ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΕΛΙΚΟΠΤΕΡΟΥ ΣΕ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΤΕΡΓΙΟΣ ΤΣΙΟΚΑΣ

Επίβλεψη:
Λέκτορας Ν. Αρετάκης

ΑΘΗΝΑ
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2014

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Ρευστών
Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών

Μελέτη μετατροπής κινητήρα ελικοπτέρου σε αεριοστρόβιλο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΤΕΡΓΙΟΣ ΤΣΙΟΚΑΣ

Επίβλεψη:
Λέκτορας Ν. Αρετάκης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία σκοπό έχει την μελέτη μετατροπής του κινητήρα T53-L-13B σε βιομηχανικό αεριοστρόβιλο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η εκπόνησή της γίνεται μετά από πρόταση της Διεύθυνσης Τεχνικού Σώματος του Γενικού Επιτελείου Στρατού (ΓΕΣ/ΔΤΧ).

Αρχικά παρουσιάζεται ο κινητήρας που μελετάται και γίνεται ένας προκαταρκτικός υπολογισμός με χρήση των θερμοδυναμικών εξισώσεων για το σημείο σχεδίασης.

Στη συνέχεια δημιουργείται το ακριβές υπολογιστικό μοντέλο που προσομοιώνει τη λειτουργία του κινητήρα με τη χρήση του προγράμματος PROOSIS. Η υλοποίηση του μοντέλου γίνεται με τη χρήση δεδομένων για τον κινητήρα από την ανοιχτή βιβλιογραφία και από δεδομένα του δοκιμαστηρίου κινητήρων της Ελληνικής Αεροπορικής Βιομηχανίας (ΕΑΒ).

Η δημιουργία του μοντέλου ξεκινάει με την κατασκευή του σχηματικού διαγράμματος και με την επιλογή των παραμέτρων για λειτουργία στο σημείο σχεδίασης ώστε να προκύψουν οι συντελεστές κλίμακας των χαρτών για τις συνιστώσες της μηχανής. Ακολουθεί η προσομοίωση της λειτουργίας της μηχανής για τα εκτός σχεδίασης σημεία. Το μοντέλο αξιολογείται σύμφωνα με τις αποκλίσεις που προκύπτουν από τα δεδομένα του δοκιμαστηρίου για διάφορα σημεία λειτουργίας. Για την

ελαχιστοποίηση των αποκλίσεων εφαρμόζεται μέθοδος βελτιστοποίησης επιλεγμένων παραμέτρων.

Το αρχικό μοντέλο βελτιώνεται με προσθήκη δεύτερης συνιστώσας συμπιεστή ώστε να διακρίνεται ο αξονικός συμπιεστής από τον ακτινικό. Η εκτίμηση των επί μέρους λόγων πίεσης γίνεται με βάση μονοδιάστατους υπολογισμούς. Επιπλέον γίνεται επιλογή συγκεκριμένων χαρτών με βάση το λόγο πίεσης και τη θέση της κάθε συνιστώσας στη μηχανή, ώστε να επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή προσομοίωση. Στο νέο βελτιωμένο μοντέλο που προκύπτει εφαρμόζονται η αντίστοιχη διαδικασία με αυτήν του πρώτου. Το μοντέλο αφού αξιολογηθεί συγκρίνεται με το προηγούμενο. Το τελικό μοντέλο είναι αυτό που απεικονίζει ιδανικά τη λειτουργία του πραγματικού κινητήρα.

Στο σημείο αυτό γίνονται οι υπολογισμοί και η περιγραφή που αφορούν στη σύνδεση του κινητήρα με τη γεννήτρια και το δίκτυο. Η γεννήτρια συνδέεται με τον κινητήρα μέσω κατάλληλα διαστασιολογημένου μειωτήρα στροφών και με το δίκτυο μέσω του απαραίτητου ηλεκτρολογικού εξοπλισμού.

Μετά την υλοποίηση του μοντέλου του κινητήρα και λαμβανομένης υπόψη της παλαιότητας της τεχνολογίας του, επιδιώκεται η βελτίωσή του με την εφαρμογή ανακόμισης των καυσαερίων. Κατασκευάζεται νέο σχηματικό διάγραμμα και το νέο μοντέλο δοκιμάζεται για λειτουργία σε συνθήκες περιβάλλοντος διαστήματος ενός ημερολογιακού έτους ώστε να συγκριθεί η λειτουργία του με αυτήν του μοντέλου χωρίς ανακόμιση.

Ως διαφορετικός τρόπος της βελτίωσης του βαθμού απόδοσης, δεδομένου ότι η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων είναι αρκετά υψηλή, εξετάζεται η λειτουργία του κινητήρα σε συνδυασμένο κύκλο νερού – υδρατμού. Κατασκευάζεται το κατάλληλο σχηματικό διάγραμμα και αφού γίνει η σχεδίαση του συνδυασμένου κύκλου στο επιλεγμένο σημείο σχεδίασης, κατασκευάζεται νέο σχηματικό διάγραμμα στο οποίο προσομοιώνεται η λειτουργία εκτός σημείου σχεδίασης. Το μοντέλο δοκιμάζεται και αυτό όπως τα προηγούμενα για λειτουργία σε διάστημα ενός ημερολογιακού έτους ώστε να γίνουν οι ανάλογες συγκρίσεις.

Από τους υπολογισμούς προκύπτει σημαντική αύξηση του βαθμού απόδοσης και στις δύο περιπτώσεις εκμετάλλευσης της θερμότητας των καυσαερίων, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο υπόψη κινητήρας προσφέρεται για τέτοιου είδους βελτίωση.

Τέλος γίνεται μια οικονομοτεχνική αξιολόγηση της υλοποίησης του απλού κύκλου χωρίς ανακόμιση θερμότητας καυσαερίων. Με βάση διάφορα σενάρια λειτουργίας και αρχικού κόστους υπολογίζεται το οριακό κόστος της κιλοβατώρας για δεκαετή απόσβεση της επένδυσης. Προκύπτει το συμπέρασμα ότι η εκτίμηση της αποδοτικότητας της επένδυσης επηρεάζεται σημαντικά από τον προορισμό και τρόπο χρησιμοποίησης του συγκροτήματος.

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

Study on conversion of helicopter engine to gas turbine for electricity production

DIPLOMA THESIS

STERGIOS TSIOKAS

Advisor:
Lecturer N. Aretakis

ABSTRACT

The purpose of this diploma thesis is to study the conversion of the T53-L-13B engine to gas turbine for Electricity Production. The study is carried out after proposition by the Quartermaster Corps administration of the Hellenic Army General Staff.

Initially, the gas turbine is presented and a preparatory calculation is held on the design point using the thermodynamic equations.

Then an exact calculation model is created with the use of PROOSIS software. The model is implemented using open source data as well as data from the Hellenic Aerospace Industry.

The modeling procedure starts with the construction of the schematic diagram and the selection of the parameters' values which lead to the map scaling factors of the gas turbine's components on the design point. The off design point simulation comes following. The model is being evaluated according to the declination from the testing data in multiple operation points. This declination is minimized through an optimization method.

A second compressor component is added to improve the initial model. The two components now represent the axial and centrifugal compressors. The pressure ratio of each compressor is estimated by monodimensional calculation. Furthermore new component maps are selected according to the pressure ratio and according to each component's positioning in the machine. The new improved model follows the same procedure as the first one. After the new model's evaluation the two models are being compared. The final model is the one that best represents the real gas turbine's operation.

At this point come the calculations and the description concerning the engine's connection with the generator and the network. The generator is connected with the engine and the network through appropriate gears and electrical equipment.

After the model's implementation and taking under consideration the engine's technology age, an efficiency improvement is attempted through the application of a heat exchanger. A new schematic is constructed and the new model's operation is tested for one year time interval according to the appropriate meteorological data. The new model is compared with the previous.

Given the high temperature exhaust gas, a different way to improve the efficiency is the engine's operation into a Combined Cycle. The appropriate schematic diagram for the combined cycle's operation is constructed. Then follows the construction of the final schematic diagram, which simulates the off design points' operation. This model is also tested for one year time interval. The models are compared to each other.

Both ways of heat recovery come with a meaningful increase of the efficiency, leading to the conclusion that the studied gas turbine is suitable for such improvements.

Finally, a feasibility study is held in order to ascertain the potential benefits of the simple cycle's operation. The marginal cost in € per kWh is calculated for ten years payback period, depending on various operation and initial cost scenarios. It is concluded that the unit's utilization purpose affects significantly the investment's efficiency.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Από τη θέση αυτή θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω τη Διεύθυνση Τεχνικού Σώματος του Γενικού Επιτελείου Στρατού που συμπεριέλαβε ένα τόσο ενδιαφέρον και επίκαιρο θέμα στη λίστα των προτεινομένων θεμάτων για τους αξιωματικούς που φοιτούν στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τον Λέκτορα κ. Αρετάκη Νικόλαο για τη θερμή αποδοχή της αρχικής πρότασης, η οποία με τη συνεχή βοήθεια και συνδρομή του σταδιακά εξελίχτηκε για να προκύψει η παρούσα εργασία. Μαζί με τον κ. Αρετάκη θα ήθελα να ευχαριστήσω τον εξωτερικό συνεργάτη του εργαστηρίου θερμικών στροβιλομηχανών δρ μηχανολόγο μηχανικό κ. Αλεξίου Αλέξιο, τον υποψήφιο διδάκτορα μηχανολόγο μηχανικό κ. Καλαθάκη Χρήστο και τους συμφοιτητές μου για την καθοριστική συμβολή τους στην διεκπεραίωση της εργασίας αυτής.

Πλέον των συμφοιτητών μου και του προσωπικού του εργαστηρίου θερμικών στροβιλομηχανών θα ήθελα να ευχαριστήσω τον διευθυντή του τμήματος κινητήρων της Ελληνικής Αεροπορικής Βιομηχανίας δρ μηχανολόγο μηχανικό κ. Κατηφόρη Νικόλαο για την υποδοχή του στις εγκαταστάσεις της ΕΑΒ και τη διάθεση μετρήσεων από το δοκιμαστήριο. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον δρ μηχανολόγο μηχανικό κ.Καμπούκο Φίλιππο για τη συνεισφορά του στην αναζήτηση πληροφοριών για ηλεκτρολογικά και οικονομοτεχνικά θέματα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 1.1

1.1 Σκοπός της παρούσας διπλωματικής 1.1

1.2 Δομή της διπλωματικής 1.2

2 Ο κινητήρας T53-L-13B 2.1

2.1 Γενικές πληροφορίες για τον κινητήρα 2.1

2.2 Ιστορικά στοιχεία 2.3

2.3 Τεχνικά Χαρακτηριστικά 2.6

2.4 Βοηθητικά συστήματα και απομαστεύσεις 2.7

2.5 Δεδομένα από το δοκιμαστήριο 2.8

3 Μοντελοποίηση και ανάλυση λειτουργίας εντός και εκτός του σημείου σχεδίασης 3.1

3.1 Αριθμητικός υπολογισμός στο σημείο σχεδίασης 3.1

3.2 Κατασκευή σχηματικού στο PROOSIS 3.9

3.3 Ρύθμιση απομάστευσης από τον συμπιεστή 3.13

3.4 Επιλογή των ισεντροπικών βαθμών απόδοσης 3.14

3.5 Επιλογή του μαθηματικού μοντέλου 3.14

3.6 Ανάλυση λειτουργίας στο σημείο σχεδίασης 3.18

3.7 Ανάλυση λειτουργίας εκτός σημείου σχεδίασης 3.20

3.8 Αποκλίσεις από τα δεδομένα του δοκιμαστηρίου 3.24

4 Βελτιστοποίηση του σημείου σχεδίασης. 4.1

4.1 Βελτιστοποίηση παραμέτρων 4.1

4.2 Σύγκριση των αποτελεσμάτων πριν και μετά τη βελτιστοποίηση 4.6

5 Βελτιωμένο μοντέλο του T53 ..... 5.1

5.1 Εκτίμηση των επιμέρους λόγων πίεσης του συμπιεστή 5.1

5.2 Σχηματικό διάγραμμα του βελτιωμένου μοντέλου 5.4

5.3 Επιλογή νέων χαρτών συνιστωσών.....5.4

5.4 Ανάλυση λειτουργίας στο σημείο σχεδίασης 5.6

5.5 Ανάλυση λειτουργίας εκτός σημείου σχεδίασης.....5.10

5.6 Αποκλίσεις από τα δεδομένα του δοκιμαστηρίου 5.13

5.7 Βελτιστοποίηση παραμέτρων του βελτιωμένου μοντέλου 5.13

5.8 Σύγκριση των αποτελεσμάτων πριν και μετά τη βελτιστοποίηση 5.18

6 Σύνδεση του κινητήρα με γεννήτρια και με το δίκτυο 6.1

6.1 Επιλογή γεννήτριας.....6.1

6.2 Έλεγχος λειτουργίας, εξοπλισμός και σύνδεση στο δίκτυο.....6.3

6.3 Σύνδεση του κινητήρα με τη γεννήτρια 6.6

7 Ανακόμιση θερμότητας καυσαερίων 7.1

7.1 Η τεχνολογία της ανακόμισης θερμότητας καυσαερίων 7.1

7.2 Εφαρμογή της ανακόμισης στο μοντέλο του T53.....7.2

7.3 Ανάλυση ετήσιου κύκλου λειτουργίας.....7.8

7.4 Σύγκριση απλού κύκλου και κύκλου με ανακόμιση 7.14

8 Συνδυασμένος κύκλος..... 8.1

8.1 Συνδυασμένος κύκλος αεριοστρόβιλου ατμοστρόβιλου 8.1

8.2 Κατασκευή μοντέλου του συνδυασμένου κύκλου 8.1

8.3 Σύγκριση απλού και συνδυασμένου Κύκλου 8.7

9 Οικονομοτεχνική αξιολόγηση..... 9.1

9.1 Βασικές έννοιες 9.1

9.2 Εισαγωγή στην αξιολόγηση της επένδυσης 9.3

9.3 Αρχικό κόστος επένδυσης 9.5

9.4 Οικονομική αξιολόγηση επένδυσης 9.7

9.5 Ανάλυση ευαισθησίας 9.10

10 Ανακεφαλαίωση - Συμπεράσματα - Προτάσεις 10.1

10.1 Ανακεφαλαίωση 10.1

10.2 Συμπεράσματα 10.1

10.3 Προτάσεις 10.2

11 Βιβλιογραφία 11.1

Π1 Σχέδια 1

Π1.1 Διαστάσεις γεννήτριας 1

Π1.2 Διαστάσεις μειωτήρα στροφών 2

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

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

1.1 Σκοπός της παρούσας διπλωματικής

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η μελέτη της δυνατότητας αξιοποίησης του αεριοστρόβιλου T53-L-13B σε εφαρμογές πέρα από την κίνηση του ελικοπτέρου HU-1, και συγκεκριμένα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μετά από σύνδεση του κινητήρα με κατάλληλη γεννήτρια.

Η σύγχρονη τάση στην αγορά της ενέργειας είναι η παραγωγή της εκεί που θα καταναλωθεί με μικρές και ευέλικτες μονάδες. Οι αεριοστρόβιλοι μηχανικής ισχύος προσφέρονται για το σκοπό αυτό όταν οι απαιτήσεις ισχύος ξεπερνούν τις δυνατότητες των Diesel κινητήρων. Ο κινητήρας T53-L-13B βρίσκεται στην παραγωγή από το 1950 και ως εκ τούτου υπάρχει πληθώρα διαθέσιμων στην αγορά σε χαμηλή τιμή σε σχέση με τον ανταγωνισμό στην τάξη ισχύος του 1MW. Το γεγονός αυτό τον κάνει κατάλληλο για εκμετάλλευση σε τέτοιες εφαρμογές.

Το θέμα της παρούσης διπλωματικής εργασίας εντάσσεται στο πλαίσιο της βιομηχανοποίησης αεροπορικών αεριοστρόβιλων. Με τον όρο βιομηχανοποίηση εννοείται η μετατροπή ενός αεριοστρόβιλου ώστε η ισχύς του να αποδίδεται σε άξονα σταθερών στροφών λειτουργίας.

Ο υπό μελέτη κινητήρας είναι αεριοστρόβιλος παραγωγής μηχανικής ισχύος επομένως η βιομηχανοποίησή του απαιτεί αρκετά λιγότερες παρεμβάσεις από τη βιομηχανοποίηση ενός αεροπορικού αεριοστρόβιλου, ο οποίος αντί για στρόβιλο ισχύος φέρει ακροφύσιο και είναι σχεδιασμένος για απόδοση ώσης και όχι μηχανικής ισχύος.

Για την επίτευξη του σκοπού υλοποιείται ένα μοντέλο του κινητήρα με χρήση του προγράμματος PROOSIS, ενώ ταυτόχρονα επιλέγεται ο κατάλληλος ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός. Τα παραπάνω, θεωρούμενα ως επενδυτική πρόταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ολοκληρώνονται με μια οικονομική αποτίμηση.

Έτερο σκοπό της εργασίας αυτής αποτελεί η δυνατότητα υλοποίησης δοκιμών και υποθετικών σεναρίων που αφορούν στον υπόψη κινητήρα με τη χρήση του υπολογιστικού μοντέλου αντί του πραγματικού κινητήρα. Με τον τρόπο αυτόν επιτυγχάνεται η προσομοίωση της λειτουργίας του κινητήρα χωρίς να απαιτείται η τοποθέτησή του στο δοκιμαστήριο για λήψη μετρήσεων και χωρίς τα κόστη μιας πραγματικής δοκιμής (κατανάλωση καυσίμου, λίπανση, προσωπικό, κίνδυνοι ατυχήματος). Επιπλέον, το υπολογιστικό μοντέλο παρέχει τη δυνατότητα λήψης

μετρήσεων σε κάθε σημείο της μηχανής, αντίθετα με το δοκιμαστήριο όπου η δυνατότητα τοποθέτησης αισθητήρων είναι περιορισμένη.

1.2 Δομή της διπλωματικής

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύσσεται σε έντεκα κεφάλαια συμπεριλαμβανομένων της εισαγωγής και της βιβλιογραφικής αναφοράς. Στο κεφάλαιο 2 περιγράφονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά και η ιστορική εξέλιξη του υπό μελέτη κινητήρα T53-L-13B.

Στο κεφάλαιο 3 αρχικά επιλέγονται τα δεδομένα της βιβλιογραφίας που θα χρησιμοποιηθούν και γίνεται ανάλυση στο σημείο σχεδίασης με βάση τις θερμοδυναμικές εξισώσεις. Στη συνέχεια υλοποιείται το μοντέλο του κινητήρα στο πρόγραμμα PROOSIS και γίνεται ανάλυση στα σημεία λειτουργίας για τα οποία υπάρχουν μετρήσεις από το εργαστήριο. Τα αποτελέσματα του μοντέλου συγκρίνονται με τις υπάρχουσες μετρήσεις.

Στο κεφάλαιο 4 λαμβάνει χώρα βελτιστοποίηση των παραμέτρων του μοντέλου ώστε αυτό να ανταποκριθεί καλύτερα στις επιδόσεις της πραγματικής μηχανής.

Στο κεφάλαιο 5 το αρχικό μοντέλο βελτιώνεται με την προσθήκη δεύτερης συνιστώσας συμπιεστή για την πιστότερη περιγραφή της λειτουργίας του αξονικού και ακτινικού τμήματος. Οι επί μέρους λόγοι πίεσης εκτιμώνται μετά από μονοδιάστατους υπολογισμούς. Ταυτόχρονα επιλέγονται κατάλληλοι χάρτες με βάση τα χαρακτηριστικά των συνιστωσών και ορίζεται η λειτουργία των απομαστεύσεων. Στη συνέχεια επαναλαμβάνεται η διαδικασία βελτιστοποίησης του κεφαλαίου 4 και τα αποτελέσματα συγκρίνονται και αξιολογούνται.

Στο κεφάλαιο 6 γίνονται υπολογισμοί και βιβλιογραφική αναφορά για τη διαδικασία και τον απαιτούμενο εξοπλισμό διασύνδεσης στο δίκτυο. Ακολούθως επιλέγονται κατάλληλη γεννήτρια και μειωτήρας στροφών προκειμένου να επιτευχθεί η σύνδεση της γεννήτριας με τον κινητήρα.

Στο κεφάλαιο 7 εξετάζεται η βελτίωση του βαθμού απόδοσης της μηχανής με ανακόμιση των καυσαερίων. Υλοποιείται το μοντέλο του κινητήρα με ανακόμιση και για τη σύγκρισή του με τον απλό κύκλο ακολουθείται διαδικασία προσομοίωσης λειτουργίας των δύο μοντέλων με ωριαία μετεωρολογικά δεδομένα διαστήματος ενός ημερολογιακού έτους.

Στο κεφάλαιο 8 εξετάζεται η βελτίωση του βαθμού απόδοσης της μηχανής με τη λειτουργία της σε συνδυασμένο κύκλο νερού - υδρατμού. Υλοποιείται το μοντέλο του συνδυασμένου κύκλου και προσομοιώνεται η λειτουργία του για ένα έτος όπως στο κεφάλαιο 7.

Στο κεφάλαιο 9 γίνεται μια οικονομοτεχνική μελέτη για τον υπολογισμό του κόστους υλοποίησης της εγκατάστασης ηλεκτροπαραγωγής με τον απλό κύκλο του αεριοστρόβιλου. Επιπλέον αξιολογείται η αποδοτικότητα της επένδυσης ανάλογα με

διάφορα σενάρια που αφορούν στο κόστος προμήθειας του κινητήρα και στον προορισμό λειτουργίας του συγκροτήματος.

Τέλος, στο κεφάλαιο 10 γίνεται μια ανακεφαλαίωση, αναπτύσσονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής και παρατίθενται σχετικές με το θέμα προτάσεις.

2 Ο κινητήρας T53-L-13B

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ο υπό μελέτη κινητήρας, T53-L-13B. Αρχικά παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά και οι επιδόσεις το κινητήρα από διάφορες πηγές και γίνεται μια ιστορική αναδρομή στις διαφορετικές εκδόσεις του T53. Στη συνέχεια παρατίθενται τα δεδομένα που ελήφθησαν από τη λειτουργία του κινητήρα στο δοκιμαστήριο.

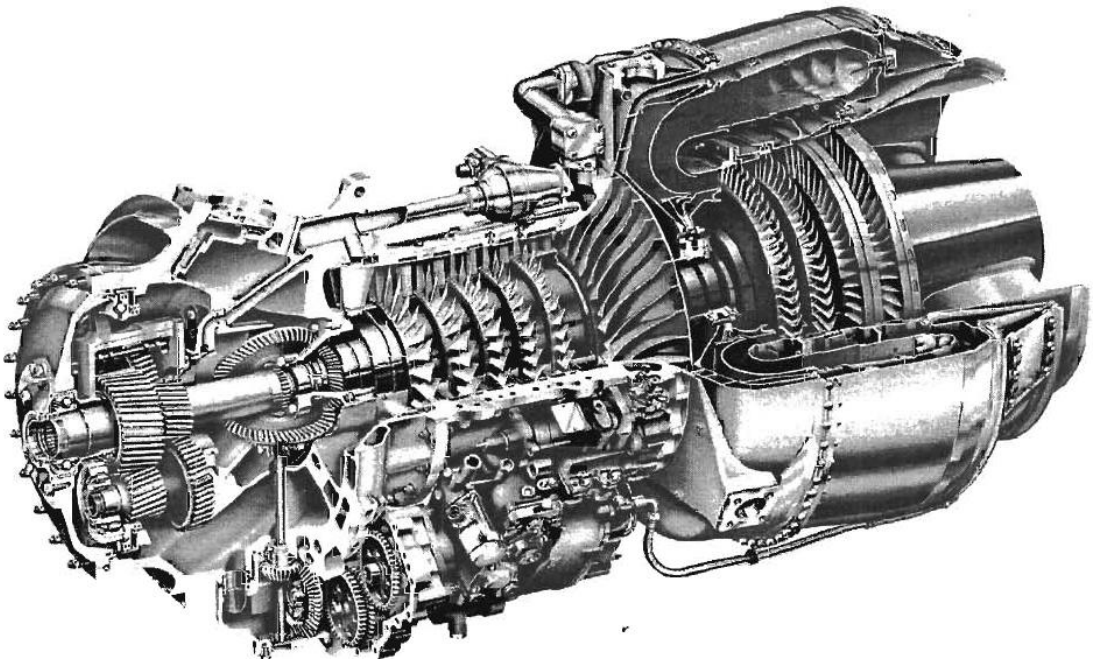
2.1 Γενικές πληροφορίες για τον κινητήρα

Ο T53-L-13B είναι αεριοστρόβιλος ισχύος που χρησιμοποιείται κυρίως για την κίνηση ατράκτου ελικοπτέρων (turboshaft) και δευτερευόντως για ελικοφόρα αεροσκάφη (turboprop). Είναι αεριοστρόβιλος με ελεύθερο στρόβιλο ισχύος. Αποτελείται από έναν 6βάθμιο συμπιεστή, θάλαμο καύσης αντίθετης ροής (reverse flow combustor), διβάθμιο στρόβιλο για την κίνηση του συμπιεστή μέσω άξονα και διβάθμιο ελεύθερο στρόβιλο ισχύος. Ο κινητήρας, η εικόνα του οποίου παρουσιάζεται στο σχήμα 2.1, αποδίδει ισχύ 1400 shp (1044,4 kW).

Σχήμα 2.1: Ο κινητήρας T53-L-13B

Στην πλευρά του συμπιεστή βρίσκεται μειωτήρας στροφών που για το σημείο σχεδιασμού μειώνει τις στροφές από 22500RPM σε 6640RPM.

Η ροή του αέρα αφού περάσει γύρω από το κιβώτιο εισέρχεται στα μεταβλητής γεωμετρίας καθοδηγητικά πτερύγια εισόδου (variable geometry inlet guide vanes) και οδηγείται στον 5βάθμιο αξονικό και μονοβάθμιο φυγοκεντρικό συμπιεστή. Στο σχήμα 2.2 παρουσιάζεται η τομή του κινητήρα και στο εσωτερικό διακρίνονται οι συνιστώσες του αεριοστρόβιλου.



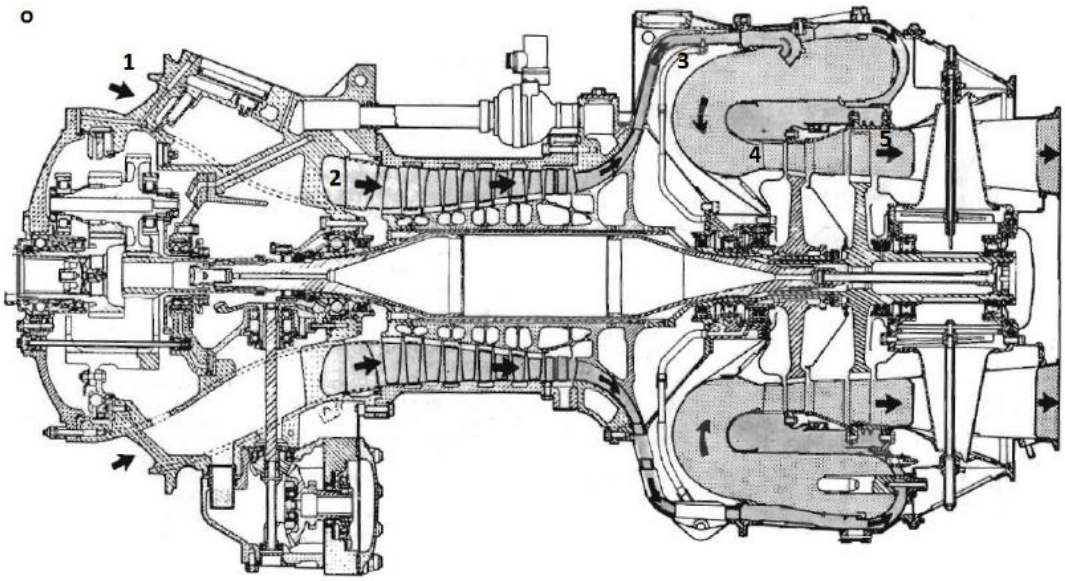
Σχήμα 2.2: Τομή του T53

Ο αέρας οδηγείται μέσω του φυγοκεντρικού συμπιεστή σε δακτυλιοειδή θάλαμο καύσης αντίθετης ροής (reverse flow annular burner) με 22 ακροφύσια έγχυσης καυσίμου. Το καυσαέριο σε υψηλή πίεση εκτονώνεται στον διβάθμιο αξονικό στρόβιλο της αεριογόνου για την κίνηση του συμπιεστή και του κιβωτίου βοηθητικών συστημάτων (accessory gearbox).

Στη συνέχεια εκτονώνεται διαμέσου του διβάθμιου ελεύθερου στροβίλου ισχύος, ο οποίος κινεί τον μειωτήρα στροφών μέσω άξονα που διέρχεται εσωτερικά του άξονα της αεριογόνου ώστε να μεταδοθεί η κίνηση στο εμπρός τμήμα της μηχανής (cold end).

Το καυσαέριο χαμηλής πίεσης εξέρχεται στο περιβάλλον σε χαμηλή ταχύτητα (καθώς πρόκειται για αεριοστρόβιλο ισχύος και όχι πρόωσης) μέσω διαχύτη στο πίσω μέρος της μηχανής.

Στο σχήμα 2.3 παρουσιάζονται τα κύρια σημεία της ροής του εργαζόμενου μέσου στον κινητήρα.



0: περιβάλλον
1: είσοδος στον αγωγό εισόδου
2: είσοδος στον συμπιεστή χαμηλής πίεσης
3: είσοδος στο θάλαμο καύσης
4: είσοδος στο στρόβιλο αεριογόνου
5: έξοδος από το στρόβιλο ισχύος

Σχήμα 2.3: Κύριες θέσεις της ροής του εργαζόμενου μέσου

2.2 Ιστορικά στοιχεία

Ο κινητήρας T53 σχεδιάστηκε κατά τη δεκαετία του 1950 για την εταιρεία Lycoming από ομάδα μηχανικών με επικεφαλής τον Anselm Franz στο Lycoming Turbine Engine Division του Stratford στο Connecticut των ΗΠΑ. Ο ίδιος είχε ηγηθεί της ομάδας σχεδιασμού του ιστορικού "Junkers Jumo 004 Turbojet", του πρώτου επιτυχημένου turbojet κινητήρα αξονικής ροής. Η πρώτη έκδοση του T53 (με κωδικό LTC-1) κατασκευάστηκε για στρατιωτική χρήση από την Πολεμική Αεροπορία των ΗΠΑ η οποία εν έτη 1952 αναζητούσε έναν κινητήρα ισχύος της τάξης των 500-700 shp (373-522 kW). Η ιστορική εξέλιξη των εκδόσεων του T53 παρουσιάζεται στον πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Ιστορικό εκδόσεων του T53

Κωδική ονομασία	**Πληροφορίες**	**Παρατηρήσεις**
T53-L11	Πρώτη έκδοση του T53.	
T53-L-2	Ναυτική έκδοση του αρχικού L-11.	
T53-L-7 (LTC1 F-2)	Turboprop έκδοση για τα πολεμικά αεροσκάφη τύπου «Grumman OV-1 A/B	Το ίδιο μοντέλο για πολιτική χρήση φέρει τον

	Mohawk».	κωδικό T5307A.
T53-L-11 (LTC1 K-5)	Έκδοση turboshaft για τα στρατιωτικά ελικόπτερα Bell UH-1 B/D/E (γνωστά και ως Huey) και Kaman HH-43F.	Το ίδιο μοντέλο για πολιτική χρήση (ελικόπτερα Bell 204B) φέρει τον εμπορικό κωδικό T5311A.
T53-L-l3	Αναβαθμισμένη έκδοση του L-11 τον οποίο διαδέχθηκε περνώντας στην παραγωγή τον Αύγουστο του 1966. Εφαρμογή στα ελικόπτερα Bell UH-1C, UH-1H, UH-1M στα ελικόπτερα CUH-1H Iroquois και AH-1 F/G και στο ελικόπτερο J HueyCobra	Η πολιτική έκδοση του T53-L-13 ήταν η T5313A η οποία αργότερα αντικαταστάθηκε από την T5313B για τα ελικόπτερα Bell 205A και A-1.
T53-L-15	Έκδοση Turboprop του L-13 για τα αεροσκάφη Grumman QV-1 C και D Mohawk.	
LTC1K-4	Χρησιμοποιήθηκε στο πρωτότυπο αεροσκάφος της Canadair, CL-84 tilt-wing (με δυνατότητα μεταβολής της γωνίας του επιπέδου περιστροφής των ελίκων) και στο ελικόπτερο Bell XV-15.	Όμοιος του T53-L-13.
T53-L-701	Έκδοση Turboprop που περιελάμβανε πλανητικό μειωτήρα για διαχωρισμό της ισχύος (split-power reduction gear)	
T53-L-701A	Βελτιωμένη έκδοση turboprop για τα QV-1 και T-CH-1A.	
T53-L-703	Έκδοση βελτιωμένης αντοχής με σύστημα αυτομάτου ελέγχου (ΣΑΕ) θερμοκρασίας εισόδου στο στρόβιλο (PTIT, power-turbine inlet temperature) αντί για ΣΑΕ θερμοκρασίας καυσαερίων (EGT, exhaust-gas temperature). Επιπλέον βελτιωμένη ψύξη της πρώτης βαθμίδας του στροβίλου της αεριογόνου και ψύξη με αέρα για την πτερύγωση του πρώτου ρότορα του στροβίλου ισχύος. Με αποδιδόμενη θερμική ισχύ 1.343 kW (1,800 shp) χρησιμοποιήθηκε στα ελικόπτερα Bell UH-1, Hand AH-1E/F/P/S και Airwork Huey 703 (UH-1H enhancement package) και Bell Huey II.	Τελευταία και πιο σύγχρονη έκδοση.
LTC1K-4K	Έκδοση χωρίς μειωτήρα στροφών (direct drive) κατάλληλη για πτήσεις μέχρι γωνίες 105° για άνοδο (nose up) και μέχρι 90° για κάθοδο (nose down).	
T5317A-1	Όμοιος του L-703 με ΣΑΕ EGT αντί του PTIT, με τις ίδιες λοιπές βελτιώσεις και χρήση	

	στο ελικόπτερο διασταυρούμενων κύριων στροφίων Kaman K-Max (γνωστό και ως K1200).	
T5317B	Όμοιος του 5317A-1 με ΣΑΕ PTIT αντί του EGT και χρήση στα ελικόπτερα Fuji-Bell 205 and Bell 205A-1.	

Ο πρόδρομος του υπό μελέτη κινητήρα είναι ο T53-L-13. Στον πίνακα 2.2 παρουσιάζονται οι εντοπιζόμενες διαφορές με τις προηγούμενες εκδόσεις.

Πίνακας 2.2: Βελτιώσεις του T53-L-13 σε σύγκριση με προηγούμενες εκδόσεις

Επανασχεδιασμός του ακροφυσίου εξόδου καυσαερίων και των αρχικών βαθμίδων του συμπιεστή ώστε να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος και βελτιωμένη συμπεριφορά για λειτουργία σε μεγάλα ύψη.
Τετραβάθμιος στρόβιλος σε αντικατάσταση του διβάθμιου στροβίλου των προηγούμενων εκδόσεων.
Καθοδηγητικά πτερύγια μεταβλητής γωνίας σε συνδυασμό με επανασχεδιασμένες τις δύο πρώτες βαθμίδες του συμπιεστή, επιτρέπουν μεγαλύτερη παροχή αέρα και δίνουν χαμηλότερες θερμοκρασίες στο στρόβιλο.
Καυστήρας ψεκασμού που επιτρέπει τη χρήση περισσότερων ειδών καυσίμου.

Ως βελτιωμένη έκδοση του T53-L-13 προέκυψαν οι εκδόσεις T53-L-13A και T53-L-13B. Οι βελτιώσεις που υπέστη ο T53-L-13 παρουσιάζονται στον πίνακα 2.3.

Πίνακας 2.3: Βελτιώσεις των T53-L-13A/B σε σύγκριση με τον T53-L-13

Βελτιωμένη σχεδίαση της δεύτερης βαθμίδας του συμπιεστή με 34 πτερύγια.
Βελτιωμένη στήριξη εδράνων κύλισης και κελύφους.
Λίπανση συστήματος ελέγχου έκχυσης καυσίμου.
Διαχύτης και κιβώτιο βοηθητικών συστημάτων με βελτιωμένη ικανότητα λίπανσης.
Συγκρότημα ελέγχου θερμοκρασίας καυσαερίων 6 αισθητήρων.

Διαφορά μεταξύ των T53-L-13A και T-53-L-13B

Φτάνοντας στις εκδόσεις A και B του T53-L-13 είναι δύσκολο να εντοπιστούν σημαντικές διαφορές. Ο T53-L-13B αποτελεί βελτιωμένη έκδοση του T53-L-13A. Οι δύο εκδόσεις αποδίδουν την ίδια ισχύ, η διαφορά τους έγκειται στη βελτιωμένη σχεδίαση των συνιστωσών του 13B. Οι δύο πρώτες βαθμίδες του συμπιεστή (αξονικές) έχουν επανασχεδιαστεί ώστε να αυξηθεί η παροχή και ο λόγος πίεσης. Οι τελευταίες τρεις βαθμίδες του συμπιεστή είναι αεροδυναμικά ίδιες με αυτές της προηγούμενης έκδοσης. Η σημαντικότερη από τις αλλαγές στη σχεδίαση είναι η χρήση τιτανίου για τον ρότορα του συμπιεστή.

Ο Τ53 σήμερα

Συνολικά έχουν παραχθεί πλέον των 19000 κινητήρων Τ53 (κυρίως Τ53-L-13/13A/13B) από το 1956 ενώ η παραγωγή του συνεχίζεται σήμερα από την εταιρεία Honeywell (ΗΠΑ). Εκτός των ΗΠΑ άδεια κατασκευής έχουν επίσης οι εταιρείες Rolls-Royce Deutschland (Γερμανία), Piaggio (Ιταλία), Kawasaki (Ιαπωνία) και AIDC (Ταϊβάν). Η ευρεία διαθεσιμότητα και το σχετικά χαμηλό του κόστος τον καθιστούν ως έναν από τους πιο δημοφιλείς αεριοστρόβιλους για εναλλακτική εκμετάλλευση όπως κίνηση πλοίων, βιομηχανική χρήση και χρήση για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Στην Ελλάδα ο κινητήρας συναντάται στα ελικόπτερα UH-1 του ελληνικού στρατού και ναυτικού όπως επίσης και σε ελικόπτερα πολιτικής χρήσης τύπου Bell. Επισκευές μεγάλης κλίμακας, ανακατασκευές και δοκιμές του κινητήρα στην Ελλάδα γίνονται από την Ελληνική Αεροπορική Βιομηχανία η οποία αποτελεί εξουσιοδοτημένο κέντρο συντήρησης της κατασκευάστριας εταιρείας Honeywell.

2.3 Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Αναζητώντας πληροφορίες για τον κινητήρα γρήγορα γίνεται αντιληπτό ότι οι διάφορες διαθέσιμες πηγές δίνουν τιμές μεγεθών που συχνά αποκλίνουν μεταξύ τους. Παρακάτω παρατίθενται υπό μορφή πινάκων τα δεδομένα που συλλέχθηκαν και θεωρούνται πιο αξιόπιστα.

Από τη βιβλιογραφία[10][11] λαμβάνονται τα δεδομένα του πίνακα 2.4.

Πίνακας 2.4 τεχνικά χαρακτηριστικά και επιδόσεις

Τύπος:	ελεύθερου άξονα στροβίλου ισχύος
Εισαγωγή αέρα:	αξονική, με καθοδηγητικά πτερύγια μεταβλητής γεωμετρίας
Συμπιεστής:	μικτής ροής, 5βάθμιος αξονικός, μονοβάθμιος φυγοκεντρικός
Θάλαμος καύσης:	αντίθετης ροής, δακτυλιοειδής, 22 ακροφύσια
Στρόβιλος:	διπλού τυμπάνου, διβάθμιος αξονικός (αεριογόνος) και διβάθμιος στρόβιλος ισχύος (με TIP shrouds)
Εξαγωγή:	διαχύτης αξονικής ροής με μέτωπο προς την πίσω πλευρά της μηχανής
Ισχύς:	1400 shp (1044,4 kW) στις 6640 RPM
Ροπή:	1200 lb/ft (1627 Nm) στις 1800 RPM
Βάρος (καθαρό):	540 lbs (245kg)
Σχέση ισχύος/βάρους:	2,6 shp/lb (4,26 kW/kg)
Λόγος συμπίεσης:	7,2:1
Ειδική κατανάλωση:	0,58 lb/shp/hr (0,35kg/kWh)
Εκκίνηση:	ηλεκτρικός εκκινητής Bendix-Scintilla TGLN
Σύστημα ελέγχου:	Chandler Evans TA-7 έλεγχος καυσίμου με μία διπλή αντλία καυσίμου στα 41,1 bar (600 Ib/sq in)
Καύσιμα:	ASTM-A-1, MIL-J-5624, MIL-F-26005A, JP-l, JP-4, JP-5, CITE
Σύστημα λίπανσης:	recirculating system. with gear pump, 4.83 bar (70 Ib/sq in)
Λιπαντικά:	MIL-L-7808, MIL-L-23699
Μήκος:	1209mm
Διάμετρος εισαγωγής:	584mm
Μέγιστη διάμετρος:	622mm

Από το εγχειρίδιο εκπαίδευσης[1] λαμβάνονται τα στοιχεία επιδόσεων του πίνακα 2.5.

Πίνακας 2.5: επιδόσεις του T53-L-13B

Ratings	Power SHP (min)	Gas Producer N1[RPM] (max)	Power Turbine N [RPM] (optimum)	Output shaft N2[RPM] (optimum)	SFC[lb/SHP/hr] (max)
			Reduction gear ratio: 3.2105/1		Exhaust area: 203 sqin
Take off	1400	25400	21190 (max 21300)	6600 (max 6635)	0.580
MaxContinuous	1250	24650	19390	6040	0.600
90% max.Cont.	1125	24250	18655	5810	0.620
75% max.Cont.	938	23475	17465	5440	0.663

2.4 Βοηθητικά συστήματα και απομαστεύσεις

Στα βοηθητικά συστήματα περιλαμβάνονται οι αντλίες καυσίμου, αντλίες ελαίου, εκκινητής, υδραυλικό σύστημα ελέγχου καυσίμου. Συνδέονται με τον άξονα της αεριογόνου μέσω του βοηθητικού κιβωτίου N2 που βρίσκεται στην είσοδο του συμπιεστή. Πλέον αυτών υπάρχουν διάφορα συστήματα απομάστευσης αέρα που περιγράφονται παρακάτω.

Εσωτερικό Σύστημα Ψύξης (Internal Cooling System)

Πρόκειται για παροχή αέρα για ψύξη του εσωτερικού της μηχανής. Συμπιεσμένος αέρας απομαστεύεται από την έξοδο του ακτινικού συμπιεστή και μέρος αυτού οδηγείται μέσω εσωτερικών οπών στα έδρανα κύλισης και στο κέλυφός τους συμπιέζοντάς τα. Έπειτα οδηγείται στα πτερύγια των πρώτων βαθμίδων του στροβίλου τα οποία και ψύχει, καταλήγοντας εν τέλει στη ροή του καυσαερίου.

Το υπόλοιπο του συμπιεσμένου αέρα που απομαστεύεται από τον ακτινικό συμπιεστή ρέει ανάμεσα στις ατράκτους του στροβίλου ισχύος και της αεριογόνου. Ένα μέρος αυτού οδηγείται στο μπροστινό έδρανο κύλισης της ατράκτου, ενώ ότι απομένει ρέει μέσα στην άτρακτο του στροβίλου ισχύος και καταλήγει στη δεύτερη βαθμίδα του στροβίλου.

Ο στρόβιλος ισχύος και τα έδρανα κύλισης που στηρίζουν την άτρακτό του ψύχονται από αέρα περιβάλλοντος που εισέρχεται μέσω του κώνου στήριξης του διαχύτη.

Αντι-παγωτικό Σύστημα (Anti-Ice System)

Το σύστημα αυτό παρέχει ζεστό αέρα στον αγωγό εισόδου όταν η μηχανή δουλεύει σε συνθήκες πάγου. Ζεστός συμπιεσμένος αέρας απομαστεύεται από τον διαχύτη πριν το θάλαμο καύσης και μέσω βαλβίδας διοχετεύεται στο εσωτερικό των στηριγμάτων του αγωγού εισόδου θερμαίνοντάς τον. Το κάτω μέρος του αγωγού εισόδου θερμαίνεται μέσω του ζεστού λιπαντικού που διέρχεται προς το κιβώτιο ταχυτήτων.

Σύστημα απομάστευσης ενδιάμεσα των βαθμίδων (Interstage Airbleed System)

Πρόκειται για σύστημα απομάστευσης αέρα μεταξύ της $4^{ης}$ και $5^{ης}$ βαθμίδας του αξονικού συμπιεστή, που χρησιμεύει για τη γρηγορότερη επιτάχυνση της αεριογόνου σε χαμηλά φορτία.

2.5 Δεδομένα από το δοκιμαστήριο

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα δεδομένα όπως ελήφθησαν από δοκιμή ανακατασκευασμένου κινητήρα στο δοκιμαστήριο. Τα δεδομένα αυτά παρουσιάζονται στον πίνακα 2.6 και χρησιμοποιούνται στη συνέχεια ώστε το μοντέλο που υλοποιείται να ανταποκρίνεται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο στις επιδόσεις του πραγματικού κινητήρα.

Πίνακας 2.6: δεδομένα από το δοκιμαστήριο

Ratings	NI speed[RPM]	NII speed [RPM]	Power [kW]	Fuel Flow [kg/s]	Tamb[K]	EGT[K]
FI	17272	1326	50.21	0.02470	285.15	690.15
75%	24130	5502.9	735.77	0.07686	285.15	789.15
max cont	25146	6033.3	967.31	0.09261	285.15	827.15
take off	25400	6265.35	1071.23	0.10029	285.15	843.15

Pt1[bar]	Pt2[bar]	P2[bar]	CIT[K]
1.00914	1.00779	1.00034	285.15
1.00914	1.00576	0.9956	285.15
1.00914	1.00406	0.98205	285.15
1.00914	1.00237	0.97528	285.15

3 Μοντελοποίηση και ανάλυση λειτουργίας εντός και εκτός του σημείου σχεδίασης

Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά γίνεται ένας αριθμητικός υπολογισμός για το σημείο σχεδίασης με χρήση των θερμοδυναμικών εξισώσεων. Κατόπιν παρουσιάζεται η διαδικασία της αρχικής μοντελοποίησης του κινητήρα με χρήση του προγράμματος PROOSIS. Για το σκοπό αυτό πρώτα κατασκευάζεται το σχηματικό διάγραμμα (schematic) με επιλογή των κατάλληλων συνιστωσών (components), στη συνέχεια επιλέγονται τα κατάλληλα μαθηματικά μοντέλα (partitions) σύμφωνα με τα οποία επιλύονται οι εξισώσεις τις ροής στη μηχανή. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών προκύπτουν μέσω των πειραμάτων (experiments) και στο τέλος του κεφαλαίου αποτιμάται η πιστότητα του μοντέλου μετά από σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα δεδομένα του δοκιμαστηρίου.

3.1 Αριθμητικός υπολογισμός στο σημείο σχεδίασης

Πριν υλοποιηθεί το μοντέλο του κινητήρα στο πρόγραμμα PROOSIS θεωρείται σκόπιμο να γίνει ένας πρώτος υπολογισμός στο σημείο σχεδίασης με χρήση των σχέσεων της θερμοδυναμικής προκειμένου να γίνει μια πρώτη εκτίμηση για τα αποτελέσματα που θα αναμένονται στη συνέχεια.

Προσεκτική επιλογή των δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν οδηγεί στην καλύτερη δυνατή μοντελοποίηση της μηχανής. Τα δεδομένα από το εγχειρίδιο χρήστη αναφέρονται σε ελάχιστη παραγόμενη ισχύ (min), σε μέγιστες στροφές του άξονα της αεριογόνου (max), σε ιδανικές στροφές άξονα εξόδου της ισχύος (opt), σε μέγιστη ειδική κατανάλωση καυσίμου και μέγιστη θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο της αεριογόνου. Καθώς στη βιβλιογραφία για κάποια μεγέθη δίδονται μέγιστες τιμές ενώ για κάποια άλλα ελάχιστες ή ιδανικές, και για να έχουμε την καλύτερη δυνατή προσέγγιση των επιδόσεων του πραγματικού κινητήρα, επιλέγεται η χρήση των δεδομένων του δοκιμαστηρίου και η συμπληρωματική χρήση δεδομένων από τη βιβλιογραφία για μεγέθη που δεν μετρώνται στο δοκιμαστήριο.

Τα δεδομένα που λαμβάνονται από το δοκιμαστήριο παρουσιάζονται στον πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Δεδομένα από το δοκιμαστήριο

Ratings	NI speed[RPM]	NII speed [RPM]	Power [kW]	Fuel Flow [kg/s]	Tamb[K]	EGT[K]
FI	17272	1326	50.21	0.02470	285.15	690.15
75%	24130	5502.9	735.77	0.07686	285.15	789.15
max cont	25146	6033.3	967.31	0.09261	285.15	827.15
take off	25400	6265.35	1071.23	0.10029	285.15	843.15

Pt1[bar]	Pt2[bar]	P2[bar]	CIT[K]
1.00914	1.00779	1.00034	285.15
1.00914	1.00576	0.9956	285.15
1.00914	1.00406	0.98205	285.15
1.00914	1.00237	0.97528	285.15

Λοιπά δεδομένα που λαμβάνονται από τη βιβλιογραφία[1] παρουσιάζονται στον πίνακα 3.2.

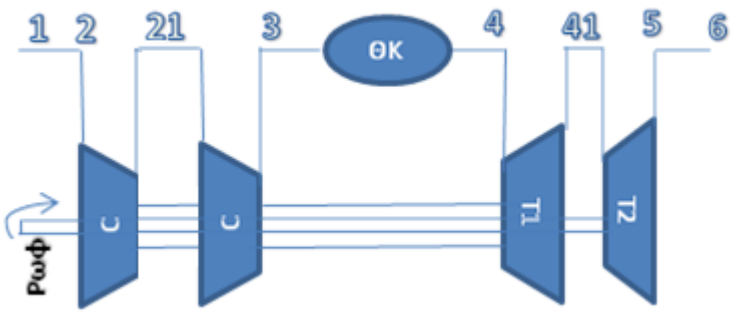
Πίνακας 3.2: Δεδομένα από τη βιβλιογραφία

Reduction g.r.	3.2105
NImax[RPM]	25400
NIImax[RPM]	6630
Exhaust Area[m^2]	0.13096748
compression ratio	7.2

Με βάση τα παραπάνω και θεωρώντας το “take off” ως σημείο σχεδίασης γίνεται η μοντελοποίηση του κινητήρα.

Υπολογισμός για το σημείο σχεδίασης

Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η αρίθμηση των κύριων θέσεων της ροής του εργαζόμενου μέσου μέσα στον κινητήρα για τους παρακάτω υπολογισμούς.



Σχήμα 3.1: Αρίθμηση κύριων θέσεων της ροής.

Ο συμπιεστής αν και αποτελείται από αξονικό και ακτινικό τμήμα, στους παρακάτω υπολογισμούς λαμβάνεται ως μία συνιστώσα. Ο κινητήρας θεωρείται ότι λειτουργεί ακίνητος στην επιφάνεια του εδάφους. Ως συνθήκες περιβάλλοντος λαμβάνονται αυτές του πίνακα 3.3.

Πίνακας 3.3: Συνθήκες περιβάλλοντος

θερμοκρασία αέρα περιβάλλοντος[K]	285.15
πίεση αέρα περιβάλλοντος Pt1[bar]	1.00914

Τα δεδομένα για το σημείο σχεδίασης όπως λαμβάνονται από την προηγούμενη παράγραφο παρουσιάζονται στον πίνακα 3.4.

Πίνακας 3.4: Επιδόσεις στο σημείο σχεδίασης

Ωφέλιμη Ισχύς Pωφ[kW]	1071.23
Παροχή καυσίμου mf[kg/s]	0.10029
Θερμογόνος Ικανότητα JP1 Hu[kJ/kg]	43020
Συνολικός λόγος πίεσης Πc	7.2

Οι παράμετροι εκτιμώνται σύμφωνα με ενδεικτικές τιμές από τη βιβλιογραφία και παρουσιάζονται στον πίνακα 3.5.

Πίνακας 3.5: Εκτιμώμενες παράμετροι

Συντελεστής Απωλειών αγωγού εξόδου K_{ex}	0.01
Μηχανικός β.α. η_{mech}	0.99
Βαθμός απόδοσης ΘΚ η_b	0.99
Συντελεστής Απωλειών ΘΚ K_b	0.03
η_{isC}	0.83
η_{isT1}	0.86
η_{isT2}	0.88

Ως εργαζόμενο μέσο μέχρι το θάλαμο καύσης (θέση 3) λαμβάνεται αέρας ενώ στη συνέχεια καυσαέριο. Στον πίνακα 3.6 παρατίθενται οι τιμές των παραμέτρων του εργαζόμενου μέσου.

Πίνακας 3.6: Εργαζόμενο μέσο

γ_α	1.4
γ_g	1.33
Σταθερά R [kJ/kgK]	0.287
C_{pa} [kJ/kgK]	1.0045
C_{pg} [kJ/kgK]	1.156697

Οι ειδικές θερμοχωρητικότητες C_{pa}, C_{pg} υπολογίζονται ως εξής:

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v}\ , R = c_p - c_v \Rightarrow\ c_p = R + \frac{R}{\gamma - 1}\ , c_v = \frac{R}{\gamma - 1}$$

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι υπολογισμοί για το σημείο λειτουργίας.

Αγωγός εισόδου 1-2:

Απώλειες πίεσης,
$P_{t2}=P_{t1}(1-k_{in}) \Rightarrow k_{in}=1-P_{t2}/P_{t1}$
$T_{t2}=T_{t1}$

Συμπιεστής 2-3:

$\pi_c=7.2$
$P_{t3}=P_{t2}\ \pi_c$

$$T_{t3} = T_{t2}\left[\left(\frac{\pi_c^{\frac{\gamma_\alpha-1}{\gamma_\alpha}} - 1}{\eta_{is,c}}\right) + 1\right]$$

Θάλαμος Καύσης 3-4:

Ισολογισμός ισχύος,
$m_f H_u \eta_b + m_\alpha c_{pa} T_{t3} = (m_\alpha + m_f) c_{pg} T_{t4} \Rightarrow T_{t4} = \frac{m_f H_u \eta_b + m_\alpha c_{pa} T_{t3}}{(m_\alpha + m_f) c_{pg}}$ [σχ 3.1]
*άγνωστη η παροχή αέρα m_α.

Απώλειες πίεσης στο θάλαμο καύσης,
$P_{t4}=P_{t3}(1-k_b)$

Ισολογισμός Ισχύος στην Αεριογόνο:

$\mathbf{P}_C=\mathbf{P}_{T1} \Rightarrow T_{t41} = T_{t4} - \frac{m_\alpha c_{p\alpha}(T_{t3}-T_{t2})}{\eta_m (m_\alpha + m_f) c_{pg}}$ [σχ. 3.2]

Άγνωστες οι m_α, T_{t4}.

Η ισχύς που παράγεται στον άξονα του στροβίλου ισχύος υπολογίζεται με ισολογισμό ισχύος ως εξής:

$\mathbf{P}_{\omega\varphi}= \eta_m\ (m_\alpha+m_f)\ c_{pg}\ (T_{t41}-T_{t5}) \Rightarrow$[σχ. 3.1, σχ. 3.2]$\Rightarrow\ \mathbf{P}_{\omega\varphi}= f(m_\alpha)$

Εφαρμόζοντας επαναληπτική διαδικασία ώστε να προκύψει η επιθυμητή ισχύς υπολογίζεται αρχικά η παροχή αέρα (mα=4.47082kg/s), και μέσω των σχ.3.1, σχ.3.2 οι θερμοκρασίες T_{t4} και T_{t41}.

Στρόβιλος αεριογόνου 4-41:

$$T_{t41} = T_{t4}\left[1 - \eta_{is,T1}\left(1 - \pi_{T1}^{-\frac{\gamma_g - 1}{\gamma_g}}\right)\right] \Rightarrow \pi_{T1} = \left[1 + \left(\frac{T_{t41}}{T_{t4}} - 1\right)\frac{1}{\eta_{is,T}}\right]^{-\frac{\gamma_g}{\gamma_g - 1}}$$

$$P_{t41} = \frac{P_{t4}}{\pi_{T1}}$$

Θέση 6 (έξοδος καυσαερίου στο περιβάλλον):

Θεωρείται ότι το καυσαέριο εξέρχεται με χαμηλή ταχύτητα στο περιβάλλον, συνεπώς η απόλυτη πίεση λαμβάνεται ίση με τη στατική, ίση με την πίεση περιβάλλοντος,
$P_{t6}=P_6=P_{t1}$

Αγωγός εξόδου 5-6:

Απώλειες πίεσης,
$P_{t6}=P_{t5}(1-k_{ex}) \Rightarrow P_{t5}=P_{t6}/(1-k_{ex})$

Η θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων δίδεται ως EGT=843.15K και ισχύει $T_{t5}=T_{t6}$

Στρόβιλος ισχύος 41-5:

$$\pi_{T2} = \frac{P_{t41}}{P_{t5}}$$

Η θερμοκρασία στην έξοδο του στροβίλου ισχύος υπολογίζεται εκ νέου από τη σχέση:

$$T_{t5} = T_{t41}\left[1 - \eta_{is,T2}\left(1 - \pi_{T2}^{-\frac{\gamma_g - 1}{\gamma_g}}\right)\right]$$

Προκύπτει T_{t5} = 844.75 K, τιμή πολύ κοντά στην T_{t5} = 843.15 K επομένως φαίνεται πως η επιλογή των παραμέτρων σε συνδυασμό με τις ληφθείσες μετρήσεις από το δοκιμαστήριο ανταποκρίνονται στους θερμοδυναμικούς νόμους.

Από τους παραπάνω υπολογισμούς προκύπτει ο πίνακας 3.7 για τις θέσεις της ροής του εργαζόμενου μέσου,

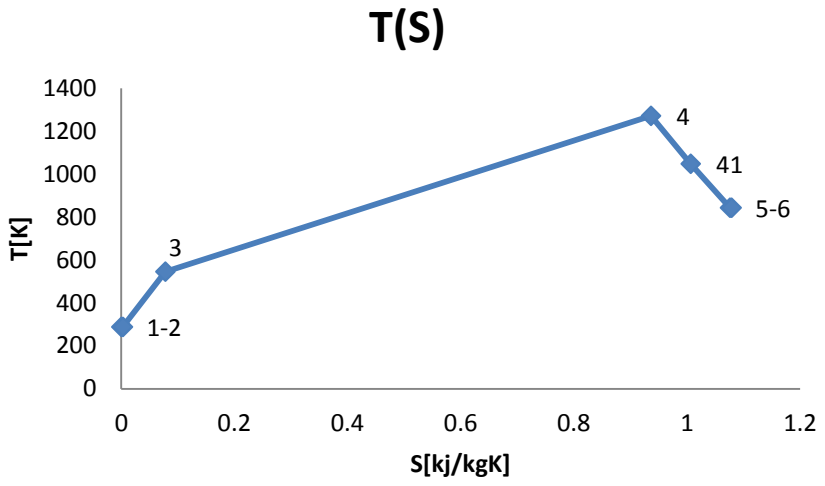
Πίνακας 3.7: Μεγέθη στις θέσεις ροής του εργαζόμενου μέσου

ΘΕΣΗ	T[K]	Pt[bar]	ΔS[kJ/kgK]	S[kJ/kgK]
0	288	1.00914		
1	288	1.00914	0	0
2	288	0.999049	0.002884	0.002884
3	545.4713	7.19315	0.075003	0.077887
4	1271.14	6.977355	0.858568	0.936455
41	1047.798	2.777602	0.070258	1.006712
5	843.15	1.019333	0.069421	1.076134
6	843.15	1.00914	0.002884	1.079018

όπου υπολογισμός της μεταβολής της εντροπίας ΔS γίνεται από τη σχέση του Gibbs,

$\Delta S=c_p \ln(T_{i+1}/T_i) - R \ln(P_{t,i+1}/P_{t,i})$

Ο θερμοδυναμικός κύκλος παρουσιάζεται στο σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2: Θερμοδυναμικός κύκλος του T53

Ο παραπάνω υπολογισμός αποτελεί την πρώτη εκτίμηση για τις τιμές των μεγεθών που αναμένουμε κατά την υλοποίηση του τελικού μοντέλου με το πρόγραμμα PROOSIS.

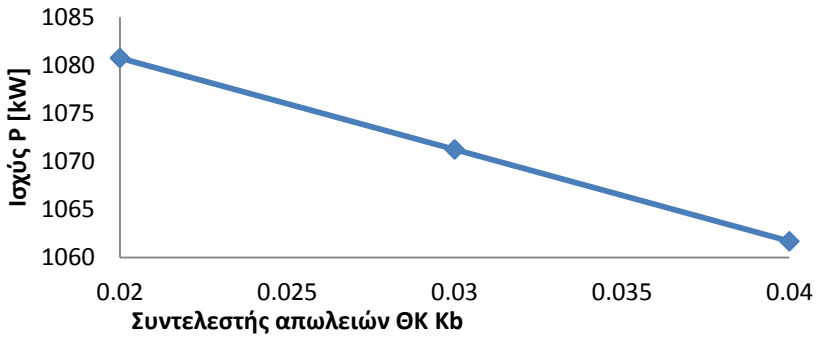
<u>Ανάλυση ευαισθησίας</u>

Από την αρχική επιλογή παραμέτρων μεταβάλουμε κατά 1% τις παραμέτρους k_b,$\eta_{is,C}$,$\eta_{is,T1}$,$\eta_{is,T2}$ και για κάθε μεταβολή υπολογίζουμε την τελικώς αποδιδόμενη ισχύ, και το θερμοδυναμικό βαθμό απόδοσης $\eta_{th}=P_{\omega\varphi}/m_f H_u$, λαμβάνοντας τον πίνακα 3.8.

Πίνακας 3.8: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας

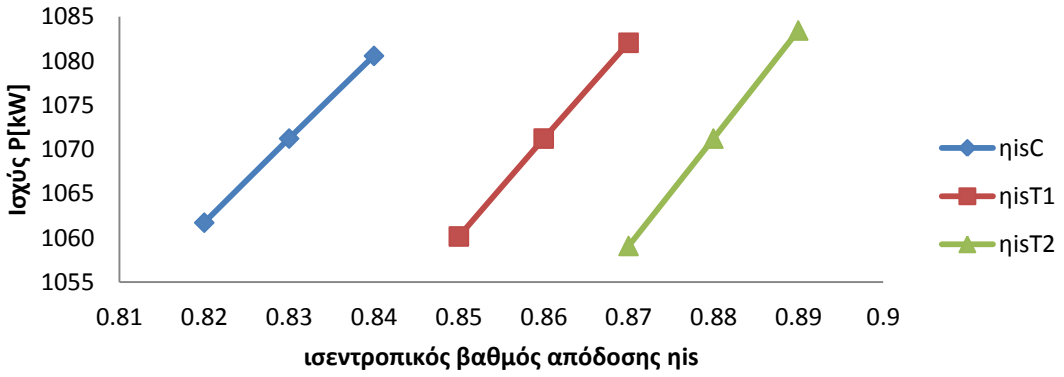
		Pωφ [kW]	ηth(%)	ΔPωφ(%)
Kb	0.02	1080.75	25.05	0.888698
	0.03	1071.23	24.83	0
	0.04	1061.67	24.61	-0.89243
ηisC	0.82	1061.73	24.61	-0.88683
	0.83	1071.23	24.83	0
	0.84	1080.57	25.05	0.871895
ηisT1	0.85	1060.17	24.57	-1.03246
	0.86	1071.23	24.83	0
	0.87	1082.05	25.08	1.010054
ηisT2	0.87	1059.1	24.55	-1.13234
	0.88	1071.23	24.83	0
	0.89	1083.44	25.11	1.139811

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας παρουσιάζονται στα σχήματα που ακολουθούν. Στο σχήμα 3.3 παρουσιάζεται η μεταβολή της ισχύος με το συντελεστή απωλειών θαλάμου καύσης.



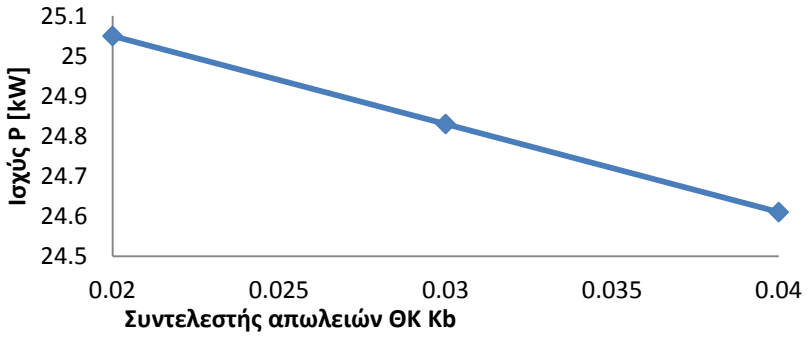
Σχήμα 3.3: Μεταβολή της ισχύος σε συνάρτηση με το συντελεστή απωλειών θαλάμου καύσης

Στο σχήμα 3.4 παρουσιάζεται η μεταβολή της ισχύος σε συνάρτηση με τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης της κάθε συνιστώσας. Παρατηρείται ότι πιο έντονη μεταβολή στην ισχύ προκύπτει από τη μεταβολή του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης του στροβίλου ισχύος.



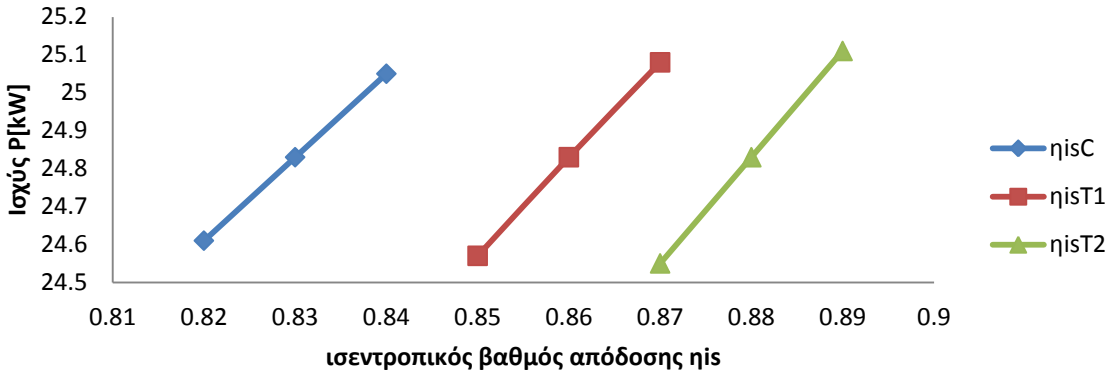
Σχήμα 3.4: Μεταβολή της ισχύος σε συνάρτηση με τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης της κάθε συνιστώσας.

Συμπληρωματικά με την επίδραση στην ισχύ, μελετάται και η επίδραση της μεταβολής των παραμέτρων στο βαθμό απόδοσης της μηχανής. Στο σχήμα 3.5 φαίνεται η επίδραση του συντελεστή απωλειών θαλάμου καύσης.



Σχήμα 3.5: Μεταβολή του β.α. της μηχανής σε συνάρτηση με το συντελεστή απωλειών θαλάμου καύσης

Στο σχήμα 3.6 φαίνεται η μεταβολή του βαθμού απόδοσης της μηχανής σε συνάρτηση με τον ισεντροπικό βαθμό της κάθε συνιστώσας.



Σχήμα 3.6: Μεταβολή του β.α. με τον ισεντροπικό β.α. της κάθε συνιστώσας

Συμπεράσματα από την ανάλυση ευαισθησίας:

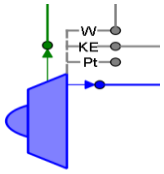
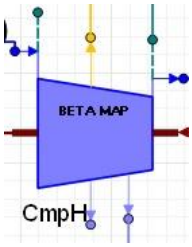
- όπως αναμενόταν, και όπως φαίνεται από το σχήμα 3.3, αύξηση στο συντελεστή απωλειών πίεσης θαλάμου καύσης προκαλεί μείωση στην παραγόμενη ισχύ, ενώ όπως προκύπτει από το σχήμα 3.4 αύξηση σε οποιονδήποτε ισεντροπικό βαθμό απόδοσης οδηγεί σε αύξηση της παραγόμενης ισχύος.
- παρατηρείται ότι η μεταβολή στον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης οποιασδήποτε συνιστώσας έχει μεγαλύτερη επίδραση στην ισχύ από ότι η αντίστοιχη μεταβολή στο συντελεστή απωλειών πίεσης του θαλάμου καύσης.
- από τα σχήματα 3.5 και 3.6 παρατηρείται ότι η μεταβολή στον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης των στροβίλων και εντονότερα του στροβίλου ισχύος επιδρά πιο πολύ στην μεταβολή της ισχύος από ότι η αντίστοιχη μεταβολή στον ισεντροπικό βαθμό του συμπιεστή.

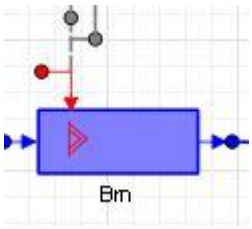
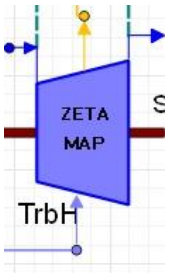
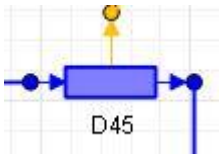
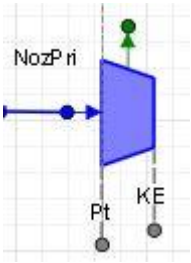
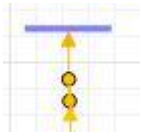
3.2 Κατασκευή σχηματικού στο PROOSIS

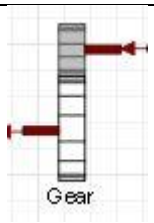
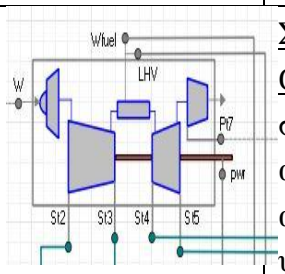
Η μοντελοποίηση στο πρόγραμμα PROOSIS[2][3] ξεκινάει με την κατασκευή του σχηματικού διαγράμματος. Το σχηματικό (schematic) είναι η γραφική αναπαράσταση των συνιστωσών της μηχανής και κατασκευάζεται επιλέγοντας τις συνιστώσες μεμονωμένα από την κατάλληλη βιβλιοθήκη (TURBO[4]) του PROOSIS.

Για την μοντελοποίηση του T53 χρησιμοποιούνται οι συνιστώσες όπως παρουσιάζονται στον πίνακα 3.9.

Πίνακας 3.9: Συνιστώσες μοντέλου του κινητήρα στο PROOSIS

Εικονίδιο Συνιστώσας	Περιγραφή	Σχόλια
	Γενική Συνιστώσα (General Component): 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.
	Ατμοσφαιρική Συνιστώσα (Atmosphere Component): Καθορίζει τις ατμοσφαιρικές συνθήκες στην είσοδο της μηχανής.	Παραμετροποιείται σύμφωνα με τις συνθήκες που επικρατούν (θερμοκρασία, πίεση κ.α.) και σύμφωνα με το υψόμετρο στο οποίο λειτουργεί ο κινητήρας.
	Συνιστώσα Εισόδου (Inlet Component): Συσχετίζει τις συνθήκες στην είσοδο της μηχανής με τις συνθήκες στην έξοδο του αγωγού εισόδου.	Στο συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιείται σταθερός λόγος απωλειών πίεσης για τον αγωγό εισόδου και η τιμή του λαμβάνεται από μετρήσεις.
	Συμπιεστής (Compressor): Συσχετίζει τα μεγέθη εισόδου/ εξόδου του συμπιεστή καθώς και την ισχύ που καταναλώνεται μέσω της ατράκτου. Χρησιμοποιεί χάρτη λειτουργίας με γραμμές-β (BETA parameter) και διαθέτει 2 απομαστεύσεις.	Γίνεται χρήση συνιστώσας που χρησιμοποιεί χάρτη ώστε στη συνέχεια να υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμών για σημεία λειτουργίας εκτός του Σημείου Σχεδίασης.

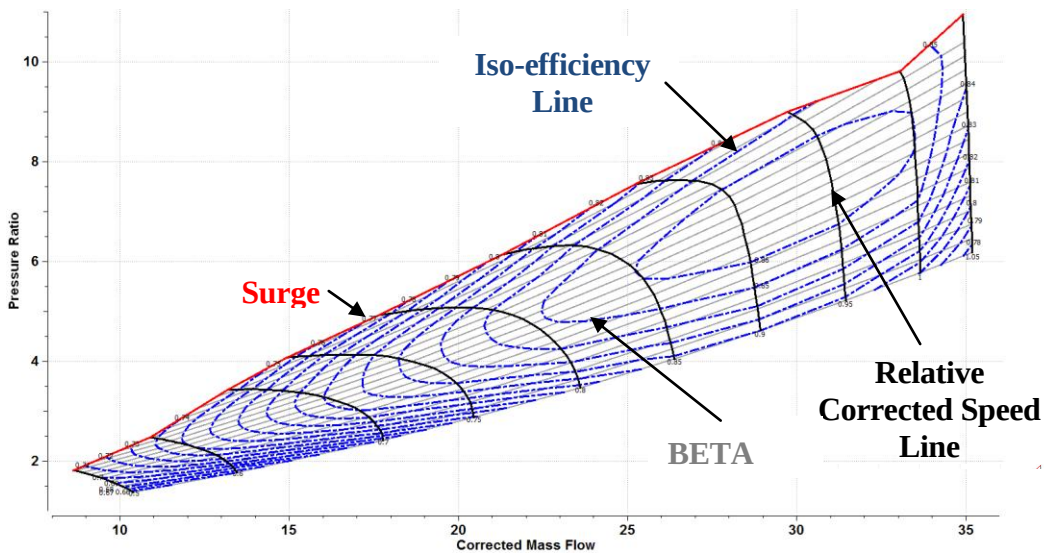
	Θάλαμος καύσης (Burner): Συσχετίζει τα μεγέθη εισόδου της ροής στο θάλαμο καύσης με τα μεγέθη εξόδου από αυτόν.	Στο συγκεκριμένο μοντέλο, οι απώλειες πίεσης και ο βαθμός απόδοσης καύσης στο σημείο σχεδίασης δίνονται από το χρήστη. Στη λειτουργία εκτός σημείου σχεδίασης τα μεγέθη αυτά μεταβάλλονται με βάση την παροχή εισόδου στο θάλαμο καύσης.
	Στρόβιλος (Turbine): Συσχετίζει τα μεγέθη εισόδου/ εξόδου από το στρόβιλο καθώς και την ισχύ που αποδίδεται στην άτρακτο. Χρησιμοποιεί χάρτη με γραμμές-β (ZETA parameter).	Στο παρόν μοντέλο η ίδια συνιστώσα χρησιμοποιείται και για τους δύο στροβίλους. Ο βαθμός απόδοσης επιλέγεται από το χρήστη.
	Αγωγός (Duct): Συσχετίζει τα μεγέθη στην είσοδο και έξοδο κάθε αγωγού με βάση κάποιο μοντέλο ροής.	Στο σημείο σχεδίασης οι απώλειες πίεσης των αγωγών επιλέγονται από το χρήστη και είναι σταθερές. Για τα εκτός σχεδίασης σημεία οι απώλειες πίεσης λαμβάνονται ως μεταβαλλόμενες.
	Ακροφύσιο (Nozzle Component): Συσχετίζει τα μεγέθη της ροής από την τελευταία βαθμίδα του στροβίλου ισχύος μέχρι την έξοδο της μηχανής.	Στο παρόν μοντέλο καθώς πρόκειται για κινητήρα ελικοπτέρου θεωρούμε μικρή πτώση πίεσης στο ακροφύσιο ενώ το εμβαδό εξόδου του ακροφυσίου λαμβάνεται από τη βιβλιογραφία και δεν αποτελεί παράμετρο σχεδίασης.
	Κέλυφος (Casing): Μοντελοποιεί την συναλλαγή θερμότητας ανάμεσα στο εσωτερικό και το κελύφος της μηχανής.	Στο παρόν μοντέλο οι διεργασίες μεταξύ εσωτερικού της μηχανής και κελύφους λαμβάνονται ως αδιαβατικές (steady-state simulation).

	Άξονες (Shafts): Υπολογίζουν την ροπή της ατράκτου για δεδομένη ταχύτητα περιστροφής συνυπολογίζοντας τυχόν πρόσδοση ή κατανάλωση ισχύος από συμπιεστές και στροβίλους.	Στο παρόν μοντέλο χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση των ατράκτων της αεριογόνου και της ατράκτου του στροβίλου ισχύος.
	Μειωτήρας στροφών (Gear box): Μεταφέρει την ισχύ από άτρακτο σε άτρακτο με ταυτόχρονο υπολογισμό της μείωσης των στροφών με βάση τη σχέση μετάδοσης.	Στο παρόν μοντέλο μεταφέρει την ισχύ από την άτρακτο του στροβίλου ισχύος στην άτρακτο εξόδου της μηχανής.
	Συνιστώσα επιδόσεων (Performance Component): 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.	Υπολογίζει μεγέθη όπως ο συνολικός λόγος συμπίεσης (OPR), η κατανάλωση καυσίμου (SFC) και η καθαρή παραγόμενη ισχύς (PWSD) που παράγεται από τη μηχανή.

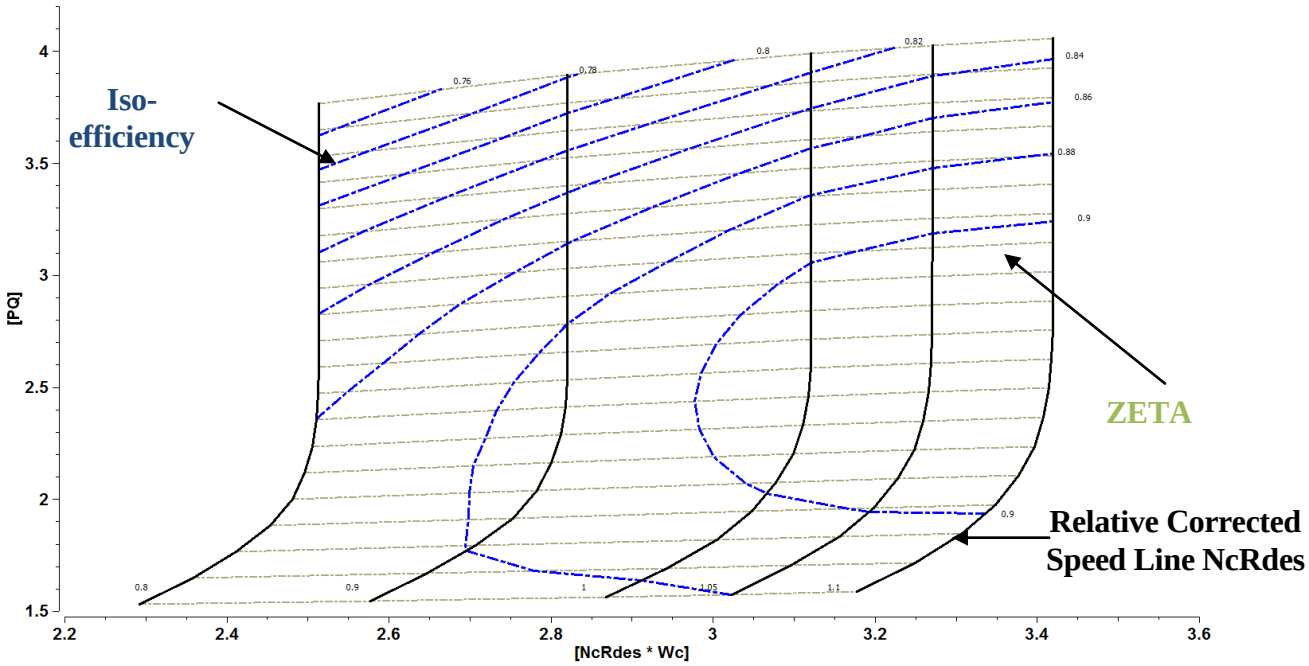
Οι συμπιεστές και οι στρόβιλοι χρησιμοποιούν χάρτες με τις παραμέτρους BETA και ZETA αντίστοιχα που εκφράζουν σημεία επάνω στις βοηθητικές γραμμές-β. Η παράμετρος BETA δεν έχει κάποια φυσική σημασία. Η παράμετρος ZETA στους στροβίλους ορίζεται ως εξής:

$$\mathrm{ZETA}_{\mathrm{TrbH/TrbL}} = \frac{\mathrm{dhqT}_{\mathrm{map}} - \mathrm{dhqT}_{\mathrm{map,min}}}{\mathrm{dhqT}_{\mathrm{map,max}} - \mathrm{dhqT}_{\mathrm{map,min}}} \tag{3.1}$$

Στο σχήμα 3.7 και στο σχήμα 3.8 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι χάρτες με γραμμές-β ενός συμπιεστή και ενός στροβίλου.

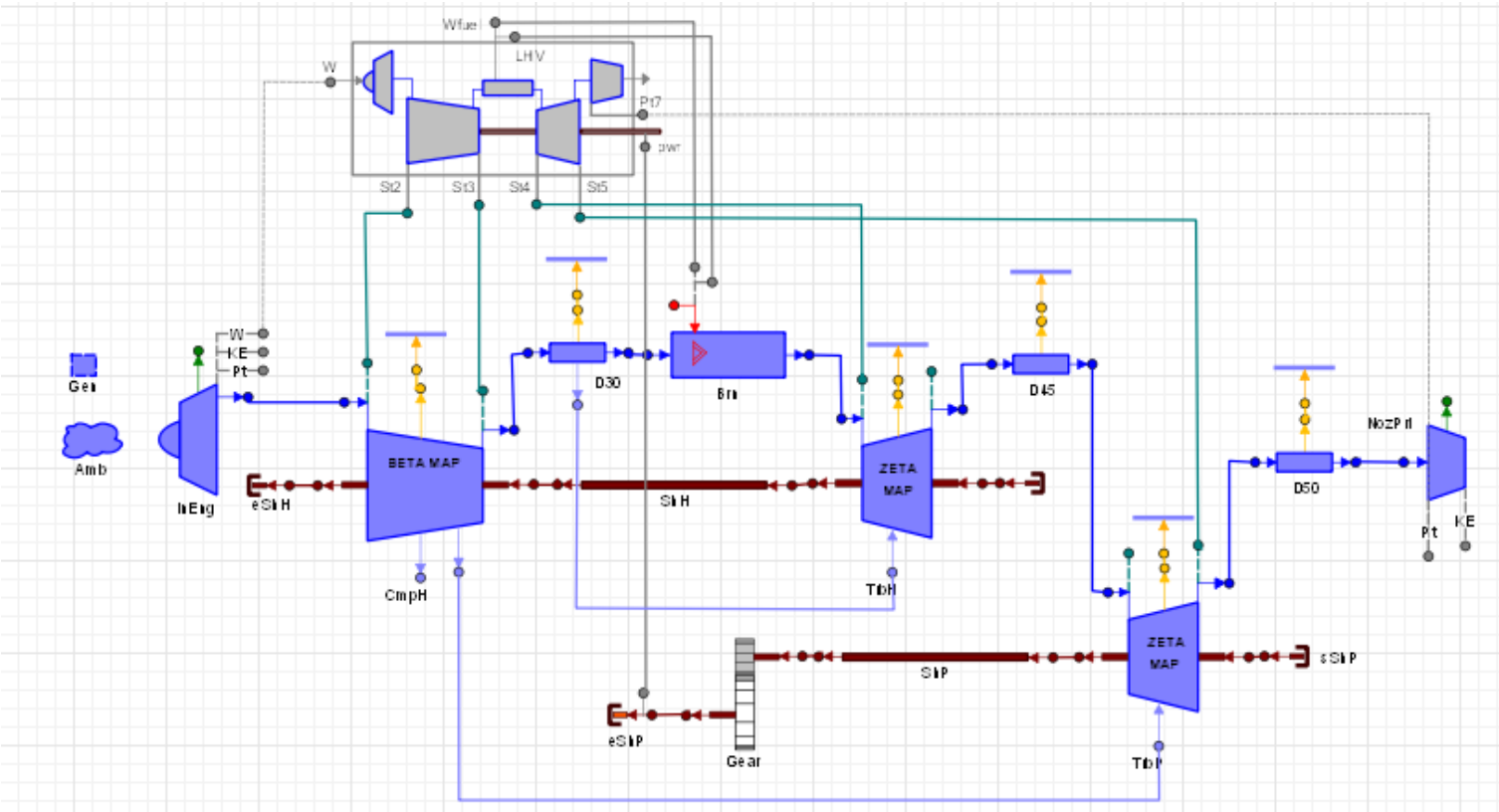


Σχήμα 3.7: Χάρτης Συμπιεστή με Γραμμές-β



Σχήμα 3.8: Χάρτης Στροβίλου με Γραμμές-β

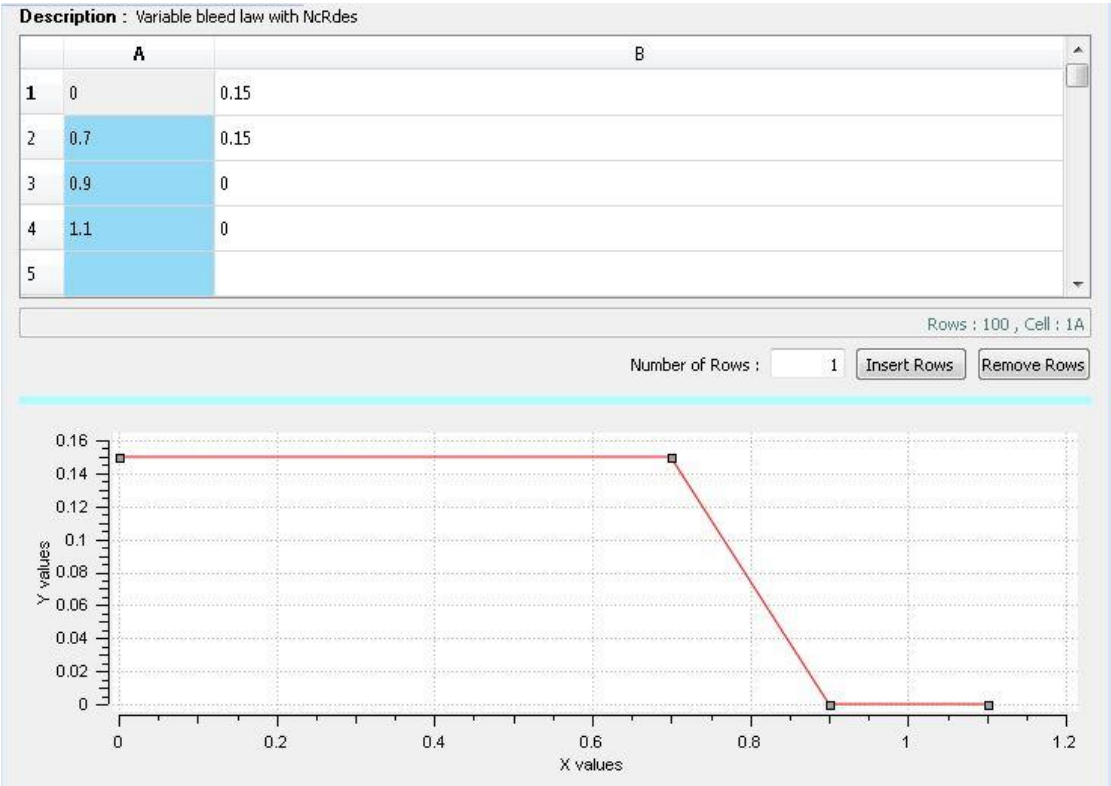
Με κατάλληλη σύνδεση των συνιστωσών που παρουσιάζονται στον πίνακα 3.9 προκύπτει το σχηματικό διάγραμμα του σχήματος 3.9.



Σχήμα 3.9: Σχηματικό διάγραμμα του T53 στο PROOSIS

3.3 Ρύθμιση απομάστευσης από τον συμπιεστή

Όπως αναφέρθηκε στην περιγραφή του κινητήρα στο προηγούμενο κεφάλαιο ένα μέρος της παροχής αέρα απομαστεύεται μεταξύ $4^{ης}$ και $5^{ης}$ βαθμίδας του συμπιεστή για την ομαλή λειτουργία του συμπιεστή σε χαμηλές στροφές. Το γεγονός ότι δεν υπάρχουν στη βιβλιογραφία λεπτομερείς πληροφορίες για την λειτουργία του συστήματος αυτού δεν επηρεάζει την παρούσα μελέτη καθώς η περιοχή λειτουργίας της απομάστευσης είναι εκτός της περιοχής ενδιαφέροντος. Ωστόσο, για την πληρότητα της μελέτης εισάγεται μια εκτίμηση της λειτουργίας του συστήματος (bleed law) όπως φαίνεται στο σχήμα 3.10. Η ποσότητα του απομαστευόμενου αέρα καθορίζεται από τις στροφές λειτουργίας της αεριογόνου σύμφωνα με το σχήμα 3.10. Ο καθορισμός της θέσης από όπου γίνεται η απομάστευση κατά μήκος του συμπιεστή γίνεται από το πεδίο των χαρακτηριστικών της συνιστώσας (attributes) ορίζοντας την τιμή του bleed enthalpy fraction από 0 έως 1 αναλόγως με την επιθυμητή θέση. Στο παρόν μοντέλο, καθώς η απομάστευση γίνεται μεταξύ $4^{ης}$ και $5^{ης}$ βαθμίδας του αξονικού συμπιεστή, και επειδή ο ακτινικός περιλαμβάνεται στην ίδια συνιστώσα, ορίζεται ως 4/6 ήτοι 0.67. Στο βελτιωμένο μοντέλο με δύο συνιστώσες συμπιεστή που ακολουθεί σε επόμενο κεφάλαιο ορίζεται ως 4/5 ήτοι 0.8.



Σχήμα 3.10: Απομάστευση μεταξύ 4ης-5ης βαθμίδας του συμπιεστή

3.4 Επιλογή των ισεντροπικών βαθμών απόδοσης

Οι ισεντροπικοί βαθμοί απόδοσης είναι αυτοί που καθορίζουν το συνολικό βαθμό απόδοσης της μηχανής, αλλά και το σε πόσο υψηλές θερμοκρασίες θα κινηθεί ο κύκλος λειτουργίας της μηχανής. Έτσι όσο χαμηλότερος είναι ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης μιας συνιστώσας, τόσο υψηλότερη θερμοκρασιακή διαφορά θα υπάρχει στα σημεία πριν και μετά από αυτή.

Στον πίνακα 3.10 παρατίθενται οι ισεντροπικοί βαθμοί απόδοσης στο αρχικό μοντέλο, επιλεγμένοι με βάση τιμές από τη βιβλιογραφία[5].

Πίνακας 3.10: Ισεντροπικοί βαθμοί απόδοσης.

συμπιεστής	0.83
στρόβιλος αεριογόνου	0.85
στρόβιλος ισχύος	0.86

3.5 Επιλογή του μαθηματικού μοντέλου

Το PROOSIS δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει ποιες μεταβλητές θα ορίσει ως οριακές (boundaries) και αντιστοίχως εμφανίζει τις αλγεβρικές μεταβλητές (algebraic), αυτές δηλαδή για τις οποίες το πρόγραμμα ζητάει μια αρχική εκτίμηση και οι

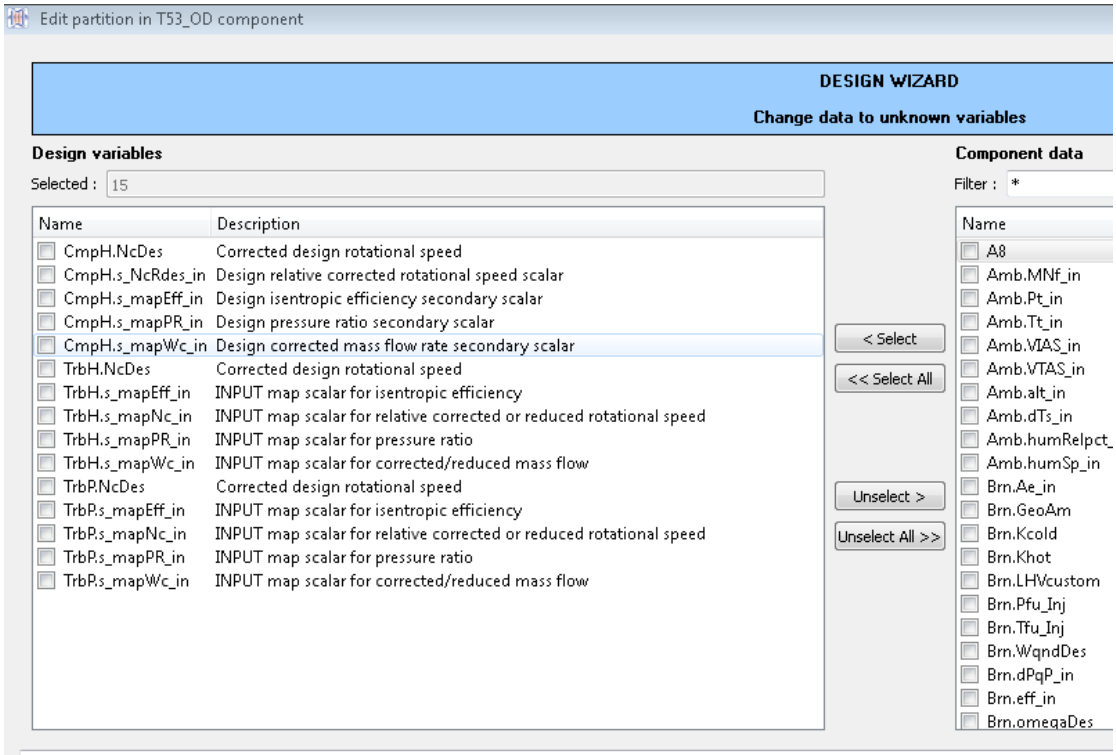
οποίες υπολογίζονται μέσα από επαναλήψεις. Επιπλέον των απλών μαθηματικών μοντέλων (default partitions) υπάρχει η δυνατότητα εκτέλεσης υπολογισμών σχεδίασης παραμέτρων (design partition). Πρόκειται για την ίδια διαδικασία με τη διαφορά ότι πλέον των προηγουμένων επιλέγονται και οι μεταβλητές οι οποίες είναι προς σχεδίαση (design variables) με αντίστοιχη αύξηση του πλήθους των οριακών μεταβλητών. Μετά την επιλογή του μαθηματικού μοντέλου είναι δυνατό να εκτελεσθούν διάφορα είδη υπολογισμών μέσω της διαδικασίας των πειραμάτων (experiments), εκτενής αναφορά στα οποία γίνεται σε επόμενη παράγραφο.

Οι οριακές μεταβλητές είναι αυτές τις οποίες το πρόγραμμα λαμβάνει ως γνωστές προκειμένου να επιλύσει το σύστημα των θερμοδυναμικών εξισώσεων, των εξισώσεων δυναμικής και των εξισώσεων συνέχειας του μοντέλου. Επομένως η επιλογή τους πρέπει να είναι τέτοια ώστε αφενός μεν να δίνεται η δυνατότητα στο πρόγραμμα να επιλύσει το πρόβλημα, αφετέρου δε ώστε η τιμή τους να είναι γνωστή ή να επιβάλλεται.

Για την υλοποίηση του μοντέλου απαιτείται η δημιουργία ενός design partition ώστε να υπολογισθούν οι συντελεστές κλίμακας των χαρτών (map scaling factors) και το εμβαδό του ακροφυσίου εξόδου, το οποίο όμως στο παρόν πρόβλημα είναι γνωστό[1]. Οι τιμές των συντελεστών κλίμακας που προκύπτουν από το design partition εισάγονται στο default partition. Έτσι, όπως αναλύεται στη συνέχεια, προκύπτει μια πρώτη τοποθέτηση του σημείου λειτουργίας πάνω στους χάρτες των συνιστωσών της μηχανής.

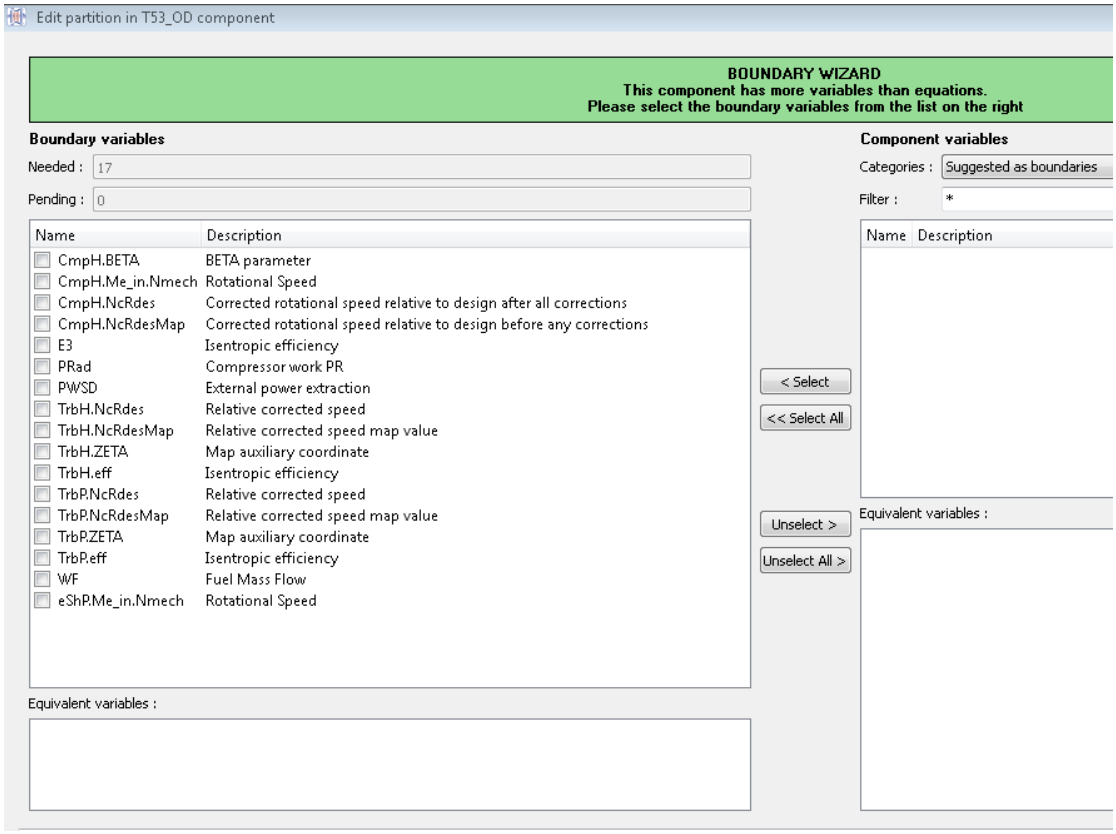
Στην περίπτωση που οι χάρτες των συνιστωσών είναι γνωστοί το design partition παραλείπεται και δημιουργείται απευθείας το default partition. Στην περίπτωση της υπό μελέτη μηχανής επιβάλλεται η δημιουργία ενός design partition ώστε να προκύψουν οι συντελεστές κλίμακας των χαρτών. Μετά από επιλογή της σχετικής καρτέλας του PROOSIS εμφανίζεται ο οδηγός δημιουργίας partition. Στο παράθυρο του σχήματος 3.11 επιλέγονται οι μεταβλητές για τις οποίες επιθυμείται να γίνει σχεδίαση.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.11 οι μεταβλητές οι οποίες πρόκειται να σχεδιαστούν είναι οι NcDes, s_NcRdes, s_mapEff, s_mapPR, s_mapWc, δηλαδή 5 για κάθε συνιστώσα και 15 στο σύνολο.



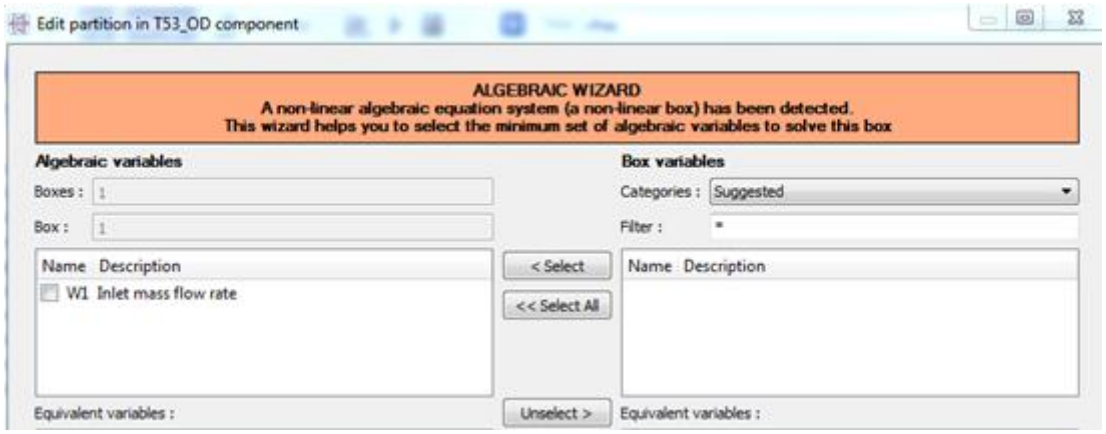
Σχήμα 3.11: Παράθυρο επιλογής μεταβλητών σχεδίασης

Στο παράθυρο του σχήματος 3.12 επιλέγονται οι οριακές μεταβλητές (boundary variables). Πρόκειται για μεταβλητές των οποίων η τιμή είναι είτε γνωστή (μεγέθη όπως κατανάλωση καυσίμου) είτε μπορεί να υποτεθεί (όπως οι παράμετροι των χαρτών). Ως οριακές συνθήκες επιλέγονται ο ΒΕΤΑ για τον συμπιεστή, οι ΖΕΤΑ για τους στροβίλους, οι γωνιακές ταχύτητες των δύο ατράκτων, οι ισεντροπικοί βαθμοί απόδοσης των συνιστωσών, ο λόγος πίεσης του συμπιεστή, η παροχή καυσίμου και οι παράμετροι των χαρτών NcRdes και NcRdesMap.



Σχήμα 3.12: Παράθυρο επιλογής οριακών μεταβλητών

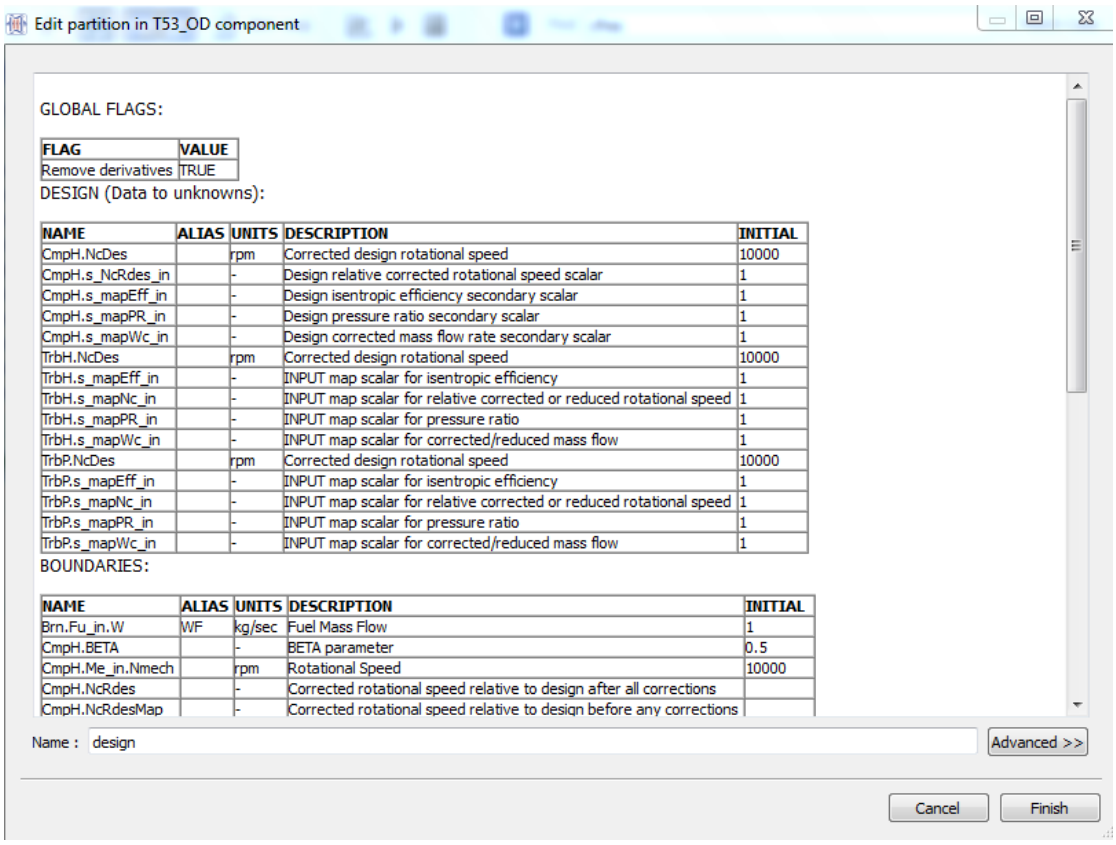
Στο παράθυρο του σχήματος 3.13 επιλέγονται οι αλγεβρικές μεταβλητές (algebraic variables). Οι αλγεβρικές μεταβλητές εξυπηρετούν στην επίλυση των μη γραμμικών αλγεβρικών συστημάτων. Δίνεται μια αρχική εκτίμηση ώστε να ξεκινήσει η επίλυση του συστήματος και μέσω επαναλήψεων υπολογίζεται η τελική τους τιμή.



Σχήμα 3.13: Παράθυρο επιλογής αλγεβρικών μεταβλητών

Τέλος, προκύπτει το παράθυρο του σχήματος 3.14 όπου παρουσιάζεται η προεπισκόπηση του partition που κατασκευάστηκε ένα βήμα πριν αποθηκευτεί.

Αναγράφεται το είδος της μεταβλητής (design, boundary, algebraic), το όνομα της, οι μονάδα μέτρησης, η περιγραφή της και η αρχική τιμή στην εκκίνηση των υπολογισμών.

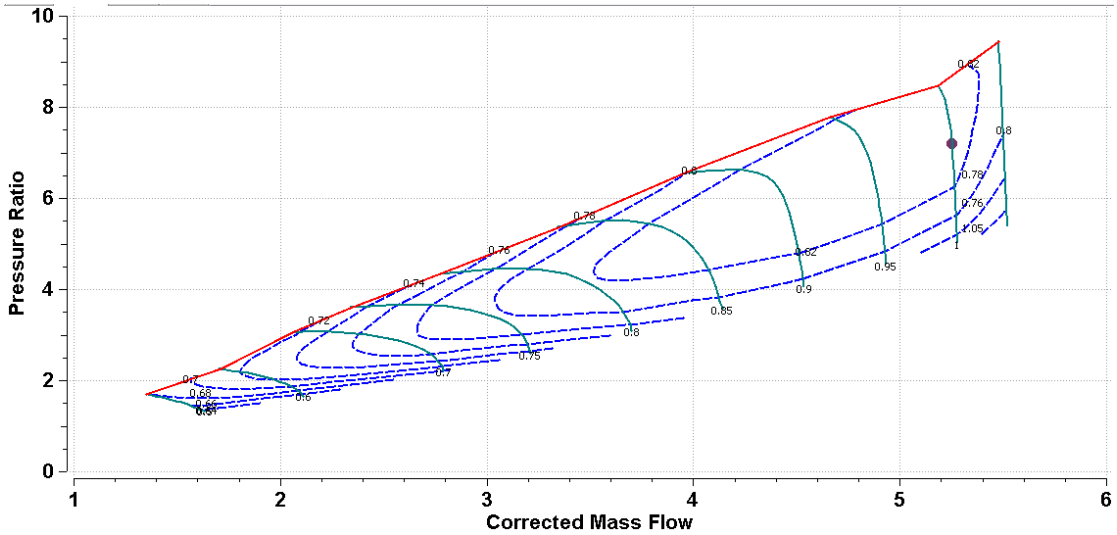


Σχήμα 3.14: Παράθυρο προεπισκόπησης partition

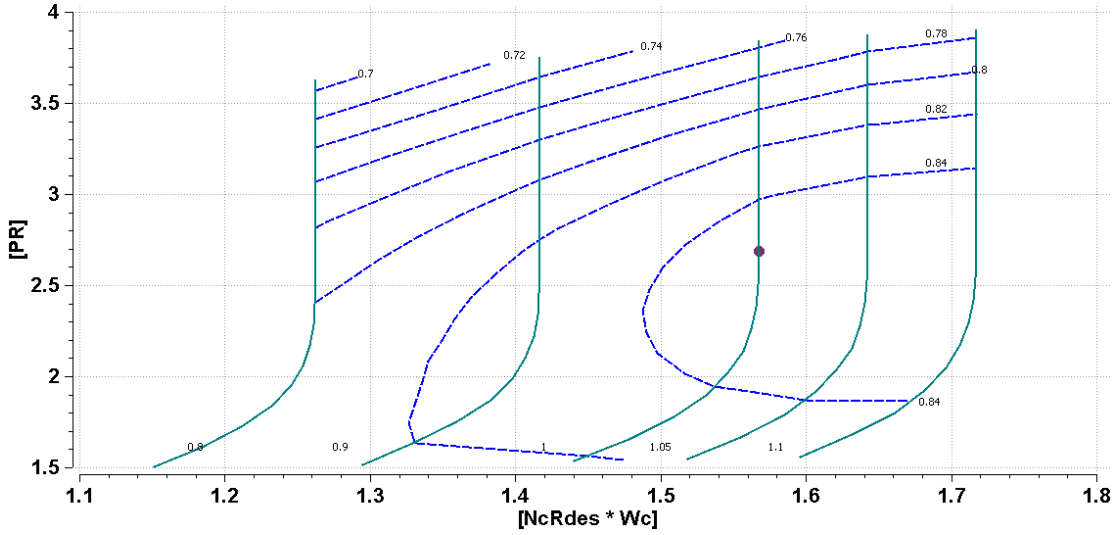
3.6 Ανάλυση λειτουργίας στο σημείο σχεδίασης

Μετά την δημιουργία του partition εκτελείται ένα πείραμα (experiment) μέσω της επιλογής “new experiment”. Το πείραμα σκοπό έχει τον υπολογισμό των μεταβλητών σχεδίασης που ορίσθηκαν στο design partition. Τα αποτελέσματα λαμβάνονται είτε στο monitor είτε σε συγκεκριμένο αρχείο “.rpt”, το οποίο καλείται σε επόμενους υπολογισμούς. Το πείραμα εκτελείται επαναληπτικά μεταβάλλοντας τις αρχικές εκτιμήσεις των ισεντροπικών βαθμών απόδοσης ώστε να επιτευχθεί ταύτιση της θερμοκρασίας εξόδου των καυσαερίων με αυτή των δεδομένων του δοκιμαστηρίου για το σημείο σχεδίασης.

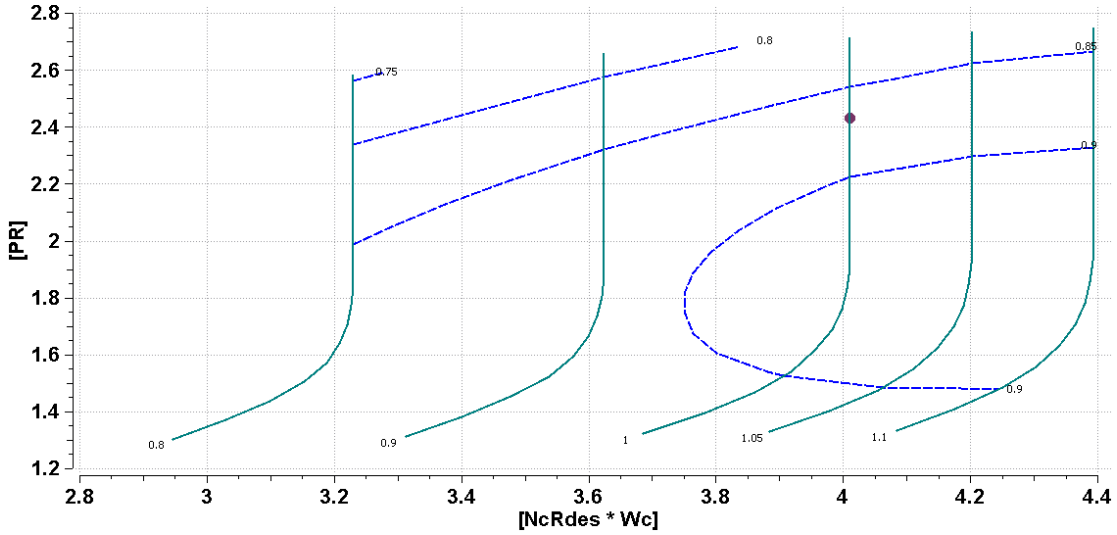
Εκτελώντας το πείραμα με την επιλογή “simulate in monitor” λαμβάνεται το σημείο λειτουργίας στους χάρτες των συνιστωσών, όπως φαίνεται στα σχήματα 3.15-3.17.



Σχήμα 3.15: Χάρτης Συμπιεστή

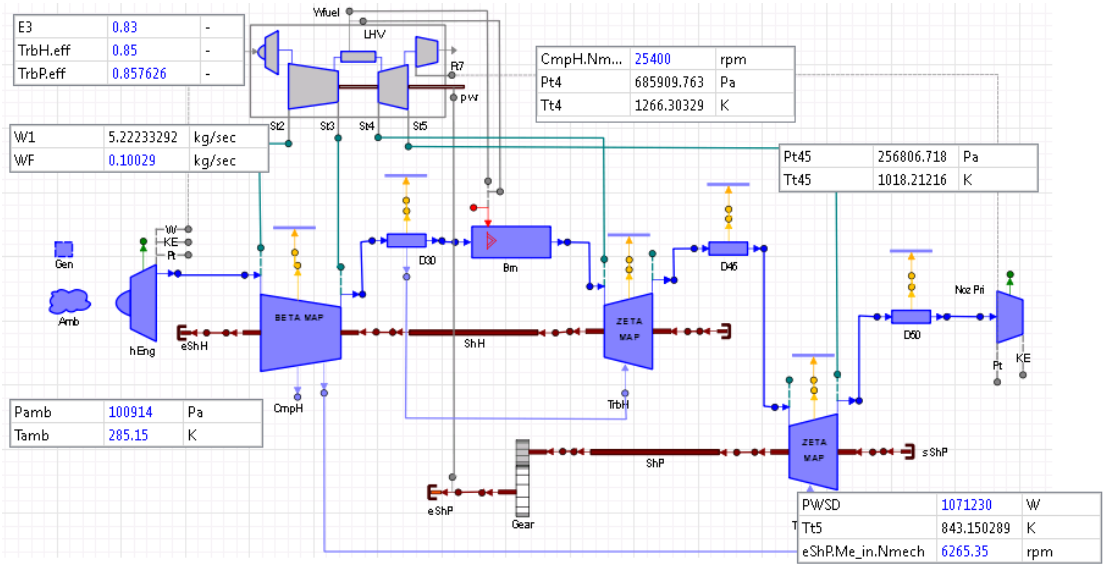


Σχήμα 3.16: Χάρτης Στροβίλου Αεριογόνου



Σχήμα 3.17: Χάρτης Στροβίλου Ισχύος

Στο σχήμα 3.18 παρουσιάζονται οι τιμές διαφόρων μεγεθών κατά τη λειτουργία της μηχανής στο σημείο σχεδίασης.



Σχήμα 3.18: Λειτουργία μηχανής στο Σημείο Σχεδίασης

Οι μετρούμενες τιμές από το δοκιμαστήριο (στροφές αεριογόνου, στροφές στροβίλου ισχύος, κατανάλωση καυσίμου, αποδιδόμενη ισχύς, θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων) προσεγγίζονται με ακρίβεια τουλάχιστον 10^{-5}. Στον πίνακα 3.11 παρουσιάζονται οι ολικές θερμοκρασίες και πιέσεις στα κύρια σημεία της ροής στον κινητήρα για το σημείο σχεδίασης. Στη συνέχεια γίνεται ανάλυση λειτουργίας για τα εκτός σχεδίασης σημεία.

Πίνακας 3.11: Ολικές θερμοκρασίες και πιέσεις κατά μήκος του κινητήρα

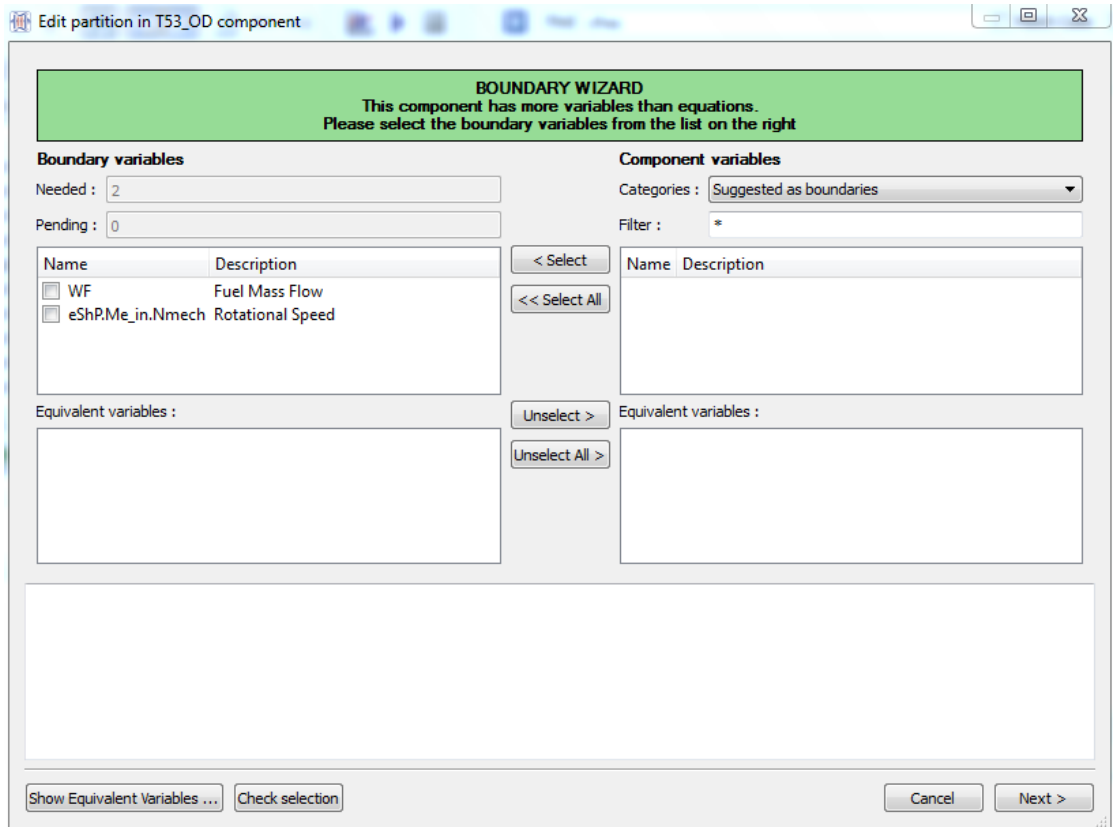
Tt1 (K)	285.15
Tt2 (K)	285.15
Tt3 (K)	541.904635
Tt4 (K)	1266.30186
Tt45 (K)	1018.21072
Tt5 (K)	843.149167
Pt1 (Pa)	100914
Pt2 (Pa)	100237
Pt3 (Pa)	721706.4
Pt4 (Pa)	685909.763
Pt45 (Pa)	252782.636
Pt5 (Pa)	103938.768

3.7 Ανάλυση λειτουργίας εκτός σημείου σχεδίασης

Η ανάλυση λειτουργίας εκτός σημείου σχεδίασης αποτελεί φυσική συνέχεια της ανάλυσης στο σημείο σχεδίασης καθώς χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα του design

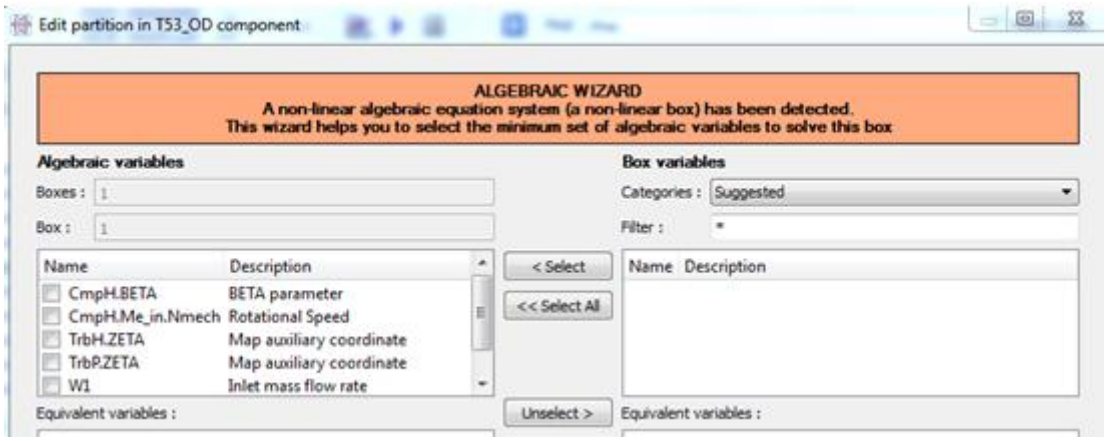
experiment που προηγήθηκε ως τιμές εισόδου στο νέο πείραμα που ακολουθεί ώστε να γίνουν οι υπολογισμοί στα εκτός σχεδίασης σημεία. Στο τέλος της διαδικασίας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συγκρίνονται με τα δεδομένα του δοκιμαστηρίου και υπολογίζονται οι αποκλίσεις.

Για τους νέους υπολογισμούς απαιτείται η κατασκευή ενός νέου μαθηματικού μοντέλου (default partition). Το default partition δημιουργείται από την αντίστοιχη επιλογή του PROOSIS και στην οθόνη επιλογής οριακών μεταβλητών (boundary variables) επιλέγονται η κατανάλωση καυσίμου και οι στροφές του άξονα στην έξοδο της μηχανής, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3.19. Επιλέγονται οι συγκεκριμένες μεταβλητές καθώς στην πραγματικότητα το σημείο λειτουργίας της μηχανής καθορίζεται από την παροχή καυσίμου, ενώ είναι επιθυμητή η λειτουργία της μηχανής σε σταθερές, συγκεκριμένες στροφές λόγω της ζεύξης με γεννήτρια.



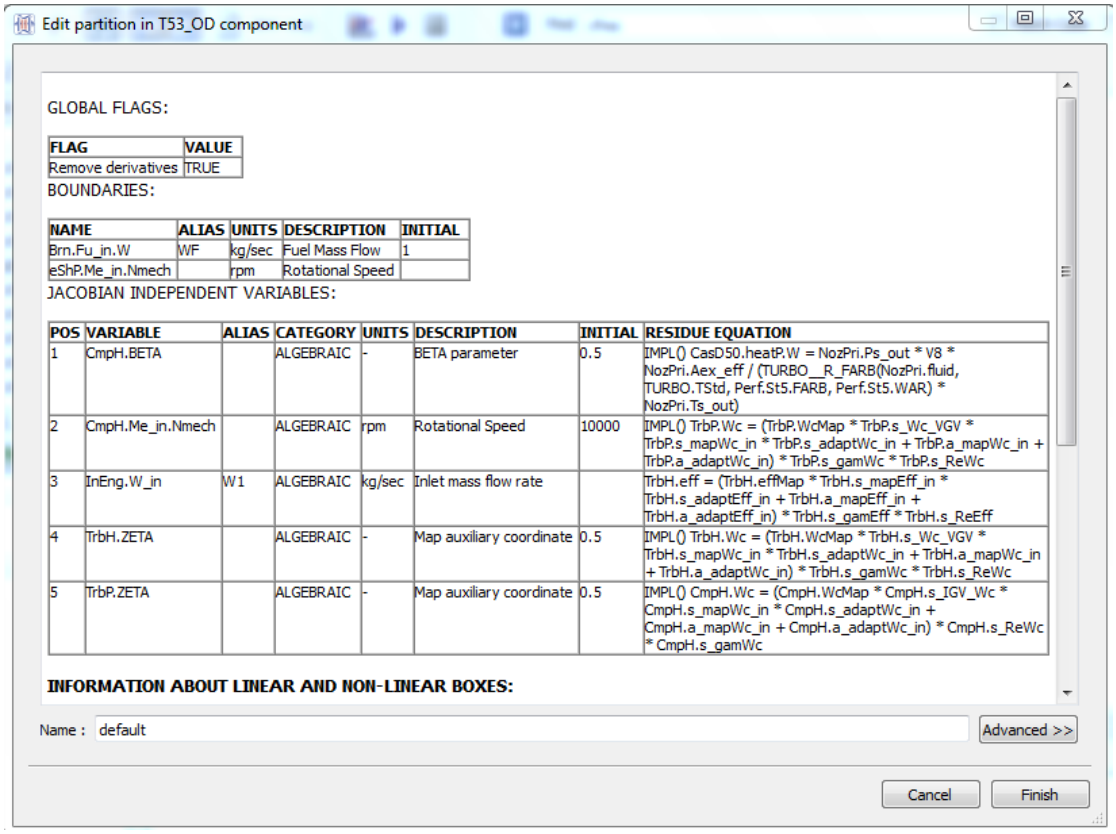
Σχήμα 3.19: Παράθυρο επιλογής οριακών μεταβλητών

Στη συνέχεια επιλέγονται οι αλγεβρικές μεταβλητές (algebraic variables) όπως παρουσιάζονται στο σχήμα 3.20,



Σχήμα 3.20: Παράθυρο επιλογής αλγεβρικών μεταβλητών

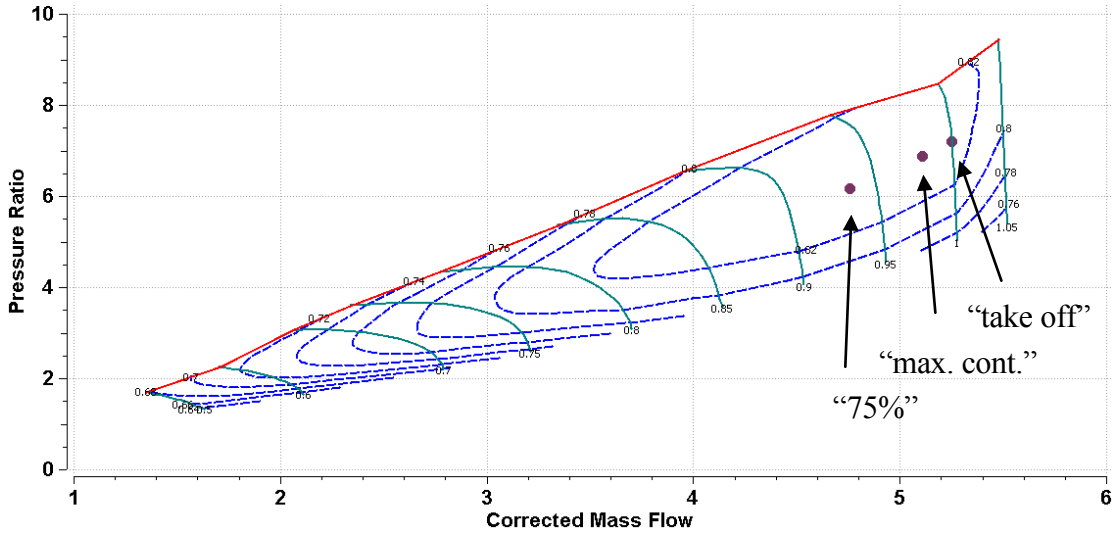
ενώ το έτοιμο προς δημιουργία default partition εμφανίζεται στο σχήμα 3.21.



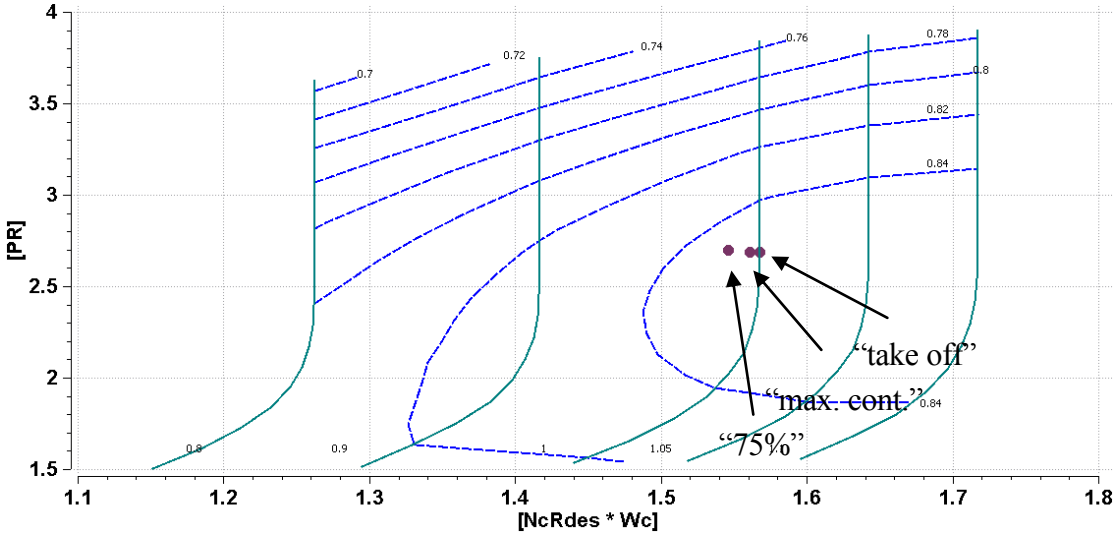
Σχήμα 3.21: Παράθυρο προεπισκόπησης του υπό δημιουργία default partition

Μετά τη δημιουργία του default partition εκτελείται ένα πείραμα μέσω της επιλογής default experiment. Στο παραπάνω πείραμα λαμβάνονται ως map scaling factors οι τιμές που προκύπτουν από το design experiment που προηγήθηκε, ενώ υπολογίζονται τα σημεία λειτουργίας για τα οποία υπάρχουν μετρήσεις πλην του σημείου “flight idle”.

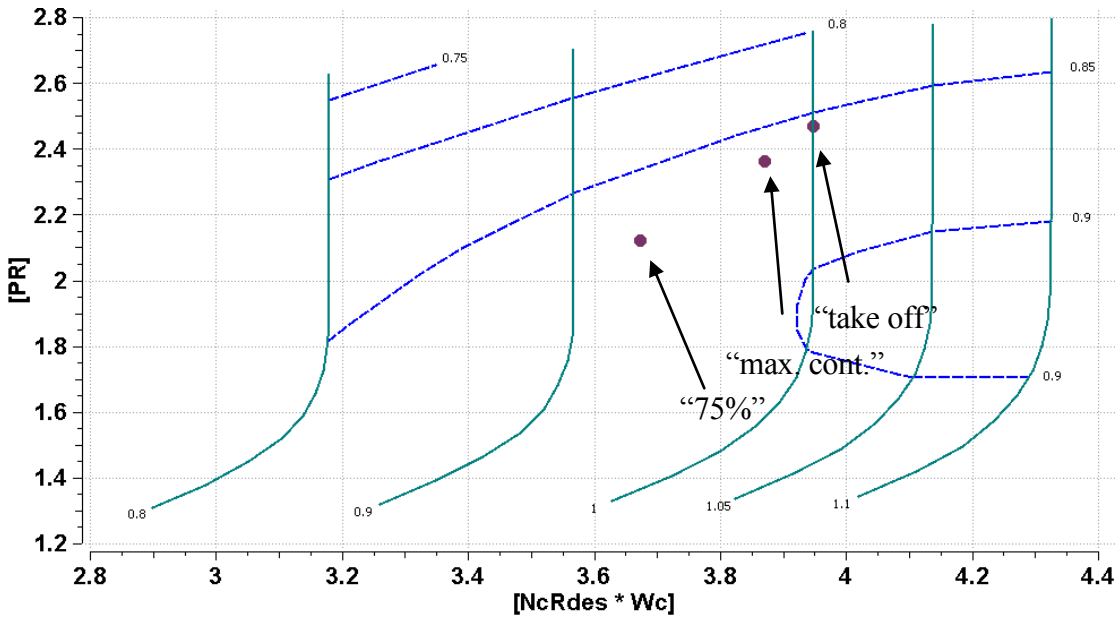
Τρέχοντας το πείραμα στο monitor προκύπτουν οι χάρτες που παρουσιάζονται στα σχήματα 3.22-3.24. Τα τρία σημεία λειτουργίας, ήτοι το “take off”, το “maximum continuous” και το “flight idle” σημειώνονται πάνω στους χάρτες.



Σχήμα 3.22: Χάρτης Συμπιεστή



Σχήμα 3.23: Χάρτης Στροβίλου Αεριογόνου



Σχήμα 3.24: Χάρτης Στροβίλου Ισχύος

Το σημείο flight idle (FI) είναι το μόνο σημείο για το οποίο οι θεωρητικές τιμές της βιβλιογραφίας απέχουν πολύ από τις μετρημένες στο δοκιμαστήριο και η τοποθέτησή του στους χάρτες απαιτεί τοπική προσαρμογή (local adaptation) αυτών. Καθώς το μοντέλο προορίζεται να λειτουργεί γύρω από το σημείο "maximum continuous", στη συγκεκριμένη μελέτη κρίνεται σκόπιμη η παράληψη του σημείου αυτού.

3.8 Αποκλίσεις από τα δεδομένα του δοκιμαστηρίου

Η αξιολόγηση του μοντέλου προκύπτει μετά από σύγκριση των αποτελεσμάτων του PROOSIS με τις μετρήσεις του εργαστηρίου. Εκτελώντας το πείραμα στο default partition λαμβάνονται τα αποτελέσματα του πίνακα 3.12.

Πίνακας 3.12: Αποτελέσματα PROOSIS για τα υπό μελέτη σημεία λειτουργίας

#Calculation id	steady-1	steady-2	steady-3
#Status	STEADY_OK	STEADY_OK	STEADY_OK
#ESI	0	0	0
CmpH.Nmech (rpm)	25400	24879.92800	23762.2459
Tt5 (K)	843.150287	819.49746	774.300144
eShP.Me_in.Nmech (rpm)	6265.35	6033.30000	5502.9
PWSD (W)	1071230	972005.87900	749419.188
Tt4 (K)	1266.30329	1225.29500	1139.32409
WF (kg/sec)	0.10029	0.09261	0.07686

Συγκρίνοντας τα παραπάνω με τα δεδομένα του δοκιμαστηρίου προκύπτει ο πίνακας 3.13 με τις επί τοις 100 αποκλίσεις.

Πίνακας 3.13: Αποκλίσεις τιμών μοντέλου – δοκιμαστηρίου

	take off[DP]	max cont	75%
Δpower[%]	0.000	0.485	1.855
ΔNI[%]	0.000	-1.058	-1.524
ΔNII[%]	0.000	0.000	0.000
ΔEGT[%]	0.000	-0.925	-1.882
ΔWF[%]	0.000	0.000	0.000

Παρατηρείται ότι οι στροφές εξόδου (NII) και η κατανάλωση καυσίμου (WF) έχουν μηδενική απόκλιση καθώς αποτελούν οριακές μεταβλητές (boundary variables) και συνεπώς ορίζονται με την επιθυμητή τιμή σε όλα τα σημεία λειτουργίας.

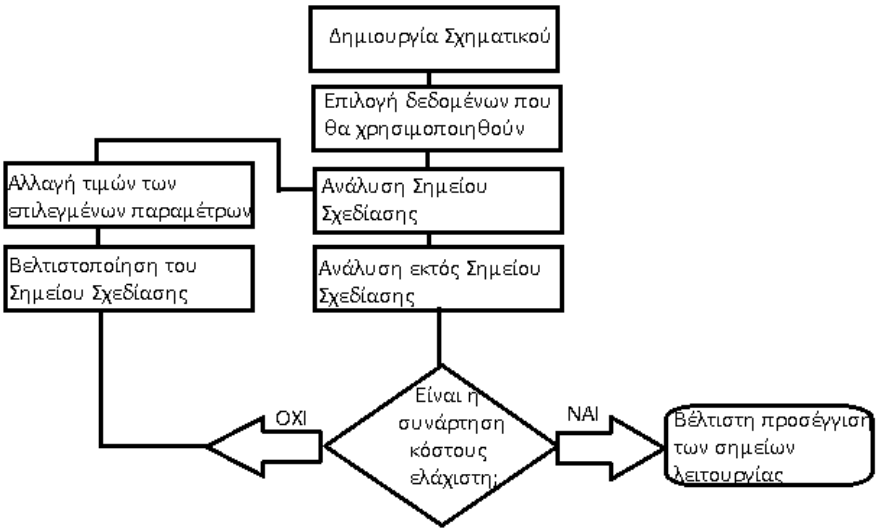
Καθώς οι μεγαλύτερες αποκλίσεις είναι της τάξης του 2% κρίνεται ότι το μοντέλο αποτελεί μια ικανοποιητική πρώτη προσέγγιση. Στη συνέχεια επιχειρείται η περαιτέρω βελτίωσή του μέσω βελτιστοποίησης παραμέτρων.

4 Βελτιστοποίηση του σημείου σχεδίασης.

Στο κεφάλαιο αυτό επιχειρείται βελτιστοποίηση του σημείου σχεδίασης (design point optimization) μέσω της ελαχιστοποίηση των αποκλίσεων των αποτελεσμάτων του μοντέλου από τις τιμές του δοκιμαστηρίου. Αυτό επιτυγχάνεται με τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων με εφαρμογή του αλγόριθμου simplex. Μετά τη βελτιστοποίηση εξετάζονται οι νέες αποκλίσεις των τιμών του μοντέλου από τις τιμές του δοκιμαστηρίου.

4.1 Βελτιστοποίηση παραμέτρων

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης[12] , κάθε μία με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα εφαρμόζεται ο αλγόριθμος simplex[6] για το λόγο ότι πρόκειται για μια μέθοδο γρήγορη και εύρωστη, που δεν απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ και χρόνο για την εφαρμογή της. Στο σχήμα 4.1 παρουσιάζεται το λογικό διάγραμμα της μεθόδου που εφαρμόζεται. Ουσιαστικά εκτελούνται επαναλαμβανόμενα τα πειράματα που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3, κάθε φορά με διαφορετικές τιμές παραμέτρων ώστε να ελαχιστοποιείται μια συνάρτηση κόστους.



Σχήμα 4.1: Λογικό διάγραμμα διαδικασίας βελτιστοποίησης

Οι μεταβλητές που επιλέγονται να βελτιστοποιηθούν είναι οι παράμετροι κλίμακας των χαρτών (map scaling factors) και παράμετροι για την τιμή των οποίων έχουμε εκτιμήσεις και όχι μετρημένη τιμή (ισεντροπικοί βαθμοί απόδοσης συνιστωσών, λόγος πίεσης συμπιεστή).

Τα σημεία λειτουργίας για το οποία εφαρμόζεται η διαδικασία βελτιστοποίησης είναι τα εξής:

- Take off (μετρήσεις ΕΑΒ)
- Maximum continuous (μετρήσεις ΕΑΒ)
- 75% maximum (μετρήσεις ΕΑΒ)

Το πείραμα παρότι περιλαμβάνει και υπολογισμό του σημείου σχεδίασης πραγματοποιείται στο ίδιο partition που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των εκτός σχεδίασης σημείων λειτουργίας (κεφάλαιο 3).

Η διαδικασία βελτιστοποίησης έχει ως εξής:

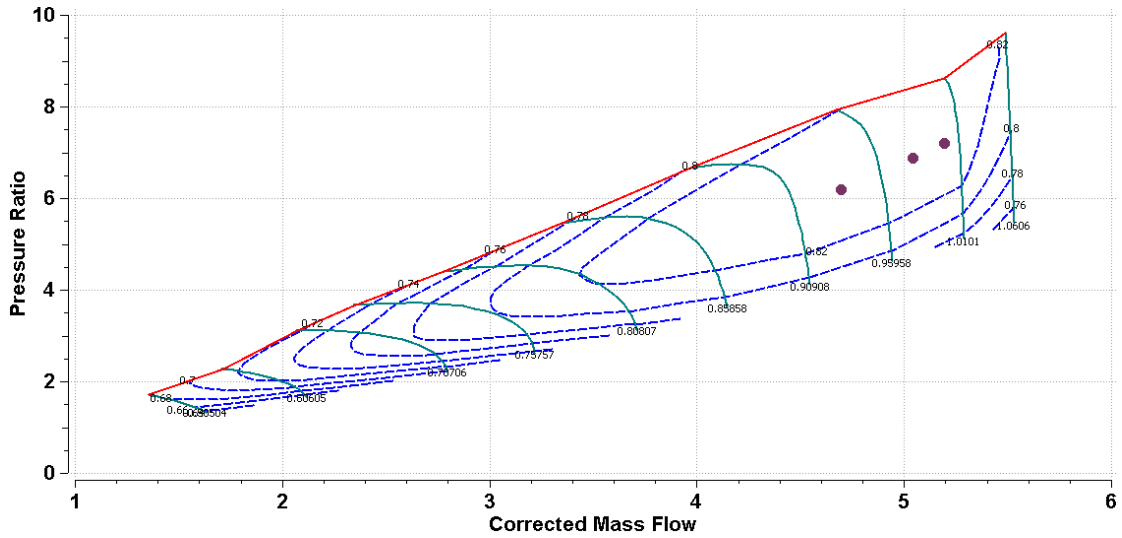
1. Δίνεται μία αρχική τιμή για τις παραμέτρους που βελτιστοποιούνται όπως αυτή προκύπτει από τον υπολογισμό του σημείου σχεδίασης (κεφάλαιο 3).
2. Δίνονται οι τιμές των μεταβλητών ελέγχου (boundary variables) για το σημείο σχεδίασης (παροχή καυσίμου, στροφές στροβίλου ισχύος). Επιπλέον δίνονται αρχικές τιμές για τις 5 αλγεβρικές του default partition. Τέλος δίνονται αρχικές τιμές για τις 15 παραμέτρους που σχεδιάζονται (3 διορθωμένες στροφές Ncdes και 12 συντελεστές κλίμακας χαρτών).
3. Αρχικά επιλύεται το πρόβλημα του σημείου σχεδίασης ομοίως με το design partition του κεφαλαίου 3. Στη συνέχεια εκτελείται το πείραμα του default partition για τα τρία σημεία λειτουργίας που μελετώνται. Αυτό το βήμα επαναλαμβάνεται πολλές φορές για διαφορετικές τιμές παραμέτρων κάθε φορά, μέσω του αλγόριθμου simplex. Στο τέλος κάθε επανάληψης τα σημεία έχουν τοποθετηθεί σε διαφορετική θέση πάνω στους χάρτες των συνιστωσών με διαφορετικές τιμές των υπόλοιπων προς βελτιστοποίηση μεταβλητών.
4. Στο τέλος της κάθε επανάληψης υπολογίζονται οι επί τοις 100 αποκλίσεις από τις τιμές του δοκιμαστηρίου για καθένα από τα υπό μελέτη μεγέθη.
$$\mathrm{fres} = \frac{\mathrm{x_{PROOSIS}} - \mathrm{x_{\delta o\kappa\iota\mu\alpha\sigma\tau\eta\rho\acute{\iota}ou}}}{\mathrm{x_{\delta o\kappa\iota\mu\alpha\sigma\tau\eta\rho\acute{\iota}ou}}} \cdot 100\%$$
5. Οι αποκλίσεις αυτές απαρτίζουν την συνάρτηση κόστους ως εξής:
$$\mathrm{CF} = \sum \mathrm{fres}^2$$
6. Το πρόγραμμα υπολογίζει σε κάθε βήμα την συνάρτηση κόστους, και στο επόμενο μεταβάλει ξανά τις παραμέτρους προσπαθώντας να την ελαχιστοποιήσει. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται με ακρίβεια σύγκλισης 10^{-5}

(desired accuracy) και εάν αυτό δεν είναι δυνατόν να επιτευχθεί, μέχρι να ολοκληρωθούν 1000 επαναλήψεις (maximum number of irritations). Το πλευρικό μήκος (side length) επιλέγεται αρχικά 0.001 και σε επόμενο κεφάλαιο γίνεται παραμετρική ανάλυση της επιρροής του στα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης.

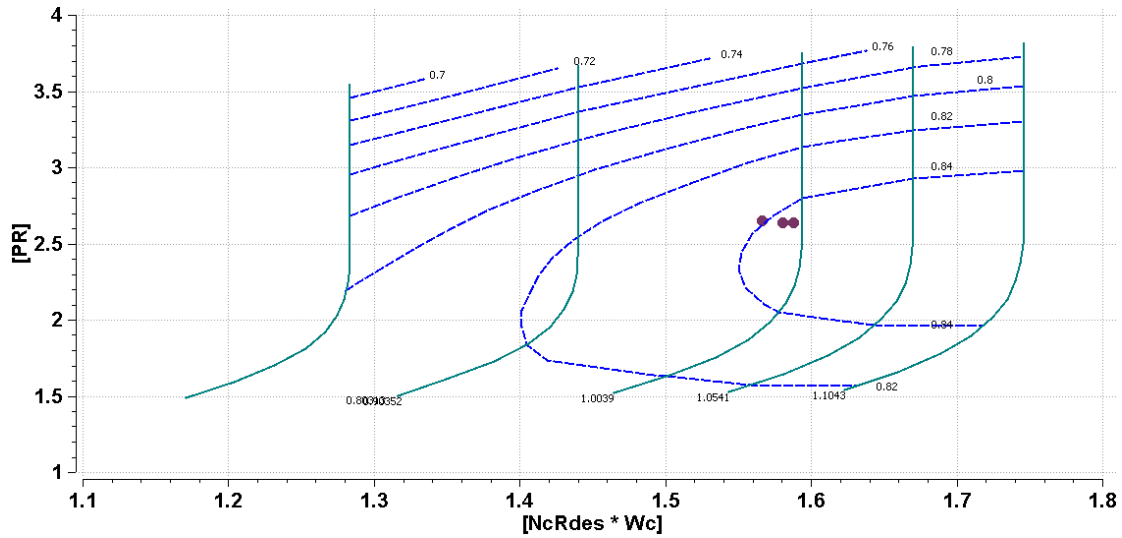
7. Όταν υπάρξει σύγκλιση χαράσσεται η νέα γραμμή λειτουργίας.

Η συγκεκριμένη ανάλυση έλαβε χώρα σε υπολογιστή με επεξεργαστή AMD Athlon™ 64 x2 Dual Core Processor 5600+ 2.8GHz 2GB RAM και ολοκληρώθηκε σε 217.23 δευτερόλεπτα πραγματοποιώντας 1628 επαναλήψεις.

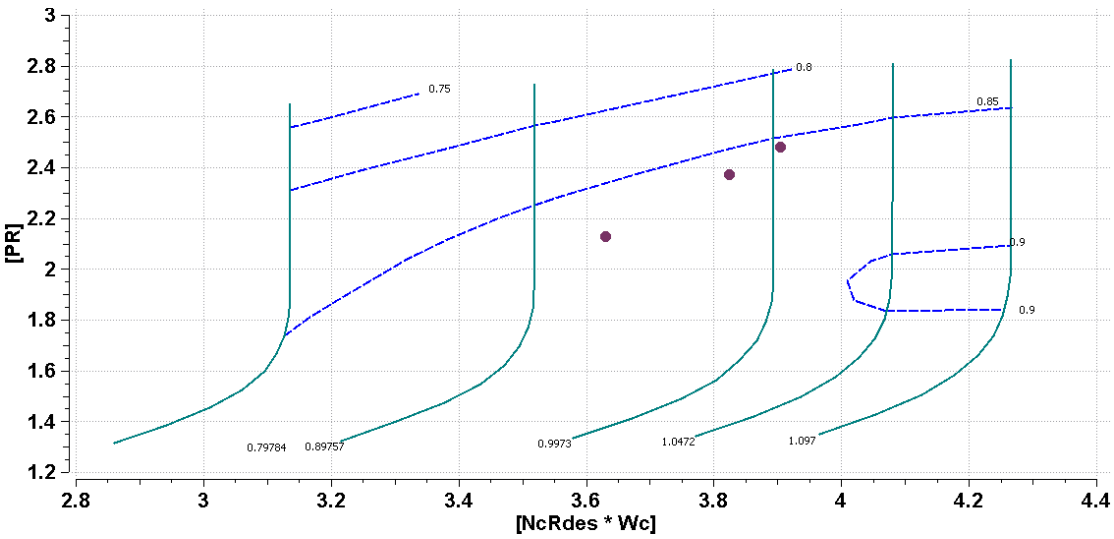
Τα αποτελέσματα από την απεικόνιση των σημείων λειτουργίας στο βελτιστοποιημένο μοντέλο παρουσιάζονται παρακάτω στους χάρτες των συνιστωσών.



Σχήμα 4.2: χάρτης συμπιεστή



Σχήμα 4.3: χάρτης στροβίλου αεριογόνου



Σχήμα 4.4: χάρτης στροβίλου ισχύος

Στον πίνακα 4.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από το PROOSIS για τα τρία σημεία λειτουργίας.

Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα PROOSIS για τα υπό μελέτη σημεία λειτουργίας

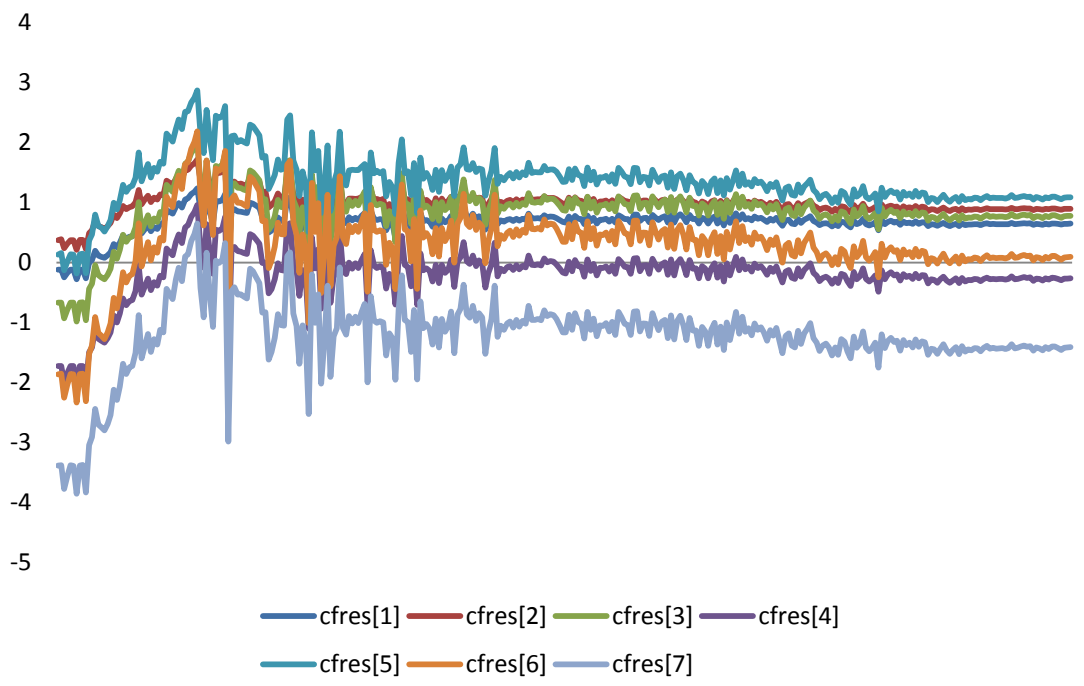
	Name	1	2	3
1	#Calculation id	steady-1	steady-2	steady-3
2	#Status	STEADY_OK	STEADY_OK	STEADY_OK
3	#ESI	0	0	0
4	CmpH.Nmech (rpm)	25400	24881.3204	23753.9674
5	Tt5 (K)	849.392488	827.058023	782.736042
6	eShP.Me_in.Nmech (rpm)	6265.35	6033.3	5502.9
7	PWSD (W)	1071230	969208.779	743431.201
8	Tt4 (K)	1274.13034	1234.36627	1148.45445
9	WF (kg/sec)	0.10029	0.09261	0.07686

Οι νέες αποκλίσεις από τα δεδομένα του δοκιμαστηρίου εμφανίζονται στον πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2: Αποκλίσεις δεδομένων μοντέλου – δοκιμαστηρίου μετά τη βελτιστοποίηση

	take off[DP]	max cont	75%
Δpower[%]	0.000	0.196	1.041
ΔNI[%]	0.000	-1.053	-1.558
ΔNII[%]	0.000	0.000	0.000
ΔEGT[%]	0.740	-0.011	-0.813
ΔWF[%]	0.000	0.000	0.000

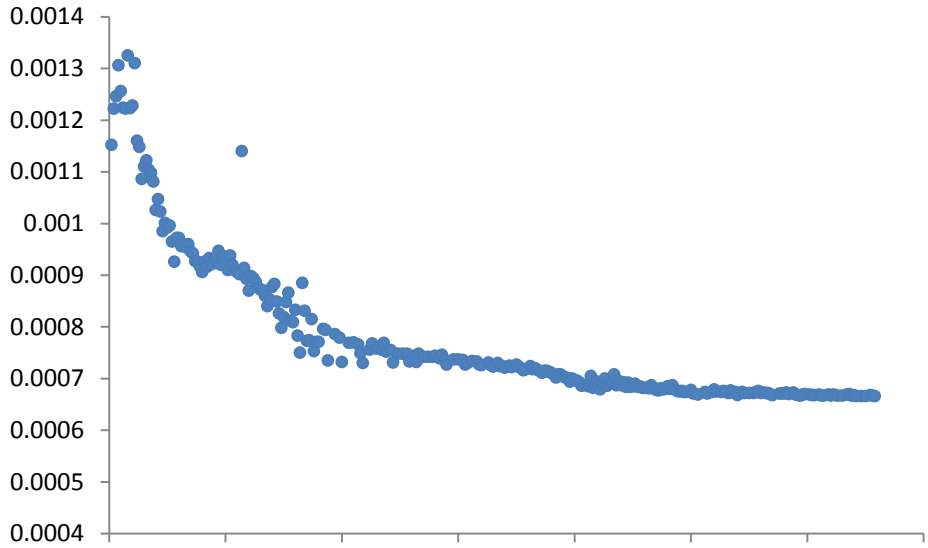
Προκειμένου να εξετασθεί η λειτουργία της βελτιστοποίησης κρίνεται σκόπιμη η παρουσίαση του σχήματος 4.5 που δείχνει την τιμή των υπολοίπων (residuals) σε συνάρτηση με την πρόοδο της βελτιστοποίησης.



Σχήμα 4.5: Απεικόνιση των υπολοίπων (residuals) κατά τη βελτιστοποίηση

όπου, cfres[1,3,6] αναφέρονται στην θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων,
cfres[2,5] αναφέρονται στην αποδιδόμενη ισχύ,
cfres[4,7] αναφέρονται στις στροφές της αεριογόνου.

Η ελαχιστοποίηση του κόστους με την πρόοδο των επαναλήψεων παρουσιάζεται στο σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.6: Τιμή της συνάρτησης κόστους κατά τη simplex

4.2 Σύγκριση των αποτελεσμάτων πριν και μετά τη βελτιστοποίηση

Η μεταβολή της συνάρτησης κόστους CF πριν και μετά τη βελτιστοποίηση παρουσιάζεται στον πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3: Τιμές της συνάρτησης κόστους πριν και μετά τη βελτιστοποίηση

CF	0.001152
CFopt	0.000638

Μετά τη βελτιστοποίηση η συνάρτηση κόστους μειώνεται περίπου στο μισό, με νέα μέγιστη απόκλιση το 1.558% του σημείου λειτουργίας “75% max”. Φαίνεται ότι η απόκλιση των στροφών της αεριογόνου (NI) δεν μεταβάλλεται ιδιαίτερα πριν και μετά τη βελτιστοποίηση. Αντιθέτως, η απόκλιση της ισχύος και της θερμοκρασίας εξόδου των καυσαερίων μειώνεται.

Στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται προσπάθεια ακόμη καλύτερης προσέγγισης των επιθυμητών τιμών με περαιτέρω βελτίωση του μοντέλου.

5 Βελτιωμένο μοντέλο του T53

Στο παρόν κεφάλαιο το αρχικό μοντέλο του κινητήρα βελτιώνεται ούτως ώστε να ανταποκρίνεται καλύτερα στην πραγματική λειτουργία του κινητήρα. Η βελτίωση συνίσταται στην αντικατάσταση της μίας συνιστώσας συμπιεστή από δύο νέες και στην αλλαγή χαρτών όλων των συνιστωσών. Μετά την εφαρμογή των αλλαγών εφαρμόζεται διαδικασία υπολογισμών όμοια με αυτήν του κεφαλαίου 4 για την ανάλυση εντός και εκτός του σημείου σχεδίασης. Τέλος, γίνεται εκ νέου βελτιστοποίηση των νέων παραμέτρων και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αυτά του προηγούμενου μοντέλου.

5.1 Εκτίμηση των επιμέρους λόγων πίεσης του συμπιεστή

Στην παράγραφο αυτή περιγράφεται η διαδικασία αντικατάστασης της συνιστώσας του συμπιεστή με δύο νέες συνιστώσες ώστε να προκύψουν δύο χάρτες, ένας για τον 5βάθμιο αξονικό συμπιεστή και ένας για τον ακτινικό. Απαραίτητος για το σκοπό αυτό είναι ένας υπολογισμός για τους επιμέρους λόγους πίεσης.

<u>Ακτινική βαθμίδα συμπιεστή</u>

Για την εκτίμηση του λόγου πίεσης της ακτινικής βαθμίδας του συμπιεστή λαμβάνονται υπόψη οι παρακάτω σχέσεις:

- Απλοποιημένη εμπειρική σχέση Stanitz:

$$\sigma = 1 - \frac{0.63\pi}{n}$$

όπου n ο αριθμός των πτερυγίων του ρότορα της βαθμίδας (36 πτερύγια).

- Σχέση υπολογισμού περιφερειακής ταχύτητας:

$$U = 2\pi R \frac{RPM}{60}$$

- Μεταβολή θερμοκρασίας στη βαθμίδα:

$$\Delta T = \frac{\Psi \cdot \sigma \cdot U^2}{C_p}$$

όπου λαμβάνεται Ψ=1.04

- Λόγος πίεσης στη βαθμίδα:

$$\frac{P_{t2}}{P_{t1}} = \left(1 + \frac{\eta_{C,is}\Delta T}{T_{t1}}\right)^{\gamma/\gamma-1}$$

όπου λαμβάνεται $\eta_{C,is} = 0.8$

Κάνοντας του παραπάνω υπολογισμούς υπολογίζουμε τα μεγέθη του πίνακα 5.1:

Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα υπολογισμών για τον ακτινικό συμπιεστή

σ	0.945022
Rtip[m]	0.164
U[m/s]	436.2206
ΔT[K]	186.182
Πc,radial	3.295547

<u>Αξονικές βαθμίδες συμπιεστή</u>

Για την εκτίμηση ενός λόγου πίεσης για κάθε μία από τις αξονικές βαθμίδες του συμπιεστή χρησιμοποιούνται οι παρακάτω σχέσεις:

- Περιφερειακή ταχύτητα στο μέσο της ακτίνας:

$$U_m = 2\pi R_m \frac{RPM}{60}$$

- Αξονική ταχύτητα:

$$V_A = \frac{\dot{m}}{\rho A}$$

- Γωνία σχετικής ταχύτητας εισόδου στη βαθμίδα ως προς τον άξονα της μηχανής:

$$\tan\beta_1 = \frac{U_m}{V_\alpha}$$

- Σχετική ταχύτητα στην είσοδο της βαθμίδας:

$$W_1 = \frac{V_\alpha}{\cos\beta_1}$$

- Μέγιστο όριο επιβράδυνσης από κριτήριο de Haller:

$$W_2 = 0.72 \cdot W_1$$

- Οριακή (μέγιστη) μεταβολή θερμοκρασίας ανά βαθμίδα:

$$\Delta T = \frac{U_m V_a(\tan\beta_1 - \tan\beta_2)}{C_p}$$

- Οριακός (μέγιστος) λόγος πίεσης ανά βαθμίδα:

$$\frac{P_{t2}}{P_{t1}} = \left(1 + \frac{\eta_{C,is}\Delta T}{T_{t1}}\right)^{\gamma/\gamma-1}$$

όπου λαμβάνεται $\eta_{C,is} = 0.9$

Κάνοντας τους υπολογισμούς των παραπάνω σχέσεων προκύπτουν τα αποτελέσματα του πίνακα 5.2:

Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα υπολογισμών στον αξονικό συμπιεστή

stage	1	2	3	4	5
Rtip[cm]	2.1	2.05	2.05	2.05	2.05
Rhub[cm]	1.2	1.25	1.35	1.4	1.45
Rtip[m]	0.13062	0.12751	0.12751	0.12751	0.12751
Rhub[m]	0.07464	0.07775	0.08397	0.08708	0.09019
A[m^2]	0.036098	0.032087	0.028927	0.027256	0.025524
T[K]	285.15	300.6012	316.0908	332.7988	349.68
Pt[bar]	1.00914	1.192144	1.397127	1.643918	1.921922
ρ[m^3/kg]	1.233094	1.381835	1.540076	1.721141	1.915063
Um[m/s]	272.9837	272.9837	281.2559	285.392	289.5281
Va[m/s]	115.9222	116.3748	115.8244	109.9943	105.5642
β1(rad)	1.169223	1.167819	1.180149	1.202926	1.221168
W1[m/s]	296.5772	296.7544	304.1713	305.8551	308.1726
W2[m/s]	213.5356	213.6632	219.0033	220.2157	221.8843
β2(rad)	0.996945	0.994807	1.013527	1.047793	1.074966
ΔT[K]dehaller	25.4512	25.48959	26.70803	26.88115	27.1988
ΔT[K]	15.4512	15.48959	16.70803	16.88115	17.1988
Πc,stage	1.181347	1.171944	1.176642	1.169111	1.163694
Πc,axial	2.216273				

Στον πίνακα 5.3 παρουσιάζονται οι τελικές τιμές των επί μέρους λόγων πίεσης ως αποτέλεσμα των παραπάνω υπολογισμών.

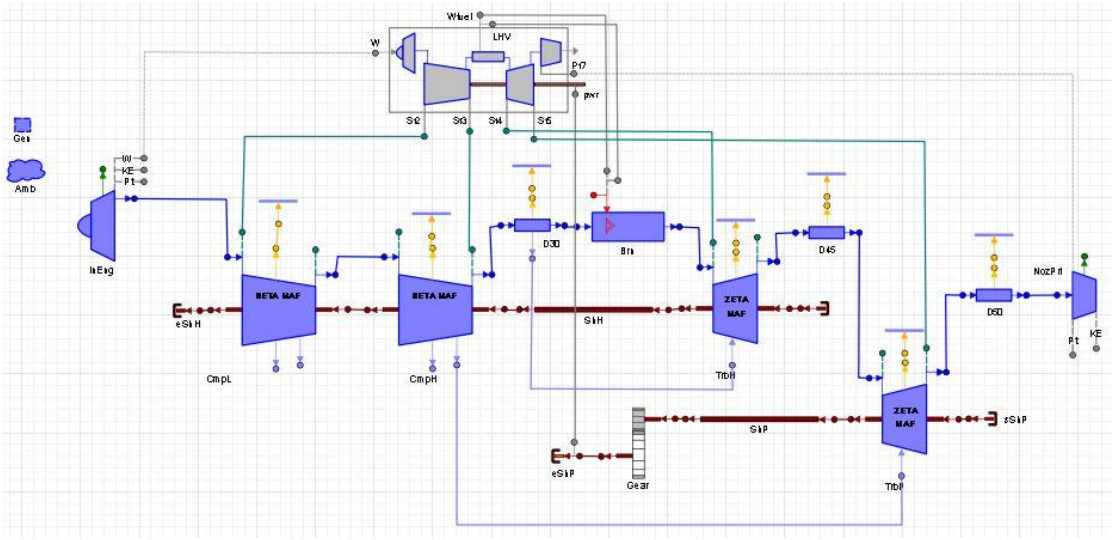
Πίνακας 5.3: Υπολογισθέντες επί μέρους λόγοι πίεσης του συμπιεστή

	Π_C
5βάθμιος αξονικός	2.2
1βάθμιος ακτινικός	3.3

Οι παραπάνω εκτιμήσεις χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για τη μοντελοποίηση του συμπιεστή με χρήση δύο συνιστωσών, μίας για τις αξονικές βαθμίδες και μίας για την ακτινική βαθμίδα.

5.2 Σχηματικό διάγραμμα του βελτιωμένου μοντέλου

Το νέο σχηματικό διάγραμμα προκύπτει από το ήδη υπάρχον με την προσθήκη μιας ακόμη συνιστώσας συμπιεστή. Αφού γίνουν οι κατάλληλες συνδέσεις των συνιστωσών και της απομάστευσης από τον συμπιεστή προκύπτει το σχηματικό διάγραμμα της εικόνας 5.1.



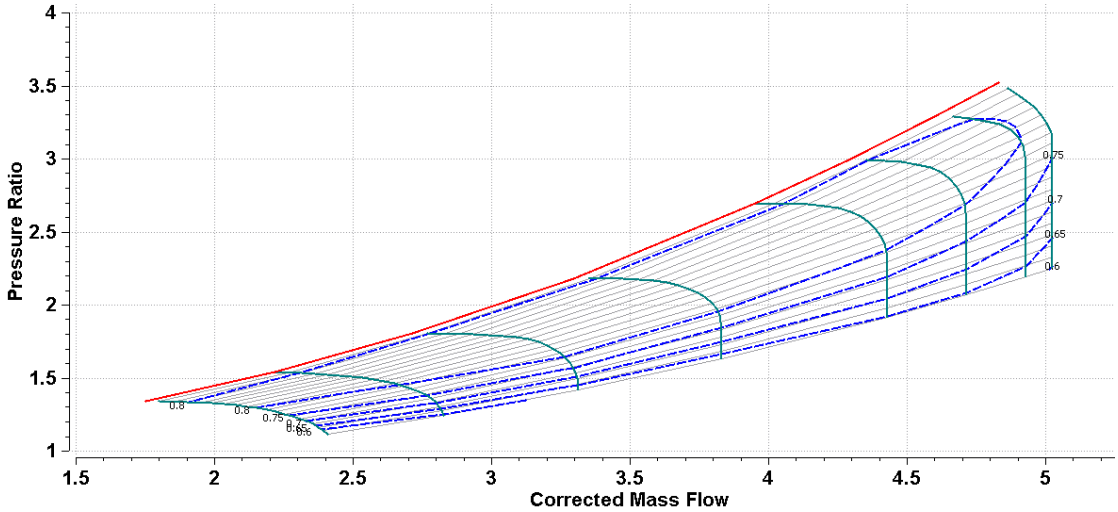
Σχήμα 5.1: Σχηματικό διάγραμμα του μοντέλου με δύο συμπιεστές.

5.3 Επιλογή νέων χαρτών συνιστωσών

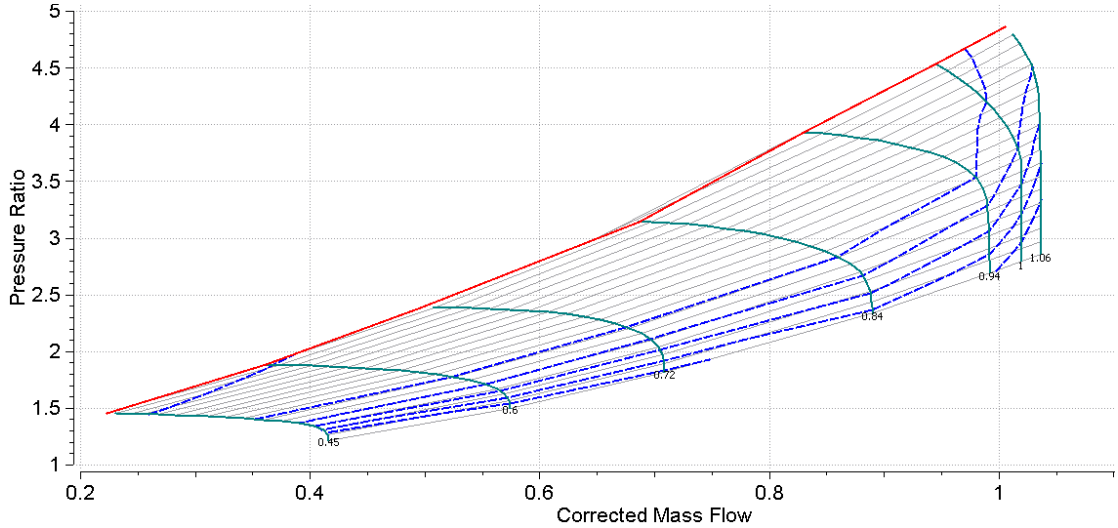
Η επιλογή του χάρτη για κάθε συνιστώσα είναι σημαντική καθώς ο χάρτης θα καθορίσει τη λειτουργία της συνιστώσας για τα εκτός σχεδίασης σημεία. Το PROOSIS χρησιμοποιεί προεπιλεγμένους χάρτες για τις συνιστώσες, οι οποίοι χρήζουν

αντικατάστασης προκειμένου οι νέοι χάρτες να ανταποκρίνονται καλύτερα στη φυσική συμπεριφορά των συνιστωσών. Λαμβάνοντας υπόψη τη συμπιεστότητα των χαρτών, τους λόγους πίεσης στους οποίους λειτουργούν οι συνιστώσες και το ρόλο της κάθε μιας στη μηχανή, επιλέγονται οι κατάλληλοι χάρτες από τη βιβλιοθήκη χαρτών του εργαστηρίου.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι χάρτες που χρησιμοποιούνται για τις συνιστώσες του νέου μοντέλου ως έχουν πριν τη σχεδίαση των παραμέτρων κλίμακας. Για τον συμπιεστή που πλέον μοντελοποιείται σε αξονικό και ακτινικό χρησιμοποιούνται δύο χάρτες, ένας κατάλληλος για αξονικό συμπιεστή αντίστοιχου λόγου πίεσης και ένας κατάλληλος για ακτινικό συμπιεστή. Οι χάρτες παρουσιάζονται στην αρχική τους μορφή (unscaled) στα σχήματα 5.2 και 5.3.

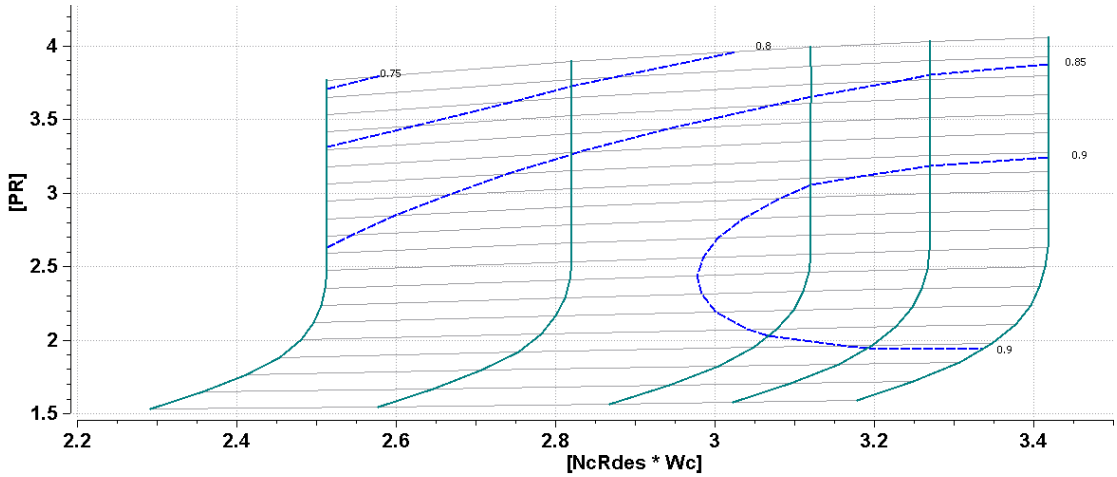


Σχήμα 5.2: Χάρτης αξονικού συμπιεστή (unscaled)



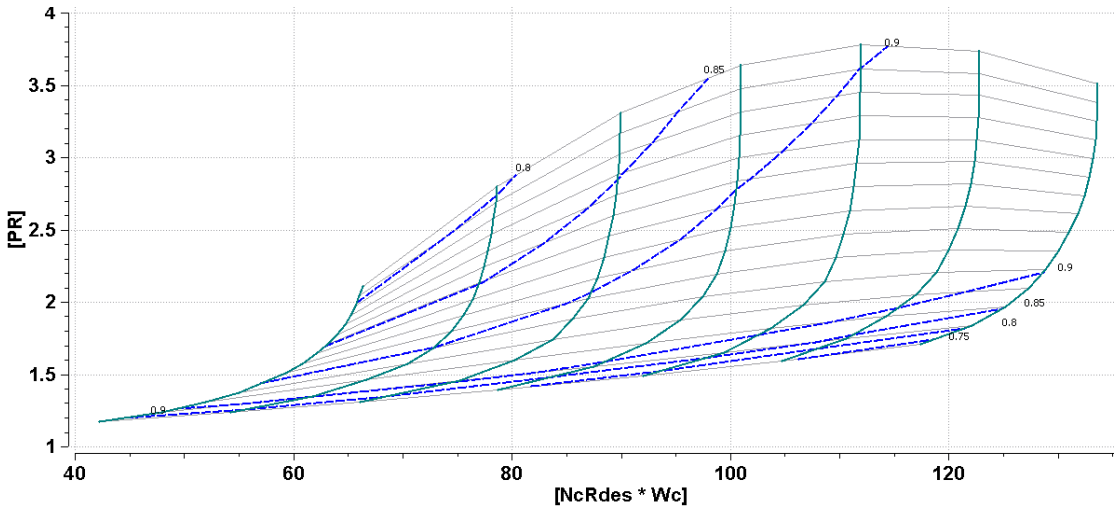
Σχήμα 5.3: Χάρτης ακτινικού συμπιεστή (unscaled)

Για το στρόβιλο της αεριογόνου διατηρείται ο αρχικός χάρτης καθώς η απεικόνιση των σημείων λειτουργίας της συγκεντρώνεται σε περιορισμένη περιοχή του χάρτη και κρίνεται ικανοποιητική. Ο χάρτης του στροβίλου της αεριογόνου παρουσιάζεται ασκαλάριστος στο σχήμα 5.4.



Σχήμα 5.4: Χάρτης στροβίλου αεριογόνου (unscaled)

Για το στρόβιλο ισχύος χρησιμοποιείται χάρτης κατάλληλος για αεριοστρόβιλους μηχανικής ισχύος (turbo-shaft). Ο χάρτης παρουσιάζεται στην αρχική του μορφή στο σχήμα 5.5.



Σχήμα 5.5: Χάρτης στροβίλου ισχύος (unscaled)

5.4 Ανάλυση λειτουργίας στο σημείο σχεδίασης

Η ακολουθούμενη διαδικασία είναι όμοια με τη διαδικασία που ακολουθείται στο κεφάλαιο 4. Δημιουργείται ένα νέο design partition και στη συνέχεια ένα experiment από το οποίο προκύπτουν οι συντελεστές κλίμακας χαρτών που θα χρησιμοποιηθούν για

τον υπολογισμό του νέου σημείου σχεδίασης. Στη συνέχεια τα εκτός σχεδίασης σημεία υπολογίζονται από ένα experiment σε νέο default partition.

Δημιουργία design partition και experiment

Καθώς το design partition δεν περιλαμβάνει τη θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων στις οριακές μεταβλητές, αλλά η τιμή της υπάρχει από μετρήσεις επιχειρείται η προσέγγισή της με προσαρμογή του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης του στροβίλου ισχύος. Η προσαρμογή γίνεται με κατάλληλη υπορουτίνα που έχει εισαχθεί στον κώδικα μεταβάλει τον βαθμό απόδοσης του στροβίλου ισχύος μέχρι να προσεγγιστούν με ακρίβεια 10^{-5} οι μετρήσεις του δοκιμαστηρίου για το σημείο σχεδίασης.

Οι τιμές των ισεντροπικών βαθμών απόδοσης πριν και μετά την προσαρμογή τους απεικονίζονται στον πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.4: Προσαρμογή των ισεντροπικών βαθμών απόδοσης

	αρχική επιλογή		αποτελέσματα
CmpL	0.83	CmpL	0.83
CmpH	0.84	CmpH	0.84
TrbH	0.85	TrbH	0.85
TrbP	**0.86**	TrbP	**0.864**
EGT[K]	**848.2**	EGT[K]	**843.15**
NI[RPM]	25400	NI[RPM]	245400
NII[RPM]	6265.35	NII[RPM]	6265.35
PWSD[W]	1071230	PWSD[W]	1071230
WF[kg/s]	0.10029	WF[kg/s]	0.10029

Παρατηρείται ότι επιβάλλεται μικρή αύξηση στην αρχική τιμή του βαθμού απόδοσης του στροβίλου ισχύος ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων.

Μετά το design experiment οι συντελεστές κλίμακας χαρτών λαμβάνουν τις τιμές του πίνακα 5.5.

Πίνακας 5.5: Τιμές συντελεστών κλίμακας χαρτών μετά το design partition experiment

CmpH.NcDes (rpm)	21654.65
CmpH.s_NcRdes_in (-)	1.052632
CmpH.s_mapEff_in (-)	1.011203
CmpH.s_mapPR_in (-)	0.587261
CmpH.s_mapWc_in (-)	2.503781
CmpL.NcDes (rpm)	25533.26

CmpL.s_NcRdes_in (-)	1.111111
CmpL.s_mapEff_in (-)	0.998403
CmpL.s_mapPR_in (-)	1.087959
CmpL.s_mapWc_in (-)	1.213378
TrbH.NcDes (rpm)	12103.58
TrbH.s_mapEff_in (-)	0.934585
TrbH.s_mapNc_in (-)	1.000000
TrbH.s_mapPR_in (-)	0.981038
TrbH.s_mapWc_in (-)	0.508196
TrbP.NcDes (rpm)	10710.19
TrbP.s_mapEff_in (-)	0.947064
TrbP.s_mapNc_in (-)	0.909091
TrbP.s_mapPR_in (-)	0.597731
TrbP.s_mapWc_in (-)	0.037097

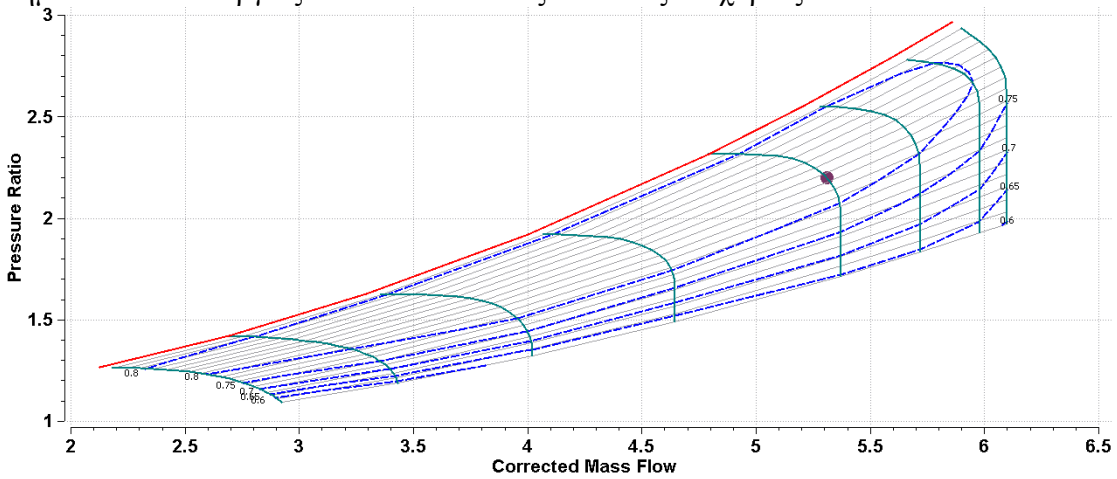
Δημιουργία default partition και experiment

Μετά το experiment του design partition δημιουργείται ένα νέο default partition όπως περιγράφηκε στο κεφαλαίο 4. Στο νέο αυτό partition εκτελείται ένα νέο default experiment το οποίο λαμβάνει ως τιμές κλίμακας χαρτών αυτές που προέκυψαν από το experiment του design partition. Έτσι προκύπτει μια αρχική τοποθέτηση του σημείου λειτουργίας πάνω στους χάρτες. Κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι η επιλογή των αρχικών παραμέτρων σχεδίασης κατά το design experiment έγινε με διαδοχικές επαναλήψεις της παραπάνω διαδικασίας με σκοπό την ορθή απεικόνιση των γραμμών λειτουργίας πάνω στους χάρτες. Ως αποτέλεσμα των δοκιμών αυτών επιλέχτηκαν οι τιμές του πίνακα 5.6.

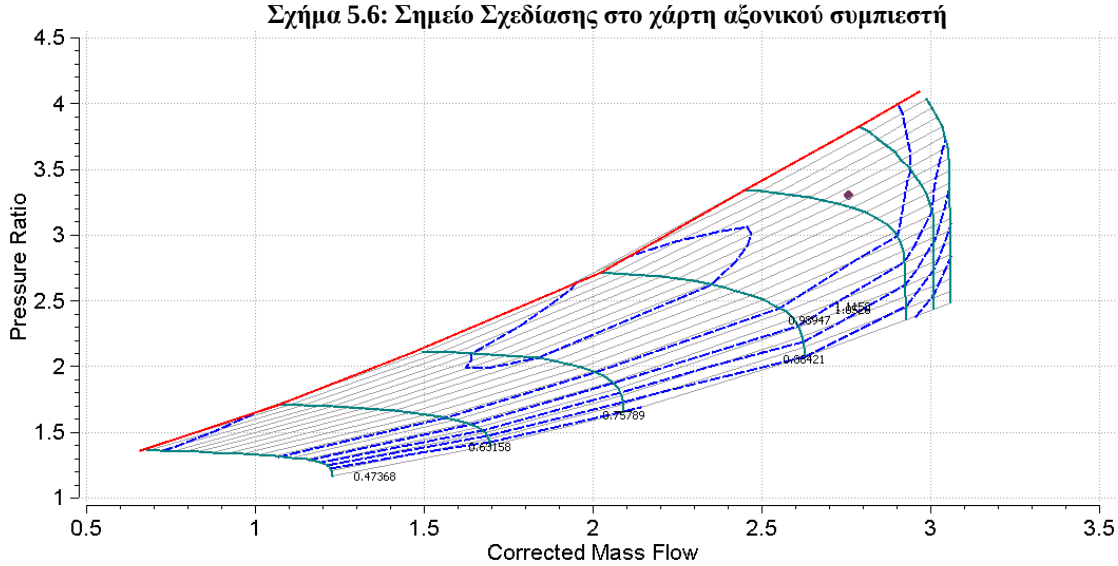
Πίνακας 5.6: Επιλογή τιμών των παραμέτρων σχεδίασης χαρτών

CmpL.BETA	0.55
CmpL.NcRdes	1
CmpL.NcRdesMap	0.9
CmpH.BETA	0.7
CmpH.NcRdes	1
CmpH.NcRdesMap	0.95
TrbH.NcRdes	1
TrbH.NcRdesMap	1
TrbH.ZETA	0.5
TrbP.NcRdes	1
TrbP.NcRdesMap	1.05
TrbP.ZETA	0.75

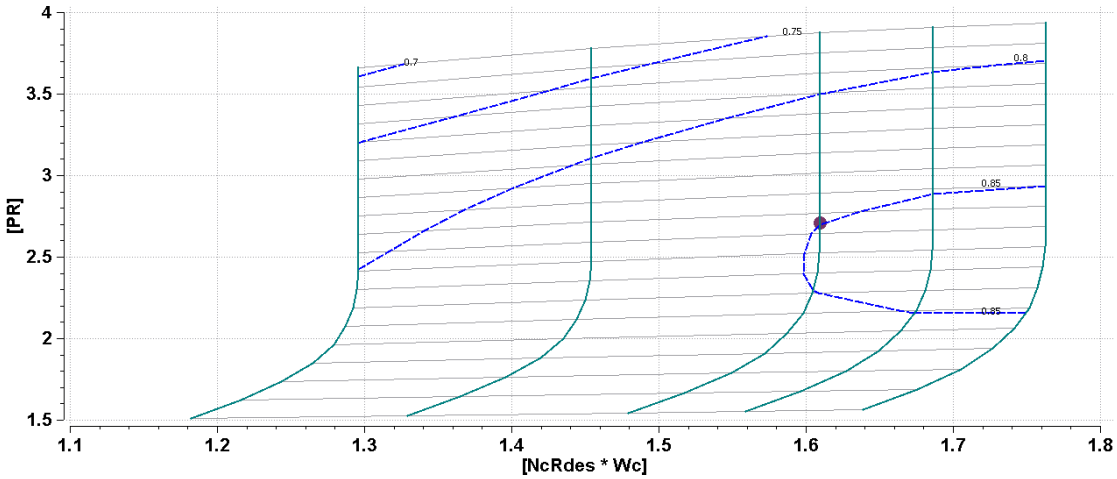
Οι τιμές του πίνακα 5.6 επανεισάγονται στο design experiment και μετά την τελευταία εκτέλεση του default experiment προκύπτει η παρακάτω απεικόνιση του σημείου λειτουργίας πάνω στους νέους χάρτες των συνιστωσών.



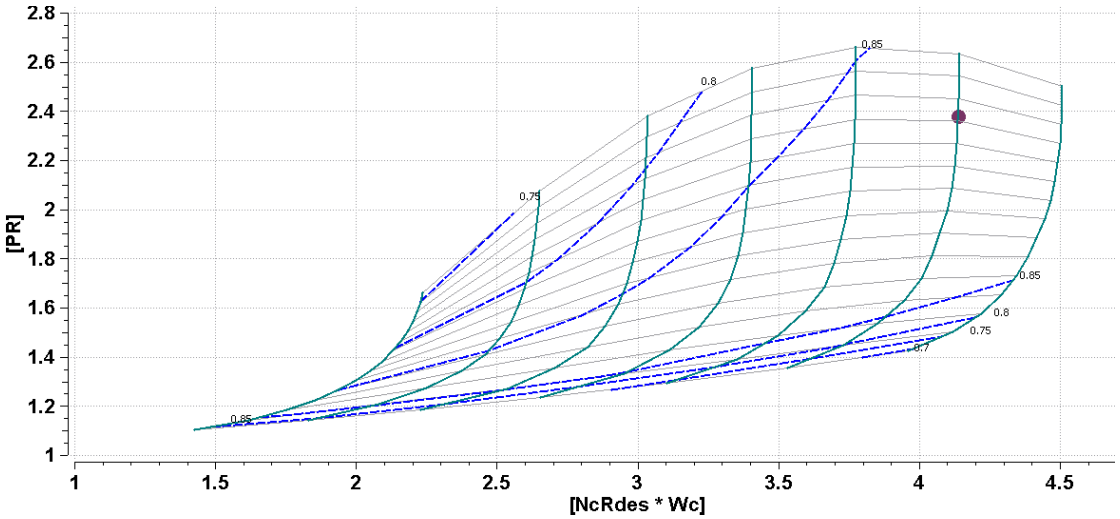
Σχήμα 5.6: Σημείο Σχεδίασης στο χάρτη αξονικού συμπιεστή



Σχήμα 5.7: Σημείο Σχεδίασης στο χάρτη ακτινικής βαθμίδας συμπιεστή



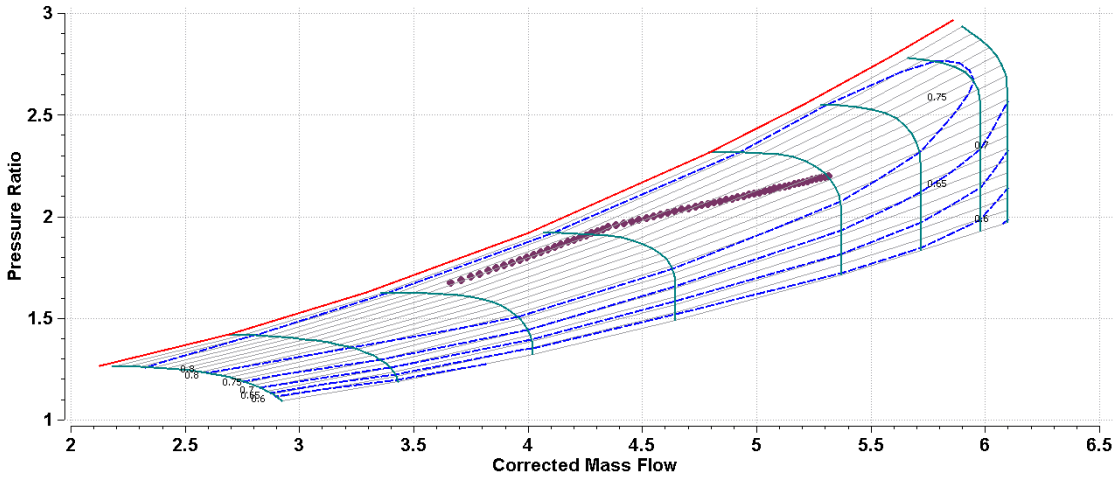
Σχήμα 5.8: Σημείο Σχεδίασης στο χάρτη στροβίλου αεριογόνου



Σχήμα 5.9: Σημείο Σχεδίασης στο χάρτη στροβίλου ισχύος

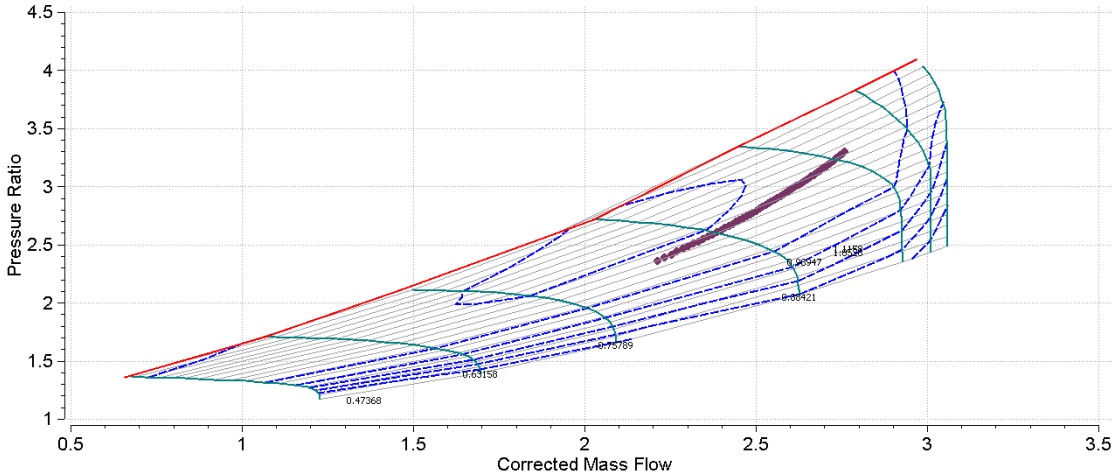
5.5 Ανάλυση λειτουργίας εκτός σημείου σχεδίασης

Η εκτός σχεδίασης λειτουργία προσομοιώνεται με το πείραμα της προηγούμενης παραγράφου, εισάγοντας τις τιμές των αντίστοιχων boundary variables (παροχή καυσίμου WF και στροφές λειτουργίας NII) για διάφορα σημεία λειτουργίας. Καθώς το μοντέλο προορίζεται για χρήση σε συνεργασία με γεννήτρια σταθερών στροφών, υπολογίζεται μια γραμμή λειτουργίας, για την οποία διατηρούνται σταθερές οι στροφές του στροβίλου ισχύος (στην τιμή του σημείου λειτουργίας «max continuous») και μεταβάλλεται η παροχή του καυσίμου από το 100% της μέγιστης τιμής της μέχρι το 40% αυτής. Έτσι προκύπτουν οι παρακάτω χάρτες γραμμών λειτουργίας για κάθε μια από τις συνιστώσες που απεικονίζονται στα σχήματα 5.10-5.13.

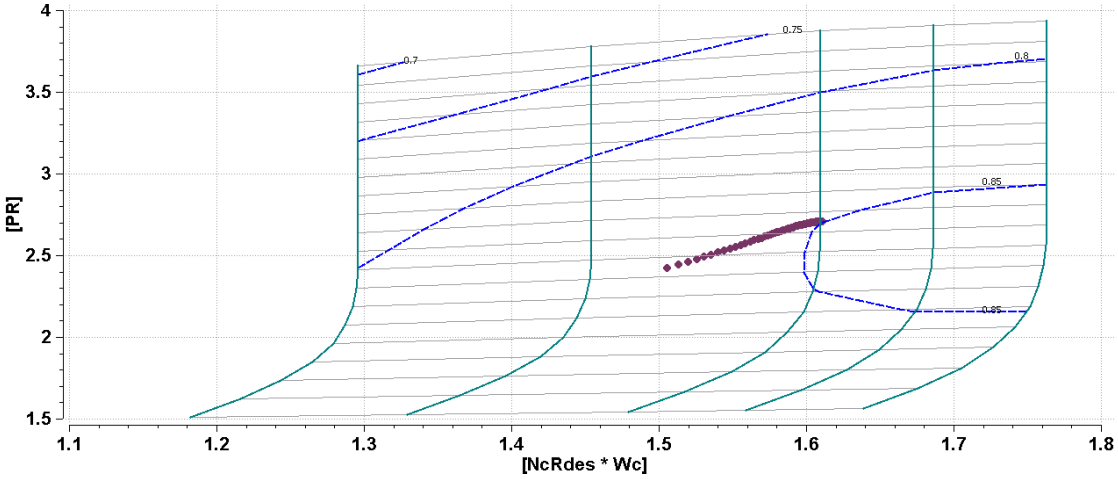


Σχήμα 5.10: Γραμμή λειτουργίας στο χάρτη του αξονικού συμπιεστή

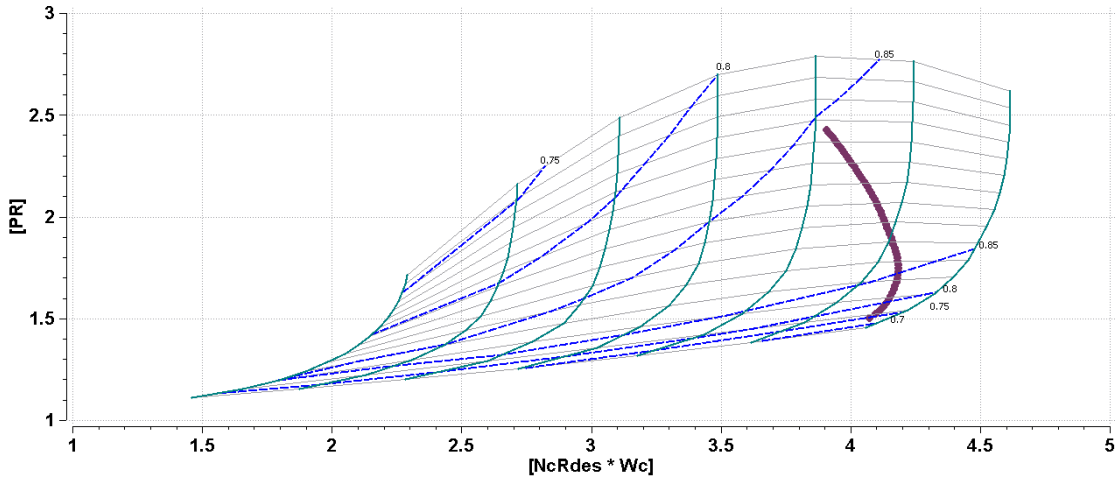
Στο σχήμα 5.10 παρατηρείται η αλλαγή της κλίσης στη γραμμή λειτουργίας του αξονικού συμπιεστή, η οποία οφείλεται στη λειτουργία της απομάστευσης ενδιαμέσως των βαθμίδων του συμπιεστή σύμφωνα με το "bleed law" που ορίσθηκε στο κεφάλαιο 3.



Σχήμα 5.11: Γραμμή λειτουργίας στο χάρτη του ακτινικού συμπιεστή



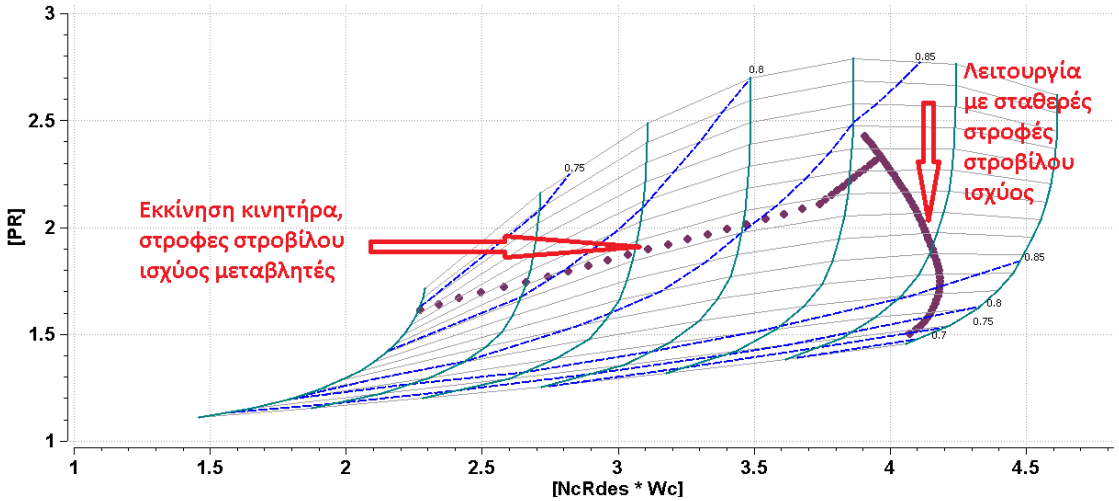
Σχήμα 5.12: Γραμμή λειτουργίας στο χάρτη του στροβίλου της αεριογόνου



Σχήμα 5.13: Γραμμή λειτουργίας στο χάρτη του στροβίλου ισχύος

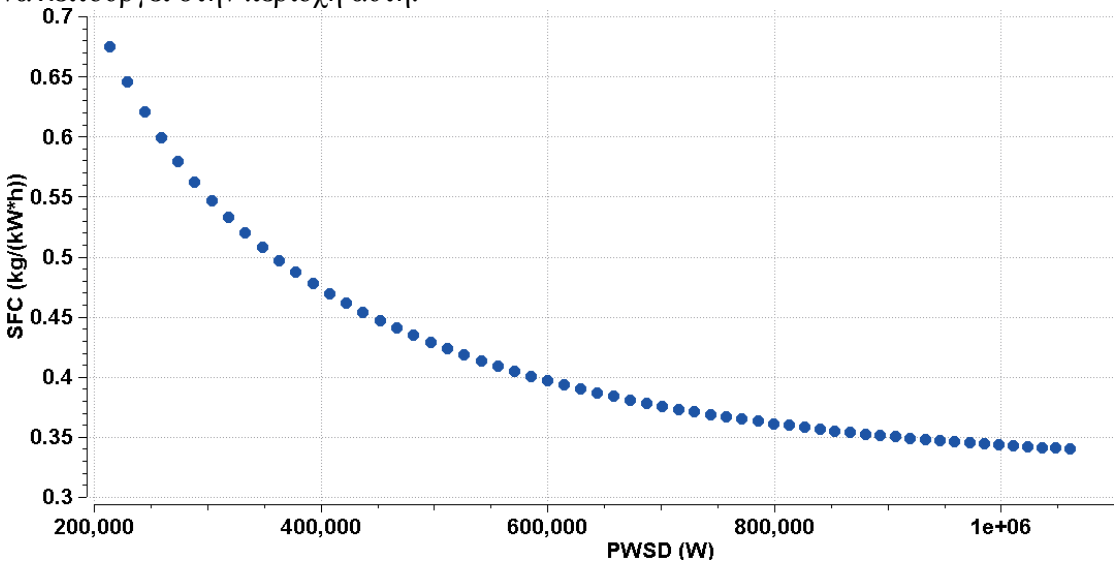
Παρατηρείται ότι η λειτουργία του στροβίλου ισχύος καθίσταται προβληματική σε χαμηλά φορτία (για παροχή καυσίμου μικρότερη του 40%max). Συνεπώς προκύπτει το πρόβλημα εκκίνησης της μηχανής, το οποίο οφείλεται στο ότι η μηχανή λειτουργεί με σταθερές στροφές στροβίλου ισχύος.

Το πρόβλημα της εκκίνησης επιλύεται με εκκίνηση της μηχανής με αποσυνδεδεμένη τη γεννήτρια από το δίκτυο (μέχρι η παροχή καυσίμου να λάβει την τιμή του σημείου 'maximum continuous") και στη συνέχεια σύνδεσή της με το δίκτυο και διατήρηση σταθερών στροφών. Εφαρμόζοντας τα παραπάνω η λειτουργία του στροβίλου ισχύος κατά την εκκίνηση θα έχει μορφή του σχήματος 5.14, όπου είναι εμφανής η αλλαγή της γραμμής λειτουργίας όταν στη μηχανή συνδέεται η γεννήτρια.



Σχήμα 5.14: Γραμμή λειτουργίας πριν και μετά τη σύνδεση του κινητήρα με τη γεννήτρια

Στο σχήμα 5.15 παρουσιάζεται η μεταβολή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου με την αποδιδόμενη ισχύ. Φαίνεται ότι η μηχανή παρουσιάζει χαμηλότερη ειδική κατανάλωση καυσίμου όσο πλησιάζει στο σημείο σχεδίασης και ως εκ τούτου συμφέρει να λειτουργεί στην περιοχή αυτή.



Σχήμα 5.15: Ειδική κατανάλωση καυσίμου (sfc) συναρτήσει της ισχύος (PWSD)

5.6 Αποκλίσεις από τα δεδομένα του δοκιμαστηρίου

Μετά την εκτέλεση του default experiment για τα τρία γνωστά σημεία λαμβάνονται τα αποτελέσματα του πίνακα 5.7 και οι αντίστοιχες επί τοις εκατό αποκλίσεις του πίνακα 5.8.

Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα βελτιωμένου μοντέλου για τα υπό μελέτη σημεία

#Calculation id	steady-1	steady-2	steady-3
#Status	STEADY_OK	STEADY_OK	STEADY_OK
#ESI	0	0	0
CmpH.Nmech (rpm)	25400	24961.9508	23986.2612
PWSD (W)	1071230	963407.079	740372.699
Tt4 (K)	1249.96029	1209.7291	1125.90898
Tt5 (K)	843.149763	821.185325	777.30302
WF (kg/sec)	0.10029	0.09261	0.07686
eShP.Me_in.Nmech (rpm)	6265.35	6033.3	5502.9

Πίνακας 5.8: Αποκλίσεις μεταξύ αποτελεσμάτων PROOSIS και δοκιμαστηρίου

	take off[DP]	max cont	75%
Δpower[%]	0.000	-0.403	0.626
ΔNI[%]	0.000	-0.732	-0.596
ΔNII[%]	0.000	0.000	0.000
ΔEGT[%]	0.000	-0.721	-1.501
ΔWF[%]	0.000	0.000	0.000

Η νέα συνάρτηση κόστους υπολογίζεται ίση με **CF=0.000422**, δηλαδή λίγο μικρότερη από τη συνάρτηση κόστους για το αρχικό μοντέλο μετά τη βελτιστοποίηση με τη μέθοδο simplex. Έτσι συμπεραίνεται ότι ο διαχωρισμός της συνιστώσας του συμπιεστή σε δύο και η αλλαγή χαρτών ήταν προς τη σωστή κατεύθυνση.

5.7 Βελτιστοποίηση παραμέτρων του βελτιωμένου μοντέλου

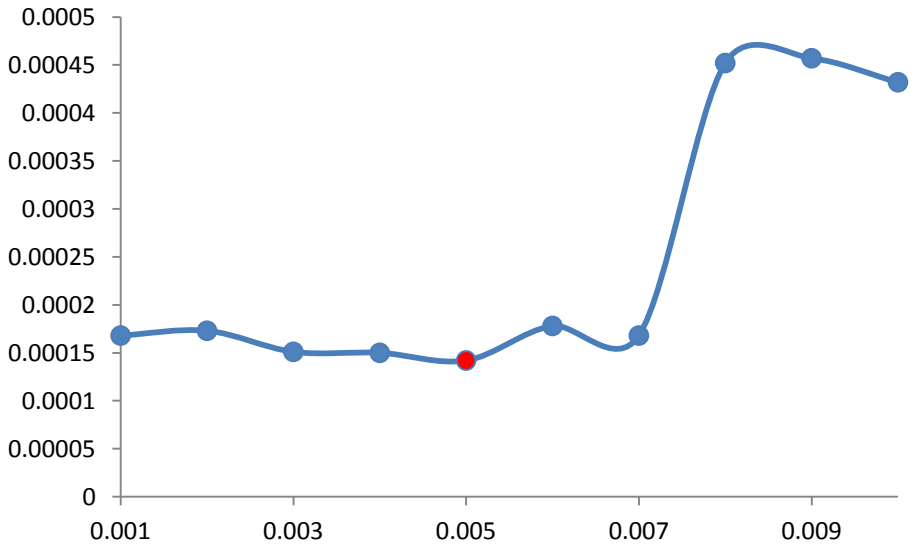
Η διαδικασία της βελτιστοποίησης είναι ίδια με την διαδικασία που ακολουθήθηκε στο πρώτο μοντέλο με τη διαφορά ότι υπάρχει μία επιπλέον συνιστώσα συμπιεστή. Έτσι βελτιστοποιούνται επιπλέον 5 παράμετροι λόγω της επιπλέον συνιστώσας.

Εκτελώντας το default experiment της βελτιστοποίησης η συνάρτηση κόστους υπολογίζεται CF=0.000168, μειωμένη περίπου στο μισό της τιμής πριν τη βελτιστοποίηση. Καθώς το μοντέλο αυτό είναι το τελικό, και επειδή το πεδίο σχεδίασης

(design space) είναι ανομοιόμορφο, κρίνεται σκόπιμο να γίνουν δοκιμές της simplex για διαφορετικά side lengths, ώστε ενδεχομένως να προκύψει κάποια καλύτερη λύση. Εφαρμόζοντας την simplex παραμετρικά για side length από 0.001 έως 0.01 με βήμα 0.001 προκύπτει ο πίνακας 5.9 και το σχήμα 5.16.

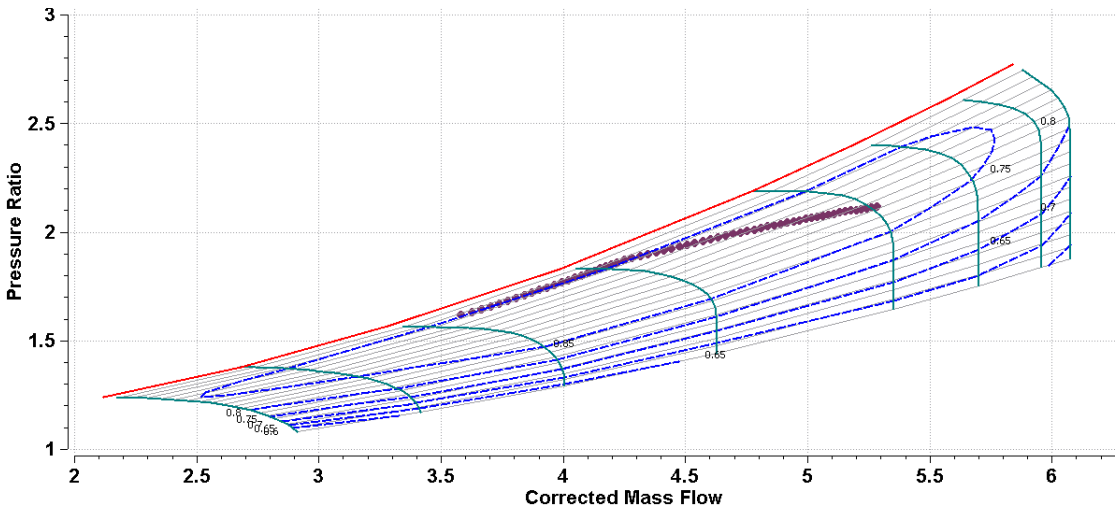
Πίνακας 5.9: Παραμετρική ανάλυση της συνάρτησης κόστους σε σχέση με το side length

side length	CF
0.001	0.000168
0.002	0.000173
0.003	0.000151
0.004	0.00015
0.005	**0.000142**
0.006	0.000178
0.007	0.000168
0.008	0.000452
0.009	0.000457
0.01	0.000432

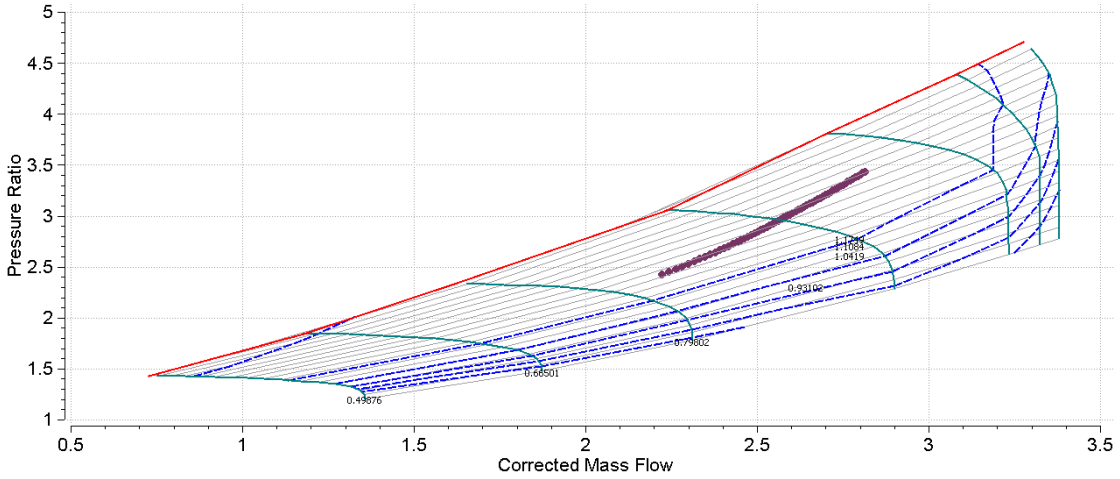


Σχήμα 5.16: Μεταβολή της CF συναρτήσει του side length.

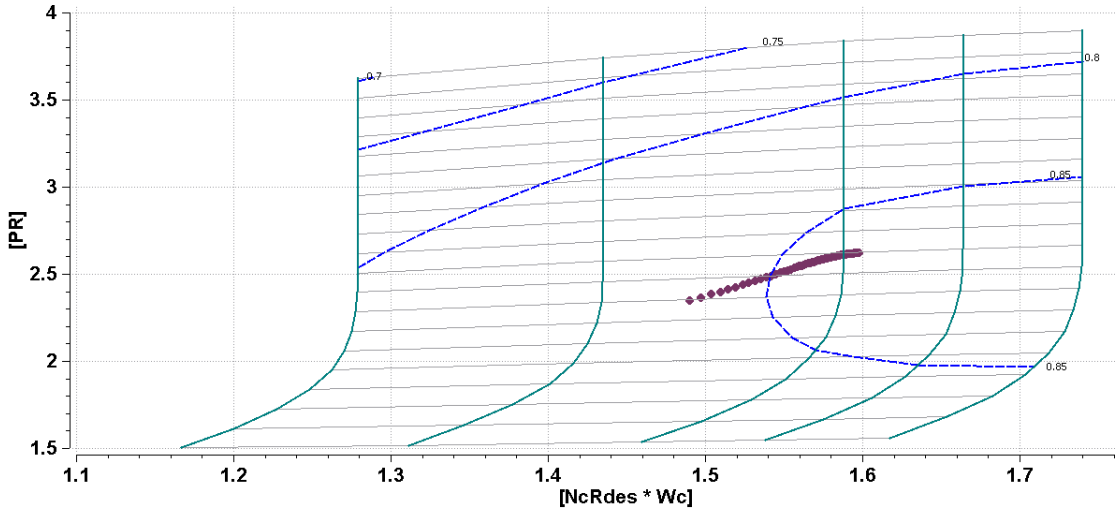
Για τιμή side length ίση με 0.005 έχουμε ελαχιστοποίηση της συνάρτησης κόστους. Έτσι προκύπτει η γραμμή λειτουργίας επί των χαρτών των συνιστωσών που παρουσιάζεται στα σχήματα 5.17-5.20.



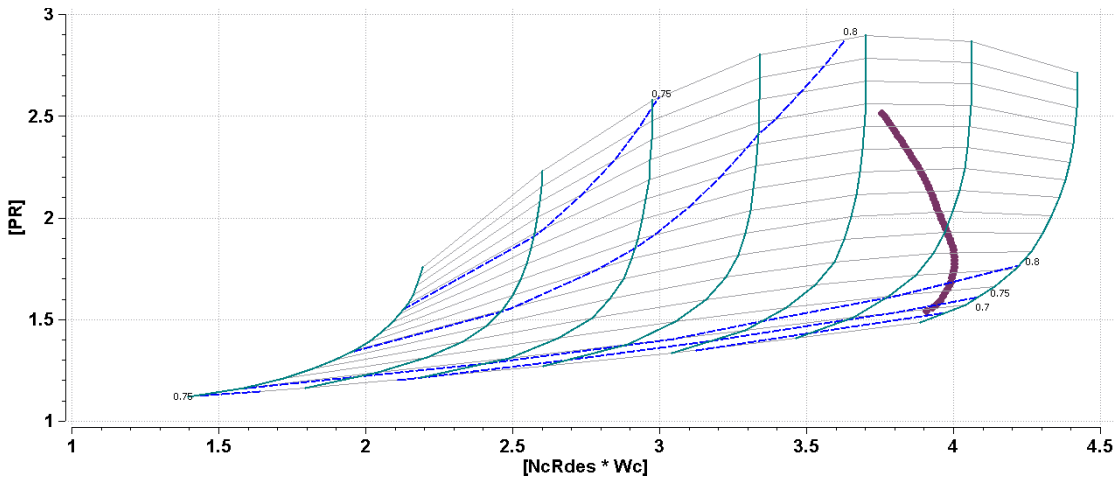
Σχήμα 5.17: Γραμμή λειτουργίας στο χάρτη του αξονικού συμπιεστή



Σχήμα 5.18: Γραμμή λειτουργίας στο χάρτη του ακτινικού συμπιεστή

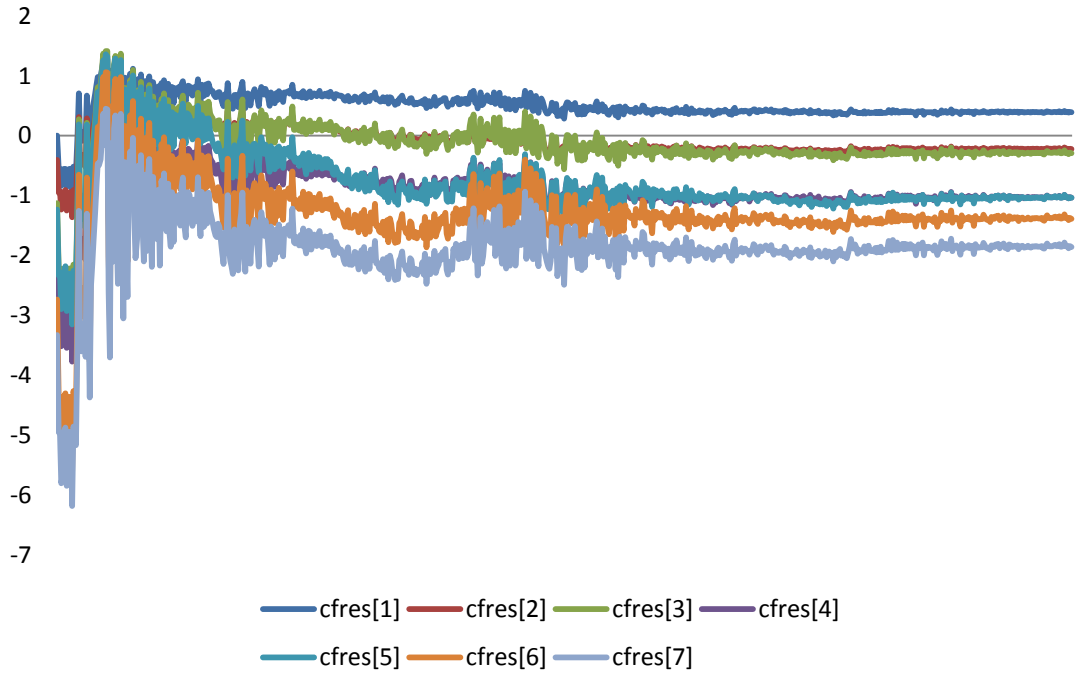


Σχήμα 5.19: Γραμμή λειτουργίας στο χάρτη του στροβίλου της αεριογόνου



Σχήμα 5.20: Γραμμή λειτουργίας στο χάρτη του στροβίλου ισχύος

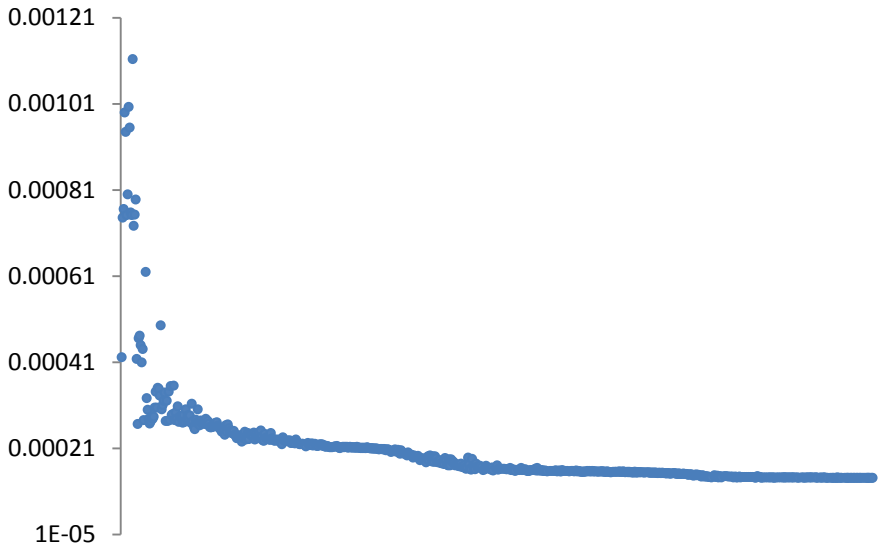
Η διακύμανση των υπολοίπων κατά τη διάρκεια της προόδου της simplex παρατίθεται στο σχήμα 5.21,



Σχήμα 5.21: Διακύμανση υπολοίπων (residuals) κατά την simplex

όπου, cfres[1,3,6] αναφέρονται στην θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων,
cfres[2,5] αναφέρονται στην αποδιδόμενη ισχύ,
cfres[4,7] αναφέρονται στις στροφές της αεριογόνου.

Η ελαχιστοποίηση του κόστους με την πρόοδο των επαναλήψεων παρουσιάζεται στο σχήμα 5.22.



Σχήμα 5.22: Ελαχιστοποίηση της συνάρτησης κόστους κατά τη simplex

Τα αποτελέσματα του PROOSIS για τα υπό μελέτη σημεία λειτουργίας μετά τη βελτιστοποίηση, καθώς επίσης και οι αποκλίσεις από τις μετρήσεις του δοκιμαστηρίου, παρουσιάζονται στους πίνακες 5.10 και 5.11 αντίστοιχα.

Πίνακας 5.10: Αποτελέσματα PROOSIS για τα υπό μελέτη σημεία μετά τη βελτιστοποίηση

1	#Calculation id	steady-1	steady-2	steady-3
2	#Status	STEADY_OK	STEADY_OK	STEADY_OK
3	#ESI	0	0	0
4	CmpH.Nmech (rpm)	25400	24949.1431	23974.9811
5	PWSD (W)	1071230	961935.739	736441.298
6	Tt4 (K)	1257.4336	1218.84916	1138.1644
7	Tt5 (K)	847.201379	826.680365	785.675387
8	WF (kg/sec)	0.10029	0.09261	0.07686
9	eShP.Me_in.Nmech (rpm)	6265.35	6033.3	5502.9

Πίνακας 5.11: Αποκλίσεις αποτελεσμάτων του PROOSIS από το δοκιμαστήριο

	take off[DP]	max cont	75%
Δpower[%]	0.000	-0.556	0.091
ΔNI[%]	0.000	-0.783	-0.642
ΔNII[%]	0.000	0.000	0.000
ΔEGT[%]	0.481	-0.057	-0.440
ΔWF[%]	0.000	0.000	0.000

5.8 Σύγκριση των αποτελεσμάτων πριν και μετά τη βελτιστοποίηση

Η συνάρτηση κόστους CF μεταξύ των υπολογισμών πριν και μετά τη βελτιστοποίηση μεταβάλλεται όπως φαίνεται στον πίνακα 5.12.

Πίνακας 5.12: Συνάρτηση κόστους πριν και μετά τη βελτιστοποίηση

CF	0.000422
CFopt	0.000142

Έχοντας καταλήξει σε συνάρτηση κόστους με τιμή CFopt=0.000142 και μέγιστες αποκλίσεις της τάξης του 0.5% για τα υπό μελέτη σημεία λειτουργίας το μοντέλο που υλοποιήθηκε θεωρείται ότι προσεγγίζει σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό τη λειτουργία του πραγματικού κινητήρα στο δοκιμαστήριο και χρησιμοποιείται ως έχει για τους υπολογισμούς των επόμενων κεφαλαίων.

6 Σύνδεση του κινητήρα με γεννήτρια και με το δίκτυο

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ο ηλεκτρολογικός εξοπλισμός και ο τρόπος διασύνδεσης της γεννήτριας με το δίκτυο της ΔΕΗ. Γίνονται υπολογισμοί για την επιλογή της γεννήτριας που θα χρησιμοποιηθεί για την μετατροπή της μηχανικής ισχύος σε ηλεκτρική και επιπλέον σχεδιάζεται και επιλέγεται κατάλληλος μειωτήρας στροφών για τη ζεύξη του κινητήρα με τη γεννήτρια.

6.1 Επιλογή γεννήτριας

Η μετατροπή της μηχανικής ισχύος σε ηλεκτρική γίνεται από τις ηλεκτρικές γεννήτριες, η αρχή λειτουργίας των οποίων βασίζεται στο νόμο του Faraday. Ανάλογα με τη σχέση της ταχύτητας περιστροφής του ρότορα και της σύγχρονης ταχύτητας περιστροφής του μαγνητικού πεδίου οι γεννήτριες διακρίνονται σε σύγχρονες και ασύγχρονες. Στην παρούσα παράγραφο γίνεται αρχικά μια σύντομη αναφορά στις δύο κατηγορίες και στις μεταξύ τους διαφορές και στη συνέχεια επιλέγεται η κατάλληλη γεννήτρια για την υπόψη εφαρμογή.

Οι σύγχρονες γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος ονομάζονται και εναλλακτήρες[17]. Το επαγωγικό τύμπανο αποτελείται από τον πυρήνα και το τύλιγμα. Οι μαγνητικοί πόλοι είναι τοποθετημένοι ακτινικά ως προς τον άξονα του περιστρεφόμενου ρότορα και στερεώνονται σε αυτόν. Τα τυλίγματα των πόλων τοποθετούνται πάνω στον πυρήνα και συνδέονται μεταξύ τους συνήθως εν σειρά έτσι ώστε να δημιουργούνται διαδοχικοί μαγνητικοί πόλοι με αντίθετη πολικότητα. Για τη διέγερση της μηχανής τα τυλίγματα των πόλων τροφοδοτούνται με συνεχές ρεύμα από τη διεγέρτρια, μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος. Ως διεγέρτρια μπορεί να χρησιμοποιηθεί γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος και στατικό σύστημα ανόρθωσης.

Όταν η σύγχρονη γεννήτρια συνδεθεί με το φορτίο στρεφόμενη στη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής της και με σταθερή την ένταση διέγερσης, η πολική τάση μεταξύ των ακροδεκτών της, δηλαδή η ηλεκτρεγερτική της δύναμη, εξαρτάται από την ένταση φορτίσεως, δηλαδή την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος γραμμής, αλλά και από τον συντελεστή ισχύος του φορτίου (cosφ), δηλαδή τη γωνία μεταξύ του διανύσματος της τάσεως και του διανύσματος της εντάσεως. Στην περίπτωση τριφασικής γεννήτριας η φόρτιση μεταξύ των τριών φάσεων είναι συμμετρική. Η τάση διατηρείται σταθερή με μεταβολή της διέγερσης ανάλογα με τη διακύμανση του συντελεστή ισχύος cosφ.

Κατά τη λειτουργία μιας γεννήτριας αναπτύσσονται απώλειες οι οποίες διακρίνονται σε ωμικές απώλειες στα τυλίγματα του επαγωγικού τυμπάνου και τους

μαγνητικούς πόλους, σε μηχανικές απώλειες και σε απώλειες του πυρήνα. Οι μηχανικές απώλειες και οι απώλειες πυρήνα θεωρούνται σταθερές και ανεξάρτητες του φορτίου. Οι ωμικές απώλειες αυξάνονται παραβολικά με την αύξηση του φορτίου. Στην προκείμενη εφαρμογή λαμβάνονται σταθερές για την περιοχή γύρω από το σημείο συνεχούς λειτουργίας.

Οι ασύγχρονες γεννήτριες χαρακτηρίζονται ως μηχανές επαγωγής λόγω του φαινομένου μέσω του οποίου επάγεται στον ρότορα εναλλασσόμενο ρεύμα. Η μηχανή επαγωγής μπορεί να θεωρηθεί ως ένας γενικευμένος μετασχηματιστής στον οποίο το μαγνητικό πεδίο του στάτη επάγεται στον ρότορα μέσω του διάκενου αέρα το οποίο λειτουργεί ως πυρήνας μεταξύ των δύο αυτών στοιχείων. Γενικά οι ασύγχρονες γεννήτριες δε διαφέρουν με τις σύγχρονες ως προς τον βαθμό απόδοσης. Χαρακτηρίζονται από απλότητα στην κατασκευή τους, από ευκολία στον παραλληλισμό τους με το δίκτυο, εύκολη συντήρηση και μικρότερο κόστος, όμως τα χαρακτηριστικά τους δεν είναι το ίδιο ικανοποιητικά όπως των σύγχρονων γεννητριών, ιδιαίτερα για την περίπτωση λειτουργίας σε διασυνδεδεμένο δίκτυο.

Κύρια μειονεκτήματα στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι ότι η τάση είναι μη ρυθμιζόμενη και καθορίζεται από το διασυνδεδεμένο δίκτυο, ενώ κατά την εν κενώ σύνδεση με το δίκτυο αναπτύσσονται έντονες διακυμάνσεις του ρεύματος με αποτέλεσμα να απαιτείται έλεγχος ευστάθειας του δικτύου. Ως εκ τούτων στην υπόψη εφαρμογή μελετάται η επιλογή σύγχρονης γεννήτριας με τους υπολογισμούς που ακολουθούν.

Μεταξύ της συχνότητας περιστροφής του τυμπάνου του επαγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος και της ταχύτητας περιστροφής του τυμπάνου θα ισχύει η σχέση[13],

$$n_\sigma = \frac{120 \cdot f}{p}$$

όπου n_σ [RPM] η σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής του τυμπάνου της γεννήτριας και f [Herz] η συχνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος.

Για δεδομένα:

p=4 (πόλοι γεννήτριας)
f=50 Herz (συχνότητα εθνικού δικτύου)

προκύπτει: n_σ= 1500 RPM
Για τη μετατροπή της ισχύος από kW σε KVA χρησιμοποιείται η σχέση:

KVA= kW/PF

όπου PF (power factor) ο συντελεστής ισχύος του ηλεκτρικού δικτύου cosφ, λαμβάνεται cosφ=0.90 –0.85

Επομένως για ισχύ συνεχούς λειτουργίας P = 967.31 kW υπολογίζεται:

P= 1074.79 KVA

Από τη βιβλιογραφία [17] (πίνακας 6.1 σελ 296) για P= 1074.79 KVA προκύπτει ο ολικός βαθμός απόδοσης της γεννήτριας ίσος με n_{GM} = 0.9664

Από τη βιβλιογραφία [17] (πίνακας 6.10 σελ 315) προκύπτει ο βαθμός απόδοσης του μετασχηματιστή n_{Tr} = 0.9888 (cosφ = 0,90 –0.85).

Με βάση τους παραπάνω υπολογισμούς επιλέγεται σύγχρονη τετραπολική γεννήτρια της εταιρείας "marathon electrics" [14], με τα χαρακτηριστικά που αναγράφονται στον πίνακα 6.1 για θερμοκρασία περιβάλλοντος 40°C.

Πίνακας 6.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά γεννήτριας

Τύπος	742RSL4050
Συχνότητα δικτύου [Hz]	50
Ισχύς [KVA]	1450
Τάση [V]	400
Γωνιακή ταχύτητα [RPM]	1500

Το σχέδιο με τις διαστάσεις της παραπάνω γεννήτριας παρατίθεται στο παράρτημα Π2.1.

6.2 Έλεγχος λειτουργίας, εξοπλισμός και σύνδεση στο δίκτυο

Η σύνδεση του κινητήρα-γεννήτριας με το δίκτυο γίνεται με κατάλληλο ηλεκτρολογικό εξοπλισμό ώστε να εξασφαλίζεται η ασφάλεια τόσο του δικτύου όσο και του συγκροτήματος κινητήρα - γεννήτριας και του προσωπικού που θα το χειρίζεται. Στην παρούσα παράγραφο περιγράφεται η διαδικασία εκκίνησης και κράτησης, ο τρόπος σύνδεσης καθώς και ο εξοπλισμός που απαιτούνται ώστε να επιτευχθεί η σύνδεση της γεννήτριας με το δίκτυο.

Εκκίνηση και κράτηση της γεννήτριας

Η εκκίνηση της σύγχρονης γεννήτριας γίνεται εν κενώ, δηλαδή αποσυνδεδεμένη από το δίκτυο[17]. Αρχικά τίθεται σε κίνηση η κινητήρια μηχανή μέχρι να επιτευχθεί η σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής. Το τύλιγμα της διέγερσης δεν τροφοδοτείται και έτσι δεν αναπτύσσεται τάση στους ακροδέκτες της μηχανής ώστε να παράγει τάση και να τροφοδοτεί το τύλιγμα διέγερσης, μέχρι να επιτευχθεί η ονομαστική τάση στους

ακροδέκτες της γεννήτριας και να ολοκληρωθεί η διαδικασία παραλληλισμού. Στη συνέχεια κλείνει ο διακόπτης που συνδέει τη γεννήτρια με το δίκτυο και η γεννήτρια αρχίζει να φορτίζεται. Η ένταση διέγερσης ρυθμίζεται συνεχώς ώστε η τάση στους ακροδέκτες της γεννήτριας να διατηρείται ίση προς την ονομαστική παρά τις μεταβολές του φορτίου.

Ως παραλληλισμός ορίζεται η διαδικασία εξίσωσης των στιγμιαίων τιμών των τάσεων της γεννήτριας και του δικτύου, η οποία θα πρέπει να διατηρηθεί και μετά το κλείσιμο του διακόπτη παραλληλισμού. Συγκεκριμένα θα πρέπει να εξασφαλισθεί η ισότητα των τάσεων, η ισότητα της συχνότητας, η ίδια διαδοχή φάσεων και ο μηδενισμός της φασικής απόκλισης μεταξύ των τάσεων των αντίστοιχων φάσεων. Εάν κλείσει ο διακόπτης σύνδεσης χωρίς να έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία παραλληλισμού υπάρχει κίνδυνος ανάπτυξης μεγάλων εντάσεων ηλεκτρικού ρεύματος.

Η κράτηση της γεννήτριας επιτυγχάνεται ακολουθώντας την αντίστροφη πορεία από αυτήν της εκκίνησης. Αποφορτίζεται η γεννήτρια με σταδιακό άνοιγμα των διακοπτών των φορτίων μέχρι του μηδενισμού τους, επενεργώντας παράλληλα στην διέγερση ώστε να διατηρείται η τάση της γεννήτριας σταθερή. Στη συνέχεια ανοίγει ο διακόπτης σύνδεσης της γεννήτριας με το δίκτυο και μηδενίζεται η τάση της γεννήτριας επενεργώντας στη διέγερση οπότε και μπορεί να σταματήσει η κινητήρια μηχανή. Μετά το μηδενισμό της προσδιδόμενης από τη μηχανή ισχύος, ο ρότορας της γεννήτριας και η άτρακτος συνεχίζουν να περιστρέφονται με ρυθμό επιβραδυνόμενο καθώς από την κινητική ενέργεια των στρεφομένων μαζών αφαιρούνται σταδιακά οι μηχανικές απώλειες. Επειδή όμως οι μηχανικές απώλειες είναι πολύ μικρές και με σκοπό την αποφυγή της εν κενώ περιστροφής για μεγάλο χρονικό διάστημα, το σύστημα εξοπλίζεται με μηχανικό φρένο το οποίο επενεργεί αυτόματα μετά την αδρανοποίηση της κινητήριας μηχανής.

Απαιτούμενος ηλεκτρολογικός εξοπλισμός

Μεταβάλλοντας τα σημεία λειτουργίας της μηχανής προκύπτουν διαφορετικές στροφές στην είσοδο της γεννήτριας και κατά συνέπεια διαφορετική συχνότητα του παραγόμενου ρεύματος από τη γεννήτρια. Για να αντιμετωπιστεί αυτό η συνήθης πρακτική είναι η παρεμβολή ενός μετατροπέα (converter) τύπου AC-DC και DC-AC μέσω του οποίου το εναλλασσόμενο ρεύμα της γεννήτριας (AC) μετατρέπεται σε συνεχές (DC) και στη συνέχεια ξαναμετατρέπεται σε εναλλασσόμενο με την επιθυμητή συχνότητα του τροφοδοτούμενου δικτύου (50Hz). Πρόκειται επί της ουσίας για ένα ηλεκτρονικό κιβώτιο συνεχούς μεταβολής των στροφών.

Καθώς η τάση της γεννήτριας είναι χαμηλή (440V), για την ενδεχόμενη σύνδεση με το δίκτυο μέσης τάσης (ΜΤ) πρέπει να παρεμβληθεί τριφασικός μετασχηματιστής ισχύος ο οποίος εξασφαλίζει τον κατάλληλο αναβιβασμό της τάσεως.

Ο εξοπλισμός σύνδεσης με το δίκτυο συμπληρώνεται με τα όργανα μέτρησης ενεργού και άεργου ισχύος (εισερχόμενη και εξερχόμενη), ωρομετρητή, αμπερομέτρων

και κιλοβατόμετρων. Επίσης ειδικοί ηλεκτρονόμοι επιτηρούν τις υπερ/υπο τάσεις, τάση ουδετέρου, υπερ/υπο συχνότητα, ώστε να επενεργούν στον διακόπτη της μονάδας όταν τα μεγέθη αυτά ξεπεράσουν τα επιτρεπτά από τη ΔΕΗ όρια[17].

Το σύνολο του εξοπλισμού αυτού τοποθετείται σε ηλεκτρικούς μεταλλικούς πίνακες τύπου πεδίου, κατασκευασμένους σύμφωνα με τις προδιαγραφές με σκοπό την ασφάλεια του προσωπικού και φέρουν τις απαραίτητες ενδείξεις ύπαρξης τάσεως. Οι πίνακες μέσης τάσης τοποθετούνται σύμφωνα με τους κανονισμούς σε διαφορετικό χώρο από τους πίνακες χαμηλής τάσης. Στους πίνακες χαμηλής τάσης τοποθετούνται οι μετασχηματιστές τάσεως και εντάσεως, τα μετρητικά όργανα όπως αμπερόμετρα ανά φάση, κιλοβατόμετρο για τη μέτρηση της ενεργού ισχύος της γεννήτριας, όργανο μέτρησης του συντελεστού ισχύος cosφ και ηλεκτρονόμος για τη διαπίστωση αντιστροφής της ροής ενεργού ισχύος, η συστοιχία πυκνωτών διόρθωσης του συντελεστού ισχύος cosφ για κάθε γεννήτρια και τέλος η αναχώρηση για τυχούσες λοιπές εσωτερικές καταναλώσεις.

Αυτοματισμοί και έλεγχος λειτουργίας

Ο αυτοματισμός της λειτουργίας της μονάδας αφορά σε τρία τμήματα αυτής, ήτοι:

- σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου και μετρητικές διατάξεις ελέγχου λειτουργίας του κινητήρα.
- ηλεκτρολογικό τμήμα (σύστημα συγχρονισμού κατά την εκκίνηση, σύστημα ρύθμισης της διέγερσης, αυτοματισμοί προστασίας έναντι αύξησης της θερμοκρασίας εδράνων και τυλιγμάτων).
- τμήμα βοηθητικού εξοπλισμού (π.χ. σύστημα πυρανίχνευσης και προστασίας).

Το σύστημα ελέγχου και επιτήρησης μπορεί να συμπληρωθεί από καταγραφή και αποθήκευση δεδομένων κατά τη λειτουργία σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η επίβλεψη της λειτουργίας μπορεί να γίνεται από την οθόνη του ηλεκτρονικού υπολογιστή από τον οποίο δίνονται και οι εντολές χειρισμού μέσω συστήματος SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition). Η επίβλεψη μπορεί να γίνεται είτε με παρουσία χειριστή επί τόπου (local control) είτε εξ αποστάσεως (remote control).

Σύνδεση με το δίκτυο

Η αποδιδόμενη μηχανική ισχύς αφού μετατραπεί σε ηλεκτρική δύναται να αποδοθεί σε ένα ισχυρό διασυνδεδεμένο δίκτυο (π.χ. ΔΕΗ), σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο μικρής ισχύος (όπου η ισχύς της μηχανής αποτελεί σημαντικό ποσοστό της ισχύος που καταναλώνεται) ή σε ένα αυτόνομο δίκτυο (τροφοδοτούμενο αποκλειστικά από τη μηχανή). Στις δύο τελευταίες περιπτώσεις είναι ιδιαίτερα δύσκολη η διατήρηση σταθερής της τάσεως και της συχνότητας καθώς και ο έλεγχος του συστήματος στις

απότομες μεταβολές της απορροφούμενης ηλεκτρικής ισχύος. Η παρούσα μελέτη εστιάζεται στην γενική περίπτωση της σύνδεσης της μονάδας με το δίκτυο της ΔΕΗ.

Σύμφωνα με την ισχύουσα οδηγία της ΔΕΗ (Οδηγία Διανομής Νο 129[17]) ένας αυτοπαραγωγός επιτρέπεται να συνδεθεί στο δίκτυο χαμηλής τάσεως (ΧΤ) εάν η συνολική ισχύς είναι μέχρι 100kW. Στην περίπτωση αυτή η γεννήτρια θα είναι ασύγχρονη με συστοιχία πυκνωτών διόρθωσης του συντελεστή ισχύος. Για ισχείς μεγαλύτερες των 100kW η σύνδεση θα πρέπει να γίνει στο δίκτυο μέσης τάσης (ΜΤ) και οι γεννήτριες μπορεί να είναι σύγχρονες ή ασύγχρονες με διόρθωση του συντελεστού ισχύος.

Η μέτρηση και τιμολόγηση γίνεται σύμφωνα με όργανα για τη μέτρηση της εισερχόμενης ή εξερχόμενης ενέργειας στο δίκτυο της ΔΕΗ, τα οποία λειτουργούν στη μέση τάση και αποτελούν ιδιοκτησία της ΔΕΗ. Τοποθετούνται δε σε χώρο ελεγχόμενο από αυτή. Τα μετρητικά όργανα, η συνδεσμολογία τους και οι μετασχηματιστές τάσεως και εντάσεως πρέπει να είναι σύμφωνα με την οδηγία της ΔΕΗ ανάλογα με την εγκατεστημένη ισχύ.

Από το σημείο αυτό γίνεται η σύνδεση με το δίκτυο διανομής μέσω γραμμής μέσης τάσης σύμφωνα με μελέτη που εκπονείται από την αρμόδια διεύθυνση της ΔΕΗ. Την κατασκευή αναλαμβάνει η ΔΕΗ αλλά το αντίστοιχο κόστος επιβαρύνει τον προϋπολογισμό του αυτοπαραγωγού. Μετά την έναρξη λειτουργίας της μονάδας, την επίβλεψη και συντήρηση της γραμμής έχει η ΔΕΗ. Επίσης θα πρέπει να υπάρχει πρόβλεψη ώστε το προσωπικό της ΔΕΗ να μπορεί να απομονώσει τη μονάδα από το δίκτυο σε περίπτωση ανάγκης. Η τιμή του συντελεστή ισχύος cosφ πρέπει να είναι μεγαλύτερη του 0.95.

6.3 Σύνδεση του κινητήρα με τη γεννήτρια

Ο κινητήρας αποδίδει την ισχύ του στον άξονα ισχύος που συνδέεται με τον αεριοστρόβιλο ισχύος και με τον οποίο παρεμβάλλεται μειωτήρας στροφών που στο σημείο σχεδίασης μειώνει τις στροφές από τις 22500 σε 6640 [10]. Με δεδομένο ότι ο κινητήρας θα χρησιμοποιηθεί στο σημείο λειτουργίας “maximum continuous” οι στροφές εξόδου από αυτόν αναμένονται περί τις 6000RPM. Επομένως χρειάζεται η παρεμβολή κατάλληλου μειωτήρα στροφών. Στην παρούσα ενότητα γίνεται ένας αρχικός σχεδιασμός ενός μειωτήρα στροφών κατά τη βιβλιογραφία[18] και στη συνέχεια επιλέγεται εναλλακτικά ένας κατάλληλος μειωτήρας στροφών από το εμπόριο.

Καθώς πρόκειται για ισχύ της τάξης του 1MW και για υψηλές στροφές λειτουργίας προτιμάται η χρήση μετωπικών τροχών με ελικοειδή οδόντωση ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη μετάδοση της ισχύος με χαμηλό θόρυβο συγκριτικά με τους μετωπικούς τροχούς ευθείας οδόντωσης.

Η σχέση μετάδοσης υπολογίζεται όπως παρακάτω,

$$i = \frac{N_{T53}[RPM]}{N_{GEN}[RPM]} = \frac{6000}{1500} = 4$$

για την επίτευξή της επιλέγεται μονοβάθμιος μειωτήρας.

Εκτίμηση διαμέτρου πινιόν

Από τη σχέση του Hertz:

$$d_{0,S1} = \frac{95}{P_0}\sqrt{\frac{M_{d1} \cdot P_0(i+1)}{\Psi_d \cdot i}}$$

Για πινιόν από υλικό χάλυβα st-70 προκύπτει: Po=72 kp/mm2

Συντελεστής Ψd: Ψd = 0.78

Ροπή Md1[kp cm]:

$$M_{d1} = 71620\frac{PWSD[PS]}{N_{T53}} = 71620\frac{1315.76}{6000} = 15612.17\ kp\ cm$$

Από τα παραπάνω προκύπτει μια πρώτη προσέγγιση της διαμέτρου του πινιόν:

$$d_{0,S1}' = 160{,}4852mm$$

Εκτίμηση διαμέτρου πινιόν από την άτρακτο:

$$d_{0,S1}'' = 2 \cdot d_a = 2 \cdot 3 \cdot \sqrt[3]{M_{d1}} = 149.9589mm$$

Ως πρώτη εκτίμηση επιλέγεται η μέγιστη τιμή, ήτοι: $d_{0,S1}' = 160{,}4852mm$

Αριθμός οδόντων πινιόν

Περιφερειακή ταχύτητα στον αρχικό κύλινδρο:

$$v_{01}[^m/_s] = \frac{\pi \cdot d_{0,S1}' \cdot N_{T53}}{60000} \Longrightarrow v_{01} = 50.69772\ m/s$$

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [18] επιλέγεται αριθμός οδόντων πινιόν $z_1 = 25$

Υπολογισμός module:

Module μετωπικής τομής:

$$m'_{S1}[mm] = \frac{d'_{0,S1}}{z_1} \Longrightarrow m'_{S1} = 6.42mm$$

Module καθέτου τομής:

$$m'_{n1}[mm] = m'_{S1} \cdot cos\beta_{0,1} \Longrightarrow m'_{n1}[mm] = 6.200671mm$$

Η οδόντωση είναι κανονική επομένως το module τυποποιείται στην αμέσως μεγαλύτερη τυποποιημένη τιμή από τη βιβλιογραφία [18], ήτοι:

$$m_{n1}[mm] = 6.5mm$$

Επομένως για το module της μετωπικής τομής (ατυποποίητο) ισχύει:

$$m_{S1}[mm] = \frac{m_{n1}}{cos\beta_{0,1}} \Longrightarrow m_{S1} = 6.729295mm$$

Τελική τιμή της διαμέτρου του πινιόν:

$$d_{0,s1} = z_1 \cdot m_{S1} = 168.2324mm$$

Αριθμός οδόντων συνεργαζόμενου τροχού:

$$z_2 = z_1 \cdot i = 100.555 \Longrightarrow z_2 = 101$$

Τελική τιμή διαμέτρου του συνεργαζόμενου τροχού:

$$d_{0,S2} = z_2 \cdot m_{S2} \Longrightarrow d_{0,S2} = 679.6588mm$$

Νέα σχέση μετάδοσης λόγω στρογγυλοποιήσεων:

$$i = \frac{z_2}{z_1} \Longrightarrow i = 4.04$$

Φανταστικοί αριθμοί οδόντων:

$$z_{n1} = \frac{z_1}{cos^3\beta_{0,1}} \Longrightarrow z_{n1} = 27.7335$$

$$z_{n2} = \frac{z_2}{cos^3\beta_{0,1}} \Longrightarrow z_{n2} = 112.0444$$

Πλάτη τροχών:

$$b_2 = \Psi_d \cdot d_{0S,1} \Longrightarrow b_2 = 131.2213mm$$

$$\Longrightarrow b_1 = b_2 + 5mm \Longrightarrow b_1 = 136.2213mm$$

<u>Έλεγχος συνεργαζόμενου τροχού σε αντοχή</u>

Πρέπει:

$$\sigma_{max} = \frac{P_{u2}q_{k2}}{b_2\varepsilon\, m_{n2}B}$$

Περιφερειακή δύναμη στο πινιόν:

$$P_{u1}[kp] = \frac{2M_{d1}[kp\ cm]}{d_{0S,1}[cm]} \Longrightarrow P_{u1} = 1856.024kp$$

Για λόγους αντοχής λαμβάνεται:

$$P_{u2} = P_{u1}$$

Βαθμός επικαλύψεως ε:
Λαμβάνεται από τη βιβλιογραφία [18]: ε = 1.73

Συντελεστής q_{k2}:
Λαμβάνεται από τη βιβλιογραφία [18]: q_{k2} = 2.21

Συντελεστής B:
Λαμβάνεται από τη βιβλιογραφία [18]: B = 1.33

Επομένως:

$$\sigma_{max}\left[\frac{kp}{mm^2}\right] = \frac{P_{u2}q_{k2}}{b_2\varepsilon\ m_{n2}B} \Longrightarrow 2.090069kp/mm^2$$

Για να ικανοποιείται η συνθήκη αντοχής του συνεργαζόμενου τροχού θα πρέπει:

$$\sigma_{B2} > \sigma_{\varepsilon\pi} \cdot 1.5\ \Longrightarrow \sigma_{B2} = 3.135103\ kp/mm^2$$

<u>Έλεγχος συνεργαζόμενου τροχού σε πίεση επιφανείας</u>

Μέγιστη πίεση επιφανείας:
Η μέγιστη πίεση επιφανείας κατά Hertz στο σημείο κυλίσεως είναι:

$$P_{max1} = \sqrt{\frac{P_{u1}(i+1)}{b_2 \cdot d_{0S,1} \cdot i}} \cdot Y_W \cdot Y_C \cdot Y_L$$

Από τη βιβλιογραφία [18] λαμβάνονται οι συντελεστές:

Y_W = 84.66305
Y_C = 1.703825
Y_L = 0.86711

Επομένως:

$$P_{max1} = 40.5091\ kp/mm^2 \Longrightarrow P_{max2} = P_{max1} = 40.5091\ kp/mm^2$$

Επιτρεπόμενη πίεση στον συνεργαζόμενο τροχό:

$$P_{\varepsilon\pi,2} = \frac{P_{0,2} \cdot y_1 \cdot y_2}{S_f}$$

Από τη βιβλιογραφία [18] λαμβάνονται οι τιμές των παραμέτρων:

παράμετρος υλικού $y_1 = 1$
παράμετρος λιπάνσεως $y_2 = 0.92$
συντελεστής ασφαλείας $S_f = 1.35$

Επομένως:

$$P_{\varepsilon\pi,2} = 0.681481 \cdot P_{0,2}$$

Πρέπει να ισχύει η σχέση:

$$P_{max,2} < P_{\varepsilon\pi,2} = 0.681481 \cdot P_{0,2} \Longrightarrow P_{0,2} > 59.4427\ kp/mm^2$$

Εκλογή Υλικού συνεργαζόμενου τροχού

Για να ικανοποιούνται οι προδιαγραφές των παραπάνω υπολογισμών θα πρέπει να ισχύουν οι περιορισμοί:

$$\sigma_{B2} = 3.135103\ kp/mm^2, P_{0,2} > 59.4427\ kp/mm^2$$

Από τη βιβλιογραφία[18], με βάσει τα παραπάνω επιλέγεται υλικό κοινός χάλυβας χωρίς θερμική επεξεργασία st-60. Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα των υπολογισμών για το μειωτήρα στροφών προκύπτει ο πίνακας 6.2 με τις βασικές κατασκευαστικές παραμέτρους:

Πίνακας 6.2: Κατασκευαστικές παράμετροι μειωτήρα στροφών

διάταξη τροχών	παράλληλη
είδος οδόντωσης	ελικοειδής
Υλικό τροχού πινιόν	κοινός χάλυβας χωρίς θερμική επεξεργασία st-70
Υλικό τροχού συνεργαζόμενου τροχού	κοινός χάλυβας χωρίς θερμική επεξεργασία st-60
module μετωπικής τομής (ατυποποίητο)	6.729296
module καθέτου τομής (τυποποιημένο)	6.5
αριθμός οδόντων πινιόν	25
αριθμός οδόντων συνεργαζόμενου τροχού	101
διάμετρος τροχού πινιόν	168.2324 mm
διάμετρος συνεργαζόμενου τροχού	679.6588 mm
πάχος τροχού πινιόν	136.2213 mm
πάχος συνεργαζόμενου τροχού	131.2213 mm
σχέση μετάδοσης	1 : 4.04

Εναλλακτικά είναι δυνατή η επιλογή κατάλληλου τυποποιημένου μειωτήρα από το εμπόριο. Από τον κατάλογο προϊόντων της εταιρείας TRIVENI GROUP [7], ακολουθώντας τον υποδεικνυόμενο αλγόριθμο υπολογισμών προκύπτουν τα παρακάτω:

Εκλογή συντελεστή ασφαλείας (service factor)

TABLE : 1

SERVICE FACTORS (S_f)

APPLICATION	Service Factors		
	Prime Mover		
	Motor	Turbine	Internal Combustion Engine (Multi-Cylinder)
BLOWERS			
Centrifugal	1.4	1.6	1.7
Lobe	1.7	1.7	2.0
COMPRESSORS			
Centrifugal process gas except air conditioning	1.3	1.5	1.6
Centrifugal air conditioning service	1.2	1.4	1.5
Centrifugal air or pipe line service	1.4	1.6	1.7
Rotary axial flow all types	1.4	1.6	1.7
Rotary liquid piston (Nash)	1.7	1.7	2.0
Rotary lobe-radial flow	1.7	1.7	2.0
Reciprocating-3 or more cyl.	1.7	1.7	2.0
Reciprocating 2 cyl.	2.0	2.0	2.3
GENERATORS AND EXCITERS			
Base load or continuous	1.1	1.1	1.3
Peak duty cycle	1.3	1.3	1.7
PUMPS			
Centrifugal (all service except as listed below)	1.3	1.5	1.7
Centrifugal boiler feed	1.7	2.0	-
Centrifugal descaling (with surge tank)	2.0	2.0	-
Centrifugal hot oil	1.5	1.7	-
Centrifugal pipe line	1.5	1.7	2.0
Centrifugal water works	1.5	1.7	2.0
Dredge	2.0	2.4	2.5
Rotary axial flow-all types	1.5	1.5	1.8
Rotary gear	1.5	1.5	1.8
Rotary liquid piston	1.7	1.7	2.0
Rotary lobe	1.7	1.7	2.0
Rotary sliding vape	1.5	1.5	1.8
Reciprocating 3 cyl. or more	1.7	1.7	2.0
Reciprocating 2 cyl.	2.0	2.0	2.3

Recommended Service Factor (extract). Application for selection to AGMA Standard 6011-H-98 and API standard 613-1995.

Σχήμα 6.1: Εκλογή συντελεστή ασφαλείας

Από τον πίνακα του σχήματος 6.1 προκύπτουν δύο συντελεστές ασφαλείας, αναλόγως αν πρόκειται για μονάδα συνεχούς λειτουργίας ή για μονάδα αιχμής. Επιλέγεται το πιο απαιτητικό σενάριο, δηλαδή το δεύτερο, επομένως:

$$S_f = 1.3$$

Υπολογισμός μεταφερόμενης ισχύος

$P_{sf} = P_{max} \cdot S_f = 1071.23 \cdot 1.3 \Longrightarrow P_{sf} = 1392.599$ kW

Λοιπές απαιτήσεις μετάδοσης κίνησης

Στροφές εισόδου [κινητήρας]: 6000 RPM

Στροφές εξόδου [γεννήτρια]: 1500 RPM

Τελική εκλογή τυποποιημένου μειωτήρα στροφών

LOW SPEED SHAFT RPM \ HIGH SPEED SHAFT RPM		KILOWATTS								
		10000	9000	8000	7000	6000	5000	4500	4000	3500
HSG 160	3000	570	585	600	610	615	610	595	580	555
	2000	320	335	355	370	390	400	410	410	405
	1500	--	--	--	250	265	285	300	300	305
	1000	--	--	--	--	--	160	170	175	185
	750	--	--	--	--	--	--	--	--	125
HSG 190	3000	895	920	945	960	970	960	940	915	880
	2000	505	530	580	585	610	635	640	645	640
	1500	--	345	370	390	420	450	460	475	480
	1000	--	--	--	--	230	250	265	280	295
	750	--	--	--	--	--	--	170	185	195
HSG 220	3000	1390	1425	1470	1495	1505	1495	1460	1425	1365
	2000	785	825	865	910	950	985	1000	1000	995
	1500	430	530	575	610	650	695	715	735	745
	1000	--	--	--	275	355	390	410	435	455
	750	--	--	--	--	--	215	265	285	305
HSG 250	3000	2035	2095	2155	2190	2205	2190	2145	2090	2000
	2000	1150	1210	1270	1335	1395	1445	1485	1470	1460
	1500	745	780	840	895	955	1020	1045	1075	1095
	1000	--	--	--	595	500	575	605	635	665
	750	--	--	--	--	--	325	325	415	445
HSG 280	3000	2860	2940	3025	3080	3100	3075	3015	2935	2810
	2000	1615	1695	1785	1875	1960	2033	2055	2065	2055
	1500	925	1100	1180	1255	1340	1430	1470	1515	1540
	1000	--	--	--	570	730	805	850	895	935
	750	--	--	--	--	--	460	550	585	625
HSG 320	3000	4270	4320	4520	4600	4625	4590	4495	4380	4195
	2000	2410	2535	2665	2800	2930	3035	3070	3085	3065
	1500	1350	1640	1765	1875	2000	2135	2195	2260	2300
	1000	--	--	685	995	1095	1205	1265	1330	1400
	750	--	--	--	--	750	775	820	875	935

Σχήμα 6.2: Πίνακας τελικής εκλογής τυποποιημένου μειωτήρα στροφών

Από τον πίνακα του σχήματος 6.2 και σύμφωνα με τους προηγηθέντες υπολογισμούς επιλέγεται ο μειωτήρας τύπου HSG 280, σχέδιο του οποίου παρατίθεται στο παράρτημα Π2.

7 Ανακόμιση θερμότητας καυσαερίων

Όντας παλαιάς τεχνολογίας, ο T53-L-13B αποβάλει στο περιβάλλον καυσαέρια υψηλής θερμοκρασίας. Ως εκ τούτου προκύπτει η δυνατότητα εκμετάλλευσης της αποβαλλόμενης αυτής θερμότητας με διάφορους τρόπους προς αύξηση του βαθμού απόδοσης. Τις τελευταίες δεκαετίες εφαρμόζεται όλο και πιο συχνά η τεχνολογία της ανακόμισης θερμότητας των καυσαερίων για τη θέρμανση του εξερχόμενου αέρα από το συμπιεστή, ιδιαίτερα σε στρατιωτικές εφαρμογές όπου έχει ιδιαίτερη σημασία η μείωση της κατανάλωσης και η αύξηση της αυτονομίας ως προς το καύσιμο[8]. Στο παρόν κεφάλαιο μελετάται η εφαρμογή της τεχνολογίας αυτής στο υπολογιστικό μοντέλο του υπό μελέτη κινητήρα.

7.1 Η τεχνολογία της ανακόμισης θερμότητας καυσαερίων

Πέραν της ενδιάμεσης ψύξης (intercooling) και της αναθέρμανσης (reheating), η εκμετάλλευση της θερμότητας των καυσαερίων που υπό κανονικές συνθήκες θα αποβαλλόταν στο περιβάλλον αποτελεί μία από τις κύριες μεθόδους βελτίωσης του βαθμού απόδοσης ενός αεριοστρόβιλου. Με την αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα στην έξοδο του συμπιεστή κερδίζεται ένα μέρος της θερμότητας που θα έπρεπε να αποδοθεί από το καύσιμο ώστε να προκύψει ίδιας ενεργειακής στάθμης καυσαέριο. Αυτό συνεπάγεται άμεση αύξηση του βαθμού απόδοσης της μηχανής και μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου.

Μειονεκτήματα της μεθόδου αποτελούν η πτώση πίεσης που προκαλείται στα δύο συναλλασσόμενα ρεύματα, οι θερμικές φορτίσεις στις μεταβατικές καταστάσεις[8], καθώς επίσης και το κόστος σχεδίασης, κατασκευής και εγκατάστασης ενός εναλλάκτη θερμότητας. Επιπλέον, στην περίπτωση του κινητήρα ελικοπτέρου πρέπει να υπολογιστεί ακριβώς το βάρος και ο όγκος του εναλλάκτη καθώς δύναται να επηρεαστεί η πτητική ικανότητα του μέσου.

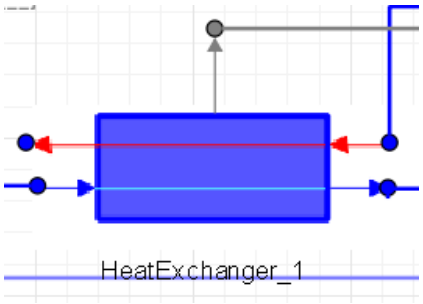
Η ανακόμιση γίνεται με χρήση ενός εναλλάκτη θερμότητας ο οποίος φέρνει σε επαφή τα δύο ρεύματα (αέρας στην έξοδο του συμπιεστή και καυσαέριο στην έξοδο του στροβίλου ισχύος). Ένας συνήθης εναλλάκτης (heat exchanger - HEX) αποτελείται από πολλούς μικρούς σωλήνες οι οποίοι περιβάλλονται από έναν εξωτερικό σωλήνα. Εσωτερικά κινείται ο αέρας υψηλής πίεσης ενώ εξωτερικά το καυσαέριο. Κύριες επιδιώξεις στην κατασκευή ενός HEX είναι η ελαχιστοποίηση του όγκου-βάρους και η μεγιστοποίηση των επαφών συναλλαγής θερμότητας μεταξύ των δύο ρευμάτων. Για την

καλύτερη συναλλαγή θερμότητας προτιμάται η διάταξη αντιρροής, ενώ η σύγχρονη τεχνολογία δίνει τη δυνατότητα κατασκευής πιο πολύπλοκων διατάξεων.

7.2 Εφαρμογή της ανακόμισης στο μοντέλο του T53

Στα προηγούμενα κεφάλαια παρουσιάστηκε η κατασκευή του βέλτιστου δυνατού μοντέλου του κινητήρα. Πάνω στο μοντέλο αυτό εφαρμόζεται η βελτίωση με την ανακόμιση θερμότητας των καυσαερίων. Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται η υλοποίηση της μεθόδου στο PROOSIS.

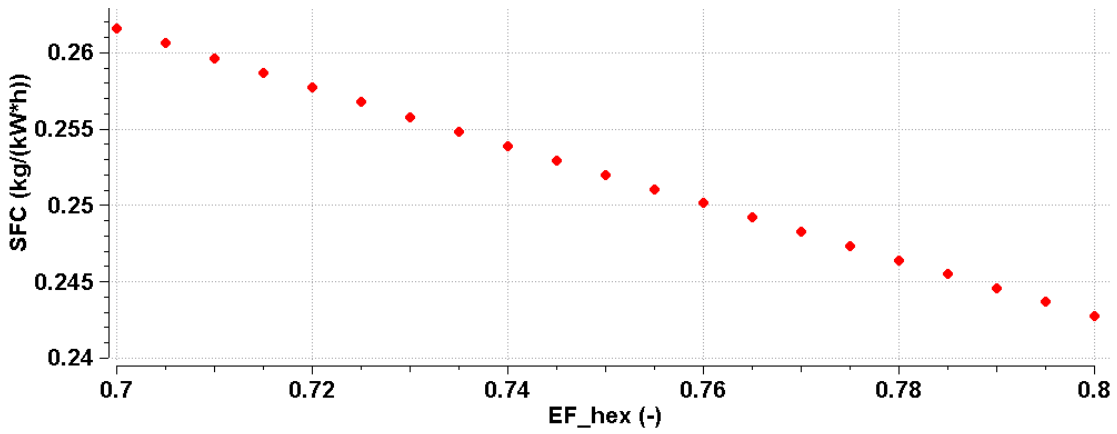
Καθώς ο εναλλάκτης (HEX) της βιβλιοθήκης TURBO του PROOSIS έχει θύρες (ports) που αφορούν στο δευτερεύον κύκλωμα (απομαστεύσεις κλπ), δημιουργείται μια νέα συνιστώσα στη βάση της προηγούμενης με αλλαγή των θυρών ώστε να επιτρέπουν τη διέλευση του πρωτεύοντος ρεύματος του εργαζόμενου μέσου. Η παράσταση της νέας συνιστώσας απεικονίζεται στο σχήμα 7.1.



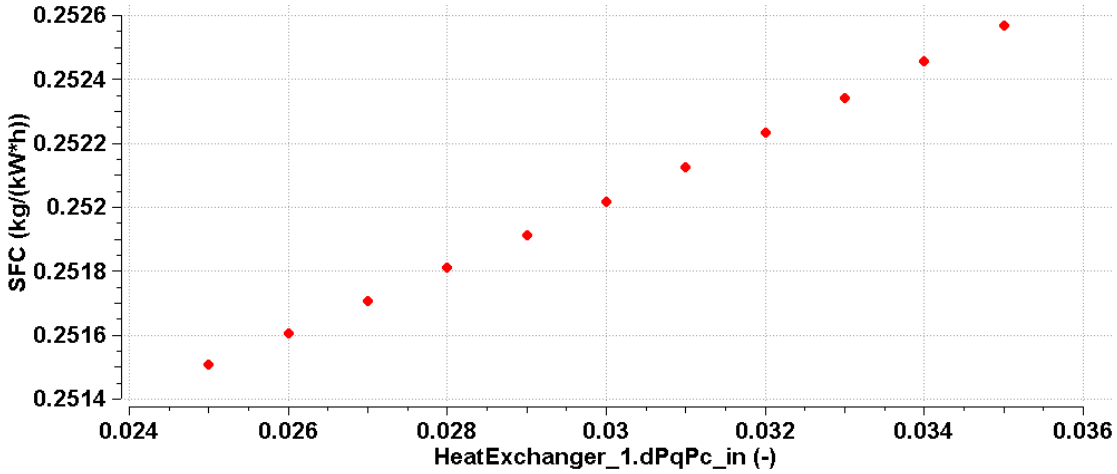
Σχήμα 7.1: Εναλλάκτης θερμότητας.

Βασικά στοιχεία που εισάγονται στον εναλλάκτη θερμότητας είναι οι πτώσεις πίεσης στα δύο ρεύματα και ο βαθμός απόδοσης της συναλλαγής θερμότητας. Επιλέγονται σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [8][9] ποσοστιαία πτώση πίεσης 3% για το ρεύμα αέρα, 4% για το ρεύμα καυσαερίου και βαθμός απόδοσης 75% (συντηρητική προσέγγιση).

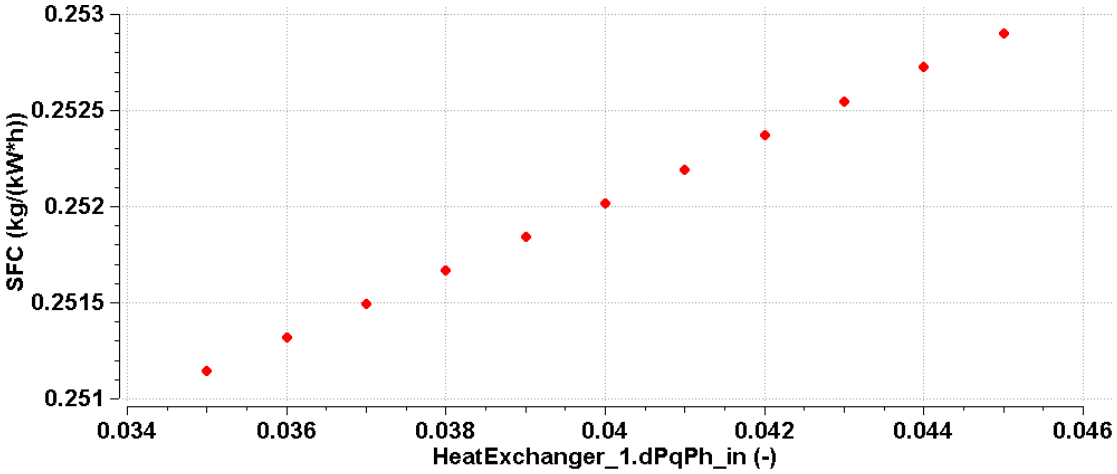
Για μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα θα έπρεπε να λαμβάνεται υπόψη η μεταβολή του βαθμού απόδοσης όπως και της πτώσης πίεσης στα δύο ρεύματα του εναλλάκτη σε συνάρτηση με το σημείο λειτουργίας. Στα σχήματα 7.2-7.4 παρουσιάζεται η επίδραση των παραπάνω παραμέτρων στη λειτουργία του κινητήρα.



Σχήμα 7.2: Επίδραση του βαθμού απόδοσης του εναλλάκτη στην sfc



Σχήμα 7.3: Επίδραση του συντελεστή απωλειών πίεσης κρύου ρεύματος στην sfc

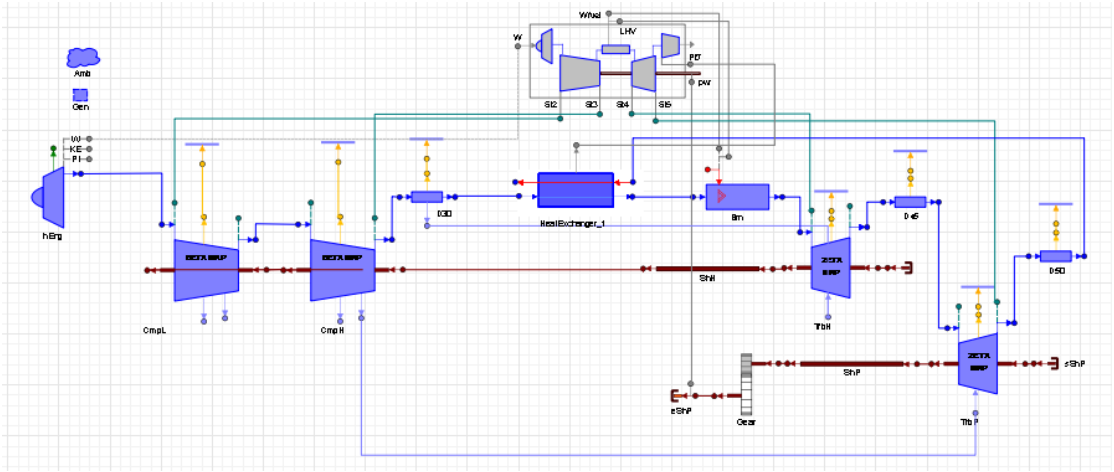


Σχήμα 7.4: Επίδραση του συντελεστή απωλειών πίεσης θερμού ρεύματος στην sfc

Όπως προκύπτει από την παραπάνω παραμετρική ανάλυση η επίδραση του βαθμού απόδοσης και της πτώσης πίεσης στα δύο ρεύματα του εναλλάκτη επιφέρει χαμηλές μεταβολές στην ειδική κατανάλωση. Επιπλέον, καθώς οι υπολογισμοί θα γίνουν για την περιοχή γύρω από το σημείο λειτουργίας “maximum continuous” οι παραπάνω τιμές θεωρείται ότι δεν μεταβάλλονται σημαντικά και έτσι λαμβάνονται σταθερές.

Νέο σχηματικό διάγραμμα

Στο υπάρχον σχηματικό διάγραμμα του κινητήρα προστίθεται ένας εναλλάκτης θερμότητας (HEX) και αφού γίνουν οι κατάλληλες συνδέσεις των θυρών προκύπτει το σχηματικό διάγραμμα του σχήματος 7.5.



Σχήμα 7.5: Σχηματικό διάγραμμα του T53-L-13B με ανακόμιση θερμότητας

Νέο μαθηματικό μοντέλο (partition)

Η προσομοίωση της λειτουργίας του υπάρχοντος κινητήρα μετά την προσθήκη ενός εναλλάκτη θερμότητας επιβάλλει τη διατήρηση σταθερών των παραμέτρων σχεδίασης του πρώτου μοντέλου, όπως αυτές προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση του κεφαλαίου 5. Συνεπώς δεν απαιτείται η δημιουργία design partition, παρά μόνο ενός default partition το οποίο είναι όμοιο με το αντίστοιχο του κεφαλαίου 5 με τη διαφορά ότι χρειάζεται μία επιπλέον οριακή συνθήκη και διαφορετικές αλγεβρικές. Οι νέες οριακές συνθήκες και αλγεβρικές μεταβλητές που χρησιμοποιούνται παρουσιάζονται στα σχήματα 7.6 και 7.7 αντίστοιχα.

.

BOUNDARIES:

NAME	ALIAS	UNITS	DESCRIPTION	INITIAL
Brn.Fu_in.W	WF	kg/sec	Fuel Mass Flow	1
HeatExchanger_1.F_outH.Pt		Pa	Total Pressure	1
eShP.Me_in.Nmech		rpm	Rotational Speed	

Σχήμα 7.6: Οριακές συνθήκες default partition μοντέλου με HEX

INFORMATION ABOUT LINEAR AND NON-LINEAR BOXES:

BOX 1 IS NONLINEAR

#	ALGEBRAICS	ALIAS	UNITS	DESCRIPTION	INITIAL	RESIDUE EQUATION
1	Brn.F_in.Tt		K	Total Temperature	1	Brn.F_in.Tt = IF (HeatExchanger_1.switchHex == FALSE) CasD30.heatP.Tg_out ELSE CasD30.heatP.Tg_out + HeatExchanger_1.EF * (CasD50.heatP.Tg_out - CasD30.heatP.Tg_out)
2	CmpH.BETA		-	BETA parameter	0.5	dP7Q5 = IF (D50.switchdPqPd == INPUTdPqPd) D50.dPqP_in ELSEIF (D50.switchdPqPd == CALCULATEdPqPd) D50.LAM * (1. - 1. / (Perf.St5.Pt / D50.Ps_in)) ELSEIF (D50.switchdPqPd == ANGdPqPd) D50.Kp * (D50.a[1] * HeatExchanger_1.F_outH.Ang ** 2. + D50.a[2] * abs(HeatExchanger_1.F_outH.Ang) + D50.a[3]) * D50.MN_in ** 2. * TURBO__gam_T(D50.fluid, Perf.St5.Tt, HeatExchanger_1.F_outH.FARB, HeatExchanger_1.F_outH.WAR) / 100. ELSE D50.dPqP_in * (D50.Wqnd / D50.WqndDes) ** 2.
3	CmpH.Me_in.Nmech		rpm	Rotational Speed	10000	IMPL() TrbP.Wc = (TrbP.WcMap * TrbP.s_Wc_VGV * TrbP.s_mapWc_in * TrbP.s_adaptWc_in + TrbP.a_mapWc_in + TrbP.a_adaptWc_in) * TrbP.s_gamWc * TrbP.s_ReWc
4	CmpL.BETA		-	BETA parameter	0.5	TrbH.eff = (TrbH.effMap * TrbH.s_mapEff_in * TrbH.s_adaptEff_in + TrbH.a_mapEff_in + TrbH.a_adaptEff_in) * TrbH.s_gamEff * TrbH.s_ReEff
5	InEng.W_in	W1	kg/sec	Inlet mass flow rate		IMPL() TrbH.Wc = (TrbH.WcMap * TrbH.s_Wc_VGV * TrbH.s_mapWc_in * TrbH.s_adaptWc_in + TrbH.a_mapWc_in + TrbH.a_adaptWc_in) * TrbH.s_gamWc * TrbH.s_ReWc
6	TrbH.ZETA		-	Map auxiliary coordinate	0.5	IMPL() CmpH.Wc = (CmpH.WcMap * CmpH.s_IGV_Wc * CmpH.s_mapWc_in * CmpH.s_adaptWc_in + CmpH.a_mapWc_in + CmpH.a_adaptWc_in) * CmpH.s_ReWc * CmpH.s_gamWc
7	TrbP.ZETA		-	Map auxiliary coordinate	0.5	IMPL() CmpL.Wc = (CmpL.WcMap * CmpL.s_IGV_Wc * CmpL.s_mapWc_in * CmpL.s_adaptWc_in + CmpL.a_mapWc_in + CmpL.a_adaptWc_in) * CmpL.s_ReWc * CmpL.s_gamWc

NOTE: click [+] for accessing the source code file
(Document generated automatically with PROOSIS Version 3.0.6 Date: 2014:06:18 Time: 12:05:04)

Name : default Advanced >>

Cancel Finish

Σχήμα 7.7: Αλγεβρικές μεταβλητές μοντέλου με HEX

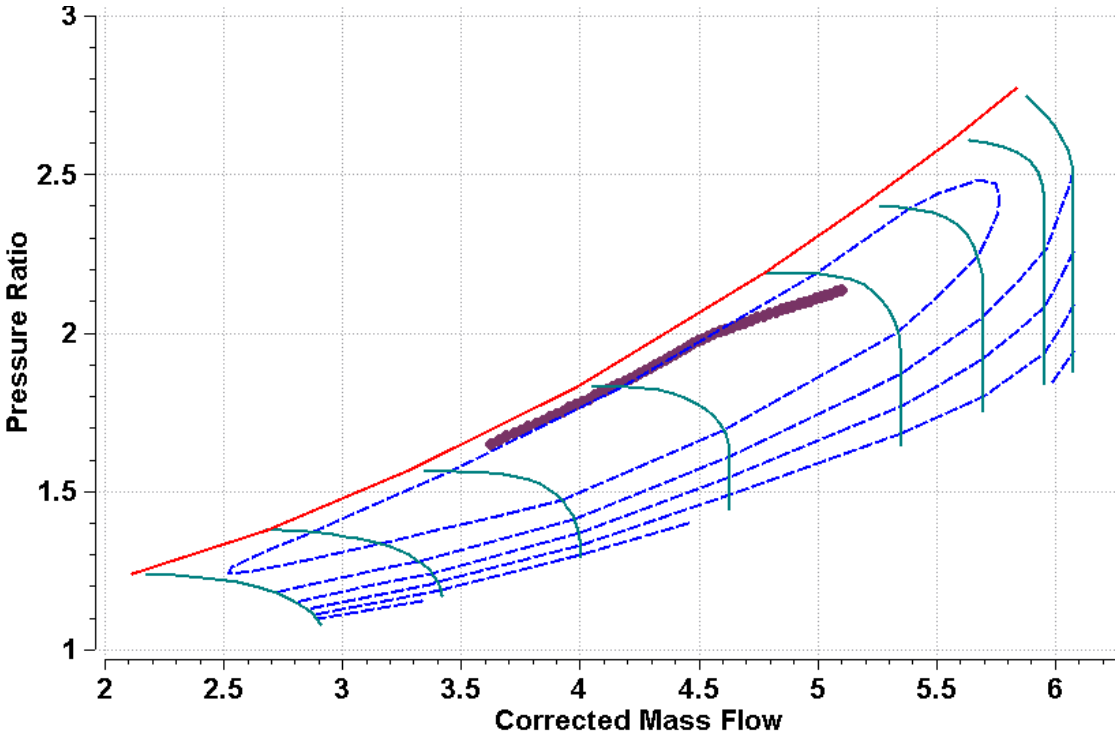
Δημιουργία experiment

Με βάση το νέο partition δημιουργείται ένα νέο experiment στο οποίο αρχικά κατασκευάζεται η γραμμή λειτουργίας με σταθερές στροφές του στροβίλου ισχύος με την ίδια μεταβολή του καυσίμου όπως στο κεφάλαιο 6. Οι νέες γραμμές λειτουργίας εμφανίζονται σε διαφορετικά σημεία και σε κάποιες περιπτώσεις εκτός χαρτών. Αυτό συμβαίνει γιατί η νέα μηχανή έχει μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης και κατά συνέπεια με την πρόσδοση ίδιας ποσότητας καυσίμου παράγει περισσότερη ισχύ και λειτουργεί σε διαφορετικό σημείο.

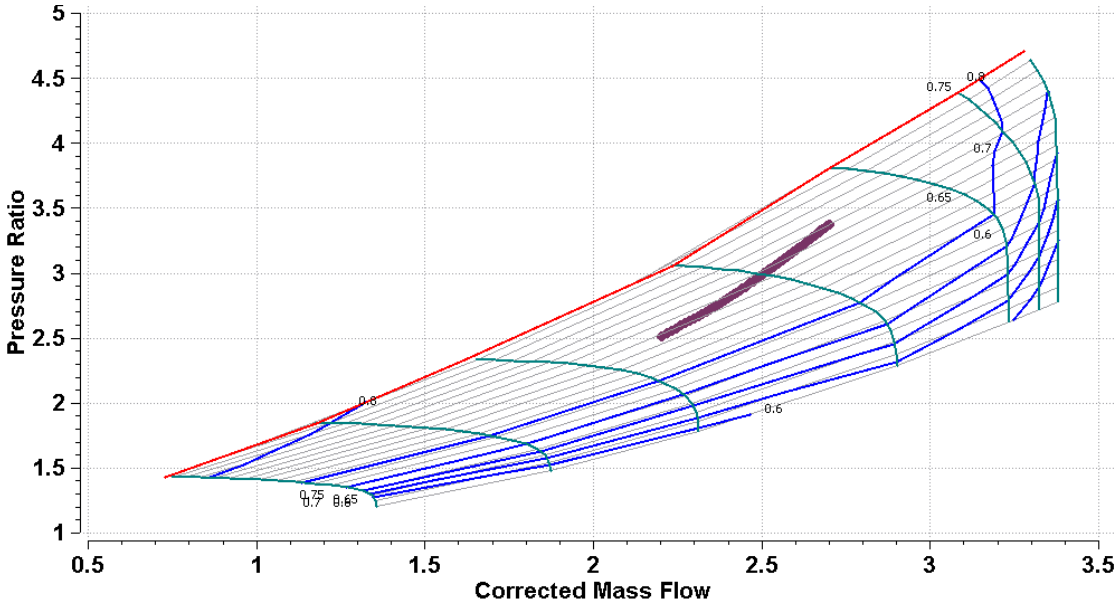
Για τον υπολογισμό της διαφοράς στην κατανάλωση καυσίμου, στο πείραμα που δημιουργείται εισάγεται μια υπορουτίνα που υπολογίζει την νέα ποσότητα του καυσίμου για την οποία επιτυγχάνεται η ίδια αποδιδόμενη ισχύς με το αρχικό μοντέλο.

Από την εκτέλεση του πειράματος προκύπτει για το σημείο λειτουργίας “maximum continuous” νέα τιμή καυσίμου WF = 0.0677168 kg/s, δηλαδή επιτυγχάνεται οικονομία καυσίμου 26.88% για το υπόψη σημείο λειτουργίας για συνθήκες περιβάλλοντος τις συνθήκες της ημέρας της δοκιμής στο δοκιμαστήριο. Με νέα αρχική τιμή καυσίμου την υπολογισθείσα δημιουργείται ένα νέο experiment προκειμένου να υπολογισθεί η γραμμή λειτουργίας στο εύρος ισχύος της αντίστοιχης γραμμής λειτουργίας του κεφαλαίου 5.

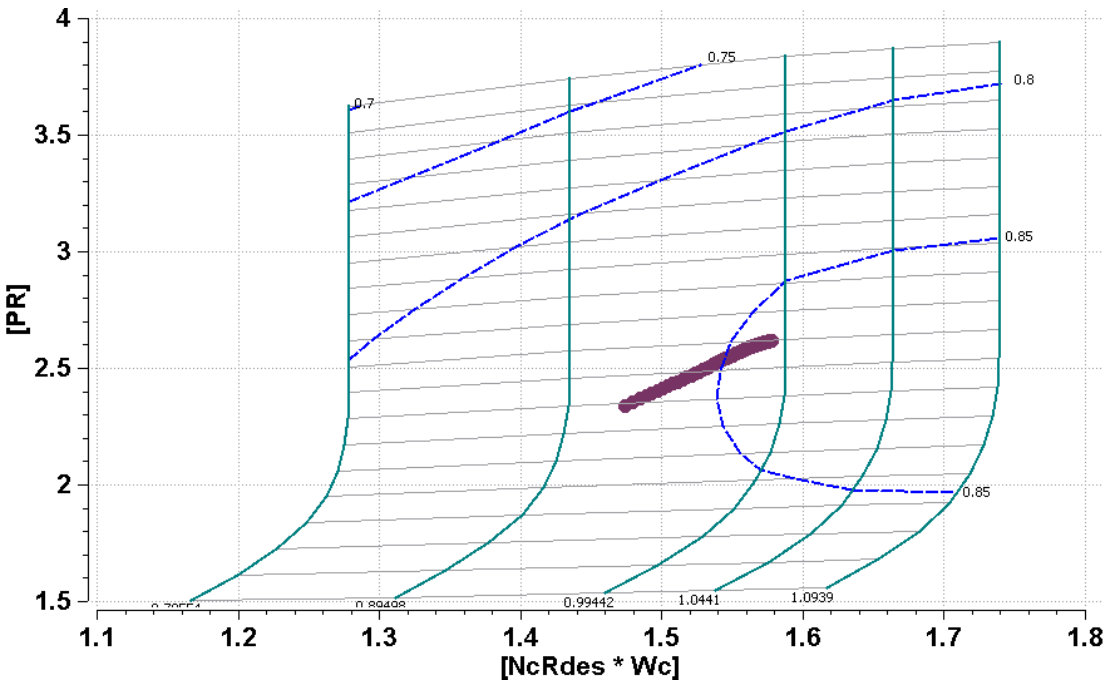
Εφαρμόζοντας τα παραπάνω προκύπτει η γραμμή λειτουργίας σε κάθε μία από τις συνιστώσες του κινητήρα (σχήματα 7.8-7.11).



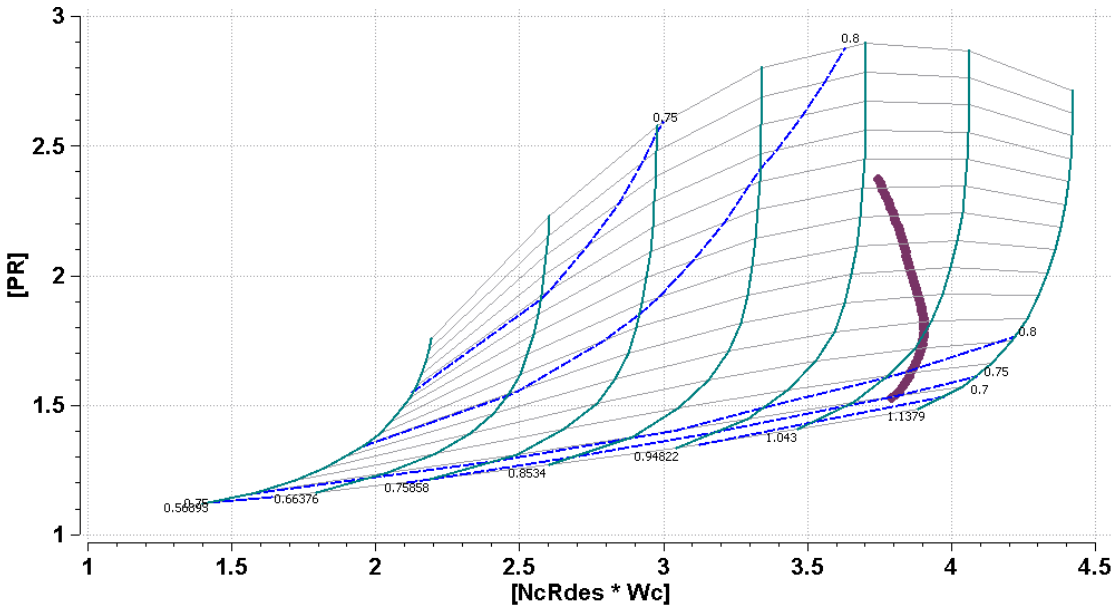
Σχήμα 7.8: γραμμή λειτουργίας αξονικού συμπιεστή



Σχήμα 7.9: γραμμή λειτουργίας ακτινικού συμπιεστή



Σχήμα 7.10: γραμμή λειτουργίας στροβίλου αεριογόνου



Σχήμα 7.11: γραμμή λειτουργίας στροβίλου ισχύος

Παρατηρείται ότι οι γραμμές λειτουργίας έχουν παρόμοια μορφή με αυτή των γραμμών λειτουργίας του μοντέλου χωρίς ανακόμιση καυσαερίων. Η διαφορά έγκειται στη μειωμένη κατανάλωση καυσίμου ο ακριβής υπολογισμός της οποίας γίνεται στην επόμενη ενότητα. Επίσης παρατηρείται ότι ο αξονικός συμπιεστής τείνει να πλησιάσει περισσότερο τη γραμμή πάλμωσης για λειτουργία σε χαμηλά φορτία. Αυτό σημαίνει ότι σε ενδεχόμενη εφαρμογή της ανακόμισης μπορεί να χρειαστεί ρύθμιση της απομάστευσης ενδιαμέσως των βαθμίδων (interstage bleed law) ώστε να απομαστεύεται περισσότερος αέρας.

7.3 Ανάλυση ετήσιου κύκλου λειτουργίας

Στην παρούσα παράγραφο γίνεται ένας υπολογισμός για τη λειτουργία του συγκροτήματος κινητήρα γεννήτριας επί ένα ημερολογιακό έτος, προκειμένου να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για την ομαλή λειτουργία της μηχανής σε διαφορετικές συνθήκες περιβάλλοντος. Αυτό επιτυγχάνεται με διαδοχικούς υπολογισμούς ανά μία ώρα για κάθε ημέρα του έτους μεταβάλλοντας μόνο τις περιβαλλοντικές συνθήκες (θερμοκρασία, πίεση, υγρασία) που λαμβάνονται από τον μετεωρολογικό σταθμό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Επιλέγεται η σταθερή λειτουργία στο σημείο “maximum continuous” προς συνεχή παροχή ηλεκτρικής ισχύος, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη διαστήματα παύσης της λειτουργίας για λόγους συντήρησης κτλ. Αρχικά γίνεται ο υπολογισμός για τον κινητήρα χωρίς ανακόμιση καυσαερίων ενώ στη συνέχεια ο υπολογισμός επαναλαμβάνεται για τον κινητήρα με ανακόμιση καυσαερίων και συγκρίνονται τα αποτελέσματα.

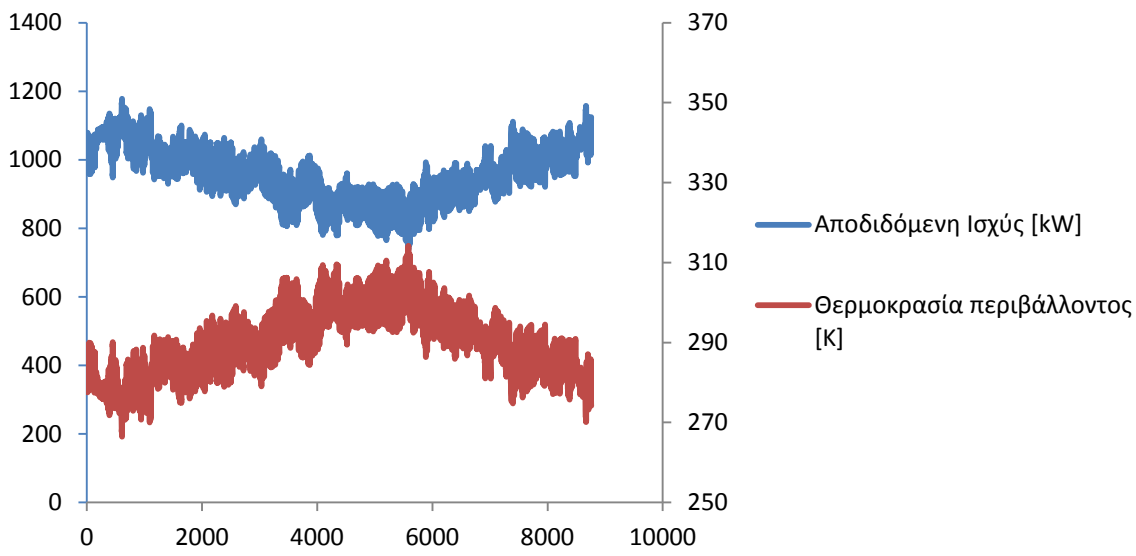
Η αποδιδόμενη ενέργεια υπολογίζεται σε MWh_{el} πολλαπλασιάζοντας τη μηχανική ισχύ που αποδίδεται στον άξονα του κινητήρα (PWSD) με τους βαθμούς απόδοσης γεννήτριας και μετασχηματιστή του κεφαλαίου 6.

Κινητήρας χωρίς ανακόμιση

Μολονότι το συγκρότημα κινητήρα γεννήτριας δεν προορίζεται για συνεχή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κρίνεται σκόπιμη η μελέτη του κινητήρα στο υποθετικό σενάριο της συνεχούς λειτουργίας για ένα χρόνο, ώστε να ληφθεί η «μέση συμπεριφορά» του για τις διαφορετικές συνθήκες περιβάλλοντος.

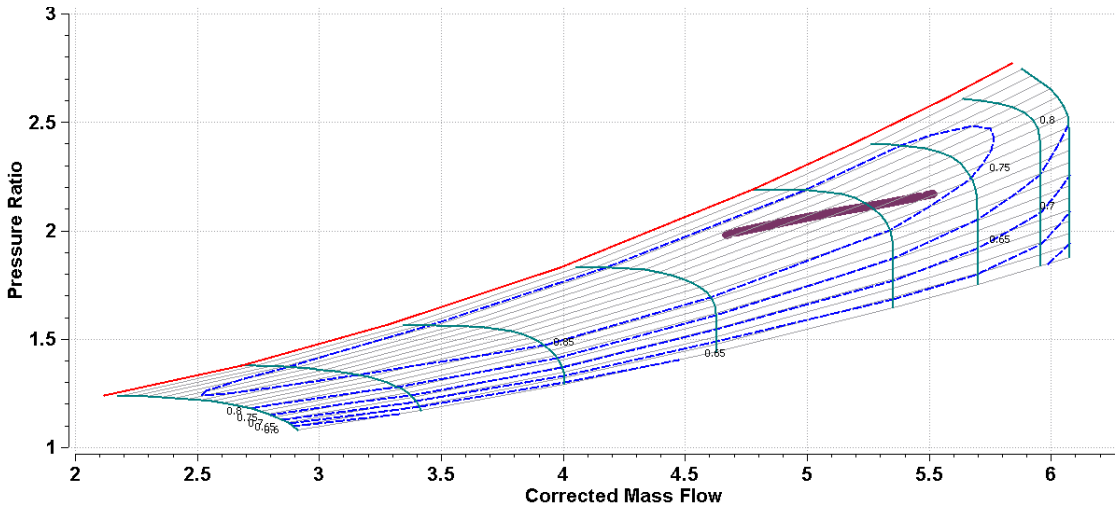
Ο υπολογισμός της λειτουργίας του συγκροτήματος επί ένα ημερολογιακό έτος επιτυγχάνεται με τη δημιουργία ενός experiment σε νέο default partion του σχηματικού του κινητήρα του κεφαλαίου 5, στο οποίο επιλέγεται ως οριακή μεταβλητή η θερμοκρασία στην είσοδο του στροβίλου της αεριογόνου. Η θερμοκρασία T_{t4} επιλέγεται να λαμβάνει τη σταθερή τιμή 1233K, όση δηλαδή λαμβάνει στο δοκιμαστήριο για το σημείο λειτουργίας maximum continuous. Επιλέγοντας σταθερή τη μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου επιτυγχάνεται η συνεχής βέλτιστη απόδοση ισχύος της μηχανής χωρίς την υπερθέρμανσή της. Στο experiment που δημιουργείται καλείται η συνάρτηση “open and read data from file” για την εισαγωγή των συνθηκών περιβάλλοντος. Με το experiment αυτό υπολογίζεται η τελικώς αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς καθώς και η συνολική ετήσια κατανάλωση καυσίμου.

Στο σχήμα 7.12 απεικονίζεται η ετήσια διακύμανση της αποδιδόμενης ισχύος και η εξάρτησή της από τη μεταβολή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Γίνεται αντιληπτό ότι η αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος επιφέρει μείωση της αποδιδόμενης ισχύος λόγω κυρίως της μείωσης της πυκνότητας του αέρα.

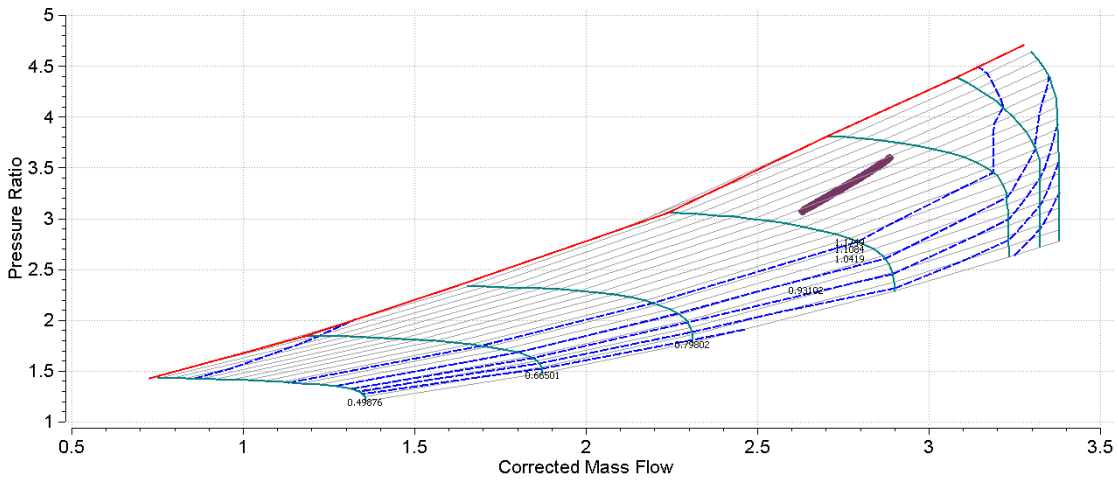


Σχήμα 7.12: Ετήσια διακύμανση αποδιδόμενης Ισχύος και θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

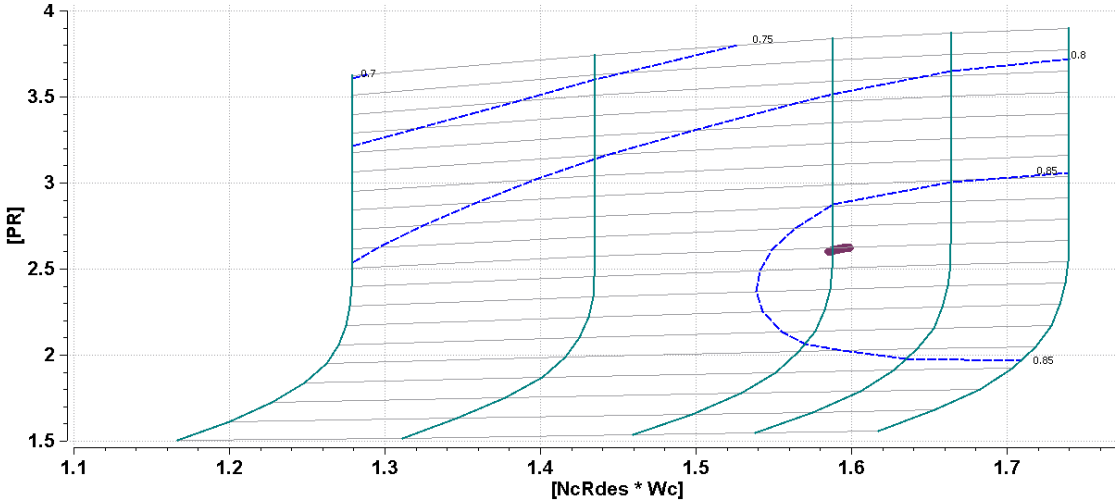
Απεικονίζοντας το σημείο λειτουργίας για κάθε ώρα του έτους πάνω στο χάρτη της κάθε συνιστώσας προκύπτει ένα νέφος σημείων (σχήματα 7.13-7.16). Πρόκειται για το ίδιο σημείο λειτουργίας κάθε φορά, που ορίζεται από της οριακές μεταβλητές (καύσιμο και στροφές στροβίλου ισχύος). Η θέση του σημείου μεταβάλλεται κάθε φορά λόγω διαφορετικών συνθηκών περιβάλλοντος.



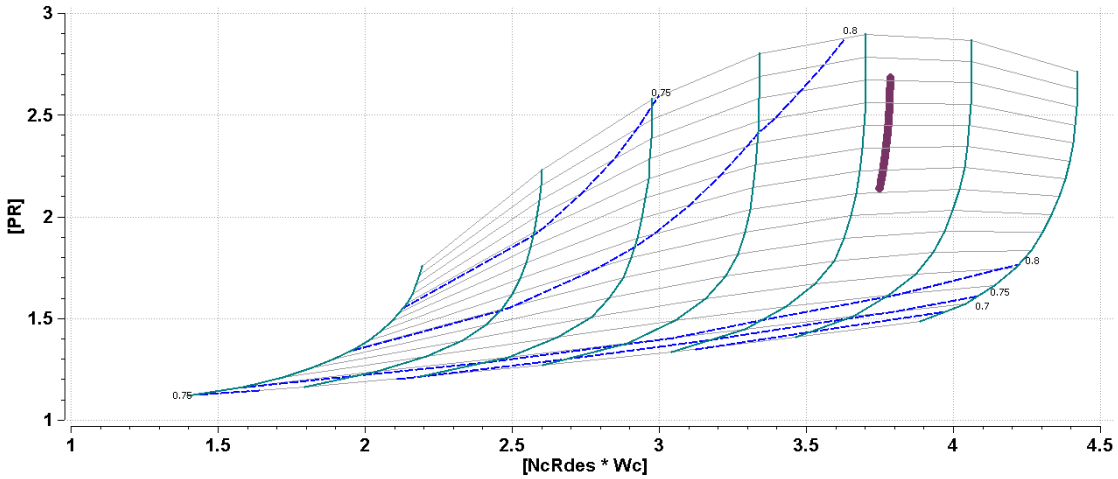
Σχήμα 7.13: Απεικόνιση των σημείων λειτουργίας στο χάρτη του αξονικού συμπιεστή στο "maximum continuous" για ωριαία μετεωρολογικά δεδομένα ενός έτους



Σχήμα 7.14: Απεικόνιση των σημείων λειτουργίας στο χάρτη του ακτινικού συμπιεστή στο "maximum continuous" για ωριαία μετεωρολογικά δεδομένα ενός έτους



Σχήμα 7.15: Απεικόνιση των σημείων λειτουργίας στο χάρτη του στροβίλου αεριογόνου στο "maximum continuous" για ωριαία μετεωρολογικά δεδομένα ενός έτους

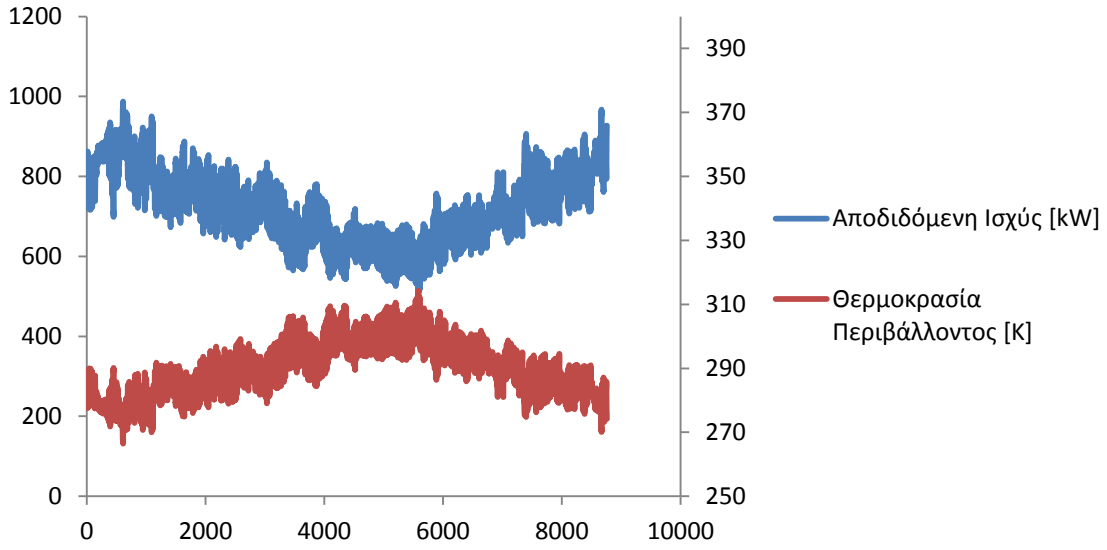


Σχήμα 7.16: Απεικόνιση των σημείων λειτουργίας στο χάρτη του στροβίλου ισχύος στο "maximum continuous" για ωριαία μετεωρολογικά δεδομένα ενός έτους

Η ετησίως παραγόμενη ενέργεια υπολογίζεται σε 8023.54 MWh_{el} με κατανάλωση 2920.57 τόνων καυσίμου.

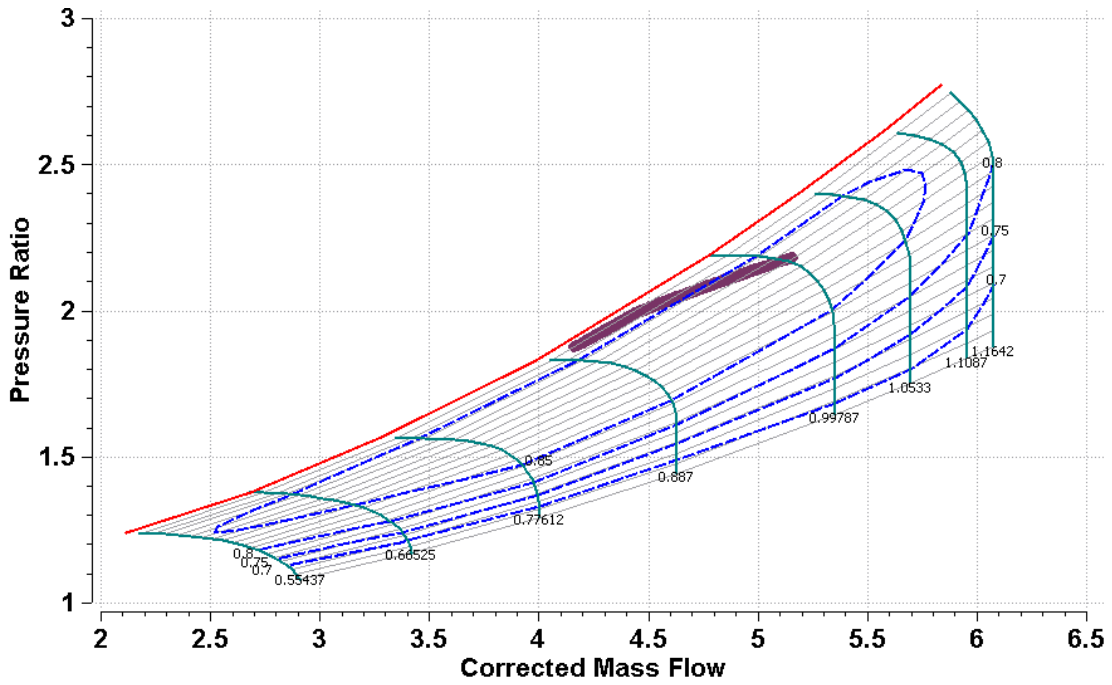
Κινητήρας με ανακόμιση

Για την εγκατάσταση με το βελτιωμένο κινητήρα εφαρμόζεται η αντίστοιχη διαδικασία με τον κινητήρα χωρίς ανακόμιση. Το experiment δημιουργείται σε default partition με επιλεγμένη την θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο υψηλής πίεσης (T_{t4}) ως οριακή μεταβλητή. Στο σχήμα 7.17 απεικονίζεται η ετήσια διακύμανση της αποδιδόμενης ισχύος και η εξάρτησή της από τη μεταβολή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

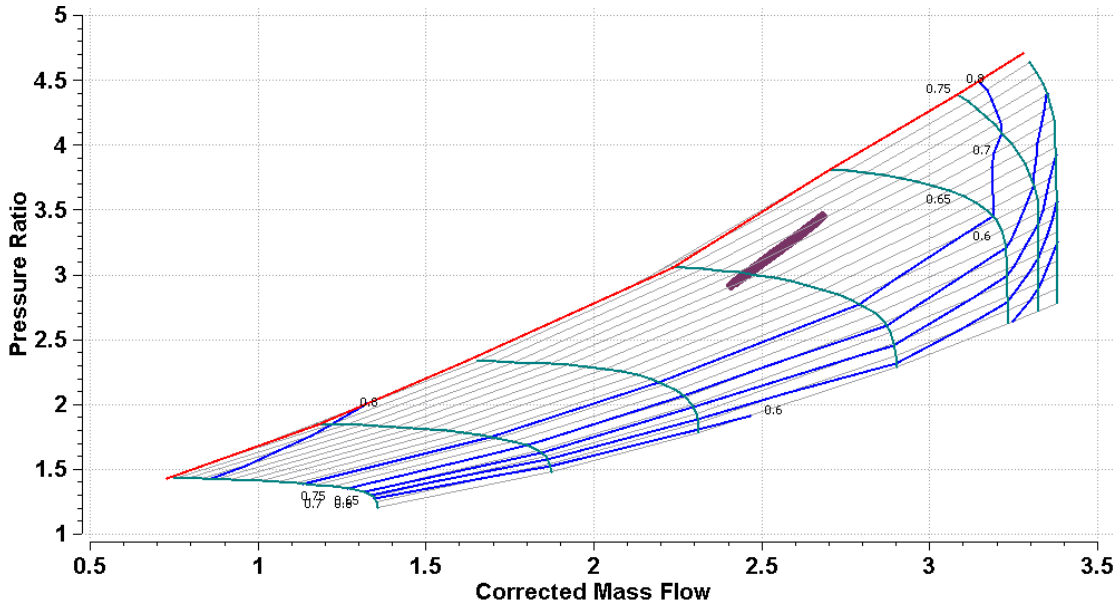


Σχήμα 7.17: Ετήσια διακύμανση αποδιδόμενης ισχύος και θερμοκρασίας περιβάλλοντος

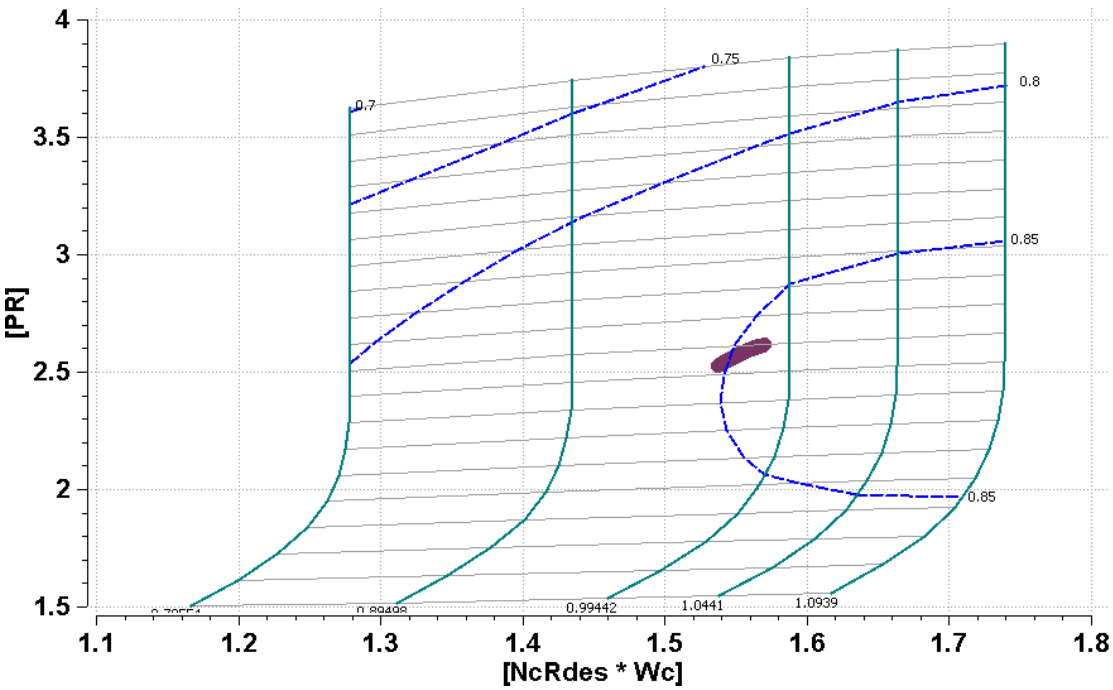
Τα σημεία λειτουργίας απεικονίζονται πάνω στους χάρτες των συνιστωσών και προκύπτουν τα παρακάτω νέφη σημείων λειτουργίας (σχήματα 7.18-7.21).



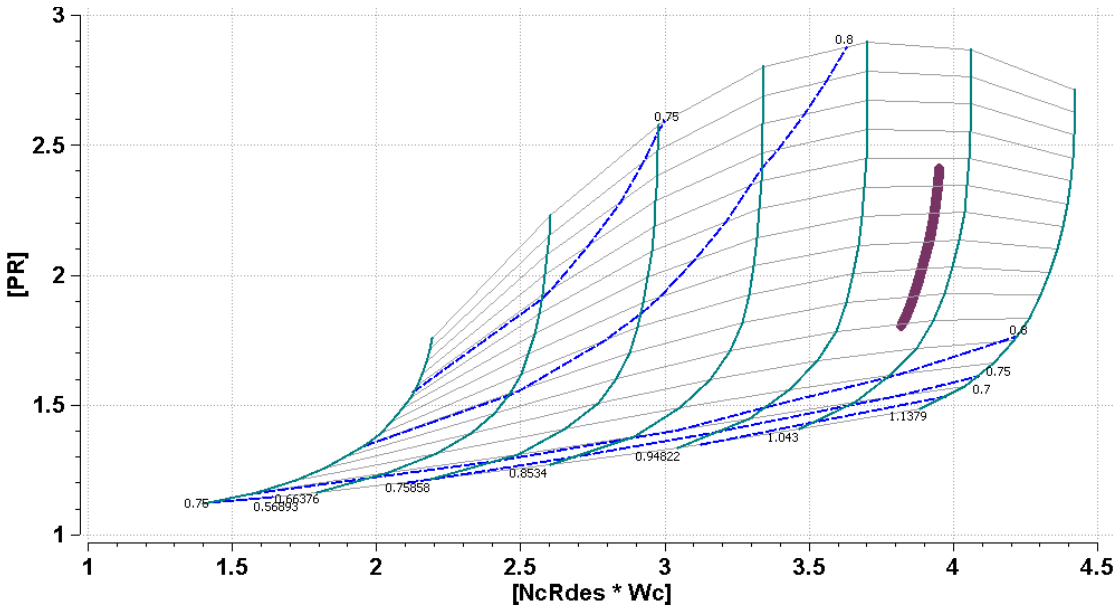
Σχήμα 7.18: Απεικόνιση των σημείων λειτουργίας με ανακόμιση στο χάρτη του αξονικού συμπιεστή στο "maximum continuous" για ωριαία μετεωρολογικά δεδομένα ενός έτους



Σχήμα 7.19: Απεικόνιση των σημείων λειτουργίας με ανακόμιση στο χάρτη του ακτινικού συμπιεστή στο "maximum continuous" για ωριαία μετεωρολογικά δεδομένα ενός έτους



Σχήμα 7.20: Απεικόνιση των σημείων λειτουργίας με ανακόμιση στο χάρτη του στροβίλου αεριογόνου στο "maximum continuous" για ωριαία μετεωρολογικά δεδομένα ενός έτους



Σχήμα 7.21: Απεικόνιση των σημείων λειτουργίας με ανακόμιση στο χάρτη του στροβίλου ισχύος στο "maximum continuous" για ωριαία μετεωρολογικά δεδομένα ενός έτους

Η ετησίως παραγόμενη ενέργεια υπολογίζεται σε 6015.96 MWh_{el} με κατανάλωση 1725.33 τόνων καυσίμου.

7.4 Σύγκριση απλού κύκλου και κύκλου με ανακόμιση

Προφανώς η εφαρμογή της ανακόμισης θερμότητας επιφέρει μείωση της κατανάλωσης καυσίμου. Η σύγκριση γίνεται υπολογίζοντας την ειδική κατανάλωση καυσίμου σε kg/kWh_{el} και τα αποτελέσματα αναγράφονται στον πίνακα 7.1. Η μείωση της ειδικής κατανάλωσης ανέρχεται σε 21.15% γεγονός που αναδεικνύει την μεγάλη δυνατότητα εξοικονόμησης καυσίμου με την εφαρμογή της υπόψη τεχνολογίας.

Πίνακας 7.1: Σύγκριση απλού κύκλου με κύκλο με ανακόμιση καυσαερίων

	SIMPLE CYCLE	HEX
μέση Ισχύς[kW_{el}]	915.9	686.8
ειδική κατανάλωση καυσίμου [kg/kWh_{el}]	0.364	0.287
μείωση ειδικής κατανάλωσης	21.15 %	

Η παρατηρούμενη πτώση στην αποδιδόμενη ισχύ οφείλεται κατά κύριο λόγο στην πτώση πίεσης που επιβάλλεται λόγω της παρεμβολής του εναλλάκτη (HEX). Η πτώση πίεσης επιβάλλεται στο ρεύμα του αέρα υψηλής πίεσης αλλά και του καυσαερίου χαμηλής πίεσης, είναι δε τόσο μεγαλύτερη όσο πιο μικρό το επιθυμητό μέγεθος του εναλλάκτη. Ο αέρας εισέρχεται με χαμηλότερη πίεση στο θάλαμο καύσης και το καυσαέριο εξέρχεται σε υψηλότερη πίεση από την τελευταία βαθμίδα του στροβίλου ισχύος. Έτσι συνολικά η μηχανή λειτουργεί σε χαμηλότερο λόγο πίεσης. Επιπλέον, με την ανακόμιση εισάγεται λιγότερο καύσιμο και έτσι το καυσαέριο έχει σύσταση που τείνει πλέον περισσότερο στη σύσταση του αέρα. Καθώς ο αέρας έχει ειδική θερμοχωρητικότητα χαμηλότερη από αυτήν του καυσαερίου, ο στρόβιλος αποδίδει λιγότερη ισχύ.

Για την εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων επιβάλλεται η διενέργεια οικονομοτεχνικής μελέτης που θα λαμβάνει υπόψη την κατασκευαστική δυνατότητα της εφαρμογής της ανακόμισης των καυσαερίων στο χώρο μεταξύ του ακτινικού συμπιεστή και του θαλάμου καύσης, την επίδραση του όγκου και του βάρους στην πτητικότητα ή φορητότητα του κινητήρα και το κόστος σχεδίασης και υλοποίησης των παραπάνω.

8 Συνδυασμένος κύκλος

Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύσσεται το υπολογιστικό μοντέλο για την εκμετάλλευση της θερμότητας των καυσαερίων με συνδυασμένο κύκλο αεριοστρόβιλου ατμοστρόβιλου (combined cycle, CC).

8.1 Συνδυασμένος κύκλος αεριοστρόβιλου ατμοστρόβιλου

Ο συνδυασμένος κύκλος αεριοστρόβιλου ατμοστρόβιλου είναι ο κύκλος που σήμερα έχει καθιερωθεί ως ο πλέον αποδοτικός πρακτικός κύκλος[16]. Η εφαρμογές του είναι αυτές που έχουν δώσει ώθηση στην τεχνολογία των αεριοστρόβιλων την τελευταία εικοσαετία. Τα καυσαέρια του αεριοστρόβιλου χρησιμοποιούνται σε ατμοπαραγωγό για την παραγωγή υπέρθερμου ατμού μέσω ενός ατμοστροβίλου ο οποίος αποδίδει μηχανική ισχύ. Η συνολική ισχύς εξόδου προκύπτει από το άθροισμα της ισχύος του αεριοστρόβιλου και του ατμοστρόβιλου. Έτσι με την ίδια ποσότητα καυσίμου αποδίδεται μεγαλύτερη ισχύς και προκύπτει συνολικά μεγαλύτερος βαθμός απόδοσης.

Η σημερινή τεχνολογία του συνδυασμένου κύκλου επιτυγχάνει θερμικό βαθμό απόδοσης στην περιοχή του 45%-60%. Οι αεριοστρόβιλοι που χρησιμοποιούνται σε συνδυασμένους κύκλους δεν είναι κατ' ανάγκη υψηλού βαθμού απόδοσης. Ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος για την επιλογή αεριοστρόβιλου είναι η διερχόμενη παροχή καυσαερίων και η θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων.

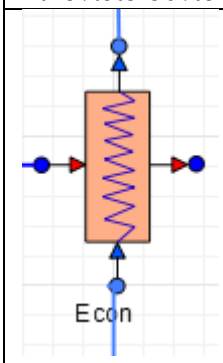
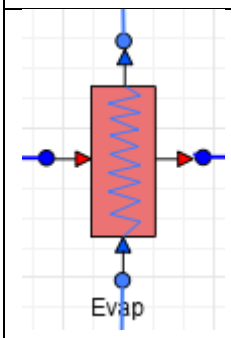
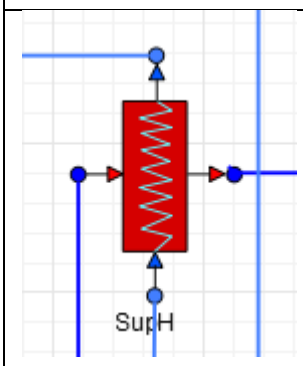
Ο T53 με βαθμό απόδοσης 25%, υψηλή θερμοκρασία καυσαερίων και παροχή καυσαερίων της τάξης των 5kg/s δείχνει να πληροί τις παραπάνω προϋποθέσεις. Για την μελέτη σκοπιμότητας της υλοποίησης του συνδυασμένου κύκλου με τον υπάρχοντα κινητήρα υλοποιείται το κατάλληλο μοντέλο στο PROOSIS. Τα αποτελέσματα θα υποδείξουν την τάξη μεγέθους των συνιστωσών του κύκλου νερού-ατμού, τη συνολικά αποδιδόμενη ισχύ και τον ολικό βαθμό απόδοσης της νέας εγκατάστασης.

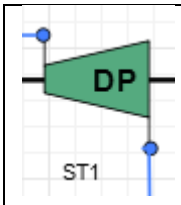
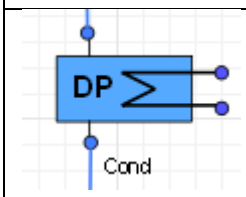
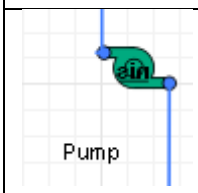
8.2 Κατασκευή μοντέλου του συνδυασμένου κύκλου

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται η διαδικασία υλοποίησης του νέου μοντέλου στο PROOSIS. Αφού περιγραφούν οι νέες συνιστώσες που χρησιμοποιούνται για το τμήμα του κύκλου νερού-ατμού, δημιουργείται ένα αρχικό μοντέλο για τη σχεδίαση των παραμέτρων του κύκλου νερού-ατμού και στη συνέχεια δημιουργείται το τελικό μοντέλο για τη μελέτη του συνδυασμένου κύκλου.

Στον πίνακα 8.1 παρουσιάζονται οι συνιστώσες που χρησιμοποιούνται για την μοντελοποίηση του συνδυασμένου κύκλου στο PROOSIS.

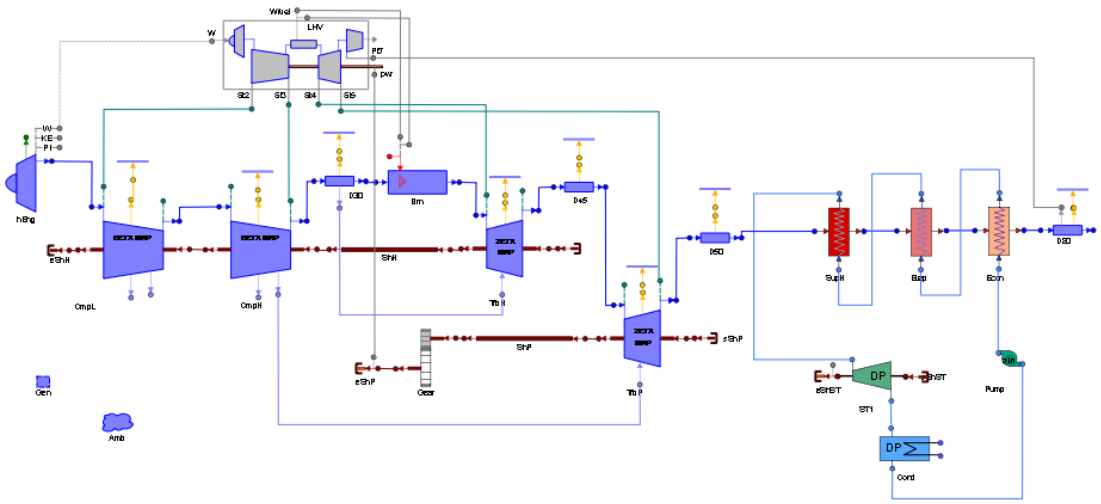
Πίνακας 8.1: Συνιστώσες του συνδυασμένου κύκλου στο PROOSIS

Εικονίδιο συνιστώσας	Περιγραφή	Σχόλια
	Οικονομητήρας (economizer): Πρόκειται για εναλλάκτη θερμότητας δύο ρευμάτων. Από το θερμό ρεύμα διέρχεται το καυσαέριο προερχόμενο από τον αεριοστρόβιλο ενώ από το ψυχρό ρεύμα διέρχεται το νερό του κύκλου νερού-ατμού.	Είναι η συνιστώσα που λαμβάνει το καυσαέριο με τη χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη αφού αυτό έχει ήδη διέλθει από τους άλλους δύο εναλλάκτες (ατμοποιητή και υπερθερμαντήρα). Η πτώση πίεσης στο παρόν μοντέλο επιλέγεται 3% για το ρεύμα νερού και 1% για το ρεύμα των καυσαερίων. Στον οικονομητήρα εισέρχεται υπόψυκτο νερό υψηλής πίεσης και εξέρχεται κορεσμένο νερό.
	Ατμοποιητής (evaporator): Πρόκειται για εναλλάκτη θερμότητας δύο ρευμάτων. Από το θερμό ρεύμα διέρχεται το καυσαέριο προερχόμενο από τον αεριοστρόβιλο ενώ από το ψυχρό ρεύμα διέρχεται το νερό του κύκλου νερού-ατμού.	Εισέρχεται κορεσμένο νερό και εξέρχεται κορεσμένος ατμός. Η πτώση πίεσης του ψυχρού ρεύματος στο παρόν μοντέλο επιλέγεται να διαμοιρασθεί στον οικονομητήρα και στον ατμοποιητή ώστε να υπολογίζονται καλύτερα τα στοιχεία του εργαζόμενου μέσου στη διφασική περιοχή όπου η πίεση και η θερμοκρασία θεωρητικά είναι σταθερές. Για το θερμό ρεύμα επιλέγεται πτώση πίεσης 1%.
	Υπερθερμαντήρας (superheater): Πρόκειται για εναλλάκτη θερμότητας δύο ρευμάτων. Από το θερμό ρεύμα διέρχεται το καυσαέριο προερχόμενο από τον αεριοστρόβιλο ενώ από το ψυχρό ρεύμα διέρχεται το νερό του κύκλου νερού-ατμού.	Είναι η πρώτη συνιστώσα την οποία συναντά το ρεύμα του εξερχόμενου καυσαερίου από τον αεριοστρόβιλο. Στο ψυχρό ρεύμα της συνιστώσας εισέρχεται κορεσμένος ατμός και εξέρχεται υπέρθερμος ατμός. Η πτώση πίεσης λαμβάνεται 5% για το ψυχρό ρεύμα και 2% για το θερμό ρεύμα.

	Ατμοστρόβιλος (steam turbine): Χρησιμοποιείται στο μοντέλο για τη σχεδίαση του κύκλου νερού-ατμού και στη συνέχεια χρησιμοποιείται η αντίστοιχη χωρίς την ένδειξη DP.	Επιλέγεται ισεντροπικός βαθμός απόδοσης[16] 0.88 και οι στροφές λειτουργίας 3600RPM. Τα υπόλοιπα μεγέθη υπολογίζονται από μοντέλο που δημιουργείται για το σχεδιασμό του κύκλου.
	Συμπυκνωτής (condencer): Πρόκειται για εναλλάκτη θερμότητας δύο ρευμάτων νερού. Στην έξοδό του προκύπτει κορεσμένο νερό ή οριακά υπόψυκτο νερό.	Η συγκεκριμένη συνιστώσα χρησιμοποιείται στο μοντέλο για τη σχεδίαση του κύκλου νερού-ατμού και στη συνέχεια χρησιμοποιείται η αντίστοιχη χωρίς την ένδειξη DP.
	Τροφοδοτική αντλία (pump): Η συνιστώσα μοντελοποιεί την τροφοδοτική αντλία του κυκλώματος που αναλαμβάνει την αύξηση της πίεσης του νερού μετά τον συμπυκνωτή προκειμένου να εισέλθει στον οικονομητήρα σε υψηλή πίεση.	Στο συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιείται αντλία με πίεση κατάθλιψης 79bar και με ισεντροπικό βαθμό απόδοσης 0.9.

Μοντέλο για σχεδίαση του συνδυασμένου κύκλου

Το σχηματικό του μοντέλου για τη σχεδίαση του συνδυασμένου κύκλου αποτελείται από το υπάρχον μοντέλο του αεριοστρόβιλου πάνω στο οποίο προστίθενται οι συνιστώσες του κύκλου νερού-ατμού. Η σχεδίαση του κύκλου γίνεται με χρήση συνιστωσών design point (ένδειξη DP) για τον ατμοστρόβιλο και το συμπυκνωτή. Το σχηματικό διάγραμμα παρουσιάζεται στο σχήμα 8.1.



Σχήμα 8.1: Σχηματικό διάγραμμα μοντέλου σχεδίασης συνδυασμένου κύκλου

Για το partition του μοντέλου σχεδίασης επιλέγονται οι οριακές μεταβλητές της οθόνης του σχήματος 8.2 και ζητείται αρχικοποίηση για της μεταβλητές του σχήματος 8.3.

BOUNDARIES:

NAME	ALIAS	UNITS	DESCRIPTION	INITIAL
Brn.Fu_in.W	WF	kg/sec	Fuel Mass Flow	1
Cond.sw_in.S		-	Salinity	0
Cond.sw_in.Tt		K	Total Temperature	283
Cond.sw_in.W		kg/sec	Mass Flow	1
Cond.wast_in.Pt		Pa	Total Pressure	1
D80.F_out.Pt		Pa	Total Pressure	1
Econ.wast_in.Pt		Pa	Total Pressure	1
Econ.wast_in.W		kg/sec	Total Mass Flow Rate	1
ST1.Me_in.Nmech		rpm	Rotational Speed	10000
eShP.Me_in.Nmech		rpm	Rotational Speed	

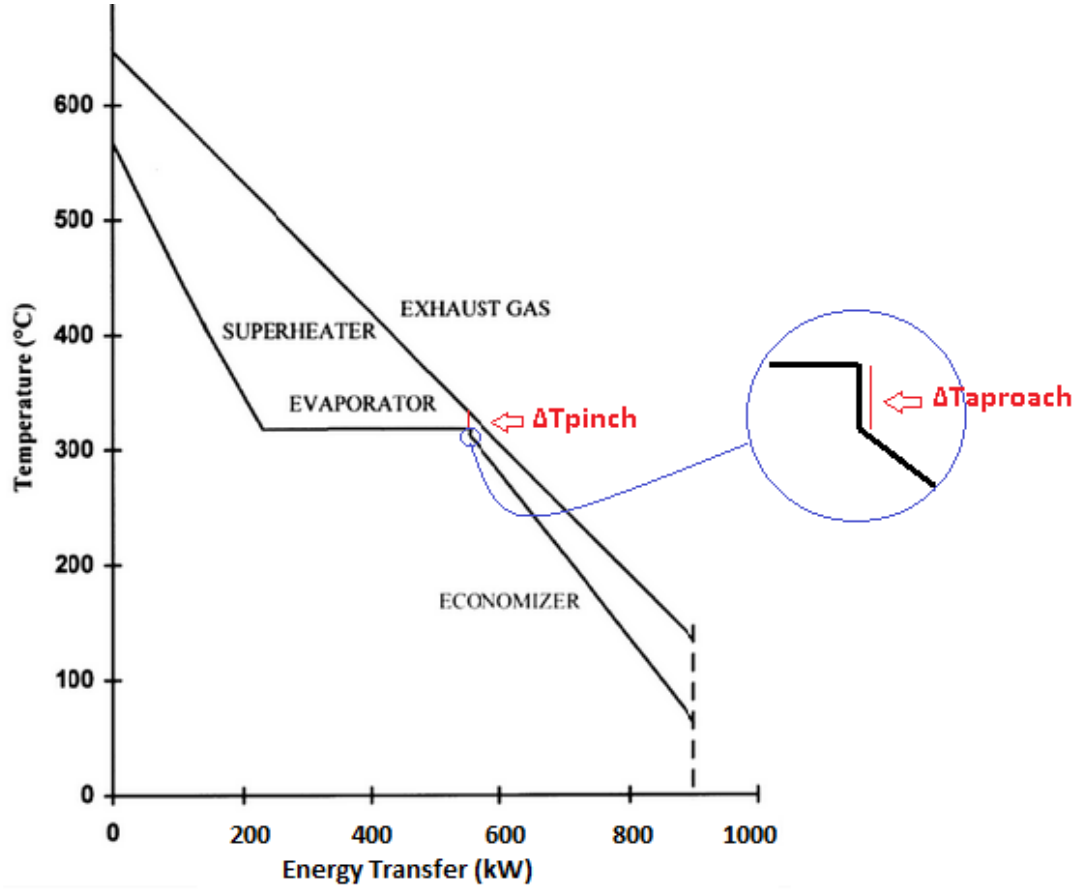
Σχήμα 8.2: Οριακές μεταβλητές για τη σχεδίαση του συνδυασμένου κύκλου

POS	VARIABLE	ALIAS	CATEGORY	UNITS	DESCRIPTION	INITIAL
1	ShH.Me_in.Nmech		DYNAMIC	rpm	Rotational Speed	
2	CmpH.BETA		ALGEBRAIC	-	BETA parameter	0.5
3	CmpL.BETA		ALGEBRAIC	-	BETA parameter	0.5
4	Econ.h_wast_out		ALGEBRAIC	J/kg	Total Enthalpy of outlet water/steam flow	
5	Econ.wast_in.Tt		ALGEBRAIC	K	Total Temperature	1
6	Evap.h_wast_out		ALGEBRAIC	J/kg	Total Enthalpy of outlet water/steam flow	
7	InEng.W_in	W1	ALGEBRAIC	kg/sec	Inlet mass flow rate	
8	TrbH.ZETA		ALGEBRAIC	-	Map auxiliary coordinate	0.5
9	TrbP.ZETA		ALGEBRAIC	-	Map auxiliary coordinate	0.5

Σχήμα 8.3: Μεταβλητές για τις οποίες ζητείται αρχικοποίηση

Από το experiment που δημιουργείται πάνω στο παραπάνω default partition, προκύπτει η σχεδίαση του αγωγού εξόδου D80, των UA των εναλλακτών (συντελεστής μετάδοσης θερμότητας επί την ενεργή επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας) και τα υπόλοιπα δεδομένα για τη ροή στο κύκλωμα νερού-ατμού.

Στο experiment ορίζονται οι θερμοκρασίες Tpinch και Taproach. Taproach είναι η θερμοκρασία προσέγγισης (approach temperature) ήτοι η διαφορά της θερμοκρασίας κορεσμού στο τύμπανο από την θερμοκρασία εξόδου του νερού από τον οικονομητήρα. Tpinch είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της θερμοκρασίας κορεσμού μέσα στο τύμπανο και της θερμοκρασίας εξόδου των καυσαερίων από τον ατμοποιητή (pinch point temperature). Στο σχήμα 8.4 παρουσιάζεται γραφικά η συναλλαγή θερμότητας στα τμήματα του ατμοπαραγωγού.



Σχήμα 8.4: Απεικόνιση συναλλαγής θερμότητας ατμοπαραγωγού

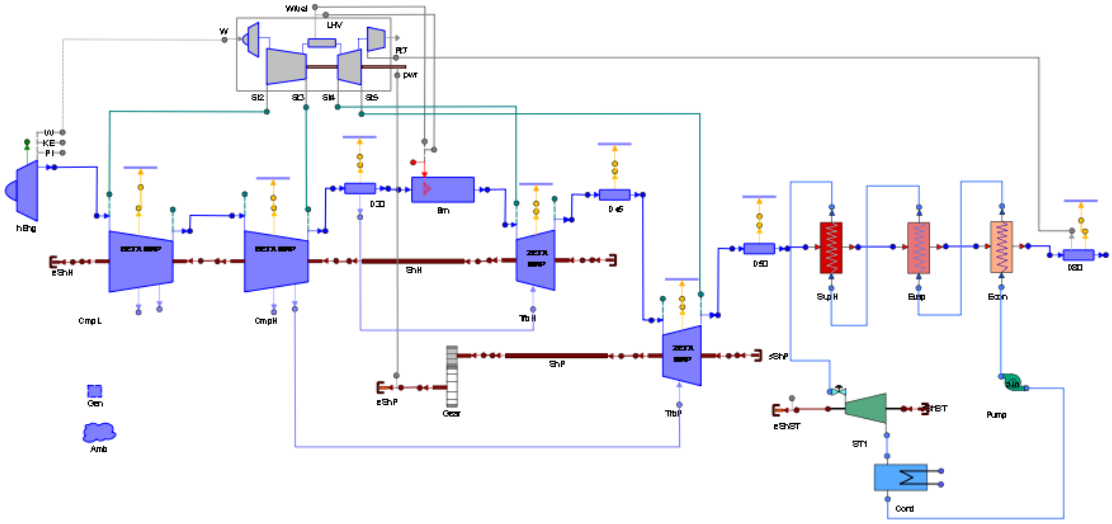
Κατασκευαστικά είναι επιθυμητό οι Tpinch και Taproach να είναι όσο το δυνατό μικρότερες γιατί κάτι τέτοιο θα επέτρεπε καλύτερα την μεταφορά της προσδιδόμενης θερμότητας αυξάνοντας την ατμοπαραγωγή. Ωστόσο, όσο αυτές οι θερμοκρασίες τείνουν προς το μηδέν οι επιφάνειες των αντίστοιχων εναλλακτών θερμότητας τείνουν προς το άπειρο, αυξάνοντας τον όγκο και το κόστος της κατασκευής. Επομένως πρέπει να βρεθεί ο καλύτερος συνδυασμός που θα δίνει καλή εκμετάλλευση της προσδιδόμενης

θερμότητας με λογικό εμβαδό επιφανειών συναλλαγής θερμότητας και περιορισμένη πτώση πίεσης.

Τα αποτελέσματα αυτά αποθηκεύονται στο αρχείο DP_file και στη συνέχεια λαμβάνονται από το experiment του τελικού μοντέλου που περιγράφεται στη συνέχεια.

Μοντέλο συνδυασμένου κύκλου

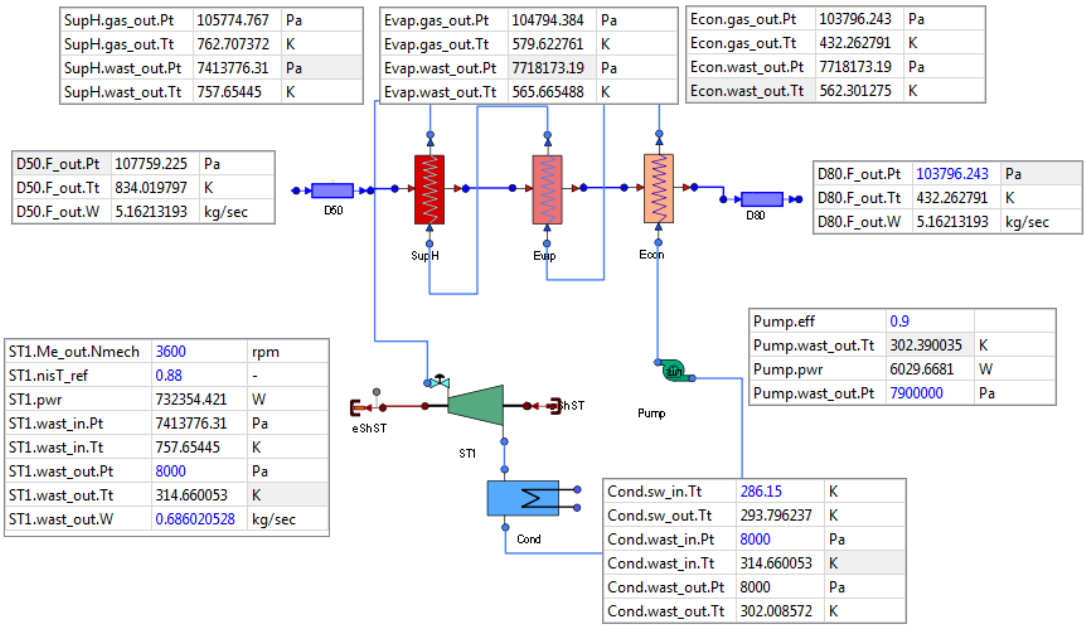
Το σχηματικό διάγραμμα του τελικού μοντέλου του συνδυασμένου κύκλου είναι όμοιο με αυτό της προηγούμενης παραγράφου με τη διαφορά ότι πλέον αντικαθίστανται οι συνιστώσες σχεδίασης (ατμοστρόβιλος και συμπυκνωτής). Το σχηματικό που προκύπτει παρουσιάζεται στο σχήμα 8.5.



Σχήμα 8.5: Σχηματικό συνδυασμένου κύκλου

Το νέο partition που δημιουργείται πάνω στο νέο σχηματικό είναι ίδιο με αυτό του μοντέλου σχεδίασης του συνδυασμένου κύκλου. Το experiment που δημιουργείται στο νέο μοντέλο λαμβάνει τιμές από το αρχείο DP_file του μοντέλου σχεδίασης και λειτουργεί με ρυθμιζόμενη παροχή καυσίμου ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο (TIT) για συνεχή λειτουργία, ήτοι 1233K. Έτσι επιτυγχάνεται η μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία καυσαερίων η οποία επιτρέπει τη μέγιστη δυνατή συνεχή ατμοπαραγωγή.

Για συνθήκες περιβάλλοντος ίδιες με αυτές του δοκιμαστηρίου και σημείο λειτουργίας το “maximum continuous” ο συνδυασμένος κύκλος λειτουργεί αποδίδοντας ισχύ 1.64 MW με βαθμό απόδοσης 41.3%. Αναλυτικότερα τα χαρακτηριστικά μεγέθη του συνδυασμένου κύκλου για το σημείο λειτουργίας “maximum continuous” παρουσιάζονται στο σχήμα 8.6.



Σχήμα 8.6: Λειτουργία συνδυασμένου κύκλου στο σημείο "maximum continuous"

8.3 Σύγκριση απλού και συνδυασμένου Κύκλου

Προκειμένου να γίνουν συγκρίσεις με το αρχικό μοντέλο του αεριοστρόβιλου και με το μοντέλο με ανακόμιση μελετάται η λειτουργία του συνδυασμένου κύκλου σε διάστημα ενός ημερολογιακού έτους. Η παραγόμενη ενέργεια σύμφωνα με το PROOSIS παρουσιάζεται στον πίνακα 8.2 σε σύγκριση με τα σενάρια που μελετήθηκαν έως τώρα.

Πίνακας 8.2: Σύγκριση αποτελεσμάτων των μοντέλων

	Simple Cycle	HEX	Combined Cycle	
			αεριοστρόβιλος	ατμοστρόβιλος
μέση Ισχύς[kW_{el}]	915.9	686.8	822.5	660.1
Ειδική Κατανάλωση καυσίμου[kg/ kWh_{el}]	0.364	0.287	0.214	
Βαθμός απόδοσης	22.93%	29.11%	21.65%	39.03% [overall]

Συγκρίνοντας τον απλό κύκλο με τον κύκλο με ανακόμιση παρατηρείται μείωση της ισχύος για τους λόγους που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, και αύξηση του βαθμού απόδοσης.

Στην περίπτωση του συνδυασμένου κύκλου ο βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης αυξάνεται σημαντικά (39.03%). Το γεγονός ότι είναι μικρότερος από τις ενδεικτικές τιμές της βιβλιογραφίας (45%) οφείλεται στο ότι αφενός πρόκειται για

αεριοστρόβιλο παλαιάς τεχνολογίας με χαμηλό βαθμό απόδοσης και αφετέρου στο ότι τα αποτελέσματα αφορούν όχι το σημείο σχεδίασης του αεριοστροβίλου αλλά το σημείο “maximum continuous”. Αναμένεται στο σημείο σχεδίασης του αεριοστρόβιλου, ο βαθμός απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου να είναι αυξημένος. Εκτελώντας το αντίστοιχο πείραμα για το σημείο σχεδίασης του αεριοστρόβιλου προκύπτει ετήσια παραγωγή ισχύος 16607.3 MWh/a, κατανάλωση kg/a και βαθμός απόδοσης 43.69%.

Πέρα από την αναμενόμενη μεγαλύτερη αύξηση του βαθμού απόδοσης στον συνδυασμένο κύκλο, ουσιαστική σύγκριση των δύο κύκλων προκύπτει μέσω οικονομοτεχνικής μελέτης η οποία θα περιλαμβάνει και το κόστος επένδυσης για τις δύο βελτιώσεις. Επιπλέον πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι μια εγκατάσταση συνδυασμένου κύκλου παύει να έχει τη δυνατότητα εύκολης μεταφοράς ενώ αυξάνεται σημαντικά η πολυπλοκότητα της εγκατάστασης.

9 Οικονομοτεχνική αξιολόγηση

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οικονομικά στοιχεία που αφορούν στην υλοποίηση του συγκροτήματος ηλεκτροπαραγωγής με τον αεριοστρόβιλο σε λειτουργία απλού κύκλου. Αναφέρονται οι βασικές έννοιες της οικονομικής ανάλυσης, γίνεται μια εισαγωγή στην αξιολόγηση επενδύσεων και στη συνέχεια παρουσιάζονται τα κόστη προμήθειας του κινητήρα, της γεννήτριας, του μειωτήρα στροφών και του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού που απαιτείται. Η οικονομοτεχνική αξιολόγηση ολοκληρώνεται με τον υπολογισμό της οριακής τιμής πώλησης της παραγόμενης ενέργειας για απόσβεση της επένδυσης σε συγκεκριμένη χρονική διάρκεια και με ανάλυση ευαισθησίας της τιμής αυτής ως προς τις βασικές παραμέτρους.

9.1 Βασικές έννοιες

Σκοπός της χρηματοοικονομικής ανάλυσης είναι να διερευνηθεί η χρηματική αποδοτικότητα του σχεδίου επένδυσης. Η ουσία της είναι ο προσδιορισμός της σχέσης μεταξύ απόδοσης και επενδυόμενου κεφαλαίου.

Βασικός όρος στην χρηματοοικονομική ανάλυση είναι η **χρηματοροή**. Η χρηματοροή ή ταμειακή ροή (cash flow) αναφέρεται στο χρηματικό ποσό που εισέρχεται ή εξέρχεται σε μια δεδομένη χρονική στιγμή από την επιχείρηση - επενδυτή. Θετικές χρηματοροές θεωρούνται όλες οι εισροές μετρητών από τους χρηματοδοτικούς πόρους και τα έσοδα πωλήσεων. Αρνητικές εισροές θεωρούνται οι συνολικές επενδύσεις, το λειτουργικό κόστος, η εξυπηρέτηση δανείων, οι πληρωμές φόρων.

Η διαπίστωση ότι ένα χρηματικό ποσό που είναι διαθέσιμο σήμερα έχει μεγαλύτερη αξία από ένα ίσο ποσό που διατίθεται κάποια στιγμή στο μέλλον, περιγράφεται από την **χρονική αξία χρήματος**. Ποσοτικοποιείται με ένα επιτόκιο (interest rate) που εκφράζει την αμοιβή δανειζομένου κεφαλαίου και υπολογίζεται συνήθως σε ετήσια βάση σαν ποσοστό του κεφαλαίου αυτού. Καθώς ένα επενδυτικό σχέδιο χαρακτηρίζεται από μια σειρά χρηματοροών που η κάθε μία από αυτές γίνεται σε διαφορετική χρονική στιγμή, είναι αναγκαία η αναγωγή όλων των χρηματοροών σε κοινή χρονική βάση.

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την αναγωγή είναι ο ανατοκισμός και η προεξόφληση. Με τον **ανατοκισμό** οι σημερινές αξίες μετατρέπονται σε ισοδύναμες μελλοντικές, με βάση ένα ορισμένο επιτόκιο ipou εκφράζει τη χρονική αξία του χρήματος. Αν C η αξία μιας χρηματοροής σήμερα ή ένα αρχικό ποσό χρημάτων, t ο αριθμός των ετών και S_t η μελλοντική αξία της αξίας C μετά την πάροδο t ετών ισχύει η σχέση:

$$S_t = C\,(1+i)^t$$

Με την **προεξόφληση**, αξίες που αναφέρονται σε κάποια χρονική στιγμή στο μέλλον ανάγονται σε σημερινές τιμές. Εφαρμόζεται για τον προσδιορισμό της παρούσας αξίας μιας μελλοντικής χρηματοροής C. Η παρούσα αξία της χρηματοροής C μετά από t έτη υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_o = C\,(1+i)^{-t}$$

Ο προσδιορισμός της αξίας μιας χρηματοροής δεν εξαρτάται μόνο από τη χρονική αξία του χρήματος, αλλά και από τον **πληθωρισμό**. Το φαινόμενο του πληθωρισμού αποτελεί μια ανεξάρτητη παράμετρο διαχρονικής μείωσης της αξίας του χρήματος, αντικατοπτρίζοντας την αύξηση των τιμών των αγαθών και υπηρεσιών. Κατά τη διαδικασία αξιολόγησης μιας επένδυσης εφαρμόζονται δύο μέθοδοι αντιμετώπισης του πληθωρισμού. Η πρώτη είναι η μέθοδος σταθερών τιμών, η οποία αγνοεί τελείως τον πληθωρισμό θεωρώντας είτε ότι δεν επηρεάζει αισθητά τις τιμές των χρηματοροών της επένδυσης είτε ότι επηρεάζει στο ίδιο ποσοστό το κόστος και το όφελός της. Η δεύτερη είναι η μέθοδος των πληθωριστικά μεταβαλλόμενων χρηματοροών, όπου εφαρμόζονται διαφορετικοί ρυθμοί πληθωρισμού στα επί μέρους μεγέθη που υπόκεινται πληθωριστικές μεταβολές.

Η σταδιακή μείωση της αξίας των παγίων περιουσιακών στοιχείων μιας επένδυσης λόγω φθοράς αντιπροσωπεύεται από τις **αποσβέσεις**. Με τη μέθοδο των αποσβέσεων επιδιώκεται η κατανομή του κόστους παγίων στοιχείων σε όλο το χρόνο ζωής τους και η αντίστοιχη επιβάρυνση του κόστους παραγωγής.

Ένα τμήμα του απαιτούμενου κόστους για την πραγματοποίηση ενός σχεδίου επένδυσης καλύπτεται συχνά με δανειακά κεφάλαια. Το **κόστος χρηματοδότησης** καθορίζεται από το ύψος του δανείου, το χρόνο λήψης, την περίοδο χάριτος αν υπάρχει, το επιτόκιο με το οποίο υπολογίζονται οι τόκοι του δανείου, τη συμφωνία ή όχι των τόκων κατά την περίοδο χάριτος και τον τρόπο αποπληρωμής του δανείου. Η αποπληρωμή γίνεται με τοκοχρεολυτικές δόσεις που περιλαμβάνουν το χρεολύσιο, δηλαδή την επιστροφή του δανείου και τον τόκο για το υπόλοιπο κεφάλαιο.

Ένα ευρύτατα εφαρμοζόμενο μέτρο οικονομικής αποδοτικότητας είναι η **καθαρή παρούσα αξία** (net present value). Εκφράζει την αξία σε χρηματικές μονάδες που προκύπτει από την προεξόφληση στο παρόν όλων τοων καθαρών χρηματοροών κάθε έτους για το χρονικό ορίζοντα του σχεδίου επένδυσης. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\mathrm{NVP} = \sum_{i=1}^{n} C_t (1+i)^{-t}$$

όπου i το επιτόκιο προεξόφλησης, t η περίοδος προεξόφλησης και n το σύνολο των ροών.

Ένας άλλος δείκτης αποδοτικότητας μιας επένδυσης είναι ο **εσωτερικός συντελεστής απόδοσης** (internal rate of return). Είναι το υπολογιζόμενο επιτόκιο με το οποίο η παρούσα αξία των ταμειακών εισροών είναι ίση με την παρούσα αξία των ταμειακών εκροών. Δηλαδή είναι το επιτόκιο για το οποίο η τιμή της NVP είναι μηδέν:

$$0 = \sum_{i=1}^{n} C_t (1 + IRR)^{-t}$$

Από τη σύγκριση του IRR με το επίσημο επιτόκιο της αγοράς i συμπεραίνεται η αποδοτικότητα ή μη του σχεδίου επένδυσης.

9.2 Εισαγωγή στην αξιολόγηση της επένδυσης

Η εγκατάσταση και εκμετάλλευση ενός συγκροτήματος συμβατικής ηλεκτροπαραγωγής αποτελεί μια επένδυση, που σημαίνει μια πολυσύνθετη δραστηριότητα κατά την οποία δεσμεύονται οικονομικοί πόροι σε μια παραγωγική δραστηριότητα, με την προσδοκία κάποιων ωφελειών στο μέλλον.

Το κόστος συμβατικής ηλεκτροπαραγωγής καθορίζεται από τρεις παραμέτρους:

- Αρχικό κόστος επένδυσης
- Κόστος καυσίμου
- Κόστος συντήρησης και λειτουργίας

Το αρχικό κόστος επένδυσης περιλαμβάνει το κόστος μελέτης, εξοπλισμού και σύνδεσης της εγκατάστασης. Το κόστος συντήρησης και λειτουργίας περιλαμβάνει την προγραμματισμένη συντήρηση, τα αναλώσιμα και ανταλλακτικά, την αποκατάσταση έκτακτων βλαβών και την επίβλεψη λειτουργίας της εγκατάστασης.

Η συγκεκριμένη επένδυση χαρακτηρίζεται από υψηλό κόστος λειτουργίας σε σχέση με το αρχικό κόστος επένδυσης, λόγω της συνεχούς κατανάλωσης καυσίμου. Ένας αρχικός υπολογισμός που παρουσιάζεται στον πίνακα 9.1 οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το κόστος παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλότερο από το κόστος πώλησής της από τη ΔΕΗ. Η χρέωση προμήθειας της ενέργειας από τη ΔΕΗ είναι σύμφωνη με το Γενικό Ενεργειακό Βιομηχανικό τιμολόγιο Γ21Β[στ].

Πίνακας 9.1: Σύγκριση κόστους παραγωγής με το κόστος αγοράς ενέργειας

	ετήσια παραγωγή [kWh/a]	κατανάλωση καυσίμου [kg/kWh]	τιμή καυσίμου [€/kg]	τιμή αγοράς από ΔΕΗ [€/kWh]	ετήσιο κόστος [M€/a]
συγκρότημα Τ53γεννήτριας	8023284	0.364	0.8	-	1.46
αγορά από ΔΕΗ		-	-	0.10153	0.82

Το συμπέρασμα που προκύπτει από τον πίνακα 9.1 αποκλείει το άμεσο οικονομικό όφελος από την αξιοποίηση της επένδυσης μέσω πώλησης της παραγόμενης ενέργειας σε τιμή ανταγωνιστική της τιμής της ΔΕΗ. Εναλλακτικές επενδυτικές ευκαιρίες ως προς το κριτήριο αυτό είναι η εγκατάσταση αιολικού πάρκου, η εγκατάσταση ηλιακού πάρκου ή η κατασκευή μικρού υδροηλεκτρικού έργου. Όμως τέτοιες επενδυτικές ευκαιρίες προϋποθέτουν την ύπαρξη κατάλληλων συνθηκών, συνεπάγονται μονιμότητα της εγκατάστασης και δεν εξασφαλίζουν τη σταθερή παραγωγή ενέργειας ανάλογα με τη ζήτηση. Επίσης πλεονέκτημα της συγκεκριμένης επένδυσης σε σχέση με τον ανταγωνισμό αποτελεί η φορητότητά της.

Η προώθηση της επένδυσης προϋποθέτει τη μελέτη, τον προγραμματισμό και το συντονισμό πολλών δραστηριοτήτων υπό το πρίσμα[19]:

- Επιχειρηματικό: δέσμευση οικονομικών πόρων, ανάληψη ευθυνών, πρωτοβουλιών και κινδύνων
- Τεχνικό: επιλογή τεχνολογίας, τεχνικός σχεδιασμός
- Χρηματοδοτικό: εξασφάλιση των αναγκαίων χρηματικών κεφαλαίων για την ταμειακή εξυπηρέτηση της επένδυσης
- Οικονομικό: εξασφάλιση της οικονομικής αποδοτικότητας μετά από έλεγχο των χρηματικών εισροών εκροών
- Περιβαλλοντικό: έλεγχος των πιθανών επιπτώσεων στο φυσικό και πολιτιστικό περιβάλλον
- Κοινωνικό: έλεγχος των πιθανών επιπτώσεων στο κοινωνικό περιβάλλον

Η διαδικασία αξιολόγησης της επένδυσης διαφοροποιείται ανάλογα με την οπτική γωνία από την οποία γίνεται. Συγκεκριμένα, άλλες παραμέτρους κόστους και οφέλους θα συμπεριλάβει ένας ιδιώτης επενδυτής και άλλες ένας δημόσιος φορέας. Στην πρώτη περίπτωση εφαρμόζεται η ιδιωτικό-οικονομική χρηματική αξιολόγηση, δηλαδή εξετάζεται αν η επένδυση αποφέρει χρηματικό κέρδος στον επιχειρηματία επενδυτή για τα κεφάλαια που διέθεσε. Η ανάλυση στηρίζεται αποκλειστικά στις ταμειακές ροές της επένδυσης και αγνοεί τις ευρύτερες επιπτώσεις της στην εθνική οικονομία, στην τοπική ανάπτυξη, στην απασχόληση και στο περιβάλλον.

Η ιδιωτική χρηματική αποδοτικότητα αποτελεί απαραίτητο όρο για την υλοποίηση και επιβίωση της επένδυσης. Στην περίπτωση που μια επένδυση εμφανίζεται χρήσιμη αλλά μη αποδοτική για τον επενδυτικό φορέα, το κράτος ως φορέας του κοινωνικού συμφέροντος μπορεί να μετατρέψει με διάφορα κίνητρα (επιδοτήσεις, χαμηλότοκα δάνεια) την κοινωνικά ενδιαφέρουσα πρόταση σε ελκυστική για τον ιδιώτη επενδυτή.

Η επένδυση στην κατασκευή ενός συγκροτήματος ηλεκτροπαραγωγής αεριοστρόβιλου γεννήτριας παρέχει το συγκριτικό πλεονέκτημα της άμεσης παραγωγής ενέργειας σε οποιαδήποτε τοποθεσία, ανεξαρτήτως καιρικών συνθηκών.

Η απόφαση για την προώθηση μιας επένδυσης είναι ιδιαίτερα σημαντική και επομένως είναι απαραίτητη η διενέργεια οικονομικής ανάλυσης που περιλαμβάνει

σύνθεση των στοιχείων κόστους και οφέλους της επένδυσης. Πιο αναλυτικά πρέπει να εκτιμηθούν τα εξής στοιχεία:

- Το συνολικό κόστος της επένδυσης και η σχεδιαζόμενη χρονική κατανομή των εκροών
- Το κατάλληλο χρηματοδοτικό σχήμα, δηλαδή το ύψος του μετοχικού κεφαλαίου, η επιχορήγηση και το δάνειο
- Ο προβλεπόμενος χρήσιμος χρόνος ζωής της επένδυσης
- Η προβλεπόμενη παραγωγή και η αναμενόμενη χρηματοροή
- Η πιθανή υπολειμματική αξία της επένδυσης
- Το υπάρχον νομικό και οικονομικό περιβάλλον το οποίο καθορίζει τη δυνατότητα πώλησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, το ύψος των φορολογικών συντελεστών, το ρυθμό απόσβεσης των παγίων περιουσιακών στοιχείων και το ύψος του πληθωρισμού.

9.3 Αρχικό κόστος επένδυσης

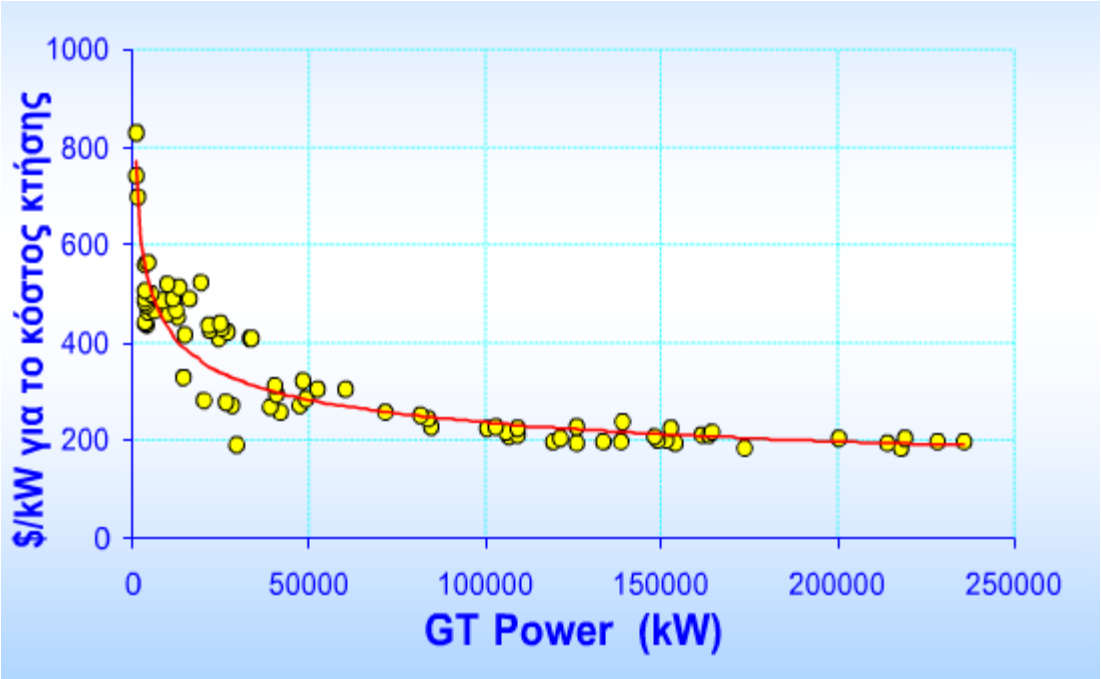
Στην παράγραφο αυτή κατηγοριοποιείται το αρχικό κόστος επένδυσης σε επί μέρους κόστη και στη συνέχεια αυτά αναλύονται περεταίρω, ενώ όπου είναι δυνατόν γίνεται αναφορά σε εναλλακτικές προτάσεις προμηθευτών. Τα δεδομένα που παρουσιάζονται συγκεντρώθηκαν μετά από έρευνα στο διαδίκτυο και μετά από επικοινωνία με διάφορες εταιρείες. Η παρουσίασή τους είναι ενδεικτική καθώς ενδέχεται να υπάρχουν αποκλίσεις από τις πραγματικές τιμές. Το αρχικό κόστος της επένδυσης διακρίνεται στα εξής επί μέρους κόστη:

- Κινητήρας
- Γεννήτρια
- Μειωτήρας στροφών
- Ηλεκτρολογικός εξοπλισμός
- Σύστημα ελέγχου

Σε αντίστοιχες επενδύσεις το κόστος του κινητήρα αποτελεί σημαντικό μέρος της επένδυσης. Εν προκειμένω όμως ο T53-L-13B αποτελεί έναν κινητήρα ευρύτατης κυκλοφορίας με αποτέλεσμα να διατίθεται μεταχειρισμένος σε εύρος τιμών χαμηλό σε σύγκριση με τον ανταγωνισμό.

Στο σχήμα 9.1 φαίνεται η κατανομή του κόστους κτήσης αεριοστρόβιλων σε σχέση με την ισχύ που αποδίδουν[21]. Το ανηγμένο κόστος ενός καινούριου - ανακατασκευασμένου T53-L-13B εκτιμάται στα 450$/kW (350€/kW), επομένως το κόστος του κινητήρα εκτιμάται στα 360000€. Στην αγορά δύναται να βρεθεί μεταχειρισμένος σε πολύ χαμηλότερη τιμή, της τάξης των 200000$ (155000€), μαζί με το κόστος συντήρησης του. Εναλλακτικά, ανάλογα με τη φύση του επενδυτή, ο

αεριοστρόβιλος μπορεί να διατεθεί απευθείας από σκάφος ελικοπτέρου το οποίο περιήλθε σε αδράνεια λόγω παλαιότητας ή άλλων προβλημάτων.



Σχήμα 9.1: Κόστος κτήσης αεριοστρόβιλων συναρτήσει της αποδιδόμενης ισχύος

Ο ανταγωνισμός στην τάξη μεγέθους ισχύος του 1MW αποτελείται από κινητήρες των εταιρειών Kawasaki, Dresser Rand, Rolls Royce, Solar, UTC PWPS και Vericor. Ενδεικτικά, ο M1T της Kawasaki που αποδίδει 1.24 MW τιμολογείται στα 1100000$ (850000€), τιμή σημαντικά υψηλότερη της τιμής του T53-L-13B.

Το έτερο τμήμα του συγκροτήματος είναι αυτό της γεννήτριας. Εταιρείες γνωστές στην αγορά για την κατασκευή γεννητριών είναι οι Marelli Motori, Brush, Kato, JCB, Stamford, Marathon Electric και Muovo Pignion. Η επιλεγμένη γεννήτρια της Marathon Electric (τύπος 742RSL4050) τιμολογείται στα 47270$[14] (37000€).

Η ζεύξη του κινητήρα με τη γεννήτρια επιτυγχάνεται με την παρεμβολή κατάλληλου μειωτήρα στροφών. Ο επιλεγμένος μειωτήρας στροφών της εταιρείας TRIVENI GROUP (τύπος HSG 280) τιμολογείται μαζί με τα έδρανα (bearings), τους συνδέσμους (couplings) και το σύστημα λίπανσης (main oil pumb and lube oil system) στα 67275$, ήτοι 52500€.

Για το συνολικό υπολογισμό του αρχικού κόστους επένδυσης υπολείπεται το κόστος του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού και του συστήματος ελέγχου, τα οποία εκτιμώνται στο 10% του συνολικού κόστους. Με βάση τα παραπάνω κατασκευάζεται ο πίνακας 9.1 με το εκτιμώμενο αρχικό κόστος της επένδυσης.

Πίνακας 9.2: Αρχικό κόστος επένδυσης

Τμήματα εγκατάστασης	Κόστος σε €		
Αεριοστρόβιλος [διάθεση|μεταχ/νος|καινούριος]	-	155000	360000
Γεννήτρια	37000		
Μειωτήρας	53000		
Ηλεκτρολογικός Εξοπλισμός και Σύστημα Ελέγχου	45000		
Σύνολο	135000	290000	495000

Το συνολικό υπολογισθέν κόστος του πίνακα 9.2 είναι ενδεικτικό. Στο συνολικό κόστος δεν υπολογίζονται το κόστος κατασκευής φορέα του συγκροτήματος, τα διάφορα απρόβλεπτα κόστη και το κόστος υλοποίησης της συνολικής μελέτης.

9.4 Οικονομική αξιολόγηση επένδυσης

Στην παρούσα παράγραφο υπολογίζεται η τιμή πώλησης της ενέργειας για την οποία επιτυγχάνεται απόσβεση της επένδυσης σε χρονική διάρκεια δέκα ετών, με επιτόκιο δανεισμού 6%. Το δάνειο θεωρείται ότι καλύπτει το σύνολο της επένδυσης. Το ετήσιο κόστος συντήρησης λαμβάνεται ως το 2% του συνολικού κόστους επένδυσης.

Μελετώνται τρία σενάρια ως προς το κόστος της επένδυσης ανάλογα με την προέλευση του κινητήρα, για καινούριο, για μεταχειρισμένο και τέλος για κινητήρα από διάθεση. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται παρατίθενται στον πίνακα 9.3.

Πίνακας 9.3

	διάθεση	μεταχ/σμένος	καινούριος
Κόστος επένδυσης [€]	135000	290000	495000
Ετήσια αποδιδόμενη ισχύς[kWh/a]	8023284		
Ειδική Κατανάλωση καυσίμου [kg/kWh]	0.364		
Ετήσιο Κόστος καυσίμου [€/a]	2336380.3		
Ετήσιο Κόστος συντήρησης [€/a]	2700		
επιτόκιο [%]	6		
έτη αποπληρωμής δανείου	10		

Ο υπολογισμός του δανείου δύναται να γίνει με τη μέθοδο ισοκεφαλαιοχρεωλυσίων όπου αποπληρώνονται κάθε χρόνο ίσα μέρη κεφαλαίου, και με τη μέθοδο ισοτοκοχρεωλυσίων, όπου αποπληρώνονται κάθε χρόνο ίσα τοκοχρεωλύσια. Η μέθοδος που ακολουθείται προκύπτει μετά από συμφωνία με την τράπεζα. Συνήθως χρησιμοποιείται η μέθοδος ισοτοκοχρεωλυσίων. Στον πίνακα 9.4 παρουσιάζονται οι σχέσεις υπολογισμού που χρησιμοποιούνται παρακάτω.

Πίνακας 9.4: Σχέσεις υπολογισμού δανείου

έτος	1	2	3	4…9	10
Χρεωλύσιο	K1	K2	K3	…	K10
Τόκοι	Kx0.06	(K-K1)x0.06	(K-K1-K2)x0.06	…	K10x0.06
Τοκοχρεωλύσιο	X	X	X	X	X

Εάν K το κεφάλαιο το δανείου, N τα έτη αποπληρωμής και i το επιτόκιο δανεισμού, τότε η ετήσια δόση ή τοκοχρεωλύσιο είναι X:

$$X = \frac{K \cdot i}{1 - (1 + i)^{-N}}$$

Κινητήρας από διάθεση

Με βάση τις σχέσεις του πίνακα 9.4 προκύπτει ο πίνακας 9.5 για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών μεγεθών του δανείου.

Πίνακας 9.5: Υπολογισμός μεγεθών δανείου (σε χιλιάδες €)

Έτος	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Χρεωλύσιο	10.2	10.9	11.5	12.2	12.9	13.7	14.5	15.4	16.3	17.3
Τόκοι	8.1	7.5	6.8	6.1	5.4	4.6	3.8	2.9	2.0	1.0
Τοκοχρεωλύσιο	18.3	18.3	18.3	18.3	18.3	18.3	18.3	18.3	18.3	18.3

Για την εκτίμηση της οριακής τιμής πώλησης της ενέργειας για την οποία γίνεται απόσβεση της επένδυσης σε βάθος δεκαετίας γίνονται οι υπολογισμοί του πίνακα 9.6. Το κόστος του χρεωλύσιου μοιράζεται μέσω της απόσβεσης στον επιθυμητό χρονικό ορίζοντα, εν προκειμένω στα 10 χρόνια. Με τη μέθοδο των αποσβέσεων επιτυγχάνεται η ελάφρυνση του λογαριασμού εκμετάλλευσης στην περίπτωση που φορολογούνται τα κέρδη.

Πίνακας 9.6: Λογαριασμός Εκμετάλλευσης (σε χιλιάδες €)

έτος	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Έσοδα	2357.4	2357.4	2357.4	2357.4	2357.4	2357.4	2357.4	2357.4	2357.4	2357.4
Κόστος λειτουργίας	2336.4	2336.4	2336.4	2336.4	2336.4	2336.4	2336.4	2336.4	2336.4	2336.4
Κόστος συντήρησης	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7
Απόσβεση	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5
Τόκοι	8.1	7.5	6.8	6.1	5.4	4.6	3.8	2.9	2.0	1.0
Τοκοχρεωλύσιο	18.3	18.3	18.3	18.3	18.3	18.3	18.3	18.3	18.3	18.3
Καθαρά κέρδη	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Σύμφωνα με τους υπολογισμούς του πίνακα 9.6 η απόσβεση της επένδυσης στη δεκαετία, δηλαδή ο μηδενισμός των καθαρών κερδών επιτυγχάνεται με τιμή πώλησης ενέργειας τα 0.2938 €/kWh. Στην οριακή αυτή περίπτωση ο εσωτερικός συντελεστής

απόδοσης (IRR) είναι ίσος με το επιλεχθέν επιτόκιο δανεισμού (i) και η καθαρή παρούσα αξία (NVP) είναι μηδενική. Για τιμές πώλησης της ενέργειας μεγαλύτερες της οριακής τότε ο IRR παίρνει τιμές μεγαλύτερες του 6% και αντίστοιχα η καθαρή παρούσα αξία λαμβάνει θετικές τιμές.

Κινητήρας Μεταχειρισμένος

Επαναλαμβάνοντας τους υπολογισμούς για το νέο ύψος της επένδυσης προκύπτουν τα παρακάτω. Με βάση τις σχέσεις του πίνακα 9.4 προκύπτει ο πίνακας 9.7 για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών μεγεθών του δανείου.

Πίνακας 9.7: Υπολογισμός μεγεθών δανείου (σε χιλιάδες €)

Έτος	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Χρεωλύσιο	22.0	23.3	24.7	26.2	27.8	29.4	31.2	33.1	35.1	37.2
Τόκοι	17.4	16.1	14.7	13.2	11.6	10.0	8.2	6.3	4.3	2.2
Τοκοχρεωλύσιο	39.4	39.4	39.4	39.4	39.4	39.4	39.4	39.4	39.4	39.4

Για την εκτίμηση της οριακής τιμής πώλησης της ενέργειας για την οποία γίνεται απόσβεση της επένδυσης σε βάθος δεκαετίας γίνονται οι υπολογισμοί του πίνακα 9.8.

Πίνακας 9.8: Λογαριασμός Εκμετάλλευσης (σε χιλιάδες €)

Έτος	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Έσοδα	2381.6	2381.6	2381.6	2381.6	2381.6	2381.6	2381.6	2381.6	2381.6	2381.6
Κόστος λειτουργίας	2336.4	2336.4	2336.4	2336.4	2336.4	2336.4	2336.4	2336.4	2336.4	2336.4
Κόστος συντήρησης	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8
Απόσβεση	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0
Τόκοι	17.4	16.1	14.7	13.2	11.6	10.0	8.2	6.3	4.3	2.2
Τοκοχρεωλύσιο	39.4	39.4	39.4	39.4	39.4	39.4	39.4	39.4	39.4	39.4
Καθαρά κέρδη	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Σύμφωνα με τους υπολογισμούς του πίνακα 9.8 η απόσβεση της επένδυσης στη δεκαετία, δηλαδή ο μηδενισμός των καθαρών κερδών επιτυγχάνεται με τιμή πώλησης ενέργειας τα 0.2968 €/kWh.

Κινητήρας καινούριος

Επαναλαμβάνοντας τους υπολογισμούς για το νέο ύψος της επένδυσης προκύπτουν τα παρακάτω. Με βάση τις σχέσεις του πίνακα 9.4 προκύπτει ο πίνακας 9.9 για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών μεγεθών του δανείου.

Πίνακας 9.9: Υπολογισμός μεγεθών δανείου (σε χιλιάδες €)

Έτος	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Χρεωλύσιο	37.6	39.8	42.2	44.7	47.4	50.3	53.3	56.5	59.9	63.4
Τόκοι	29.7	27.4	25.1	22.5	19.8	17.0	14.0	10.8	7.4	3.8
Τοκοχρεωλύσιο	67.3	67.3	67.3	67.3	67.3	67.3	67.3	67.3	67.3	67.3

Για την εκτίμηση της οριακής τιμής πώλησης της ενέργειας για την οποία γίνεται απόσβεση της επένδυσης σε βάθος δεκαετίας γίνονται οι υπολογισμοί του πίνακα 9.10.

Πίνακας 9.10: Λογαριασμός Εκμετάλλευσης (σε χιλιάδες €)

Έτος	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Έσοδα	2413.5	2413.5	2413.5	2413.5	2413.5	2413.5	2413.5	2413.5	2413.5	2413.5
Κόστος λειτουργίας	2336.4	2336.4	2336.4	2336.4	2336.4	2336.4	2336.4	2336.4	2336.4	2336.4
Κόστος συντήρησης	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9
Απόσβεση	49.5	49.5	49.5	49.5	49.5	49.5	49.5	49.5	49.5	49.5
Τόκοι	29.7	27.4	25.1	22.5	19.8	17.0	14.0	10.8	7.4	3.8
Τοκοχρεωλύσιο	67.3	67.3	67.3	67.3	67.3	67.3	67.3	67.3	67.3	67.3
Καθαρά κέρδη	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Σύμφωνα με τους υπολογισμούς του πίνακα 9.10 η απόσβεση της επένδυσης στη δεκαετία, δηλαδή ο μηδενισμός των καθαρών κερδών επιτυγχάνεται με τιμή πώλησης ενέργειας τα 0.3008 €/kWh.

9.5 Ανάλυση ευαισθησίας

Για την καλύτερη εκτίμηση της επιρροής των διαφόρων παραμέτρων[20] στην αποδοτικότητα της επένδυσης γίνεται ανάλυση ευαισθησίας των αποτελεσμάτων ως προς την επιλογή του εξοπλισμού και τα σενάρια λειτουργίας της εγκατάστασης.

Από την ανάλυση της προηγούμενης παραγράφου διαπιστώνεται ότι η εκλογή σεναρίου προμήθειας κινητήρα δεν επηρεάζει ιδιαίτερα την οριακή τιμή πώλησης της ενέργειας, η οποία κινείται στο διάστημα 0.2938-0.3008 €/kWh. Αυτό συμβαίνει γιατί σε οποιοδήποτε σενάριο το κόστος κτήσης του κινητήρα είναι πολύ μικρό σε σχέση με το κόστος λειτουργίας του. Συμπερασματικά, τυχούσα διάθεση του κινητήρα δεν αποτελεί παράγοντα που από μόνος του κάνει την επένδυση συμφέρουσα.

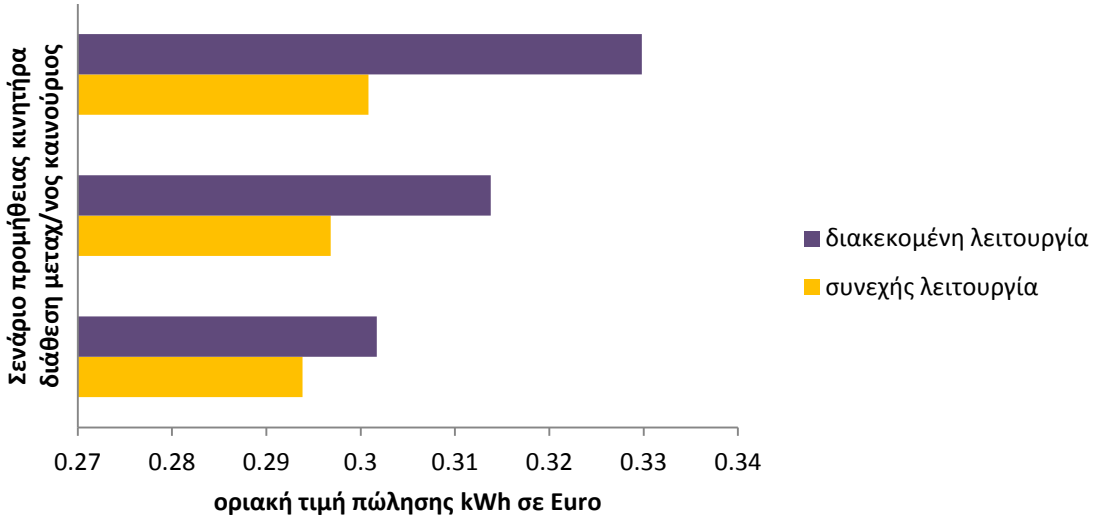
Η εκτίμηση διαφέρει στην περίπτωση που πρόκειται για παραγωγή ενέργειας σε περιορισμένη κλίμακα, δηλαδή για την περίπτωση διακοπτόμενης λειτουργίας. Στον πίνακα 9.11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών για το υποθετικό

σενάριο παραγωγής 2GWh ετησίως, δηλαδή περίπου το 25% της μέγιστης δυνατότητας παραγωγής.

Πίνακας 9.11: Οριακή τιμή πώλησης της kWh σε c € για περιορισμένη παραγωγή ενέργειας

κινήτρας	διάθεση	μεταχ/σμένος	καινούριος
οριακή τιμή πώλησης kWh	30.17	31.38	32.98

Η επίδραση στην οριακή τιμή πώλησης της kWh ανάλογα με το κάθε σενάριο παρουσιάζεται στο σχήμα 9.2.

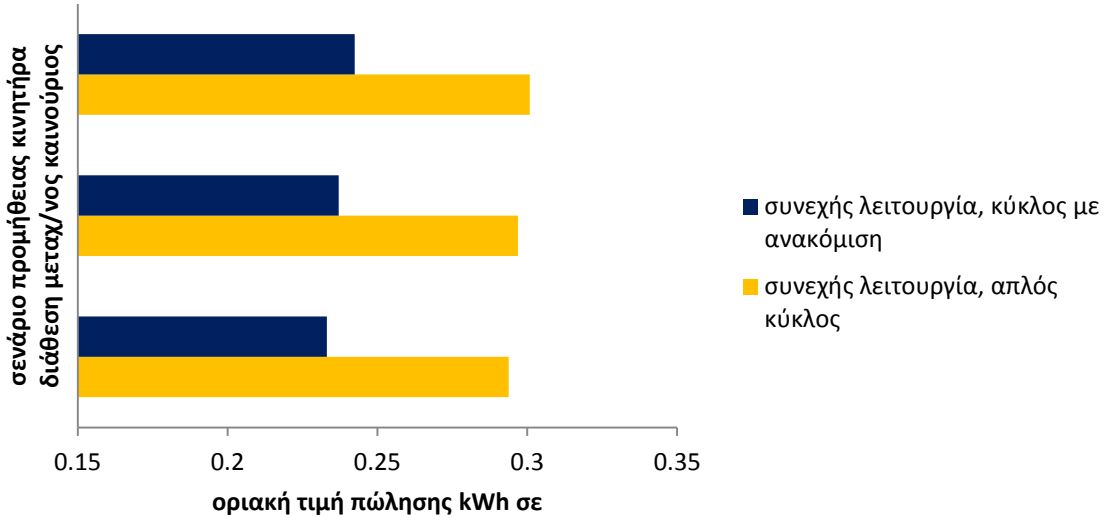


Σχήμα 9.2: Διαμόρφωση της οριακής τιμής πώλησης της ενέργειας σε σχέση με τα σενάρια προμήθειας και λειτουργίας του κινητήρα

Στην περίπτωση της μη συνεχούς λειτουργίας της μηχανής παρατηρείται ότι η επιλογή σεναρίου προμήθειας του κινητήρα παίζει σημαντικότερο ρόλο, καθώς αυξάνεται η επιρροή στην οριακή τιμή πώλησης της ενέργειας. Επομένως όταν πρόκειται για χρήση σε περιορισμένα διαστήματα κατά τη διάρκεια του έτους η διάθεση του κινητήρα κάνει την επένδυση ιδιαίτερα συμφέρουσα σε σχέση με το σενάριο αγοράς καινούριου κινητήρα. Αντίθετα, αν πρόκειται για συνεχή ηλεκτροπαραγωγή, η αποδοτικότητα της επένδυσης δεν επηρεάζεται σημαντικά από το κόστος κτήσης του κινητήρα.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η διαμόρφωση της τιμής στην περίπτωση εφαρμογής ανακόμισης των καυσαερίων. Με την υπόθεση ότι το κόστος επένδυσης δεν αλλάζει, επαναλαμβάνοντας τους οικονομικούς υπολογισμούς της προηγούμενης παραγράφου, η νέα οριακή τιμή πώλησης προκύπτει 0.2331€/kWh για κινητήρα από διάθεση, 0.2371€/kWh για κινητήρα μεταχειρισμένο και 0.2424 €/kWh για κινητήρα καινούριο. Προκύπτει μείωση της οριακής τιμής πώλησης 20.66%, 20.11% και 19.41% αντίστοιχα.

Αυτό σημαίνει ότι η εφαρμογή της ανακόμισης αποδίδει περισσότερο στην επένδυση με μικρότερο κόστος κτήσης κινητήρα. Οι νέες οριακές τιμές πώλησης της kWh που προκύπτουν παρουσιάζονται στο σχήμα 9.3.



Σχήμα 9.3: Διαμόρφωση της οριακής τιμής πώλησης πριν και μετά την εφαρμογή της ανακόμισης θερμότητας

Συνοψίζοντας, από τους υπολογισμούς της παραγράφου προκύπτει το γενικό συμπέρασμα ότι η εκτίμηση της αποδοτικότητας της επένδυσης πρέπει να λάβει σοβαρά υπόψη της τον προορισμό χρήσης της εγκατάστασης, αν πρόκειται δηλαδή για συνεχή ή διακοπτόμενη ηλεκτροπαραγωγή και αν πρόκειται για ηλεκτροπαραγωγή σε τοποθεσία όπου υπάρχει ήδη παροχή του εθνικού δικτύου.

10 Ανακεφαλαίωση - Συμπεράσματα - Προτάσεις

10.1 Ανακεφαλαίωση

Σκοπός της παρούσης εργασίας ήταν αρχικά η δημιουργία ενός υπολογιστικού μοντέλου του κινητήρα T53-L-13B ώστε αυτό να χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια για τον υπολογισμό της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας σε ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος αεριοστρόβιλου Απλού Κύκλου και γεννήτριας.

Η διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πρόγραμμα PROOSIS, ένα σύγχρονο λογισμικό προγραμματισμού που χρησιμοποιείται ευρέως στη μοντελοποίηση ενεργειακών συστημάτων. Η αξιόπιστη προσομοίωση του πραγματικού κινητήρα επιτεύχθηκε εφαρμόζοντας διαδικασίες βελτιστοποίησης και ελέγχθηκε με σύγκριση των στοιχείων του μοντέλου με τα δεδομένα από το δοκιμαστήριο.

Μετά τη δημιουργία του μοντέλου του κινητήρα έγιναν οι απαραίτητοι υπολογισμοί ώστε να επιλεχθεί μειωτήρας στροφών που θα μεταφέρει την ισχύ σε κατάλληλη γεννήτρια και στη συνέχεια στο δίκτυο μέσω του απαραίτητου ηλεκτρολογικού εξοπλισμού.

Στα πλαίσια της υλοποίησης σεναρίων βελτίωσης του βαθμού απόδοσης δημιουργήθηκαν δύο επιπλέον υπολογιστικά μοντέλα του κινητήρα με ανακόμιση θερμότητας καυσαερίων και συνδυασμένου κύκλου. Για την καλύτερη δυνατή σύγκριση των τριών σεναρίων (απλός κύκλος, κύκλος με ανακόμιση, συνδυασμένος κύκλος) έγινε προσομοίωση λειτουργίας για ένα ημερολογιακό έτος με βάση τα μετεωρολογικά δεδομένα του σταθμού του ΕΜΠ.

Η διπλωματική εργασία καταλήγει με οικονομική αξιολόγηση της πιθανής επένδυσης για τον απλό κύκλο αεριοστροβίλου.

10.2 Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα από τα στάδια της διπλωματικής εργασίας οδηγούν στην εξαγωγή των παρακάτω συμπερασμάτων:

- Όπως φαίνεται από τις αποκλίσεις για τα μελετώμενα σημεία λειτουργίας, η διαδικασία της μοντελοποίησης με βάση στοιχεία από την ανοιχτή βιβλιογραφία και δεδομένα από το δοκιμαστήριο οδηγεί σε μοντέλο που προσομοιώνει ικανοποιητικά την πραγματική μηχανή.

- Η τοποθέτηση ανακομιστή (HEX) βαθμού απόδοσης 75% αυξάνει το βαθμό απόδοσης από το 22.93% στο 29.11% και επιφέρει μείωση 21.15% στην ειδική κατανάλωση καυσίμου.
- Ο συνδυασμένος κύκλος με κύκλο νερού υδρατμού με αντλία κατάθλιψης 79bar παράγει ατμό στους 758K και έχει βαθμό απόδοσης 39.03%. Η ειδική κατανάλωση μειώνεται κατά 41.21% σε σχέση με τον απλό κύκλο.
- Το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με το υπό μελέτη συγκρότημα απλού κύκλου είναι μεγαλύτερο του κόστους αγοράς από το δίκτυο και κινείται στην περιοχή των 0.30 €/kWh, επηρεαζόμενο κυρίως από την τιμή του καυσίμου και λιγότερο από το αρχικό κόστος επένδυσης, όταν πρόκειται για συνεχή ηλεκτροπαραγωγή.
- Στην περίπτωση της διακοπτόμενης ηλεκτροπαραγωγής στο 25% της μέγιστης δυνατότητας συνεχούς παραγωγής, προκύπτει αύξηση του κόστους της κιλοβατώρας κατά 5%. Η αποδοτικότητα της επένδυσης πλέον επηρεάζεται περισσότερο από το αρχικό κόστος επένδυσης και κατά συνέπεια τυχούσα διάθεση του κινητήρα κάνει πιο συμφέρουσα την επένδυση σε σύγκριση με το σενάριο συνεχούς ηλεκτροπαραγωγής.
- Η εφαρμογή της ανακόμισης αποδίδει περισσότερο στην επένδυση με μικρότερο κόστος κτήσης κινητήρα.
- Η εκτίμηση της αποδοτικότητας της επένδυσης επηρεάζεται σημαντικά από τον τρόπο χρησιμοποίησης του συγκροτήματος.

10.3 Προτάσεις

Η παρούσα διπλωματική εργασία δίνει το έναυσμα για περεταίρω έρευνα πάνω στην αξιοποίηση του T53-L-13B αλλά και αντίστοιχων αεριοστρόβιλων ισχύος για χρήση πέραν της αεροπορικής.

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε μπορεί να βελτιωθεί με τοπική προσαρμογή χαρτών ώστε να καλύπτει και την περιοχή χαμηλών στροφών λειτουργίας (flight idle) και να χρησιμοποιηθεί για προσομοίωση πτήσης, διαγνωστική βλαβών κτλ.

Το μοντέλο του συνδυασμένου κύκλου μπορεί με κατάλληλες τροποποιήσεις να αποτελέσει τη βάση για την προσομοίωση ήδη υπαρχόντων εγκαταστάσεων. Η σχεδίαση και διαστασιολόγηση των εναλλακτών θερμότητας στον κύκλο με ανακόμιση και στον συνδυασμένο κύκλο αποτελούν αντικείμενα προς εμβάθυνση. Η υλοποίηση των παραπάνω σεναρίων προϋποθέτει αυτοτελείς οικονομοτεχνικές μελέτες.

Προκειμένου να προκύψει μια πληρέστερη πρόταση για την εκμετάλλευση του T53-L-13B, η μελέτη σχεδιασμού του συγκροτήματος ηλεκτροπαραγωγής δύναται να εμβαθύνει σε επί μέρους σημεία:

- Επανασχεδίαση συστήματος λίπανσης κινητήρα
- Κατασκευαστική μελέτη της συνδεσιμότητας των τμημάτων και τοποθέτησή τους σε ενιαίο φορέα

- Περιορισμός του παραγόμενου θορύβου με τοποθέτηση διάταξης σιγαστήρα
- Αναλυτικός ηλεκτρολογικός σχεδιασμός και κοστολόγηση της σύνδεσης της γεννήτριας με το δίκτυο
- Τοποθέτηση συστήματος ελέγχου λειτουργίας
- Δυνατότητα καύσης εναλλακτικών καυσίμων
- Φιλική προς το περιβάλλον διαχείριση των καυσαερίων

11 Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

[1] T53-L-13B Student's Workbook.

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

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

[4] A. Alexiou, T. Tsalavoutas: TURBO Library Reference Manual, Empresarios Agrupados Internacional, 1st Edition.

[5] Helicopter Engine Optimization for Minimum Mission Fuel Burn, A. Alexiou, B. Pons, P. Cobas, K. Mathioudakis.

[6] A simplex method for function minimization, J. A. Nelder and R. Mead.

[7] Triveny Group Gearbox catalogue, 2014, ISOK9001 & 14001Accredited.

[8] Gas turbine recuperator renaissance, Colin F. McDonald.

[9] Recuperated gas turbine aeroengines. Part III: engine concepts for reduced emissions, lower fuel consumption, and noise abatement, Colin F. McDonald, Aristide F. Massardo, Colin Rodgers, Aubrey Stone.

[10] http://www.turbokart.com

[11] http://jae.janes.com

[12] http://ocw.mit.edu

[13] http://www.elec-toolbox.com

[14]http://www.marathonelectric.com

Ελληνική Βιβλιογραφία

[15] Εισαγωγή στις θερμικές στροβιλομηχανές, Κ.Δ. Παπαηλίου, Κ.Μ.Μαθιουδάκης, Κ.Χ. Γιαννάκογλου, Εκδόσεις ΕΜΠ.

[16] Λειτουργία Αεριοστροβίλων και Ατμοστροβίλων, Κ.Μαθιουδάκης, Εκδόσεις ΕΜΠ.

[17] Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα, Δ. Ε. Παπαντώνης, Εκδόσεις Συμεών.

[18] Οδοντώσεις και Μειωτήρες Στροφών, Θ.Ν.Κωστόπουλος, Εκδόσεις Συμεών.

[19] Τεχνικές Εκτίμησης Κόστους και Αξιολόγησης Βιομηχανικών Επενδύσεων, Δ. Λίποβατζ-Κρεμεζή, Εκδόσεις Συμμετρία.

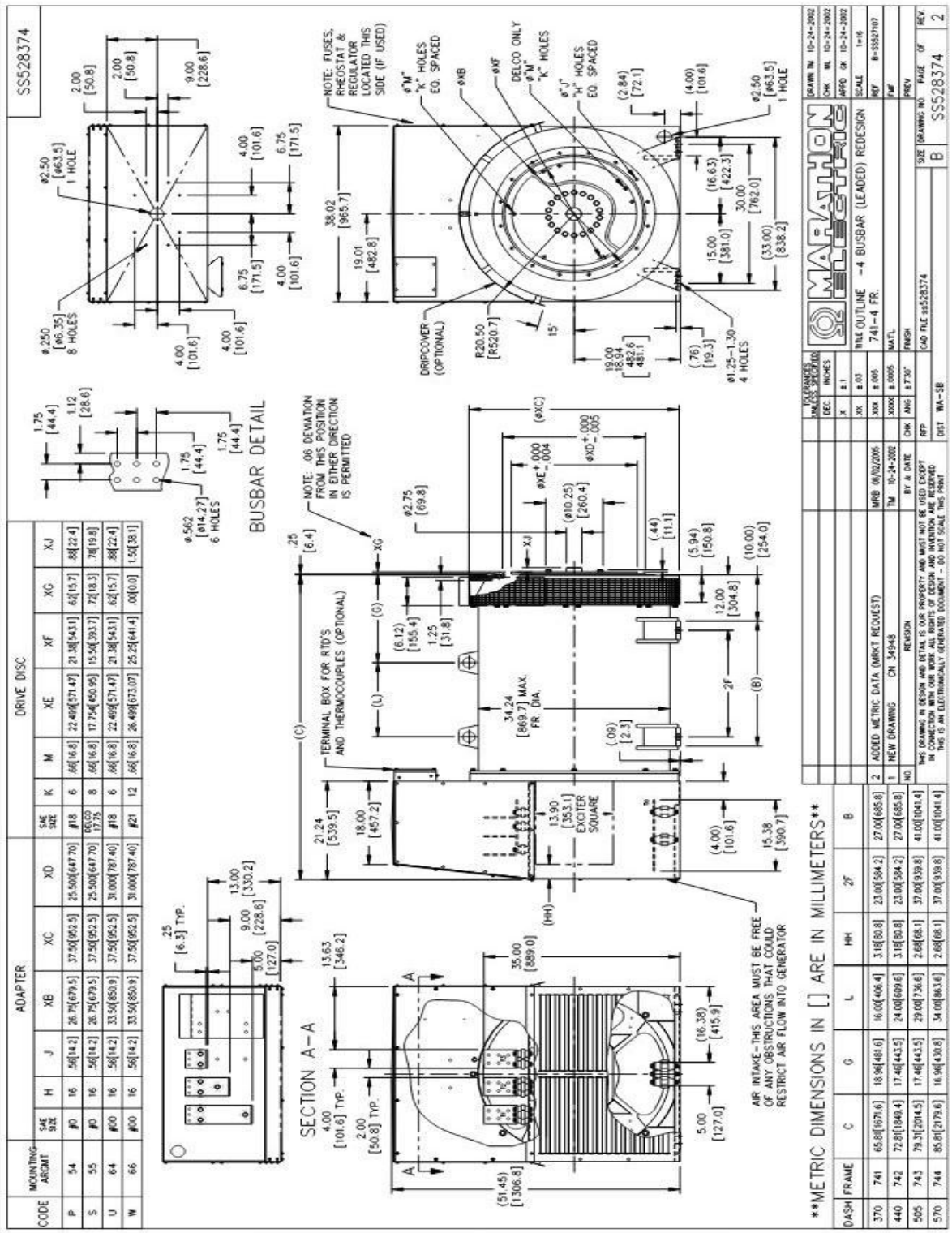
[20] Σημειώσεις Αιολικής Ενέργειας, Α. Ζερβός, Γ. Κάραλης, Εκδόσεις ΕΜΠ.

[21] http://edu.ltt.ntua.gr

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

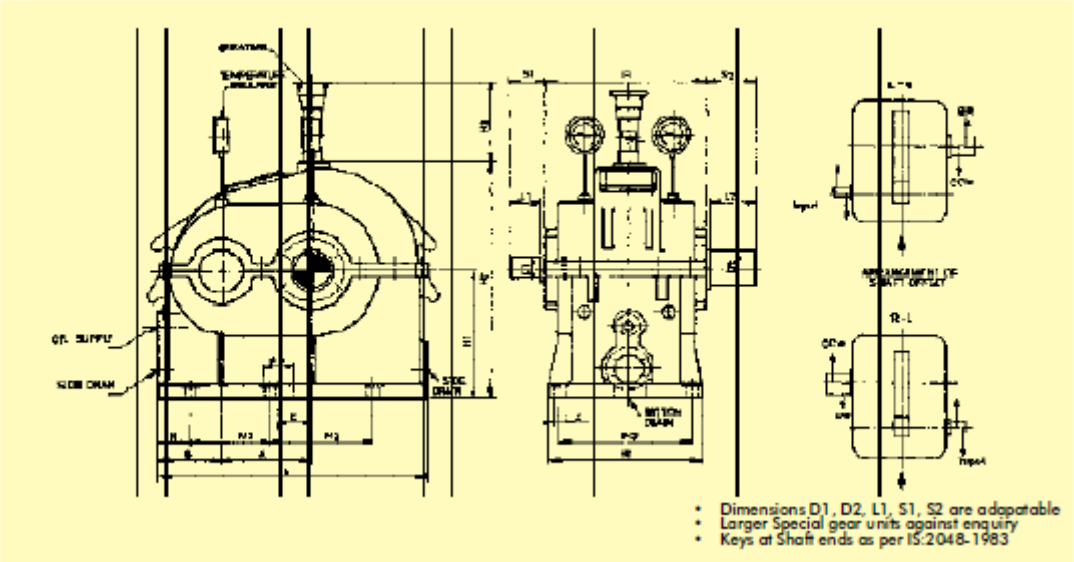
Π1 Σχέδια

Π1.1 Διαστάσεις γεννήτριας



Π1.2 Διαστάσεις μειωτήρα στροφών

GENERAL DIMENSIONS



Model HSG	A	B	L	W	H1	H2	H3	R	N	M1	M2	M3	E	D	Z	Bolts Size	Weight Kgs
160	160	165	520	330	265	455	200	330	85	150	200	280	-	70	22	M20	300
190	190	190	600	375	280	500	200	375	85	215	215	315	-	70	22	M20	430
220	220	210	670	400	320	570	200	400	85	250	250	320	-	75	26	M24	550
250	250	225	760	440	375	660	300	450	80	300	300	380	95	100	26	M24	700
280	280	240	860	530	400	730	300	500	120	280	280	460	115	110	26	M24	940
320	320	270	930	600	450	775	300	600	120	310	340	520	115	110	33	M30	1200
360	360	240	1050	670	500	915	300	670	120	320	400	580	-	115	33	M30	2000
400	400	270	1150	700	530	950	300	690	125	350	400	600	-	115	40	M36	2600
450	450	270	1270	720	560	1080	300	740	140	430	500	620	-	110	40	M36	2900
500	500	325	1415	760	630	1180	300	780	140	500	500	660	-	110	40	M36	3400
560	560	360	1525	800	710	1330	300	820	150	550	550	700	-	110	40	M36	4800

- ALL DIMENSIONS ARE IN mm