



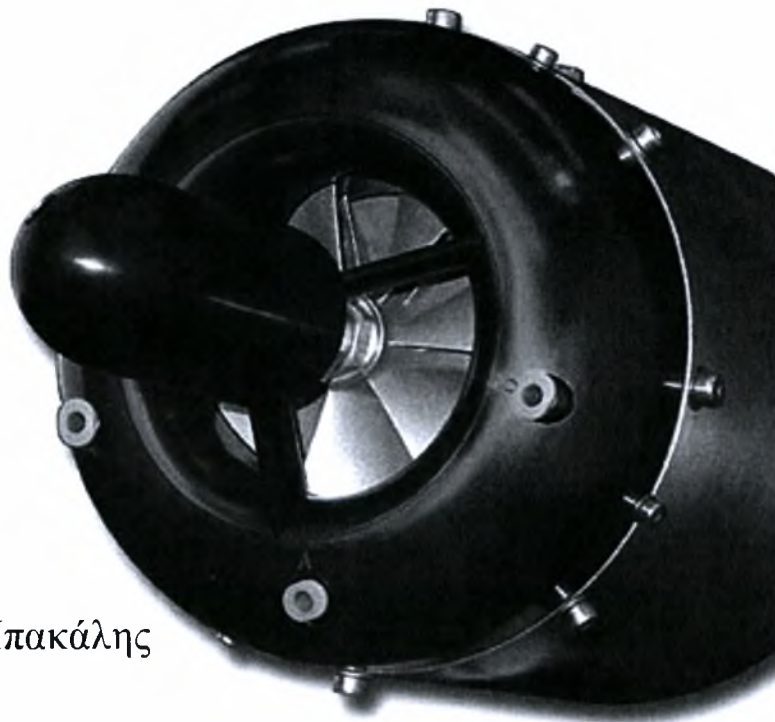
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ & ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη εγκαταστάσεων μικρών αεροστροβίλων



Συντάκτης:
Διαμαντής Μπακάλης

Επιβλέπων:
Αναστάσιος Σταμάτης

Βόλος, Ιούλιος 2008



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 6438/1
Ημερ. Εισ.: 14-07-2008
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ
2008
ΜΠΑ

© 2008 Διαμαντής Μπακάλης

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

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής Δρ. Σταμάτης Αναστάσιος
(Επιβλέπων) Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Σταματέλλος Αναστάσιος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Σταπουντζής Ερρίκος
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους όσους συνέβαλαν άμεσα ή έμμεσα για την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Πριν από όλους και όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, που μου ήταν δίπλα μου σε εύκολες και δύσκολες στιγμές με ηθική και υλική υποστήριξη. Ελπίζω να μην τους απογοήτευσα ποτέ και να φανώ αντάξιος των προσδοκιών τους.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ θα ήθελα να απευθύνω στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Α. Σταμάτη, για την εμπιστοσύνη του και την ευκαιρία που μου έδωσε για την πραγματοποίηση αυτής της διπλωματικής.

Ευχαριστίες οφείλω στους συνεργάτες του Εργαστηρίου Θερμοδυναμικής & Θερμικών Μηχανών, Δρ. Γεώργιο Κωνσταντά και Τελ. Μηχανολόγο Μηχανικό Βιομηχανίας Λουκά Δημητριάδη, για τις εποικοδομητικές συζητήσεις που είχαμε. Η συμβολή τους στο εργαστηριακό μέρος ήταν πολύτιμη.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον ηλεκτρονικό του τμήματος, Αναστάσιο Δαφερέρα, για την πολύτιμη βοήθεια του στα ηλεκτρονικά τμήματα της πειραματικής διάταξης.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην Εύη, για την κατανόηση που έδειξε όλο αυτό τον καιρό και την στήριξη που μου προσέφερε στις δύσκολες στιγμές.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω του πολύ καλούς μου φίλους και συμφοιτητές, Λουκά Δημητριάδη, Δημήτρη Δημόπουλο, Χρήστο Μπότσικα και Δημήτρη Τζιουρτζιούμη για όλες τις στιγμές που περάσαμε μαζί.

Λίστα συμβόλων

A	Εμβαδό διατομής
a	Ταχύτητα του ήχου
C _p	Ειδική θερμότητα
EGT	Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων
F	Ωση ή στήλη εξισώσεων
FAR	Λόγος καυσίμου αέρα
Fr	Κλάσμα μάζας στοιχείου στο καύσιμο
g	Διάνυσμα γεωμετρικής ταυτότητας
h	Ενθαλπία
LHV	Θερμογόνος δύναμη
\dot{m}	Παροχή μάζας
M	Αριθμός Mach ή μοριακό βάρος
N	Αριθμός στροφών
P	Πίεση ή Ισχύς
PR	Λόγος Πίεσης
R	Παγκόσμια σταθερά αερίων
τ_d	Πτώση πίεσης στον αγωγό εισόδου
S	Εντροπία
T	Θερμοκρασία
u	Διάνυσμα συνθηκών λειτουργίας
V	Ταχύτητα ή υποθετικό μέγεθος
W	Παράμετρος παροχής για τους χάρτες των συνιστωσών
x	Ποσοστό
z	Διάνυσμα κατάστασης
α	Συντελεστής για τον υπολογισμό της ενθαλπίας
γ	Ισεντροπικός εκθέτης
δ	Αδιάστατη πίεση
η	Βαθμός απόδοσης

Θ	Αδιάστατη θερμοκρασία
ρ	Πυκνότητα

Δείκτες

0...8	Διατομή του κινητήρα
amb	Περιβάλλον
burn	Καυστήρας
comp	Συμπιεστής
cr	Κρίσιμος
down	Χαρακτηρίζει τους αισθητήρες που βρίσκονται στο κάτω μέρος της διατομής
f	Καύσιμο
g	Καυσαέριο
in	Είσοδος
is	Ισεντροπικός
left	Χαρακτηρίζει τους αισθητήρες που βρίσκονται στο αριστερό μέρος της διατομής
loss	Απώλειες
noz	Ακροφύσιο
out	Έξοδος
p	Πολυτροπικός
ref	Συνθήκες αναφοράς
right	Χαρακτηρίζει τους αισθητήρες που βρίσκονται στο δεξί μέρος της διατομής
s	Υποδεικνύει την υπολογιζόμενη θερμοκρασία εξόδου του καυστήρα
t	Ολικό μέγεθος
turb	Στρόβιλος
up	Χαρακτηρίζει τους αισθητήρες που βρίσκονται στο πάνω μέρος της διατομής
a	Αέρας

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	17
1.1 Γενικά στοιχεία μοντελοποίησης.....	17
1.1.1 Μαθηματική μοντελοποίηση και προσομοίωση.....	17
1.1.2 Αξία της προσομοίωσης.....	19
1.2 Περιγραφή κινητήρα Olympus HP ES.....	22
2. Παρακολούθηση λειτουργίας.....	26
2.1 Τρόποι παρακολούθησης λειτουργίας.....	26
2.2 Παρακολούθηση κινητήρα Olympus HP ES στο εργαστήριο.....	27
2.3 Προκαταρκτικοί υπολογισμοί κύκλου λειτουργίας.....	28
2.3.1 Μεθοδολογία – Χρησιμοποιούμενες σχέσεις – Παραδοχές.....	29
2.3.2 Αποτελέσματα και σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	34
2.4 Μετρούμενα μεγέθη και η σημασία τους.....	37
2.4.1 Θέση 3.....	37
2.4.2 Θέση 4.....	38
2.4.3 Θέση 5.....	39
2.5 Χρησιμοποιούμενα όργανα μέτρησης.....	39
2.5.1 Μέτρηση της θερμοκρασίας.....	39
2.5.2 Μέτρηση της πίεσης.....	41
2.6 Περιγραφή δοκιμαστηρίου.....	43
2.7 Πρόσκτηση δεδομένων με την βοήθεια H/Y.....	44
2.7.1 Το πρόγραμμα πρόσκτησης δεδομένων.....	44
2.7.2 Κάρτα πρόσκτησης δεδομένων.....	46
2.7.3 Ανάκτηση δεδομένων από την ECU.....	48
2.7.4 Περιγραφή προγράμματος AMT.vi.....	49
3. Παρουσίαση και επεξεργασία των πειραματικών μετρήσεων.....	51
3.1 Παρουσίαση των μετρήσεων.....	51
3.2 Επεξεργασία των μετρήσεων.....	56
3.3 Παραδοχές.....	59
3.4 Αριθμητική επεξεργασία.....	60

3.5 Αναγωγή των αποτελεσμάτων για συνθήκες τυπικής ημέρας	66
3.6 Αποτελέσματα	68
3.6.1 Συμπιεστής	68
3.6.2 Θάλαμος καύσης	70
3.6.3 Στρόβιλος	73
3.6.4 Ακροφύσιο	77
4. Κατασκευή υπολογιστικού μοντέλου	80
4.1 Απαιτήσεις μοντέλου	80
4.2 Γενικές αρχές – Ορισμοί	81
4.2.1 Υπολογιστικές δυσκολίες μοντελοποίησης	82
4.2.2 Μικτά μοντέλα	83
4.2.3 Συναρτησιακά μοντέλα συνιστωσών	83
4.3 Διακεκριμενοποίηση του αεροστροβίλου	85
4.3.1 Σύζευξη συνιστωσών	86
4.4 Δεδομένα εισόδου	87
4.4.1 Περιγραφή διαδικασίας επίλυσης	87
4.4.2 Μεταβλητή ελέγχου	89
4.4.3 Υποθετικά μεγέθη και συναρτήσεις σφάλματος	89
4.5 Συναρτήσεις σφάλματος	92
4.6 Σύνοψη διαδικασίας υπολογισμού	94
4.7 Χάρτες συνιστωσών	95
4.7.1 Δεδομένα χαρτών	95
4.8 Κατασκευή χαρτών	96
4.9 Αποτελέσματα προσομοίωσης	99
4.10 Συζήτηση αποτελεσμάτων	101
5. Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων	103
5.1 Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων	103
5.1.1 Συμπιεστής	103
5.1.2 Στρόβιλος	105
5.1.3 Γενικά στοιχεία	107
5.2 Συμπεράσματα	110

6. Ανακεφαλαίωση – Συμπεράσματα – Προτάσεις.....	111
6.1 Ανακεφαλαίωση.....	111
6.2 Συμπεράσματα – Προτάσεις.....	112
Βιβλιογραφία	114
Π1 Εγχειρίδιο χρήσης κινητήρα Olympus.....	118
Π1.1 Περιγραφή κινητήρα Olympus HP ES.....	118
Π1.2 Electronic Control Unit (ECU).....	118
Π1.3 Αντλία καυσίμου	118
Π1.4 Καύσιμο.....	119
Π1.5 Αέριο Εκκίνησης.....	119
Π1.6 Ανάφλεξη μίγματος αέρα – προπανίου	120
Π1.7 Περιγραφή λειτουργίας ECU	120
Π1.8 Περιγραφή των εισόδων στην ECU	121
Π1.9 Βομβητής – Ηχητικά σήματα	122
Π1.10 Λειτουργία του κινητήρα	123
Π1.10.1 Διαδικασία εκκίνησης	123
Π1.10.2 Διαδικασία τερματισμού λειτουργίας.....	124
Π1.10.3 Έκτακτη διαδικασία τερματισμού λειτουργίας.....	125
Π1.11 Προληπτική συντήρηση	125
Π1.11.1 Εποπτικός έλεγχος του κινητήρα	125
Π1.11.2 Έλεγχος των εδράνων κύλισης του άξονα περιστροφής.....	126
Π1.11.3 Αποθήκευση και λίπανση.....	126
Π1.11.4 Αφαίρεση του μπροστινού καλύμματος του κινητήρα και λίπανση πριν την επαναχρησιμοποίηση.....	127
Π2 Προβλήματα κατά την επεξεργασία των μετρήσεων	128
Π2.1 Υπολογισμός μαζικής παροχής	128
Π2.2 Θερμοκρασία εξόδου θαλάμου καύσης	129
Π3 Περιγραφή κώδικα.....	132
Π3.1 Περιγραφή αρχείων κώδικα	132
Π3.1.1 Αρχείο MainPro.for.....	132
Π3.1.2 Αρχείο GTModel.for	132

Π3.1.3	Αρχείο Engine.for.....	133
Π3.1.4	Αρχείο Numerical.for.....	133
Π3.1.5	Αρχείο Interpolation.for.....	134
Π3.1.6	Αρχείο Thermo.for.....	134
Π3.2	Περιγραφή αρχείων εισόδου-εξόδου.....	135
Π3.2.1	Accuracy.txt.....	135
Π3.2.2	Areabl.txt.....	135
Π3.2.3	Cmap.txt.....	136
Π3.2.4	Data.txt.....	136
Π3.2.5	Ctmap.txt.....	137
Π3.2.6	Debug.txt.....	137
Π3.2.7	Engine.dat.....	137
Π3.2.8	Factors.txt.....	138
Π3.2.9	gtperf.txt.....	138
Π3.2.10	input.txt.....	138
Π3.2.11	map position.txt.....	138
Π3.2.12	Maesurements.txt.....	138
Π4	Περιγραφή υπορουτινών.....	139
Π4.1	Υπορουτίνα GTModel.....	139
Π4.2	Υπορουτίνα RESUL.....	139
Π4.3	Υπορουτίνα initialization.....	140
Π4.4	Υπορουτίνα engin.....	140
Π4.5	Υπορουτίνα inlet.....	141
Π4.6	Υπορουτίνα comprbleed.....	141
Π4.7	Υπορουτίνα civol.....	142
Π4.8	Υπορουτίνα compr.....	142
Π4.9	Υπορουτίνα difsr.....	143
Π4.10	Υπορουτίνα burn.....	144
Π4.11	Υπορουτίνα remix.....	144
Π4.12	Υπορουτίνα cooler.....	144
Π4.13	Υπορουτίνα cturb.....	145

Π4.14	Υπορουτίνα AfterBurn	145
Π4.15	Υπορουτίνα nozzle	146
Π4.16	Υπορουτίνα machsolversub.....	146
Π4.17	Υπορουτίνα machsolver	147
Π4.18	Υπορουτίνα thrustcalc	147
Π4.19	Υπορουτίνα map.....	148
Π4.20	Υπορουτίνα afquir	148
Π4.21	Υπορουτίνα synthesis.....	149
Π4.22	Υπορουτίνα SteamSatPres.....	150
Π4.23	Υπορουτίνα procom	150
Π4.24	Υπορουτίνα combustion.....	151
Π4.25	Υπορουτίνα therprop	151
Π4.26	Υπορουτίνα fuelhu	152
Π4.27	Υπορουτίνα gasfuelsynthesis	153
Π4.28	Υπορουτίνα gasfuelhu	153
Π4.29	Υπορουτίνα thermo	154
Π4.30	Υπορουτίνα thturb.....	154
Π4.31	Υπορουτίνα qays0	155
Π4.32	Υπορουτίνα qays	156
Π4.33	Υπορουτίνα J79NR	156
Π4.34	Υπορουτίνα LUDCMP	157
Π4.35	Υπορουτίνα LUBKSB.....	158
Π4.36	Υπορουτίνα J79FUNCT.....	158
Π4.37	Υπορουτίνα J79FDJAC.....	159
Π4.38	Υπορουτίνα J79GVAR.....	159
Π4.39	Υπορουτίνα J79ERVAR	160
Π5	Στοιχεία μεταλλάκτη πίεσης.....	161
Π6	Πρωτόκολλο επικοινωνίας ECU με H/Y	166
Π7	Εγχειρίδιο χρήσης του ενισχυτή θερμοστοιχείων.....	169
Π7.1	Η μπροστινή όψη του ενισχυτή.....	169
Π7.2	Η πίσω όψη του ενισχυτή.....	170

Π7.3	Συνδεσμολογία των θερμοστοιχείων της εγκατάστασης του κινητήρα Olympus ..	171
Π8	Το ολοκληρωμένο κύκλωμα – ενισχυτής AD595AQ.....	172
Π9	Η μετρητική αλυσίδα	180
Π10	Φωτογραφίες της εγκατάστασης του Olympus	181
Π11	Πειραματικά δεδομένα.....	187

Σχήμα 1.1. Αναπαράσταση ενός φυσικού συστήματος από ένα αριθμητικό μοντέλο.	18
Σχήμα 1.2. Ο κινητήρα Olympus HP ES.....	22
Σχήμα 1.3. Ο κινητήρας Olympus σε τομή	23
Σχήμα 2.1. Αρίθμηση θέσεων στον κινητήρα Olympus.....	28
Σχήμα 2.2. Κατανομή ολικής και στατικής θερμοκρασίας κατά μήκος του κινητήρα. ...	35
Σχήμα 2.3. Κατανομή ολικής και στατικής πίεσης κατά μήκος του κινητήρα.....	36
Σχήμα 2.4. Κατανομή της ταχύτητας κατά μήκος του κινητήρα.....	36
Σχήμα 2.5. Τα όργανα μέτρησης στη θέση 3.....	38
Σχήμα 2.6. Τα όργανα μέτρησης στη θέση 4.....	38
Σχήμα 2.7. Τα όργανα μέτρησης στη θέση 5.....	39
Σχήμα 2.8. Ο ενισχυτής των θερμοστοιχείων.....	41
Σχήμα 2.9. Ο μετατάκτης πίεσης A-10 της WIKA	42
Σχήμα 2.10. Κύκλωμα σύνδεσης μεταλλάκτη πίεσης.	43
Σχήμα 2.11. Η κάρτα πρόσκτησης δεδομένων USB-6229.....	46
Σχήμα 2.12. Λειτουργίες ακροδεκτών κάρτας.....	47
Σχήμα 3.1. Οι μετρήσεις των πιέσεων στην έξοδο του συμπιεστή (θέση 3).....	53
Σχήμα 3.2. Η μέτρηση της ολικής πίεσης στην έξοδο του θαλάμου καύσης (θέση 4).....	53
Σχήμα 3.3. Οι μετρήσεις των πιέσεων στην έξοδο του στροβίλου (θέση 5).	54
Σχήμα 3.4. Οι μετρήσεις των θερμοκρασιών στην έξοδο του συμπιεστή (θέση 3).....	55
Σχήμα 3.5. Η μέτρηση της θερμοκρασίας στην έξοδο του θαλάμου καύσης (θέση 4). ...	55
Σχήμα 3.6. Οι μετρήσεις των θερμοκρασιών στην έξοδο του στροβίλου (θέση 5),.....	56
Σχήμα 3.7. Οι κατανομές των πιέσεων στη θέση 3	57
Σχήμα 3.8. Οι κατανομές των πιέσεων στη θέση 5	57
Σχήμα 3.9. Η κατανομή της ολικής θερμοκρασίας στη θέση 3	58
Σχήμα 3.10. Η κατανομή της θερμοκρασίας στη θέση 5 (μέση τιμή των	58
Σχήμα 3.11 Λόγος πίεσης του συμπιεστή.....	68
Σχήμα 3.12. Βαθμοί απόδοση του συμπιεστή.	69
Σχήμα 3.13. Αναρροφούμενη παροχή αέρα από τον συμπιεστή.....	70
Σχήμα 3.14. Λόγος πίεσης του θαλάμου καύσης.....	71
Σχήμα 3.15. Βαθμός απόδοσης του θαλάμου καύσης.	71
Σχήμα 3.16. Ανηγγμένη κατανάλωση καυσίμου.....	72

Σχήμα 3.17. Η υπολογιζόμενη θερμοκρασία εξόδου του θαλάμου καύσης.....	73
Σχήμα 3.18. Λόγος πίεσης στροβίλου	74
Σχήμα 3.19. Βαθμοί απόδοσης στροβίλου.....	75
Σχήμα 3.20. Χαρακτηριστική λειτουργίας στροβίλου.....	76
Σχήμα 3.21. Παραγόμενη ισχύς από το στρόβιλο.	76
Σχήμα 3.22. Ταχύτητα και αριθμός Mach στην έξοδο του ακροφυσίου.	77
Σχήμα 3.23. Ανηγμένη ώση του κινητήρα.....	78
Σχήμα 3.24. Ειδική ώση.....	79
Σχήμα 3.25. Ειδική κατανάλωση.	79
Σχήμα 4.1. Συνοπτικό διάγραμμα λειτουργίας του κώδικα	89
Σχήμα 4.2. Χάρτης συμπίεστή (λόγος πίεσης – ανηγμένη παροχή).....	97
Σχήμα 4.3 Χάρτης συμπίεστή (πολυτροπικός βαθμός απόδοσης – ανηγμένη παροχή)...	97
Σχήμα 4.4. Χάρτης στροβίλου (ανηγμένη παροχή – λόγος πίεσης).....	98
Σχήμα 4.5. Χάρτης στροβίλου (ισεντροπικός βαθμός απόδοσης – λόγος πίεσης).....	98
Σχήμα 4.6. Αποτελέσματα της προσομοίωσης στο χάρτη του συμπίεστή.	99
Σχήμα 4.7. Αποτελέσματα της προσομοίωσης στο χάρτη του συμπίεστή.	100
Σχήμα 4.8. Αποτελέσματα προσομοίωσης στο χάρτη του στροβίλου.....	100
Σχήμα 4.9. Αποτελέσματα προσομοίωσης στο χάρτη του στροβίλου.....	101
Σχήμα 5.1. Ολική πίεση εξόδου συμπίεστή.....	104
Σχήμα 5.2. Ολική θερμοκρασία εξόδου συμπίεστή.....	104
Σχήμα 5.3. Ολική πίεση εξόδου του συμπίεστή.	105
Σχήμα 5.4. Θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο.....	106
Σχήμα 5.5. Θερμοκρασία εξόδου στροβίλου.....	107
Σχήμα 5.6. Αναρροφούμενη παροχή αέρα από το συμπίεστή.....	108
Σχήμα 5.7. Κατανάλωση καυσίμου.	109
Σχήμα 5.8. Η ώση που παράγει ο κινητήρας.	109
Σχήμα Π0.1. Αναρροφούμενη παροχή αέρα από τον κινητήρα	129
Σχήμα Π0.2. Θερμοκρασία εξόδου θαλάμου καύσης.....	130
Σχήμα Π7.0.3. Ο ενισχυτής των θερμοστοιχείων.	169
Σχήμα Π7.0.4. Η μπροστινή όψη του ενισχυτή των θερμοστοιχείων.	170
Σχήμα Π7.0.5. Η πίσω όψη του ενισχυτή.	170

Σχήμα Π10.6. Γενική άποψη της πειραματικής διάταξης	181
Σχήμα Π10.7. Η βάση στήριξης του κινητήρα	181
Σχήμα Π10.8. Ο κινητήρας με τα μετρητικά όργανα (πλάι).....	182
Σχήμα Π10.9. Ο κινητήρας με τα μετρητικά όργανα (μπροστά).....	182
Σχήμα Π10.10. Ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου (ECU) του κινητήρα	183
Σχήμα Π10.11. Το χειριστήριο του κινητήρα.....	183
Σχήμα Π10.12. Το τερματικό παρακολούθησης της λειτουργίας του κινητήρα	184
Σχήμα Π10.13. Η αντλία καυσίμου του κινητήρα.....	184
Σχήμα Π10.14. Η μπαταρία για την τροφοδοσία του κινητήρα	185
Σχήμα Π10.15. Η βαλβίδα του καυσίμου.	185
Σχήμα Π10.16. Η βαλβίδα του αερίου εκκίνησης.	186

1. Εισαγωγή

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε μελέτη του κινητήρα Olympus HP ES της AMT. Στόχος της εργασίας ήταν να κατασκευαστεί ένα δοκιμαστήριο του κινητήρα στο Εργαστήριο Θερμοδυναμικής και Θερμικών Μηχανών του ΠΘ, να μελετηθεί η λειτουργία του κινητήρα και τελικά να κατασκευαστεί ένα μαθηματικό μοντέλο που θα προσομοιώνει την λειτουργία του.

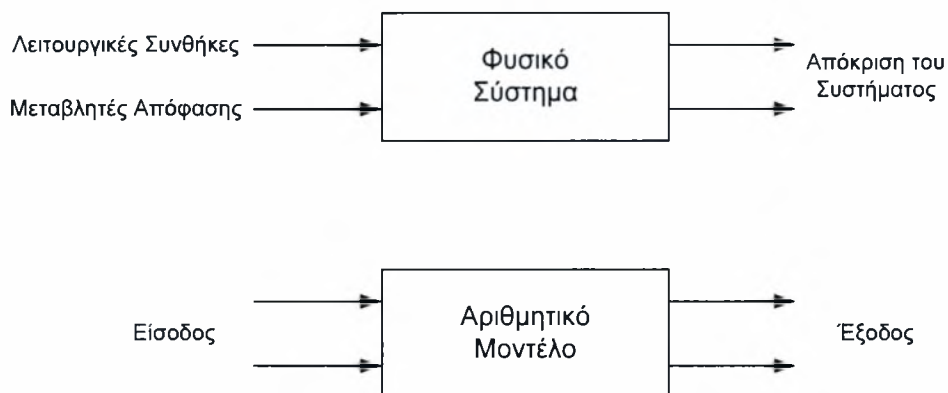
Στο κεφάλαιο αυτό δίνονται στοιχεία για την μοντελοποίηση κινητήρων, του σκοπούς που εξυπηρετεί και την μεγάλη χρησιμότητα που έχει στο σχεδιασμό ενεργειακών συστημάτων. Στη συνέχεια περιγράφεται ο κινητήρας Olympus. Αναφέρονται οι συνιστώσες από τις οποίες αποτελείται και περιγράφεται συνοπτικά το σύστημα αυτόματης λειτουργίας και ελέγχου που διαθέτει.

1.1 Γενικά στοιχεία μοντελοποίησης

1.1.1 Μαθηματική μοντελοποίηση και προσομοίωση

Ο κύριος σκοπός της μαθηματικής μοντελοποίησης είναι η δημιουργία ενός υπολογιστικού κώδικα, που τρέχει με τη βοήθεια κάποιου ηλεκτρονικού υπολογιστή, ο οποίος περιέχει δεδομένα του πραγματικού συστήματος και επιτρέπει την πρόβλεψη της συμπεριφοράς

του συστήματος κάτω από διαφορετικές συνθήκες [35]. Κατά συνέπεια, πραγματοποιείται μια αμφιμονοσήμαντη απόκριση μεταξύ του φυσικού συστήματος και του μαθηματικού μοντέλου έτσι ώστε η επιθυμητή πληροφορία για τα χαρακτηριστικά του συστήματος και την συμπεριφορά του να μπορεί να αποκτηθεί με επεξεργασία του μαθηματικού μοντέλου σε διαφορετικές συνθήκες. Όπως φαίνεται σχηματικά στη παρακάτω εικόνα (σχήμα 1.1), τα δεδομένα εισόδου σε ένα φυσικό σύστημα, προκύπτουν από τις αλλαγές των μεταβλητών απόφασης και των λειτουργικών συνθηκών, τα οποία δίνονται αντίστοιχα σαν είσοδοι στο υπολογιστικό μοντέλο. Οι έξοδοι από το μοντέλο παριστούν τις αναμενόμενες εξόδους από το πραγματικό φυσικό σύστημα, εάν αυτό το σύστημα κατασκευαστεί και ελεγχθεί.



Σχήμα 1.1. Αναπαράσταση ενός φυσικού συστήματος από ένα αριθμητικό μοντέλο.

Για την πραγματοποίηση της μαθηματικής μοντελοποίησης αναπτύσσονται πρώτα τα μοντέλα για κάθε τμήμα, συνιστώσα ή υποσύστημα, για ένα δεδομένο ενεργειακό σύστημα. Αυτά τα μεμονωμένα μοντέλα τελικά ενώνονται για να αποτελέσουν το συνολικό μαθηματικό μοντέλο του συστήματος. Σημειώνεται ότι το μαθηματικό μοντέλο που αναπτύσσεται, από τις ανάλογες εξισώσεις που περιγράφουν κάθε συνιστώσα του συστήματος, πρέπει να λυθεί ώστε να υπολογιστεί η συμπεριφορά του συστήματος. Οι εξισώσεις μπορεί να είναι αλγεβρικές, διαφορικές ή ολοκληρωτικές και μπορεί να είναι γραμμικές ή μη γραμμικές. Για διαφορετικούς τύπους εξισώσεων χρησιμοποιούνται διαφορετικοί αλγόριθμοι επίλυσης. Όλοι αυτοί οι αλγόριθμοι συνδέονται μεταξύ τους για να λύσουν το σύστημα εξισώσεων που προκύπτει.

Αφού φτιαχτεί το μαθηματικό μοντέλο του συστήματος, σειρά έχει η ανάλυση του μεταβάλλοντας τις μεταβλητές απόφασης και τις συνθήκες λειτουργίας. Αυτή η διαδικασία της μελέτης της συμπεριφοράς ενός συστήματος μέσω ενός μοντέλου είναι γνωστή ως προσομοίωση.

1.1.2 Αξία της προσομοίωσης

Η προσομοίωση είναι ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία στο σχεδιασμό ενεργειακών συστημάτων. Αφού τα πειράματα με βάση ένα πρωτότυπο του πραγματικού συστήματος είναι γενικά πολύ δαπανηρά και χρονοβόρα, στρεφόμεστε στη προσομοίωση η οποία βασίζεται σε μοντέλο, του προς μελέτη συστήματος, για την απόκτηση της επιθυμητής πληροφορίας, όσον αφορά την συμπεριφορά του συστήματος κάτω από διαφορετικές συνθήκες. Τα αποτελέσματα που επιτυγχάνονται από την προσομοίωση είναι ενδεικτικά της συμπεριφοράς του πραγματικού συστήματος.

Υπάρχουν αρκετοί λόγοι που μπορεί να χρησιμοποιηθεί η προσομοίωση ενός συστήματος μέσω του μαθηματικού του μοντέλου. Η προσομοίωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για:

1. Υπολογισμό διαφορετικών σχεδιασμών (designs) για την επιλογή του καλύτερου
2. Μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος για διάφορες συνθήκες
3. Καθορισμό ορίων ασφαλείας του συστήματος
4. Καθορισμό επιδράσεων παραμέτρων του συστήματος για βελτιστοποίηση
5. Βελτίωση ή τροποποίηση ήδη υπάρχοντων συστημάτων
6. Ανάλυση ευαισθησίας διαφόρων μεταβλητών ενός σχεδιασμού

Όλοι οι λόγοι αναπτύσσονται στις επόμενες παραγράφους.

Ο υπολογισμός διαφορετικών σχεδιασμών αποτελεί μια πάρα πολύ σημαντική χρήση της προσομοίωσης, διότι μπορούν να ελεγχθούν πολλές παραλλαγές για μια δεδομένη εφαρμογή. Εάν κάθε ένα από αυτά τα μοντέλα-παραλλαγές έπρεπε να κατασκευαστεί και να δοκιμαστεί, το κόστος θα ήταν υπερβολικά υψηλό. Η προσομοίωση χρησιμοποιείται αποτελεσματικά για την ανάλυση κάθε μοντέλου. Για παράδειγμα, σε μια εγκατάσταση αεροστροβίλου με συγκεκριμένη απαίτηση σε ισχύ, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα υλικά και εξαρτήματα με διαφορετικές γεωμετρίες. Αντί να κατασκευαστούν όλοι αυτοί

συνδυασμοί, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα μαθηματικό μοντέλο το οποίο θα είναι ικανοποιητική και ακριβής προσέγγιση του συγκεκριμένου θερμικού συστήματος που θα χρησιμοποιηθεί για να προσομοιώσει το πραγματικό σύστημα, με σκοπό να αποκτηθούν οι επιθυμητές πληροφορίες. Οι λειτουργικές συνθήκες για τις οποίες σχεδιάστηκε το σύστημα, εξετάζονται πρώτα, για να καθοριστεί εάν ο συνδυασμός ικανοποιεί τις ανάγκες και τους περιορισμούς που επιβάλλονται από τη φύση του προβλήματος. Αυτές οι συνθήκες συχνά αναφέρονται και ως συνθήκες σχεδιασμού (design conditions) διότι αποτελούν τη βάση του συστήματος, δηλαδή το ονομαστικό σημείο λειτουργίας. Ακόμα και αν ένας μόνο συνδυασμός έχει αναπτυχθεί για μια δεδομένη εφαρμογή, θα πρέπει να καθοριστεί εάν είναι αποδεκτός.

Πρόβλεψη της συμπεριφοράς του συστήματος πέρα των συνθηκών σχεδιασμού (off-design performance) είναι άλλη μια σημαντική χρήση της προσομοίωσης. Μια τέτοια μελέτη παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για την λειτουργία του συστήματος, καθώς και την συμπεριφορά του όταν αλλάζουν οι λειτουργικές συνθήκες. Τα θερμικά συστήματα σπάνια λειτουργούν σε συνθήκες σχεδιασμού και έτσι είναι σημαντικό να καθοριστεί το εύρος των λειτουργικών συνθηκών για τις οποίες η λειτουργία του συστήματος είναι αποδεκτή. Η απόκλιση από τις συνθήκες σχεδιασμού μπορεί να συμβεί για πολλούς λόγους, όπως είναι η μεταβολή της ενέργειας που παρέχετε στο σύστημα, αλλαγές στα χαρακτηριστικά των τμημάτων με το χρόνο, αλλαγές στις περιβαλλοντικές συνθήκες και μεταβολή του ενεργειακού φορτίου του συστήματος. Τα αποτελέσματα που αποκτούνται σε συνθήκες διαφορετικές από αυτές του ονομαστικού σημείου λειτουργίας υποδεικνύουν την προσαρμοστικότητα και αξιοπιστία του συστήματος. Είναι επιθυμητό να υπάρχει ένα μεγάλο εύρος συνθηκών λειτουργίας πέρα των ονομαστικών, για τις οποίες η λειτουργία του συστήματος είναι ικανοποιητική. Ένα περιορισμένο εύρος δεν είναι επιθυμητό, διότι αναμένεται να προκύψουν μεγάλες μεταβολές λειτουργικών συνθηκών. Για παράδειγμα η μηχανή ενός αεροσκάφους δουλεύει σε ένα μεγάλο εύρος συνθηκών περιβάλλοντος αν αναλογιστεί κανείς την μεταβολή στη θερμοκρασία και την πίεση της ατμόσφαιρας συναρτήσει του υψομέτρου.

Επίσης η προσομοίωση μπορεί να υποδείξει τα όρια ασφαλείας του συστήματος. Είναι σημαντικό για παράδειγμα να καθοριστεί η μέγιστη θερμοκρασία του καυστήρα ενός αεροστρόβιλου ή οι μέγιστες στροφές που μπορεί να αναπτύξει ο αεροστρόβιλος, χωρίς να υπάρχει κίνδυνος για την καταστροφή του συστήματος ή για το χρήστη. Για την αποφυγή αστοχιών στο σύστημα χρησιμοποιούνται διάφοροι μηχανισμοί ασφαλείας, όπως είναι η

καταναγκαστική διακοπή της λειτουργίας του συστήματος, εάν ξεπεραστούν κάποια όρια ασφαλείας ή η χρήση προειδοποιητικών λυχνιών για την ένδειξη πιθανής βλάβης στο σύστημα.

Η προσομοίωση συστημάτων παίζει σημαντικό ρόλο στην βελτιστοποίηση τους. Η βελτιστοποίηση ενός συστήματος μπορεί να περιλαμβάνει την ελαχιστοποίηση παραμέτρων όπως είναι το κόστος, το βάρος και η κατανάλωση καυσίμου, ή την μεγιστοποίηση ποσοτήτων όπως η απόδοση, η έξοδος του συστήματος (π.χ. ώση) και τα έσοδα από την λειτουργία του συστήματος. Οποιοδήποτε και αν είναι το κριτήριο της βελτιστοποίησης, είναι σημαντικό οι μεταβλητές να βρίσκονται μέσα σε συγκεκριμένο εύρος, καθορισμένο από τους φυσικούς περιορισμούς. Για την βελτιστοποίηση χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές ανάλογα με το είδος του προβλήματος.

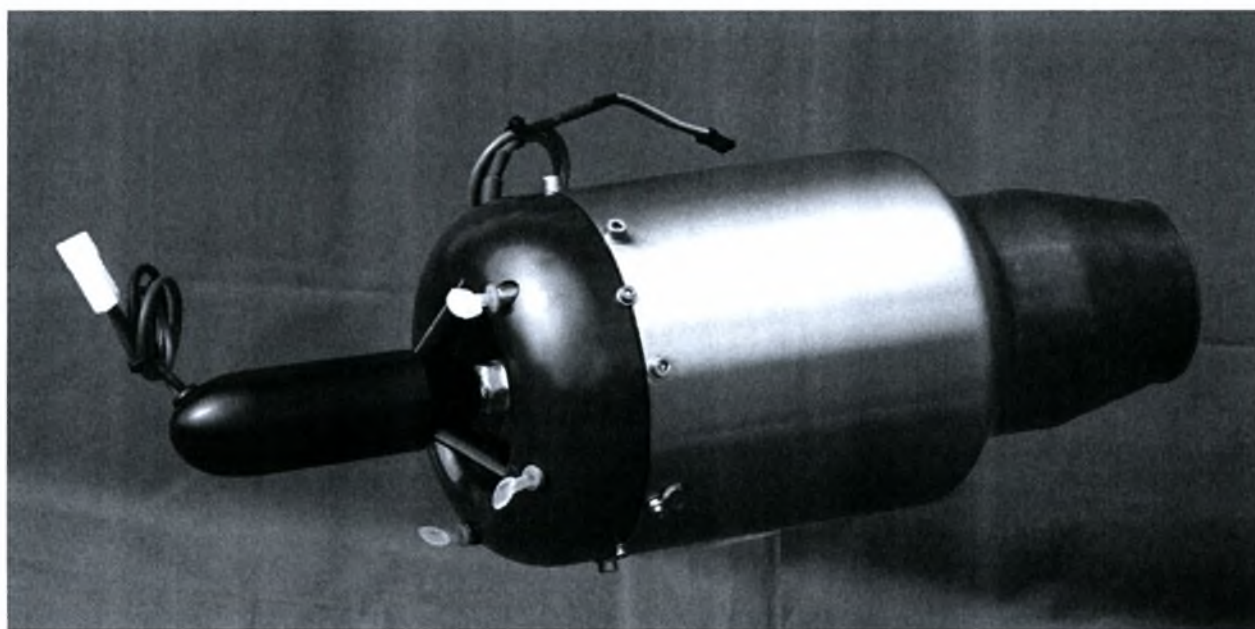
Άλλη μία σημαντική χρήση της προσομοίωσης είναι για διορθώνει ελαττώματα σε ήδη υπάρχοντα συστήματα και να βελτιώνει τη λειτουργία τους. Αντί να τροποποιηθεί ένα συγκεκριμένο σύστημα για διορθωθεί ένα ελάττωμα ή να βελτιωθεί το σύστημα, χρησιμοποιείται, σε πρώτη προσέγγιση, η προσομοίωση για να καθοριστεί το αποτέλεσμα αυτής της τροποποίησης. Αφού η προσομοίωση αποτελεί μια προσέγγιση του πραγματικού φυσικού συστήματος, η χρησιμότητα της στην πραγματοποίηση αλλαγών είναι μεγάλη γιατί προβλέπεται η συμπεριφορά του συστήματος χωρίς αυτό να επηρεαστεί καθόλου. Για παράδειγμα μπορούμε να δούμε τη επιρροή θα έχει στην ώση που παράγει ένας αεροστρόβιλος, η μεταβολή της γωνίας των πτερυγίων του στροβίλου.

Ένα ερώτημα που υπάρχει συχνά στο σχεδιασμό είναι η επιρροή μιας συγκεκριμένης παραμέτρου στη συμπεριφορά του συστήματος. Για παράδειγμα, εάν σε ένα αεροστρόβιλο η απομάστευση από το συμπιεστή μεταβάλλεται ποια θα είναι το αποτέλεσμα στη συνολική συμπεριφορά του συστήματος. Τέτοιου είδους ερωτήματα σχετικά με την ευαισθησία της συμπεριφοράς του συστήματος σε μεταβολές των παραμέτρων σχεδιασμού είναι σημαντικές από πρακτική άποψη. Μεγάλη μείωση του κόστους του συστήματος μπορεί να πραγματοποιηθεί με μικρές αλλαγές στο σχεδιασμό με στόχο τη χρήση τυποποιημένων εξαρτημάτων. Σωλήνες και κοχλίες είναι συνήθως διαθέσιμοι σε τυποποιημένες διαστάσεις και εάν χρησιμοποιηθούν στο σύστημα το κόστος μειώνεται αρκετά. Η προσομοίωση χρησιμοποιείται για να καθοριστεί η ευαισθησία της συμπεριφοράς του συστήματος σε συγκεκριμένες μεταβλητές και να κριθεί αν μπορούν να γίνουν μικρές τροποποιήσεις με σκοπό τη μείωση του κόστους χωρίς να επηρεαστεί αρκετά η συμπεριφορά του συστήματος.

1.2 Περιγραφή κινητήρα Olympus HP ES

Ο κινητήρας Olympus κατασκευάζεται στην Ολλανδία από την εταιρεία AMT (Advanced Micro Turbines) [14]. Πρόκειται για μια μικρογραφία αεροπορικού κινητήρα τύπου turbojet (στροβιλοαντιδραστήρα) που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ώσης σε μοντέλα αεροσκαφών. Μια φωτογραφία του κινητήρα φαίνεται στην εικόνα

Ο κινητήρα Olympus HP αποτελείται από ένα ακτινικό συμπιεστή και ένα αξονικό στρόβιλο. Ο θάλαμος καύσης είναι δακτυλιοειδής και η τροφοδοσία του καυσίμου γίνεται από ένα χαμηλής πίεσης σύστημα καυσίμου που έχει αναπτύξει η κατασκευάστρια εταιρεία, το οποίο χρησιμοποιεί τα έδρανα κύλισης του άξονα περιστροφής για να εισάγει το καύσιμο στο θάλαμο καύσης. Το καύσιμο διακινείται από μια γρναζωτή αντλία η οποία αποτελείται από δυο οδοντωτούς τροχούς που περιστρέφονται μέσα σε ένα ειδικά διαμορφωμένο κέλυφος.



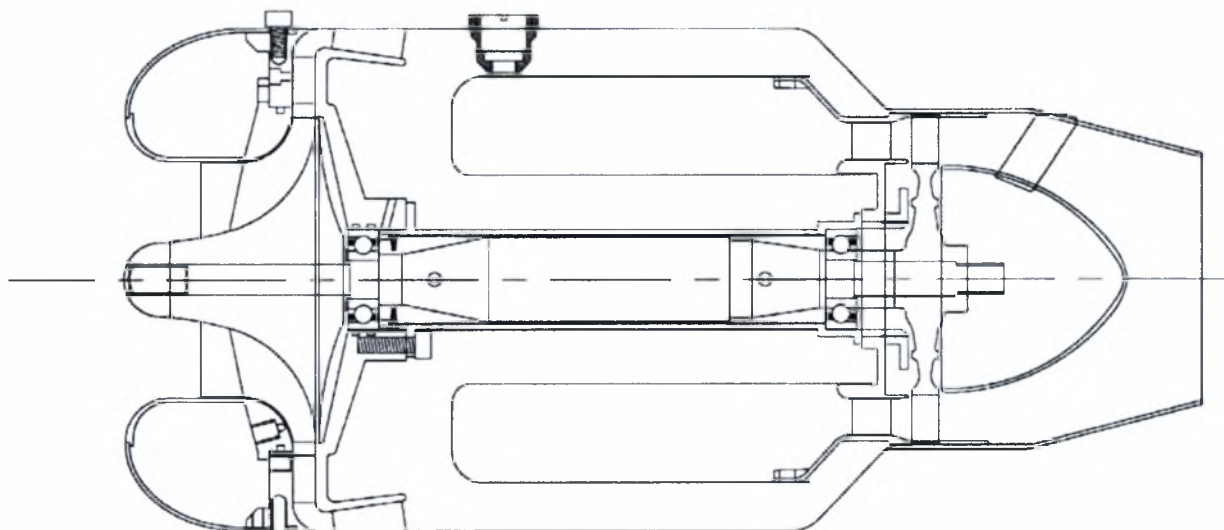
Σχήμα 1.2. Ο κινητήρα Olympus HP ES

Για την λειτουργία της μηχανής μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι τύποι καυσίμων όπως φαίνεται παρακάτω.

Τύπος καυσίμου

- | | | |
|----|-----------------|--|
| 1. | JP-4 / Kerosene | Χρησιμοποιείται στα στρατιωτικά αεροσκάφη |
| 2. | Paraffin | Χρησιμοποιείται στις θερμάστρες πετρελαίου |
| 3. | Jet A-1 | Χρησιμοποιείται στα πολιτικά αεροσκάφη |
| 4. | White spirit | Χρησιμοποιείται ως διαλυτικό χρωμάτων |

Στο δοκιμαστήριο του κινητήρα που εγκαταστάθηκε στο εργαστήριο, εξ' αρχής χρησιμοποιήθηκε ως καύσιμο paraffin, γνωστό και ως φωτιστικό πετρέλαιο, του οποίου η σύσταση είναι παραφινική και έχει ιδιότητες παρόμοιες με τα αεροπορικά καύσιμα.



Σχήμα 1.3. Ο κινητήρας Olympus σε τομή

Η μηχανή προστατεύεται από εσφαλμένη χρήση από ένα μικροεπεξεργαστή, που θα αναφέρεται από εδώ και στο εξής ως ECU (Engine Control Unit), ο οποίος καθορίζει τα όρια λειτουργίας της μηχανής. Η ECU είναι πλήρως αυτοματοποιημένη και δεν χρειάζεται ρύθμιση από το χρήστη. Πάνω σε αυτή συνδέονται όλα τα εξαρτήματα που συνοδεύουν την μηχανή και συμβάλουν στην λειτουργία της. Τροφοδοτείται από μια συστοιχία δέκα επαναφορτιζόμενων μπαταριών NiCad, συνολικής τάσης 12 Volt (1700 Mah). Η ECU ελέγχει την κατάσταση της μηχανής 'διαβάζοντας' συνεχώς τις στροφές και την θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων. Επίσης πραγματοποιεί και την διαδικασία εκκίνησης του κινητήρα. Ως εισόδους από τον χρήστη δέχεται

το επίπεδο ισχύος (throttle level) και την κατάσταση της μηχανής (Running position, Auto-Stop, Stop). Οι παράμετροι αυτοί καθορίζονται από τη χειριστήριο (control box).

Παρά το γεγονός ότι η ECU ελέγχει την λειτουργία του κινητήρα, ο τρόπος ελέγχου που εφαρμόζει δεν είναι γνωστός στο χρήστη. Η μόνη δυνατότητα που δίνει στο χρήστη είναι, είτε μέσω του EDT (Engine Data Terminal) είτε μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή, την παρακολούθηση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα και της θερμοκρασίας καυσαερίων καθώς και ορισμένων μηνυμάτων που αφορούν την λειτουργία του κινητήρα και των εξαρτημάτων του.

Στις εδράσεις της ατράκτου της μηχανής υπάρχουν δυο έδρανα κύλισης (ρουλεμάν), το ένα μετά τον συμπιεστή και του άλλο πριν τον στρόβιλο, τα οποία λιπαίνονται με την διέλευση του καυσίμου διαμέσου των σφαιρών. Για το λόγο αυτό το καύσιμο πριν χρησιμοποιηθεί αναμιγνύεται με 4.5 % κ.ο. λιπαντικό Aeroshell 500 (λιπαντικό για αεροπορικούς κινητήρες). Το λιπαντικό φροντίζει για την λίπανση του κινητήρα κατά τις διαδικασίες εκκίνησης (start up) και τερματισμού (power-down sequence) της λειτουργίας. Όταν ξεκινήσει η διαδικασία τερματισμού, η ροή του καυσίμου διακόπτεται και το καύσιμο που υπάρχει μέσα στη μηχανή εξατμίζεται από την υψηλή θερμοκρασία που επικρατεί και επικάθεται σε όλες τις επιφάνειες. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιεί την λίπανση που απαιτείται για να είναι έτοιμος ο κινητήρας κατά την επομένη διαδικασία εκκίνησης.

Για την εκκίνηση της μηχανής χρησιμοποιείται αέριο για την προθέρμανση της το οποίο είναι προπάνιο. Το προπάνιο βρίσκεται σε μια φιάλη του εμπορίου υπό πίεση 4 bar. Η παροχή του αερίου ελέγχεται από μια ρυθμιστική βαλβίδα την οποία χειρίζεται η ECU. Η ανάφλεξη του προπανίου γίνεται με αναφλεκτήρα (μπουζί) ο οποίος λειτουργεί με ρεύμα τάσης 1.5 ή 2 Volts. Η τροφοδοσία και καύση του προπανίου γίνεται μέχρι τη στιγμή που η θερμοκρασία της μηχανής φτάσει μια συγκεκριμένη τιμή, από εκείνη την στιγμή και μετά η τροφοδοσία του αερίου διακόπτεται και αρχίζει η τροφοδοσία του καυσίμου στο θάλαμο καύσης.

Η εκκίνηση ακολουθεί ειδική διαδικασία, διότι ο αεροστρόβιλος δεν μπορεί να εκκινήσει με μια απλή έγχυση και ανάφλεξη του καυσίμου. Αρχικά, ενεργοποιείται η μίζα και αρχίζει να περιστρέφει τον κινητήρα, όταν η ταχύτητα περιστροφής φτάσει την κατάλληλη τιμή η μίζα σταματάει και ανοίγει η βαλβίδα του προπανίου. Διοχετεύεται προπάνιο μέσα στο κινητήρα και αναφλέγεται με την ενεργοποίηση του αναφλεκτήρα. Στη συνέχεια ενεργοποιείται ξανά η μίζα για την επιτάχυνση της μηχανής, κλείνει η βαλβίδα του προπανίου και απενεργοποιείται ο

αναφλεκτήρας. Κατόπιν ξεκινάει να λειτουργεί η αντλία καυσίμου και μετά από λίγο χρονικό διάστημα αφού ανέβουν αρκετά οι στροφές, σταματάει η μίζα. Από αυτό το σημείο και μετά η μηχανή μπορεί να διατηρεί από μόνη της την περιστροφή της. Βέβαια προτού φτάσουν οι στροφές στο ρελαντί γίνεται μια βαθμονόμηση της ECU ανεβάζοντας τις στροφές της μηχανής σε 50000 RPM, που είναι το σημείο αναφοράς, για 5 δευτερόλεπτα περίπου. Μετά από αυτή την βαθμονόμηση μειώνονται οι στροφές στο ρελαντί (36000 RPM) και η μηχανή είναι έτοιμη προς χρήση.

2. Παρακολούθηση λειτουργίας

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η παρακολούθηση του κινητήρα Olympus HP στο εργαστήριο. Αρχικά δίνονται κάποια στοιχεία για τον τρόπο παρακολούθησης αεροπορικών κινητήρων σε δοκιμαστήρια. Κατόπιν γίνεται θεωρητικός υπολογισμός του κύκλου λειτουργίας με την βοήθεια πληροφοριών που είναι γνωστές από την κατασκευάστρια εταιρία. Παρουσιάζονται τα μετρούμενα μεγέθη, τα χρησιμοποιούμενα όργανα μέτρησης και η αρχή λειτουργίας τους. Γίνεται περιγραφή του δοκιμαστηρίου και της πειραματικής διάταξης. Και τέλος περιγράφεται ο τρόπος πρόσκτησης δεδομένων με την βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή.

2.1 Τρόποι παρακολούθησης λειτουργίας

Κατά την παρακολούθηση της λειτουργίας μιας μηχανής προκύπτει μεγάλος όγκος δεδομένων από τις μετρήσεις που γίνονται [7,8]. Οι πληροφορίες αυτές πρέπει να συλλεχτούν, να επεξεργαστούν και να αποθηκευτούν. Στις πρώτες εγκαταστάσεις αεροστροβίλων οι μετρήσεις πραγματοποιούνταν με αναλογικά όργανα (π.χ. σωλήνας Bourdon για την μέτρηση της πίεσης) και η ανάγνωση και καταγραφή των ενδείξεων γινόταν από τους χειριστές της

μηχανής. Όπως γίνεται αντιληπτό αυτό είχε ως αποτέλεσμα να μη γίνονται αρκετά ακριβείς μετρήσεις λόγω των σφαλμάτων ανάγνωσης της κλίμακας των αναλογικών οργάνων και επιπλέον οι μετρήσεις αυτές να είναι περιορισμένες σε αριθμό. Η επεξεργασία και παρουσίαση αυτών των μετρήσεων ήταν μια χρονοβόρα διαδικασία αφού γινόταν χειρωνακτικά.

Με την εξέλιξη της ηλεκτρονικής και την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών κατασκευάστηκαν ηλεκτρονικά όργανα μέτρησης τα οποία «συνεργάζονται» με Η/Υ και είναι πιο ακριβή. Αυτό είχε ως επακόλουθο να αυξηθεί ο όγκος των πληροφοριών και να βελτιωθεί η ακρίβεια των μετρήσεων. Η επεξεργασία και παρουσίαση όλων των δεδομένων μπορεί να γίνει σε ελάχιστο χρόνο με τη βοήθεια των Η/Υ.

Η επεξεργασία των μετρήσεων μπορεί να γίνει είτε ταυτόχρονα (on-line) με την διαδικασία της δοκιμής είτε ετεροχρονισμένα (off-line), δηλαδή μετά το τέλος της δοκιμής.

Η on-line επεξεργασία έχει το πλεονέκτημα ότι παρουσιάζει απ' ευθείας στο χειριστή τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των μετρήσεων για την κατάσταση της λειτουργίας της μηχανής. Ο χειριστής με αυτό τον τρόπο έχει την δυνατότητα να επέμβει άμεσα στον τρόπο λειτουργίας της μηχανής και να κάνει τις ενέργειες που απαιτούνται. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων μπορεί να γίνει με ευδιάκριτο και κατανοητό τρόπο χρησιμοποιώντας γραφήματα και ενδείκτες. Το μειονέκτημα που παρουσιάζει η on-line επεξεργασία είναι ότι απαιτείται μεγάλη υπολογιστική ισχύ για την συλλογή και ταυτόχρονη επεξεργασία δεδομένων.

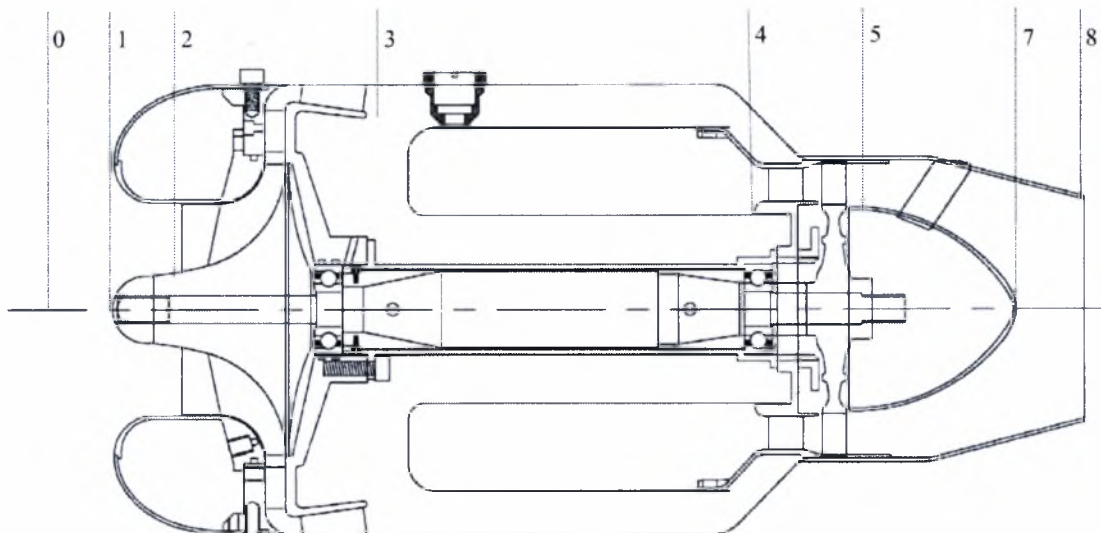
Όσον αφορά την off-line επεξεργασία δεν υπάρχει περιορισμός στον χρόνο της επεξεργασίας των μετρήσεων κάτι που δίνει την δυνατότητα για καλύτερη και σε βάθος, επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

2.2 Παρακολούθηση κινητήρα Olympus HP ES στο εργαστήριο

Ο κινητήρας Olympus HP ES είναι τοποθετημένος σε ειδική βάση που διαμορφώθηκε για τους πειραματικούς σκοπούς του εργαστηρίου. Πάνω στον κινητήρα είναι τοποθετημένα τα αισθητήρια όργανα που χρησιμεύουν για την παρακολούθηση της λειτουργίας του. Η παρακολούθηση της λειτουργίας γίνεται με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή ο οποίος χρησιμοποιεί κατάλληλο λογισμικό για το σκοπό αυτό. Το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα στο

χρήστη για την on-line επεξεργασία και απεικόνιση των μετρούμενων μεγεθών. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσης των μετρήσεων για περαιτέρω επεξεργασία.

Για την διευκόλυνση του αναγνώστη χρησιμοποιούνται κάποιοι δείκτες για να υποδηλώσουν τη θέση μιας διατομής κατά μήκος μιας μηχανής. Οι δείκτες αυτοί είναι τυποποιημένοι και είναι σύμφωνα με το πρότυπο SAE AS755 [33]. Η αρίθμηση των θέσεων φαίνεται στο σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1. Αρίθμηση θέσεων στον κινητήρα Olympus.

2.3 Προκαταρκτικοί υπολογισμοί κύκλου λειτουργίας

Στην ενότητα αυτή επιχειρείται η μελέτη του κύκλου λειτουργίας του κινητήρα σε θεωρητικό επίπεδο [15,32]. Ο σκοπός αυτής της προκαταρκτικής μελέτης είναι για να υπολογιστούν κατά προσέγγιση οι τιμές των μεγεθών που θα προκύψουν κατά την πειραματική διαδικασία. Αυτά τα μεγέθη χαρακτηρίζουν την λειτουργία του κινητήρα και θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την κατασκευή του δοκιμαστηρίου και την επιλογή των οργάνων μέτρησης.

Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιούνται τα στοιχεία που δίνει ο κατασκευαστής στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας. Το ονομαστικό σημείο λειτουργίας είναι αυτό που ο κινητήρας αναπτύσσει την μέγιστη τιμή της ώσης του και έχει το μεγαλύτερο θερμικό βαθμό απόδοσης.

Οι υπολογισμοί έγιναν με την βοήθεια του προγράμματος MS Excel – Solver. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με την μορφή γραφημάτων στην ενότητα 2.3.2.

2.3.1 Μεθοδολογία – Χρησιμοποιούμενες σχέσεις – Παραδοχές

Όπως είναι γνωστό οι απόδοση και η λειτουργία μιας μηχανής εξαρτάται από τις συνθήκες (θερμοκρασία, πίεση και υγρασία) που επικρατούν στον περιβάλλοντα χώρο. Για τους υπολογισμούς που ακολουθούν δεν λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της υγρασίας, ενώ οι εξωτερικές συνθήκες λαμβάνονται ίσες με τις πρότυπες. Δηλαδή:

- Θερμοκρασία περιβάλλοντος: $T_0 = 288\text{K}$
- Πίεση περιβάλλοντος: $P_0 = 1.013\text{ bar}$

Τα στοιχεία του ονομαστικού σημείου λειτουργία που δίνει η κατασκευάστρια εταιρεία είναι:

- Λόγος πίεσης συμπίεστή: $PR_{\text{comp}} = 3.8$
- Μαζική ροή αναρροφούμενου αέρα: $\dot{m}_a = 0.45\text{ kg/s}$
- Κατανάλωση καυσίμου: $\dot{m}_f = 0.01067\text{ kg/s}$
- Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων: $T_{t8} = 973\text{ K}$

Σε υπολογισμούς που γίνονται για αεροστροβίλους, συνήθως ενδιαφέρουν οι τιμές των ολικών πιέσεων και θερμοκρασιών, που εκφράζουν το ενεργειακό περιεχόμενο του εργαζόμενου μέσου που διέρχεται από τον κινητήρα. Για τον υπολογισμό των στατικών μεγεθών απαιτείται η γνώση των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων, που μπορούν να εκφραστούν με το λόγο ειδικών θερμοχωρητικοτήτων, το γ , και του αριθμού Mach στη διατομή υπολογισμού, όπως στις παρακάτω εξισώσεις για την συμπίεστη ροή:

$$\frac{T_t}{T} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \quad (2.1)$$

$$\frac{P_t}{P} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (2.2)$$

Σε μια διατομή ο αριθμός Mach και η ταχύτητα του ρευστού δίνονται από τις σχέσεις:

$$M = \frac{V}{\sqrt{\gamma RT}} \quad (2.3)$$

$$V = \frac{\dot{m}}{\rho A} \quad (2.4)$$

Από τις προηγούμενες σχέσεις και με την βοήθεια της καταστατικής εξίσωσης, $P = \rho RT$, προκύπτει η σχέση που συνδέει τον αριθμό Mach με τα ολικά μεγέθη της ροής σε μια δεδομένη διατομή.

$$\dot{m} = \frac{A \cdot P_t}{\sqrt{T_t}} \sqrt{\frac{\gamma}{R}} M \left[1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right]^{\frac{1+\gamma}{2(1-\gamma)}} \quad (2.5)$$

Για τον υπολογισμό του αριθμού Mach από αυτή τη σχέση απαιτούνται η μαζική ροή, οι ολικές συνθήκες της ροής, οι θερμοδυναμικές ιδιότητες του ρευστού στις συνθήκες της διατομής και το εμβαδό της διατομής. Από το σκαρίφημα της μηχανής που διαθέτει ο κατασκευαστής, μετρώνται απ' ευθείας η εσωτερική και εξωτερική ακτίνα των δακτυλιοειδών διατομών και υπολογίζεται το εμβαδόν τους. Τα δεδομένα αυτά φαίνονται στον πίνακα 2.1. Η αρίθμηση έγινε σύμφωνα με το σχήμα 2.1.

Για την πραγματοποίηση των προκαταρκτικών υπολογισμών των συνιστωσών του κινητήρα χρησιμοποιούνται εκτιμήσεις των βαθμών απόδοσης τους, με βάση την υπάρχουσα τεχνολογία και λαμβάνοντας πάντοτε υπόψη ότι οι στροβιλομηχανές μικρού μεγέθους έχουν χαμηλούς βαθμούς απόδοσης [41]. Επίσης, υποτίθενται τυπικές τιμές για τις απώλειες πίεσεως στους αγωγούς εισόδου και εξόδου του κινητήρα. Όλες οι παραπάνω παράμετροι παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 2.2. Πρέπει να σημειωθεί ότι στις περισσότερες περιπτώσεις,

οι εκτιμήσεις των μεγεθών είναι συντηρητικές, ώστε οι εκτιμώμενες επιδόσεις να μην είναι υψηλότερες από τις πραγματικές, οι οποίες θα προσδιοριστούν με τη διεξαγωγή δοκιμών.

Διατομή	Εξωτερική ακτίνα (mm)	Εσωτερική ακτίνα (mm)	Εμβαδό Διατομής (mm ²)
1	40	0	5027
2	30	11	2447
3	63	53	3644
4	39	30	1951
5	40	29	2384
7	35	0	3848
8	32	0	3117

Πίνακας 2.1. Εμβαδά διατομών κινητήρα.

Πτώση πίεσης στον αγωγό εισόδου, r_d	0.99
Ισεντροπικός β.α. συμπίεστή, $\eta_{is, comp}$	0.60
Ισεντροπικός β.α. στροβίλου, $\eta_{is, turb}$	0.70
Β.α. θαλάμου καύσης, η_b	0.80
Συντελεστής απωλειών ολικής πίεσης στον θ.κ., PR_{burn}	0.99
Μηχανικός β.α., η_m	0.98
Ισεντροπικός β.α. ακροφυσίου, $\eta_{is, noz}$	0.95

Πίνακας 2.2 Χρησιμοποιούμενες τιμές παραμέτρων λειτουργίας του κινητήρα.

Ακόμα για την θερμογόνο δύναμη του καυσίμου και την ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα και των καυσαερίων χρησιμοποιούνται αντίστοιχα οι τυπικές τιμές: $LHV = 43.1 \text{ MJ/kg}$, $C_{p_a} = 1.005 \text{ KJ/kg.K}$ και $C_{p_g} = 1.150 \text{ KJ/kg.K}$.

Οι μαθηματικές σχέσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του κύκλου λειτουργίας του κινητήρα είναι τυπικές εξισώσεις που εφαρμόζονται σε θερμικές στροβιλομηχανές και η απόδειξη τους μπορεί να βρεθεί στη σχετική βιβλιογραφία. Εδώ

εμφανίζονται με τη μορφή και με τη σειρά που χρησιμοποιήθηκαν, κατά συνιστώσες του κινητήρα.

1. Αγωγός εισόδου

$$T_{t2} = T_{t1} = T_0 \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_0^2 \right) \quad (2.6)$$

$$P_{t2} = r_d P_{t0} = r_d P_0 \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_0^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (2.7)$$

2. Συμπιεστής

$$P_{t3} = PR_c \cdot P_{t2} \quad (2.8)$$

$$T_{t3} = T_{t2} \left[1 + \frac{1}{\eta_{is,comp}} \left(PR_{comp}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \right] \quad (2.9)$$

3. Θάλαμος καύσης

$$FAR = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} \quad (2.10)$$

$$P_{t4} = PR_{burn} \cdot P_{t3} \quad (2.11)$$

$$T_{t4} = \frac{FAR \cdot \eta_b \cdot HV + Cp_a \cdot T_{t3}}{(1 + FAR)Cp_g} \quad (2.12)$$

4. Στρόβιλος

$$T_{t5} = T_{t4} - \frac{1}{\eta_m} \frac{1}{(1+f)} \frac{Cp_a}{Cp_g} (T_{t3} - T_{t2}) \quad (2.13)$$

$$P_{t5} = P_{t4} \left[1 - \frac{1}{\eta_{is,turb}} \left(1 - \frac{T_{t5}}{T_{t4}} \right) \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (2.14)$$

5. Ακροφύσιο

Για την εξέταση της συμπεριφοράς του ακροφυσίου, πρέπει να γνωρίζουμε αν αυτό είναι στραγγαλισμένο ή όχι, διότι η λειτουργία του ακροφυσίου επηρεάζει έντονα την ώση που επιτυγχάνει ο κινητήρας. Για το λόγο αυτό υπολογίζεται ο κρίσιμος λόγος πίεσης ακροφυσίου, από τη σχέση

$$PR_{cr} = \frac{P_{t7}}{P_8} = \left(1 - \frac{1}{\eta_{is,noz}} \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (2.15)$$

Αν ο λόγος πίεσης του ακροφυσίου (P_{t7}/P_8) είναι μεγαλύτερος του κρίσιμου, τότε το ακροφύσιο είναι στραγγαλισμένο και η πίεση εξόδου είναι ανάλογη της ολικής πίεσης στην είσοδο του ακροφυσίου και μεγαλύτερη της πίεσης περιβάλλοντος. Κατά συνέπεια, ο όρος ($P_8 - P_0$) στη σχέση της ώσης θα πρέπει να ληφθεί υπόψη

6. Χαρακτηριστικές ποσότητες

Τέλος υπολογίζονται και ορισμένες χαρακτηριστικές ποσότητες, ενδεικτικές της λειτουργίας της μηχανής. Συγκεκριμένα υπολογίζονται:

- Ώση

$$F = \dot{m}_a [(1 + FAR)V_8 - V_0] + \left(1 - \frac{P_0}{P_8} \right) \dot{m}_g \frac{RT_8}{V_8} \quad (2.16)$$

- Ειδική ώση

$$F_s = \frac{F}{\dot{m}_a} = (1 + FAR)V_8 - V_0 + \left(1 - \frac{P_0}{P_8}\right) \frac{\dot{m}_e}{\dot{m}_a} \frac{RT_8}{V_8} \quad (2.17)$$

- Λόγος πίεσης στροβίλου

$$PR_{\text{turb}} = \frac{P_{t4}}{P_{t5}} \quad (2.18)$$

- Λόγος πίεσης ακροφυσίου

$$PR_{\text{noz}} = \frac{P_{t7}}{P_8} \quad (2.19)$$

2.3.2 Αποτελέσματα και σχολιασμός αποτελεσμάτων

Στο πίνακα 2.3 παρουσιάζονται βασικά μεγέθη και παράμετροι τις λειτουργίας του κινητήρα, που προέκυψαν από τα δεδομένα που δίνει ο κατασκευαστής για το ονομαστικό σημείο λειτουργίας.

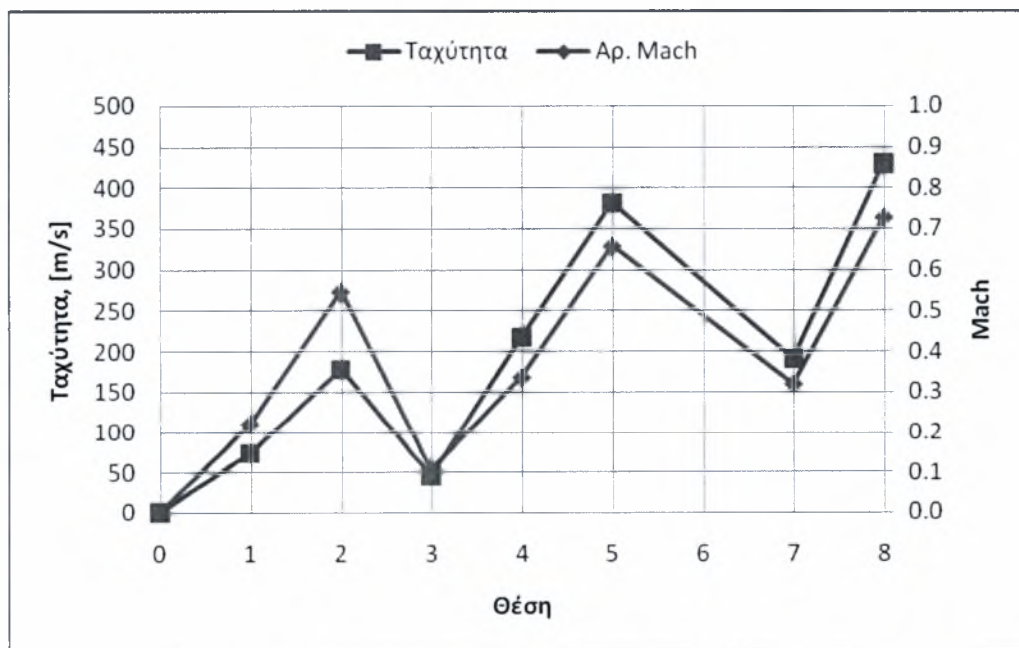
Ωση, F (N)	198.30
Ειδική ώση, Fs (N/kg)	277.44
Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων (EGT), T _{t8} (K)	935.24
Λόγος πίεσης στροβίλου, PR _{turb}	2.6453
Κρίσιμος λόγος πίεσης ακροφυσίου, PR _{noz.cr}	1.9304
Λόγος πίεσης ακροφυσίου, PR _{noz}	1.4079
Λόγος καυσίμου-αέρα, FAR	0.0237
Αριθμός Mach στην έξοδο, M ₈	0.4583
Ταχύτητα εξόδου καυσαερίων, V ₈ (m/s)	430.46

Πίνακας 2.3. Παράμετροι επιδόσεων στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας

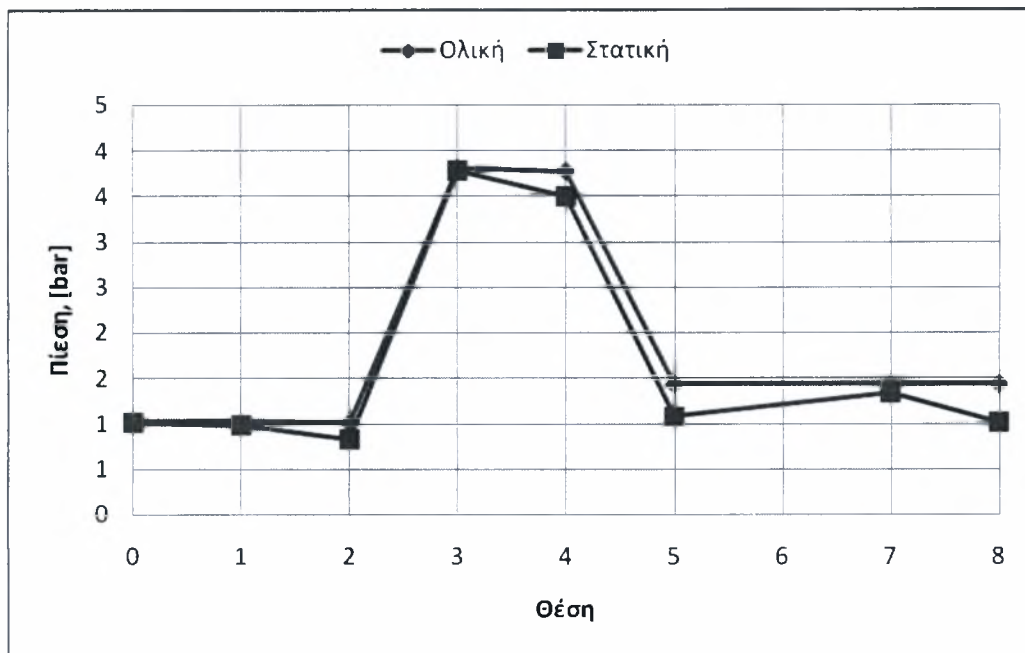
Ένα αποτέλεσμα που προκύπτει παρατηρώντας τον παραπάνω πίνακα είναι ότι η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων είναι μικρότερη κατά 35 K από αυτή που δίνει ο κατασκευαστής. Πρόκειται για απόκλιση που οφείλεται κυρίως στην επιλογή χαμηλού βαθμού απόδοσης του θαλάμου καύσης (πίνακας 2.2). Η επιλογή αυτή της τιμής έγινε, διότι στην υπάρχουσα βιβλιογραφία, οι θάλαμοι καύσης τέτοιας κλίμακας στροβιλομηχανών έχουν απόδοση που κυμαίνεται μεταξύ 70-80% [10]. Ακόμα η τιμή της ώσης υπολογίστηκε 198 N που είναι πολύ χαμηλότερη από αυτή που δίνει ο κατασκευαστής. Ο λόγος αυτή της απόκλισης δεν μπορεί να εξηγηθεί στην παρούσα φάση των προκαταρκτικών υπολογισμών.

Επιπλέον ο λόγος πίεσης του ακροφυσίου είναι μικρότερος του κρίσιμου. Αυτό σημαίνει ότι το ακροφύσιο δεν είναι στραγγαλισμένο και η πίεση στην έξοδο του είναι ατμοσφαιρική.

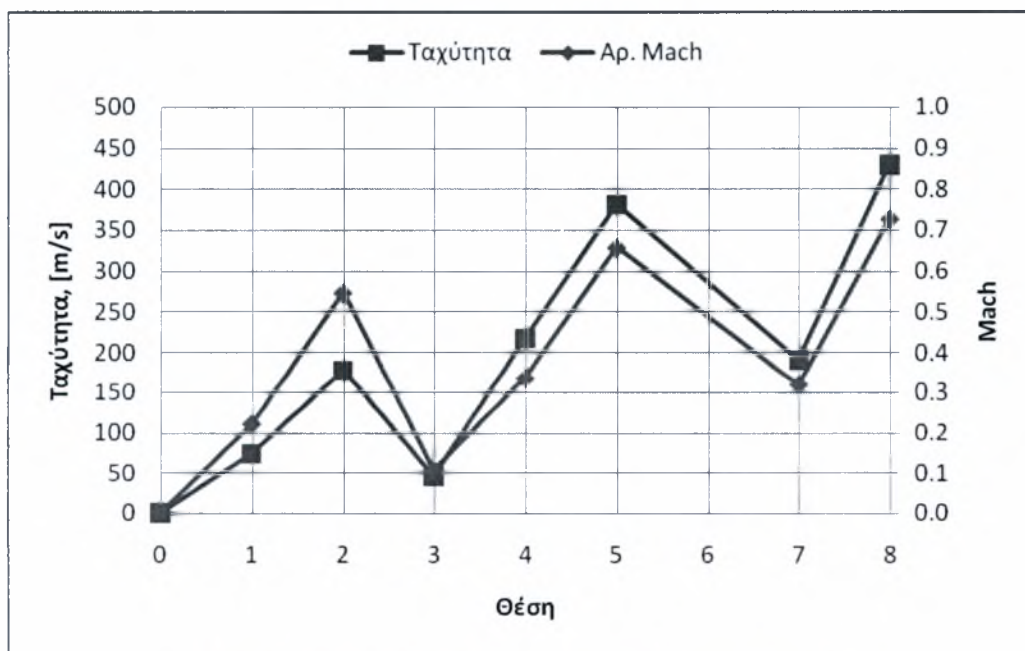
Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι κατανομές ολικής και στατικής θερμοκρασίας και ολικής και στατικής πίεσης καθώς και οι κατανομές της ταχύτητα και του αριθμού Mach κατά μήκος της διαδρομής του εργαζόμενου μέσου. Η αρίθμηση των θέσεων έγινε σύμφωνα με το σχήμα 2.1



Σχήμα 2.2. Κατανομή ολικής και στατικής θερμοκρασίας κατά μήκος του κινητήρα.



Σχήμα 2.3. Κατανομή ολικής και στατικής πίεσης κατά μήκος του κινητήρα



Σχήμα 2.4. Κατανομή της ταχύτητας κατά μήκος του κινητήρα

2.4 Μετρούμενα μεγέθη και η σημασία τους

Όπως είναι γνωστό, για τον υπολογισμό του θερμοδυναμικού κύκλου λειτουργίας ενός κινητήρα Turbojet είναι απαραίτητη η γνώση των μεγεθών της πίεσης και της θερμοκρασίας στην είσοδο και έξοδο των συνιστωσών που απαρτίζεται όπως επίσης και οι βαθμοί απόδοσης αυτών. Επιπλέον απαιτείται και η γνώση των συνθηκών περιβάλλοντος καθώς και του αριθμού Mach της πτήσης. Όλες οι ποσότητες που αναφέρθηκαν προηγουμένως δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Αρκούν κάποιες από αυτές για τον υπολογισμό των υπολοίπων.

Στην περίπτωση του κινητήρα Olympus είναι δύσκολο να μετρηθούν όλες εκείνες οι παράμετροι που θα καθορίσουν πλήρως τον θερμοδυναμικό κύκλο λειτουργίας του. Διότι απαιτείται συνδυασμός σύνθετων μετρήσεων, οι οποίες στο συγκεκριμένο κινητήρα γίνονται αρκετά δύσκολα λόγω των μικρών διαστάσεων του. Για το λόγο αυτό οι βαθμοί απόδοσης των συνιστωσών που δεν συναλλάσσουν έργο (αγωγός εισόδου, θάλαμος καύσης, ακροφύσιο) εκτιμώνται με βάση το υπάρχον επίπεδο τεχνολογίας και την σχετική πείρα στο αντικείμενο. Ο μηχανικός βαθμός απόδοσης επίσης εκτιμάται σύμφωνα με την πείρα, ενώ οι βαθμοί απόδοσης συμπίεστή και στροβίλου προκύπτουν από επεξεργασία των μετρήσεων.

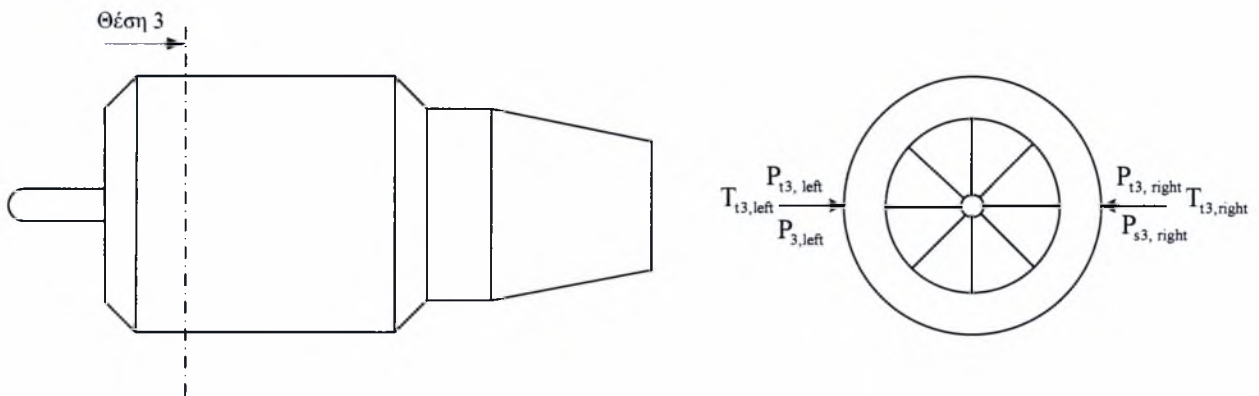
Η έκδοση του κινητήρα Olympus την οποία διαθέτει το ΕΘΘΜ, είναι τροποποιημένη με επιπλέον μετρητικά όργανα σε κατάλληλες θέσεις για τον ακριβή υπολογισμό του κύκλου λειτουργίας. Συγκεκριμένα, το περίβλημα του κινητήρα φέρει διατρήσεις με ειδική διαμόρφωση, για την τοποθέτηση αισθητηρίων θερμοκρασίας και πίεσης.

Οι θέσεις στις οποίες είναι τοποθετημένα τα επιπλέον μετρητικά όργανα περιγράφονται στις σελίδες που ακολουθούν. Η αρίθμηση των θέσεων έγινε υιοθετώντας αυτή του σχήματος 2.1.

2.4.1 Θέση 3

Η θέση με τον αριθμό 3 αντιστοιχεί στην έξοδο του συμπίεστή. Στη θέση αυτή έχουν τοποθετηθεί δυο θερμοστοιχεία σε αντιδιαμετρικές θέσεις τα οποία συμβολίζονται με $T_{t3, \text{left}}$ και $T_{t3, \text{right}}$. Επίσης σε αντιδιαμετρικές θέσεις έχουν τοποθετηθεί αισθητήρες για την μέτρηση της πίεσης. Στις θέσεις αυτές τόσο η στατική όσο και η ολική πίεση. Οι αισθητήρες συμβολίζονται

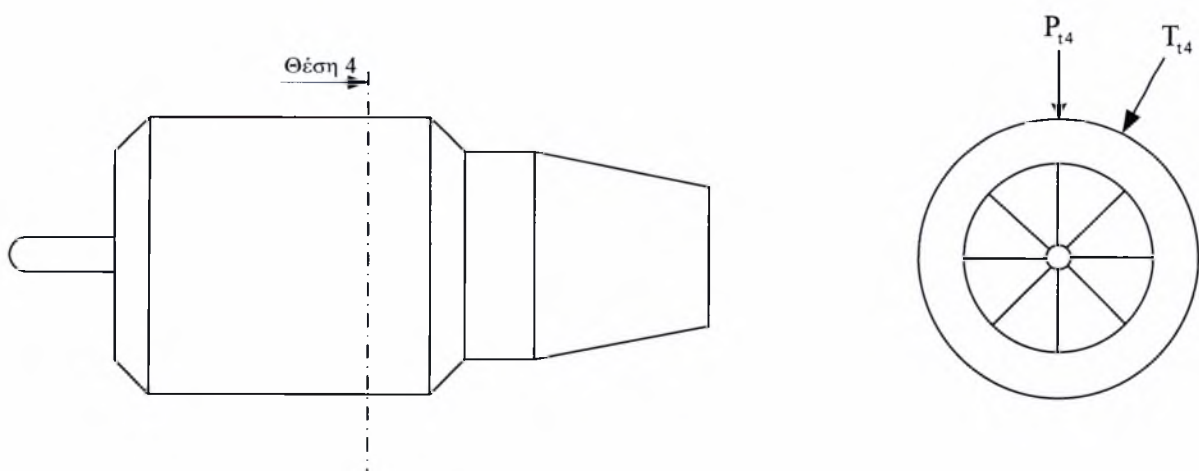
με $P_{t3, right}$, $P_{t3, left}$, $P_{s3, right}$, $P_{s3, left}$. Ένα σκαρίφημα όπου παρουσιάζονται όλα τα προηγούμενα αισθητήρια όργανα φαίνεται στο σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5. Τα όργανα μέτρησης στη θέση 3

2.4.2 Θέση 4

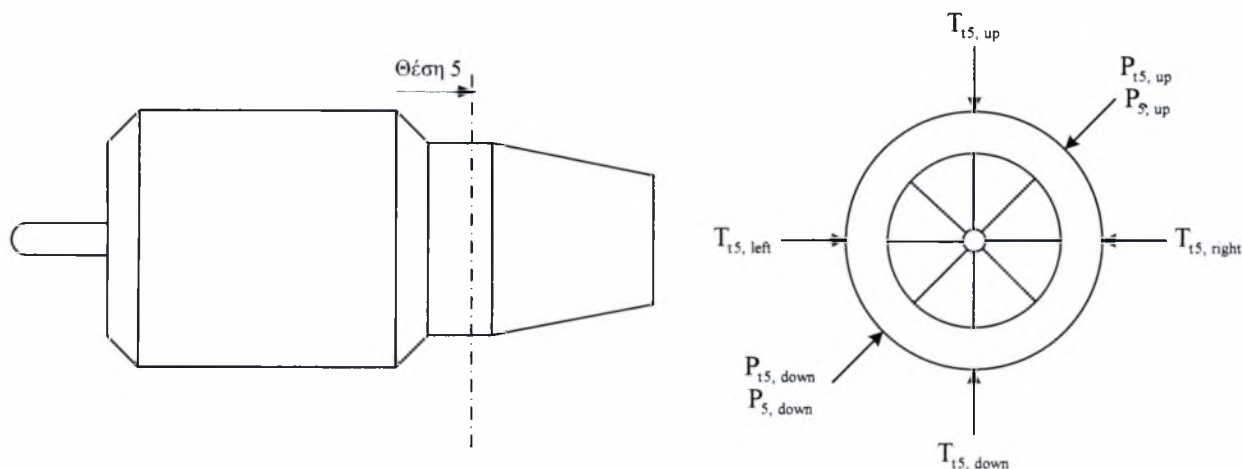
Η θέση με τον αριθμό 4 αντιστοιχεί στην έξοδο του θαλάμου καύσης. Στη θέση αυτή έχουν τοποθετηθεί δυο αισθητήρες, ένας για την πίεση και ένας για την θερμοκρασία οι οποίοι συμβολίζονται με P_{t4} και T_{t4} αντίστοιχα. Οι θέσεις όπου είναι τοποθετημένοι φαίνονται στο σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6. Τα όργανα μέτρησης στη θέση 4.

2.4.3 Θέση 5

Η θέση με τον αριθμό 5 αντιστοιχεί στην έξοδο του στροβίλου. Στη θέση αυτή έχουν τοποθετηθεί τέσσερα θερμοστοιχεία όπως φαίνεται στο σχήμα 2.7, τα οποία συμβολίζονται με $T_{t5, up}$, $T_{t5, down}$, $T_{t5, right}$, $T_{t5, left}$. Επιπλέον σε αντιδιαμετρικές θέσεις υπάρχουν αισθητήρες για την στατική και ολική πίεση και φέρουν τα διακριτικά $P_{t5, up}$, $P_{t5, down}$, $P_{5, up}$ και $P_{5, down}$.



Σχήμα 2.7. Τα όργανα μέτρησης στη θέση 5

2.5 Χρησιμοποιούμενα όργανα μέτρησης

Στις ενότητες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι βασικές αρχές λειτουργίας των οργάνων μέτρησης που χρησιμοποιούνται στον κινητήρα Olympus [27].

2.5.1 Μέτρηση της θερμοκρασίας

Στην πειραματική διάταξη του κινητήρα Olympus η μέτρηση της θερμοκρασίας γίνεται με την βοήθεια θερμοστοιχείων (thermocouples). Ένα θερμοστοιχείο ή αλλιώς θερμοζεύγος αποτελείται από δυο ανόμοια μέταλλα που συνδέονται μεταξύ τους και σχηματίζουν ένα κλειστό βρόχο. Όταν τα σημεία σύνδεσης των δύο μετάλλων βρίσκονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες προκαλείται ροή ρεύματος, με τιμή ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας. Εκτός από τη διαφορά της θερμοκρασίας, η τιμή του ρεύματος εξαρτάται και από τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται.

Το μέγεθος της ηλεκτρεγερτικής δύναμης (HEΔ) που αναπτύσσεται είναι μικρό, της τάξης των μερικών mV, το οποίο μπορεί να μετρηθεί με την βοήθεια ενός βολτόμετρου τοποθετημένου στο ψυχρό άκρο του κυκλώματος και να βαθμονομηθεί κατάλληλα η κλίμακα του σε τιμές θερμοκρασίας.

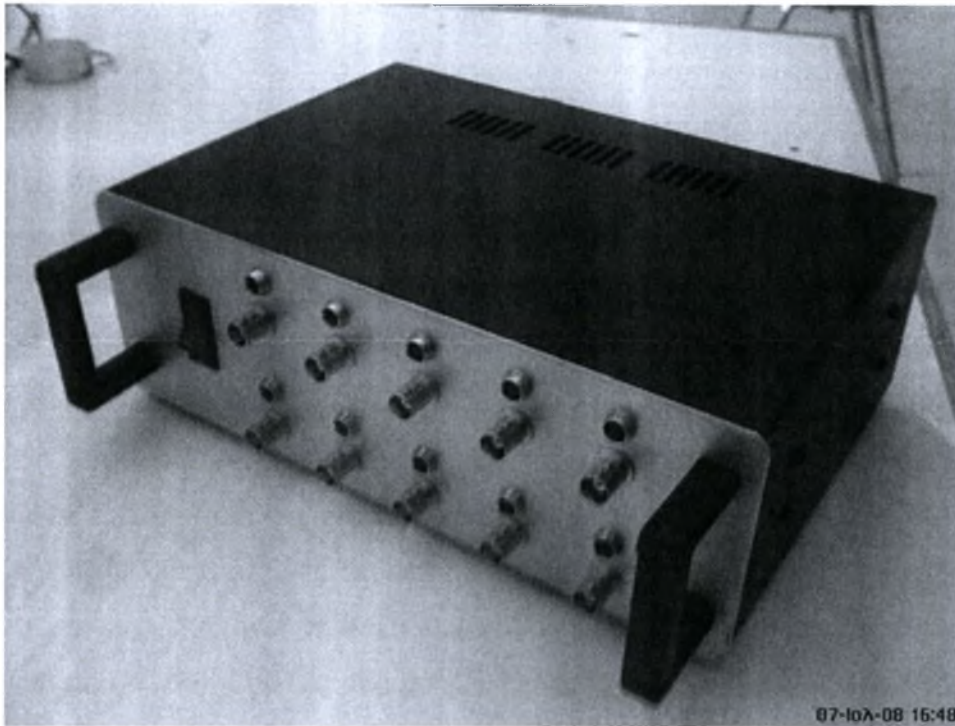
Για την λήψη αποτελεσμάτων ακριβείας, θα πρέπει η μία επαφή να διατηρείται σε σταθερή θερμοκρασία και έτσι να αποφεύγονται σφάλματα λόγω ολίσθησης. Η τελική HEΔ δεν επηρεάζεται από το μέγεθος των μεταλλικών αγωγών, το εμβαδό των επαφών και τον τρόπο σύνδεσης αυτών.

Τυπικά υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή θερμοστοιχείων είναι κράματα νικελίου-χρωμίου, νικελίου-αλουμινίου, χαλκού-νικελίου, λευκόχρυσου-ροδίου καθώς και καθαρά μέταλλα όπως είναι ο σίδηρος και ο χαλκός.

Κάποια από τα ζεύγη υλικών που χρησιμοποιούνται έχουν τυποποιηθεί. Έτσι έχουν προκύψει κάποιες κατηγορίες θερμοστοιχείων, που συνήθως έχουν ένα χαρακτηριστικό γράμμα, όπως είναι E, J, K, R κ.α., για να διακρίνονται. Ο λόγος που υπάρχουν τόσες πολλές κατηγορίες θερμοστοιχείων είναι γιατί κάθε τύπος έχει εφαρμογή σε συγκεκριμένο περιβάλλον λειτουργίας και εύρος θερμοκρασιών.

Τα θερμοστοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την μηχανή Olympus είναι τύπου K. Το υλικό κατασκευής τους είναι 90%Ni-10%Cr για το θετικό άκρο και 95%Ni-2%Si-2%Mn-1%Al για το αρνητικό άκρο. Το εύρος θερμοκρασιών που μπορεί να μετρήσει είναι από -200 °C έως 1100 °C το οποίο μπορεί να επεκταθεί μέχρι τους 1300 °C για μικρής διάρκειας μετρήσεις. Σε αυτό το εύρος θερμοκρασιών η HEΔ που αναπτύσσεται μεταξύ των επαφών του θερμοστοιχείου είναι γραμμική συνάρτηση της θερμοκρασίας. Αυτού του τύπου τα θερμοστοιχεία αντέχουν σε οξειδωτικά περιβάλλοντα όπως είναι αυτά των καυσαερίων των στροβιλοαντιδραστήρων. Επομένως τα θερμοστοιχεία που επιλέχθηκαν ικανοποιούν τις απαιτήσεις του δοκιμαστηρίου.

Επειδή στους ακροδέκτες των θερμοστοιχείων η τιμή της τάσης που αναπτύσσεται είναι πολύ μικρή, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, κρίνεται σκόπιμο το σήμα αυτό να ενισχυθεί έτσι ώστε να μπορεί να «διαβαστεί» από την συσκευή πρόσκτησης δεδομένων. Για τον σκοπό αυτό κατασκευάστηκε ο ενισχυτής που φαίνεται στο σχήμα 2.8. Το βασικό στοιχείο της διάταξης αυτής είναι το ολοκληρωμένο κύκλωμα – ενισχυτής AD595AQ το οποίο πραγματοποιεί την ενίσχυση του σήματος. Στοιχεία για τα χαρακτηριστικά του ολοκληρωμένου κυκλώματος μπορούν να βρεθούν στο παράρτημα Π8.



Σχήμα 2.8. Ο ενισχυτής των θερμοστοιχείων.

2.5.2 Μέτρηση της πίεσης

Η μέτρηση της πίεσης στις θέσεις 3, 4 και 5 του κινητήρα Olympus γίνεται με την βοήθεια μεταλλακτών πίεσης. Πάνω στον κινητήρα είναι τοποθετημένα τα αισθητήρια όργανα μέτρησης, τα οποία είναι μεταλλικοί σωλήνες, εσωτερικής διαμέτρου 1mm, κατασκευασμένοι από ανοξείδωτο χάλυβα για την θέση 3 και κράμα Inconel για τις θέσεις 4 και 5. Για την μέτρηση της στατικής πίεσης οι σωλήνες τοποθετούνται στο περίβλημα της μηχανής έτσι ώστε το άκρο τους να βρίσκεται πάνω στο όριο της διατομής για την οποία γίνεται η μέτρηση της πίεσης και να μην παρεμβάλλονται στο πεδίο ροής. Ενώ για την μέτρηση της ολικής πίεσης οι σωλήνες σχηματίζουν στο άκρο του ένα σωλήνα Pitot, ο οποίος παρεμβάλλεται στο πεδίο ροής. Οι αισθητήρες συνδέονται με του μεταλλάκτες με την βοήθεια πλαστικών σωλήνων.

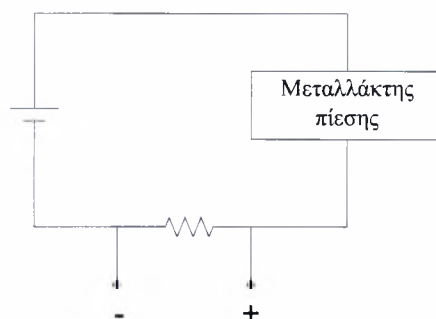
Υπάρχουν διάφορες αρχές με βάσει τις οποίες μεταβάλλεται η πίεση σε ηλεκτρικό ρεύμα. Αυτές είναι η μεταβολή της χωρητικότητας πυκνωτή, το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, η μεταβολή της αντίστασης. Βέβαια η επιλογή του είδους του αισθητήρα εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας και τις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής.

Στο δοκιμαστήριο που στήθηκε στο εργαστήριο χρησιμοποιήθηκαν μεταλλάκτες πίεσης που λειτουργούν με βάση το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Η ανίχνευση της πίεσης γίνεται με την μετατόπιση ενός λεπτού μεταλλικού διαφράγματος, το οποίο πιέζει τον πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο, καθώς παραμορφώνεται από τις μεταβολές τις πίεσης που δέχεται. Η ηλεκτρική τάση που αναπτύσσεται στα άκρα του κρυστάλλου είναι ανάλογη της μηχανικής τάσης και άρα της πίεσης. Το κύριο πλεονέκτημα που έχουν αυτού του τύπου οι μεταλλάκτες είναι η ταχεία απόκριση τους και το σχετικά μεγάλο εύρος λειτουργίας τους. Επίσης έχουν πολύ μεγάλη ευαισθησία, καλή ακρίβεια και επαναληψιμότητα, καθώς και χαμηλή υστέρηση.

Οι μεταλλάκτες που επιλέχθηκαν είναι οι A10 της WIKA (σχήμα 2.9) με εύρος μέτρησης 0-10bar. Μπορούν να τροφοδοτηθούν με συνεχές ρεύμα τάσης 8-30VDC. Όμως στην περίπτωση του δοκιμαστηρίου του Olympus επιλέχθηκε τροφοδοσία με τάση 9VDC που παρέχεται με κατάλληλο μετασχηματιστή. Οι μεταλλάκτες, χρησιμοποιούν ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα για την ρύθμιση του σήματος εξόδου. Η έξοδος του μεταλλάκτη είναι ρεύμα εντάσεως 4-20mA το οποίο μεταβάλλεται γραμμικά σε όλο το εύρος μέτρησης. Αλλά για να είναι εκμεταλλεύσιμη αυτή η έξοδος από την κάρτα ανάκτησης δεδομένων πρέπει να μετατραπεί σε τάση. Για να επιτευχθεί αυτό εισάγεται μια αντίσταση στο κύκλωμα τροφοδοσίας και μετράται η τάση στα άκρα της, η οποία είναι ανάλογη της πίεσης αφού η ένταση του ρεύματος του μεταλλάκτη είναι και αυτή ανάλογη της πίεσης. Η διαμόρφωση του κυκλώματος φαίνεται στο σχήμα



Σχήμα 2.9. Ο μεταλλάκτης πίεσης A-10 της WIKA



Σχήμα 2.10. Κύκλωμα σύνδεσης μεταλλάκτη πίεσης.

Περισσότερες πληροφορίες που αφορούν τους μεταλλάκτες πίεσης όπως είναι η ευαισθησία, ο χρόνος απόκρισης κ.α. μπορούν να βρεθούν στο παράρτημα Π10.

2.6 Περιγραφή δοκιμαστηρίου.

Για τις ανάγκες των δοκιμών στο εργαστήριο φτιάχτηκε ένα ειδική βάση πάνω στην οποία τοποθετήθηκε η κλίνη του κινητήρα. Πρόκειται για ένα ειδικό τραπέζι στο οποίο το ξύλινο μέρος συγκρατείται με ειδικές μεταλλικές γωνίες πάνω στο πλαίσιο του τραπεζιού. Πάνω στο επίπεδο του τραπεζιού τοποθετείται η κλίνη του κινητήρα, η οποία στερεώνεται στους ευθύγραμμους οδηγούς πάνω στους οποίους μετακινείται. Επιπλέον δίπλα από την κλίνη του κινητήρα είναι τοποθετημένοι οι μεταλλάκτες πίεσης, οι ενισχυτές των θερμοστοιχείων, η κάρτα πρόσκτησης δεδομένων και τα εξαρτήματα που συνοδεύουν τον κινητήρα. Το δοχείο καυσίμου και η φιάλη του αερίου εκκίνησης έχουν τοποθετηθεί, για λόγους ασφαλείας, μακριά από τον κινητήρα. Το τραπέζι αυτό τοποθετήθηκε με τρόπο ώστε τα καυσαέρια να διαφεύγουν από μια θυρίδα εξαερισμού του χώρου του εργαστηρίου.

Σε απόσταση ασφαλείας από την κλίνη του κινητήρα βρίσκεται το γραφείο πάνω το οποίο έχει τοποθετηθεί ο υπολογιστής του κάνει την πρόσκτηση και επεξεργασία των δεδομένων λειτουργίας του κινητήρα. Στην οθόνη του υπολογιστή εμφανίζονται οι βασικές παράμετροι λειτουργίας. Δηλαδή οι στροφές, η υπολογιζόμενη τιμή της ώσης, οι θερμοκρασίες, πιέσεις, ενθαλπίες και ο αριθμός Mach σε κάθε διατομή του κινητήρα. Οι βαθμοί απόδοσης των συνιστωσών του κινητήρα και οι παροχές των κινούμενων μέσων και καυσίμου. Πέρα από την

παρακολούθηση των παραμέτρων αυτών ο χρήστης έχει την δυνατότητα να τις αποθηκεύσει για επιπλέον επεξεργασία.

2.7 Πρόσκτηση δεδομένων με την βοήθεια H/Y

Όπως σε όλα τα σύγχρονα δοκιμαστήρια, έτσι και στο δοκιμαστήριο που στήθηκε για τον κινητήρα Olympus στο εργαστήριο θερμοδυναμικής και θερμικών μηχανών η πρόσκτηση των δεδομένων από τους αισθητήρες γίνεται με την βοήθεια H/Y. Στις σελίδες που ακολουθούν περιγράφεται ο τρόπος που γίνεται αυτό, η συσκευή που χρησιμοποιείται καθώς και το λογισμικό που χρησιμοποιείται για τον σκοπό αυτό.

2.7.1 Το πρόγραμμα πρόσκτησης δεδομένων

Για την πρόσκτηση δεδομένων από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή χρησιμοποιείται το λογισμικό LabVIEW 8.5. Το λογισμικό LabVIEW είναι μια γραφική γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιεί εικονίδια αντί για εντολές με μορφή λέξεων, για την δημιουργία εφαρμογών. Σε αντίθεση με τις κλασσικές γλώσσες προγραμματισμού, στις οποίες το πρόγραμμα εκτελείται με την σειρά που είναι γραμμένες οι εντολές του, στην γλώσσα προγραμματισμού LabVIEW το πρόγραμμα εκτελείται ακολουθώντας την ροή των δεδομένων (dataflow) μεταξύ των VIs και των συναρτήσεων. Τα VIs, ή σε μετάφραση, εικονικά όργανα (virtual instruments), είναι υπορουτίνες του LabVIEW που προσομοιώνουν εικονικά όργανα.

Ο χρήστης επικοινωνεί με τον κώδικα του LabVIEW χρησιμοποιώντας μια διεπιφάνεια επικοινωνίας που κατασκευάζεται από τον ίδιο χρησιμοποιώντας ένα σύνολο οργάνων και αντικειμένων που του παρέχει το λογισμικό. Αυτή η διεπιφάνεια είναι γνωστή ως front panel. Αφού φτιαχτεί η διεπιφάνεια αυτή ο χρήστης μπορεί να προσθέσει κώδικα με την μορφή εικονιδίων, που αποτελούν γραφικές αναπαραστάσεις συναρτήσεων και έτσι να ελέγχει τα όργανα της διεπιφάνειας. Αυτός ο γραφικός κώδικας αναφέρεται στο λογισμικό ως block diagram.

Όπως προαναφέρθηκε το front panel αποτελείται από ένα σύνολο οργάνων και αντικειμένων. Αυτά τα όργανα-τερματικά μπορεί να είναι είτε τερματικά εισόδου είτε τερματικά εξόδου του VI. Τα τερματικά εισόδου προσομοιώνουν κάποιο χειριστήριο όργανο, για

παράδειγμα διακόπτες και κουμπιά, και παρέχουν δεδομένα στο block diagram. Αντίθετα τα τερματικά εξόδου χρησιμοποιούνται για να απεικονίσουν τις πληροφορίες που προκύπτουν από το block diagram. Η απεικόνιση γίνεται με την μορφή γραφημάτων, λυχνιών LED και άλλων οργάνων.

Αφού φτιαχτεί το front panel, σειρά έχει να δημιουργηθεί ο κώδικας στο block diagram. Το block diagram περιέχει το κώδικα με μορφή εικονιδίων. Τα εικονίδια αυτά μπορεί να είναι τερματικά και κόμβοι, που συνδέονται μεταξύ τους με καλώδια (wires). Το χρώμα και το σύμβολο του κάθε τερματικού υποδηλώνει τον τύπο των δεδομένων που διαχειρίζεται.

Το πρόγραμμα LabVIEW λαμβάνει τα δεδομένα από τους αισθητήρες με κατάλληλη συσκευή, η οποία παρουσιάζεται σε επόμενη ενότητα. Τα δεδομένα αυτή είναι ηλεκτρικά σήματα με τάση 0-10V τα οποία τα «μεταφράζονται» σε κάποιο αριθμό από 0-10 έτσι ώστε να μπορεί να τα επεξεργαστεί το λογισμικό. Για την επεξεργασία όπως προαναφέρθηκε μπορούν να χρησιμοποιηθούν συναρτήσεις με την μορφή εικονιδίων. Οι τεχνικές της επεξεργασίας είναι οι ίδιες με αυτές στον κλασικό προγραμματισμό, χρησιμοποιώντας βρόχους επανάληψης, υπορουτίνες (στη συγκεκριμένη περίπτωση subVIs) με ορίσματα, πίνακες με αριθμούς, διανύσματα κλπ. Τα αποτελέσματα μπορούν αποθηκευτούν σε αρχείο όπως επίσης μπορούν να διαβαστούν και δεδομένα από κάποιο αρχείο.

Ο τρόπος προγραμματισμού σε LabVIEW μπορεί να γίνει με δυο μεθοδολογίες, Traditional NI-DAQ και DAQmx. Η διαφορά σε αυτές τις δυο μεθοδολογίες είναι στις συναρτήσεις που χρησιμοποιούν για την ανάκτηση των δεδομένων από τις συσκευές εισόδου. Η μεθοδολογία Traditional NI-DAQ χρησιμοποιούνταν σε παλιότερες εκδόσεις του λογισμικού LabVIEW, περιείχε πολύπλοκες συναρτήσεις για την ανάκτηση των δεδομένων και είχε περιορισμένες δυνατότητες. Η μεθοδολογία DAQmx αναπτύχθηκε πρόσφατα και έχει απλοποιήσει αρκετά την διαδικασία της ανάκτηση δεδομένων. Οι συναρτήσεις της είναι απλές και προσφέρει μεγαλύτερους ρυθμούς δειγματοληψίας. Αλλά το κύριο πλεονέκτημα της είναι ότι μπορεί να προσομοιώσει οποιαδήποτε συσκευή υποστηρίζει το λογισμικό DAQmx και έτσι να γίνουν έλεγχοι και τροποποιήσεις στο κώδικα του LabVIEW χωρίς να είναι συνδεδεμένη η συσκευή.

2.7.2 Κάρτα πρόσκτησης δεδομένων

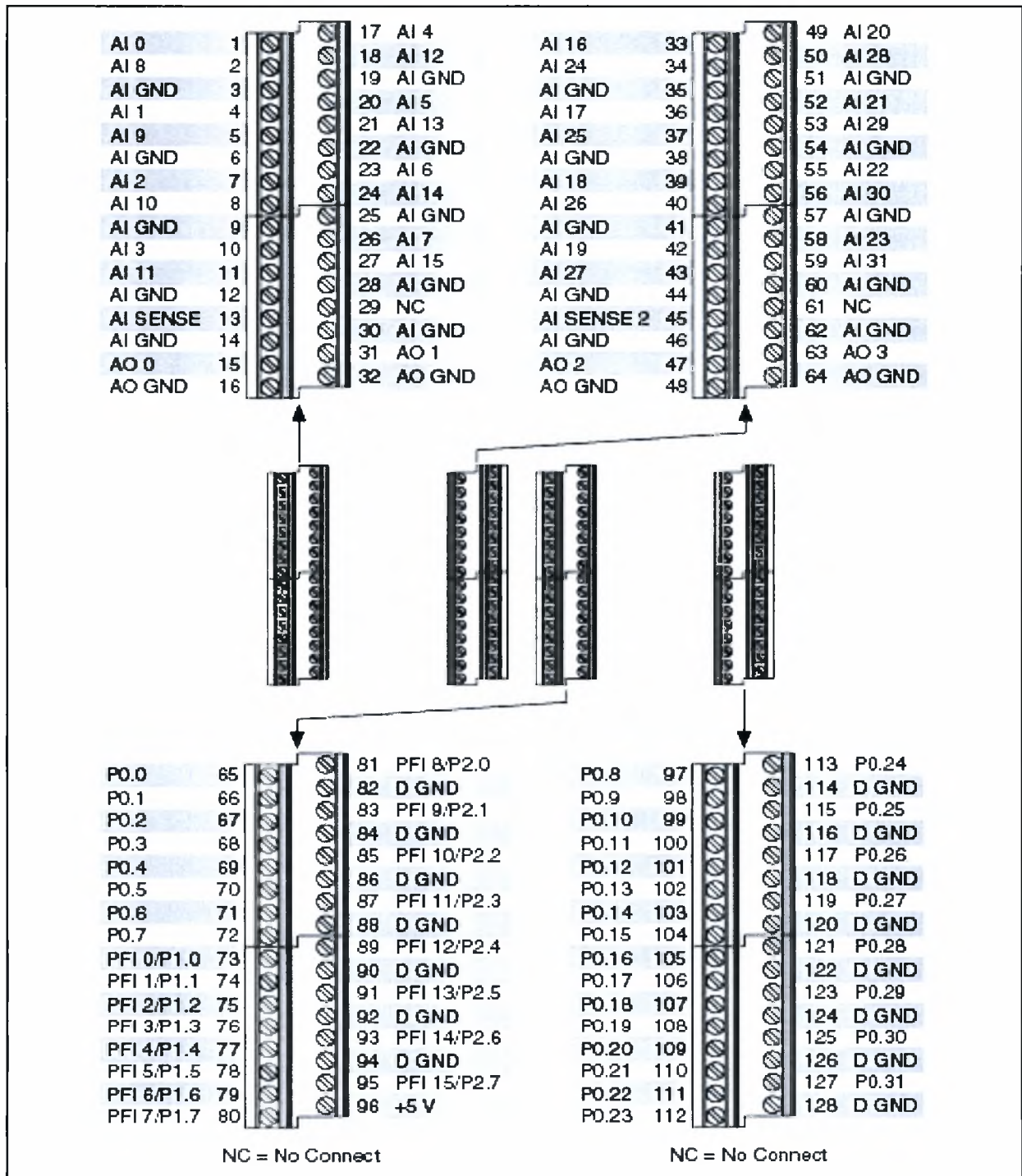
Για την πρόσκτηση των δεδομένων από τον υπολογιστή, χρησιμοποιείται η κάρτα USB-6229 της National Instruments. Όπως φαίνεται από την ονομασία της συνδέεται με τον υπολογιστή μέσω USB θύρας. Χρησιμοποιεί την τεχνολογία DAQmx για την ανάκτηση των δεδομένων. Διαθέτει 32 αναλογικά κανάλια εισόδου, 4 αναλογικά κανάλια εξόδου καθώς και 48 κανάλια εισόδου/εξόδου. Ο ρυθμός πρόσκτησης δεδομένων είναι 250 kS/s ο οποίος μοιράζεται στα κανάλια που χρησιμοποιούνται κάθε φορά.

Μια φωτογραφία της κάρτας ανάκτησης δεδομένων φαίνεται στην εικόνα 2.11.



Σχήμα 2.11. Η κάρτα πρόσκτησης δεδομένων USB-6229

Για την λειτουργία της κάρτας απαιτείται τροφοδοσία ηλεκτρικού ρεύματος το οποίο παρέχεται από κατάλληλο τροφοδοτικό το οποίο συνοδεύει την κάρτα. Οι αισθητήρες συνδέονται στις κλέμες που διαθέτει η κάρτα, οι οποίες διακρίνονται στην εικόνα 2.11. Από το πράσινο χρώμα που έχουν. Περιέχουν 128 ακροδέκτες. Η λειτουργία του κάθε ακροδέκτη φαίνεται στο σχήμα 2.11.



Σχήμα 2.12. Λειτουργίες ακροδεκτών κάρτας.

Οι αισθητήρες συνδέονται στα κανάλια με την αντιστοιχία που φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

α/α	Αισθητήρας	Κανάλι	Ακροδέκτες	
			(+)	(-)
0	$P_{3, right}$	ai0	1	3
1	$P_{3, left}$	ai1	4	6
2	$P_{t3, right}$	ai2	7	9
3	$P_{t3, left}$	ai3	10	12
4	P_{t4}	ai4	17	19
5	$P_{5, up}$	ai5	20	22
6	$P_{5, down}$	ai6	23	25
7	$P_{t5, up}$	ai7	26	28
8	$P_{t5, down}$	ai8	2	3
9	$T_{t3, left}$	ai9	5	6
10	$T_{t3, right}$	ai10	8	9
11	T_{t4}	ai11	11	12
12	$T_{t5, left}$	ai12	18	19
13	$T_{t5, right}$	ai13	21	22
14	$T_{t5, up}$	ai14	24	25
15	$T_{t5, down}$	ai15	27	28

2.7.3 Ανάκτηση δεδομένων από την ECU

Τα δεδομένα που εξόδου Telemetry μπορούν να παρακολουθούνται μέσω H/Y, εγκαθιστώντας το πρόγραμμα που παρέχει ο κατασκευαστής του κινητήρα. Όμως τα δεδομένα αυτά δεν μπορούν να υποστούν on-line επεξεργασία ούτε να αποθηκευτούν σε κάποιο αρχείο. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αυτό μέσα στον κώδικα του LabVIEW εκτός από την πρόσκτηση των δεδομένων που γίνεται από τους αισθητήρες μέσω της κάρτα USB6229, γίνεται πρόσκτηση δεδομένων και από την ECU της μηχανής μέσω της εξόδου Telemetry που διαθέτει και η οποία συνδέεται στην σειριακή θύρα του υπολογιστή. Όμως για να είναι εφικτή η αποκωδικοποίηση της πληροφορίας που στέλνει η ECU στον υπολογιστή πρέπει να είναι γνωστό το πρωτόκολλο σειριακής επικοινωνίας της ECU με H/Y. Το πρωτόκολλο αυτό παρέχεται από τον κατασκευαστή [Παράρτημα Π6] και γνωρίζοντας το μπορεί να γίνει η ανάκτηση των δεδομένων από το LabVIEW.

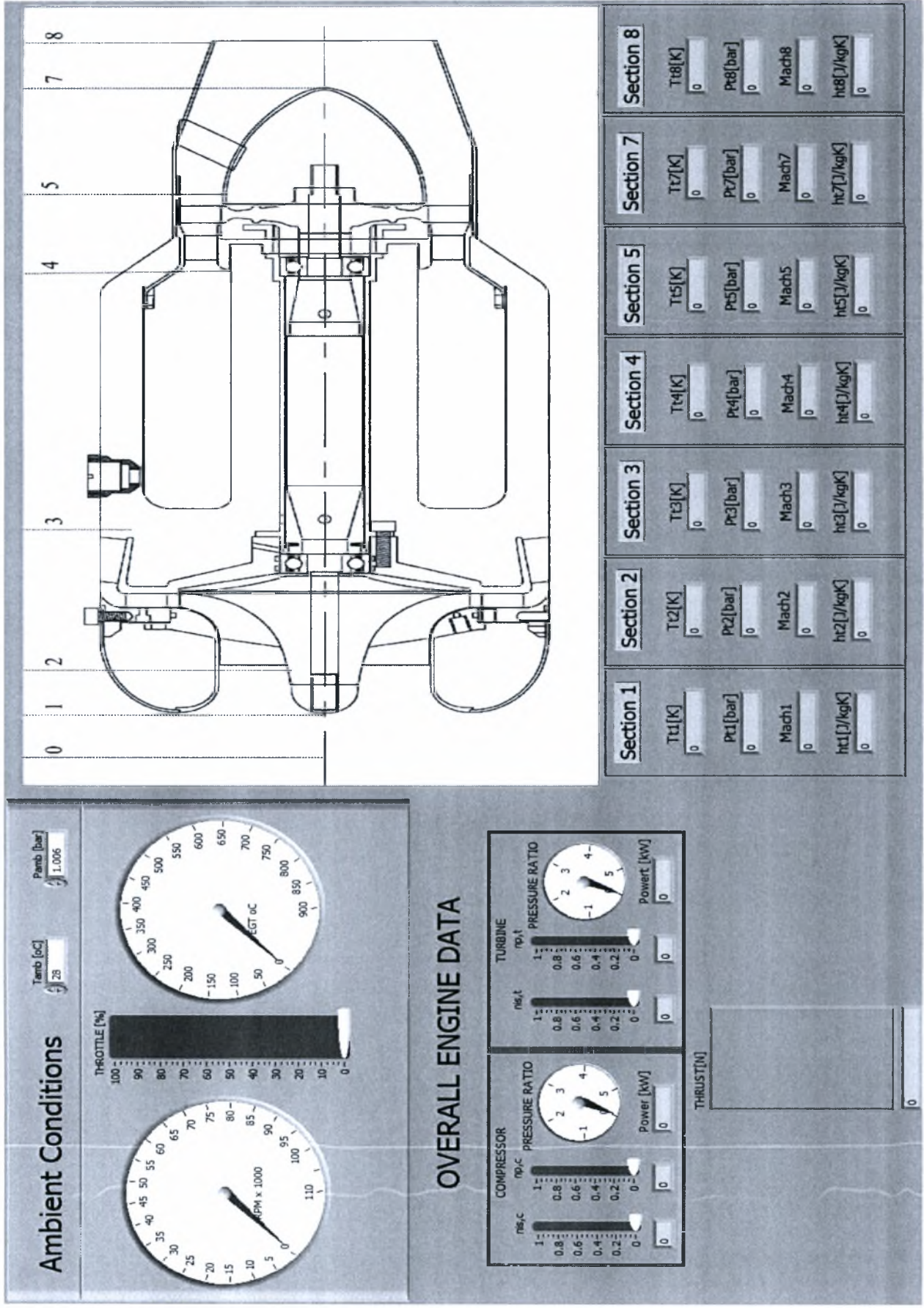
Τα δεδομένα που είναι σημαντικό να διαβάζονται (και να μεταφράζονται σε τιμές μεγεθών) από την ECU είναι οι στροφές, η EGT και το επίπεδο ισχύος (throttle level).

2.7.4 Περιγραφή προγράμματος AMT.vi

Στα πλαίσια αυτή της διπλωματικής γράφτηκε το πρόγραμμα AMT.vi για την πρόσκτηση των δεδομένων με H/Y. Το πρόγραμμα αυτό δίνει δυνατότητα διεξαγωγής μετρήσεων των μεγεθών που αφορούν τον κινητήρα Olympus. Τα μεγέθη αυτά διαβάζονται από την κάρτα πρόσκτησης δεδομένων και την ECU. Στην συνέχεια επεξεργάζονται από τον κώδικα του LabVIEW, απεικονίζονται στα τερματικά του front panel και αποθηκεύονται σε αρχείο.

Μια φωτογραφία των τερματικών του προγράμματος πρόσκτησης φαίνονται στην επόμενη σελίδα όπου φαίνεται μια εικόνα σε τομή του κινητήρα Olympus πάνω στην οποία έχουν σχεδιαστεί οι θέσεις με την αρίθμηση τους. Επιπλέον διακρίνονται τα τερματικά των οργάνων μέτρησης και τα εικονίδια στα οποία εισάγονται οι συνθήκες περιβάλλοντος.

Για την on-line επεξεργασία χρησιμοποιήθηκαν σχέσεις που έπαιρναν υπόψη την πειραματική τιμή της θερμοκρασίας εισόδου στο στρόβιλο. Επειδή όμως αντιμετωπίστηκαν κάποια προβλήματα που είχαν να κάνουν ως προς το πόσο ήταν αντιπροσωπευτική αυτή η μέτρηση, τα αποτελέσματα αυτά, της on-line επεξεργασίας, δεν λήφθηκαν υπόψη και ακολούθησε off-line επεξεργασία στο MS-Excel όπου εντοπίστηκαν τα προβλήματα. Έτσι έγιναν κάποιες διορθώσεις στο κώδικα του AMT.vi, και εφαρμόστηκε η μεθοδολογία που αναφέρετε στο κεφάλαιο 3, έτσι ώστε όταν τροφοδοτήθηκε με τα πειραματικά δεδομένα δεν παρουσιάστηκε κάποιο πρόβλημα στην επεξεργασία.



Σχήμα 2.13. Το πρόγραμμα πρόσκτηση δεδομένων.

3. Παρουσίαση και επεξεργασία των πειραματικών μετρήσεων

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται παρουσίαση των μετρήσεων που λαμβάνονται από την λειτουργία του κινητήρα. Επιπλέον περιγράφεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την επεξεργασία των μετρήσεων αυτών και γίνεται παρουσίαση και σχολιασμός τους.

3.1 Παρουσίαση των μετρήσεων

Σε προηγούμενο κεφάλαιο αναφέρθηκαν εκτενώς οι μετρήσεις που γίνονται πάνω στον κινητήρα, τα όργανα που χρησιμοποιούνται και οι θέσεις των μετρήσεων. Συνοπτικά τα δεδομένα αυτά φαίνονται στον πίνακα 3.1 μαζί με τις ονομασίες που χρησιμοποιούνται για κάθε μέτρηση ξεχωριστά.

Όνομασία	Μετρούμενο μέγεθος
$P_{3, right}$	Στατική πίεση στην έξοδο του συμπιεστή (δεξιά)
$P_{3, left}$	Στατική πίεση στην έξοδο του συμπιεστή (αριστερά)
$P_{t3, right}$	Ολική πίεση στην έξοδο του συμπιεστή (δεξιά)
$P_{t3, left}$	Ολική πίεση στην έξοδο του συμπιεστή (αριστερά)
P_{t4}	Ολική πίεση στην έξοδο του θαλάμου καύσης
$P_{5, up}$	Στατική πίεση στην έξοδο του στροβίλου (πάνω)
$P_{5, down}$	Στατική πίεση στην έξοδο του στροβίλου (κάτω)
$P_{t5, up}$	Ολική πίεση στην έξοδο του στροβίλου (πάνω)
$P_{t5, down}$	Ολική πίεση στην έξοδο του στροβίλου (κάτω)
$T_{t3, left}$	Ολική θερμοκρασία στην έξοδο του συμπιεστή (αριστερά)
$T_{t3, right}$	Ολική θερμοκρασία στην έξοδο του συμπιεστή (δεξιά)
T_{t4}	Ολική θερμοκρασία στην έξοδο του θαλάμου καύσης
$T_{t5, left}$	Ολική θερμοκρασία στην έξοδο του στροβίλου (αριστερά)
$T_{t5, right}$	Ολική θερμοκρασία στην έξοδο του στροβίλου (δεξιά)
$T_{t5, up}$	Ολική θερμοκρασία στην έξοδο του στροβίλου (πάνω)
$T_{t5, down}$	Ολική θερμοκρασία στην έξοδο του στροβίλου (κάτω)
EGT	Ολική θερμοκρασία στην έξοδο του στροβίλου (από ECU)
N	Στροφές του κινητήρα (από ECU)

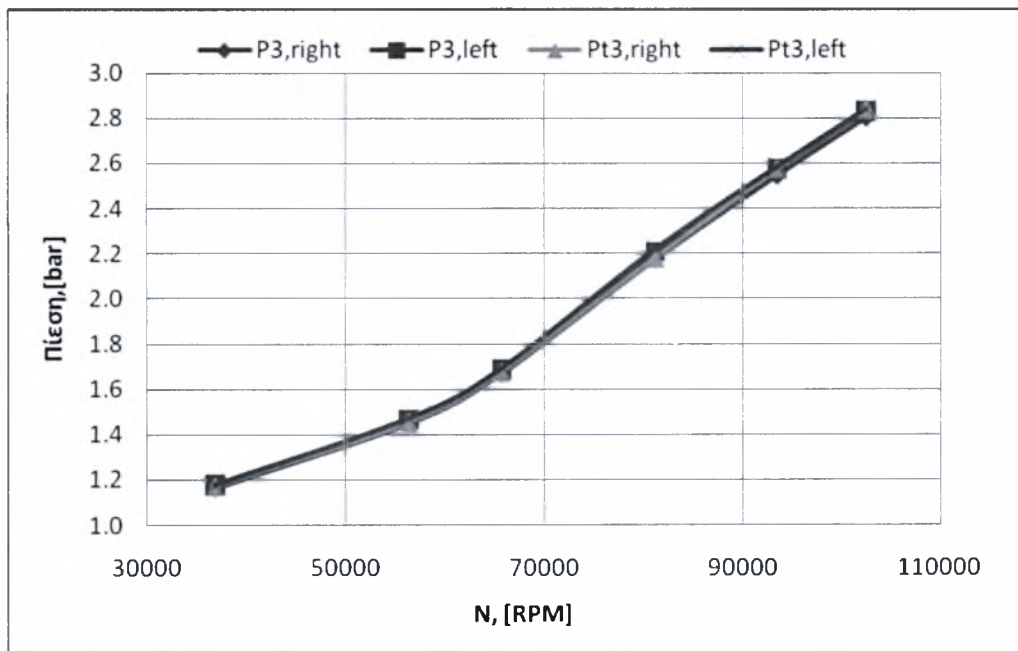
Πίνακας 3.1. Μετρούμενα μεγέθη

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται στις σελίδες που ακολουθούν συναρτήσει των στροφών του κινητήρα για κάθε διατομή ξεχωριστά.

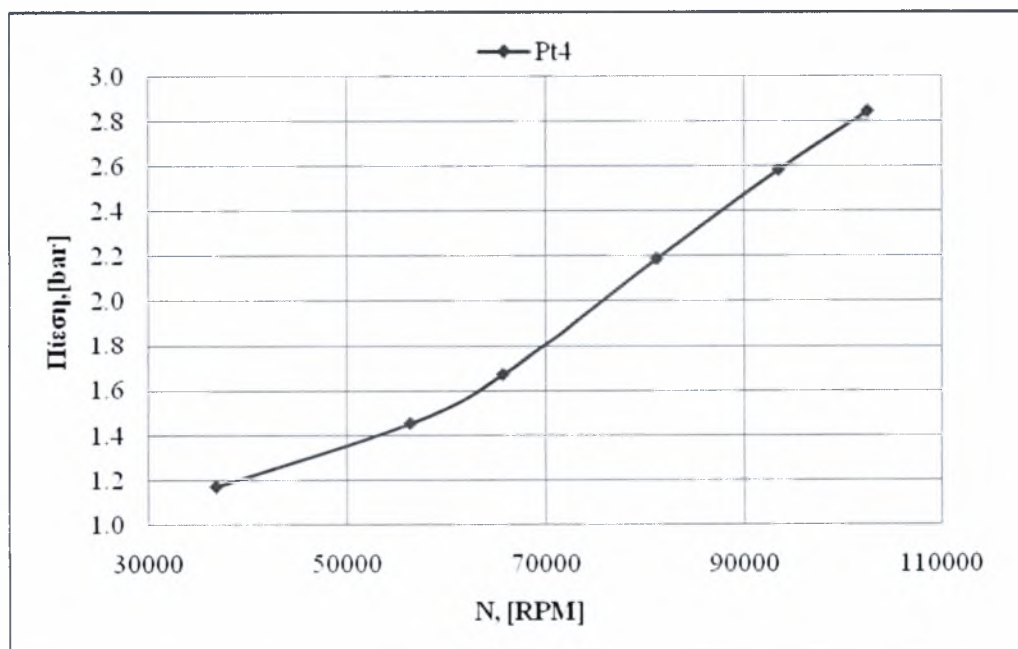
Στο σχήμα 3.1 δίνονται οι πιέσεις, στατικές και ολικές, στην έξοδο του συμπιεστή όπως αυτές μετρήθηκαν από τα χρησιμοποιούμενα όργανα μέτρησης. Δεν φαίνεται να διαφοροποιούνται έντονα οι στατικές από τις ολικές πιέσεις, ούτε να υπάρχει διαφορά σε σχέση με την θέση μέτρησης. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι γιατί οι αισθητήρες είναι τοποθετημένοι μετά το τμήμα που λειτουργεί σαν διάχυτης με αποτέλεσμα να επιβραδύνεται η ροή του κινούμενου μέσου και έτσι οι τιμές των στατικών και ολικών πιέσεων να είναι περίπου ίδιες. Απ' ότι φαίνεται στο σχήμα 3.1 η πίεση εξόδου έχει γραμμική εξάρτηση από της στροφές του κινητήρα.

Ομοίως με την πίεση στην έξοδο του συμπιεστή, έτσι και με την πίεση στην έξοδο του θαλάμου καύσης φαίνεται να υπάρχει γραμμική εξάρτηση από της στροφές. Αυτό είναι κάτι το

αναμενόμενο αφού ο λόγος πίεσης (απώλειες πίεσης) του θαλάμου καύσης παραμένει σχεδόν σταθερός.

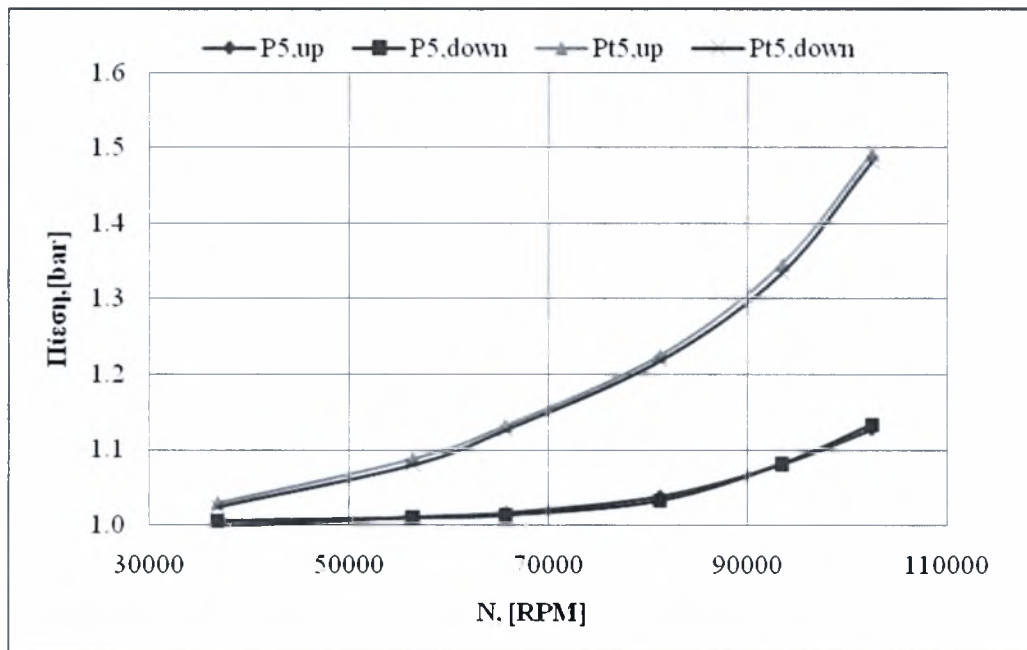


Σχήμα 3.1. Οι μετρήσεις των πιέσεων στην έξοδο του συμπιεστή (θέση 3)



Σχήμα 3.2. Η μέτρηση της ολικής πίεσης στην έξοδο του θαλάμου καύσης (θέση 4)

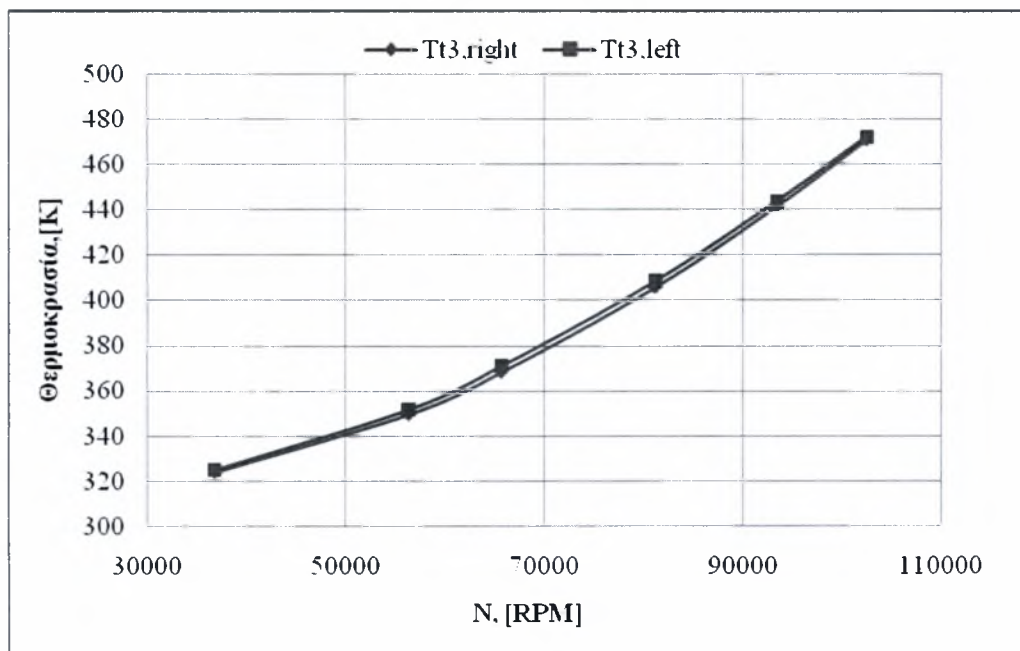
Σε αντίθεση με τον συμπιεστή, στο στρόβιλο οι στατικές πιέσεις διαφέρουν αρκετά από τις ολικές (σχήμα 3.3), αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι ο στρόβιλος επιταχύνει τη ροή του κινούμενου μέσου. Επίσης φαίνεται να υπάρχει μια παραβολική εξάρτηση από τις στροφές.



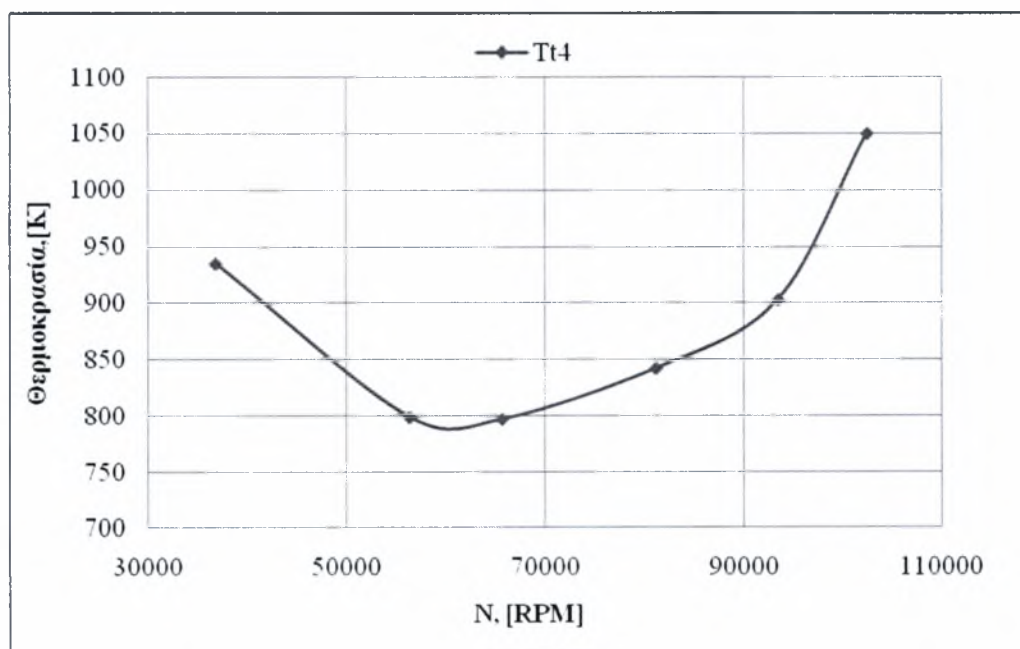
Σχήμα 3.3. Οι μετρήσεις των πιέσεων στην έξοδο του στρόβιλου (θέση 5).

Όπως με την πίεση εξόδου, έτσι και με την θερμοκρασία εξόδου του συμπιεστή (σχήμα 3.4) φαίνεται να υπάρχει γραμμική εξάρτηση από τις στροφές. Η διαφορά της θερμοκρασία στα δύο σημεία μέτρηση είναι πολύ μικρή.

Η μεταβολή της θερμοκρασίας εξόδου του θαλάμου καύσης (σχήμα 3.5) μεταβάλλεται κάπως ακανόνιστα με την αύξηση των στροφών. Αυτού του είδους η μεταβολή δημιουργεί προβλήματα (π.χ. βαθμός απόδοσης στρόβιλου μεγαλύτερος από 100%) στους υπολογισμούς που γίνονται κατά την επεξεργασία των μετρήσεων. Με αποτέλεσμα όπως θα φανεί στις επόμενες ενότητες να αγνοηθεί αυτή η μέτρηση και να υπολογιστεί μια νέα διορθωμένη τιμή που προκύπτει με την βοήθεια των υπολοίπων.



Σχήμα 3.4. Οι μετρήσεις των θερμοκρασιών στην έξοδο του συμπιεστή (θέση 3).

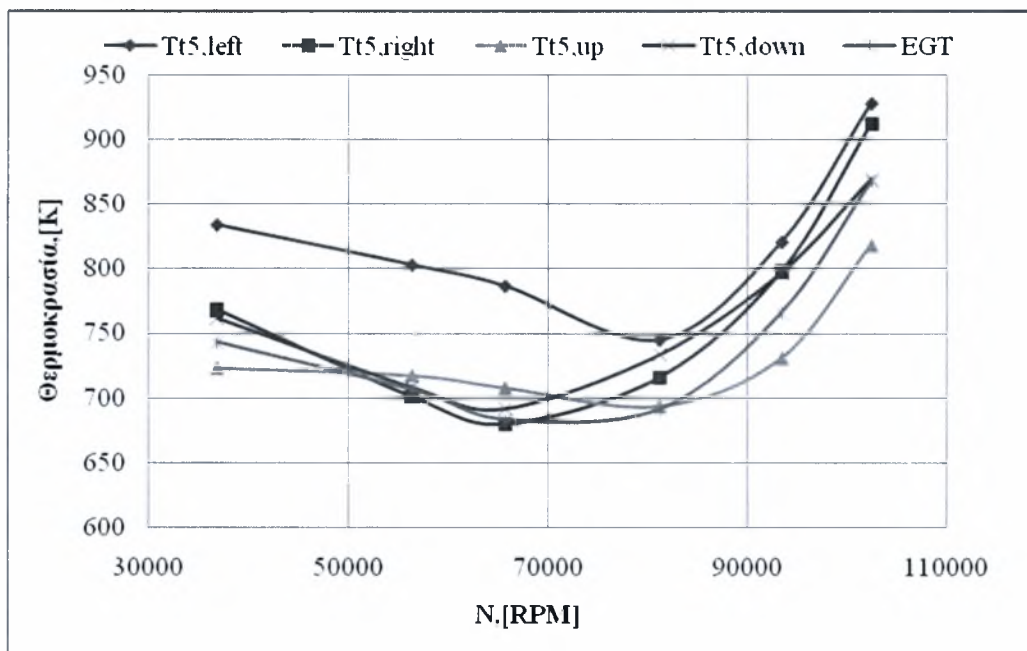


Σχήμα 3.5. Η μέτρηση της θερμοκρασίας στην έξοδο του θαλάμου καύσης (θέση 4).

Στο σχήμα 3.6 φαίνονται οι μετρήσεις της θερμοκρασίας εξόδου των καυσαερίων (θέση 5). Επίσης στο διάγραμμα αυτό έχει τοποθετηθεί και η μέτρηση της EGT που γίνεται από την μονάδα ελέγχου της μηχανής. Ο αισθητήρας της EGT βρίσκεται στην θέση 7, αλλά αυτό δεν έχει

σημασία, γιατί η ολική θερμοκρασία διατηρείται από την έξοδο του στροβίλου μέχρι την έξοδο της δέσμης των καυσαερίων από το ακροφύσιο.

Οι θερμοκρασίες που μετράνε τα περιφερικά διατεταγμένα θερμοστοιχεία στη έξοδο του στροβίλου, διαφέρουν αρκετά μεταξύ τους. Πιθανά αίτια αυτής της διαφοροποίησης είναι η εσφαλμένη τοποθέτηση του στη διατομή, δηλαδή σε διαφορετικό βάθος. Ή η ανομοιόμορφη έγχυση του καυσίμου στο θάλαμο καύσης η οποία δημιουργεί ένα ανομοιόμορφο προφίλ το οποίο μεταφέρεται στην έξοδο του στροβίλου.



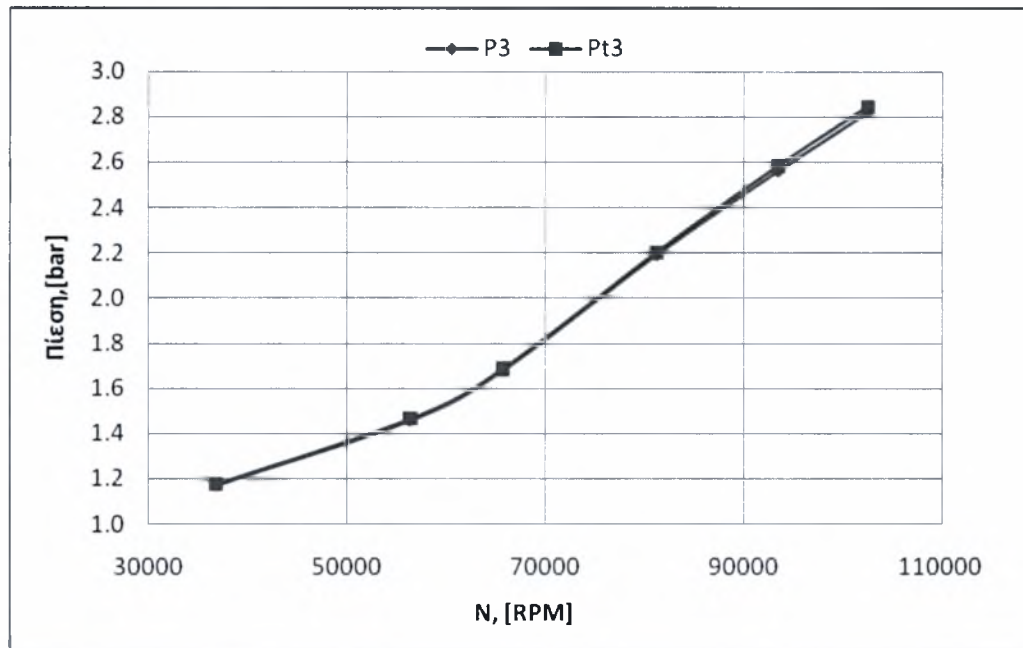
Σχήμα 3.6. Οι μετρήσεις των θερμοκρασιών στην έξοδο του στροβίλου (θέση 5), συμπεριλαμβανομένης και της EGT (θέση 7).

3.2 Επεξεργασία των μετρήσεων

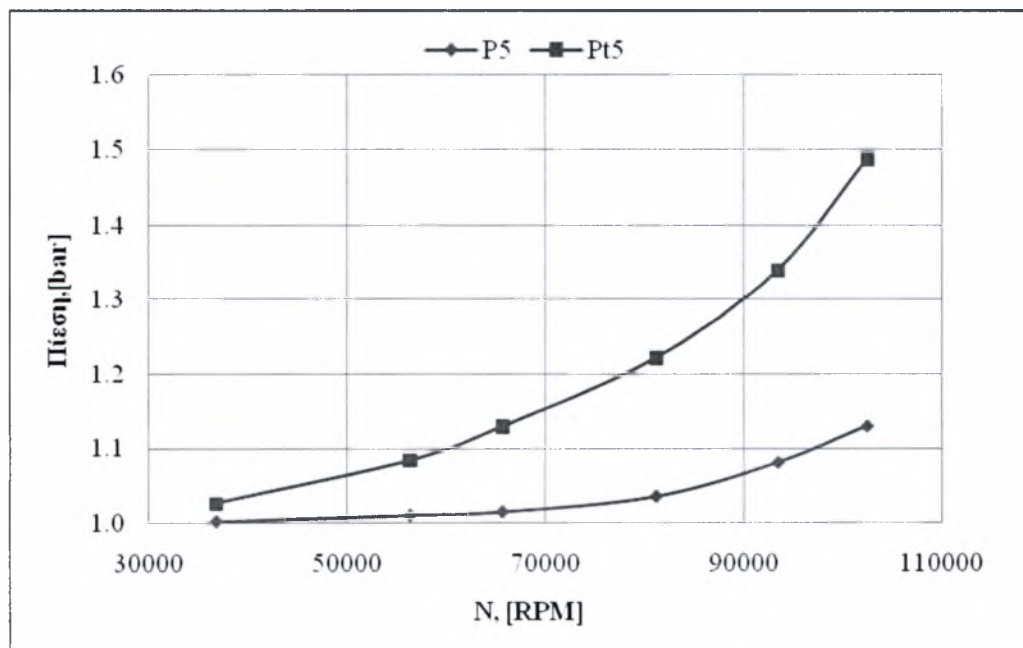
Το πρώτο βήμα για την επεξεργασία των μετρήσεων είναι να βρεθούν οι μέσες τιμές των μεγεθών σε κάθε διατομή όπου υπάρχουν περισσότεροι από ένας αισθητήρες. Οι τιμές αυτές θεωρούνται αντιπροσωπευτικές για κάθε διατομή και θα χρησιμοποιηθούν για την περαιτέρω επεξεργασία και διεξαγωγή αποτελεσμάτων.

Στη θέση 4 υπάρχει ένας αισθητήρας που μετράει την ολική πίεση και ένας που μετράει την ολική θερμοκρασία, οπότε ισχύουν οι τιμές που φαίνονται στα σχήματα 3.2 και 3.5.

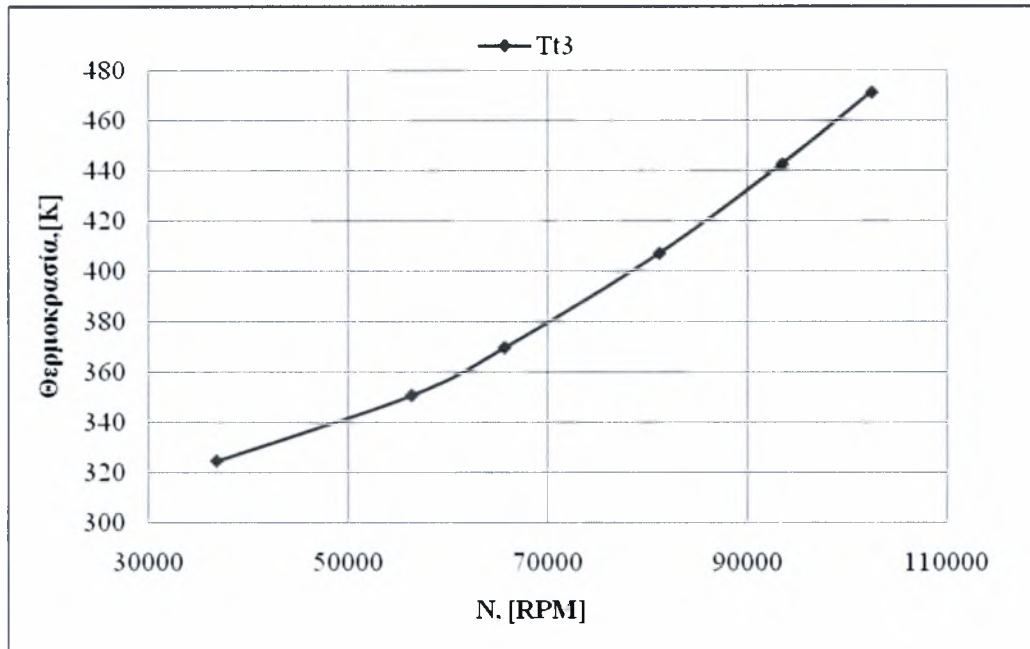
Για τις άλλες θέσεις οι τιμές διαμορφώνονται ως εξής:



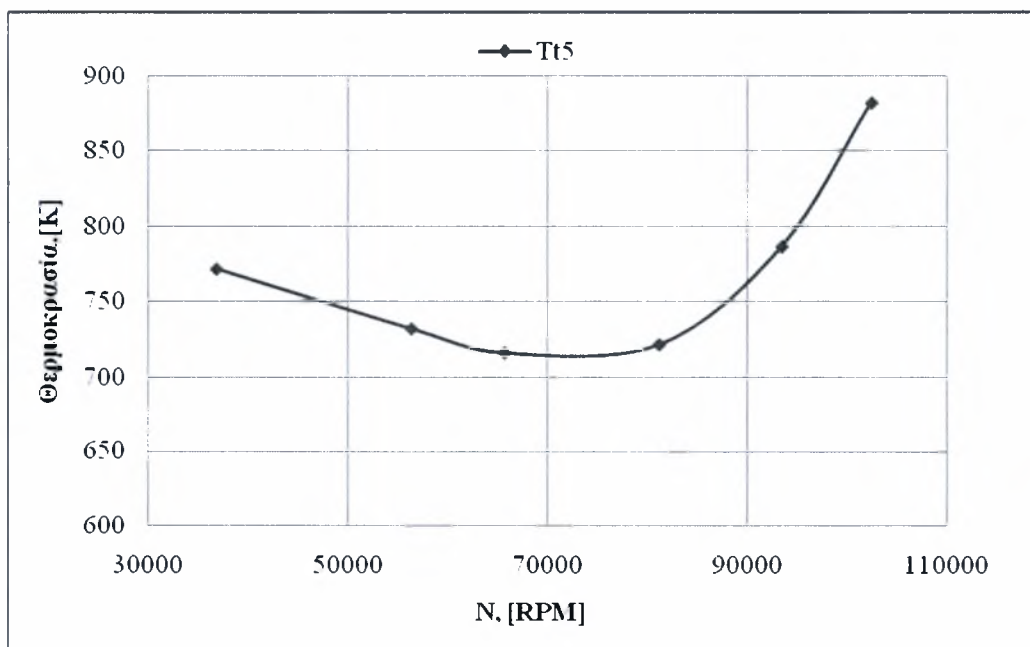
Σχήμα 3.7. Οι κατανομές των πιέσεων στη θέση 3



Σχήμα 3.8. Οι κατανομές των πιέσεων στη θέση 5



Σχήμα 3.9. Η κατανομή της ολικής θερμοκρασίας στη θέση 3



Σχήμα 3.10. Η κατανομή της θερμοκρασίας στη θέση 5 (μέση τιμή των τεσσάρων θερμοστοιχείων στη θέση 5)

3.3 Παραδοχές

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2 η επεξεργασία των μετρήσεων γίνεται on-line με την βοήθεια του προγράμματος πρόσκτησης δεδομένων LabVIEW. Για την επεξεργασία των μετρήσεων γίνονται κάποιες παραδοχές οι οποίες αναφέρονται στις παραγράφους που ακολουθούν.

Η πρώτη σημαντική παραδοχή που γίνεται είναι ότι η ροή είναι μονοδιάστατη, δηλαδή τα τρισδιάστατα φαινόμενα που συμβαίνουν κατά τη διέλευση του κινούμενου μέσου από τις συνιστώσες του κινητήρα αμελούνται και η κατάσταση σε κάθε διατομή περιγράφεται από κατάλληλα υπολογισμένες «μέσες τιμές».

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενες ενότητες μετρήσεις γίνονται σε περισσότερα από ένα σημεία σε κάθε διατομή. Από τις διαφορετικές αυτές μετρήσεις, στην επεξεργασία λαμβάνονται υπόψη η μέση τιμή τους, η οποία θεωρείται αντιπροσωπευτική για τη διατομή στο εκάστοτε σημείο λειτουργίας.

Οι απώλειες θερμότητας από το κέλυφος του κινητήρα προς το περιβάλλον δεν υπολογίζονται, δηλαδή η ροή του εργαζόμενου μέσου θεωρείται αδιαβατική. Οι απώλειες αυτές ωστόσο, μπορούν να ενσωματωθούν σε παραμέτρους των συνιστωσών όπως είναι οι βαθμοί απόδοσης.

Η θερμογόνο δύναμη του καυσίμου θεωρείται σταθερή και δεν μεταβάλλεται με την αλλαγή των συνθηκών του περιβάλλοντος. Επιπλέον η ποσότητα του λιπαντικού που προστίθεται στο καύσιμο θεωρείται αμελητέα και δεν έχει καμία επιρροή στη τελική θερμογόνο δύναμη του καυσίμου μίγματος κηροζίνης-λιπαντικού.

Συμφωνά με τις πληροφορίες που δίνει ο κατασκευαστής στο εγχειρίδιο του κινητήρα, 1% τις ποσότητας του εισερχόμενου αέρα περνάει διαμέσου των εδράνων κύλισης για ψύξη. Επειδή αυτή το ποσοστό είναι πολύ μικρό δεν λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς.

Ο αέρας θεωρείται μίγμα αερίων, τα ποσοστά των οποίων είναι: $x_{N_2} = 0.7552$, $x_{O_2} = 0.2315$, $x_{CO_2} = 0.0005$, $x_{Ar} = 0.0128$, $x_{Ne} = 0.00001$, $x_{H_2O} = 0$, $x_{SO_2} = 0$. Στις τιμές αυτές παρατηρούμε ότι η ποσότητα του νερού είναι μηδενική, αυτό προκύπτει γιατί αμελείται η υγρασία του αέρα. Επιπλέον είναι μηδενική και η ποσότητα του διοξειδίου του θείου, η οποία αναφέρεται για λόγου πληρότητας γιατί όπως θα φανεί στη συνέχεια η ποσότητα αυτή μεταβάλλεται στα καυσαέρια.

Τέλος, κατά τη διάρκεια των υπολογισμών θεωρούνται μεταβλητές οι ιδιότητες του αέρα και των καυσαερίων και στις αναγωγές που γίνονται για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων δεν λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της υγρασίας του περιβάλλοντος στις επιδόσεις του κινητήρα.

3.4 Αριθμητική επεξεργασία

Για την επεξεργασία των μετρήσεων on-line όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο έχει φτιαχτεί το AMT.vi το οποίο πραγματοποιεί την επεξεργασία των μετρήσεων.

Για την επεξεργασία των μετρήσεων ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

1. Ο κινητήρας είναι ακίνητος οπότε ο αριθμός Mach στην είσοδο του είναι $M_0 = 0$. Επιπλέον η ολική θερμοκρασία στην είσοδο του συμπιεστή είναι:

$$T_{t2} = T_{t1} = T_{t0} = T_{amb} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_0^2 \right) = T_{amb} \quad (3.1)$$

όπου T_{amb} η θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου του κινητήρα.

2. Από την θερμοκρασία T_{t2} προκύπτει η ολική ενθαλπία κάθε στοιχείου του μίγματος του ατμοσφαιρικού αέρα $h_{t2,j}$, όπου j το κάθε στοιχείο του αέρα, από την πολυωνυμική σχέση:

$$h_{t,j}(T_t) = \sum_i \alpha_{i,j} T_t^i \quad (3.2)$$

και η ενθαλπία του κινούμενου μέσου από τη σχέση

$$h_t(T_t) = \sum_j x_j h_{t,j} \quad (3.3)$$

3. Ο λόγος πίεσης του συμπιεστή δίνεται από την σχέση:

$$PR_{comp} = \frac{P_{t3}}{P_{t2}} \quad (3.4)$$

4. Θεωρώντας ότι η συμπίεση του αέρα στο συμπιεστή γίνεται ισεντροπικά μπορεί να υπολογιστεί η θερμοκρασία $T_{t3, is}$ από την σχέση 3.5.

$$T_{t3, is} = T_{t2} \text{PR}_{\text{comp}}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (3.5)$$

Επειδή είναι γνωστές οι θερμοκρασίες T_{t3} και $T_{t3, is}$, υπολογίζονται οι ενθαλπίες για τις θερμοκρασίες αυτές και προκύπτει ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του συμπιεστή:

$$\eta_{is, \text{comp}} = \frac{h_{t3, is} - h_{t2}}{h_{t3} - h_{t2}} \quad (3.6)$$

καθώς και ο πολυτροπικός βαθμός απόδοσης από τη σχέση:

$$\eta_{p, \text{comp}} = \frac{\ln(\text{PR}_{\text{comp}})^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}{\ln(T_{t3}/T_{t2})} \quad (3.7)$$

5. Στην έξοδο του στροβίλου είναι γνωστή τόσο η στατική όσο και ολική πίεση οπότε μπορεί να υπολογιστεί και ο αριθμός Mach, M_5 :

$$P_{t5} = P_5 \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_5^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (3.8)$$

6. Η μαζική παροχή καυσαερίων μπορεί να βρεθεί από τη σχέση:

$$\dot{m}_g = \frac{P_{t5} A_5}{\sqrt{T_{t5}}} \sqrt{\frac{\gamma}{R}} M_5 \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_5^2 \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \quad (3.9)$$

7. Η ισχύς που καταναλώνει ο συμπιεστής είναι:

$$P_{\text{comp}} = \dot{m}_a c_p (T_{t3} - T_{t2}) \quad (3.10)$$

8. Εφόσον είναι γνωστές οι παροχές των καυσαερίων και του καυσίμου μπορεί να υπολογιστεί η παροχή του αέρα.

$$\dot{m}_a = \dot{m}_g - \dot{m}_f \quad (3.11)$$

και ο λόγος καυσίμου/αέρα

$$\text{FAR} = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} \quad (3.12)$$

9. Στις θέσεις 4 και 5 είναι γνωστές οι ολικές θερμοκρασίες και ο λόγος FAR, οπότε μπορούν να υπολογιστεί η σύσταση των καυσαερίων από τις σχέσεις:

$$\dot{m}_{g,N_2} = x_{N_2} + \text{FAR} \cdot Fr_{N_2} \quad (3.13)$$

$$\dot{m}_{g,O_2} = x_{O_2} - \text{FAR} \left(\frac{Fr_C}{M_C} + \frac{Fr_{H_2}}{M_{H_2}} + \frac{Fr_S}{M_S} - \frac{Fr_{O_2}}{M_{O_2}} \right) M_{O_2} \quad (3.14)$$

$$\dot{m}_{g,CO_2} = x_{CO_2} + \frac{\text{FAR} \cdot Fr_C \cdot M_{CO_2}}{M_C} + \text{FAR} \cdot Fr_{CO_2} \quad (3.15)$$

$$\dot{m}_{g,SO_2} = x_{SO_2} + \frac{\text{FAR} \cdot Fr_S \cdot M_{SO_2}}{M_S} \quad (3.16)$$

$$\dot{m}_{g,Ar} = x_{Ar} \quad (3.17)$$

$$\dot{m}_{g,Ne} = x_{Ne} \quad (3.18)$$

Η συνολική μάζα των παραγόμενων καυσαερίων για 1kg αέρα και FAR kg καυσίμου είναι:

$$\dot{m}_g = \dot{m}_{g,N_2} + \dot{m}_{g,O_2} + \dot{m}_{g,CO_2} + \dot{m}_{g,SO_2} + \dot{m}_{g,Ar} + \dot{m}_{g,Ne} \quad (3.19)$$

Συνεπώς η νέα σύσταση του κινούμενου μέσου – καυσαέρια είναι

$$x_{N_2} = \dot{m}_{g,N_2} / \dot{m}_g \quad (3.20)$$

$$x_{O_2} = \dot{m}_{g,O_2} / \dot{m}_g \quad (3.21)$$

$$x_{CO_2} = \dot{m}_{g,CO_2} / \dot{m}_g \quad (3.22)$$

$$x_{SO_2} = \dot{m}_{g,SO_2} / \dot{m}_g \quad (3.23)$$

$$x_{Ar} = \dot{m}_{g,Ar} / \dot{m}_g \quad (3.24)$$

$$x_{Ne} = \dot{m}_{g,Ne} / \dot{m}_g \quad (3.25)$$

10. Αν και η θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο μετράται (σχήμα 3.5), όταν επιχειρήθηκε να γίνουν υπολογισμοί με αυτές τις τιμές προέκυψαν παράλογα αποτελέσματα (π.χ. βαθμός απόδοσης στροβίλου μεγαλύτερος από 100%), με αποτέλεσμα να υπολογιστεί η θερμοκρασία στη θέση 4 με την βοήθεια των υπολοίπων μετρήσεων.

Ο υπολογισμός έγινε εφαρμόζοντας την αρχή διατήρησης της μηχανικής ισχύος στον άξονα της μηχανής. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση 3.26, υποθέτοντας ότι η τιμή του μηχανικού βαθμού απόδοσης η_m έχει τιμή 0.98:

$$\eta_m (\dot{m}_a + \dot{m}_f) C_{p_g} (T_{14} - T_{15}) = \dot{m}_a C_{p_a} (T_{13} - T_{12}) \quad (3.26)$$

Στην οποία η μόνη άγνωστη ποσότητα είναι η θερμοκρασία T_{14} . Η νέα θερμοκρασία, $T_{14,s}$, φαίνεται παρακάτω σε διάγραμμα.

11. Ο λόγος πίεσης στο στρόβιλο είναι:

$$PR_{\text{turb}} = \frac{P_{14}}{P_{15}} \quad (3.27)$$

12. Θεωρώντας ότι η αποτόνωση των καυσαερίων γίνεται ισεντροπικά μπορούμε να υπολογίσουμε την θερμοκρασία $T_{t5, is}$

$$\frac{T_{t4}}{T_{t5, is}} = \left(\frac{P_{t4}}{P_{t5}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (3.28)$$

και την ενθαλπία $h_{t5, is}$ από τις σχέσεις 3.2 και 3.3. Οπότε ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του στροβίλου είναι:

$$\eta_{is, turb} = \frac{h_{t4} - h_{t5}}{h_{t4} - h_{t5, is}} \quad (3.29)$$

και ο πολυτροπικός

$$\eta_{p, turb} = \frac{\ln(T_{t5} / T_{t4})}{\ln(P_{t5} / P_{t4})^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \quad (3.30)$$

13. Η ισχύς που παράγει ο στρόβιλος βρίσκεται από τη σχέση:

$$P_{turb} = \dot{m}_g (h_{t4} - h_{t5}) \quad (3.31)$$

14. Η απόδοση του θαλάμου καύσης είναι:

$$\eta_b = \frac{\dot{m}_g (h_{t4} - h_g^{\circ}) - \dot{m}_a (h_{t3} - h_a^{\circ})}{\dot{m}_f LHV} \quad (3.32)$$

15. Για να υπολογίσουμε την πυκνότητα των καυσαερίων μπορούμε να εφαρμόσουμε την καταστατική εξίσωση στην έξοδο του ακροφυσίου. Δηλαδή:

$$\rho_g = \frac{P_g}{RT_g} = \frac{P_{amb}}{RT_g} \quad (3.33)$$

η πυκνότητα των καυσαερίων συνδέεται με την μαζική παροχή με την σχέση:

$$\dot{m}_g = \rho_g V_g A_g \quad (3.34)$$

οπότε έχουμε

$$\frac{\dot{m}_g}{A_g V_g} = \frac{P_{amb}}{RT_{g8}} \quad (3.35)$$

γράφοντας την ταχύτητα συναρτήσει του αριθμού Mach και την στατική θερμοκρασία συναρτήσει της ολικής καταλήγουμε στην παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{\dot{m}_g}{A_g M_g} = \frac{P_{amb} \sqrt{\gamma_g \left(1 + \frac{\gamma_g - 1}{2} M_g^2 \right)}}{\sqrt{RT_{t8}}} \quad (3.36)$$

στην οποία η μόνη άγνωστη ποσότητα είναι ο αριθμός Mach αφού $T_{t8} = T_{t5}$. Η σχέση αυτή λύνεται επαναληπτικά με την μέθοδο απλών επαναλήψεων.

16. Εφόσον έχει υπολογιστεί ο αριθμός Mach στην έξοδο του ακροφυσίου, μπορεί να υπολογιστεί, η θερμοκρασία και η ταχύτητα στη θέση αυτή με την βοήθεια των σχέσεων

$$a_g = \sqrt{\gamma RT_g} \quad (3.37)$$

και

$$V_8 = \sqrt{2(h_{t5} - h_8)} \quad (3.38)$$

Οι οποίες αποτελούν σύστημα δυο εξισώσεων με δυο αγνώστους, τις ποσότητες V_8 και T_8 , αφού η ενθαλπία στη θέση 8 είναι συνάρτηση της θεοκρασίας.

17. Η ώση που παράγει ο κινητήρας είναι:

$$F = \dot{m}_g V_8 - \dot{m}_a V_0 + A_8(P_8 - P_0) \quad (3.39)$$

18. Η ειδική ώση:

$$F_s = \frac{F}{\dot{m}_a} \quad (3.40)$$

3.5 Αναγωγή των αποτελεσμάτων για συνθήκες τυπικής ημέρας

Οι συνθήκες περιβάλλοντος παίζουν σημαντικό ρόλο στις επιδόσεις της μηχανής. Επηρεάζουν σημαντικά τις θερμοκρασίες και τις πιέσεις του κινούμενου μέσου καθώς και τη ροή του καυσίμου σε οποιαδήποτε στροβιλομηχανή. Για να είναι δυνατή η σύγκριση και αξιολόγηση των επιδόσεων μια μηχανής, θα πρέπει οι ποσότητες που τις περιγράφουν να αναχθούν σε συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας [4, 19]. Οι συνθήκες στις οποίες γίνεται η αναγωγή έχουν τυποποιηθεί και ονομάζονται συνθήκες τυπικής ημέρας (Standard Day conditions). Οι συνθήκες αυτές αντιστοιχούν σε πίεση $P_{ref} = 101.325 \text{ kPa} = 1 \text{ bar}$ και θερμοκρασία $T_{ref} = 288.15 \text{ K}$. Για να αναχθούν οι ποσότητες του περιγράφουν την λειτουργία της μηχανής ορίζονται δυο ποσότητες

$$\delta = \frac{P_1}{P_{ref}} \quad (3.41)$$

και

$$\Theta = \frac{T_1}{T_{\text{ref}}} \quad (3.42)$$

οι οποίες ονομάζονται αδιάστατη πίεση και αδιάστατη ταχύτητα, αντίστοιχα. Με τις ποσότητες αυτές ορίζονται τα ανηγμένα μεγέθη που περιγράφουν την λειτουργία του κινητήρα. Τα μεγέθη αυτά είναι:

- Ανηγμένη πίεση

$$P_c = \frac{P}{\delta} \quad (3.43)$$

- Ανηγμένη θερμοκρασία

$$T_c = \frac{T}{\Theta} \quad (3.44)$$

- Ανηγμένος αριθμός στροφών

$$N_c = \frac{N}{\sqrt{\Theta}} \quad (3.45)$$

- Ανηγμένη παροχή κινούμενου μέσου

$$\dot{m}_c = \frac{\dot{m}\sqrt{\Theta}}{\delta} \quad (3.46)$$

- Ανηγμένη παροχή καυσίμου

$$\dot{m}_{fc} = \frac{\dot{m}_f}{\delta\sqrt{\Theta}} \quad (3.47)$$

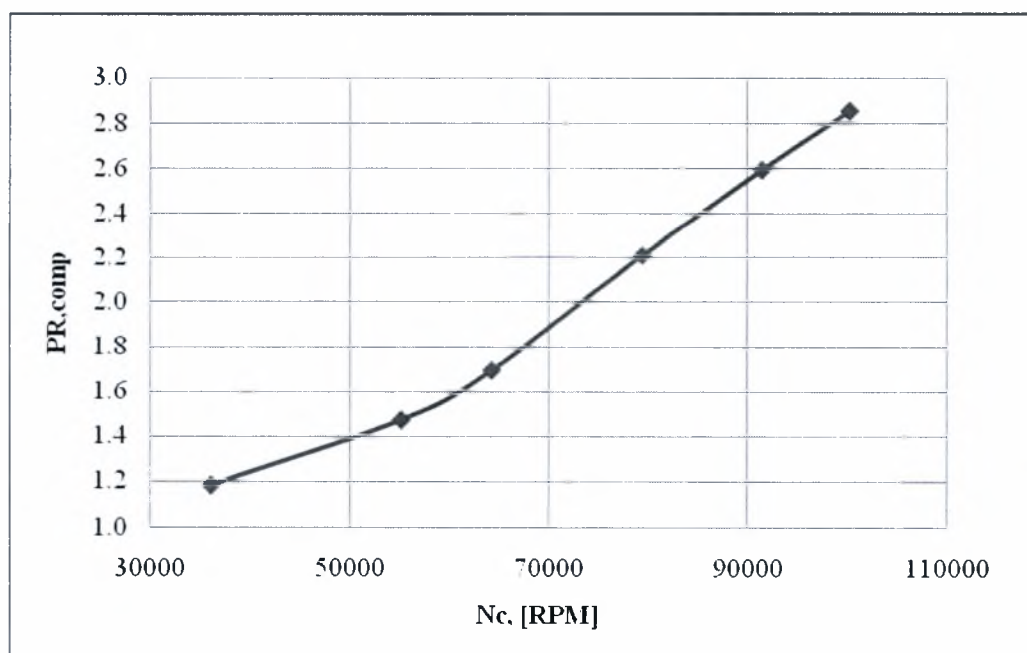
- Ανηγμένη ώση

$$F_c = \frac{F}{\delta} \quad (3.48)$$

3.6 Αποτελέσματα

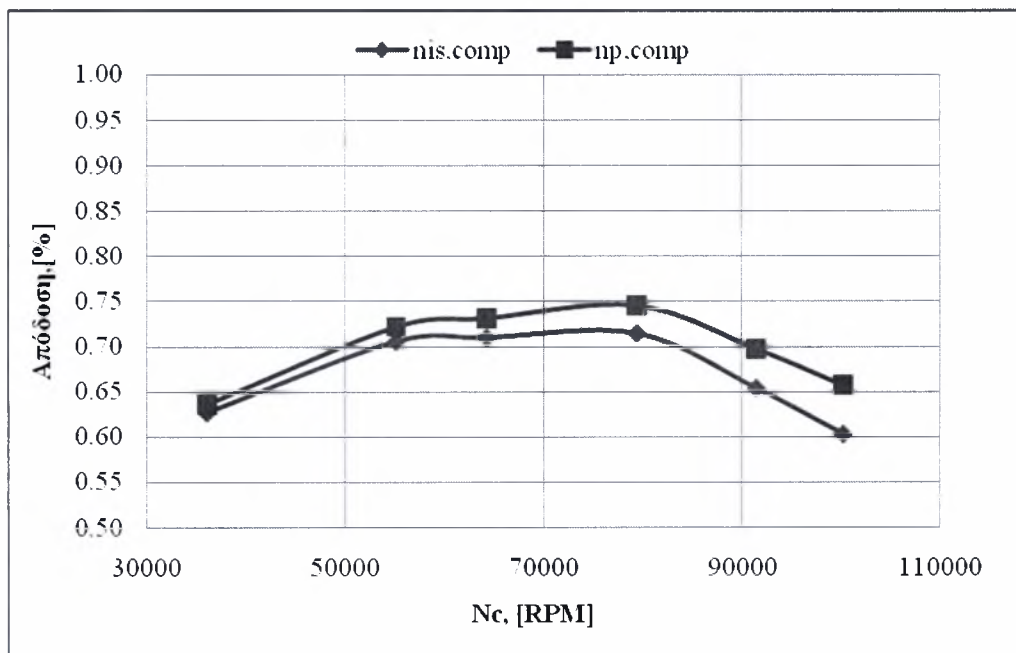
3.6.1 Συμπιεστής

Στο σχήμα 3.11 φαίνεται η εξάρτηση του λόγου πίεσης του συμπιεστή από την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Είναι φανερό ότι εξαρτάται γραμμικά από τις στροφές του κινητήρα. Επίσης παρατηρείται ότι στις 102500 RPM, που ήταν και οι μέγιστες στροφές που λειτούργησε ο κινητήρας κατά την πειραματική διαδικασία, ο λόγος πίεσης είναι περίπου 2.8, αυτό δημιουργεί την υπόνοια ότι ο κινητήρας δεν μπορεί να πιάσει τον λόγο πίεσης 3.8, που δίνει ο κατασκευαστής για τις μέγιστες στροφές (108500 RPM). Αυτή η παρατήρηση γίνεται με κάποια επιφύλαξη, παρατηρώντας απλώς την κλίση της γραφικής παράστασης που φαίνεται στο σχήμα 3.11.



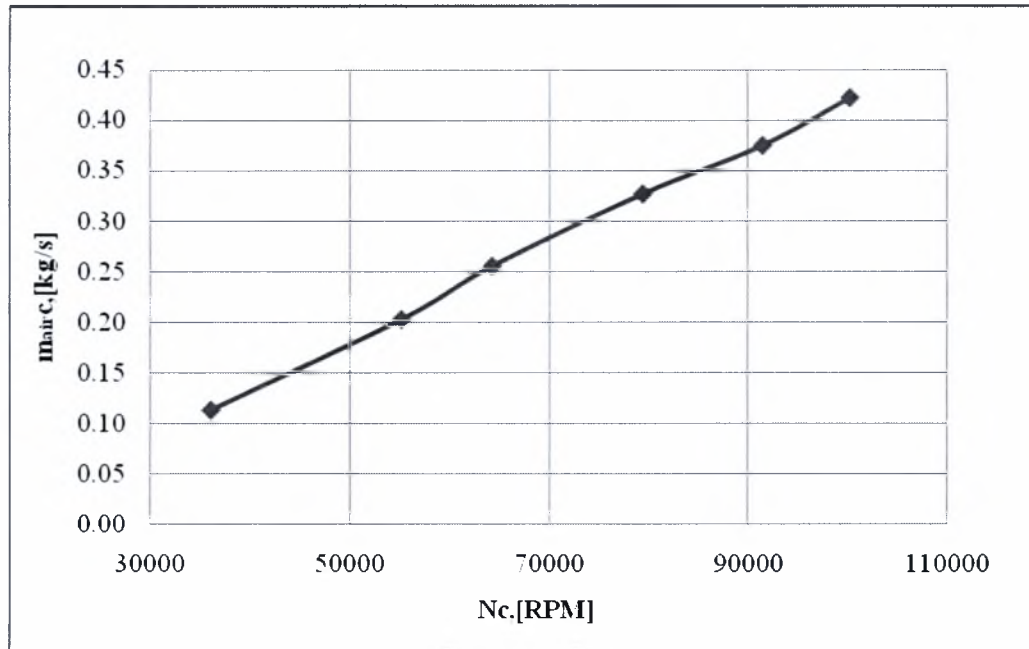
Σχήμα 3.11 Λόγος πίεσης του συμπιεστή

Στο σχήμα 3.12 φαίνονται ο ισεντροπικός και ο πολυτροπικός βαθμός απόδοσης του συμπιεστή. Η απόδοση του συμπιεστή παρουσιάζει την μέγιστη τιμή της στις 81000 RPM. Μια παρατήρηση που μπορεί να γίνει κοιτώντας το διάγραμμα είναι η διαφορά του πολυτροπικού από τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης αυξάνει όσο αυξάνονται οι στροφές του κινητήρα. Αυτό συμβαίνει γιατί οι ισοβαρείς καμπύλες αποκλίνουν στο διάγραμμα T-s με την αύξηση του s.



Σχήμα 3.12. Βαθμοί απόδοση του συμπιεστή.

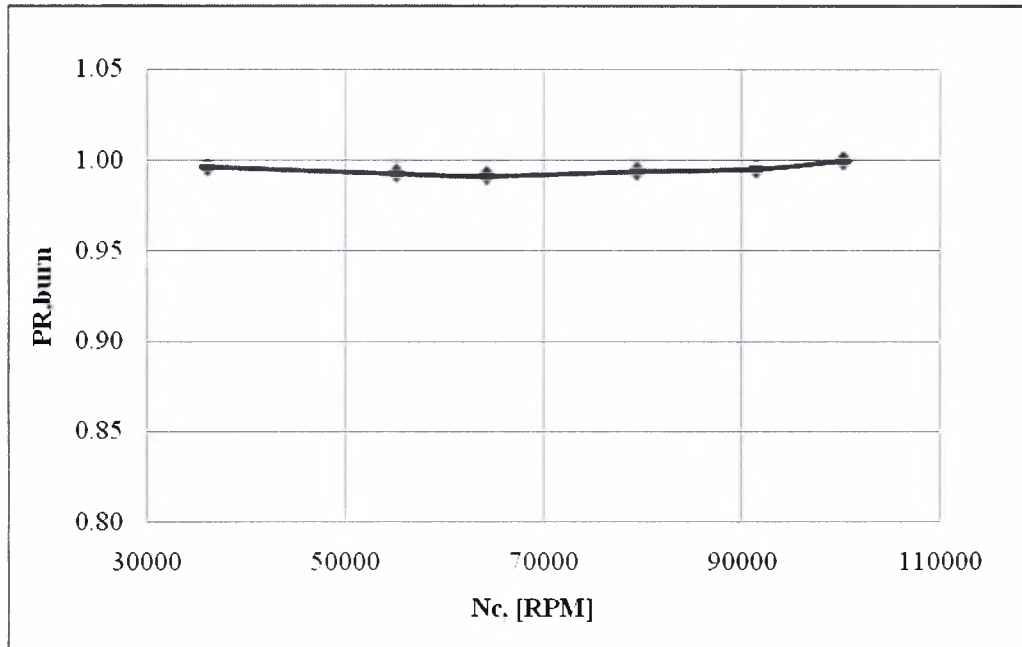
Στο σχήμα 3.13 φαίνεται η αναρροφούμενη παροχή αέρα από τον συμπιεστή, η οποία γραμμική εξάρτηση από τον αριθμό των στροφών, κάτι που είναι αναμενόμενο σε μια φυγοκεντρική στροβιλομηχανή.



Σχήμα 3.13. Αναρροφούμενη παροχή αέρα από τον συμπιεστή

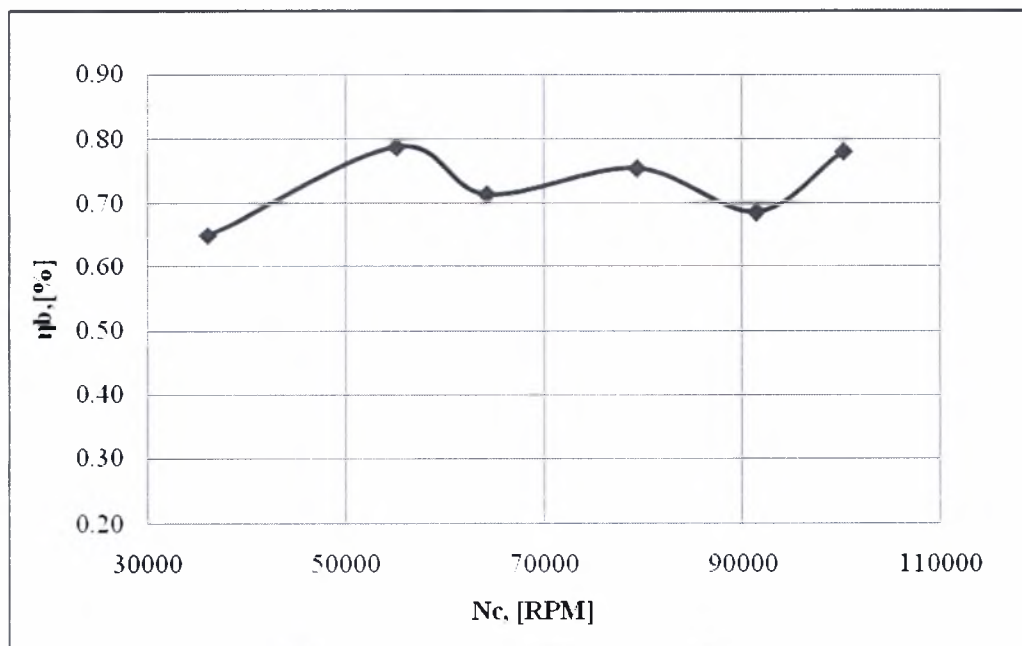
3.6.2 Θάλαμος καύσης

Στο σχήμα 3.14 φαίνεται η μεταβολή του λόγου πίεσης του θαλάμου καύσης συναρτήσει των στροφών. Ο λόγος πίεσης φαίνεται να παραμένει σταθερός με τη μεταβολή των στροφών και τυχόν αποκλίσεις οφείλονται πιθανόν σε ηλεκτρονικό θόρυβο που υπάρχει στα όργανα μέτρησης.



Σχήμα 3.14. Λόγος πίεσης του θαλάμου καύσης

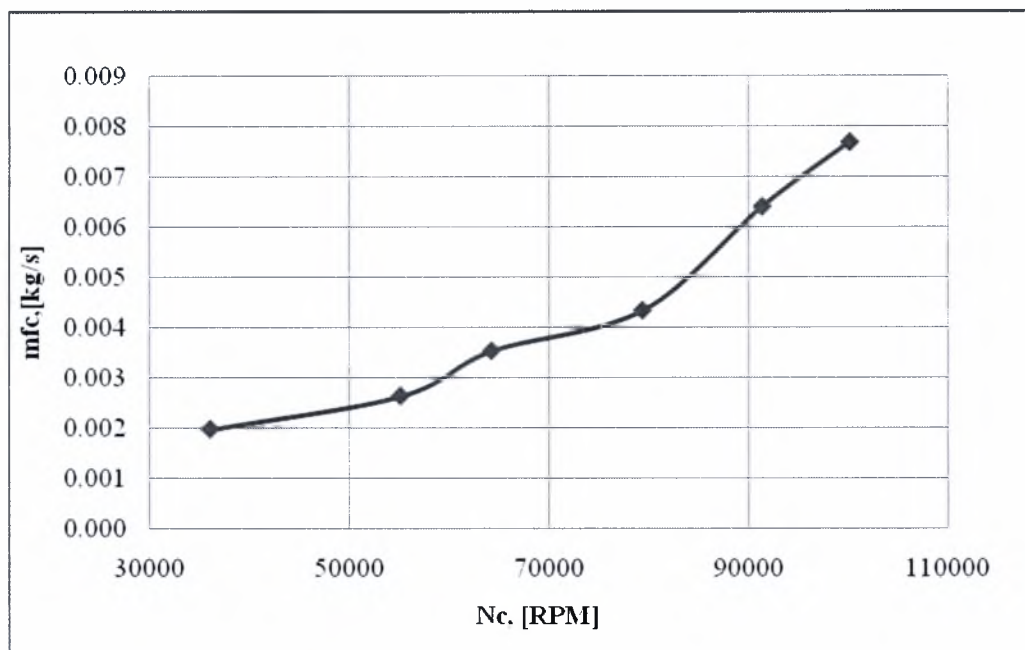
Ο βαθμός απόδοσης του θαλάμου καύσης συναρτήσει των στροφών εικονίζεται στο σχήμα 3.15. Από την μορφή που έχει η καμπύλη δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο ασφαλές συμπέρασμα. Αυτό που φαίνεται είναι ότι η απόδοση του καυστήρα έχει τιμή πολύ μικρή σε σχέση με του βαθμούς απόδοσης των μεγάλων στροβιλοαντιδραστήρων (περίπου 0.98). Αλλά αυτό είναι κάτι το συνηθισμένο σε τέτοιου μεγέθους στροβιλοαντιδραστήρες [10].



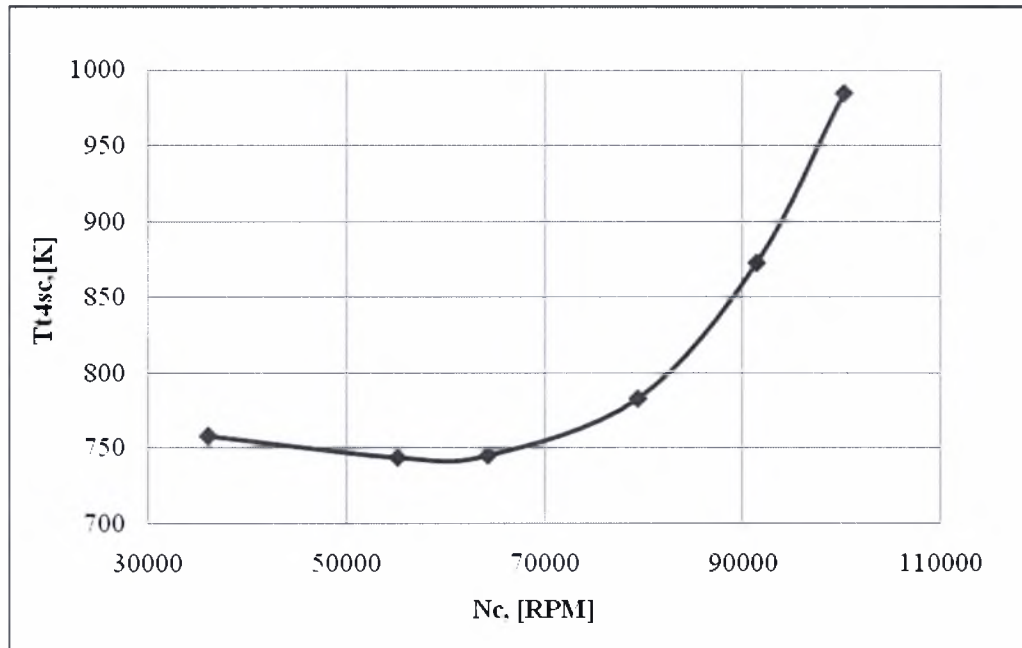
Σχήμα 3.15. Βαθμός απόδοσης του θαλάμου καύσης.

Στο σχήμα 3.16 δίνεται η ανηγμένη κατανάλωση του καυσίμου συναρτήσει των ανηγμένων στροφών η οποία απ' ό τι φαίνεται παρουσιάζει μια παραβολική εξάρτηση από της στροφές.

Η θερμοκρασία εξόδου του θαλάμου καύση έτσι όπως έχει προκύψει από τους υπολογισμούς εικονίζεται στο σχήμα 3.17. Συγκρίνοντας με το σχήμα 3.5 όπου εικονίζεται η μετρούμενη T_{t4} , η υπολογιζόμενη T_{t4s} έχει μια πιο ομαλή συμπεριφορά με την αύξηση των στροφών και παίρνει τιμές μικρότερες σε σχέση με τις μετρούμενες.



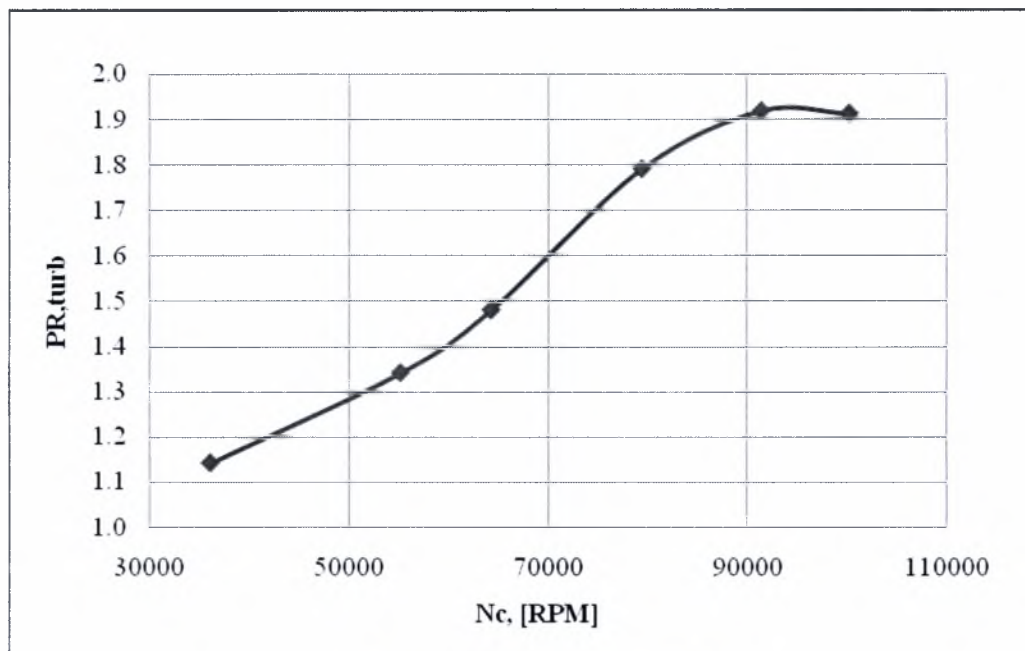
Σχήμα 3.16. Ανηγμένη κατανάλωση καυσίμου.



Σχήμα 3.17. Η υπολογιζόμενη θερμοκρασία εξόδου του θαλάμου καύσης

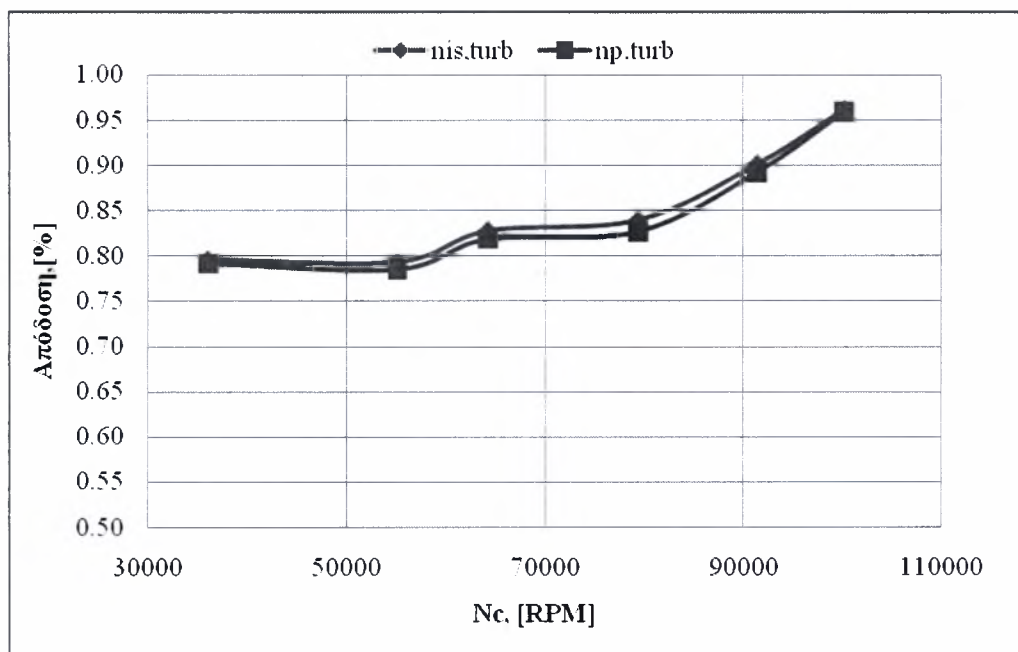
3.6.3 Στρόβιλος

Η μεταβολή του λόγου πίεσης του στροβίλου φαίνεται στο σχήμα 3.18. Στο μεγαλύτερο σημείο λειτουργίας ο λόγος πίεσης μειώνεται λίγο σε σχέση με το αμέσως προηγούμενο. Αυτό δεν μπορεί να αιτιολογηθεί για λόγο συμβαίνει, η μόνη υπόθεση που μπορεί να γίνει είναι ότι υπάρχει κάποιο σφάλμα στις μετρήσεις.



Σχήμα 3.18. Λόγος πίεσης στροβίλου

Ο πολυτροπικός και ο ισεντροπικός βαθμός του στροβίλου εικονίζονται στο σχήμα 3.19. Γίνεται φανερό ότι αυξάνονται συνεχώς με την αύξηση των στροφών σε αντίθεση με τις αποδόσεις του συμπιεστή (σχήμα 3.12) που εμφανίζουν μέγιστο. Επιπλέον δεν παρατηρείται συνεχόμενη αύξηση της διαφορά του ισεντροπικού από τον πολυτροπικό βαθμό απόδοσης όπως συμβαίνει στον συμπιεστή. Αυτό γίνεται γιατί μεταβάλλεται τόσο η θερμοκρασία εισόδου του στροβίλου όσο και η θερμοκρασία εξόδου, σε αντιπαράθεση με τον συμπιεστή που η θερμοκρασία εισόδου του, παραμένει σταθερή και ίση με αυτή του περιβάλλοντος, ενώ η θερμοκρασία εξόδου μεταβάλλεται στο εκάστοτε σημείο λειτουργίας του.

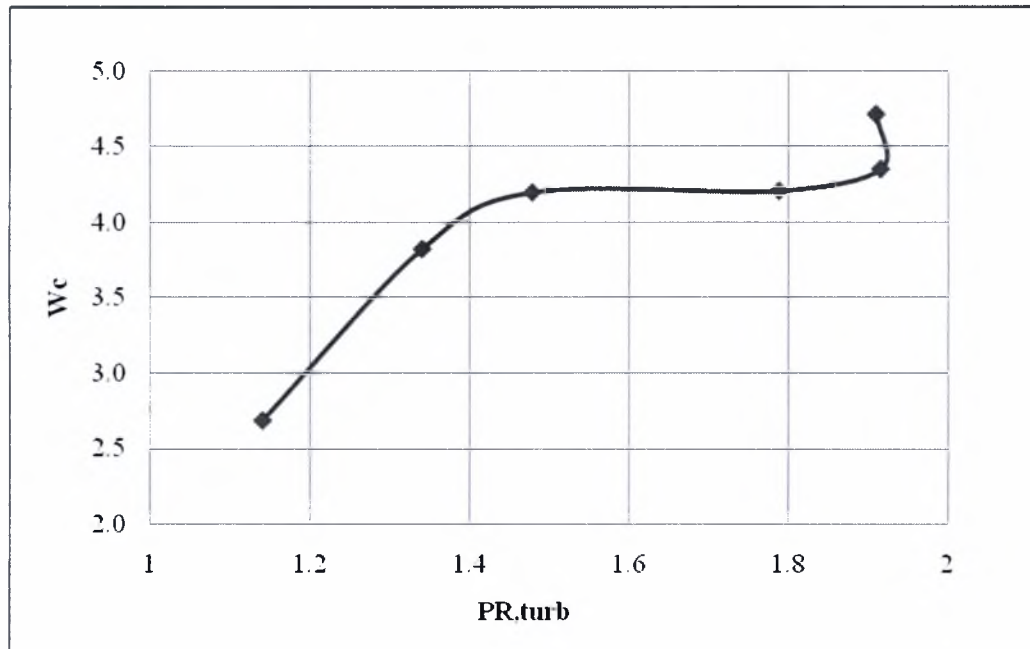


Σχήμα 3.19. Βαθμοί απόδοσης στροβίλου.

Στο σχήμα 3.20 εικονίζεται η χαρακτηριστική λειτουργίας του στροβίλου. Η ποσότητα W_c που φαίνεται στο σχήμα είναι η ανηγμένη παροχή η οποία δίνεται από τη σχέση:

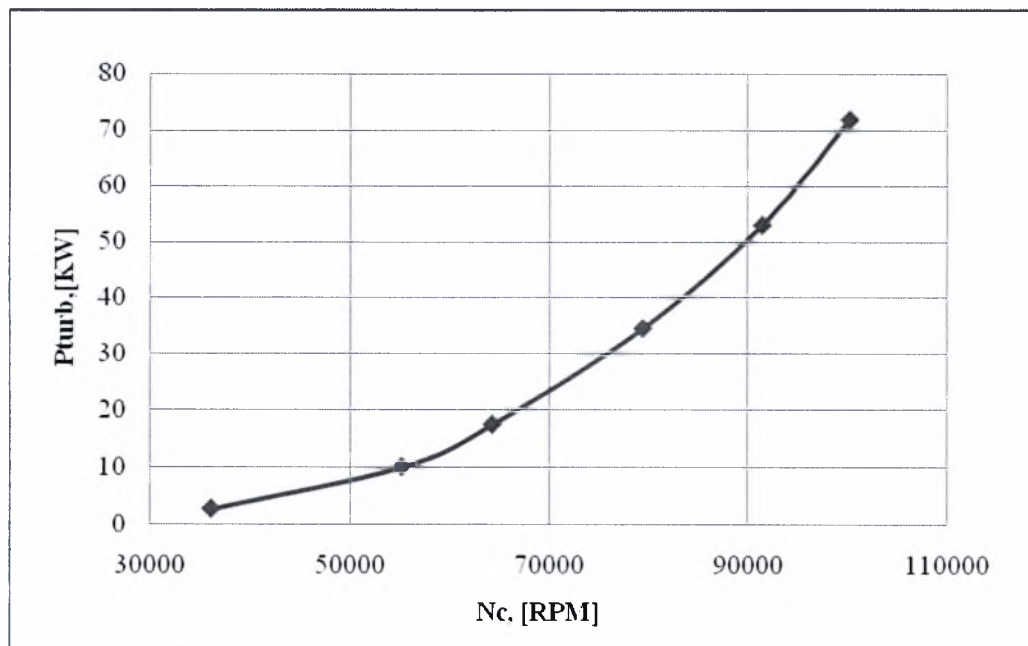
$$W_c = \frac{\dot{m}_g \sqrt{T_{14s}}}{P_{14}} \quad (3.49)$$

Παρατηρώντας την χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας φαίνεται ότι έχει μια ιδιαίζουσα μορφή η οποία δεν μπορεί να εξηγηθεί με τις υπάρχουσες μετρήσεις. Η μορφή αυτής της χαρακτηριστικής θα μας απασχολήσει σε επόμενο κεφάλαιο, όταν θα χρειαστεί να κατασκευαστεί ο χάρτης λειτουργίας του στροβίλου. Για να ξεκαθαρίσει το τοπίο θα πρέπει να ληφθούν μετρήσεις σε περισσότερα σημεία λειτουργία. Η μόνη αιτιολογία που μπορεί να δοθεί στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι ότι υπάρχει κάποιο σφάλμα στις μετρήσεις. Επιπλέον η μορφή αυτής της καμπύλης θα μπορούσε να δικαιολογηθεί από το γεγονός ότι ο στρόβιλος είναι στραγγαλισμένος. Αλλά επειδή οι μετρήσεις είναι λίγες, δεν μπορεί να ειπωθεί κάτι τέτοιο με σιγουριά.



Σχήμα 3.20. Χαρακτηριστική λειτουργίας στροβίλου

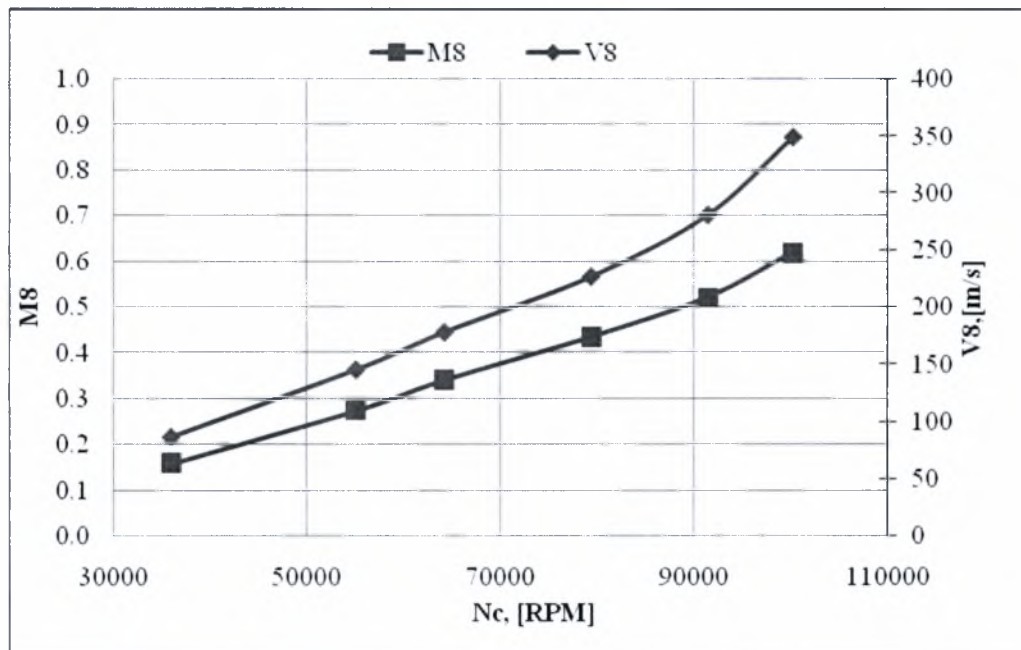
Ενδεικτικά, στο σχήμα 3.21, παρουσιάζεται η ισχύς που παράγει ο στρόβιλος. Εντύπωση προκαλεί το γεγονός που σε μια μηχανή τόσο μικρών διαστάσεων, παράγονται τόσο υψηλά επίπεδα ισχύος. Οι τιμές της κατανάλωσης ισχύος από τον συμπιεστή, είναι ελαφρώς μικρότερες, αφού ο μηχανικός βαθμός απόδοσης είναι $\eta_m = 0.98$.



Σχήμα 3.21. Παραγόμενη ισχύς από το στρόβιλο.

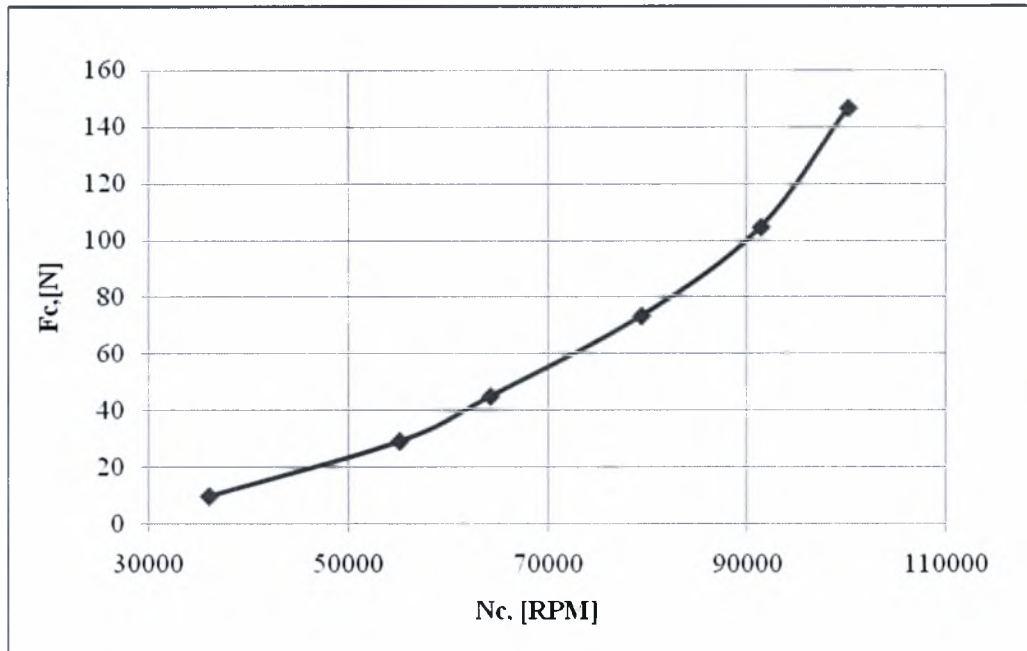
3.6.4 Ακροφύσιο

Στο σχήμα που ακολουθεί (σχήμα 3.21) φαίνεται ο αριθμός Mach και η ταχύτητα των καυσαερίων στην έξοδο του ακροφυσίου. Ο μέγιστος αριθμός Mach είναι αρκετά μικρότερος της μονάδας, πράγμα που σημαίνει ότι το ακροφύσιο βρίσκεται αρκετά μακριά από την περιοχή στραγγαλισμού.



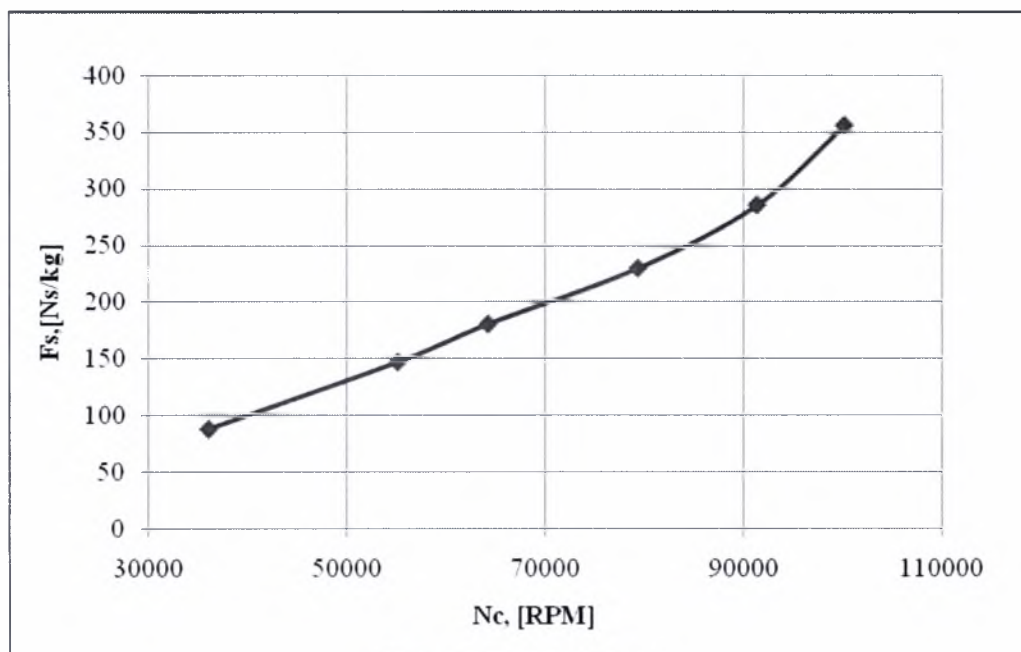
Σχήμα 3.22. Ταχύτητα και αριθμός Mach στην έξοδο του ακροφυσίου.

Στην συνέχεια φαίνεται η ανηγμένη ώση που παράγει ο κινητήρας συναρτήσει των ανηγμένων στροφών (σχήμα 3.22). Παρατηρώντας προσέχτικα την γραφική παράσταση φαίνεται ότι ο κινητήρας στο μέγιστο σημείο λειτουργία που μετρήθηκε, το οποίο υπολείπεται κατά 6000 RPM από το ονομαστικό σημείο λειτουργίας (108500 RPM), παράγει περίπου 145 N ώση η οποία υπολείπεται αρκετά της μέγιστης ώσης που αναφέρει ο κατασκευαστής. Αυτό αποτελεί ένδειξη ότι ο κινητήρας δεν μπορεί να παράγει την μέγιστη ώση που δίνει ο κατασκευαστή 230 N. Βέβαια αυτό αναφέρεται με κάθε επιφύλαξη αφού κατά την διάρκεια του πειράματος ο κινητήρας δεν λειτούργησε στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας, και ακόμα δεν είχε εγκατασταθεί κάποια δυναμοκυψέλη (load cell) έτσι ώστε να υπάρχει και η μέτρηση της ώσης.

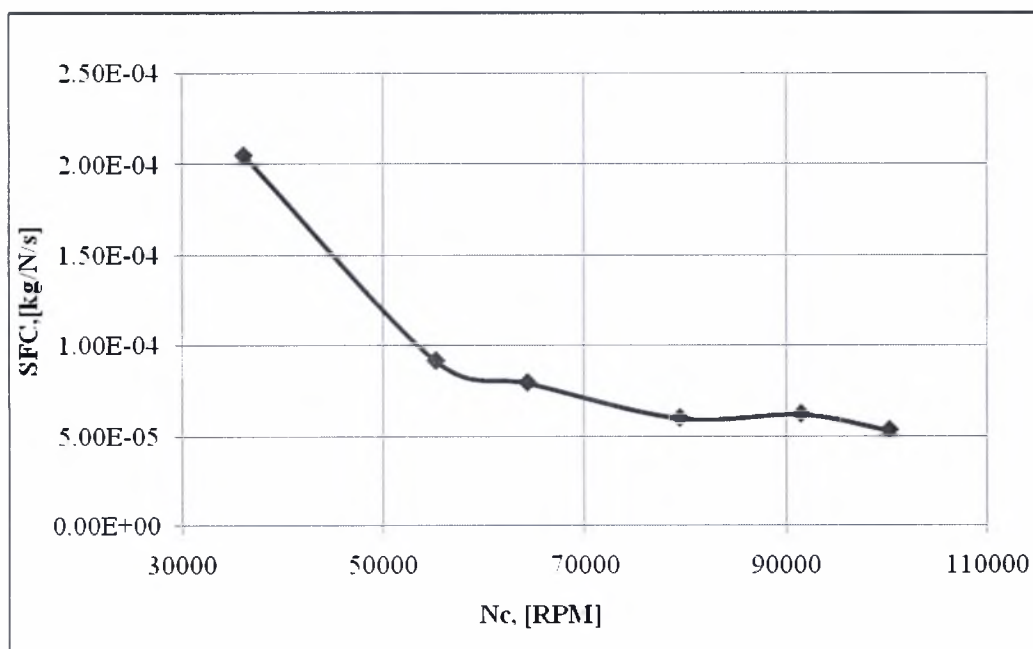


Σχήμα 3.23. Ανηγμένη ώση του κινητήρα

Άλλες παράμετροι που καθορίζουν τη λειτουργία του κινητήρα είναι η ειδική ώση και η ειδική κατανάλωση καυσίμου, οι οποίες φαίνονται στην επόμενη σελίδα. Η ειδική ώση είναι ένα μέτρο της συγκέντρωσης της μηχανής. Ενώ η ειδική κατανάλωση είναι ένδειξη της αποδοτικής λειτουργίας της μηχανής. Παρατηρώντας το σχήμα 3.24 φαίνεται ότι η ειδική κατανάλωση τείνει προς μια σταθερή τιμή όσο αυξάνουν οι στροφές. Αυτό συμβαίνει γιατί τείνει προς το ονομαστικό σημείο λειτουργίας της.



Σχήμα 3.24. Ειδική ώση.



Σχήμα 3.25. Ειδική κατανάλωση.

4. Κατασκευή υπολογιστικού μοντέλου

Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται τα χαρακτηριστικά που θα πρέπει να έχει το μοντέλο για τον κινητήρα Olympus. Επιπλέον παρουσιάζονται οι γενικές αρχές με τις οποίες λειτουργεί ο κώδικας TJ. Και τέλος παρουσιάζονται με την βοήθεια των χαρτών του στροβίλου και του συμπιεστή, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

4.1 Απαιτήσεις μοντέλου

Για να είναι εύχρηστο το μοντέλο και κατανοητό στο χρήστη πρέπει να ικανοποιούνται οι παρακάτω απαιτήσεις[37]:

1. Το μοντέλο πρέπει να βοηθά στην κατανόηση των διεργασιών που επιτελούνται στον αεροστρόβιλο. Δηλαδή θα πρέπει το μοντέλο να εκφράζει χαρακτηριστικά μεγέθη που προσδιορίζουν τη λειτουργία του πραγματικού συστήματος. Για παράδειγμα ο λόγος πίεσης

στο συμπιεστή και ο βαθμός απόδοσης του στροβίλου είναι χαρακτηριστικά μεγέθη για την περιγραφή του αεροστροβίλου.

2. Η δομή του μοντέλου πρέπει να ακολουθεί τμηματικά την φυσική διάκριση του είδους των διεργασιών που επιτελούνται στα διάφορα υποσυστήματα της εγκατάστασης (π.χ. συμπίεση, καύση, αποτόνωση).
3. Να είναι όσο το δυνατόν απλό, για να διευκολύνει την υπολογιστική προσομοίωση.

4.2 Γενικές αρχές – Ορισμοί

Ως μοντέλο ορίζεται κάθε περιγραφή συστήματος η οποία επιτρέπει να προβλεφθεί η συμπεριφορά του όταν υπόκειται σε καθορισμένες εισόδους.

Ανάλογα με τον τρόπο που δομούνται τα μοντέλα χωρίζονται σε δυο κατηγορίες, εσωτερικά και εξωτερικά.

Εξωτερικά είναι τα μοντέλα που προσδιορίζουν μόνο την έξοδο ενός συστήματος σε σχέση με την είσοδο.

Εσωτερικά είναι τα μοντέλα που για μια συγκεκριμένη είσοδο, πέρα από την έξοδο του συστήματος υπολογίζουν και όλες εκείνες τις παραμέτρους που βοηθούν στην περιγραφή ολόκληρης της δομής του συστήματος.

Σε σχέση με τη διαδικασία διαμόρφωσης των μοντέλων υπάρχουν δυο βασικές μεθοδολογικές κατηγορίες:

- A. Η φυσική ή αναλυτική μοντελοποίηση
- B. Η συναρτησιακή ή αντιπροσωπευτική μοντελοποίηση

Στην πρώτη κατηγορία, η ανάλυση και περιγραφή του συστήματος γίνεται με επίλυση όλων εκείνων των εξισώσεων που διέπουν τις διεργασίες που πραγματοποιούνται μέσα στο σύστημα. Στη δεύτερη κατηγορία, γίνεται χρήση μιας συνάρτησης μεταφοράς η οποία έχει συγκροτηθεί από πειραματικά δεδομένα και προσδιορίζει μόνο την έξοδο του συστήματος. Τα μοντέλα που προκύπτουν από την αναλυτική μοντελοποίηση είναι συνήθως εσωτερικά, ενώ τα μοντέλα από την συναρτησιακή μοντελοποίηση είναι εκ των πραγμάτων εξωτερικά, αφού δεν υπάρχει άλλη πληροφορία πέρα από την έξοδο του.

Αναφορικά με τις κατηγορίες που ορίστηκαν παραπάνω, το πληρέστερο μοντέλο μιας εγκατάστασης αεροστροβίλου θα είναι φυσικού τύπου (πλήρης διατύπωση των φυσικών νόμων) και εσωτερικής δομής (εφαρμογή των νόμων στο εσωτερικό των συνιστωσών της εγκατάστασης).

Η γενική μαθηματική διατύπωση ενός τέτοιου μοντέλου είναι [6]:

$$F(\bar{z}, \bar{u}, \bar{g}) = 0 \quad (4.1)$$

Όπου

\bar{z} : το διάνυσμα κατάστασης που περιλαμβάνει σε κάθε σημείο της εγκατάστασης τις αεροθερμοδυναμικές ιδιότητες του εργαζόμενου μέσου (διάνυσμα λειτουργικών μεταβλητών)

\bar{u} : το διάνυσμα εισόδου που περιλαμβάνει τις παραμέτρους ελέγχου και συνθήκες περιβάλλοντος της εγκατάστασης (διάνυσμα συνθηκών λειτουργίας)

\bar{g} : το διάνυσμα που περιλαμβάνει τα πλήρη γεωμετρικά στοιχεία της εγκατάστασης (διάνυσμα γεωμετρικής ταυτότητας)

F: στήλη εξισώσεων (φυσικοί νόμοι)

4.2.1 Υπολογιστικές δυσκολίες μοντελοποίησης

Για την πραγματοποίηση της μοντελοποίησης εμφανίζονται οι παρακάτω υπολογιστικές δυσκολίες:

1. Για την περίπτωση του αεροστροβίλου οι εξισώσεις που περιγράφουν την ροή σε τρισδιάστατη μορφή δεν έχουν επιλυθεί πλήρως, παρά την τεράστια εξέλιξη στα υπολογιστικά συστήματα.
2. Η δισδιάστατη επίλυση των εξισώσεων σε συνδυασμό με ημιεμπειρικές σχέσεις απαιτούν σημαντικό πλήθος δεδομένων ως προς τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συστήματος για τα οποία συνήθως δεν υπάρχουν διαθέσιμες πληροφορίες, με αποτέλεσμα αυτή η μεθοδολογία να είναι αρκετά δύσχρηστη.
3. Το μονοδιάστατο μοντέλο, που λαμβάνει υπόψη μια γραμμή ροής σαν αντιπροσωπευτική της μέσης κατάστασης που επικρατεί σε κάθε διατομή είναι αρκετά διαδεδομένο στην

προσομοίωση στροβιλομηχανών. Για να ανακτηθούν τα δεδομένα που λείπουν από αυτή την απλοποίηση έχουν αναπτυχθεί εμπειρικές σχέσεις οι οποίες απαιτούν αρκετά στοιχεία για την γεωμετρία των πτερυγώσεων.

Από τις παραπάνω παρατηρήσεις είναι φανερό γιατί η μοντελοποίηση περιορίζεται στη μονοδιάστατη θεώρηση και στη διακεκριμενοποίηση των εγκαταστάσεων (σε επίπεδο διαχωρισμού του είδους των διεργασιών π.χ. συμπίεση, αποτόνωση κλπ.), ώστε να περιορίζεται ο όγκος των δεδομένων που αφορούν τα γεωμετρικά στοιχεία.

4.2.2 Μικτά μοντέλα

Μια λύση που συνδυάζει τα πλεονεκτήματα εσωτερικών και εξωτερικών μοντέλων είναι τα μικτά μοντέλα. Στα μοντέλα αυτά αν και διατηρείται η εσωτερική δομή, οι ημιεμπειρικές σχέσεις κάθε συνιστώσας που περιέχουν λεπτομερή γεωμετρικά μεγέθη αντικαθίστανται από τις συναρτησιακές συσχετίσεις λειτουργικών παραμέτρων, που αποδίδονται με το πεδίο χαρακτηριστικών της. Το πεδίο χαρακτηριστικών μπορεί να έχει προκύψει είτε πειραματικά σε δοκιμαστήρια, είτε αναλυτικά από υπολογιστικά προγράμματα επίλυσης της ροής στη συνιστώσα.

Ένα μικτό μοντέλο αποτελεί ουσιαστικά την φυσικού τύπου σύζευξη μοντέλων λειτουργικών συνιστωσών που έχουν προκύψει εν μέρει με συναρτησιακό τρόπο.

4.2.3 Συναρτησιακά μοντέλα συνιστωσών

Για την εφαρμογή όσων αναφέρθηκαν προηγουμένως, ο αεροστρόβιλος χωρίζεται σε επιμέρους λειτουργικές συνιστώσες. Δηλαδή ο αεροστρόβιλος, που αποτελεί το προς μελέτη σύστημα, διαιρείται σε μια ομάδα υποσυστημάτων, για την ευκολότερη εφαρμογή των νόμων εκείνων που περιγράφουν κάθε ένα από τα υποσυστήματα αυτά. Κάθε λειτουργική συνιστώσα θεωρείται σαν ένας όγκος ελέγχου, στον οποίο οι διεργασίες που επιτελούνται εκφράζονται με τη συσχέτιση της κατάστασης του εργαζόμενου μέσου μέσα στα όρια του όγκου αυτού. Για μονοδιάστατη θεώρηση, τα όρια αυτά είναι αντιπροσωπευτικά σημεία στις διατομές εισόδου και

εξόδου του όγκου ελέγχου. Η κατάσταση του εργαζόμενου μέσου εκφράζεται σε κάθε διατομή από το διάνυσμα κατάστασης $\bar{z} = [P_i \ T_i \ \dot{m} \ P \ T \ h \ S \ M \ FAR]$, όπου:

P_i : ολική πίεση

T_i : ολική θερμοκρασία

\dot{m} : μαζική παροχή

P : στατική πίεση

T : στατική θερμοκρασία

h : ενθαλπία

S : εντροπία

M : αριθμός Mach

FAR : λόγος καυσίμου – αέρα

Η μεθοδολογία της συναρτησιακής μοντελοποίησης βασίζεται στη διατύπωση εξισώσεων και παραμέτρων στις οποίες απουσιάζουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του όγκου ελέγχου πλην ορισμένων εξαιρέσεων, όπως είναι το εμβαδό των διατομών εισόδου – εξόδου. Έτσι το διάνυσμα \bar{g} στη σχέση 4.1 αντικαθίσταται από το διάνυσμα \bar{x} το οποίο περιλαμβάνει το πεδίο χαρακτηριστικών παραμέτρων του όγκου ελέγχου.

Σύμφωνα με τα προηγούμενα η γενική μαθηματική διατύπωση οποιασδήποτε συνιστώσας έχει την μορφή:

$$F_i(\bar{z}_{out,i} \ \bar{z}_{in,i} \ \bar{u}_i \ \bar{x}_i) = 0 \quad (4.2)$$

όπου:

i : δείκτης της i -οστής συνιστώσας

in : διατομή εισόδου της συνιστώσας

out : διατομή εξόδου της συνιστώσας

Η F_i αποτελεί ένα αποτελείται από ένα σύνολο συναρτήσεων που προσδιορίζουν τη συμπεριφορά του εργαζόμενου μέσου και επιπλέον δίνουν πληροφορίες σχετικά με την λειτουργία της εκάστοτε συνιστώσας. Πιο συγκεκριμένα οι σχέσεις αυτές διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Εξισώσεις ορισμού

$$F_{\text{def},i}(\bar{z}_{\text{out},i}, \bar{z}_{\text{in},i}, \bar{u}_i, \bar{x}_i) = 0 \quad (4.3)$$

- Συσχετίσεις χαρακτηριστικών παραμέτρων

$$F_{\text{map},i}(\bar{x}_i) = 0 \quad (4.4)$$

- Εξισώσεις διατήρησης

$$F_{\text{con},i}(\bar{z}_{\text{out},i}, \bar{z}_{\text{in},i}, \bar{u}_i) = 0 \quad (4.5)$$

- Εξισώσεις συμπίεσότητας

$$F_{\text{com},i}(\bar{z}_{\text{in},i}) = 0 \quad (4.6)$$

$$F_{\text{com},i}(\bar{z}_{\text{out},i}) = 0 \quad (4.7)$$

4.3 Διακεκριμενοποίηση του αεροστροβίλου

Για να είναι δυνατή η προσομοίωση του κινητήρα Olympus, απαιτείται η διακεκριμενοποίηση του σε επιμέρους συνιστώσες, έτσι ώστε κάθε μία να επιτελεί μια συγκεκριμένη διεργασία. Σύμφωνα με την σειρά παρουσίας τους στη μηχανής, οι συνιστώσες είναι:

1. αγωγός εισόδου
2. συμπίεστής
3. διαχύτης
4. καυστήρας
5. στρόβιλος
6. ακροφύσιο

Τις συνιστώσες αυτές τις προσομοιώνουν αντίστοιχες υπορουτίνες στο πρόγραμμα, οι οποίες καλούνται διαδοχικά για την επίτευξη της προσομοίωσης. Κάθε λειτουργική συνιστώσα θεωρείται σαν ένας όγκος ελέγχου, στον οποίο οι διεργασίες που επιτελούνται εκφράζονται με την συσχέτιση της κατάστασης του εργαζόμενου μέσου στα όρια του όγκου αυτού. Για μονοδιάστατη θεώρηση, που χρησιμοποιείται στον κινητήρα Olympus, τα όρια αυτά είναι αντιπροσωπευτικά σημεία στις διατομές εισόδου και εξόδου κάθε συνιστώσας.

4.3.1 Σύζευξη συνιστωσών

Η κατάσταση του εργαζόμενου μέσου κατά τη διέλευση του από τις συνιστώσες, περιγράφεται από διάνυσμα κατάστασης $\bar{z} = [P_i \ T_i \ \dot{m} \ P \ T \ h \ S \ M \ FAR]$. Κατά τη διαδρομή αυτή του εργαζόμενου μέσου η έξοδος μιας συνιστώσας είναι ταυτοχρόνως είσοδος της επόμενης. Έτσι κατά τη σύζευξη των συνιστωσών του αεροστροβίλου απαιτείται η συμβιβαστικότητα της κατάστασης του εργαζόμενου μέσου στα όρια των συνιστωσών. Η απαίτηση αυτή εκφράζεται, από τη συνθήκη θερμοδυναμικής συμβιβαστικότητας που εκφράζεται από τη σχέση

$$\bar{z}_{out,i} = \bar{z}_{in,i+1} \quad (4.8)$$

Επιπλέον κατά τη σύζευξη των συνιστωσών, πρέπει να πληρείται το ισοζύγιο μηχανικής ενέργειας σε κάθε άξονα. Αυτό εκφράζεται με την αρχή διατήρησης της μηχανικής ισχύος σε κάθε ανεξάρτητο άξονα, που σε μόνιμη κατάσταση γράφεται ως:

$$\sum P_{comp} + P_{loss} = \sum P_{turb} \quad (4.9)$$

4.4 Δεδομένα εισόδου

Όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες ενότητες κάθε συνιστώσα περιγράφεται από μια ομάδα εξισώσεων οι οποίες προσδιορίζουν την λειτουργία της και την συμπεριφορά του κινούμενου μέσου. Οι εξισώσεις αυτές διαμορφώνονται σύμφωνα με τα δεδομένα που εισάγονται στο πρόγραμμα. Τα δεδομένα αυτά αποτελούν τις χαρακτηριστικές παραμέτρους κάθε συνιστώσας.

Συγκεκριμένα στο πρόγραμμα εισάγονται:

- Ο συντελεστής των απωλειών πίεσης στον αγωγό εισόδου
- Ο βαθμός απόδοσης του θαλάμου καύσης
- Ο λόγος πίεσης στο θάλαμο καύσης
- Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του ακροφυσίου
- Η θερμογόνος δύναμη του καυσίμου

Οι παράμετροι που αναφέρθηκαν προηγουμένως παραμένουν αμετάβλητες σε οποιοδήποτε σημείο λειτουργίας του κινητήρα. Και σχηματίζουν τις σχέσεις ορισμού των αντίστοιχων συνιστωσών.

Πέρα από τις χαρακτηριστικές παραμέτρους εισάγονται και συσχετίσεις χαρακτηριστικών παραμέτρων – χάρτες. Χάρτες εισάγονται μόνο για τον συμπιεστή και των στρόβιλο. Η εισαγωγή τους γίνεται με μορφή διακριτών σημείων, σε ξεχωριστά αρχεία εισόδου.

Τέλος απαραίτητο δεδομένο εισόδου για το πρόγραμμα είναι οι συνθήκες περιβάλλοντος πίεση, θερμοκρασία και υγρασία. Καθώς και η ταχύτητα της πτήσης.

4.4.1 Περιγραφή διαδικασίας επίλυσης

Σε προηγούμενη ενότητα παρουσιάστηκαν οι σχέσεις που χρησιμοποιούνται για την μοντελοποίηση της κάθε συνιστώσας. Αν και ορισμένες από τις σχέσεις αυτές είναι γραμμικές (πχ εξισώσεις διατήρησης) υπάρχουν και σχέσεις που είναι μη-γραμμικές. Επιπλέον το σύστημα εξισώσεων που προκύπτει είναι πεπλεγμένης μορφής με αποτέλεσμα να μπορεί να επιλυθεί μόνο με επαναληπτικό τρόπο.

Το σύστημα αποτελείται από 5 ομάδες εξισώσεων για κάθε συνιστώσα. Είναι οι σχέσεις 4.3 έως 4.9. Αυτές συγκροτούν ένα σύστημα N εξισώσεων με $N+1$ αγνώστους. Επομένως η

επίλυση του προϋποθέτει τον καθορισμό μιας ανεξάρτητης μεταβλητής (control variable) για τον καθορισμό των υπολοίπων N αγνώστων. Με την καθορισμό αυτής της ποσότητας, το μαθηματικό μοντέλο, μπορεί να υπολογίσει όλα τα μεγέθη που περιγράφουν τον θερμοδυναμικό κύκλο λειτουργίας του κινητήρα.

Η μορφή των συναρτησιακών μοντέλων των συνιστωσών προσφέρει την αναλυτική περιγραφή μεγεθών κατάντι της συνιστώσας συναρτήσε:

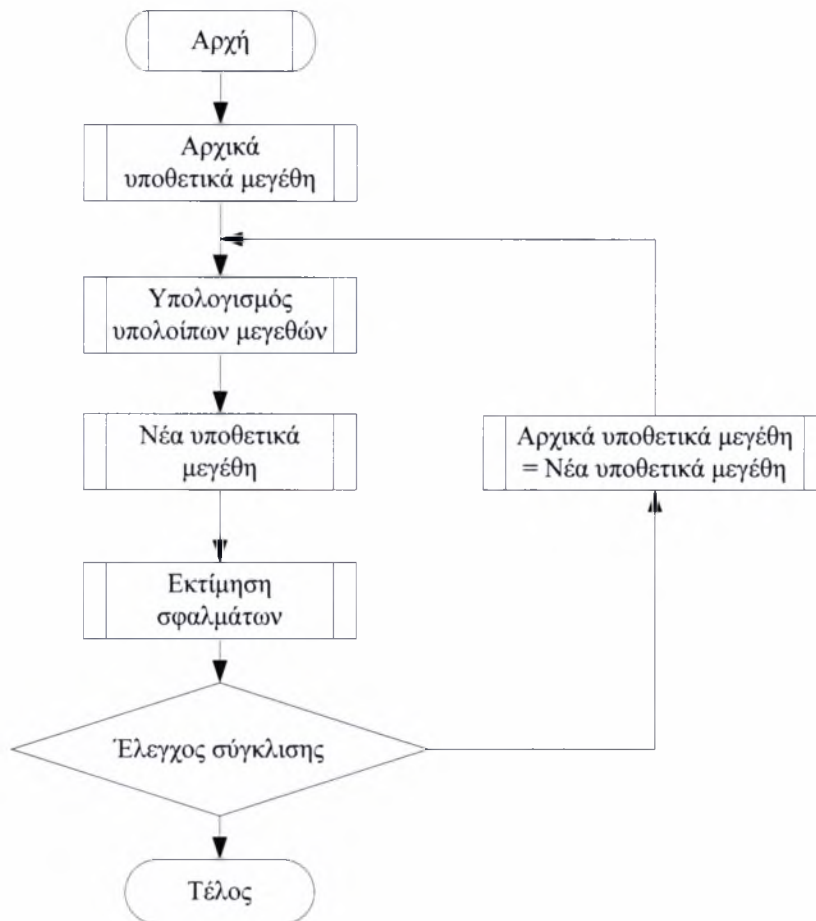
- των μεγεθών ανάντι της συνιστώσας με την βοήθεια των εξισώσεων διατήρησης
- των χαρακτηριστικών παραμέτρων (χάρτες συνιστωσών)

Ακόμα σε κάθε διατομή ένας αριθμός μεγεθών εκφράζεται αναλυτικά συναρτήσε κάποιων άλλων με την βοήθεια των εξισώσεων συμπιεστότητας. Ένας αριθμός χαρακτηριστικών παραμέτρων εκφράζεται συναρτήσε των υπολοίπων με τις συσχετίσεις που υπάρχουν μεταξύ τους. Και τέλος υπάρχουν και οι οριακές συνθήκες με αποτέλεσμα ορισμένες μεταβλητές να είναι γνωστές.

Άρα από την προηγούμενη ανάλυση είναι φανερό ότι δεν χρειάζεται να γίνει υπόθεση αρχικών τιμών για όλες της εξαρτημένες μεταβλητές. Αρκούν ορισμένες από αυτές για να καθοριστούν οι υπόλοιπες.

Έστω ότι καθορίζονται M αρχικά υποθετικά μεγέθη. Τα υπόλοιπα $N-M$ μεγέθη καθορίζονται από τις από τις $N-M$ εξισώσεις. Οι M εξισώσεις που δεν έχουν χρησιμοποιηθεί συμβάλλουν στον έλεγχο της ορθότητας των αρχικών τιμών αντικαθιστώντας σε αυτές τα υπολογισμένα μεγέθη $N-M$ και συγκρίνοντας τις νέες τιμές με τις προηγούμενες. Με αυτό τον τρόπο ορίζονται οι συναρτήσεις σφάλματος.

Ένα απλοποιημένο διάγραμμα τις διαδικασίας υπολογισμού είναι αυτό που φαίνεται στο σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1. Συνοπτικό διάγραμμα λειτουργίας του κώδικα

4.4.2 Μεταβλητή ελέγχου

Ως ανεξάρτητη μεταβλητή (μεταβλητή ελέγχου) για την επίλυση του συστήματος που προκύπτει από την μοντελοποίηση του αεροστροβίλου επιλέγεται ο αριθμός στροφών N , του άξονα του κινητήρα.

4.4.3 Υποθετικά μεγέθη και συναρτήσεις σφάλματος

Παρακάτω περιγράφεται η λογική βάσει της οποίας επιλέχθηκαν τα υποθετικά μεγέθη και οι συναρτήσεις σφάλματος. Αυτό γίνεται περιγράφοντας του υπολογισμούς που επιτελούνται σε κάθε συνιστώσα του αεροστροβίλου.

Αγωγός εισόδου

Στη είσοδο του αγωγού εισόδου είναι γνωστές οι συνθήκες περιβάλλοντος T_{atm} , P_{atm} ως οριακές συνθήκες του συστήματος. Ισχύουν οι σχέσεις:

$$P_{t1} = P_{atm}$$

$$T_{t1} = T_{atm}$$

$$FAR_1 = 0$$

Για να προσδιοριστούν οι υπόλοιπες μεταβλητές του διάνυσματος κατάστασης στη διατομή 1 του αγωγού εισόδου απαιτείται άλλη μια ποσότητα. Η ποσότητα αυτή επιλέγεται να είναι η παροχή του κινούμενου μέσου, η οποία αρχικά δίνεται έτσι ώστε να είναι ίση με την μαζική παροχή του κινούμενου μέσου στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας του κινητήρα. Βέβαια αυτή η τιμή θα αλλάξει σταδιακά με τις διαδοχικές προσεγγίσεις του αλγόριθμου επίλυσης και θα υπολογιστεί η τελική της τιμή. Έτσι προκύπτει το διάνυσμα κατάστασης στη θέση 1.

Από το συναρτησιακό μοντέλο του αγωγού εισόδου προκύπτει και το διάνυσμα κατάστασης του κινούμενου \bar{Z}_2 .

Συμπιεστής

Το διάνυσμα κατάστασης στην είσοδο του συμπιεστή (θέση 2) είναι γνωστό από τους υπολογισμούς στην αμέσως προηγούμενη συνιστώσα. Για τον υπολογισμό του \bar{Z}_3 είναι γνωστά τα μεγέθη \dot{m}_3 και FAR_3 , τα οποία προκύπτουν από τις εξισώσεις συνέχειας. Όμως απαιτούνται δυο ακόμα ποσότητες για τον προσδιορισμό του διάνυσματος κατάστασης στη θέση 3. Έτσι γίνεται υπόθεση του λόγου πίεσης του συμπιεστή:

$$PR_{comp} = V_1$$

Και υπολογίζεται η τιμή της p_{t3} .

Αφού έχει επιλεγεί ως μεταβλητή ελέγχου ο αριθμός των στροφών, και έχει γίνει υπόθεση της τιμής του λόγου πίεσης, από το χάρτη του συμπιεστή υπολογίζεται ο πολυτροπικός βαθμός απόδοσης. Οπότε με την βοήθεια του πολυτροπικού βαθμού απόδοσης υπολογίζεται η θερμοκρασία T_{t3} και με βάση αυτή την τιμή και της προηγούμενες το διάνυσμα \bar{z}_3 .

Καυστήρας

Ο λόγος πίεσης του θαλάμου καύσης αποτελεί χαρακτηριστική παράμετρο εισάγεται ως δεδομένο στο πρόγραμμα. Έτσι μπορεί να υπολογιστεί η πίεση εξόδου του καυστήρα p_{t4} . Επιπλέον χαρακτηριστική παράμετρος του καυστήρα είναι ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης ο οποίος και αυτός εισάγεται στο πρόγραμμα σαν δεδομένο. Αλλά από τα προηγούμενα δεδομένα δεν μπορεί να υπολογιστεί να κάποιο επιπλέον μέγεθος ώστε να προκύψει το διάνυσμα \bar{z}_4 . Έτσι γίνεται υπόθεση της T_{t4}

$$T_{t4} = V_2$$

Οπότε έχουμε τις σχέσεις

$$FAR_4 = \frac{(h_{t4} - h_g^o) - (h_{t3} - h_a^o)}{\eta_b LHV - (h_{t4} - h_g^o)}$$

και

$$\dot{m}_4 = (1 + FAR)\dot{m}_3$$

Επομένως είναι γνωστά τέσσερα μεγέθη και έτσι μπορεί να υπολογιστεί το διάνυσμα \bar{z}_4 .

Στρόβιλος

Οι υπολογισμοί στον στρόβιλο γίνονται με τον ίδιο τρόπο που γίνονται στον συμπιεστή. Δηλαδή, από τις εξισώσεις συνέχειας προκύπτουν οι ποσότητες \dot{m}_5 και FAR_5 . Γίνεται υπόθεση του λόγου πίεσης και υπολογίζεται η τιμή της P_{t5}



$$PR_{\text{turb}} = V_3$$

Επιπλέον έχει επιλεγεί ως μεταβλητή ελέγχου ο αριθμός των στροφών και με τη βοήθεια του λόγου πίεσης προκύπτει από το χάρτη του στροβίλου προκύπτει ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης και με τη βοήθεια αυτού η θερμοκρασία T_{15} .

Ακροφύσιο

Το ακροφύσιο είναι το τελευταίο τμήμα του κινητήρα. Αν υποθέσουμε ότι η ροή είναι χωρίς απώλειες ισχύουν οι σχέσεις

$$P_{18} = P_{17}$$

$$\dot{m}_8 = \dot{m}_{7s}$$

$$FAR_8 = FAR_7$$

$$T_{18} = T_{17}$$

Αφού είναι γνωστά τέσσερα μεγέθη μπορεί να προκύψει το διάλυμα κατάστασης στην είσοδο και στην έξοδο του ακροφυσίου. Συνεπώς δεν είναι απαραίτητο να οριστεί κανένα νέο υποθετικό μέγεθος.

4.5 Συναρτήσεις σφάλματος

Κριτήριο για τον προσδιορισμό των εξισώσεων σφαλμάτων αποτελεί η καλή συμπεριφορά του Ιακωβιανού πίνακα. Ο Ιακωβιανός πίνακας αποτελείται από τη μερική παράγωγο των σφαλμάτων με τα υποθετικά μεγέθη. Δηλαδή:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial e_1}{\partial V_1} & \frac{\partial e_1}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial e_1}{\partial V_i} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial e_i}{\partial V_1} & \frac{\partial e_i}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial e_i}{\partial V_i} \end{pmatrix}$$

Από την παρατήρηση του Ιακωβιανού πίνακα διαπιστώνεται κατά πόσο τα διάφορα σφάλματα που εισάγουμε εξαρτώνται από τα υποθετικά μεγέθη. Μεγάλη τιμή της μερικής παραγώγου $\partial e_i / \partial V_i$ σημαίνει ότι για μικρές μεταβολές του υποθετικού μεγέθους V_i προκύπτει μεγάλη μεταβολή του σφάλματος e_i , πράγμα που δεν είναι επιθυμητό για την επαναληπτική διαδικασία σύγκλισης.

Οι εξισώσεις σφαλμάτων e_i που διαλέγονται για τη χρησιμοποίηση στην επαναληπτική διαδικασία είναι τέτοιες ώστε οι μερικές παράγωγοι $\partial e_i / \partial V_i$ να παρουσιάζουν μικρές τιμές κοντά στη μονάδα και ο δείκτης κατάστασης του Ιακωβιανού πίνακα να είναι επίσης κοντά στη μονάδα.

Στην περίπτωση που σαν μεταβλητή απόφασης είναι οι στροφές του κινητήρα οι εξισώσεις σφαλμάτων είναι:

$$\bullet \quad e_1 = \frac{P_{14} - P_{14}^*}{P_{14}} \quad (4.10)$$

όπου: P_{14} : η ολική πίεση εισόδου στον στρόβιλο

P_{14}^* : η ολική πίεση εισόδου στο στρόβιλο υπολογισμένη από το χάρτη

$$\bullet \quad e_2 = \frac{\dot{m}_7 - \dot{m}_7^*}{\dot{m}_7} \quad (4.11)$$

όπου: \dot{m}_7 : η παροχή στην είσοδο του ακροφυσίου

\dot{m}_7^* : η παροχή στην είσοδο του ακροφυσίου η οποία υπολογίζεται από τη σχέση

$$\dot{m}_7^* = \frac{A_7 V_7 P_7}{T_7 R}$$

$$\bullet \quad e_3 = \frac{P_{\text{comp}} - P_{\text{turb}}}{P_{\text{turb}}} \quad (4.12)$$

όπου: P_{comp} : η ισχύς του συμπιεστή

P_{turb} : η ισχύς του στρόβιλου

4.6 Σύνοψη διαδικασίας υπολογισμού

Συνοψίζοντας όσα περιγράφηκαν παραπάνω έχουμε:

- a) Δεδομένα
1. Βαθμοί απόδοσης θαλάμου καύσης και ακροφυσίου
 2. Λόγοι πίεσης αγωγού εισόδου και θαλάμου καύσης
 3. Θερμογόνος δύναμη καυσίμου
 4. Χάρτες συμπίεστη και στροβίλου
 5. Συνθήκες περιβάλλοντος
- b) Μεταβλητές υπόθεσης (με μορφή διανύσματος)

$$\bar{V} = \begin{bmatrix} PR_{comp} \\ T_{t4} \\ PR_{turb} \end{bmatrix}$$

- c) Συναρτήσεις σφάλματος (με μορφή διανύσματος)

$$\bar{e} = \begin{bmatrix} \frac{P_{t5} - P_{t5}^*}{P_{t5}} \\ \frac{\dot{m}_7 - \dot{m}_7^*}{\dot{m}_7} \\ \frac{P_{comp} - P_{turb}}{P_{comp}} \end{bmatrix}$$

- d) Ανεξάρτητες μεταβλητές ελέγχου

- Μεταβλητή ελέγχου: Αριθμός στροφών του άξονα της μηχανής N

Έτσι το πρόβλημα προσομοίωσης και υπολογισμού του κύκλου λειτουργίας του κινητήρα καταλήγει στην επίλυση του πεπλεγμένου συστήματος $\bar{e}(\bar{V}) = 0$

4.7 Χάρτες συνιστώσων

4.7.1 Δεδομένα χαρτών

Τα πεδία των χαρακτηριστικών (χάρτες), του συμπιεστή και του στροβίλου, δίνονται παραμετρικά με μορφή πινάκων που περιλαμβάνουν τις τιμές των μεγεθών που συσχετίζουν. Οι παράμετροι αυτές είναι διορθωμένες ως προς τις συνθήκες εισόδου κάθε συνιστώσας. Συγκεκριμένα για κάθε συνιστώσα ξεχωριστά ισχύει:

Συμπιεστής

Στο χάρτη του συμπιεστή η παράμετρος των στροφών N_c δίνεται από την σχέση:

$$N_c = \frac{N}{\sqrt{\frac{T_{in}}{T_{ref}}}} \quad (4.13)$$

Η παράμετρος της παροχής από την εξίσωση:

$$W_c = \frac{\dot{m}_{in} \sqrt{\frac{T_{in}}{T_{ref}}}}{\frac{P_{in}}{P_{ref}}} \quad (4.14)$$

Επιπλέον στο χάρτη του συμπιεστή δίνεται ο λόγος πίεσης και ο πολυτροπικός βαθμός απόδοσης του όπως αυτοί υπολογίζονται από τις σχέσεις 3.4 και 3.7 αντίστοιχα.

Στρόβιλος

Στο χάρτη του στροβίλου η παράμετρος των στροφών N_c δίνεται από τη σχέση:

$$N_c = \frac{N / \sqrt{T_{in}}}{(N / \sqrt{T_{in}})_{des}} \quad (4.15)$$

Και η παράμετρος της παροχής:

$$W_c = \frac{\dot{m}_{in} \sqrt{T_{in}}}{P_{in}} N_c \quad (4.16)$$

Ακόμα στον χάρτη δίνεται ο λόγος πίεσης και ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης, όπως υπολογίζονται από τις σχέσεις 3.27 και 3.29 Αντίστοιχα.

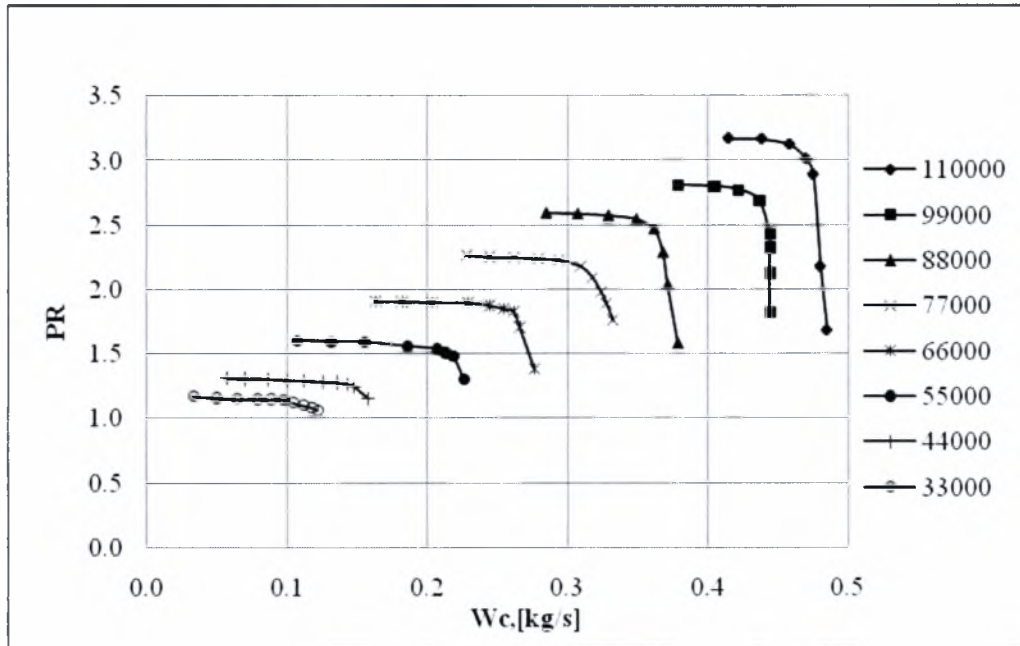
Βέβαια οι πίνακες αυτοί πρέπει να έχουν συγκεκριμένη μορφή όπως περιγράφεται στο παράρτημα Π3.

4.8 Κατασκευή χαρτών

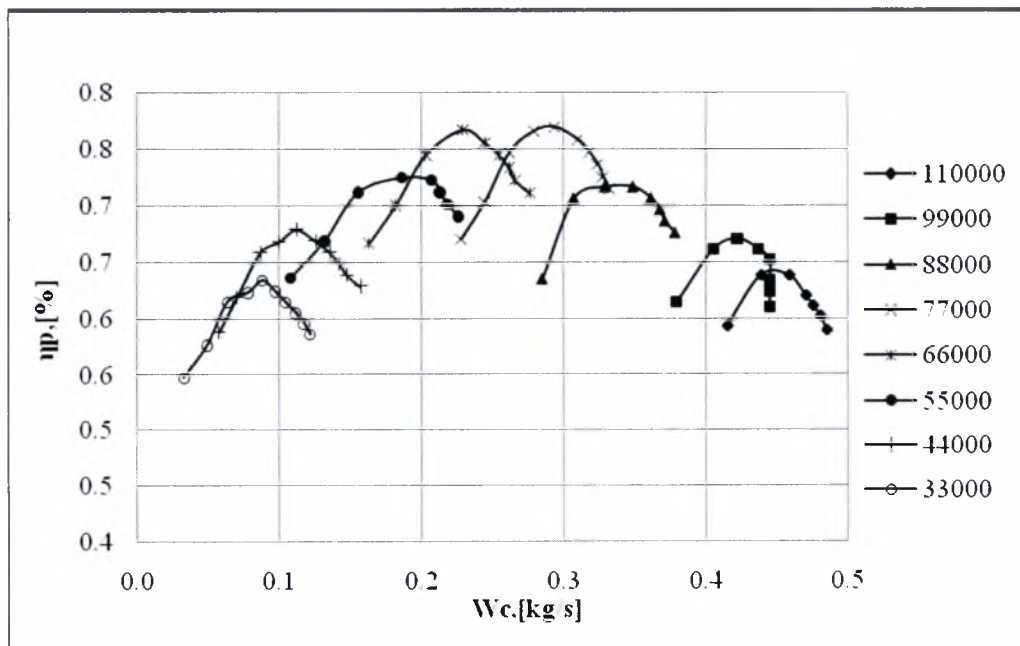
Για την κατασκευή των χαρτών έγινε αναζήτηση σε σχετική βιβλιογραφία που αφορούσε στροβιλοαντιδραστήρες παρόμοιου μεγέθους και τύπου με αυτό του Olympus [9, 13]. Σε πρώτη φάση, στους χάρτες αυτούς τοποθετήθηκαν τα σημεία λειτουργίας που λήφθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία και τροποποιήθηκαν έτσι ώστε τα πειραματικά σημεία λειτουργίας των συνιστωσών, συμπιεστή και στροβίλου, να είναι όσο το δυνατόν πλησιέστερα στα αντίστοιχα σημεία λειτουργίας των χαρτών. Τα σημεία λειτουργίας δόθηκαν με την βοήθεια των παραμέτρων που ορίστηκαν στην ενότητα 4.7.1. Η τροποποίηση αυτή ήταν με την με την μετακίνηση των ισοταχών καμπυλών των χαρτών.

Αλλά με την χονδροειδή αυτή τροποποίηση διαπιστώθηκε γρήγορα ότι το πρόγραμμα δεν συνέκλινε στα προβλεπόμενα (πειραματικά) σημεία. Αυτό είχε σαν συνέπεια να γίνουν πιο λεπτομερής διορθώσεις στις χαρακτηριστικές καμπύλες, του συμπιεστή και του στροβίλου, μετατοπίζοντας όχι μόνο τις ισοταχείς καμπύλες αλλά μεταβάλλοντας και την μορφή τους.

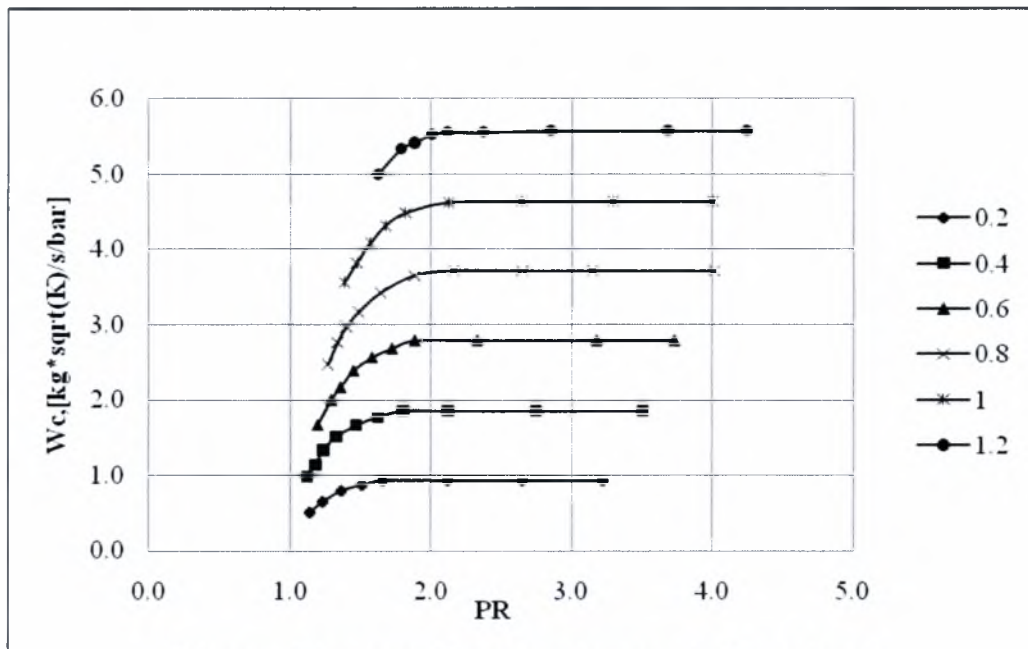
Η τελική μορφή των χαρτών φαίνεται στα διαγράμματα που ακολουθούν:



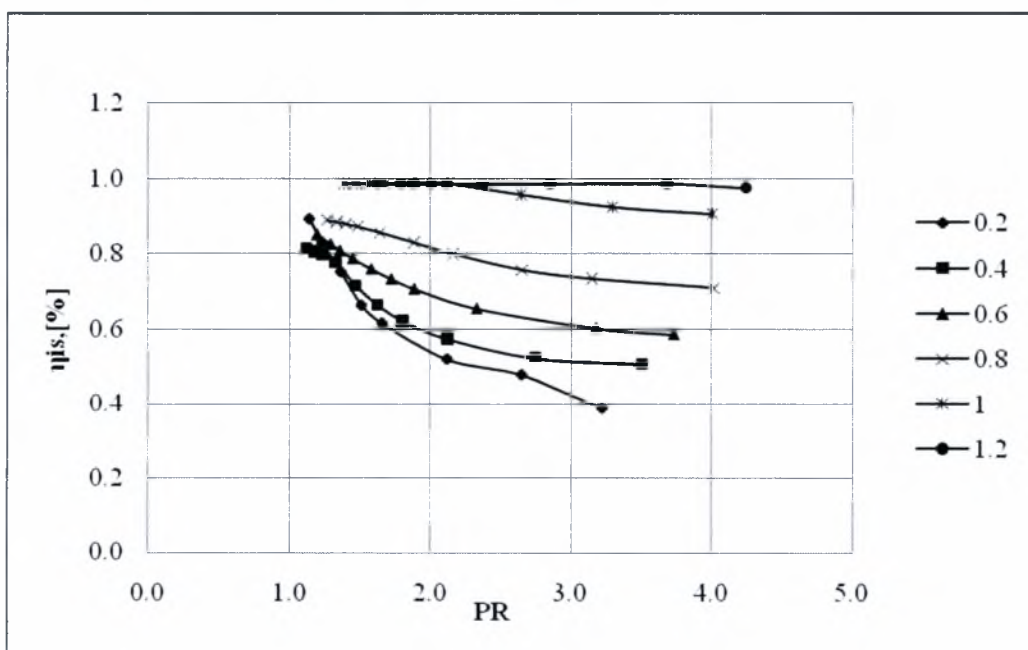
Σχήμα 4.2. Χάρτης συμπιεστή (λόγος πίεσης – ανηγμένη παροχή)



Σχήμα 4.3 Χάρτης συμπιεστή (πολυτροπικός βαθμός απόδοσης – ανηγμένη παροχή)



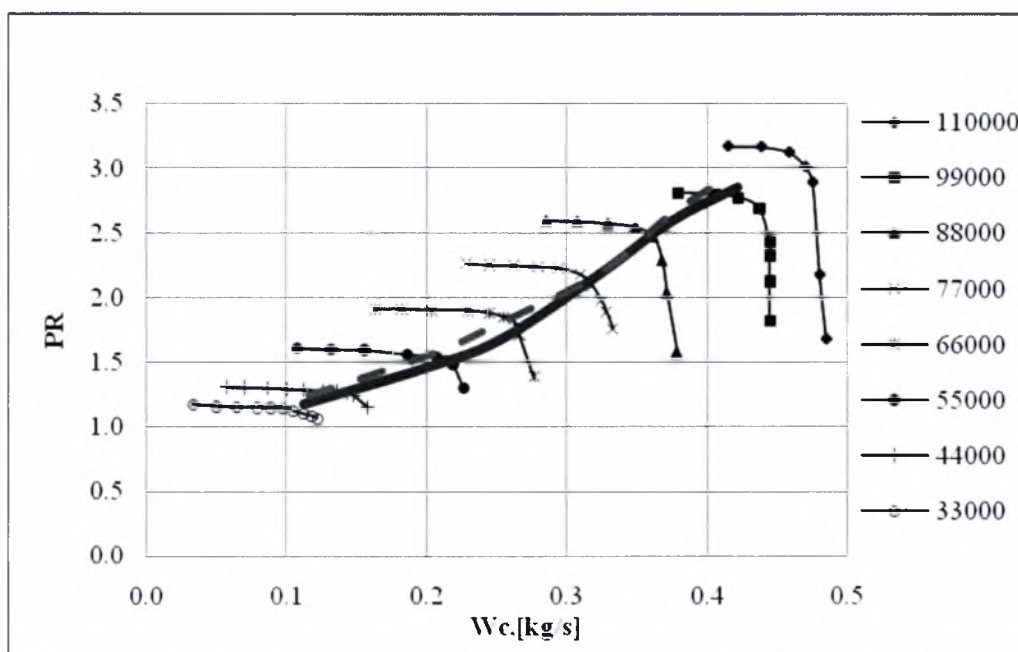
Σχήμα 4.4. Χάρτης στροβίλου (ανηγμένη παροχή – λόγος πίεσης)



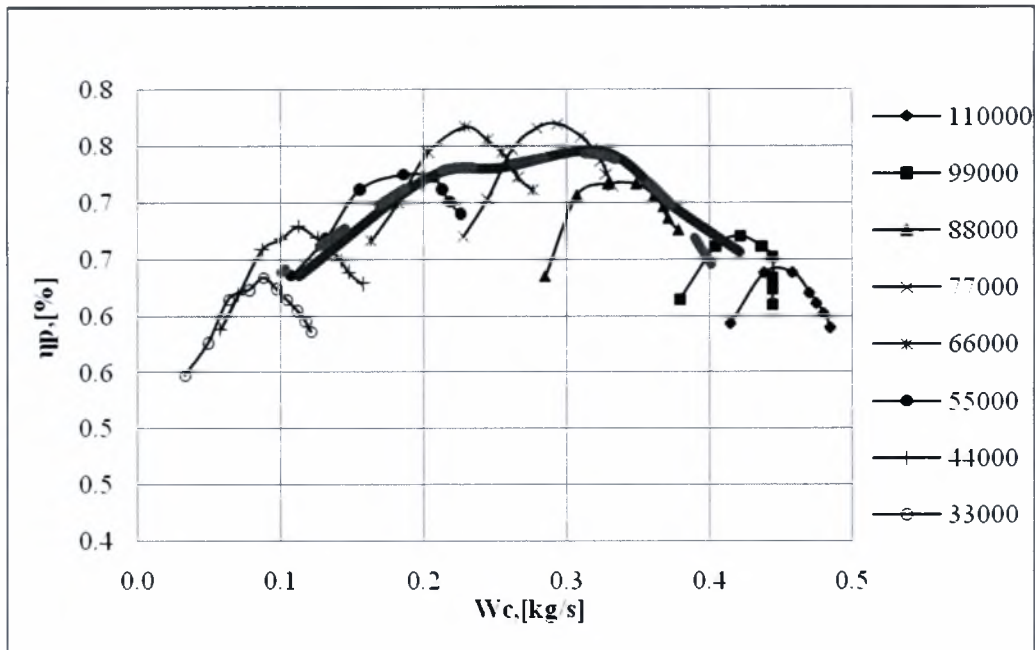
Σχήμα 4.5. Χάρτης στροβίλου (ισεντροπικός βαθμός απόδοσης – λόγος πίεσης)

4.9 Αποτελέσματα προσομοίωσης

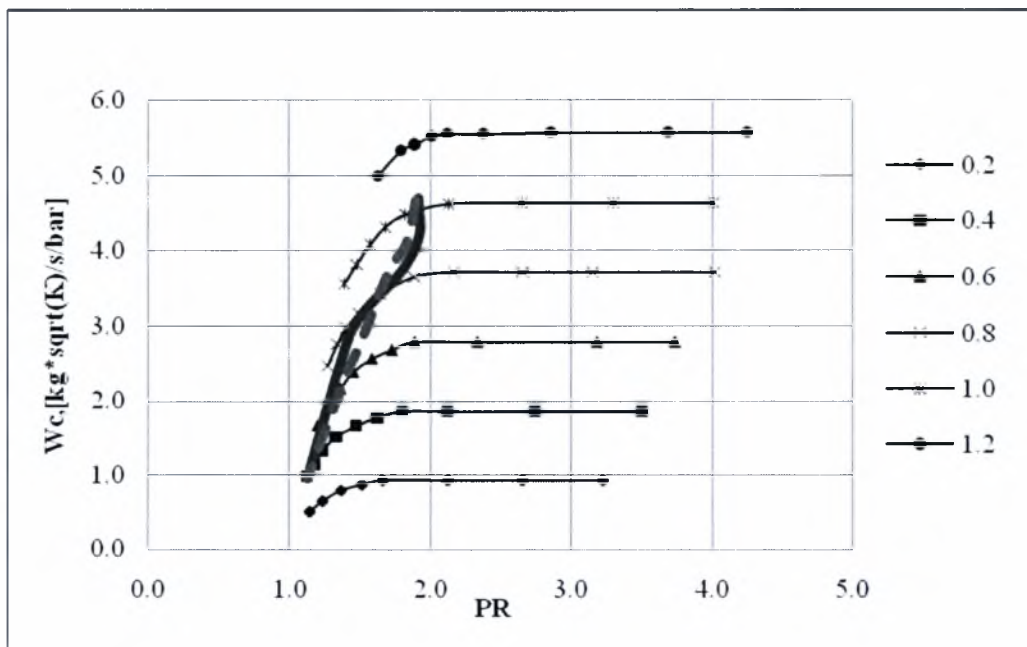
Στα διαγράμματα που ακολουθούν δίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με την βοήθεια των χαρτών του συμπιεστή και του στροβίλου. Πάνω στους χάρτες έχουν τοποθετηθεί η πειραματική γραμμή λειτουργίας και η υπολογιζόμενη από το πρόγραμμα TJ. Οι κόκκινες συνεχείς γραμμές αντιστοιχούν στα πειραματικά αποτελέσματα ενώ οι πράσινες διακεκομμένες στα υπολογιστικά αποτελέσματα.



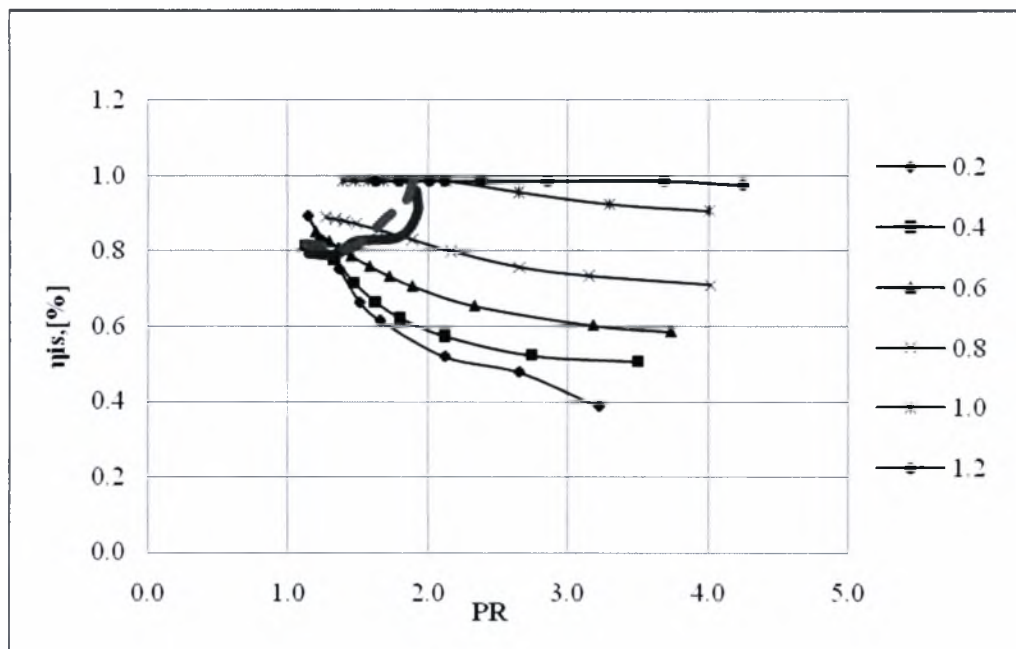
Σχήμα 4.6. Αποτελέσματα της προσομοίωσης στο χάρτη του συμπιεστή.



Σχήμα 4.7. Αποτελέσματα της προσομοίωσης στο χάρτη του συμπιεστή.



Σχήμα 4.8. Αποτελέσματα προσομοίωσης στο χάρτη του στροβίλου.



Σχήμα 4.9. Αποτελέσματα προσομοίωσης στο χάρτη του στροβίλου.

4.10 Συζήτηση αποτελεσμάτων

Βλέποντας τα προηγούμενα αποτελέσματα φαίνεται ότι ο κώδικας προσομοιώνει αρκετά καλά τον αεροστρόβιλο στις χαμηλές στροφές. Σε αντίθεση με τις υψηλότερες όπου δεν συγκλίνει τόσο καλά έτσι ώστε να συμπέσει στα πειραματικά σημεία λειτουργίας, και παρουσιάζεται μια μικρή απόκλιση. Ο λόγος που μπορεί να συμβαίνει αυτό είναι γιατί κατά την πειραματική διαδικασία δεν λήφθηκαν μετρήσεις από το ονομαστικό σημείο λειτουργίας (στις μέγιστες στροφές) του κινητήρα. Αυτό είχε σαν συνέπεια να μην είναι γνωστό πως ακριβώς θα έπρεπε να τροποποιηθούν οι χαρακτηριστικές λειτουργίας των συνιστωσών στις πολύ υψηλές στροφές.

Επιπλέον η απόκλιση φαίνεται να είναι μεγαλύτερη στους χάρτες του στροβίλου. Στους οποίους, είναι προφανές ότι ο κώδικας δεν μπορεί να «ακολουθήσει» το ιδιόμορφο σχήμα που έχουν οι καμπύλες των πειραματικών σημείων λειτουργίας, αλλά αντίθετα κινείται πιο ομαλά.

Η γραμμή λειτουργίας που έχει προκύψει από τον κώδικα στους χάρτες του στροβίλου είναι πιο φυσιολογική. Σε αντίθεση με την πειραματική που έχει αυτή την ιδιαίτερη μορφή. Η

συγκεκριμένη καμπύλη δεν μπορεί να εξηγηθεί, με τις υπάρχουσες μετρήσεις για πιο λόγο προκύπτει. Η μόνη εικασία που μπορεί να γίνει είναι ότι υπάρχει κάποιο συστηματικό σφάλμα στις μετρήσεις που αφορούν τον στρόβιλο, το οποίο εντείνεται καθώς αυξάνεται η ισχύς της μηχανής.

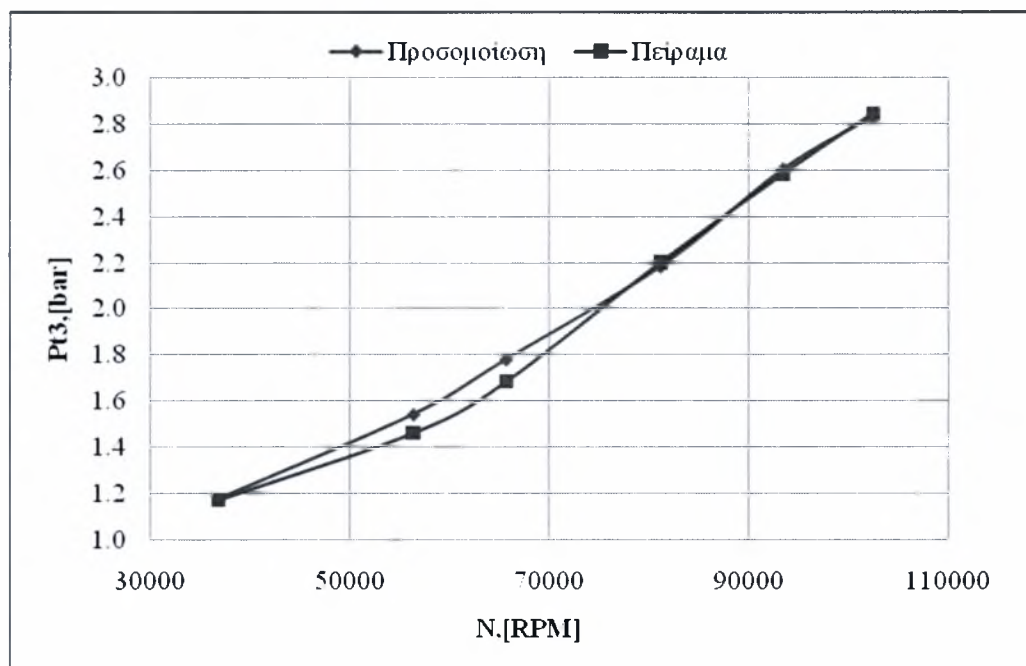
5. Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται συγκριτική παρουσίαση των μετρήσεων που λήφθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία με τις τιμές που λήφθηκαν από το πρόγραμμα προσομοίωσης. Η παρουσίαση γίνεται για κάθε συνιστώσα του αεροστροβίλου ξεχωριστά, με σκοπό να γίνουν πιο συγκεκριμένες οι παρατηρήσεις και σχολιασμοί.

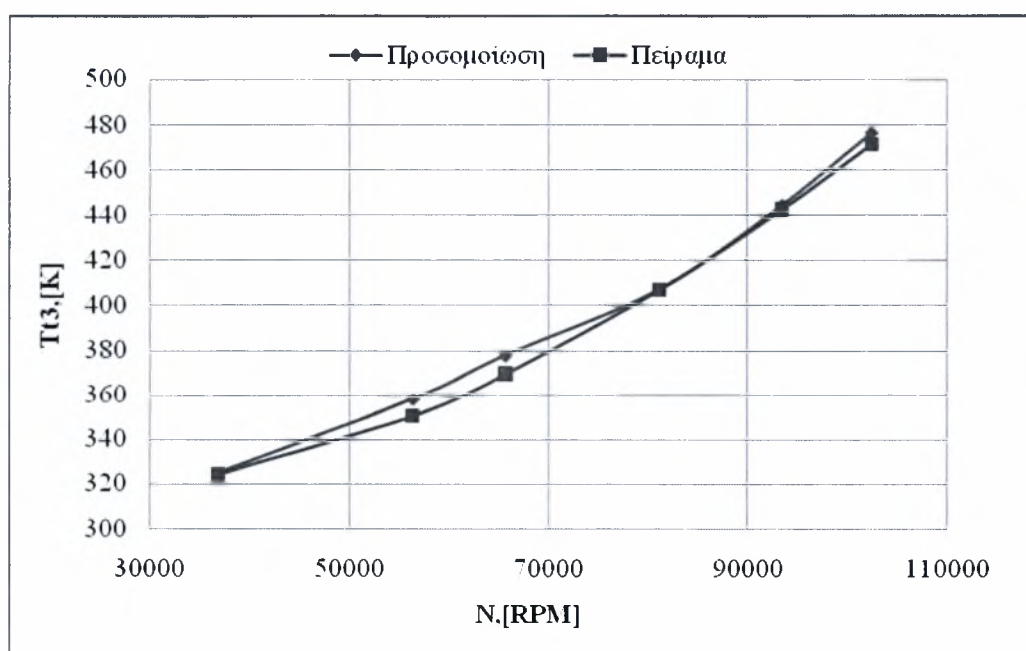
5.1 Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων

5.1.1 Συμπιεστής

Οι μετρήσεις που υπάρχουν για τον συμπιεστή είναι η ολική πίεση και θερμοκρασία εξόδου. Βέβαια έχει μετρηθεί και η στατική πίεση στην έξοδο του συμπιεστή, ωστόσο δεν λαμβάνεται υπόψη στη σύγκριση διότι μόνο η ολική πίεση αρκεί για την σύγκριση των δεδομένων. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα σχήματα 5.1 και 5.2.



Σχήμα 5.1. Ολική πίεση εξόδου συμπιεστή.

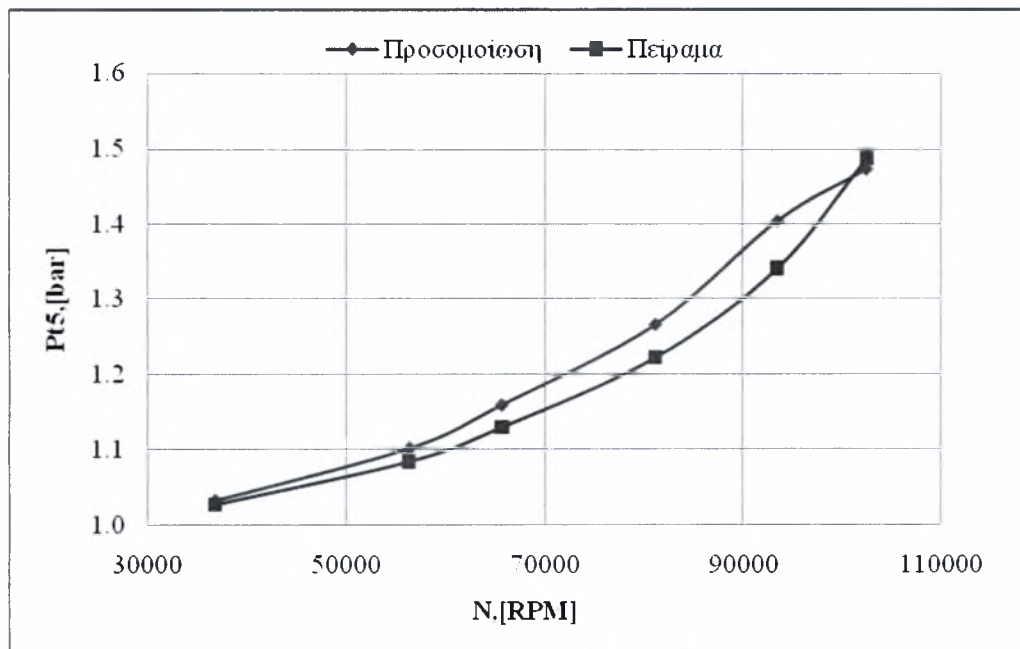


Σχήμα 5.2. Ολική θερμοκρασία εξόδου συμπιεστή.

Παρατηρώντας τα προηγούμενα διαγράμματα φαίνεται ότι ο κώδικας προσομοιώνει πολύ καλά την λειτουργία του συμπιεστή. Αφού τα σημεία λειτουργίας που έχουν υπολογιστεί από τον κώδικα σχεδόν συμπίπτουν με τα πειραματικά.

5.1.2 Στρόβιλος

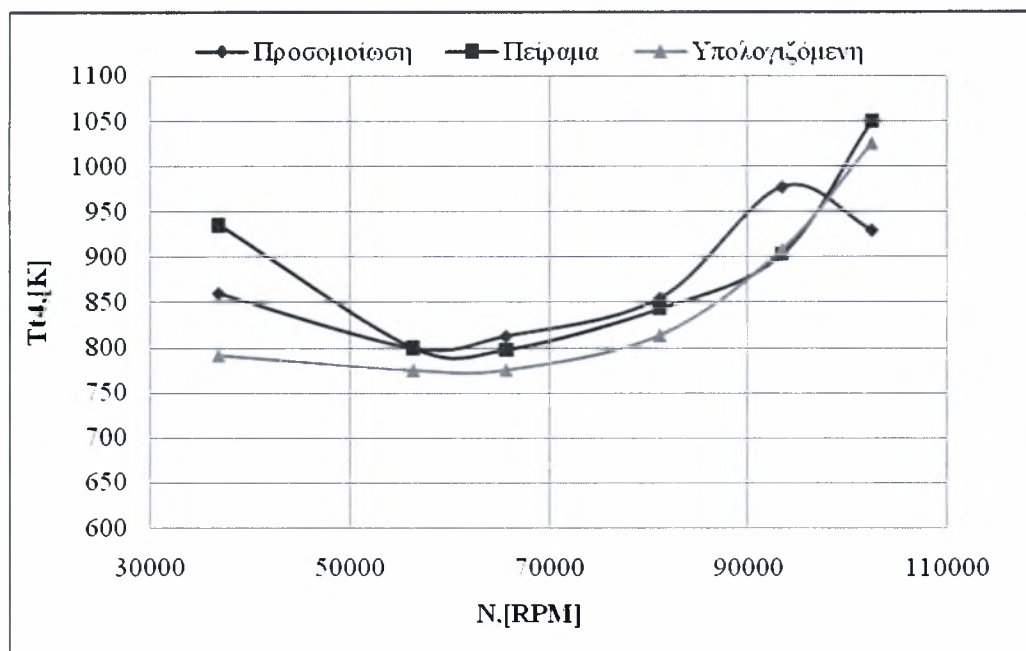
Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι μετρήσεις και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που έχουν να κάνουν με την λειτουργία του στροβίλου. Όπως στο συμπιεστή έτσι και στον στρόβιλο δεν αναφέρεται η μέτρηση της στατικής πίεσης αφού οι τιμές των ολικών μόνο πιέσεων αρκούν για την σύγκριση των δεδομένων.



Σχήμα 5.3. Ολική πίεση εξόδου του συμπιεστή.

Στο σχήμα 5.3 εικονίζεται η ολική πίεση εξόδου του στροβίλου, έτσι όπως μετρήθηκε και υπολογίστηκε κατά την πειραματική διαδικασία και την προσομοίωση, αντίστοιχα. Είναι φανερό ότι οι πειραματικές τιμές δεν προσεγγίστηκαν τόσο καλά όσο αυτές του συμπιεστή (σχήμα 5.1). Ωστόσο το σφάλμα που υπάρχει είναι μικρό, της τάξεως του 5%, που είναι μια αρκετά καλή προσέγγιση, λαμβάνοντας υπόψη ότι έγινε δειγματοληψία σε λίγα σημεία.

Η θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο φαίνεται στο σχήμα 5.4. Στο διάγραμμα του σχήματος απεικονίζονται, για λόγους πληρότητας και άμεσης σύγκρισης, η θερμοκρασία που έχει μετρηθεί, η υπολογιζόμενη με τον τρόπο που περιγράφεται στο κεφάλαιο 3, και αυτή που έχει προκύψει από τον κώδικα.



Σχήμα 5.4. Θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο.

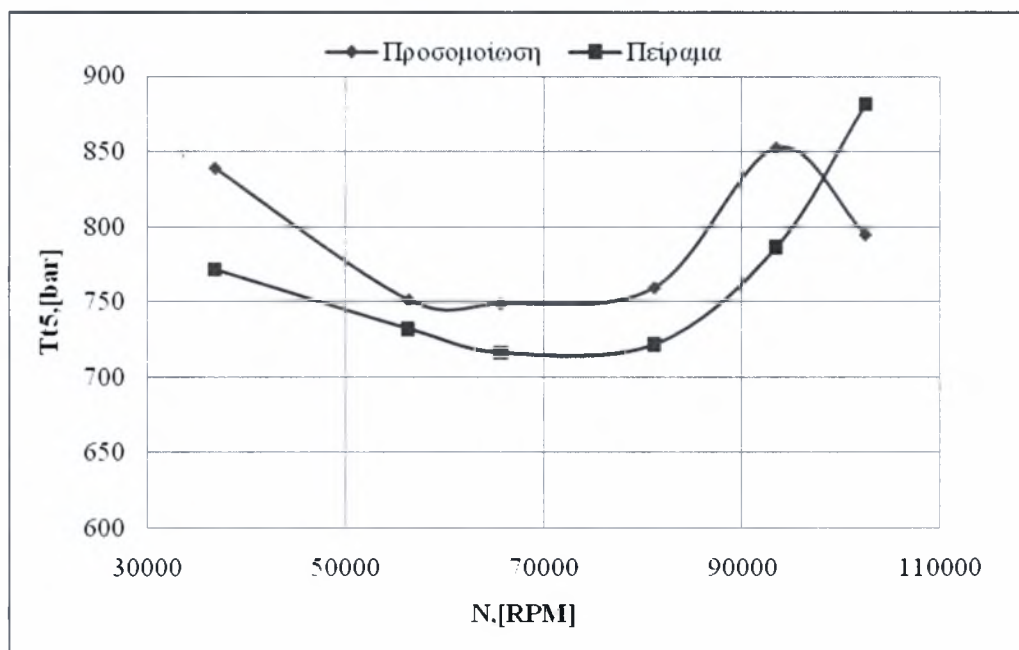
Παρατηρώντας το σχήμα 5.4 προκύπτει ότι ο κώδικας δεν έχει υπολογίσει με ικανοποιητική ακρίβεια την θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο. Φαίνεται να υπάρχει μια σταθερή απόκλιση από την υπολογιζόμενη τιμή της θερμοκρασίας. Για την οποία η μόνη εξήγηση που μπορεί να δοθεί, είναι ότι συμβαίνει επειδή οι ανηγμένες παροχές στο χάρτη του στροβίλου είναι υψηλότερες από αυτές που θα έπρεπε να είναι.

Συγκεκριμένα κοιτώντας το χάρτη του στροβίλου (σχήμα 4.8), για συγκεκριμένο λόγο πίεσης προκύπτει υψηλότερη τιμή της ανηγμένης παροχής. Το οποίο έχει σαν συνέπεια η θερμοκρασία εισόδου να επιβάλλεται να είναι υψηλότερη, κάτι που εξηγείται με τη βοήθεια της σχέσης 4.16. Όπου για δεδομένη παροχή καυσαερίων και πίεσης εισόδου, η θερμοκρασία εισόδου θα πρέπει να είναι υψηλότερη έτσι ώστε η ανηγμένη παροχή να είναι συμβατή με αυτή του χάρτη.

Ένα επιπλέον σχόλιο που μπορεί να γίνει για το σχήμα 5.4 είναι ότι η μεταβολή της θερμοκρασίας εισόδου στο στρόβιλο δεν ακολουθεί την ίδια εξάρτηση στις υψηλές στροφές. Αυτό είναι προφανώς σφάλμα στο χάρτη του στροβίλου. Γιατί όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο δεν λήφθηκαν μετρήσεις στις ονομαστικό σημείο λειτουργίας (μέγιστες στροφές) της μηχανής. Με αποτέλεσμα, οι ισοταχείς καμπύλες στους χάρτες να μην είναι φανερό πως θα διαμορφωθούν.

Και τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι υπήρξε δυσκολία στη διαμόρφωση του χάρτη του στροβίλου λόγω του ιδιόμορφου σχήματος που είχε η πειραματική καμπύλη λειτουργίας.

Στη συνέχεια δίνεται η θερμοκρασία εξόδου του στροβίλου (σχήμα 5.5), η οποία και αυτή ακολουθεί την ίδια εξάρτηση με την θερμοκρασία εισόδου, κάτι που είναι και αναμενόμενο. Οι τιμές της προσομοίωσης αποκλίνουν συστηματικά από τις πειραματικές, διότι, όπως επισημάνθηκε προηγουμένως, είναι συστηματική η απόκλιση της θερμοκρασίας εισόδου. Αν διορθωθεί η θερμοκρασία εισόδου, απ' ευθείας θα διορθωθούν και οι τιμές της θερμοκρασίας εισόδου.



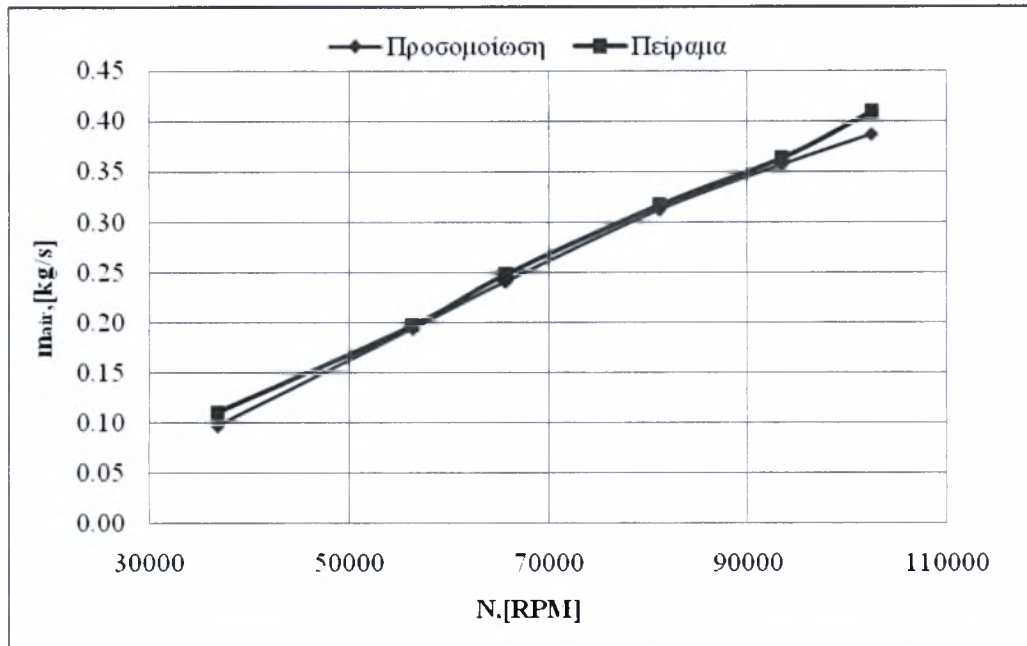
Σχήμα 5.5. Θερμοκρασία εξόδου στροβίλου.

5.1.3 Γενικά στοιχεία

Πέρα από τις μετρήσεις παρουσιάζονται και κάποια γενικά στοιχεία που δείχνουν το πόσο καλά προσεγγίζει το μοντέλο προσομοίωσης την πραγματική μηχανή. Τα στοιχεία αυτά είναι η αναρροφούμενη παροχή αέρα από το συμπιεστή, η κατανάλωση καυσίμου, η ώση και παρουσιάζονται με μορφή γραφημάτων στις σελίδες που ακολουθούν.

Η αναρροφούμενη παροχή αέρα από το συμπιεστή φαίνεται στο σχήμα 5.6. Από τη γραφική παράσταση φαίνεται ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σχεδόν ταυτίζονται με τα

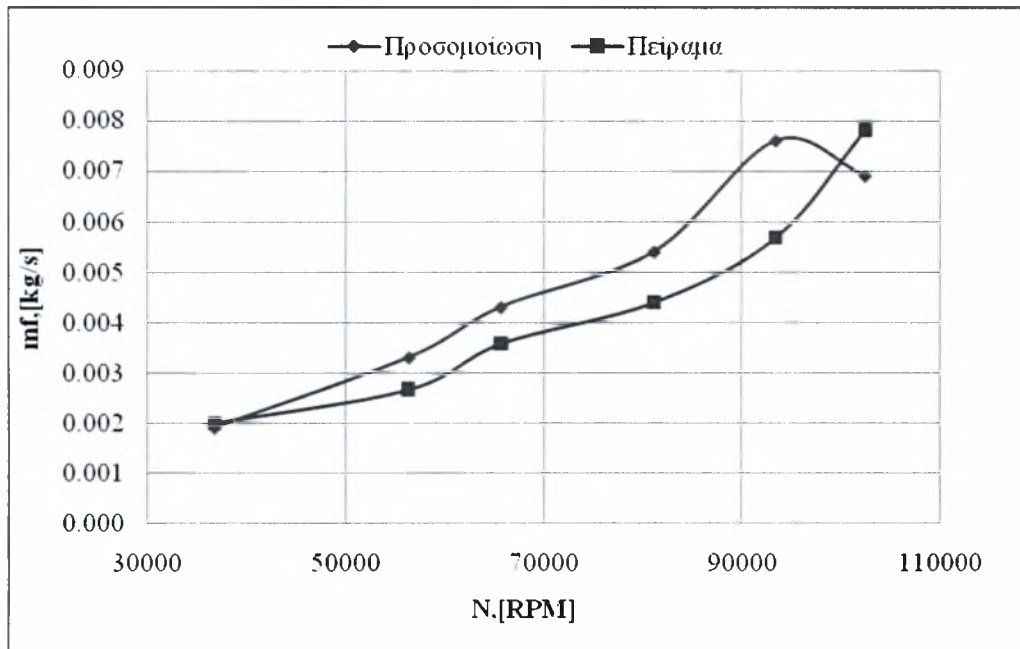
πειραματικά. Βέβαια πρέπει να σημειωθεί ότι η παροχή του αέρα δεν μετρήθηκε απ' ευθείας, αλλά προέκυψε κατόπιν υπολογισμών, και ενδέχεται οι πραγματικές τιμές να διαφέρουν λίγο από αυτές που υπολογίστηκαν. Ωστόσο το γεγονός ότι και ο κώδικας έχει συγκλίνει περίπου στις ίδιες τιμές με τις πειραματικές είναι ένδειξη ότι οι παροχές έχουν υπολογιστεί σωστά.



Σχήμα 5.6. Αναρροφούμενη παροχή αέρα από το συμπιεστή.

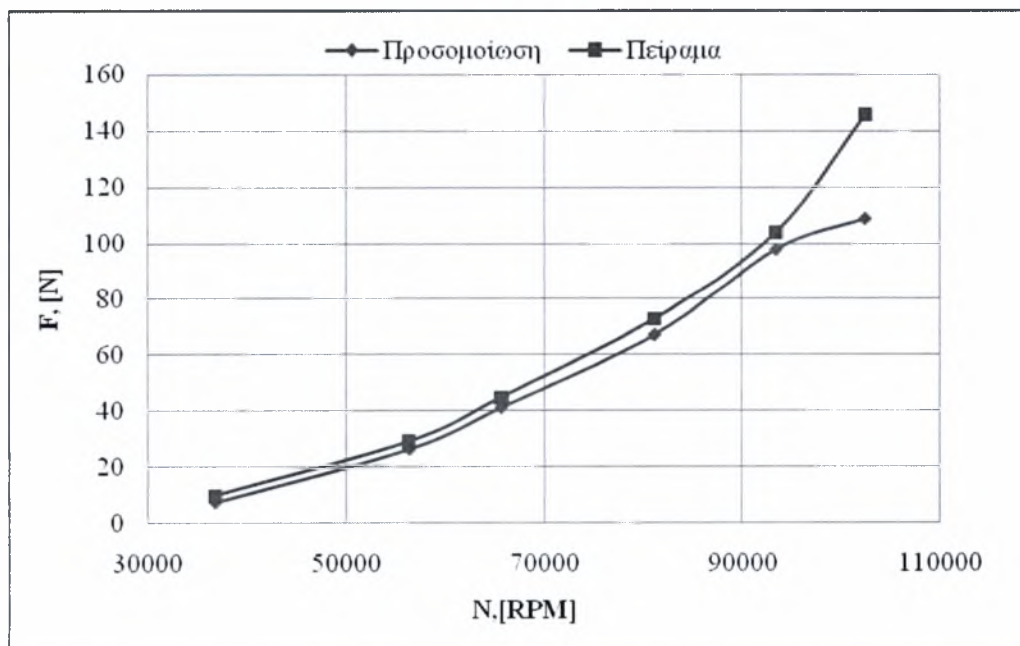
Στο σχήμα 5.7 εικονίζεται η κατανάλωση του καυσίμου. Αν και κατά την πειραματική διαδικασία δεν χρησιμοποιήθηκε κάποιος ηλεκτρονικός ζυγός ο οποίος να είναι συνδεδεμένος με τον υπολογιστή και να υπολογίζεται από το πρόγραμμα πρόσκτησης δεδομένων η κατανάλωση του καυσίμου. Εν τούτοις, χρησιμοποιήθηκε ένα απλός ηλεκτρονικός ζυγός, με ακρίβεια 0.5g, με τη βοήθεια του οποίου μετρήθηκαν κάποιες τιμές της κατανάλωσης, για να υπάρχει απλά μια ένδειξη της ποσότητας καυσίμου που καταναλώνει ο κινητήρας. Είναι προφανές ότι αυτές οι μετρήσεις δεν είναι αρκετά αξιόπιστες και θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν με κάποια επιφύλαξη. Ωστόσο έχουν συμπεριληφθεί στο γράφημα του σχήματος 5.7 για να υπάρχει μια ένδειξη της εξάρτησης της κατανάλωσης του καυσίμου από τις στροφές του κινητήρα.

Στο σχήμα 5.8 απεικονίζεται η ώση που παράγει ο κινητήρας έτσι όπως αυτή υπολογίστηκε και προέκυψε από τα υπολογίστηκε και προέκυψε από τα πειραματικά δεδομένα



Σχήμα 5.7. Κατανάλωση καυσίμου.

και τον κώδικα προσομοίωσης, αντίστοιχα. Και σε αυτό το σχήμα φαίνεται ότι ο κώδικα υπολογίζει με μεγάλη ακρίβεια την ώση που παράγει ο κινητήρας. Το μόνο πρόβλημα που υπάρχει είναι η απόκλιση στις υψηλές στροφές, που όπως έχει εξηγηθεί και σε προηγούμενη ενότητα, αιτία για αυτή την απόκλιση είναι η ελλιπής γνώση της συμπεριφοράς του κινητήρα σε αυτές τις στροφές.



Σχήμα 5.8. Η ώση που παράγει ο κινητήρας.

5.2 Συμπεράσματα

Κοιτώντας τις προηγούμενες εικόνες προκύπτει το συμπέρασμα ότι ο κώδικας προσομοιώνει αρκετά καλά την λειτουργία του κινητήρα. Το μόνο πρόβλημα έντονης απόκλιση από τα πειραματικά δεδομένα είναι στην συνιστώσα του στροβίλου. Όπου από τις αντίστοιχες εικόνες φαίνεται ότι είναι συστηματική η αιτία αυτής της απόκλισης.

Αυτό που θα βοηθούσε αρκετά ώστε να προκύπτουν αποτελέσματα που να συμφωνούν καλύτερα με τα πειραματικά αποτελέσματα, είναι να γίνουν πειράματα για περισσότερα σημεία λειτουργίας και για όλο το εύρος στροφών. Εάν υπάρχουν περισσότερα σημεία οι χάρτες θα μπορέσουν να κατασκευαστούν με περισσότερη ακρίβεια.

Το σημαντικότερο συμπέρασμα είναι ο κώδικας μπορεί να προσομοιώσει την θεωρητική μεταβολή των μετρούμενων μεγεθών, όπως παρουσιάζονται στη σχετική βιβλιογραφία και σε δημοσιεύσεις που αφορούν παρόμοιου μεγέθους κινητήρες.

6. Ανακεφαλαίωση – Συμπεράσματα – Προτάσεις

Στο κεφάλαιο αυτό ανακεφαλαιώνεται η δομή της εργασίας, η πορεία που ακολουθήθηκε και τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

6.1 Ανακεφαλαίωση

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η κατασκευή ενός δοκιμαστηρίου για τον κινητήρα Olympus, η μελέτη της λειτουργίας του κινητήρα και τέλος η κατασκευή ενός μαθηματικού μοντέλου του κινητήρα για την προσομοίωση της λειτουργίας του.

Η εργασία είχε δυο συνιστώσες:

1. Την κατασκευή ενός δοκιμαστηρίου για την παρακολούθηση του κινητήρα
2. Την δημιουργία του μαθηματικού μοντέλου του κινητήρα.

Για την κατασκευή του δοκιμαστηρίου έγινε έρευνα σε σχετική βιβλιογραφία, όπου αναφέρονται εφαρμογές και εγκαταστάσεις παρόμοιων κινητήρων. Τα στοιχεία που συλλέχθηκαν αφορούσαν επιδόσεις για τέτοιου μεγέθους κινητήρες, μετρήσεις που μπορούν να γίνουν καθώς και όργανα που χρησιμοποιούνται.

Παράλληλα με τις διαδικασίες για το εγκατάσταση του δοκιμαστηρίου, έγινε προσπάθεια για την δημιουργία ενός πρόχειρου μαθηματικού μοντέλου το οποίο βασιζόταν στα λιγιστά στοιχεία που έδινε ο κατασκευαστής για τις επιδόσεις του κινητήρα και στα στοιχεία που βρέθηκαν για ανάλογες μηχανές. Κάτι που στη συνέχεια φάνηκε πολύ χρήσιμο, όταν λειτούργησε ο κινητήρας και λήφθηκαν οι μετρήσεις που αφορούσαν την λειτουργία του. Διότι υπήρξε σταδιακή εξοικείωση με τον κώδικα προσομοίωσης και επιπλέον δεν χρειάστηκε να γίνουν πολλές διορθώσεις σε αυτό το πρόχειρο μοντέλο, έτσι ώστε να προσομοιώνει τον κινητήρα Olympus.

6.2 Συμπεράσματα – Προτάσεις

Από την κατασκευή του δοκιμαστηρίου και του μαθηματικού μοντέλου για τον κινητήρα Olympus προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα.

1. Η κατασκευή ενός δοκιμαστηρίου ενός κινητήρα όπως είναι ο Olympus απαιτεί προσεκτική και ακριβή μελέτη. Ειδικά στη συγκεκριμένη περίπτωση, που δεν υπήρχε ανάλογη μηχανή στο ΕΘΜ, έτσι ώστε να υπάρχει κάποια εξοικείωση με αυτού του είδους τα δοκιμαστήρια.
2. Ο συγκεκριμένος κινητήρας, λόγω της υψηλής ταχύτητας περιστροφής του, παράγει υψηλά επίπεδα θορύβου, τα οποία είναι επικίνδυνα για την ανθρώπινη υγεία. Έτσι, θα πρέπει να κατασκευαστεί κάποιος θάλαμος γύρω από τη διάταξη συγκράτησης του κινητήρα, με την απαραίτητη ηχομόνωση, για να περιοριστούν τα επίπεδα θορύβου.
3. Κατά την επεξεργασία των μετρήσεων έγινε φανερό ότι λείπουν βασικές μετρήσεις οι οποίες χαρακτηρίζουν την λειτουργία του κινητήρα. Αυτές είναι η κατανάλωση του καυσίμου και η ώση που παράγει ο κινητήρας. Τα μεγέθη αυτά μετρούνται σχετικά εύκολα με τη χρήση ενός ηλεκτρονικού ζυγού και μια δυναμοκυψέλης (load cell), τα οποία θα συνδεθούν πάνω στη κάρτα πρόσκτησης δεδομένων και έτσι θα είναι δυνατή η λήψη αυτών των μετρήσεων παράλληλα με τις υπόλοιπες.
4. Για την βελτίωση του μαθηματικού μοντέλου του κινητήρα, θα πρέπει να ληφθούν μετρήσεις σε περισσότερα σημεία λειτουργίας και περισσότερο σημαντικό είναι να ληφθούν στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας του. Κάτι που δεν έγινε σε αυτή τη διπλωματική, αφού είχε

σαν στόχο μια πρώτη γνωριμία και εξοικείωση με τον κινητήρα. Έτσι θα μπορέσει να βελτιωθεί το μοντέλο και να λειτουργεί καλύτερα στις υψηλές στροφές.

5. Επιπλέον, θα πρέπει να δοκιμαστεί να τρέξει το αντίστροφο μέρος του κώδικα, για να διορθωθούν με περισσότερη ακρίβεια οι χάρτες του συμπιεστή και του στροβίλου.
6. Τέλος κρίνεται σκόπιμη η αποσυναρμολόγηση του κινητήρα, για την πλήρη εξέταση της γεωμετρίας του εσωτερικού του.

Βιβλιογραφία

1. E.Benini; S.Giacometti, Design, manufacturing and operation of a small turbojet-engine for research purposes. *Applied Energy, Elsevier* 2007.
2. Real-Time Modeling Methods for Gas Turbine Engine Performance. *SAE AIR4548*.
3. Gas Turbine Engine Steady-State and Transient Performance Presentation for Digital Computer Programs. *SAE AS861*.
4. A.J.Volponi, Gas turbine parameter corrections. *Engineering for Gas Turbine and Power* 1999, (ASME).
5. A.Stamatis; K.Mathioudakis; J.Ruiz; B.Curnock, Real time engine model implementation for adaptive control & performance monitoring of large civil turbofans. *ASME Paper 2001-GT-0362*.
6. A.Stamatis; Ph.Kamboukos; N.Aretakis; K.Mathioudakis, On board adaptive models: A general framework and implementation aspects. *ASME TURBO EXPO* 2002.
7. AGARD, Operation and performance measurements on engines in sea level test facilities. *AGARD Lecture Series No 132* March 1984.
8. AGARD, Advanced instrumentation for aero engine components. *AGARD Conference Proceedings No 399* November 1986.
9. C.R.Davison; A.M.Birk, Steady state and transient modeling of a micro-turbine with comparison to operating engine. *ASME Paper GT2004-53378*.
10. E.John, Gas Turbine Performance at Outdoor Test Beds. *MSc Thesis, Cranfield University* 2006-2007.
11. F.Delattin; S.Bram; S.Knoops; J.Ruyck, Effects of steam injection on microturbine efficiency and performance. *ELSEVIER* 2007.
12. G.Oates, *Aerothermodynamic of Aircraft Engine Components*. AIAA: 1985.
13. G.Oates, *Aircraft Propulsion Systems Technology and Design*. AIAA: 1989.
14. Goor, B. v. d., Manual Olympus HP E-START. *AMT Netherlands* 2005.
15. H.Cohen; G.Rogers; H.Saravanamuttoo, *Gas Turbine Theory*. Longman Group Limited: 1996.

16. J.C.Ho; K.J.Chua; S.K.Chou, Performance study of a microturbine system for cogeneration application. *ELSEVIER* 2003.
17. J.D.Mattingly, *Elements of Propulsion: Gas Turbines and Rockets*. AIAA: 2006.
18. J.D.Mattingly; W.H.Heiser; D.T.Pratt, *Aircraft Engine Design*. AIAA: 2002.
19. J.Kurzke, Model based gas turbine parameter corrections. *ASME Paper GT2003-38234*.
20. J.Peirs; D.Reynaerts; F.Verplaetsen, A microturbine for electric power generation. *ELSEVIER* 2003.
21. K.Hunecke, *Jet Engines: Fundamentals of Theory, Design and Operation*. 6th ed.; Motorbooks International: 2006.
22. K.Mathioudakis, Gas Turbine Test Parameters Corrections Including Operation With Water Injection. *ASME* 2003.
23. L.Colombo; F.Armanasco; O.Perego, Experimentation on cogenerative system based on a microturbine. *ELSEVIER* 2006.
24. M.Lichtsinder; Y.Levy, Jet Engine Model for Control and Real-Time Simulations. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, ASME 2006, 128.
25. M.P.Boyce, *Gas Turbine Engineering Handbook*. 2nd ed.; Butterworth-Heinemann: 2002.
26. N.Aretakis; K.Mathioudakis; A.Stamatis, Nonlinear Engine Component Fault Diagnosis From a Limited Number of Measurements Using a Combinatorial Approach. *ASME* 2003.
27. P.Elgar, *Αισθητήρες Μέτρησης και Ελεγχου*. Εκδόσεις Τζιόλα: 2003.
28. P.P.Walsh; P.Fletcher, *Gas Turbine Performance*. 2nd ed.; Blackwell Science: 2004.
29. R.D.Flack, *Fundamentals of Jet Propulsion with Applications*. Cambridge University Press: 2005.
30. R.Gorla; A.Khan, *Turbomachinery Design and Theory*. Marcel Dekker: 2003.
31. R.I.Lewis, *Turbomachinery Performance Analysis*. Elsevier: 1996.
32. S.L.Dixon, *Fluid Mechanics, Thermodynamics of Turbomachinery*. 4th ed.; Butterworth-Heinemann: 1998.
33. SAE, Aircraft propulsion system performance station designation and nomenclature. *AS* 755.
34. W.Wang; R.Cai; N.Zhang, General characteristics of a single shaft microturbine set at variable speed operation and its optimization. *ELSEVIER* 2004.
35. Y.Jaluria, *Design and Optimazation of Thermal Systems*. 2nd ed.; CRC Press: 2008.

36. Α.Σιμιτσιδέλλης, Προσομοίωση μεταβατικής λειτουργίας αεροστροβίλου με μικτό και αντιπροσωπευτικό μοντέλο. *Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ Αθήνα 1992.*
37. Α.Σταμάτης, Η διαγνωστική στις εγκαταστάσεις αεροστροβίλων και η εφαρμογή της στην προληπτική συντήρηση. *Διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ 1990.*
38. Δ.Π.Ψωινός, *Στατιστική*. Εκδόσεις Ζήτη: 1999.
39. Κ.Δ.Παπαηλίου, *Περίληπτικές σημειώσεις του μαθήματος: Θερμικών Στροβιλομηχανών* Ι. Αθήνα 1981.
40. Κ.Δ.Ρακόπουλος, *Αρχές Βιομηχανικών Αεροστροβίλων*. Εκδόσεις Φούντας: 2001.
41. Κ.Μαθιουδάκης, *Εισαγωγή στους αεροπορικούς κινητήρες: Στροβιλοαντιδραστήρες. Σημειώσεις παραδόσεων 1997.*

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Π1 Εγχειρίδιο χρήσης κινητήρα Olympus

Στις σελίδες που ακολουθούν περιγράφεται ο κινητήρας, τα εξαρτήματα που τον συνοδεύουν και δίνονται οδηγίες για τον τρόπο χρήσης του.

Π1.1 Περιγραφή κινητήρα Olympus HP ES

Ο κινητήρας Olympus HP ES αποτελείται από ένα μονοβάθμιο ακτινικό συμπιεστή και ένα μονοβάθμιο αξονικό στρόβιλο.

Ο θάλαμος καύσης είναι δακτυλιοειδούς μορφής και τροφοδοτείται από ένα χαμηλής πίεσης σύστημα καυσίμου. Τα έδρανα της ατράκτου λιπαίνονται από την διέλευση του καυσίμου το οποίο είναι αναμιγμένο με το λιπαντικό.

Ο κινητήρας προστατεύεται από λανθασμένο χειρισμό ή καταστροφή από ένα σύστημα ελέγχου, που στο εξής θα αναφέρεται ως ECU (Engine Control Unit), το οποίο καθορίζει τις παραμέτρους λειτουργίας του κινητήρα και τον εξαναγκάζει να λειτουργήσει εντός των ορίων που επιβάλει ο κατασκευαστής. Η ECU είναι πλήρως αυτοματοποιημένη και δεν χρειάζεται καμιά παρέμβαση από το χρήστη.

Π1.2 Electronic Control Unit (ECU)

Η ECU είναι ένα σύστημα ελέγχου με μικροεπεξεργαστή, που τροφοδοτείται από την μπαταρία του συστήματος. Έχει εισόδους για την σύνδεση του χειριστηρίου του κινητήρα καθώς και εισόδους για τα αισθητήρια όργανα της θερμοκρασίας εξόδου των καυσαερίων και των στροφών του κινητήρα τα οποία χρησιμοποιεί για να ελέγξει αν έχουν υπερβεί τις προκαθορισμένες μέγιστες τιμές.

Π1.3 Αντλία καυσίμου

Η αντλία καυσίμου είναι γραναζωτού τύπου. Αποτελείται από δυο οδοντωτούς τροχούς οι οποίοι περιστρέφονται μέσα στο κέλυφός της. Όλα τα τμήματα της αντλίας είναι

κατασκευασμένα με μεγάλη ακρίβεια, για αυτό το λόγο απαιτείται το καύσιμο που θα χρησιμοποιηθεί να καθαρό χωρίς σωματίδια ή άλλες διαλυμένες ουσίες που θα βλάψουν την λειτουργία της αντλίας.

Π1.4 Καύσιμο

Για την λειτουργία της μηχανής μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι τύποι καυσίμων. Ωστόσο ο κατασκευαστής συστήνει την χρήση ενός μόνο καυσίμου και να μην γίνονται αλλαγές στο είδος του καυσίμου.

Τύπος καυσίμου

- | | |
|--------------------|--|
| 5. JP-4 / Kerosene | Χρησιμοποιείται στα στρατιωτικά αεροσκάφη |
| 6. Paraffin | Χρησιμοποιείται στις θερμάστρες πετρελαίου |
| 7. Jet A-1 | Χρησιμοποιείται στα πολιτικά αεροσκάφη |

Ο κινητήρας Olympus HP ES χρησιμοποιεί το καύσιμο για λίπανση, οπότε το καύσιμο πριν χρησιμοποιηθεί αναμιγνύεται με 4.5 % κ.ο. λιπαντικό Aeroshell 500. Το λιπαντικό φροντίζει για την λίπανση του κινητήρα κατά τις διαδικασίες εκκίνησης και τερματισμού της λειτουργίας. Όταν ξεκινήσει η διαδικασία τερματισμού, η ροή του καυσίμου διακόπτεται και το καύσιμο που υπάρχει μέσα στη μηχανή εξατμίζεται από την υψηλή θερμοκρασία που επικρατεί και επικάθεται σε όλες τις επιφάνειες. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιεί την λίπανση που απαιτείται για να είναι έτοιμος ο κινητήρας κατά την επομένη διαδικασία εκκίνησης.

Π1.5 Αέριο Εκκίνησης

Το αέριο εκκίνησης που χρησιμοποιείται για την προθέρμανση του κινητήρα είναι προπάνιο. Η χρήση μίγματος βουτανίου/προπανίου δεν είναι αξιόπιστη επιλογή, ειδικά στα ψυχρά κλίματα.

Η φιάλη προπανίου πρέπει να είναι εφοδιασμένη με ένα ρυθμιστή πίεσης. Αυτό είναι απαραίτητο για τον έλεγχο της ποσότητας του προπανίου που διοχετεύεται στην μηχανή κατά τη διαδικασία εκκίνησης. Επιπλέον η φιάλη πρέπει να βρίσκεται σε ορθή θέση για να παρέχεται

αέριο στον κινητήρα. Αν η φιάλη ανατραπεί υπάρχει κίνδυνος να φτάσει υγρό προπάνιο στην μηχανή, κάτι που είναι πολύ επικίνδυνο.

Π1.6 Ανάφλεξη μίγματος αέρα – προπανίου

Η ανάφλεξη του μίγματος αέρα – προπανίου γίνεται με την βοήθεια ενός εναυστήρα τύπου πυρακτώσεως. Αυτό του τύπου οι εναυστήρες πυρακτώνονται αφού τροφοδοτηθούν με κατάλληλη τάση. Ο εναυστήρας που χρησιμοποιεί ο κινητήρας Olympus λειτουργεί με τάση 1.5 ή 2 Volts. Είναι σημαντικό να ελέγχεται ότι ο εναυστήρας δουλεύει σωστά πριν από κάθε εκκίνηση του κινητήρα. Με ένα χαλασμένο εναυστήρα υπάρχει κίνδυνος να συγκεντρωθεί μεγάλη ποσότητα προπανίου μέσα στη μηχανή, κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε φωτιά. Όταν υπάρχει πρόβλημα στην εκκίνηση της μηχανής αυτό που πρέπει να ελέγχεται πρώτα είναι ο εναυστήρας καύσης.

Π1.7 Περιγραφή λειτουργίας ECU

Η ECU ελέγχει την λειτουργία της μηχανής και την περιορίζει μέσα στα όρια που έχουν προκαθοριστεί από τον κατασκευαστή. Υπάρχουν υποδοχές για την σύνδεση των συνοδευτικών εξαρτημάτων του κινητήρα που ελέγχουν την λειτουργία του.

Οι είσοδοι της ECU είναι:

- A. Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων (EGT)
- B. Ταχύτητα περιστροφής ατράκτου (RPM)
- C. Επίπεδο ισχύος του κινητήρα (throttle level)
- D. Είσοδος CTF
- E. Κατάσταση του κινητήρα (running, power – down sequence, stop)
- F. Μπαταρία τροφοδοσίας

Οι έξοδοι της ECU είναι:

- A. Βαλβίδα καυσίμου
- B. Σύνδεση εναυστήρα πυρακτώσεως
- C. Βαλβίδα αερίου εκκίνησης

- D. Σύνδεση μίζας
- E. Σύνδεση αντλίας καυσίμου
- F. Σύνδεση EDT (Engine Data Terminal)

Π1.8 Περιγραφή των εισόδων στην ECU

Παρακάτω αναλύονται οι εισοδοί της ECU με την σειρά που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

- Στην είσοδο A της ECU συνδέεται ένα θερμοστοιχείο τύπου K. Το θερμοστοιχείο τοποθετείται στην ειδική οπή που υπάρχει στο ακροφύσιο του κινητήρα (1-2 mm μέσα στο ακροφύσιο). Προσοχή χρειάζεται στην πολικότητα του θερμοστοιχείου, η πρίζα έχει μια πλατιά και μια στενή επαφή.
- Στην είσοδο B της ECU συνδέεται ο μετρητής στροφών την ατράκτου του κινητήρα.
- Στην είσοδο C συνδέεται το καλώδιο του χειριστηρίου που μεταφέρει το σήμα για το επίπεδο ισχύος της μηχανής.
- Στην είσοδο D συνδέεται το κουμπί που χρησιμεύει για την ρύθμιση ασύρματου χειριστηρίου στην περίπτωση που ο κινητήρας τοποθετηθεί σε κάποιο μοντέλο αεροπλάνου.
- Στην είσοδο E συνδέεται το καλώδιο του χειριστηρίου που μεταφέρει το σήμα για την κατάσταση της μηχανής
- Στην είσοδο F συνδέεται η μπαταρία που τροφοδοτεί όλα τα εξαρτήματα του κινητήρα.

Στην συνέχεια περιγράφονται οι έξοδοι της ECU με την σειρά που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα.

- Στην έξοδο A συνδέεται η βαλβίδα καυσίμου. Όταν συνδέεται η βαλβίδα καυσίμου πρέπει να δοθεί προσοχή στην φορά ροής ώστε να τοποθετηθεί με σωστό τρόπο.
- Στην έξοδο B συνδέεται ο εναυστήρας πυρακτώσεως. Ο θετικός πόλος της εξόδου συνδέεται στον εναυστήρα και ο αρνητικός γειώνεται πάνω στην μηχανή. Δηλαδή συνδέεται πάνω σε μία από τις οχτώ βίδες του καλύμματος του κινητήρα.

- Στην έξοδο C συνδέεται η βαλβίδα του προπανίου. Όταν συνδέεται η βαλβίδα θα πρέπει να προσεχθεί η φορά με την οποία τοποθετείται ώστε να είναι αυτή που πρέπει.
- Η έξοδος D πρέπει να συνδεθεί με το καλώδιο της μίζας του κινητήρα.
- Στην έξοδο E συνδέεται με την αντλία καυσίμου του κινητήρα. Το εμβαδό των καλωδίων θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 1.5mm^2 . Το μέγιστο μήκος του καλωδίου δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το 50cm.
- Η έξοδος F συνδέεται με το τερματικό ενδείξεων της μηχανής (EDT), ή με της σειριακή θύρα ενός H/Y, για την απεικόνιση δεδομένων λειτουργίας στην οθόνη του.

Π1.9 Βομβητής – Ηχητικά σήματα

Η ECU περιέχει ένα ενσωματωμένο βομβητή ο οποίος με ηχητικά σήματα προειδοποιεί το χρήστη για την κατάσταση λειτουργίας του κινητήρα. Τα διάφορα είδη ηχητικών σημάτων είναι:

- OK : Ήχος υψηλής συχνότητας που ακολουθείται αμέσως από ήχο χαμηλής συχνότητας.
- Εκκίνηση : Όταν ξεκινάει η διαδικασία εκκίνησης ακούγεται μια σειρά από 5 ήχους, μετά τον πέμπτο ήχο αρχίζει η διαδικασία εκκίνησης.
- Έλλειψη σήματος : Αυτός ο ήχος είναι χαμηλής συχνότητας με μικρές παύσεις. Συμβαίνει όταν δεν είναι συνδεδεμένο το κανάλι (είσοδος E) που καθορίζει την κατάσταση του κινητήρα.
- Αδυναμία εκκίνησης : Αυτός ο ήχος είναι υψηλής συχνότητας με μικρές παύσεις. Εκπέμπεται όταν επιχειρείται εκκίνηση της μηχανής και η θερμοκρασία του κινητήρα είναι υψηλή ή το θερμοστοιχείο που συνδέεται στο ακροφύσιο είναι αποσυνδεδεμένο.
- Κατάσταση ασφαλείας : Αυτός ο ήχος είναι υψηλής/χαμηλής συχνότητας. Εκπέμπεται όταν η ECU είναι σε κατάσταση ασφαλείας.
- Βλάβη : Αυτό ο ήχος εκπέμπεται όταν υπάρχει βλάβη στο σύστημα. Αποτελείται από έξι σύντομους ήχους με ένα υψηλής ή χαμηλής συχνότητας ήχο. Ο υψηλής ή χαμηλής συχνότητας ήχος υποδεικνύει ότι δεν υπάρχει σφάλμα ή υπάρχει. Η θέση του χαμηλής

συχνότητας ήχου (δηλαδή 1^{ος}, 2^{ος}, 3^{ος} κλπ) στη ακολουθία των έξι ήχων υποδεικνύει το είδος της βλάβης.

1. Θέση 1: Σφάλμα κατά την διαδικασία εκκίνησης ή χαμηλή ταχύτητα περιστροφής
2. Θέση 2: Βλάβη στο κανάλι εισόδου E (διακόπτης κατάστασης)
3. Θέση 3: Βλάβη στο κανάλι εισόδου C (επίπεδο ισχύος)
4. Θέση 4: Βλάβη κατά τη λήψη της EGT
5. Θέση 5: Υψηλός αριθμός στροφών
6. Θέση 6: Αφόρτιστη μπαταρία

- 1.1 Όταν παρουσιαστεί κάποιο σφάλμα αυτό εμφανίζεται στο τερματικό ενδείξεων (EDT). Για να συνεχιστεί η λειτουργία του κινητήρα θα πρέπει αυτό να διαγραφεί. Η διαγραφή του σφάλματος γίνεται θέτοντας τον διακόπτη τριών θέσεων του χειριστηρίου στη θέση “Stop” και το διακόπτη για το επίπεδο ισχύος της μηχανής στο “Max 100%”.

Π1.10 Λειτουργία του κινητήρα

Π1.10.1 Διαδικασία εκκίνησης

Παρακάτω αναφέρονται τα βήματα για την εκκίνηση της μηχανής:

1. Στρέψτε το διακόπτη για το επίπεδο ισχύος της μηχανής στη θέση “Min 0%”.
2. Τοποθετήστε το διακόπτη τριών θέσεων του χειριστηρίου στη θέση “Stop”
3. Ανοίξτε την φιάλη προπανίου.
4. Για να ξεκινήσει ο μικροστρόβιλος τοποθετείστε το διακόπτη τριών θέσεων στη θέση “Running Position”. Θα ακουστούν 5 χαρακτηριστικοί ήχοι από την ECU, και στη συνέχεια θα ξεκινήσει η διαδικασία εκκίνησης. Θα ενεργοποιηθεί η μίζα για να περιστρέψει τον κινητήρα και θα αρχίσει η διοχέτευση του αερίου εκκίνησης στο θάλαμο καύσης.
5. Στη συνέχεια, όταν οι στροφές φτάσουν τις 9000RPM και η EGT του 88°C, διακόπτεται η παροχή του αερίου εκκίνησης, και η ECU θέτει σε λειτουργία την αντλία καυσίμου ανοίγοντας παράλληλα και την βαλβίδα. Η φιάλη του προπανίου πρέπει να παραμείνει ανοιχτή μέχρι η μηχανή να ξεπεράσει τις 36000RPM.

6. Η ECU θα αυξήσει αυτόματα τις στροφές του κινητήρα στο σημείο βαθμονόμησης του, περίπου 50000RPM. (Τώρα μπορεί να κλείσει η φιάλη προπανίου). Η ECU θα κρατήσει την μηχανή στις 50000RPM για περίπου 5 δευτερόλεπτα και στη συνέχεια θα μειώσει τις στροφές στο ρελαντί (36000RPM).
7. Μετά από αυτές τις λειτουργίες ο χρήστης μπορεί να λειτουργήσει την μηχανή σύμφωνα με τις ανάγκες του.

Παρατηρήσεις

- Πριν από κάθε εκκίνηση θα πρέπει η μπαταρία της μηχανής να είναι πλήρως φορτισμένη για να μπορέσει να τροφοδοτηθεί επαρκώς η μίζα και ο εναυστήρας και να είναι ασφαλής η εκκίνηση
- Εάν γίνει απόπειρα για εκκίνηση της μηχανής και ακούγεται ένας συνεχής οξύς ήχος με μικρές διακοπές, η θερμοκρασία της εξάτμισης της μηχανής είναι πολύ υψηλή για να ξεκινήσει η μηχανή (πάνω από 88°C). Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα θα πρέπει ο διακόπτης του χειριστηρίου να τοποθετηθεί στη μεσαία θέση για να ψυχθεί η μηχανή. Όταν ψυχθεί επαρκώς η μηχανή μπορεί να ξεκινήσει πάλι.
- Κατά την αύξηση της ισχύος στη μέγιστη τιμή της για πρώτη μετά την εκκίνηση της μηχανής υπάρχει περιορισμός της στο 90% για 3-4 δευτερόλεπτα για την ρύθμιση της ECU. Επομένως όταν απαιτείται η μέγιστη ισχύς θα πρέπει πρώτα η μηχανή να έχει

Π1.10.2 Διαδικασία τερματισμού λειτουργίας

Για τον ομαλό τερματισμό της λειτουργίας θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η αυτόματη διαδικασία διακοπής της λειτουργίας η οποία αποτελείται από τα εξής βήματα.

- Τοποθετήστε το διακόπτη τριών θέσεων του χειριστηρίου στην μεσαία θέση “Auto Stop” για να ενεργοποιηθεί η αυτόματη διαδικασία διακοπής της λειτουργίας
- Η ECU μετά από αυτή την πράξη θα επιβραδύνει τον κινητήρα στις 60000RPM για περίπου 5 δευτερόλεπτα και θα περιμένει μέχρι η θερμοκρασία των καυσαερίων να σταθεροποιηθεί.
Προσοχή: υπάρχουν ακόμα 2 kg_f ώσης σε αυτές τις στροφές.
- Στη συνέχεια η ECU θα σταματήσει τη μηχανή.

- Και τέλος θα ενεργοποιήσει και θα απενεργοποιήσει τη μίζα αρκετές φορές μέχρι η θερμοκρασία του ακροφυσίου πέσει κάτω από τους 88°C.

Π1.10.3 Έκτακτη διαδικασία τερματισμού λειτουργίας

Αν παρουσιαστεί έκτακτη ανάγκη για διακοπή της λειτουργίας, και η μηχανή πρέπει να σταματήσει αμέσως, τοποθετήστε τον διακόπτη τριών θέσεων του χειριστηρίου στη θέση “Stop”. Η ECU μετά από αυτή την κίνηση, θα σταματήσει τη μηχανή αμέσως, σε οποιοδήποτε στροφές και αν λειτουργεί. Η μέθοδος αυτή θα πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο σε περίπτωση ανάγκης.

Π1.11 Προληπτική συντήρηση

Για την καλύτερη λειτουργία της μηχανής θα πρέπει να γίνεται σε τακτά χρονικά διαστήματα προληπτική συντήρηση καθώς και επιθεώρηση για την ύπαρξη βλαβών.

Π1.11.1 Εποπτικός έλεγχος του κινητήρα

Ο εποπτικός έλεγχος του κινητήρα θα πρέπει να πραγματοποιείται κάθε 1 ώρα λειτουργίας του κινητήρα. Κατά τη διάρκεια του ελέγχου αυτού θα πρέπει να επιθεωρούνται:

- Το κέλυφος του κινητήρα εξωτερικά, ειδικά για μεταβολές του χρώματος του το οποίο υποδεικνύει μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας του κινητήρα.
- Οι βάσεις του κινητήρα για πιθανές ρωγμές.
- Η εισαγωγή του κινητήρα και η πτερωτή του συμπιεστή
- Η αντλία καυσίμου για τυχόν διαρροές από το κέλυφος της.
- Το δοχείο καυσίμου για τυχόν διαρροές.
- Οι πτερωτές του συμπιεστή και του στροβίλου για τυχόν επαφή με το κέλυφος του κινητήρα.
- Το φίλτρο του καυσίμου.

Π1.11.2 Έλεγχος των εδράνων κύλισης του άξονα περιστροφής.

Η κατάσταση των εδράνων κύλισης μπορεί να ελεγχθεί περιστρέφοντας τον άξονα του κινητήρα με το χέρι. Ωστόσο και κατά την λειτουργία του κινητήρα θα πρέπει ελέγχεται:

- Εάν ο κινητήρα παράγει υψηλά επίπεδα θορύβου από τα κανονικά, τότε τα έδρανα κύλισης του είναι πιθανόν φθαρμένα από ακαθαρσίες στο καύσιμο ή στον αναρροφούμενο αέρα. Σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να αντικατασταθεί το καύσιμο (και/ή το φίλτρο) και να γίνει δοκιμαστική λειτουργία του κινητήρα σε περιοχή απαλλαγμένη, όσο είναι αυτό εφικτό, από σκόνη.
- Εάν η απόδοση του κινητήρα κατά τη δοκιμαστική λειτουργία είναι κανονική, δεν είναι απαραίτητο να αντικατασταθούν τα έδρανα κύλισης. Αλλά είναι απαραίτητο να ελέγχονται πιο συχνά.
- Εάν παρατηρούνται ανωμαλίες σε ορισμένα σημεία κατά την περιστροφή του άξονα με το χέρι, τότε ένα από τα δύο έδρανα κύλισης είναι φθαρμένο. Αυτό μπορεί να έχει προκληθεί, για παράδειγμα, από σωματίδια σκόνης ή άμμου τα οποία έχουν απορροφηθεί από τη μηχανή (περίπου 1% του αναρροφούμενου αέρα διέρχεται από τα έδρανα κύλισης για ψύξη) ή από ακαθαρσίες στο καύσιμο.

Π1.11.3 Αποθήκευση και λίπανση

Εάν η μηχανή δεν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για διάστημα 3 μηνών ή και μεγαλύτερο θα πρέπει να λιπανθεί με ένα μίγμα καυσίμου και 20% Aeroshell 500 λιπαντικό. Το μίγμα αυτό εισάγεται με την βοήθεια μια ιατρικής σύριγγας στην υποδοχή L που βρίσκεται κάτω από το μπροστινό κάλυμμα του κινητήρα. Η ποσότητα που πρέπει να εισαχθεί είναι 3ccm. Αυτή η διαδικασία γίνεται για αποτραπεί η διάβρωση των εδράνων κύλισης, σε περίπτωση που η μηχανή αποθηκευτεί σε περιβάλλον με υγρασία.

Εάν ο κινητήρας δεν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για μεγαλύτερο διάστημα (6-12 μήνες) θα πρέπει να τοποθετηθεί σε κατακόρυφη θέση, με τον συμπιεστή προς τα πάνω, και την είσοδο και έξοδο καλυμμένες για την αποφυγή εισόδου της σκόνης. Μετά από αυτή την περίοδο αποθήκευσης ο κινητήρα θα πρέπει να λιπανθεί πριν την επαναχρησιμοποίησή του.

Π1.11.4 Αφαίρεση του μπροστινού καλύμματος του κινητήρα και λίπανση πριν την επαναχρησιμοποίηση

Η διαδικασία αφαίρεσης του μπροστινού καλύμματος και της λίπανσης πριν την επαναχρησιμοποίηση του κινητήρα περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

1. Αφαίρεση των συνδετήρων του αέρα και του αερίου εκκίνησης χρησιμοποιώντας ένα κλειδί τύπου Allen 2.5mm το οποίο εισάγεται στην οπή του συνδετήρα και περιστρέφεται αριστερόστροφα.
Σημείωση: Ο συνδετήρας του καυσίμου δεν μπορεί να αφαιρεθεί. Εάν επιχειρηθεί η αφαίρεση του με την διαδικασία που προαναφέρθηκε το πιο πιθανό είναι να καταστραφεί και να προκληθεί διαρροή καυσίμου.
2. Ξέσφιγμα των 7 από τις 8 βίδες που συγκρατούν το κάλυμμα του κινητήρα γυρίζοντας τες μισή στροφή. Προσοχή: να μην ξεσφιχτεί η 8^η βίδα γιατί θα πάψει να ισχύει η εγγύηση του κινητήρα.
3. Το μπροστινό κάλυμμα θα πρέπει τώρα να έχει ‘χαλαρώσει’, οπότε μπορεί να αφαιρεθεί, εισάγοντας 2 κλειδιά Allen, ή κάτι παρόμοιο, σε 2 από τις οπές που χρησιμοποιούνται για να το ασφαλίσουν στην μηχανή και τραβώντας το προς τα έξω. Προσοχή: να μην τραυματιστεί το καλώδιο του αισθητήρα στροφών.
4. Αφαιρώντας το σωληνάκι που είναι στον συνδετήρα του καυσίμου και χρησιμοποιώντας μια ιατρική σύριγγα στην οποία έχει προσαρμοστεί ένα σωληνάκι μικρού μήκους, εισάγονται 5 ή 6cc καυσίμου και 20% λιπαντικού Aeroshell 500 στην οπή με την ένδειξη ‘Lube’.
5. Στη συνέχεια επανατοποθετείται το σωληνάκι του καυσίμου και προσαρμόζεται το κάλυμμα του κινητήρα αντιστρέφοντας την προηγούμενη διαδικασία.

Π2 Προβλήματα κατά την επεξεργασία των μετρήσεων

Κατά την επεξεργασία των μετρήσεων προέκυψαν κάποιες δυσκολίες οι οποίες είχαν να κάνουν με το ποιες μετρήσεις θα χρησιμοποιηθούν για την περαιτέρω επεξεργασία και ποιες όχι. Επιπλέον υπήρχε και το ζήτημα ποιες μετρήσεις είναι αντιπροσωπευτικές της κατάστασης του κινούμενου μέσου σε κάθε διατομή και ποιες όχι.

Επειδή δεν υπήρχε αρκετή πληροφόρηση για τις διεργασίες που συμβαίνουν στο εσωτερικό του στροβίλου, έγινε προσπάθεια έτσι ώστε να ελεγχθούν όσα περισσότερα διαφορετικά σενάρια επεξεργασίας των μετρήσεων ήταν δυνατόν και να επιλεγεί το καλύτερο και το πιο λογικό.

Τα δύο προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν κατά την επεξεργασία των μετρήσεων ήταν ο υπολογισμός της παροχής του κινούμενου μέσου και η εκτίμηση της θερμοκρασίας εξόδου του θαλάμου καύσης. Τα προβλήματα αυτά αναλύονται στις σελίδες που ακολουθούν

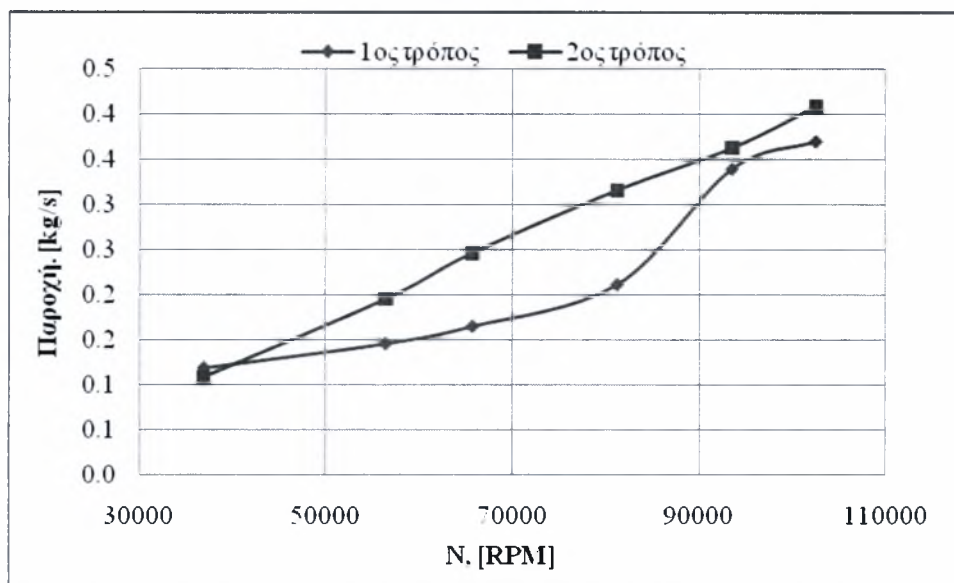
Π2.1 Υπολογισμός μαζικής παροχής

Με τα μεγέθη που μετρούνται πάνω στον κινητήρα Olympus η παροχή του κινούμενου μέσου μπορεί να υπολογιστεί με δύο τρόπους.

- 1ος. Με τη βοήθεια της στατικής και της ολικής πίεσης στην έξοδο του συμπιεστή, από τις οποίες προκύπτει ο αριθμός Mach στη συγκεκριμένη διατομή από τη σχέση 2.2 και η παροχή του αέρα από τη σχέση 2.5.
- 2ος. Με τη βοήθεια της στατικής και ολικής πίεσης στην έξοδο του στροβίλου και τις δυο σχέσεις που αναφέρθηκαν στον πρώτο τρόπο. Στη συγκεκριμένη περίπτωση υπολογίζεται η παροχή των καυσαερίων που διαφέρει από αυτή του αέρα.

Τα αποτελέσματα με τους δυο προηγούμενους τρόπους φαίνονται στο σχήμα Π1.1. Φαίνεται ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το δεύτερο τρόπο υπολογισμού της παροχής του αέρα είναι πιο κοντά στην πραγματικότητα, αφού συμφωνούν με αυτά στην σχετική βιβλιογραφία. Τα αποτελέσματα με τον πρώτο τρόπο παρουσιάζουν μια ανεξήγητη μεταβολή με την αύξηση των στροφών, που πιθανός οφείλεται σε σφάλμα στις μετρήσεις. Αφού όπως

φαίνεται από το σχήμα 3.1 οι τιμές της στατικής και της ολικής πίεσης δεν διαφέρουν πολύ. Έτσι ένα μικρό σφάλμα στις μετρήσεις των μεγεθών αυτών μπορεί να οδηγήσει στα αποτελέσματα του σχήματος Π1.1.



Σχήμα Π0.1. Αναρροφούμενη παροχή αέρα από τον κινητήρα

Π2.2 Θερμοκρασία εξόδου θαλάμου καύσης

Η τιμή της θερμοκρασίας εξόδου του θαλάμου καύσης αν και έχει μετρηθεί όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5. Εντούτοις, γρήγορα έγινε αντιληπτό ότι η τιμή της θερμοκρασίας αυτής δεν είναι αντιπροσωπευτική με αποτέλεσμα να οδηγεί σε παράλογες τιμές του βαθμού απόδοσης του στροβίλου. Έτσι η μέτρηση αυτή αγνοήθηκε και έγινε προσπάθεια να υπολογιστεί με τη βοήθεια των υπόλοιπων μετρήσεων.

Η θερμοκρασία εξόδου του θαλάμου καύσης υπολογίστηκε με τους εξής τρόπους:

- 1ος. Με ισοζύγιο ενέργειας στο θάλαμο καύσης χρησιμοποιώντας την σχέση του ορισμού απόδοσης του καυστήρα:

$$\eta_b = \frac{(1 + \text{FAR})(h_{t4} - h_g^o) - (h_{t3} - h_a^o)}{\text{FAR} \cdot \text{LHV}}$$

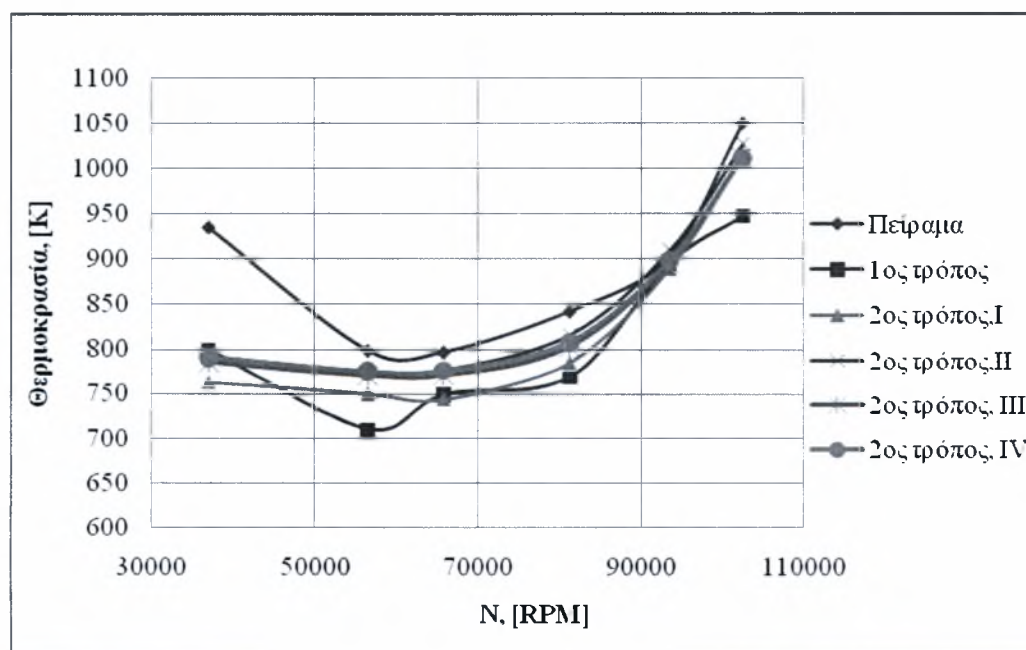
- 2ος. Με την αρχή διατήρησης της μηχανικής ισχύος από την σχέση:

$$\eta_m \dot{m}_g C_{p_g} (T_{14} - T_{out,turbine}) = \dot{m}_a C_{p_a} (T_{13} - T_{12})$$

Θεωρώντας κάθε φορά διαφορετική θερμοκρασία εξόδου στροβίλου, $T_{out,turbine}$. Η θερμοκρασία εξόδου στροβίλου επιλέχθηκε να είναι:

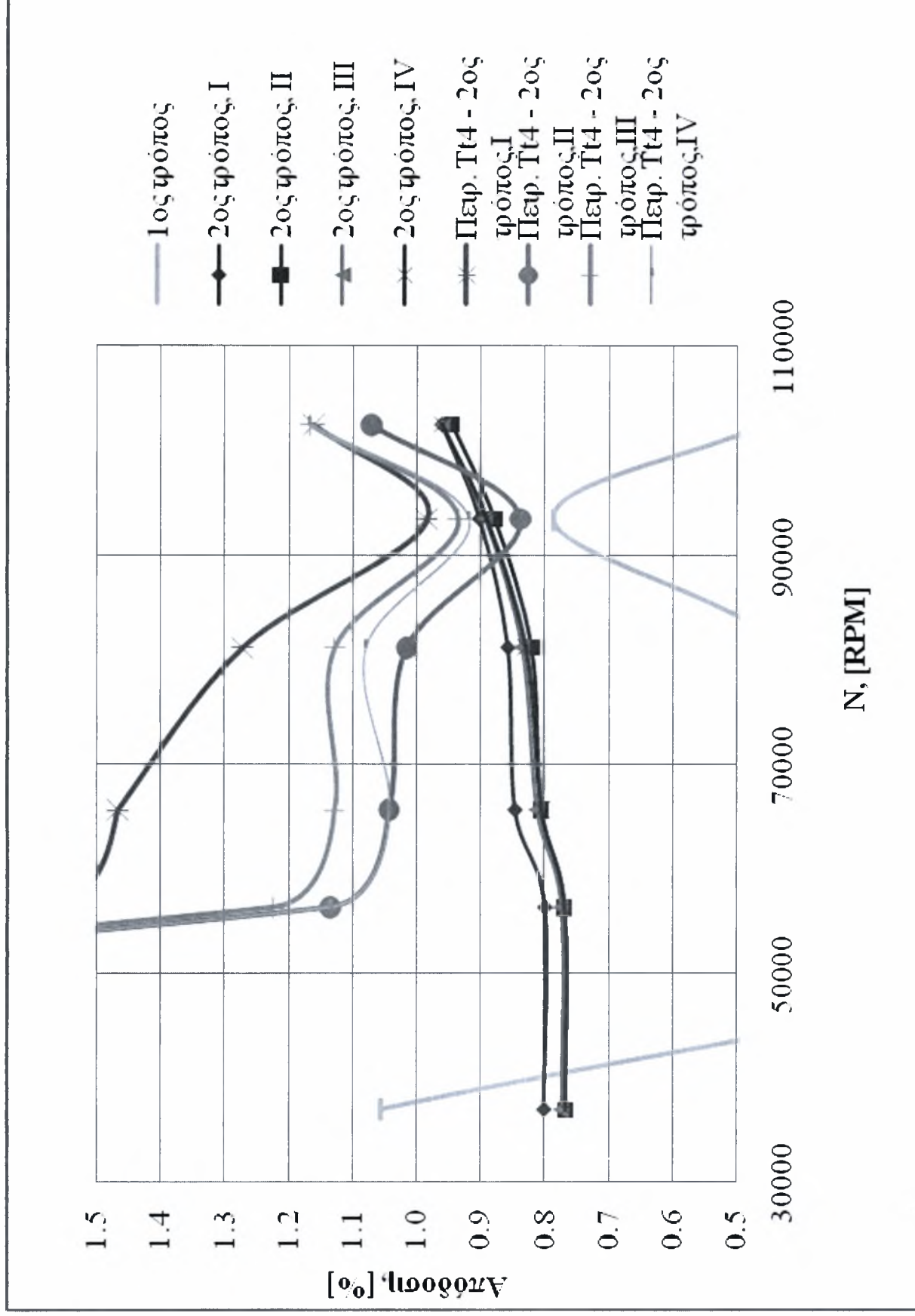
- I. Ίση με την EGT
- II. Ίση με την μέση τιμή των τεσσάρων θερμοστοιχείων, T_{15}
- III. Ίση με τη μέση τιμή των τεσσάρων θερμοστοιχείων, T_{15} , και της EGT, με εξαίρεση της μέτρησης, $T_{15, left}$ στα τρία σημεία λειτουργία με τις χαμηλότερες στροφές, λόγω της μεγάλης διαφοράς της από τις υπόλοιπες μετρήσεις.
- IV. Τα ίδια με την περίπτωση III, αλλά χωρίς την EGT.

Τα αποτελέσματα των προηγούμενων δοκίμων φαίνονται στο σχήμα Π2.2.



Σχήμα Π0.2. Θερμοκρασία εξόδου θαλάμου καύσης.

Στο σχήμα Π2.3 φαίνονται οι βαθμοί απόδοσης του στροβίλου με συνδυασμούς για όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις.



Π3 Περιγραφή κώδικα

Το πρόγραμμα TJ είναι γραμμένος σε κώδικα FORTRAN 77. Έχει δημιουργηθεί από τον καθηγητή Α. Σταμάτη με σκοπό την προσομοίωση των πιο κοινών τύπων κινητήρων turbojet. Αποτελείται από πέντε αρχεία *.for τα οποία είναι τα *MainPro.for*, *GTModel.for*, *Engine.for*, *Interpolation.for* και *Thermo.for*, στα οποία περιλαμβάνονται όλες οι υπορουτίνες που προσομοιώνουν την λειτουργία του αεροστροβίλου.

Πέρα από τα αρχεία που περιέχουν τον κώδικα, για να τρέξει το πρόγραμμα απαιτούνται και κάποια αρχεία εισόδου-εξόδου. Αυτά είναι τα *Accuracy.txt*, *areabl.txt*, *Cmap.txt*, *Ctmap.txt*, *data.txt*, *debug.txt*, *engine.dat*, *Factors.txt*, *gtperf.dat*, *input.txt*, *map_position.txt*, *Measurements.tx*, και *Thermodynamic_quantities.txt*.

Π3.1 Περιγραφή αρχείων κώδικα

Π3.1.1 Αρχείο MainPro.for

Στο αρχείο αυτό γίνεται η ανάγνωση των αρχείων εισόδου *Cmap.txt*, *Ctmap.txt*, *data.txt*, *areabl.txt*, *Accuracy.txt*, *input.txt*, *data.txt* καθώς και η εγγραφή των αρχείων εξόδου *guessing_variables.txt*, *Thermodynamic_quantities.txt*, *map_position.txt*, *Factors.txt*. Όσον αφορά το αρχείο *Measurements.txt* αυτό μπορεί να είναι είτε εξόδου είτε εισόδου ανάλογα αν το πρόγραμμα είναι λειτούργει σε ευθεία λειτουργία (simulation) ή αντίστροφη (adaptive).

Επίσης γίνεται κλήση της υπορουτίνας GTModel.

Π3.1.2 Αρχείο GTModel.for

Στο αρχείο αυτό υπάρχουν οι εξής υπορουτίνες:

- GTModel
- RESUL
- Initialization

Π3.1.3 Αρχείο Engine.for

Σε αυτό το αρχείο υπάρχουν οι υπορουτίνες που αφορούν την προσομοίωση συνιστωσών στροβιλοαντιδραστήρα ενός άξονα. Οι υπορουτίνες αυτές με την σειρά που εμφανίζονται στο αρχείο είναι:

- engine
- inlet
- comprbleed
- civol
- compr
- difsr
- burn
- remix
- cooler
- cturb
- AfterBurn
- nozzle
- machsolversup
- machsolversub
- machsolver
- thrustcalc
- dummy
- cvchart

Π3.1.4 Αρχείο Numerical.for

Σε αυτό το αρχείο υπάρχουν οι υπορουτίνες που πραγματοποιούν τους υπολογιστικούς αλγόριθμους που απαιτούνται για την προσομοίωση του αεροστροβίλου.

Οι υπορουτίνες αυτές με την σειρά που εμφανίζονται στο αρχείο είναι:

- amoeba
- obifunct
- J79NR

- LUDCMP
- LUBKSB
- J79FUNCT
- J79FDJAC
- J79GVAR
- J79ERVAR
- svdcmp
- svdsrt

Π3.1.5 Αρχείο Interpolation.for

Οι υπορουτίνες που υπάρχουν σε αυτό το αρχείο χρησιμεύουν για παρεμβολή στις χαρακτηριστικές καμπύλες των χαρτών των συνιστωσών καθώς και των συντελεστών που χρησιμεύουν για την εκτίμηση των υποθετικών μεγεθών.

Οι υπορουτίνες κατά σειρά εμφάνισης στο αρχείο είναι:

- map
- afquir
- OBICUR
- SURFINTER
- EXPAND
- BISECT
- splint
- spline
- mapevo

Π3.1.6 Αρχείο Thermo.for

Σε αυτό το αρχείο οι υπορουτίνες που υπάρχουν υπολογίζουν τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του εργαζόμενου μέσου και του καυσίμου.

Οι υπορουτίνες με τη σειρά που εμφανίζονται στο αρχείο είναι:

- synthesis

- SteamSatPress
- procom
- combustion
- therprop
- fuelhu
- gasfuelsynthesis
- gasfuelhu
- thermo
- thturb
- qays0
- qays

Π3.2 Περιγραφή αρχείων εισόδου-εξόδου

Στις σελίδες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αρχεία που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα για την εισαγωγή και εξαγωγή δεδομένων.

Π3.2.1 Accuracy.txt

Στο αρχείο αυτό εισάγονται τα δεδομένα που αφορούν τον επαναληπτικό αλγόριθμο επίλυσης του μη – γραμμικού συστήματος που προκύπτει από την προσομοίωση του αεροστροβίλου. Πιο συγκεκριμένα εισάγονται: ο αριθμός των επαναλήψεων, η ακρίβεια για την σύγκλιση των συναρτήσεων σφάλματος και το βήμα για τον υπολογισμό του Ιακωβιανού πίνακα.

Π3.2.2 Areabl.txt

Σε αυτό το αρχείο υπάρχουν οι χαρακτηριστικές που προσδιορίζουν την μεταβολή του εμβαδού του ακροφυσίου συναρτήσει των απομαστεύσεων του συμπιεστή.

Π3.2.3 Cmap.txt

Σε αυτό το αρχείο υπάρχουν οι χαρακτηριστικές καμπύλες του συμπιεστή. Η είσοδος γίνεται με την παρακάτω μορφή:

A		
B		
C		
D	E	F
D	E	F
D	E	F
B		
C		
D	E	F
⋮	⋮	⋮

Όπου:

A : Αριθμός ισοταχών του χάρτη

B : Ανηγμένος αριθμός στροφών κάθε ισοταχούς

C : Αριθμός δεδομένων που προσδιορίζουν κάθε ισοταχή

D : Ανηγμένη παροχή

E : Λόγος πίεσης

F : Πολυτροπικός βαθμός απόδοσης

Π3.2.4 Data.txt

Σε αυτό το αρχείο ορίζονται οι συνθήκες περιβάλλοντος του αεροστροβίλου. Δηλαδή η πίεση και η θερμοκρασία περιβάλλοντος, η υγρασία, το υψόμετρο και ο αριθμός Mach. Εκτός από τις συνθήκες περιβάλλοντος ορίζεται και η μεταβλητή απόφασης (π.χ. στροφές, παροχή καυσίμου κλπ.) και οι παράμετροι προσαρμογής του μοντέλου.

Π3.2.5 Ctmap.txt

Σε αυτό το αρχείο υπάρχουν οι χαρακτηριστικές καμπύλες του στοβίλου. Η είσοδος γίνεται με την παρακάτω μορφή:

A		
B		
C		
D	E	F
D	E	F
D	E	F
B		
C		
D	E	F
⋮	⋮	⋮

Όπου:

A : Αριθμός ισοταχών του χάρτη

B : Ανηγμένος αριθμός στροφών κάθε ισοταχούς

C : Αριθμός δεδομένων που προσδιορίζουν κάθε ισοταχή

D : Λόγος πίεσης

E : Ανηγμένη παροχή

F : Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης

Π3.2.6 Debug.txt

Στο αρχείο αυτό παρατίθενται οι καμπύλες με τις οποίες γίνεται εκτίμηση των μεγεθών υπόθεσης.

Π3.2.7 Engine.dat

Στο αρχείο αυτό δίνονται όλες οι παράμετροι που απαιτούνται για τον καθορισμό του τύπου του αεροστροβίλου. Επίσης δίνονται στοιχεία που αφορούν τις διαστάσεις της μηχανής, το καύσιμο και τιμές για τον καθορισμό των σημείων λειτουργίας.

Π3.2.8 Factors.txt

Στο αρχείο αυτό τυπώνονται οι αποκλίσεις των δεικτών λειτουργικής κατάστασης. Όταν εκτελείται το ευθύ μέρος του προγράμματος έχουν την τιμή 0.

Π3.2.9 gtpperf.txt

Σε αυτό το αρχείο παρατίθεται το σύνολο των θερμοδυναμικών μεγεθών του εργαζόμενου μέσου που περιγράφουν την λειτουργία του αεροστροβίλου. Παρατίθενται επίσης τα βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη του αεροστροβίλου όπως βαθμοί απόδοσης, ισχύς στροβίλου και συμπίεστή, κατανάλωση καυσίμου κλπ.

Π3.2.10 input.txt

Σε αυτό το αρχείο καθορίζεται η είσοδος του προγράμματος, δηλαδή η μεταβλητή απόφασης που θα δέχεται σαν είσοδο το πρόγραμμα. Ο τρόπος –προσομοίωση (simulation) ή αντίστροφα (adaptive)- με το οποίο λειτουργεί το πρόγραμμα. Οι μεταβλητές που χρησιμοποιεί κατά την αντίστροφη λειτουργία και οι αλγόριθμοι με τους οποίους θα γίνει το τρέξιμο του κώδικα.

Π3.2.11 map position.txt

Στο αρχείο αυτό τυπώνονται τα σημεία των χαρτών, συμπίεστή και στροβίλου, πάνω στα οποία «κινείται» το πρόγραμμα για τον προσδιορισμό του κάθε σημείου λειτουργίας.

Π3.2.12 Maesurements.txt

Σε αυτό το αρχείο εισάγονται οι πειραματικές μετρήσεις από την λειτουργία του αεροστροβίλου για την λειτουργία του προγράμματος σε αντίστροφο τρέξιμο. Όταν το πρόγραμμα κάνει προσομοίωση τυπώνει τις αντίστοιχες τιμές που υπολογίζει.

Π4 Περιγραφή υπορουτινών

Στο παράρτημα αυτό περιγράφονται οι σημαντικότερες υπορουτίνες του κώδικα.

Π4.1 Υπορουτίνα GTModel

1. Σκοπός

Πραγματοποιεί τον ορισμό των παραμέτρων λειτουργίας του αεροστροβίλου, και ξεκινά την κύρια διαδικασία υπολογισμού του κύκλου λειτουργίας ανάλογα με την χρήση του κώδικα σε ευθεία λειτουργία ή αντίστροφη.

2. Κάλεσμα

call GTModel (apmc, amap, armm, arpe, armp, iercd)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
apmc	structure	Περιέχει τις μεταβλητές εξόδου
amap	structure	Περιέχει τα δεδομένα των χαρτών
armm	structure	Περιέχει τις μετρήσεις
arpe	structure	Περιέχει τις μεταβλητές εισόδου
armp	structure	Περιέχει τα δεδομένα των αρχείων input.txt και accuracy.txt
iercd	integer	Δείκτης σφάλματος

3. Σχόλια

Καλούνται οι υπορουτίνες: initialization, J79NR, amoeba, resul

Π4.2 Υπορουτίνα RESUL

1. Σκοπός

Τυπώνει τα αποτελέσματα της λειτουργίας του αεροστροβίλου στο αρχείο gtp perf.dat.

2. Κάλεσμα

call RESUL

Π4.3 Υπορουτίνα initialization

1. Σκοπός

Καθορίζει τις συνθήκες εισόδου στον αεροστρόβιλο καθώς και τα υποθετικά μεγέθη για την λειτουργία του προγράμματος.

2. Κάλεσμα

call initialization (initial, npinit, speedtd, prctb, t6tb, prcttb, setopvar, setabvar,x)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
initial	integer	Καθορίζει αν η εκτίμηση αρχικών τιμών θα γίνει χρησιμοποιώντας την γραμμή λειτουργίας ή τις πινακοποιημένες τιμές (τιμή 1 ή 2 αντίστοιχα)
npinit	integer	Αριθμός των σημείων των καμπύλων αρχικών τιμών
speedtb	real 1D array	Διάνυσμα με τις τιμές της ταχύτητας των καμπύλων αρχικών τιμών
prctb	real 1D array	Διάνυσμα με τις τιμές του λόγου πίεσης συμπιεστή των καμπύλων αρχικών τιμών
t6tb	real 1D array	Διάνυσμα με τις τιμές της θερμοκρασίας εισόδου στο στρόβιλο των καμπύλων αρχικών τιμών
prcttb	real 1D array	Διάνυσμα με τις τιμές του λόγου πίεσης στροβίλου των καμπύλων αρχικών τιμών
setopvar	real	Μεταβλητή απόφασης για την λειτουργία της μηχανής
setabvar	real	Μεταβλητή απόφασης για την λειτουργία του μετακαυστήρα
x	real 1D array	Συντελεστές που καθορίζουν τα υποθετικά μεγέθη

3. Σχόλια

Καλούνται οι υπορουτίνες: inlet, spline, splint, mapevo, procom, thermo

Π4.4 Υπορουτίνα engin

1. Σκοπός

Η υπορουτίνα αυτή οργανώνει τη διαδοχική κλήση των υπορουτινών των συνιστωσών του αεροστροβίλου.

2. Κάλεσμα

call engin

3. Σχόλια

Καλούνται οι υπορουτίνες: synthesis, inlet, comprbleed, civol, compr, difsr, burn, remix, cturb, Afterburn, nozzle, ThrustCalc, dummy

Π4.5 Υπορουτίνα inlet

1. Σκοπός

Θερμοδυναμική προσέγγιση των δεδομένων εισόδου της μηχανής, λαμβάνοντας υπόψη το υψόμετρο και την ταχύτητα πτήσης.

2. Κάλεσμα

call inlet (j, iflag)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
j	integer	Σταθερά που καθορίζει τα δεδομένα εισόδου στην υπορουτίνα
iflag	integer	Σταθερά που χρησιμοποιείται από την υπορουτίνα procom

3. Σχόλια

Καλούνται οι υπορουτίνες: procom

Π4.6 Υπορουτίνα comprbleed

1. Σκοπός

Υπολογίζει τις απομαστεύσεις του συμπιεστή σε σχέση με το φορτίο της μηχανής ή την ταχύτητα

2. Κάλεσμα

call comprbleed

Π4.7 Υπορουτίνα civol

1. Σκοπός

Μοντελοποιεί τον αγωγό εισόδου του κινούμενου μέσου στο συμπιεστή.

2. Κάλεσμα

call civol (j)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
j	integer	Σταθερά που καθορίζει τα δεδομένα εισόδου στην υπορουτίνα

3. Σχόλια

Καλείται η υπορουτίνα qays

Π4.8 Υπορουτίνα compr

1. Σκοπός

Μοντελοποιεί την συνιστώσα του συμπιεστή

2. Κάλεσμα

call compr (j)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
j	integer	Σταθερά που καθορίζει τα δεδομένα εισόδου στην υπορουτίνα

3. Σχόλια

Καλούνται οι υπορουτίνες: `procom`, `mareno`, `qays`

4. Χαρακτηριστικά

Στην υπορουτίνα αυτή υπολογίζονται τα θερμοδυναμικά μεγέθη και το έργο που καταναλώνει ο συμπιεστής. Στην είσοδο του συμπιεστή είναι γνωστά όλα τα θερμοδυναμικά μεγέθη καθώς και ο αριθμός στροφών και ο λόγος πίεσης. Με τα προηγούμενα μεγέθη υπολογίζονται με την βοήθεια του χάρτη η ανηγμένη παροχή και ο πολυτροπικός βαθμός απόδοσης.

Με βάση τον πολυτροπικό βαθμό απόδοσης και τον λόγο πίεσης υπολογίζεται επαναληπτικά η θερμοκρασία (ισεντροπική και πραγματική) εξόδου από τον συμπιεστή και στη συνέχεια οι αντίστοιχες ενθαλπίες και ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του συμπιεστή.

Π4.9 Υπορουτίνα `difsr`

1. Σκοπός

Μοντελοποιεί τις συνιστώσες που λειτουργούν ως διαχύτες του αεροστροβίλου.

2. Κάλεσμα

`call difsr (i, id)`

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
<code>i</code>	integer	Σταθερά που καθορίζει τα δεδομένα εισόδου στην υπορουτίνα
<code>id</code>	integer	Σταθερά που καθορίζει τον αύξοντα αριθμό διαχύτη

3. Σχόλια

Καλούνται οι υπορουτίνες: `procom`, `qays`

Π4.10 Υπορουτίνα burn

1. Σκοπός

Μοντελοποιεί την συνιστώσα του καυστήρα του αεροστροβίλου.

2. Κάλεσμα

call burn (i)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
i	integer	Σταθερά που καθορίζει τα δεδομένα εισόδου στην υπορουτίνα

3. Σχόλια

Καλούνται οι υπορουτίνες: procom, qays

Π4.11 Υπορουτίνα remix

1. Σκοπός

Μοντελοποιεί την συνιστώσα του επαναμίκτη.

2. Κάλεσμα

call remix (i, ir)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
i	integer	Σταθερά που καθορίζει τα δεδομένα εισόδου στην υπορουτίνα
Ir	integer	Σταθερά που καθορίζει τον αύξοντα αριθμό του διαχύτη

3. Σχόλια

Καλούνται οι υπορουτίνες: cooler, thermo, qays

Π4.12 Υπορουτίνα cooler

1. Σκοπός

Υπολογίζει την ψύξη που πραγματοποιείται στον επαναμίκτη.

2. Κάλεσμα

call cooler (tx, hx)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
tx	real	Θερμοκρασία εισόδου στη συνιστώσα
hx	real	Ενθαλπία εισόδου στη συνιστώσα

3. Σχόλια

Καλούνται οι υπορουτίνες: procom

Π4.13 Υπορουτίνα cturb

1. Σκοπός

Μοντελοποιεί την συνιστώσα του στροβίλου πυρήνα του αεροστροβίλου.

2. Κάλεσμα

call cturb (i)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
i	integer	Σταθερά που καθορίζει τα δεδομένα εισόδου στην υπορουτίνα

3. Σχόλια

Καλούνται οι υπορουτίνες: procom, mareno, thturb, qays

Π4.14 Υπορουτίνα AfterBurn

1. Σκοπός

Μοντελοποιεί την συνιστώσα του μετακαυστήρα.

2. Κάλεσμα

call AfterBurn (i)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
i	integer	Σταθερά που καθορίζει τα δεδομένα εισόδου στην υπορουτίνα

3. Σχόλια

Καλούνται οι υπορουτίνες: procom, qays, thermo

Π4.15 Υπορουτίνα nozzle

1. Σκοπός

Μοντελοποιεί την συνιστώσα του ακροφυσίου.

2. Κάλεσμα

call nozzle (i, kind)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
i	integer	Σταθερά που καθορίζει τα δεδομένα εισόδου στην υπορουτίνα
kind	integer	Στα που καθορίζει το είδος του ακροφυσίου, συγκλίνον ή συγκλίνον-αποκλίνον (kind = 1 ή 2 αντίστοιχα)

3. Σχόλια

Καλούνται οι υπορουτίνες: procom, thermo, machsolver, machsolversub

Π4.16 Υπορουτίνα machsolversub

1. Σκοπός

Επιλύει την μη γραμμική εξίσωση του αριθμού Mach για υποηχητικές ροές.

2. Κάλεσμα

call machsolversub (a, w, t, p, ama, gama, r, tol)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
a	real	Εμβαδό διατομής του ακροφυσίου
w	real	Μαζική παροχή
t	real	Ολική θερμοκρασία
p	real	Ολική πίεση
ama	real	Αριθμός Mach
gama	real	Λόγος ειδικών θερμοτήτων, γ
r	real	Παγκόσμια σταθερά αερίων
tol	real	Ακρίβεια

Π4.17 Υπορουτίνα machsolver

1. Σκοπός

Επιλύει την μη γραμμική εξίσωση του αριθμού Mach συναρτήσει του λόγου εμβαδών και των συνθηκών του αέρα

2. Κάλεσμα

call machsolver (ain, aout, amain, amaout, gama, r, tol)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
ain	real	Εμβαδό διατομής εισόδου
aout	real	Εμβαδό διατομής εξόδου
amain	real	Αριθμός Mach εισόδου
amaout	real	Αριθμός Mach εξόδου
gama	real	Λόγος ειδικών θερμοτήτων, γ
r	real	Παγκόσμια σταθερά αερίων
tol	real	Ακρίβεια

Π4.18 Υπορουτίνα thrustcalc

1. Σκοπός

Υπολογίζει την ώση που παράγει ο κινητήρας.

2. Κάλεσμα

call thustcalc

Π4.19 Υπορουτίνα map

1. Σκοπός

Σκοπός της υπορουτίνας αυτής είναι ο προσδιορισμός τιμών με παρεμβολή στους χάρτες λειτουργίας των συνιστωσών του αεροστροβίλου. Δηλαδή κάνει παρεμβολή σε μια οικογένεια καμπυλών με δυο ανεξάρτητες μεταβλητές.

2. Κάλεσμα

call map (p, a, b, c, d, ax, na, bx, cx, dx, no, nam, nom, ncode)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
p	real	Αναλογία εισόδου μεταξύ 0 και 1, εάν δεν είναι είσοδος τότε παίρνει την τιμή -1
a	real	Ανεξάρτητη μεταβλητή εισόδου
b	real	Ανεξάρτητη μεταβλητή εισόδου (αν $p = -1$) ή εξαρτημένη αν ($0 < p < 1$)
c	real	εξαρτημένη μεταβλητή
d	real	εξαρτημένη μεταβλητή
ax	real 1D	Διάστημα όπου περιλαμβάνονται οι τιμές των ισογραμμών
na	integer	Αριθμός ισογραμμών
bx	real 2D	Σημεία πάνω σε κάθε ισογραμμή
cx	real 2D	Σημεία πάνω σε κάθε ισογραμμή
dx	real 2D	Σημεία πάνω σε κάθε ισογραμμή
no	integer 1D	Αριθμός σημείων πάνω σε κάθε ισογραμμή
nam	integer	Διάσταση του ax – πρώτη διάσταση των bx, cx, dx
nom	integer	Δεύτερη διάσταση των bx, cx, dx
ncode	integer	δείκτης εξόδου

3. Σχόλια

Καλείται η υπορουτίνα afquir

Π4.20 Υπορουτίνα afquir

1. Σκοπός

Η υπορουτίνα αυτή χρησιμοποιείται από την υπορουτίνα `par` για τετραγωνική παρεμβολή στους χάρτες των συνιστωσών.

2. Κάλεσμα

call `afquir` (`x`, `aind`, `depend`, `ans`, `maj`, `tol`, `dir`, `anew`, `icon`)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
<code>x</code>	real 1D	Διάνυσμα λειτουργίας
<code>aind</code>	real	Ανεξάρτητη μεταβλητή
<code>depend</code>	real	Εξαρτημένη μεταβλητή
<code>ans</code>	real	Αποτέλεσμα στο οποίο θα πρέπει να συγκλίνει
<code>maj</code>	integer	Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων
<code>tol</code>	real	Επί τοις εκατό όριο σύγκλισης
<code>dir</code>	real	Διεύθυνση και ποσοστό για την αρχική υπόθεση
<code>anew</code>	real	Υπολογιζόμενη τιμή της επόμενης δοκιμής για την ανεξάρτητη μεταβλητή
<code>icon</code>	integer	Δείκτης ελέγχου

Π4.21 Υπορουτίνα `synthesis`

1. Σκοπός

Η υπορουτίνα αυτή υπολογίζει τη σύνθεση του αέρα με υγρασία, δεδομένων της θερμοκρασίας, πίεση και σχετικής υγρασίας του μίγματος.

2. Κάλεσμα

call `synthesis` (`t`, `p`, `rh`, `xn2`, `xo2`, `xh2o`, `xco2`, `xso2`, `xar`, `xneon`)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
<code>t</code>	real	Θερμοκρασία του αέρα σε K
<code>p</code>	real	Πίεση του αέρα σε bar
<code>rh</code>	rea	Σχετική υγρασία
<code>xn2</code>	real	Κλάσμα μάζας του αζώτου
<code>xo2</code>	real	Κλάσμα μάζας του οξυγόνου
<code>xh2o</code>	real	Κλάσμα μάζας των υδρατμών
<code>xco2</code>	real	Κλάσμα μάζας του διοξειδίου του άνθρακα
<code>xso2</code>	real	Κλάσμα μάζας του διοξειδίου του θείου

xar	real	Κλάσμα μάζας του αργού
xpeon	real	Κλάσμα μάζας του νέου

3. Σχόλια

Καλείται η υπορουτίνα: SteamSatPress

Π4.22 Υπορουτίνα SteamSatPres

1. Σκοπός

Δεδομένης της θερμοκρασίας, υπολογίζει την πίεση κορεσμού του ατμού.

2. Κάλεσμα

call SteamSatPres (t, psat)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
t	real	Θερμοκρασία του αέρα σε K
psat	real	Πίεση κορεσμού του ατμού σε bar

Π4.23 Υπορουτίνα procom

1. Σκοπός

Η υπορουτίνα αυτή υπολογίζει τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του κινούμενου μέσου, του αεροστροβίλου, με την βοήθεια πολυωνυμίων προσεγγίσεων.

2. Κάλεσμα

call procom (far, tg, sspeed, gamg, cpg, rg, phig, hg, iflag)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
far	real	Λόγος καυσίμου-αέρα
tg	real	Θερμοκρασία
sspeed	real	Ταχύτητα του ήχου
gamg	real	Ισεντροπικός εκθέτης

cpg	real	Ειδική θερμότητα
rg	real	Σταθερά αερίου R
phig	real	Παράμετρος Keenan-Kaye
hg	real	Ενθαλπία
iflag	integer	Σταθερά που έχει να κάνει με την σύσταση του αέρα 0: τυπική σύσταση του ξηρού αέρα 1: υπολογιζόμενη σύσταση του αέρα

3. Σχόλια

Καλούνται οι υπορουτίνες: therprop, combustion

Π4.24 Υπορουτίνα combustion

1. Σκοπός

Η υπορουτίνα αυτή μοντελοποιεί τη διαδικασία της καύσης.

2. Κάλεσμα

call combustion (cfar, xn2, xo2, xh2o, xco2, xso2, xar, xneon)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
cfar	real	Λόγος καυσίμου-αέρα
xn2	real	Κλάσμα μάζας του αζώτου
xo2	real	Κλάσμα μάζας του οξυγόνου
xh2o	real	Κλάσμα μάζας των υδρατμών
xco2	real	Κλάσμα μάζας του διοξειδίου του άνθρακα
xso2	real	Κλάσμα μάζας του διοξειδίου του θείου
xar	real	Κλάσμα μάζας του αργού
xneon	real	Κλάσμα μάζας του νέου

Π4.25 Υπορουτίνα therprop

1. Σκοπός

Η υπορουτίνα αυτή υπολογίζει τις θερμοδυναμικές ιδιότητες ενός μίγματος αερίων. Ο υπολογισμός γίνεται για κάθε αέριο ξεχωριστά με τη βοήθεια πολυωνυμικών σχέσεων. Τα

δεδομένα εισόδου της υπορουτίνας, είναι η θερμοκρασία σε K και η σύσταση του μίγματος των αερίων.

2. Κάλεσμα

call therprop (tg, xn2, xo2, xh2o, xco2, xar, xneon, cp, h, phi, r, gam)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
tg	real	Θερμοκρασία
xn2	real	Κλάσμα μάζας του αζώτου
xo2	real	Κλάσμα μάζας του οξυγόνου
xh2o	real	Κλάσμα μάζας των υδρατμών
xco2	real	Κλάσμα μάζας του διοξειδίου του άνθρακα
xso2	real	Κλάσμα μάζας του διοξειδίου του θείου
xar	real	Κλάσμα μάζας του αργού
xneon	real	Κλάσμα μάζας του νέου
xn2	real	Κλάσμα μάζας του αζώτου
cp	real	Ειδική θερμότητα
h	real	Ενθαλπία
phi	real	Παράμετρος Keenan-Kaye
gam	real	Ισεντροπικός εκθέτης

Π4.26 Υπορουτίνα fuelhu

1. Σκοπός

Η υπορουτίνα αυτή υπολογίζει τη θερμογόνο δύναμη του καυσίμου, όταν είναι γνωστή η σύνθεσή του.

2. Κάλεσμα

call fuelhu (cfr, hfr, ofr, nfr, sfr, hu)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
cfr	real	Κλάσμα μάζας του άνθρακα στο καύσιμο
hfr	real	Κλάσμα μάζας του υδρογόνου στο καύσιμο
ofr	real	Κλάσμα μάζας του οξυγόνου στο καύσιμο
nfr	real	Κλάσμα μάζας του αζώτου στο καύσιμο
sfr	real	Κλάσμα μάζας του θείου στο καύσιμο

hu | real | Θερμογόνος δύναμη του καυσίμου

Π4.27 Υπορουτίνα gasfuelsynthesis

1. Σκοπός

Η υπορουτίνα αυτή υπολογίζει τη σύνθεση κατ' όγκο και τα συνολικά κλάσματα μάζας του άνθρακα, υδρογόνου, οξυγόνου, αζώτου και θείου ενός αερίου καυσίμου σε περίπτωση που είναι γνωστή η σύνθεσή του.

2. Κάλεσμα

call gasfuelsynthesis (isflag)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
isflag	integer	Σχετίζεται με τον τρόπο που είναι δεδομένη η σύνθεση του καυσίμου: 0: κατά βάρος 1: κατ' όγκο

Π4.28 Υπορουτίνα gasfuelhu

1. Σκοπός

Η υπορουτίνα αυτή υπολογίζει τη θερμογόνο δύναμη ενός αερίου καυσίμου όταν είναι γνωστή η σύνθεση του κατ' όγκο.

2. Κάλεσμα

call gasfuelhu (hu)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
hu	real	Θερμογόνος δύναμη

Π4.29 Υπορουτίνα thermo

1. Σκοπός

Η υπορουτίνα αυτή υπολογίζει τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του κινούμενου μέσου, όταν είναι γνωστή η θερμοκρασία ή η ενθαλπία. Σε περίπτωση που είναι γνωστή η θερμοκρασία υπολογίζονται η ενθαλπία, η εντροπία και η σταθερά R. Ενώ σε περίπτωση που είναι γνωστή η ενθαλπία υπολογίζονται η θερμοκρασία, η εντροπία και η σταθερά R.

2. Κάλεσμα

call thermo (hx, tx, sx, rx, fx, k)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
hx	real	Ενθαλπία
tx	real	Θερμοκρασία
sx	real	Εντροπία
rx	real	Σταθερά αερίου R
fx	real	Λόγος καυσίμου-αέρα (δεδομένο εισόδου)
k	integer	Σχετίζεται με τα δεδομένα της υπορουτίνας 0: δεδομένη θερμοκρασία 1: δεδομένη ενθαλπία

3. Σχόλια

Καλείται η υπορουτίνα procom

Π4.30 Υπορουτίνα thturb

1. Σκοπός

Η υπορουτίνα αυτή υπολογίζει τα δεδομένα εξόδου του στροβίλου, δεδομένων των συνθηκών εισόδου (πίεση και θερμοκρασία), του λόγου πίεσης και του ισεντροπικού βαθμού

απόδοσης. Τα δεδομένα που υπολογίζει είναι η πίεση, η θερμοκρασία, η ενθαλπία και η εντροπία.

2. Κάλεσμα

call thturb (farx, pt3, tt3, prt, eftis, pt4, tt4, h4, s4)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
farx	real	Λόγος καυσίμου – αέρα
pt3	real	Ολική πίεση εισόδου
tt3	real	Ολική θερμοκρασία εισόδου
prt	real	Λόγος πίεσης
eftis	real	Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης
pt4	real	Ολική πίεση εξόδου
tt4	real	Ολική θερμοκρασία εξόδου
h4	real	Ενθαλπία εξόδου
s4	real	Εντροπία εξόδου

3. Σχόλια

Καλούνται οι υπορουτίνες procom και thermo.

Π4.31 Υπορουτίνα qays0

1. Σκοπός

Η υπορουτίνα αυτή υπολογίζει τις στατικές από τις ολικές συνθήκες, χρησιμοποιώντας τις ισεντροπικές σχέσεις και τον μέσο ισεντροπικό εκθέτη

2. Κάλεσμα

call qays0 (i, mode)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
i	integer	Θέση
mode	integer	0: Υπολογισμοί για ολική θερμοκρασία και στατική πίεση 1: Υπολογισμοί για ολική θερμοκρασία και ολική πίεση

3. Σχόλια

Καλείται η υπορουτίνα `procom`.

Π4.32 Υπορουτίνα `qays`

1. Σκοπός

Η υπορουτίνα αυτή υπολογίζει τις στατικές από τις ολικές συνθήκες, χρησιμοποιώντας τις ισηντροπικές σχέσεις και μαζική παροχή.

2. Κάλεσμα

`call qays (i, mode)`

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
<code>i</code>	integer	Θέση
<code>mode</code>	integer	0: Υπολογισμοί για ολική θερμοκρασία και στατική πίεση 1: Υπολογισμοί για ολική θερμοκρασία και ολική πίεση

3. Σχόλια

Καλείται η υπορουτίνα `procom`

Π4.33 Υπορουτίνα `J79NR`

1. Σκοπός

Η υπορουτίνα αυτή χρησιμοποιείται στο ευθύ και στο αντίστροφο μέρος του κώδικα. Λύνει ένα σύστημα της μορφής $F(X) = 0$, χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο Newton-Raphson.

2. Κάλεσμα

`call J79NR (N, X, ITERMAX, TOL, EPS, ITER, IERROR)`

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
<code>N</code>	integer	Αριθμός εξισώσεων
<code>X</code>	real 1D	Διάνυσμα υποθετικών μεγεθών
<code>ITERMAX</code>	integer	Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων

TOL	real	Ακρίβεια σύγκλισης
EPS	real	Βήμα για τον υπολογισμό του Ιακωβιανού πίνακα
IERROR	integer	Δείκτης σφάλματος

3. Σχόλια

Καλούνται οι υπορουτίνες J79FUNCT, J79FDJAC, LUDCMP, LUBKSB.

4. Χαρακτηριστικά

Σαν έξοδο η υπορουτίνα έχει το διάνυσμα X που αποτελεί και τη λύση του συστήματος, το διάνυσμα Y που περιέχει τα σφάλματα, τον αριθμό επαναλήψεων ITER και τον δείκτη IERROR που υποδεικνύει τον τύπο του σφάλματος σε περίπτωση που αυτό συμβεί. Παίρνει τις τιμές:

- 1: εάν υπολογιστεί μια φορά η Ιακωβιανή ορίζουσα
- 2: εάν έχει ξεπεραστεί ο αριθμός των επαναλήψεων και δεν έχει συγκλίνει ο αλγόριθμος

Π4.34 Υπορουτίνα LUDCMP

1. Σκοπός

Η υπορουτίνα αυτή πραγματοποιεί παραγοντοποίηση LU ενός πίνακα.

2. Κάλεσμα

call LUDCMP (A, N, INDX, D, IERROR)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
A	real 2D	Ο πίνακας $A(N \times N)$
N	integer	Η διάσταση του πίνακα
INDX	integer 1D	Το διάνυσμα οδήγησης
D	real	Δείκτης εναλλαγών
IERROR	integer	Δείκτης σφάλματος

3. Χαρακτηριστικά

Η υπορουτίνα αυτή πραγματοποιεί παραγοντοποίηση LU ενός πίνακα A διαστάσεων $N \times N$. INDX είναι ένα διάνυσμα εξόδου που περιέχει τις εναλλαγές γραμμών του πίνακα, που

γίνονται εξ' αιτίας της μερικής οδήγησης (partial pivoting). D είναι έξοδος που παίρνει την τιμή -1 ή 1, ανάλογα εάν ο αριθμός των εναλλαγών του πίνακα ήταν άρτιος ή περιττός, αντίστοιχα. Αυτή η υπορουτίνα χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με την LUBSKB για να λύσει γραμμικές εξισώσεις.

Π4.35 Υπορουτίνα LUBKSB

1. Σκοπός

Η υπορουτίνα αυτή λύνει ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων.

2. Κάλεσμα

call LUBKSB (A, N, INDX, B)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
A	real 2D	Ο πίνακας A(N×N)
N	integer	Η διάσταση του πίνακα
INDX	integer 1D	Το διάνυσμα οδήγησης
B	real 1D	Συντελεστές εξισώσεων ή λύση συστήματος

3. Χαρακτηριστικά

Η υπορουτίνα αυτή λύνει ένα σύστημα N γραμμικών εξισώσεων, $AX=B$. Εισάγεται ο πίνακας A που έχει δημιουργηθεί έπειτα από παραγοντοποίηση LU, με την υπορουτίνα LUDCMP. Το διάνυσμα INDX είναι είσοδος που προέρχεται από την υπορουτίνα LUDCMP. Το διάνυσμα B μπαίνει σαν είσοδος και περιέχει το δεξί μέρος της εξίσωσης $AX=B$ και εξέρχεται με τη λύση του συστήματος (X διάνυσμα).

Π4.36 Υπορουτίνα J79FUNCT

1. Σκοπός

Η υπορουτίνα αυτή υπολογίζει την εξίσωση $Y(I)=YI(X)$, για $I=1$ έως N. Δέχεται ως είσοδο τα υποθετικά μεγέθη X(I) και επιστρέφει κα σφάλματα Y(I).

2. Κάλεσμα

call J79FUNCT (X, Y)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
X	real 1D	Διάνυσμα με τις μεταβλητές υπόθεσης
Y	real 1D	Διάνυσμα με τα σφάλματα

3. Σχόλια

Καλούνται οι υπορουτίνες J79GVAR, ENGIN, J79ERVAR

Π4.37 Υπορουτίνα J79FDJAC

1. Σκοπός

Η υπορουτίνα αυτή υπολογίζει τον Ιακωβιανό πίνακα για τα υποθετικά μεγέθη X.

2. Κάλεσμα

call J79FDJAC (N, X, Y, EPS, DY)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
N	integer	Διάσταση των διανυσμάτων
X	real 1D	Ανεξάρτητο διάνυσμα, (διάνυσμα υποθετικών μεγεθών)
Y	real 1D	Εξαρτημένο διάνυσμα, (διάνυσμα σφαλμάτων)
EPS	real	Βήμα για τον υπολογισμό του Ιακωβιανού πίνακα
DY	real 2D	Ιακωβιανός πίνακας

3. Σχόλια

Καλούνται οι υπορουτίνες svdcmp, svdsrt

Π4.38 Υπορουτίνα J79GVAR

1. Σκοπός

Η υπορουτίνα αυτή υπολογίζει τα υποθετικά μεγέθη. Δέχεται ως είσοδο το διάνυσμα X που περιέχει του υποθετικούς συντελεστές x_i και υπολογίζει τα υποθετικά μεγέθη με σχέσεις της μορφής:

$$(\text{υποθετικό μέγεθος}) = x_i \times (\text{τιμή του μεγέθους στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας})$$

2. Κάλεσμα

call J79GVAR (X)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
X	real 1D	Διάνυσμα που περιέχει τους συντελεστές για την εκτίμηση των υποθετικών μεγεθών

Π4.39 Υπορουτίνα J79ERVAR

1. Σκοπός

Η υπορουτίνα αυτή υπολογίζει τα υποθετικά μεγέθη. Δέχεται ως είσοδο το διάνυσμα X που περιέχει του υποθετικούς συντελεστές x_i και υπολογίζει τα υποθετικά μεγέθη με σχέσεις της μορφής:

$$(\text{υποθετικό μέγεθος}) = x_i \times (\text{τιμή του μεγέθους στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας})$$

2. Κάλεσμα

call J79GVAR (X)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΥΠΟΣ	ΣΧΟΛΙΑ
X	real 1D	Διάνυσμα που περιέχει τους συντελεστές για την εκτίμηση των υποθετικών μεγεθών

Π5 Στοιχεία μεταλλάκτη πίεσης

Electronic
Pressure Measurement

Pressure transmitter for general industrial applications Model A-10

WIKAI Data Sheet PE 81 60



Applications

- Mechanical engineering
- Machine tools
- Control and feedback control systems
- Hydraulics / Pneumatics
- Pumps / Compressors

Special Features

- Pressure ranges: from 0 ... 1 bar up to 0 ... 600 bar
- Non-linearity: 0,3 % or 0,6 %
- Signal output: 4-20 mA, 0-10 V, 0-5 V and others
- Electrical connection: DIN 175301-803 A and C, M12x1, Flying leads 2m
- Pressure connection: G1/4 DIN 3852-E, 1/4NPT and others

Description

Simple - reliable - competitive

The WIKAI A-10 can be used for a multitude of functions across many different applications. Exceptionally simple installation, set-up and operation with an excellent price/performance ratio set this highly-reliable product apart.



Pressure transmitter A-10

WIKAI Data Sheet PE 81 60 · 05/2007

Seite 1 von 4

Data Sheets for related models
Pressure transmitter for general applications; Model S-10; see Data Sheet PE 81 01

WIKAI
Part of your business

Specifications		Model A-10								
Pressure ranges	bar	1	1.6	2.5	4	6	10	16	25	
Over pressure safety	bar	2	3.2	5	8	12	20	32	50	
Burst pressure	bar	5	10	10	17	34	34	100	100	
Pressure ranges	bar	40	60	100	160	250	400	600		
Over pressure safety	bar	80	120	200	320	500	800	1200		
Burst pressure	bar	400	550	800	1000	1200	1700	2400		
MPa and kg/cm ² are available {Absolute pressure: 0 ... 1 bar up to 0 ... 25 bar}										
Pressure ranges	psi	15	20	30	50	100	150	200	300	
Over pressure safety	psi	30	40	60	100	200	290	400	600	
Burst pressure	psi	75	75	150	250	500	500	1500	1500	
Pressure ranges	psi	500	1000	1500	2000	3000	5000	10000		
Over pressure safety	psi	1000	1740	2900	4000	6000	10000	17400		
Burst pressure	psi	2500	7975	11600	14500	17400	24650	34800		
{Absolute pressure: 0 ... 15 psi up to 0 ... 300 psi}										
Vacuum resistance		As of 0 ... 10 bar								
Fatigue life		10 Mio. max. load cycles								
Materials										
■ Wetted parts										
» Pressure Connection		316 L								
» Pressure sensor		316 L (as of 0 ... 10 bar rel XM-13)								
■ Internal transmission fluid		Silicone oil (only with pressure ranges up to 0 ... 6 bar and 0 ... 25 bar abs)								
■ Case		316 L								
Power supply UB	UB in VDC	8 ... 30 (14 ... 30 with signal output 0 ... 10 V) {8 ... 36 and 14 ... 36 with signal output 0 ... 10 V}								
maximum ohmic load RA		0 ... 10 V, 3-wire $R_A > 10 \text{ k}$ 0 ... 5 V, 3-wire $R_A > 5 \text{ k}$ 1 ... 5 V, 3-wire $R_A > 5 \text{ k}$ 0.5 ... 4.5 V, 3-wire $R_A > 4.5 \text{ k}$ {Other signal output on request}								
Response time	ms	< 4								
Current consumption	mA	Signal current (max. 25) for current output Max. 8 for voltage output signal								
Insulation voltage	VDC	500 ¹⁾								
¹⁾ For power supply, use a circuit with energy limitation (EN/UL/IEC 61010-1, section 9.3) with the following maximum values for the current: bei UB = 30 V (DC): 5 A. Alternative for North America: The connection may also be made to „Class 2 Power Units“ (UL 1310) or „Class 2 Transformers“ (UL 1585).										
Non-linearity	% of span	$\leq \pm 0.3$		according to IEC 61298-2						
		$\leq \pm 0.6$								
Accuracy ²⁾	% of span	$\leq \pm 0.5$		(with non-linearity 0.3 %)						
		$\leq \pm 0.6$		(with non-linearity 0.3 % and with signal output 0 ... 5 V)						
		$\leq \pm 1.0$		(with non-linearity 0.6 %)						
²⁾ Including non-linearity, hysteresis, zero point and full scale error (corresponds to error of measurement per IEC 61298-2)										
Zero offset	% of span	$\leq 0.15 \text{ typ.}, \leq 0.4 \text{ max.}$		(with non-linearity 0.3 %)						
		$\leq 0.5 \text{ typ.}, \leq 0.8 \text{ max.}$		(with non-linearity 0.6 %)						
Hysteresis	% of span	≤ 0.15								
Non-repeatability	% of span	≤ 0.1								
Long-term drift	% of span	≤ 0.1								
Signal noise	% of span	≤ 0.3								
Permissible temperature of										
■ Medium	°C	0 ... +80 (-30 ... +100)								
■ Ambience	°C	0 ... +80 (-20 ... +80)								
■ Storage	°C	-20 ... +80 (-40 ... +80)								
Operating temperature range	°C	0 ... +80								
Temperature error within operating temperature range	% of span	$\leq 1.0 \text{ typ.}, \leq 2.5 \text{ max.}$								

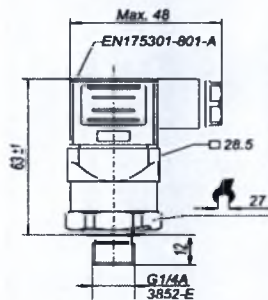
Specifications		Model A-10
Approvals		
RoHS-conformity		On request
CE-conformity		
<ul style="list-style-type: none"> ■ Pressure equipment directive ■ EMC directive 		97/23/EC 89/336/EEC emission (class B) and immunity according to EN 61 326
Shock resistance	g	500 according to IEC 60068-2-27 (mechanical shock)
Vibration resistance	g	10 according to IEC 60068-2-6 (vibration under resonance)
Wiring protection	VDC	
<ul style="list-style-type: none"> ■ Overvoltage protection ■ Short-circuit proofness ■ Reverse polarity protection 		32; 36 with 4 ... 20 mA Sig+ towards UB- UB+ towards UB-
Reference conditions		According to IEC 61298-1
<ul style="list-style-type: none"> ■ Relative humidity 	%	45 ... 75
Weight	g	Approx. 80

(1) Items in curved brackets are optional extras for additional price

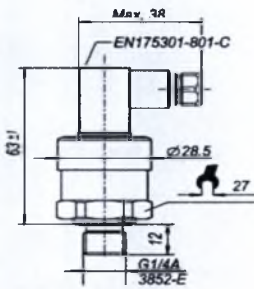
Dimensions in mm

Ingress protection IP per IEC 60529. The ingress protection classes specified only apply while the pressure transmitter is connected with female connectors that provide the corresponding ingress protection.

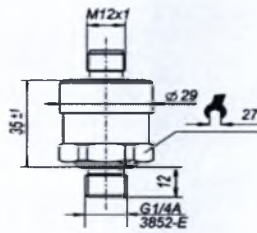
DIN 175301-803 A
L-connector
for conductor cross section up to max. 1.5 mm²,
conductor outer diameter 6-8 mm
IP 65



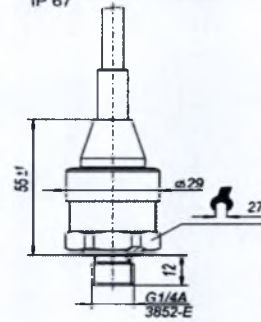
DIN 175301-803 C
L-connector
for conductor cross section up to max. 0.75 mm²,
conductor outer diameter 4.5-6 mm
IP 65



M 12x1, 4-pin
IP 67



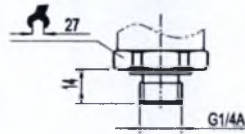
Flying leads,
conductor cross section 3x 0.34 mm²,
conductor outer diameter 6.6 mm,
PUR cable - unshielded,
IP 67



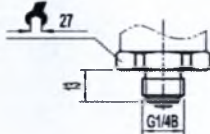
For tapped holes and welding sockets please see Technical Information IN 00.14 for download at www.wika.de

Pressure connections

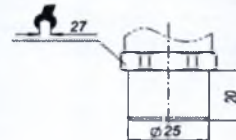
G 1/4
DIN 3852-E
with sealing NBR (FKM)
Over pressure safety max. 600 bar



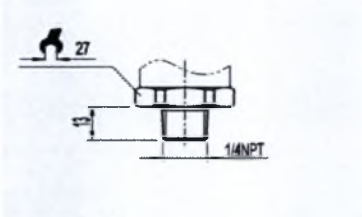
G 1/4
EN 837
with sealing
Copper (Stainless steel)



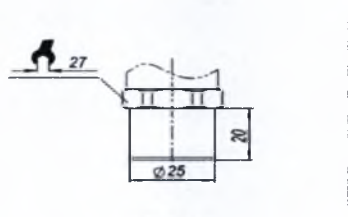
G 1/4female
EN 837
with sealing
Copper (Stainless steel)



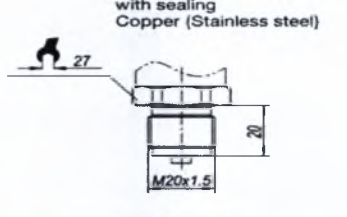
Pressure connections
1/4 NPT



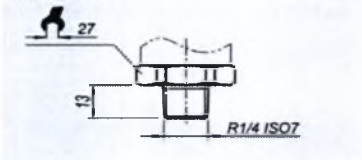
1/4 NPT female



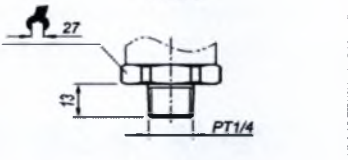
M 20 x 1.5
with sealing
Copper (Stainless steel)



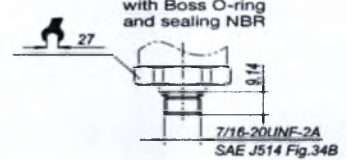
R 1/4 ISO 7



PT 1/4



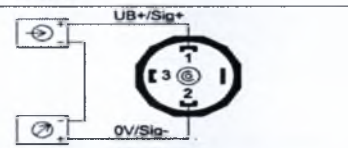
7/16-20 UNF
with Boss O-ring
and sealing NBR



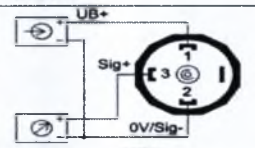
Electrical connections

DIN 175301-803 A
L-connector

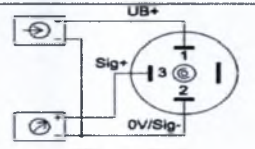
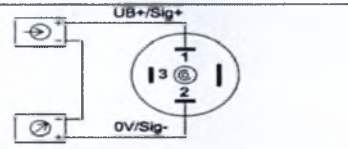
2-wire



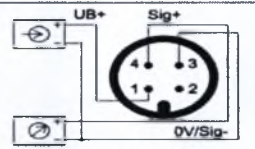
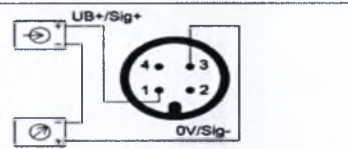
3-wire



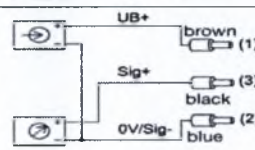
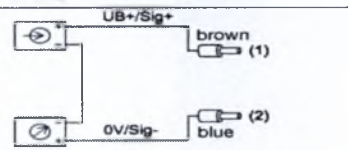
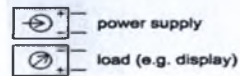
DIN 175301-803 C
L-connector



M 12x1, 4-pin
without angle socket or
female cable connectors



Flying leads



Specifications and dimensions given in this leaflet represent the state of engineering at the time of printing. Modifications may take place and materials specified may be replaced by others without prior notice.



WIKAI Alexander Wiegand GmbH & Co. KG
Alexander-Wiegand-Straße 30
63911 Klingenberg/Germany
Tel. (+49) 9372/132-0
Fax (+49) 9372/132-406
E-mail info@wika.de
www.wika.de

Π6 Πρωτόκολλο επικοινωνίας ECU με H/Y

1.1 EDT data

The ECU reports its status and condition via a serial protocol. This serial protocol is based on the industrial standard RS232

After power up the ECU transmitted the software version, the software date and a number of settings. After this, the normal serial data is transmitted.

1.1.1 General specifications

Item	Description
Level	Standard RS232 level -12V to 12V
Baud rate	Standard the ECU setting is 2400. This gives an average of 48 bytes per second. Other settings are 2400-4800-9600-19200-38400-57600-115200
Protocol setup	8 data bits, no parity, 1 stop-bit
Data stream*	0xFF, {data1}, {data2}, {data3}, {data4}, {data5}

*Value of the data bytes 1 to 5 is always between 0 and 0xFE (254). After 10 data sets of normal information an alternating data set is send.

1.1.2 Normal information data set

Byte	Unit	Description																																																																																																																																																																		
Leader		Value always 0xFF (255)																																																																																																																																																																		
Data 1 (Status)		This data byte describes the state of the ECU and which type of engine is installed If B2, B1 and B0 are zero (low) then the bits B7 to B3 will indicated which engine is installed																																																																																																																																																																		
		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="8">Bits</th> <th>Description</th> </tr> <tr> <th>7</th> <th>6</th> <th>5</th> <th>4</th> <th>3</th> <th>2</th> <th>1</th> <th>0</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>Error (See Error information set)</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>Operator Switch in Emergency stop mode</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>Operator Switch in Auto stop mode</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>Operator Switch in Running mode</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>PEGASUS engine ID (older versions)</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>OLYMPUS engine ID (older versions)</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>MERCURY engine ID (older versions)</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>MERCURY engine ID</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>PEGASUS engine ID</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>OLYMPUS engine ID</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>TITAN engine ID</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>1</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>Start clearance</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>1</td> <td>X</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>Starting</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>X</td> <td>1</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>Started up</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>1</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>Idle calibration</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>Maximum RPM reached</td> </tr> </tbody> </table>	Bits								Description	7	6	5	4	3	2	1	0		0	0	0	0	0	0	0	0	Error (See Error information set)	X	X	X	X	X	0	0	1	Operator Switch in Emergency stop mode	X	X	X	X	X	0	1	0	Operator Switch in Auto stop mode	X	X	X	X	X	1	0	0	Operator Switch in Running mode	0	0	0	0	0	0	1	1	PEGASUS engine ID (older versions)	0	0	0	0	0	1	1	0	OLYMPUS engine ID (older versions)	0	0	0	0	0	1	1	1	MERCURY engine ID (older versions)	0	0	0	0	1	0	0	0	MERCURY engine ID	0	0	0	1	0	0	0	0	PEGASUS engine ID	0	0	0	1	1	0	0	0	OLYMPUS engine ID	0	0	1	0	0	0	0	0	TITAN engine ID	X	X	X	X	1	S	S	S	Start clearance	X	X	X	1	X	S	S	S	Starting	X	X	1	X	X	S	S	S	Started up	X	1	X	X	X	S	S	S	Idle calibration	1	X	X	X	X	S	S	S	Maximum RPM reached
Bits								Description																																																																																																																																																												
7	6	5	4	3	2	1	0																																																																																																																																																													
0	0	0	0	0	0	0	0	Error (See Error information set)																																																																																																																																																												
X	X	X	X	X	0	0	1	Operator Switch in Emergency stop mode																																																																																																																																																												
X	X	X	X	X	0	1	0	Operator Switch in Auto stop mode																																																																																																																																																												
X	X	X	X	X	1	0	0	Operator Switch in Running mode																																																																																																																																																												
0	0	0	0	0	0	1	1	PEGASUS engine ID (older versions)																																																																																																																																																												
0	0	0	0	0	1	1	0	OLYMPUS engine ID (older versions)																																																																																																																																																												
0	0	0	0	0	1	1	1	MERCURY engine ID (older versions)																																																																																																																																																												
0	0	0	0	1	0	0	0	MERCURY engine ID																																																																																																																																																												
0	0	0	1	0	0	0	0	PEGASUS engine ID																																																																																																																																																												
0	0	0	1	1	0	0	0	OLYMPUS engine ID																																																																																																																																																												
0	0	1	0	0	0	0	0	TITAN engine ID																																																																																																																																																												
X	X	X	X	1	S	S	S	Start clearance																																																																																																																																																												
X	X	X	1	X	S	S	S	Starting																																																																																																																																																												
X	X	1	X	X	S	S	S	Started up																																																																																																																																																												
X	1	X	X	X	S	S	S	Idle calibration																																																																																																																																																												
1	X	X	X	X	S	S	S	Maximum RPM reached																																																																																																																																																												
		X = don't care 1 or 0 S = state as in Operator Switch																																																																																																																																																																		
Data 2 (RPM value)	RPM	Motor type : PEGASUS, OLYMPUS, TITAN RPM = value * 500 Motor type : MERCURY RPM = value * 700																																																																																																																																																																		
Data 3 (EGT value)	°C	EGT = value * 46 – 50																																																																																																																																																																		
Data 4 (Throttle setting)	%	THR = value / 2																																																																																																																																																																		
Data 5 (Vout value)	Volt	VOUT = value * 6.25 / 255 (Engine ID MERCURY PEGASUS) VOUT = value * 8.30 / 255 (Engine ID OLYMPUS, TITAN)																																																																																																																																																																		

1.1.3 Error information data set

Byte	Unit	Description																																																																																										
Leader		Value always 0xFF (255)																																																																																										
Data 1 (Status)		This data byte describes the state of the ECU and when it's in the error mode this value is ZERO																																																																																										
Data 2 (Error code)		RPM value is overruled with the error code of the ECU. Next table gives the relation between error code and the bits which are set																																																																																										
		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="8">Bits</th> <th>Description</th> </tr> <tr> <th>7</th> <th>6</th> <th>5</th> <th>4</th> <th>3</th> <th>2</th> <th>1</th> <th>0</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>1</td> <td>rpm low</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>1</td> <td>X</td> <td>switch channel not present</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>1</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>throttle channel not present</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>1</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>EGT error</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>1</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>rpm high</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>X</td> <td>1</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>supply low</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>1</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>supply low for Auto Start System</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Bits								Description	7	6	5	4	3	2	1	0		X	X	X	X	X	X	X	1	rpm low	X	X	X	X	X	X	1	X	switch channel not present	X	X	X	X	X	1	X	X	throttle channel not present	X	X	X	X	1	X	X	X	EGT error	X	X	X	1	X	X	X	X	rpm high	X	X	1	X	X	X	X	X	supply low	X	1	X	X	X	X	X	X	supply low for Auto Start System	1	X	X	X	X	X	X	X	
Bits								Description																																																																																				
7	6	5	4	3	2	1	0																																																																																					
X	X	X	X	X	X	X	1	rpm low																																																																																				
X	X	X	X	X	X	1	X	switch channel not present																																																																																				
X	X	X	X	X	1	X	X	throttle channel not present																																																																																				
X	X	X	X	1	X	X	X	EGT error																																																																																				
X	X	X	1	X	X	X	X	rpm high																																																																																				
X	X	1	X	X	X	X	X	supply low																																																																																				
X	1	X	X	X	X	X	X	supply low for Auto Start System																																																																																				
1	X	X	X	X	X	X	X																																																																																					
		X = don't care 1 or 0																																																																																										
Data 3 (EGT value)	°C	EGT = value * 4.6 – 50																																																																																										
Data 4 (Throttle setting)	%	THR = value / 2																																																																																										
Data 5 (Vout value)	Volt	VOUT = value * 6.25 / 255 (Engine ID: MERCURY, PEGASUS) VOUT = value * 8.30 / 255 (Engine ID: OLYMPUS, TITAN)																																																																																										

1.1.4 Alternate information data set (transmitted every 3 seconds)

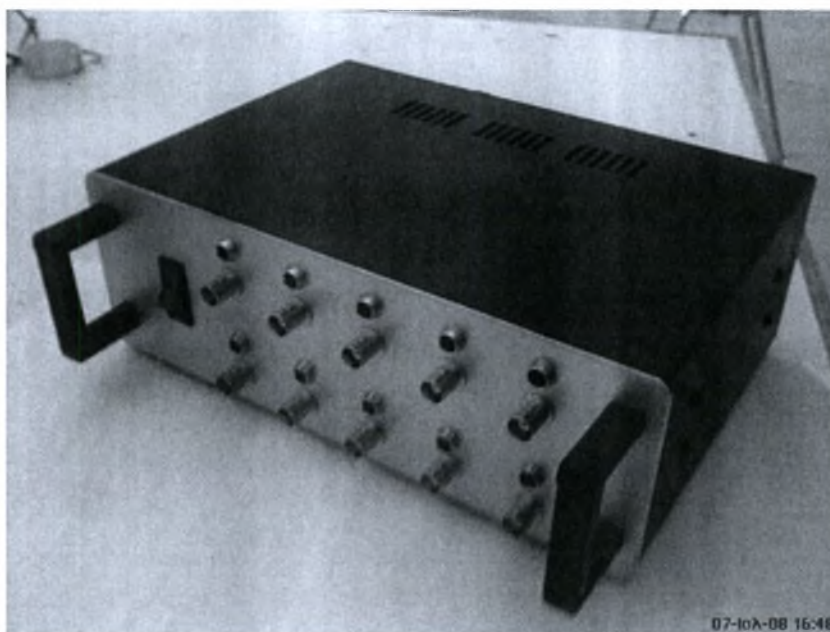
Byte	Unit	Description																																																																																	
Leader		Value always 0xFF (255)																																																																																	
Data 1 (Engine ID)		If B2, B1 and B0 are zero (low) then the bits B7 to B3 will indicate which engine is installed																																																																																	
		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="8">Bits</th> <th>Description</th> </tr> <tr> <th>7</th> <th>6</th> <th>5</th> <th>4</th> <th>3</th> <th>2</th> <th>1</th> <th>0</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>PEGASUS engine ID (older versions)</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>OLYMPUS engine ID (older versions)</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>MERCURY engine ID (older versions)</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>MERCURY engine ID</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>PEGASUS engine ID</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>OLYMPUS engine ID</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>TITAN engine ID</td> </tr> </tbody> </table>	Bits								Description	7	6	5	4	3	2	1	0		0	0	0	0	0	0	1	1	PEGASUS engine ID (older versions)	0	0	0	0	0	1	1	0	OLYMPUS engine ID (older versions)	0	0	0	0	0	1	1	1	MERCURY engine ID (older versions)	0	0	0	0	1	0	0	0	MERCURY engine ID	0	0	0	1	0	0	0	0	PEGASUS engine ID	0	0	0	1	1	0	0	0	OLYMPUS engine ID	0	0	1	0	0	0	0	0	TITAN engine ID
Bits								Description																																																																											
7	6	5	4	3	2	1	0																																																																												
0	0	0	0	0	0	1	1	PEGASUS engine ID (older versions)																																																																											
0	0	0	0	0	1	1	0	OLYMPUS engine ID (older versions)																																																																											
0	0	0	0	0	1	1	1	MERCURY engine ID (older versions)																																																																											
0	0	0	0	1	0	0	0	MERCURY engine ID																																																																											
0	0	0	1	0	0	0	0	PEGASUS engine ID																																																																											
0	0	0	1	1	0	0	0	OLYMPUS engine ID																																																																											
0	0	1	0	0	0	0	0	TITAN engine ID																																																																											
Data 2 (idle voltage)	Volt	PWOMIN = value * 6.25 / 255 (Engine ID: MERCURY, PEGASUS) PWOMIN = value * 8.30 / 255 (Engine ID: OLYMPUS, TITAN)																																																																																	
Data 3 (max rpm voltage)	Volt	PWOMAX = value * 6.25 / 255 (Engine ID: MERCURY, PEGASUS) PWOMAX = value * 8.30 / 255 (Engine ID: OLYMPUS, TITAN)																																																																																	
Data 4 (battery voltage)	Volt	SUPLVAL = value * 10.0 / 255 (Engine ID: MERCURY, PEGASUS) SUPLVAL = value * 10.0 / 255 (Engine ID: OLYMPUS, TITAN)																																																																																	
Data 5 (ext batt. voltage)	Volt	Vout = 7 + (value * 6.25 / 255) (Engine ID: MERCURY, PEGASUS) Vout = 7 + (value * 8.30 / 255) (Engine ID: OLYMPUS, TITAN)																																																																																	

1.1.5 ECU set-up data set

Byte	Unit	Description
Leader		Value always 0xFF (255)
Data 1 (ECU set-up)		Value always 0x05 (5)
Data 2 (high byte)	ms	Input pulse width information from the switch channel
Data 3 (low byte)		
Data 4 (pulse difference)	ms	Pulse width minimum: $PW_{min} = ((256 * PWTH) + PWTL) - 62464$ $PW_{max} = PW_{min} + PWIDIFF * 16$
Data 5 ... 17		A string of 12 bytes is transmitted (ASCII) which containing the software version and the production date. Format: "X.NN.YYMMDD" (old) "XX.NN.YYMMDD" (new) Software version and engine type 1.NN: Pegasus engine (obsolete) 2.NN: Pegasus engine (obsolete) 3.NN: Olympus engine 4.NN: Pegasus engine 5.NN: Mercury engine 6.NN: Olympus engine 7.NN: Pegasus engine 8.NN: Mercury engine 9.NN: Olympus engine 10.NN: Titan engine

Π7 Εγχειρίδιο χρήσης του ενισχυτή θερμοστοιχείων

Επειδή η τάση των θερμοστοιχείων είναι μικρή της τάξης των mV πρέπει να ενισχυθεί για να μπορεί να εκμεταλλευτεί από την κάρτα πρόσκτησης δεδομένων. Για τον σκοπό αυτό φτιάχτηκε ο ενισχυτής της παρακάτω εικόνας. Το βασικό στοιχείο αυτό του ενισχυτή είναι το ολοκληρωμένο κύκλωμα AD595AQ, του οποίου τα χαρακτηριστικά δίνονται στο παράρτημα Π8.

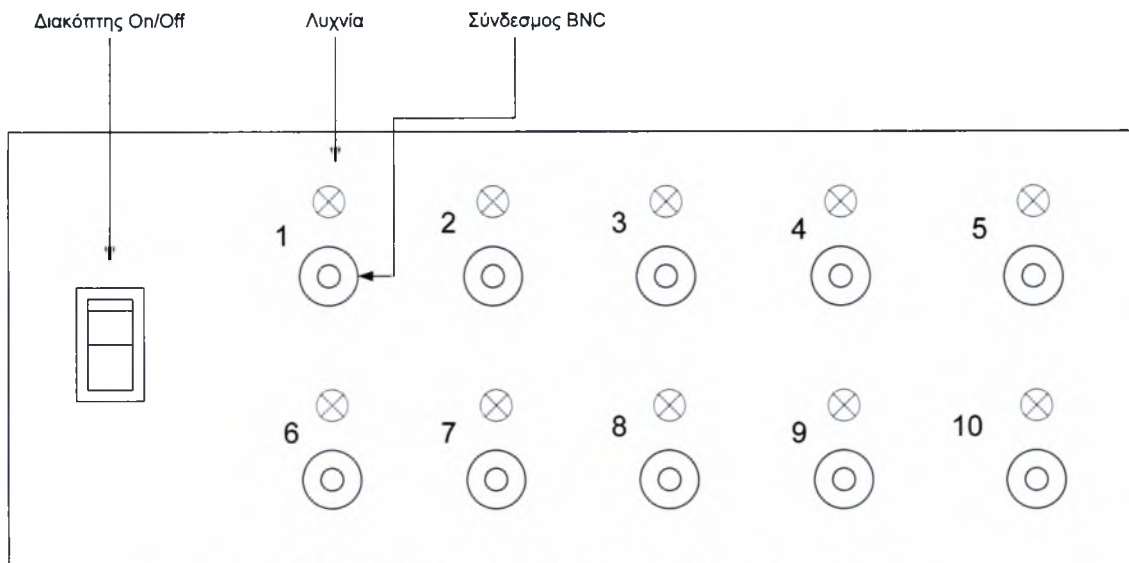


Σχήμα Π7.0.3. Ο ενισχυτής των θερμοστοιχείων.

Π7.1 Η μπροστινή όψη του ενισχυτή

Στην μπροστινή όψη του ενισχυτή διακρίνονται ο διακόπτης για την ενεργοποίηση της λειτουργίας του ενισχυτή. Οι λυχνίες, που ανάβουν σε περίπτωση που υπάρχει κάποια βλάβη σε κάποιο θερμοστοιχείο ή όταν δεν είναι ενεργοποιημένη η κάρτα πρόσκτησης δεδομένων. Και τέλος υπάρχουν οι σύνδεσμοι BNC για την σύνδεση με την κάρτα πρόσκτησης δεδομένων.

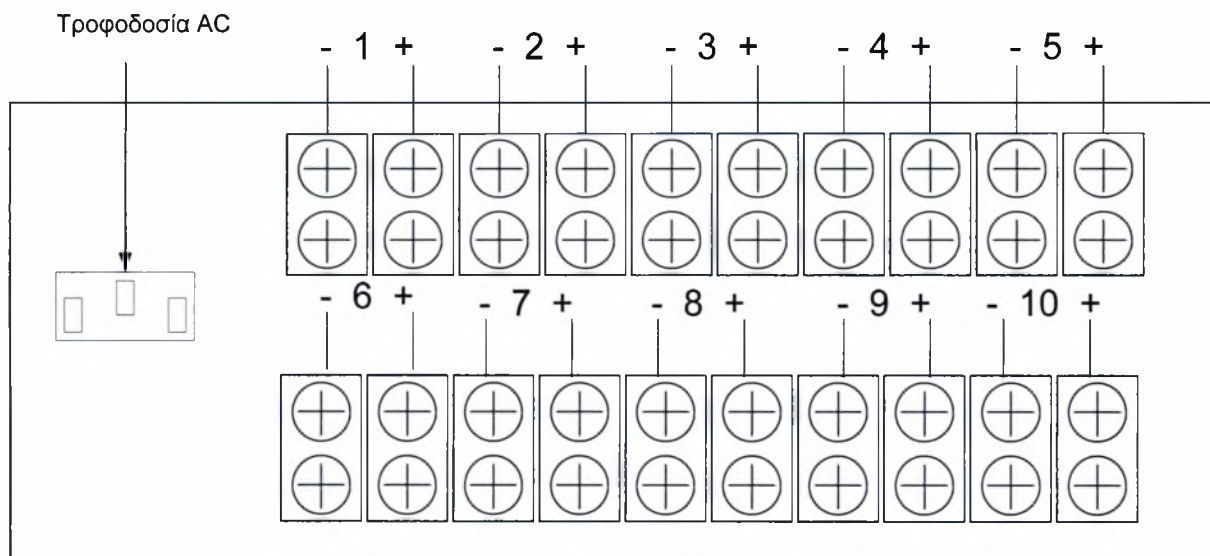
Επίσης στο σχήμα φαίνεται και η αρίθμηση των εξόδων του ενισχυτή.



Σχήμα Π7.0.4. Η μπροστινή όψη του ενισχυτή των θερμοστοιχείων.

Π7.2 Η πίσω όψη του ενισχυτή

Στην πίσω όψη του ενισχυτή διακρίνονται οι κλέμες πάνω στις οποίες συνδέονται οι ακροδέκτες των θερμοστοιχείων. Στο σχήμα διακρίνονται οι θέσεις που συνδέεται το κάθε θερμοστοιχείο καθώς και η πολικότητα που θα πρέπει να έχουν.



Σχήμα Π7.0.5. Η πίσω όψη του ενισχυτή.

Π7.3 Συνδεσμολογία των θερμοστοιχείων της εγκατάστασης του κινητήρα Olympus

Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται οι θέσεις που είναι συνδεδεμένα τα θερμοστοιχεία της εγκατάστασης.

Θερμοστοιχείο	Θέση
$T_{t3, \text{left}}$	1
$T_{t3, \text{right}}$	2
T_{t4}	3
$T_{t5, \text{left}}$	4
$T_{t5, \text{right}}$	5
$T_{t5, \text{up}}$	6
$T_{t5, \text{down}}$	7

Πίνακα Π7.1. Σύνδεση θερμοστοιχείων στον ενισχυτή

Π8 Το ολοκληρωμένο κύκλωμα – ενισχυτής AD595AQ



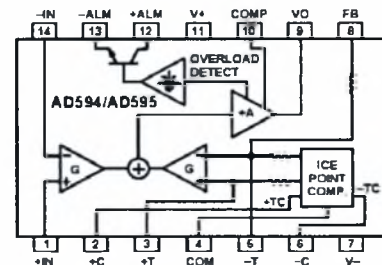
Monolithic Thermocouple Amplifiers with Cold Junction Compensation

AD594/AD595

FEATURES

Pretrimmed for Type J (AD594) or Type K (AD595) Thermocouples
Can Be Used with Type T Thermocouple Inputs
Low Impedance Voltage Output: 10 mV/°C
Built-In Ice Point Compensation
Wide Power Supply Range: +5 V to ±15 V
Low Power: <1 mW typical
Thermocouple Failure Alarm
Laser Wafer Trimmed to 1°C Calibration Accuracy
Setpoint Mode Operation
Self-Contained Celsius Thermometer Operation
High Impedance Differential Input
Side-Brazed DIP or Low Cost Cerdip

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



PRODUCT DESCRIPTION

The AD594/AD595 is a complete instrumentation amplifier and thermocouple cold junction compensator on a monolithic chip. It combines an ice point reference with a precalibrated amplifier to produce a high level (10 mV/°C) output directly from a thermocouple signal. Pin-strapping options allow it to be used as a linear amplifier-compensator or as a switched output setpoint controller using either fixed or remote setpoint control. It can be used to amplify its compensation voltage directly, thereby converting it to a stand-alone Celsius transducer with a low impedance voltage output.

The AD594/AD595 includes a thermocouple failure alarm that indicates if one or both thermocouple leads become open. The alarm output has a flexible format which includes TTL drive capability.

The AD594/AD595 can be powered from a single ended supply (including +5 V) and by including a negative supply, temperatures below 0°C can be measured. To minimize self-heating, an unloaded AD594/AD595 will typically operate with a total supply current 160 µA, but is also capable of delivering in excess of ±5 mA to a load.

The AD594 is precalibrated by laser wafer trimming to match the characteristic of type J (iron-constantan) thermocouples and the AD595 is laser trimmed for type K (chromel-alumel) inputs. The temperature transducer voltages and gain control resistors

are available at the package pins so that the circuit can be recalibrated for the thermocouple types by the addition of two or three resistors. These terminals also allow more precise calibration for both thermocouple and thermometer applications.

The AD594/AD595 is available in two performance grades. The C and the A versions have calibration accuracies of ±1°C and ±3°C, respectively. Both are designed to be used from 0°C to +50°C, and are available in 14-pin, hermetically sealed, side-brazed ceramic DIPs as well as low cost cerdip packages.

PRODUCT HIGHLIGHTS

1. The AD594/AD595 provides cold junction compensation, amplification, and an output buffer in a single IC package.
2. Compensation, zero, and scale factor are all precalibrated by laser wafer trimming (LWT) of each IC chip.
3. Flexible pinout provides for operation as a setpoint controller or a stand-alone temperature transducer calibrated in degrees Celsius.
4. Operation at remote application sites is facilitated by low quiescent current and a wide supply voltage range +5 V to dual supplies spanning 30 V.
5. Differential input rejects common-mode noise voltage on the thermocouple leads.

REV. C

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.
Tel: 781/329-4700 World Wide Web Site: <http://www.analog.com>
Fax: 781/326-8703 © Analog Devices, Inc., 1999

AD594/AD595—SPECIFICATIONS (@ +25°C and $V_S = 5\text{ V}$, Type J (AD594), Type K (AD595) Thermocouple, unless otherwise noted)

Model	AD594A			AD594C			AD595A			AD595C			Units
	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
ABSOLUTE MAXIMUM RATING													
$+V_S$ to $-V_S$			36			36			36			36	Volts
Common-Mode Input Voltage	$-V_S - 0.15$		$+V_S$	$-V_S - 0.15$		$+V_S$	$-V_S - 0.15$		$+V_S$	$-V_S - 0.15$		$+V_S$	Volts
Differential Input Voltage	$-V_S$		$+V_S$	$-V_S$		$+V_S$	$-V_S$		$+V_S$	$-V_S$		$+V_S$	Volts
Alarm Voltages													
ALM	$-V_S$		$+V_S + 36$	$-V_S$		$+V_S + 36$	$-V_S$		$+V_S + 36$	$-V_S$		$+V_S + 36$	Volts
ALM	$-V_S$		$+V_S$	$-V_S$		$+V_S$	$-V_S$		$+V_S$	$-V_S$		$+V_S$	Volts
Operating Temperature Range	-55		+125	-55		+125	-55		+125	-55		+125	°C
Output Short Circuit to Common	Indefinite			Indefinite			Indefinite			Indefinite			
TEMPERATURE MEASUREMENT													
Specified Temperature Range (0°C to +50°C)													
Calibration Error at +25°C ¹			± 3			± 1			± 3			± 1	°C
Stability vs. Temperature ²			± 0.05			± 0.025			± 0.05			± 0.025	°C/°C
Gain Error			± 1.5			± 0.75			± 1.5			± 0.75	%
Nominal Transfer Function			10			10			10			10	mV/°C
AMPLIFIER CHARACTERISTICS													
Closed Loop Gain ³	193.4 (Temperature in °C) × 51.70 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$			193.4 (Temperature in °C) × 51.70 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$			247.3 (Temperature in °C) × 40.44 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$			247.3 (Temperature in °C) × 40.44 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$			
Input Offset Voltage			0.1			0.1			0.1			0.1	μV
Input Bias Current			0.1			0.1			0.1			0.1	μA
Differential Input Range	-10		+50	-10		+50	-10		+50	-10		+50	mV
Common-Mode Range	$-V_S - 0.15$		$-V_S - 4$	$-V_S - 0.15$		$-V_S - 4$	$-V_S - 0.15$		$-V_S - 4$	$-V_S - 0.15$		$-V_S - 4$	Volts
Common-Mode Sensitivity - RTD			10			10			10			10	mV/V
Power Supply Sensitivity - RTD			10			10			10			10	mV/V
Output Voltage Range													
Dual Supply	$-V_S + 2.5$		$+V_S - 2$	$-V_S + 2.5$		$+V_S - 2$	$-V_S + 2.5$		$+V_S - 2$	$-V_S + 2.5$		$+V_S - 2$	Volts
Single Supply	0		$+V_S - 2$	0		$+V_S - 2$	0		$+V_S - 2$	0		$+V_S - 2$	Volts
Usable Output Current ⁴			± 5			± 5			± 5			± 5	mA
3 dB Bandwidth			15			15			15			15	Hz
ALARM CHARACTERISTICS													
V_{LEAKAGE} at 2 mA			0.3			0.3			0.3			0.3	Volts
Leakage Current			± 1			± 1			± 1			± 1	μA max
Operating Voltage at -ALM			$+V_S - 4$			$+V_S - 4$			$+V_S - 4$			$+V_S - 4$	Volts
Short Circuit Current			20			20			20			20	mA
POWER REQUIREMENTS													
Specified Performance	$+V_S = 5, -V_S = 0$			$+V_S = 5, -V_S = 0$			$+V_S = 5, -V_S = 0$			$+V_S = 5, -V_S = 0$			Volts
Operating ⁵	$+V_S$ to $-V_S \leq 30$			$+V_S$ to $-V_S \leq 30$			$+V_S$ to $-V_S \leq 30$			$+V_S$ to $-V_S \leq 30$			Volts
Quiescent Current (No Load)													
$+V_S$			160 300			160 300			160 300			160 300	μA
$-V_S$			100			100			100			100	μA
PACKAGE OPTION													
TO-116 (D-14)			AD594AD			AD594CD			AD595AD			AD595CD	
Cardip (Q-14)			AD594AQ			AD594CQ			AD595AQ			AD595CQ	

NOTES
¹Calibrated for minimum error at +25°C using a thermocouple sensitivity of 51.7 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$. Since a J type thermocouple deviates from this straight line approximation, the AD594 will normally read 3.1 mV when the measuring junction is at 0°C. The AD595 will similarly read 2.7 mV at 0°C.
²Defined as the slope of the line connecting the AD594/AD595 errors measured at 0°C and 50°C ambient temperature.
³Pin 8 shorted to Pin 9.
⁴Current Sink Capability in single supply configuration is limited to current drawn to ground through a 50 k Ω resistor at output voltages below 2.5 V.
⁵ $-V_S$ must not exceed -16.5 V.
 Specifications shown in **boldface** are tested on all production units at final electrical test. Results from those tests are used to calculate outgoing quality levels. All min and max specifications are guaranteed, although only those shown in **boldface** are tested on all production units.
 Specifications subject to change without notice.

INTERPRETING AD594/AD595 OUTPUT VOLTAGES

To achieve a temperature proportional output of 10 mV/°C and accurately compensate for the reference junction over the rated operating range of the circuit, the AD594/AD595 is gain trimmed to match the transfer characteristic of J and K type thermocouples at 25°C. For a type J output in this temperature range the TC is 51.70 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, while for a type K it is 40.44 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$. The resulting gain for the AD594 is 193.4 (10 mV/°C divided by 51.7 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$) and for the AD595 is 247.3 (10 mV/°C divided by 40.44 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$). In addition, an absolute accuracy trim induces an input offset to the output amplifier characteristic of 16 μV for the AD594 and 11 μV for the AD595. This offset arises because the AD594/AD595 is trimmed for a 250 mV output while applying a 25°C thermocouple input.

Because a thermocouple output voltage is nonlinear with respect to temperature, and the AD594/AD595 linearly amplifies the

compensated signal, the following transfer functions should be used to determine the actual output voltages:

$$AD594 \text{ output} = (\text{Type J Voltage} + 16 \mu\text{V}) \times 193.4$$

$$AD595 \text{ output} = (\text{Type K Voltage} + 11 \mu\text{V}) \times 247.3 \text{ or conversely:}$$

$$\text{Type J voltage} = (AD594 \text{ output}/193.4) - 16 \mu\text{V}$$

$$\text{Type K voltage} = (AD595 \text{ output}/247.3) - 11 \mu\text{V}$$

Table 1 lists the ideal AD594/AD595 output voltages as a function of Celsius temperature for type J and K ANSI standard thermocouples, with the package and reference junction at 25°C. As is normally the case, these outputs are subject to calibration, gain and temperature sensitivity errors. Output values for intermediate temperatures can be interpolated, or calculated using the output equations and ANSI thermocouple voltage tables referred to zero degrees Celsius. Due to a slight variation in alloy content between ANSI type J and DIN FE-CUNI

AD594/AD595

Table I. Output Voltage vs. Thermocouple Temperature (Ambient +25°C, $V_S = -5\text{ V}, +15\text{ V}$)

Thermocouple Temperature °C	Type J Voltage mV	AD594 Output mV	Type K Voltage mV	AD595 Output mV
-200	-7.890	-1523	-5.891	-1454
-180	-7.402	-1428	-5.550	-1370
-160	-6.821	-1316	-5.141	-1269
-140	-6.159	-1188	-4.669	-1152
-120	-5.426	-1046	-4.138	-1021
-100	-4.632	-893	-3.553	-876
-80	-3.785	-729	-2.920	-719
-60	-2.892	-556	-2.243	-552
-40	-1.960	-376	-1.527	-375
-20	-995	-189	-777	-189
-10	-501	-94	-392	-94
0	0	3.1	0	2.7
10	507	101	397	101
20	1.019	200	798	200
25	1.277	250	1.000	250
30	1.536	300	1.203	300
40	2.058	401	1.611	401
50	2.585	503	2.022	503
60	3.115	606	2.436	605
80	4.186	813	3.266	810
100	5.268	1022	4.095	1015
120	6.359	1233	4.919	1219
140	7.457	1445	5.733	1420
160	8.560	1659	6.539	1620
180	9.667	1873	7.338	1817
200	10.777	2087	8.137	2015
220	11.887	2302	8.938	2213
240	12.998	2517	9.745	2413
260	14.108	2732	10.560	2614
280	15.217	2946	11.381	2817
300	16.325	3160	12.207	3022
320	17.432	3374	13.039	3227
340	18.537	3588	13.874	3434
360	19.640	3801	14.712	3641
380	20.743	4015	15.552	3849
400	21.846	4228	16.395	4057
420	22.949	4441	17.241	4266
440	24.054	4655	18.088	4476
460	25.161	4869	18.938	4686
480	26.272	5084	19.788	4896

Thermocouple Temperature °C	Type J Voltage mV	AD594 Output mV	Type K Voltage mV	AD595 Output mV
500	27.388	5300	20.640	5107
520	28.511	5517	21.493	5318
540	29.642	5736	22.346	5529
560	30.782	5956	23.198	5740
580	31.933	6179	24.050	5950
600	33.096	6404	24.902	6161
620	34.273	6632	25.751	6371
640	35.464	6862	26.599	6581
660	36.671	7095	27.445	6790
680	37.893	7332	28.288	6998
700	39.130	7571	29.128	7206
720	40.382	7813	29.965	7413
740	41.647	8058	30.799	7619
750	42.283	8181	31.214	7722
760	-	-	31.629	7825
780	-	-	32.455	8029
800	-	-	33.277	8232
820	-	-	34.095	8434
840	-	-	34.909	8636
860	-	-	35.718	8836
880	-	-	36.524	9035
900	-	-	37.325	9233
920	-	-	38.122	9430
940	-	-	38.915	9626
960	-	-	39.703	9821
980	-	-	40.488	10015
1000	-	-	41.269	10209
1020	-	-	42.045	10400
1040	-	-	42.817	10591
1060	-	-	43.585	10781
1080	-	-	44.349	10970
1100	-	-	45.108	11158
1120	-	-	45.863	11345
1140	-	-	46.612	11530
1160	-	-	47.356	11714
1180	-	-	48.095	11897
1200	-	-	48.828	12078
1220	-	-	49.555	12258
1240	-	-	50.276	12436
1250	-	-	50.633	12524

thermocouples Table I should not be used in conjunction with European standard thermocouples. Instead the transfer function given previously and a DIN thermocouple table should be used. ANSI type K and DIN NiCr-Ni thermocouples are composed

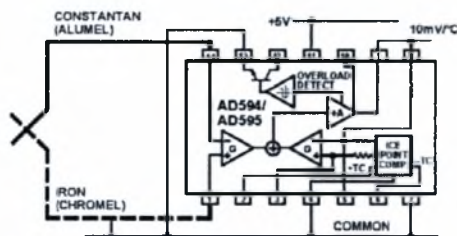


Figure 1. Basic Connection, Single Supply Operation

of identical alloys and exhibit similar behavior. The upper temperature limits in Table I are those recommended for type J and type K thermocouples by the majority of vendors.

SINGLE AND DUAL SUPPLY CONNECTIONS

The AD594/AD595 is a completely self-contained thermocouple conditioner. Using a single +5 V supply the interconnections shown in Figure 1 will provide a direct output from a type J thermocouple (AD594) or type K thermocouple (AD595) measuring from 0°C to +300°C.

Any convenient supply voltage from +5 V to +30 V may be used, with self-heating errors being minimized at lower supply levels. In the single supply configuration the +5 V supply connects to Pin 11 with the V- connection at Pin 7 strapped to power and signal common at Pin 4. The thermocouple wire inputs connect to Pins 1 and 14 either directly from the measuring point or through intervening connections of similar thermocouple wire type. When the alarm output at Pin 13 is not used it should be connected to common or -V. The precalibrated feedback network at Pin 8 is tied to the output at Pin 9 to provide a 10 mV/°C nominal temperature transfer characteristic.

By using a wider ranging dual supply, as shown in Figure 2, the AD594/AD595 can be interfaced to thermocouples measuring both negative and extended positive temperatures.

AD594/AD595

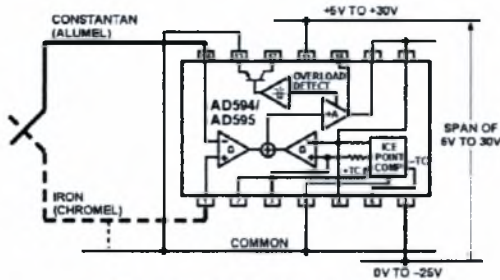


Figure 2. Dual Supply Operation

With a negative supply the output can indicate negative temperatures and drive grounded loads or loads returned to positive voltages. Increasing the positive supply from 5 V to 15 V extends the output voltage range well beyond the 750°C temperature limit recommended for type J thermocouples (AD594) and the 1250°C for type K thermocouples (AD595).

Common-mode voltages on the thermocouple inputs must remain within the common-mode range of the AD594/AD595, with a return path provided for the bias currents. If the thermocouple is not remotely grounded, then the dotted line connections in Figures 1 and 2 are recommended. A resistor may be needed in this connection to assure that common-mode voltages induced in the thermocouple loop are not converted to normal mode.

THERMOCOUPLE CONNECTIONS

The isothermal terminating connections of a pair of thermocouple wires forms an effective reference junction. This junction must be kept at the same temperature as the AD594/AD595 for the internal cold junction compensation to be effective.

A method that provides for thermal equilibrium is the printed circuit board connection layout illustrated in Figure 3.

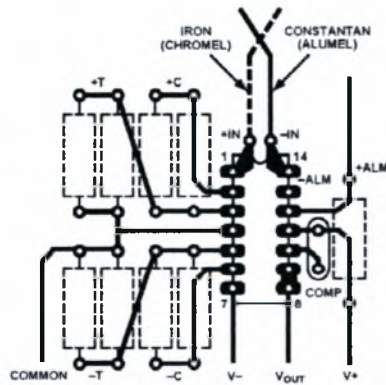


Figure 3. PCB Connections

Here the AD594/AD595 package temperature and circuit board are thermally contacted in the copper printed circuit board tracks under Pins 1 and 14. The reference junction is now composed of a copper-constantan (or copper-alumel) connection and copper-iron (or copper-chromel) connection, both of which are at the same temperature as the AD594/AD595.

The printed circuit board layout shown also provides for placement of optional alarm load resistors, recalibration resistors and a compensation capacitor to limit bandwidth.

To ensure secure bonding the thermocouple wire should be cleaned to remove oxidation prior to soldering. Noncorrosive rosin flux is effective with iron, constantan, chromel and alumel and the following solders: 95% tin-5% antimony, 95% tin-5% silver or 90% tin-10% lead.

FUNCTIONAL DESCRIPTION

The AD594 behaves like two differential amplifiers. The outputs are summed and used to control a high gain amplifier, as shown in Figure 4.

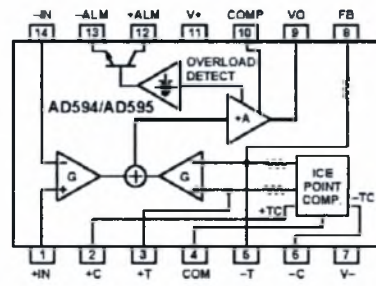


Figure 4. AD594/AD595 Block Diagram

In normal operation the main amplifier output, at Pin 9, is connected to the feedback network, at Pin 8. Thermocouple signals applied to the floating input stage, at Pins 1 and 14, are amplified by gain G of the differential amplifier and are then further amplified by gain A in the main amplifier. The output of the main amplifier is fed back to a second differential stage in an inverting connection. The feedback signal is amplified by this stage and is also applied to the main amplifier input through a summing circuit. Because of the inversion, the amplifier causes the feedback to be driven to reduce this difference signal to a small value. The two differential amplifiers are made to match and have identical gains, G. As a result, the feedback signal that must be applied to the right-hand differential amplifier will precisely match the thermocouple input signal when the difference signal has been reduced to zero. The feedback network is trimmed so that the effective gain to the output, at Pins 8 and 9, results in a voltage of 10 mV/°C of thermocouple excitation.

In addition to the feedback signal, a cold junction compensation voltage is applied to the right-hand differential amplifier. The compensation is a differential voltage proportional to the Celsius temperature of the AD594/AD595. This signal disturbs the differential input so that the amplifier output must adjust to restore the input to equal the applied thermocouple voltage.

The compensation is applied through the gain scaling resistors so that its effect on the main output is also 10 mV/°C. As a result, the compensation voltage adds to the effect of the thermocouple voltage a signal directly proportional to the difference between 0°C and the AD594/AD595 temperature. If the thermocouple reference junction is maintained at the AD594/AD595 temperature, the output of the AD594/AD595 will correspond to the reading that would have been obtained from amplification of a signal from a thermocouple referenced to an ice bath.

AD594/AD595

The AD594/AD595 also includes an input open circuit detector that switches on an alarm transistor. This transistor is actually a current-limited output buffer, but can be used up to the limit as a switch transistor for either pull-up or pull-down operation of external alarms.

The ice point compensation network has voltages available with positive and negative temperature coefficients. These voltages may be used with external resistors to modify the ice point compensation and recalibrate the AD594/AD595 as described in the next column.

The feedback resistor is separately pinned out so that its value can be padded with a series resistor, or replaced with an external resistor between Pins 5 and 9. External availability of the feedback resistor allows gain to be adjusted, and also permits the AD594/AD595 to operate in a switching mode for setpoint operation.

CAUTIONS:

The temperature compensation terminals (+C and -C) at Pins 2 and 6 are provided to supply small calibration currents only. The AD594/AD595 may be permanently damaged if they are grounded or connected to a low impedance.

The AD594/AD595 is internally frequency compensated for feedback ratios (corresponding to normal signal gain) of 75 or more. If a lower gain is desired, additional frequency compensation should be added in the form of a 300 pF capacitor from Pin 10 to the output at Pin 9. As shown in Figure 5 an additional 0.01 μ F capacitor between Pins 10 and 11 is recommended.

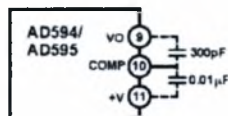


Figure 5. Low Gain Frequency Compensation

RECALIBRATION PRINCIPLES AND LIMITATIONS

The ice point compensation network of the AD594/AD595 produces a differential signal which is zero at 0°C and corresponds to the output of an ice referenced thermocouple at the temperature of the chip. The positive TC output of the circuit is proportional to Kelvin temperature and appears as a voltage at +T. It is possible to decrease this signal by loading it with a resistor from +T to COM, or increase it with a pull-up resistor from +T to the larger positive TC voltage at +C. Note that adjustments to +T should be made by measuring the voltage which tracks it at -T. To avoid destabilizing the feedback amplifier the measuring instrument should be isolated by a few thousand ohms in series with the lead connected to -T.

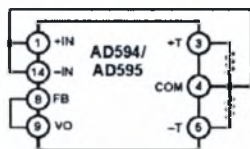


Figure 6. Decreased Sensitivity Adjustment

Changing the positive TC half of the differential output of the compensation scheme shifts the zero point away from 0°C. The zero can be restored by adjusting the current flow into the negative input of the feedback amplifier, the -T pin. A current into

this terminal can be produced with a resistor between -C and -T to balance an increase in +T, or a resistor from -T to COM to offset a decrease in +T.

If the compensation is adjusted substantially to accommodate a different thermocouple type, its effect on the final output voltage will increase or decrease in proportion. To restore the nominal output to 10 mV/°C the gain may be adjusted to match the new compensation and thermocouple input characteristics. When reducing the compensation the resistance between -T and COM automatically increases the gain to within 0.5% of the correct value. If a smaller gain is required, however, the nominal 47 k Ω internal feedback resistor can be paralleled or replaced with an external resistor.

Fine calibration adjustments will require temperature response measurements of individual devices to assure accuracy. Major reconfigurations for other thermocouple types can be achieved without seriously compromising initial calibration accuracy, so long as the procedure is done at a fixed temperature using the factory calibration as a reference. It should be noted that intermediate recalibration conditions may require the use of a negative supply.

EXAMPLE: TYPE E RECALIBRATION—AD594/AD595

Both the AD594 and AD595 can be configured to condition the output of a type E (chromel-constantan) thermocouple. Temperature characteristics of type E thermocouples differ less from type J, than from type K, therefore the AD594 is preferred for recalibration.

While maintaining the device at a constant temperature follow the recalibration steps given here. First, measure the device temperature by tying both inputs to common (or a selected common-mode potential) and connecting FB to VO. The AD594 is now in the stand alone Celsius thermometer mode. For this example assume the ambient is 24°C and the initial output VO is 240 mV. Check the output at VO to verify that it corresponds to the temperature of the device.

Next, measure the voltage -T at Pin 5 with a high impedance DVM (capacitance should be isolated by a few thousand ohms of resistance at the measured terminals). At 24°C the -T voltage will be about 8.3 mV. To adjust the compensation of an AD594 to a type E thermocouple a resistor, R1, should be connected between +T and +C, Pins 2 and 3, to raise the voltage at -T by the ratio of thermocouple sensitivities. The ratio for converting a type J device to a type E characteristic is:

$$r(AD594) = (60.9 \mu V/^{\circ}C) / (51.7 \mu V/^{\circ}C) = 1.18$$

Thus, multiply the initial voltage measured at -T by r and experimentally determine the R1 value required to raise -T to that level. For the example the new -T voltage should be about 9.8 mV. The resistance value should be approximately 1.8 k Ω .

The zero differential point must now be shifted back to 0°C. This is accomplished by multiplying the original output voltage VO by r and adjusting the measured output voltage to this value by experimentally adding a resistor, R2, between -C and -T, Pins 5 and 6. The target output value in this case should be about 283 mV. The resistance value of R2 should be approximately 240 k Ω .

Finally, the gain must be recalibrated such that the output VO indicates the device's temperature once again. Do this by adding a third resistor, R3, between FB and -T, Pins 8 and 5. VO should now be back to the initial 240 mV reading. The resistance value

AD594/AD595

of R3 should be approximately 280 kΩ. The final connection diagram is shown in Figure 7. An approximate verification of the effectiveness of recalibration is to measure the differential gain to the output. For type E it should be 164.2.

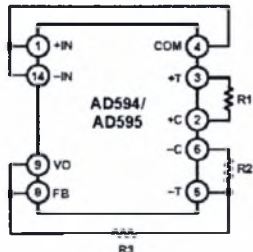


Figure 7. Type E Recalibration

When implementing a similar recalibration procedure for the AD595 the values for R1, R2, R3 and r will be approximately 650 Ω, 84 kΩ, 93 kΩ and 1.51, respectively. Power consumption will increase by about 50% when using the AD595 with type E inputs.

Note that during this procedure it is crucial to maintain the AD594/AD595 at a stable temperature because it is used as the temperature reference. Contact with fingers or any tools not at ambient temperature will quickly produce errors. Radiational heating from a change in lighting or approach of a soldering iron must also be guarded against.

USING TYPE T THERMOCOUPLES WITH THE AD595

Because of the similarity of thermal EMFs in the 0°C to +50°C range between type K and type T thermocouples, the AD595 can be directly used with both types of inputs. Within this ambient temperature range the AD595 should exhibit no more than an additional 0.2°C output calibration error when used with type T inputs. The error arises because the ice point compensator is trimmed to type K characteristics at 25°C. To calculate the AD595 output values over the recommended -200°C to +350°C range for type T thermocouples, simply use the ANSI thermocouple voltages referred to 0°C and the output equation given on page 2 for the AD595. Because of the relatively large nonlinearities associated with type T thermocouples the output will deviate widely from the nominal 10 mV/°C. However, cold junction compensation over the rated 0°C to +50°C ambient will remain accurate.

STABILITY OVER TEMPERATURE

Each AD594/AD595 is tested for error over temperature with the measuring thermocouple at 0°C. The combined effects of cold junction compensation error, amplifier offset drift and gain error determine the stability of the AD594/AD595 output over the rated ambient temperature range. Figure 8 shows an AD594/AD595 drift error envelope. The slope of this figure has units of °C/°C.

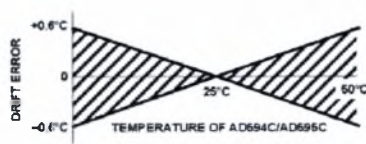


Figure 8. Drift Error vs. Temperature

THERMAL ENVIRONMENT EFFECTS

The inherent low power dissipation of the AD594/AD595 and the low thermal resistance of the package make self-heating errors almost negligible. For example, in still air the chip to ambient thermal resistance is about 80°C/watt (for the D package). At the nominal dissipation of 800 μW the self-heating in free air is less than 0.065°C. Submerged in fluorinert liquid (unstirred) the thermal resistance is about 40°C/watt, resulting in a self-heating error of about 0.032°C.

SETPOINT CONTROLLER

The AD594/AD595 can readily be connected as a setpoint controller as shown in Figure 9.

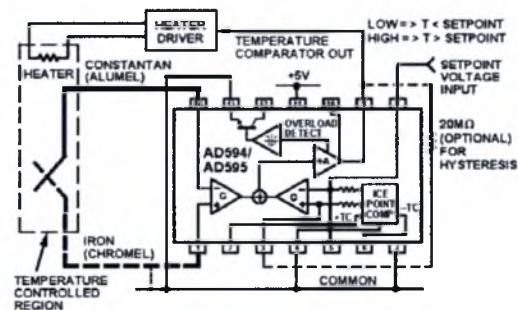


Figure 9. Setpoint Controller

The thermocouple is used to sense the unknown temperature and provide a thermal EMF to the input of the AD594/AD595. The signal is cold junction compensated, amplified to 10 mV/°C and compared to an external setpoint voltage applied by the user to the feedback at Pin 8. Table I lists the correspondence between setpoint voltage and temperature, accounting for the nonlinearity of the measurement thermocouple. If the setpoint temperature range is within the operating range (-55°C to +125°C) of the AD594/AD595, the chip can be used as the transducer for the circuit by shorting the inputs together and utilizing the nominal calibration of 10 mV/°C. This is the centigrade thermometer configuration as shown in Figure 13.

In operation if the setpoint voltage is above the voltage corresponding to the temperature being measured the output swings low to approximately zero volts. Conversely, when the temperature rises above the setpoint voltage the output switches to the positive limit of about 4 volts with a +5 V supply. Figure 9 shows the setpoint comparator configuration complete with a heater element driver circuit being controlled by the AD594/AD595 toggled output. Hysteresis can be introduced by injecting a current into the positive input of the feedback amplifier when the output is toggled high. With an AD594 about 200 nA into the +T terminal provides 1°C of hysteresis. When using a single 5 V supply with an AD594, a 20 MΩ resistor from V_O to +T will supply the 200 nA of current when the output is forced high (about 4 V). To widen the hysteresis band decrease the resistance connected from VO to +T.

AD594/AD595

ALARM CIRCUIT

In all applications of the AD594/AD595 the -ALM connection, Pin 13, should be constrained so that it is not more positive than $(V+) - 4\text{ V}$. This can be most easily achieved by connecting Pin 13 to either common at Pin 4 or $V-$ at Pin 7. For most applications that use the alarm signal, Pin 13 will be grounded and the signal will be taken from +ALM on Pin 12. A typical application is shown in Figure 10.

In this configuration the alarm transistor will be off in normal operation and the 20 k pull up will cause the +ALM output on Pin 12 to go high. If one or both of the thermocouple leads are interrupted, the +ALM pin will be driven low. As shown in Figure 10 this signal is compatible with the input of a TTL gate which can be used as a buffer and/or inverter.

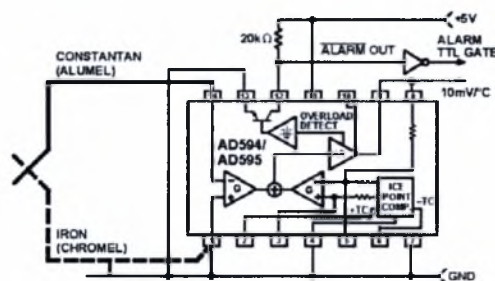


Figure 10. Using the Alarm to Drive a TTL Gate ("Grounded" Emitter Configuration)

Since the alarm is a high level output it may be used to directly drive an LED or other indicator as shown in Figure 11.

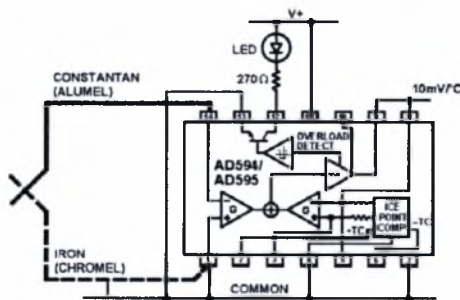


Figure 11. Alarm Directly Drives LED

A 270 Ω series resistor will limit current in the LED to 10 mA, but may be omitted since the alarm output transistor is current limited at about 20 mA. The transistor, however, will operate in a high dissipation mode and the temperature of the circuit will rise well above ambient. Note that the cold junction compensation will be affected whenever the alarm circuit is activated. The time required for the chip to return to ambient temperature will depend on the power dissipation of the alarm circuit, the nature of the thermal path to the environment and the alarm duration.

The alarm can be used with both single and dual supplies. It can be operated above or below ground. The collector and emitter of the output transistor can be used in any normal switch configuration. As an example a negative referenced load can be driven from -ALM as shown in Figure 12.

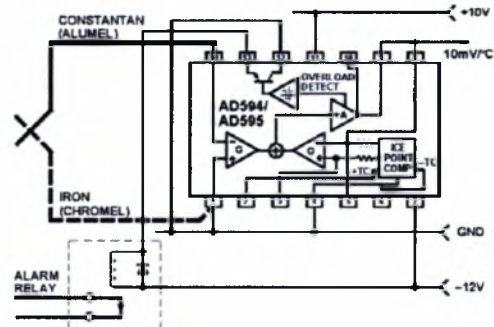


Figure 12. -ALM Driving A Negative Referenced Load

The collector (+ALM) should not be allowed to become more positive than $(V-) + 36\text{ V}$, however, it may be permitted to be more positive than $V+$. The emitter voltage (-ALM) should be constrained so that it does not become more positive than 4 volts below the $V+$ applied to the circuit.

Additionally, the AD594/AD595 can be configured to produce an extreme upscale or downscale output in applications where an extra signal line for an alarm is inappropriate. By tying either of the thermocouple inputs to common most runaway control conditions can be automatically avoided. A +IN to common connection creates a downscale output if the thermocouple opens, while connecting -IN to common provides an upscale output.

CELSIUS THERMOMETER

The AD594/AD595 may be configured as a stand-alone Celsius thermometer as shown in Figure 13.

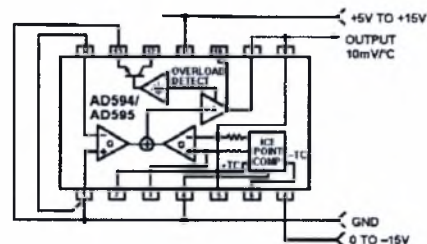


Figure 13. AD594/AD595 as a Stand-Alone Celsius Thermometer

Simply omit the thermocouple and connect the inputs (Pins 1 and 14) to common. The output now will reflect the compensation voltage and hence will indicate the AD594/AD595 temperature with a scale factor of 10 mV/°C. In this three terminal, voltage output, temperature sensing mode, the AD594/AD595 will operate over the full military -55°C to +125°C temperature range.

AD594/AD595

THERMOCOUPLE BASICS

Thermocouples are economical and rugged; they have reasonably good long-term stability. Because of their small size, they respond quickly and are good choices where fast response is important. They function over temperature ranges from cryogenics to jet-engine exhaust and have reasonable linearity and accuracy.

Because the number of free electrons in a piece of metal depends on both temperature and composition of the metal, two pieces of dissimilar metal in isothermal and contact will exhibit a potential difference that is a repeatable function of temperature, as shown in Figure 14. The resulting voltage depends on the temperatures, T1 and T2, in a repeatable way.

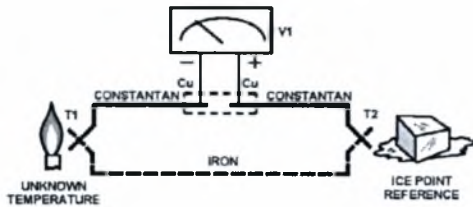


Figure 14. Thermocouple Voltage with 0°C Reference

Since the thermocouple is basically a differential rather than absolute measuring device, a known reference temperature is required for one of the junctions if the temperature of the other is to be inferred from the output voltage. Thermocouples made of specially selected materials have been exhaustively characterized in terms of voltage versus temperature compared to primary temperature standards. Most notably the water-ice point of 0°C is used for tables of standard thermocouple performance.

An alternative measurement technique, illustrated in Figure 15, is used in most practical applications where accuracy requirements do not warrant maintenance of primary standards. The reference junction temperature is allowed to change with the environment of the measurement system, but it is carefully measured by some type of absolute thermometer. A measurement of the thermocouple voltage combined with a knowledge of the reference temperature can be used to calculate the measurement junction temperature. Usual practice, however, is to use a convenient thermoelectric method to measure the reference temperature

and to arrange its output voltage so that it corresponds to a thermocouple referred to 0°C. This voltage is simply added to the thermocouple voltage and the sum then corresponds to the standard voltage tabulated for an ice-point referenced thermocouple.

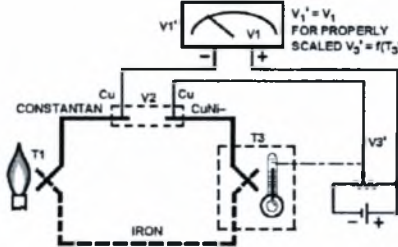


Figure 15. Substitution of Measured Reference Temperature for Ice Point Reference

The temperature sensitivity of silicon integrated circuit transistors is quite predictable and repeatable. This sensitivity is exploited in the AD594/AD595 to produce a temperature related voltage to compensate the reference of "cold" junction of a thermocouple as shown in Figure 16.

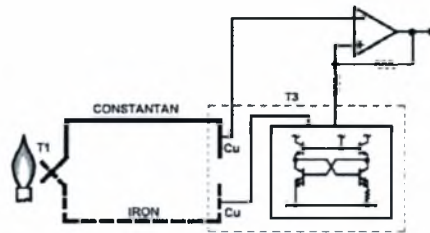


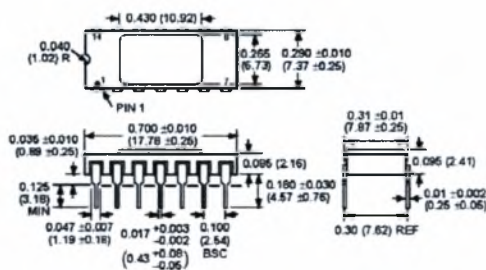
Figure 16. Connecting Isothermal Junctions

Since the compensation is at the reference junction temperature, it is often convenient to form the reference "junction" by connecting directly to the circuit wiring. So long as these connections and the compensation are at the same temperature no error will result.

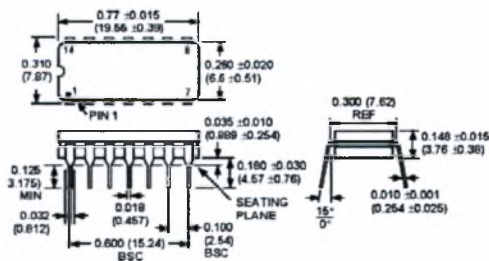
OUTLINE DIMENSIONS

Dimensions shown in inches and (mm).

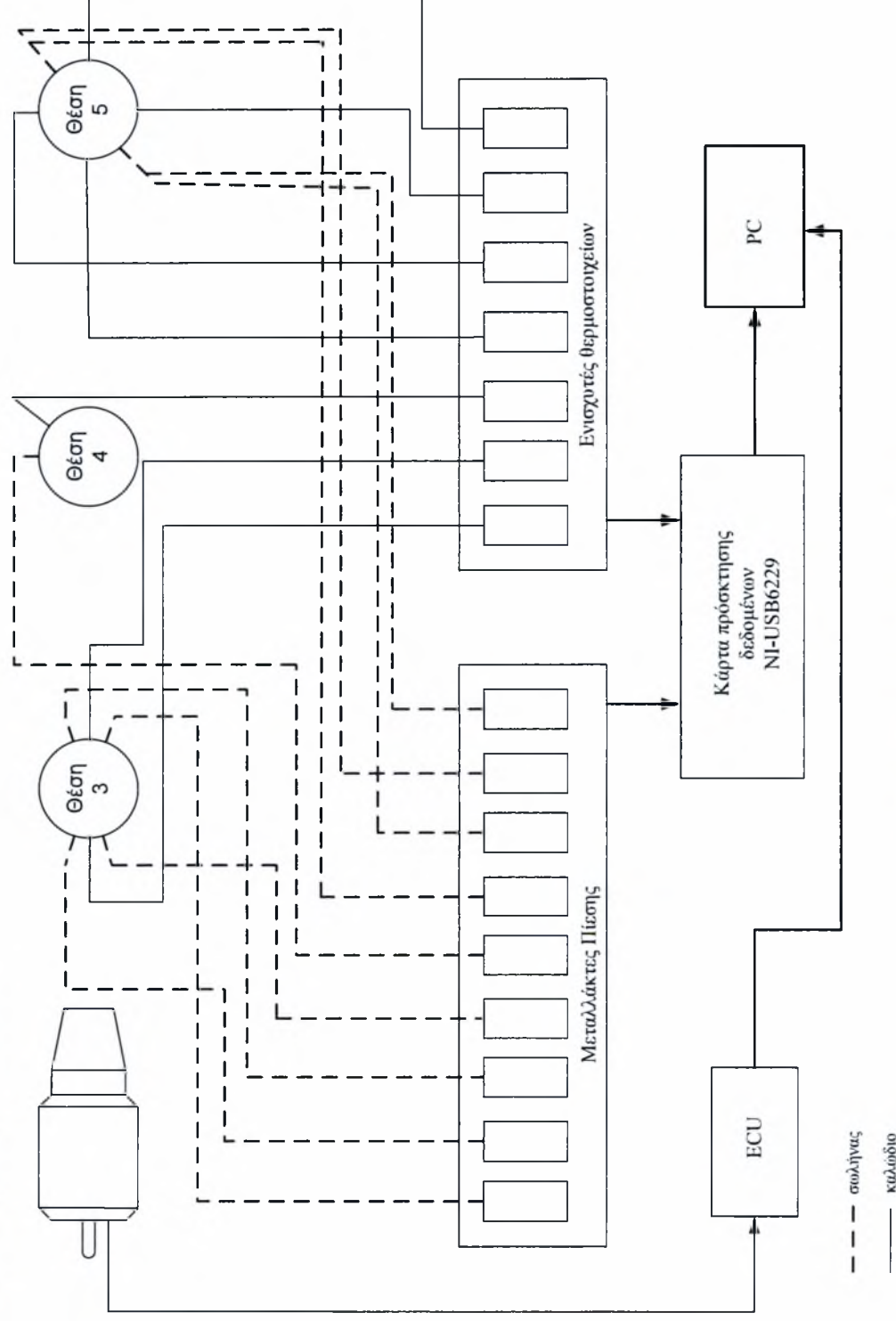
TO-116 (D) Package



Cerdip (Q) Package



Π9 Η μετρητική αλυσίδα

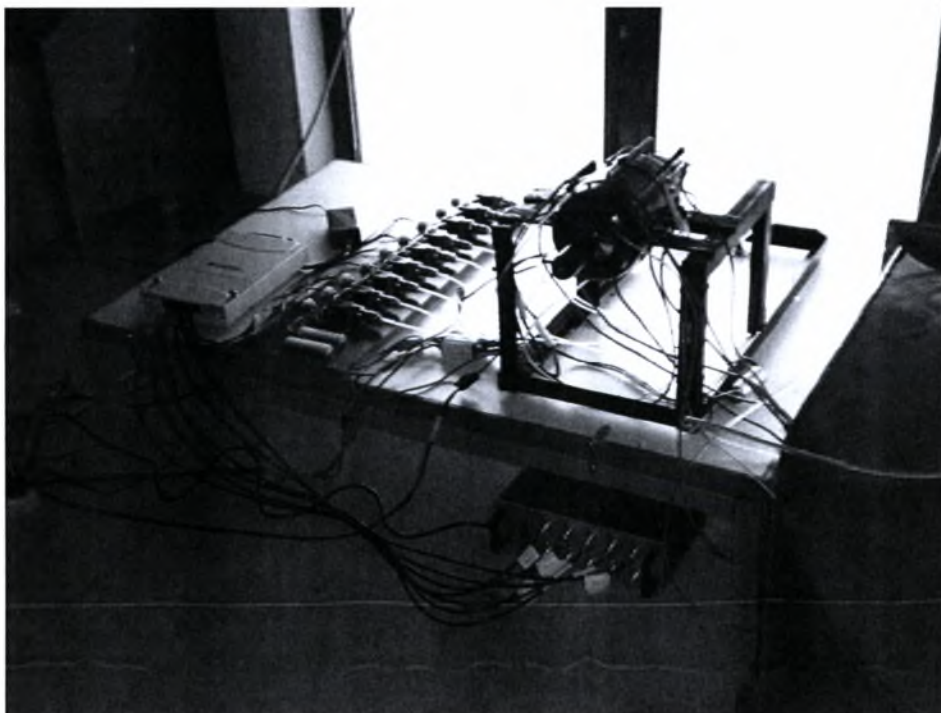


Σχήμα Π9.1. Η μετρητική αλυσίδα της διάταξης

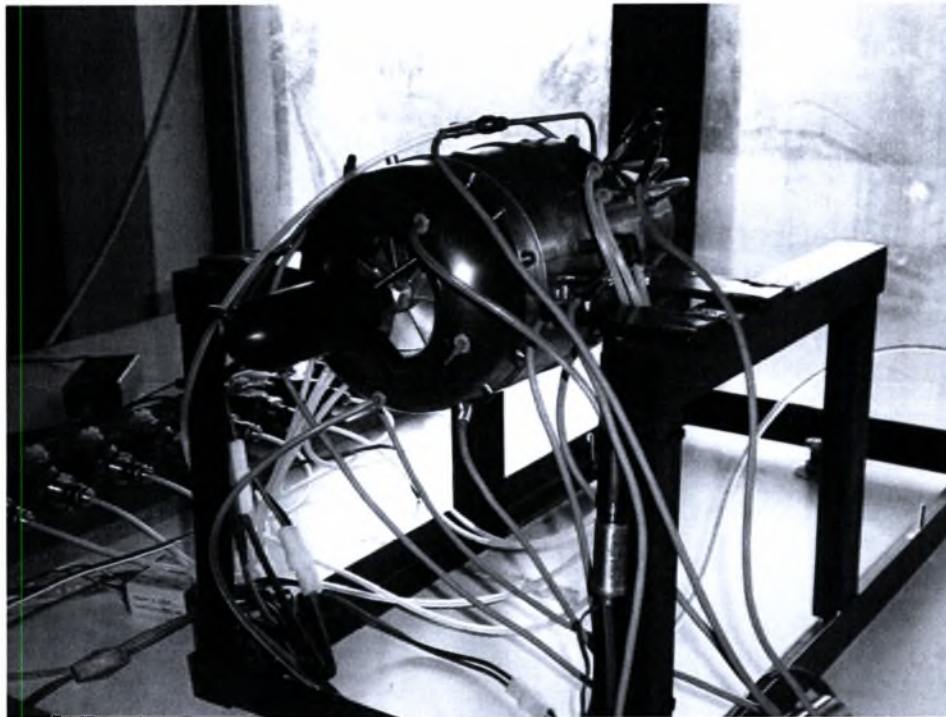
Π10 Φωτογραφίες της εγκατάστασης του Olympus



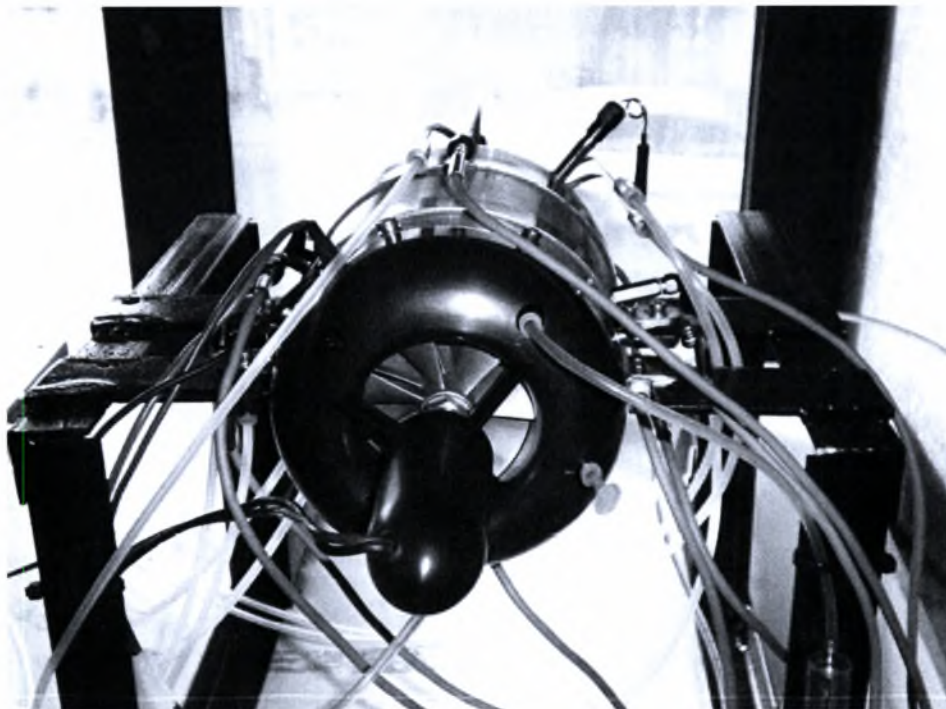
Σχήμα Π10.6. Γενική άποψη της πειραματικής διάταξης



Σχήμα Π10.7. Η βάση στήριξης του κινητήρα



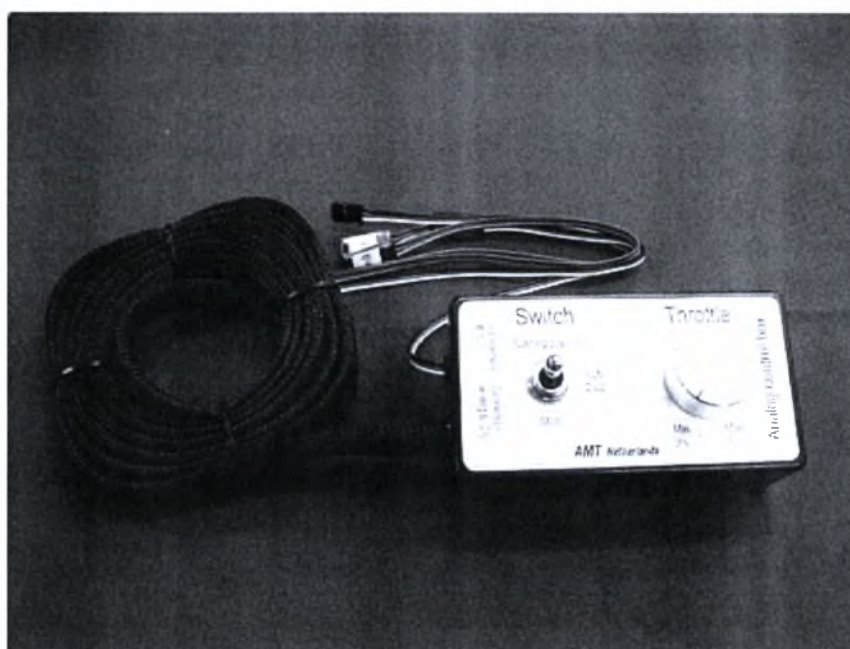
Σχήμα Π10.8. Ο κινητήρας με τα μετρητικά όργανα (πλαί).



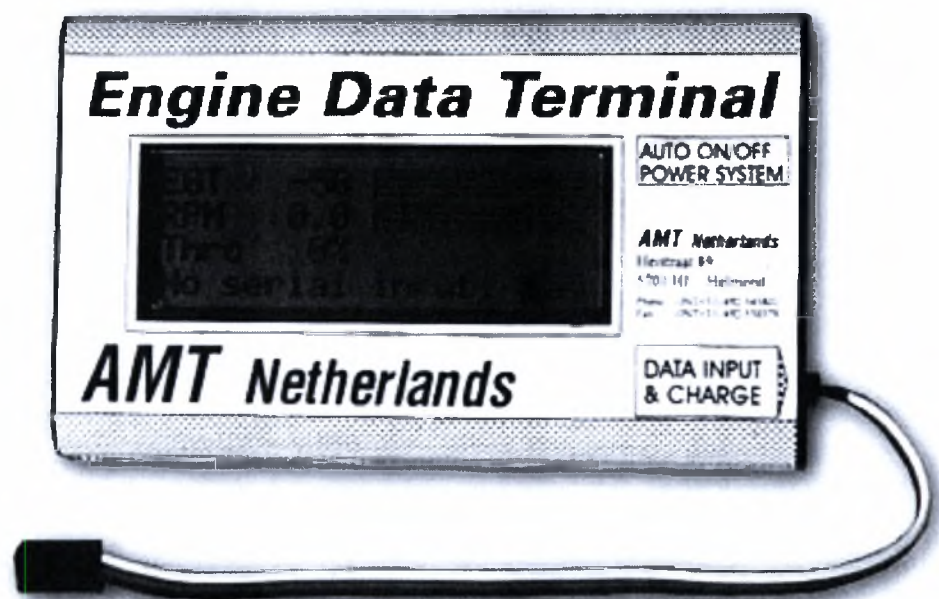
Σχήμα Π10.9. Ο κινητήρας με τα μετρητικά όργανα (μπροστά)



Σχήμα Π10.10. Ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου (ECU) του κινητήρα



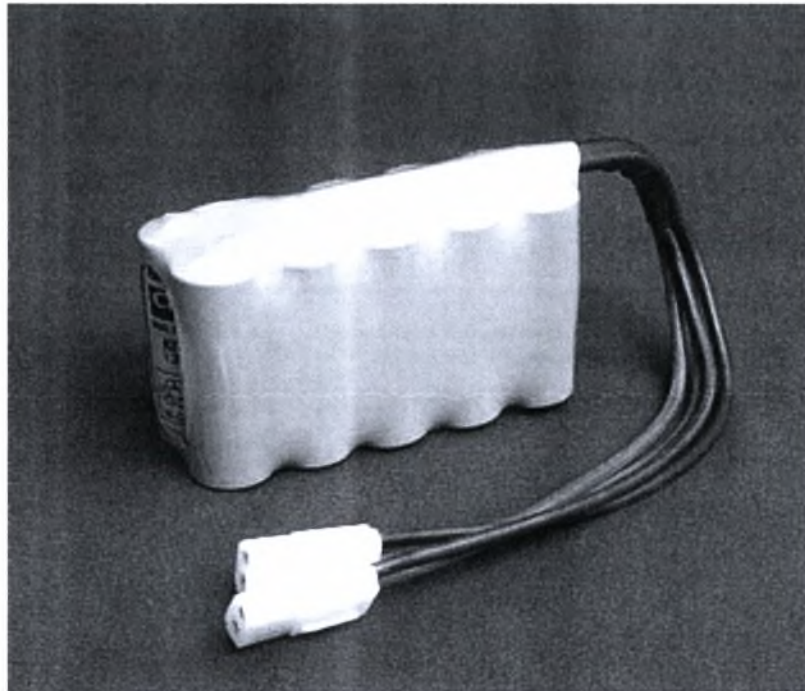
Σχήμα Π10.11. Το χειριστήριο του κινητήρα



Σχήμα Π10.12. Το τερματικό παρακολούθησης της λειτουργίας του κινητήρα



Σχήμα Π10.13. Η αντλία καυσίμου του κινητήρα



Σχήμα Π10.14. Η μπαταρία για την τροφοδοσία του κινητήρα



Σχήμα Π10.15. Η βαλβίδα του καυσίμου.



Σχήμα Π10.16. Η βαλβίδα του αερίου εκκίνησης.

Π11 Πειραματικά δεδομένα

Στις σελίδες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα στατιστικά αποτελέσματα των μετρήσεων για κάθε σημείο λειτουργίας. Η στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων έγινε με την βοήθεια του προγράμματος MS-Excel.

1ο Σημείο Λειτουργίας

	P3,right	P3,left	P3,right	P3,left	Pt4	P5,up	P5,down	Pt5,up	Pt5,down
Mean	1,163567504	1,178807752	1,173593867	1,177388903	1,171014345	0,998891053	1,005529664	1,02967623	1,023411212
Standard Error	0,000191105	0,000227417	0,000175559	0,000341368	0,00018373	7,58871E-05	0,000164307	0,000145565	0,000125921
Median	1,163885	1,178766	1,173683	1,17749	1,171148	0,998921	1,00554	1,029825	1,023429
Mode	1,164126	1,178526	1,173283	1,17941	1,171628	0,998921	1,00618	1,029905	1,023749
Standard Deviation	0,002031475	0,002417478	0,001866215	0,003628786	0,001953074	0,000806691	0,001746611	0,001547373	0,001338562
Sample Variance	4,12689E-06	5,8442E-06	3,48276E-06	1,31681E-05	3,8145E-06	6,5075E-07	3,05065E-06	2,39436E-06	1,79175E-06
Kurtosis	-0,46574917	0,707046324	-0,43719383	0,173054436	-0,15948101	-0,67382636	0,525031598	0,328076371	-0,2097608
Skewness	-0,17815613	-0,33831149	-0,21959895	-0,19458063	-0,27442777	0,171833618	0,006127564	-0,18721517	-0,07237797
Range	0,009523	0,013602	0,008875	0,020167	0,010644	0,003443	0,009516	0,008787	0,007034
Minimum	1,158444	1,170925	1,168726	1,168206	1,165226	0,997159	1,001142	1,025432	1,019592
Maximum	1,167967	1,184527	1,177601	1,188373	1,17587	1,000602	1,010658	1,034219	1,026626
Sum	131,483128	133,205276	132,616107	133,044946	132,324621	112,874689	113,624852	116,353414	115,645467
Count	113	113	113	113	113	113	113	113	113
Largest(1)	1,167967	1,184527	1,177601	1,188373	1,17587	1,000602	1,010658	1,034219	1,026626
Smallest(1)	1,158444	1,170925	1,168726	1,168206	1,165226	0,997159	1,001142	1,025432	1,019592
Confidence Level(98.0%)	0,000451028	0,000536728	0,000414337	0,000805663	0,000433621	0,000179101	0,000387783	0,000343548	0,000297188

	Tt3,left	Tt3,right	Tt4	Tt5,left	Tt5,right	Tt5,up	Tt5,down	EGT	RPM
Mean	325,1043919	323,7529177	934,6544393	833,6938707	767,9751873	722,7412289	761,5079196	742,95	36884,95575
Standard Error	0,018664799	0,014267116	0,23951807	0,159169117	0,043476356	0,041109895	0,032380075	1,50394E-13	19,88514901
Median	325,162181	323,794817	934,129522	833,543176	767,940695	722,791611	761,544674	742,95	37000
Mode	325,321919	323,833155	936,589558	835,843453	767,646772	723,155819	761,60857	742,95	37000
Standard Deviation	0,198409538	0,151661527	2,546112007	1,691990923	0,462160003	0,437004182	0,344204922	1,59871E-12	211,3820335
Sample Variance	0,039366345	0,023001219	6,482686355	2,862833284	0,213591869	0,190972655	0,118477028	2,55586E-24	44682,3641
Kurtosis	-0,28369343	-0,0102132	-0,52553346	2,808571765	0,761382186	-1,32806708	-1,03048271	-2,03636364	-0,31618211
Skewness	-0,91862814	-0,85556373	0,682849375	-0,68367754	-0,14026338	-0,17527955	-0,13083999	1,013503503	-1,29989654
Range	0,785914	0,645344	9,386476	9,360848	2,517515	1,565456	1,277926	0	500
Minimum	324,60629	323,353939	930,442663	827,447444	766,496638	721,922623	760,841815	742,95	36500
Maximum	325,392204	323,999283	939,829139	836,808292	769,014153	723,488079	762,119741	742,95	37000
Sum	36736,79628	36584,0797	105615,9516	94207,40739	86781,19617	81669,75887	86050,39491	83953,35	4168000
Count	113	113	113	113	113	113	113	113	113
Largest(1)	325,392204	323,999283	939,829139	836,808292	769,014153	723,488079	762,119741	742,95	37000
Smallest(1)	324,60629	323,353939	930,442663	827,447444	766,496638	721,922623	760,841815	742,95	36500
Confidence Level(98.0%)	0,044050867	0,033671878	0,565287545	0,375655664	0,10260872	0,097023627	0,076420344	3,54944E-13	46,93101894

Εργαστήριο Θερμοδυναμικής & Θερμικών Μηχανών

2ο Σημείο Λειτουργίας

	P3,right	P3,left	P3,right	P3,left	P4	P5,up	P5,down	P5,up	P5,down	RPM
Mean	1,449734857	1,466972552	1,456072491	1,471855917	1,452946726	1,010958874	1,010109235	1,08813197	1,079320326	
Standard Error	0,000480125	0,000461243	0,00046002	0,000560983	0,000456095	9,87183E-05	0,000100111	0,000160723	0,000148079	
Median	1,447944	1,465396	1,454787	1,471191	1,450548	1,011093	1,010138	1,088061	1,07942	
Mode	1,446383	1,465116	1,451988	1,463109	1,447587	1,012614	1,011617	1,088701	1,080179	
Standard Deviation	0,007281457	0,006995098	0,006976548	0,008507725	0,006917016	0,001497137	0,001518259	0,002437484	0,002245729	
Sample Variance	5,30196E-05	4,89314E-05	4,86722E-05	7,23814E-05	4,78451E-05	2,24142E-06	2,30511E-06	5,94133E-06	5,0433E-06	
Kurtosis	-0,97702789	-1,12115006	-1,01235727	-0,85737208	-1,03762025	-0,12187245	0,355592386	-0,34348723	-0,45776164	
Skewness	0,324369264	0,2605039	0,266056787	0,27168227	0,503039479	-0,53287584	-0,46207722	0,1350706	-0,02545181	
Range	0,033451	0,029444	0,030621	0,039853	0,026412	0,008008	0,009196	0,012542	0,01111	
Minimum	1,433259	1,453994	1,443114	1,454386	1,442224	1,005888	1,004021	1,08191	1,074105	
Maximum	1,46671	1,483438	1,473735	1,494239	1,468636	1,013896	1,013217	1,094452	1,085215	
Sum	333,439017	337,403687	334,896673	338,526861	334,177747	232,520541	232,325124	250,270353	248,243675	
Count	230	230	230	230	230	230	230	230	230	
Largest(1)	1,46671	1,483438	1,473735	1,494239	1,468636	1,013896	1,013217	1,094452	1,085215	
Smallest(1)	1,433259	1,453994	1,443114	1,454386	1,442224	1,005888	1,004021	1,08191	1,074105	
Confidence Level(98.0%)	0,001124809	0,001080573	0,001077708	0,001314238	0,001068512	0,000231271	0,000234534	0,000376532	0,000346911	

	T13,left	T13,right	T14	T15,left	T15,right	T15,up	T15,down	EGT	RPM
Mean	351,7820934	349,4488248	798,7842266	802,7349771	700,7375295	716,90133	708,0151292	706,15	56408,69565
Standard Error	0,052678986	0,051458593	0,062801137	0,874578344	0,324226703	0,031114528	0,351913006	2,02841E-13	35,01677395
Median	352,068567	349,691655	798,834594	799,531065	698,827369	716,9674765	707,3383295	706,15	56000
Mode	352,023841	349,62776	799,524675	802,285002	698,658045	716,945113	708,510823	706,15	56000
Standard Deviation	0,798916385	0,780408196	0,952426393	13,2636373	4,917141404	0,471875181	5,337024989	3,07624E-12	531,0556706
Sample Variance	0,63826739	0,609036952	0,907116035	175,9240743	24,17827958	0,222666186	28,48383574	9,46325E-24	282020,1253
Kurtosis	1,269099439	1,115285936	-0,50301799	0,833529461	1,025206161	-0,76321226	0,401700357	-2,01762115	-0,0638711
Skewness	-1,71879625	-1,61299999	-0,20487662	1,551904352	1,649278259	0,05751199	1,335204306	1,006576558	1,121073917
Range	2,849738	2,83057	4,440803	43,737153	16,293507	2,089404	17,111383	0	1500
Minimum	349,672487	347,378639	796,457646	791,965728	696,351396	715,807761	703,303291	706,15	56000
Maximum	352,522225	350,209209	800,898449	835,702881	712,644903	717,897165	720,414674	706,15	57500
Sum	80909,88148	80373,2297	183720,3721	184629,0447	161169,6318	164887,3059	162843,4797	162414,5	12974000
Count	230	230	230	230	230	230	230	230	230
Largest(1)	352,522225	350,209209	800,898449	835,702881	712,644903	717,897165	720,414674	706,15	57500
Smallest(1)	349,672487	347,378639	796,457646	791,965728	696,351396	715,807761	703,303291	706,15	56000
Confidence Level(98.0%)	0,123413255	0,120554188	0,147126838	2,048911108	0,759579399	0,072893301	0,824441256	4,75205E-13	82,03525462

Εργαστήριο Θερμοδυναμικής & Θερμικών Μηχανών

3ο Σημείο Λειτουργίας

	P3,right	P3,left	Pt3,right	Pt3,left	Pt4	P5,up	P5,down	Pt5,up	Pt5,down
Mean	1,669523176	1,687626034	1,674106074	1,692172233	1,670365085	1,016720807	1,01375146	1,132269597	1,125848744
Standard Error	0,000460273	0,000513707	0,000485162	0,000606292	0,000477951	0,000133711	0,000142462	0,000167039	0,000177898
Median	1,669501	1,688419	1,674169	1,691748	1,670122	1,016698	1,013856	1,132238	1,12574
Mode	1,676623	1,692819	1,667533	1,691748	1,663679	1,01838	1,014736	1,131918	1,126539
Standard Deviation	0,006106213	0,006815096	0,006436401	0,008043373	0,006340739	0,001773872	0,001889976	0,002216018	0,00236008
Sample Variance	3,72858E-05	4,64455E-05	4,14273E-05	6,46959E-05	4,0205E-05	3,14662E-06	3,57201E-06	4,91074E-06	5,56998E-06
Kurtosis	-0,98990465	-1,05119259	-1,05659842	-0,22921045	-1,19400175	-0,55232169	0,68179811	0,097974011	-0,10251537
Skewness	-0,1931175	-0,21142149	0,041537007	0,013034432	-0,00928399	0,053051411	-0,37210343	0,07821154	0,11725833
Range	0,024328	0,027523	0,028302	0,042415	0,026012	0,008408	0,012314	0,012781	0,012789
Minimum	1,657337	1,672817	1,660658	1,6695	1,657356	1,012775	1,0069	1,126646	1,118706
Maximum	1,681665	1,70034	1,68896	1,711915	1,683368	1,021183	1,019214	1,139427	1,131495
Sum	293,836079	297,022182	294,642669	297,822313	293,984255	178,942862	178,420257	199,279449	198,149379
Count	176	176	176	176	176	176	176	176	176
Largest(1)	1,681665	1,70034	1,68896	1,711915	1,683368	1,021183	1,019214	1,139427	1,131495
Smallest(1)	1,657337	1,672817	1,660658	1,6695	1,657356	1,012775	1,0069	1,126646	1,118706
Confidence Level(98.0%)	0,00108065	0,001206105	0,001139085	0,00142348	0,001122155	0,000313932	0,000334479	0,000392181	0,000417676

	Tt3,left	Tt3,right	Tt4	Tt5,left	Tt5,right	Tt5,up	Tt5,down	EGT	RPM
Mean	370,89835	368,0990014	797,095558	786,3184481	679,9001589	707,5299818	691,5321074	683,15	65724,43182
Standard Error	0,042786901	0,048339381	0,142069693	0,088043124	0,043360031	0,031563362	0,026128228	1,54691E-13	18,79912887
Median	370,767582	368,023271	797,6333405	786,3268705	679,744812	707,581135	691,520853	683,15	65500
Mode	370,29795	367,665456	798,106174	785,224658	679,744812	707,034823	691,578359	683,15	65500
Standard Deviation	0,567632393	0,641294361	1,884767468	1,16802403	0,575235814	0,418735321	0,34663012	2,0522E-12	249,3986274
Sample Variance	0,322205533	0,411258457	3,552348407	1,364280135	0,330896242	0,175339269	0,12015244	4,21153E-24	62199,67532
Kurtosis	-1,67862995	-1,68775827	-0,90535745	-0,71978086	8,562220377	1,572616867	-0,697314	-2,02312139	-1,97961409
Skewness	0,105984567	-0,02163445	-0,48572586	-0,23723302	2,488574405	0,870587218	0,263268428	1,008616596	0,20739544
Range	1,872138	1,878527	6,689956	5,003088	3,53984	2,402494	1,501557	0	500
Minimum	369,984862	367,128734	793,166981	783,365273	679,016397	706,728122	690,824386	683,15	65500
Maximum	371,857	369,007261	799,856937	788,368361	682,556237	709,130616	692,325943	683,15	66000
Sum	65278,1096	64785,42424	140288,8182	138392,0469	119662,428	124525,2768	121709,6509	120234,4	11567500
Count	176	176	176	176	176	176	176	176	176
Largest(1)	371,857	369,007261	799,856937	788,368361	682,556237	709,130616	692,325943	683,15	66000
Smallest(1)	369,984862	367,128734	793,166981	783,365273	679,016397	706,728122	690,824386	683,15	65500
Confidence Level(98.0%)	0,100457007	0,113493369	0,333557601	0,206711597	0,101802626	0,074105879	0,061345027	3,63189E-13	44,13743837

4ο Σημείο Λειτουργίας

	P3,right	P3,left	Pt3,right	Pt3,left	Pt4	P5,up	P5,down	Pt5,up	Pt5,down
Mean	2,17265411	2,208091638	2,180374638	2,21847887	2,18548199	1,038518708	1,032952083	1,224911498	1,217271432
Standard Error	0,000264065	0,000258054	0,000316823	0,00043169	0,000242947	9,74235E-05	0,000134445	0,00017712	0,000173607
Median	2,172876	2,208233	2,180332	2,218091	2,185663	1,03856	1,032808	1,224984	1,2175
Mode	2,174157	2,210234	2,182011	2,220732	2,183742	1,03832	1,030329	1,223466	1,218939
Standard Deviation	0,004581351	0,004477066	0,005496675	0,007489547	0,004214973	0,001690234	0,002332539	0,003072921	0,003011962
Sample Variance	2,09888E-05	2,00441E-05	3,02134E-05	5,60933E-05	1,7766E-05	2,85689E-06	5,44074E-06	9,44284E-06	9,07192E-06
Kurtosis	1,129720457	0,911907955	0,748178871	-0,12315489	0,081628845	0,000941202	-0,43316623	-0,19047515	0,151824111
Skewness	-0,45343979	-0,46215888	-0,28128194	0,032316113	-0,2602426	0,16539461	0,089061779	0,0278343	-0,17831844
Range	0,032011	0,028724	0,038855	0,042975	0,02457	0,01017	0,012634	0,017575	0,018384
Minimum	2,152629	2,191031	2,157787	2,198564	2,171337	1,033916	1,02689	1,215957	1,207269
Maximum	2,18464	2,219755	2,196642	2,241539	2,195907	1,044086	1,039524	1,233532	1,225653
Sum	653,968887	664,635583	656,292766	667,76214	657,830079	312,594131	310,918577	368,698361	366,398701
Count	301	301	301	301	301	301	301	301	301
Largest(1)	2,18464	2,219755	2,196642	2,241539	2,195907	1,044086	1,039524	1,233532	1,225653
Smallest(1)	2,152629	2,191031	2,157787	2,198564	2,171337	1,033916	1,02689	1,215957	1,207269
Confidence Level(98.0%)	0,000617606	0,000603547	0,000740999	0,001009655	0,000568215	0,000227858	0,000314446	0,000414256	0,000406038

	Tt3,left	Tt3,right	Tt4	Tt5,left	Tt5,right	Tt5,up	Tt5,down	EGT	RPM
Mean	408,1919535	405,5305036	842,1014357	744,806739	715,7508919	693,3975506	733,2875671	691,0051495	81209,30233
Standard Error	0,047744751	0,050084744	0,09053778	0,102386261	0,177522003	0,050536418	0,170155208	0,188896795	23,60480118
Median	408,424397	405,830239	842,213945	744,586605	716,357268	693,277995	734,248196	692,35	81000
Mode	408,82055	405,874966	842,399245	745,097775	716,286982	693,469683	734,420716	692,35	81000
Standard Deviation	0,828340466	0,858937835	1,570771781	1,776335239	3,079891638	0,876774076	2,952082529	3,277236903	409,5279945
Sample Variance	0,686147927	0,735052961	2,467323988	3,155366882	9,485732501	0,76873278	8,714791259	10,74028172	167713,1783
Kurtosis	7,455275725	5,122298825	3,097322534	6,663855278	7,840369081	6,568635578	8,420226638	2,097804615	9,902126163
Skewness	-2,66178702	-2,10814244	-1,37511494	2,233957931	-2,6835009	2,27304983	-2,89557558	-0,453398751	2,938609739
Range	3,999859	4,913565	8,667991	10,255347	16,632162	5,060569	14,517212	18,4	2000
Minimum	404,942092	402,347934	836,27795	742,024366	703,213836	692,210931	721,398675	683,15	81000
Maximum	408,941951	407,261499	844,935941	752,279713	719,845998	697,2715	735,915887	701,55	83000
Sum	122865,778	122064,6816	253472,5321	224186,8284	215441,0185	208712,6627	220719,5577	207992,55	244444000
Count	301	301	301	301	301	301	301	301	301
Largest(1)	408,941951	407,261499	844,935941	752,279713	719,845998	697,2715	735,915887	701,55	83000
Smallest(1)	404,942092	402,347934	836,27795	742,024366	703,213836	692,210931	721,398675	683,15	81000
Confidence Level(98.0%)	0,111667423	0,117140298	0,211753553	0,239466276	0,415195897	0,11819669	0,397966129	0,441799737	55,20789783

Εργαστήριο Θερμοδυναμικής & Θερμικών Μηχανών

5ο Σημείο Λειτουργίας

	P3,right	P3,left	P3,right	P3,left	P4	P5,up	P5,down	P15,up	P15,down
Mean	2,5443764	2,574973919	2,578048757	2,584508559	2,581376888	1,081173199	1,081630757	1,345867794	1,333775581
Standard Error	0,000262232	0,000251327	0,000360674	0,000408629	0,000251682	0,00022861	0,000275349	0,000368261	0,000417162
Median	2,544766	2,575152	2,577564	2,584019	2,581233	1,081243	1,081825	1,34605	1,333958
Mode	2,544766	2,574912	2,575366	2,580938	2,581193	1,080122	1,082624	1,344971	1,33156
Standard Deviation	0,00305812	0,002930951	0,004206151	0,004765393	0,002935086	0,002666024	0,003211091	0,004294621	0,004864901
Sample Variance	9,3521E-06	8,59047E-06	1,76917E-05	2,2709E-05	8,61473E-06	7,10769E-06	1,03111E-05	1,84438E-05	2,36673E-05
Kurtosis	0,428535694	-0,40392426	-0,0620851	-0,05733897	0,5608168	0,636372082	0,039243484	0,392355456	0,190406192
Skewness	-0,46604233	-0,34563688	0,371315989	0,021605617	0,179120809	-0,15239033	0,050140958	0,113451182	-0,38016618
Range	0,016566	0,013522	0,022306	0,027209	0,017288	0,017057	0,017591	0,024125	0,024858
Minimum	2,535883	2,566751	2,56793	2,568614	2,57399	1,072274	1,073669	1,334187	1,319331
Maximum	2,552449	2,580273	2,590236	2,595823	2,591278	1,089331	1,09126	1,358312	1,344189
Sum	346,043519	350,196453	350,614631	351,493164	351,067254	147,039555	147,101783	183,03802	181,393479
Count	136	136	136	136	136	136	136	136	136
Largest(1)	2,552449	2,580273	2,590236	2,595823	2,591278	1,089331	1,09126	1,358312	1,344189
Smallest(1)	2,535883	2,566751	2,56793	2,568614	2,57399	1,072274	1,073669	1,334187	1,319331
Confidence Level(98.0%)	0,000617369	0,000591696	0,000849131	0,00096203	0,000592531	0,000538213	0,00064825	0,000866992	0,000982119

	Ti3,left	Ti3,right	Ti4	Ti5,left	Ti5,right	Ti5,up	Ti5,down	EGT	RPM
Mean	443,4261825	441,2438676	902,5642822	820,2466802	797,7552608	730,5205112	796,984651	765,95	93500
Standard Error	0,013697243	0,020810534	0,226545316	0,08864354	0,099251759	0,052137433	0,045253006	1,66338E-13	0
Median	443,445539	441,253922	902,1171445	820,3709025	798,0103295	730,3313595	797,071052	765,95	93500
Mode	443,298579	441,343375	904,583565	821,543404	798,285084	729,794632	797,039104	765,95	93500
Standard Deviation	0,159735933	0,24269045	2,641949682	1,033752438	1,157464466	0,724640761	0,527736206	1,93982E-12	0
Sample Variance	0,025515568	0,058898655	6,979898123	1,068644103	1,339723989	0,525104232	0,278505503	3,76291E-24	0
Kurtosis	-0,24889023	33,43067937	-1,27442183	-0,90310752	-0,45577682	-1,17398568	7,551811044	-2,03007519	#DIV/0!
Skewness	-0,50722448	4,086422466	0,230967441	-0,3745489	-0,55338409	0,281568903	-2,07798164	1,011187145	#DIV/0!
Range	0,747578	2,415251	3,386452	3,929636	5,213949	3,041459	3,878513	0	0
Minimum	443,011049	440,825822	898,296112	817,914081	795,019977	729,270683	794,125427	765,95	93500
Maximum	443,758627	443,241073	907,682564	821,843717	800,233926	732,312142	798,00394	765,95	93500
Sum	60305,96082	60009,166	122748,7424	111553,5485	108494,7155	99350,78952	108389,9125	104169,2	12716000
Count	136	136	136	136	136	136	136	136	136
Largest(1)	443,758627	443,241073	907,682564	821,843717	800,233926	732,312142	798,00394	765,95	93500
Smallest(1)	443,011049	440,825822	898,296112	817,914081	795,019977	729,270683	794,125427	765,95	93500
Confidence Level(98.0%)	0,032247245	0,048993975	0,533352743	0,208692354	0,233667148	0,146289363	0,106538574	3,91608E-13	0

6ο Σημείο Λειτουργίας

	P3,right	P3,left	P3,right	P3,left	Pt3,right	Pt3,left	Pt4	P5,up	P5,down	Pt5,up	Pt5,down
Mean	2,80180188	2,83203732	2,842745661	2,840605208	2,839893863	1,125861951	1,133231236	1,491743232	1,480272313		
Standard Error	0,00014328	0,000161738	0,000239916	0,000297133	0,000150632	0,000149296	0,000167698	0,000232192	0,000287936		
Median	2,801696	2,83214	2,842799	2,840789	2,839865	1,126968	1,133321	1,4918	1,479991		
Mode	2,802696	2,8323	2,844398	2,837588	2,838904	1,126007	1,133081	1,49204	1,479032		
Standard Deviation	0,00309298	0,003491442	0,005179073	0,006414221	0,003251693	0,003222859	0,003620097	0,005012341	0,006215675		
Sample Variance	9,56652E-06	1,21902E-05	2,68228E-05	4,11422E-05	1,05735E-05	1,03868E-05	1,31051E-05	2,51236E-05	3,86346E-05		
Kurtosis	0,201278381	0,340463796	0,015576173	-0,14785991	-0,10722989	0,107441128	0,024242811	0,223149928	0,030893498		
Skewness	-0,06334746	-0,15138517	0,003847204	-0,16027369	-0,01162037	-0,17770583	0,13966412	0,080744513	0,147583927		
Range	0,022168	0,024403	0,0319	0,042335	0,019928	0,019619	0,02135	0,029158	0,040205		
Minimum	2,788611	2,817818	2,826169	2,819341	2,830501	1,115597	1,122686	1,47806	1,461048		
Maximum	2,810779	2,842221	2,858069	2,861676	2,850429	1,135216	1,144036	1,507218	1,501253		
Sum	1305,639676	1319,729391	1324,719478	1323,722027	1323,39054	525,117669	528,085756	695,152346	689,806898		
Count	466	466	466	466	466	466	466	466	466		
Largest(1)	2,810779	2,842221	2,858069	2,861676	2,850429	1,135216	1,144036	1,507218	1,501253		
Smallest(1)	2,788611	2,817818	2,826169	2,819341	2,830501	1,115597	1,122686	1,47806	1,461048		
Confidence Level(98,0%)	0,000334471	0,00037756	0,000560058	0,000693626	0,000351634	0,000348516	0,000391473	0,000542028	0,000672155		

	Tt3,left	Tt3,right	Tt4	Tt5,left	Tt5,right	Tt5,up	Tt5,down	EGT	RPM
Mean	471,5903297	470,3585437	1049,220156	927,3600635	911,5835128	817,5934883	869,1209844	867,15	102486,0515
Standard Error	0,050994676	0,099392258	0,154062991	0,138976827	0,109767008	0,092609927	0,073620879	2,58333E-13	3,818373333
Median	471,594731	470,1856335	1049,988189	927,909147	911,318299	817,588209	869,3125235	867,15	102500
Mode	471,732107	470,66505	1049,259755	922,219119	911,10105	817,454026	869,529773	867,15	102500
Standard Deviation	1,100823756	2,145583958	3,3257629	3,00097375	2,36954404	1,999173574	1,589256361	5,57664E-12	82,4273517
Sample Variance	1,211812942	4,603530521	11,06069887	9,000584257	5,614738959	3,99669498	2,525735782	3,10989E-23	6794,268309
Kurtosis	305,0010638	68,31662201	1,021305596	1,210147685	-0,14708987	0,474562629	0,630619943	-2,00863931	31,22169118
Skewness	15,78244623	7,261149429	-1,15973479	-1,1413816	-0,05214129	-0,51866169	-0,84979182	-1,00323218	-5,75219173
Range	22,337925	27,328182	17,354603	15,411956	13,539766	12,095613	8,249068	0	500
Minimum	470,594765	468,588444	1038,377989	917,950802	906,404626	812,259241	864,251903	867,15	102000
Maximum	492,93269	495,916626	1055,732592	933,362758	919,944392	824,354854	872,500971	867,15	102500
Sum	219761,0937	219187,0814	488936,5926	432159,1096	424797,917	380998,5655	405010,3787	404091,9	47758500
Count	466	466	466	466	466	466	466	466	466
Largest(1)	492,93269	495,916626	1055,732592	933,362758	919,944392	824,354854	872,500971	867,15	102500
Smallest(1)	470,594765	468,588444	1038,377989	917,950802	906,404626	812,259241	864,251903	867,15	102000
Confidence Level(98,0%)	0,119041658	0,232020677	0,359643702	0,324426653	0,25623943	0,216188047	0,171860129	6,03051E-13	8,913587294



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000097194