



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΓΕΝΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ
ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ TURBOPROP ΤΡΙΩΝ
ΑΞΟΝΩΝ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟΝ PW123AF

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΜΕΓΑΛΟΓΙΑΝΝΗ ΜΕΛΙΝΑ

Επίβλεψη: Αν. Καθηγητής Ν. Αρετάκης

ΑΘΗΝΑ
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2022



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING
FLUID SECTION
LABORATORY OF THERMAL TURBOMACHINERY

**MODELING OF A GENERAL THREE SHAFT
TURBOPROP ENGINE AND APPLICATION TO
PW123AF ENGINE**

DIPLOMA THESIS
MEGALOGIANNI MELINA

Advisor: N.Aretakis

ATHENS
FEBRUARY 2022



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

**ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΓΕΝΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ
TURBOPROP ΤΡΙΩΝ ΑΞΟΝΩΝ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟΝ PW123AF**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΜΕΓΑΛΟΓΙΑΝΝΗ ΜΕΛΙΝΑ**

Επίβλεψη: Αν. Καθηγητής Ν. Αρετάκης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σκοπό την ανάπτυξη ενός γενικού μοντέλου αεροπορικού κινητήρα turboprop τριών αξόνων και εφαρμογή του στο μοντέλο της Pratt & Whitney PW123AF. Ο συγκεκριμένος κινητήρας χρησιμοποιείται από την Ελληνική Πολεμική Αεροπορία στα αεροσκάφη πυρόσβεσης Canadair CL-415. Για το σκοπό αυτό θα χρησιμοποιηθούν δεδομένα από το δοκιμαστήριο της Ελληνικής Αεροπορικής Βιομηχανίας (EAB), η οποία έχει τη δυνατότητα συντήρησης και δοκιμής του συγκεκριμένου κινητήρα.

Το συγκεκριμένο μοντέλο έρχεται να συμπληρώσει τα γενικά μοντέλα που έχουν δημιουργηθεί από το Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών στα πλαίσια άλλων διπλωματικών εργασιών για άλλες διατάξεις κινητήρων.

Η ανάπτυξη του μοντέλου υλοποιείται στο υπολογιστικό περιβάλλον αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού PROOSIS, το οποίο αποτελεί ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο πρόγραμμα μοντελοποίησης ενεργειακών συστημάτων. Πιο συγκεκριμένα, τροποποιείται ήδη υπάρχον λογισμικό για διαφορετική διάταξη κινητήρα, ενώ προστίθενται και νέες δυνατότητες. Το λογισμικό που αναπτύχθηκε, δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη για ανάλυση στο σημείο σχεδιασμού, ανάλυση σε σημεία εκτός του σημείου σχεδιασμού, βελτιστοποίηση της θέσης του σημείου σχεδιασμού με βάση τις επιδόσεις εκτός σημείου σχεδιασμού, αυτόματη τοπική προσαρμογή χαρτών, ανάλυση ευαισθησίας, διάγνωση βλαβών και δημιουργία υπογραφών βλαβών. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει ποιες από τις παραπάνω λειτουργίες θα χρησιμοποιήσει και με ποια σειρά, ανάλογα την εργασία που επιθυμεί.

Με στόχο την πιστοποίηση του λογισμικού γίνεται εφαρμογή του, σε δεδομένα από δοκιμαστήριο για τον κινητήρα PW123AF. Αρχικά, γίνεται παρουσίαση του λογισμικού. Ακολουθεί μία εκτενής βιβλιογραφική επισκόπηση, όπως επίσης και αναφορά στα αεροσκάφη στα οποία χρησιμοποιείται και τέλος γίνεται χρήση των διαφόρων λειτουργιών του λογισμικού, με σκοπό την προσαρμογή του γενικού μοντέλου στα δεδομένα των μετρήσεων. Επίσης, πραγματοποιείται μία ανάλυση ευαισθησίας με σκοπό τον προσδιορισμό των πιο κατάλληλων μετρήσεων για τη διάγνωση βλαβών των επιμέρους συνιστωσών, ενώ παράλληλα δημιουργούνται και υπογραφές τυπικών βλαβών οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διάγνωση από το προσωπικό του δοκιμαστηρίου.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING
FLUID SECTION
LABORATORY OF THERMAL TURBOMACHINERY

MODELING OF A GENERAL THREE SHAFT TURBOPROP ENGINE AND APPLICATION TO PW123AF ENGINE

DIPLOMA THESIS
MEGALOGIANNI MELINA

Advisor: N.Aretakis

ABSTRACT

The main goal of this diploma thesis is the development of a general model of a three-shaft turboprop engine and the application to the model PW123AF of Pratt & Whitney. This specific engine is used by the Hellenic Air Force as a waterbomber for the Canadair CL-415. For the purpose of this study, measurements are sourced from the Hellenic Airspace Industry (HAI).

The motivation for this work arises from the need to create a general model with a specific layout, in order to study and monitor the operation of aircraft engines with similar layouts.

The model was developed in the PROOSIS object-oriented simulation environment which is used by LTT/NTUA for modelling and simulation of gas turbines. More accurately, an existing software is modified and new features are added. Depending on user requirements, the developed model is able to perform design point analysis, off design analysis, design point optimization, local map adaptation, sensitivity analysis, fault diagnosis and creation of fault signatures. The user can choose which of the above functions to use, in order to reduce the deviations between model predictions and operational data for the engine studied.

With the aim of certifying the model created, while having at our disposal measurements for the PW123AF engine, we implement all the functions of the developed code to this model. For this purpose, we mention the technical features of the engine, the

bibliographic review, as well as the aircrafts using PW123AF. As a result, the reliability of the general model is certified and the deviations of the measured quantities are minimized.

In addition, a sensitivity analysis is carried out with the purpose of using the most appropriate measurements for the fault diagnosis of each specific component, while at the same time fault signatures are created for typical faults. These signatures can be used by the staff of HAI.

Από αυτή τη θέση θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου Αρετάκη Νικόλαο, τόσο για τη βοήθειά του στην εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας, όσο και για το έναυσμα που μου έδωσε να ασχοληθώ με τον τομέα των Αεροπορικών Κινητήρων, μέσω των μαθημάτων του. Γενικότερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών του ΕΜΠ, οι οποίοι παρόλες τις ραγδαίες αλλαγές στη διεξαγωγή των μαθημάτων, προσαρμόστηκαν άμεσα, μας έδωσαν πρόσβαση σε όλα τα απαραίτητα προγράμματα/λογισμικά και μας παρακίνησαν να ασχοληθούμε με τον τομέα.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τον κ. Καλαθάκη Χρήστο για τη συνεργασία μας κατά τη διεξαγωγή της διπλωματικής εργασίας, τις πληροφορίες που μου παρείχε, όπως επίσης και για το χρόνο που αφιέρωσε κατά την επίσκεψή μου στην Ελληνική Αεροπορική Βιομηχανία (ΕΑΒ), ώστε να παρακολουθήσω τη διαδικασία συλλογής μετρήσεων στο δοκιμαστήριο.

Στην οικογένειά μου,

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	Εισαγωγή	13
1.1.	Γενικά	13
1.2.	Δομή διπλωματικής εργασίας	14
2	Περιγραφή Λογισμικού Προσαρμογής Γενικού Μοντέλου	16
2.1.	Υπολογιστικό πρόγραμμα PROOSIS	16
2.2.	Γενικά στοιχεία	18
2.2.1.	Δημιουργία βιβλιοθήκης	20
2.2.2.	Δημιουργία σχηματικού	21
2.2.3.	Δημιουργία μαθηματικού μοντέλου	27
2.2.4.	Δημιουργία λογισμικού – experiment	29
2.3.	Κώδικας προσομοίωσης	29
2.3.1.	Αρχείο Εισόδου	30
2.3.2.	Ανάλυση στο σημείο σχεδιασμού	30
2.3.3.	Ανάλυση εκτός σημείου σχεδιασμού	36
2.3.4.	Βελτιστοποίηση του σημείου σχεδιασμού	38
2.3.5.	Τοπική προσαρμογή	41
2.3.6.	Γραμμή Λειτουργίας	41
2.3.7.	Ανάλυση ευαισθησίας	42
2.3.8.	Δημιουργία υπογραφών βλαβών	42
3	Περιγραφή Κινητήρα PW100	44
3.1.	Κινητήρες PW100	44
3.2.	Μοντέλο PW123	45
3.3.	Τμήματα κινητήρα	46
3.3.1.	Ψυχρό τμήμα κινητήρα (Cold Section)	46
3.3.2.	Θερμό τμήμα (Hot Section)	47
3.3.3.	Τμήμα καύσης (Combustion Section)	48
3.3.4.	Τμήμα στροβίλου υψηλής πίεσης (High Pressure Turbine Section)	48
3.3.5.	Τμήμα στροβίλου χαμηλής πίεσης (Low Pressure Turbine Section)	48
3.3.6.	Τμήμα στροβίλου ισχύος (Power Turbine Section)	48
3.3.7.	Κιβώτιο ταχυτήτων (Reduction Gearbox)	49

3.3.8.	Βοηθητικά κιβώτια ταχυτήτων (Accessory Gearbox and Angle Drive Gearbox)	49
3.3.9.	Σύστημα λίπανσης (Oil System)	50
3.3.10.	Δευτερεύον σύστημα αέρα (Secondary Air System)	50
3.4.	Αεροσκάφος Canadair	51
3.5.	Συλλογή δεδομένων	53
4	Μοντελοποίηση κινητήρα PW123AF	60
4.1.	Δεδομένα δοκιμαστηρίου	60
4.2.	Ανάλυση λειτουργίας στο σημείο σχεδιασμού μέσω βελτιστοποίησης	64
4.3.	Ανάλυση λειτουργίας εκτός του σημείου σχεδιασμού	71
4.3.1.	Επίδραση βαθμού απόδοσης κιβωτίου ταχυτήτων	71
4.3.2.	Επίδραση παραμέτρου μερικού φορτίου βαθμού απόδοσης καύσης	77
4.4.	Ανάλυση λειτουργίας στο σημείο σχεδιασμού μέσω βελτιστοποίησης με διαφορετικά σημεία λειτουργίας	83
4.5.	Τοπική προσαρμογή	88
4.6.	Γραμμή λειτουργίας	97
4.7.	Εφαρμογή μοντέλου σε άλλους κινητήρες	99
5	Διαγνωστική κινητήρα PW123AF	108
5.1.	Ανάλυση ευαισθησίας με σταθερή ισχύ	108
5.2.	Δημιουργία υπογραφών βλαβών για τον PW123AF	119
5.3.	Υπογραφές βλαβών κατασκευαστή	135
6	Ανακεφαλαίωση – Συμπεράσματα	142
6.1.	Ανακεφαλαίωση	142
6.2.	Συμπεράσματα	143
	Βιβλιογραφία	144

1 Εισαγωγή

1.1. Γενικά

Οι αεριοστρόβιλοι ως διατάξεις παραγωγής ώσης για την πρόωση αεροσκαφών εξελίσσονται διαρκώς με στόχο την ελάττωση του κόστους λειτουργίας και τον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Στη σύγχρονη πραγματικότητα, με τους γρήγορους ρυθμούς ανάπτυξης, οι αεροπορικές εταιρείες θέτουν ως στόχο το σχεδιασμό κινητήρων του μέλλοντος, κινητήρες δηλαδή με χαμηλή κατανάλωση καυσίμου και οικολογική συνείδηση. Οι ανάγκες αυτές οδηγούν τις εταιρείες κατασκευής αεροπορικών κινητήρων να επενδύουν ολοένα και περισσότερο στην έρευνα και ανάπτυξη των κινητήρων. Επομένως, τα ερευνητικά κέντρα και οι τομείς συντήρησης αεροπορικών εταιρειών πραγματοποιούν ελέγχους συντήρησης και διάγνωσης της κατάστασης λειτουργίας των κινητήρων.

Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων, καθίσταται απαραίτητη η χρήση μοντέλων προσομοίωσης των κινητήρων. Συνοπτικά, τα μοντέλα προσομοίωσης αεροπορικών κινητήρων καθίστανται αναγκαία για:

- επίβλεψη της λειτουργίας τους σε πραγματικό χρόνο
- διάγνωση βλαβών για διάφορες καταστάσεις λειτουργίας
- συγκριτική μελέτη επιδόσεων και επιλογή κατάλληλου αεροσκάφους για νέα εγκατάσταση
- πρόβλεψη και βελτιστοποίηση του κόστους λειτουργίας

Το Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΘΣ / ΕΜΠ) αναπτύσσει μοντέλα αεροπορικών κινητήρων με σκοπό τη μελέτη και την παρακολούθηση λειτουργίας τους. Τα μοντέλα αυτά δημιουργούνται για όλους τους τύπους και διατάξεις στροβιλοκινητήρων, αλλά και για κάθε κινητήρα ξεχωριστά με αυτόνομες λειτουργίες προσομοίωσης. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η χρήση τους από εξειδικευμένο χρήστη, με κίνδυνο πιθανού λάθους κατά τη χρήση των λογισμικών, την εισαγωγή, μεταφορά και εξαγωγή δεδομένων. Κάποια από τα μοντέλα αυτά είναι αρκετά πολύπλοκα και απαιτούν εμπειρία του χρήστη πάνω στην λειτουργία των μηχανών, ενώ άλλα είναι δομημένα έτσι ώστε να παρέχουν ένα πιο φιλικό περιβάλλον εργασίας.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τη δημιουργία ενός γενικού μοντέλου αεροπορικών κινητήρων turboprop τριών αξόνων, με κατάλληλη τροποποίηση αντίστοιχου γενικού μοντέλου, κινητήρα διπλού ρεύματος. Το λογισμικό αυτό αναπτύχθηκε στο πρόγραμμα αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού PROOSIS. Πραγματοποιείται η εφαρμογή του λογισμικού στον κινητήρα PW123AF, ο οποίος ανήκει στην οικογένεια PW100 και αποτελεί κινητήρα που είναι ευρέως διαδεδομένος. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται δεδομένα από δοκιμαστήριο, ενώ για την πιστοποίηση και αξιολόγηση του λογισμικού γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με τα διαθέσιμα δεδομένα.

1.2. Δομή διπλωματικής εργασίας

Η δομή της διπλωματικής εργασίας παρουσιάζεται συνοπτικά παρακάτω.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγή στην εργασία.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται επισκόπηση του προγράμματος PROOSIS και του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε. Αναλύονται τα βήματα που υλοποιήθηκαν για την προσαρμογή του υπάρχοντος λογισμικού στις απαιτήσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας, τόσο ως προς τις αλλαγές που απαιτούνται για τη νέα διάταξη κινητήρα, όσο και ως προς τις προσθήκες για νέες δυνατότητες και λειτουργίες αυτού.

Στο τρίτο κεφάλαιο πραγματοποιείται μία εκτενής βιβλιογραφική επισκόπηση για την οικογένεια κινητήρων PW100 και πιο συγκεκριμένα για το μοντέλο PW123AF, καθώς και τα αεροσκάφη στα οποία χρησιμοποιείται.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία εφαρμογής του λογισμικού για τη δημιουργία του μοντέλου του κινητήρα PW123AF, με σκοπό την πιστοποίηση του λογισμικού. Αρχικά, επιλέγονται τα βιβλιογραφικά και πειραματικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται για τον κινητήρα και γίνεται ανάλυση στο σημείο σχεδιασμού, καθώς επίσης υπολογίζονται οι αποκλίσεις των επιδόσεων σε σημεία εκτός του σημείου σχεδιασμού. Στη συνέχεια πραγματοποιείται ανάλυση λειτουργίας στο σημείο σχεδιασμού μέσω βελτιστοποίησης με διαφορετικά σημεία λειτουργίας, ενώ πραγματοποιείται και τοπική προσαρμογή των χαρτών με στόχο τη μείωση των αποκλίσεων από τις μετρήσεις του δοκιμαστηρίου.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, αρχικά γίνεται μία ανάλυση ευαισθησίας για εντοπισμό των πιο κατάλληλων μετρήσεων για διάγνωση βλαβών των επιμέρους συνιστωσών του κινητήρα, στη συνέχεια δημιουργούνται υπογραφές βλαβών για τυπικές βλάβες του κινητήρα, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα από το προσωπικό του δοκιμαστηρίου, ενώ γίνεται και

σύγκριση των υπογραφών βλαβών που αναφέρονται από τον κατασκευαστή σε σχέση με τις αντίστοιχες υπογραφές που παράγονται από το μοντέλο.

Στο τελευταίο κεφάλαιο γίνεται ανακεφαλαίωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας.

2 Περιγραφή Λογισμικού Προσαρμογής Γενικού Μοντέλου

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται το υπολογιστικό πρόγραμμα PROOSIS, αναφέρονται κάποια γενικά χαρακτηριστικά του λογισμικού μοντελοποίησης, περιγράφεται το περιβάλλον προσομοίωσης, ενώ τέλος αναλύεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη δημιουργία ενός γενικού μοντέλου αεροπορικού κινητήρα turboprop τριών αξόνων. Στη συνέχεια περιγράφεται το αυτοματοποιημένο λογισμικό προσαρμογής στο περιβάλλον PROOSIS και το πως αυτό εντάχθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία.

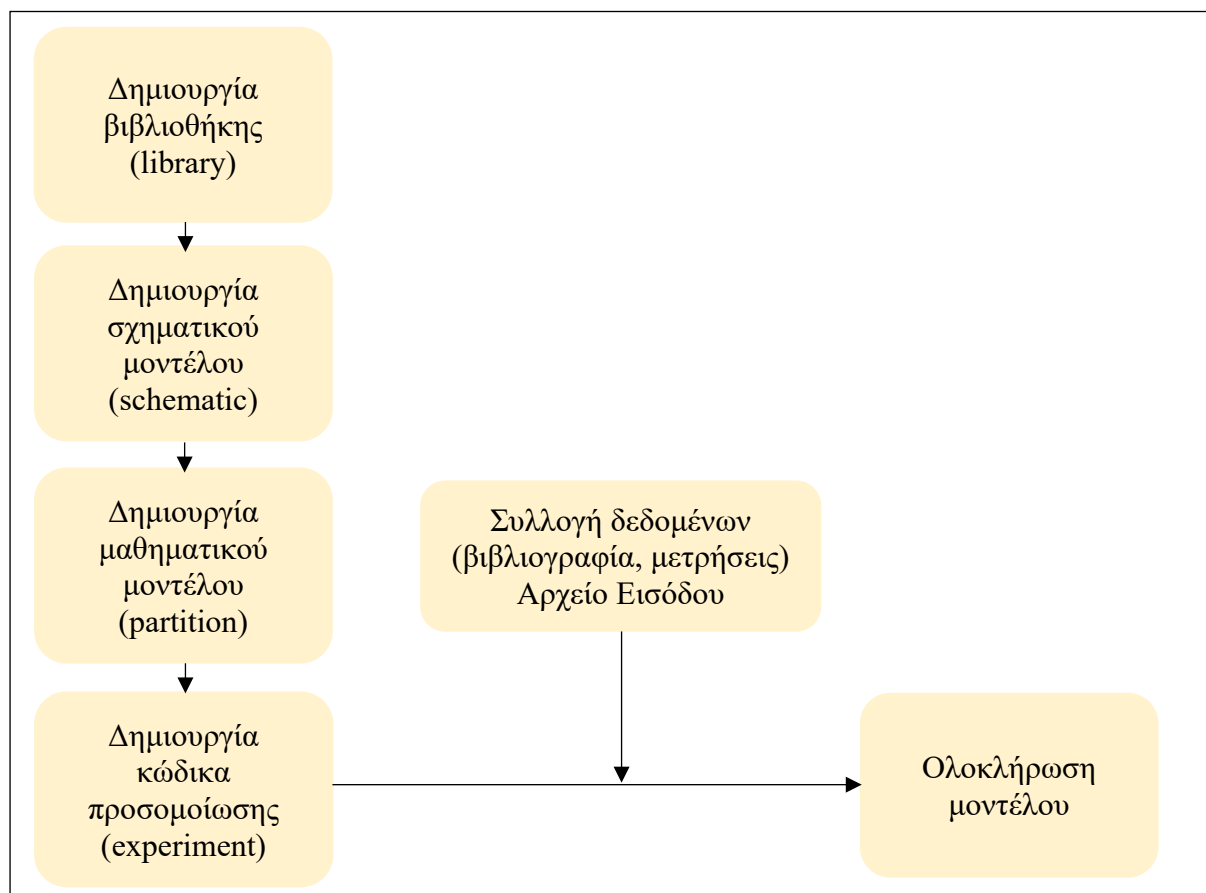
Στόχος του κεφαλαίου καθίσταται η εξοικείωση του αναγνώστη με τις βασικές έννοιες του λογισμικού και η βηματική ανάπτυξη της διαδικασίας που ακολουθήθηκε για τη δημιουργία του χρησιμοποιούμενου μοντέλου.

2.1. Υπολογιστικό πρόγραμμα PROOSIS

Το υπολογιστικό πρόγραμμα PROOSIS αποτελεί ένα αυτόνομο, αντικειμενοστραφές περιβάλλον προσομοίωσης βιομηχανικών αεριοστρόβιλων και αεροπορικών κινητήρων. Χρησιμοποιείται για τη δημιουργία, εκτέλεση, διαχείριση και κοινή χρήση μοντέλων διαφορετικών κινητήρων, με χρήση τυπικών ή προσαρμοσμένων βιβλιοθηκών των εξαρτημάτων του εκάστοτε κινητήρα. Οι υπολογισμοί που εκτελεί μπορεί να είναι σε σταθερή ή μεταβατική κατάσταση, μπορούν επίσης να γίνουν υπολογισμοί διαφορετικών τύπων, γίνεται δηλαδή ανάλυση σε σημεία εντός και εκτός σχεδιασμού (on and off design – point analysis), όπως επίσης υλοποιούνται παραμετρικές μελέτες και αναλύσεις ευαισθησίας και βελτιστοποίησης. Μπορεί επίσης να εκτελέσει υπολογισμούς σε πραγματικό χρόνο. Σημαντικός παράγοντας της υλοποίησης των ανωτέρω διαφόρων λειτουργιών και υπολογισμών καθίσταται η δυνατότητα σύνδεσης του PROOSIS με εξωτερικά εργαλεία (πχ. CFD, FEA). Έτσι, το PROOSIS αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για όλες τις φάσεις του κύκλου ζωής του κινητήρα, από την προκαταρκτική και λεπτομερή σχεδίαση έως την εκ των υστέρων πιστοποίησή του. Στη σύγχρονη βιομηχανία αποτελεί σημαντικό εργαλείο, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κοινό πλαίσιο σε έργα κινητήρων πολλών συνεργατών, παρέχοντας κοινά πρότυπα και μεθοδολογίες.

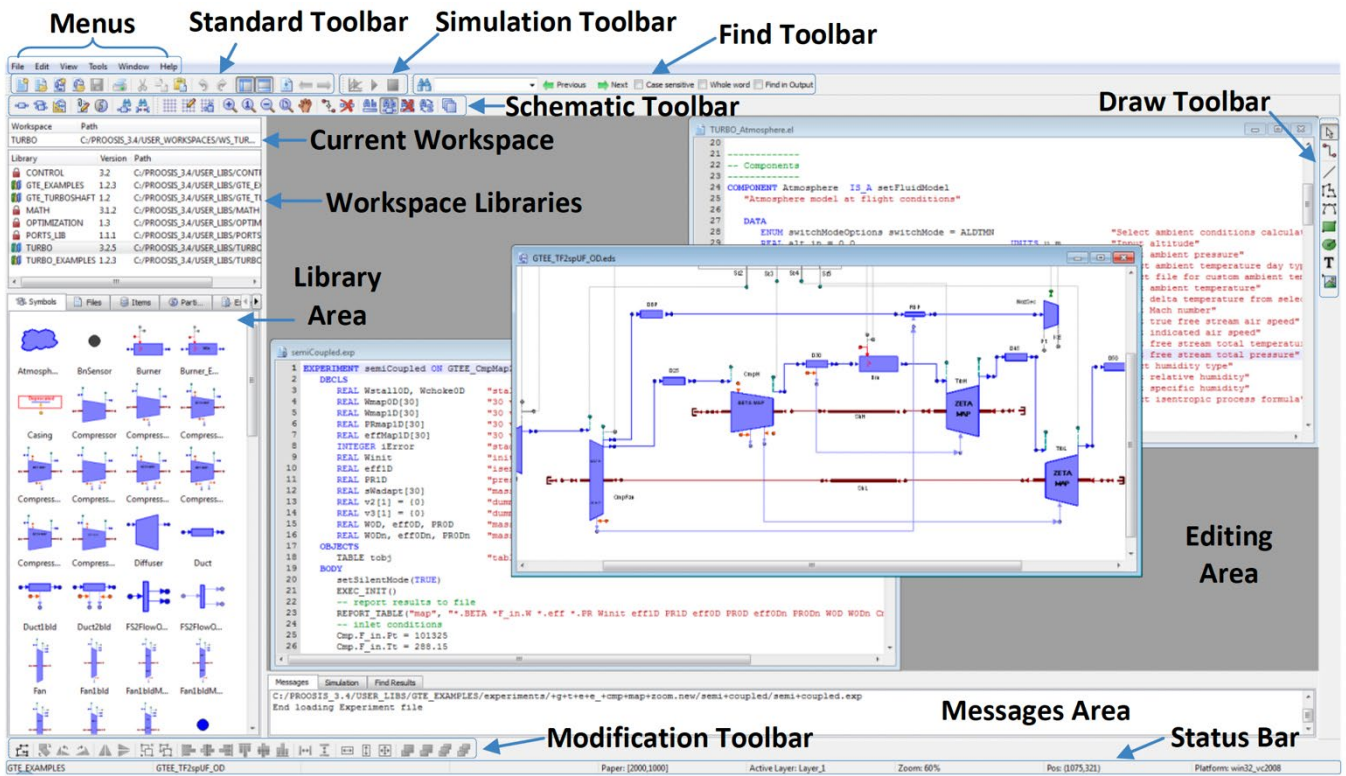
Πρόκειται για περιβάλλον μοντελοποίησης και προσομοίωσης, το οποίο αναπτύχθηκε αρχικά στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού έργου VIVACE, από μία κοινοπραξία ευρωπαϊκών πανεπιστημίων, ερευνητικών ιδρυμάτων και εταιρειών. Βασίζεται στο EcosimPro, εργαλείο προσομοίωσης, που αναπτύχθηκε από την Ισπανική εταιρεία Empresarios Agrupados Internacional S. A., για τη μοντελοποίηση κάθε φυσικής διεργασίας που εκφράζεται με όρους διαφορικών αλγεβρικών εξισώσεων (DAE) ή συνήθων διαφορικών εξισώσεων (ODE) και διακριτών γεγονότων.

Στο παρακάτω δομικό διάγραμμα φαίνεται η σειρά των βημάτων που ακολουθήθηκαν κατά τη δημιουργία του προγράμματος μοντελοποίησης στο PROOSIS.(βλ. Σχήμα 2.1)



Σχήμα 2.1. Ακολουθία δημιουργίας μοντέλου στο PROOSIS

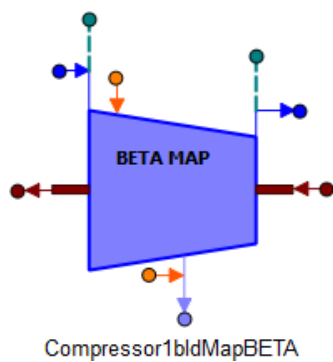
Παρακάτω θα αναλυθούν με ακρίβεια τα βασικά βήματα υλοποίησης του προγράμματος μοντελοποίησης. Το περιβάλλον PROOSIS φαίνεται πιο αναλυτικά στην Εικόνα 2.1.



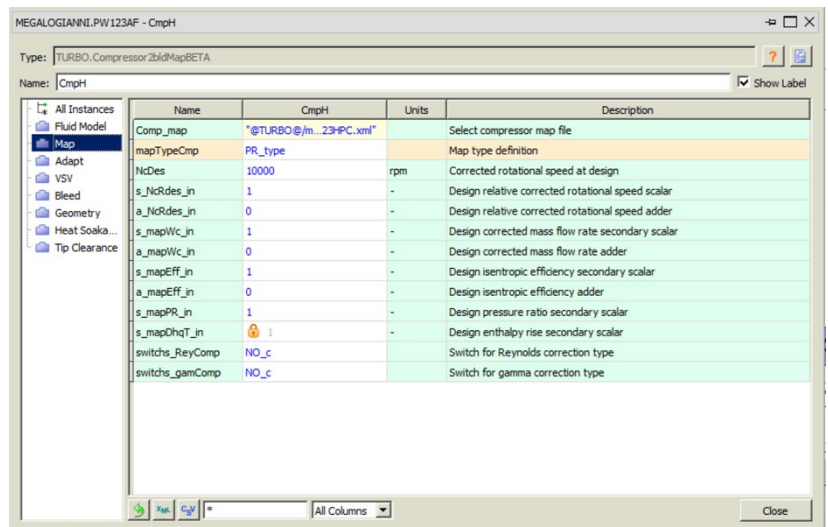
Εικόνα 2.1. Περιβάλλον PROOSIS

2.2. Γενικά στοιχεία

Οι συνιστώσες (components) αποτελούν την πιο σημαντική έννοια στην αντικειμενοστραφή γλώσσα προγραμματισμού του PROOSIS. Περιέχουν τη μαθηματική περιγραφή του αντίστοιχου πραγματικού στοιχείου που αναπαριστούν (πχ. συμπιεστής, στρόβιλος, καυστήρας, ακροφύσιο, θάλαμος καύσης). Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για αρχεία κώδικα (source code files), τα οποία απεικονίζονται με ένα συγκεκριμένο εικονίδιο (Σχήμα 2.2), ανάλογα τη φυσική διεργασία που υλοποιούν και συνεπώς καθίστανται φιλικά προς το χρήστη, καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς γνώσεις προγραμματισμού. Είναι δυνατός ο καθορισμός των συνιστωσών μέσω ενός παραθύρου που περιέχει πεδία εισαγωγής τιμών για τις ιδιότητες της εκάστοτε συνιστώσας. (Εικόνα 2.2)



Σχήμα 2.2. Συνιστώσα συμπιεστή



Εικόνα 2.2. Καθορισμός ιδιοτήτων συνιστωσών

Οι θύρες (ports) αποτελούν μέρος της διεπαφής μεταξύ των συνιστωσών και χρησιμοποιούνται για τη σύνδεσή τους, έτσι ώστε να δημιουργηθεί μια σύνθετη συνιστώσα (πχ. ένας κινητήρας ή ένα υποσύστημα κινητήρα). Οι θύρες επιτρέπουν τη μεταφορά ενός συνόλου μεταβλητών μεταξύ των συνδεδεμένων συνιστωσών και μπορούν να μεταφέρουν ή να δεχθούν πληροφορία ανάλογα τους κανόνες που έχουν καθοριστεί από το χρήστη (γραμμένοι σε EL¹ code). Οι θύρες επομένως, ορίζουν το σύνολο των μεταβλητών που πρέπει να εναλλάσσονται μεταξύ των συνδεδεμένων εξαρτημάτων (πχ. παροχή, πίεση, θερμοκρασία ή ταχύτητα περιστροφής, ροπή, αδράνεια).

Στον Πίνακα 2.1 παρατίθενται τα κυριότερα είδη θυρών που συναντώνται στο PROOSIS με τα σύμβολά τους και το είδος της πληροφορίας που μεταφέρουν.

¹ EcoSimPro Language

No	Port Type	Symbol	Allowed Connections	Description
1	Fluid	●	Single	Main flow variables (e.g. flow rate, pressure, temperature)
2	Sas	●	Single	Secondary air system variables (e.g. flow rate, pressure, temperature)
3	Mech	●	Single In	Mechanical variables (e.g. rotational speed, torque)
4	Fuel	●	Single	Fuel variables (e.g. fuel flow rate)
5	Thrust	●	Single Out	Thrust variables
6	Info	●	Single In	Information variables
7	FluidInfo	●	Single	Fluid information variables (e.g. flow rate, pressure, temperature)
8	Liquid	●	Single	Cooling media variables (e.g. liquid type, flow rate, temperature)
9	TwoPh1F	●	Single	Two phase of single fluid flow variables
10	TwoPh2F	●	Single	Two phase of two fluids flow variables

Πίνακας 2.1. Τύποι θυρών και είδος πληροφορίας που μεταφέρουν

2.2.1. Δημιουργία βιβλιοθήκης

Οι βιβλιοθήκες στο περιβάλλον του PROOSIS αποτελούν χώρους εργασίας για τους χρήστες. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε ως έτοιμες βιβλιοθήκες (πχ. TURBO), είτε με μετατροπές και προσθήκες του χρήστη. Στις βιβλιοθήκες αποθηκεύονται οι συνιστώσες, οι θύρες, τα σχηματικά διαγράμματα, όπως επίσης και τα μαθηματικά μοντέλα, οι κώδικες προσομοίωσης και οι υπορουτίνες που περιγράφουν τα παραπάνω. Σημειώνεται ότι η κύρια πηγή άντλησης των συνιστωσών για αεροπορικούς κινητήρες είναι η βιβλιοθήκη TURBO.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας δημιουργήθηκε μία βιβλιοθήκη, η οποία απαρτίζεται από ένα σχηματικό για κινητήρα turboprop τριών αξόνων και από τα κατάλληλα partitions και experiments, που θα αναλυθούν παρακάτω.

Name	Version	Test	Path
PROOSIS5	0.0		Z:/WS_PR
CONTROL	4.0.7		Z:/Proosis
GTE_EXAMPLES	2.0.2		Z:/Proosis
GTE_TURBOSHAF	2.0.2		Z:/Proosis
MATH	3.2.5		Z:/Proosis
MEGALOGIANNI	0.0		Z:/Proosis
PORTS_LIB	1.1.4		Z:/Proosis
TURBO	4.0.3		Z:/Proosis
TURBO_EXAMPLES	2.0.2		Z:/Proosis
TURBO_REF	1.0.2		Z:/Proosis

Εικόνα 2.3. Βιβλιοθήκη που δημιουργήθηκε

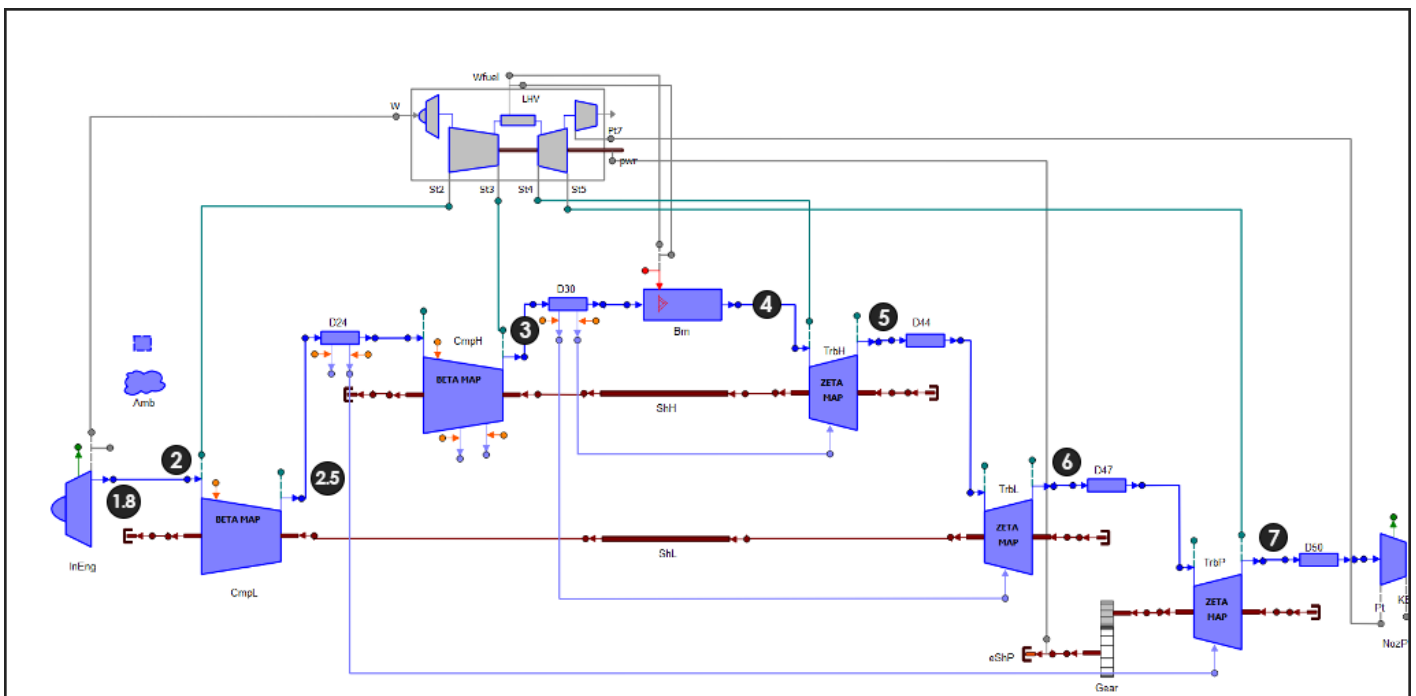
Name	Type
#_LIBRARY_MISC	Library Miscellane
experiments	
Indexx	Function
NACELLED_RAY_UTF	Function
POLYFIT	Function
SVDCMP	Function
Simplex	External Function
TS_2Sp3ShNz_OD	Component
default	Partition
MPDODFILE	Experiment
pinv	Function

Εικόνα 2.4. Περιεχόμενα βιβλιοθήκης λογισμικού



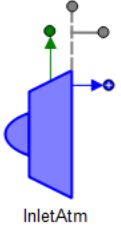
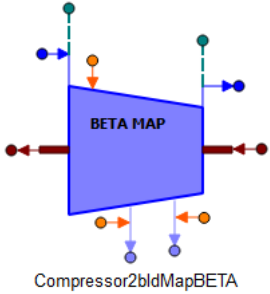
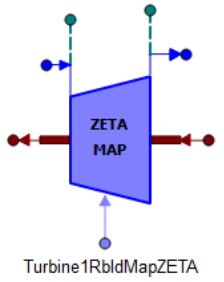
2.2.2. Δημιουργία σχηματικού

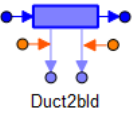

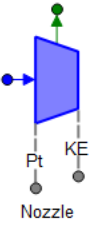

Το σχηματικό (schematic) δημιουργείται από το συνδυασμό των επιμέρους συνιστωσών που απαρτίζουν τον κινητήρα και τη σύνδεσή τους με τις κατάλληλες θύρες. Έχουμε έτσι την γραφική αναπαράσταση του κινητήρα που μελετάμε όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3.

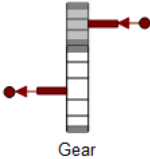
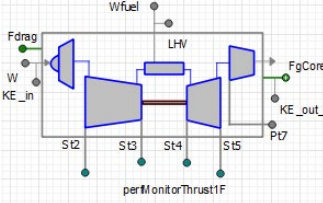
Το σχηματικό που δημιουργήθηκε φαίνεται παρακάτω, ενώ οι επιμέρους συνιστώσες αναλύονται στον Πίνακα 2.2.



Σχήμα 2.3. Σχηματικό για κινητήρα turboprop τριών αξόνων

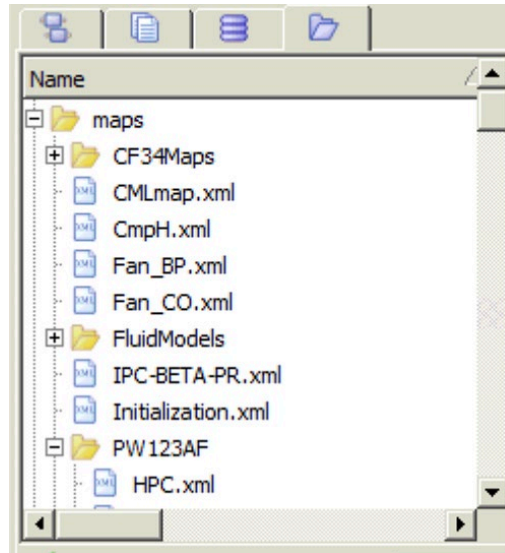
A/A	Σχηματική απεικόνιση στο PROOSIS	Ονομασία συνιστώσας	Περιγραφή Λειτουργίας	Χρήση στο μοντέλο / Σχόλια
1		General	Καθορίζει το είδος του καυσίμου που περιέχεται στο καυσαέριο που διακινείται, καθώς και την θερμοδυναμική συμπεριφορά του.	Επιλέγεται το καύσιμο Jet A, εφόσον πρόκειται για αεροπορικό κινητήρα.
2		Atmosphere	Υπολογίζει τις ατμοσφαιρικές συνθήκες στην είσοδο του κινητήρα.	Περιέχει παραμέτρους για το υψόμετρο, τον αριθμό Mach πτήσης, την απόκλιση από τις συνθήκες τυπικής ημέρας καθώς και την σχετική υγρασία.
3		Engine Inlet	Υπολογίζει τις συνθήκες στην έξοδο του αγωγού εισόδου της μηχανής, καθώς και την κινητική ενέργεια του εισερχόμενου ρεύματος.	Στο συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιείται σταθερός λόγος απωλειών πίεσης για τον αγωγό εισόδου και η τιμή του επιλέγεται από το χρήστη.
4		Compressor High/Low Pressure	Υπολογίζει τα μεγέθη στην έξοδο του συμπιεστή και την απαιτούμενη ισχύ στην άτρακτο. Χρησιμοποιεί χάρτη λειτουργίας με γραμμές-β (BETA parameter) και διαθέτει 2 απομαστεύσεις.	Οι απομαστεύσεις δίνονται ως ποσοστό της ροής εισόδου.
5		Turbine High/Low Pressure & Power Turbine	Υπολογίζει τα μεγέθη στην έξοδο του στροβίλου και την ισχύ που παράγεται στην άτρακτο. Χρησιμοποιεί χάρτη με γραμμές-β (ZETA parameter).	Στο παρόν μοντέλο η ίδια συνιστώσα χρησιμοποιείται και για τους τρεις στροβίλους. Διαθέτει μία είσοδο απομάστευσης, η οποία χρησιμοποιείται για ψύξη πτερυγίων στον στρόβιλο ΥΠ,

A/A	Σχηματική απεικόνιση στο PROOSIS	Ονομασία συνιστώσας	Περιγραφή Λειτουργίας	Χρήση στο μοντέλο / Σχόλια
				για στεγάνωση στο στρόβιλο ΧΠ και στο στρόβιλο ισχύος.
6		Duct with bleeds	Υπολογίζει για διάφορα μοντέλα απωλειών πίεσης και μετάδοσης θερμότητας, τις συνθήκες στην έξοδο ενός αγωγού/διαχύτη.	Στο συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιείται στην είσοδο και έξοδο του συμπιεστή (D24 και D30). Οι απώλειες πίεσης στο σημείο σχεδιασμού είναι σταθερές και δίνονται από το χρήστη στο αρχείο εισόδου. Σε λειτουργία εκτός σημείου σχεδιασμού, οι απώλειες μεταβάλλονται με την παροχή εισόδου.
7		Duct without bleeds	Υπολογίζει για διάφορα μοντέλα απωλειών πίεσης και μετάδοσης θερμότητας, τις συνθήκες στην έξοδο ενός αγωγού/διαχύτη.	Στο συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιείται στις εξόδους των στροβίλων (D44, D47 και D50). Οι απώλειες πίεσης στο σημείο σχεδιασμού είναι σταθερές και δίνονται από το χρήστη στο αρχείο εισόδου.
8		Nozzle	Υπολογίζει την παραγόμενη ώση από το ρεύμα που εκτονώνεται στην ατμόσφαιρα.	Στο παρόν μοντέλο ο συντελεστής ώσης C_x και ο συντελεστής εκβολής C_d είναι σταθερές και δίνονται από το χρήστη στο αρχείο εισόδου.
9		Shaft	Υπολογίζει τη ροπή της ατράκτου για δεδομένη ταχύτητα περιστροφής	Στο παρόν μοντέλο χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση των τριών

A/A	Σχηματική απεικόνιση στο PROOSIS	Ονομασία συνιστώσας	Περιγραφή Λειτουργίας	Χρήση στο μοντέλο / Σχόλια
			<p>συνυπολογίζοντας τυχόν μεταβολές ισχύος από συμπιεστές και στροβίλους.</p>	<p>ατράκτων. Ο μηχανικός βαθμός απόδοσης είναι σταθερός και δίνεται από το χρήστη στο αρχείο εισόδου.</p>
10		Gearbox	<p>Προσαρμόζει τις στροφές του άξονα ισχύος στις στροφές της έλικας.</p>	<p>Στο παρόν μοντέλο η σχέση μετάδοσης είναι σταθερή, ενώ ο βαθμός απόδοσης εξαρτάται από την ισχύ εισόδου και το βαθμό απόδοσης στο σημείο σχεδιασμού, ο οποίος δίνεται από το χρήστη στο αρχείο εισόδου.</p>
11		Performance	<p>Η συγκεκριμένη συνιστώσα δεν αποτελεί μέρος του πραγματικού κινητήρα. Σκοπός της χρήσης της συνιστώσας αυτής είναι η σύνδεση της με τις υπόλοιπες συνιστώσες για τη συλλογή των απαραίτητων πληροφοριών από αυτές μέσω των θυρών (info ports), για τον υπολογισμό των συνολικών επιδόσεων της μηχανής.</p>	<p>Ορισμένα από τα μεγέθη τα οποία υπολογίζει είναι ο συνολικός λόγος πίεσης (OPR), η ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFC), και η καθαρή παραγόμενη ισχύς της μηχανής (PWSD).</p>

Πίνακας 2.2. Περιγραφή components

Οι επιμέρους συνιστώσες χρησιμοποιούν χάρτες λόγου πίεσης – παροχής – βαθμού απόδοσης. Οι χάρτες των φυγοκεντρικών συμπιεστών και των αξονικών στροβίλων βρίσκονται στον υποφάκελο maps (Εικόνα 2.5) της βιβλιοθήκης που εργαζόμαστε.



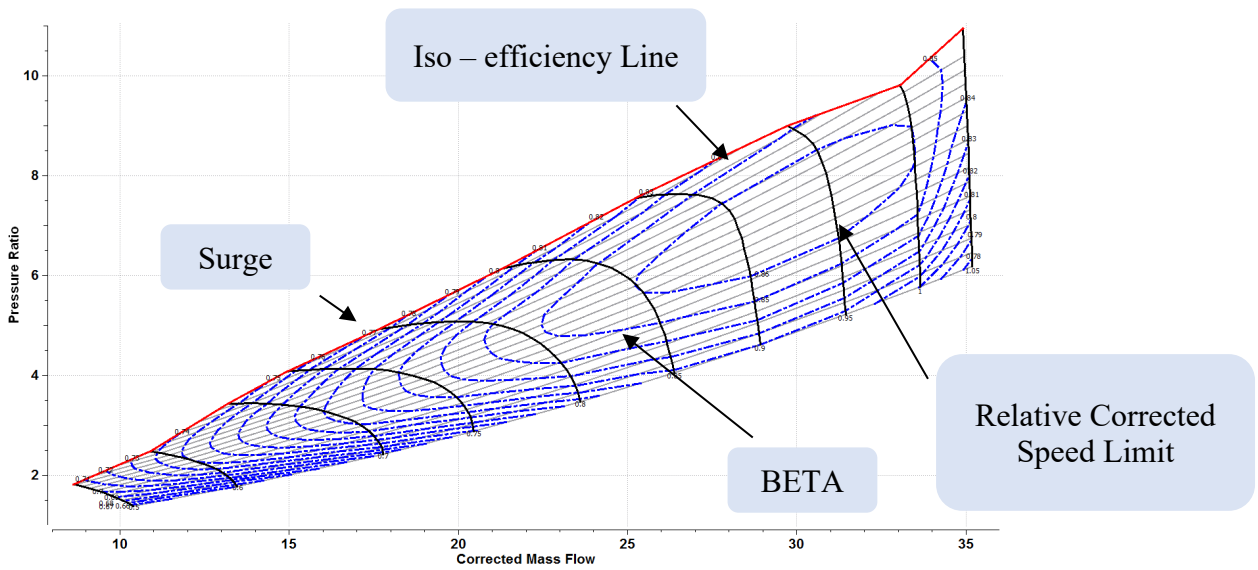
Εικόνα 2.5. Υποφάκελος χαρτών

Οι συμπιεστές και στροβίλοι χρησιμοποιούν χάρτες με τις παραμέτρους BETA και ZETA. Οι παράμετροι αυτοί εκφράζουν τις ιδεατές γραμμές πάνω στους χάρτες και χρησιμοποιούνται ευρέως στη μοντελοποίηση, διότι διευκολύνουν τον προσδιορισμό των σημείων λειτουργίας.

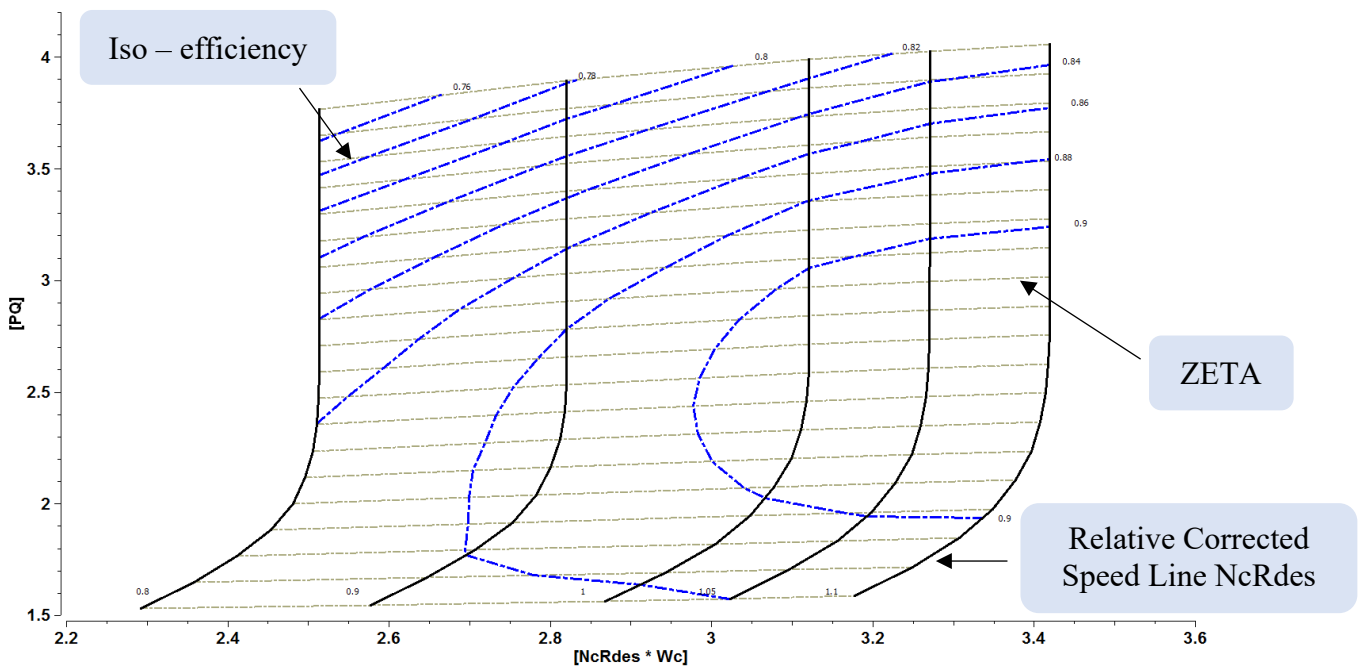
Η παράμετρος BETA στους συμπιεστές δεν έχει κάποια φυσική σημασία και έτσι δεν μπορεί να οριστεί ακριβώς, ενώ η παράμετρος ZETA στους στροβίλους ορίζεται ως:

$$ZETA_{TrbH/TrbL} = \frac{PR_{map} - PR_{map,min}}{PR_{map,max} - PR_{map,min}}$$

Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.4, στους συμπιεστές οι γραμμές – β έχουν μοναδικό σημείο τομής με κάθε ισοταχή. Έτσι, με γνωστή την ταχύτητα περιστροφής και την τιμή της γραμμής – β, ορίζεται μοναδικό σημείο στη χαρακτηριστική λειτουργίας της συνιστώσας. Σημαντικό πλεονέκτημα της διαμόρφωσης αυτής καθίσταται στις περιπτώσεις που η χαρακτηριστική του στροβίλου είναι σχεδόν κατακόρυφη. Στους στροβίλους, επειδή υπάρχει το φαινόμενο του στραγγαλισμού, οι γραμμές – ζ είναι συσχέτιση του λόγου πίεσης και των ανηγμένων στροφών.



Σχήμα 2.4. Χάρτης συμπίεστη με γραμμές - β



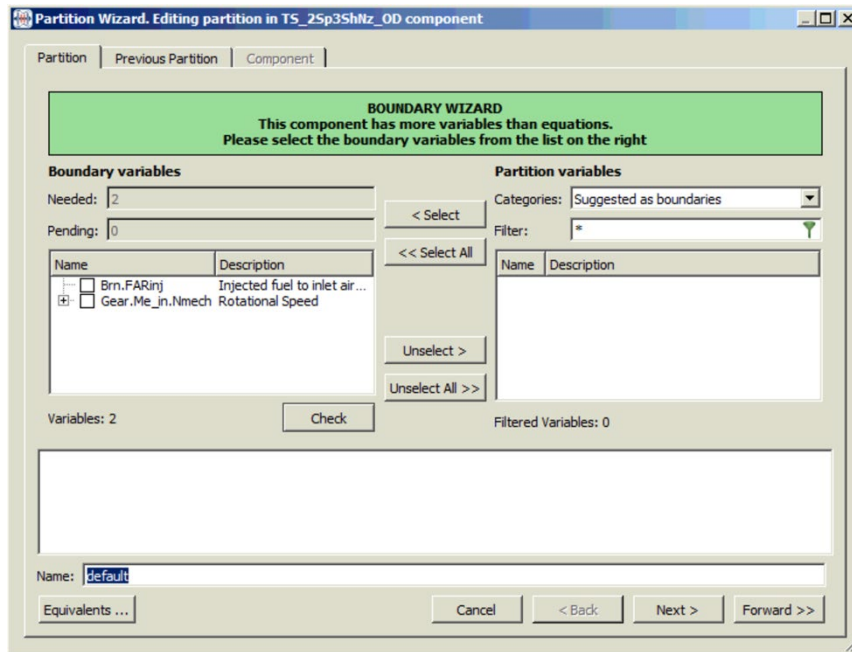
Σχήμα 2.5. Χάρτης στροβίλου με γραμμές - ζ

2.2.3. Δημιουργία μαθηματικού μοντέλου

Στο παρόν βήμα υλοποιείται το μαθηματικό μοντέλο ή αλλιώς partition. Το μαθηματικό μοντέλο καθορίζεται από το σχηματικό διάγραμμα και εκφράζει ουσιαστικά τον μαθηματικό τρόπο επίλυσης του σχηματικού μοντέλου. Για την επίλυση του μοντέλου χρειάζονται κάποιες τιμές σε συγκεκριμένες μεταβλητές ή πιθανά μία αρχικοποίηση σε κάποιες άλλες. Υπάρχουν τρεις διαφορετικές επιλογές για τα partitions και όλες οι εντολές δίνονται με τη βοήθεια αναδυόμενων παραθύρων (wizards):

- *New partition*: Με αυτή την επιλογή ο χρήστης επιλέγει τις μεταβλητές που θα δώσει στο πρόγραμμα ως οριακές συνθήκες (boundary variables) και από μία αρχική τιμή σε κάποιες άλλες μεταβλητές (algebraic variables) εάν και εφόσον αυτό απαιτείται.
- *Default partition*: Με αυτή την επιλογή το partition δημιουργείται αυτόματα και το λογισμικό επιλέγει αυτόματα τις μεταβλητές που θεωρεί ότι απαιτούνται για την επίλυση.
- *Design partition*: Με αυτή την επιλογή δηλώνεται πως εκτός από τις οριακές συνθήκες και αλγεβρικές μεταβλητές ο χρήστης επιθυμεί να γίνει σχεδίαση (design) και σε μία άλλη παράμετρο που για το πρόβλημα θεωρείται γνωστή (data) εφόσον έχει καταχωρηθεί έτσι κατά την δημιουργία των συνιστωσών/components (πχ. το εμβαδόν ενός ακροφυσίου).

Στην παρούσα περίπτωση για την επίλυση των εξισώσεων απαιτούνται δύο οριακές μεταβλητές (boundary variables) και έξι αλγεβρικές (algebraic variables), οι οποίες πρέπει να αρχικοποιηθούν κατάλληλα για την επίλυση του προβλήματος. Οι οριακές μεταβλητές που επιλέγονται όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.6 είναι ο λόγος αέρα/καυσίμου (Brn.FARinj) και η ταχύτητα περιστροφής του άξονα ισχύος (Gear.Me_in.Nmech).

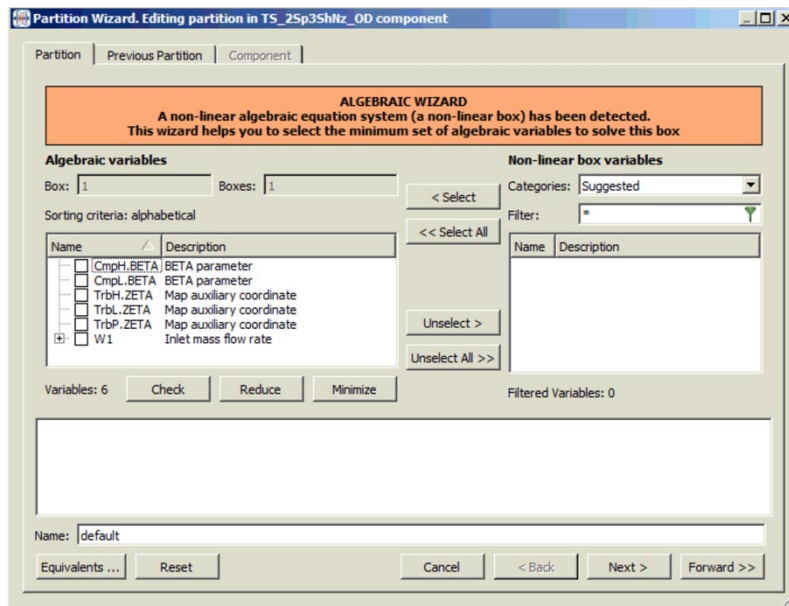


Εικόνα 2.6. Οριακές μεταβλητές μαθηματικού μοντέλου

Οι αλγεβρικές που επιλέχθηκαν είναι οι εξής:

- $W1$, η παροχή εισόδου στον κινητήρα
- $CmpL.BETA$, ο αριθμός β των χαρακτηριστικών γραμμών β του χάρτη του συμπιεστή χαμηλής πίεσης
- $CmpH.BETA$, ο αριθμός β των χαρακτηριστικών γραμμών β του χάρτη του συμπιεστή υψηλής πίεσης
- $TrbH.ZETA$, ο αριθμός ζ των χαρακτηριστικών γραμμών ζ του χάρτη του στροβίλου υψηλής πίεσης
- $TrbL.ZETA$, ο αριθμός ζ των χαρακτηριστικών γραμμών ζ του χάρτη του στροβίλου χαμηλή πίεσης
- $TrbP.ZETA$, ο αριθμός ζ των χαρακτηριστικών γραμμών ζ του χάρτη του στροβίλου ισχύος

Εκτός από τις αλγεβρικές μεταβλητές, υπάρχουν και 2 δυναμικές, οι οποίες είναι οι στροφές χαμηλής και υψηλής πίεσης. Ορίζεται έτσι ένα σύστημα προς επίλυση 8 αγνώστων με 8 εξισώσεις.



Εικόνα 2.7. Αλγεβρικές μεταβλητές μαθηματικού μοντέλου

2.2.4. Δημιουργία λογισμικού – experiment

Σε αυτό το βήμα, έχοντας ήδη δημιουργήσει τη σχηματική αναπαράσταση του κινητήρα, όπως επίσης και το μαθηματικό μοντέλο, ακολουθεί η δημιουργία του κώδικα προσομοίωσης σε γλώσσα προγραμματισμού EL. Σκοπός του κώδικα είναι να έχει ο χρήστης τη δυνατότητα μοντελοποίησης διαφορετικών κινητήρων όμοιας διάταξης, χωρίς να απαιτείται επαναπρογραμματισμός, παρά μόνο εισαγωγή δεδομένων σε ένα αρχείο εισόδου. Βασιζόμενοι σε έναν ήδη υπάρχοντα κώδικα για κινητήρα διπλού ρεύματος, ο οποίος πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια άλλης διπλωματικής εργασίας (Ακκογιούνογλου, 2018), γίνονται οι κατάλληλες τροποποιήσεις και προσθήκες για την προσαρμογή του στη συγκεκριμένη διάταξη κινητήρα.

2.3. Κώδικας προσομοίωσης

Ο κώδικας προσομοίωσης δέχεται εξωτερικά αρχεία εισόδου και μέσω των κατάλληλων υπορουτινών (functions) εξάγει στο περιβάλλον του PROOSIS τα απαραίτητα αποτελέσματα.

Ο κώδικας του μαθηματικού μοντέλου προγραμματίστηκε με στόχο το γενικευμένο χαρακτήρα, όπως αναφέρθηκε και στον κύριο στόχο της διπλωματικής εργασίας. Στα πλεονεκτήματά του εντάσσεται και ο έλεγχος από το χρήστη, μέσω της χρήσης εξωτερικού αρχείου για την εισαγωγή και επεξεργασία των χρησιμοποιούμενων παραμέτρων και την

επιλογή της λειτουργίας του. Ως αποτέλεσμα, μειώνεται ο χρόνος, καθώς αυξάνεται η ευκολία χρήσης του λογισμικού.

Επιπρόσθετα, οι λειτουργίες προσομοίωσης διαφοροποιούνται σύμφωνα με τις ανάγκες του χρήστη. Πιο συγκεκριμένα οι λειτουργίες χωρίζονται ως εξής:

1. Ανάλυση στο σημείο σχεδιασμού (Design Point Analysis)
2. Βελτιστοποίηση παραμέτρων και θέσης σημείου σχεδιασμού στους χάρτες λειτουργίας με βάση τις επιδόσεις σε σημεία εκτός του σημείου σχεδιασμού (Design Point Optimization)
3. Προσομοίωση γραμμής λειτουργίας (Operating Line)
4. Ανάλυση σημείων εκτός του σημείου σχεδιασμού (Off – Design Point Analysis)
5. Τοπική προσαρμογή χαρτών ή διάγνωση βλάβης (Adapt Optimization)
6. Αυτοματοποιημένη τοπική προσαρμογή χαρτών (Local Adaptation)
7. Ανάλυση Ευαισθησίας (Sensitivity Analysis)
8. Δημιουργία Υπογραφών Βλαβών (Run Faults)

2.3.1. Αρχείο Εισόδου

Προϋπόθεση για τη χρήση του λογισμικού είναι η δημιουργία του αρχείου εισόδου με στοιχεία του κινητήρα προς μοντελοποίηση. Στο αρχείο εισόδου ο χρήστης μπορεί να:

- Επιλέξει τη λειτουργία που θα πραγματοποιήσει το πρόγραμμα (MODE 1 – 8)
- Επεξεργαστεί τις ιδιότητες των συνιστωσών, όπως λόγους πίεσης, απώλειες πίεσης, παροχές απομαστεύσεων, ισεντροπικούς βαθμούς απόδοσης, βαθμό απόδοσης του θαλάμου καύσης, βαθμούς απόδοσης αξόνων, τιμές των β και ζ των χαρτών λειτουργίας
- Επεξεργαστεί και να επιλέξει τιμές για τα διαθέσιμα σημεία λειτουργίας (συνθήκες πτήσης, ολικό λόγο πίεσης, παροχή αέρα, πιέσεις, παροχή καυσίμου, ταχύτητες περιστροφής, ώση κτλ.)

2.3.2. Ανάλυση στο σημείο σχεδιασμού

Η ανάλυση στο σημείο σχεδιασμού (design point analysis) – MODE 1, αποτελεί την πρώτη διαδικασία που πρέπει να πραγματοποιηθεί για την ανάπτυξη ενός μοντέλου. Για τον υπολογισμό του σημείου σχεδιασμού, απαιτείται η επιλογή κατάλληλων χαρτών για όλες τις συνιστώσες και ο υπολογισμός των αντίστοιχων συντελεστών κλίμακας των χαρτών αυτών,

επιλέγοντας τη θέση του σημείου πάνω στους χάρτες, καθώς και τις επιδόσεις του σημείου σχεδιασμού (λόγοι πίεσης, βαθμοί απόδοσης, συνολικές επιδόσεις).

Οι συντελεστές κλίμακας για κάθε χάρτη είναι 4 και συσχετίζουν την παροχή μάζας, το λόγο πίεσης, τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης και τις στροφές της μηχανής υπό μοντελοποίηση σε σχέση με το χάρτη αναφοράς.

Εκτός από τους συντελεστές κλίμακας πρέπει να υπολογιστούν και οι διορθωμένες στροφές των συνιστωσών, το εμβαδόν ακροφυσίου, το ποσοστό απομάστευσης για ψύξη του στρόβιλου υψηλής και ο λόγος αέρα/καυσίμου για δεδομένη παροχή καυσίμου. Δεδομένου ότι ο αριθμός των συνιστωσών για τη συγκεκριμένη διάταξη είναι 5 (2 συμπιεστές και 3 στρόβιλοι), ο συνολικός αριθμός των αγνώστων είναι 28. Οι αντίστοιχοι άγνωστοι φαίνονται στον Πίνακα 2.3.

Όνομα μεταβλητής στο PROOSIS	Περιγραφή μεταβλητής
CmpL.NcDes	Διορθωμένες στροφές σημείου σχεδιασμού (CmpL)
CmpL.s_NcRdes_in	Συντελεστής κλίμακας διορθωμένων στροφών (CmpL)
CmpL.s_mapEff_in	Συντελεστής κλίμακας ισηντροπικού B.A. (CmpL)
CmpL.s_mapPR_in	Συντελεστής κλίμακας λόγου πίεσης (CmpL)
CmpL.s_mapWc_in	Συντελεστής κλίμακας διορθωμένης παροχής (CmpL)
CmpH.NcDes	Διορθωμένες στροφές σημείου σχεδιασμού (CmpH)
CmpH.s_NcRdes_in	Συντελεστής κλίμακας διορθωμένων στροφών (CmpH)
CmpH.s_mapEff_in	Συντελεστής κλίμακας ισηντροπικού B.A. (CmpH)
CmpH.s_mapPR_in	Συντελεστής κλίμακας λόγου πίεσης (CmpH)
CmpH.s_mapWc_in	Συντελεστής κλίμακας διορθωμένης παροχής (CmpH)
TrbH.NcDes	Διορθωμένες στροφές σημείου σχεδιασμού (TrbH)
TrbH.s_mapNc_in	Συντελεστής κλίμακας διορθωμένων στροφών (TrbH)
TrbH.s_mapEff_in	Συντελεστής κλίμακας ισηντροπικού B.A. (TrbH)
TrbH.s_mapPR_in	Συντελεστής κλίμακας λόγου πίεσης (TrbH)
TrbH.s_mapWc_in	Συντελεστής κλίμακας διορθωμένης παροχής (TrbH)
TrbL.NcDes	Διορθωμένες στροφές σημείου σχεδιασμού (TrbL)
TrbL.s_mapNc_in	Συντελεστής κλίμακας διορθωμένων στροφών (TrbL)
TrbL.s_mapEff_in	Συντελεστής κλίμακας ισηντροπικού B.A. (TrbL)
TrbL.s_mapPR_in	Συντελεστής κλίμακας λόγου πίεσης (TrbL)
TrbL.s_mapWc_in	Συντελεστής κλίμακας διορθωμένης παροχής (TrbL)
TrbP.s_mapNc_in	Συντελεστής κλίμακας διορθωμένων στροφών (TrbP)
TrbP.s_mapEff_in	Συντελεστής κλίμακας ισηντροπικού B.A. (TrbP)
TrbP.s_mapPR_in	Συντελεστής κλίμακας λόγου πίεσης (TrbP)
TrbP.s_mapWc_in	Συντελεστής κλίμακας διορθωμένης παροχής (TrbP)
Bm.FARinj	Λόγος αέρα/καυσίμου
NozPri.Aexit	Εμβαδόν ακροφυσίου εξόδου
D30.Wbleed2	Απομάστευση από το διαχύτη στην έξοδο του συμπιεστή υψηλής πίεσης

Πίνακας 2.3. Άγνωστοι παράμετροι κατά την ανάλυση στο σημείο σχεδιασμού

Τα βήματα που ακολουθούμε για τη διαδικασία επίλυσης στο σημείο σχεδιασμού είναι τα εξής:

1. Εισαγωγή δεδομένων και παραμέτρων σημείου σχεδιασμού από το αρχείο εισόδου
2. Προσεγγιστική επίλυση του σημείου σχεδιασμού με σκοπό την αρχικοποίηση των μεταβλητών – συντελεστών προς σχεδίαση
3. Αρχικοποίηση αλγεβρικών μεταβλητών του μαθηματικού μοντέλου και των 28 επιπρόσθετων μεταβλητών σχεδιασμού
4. Επίλυση του σημείου σχεδιασμού (χρήση μεθόδου Newton – Raphson για την επίλυση του μη γραμμικού συστήματος 36x36)
5. Αποθήκευση παραμέτρων και συντελεστών προσαρμογής και κλίμακας χαρτών

Βήμα 1^ο : Εισαγωγή δεδομένων και παραμέτρων σημείου σχεδιασμού από το αρχείο εισόδου

Για την αρχική επίλυση του σημείου σχεδιασμού στο PROOSIS ο χρήστης πρέπει να εισάγει στο αρχείο εισόδου τα παρακάτω δεδομένα:

1. Συνθήκες πτήσης
2. Ισχύς και ώση κινητήρα
3. Παροχή αέρα και παροχή καυσίμου
4. Στροφές ατράκτων (χαμηλής, υψηλής, ισχύος)
5. Πιέσεις στην είσοδο και έξοδο του LPC, στην έξοδο του HPC
6. Θερμοκρασίες στην είσοδο του LPC και έξοδο του HPC
7. Θερμοκρασίες ανάμεσα στον LPT και PT
8. Θερμοκρασία και πίεση εξόδου καυσαερίων

Εναλλακτικά, αντί για τις παραπάνω πιέσεις μπορούν να δοθούν οι αντίστοιχοι λόγοι πίεσης των συμπιεστών. Αντίστοιχα, αντί για τις θερμοκρασίες μπορούν να δοθούν οι ισεντροπικοί βαθμοί απόδοσης των συμπιεστών και στροβίλων. Η πρώτη περίπτωση είναι πιο κατάλληλη όταν έχουμε δεδομένα από δοκιμαστήριο, όπου έχουμε συγκεκριμένες μετρήσεις, ενώ η δεύτερη αποτελεί τη γενική μεθοδολογία που ακολουθείται, όπου γνωρίζουμε ή μπορούμε να υποθέσουμε τις επιδόσεις (λόγους πίεσης, βαθμούς απόδοσης).

Εκτός από τα παραπάνω, πρέπει να θέσουμε και τα εξής μεγέθη:

9. Η θέση του σημείου σχεδιασμού στον χάρτη, δηλαδή οι μεταβλητές NcRdesMap και BETA – ZETA για συμπιεστές και στροβίλους αντίστοιχα

10. Οι απώλειες ολικής πίεσης σε όλους τους αγωγούς
11. Τα ποσοστά και οι θέσεις απομάστευσης των συμπιεστών και των αγωγών
12. Οι μηχανικοί βαθμοί απόδοσης των αξόνων – ατράκτων
13. Ο βαθμός απόδοσης του κιβωτίου ταχυτήτων
14. Οι συντελεστές ώσης και εκβολής του ακροφυσίου

Βήμα 2^ο : Αρχικοποίηση των μεταβλητών

Με σκοπό την αρχικοποίηση των μεταβλητών, γίνεται υπολογισμός του κύκλου και εκτίμηση όλων των παραμέτρων κατά μήκος της μηχανής, ενώ τα μεγέθη και ο τρόπος υπολογισμού εξαρτώνται από τις επιλογές και τα δεδομένα που έχει δώσει ο χρήστης.

Βήμα 3^ο : Καθορισμός οριακών και αλγεβρικών μεταβλητών

Έχοντας ολοκληρώσει την αρχικοποίηση, ορίζουμε τις αρχικές τιμές όλων των αγνώστων μεταβλητών προς επίλυση.

Βήμα 4^ο : Επίλυση σημείου σχεδιασμού

Η επίλυση γίνεται με χρήση της μαθηματικής υπορουτίνας (nsolver) που υλοποιεί τη μέθοδο Newton – Raphson για μη γραμμικά συστήματα. Οι εξισώσεις των μεταβλητών 1 – 8 επιβάλλονται από το PROOSIS σύμφωνα με τη διάταξη του κινητήρα. Οι υπόλοιπες εξισώσεις απαιτούν τα εξής μεγέθη:

- Το λόγο πίεσης ή τη θερμοκρασία εξόδου του συμπιεστή χαμηλής πίεσης
- Τον ολικό λόγο πίεσης ή τη θερμοκρασία εξόδου του συμπιεστή υψηλής πίεσης
- Τον ισεντροπικό (ή πολυτροπικό) βαθμό απόδοσης συμπιεστή χαμηλής πίεσης (εναλλακτικά υπάρχει και η δυνατότητα εξίσωσης του πολυτροπικού βαθμού απόδοσης του συμπιεστή χαμηλής πίεσης με τον αντίστοιχο βαθμό απόδοσης του συμπιεστή υψηλής πίεσης)
- Τον ισεντροπικό (ή πολυτροπικό) βαθμό απόδοσης συμπιεστή υψηλής πίεσης ή τη θερμοκρασία εξόδου του συμπιεστή υψηλής πίεσης
- Τον ισεντροπικό (ή πολυτροπικό) βαθμό απόδοσης του στροβίλου υψηλής πίεσης (εναλλακτικά υπάρχει και η δυνατότητα εξίσωσης του ισεντροπικού βαθμού

απόδοσης του στροβίλου υψηλής πίεσης με τον αντίστοιχο βαθμό απόδοσης του στροβίλου χαμηλής πίεσης)

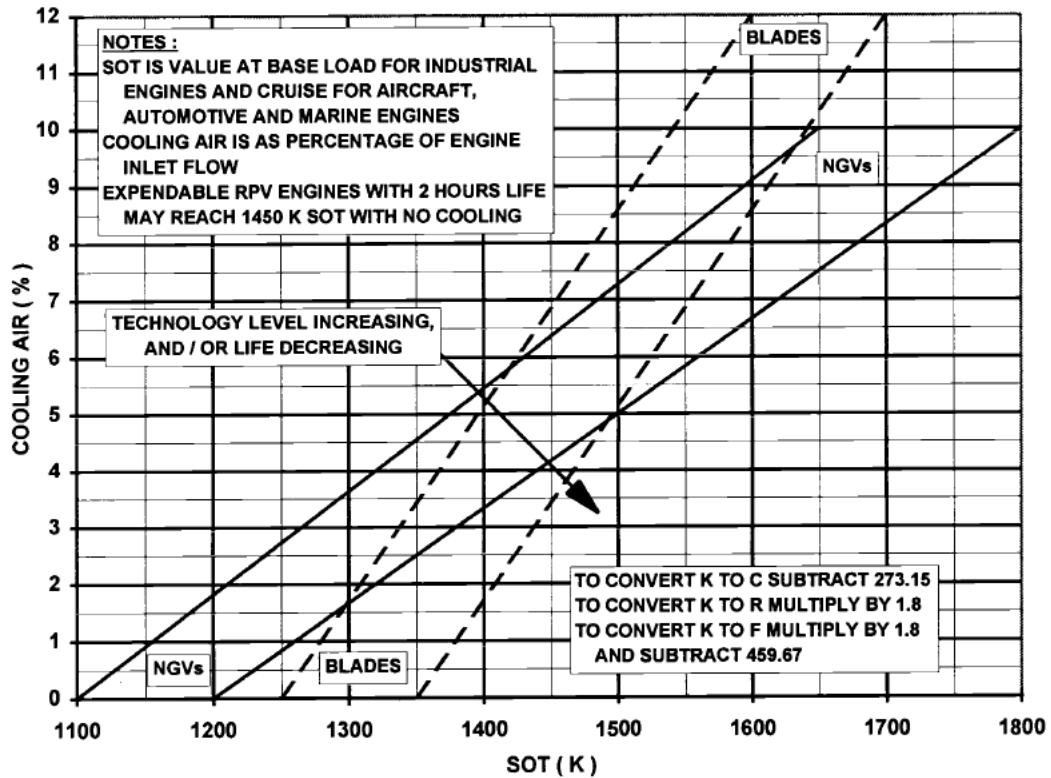
- Τον ισεντροπικό (ή πολυτροπικό) βαθμό απόδοσης του στροβίλου χαμηλής πίεσης (εναλλακτικά υπάρχει και η δυνατότητα εξίσωσης του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης του στροβίλου χαμηλής πίεσης με τον αντίστοιχο βαθμό απόδοσης του στροβίλου ισχύος)
- Τον ισεντροπικό (ή πολυτροπικό) βαθμό απόδοσης του στροβίλου ισχύος
- Τα CmpL.NcRDes, CmpL.NcRDesMap, CmpL.BETA, CmpH.NcRdes, CmpH.NcRdesMap, CmpH.BETA, TrbH.NcRdes, TrbH.NcRdesMap, TrbH.ZETA, TrbL.NcRdes, TrbL.NcRdesMap, TrbL.ZETA, TrbP.NcRdes, TrbP.NcRdesMap, TrbP.ZETA
- Τις στροφές περιστροφής άξονα υψηλής και χαμηλής πίεσης
- Την ισχύ
- Την παροχή αέρα εισόδου στον κινητήρα
- Την παροχή καυσίμου
- Εναλλακτικά αντί για το ποσοστό απομάστευσης από το διαχύτη (D30.Wbleed2), μπορεί να επιλεγεί το ποσοστό αυτό να υπολογίζεται μέσω της θερμοκρασίας εξόδου από το στάτορα του στροβίλου υψηλής (TrbH.Tt_eqSoc) και τη χρονολογία εισαγωγής του κινητήρα (EIS), σύμφωνα με τη σχέση που ακολουθεί, η οποία έχει προκύψει από ψηφιοποίηση του Διαγράμματος 2.1 (Walsh & Fletcher, 2004)

$$w_{bleed} = (1 + \max(0, (EIS - 1985)/(2005 - 1985) \cdot (-0.0015152)) SOT + 0.018182 \cdot 1360 - 20) + \max(0, (EIS - 1985)/(2005 - 1985) \cdot (-3.42857) + 0.0342857 SOT - 42.857)/100$$

Βήμα 5^ο : Αποθήκευση αποτελεσμάτων

Η αποθήκευση των αποτελεσμάτων γίνεται σε προκαθορισμένο αρχείο (DPFile) με όλα τα δεδομένα του κύκλου για το σημείο σχεδιασμού.

Chart 5.16 Turbine NGV and blade cooling flow requirements versus SOT.



Διάγραμμα 2.1. Διάγραμμα εκτίμησης απαιτήσεων ψύξης

2.3.3. Ανάλυση εκτός σημείου σχεδιασμού

Στην ανάλυση εκτός του σημείου σχεδιασμού (off design analysis) – MODE 5, υλοποιείται η εξής διαδικασία:

1. Εισαγωγή δεδομένων από την ανάλυση του σημείου σχεδιασμού
2. Εναλλαγή ιδιοτήτων συνιστωσών
3. Αρχικοποίηση αλγεβρικών μεταβλητών
4. Καθορισμός των οριακών μεταβλητών
5. Επίλυση του σημείου
6. Υπολογισμός αποκλίσεων από τις διαθέσιμες μετρήσεις

Βήμα 1^ο : Εισαγωγή των δεδομένων λειτουργίας και των αποθηκευμένων παραμέτρων από το αρχείο επίλυσης του σημείου σχεδιασμού (DPFile)

Αρχικά, εισάγονται στον κώδικα όλοι οι παράμετροι του σημείου σχεδιασμού, οι οποίοι βρίσκονται στο DPFile, από την ανάλυση στο σημείο σχεδιασμού, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Το αρχείο αυτό παρέχει τα απαραίτητα μεγέθη της μηχανής προς μοντελοποίηση και καλείται στον κώδικα στην αρχή της διαδικασίας. Στη συνέχεια, ο χρήστης πρέπει να εισάγει τα απαραίτητα δεδομένα για την επίλυση των off – design σημείων, όπου απαραίτητος καθίσταται ο καθορισμός της ισχύος, των στροφών του άξονα ισχύος και των συνθηκών πτήσης. Ο χρήστης μπορεί να εισάγει επιπλέον δεδομένα , όπως η ώση, η παροχή αέρα, η παροχή καυσίμου, οι στροφές των ατράκτων, οι πιέσεις και οι θερμοκρασίες κατά μήκος της μηχανής, εφόσον τα έχει διαθέσιμα για το συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας. Σε αυτή την περίπτωση, μετά το τέλος της διαδικασίας, υπολογίζονται οι διαφορές αυτών των μεγεθών σε σχέση με τα αντίστοιχα που παράγει το μοντέλο.

Βήμα 2^ο : Εναλλαγή ιδιοτήτων των συνιστωσών

Στην ανάλυση εκτός σημείου σχεδιασμού, οι απώλειες πίεσης των αγωγών και του θαλάμου καύσης αλλάζουν βάση της ανηγμένης παροχής στην είσοδο της αντίστοιχης συνιστώσας, ενώ ο βαθμός απόδοσης του θαλάμου καύσης υπολογίζεται με βάση τη φόρτιση του θαλάμου καύσης. (Εικόνα 2.8)

```
Brn.switchdPqPb = CUSTOMdPqP  
Brn.switcheffb = CUSTOMeff  
D24.switchdPqPd = CUSTOMdPqPd  
D30.switchdPqPd = CUSTOMdPqPd  
D44.switchdPqPd = CUSTOMdPqPd  
D47.switchdPqPd = CUSTOMdPqPd  
D50.switchdPqPd = CUSTOMdPqPd
```

Εικόνα 2.8. Εναλλαγή ιδιοτήτων παραμέτρων

Βήμα 3^ο : Καθορισμός οριακών μεταβλητών

Για τον καθορισμό των οριακών και αλγεβρικών μεταβλητών εργαζόμαστε όπως ακριβώς και στην ανάλυση στο σημείο σχεδιασμού, επιλέγοντας τα παρακάτω μεγέθη με αρχικές τιμές αυτές του σημείου σχεδιασμού:

1. CmpL.Nmech
2. CmpH.Nmech
3. CmpL.BETA

4. CmpH.BETA
5. InEng.W_in
6. TrbH.ZETA
7. TrbL.ZETA
8. TrbP.ZETA
9. Brn.FARinj

Βήμα 4^ο : Επίλυση σημείου

Καλείται η συνάρτηση nsolver και γίνεται επίλυση του κάθε σημείου με μεταβλητή ελέγχου την τιμή της ισχύος (επίλυση συστήματος 9x9).

Βήμα 5^ο : Υπολογισμός αποκλίσεων

Τέλος, γίνεται υπολογισμός των αποκλίσεων των μεγεθών που έχει εισάγει ο χρήστης σε σχέση με τα αντίστοιχα υπολογιζόμενα μεγέθη από το μοντέλο.

2.3.4. Βελτιστοποίηση του σημείου σχεδιασμού

Η βελτιστοποίηση του σημείου σχεδιασμού (design point optimization) – MODE 2 επιτυγχάνεται μέσω της ελαχιστοποίησης των αποκλίσεων των μεγεθών που έχει εισάγει ο χρήστης σε σχέση με αυτά του μοντέλου. Για τη βελτιστοποίηση γίνεται χρήση του αλγορίθμου SIMPLEX. Επιλέγεται η συγκεκριμένη μέθοδος βελτιστοποίησης, τόσο για τη μικρή υπολογιστική ισχύ που απαιτεί, όσο και για το γεγονός ότι αποτελεί γρήγορη μέθοδο βελτιστοποίησης για παρόμοια υπολογιστικά προβλήματα.

Η συνάρτηση SIMPLEX δέχεται ως ορίσματα:

- τον αριθμό των ανεξάρτητων μεταβλητών για βελτιστοποίηση
- το μέγιστο αριθμό επαναλήψεων
- το σφάλμα σύγκλισης

Στον αλγόριθμο καθορίζεται επίσης από το χρήστη η συνάρτηση κόστους (CF) που ελαχιστοποιείται.

Η SIMPLEX επιστρέφει στο χρήστη:

- τις τιμές των βελτιστοποιημένων παραμέτρων που έχουν τεθεί
- τον τελικό αριθμό επαναλήψεων

```
8
9
10 -----
11 -- Minimization Function (Nelder-Mead Simplex method)
12 -----
13 "FORTRAN" FUNCTION NO_TYPE Simplex
14 (
15   IN INTEGER icniv      "number of independent variables",
16   IN INTEGER icmxit    "maximum number of iterations",
17   IN REAL rceps       "convergence tolerance of 'func' function",
18   IN REAL rcmin       "desired accuracy of independent variables",
19   IN REAL rvsdvl      "side length of simplex",
20   OUT REAL rvx1[]     "starting point (guess vector) and final solution returned by the routine",
21   FUNC_PTR cfunc      "function to be minimized",
22   OUT INTEGER lvconv   "convergence indicator -true if fmin<rceps",
23   OUT INTEGER iviter  "final number of iterations"
24 ) IN "GTE_EXAMPLES.lib"
25
```

Εικόνα 2.9. Ορίσματα της συνάρτησης SIMPLEX στο περιβάλλον PROOSIS

Η συνάρτηση κόστους (cost function) ορίζεται ως εξής:

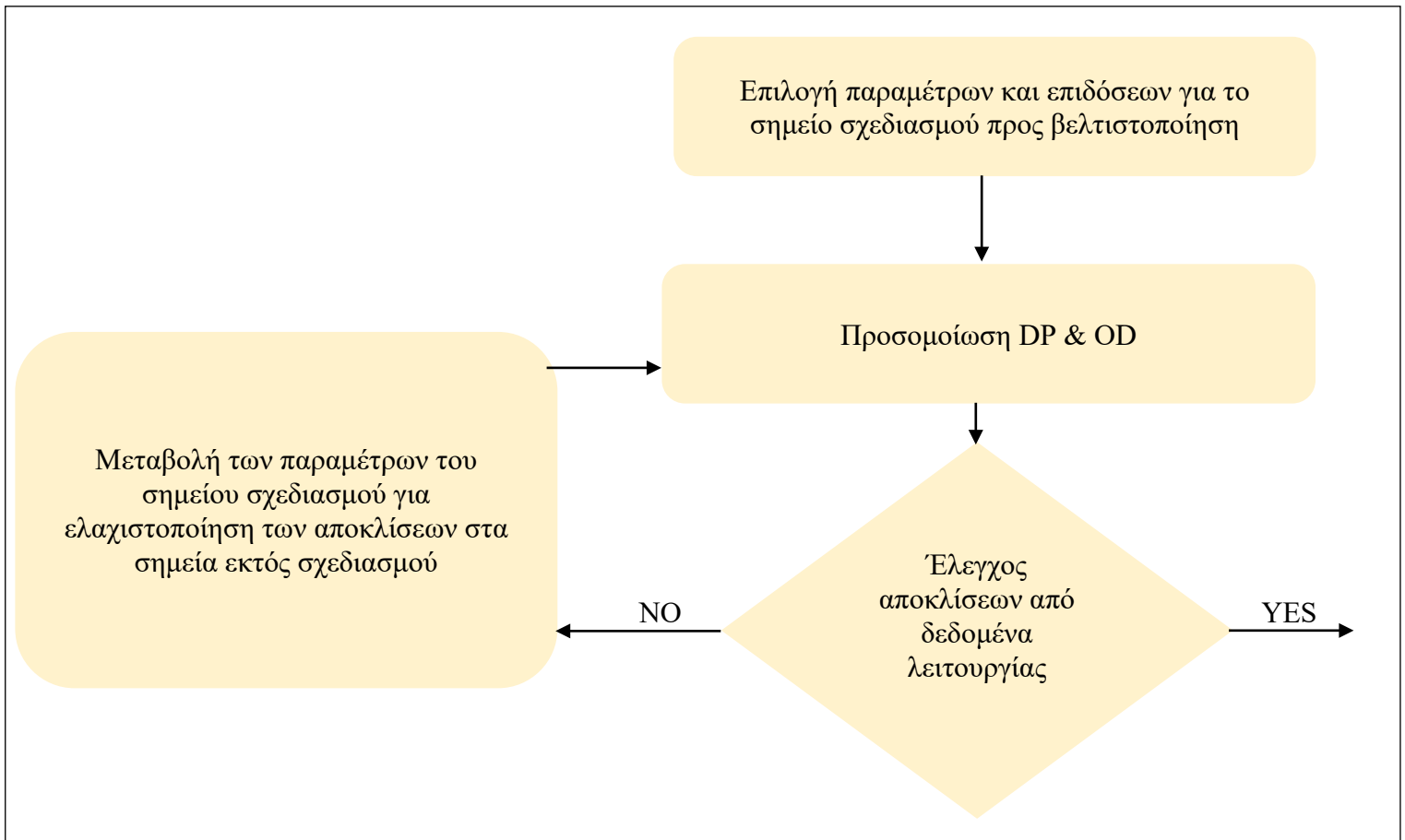
$$CF = \sum \Delta Y^2$$

με

$$\Delta Y = \frac{Y_{REFERENCE VALUES} - Y_{PROOSIS MODEL VALUES}}{Y_{PROOSIS MODEL VALUES}} \cdot 100\%$$

(Εξίσωση 2.1.)

οι αποκλίσεις του μοντέλου που δημιουργήθηκε στο PROOSIS σε σχέση με τις τιμές που έχει εισάγει ο χρήστης. Ακολουθεί το λογικό διάγραμμα της διαδικασίας βελτιστοποίησης (Σχήμα 2.6).



Σχήμα 2.6. Λογικό διάγραμμα διαδικασίας βελτιστοποίησης

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει μία σειρά από μεγέθη στο σημείο σχεδιασμού, τα οποία θα τροποποιηθούν κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης, με σκοπό τη μείωση των αποκλίσεων. Αυτά είναι:

- Οι λόγοι πίεσης και οι βαθμοί απόδοσης
- Η θέση του σημείου σχεδιασμού στους χάρτες
- Οι απώλειες πίεσης των αγωγών
- Οι απομαστεύσεις από τις διάφορες θέσεις, όπου είναι διαθέσιμες
- Οι βαθμοί απόδοσης αξόνων, θαλάμου καύσης και κιβωτίου ταχυτήτων
- Οι συντελεστές ώσης και εκβολής ακροφυσίου
- Οι στροφές ατράκτων
- Η παροχή αέρα και η παροχή καυσίμου
- Η ισχύς του κινητήρα

Στη συνάρτηση κόστους, που αναφέρεται παραπάνω, προστίθεται penalty, σε περίπτωση που κάποια μεταβλητή από τις παραπάνω λάβει τιμή εκτός των προκαθορισμένων ορίων που έχει ορίσει ο χρήστης, έτσι ώστε να απομακρύνει τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης από τις αντίστοιχες λύσεις.

2.3.5. Τοπική προσαρμογή

Η τοπική προσαρμογή μπορεί να γίνει με δύο τρόπους. Ο πρώτος ήταν διαθέσιμος στο υπάρχον λογισμικό, ενώ ο δεύτερος προστέθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

Στην πρώτη περίπτωση – MODE 3 , γίνεται χρήση του κώδικα βελτιστοποίησης Simplex, με στόχο τη μείωση των αποκλίσεων των διαθέσιμων δεδομένων για κάθε ένα από τα σημεία εκτός σημείου σχεδιασμού, τροποποιώντας τους συντελεστές προσαρμογής των χαρτών που επιθυμεί ο χρήστης. Η διαδικασία πρέπει να γίνεται για κάθε διαθέσιμο σημείο λειτουργίας ξεχωριστά. Στη συνέχεια με βάση τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τα διάφορα σημεία λειτουργίας, τροποποιούνται κατάλληλα οι χάρτες. Οι νέοι χάρτες, εφόσον έχει γίνει σωστά η διαδικασία, θα παρουσιάζουν μικρότερες αποκλίσεις σε σχέση με τους αρχικούς χάρτες. Η συγκεκριμένη περίπτωση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για διάγνωση βλάβης, οπότε τα αποτελέσματα των συντελεστών προσαρμογής αντιστοιχούν στις μεταβολές που έχει υποστεί η αντίστοιχη συνιστώσα (συμπιεστής ή στρόβιλος).

Στη δεύτερη περίπτωση – MODE 8 , η διαδικασία αντί να γίνεται σταδιακά από το χρήστη σημείο με σημείο, γίνεται αυτοματοποιημένα αφού επιλέξει ο χρήστης τον αριθμό των σημείων λειτουργίας που θέλει να λάβει υπόψιν του στην τοπική προσαρμογή των χαρτών. Οπότε, γίνονται διαδοχικές βελτιστοποιήσεις, ενώ τα αποτελέσματα εισάγονται απευθείας στους χάρτες τροποποιώντας τους και σώζοντάς τους με νέο όνομα. Στη συνέχεια, ο χρήστης έχει πλέον τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει τους νέους χάρτες, οι οποίοι εφόσον έχει γίνει σωστά η διαδικασία, θα παρουσιάζουν μικρότερες αποκλίσεις.

2.3.6. Γραμμή Λειτουργίας

Για τη χάραξη της γραμμής λειτουργίας ακολουθείται η ίδια μεθοδολογία με αυτήν της ανάλυσης εκτός του σημείου σχεδιασμού. Τα εξεταζόμενα σημεία αναφέρονται σε συνθήκες πτήσης του σημείου σχεδιασμού και ισχύ από το 105% μέχρι το 5% του σημείου σχεδιασμού.

2.3.7. Ανάλυση ευαισθησίας

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας προστέθηκε μία επιπλέον δυνατότητα, αυτή της ανάλυσης ευαισθησίας – MODE 6. Μέσω της ανάλυσης αυτής, υπολογίζεται ο Ιακωβιανός πίνακας του γραμμικοποιημένου μοντέλου του κινητήρα γύρω από το σημείο σχεδιασμού, για σταθερή ισχύ. Ο Ιακωβιανός πίνακας έχει ως στοιχεία του τις ποσοστιαίες μεταβολές των μετρούμενων μεγεθών για 1% μεταβολή των παραμέτρων υγείας των διαφόρων συνιστωσών.

Με χρήση του πίνακα αυτού και του αριθμού κατάστασης των υποπινάκων που μπορούν να προκύψουν από αυτόν τον πίνακα μπορούμε να επιλέξουμε τις πιο κατάλληλες μετρήσεις για διάγνωση βλαβών συγκεκριμένων συνιστωσών ή να επιλέξουμε τις συνιστώσες εκείνες, οι βλάβες των οποίων μπορούν να διαγνωστούν για συγκεκριμένο σετ μετρήσεων.

2.3.8. Δημιουργία υπογραφών βλαβών

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, προστέθηκε επίσης η δυνατότητα δημιουργίας υπογραφών τυπικών βλαβών – MODE 7. Μέσω της διαδικασίας αυτής, υπολογίζονται οι μεταβολές των διαφόρων μετρούμενων μεγεθών μεταξύ υγιούς κατάστασης και κατάσταση με βλάβη. Οι βλάβες, οι οποίες έχουν εισαχθεί στο λογισμικό φαίνονται στον Πίνακα 2.4, όπου επίσης παρουσιάζεται η συσχέτιση της μεταβολής των δύο παραμέτρων υγείας της κάθε συνιστώσας, της ανηγμένης παροχής SW και του βαθμού απόδοσης SE. Όπως γνωρίζουμε από τη βιβλιογραφία, η κάθε βλάβη μπορεί να αναγνωριστεί από τη σχέση των παραμέτρων αυτών. Για παράδειγμα, η αύξηση του ακτινικού διακένου του συμπιεστή, παρουσιάζει μια παρόμοια μεταβολή τόσο στην ανηγμένη παροχή, όσο και στο βαθμό απόδοσης, ενώ οι επικαθίσεις παρουσιάζουν τριπλάσια μεταβολή στην παροχή σε σχέση με το βαθμό απόδοσης. Στην υγιή κατάσταση της μηχανής οι συντελεστές λαμβάνουν την τιμή 1, ενώ απόκλιση από τη μονάδα συνεπάγεται βλάβη στην αντίστοιχη συνιστώσα.

Μεταβολή ΔSW/ΔSE για κάθε βλάβη (%/%)	Είδος βλάβης
-1/-1	Αύξηση Ακτινικού Διακένου Συμπιεστή
-1/0	Μεταβολή Παροχής Συμπιεστή
+1/-1	Αύξηση Διακένων Πτερυγίων Στροβίλου
+3/-1	Διάβρωση Πτερυγίων Στροβίλου
-8/-1	Διάβρωση Πτερυγίων Συμπιεστή
-3/-1	Εξανθρακώματα Στροβίλου
-3/-1	Επικαθίσεις Συμπιεστή
-1/0	Κάμψη Σταθερών Πτερυγίων Στροβίλου

Πίνακας 2.4. Λόγοι αποκλίσεων παραμέτρων υγείας για διάφορες βλάβες συμπιεστών και στροβίλων

Προκειμένου να έχουμε μια κοινή αναφορά όσον αφορά τη σοβαρότητα της βλάβης ορίζουμε το συντελεστή σοβαρότητας βλάβης (severity factor SF %) από την παρακάτω σχέση:

$$SF = \frac{\sqrt{SW^2 + SE^2}}{5} \cdot 100\%$$

Ο κώδικας παράγει υπογραφές βλαβών για διαφορετικό συντελεστή σοβαρότητας βλάβης από 0 – 100%.

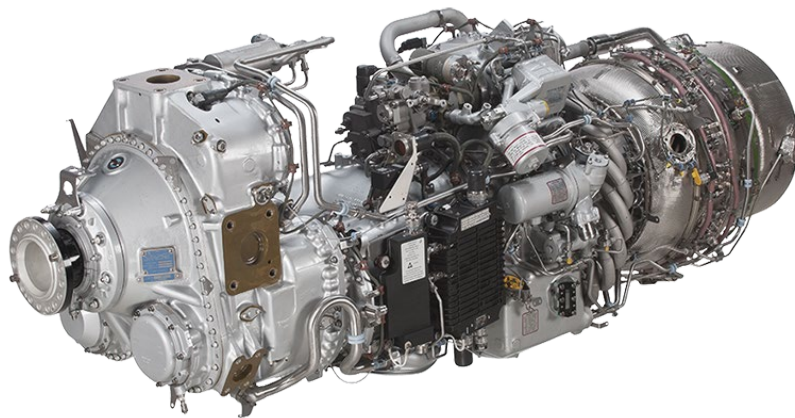
3 Περιγραφή Κινητήρα PW100

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει αναφορά στην οικογένεια κινητήρων PW100 της Pratt & Whitney. Ειδικότερα θα γίνει αναφορά στο μοντέλο PW123AF και στις επιμέρους συνιστώσες του. Τέλος, θα παρατεθούν τα αεροσκάφη που χρησιμοποιούν τον υπό μελέτη κινητήρα και η ιστορική τους εξέλιξη.

3.1. Κινητήρες PW100

Οι κινητήρες PW100 αποτελούν μία οικογένεια αεροπορικών κινητήρων turboprop 1.300 – 3.700 kW, οι οποίοι κατασκευάζονται από την Pratt & Whitney Canada. Ο κινητήρας τέθηκε για πρώτη φορά σε λειτουργία το 1984, ενώ η Pratt & Whitney Canada κυριαρχεί στην αγορά των κινητήρων turboprop.

Ο PW100, αρχικά ονομαζόμενος PT7, χρησιμοποιεί μία σχετικά ασυνήθιστη διαμόρφωση κινητήρα τριών αξόνων. Ο PW100 αποτελείται από ένα φυγοκεντρικό συμπιεστή χαμηλής πίεσης, κινούμενο από μονοβάθμιο στρόβιλο χαμηλής πίεσης, που τροφοδοτεί φυγοκεντρικό συμπιεστή υψηλής πίεσης, κινούμενο από μονοβάθμιο στρόβιλο υψηλής πίεσης. Η ισχύς παρέχεται στο κιβώτιο ταχυτήτων, μέσω ενός τρίτου άξονα, ο οποίος συνδέεται με ένα διβάθμιο στρόβιλο ισχύος.



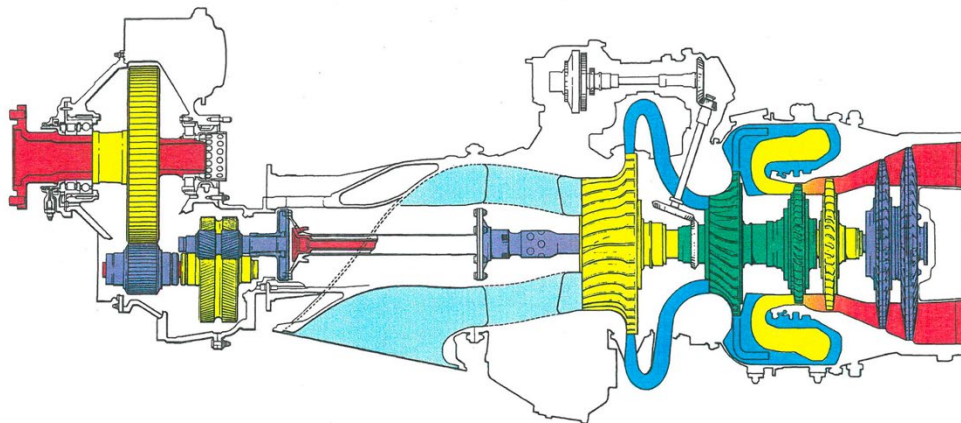
Εικόνα 3.1. Αεροπορικός κινητήρας PW100

Η σειρά PW100 σχεδιάστηκε για αυξημένη ισχύ και μικρότερη κατανάλωση καυσίμου, εν αναμονή μεγαλύτερων και ταχύτερων τοπικής εμβέλειας αεροσκαφών. Οι κινητήρες της σειράς χρησιμοποιούνται στα ATR42 & ATR72, De Havilland Canada Dash 8, ενώ παλαιότερα έδιναν ισχύ στα British Aerospace ATP, Embraer EMB -120 Brasilia και Fokker 50.

3.2. Μοντέλο PW123

Συγκεκριμένα, το μοντέλο PW123 της οικογένειας αεροσκαφών της Pratt & Whitney, επιτρέπει τη λειτουργία της έλικας, έτσι ώστε να μειώνεται ο θόρυβός της, τόσο στο έδαφος, όσο και κατά τη διάρκεια της πτήσης. Οι συμπιεστές λειτουργούν στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας για κάθε κατάσταση πτήσης, ενώ η ταχύτητα έλικας ελέγχεται ανεξάρτητα για μέγιστη απόδοση.

Ο PW123 αποτελεί κινητήρα turboprop τριών αξόνων με ισχύ 1775kW στις 1200rpm. Πιο συγκεκριμένα, ο PW123AF πιστοποιήθηκε το 1989 με μέγιστη συνεχόμενη ισχύ 2261eshp (1686 kW). Αποτελείται από δύο μονοβάθμιους φυγοκεντρικούς συμπιεστές (υψηλής και χαμηλής πίεσης), δύο αξονικούς μονοβάθμιους στρόβιλους (υψηλής και χαμηλής πίεσης), ένα διβάθμιο στρόβιλο ισχύος και ένα κιβώτιο ταχυτήτων.



Εικόνα 3.2. Τομή κινητήρα PW100

3.3. Τμήματα κινητήρα

3.3.1. Ψυχρό τμήμα κινητήρα (Cold Section)

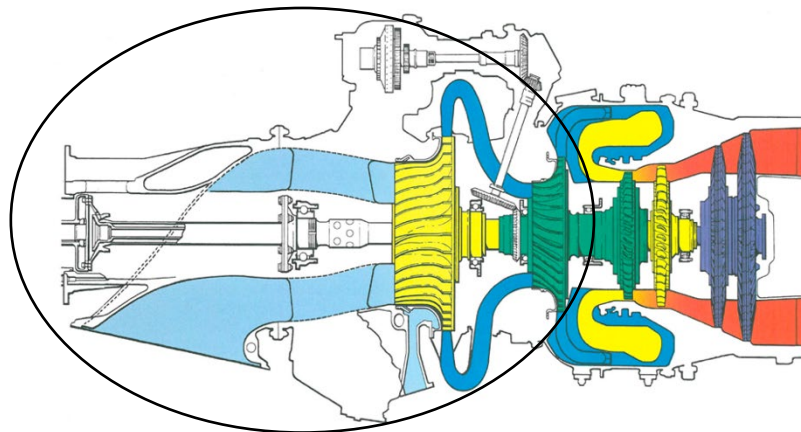
Σκοπός του ψυχρού τμήματος είναι η παροχή αέρα και πίεσης για την κάλυψη των απαιτήσεων του κινητήρα και του πλαισίου του αεροσκάφους. Πιο συγκεκριμένα, για τον κινητήρα που μελετάμε οι απαιτήσεις αυτές καθίστανται:

- η διατήρηση της καύσης
- η ψύξη των θερμών συνιστωσών
- η στεγανοποίηση των κοιλοτήτων των ρουλεμάν
- η υποβοήθηση στον καθαρισμό λαδιού των ρουλεμάν
- ο έλεγχος της πίεσης αέρα για περίπτωση υπέρβασης ταχύτητας

Ενώ για το αεροσκάφος, το ψυχρό τμήμα συμμετέχει στο σύστημα περιβαλλοντικού ελέγχου, θέρμανσης, κλιματισμού και πίεσης.

Το ψυχρό τμήμα χωρίζεται:

- Στην εισαγωγή αέρα στη στροβιλομηχανή μέσω των περιβλημάτων εισαγωγής αέρα (μπροστινή και πίσω περιοχή εισαγωγής αέρα).
- Στα δύο στάδια συμπίεσης. Στο πρώτο στάδιο συμπίεσης η πτερωτή χαμηλής πίεσης επιταχύνει τον αέρα, ο οποίος εξέρχεται από το διαχύτη χαμηλής πίεσης στους σωλήνες διάχυσης, οι οποίοι αυξάνουν την πίεση του αέρα και κατευθύνουν το συμπιεσμένο αέρα στο δεύτερο στάδιο συμπίεσης, όπου επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία από την πτερωτή υψηλής πίεσης, όπου ο αέρας οδηγείται τελικά στο θάλαμο καύσης.
- Στα κελύφη του κινητήρα που στηρίζουν και περιέχουν τις επιμέρους συνιστώσες (low pressure diffuser case, inter compressor case, gas generator case).

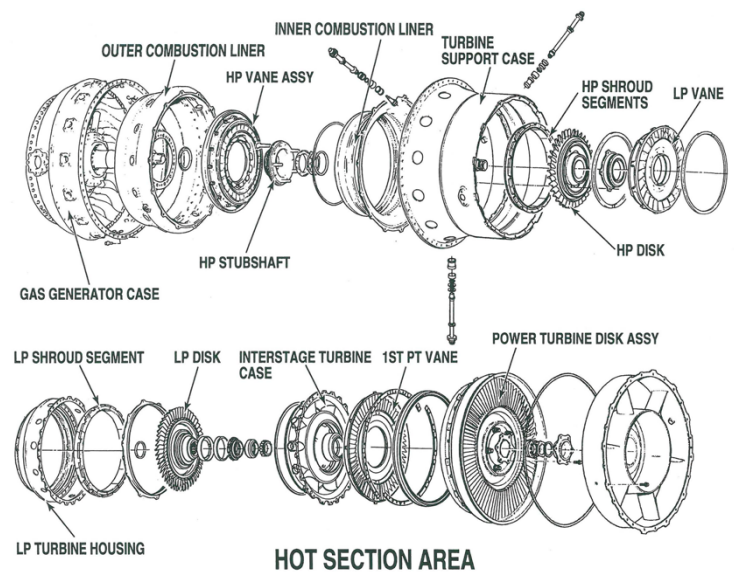


COLD SECTION

Εικόνα 3.3. Ψυχρό τμήμα κινητήρα

3.3.2. Θερμό τμήμα (Hot Section)

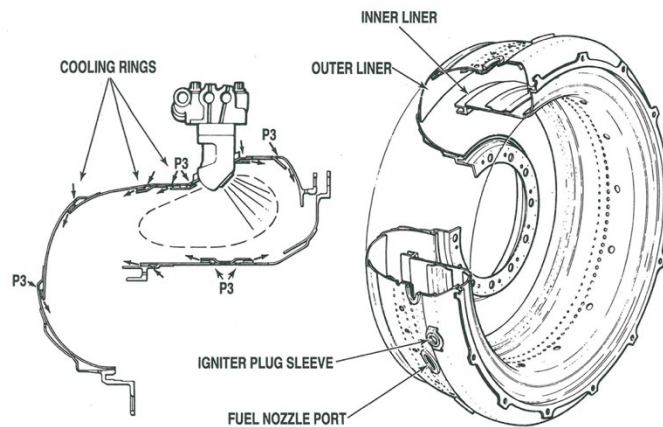
Το θερμό τμήμα του κινητήρα παράγει ενέργεια καύσης μέσω της ανάφλεξης του πεπιεσμένου αέρα με το καύσιμο. Μετατρέπει την ενέργεια καύσης σε περιστροφική δύναμη που στρέφει τους συμπιεστές και την έλικα. Οι κύριες συνιστώσες θερμού τμήματος είναι ο θάλαμος καύσης, τα πτερύγια και οι στρόβιλοι υψηλής και χαμηλής πίεσης, οι δακτύλιοι των πτερυγίων του στροβίλου ισχύος, ο στρόβιλος ισχύος, το περίβλημα του στροβίλου χαμηλής πίεσης και τα κελύφη ενδιάμεσα των στροβίλων.



Εικόνα 3.4. Θερμό τμήμα κινητήρα

3.3.3. Τμήμα καύσης (Combustion Section)

Παρέχει χώρο για την καύση του μίγματος αέρα/καυσίμου. Ο θάλαμος καύσης έχει μορφή περιφερειακού δακτυλίου αντίστροφης ροής (annular reverse flow), έχει κεραμική επίστρωση, ενώ τα υλικά του είναι ειδικά κράματα για αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες. Οι δακτύλιοι ψύξης παρέχουν αέρα για την προστασία των τοιχωμάτων του θαλάμου καύσης, ενώ οι οπές αέρα αραιώσης παρέχουν αέρα στην περιοχή της καύσης. Τέλος, στο θάλαμο καύσης υπάρχουν 14 μπεκ καυσίμου και 2 αναφλεκτήρες.



Εικόνα 3.5. Θάλαμος καύσης

3.3.4. Τμήμα στρόβιλου υψηλής πίεσης (High Pressure Turbine Section)

Αποτελείται από 24 ψυχόμενα ακροφύσια με κεραμική επίστρωση, 38 κινητά πτερύγια, τα οποία ψύχονται εσωτερικά και 2 καλύμματα συγκράτησης των πτερυγίων, στο μπροστά και στο πίσω μέρος.

3.3.5. Τμήμα στρόβιλου χαμηλής πίεσης (Low Pressure Turbine Section)

Ο στρόβιλος χαμηλής πίεσης είναι μονοβάθμιος, μη ψυχόμενος, ενώ ο αριθμός των κινητών πτερυγίων είναι 47 για τον PW119B/C και 53 για τους PW118/120/121.

3.3.6. Τμήμα στρόβιλου ισχύος (Power Turbine Section)

Ο στρόβιλος ισχύος είναι διβάθμιος, μη ψυχόμενος, με καλυμμένα πτερύγια στην κορυφή. Ο αριθμός κινητών πτερυγίων είναι 66 για την 1^η βαθμίδα και 71 στη 2^η. Ο άξονας του στρόβιλου ισχύος συνδέει το στρόβιλο με το κιβώτιο ταχυτήτων (reduction gearbox).

3.3.7. Κιβώτιο ταχυτήτων (Reduction Gearbox)

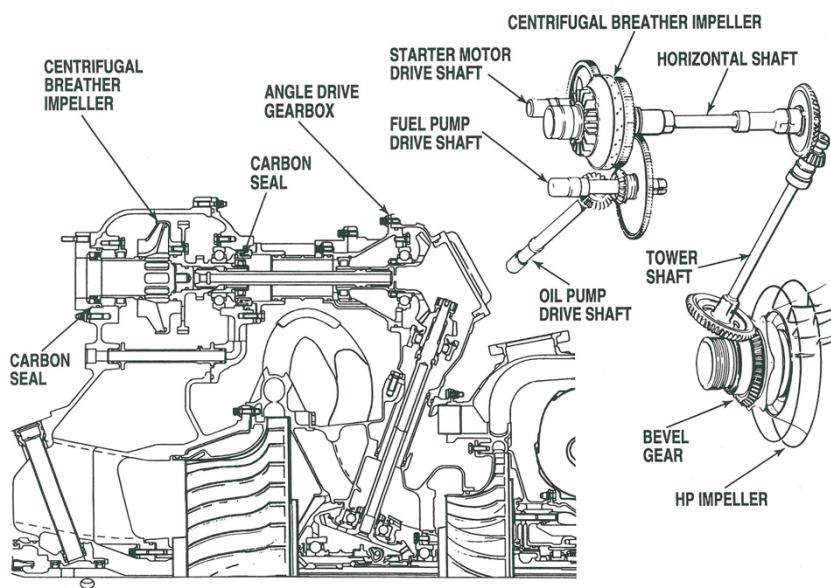
Το κιβώτιο ταχυτήτων είναι ένα σύστημα μειωτήρα δύο βαθμίδων και σκοπός του είναι η μείωση της ταχύτητας εισόδου του στροβίλου ισχύος στην απαιτούμενη ταχύτητα εξόδου για την εύρυθμη λειτουργία της έλικας. Το κιβώτιο ταχυτήτων συνδέεται με διάφορα βοηθητικά εξαρτήματα του αεροσκάφους.

3.3.8. Βοηθητικά κιβώτια ταχυτήτων (Accessory Gearbox and Angle Drive Gearbox)

Παρέχει σύστημα μετάδοσης κίνησης για την εκκίνηση της περωτής του HP, όπως επίσης και για τα εξαρτήματα του κινητήρα (αντλία καυσίμου, συγκρότημα αντλίας λαδιού).

Το τμήμα αυτό αποτελείται από το βοηθητικό κιβώτιο ταχυτήτων (Accessory Gearbox – AGB), όπου αποτελείται από γρανάζια, μηχανισμούς κίνησης και σημεία στερέωσης των βοηθητικών εξαρτημάτων. Είναι ενσωματωμένο στην πίσω θέση εισόδου αέρα και έχει τρεις άξονες μετάδοσης κίνησης: εκκίνησης, αντλίας καυσίμου και φυγοκεντρικού συστήματος αναπνοής.

Το γωνιακό κιβώτιο ταχυτήτων (Angle Drive Gearbox) συνδέει το βοηθητικό κιβώτιο ταχυτήτων με την περωτή του HP και τοποθετείται μεταξύ των δύο συμπιεστών. Το φυγοκεντρικό σύστημα αναπνοής βοηθάει στον εξαερισμό του δευτερεύοντος αέρα που επιστρέφει στο AGB από τους λαβύρινθους και διαχωρίζει τον αέρα από το λάδι.



Εικόνα 3.6. Βοηθητικό και γωνιακό κιβώτιο ταχυτήτων

3.3.9. Σύστημα λίπανσης (Oil System)

Το σύστημα λίπανσης χρησιμοποιείται για τη λίπανση και τη ψύξη των ρουλεμάν και γραναζιών του κινητήρα. Παρέχει επίσης λάδι στο σύστημα της προπέλας. Είναι ένα ενιαίο σύστημα, τόσο για τη στροβιλομηχανή, όσο και το κιβώτιο ταχυτήτων και αποτελείται από τρία υποσυστήματα:

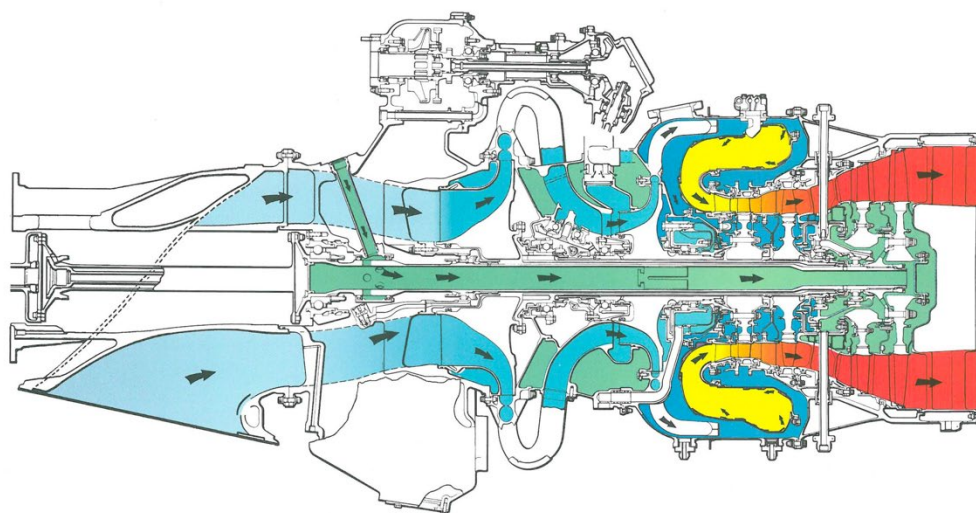
- Το σύστημα πίεσης, το οποίο τροφοδοτεί με λάδι τα γρανάζια και τα ρουλεμάν του κινητήρα.
- Το σύστημα επιστροφής, το οποίο επιστρέφει το λάδι από τα κάρτερ και τις κοιλότητες των ρουλεμάν πίσω στη δεξαμενή λαδιού.
- Το σύστημα εξαερισμού, το οποίο επιτρέπει τη ροή αέρα στις κοιλότητες των ρουλεμάν για τη διατήρηση της ροής αέρα στους λαβυρίθους.

Τα κύρια στοιχεία του συστήματος λίπανσης είναι η δεξαμενή λαδιού, μία αντλία πίεσης, 2 – 3 αντλίες επιστροφής, φίλτρα, βαλβίδα ελέγχου, βαλβίδα ρύθμισης πίεσης και 2 ανιχνευτές μεταλλικών ρινισμάτων.

3.3.10. Δευτερεύον σύστημα αέρα (Secondary Air System)

Οι πιέσεις του αέρα εκκένωσης των συμπιεστών (χαμηλής και υψηλής) δε χρησιμοποιούνται μόνο για την καύση, αλλά και για τις ανάγκες του αεροσκάφους όπως:

- καμπίνα αεροσκάφους (εξαερισμός και έλεγχος πίεσης)
- θέρμανση, ψύξη και αποπαγοποίηση



Εικόνα 3.7. Δευτερεύον σύστημα αέρα για στεγανοποίηση των ρουλεμάν και ψύξη στροβίλων

Η ροή του δευτερεύοντος αέρα εμποδίζει τη διαρροή λαδιού στη διαδρομή του αερίου και χρησιμοποιείται επίσης για τη ψύξη των εξαρτημάτων του θερμού τμήματος της μηχανής. Τέλος, η ροή του δευτερεύοντος αέρα βοηθάει στον καθαρισμό λαδιού από τις κοιλότητες των ρουλεμάν.

3.4. Αεροσκάφος Canadair

Στην ενότητα αυτή θα γίνει αναφορά στην οικογένεια αεροσκαφών Canadair, τα οποία χρησιμοποιούν τους κινητήρες της Pratt & Whitney PW123AF.

Το Canadair CL-215, επονομαζόμενο και Scooper, είναι το πρώτο μοντέλο της σειράς αμφίβιων αεροσκαφών που κατασκευάστηκε από την Καναδική εταιρεία αεροσκαφών Canadair (πλέον Bombardier). Αποτελεί το πρώτο αεροσκάφος που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε για ρόλο αεροπυρόσβεσης, ενώ είναι από τα λίγα αεροσκάφη που έχουν παραχθεί σε μεγάλο αριθμό κατά τη μεταπολεμική εποχή. Το CL-215 είναι ένα δικινητήριο, high – wing αεροσκάφος , το οποίο σχεδιάστηκε τη δεκαετία του 1960. Από την αρχή σχεδιάστηκε έτσι ώστε να εκτελεί επιχειρήσεις εναέριας πυρόσβεσης.

Έχει τη δυνατότητα να πετάει με σχετικά χαμηλές ταχύτητες σε περιβάλλοντα με υψηλές ριπές αέρα, όπως αυτά των δασικών πυρκαγιών. Το αεροσκάφος μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης και για άλλους τύπους αποστολών, όπως τη μεταφορά επιβατών και εμπορευμάτων, επιχειρήσεις έρευνας και διάσωσης. Στις 23 Οκτωβρίου 1967 υλοποιήθηκε η πρώτη πτήση του πρωτότυπου CL-215 και το πρώτο αεροσκάφος παράχθηκε τον Ιούνιο του 1969, ενώ η παραγωγή του σταμάτησε το 1990, λόγω της βελτιωμένης εκδοχής του, Canadair CL-415. Σημειώνεται ότι πριν τον τερματισμό της παραγωγής του είχαν αναπτυχθεί πολυάριθμα προγράμματα μετατροπής και βελτίωσης για τα υπάρχοντα αεροσκάφη, όπως το CL-215T, ένα μοντέλο που αντικατέστησε τους έως τότε κινητήρες Pratt & Whitney R-2800-83AM με τους κινητήρες της Pratt & Whitney Canada PW123AF.



Εικόνα 3.8. Canadair CL-215 – Scooper

Το Canadair CL-415 (Superscooper, αργότερα Bombardier 415), είναι ένα αμφίβιο αεροσκάφος που κατασκευάστηκε αρχικά από την Canadair και στη συνέχεια από την Bombardier και τη Viking Aircraft. Βασίζεται στο Canadair CL-215 και ενώ έχει σχεδιαστεί για εναέρια πυρόσβεση, χρησιμοποιείται και σε πολλές αποστολές έρευνας και διάσωσης. Η ανάπτυξή του ξεκίνησε το 1990, ενώ η παραγωγή του ξεκίνησε το 2003. Εκτός από τους κινητήρες PW123AF που χρησιμοποιήθηκαν στο CL-415, το μοντέλο παρουσίασε και αλλαγές στο πιλοτήριο και στην αεροδυναμική του, με στόχο την βελτιωμένη απόδοση. Η παραγωγή συνεχίστηκε έως το 2015.

Το Canadair CL-415 έχει δυνατότητα λήψης 5455 λίτρων νερού σε 12 δευτερόλεπτα.



Εικόνα 3.9. Superscooper



Εικόνα 3.10. Canadair CL-415

Τεχνικά Χαρακτηριστικά	Μεγέθη
Πλήρωμα	2
Κινητήρες	2 turboprop PW123AF
Εκπέτασμα Πτερύγων	28.60 m
Μήκος	19.82 m
Μέγιστη Ταχύτητα	376 km/h

Πίνακας 3.1. Τεχνικά χαρακτηριστικά Canadair CL-415

3.5. Συλλογή δεδομένων

Η συλλογή και η επιλογή δεδομένων από διάφορες βιβλιογραφικές πηγές καθίσταται βασικό βήμα για την ορθή μοντελοποίηση του κινητήρα. Σημειώνεται ότι η λανθασμένη επιλογή μπορεί να οδηγήσει σε προφανή λάθη κατά τη μοντελοποίηση που διενεργεί ο χρήστης και τέλος σε λανθασμένες αναλύσεις του συνολικού μοντέλου.

Αρχικά, παρατίθενται προδιαγραφές και λειτουργίες των κινητήρων της οικογένειας PW100. Γίνεται αναφορά στα μοντέλα PW118/119/120/121/124/127/150, ενώ στη συνέχεια ακολουθεί εκτενής αναφορά στο μοντέλο PW123AF που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία. Συγκεκριμένα, στους πίνακες (Πίνακας 3.2 – Πίνακας 3.6) υπάρχουν διαθέσιμες πληροφορίες για τις επιδόσεις των διαφορετικών μοντέλων της οικογένειας.

	PW118/120/121	PW119	PW124	PW127
π_{LPC}	4.1	5.6	5.1	5.65
π_{HPC}	2.8	2.6	2.7	2.6
OPR	11.48	14.56	13.77	14.69

Πίνακας 3.2. Λόγοι πίεσης διαφορετικών μοντέλων κινητήρων της οικογένειας PW100

Κινητήρας	OPR
PW118	10.9
PW119	13.2
PW120	11.4
PW123	13.8
PW125	14.4
PW127	14.7
PW150	18

Πίνακας 3.3. Ολικοί λόγοι πίεσης διαφορετικών μοντέλων κινητήρων της οικογένειας PW100 (P&WC/CANADA, 2004)

Κινητήρας	PW120	PW127	PW150
Χρονολογία	1979	1990	1995
Βάρος (kg)	417	481	690
Θερμοδυναμική ισχύς ² απογείωσης (kW)	1782	2457	4981
Ισχύς/Βάρος (kW/kg)	4.27	5.11	7.22
Max GBX power (kW)	1491	2050	3781
ESFC (kg/kW/hr)	0.286	0.273	0.255
Παροχή αέρα (kg/s)	6.7	8.49	14.44
Ολικός λόγος πίεσης	12.14	15.77	17.97
Έλεγχος	Supervisory DEC with mech bkup	FADEC with hydro mech bkup	FADEC with Dual Channel
Αρχική Εγκατάσταση	DeHavilland Dash8-100	ATR-72	Bombardier Dash8-400

Πίνακας 3.4. Τεχνικά χαρακτηριστικά και πληροφορίες κινητήρων της σειράς PW100

² Thermodynamic power: η ισχύς του turbo-prop στο επίπεδο της θάλασσας για μέγιστη θερμοκρασία TIT

Maximum Cruise	ePower		Power		$N_{propeller}$	T
	ekW	ehp	kW	shp	rpm	C
PW118	1188	1593	1127	1511	1300	19.8
PW118A	1188	1593	1127	1511	1300	29.4
PW118B	1188	1593	1127	1511	1200	29.6
PW119B,C	1357	1820	1293	1734	1200	54.8
PW120	1271	1704	1207	1619	1200	15
PW120A	1295	1737	1231	1651	1200	15
PW121,A	1330	1784	1268	1700	1200	15
PW123,E,125B	1593	2136	1514	2030	1200	22.2
PW123AF	1593	2136	1514	2030	1200	22
PW123B	1593	2136	1514	2030	1200	22.6
PW123C	1532	2054	1454	1950	1200	26.1
PW123D	1532	2054	1454	1950	1200	34.4
PW124B	1639	2198	1557	2088	1200	24.6
PW126	1634	2191	1553	2083	1200	26.3
PW126A	1633	2190	1551	2080	1200	27.2
PW127	1668	2237	1589	2131	1200	22.6
PW127B,C	1667	2235	1589	2131	1200	20.5
PW127D	1667	2235	1589	2131	1200	24.7
PW127E	1667	2235	1589	2131	1200	25.5
PW127F,J	1667	2235	1589	2131	1200	22.6
PW127G	1667	2235	1589	2131	1200	24.2
PW127H	1667	2235	1589	2131	1200	25.7
PW150A	3193	4282	2942	3945	1020	25.8

Πίνακας 3.5. Επιδόσεις διαφορετικών μοντέλων της οικογένειας PW100 για μέγιστη πλεύση

Take off	ePower		Power		ESFC	
	ekW	ehp	kW	shp	lb/h/ehp	μg/J
PW118	1411	1892	1342	1800	0.498	84.1
PW118A	1411	1892	1342	1800	0.504	85.2
PW119B	1702	2282	1626	2181	0.49	82.8
PW119C	–	–	–	–	0.49	82.8
PW120	1566	2100	1491	1999	0.485	81.9
PW120A	1566	2100	1491	1999	0.485	81.9
PW121	1679	2252	1603	2150	0.477	80.6
PW121A	1718	2304	1640	2199	0.474	80.1
PW123	1866	2502	1775	2380	0.47	79.4
PW123AF	1866	2502	1775	2380	0.47	79.4
PW123B	1958	2626	1864	2500	0.463	78.2
PW123C	1687	2262	1603	2150	0.483	81.6
PW123D	1687	2262	1603	2150	0.483	81.6
PW123E	1866	2502	1775	2380	0.47	79.4
PW124B	–	–	–	–	0.468	79.1
PW125B	1958	2626	1864	2500	0.463	78.2
PW126	2078	2787	1978	2653	0.462	78.1
PW126A	2084	2795	1985	2662	0.461	77.9
PW127	2147.6	2880	2051	2750	0.459	77.6
PW127A	1864	2500	–	–	–	0.0
PW127AF	–	–	1775	2380	–	0.0
PW127B	2147.6	2880	2051	2750	0.459	77.6
PW127C	2147.6	2880	2051	2750	0.459	77.6
PW127D	2147.6	2880	2051	2750	–	0.0
PW127E	1876	2516	1790	2400	0.474	80.1
PW127F	2147.6	2880	2051	2750	0.459	77.6
PW127G	2177	2919	2177	2919	0.453	76.5
PW127H	–	–	2051	2750	0.459	77.6
PW127J	2147.6	2880	2051	2750	0.459	77.6
PW150A	4095	5491	3781	5070	0.433	73.2

Πίνακας 3.6. Επιδόσεις διαφορετικών μοντέλων της οικογένειας PW100 για μέγιστη απογείωση

Παρακάτω παρουσιάζονται πληροφορίες για τις επιδόσεις και τα χαρακτηριστικά του κινητήρα PW123AF, από δημοσιευμένες πηγές σχετικά με την πιστοποίησή του (Πίνακας 3.7).

Χαρακτηριστικά	Τιμές
Ολικό μήκος	2130 mm
Ολικό πλάτος	660 mm
Βάρος	450 kg
Μέγιστη ισχύς απογείωσης (max T-O)	1775 kW
Μέγιστη θερμοκρασία αέρα για max T-O	35 C
Μέγιστη συνεχής ισχύς (max const)	1603 kW
Μέγιστη θερμοκρασία αέρα για max const	45 C
Μέγιστη θερμοκρασία ITT	800 C
Μέγιστη ITT trans 20sec	840 C
Μέγιστη ITT start 5sec	950 C
Μέγιστες στροφές έλικα για T-O	1212 rpm
Μέγιστες στροφές έλικα για const	1212 rpm
Μέγιστες στροφές έλικα για trans 20 secs	1320 rpm
Μέγιστες στροφές υψηλής για T-O	34200 rpm
Μέγιστες στροφές υψηλής για const	34200 rpm
Μέγιστες στροφές υψηλής για trans 20 secs	34450 rpm
Μέγιστες στροφές χαμηλής για T-O	28800 rpm
Μέγιστες στροφές υψηλής για const	28800 rpm
Μέγιστες στροφές υψηλής για trans 20 secs	28900 rpm
Μέγιστη θερμοκρασία SOT	1316 C

Πίνακας 3.7. Προδιαγραφές και πληροφορίες για τον κινητήρα PW123AF (EASA, 2018)

Από τη βιβλιογραφία είναι επίσης γνωστές οι επιδόσεις του κινητήρα για διαφορετικά σημεία λειτουργίας του (Πίνακας 3.8) (Jane's Information Group, 2004).

Ratings	ePower		Power		Thrust		ESFC		fuel	
	ehp	kW	shp	ekW	lbf	Nt	lb/ehp/h	μg/J	lb/h	kg/s
Max T-O Static	2502	1865.74	2380	1774.77	305.00	1356.71	0.47	79.41	1175.94	0.148166
Max Continuous	2261	1686.03	2150	1603.25	277.50	1234.38	0.483	81.61	1092.06	0.137598
Max Climb (Mach=0.32, Alt=19950ft)	2197	1638.30	2088	1557.02	183.24	815.08	0.487	82.29	1069.94	0.134810
Max Cruise (Mach=0.32, Alt=19950ft)	2136	1592.81	2030	1513.77	178.19	792.64	0.492	83.13	1050.91	0.132413

Πίνακας 3.8. Επιδόσεις για διαφορετικά σημεία λειτουργίας

Οι επιδόσεις του κινητήρα ορίζονται ως:

- Maximum Take – off Power: Είναι η μέγιστη διαθέσιμη ισχύς πιστοποιημένη για απογείωση και είναι 10% μεγαλύτερη από την normal take – off power. Σκοπός της μέγιστης ισχύς απογείωσης είναι να χρησιμοποιηθεί σε περίπτωση βλάβης της μηχανής ή σε σταμάτημα λειτουργίας της.
- Normal Take – off Power: Είναι η ονομαστική ισχύς που θα παρέχει ο κινητήρας, με δύο κινητήρες απογείωσης.
- Maximum Continuous Power: Αποτελεί επίδοση ισοδύναμη της ισχύος απογείωσης και χρησιμοποιείται με την εντολή του πιλότου, όταν κρίνει ότι είναι απαραίτητο για να διασφαλίσει μία ασφαλή πτήση. Γενικά, χρησιμοποιείται όταν το αεροσκάφος πετάει με έναν κινητήρα, είτε λόγω απογείωσης με έναν κινητήρα, είτε λόγω βλάβης.
- Maximum Climb Power: Είναι η μέγιστη εγκεκριμένη ισχύς για άνοδο.
- Maximum Cruise Power: Είναι η μέγιστη εγκεκριμένη ισχύς για πλεύση.

Τα σκιασμένα κελιά του Πίνακα 3.8 αποτελούν τα γνωστά μεγέθη από τη βιβλιογραφία, ενώ τα υπόλοιπα μεγέθη υπολογίζονται με βάση τις παρακάτω σχέσεις:

$$Power (kW) = Power (shp) \cdot 0.74569987$$

$$ePower (ekW) = ePower (ehp) \cdot 0.74569987$$

$$Thrust(lbf) = (ePower - Power) \cdot 2.5$$

$$Thrust(Nt) = Thrust(lbf) \cdot 4.4482216$$

Ο όρος ESFC: equivalent specific fuel consumption χρησιμοποιείται για τη σύγκριση της κατανάλωσης καυσίμου σε turboprop μηχανές.

$$ESFC \left(\frac{lb}{h} \right) = \frac{W_f}{ESHP}$$

Ο όρος ESHP: equivalent shaft horsepower υπολογίζεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$ESHP = SHP + \frac{F_n}{2.5} \quad \text{όταν το αεροσκάφος δεν κινείται}$$

και

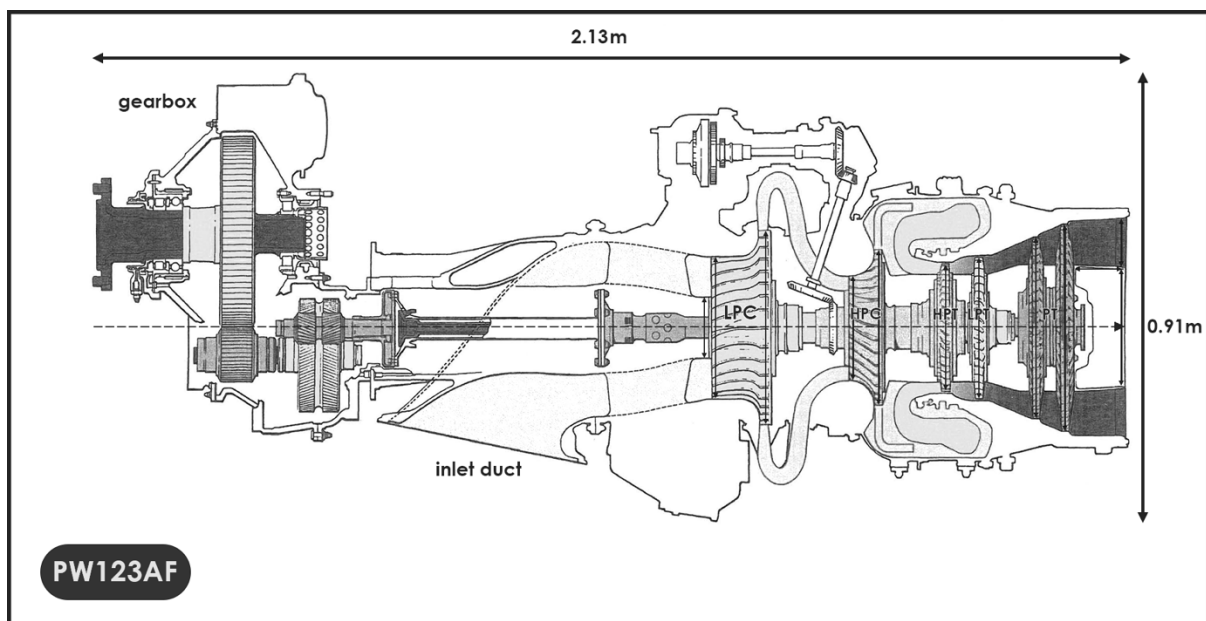
$$ESHP = SHP + \frac{F_n \cdot V}{550} \quad \text{όταν το αεροσκάφος κινείται}$$

όπου F_n σε pounds και V σε ft/sec

$$fuel \left(\frac{lb}{h} \right) = ESFC \cdot ePower$$

$$fuel \left(\frac{kg}{s} \right) = fuel \left(\frac{lb}{h} \right) \cdot 0.00012599788$$

Τέλος, στην Εικόνα 3.11 απεικονίζεται κινητήρας της οικογένειας PW100 σε τομή με τα επιμέρους τμήματά του και τις κύριες διαστάσεις του, όπως αυτές δίνονται στη βιβλιογραφία.



Εικόνα 3.11. Αξονική τομή κινητήρα PW123AF και συνολικές διαστάσεις

4 Μοντελοποίηση κινητήρα PW123AF

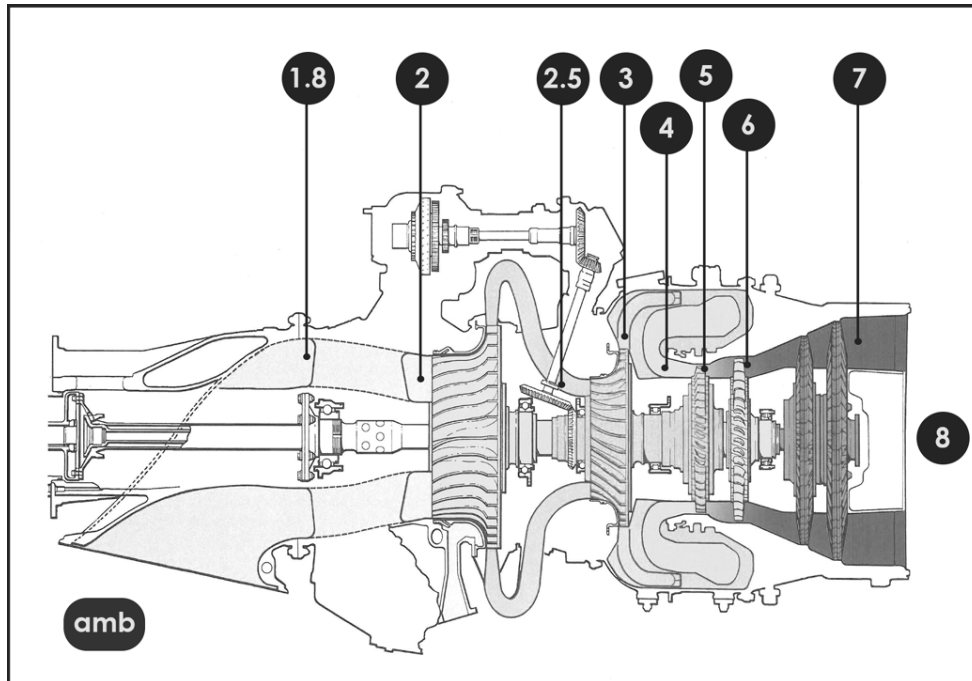
Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία της μοντελοποίησης του κινητήρα PW123AF της Pratt & Whitney με χρήση του λογισμικού που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Η υλοποίηση του μοντέλου γίνεται με τη χρήση δεδομένων για τον κινητήρα από την ανοιχτή βιβλιογραφία και από δεδομένα του δοκιμαστηρίου κινητήρων της Ελληνικής Αεροπορικής Βιομηχανίας (ΕΑΒ).

4.1. Δεδομένα δοκιμαστηρίου

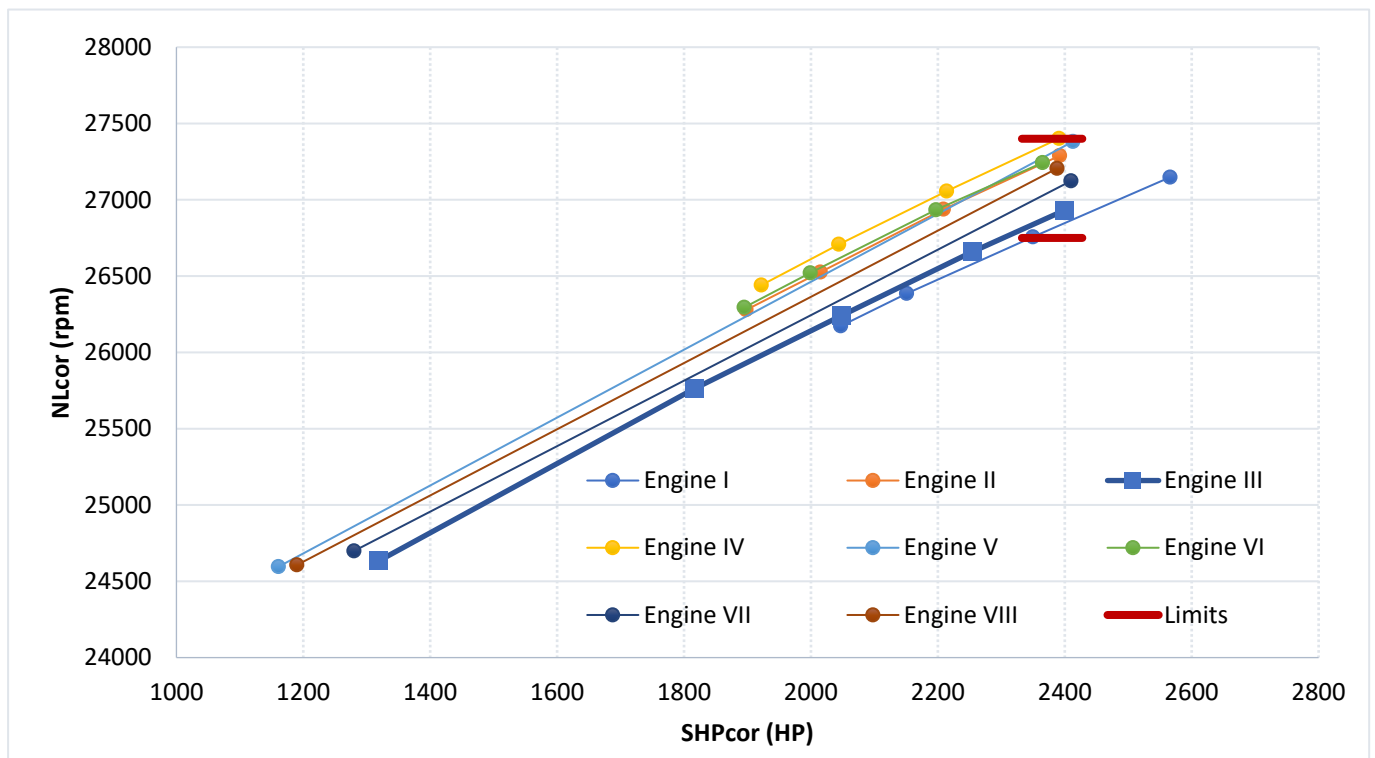
Ο συγκεκριμένος κινητήρας επισκευάζεται και δοκιμάζεται στην Ελληνική Αεροπορική Βιομηχανία. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής έγινε συγκέντρωση δεδομένων από διαφορετικούς κινητήρες. Τα δεδομένα που έχουμε στη διάθεσή μας από το δοκιμαστήριο είναι τα εξής:

- η παροχή και η θερμοκρασία καυσίμου (W_F , T_F)
- οι στροφές των αξόνων (NH, NL, NP)
- η ατμοσφαιρική πίεση (P_{amb})
- η θερμοκρασία και η πίεση εισόδου στον κινητήρα (P_1 , T_1)
- οι πιέσεις εισόδου και εξόδου του συμπιεστή χαμηλής πίεσης (P_2 , P_{25})
- η θερμοκρασία και η πίεση εξόδου του συμπιεστή υψηλής πίεσης (P_3 , T_3)
- η θερμοκρασία μεταξύ των τροβίλων χαμηλής πίεσης και ισχύος (T_6)
- η θερμοκρασία και η πίεση εξόδου των καυσαερίων (T_8 , P_{s8})

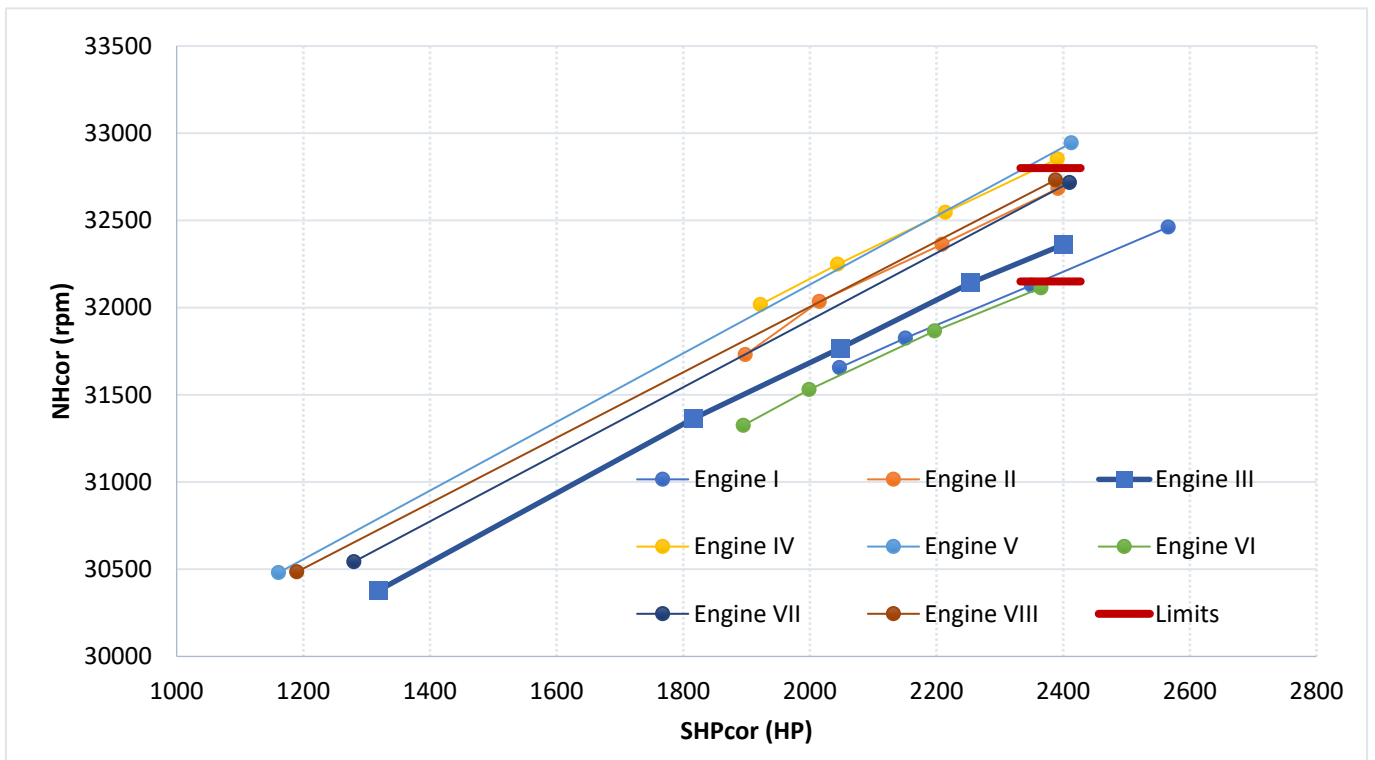
Οι χαρακτηριστικές θέσεις του κινητήρα φαίνονται στο Σχήμα 4.1, ενώ στα Διαγράμματα 4.1 – 4.6 παρουσιάζονται ενδεικτικές μετρήσεις διορθωμένες συναρτήσει της διορθωμένης ισχύος, για διαφορετικούς κινητήρες. Στα γραφήματα παρουσιάζονται επίσης και τα όρια (limits) που θέτει ο κατασκευαστής στο 100% της ισχύος.



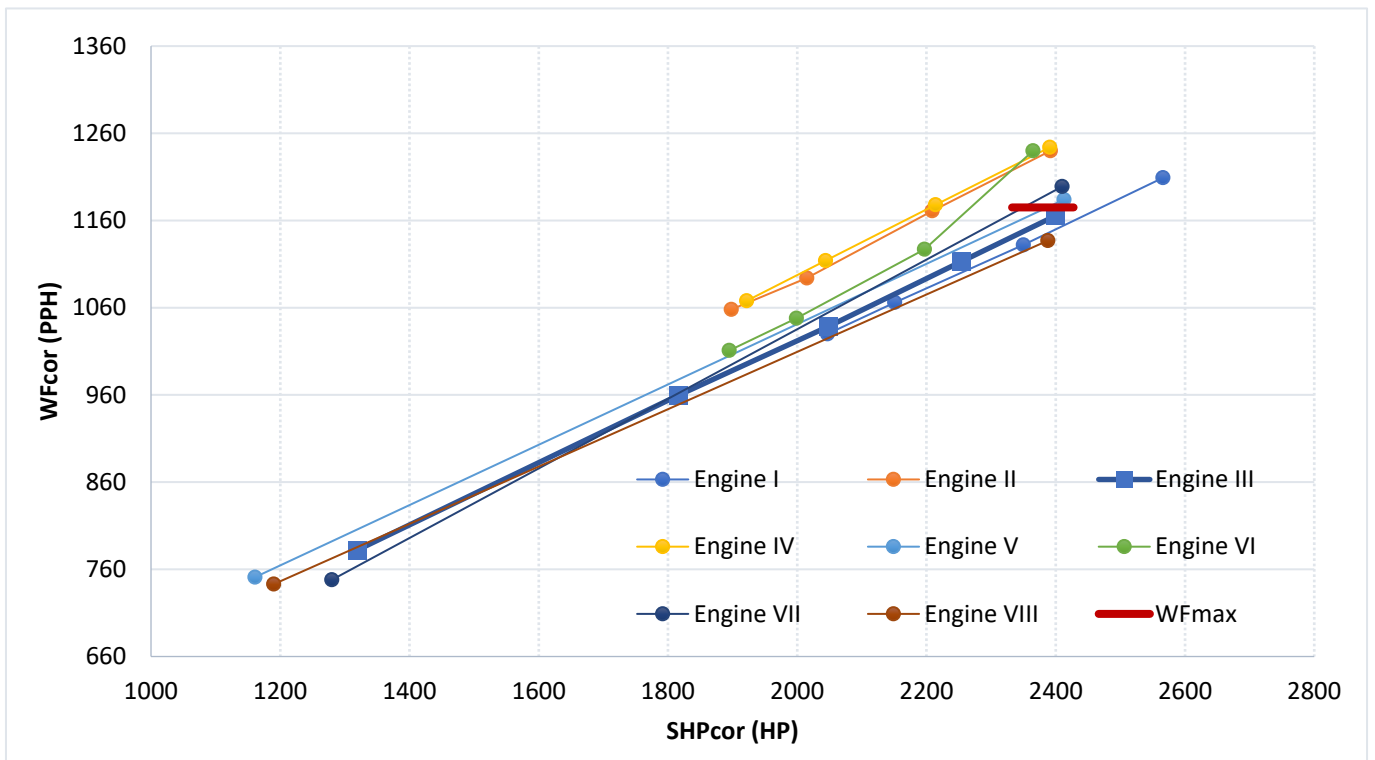
Σχήμα 4.1. Αρίθμηση χαρακτηριστικών θέσεων κινητήρα PW123AF.



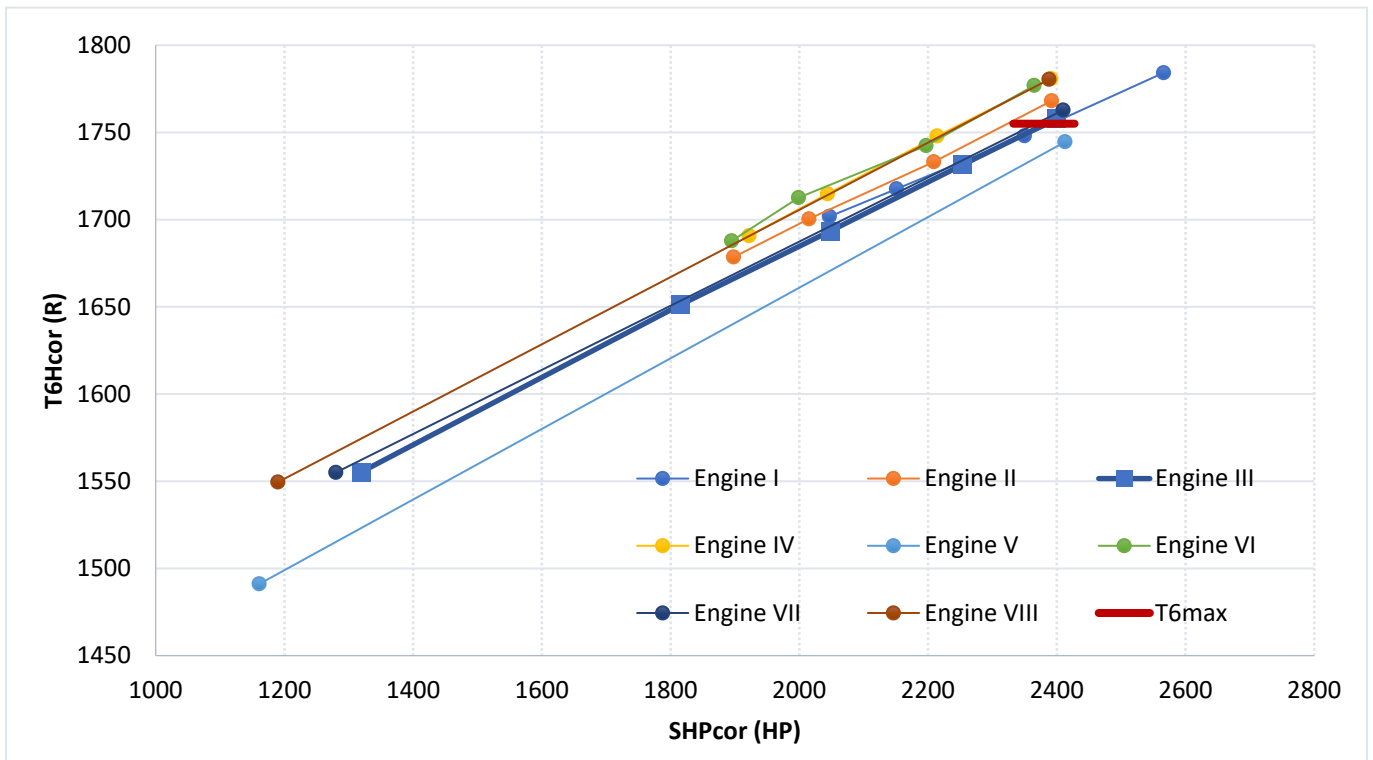
Διάγραμμα 4.1. Διορθωμένες στροφές περιστροφής άξονα χαμηλής πίεσης συναρτήσει διορθωμένης ισχύος



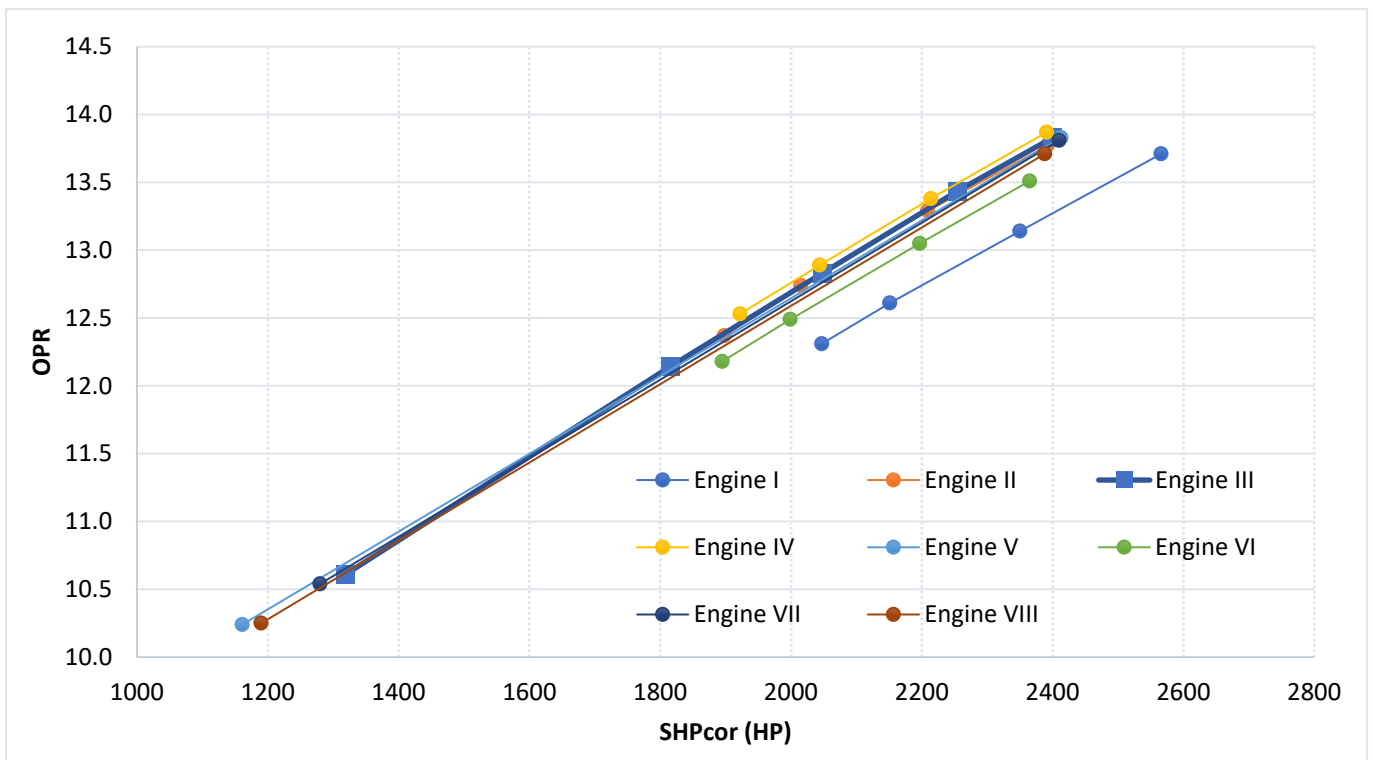
Διάγραμμα 4.2. Διορθωμένες στροφές περιστροφής άξονα υψηλής πίεσης συναρτήσει διορθωμένης ισχύος



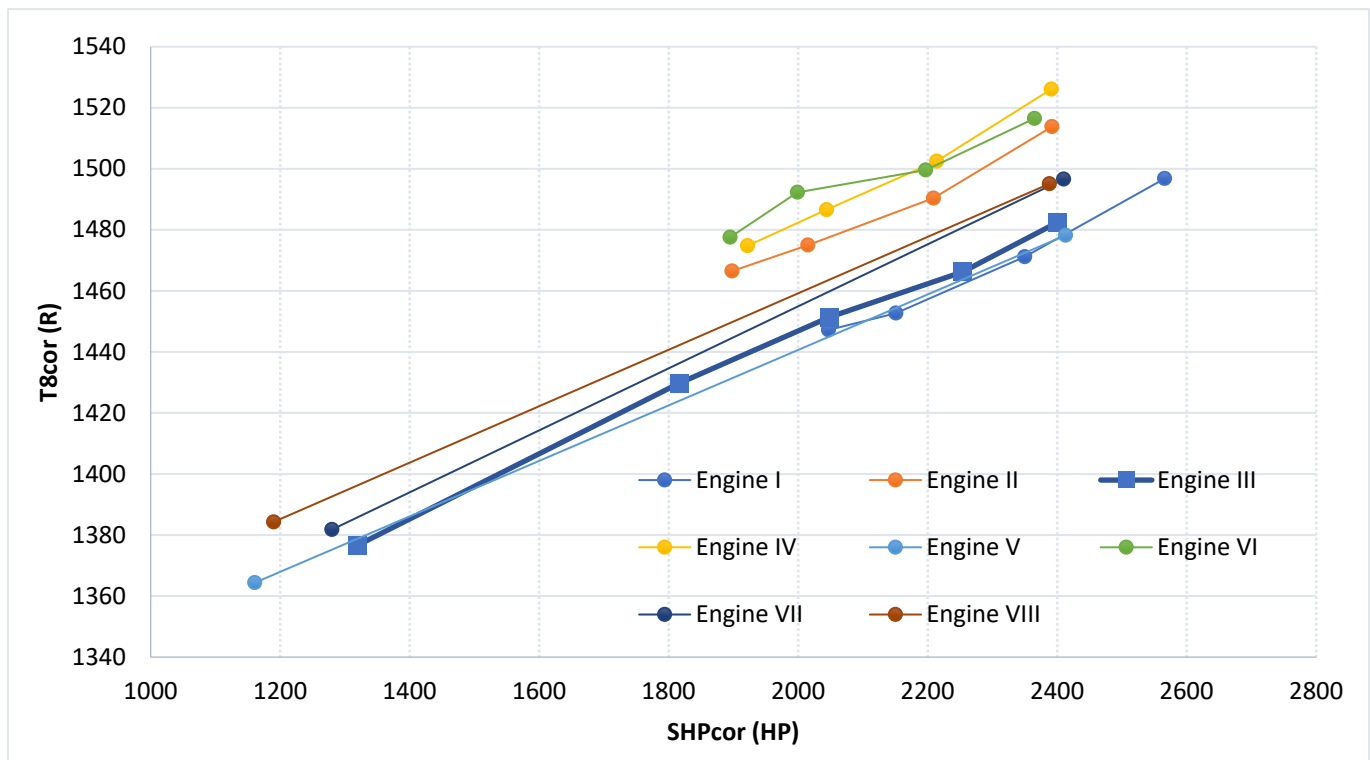
Διάγραμμα 4.3. Διορθωμένη παροχή καυσίμου συναρτήσει διορθωμένης ισχύος



Διάγραμμα 4.4. Διορθωμένη θερμοκρασία μεταξύ στροβίλων συναρτήσει διορθωμένης ισχύος



Διάγραμμα 4.5. Συνολικός λόγος πίεσης συναρτήσει διορθωμένης ισχύος



Διάγραμμα 4.6. Διορθωμένη θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων συναρτήσει διορθωμένης ισχύος

Για τη μοντελοποίηση του κινητήρα PW123AF, επιλέγονται τα δεδομένα του κινητήρα No3 (Engine III), για τους εξής λόγους:

- Διαθέτουμε 5 ισοκατανεμημένα σημεία λειτουργίας (55 – 101 % της ισχύος)
- Όλα τα μεγέθη είναι εντός των ορίων που θέτει ο κατασκευαστής για τη μέγιστη ισχύ
- Σε όλα τα μεγέθη παρατηρείται γραμμική συμπεριφορά στο παραπάνω εύρος της ισχύος, όπως αναμένεται, γεγονός που σημαίνει ότι δεν υπάρχει κάποιο πρόβλημα σφάλματος στις μετρήσεις

4.2. Ανάλυση λειτουργίας στο σημείο σχεδιασμού μέσω βελτιστοποίησης

Ως σημείο σχεδιασμού θεωρούμε το σημείο απογείωσης (max take – off 100%), σε συνθήκες τυπικής ημέρας. Δεδομένου ότι τα διαθέσιμα δεδομένα της βιβλιογραφίας δεν επαρκούν για την ανάλυση στο σημείο σχεδιασμού και θέλοντας να προσαρμόσουμε το μοντέλο σε συγκεκριμένο κινητήρα, χρησιμοποιούμε τα δεδομένα του δοκιμαστηρίου και την ανάλυση λειτουργίας στο σημείο σχεδιασμού μέσω βελτιστοποίησης που παρέχεται από το λογισμικό.

Συγκεκριμένα, θα χρησιμοποιήσουμε το πιο κοντινό σημείο στο 100%, όπου για τον επιλεγμένο κινητήρα είναι το 101%. Ουσιαστικά, προσεγγίζεται το σημείο σχεδιασμού μέσω

ενός σημείου εκτός σχεδιασμού, που βρίσκεται όμως πολύ κοντά σε αυτό και η ανάλυσή μας δεν επηρεάζεται από την ακρίβεια των επιλεγμένων χαρτών, κάτι το οποίο δε θα ίσχυε σε περίπτωση επιλογής ενός απομακρυσμένου σημείου (πχ. 55%).

Εργαζόμαστε επομένως, σύμφωνα με το Κεφάλαιο 2.3.4 και πραγματοποιούμε βελτιστοποίηση του σημείου σχεδιασμού με το off – design σημείο 101%. Η ώση και η ισχύς δίνονται από τις επιδόσεις του κινητήρα για το σημείο 100%, ενώ οι βαθμοί απόδοσης και οι λόγοι πίεσης προσεγγίζονται από τα μετρούμενα μεγέθη που έχουμε από το δοκιμαστήριο (πιέσεις και θερμοκρασίες) για το σημείο 101%. Τα μετρούμενα μεγέθη που χρησιμοποιούνται για τη βελτιστοποίηση είναι όλα τα διαθέσιμα μεγέθη, όπως αναφέρθηκαν παραπάνω.

Όσο αναφορά τους συμπίεστες, χρησιμοποιήθηκαν χάρτες, οι οποίοι προέκυψαν από κώδικα μέσης γραμμής (Ntonas, 2022), με βάση τις διαστάσεις που προέκυψαν από ψηφιοποίηση της αξονικής τομής του κινητήρα (Εικόνα 3.11). Όσο αναφορά τους στρόβιλους χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλοι χάρτες από τη βιβλιογραφία.

Ο Πίνακας 4.1 παρουσιάζει τις αρχικές τιμές, καθώς και τα όρια μεταβολής των παραμέτρων που επιλέξαμε να μεταβληθούν κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης του σημείου σχεδιασμού με σημείο εκτός σχεδιασμού το 101% της ισχύος. Οι παράμετροι αυτοί είναι οι λόγοι πίεσης, η παροχή αέρα, η παροχή καυσίμου, οι στροφές χαμηλής και υψηλής πίεσης και το ποσοστό απομάστευσης για ψύξη που παράγει έργο στον στρόβιλο υψηλής πίεσης.

Μεταβλητή	Αρχική Τιμή	Εύρος αναζήτησης κατά τη βελτιστοποίηση
P21Q2	4.74	4.10 – 5.10
OPR	13.8	13.00 – 14.00
EP3	0.843	0.800 – 0.910
E5	0.843	0.800 – 0.910
W1	7.413487	7.00 – 9.00
WF	0.148166	0.1300 – 0.1550
NH	32384	32000 – 34500
NL	26979	26000 – 28900

Πίνακας 4.1. Αρχικές τιμές και όρια παραμέτρων σχεδιασμού που χρησιμοποιούνται κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης

Ο πολυτροπικός βαθμός απόδοσης του συμπιεστή χαμηλής (EP24) θεωρείται ίσος με τον πολυτροπικό βαθμό απόδοσης του υψηλής (EP3) και οι ισεντροπικοί βαθμοί απόδοσης των στροβίλων υψηλής (E44) και χαμηλής (E47), θεωρούνται ίσοι με τον αντίστοιχο ισεντροπικό βαθμό απόδοσης του στροβίλου ισχύος (E5). Το ποσοστό απομάστευσης από τον D30 για ψύξη του στροβίλου υψηλής υπολογίζεται με βάση τη θερμοκρασία εξόδου από το στάτορα του στροβίλου.

Εκτός από τις παραμέτρους σχεδιασμού, όλες οι υπόλοιπες παράμετροι του μοντέλου λαμβάνουν σταθερές τιμές και ίσες με αυτές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2.

Μεταβλητή	Τιμή
CmpL.NcRdes	1.000
CmpL.NcRdesMap	1.000
CmpL.BETA	0.650
CmpH.NcRdes	1.000
CmpH.NcRdesMap	1.000
CmpH.BETA	0.650
TrbH.NcRdes	1.000
TrbH.NcRdesMap	1.050
TrbH.ZETA	0.650
TrbL.NcRdes	1.000
TrbL.NcRdesMap	1.000
TrbL.ZETA	0.650
TrbP.NcRdes	1.000
TrbP.NcRdesMap	1.000
TrbP.ZETA	0.650
InEng.PqP_in	0.990
D24.dPqP_in	0.010
D24.Wbleed2	0.005
D30.dPqP_in	0.015
D30.Wbleed1	0.010
D44.dPqP_in	0.005

Μεταβλητή	Τιμή
D47.dPqP_in	0.005
D50.dPqP_in	0.150
CmpH.h_Bld2	1.000
Brn.eff_in	0.985
Brn.dPqP_in	0.040
ShH.eff	0.984
ShL.eff	0.990
Gear.Eff	0.985
NozPri.Cx_in	0.995
NozPri.Cd_in	0.995

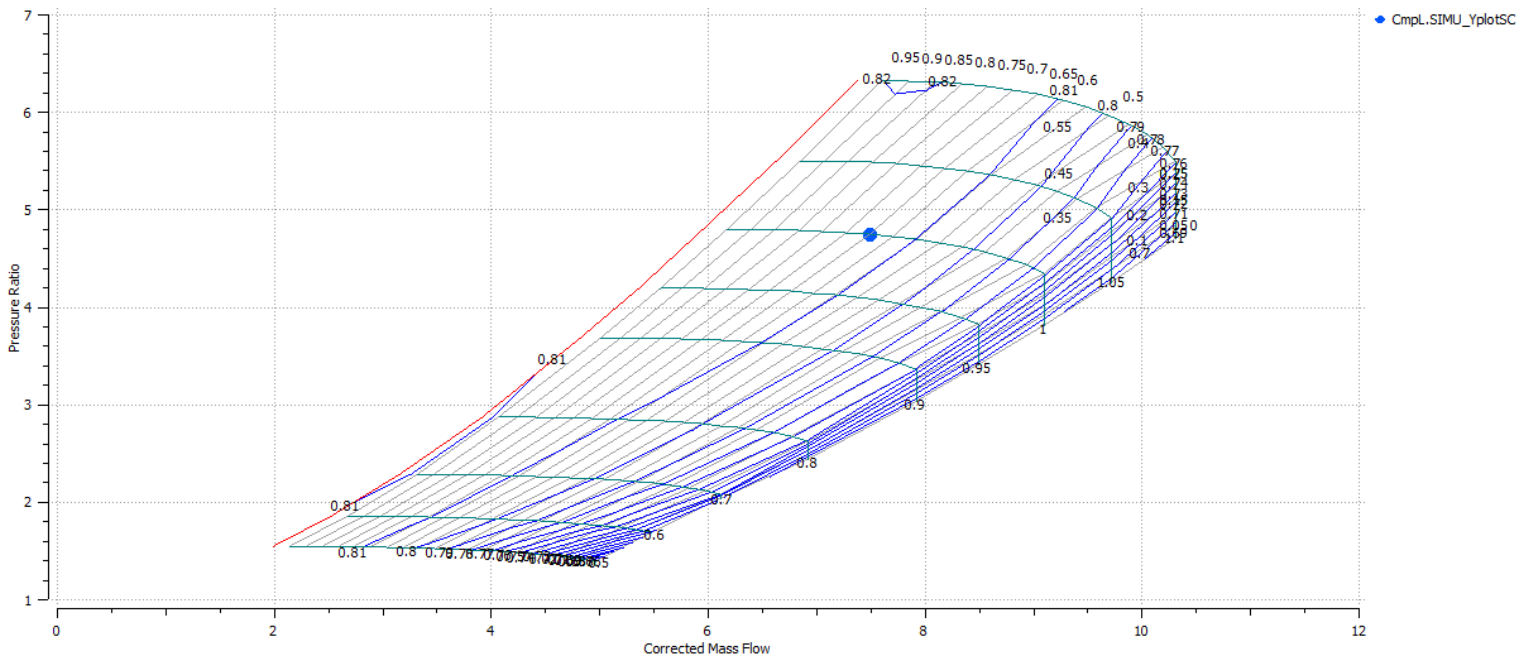
Πίνακας 4.2. Παράμετροι που λαμβάνουν σταθερές τιμές κατά τη βελτιστοποίηση

Ο θάλαμος καύσης λαμβάνει τυπικό βαθμό απόδοσης και απώλειες πίεσης, σύμφωνα με τη μορφή του (θάλαμος αντίστροφης ροής) και την τεχνολογία του (κινητήρας του 1989). Επίσης, ο άξονας περιστροφής υψηλής πίεσης έχει μικρότερη τιμή μηχανικού βαθμού απόδοσης, από τον άξονα χαμηλής, καθώς μέρος της ισχύος του χρησιμοποιείται από τα βοηθητικά συστήματα (αντλίες κτλ.). Οι τιμές BETA και ZETA των χαρτών και οι απώλειες πίεσης των αγωγών λαμβάνουν τυπικές τιμές.

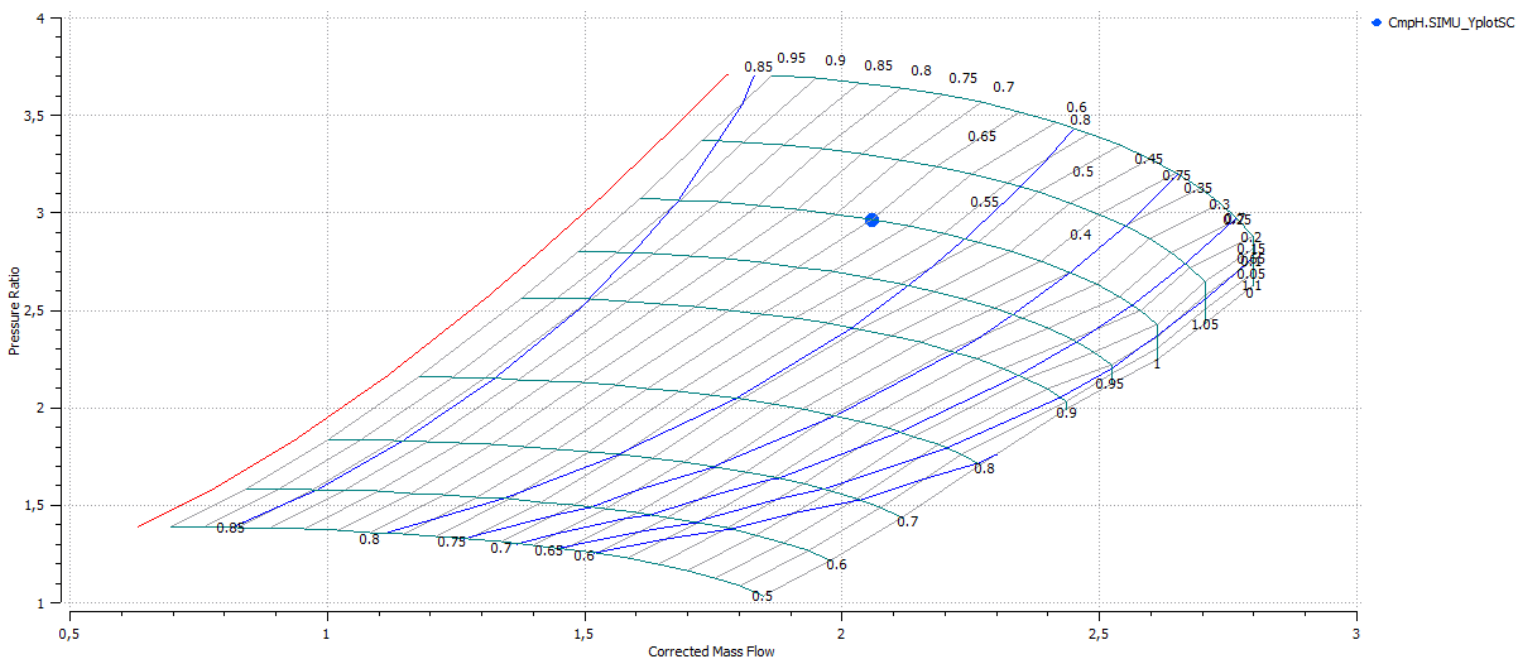
Στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζεται η αρχική τιμή που έχει τεθεί και οι τιμές όλων των παραμέτρων σχεδιασμού στο τέλος της βελτιστοποίησης. Στα Σχήματα 4.2 - 4.6 παρουσιάζεται το σημείο σχεδιασμού πάνω στους χάρτες των συνιστωσών και στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται ενδεικτικά μεγέθη για το σημείο σχεδιασμού.

Μεταβλητή	Αρχική Τιμή	Τιμή στο τέλος της βελτιστοποίησης
P21Q2	4.740	4.740052
OPR	13.80	13.894673
EP3	0.843	0.849289
E5	0.843	0.845024
W1	7.413	7.486673
WF	0.148	0.146059
NH	32384	32429.492
NL	26979	27028.0872

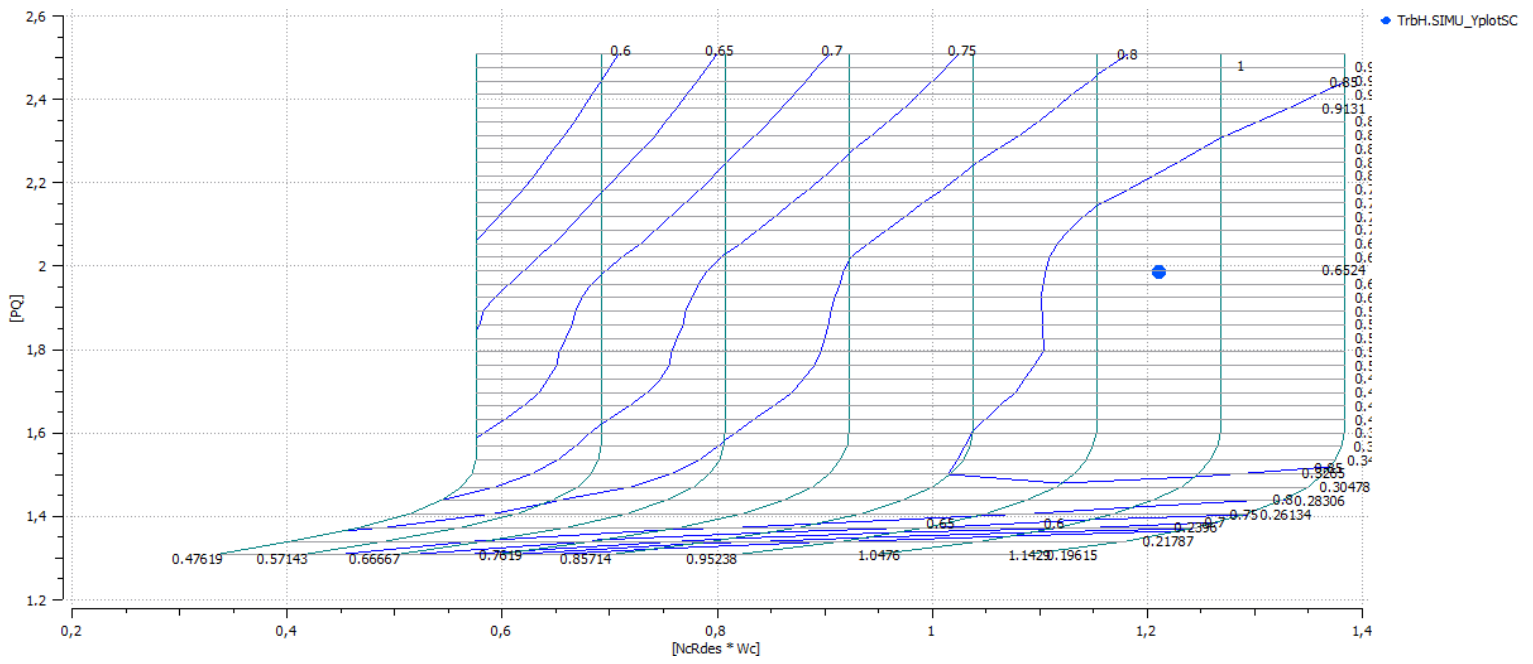
Πίνακας 4.3. Παράμετροι σχεδιασμού μετά τη βελτιστοποίηση



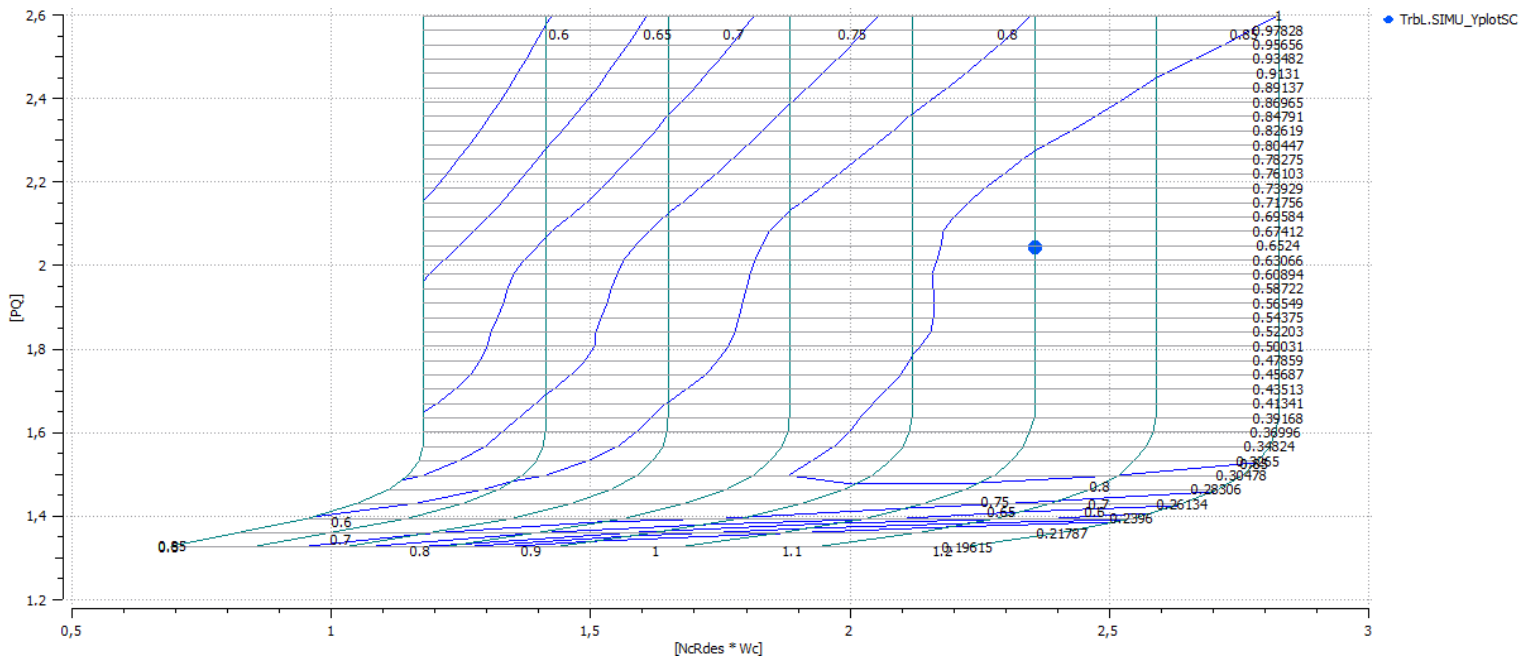
Σχήμα 4.2. Σημείο σχεδιασμού στο χάρτη του συμπιεστή χαμηλής πίεσης (CmpL)



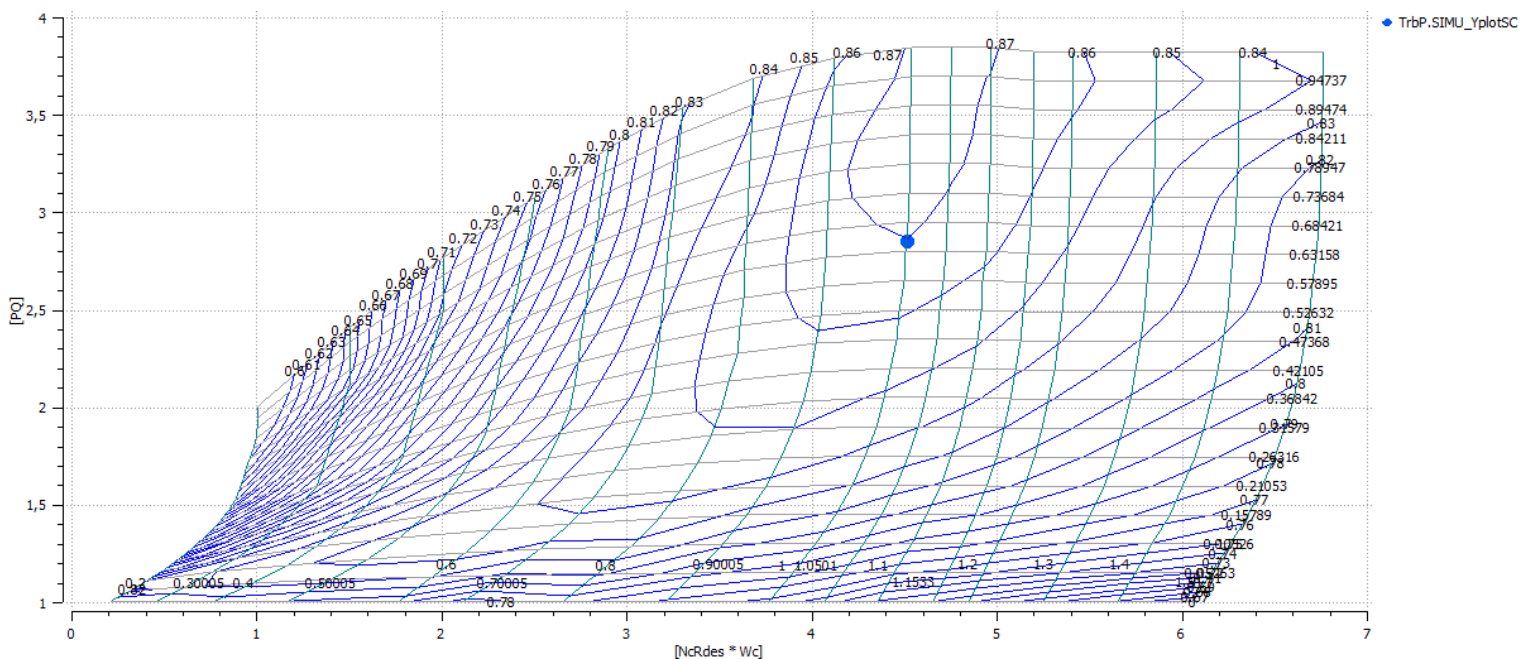
Σχήμα 4.3. Σημείο σχεδιασμού στο χάρτη του συμπιεστή υψηλής πίεσης (CmpH)



Σχήμα 4.4. Σημείο σχεδιασμού στο χάρτη του στροβίλου υψηλής πίεσης (TrbH)



Σχήμα 4.5. Σημείο σχεδιασμού στο χάρτη του στροβίλου χαμηλής πίεσης (TrbL)



Σχήμα 4.6. Σημείο σχεδιασμού στο χάρτη του στροβίλου ισχύος (TrbP)

Μεταβλητή	Τιμή
InEng.W_in	7.48667324 (kg/s)
Brn.Fu_in.W	0.146058771 (kg/s)
Perf.pwr.Channel	1774765.7 (W)
CmpL.Nmech	27028.0872 (rpm)
CmpL.PR_cw	4.74005155
CmpL.eff	0.8492887
CmpL.effPoly	0.82607925
CmpL.F_in.Tt	288.15 (K)
CmpH.Nmech	32429.492 (rpm)
CmpH.PR_cw	2.96094324
CmpH.eff	0.82607925
CmpH.effPoly	0.8492887
CmpH.F_in.Tt	484.475257 (K)
CmpH.F_out.Tt	687.763134 (K)
TrbH.PQ	2.00539243
TrbH.eff	0.86175583
TrbH.effPoly	0.85171165
TrbH.F_in.Tt	1445.12599 (K)
TrbH.F_out.Tt	823.870082 (K)
TrbL.PQ	2.06787948
TrbL.eff	0.86175583

Μεταβλητή	Τιμή
TrbL.effPoly	0.85092703
TrbL.F_out.Tt	1029.84345 (K)
TrbP.PQ	2.87198085
TrbP.eff	0.86175583
TrbP.effPoly	0.84502388
TrbP.F_out.Tt	823.870082 (K)
D30.Wbleed2	0.10479964
NozPri.Aexit	0.09850542 (m ²)
NozPri.Ps_out	101325 (Pa)

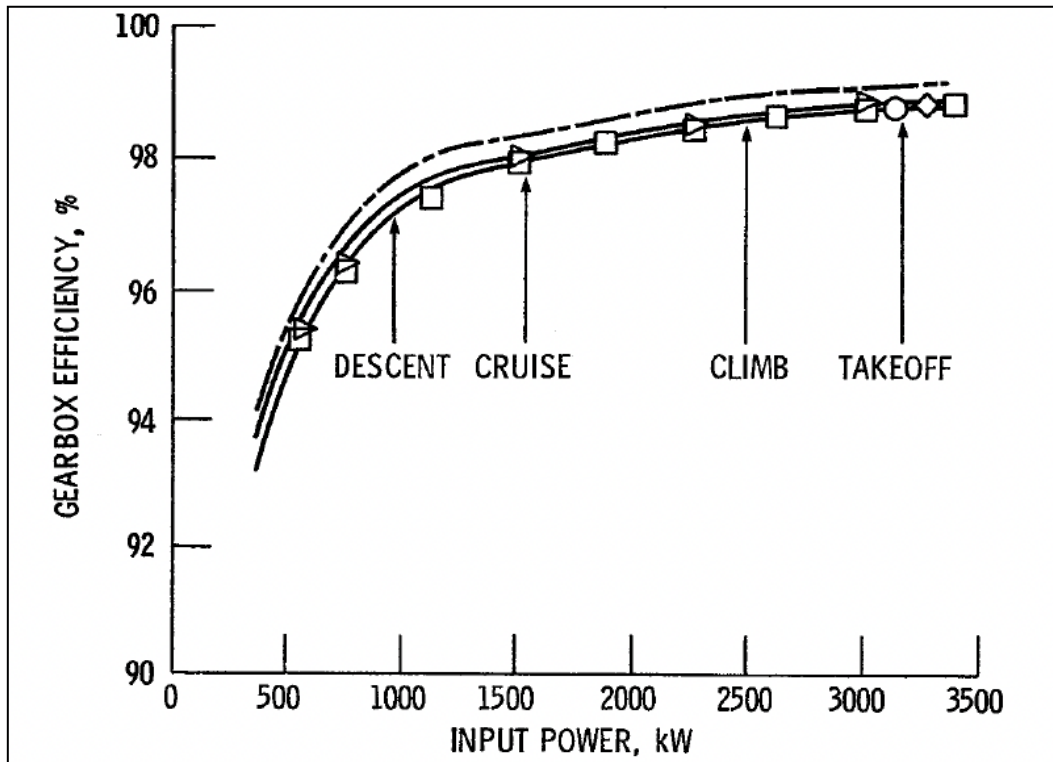
Πίνακας 4.4. Ενδεικτικά αποτελέσματα ανάλυσης στο σημείο σχεδιασμού

4.3. Ανάλυση λειτουργίας εκτός του σημείου σχεδιασμού

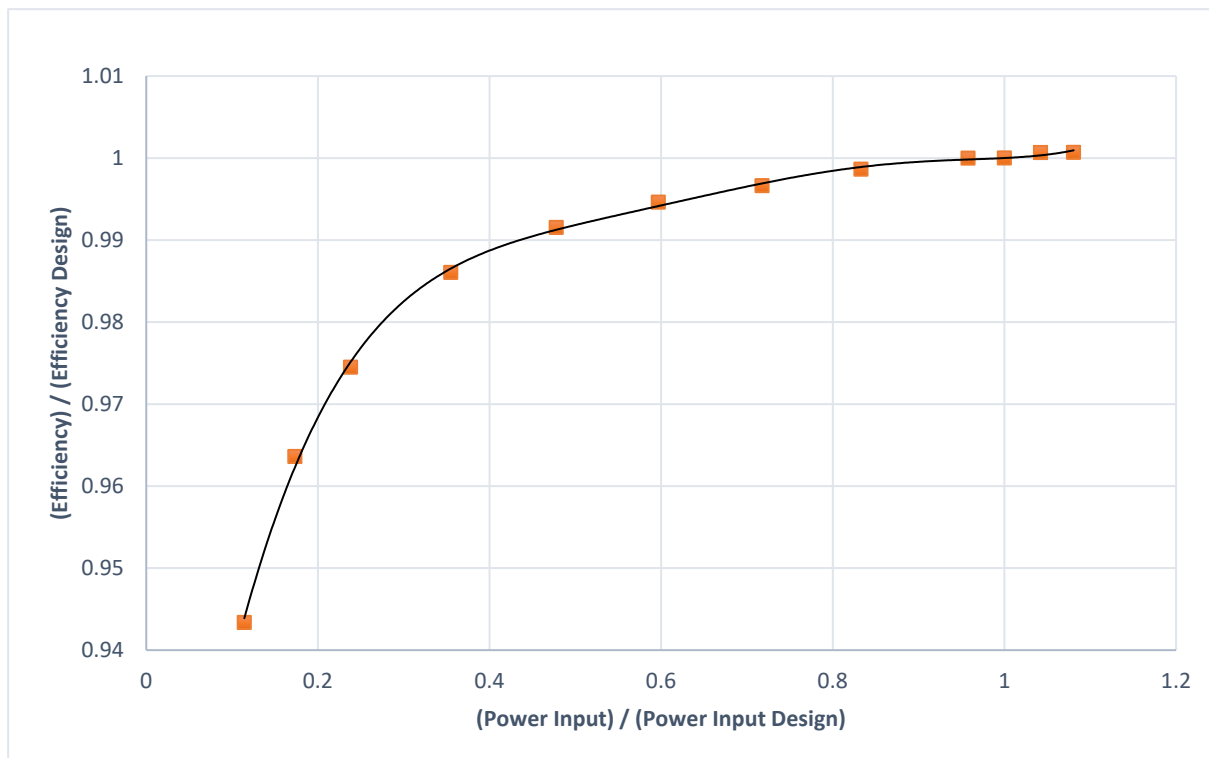
Στην ανάλυση εκτός σημείου σχεδιασμού χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα της ανάλυσης στο σημείο σχεδιασμού. Ως σημεία εκτός σημείου σχεδιασμού θεωρούμε εκείνα που έχουμε ως δεδομένα από το δοκιμαστήριο, δηλαδή στο 101, 95, 86, 76 και 55% της μέγιστης ισχύος. Πριν γίνει η ανάλυση αυτή είναι κρίσιμο να μελετήσουμε την επίδραση δύο παραμέτρων που δε γνωρίζουμε ακριβώς την τιμή τους, αλλά επηρεάζουν σημαντικά την εκτός σημείου σχεδιασμού συμπεριφορά. Οι παράμετροι αυτοί είναι ο βαθμός απόδοσης του κιβωτίου ταχυτήτων και η εξάρτηση με την ισχύ εισόδου και η σταθερά μερικού φορτίου για την εκτίμηση του βαθμού απόδοσης καύσης εκτός σημείου σχεδιασμού. Παρακάτω περιγράφεται η προσέγγιση των παραμέτρων αυτών, όπως επίσης και η επίδρασή τους στο μοντέλο του κινητήρα που μελετάμε.

4.3.1. Επίδραση βαθμού απόδοσης κιβωτίου ταχυτήτων

Για το βαθμό απόδοσης του κιβωτίου ταχυτήτων γίνεται χρήση του Διαγράμματος 4.7, του οποίου η καμπύλη έχει προκύψει για τον κινητήρα T56 (Anderson Neil, et al., 1984), ο οποίος έχει κιβώτιο ταχυτήτων παρόμοιας διάταξης με τον PW123AF. Μέσω ψηφιοποίησης και αδιαστατοποίησης της καμπύλης προκύπτει το Διάγραμμα 4.8. Η καμπύλη αυτή έχει εισαχθεί στο λογισμικό και στη συνιστώσα του κιβωτίου ταχυτήτων, έτσι ώστε ο βαθμός απόδοσης του κιβωτίου να μεταβάλλεται με την ισχύ εισόδου.

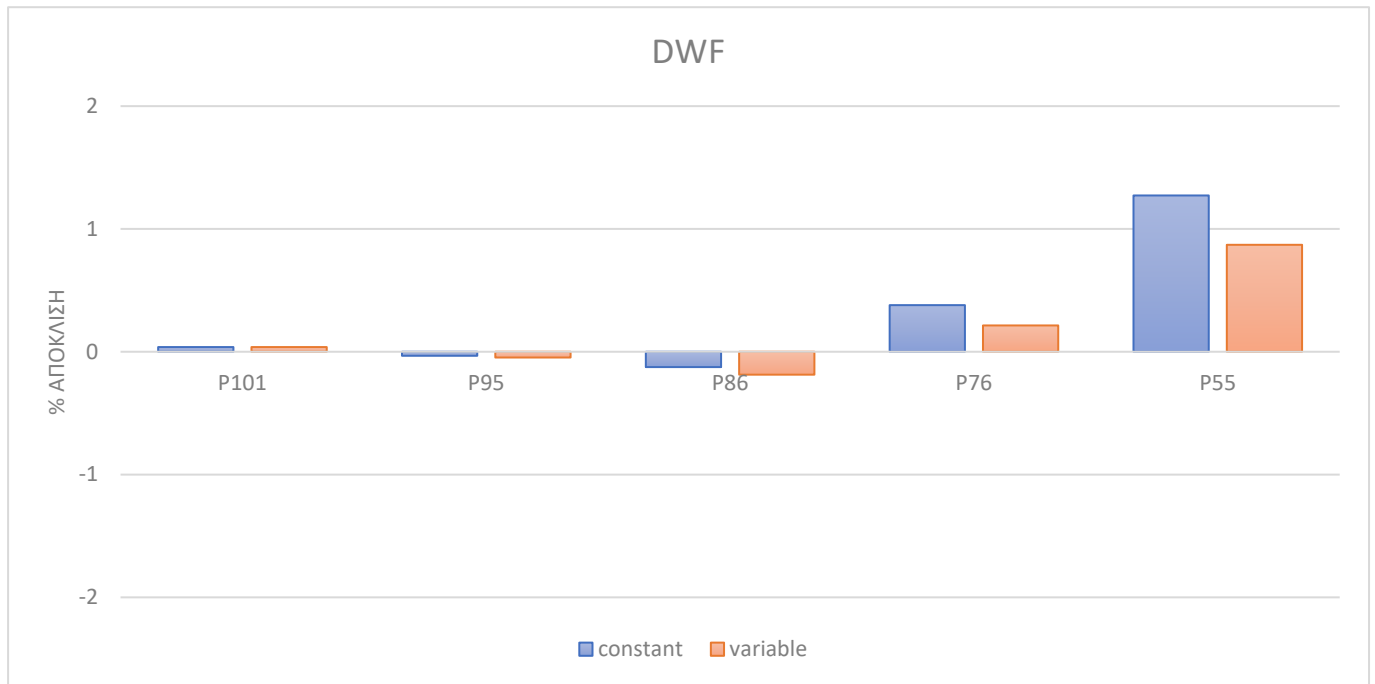


Διάγραμμα 4.7. Βαθμός απόδοσης κιβωτίου συναρτήσει ισχύος σε kW για τον κινητήρα T56

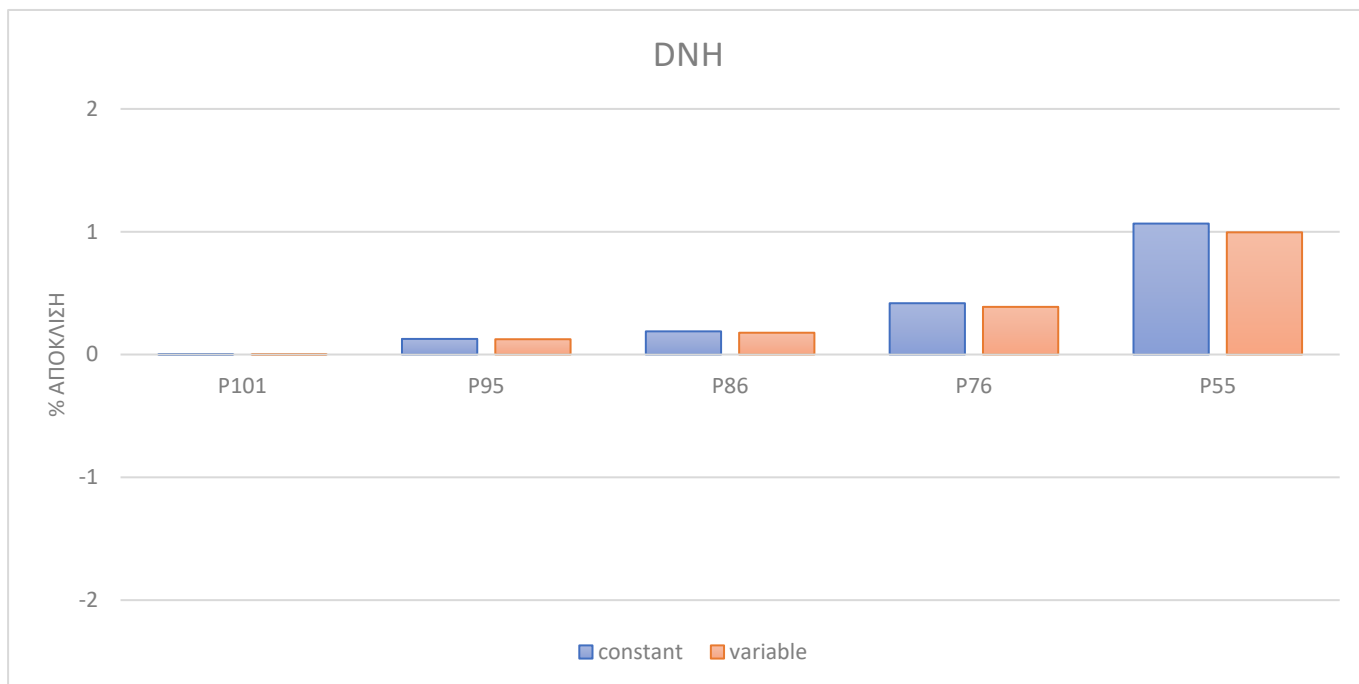


Διάγραμμα 4.8. Αδιάστατη καμπύλη βαθμού απόδοσης κιβωτίου ταχυτήτων

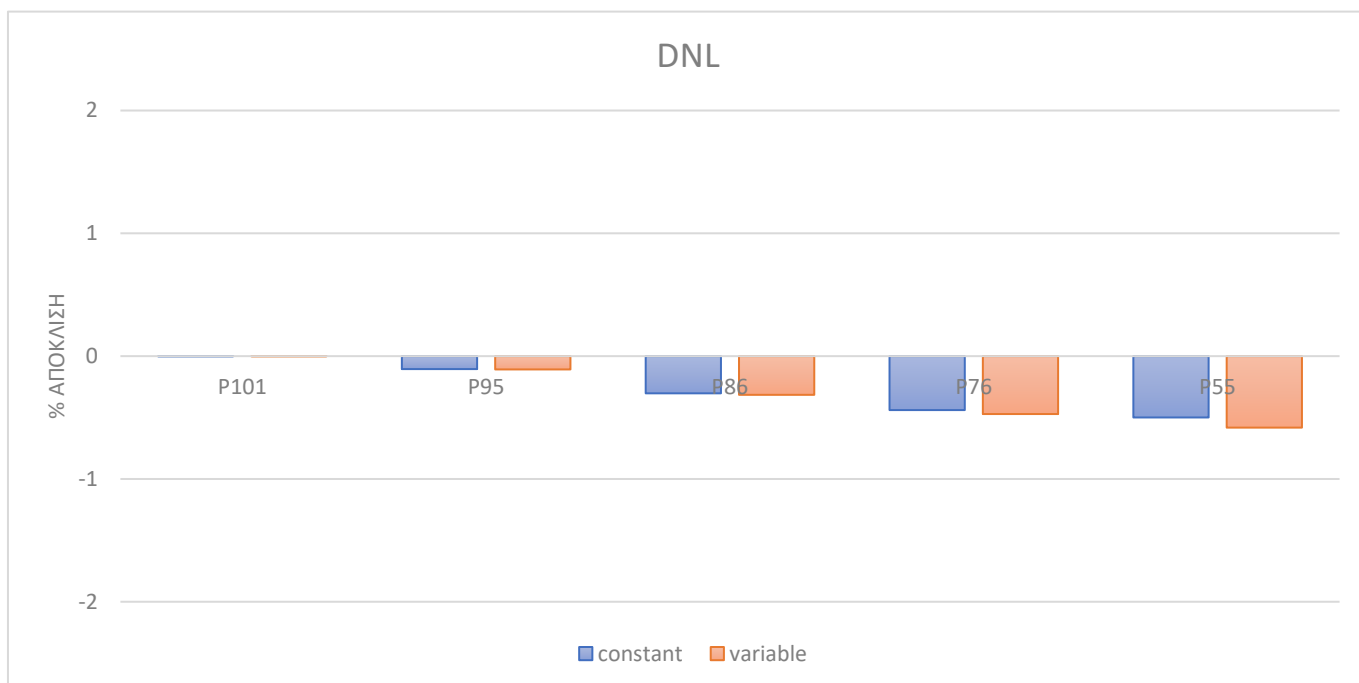
Στο λογισμικό ο χρήστης καλείται να επιλέξει αν θα χρησιμοποιήσει αυτή τη συσχέτιση για τα σημεία εκτός σχεδιασμού ή όχι, οπότε σε αυτή την περίπτωση ο βαθμός απόδοσης είναι σταθερός και ίσος με αυτόν του σημείου σχεδιασμού. Στα πλαίσια της μελέτης αυτής πραγματοποιήθηκε ανάλυση εκτός σημείου σχεδιασμού με σταθερό και μεταβλητό βαθμό απόδοσης. Οι αποκλίσεις του μοντέλου από τις μετρήσεις παρουσιάζονται στα Διαγράμματα 4.9 – 4.16.



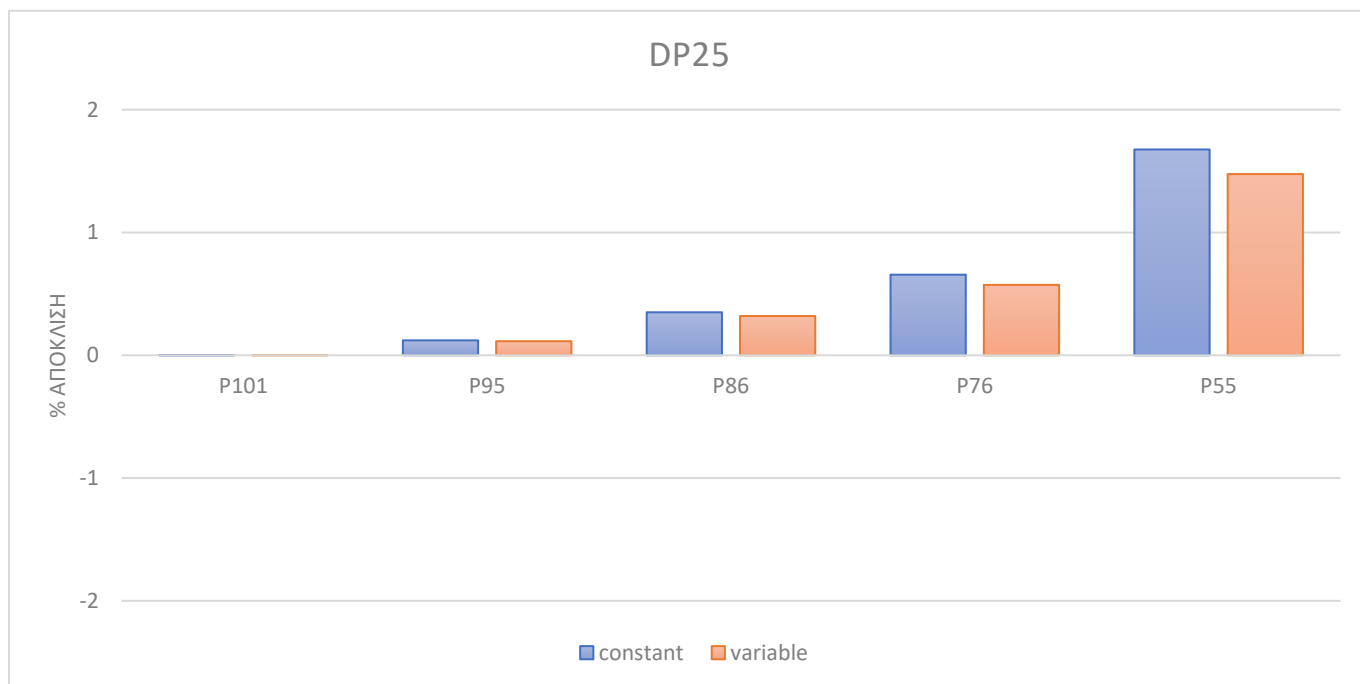
Διάγραμμα 4.9. Αποκλίσεις μοντέλου για την παροχή καυσίμου για σταθερό και μεταβλητό βαθμό απόδοσης κιβωτίου ταχυτήτων



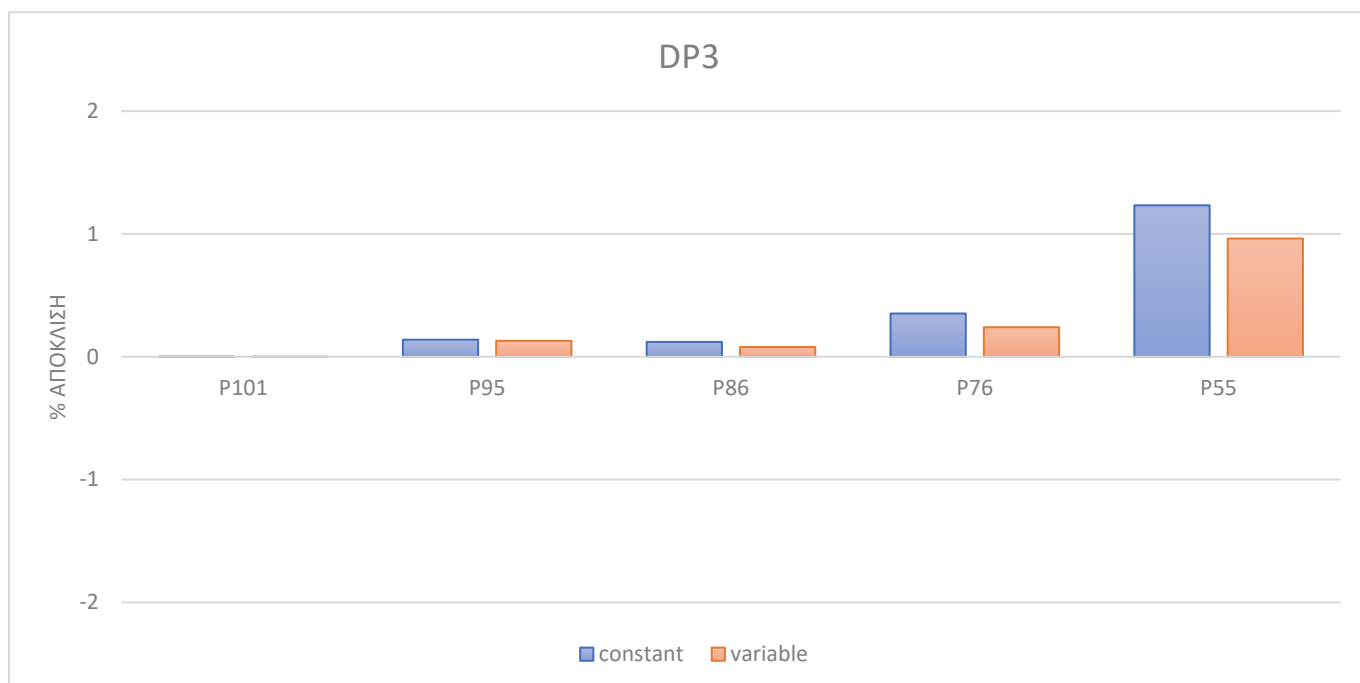
Διάγραμμα 4.10. Αποκλίσεις μοντέλου για τις στροφές περιστροφής άξονα υψηλής πίεσης για σταθερό και μεταβλητό βαθμό απόδοσης κιβωτίου ταχυτήτων



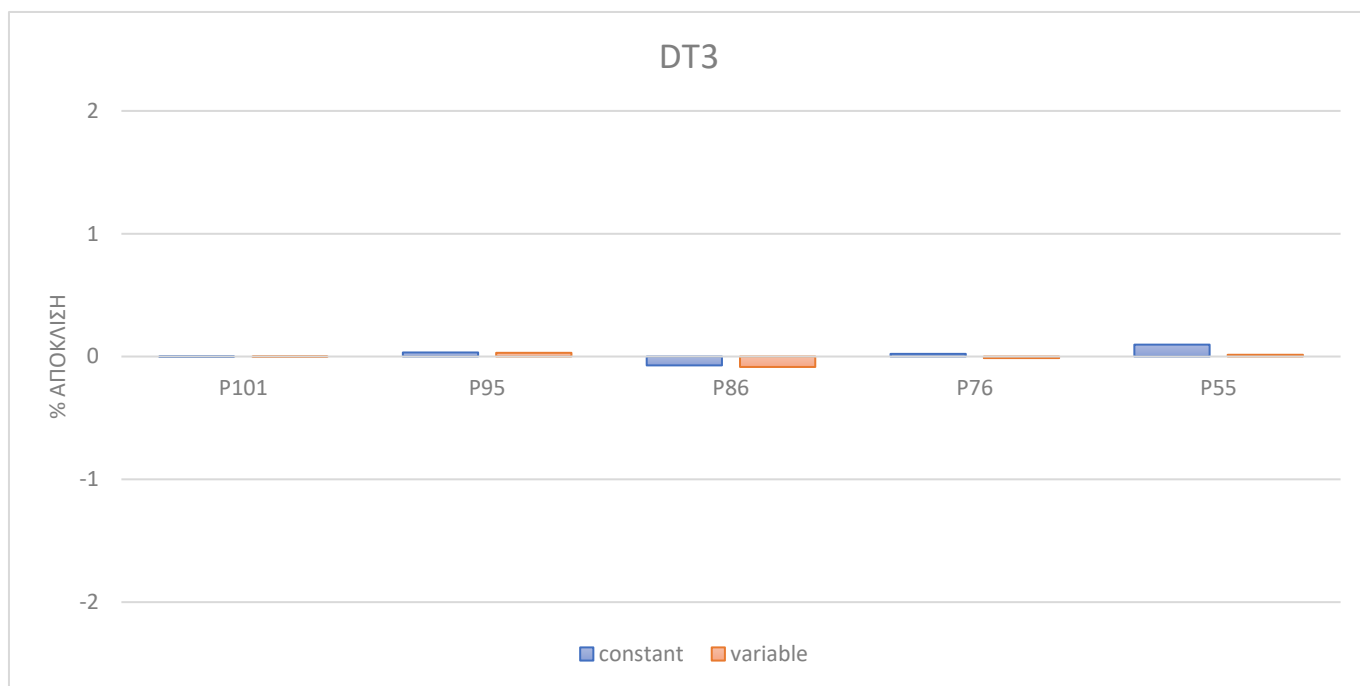
Διάγραμμα 4.11. Αποκλίσεις μοντέλου για τις στροφές περιστροφής άξονα χαμηλής πίεσης για σταθερό και μεταβλητό βαθμό απόδοσης κιβωτίου ταχυτήτων



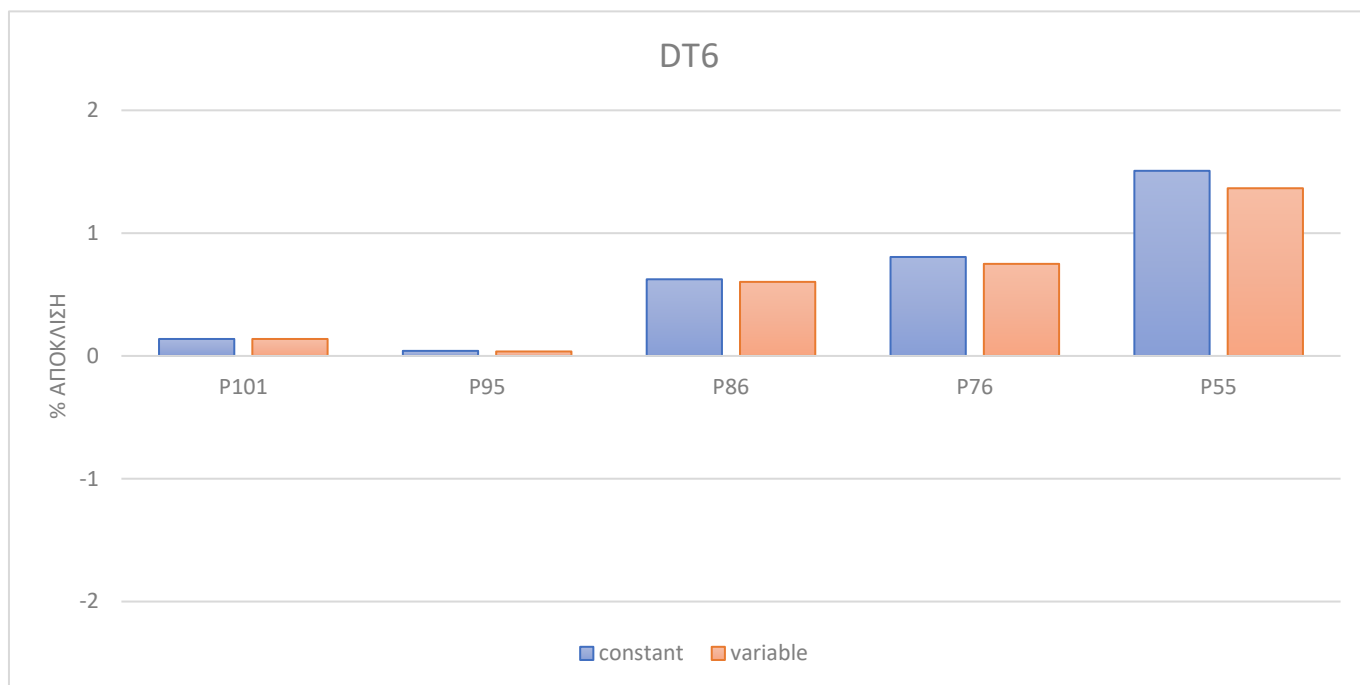
Διάγραμμα 4.12. Αποκλίσεις μοντέλου για την πίεση εξόδου του συμπιεστή χαμηλής πίεσης για σταθερό και μεταβλητό βαθμό απόδοσης κιβωτίου ταχυτήτων



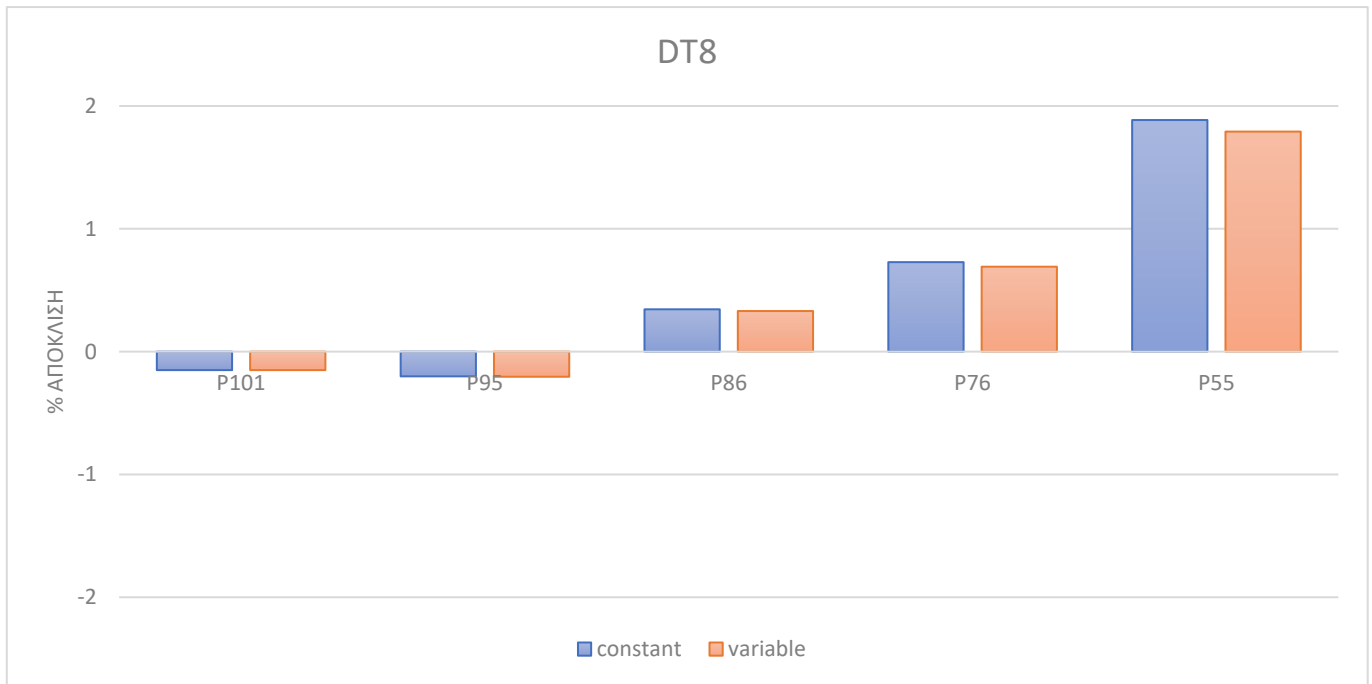
Διάγραμμα 4.13. Αποκλίσεις μοντέλου για την πίεση εξόδου του συμπιεστή υψηλής πίεσης για σταθερό και μεταβλητό βαθμό απόδοσης κιβωτίου ταχυτήτων



Διάγραμμα 4.14. Αποκλίσεις μοντέλου για τη θερμοκρασία εξόδου του συμπιεστή υψηλής πίεσης για σταθερό και μεταβλητό βαθμό απόδοσης κιβωτίου ταχυτήτων



Διάγραμμα 4.15. Αποκλίσεις μοντέλου για τη θερμοκρασία μεταξύ στροβίλων για σταθερό και μεταβλητό βαθμό απόδοσης κιβωτίου ταχυτήτων



Διάγραμμα 4.16. Αποκλίσεις μοντέλου για τη θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων για σταθερό και μεταβλητό βαθμό απόδοσης κιβωτίου ταχυτήτων

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα, είναι απαραίτητη η χρήση μεταβλητού βαθμού απόδοσης κιβωτίου δεδομένου ότι μειώνει τις αποκλίσεις έως και 0.4% στην παροχή καυσίμου.

4.3.2. Επίδραση παραμέτρου μερικού φορτίου βαθμού απόδοσης καύσης

Για την εκτίμηση του βαθμού απόδοσης του θαλάμου καύσης σε σημεία εκτός του σημείου σχεδιασμού, λαμβάνεται υπόψιν το φορτίο του θαλάμου καύσης Ω , το οποίο εκφράζεται από την Εξίσωση 4.1. Ο βαθμός απόδοσης εκτός σημείου σχεδιασμού υπολογίζεται από την Εξίσωση 4.2 με βάση το φορτίο και το βαθμό απόδοσης και το φορτίο στο σημείο σχεδιασμού. Στη σχέση αυτή περιλαμβάνεται η σταθερά μερικού φορτίου (b : part load constant), η οποία παίρνει τιμές από 1.6 – 2.2, με τιμή αναφοράς το 1.6. Στο Διάγραμμα 4.17 παρουσιάζεται η μεταβολή του φορτίου για διάφορες τιμές της παραμέτρου. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα, όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή αυτή, τόσο πιο απότομη είναι η μεταβολή του βαθμού απόδοσης με τη μεταβολή του φορτίου.

$$\Omega = \frac{\dot{m}_3}{P_{t3}^{1.8} \cdot e^{\frac{T_{t3}}{300}} \cdot Vol}$$

(Εξίσωση 4.1.)

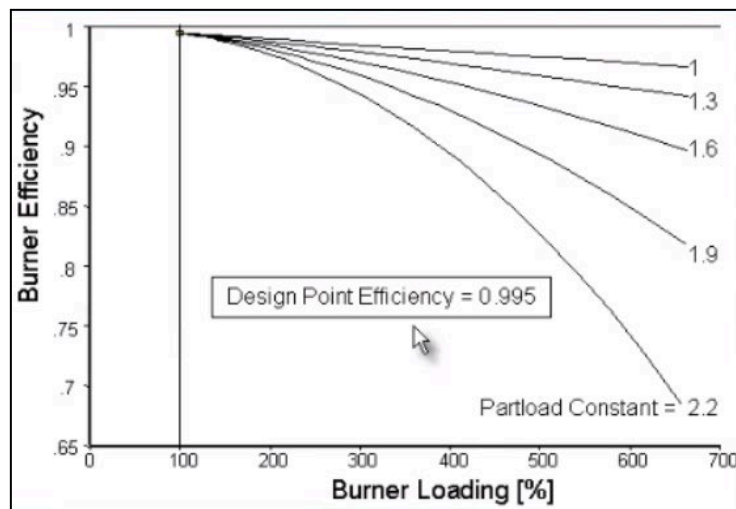
$$\log(1 - \eta_b) = \log(1 - \eta_{bdes}) + b \cdot \log\left(\frac{\Omega}{\Omega_{des}}\right)$$

(Εξίσωση 4.2.)

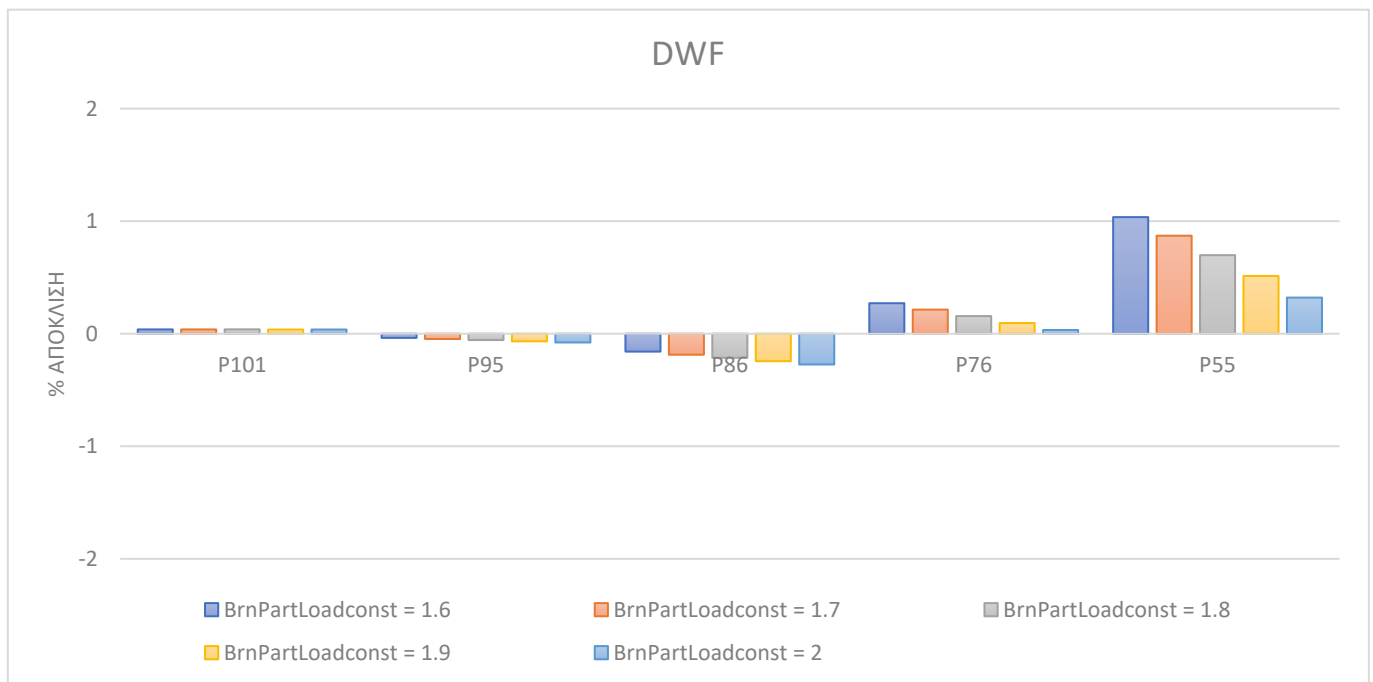
με $\dot{m}_3 \left(\frac{kg}{s}\right)$, $P_{t3}(bar)$, $T_{t3}(K)$ παροχή εισόδου, πίεση και θερμοκρασία στο θάλαμο καύσης

V_{ol} : όγκος θαλάμου καύσης

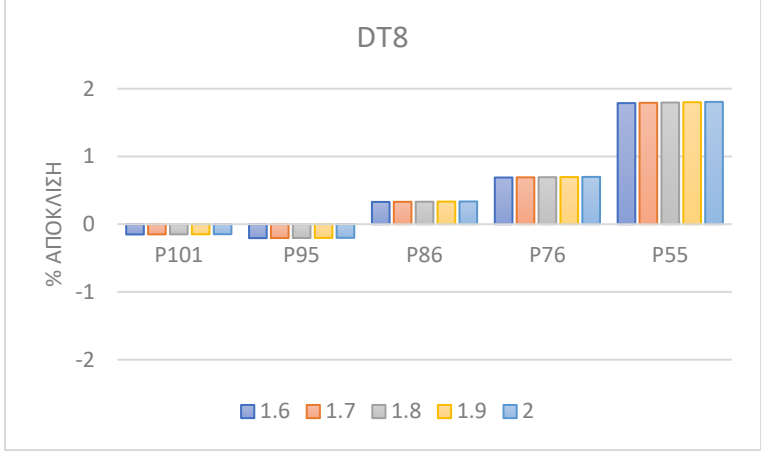
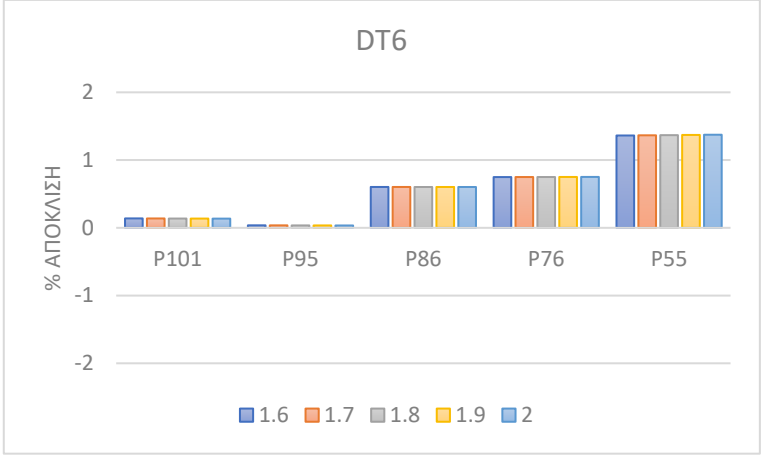
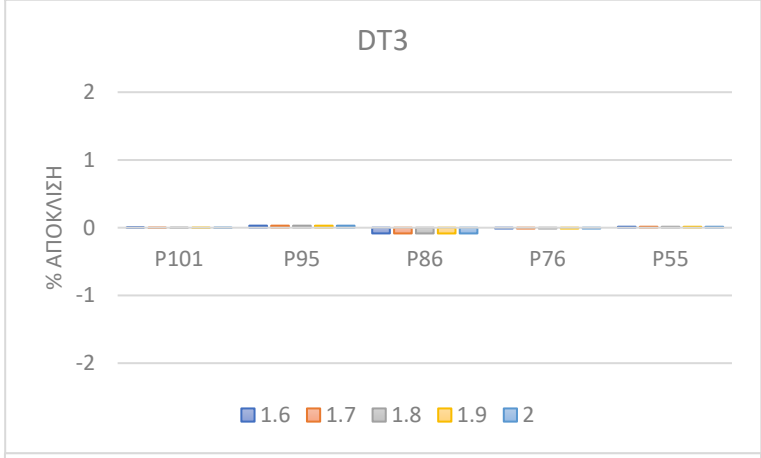
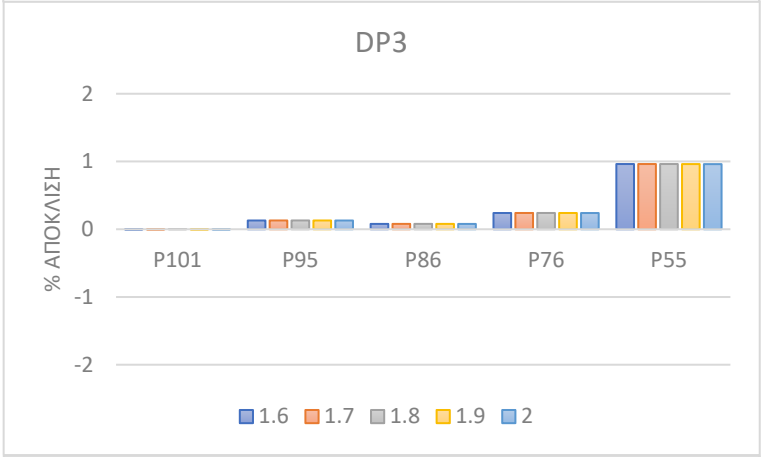
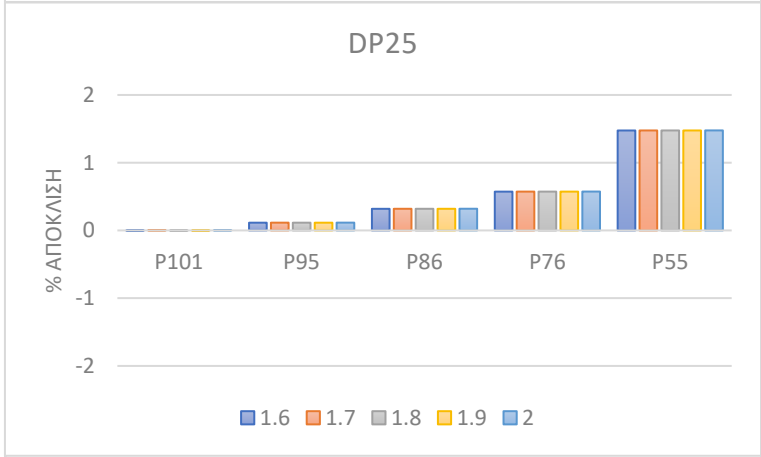
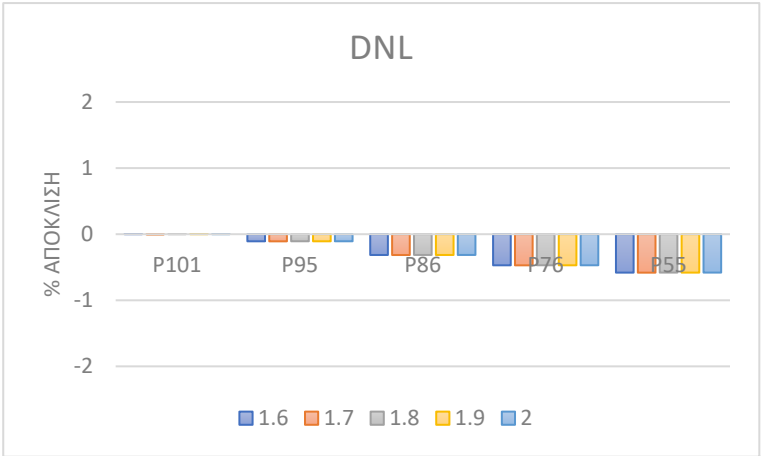
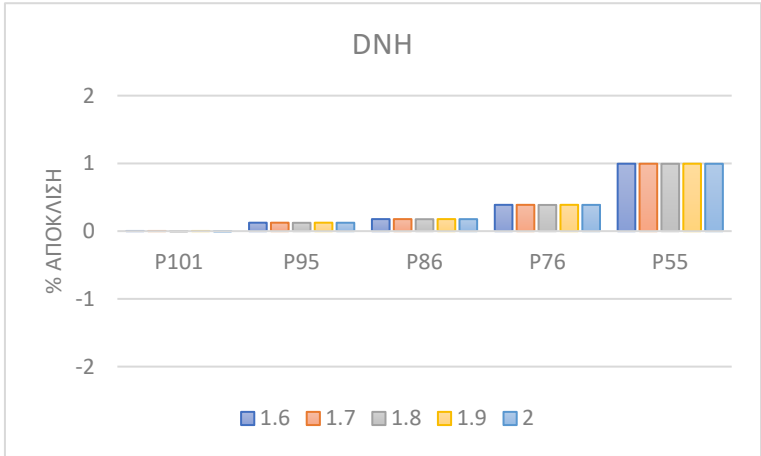
Στα πλαίσια της μελέτης αυτής, έγινε ανάλυση εκτός σημείου σχεδιασμού για 5 τιμές της μεταβλητής από 1.6 – 2. Οι αποκλίσεις του μοντέλου από τις μετρήσεις για τις διαφορετικές τιμές της παραμέτρου παρουσιάζονται στα Διαγράμματα 4.18 – 4.19.



Διάγραμμα 4.17. Βαθμός απόδοσης θαλάμου καύσης – Φορτίο



Διάγραμμα 4.18. Αποκλίσεις μοντέλου για την παροχή καυσίμου για διαφορετικές τιμές της σταθεράς μερικού φορτίου

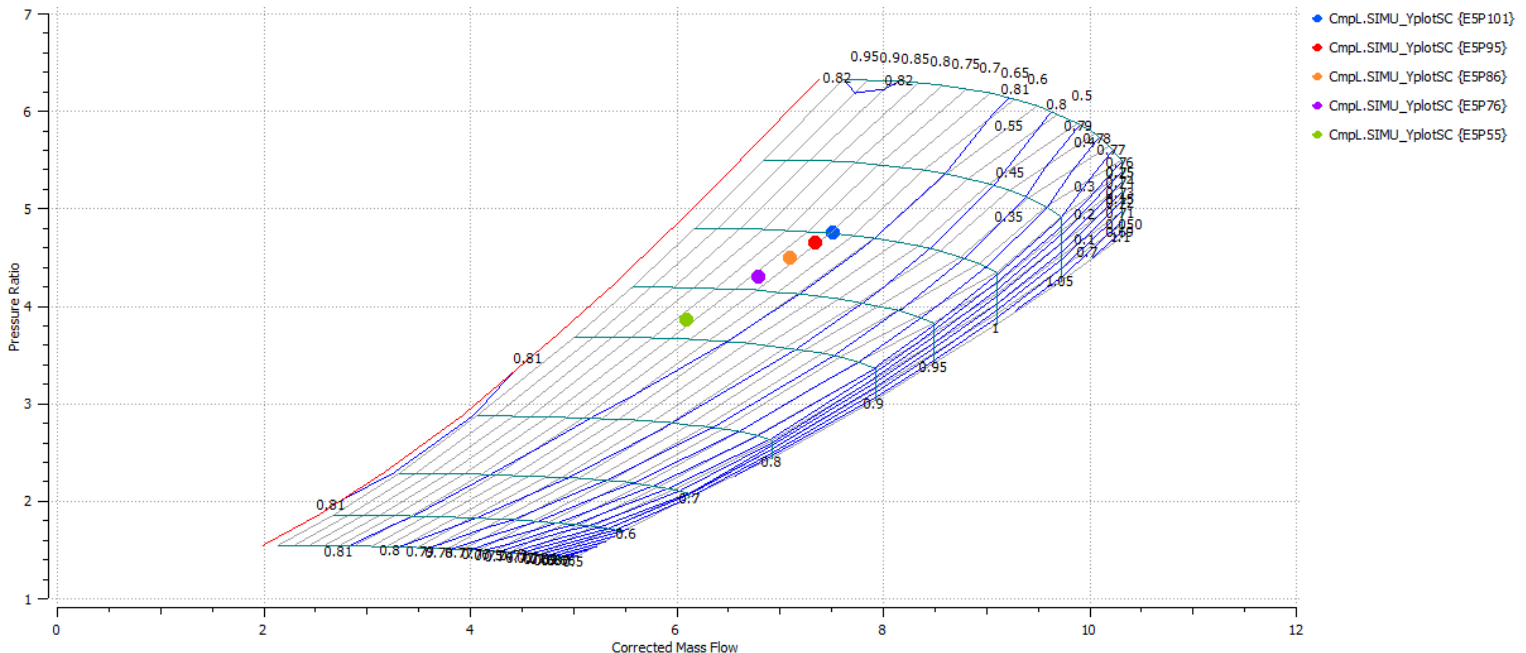


Διαγράμματα 4.19. Αποκλίσεις μοντέλου για τα μετρούμενα μεγέθη για διαφορετικές τιμές της σταθεράς μερικού φορτίου

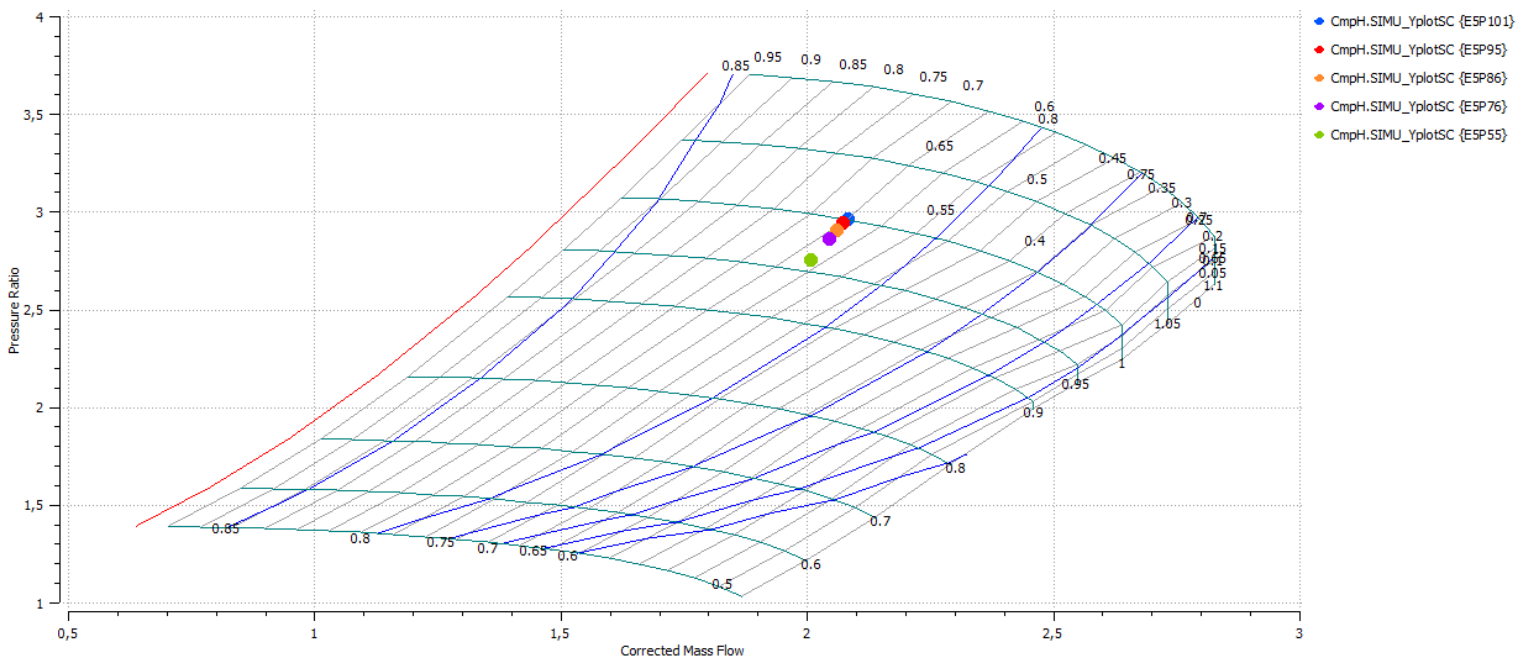
Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι όσο η τιμή της σταθεράς μερικού φορτίου αυξάνεται, τόσο οι αποκλίσεις της παροχής καυσίμου στα απομακρυσμένα σημεία (55%,76%) μειώνονται, ενώ οι αποκλίσεις των υπόλοιπων μετρήσεων δεν παρουσιάζουν σημαντικές αλλαγές. Άρα, η σταθερά μερικού φορτίου επηρεάζει μόνο την παροχή καυσίμου.

Στα πλαίσια της τρέχουσας μελέτης, δοκιμάστηκαν διαφορετικές τιμές της σταθεράς μερικού φορτίου και την καλύτερη συμπεριφορά στη συνολική προσαρμογή του μοντέλου είχε η τιμή 1.7. Συγκεκριμένα, με χρήση της τοπικής προσαρμογής, όπως θα δούμε παρακάτω, και προσπαθώντας να μειώσουμε τις αποκλίσεις και των υπόλοιπων μετρούμενων μεγεθών (DP25, DT8, DT6), επιτυγχάνεται σημαντική μείωση και στις αποκλίσεις του καυσίμου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η χρήση υψηλής τιμής της σταθεράς να δημιουργεί σημαντική αρνητική απόκλιση στο 55%. Από την άλλη πλευρά, η χρήση της τιμής 1.7 δίνει μία μικρή αρχική μείωση στην παροχή καυσίμου, η οποία μειώνεται περαιτέρω με την τοπική προσαρμογή, μένοντας όμως μέσα σε αποδεκτά όρια.

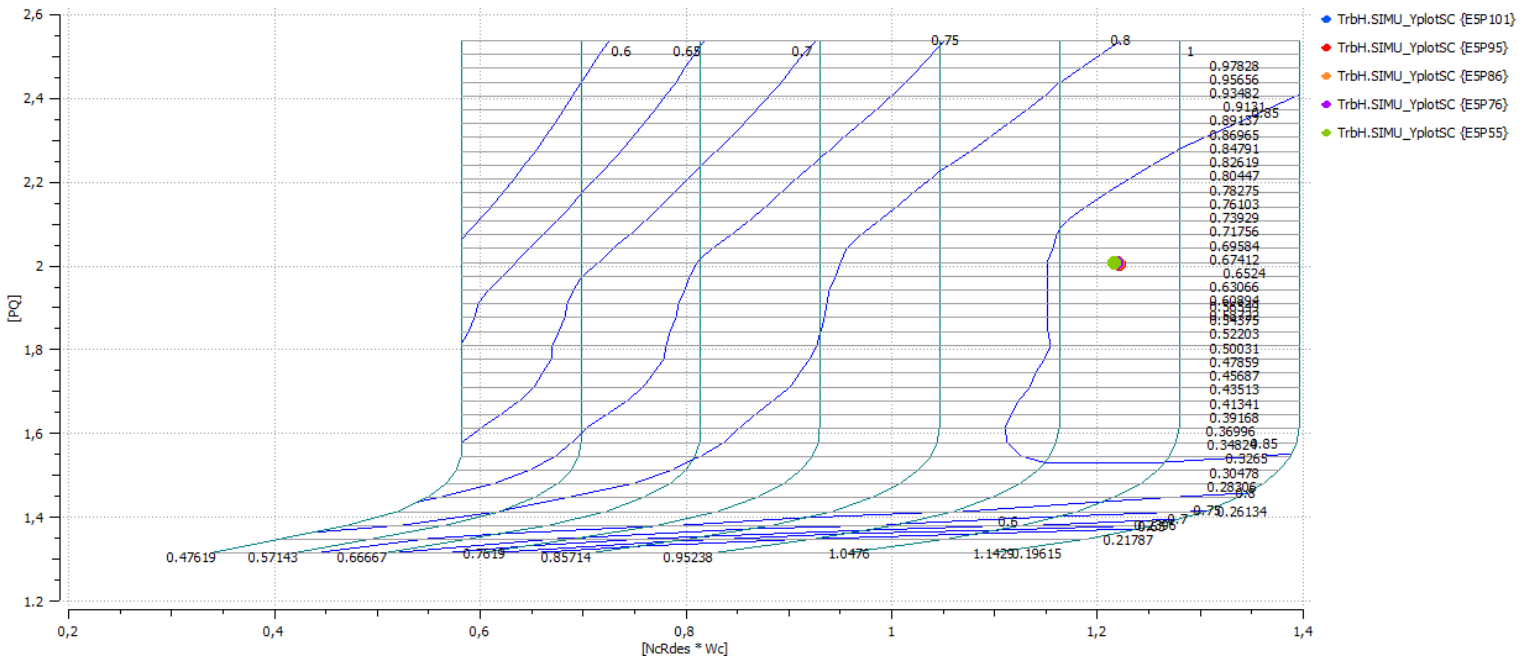
Στα Σχήματα 4.7 – 4.11 παρουσιάζονται τα σημεία εκτός σχεδιασμού πάνω στους αντίστοιχους χάρτες των συνιστωσών, χρησιμοποιώντας μεταβλητό βαθμό απόδοσης κιβωτίου και σταθερά μερικού φορτίου 1.7.



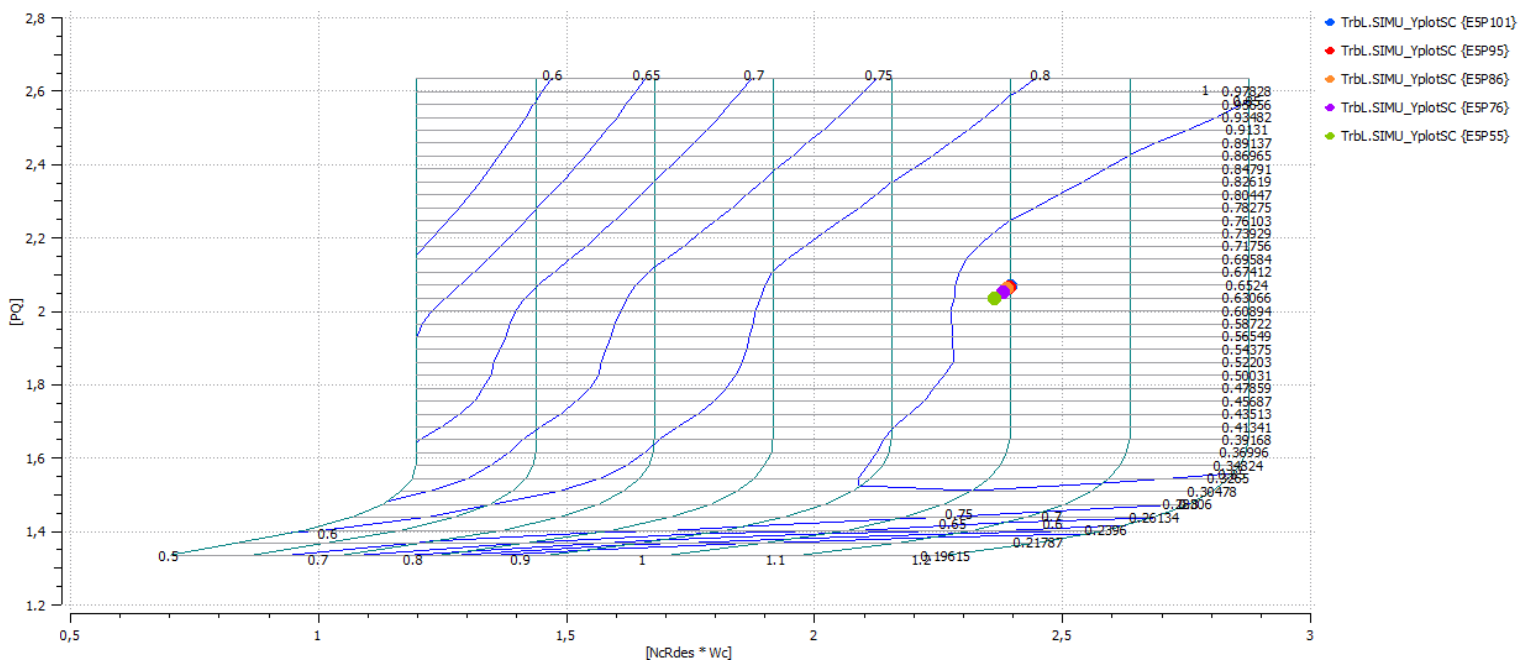
Σχήμα 4.7. Σημεία εκτός σχεδιασμού στο χάρτη του συμπιεστή χαμηλής πίεσης



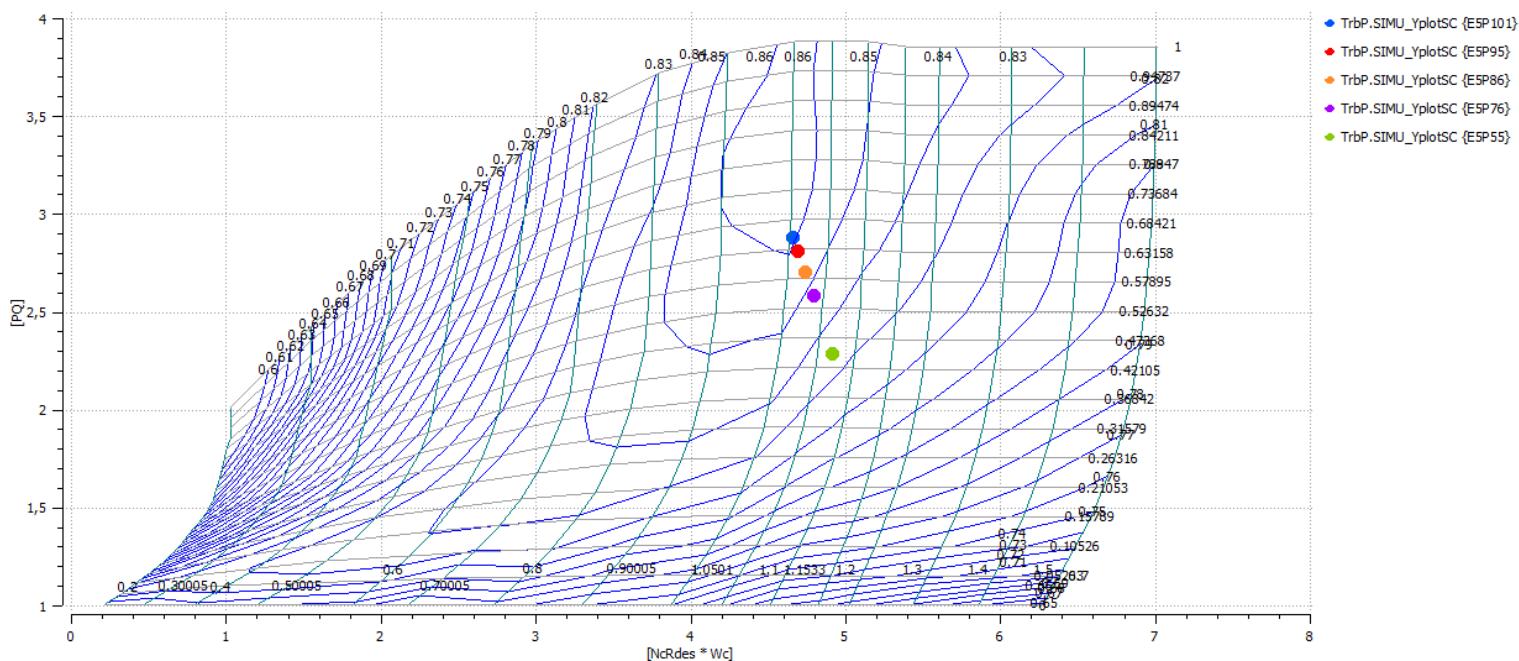
Σχήμα 4.8. Σημεία εκτός σχεδιασμού στο χάρτη του συμπιεστή υψηλής πίεσης



Σχήμα 4.9. Σημεία εκτός σχεδιασμού στο χάρτη του στροβίλου υψηλής πίεσης



Σχήμα 4.10. Σημεία εκτός σχεδιασμού στο χάρτη του στροβίλου χαμηλής πίεσης



Σχήμα 4.11. Σημεία εκτός σχεδιασμού στο χάρτη του στροβίλου ισχύος

Από τα παραπάνω σχήματα παρατηρούμε την αναμενόμενη συμπεριφορά για εκτός σημείου σχεδιασμού λειτουργία.

4.4. Ανάλυση λειτουργίας στο σημείο σχεδιασμού μέσω βελτιστοποίησης με διαφορετικά σημεία λειτουργίας

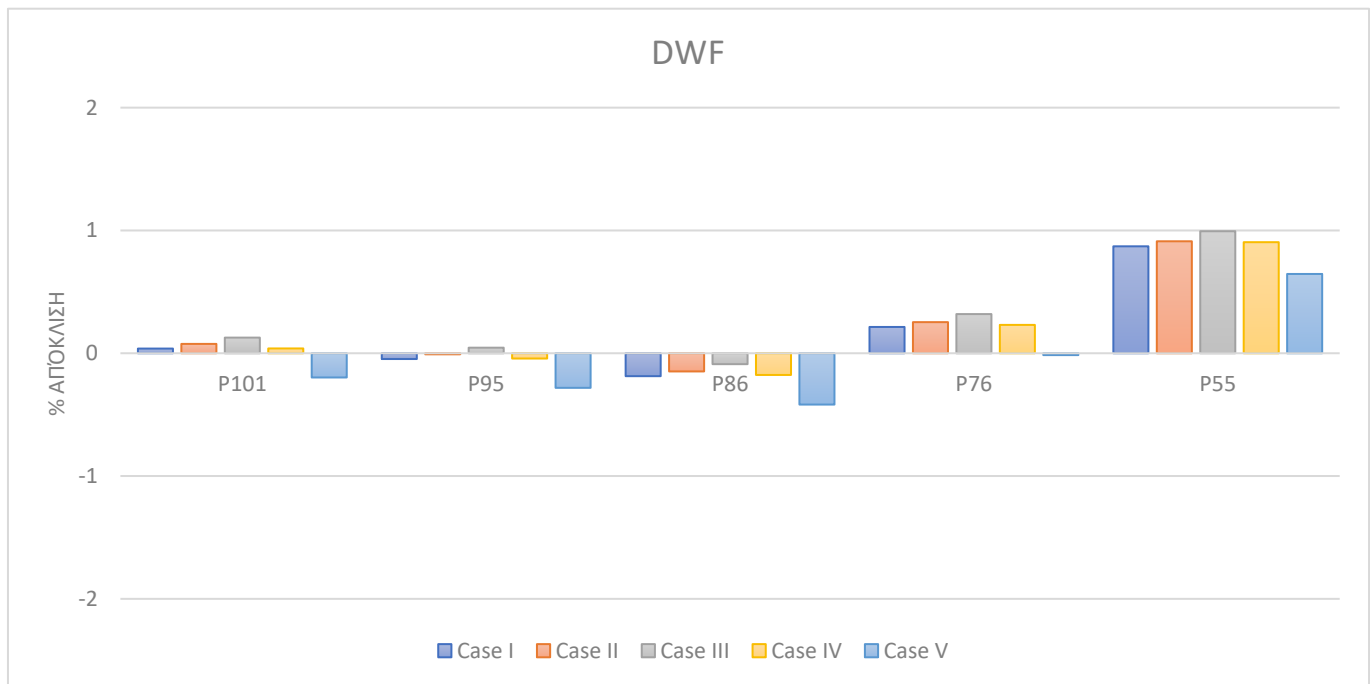
Πριν προχωρήσουμε στην τοπική προσαρμογή του μοντέλου, πραγματοποιήθηκε μία ανάλυση στο σημείο σχεδιασμού μέσω βελτιστοποίησης, αλλά με χρήση περισσότερων από ένα σημεία εκτός σημείου σχεδιασμού, με σκοπό να δούμε αν μπορούν να επιτευχθούν μικρότερες αποκλίσεις στα απομακρυσμένα σημεία. Συγκεκριμένα μελετήθηκαν οι εξής περιπτώσεις:

- Περίπτωση II: Βελτιστοποίηση με τα 101%, 95%
- Περίπτωση III: Βελτιστοποίηση με τα 101%, 95%,86%
- Περίπτωση IV: Βελτιστοποίηση με τα 101%, 95%,86%,76%
- Περίπτωση V: Βελτιστοποίηση με τα 101%, 95%,86%,76%,55%

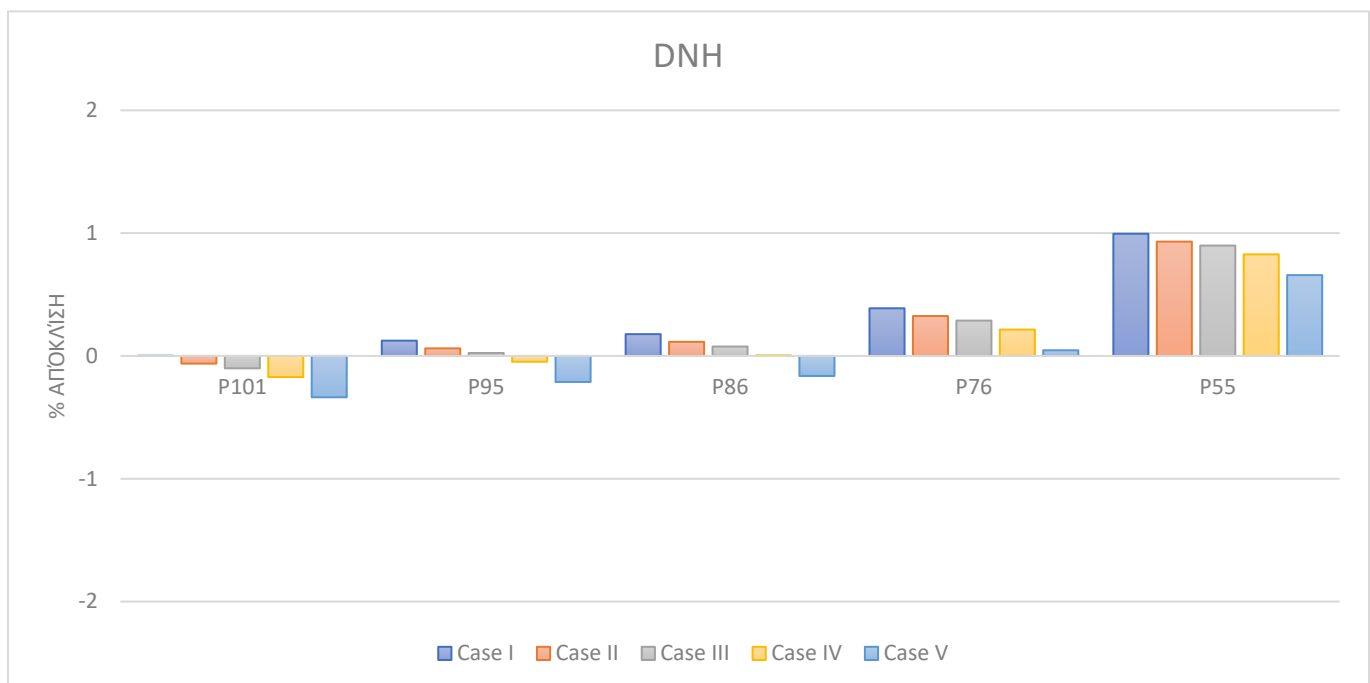
Οι αποκλίσεις των μετρήσεων για τις παραπάνω περιπτώσεις συγκρίνονται με αυτές της βελτιστοποίησης με το 101% (Περίπτωση I) και παρουσιάζονται στα Διαγράμματα 4.20 – 4.27.

Από τα διαγράμματα αυτά παρατηρούμε ότι για τα περισσότερα μετρούμενα μεγέθη, οι διαφορές αυξάνονται όσο απομακρυνόμαστε από το σημείο σχεδιασμού, όπως αναμένεται. Όταν λαμβάνουμε όλα τα σημεία υπόψιν (Περίπτωση V), το λογισμικό καταλήγει σε μία μέση λύση μειώνοντας τις αποκλίσεις στο 55%, αλλά αυξάνοντας τις αποκλίσεις στα υπόλοιπα σημεία.

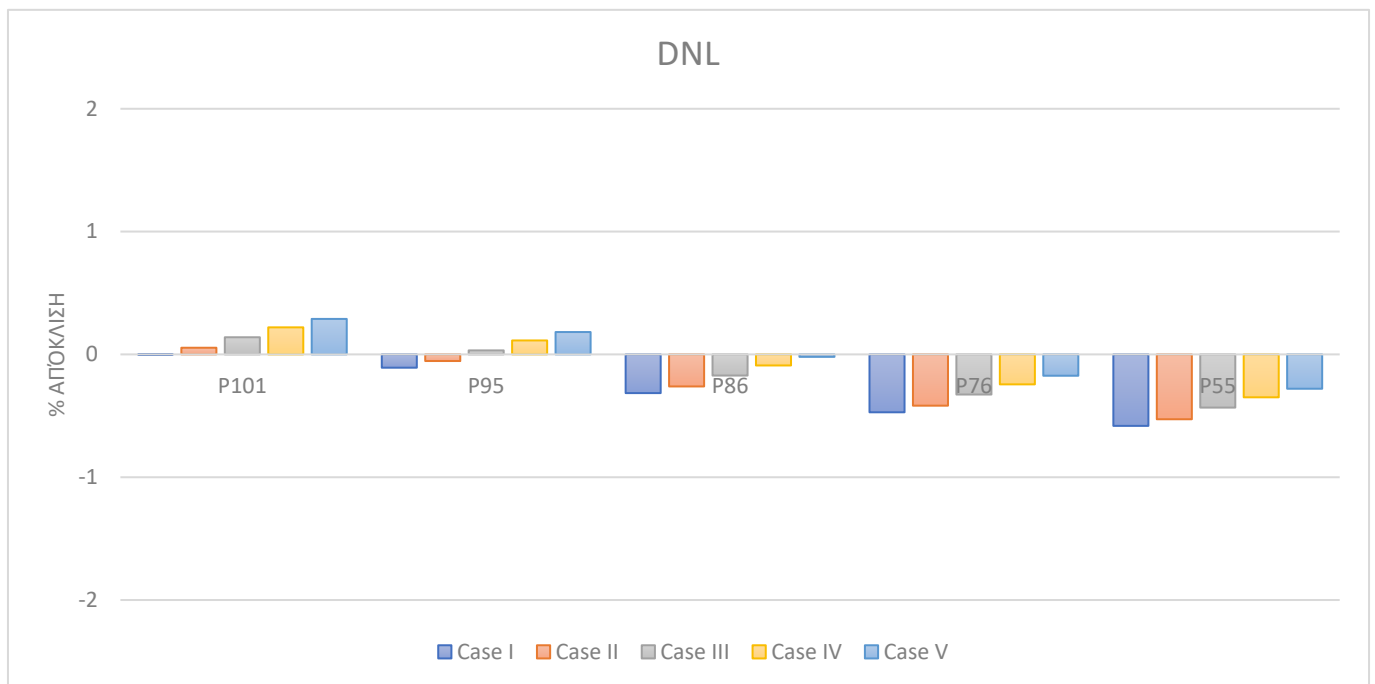
Επομένως, θεωρώντας σημαντική προϋπόθεση δημιουργίας του μοντέλου να είναι πολύ καλά προσαρμοσμένο στις υψηλές τιμές ισχύος, καθώς με βάση αυτές τις τιμές το προσωπικό του δοκιμαστηρίου θα ελέγξει κατά πόσο ο κινητήρας είναι εντός ή εκτός ορίων, τελικά επιλέγεται η Περίπτωση I.



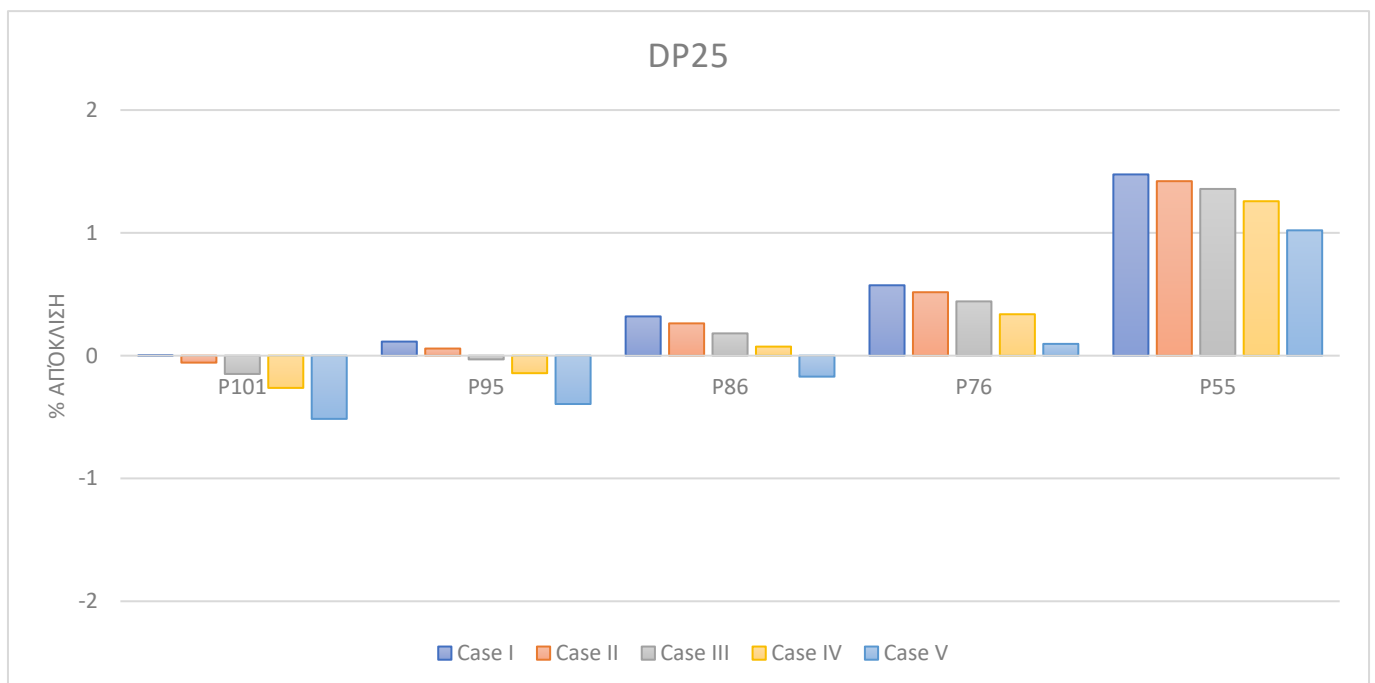
Διάγραμμα 4.20. Αποκλίσεις μεταξύ υπολογιζόμενης και δεδομένης παροχής καυσίμου για τις 5 διαφορετικές περιπτώσεις βελτιστοποίησης



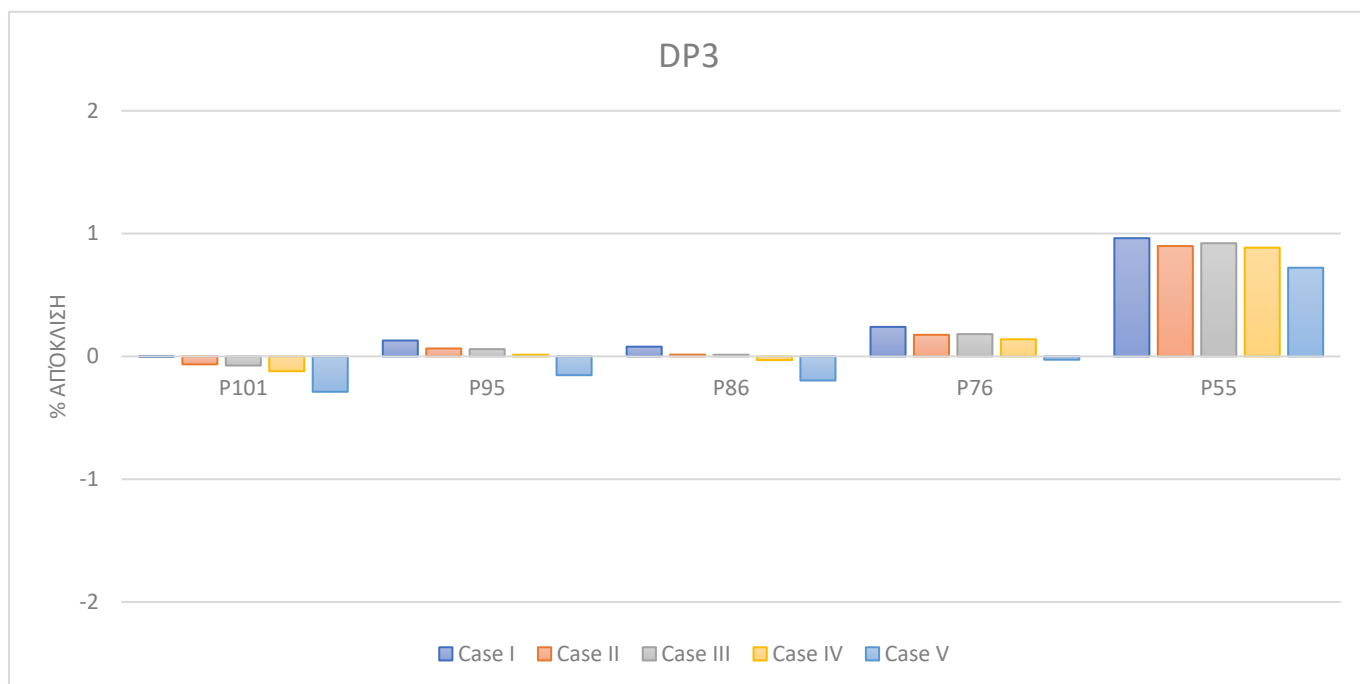
Διάγραμμα 4.21. Αποκλίσεις μεταξύ υπολογιζόμενων και δεδομένων στροφών περιστροφής άξονα υψηλής πίεσης για τις 5 διαφορετικές περιπτώσεις βελτιστοποίησης



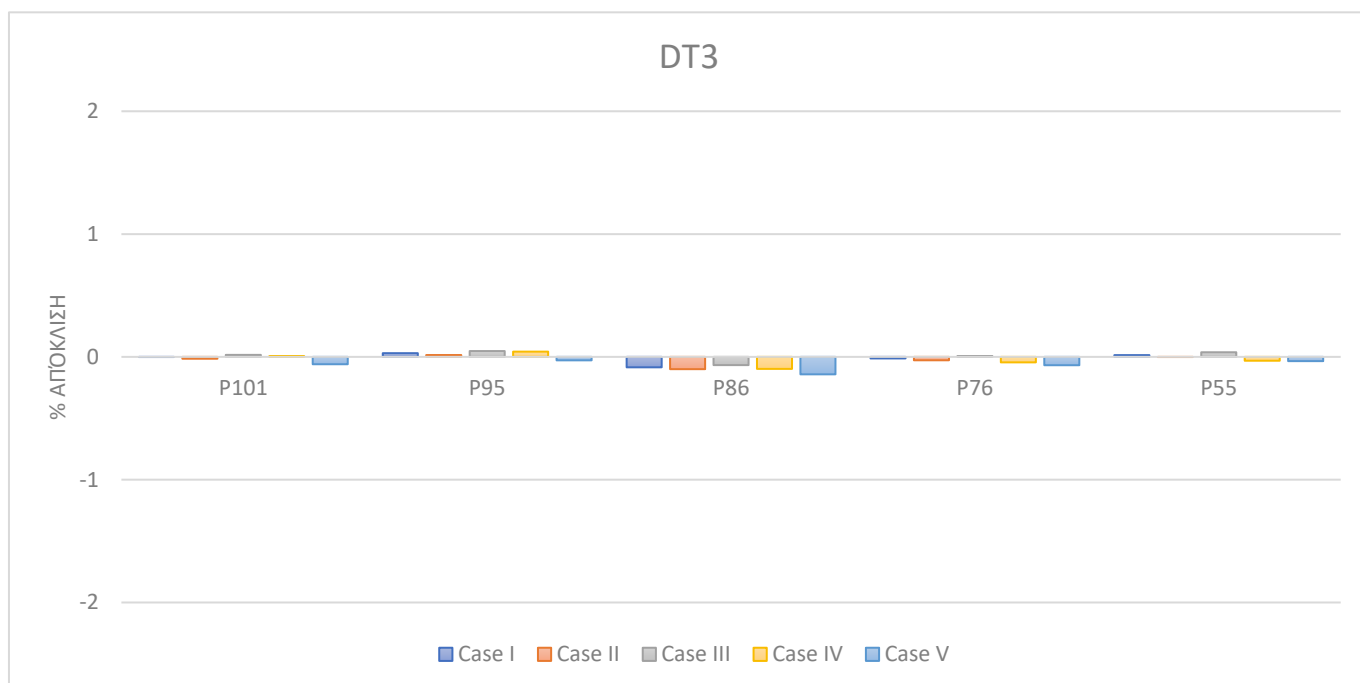
Διάγραμμα 4.22. Αποκλίσεις μεταξύ υπολογιζόμενων και δεδομένων στροφών περιστροφής άξονα χαμηλής πίεσης για τις 5 διαφορετικές περιπτώσεις βελτιστοποίησης



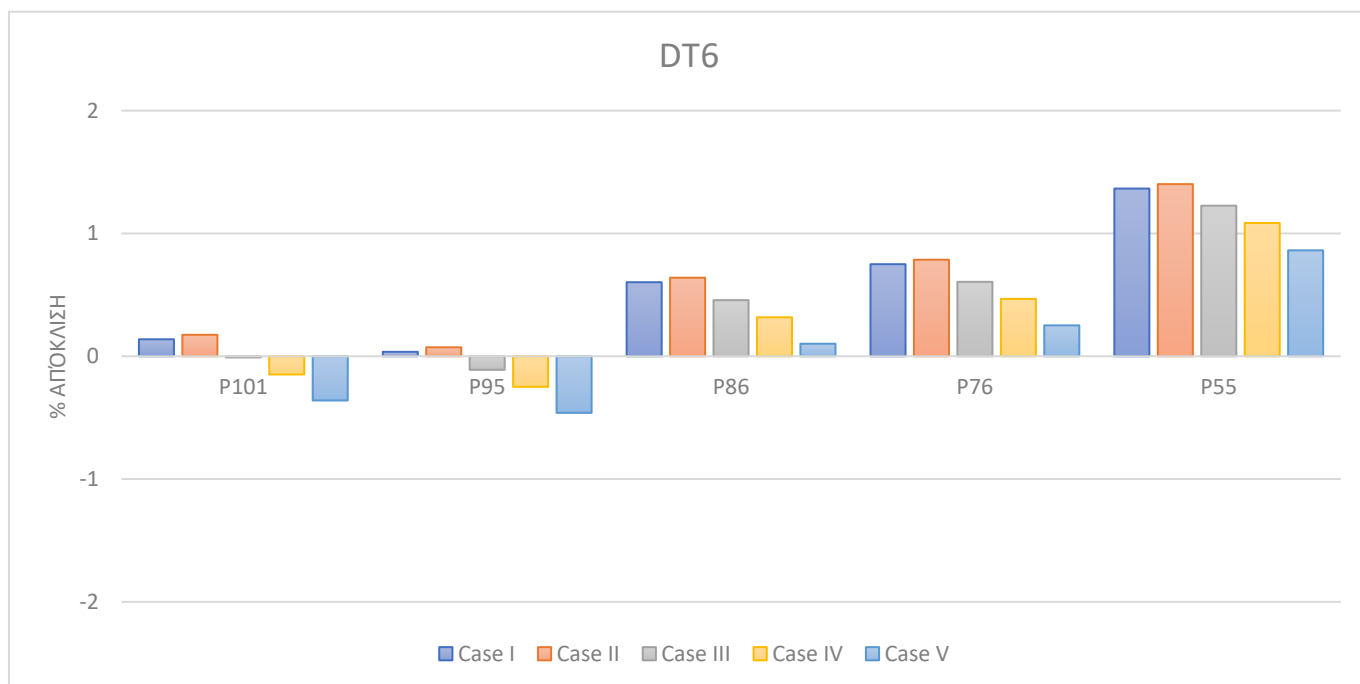
Διάγραμμα 4.23. Αποκλίσεις μεταξύ υπολογιζόμενης και δεδομένης πίεσης εξόδου συμπιεστή χαμηλής πίεσης για τις 5 διαφορετικές περιπτώσεις βελτιστοποίησης



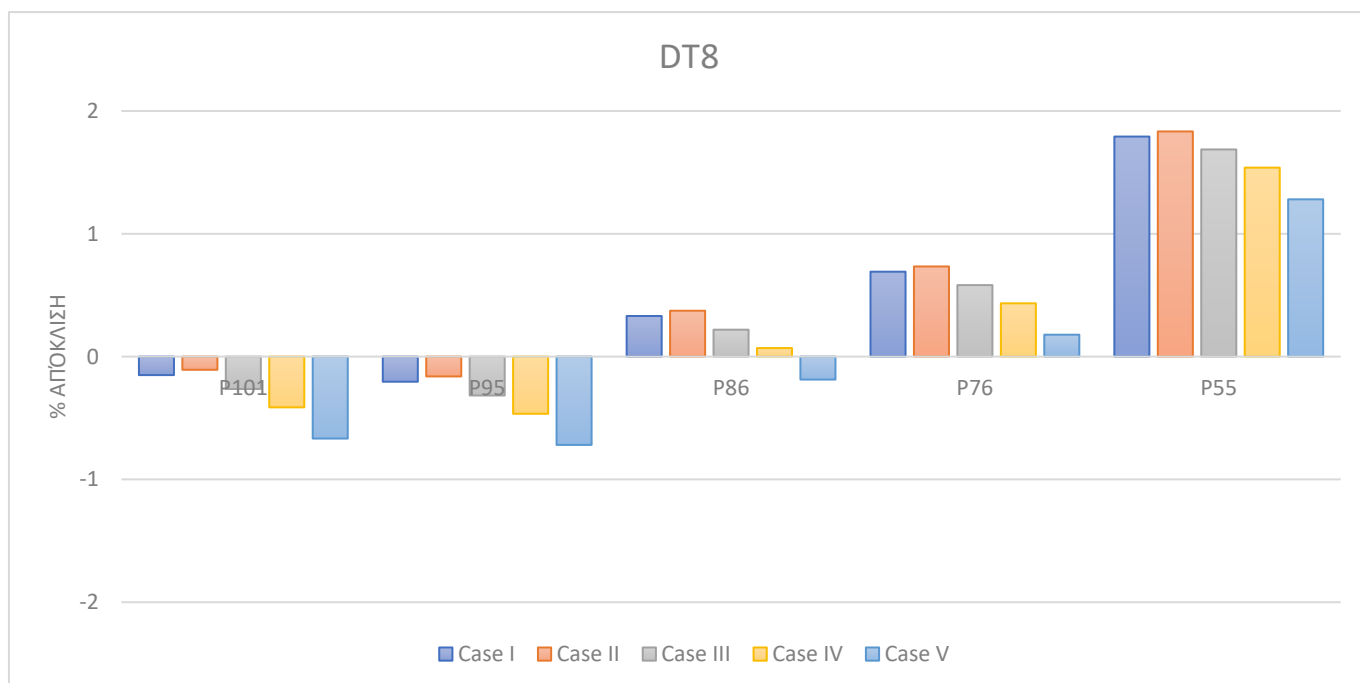
Διάγραμμα 4.24. Αποκλίσεις μεταξύ υπολογιζόμενης και δεδομένης πίεσης εξόδου του συμπιεστή υψηλής πίεσης για τις 5 διαφορετικές περιπτώσεις βελτιστοποίησης



Διάγραμμα 4.25. Αποκλίσεις μεταξύ υπολογιζόμενης και δεδομένης θερμοκρασίας εξόδου του συμπιεστή υψηλής πίεσης για τις 5 διαφορετικές περιπτώσεις βελτιστοποίησης



Διάγραμμα 4.26. Αποκλίσεις μεταξύ υπολογιζόμενης και δεδομένης θερμοκρασίας μεταξύ του στροβίλου χαμηλής πίεσης και του στροβίλου ισχύος για τις 5 διαφορετικές περιπτώσεις βελτιστοποίησης



Διάγραμμα 4.27. Αποκλίσεις μεταξύ υπολογιζόμενης και δεδομένης θερμοκρασίας εξόδου των καυσαερίων για τις 5 διαφορετικές περιπτώσεις βελτιστοποίησης

4.5. Τοπική προσαρμογή

Για να θεωρείται ένα μοντέλο ικανοποιητικής ακρίβειας πρέπει οι αποκλίσεις όλων των μετρήσεων να είναι μέσα στο εύρος $\pm 1\%$. Από την ανάλυση εκτός σημείου σχεδιασμού παρατηρούμε ότι εκτός αυτών των ορίων βρίσκονται οι αποκλίσεις των μεγεθών P25, T6 και T8 για το 55% της ισχύος. Για να μπορέσουμε να μειώσουμε τις αποκλίσεις αυτές είναι απαραίτητη η τοπική προσαρμογή των χαρτών. Για το σκοπό αυτό θα χρησιμοποιήσουμε την αυτοματοποιημένη διαδικασία τοπικής προσαρμογής – MODE 8 που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

Αρχικά πρέπει να γίνει η επιλογή των συντελεστών προσαρμογής που είναι οι πιο κατάλληλοι για την τοπική προσαρμογή. Από το χάρτη του συμπιεστή χαμηλής πίεσης (Σχήμα 4.7) παρατηρούμε ότι το 55% της ισχύος βρίσκεται ανάμεσα στις χαρακτηριστικές 0.9 – 0.95, άρα προσαρμόζοντας τοπικά τις χαρακτηριστικές αυτές, μπορούμε να μειώσουμε τις αποκλίσεις. Στο συμπιεστή υψηλής όλα τα σημεία βρίσκονται μεταξύ 0.95 – 1, επομένως αν αλλάξουμε τη χαρακτηριστική 0.95 δε θα επηρεάσουμε μόνο το 55%, αλλά και όλα τα υπόλοιπα σημεία. Ομοίως στους στροβίλους υψηλής και χαμηλής πίεσης τα σημεία είναι κοντά και αναμένεται η ίδια συμπεριφορά. Στο χάρτη του στροβίλου ισχύος (Σχήμα 4.11) το 55% βρίσκεται ανάμεσα στις χαρακτηριστικές 1.1 – 1.15, άρα μπορούμε να προσαρμόσουμε τοπικά τις χαρακτηριστικές αυτές.

Με βάση τα παραπάνω, επιλέγουμε τους εξής 3 συντελεστές προσαρμογής:

- CmpL.s_adaptEff_in
- TrbP.s_adaptWc_in
- TrbP.s_adaptEff_in

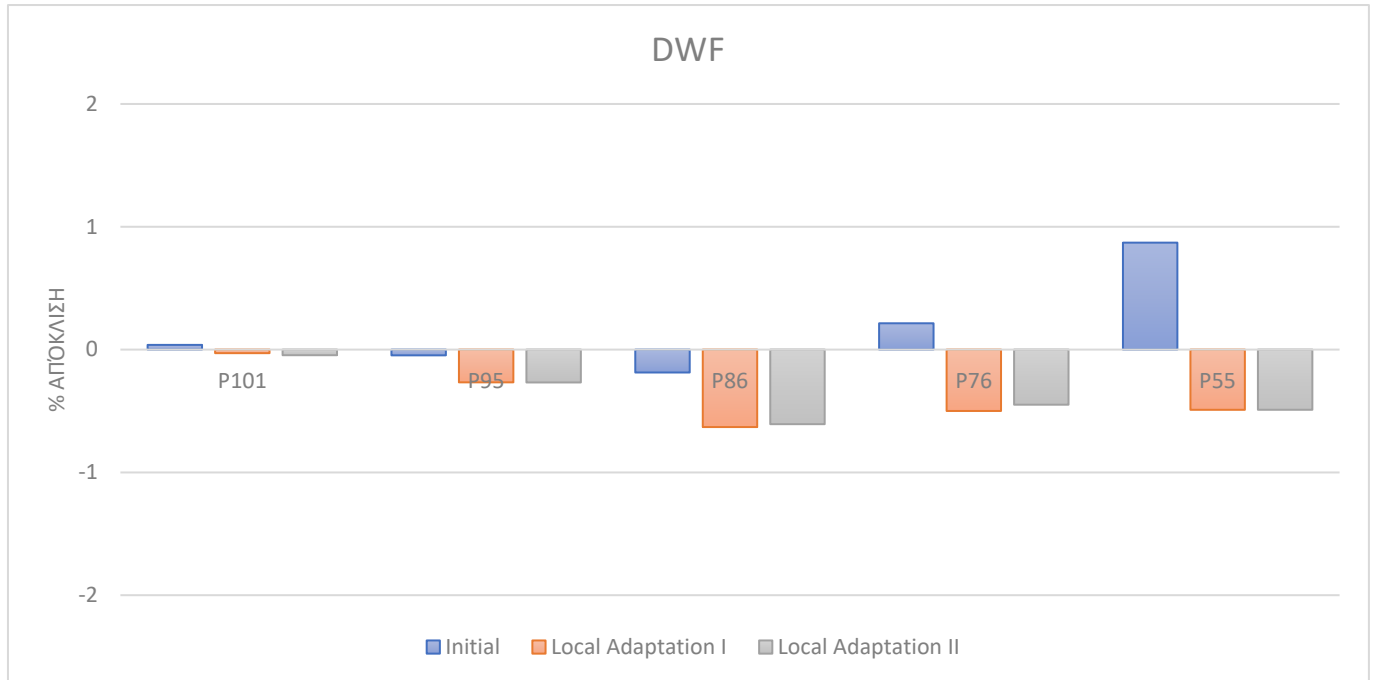
Στη συνέχεια, θα πρέπει να επιλέξουμε τα σημεία εκτός σημείου σχεδιασμού που θα χρησιμοποιήσουμε για την τοπική προσαρμογή. Προφανώς το πρώτο σημείο είναι το 55% , ενώ στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, επιλέγεται και ένα επιπλέον σημείο το 76%, προκειμένου να διαπιστωθεί κατά πόσο μπορούν να επιτευχθούν μικρότερες αποκλίσεις. Συγκεκριμένα μελετήθηκαν οι εξής περιπτώσεις:

- Local Adaptation I: τοπική προσαρμογή με το σημείο 55%
- Local Adaptation II: τοπική προσαρμογή με τα σημεία 55% και 76%

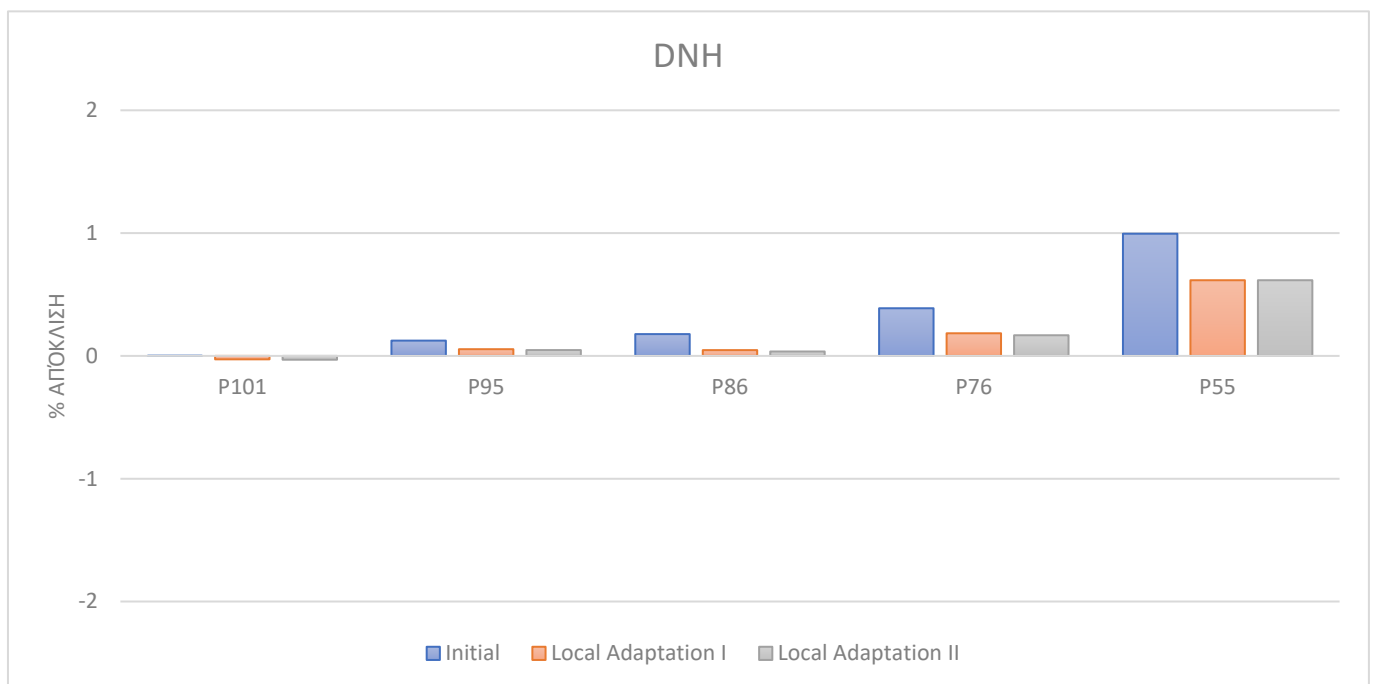
Τα αποτελέσματα των αποκλίσεων και η σύγκριση με τα αποτελέσματα του αρχικού μοντέλου φαίνονται παρακάτω. (Διάγραμμα 4.28 – Διάγραμμα 4.35)

Από τα διαγράμματα αυτά παρατηρούμε ότι οι αποκλίσεις όλων των μετρήσεων μετά την τοπική προσαρμογή βρίσκονται μέσα στο $\pm 1\%$ ενώ η χρήση ενός επιπλέον σημείου (76%)

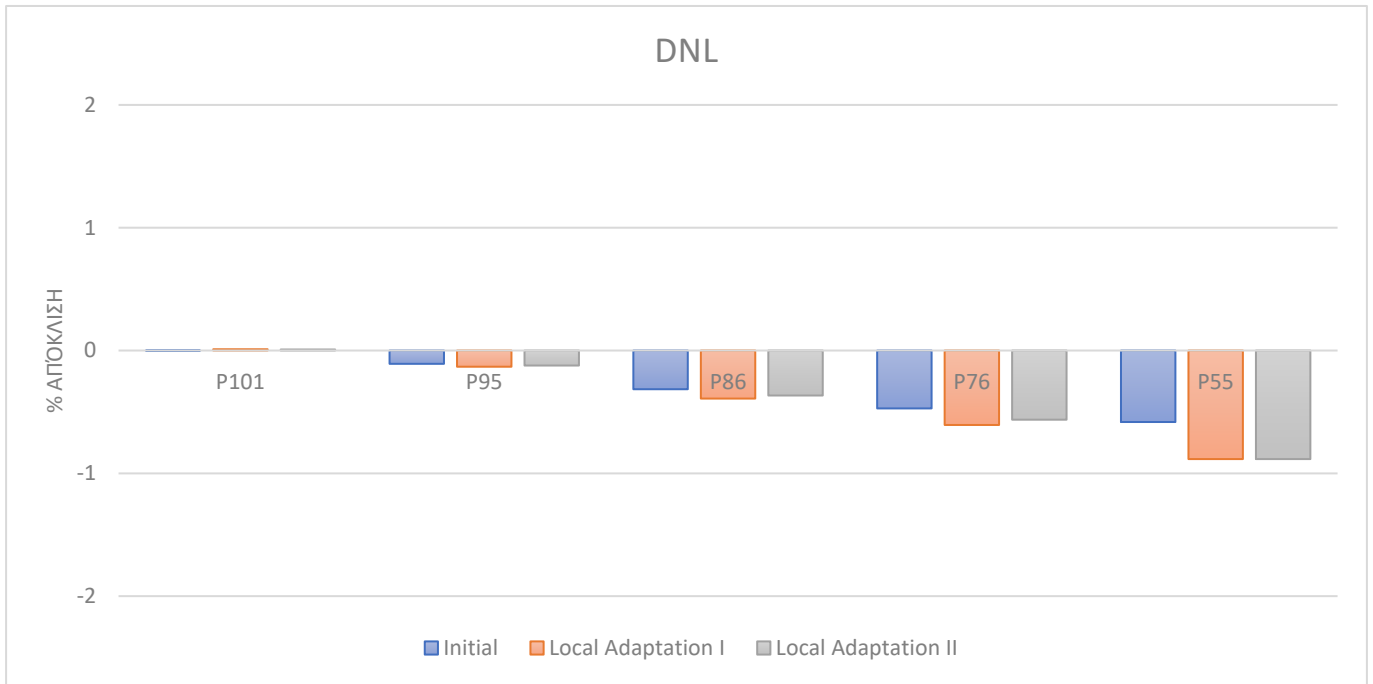
δεν επιφέρει σημαντικές αλλαγές στις αποκλίσεις. Η τοπική προσαρμογή έχει σαν αποτέλεσμα μία μικρή αύξηση στις αποκλίσεις που παρατηρούνταν πριν την προσαρμογή, στη θερμοκρασία εξόδου από το συμπιεστή υψηλής πίεσης και στις στροφές χαμηλής, σε αντίθεση με όλα τα άλλα μεγέθη.



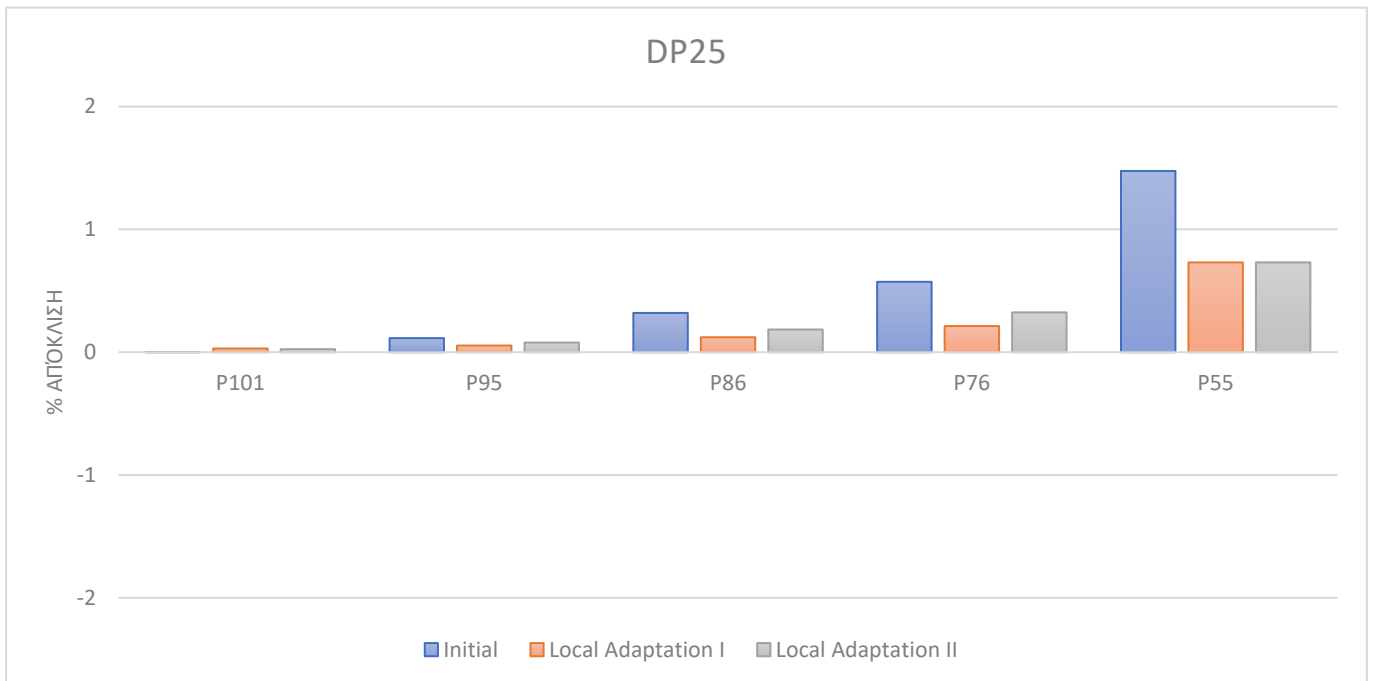
Διάγραμμα 4.28. Αποκλίσεις παροχής καυσίμου για το αρχικό μοντέλο και τα μοντέλα μετά τις τοπικές προσαρμογές



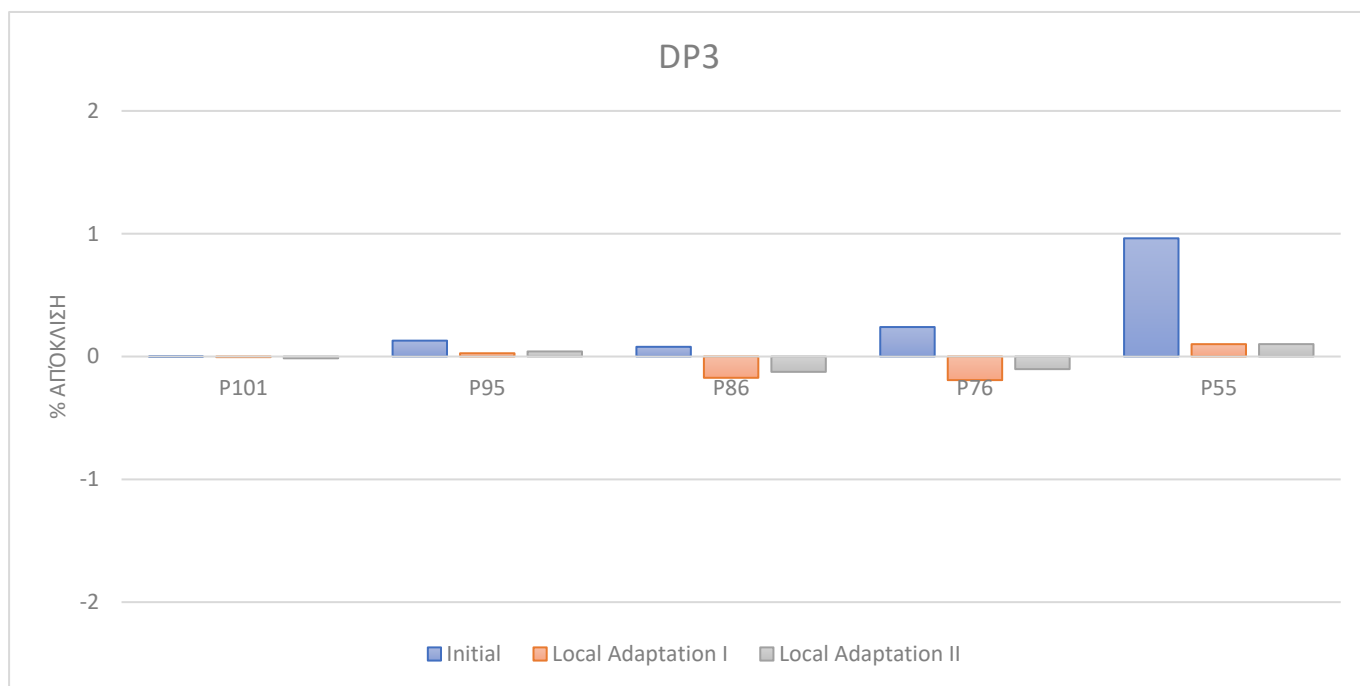
Διάγραμμα 4.29. Αποκλίσεις στροφών περιστροφής άξονα υψηλής πίεσης για το αρχικό μοντέλο και τα μοντέλα μετά τις τοπικές προσαρμογές



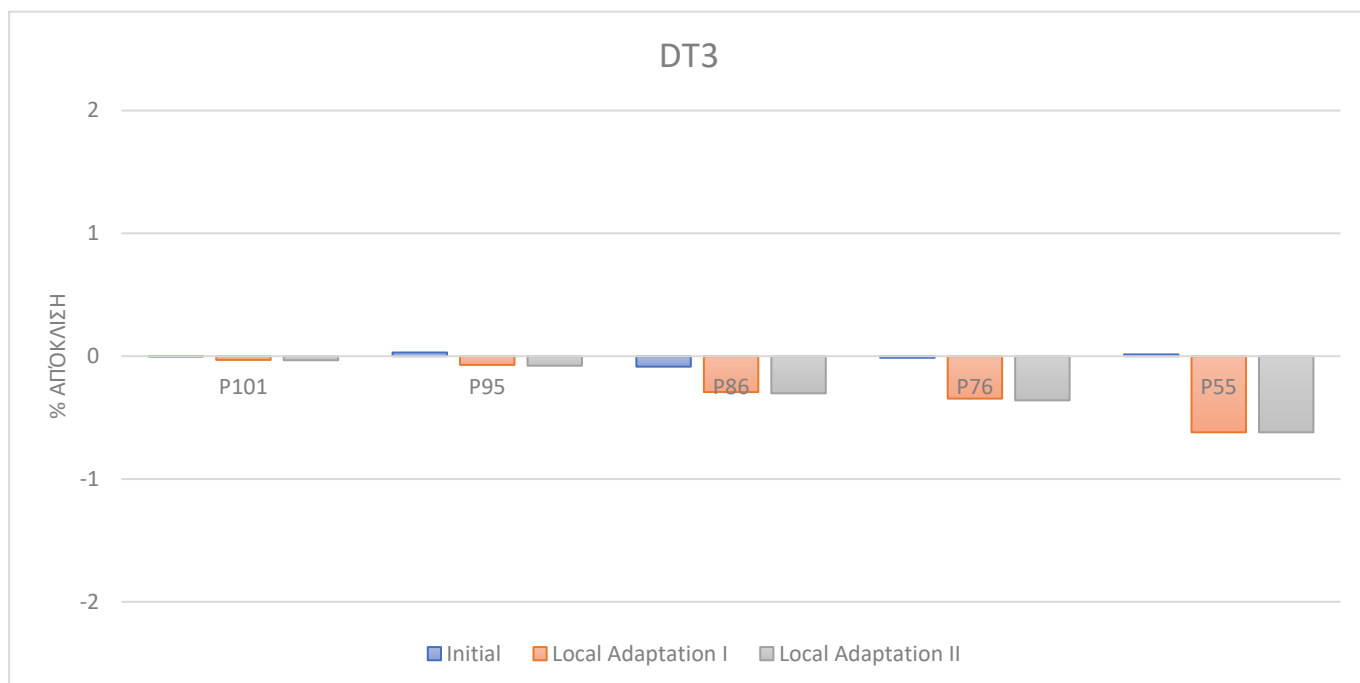
Διάγραμμα 4.30. Αποκλίσεις στρωφών περιστροφής άξονα χαμηλής πίεσης για το αρχικό μοντέλο και τα μοντέλα μετά τις τοπικές προσαρμογές



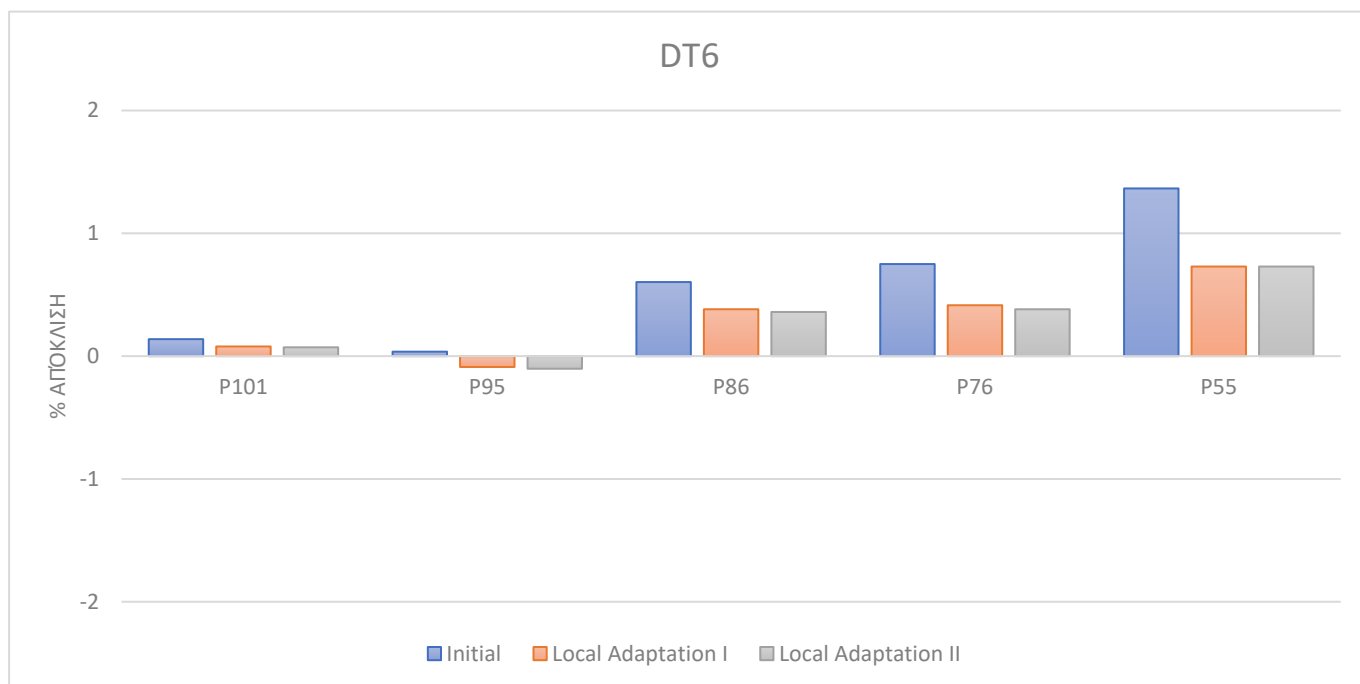
Διάγραμμα 4.31. Αποκλίσεις πίεσης εξόδου του συμπιεστή χαμηλής πίεσης για το αρχικό μοντέλο και τα μοντέλα μετά τις τοπικές προσαρμογές



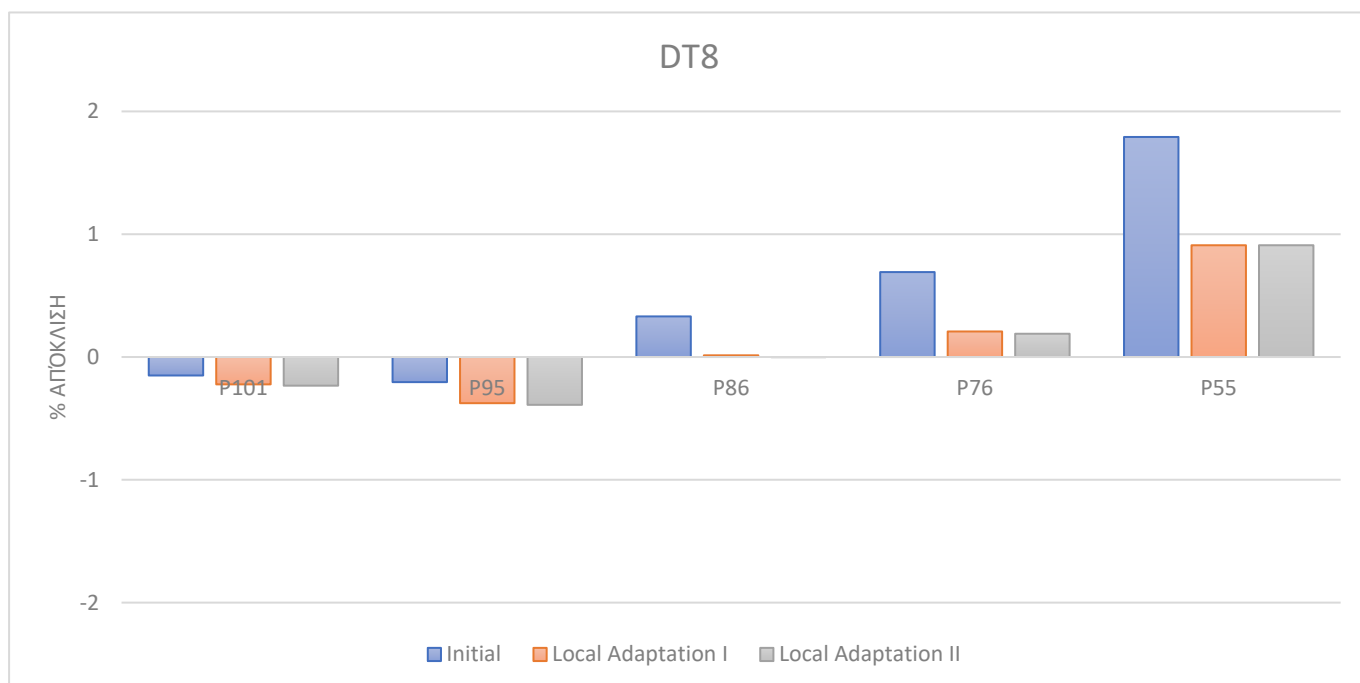
Διάγραμμα 4.32. Αποκλίσεις πίεσης εξόδου του συμπιεστή υψηλής πίεσης για το αρχικό μοντέλο και τα μοντέλα μετά τις τοπικές προσαρμογές



Διάγραμμα 4.33. Αποκλίσεις θερμοκρασίας εξόδου του συμπιεστή υψηλής πίεσης για το αρχικό μοντέλο και τα μοντέλα μετά τις τοπικές προσαρμογές

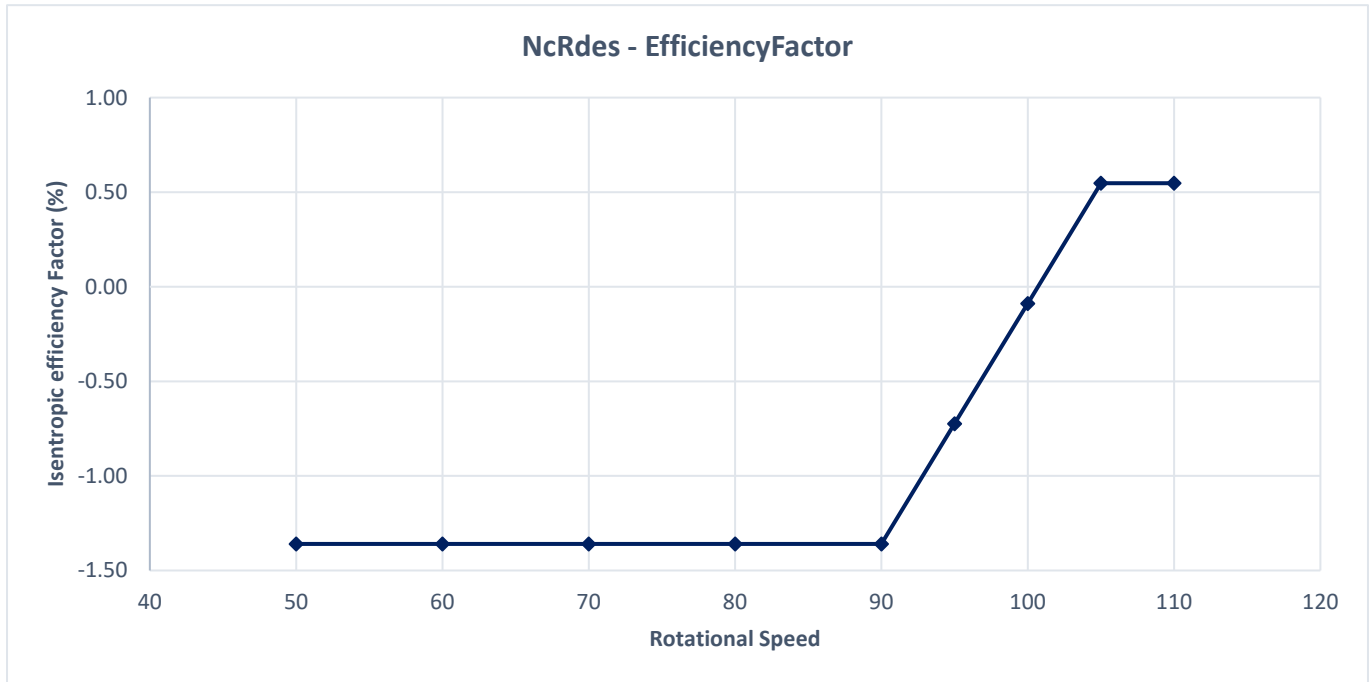


Διάγραμμα 4.34. Αποκλίσεις θερμοκρασίας μεταξύ στροβίλων για το αρχικό μοντέλο και τα μοντέλα μετά τις τοπικές προσαρμογές

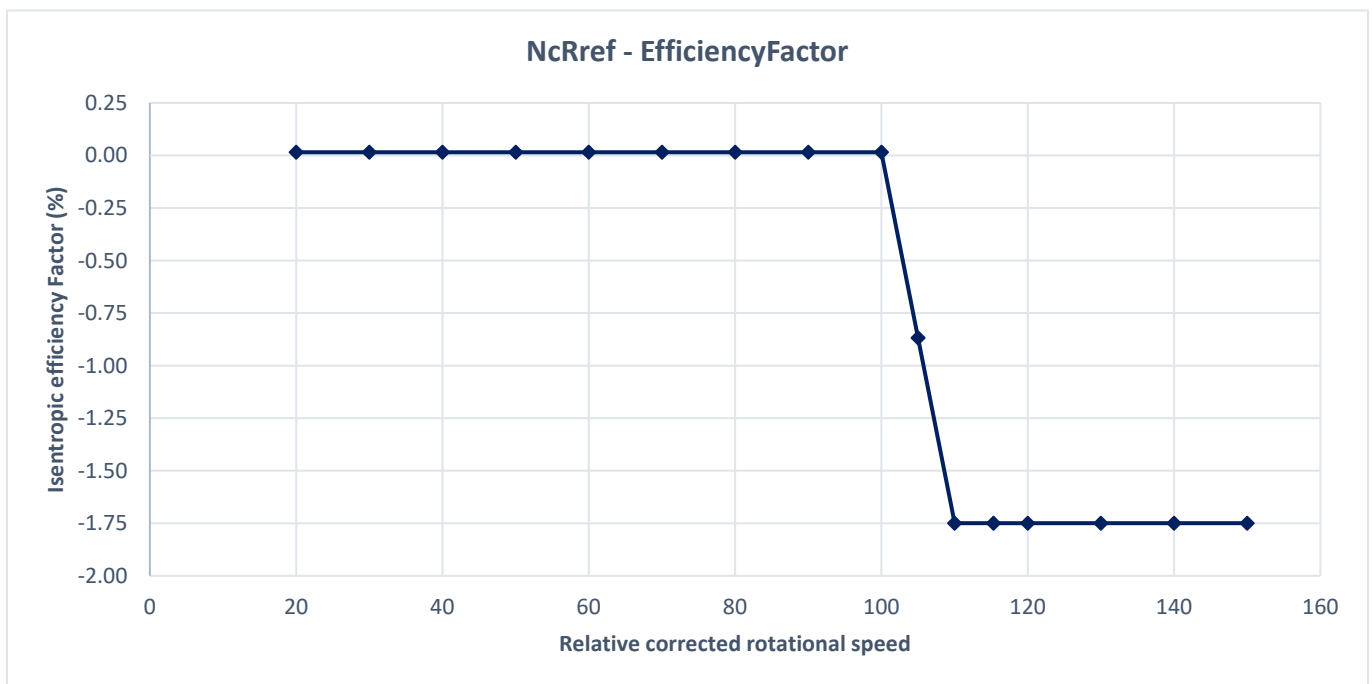


Διάγραμμα 4.35. Αποκλίσεις θερμοκρασίας εξόδου καυσαερίων για το αρχικό μοντέλο και τα μοντέλα μετά τις τοπικές προσαρμογές

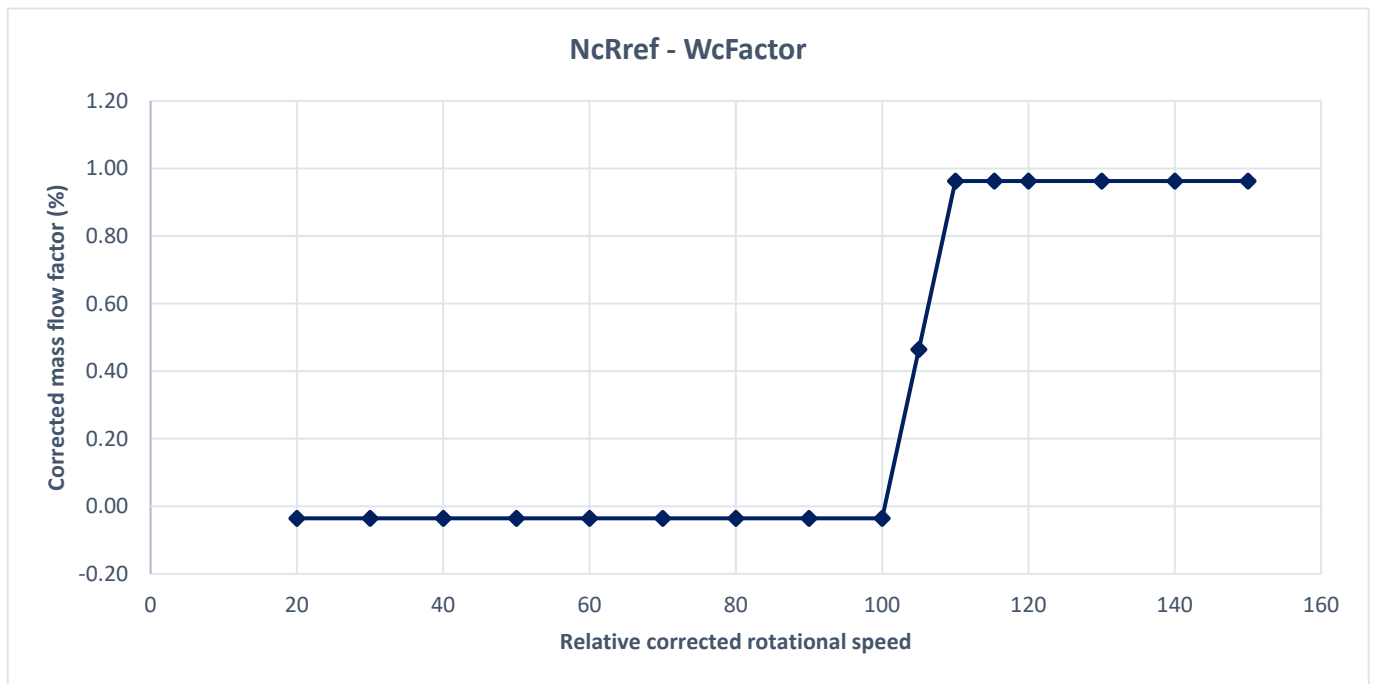
Στα Διαγράμματα 4.36 – 4.38 παρουσιάζεται η μεταβολή των συντελεστών προσαρμογής συναρτήσει των στροφών, μετά την τοπική προσαρμογή με χρήση μόνο του 55%, ενώ στα Σχήματα 4.12 – 4.16 παρουσιάζονται οι χάρτες όλων των συνιστωσών μετά την τοπική προσαρμογή.



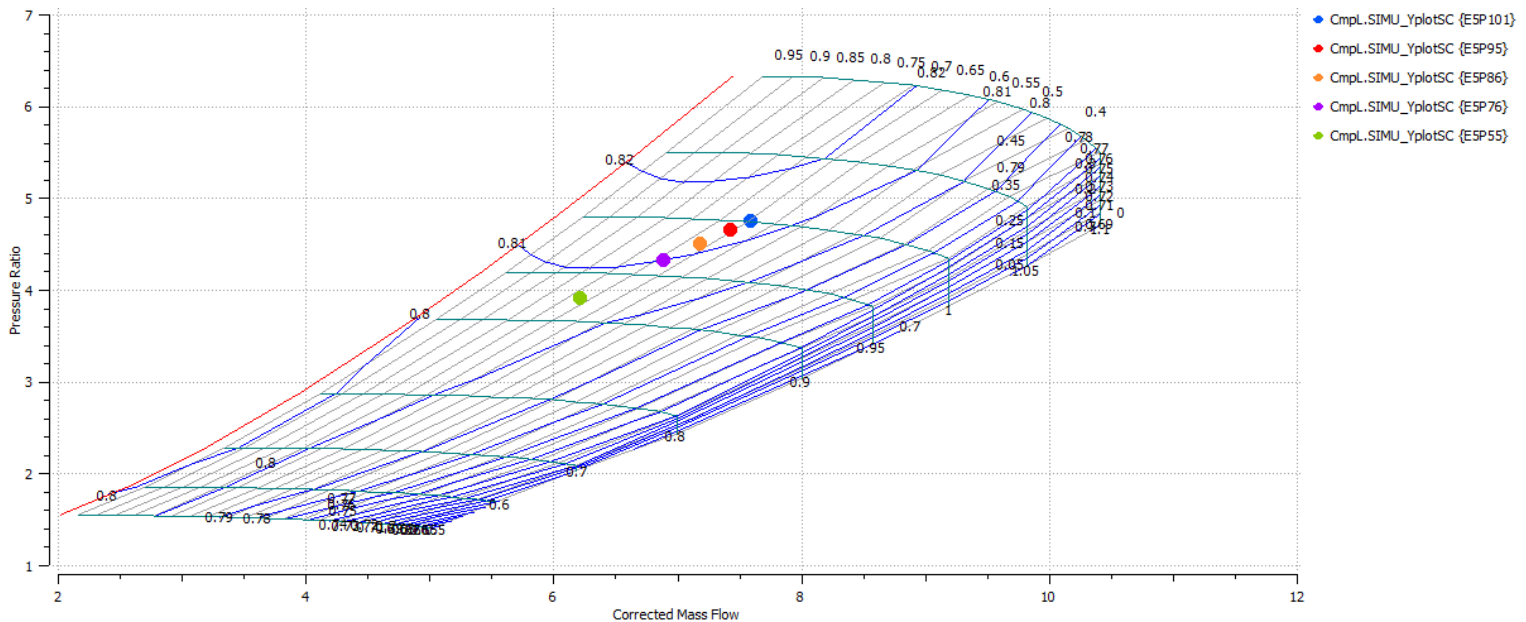
Διάγραμμα 4.36. Ταχύτητα περιστροφής – συντελεστής ισεντροπικής απόδοσης για το συμπιεστή χαμηλής πίεσης



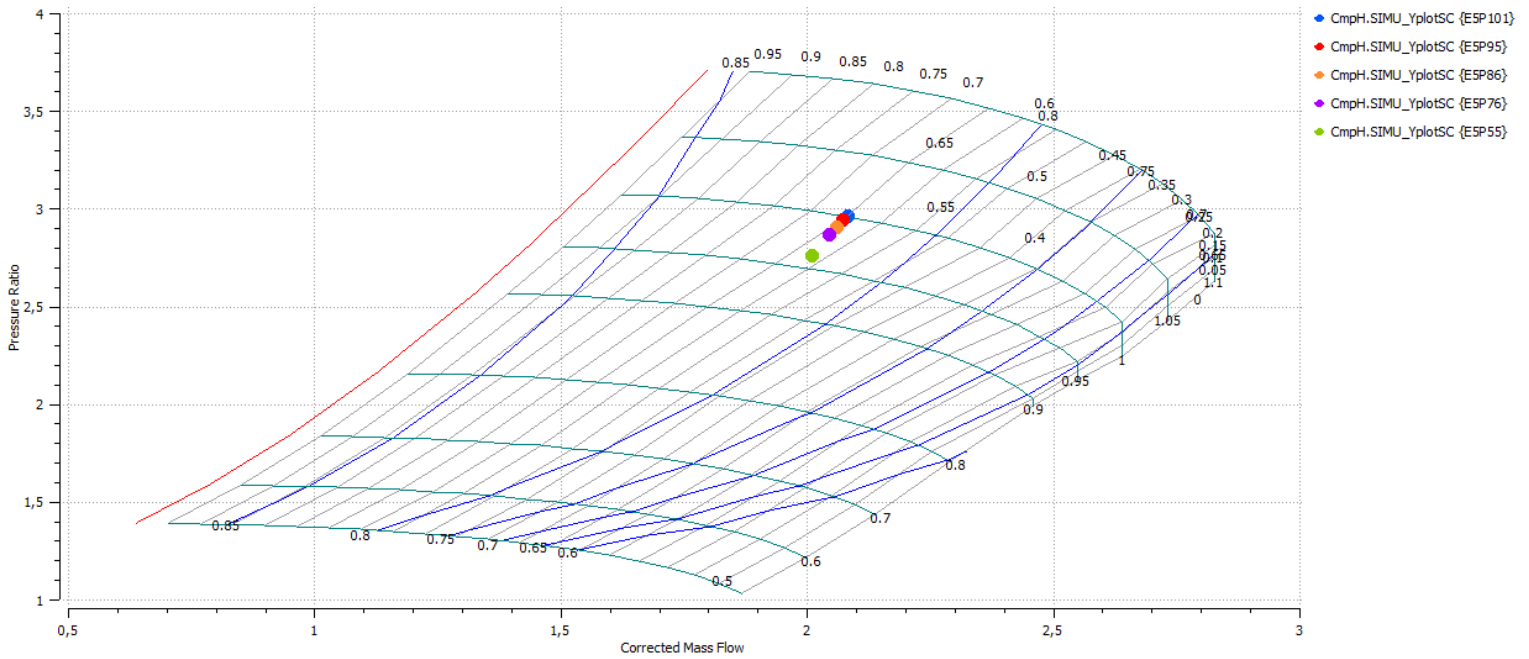
Διάγραμμα 4.37. Ταχύτητα περιστροφής – συντελεστής ισεντροπικής απόδοσης για το στρόβιλο ισχύος



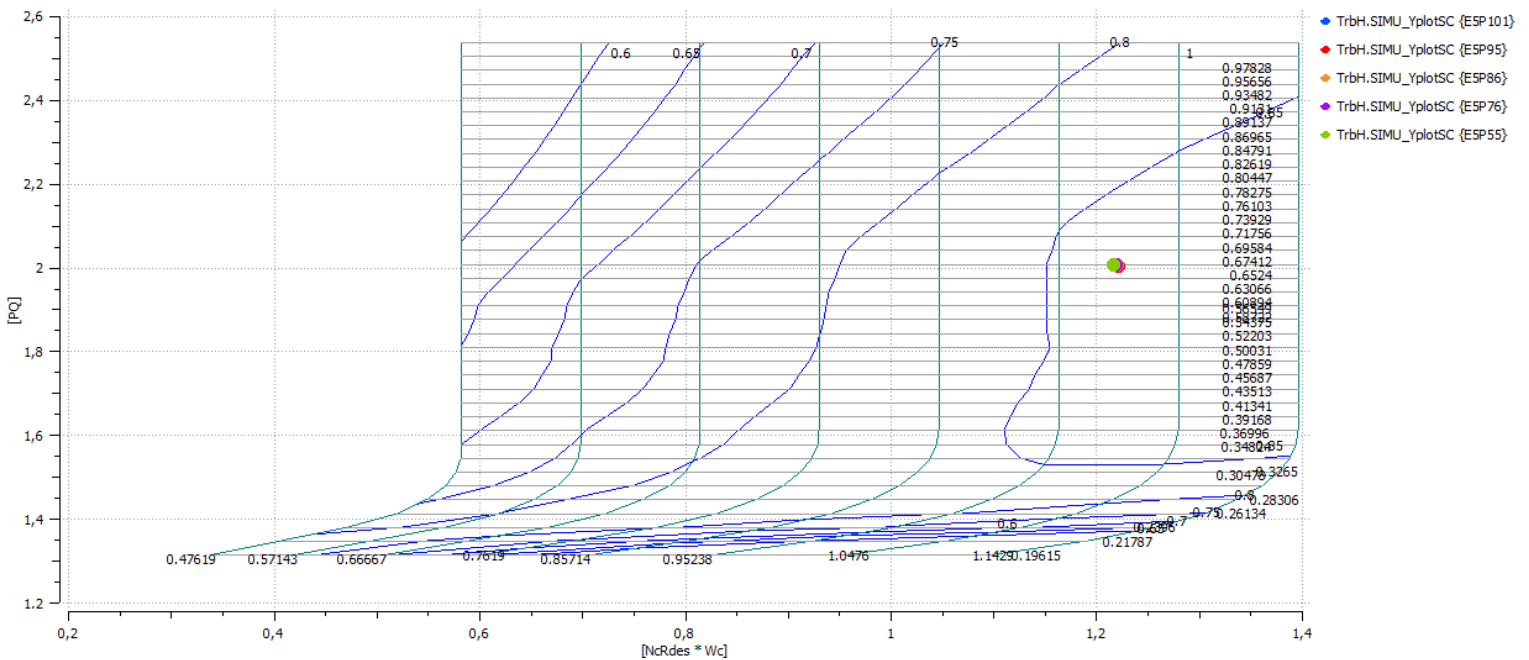
Διάγραμμα 4.38. Ταχύτητα περιστροφής – συντελεστής διορθωμένης παροχής μάζας για το στρόβιλο ισχύος



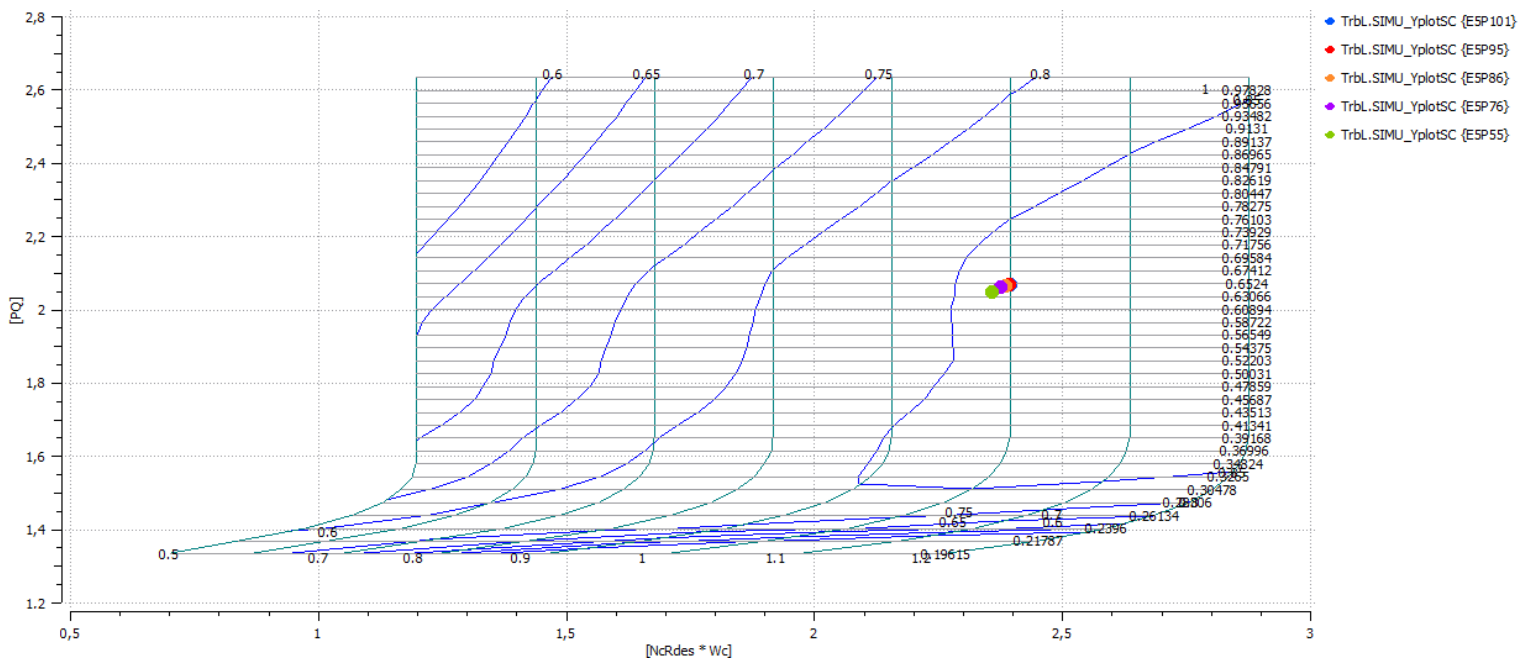
Σχήμα 4.12. Σημεία εκτός σχεδιασμού στο χάρτη του συμπιεστή χαμηλής πίεσης μετά την τοπική προσαρμογή



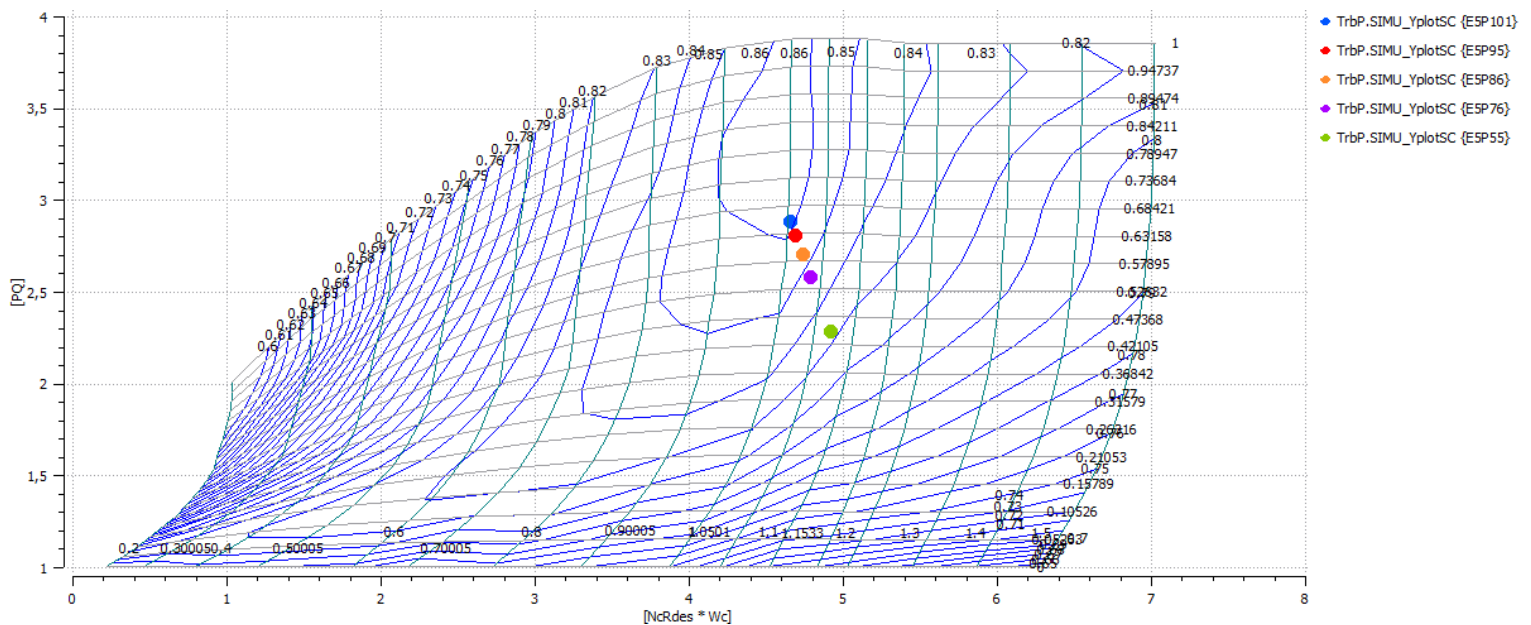
Σχήμα 4.13. Σημεία εκτός σχεδιασμού στο χάρτη του συμπιεστή υψηλής πίεσης μετά την τοπική προσαρμογή



Σχήμα 4.14. Σημεία εκτός σχεδιασμού στο χάρτη του στροβίλου υψηλής πίεσης μετά την τοπική προσαρμογή



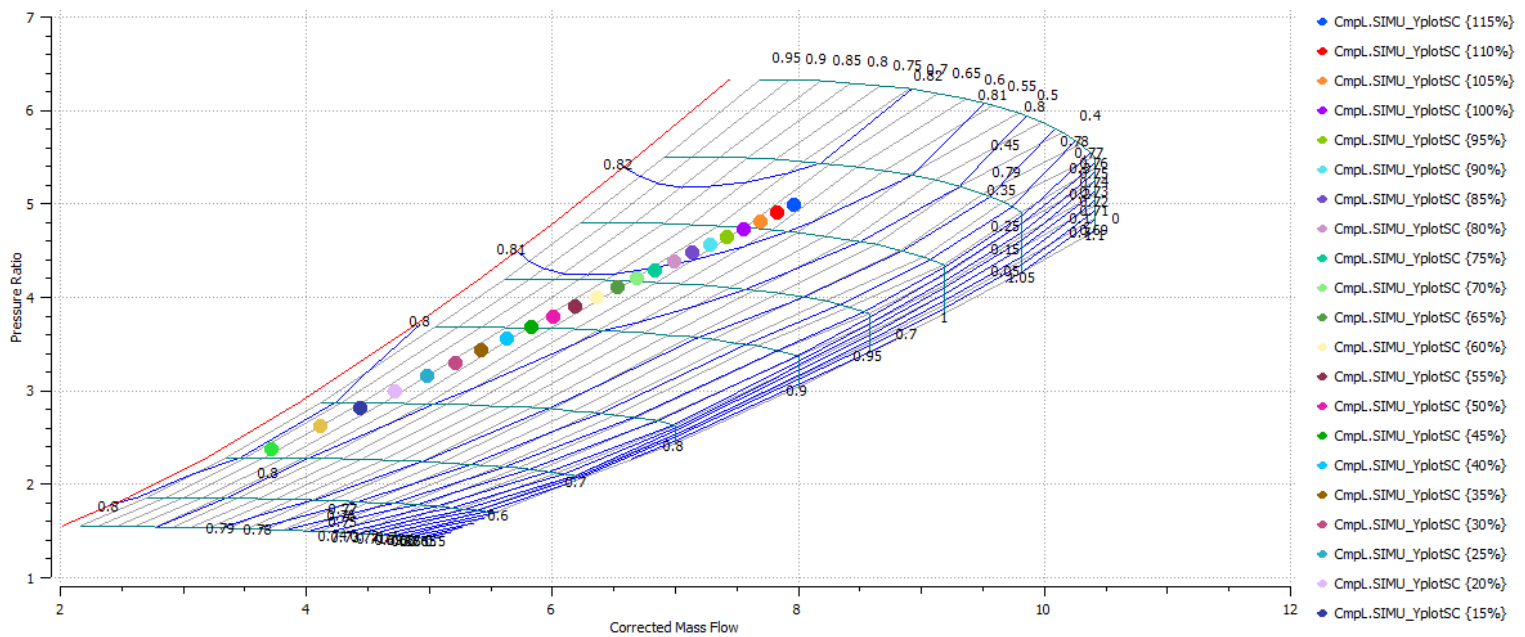
Σχήμα 4.15. Σημεία εκτός σχεδιασμού στο χάρτη του στροβίλου χαμηλής πίεσης μετά την τοπική προσαρμογή



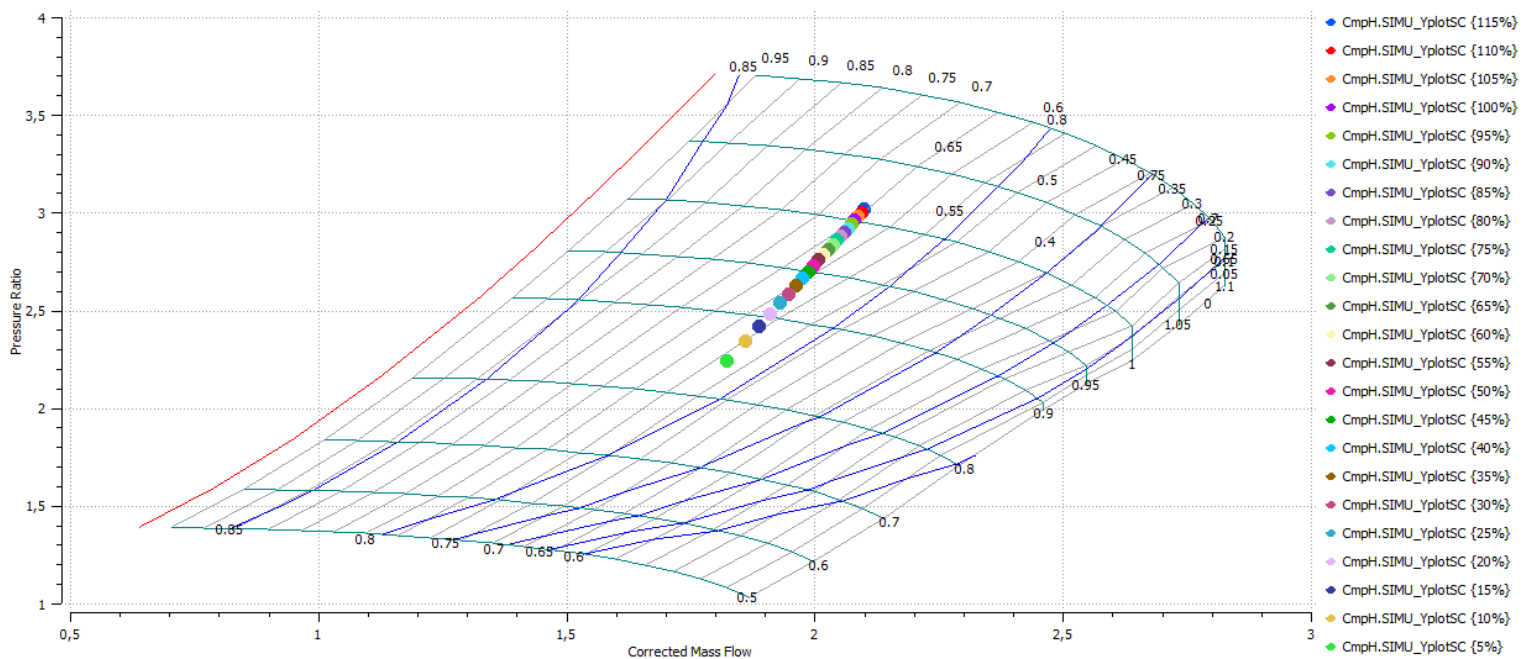
Σχήμα 4.16. Σημεία εκτός σχεδιασμού στο χάρτη του στροβίλου ισχύος μετά την τοπική προσαρμογή

4.6. Γραμμή λειτουργίας

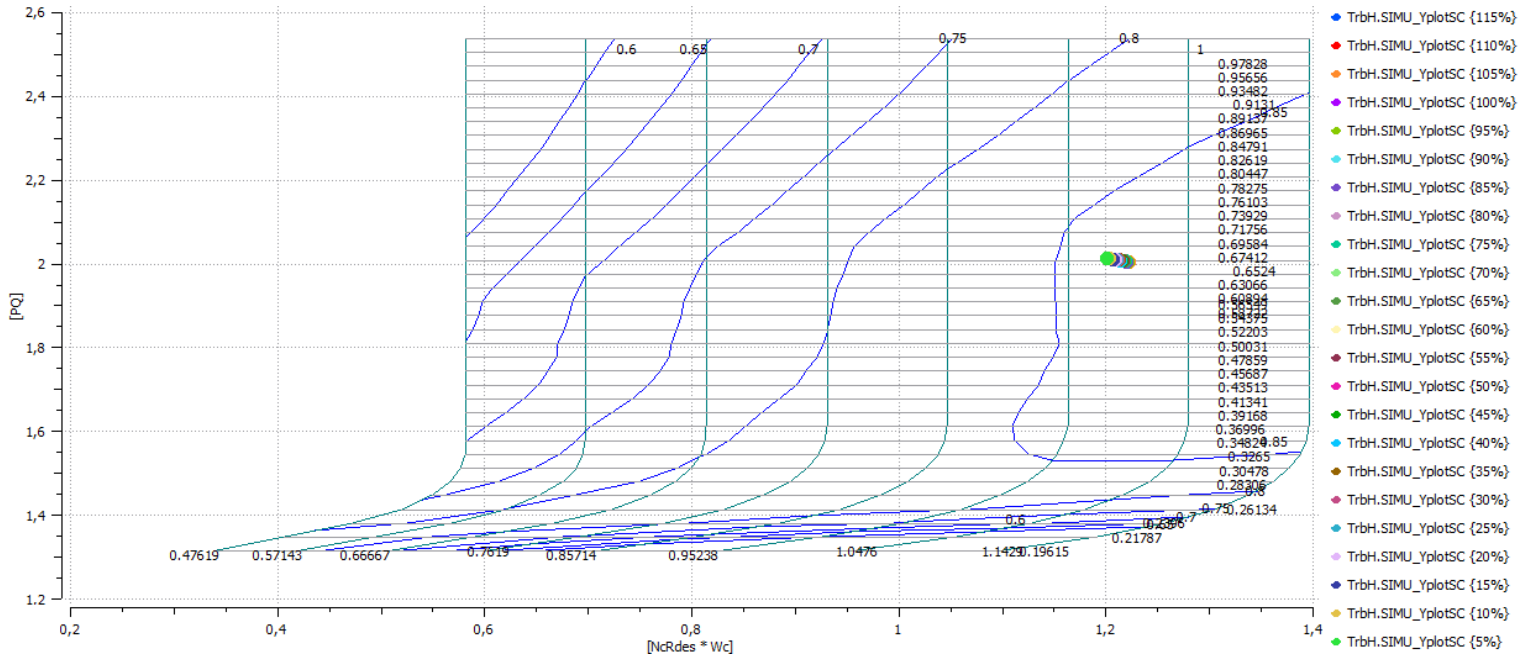
Για μία ποιοτική εικόνα της συμπεριφοράς του μοντέλου πραγματοποιείται προσομοίωση μιας γραμμής λειτουργίας από 5-105% της μέγιστης ισχύος του. Παρακάτω παρατίθενται οι αντίστοιχοι χάρτες λειτουργίας και παρατηρείται ότι έχουν την αναμενόμενη συμπεριφορά για κάθε συνιστώσα.



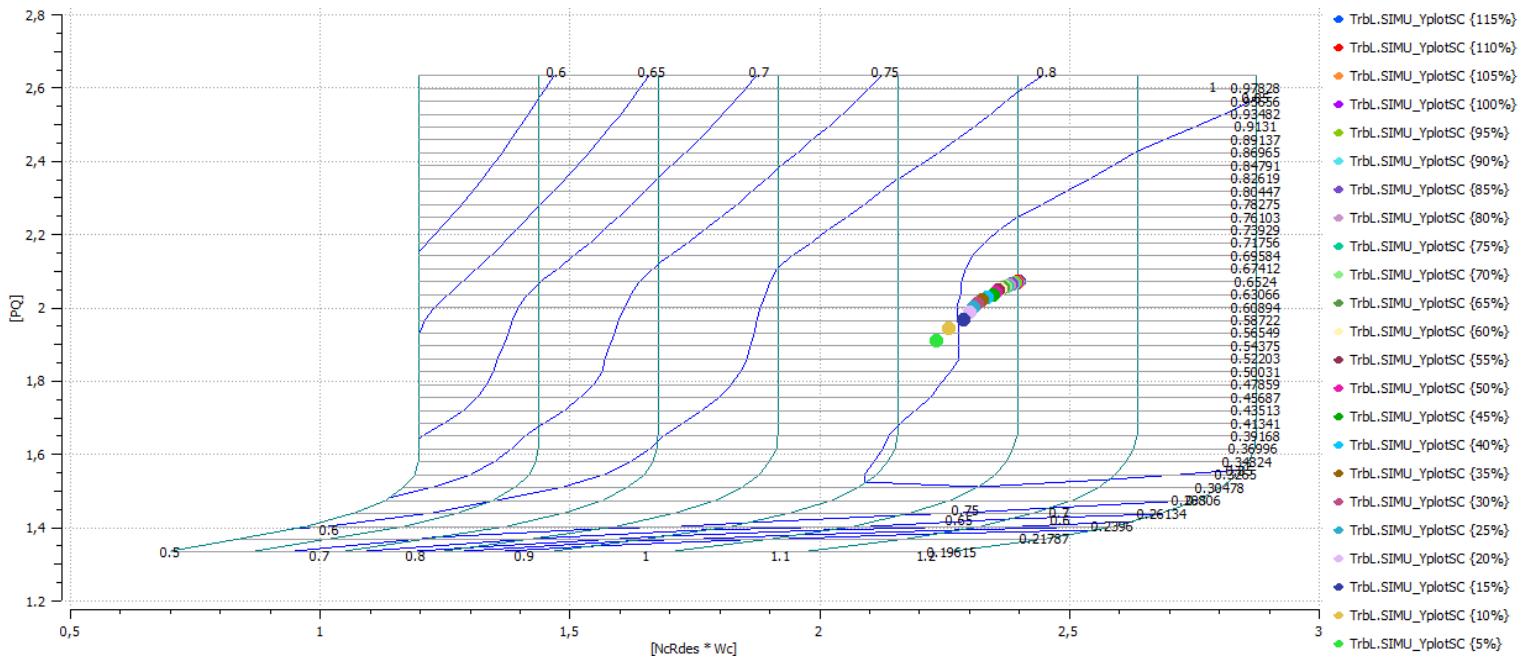
Σχήμα 4.17. Γραμμή λειτουργίας στο χάρτη του συμπιεστή χαμηλής πίεσης



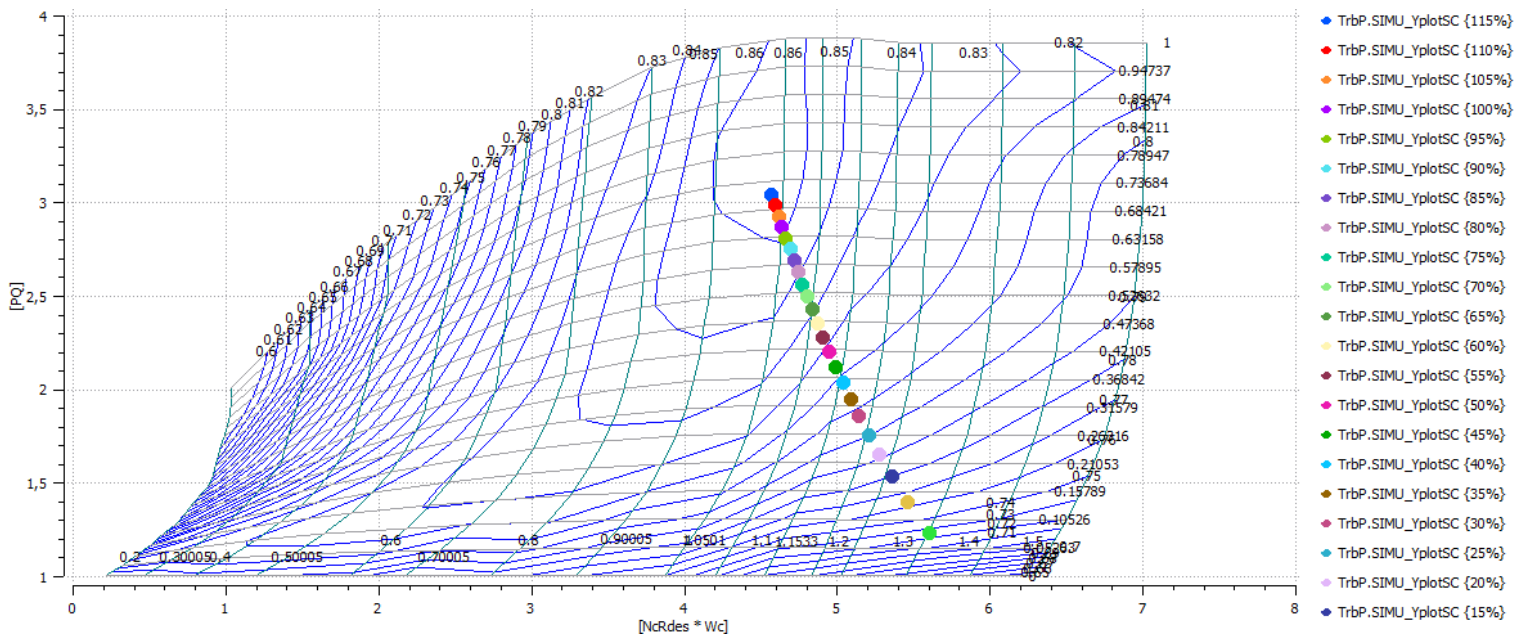
Σχήμα 4.18. Γραμμή λειτουργίας στο χάρτη του συμπιεστή υψηλής πίεσης



Σχήμα 4.19. Γραμμή λειτουργίας στο χάρτη του στροβίλου υψηλής πίεσης



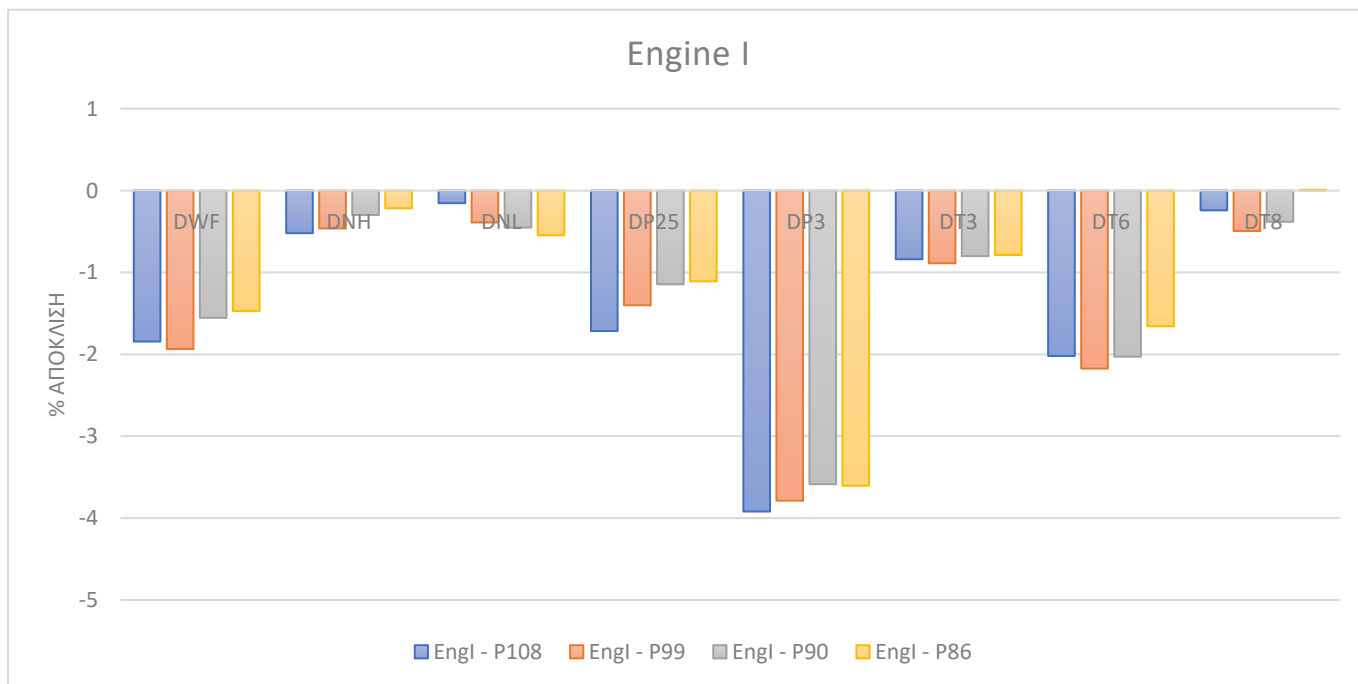
Σχήμα 4.20. Γραμμή λειτουργίας στο χάρτη του στροβίλου χαμηλής πίεσης



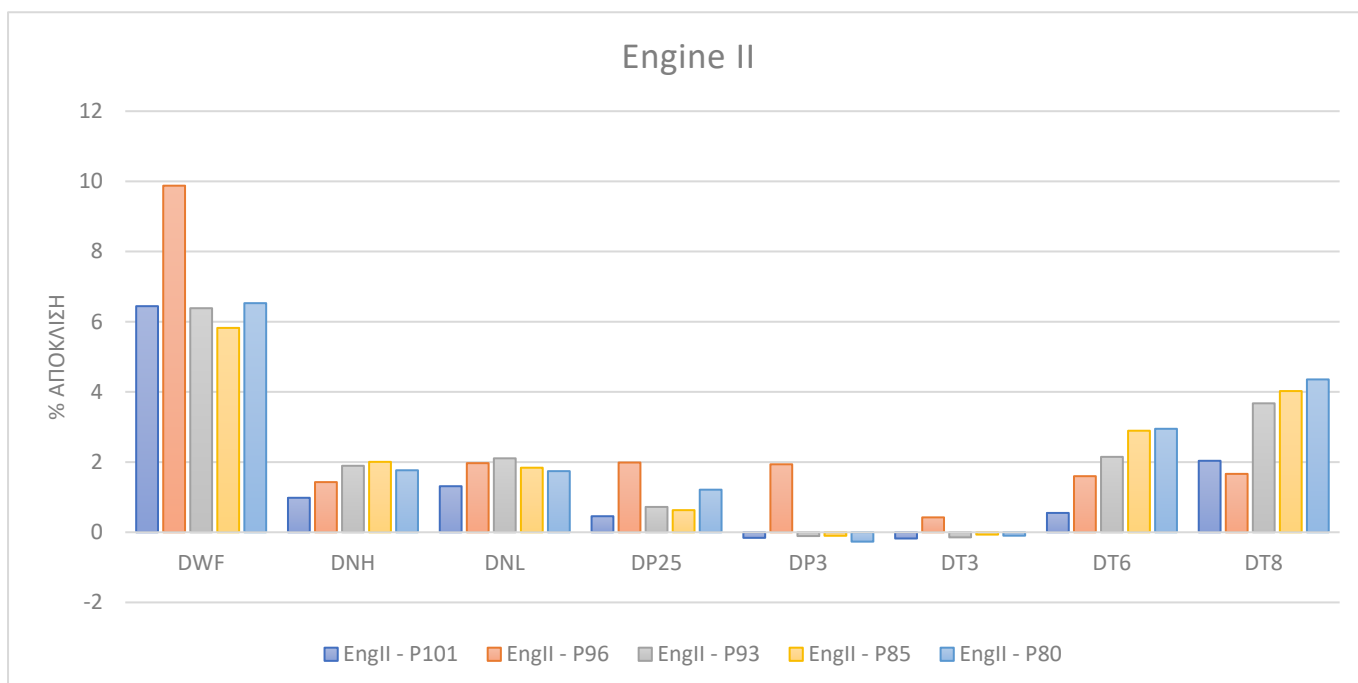
Σχήμα 4.21. Γραμμή λειτουργίας στο χάρτη του στροβίλου ισχύος

4.7. Εφαρμογή μοντέλου σε άλλους κινητήρες

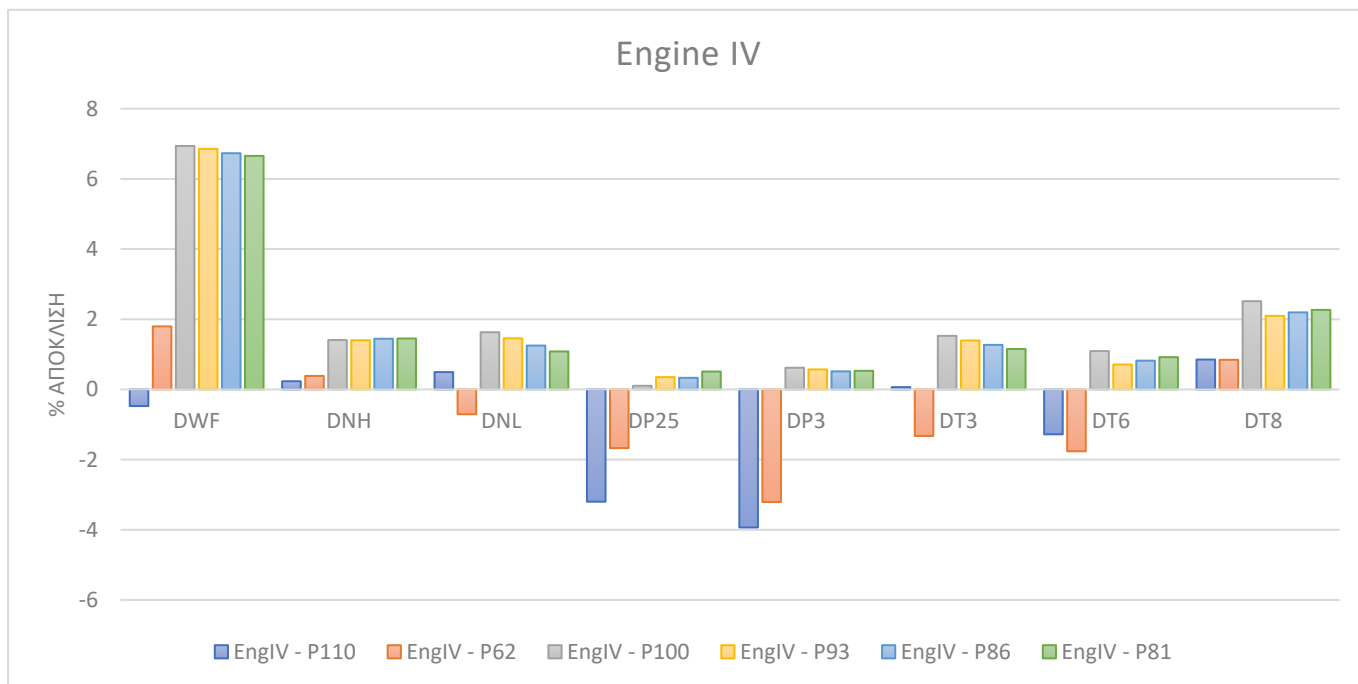
Σε αυτή την παράγραφο γίνεται χρήση του μοντέλου, όπως αυτό έχει ήδη προσαρμοσθεί με τον επιλεγμένο κινητήρα (Engine III), με σκοπό την εύρεση των αποκλίσεων των μετρούμενων μεγεθών για τους υπόλοιπους διαθέσιμους κινητήρες. Αρχικά παρατίθενται οι αποκλίσεις των μετρούμενων μεγεθών ανά κινητήρα (Διάγραμμα 4.39 – Διάγραμμα 4.44), ενώ στη συνέχεια παρουσιάζονται οι αποκλίσεις της κάθε μέτρησης ξεχωριστά για κάθε σημείο λειτουργίας του κάθε κινητήρα (Διάγραμμα 4.45 – Διάγραμμα 4.52).



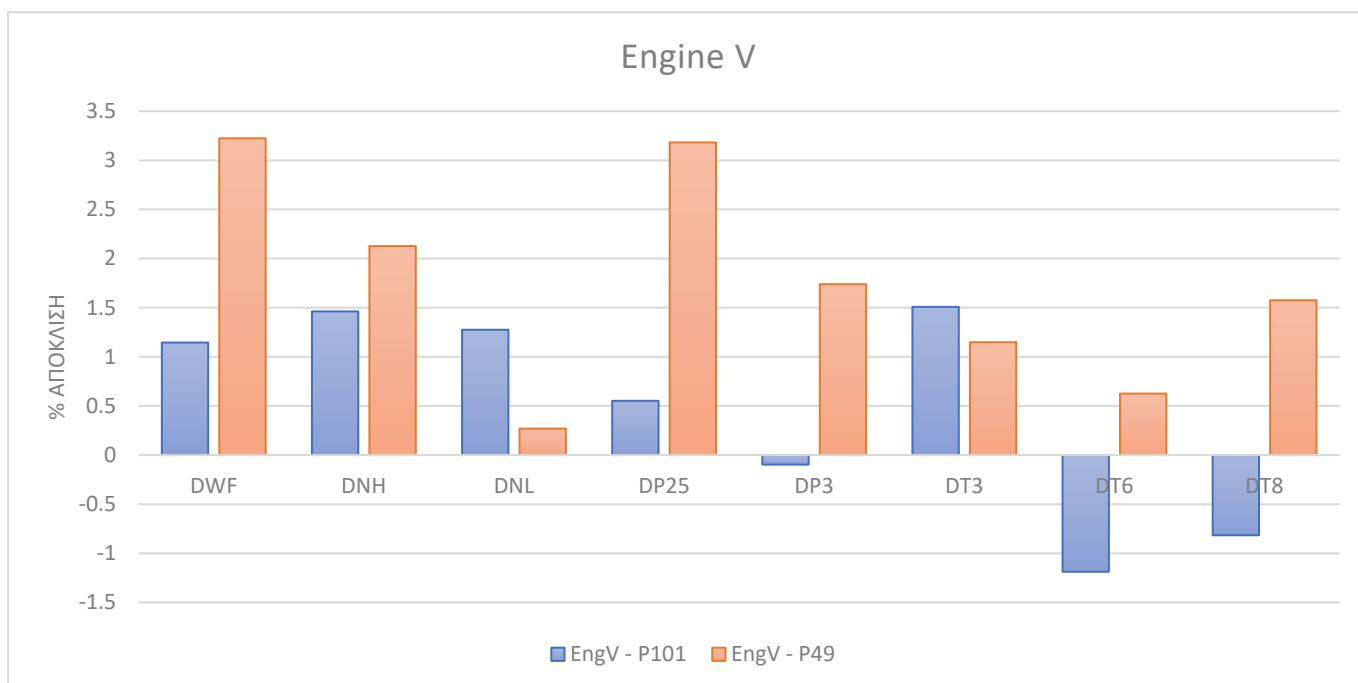
Διάγραμμα 4.39. Αποκλίσεις μετρούμενων μεγεθών του κινητήρα I.



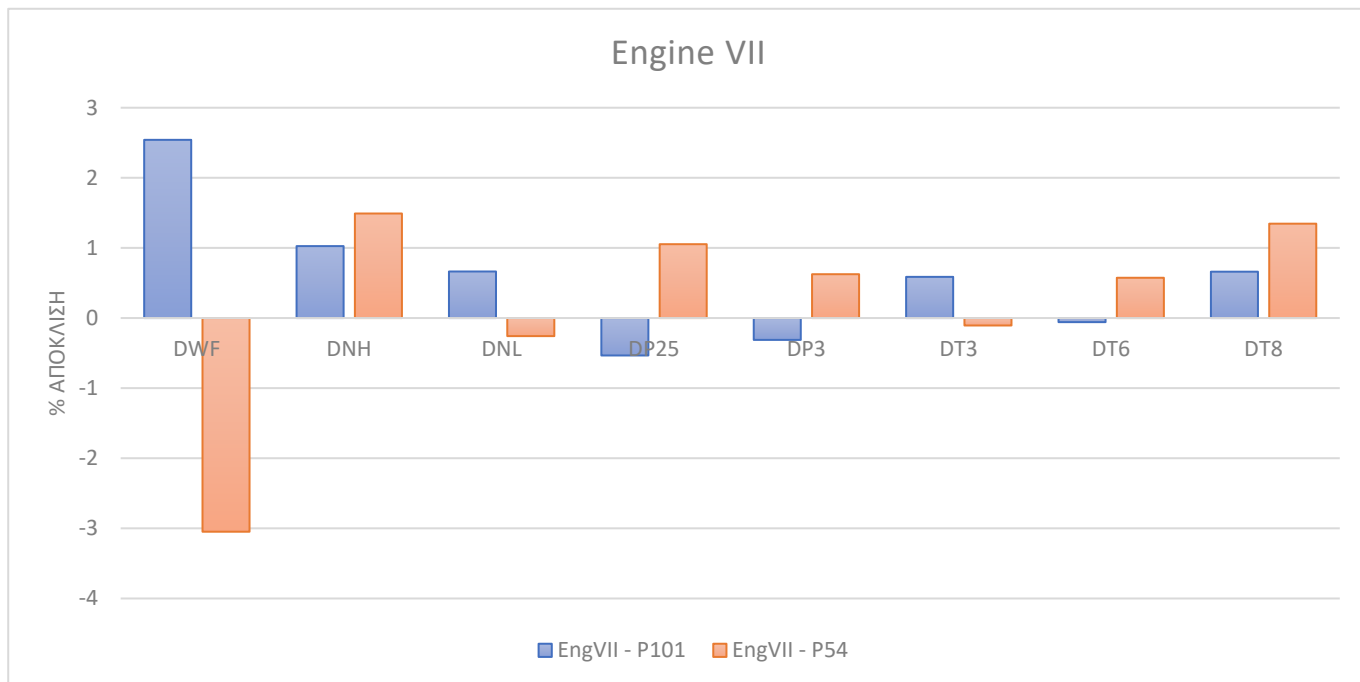
Διάγραμμα 4.40. Αποκλίσεις των μετρούμενων μεγεθών του κινητήρα II



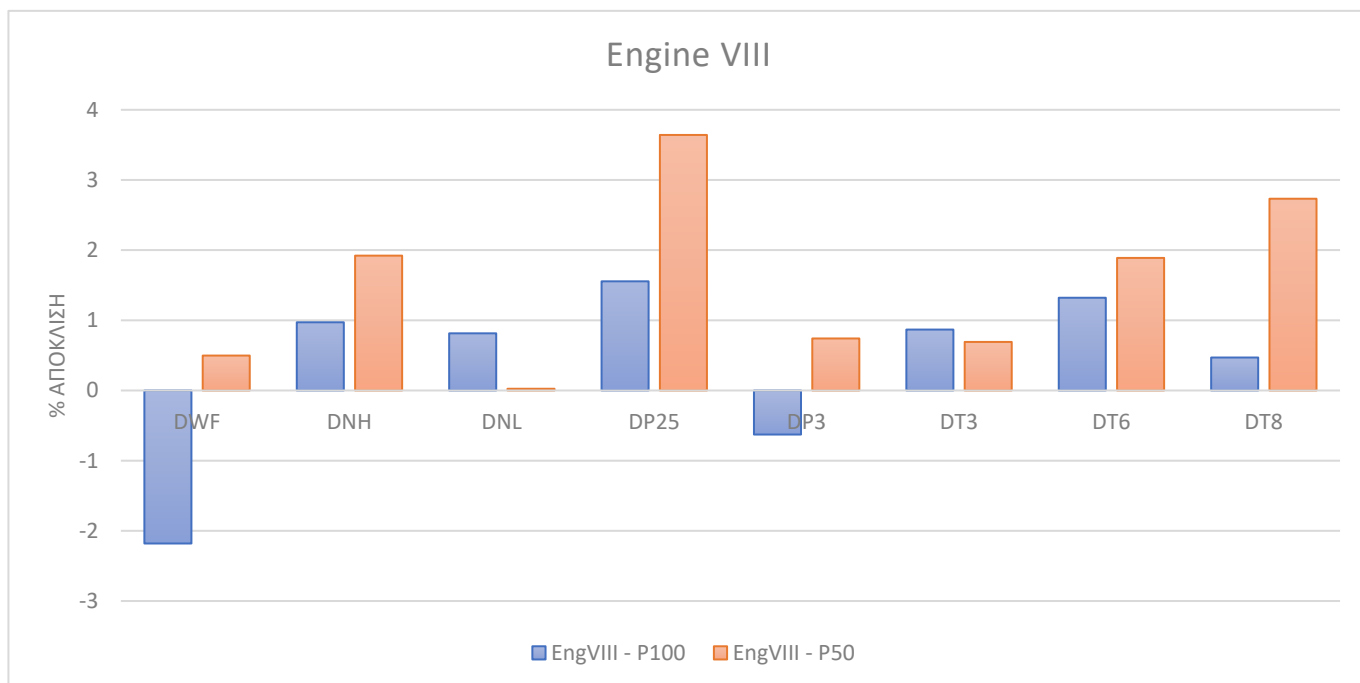
Διάγραμμα 4.41. Αποκλίσεις των μετρούμενων μεγεθών του κινητήρα IV



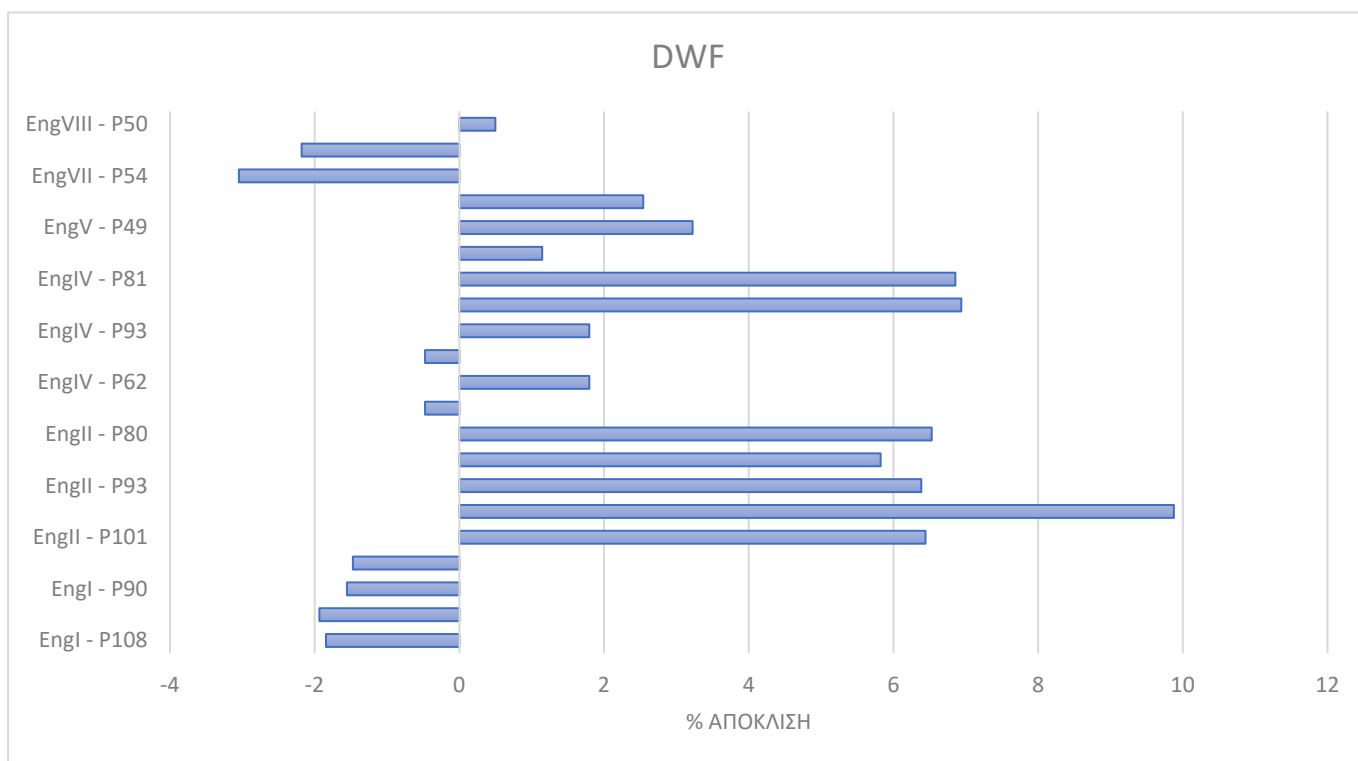
Διάγραμμα 4.42. Αποκλίσεις των μετρούμενων μεγεθών του κινητήρα V



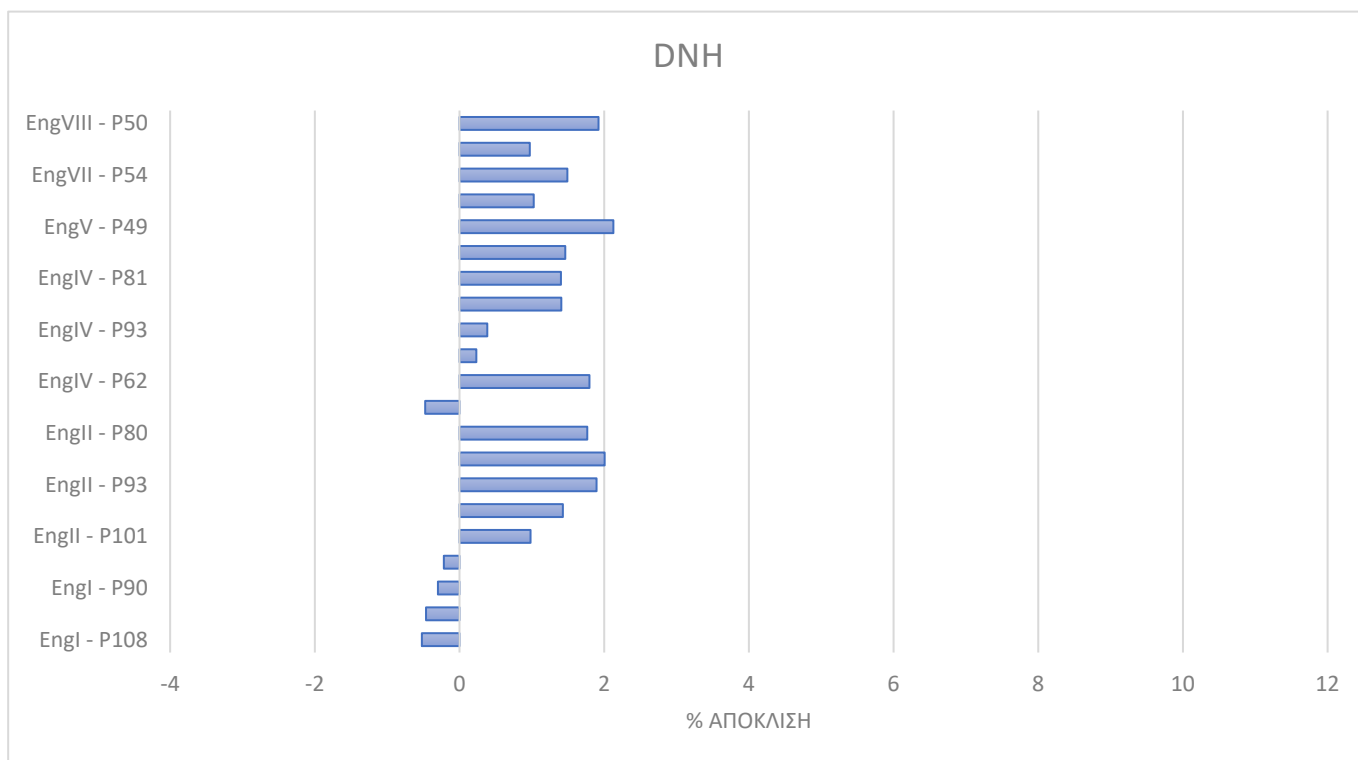
Διάγραμμα 4.43. Αποκλίσεις των μετρούμενων μεγεθών του κινητήρα VII



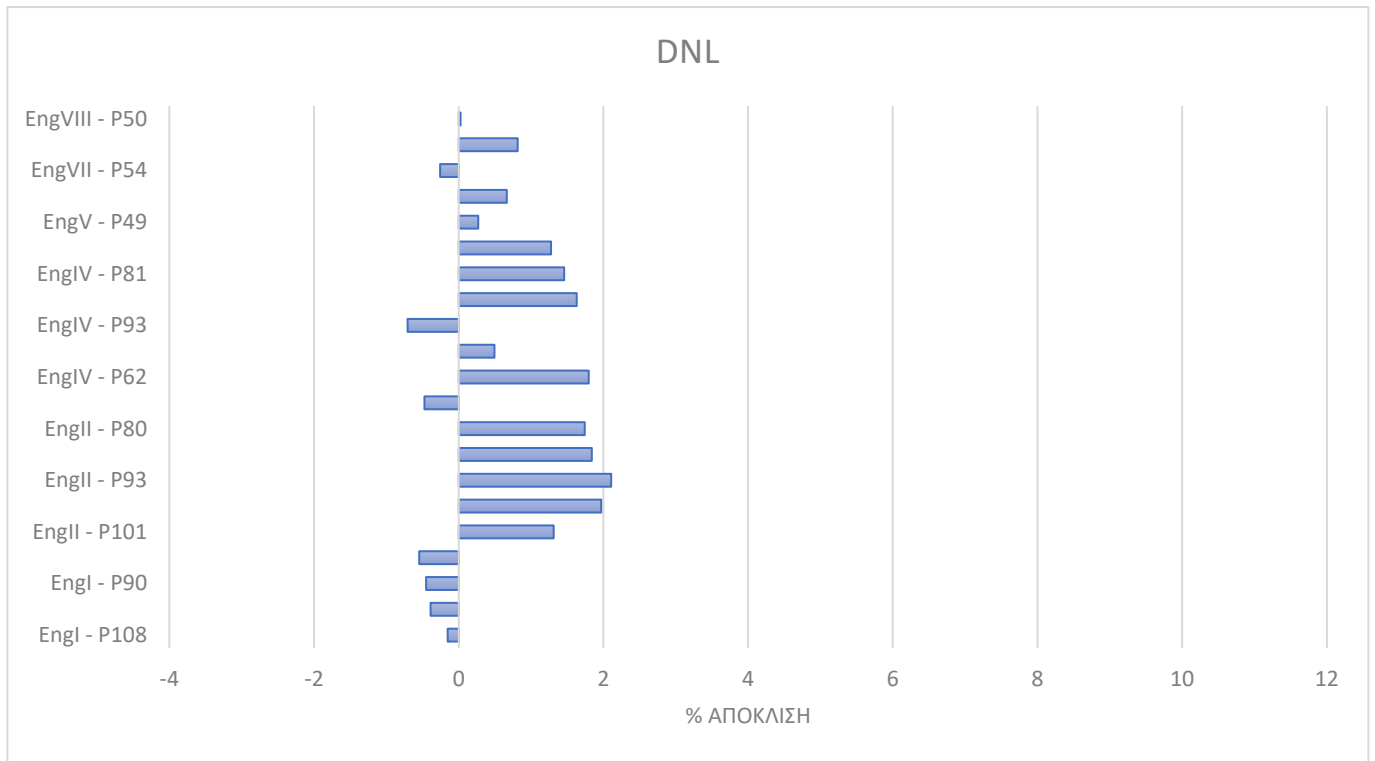
Διάγραμμα 4.44. Αποκλίσεις των μετρούμενων μεγεθών του κινητήρα VIII



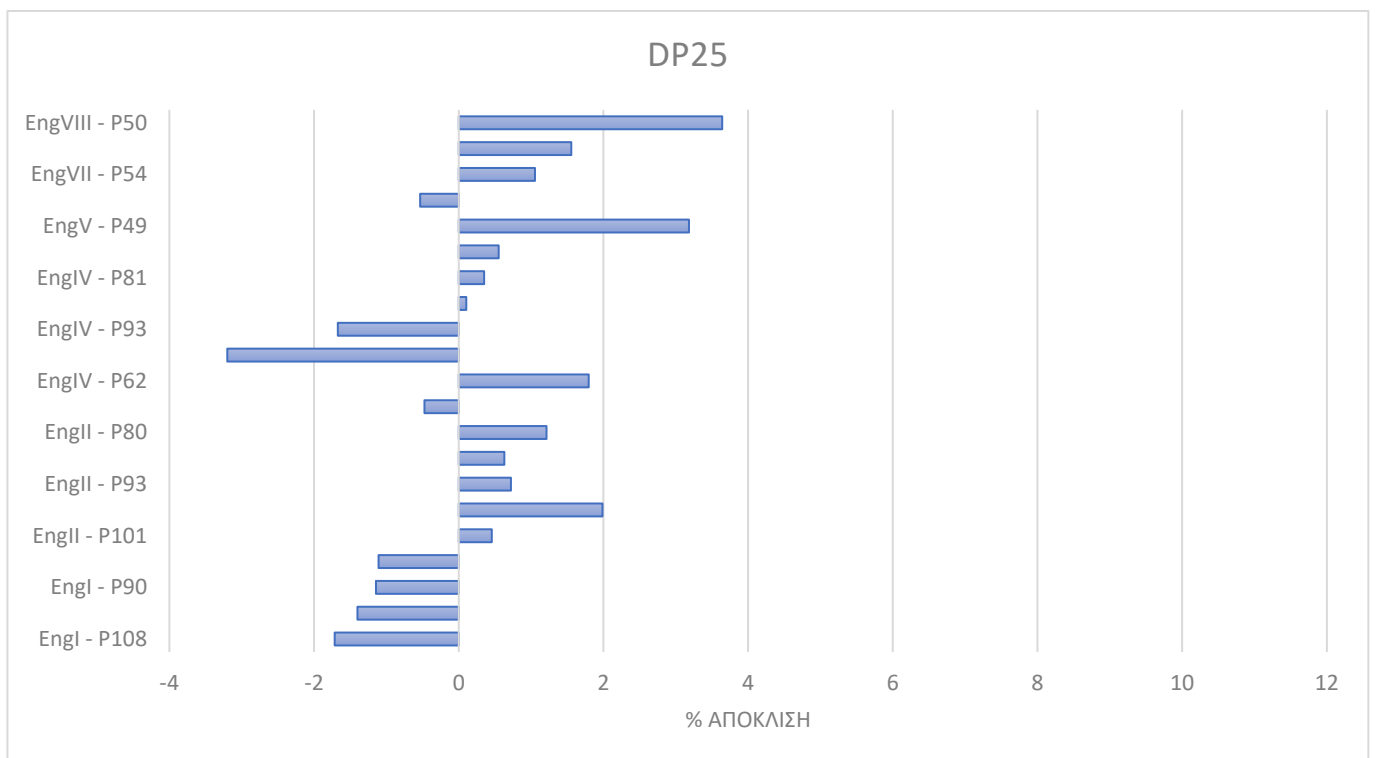
Διάγραμμα 4.45. Αποκλίσεις παροχής καυσίμου για κάθε σημείο λειτουργίας κάθε κινητήρα



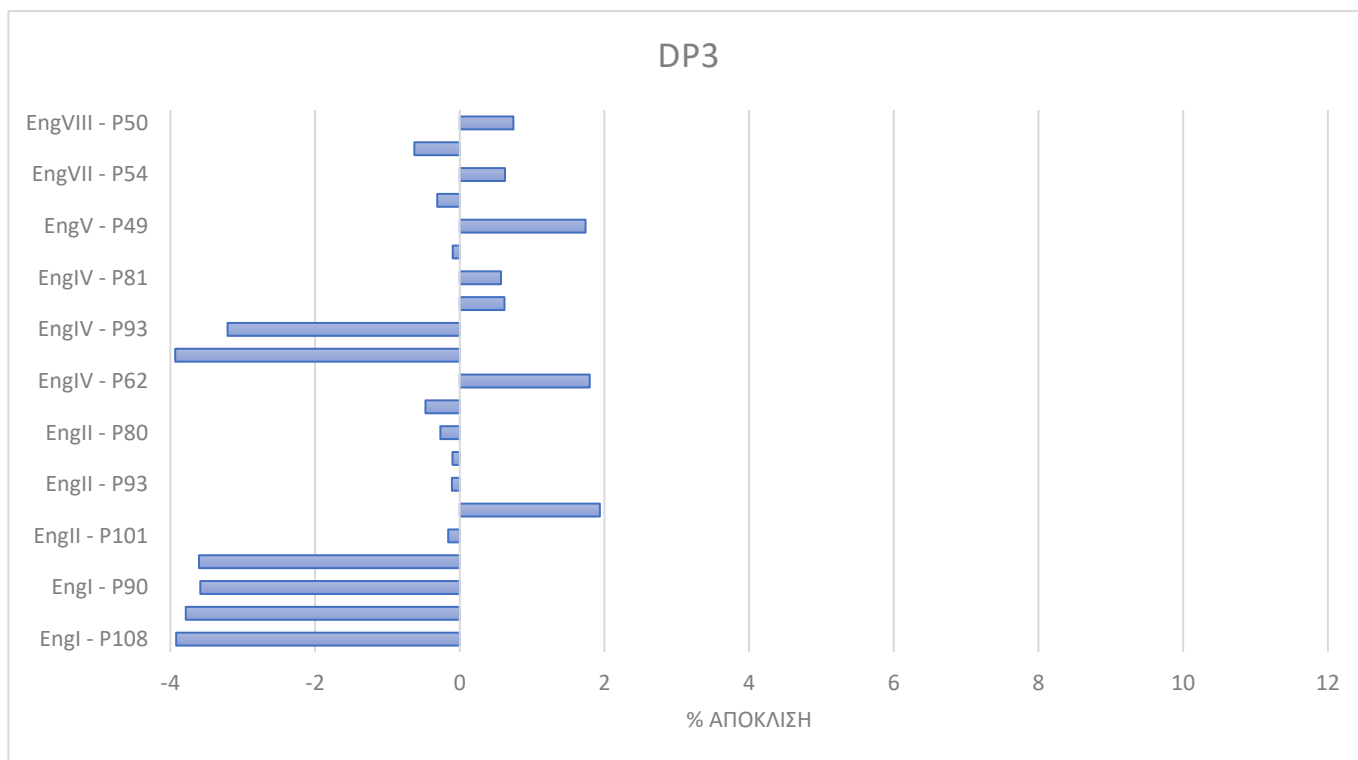
Διάγραμμα 4.46. Αποκλίσεις στροφών υψηλής για κάθε σημείο λειτουργίας κάθε κινητήρα



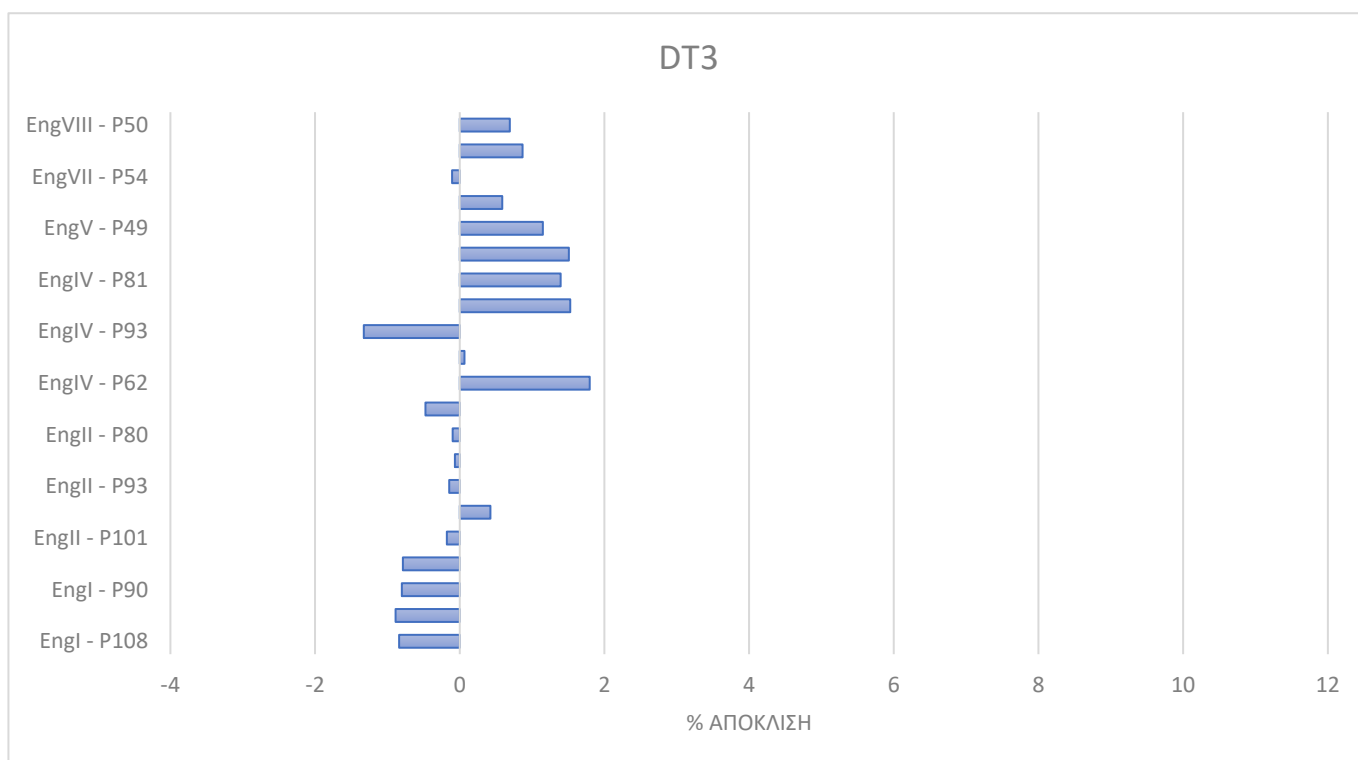
Διάγραμμα 4.47. Αποκλίσεις στροφών χαμηλής για κάθε σημείο λειτουργίας κάθε κινητήρα



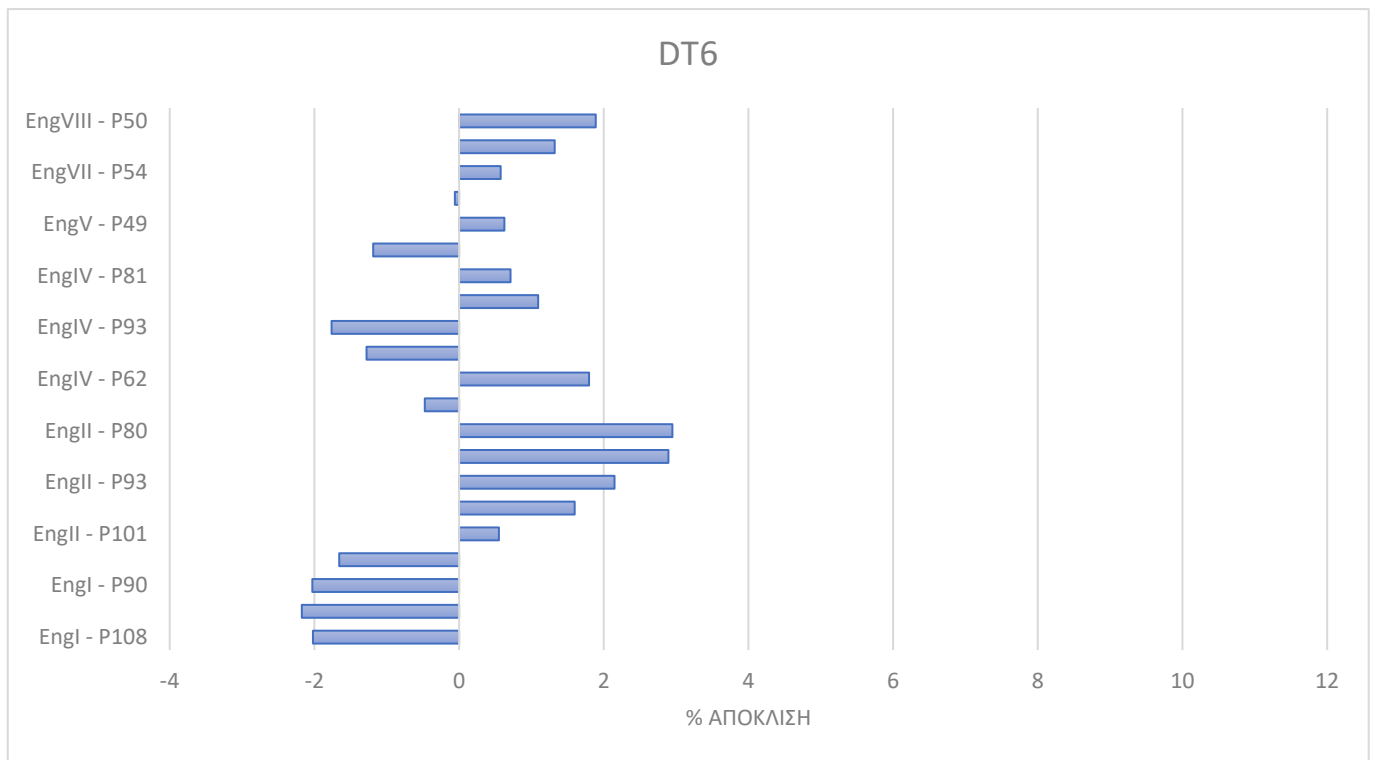
Διάγραμμα 4.48. Αποκλίσεις πίεσης εξόδου του συμπιεστή χαμηλής πίεσης για κάθε σημείο λειτουργίας κάθε κινητήρα



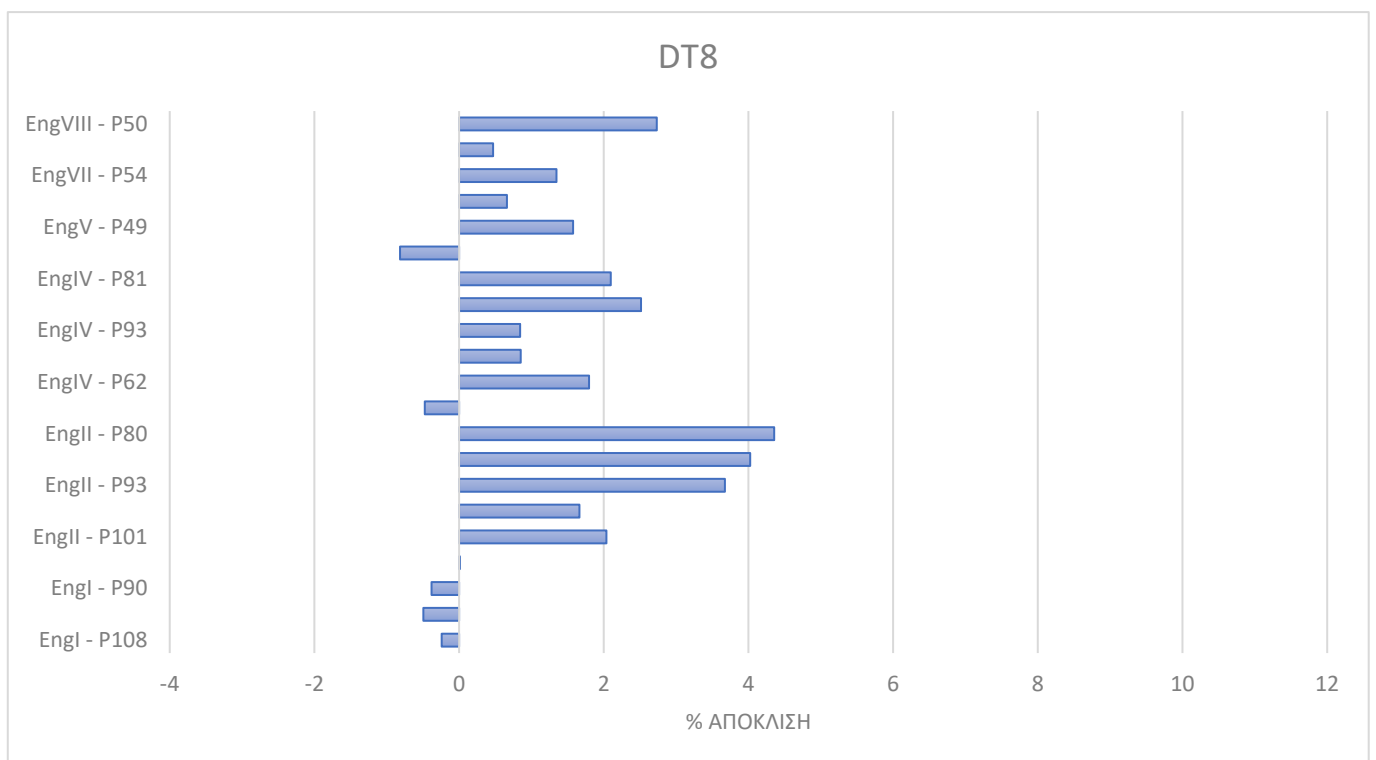
Διάγραμμα 4.49. Αποκλίσεις πίεσης εξόδου του συμπιεστή υψηλής πίεσης για κάθε σημείο λειτουργίας κάθε κινητήρα



Διάγραμμα 4.50. Αποκλίσεις θερμοκρασίας εξόδου του συμπιεστή υψηλής πίεσης για κάθε σημείο λειτουργίας κάθε κινητήρα



Διάγραμμα 4.51. Αποκλίσεις θερμοκρασίας μεταξύ στροβίλων για κάθε σημείο λειτουργίας κάθε κινητήρα



Διάγραμμα 4.52. Αποκλίσεις θερμοκρασίας εξόδου καυσαερίων για κάθε σημείο λειτουργίας κάθε κινητήρα

Γενικά, από τα παραπάνω διαγράμματα καθίσταται σαφές ότι οι μεγαλύτερες αποκλίσεις παρατηρούνται στην παροχή καυσίμου (Διάγραμμα 4.45). Από τα διαγράμματα του κάθε κινητήρα ξεχωριστά, παρατηρούμε ότι το μοντέλο είναι συμβατό με την εικόνα που έχουμε από τα διορθωμένα μεγέθη συναρτήσει της διορθωμένης ισχύος (βλ. Διάγραμμα 4.1 – Διάγραμμα 4.6).

Πιο συγκεκριμένα, ο κινητήρας I (Διάγραμμα 4.39) παρατηρούμε ότι παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά από τον κινητήρα αναφοράς, αφού έχει καλύτερο βαθμός απόδοσης, καθώς πετυχαίνει το ίδιο φορτίο με μικρότερη τιμή καυσίμου, χαμηλότερες στροφές και μικρότερη θερμοκρασία μεταξύ των στροβίλων. Το αποτέλεσμα αυτό επαληθεύεται και στο Διάγραμμα 4.3, όπου η καμπύλη του καυσίμου βρίσκεται πιο κάτω από την καμπύλη αναφοράς. Αντίστοιχα, ο κινητήρας II (Διάγραμμα 4.40), αποτελεί κινητήρα χειρότερης κατάστασης, καθώς όλα τα μετρούμενα μεγέθη είναι αυξημένα σε σχέση με τον κινητήρα αναφοράς. Επίσης, οι κινητήρες IV και V, αποτελούν κινητήρες χειρότερης κατάστασης, αφού οι περισσότερες τιμές των μετρήσεων είναι αυξημένες σε σχέση με τον κινητήρα αναφοράς.

Για τον κινητήρα VII, παρατηρούμε μια μεγάλη μείωση στην παροχή καυσίμου (-3.05%) στο 54% της ισχύος, ενώ οι στροφές περιστροφής και όλα τα υπόλοιπα μεγέθη αυξάνονται σε σχέση με το μοντέλο αναφοράς, οπότε προκύπτει το συμπέρασμα ότι η μέτρηση αυτή μπορεί να είναι λανθασμένη. Το ίδιο παρατηρούμε και στον κινητήρα VIII, για το σημείο 100% της ισχύος.

5 Διαγνωστική κινητήρα PW123AF

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται θέματα που σχετίζονται με τη διάγνωση βλαβών του κινητήρα PW123AF και τα οποία έχουν εισαχθεί στο λογισμικό στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η ανάλυση ευαισθησίας των μετρήσεων με τις παραμέτρους υγείας για την καλύτερη επιλογή παραμέτρων και μετρήσεων και η δημιουργία υπογραφών τυπικών βλαβών για χρήση από το προσωπικό του δοκιμαστηρίου.

5.1. Ανάλυση ευαισθησίας με σταθερή ισχύ

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η εφαρμογή της ανάλυσης ευαισθησίας – MODE 6 του λογισμικού που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας για σταθερή ισχύ. Οι παράμετροι υγείας οι οποίοι εμπλέκονται στο συγκεκριμένο μοντέλο είναι 10 (2 για κάθε συνιστώσα). Από τον Ιακωβιανό πίνακα που δημιουργείται σε κάθε περίπτωση

- A. Εξάγουμε συμπεράσματα για την ευαισθησία των μετρήσεων στις αλλαγές των παραμέτρων υγείας.
- B. Με χρήση του αριθμού κατάστασης (condition number – CN) των επιμέρους υποπινάκων, μπορούμε να επιλέξουμε τα σετ των μετρήσεων που είναι πιο κατάλληλα για εκτίμηση συγκεκριμένων παραμέτρων υγείας, όπως επίσης και τα σετ των παραμέτρων υγείας για συγκεκριμένο σετ μετρήσεων.

Παρακάτω, παρουσιάζεται αρχικά ο Ιακωβιανός πίνακας, έπειτα ακολουθούν τα σετ των παραμέτρων υγείας για συγκεκριμένο σετ μετρήσεων και τέλος παρουσιάζονται τα σετ των μετρήσεων που είναι πιο κατάλληλα για εκτίμηση συγκεκριμένων παραμέτρων υγείας.

Από τα αποτελέσματα αυτά παρατηρούμε ότι με χρήση όλων των διαθέσιμων μετρήσεων οδηγούμαστε σε πολύ μεγάλους αριθμούς κατάστασης, προκύπτει έτσι το συμπέρασμα ότι κάποια μέτρηση παρέχει την ίδια πληροφορία με κάποια άλλη. Έτσι, αφαιρούμε κάθε φορά μία από τις διαθέσιμες μετρήσεις, έτσι ώστε να βρούμε ποια μέτρηση πρέπει να αφαιρεθεί. Το σύστημα που καταλήγουμε είναι 7x7 και περιλαμβάνει την παροχή καυσίμου, τις στροφές, τις πιέσεις εξόδου των συμπιεστών, τη θερμοκρασία εξόδου του συμπιεστή υψηλής πίεσης και τη θερμοκρασία μεταξύ των στροβίλων (ITT) ή τη θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων.

Επίσης, οι βλάβες για τις οποίες εντοπίζουμε τα κατάλληλα σετ μετρήσεων είναι για βλάβη σε κάθε συνιστώσα ξεχωριστά, στους 2 συμπίεστες, στους 3 στρόβιλους και τέλος για βλάβη στον άξονα χαμηλής και αντίστοιχα στον άξονα υψηλής.

Πιο συγκεκριμένα, οι παράμετροι υγείας που επιλέγονται για τις δεδομένες μετρήσεις είναι SWLPC, SELPC, SWHPC, SEHPC, SWHPT, SELPT και SEPT. Για βλάβη στο συμπίεστη χαμηλής οι πιο κατάλληλες μετρήσεις είναι NL και T3, ενώ για βλάβη στο συμπίεστη υψηλής είναι NH και T6 ή T8. Επίσης, οι πιο κατάλληλες μετρήσεις για βλάβη στο στρόβιλο υψηλής είναι P25 και P3, για βλάβη στο στρόβιλο χαμηλής είναι NH και T6 ή T8, ενώ για το στρόβιλο ισχύος είναι WF και T6 ή T8.

Από τον Ιακωβιανό πίνακα προκύπτει ότι η παροχή καυσίμου επηρεάζεται περισσότερο από τις παραμέτρους υγείας SEPT, SELPT, SELPC και SWHPT, ενώ οι ανηγμένες παροχές των συμπίεστων έχουν ελάχιστη επίδραση. Οι στροφές υψηλής επηρεάζονται αντίστοιχα από SWLPT, SWHPT, SEHPT και SEHPC, ενώ οι στροφές χαμηλής από SWLPT, SWPT, SELPT και SELPT. Τέλος, όσον αναφορά την ITT, επηρεάζεται περισσότερο από SELPT, SELPC, SWPT και SEHPT.

Μετρήσεις	Παράμετροι Υγείας (f)									
	SWLPC	SELPC	SWHPC	SEHPC	SWHPT	SEHPT	SWLPT	SELPT	SWPT	SEPT
DW1	0.0172	0.6130	0.0649	0.3482	-0.2741	0.4059	-0.2486	0.6131	1.0000	-0.3609
DWF	-0.0140	-0.4034	-0.0451	-0.2313	0.3206	-0.2907	0.2268	-0.4289	0.1336	-0.7072
DNH	-0.0106	-0.3280	-0.0559	0.3845	-0.8327	0.4869	0.9273	-0.2592	-0.1836	-0.1213
DNL	-0.0432	0.2681	-0.0345	-0.1765	0.1552	-0.2055	-0.8269	0.4056	0.5651	-0.1468
DP25	0.0152	0.7359	-0.1072	-0.5507	0.5084	-0.6410	-2.2547	1.1719	1.6191	-0.3506
DP3	0.0066	0.3087	0.0301	0.1774	-1.1250	0.2935	-0.1132	0.4038	0.8659	-0.4756
DT3	-0.0145	-0.3014	-0.0403	-0.1619	-0.3559	0.1716	0.1178	0.0946	0.2263	-0.1375
DT4	-0.0209	-0.6050	-0.0691	-0.3413	0.1052	-0.2520	0.2751	-0.4461	-0.3007	-0.2286
DT6	-0.0206	-0.6591	-0.0721	-0.3764	0.3388	-0.4376	0.3103	-0.6597	-0.5339	-0.2360
DT8	-0.0227	-0.7122	-0.0783	-0.4070	0.3763	-0.4731	0.3430	-0.7116	-0.4501	-0.4014
DFn	0.0104	0.4617	0.0465	0.2610	-0.1478	0.3044	-0.1347	0.4614	1.4914	-1.1136

Πίνακας 5.1. Ιακωβιανός πίνακας για σταθερή ισχύ

Order	CN	WF, NH, NL, P25, P3, T3, (T6 or T8)						
1	43.16	SWLPC	SELPC	SWHPC	SEHPC	SWHPT	SELPT	SEPT
2	43.61	SWLPC	SELPC	SWHPC	SWHPT	SEHPT	SELPT	SEPT
3	43.84	SWLPC	SELPC	SWHPC	SEHPC	SWHPT	SEHPT	SEPT
4	44.42	SWLPC	SWHPC	SEHPC	SWHPT	SEHPT	SELPT	SEPT
5	44.93	SWLPC	SELPC	SEHPC	SWHPT	SEHPT	SELPT	SEPT
6	49.24	SWLPC	SWHPC	SEHPC	SWHPT	SEHPT	SWPT	SEPT
7	50.21	SWLPC	SELPC	SWHPC	SEHPC	SWHPT	SWPT	SEPT
8	50.26	SWLPC	SELPC	SWHPC	SWHPT	SEHPT	SWPT	SEPT
9	50.57	SWLPC	SELPC	SWHPC	SEHPC	SWHPT	SEHPT	SWPT
10	50.65	SWLPC	SELPC	SEHPC	SWHPT	SEHPT	SWPT	SEPT
11	55.76	SWLPC	SWHPC	SEHPC	SWHPT	SEHPT	SELPT	SWPT
12	59.07	SWLPC	SELPC	SWHPC	SWHPT	SEHPT	SELPT	SWPT
13	59.07	SWLPC	SELPC	SWHPC	SEHPC	SWHPT	SELPT	SWPT
14	59.19	SWLPC	SELPC	SEHPC	SWHPT	SEHPT	SELPT	SWPT
15	63.93	SWLPC	SWHPC	SEHPC	SWHPT	SEHPT	SWLPT	SEPT
16	66.66	SWLPC	SELPC	SWHPC	SWHPT	SEHPT	SWLPT	SEPT
17	67.25	SWLPC	SWHPC	SEHPC	SWHPT	SWLPT	SELPT	SEPT
18	70.53	SWLPC	SELPC	SWHPC	SWHPT	SWLPT	SELPT	SEPT
19	70.56	SWLPC	SELPC	SEHPC	SWHPT	SEHPT	SWLPT	SEPT
20	72.43	SWLPC	SWHPC	SEHPC	SWHPT	SWLPT	SWPT	SEPT
21	72.43	SWLPC	SWHPC	SEHPC	SWHPT	SEHPT	SWLPT	SWPT
22	75.06	SWLPC	SELPC	SWHPC	SWHPT	SWLPT	SWPT	SEPT
23	75.75	SWLPC	SELPC	SWHPC	SWHPT	SEHPT	SWLPT	SWPT
24	75.85	SWLPC	SELPC	SEHPC	SWHPT	SWLPT	SELPT	SEPT
25	77.56	SWLPC	SWHPC	SEHPC	SWHPT	SWLPT	SELPT	SWPT
26	79.66	SWLPC	SELPC	SEHPC	SWHPT	SEHPT	SWLPT	SWPT
27	80.93	SWLPC	SELPC	SWHPC	SWHPT	SWLPT	SELPT	SWPT
28	81.10	SWLPC	SELPC	SEHPC	SWHPT	SWLPT	SWPT	SEPT
29	86.56	SWLPC	SELPC	SEHPC	SWHPT	SWLPT	SELPT	SWPT
30	91.72	SWHPC	SEHPC	SWHPT	SEHPT	SWLPT	SWPT	SEPT
31	92.21	SELPC	SWHPC	SWHPT	SEHPT	SWLPT	SWPT	SEPT
32	98.88	SELPC	SEHPC	SWHPT	SEHPT	SWLPT	SWPT	SEPT
33	102.64	SWHPC	SEHPC	SWHPT	SEHPT	SWLPT	SELPT	SEPT
34	102.98	SELPC	SWHPC	SWHPT	SEHPT	SWLPT	SELPT	SEPT
35	112.31	SELPC	SEHPC	SWHPT	SEHPT	SWLPT	SELPT	SEPT
36	121.79	SWHPC	SEHPC	SWHPT	SEHPT	SWLPT	SELPT	SWPT
37	122.38	SELPC	SWHPC	SWHPT	SEHPT	SWLPT	SELPT	SWPT
38	132.42	SELPC	SEHPC	SWHPT	SEHPT	SWLPT	SELPT	SWPT

Πίνακας 5.2. Καταλληλότητα συνδυασμών παραμέτρων υγείας για δεδομένες μετρήσεις με χρήση του αριθμού κατάστασης

Order	CN	LPC Fault	
1	9.64	NL	T3
2	10.56	NH	NL
3	11.08	WF	NL
4	11.10	NL	P3
5	14.89	NL	T6
6	15.70	NL	T8
7	17.10	NL	P25
8	75.06	P3	T3
9	104.17	P25	T3
10	128.86	NH	T3
11	155.22	WF	P3
12	156.76	WF	T3
13	157.80	T3	T6
14	168.77	WF	P25
15	173.16	T3	T8
16	177.52	P25	T8
17	180.88	NH	P3
18	189.71	P25	T6

Πίνακας 5.3. Καταλληλότητα συνδυασμών μετρήσεων για βλάβη σε συμπιεστή χαμηλής πίεσης με χρήση του αριθμού κατάστασης

Order	CN	HPC Fault	
1	5.94	NH	T8
2	5.94	NH	T6
3	6.31	NH	P25
4	6.67	WF	NH
5	7.14	NH	T3
6	7.80	NH	NL
7	8.41	NH	P3
8	26.36	P3	T3
9	39.05	NL	T3
10	41.07	WF	T3
11	49.64	T3	T6
12	53.35	T3	T8
13	70.43	P25	T3
14	80.98	NL	P3
15	84.85	WF	P3
16	123.73	P3	T6
17	124.80	P3	T8
18	142.85	P25	P3

Πίνακας 5.4. Καταλληλότητα συνδυασμών μετρήσεων για βλάβη σε συμπιεστή υψηλής πίεσης με χρήση του αριθμού κατάστασης

Order	CN	HPT Fault	
1	3.22	P25	P3
2	3.81	P3	T8
3	3.97	P3	T6
4	4.52	T3	T6
5	4.57	NL	T3
6	4.82	T3	T8
7	5.40	NH	P25
8	5.68	P25	T3
9	5.98	NH	T8
10	6.04	NH	T6
11	6.45	WF	P3
12	6.95	WF	T3
13	7.39	NH	P3
14	7.51	NL	P3
15	10.34	NH	NL
16	11.72	WF	T6
17	12.13	WF	NL
18	12.93	WF	NH
19	12.99	WF	T8
20	14.77	WF	P25
21	16.95	P3	T3
22	35.77	NH	T3
23	110.83	NL	T8
24	148.06	NL	P25
25	153.78	T6	T8
26	185.49	P25	T6

Πίνακας 5.5. Καταλληλότητα συνδυασμών μετρήσεων για βλάβη σε στρόβιλο υψηλής πίεσης με χρήση του αριθμού κατάστασης

Order	CN	LPT Fault	
1	2.28	NH	T8
2	2.31	NH	T6
3	2.84	NH	P3
4	2.94	NL	T8
5	2.95	NL	T6
6	3.08	P3	T3
7	3.11	WF	NH
8	3.25	NL	P3
9	3.28	WF	T3
10	3.87	WF	NL
11	4.97	T3	T6
12	5.38	T3	T8
13	5.71	P25	T8
14	6.05	P25	T6
15	6.76	NL	T3
16	7.91	NH	T3
17	8.41	P25	P3
18	9.44	WF	P25
19	9.45	WF	P3
20	10.88	NH	NL
21	13.73	P3	T8
22	13.90	P3	T6
23	14.63	NH	P25
24	18.39	P25	T3
25	46.33	WF	T6
26	60.02	WF	T8
27	133.60	NL	P25

Πίνακας 5.6. Καταλληλότητα συνδυασμών μετρήσεων για βλάβη σε στρόβιλο χαμηλής πίεσης με χρήση του αριθμού κατάστασης

Order	CN	PT Fault	
1	1.37	WF	T6
2	1.64	NH	T3
3	1.66	WF	NL
4	1.82	WF	T8
5	1.84	P3	T8
6	1.87	NL	T8
7	2.28	WF	P3
8	2.43	T3	T8
9	2.47	P3	T6
10	2.58	WF	P25
11	2.87	NL	T6
12	2.89	T3	T6
13	3.57	P25	T8
14	3.60	WF	NH
15	3.81	NH	NL
16	3.89	WF	T3
17	5.13	NH	P3
18	5.23	P25	T6
19	6.36	T6	T8
20	7.85	P25	P3
21	9.13	NL	T3
22	9.19	NL	P3
23	10.62	NH	P25
24	18.09	NH	T6
25	19.59	P25	T3
26	21.53	NH	T8
27	77.99	NL	P25
28	91.31	P3	T3

Πίνακας 5.7. Καταλληλότητα συνδυασμών μετρήσεων για βλάβη σε στρόβιλο ισχύος με χρήση του αριθμού κατάστασης

Order	CN	LPC&HPC Fault			
1	23.90	NH	NL	P25	T3
2	24.03	NH	NL	P25	P3
3	24.08	WF	NH	NL	P25
4	24.93	NH	NL	P25	T6
5	25.23	NH	NL	P25	T8
6	109.74	NL	P25	P3	T3
7	130.27	NL	P25	T3	T6
8	133.89	NL	P25	T3	T8
9	147.03	WF	NL	P25	T3
10	196.00	NH	P25	P3	T3

Πίνακας 5.8. Καταλληλότητα συνδυασμών μετρήσεων για βλάβη στους συμπιεστές με χρήση του αριθμού κατάστασης

Order	CN	HPT&LPT Fault			
1	61.76	NH	NL	P3	T3
2	62.94	NH	NL	P3	T6
3	63.68	NH	NL	P3	T8
4	67.50	WF	NH	NL	P3
5	70.84	WF	NH	T3	T6
6	73.61	WF	NH	NL	T3
7	76.99	WF	NH	T3	T8
8	77.51	NH	NL	T3	T8
9	78.51	NH	NL	T3	T6
10	81.24	WF	NL	T3	T6
11	87.09	WF	NL	P25	T3
12	88.78	NL	P25	T3	T8
13	88.80	NL	P25	T3	T6
14	89.91	WF	NL	P25	P3
15	90.77	NL	P25	P3	T6
16	90.89	NL	P25	P3	T8
17	93.05	NL	P25	P3	T3
18	94.98	WF	NL	T3	T8
19	97.91	NH	NL	P25	P3
20	98.42	WF	NH	NL	P25
21	99.64	NH	NL	P25	T8
22	99.68	NH	NL	P25	T6
23	103.36	WF	NL	P3	T6
24	105.53	WF	NH	P3	T6
25	108.93	WF	P3	T3	T6
26	111.05	WF	NL	P25	T8
27	112.21	WF	NL	P25	T6
28	121.96	WF	NH	P3	T3
29	122.00	WF	NL	P3	T8
30	122.86	WF	NH	P3	T8
31	128.22	WF	P3	T3	T8
32	140.71	WF	P25	T3	T6
33	140.91	NH	NL	P25	T3
34	155.50	NH	P3	T3	T8
35	156.50	WF	P25	T3	T8
36	161.44	NH	P3	T3	T6
37	167.57	WF	P25	P3	T6
38	193.17	WF	P25	P3	T8
39	194.68	WF	NH	P25	T6
40	197.83	WF	P25	P3	T3

Πίνακας 5.9. Καταλληλότητα συνδυασμών μετρήσεων για βλάβη στους στροβίλους υψηλής και χαμηλής πίεσης με χρήση του αριθμού κατάστασης

Order	CN	HPT&PT Fault			
1	7.37	WF	NL	T3	T6
2	7.91	WF	NH	P3	T6
3	8.01	WF	NL	P3	T6
4	8.52	WF	NL	T3	T8
5	8.57	WF	P25	P3	T6
6	8.75	WF	NH	NL	T6
7	8.91	WF	NH	P3	T8
8	9.00	WF	NL	P3	T8
9	9.71	WF	NH	NL	T8
10	9.92	WF	P25	P3	T8
11	10.29	WF	NH	P25	T6
12	11.59	WF	NH	P25	T8
13	12.64	WF	P25	T3	T6
14	13.51	WF	P25	T3	T8
15	15.73	WF	NH	T3	T6
16	16.45	WF	NH	T3	T8
17	22.37	WF	P3	T3	T8
18	22.57	WF	P3	T3	T6
19	25.46	P3	T3	T6	T8
20	26.14	NL	T3	T6	T8
21	26.78	NH	NL	T6	T8
22	28.55	WF	NL	P3	T3
23	29.75	NH	P3	T6	T8
24	30.90	NL	P3	T6	T8
25	33.92	WF	NH	P3	T3
26	33.96	P25	P3	T6	T8
27	34.87	NL	P3	T3	T8
28	35.40	NH	T3	T6	T8
29	35.70	NH	P25	T6	T8
30	36.11	WF	P25	P3	T3
31	38.23	P25	T3	T6	T8
32	38.66	NL	P3	T3	T6
33	41.85	NH	P3	T3	T8
34	42.12	P25	P3	T3	T8
35	44.06	WF	NH	NL	P3
36	45.96	NH	NL	P3	T8
37	46.29	WF	NH	P25	P3
38	46.90	NH	P3	T3	T6
39	47.17	P25	P3	T3	T6
40	48.06	NH	NL	P3	T6
41	52.89	NH	P25	P3	T8
42	58.91	NH	P25	P3	T6
43	64.10	WF	NH	NL	T3
44	82.48	WF	NH	P25	T3
45	90.26	NH	NL	T3	T8
46	92.19	NH	P25	T3	T8
47	100.81	NH	P25	T3	T6

Order	CN	HPT&PT Fault			
48	104.89	NH	NL	T3	T6
49	116.58	NH	NL	P25	T3
50	117.71	NL	P25	P3	T3
51	122.12	NH	NL	P25	P3
52	125.79	NL	P25	P3	T6
53	135.89	NL	P25	P3	T8
54	139.89	WF	NL	T6	T8
55	141.22	NH	NL	P25	T6
56	150.20	NH	NL	P3	T3
57	157.57	NH	NL	P25	T8
58	157.72	NL	P25	T3	T6
59	175.31	WF	NL	P25	T8
60	180.50	NL	P25	T3	T8
61	188.97	WF	NL	P25	T6

Πίνακας 5.10. Καταλληλότητα συνδυασμών μετρήσεων για βλάβη στους στροβίλους υψηλής πίεσης και ισχύος με χρήση του αριθμού κατάστασης

Order	CN	LPC&LPT Fault			
1	43.17	NH	NL	P3	T3
2	43.28	WF	NH	NL	T3
3	47.09	NH	NL	T3	T6
4	48.09	NH	NL	T3	T8
5	61.80	NL	P25	P3	T3
6	62.57	WF	NL	P25	T3
7	63.61	NL	P25	T3	T6
8	64.05	NL	P25	T3	T8
9	64.45	NH	NL	P25	T3
10	64.92	NH	NL	P25	P3
11	65.38	NL	P25	P3	T6
12	65.42	WF	NH	NL	P25
13	65.55	NL	P25	P3	T8
14	66.46	NH	NL	P25	T6
15	66.85	NH	NL	P25	T8
16	68.61	WF	NL	P25	P3
17	108.02	NH	NL	P3	T6
18	110.58	NH	NL	P3	T8
19	173.71	WF	NH	NL	P3
20	193.94	WF	NL	P3	T3

Πίνακας 5.11. Καταλληλότητα συνδυασμών μετρήσεων για βλάβη σε συμπιεστή και στρόβιλο χαμηλής πίεσης με χρήση του αριθμού κατάστασης

Order	CN	LPC&PT Fault			
1	31.41	NL	P3	T3	T8
2	31.64	WF	NL	T3	T6
3	31.91	WF	NL	P3	T3
4	32.11	NL	P3	T3	T6
5	34.92	NH	NL	P3	T3
6	36.89	WF	NL	T3	T8
7	39.28	WF	NH	NL	P3
8	41.85	WF	NL	P25	T3
9	42.59	WF	NH	NL	P25
10	44.06	WF	NL	P25	T8
11	44.24	WF	NL	P25	T6
12	44.38	WF	NH	NL	T3
13	44.68	NL	P25	T3	T8
14	44.96	NH	NL	P25	T3
15	45.74	NL	P25	T3	T6
16	46.43	NL	P25	P3	T3
17	46.58	NH	NL	P25	P3
18	46.74	WF	NL	P25	P3
19	47.83	NL	P25	P3	T8
20	48.30	NL	P25	P3	T6
21	51.76	NH	NL	P3	T8
22	54.56	NH	NL	P25	T8
23	56.98	WF	NL	P3	T6
24	57.59	WF	NL	P3	T8
25	60.78	NH	NL	P3	T6
26	68.02	WF	NH	NL	T6
27	79.92	WF	NH	NL	T8
28	82.44	NL	P25	T6	T8
29	83.42	NL	T3	T6	T8
30	85.68	NH	NL	P25	T6
31	114.31	NH	NL	T6	T8
32	140.26	NH	NL	T3	T8

Πίνακας 5.12. Καταλληλότητα συνδυασμών μετρήσεων για βλάβη σε συμπιεστή χαμηλής πίεσης και στρόβιλο ισχύος με χρήση του αριθμού κατάστασης

Order	CN	HPC&HPT Fault			
1	17.61	NH	P25	P3	T3
2	17.97	NH	P3	T3	T8
3	18.25	NH	P3	T3	T6
4	22.31	WF	NH	P3	T3
5	25.78	NH	NL	P3	T3
6	65.05	WF	NH	T3	T6
7	69.91	WF	NH	T3	T8
8	74.65	WF	NH	NL	T3
9	74.71	WF	NH	P25	T3

Πίνακας 5.13. Καταλληλότητα συνδυασμών μετρήσεων για βλάβη σε συμπιεστή και στρόβιλο υψηλής πίεσης με χρήση του αριθμού κατάστασης

5.2. Δημιουργία υπογραφών βλαβών για τον PW123AF

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η εφαρμογή της δημιουργίας υπογραφών τυπικών βλαβών – MODE 7 του λογισμικού που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

Παρακάτω παρουσιάζονται αρχικά οι μεταβολές των μετρούμενων μεγεθών υπό την παρουσία βλαβών στις διάφορες συνιστώσες για διάφορα επίπεδα σοβαρότητας βλάβης (Διάγραμμα 5.1 – Διάγραμμα 5.20). Έπειτα, παρουσιάζονται οι υπογραφές βλαβών για σοβαρότητα βλάβης 100% (Διάγραμμα 5.21 – Διάγραμμα 5.28). Τέλος, για καλύτερη σύγκριση των υπογραφών παρουσιάζονται στο ίδιο διάγραμμα οι υπογραφές για την ίδια βλάβη σε διαφορετική συνιστώσα.

Από τη μελέτη των υπογραφών βλαβών, παρατηρούμε αρχικά ότι οι υπογραφές των βλαβών του συμπιεστή είναι παρόμοιες για διαφορετικές βλάβες, έχουν όμως διαφορετικό μέγεθος ανάλογα τη βλάβη (βλ. διαγράμματα αύξησης ακτινικού διακένου, διάβρωσης πτερυγίων, επικαθίσεων). Πιο συγκεκριμένα, για όλες τις πιθανές βλάβες των συμπιεστών παρατηρούμε αύξηση της παροχής καυσίμου, μείωση της πίεσης εξόδου συμπιεστή υψηλής πίεσης, αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου συμπιεστή υψηλής πίεσης και αύξηση της θερμοκρασίας ITT και για τους 2 συμπιεστές. Οι διαφορές που παρουσιάζονται είναι στις στροφές, όπου για το συμπιεστή χαμηλής πίεσης παρατηρούμε αύξηση των στροφών υψηλής και μείωση των στροφών χαμηλής, ενώ ο συμπιεστής υψηλής πίεσης παρουσιάζει αντίθετη συμπεριφορά. Το ίδιο συμβαίνει και στην πίεση εξόδου συμπιεστή χαμηλής πίεσης, όπου για το συμπιεστή χαμηλής πίεσης παρουσιάζεται μείωση του μεγέθους, ενώ στο συμπιεστή

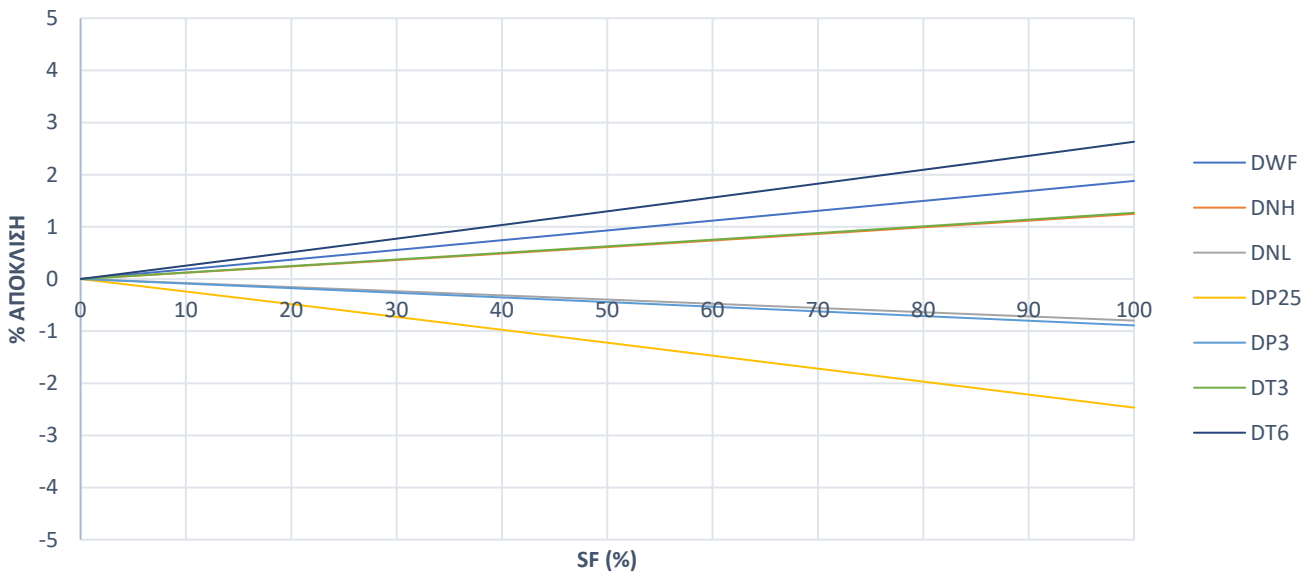
υψηλής αύξηση. Παρατηρούμε επίσης, ότι για τις περιπτώσεις βλάβης λόγω αύξησης ακτινικού διακένου και διάβρωσης πτερυγίων οι αποκλίσεις του συμπιεστή χαμηλής πίεσης είναι μεγαλύτερες από αυτές του υψηλής. Επίσης, για βλάβη λόγω επικαθίσεων στους συμπιεστές παρατηρούμε ότι οι αποκλίσεις είναι αρκετά μικρές σε σχέση με τις υπόλοιπες βλάβες που αναφέρθηκαν έως τώρα, με μέγιστη απόκλιση για το συμπιεστή υψηλής πίεσης στην πίεση εξόδου συμπιεστή χαμηλής πίεσης ίση με 1.61%.

Τέλος, γίνεται αντιληπτό, ότι η μεταβολή της παροχής του συμπιεστή έχει πολύ μικρή επίδραση στον κινητήρα, κάτι που επαληθεύεται και από την ανάλυση ευαισθησίας, όπου παρατηρούμε την επίδραση της παροχής του συμπιεστή χαμηλής πίεσης ίση με -0.014% και αντίστοιχα του συμπιεστή υψηλής πίεσης ίση με -0.045% για 1% αλλαγή της παραμέτρου υγείας SW.

Από τη μελέτη των υπογραφών βλαβών των στροβίλων δεν παρατηρούμε ομοιότητα μεταξύ των τεσσάρων υπογραφών. Παρατηρούμε όμως παρόμοια συμπεριφορά μεταξύ της κάμψης σταθερών πτερυγίων και των εξανθρακωμάτων, όπως επίσης και μεταξύ της αύξησης διακένων και της διάβρωσης πτερυγίων. Είναι σαφές ότι οι μεγαλύτερες αποκλίσεις παρατηρούνται για την πίεση εξόδου του συμπιεστή χαμηλής πίεσης που φτάνει μέχρι και 12% για βλάβη στο στρόβιλο χαμηλής πίεσης. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρούμε ότι οι αποκλίσεις για την παροχή καυσίμου παρουσιάζουν αυξητική τάση, εκτός από την περίπτωση κάμψης σταθερών πτερυγίων στροβίλου υψηλής και χαμηλής πίεσης, όπου παρουσιάζεται μείωση του μεγέθους. Το ίδιο παρατηρείται και για το στρόβιλο υψηλής πίεσης για βλάβη λόγω εξανθρακωμάτων. Μέσω των υπογραφών μπορούμε να παρατηρήσουμε επίσης, ότι οι στροφές υψηλής δεν επηρεάζονται σημαντικά για βλάβη στο στρόβιλο ισχύος. Επιπλέον, οι βλάβες στο στρόβιλο χαμηλής πίεσης, φαίνεται να μην επηρεάζουν τη θερμοκρασία εξόδου του συμπιεστή υψηλής πίεσης.

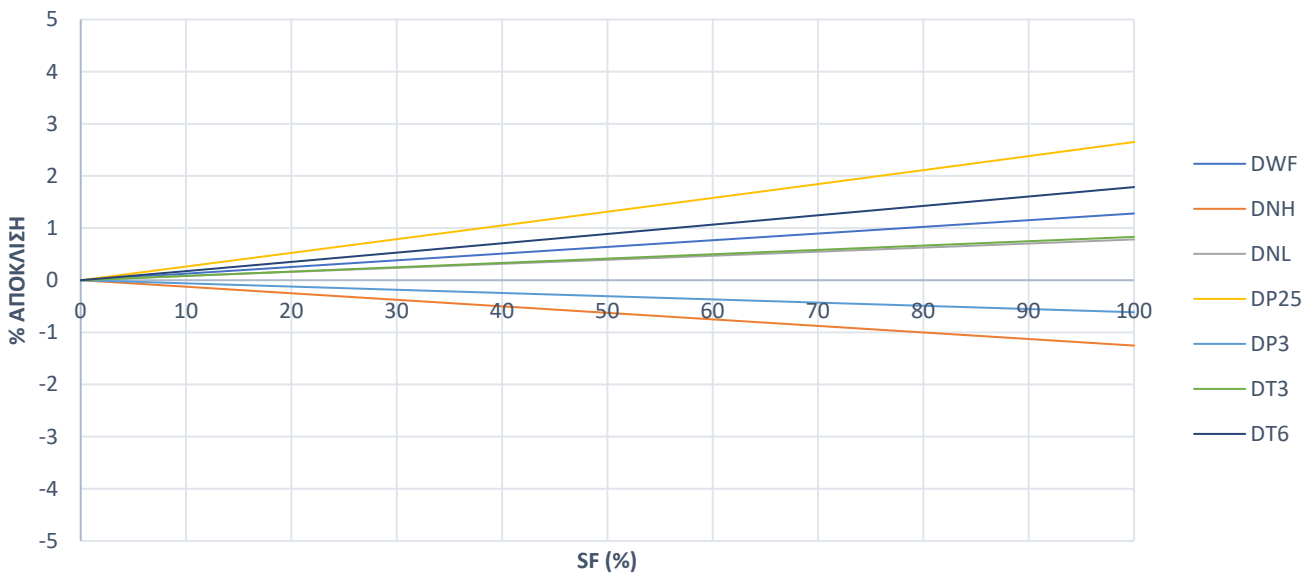
Τέλος, παρατηρούμε ότι οι αποκλίσεις των μετρούμενων μεγεθών στους στροβίλους παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές από αυτές των συμπιεστών.

ΑΥΞΗΣΗ ΑΚΤΙΝΙΚΟΥ ΔΙΑΚΕΝΟΥ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ

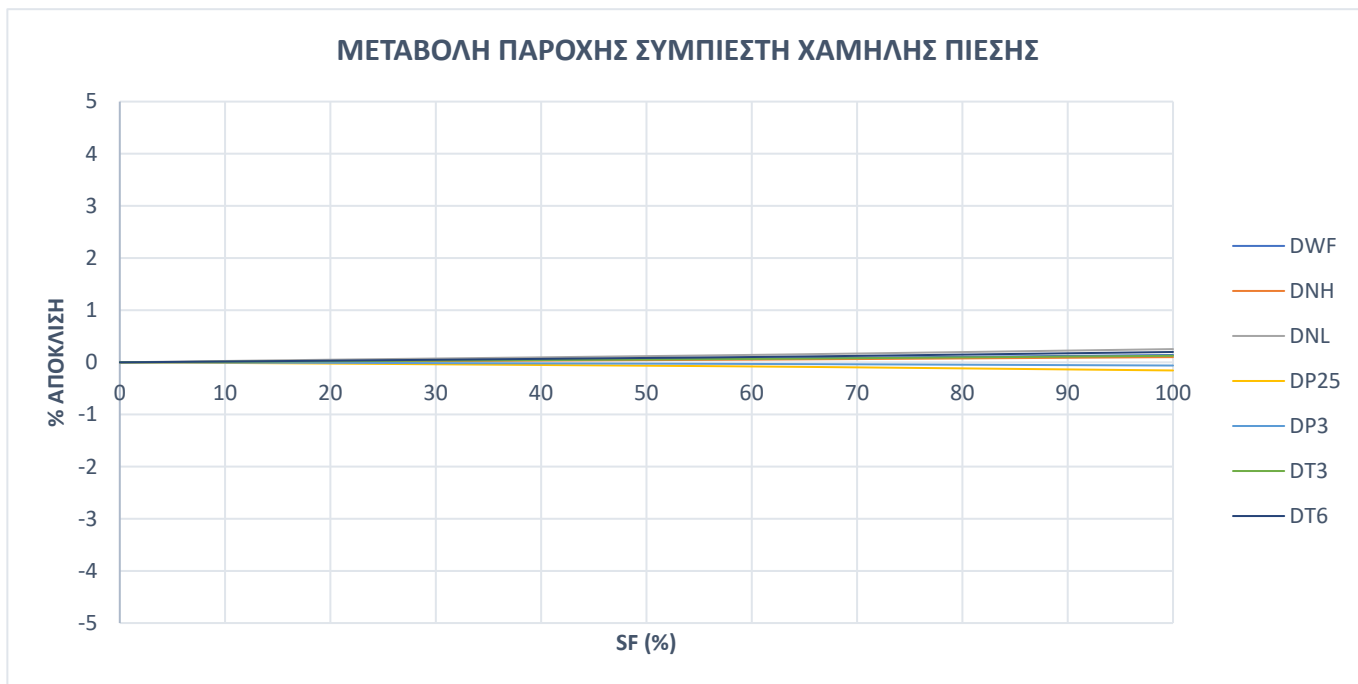


Διάγραμμα 5.1. Αποκλίσεις των μεγεθών συναρτήσει του SF (%) για αύξηση ακτινικού διακένου συμπίεστη χαμηλής πίεσης

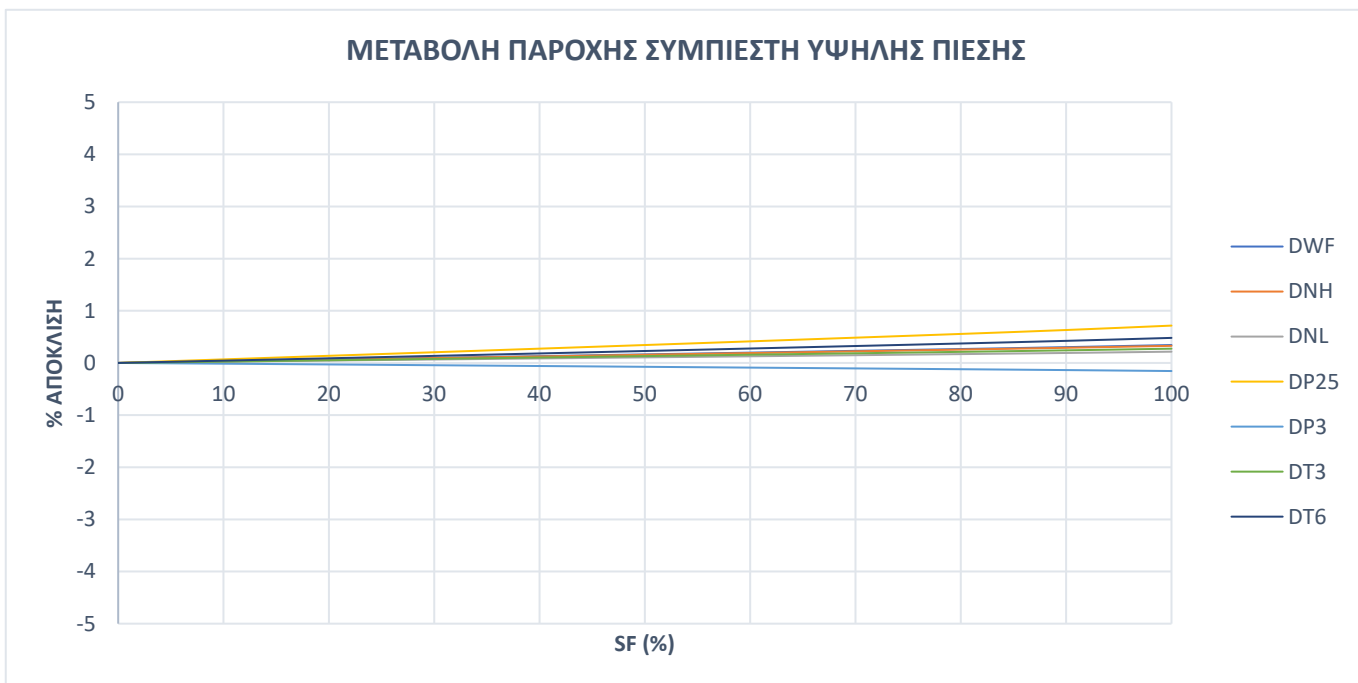
ΑΥΞΗΣΗ ΑΚΤΙΝΙΚΟΥ ΔΙΑΚΕΝΟΥ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ ΥΨΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ



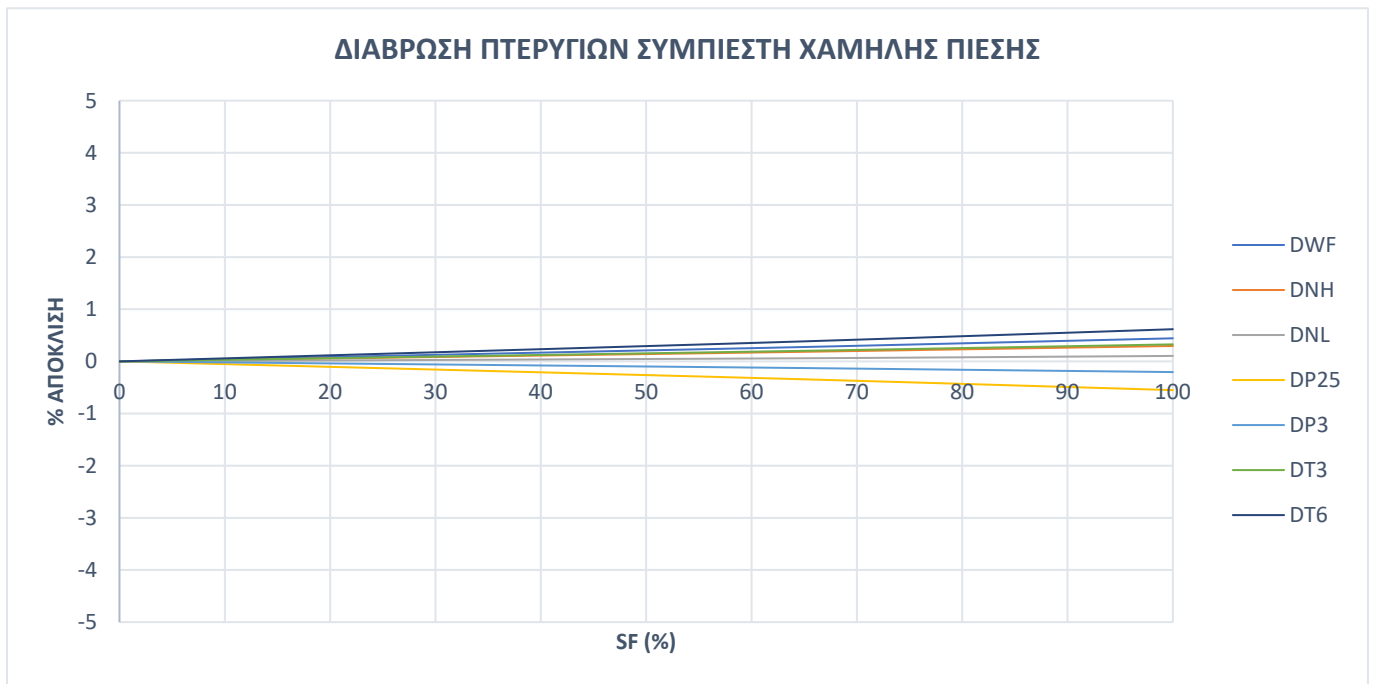
Διάγραμμα 5.2. Αποκλίσεις των μεγεθών συναρτήσει του SF (%) για αύξηση ακτινικού διακένου συμπίεστη υψηλής πίεσης



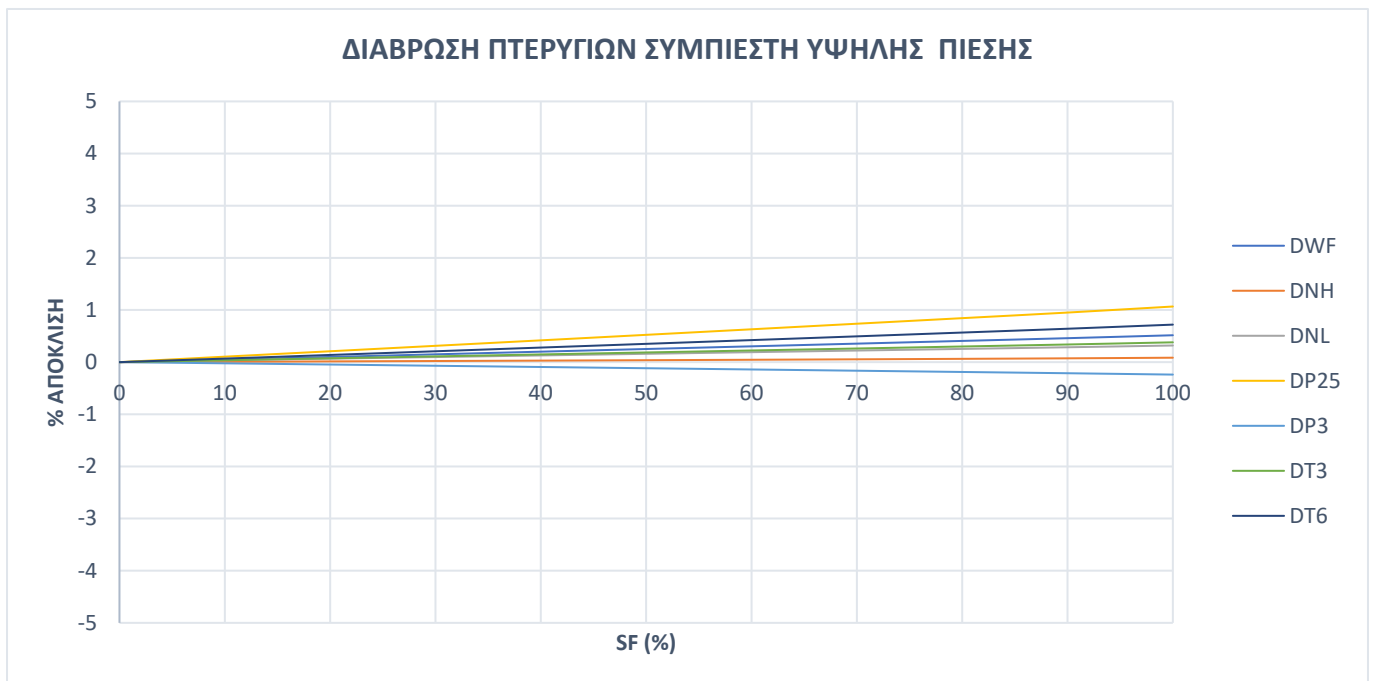
Διάγραμμα 5.3. Αποκλίσεις των μεγεθών συναρτήσει του SF (%) για μεταβολή παροχής συμπιεστή χαμηλής πίεσης



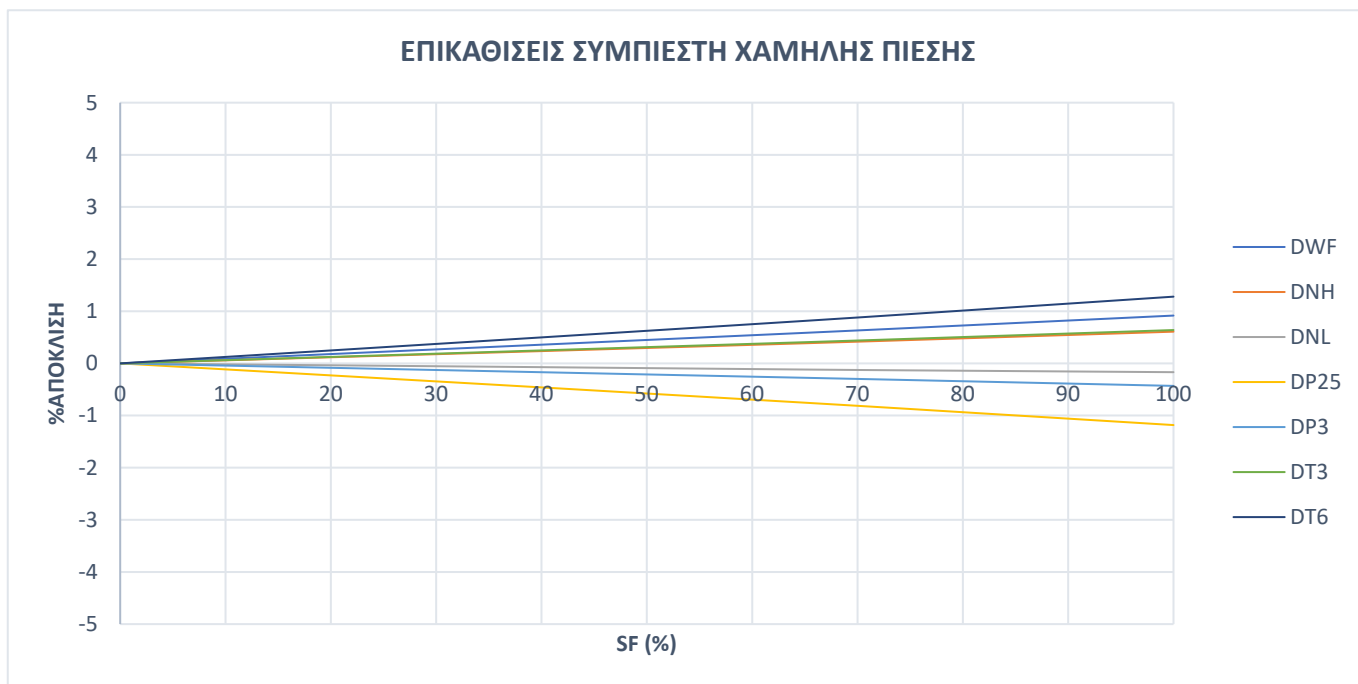
Διάγραμμα 5.4. Αποκλίσεις των μεγεθών συναρτήσει του SF (%) για μεταβολή παροχής συμπιεστή υψηλής πίεσης



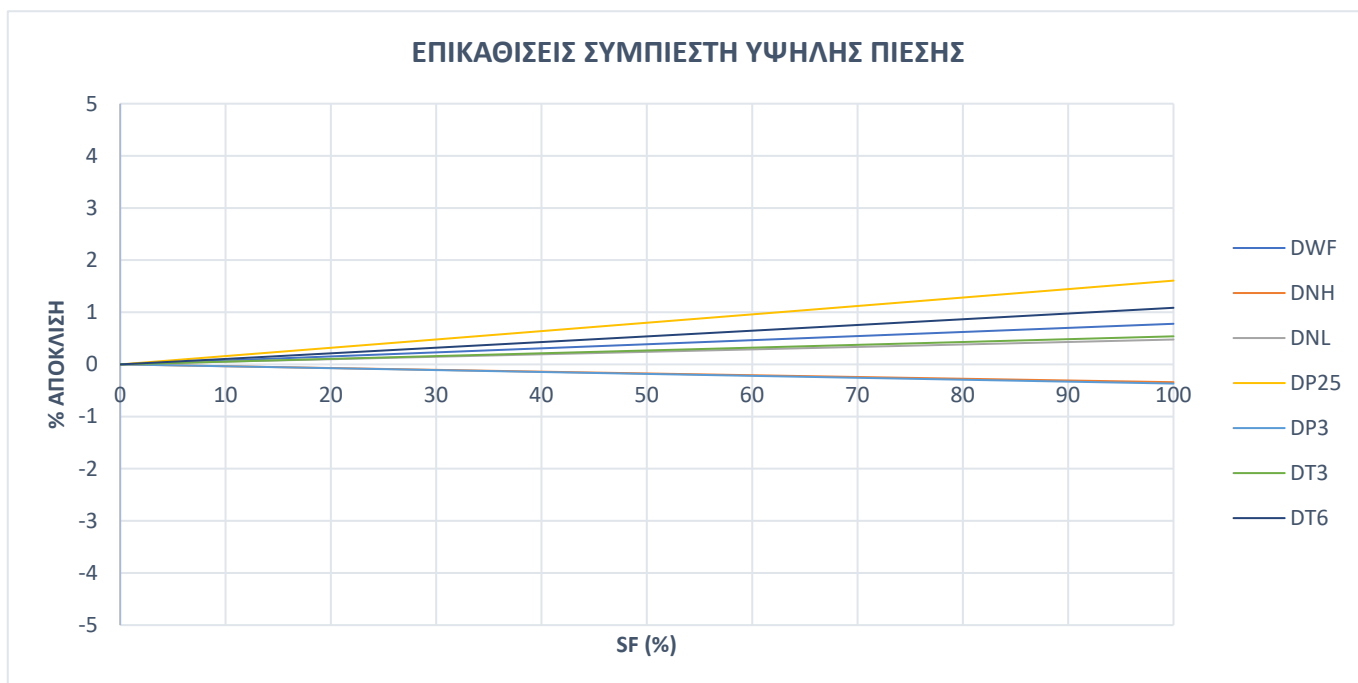
Διάγραμμα 5.5. Αποκλίσεις των μεγεθών συναρτήσει του SF (%) για διάβρωση πτερυγίων συμπιεστή χαμηλής πίεσης



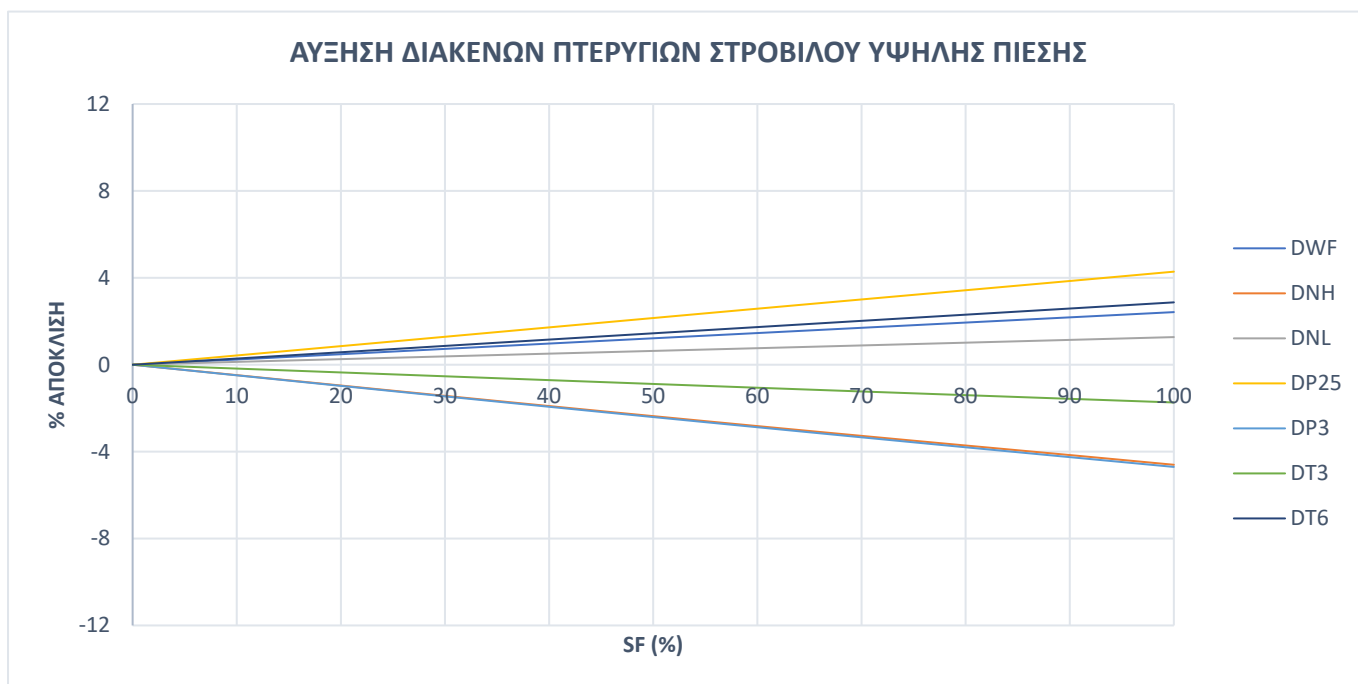
Διάγραμμα 5.6. Αποκλίσεις των μεγεθών συναρτήσει του SF (%) για διάβρωση πτερυγίων συμπιεστή υψηλής πίεσης



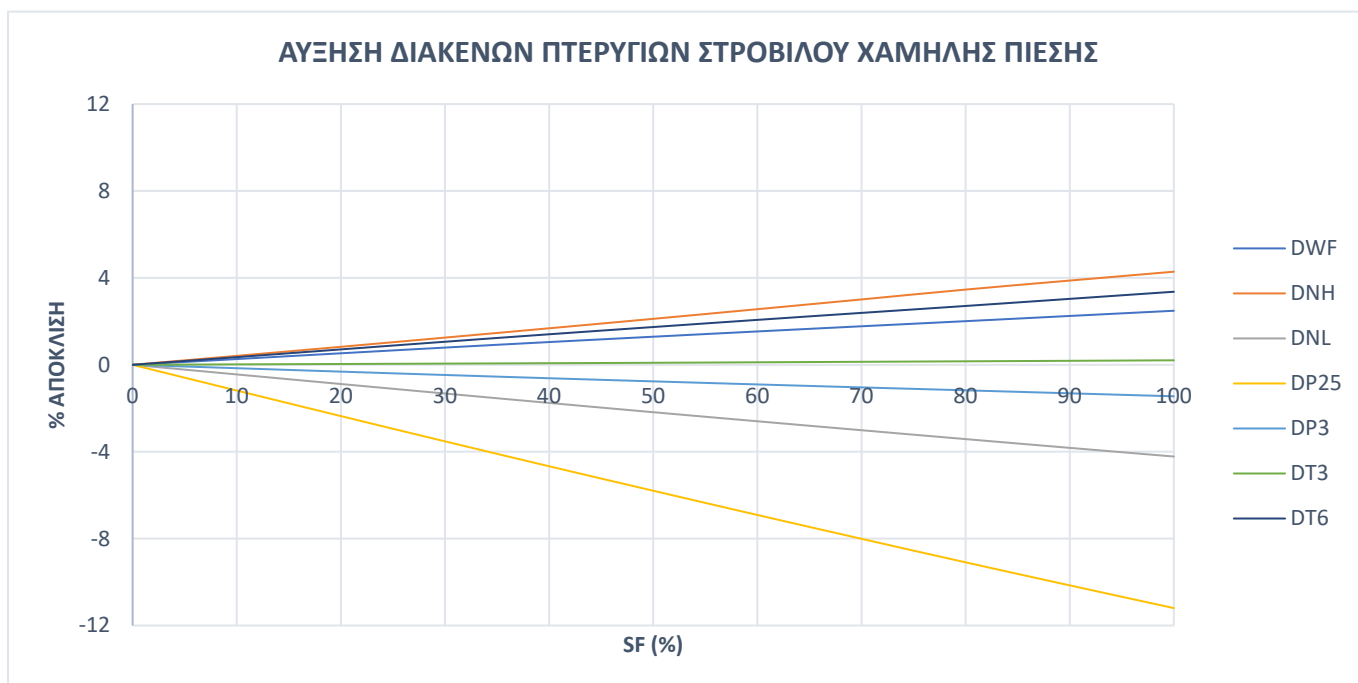
Διάγραμμα 5.7. Αποκλίσεις των μεγεθών συναρτήσει του SF (%) για επικαθίσεις συμπίεστη χαμηλής πίεσης



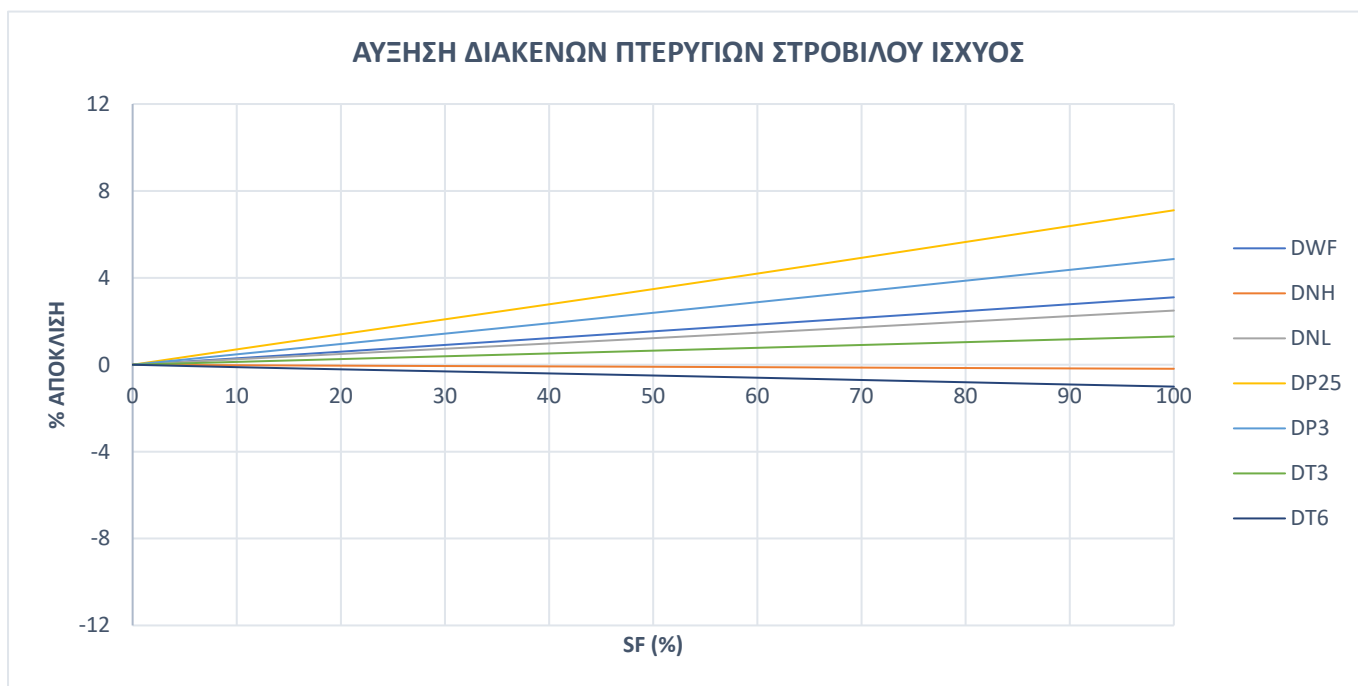
Διάγραμμα 5.8. Αποκλίσεις των μεγεθών συναρτήσει του SF (%) για επικαθίσεις συμπίεστη υψηλής πίεσης



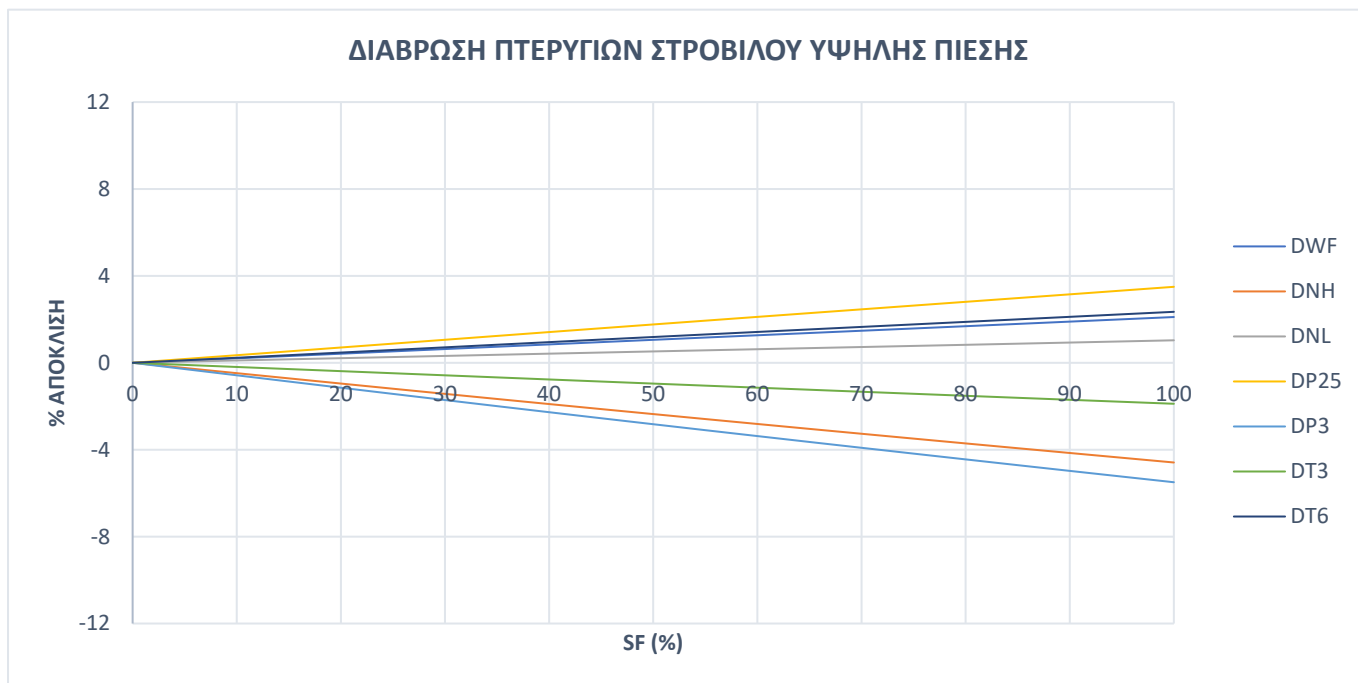
Διάγραμμα 5.9. Αποκλίσεις των μεγεθών συναρτήσει του SF (%) για αύξηση διακένων πτερυγίων στροβίλου υψηλής πίεσης



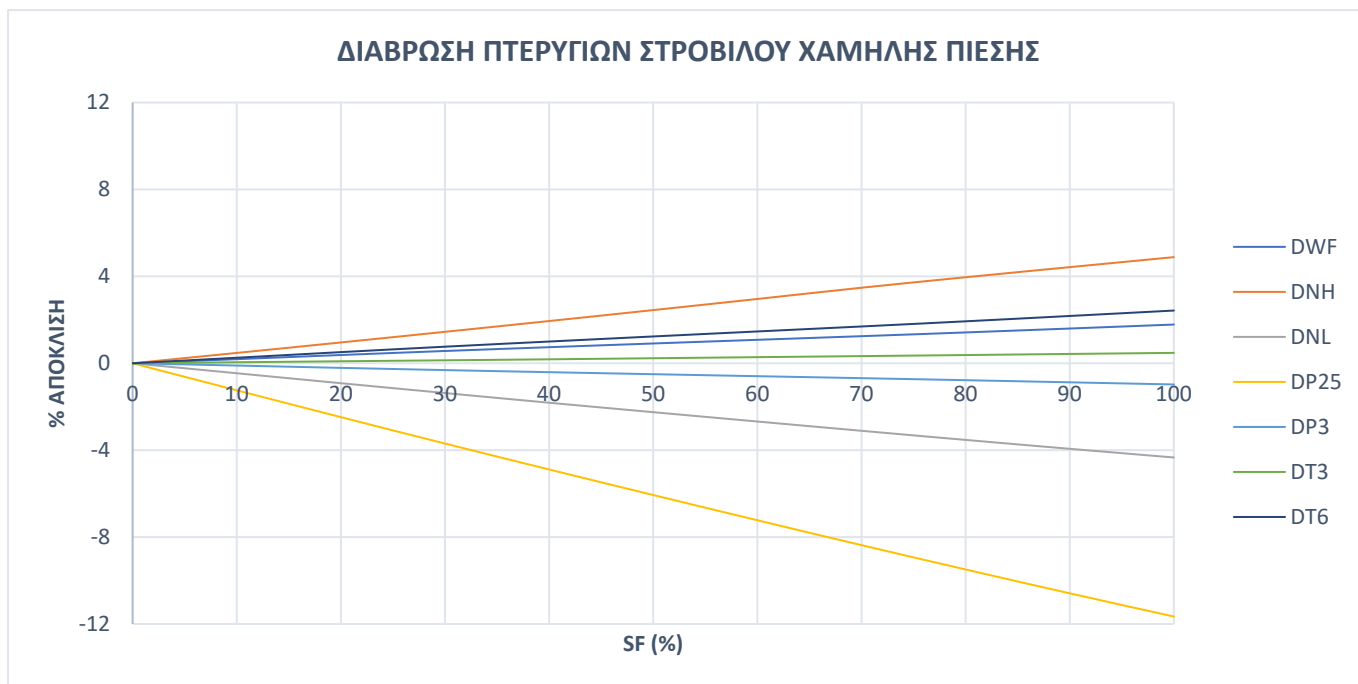
Διάγραμμα 5.10. Αποκλίσεις των μεγεθών συναρτήσει του SF (%) για αύξηση διακένων πτερυγίων στροβίλου χαμηλής πίεσης



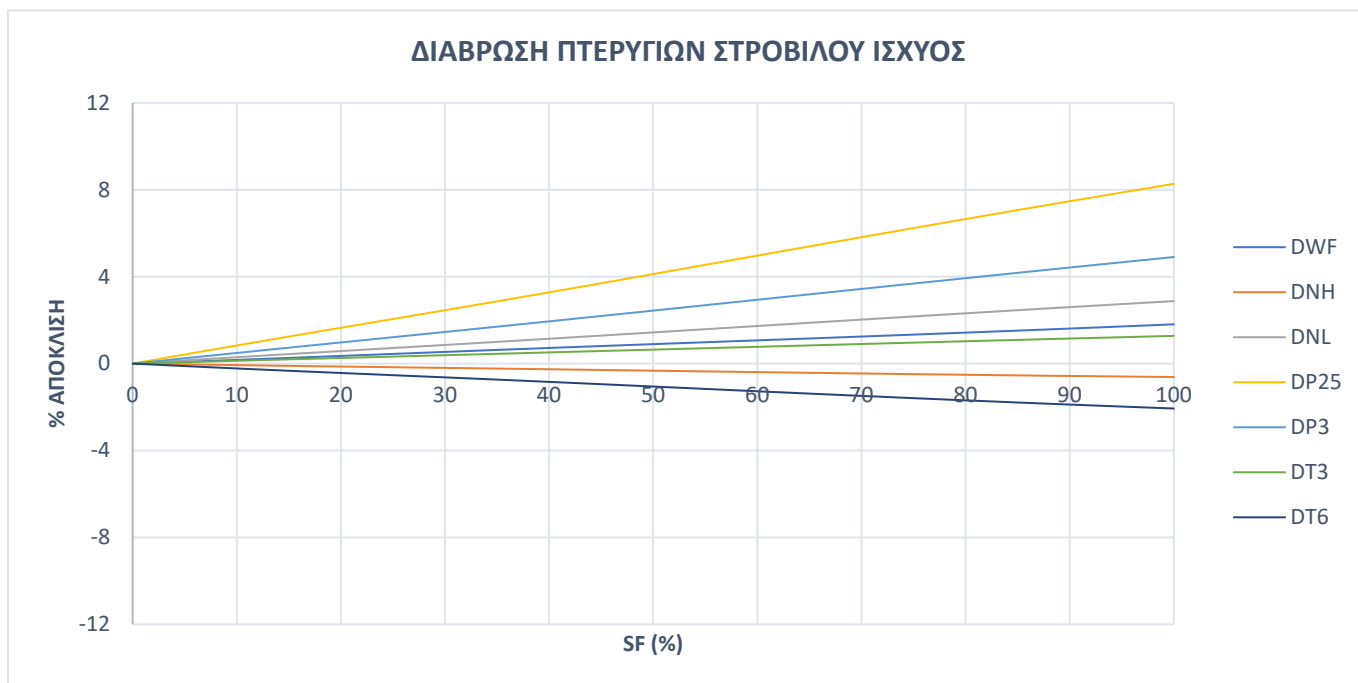
Διάγραμμα 5.11. Αποκλίσεις των μεγεθών συναρτήσει του SF (%) για αύξηση διακένων πτερυγίων στροβίλου ισχύος



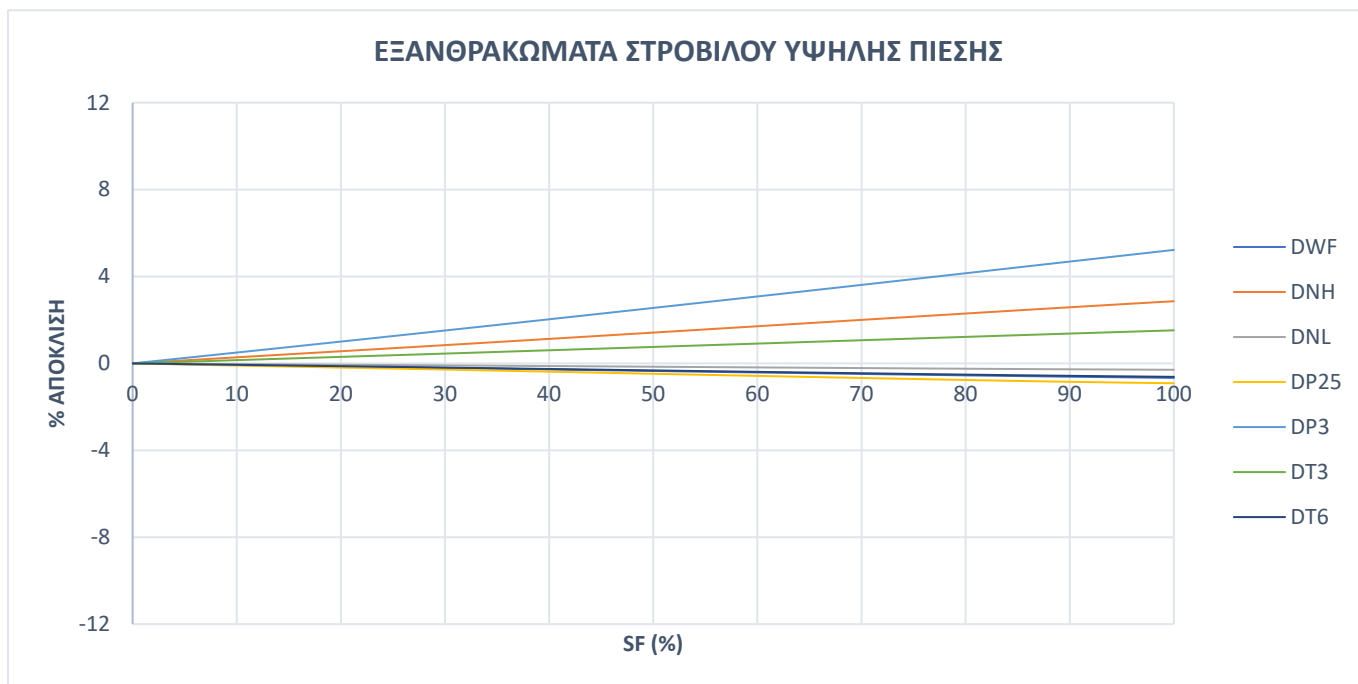
Διάγραμμα 5.12. Αποκλίσεις των μεγεθών συναρτήσει του SF (%) για διάβρωση πτερυγίων στροβίλου υψηλής πίεσης



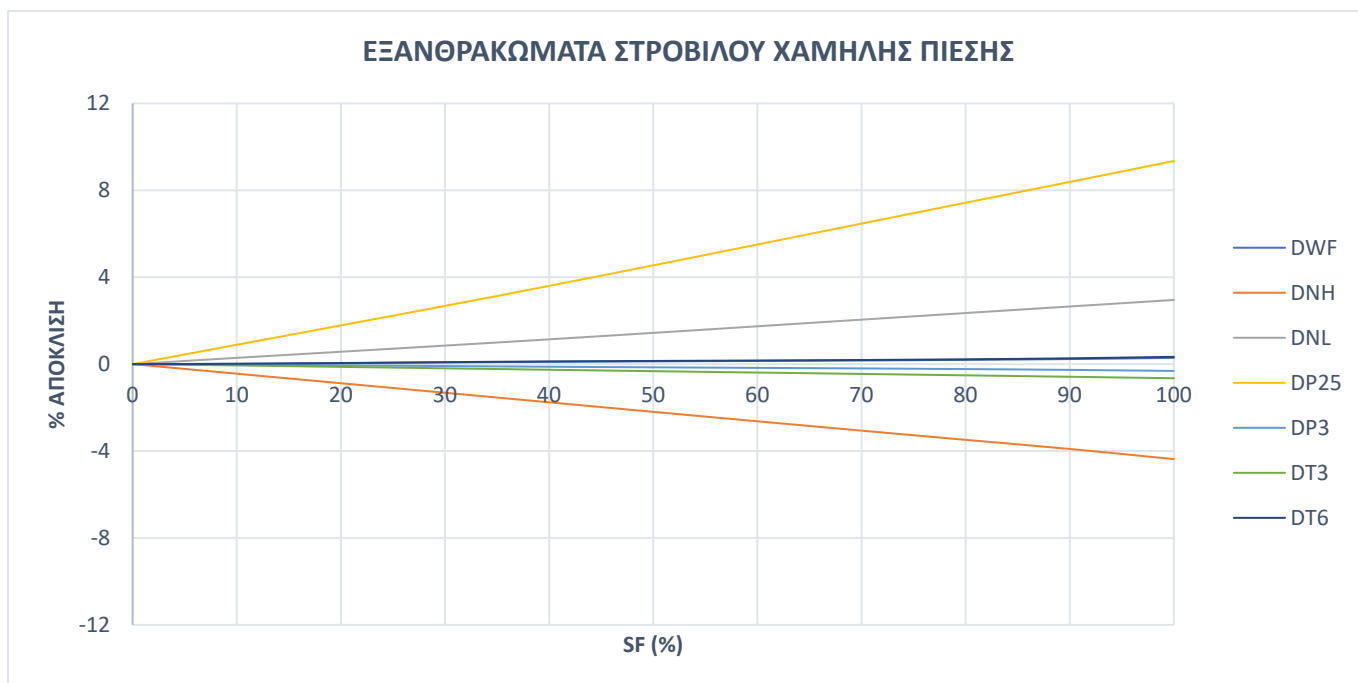
Διάγραμμα 5.13. Αποκλίσεις των μεγεθών συναρτήσει του SF (%) για διάβρωση πτερυγίων στροβίλου χαμηλής πίεσης



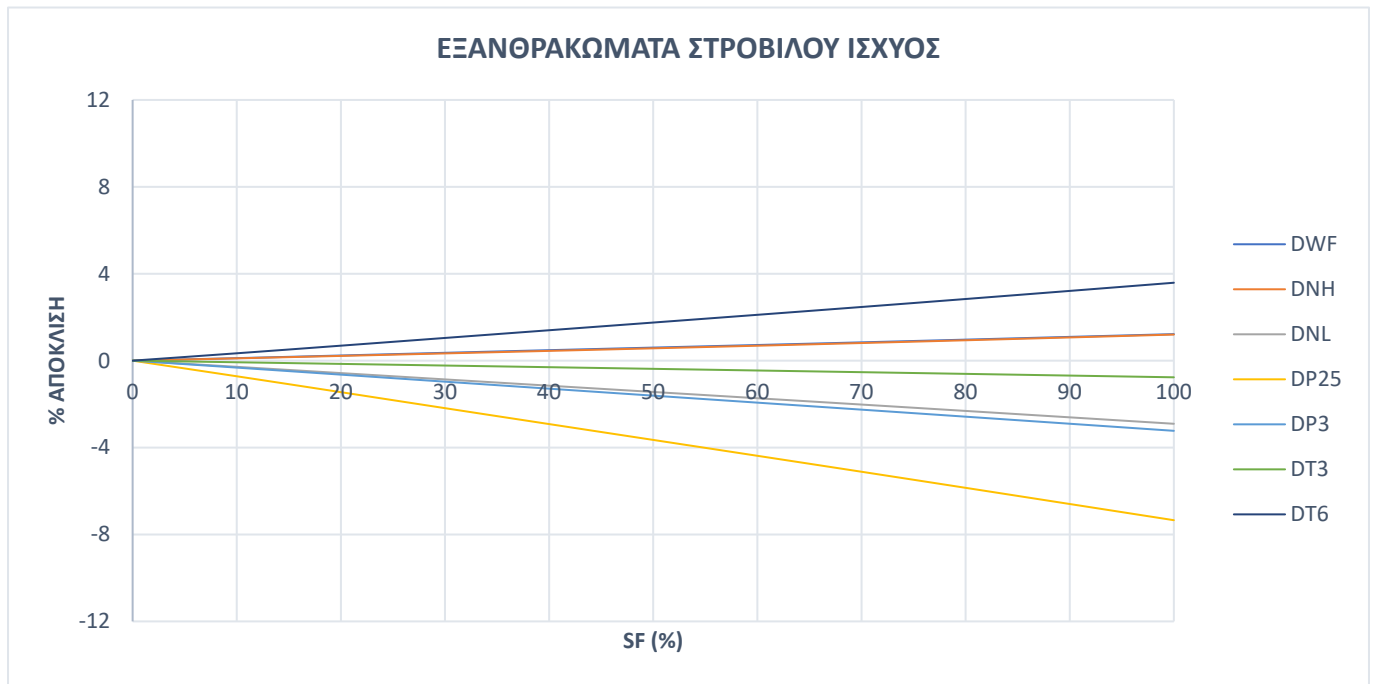
Διάγραμμα 5.14. Αποκλίσεις των μεγεθών συναρτήσει του SF (%) για διάβρωση πτερυγίων στροβίλου ισχύος



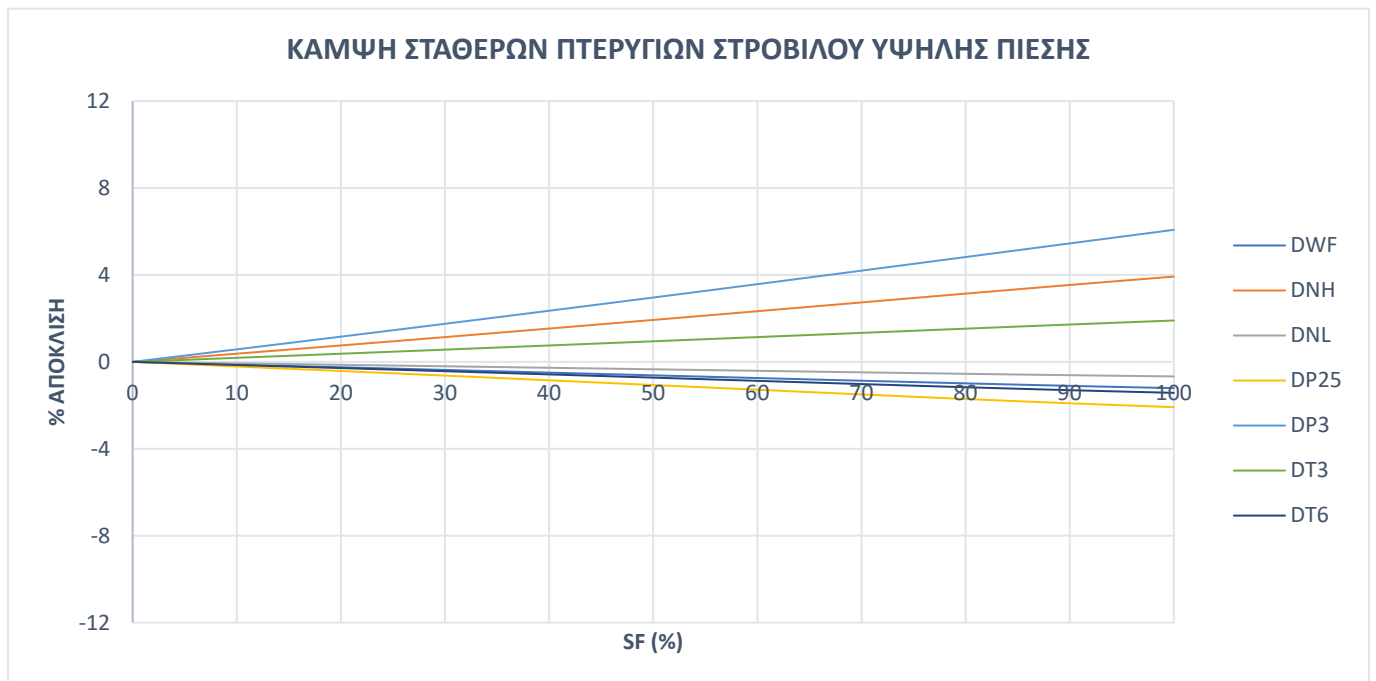
Διάγραμμα 5.15. Αποκλίσεις των μεγεθών συναρτήσει του SF (%) για εξανθρακώματα στροβίλου υψηλής πίεσης



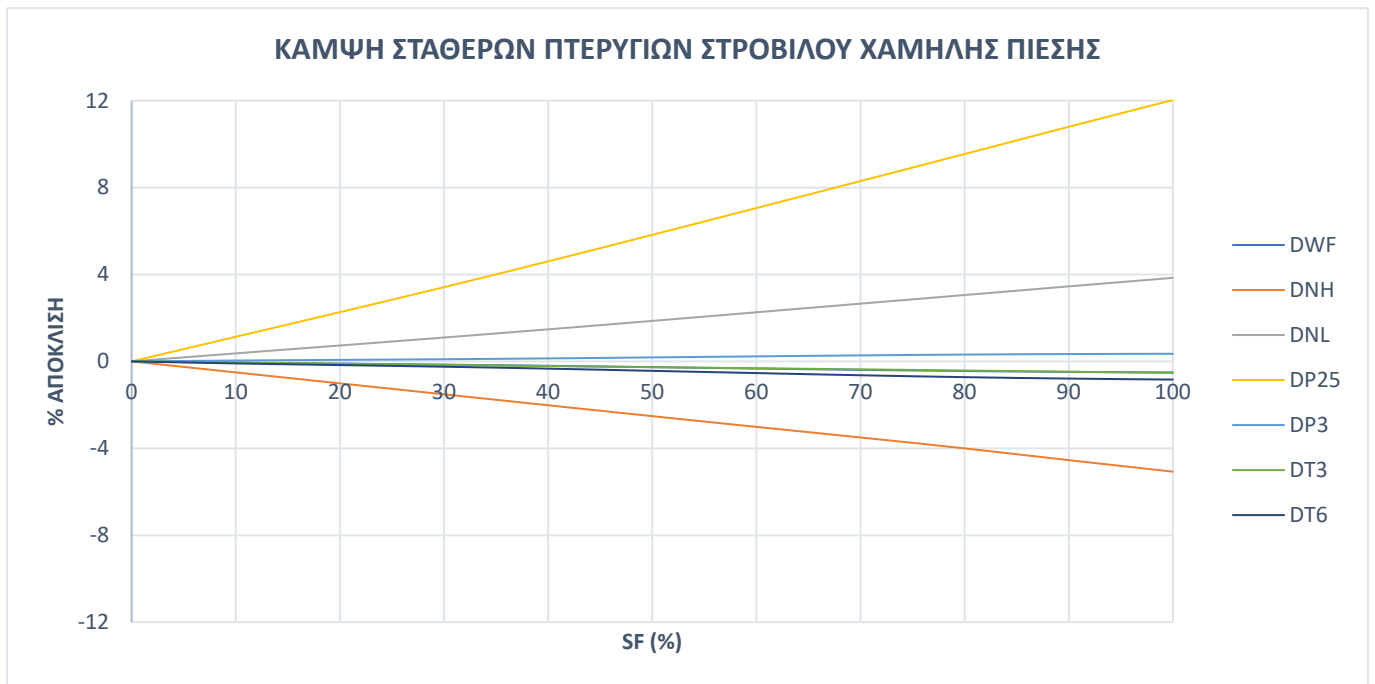
Διάγραμμα 5.16. Αποκλίσεις των μεγεθών συναρτήσει του SF (%) για εξανθρακώματα στροβίλου χαμηλής πίεσης



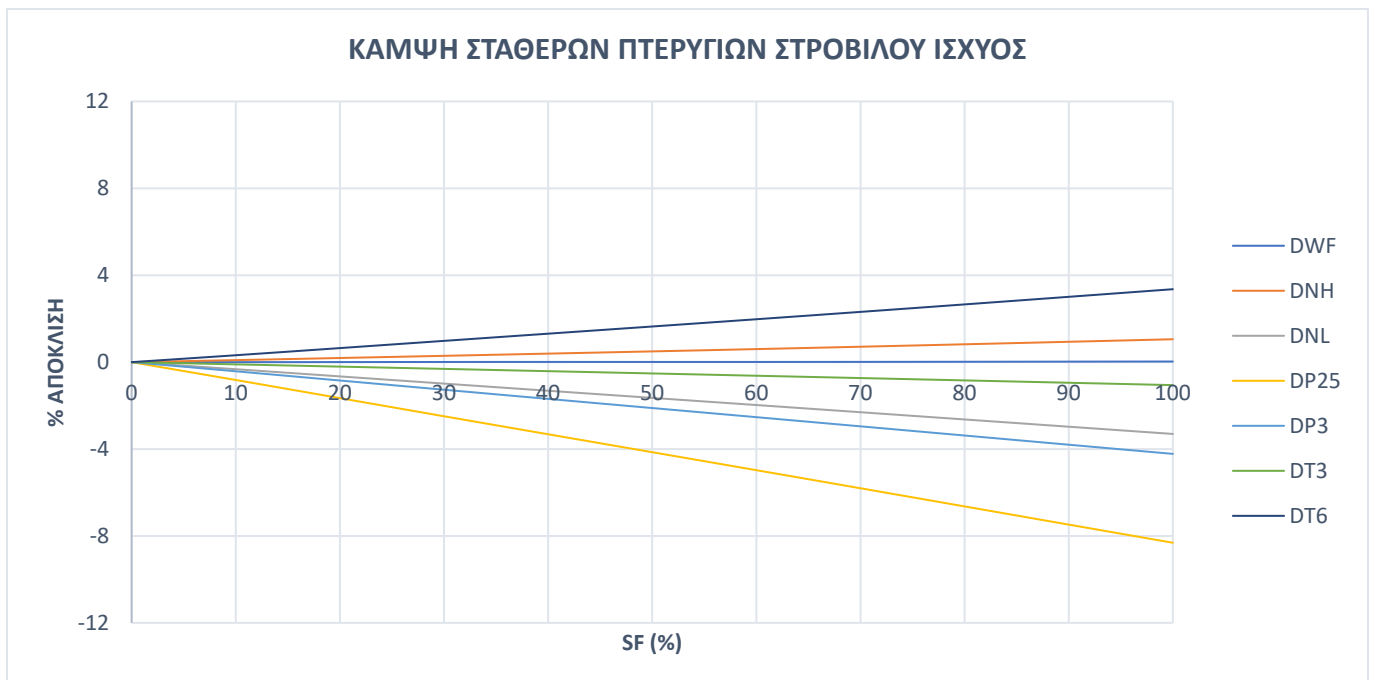
Διάγραμμα 5.17. Αποκλίσεις των μεγεθών συναρτήσει του SF (%) για εξανθρακώματα στρόβιλου ισχύος



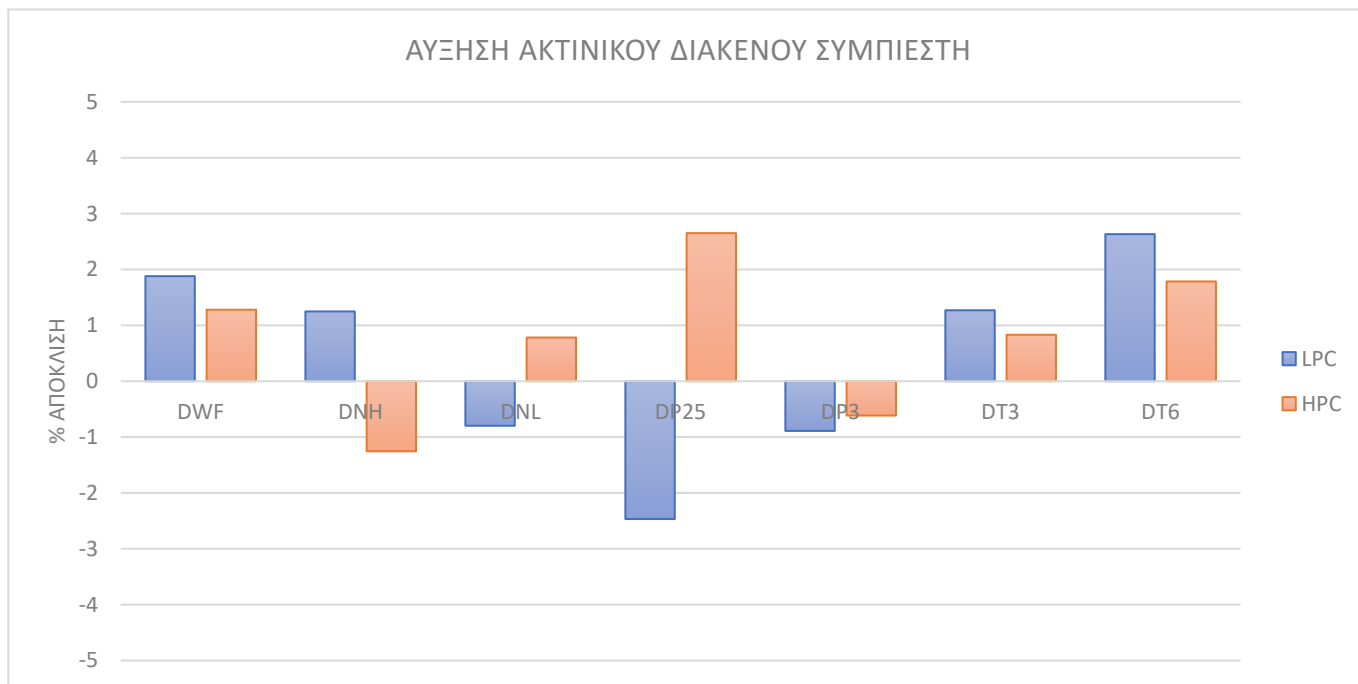
Διάγραμμα 5.18. Αποκλίσεις των μεγεθών συναρτήσει του SF (%) για κάμψη σταθερών πτερυγίων στρόβιλου υψηλής πίεσης



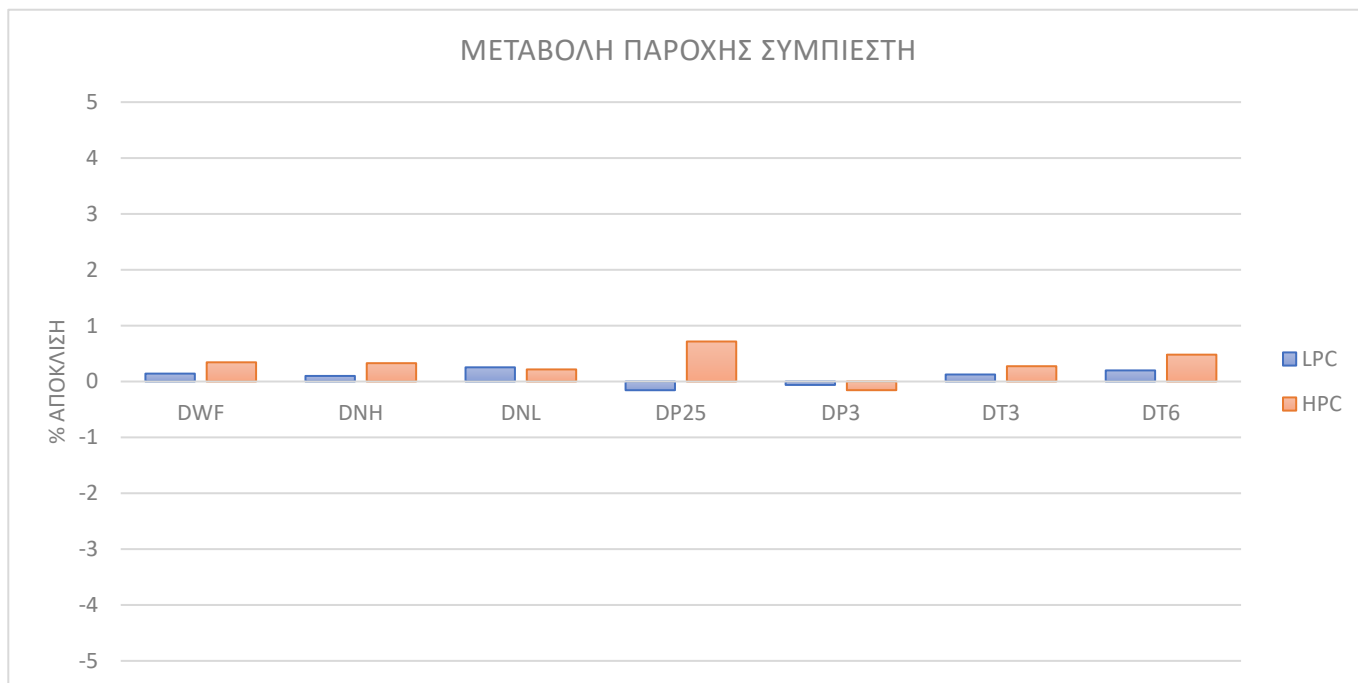
Διάγραμμα 5.19. Αποκλίσεις των μεγεθών συναρτήσει του SF (%) για κάμψη σταθερών πτερυγίων στροβίλου χαμηλής πίεσης



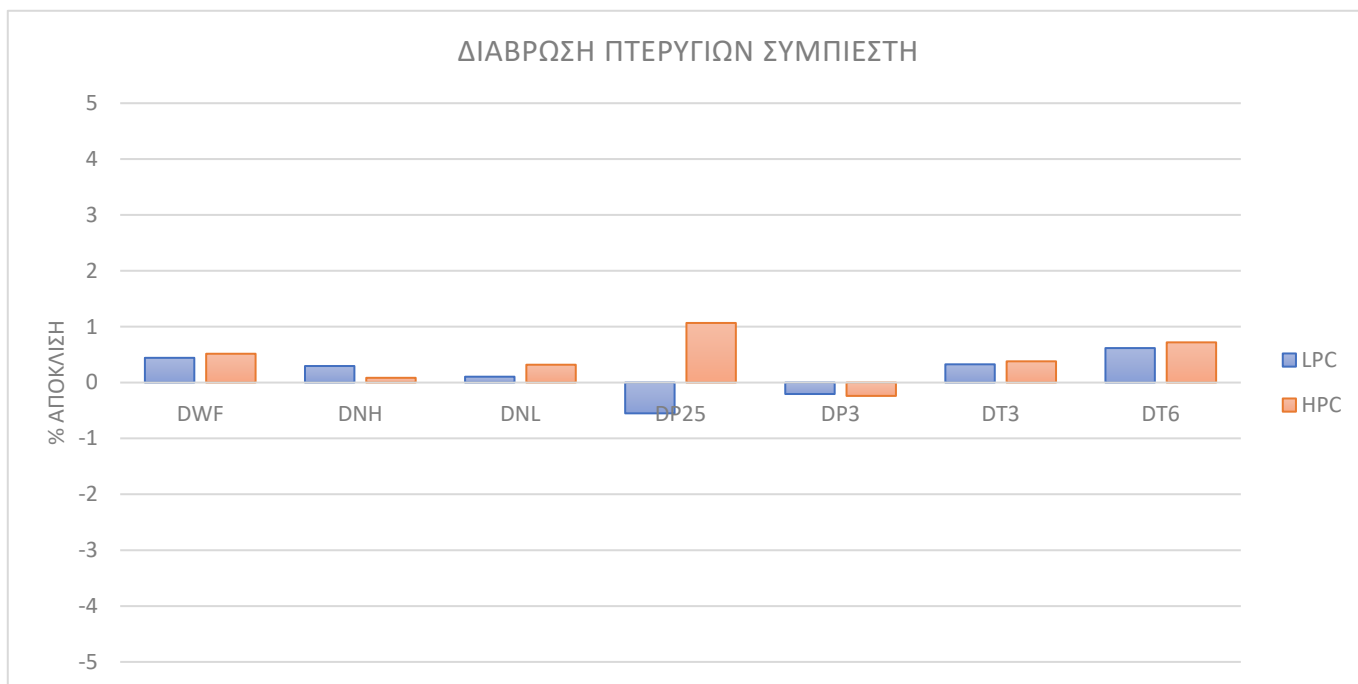
Διάγραμμα 5.20. Αποκλίσεις των μεγεθών συναρτήσει του SF (%) για κάμψη σταθερών πτερυγίων στροβίλου ισχύος



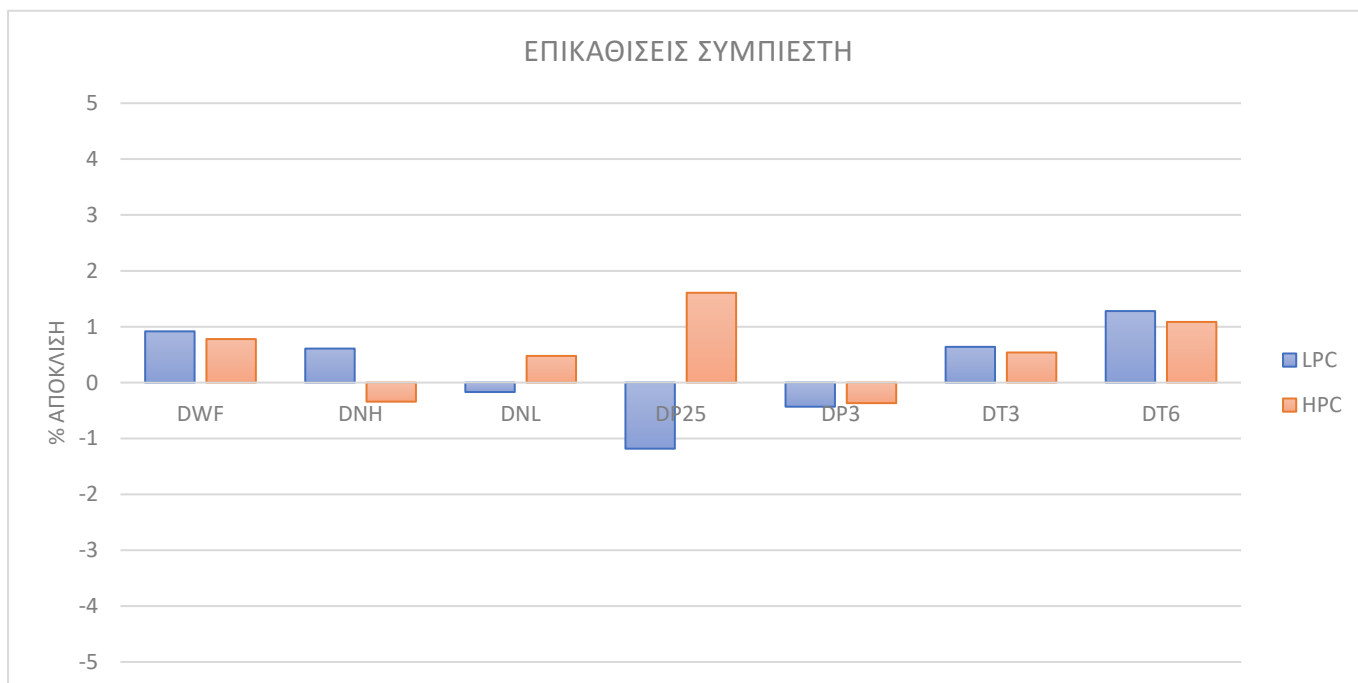
Διάγραμμα 5.21. Υπογραφή βλάβης αύξησης ακτινικού διακένου συμπίεστη (SF = 100%)



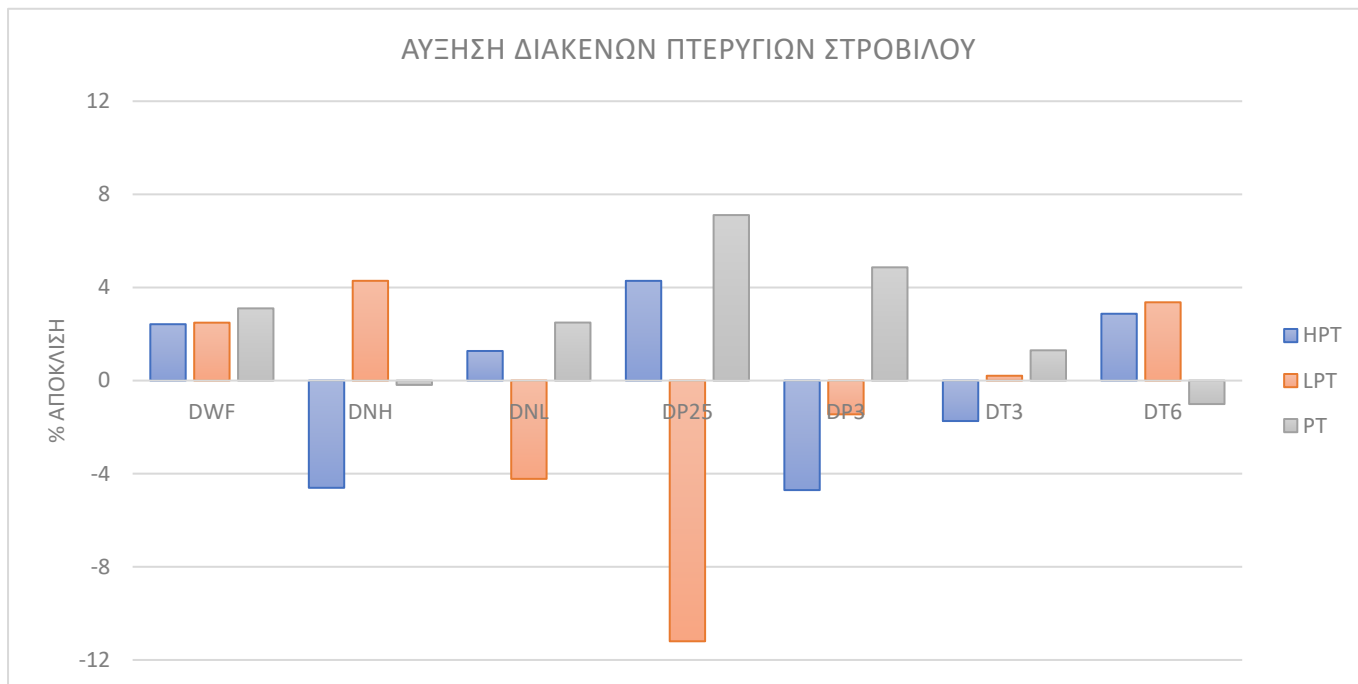
Διάγραμμα 5.22. Υπογραφή βλάβης μεταβολής παροχής συμπίεστη (SF = 100%)



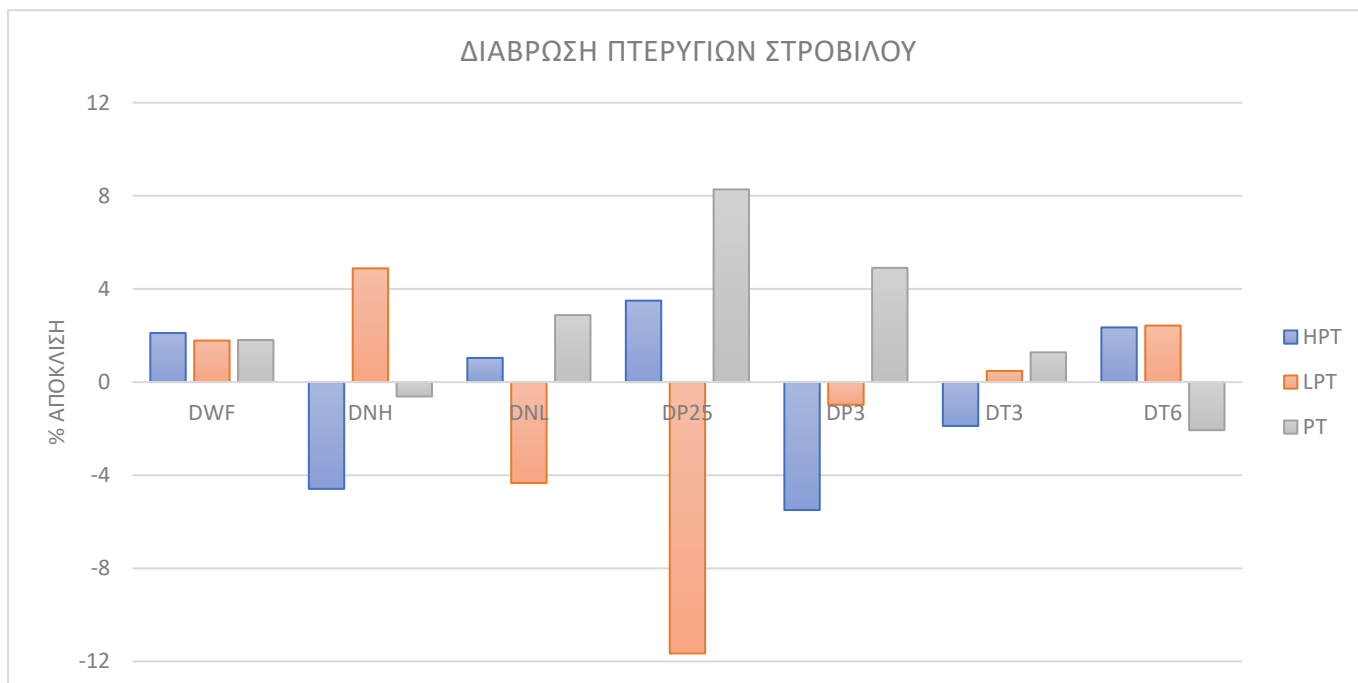
Διάγραμμα 5.23. Υπογραφή βλάβης διάβρωσης πτερυγίων συμπιεστή (SF = 100%)



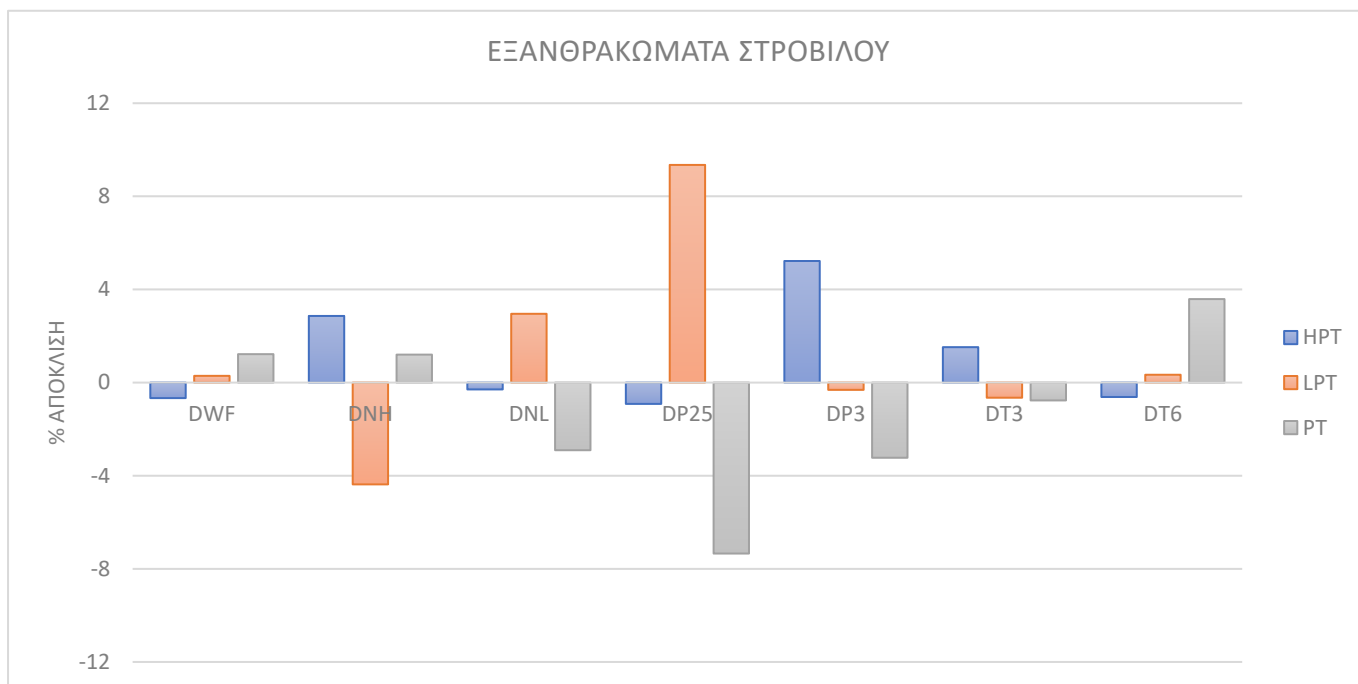
Διάγραμμα 5.24. Υπογραφή βλάβης επικαθίσεων συμπιεστή (SF = 100%)



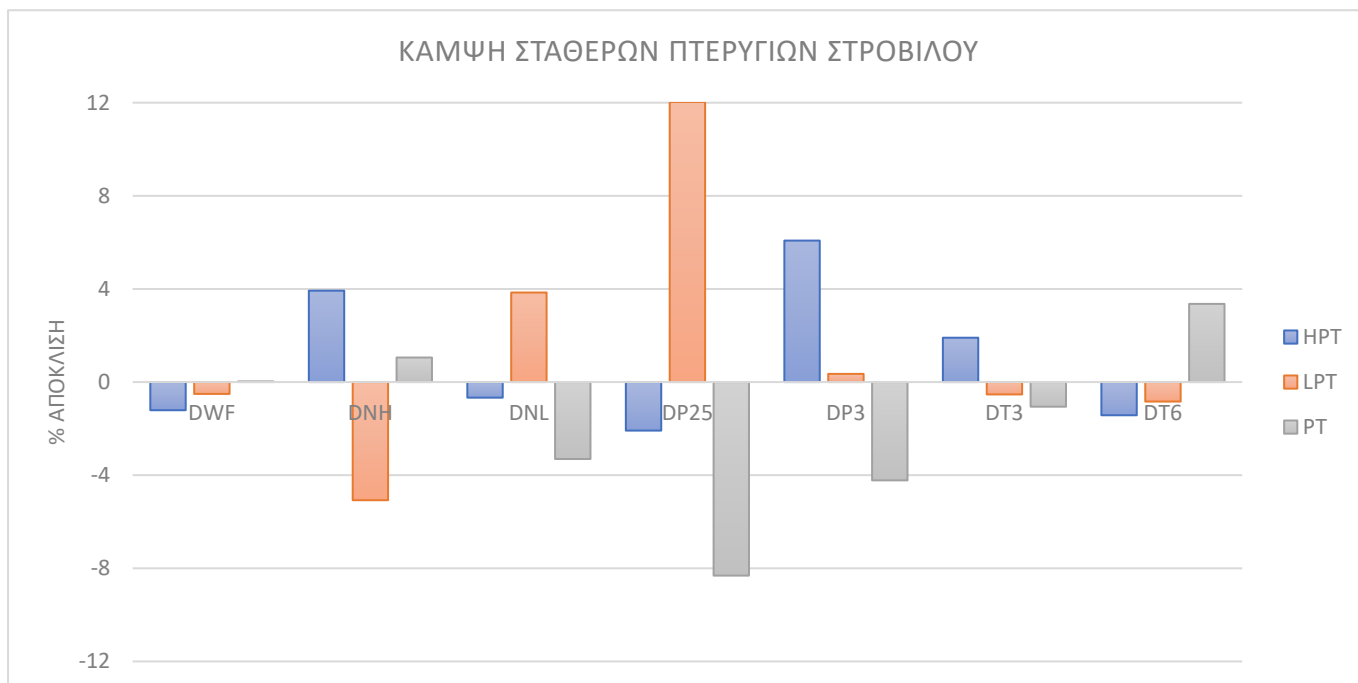
Διάγραμμα 5.25. Υπογραφή βλάβης αύξησης διακένων πτερυγίων στροβίλου (SF = 100%)



Διάγραμμα 5.26. Υπογραφή βλάβης διάβρωσης πτερυγίων στροβίλου (SF = 100%)



Διάγραμμα 5.27. Υπογραφή βλάβης εξανθρακωμάτων στροβίλου (SF = 100%)



Διάγραμμα 5.28. Υπογραφή βλάβης κάμψης σταθερών πτερυγίων στροβίλου (SF = 100%)

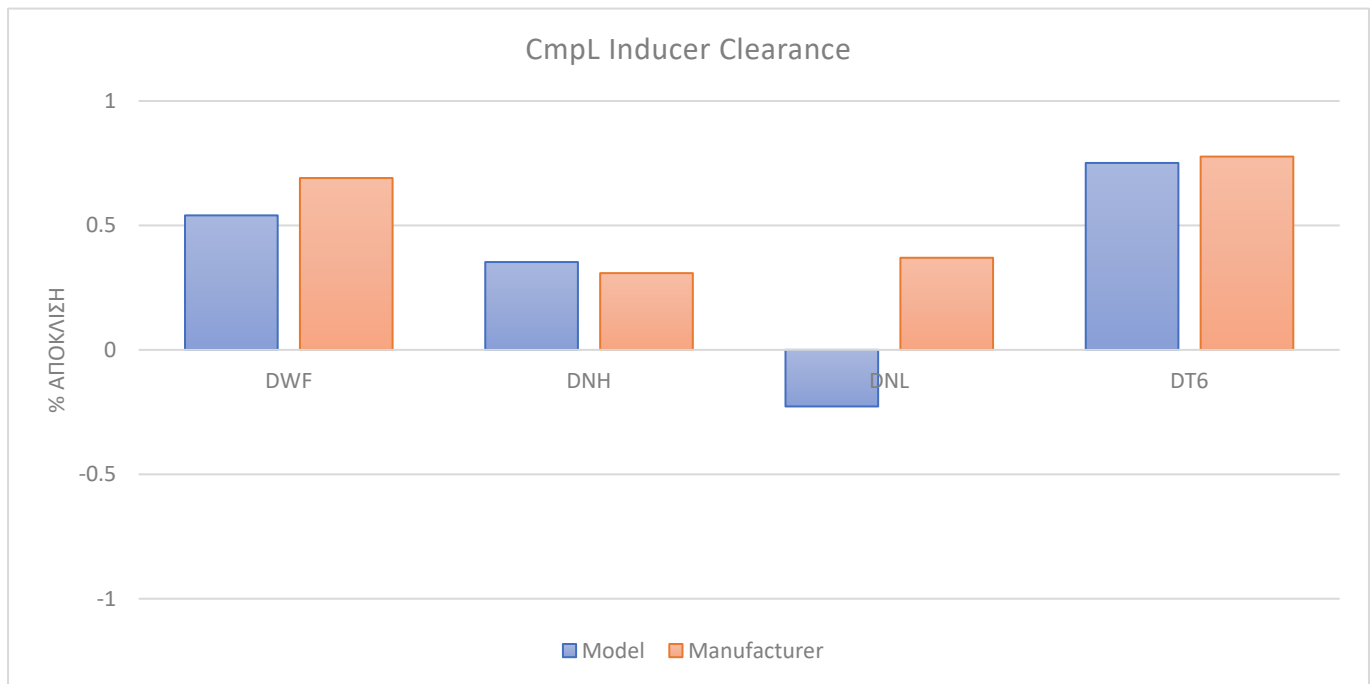
5.3. Υπογραφές βλαβών κατασκευαστή

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μελετήθηκαν επίσης υπογραφές βλαβών, οι οποίες παρέχονται από τον κατασκευαστή του κινητήρα. Στον Πίνακα 5.14 παρουσιάζονται οι βλάβες, οι γεωμετρικές αλλαγές στις οποίες αντιστοιχούν, οι μεταβολές στις 4 βασικές μετρήσεις και οι παράμετροι υγείας, όπως αυτές εκτιμήθηκαν από το μοντέλο με διαδικασία βελτιστοποίησης (Adapt Optimization). Για τη βλάβη του ακτινικού διακένου των συμπιεστών θεωρήθηκε λόγος SW/SE = -1/-1, ενώ για τους στροβίλους +1/-1. Για την περίπτωση της μείωσης της διαμέτρου των στροβίλων υπολογίστηκε σαν βέλτιστος λόγος SW/SE = -2/-1. Η ακριβής τιμή των παραμέτρων προέκυψε μέσω βελτιστοποίησης. Στα Διαγράμματα 5.29 – 5.35 παρουσιάζονται οι συγκρίσεις μεταξύ των μεγεθών που αναφέρει ο κατασκευαστής και των αντίστοιχων του μοντέλου.

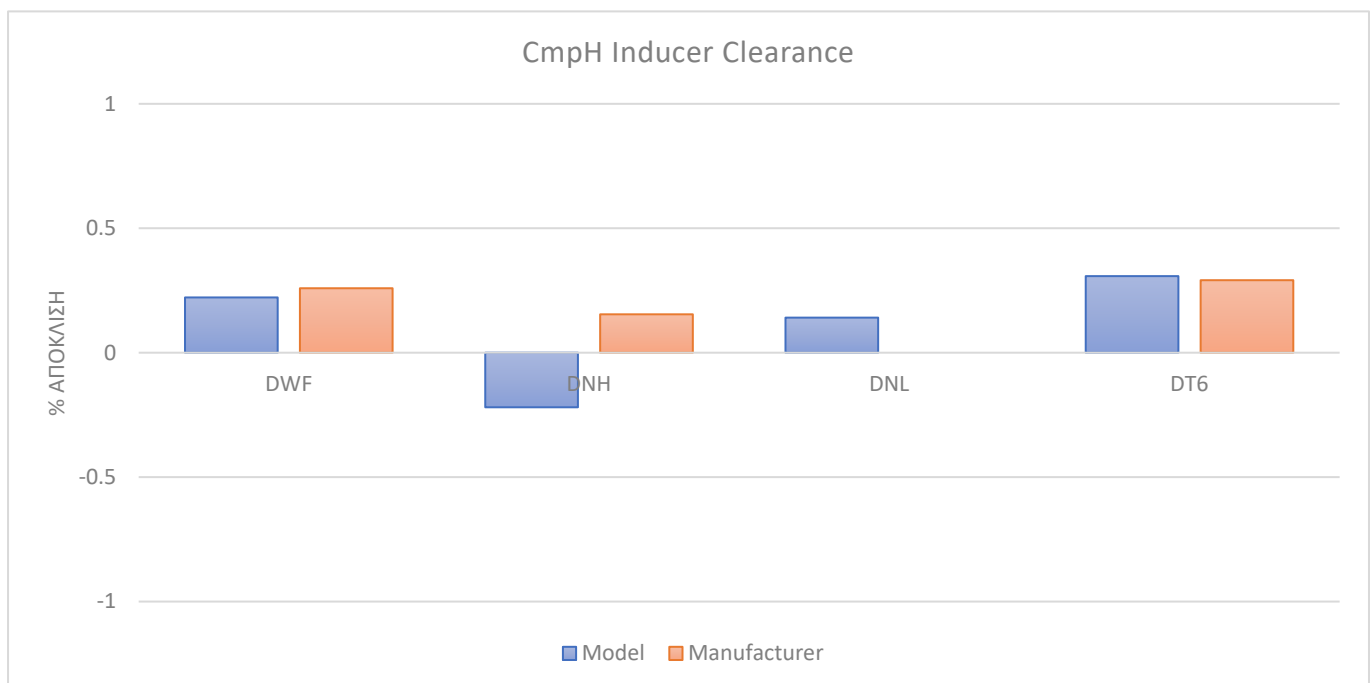
Από τα διαγράμματα αυτά παρατηρούμε ότι οι αποκλίσεις του μοντέλου πλησιάζουν τις αποκλίσεις που δίνονται από τον κατασκευαστή, εκτός από τις στροφές χαμηλής και υψηλής πίεσης για βλάβη συμπιεστών, όπου παρουσιάζουν αντίθετη κατεύθυνση από αυτή που δίνει ο κατασκευαστής.

Βλάβη	Γεωμετρικές Αλλαγές	NL (%)	NH (%)	ITT (%)	WF (%)	SW (%)	SE (%)
CmpL Inducer Clearance	+0.127 (mm)	+0.37	+0.31	+0.78	+0.69	-1.03	-1.03
CmpH Inducer Clearance	+0.127 (mm)	0.00	+0.15	+0.29	+0.26	-0.62	-0.62
TrbH Tip Clearance	+0.127 (mm)	0.00	-0.80	+1.07	+0.69	+0.91	-0.91
TrbL Tip Clearance	+0.127 (mm)	-0.33	+0.40	+0.39	+0.35	+0.35	-0.35
TrbP Tip Clearance	+0.254 (mm)	+0.19	+0.15	+0.19	+0.17	+0.24	-0.24
TrbH Diameter	-0.813 (mm)	0.00	+0.46	-0.10	-0.09	-0.80	-0.40
TrbL Diameter	-0.813 (mm)	+0.19	-0.25	+0.19	-0.26	-0.30	-0.15

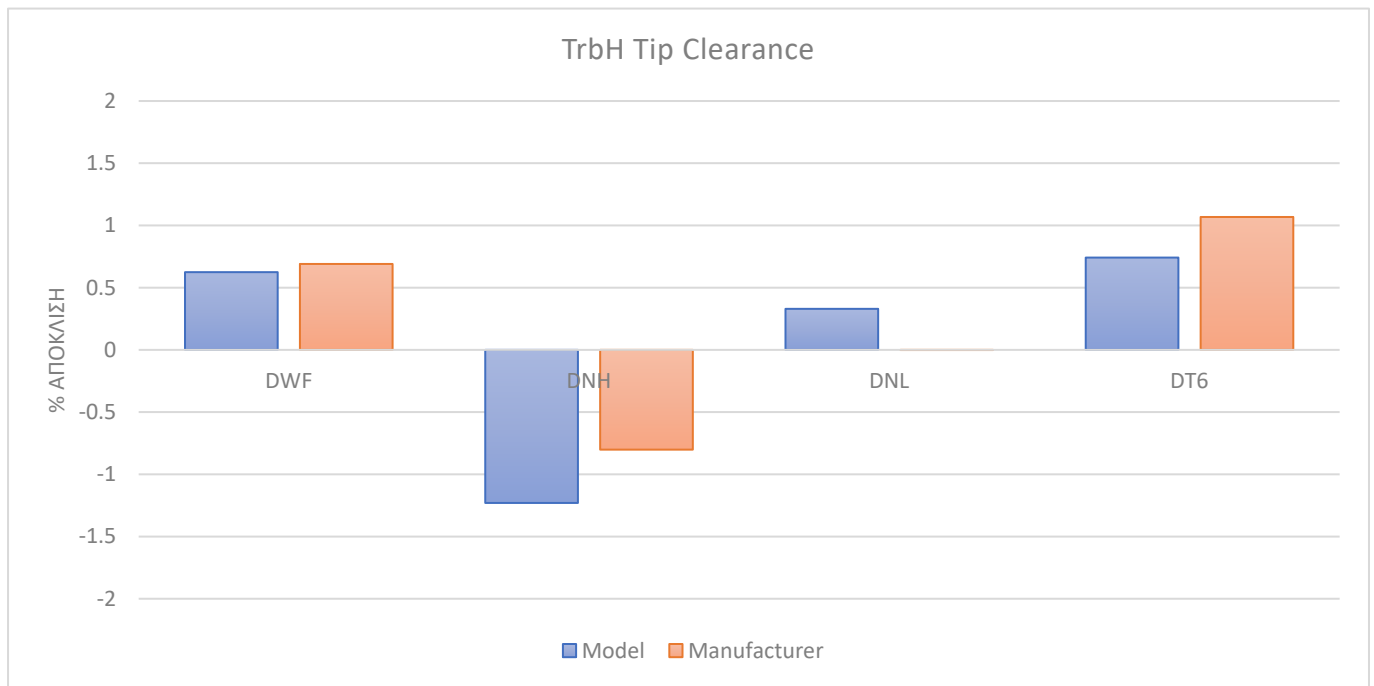
Πίνακας 5.14. Υπογραφές βλαβών και γεωμετρικές αλλαγές σύμφωνα με τον κατασκευαστή



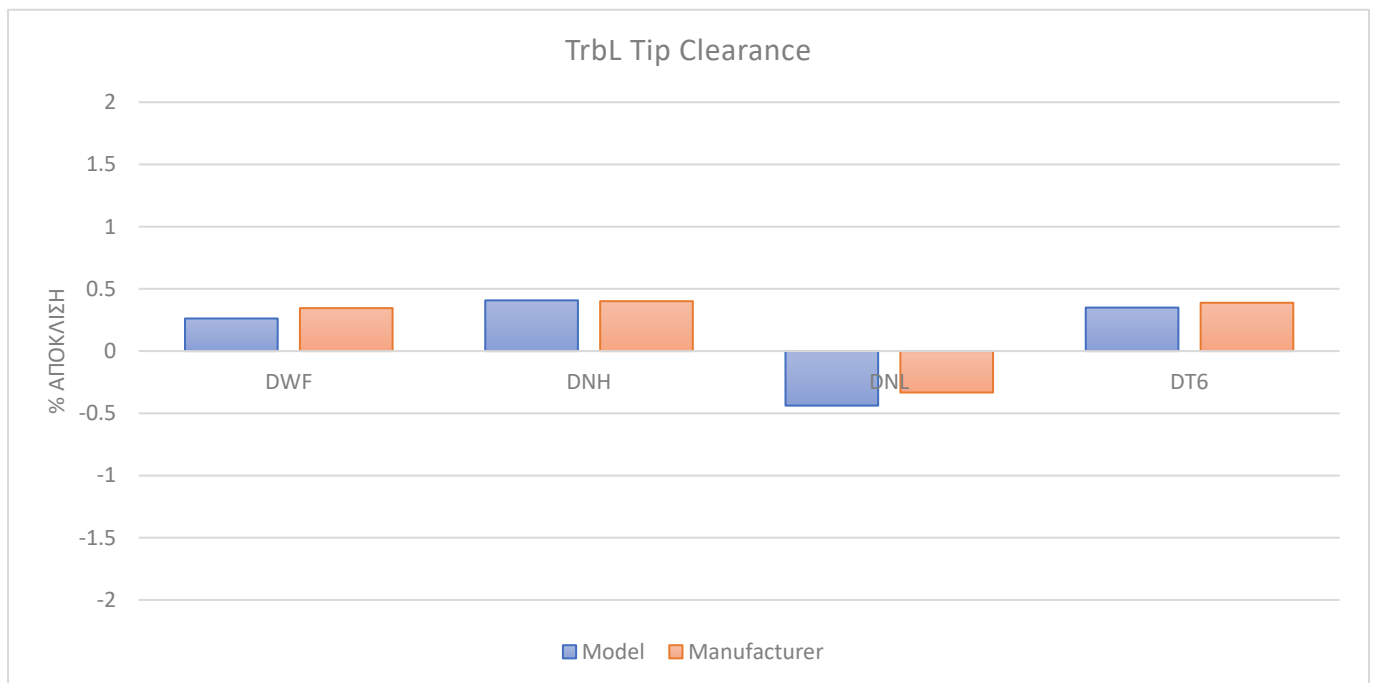
Διάγραμμα 5.29. Αποκλίσεις μοντέλου και κατασκευαστή για αύξηση διακένου συμπίεστή χαμηλής πίεσης



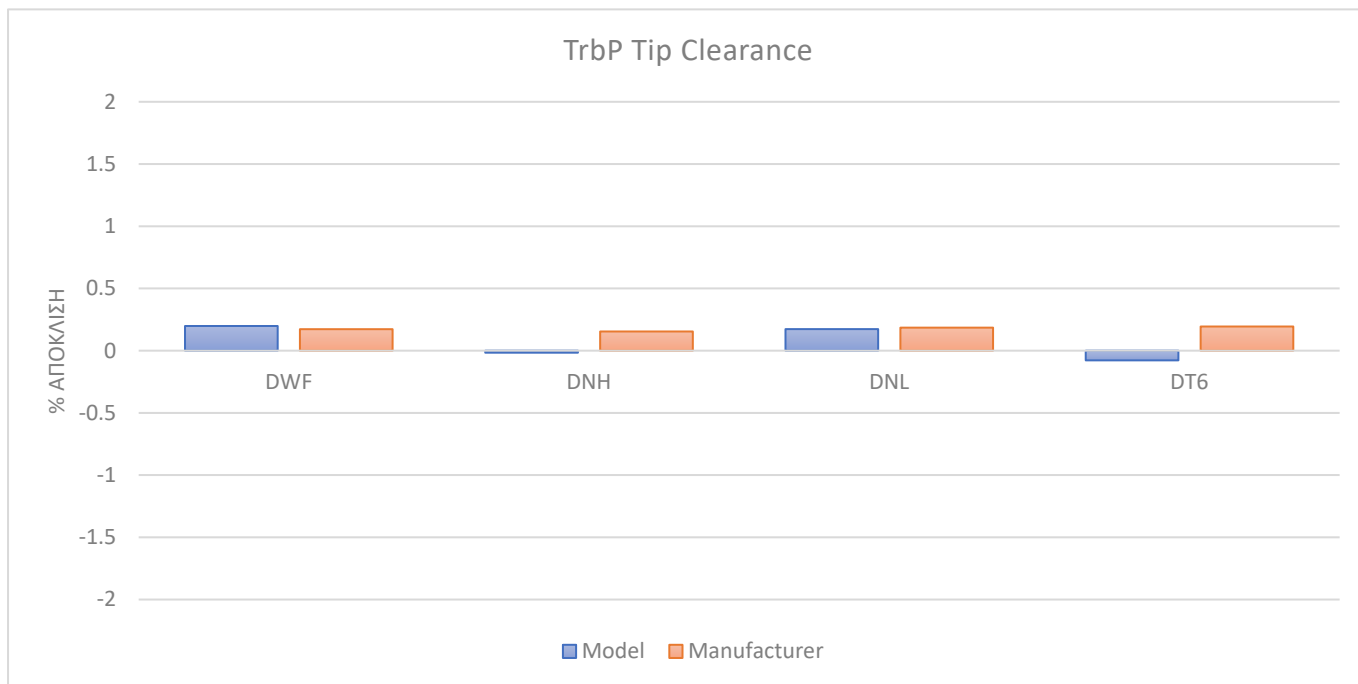
Διάγραμμα 5.30. Αποκλίσεις μοντέλου και κατασκευαστή για αύξηση διακένου συμπίεστή υψηλής πίεσης



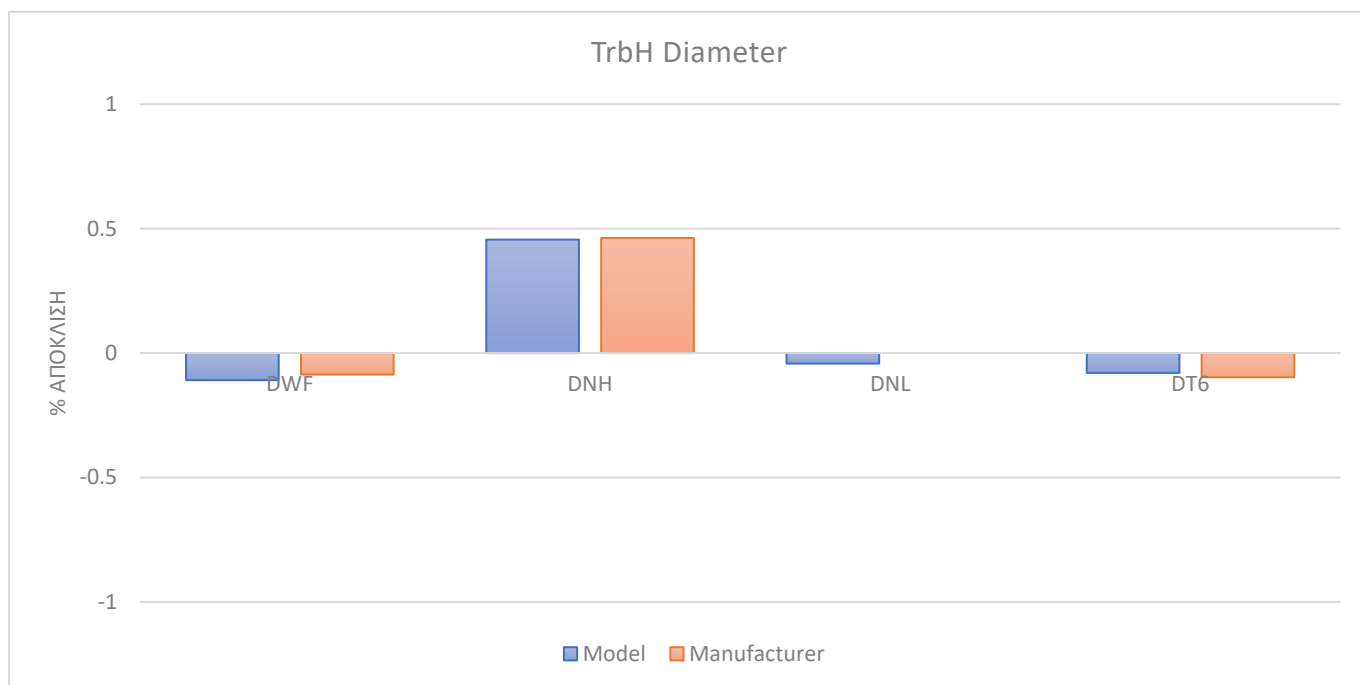
Διάγραμμα 5.31. Αποκλίσεις μοντέλου και κατασκευαστή για αύξηση διακένου στροβίλου υψηλής πίεσης



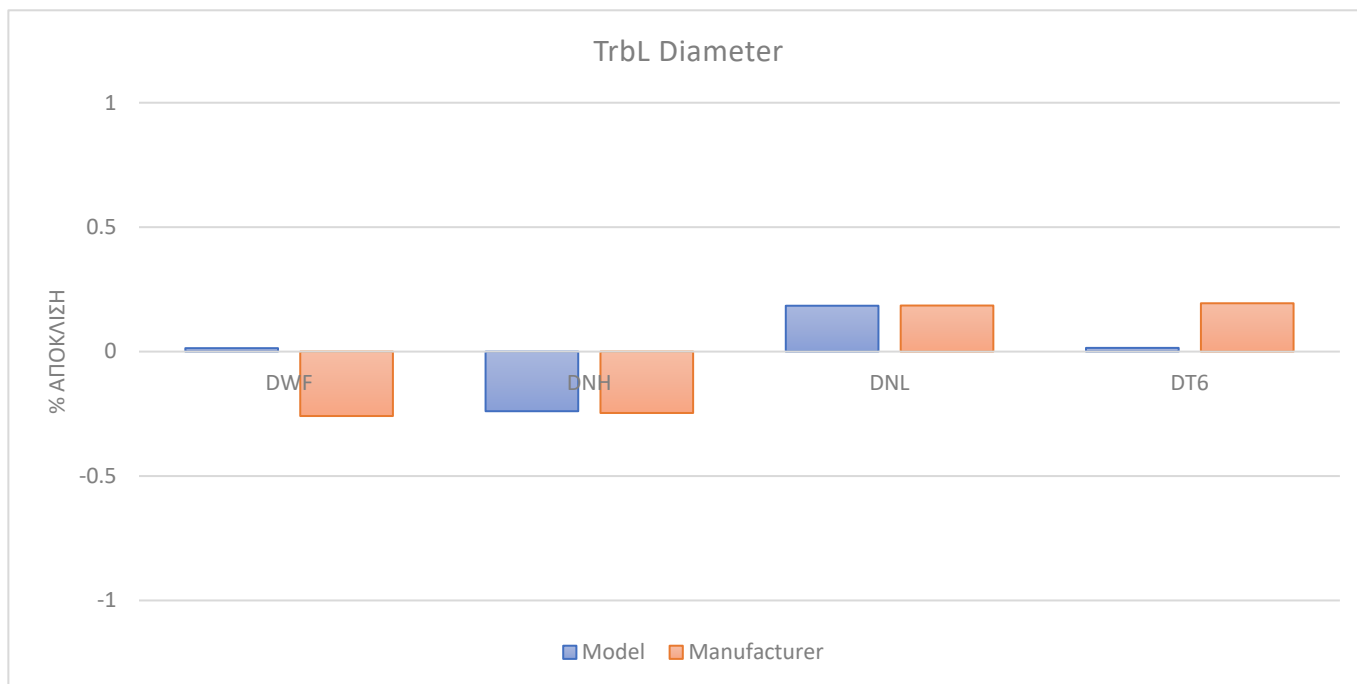
Διάγραμμα 5.32. Αποκλίσεις μοντέλου και κατασκευαστή για αύξηση διακένου στροβίλου χαμηλής πίεσης



Διάγραμμα 5.33. Αποκλίσεις μοντέλου και κατασκευαστή για αύξηση διακένου στροβίλου ισχύος



Διάγραμμα 5.34. Αποκλίσεις μοντέλου και κατασκευαστή για μείωση διαμέτρου στροβίλου υψηλής πίεσης



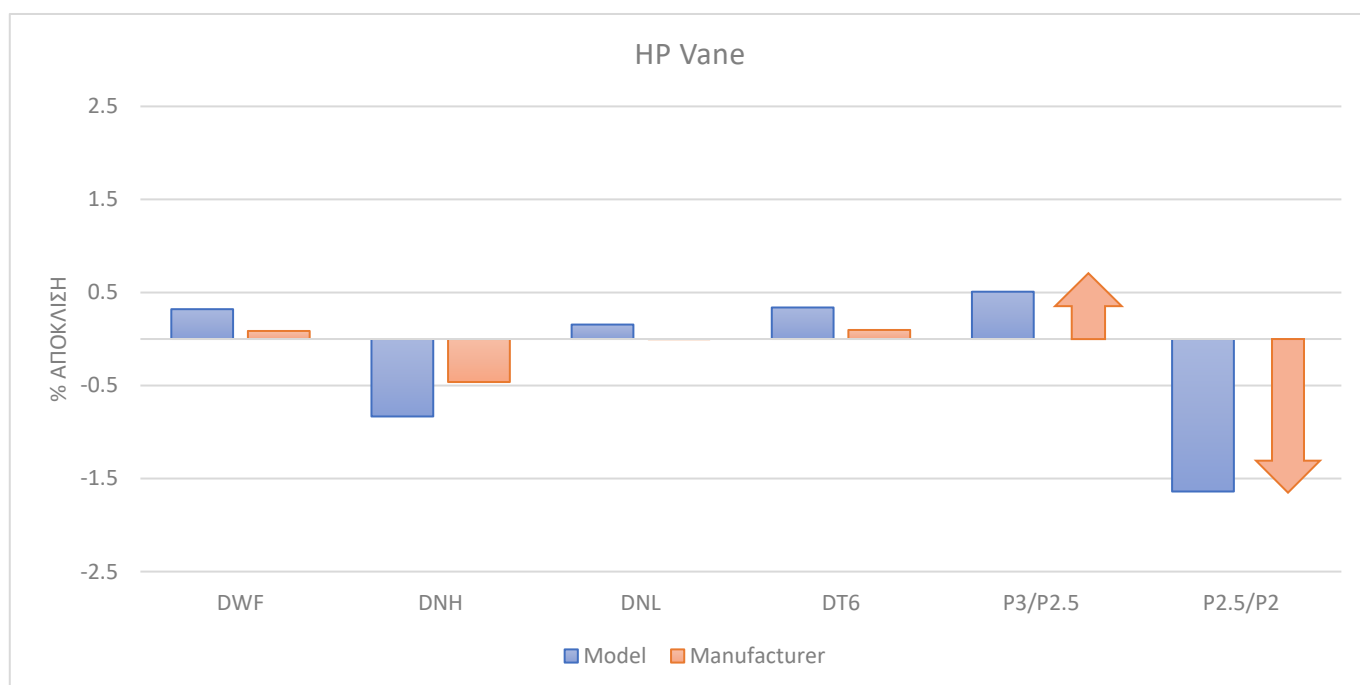
Διάγραμμα 5.35. Αποκλίσεις μοντέλου και κατασκευαστή για μείωση διαμέτρου στροβίλου χαμηλής πίεσης

Ο κατασκευαστής επίσης, παρουσιάζει και τις μεταβολές των 4 βασικών μεγεθών με αύξηση κατά 1% της ενεργού διατομής των σταθερών πτερυγίων των στροβίλων. Στον Πίνακα 5.15 παρουσιάζονται οι μεταβολές των μεγεθών αυτών, ενώ στα Διαγράμματα 5.36 – 5.38 παρουσιάζονται οι συγκρίσεις μεταξύ των μεγεθών που αναφέρει ο κατασκευαστής και αυτών που παράγει το μοντέλο, όπως επίσης και η κατεύθυνση (αύξηση/μείωση) των λόγων πίεσης των συμπιεστών, όπου δε δίνεται ακριβής τιμή από τον κατασκευαστή. Σημειώνεται ότι τα βέλη της κατεύθυνσης δίνουν μόνο την πληροφορία της κατεύθυνσης του μεγέθους και όχι την ακριβή τιμή του. Για την εισαγωγή της κατάστασης αυτής στο μοντέλο, θεωρούμε ότι η μεταβολή του ενεργού εμβαδού αντιστοιχεί σε μεταβολή της ανηγμένης παροχής (στρόβιλοι στραγγαλισμένοι στο 100%), άρα 1% μεταβολή στο ενεργό εμβαδό αντιστοιχεί σε 1% μεταβολή στην ανηγμένη παροχή.

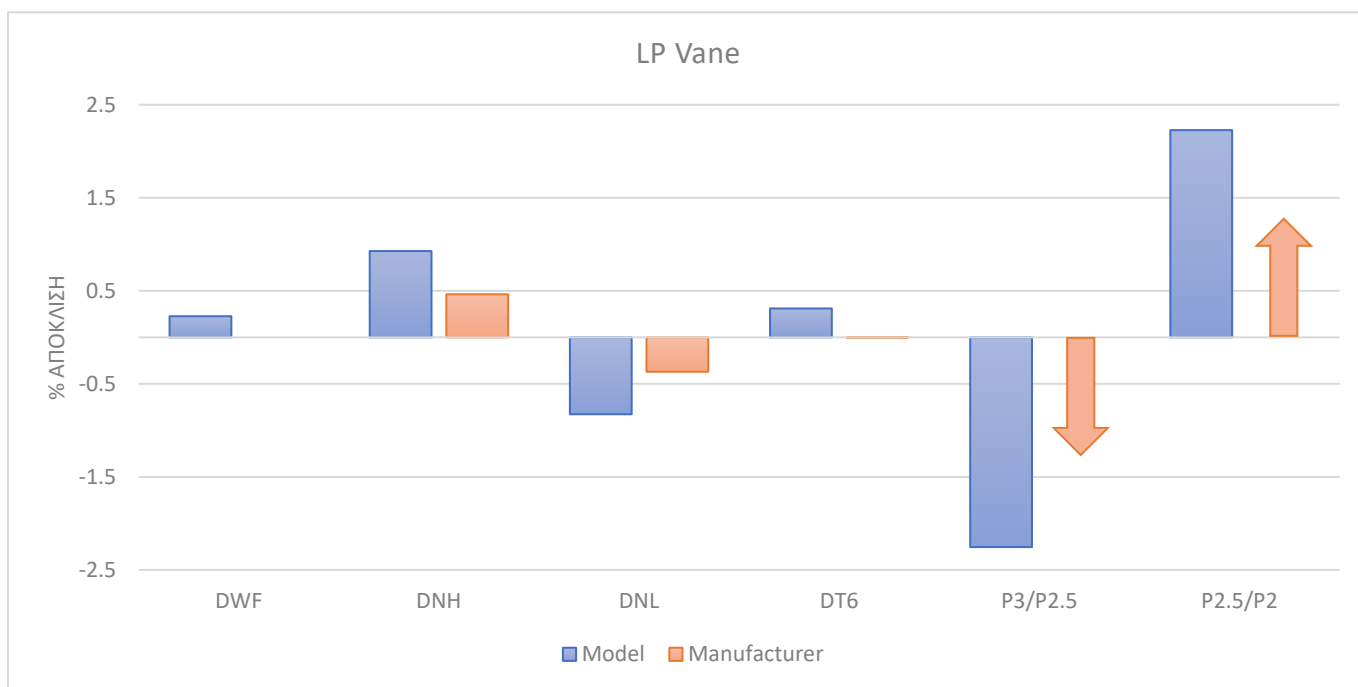
Από τα διαγράμματα αυτά, παρατηρούμε ότι οι αποκλίσεις του μοντέλου είναι μεγαλύτερες από τις αποκλίσεις του κατασκευαστή και αντιστοιχούν περίπου στο διπλάσιο, ενώ η τάση αύξησης/μείωσης του κάθε μεγέθους είναι η ίδια και στις δύο περιπτώσεις.

Βλάβη	Γεωμετρικές Αλλαγές	NL (%)	NH (%)	ITT (%)	WF (%)	SW (%)	SE (%)
HP Vane	+1%	0.00	-0.46	+0.10	+0.09	+1%	0
LP Vane	+1%	-0.37	+0.46	0.00	0.00	+1%	0
PT Vane	+1%	+0.37	0.00	-0.29	+0.09	+1%	0

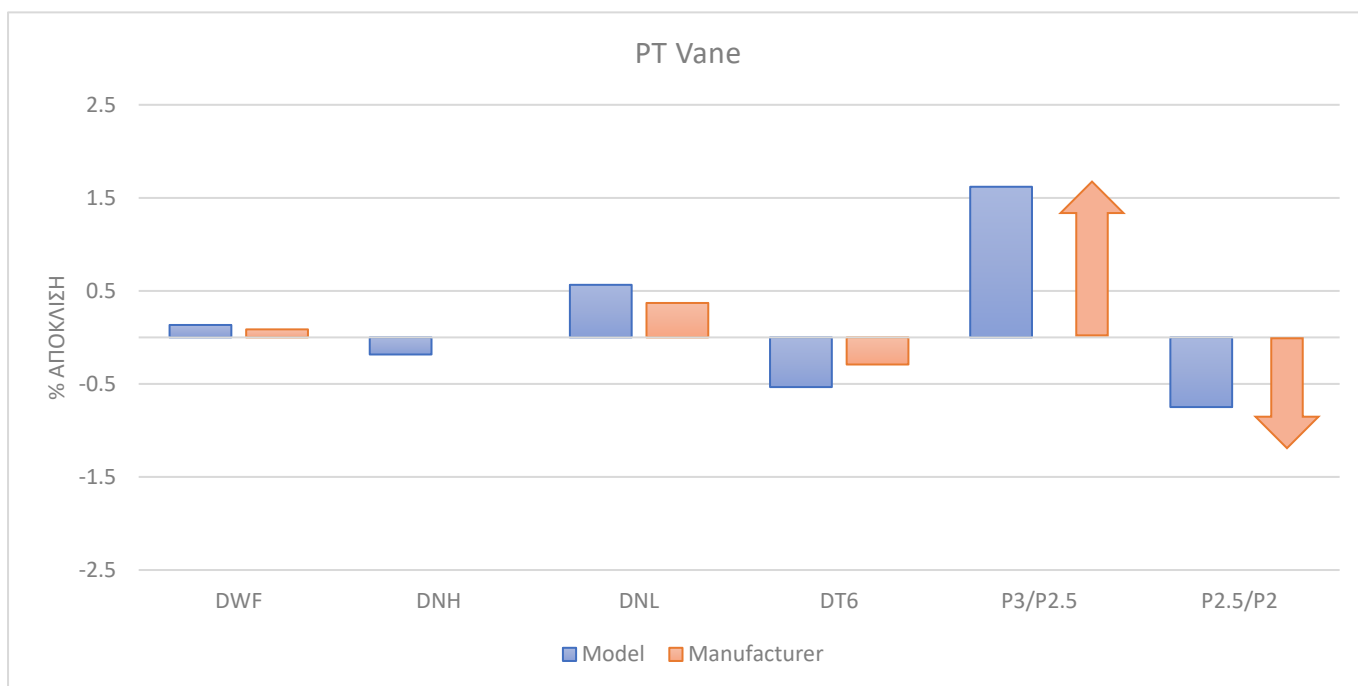
Πίνακας 5.15. Υπογραφές βλαβών που αντιστοιχούν σε μεταβολή του ενεργού εμβαδού των σταθερών πτερυγίων των στροβίλων



Διάγραμμα 5.36. Αποκλίσεις μοντέλου και κατασκευαστή για βλάβη στα σταθερά πτερύγια του στροβίλου υψηλής πίεσης



Διάγραμμα 5.37. Αποκλίσεις μοντέλου και κατασκευαστή για βλάβη στα σταθερά πτερύγια του στροβίλου χαμηλής πίεσης



Διάγραμμα 5.38. Αποκλίσεις μοντέλου και κατασκευαστή για βλάβη στα σταθερά πτερύγια του στροβίλου ισχύος

6 Ανακεφαλαίωση – Συμπεράσματα

6.1. Ανακεφαλαίωση

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας δημιουργήθηκε ένα λογισμικό προσαρμογής γενικού μοντέλου αεροπορικού κινητήρα turboprop τριών αξόνων, το οποίο εφαρμόζεται στον κινητήρα PW123AF της Pratt & Whitney Canada.

Η διπλωματική εργασία ξεκινάει με μια σύντομη περιγραφή του PROOSIS και την ανάλυση των βημάτων που υλοποιήθηκαν για την προσαρμογή του υπάρχοντος λογισμικού στις απαιτήσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στη συνέχεια, πραγματοποιείται λεπτομερής περιγραφή του κινητήρα PW123AF και των επιμέρους συνιστωσών του. Αναλύεται η διαδικασία εφαρμογής του λογισμικού για τη δημιουργία του μοντέλου του κινητήρα PW123AF, με σκοπό την πιστοποίηση του λογισμικού.

Ακολουθεί μία ανάλυση ευαισθησίας για εντοπισμό των πιο κατάλληλων μετρήσεων για διάγνωση βλαβών των επιμέρους συνιστωσών του κινητήρα, και δημιουργούνται υπογραφές βλαβών για τυπικές βλάβες του κινητήρα, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα από το προσωπικό του δοκιμαστηρίου. Τέλος, γίνεται σύγκριση των υπογραφών βλαβών που αναφέρονται από τον κατασκευαστή σε σχέση με τις αντίστοιχες υπογραφές που παράγονται από το μοντέλο.

6.2. Συμπεράσματα

Γενικότερα, καθίσταται σαφές ότι η μοντελοποίηση ενός αεροπορικού κινητήρα αποτελεί μία χρονοβόρα διαδικασία, η οποία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις πληροφορίες που διαθέτουμε. Οι πληροφορίες αυτές μπορεί να είναι είτε διαθέσιμες στην ανοιχτή βιβλιογραφία, είτε μετρούμενα μεγέθη δοκιμαστηρίου. Καθώς όμως πολλές φορές ο χρήστης δεν έχει στη διάθεσή του όλες τις αρχικές πληροφορίες που απαιτούνται για το μοντέλο, γίνεται χρήση προσεγγιστικών και ημιεμπειρικών σχέσεων.

Το γενικό μοντέλο που δημιουργήθηκε για κινητήρες όμοιας διάταξης με τον PW123AF θεωρείται αξιόπιστο, καθώς ακολουθώντας τη διαδικασία μοντελοποίησης που αναφέρθηκε παραπάνω προκύπτουν αποκλίσεις εντός αποδεκτών ορίων ($\pm 1\%$).

Σημαντικό καθίσταται επίσης ότι το ήδη υπάρχον λογισμικό με τις νέες προσθήκες και τροποποιήσεις είναι φιλικό προς το χρήστη, καθώς απαιτείται μόνο η επεξεργασία ενός αρχείου εισόδου.

Τέλος, η προσθήκη στο λογισμικό των δυνατοτήτων της ανάλυσης ευαισθησίας και της δημιουργίας υπογραφών βλαβών παρέχει πληροφορίες οι οποίες είναι απαραίτητες για τη διάγνωση βλαβών στο συγκεκριμένο κινητήρα.

Βιβλιογραφία

Alexiou, A., 2014. *Introduction To Gas Turbine Modeling With PROOSIS*. 2nd Edition ed. s.l.:Empresarios Agrupados Internacional S.A.

Anderson Neil, E., Loewenthal Stuart, H. & Black Joseph, D., 1984. *An Analytical Method To Predict Efficiency of Aircraft Gearboxes*, Ohio: Prepared for the Twentieth Joint Propulsion Conference June 11-13, Technical Report 84-C-8.

Grönstedt, T., 2002. *IDENTIFIABILITY IN MULTI-POINT GAS TURBINE PARAMETER ESTIMATION PROBLEMS*. The Netherlands, In Proc., ASME 2002 Turbo Expo Conf., 1-9.

Jane's Information Group, 2004. P&WC PW100. *Jane's Aero Engines*, Issue 15, pp. 88-91.

Ntonas, K., 2022. *Integrated Processes for Turbocharger design and retrofitting*, PhD Thesis. Athens: National Technical University of Athens.

Ntonas, K., et al., 2020. *Integrated Simulation Framework for Assessing Turbocharger Fault Effects on Diesel-Engine Performance and Operability*, s.l.: J. Energy Eng.146 (4): 04020023.

Pratt & Whitney Canada, 1998. *SMALL PW100 SERIES: PW118/118A1118B/119B/119C/120/120A/121 TRAINING MANUAL*. Canada: Pratt & Whitney Canada.

Skölde, P., Grönstedt, T. & Wallin, M., 2004. *AN AUGMENTED MULTIPOINT ESTIMATION TECHNIQUE FOR GAS PATH ANALYSIS MODEL GENERATION*. Austria, In Proc., ASME 2004 Turbo Expo Conf., 1-7.

Walsh, P. P. & Fletcher, P., 2004. *Gas turbine performance*. 2nd επιμ. Philadelphia: Blackwell Science.

Canada, Pratt & Whitney, National Air and Space Museum, n.d. *Pratt & Whitney Canada PW123 Turboprop Engine*. [Online]
Available at: https://airandspace.si.edu/collection-objects/pratt-whitney-canada-pw123-turboprop-engine/nasm_A19900255000
[Accessed 07 January 2022].

EASA, 2018. *Type Certificate Data Sheet No. IM.E.041*. [Online]
Available at:
<https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/EASA%20IM.E.041%20TCDS%20Issue%204.pdf>
[Accessed 07 January 2022].

En.wikipedia.org, 2021. *Pratt & Whitney Canada PW100*. [Online]
Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Pratt_%26_Whitney_Canada_PW100
[Accessed 07 January 2022].

En.wikipedia.org, 2021. *Canadair CL-215*. [Online]
Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Canadair_CL-215
[Accessed 07 January 2022].

En.wikipedia.org, 2021. *Canadair CL-415*. [Online]
Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Canadair_CL-415
[Accessed 07 January 2022].

forecastinternational.com, n.d. *The Market for Aviation Turboprop Engines*. [Online]
Available at: https://www.forecastinternational.com/samples/F641_CompleteSample.pdf
[Accessed 07 January 2022].

Hellenic Air Force, 2015. *Canadair CL-415*. [Online]
Available at: <https://www.haf.gr/en/equipment/canadair-cl-415/>
[Accessed 07 January 2022].

Ακκογιούνου, Β., 2018. *Ανάπτυξη και Εφαρμογή Λογισμικού Προσαρμογής Γενικού Μοντέλου Αεροπορικού Κινητήρα Διπλού Ρεύματος σε Δεδομένα Λειτουργίας*, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Αρετάκης, Ν., 2020. *ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΕΣ II: Συμπιεστές, σημειώσεις μαθήματος*. Αθήνα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Θεοδωρόπουλος, Λ., 2019. *Ανάπτυξη Λογισμικού Προσαρμογής Γενικού Μοντέλου Κινητήρα Χαμηλού Λόγου Παράκαμψης με Ανάμειξη και Μετάκαυση σε Δεδομένα Λειτουργίας Εφαρμογή GE F110-129 και PW F100-229*, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Κουρμπέτης, Π., 2015. *Ανάπτυξη και Εφαρμογή Λογισμικού Προσαρμογής Γενικού Μοντέλου Αεροπορικού Κινητήρα Διπλού Ρεύματος σε Δεδομένα Λειτουργίας*, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Μαθιουδάκης, Κ., 2016. *Εισαγωγή στους ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ: Στροβιλοαντιδραστήρες*. Αθήνα: Πανεπιστημιακές εκδόσεις Ε.Μ.Π.

Μαθιουδάκης, Κ., 2016. *ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΗ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ*. Αθήνα: Πανεπιστημιακές εκδόσεις Ε.Μ.Π.

Μαθιουδάκης, Κ., 2019. *ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ*. Αθήνα: Πανεπιστημιακές εκδόσεις Ε.Μ.Π.