



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

ΜΕΛΕΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΔΟΚΙΜΑΣΤΗΡΙΟΥ ΜΙΚΡΟΥ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ

Διπλωματική Εργασία
ΝΤΙΝΟΠΟΥΛΟΣ ΓΡΗΓΟΡΙΟΣ

Επίβλεψη:
Καθηγητής Κ. ΜΑΘΙΟΥΔΑΚΗΣ
Επίκουρος Καθηγητής Ν. ΑΡΕΤΑΚΗΣ

ΑΘΗΝΑ
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Τομέας Ρευστών

Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών

Μελέτη σχεδίασης δοκιμαστηρίου μικρού αεριοστροβίλου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΝΤΙΝΟΠΟΥΛΟΣ ΓΡΗΓΟΡΙΟΣ

Επίβλεψη:

Καθηγητής Κ. Μαθιουδάκης

Επίκουρος Καθηγητής Ν. Αρετάκης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την μελέτη με σκοπό την εγκατάσταση του κινητήρα ΡΤ6Τ-6 στον χώρο δοκιμών του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών (ΕΘΣ) του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ). Η εργασία αποτελείται από δύο μέρη, με το πρώτο να αφορά την μοντελοποίηση του κινητήρα και το δεύτερο να εστιάζει στο σχεδιασμό της εγκατάστασης και την αξιοποίηση των μετρήσεων του ΕΘΣ

Αρχικά παρουσιάζεται ο κινητήρας και παρέχονται λεπτομέρειες αναφορικά με την λειτουργία του. Επίσης επιλέγονται οι παράμετροι λειτουργίας όλων των συνιστωσών του για το σημείο σχεδίασης, σύμφωνα πάντα με το εγχειρίδιο του κινητήρα και τις μετρήσεις του ΕΘΣ.

Αφού προηγηθούν τα παραπάνω, εξετάζεται η λειτουργία του κινητήρα στο σημείο σχεδίασης βάσει ενός απλού θερμοδυναμικού μοντέλου. Στη συνέχεια παράγεται το ακριβές μοντέλο του κινητήρα με τη βοήθεια του περιβάλλοντος προγραμματισμού PROOSIS και τα αποτελέσματά του συγκρίνονται με εκείνα του απλού θερμοδυναμικού μοντέλου. Ακολουθεί διερεύνηση για την κατάλληλη τοποθέτηση του σημείου σχεδίασης στους χάρτες λειτουργίας των συνιστωσών και υπολογισμός των συντελεστών κλίμακας και εξετάζεται η λειτουργία του κινητήρα σε σημεία εκτός σχεδίασης. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με εκείνα από τις μετρήσεις του εργαστηρίου που αφορούν κινητήρες με διαφορετικό σειριακό αριθμό (serial number).

Στη συνέχεια περιγράφεται η λειτουργία του κινητήρα σε δοκιμαστήριο και η ανάγκη για αναγωγή των μεγεθών λειτουργίας στις συνθήκες αναφοράς, εξαιτίας της μεταβολής των συνθηκών του περιβάλλοντος. Ακόμα, εξετάζεται η λειτουργία του κινητήρα παρουσιάζοντας τα ανηγμένα μεγέθη και επεξηγείται η δυνατότητα του κινητήρα να δουλεύει σε πολύ χαμηλά φορτία, δίχως οι συνιστώσες του να λειτουργούν σε επίφοβες περιοχές του πεδίου λειτουργίας τους. Το παραπάνω εξυπηρετεί, ώστε η παραγόμενη ισχύς του κινητήρα να περιορίζεται σε εκείνη που μπορεί να απορροφήσει η γεννήτρια του δοκιμαστηρίου του ΕΘΣ. Αναφορικά με το δεύτερο κομμάτι της εργασίας, σχεδιάζεται η βάση τοποθέτησης του κινητήρα, όπως ακριβώς εκείνη που χρησιμοποιείται για την στήριξη του κινητήρα εντός του ελικοπτέρου. Επίσης, σχεδιάζεται και η διάταξη εκτόνωσης των καυσαερίων στο περιβάλλον εκτός του χώρου δοκιμών, πραγματοποιώντας διερεύνηση για το εμβαδό της διατομής εξόδου των καυσαερίων με σκοπό την επίτευξη μεγαλύτερης παραγόμενης ισχύος. Ακόμα γίνεται αναφορά στην διάταξη στραγγαλισμού (throttling) της ροής εισόδου, την οποία διαθέτει το δοκιμαστήριο του ΕΘΣ, ενώ γίνεται προκαταρκτικός σχεδιασμός των προσαρμοστικών μερών για την εισαγωγή του κινητήρα και των αγωγών σύνδεσης της διάταξης στραγγαλισμού με την είσοδο του κινητήρα.

Βάσει των παραπάνω ελέγχονται τα εύρη τιμών των επιθυμητών μετρούμενων μεγεθών για διαφορετικά επίπεδα στραγγαλισμού της εισερχόμενης ροής στην μηχανή. Επίσης, παρουσιάζονται τα όργανα μέτρησης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και περιγράφεται συνοπτικά η λειτουργία τους, ενώ επιλέγονται τα κατάλληλα για λειτουργία βάσει των προαναφερθέντων ευρών τιμών. Ακόμα, παρουσιάζονται τα μεγέθη που είναι δυνατόν να μετρηθούν επί του κινητήρα, καθώς και οι θέσεις που πραγματοποιούνται οι μετρήσεις.

Τέλος, γίνεται αναφορά στην επεξεργασία των δεδομένων από τις μετρήσεις, δηλαδή αξιοποίηση των μετρούμενων παραμέτρων λειτουργίας του κινητήρα για υπολογισμό εκείνων που είναι αδύνατον να μετρηθούν, λόγω της μη ύπαρξης θέσεων μέτρησης ή λόγω ακραίων συνθηκών, όπως συμβαίνει στην έξοδο του θαλάμου καύσης.



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

Study on design of test bed facility for small gas turbine

DIPLOMA THESIS

DINOPOULOS GRIGORIOS

Advisor:

Professor K. Mathioudakis
Assistant Professor N. Aretakis

ABSTRACT

The present diploma thesis studies the installation of the engine PT6T-6 to a test bed inside the facility of the Laboratory of Thermal Turbomachines of National Technical University of Athens. The diploma thesis is composed of two parts. The first concerns the modelling of the engine and the second focuses on the design of the test bed and the exploitation of the measurements.

In first the engine is presented and details are given concerning its performance. Additionally the parameters of performance of all components are chosen for the design point according to the manual of the engine and the measurements of the LTT.

Next to the above, the performance of the engine is examined at the design point based on a simple thermodynamic model. Then the exact model of the engine is produced by the PROOSIS program and these results are compared to those of the simple thermodynamic model. Next there is a deep research in order to find the proper location of the design point to the maps of components, calculate the map scalars and test the off-design performance of the engine. The results are compared to those of the LTT measurements, concerning engines with different serial number.

Afterwards the performance of the engine in a test bed facility is described and the need of correction of the performance magnitudes to the reference conditions, because of the change of the environmental condition. In addition the performance of the engine is examined, concerning the corrected magnitudes, and also the capability of the engine running in part loads is explained, without its components perform on fearful map areas. The above is needed in order to limit the produced power of the engine to what it can be absorbed by the generator of the test bed of LTT.

As far as the second part of the thesis concerns the base of the engine is designed, exactly the same as the one which is used to support the engine in the helicopter. Also the tube system for the expansion of the exhaust gases to the environment outside the test area is designed, doing investigation for the exit area in order to achieve higher produced power. Additionally is mentioned the throttling system of the incoming flow, which the LTT already has, and a preliminary design of the adaptive parts for the inlet of the engine and the connection of tubes of the throttling system to the inlet of the engine is taking place.

According to the above, the ranges of magnitudes of the desired measured parameters for different throttling levels of the incoming flow are examined. In addition the instruments of measurement, which can be used, are presented and their performance is briefly described, while the suitable instruments for operation according to the above ranges are chosen. Moreover the parameters, which can be measured on the engine, are presented as well as their positions, on which the measurements occurred.

Finally, the processing of the data measurement is mentioned, meaning the exploitation of the measured performance parameters of the engine to calculate those, which are impossible to measure, due to non-existing measuring locations or due to extreme conditions, as it happens in combustor exit.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1.1
1.1	Σκοπός της παρούσας διπλωματικής	1.1
1.2	Δομή της διπλωματικής.....	1.3
2	Μοντελοποίηση και ανάλυση λειτουργίας	2.1
2.1	Γενικά στοιχεία	2.1
2.2	Ιστορική αναδρομή.....	2.3
2.3	Τεχνικά χαρακτηριστικά.....	2.4
2.4	Βοηθητικά συστήματα και απομαστεύσεις.....	2.6
2.5	Σημεία λειτουργίας και επιδόσεις του κινητήρα PT6T-6	2.7
2.6	Εκτίμηση επιμέρους λόγων πίεσης συμπιεστών	2.8
2.7	Θερμοδυναμική ανάλυση σημείου σχεδίασης	2.11
2.8	Ανάλυση σημείου σχεδίασης στο PROOSIS.....	2.15
2.9	Ανάλυση λειτουργίας στο σημείο σχεδίασης	2.24
2.10	Ανάλυση λειτουργίας εκτός σημείου σχεδίασης.....	2.26
3	Δημιουργία δοκιμαστηρίου και τοποθέτηση κινητήρα	3.1
3.1	Διάταξη δοκιμών με μειωμένη ισχύ κινητήρα.....	3.1
3.2	Υπάρχουσα εγκατάσταση	3.6
3.3	Διάταξη της βάσης.....	3.8
3.4	Σχεδιασμός βάσης.....	3.9
3.5	Σχεδίαση αγωγού εξόδου	3.13
3.6	Σχεδιασμός διαχύτη.....	3.21
3.7	Διάταξη στραγγαλισμού ροής.....	3.26

4	Μετρητική εγκατάσταση	4.1
4.1	Μετρούμενα μεγέθη	4.1
4.2	Όργανα μέτρησης	4.2
4.2.1	Μέτρηση πίεσης	4.2
4.2.2	Μέτρηση θερμοκρασίας	4.5
4.2.3	Μέτρηση παροχής μάζας εργαζόμενου μέσου.....	4.5
4.2.4	Μέτρηση ταχύτητας περιστροφής.....	4.6
4.2.5	Μέτρηση ροπής ατράκτου.....	4.7
4.2.6	Μέτρηση παροχής καυσίμου.....	4.7
4.3	Μεγέθη και θέσεις μέτρησης	4.8
4.4	Υπάρχουσες θέσεις μέτρησης επί του κινητήρα	4.12
4.5	Εύρος λειτουργίας οργάνων	4.13
4.6	Επιθυμητά μεγέθη προς μέτρηση	4.30
4.7	Τελικά μεγέθη προς μέτρηση	4.31
5	Επεξεργασία δεδομένων	5.1
5.1	Υπολογισμός επιδόσεων	5.1
5.1.1	Υπολογισμός παροχής μάζας εισόδου κινητήρα	5.2
5.1.2	Υπολογισμός θερμοκρασιών θερμού τμήματος.....	5.4
5.1.3	Υπολογισμός ισεντροπικών βαθμών απόδοσης.....	5.4
5.1.4	Υπολογισμός διορθωμένων μεγεθών	5.5
6	Ανακεφαλαίωση - Συμπεράσματα - Προτάσεις	6.1
6.1	Ανακεφαλαίωση	6.1
6.2	Συμπεράσματα	6.1
6.3	Προτάσεις	6.2
7	Βιβλιογραφικές αναφορές	7.1
Π1	Μεταβλητές περιβάλλοντος προγραμματισμού PROOSIS	1
Π2	Μηχανολογικά σχέδια εγκατάστασης	1

Π3	Υπολογισμός απωλειών πίεσης αγωγού εξόδου.....	1
Π4	Υπολογισμός στατικών φορτίων στα τοιχώματα του διαχύτη.....	1

1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται ο σκοπός, η δομή και τα πεδία συμβολής της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

1.1 Σκοπός της παρούσας διπλωματικής

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη για τη σχεδίαση δοκιμαστηρίου με στόχο την τοποθέτηση του κινητήρα PT6T-6 για διεξαγωγή δοκιμών και μετρήσεων επί της λειτουργίας του. Ακόμα, κατά την λειτουργία του κινητήρα στο δοκιμαστήριο είναι δυνατή η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αφού το δοκιμαστήριο του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών (ΕΘΣ) διαθέτει γεννήτρια για την απορρόφηση της παραγόμενης ισχύος κατά την λειτουργία του κινητήρα. Η διεξαγωγή δοκιμών και η βιομηχανοποίηση αεροπορικών αεροστροβίλων είναι συνήθης πρακτική και για αυτόν τον λόγο έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές διπλωματικές εργασίες με αυτό το αντικείμενο. Οι μετρήσεις από δοκιμές συμβάλλουν στην αξιολόγηση της λειτουργίας της μηχανής και στην προσαρμογή μοντέλων σε πραγματικές μηχανές με σκοπό την αξιολόγηση της λειτουργίας τους. Ενδεικτικά αναφέρονται οι διπλωματικές του Στέργιου Τσιόκα^[1] και του Χρήστου Αμπάτη^[2], οι οποίες εκπονήθηκαν στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ) και έχουν ως αντικείμενο την βιομηχανοποίηση και την διεξαγωγή και επεξεργασία μετρήσεων σε στροβιλομηχανές αντίστοιχα. Επίσης αναφορά σε δοκιμές θερμικών στροβιλομηχανών και αξιολόγηση της απόδοσής τους γίνεται στο [3], ενώ εκτεταμένη αναφορά σε δοκιμαστήρια αεροπορικών κινητήρων πραγματοποιείται στο [4].

Όπως προαναφέρθηκε, η διαδικασία των δοκιμών με σκοπό την αξιολόγηση της απόδοσης (Performance Evaluation) μίας μηχανής είναι ευρύτατα διαδεδομένη και χρησιμοποιείται ιδιαίτερα σε πεδία εφαρμογών, όπου η απόδοση και η πιστοποίηση των επιδόσεων είναι ζωτικής σημασίας (ηλεκτροπαραγωγή, πολιτική και στρατιωτική αεροπορία και άλλα). Ένας κινητήρας υποβάλλεται σε δοκιμές κυρίως για τρεις λόγους, πιστοποίηση επιδόσεων, έλεγχο επιδόσεων μετά από μακροχρόνια χρήση και μετά από συντήρηση. Συγκεκριμένα, δοκιμές γίνονται για την πιστοποίηση των προδιαγραφών που απαιτείται να τηρεί η μηχανή και πραγματοποιούνται πριν την παράδοσή της. Για παράδειγμα, οι κινητήρες των αεροσκαφών ελέγχονται πριν εγκατασταθούν αναφορικά με την προδιαγεγραμμένη ώση. Επίσης, δοκιμές και μετρήσεις πραγματοποιούνται για έλεγχο της απόδοσης της μηχανής και έτσι επιτυγχάνεται η εξακρίβωση και αντιμετώπιση τυχούσας μειωμένης απόδοσης (πεδίο διαγνωστικής στροβιλομηχανών) και αποτροπή δημιουργίας σημαντικής βλάβης. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατόν να

επανακτηθεί η αποδοτικότητα της μηχανής, γεγονός που οδηγεί σε μειωμένο κόστος λειτουργίας (μειωμένη κατανάλωση καυσίμου και ομαλή λειτουργία μηχανής) και αποφυγή τερματισμού λειτουργίας για εκτεταμένο έλεγχο και επιδιορθώσεις, οι οποίες οδηγούν σε μεγάλες οικονομικές επιπτώσεις. Ακόμα, έπειτα από κάθε διαδικασία συντήρησης και αποκατάστασης βλαβών, επιτάσσεται να δοκιμασθεί ο κινητήρας για να διαπιστωθεί αν λειτουργεί ομαλά και σύμφωνα με τις προδιαγραφές. Τέλος, οι μετρήσεις από τις δοκιμές μπορούν να συμβάλλουν και στην βελτίωση μοντέλων κινητήρων και προσαρμογή τους βάσει των μετρήσεων στην εκάστοτε μηχανή, τα οποία βοηθούν στην διάγνωση βλαβών.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής, η εγκατάσταση και λειτουργία του κινητήρα στο δοκιμαστήριο έπεται της παραγωγής του μοντέλου που αναπαριστά την συμπεριφορά του. Το προαναφερθέν μοντέλο εξυπηρετεί στον έλεγχο και την αξιολόγηση της λειτουργίας του κινητήρα, πριν εκείνος τεθεί σε λειτουργία, με κύριο σκοπό την αποφυγή βλαβών, οι οποίες θα μπορούσαν να προκύψουν από ακραίες συνθήκες λειτουργίας. Για την μελέτη της συμπεριφοράς του κινητήρα πραγματοποιείται μοντελοποίηση του κινητήρα με χρήση του προγράμματος PROOSIS (Propulsion Object Oriented Simulation Software), το οποίο αξιοποιείται για την μοντελοποίηση συστημάτων που αφορούν συναλλαγή θερμότητας και ισχύος, έλεγχο (control system) και άλλα.

Για να μετρηθούν οι επιδόσεις ενός κινητήρα απαιτείται η ύπαρξη του κατάλληλου μετρητικού εξοπλισμού. Ο εξοπλισμός δεν μπορεί να υπάρξει για έναν εγκατεστημένο κινητήρα, επειδή τα μετρήσιμα μεγέθη για τον καθορισμό των επιδόσεων του είναι περισσότερα από αυτά που απαιτούνται από το σύστημα ελέγχου του κινητήρα. Επίσης για την τοποθέτηση και σωστή βαθμονόμηση των οργάνων απαιτείται περισσότερος διαθέσιμος χώρος από αυτόν που υπάρχει σε έναν ήδη εγκατεστημένο κινητήρα, έτσι είναι απαραίτητη η χρήση εγκαταστάσεων δοκιμαστηρίου. Η λειτουργία, όμως, του κινητήρα εξαρτάται άμεσα από τις συνθήκες περιβάλλοντος με άμεση επίδραση στις επιδόσεις του για τις ίδιες παραμέτρους ελέγχου (παροχή καυσίμου, ταχύτητα περιστροφής ατράκτου και άλλες). Για να είναι συγκρίσιμες οι μετρήσεις πραγματοποιείται αναγωγή τους ως προς τις συνθήκες περιβάλλοντος τυπικής ημέρας. Αξιοποιώντας το παραπάνω μοντέλο, ελέγχονται τα όρια των επιθυμητών προς μέτρηση μεγεθών και στη συνέχεια επιλέγονται οι κατάλληλοι αισθητήρες με σκοπό την αξιολόγηση της λειτουργίας του κινητήρα, ολοκληρώνοντας, έτσι τον χαρακτήρα της εγκατάστασης, η οποία προσφέρεται ως χώρος δοκιμών. Ως κατάλληλοι αισθητήρες, εννοούνται εκείνοι που παρουσιάζουν την μέγιστη ακρίβεια στο επιθυμητό εύρος λειτουργίας. Τέλος, σχεδιάζεται η βάση στήριξης του κινητήρα, όπως επίσης, και η διάταξη για την αποτόνωση των καυσαερίων στο περιβάλλον εκτός του χώρου δοκιμών.

Εξαιτίας της περιορισμένης δυνατότητας τοποθέτησης οργάνων μέτρησης επί του συγκροτήματος του κινητήρα, το υπολογιστικό μοντέλο που προαναφέρθηκε αξιοποιείται με σκοπό την εξακρίβωση της κατάστασης του κινητήρα για σημεία

λειτουργίας διαφορετικά του σημείου σχεδίασης. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η γνώση όλων των παραμέτρων σε κάθε θέση του κινητήρα.

1.2 Δομή της διπλωματικής

Αφού προηγήθηκε η ανάδειξη του σκοπού της διπλωματικής, στην παρούσα παράγραφο αναλύεται η δομή της. Η παρούσα διπλωματική εργασία περιλαμβάνει επτά κεφάλαια, στα οποία συμπεριλαμβάνονται το κεφάλαιο της εισαγωγής και η βιβλιογραφία. Αρχικά παρουσιάζεται ο κινητήρας μαζί με τις επιδόσεις του, οι οποίες απαιτούνται για την μοντελοποίησή του. Στη συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά η παραγωγή του μοντέλου, το οποίο επιτρέπει την γνώση της κατάστασης του κινητήρα χωρίς εκείνος να τεθεί σε λειτουργία. Ακόμα, εξετάζεται η λειτουργία του κινητήρα παρουσιάζοντας τις 'αδιάστατες' παραμέτρους και η δυνατότητα παραγωγής μικρότερης ισχύος, ώστε να μπορεί να απορροφηθεί από την γεννήτρια, δίχως η λειτουργία των συνιστωσών του κινητήρα να χαρακτηρίζεται προβληματική. Η εγκατάσταση του δοκιμαστηρίου καθορίζεται με τον σχεδιασμό της βάσης στήριξης και των διατάξεων εξόδου των καυσαερίων και εισόδου του αέρα, ενώ περιγράφεται και η διάταξη στραγγαλισμού της ροής εισόδου. Επίσης αξιοποιείται το παραπάνω μοντέλο με σκοπό την εξακρίβωση των ορίων των επιθυμητών προς μέτρηση μεγεθών και την επιλογή του μετρητικού εξοπλισμού. Τέλος, αναλύεται η αξιοποίηση των μετρήσεων από την δοκιμή του κινητήρα.

Πιο αναλυτικά, στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται η εξέλιξη που γνώρισε η οικογένεια κινητήρων PT6T Twin Pac με την πάροδο των ετών. Επίσης γίνεται αναφορά στα τεχνικά χαρακτηριστικά του υπό μελέτη κινητήρα. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η διαδικασία μοντελοποίησης του κινητήρα και επιλογής των επιδόσεων των επιμέρους συνιστωσών για το σημείο σχεδίασης. Ακόμα, συγκρίνονται τα αποτελέσματα του μοντέλου του κινητήρα με μετρήσεις από το δοκιμαστήριο για ένα εύρος συνθηκών λειτουργίας.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται αναφορά στην λειτουργία του κινητήρα σε χαμηλά φορτία, παρουσιάζοντας τις διορθωμένες παραμέτρους, δίχως οι συνιστώσες του να λειτουργούν σε προβληματικές περιοχές. Δηλαδή, οι συνιστώσες λειτουργούν στο ίδιο σημείο στον χάρτη τους, παράγοντας ως σύνολο μικρότερη ισχύ. Επίσης, παρουσιάζεται η εγκατάσταση του κινητήρα στο δοκιμαστήριο. Η παραπάνω εγκατάσταση περιλαμβάνει την βάση στήριξης του κινητήρα, την διάταξη εξόδου των καυσαερίων, όπως και την διάταξη στραγγαλισμού της εισερχόμενης ροής στη μηχανή. Επίσης έγινε διερεύνηση ως προς το εμβαδό εξόδου της παραπάνω διάταξης με σκοπό την επίτευξη μεγαλύτερης παραγόμενης ισχύος

Στο κεφάλαιο 4 πραγματοποιείται εκτεταμένη αναφορά για μετρούμενα μεγέθη, μετρητικά όργανα και μετρητικές διατάξεις. Επίσης, παρουσιάζονται τα εύρη τιμών για το κάθε επιθυμητό μετρούμενο μέγεθος, όπως εκείνα προέκυψαν από το μοντέλο του

κινητήρα στο PROOSIS με σκοπό την επιλογή των καταλλήλων μετρητικών οργάνων. Ως κατάλληλα μετρητικά όργανα, εννοούνται εκείνα που παρουσιάζουν την μέγιστη ακρίβεια στο επιθυμητό εύρος λειτουργίας.

Το κεφάλαιο 5 αναφέρεται στην επεξεργασία των μετρήσεων, δηλαδή στον υπολογισμό των υπολοίπων παραμέτρων λειτουργίας του κινητήρα βάσει των μετρομένων παραμέτρων.

Τέλος, στο κεφάλαιο 6 γίνεται ανακεφαλαίωση, ενώ παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας και παρατίθενται προτάσεις για βαθύτερη διερεύνηση.

Στο κείμενο που ακολουθεί τηρείται το διεθνές σύστημα για τους αριθμούς, όπου η υποδιαστολή γίνεται με χρήση του συμβόλου ‘.’.

2

Μοντελοποίηση και ανάλυση λειτουργίας

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται γενικές πληροφορίες αναφορικά με τον κινητήρα PT6T-6, ο οποίος αποτελεί το αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής. Γίνεται αναφορά στην κατασκευάστρια εταιρεία, στην διάταξή του, καθώς και στις επιδόσεις του. Επίσης, πραγματοποιείται αναφορά στην εξέλιξη του κινητήρα. Ακόμα παρουσιάζεται η μοντελοποίηση του κινητήρα PT6T-6. Αρχικά γίνεται ένας προκαταρκτικός σχεδιασμός των δύο συμπιεστών για υπολογισμό των λόγων πιέσεων που απαιτούνται για την μοντελοποίηση του κινητήρα. Στη συνέχεια η ανάλυση του σημείου σχεδίασης γίνεται σε μία πρώτη προσέγγιση με χρήση των θερμοδυναμικών εξισώσεων για να γίνει μία πρώτη εκτίμηση των θερμοδυναμικών μεγεθών πριν ακολουθήσει λεπτομερής μελέτη. Επίσης, η ίδια ανάλυση γίνεται μέσω του περιβάλλοντος προγραμματισμού PROOSIS (Propulsion Object Oriented Simulation Software), ενώ το ίδιο περιβάλλον χρησιμοποιείται και για την προσομοίωση της λειτουργίας της μηχανής σε συνθήκες εκτός σχεδίασης. Τέλος, για τα σημεία εκτός σχεδίασης γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου και μετρήσεων από δοκιμαστήρια με σκοπό την αξιολόγηση του μοντέλου.

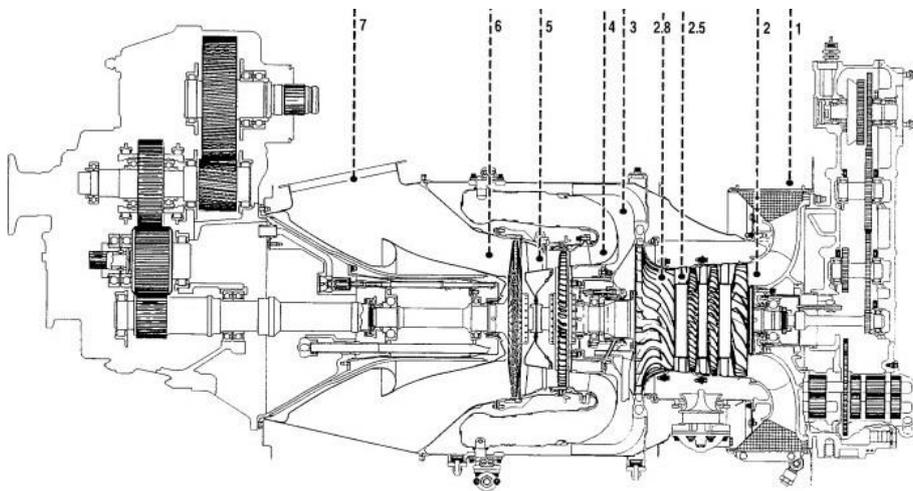
2.1 Γενικά στοιχεία

Ο κινητήρας PT6T-6 είναι αεριοστρόβιλος ισχύος με ελεύθερο στρόβιλο ισχύος για την κίνηση ατράκτου ελικοπτέρου. Ανήκει στην οικογένεια PT6T Twin-Pac της κατασκευάστριας εταιρείας Pratt & Whitney Canada και πρόκειται για την αναβαθμισμένη έκδοση του κινητήρα PT6T-3^[5], ο οποίος αποτελεί την απλούστερη έκδοση παραγωγής. Ο όρος Twin-Pac αναφέρεται στο γεγονός πως ο εξοπλισμός των ελικοπτέρων γίνεται πάντα με ζεύγος κινητήρων PT6T. Η συγκεκριμένη οικογένεια αφορά εφαρμογές στην πολιτική, αλλά και στην πολεμική αεροπορία.

Οι κινητήρες αυτής της οικογενείας αποτελούνται από έναν τριβάθμιο αξονικό συμπιεστή, έναν μονοβάθμιο φυγοκεντρικό συμπιεστή και έναν μονοβάθμιο στρόβιλο στην ίδια άτρακτο (αεριογόνος), ενώ ένας μονοβάθμιος στρόβιλος ισχύος παράγει την ισχύ που εισάγεται στον μειωτήρα στροφών για την κίνηση του στροφείου. Η καύση πραγματοποιείται σε δακτυλιοειδή θάλαμο καύσης αντίθετης ροής για εξοικονόμηση όγκου του συνόλου της εγκατάστασης. Τέλος, υπάρχει και ένα κιβώτιο για την λειτουργία των βοηθητικών συστημάτων και είναι τοποθετημένο στην πλευρά του συμπιεστή. Η διάταξη του κινητήρα φαίνεται στο Σχήμα 2.1, ενώ στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζεται η αρίθμηση των θέσεων κατά την πορεία του αερίου.



Σχήμα 2.1 : Διάταξη κινητήρα PT6T-6^[5]



Σχήμα 2.2 : Αρίθμηση των θέσεων της πορείας του εργαζομένου μέσου^[5]

Ο κινητήρας PT6T-6 παράγει κατά την απογείωση 723.33 kW ισχύ ατράκτου στις 33000 rpm ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου ισχύος, την οποία ο μειωτήρας στροφών μειώνει σε 6600 rpm.

2.2 Ιστορική αναδρομή

Η ανάπτυξη της οικογένειας PT6T έγινε με σκοπό την εφαρμογή τους στα ελικόπτερα Bell 212 και UH-1N Twin Huey κατά το έτος 1970. Με την πάροδο των ετών σχεδιάστηκαν νέα μοντέλα με αυξημένες επιδόσεις για μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών στην πολιτική και στρατιωτική αεροπορία. Όταν πρόκειται για στρατιωτική εφαρμογή, χρησιμοποιείται η ονομασία T400.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα μοντέλα που έχουν παραχθεί, καθώς και ορισμένα χαρακτηριστικά τους.

PT6T-3 : Το βασικό μοντέλο παραγωγής.

PT6T-3B : Όμοιος με PT6T-3. Στρόβιλος αεριογόνου όπως σε PT6T-6 για αύξηση επιδόσεων.

PT6T-3D : Βελτιωμένο θερμό τμήμα μηχανής για αυξημένες επιδόσεις και βελτιωμένος μειωτήρας στροφών (RGB). Διπλοί εγχυτήρες καυσίμου. Νέο σύστημα ελέγχου ροπής.

PT6T-6 : Βελτιωμένη έκδοση του PT6T-3 με βελτιώσεις στο θερμό τμήμα για αύξηση επιδόσεων.

PT6T-6B : Όμοιος με PT6T-6B. Νέο σύστημα ελέγχου ροπής.

T400-CP-400 : Έκδοση του PT6T-3 για στρατιωτικές εφαρμογές (US Navy, US Air Force, Canadian Forces).

T400-CP-401 : Έκδοση του PT6T-3 για στρατιωτικές εφαρμογές (US Army).

T400-WV-402 : Όμοιος με T400-CP-400. Διπλοί εγχυτήρες καυσίμου. Βελτιωμένο θερμό τμήμα για αύξηση επιδόσεων και σύστημα προστασίας για την υπέρβαση του ορίου ταχύτητας περιστροφής της ατράκτου ισχύος.

Ακόμα, στον Πίνακα 2.1 γίνεται αναφορά στα ελικόπτερα που εξοπλίζονται από την παραπάνω οικογένεια κινητήρων, ενώ περιγράφεται και ο ρόλος του κάθε ελικοπτερου. Τέλος, στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζονται αναλυτικά το μοντέλο κινητήρα που εξοπλίζει κάθε ελικόπτερο.

Πίνακας 2.1 : Μοντέλα ελικοπτέρων που εξοπλίζονται με κινητήρες PT6T

Model	Utility
Bell 212	Civil / Military (Bell UH-1N Twin Huey)
Bell 309	Military experimental attack helicopter
Bell 412	Multipurpose

Bell SeaCobra	AH-1J	Attack helicopter
Bell SeaCobra	AH-1T	Attack helicopter
Bell Griffon	CH-146	Multi-role
Sikorsky S-58T		Military / Multipurpose
Sikorsky S-69		Experimental co-axial compound helicopter

Πίνακας 2.2 : Αναλυτική περιγραφή της εγκατάστασης των εκδόσεων PT6T^[5]

Engine Model	Certification Date	Take-Off Rating (SHP)	Installation
PT6T-3	1970	1800	BELL 212 AGUSTA BELL AB 212 SIKORSKY S-58T
PT6T-3B PT6T-3BF	1979 1998	1800	BELL 212 BELL 412 & 412 SP AGUSTA BELL AB 212 & 412
PT6T-3BE PT6T-3BG	1990 1998	1800	BELL 412 HP AGUSTA BELL AB 412 HP
PT6T-3D PT6T-3DE	1993 1995	1800	BELL 412 HP & 412 EP BELL CFUTTH CH-146 "Griffon" AGUSTA BELL AB 412 HP/EP
PT6T-3DF	1996	1800	BELL 412 EP
PT6T-6	1974	1875	AGUSTA BELL AB 212 & 412 SIKORSKY S-58T
PT6T-6B	1992	1875	AGUSTA BELL AB 412
T400-CP-400	1970	1800	USN, USAF, CF MILITARY BELL AH-1J, UH-1N, CUH-1N
T400-CP-401	1972	1800	US ARMY MILITARY BELL VH-1N
T400-WV-402	1975	1970	US NAVY MILITARY BELL AH-1J, AH-1T

2.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά

Αναφορικά με την πιο αναβαθμισμένη έκδοση του κινητήρα PT6T(έκδοση PT6T-6), η οποία μελετάται στην παρούσα διπλωματική, στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζονται στοιχεία για την λειτουργία, τις συνιστώσες και την διάταξη του κινητήρα. Όλα τα στοιχεία του Πίνακα 2.3 ισχύουν και για τις άλλες εκδόσεις του κινητήρα PT6T.

Πίνακας 2.3 : Τεχνικά χαρακτηριστικά ΡΤ6Τ-6^[5]

Αξονικός συμπιεστής	3 βαθμίδες. Πτερύγια πρώτης βαθμίδας από τιτάνιο. Δεύτερης και τρίτης από ανοξείδωτο χάλυβα.
Φυγοκεντρικός συμπιεστής	1 βαθμίδα. Πτερωτή από τιτάνιο.
Θάλαμος Καύσης	Αντίθετης ροής. Δακτυλιοειδής.
Στρόβιλος αεριογόνου	1 βαθμίδα. Περιστροφή clockwise (CW).
Στρόβιλος ισχύος	1 βαθμίδα. Περιστροφή counterclockwise (CCW).
Μειωτήρας στροφών	Λόγος μετάδοσης 5:1. Κοινός για το ζεύγος κινητήρων.
Κιβώτιο βοηθητικών συστημάτων	Κίνηση από άτρακτο αεριογόνου.
Μήκος (mm)	1671
Πλάτος (mm)	1105
Ύψος (mm)	828
Βάρος (kg)	313

Εν συνεχεία, παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.4 οι μέγιστες επιδόσεις του κινητήρα ΡΤ6Τ-6 για συνεχή λειτουργία, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν για την ορθή μοντελοποίηση της λειτουργίας του, η οποία παρουσιάζεται σε επόμενες παραγράφους.

Πίνακας 2.4 : Μέγιστες επιδόσεις ΡΤ6Τ-6^[5]

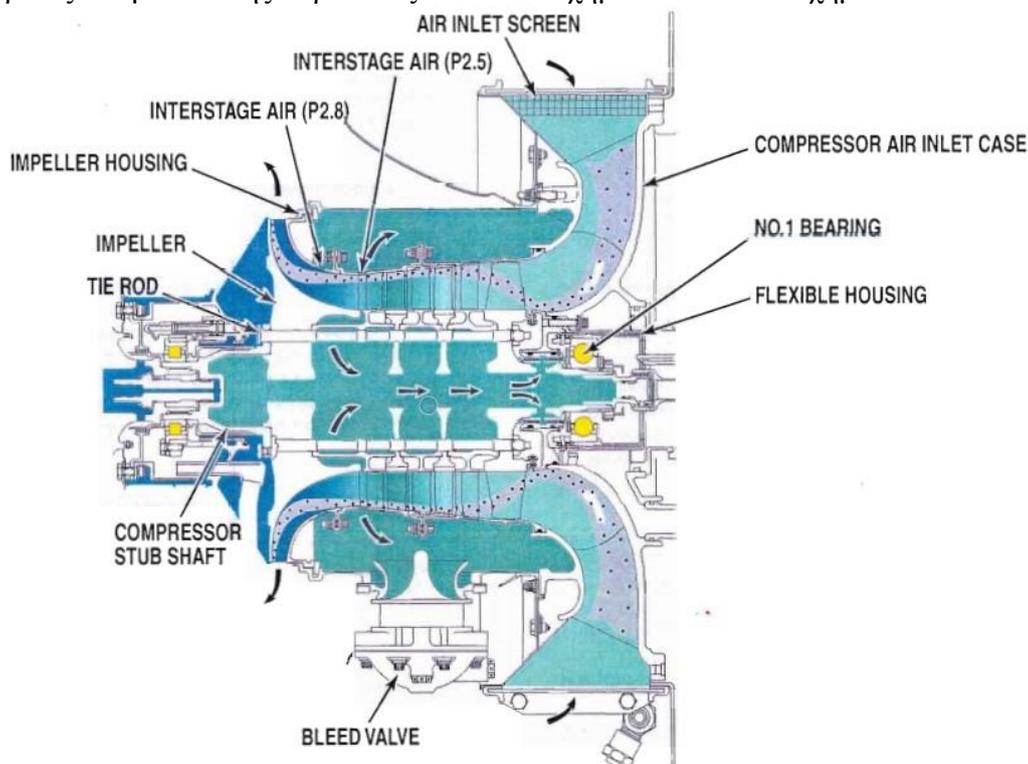
Συνολικός λόγος πίεσης	7.3 : 1
Μέγιστη παροχή αέρα (kg/s)	3
100% N1 ατράκτου αεριογόνου (rpm)	38100
100% N2 ατράκτου ισχύος (rpm)	33000
100% Ns ατράκτου εξόδου (rpm)	6600
Μέγιστη παραγόμενη ισχύς (kW)	723.33

2.4 Βοηθητικά συστήματα και απομαστεύσεις

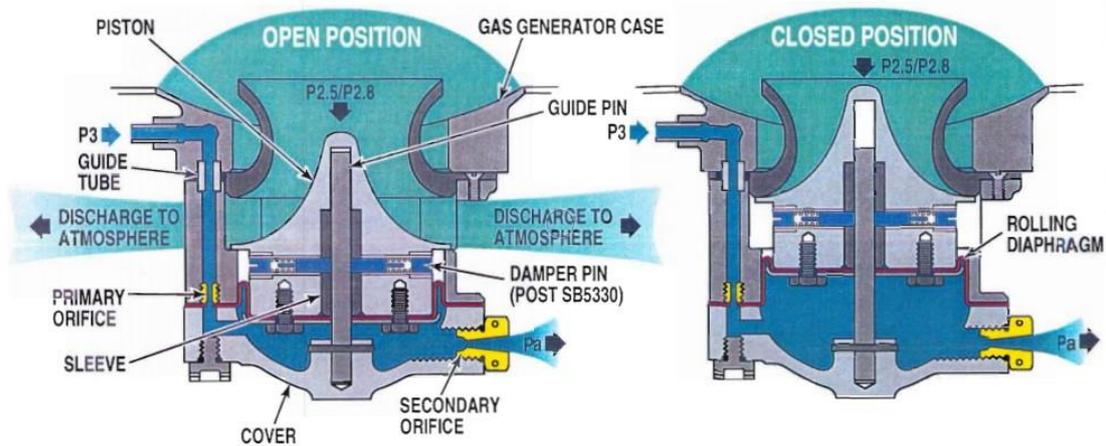
Η άτρακτος της αεριογόνου παρέχει ισχύ στο κιβώτιο των βοηθητικών συστημάτων (accessory gearbox). Τα πιο σημαντικά συστήματα που περιλαμβάνει είναι η αντλία καυσίμου, η αντλία λιπαντικού, η μονάδα ελέγχου του καυσίμου και η αντλία για τον διαχωρισμό του αέρα από το λιπαντικό.

Κατά την λειτουργία του κινητήρα PT6T-6 πραγματοποιούνται απομαστεύσεις από τις θέσεις 2.5, 2.8, και 3 (γίνεται χρήση της αριθμησης, όπως αυτή προκύπτει από το Σχήμα 2.3).

Οι απομαστεύσεις από τις θέσεις 2.5 και 2.8 έχουν ως σκοπό την αποφυγή της εισόδου των συμπιεστών στην περιοχή ασταθούς λειτουργίας κατά την λειτουργία του κινητήρα σε χαμηλές στροφές. Ο έλεγχος των παραπάνω απομαστεύσεων γίνεται από την βαλβίδα απομάστευσης για την λειτουργία της οποίας απαιτείται και ροή του εργαζομένου μέσου προερχόμενο από τη θέση 3. Η θέση και η λειτουργία της βαλβίδας απομάστευσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.3 και στο Σχήμα 2.4 αντίστοιχα.



Σχήμα 2.3 : Θέση βαλβίδας απομάστευσης^[5]



Σχήμα 2.4 : Λειτουργία βαλβίδας απομάστευσης^[5]

Οι υπόλοιπες απομαστεύσεις της θέσης 3 αφορούν την ψύξη του θερμού τμήματος της μηχανής και την λειτουργία ορισμένων συστημάτων του κινητήρα. Στον Πίνακα 2.5 παρουσιάζονται λεπτομερώς η χρήση και το ποσοστό των απομαστεύσεων επί της αναρροφούμενης παροχής αέρα. Το μέγεθος των απομαστεύσεων απαιτείται για να μοντελοποιηθεί ακριβώς η συμπεριφορά της μηχανής.

Πίνακας 2.5 : Ποσότητα και χρήση απομαστεύσεων

Ποσοστό	Χρήση
8%	Ψύξη δίσκων στροβίλων και στάτορα στροβίλου αεριογόνου. Επισφράγιση εδράνων κύλισης.
2%	Λειτουργία βαλβίδας απομάστευσης και μονάδας αυτομάτου ελέγχου καυσίμου.
5%	Θέρμανση καμπίνας.

2.5 Σημεία λειτουργίας και επιδόσεις του κινητήρα PT6T-6

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται ενδεικτικά οι επιδόσεις του κινητήρα σε εύρος φορτίων σύμφωνα με το [5] (Πίνακας 2.6).

Πίνακας 2.6 : Σημεία λειτουργίας PT6T-6

Λειτουργία	P (shp)	ITT (°C)	N1 (%)
Continuous (OEI)	970	624	100.8
Take-off	937.5	624	100.8
Maximum Continuous	837.5	593	100.8

Όπου ITT (Interstage Turbine Temperature), η ενδιάμεση θερμοκρασία των στροβίλων (θέση 5, σύμφωνα με το Σχήμα 2.2).

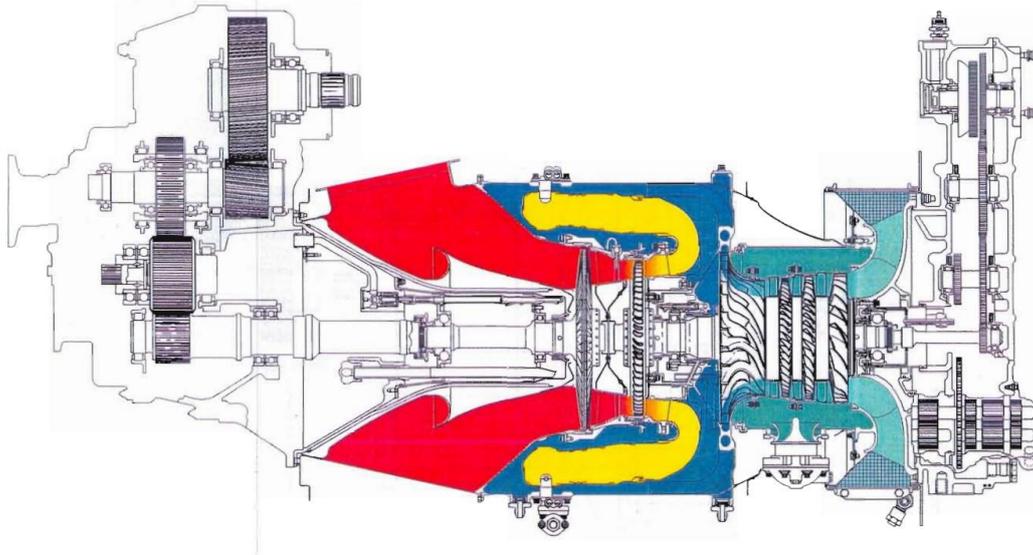
2.6 Εκτίμηση επιμέρους λόγων πίεσης συμπιεστών

Ο κινητήρας PT6T-6 διαθέτει δύο διαφορετικές συνιστώσες συμπιεστών. Για να γίνει πλήρης θερμοδυναμική ανάλυση απαιτείται να μπορούν να υπολογισθούν όλα τα μεγέθη σε κάθε θέση του κινητήρα (ακόμα και ανάμεσα στους συμπιεστές) και για να πραγματοποιηθεί το παραπάνω χρειάζονται οι επιμέρους λόγοι πίεσης. Απόρροια των παραπάνω είναι πως για την επίλυση του συστήματος των θερμοδυναμικών εξισώσεων του κινητήρα (μονοδιάστατη ανάλυση) για το σημείο σχεδίασης είναι απαραίτητη η γνώση των λόγων πίεσης των δύο συμπιεστών, του τριβάθμιου αξονικού και του μονοβάθμιου φυγοκεντρικού. Για τον παραπάνω λόγο γίνεται προσπάθεια να εκτιμηθεί η γεωμετρία των βαθμίδων και μέσω της σχέσης του Euler να προκύψουν τελικά οι επιμέρους λόγοι πίεσης των συμπιεστών. Επισημαίνεται πως ως σημείο σχεδίασης λαμβάνεται το σημείο λειτουργίας του κινητήρα, το οποίο αντιστοιχεί στην απογείωση.

Για τον σκοπό αυτό αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης σε FORTRAN 95 με στόχο την επίτευξη του ενδεδειγμένου συνολικού λόγου πίεσης που αντιστοιχεί στο σημείο σχεδίασης για συνθήκες κανονικής μέρας, όπως έχει καταγραφεί στην παράγραφο 2.3. Ως μεταβλητές σχεδιασμού επιλέχθηκαν ο αριθμός Mach της ροής στην είσοδο του αξονικού συμπιεστή και η γωνία της ροής στην έξοδο του στάτορα, η οποία θεωρήθηκε ίδια για όλες τις βαθμίδες. Επειδή ο σχεδιασμός των δύο συνιστωσών δεν αποτελεί άμεσα αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής, δεν γίνεται αναφορά στην πορεία των υπολογισμών.

Για την εκτίμηση της γεωμετρίας σε κάθε θέση του κινητήρα στο 'κρύο' τμήμα του, χρησιμοποιείται το Σχήμα 2.5 με γνωστή τη διάσταση του συνολικού μήκους του κινητήρα που είναι 1671 mm (66 inches). Θεωρώντας πως η τομή του κινητήρα παρουσιάζεται υπό κλίμακα, λαμβάνονται οι μετρήσεις των εσωτερικών (R_{hub}) και

εξωτερικών διαμέτρων (R_{tip}) των βαθμίδων και ανάγονται στις πραγματικές τιμές. Οι τιμές των διαμέτρων του αξονικού και ακτινικού συμπιεστή παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.7 και στον Πίνακα 2.8 αντίστοιχα, ενώ των υπολοίπων δεδομένων, δηλαδή της παροχής αέρα εισόδου m_a , ολικής θερμοκρασίας εισόδου T_{in} και ολικής πίεσης εισόδου P_{in} στον Πίνακα 2.9. Τονίζεται πως ως ισεντροπικός βαθμός απόδοσης για την κάθε μεμονωμένη βαθμίδα επιλέγεται 0.83 σύμφωνα με το [1].



Σχήμα 2.5 : Τομή κινητήρα για εκτίμηση των διαμέτρων των βαθμίδων

Πίνακας 2.7 : Δεδομένα γεωμετρίας αξονικού συμπιεστή

stage	1	2	3
Rhub (mm)	67.75	67.75	67.75
Rtip (mm)	105.40	101.60	96.70

Πίνακας 2.8 : Δεδομένα γεωμετρίας ακτινικού συμπιεστή

Rhub,in (mm)	67.75
Rtip,in (mm)	94.10
Rout (mm)	141.15

Πίνακας 2.9 : Δεδομένα για υπολογισμό των επιμέρους λόγων πίεσης

m (kg/s)	3.00
T _{tin} (K)	288.15
P _{tin} (bar)	1.01

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τους δύο συμπιεστές στον Πίνακα 2.10 και Πίνακα 2.11. Για την περιγραφή των τριγώνων ταχυτήτων στη μέση ακτίνα χρησιμοποιείται η αξονική ταχύτητα V_a , η συνισταμένη σχετική ταχύτητα της ροής ως προς το περύγιο W και οι γωνίες της απόλυτης και σχετικής ταχύτητας, α και β αντίστοιχα. Τέλος, στον Πίνακα 2.11 παρουσιάζονται οι συνολικές επιδόσεις του τριβάθμιου αξονικού συμπιεστή.

Πίνακας 2.10 : Αποτελέσματα σχεδιασμού τριβάθμιου αξονικού συμπιεστή

stage	1	2	3
T _{tin} (K)	288.15	317.74	347.41
P _{tin} (bar)	1.01	1.38	1.79
ρ (m ³ /kg)	1.10	1.38	1.66
U _m (m/s)	345.24	337.67	327.90
V _a (m/s)	133.39	120.50	120.97
W ₁ (m/s)	294.28	312.69	303.71
β_1 (deg)	63.08	67.37	66.56
W ₂ (m/s)	211.88	225.14	218.67
β_2 (deg)	56.30	62.02	60.39
P _{c,stage}	1.35	1.32	1.28

Πίνακας 2.11 : Επιδόσεις τριβάθμιου αξονικού συμπιεστή

P _{c,axial}	2.29
$\eta_{is,axial}$	0.825
m (kg/s)	3.00

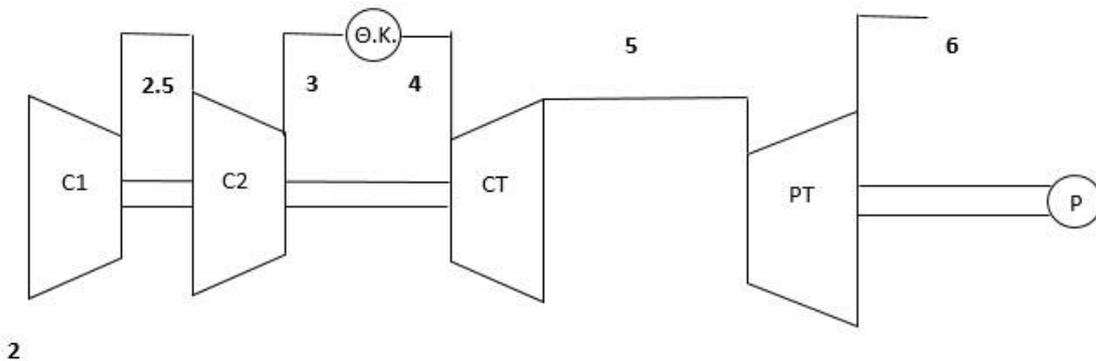
Τα αποτελέσματα του σχεδιασμού για τον ακτινικό συμπιεστή παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.12.

Πίνακας 2.12 : Αποτελέσματα σχεδιασμού μονοβάθμιου ακτινικού συμπιεστή

slip factor	0.93
β_1 (deg)	67.48
β_2 (deg)	71.13
ΔT_t (K)	185.81
$\Pi_{c,radial}$	3.19
$\eta_{is,radial}$	0.83

2.7 Θερμοδυναμική ανάλυση σημείου σχεδίασης

Στην παρούσα παράγραφο γίνεται μοντελοποίηση του σημείου σχεδίασης χρησιμοποιώντας απλή θερμοδυναμική ανάλυση με σκοπό να συγκριθούν τα αποτελέσματα με εκείνα της μοντελοποίησης με χρήση του περιβάλλοντος προγραμματισμού PROOSIS. Με χρήση των θερμοδυναμικών εξισώσεων υπολογίστηκαν οι ολικές θερμοκρασίες και οι ολικές πιέσεις σε κάθε θέση του κινητήρα. Η αρίθμηση των θέσεων γίνεται σύμφωνα με το Σχήμα 2.6, το οποίο αποτελεί απλοποιημένη μορφή της διάταξης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.6: Αρίθμηση κυρίων θέσεων διέλευσης της ροής.

Στον Πίνακα 2.13 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του εργαζομένου μέσου (σταθερά αερίου, θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση) τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην προαναφερθείσα ανάλυση.

Πίνακας 2.13 : Εργαζόμενο μέσο

γ_a	1.4
γ_g	1.33
Σταθερά R_a (kJ/kgK)	0.287
C_{pa} (kJ/kgK)	1.0045
C_{pg} (kJ/kgK)	1.1567

Ο δείκτης “a” δηλώνει αέρα, ενώ ο δείκτης “g” δηλώνει καυσαέριο.

Οι συνθήκες περιβάλλοντος λαμβάνονται ίσες με εκείνες που επικρατούν κατά την κανονική μέρα (standard day) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.14.

Πίνακας 2.14 : Συνθήκες περιβάλλοντος

T_{t_0} (K)	288.15
P_{t_0} (bar)	1.01325

Οι επιδόσεις του κινητήρα στο σημείο σχεδίασης έχουν ληφθεί από την βιβλιογραφία^[1] και από μετρήσεις ΕΘΣ, από τις οποίες προκύπτει πως η ονομαστική ισχύς είναι 723.33 kW, και παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.15.

Πίνακας 2.15 : Επιδόσεις στο σημείο σχεδίασης

Ωφέλιμη Ισχύς $P_{\omega\phi}$ (kW)	723.33
Συνολικός λόγος πίεσης P_c	7.30
Αναρροφώμενη παροχή m_a (kg/s)	3.00
Παροχή καυσίμου m_f (kg/s)	0.072
Θερμογόνος Ικανότητα JP1 H_u (kJ/kg)	43020

Οι βαθμοί απόδοσης και οι συντελεστές απωλειών ολικής πίεσης των τμημάτων του κινητήρα του κινητήρα παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.16. Οι συντελεστές απωλειών και οι ισεντροπικοί βαθμοί απόδοσης των στροβίλων επιλέχθηκαν βάσει του [1].

Πίνακας 2.16 : Βαθμοί απόδοσης και συντελεστές απωλειών

Συντελεστής απωλειών αγωγού εισόδου K_{in}	0.01
Μηχανικοί β.α. η_{mech}	0.99
Βαθμός απόδοσης ΘΚ η_b	0.99
Συντελεστής Απωλειών ΘΚ K_b	0.03
η_{isC1}	0.83
η_{isC2}	0.83
η_{isGT}	0.85
η_{isPT}	0.86

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν στον αλγόριθμο για τον υπολογισμό των θερμοδυναμικών μεγεθών κατά την λειτουργία του κινητήρα στο σημείο σχεδίασης.

Αγωγός εισόδου 1-2 :

$$T_{t1} = T_{t0}$$

$$P_{t1} = P_{t0}$$

$$P_{t2} = P_{t1}(1 - k_{in})$$

$$T_{t2} = T_{t1}$$

Συμπιεστής 1 (αξονικός) 2-21:

$$\pi_{c1} = 2.29$$

$$P_{t2.5} = P_{t2} \pi_c$$

$$T_{t2.5} = T_{t2} \left[\left(\frac{\frac{\gamma\alpha - 1}{\pi_{c1}^{\gamma\alpha}} - 1}{\eta_{is,c1}} \right) + 1 \right]$$

Συμπιεστής 2 (ακτινικός) 2.5-3:

$$\pi_{c2} = 3.19$$

$$P_{t3} = P_{t2.5} \pi_c$$

$$T_{t3} = T_{t2.5} \left[\left(\frac{\frac{\gamma\alpha - 1}{\pi_{c2}^{\gamma\alpha}} - 1}{\eta_{is,c1}} \right) + 1 \right]$$

Θάλαμος Καύσης 3-4:

Ισολογισμός θερμικής ισχύος

$$m_f H_u \eta_b + (m_a - m_{bl} - m_{ex}) C_{pa} (T_{t3} - T_{ref}) = (m_a - m_{bl} - m_{ex} + m_f) C_{pg} (T_{t4} - T_{ref}) \Rightarrow$$

$$T_{t4} = T_{ref} + \frac{m_f H_u \eta_b + (m_a - m_{bl} - m_{ex}) c_{pa} (T_{t3} - T_{ref})}{(m_a - m_{bl} - m_{ex} + m_f) c_{pg}}$$

Απώλειες πίεσης στο θάλαμο καύσης

$$P_{t4} = P_{t3}(1-k_b)$$

Όπου m_{bl} η παροχή απομάστευσης για την ψύξη του στροβίλου αεριογόνου και m_{ex} η παροχή αέρα που εξέρχεται από το σύστημα του κινητήρα.

Ισολογισμός Ισχύος στην Αεριογόνο:

Εισαγωγή αέρα ψύξης στη ροή στην είσοδο του στροβίλου αεριογόνου

$$T_{t4bl} = \frac{m_{bl}c_{p\alpha}T_{t3} + (m_{\alpha} - m_{ex} - m_{bl} + m_f)c_{pg}T_{t4}}{(m_{\alpha} - m_{ex} + m_f)c_{pg}}$$

$$P_C = P_{CT} \Rightarrow T_{t5} = T_{t4bl} - \frac{m_{\alpha}c_{p\alpha}(T_{t3} - T_{t2}) + P_{acc}}{\eta_m(m_{\alpha} - m_{ex} + m_f)c_{pg}}$$

Όπου P_{acc} η απομάστευση ισχύος για το κιβώτιο βοηθητικών συστημάτων (accessory gearbox).

Ισολογισμός Ισχύος στην ελεύθερη άτρακτο:

$$P_{\omega\phi} = \eta_m (m_{\alpha} - m_{ex} + m_f) c_{pg} (T_{t5} - T_{t6}) \Rightarrow T_{t6} = T_{t5} - \frac{P_{\omega\phi}}{\eta_m(m_{\alpha} - m_{ex} + m_f)c_{pg}}$$

Στρόβιλος αεριογόνου 4-5:

$$\pi_{CT} = \left[1 + \left(\frac{T_{t5}}{T_{t4}} - 1 \right) \frac{1}{\eta_{is,CT}} \right]^{\frac{\gamma_g}{\gamma_g - 1}}$$

$$P_{t5} = \frac{P_{t4}}{\pi_{CT}}$$

Στρόβιλος ισχύος 5-6:

$$\pi_{PT} = \left[1 + \left(\frac{T_{t6}}{T_{t5}} - 1 \right) \frac{1}{\eta_{is,PT}} \right]^{\frac{\gamma_g}{\gamma_g - 1}}$$

$$P_{t6} = \frac{P_{t5}}{\pi_{PT}}$$

Κατά την παραπάνω ανάλυση λαμβάνονται υπ'όψη οι απομαστεύσεις όπως εκείνες παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 2.5, με την διαφορά πως θεωρήθηκε ότι όλες οι απομαστεύσεις πραγματοποιούνται στην θέση 3. Ο όρος m_{bl} εκφράζει την παροχή

απομάστευσης για την ψύξη του στροβίλου αεριογόνου και ο όρος m_{ex} εκφράζει την παροχή αέρα που εξέρχεται από το σύστημα του κινητήρα.

Οι ολικές θερμοκρασίες και πιέσεις για την κάθε θέση του κινητήρα παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.17.

Πίνακας 2.17 : Ολική θερμοκρασία και πίεση σε κάθε θέση του κινητήρα

Θέση	Tt (K)	Pt (bar)
0	288.15	1.01
1	288.15	1.01
2	288.15	1.00
2.5	381.35	2.30
3	561.77	7.32
4	1451.54	7.10
5	1187.91	2.70
6	968.32	1.02

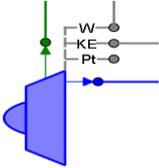
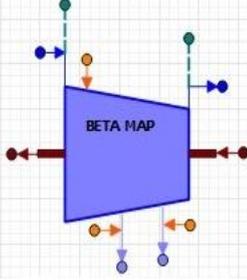
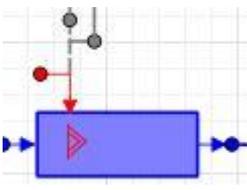
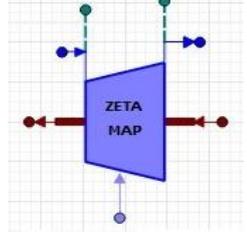
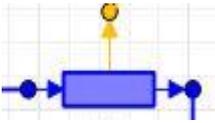
Οι παραπάνω υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν μέσω κώδικα σε FORTRAN 95. Από την παραπάνω ανάλυση προέκυψε μία πρώτη εκτίμηση για την λειτουργία του κινητήρα στο σημείο σχεδίασης. Τα αποτελέσματα του απλού θερμοδυναμικού μοντέλου της παρούσας παραγράφου, συγκρίνονται με εκείνα του μοντέλου στο PROOSIS, διαδικασία η οποία περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο.

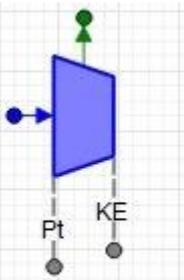
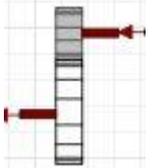
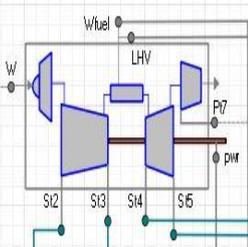
2.8 Ανάλυση σημείου σχεδίασης στο PROOSIS

Για πιο ακριβή μοντελοποίηση της μηχανής χρησιμοποιείται το περιβάλλον προγραμματισμού PROOSIS. Ο καθορισμός του σημείου σχεδίασης απαιτείται για την προσαρμογή των χαρτών των συνιστωσών, διαδικασία που περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο. Η μοντελοποίηση του κινητήρα με τη χρήση του PROOSIS γίνεται μέσω συνιστωσών, οι οποίες διενεργούν μία συγκεκριμένη λειτουργία. Η κάθε συνιστώσα περιγράφεται στον Πίνακα 2.18.

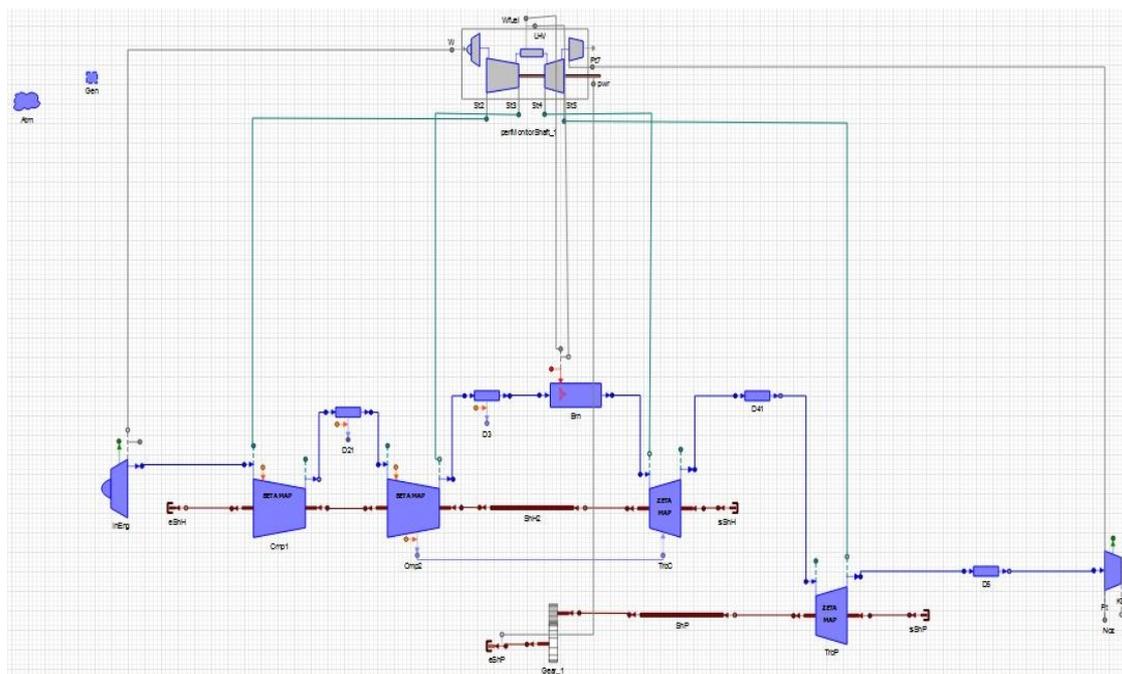
Πίνακας 2.18 : Συνιστώσες μοντέλου του κινητήρα στο PROOSIS^[6]

Εικονίδιο Συνιστώσας	Περιγραφή	Σχόλια
	<u>Γενική Συνιστώσα (General Component):</u> Καθορίζει το είδος του καυσίμου που περιέχεται στο καυσαέριο που διακινείται, καθώς και την θερμοδυναμική συμπεριφορά του.	Στο συγκεκριμένο μοντέλο καθώς πρόκειται για κινητήρα ελικοπτέρου επιλέχθηκε το στρατιωτικό καύσιμο JP4.

	<p><u>Ατμοσφαιρική Συνιστώσα (Atmosphere Component):</u> Καθορίζει τις ατμοσφαιρικές συνθήκες στην είσοδο της μηχανής.</p>	<p>Δέχεται τιμές για την θερμοκρασία και πίεση περιβάλλοντος, καθώς και για το υψόμετρο και τον αριθμό Mach της εξωτερικής ροής.</p>
	<p><u>Συνιστώσα Εισόδου (Inlet Component):</u> Συσχετίζει τις συνθήκες στην είσοδο της μηχανής με τις συνθήκες στην έξοδο του αγωγού εισόδου.</p>	<p>Στο παρόν μοντέλο ο λόγος απωλειών πίεσης ορίζεται από τον χρήστη.</p>
	<p><u>Συμπιεστής (Compressor BETA MAP):</u> Συσχετίζει τα μεγέθη εισόδου/ εξόδου του συμπιεστή καθώς και την ισχύ που καταναλώνεται μέσω της άτρακτου. Χρησιμοποιεί χάρτη λειτουργίας με γραμμές-β (BETA parameter) και διαθέτει 2 απομαστεύσεις.</p>	<p>Γίνεται χρήση συνιστώσας που χρησιμοποιεί χάρτη ώστε στη συνέχεια να υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμών για σημεία λειτουργίας εκτός του σημείου σχεδίασης, ενώ ο χάρτης προσαρμόζεται με βάση το σημείο σχεδίασης.</p>
	<p><u>Θάλαμος καύσης (Burner):</u> Συσχετίζει τα μεγέθη εισόδου της ροής στο θάλαμο καύσης με τα μεγέθη εξόδου από αυτόν.</p>	<p>Στο συγκεκριμένο μοντέλο, οι απώλειες πίεσης και ο βαθμός απόδοσης καύσης στο σημείο σχεδίασης δίνονται από το χρήστη. Στη λειτουργία εκτός σημείου σχεδίασης τα μεγέθη αυτά μεταβάλλονται με βάση την παροχή εισόδου στο θάλαμο καύσης.</p>
	<p><u>Στρόβιλος (Turbine ZETA MAP):</u> Συσχετίζει τα μεγέθη εισόδου/ εξόδου από το στρόβιλο καθώς και την ισχύ που αποδίδεται στην άτρακτο. Χρησιμοποιεί χάρτη με γραμμές-β (ZETA parameter).</p>	<p>Γίνεται χρήση συνιστώσας που χρησιμοποιεί χάρτη ώστε στη συνέχεια να υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμών για σημεία λειτουργίας εκτός του σημείου σχεδίασης, ενώ ο χάρτης προσαρμόζεται με βάση το σημείο σχεδίασης.</p>
	<p><u>Αγωγός (Duct):</u> Συσχετίζει τα μεγέθη στην είσοδο και έξοδο κάθε αγωγού με βάση κάποιο μοντέλο ροής. Μπορεί να εμπεριέχει και κανάλι για απομάστευση ρευστού.</p>	<p>Στο σημείο σχεδίασης οι απώλειες πίεσης των αγωγών επιλέγονται από το χρήστη και είναι σταθερές. Για τα εκτός σχεδίασης σημεία λειτουργίας οι απώλειες πίεσης λαμβάνονται ως μεταβαλλόμενες.</p>

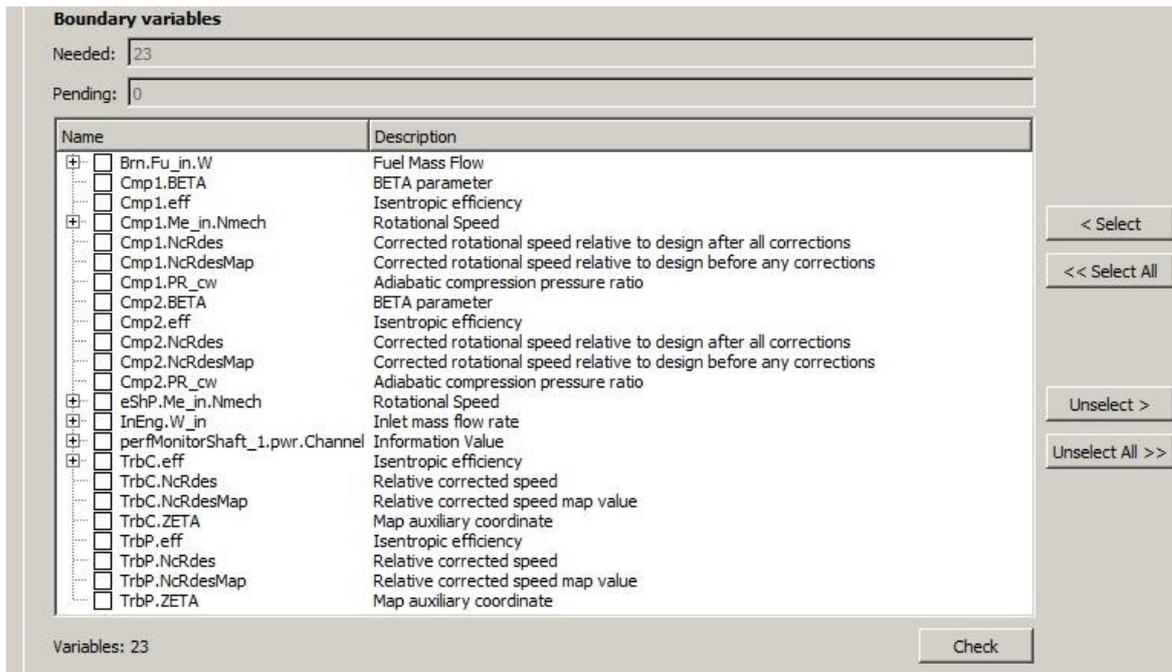
	<p><u>Ακροφύσιο (Nozzle Component):</u> Συσχετίζει τα μεγέθη της ροής από την τελευταία βαθμίδα του στροβίλου ισχύος μέχρι την έξοδο της μηχανής.</p>	<p>Στο συγκεκριμένο μοντέλο το εμβαδό εξόδου προκύπτει από τον υπολογισμό στο σημείο σχεδίασης και δεν λαμβάνεται ως δεδομένο.</p>
	<p><u>Άξονας (Shaft):</u> Υπολογίζει την ροπή της ατράκτου για δεδομένη ταχύτητα περιστροφής. Ως συνιστώσα επιδέχεται και απομάστευση ισχύος.</p>	<p>Στο παρόν μοντέλο χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση των ατράκτων της αεριογόνου και της ατράκτου του στροβίλου ισχύος. Επιλέγεται οι υπολογισμοί να γίνονται για σταθερές στροφές (steady calculation).</p>
	<p><u>Μειωτήρας στροφών (Gear box):</u> Μεταφέρει την ισχύ από άτρακτο σε άτρακτο με ταυτόχρονο υπολογισμό της μείωσης των στροφών με βάση τη σχέση μετάδοσης.</p>	<p>Στο παρόν μοντέλο μεταφέρει την ισχύ από την άτρακτο του στροβίλου ισχύος στην άτρακτο εξόδου της μηχανής.</p>
	<p><u>Συνιστώσα επιδόσεων (Performance Component):</u> Η συγκεκριμένη συνιστώσα συνδέεται με τις υπόλοιπες συνιστώσες και αποκομίζει απαραίτητες πληροφορίες από αυτές μέσω θυρών (info ports), για τον υπολογισμό συνολικών επιδόσεων της μηχανής.</p>	<p>Υπολογίζει μεγέθη όπως ο συνολικός λόγος συμπίεσης (OPR), η κατανάλωση καυσίμου (SFC) και η καθαρή παραγόμενη ισχύς (PWSD) που παράγεται από τη μηχανή.</p>

Το πρώτο βήμα για την κατασκευή του μοντέλου του κινητήρα στο PROOSIS είναι η δημιουργία του σχηματικού (schematic). Πρόκειται για το φυσικό μοντέλο του κινητήρα, δηλαδή τη φυσική συνεργασία μεταξύ όλων των συνιστωσών του κινητήρα, η οποία δηλώνεται με την κατάλληλη σύνδεση των συνιστωσών μέσω των εικονιδίων που παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 2.18. Το σχηματικό του κινητήρα παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7 : Σχηματικό του κινητήρα PT6T-6 στο PROOSIS

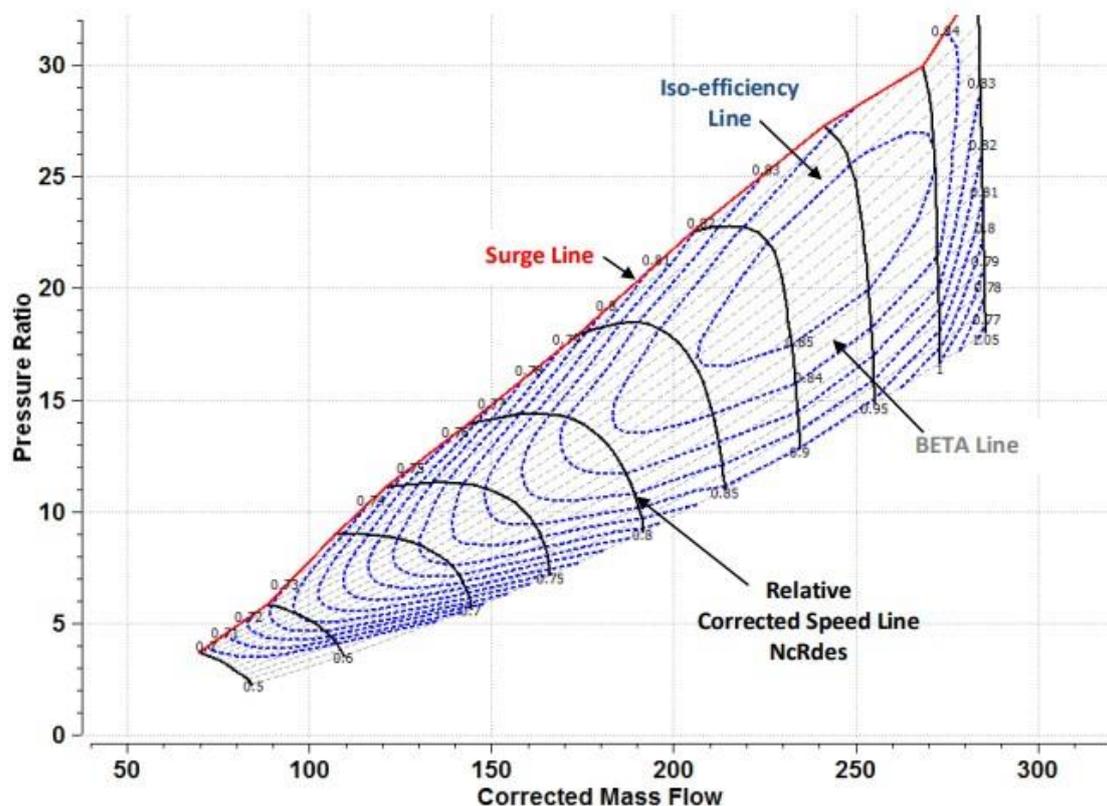
Το επόμενο βήμα για την ολοκλήρωση του μοντέλου είναι ο ορισμός του μαθηματικού μοντέλου, δηλαδή η επιλογή των οριακών μεταβλητών που απαιτούνται για την επίλυση του μαθηματικού συστήματος του κινητήρα. Η επιλογή των οριακών μεταβλητών, οι οποίες μπορεί να είναι η παροχή καυσίμου, παραγόμενη ισχύς ή η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου ισχύος, γίνεται από τον χρήστη, ανάλογα με τα δεδομένα που έχει στη διάθεση του. Επίσης μπορούν να οριστούν επιπρόσθετοι άγνωστοι με την απαίτηση, όμως, επιπρόσθετων δεδομένων. Για παράδειγμα, για τον υπολογισμό του εμβαδού εξόδου απαιτείται ως επιπλέον δεδομένο η παροχή αέρα στην είσοδο του κινητήρα. Η προαναφερθείσα δήλωση μεταβλητών για το μοντέλο του κινητήρα PT6T-6 φαίνεται στο Σχήμα 2.8, ενώ οι επιπρόσθετοι άγνωστοι παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.11.



Σχήμα 2.8 : Δήλωση οριακών μεταβλητών για υπολογισμό στο σημείο σχεδίασης

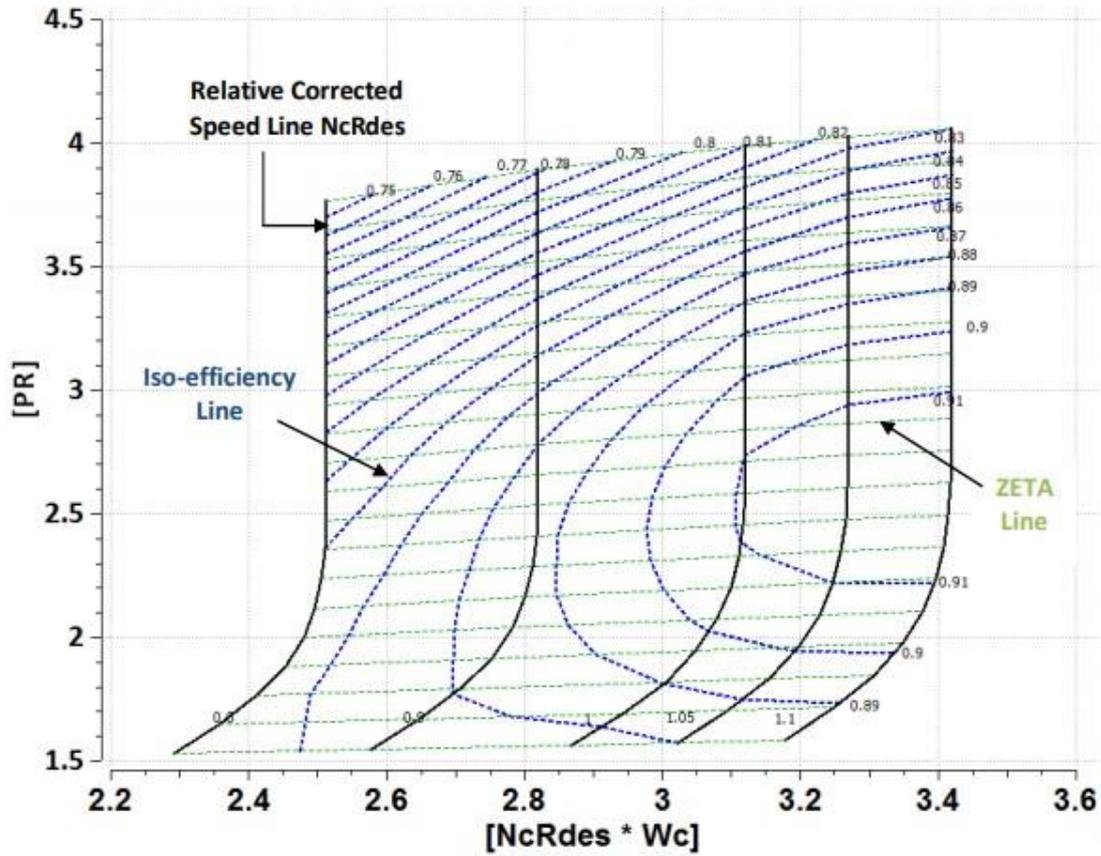
Ως οριακές μεταβλητές επιλέγονται οι τιμές BETA για τους συμπιεστές, οι τιμές ZETA για τους στροβίλους, επίσης οι γωνιακές ταχύτητες των δύο ατράκτων, οι ισηντροπικοί βαθμοί απόδοσης των συνιστωσών, οι λόγοι πίεσης των συμπιεστών, η παροχή καυσίμου, η παραγόμενη ισχύς στο σημείο λειτουργίας που λαμβάνεται ως το σημείο σχεδίασης και τέλος, οι παράμετροι των χαρτών, NcRdes και NcRdesMap. Η μεταβλητή NcRdes αναφέρεται στην πραγματική λειτουργία των συνιστωσών, ενώ τα ζεύγη μεταβλητών BETA, NcRdesMap και ZETA, NcRdesMap ορίζουν την θέση του σημείου λειτουργίας στους χάρτες των συμπιεστών και των στροβίλων αντίστοιχα.

Ο ορισμός των παραπάνω μεταβλητών γίνεται με χρήση των χαρτών των συνιστωσών που χρησιμοποιούνται από το PROOSIS. Στο Σχήμα 2.9 παρουσιάζεται ο χάρτης για συμπιεστή υψηλού λόγου πίεσης, όπου στους καθέτους άξονες περιγράφονται ο λόγος πίεσης και η ανηγμένη παροχή, ενώ επίσης διακρίνονται και οι ισοϋψείς καμπύλες (μαύρες καμπύλες) των ανηγμένων στροφών αναφορικά με τις ανηγμένες στροφές στο σημείο σχεδίασης (μεταβλητή NcRdesmap) και της μεταβλητής BETA (γκρι καμπύλες) με σύνολο τιμών στο διάστημα [0,1]. Το τελευταίο μέγεθος περιγράφει την απόσταση από το όριο της ασταθούς λειτουργίας και συγκεκριμένα όσο μεγαλύτερη η τιμή της μεταβλητής, τόσο πιο κοντά στην ασταθή λειτουργία βρίσκεται το σημείο λειτουργίας.



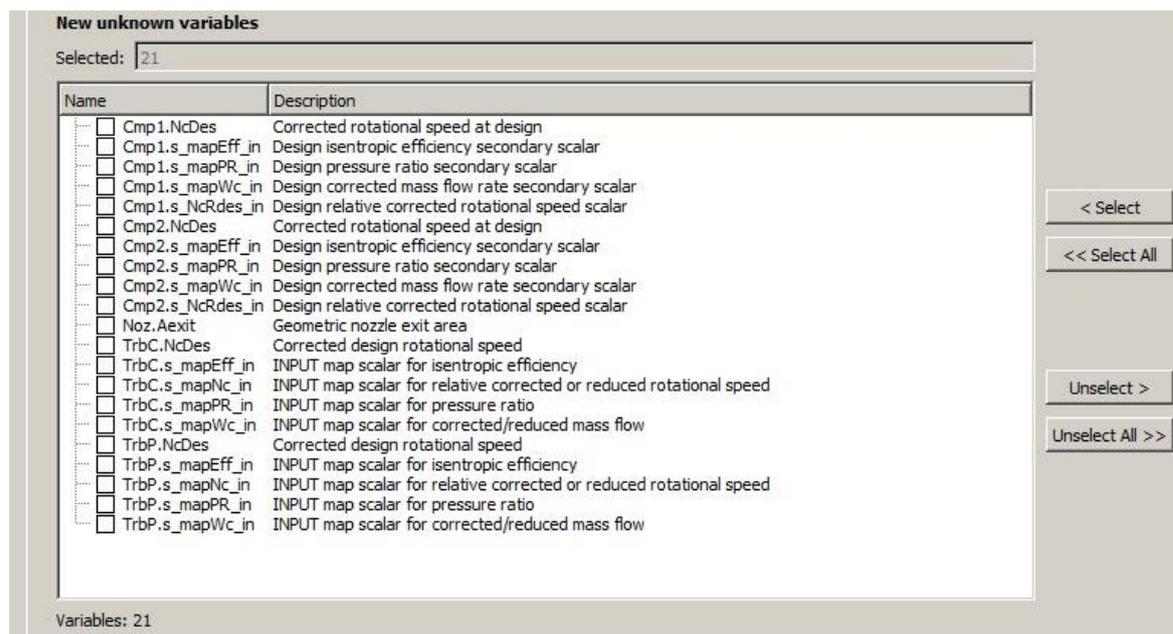
Σχήμα 2.9 : Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή με χρήση της μεταβλητής BETA^[7]

Η χρήση της μεταβλητής BETA δικαιολογείται από τη μορφή των isoψώνων καμπυλών της ανηγμένης ταχύτητας περιστροφής στις οποίες παρατηρείται ο στραγγαλισμός της ροής, δηλαδή οι καμπύλες γίνονται κάθετες στον άξονα της ανηγμένης παροχής. Επειδή το παραπάνω γεγονός δυσκολεύει τη διακριτοποίηση των σημείων λειτουργίας σε αυτές τις περιοχές και επιθυμείται ο ορισμός του σημείου λειτουργίας να γίνεται με τον ίδιο τρόπο και για τα κατακόρυφα και για τα οριζόντια τμήματα των χαρακτηριστικών, η χρήση της μεταβλητής BETA φαίνεται επιτακτική. Ο ορισμός των σημείων λειτουργίας του συμπιεστή πάνω στον χάρτη, πλέον γίνεται με τον ορισμό τιμών δύο ανεξάρτητων μεγεθών, της μεταβλητής BETA και της μεταβλητής $NcRdesmap$. Με βάση, λοιπόν, τα ζεύγη τιμών των παραπάνω μεταβλητών πινακοποιούνται ο λόγος πίεσης, η ανηγμένη παροχή και ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης. Αντίστοιχα για τους στροβίλους υιοθετείται η μεταβλητή ZETA και ο αντίστοιχος χάρτης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.10.



Σχήμα 2.10 : Χάρτης λειτουργίας στροβίλου με χρήση της μεταβλητής ZETA^[7]

Στο Σχήμα 2.11 φαίνεται η απαίτηση για υπολογισμό (ανανέωση) των συντελεστών κλίμακας όλων των χαρτών (map scaling factors) για κάθε συνιστώσα, δηλαδή δήλωση των παραπάνω συντελεστών ως επιπρόσθετους αγνώστους. Επίσης και το εμβαδό εξόδου του ακροφυσίου δηλώνεται ως επιπρόσθετη μεταβλητή. Για την κάθε συνιστώσα οι συντελεστές κλίμακας των χαρτών αφορούν τον λόγο πίεσης, την διορθωμένη παροχή, τον ισηντροπικό βαθμό απόδοσης τις διορθωμένες στροφές ανηγμένες ως προς τις αντίστοιχες του σημείου σχεδίασης και τις διορθωμένες στροφές στο σημείο σχεδίασης. Τα παραπάνω μεγέθη αντιστοιχούν στους συμβολισμούς s_{mapPR} , s_{mapWc} , s_{mapEff} , s_{NcRdes} , $NcDes$ (βλέπε Π1). Οι παραπάνω υπολογισμοί έχουν ως στόχο την προσαρμογή των χαρτών των συνιστωσών που διαθέτει το PROOSIS αναφορικά με το σημείο σχεδίασης που δηλώνεται, δηλαδή επιχειρείται οι τιμές των μεγεθών των χαρτών να αντιστοιχούν σε αυτές που δηλώνονται από τον χρήστη (για παράδειγμα οι τιμές των λόγων πίεσης και των ισηντροπικών βαθμών απόδοσης).

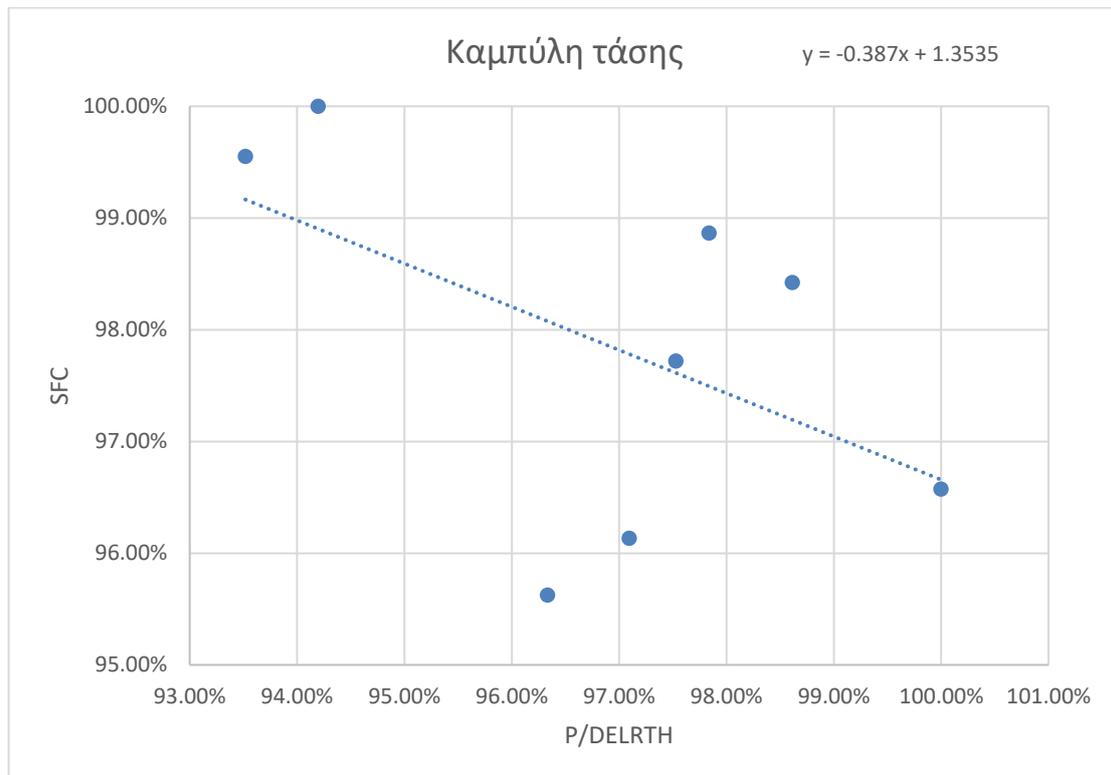


Σχήμα 2.11 : Δήλωση επιπρόσθετων μεταβλητών προς υπολογισμό

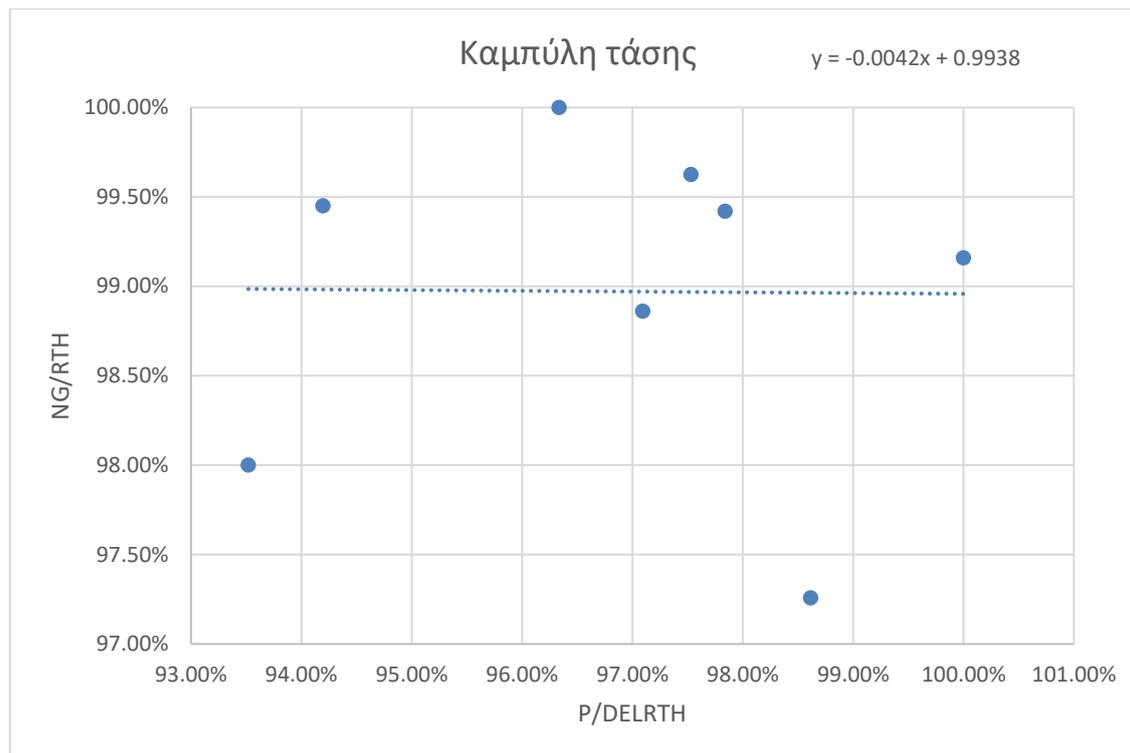
Τέλος, για την ολοκλήρωση του μαθηματικού συστήματος απαιτούνται τιμές για τις οριακές μεταβλητές, των οποίων ο ορισμός παρουσιάστηκε στο Σχήμα 2.8. Ένα παράδειγμα ορισμού τιμών για τα παραπάνω μεγέθη φαίνεται στο Σχήμα 2.12. Οι τιμές της παροχής καυσίμου και της ταχύτητας περιστροφής της ατράκτου αεριογόνου προέκυψαν σύμφωνα με την καμπύλη τάσης, η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.13 και στο Σχήμα 2.14, για όλα τα σημεία λειτουργίας, που ήταν διαθέσιμα από το εργαστήριο, διαφορετικών μηχανών, τα οποία προσεγγίζουν την λειτουργία του κινητήρα στο πλήρες φορτίο. Παρ' όλο που το πλήθος των σημείων δεν είναι επαρκές, έγινε η παραδοχή πως στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι αποδεκτό να θεωρηθεί πως τα παραπάνω σημεία λειτουργίας κατανέμονται περί μίας γραμμικής καμπύλης τάσης. Στο Σχήμα 2.13 φαίνεται η σχέση μεταξύ της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου και της διορθωμένης παραγόμενης ισχύος ατράκτου, ενώ στο Σχήμα 2.14 παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ της διορθωμένης ταχύτητας περιστροφής ατράκτου αεριογόνου και της διορθωμένης παραγόμενης ισχύος ατράκτου ως ποσοστά των μεγίστων τιμών. Επισημαίνεται πως το μέγεθος $\delta\sqrt{\theta}$ συμβολίζεται ως DELRTH, ενώ το μέγεθος $\sqrt{\theta}$ συμβολίζεται ως RTH, όπου $\theta = T_0/T_{REF}$ και $\delta = P_0/P_{REF}$ με $T_{REF} = 288.15$ K και $P_{REF} = 101325$ Pa. Η επιλογή των τιμών έγινε για παραγωγή ισχύος ατράκτου 723.33 kW (970 shp). Με αυτόν τον τρόπο επιχειρείται η προσαρμογή του μοντέλου σε μία 'μέση' μηχανή.

Set boundary conditions, initialize variables and configure non-linear boxes				
Set boundary values				
	Name	Value	Units	Description
1	Brn.Fu_in.W	0.072	kg/s	Fuel Mass Flow
2	Cmp1.BETA	0.55	-	BETA parameter
3	Cmp1.Me_in.Nmech	37940	rpm	Rotational Speed
4	Cmp1.NcRdes	1	-	Corrected rotational speed relative to design after all corrections
5	Cmp1.NcRdesMap	0.9	-	Corrected rotational speed relative to design before any corrections
6	Cmp1.PR_cw	2.29	-	Adiabatic compression pressure ratio
7	Cmp1.eff	0.8258	-	Isentropic efficiency
8	Cmp2.BETA	0.5	-	BETA parameter
9	Cmp2.NcRdes	1	-	Corrected rotational speed relative to design after all corrections
10	Cmp2.NcRdesMap	0.95	-	Corrected rotational speed relative to design before any corrections
11	Cmp2.PR_cw	3.19	-	Adiabatic compression pressure ratio
12	Cmp2.eff	0.83	-	Isentropic efficiency
13	InEng.W_in	3	kg/s	Inlet mass flow rate
14	TrbC.NcRdes	1	-	Relative corrected speed
15	TrbC.NcRdesMap	1	-	Relative corrected speed map value
16	TrbC.ZETA	0.5	-	Map auxiliary coordinate
17	TrbC.eff	0.85	-	Isentropic efficiency
18	TrbP.NcRdes	1	-	Relative corrected speed
19	TrbP.NcRdesMap	0.95	-	Relative corrected speed map value
20	TrbP.ZETA	0.75	-	Map auxiliary coordinate
21	TrbP.eff	0.864	-	Isentropic efficiency
22	eShP.Me_in.Nmech	6600	rpm	Rotational Speed
23	perfMonitorShaft_1.pwr.Channel	723330	W	Information Value

Σχήμα 2.12 : Ορισμός τιμών των οριακών μεταβλητών



Σχήμα 2.13 : Καμπύλη τάσης για την ειδική κατανάλωση καυσίμου σχετικά με την διορθωμένη ισχύ



Σχήμα 2.14 : Καμπύλη τάσης για την διορθωμένη ταχύτητα περιστροφής ατράκτου σχετικά με την διορθωμένη ισχύ

2.9 Ανάλυση λειτουργίας στο σημείο σχεδίασης

Μετά τον ορισμό του μαθηματικού συστήματος και των τιμών των οριακών μεταβλητών, ακολουθεί η επίλυση του συστήματος, η οποία οδηγεί στον υπολογισμό όλων των μεγεθών σε όλες τις θέσεις του κινητήρα, τα οποία αφορούν την λειτουργία του στο σημείο σχεδίασης. Τα αποτελέσματα των παραπάνω υπολογισμών παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.19 , όπου παρουσιάζονται οι ολικές θερμοκρασίες και πιέσεις σε κάθε θέση του κινητήρα, ενώ στον Πίνακα 2.20 φαίνονται οι αποκλίσεις των αποτελεσμάτων του απλού θερμοδυναμικού μοντέλου που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 2.7 από τα αποτελέσματα του περιβάλλοντος προγραμματισμού PROOSIS.

Πίνακας 2.19 : Αποτελέσματα PROOSIS για ολικές θερμοκρασίες και πιέσεις

Θέση	Tt (K)	Pt (bar)
0	288.15	1.01
1	288.15	1.01
2	288.15	1.00
2.5	381.09	2.30

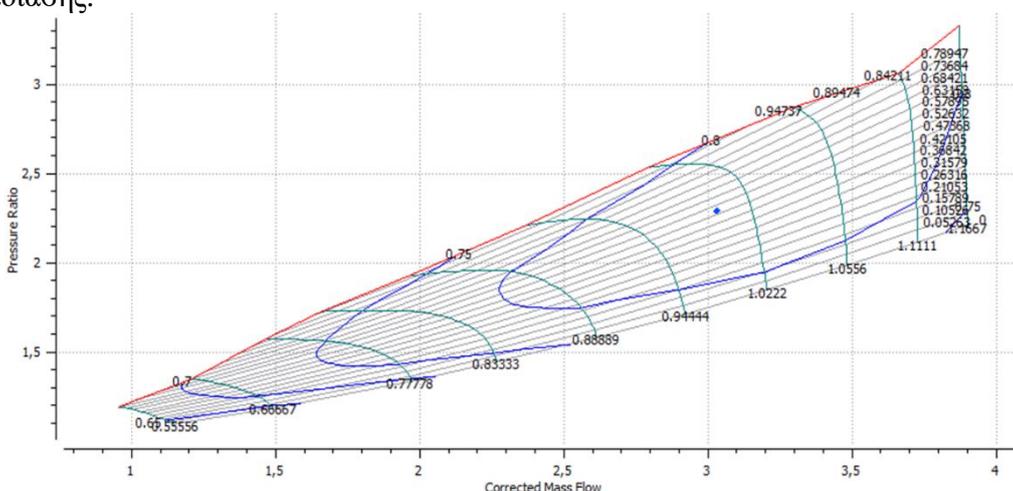
3	557.62	7.33
4	1449.24	6.97
5	1208.87	2.69
6	996.72	1.03

Πίνακας 2.20 : Αποκλίσεις απλού μοντέλου από μοντέλο PROOSIS

Θέση	ΔTt	ΔPt
0	0.00%	0.00%
1	0.00%	0.00%
2	0.00%	0.31%
2.5	0.07%	-0.12%
3	0.74%	-0.10%
4	0.16%	1.91%
5	-1.73%	0.22%
6	-2.85%	-0.81%

Οι αποκλίσεις που παρατηρούνται οφείλονται στην μεγαλύτερη ανάλυση των απωλειών ολικής πίεσης εντός των αγωγών, καθώς και στο γεγονός πως το μοντέλο του PROOSIS χρησιμοποιεί μεταβλητές ιδιότητες του εργαζομένου μέσου. Παρ'όλο που τα δύο μοντέλα δεν αποκλίνουν πολύ (αποκλίσεις μικρότερες του 3%), το απλό θερμοδυναμικό μοντέλο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσομοιώσει την off design λειτουργία του κινητήρα, διαδικασία που παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο με χρήση του μοντέλου στο PROOSIS.

Ακόμα, στο Σχήμα 2.15 παρουσιάζεται το σημείο λειτουργίας του κινητήρα στον προσαρμοσμένο πλέον χάρτη του αξονικού συμπιεστή βάσει του δηλωθέντος σημείου σχεδίασης.

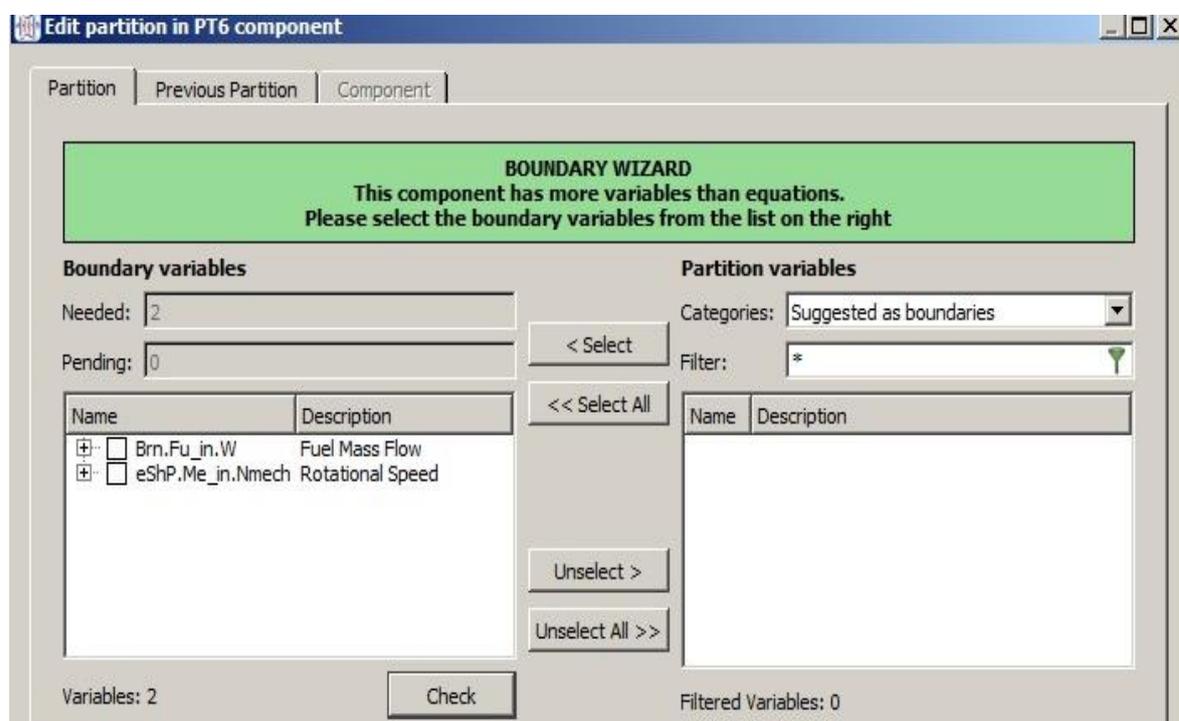


Σχήμα 2.15 : Αποτύπωση του σημείου σχεδίασης στον χάρτη του αξονικού συμπιεστή

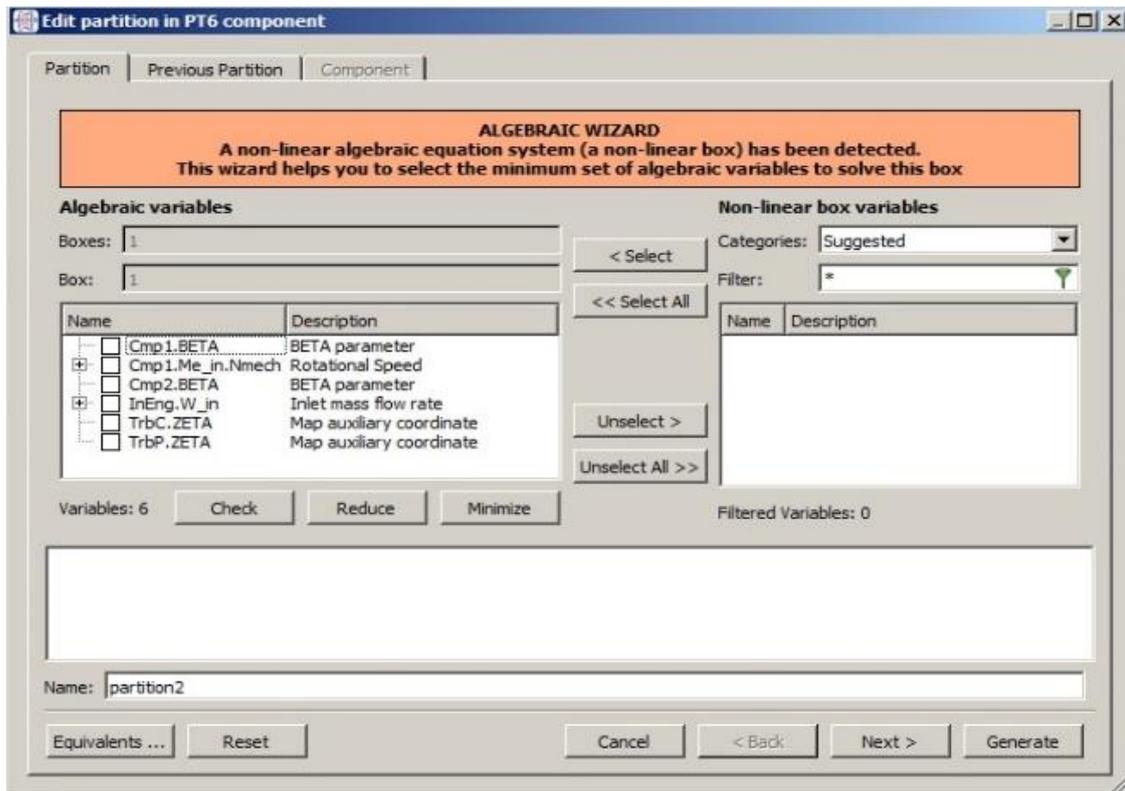
2.10 Ανάλυση λειτουργίας εκτός σημείου σχεδίασης

Μετά την προσαρμογή των αρχικών χαρτών των συνιστωσών που διαθέτει το PROOSIS βάσει του σημείου λειτουργίας που εισάγεται από τον χρήστη ως το σημείο σχεδίασης, είναι δυνατή η ανάλυση λειτουργίας του κινητήρα για σημεία εκτός σχεδίασης. Το σύστημα των εξισώσεων σε αυτή την περίπτωση απαιτεί λιγότερες οριακές μεταβλητές για την επίλυση του, συγκριτικά με όσες απαιτούνται για τον υπολογισμό του σημείου σχεδίασης. Αυτό συμβαίνει, γιατί τίθενται στη διάθεση του συστήματος οι ήδη προσαρμοσμένοι χάρτες της κάθε συνιστώσας.

Στο Σχήμα 2.16 φαίνεται η δήλωση των στροφών της ατράκτου ισχύος και της παροχής του καυσίμου ως οριακές μεταβλητές, ενώ στο Σχήμα 2.17 παρουσιάζονται οι βοηθητικές μεταβλητές ή διαφορετικά αλγεβρικές μεταβλητές (algebraic variables) που απαιτούνται για την επίλυση του μη γραμμικού συστήματος που προκύπτει.



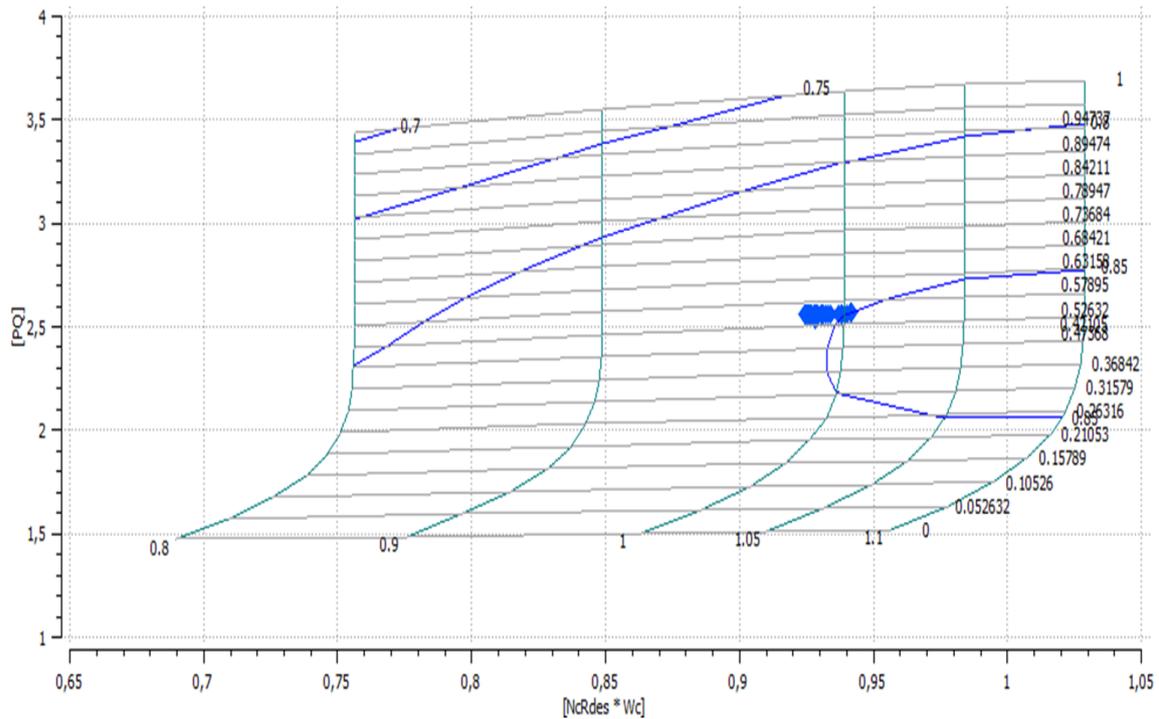
Σχήμα 2.16 : Οριακές μεταβλητές για την off-design λειτουργία του κινητήρα



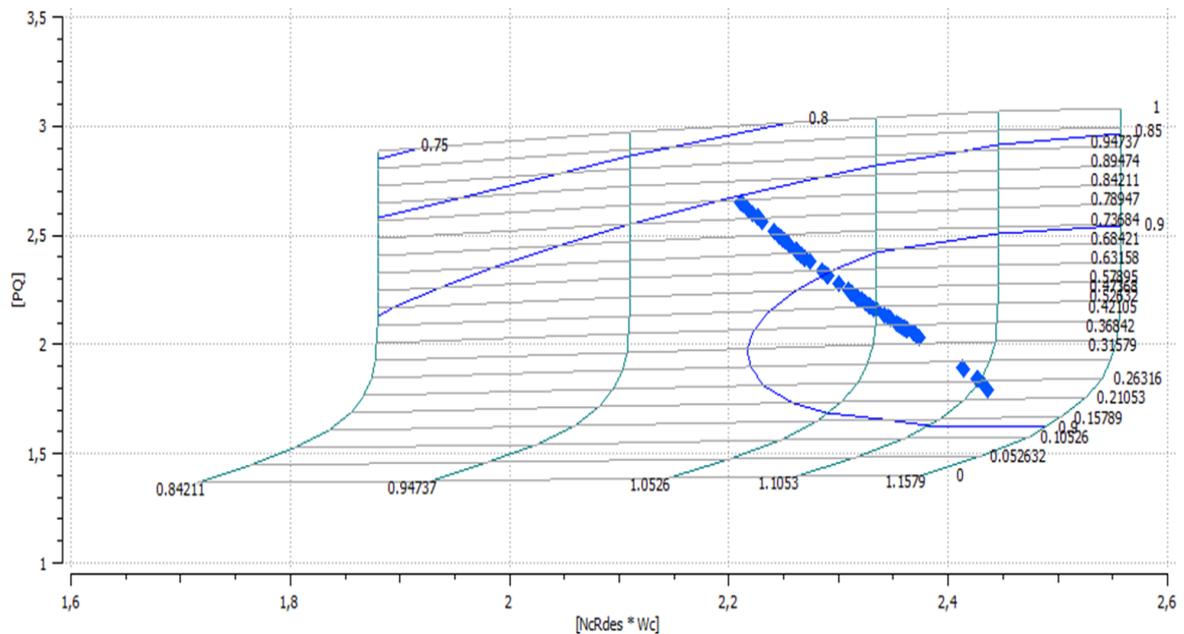
Σχήμα 2.17 : Αλγεβρικές μεταβλητές για την επίλυση του μη γραμμικού συστήματος

Έχοντας διαθέσιμες μετρήσεις του ΕΘΣ για πολλές μηχανές με σταθερή την ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου εξόδου, επιχειρείται η προσομοίωση της λειτουργίας της μηχανής μέσω του μοντέλου βάσει των παραπάνω μετρήσεων με σκοπό τον έλεγχο των αποκλίσεων των μεγεθών που προκύπτουν μέσω των υπολογισμών με το πρόγραμμα PROOSIS από τις τιμές των μετρήσεων. Πιο συγκεκριμένα εξετάζεται η απόκλιση της παραγόμενης ισχύος και της ταχύτητας περιστροφής της αεριογόνου από τις τιμές των μετρήσεων για σταθερή ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου ισχύος 33000 rpm και μεταβάλλοντας την παροχή καυσίμου. Μέσω της παραπάνω διαδικασίας ελέγχεται αν το μοντέλο αντιπροσωπεύει την λειτουργία μίας ‘μέσης’ μηχανής, αφού οι μετρήσεις προέρχονται από διαφορετικές μηχανές.

Στα σχήματα 3.11 μέχρι 3.14 φαίνεται η γραμμή λειτουργίας, όπως εκείνη αναλύθηκε παραπάνω, αποτυπωμένη στους χάρτες των τεσσάρων συνιστωσών του κινητήρα. Επισημαίνεται πως τα παρακάτω αποτελέσματα προέκυψαν από διερεύνηση σχετικά την τοποθέτηση του σημείου σχεδίασης στους χάρτες του PROOSIS (μεταβλητές BETA και NcRdesmap) πριν αυτοί προσαρμοστούν, η οποία οδήγησε στις αποκλίσεις από τις μετρήσεις που αναπαρίστανται με την μπλε καμπύλη στο Σχήμα 2.24 και στο Σχήμα 2.25. Όπως έχει προαναφερθεί, η τοποθέτηση ενός σημείου λειτουργίας στους χάρτες καθορίζεται από τις τιμές των μεγεθών BETA και NcRdesmap της κάθε συνιστώσας και οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.12.



Σχήμα 2.20 : Αποτύπωση γραμμής λειτουργίας στον χάρτη του στροβίλου αεριογόνου



Σχήμα 2.21 : Αποτύπωση γραμμής λειτουργίας στον χάρτη του στροβίλου ισχύος

Τέλος, πραγματοποιήθηκε διερεύνηση αναφορικά με την τοποθέτηση του σημείου σχεδίασης στον χάρτη του αξονικού συμπιεστή. Στο Σχήμα 2.22 και στο Σχήμα 2.23 παρουσιάζονται οι αποκλίσεις της ταχύτητας περιστροφής της αεριογόνου και της ισχύος, αντίστοιχα, από τις μετρήσεις του δοκιμαστηρίου για δύο διαφορετικά ζεύγη τιμών BETA και NcRdesmap. Η διερεύνηση οδήγησε στην επιλογή των τιμών 0.55 και 0.9, για τις μεταβλητές BETA και NcRdesmap αντίστοιχα. Μετά την κατάλληλη

τοποθέτηση του σημείου σχεδίασης, όπου παρατηρούνται μικρές αποκλίσεις από τις μετρήσεις της ισχύος και της ταχύτητας περιστροφής της αεριογόνου, ακολούθησε και τροποποίηση του χάρτη του αξονικού συμπιεστή αναφορικά με τις ισοταχείς καμπύλες των ανηγμένων στροφών που έχουν αδιαστατοποιηθεί με τις αντίστοιχες στο σημείο σχεδίασης (μεταβλητή $NcRdesmap$) με στόχο την μείωση των αποκλίσεων των αποτελεσμάτων από τα δεδομένα του δοκιμαστηρίου για ένα εύρος σημείων λειτουργίας. Συγκεκριμένα στην καμπύλη 0.90 δόθηκε η τιμή 0.92.

Στο Σχήμα 2.24 και στο Σχήμα 2.25 φαίνονται οι εκατοστιαίες αποκλίσεις, πριν και μετά την τροποποίηση του χάρτη του αξονικού συμπιεστή, των αποτελεσμάτων από τις μετρήσεις της ταχύτητας περιστροφής της αεριογόνου και της παραγόμενης ισχύος αντίστοιχα για το κάθε σημείο λειτουργίας, οι οποίες υπολογίζονται από την παρακάτω σχέση.

$$DELTA = \left(\frac{TιμήPROOSIS - TιμήΜέτρηση}{TιμήΜέτρηση} \right) * 100\%$$

Επειδή οι πληροφορίες που παρέχουν οι μετρήσεις αφορούν διορθωμένα (ή ανηγμένα) μεγέθη σχετικά με τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, επιλέγεται οι υπολογισμοί του μοντέλου να πραγματοποιηθούν για συνθήκες τυπικής ημέρας ($\theta=1$ και $\delta=1$), όπου τα διορθωμένα και τα πραγματικά μεγέθη λαμβάνουν την ίδια τιμή. Οι διορθωμένες μεταβλητές χρησιμοποιούνται, επειδή οι ατμοσφαιρικές συνθήκες ποικίλουν από δοκιμή σε δοκιμή με αποτέλεσμα οι μετρήσεις του κινητήρα να μην είναι άμεσα συγκρίσιμες. Πραγματοποιείται, λοιπόν, αναγωγή των μετρήσεων σε συνθήκες τυπικής ημέρας. Η αναγωγή για το κάθε μέγεθος είναι διαφορετική και έχει προκύψει από ανάλυση της λειτουργίας στροβιλομηχανών, η οποία δείχνει πως η λειτουργία ενός κινητήρα καθορίζεται και από τις ανηγμένες (ή διορθωμένες) παραμέτρους^[4]. Η αναγωγή για το κάθε μέγεθος λειτουργίας παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.21.

Πίνακας 2.21 : Αναγωγή μεγεθών

Μέγεθος	Σχέση Αναγωγής
Πίεση	$\frac{Pt}{\delta}$
Θερμοκρασία	$\frac{Tt}{\theta}$
Ταχύτητα Περιστροφής	$\frac{N}{\sqrt{\theta}}$
Παροχή Μάζας Ρευστού	$\frac{m\sqrt{\theta}}{\delta}$
Παροχή Μάζας Καυσίμου	$\frac{m}{\delta\sqrt{\theta}}$
Ισχύς	$\frac{P}{\delta\sqrt{\theta}}$

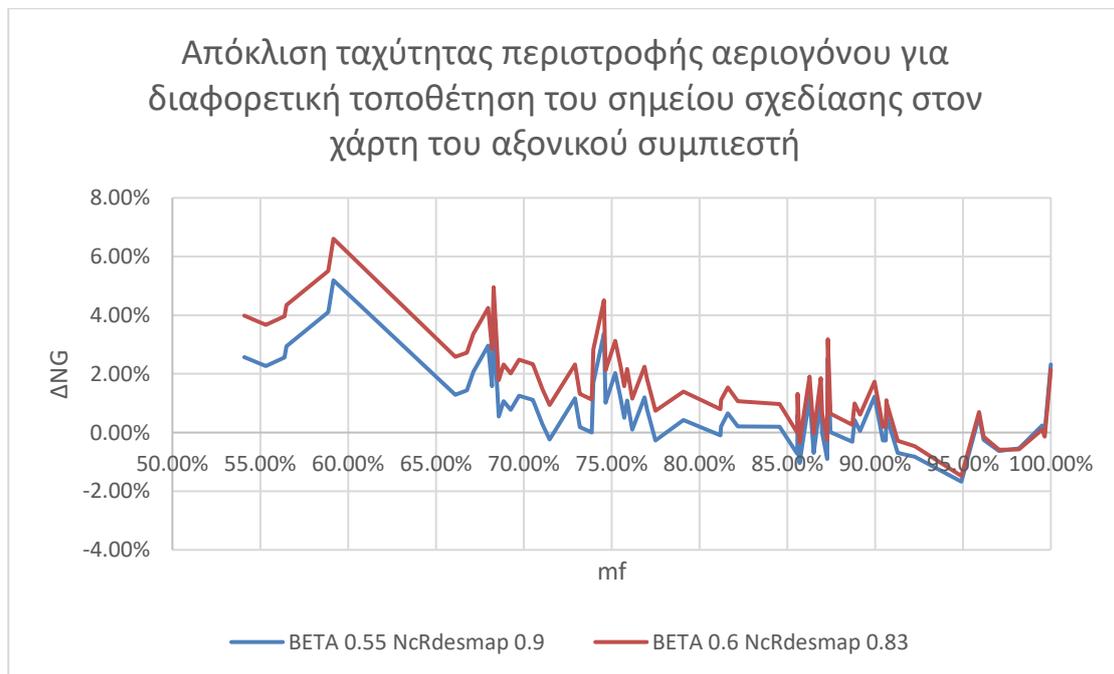
Για την αναγωγή χρησιμοποιούνται τα μεγέθη δ και θ , των οποίων ο ορισμός παρουσιάζεται παρακάτω.

$$\delta = \frac{P_{tin}}{P_{ref}}$$

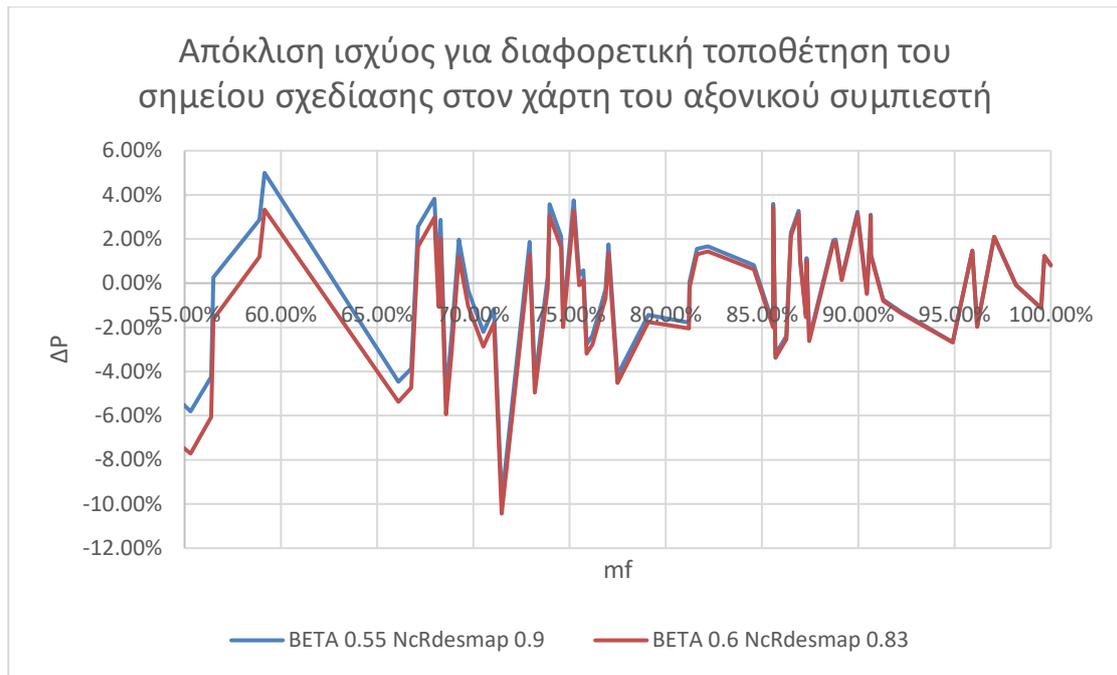
$$\theta = \frac{T_{tin}}{T_{ref}}$$

Βάσει των παραπάνω ορισμών φαίνεται πως οι ανηγμένες μεταβλητές που παρουσιάστηκαν παραπάνω είναι ίσες με τα πραγματικά μεγέθη του συστήματος του κινητήρα μόνο όταν οι συνθήκες εισόδου είναι αυτές της τυπικής ημέρας

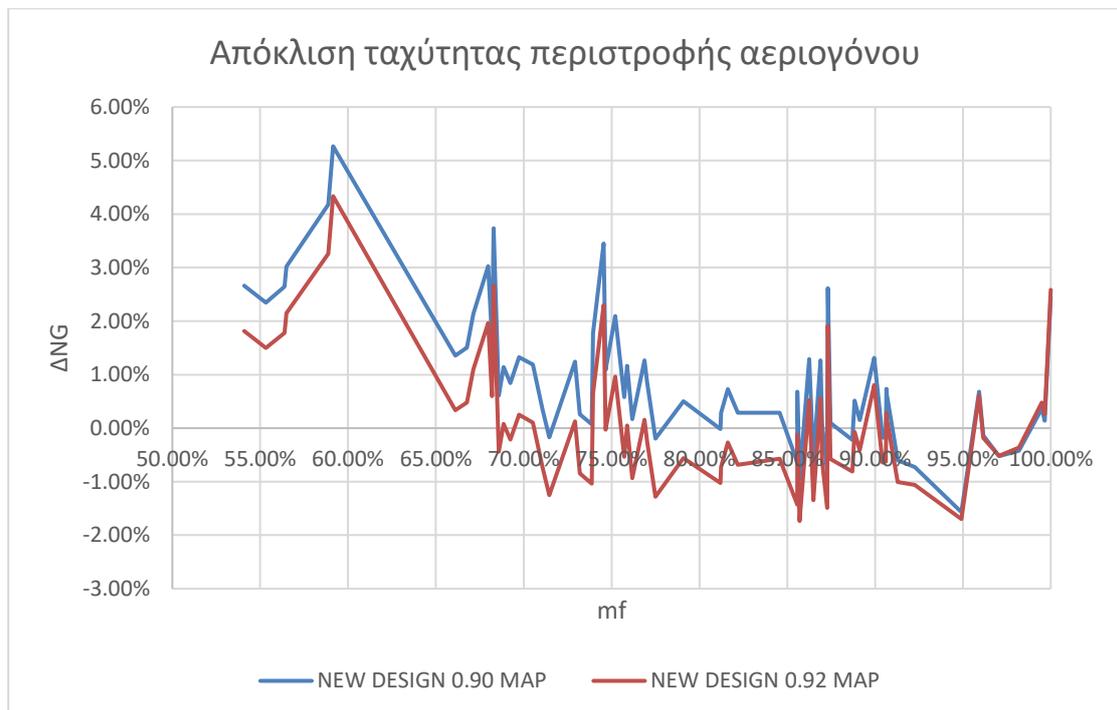
Συγκεκριμένα, για έναν κινητήρα που εξάγει ισχύ ατράκτου (turboshaft) η λειτουργία του καθορίζεται πλήρως από δύο ανηγμένα μεγέθη ανεξαρτήτως των συνθηκών περιβάλλοντος, για παράδειγμα με δεδομένες τιμές για την ανηγμένη παροχή καυσίμου $m_f / \delta\sqrt{\theta}$ και την ανηγμένη ταχύτητα περιστροφής ατράκτου $N / \sqrt{\theta}$, όλα τα υπόλοιπα ανηγμένα μεγέθη καθορίζονται, όπως αναλύεται στην επόμενη παράγραφο.



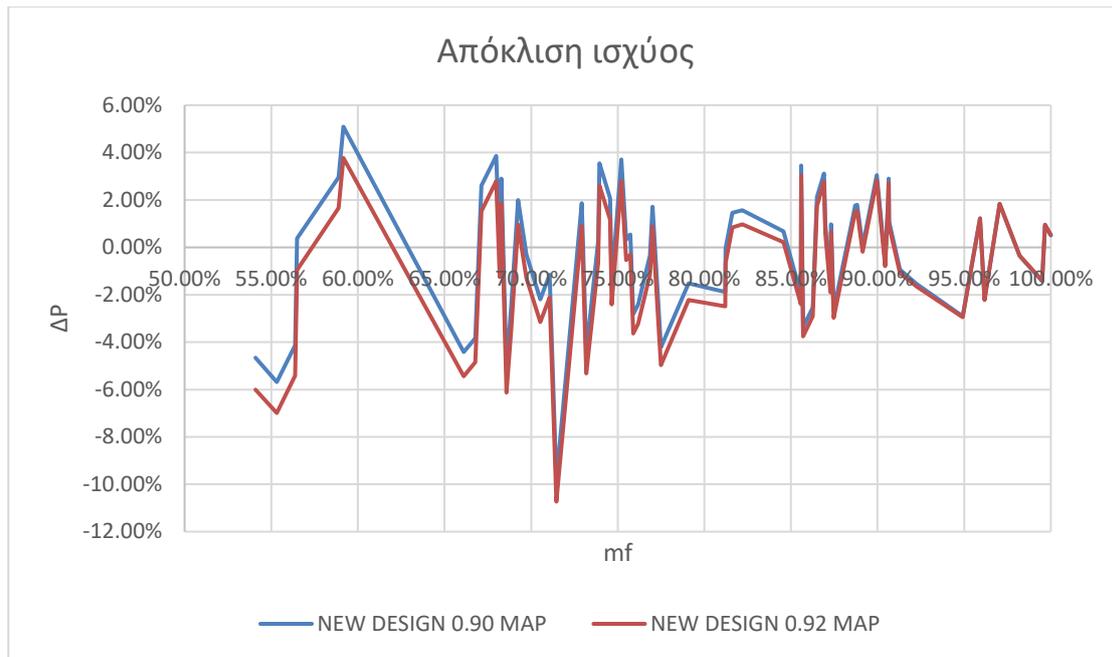
Σχήμα 2.22 : Απόκλιση ταχύτητας περιστροφής αεριογόνου για διαφορετική τοποθέτηση του σημείου σχεδίασης στον χάρτη του αξονικού συμπιεστή



Σχήμα 2.23 : Απόκλιση ισχύος για διαφορετική τοποθέτηση του σημείου σχεδίασης στον χάρτη του αξονικού συμπιεστή

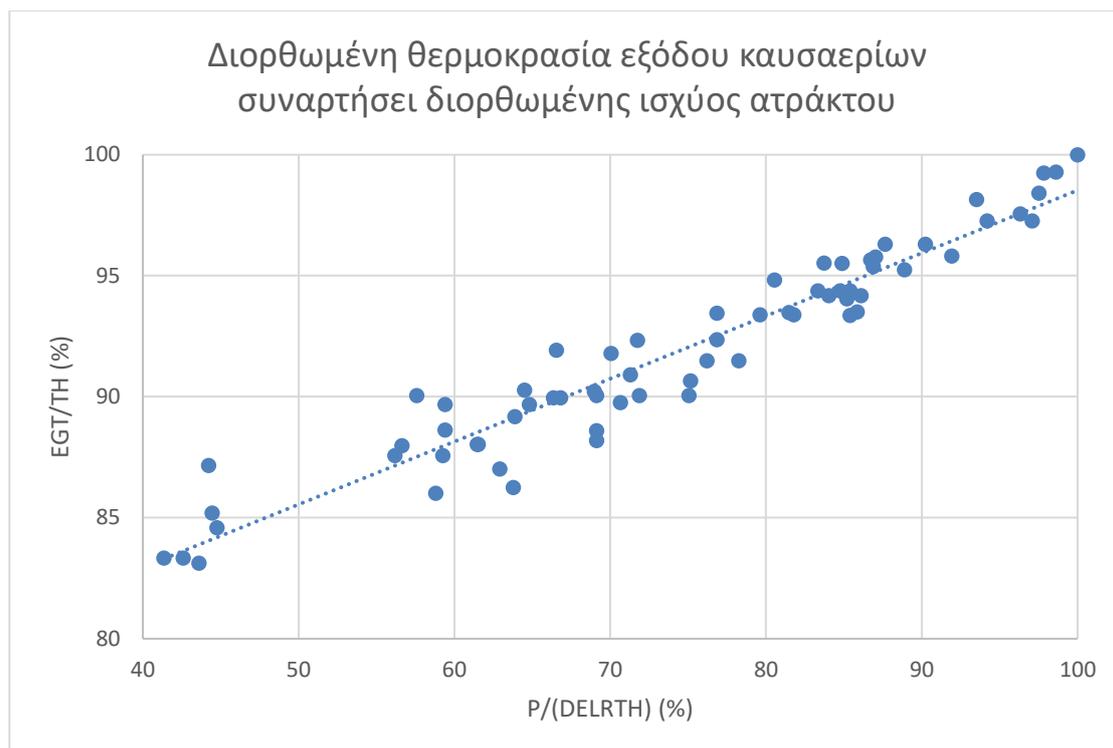


Σχήμα 2.24 : Απόκλιση της υπολογισμένης ταχύτητας περιστροφής της αεριογόνου από τις μετρήσεις συναρτήσει της παροχής καυσίμου



Σχήμα 2.25 : Απόκλιση της υπολογισμένης ισχύος από τις μετρήσεις συναρτήσει της παροχής καυσίμου

Από το Σχήμα 2.24 και το Σχήμα 2.25 φαίνεται πως μετά την τροποποίηση του χάρτη του αξονικού συμπιεστή υπάρχει μεγαλύτερη ελάττωση των αποκλίσεων της ταχύτητας περιστροφής της αεριογόνου και της παραγόμενης ισχύος. Βέβαια παρατηρούνται αποκλίσεις της τάξης ακόμα και 10% για την ισχύ κυρίως για τα χαμηλά φορτία. Οι παραπάνω αποκλίσεις οφείλονται στο γεγονός πως οι μετρήσεις του δοκιμαστηρίου έχουν προέλθει από διαφορετικές μηχανές PT6T-6, όπως επίσης και στο γεγονός πως οι χάρτες των συνιστωσών που παρέχει το πρόγραμμα PROOSIS διαφέρουν από τους πραγματικούς κάθε μηχανής. Επειδή, όμως, οι χάρτες του μοντέλου έχουν υποστεί προσαρμογή βάσει του σημείου σχεδίασης, οι μεγαλύτερες διαφορές παρατηρούνται σε περιοχές μακριά από το σημείο σχεδίασης. Για να γίνει πιο κατανοητό το γεγονός πως διαφορετικές μηχανές έχουν διαφορετική συμπεριφορά, ακόμα και για το ίδιο σημείο λειτουργίας, στο Σχήμα 2.26 παρουσιάζεται η σχέση της διορθωμένης θερμοκρασίας εξόδου των καυσαερίων με την διορθωμένη ισχύ ατράκτου, με τις παραπάνω ποσότητες να εκφράζονται ως ποσοστό της μέγιστης τιμής που παρατηρείται από τις μετρήσεις. Από το παρακάτω σχήμα παρατηρεί κανείς πως, ενώ παρατηρείται σημαντική διασπορά, υπάρχει μία γενική αύξουσα συσχέτιση των δύο μεγεθών. Το παραπάνω γεγονός οφείλεται στο γεγονός πως οι μετρήσεις προέρχονται από διαφορετικές μηχανές, οπότε διαφέρει και η συμπεριφορά τους.



Σχήμα 2.26 : Διορθωμένη θερμοκρασία εξόδου συναρτήσει της διορθωμένης ισχύος ατράκτου εξόδου

Επίσης από το Σχήμα 2.26 παρατηρεί κανείς πως για σημεία λειτουργίας με περίπου σταθερή διορθωμένη ισχύ εξόδου υπάρχουν διαφορές στην θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων. Αν οι μετρήσεις προέρχονταν από μία μόνο μηχανή δεν θα αναμενόταν σημαντική διαφορά. Δεδομένου ότι οι μετρήσεις προέρχονται από διαφορετικές μηχανές, η διαφοροποίηση που παρατηρείται αντικατοπτρίζει τις διαφορές μεταξύ των μηχανών. Επειδή πρόκειται για μηχανές ίδιου τύπου, οι διαφορές αφορούν τις ανοχές κατασκευής και συναρμολόγησης. Το τελευταίο σχόλιο εμπίπτει στην λειτουργία της μηχανής αποτυπωμένη με τις αδιάστατες ή, διαφορετικά, διορθωμένες παραμέτρους, όπως παρουσιάζεται και εξετάζεται βάσει του μοντέλου στο επόμενο κεφάλαιο.

Συνοψίζοντας, για τον έλεγχο των επιδόσεων και των ορίων λειτουργίας του κινητήρα, πριν την εγκατάστασή του στο δοκιμαστήριο, κατασκευάστηκε το μοντέλο που τον προσομοιώνει με βάση μετρήσεις πολλών μηχανών. Με αυτόν τον τρόπο το μοντέλο εκφράζει μία ‘μέση’ μηχανή και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσομοιώσει την λειτουργία της μηχανής που θα τοποθετηθεί στο δοκιμαστήριο του ΕΘΣ.

3

Δημιουργία δοκιμαστηρίου και τοποθέτηση κινητήρα

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζεται η λειτουργία του κινητήρα στο δοκιμαστήριο λαμβάνοντας υπ' όψη τις διορθωμένες παραμέτρους με σκοπό την επίτευξη μειωμένης ισχύος προς απορρόφηση από την γεννήτρια του δοκιμαστηρίου. Επίσης παρουσιάζεται ο σχεδιασμός του δοκιμαστηρίου, όπου θα τοποθετηθεί και θα λειτουργεί ο κινητήρας. Συγκεκριμένα περιγράφεται η διάταξη της βάσης στήριξης της μηχανής, καθώς και ο σχεδιασμός της διάταξης για την έξοδο των καυσαερίων στο περιβάλλον. Ακόμα γίνεται αναφορά στην διάταξη στραγγαλισμού της ροής στην είσοδο της μηχανής. Συγκεκριμένα αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί η υπάρχουσα διάταξη στραγγαλισμού του ΕΘΣ, ενώ σχεδιάστηκαν οι αγωγοί για την σύνδεσή της με την εισαγωγή του κινητήρα. Το μοντέλο συμβάλλει στην γνώση της κατάστασης του κινητήρα με σκοπό την αποφυγή βλαβών πριν τεθεί σε λειτουργία ο κινητήρας, ενώ οι μετρήσεις που λαμβάνονται κατά τις δοκιμές της πραγματικής μηχανής βοηθούν στην εξακρίβωση της απόδοσης του κινητήρα.

3.1 Διάταξη δοκιμών με μειωμένη ισχύ κινητήρα

Επειδή ο κινητήρας της παρούσης διπλωματικής προορίζεται για τοποθέτηση στις εγκαταστάσεις του εργαστηρίου θερμικών στροβιλομηχανών επιβάλλεται η ισχύς που παράγει να μπορεί να καταναλωθεί από τις γεννήτριες του εργαστηρίου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η γεννήτρια μπορεί να καταναλώσει μέγιστη ισχύ 420 kW, ενώ η μέγιστη ισχύς που παράγει ο κινητήρας είναι περίπου 723 kW σε συνθήκες τυπικής ημέρας. Για να μπορέσει ο κινητήρας να λειτουργήσει σε τόσο χαμηλά φορτία, αν γίνει χρήση των ανηγμένων παραμέτρων (όπως παρουσιάστηκε στην παράγραφο 2.10) φαίνεται πως αν υπάρξει στραγγαλισμός (ελεγχόμενη πτώση πίεσης στον αγωγό εισόδου με $\delta < 1$) της ροής κατά την είσοδό της στον κινητήρα με τις ανηγμένες παραμέτρους ελέγχου να παραμένουν σταθερές (εδώ ανηγμένη ταχύτητα περιστροφής ατράκτου ισχύος $N_s / \sqrt{\theta}$ και ανηγμένη παροχή καυσίμου $m_f / \delta \sqrt{\theta}$), τότε η ανηγμένη ταχύτητα περιστροφής της αεριογόνου και η ανηγμένη παροχή του αξονικού συμπιεστή θα παραμείνουν σταθερές, όπως και η ανηγμένη ισχύς, με αποτέλεσμα να μειώνεται η παραγόμενη ισχύς, όπως φαίνεται από τις σχέσεις του Πίνακα 2.21. Γεγονός που οδηγεί τον αξονικό συμπιεστή να λειτουργεί στο ίδιο σημείο με τις ίδιες επιδόσεις, ενώ παράλληλα ο κινητήρας να παράγει μειωμένη ισχύ. Συνοψίζοντας, λοιπόν, φαίνεται πως βάσει της 'αδιάστατης' λειτουργίας του κινητήρα μπορεί να επιτευχθούν χαμηλά φορτία χωρίς να υπάρχει προβληματική λειτουργία των συνιστωσών.

Ελέγχοντας την παραπάνω θεώρηση μέσω του μοντέλου του κινητήρα που κατασκευάστηκε στο PROOSIS, παρατηρείται απόκλιση των μεγεθών από τις αναμενόμενες τιμές ιδιαίτερα για τα σημεία λειτουργίας με πίεση εισόδου που απέχει αρκετά από την πίεση του περιβάλλοντος. Συγκεκριμένα στο Σχήμα 3.2 και Σχήμα 3.3 παρουσιάζονται η ανηγμένη ταχύτητα περιστροφής της αεριογόνου και η ανηγμένη ισχύς αντίστοιχα συναρτήσει της ανηγμένης παροχής καυσίμου, όπως προέκυψαν για σταθερή ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου εξόδου 6600 rpm και για ένα εύρος παροχής καυσίμου, για ένα εύρος λόγων πύσεων δ στον αγωγό εισόδου του κινητήρα. Η δήλωση των παραπάνω παραμετρικών παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1.

Parametric Study Configuration

Name: Description:

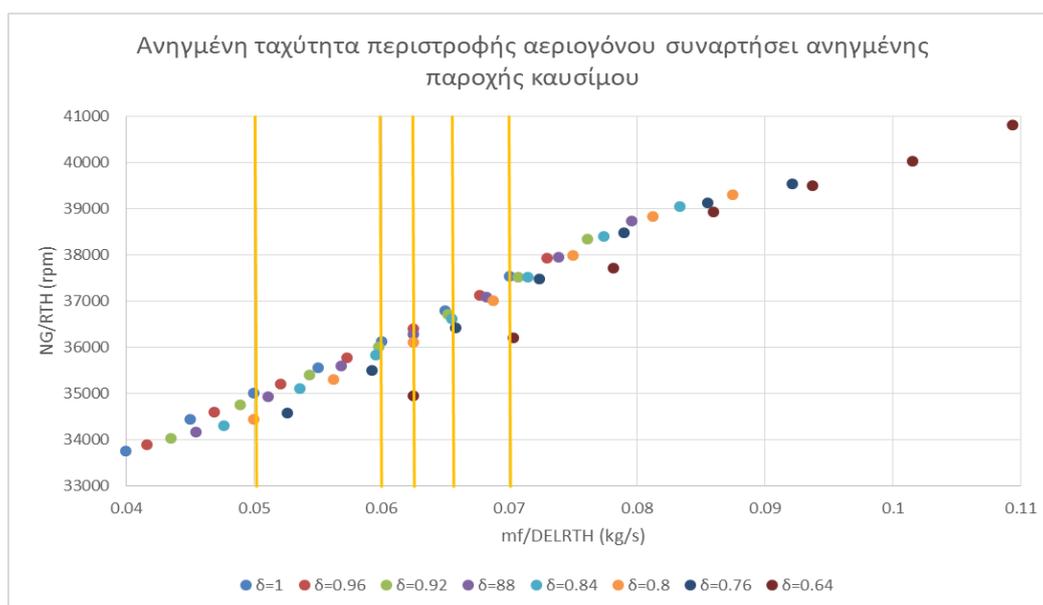
Parametric study type

Steady State
 Transient

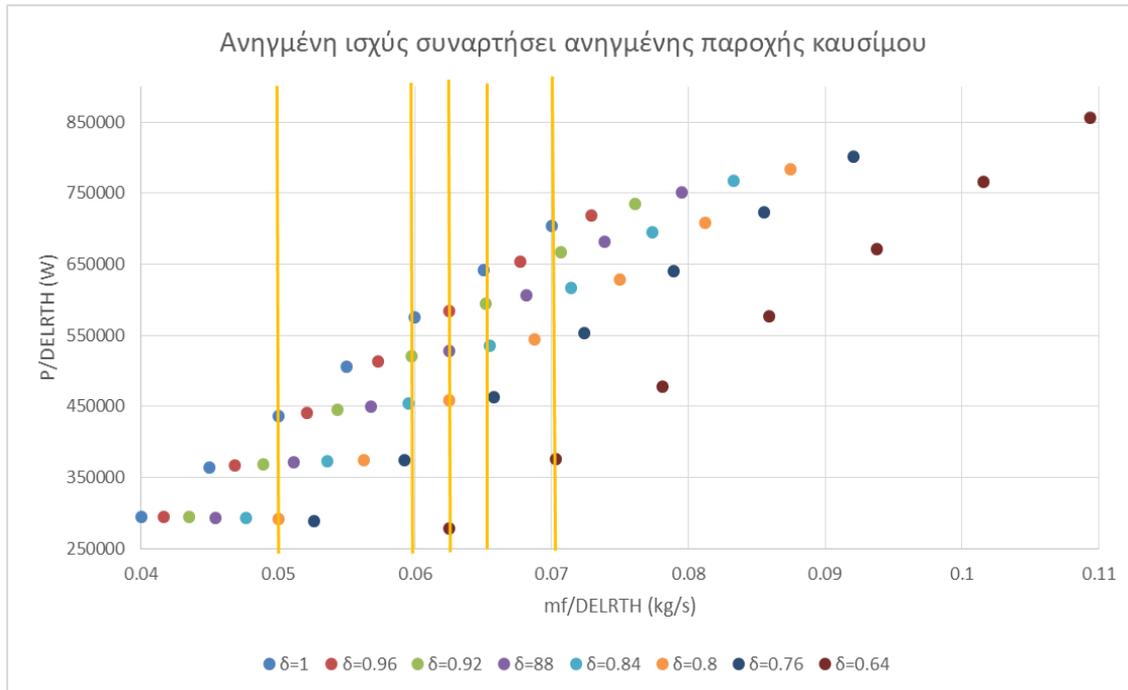
Parameters

Name	Type	Mode	Submode	Value	Units	Category	Description
InEng.PqP_in	REAL	INTERVAL	By Final Value	final=0.52;initial=1;step=12;	-	DATA	Pressure ...qP option
Bm.Fu_in.W	REAL	INTERVAL	By Final Value	final=0.07;initial=0.04;step=6;	kg/s	BOUNDARY	Fuel Mass Flow

Σχήμα 3.1 : Δήλωση παραμετρικών μεταβλητών για προσομοίωση γραμμής λειτουργίας



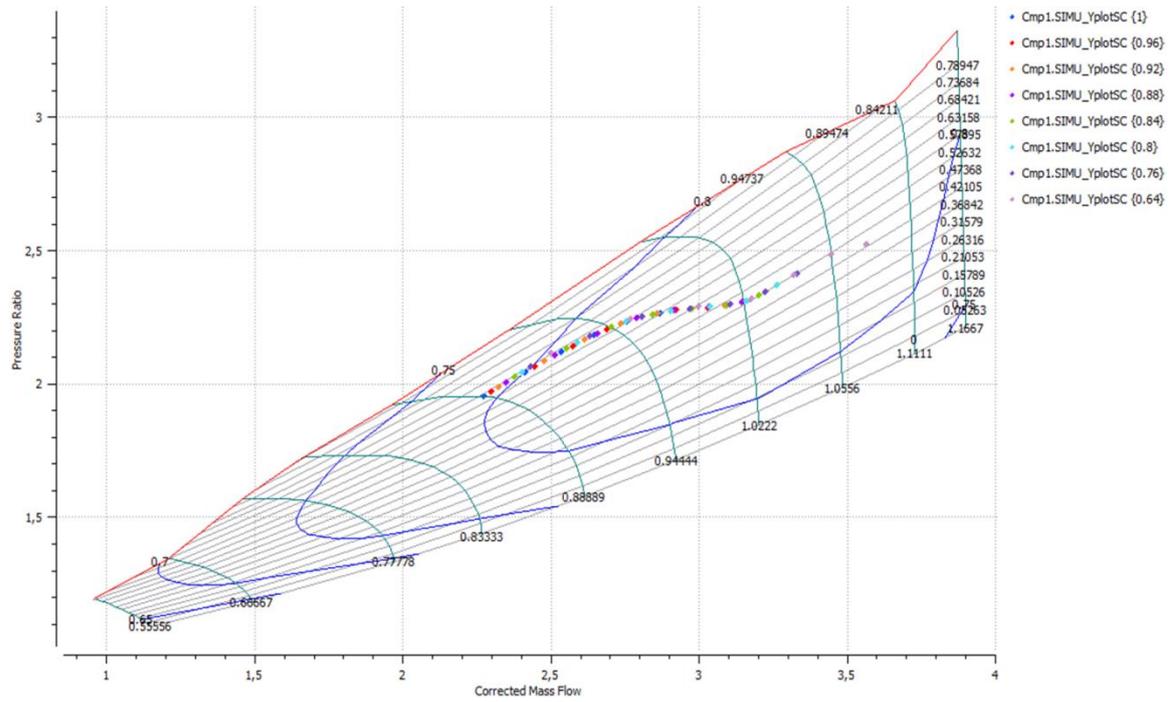
Σχήμα 3.2 : Ανηγμένη ταχύτητα περιστροφής της αεριογόνου συναρτήσει της ανηγμένης παροχής καυσίμου



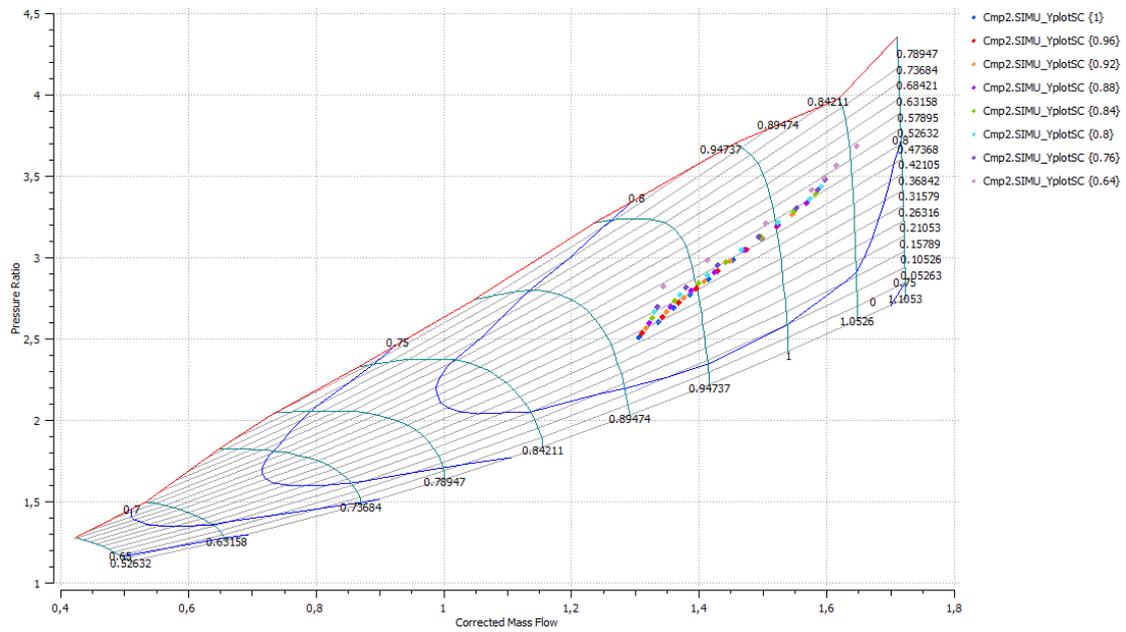
Σχήμα 3.3 : Ανηγμένη ισχύς συναρτήσει της ανηγμένης παροχής καυσίμου

Από τα παραπάνω σχήματα φαίνεται πως για τα σημεία λειτουργίας με περίπου ίδια ανηγμένη παροχή καυσίμου (περιοχές με κίτρινες κατακόρυφες γραμμές) προκύπτει ανηγμένη ταχύτητα περιστροφής με σχεδόν σταθερή τιμή, με τη μέγιστη απόκλιση που παρατηρείται μεταξύ των τιμών σημείων με ίδια ανηγμένη παροχή καυσίμου να προσεγγίζει το 6%. Αντιθέτως η ανηγμένη ισχύς παρουσιάζει μεγαλύτερες αποκλίσεις αναφορικά με σημεία λειτουργίας με περίπου ίδια ανηγμένη παροχή καυσίμου, γεγονός που είναι εμφανές παρατηρώντας το Σχήμα 3.3. Επισημαίνεται πως το μέγεθος $\delta\sqrt{\theta}$ συμβολίζεται ως DELRTH, ενώ το μέγεθος $\sqrt{\theta}$ συμβολίζεται ως RTH.

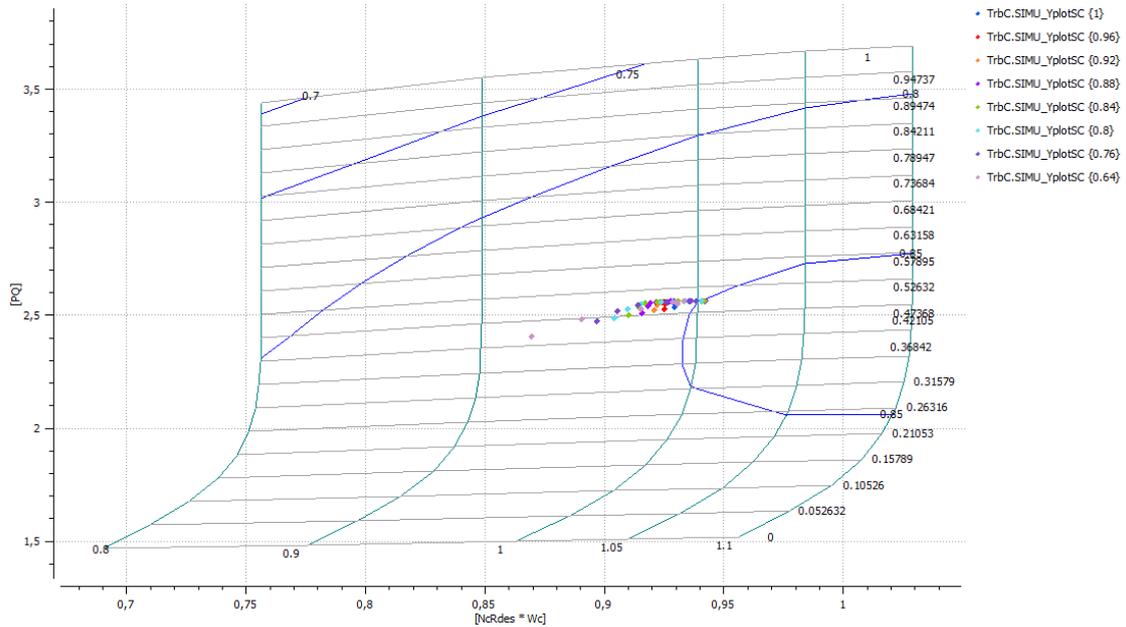
Στα σχήματα 4.3-4.6 παρουσιάζονται οι προκύπτουσες γραμμές λειτουργίας αποτυπωμένες στους χάρτες κάθε συνιστώσας.



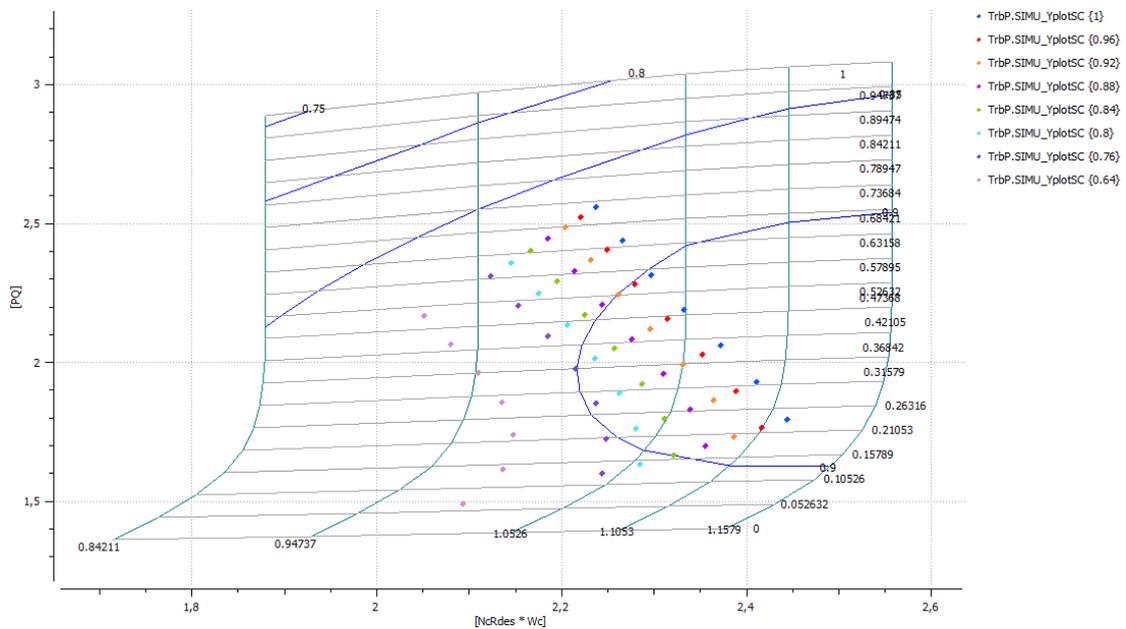
Σχήμα 3.4 : Αποτύπωση γραμμής λειτουργίας στον χάρτη του αξονικού συμπιεστή συναρτήσει της πίεσης εισόδου μηχανής



Σχήμα 3.5 : Αποτύπωση γραμμής λειτουργίας στον χάρτη του ακτινικού συμπιεστή συναρτήσει της πίεσης εισόδου μηχανής



Σχήμα 3.6 : Αποτύπωση γραμμής λειτουργίας στον χάρτη του στροβίλου αεριογόνου συναρτήσει της πίεσης εισόδου μηχανής



Σχήμα 3.7 : Αποτύπωση γραμμής λειτουργίας στον χάρτη του στροβίλου ισχύος συναρτήσει της πίεσης εισόδου μηχανής

Παρατηρώντας το Σχήμα 3.4 φαίνονται σημεία λειτουργίας που αλληλοκαλύπτονται, δηλαδή διαθέτουν ίδιες τιμές για τα μεγέθη $m\sqrt{\theta}/\delta$ και την ανηγμένη ταχύτητα περιστροφής ατράκτου αεριογόνου $N_G/\sqrt{\theta}$, γεγονός που επαληθεύει εν μέρει και το Σχήμα 3.2.

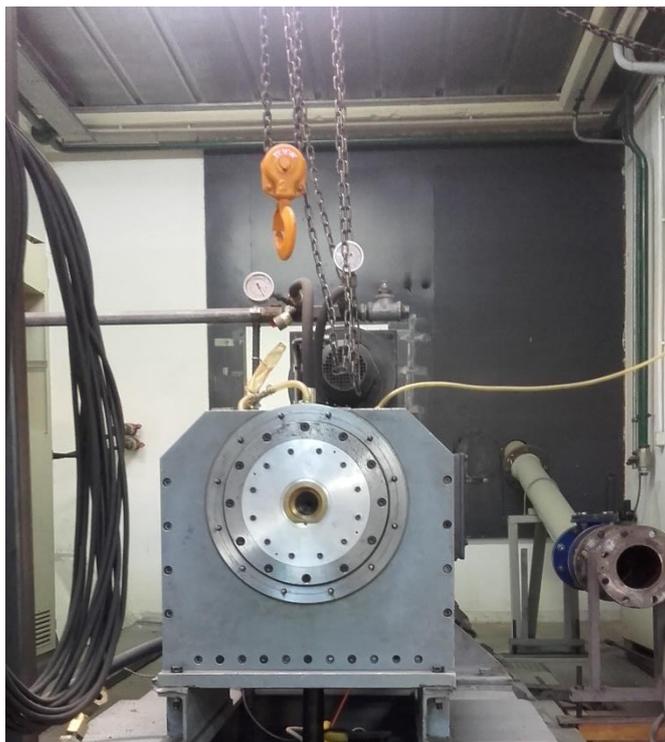
Συνοψίζοντας, με την βοήθεια του μοντέλου έγινε εκτίμηση των στοιχείων σχεδιασμού της εγκατάστασης δοκιμών, όπως είναι η μικρότερη δυνατή παραγόμενη ισχύς, που μπορεί να επιτύχει ο κινητήρας, δίχως να παρατηρείται προβληματική λειτουργία, και ο βαθμός στραγγαλισμού της ροής εισόδου. Για να ολοκληρωθεί η εγκατάσταση απαιτείται ακόμα να διαμορφωθεί ο χώρος του δοκιμαστηρίου, διαδικασία που περιγράφεται στις επόμενες παραγράφους.

3.2 Υπάρχουσα εγκατάσταση

Ο σχεδιασμός του δοκιμαστηρίου για τον κινητήρα PT6T-6 γίνεται επί της υπάρχουσας εγκατάστασης του δοκιμαστηρίου του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών (ΕΘΣ). Η παραπάνω εγκατάσταση περιλαμβάνει μία βάση (παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.8), όπου είναι τοποθετημένος ο μειωτήρας στροφών (παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.9) και η γεννήτρια για την απορρόφηση της παραγόμενης ισχύος από τον κινητήρα. Συγκεκριμένα, ο μειωτήρας έχει σχέση μετάδοσης 26.6:1, ενώ η γεννήτρια συνεχούς ρεύματος έχει μέγιστη απορρόφηση ισχύος 420 kW στις 3000 rpm, η οποία είναι πολύ μικρότερη από εκείνη που παράγει ο κινητήρας στο μέγιστο φορτίο που είναι περίπου 723 kW. Επίσης για είσοδο στον μειωτήρα 6600 rpm (άτρακτος ισχύος), η γεννήτρια θα λειτουργεί με περίπου 248 rpm, γεγονός που οδηγεί σε ακόμα μικρότερη απορρόφηση ισχύος. Εξαιτίας των παραπάνω απαιτείται να γίνει διερεύνηση για κατάλληλη γεννήτρια και μειωτήρα στροφών, η οποία δεν περιλαμβάνεται στην παρούσα διπλωματική.



Σχήμα 3.8 : Βάση δοκιμαστήριου ΕΘΣ



Σχήμα 3.9 : Μειωτήρας ταχύτητας περιστροφής δοκιμαστήριου ΕΘΣ

Επίσης για την λειτουργία του κινητήρα σε δοκιμαστήριο απαιτείται η ύπαρξη βάσης στήριξης, διάταξης εισαγωγής του αέρα και διάταξης εξαγωγής των καυσαερίων. Τα παραπάνω θέματα αναλύονται στις επόμενες παραγράφους

3.3 Διάταξη της βάσης

Για να μπορέσουν να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις για τον καθορισμό της λειτουργίας του κινητήρα, απαιτείται μία βάση στήριξης, η οποία θα παραλαμβάνει τα φορτία που προκύπτουν από την λειτουργία του κινητήρα, όπως αναλύεται σε επόμενες παραγράφους. Με σκοπό την δέσμευση κάθε βαθμού ελευθερίας του κινητήρα, αλλά και την αποτελεσματική παραλαβή των φορτίων κατά την λειτουργία του, η βάση που θα χρησιμοποιηθεί είναι πιστό αντίγραφο αυτής που υπάρχει και στο ελικόπτερο, όταν δηλαδή ο κινητήρας είναι εγκατεστημένος. Για την γνώση της μορφής και των διαστάσεων της βάσης πραγματοποιήθηκε επίσκεψη στη βάση ελικοπτέρων του Πολεμικού Ναυτικού στον Μαραθώνα, όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις. Βάσει των παραπάνω, απαιτείται η βάση να είναι κοινή και για τους δύο κινητήρες του ζεύγους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.10. Επίσης, για να είναι η στήριξη του κινητήρα αποτελεσματική, απαιτείται να υπάρχουν οι παρακάτω στηρίξεις κατά το μήκος του κινητήρα (κοιτώντας από τη μεριά του κοινού μειωτήρα ταχύτητας περιστροφής) : 3 αρθρώσεις, 2 αρθρώσεις και 2 αρθρώσεις συνδεδεμένες με μία κοινή ράβδο ως αντιστάθμιση (Σχήμα 3.11).



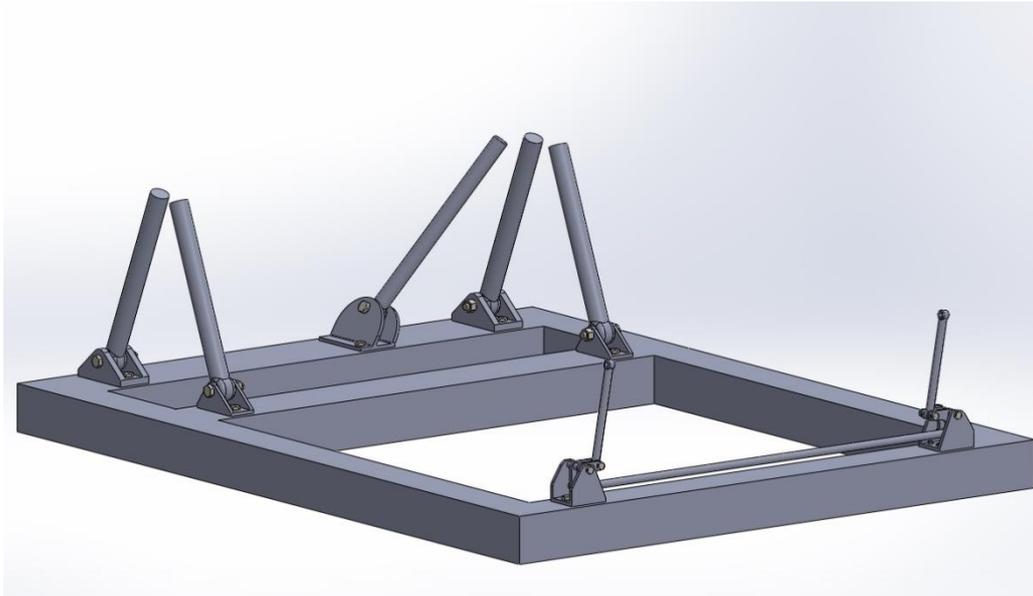
Σχήμα 3.10 : Διάταξη βάσης ζεύγους κινητήρων

Με την παραπάνω γνώση επιχειρείται ο σχεδιασμός του συνόλου της βάσης, αλλά και των μελών του ξεχωριστά με σκοπό την εκτίμηση των διαστάσεών του με τελικό στόχο την τοποθέτηση της παραπάνω διάταξης στον χώρο δοκιμών του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών. Η παρουσίαση του σχεδιασμού πραγματοποιείται στην επόμενη παράγραφο.

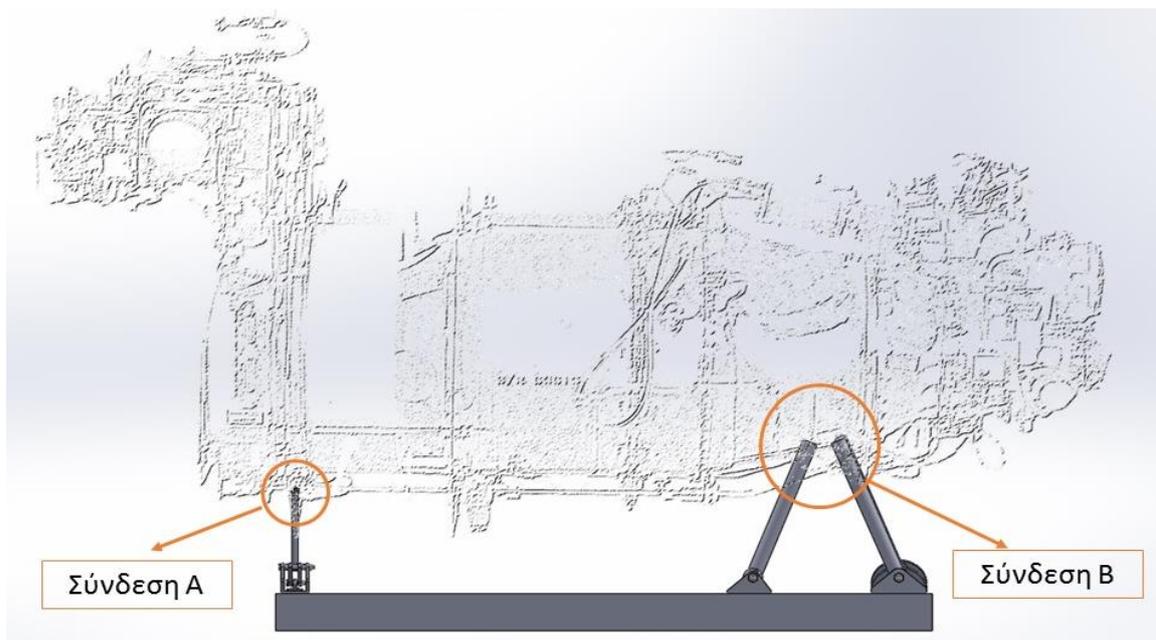
3.4 Σχεδιασμός βάσης

Ο σχεδιασμός της βάσης και των εδράσεων του ζεύγους κινητήρων πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα SOLIDWORKS. Συγκεκριμένα παρήχθη το 3D μοντέλο της διάταξης, αλλά και των εδράσεων, ενώ εξήχθησαν και τα μηχανολογικά σχέδια (με κατάλληλες όψεις) του κάθε κομματιού. Ο σχεδιασμός βασίστηκε σε μετρήσεις που πραγματοποιηθήκαν επί της πραγματικής βάσης του ζεύγους.

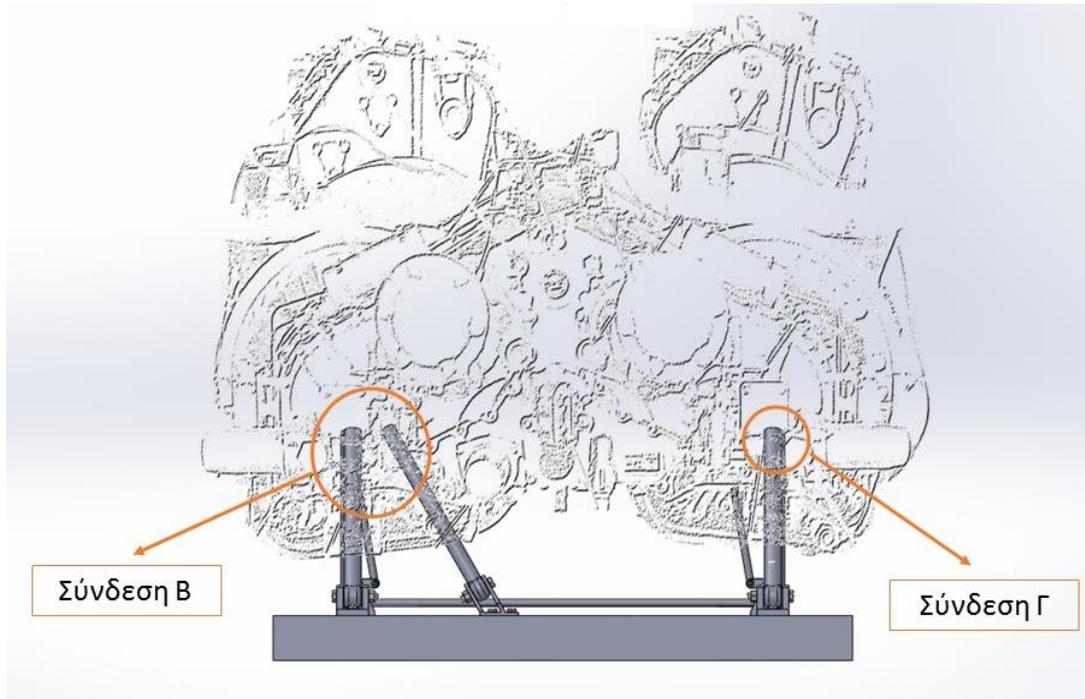
Στο Σχήμα 3.12 παρουσιάζεται η βάση του κινητήρα, όπως εκείνη προέκυψε από τον σχεδιασμό (SOLIDWORKS), ενώ στο Σχήμα 3.12 και στο Σχήμα 3.13 παρουσιάζονται δύο διαφορετικές όψεις του ζεύγους, όπου φαίνεται η θέση του αναφορικά με την βάση, όταν είναι συνδεδεμένο με την βάση.



Σχήμα 3.11 : Βάση στήριξης ζεύγους



Σχήμα 3.12 : Πρόοψη διάταξης ζεύγους και βάσης στήριξης



Σχήμα 3.13 : Πλάγια όψη διάταξης ζεύγους και βάσης στήριξης

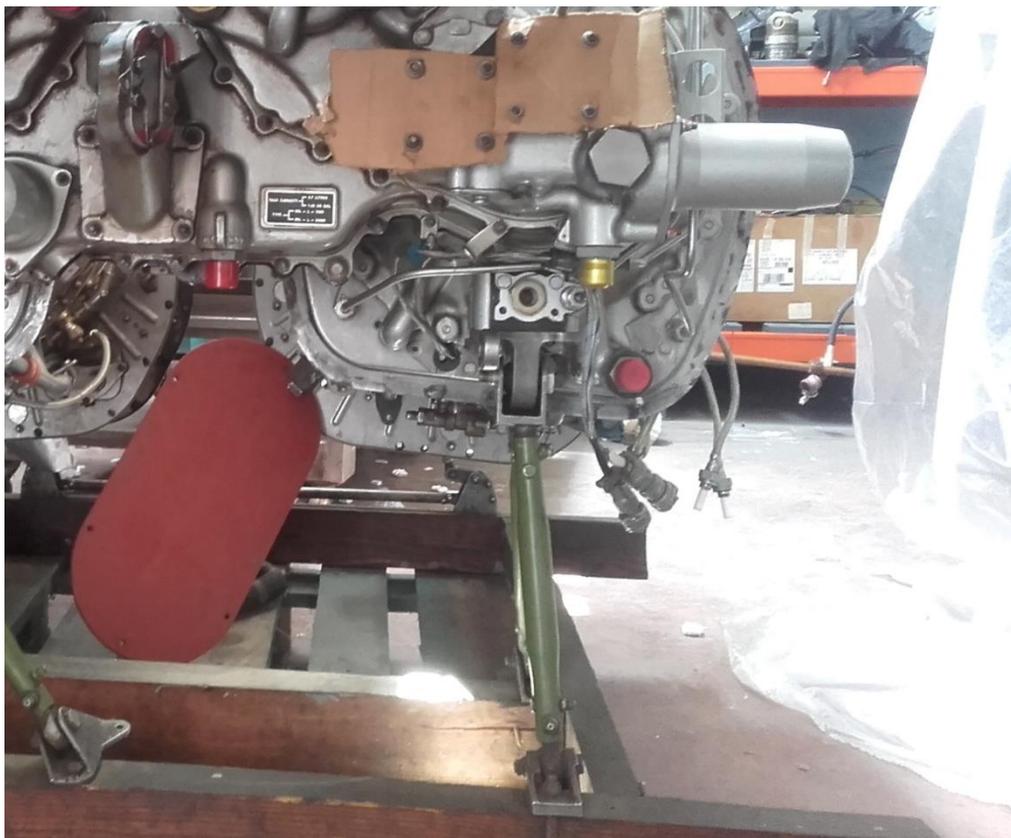
Η κάθε μία σύνδεση που αναφέρεται στα δύο προηγούμενα σχήματα, πρόκειται για μία άρθρωση που δέχεται μία, δύο ή και τρεις ράβδους στήριξης και όλες παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.14, Σχήμα 3.15 και Σχήμα 3.16.



Σχήμα 3.14 : Σύνδεση Α



Σχήμα 3.15 : Σύνδεση Β



Σχήμα 3.16 : Σύνδεση Γ

Για την λειτουργία της μηχανής εντός του χώρου δοκιμαστηρίου απαιτείται η ύπαρξη διάταξης εξόδου καυσαερίων για να εξέρχονται τα καυσαέρια από αυτόν τον χώρο, έτσι ώστε να μην αναρροφώνται από την μηχανή. Επίσης, η λειτουργία μίας μηχανής εξαρτάται άμεσα από την διάταξη εξόδου των καυσαερίων. Πιο συγκεκριμένα, για εκτόνωση των καυσαερίων στο περιβάλλον, το εμβαδό εξόδου και οι απώλειες ολικής πίεσης του αγωγού ρυθμίζουν την αναρροφώμενη παροχή και την ολική πίεση του αερίου στην έξοδο της τελευταίας συνιστώσας. Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζεται η μελέτη που πραγματοποιήθηκε για την επιλογή του κατάλληλου αγωγού σε συμφωνία πάντα με τους περιορισμούς στην χωροταξία που δημιουργεί ο χώρος του δοκιμαστηρίου του ΕΘΣ.

3.5 Σχεδίαση αγωγού εξόδου

Στην παρούσα παράγραφο εξετάζεται η λειτουργία του κινητήρα για τρεις διαφορετικές τιμές του εμβαδού εξόδου της εγκατάστασης εξαγωγής των καυσαερίων στο περιβάλλον. Για την διερεύνηση, όμως, της λειτουργίας της μηχανής συναρτήσει του εμβαδού εξόδου του αγωγού των καυσαερίων, απαιτείται ο υπολογισμός των απωλειών

πίεσης που θα προκαλέσει η εγκατάστασή του. Για τον υπολογισμό των απωλειών το ρευστό θεωρείται ασυμπίεστο και απαιτείται η γνώση της δυναμικής πίεσης στην είσοδο του αγωγού/διαχύτη. Για την εκτίμηση της πυκνότητας στην είσοδο του αγωγού αξιοποιούνται τα αποτελέσματα στο σημείο σχεδίασης, όπως αυτό έχει δηλωθεί στο Σχήμα 2.12, υποθέτοντας πως μεταβολή του εμβαδού στην έξοδο της εγκατάστασης δεν θα επιφέρει σημαντικές μεταβολές στα θερμοδυναμικά μεγέθη στην έξοδο του στροβίλου ισχύος. Προσοχή απαιτείται για την παροχή του αερίου στην έξοδο της μηχανής, η οποία προκύπτει από την παροχή αέρα στην είσοδο της μηχανής, την παροχή του καυσίμου και τις απομαστεύσεις που πραγματοποιούνται. Έπειτα, εκτιμάται ο συντελεστής απωλειών^[8] για ευθύγραμμο και κατακόρυφο αγωγό/διαχύτη, ο οποίος εξαρτάται από την μορφή του διαχύτη (λόγος εμβαδών, αδιάστατο μήκος). Στη συνέχεια υπολογίζεται η ολική πίεση στην έξοδο του αγωγού που εκβάλλει στο περιβάλλον και στην προκύπτουσα τιμή προστίθενται οι απώλειες που υπολογίστηκαν παραπάνω. Έτσι, προκύπτει η ολική πίεση στην είσοδο του αγωγού, καθώς και ο λόγος των ολικών πιέσεων εξόδου και εισόδου. Η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω παρουσιάζεται στο Παράρτημα Π3. Η διατομή του αγωγού μετά την έξοδο της μηχανής είναι ορθογωνική με διαστάσεις 174mm X 399mm, δηλαδή με εμβαδό ελάχιστα μεγαλύτερο από αυτό της εξόδου της που είναι 0.0639 m², επειδή προηγήθηκε απότομη (μηδενικού μήκους) προσαρμογή της ελλειπτικής διατομής της εξόδου του κινητήρα σε ορθογωνική. Τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1 : Αποτελέσματα ανάλυσης για τους τρεις αγωγούς εξόδου

A1 (m ²)	0.0705	0.0705	0.0705
A2 (m ²)	0.0705	0.1849	0.306
AreaRatio	1.00	2.62	4.34
L/a	9.60	9.60	9.60
Re _{in}	283187	283187	283187
Pd (Pa)	2939.29	2939.29	2939.29
Pt _{out} (Pa)	103720.85	101667.17	101449.96
V _{out} (m/s)	115.47	43.91	26.55
Kd	0.14	0.31	0.48
Cre	-	0.80	0.80
Kd _{cor}	-	0.44	0.82
Kd _{tr}	0.20	0.20	0.20
ΔP (Pa)	1001.07	1886.13	3002.59
P _{tin} (Pa)	104721.92	103553.30	104452.55
dP (%)	0.96	1.83	2.88

Αφού προκύψουν οι απώλειες ολικής πίεσης για τους τρεις αγωγούς μελετήθηκε η επίδραση που έχουν στην λειτουργία της μηχανής στο σημείο σχεδίασης, αλλά και στην off-design συμπεριφορά της. Συγκεκριμένα, εξετάστηκαν η παραγόμενη ισχύς, η ολική πίεση εξόδου του στροβίλου ισχύος και η παροχή στην είσοδο του κινητήρα. Στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζονται οι τρεις διαφορετικές διατάξεις, καθώς και οι απώλειες πίεσης που δημιουργούνται, όπως προέκυψαν από την ανάλυση που προηγήθηκε.

Πίνακας 3.2 : Αγωγοί εξόδου καυσαερίου

A/A	A1 (m ²)	A2 (m ²)	ΔP (Pa)
1	0.0705	0.0705	413
2	0.0705	0.1849	3163
3	0.0705	0.3060	3813

Όπως προκύπτει από τον παραπάνω πίνακα, η πρώτη εναλλακτική αφορά έναν αγωγό σταθερής διατομής, η οποία είναι ελάχιστα μεγαλύτερη από την διατομή εξόδου του κινητήρα, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 3.17, εξαιτίας της προσαρμογής της ελλειπτικής διατομής του κινητήρα σε ορθογωνική, όπως έχει προαναφερθεί. Οι υπόλοιπες αφορούν διαχύτες με αυξανόμενο λόγο εμβαδών. Ο μεγαλύτερος λόγος εμβαδών αφορά τον διαχύτη με εμβαδό εξόδου ίσο με αυτό της καπνοδόχου του δοκιμαστηρίου, η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.18.

Επειδή το εμβαδό εξόδου του διαχύτη δεν αξιοποιεί όλο το εμβαδό της καπνοδόχου (cropped diffuser) για τις δύο πρώτες περιπτώσεις, η εξερχόμενη ροή αποκολλάται από το τοίχωμα του διαχύτη, γεγονός που επιφέρει επιπρόσθετες απώλειες, οι οποίες συνιστάται να συμπεριληφθούν για ακριβέστερα αποτελέσματα. Επίσης, επισημαίνεται πως οι απώλειες πίεσης υπολογίσθηκαν για κατακόρυφους αγωγούς με τα χαρακτηριστικά της εγκατάστασης του εργαστηρίου, οπότε για μία ακριβέστερη μελέτη απαιτείται διόρθωση τους σύμφωνα με την τελική γεωμετρία που θα επιλεγεί.



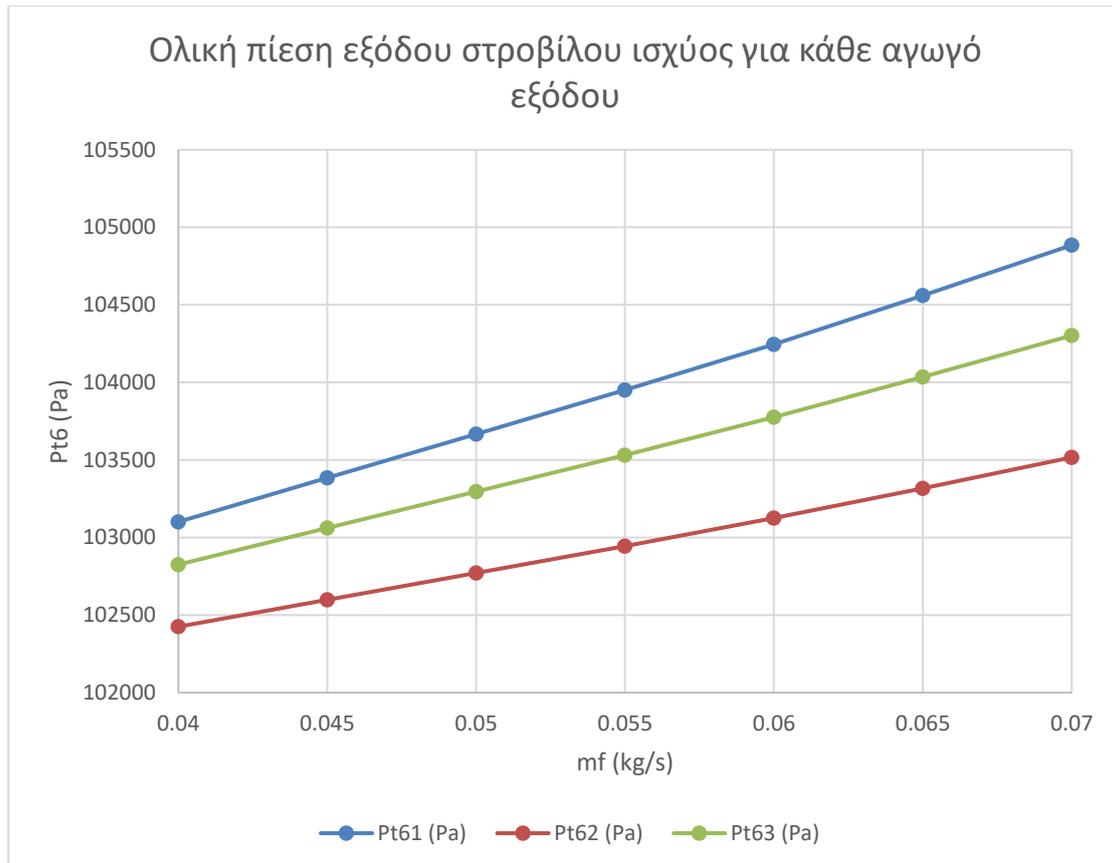
Σχήμα 3.17 : Διατομή εξόδου καυσαερίων του κινητήρα PT6T-6



Σχήμα 3.18 : Άνοιγμα εισόδου καπνοδόχου δοκιμαστηρίου ΕΘΣ

Για την μοντελοποίηση της λειτουργίας του κινητήρα με τα τρία διαφορετικά εμβαδά εξόδου, επιλέγεται η προσαρμογή των χαρτών να γίνει για το ίδιο σημείο σχεδίασης, τα χαρακτηριστικά του οποίου παρουσιάστηκαν στο Σχήμα 2.12. Στη συνέχεια για την μελέτη της συμπεριφοράς της μηχανής επιλέχθηκε μία γραμμή

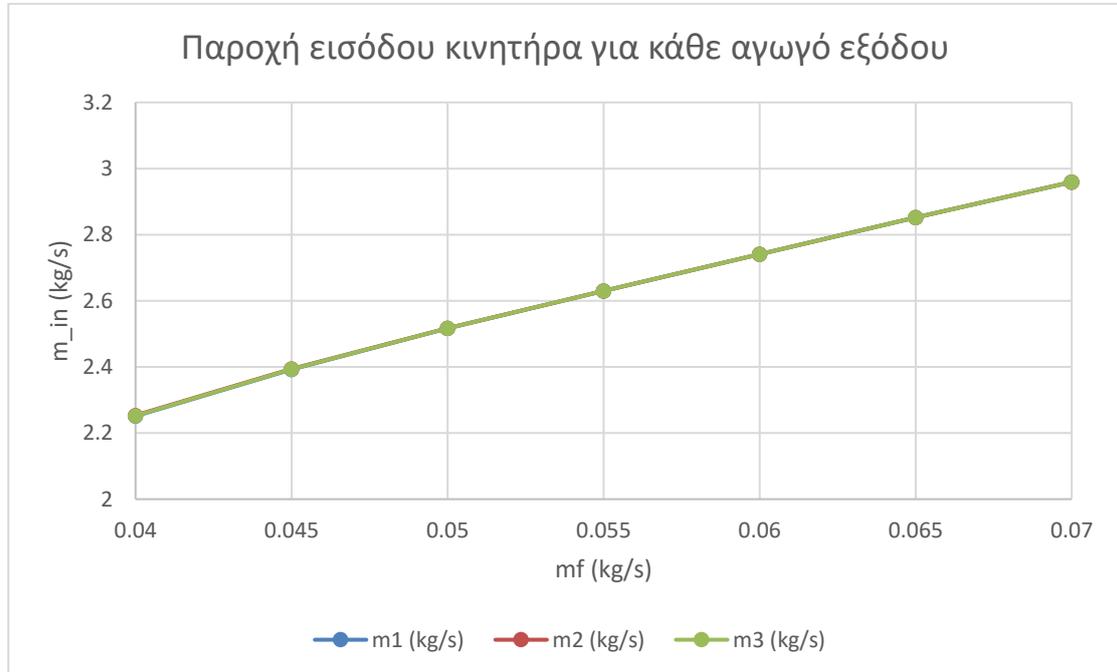
λειτουργίας και για την κάθε περίπτωση που εξετάζεται, καθορίζονται οι απώλειες ολικής πίεσης και το εμβαδό εξόδου του διαχύτη. Το παραπάνω έχει ως αποτέλεσμα να διαφοροποιούνται οι επιδόσεις της μηχανής. Οι διαφορές αυτές παρουσιάζονται για τα τρία μεγέθη που προαναφέρθηκαν (ολική πίεση εξόδου στροβίλου ισχύος, παροχή εισόδου κινητήρα και παραγόμενη ισχύς,) στο Σχήμα 3.19, Σχήμα 3.20 και στο Σχήμα 3.21 αντίστοιχα για να γίνουν πιο κατανοητές. Επιλέχθηκε μία γραμμή λειτουργίας με σταθερή ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου ισχύος (33000 rpm) και με μεταβλητή παροχή μάζας καυσίμου (μεταβλητή Brn.Fu_in.W).



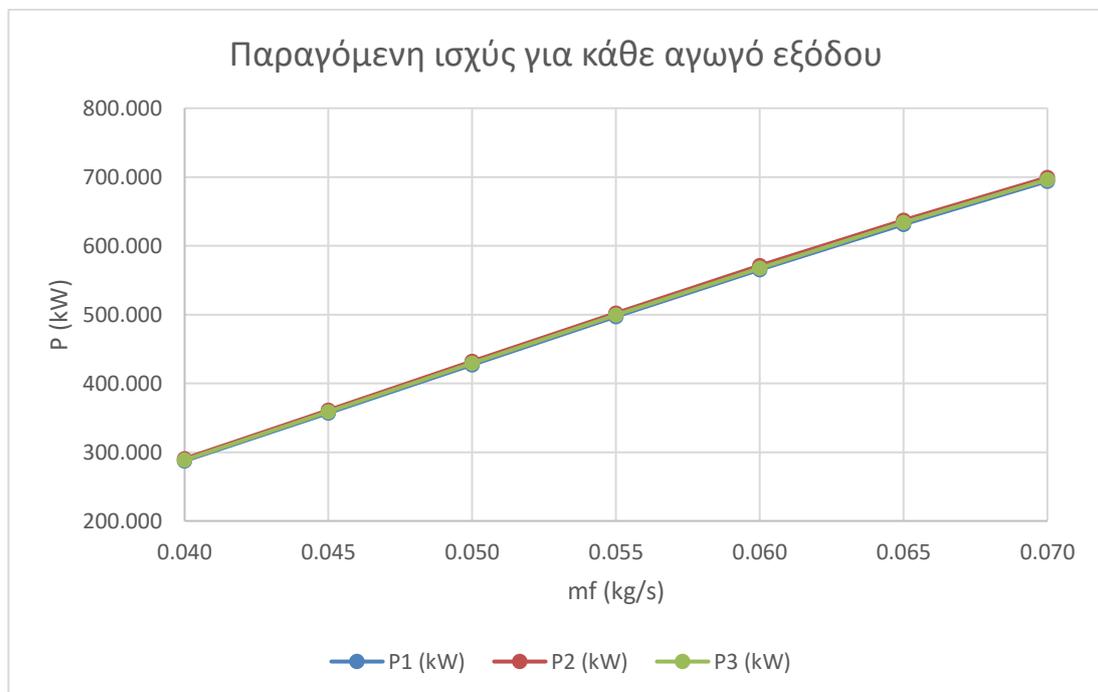
Σχήμα 3.19 : Ολική πίεση εξόδου στροβίλου ισχύος για τους διαφορετικούς αγωγούς εξόδου

Στο παραπάνω σχήμα παρατηρεί κανείς πως, ενώ ο ευθύγραμμος αγωγός δημιουργεί τις μικρότερες απώλειες, η έξοδος των καυσαερίων από τον αγωγό γίνεται με μεγαλύτερη ολική πίεση συγκριτικά με τους δύο διαχύτες. Επίσης, φαίνεται πως για αυξανόμενο εμβαδό εξόδου (για τους δύο διαχύτες) η πίεση Pt6 είναι αυξημένη. Αυτό συμβαίνει, επειδή οι απώλειες αποκλίνοντας αγωγού αυξάνονται με τον λόγο εμβαδών, ενώ η εκτόνωση των καυσαερίων γίνεται πάντα στο περιβάλλον, δηλαδή η στατική

πίεση εξόδου είναι πάντα αυτή του περιβάλλοντος. Το παραπάνω γεγονός επιβάλλει ένα ελάχιστο όριο στην ολική πίεση στην έξοδο του διαχύτη.



Σχήμα 3.20 : Παροχή αναρρόφησης κινητήρα για τους διαφορετικούς αγωγούς εξόδου

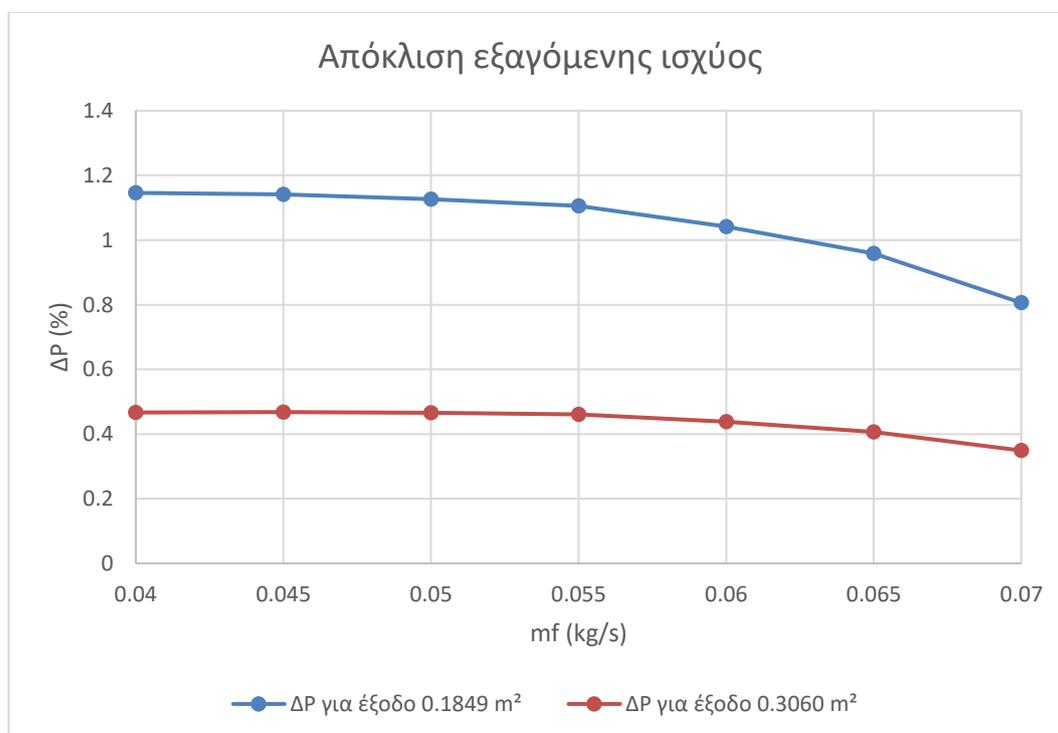


Σχήμα 3.21 : Παραγόμενη ισχύς για τους διαφορετικούς αγωγούς εξόδου

Ενώ οι διαφορές που παρουσιάστηκαν στο Σχήμα 3.19 είναι εμφανείς, οι αποκλίσεις στην παροχή αέρα εισόδου και στην παραγόμενη ισχύ δεν είναι ευδιάκριτες, για αυτόν τον λόγο στον Πίνακα 3.3 παρουσιάζονται οι ακριβείς τιμές συγκεκριμένα για την παραγόμενη ισχύ για το κάθε σημείο λειτουργίας, επειδή σε εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής αυτό το μέγεθος αποτελεί κρίσιμο παράγοντα. Επίσης, στο Σχήμα 3.22 παρουσιάζονται οι αποκλίσεις της ισχύος για κάθε σημείο λειτουργίας από την παραγόμενη ισχύ με το μικρότερο εμβαδό εξόδου (ευθύγραμμος αγωγός) της εγκατάστασης.

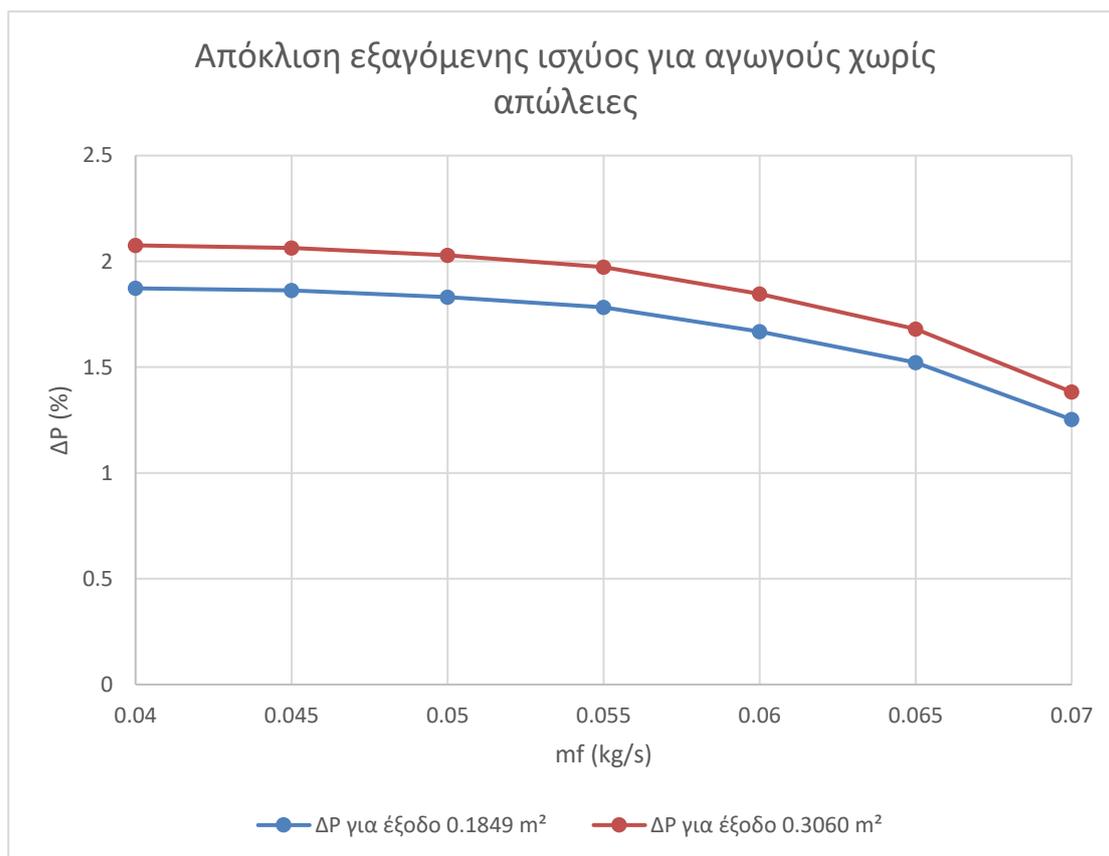
Πίνακας 3.3 : Παραγόμενη ισχύς συναρτήσει παροχής καυσίμου

mf (kg/s)	P1 (kW)	P2 (kW)	P3 (kW)
0.040	287.287	290.579	288.628
0.045	356.837	360.910	358.507
0.050	427.115	431.926	429.104
0.055	496.880	502.376	499.171
0.060	565.189	571.075	567.663
0.065	631.246	637.298	633.813
0.070	693.855	699.447	696.277



Σχήμα 3.22 : Απόκλιση ισχύος από την ισχύ που παράγεται με τον αγωγό ελαχίστου εμβαδού εξόδου

Από τον παραπάνω πίνακα διακρίνει κανείς πως η ισχύς P2, η οποία αντιστοιχεί στο μεσαίο εμβαδό εξόδου που μελετάται, είναι πάντα μεγαλύτερη, γεγονός μείζονος σημασίας για εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής. Στην περίπτωση, λοιπόν, που δεν υπάρχουν χωροταξικοί περιορισμοί, η επιλογή του διαχύτη με μεσαίου μεγέθους εμβαδόν φαίνεται ως η πιο συμφέρουσα. Στην επόμενη παράγραφο αναλύεται η επιλογή εμβαδού της διατομής εξόδου του διαχύτη. Τέλος, στο Σχήμα 3.23 φαίνεται ποια θα ήταν η επίδραση στην παραγόμενη ισχύ αν οι απώλειες πίεσης για τους τρεις αγωγούς ήταν μηδενικές. Παρατηρεί κανείς πως αυτή τη φορά η μεγαλύτερη παραγωγή ισχύος προκύπτει για το μεγαλύτερο εμβαδό εξόδου. Το παραπάνω μπορεί να αιτιολογηθεί βάσει της ολικής πίεσης εξόδου του στροβίλου ισχύος Pt6. Αν οι απώλειες είναι σημαντικές, τότε απαιτείται η παραπάνω πίεση να είναι αυξημένη, γεγονός που οδηγεί σε πιο ήπια αποτόνωση του στροβίλου, δηλαδή μικρότερη παραγωγή έργου. Επιπροσθέτως, από τον Πίνακα 3.3 φαίνεται πως ο διαχύτης με το μεγαλύτερο εμβαδό εξόδου χαρακτηρίζεται από την ελάχιστη ολική πίεση στην έξοδό του για το ίδιο σημείο σχεδίασης που μελετάται.. Έτσι, με μηδενικές απώλειες επιτυγχάνεται μεγαλύτερη αποτόνωση στον στρόβιλο.



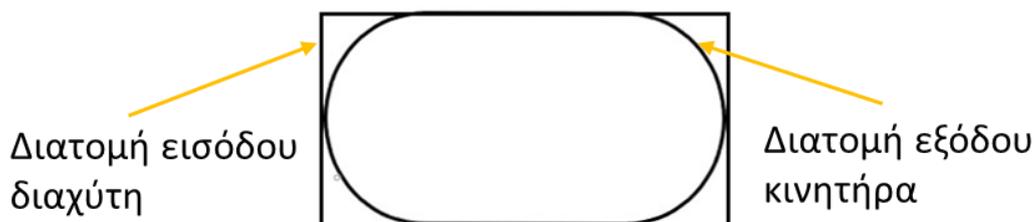
Σχήμα 3.23 : Απόκλιση ισχύος από την ισχύ που παράγεται με τον αγωγό ελαχίστου εμβαδού εξόδου χωρίς την ύπαρξη απωλειών

3.6 Σχεδιασμός διαχύτη

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο η πιο ωφέλιμη επιλογή για τον αγωγό εξόδου είναι αυτός με το μεσαίου μεγέθους εμβασμό εξόδου. Εξαιτίας, όμως, των περιορισμών που επιβάλλει ο χώρος του δοκιμαστηρίου κυρίως στο ύψος της εγκατάστασης, είναι απαραίτητο να ελεγχθεί η γεωμετρία του διαχύτη και συγκεκριμένα αν η γωνία του είναι εντός των ορίων για ροή χωρίς αποκόλληση. Από μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στον χώρο του δοκιμαστηρίου του ΕΘΣ, καθώς και επί του κινητήρα, προκύπτουν για τον διαχύτη γωνίες μικρότερες των 2° . Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία^[6,7], για διαχύτες με γωνία μικρότερη των 2.5° για μεσαίους και μεγάλους αριθμούς Reynolds δεν υπάρχει εμφανής αποκόλληση του ρευστού από τα τοιχώματα του διαχύτη. Σύμφωνα με τα παραπάνω, λοιπόν, η λειτουργία του συγκεκριμένου διαχύτη είναι ασφαλής από θέματα αποκόλλησης.

Ένα άλλο ζήτημα που πρέπει να ληφθεί υπ'όψη είναι η λειτουργία του συγκροτήματος σε αρκετά υψηλές θερμοκρασίες συγκριτικά με αυτή του περιβάλλοντος και συγκεκριμένα για το σημείο σχεδίασης τα καυσαέρια εξέρχονται με θερμοκρασία περίπου 1000 K. Το παραπάνω γεγονός οδηγεί σε διαστολή των τοιχωμάτων του διαχύτη, οι οποίες πρέπει να προσμετρηθούν στις τελικές διαστάσεις του διαχύτη.

Ο τελικός σχεδιασμός του διαχύτη οδηγεί σε ορθογωνική διατομή στην είσοδο και στην έξοδό του, κυρίως εξαιτίας του μικρού κόστους για την κατασκευή του (χάλυβας χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα και τελική μορφοποίηση με χρήση στράντζας), αλλά και εξαιτίας της ορθογωνικής διατομής της καπνοδόχου. Οι διαστάσεις στην είσοδο επιλέχθηκαν να είναι ίσες με τις μέγιστες διαστάσεις του ελλειπτικού τμήματος στην έξοδο του κινητήρα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.24, δηλαδή 399mmX174mm. Στην έξοδό του οι διαστάσεις είναι 537mmX340mm, διαστάσεις που δίνουν εμβασμό ελάχιστα μικρότερο από αυτό που μελετήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, εξαιτίας της πρόληψης για την θερμική διαστολή κατά την λειτουργία του σε υψηλές θερμοκρασίες. Επιπροσθέτως, επιλέγεται να χρησιμοποιηθούν και πείροι-οδηγοί διαμέτρου 10 mm για να βοηθήσουν στην ομαλή θερμική διαστολή κατά το ύψος του διαχύτη. Η παραπάνω επιμήκυνση, όπως και εκείνη στην εγκάρσια διεύθυνση, δεν δεσμεύονται για την αποφυγή δημιουργίας μεγάλων τάσεων στα τοιχώματα και τις συνδέσεις του διαχύτη που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε αστοχία υλικού. Η παραπάνω επιλογή ακολούθησε τη σχετική μελέτη που πραγματοποιήθηκε για τις θερμικές διαστολές στο σημείο σχεδίασης και παρουσιάζεται παρακάτω. Συγκεκριμένα προέκυψε συνολική θερμική διαστολή σχεδόν 18 mm κατά την κατακόρυφη διεύθυνση (διεύθυνση y παραρτήματος Π3), περίπου 7 mm κατά την διεύθυνση x και περίπου 3 mm κατά την διεύθυνση z.



Σχήμα 3.24 : Διατομές κινητήρα και διαχύτη

Η θερμική διαστολή των ελασμάτων των τοιχωμάτων του διαχύτη υπολογίστηκε μέσω της παρακάτω σχέσης, ενώ στον πίνακα περιγράφονται τα μεγέθη που συμμετέχουν στον υπολογισμό.

$$\Delta L = L \alpha \Delta T$$

Πίνακας 3.4 : Επεξήγηση συμβόλων για υπολογισμό θερμικής διαστολής

Σύμβολο	Περιγραφή
ΔL (mm)	Επιμήκυνση
L (mm)	Αρχικό μήκος
α (1/K)	Συντελεστής θερμικής διαστολής
ΔT (K)	Θερμοκρασιακή διαφορά

Χωρίς να ληφθεί υπ'όψη η θερμική διαστολή των ελασμάτων, από τον σχεδιασμό του διαχύτη προέκυψαν ελάσματα ως τοιχώματα του διαχύτη μήκους 2316, 2290, 2266 και 2258 mm. Για τα παραπάνω ελάσματα οι θερμικές διαστολές στο σύστημα αξόνων που ορίζεται στο Π3, παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.5, όπου L το αρχικό μήκος των ελασμάτων, θ η γωνία των ελασμάτων ως προς το κατακόρυφο επίπεδο και α ο συντελεστής θερμικής διαστολής, του οποίου η τιμή επιλέχθηκε για χάλυβα χαμηλών μηχανικών ιδιοτήτων. Από τον παρακάτω πίνακα παρατηρούνται σημαντικές διαστολές κατά το ύψος του διαχύτη και είναι περίπου 18 mm.

Πίνακας 3.5 : Υπολογισμοί θερμικών διαστολών τοιχωμάτων διαχύτη

	Μέγεθος	Έλασμα 1	Έλασμα 2	Έλασμα 3	Έλασμα 4
	Δεδομένα	L (mm)	2318	2290	2266
θ (deg)		13	10	5	1
ΔT (K)		711.85	711.85	711.85	711.85
α (1/K)		1.1E-5	1.1E-5	1.1E-5	1.1E-5
Αποτελέσματα	ΔL (mm)	18	18	18	18
	ΔL_x (mm)	4	3	-	-

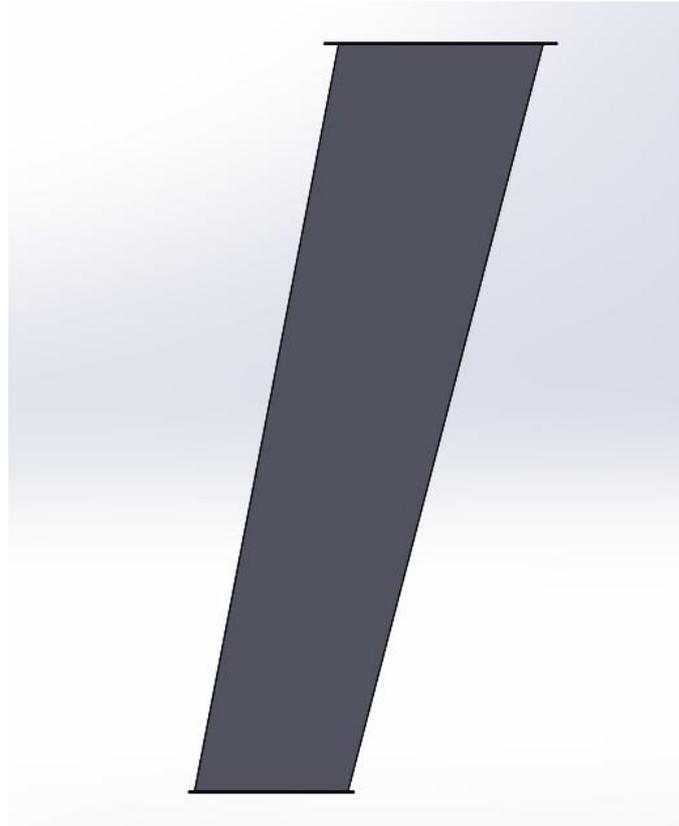
	ΔL_y (mm)	18	18	18	18
	ΔL_z (mm)	-	-	2	0

Ενώ οι διαστολές των εσωτερικών πλευρών των φλαντζών (σύνδεση με τον κινητήρα και σύνδεση με το άνοιγμα εισόδου καπνοδόχου) με τις οποίες συνδέονται τα τοιχώματα του διαχύτη παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.6.

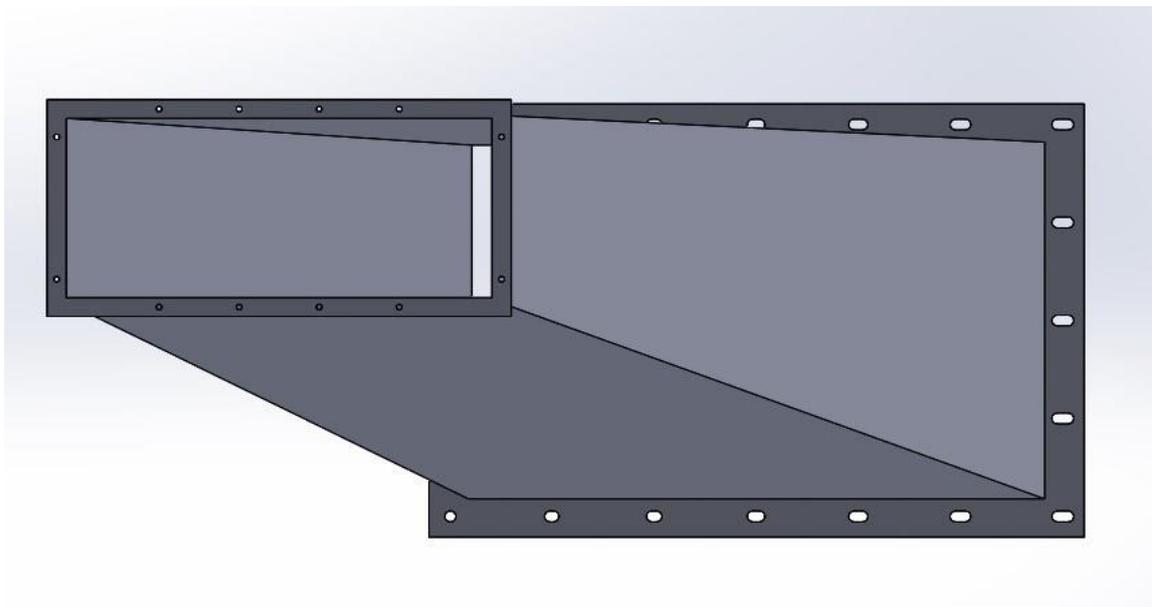
Πίνακας 3.6 : Υπολογισμοί θερμικών διαστολών φλαντζών

Μέγεθος	Φλάντζα κινητήρα	Φλάντζα κινητήρα	Φλάντζα καπνοδόχου	Φλάντζα καπνοδόχου
L (mm)	399	174	544	340
ΔT (K)	711.85	711.85	711.85	711.85
α (1/K)	1.1E-5	1.1E-5	1.1E-5	1.1E-5
ΔL_x (mm)	3	-	4	-
ΔL_z (mm)	-	1	-	3

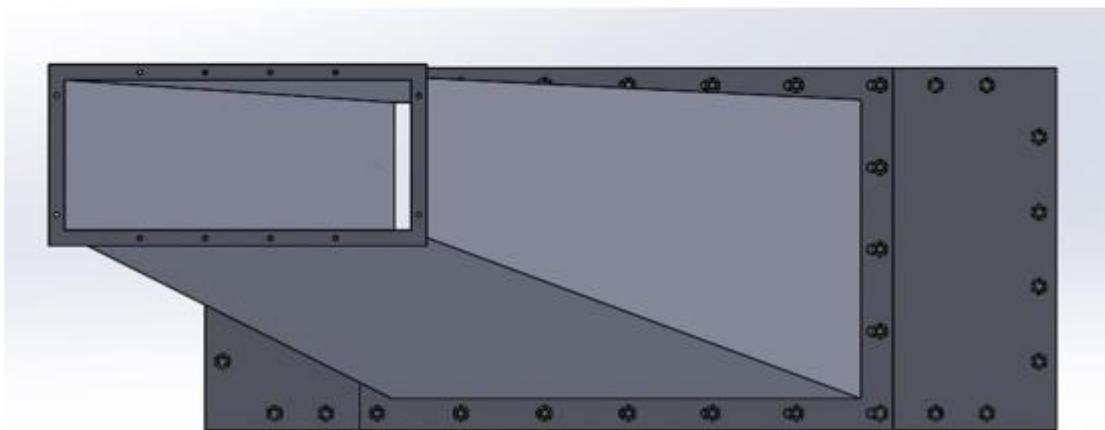
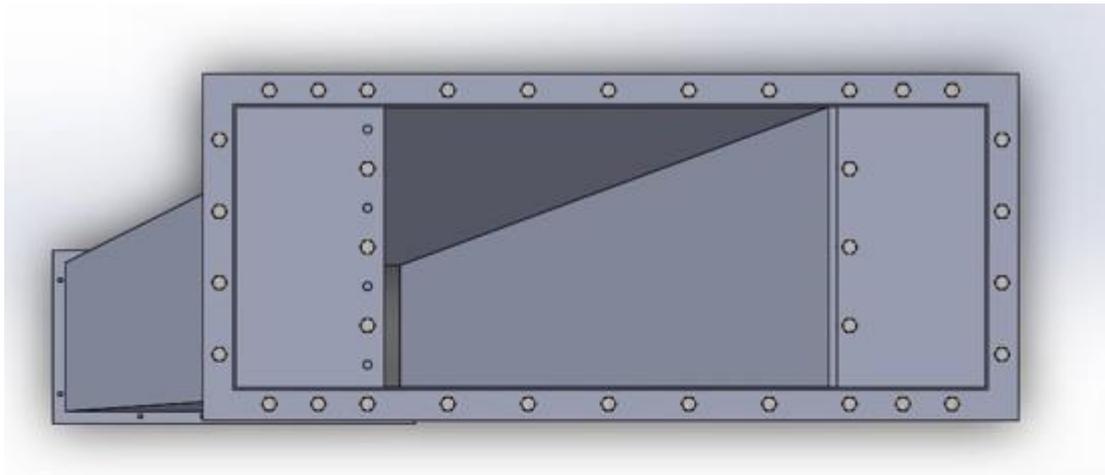
Μετά τον υπολογισμό των θερμικών διαστολών και τον συμψηφισμό τους στον σχεδιασμό του διαχύτη, παρήχθησαν τα μηχανολογικά σχέδια (SOLIDWORKS) της εγκατάστασης του διαχύτη στον κινητήρα στο δοκιμαστήριο του εργαστηρίου και παρουσιάζονται στο Παράρτημα Π2. Σε αυτήν την παράγραφο παρουσιάζονται ενδεικτικά η κάτοψη και η πρόοψη του διαχύτη στο Σχήμα 3.25 και Σχήμα 3.26 στο αντίστοιχα. Επίσης στο Σχήμα 3.27 παρουσιάζεται συνολικά η εγκατάσταση, η οποία περιλαμβάνει τον διαχύτη, την καπνοδόχο και το έλασμα για την πρόσδεση του διαχύτη επί της καπνοδόχου, τα οποία φαίνονται στο Σχήμα 3.28.



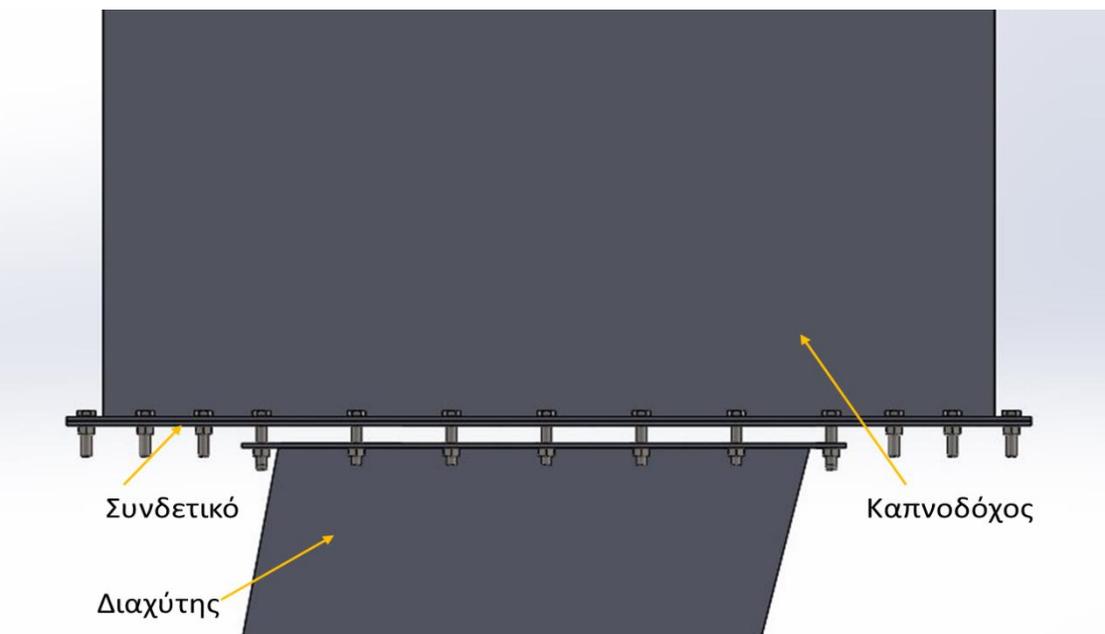
Σχήμα 3.25 : Κάτοψη διαχύτη



Σχήμα 3.26 : Πρόοψη διαχύτη



Σχήμα 3.27 : Συνολική παρουσίαση εγκατάστασης



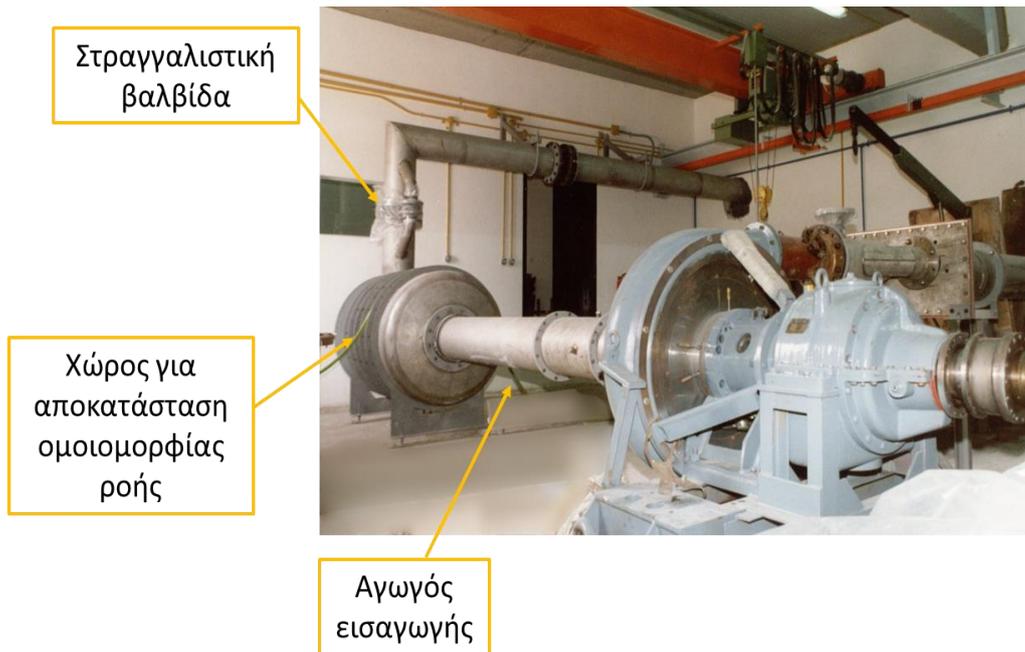
Σχήμα 3.28 : Παρουσίαση των μερών της εγκατάστασης

Επίσης μελετήθηκαν τα φορτία που ασκούνται στα τοιχώματα του διαχύτη, εξαιτίας της διαφοράς της στατικής πίεσης εντός του διαχύτη από την ατμοσφαιρική πίεση, διαδικασία η οποία παρουσιάζεται στο παράρτημα Π3. Από την παραπάνω ανάλυση προέκυψε πως το μεγαλύτερο φορτίο (εκτός του βάρους του διαχύτη) που καλούνται να εξισορροπήσουν οι στηρίξεις του διαχύτη έχει κατακόρυφη διεύθυνση, αντίθετη της βαρύτητας, με μέτρο περίπου 16 N. Τα φορτία στις άλλες διευθύνσεις προκύπτουν σχεδόν μηδενικά.

3.7 Διάταξη στραγγαλισμού ροής

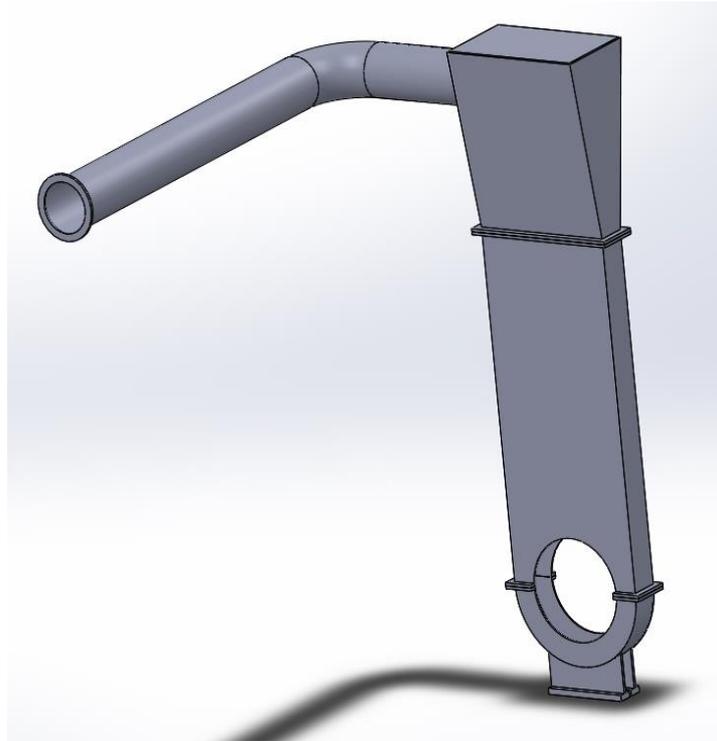
Στην παράγραφο έγινε αναφορά σε στραγγαλισμό της ροής εισόδου με σκοπό την επίτευξη μειωμένης ισχύος. Στην παρούσα παράγραφο γίνεται περιγραφή της διάταξης, χωρίς όμως να γίνεται σχεδιασμός της.

Ο όρος ‘στραγγαλισμός’ (throttling) σημαίνει πτώση ολικής πίεσης, η οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί με χρήση βαλβίδας για την διατάραξη της ροής. Ο αέρας από το περιβάλλον διέρχεται μέσω της βαλβίδας από την οποία εξέρχεται σε έναν προθάλαμο μεγάλων διαστάσεων. Ο συγκεκριμένος έχει σκοπό να δημιουργήσει ομοιόμορφες συνθήκες ροής στην είσοδο της μηχανής, αφού οι μεγάλες διαστάσεις του επιτρέπουν την εξομάλυνση των στροβιλισμών που δημιούργησε η βαλβίδα. Το ομοιόμορφο πεδίο ταχύτητας της ροής είναι πολύ σημαντικό για την λειτουργία, κυρίως, του συμπιεστή, αφού εκείνος δέχεται πρώτος την ροή. Όταν επικρατούν ανομοιόμορφες συνθήκες στην είσοδο του συμπιεστή, το κάθε πτερύγιο λειτουργεί διαφορετικά με αποτέλεσμα ο συμπιεστής να δέχεται ασύμμετρα φορτία. Η ασύμμετρη φόρτιση προκαλεί κόπωση των πτερυγίων και ταλαντώσεις του συγκροτήματος του συμπιεστή. Στο Σχήμα 3.29 παρουσιάζεται η διάταξη στραγγαλισμού (throttling) που διαθέτει το ΕΘΣ. Στο πάνω μέρος του σχήματος φαίνεται ο αγωγός εισόδου του αέρα περιβάλλοντος που τον οδηγεί στην στραγγαλιστική βαλβίδα και στη συνέχεια εισάγεται στον συμπιεστή.

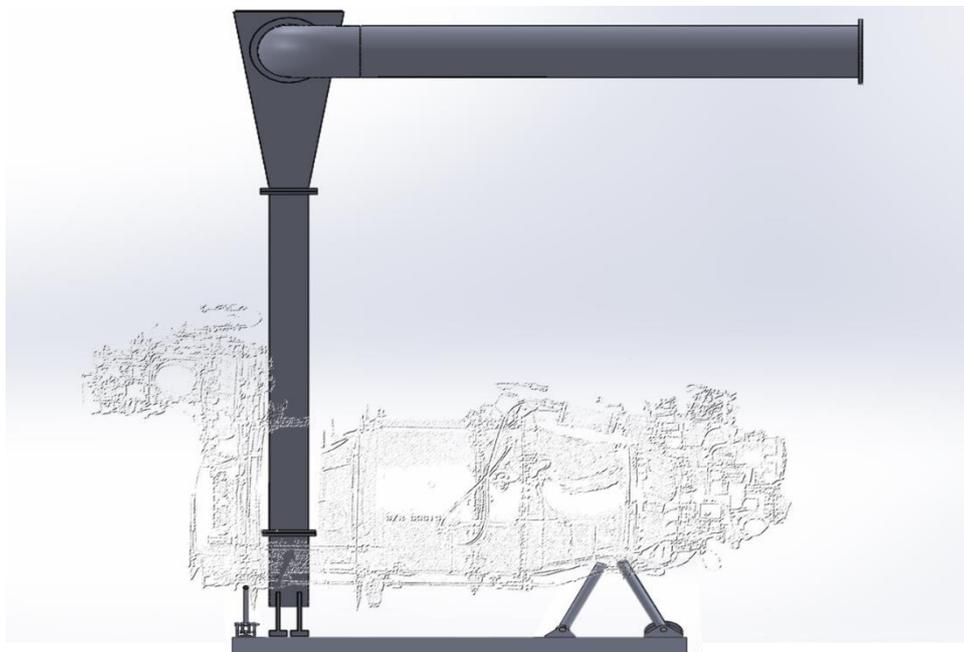


Σχήμα 3.29 : Διάταξη στραγγαλισμού ροής ΕΘΣ

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιήθηκε προκαταρκτικός σχεδιασμός της διάταξης εισαγωγής του αέρα, μετά τον στραγγαλισμό, στον κινητήρα. Τονίζεται πως πρόκειται για προκαταρκτικό σχεδιασμό και η μορφή και οι διαστάσεις της διάταξης δεν είναι οι τελικές. Η παραπάνω διάταξη αποτελείται από τους αγωγούς που οδηγούν τον αέρα στην είσοδο του κινητήρα και από το κέλυφος που περιβάλλει την εισαγωγή του κινητήρα, ώστε ο αέρας να οδηγείται εντός του κινητήρα και να μην διαφύγει στο περιβάλλον. Τα παραπάνω παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.30, ενώ σε συνεργασία με τον κινητήρα παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.31. Ο σχεδιασμός του κελύφους έγινε, ώστε να προσεγγίζονται οι αναλογίες των μεγεθών, όπως εκείνες προκύπτουν από την διεθνή βιβλιογραφία για υπάρχουσες διατάξεις, τηρουμένων των περιορισμών που θέτει το συγκρότημα του κινητήρα (π.χ. απόσταση από άτρακτο, όπως φαίνεται στο παράρτημα Π2). Επίσης για την δημιουργία ομοιόμορφου πεδίου ροής του αέρα κατά την είσοδό του στον κινητήρα είναι απαραίτητο να γίνει χρήση πτερυγίων οδηγών με σκοπό την στροφή της ροής ομαλά με κατεύθυνση προς την εισαγωγή του κινητήρα.

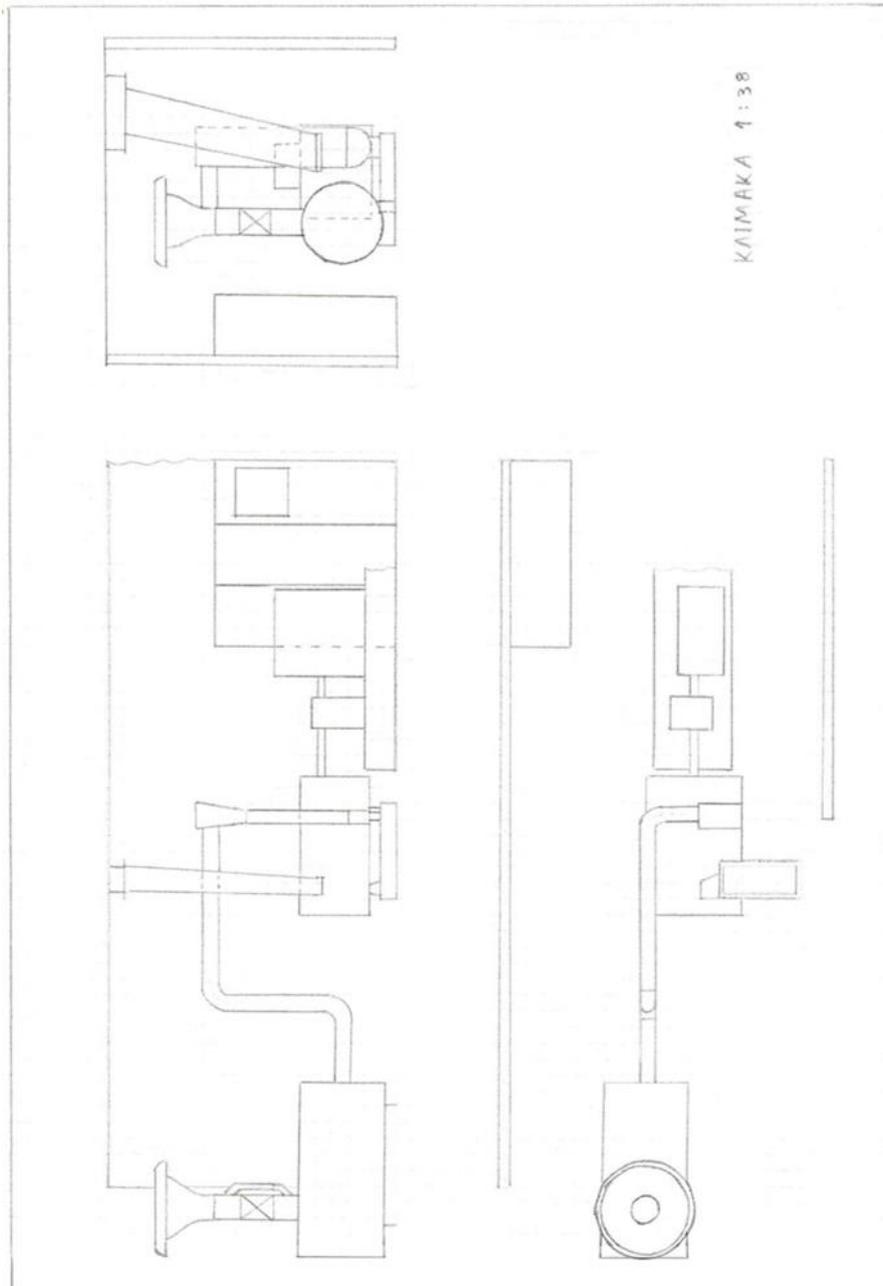


Σχήμα 3.30 : Διάταξη εισαγωγής του αέρα στον κινητήρα



Σχήμα 3.31 : Εισαγωγή αέρα στον εγκατεστημένο κινητήρα δοκιμαστηρίου

Στο παράρτημα Π2 παρουσιάζεται το μηχανολογικό σχέδιο του χώρου δοκιμών μετά την τοποθέτηση του κινητήρα στο δοκιμαστήριο. Το σύνολο της εγκατάστασης μετά την τοποθέτηση του κινητήρα στο δοκιμαστήριο και την προσθήκη του διαχύτη και της διάταξης στραγγαλισμού παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.32. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται η κάτοψη, η πρόοψη και η πλάγια όψη από αριστερά. Επίσης διακρίνεται ο μειωτήρας στροφών, ο οποίος οδηγεί στην γεννήτρια που διαθέτει το εργαστήριο για την απορρόφηση της παραγόμενης ισχύος από τον κινητήρα.



Σχήμα 3.32 : Όψεις συνολικής εγκατάστασης δοκιμών

Μετά τον σχεδιασμό της εγκατάστασης του δοκιμαστηρίου, όπου θα λειτουργεί ο κινητήρας, απαιτείται ακόμα να επιλεγούν και να τοποθετηθούν τα κατάλληλα μετρητικά όργανα για να γίνει αξιολόγηση της λειτουργίας και της απόδοσης του κινητήρα, διαδικασία που παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο.

4

Μετρητική εγκατάσταση

Ο σκοπός των δοκιμών των κινητήρων είναι να αποκτηθεί γνώση για την λειτουργία του, δηλαδή για τις συνολικές επιδόσεις του και τις επιδόσεις των συνιστωσών του. Για να πραγματοποιηθούν τα παραπάνω απαιτείται μετρητικός εξοπλισμός, ο οποίος διαμορφώνεται από το πλήθος των μετρήσεων και των μετρούμενων μεγεθών και από την επιθυμητή ακρίβεια. Στο τρέχον κεφάλαιο παρουσιάζονται τα μετρούμενα μεγέθη και ο λόγος για τον οποίο είναι χρήσιμη η γνώση τους. Επίσης γίνεται αναφορά στα μετρητικά όργανα, στα χαρακτηριστικά τους και στην κατάλληλη εφαρμογή τους.

4.1 Μετρούμενα μεγέθη

Τα μεγέθη που πρωτίστως περιγράφουν την λειτουργία της μηχανής είναι η πίεση P και η θερμοκρασία T περιβάλλοντος και των θέσεων της μηχανής. Τα παραπάνω μεγέθη βοηθούν στην αναγωγή των υπολοίπων μετρήσεων σε συνθήκες κανονικής μέρας, στην μέτρηση ή/και στον υπολογισμό της παροχής μάζας \dot{m} του εργαζόμενου μέσου, καθώς και στον υπολογισμό των επιδόσεων κάθε συνιστώσας (λόγος πίεσης, ανηγμένη παροχή $\dot{m}\sqrt{T}/P$ και ανηγμένες στροφές N/\sqrt{T}). Ακόμα, η γνώση των θερμοκρασιών συμβάλλει στον έλεγχο των ορίων του κινητήρα αναφορικά με τις αντοχές των υλικών.

Επίσης, πάντα μετριέται η παροχή του καυσίμου, αφού αποτελεί παράμετρο ελέγχου για την λειτουργία της μηχανής και οι μεταβολές του φορτίου πραγματοποιούνται συνήθως με αλλαγή της παροχής του καυσίμου.

Μία ακόμα παράμετρος που χαρακτηρίζει την λειτουργία κάθε είδους στροβιλομηχανής είναι η ταχύτητα περιστροφής των ατράκτων. Είναι απαραίτητη ως μέτρηση, γιατί έτσι ελέγχεται η καταπόνηση των συνιστωσών και των εδράνων αναφορικά με την μηχανική τους αντοχή. Επίσης, ένα μέγεθος που δεν συνδέεται άμεσα με την θερμοδυναμική συμπεριφορά της μηχανής, αλλά με την γενικότερη συμπεριφορά της είναι οι κραδασμοί και συνίσταται να λαμβάνονται πάντα υπ' όψη.

Τέλος, ανάλογα με το είδος της μηχανής, δηλαδή αν πρόκειται για μηχανή παραγωγής ώσης ή παραγωγής ισχύος προς εκμετάλλευση, επιλέγεται να μετρηθεί η ανάλογη παράμετρος. Αναφορικά, λοιπόν, με την παρούσα εργασία που έχει ως αντικείμενο μελέτης έναν στροβιλοκινητήρα με στρόβιλο ισχύος, το μέγεθος που μπορεί να μετρηθεί και συνδέεται άμεσα με την λειτουργία του είναι η παραγόμενη ισχύς.

4.2 Όργανα μέτρησης

Στην τρέχουσα παράγραφο παρουσιάζονται τα όργανα και οι μέθοδοι μέτρησης^[4] για τα μεγέθη που παρουσιάστηκαν παραπάνω και περιγράφεται ο σχεδιασμός του μετρητικού συστήματος του δοκιμαστηρίου. Κατά τις δοκιμές κινητήρων τα μετρούμενα μεγέθη είναι επιθυμητό να καταγράφονται και να είναι άμεσα διαθέσιμα για τον υπολογισμό των επιδόσεων του κινητήρα (Κεφάλαιο 5). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η διάγνωση της κατάστασης της μηχανής, όπου υπολογισμοί πραγματοποιούνται καθώς ο κινητήρας λειτουργεί. Βάσει των παραπάνω επιλέγονται συνήθως ηλεκτρικοί μεταλλάκτες (electrical transducers), δηλαδή μεταλλάκτες που εξάγουν ηλεκτρικό σήμα (ρεύμα ή τάση), το οποίο ψηφιοποιείται και αξιοποιείται από Η/Υ. Μηχανικοί μεταλλάκτες (mechanical transducers) χρησιμοποιούνται για μία ασφαλή εκτίμηση των μεγεθών, αφού η λειτουργία τους δεν βασίζεται σε περίπλοκα ηλεκτρικά κυκλώματα, όπως συμβαίνει στην προηγούμενη περίπτωση μεταλλακτών.

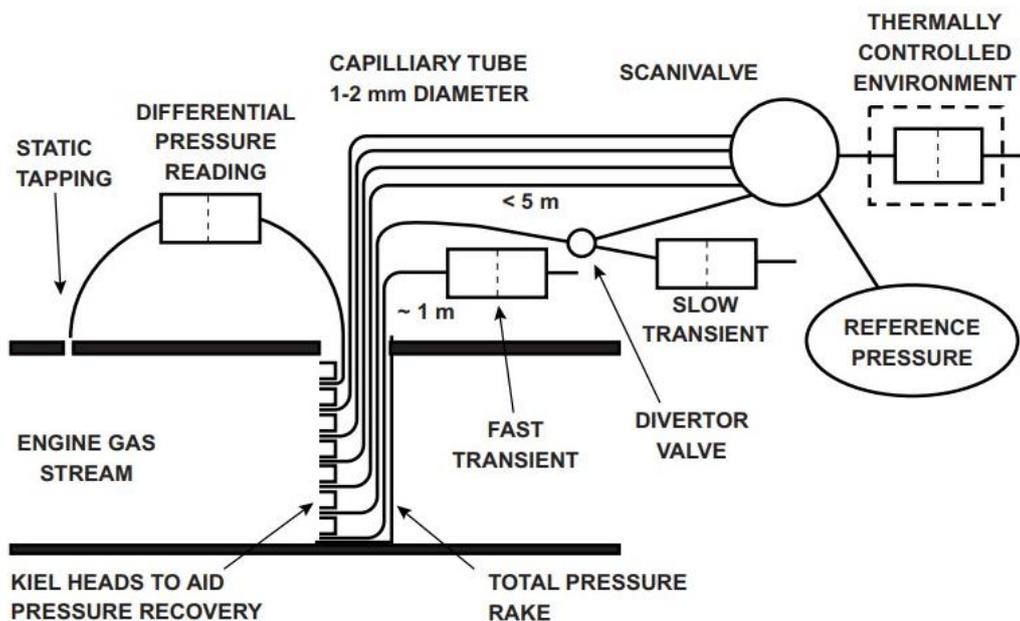
4.2.1 Μέτρηση πίεσης

Η μέτρηση της ολικής και στατικής πίεσης μπορεί να γίνει αναλογικά με μανόμετρα. Επειδή η λειτουργία τους είναι απλή και δεν διαθέτουν πολύπλοκα ηλεκτρονικά κυκλώματα, όπως οι ψηφιακοί μεταλλάκτες, είναι αξιόπιστα και κατάλληλα για μία πρώτη εκτίμηση της πίεσης, αλλά και για έλεγχο της λειτουργίας των ηλεκτρονικών οργάνων. Διαφορετικά χρησιμοποιούνται μεταλλάκτες, οι οποίοι παρέχουν ως έξοδο ηλεκτρικό σήμα με εισόδους την προς μέτρηση πίεση της μηχανής και μία πίεση αναφοράς. Διαθέτουν μία μεμβράνη, η οποία με την επίδραση της πίεσης παραμορφώνεται και αυτή η παραμόρφωση μεταφράζεται σε ηλεκτρικό σήμα. Έχουν σαφώς μεγαλύτερη ακρίβεια από τα μανόμετρα, μπορεί όμως είναι πιο ευαίσθητοι σε αλλαγές της θερμοκρασίας με αποτέλεσμα να απαιτείται επαναβαθμονόμησή τους.

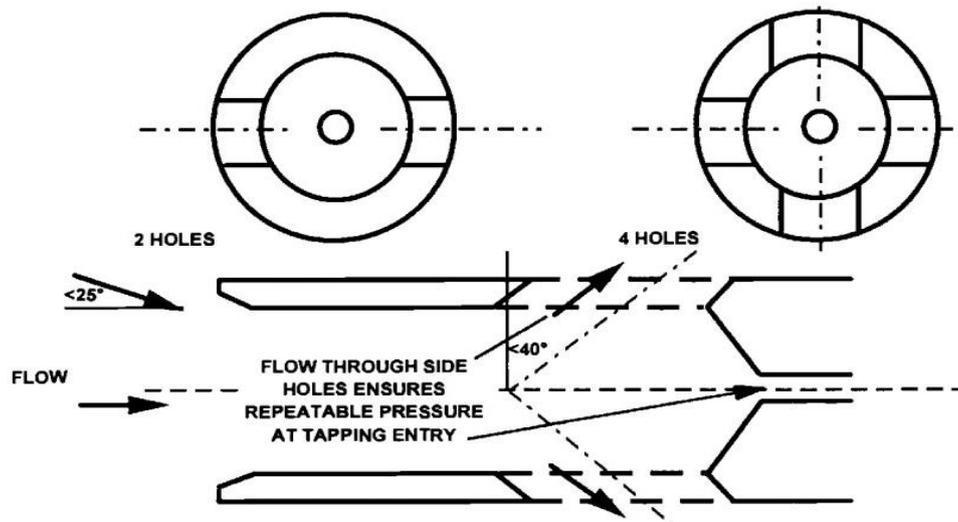
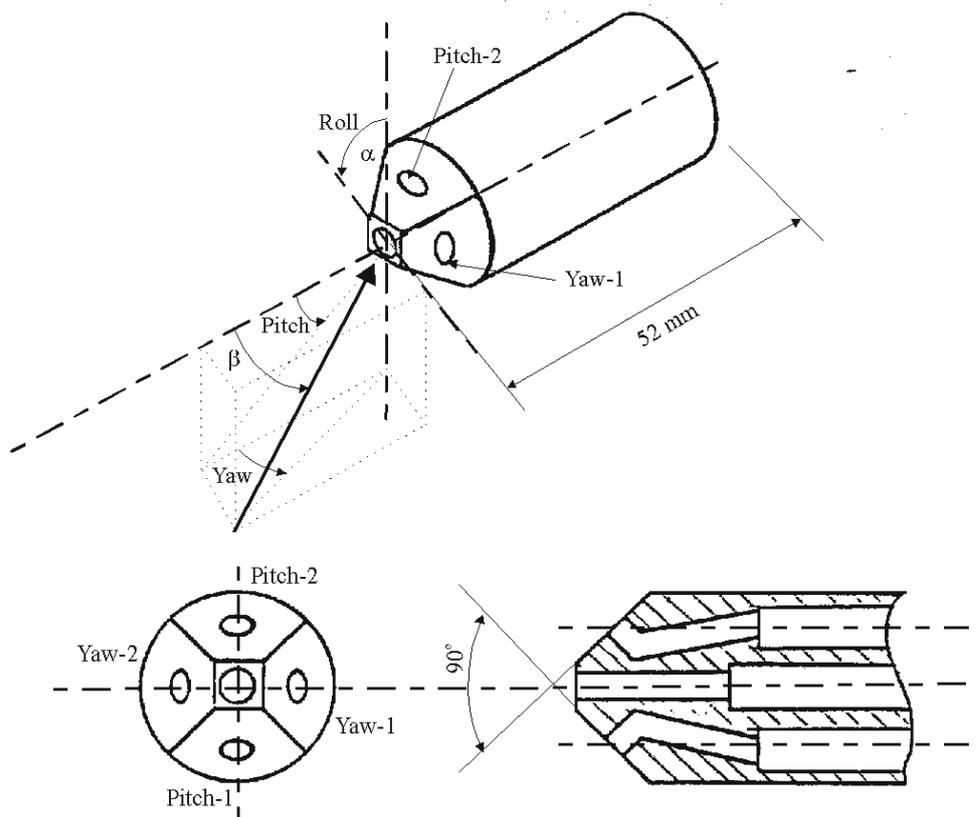
Για την μέτρηση ιδιαίτερα της ολικής πίεσης ενδείκνυται να χρησιμοποιούνται περισσότεροι από ένας αισθητήρες, επειδή κατά την λειτουργία της μηχανής δημιουργούνται προφίλ πίεσης και κατά την ακτίνα και κατά την περιφέρεια, εξαιτίας του ύψους των πτερυγίων και της παρουσίας των πτερυγίων του στάτορα, αν πρόκειται για μετρήσεις σε συμπιεστή. Ακόμα είναι πολύ σύνηθες να υπάρχει ανομοιομορφία της ροής στην είσοδο του συμπιεστή, η οποία προκλήθηκε κατά την είσοδο της ροής στην μηχανή. Έτσι, φαίνεται επιτακτική η ανάγκη για μετρήσεις σε περισσότερα σημεία σε οποιαδήποτε θέση της μηχανής. Ως τιμή για την πίεση λαμβάνεται η μέση τιμή των μετρήσεων. Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται η διάταξη των οργάνων για την ακτινική μέτρηση της ολικής και της στατικής πίεσης σε μία θέση της μηχανής. Όπως παρουσιάζεται, κάθε σωλήνας πίεσης κάθε οπής, συνδέεται σε ένα δοχείο μεγαλύτερου όγκου στο οποίο έχουμε εξισορρόπηση των πιέσεων από όλους τους σωλήνες πίεσης που

φθάνουν εκεί. Με αυτόν τον τρόπο λαμβάνεται η μέση πίεση στην συγκεκριμένη διατομή. Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθείται, όταν πρόκειται για περιφερειακές μετρήσεις. Επίσης, στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η κατά την ακτίνα μέτρηση της ολικής πίεσης για τους λόγους που προαναφέρθηκαν, καθώς και ο έλεγχος της θερμοκρασίας του μεταλλάκτη.

Ένα ακόμα σημείο που απαιτεί προσοχή είναι το γεγονός ότι το ρευστό εξέρχεται των περυγώσεων με μία διεύθυνση, η οποία διαφέρει από εκείνη του άξονα της μηχανής. Οπότε αν η διεύθυνση του μετρητικού δεν είναι αντίθετη εκείνης της ροής, δεν μπορεί να ανακτηθεί η ολική πίεση, αφού δεν θα υπάρξει ανακοπή της ροής. Επίσης για σημεία λειτουργίας εκτός σχεδίασης δεν είναι γνωστή η γωνία που σχηματίζει το διάνυσμα της ταχύτητας της ροής ως προς τον άξονα της μηχανής, καθώς επίσης η διεύθυνση της ροής μεταβάλλεται κατά την ακτίνα, εξαιτίας της διαφορετικής γραμμικής ταχύτητας του περυγίου καθ' ύψος. Για να μετρηθεί σε τέτοιες περιπτώσεις η ολική πίεση απαιτείται να χρησιμοποιηθεί στο άκρο του οργάνου μία κεφαλή Kiel δύο ή τεσσάρων οπών ή διαφορετικά ένας σωλήνας τριών ή πέντε οπών, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2 και Σχήμα 4.3 αντίστοιχα.



Σχήμα 4.1 : Διάταξη μετρητικών οργάνων και χρήση μεταλλάκτη ολικής και στατικής πίεσης^[4]

Σχήμα 4.2 : Κεφαλή Kiel^[4]Σχήμα 4.3 : Σολήνας πίεσης πέντε οπών^[2]

Όπως φαίνεται και από τα παραπάνω σχήματα ο αριθμός των οπών έχει σημασία για το επίπεδο στο οποίο ανήκει η διεύθυνση της ροής. Αν η κίνηση της ροής λαμβάνει χώρα σε επίπεδο κάθετο σε εκείνο της ακτίνας, τότε απαιτείται να χρησιμοποιηθεί ένας σωλήνας τριών οπών. Σε αντίθετη περίπτωση που η ροή διαθέτει και ακτινική συνιστώσα ταχύτητας (κίνηση στον χώρο), απαιτείται σωλήνας πέντε οπών. Για την αξιοποίηση, όμως, των παραπάνω οργάνων απαιτείται η γνώση των καμπύλων βαθμονόμησής τους για διεξαγωγή έγκυρων αποτελεσμάτων. Από τις καμπύλες βαθμονόμησης εκτός από την ολική και τη στατική πίεση της ροής, προκύπτει επίσης και η γωνία της ως προς το μετρητικό.

4.2.2 Μέτρηση θερμοκρασίας

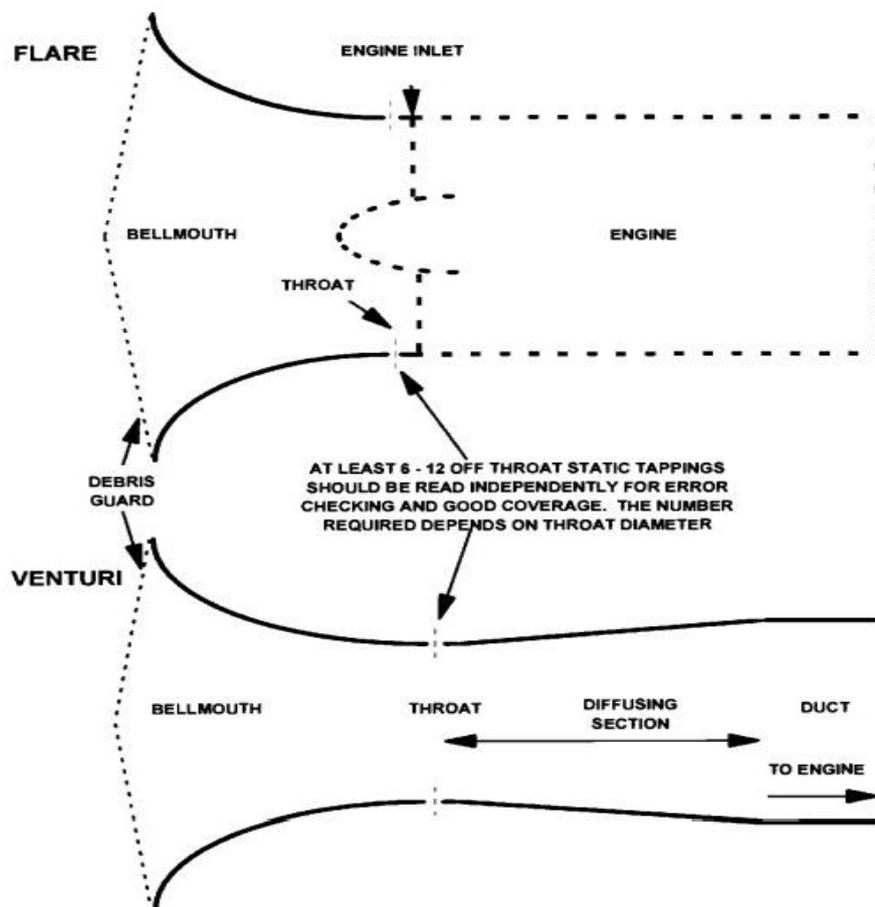
Όταν αναφερόμαστε σε μέτρηση θερμοκρασίας, εννοείται πως πρόκειται για μέτρηση της ολικής θερμοκρασίας. Το παραπάνω συμβαίνει, γιατί η συσκευή προκαλεί ανακοπή στην ροή. Για την μέτρηση της ολικής θερμοκρασίας χρησιμοποιούνται συνήθως δύο είδη οργάνων, τα θερμομέτρα αντίστασης (RBT) και τα θερμοζεύγη. Τα θερμομέτρα αντίστασης, τα οποία με την αλλαγή της θερμοκρασίας μεταβάλλουν την ηλεκτρική αγωγιμότητά τους, έχουν πολύ καλή ακρίβεια, αλλά επειδή το κόστος τους είναι υψηλό και η αντοχή τους περιορίζεται στα 1000 K χρησιμοποιούνται κυρίως για την μέτρηση της ολικής θερμοκρασίας στην είσοδο της μηχανής. Τα θερμοζεύγη είναι λιγότερο ακριβή, αλλά η αντοχή τους σε ακραίες θερμοκρασίες είναι μεγαλύτερη και για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται για την μέτρηση των θερμοκρασιών στο θερμό τμήμα της μηχανής και συγκεκριμένα για την καταγραφή του προφίλ των θερμοκρασιών που υπάρχει μετά τον στρόβιλο. Αυτό το έντονο προφίλ δημιουργείται από την ‘σημειακή’ έγχυση του καυσίμου από τον κάθε εγχυτήρα στον θάλαμο καύσης.

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, για την καταγραφή ανομοιόμορφων πεδίων απαιτούνται μετρήσεις σε πολλά σημεία για την ίδια θέση. Στην βιβλιογραφία αναφέρεται πως ιδιαίτερα για το θερμοκρασιακό πεδίο στο θερμό τμήμα της μηχανής ενδείκνυται να χρησιμοποιούνται τουλάχιστον 8 θερμοζεύγη κατά την περιφέρεια και τουλάχιστον 3 κατά την ακτίνα.

4.2.3 Μέτρηση παροχής μάζας εργαζόμενου μέσου

Για την μέτρηση της παροχής μάζας του εργαζόμενου συμπιεστού μέσου σε μία θέση γνωστής διατομής χρησιμοποιούνται οι μετρήσεις της ολικής και στατικής πίεσης και της ολικής θερμοκρασίας. Στην περίπτωση, όμως, που το ρευστό θεωρείται ασυμπιεστο (χαμηλοί αριθμοί Mach), όπως στην είσοδο του κινητήρα, χρησιμοποιούνται ειδικά διαμορφωμένοι αγωγοί (flare, venturi), όπως για παράδειγμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.4, οι οποίοι, όμως δημιουργούν πτώση ολικής πίεσης στη ροή. Συγκεκριμένα ο

αγωγός τύπου Venturi απαιτεί μεγάλο μήκος για την εγκατάστασή του με σκοπό την ομαλή αποκατάσταση της ροής στην έξοδό του, οι απώλειες, όμως, διατηρούνται υψηλές. Για τον καθορισμό της παροχής μάζας ασυμπίεστου ρευστού απαιτούνται οι μετρήσεις στατικής πίεσης σε δύο θέσεις γνωστών διατομών κατά μήκος του αγωγού,



Σχήμα 4.4 : Αγωγοί τύπου flare και venturi^[4]

4.2.4 Μέτρηση ταχύτητας περιστροφής

Η μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής πραγματοποιείται μέσω ενός οδοντωτού τροχού με γνωστό αριθμό οδόντων και ενός ηλεκτρονικού αισθητήρα, ο οποίος διαθέτει έναν μόνιμο μαγνήτη, ανιχνεύει το πέρασμα των οδόντων και παράγει ανάλογο ηλεκτρικό σήμα. Για σταθερή κατάσταση λειτουργίας, ο καθορισμός της ταχύτητας περιστροφής γίνεται με πολύ καλή ακρίβεια με καταγραφή των παλμών σε ένα γνωστό χρονικό διάστημα.

Ένας άλλος τρόπος μέτρησης της ταχύτητας περιστροφής είναι με χρήση ταχυμέτρου. Σε αυτή τη διάταξη υπάρχει ένας άξονας με τυλίγματα εντός μαγνητικού πεδίου. Ο παραπάνω άξονας συνδέεται με την άτρακτο, της οποίας η ταχύτητα περιστροφής είναι επιθυμητή προς μέτρηση. Με αυτόν τον τρόπο ο άξονας

περιστρέφεται εντός του μαγνητικού πεδίου και δημιουργείται τάση στα άκρα των τυλιγμάτων, η οποία μεταφράζεται σε ταχύτητα περιστροφής.

4.2.5 Μέτρηση ροπής ατράκτου

Αφορά κινητήρες, οι οποίοι εξάγουν ισχύ μέσω ατράκτου. Η μέτρηση της ροπής πραγματοποιείται μέσω αισθητήρων (strain gauges) που αναγνωρίζουν την γωνιακή παραμόρφωση των δύο άκρων ενός συγκεκριμένου μήκους της ατράκτου. Η παραπάνω παραμόρφωση μεταφράζεται σε εφαρμοζόμενη ροπή επί της ατράκτου. Επιπλέον, με τη γνώση της γωνιακής ταχύτητας της ατράκτου προκύπτει η ισχύς που μεταδίδει η άτρακτος. Επίσης, η γνώση της ισχύος συμβάλλει στον υπολογισμό της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου, ένα μέγεθος αντιπροσωπευτικό της εύρυθμης λειτουργίας της μηχανής, αλλά και του κόστους λειτουργίας της.

Στον κινητήρα PT6T-6 η μέτρηση της ροπής της ατράκτου εξόδου^[5] γίνεται μέσω μέτρησης της πίεσης σε έναν θάλαμο λαδιού με βαλβίδα ελέγχου, η οποία δημιουργείται για να ισορροπήσει αξονικά η δεύτερη ελικοειδής βαθμίδα του μειωτήρα στροφών. Κατά την μετάδοση της ισχύος μέσω της ελικοειδούς βαθμίδας, προκαλείται αξονική μετατόπιση στο οδοντωτό τροχό της δεύτερης βαθμίδας, εξαιτίας των φορτίων που δέχεται η οδόντωση. Αυτή η μετατόπιση γίνεται εντός ενός θαλάμου λαδιού και η πίεση που δημιουργείται εξισορροπεί το αξονικό φορτίο που δέχεται ο οδοντωτός τροχός. Με τη γνώση της σχέσης μετάδοσης, η πίεση ανάγεται σε ροπή στην άτρακτο εξόδου.

4.2.6 Μέτρηση παροχής καυσίμου

Η παροχή καυσίμου είναι πολύ σημαντική παράμετρος για την λειτουργία της μηχανής και τα συστήματα ελέγχου επιδρούν στην λειτουργία της μηχανής μεταβάλλοντας την παροχή καυσίμου. Η μέτρηση της ογκομετρικής παροχής καυσίμου στις περισσότερες περιπτώσεις γίνεται με παροχόμετρα που διαθέτουν εσωτερικά έναν στρόβιλο (turbine flow meter) παρέχοντας υψηλή ακρίβεια. Η ροή του καυσίμου περιστρέφει τον στρόβιλο με την ταχύτητα περιστροφής να είναι συνάρτηση της παροχής. Η ταχύτητα περιστροφής μετριέται από αισθητήρες και με γνωστή την πυκνότητα του καυσίμου προκύπτει η παροχή μάζας του καυσίμου. Επίσης, η ογκομετρική παροχή καυσίμου είναι δυνατόν να μετρηθεί με μηχανισμό εμβόλου, όπου το έμβολο κινείται σε θάλαμο γνωστού όγκου και με αυτόν τον τρόπο είναι γνωστή η ογκομετρική παροχή του καυσίμου σε κάθε κύκλο λειτουργίας του οργάνου. Παρέχει πολύ υψηλή ακρίβεια στην περίπτωση που η ροή είναι σταθερή.

Για αξιόπιστες μετρήσεις συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται σε σειρά δύο ειδών παροχόμετρα, τηρώντας ασφαλή απόσταση μεταξύ των οργάνων για να μην υπάρξει διατάραξη της ροής.

4.3 Μεγέθη και θέσεις μέτρησης

Όπως έχει προαναφερθεί είναι επιθυμητή η γνώση όσο το δυνατό περισσότερων μεγεθών σε όλες τις θέσεις τις μηχανής, γιατί με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατός ο καθορισμός των επιδόσεων κάθε συνιστώσας. Σε αυτό το σημείο, όμως, επεμβαίνουν οι περιορισμοί της αντοχής των υλικών των μετρητικών οργάνων, καθώς οι περιορισμοί πρόσβασης του κελύφους της μηχανής, γεγονός που επιτρέπει να γίνουν μετρήσεις μόνο σε σημεία όπου υπάρχουν οι κατάλληλες υποδοχές. Για παράδειγμα θα ήταν πολύ χρήσιμο να γνώριζε κανείς το προφίλ των θερμοκρασιών στην έξοδο του θαλάμου καύσης, γιατί όπως έχει προαναφερθεί παρέχει γνώση για την υγεία των συνιστωσών του θαλάμου καύσης (π.χ. εγχυτήρες καυσίμου). Επίσης το προφίλ των θερμοκρασιών αφορά τις συνθήκες στην είσοδο του στροβίλου, όπου απαιτείται το θερμοκρασιακό πεδίο να είναι όσο το δυνατό ομοιόμορφο για αποφυγή καταστροφικών βλαβών στα πτερύγια του ρότορα του στροβίλου. Όσο χρήσιμες και αν είναι, όμως τέτοιου είδους μετρήσεις δεν μπορούν εύκολα να πραγματοποιηθούν, εξαιτίας των ακραίων θερμοκρασιών που επικρατούν στο θερμό τμήμα της μηχανής. Το αποτέλεσμα των παραπάνω είναι πως μετρούνται όσο το δυνατόν περισσότερα μεγέθη με τα υπόλοιπα να προκύπτουν από υπολογισμούς με βάση τις μετρήσεις που προηγήθηκαν.

Συγκεκριμένα για τον κινητήρα ΡΤ6Τ-6 τα θερμοδυναμικά μεγέθη των οποίων είναι επιθυμητή η μέτρηση παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1. Τα μεγέθη παρουσιάζονται ως επιθυμητά, γιατί με βάση τα προαναφερθέντα δεν είναι σίγουρο ότι μπορεί να πραγματοποιηθεί η συγκεκριμένη μέτρηση στη συγκεκριμένη θέση. Η αρίθμηση των θέσεων γίνεται σύμφωνα με εκείνη που εφαρμόστηκε στο Κεφάλαιο 2.

Πίνακας 4.1 : Επιθυμητές μετρήσεις θερμοδυναμικών μεγεθών επί του κινητήρα

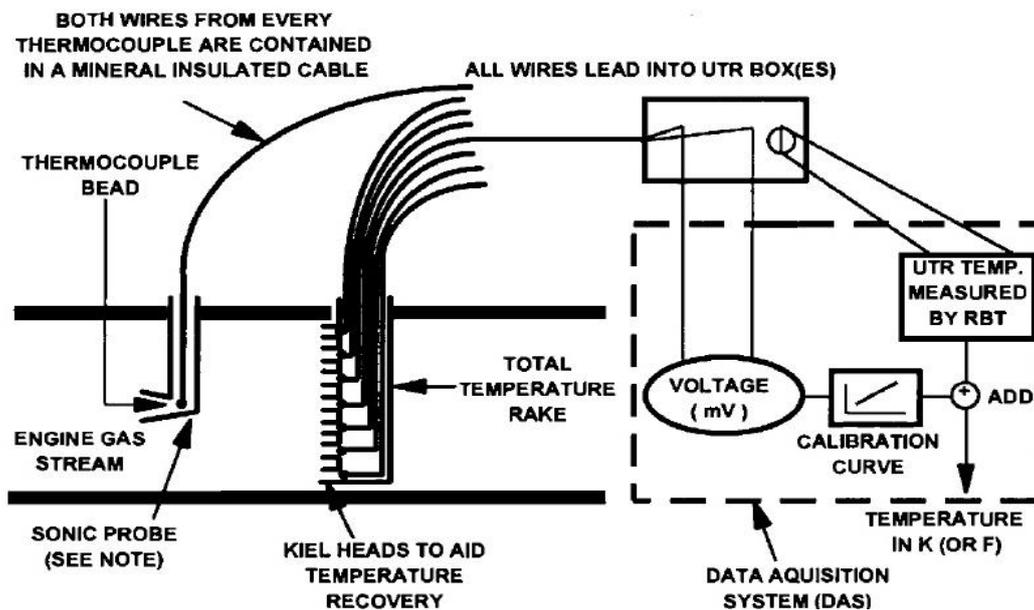
Θέση	Μέγεθος	Σημεία Μέτρησης	Τρόπος μέτρησης
0	Στατική θερμοκρασία	1	Σημειακά
	Στατική πίεση	1	Σημειακά
1	Ολική θερμοκρασία	3	Περιφερειακά
	Ολική πίεση	3	Περιφερειακά
2	Ολική θερμοκρασία	3	Περιφερειακά
	Ολική πίεση	3	Περιφερειακά
	Παροχή μάζας	-	-

2.5	Ολική θερμοκρασία	3	Περιφερειακά/Ακτινικά
	Ολική πίεση	3	Περιφερειακά/Ακτινικά
	Παροχή μάζας	-	-
3	Ολική θερμοκρασία	3	Περιφερειακά/Ακτινικά
	Ολική πίεση	3	Περιφερειακά/Ακτινικά
	Παροχή μάζας	-	-
5	Ολική θερμοκρασία	8	Περιφερειακά/Ακτινικά
	Ολική πίεση	3	Περιφερειακά/Ακτινικά
	Παροχή μάζας	-	-
6	Ολική θερμοκρασία	8	Περιφερειακά/Ακτινικά
	Ολική πίεση	3	Περιφερειακά/Ακτινικά

Ως σημεία μέτρησης εννοούνται οι θέσεις περιφερειακά της διατομής, όπου πραγματοποιείται μέτρηση. Όταν σε κάποια θέση πραγματοποιούνται πολλαπλές μετρήσεις, ως τελική ένδειξη λαμβάνεται η μέση τιμή των μεγεθών, εκτός των θερμοκρασιών στο θερμό τμήμα, όπου είναι επιθυμητή και η γνώση του θερμοκρασιακού πεδίου. Από τον Πίνακα 4.1 παραλείπεται η θέση 4, η οποία αντιστοιχεί στην έξοδο του θαλάμου καύσης, επειδή η θερμοκρασία άνω των 1300 K αποτελεί το όριο για την λειτουργία και την αντοχή των μετρητικών οργάνων. Επίσης για την μέτρηση της παροχής μάζας ρευστού σε μία διατομή απαιτείται και μέτρηση ακτινικών και περιφερειακών κατανομών της στατικής πίεσης, η οποία μπορεί να μετριέται στο κέλυφος της μηχανής στις θέσεις όπου πραγματοποιείται μέτρηση της ολικής πίεσης και σε ακτινικές θέσεις, καθώς και της διεύθυνσης της ροής. Τέλος, όταν αναφέρεται και ακτινική κατανομή των μετρητικών οργάνων, επιλέγεται, εξαιτίας του μικρού μεγέθους της μηχανής, να χρησιμοποιηθούν τρία όργανα κατά την ακτίνα σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους. Τα μη θερμοδυναμικά μεγέθη προς μέτρηση είναι οι ταχύτητες περιστροφής της ατράκτου της αεριογόνου και ισχύος και η ροπή που παράγεται από την άτρακτο ισχύος. Επειδή στο δοκιμαστήριο του ΕΘΣ υπάρχει γεννήτρια για την απορρόφηση της παραγόμενης ισχύος από τον κινητήρα, η απορροφούμενη ισχύς μπορεί να μετρηθεί ηλεκτρικός στην γεννήτρια. Η τελευταία μέτρηση μπορεί να αντικαταστήσει την μέτρηση της ροπής ατράκτου.

Για τις θερμοκρασίες περιβάλλοντος και εισόδου της μηχανής χρησιμοποιούνται θερμομέτρα αντίστασης που χαρακτηρίζονται από υψηλή ακρίβεια, ενώ για τις υπόλοιπες θερμοκρασίες στο 'κρύο' τμήμα της μηχανής χρησιμοποιούνται θερμοζεύγη. Η παραπάνω επιλογή δεν γίνεται εξαιτίας του εύρους μέτρησης ή της αντοχής των οργάνων, αλλά αναφορικά με το κόστος των οργάνων, το οποίο στην περίπτωση των θερμομέτρων αντίστασης είναι υψηλό. Στο 'θερμό' τμήμα της μηχανής και σύμφωνα με την υποπαράγραφο 5.2.2, χρησιμοποιούνται θερμοζεύγη, επειδή διαθέτουν μεγαλύτερη

αντοχή σε ακραίες θερμοκρασίες. Ως θερμοκρασία αναφοράς, όμως, των θερμοζευγών λαμβάνεται η μέτρηση των θερμομέτρων αντίστασης στην είσοδο του κινητήρα. Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα εγκατάστασης με θερμοζεύγη παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.5.



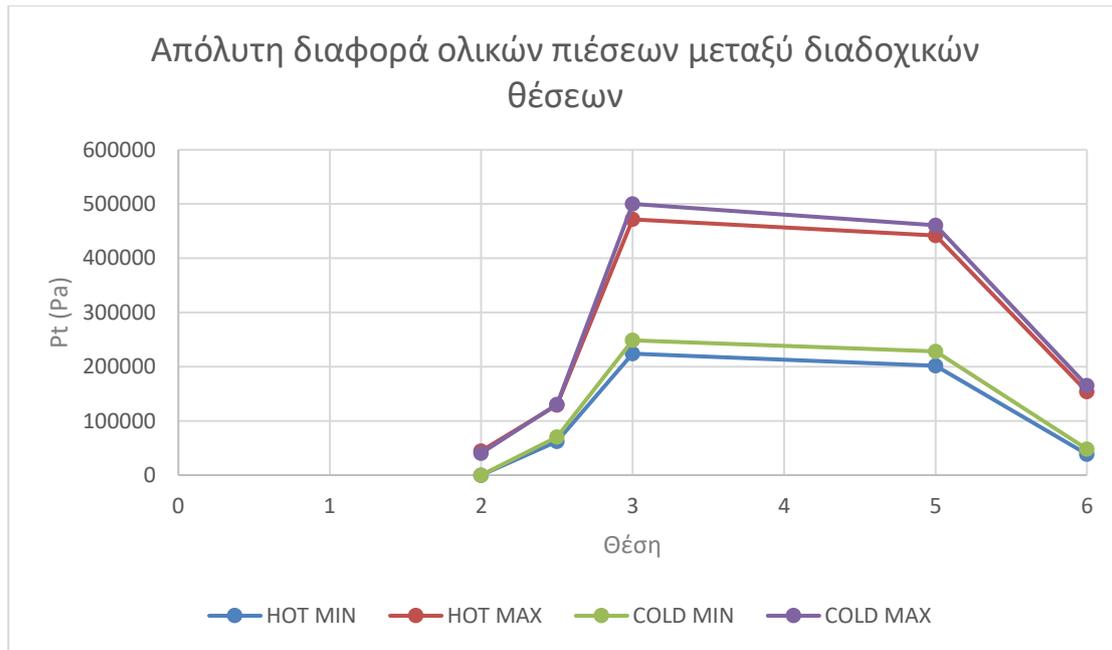
Σχήμα 4.5 : Μετρητικό σύστημα με θερμοζεύγη^[4]

Επίσης στο Σχήμα 4.5, όπως και στο Σχήμα 4.1, φαίνεται η παράλληλη σύνδεση των σημάτων εξόδου των μετρητικών για να ληφθεί ως αποτέλεσμα η μέση τιμή των μετρήσεων όλων των μετρητικών εκείνης της θέσης.

Για την μέτρηση της πίεσης χρησιμοποιούνται αποκλειστικά μεταλλάκτες. Η παράμετρος, η οποία απαιτεί προσοχή είναι η πίεση που χρησιμοποιείται ως αναφορά. Συνήθης τακτική είναι η μέτρηση διαφοράς πιέσεων, γιατί με αυτόν τον τρόπο η μετρούμενη ποσότητα φράζεται σε ένα πιο διαχειρίσιμο εύρος τιμών. Το παραπάνω έχει ως αποτέλεσμα να μην απαιτούνται πολλά είδη μεταλλακτών, με το κάθε είδος να λειτουργεί αποτελεσματικά σε διαφορετικό εύρος τιμών. Έτσι επιτυγχάνεται η χρήση ελαχίστων διαφορετικών τύπων μεταλλακτών με τη δυνατότητα για εφαρμογή σε ποικιλία θέσεων επί της μηχανής. Τελικά με τη γνώση μίας μόνο πίεσης και των διαφορών τους μπορούν να προκύψουν όλες οι άλλες πιέσεις.

Συγκεκριμένα για τον κινητήρα PT6T-6 διενεργήθηκε μία διερεύνηση αναφορικά με τις ελάχιστες και μέγιστες διαφορές πιέσεων για τις γραμμές λειτουργίας με στραγγαλισμό της ροής εισόδου που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3. Η προαναφερθείσα διερεύνηση έγινε μέσω του μοντέλου της μηχανής. Στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζεται το εύρος της διαφοράς ολικών πιέσεων διαδοχικών θέσεων που παρατηρείται σε κάθε θέση του κινητήρα για μία θερμή (308.15 K) και μία ψυχρή ημέρα

(278.15 K) (όπως συμβαίνει πραγματικά σε δοκιμές κινητήρων) με πίεση περιβάλλοντος ίση με αυτή της τυπικής ημέρας, με την προϋπόθεση ότι είναι δυνατή η επέμβαση σε κάθε θέση της μηχανής. Από το παρακάτω σχήμα φαίνεται πως στις θέσεις 3 και 5 θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ο ίδιος τύπος μεταλλάκτη, αφού το εύρος λειτουργίας είναι περίπου σταθερό. Αντίστοιχη παρατήρηση γίνεται για τις θέσεις 4 και 6. Από την παραπάνω ανάλυση παραλείπεται η θέση 4, αφού όπως έχει προαναφερθεί οι υψηλές θερμοκρασίες που επικρατούν μετά τον θάλαμο καύσης δεν επιτρέπουν την ύπαρξη και την εύρυθμη λειτουργία οργάνων μέτρησης.



Σχήμα 4.6 : Εύρος διαφοράς πιέσεων κάθε θέσης

Τέλος, η σημασία των μεγεθών που μετριοούνται δεν περιορίζεται μόνο για την γνώση της κατάστασης του κινητήρα, όπως για παράδειγμα η γνώση των θερμοκρασιών στο θερμό τμήμα. Με την γνώση των θερμοδυναμικών μεγεθών μπορούν να υπολογισθούν οι επιδόσεις της κάθε συνιστώσας. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο υπολογισμός του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης συνιστώσας, όπου απαιτείται η γνώση των ολικών θερμοκρασιών και πιέσεων εισόδου και εξόδου και προκύπτει από την γνωστή σχέση (ως π ορίζεται ο λόγος ολικών πιέσεων εξόδου και εισόδου).

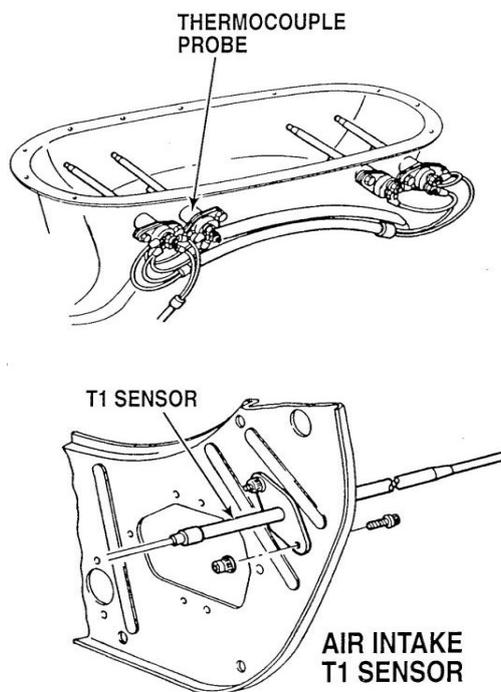
Αν, όμως, δεν είναι δυνατή η μέτρηση των κατάλληλων μεγεθών, δεν είναι δυνατό να υπολογισθούν οι επιδόσεις των συνιστωσών. Επειδή, λοιπόν τα μεγέθη που δεν είναι δυνατό να μετρηθούν είναι σημαντικά, προκύπτουν από υπολογισμούς. Έτσι, με βάση τα διαθέσιμα μεγέθη και εφαρμόζοντας ενεργειακούς υπολογισμούς μπορούμε να εκτιμήσουμε τα παραπάνω μεγέθη. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η έξοδος του θαλάμου καύσης για τους λόγους που έχουν αναφερθεί σε προηγούμενες παραγράφους. Η γνώση της ολικής θερμοκρασίας, παροχής μάζας εργαζόμενου μέσου

στην είσοδό του και η γνώση της παροχής μάζας του εγχυόμενου καυσίμου, οδηγούν στον υπολογισμό της ολικής θερμοκρασίας στην έξοδο του θαλάμου καύσης.

4.4 Υπάρχουσες θέσεις μέτρησης επί του κινητήρα

Στις επόμενες παραγράφους τηρείται η αρίθμηση των θέσεων του κινητήρα, σύμφωνα με το Σχήμα 2.2. Όπως έχει προαναφερθεί οι θέσεις μέτρησης επί του κινητήρα είναι περιορισμένες και φυσικά πολύ λιγότερες από τις επιθυμητές. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7, λαμβάνονται μετρήσεις της ολικής θερμοκρασίας εισόδου του κινητήρα και της θερμοκρασίας εξόδου του κινητήρα, των ταχυτήτων περιστροφής των ατράκτων αεριογόνου και ισχύος και της ροπής που μεταφέρει η άτρακτος εξόδου του μειωτήρα. Επίσης υπάρχει διαθέσιμη υποδοχή για τοποθέτηση οργάνου μέτρησης για την ολική πίεση στην έξοδο του ακτινικού συμπιεστή. Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται συνοπτικά τα μετρούμενα μεγέθη και η θέση μέτρησης, καθώς και ο αριθμός των σημείων μέτρησης.

Κατά την λειτουργία του κινητήρα τα σήματα των αισθητήρων του Πίνακα 4.2 οδηγούνται στον πίνακα ενδείξεων στο πιλοτήριο, αφού πρώτα δεχτούν διόρθωση αναφορικά με τις συνθήκες εισόδου του αέρα στον κινητήρα. Κατά την λειτουργία, όμως του κινητήρα στο δοκιμαστήριο είναι δυνατό να λαμβάνονται τα σήματα απευθείας από τα όργανα και να οδηγούνται για επεξεργασία σε Η/Υ.



Σχήμα 4.7 : Θέσεις μέτρησης θερμοκρασίας εισόδου και εξόδου

Πίνακας 4.2 : Μετρήσεις επί του κινητήρα

Μέγεθος	Θέση	Σημεία
Ολική θερμοκρασία εισόδου	1	1
Ολική πίεση	3	1
Ολική θερμοκρασία εξόδου	7	4
Ταχύτητα περιστροφής ατράκτου αεριογόνου	-	1
Ταχύτητα περιστροφής ατράκτου ισχύος	-	1
Ροπή ατράκτου εξόδου	-	1

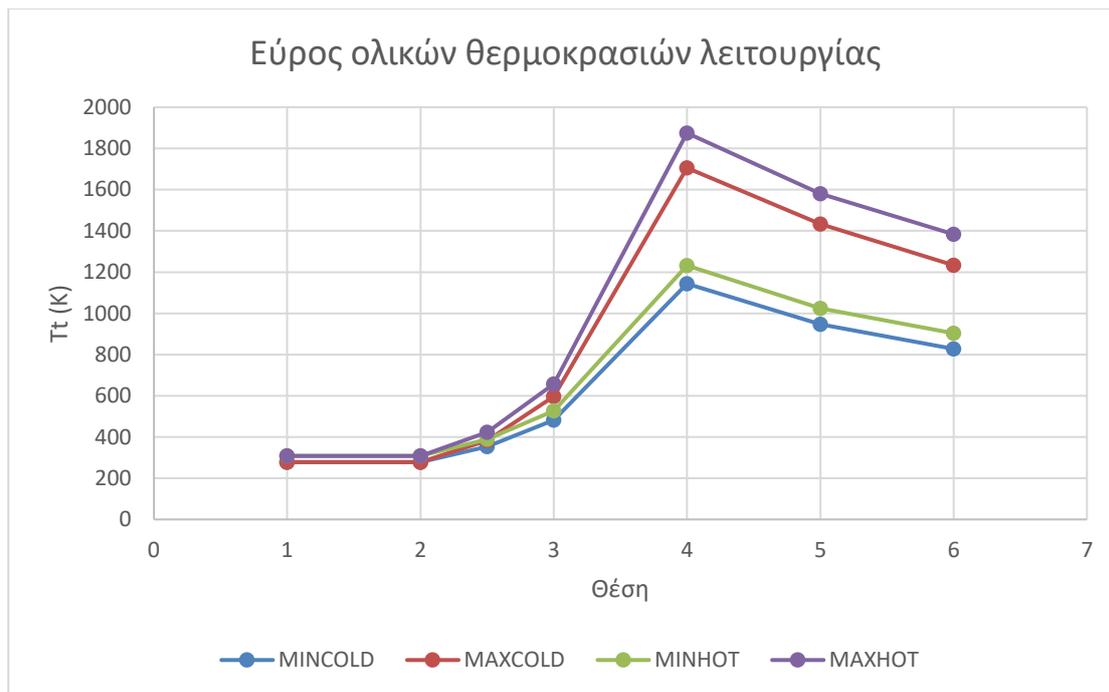
Στην επόμενη παράγραφο μελετώνται τα μεγέθη για τα οποία θα ήταν επιθυμητό να πραγματοποιούνταν μετρήσεις, οι οποίες θα προσέφεραν καλύτερη γνώση για την κατάσταση του κινητήρα, αλλά και θα αξιοποιούνταν για τον υπολογισμό των επιδόσεών του.

4.5 Εύρος λειτουργίας οργάνων

Ανάλογα με τις απαιτήσεις ισχύος ο κινητήρας λειτουργεί σε διαφορετικά σημεία κάθε φορά με αποτέλεσμα τα μετρούμενα μεγέθη να κυμαίνονται σε ένα εύρος τιμών. Με την γνώση αυτού του εύρους μεταβολής για τις διάφορες συνθήκες λειτουργίας, επιλέγονται τα κατάλληλα μετρητικά όργανα. Η εκτίμηση της παραπάνω μεταβολής για το κάθε ένα μέγεθος γίνεται με χρήση του μοντέλου της μηχανής. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η μεταβολή κάθε ενός επιθυμητού μετρομένου μεγέθους για κάθε θέση της μηχανής με τη μορφή καμπυλών, ώστε να υπάρξει πλήρης εικόνα της μεταβολής για τις διάφορες συνθήκες λειτουργίας, σε περίπτωση που χρειαστεί να μελετηθούν εναλλακτικές δυνατότητες μέτρησης.

Ολική θερμοκρασία

Στο Σχήμα 4.8 φαίνονται οι μέγιστες και ο ελάχιστες τιμές της ολικής θερμοκρασίας για τις γραμμές λειτουργίας που έχουν προαναφερθεί.



Σχήμα 4.8 : Μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες σε θερμή και ψυχρή ημέρα

Ενώ στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται αναλυτικά οι περιοχές λειτουργίας των οργάνων για την κάθε θέση, καθώς και ο τύπος του οργάνου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί.

Πίνακας 4.3 : Περιοχή λειτουργίας μετρητικών θερμοκρασίας

Θέση	Ελάχιστη (K)	Μέγιστη (K)	Τύπος
1	278	308	Θερμόμετρο αντίστασης
2	278	308	Θερμοζεύγος
2.5	353	423	Θερμοζεύγος
3	481	656	Θερμοζεύγος
4	1143	1874	Θερμοζεύγος
5	947	1580	Θερμοζεύγος
6	827	1384	Θερμοζεύγος

Στη συνέχεια καταγράφονται αναλυτικά οι ολικές θερμοκρασίες για κάθε θέση του κινητήρα, όπως προέκυψαν από τις γραμμές λειτουργίας που έχουν συζητηθεί για ψυχρή (278.15 K) και θερμή ημέρα (308.15 K).

Θέση 1

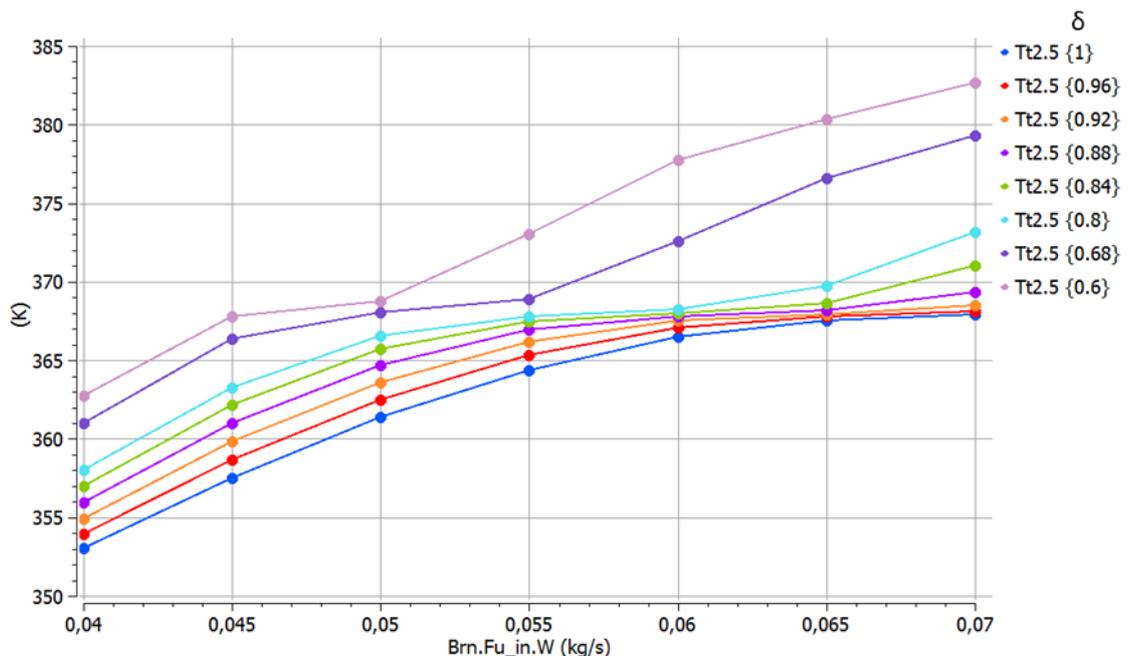
Στην είσοδο του κινητήρα, κατά τη δοκιμή του, η ολική θερμοκρασία $Tt1$ είναι ίση με την στατική θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Οπότε η $Tt1$ ($^{\circ}\text{C}$) ανήκει στο διάστημα $[5, 35]$, το οποίο μελετάται.

Θέση 2

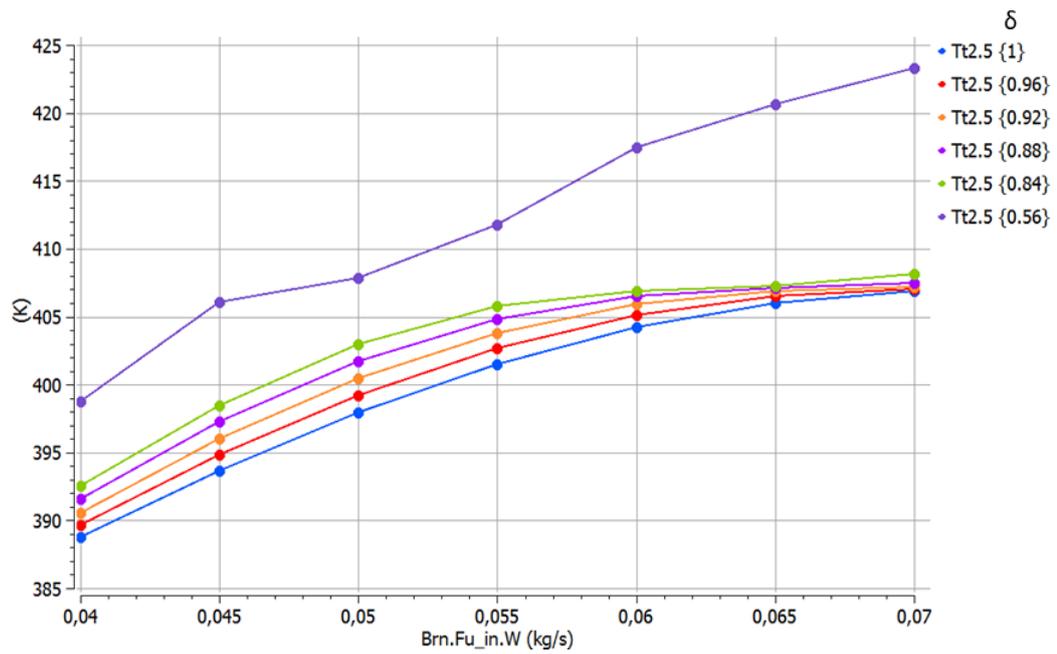
Όπως και παραπάνω, η ολική θερμοκρασία στην είσοδο του αξονικού συμπιεστή είναι ίση με αυτή του περιβάλλοντος.

Θέση 2.5

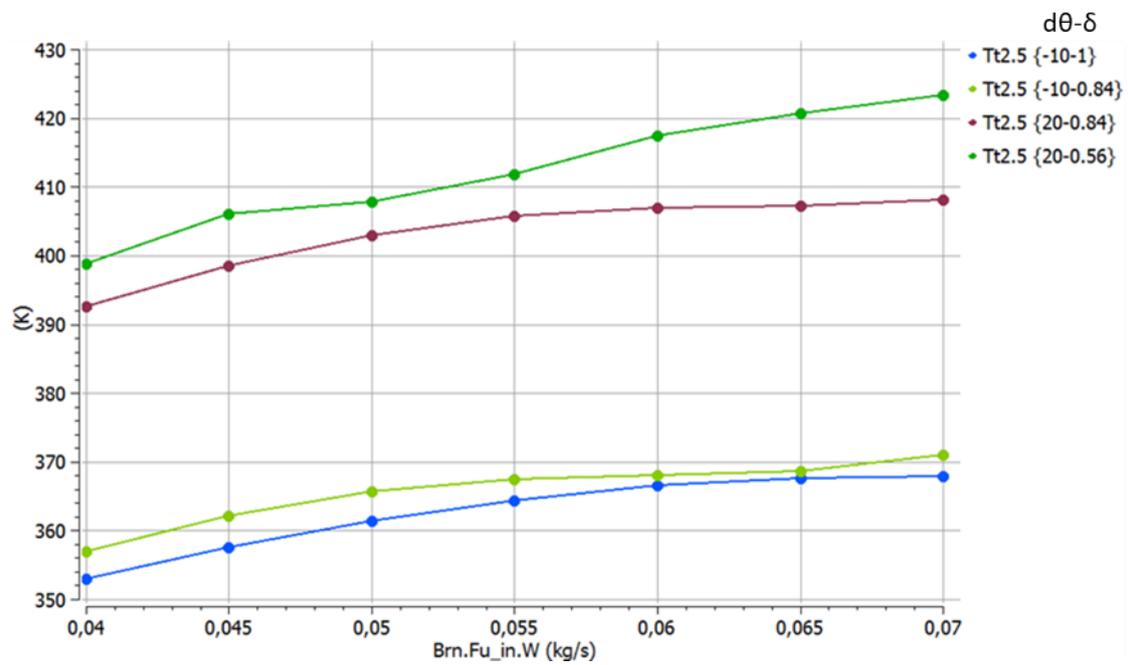
Στην είσοδο του ακτινικού συμπιεστή η μεταβολή της ολικής θερμοκρασίας $Tt2.5$ παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.9 για ψυχρή ημέρα και στο Σχήμα 4.10 για θερμή μέρα με τη μορφή ισοϋψών καμπυλών του λόγου ολικών πιέσεων στην έξοδο και την είσοδο του αγωγού εισόδου, συναρτήσει της παροχής μάζας καυσίμου (\dot{m}_f που αντιστοιχεί στη μεταβλητή $Bm.F_{in.W}$ του PROOSIS) μέσω της οποίας ελέγχεται η λειτουργία της μηχανής. Τέλος, στο Σχήμα 4.11 παρουσιάζεται συνολικά η περιοχή εντός της οποίας κυμαίνεται η $Tt2.5$. Στο συγκεκριμένο σχήμα παρουσιάζονται οι ισοϋψείς καμπύλες του στραγγαλισμού της ροής δ , η οποία ως μέγεθος φαίνεται εντός των αγκυλών, για απόκλιση θερμοκρασίας περιβάλλοντος $d\theta$ από αυτή της τυπικής ημέρας κατά -10 K και κατά $+20\text{ K}$, δηλαδή για θερμοκρασίες 278.15 K (5°C) και 308.15 K (35°C).



Σχήμα 4.9 : Ολική θερμοκρασία εισόδου ακτινικού συμπιεστή για ψυχρή ημέρα



Σχήμα 4.10 : Ολική θερμοκρασία εισόδου ακτινικού συμπιεστή για θερμή ημέρα

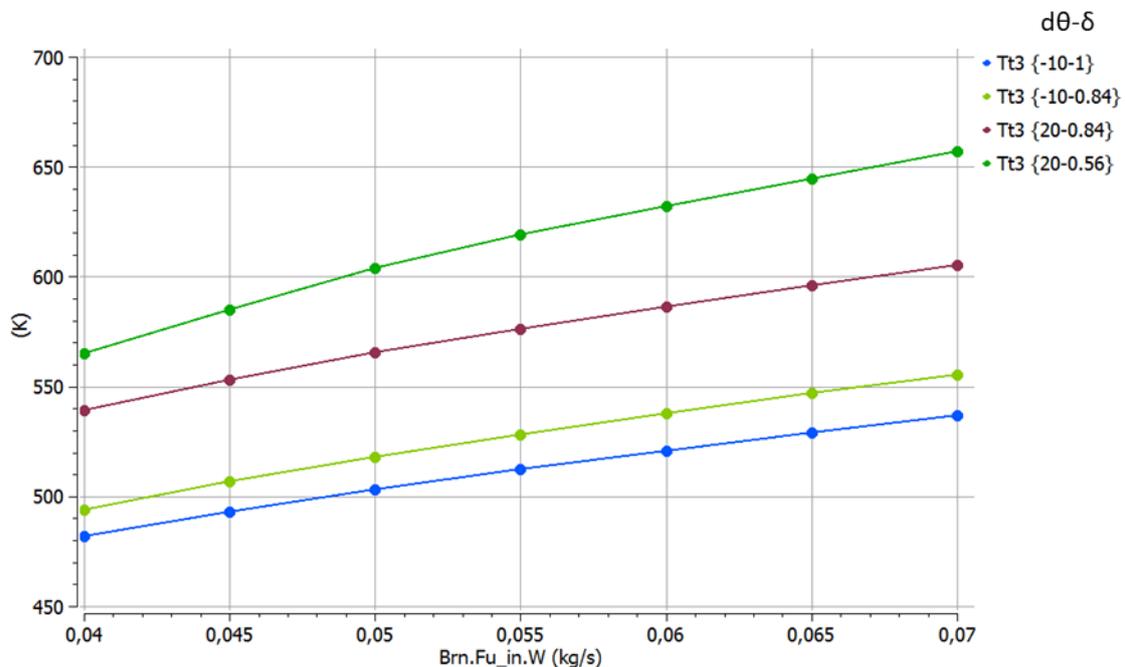


Σχήμα 4.11 : Περιοχή διακύμανσης της ολικής θερμοκρασίας εξόδου αξονικού συμπιεστή Tt2.5

Η παραπάνω διαδικασία έχει ακολουθηθεί και για τις υπόλοιπες θέσεις, καθώς και για τα υπόλοιπα μεγέθη. Για λόγους συντομίας θα παρουσιάζεται το τελικό διάγραμμα που δηλώνει το εύρος τιμών του αντίστοιχου μεγέθους με ενδεικτικές γραμμές λειτουργίας για την κατανόηση της συμπεριφοράς της μηχανής σε κάθε θέση της. Στα σχήματα που ακολουθούν, εντός των αγκυλών δίνονται κατά σειρά η απόκλιση από την θερμοκρασία τυπικής ημέρας και ο βαθμός στραγγαλισμού της ροής.

Θέση 3

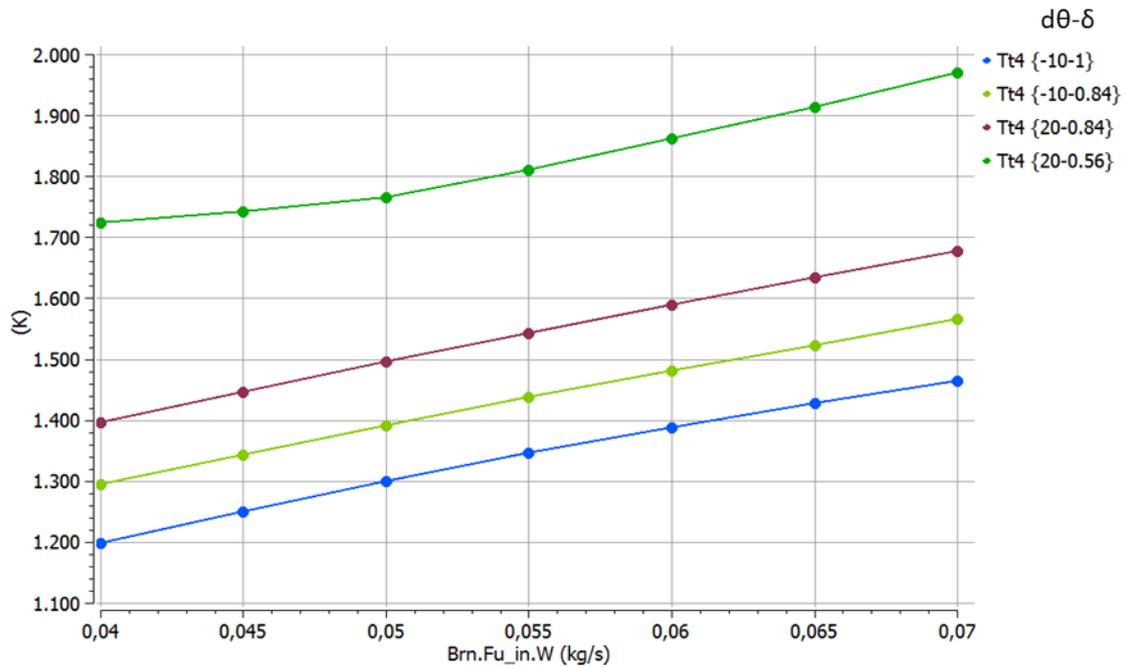
Η ολική θερμοκρασία στην έξοδο του ακτινικού συμπιεστή παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.12.



Σχήμα 4.12 : Περιοχή διακύμανσης της ολικής θερμοκρασίας εξόδου ακτινικού συμπιεστή Tt3

Θέση 4

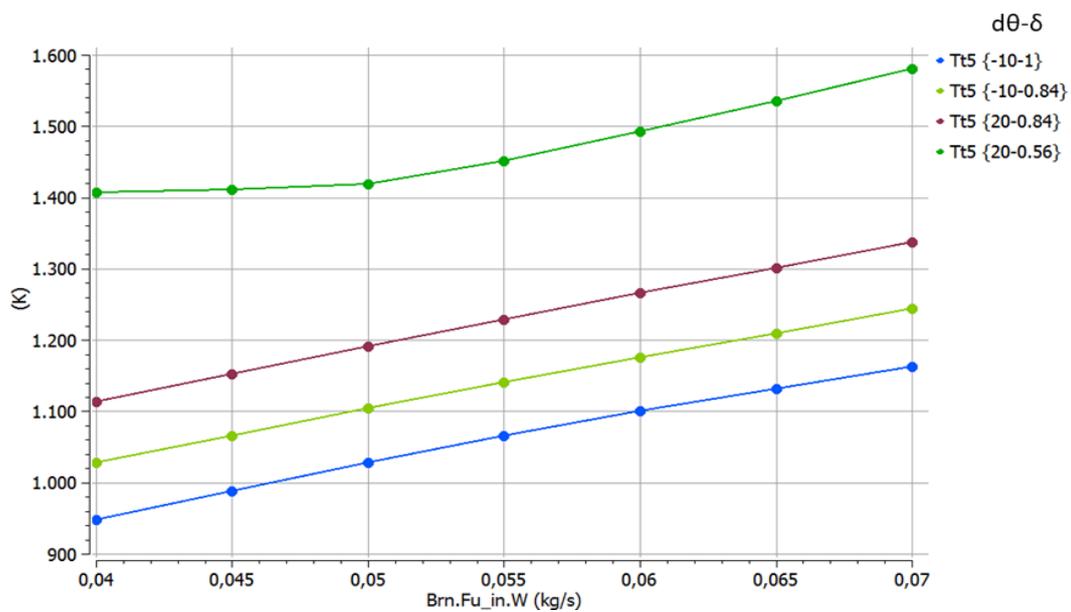
Η ολική θερμοκρασία στην έξοδο του θαλάμου καύσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.13. Όπως έχει ήδη αναφερθεί οι θερμοκρασίες που επικρατούν σε αυτή την περιοχή είναι ακραίες αναφορικά με την ύπαρξη και την λειτουργία μετρητικών οργάνων, παρ'όλα αυτά παρουσιάζονται με σκοπό την περιγραφή της λειτουργίας της μηχανής στη θέση αυτή.



Σχήμα 4.13 : Περιοχή διακύμανσης της ολικής θερμοκρασίας εξόδου θαλάμου καύσης Tt4

Θέση 5

Η περιοχή εντός της οποίας κυμαίνεται η ολική θερμοκρασία στην έξοδο του στροβίλου αεριογόνου Tt5 παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.14.

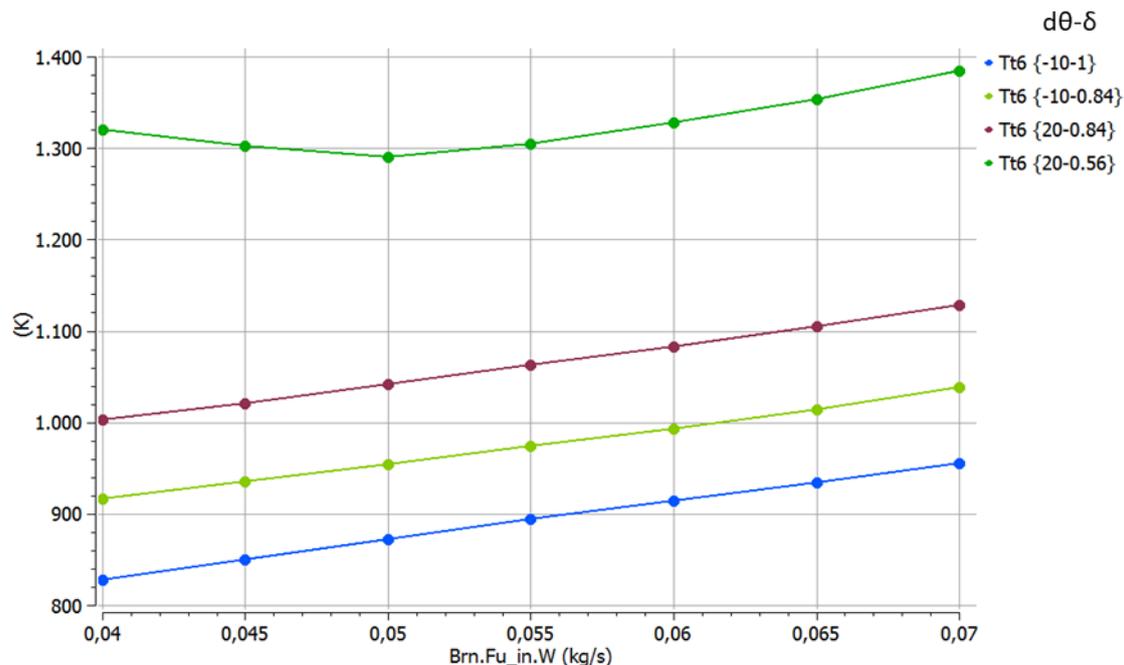


Σχήμα 4.14 : Περιοχή διακύμανσης της ολικής θερμοκρασίας εξόδου στροβίλου αεριογόνου

Tt5

Θέση 6

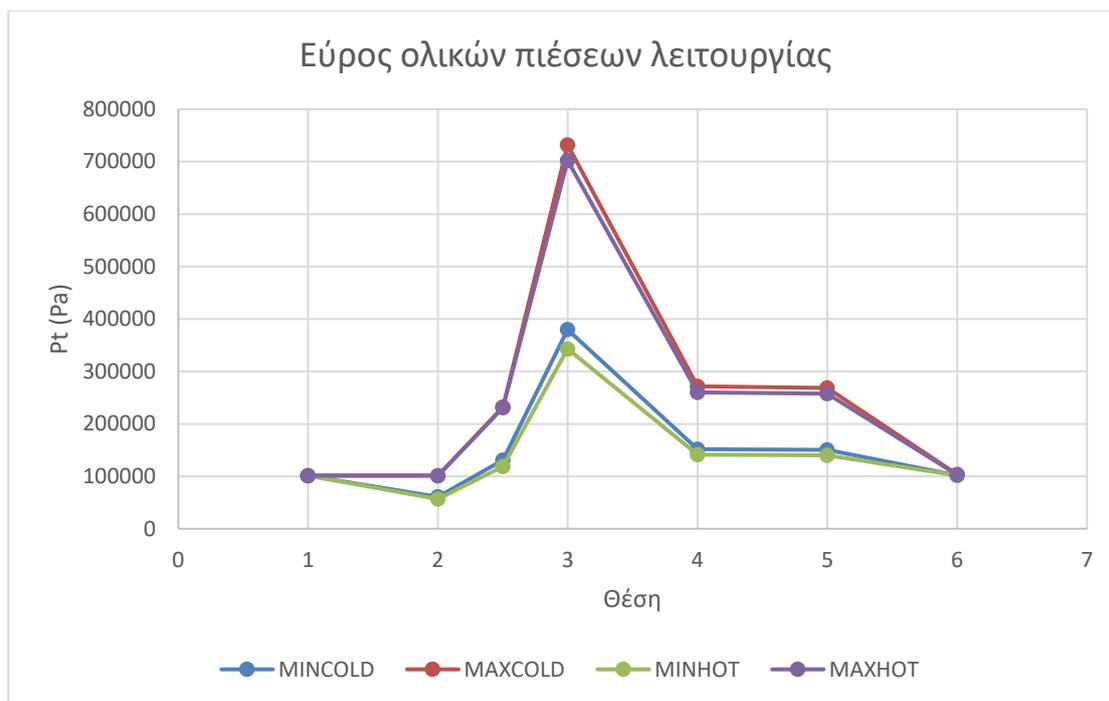
Η περιοχή εντός της οποίας κυμαίνεται η ολική θερμοκρασία στην έξοδο του στροβίλου ισχύος Tt6 παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.15 .



Σχήμα 4.15 : Περιοχή διακύμανσης της ολικής θερμοκρασίας εξόδου στροβίλου ισχύος Tt6

Ολική πίεση

Στην προηγούμενη παράγραφο παρουσιάστηκαν οι περιοχές λειτουργίας μεταλλακτών πίεσης, οι οποίοι μετρούν την διαφορά ολικών πιέσεων μεταξύ διαδοχικών θέσεων. Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζεται το εύρος λειτουργίας μεταλλακτών, οι οποίοι μετρούν την απόλυτη ολική πίεση κάθε θέσης. Στο Σχήμα 4.16 φαίνεται η διακύμανση της ολικής πίεσης σε κάθε θέση του κινητήρα για τις γραμμές λειτουργίας που έχουν εξετασθεί σε συνθήκες ψυχρής και θερμής ημέρας με πίεση περιβάλλοντος τυπικής ημέρας, θεωρώντας πως ο στραγγαλισμός της ροής πραγματοποιείται στον αγωγό εισόδου της μηχανής, για να μπορέσει να αξιοποιηθεί το μοντέλο. Στην πραγματικότητα, ο στραγγαλισμός της ροής γίνεται πριν εισέλθει ο αέρας στην μηχανή, διάταξη που περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 3.



Σχήμα 4.16 : Μέγιστες και ελάχιστες πιέσεις σε θερμή και ψυχρή ημέρα

Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται αναλυτικά οι περιοχές λειτουργίας των οργάνων για την κάθε θέση, καθώς και ο τύπος του οργάνου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί.

Πίνακας 4.4 : Περιοχή λειτουργίας μετρητικών πίεσης

Θέση	Ελάχιστη (Pa)	Μέγιστη (Pa)	Τύπος
1	101325	101325	Μεταλλάκτης
2	56742	101325	Μεταλλάκτης
2.5	119029	231872	Μεταλλάκτης
3	343081	732073	Μεταλλάκτης
4	141587	271350	Μεταλλάκτης
5	140390	268641	Μεταλλάκτης
6	101872	103389	Μεταλλάκτης

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά οι πιέσεις σε κάθε θέση του κινητήρα, οι οποίες προκύπτουν κατά την λειτουργία του, όπως έχει παρουσιαστεί και παραπάνω, δηλαδή με σταθερή ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου ισχύος και μεταβαλλόμενη παροχή μάζας καυσίμου.

Θέση 1

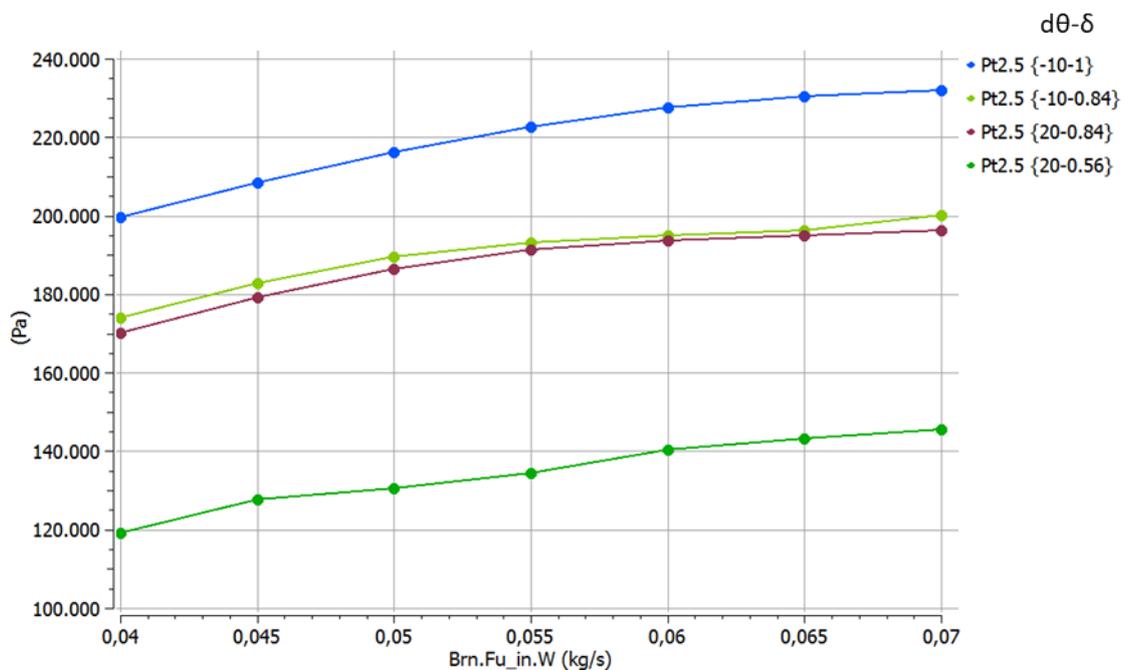
Επειδή θεωρείται πως ο στραγγαλισμός της ροής επιτυγχάνεται κατά την πορεία της μέσω του αγωγού εισόδου, η ολική πίεση στη θέση 1 είναι ίση με τη στατική πίεση του περιβάλλοντος, αφού πρόκειται για στατικές δοκιμές του κινητήρα.

Θέση 2

Στην είσοδο του αξονικού συμπιεστή επικρατεί μειωμένη ολική πίεση σε σχέση με την πίεση στην είσοδο της μηχανής. Επίσης, η μοντελοποίηση της λειτουργίας του έγινε επιτυχώς για λόγο ολικών πιέσεων εξόδου και εισόδου του αγωγού εισόδου που ανήκει στο διάστημα $[0.56, 1]$ με την πίεση περιβάλλοντος να είναι ίση με αυτή της τυπικής ημέρας. Οπότε, η ολική πίεση Pt2 σε Pa κυμαίνεται στο διάστημα $[56742, 101325]$.

Θέση 2.5

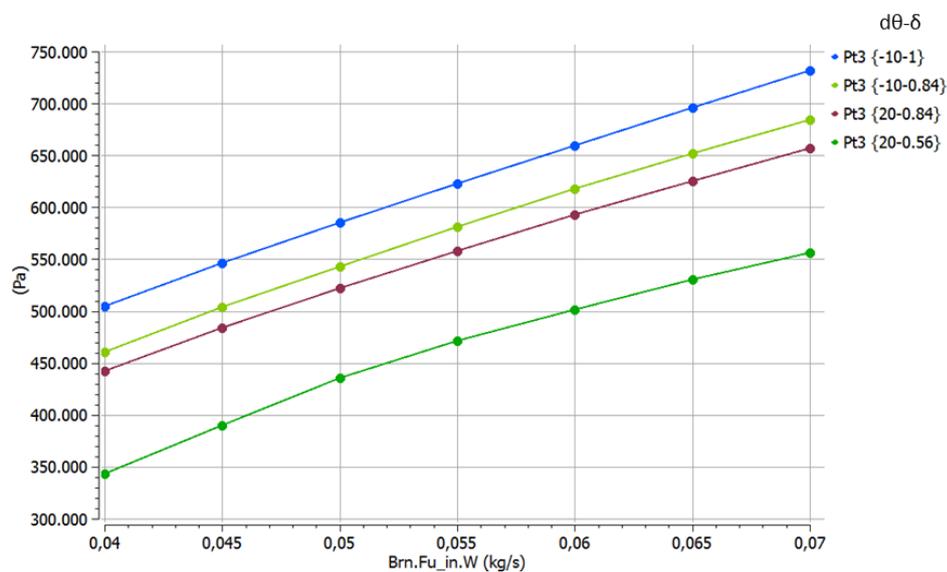
Στην έξοδο του αξονικού συμπιεστή η ολική πίεση Pt2.5 κυμαίνεται στην περιοχή που φαίνεται στο Σχήμα 4.17.



Σχήμα 4.17 : Περιοχή διακύμανσης της ολικής πίεσης Pt2.5 στην έξοδο του αξονικού συμπιεστή

Θέση 3

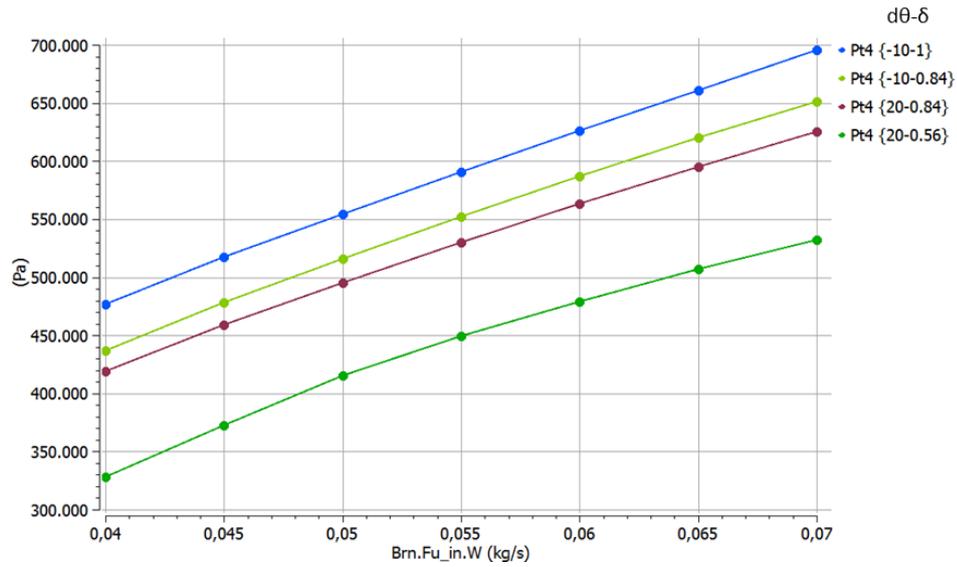
Η ολική πίεση Pt3 στην έξοδο του ακτινικού συμπιεστή παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.18.



Σχήμα 4.18 : Περιοχή διακύμανσης της ολικής πίεσης Pt3 στην έξοδο του ακτινικού συμπιεστή

Θέση 4

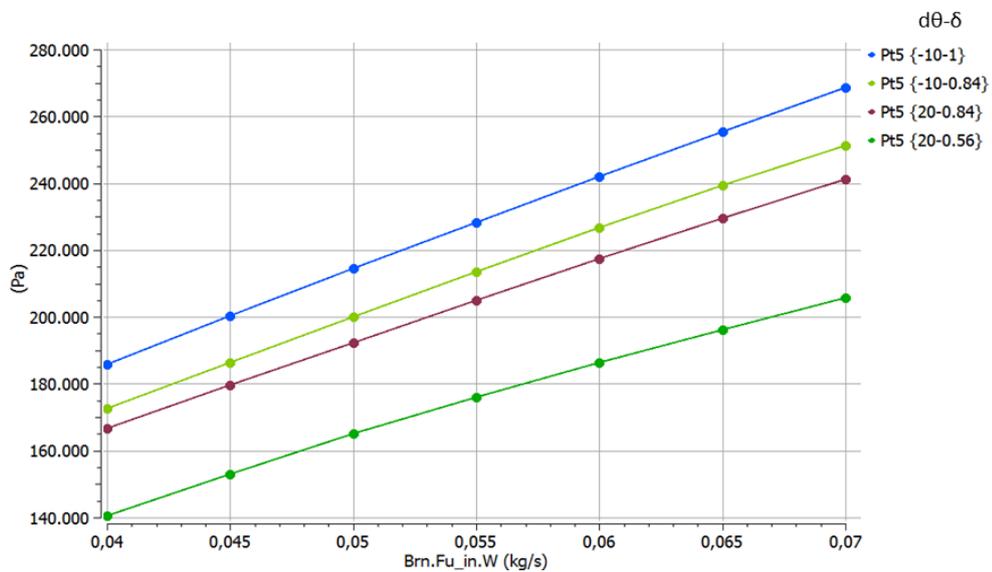
Η ολική πίεση Pt4 στην έξοδο του θαλάμου καύσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.19. Όπως έχει ήδη αναφερθεί οι θερμοκρασίες που επικρατούν σε αυτή την περιοχή είναι ακραίες αναφορικά με την ύπαρξη και την λειτουργία μετρητικών οργάνων, παρ'όλα αυτά παρουσιάζονται με σκοπό την περιγραφή της λειτουργίας της μηχανής στη θέση αυτή. Επειδή πρόκειται για άεργη μετάβαση της ροής, οι διαφορές που προκύπτουν από τις τιμές της θέσης 3 οφείλονται στις απώλειες πίεσης που προκαλεί ο θάλαμος καύσης.



Σχήμα 4.19 : Περιοχή διακόμανσης της ολικής πίεσης Pt4 στην έξοδο του θαλάμου καύσης

Θέση 5

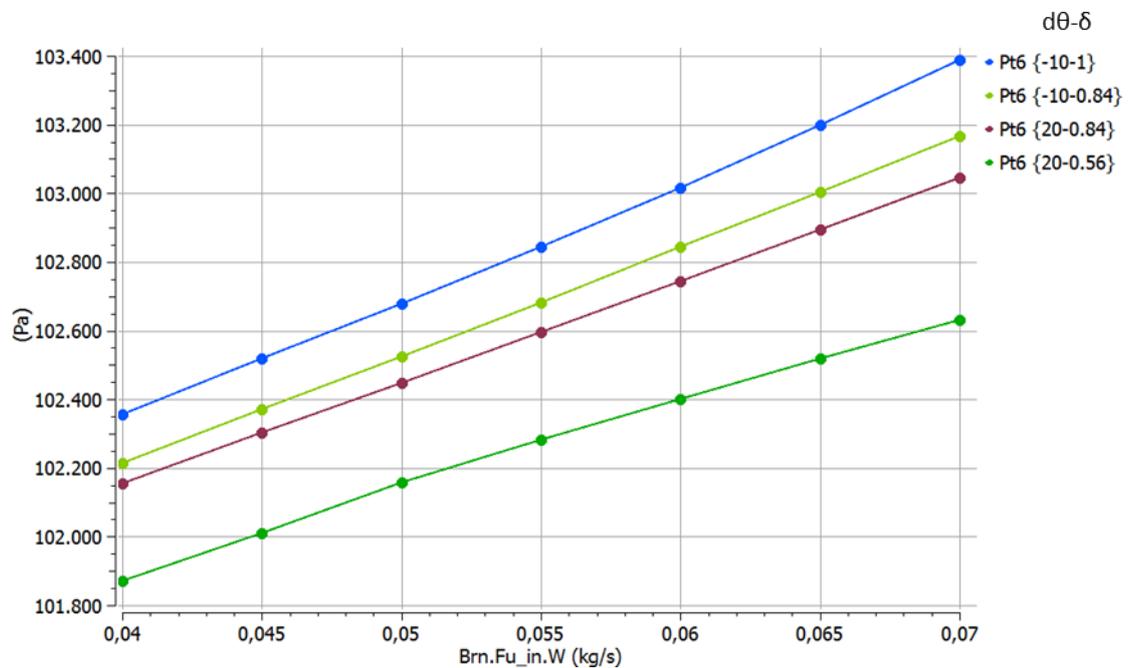
Η περιοχή εντός της οποίας κυμαίνεται η ολική πίεση στην έξοδο του στροβίλου αεριογόνου Pt5 παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.20.



Σχήμα 4.20 : Περιοχή διακόμανσης της ολικής πίεσης Pt5 στην έξοδο του στροβίλου αεριογόνου

Θέση 6

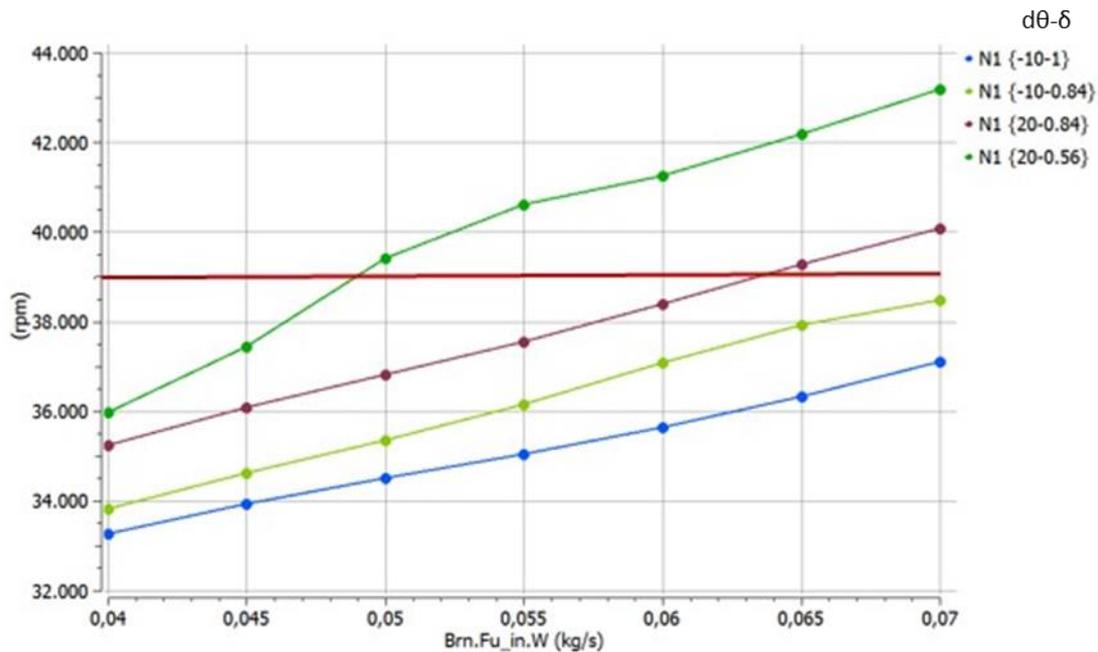
Η περιοχή εντός της οποίας κυμαίνεται η ολική πίεση Pt6 στην έξοδο του στροβίλου ισχύος παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.21.



Σχήμα 4.21 : Περιοχή διακύμανσης της ολικής πίεσης Pt6 στην έξοδο του στροβίλου ισχύος

Ταχύτητα περιστροφής ατράκτου αεριογόνου

Από τις γραμμές λειτουργίας που μελετήθηκαν, οι τιμές της ταχύτητας περιστροφής της ατράκτου της αεριογόνου κυμαίνεται στο διάστημα [29083 , 43189] σε rpm. Το ανώτερο, όμως, όριο αντοχής της ατράκτου αεριογόνου κατά την εκκίνηση για τον κινητήρα PT6T-6 είναι περίπου 39000 rpm (κόκκινη καμπύλη), οπότε φαίνεται πως ο κινητήρας δεν μπορεί να λειτουργήσει σε όλα τα σημεία λειτουργίας που μελετώνται. Τελικά ως μέγιστη τιμή για την ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου αεριογόνου ορίζεται η τιμή 39000 rpm. Στον Πίνακα 4.5 παρουσιάζονται οι οριακές τιμές για την ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου αεριογόνου, καθώς και ο τύπος μετρητικού οργάνου που χρησιμοποιείται. Στο Σχήμα 4.22 παρουσιάζονται τα όρια της ταχύτητας περιστροφής ατράκτου αεριογόνου N1, όπου φαίνεται πως ορισμένα σημεία λειτουργίας υπερβαίνουν το όριο των 39000 rpm που αναφέρθηκε παραπάνω.



Σχήμα 4.22 : Περιοχή διακύμανσης της ταχύτητας περιστροφής ατράκτου αεριογόνου N1

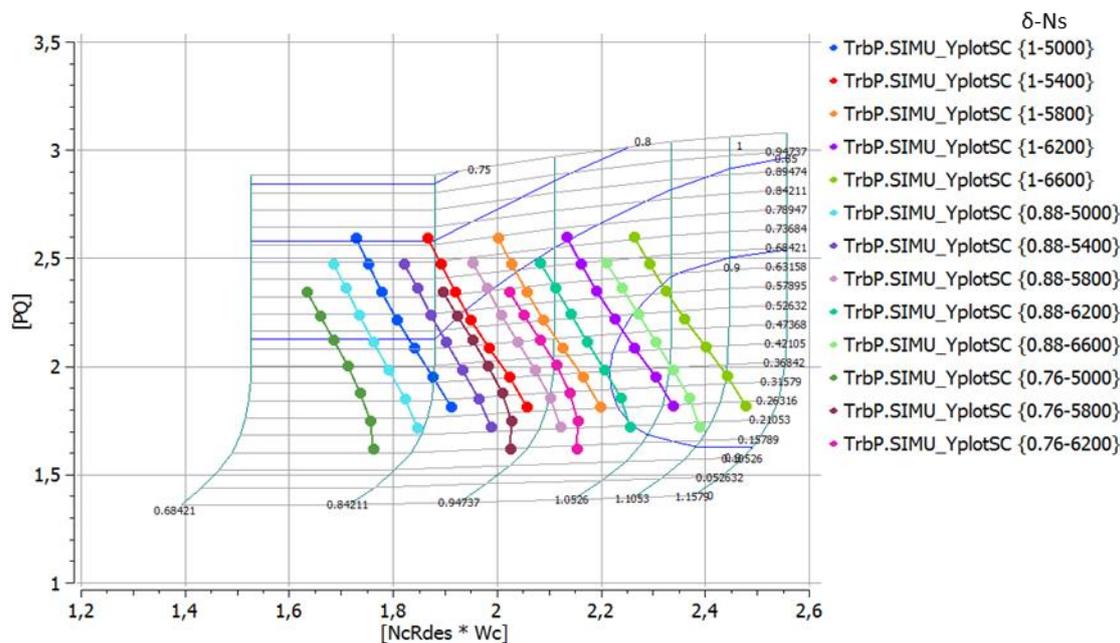
Ταχύτητα περιστροφής ατράκτου ισχύος

Για τις οριακές τιμές της ταχύτητας περιστροφής της ατράκτου ισχύος μελετώνται διαφορετικές γραμμές λειτουργίας από αυτές των προηγούμενων κεφαλαίων, όπου η λειτουργία του κινητήρα γινόταν με σταθερές τιμές του παραπάνω μεγέθους. Συγκεκριμένα εξετάζεται η μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής στο διάστημα [29000 , 33000] σε rpm, δηλαδή από περίπου 88% μέχρι 100% της επιτρεπόμενης ταχύτητας περιστροφής της ατράκτου ισχύος, ενώ η παροχή του καυσίμου επιδέχεται την ίδια μεταβολή, δηλαδή [0.04 , 0.07] (kg/s). Το διάστημα [29000 , 33000] σε rpm της ατράκτου ισχύος αντιστοιχεί στο διάστημα [5800 , 6600] σε rpm της ατράκτου εξόδου. Ο περιορισμός της ταχύτητας περιστροφής σε αυτό το διάστημα προκαλείται από τα όρια του χάρτη του στροβίλου ισχύος του μοντέλου του περιβάλλοντος προγραμματισμού PROOSIS.

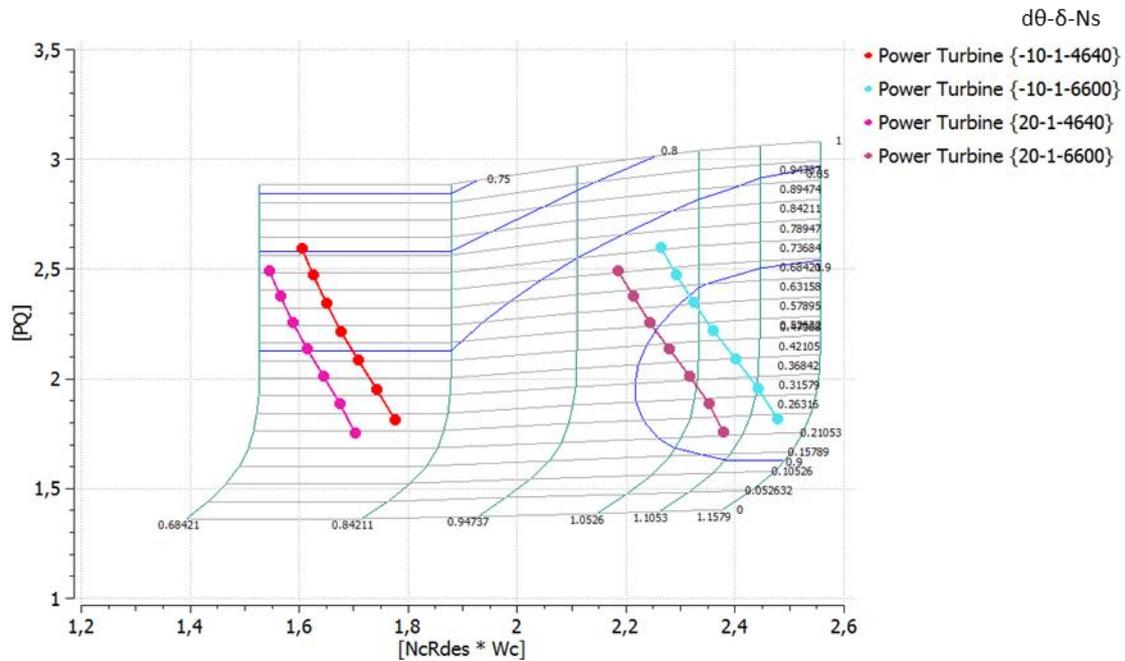
Μεταβάλλοντας τον χάρτη του στροβίλου ισχύος και συγκεκριμένα, προσθέτοντας μία χαρακτηριστική για το μέγεθος NcRdes στην περιοχή χαμηλών ταχυτήτων περιστροφής του χάρτη, επιτυγχάνεται, κατά τον στραγγαλισμό, ταχύτητα περιστροφής 25000 rpm για την άτρακτο ισχύος. Το παραπάνω μέγεθος μειώνεται περισσότερο στην περίπτωση που δεν προκαλείται στραγγαλισμός της ροής. Έτσι, τα νέα όρια χάρτη οριοθετούν μία ελάχιστη ταχύτητα περιστροφής σε 23200 rpm. Στο Σχήμα 4.23 παρουσιάζεται ενδεικτικά για μία ψυχρή μέρα (278.15 K) ο τροποποιημένος χάρτης του στροβίλου του στροβίλου ισχύος, όπου φαίνονται οι γραμμές λειτουργίας σταθερού

μεγέθους στραγγαλισμού και σταθερής ταχύτητας περιστροφής N_s ατράκτου εξόδου του κιβωτίου, γεγονός που συνεπάγεται σταθερή ταχύτητα περιστροφής N_2 ατράκτου εξόδου του κινητήρα, αφού ο μειωτήρας επιτυγχάνει μείωση των ταχυτήτων περιστροφής με γνωστό λόγο μετάδοσης 5:1. Εντός των αγκυλών παρατίθενται κατά σειρά ο βαθμός στραγγαλισμού και η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου εξόδου.

Τα συνολικά όρια προκύπτουν από το Σχήμα 4.24, στο οποίο παρουσιάζονται οι γραμμές λειτουργίας για λόγο πιέσεων αγωγού εισόδου ίσο με 1 (χωρίς στραγγαλισμό) με μεταβλητή ταχύτητα περιστροφής ατράκτου εξόδου μειωτήρα για θερμοκρασίες περιβάλλοντος 278.15 K και 308.15 K, όπως έχει αναλυθεί σε προηγούμενη παράγραφο. Στο Σχήμα 4.23 εντός των αγκυλών παρουσιάζονται κατά σειρά ο βαθμός στραγγαλισμού και η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου εξόδου, ενώ στο Σχήμα 4.24 η απόκλιση από την θερμοκρασία τυπικής ημέρας, ο βαθμός στραγγαλισμού και η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου εξόδου. Με αυτόν τον τρόπο, οι οριακές τιμές για την ταχύτητα περιστροφής N_s σε rpm της ατράκτου εξόδου προκύπτουν [4640 , 6600], ενώ για τον στρόβιλο ισχύος [23200 , 33000], όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.5 και στον Πίνακα 4.6.

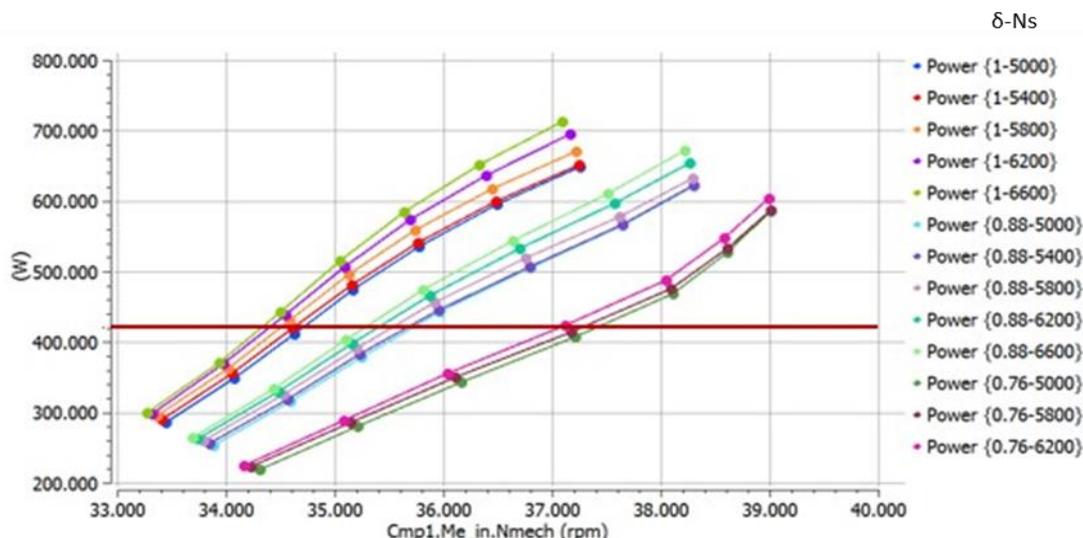


Σχήμα 4.23 : Αποτύπωση γραμμών λειτουργίας σταθερού N_s στον χάρτη του στρόβιλου ισχύος

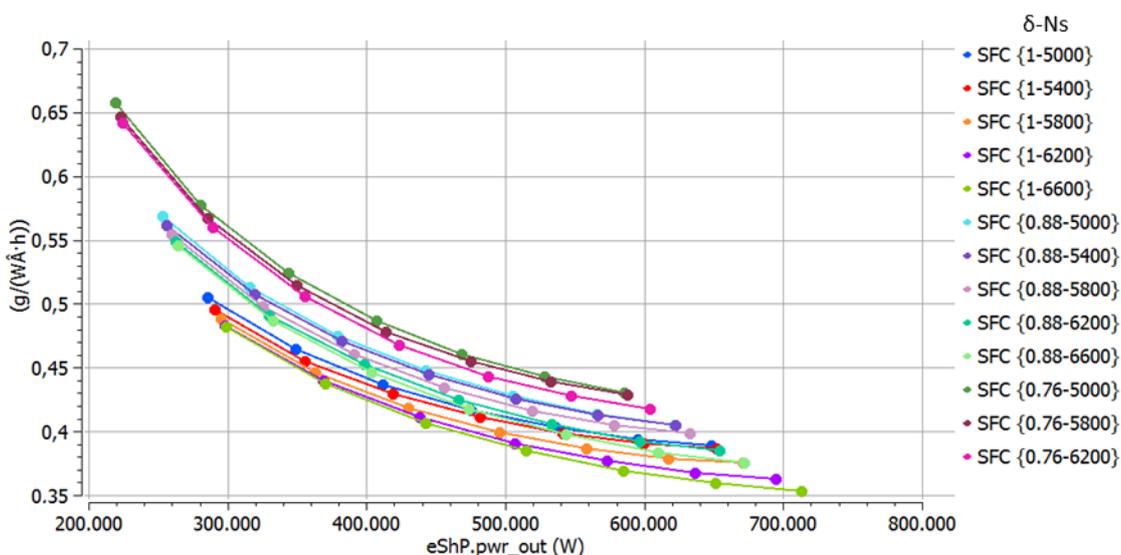


Σχήμα 4.24 : Όρια λειτουργίας στροβίλου ισχύος αποτυπωμένα στο χάρτη του

Τέλος, στο Σχήμα 4.25 παρουσιάζεται η παραγόμενη ισχύς συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής της ατράκτου αεριογόνου (N_1 αντιστοιχεί στην μεταβλητή Cmp1.Me_in.Nmech του PROOSIS) για της ίδιες συνθήκες λειτουργίας που αναλύθηκαν προηγουμένως. Επισημαίνεται πως η μέγιστη ισχύς που μπορεί να απορροφήσει η εγκατάσταση του δοκιμαστηρίου του ΕΘΣ είναι 420 kW (κόκκινη καμπύλη). Στο παραπάνω σχήμα παρατηρούνται περιοχές σταθερού στραγγαλισμού με μικρή εξάρτηση από την ταχύτητα περιστροφής του στροβίλου ισχύος. Την ίδια συμπεριφορά παρατηρεί κανείς και στο Σχήμα 4.26, στο οποίο καταγράφεται η σχέση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου με την παραγόμενη ισχύ (P που αντιστοιχεί στην μεταβλητή eShP.pwr_out του PROOSIS).



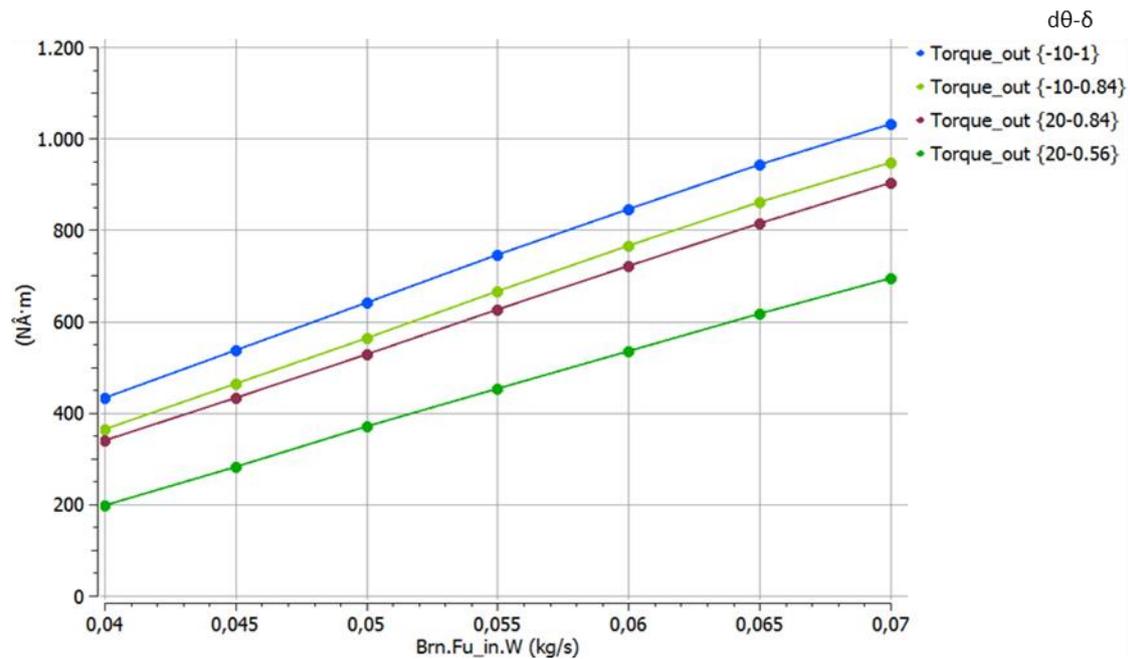
Σχήμα 4.25 : Παραγόμενη ισχύς συναρτήσει ταχύτητας περιστροφής ατράκτου αεριογόνου



Σχήμα 4.26 : Ειδική κατανάλωση καυσίμου συναρτήσει παραγόμενης ισχύος

Ροπή ατράκτου εξόδου

Η ροπή σε Nm που μεταφέρει η άτρακτος εξόδου του μειωτήρα κυμαίνεται στο διάστημα [198.03 , 1031.69]. Η ροπή της ατράκτου ισχύος προκύπτει από την γνώση της ροπής εξόδου και της σχέσης μετάδοσης του μειωτήρα, υποθέτοντας μηδενικές απώλειες στο σύστημα του μειωτήρα. Στο Σχήμα 4.27 παρουσιάζεται το εύρος τιμών της ροπής εξόδου κατά την λειτουργία του κινητήρα.



Σχήμα 4.27 : Εύρος τιμών ροπής εξόδου του μειωτήρα

Παροχή μάζας καυσίμου

Η παροχή του καυσίμου, για τις γραμμές λειτουργίας που χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση των ορίων άλλων μεγεθών του κινητήρα, φράζεται στο διάστημα [0.04 , 0.072], όπου η μέγιστη τιμή αντιστοιχεί στο σημείο σχεδίασης της μηχανής.

Στον Πίνακα 4.5 φαίνονται τα εκτιμώμενα εύρη διακύμανσης των μη θερμοδυναμικών μεγεθών.

Πίνακας 4.5 : Περιοχή λειτουργίας και μέτρηση μη θερμοδυναμικών μεγεθών

Μέγεθος	Ελάχιστη	Μέγιστη	Τύπος
Ταχύτητα περιστροφής ατράκτου αεριογόνου (rpm)	29083	39000	Ταχύμετρο
Ταχύτητα περιστροφής ατράκτου ισχύος (rpm)	23200	33000	Ταχύμετρο
Ροπή ατράκτου εξόδου (Nm)	198	1031	Υδραυλικός
Παροχή καυσίμου (kg/s)	0.04	0.072	Παροχόμετρο με στρόβιλο

Επισημαίνεται πως βάσει των ορίων λειτουργίας του κινητήρα (παραγόμενη ισχύς και ταχύτητα περιστροφής ατράκτου αεριογόνου), προκύπτουν μερικά σημεία λειτουργίας που τα υπερβαίνουν, όπως προκύπτει από το Σχήμα 4.22 και το Σχήμα 4.25. Το παραπάνω γεγονός σημαίνει πως τα όρια των μεγεθών που παρουσιάστηκαν στην παρούσα παράγραφο εμπεριέχουν τα σημεία λειτουργίας που υπερβαίνουν τα όρια λειτουργίας του κινητήρα.

4.6 Επιθυμητά μεγέθη προς μέτρηση

Αξιοποιώντας τα αποτελέσματα της ανάλυσης που προηγήθηκε στην παράγραφο 4.5, στον Πίνακα 4.6 παρουσιάζονται συνολικά τα επιθυμητά προς μέτρηση μεγέθη με το εύρος τιμών τους, την θέση στην οποία πραγματοποιείται η μέτρηση και γίνεται πρόταση για τον τύπο μετρητικού οργάνου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Για την μέτρηση της πίεσης σε θέσεις εντός της μηχανής, χρησιμοποιούνται μεταλλάκτες διαφορικής πίεσης, για την αποφυγή λειτουργίας σε ακραία μεγάλες ή μικρές τιμές πιέσεων και εξαιτίας του χαμηλοτέρου κόστους συγκριτικά με μεταλλάκτες απόλυτης πίεσης. Ως πίεση αναφοράς λαμβάνεται η πίεση περιβάλλοντος τυπικής ημέρας, όπως έχει χρησιμοποιηθεί στο μοντέλο. Για τον λόγο αυτό απαιτείται να μετρηθεί η απόλυτη πίεση του περιβάλλοντος, ώστε να υπολογιστούν οι απόλυτες πιέσεις στις θέσεις μέτρησης. Έτσι, στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι απόλυτες τιμές των διαφορών των πιέσεων από την πίεση περιβάλλοντος για τις θέσεις εντός της μηχανής. Επίσης, επειδή το μοντέλο του κεφαλαίου 2 δεν συνυπολογίζει μεταφορά θερμότητας από το κέλυφος της μηχανής στο περιβάλλον, η ολική θερμοκρασία στη θέση 7 εξισώνεται με εκείνη στη θέση 6. Τέλος, επειδή στη διάταξη του δοκιμαστηρίου η ροή στραγγαλίζεται πριν την είσοδο της μηχανής, τα αποτελέσματα για το εύρος πιέσεων στη θέση 1 εξισώνονται με εκείνα στη θέση 2.

Πίνακας 4.6 : Μετρούμενα μεγέθη και τύπος μετρητικού οργάνου

A/A	Μέγεθος	Θέση	Ελάχιστη	Μέγιστη	Τύπος
1	Θερμοκρασία περιβάλλοντος(°C)	0	5	35	Θερμόμετρο αντίστασης
2	Θερμοκρασία (°C)	1	5	35	Θερμόμετρο αντίστασης
3	Θερμοκρασία (°C)	2	5	35	Θερμοζεύγος
4	Θερμοκρασία (°C)	2.5	79	150	Θερμοζεύγος
5	Θερμοκρασία (°C)	3	208	383	Θερμοζεύγος
6	Θερμοκρασία (°C)	4	870	1601	Θερμοζεύγος

7	Θερμοκρασία (°C)	5	674	1307	Θερμοζεύγος
8	Θερμοκρασία (°C)	6	554	1111	Θερμοζεύγος
9	Θερμοκρασία (°C)	7	554	1111	Θερμοζεύγος
10	Πίεση περιβάλλοντος (Pa)	0	98300	101325	Μεταλλάκτης
11	Ολική πίεση (Pa)	1	0	44583	Μεταλλάκτης
12	Ολική πίεση (Pa)	2	0	44583	Μεταλλάκτης
13	Ολική πίεση (Pa)	2.5	17704	130547	Μεταλλάκτης
14	Ολική πίεση (Pa)	3	241756	630748	Μεταλλάκτης
15	Ολική πίεση (Pa)	4	40262	170025	Μεταλλάκτης
16	Ολική πίεση (Pa)	5	39065	167316	Μεταλλάκτης
17	Ολική πίεση (Pa)	6	547	2064	Μεταλλάκτης
18	Ολική πίεση (Pa)	7	547	2064	Μεταλλάκτης
19	Ταχύτητα περιστροφής ατράκτου αεριογόνου N1 (rpm)	-	29083	39000	Ταχύμετρο
20	Ταχύτητα περιστροφής ατράκτου ισχύος N2 (rpm)	-	23200	33000	Ταχύμετρο
21	Ροπή ατράκτου εξόδου (Nm)	-	198	1031	Υδραυλικός
22	Παροχή καυσίμου (kg/s)	-	0.04	0.072	Παροχόμετρο με στρόβιλο

Προτείνεται επίσης να τοποθετηθούν και επιταχυνσιόμετρα, ώστε να παρακολουθείται η μηχανική καταπόνηση των ατράκτων, των εδράνων και του συνόλου του κινητήρα.

4.7 Τελικά μεγέθη προς μέτρηση

Ο σχεδιασμός της μετρητικής εγκατάστασης ξεκινά με τα μεγέθη που είναι σίγουρα ως προς την δυνατότητα μέτρησής του. Αυτά τα μεγέθη παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 4.2. Στη συνέχεια συγκαταλέγονται οι επιθυμητές μετρήσεις που βοηθούν στον υπολογισμό των επιδόσεων των συνιστωσών και του κινητήρα συνολικά. Στα επιθυμητά μεγέθη προς μέτρηση δεν συμπεριλαμβάνονται η μέτρηση της ολικής πίεσης και θερμοκρασίας στην θέση 4, εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών που επικρατούν στην έξοδο του θαλάμου καύσης και προκαλούν μεγάλη δυσκολία στην διεξαγωγή μετρήσεων. Στον πίνακα παρουσιάζονται τα παραπάνω μετρούμενα μεγέθη, συνοδευόμενα από το κανάλι σύνδεσής τους με τον αναλογοψηφιακό μετατροπέα (ADC, Analog to Digital Converter), το επιλεγμένο μετρητικό, από εκείνα που διαθέτει το ΕΘΣ, σύμφωνα με το εύρος διακύμανσης της τιμής τους και τη διαφορά τάσης που υπάρχει

στην έξοδο των οργάνων. Επισημαίνεται πως για τα θερμοζεύγη υπάρχουν ειδικές κάρτες για την υποδοχή των σημάτων τους και για αυτόν τον λόγο ομαδοποιούνται ξεχωριστά. Επίσης, επειδή στη διάταξη του δοκιμαστηρίου η ροή στραγγαλίζεται πριν την είσοδο της μηχανής, τα αποτελέσματα για το εύρος πιέσεων στη θέση 1 εξισώνονται με εκείνα στη θέση 2, όπως σχολιάστηκε και στην προηγούμενη παράγραφο.

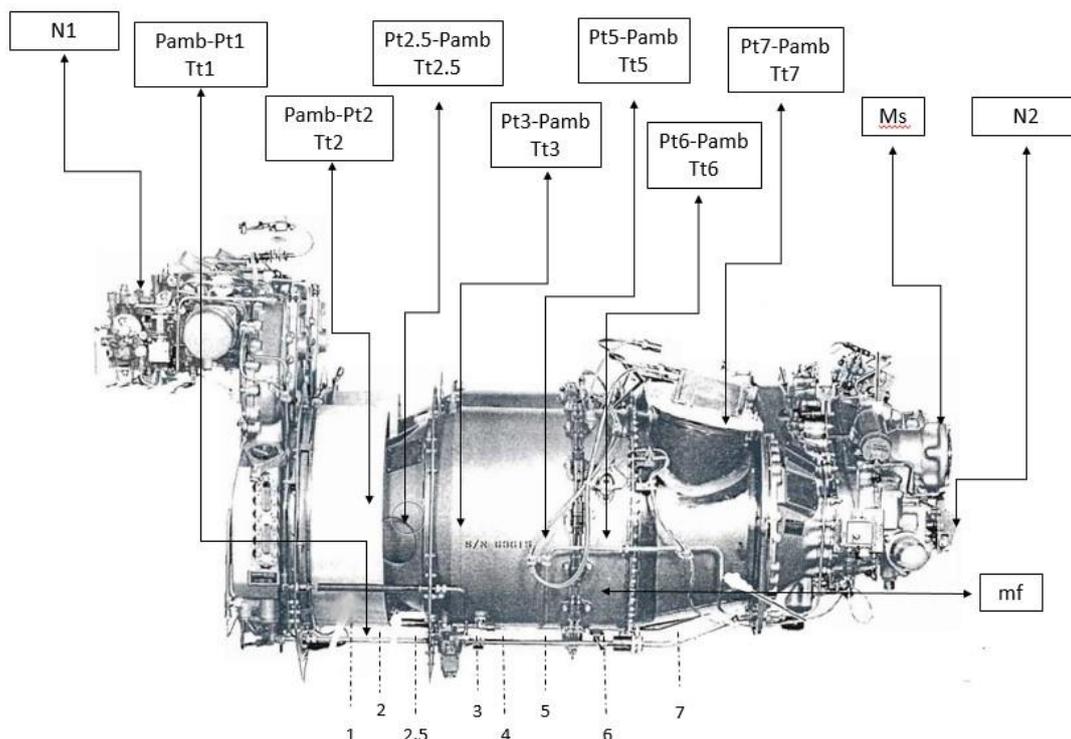
Πίνακας 4.7 : Όργανα μέτρησης μετρητικής εγκατάστασης

ADC Channel Number	Μέγεθος	Θέση	Ελάχιστη τάση εξόδου (V)	Μέγιστη τάση εξόδου (V)	Κωδικός οργάνου
1	Ταχύτητα περιστροφής ατράκτου αεριογόνου N1 (rpm)	-	-	-	ELTEM009
2	Ταχύτητα περιστροφής ατράκτου ισχύος N2 (rpm)	-	-	-	ELTEM009
3	Ροπή ατράκτου εξόδου Ms (Nm)	-	-	-	-
4	Παροχή καυσίμου m_f (kg/s)	-	-	-	-
5	P_0 (Pa)	0	0	5	TRA054
6	T_0 (°C)	0	-	-	TEMP010
7	T_{11} (°C)	1	-	-	TEMP010
8	P_0-P_{11} (Pa)	1	0	10	TRA065-A
9	P_0-P_{12} (Pa)	2	0	10	TRA065-A
10	$P_{12.5}-P_0$ (Pa)	2.5	-	-	TRA019
11	$P_{12.5}-P_0$ (Pa)	3	9	28	TRA092
12	$P_{15}-P_0$ (Pa)	5	-	-	TRA019
13	$P_{16}-P_0$ (Pa)	6	-	-	TRA027
14	$P_{17}-P_0$ (Pa)	7	-	-	TRA027
15	T_{12} (°C)	2	-	-	TEMP012
16	$T_{12.5}$ (°C)	2.5	0	10	ELTEM092-5
17	T_{13} (°C)	3	-	-	TEMP004
18	T_{15} (°C)	5	-	-	-
19	T_{16} (°C)	6	-	-	-
20	T_{17} (°C)	7	-	-	-

Ο κινητήρας διαθέτει ήδη όργανα για την μέτρηση των N1, N2, Ms, T_{11} και T_{17} . Στον πίνακα παρουσιάζονται ενδεικτικά οι κωδικοί των οργάνων του εργαστηρίου που θα μπορούσαν να λειτουργήσουν κατά τις δοκιμές του κινητήρα PT6T-6 βάσει του

εύρους διακύμανσης του Πίνακα 4.6, αν είναι δυνατόν να δημιουργηθούν οι κατάλληλες υποδοχές στο κέλυφος της μηχανής για το κάθε προτεινόμενο όργανο. Για παράδειγμα, επειδή το όργανο του εργαστηρίου με κωδική ονομασία ELTEM009 είναι παλμικό ταχύμετρο, απαιτείται η ύπαρξη κατάλληλης θέσης στο κέλυφος της μηχανής για την τοποθέτηση και τη λειτουργία του.

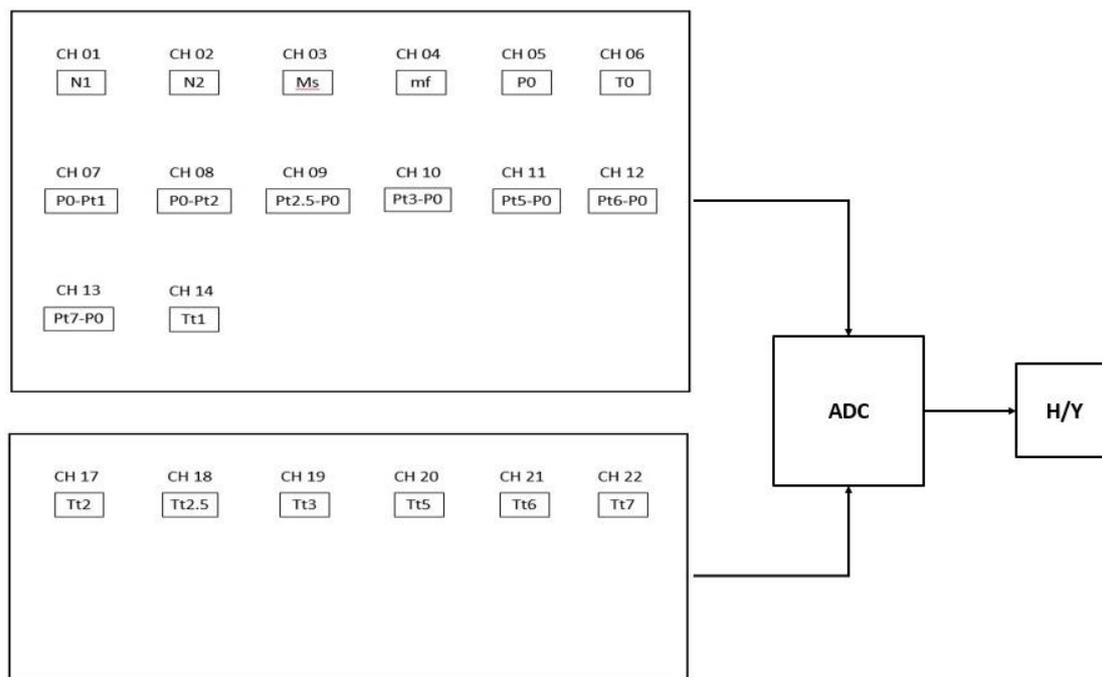
Τέλος, στο Σχήμα 4.28 παρουσιάζονται οι θέσεις και τα μεγέθη μέτρησης επί του κινητήρα. Επισημαίνεται πως πρόκειται και για επιθυμητές μετρήσεις, επειδή η διάταξη του κινητήρα ενδέχεται να μην επιτρέπει την πρόσβαση σε όλες τις θέσεις που προαναφέρθηκαν.



Σχήμα 4.28 : Θέσεις και μεγέθη μέτρησης επί του κινητήρα

Επειδή, όπως έχει προαναφερθεί, ως μέτρηση της πίεσης λαμβάνεται η μέση τιμή όλων των θέσεων μέτρησης μίας διατομής, χρησιμοποιείται ένας μεταλλάκτης σε κάθε διατομή που λαμβάνει ως είσοδο μόνο έναν σωλήνα πίεσης. Αντίστοιχα λαμβάνεται η μέση τιμή των θερμοκρασιών σε κάθε διατομή. Οι μεταλλάκτες παρέχουν ως έξοδο ένα συνεχές σήμα (τάση ή ρεύμα), το οποίο οδηγείται στον αναλογοψηφιακό μετατροπέα (Analog to Digital Converter - ADC). Ο ADC μετατρέπει τα αναλογικά σήματα των μεταλλακτών σε ψηφιακά με σκοπό την δυνατότητα επεξεργασία τους από Η/Υ. Στην περίπτωση, λοιπόν, που αξιοποιούνται οι μέσες τιμές των μεγεθών απαιτούνται 20 κανάλια για τον αναλογοψηφιακό μετατροπέα, αμελώντας τις μετρήσεις στην θέση 4 για τους λόγους που προαναφέρθηκαν. Στην περίπτωση που είναι επιθυμητή η γνώση του

προφίλ των θερμοκρασιών στο θερμό τμήμα στις θέσεις 5 και 6, απαιτούνται 34 κανάλια, σύμφωνα πάντα με την επιλογή των οργάνων του Πίνακα 4.1. Προκύπτει πως απαιτούνται τουλάχιστον 2 κάρτες των 16 καναλιών έκαστη για την αναλογοψηφιακή μετατροπή των σημάτων. Η σύνδεση των μεταλλακτών με τον αναλογοψηφιακό μετατροπέα και η κατανομή των μετρήσεων στις κάρτες του παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.29.



Σχήμα 4.29 : Μετρητική αλυσίδα

Αφού υπολογίστηκαν τα όρια λειτουργίας των οργάνων μέτρησης για τα επιθυμητά προς μέτρηση μεγέθη και καθορίστηκε η μετρητική αλυσίδα, στην συνέχεια αξιοποιηθούν οι μετρήσεις που πραγματοποιούνται στον κινητήρα με σκοπό να υπολογιστούν οι επιδόσεις του. Η επεξεργασία των δεδομένων από τις μετρήσεις του κινητήρα παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο.

5

Επεξεργασία δεδομένων

Όπως σχολιάστηκε και στο κεφάλαιο 4, οι μετρήσεις που πραγματοποιούνται παρέχουν τη δυνατότητα να υπολογισθούν οι συνολικές επιδόσεις του κινητήρα, καθώς επίσης και της κάθε μίας συνιστώσας, με τη δυνατότητα, ακόμα, να συγκριθούν με τα αποτελέσματα του μοντέλου. Το παραπάνω, βέβαια, πραγματοποιείται στην περίπτωση που αριθμός των μετρήσεων επαρκεί για τους παραπάνω υπολογισμούς. Στις επόμενες παραγράφους περιγράφεται ο υπολογισμός των επιδόσεων του συγκροτήματος βάσει των δυνατών μετρήσεων επί του κινητήρα PT6T-6.

5.1 Υπολογισμός επιδόσεων

Στη συνέχεια παρουσιάζονται ξανά στον Πίνακα 5.1 τα μετρούμενα μεγέθη επί του κινητήρα για λόγους πληρότητας, με επιπρόσθετες μετρήσεις της πίεσης και θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Η μέτρηση της πίεσης και της θερμοκρασίας μπορεί να πραγματοποιηθεί εντός του δοκιμαστηρίου, χωρίς καμία απαίτηση για ύπαρξη υποδοχής αντίστοιχου οργάνου μέτρησης επί του κινητήρα.

Πίνακας 5.1 : Μετρούμενα μεγέθη επί του κινητήρα

Κανάλι	Μέγεθος	Θέση	Σημεία
1	Ταχύτητα περιστροφής ατράκτου αεριογόνου	-	1
2	Ταχύτητα περιστροφής ατράκτου ισχύος	-	1
3	Ροπή ατράκτου εξόδου	-	1
5	Πίεση περιβάλλοντος	0	1
6	Θερμοκρασία περιβάλλοντος	0	1
7	Ολική θερμοκρασία εισόδου	1	1
11	Ολική πίεση	3	1
20	Ολική θερμοκρασία εξόδου	7	4

Από τα μεγέθη του παραπάνω πίνακα, αξιοποιούνται τα κατάλληλα κάθε φορά για τον υπολογισμό των επιδόσεων του συγκροτήματος. Μερικά από τα μεγέθη που

αφορούν οι υπολογισμοί είναι η παροχή αέρα εισόδου, οι ισεντροπικοί βαθμοί απόδοσης και οι θερμοκρασίες σε ενδιάμεσες θέσεις του κινητήρα, όπου δεν είναι δυνατή η μέτρησή τους. Στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία υπολογισμού της παροχής εισόδου του κινητήρα, των θερμοκρασιών του θερμού τμήματος (θέση 4 και 5), των ισεντροπικών βαθμών απόδοσης των συνιστωσών και των διορθωμένων μεγεθών στην είσοδο κάθε συνιστώσας.

5.1.1 Υπολογισμός παροχής μάζας εισόδου κινητήρα

Για τον υπολογισμό της παροχής εισόδου αναγράφονται οι παρακάτω σχέσεις, οι οποίες παρουσιάστηκαν και στην παράγραφο 2.11 και τηρείται η αρίθμηση που υπάρχει στο εγχειρίδιο του κινητήρα (Σχήμα 2.2).

Θάλαμος Καύσης 3-4:

Ισολογισμός θερμικής ισχύος

$$m_f H_u \eta_b + (m_a - m_{bl} - m_{ex}) C_{pa}(T_{t3} - T_{ref}) = (m_a - m_{bl} - m_{ex} + m_f) C_{pg}(T_{t4} - T_{ref}) \Rightarrow$$

$$T_{t4} = T_{ref} + \frac{m_f H_u \eta_b + (m_a - m_{bl} - m_{ex}) C_{pa}(T_{t3} - T_{ref})}{(m_a - m_{bl} - m_{ex} + m_f) c_{pg}}$$

Ισολογισμός Ισχύος στην Αεριογόνο:

Εισαγωγή αέρα ψύξης στη ροή

$$T_{t4bl} = \frac{m_{bl} c_{pa} T_{t3} + (m_a - m_{ex} - m_{bl} + m_f) c_{pg} T_{t4}}{(m_a - m_{ex} + m_f) c_{pg}}$$

$$P_C = P_{CT} \Rightarrow T_{t5} = T_{t4bl} - \frac{m_a c_{pa} (T_{t3} - T_{t2}) + P_{acc}}{\eta_m (m_a - m_{ex} + m_f) c_{pg}}$$

Όπου P_{acc} η απομάστευση ισχύος για το κιβώτιο βοηθητικών συστημάτων (accessory gearbox), m_{bl} η παροχή απομάστευσης για την ψύξη του στροβίλου αεριογόνου και m_{ex} η παροχή αέρα που εξέρχεται από το σύστημα του κινητήρα.

Ισολογισμός στροβίλου ισχύος:

$$P_{\omega\phi} = \eta_m (m_a - m_{ex} + m_f) c_{pg} (T_{t5} - T_{t6}) \Rightarrow T_{t6} = T_{t5} - \frac{P_{\omega\phi}}{\eta_m (m_a - m_{ex} + m_f) c_{pg}}$$

Με συνδυασμό των τεσσάρων παραπάνω εξισώσεων προκύπτει η παρακάτω έκφραση για την παροχή του αέρα στην είσοδο του κινητήρα.

$$m_a =$$

$$\frac{m_f(-\eta_m C_{pg} T_{t6} + \eta_m C_{pg} T_{ref} + \eta_m H_u \eta_b) + m_{ex}(\eta_m C_{pg} T_{t6} - \eta_m C_{pg} T_{ref} - \eta_m C_{pa} T_{t3} + \eta_m C_{pa} T_{ref}) + m_{bl} \eta_m T_{ref} (C_{pa} - C_{pg}) - P}{\eta_m C_{pg} T_{t6} - \eta_m C_{pg} T_{ref} + \eta_m C_{pa} T_{ref} + (1 - \eta_m) C_{pa} T_{t3} - C_{pa} T_{t2}}$$

Η παραπάνω σχέση αποτελεί ουσιαστικά έναν ισολογισμό ισχύος για το σύνολο του κινητήρα, όπου $P = P_{\omega\phi} + P_{acc}$, η ωφέλιμη ισχύς και η ισχύς που απαιτούν τα βοηθητικά συστήματα του κινητήρα. Στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζονται τα μεγέθη που εμπλέκει η παραπάνω έκφραση.

Πίνακας 5.2 : Απαιτούμενα μεγέθη για υπολογισμό παροχής εισόδου m_a

Μέγεθος	Περιγραφή	Τιμή
m_{bl}	Παροχή μάζας απομαστεύσεων	Υπόθεση
m_{ex}	Παροχή μάζας αέρα που εξάγεται	Υπόθεση
m_f	Παροχή καυσίμου	Μέτρηση
T_{t2}	Ολική θερμοκρασία εισόδου κινητήρα	Μέτρηση
T_{t3}	Ολική θερμοκρασία εισόδου Θ.Κ.	Μέτρηση/Υπόθεση
T_{t6}	Ολική θερμοκρασία εξόδου στροβίλου ισχύος	Αναγωγή μέτρησης
$P_{\omega\phi}$	Παραγόμενη ισχύς κινητήρα	Μέτρηση
P_{acc}	Ισχύς βοηθητικών συστημάτων	Υπόθεση

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρεί κανείς πως για τον υπολογισμό της παροχής εισόδου απαιτούνται μεγέθη πέρα από εκείνα που είναι δυνατόν να μετρηθούν. Αυτά τα μεγέθη είναι (αγνοώντας την συνεισφορά της ισχύος P_{acc}) οι απομαστεύσεις του κινητήρα (κυρίως στη θέση 3), η θερμοκρασία στην θέση 3 και η θερμοκρασία στην έξοδο του στροβίλου ισχύος (θέση 6). Αναφορικά με την T_{t6} μπορεί να γίνει αναγωγή της μέτρησης θερμοκρασίας καυσαερίων εξόδου του κινητήρα (θέση 7), σύμφωνα με έναν συντελεστή απωλειών θερμότητας. Ακόμα, αν δεν είναι δυνατή η μέτρηση της T_{t3} , μπορεί να υπολογισθεί αν γίνει εκτίμηση των ισεντροπικών βαθμών απόδοσης των συμπιεστών και της θερμοκρασίας ή της ολικής πίεσης στην θέση 2.5 και με χρήση της παρακάτω σχέσης και για τους δύο συμπιεστές προκύπτει η T_{t3} .

$$\eta_{isc} = \left[\left(\frac{\left(\frac{P_{tout}}{P_{tin}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}{\frac{T_{tout}}{T_{tin}} - 1} \right) \right]$$

Επίσης είναι ανάγκη να γίνουν και εκτιμήσεις των βαθμών απόδοσης του συστήματος. Τέλος, τονίζεται πως, επειδή πρόκειται για υπολογισμό βάσει μετρήσεων, το τελικό μέγεθος θα περιέχει και αυτό αβεβαιότητα, η οποία υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση.

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\theta y}{\theta x_i} \sigma_{x_i} \right)^2}$$

Όπου σ_{x_i} η τυπική απόκλιση του κάθε μετρούμενου μεγέθους και $\frac{\theta y}{\theta x_i}$ η μερική παράγωγος του μεγέθους που υπολογίζεται.

5.1.2 Υπολογισμός θερμοκρασιών θερμού τμήματος

Αφού έχει προηγηθεί ο υπολογισμός της παροχής μάζας εισόδου του κινητήρα m_a , η θερμοκρασία εξόδου του θαλάμου καύσης (θέση 4) υπολογίζεται από την σχέση

$$T_{t4} = T_{ref} + \frac{m_f H_u \eta_b + (m_a - m_{bl} - m_{ex}) C_{pa} (T_{t3} - T_{ref})}{(m_a - m_{bl} - m_{ex} + m_f) c_{pg}}$$

Στην συνέχεια υπολογίζονται η θερμοκρασία εισόδου του στροβίλου αεριογόνου T_{t4bl} , στην οποία συμμετέχει και ο αέρας ψύξης του στάτορά του, και η ενδιάμεση θερμοκρασία των στροβίλων T_{t5} , μέσω των παρακάτω σχέσεων.

$$T_{t4bl} = \frac{m_{bl} c_{pa} T_{t3} + (m_a - m_{ex} - m_{bl} + m_f) c_{pg} T_{t4}}{(m_a - m_{ex} + m_f) c_{pg}}$$

$$T_{t5} = T_{t4bl} - \frac{m_a c_{pa} (T_{t3} - T_{t2}) + P_{acc}}{\eta_m (m_a - m_{ex} + m_f) c_{pg}}$$

5.1.3 Υπολογισμός ισεντροπικών βαθμών απόδοσης

Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης για τις συνιστώσες των συμπιεστών υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση, θεωρώντας πως η θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση του εργαζόμενου μέσου δεν μεταβάλλεται για τις θέσεις εισόδου και εξόδου. Συγκεκριμένα απαιτείται η γνώση των ολικών θερμοκρασιών και πιέσεων στην είσοδο και στην έξοδο της συνιστώσας, καθώς και οι ιδιότητες του αερίου.

$$\eta_{isC} = \left[\left(\frac{\left(\frac{P_{tout}}{P_{tin}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}{\frac{T_{tout}}{T_{tin}} - 1} \right) \right]$$

Αντίστοιχα υπολογίζεται ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης των στροβίλων μέσω της παρακάτω έκφρασης.

$$\eta_{isT} = \left[\left(\frac{1 - \frac{T_{tout}}{T_{tin}}}{1 - \left(\frac{P_{tout}}{P_{tin}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \right) \right]$$

5.1.4 Υπολογισμός διορθωμένων μεγεθών

Αφού προηγηθεί ο υπολογισμός της παροχής μάζας εισόδου και ακολουθήσει ο υπολογισμός των θερμοκρασιών στο θερμό τμήμα της μηχανής, με την προϋπόθεση πως και οι ολικές πιέσεις είναι γνωστές σε κάθε θέση, είναι δυνατός ο υπολογισμός των διορθωμένων μεγεθών στην είσοδο κάθε συνιστώσας. Συγκεκριμένα υπολογίζεται ο λόγος πιέσεων, η διορθωμένη παροχή και η διορθωμένη ταχύτητα περιστροφής, όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια.

Λόγος πιέσεων

Για τις συνιστώσες των συμπιεστών ο λόγος προκύπτει από την παρακάτω έκφραση.

$$\Pi_C = \frac{P_{tout}}{P_{tin}}$$

Ενώ για τις συνιστώσες των στροβίλων, ο λόγος πιέσεων υπολογίζεται από την σχέση

$$\Pi_T = \frac{P_{tin}}{P_{tout}}$$

Διορθωμένη παροχή

Η διορθωμένη παροχή στην είσοδο κάθε συνιστώσας υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση

$$\dot{m}_c = \frac{\dot{m}_{in} \sqrt{\theta}}{\delta_{in}}$$

Όπου

$$\theta = \frac{T_{tin}}{T_{ref}}$$

και

$$\delta = \frac{P_{tin}}{P_{ref}}$$

Με $T_{ref} = 288.15$ K, η θερμοκρασία αναφοράς και $P_{ref} = 101325$ Pa, η πίεση αναφοράς.

Διορθωμένη ταχύτητα περιστροφής

Η διορθωμένη ταχύτητα περιστροφής κάθε συνιστώσας προκύπτει από την παρακάτω σχέση.

$$N_c = \frac{N}{\sqrt{\theta}_{in}}$$

Με N συμβολίζεται η ταχύτητα περιστροφής ατράκτου σε rpm. Για τον συγκεκριμένο κινητήρα αξιοποιούνται οι μετρήσεις της ταχύτητας περιστροφής που γίνονται στις δύο ατράκτους (αεριογόνου και ισχύος) μέσω των ταχυμέτρων.

6

Ανακεφαλαίωση - Συμπεράσματα - Προτάσεις

6.1 Ανακεφαλαίωση

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε μελέτη με σκοπό την δημιουργία εγκατάστασης δοκιμών για τον κινητήρα PT6T-6 προσαρμοσμένη στην υπάρχουσα εγκατάσταση του ΕΘΣ.

Η παραπάνω μελέτη πραγματοποιήθηκε αξιοποιώντας το περιβάλλον προγραμματισμού PROOSIS για την μοντελοποίηση του συγκροτήματος του κινητήρα. Το παραπάνω μοντέλο είναι δυνατό να βελτιωθεί με την προσαρμογή του, βάσει μετρήσεων πραγματικών μηχανών που είναι διαθέσιμες από το ΕΘΣ.

Στη συνέχεια, βάσει του παραπάνω μοντέλου, εξετάζεται η λειτουργία της μηχανής για παραγωγή μειωμένης ισχύος, εκφρασμένη με τις διορθωμένες παραμέτρους.

Ακόμα, σχεδιάζεται η βάση στήριξης και η διάταξη εξαγωγής των καυσαερίων του κινητήρα και ελέγχεται η επίδραση του εμβαδού εξόδου στην λειτουργία του. Επίσης σχεδιάζεται η εισαγωγή του κινητήρα και η σύνδεσή της με την διάταξη στραγγαλισμού που διαθέτει το εργαστήριο.

Έπειτα με σκοπό την σχεδίαση του μετρητικού συστήματος γίνεται αναφορά σε μετρητικές διατάξεις και στη δυνατότητα μετρήσεων επί του κινητήρα. Στη συνέχεια γίνεται έλεγχος των ορίων λειτουργίας των οργάνων μέτρησης. Αφού καθοριστούν τα όρια, επιλέγονται τα κατάλληλα μετρητικά όργανα που απαρτίζουν το μετρητικό σύστημα του κινητήρα.

Τέλος, παρουσιάζεται η διαδικασία υπολογισμού των επιδόσεων του κινητήρα και των συνιστωσών του βάσει των δεδομένων των μετρήσεων.

6.2 Συμπεράσματα

Από την παρούσα διπλωματική εργασία διεξάγεται το συμπέρασμα πως, ενώ πρόκειται για μελέτη σχεδιασμού δοκιμαστηρίου βασισμένη, κυρίως, στην βιβλιογραφία και παραδοχές για την λειτουργία της μηχανής, έγινε σε μεγάλο βαθμό εκτίμηση όλων των παραμέτρων που αφορούν το δοκιμαστήριο. Συγκεκριμένα, βάσει μετρήσεων πλήθους κινητήρων PT6T-6, αναπτύχθηκε το μοντέλο που προσομοιώνει την λειτουργία μίας μέσης μηχανής, με τα αποτελέσματα να μην αποκλίνουν σημαντικά από τις μετρήσεις μηχανών με διαφορετικούς σειριακούς αριθμούς (serial numbers). Επίσης, βάσει του μοντέλου, εκτιμήθηκαν οι επιδόσεις του κινητήρα κατά την λειτουργία του

στο δοκιμαστήριο και πραγματοποιήθηκε μία αρχική επιλογή μετρητικού εξοπλισμού. Ακόμα, διαπιστώθηκε μία περιοχή λειτουργίας στην οποία μπορεί να λειτουργήσει ο κινητήρας και ικανοποιείται ο περιορισμός ισχύος της υπάρχουσας εγκατάστασης και οι περιορισμοί λειτουργίας του κινητήρα. Επιπλέον, διαπιστώθηκε πως με στραγγαλισμό (throttling) της ροής στην είσοδο της μηχανής είναι δυνατή η ασφαλής λειτουργία του κινητήρα για παραγωγή μειωμένης ισχύος. Τέλος, βάσει της βιβλιογραφίας και μετρήσεων επί του κινητήρα, έγινε δυνατός ο προκαταρκτικός σχεδιασμός της διάταξης του χώρου δοκιμών, ο οποίος περιλαμβάνει την βάση στήριξης του ζεύγους κινητήρων και τις διατάξεις εισαγωγής αέρα και εξαγωγής καυσαερίων. Για την υλοποίηση, όμως, των παραπάνω απαιτείται ακριβέστερη μελέτη σε θέματα που προτείνονται στην επόμενη παράγραφο.

6.3 Προτάσεις

Για την υλοποίηση όσων πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία προτείνεται :

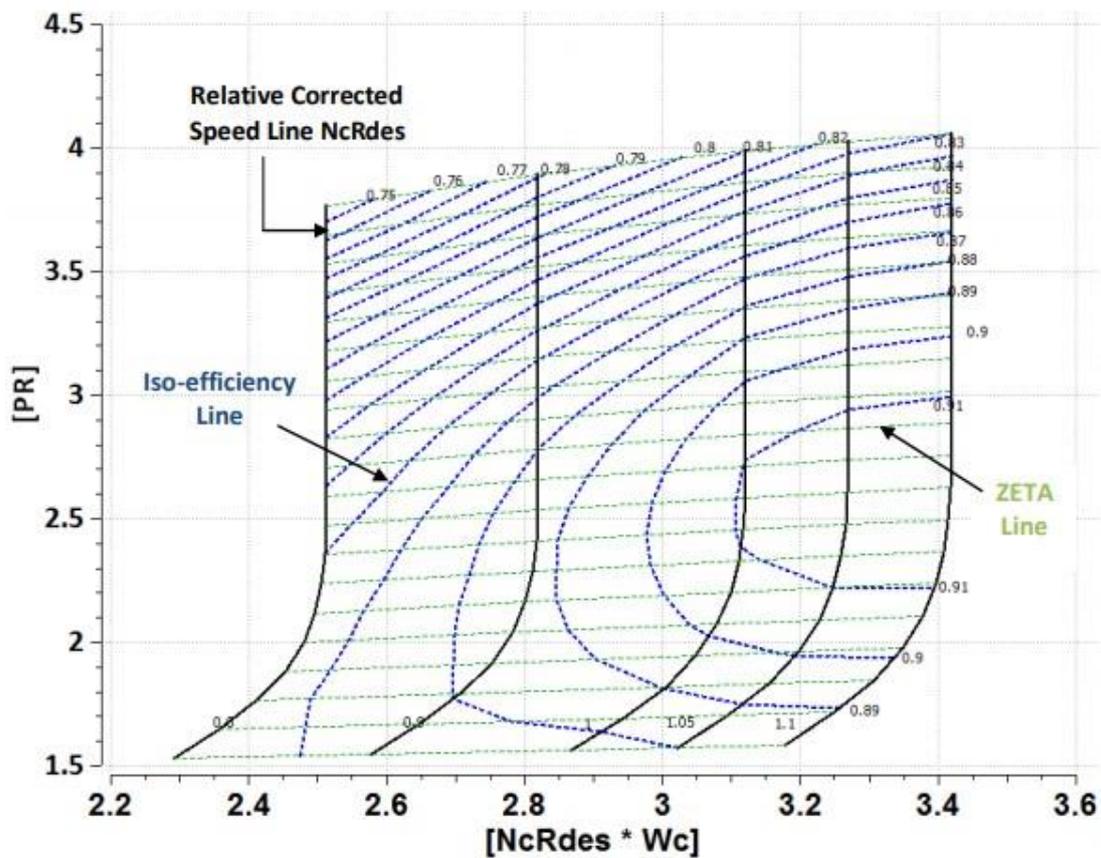
- Προσαρμογή του μοντέλου στον κινητήρα που θα λειτουργήσει στο δοκιμαστήριο.
- Λήψη μετρήσεων ακριβείας επί του συγκροτήματος.
- Παραγωγή μηχανολογικών σχεδίων.
- Μελέτη για επιλογή μειωτήρα στροφών και γεννήτριας στο δοκιμαστήριο σύμφωνα με τις επιδόσεις του κινητήρα.

7

Βιβλιογραφικές αναφορές

- [1] Στ. Τσιόκας, 2014, “ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΕΛΙΚΟΠΤΕΡΟΥ ΣΕ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ”, Διπλωματική εργασία Ε.Μ.Π..
- [2] Χρ. Αμπάτης, 2010, “Σχεδιασμός και κατασκευή συνιστωσών, θέση σε λειτουργία και μετρήσεις σε διάταξη δοκιμών αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών”, Διπλωματική εργασία Ε.Μ.Π..
- [3] https://www.ge.com/content/dam/gepower-pgdp/global/en_US/documents/service/gas%20turbine%20services/turbine-performance-evaluation-fact-sheet.pdf
- [4] Walsh, P.P., and Fletcher, P., 2004, “Gas Turbine Performance”, Blackwell Publishing, Gulf Publishing Company, 2nd Edition
- [5] Customer Training Manual PT6T-3/6
- [6] Alexios Alexiou, “Introduction To Gas Turbine Modelling With PROOSIS”, 2nd Edition
- [7] Alexios Alexiou, “TURBO 4.0 Library Reference Manual”
- [8] Miller, D.S., 1990, “INTERNAL FLOW SYSTEMS, DESIGN AND PERFORMANCE PREDICTION”, 2nd Edition, pp. 189-258.
- [9] Sparrow, E.M., Abraham, J.P., and Minkowycz, W.J., 2009, “Flow separation in a diverging conical duct: Effect of Reynolds number and divergence angle”, International Journal of Heat and Mass Transfer 52 3079-3083.
- [10] Reshmin, A.I., Teplovodskii, S. Kh., and Trifonov, V.V., 2011, “Turbulent Flow in a Circular Separationless Diffuser at Reynolds Numbers Smaller than 2000”, Fluid Dynamics, Vol. 46, No. 2, pp. 278-285.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ



Σχήμα ΠΙ. 2 : Χάρτης στροβίλου με χρήση μεταβλητής ZETA^[7]

Στα παραπάνω σχήματα παρατηρούνται καμπύλες σταθερού BETA (συμπίεστης) και ZETA (στρόβιλος), καμπύλες σταθερής διορθωμένης ταχύτητας περιστροφής ως προς εκείνης στο σημείο σχεδίασης (NcRdes) και καμπύλες σταθερού ισηντροπικού βαθμού απόδοσης. Το σημείο λειτουργίας πάνω στον χάρτη συνιστώσων καθορίζεται πλήρως από ένα ζεύγος τιμών BETA και NcRdes για τους συμπίεστες και ZETA και NcRdes αντίστοιχα για τους στροβίλους. Τα μεγέθη που φαίνονται στους χάρτες παρουσιάζονται παρακάτω.

Διορθωμένη παροχή μάζας

$$W_c = \frac{W_{in} \sqrt{\theta_{in}}}{\Delta_{in}}$$

Με theta και delta να ορίζονται ως

$$\theta = \frac{T_{in}}{T_{ref}}$$

και

$$\text{delta} = \frac{P_{tin}}{P_{ref}}$$

Όπου T_{ref} και P_{ref} η θερμοκρασία και η πίεση αναφοράς.

Διορθωμένη ταχύτητα περιστροφής

$$N_c = \frac{N_{mech}}{\sqrt{\theta_{in}}}$$

Με N την ταχύτητα περιστροφής της συνιστώσας. Ενώ η σχετική διορθωμένη ταχύτητα περιστροφής ορίζεται ως

$$NcRdes = \frac{N_c}{NcDes}$$

Με $NcDes$ την διορθωμένη ταχύτητα περιστροφής στο σημείο σχεδίασης.

Ο λόγος πίεσης για ολικές πιέσεις P_t ορίζεται ως

$$PR = \frac{P_{tout}}{P_{tin}}$$

Η προσαρμογή των χαρτών, που παρουσιάστηκαν στο Σχήμα Π1. 1 και στο Σχήμα Π1. 2 βάσει του σημείου σχεδίασης γίνεται με την βοήθεια συντελεστών scalars και αθροιστών adders. Στη συνέχεια δίνονται οι σχέσεις για τον υπολογισμό των νέων τιμών των μεταβλητών των χαρτών βάσει των scalars, ενώ στον Πίνακα Π1.1 παρατίθεται ο τύπος κάθε συντελεστή.

Για τους συμπίεστές

$$NcRdes = (NcRdes_{map} \cdot s_{map,Nc} + a_{map,Nc}) \cdot s_{gam,Nc}$$

$$Wc = (Wc_{map} \cdot s_{IGV,Wc} \cdot s_{tc,Wc} \cdot s_{map,Wc} \cdot s_{adapt,Wc} + a_{map,Wc} + a_{adapt,Wc}) \cdot s_{gam,Wc} \cdot s_{Re,Wc}$$

$$eff = (eff_{map} \cdot s_{IGV,eff} \cdot s_{tc,eff} \cdot s_{map,eff} \cdot s_{adapt,eff} + a_{map,eff} + a_{adapt,eff}) \cdot s_{gam,eff} \cdot s_{Re,eff}$$

$$PR_{ad} = \left(s_{gam,PR} \cdot \left((PR_{map} - 1) \cdot s_{IGV,PR} \cdot s_{map,PR} + 1 \right)^{\frac{gam_{ref}-1}{gam_{ref}}} - 1 \right) + 1 \Bigg)^{\frac{gam_n}{gam_n-1}}$$

Όπου eff ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης. Ο δείκτης map υποδηλώνει την τιμή των μεγεθών στον αρχικό χάρτη πριν την προσαρμογή του.

Για τους στροβίλους

$$NcRdes = (NcRdes_{map} \cdot s_{map,Nc} + a_{map,Nc}) \cdot s_{gam,Nc}$$

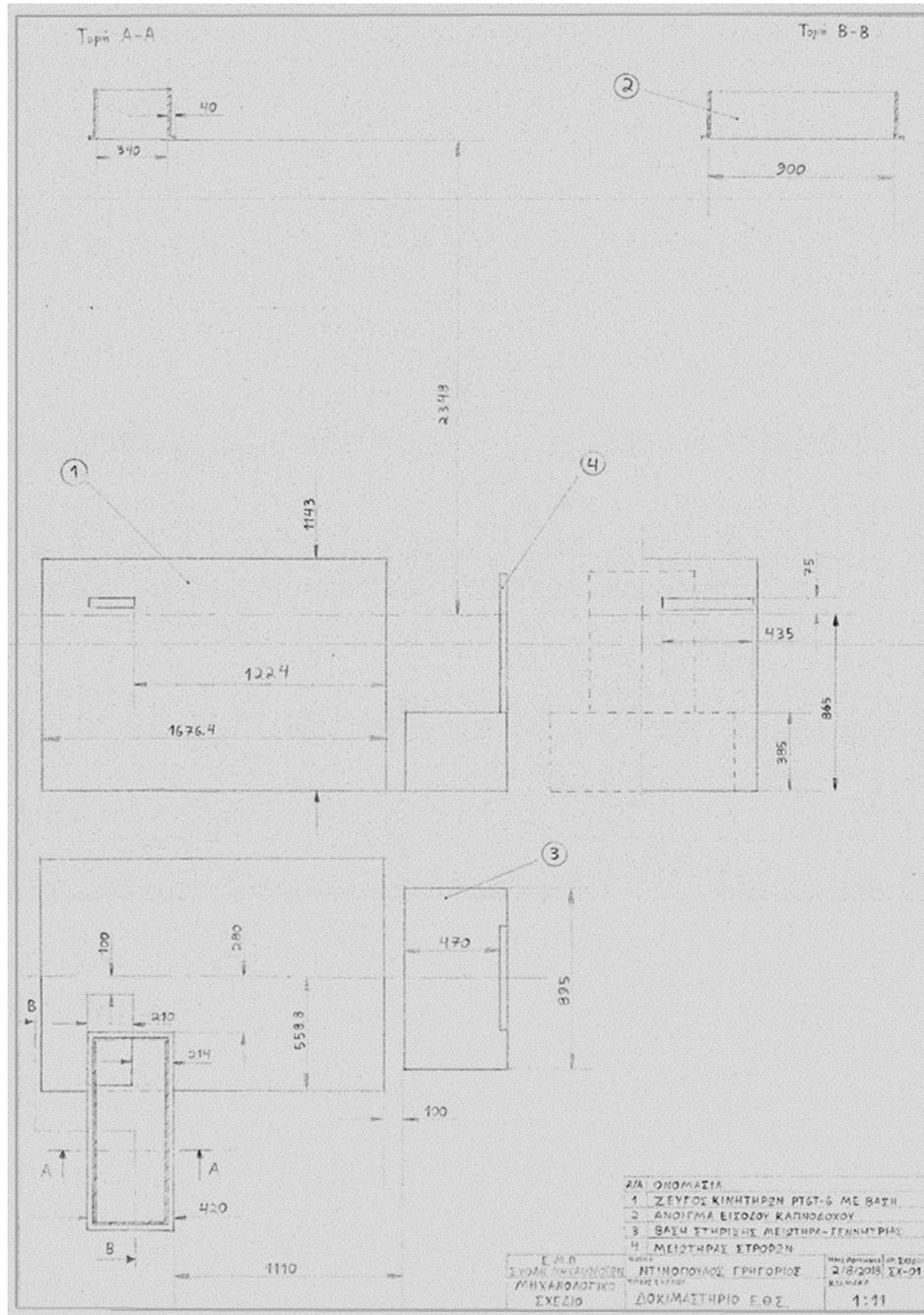
$$Wc = (Wc_{map} \cdot s_{map,Wc} \cdot s_{tc,Wc} \cdot s_{VGV} \cdot s_{adapt,Wc} + a_{map,Wc} + a_{adapt,Wc}) \cdot s_{gam,Wc} \cdot s_{Re,Wc}$$

$$eff = (eff_{map} \cdot s_{map,eff} \cdot s_{tc,eff} \cdot s_{adapt,eff} + a_{map,eff} + a_{adapt,eff}) \cdot s_{gam,eff} \cdot s_{Re,eff}$$

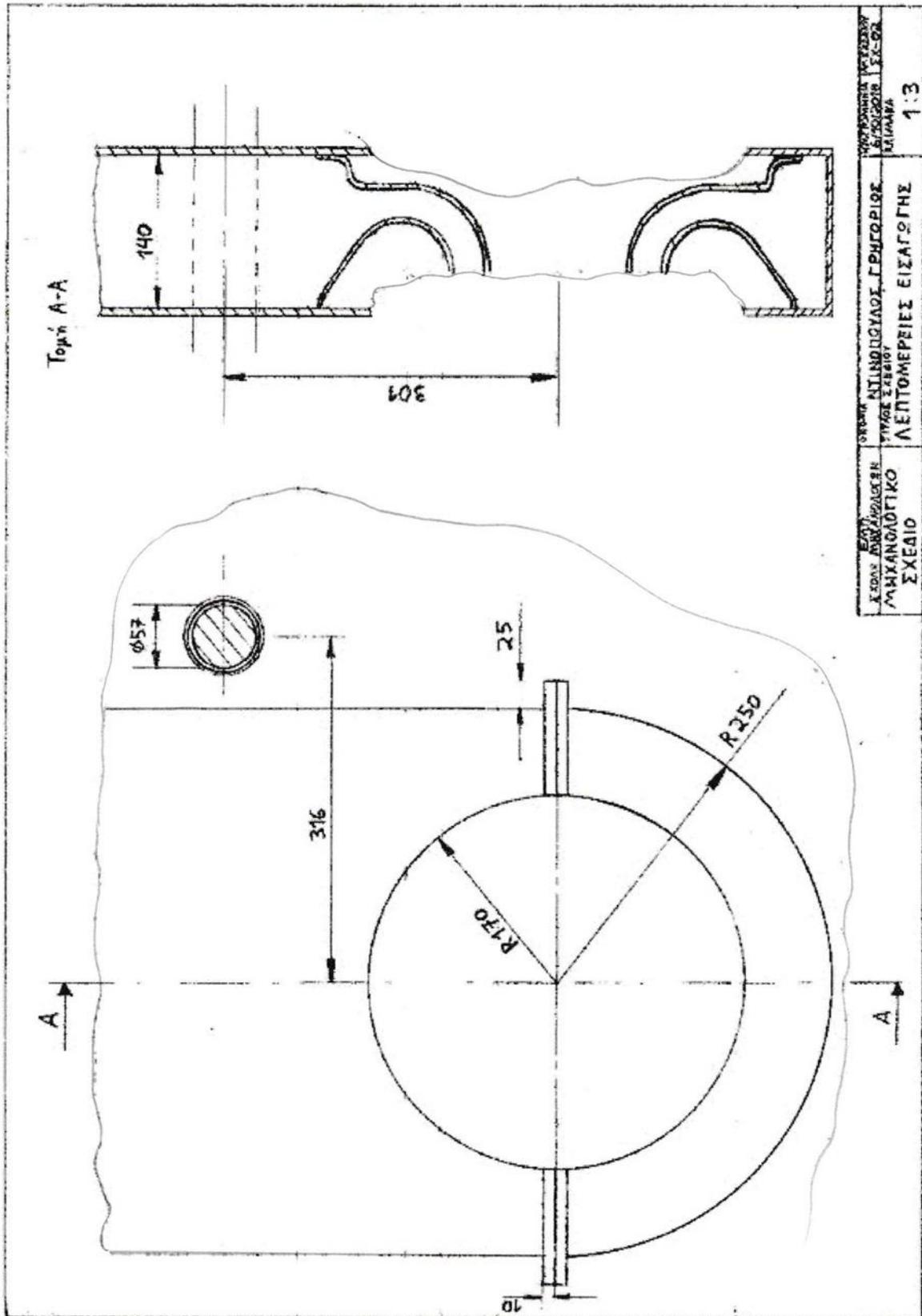
$$PQ = \left(1 - s_{gam,PR} \cdot \left(1 - (s_{map,PR} \cdot (PR_{map} - 1) + 1)^{\frac{gam_{ref} - 1}{gam_{in}}} \right) \right)^{\frac{gam_{in}}{gam_{ref} - 1}}$$

Πίνακας ΠΙ. 1 : Συντελεστές προσαρμογής χαρτών

Μέγεθος	Τύπος Συντελεστή
s_{map}	Κλίμακας
a_{map}	Αθροιστής
s_{adapt}	Προσαρμογής
a_{adapt}	Αθροιστής προσαρμογής
$s_{IGV/VGV}$	Διόρθωσης για την επίδραση των IGVs/VGVs
s_{tc}	Διόρθωσης για την επίδραση του περιθωρίου κεφαλής πτερυγίου (tip clearance) στα Wc και eff
s_{Re}	Διόρθωσης για την επίδραση του αριθμού Reynolds στα Wc και eff
s_{gam}	Διορθωτικός



Σχήμα Π2. 14 : Μηχανολογικό σχέδιο της εγκατάστασης του δοκιμαστηρίου μετά την τοποθέτηση του κινητήρα



Σχήμα Π2. 15 : Λεπτομέρειες προσαρμοστικού κελύφους της εισαγωγής του κινητήρα

Π3 Υπολογισμός απωλειών πίεσης αγωγού εξόδου

Για την εκτίμηση των απωλειών ολικής πίεσης στον αγωγό εξόδου, αρχικά υπολογίζεται, για τα χαρακτηριστικά του επιθυμητού σημείου σχεδίασης (Σχήμα 2.12), η δυναμική πίεση P_d στην έξοδο της μηχανής που αποτελεί την είσοδο για τον αγωγό εκτόνωσης των καυσαερίων στο περιβάλλον, καθώς και ο αριθμός Reynolds, μέσω της επίλυσης του παρακάτω συστήματος εξισώσεων, ενώ στον Πίνακα Π3.2 παρουσιάζονται τα δεδομένα εισόδου του συστήματος εξισώσεων. Στον Πίνακα Π3.1 παρουσιάζεται η επεξήγηση των συμβόλων.

Πίνακας Π3. 1 : Επεξήγηση συμβόλων

Συμβολισμός	Μέγεθος
P_t (Pa)	Ολική πίεση
P (Pa)	Στατική πίεση
P_d (Pa)	Δυναμική πίεση
T_t (K)	Ολική θερμοκρασία
T (K)	Στατική θερμοκρασία
ρ (kg/m ³)	Πυκνότητα ρευστού
m (kg/s)	Παροχή μάζας
A (m ²)	Εμβαδό
v_g (m ² /s)	Κινηματική συνεκτικότητα
Re	Αριθμός Reynolds
v (m/s)	Ταχύτητα ροής
M	Αριθμός Mach ροής
D_h (m)	Υδραυλική διάμετρος

Θέση 7

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

$$T_t = T \left(1 + \frac{(\gamma-1)M^2}{2} \right) \quad \text{ή} \quad T_t = T + v^2 / (2 C_p)$$

$$v = M \sqrt{\gamma R T}$$

$$\dot{m} = \frac{P}{RT} v A$$

$$\rho = \frac{P}{RT}$$

$$P_d = \frac{1}{2} \rho v^2$$

$$Re = v D_h / \nu_g$$

Ως ν_g συμβολίζεται η κινηματική συνεκτικότητα του ρευστού.

Δεδομένα Εισόδου

Πίνακας Π3. 2 : Δεδομένα εισόδου συστήματος για την θέση 7 (σημείο σχεδίασης)

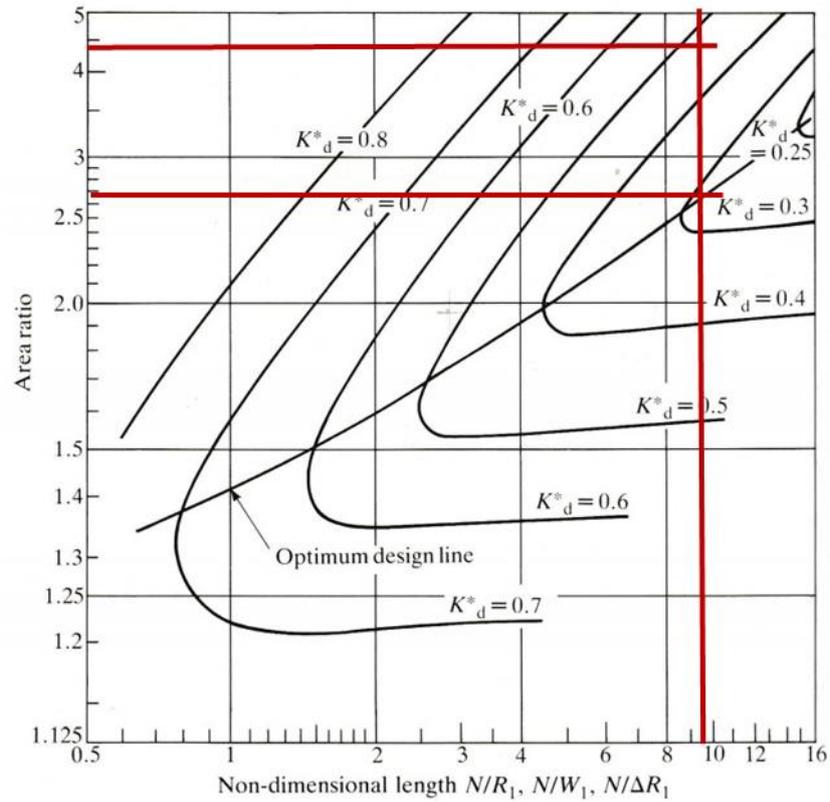
Pt (Pa)	103403.15
Tt (K)	996.72
m (kg/s)	2.88
A (m ²)	0.0639
ν_g (m ² /s)	10 ⁻⁴

Από την σχεδίαση του διαχύτη προκύπτει ο συντελεστής απωλειών πίεσης K_d (επιδέχεται διόρθωση σχετικά με τον αριθμό Reynolds, Σχήμα Π3. 2) από το Σχήμα Π3. 1 και οι απώλειες υπολογίζονται μέσω της σχέσης

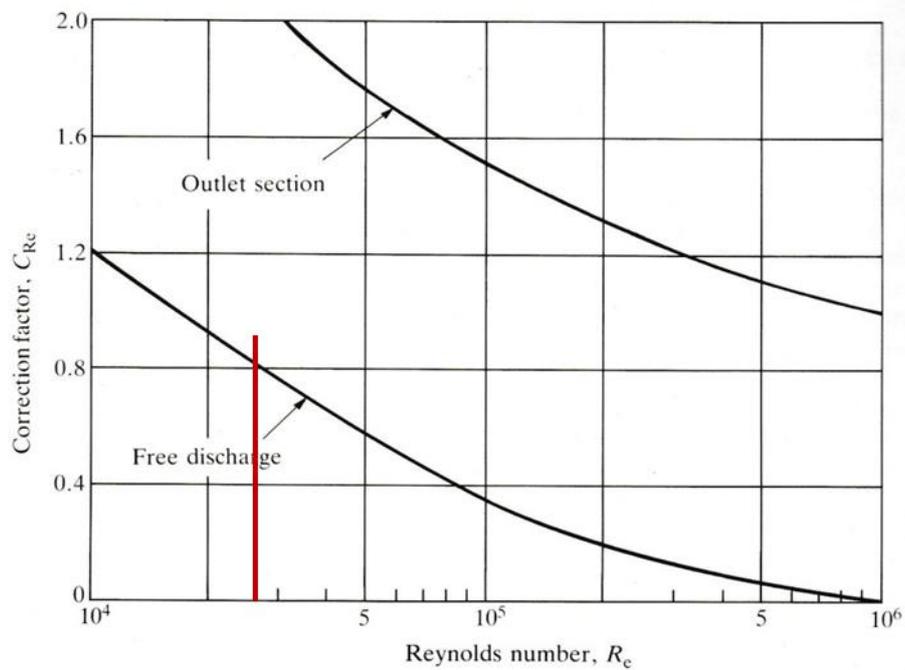
$$K_{d_corr} = K_d + \left(K_d - \frac{1}{AreaRatio^2} \right) C_{Re}$$

$$K_{d_sum} = K_{d_corr} + K_{d_sum}$$

$$\Delta P = K_{d_sum} P_d$$



Σχήμα Π3. 1 : Επιλογή συντελεστή απωλειών διαχύτη^[8]



Σχήμα Π3. 2 : Επιλογή συντελεστή διόρθωσης βάσει αριθμού Reynolds^[8]

Επίσης στο προηγούμενο $K_{d,corr}$ προστίθεται και ο συντελεστής απωλειών $K_{d,tr}$ εξαιτίας της απότομης μετατροπής της ελλειπτικής διατομής στην έξοδο του κινητήρα σε

ορθογωνική. Οι απώλειες από στροφή της ροής αμελούνται για μικρές γωνίες ($< 11^\circ$), όπως προκύπτει για την συγκεκριμένη εγκατάσταση.

Ο συντελεστής απωλειών για τον ευθύγραμμο αγωγό υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση, όπου ως τραχύτητα λαμβάνεται $k = 0.025 \text{ mm}$, ενώ προστίθεται και ο συντελεστής απωλειών λόγω της απότομης προσαρμογής των διατομών.

$$f = 0.25 / \left[\log \left(\frac{k}{3.7Dh} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2$$

$$K_d = fL / Dh$$

$$K_{d_sum} = K_d + K_{tr}$$

$$\Delta P = K_{d_sum} P_d$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται για τα χαρακτηριστικά του επιθυμητού σημείου σχεδίασης η ολική πίεση εξόδου των καυσαερίων (θέση 9), όταν εκείνα εκτονώνονται στην ατμόσφαιρα, μέσω της επίλυσης του παρακάτω συστήματος εξισώσεων, ενώ στον Πίνακα Π3.3 παρουσιάζονται τα δεδομένα εισόδου του συστήματος εξισώσεων.

Θέση 9

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

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

$$v = M \sqrt{\gamma RT}$$

$$\dot{m} = \frac{P}{RT} v A$$

Δεδομένα Εισόδου

Πίνακας Π3. 3 : Δεδομένα εισόδου συστήματος για την θέση 9

P (Pa)	101325
Tt (K)	996.72
m (kg/s)	2.88
A (m ²)	0.0705 , 0.1849 , 0.3060

Τέλος, υπολογίζεται η ολική πίεση στην είσοδο της διάταξης εξόδου καυσαερίων και το ποσοστό απωλειών πίεσης ως

$$P_{\text{in}} = P_{t9} + \Delta P = P_{\text{tout}} + \Delta P$$

$$dP = \frac{P_{\text{tin}} - P_{t9}}{P_{\text{tin}}}$$

Π4 Υπολογισμός στατικών φορτίων στα τοιχώματα του διαχύτη

Για τον υπολογισμό των δυνάμεων που προέρχονται από την δράση της πίεσης στα τοιχώματα του διαχύτη, απαιτείται η γνώση της στατικής πίεσης $P(x)$ κατά το μήκος του τοιχώματος, καθώς και το πλάτος $b(x)$ του τοιχώματος σε κάθε θέση. Αφού πρόκειται για διαχύτη το πλάτος θα μεταβάλλεται.

Οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται για το σημείο σχεδίασης για συνθήκες τυπικής ημέρας. Βάσει των συντελεστών απωλειών που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3, υπολογίζεται η στατική πίεση στην είσοδο του διαχύτη (θέση 7). Στη συνέχεια θεωρείται γραμμική η μεταβολή της πίεσης, μέχρι να εκτονωθεί σε εκείνη του περιβάλλοντος (P_{amb}). Η συνάρτηση της πίεσης παρουσιάζεται στη συνέχεια.

$$P(x) = a x + b$$

$$a = (P_{amb} - P_{st7}) / L$$

$$b = P_{st7}$$

Όπου

L : το μήκος του τοιχώματος

P_{amb} : πίεση περιβάλλοντος

P_{st7} : στατική πίεση εισόδου διαχύτη

Η στατική πίεση στην είσοδο του διαχύτη προκύπτει μετά την αφαίρεση των απωλειών ολικής πίεσης κατά το τμήμα μετάβασης της ροής από το εμβαδό εξόδου του κινητήρα (0.0639 m^2) σε αυτό στην είσοδο του διαχύτη (0.0739 m^2). Αφού έχει καθορισθεί ο συντελεστής απωλειών ολικής πίεσης κατά το τμήμα της μετάβασης, υπολογίζεται η δυναμική πίεση στην έξοδο της μηχανής (θέση 7), επιλύοντας επαναληπτικά το παρακάτω σύστημα εξισώσεων. Στον Πίνακα Π4.1 περιγράφονται τα μεγέθη που συμμετέχουν στην συγκεκριμένη ανάλυση, ενώ τα δεδομένα εισόδου παρουσιάζονται στον Πίνακα Π4.2.

Θέση 7

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

$$T_t = T \left(1 + \frac{(\gamma-1)M^2}{2}\right) \quad \text{ή} \quad T_t = T + v^2 / (2 C_p)$$

$$v = M \sqrt{\gamma R T}$$

$$\dot{m} = \frac{P}{RT} v A$$

$$\rho = \frac{P}{RT}$$

$$P_d = \frac{1}{2} \rho v^2$$

Πίνακας Π4. 1 : Περιγραφή μεγεθών συστήματος

Μέγεθος	Περιγραφή
Pt (Pa)	Ολική πίεση
Tt (K)	Ολική θερμοκρασία
m (kg/s)	Παροχή μάζας ρευστού
A (m ²)	Εμβαδό διατομής
K _{d,tr}	Συντελεστής απωλειών πίεσης

Πίνακας Π4. 2 : Δεδομένα εισόδου συστήματος της θέσης 7

Pt (Pa)	103584.3
Tt (K)	996.92
m (kg/s)	2.88
A (m ²)	0.0639
K _{d,tr}	0.2

Οι απώλειες ολικής πίεσης προκύπτουν μέσω της παρακάτω έκφρασης, όπου K_{d,tr} ο συντελεστής απωλειών ολικής πίεσης και P_d η δυναμική πίεση.

$$\Delta P = K_{d,tr} P_d$$

$$P_{t,diffuser_in} = P_{t7} - \Delta P$$

Εξαιτίας των παραπάνω απωλειών, η ολική πίεση στην είσοδο του διαχύτη είναι μειωμένη. Τέλος, όμοια με προηγουμένως υπολογίζεται η στατική πίεση στην είσοδο του

διαχύτη με εμβαδό διατομής 0.0735 m^2 . Τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης παρουσιάζονται στον Πίνακα Π4.3.

Πίνακας Π4. 3 : Αποτελέσματα ανάλυσης απολειών

P_d (Pa)	2864.68
ΔP (Pa)	572.93
$P_{st,diffuser_in}$ (Pa)	100632.57

Η συνολική δύναμη προκύπτει ως το ολοκλήρωμα της πίεσης κατά το μήκος του τοιχώματος και υπολογίζεται ως

$$F = \int_0^L (P(x) - P_{amb}) b(x) dx$$

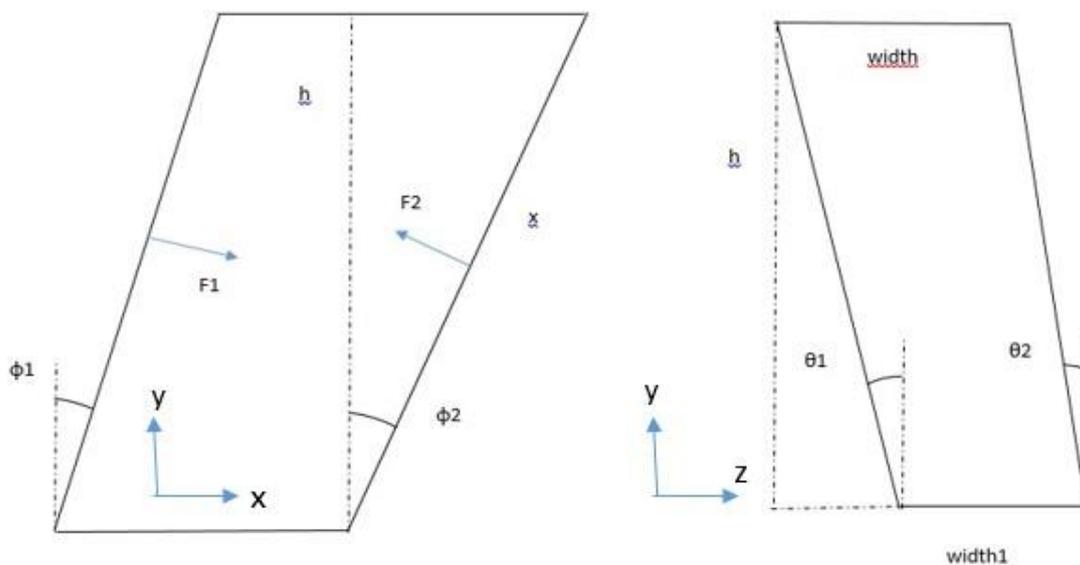
Στο Σχήμα Π4. 1 παρουσιάζεται ποιοτικά η γεωμετρία του διαχύτη σε πρόοψη (αριστερά) και πλάγια όψη (δεξιά). Για τον υπολογισμό της δύναμης που ασκείται σε κάθε ένα τοίχωμα στο επίπεδο της πρόοψης, το πλάτος προκύπτει

$$b(x) = \text{width} = \text{width1} + h \tan\theta_1 - h \tan\theta_2$$

$$\text{με } h = x \cos\phi_1$$

ή

$$h = x \cos\phi_2$$



Σχήμα Π4. 1 : Γεωμετρία διαχύτη

Τα δεδομένα του παραπάνω συστήματος παρουσιάζονται στον Πίνακα Π4.4. Τα παρακάτω δεδομένα προέκυψαν από την ανάλυση επί της γεωμετρίας του διαχύτη, έτσι ώστε να τηρούνται οι χωροταξικοί περιορισμοί κατά την εγκατάσταση του κινητήρα στο δοκιμαστήριο.

Πίνακας Π4. 4 : Δεδομένα υπολογισμού πλάτους σε κάθε θέση τοιχώματος

$\phi 1$ (deg)	9.60
$\phi 2$ (deg)	13.00
$\theta 1$ (deg)	4.92
$\theta 2$ (deg)	0.66
width1 (m)	0.174

Για τον υπολογισμό των δυνάμεων στα άλλα δύο τοιχώματα του διαχύτη ακολουθείται αντίστοιχη ανάλυση. Τα συνολικά φορτία που ασκούνται στα τοιχώματα του διαχύτη παρουσιάζονται στον Πίνακα Π4.5.

Πίνακας Π4. 5 : Συνολικά φορτία επί του διαχύτη

ΣF_x (N)	-0.55
ΣF_y (N)	15.80
ΣF_z (N)	0.00