Temperature T1	K	288
Total Pressure P1	kPa	101.325
Ambient Pressure Pamb	kPa	101.324

Relative Humidity [%]		60
<b>Basic Data</b>		
Inlet Corr. Flow W2Rstd	kg/s	0.323
Intake Pressure Ratio		0.96
Pressure Ratio		3.6
Burner Exit Temperature	K	1083.94
Burner Design Efficiency		0.98
Burner Partload Constant		1.6
Fuel Heating Value	MJ/kg	47.5
Water-Fuel-Ratio		0
Steam-Fuel-Ratio		0
Overboard Bleed	kg/s	0
Mechanical Efficiency		0.98
Burner Pressure Ratio		0.98
Turbine Exit Duct Press Ratio		1.003
Design Exhaust Pressure Ratio		1.003
<b>Air System</b>		
Rel. Handling Bleed		0
Rel. Overboard Bleed W Bld/W2		0
Rel. Enthalpy of Overb. Bleed		0
Turbine Cooling Air W C1/W2		0
NGV Cooling Air W C1 NGV/W2		0
<b>Comp Efficiency</b>		
Isentr. Compr. Efficiency		0.796
<b>Comp Design</b>		
Nominal Spool		96000
<b>Turb Efficiency</b>		
Isentr. Turbine Efficiency		0.86618
<b>Heat Exchanger</b>		
Heat Exchanger Effectiveness		0.81
Heat Exchanger Design P35/P3		0.94
Heat Exchanger Design P7/P6		0.94

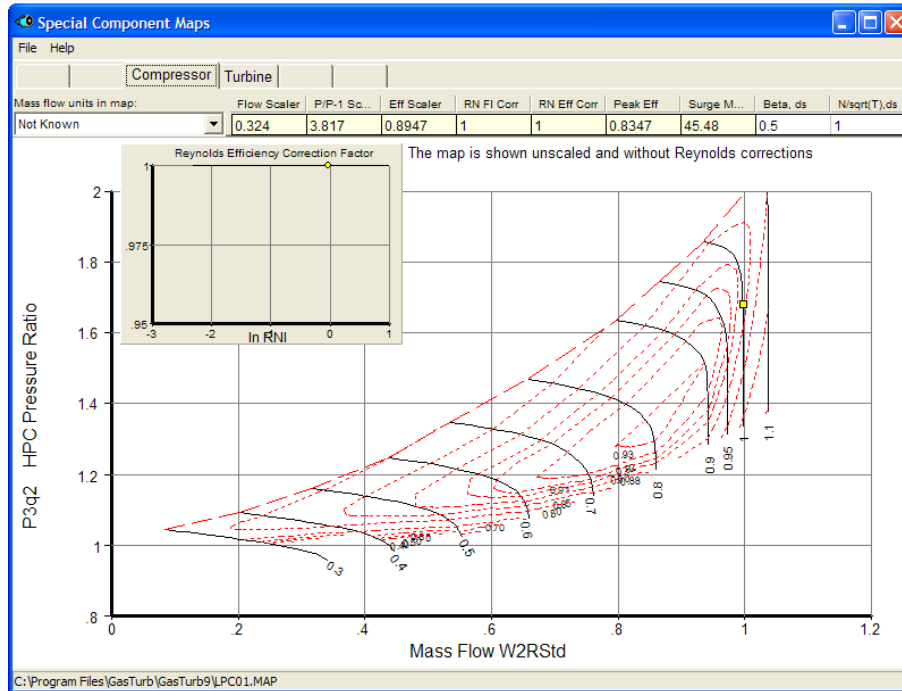
Οι υπολογισμοί για παραμέτρους εκτός του σημείου λειτουργίας γίνονται από το παράθυρο που φαίνεται στην εικόνα 4.

Οι παράμετροι των χαρτών είναι (Πίνακας 3):

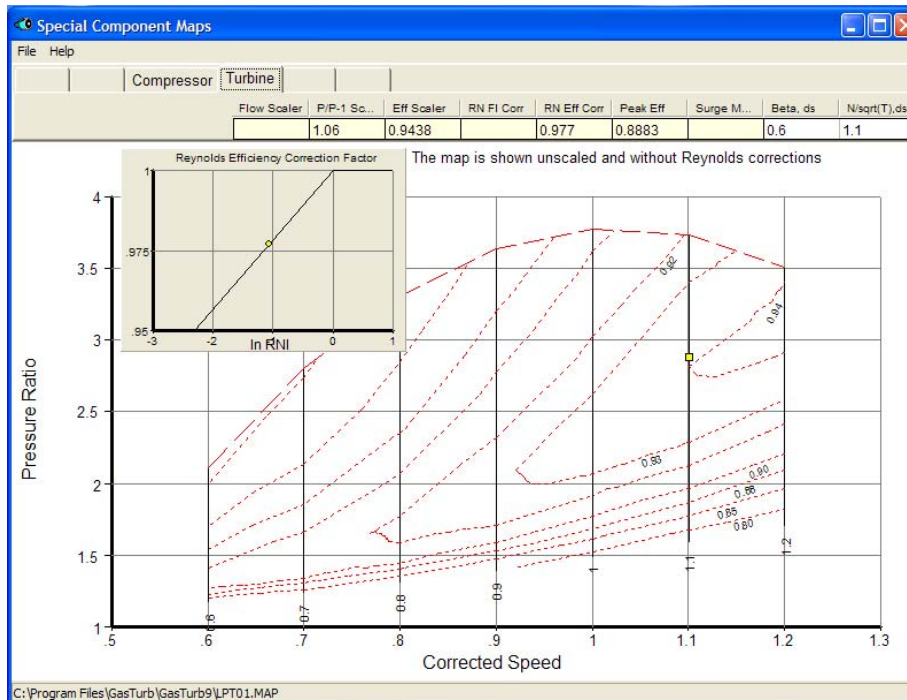
Συσκευή	N/sqrt(T)	Beta
Συμπιεστής	1	0.5
Στρόβιλος	1.1	0.6

Πίνακας 3. Παράμετροι χαρτών

Για την περίπτωση μας οι χάρτες που επιλέχθηκαν φαίνονται στις εικόνες 7 και 8, όπου εικονίζονται τα παράθυρα εισαγωγής των χαρτών καθώς και τα πλαίσια εισαγωγής των παραμέτρων  $N/\sqrt{T}$  και Beta.

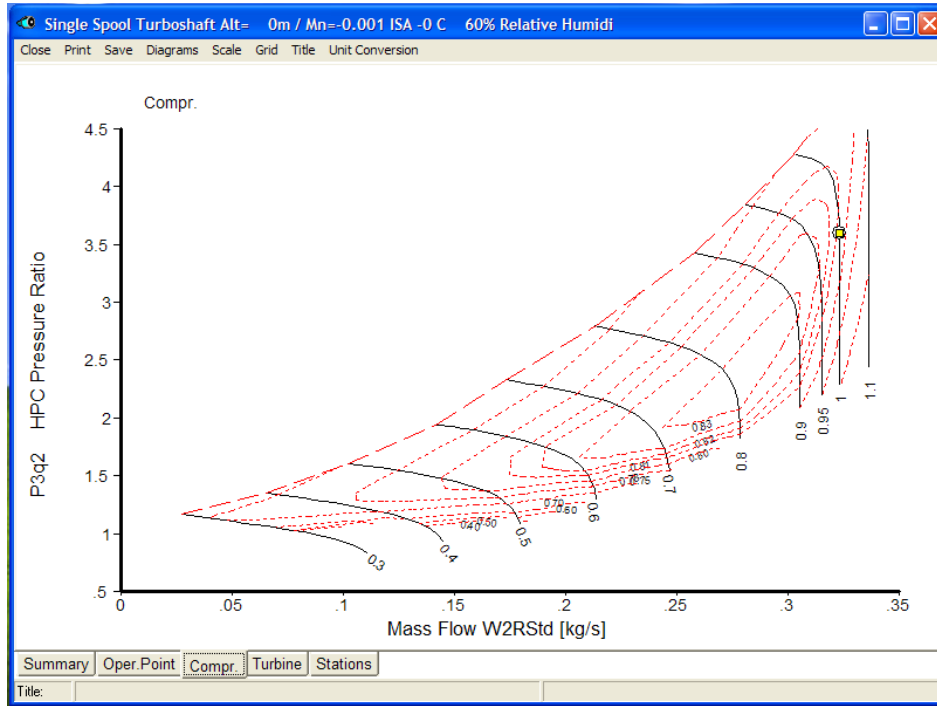


Εικόνα 7. Αρχικός χάρτης συμπίεστή στο GasTurb.

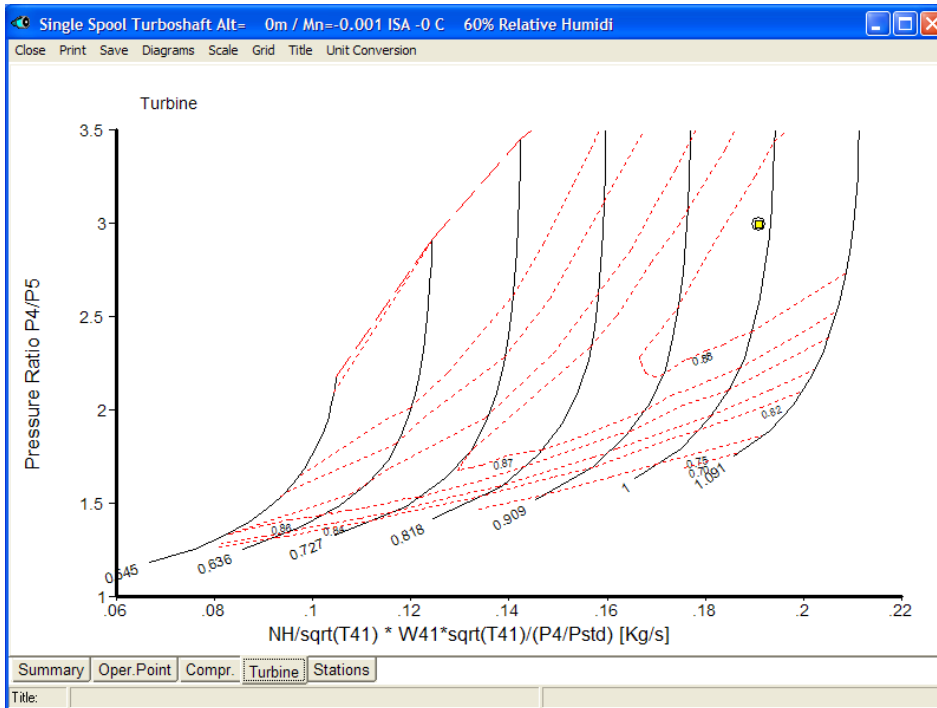


Εικόνα 8. Αρχικός χάρτης στροβίλου

Η μορφή που έχουν οι χάρτες μετά την κλιμάκωση (scaling) που κάνει το πρόγραμμα αυτόματα φαίνονται στις εικόνες 9 και 10.



Εικόνα 9. Χάρτης συμπίεση μετά την κλιμάκωση.



Εικόνα 10. Χάρτης στροβίλου μετά την κλιμάκωση.

## 4.2 Εισαγωγή δεδομένων στον κώδικα GTgeneral

Η είσοδος των παραμέτρων στον κώδικα, γίνεται, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, μέσω του αρχείου *engine.dat*. Σε αυτό το αρχείο εισάγονται τα μεγέθη του ονομαστικού σημείου λειτουργίας. Οι τιμές που επιλέχθηκαν είναι οι ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα GasTurb.

Όσον αφορά τους χάρτες, χρησιμοποιήθηκαν ήδη υπάρχοντες από προηγούμενη προσομοίωση, οι οποίοι τροποποιήθηκαν έτσι ώστε να περιγράφουν όσο το δυνατόν καλύτερα το συμπιεστή και το στρόβιλο του αεροστροβίλου C30.

Οι διαδικασίες είναι η ακόλουθη. Βρέθηκαν κάποιοι συντελεστές με τους οποίους πολλαπλασιάστηκαν τα δεδομένα που υπάρχουν στους χάρτες για τον λόγο πίεσης, την παροχή, και το βαθμό απόδοσης. Οι τιμές αυτών προκύπτουν από τις παρακάτω σχέσεις:

### Συντελεστής λόγου πίεσης

$$sf_{PR} = \frac{PR_{\text{design point,C30}}}{PR_{\text{design point,map}}} \quad (10)$$

### Συντελεστής απόδοσης

$$sf_{\text{eff}} = \frac{\eta_{\text{design point,C30}}}{\eta_{\text{design point,map}}} \quad (11)$$

### Συντελεστής παροχής

Για τον συντελεστή παροχής υπάρχει μια ιδιαιτερότητα, γιατί στο χάρτη του συμπιεστή εισάγεται η πραγματική παροχή ενώ στο χάρτη του στροβίλου η ανηγμένη

- Συμπιεστής

$$sf_w = \frac{W_{\text{design point,map}}}{W_{\text{design point,C30}}} \quad (12)$$

- Στρόβιλος

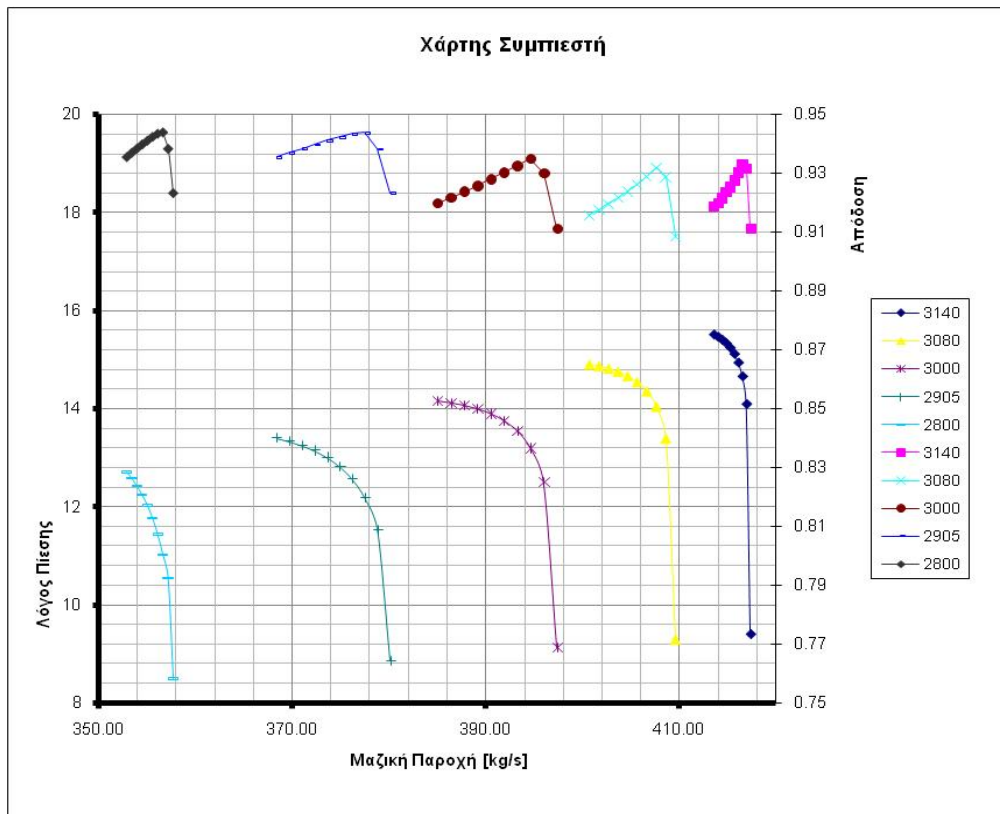
$$sf_q = \frac{Q_{\text{design point,C30}}}{Q_{\text{design point,map}}} \quad (13)$$

Όπου η ανηγμένη παροχή  $q$  δίνεται από τη σχέση:

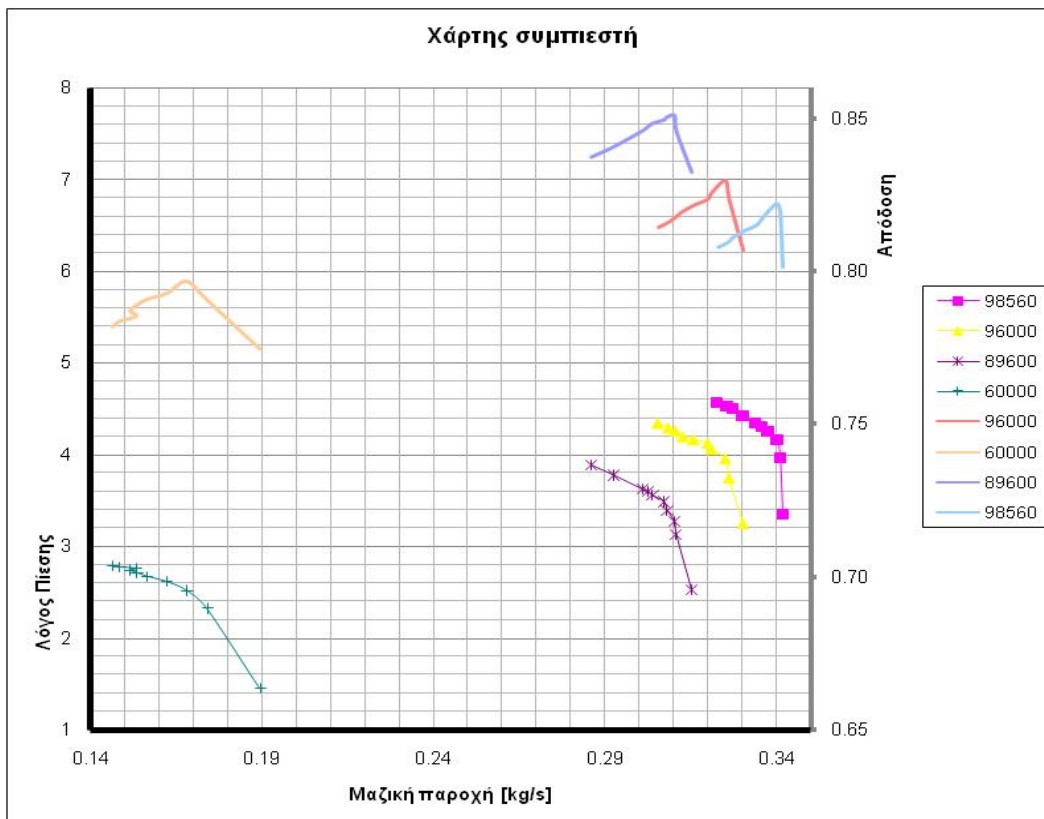
$$q = \frac{w\sqrt{T}}{p} \frac{\left(\frac{N}{\sqrt{T}}\right)}{\left(\frac{N}{\sqrt{T}}\right)_{\text{design}}} \quad (14)$$

Βέβαια αυτή η τροποποίηση που έγινε στους χάρτες ήταν αρκετά χονδροειδής, κάτι που φάνηκε και στην πράξη μετά το τρέξιμο του κώδικα, ο οποίος αν και προσέγγιζε καλά το ονομαστικό σημείο λειτουργίας, πέρα αυτού, έδινε αποτελέσματα με μεγάλο σφάλμα. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να πραγματοποιηθούν και άλλες τροποποιήσεις στους χάρτες, μεταβάλλοντας τις τιμές των προηγούμενων συντελεστών, έτσι ώστε να προκύψουν αποτελέσματα που να συμφωνούν με τα πειραματικά δεδομένα. Οι χάρτες οι αρχικοί καθώς και οι τροποποιημένοι φαίνονται στις εικόνες 11 έως 15.

Το πρόβλημα αυτό θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί με την διαδικασία του αντίστροφου τρέξιματος που διαθέτει ο κώδικας. Η διαδικασία είναι η εξής. Αρχικά τροφοδοτείτε το πρόγραμμα με τα πειραματικά δεδομένα για ένα σημείο λειτουργίας του κινητήρα. Στη συνέχεια εκτελείται το αντίστροφο μέρος του προγράμματος όπου υπολογίζονται κάποιοι συντελεστές που δείχνουν το πόσο απέχουν τα μεγέθη που έχουν εισαχθεί στους χάρτες από τα πραγματικά και με βάση αυτούς του συντελεστές τροποποιούνται ανάλογα οι χάρτες. Αυτή η διαδικασία δεν χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη περίπτωση αφού στόχος ήταν μια πρώτη επαφή με τα προγράμματα προσομοίωσης αεροστροβίλων.

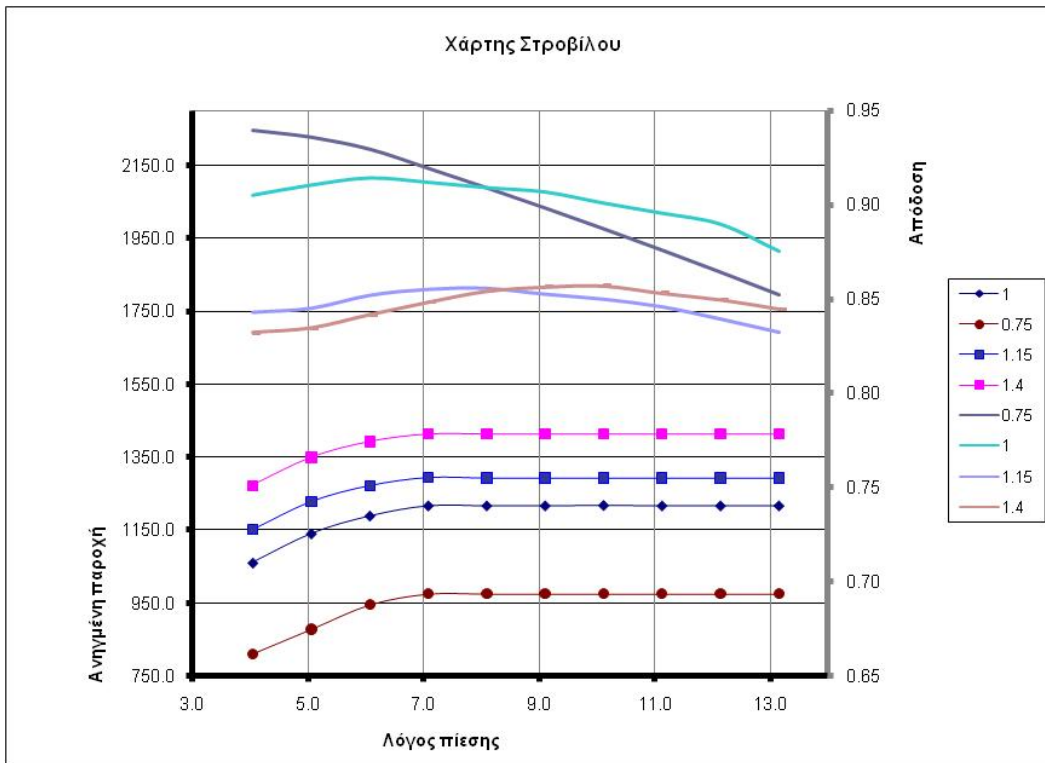


Εικόνα 11. Αρχικός χάρτης συμπίεστη.

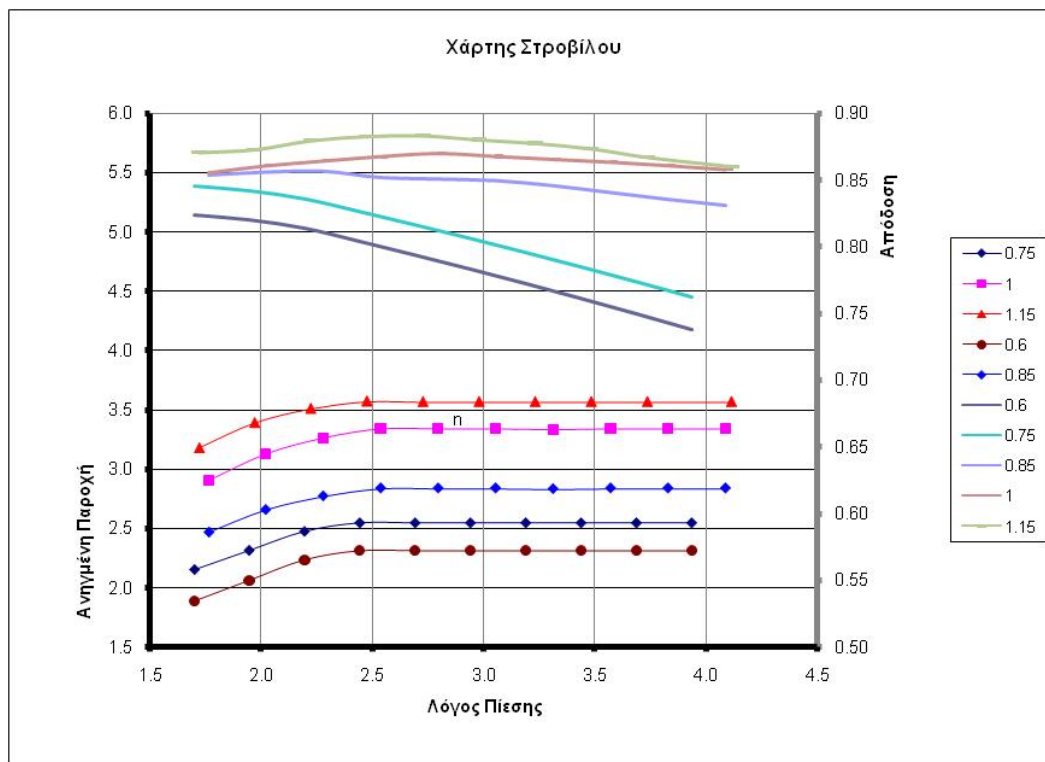


Εικόνα 12. Τροποποιημένος χάρτης συμπίεστη





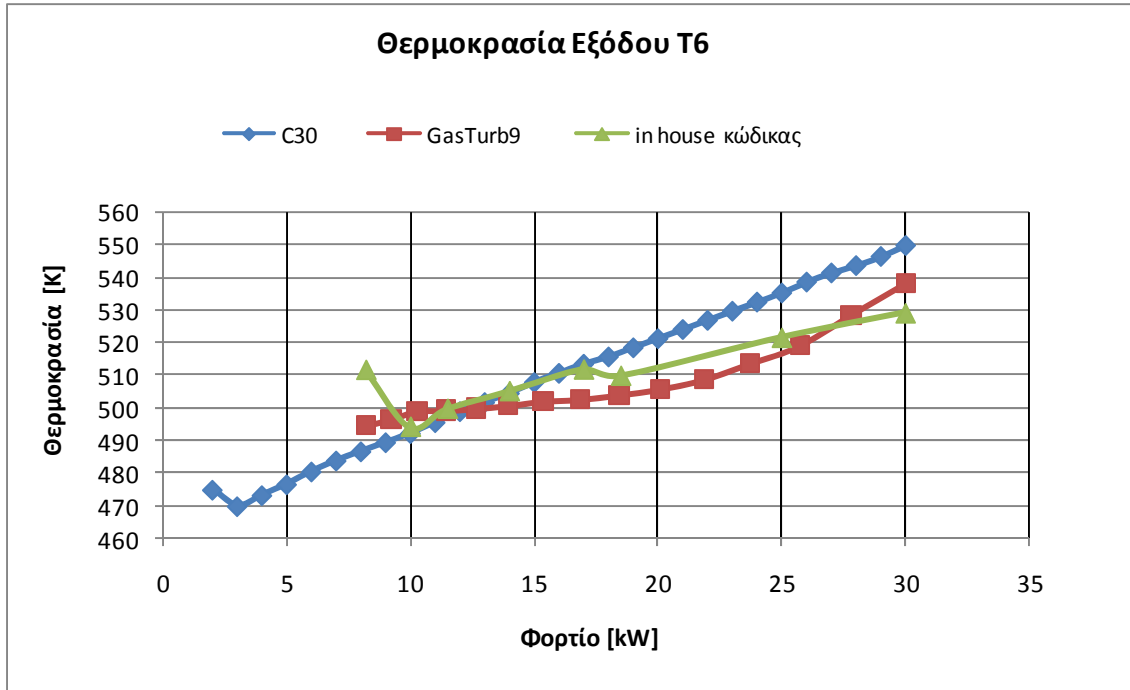
Εικόνα 13. Αρχικός χάρτης στροβίλου



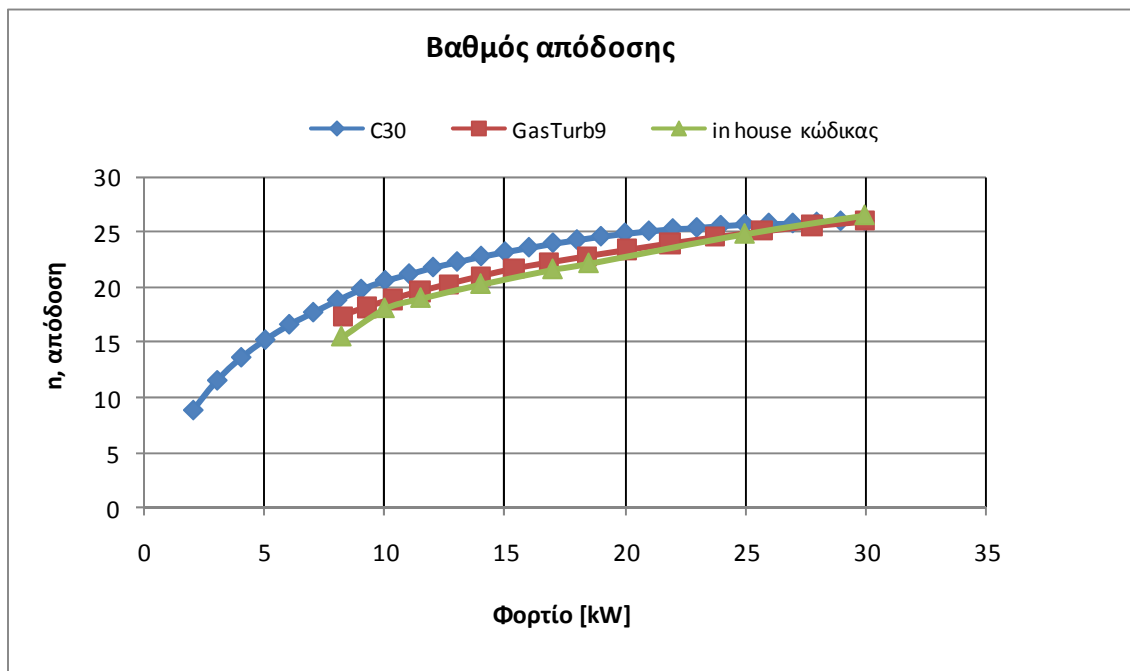
Εικόνα 14. Τροποποιημένος χάρτης στροβίλου

## 5. Αποτελέσματα

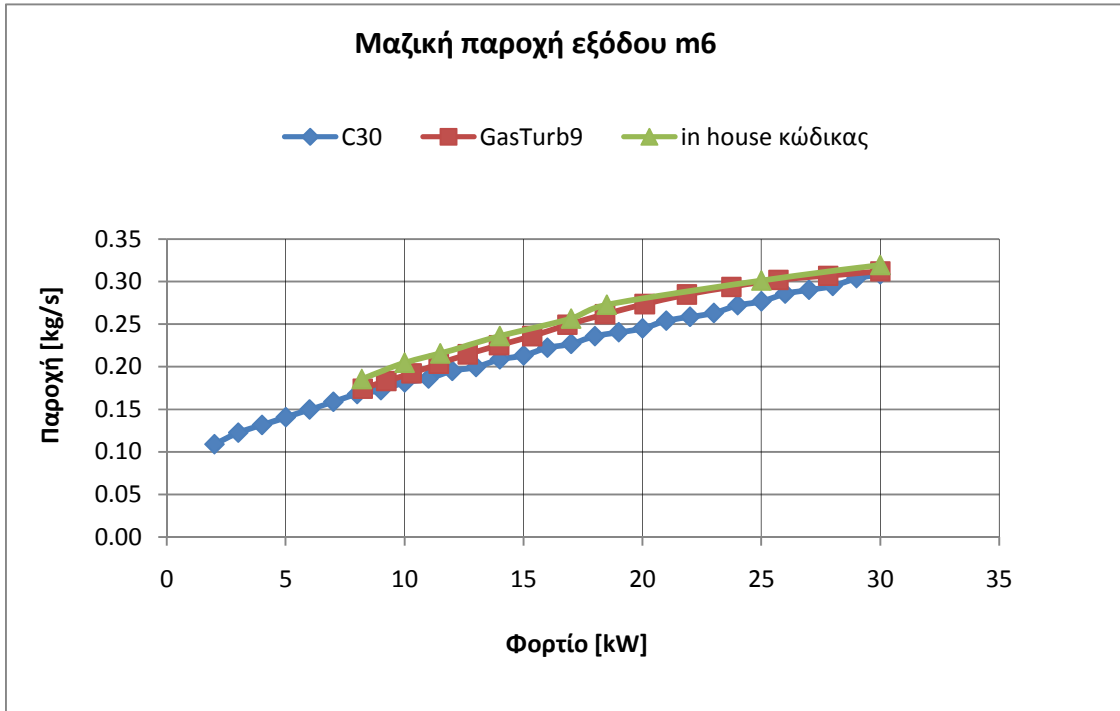
Στα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση του μικροστροβίλου στα δυο προγράμματα, συγκρινόμενα με τα εργοστασιακά δεδομένα.



Εικόνα 15. Θερμοκρασία εξόδου του αεροστροβίλου

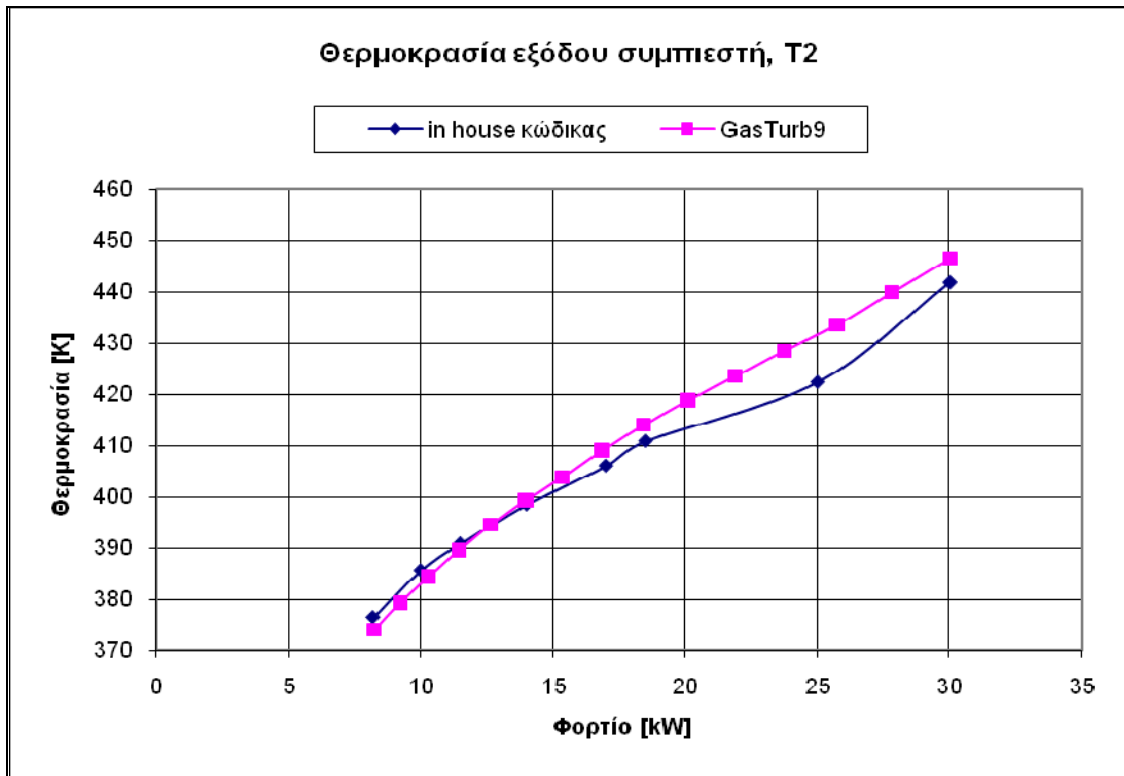


Εικόνα 16. Βαθμός απόδοσης του αεροστροβίλου

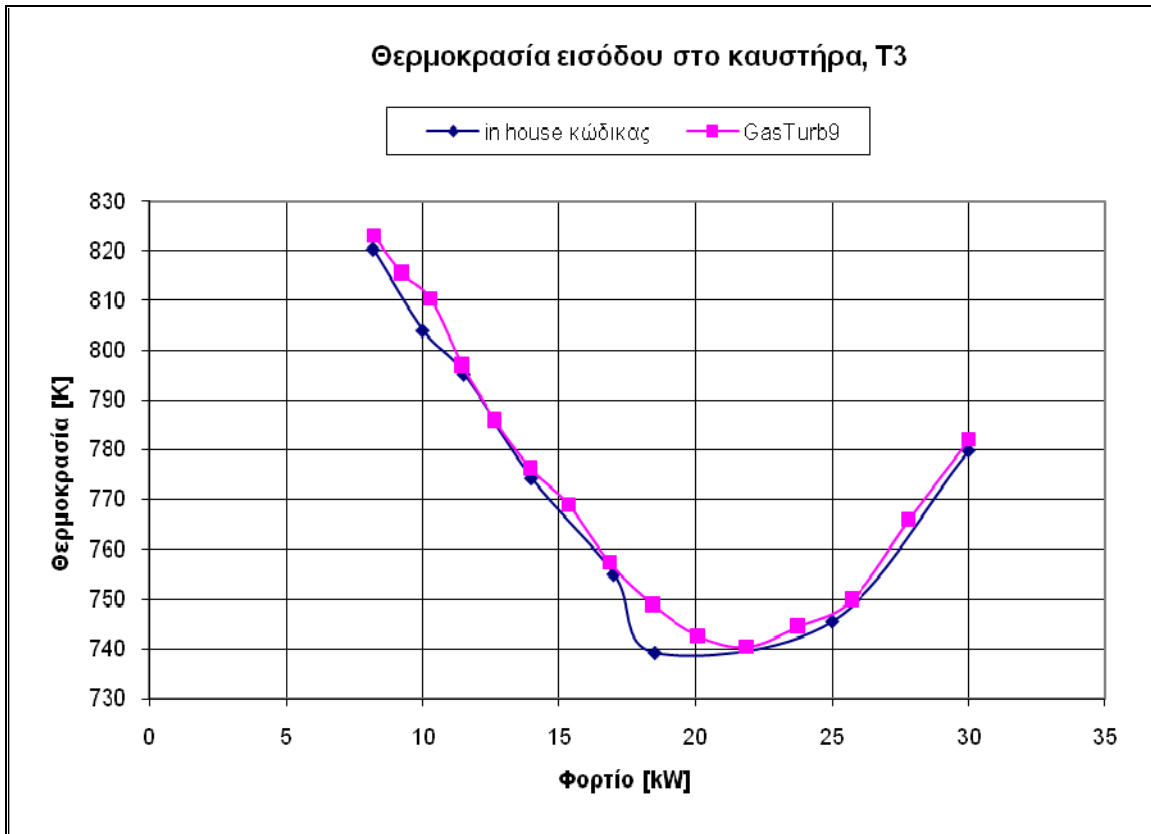


Εικόνα 17. Μαζική παροχή εξόδου του αεροστροβίλου.

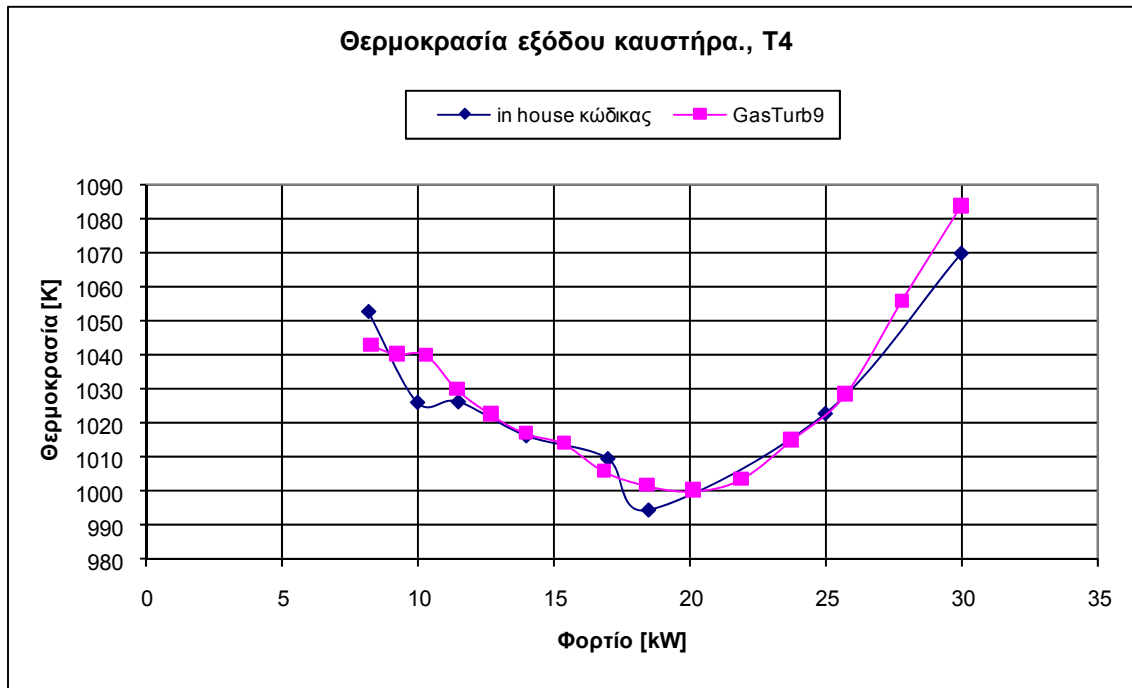
Παρακάτω γίνεται σύγκριση βασικών παραμέτρων λειτουργίας του αεροστροβίλου που προέκυψαν από τα δυο προγράμματα.



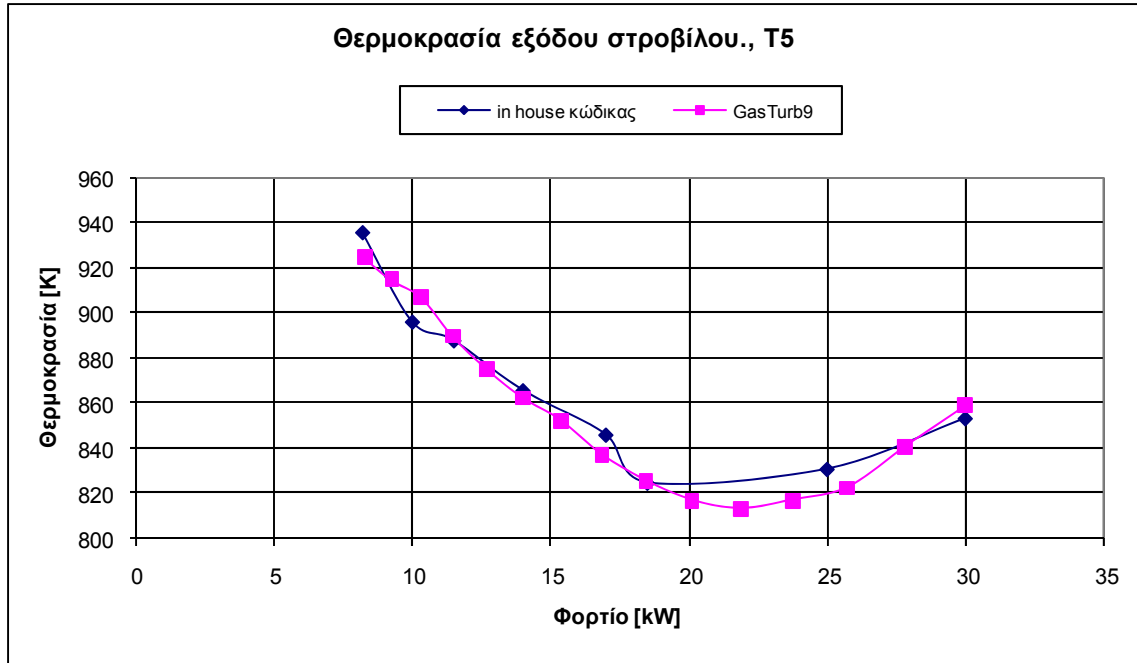
Εικόνα 18. Θερμοκρασία εξόδου συμπιεστή



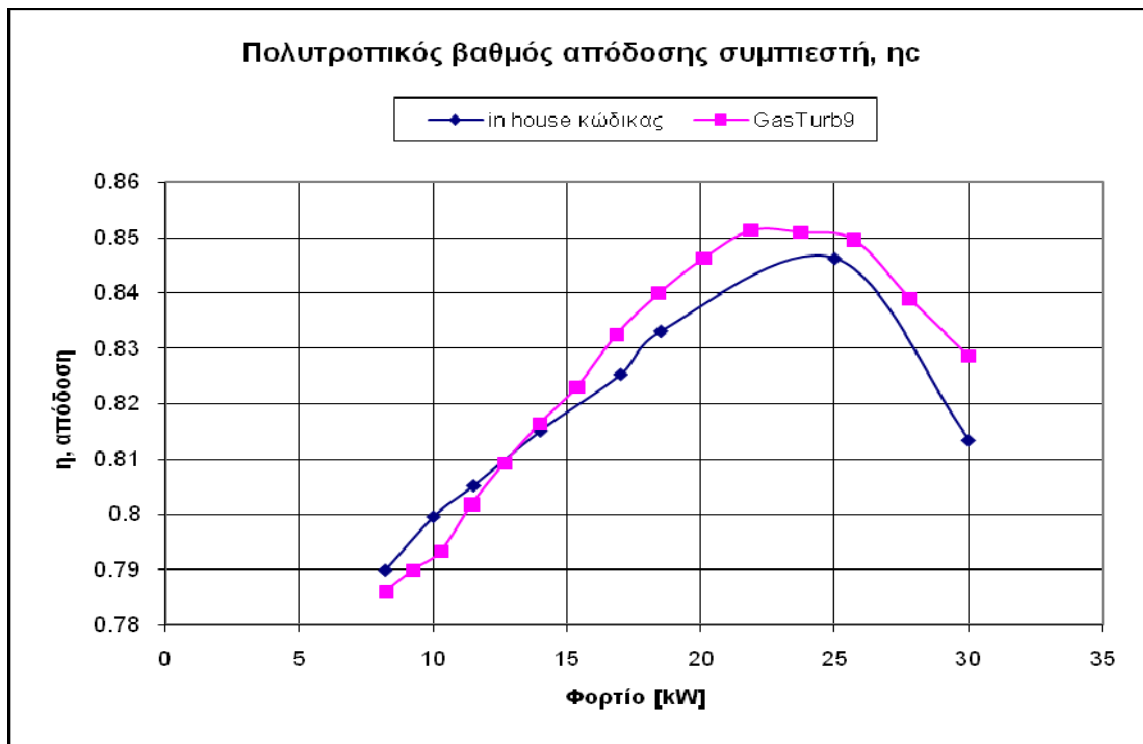
Εικόνα 19. Θερμοκρασία εισόδου καυστήρα



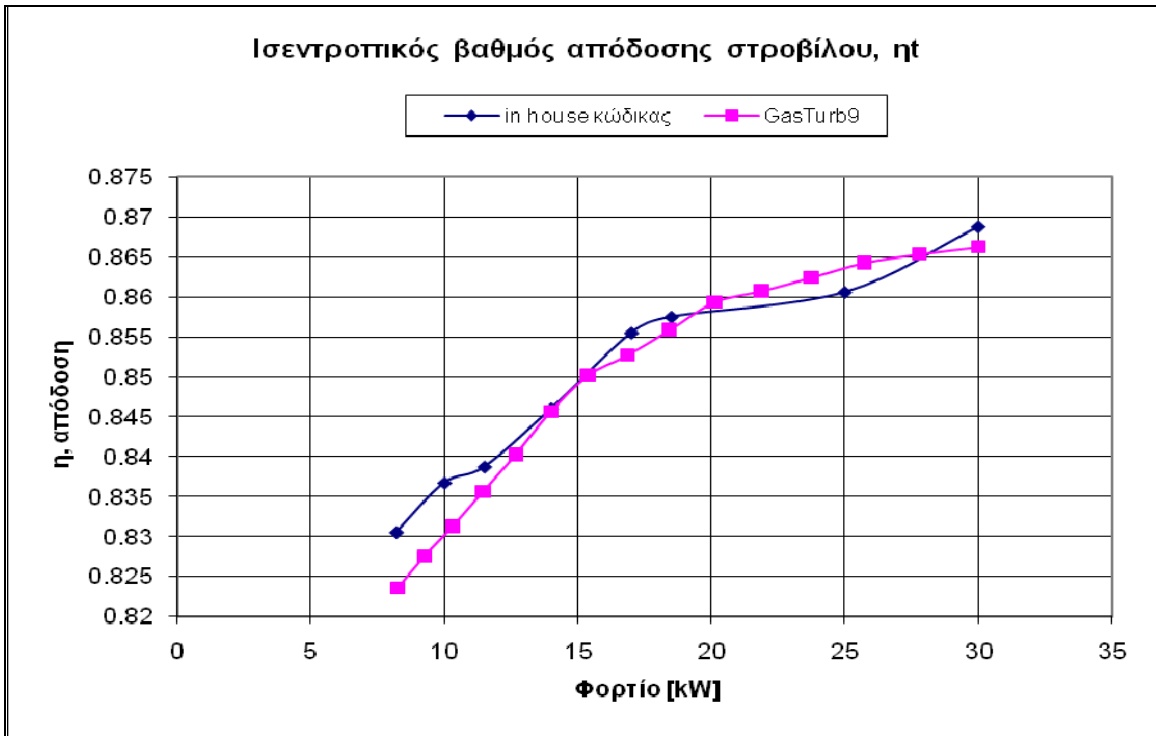
Εικόνα 20. Θερμοκρασία εξόδου καυστήρα



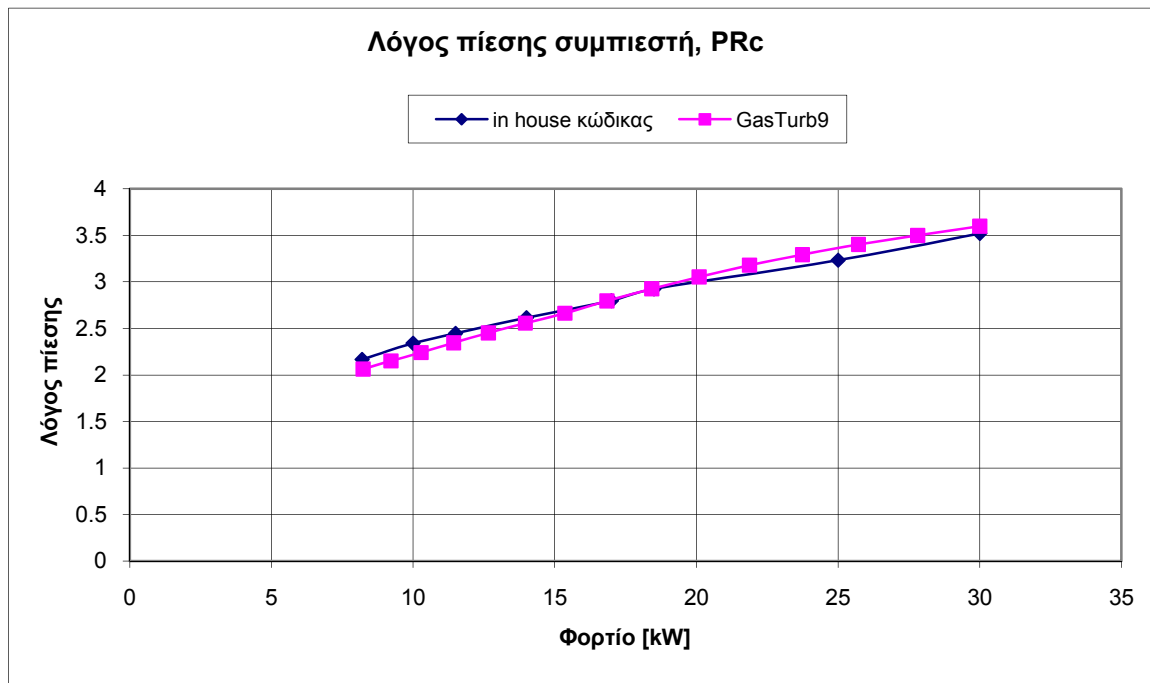
Εικόνα 21. Θερμοκρασία εξόδου στροβίλου



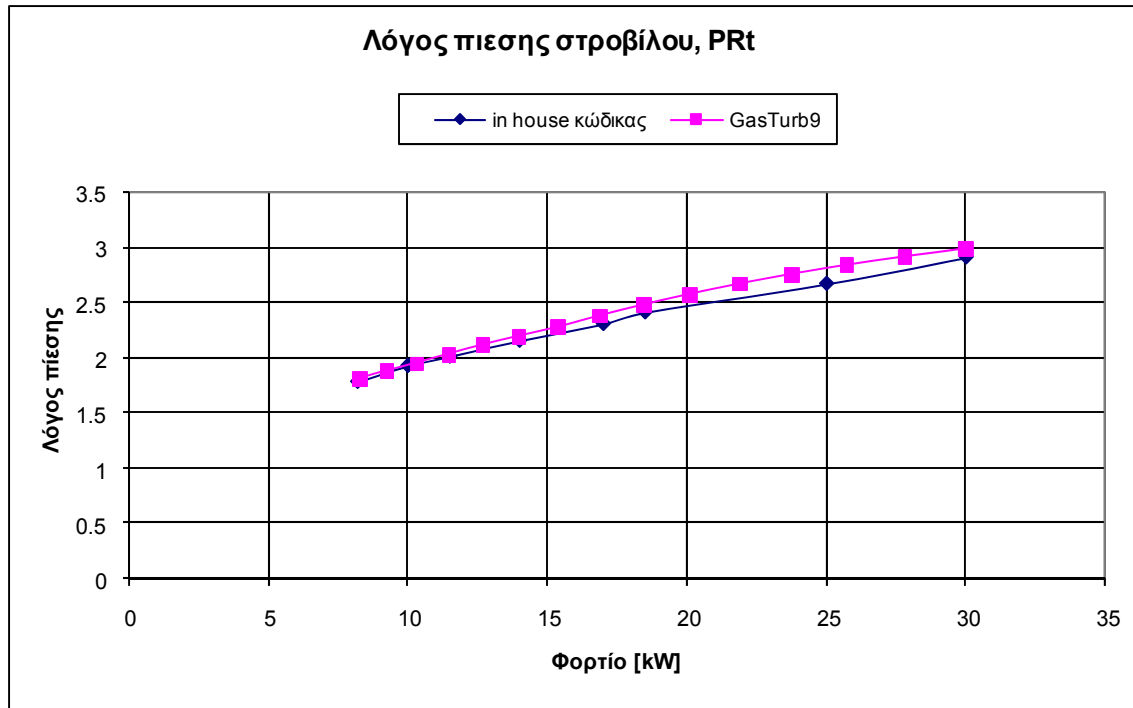
Εικόνα 22. Πολυτροπικός βαθμός απόδοσης συμπιεστή



Εικόνα 23. Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου



Εικόνα 24. Λόγος πίεσης συμπίεστη



Εικόνα 25. Λόγος πίεσης στροβίλου

## 6. Συζήτηση και σχολιασμός αποτελεσμάτων

Από τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται φανερό ότι και τα δυο προγράμματα προσομοιώνουν πολύ καλά την μηχανή και στο σημείο λειτουργίας αλλά και πέρα αυτού.

Ο λόγος που υπάρχει αυτή η απόκλιση από τις πειραματικές τιμές είναι γιατί δεν είναι γνωστοί οι χάρτες του συμπιεστή και του στροβίλου αλλά και άλλες βασικές παράμετροι οι οποίες εκτιμήθηκαν εμπειρικά.

Οι χάρτες που χρησιμοποιήθηκαν από το GasTurb είναι γενικού τύπου οι οποίοι προσαρμόζονται ανάλογα σε κάθε περίπτωση.

Οι χάρτες του κώδικα GTgeneral προέρχονται από μια μεγαλύτερη μηχανή οι οποίοι τροποποιήθηκαν έτσι ώστε να περιγράφουν τον κινητήρα C30 όσο το δυνατό καλύτερα.

Γίνεται φανερό από τα αποτελέσματα, ότι είναι δυνατό να βελτιωθούν και άλλο οι προσομοιώσεις και με τα δυο προγράμματα.

Το γενικό συμπέρασμα που προκύπτει από την προηγούμενη διαδικασία είναι ότι υπάρχει δυνατότητα να φτιαχτούν αξιόπιστες προσομοιώσεις μιας μηχανής, ακόμα και αν είναι γνωστά ελάχιστα χαρακτηριστικά της. Με την προσομοίωση της λειτουργίας οποιουδήποτε τύπου κινητήρα λαμβάνονται πληροφορίες που αφορούν τόσο την ίδια την μηχανή συνολικά, όσο και τις επιμέρους συνιστώσες από τις οποίες συγκροτείται, αφού υπολογίζονται τόσο οι επιδόσεις της, όσο και τα χαρακτηριστικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν τη λειτουργία των συνιστωσών.

## 7. Συμπεράσματα

Η συγκεκριμένη εργασία έγινε στα πλαίσια της Αναμόρφωσης του Προπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών και ξεκίνησε στις αρχές Δεκεμβρίου 2007. Οι γνώσεις μου περιελάμβαναν τα βασικά μαθήματα του τμήματος και του τομέα ενέργειας μέχρι 9<sup>ο</sup> εξάμηνο, που ήταν το τρέχον.

Οι δυσκολίες που συναντήθηκαν κατανέμονται σε τρεις κατηγορίες:

**Κατασκευή μοντέλου GasTurb:** Το πρόβλημα που υπήρχε ήταν στον υπολογισμό των βασικών παραμέτρων του μοντέλου, από τις οποίες για κάποιες θεωρήθηκαν τυπικές και με τη βοήθεια αυτών υπολογίστηκαν οι υπόλοιπες, μέσω των αλγορίθμων που διαθέτει το GasTurb.

**Λειτουργία in house κώδικα:** Η δυσκολία που υπήρξε ήταν στην πραγματοποίηση κάποιων τροποποιήσεων του κώδικα έτσι ώστε να ταιριάζει στο συγκεκριμένο κινητήρα.

**Κατασκευή χαρτών για τον in house κώδικα:** Το τελευταίο πρόβλημα το οποίο έπρεπε να αντιμετωπιστεί ήταν η κατασκευή των χαρτών του συμπεσστή και του στροβίλου.

Ο χρόνος ενασχόλησης που χρειάστηκε για να πραγματοποιηθεί η συγκεκριμένη μελέτη κατανέμεται ως εξής:

Αναζήτηση πληροφοριών: 10 ώρες

Κατασκευή μοντέλου στο GasTurb: 15 ώρες

Τροποποίηση in house κώδικα: 15 ώρες

Κατασκευή χαρτών για τον in house κώδικα: 25 ώρες

Τρέξιμο κώδικα: 5 ώρες

## 8. Βιβλιογραφία

- 1) Σταμάτης Α., Η διαγνωστική στις εγκαταστάσεις αεριοστροβίλων και η εφαρμογή της στην προληπτική συντήρηση. (Διδακτορική διατριβή), Αθήνα 1990
- 2) AIR 4548 Real Time Modeling Methods for Gas Turbine Engines. Society of Automotive Engineers.
- 3) Σιμιτσιδέλλης Α., Προσομοίωση μεταβατική λειτουργίας αεριοστροβίλου με μικτο και αντιπροσωπευτικό μοντέλο. (Διπλωματική εργασία), Αθήνα 1992
- 4) Δράκος Μ., Συγκρότηση λογισμικού και πακέτου δεδομένων για την προσομοίωση λειτουργίας ελικοφόρου στροβιλοαντιδραστήρα. (Διπλωματική εργασία), Αθήνα 1998
- 5) Gas Turb 9, User's manual
- 6) A. Stamatias, K. Mathioudakis, J. Ruiz, B. Curnock, Real time engine model implementation for adaptive control & performance monitoring of large civil turbofans, ASME 2001-GT-0362



- 7) A. Stamatis, Ph. Kamboukos, N. Aretakis, K. Mathioudakis, On board adaptive models: A general framework and implementation aspects, ASME GT-2002-30622
- 8) A. Stamatis, K. Mathioudakis, K. Papailiou. Optimal Measurements and Health Indices Selection for Gas Turbine Performance Status and Fault Diagnosis. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol.114, No 2, pp 209-216, Apr 1992.
- 9) N. Aretakis, K. Mathioudakis, A. Stamatis, Non-Linear Engine Component Fault Diagnosis From a Limited Number of Measurements Using A Combinatorial Approach, ASME paper GT-2002-30031, Accepted for publication in ASME Transactions.
- 10) J. Kurzke, Advanced user-friendly gas turbine performance calculations on a personal computer, ASME paper, 1995
- 11) C. Riegler, M. Bauer, J. Kurzke, Some Aspects of Modeling Compressor Behavior in Gas Turbine Performance Calculations, Journal of Turbomachinery, Volume 123, Issue 2, pp. 372-378, April 2001