



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ: «Προσομοίωση Λειτουργίας Αεριοστροβίλου με χρήση του εμπορικού λογισμικού *Simcenter Amesim*»

Gas Turbine Analysis and Simulation using Simcenter Amesim

Συγγραφέας: Κοσμάς Γ. Κοφινάς

Αριθμός Μητρώου:18393064

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Δημήτριος Γ. Κουμπογιάννης

Αιγάλεω, 2023



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική εργασία

«Προσομοίωση Αεριοστροβίλου με χρήση του εμπορικού λογισμικού *Simcenter Amesim*»

Συγγραφέας

Κοσμάς Γ. Κοφφινάς (Α.Μ.: 18393064)

Επιβλέπων

Δρ. Δημήτριος Γ. Κουμπογιάννης

Ημερομηνία εξέτασης

04/06/2024

Εξεταστική Επιτροπή

Γεώργιος Λιβανός

Δημήτριος Κουμπογιάννης

Αντώνιος Χατζηαποστόλου

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Κοφφινάς Κοσμάς του Γεωργίου, με αριθμό μητρώου 18393064 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου».

Ο Δηλών

Κοφφινάς Κοσμάς

Ευχαριστίες

Για την συγγραφή της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όσους συνέβαλαν είτε άμεσα είτε έμμεσα σε αυτήν. Πρωτίστως, τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής εργασίας, Δρ. Δημήτριο Γ. Κουμπογιάννη, για την απόλυτη στήριξη, καθοδήγηση και συμβολή του στην εκπόνηση της εργασίας. Θα ήθελα επιπλέον να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου Αντώνιο Χατζηαποστόλου για την συνεργασία μας όσον αφορά το λογισμικό *Simcenter Amesim*, εφόσον εκείνος ήταν ο υπεύθυνος σε ό,τι αφορούσε λειτουργικά ζητήματα του λογισμικού. Τέλος, δεν θα μπορούσα να μην αναφερθώ στην οικογένειά μου, οι οποίοι καθ'όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας ήταν πάντα δίπλα μου με όπλο την συμπράσταση και την υποστήριξή τους.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει την ανάλυση μοντέλου αεριοστροβίλου αξιοποιώντας το εμπορικό λογισμικό *Simcenter Amesim*. Σε πρώτο στάδιο, το κεφάλαιο της εισαγωγής πραγματεύεται το κίνητρο ενασχόλησης με το συγκεκριμένο θέμα, καθώς και την σημασία της ανάπτυξης και χρήσης ενός υπολογιστικού μοντέλου για την προσομοίωση. Στην συνέχεια, παρουσιάζονται ορισμένα βασικά στοιχεία θεωρίας όσον αφορά τον αεριοστρόβιλο ενός και δύο αξόνων, καθώς και η μοντελοποίησή τους στο σημείο λειτουργίας (υπολογιστική μέθοδος επίλυσης), ενώ γίνεται αναφορά στους χάρτες συμπίεστη και στροβίλου, με σκοπό την κατανόησή τους. Έπειτα, παρουσιάζεται εν συντομία το λογισμικό *Simcenter Amesim*, η βιβλιοθήκη με στοιχεία αεριοστροβίλου καθώς και η εφαρμογή *Gas Turbine Performance*, η οποία χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση. Στα επόμενα κεφάλαια παρουσιάστηκε η ανάλυση μοντέλου αεριοστροβίλου ενός και δύο αξόνων στο *Amesim*, στην οποία συμπεριλήθησαν δοκιμές προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη προσέγγιση των επιδόσεων του πραγματικού αεριοστροβίλου *LM 2500* και σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ υπολογιστικής μεθόδου και *Amesim*. Ακολουθεί ανάλυση ευαισθησίας και στα δύο μοντέλα, με σκοπό να προκύψουν οι παράμετροι που επιδρούν σημαντικά στις επιδόσεις του αεριοστροβίλου. Στο τελευταίο κεφάλαιο, πραγματοποιείται μελέτη σε *off-design* σημεία λειτουργίας σε μοντέλο αεριοστροβίλου δύο αξόνων, ανάλυση των επιδόσεων και εξαγωγή συμπερασμάτων.

Λέξεις κλειδιά: Αεριοστρόβιλος, Επιδόσεις, Εμπορικό λογισμικό *Simcenter Amesim*

Abstract

The present diploma thesis reviews the Gas Turbine model analysis, using the Simcenter Amesim software. At first, the motivation for pursuing the specific topic is presented, as well as the importance of developing such a computational model in order to simulate a Gas Turbine. Secondly, 1-shaft and 2-shaft Gas Turbine are presented in brief when operating at the design point, while reference is made to the compressor and turbine maps. The above are followed by a short presentation of the Simcenter Amesim software, the Gas Turbine library, and the Gas Turbine Performance application, which was used for the simulation in the present diploma thesis. By using the Gas Turbine Performance application, multiple tries were followed on 1-shaft and 2-shaft gas turbine models, in order to find the suitable parameters that approach the LM 2500 industrial Gas Turbine performance as much as possible. In addition, this diploma thesis presents a sensitivity analysis in both models (1-shaft and 2-shaft), in order to determine the parameters that significantly affect the performance of a Gas Turbine. The last chapter of this diploma thesis deals with the study of an off-design analysis of a two-shaft gas turbine model in Amesim.

Key words: *Gas Turbine, Performance, Simcenter Amesim Software*

Πίνακας Περιεχομένων

1. Εισαγωγή	12
2. Λειτουργία Αεριοστροβίλων	15
2.1 Γενικές Πληροφορίες	15
2.2 Μοντελοποίηση Αεριοστροβίλου ενός και δύο αξόνων.....	19
2.2.1 Μοντελοποίηση στο Ονομαστικό Σημείο Λειτουργίας (<i>Design Point</i>).....	19
2.2.2 Χαρακτηριστική Καμπύλη Συμπίεστη μίας βαθμίδας	24
2.2.3 Χαρακτηριστική Καμπύλη Λειτουργίας Στροβίλου	27
3.Εισαγωγή στο Λογισμικό Amesim	29
3.1 Ανάλυση Βιβλιοθήκης Αεριοστροβίλου (<i>Gas Turbine Library</i>).....	32
4. Μελέτη Περίπτωσης στο Amesim – Αεριοστροβίλος ενός άξονα	35
4.1 Προσέγγιση επιδόσεων πραγματικού κύκλου.....	35
4.2 Σύγκριση Υπολογιστικής Μεθόδου – Μεθόδου Λογισμικού Amesim	46
4.3 Ανάλυση ευαισθησίας	47
4.3.1 Επίδραση σχετικής υγρασίας (<i>RH</i>) στις επιδόσεις	48
4.3.2 Επίδραση θερμοκρασίας περιβάλλοντος (<i>Tamb</i>) στις επιδόσεις.....	50
4.3.3 Επίδραση ισηντροπικού βαθμού απόδοσης συμπίεστη στις επιδόσεις	52
4.3.4 Επίδραση λόγου πίεσης συμπίεστη στις επιδόσεις.....	54
4.3.5 Επίδραση μέγιστης θερμοκρασίας <i>Tmax</i> στις επιδόσεις	56
4.3.6 Επίδραση ισηντροπικού βαθμού απόδοσης στροβίλου <i>n_{is,t}</i> στις επιδόσεις.....	58
4.3.7 Επίδραση κατώτερης θερμογόνου δύναμης LHV στις επιδόσεις	60
4.4 Σύγκριση επιδόσεων με χρήση παραμέτρων από πηγές σε σχέση με τις επιδόσεις.....	64
4.5 Συμπεράσματα.....	66
5. Αεριοστροβίλος δύο αξόνων (<i>2-shaft</i>).....	69
5.2 Ανάλυση ευαισθησίας	77
5.2.1 Επίδραση θερμοκρασίας περιβάλλοντος στις επιδόσεις	78
5.2.2 Επίδραση σχετικής υγρασίας στις επιδόσεις.....	79

5.2.3 Επίδραση ισεντροπικού βαθμού απόδοσης συμπιεστή στις επιδόσεις	80
5.2.4 Επίδραση λόγου πίεσης συμπιεστή στις επιδόσεις	81
5.2.5 Επίδραση μέγιστης θερμοκρασίας T_{max} στις επιδόσεις	83
5.2.6 Επίδραση ισεντροπικού βαθμού απόδοσης στροβίλου υψηλής πίεσης (h_{pt}) στις επιδόσεις	84
5.2.7 Επίδραση ισεντροπικού βαθμού απόδοσης στροβίλου ισχύος (p_t) στις επιδόσεις	85
5.2.8 Επίδραση κατώτερης θερμογόνου δύναμης LHV στις επιδόσεις.....	86
5.3 Συμπεράσματα	90
6. Μελέτη <i>off design points</i> στο <i>Amesim</i> (2-shaft)	94
6.1. Εμφάνιση επιδόσεων σε τυχαίο <i>off-design point</i>	97
6.2 Ανάλυση των επιδόσεων του κύκλου στα <i>off-design points</i>	99
6.2.1 Μελέτη Περίπτωσης 1 – T_{04} σταθερή.....	100
6.2.2 Μελέτη Περίπτωσης 2 – N_{pt} σταθερό	104
6.2.3 Μελέτη Περίπτωσης 3 – <i>Shaft Power</i> σταθερή / $N_{pt}(\%)$ μεταβαλλόμενο	107
6.2.4 Μελέτη Περίπτωσης 4 – $N_{pt}(\%)$ σταθερή / <i>Shaft Power</i> μεταβαλλόμενη.....	111
6.2.5 Μελέτη Περίπτωσης 5 – mf σταθερή / $N_{pt}(\%)$ μεταβαλλόμενη	114
6.2.6 Μελέτη Περίπτωσης 6 – $N_{pt}(\%)$ σταθερή / mf μεταβαλλόμενη.....	117
7. Συμπεράσματα και Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	121
8. Βιβλιογραφία.....	122

1. Εισαγωγή

Κατά την διάρκεια των παλαιότερων ετών, ειδικότερα μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, η εξέλιξη του αεριοστροβίλου ήταν τέτοια, ώστε να μην εφαρμόζεται αποκλειστικά και μόνο σε αεροσκάφη, μπορούσε να συναγωνιστεί τις μηχανές *Diesel* και τους ατμοστροβίλους ως κινητήρια μηχανή στις ναυτικές εγκαταστάσεις πρόωσης. Η συνεχής πρόοδος και εξέλιξη της τεχνολογίας οδήγησε στην βελτίωση του βαθμού απόδοσης του αεριοστροβίλου, ενώ επιπλέον λόγω της απλότητας κατασκευής του και της έλλειψης πολλών βοηθητικών και περιφερειακών μηχανημάτων θα μπορούσε κάλλιστα να θεωρηθεί οικονομικά ανταγωνιστικότερος απέναντι στις μηχανές *Diesel*.

Στην σύγχρονη εποχή, παρατηρείται αυξημένο ενδιαφέρον ως προς την μέθοδο της προσομοίωσης στον σχεδιασμό, στον κύκλο ζωής ενός αεριοστροβίλου, καθώς και στις επιδόσεις του. Από την στιγμή μάλιστα που η πειραματική μελέτη της λειτουργίας του θεωρείται αρκετά δαπανηρή, και πολλές φορές δύσκολη για τον χρήστη, κυρίως κατά την μέτρηση μεγεθών που απαιτούνται επιπλέον όργανα από τα τυποποιημένα, τότε είναι επιθυμητή η μοντελοποίηση της λειτουργίας τους μέσω συγκεκριμένων λογισμικών.

Επιπλέον, χρησιμοποιώντας ένα οποιοδήποτε υπολογιστικό μοντέλο για την προσομοίωση της λειτουργίας ενός αεριοστροβίλου, επιτυγχάνεται αφενός απλοποίηση στην κατανόηση του συστήματος, καθώς ο χρήστης διατηρεί και επικεντρώνεται στα χαρακτηριστικά του συστήματος που τον ενδιαφέρουν για την εκπόνηση της μελέτης, με αποτέλεσμα να μην περιπλέκεται με λεπτομέρειες, και αφετέρου επιτυγχάνεται μείωση του χρόνου και του κόστους σε σύγκριση με μία πειραματική μελέτη.

Η ανάπτυξη υπολογιστικού μοντέλου είναι αρκετά σημαντική και σε άλλους τομείς. Μέσω του ηλεκτρονικού υπολογιστή στο οποίο είναι εγκατεστημένο το λογισμικό προσομοίωσης, υπάρχει δυνατότητα επιτάχυνσης των χρονικών μεταβολών, έτσι ώστε να γίνει μία ευκολότερη πρόβλεψη της μελλοντικής συμπεριφοράς και λειτουργίας του εκάστοτε μοντέλου, είτε είναι αεριοστροβίλος είτε κάποιου άλλου είδους μηχανή. Επιπρόσθετα, κατά την δημιουργία του μοντέλου μπορούν να εντοπιστούν ευκολότερα σφάλματα που ενδεχομένως να προκύψουν σε ενδεχόμενη πειραματική μελέτη, και να διορθωθούν κατάλληλα πριν από την ανάπτυξη του συστήματος.

Με την πάροδο των χρόνων, εμφανίζεται ολοένα και περισσότερο η ανάγκη μελέτης προβλημάτων που σχετίζονται με την ενεργειακή απόδοση και την μείωση του

περιβαλλοντικού αποτυπώματος των πλοίων. Το ιδανικότερο ως προς την μελέτη ενός αεριοστροβίλου ή οποιασδήποτε μηχανής, είναι ο συνδυασμός όσο το δυνατόν υψηλότερης απόδοσης, χαμηλότερου κόστους και φιλικότερης συμπεριφοράς προς το περιβάλλον. Επομένως, μέσω της προσομοίωσης από το υπολογιστικό μοντέλο, μεταβάλλοντας ορισμένες παραμέτρους και αναλύοντας τα αποτελέσματα που προκύπτουν, διαπιστώνεται ο αποδοτικότερος συνδυασμός των παραμέτρων, που προσπαθεί να συγκεράσει όσο το δυνατόν καλύτερα την απόδοση, το κόστος και τον αντίκτυπο προς το περιβάλλον. Στη συνέχεια, οι παράμετροι αυτοί μπορούν να εφαρμοστούν στο πραγματικό σύστημα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω στοιχεία, λόγω της ραγδαίας ανάπτυξης των αεριοστροβίλων αλλά και λόγω της ανάγκης για εκτενέστερη μελέτη, έχουν αναπτυχθεί διάφορα εμπορικά προγράμματα τα οποία επιτρέπουν την ευκολότερη μελέτη και ανάλυση της λειτουργίας του. Με την χρήση των συγκεκριμένων προγραμμάτων, καθίσταται δυνατή η μελέτη του βαθμού απόδοσης και των επιδόσεων του αεριοστροβίλου σε διάφορα σημεία λειτουργίας του, αλλά και σε διαφορετικές διατάξεις αεριοστροβίλων, λ.χ. απλού άξονα, δύο αξόνων. Όσον αφορά τον τομέα της εκπαίδευσης, με την χρήση υπολογιστικών πακέτων προσομοίωσης γίνεται ευκολότερα κατανοητός ο κύκλος λειτουργίας της εγκατάστασης, καθώς και όλες οι θερμικές διεργασίες που πραγματοποιούνται, χωρίς να απαιτείται η χρήση οργάνων και εξοπλισμού, όπως σε μία πειραματική μελέτη. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία από τέτοιου είδους λογισμικά, ένα εκ των οποίων είναι το *Simcenter Amesim* που έχει αποκτηθεί από το τμήμα Ναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Το συγκεκριμένο λογισμικό έχει αναπτυχθεί από την εταιρεία *Siemens* και ουσιαστικά προσφέρει στον χρήστη την δυνατότητα δημιουργίας πολύπλοκων συστημάτων και μηχανών, προσθέτοντας σύμβολα και ενώνοντάς τα, σε ένα σχεδιαστικό περιβάλλον σε μία διάσταση, δηλαδή ως *ID Modelling*. Όταν ολοκληρωθεί η σχεδίαση του εκάστοτε συστήματος, ορίζονται οι τιμές των παραμέτρων σε κάθε σύμβολο, το οποίο στην περίπτωση του αεριοστροβίλου μπορεί να είναι ένας στρόβιλος, ένα ακροφύσιο, ο θάλαμος καύσης, ενώ στο τέλος ορίζεται ο χρόνος προσομοίωσης του συστήματος. Επιπλέον, υπάρχουν βιβλιοθήκες που παρέχουν έτοιμα συστήματα, για μεγαλύτερη διευκόλυνση του χρήστη, που αφορούν συγκεκριμένα μοντέλα και παραδείγματα, τα οποία όμως μπορούν να αλλάξουν μεταβάλλοντας τις παραμέτρους των επιμέρους στοιχείων του συστήματος.

Στόχος της Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει αρχικά στην ενημέρωση του αναγνώστη σχετικά με το αντικείμενο των αεριοστροβίλων, παρουσιάζοντας κάποια βασικά εισαγωγικά στοιχεία, όπως την έννοια και τα είδη ενός συστήματος αεριοστροβίλου, με απώτερο σκοπό την κατανόηση του θέματος. Στη συνέχεια, ένας βασικός στόχος της εργασίας είναι η εξοικείωση με το λογισμικό *Amesim* και την βιβλιοθήκη που αφορά συγκεκριμένα τον αεριοστροβίλο. Αξιοποιώντας και κατανοώντας την συγκεκριμένη βιβλιοθήκη, επιτυγχάνεται η μοντελοποίηση ενός συστήματος αεριοστροβίλου σε διάφορα σημεία λειτουργίας, ενώ μεταβάλλοντας τις παραμέτρους του συστήματος, γίνεται προσπάθεια επίτευξης υψηλότερου βαθμού απόδοσης με ταυτόχρονη φιλικότερη συμπεριφορά προς το περιβάλλον.

2. Λειτουργία Αεριοστροβίλων

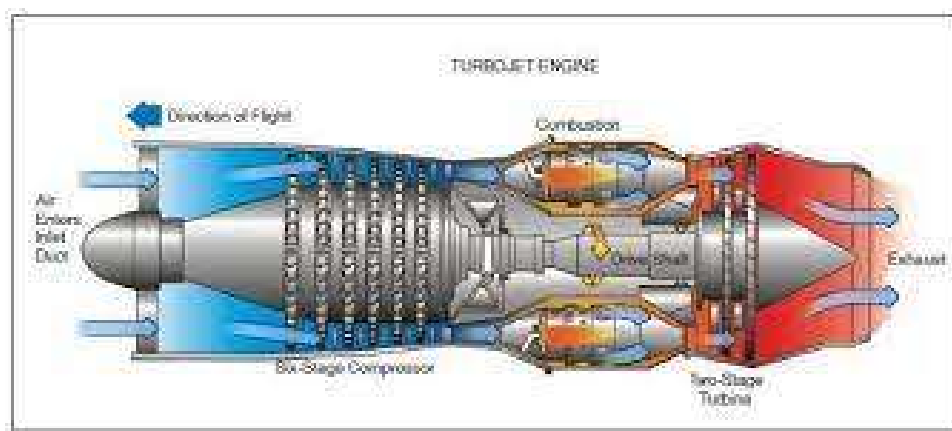
2.1 Γενικές Πληροφορίες

Ως αεριοστρόβιλος θεωρείται ένας κινητήρας που εξάγει ενέργεια από την ροή αέρα και την μετατρέπει σε ωφέλιμο έργο. Ένα πλεονέκτημα που διαθέτει έναντι των Μηχανών Εσωτερικής Καύσης είναι η συμπαγής κατασκευή του, που οφείλεται στην συνεχή ροή του αέρα μέσα στην μηχανή, ενώ το περιστρεφόμενο τμήμα του αεριοστροβίλου χρησιμοποιείται άμεσα στην παροχή κίνησης σε κάποια γεννήτρια ή αντλία. Γενικότερα οι αεριοστρόβιλοι συνδυάζουν υψηλή ευκινησία, χαμηλή θερμική αδράνεια, προσδίδουν μεγάλο ποσό ισχύος σε σχέση με το βάρος τους, διαθέτουν μικρό αριθμό κινούμενων μηχανημάτων, ενώ επιπρόσθετα περιορίζουν τον θόρυβο και τους κραδασμούς σε σχέση με άλλες μηχανές και έχουν την δυνατότητα εναλλαγής πολλών διαφορετικών καυσίμων. Η απλούστερη μορφή αεριοστροβίλου είναι μία συνδεσμολογία στροφείου, στην οποία πάνω σε έναν άξονα υπάρχουν πτερύγια που περιστρέφονται λόγω της επίδρασης του ρευστού (νερό, αέρας) πάνω σε εκείνα.

Ένας αεριοστρόβιλος μπορεί να είναι είτε ακτινικής είτε αξονικής ροής. Η κατηγορία αεριοστροβίλου τύπου ακτινικής ροής είναι συμπαγής και σταθερή κατασκευή που δημιουργείται μέσω χύτευσης. Χρησιμοποιείται για την μεταφορά αερίων και διαφόρων αεριομικμάτων και λειτουργούν με χρήση μίας περιστρεφόμενης κεφαλής, η οποία δημιουργεί μία ακτινική ροή αέρα. Λόγω της ταχύτητας του αέρα, και κατ' επέκταση της μεγάλης περιστροφικής ταχύτητας που αναπτύσσεται, δημιουργείται μία διαφορά πίεσης, η οποία με την σειρά της δημιουργεί ροή αέρα. Ο αέρας ακολουθεί μία ακτινική πορεία και μεταφέρει εκτός τα αέρια, τα αεριομίγματα και τους μικροοργανισμούς με τους οποίους ήρθε σε επαφή. Συγκεκριμένα, τα καυσαέρια οδηγούνται στο στροφείο διαμέσου ενός κελύφους σπειροειδούς σχήματος, ενώ πριν από το στροφείο υπάρχει μία σταθερή πτερύγωση, η οποία ρυθμίζει την γωνία πρόσπτωσης της ροής στην κινητή πτερύγωση. Ο αεριοστρόβιλος αξονικής ροής χρησιμοποιείται για τον ίδιο λόγο με τον αεριοστρόβιλο ακτινικής ροής, και μπορεί να διαθέτει μία ή δύο βαθμίδες. Η κάθε βαθμίδα από έναν στάτορα (στατικά πτερύγια) και αμέσως μετά από έναν ρότορα (κινητά πτερύγια). Ο αέρας εισέρχεται πρώτα από ένα ακροφύσιο, στη συνέχεια διαμέσου του στάτορα οδηγείται στο περιστρεφόμενο μέρος της βαθμίδας, τον ρότορα, δημιουργώντας μία διαφορά πίεσης η οποία οδηγεί τον αέρα να κινηθεί παράλληλα με τον άξονα του αεριοστροβίλου. Λόγω της μεγάλης ταχύτητας περιστροφής τους και της υψηλής θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στα πτερύγια του στροβίλου λόγω διαβροχής τους από τα καυσαέρια, δημιουργούνται ισχυρές φυγοκεντρικές δυνάμεις που συμβάλλουν στην

φθορά και καταπόνηση των πτερυγίων. Επιπλέον, μία ακόμη κατηγοριοποίηση των αεροστροβίλων είναι ανοιχτού και κλειστού τύπου. Στους αεροστροβίλους ανοιχτού τύπου πραγματοποιείται συνεχής εισροή αέρα, η ενέργεια προστίθεται μέσω του καυσίμου στον θάλαμο καύσης, ενώ τέλος τα καυσαέρια εξέρχονται στην ατμόσφαιρα. Στους αεροστροβίλους κλειστού τύπου, τα καυσαέρια της εξόδου εξέρχονται προς την ατμόσφαιρα, ωστόσο ο αέρας οδηγείται και πάλι στην είσοδο του κινητήρα, επί της ουσίας γίνεται ανακύκλωση.

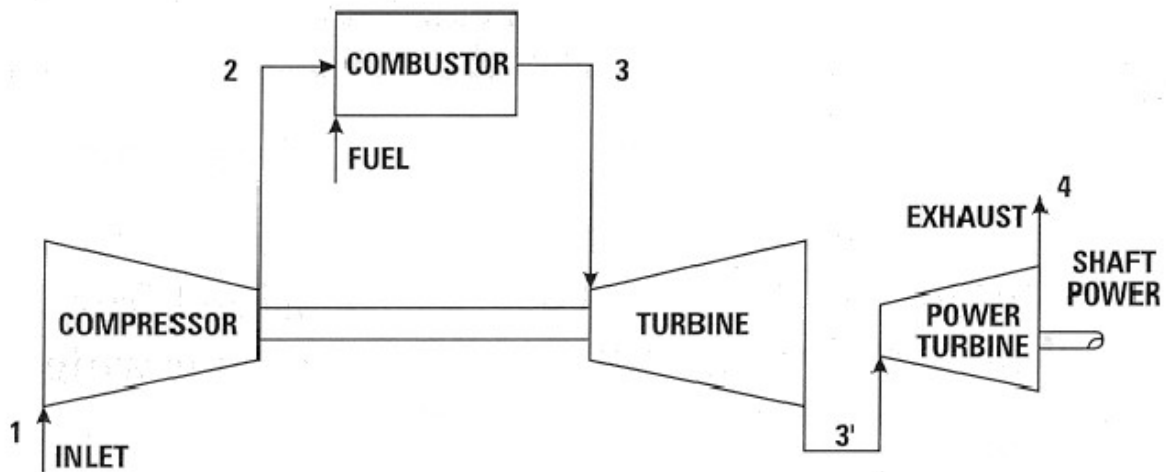
Η πιο συνηθισμένη δομή ενός αεροστροβίλου, συγκεκριμένα ενός ναυτικού αεροστροβίλου παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 2.1: Απεικόνιση Αεροστροβίλου [πηγή:

<http://tourbinas.weebly.com/deltaiotaalphadeltaiotakappaalphasigmaiotaalpha.html>].

Ο πιο συνηθισμένος τύπος αεροστροβίλου αποτελείται από το τμήμα εισόδου, τον συμπιεστή, τον θάλαμο καύσης, τον στρόβιλο υψηλής πίεσης, τον στρόβιλο χαμηλής πίεσης και το τμήμα εξαγωγής, όπως φαίνεται στο σχήμα 1. Παρακάτω αναλύονται συνοπτικά τα επιμέρους στοιχεία ενός απλού αεροστροβίλου.



Εικόνα 2.2: Σχηματική απεικόνιση αεριοστροβίλου με τα βασικά μέρη [πηγή: (Στυλιανή, 2010)].

Τμήμα Εισαγωγής (Inlet): Ο φρέσκος αέρας εισέρχεται με συνθήκες περιβάλλοντος (πίεση, θερμοκρασία) και προετοιμάζεται σχετικά με τις απαιτήσεις του συμπιεστή σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας, δηλαδή ο αέρας να εισέλθει στην κατάλληλη πίεση και ταχύτητα, και τα σωματίδια να είναι επαρκώς καθαρά.

Συμπιεστής (Compressor): Ο αέρας μετά το τμήμα εισαγωγής, αφού προετοιμαστεί καταλλήλως, εισέρχεται στον συμπιεστή. Ο συμπιεστής είναι είτε φυγοκεντρικός (περιστροφική κίνηση) είτε αξονικής ροής, και λαμβάνει την κίνηση από τον στρόβιλο, όπου συνδέονται μεταξύ τους με άξονα. Συμπιέζει τον ατμοσφαιρικό αέρα σε πίεση 5 έως 20 ατμοσφαιρών ενώ παράλληλα αυξάνει την θερμοκρασία του, και προετοιμάζει τον αέρα για την εισαγωγή του στον θάλαμο καύσης προκειμένου να πραγματοποιηθεί η διαδικασία της καύσης.

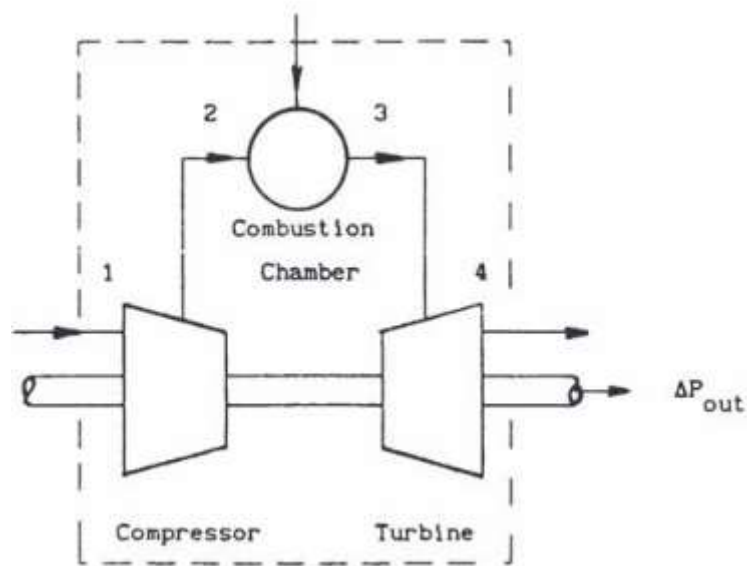
Θάλαμος Καύσης (Combustion Chamber): Μετά την έξοδο από τον συμπιεστή, ο αέρας έχει αυξημένη πίεση και θερμοκρασία, επομένως για την παραγωγή έργου, είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί η διαδικασία της καύσης. Η διαδικασία γίνεται στον θάλαμο καύσης, με τον παρερχόμενο αέρα από τον συμπιεστή, μαζί με έγχυση καυσίμου, και παράγεται καυσαέριο υψηλής πίεσης και ταχύτητας.

Στρόβιλος (Turbine): Ο στρόβιλος είναι το τμήμα της εγκατάστασης όπου γίνεται η παραγωγή του ωφέλιμου μηχανικού έργου. Συνήθως αποτελείται από δύο επιμέρους στροβίλους συνδεδεμένους σε σειρά. Ο πρώτος συνδέεται με τον συμπιεστή και του προσδίδει κίνηση μέσω ενός κοινού άξονα, και ονομάζεται στρόβιλος υψηλής πίεσης ή στρόβιλος αεριογόνου.

Ο δεύτερος στρόβιλος, λαμβάνει κίνηση από τα καυσαέρια που εξάγονται από τον στρόβιλο υψηλής πίεσης και ονομάζεται στρόβιλος χαμηλής πίεσης. Το τμήμα της εγκατάστασης που αποτελείται από τον στρόβιλο υψηλής πίεσης, τον θάλαμο καύσης και τον συμπιεστή ονομάζεται αεριογόνο τμήμα, διότι έχει στόχο την παραγωγή καυσαερίων, και μέσω αυτών την μετάδοση της κίνησης στον στρόβιλο χαμηλής πίεσης.

Τμήμα Εξαγωγής (Outlet): Συνήθως πρόκειται για ένα ακροφύσιο μέσω του οποίου εξάγονται τα καυσαέρια προς το περιβάλλον. Σε ορισμένους ναυτικούς κινητήρες ενδέχεται να υπάρχει και μειωτήρας στροφών, έτσι ώστε να μειώνονται οι στροφές του στροβίλου, προκειμένου να δημιουργηθεί κατάλληλη ταχύτητα για την έλικα.

Αντίστοιχα, ο πιο απλός τύπος αεριοστροβίλου είναι απλού άξονα, όπου περιλαμβάνει το τμήμα εισαγωγής αέρα, τον συμπιεστή (*compressor*), ο οποίος συνδέεται με τον στρόβιλο (*turbine*) μέσω ενός άξονα, τον θάλαμο καύσης (*combustion chamber*) και το τμήμα εξόδου των καυσαερίων. Ενδεικτικό σχεδιάγραμμα παρατίθεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 2.3: Αεριοστροβίλος απλού άξονα [πηγή: (A. Hussain, 1992)].

Τα σημεία που απεικονίζονται είναι τα εξής:

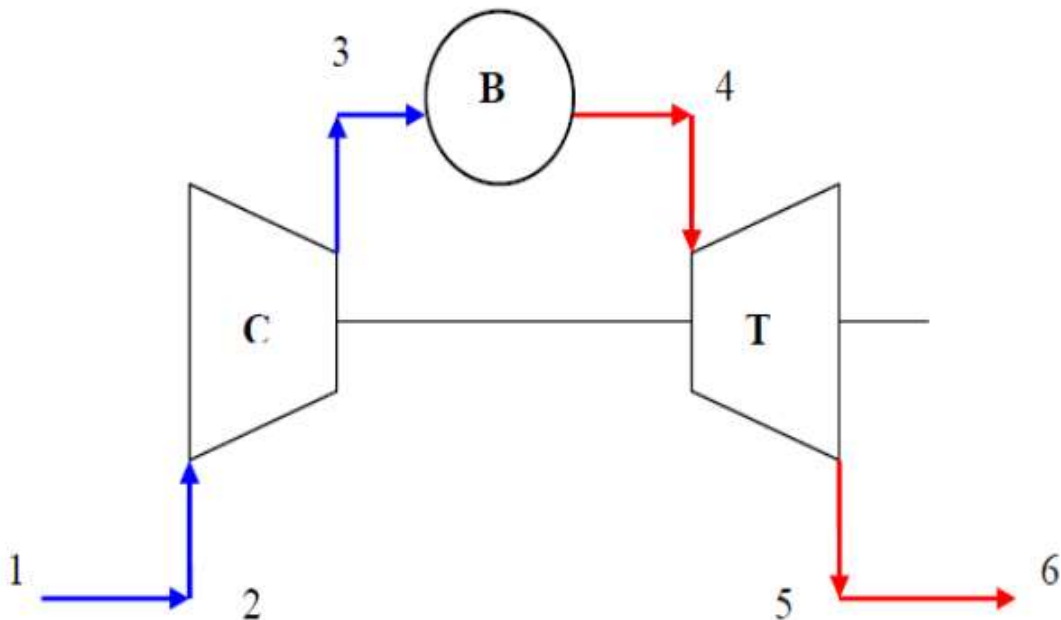
- Σημείο 1: Είσοδος στον συμπιεστή
- Σημείο 2: Είσοδος στον θάλαμο καύσης
- Σημείο 3: Έξοδος από τον θάλαμο καύσης
- Σημείο 4: Έξοδος από τον στρόβιλο

2.2 Μοντελοποίηση Αεριοστροβίλου ενός και δύο αξόνων

2.2.1 Μοντελοποίηση στο Ονομαστικό Σημείο Λειτουργίας (*Design Point*)

Η μοντελοποίηση κύκλου αεριοστροβίλου στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας, αφορά την επίλυση του κύκλου, καθώς και την εξακρίβωση των πιέσεων και θερμοκρασιών στα διάφορα τμήματα του κύκλου, από την είσοδο στον στρόβιλο μέχρι την έξοδο των καυσαερίων. Χρησιμοποιώντας τις τιμές των πιέσεων και των θερμοκρασιών υπολογίζονται οι επιδόσεις του συστήματος αεριοστροβίλου.

Σε πρώτη φάση, θα πραγματοποιηθεί μοντελοποίηση σε κύκλο αεριοστροβίλου απλής ατράκτου, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 2.4: Σχηματική Αναπαράσταση Αεριοστροβίλου ενός άξονα.

Τα δεδομένα που απαιτούνται για την μοντελοποίηση στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας είναι τα εξής:

- Ατμοσφαιρική πίεση περιβάλλοντος P_0 (bar)
- Θερμοκρασία περιβάλλοντος T_0 (K)
- Παροχή μάζας αέρα \dot{m}_a ($\frac{\text{kg}}{\text{s}}$)
- Συντελεστής απωλειών πίεσης στον αγωγό εισόδου K_{in}
- Λόγος συμπίεσης αέρα π_c

- Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του συμπιεστή $n_{is,C}$
- Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του στροβίλου $n_{is,T}$
- Βαθμός απόδοσης θαλάμου καύσης n_b
- Μηχανικός βαθμός απόδοσης n_m
- Κατώτερη θερμογόνος δύναμη καυσίμου $LHV \left(\frac{kJ}{kg}\right)$
- Συντελεστής απωλειών πίεσης στον θάλαμο καύσης K_b
- Συντελεστής απωλειών πίεσης στον αγωγό εξόδου καυσαερίων K_{out}
- Μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου μετά την έξοδο από τον θάλαμο καύσης Tt_4 (K)
- Συντελεστής ειδικής θερμοχωρητικότητας του αέρα $Cpa \left(\frac{kJ}{kg \times K}\right)$
- Συντελεστής ειδικής θερμοχωρητικότητας του καυσίμου $Cpg \left(\frac{kJ}{kg \times K}\right)$
- Ισεντροπικός συντελεστής εκτόνωσης αέρα γ_a
- Ισεντροπικός συντελεστής εκτόνωσης καυσαερίου γ_g

Οι συντελεστές ειδικής θερμοχωρητικότητας αέρα και καυσίμου Cpa και Cpg , καθώς και οι αντίστοιχοι ισεντροπικοί συντελεστές εκτόνωσης γ_a και γ_g έχουν σταθερή τιμή καθ' όλη την διάρκεια της μοντελοποίησης.

Σύμφωνα με την αρίθμηση του **Σχήματος 3**, ξεκινώντας την μοντελοποίηση του αεριοστροβίλου απλής ατράκτου, σε κάθε θέση του συστήματος προκύπτουν τα εξής:

Θέση 1: Είσοδος αέρα

Η πίεση στη θέση 1 είναι: $Pt_1 = P_0$

Η θερμοκρασία στη θέση 1 είναι: $Tt_1 = T_0$

Θέση 2: Προετοιμασία εισόδου στον συμπιεστή

Η πίεση στην θέση 2 είναι: $Pt_2 = (1 - K_{in}) \times Pt_1$

Η θερμοκρασία στη θέση 2 είναι: $Tt_2 = Tt_1$

Θέση 3: Έξοδος από τον συμπιεστή

Η πίεση στην θέση 3 είναι: $Pt_3 = \pi_c \times Pt_2$

Η θερμοκρασία στην θέση 3 είναι: $Tt_3 = Tt_2 \times \left(1 + \left(\frac{1}{n_{is,C}}\right) \times (\pi_c^{\epsilon_a} - 1)\right)$

Όπου $\epsilon_a = \frac{\gamma_a - 1}{\gamma_a}$

Θέση 4: Έξοδος του καυσαερίου από τον θάλαμο καύσης

Η πίεση στην θέση 4 είναι: $P_{t4} = (1 - K_b) \times P_{t3}$

Η θερμοκρασία στην θέση 4 είναι γνωστή από τα δεδομένα

Θέση 5: Έξοδος του καυσαερίου από τον στρόβιλο

Η πίεση στην θέση 5 είναι: $P_{t5} = \frac{P_{t6}}{1 - K_{out}}$ όπου $P_{t6} = P_0$

Η θερμοκρασία στην θέση 5 είναι: $T_{t5} = T_{t4} \times (1 - n_{is,T} \times (1 - (\frac{1}{\pi_T})^{eg}))$

Όπου π_T είναι ο λόγος εκτόνωσης καυσαερίου στον στρόβιλο και ισχύει: $\pi_T = \frac{P_{t4}}{P_{t5}}$, και $eg = \frac{\gamma g - 1}{\gamma g}$

Θέση 6: Έξοδος των καυσαερίων

Η πίεση στην θέση 6 είναι: $P_{t6} = P_0$

Η θερμοκρασία στην θέση 6 είναι ίση με την θερμοκρασία στην θέση 5, $T_{t6} = T_{t5}$ (K)

Εφόσον έχουν υπολογιστεί όλες οι θερμοκρασίες και οι πιέσεις στις θέσεις του συστήματος αεριοστροβίλου απλής ατράκτου, επόμενο και τελικό βήμα της μοντελοποίησης είναι ο υπολογισμός των επιδόσεων του κύκλου.

Ειδικό έργο συμπιεστή: $w_c = C_{pa} \times (T_{t3} - T_{t2}) \left(\frac{kJ}{kg}\right)$

Ειδικό έργο στροβίλου $w_T = (1 + f) \times C_{pg} \times (T_{t4} - T_{t5}) \left(\frac{kJ}{kg}\right)$,

Όπου f: λόγος καυσίμου – αέρα, $f = \frac{C_{pg} \times T_{t4} - C_{pa} \times T_{t3}}{n_b \times LHV - C_{pg} \times T_{t4}}$

Καθαρό ειδικό έργο: $w_k = (n_m \times w_T) - w_c \left(\frac{kJ}{kg}\right)$

Θερμικός βαθμός απόδοσης: $n_\theta = \frac{w_k}{f \times LHV}$

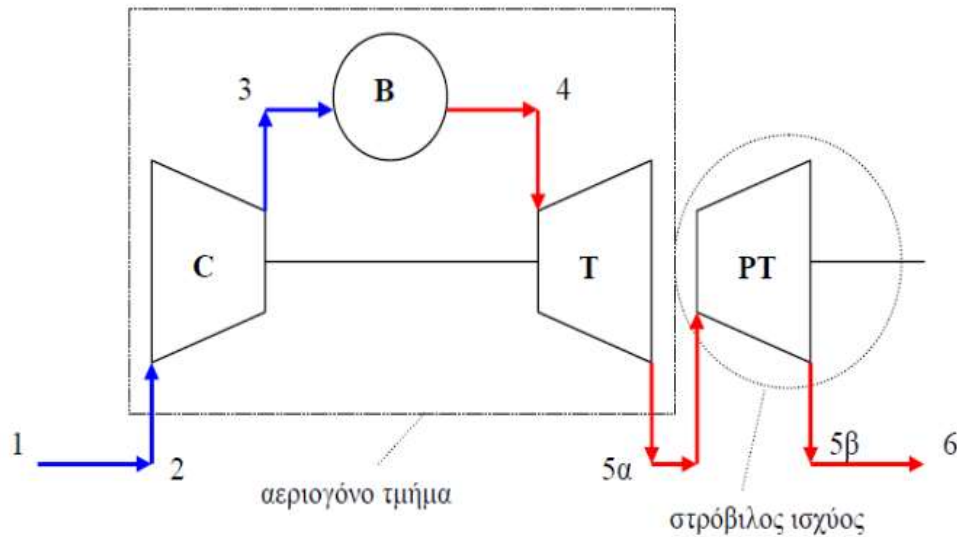
Ειδική κατανάλωση καυσίμου: $sfc = \frac{3600}{n_\theta \times LHV} \left(\frac{kg}{kW}\right)$

Καθαρή ισχύς: $\dot{W}_k = \dot{m}_a \times w_k$ (kW)

Παροχή θερμότητας $q_p = \frac{1}{n_\theta}$

Παροχή μάζας καυσαερίων: $\dot{m}_g = \dot{m}_a \times (1+f) \left(\frac{kg}{s}\right)$

Εάν η διάταξη του αεριοστροβίλου διαθέτει δύο άξονες, υπάρχει ένας επιπλέον στρόβιλος, που ονομάζεται στρόβιλος υψηλής πίεσης (PT), όπως φαίνεται στο σχήμα 4:



Εικόνα 2.5: Σχηματική Αναπαράσταση Αεριοστροβίλου δύο αξόνων.

τότε για την επίλυση (μοντελοποίηση) του ονομαστικού σημείου λειτουργίας, απαιτούνται δύο επιπρόσθετα δεδομένα, ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του στροβίλου ισχύος $n_{is,PT}$ καθώς και ο μηχανικός βαθμός απόδοσης του άξονα $nm_{,pt}$. Η διαδικασία επίλυσης είναι ακριβώς ίδια όπως και στον αεριοστρόβιλο ενός άξονα, μέχρι την θέση 4. Από εκεί και μετά, η επίλυση στο σημείο λειτουργίας έχει ως εξής:

Θέση 5α: Έξοδος καυσαερίου από τον στρόβιλο υψηλής πίεσης T ή HPT

$$\text{Ειδικό έργο συμπίεστη: } wc = C_p a \times (Tt_3 - Tt_2) \left(\frac{kJ}{kg}\right)$$

$$\text{Ειδικό έργο στροβίλου υψηλής πίεσης T ή HPT: } w_T = wc \left(\frac{kJ}{kg}\right)$$

$$\text{Θερμοκρασία στην θέση 5α: } Tt_{5a} = Tt_4 - \frac{w_T}{(1+f) \times C_{pg} \times nm} \text{ (K)}$$

Πίεση στην θέση 5α: $Pt_{5a} = \frac{Pt_4}{\pi_T}$ (bar), όπου π_T ο λόγος εκτόνωσης καυσαερίων στον στρόβιλο

υψηλής πίεσης, με $\pi_T = \left(1 + n_{is,T} \times \left(\frac{Tt_4}{Tt_{5a}} - 1\right)\right)^{\left(\frac{\gamma_g}{\gamma_g - 1}\right)}$

Θέση 5β: Έξοδος καυσαερίου από τον στρόβιλο ισχύος PT

Πίεση στην θέση 5β: $P_{t5\beta} = \frac{P_{t6}}{1-K_0}$ (bar), όπου $P_{t6} = P_0$

Θερμοκρασία στην θέση 5β: $T_{t5\beta} = T_{t5\alpha} \times (1 - n_{is,PT} \times (1 - (\frac{1}{\pi_{PT}})^{\varepsilon_g}))$ (K)

Όπου π_{PT} είναι ο λόγος εκτόνωσης καυσαερίου στον στρόβιλο και ισχύει: $\pi_{PT} = \frac{P_{t5\alpha}}{P_{t5\beta}}$, και $\varepsilon_g = \frac{\gamma g - 1}{\gamma g}$

Θέση 6: Έξοδος των καυσαερίων

Πίεση στην θέση 6: $P_{t6} = P_0$ (bar)

Θερμοκρασία στην θέση 6: $T_{t6} = T_{t5\beta}$ (K)

Υπολογισμός επιδόσεων του κύκλου

Ειδικό έργο συμπιεστή: $w_c = C_p a \times (T_{t3} - T_{t2})$ ($\frac{kJ}{kg}$)

Ειδικό έργο στροβίλου υψηλής πίεσης T ή HPT: $w_T = w_c$ ($\frac{kJ}{kg}$)

Καθαρό ειδικό έργο $w_k = w_{PT} = ((1 + f) \times C_p g \times (T_{t5\alpha} - T_{t5\beta})) \times \eta_{m,pt}$ ($\frac{kJ}{kg}$)

Θερμικός βαθμός απόδοσης: $\eta_{\theta} = \frac{w_k}{f \times LHV}$

Ειδική κατανάλωση καυσίμου: $sfc = \frac{3600}{\eta_{\theta} \times LHV}$ ($\frac{kg}{kWh}$)

Καθαρή ισχύς: $\dot{W}_k = \dot{m}_a \times w_k$ (kW)

Παροχή θερμότητας $q_p = \frac{1}{\eta_{\theta}}$

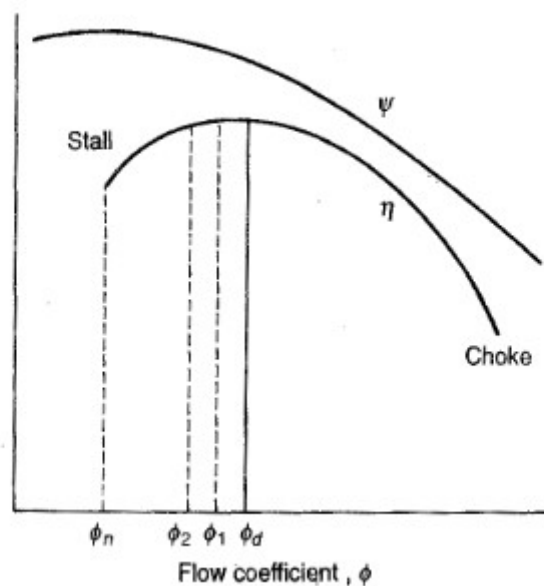
Παροχή μάζας καυσαερίων: $\dot{m}_g = \dot{m}_a \times (1 + f)$ ($\frac{kg}{s}$)

Ένας κύκλος αεριοστροβίλου ενός άξονα απαρτίζεται, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, από τρία βασικά εξαρτήματα: τον συμπιεστή (*compressor*), τον στρόβιλο (*turbine*) και τον θάλαμο καύσης. Ο συμπιεστής με τον στρόβιλο συνδέονται μεταξύ τους με κοινό άξονα, και επομένως ο κύκλος χαρακτηρίζεται από ένα συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας

(*design point*). Ωστόσο, το κάθε εξάρτημα διαθέτει το δικό του πεδίο λειτουργίας το οποίο μπορεί να εκφραστεί από την εκάστοτε καμπύλη λειτουργίας.

2.2.2 Χαρακτηριστική Καμπύλη Συμπιεστή μίας βαθμίδας

Η χαρακτηριστική καμπύλη συμπιεστή μίας βαθμίδας σχεδιάζεται συναρτήσει της αδιάστατης ροής $\frac{\dot{m}}{U}$, όπου \dot{m} η παροχή μάζας αέρα και U η γραμμική ταχύτητα του αέρα, και της αδιαστατοποιημένης μορφής της μεταβολής πίεσης $\frac{\Delta P}{\rho \times U^2}$, όπου ρ η πυκνότητα του αέρα.



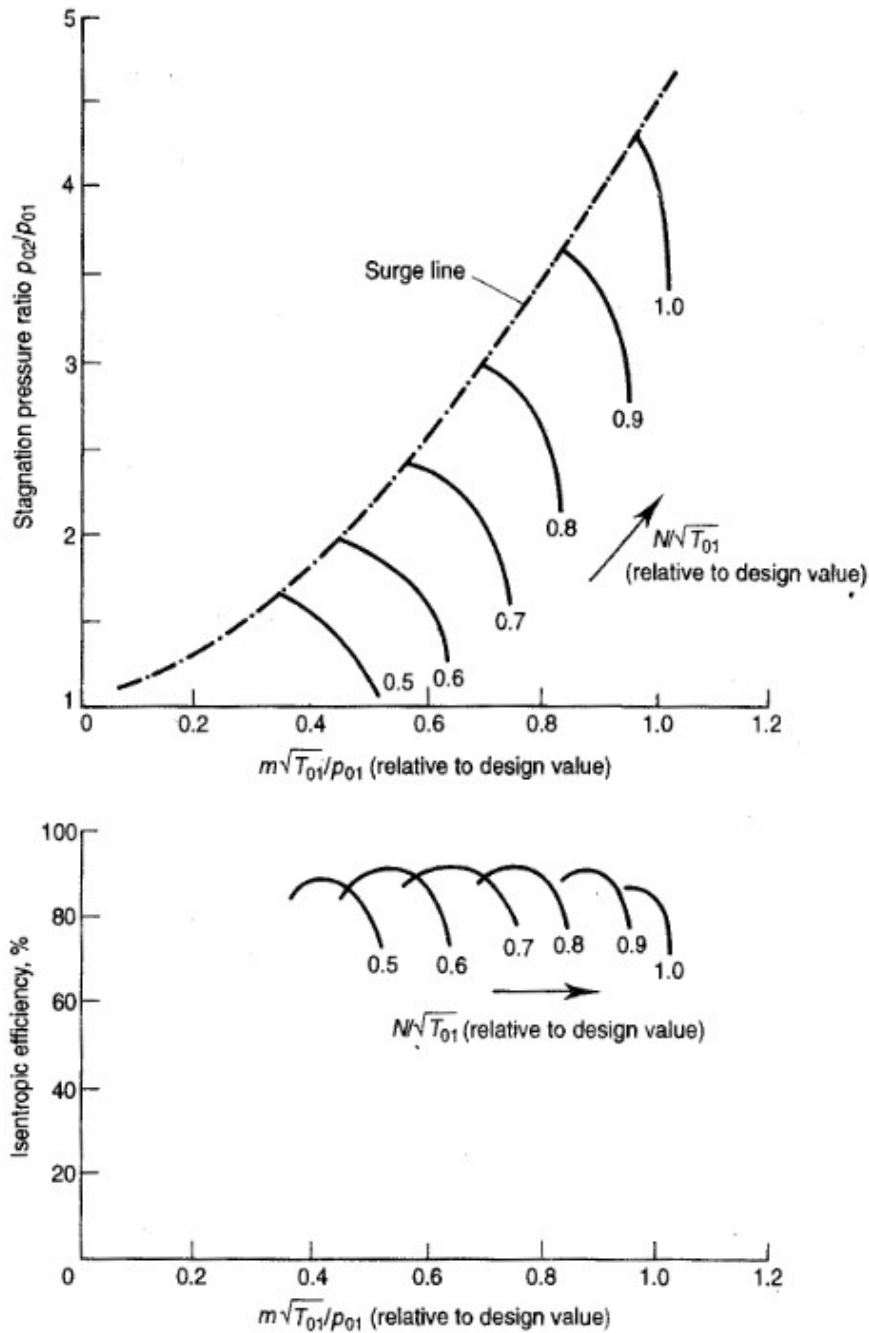
Εικόνα 2.6: Πραγματική Χαρακτηριστική Καμπύλη Συμπιεστή (HIH Saravanamuttoo, H.Cohen, GFC Rogers).

Η παραπάνω καμπύλη αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο αριθμό στροφών άξονα n . Εάν ο άξονας περιστρέφεται με μεγαλύτερο αριθμό στροφών, η καμπύλη μετατοπίζεται προς τα πάνω, ενώ αντίστοιχα αν οι στροφές του άξονα ελαττώνονται, η καμπύλη μετατοπίζεται προς τα κάτω. Η συγκεκριμένη καμπύλη λειτουργίας δίνουν ως αποτελέσματα τον λόγο πίεσης και τον βαθμό απόδοσης σε συνάρτηση με την παροχή μάζας του συμπιεστή και την ταχύτητα περιστροφής του άξονα. Λόγο του ότι τα συγκεκριμένα μεγέθη επηρεάζονται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, είναι απαραίτητο να γίνει αναγωγή ώστε να μην εξαρτώνται από τις συνθήκες εισόδου.

Επομένως, οι χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας του συμπιεστή εξάγουν ως αποτελέσματα τον λόγο πίεσης της βαθμίδας P_{02}/P_{01} , όπου P_{01} και P_{02} η ολική πίεση εισόδου και εξόδου της βαθμίδας του συμπιεστή, καθώς και τον βαθμό απόδοσης $\eta_{is,c}$ συναρτήσει της

ανηγμένης παροχής μάζας $\frac{\dot{m}\sqrt{T_{01}}}{\rho_{01}}$, για συγκεκριμένο αριθμό ανηγμένων στροφών $\frac{N}{\sqrt{T_0}}$, όπου T_{01} είναι η θερμοκρασία εισόδου στην βαθμίδα ή στον ίδιο τον συμπιεστή, εφόσον γίνεται αναφορά σε μονοβάθμιο συμπιεστή. Τα παραπάνω ανηγμένα μεγέθη μπορούν να εκφραστούν και ως $\frac{\dot{m}\sqrt{\theta}}{\delta}$, $\frac{N}{\sqrt{\theta}}$ όπου $\delta = P_{01}/Pref$ και $\theta = T_{01}/Tref$, όπου $Pref = 1.01325 \text{ bar}$ (πίεση περιβάλλοντος ή αναφοράς) και $Tref = 288.15 \text{ K}$ (θερμοκρασία περιβάλλοντος ή αναφοράς). Τα συγκεκριμένα μεγέθη ονομάζονται και «διορθωμένα» ή “*corrected*”.

Όσον αφορά τον πολυβάθμιο αξονικό συμπιεστή, οι χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας παρουσιάζονται στα διαγράμματα που ακολουθούν:



Εικόνα 2.7: Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας πολυβάθμιου συμπιεστή (HIH Saravanamuttoo, H.Cohen, GFC Rogers).

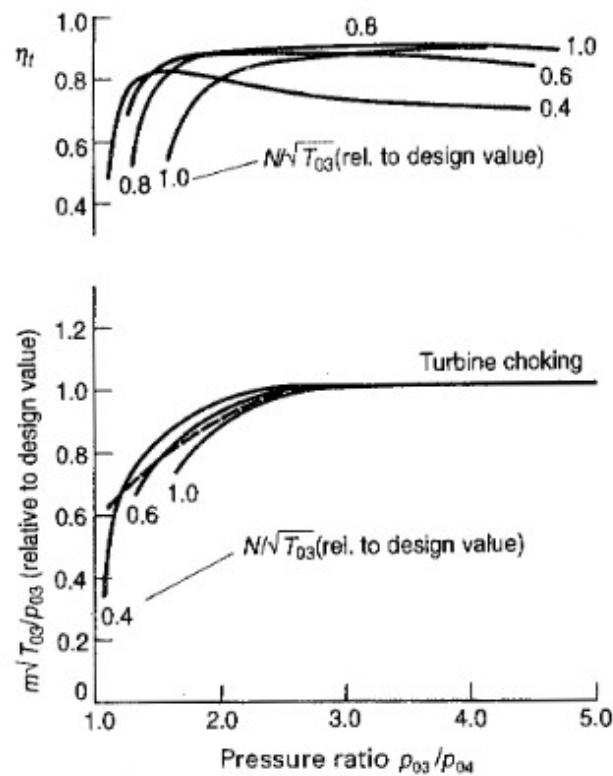
Στο πρώτο διάγραμμα, διακρίνονται οι καμπύλες σταθερής ταχύτητας περιστροφής $\frac{N}{\sqrt{T_{01}}}$, με τον οριζόντιο άξονα να περιλαμβάνει τιμές της ανηγμένης ή διορθωμένης παροχής μάζας $\frac{\dot{m}\sqrt{T_0}}{\rho_0}$, και τον κατακόρυφο άξονα να περιλαμβάνει τιμές του λόγου πίεσης P_{02}/P_{01} . Οι καμπύλες σταθερής ταχύτητας περιστροφής οριοθετούνται στα αριστερά από την καμπύλη πάλμωσης (*surge line*), ενώ στα δεξιά εμφανίζεται το φαινόμενο του φραγμού (*choking*). Το

φαινόμενο της πάλμωσης εμφανίζεται κατά την αποκόλληση της ροής (*stall*) και μπορεί να αποβεί καταστροφικό για την μηχανή, λόγω των ταλαντώσεων που προκαλούνται. Για την προσέγγιση της γραμμής πάλμωσης, το σημείο κινείται πάνω στην καμπύλη σταθερής ταχύτητας περιστροφής προς τα αριστερά, δηλαδή προς μειούμενη διορθωμένη παροχή μάζας. Ακολουθώντας από την άλλη την αντίστοιχη καμπύλη προς την πλευρά αυξανόμενων τιμών της διορθωμένης παροχής μάζας, παρατηρείται ότι μετά από μία συγκεκριμένη τιμή σταθεροποιείται, σε συνδυασμό με απότομη πτώση του λόγου πίεσης, πλησιάζοντας στο φαινόμενο του στραγγαλισμού (*choking*).

Όσον αφορά το δεύτερο διάγραμμα, δίνεται η τιμή του βαθμού απόδοσης συναρτήσει της ανηγμένης ή διορθωμένης παροχής μάζας, για μία συγκεκριμένη τιμή σταθερής ταχύτητας άξονα.

2.2.3 Χαρακτηριστική Καμπύλη Λειτουργίας Στροβίλου

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας ενός πολυβάθμιου στροβίλου παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα:



Εικόνα 2.8: Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας πολυβάθμιου στροβίλου (HIH Saravanamuttoo, H.Cohen, GFC Rogers).

Στα παραπάνω διαγράμματα των χαρακτηριστικών του στροβίλου είναι ευκρινές ότι δεν υπάρχουν αντίστοιχοι περιορισμοί όπως η γραμμή πάλμωσης στον συμπιεστή. Στο άνω διάγραμμα της εικόνας 2.7, παρουσιάζονται οι καμπύλες του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης του στροβίλου συναρτήσει του λόγου πίεσης του στροβίλου P_{03}/P_{04} , όπου ο δείκτης 3 αντιστοιχεί στην είσοδο ενώ ο δείκτης 4 στην έξοδο του στροβίλου. Ο βαθμός απόδοσης του στροβίλου φαίνεται ότι σταθεροποιείται για ένα εύρος συγκεκριμένων τιμών του λόγου πίεσης. Αυτό συμβαίνει λόγω της επιταχυνόμενης ροής στον στρόβιλο, δεν εμφανίζεται αποκόλληση της ροής και επομένως δεν υπάρχουν απώλειες σε μεγάλο βαθμό.

Στο δεύτερο διάγραμμα παρουσιάζεται η μεταβολή της ανηγμένης παροχής μάζας στον στρόβιλο $\frac{\dot{m}\sqrt{T_{03}}}{P_{03}}$, συναρτήσει του λόγου πίεσης P_{03}/P_{04} , για σταθερό αριθμό στροφών $\frac{N}{\sqrt{T_{03}}}$. Παρατηρείται ότι για οποιαδήποτε καμπύλη σταθερής περιστροφικής ταχύτητας, η ανηγμένη παροχή μάζας προσεγγίζει μία συγκεκριμένη σταθερή τιμή. Όλες οι καμπύλες σταθερών στροφών, για μία συγκεκριμένη τιμή λόγου πίεσης, καταλήγουν σε μία, και η παροχή μάζας μεγιστοποιείται, έτσι εμφανίζεται το φαινόμενο του φραγμού (*turbine choking*) σε κάποιο σημείο της ροής μέσα στον στρόβιλο.

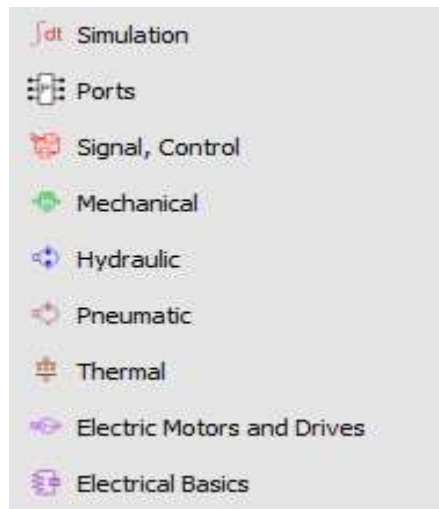
3.Εισαγωγή στο Λογισμικό *Amesim*

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα αναλυθεί αρχικά το εμπορικό λογισμικό *Amesim* γενικότερα, ως προς την λειτουργία του και τις δυνατότητες που προσφέρει στον χρήστη, ενώ στην συνέχεια θα παρουσιαστεί η ειδική βιβλιοθήκη του λογισμικού για αεριοστροβίλους. Αρχικά παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία του λογισμικού, καθώς και ο τρόπος με τον οποίον ο χρήστης μπορεί να σχεδιάσει και να προσομοιώσει οποιαδήποτε μηχανή, έχοντας πλήρες έλεγχο των παραμέτρων, των δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν αλλά και τις λειτουργίες που θα εκτελέσει το λογισμικό. Έπειτα, θα περιγραφούν αναλυτικά τα στοιχεία (*components*) εντός της βιβλιοθήκης αεριοστροβίλου, οι παράμετροι και οι διορθώσεις, με τα οποία ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει και να προσομοιώσει έναν οποιονδήποτε αεριοστρόβιλο.

Το εμπορικό λογισμικό *Amesim* βασίζεται στις αρχές του αντικειμενοστραφή προγραμματισμού. Διαθέτει σύμβολα ή στοιχεία (*components*) τα οποία εκτελούν συνήθως μία διεργασία, ενώ δίνεται η δυνατότητα τροποποίησης των παραμέτρων τους και των χαρακτηριστικών τους. Ενώνοντας τα συγκεκριμένα στοιχεία, και μεταβάλλοντας τα χαρακτηριστικά τους, μπορούν να δημιουργηθούν διάφορα μοντέλα. Ανοίγοντας το λογισμικό, εμφανίζεται αρχικά μία περιοχή σχεδίασης, και στην δεξιά πλευρά υπάρχουν τα σύμβολα των στοιχείων, χωρισμένα σε κατηγορίες (βιβλιοθήκες). Όταν επιλεγούν τα κατάλληλα σύμβολα και σχεδιαστεί το εκάστοτε μοντέλο, η προσομοίωση του συστήματος προχωράει με βάση τα εξής στάδια:

- Το κάθε στοιχείο αποτελείται από μία συγκεκριμένη λειτουργία, η οποία ορίζεται από κάποια μαθηματική σχέση με παραμέτρους.
- Ρυθμίζονται κατάλληλα οι παράμετροι των στοιχείων.
- Η διαδικασία της προσομοίωσης ξεκινά, ρυθμίζοντας τον χρόνο.
- Μετά το τέλος της προσομοίωσης, προκύπτουν διαγράμματα και γραφήματα που επεξηγούν και ερμηνεύουν την συμπεριφορά του εκάστοτε συστήματος που έχει σχεδιαστεί.

Ανοίγοντας το λογισμικό, εμφανίζεται ένα μεγάλο λευκό πλαίσιο, στα δεξιά του οποίου βρίσκονται τα διάφορα στοιχεία, ομαδοποιημένα σε κατηγορίες, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:

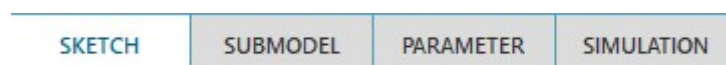


Εικόνα 3.1: Κατηγοριοποίηση στοιχείων (components) στο Amesim.

Οι βασικές κατηγορίες των στοιχείων είναι οι εξής:

- Μηχανικά Στοιχεία (Mechanical): Χρησιμοποιούνται μεμονωμένα για την προσομοίωση ενός πλήρως μηχανικού συστήματος. Περιλαμβάνονται μάζες, αποσβεστήρες, ελατήρια, καθώς επίσης στοιχεία γραμμικής και περιστροφικής κίνησης.
- Στοιχεία Ελέγχου (Control): Περιλαμβάνονται τα στοιχεία που χρησιμεύουν στον έλεγχο, την λήψη μετρήσεων και την ευκολότερη παρατήρηση του εκάστοτε συστήματος, όπως χρονομετρητές, διακόπτες.
- Υδραυλικά Στοιχεία (Hydraulic): Περιέχει διάφορα υδραυλικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται σε υδραυλικά συστήματα, δηλαδή σε συστήματα που κινούνται με την βοήθεια ενός υδραυλικού υγρού. Περιλαμβάνει μετρητές πίεσης, υδραυλικά μοτέρ, αντλίες.
- Πνευματικά Στοιχεία (Pneumatic): Περιλαμβάνει στοιχεία όπως αντλίες, μετρητές, συμπιεστές, στροβίλους, εναλλάκτες θερμότητας που χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό πολύπλοκων πνευματικών συστημάτων, που λειτουργούν δηλαδή με πεπιεσμένο αέρα.
- Θερμικά Στοιχεία (Thermal): Χρησιμοποιούνται για την μοντελοποίηση παραδοσιακών τρόπων μεταφοράς θερμότητας μεταξύ στερεών υλικών και συμβάλλουν επίσης στην μελέτη της θερμικής εξέλιξης στα συγκεκριμένα στερεά, όταν υποβάλλονται σε πηγές θέρμανσης. Συγκεκριμένα περιλαμβάνει αισθητήρες θερμοκρασίας, εναλλάκτες θερμότητας κ.λ.π.
- Ηλεκτρικά Στοιχεία (Electric Motors and Drives): Περιλαμβάνει στοιχεία που χρησιμοποιούνται για την μοντελοποίηση ηλεκτρικών μερών σε διάφορα συστήματα. Διαθέτει συσκευές εναλλασσόμενου και συνεχούς ρεύματος, ηλεκτρικά μοτέρ, πυκνωτές, αντιστάσεις κ.λ.π.

Στο αρχικό παράθυρο του λογισμικού, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, υπάρχει ένα μεγάλο λευκό πλαίσιο. Ακριβώς από πάνω, διακρίνονται τα εξής βήματα σε καρτέλες: *Sketch*, *Submodel*, *Parameter* και *Simulation*.



Εικόνα 3.2: Τα τέσσερα βήματα δημιουργίας ενός μοντέλου στο Amesim.

Το *Sketch Mode*, είναι το πρώτο βήμα που εμφανίζεται ανοίγοντας το λογισμικό. Επιλέγοντας τα κατάλληλα στοιχεία από τις κατηγορίες που αναλύθηκαν παραπάνω, ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει το δικό του σύστημα από την αρχή. Επιπλέον, τροποποιώντας ορισμένα στοιχεία από κάποια έτοιμη βιβλιοθήκη, δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας παραλλαγών του συστήματος.

Όταν ολοκληρωθεί η σχεδίαση του μοντέλου, το επόμενο βήμα είναι ο ορισμός των *Submodels*. Συνήθως, κάθε στοιχείο του συστήματος ορίζεται σαν ένα διαφορετικό *Submodel*, ενώ στο συγκεκριμένο *mode* ορίζεται η μορφή των εξισώσεων επίλυσης του προβλήματος και συγκεκριμένος τύπος για κάθε στοιχείο. Εάν δεν υπάρχει σωστή σύνδεση μεταξύ των επιμέρους στοιχείων, ο χρήστης πρέπει να επιστρέψει ένα βήμα πίσω, στο *Sketch Mode*, ώστε να ολοκληρωθεί η σωστή σχεδίαση του συστήματος.

Στη συνέχεια, επόμενο βήμα είναι ο ορισμός των παραμέτρων του συστήματος, μέσω του *Parameter Mode*. Επί της ουσίας, με την βοήθεια του συγκεκριμένου *Mode*, μπορούν να μεταβληθούν οι παράμετροι του κάθε στοιχείου στο *Sketch*, με αποτέλεσμα ο χρήστης να έχει την δυνατότητα δημιουργίας του δικού του μοντέλου, ενώ αλλάζοντας αρκετές φορές τις παραμέτρους, μπορεί να μελετήσει το σύστημα από πολλές διαφορετικές οπτικές.

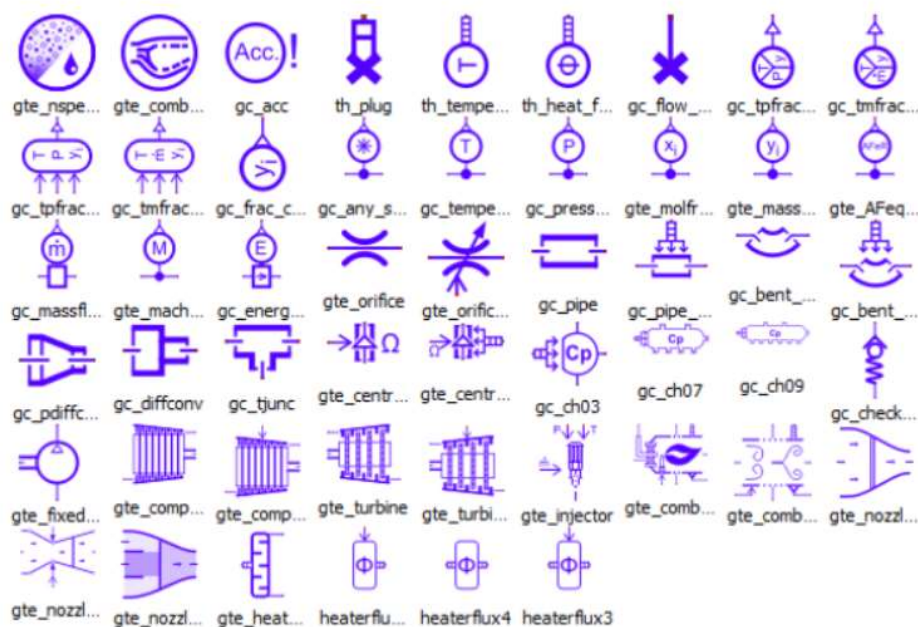
Τελευταίο βήμα είναι η προσομοίωση του συστήματος μετά τον ορισμό των παραμέτρων, με την βοήθεια του *Run Mode*. Ορίζεται αρχικά ο χρόνος της προσομοίωσης, ενώ μόλις ολοκληρωθεί το *Simulation*, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται μέσα από διαγράμματα, ουσιαστικά διακρίνεται λεπτομερώς η λειτουργία του συστήματος μέσα από αυτά.

3.1 Ανάλυση Βιβλιοθήκης Αεριοστροβίλου (*Gas Turbine Library*)

Όπως είναι γνωστό, στο *Amesim* υπάρχουν συγκεκριμένες βιβλιοθήκες, που δίνουν την δυνατότητα στον χρήστη να δημιουργήσει πολύπλοκα συστήματα, τα οποία δεν είναι εύκολο να σχεδιαστούν από την αρχή, επιλέγοντας τα στοιχεία (*components*) ένα ένα ξεχωριστά. Μία από τις βιβλιοθήκες χρησιμοποιείται ειδικά για αεριοστροβίλους, και στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα γίνει μία σύντομη αναφορά σε αυτήν καθώς και στον τρόπο λειτουργίας της.

Η βιβλιοθήκη για αεριοστροβίλους αποτελείται από ένα σύνολο στοιχείων που χρησιμοποιούνται από τον χρήστη για την κατασκευή μοντέλων αεριοστροβίλων, χρησιμοποιώντας πολλά διαφορετικά μίγματα αερίων που ενδέχεται να περιέχουν μέχρι και 100 στοιχεία. Με την βοήθεια της συγκεκριμένης βιβλιοθήκης, ο χρήστης μπορεί να παρατηρήσει τις μεταβολές της θερμοκρασίας, πίεσης, σύνθεσης μίγματος, παροχής μάζας, ενθαλπίας.

Η βιβλιοθήκη για αεριοστροβίλους στο *Amesim* αποτελείται από τα εξής στοιχεία, που παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 3.3: Επιμέρους στοιχεία της βιβλιοθήκης *Gas Turbine*.

Τα στοιχεία της βιβλιοθήκης *Gas Turbine* μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, *resistive* και *capacitive*. Τα *resistive elements* είναι στοιχεία τα οποία διαχέουν ενέργεια, και αντιδρούν ακαριαία σε μεταβολές πίεσης και θερμοκρασίας, ώστε να βρίσκονται πάντα σε κατάσταση ισορροπίας. Οι μεταβλητές που υπολογίζονται στα άκρα των συγκεκριμένων στοιχείων στην βιβλιοθήκη *Gas Turbine*, είναι η παροχή μάζας, σε γραμμάρια ανά δευτερόλεπτο (g/s) και η ενθαλπία σε *Joule* ανά δευτερόλεπτο (J/s). Τα *capacitive elements* είναι στοιχεία τα οποία αποθηκεύουν και προσδίδουν ενέργεια χωρίς απώλειες. Οι μεταβλητές που υπολογίζονται στα άκρα των στοιχείων κατά την δημιουργία ενός μοντέλου αεριοστροβίλου είναι η πίεση σε *bar*, η θερμοκρασία σε βαθμούς *Kelvin* (K) και η πυκνότητα των στοιχείων του μίγματος καύσης σε κιλά ανά κυβικό μέτρο (kg/m^3). Στο λογισμικό *Amesim*, ένα *capacitive element* μπορεί να συνδεθεί μόνο με ένα *resistive element*. Επομένως, προκειμένου να σχεδιαστεί ένα μοντέλο αεριοστροβίλου στην βιβλιοθήκη *Gas Turbine*, πρέπει να υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο τύπων στοιχείων.

Στο λογισμικό *Simcenter Amesim*, παρατηρούμε ότι η βιβλιοθήκη *Gas Turbine* αποτελείται από διαφόρους τύπους στοιχείων. Τα στοιχεία πηγής (*Sources*) χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των οριακών συνθηκών στο σύστημα, όπως για παράδειγμα την ροή μάζας ή την θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Οι αισθητήρες (*Sensors*) χρησιμοποιούνται στην μέτρηση διαφόρων μεταβλητών, όπως πίεσης και θερμοκρασίας, που θα οδηγήσουν στο τέλος στην εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

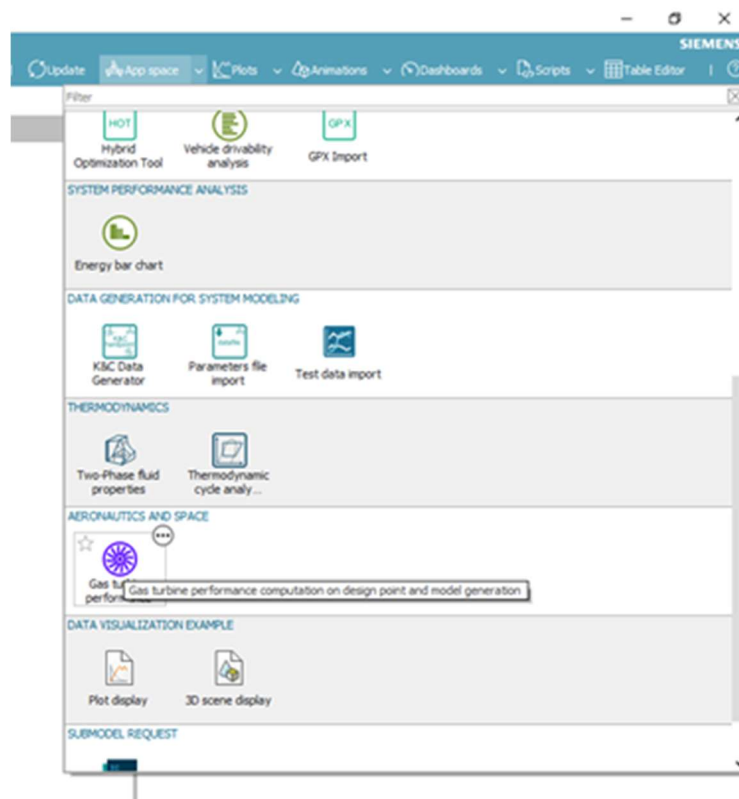
Στην κατηγορία *fluids and volumes*, καθορίζεται το μίγμα καυσίμου που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί και να προστεθεί στον θάλαμο καύσης. Επιπλέον συναντώνται τύποι στομίων (*orifices*), τα οποία προκαλούν συνήθως απώλεια πίεσης και ρυθμίζουν την παροχή όγκου και μάζας κατά την ροή ενός ρευστού, καθώς επίσης και σωλήνες (*pipes*), στοιχεία τα οποία απλώς διευκολύνουν την μεταφορά της ροής από ένα σημείο σε ένα άλλο. Η βαλβίδα ελέγχου (*control valve*) που συναντάται επίσης στην βιβλιοθήκη *Gas Turbine*, επί της ουσίας ελέγχει την κατεύθυνση της ροής σε ένα οποιοδήποτε σύστημα. Στην κατηγορία *Compressors and Turbines* υπάρχουν οι συμπιεστές και οι στρόβιλοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα οποιοδήποτε σύστημα, ενώ οι εγχυτές (*injectors*) είναι στοιχεία τα οποία προσθέτουν ροή καυσίμου σε μικρές ποσότητες στον θάλαμο καύσης. Στην κατηγορία *Combustion Chamber* βρίσκεται ως στοιχείο της βιβλιοθήκης ο θάλαμος καύσης, χώρος στον οποίο γίνεται η καύση, η χημική αντίδραση του μίγματος καυσίμου με τον υδρατμό (H_2O). Στην κατηγορία *Nozzle*, βρίσκεται το ακροφύσιο,

στοιχείο το οποίο συνδέεται στην έξοδο του στροβίλου και ελέγχει τα χαρακτηριστικά της ροής των καυσαερίων, προκειμένου να υπάρχει βελτιστοποίηση στην ώθηση και γενικότερα σε ολόκληρο το σύστημα. Τέλος, στην υποκατηγορία *Heat Exchangers* βρίσκονται οι εναλλάκτες θερμότητας, στοιχείο που χρησιμοποιείται για την μεταφορά θερμότητας μεταξύ δύο ρευστών που βρίσκονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες.

4. Μελέτη Περίπτωσης στο *Amesim* – Αεριοστρόβιλος ενός άξονα

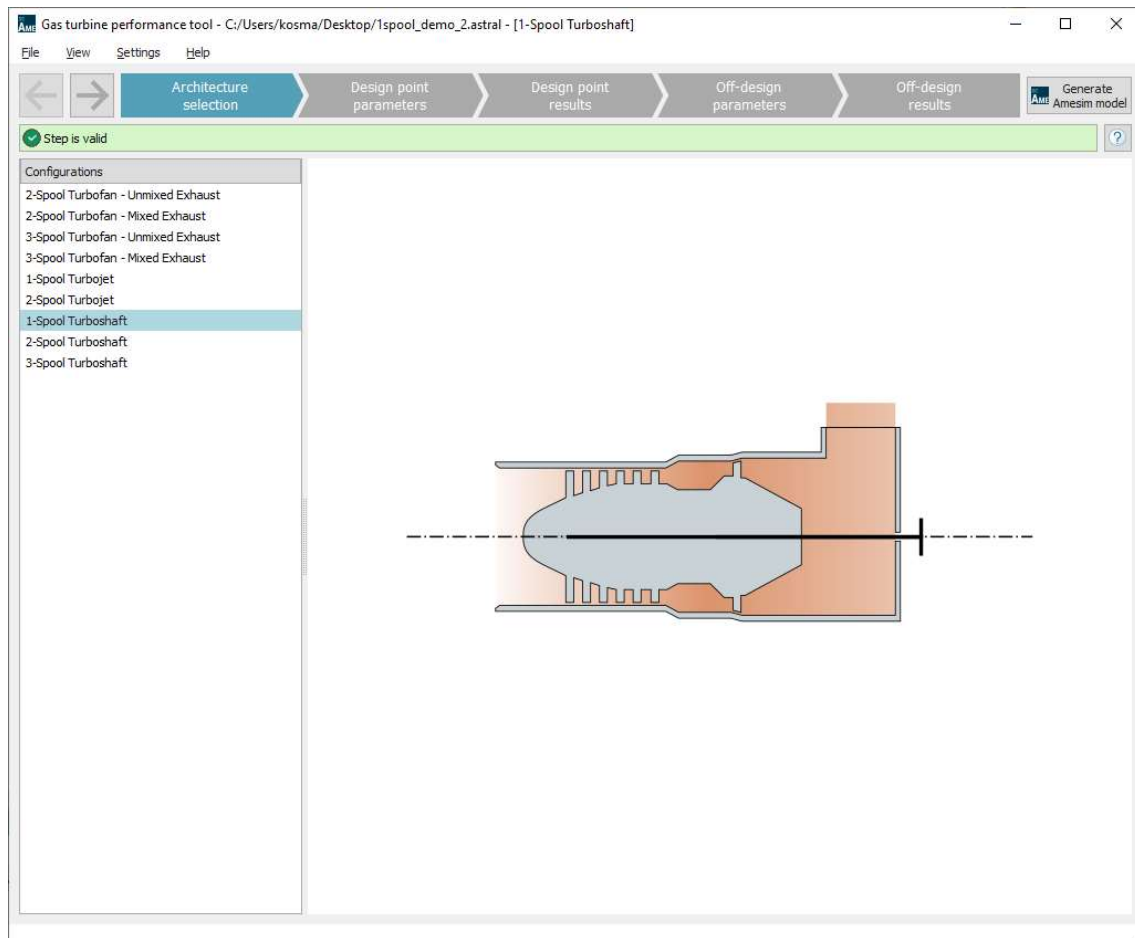
4.1 Προσέγγιση επιδόσεων πραγματικού κύκλου

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενα κεφάλαια, το λογισμικό *Simcenter Amesim* προσφέρει στον χρήστη αρκετές δυνατότητες, κυρίως μέσω των βιβλιοθηκών που διαθέτει. Στην παρούσα εργασία, η μελέτη του κύκλου αεριοστροβίλου πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια μίας σημαντικής εφαρμογής του λογισμικού, η οποία συνδυάζει στοιχεία της βιβλιοθήκης αεριοστροβίλου, της *Gas Turbine Performance*, όπως φαίνεται και από την παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 4.1: Επιλογή *Gas Turbine Performance* στο λογισμικό *Amesim*.

Επιλέγοντας την εφαρμογή *Gas Turbine Performance*, εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο:



Εικόνα 4.2: Δυνατότητες της εφαρμογής Gas Turbine Performance.

Σε πρώτη φάση, αποφασίστηκε η προσομοίωση σε αεριοστρόβιλο ενός άξονα (1 – *Spool Turboshaft*) καθώς και σε αντίστοιχη διάταξη με δύο άξονες (2 – *Spool Turboshaft*). Προκειμένου να εξαχθούν αποτελέσματα σχετικά με το σημείο λειτουργίας του αεριοστροβίλου ή “*design point*”, χρειάζεται να οριστούν συγκεκριμένες παράμετροι, όπως οι αρχικές συνθήκες (πίεση και θερμοκρασία περιβάλλοντος), η παροχή μάζας αέρα, οι ισεντροπικοί βαθμοί απόδοσης συμπιεστή και στροβίλου, οι απώλειες πίεσης εισόδου, εξόδου και θαλάμου καύσης κ.α. Μεταβάλλοντας τις τιμές των παραμέτρων, προκύπτουν διαφορετικές επιδόσεις για την ίδια διάταξη αεριοστροβίλου. Στο *Amesim*, επιλέγοντας μία συγκεκριμένη διάταξη αεριοστροβίλου, οι παράμετροι χωρίζονται σε θέσεις (*stations*), προς διευκόλυνση του χρήστη. Παρακάτω παρουσιάζονται εν συντομία οι θέσεις και οι παράμετροι, αρχικά σε διάταξη ενός άξονα (1 - *Spool*) και στη συνέχεια στην αντίστοιχη διάταξη δύο αξόνων (2 – *Spool*).

Τα παραπάνω δεδομένα τοποθετούνται σε κάθε ξεχωριστό *section* του αεριοστροβίλου, στην επιλογή *Design point parameters*.

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.2, δίνει την δυνατότητα επιλογής διάταξης αεριοστροβίλου ενός, δύο ή και τριών αξόνων, η οποία χωρίζεται σε συγκεκριμένες θέσεις ή *stations*. Η κάθε θέση διαθέτει συγκεκριμένες παραμέτρους, οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω.

Επιπρόσθετα, το λογισμικό παρέχει την δυνατότητα εισαγωγής ορισμένων διαρροών (*Bleed*). Στην παρούσα φάση δεν κρίθηκε απαραίτητο, επομένως οι μοναδικές παράμετροι που μεταβλήθηκαν ήταν ο αριθμός των βαθμίδων του στροβίλου υψηλής πίεσης (*HP Turbine*) και ο αντίστοιχος αριθμός βαθμίδων στον στρόβιλο ισχύος (*Power Turbine*).

Πρωταρχικός στόχος ήταν η προσέγγιση των επιδόσεων του εμπορικού αεριοστροβίλου *LM 2500* στο σημείο λειτουργίας του, που χρησιμοποιείται και για ναυτικούς σκοπούς εκτός των υπολοίπων χρήσεων του, στο λογισμικό *Amesim*, θεωρώντας μοντέλο ενός άξονα αρχικά, και δύο αξόνων στη συνέχεια. Καθώς το λογισμικό ακολουθεί έναν συγκεκριμένο τρόπο προσέγγισης και χρησιμοποιεί ένα έτοιμο μοντέλο, έπρεπε να γίνουν ορισμένες δοκιμές ώστε να προσεγγιστούν οι επιδόσεις του *LM 2500*, για έναν ή δύο άξονες. Οι επιδόσεις του αεριοστροβίλου *LM 2500*, σύμφωνα με το *datasheet* από τον κατασκευαστή, την εταιρεία *General Electric*, καθώς και ορισμένες χρήσιμες πληροφορίες, διακρίνονται στον παρακάτω πίνακα:

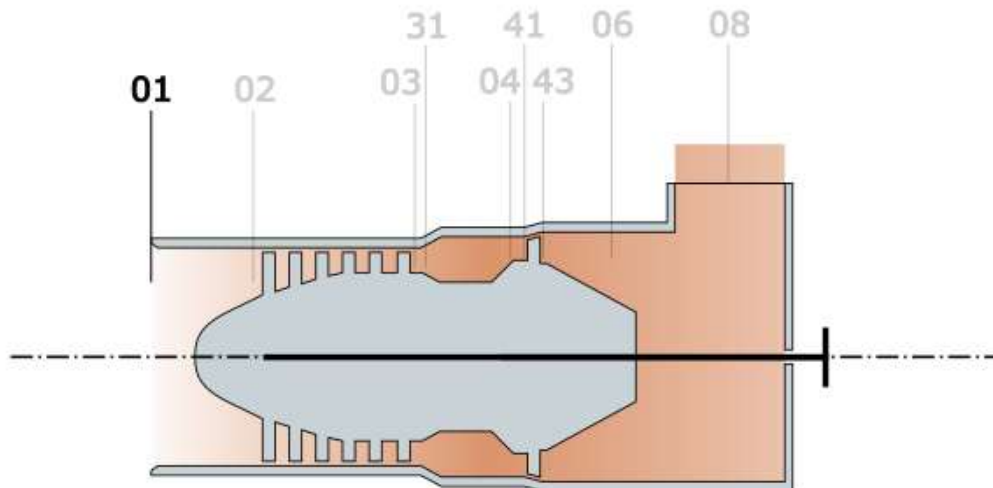
Λεδομένα από τον κατασκευαστή		Μονάδες Μέτρησης
Καθαρή παραγόμενη ισχύς <i>Wk</i>	25060	<i>kW</i>
Θερμικός βαθμός απόδοσης <i>nθ</i>	34.7 %	
Ειδική κατανάλωση καυσίμου <i>sfc</i>	0.2269	<i>kg/kWh</i>
Θερμοκρασία αποβολής καυσαερίων <i>Texh</i>	566	<i>Celsius</i>
Λόγος πίεσης συμπίεστή <i>pc</i>	18	
Παροχή μάζας αέρα <i>mia</i>	69.4	<i>kg/s</i>

Παροχή μάζας καυσαερίων \dot{m}_g	70.3	kg/s
Ταχύτητα στροβίλου ισχύος n	3600	rpm
Αριθμός βαθμίδων συμπιεστή	16	
Αριθμός βαθμίδων στροβίλου υψηλής πίεσης	2	
Αριθμός βαθμίδων στροβίλου ισχύος	6	
Θερμοκρασία περιβάλλοντος T_{amb}	15	$Celsius$
Πίεση περιβάλλοντος P_{amb}	1.013 ή 101300	Bar ή Pa
Κατώτερη Θερμογόνος δύναμη καυσίμου LHV	48620	kJ/kg
Βαθμός απόδοσης θαλάμου καύσης η_b	0.98	
Μηχανικός βαθμός απόδοσης άξονα η_m	1	
Συντελεστής απωλειών αγωγού εισόδου (<i>intake pressure ratio - K_{in}</i>)	0.985	
Συντελεστής απωλειών θαλάμου καύσης (<i>burner pressure ratio- K_b</i>)	0.96	
Συντελεστής απωλειών αγωγού εξόδου καυσαερίων (<i>turbine exit duct pressure - K_{out}</i>)	0.97	

Πίνακας 4.1: Επιδόσεις και δεδομένα του LM 2500.

Ως επιδόσεις του αεριοστροβίλου, θεωρούνται τα τέσσερα πρώτα μεγέθη του πίνακα, δηλαδή η καθαρή παραγόμενη ισχύς (Wk), ο θερμικός βαθμός απόδοσης ($\eta\theta$), η ειδική κατανάλωση καυσίμου (sfc) και η θερμοκρασία αποβολής καυσαερίων (T_{exh}). Οι τιμές των προαναφερθέντων μεγεθών, καθώς και ο λόγος πίεσης συμπιεστή p_c , η παροχή μάζας αέρα και καυσαερίων \dot{m}_a και \dot{m}_g , η ταχύτητα στροβίλου ισχύος, οι βαθμίδες συμπιεστή και στροβίλων και η πίεση και θερμοκρασία περιβάλλοντος, αναγράφονται στο *datasheet* του κατασκευαστή. Για λόγους ευκολίας, οι συντελεστές απωλειών πίεσης, ο μηχανικός βαθμός απόδοσης άξονα και ο βαθμός απόδοσης θαλάμου καύσης παρέμειναν σταθεροί σε ολόκληρη την διαδικασία, διατηρώντας τις τιμές του πίνακα 4.1. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο, έγινε προσπάθεια προσέγγισης των ανωτέρω επιδόσεων, αξιοποιώντας το μοντέλο του λογισμικού.

Αρχικά, από το *Gas Turbine Performance App* του *Amesim*, επιλέγεται το μοντέλο 1 – *Spool Turboshaft*. Μεταβαίνοντας στην καρτέλα “*Design Point Parameters*”, εμφανίζεται ο αεριοστρόβιλος ενός άξονα, χωρισμένος σε θέσεις (*stations*), η κάθε μία με τις δικές τις παραμέτρους, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 4.3: Σχηματική απεικόνιση αεριοστρόβιλου ενός άξονα.

Διατηρώντας σταθερές τις απώλειες πίεσης εισόδου, εξόδου και θαλάμου καύσης, καθώς επίσης και τον μηχανικό βαθμό απόδοσης άξονα και την ταχύτητά του, τον βαθμό απόδοσης θαλάμου καύσης, την θερμογόνο ικανότητα του καυσίμου και τις περιβαλλοντικές συνθήκες, πραγματοποιήθηκαν ορισμένες δοκιμές, μεταβάλλοντας τις εξής παραμέτρους: Μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου (*Burner exit temperature*), ισεντροπικός βαθμός απόδοσης συμπεσστή (*hpc isentropic efficiency*), ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στρόβιλου (*hpt isentropic efficiency*).

Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές των παραμέτρων ανά θέση ορίζονται ως εξής:

Station 01

Αναφέρεται στις συνθήκες του αέρα εξωτερικά του συστήματος, με παραμέτρους την πίεση και θερμοκρασία περιβάλλοντος, καθώς και την σχετική υγρασία.

Παράμετροι:

- P_{amb} : 101325 Pa

- T_{amb} : 288.15 K (15 Celsius + 273.15 για μετατροπή σε Kelvin)
- Σχετική υγρασία (Relative Humidity): 60% (μία μέση τιμή υγρασίας στο εξωτερικό περιβάλλον)

Station 02 – Inlet

Είσοδος του αέρα στον συμπιεστή. Στο λογισμικό, ως δεδομένα στην συγκεκριμένη θέση θεωρούνται η παροχή μάζας αέρα, καθώς και ο συντελεστής απωλειών αγωγού εισόδου (*intake pressure ratio*).

Παράμετροι:

- Διορθωμένη παροχή μάζας (*Inlet corrected mass flow rate*): 70.15 kg/s (Στα αποτελέσματα θα προκύψει ότι: $\dot{m}_{ia} = 68.9671$ kg/s και $\dot{m}_{ig} = 70.3636$ kg/s, τιμές αρκετά κοντά στις αντίστοιχες του πίνακα 1)
- K_{in} : 0.985 (Η πίεση στην Θέση 02 είναι 0.15% μικρότερη από την πίεση της Θέσης 01).

Station 03 – Compressor Outlet

Έξοδος Συμπιεστή. Αναφέρεται στον πεπιεσμένο αέρα, πριν από την είσοδό του στον θάλαμο καύσης. Μπορούν να δοθούν τιμές για τις εξής παραμέτρους: Λόγος πίεση συμπιεστή p_c , ισεντροπικός βαθμός απόδοσης συμπιεστή $n_{is, c}$, ταχύτητα του άξονα που κινεί τον στρόβιλο υψηλής πίεσης n (rpm), καθώς και για τον μηχανικό βαθμό απόδοσης του ίδιου άξονα nm .

Παράμετροι:

- p_c : 18
- Ταχύτητα στρόβιλου (High Pressure Shaft Rotary Speed) n : 3600 rpm
- $n_{is, c}$: **Μεταβλητή τιμή**
- nm : 1

Station 04 – Burner

Θάλαμος καύσης, με παραμέτρους τον βαθμό απόδοσης θαλάμου καύσης n_B , την μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου T_4 ή T_{max} , τον συντελεστή απωλειών πίεσης στον θάλαμο K_b και την κατώτερη θερμογόνο ικανότητα LHV .

Παράμετροι:

- Μέγιστη θερμοκρασία κύκλου (*Burner exit temperature*) T_4 ή T_{max} : **Μεταβλητή τιμή**
- n_b : 0.98
- K_b : 0.96

- LHV : 48620 kJ/kg ή 48.62 MJ/kg

Station 43 – High Pressure Turbine Outlet

Έξοδος στροβίλου, με μοναδική παράμετρο τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης του στροβίλου.

Παράμετροι:

- Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου (*hpt isentropic efficiency*): **Μεταβλητή τιμή**

Station 06 – Core nozzle inlet (έξοδος στροβίλου, είσοδος στο ακροφύσιο)

Είσοδος στο ακροφύσιο (*nozzle*), με μοναδική παράμετρο τις απώλειες πίεσης μετά τον στρόβιλο.

Παράμετροι:

- K_{out} : 0.97

Station 08 – Core nozzle throat

Έξοδος από το ακροφύσιο (*nozzle*), όπου βασική παράμετρος είναι ο λόγος πίεσης της θέσης 08 με την αντίστοιχη πίεση της θέσης 01 (πίεση περιβάλλοντος).

Παράμετροι:

- Λόγος πίεσης εξόδου προς την ατμοσφαιρική (*exhaust pressure ratio P_8/P_{amb}*): 1.04

Bleed (Διαρροές)

Το συγκεκριμένο τμήμα αφορά τις όποιες διαρροές μάζας αέρα ή καυσαερίου μπορεί να υπάρχουν, καθώς η διάταξη δεν είναι ιδανική. Για χάριν ευκολίας, δεν υπάρχουν διαρροές μάζας προς το εξωτερικό περιβάλλον, επομένως ορίζεται μόνο ο αριθμός βαθμίδων του στροβίλου, σύμφωνα με τα δεδομένα από τον κατασκευαστή, ο στρόβιλος είναι έξι βαθμίδων.

Μεταβάλλοντας τις τιμές της μέγιστης θερμοκρασίας του κύκλου και των ισεντροπικών βαθμών απόδοσης στροβίλου και συμπίεστή, προκύπτουν διαφορετικές τιμές στις επιδόσεις του αεριοστροβίλου. Ύστερα από αρκετές δοκιμές στο λογισμικό, παρουσιάζονται παρακάτω

οι τιμές των παραμέτρων που προσεγγίζουν τις πραγματικές επιδόσεις του LM 2500, για μοντέλο αεριοστροβίλου ενός άξονα:

1^η Περίπτωση

Τιμές Παραμέτρων		Αποτελέσματα		Αποκλίσεις (%)	
$T_{max} (K)$	1430	$Wk (kW)$	21998	dWk	12.21868
nis,c	0.83	$n\theta$	0.3539	$dn\theta$	1.988473
nis,t	0.9	$sfc (kg/kWh)$	0.2092	$dsfc$	7.800793
		$Texh (K)$	804.8406	$dTexh$	4.08859

2^η Περίπτωση

Τιμές Παραμέτρων		Αποτελέσματα		Αποκλίσεις (%)	
$T_{max} (K)$	1460	$Wk (kW)$	22775.4	dWk	9.11652
nis,c	0.85	$n\theta$	0.3458	$dn\theta$	0.345821
nis,t	0.88	$sfc (kg/kWh)$	0.2141	$dsfc$	5.641252
		$Texh (K)$	839.1223	$dTexh$	0.003301

3^η Περίπτωση

Τιμές Παραμέτρων		Αποτελέσματα		Αποκλίσεις (%)	
$T_{max} (K)$	1460	$Wk (kW)$	23735.5	dWk	5.285315
nis,c	0.86	$n\theta$	0.3583	$dn\theta$	3.256484
nis,t	0.89	$sfc (kg/kWh)$	0.2067	$dsfc$	8.9026
		$Texh (K)$	831.7553	$dTexh$	0.881213

4^η Περίπτωση

Τιμές Παραμέτρων		Αποτελέσματα		Αποκλίσεις (%)	
$T_{max} (K)$	1475	$Wk (kW)$	23787	dWk	5.079808
nis,c	0.87	$n\theta$	0.3493	$dn\theta$	0.662824
nis,t	0.875	$sfc (kg/kWh)$	0.212	$dsfc$	6.56677
		$Texh (K)$	852.782	$dTexh$	1.624501

5^η Περίπτωση

Τιμές Παραμέτρων		Αποτελέσματα		Αποκλίσεις (%)	
$T_{max} (K)$	1473	$Wk (kW)$	23706.7	dWk	5.400239
nis,c	0.87	$n\theta$	0.3492	$dn\theta$	0.634006
nis,t	0.875	$sfc (kg/kWh)$	0.2121	$dsfc$	6.522697

	$Texh (K)$	851.4786	$dTexh$	1.469177
--	------------	----------	---------	----------

Οι αποκλίσεις προέκυψαν σύμφωνα με την μαθηματική σχέση: $\frac{|Υαρχικό-Υτελικό|}{Υαρχικό}$, όπου Y ένα οποιοδήποτε μέγεθος από την ισχύς Wk , τον βαθμό απόδοσης $n\theta$, την ειδική κατανάλωση καυσίμου sfc και την θερμοκρασία αποβολής καυσαερίων $Texh$. Ως τελική θεωρείται η τιμή του εκάστοτε μεγέθους σε κάθε περίπτωση, στον πίνακα «Αποτελέσματα», ενώ ως αρχική θεωρείται η τιμή του εκάστοτε μεγέθους που αναγράφεται στον πίνακα 4.1, με τις επιδόσεις του $LM 2500$. Πιο αναλυτικά, οι αρχικές τιμές φαίνονται και στον παρακάτω πίνακα:

Επιδόσεις $LM 2500$		
Καθαρή Παραγόμενη Ισχύς (Wk)	25060	kW
Θερμικός Βαθμός Απόδοσης ($n\theta$)	0.347	
Ειδική Κατανάλωση Καυσίμου (sfc)	0.2269	kg/kWh
Θερμοκρασία Αποβολής Καυσαερίων ($Texh$)	839.15	K

Πίνακας 4.2: Επιδόσεις $LM 2500$ (αρχικές τιμές μεγεθών στην σχέση των αποκλίσεων).

Έχοντας καταλήξει στις παραπάνω περιπτώσεις για αεριοστρόβιλο ενός άξονα, είναι απαραίτητη η επιλογή μόνο μίας, ώστε να προκύψουν συγκεκριμένα αποτελέσματα και διαγράμματα. Για την εύρεση της βέλτιστης περίπτωση όσον αφορά τις αποκλίσεις, έγιναν τα εξής: Αρχικά λαμβάνεται υπόψη η μεγαλύτερη ποσοστιαία μεταβολή από τις dWk , $dn\theta$, $dsfc$ και $dTexh$, συμβολίζεται με M . Στην συνέχεια, για κάθε περίπτωση υπολογίζεται ο μέσος όρος των αποκλίσεων, με την γνωστή αριθμητική σχέση $Average A = \frac{dWk+dn\theta+dsfc+dTexh}{4}$. Τέλος, υπολογίζεται για κάθε περίπτωση το άθροισμα μέσης και μέγιστης τιμής $A + M$. Η περίπτωση με το μικρότερο άθροισμα, είναι η βέλτιστη, και τα δεδομένα της χρησιμοποιούνται για την συνέχεια της εργασίας, στην μελέτη του σημείου λειτουργίας (*design point*) και των μερικών φορτίων.

Πιο συγκεκριμένα, για μοντέλο αεριοστροβίλου ενός άξονα, σύμφωνα με τις παραπάνω αποκλίσεις, έχουμε τα εξής αποτελέσματα.

	1η Περίπτωση	2η Περίπτωση	3η Περίπτωση	4η Περίπτωση	5η Περίπτωση
dWk (%)	12.219	9.117	5.285	5.080	5.400
$dn\theta$ (%)	1.988	0.346	3.256	0.663	0.634
$dsfc$ (%)	7.801	5.641	8.903	6.567	6.523
$dTexh$ (%)	4.089	0.003	0.881	1.625	1.469
M	12.219	9.117	8.903	6.567	6.523
A	6.524	3.777	4.581	3.483	3.507
$A+M$	18.743	12.893	13.484	10.050	10.029

Πίνακας 4.3: Κριτήριο επιλογής βέλτιστων παραμέτρων.

Τελικώς προκύπτει ότι η βέλτιστη περίπτωση είναι η 5^η, καθώς διαθέτει το μικρότερο άθροισμα $A + M$, όπως φαίνεται και στον πίνακα 4.3. Συνεπώς, για μοντέλο αεριοστροβίλου ενός άξονα, οι τιμές των παραμέτρων που προσεγγίζουν τις επιδόσεις του αεριοστροβίλου LM 2500 είναι οι ακόλουθες:

Δεδομένα προσομοίωσης (1 – shaft)		Μονάδες Μέτρησης
Μέγιστη Θερμοκρασία κύκλου $T4$ ή $Tmax$	1473	K
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης συμπιεστή $\eta_{is,c}$	0.87	
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου $\eta_{is,t}$	0.875	
Λόγος πίεσης συμπιεστή p_c	18	
Παροχή μάζας αέρα \dot{m}_a	69.4	kg/s
Παροχή μάζας καυσαερίων \dot{m}_g	70.3	kg/s
Ταχύτητα στροβίλου n	3600	rpm
Αριθμός βαθμίδων συμπιεστή	16	
Αριθμός βαθμίδων στροβίλου	6	
Θερμοκρασία περιβάλλοντος T_{amb}	15	$Celsius$
Πίεση περιβάλλοντος P_{amb}	1.013 ή 101300	Bar ή Pa
Κατώτερη Θερμογόνος δύναμη καυσίμου LHV	48620	kJ/kg

Βαθμός απόδοσης θαλάμου καύσης nb	0.98	
Μηχανικός βαθμός απόδοσης άξονα nm	1	
Συντελεστής απωλειών αγωγού εισόδου (<i>intake pressure ratio</i>) Kn	0.985	
Συντελεστής απωλειών θαλάμου καύσης (μείωση πίεσης στον θάλαμο καύσης) Kb	0.96	
Συντελεστής απωλειών αγωγού εξόδου καυσαερίων (<i>turbine exit duct pressure</i>) $Kout$	0.97	

Πίνακας 4.4: Δεδομένα προσομοίωσης για μοντέλο ενός άξονα στο Amesim.

Αποτελέσματα προσομοίωσης (1 – shaft)		Μονάδες Μέτρησης
Καθαρή παραγόμενη ισχύς (Wk)	23706.7	kW
Θερμικός βαθμός απόδοσης ($n\theta$)	0.3492	
Ειδική κατανάλωση καυσίμου (sfc)	0.2121	Kg/kWh
Θερμοκρασία αποβολής καυσαερίων (T_{exh})	851.4786	K

Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα προσομοίωσης για μοντέλο ενός άξονα στο Amesim.

4.2 Σύγκριση Υπολογιστικής Μεθόδου – Μεθόδου Λογισμικού Amesim

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα προσομοίωσης, αποφασίστηκε η σύγκρισή τους με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τους απλούς υπολογισμούς, όπως αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Διατηρώντας τα ίδια δεδομένα, προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα και οι αποκλίσεις τους:

Αποτελέσματα με υπολογισμούς		Αποτελέσματα στο Amesim		Αποκλίσεις υπολογισμών - Amesim (%)	
Wk (kW)	22353.01	Wk (kW)	23706.7	dWk	6.055942
$n\theta$	0.313534	$n\theta$	0.3492	$dn\theta$	11.37551
sfc (kg/kWh)	0.236158	sfc (kg/kWh)	0.2121	$dsfc$	10.18732
mg (kg/s)	70.43345	mg	70.3	dmg	0.189465
$Texh$ (K)	833.19	$Texh$ (K)	851.4786	$dTexh$	2.19501

Πίνακας 4.6: Αποτελέσματα και αποκλίσεις μεταξύ υπολογιστικής μεθόδου και Amesim.

Παρατηρείται ότι υπάρχουν σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των δύο μεθόδων, κυρίως στα μεγέθη του θερμικού βαθμού απόδοσης $n\theta$ και στην ειδική κατανάλωση καυσίμου sfc . Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων με την βοήθεια υπολογισμών, με τα αντίστοιχα δεδομένα του κατασκευαστή για το μοντέλο αεριοστροβίλου LM 2500, έστω και αν πρόκειται για αεριοστρόβιλο ενός άξονα. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται αρχικά τα δεδομένα από τον κατασκευαστή καθώς και οι αποκλίσεις που παρουσιάζουν με την μέθοδο υπολογισμών.

Αποτελέσματα με υπολογισμούς		Επιδόσεις LM 2500		Αποκλίσεις επιδόσεων - υπολογισμών (%)	
Wk (kW)	22353.01	Wk (kW)	25060	dWk	10.80202
$n\theta$	0.313534	$n\theta$	0.347	$dn\theta$	9.644401
sfc (kg/kWh)	0.236158	sfc (kg/kWh)	0.2269	$dsfc$	4.080294
mg (kg/s)	70.43345	mg (kg/s)	70.3	dmg	0.189824
$Texh$ (K)	833.19	$Texh$ (K)	839.15	$dTexh$	0.710243

Πίνακας 4.7: Αποτελέσματα και αποκλίσεις μεταξύ υπολογιστικής μεθόδου και πραγματικών επιδόσεων.

Προκειμένου να αποφανθούμε ποια μέθοδος μεταξύ των υπολογισμών και του λογισμικού προσεγγίζει τις επιδόσεις του LM 2500, ακολουθείται η διαδικασία σύγκρισης υπολογίζοντας το άθροισμα της μέσης και της μέγιστης τιμής των αποκλίσεων για κάθε μέθοδο. Επομένως πιο αναλυτικά, εάν δεν συνυπολογίσουμε την παροχή μάζας καυσαερίων mg έχουμε:

	Αποκλίσεις - μέθοδος AMESIM (%)	Αποκλίσεις - μέθοδος υπολογισμών (%)
dWk	5.400	10.802
$dn\theta$	0.634	9.644
$dsfc$	6.523	4.080
$dTexh$	1.469	0.710
M	6.523	10.802
A	3.507	6.309
$A+M$	10.029	17.111

Πίνακας 4.8: Αποκλίσεις υπολογιστικής μεθόδου και Amesim από τις πραγματικές επιδόσεις.

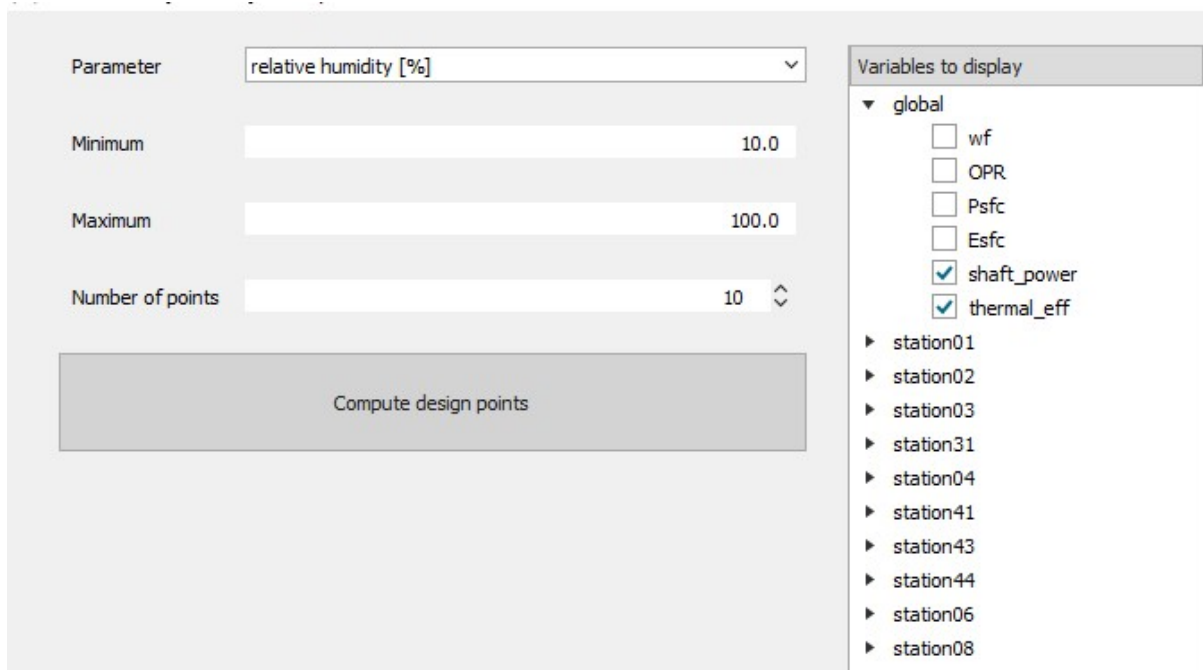
Όπως είναι φυσικό, μικρότερο άθροισμα $A + M$ έχει η μέθοδος του λογισμικού *Amesim*, αναφορικά με την περίπτωση αεριοστροβίλου ενός άξονα, το οποίο δείχνει ότι η συγκεκριμένη μέθοδος εξάγει καλύτερα αποτελέσματα, που προσεγγίζουν τις επιδόσεις του *LM 2500* σύμφωνα με τον κατασκευαστή.

4.3 Ανάλυση ευαισθησίας

Όπως φάνηκε και από τα προηγούμενα κεφάλαια, το σημείο λειτουργίας ενός κύκλου αεριοστροβίλου εξαρτάται από πολλές παραμέτρους. Μεταβάλλοντας τις τιμές των παραμέτρων στο λογισμικό *Amesim*, παρατηρούνται διαφορές στις επιδόσεις του κύκλου. Προκειμένου όμως να αποφανθούμε ποια από τις παραμέτρους/μεγέθη έχει μεγαλύτερη επίδραση στις επιδόσεις, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας. Ενδεικτικά, ορισμένα από τα μεγέθη που θα αναλυθούν είναι οι βαθμοί απόδοσης συμπιεστή και στροβίλου ($\eta_{is,c}$ και $\eta_{is,t}$), ο λόγος πίεσης συμπιεστή p_c , η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου T_4 ή T_{max} , η θερμοκρασία του περιβάλλοντος T_{amb} και η σχετική υγρασία RH (*Relative Humidity*). Έχοντας δηλαδή μία μικρή μεταβολή προς τα πάνω ή προς τα κάτω στο εκάστοτε μέγεθος, της τάξης του 5%, παρατηρείται η αντίστοιχη ποσοστιαία μεταβολή στην τιμή μίας συγκεκριμένης επίδοσης. Με απλά λόγια, εάν αυξηθεί λόγου χάρη ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του συμπιεστή κατά 5%, αναζητείται η ποσοστιαία μεταβολή (αύξηση ή μείωση) του καθαρού έργου ή του θερμικού βαθμού απόδοσης. Ενδεικτικά, οι επιδόσεις του αεριοστροβίλου που θα μελετηθούν είναι το καθαρό ειδικό έργο Wk (*shaft power*) και ο θερμικός βαθμός απόδοσης $\eta\theta$ (*thermal efficiency*).

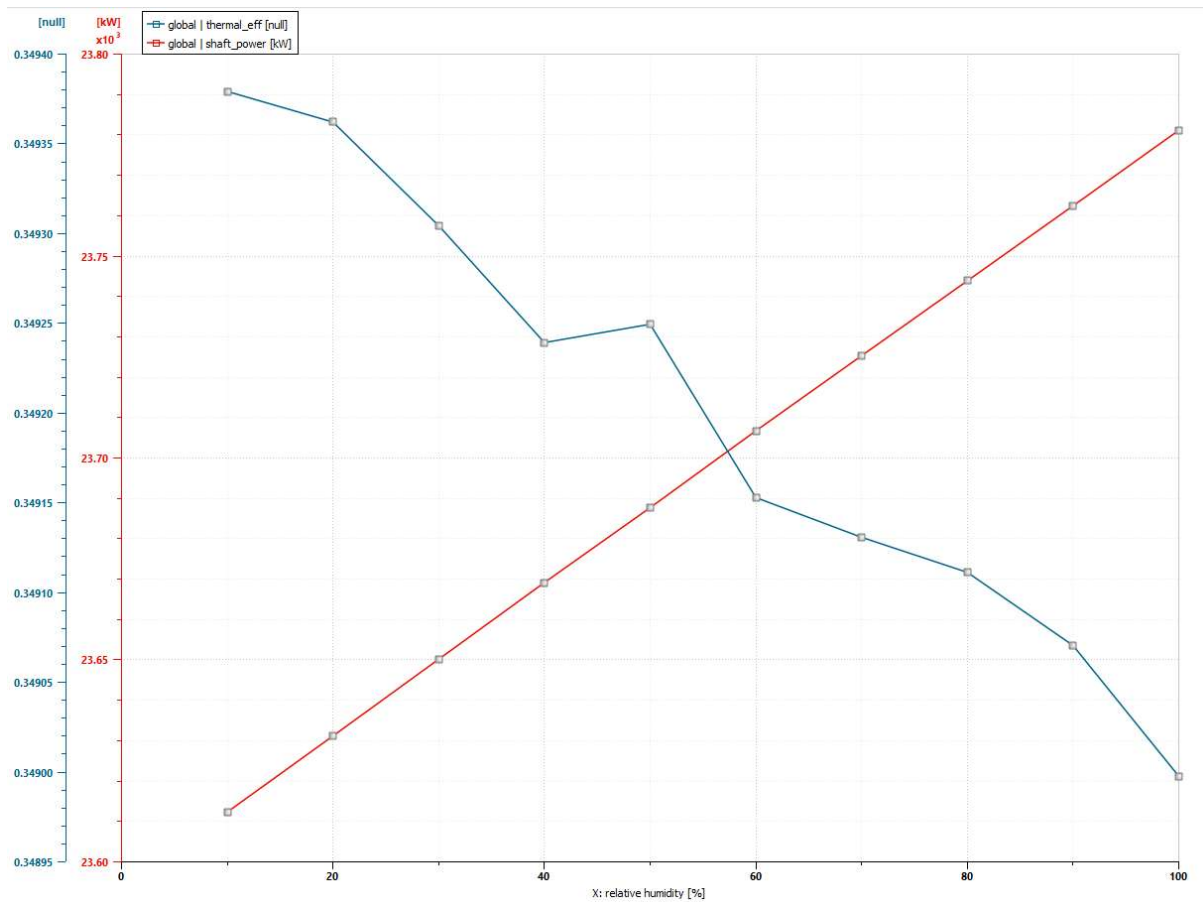
4.3.1 Επίδραση σχετικής υγρασίας (RH) στις επιδόσεις

Στην περίπτωση του μοντέλου αεριοστροβίλου ενός άξονα, η μελέτη προσομοίωσης πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη το ποσοστό της σχετικής υγρασίας 60%. Σε περίπτωση λειτουργίας αεριοστροβίλων σε πλοία, η σχετική υγρασία ενδέχεται να μεταβάλλεται, λόγω των διαφορετικών καιρικών συνθηκών, επομένως θα επιδρά και στις επιδόσεις του αεριοστροβίλου. Στο *Amesim* δίνεται η δυνατότητα γρήγορης σχεδίασης διαγραμμάτων, επιλέγοντας το *mode* «1 – parameter analysis», από την καρτέλα *Design Point Parameters*. Επιλέγεται ως κύρια παράμετρος η σχετική υγρασία (*relative humidity*), με ελάχιστη τιμή 10% και μέγιστη τιμή 100%. Στην ακριβώς διπλανή στήλη, επιλέγονται τα μεγέθη που πρόκειται να απεικονιστούν σε συνάρτηση πάντα με την σχετική υγρασία.



Εικόνα 4.4: 1- Parameter Analysis στο Amesim.

Όπως φαίνεται και από την παραπάνω εικόνα, δίνεται η δυνατότητα απεικόνισης της μεταβολής αρκετών παραμέτρων αναφορικά με την σχετική υγρασία, ακόμα και για τις παραμέτρους των επιμέρους βαθμίδων. Με δεδομένο ότι ο αεριοστροβίλος αναρροφά αέρα κατευθείαν από την ατμόσφαιρα, για ποσοστά σχετικής υγρασίας αέρα από 10% έως 100%, λαμβάνεται το παρακάτω γράφημα:



Σχήμα 4.1: Μεταβολή Wk και $n\theta$ σε συνάρτηση με την σχετική υγρασία.

Η κόκκινη καμπύλη αντιστοιχεί στο καθαρό ειδικό έργο Wk , ενώ η μπλε δείχνει την μεταβολή του θερμικού βαθμού απόδοσης $n\theta$ σε συνάρτηση με την μεταβολή της σχετικής υγρασίας. Ενώ το καθαρό ειδικό έργο που παράγεται, αυξάνεται με σταθερό ρυθμό κατά την αύξηση της σχετικής υγρασίας, ο θερμικός βαθμός απόδοσης ακολουθεί μία ακανόνιστη συμπεριφορά, με μία γενικότερη τάση μείωσης, χωρίς σταθερό ρυθμό. Η παραπάνω συμπεριφορά ίσως να οφείλεται στο γεγονός ότι όσο πιο υγρός είναι ο αέρας που λαμβάνεται από τον συμπιεστή, θα μειωθεί η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου, επομένως κατά συνέπεια και ο θερμικός βαθμός απόδοσης. Ωστόσο, σε περιβάλλον με υγρασία από 40 έως 45% περίπου, παρατηρείται μία μικρή αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης, πριν ξεκινήσει ξανά να μειώνεται.

Εξετάζοντας την μεταβολή του ειδικού έργου Wk και του θερμικού βαθμού απόδοσης $n\theta$ ενώ η σχετική υγρασία RH κυμαίνεται από 55 έως 65%, προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

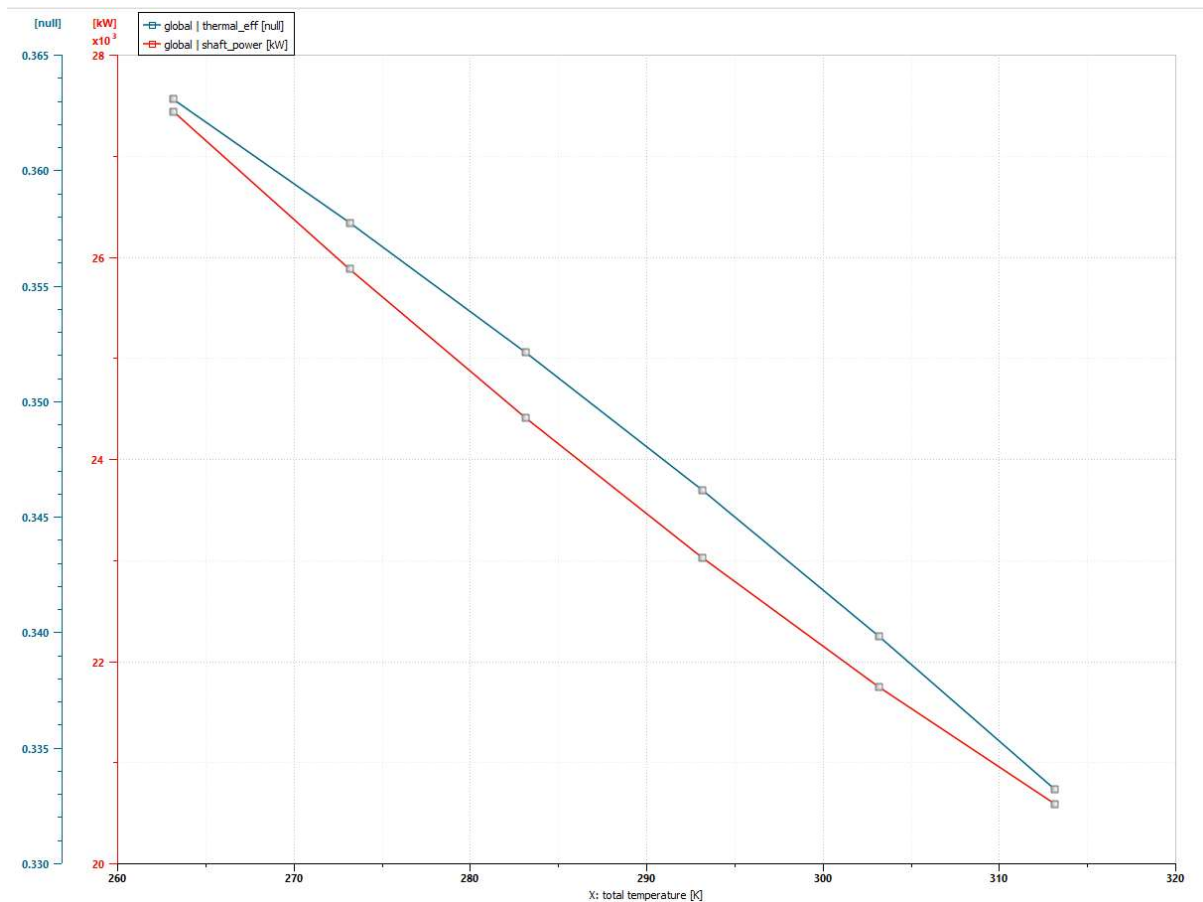
	Μεταβολή RH (%)	Wk (kW)	$n\theta$
Κάτω άκρο Κ (-5%)	55	23697.27	0.3492
Ονομαστική τιμή παραμέτρου	60	23706.7	0.3492
Άνω άκρο Α (+5%)	65	23716.01	0.3491

Αποκλίσεις άκρων από ονομαστική τιμή (%)			
$dWk(K) =$	-0.040	$dn\theta(K) =$	0.002
$dWk(A) =$	0.039	$dn\theta(A) =$	-0.015

Οι ποσοστιαίες μεταβολές των επιδόσεων Wk και $n\theta$, όπως φαίνεται και από τους παραπάνω πίνακες, θεωρούνται αμελητέες. Η μεταβολή της σχετικής υγρασίας όπως φαίνεται επηρεάζει αισθητά λιγότερο τις επιδόσεις του αεριοστροβίλου.

4.3.2 Επίδραση θερμοκρασίας περιβάλλοντος (T_{amb}) στις επιδόσεις

Η θερμοκρασία περιβάλλοντος αποτελεί επίσης έναν παράγοντα που επιδρά στις επιδόσεις του αεριοστροβίλου. Εφόσον η διάταξη του αεριοστροβίλου είναι εγκατεστημένη σε πλοίο, η επικρατούσα θερμοκρασία είναι διαφορετική κάθε φορά, και εξαρτάται από την θέση του πλοίου, την εποχή του ταξιδιού και από τις καιρικές συνθήκες. Με δεδομένο ότι ο αεριοστροβίλος αναρροφά αέρα κατευθείαν από την ατμόσφαιρα, η μελέτη για την επίδραση της θερμοκρασίας στις επιδόσεις του κύκλου θα γίνει για εύρος θερμοκρασιών από -10 έως 40 βαθμούς *Celsius*, δηλαδή με μετατροπή σε κλίμακα *Kelvin*, το εύρος θα είναι από 263.15 έως 313.15 *K*. Με την ίδια μέθοδο λαμβάνεται μέσω του *Amesim* το παρακάτω γράφημα.



Σχήμα 4.2: Μεταβολή Wk και $n\theta$ σε συνάρτηση με την T_{amb} (K).

Από το παραπάνω γράφημα είναι εμφανές ότι το ειδικό έργο και ο θερμοκός βαθμός απόδοσης του αεριοστροβίλου μειώνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Ο θερμοκός βαθμός απόδοσης δίνεται επιπλέον από την σχέση $n\theta = 1 - \frac{T_{low}}{T_{high}}$, όπου T_{low} η θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αύξηση της συγκεκριμένης θερμοκρασίας, οδηγεί σε αύξηση του λόγου $\frac{T_{low}}{T_{high}}$, επομένως σε μείωση του βαθμού απόδοσης. Επιπλέον, όσο αυξάνεται η θερμοκρασία περιβάλλοντος (T_{amb}), διατηρώντας σταθερό τον λόγο πίεσης και τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης του συμπιεστή, θα αυξηθεί και η θερμοκρασία του αέρα μετά τον συμπιεστή (πριν την είσοδο στον θάλαμο καύσης). Επομένως, αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα αύξηση του καθαρού έργου συμπιεστή w_c , συνεπώς παρατηρείται μείωση στο καθαρό ειδικό έργο Wk .

Αντίστοιχα με πριν, πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας και στην μεταβολή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος T_{amb} , προκειμένου να παρατηρηθεί η ποσοστιαία μεταβολή των επιδόσεων Wk και $n\theta$, σε ποσοστιαία αυξομείωση της T_{amb} κατά 5%. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στους παρακάτω πίνακες:

	Μεταβολή T_{amb}	Wk (kW)	$n\theta$
Κάτω άκρο Κ (-5%)	273.7	25799.68	0.357413
Ονομαστική τιμή παραμέτρου	288.15	23706.7	0.3492
Άνω άκρο Α (+5%)	302.55	21824.31	0.340231

Αποκλίσεις άκρων από ονομαστική τιμή (%)			
$dWk(K) =$	8.829	$dn\theta(K) =$	2.352
$dWk(A) =$	-7.940	$dn\theta(A) =$	-2.568

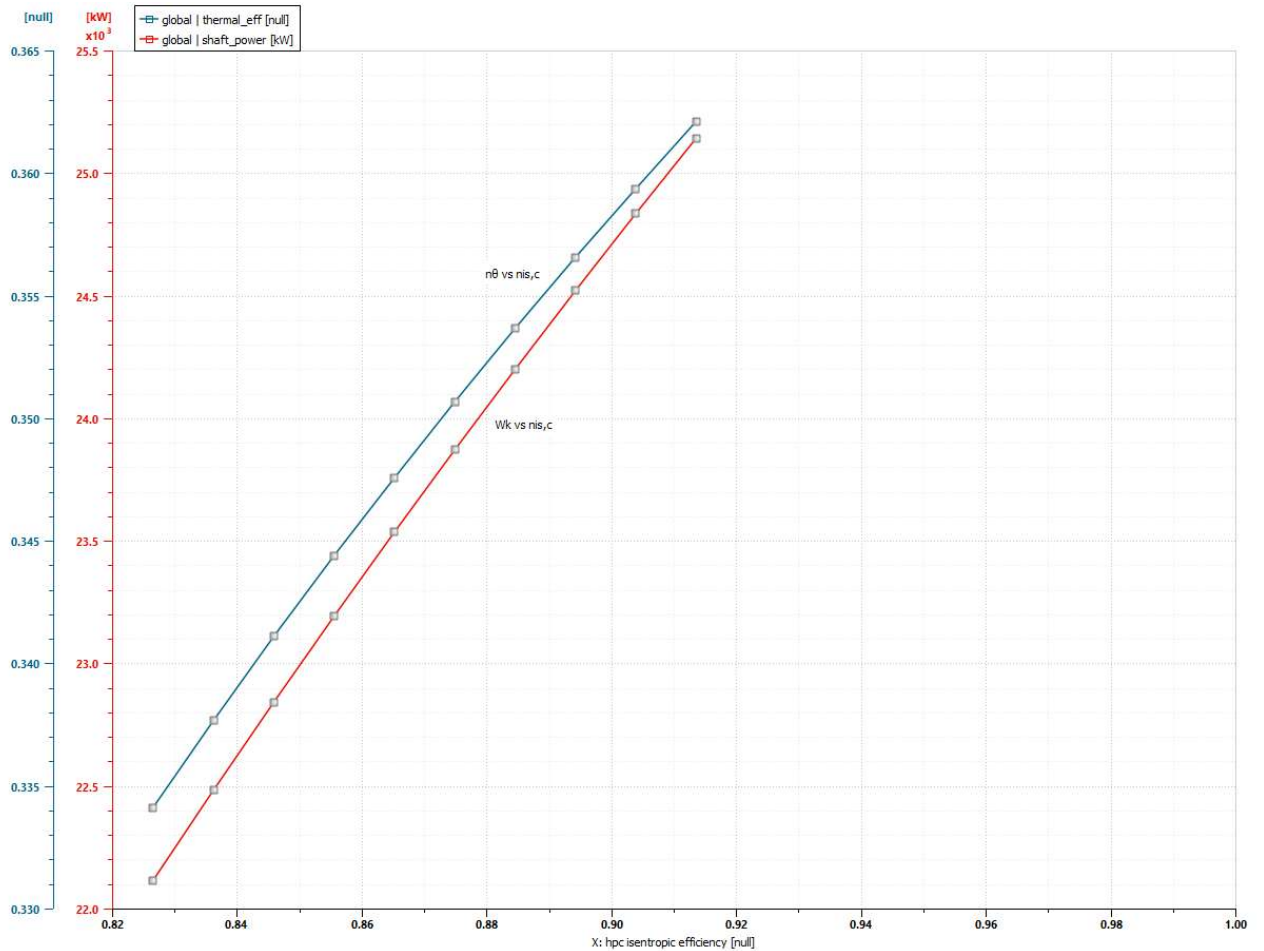
Μείωση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος κατά 5%, επιφέρει αύξηση του καθαρού ειδικού έργου Wk κατά περίπου 8.8%, και αντίστοιχα αύξηση του βαθμού απόδοσης $n\theta$ κατά 2.3%. Αντίθετα, αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος κατά 5%, συντελεί σε μείωση του έργου κατά 8% περίπου, και αντίστοιχα σε μείωση του βαθμού απόδοσης κατά 2.6%.

4.3.3 Επίδραση ισεντροπικού βαθμού απόδοσης συμπιεστή στις επιδόσεις

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, αναζητείται η μεταβολή του καθαρού έργου Wk και του θερμικού βαθμού απόδοσης που αντιστοιχεί σε μεταβολή του $n_{is,c}$ κατά +5% ή -5% από την τιμή που υπολογίστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο μέσω του λογισμικού. Αρχικά, γνωρίζοντας ότι $n_{is,c} = 0.87$, υπολογίζονται τα όρια + και - 5% από την αρχική τιμή (ονομαστική), σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα:

	Μεταβολή $n_{is,c}$
Κάτω άκρο Κ (-5%)	0.8265
Ονομαστική τιμή παραμέτρου (Ο)	0.87
Άνω άκρο Α (+5%)	0.9135

Μεταβαίνοντας στο λογισμικό *Amesim* στην καρτέλα *Design Point Parameters*, ορίζεται αρχικά ως παράμετρος ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης συμπιεστή $n_{is,c}$, με *minimum* τιμή $n_{is,c}$ (Κ) = 0.8265 (5% μικρότερη της ονομαστικής), *maximum* τιμή $n_{is,c}$ (Α) = 0.9135 (5% μεγαλύτερη της ονομαστικής), ενώ ως μεταβλητές επιλέγονται ταυτόχρονα το καθαρό έργο και ο θερμικός βαθμός απόδοσης ταυτόχρονα, ώστε η μεταβολή να αποτυπωθεί στο ίδιο διάγραμμα. Παρακάτω παρουσιάζεται η συγκεκριμένη μεταβολή σε συνάρτηση με τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης συμπιεστή.



Σχήμα 4.3: Μεταβολή Wk και $n\theta$ σε συνάρτηση με $n_{is,c}$.

Η κόκκινη καμπύλη αντιστοιχεί στο καθαρό έργο Wk ενώ η μπλε αντιστοιχεί στον θερμικό βαθμό απόδοσης $n\theta$. Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο ισηντροπικός βαθμός απόδοσης του συμπιεστή, υπάρχει αύξηση στις συγκεκριμένες επιδόσεις του κύκλου. Για $n_{is,c} = 0.8265$ και 0.9135 , δηλαδή 5% κάτω και άνω από την ονομαστική τιμή, το καθαρό έργο και ο θερμικός βαθμός απόδοσης ισούνται με:

	Μεταβολή $n_{is,c}$	Wk (kW)	$n\theta$
Κάτω άκρο K (-5%)	0.8265	22117.92	0.334149
Ονομαστική τιμή παραμέτρου	0.87	23706.7	0.3492
Άνω άκρο A (+5%)	0.9135	25144.05	0.362125

Η ποσοστιαία μεταβολή της εκάστοτε επίδοσης υπολογίζεται με την παρακάτω σχέση: $\Delta X(K \text{ ή } A) = \frac{|XO - X(A \text{ ή } K)|}{XO} \times 100\%$, όπου X ένα τυχαίο μέγεθος (Wk ή $n\theta$), XA η τιμή του μεγέθους στο άνω άκρο (+5% του $n_{is,c}$) και XO η τιμή του μεγέθους στο κάτω άκρο (-5% του $n_{is,c}$). Συγκεκριμένα, οι ποσοστιαίες μεταβολές του καθαρού έργου Wk και του θερμικού βαθμού απόδοσης $n\theta$ παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Αποκλίσεις άκρων από ονομαστική τιμή (%)			
$dWk(K) =$	-6.702	$dn\theta(K) =$	-4.310
$dWk(A) =$	6.063	$dn\theta(A) =$	3.701

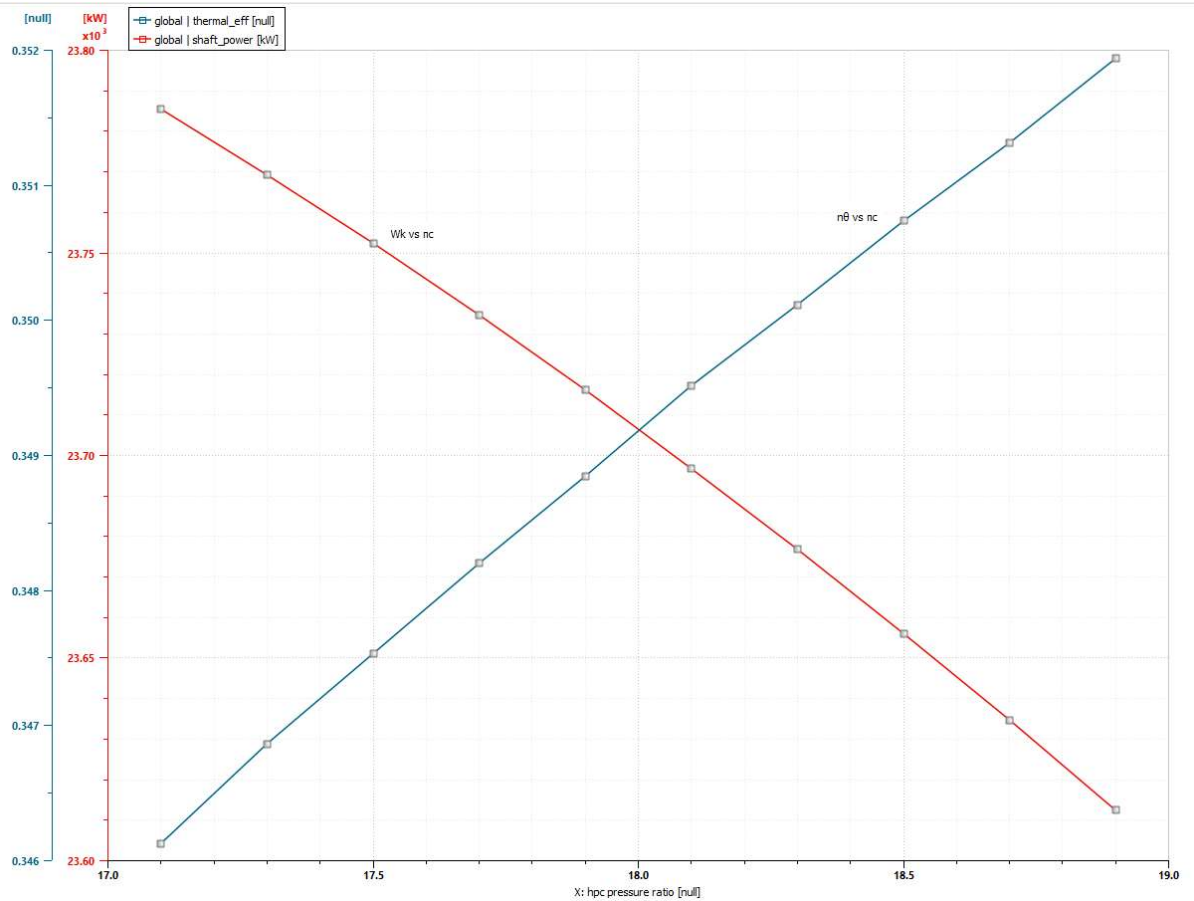
Συγκεκριμένα, για 5% αύξηση του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης συμπιεστή $n_{is,c}$, παρατηρείται περίπου 6.7% αύξηση του καθαρού έργου και 4.3% αύξηση στον βαθμό απόδοσης. Αντίστοιχα, για μείωση 5% του $n_{is,c}$, παρατηρείται μείωση περίπου 6.06% στο καθαρό έργο και 3.7% μείωση στον θερμικό βαθμό απόδοσης. Το συμπέρασμα που προκύπτει από την ανάλυση ευαισθησίας, για δεδομένη μεταβολή (αύξηση ή μείωση) του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης συμπιεστή, το καθαρό ειδικό έργο αυξάνεται ή μειώνεται με ταχύτερο ρυθμό σε σχέση με τον θερμικό βαθμό απόδοσης.

4.3.4 Επίδραση λόγου πίεσης συμπιεστή στις επιδόσεις

Αντίστοιχα με τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης συμπιεστή, μελετήθηκε η συμπεριφορά των επιδόσεων του κύκλου Wk και $n\theta$ με ανάλυση ευαισθησίας, μεταβάλλοντας αυτή την φορά τον λόγο πίεσης του συμπιεστή pc . Ακολουθείται ακριβώς η ίδια διαδικασία, υπολογίζοντας αρχικά τα όρια + και - 5% από την ονομαστική τιμή του pc , όπου $pc = 18$ από το λογισμικό, ώστε να προκύψει το εύρος τιμών του διαγράμματος στη συνέχεια.

	Μεταβολή pc
Κάτω άκρο K (-5%)	17.1
Ονομαστική τιμή παραμέτρου (O)	18
Άνω άκρο A (+5%)	18.9

Έπειτα, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, προκύπτει το διάγραμμα ειδικού έργου και βαθμού απόδοσης σε συνάρτηση με τον λόγο πίεσης. Το εύρος τιμών ορίζεται από την ελάχιστη τιμή $pc(K) = 17.1$ και την μέγιστη τιμή $pc(A) = 18.9$.



Σχήμα 4.4: Μεταβολή Wk και $n\theta$ σε συνάρτηση με pc .

Η κόκκινη καμπύλη αντιστοιχεί στο καθαρό έργο Wk ενώ η μπλε αντιστοιχεί στον θερμικό βαθμό απόδοσης $n\theta$. Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα, η αύξηση του λόγου πίεσης προκαλεί μείωση στο καθαρό ειδικό έργο, ενώ αντίθετα ο θερμικός βαθμός απόδοσης αυξάνεται. Το σημείο στο οποίο τέμνονται οι δύο καμπύλες αντιστοιχεί στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας, όπως είχε οριστεί στο λογισμικό *Amesim*. Για $pc = 17.1$ και $pc = 18.9$, δηλαδή 5% άνω και κάτω από την ονομαστική τιμή, οι επιδόσεις (καθαρό έργο και βαθμός απόδοσης) υπολογίζονται από το διάγραμμα, σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα:

	Μεταβολή pc	Wk (kW)	$n\theta$
Κάτω άκρο Κ (-5%)	17.1	23785.48	0.346128
Ονομαστική τιμή παραμέτρου	18	23706.7	0.3492
Άνω άκρο Α (+5%)	18.9	23612.44	0.35194

Οι ποσοστιαίες μεταβολές του καθαρού έργου Wk και του θερμικού βαθμού απόδοσης $n\theta$ από την ονομαστική τιμή pc σε σχέση με τις επιδόσεις στο *design point*, υπολογίζονται όπως στην προηγούμενη περίπτωση και παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Αποκλίσεις άκρων από ονομαστική τιμή (%)			
$dWk(K) =$	0.332	$dn\theta(K) =$	-0.880
$dWk(A) =$	-0.398	$dn\theta(A) =$	0.785

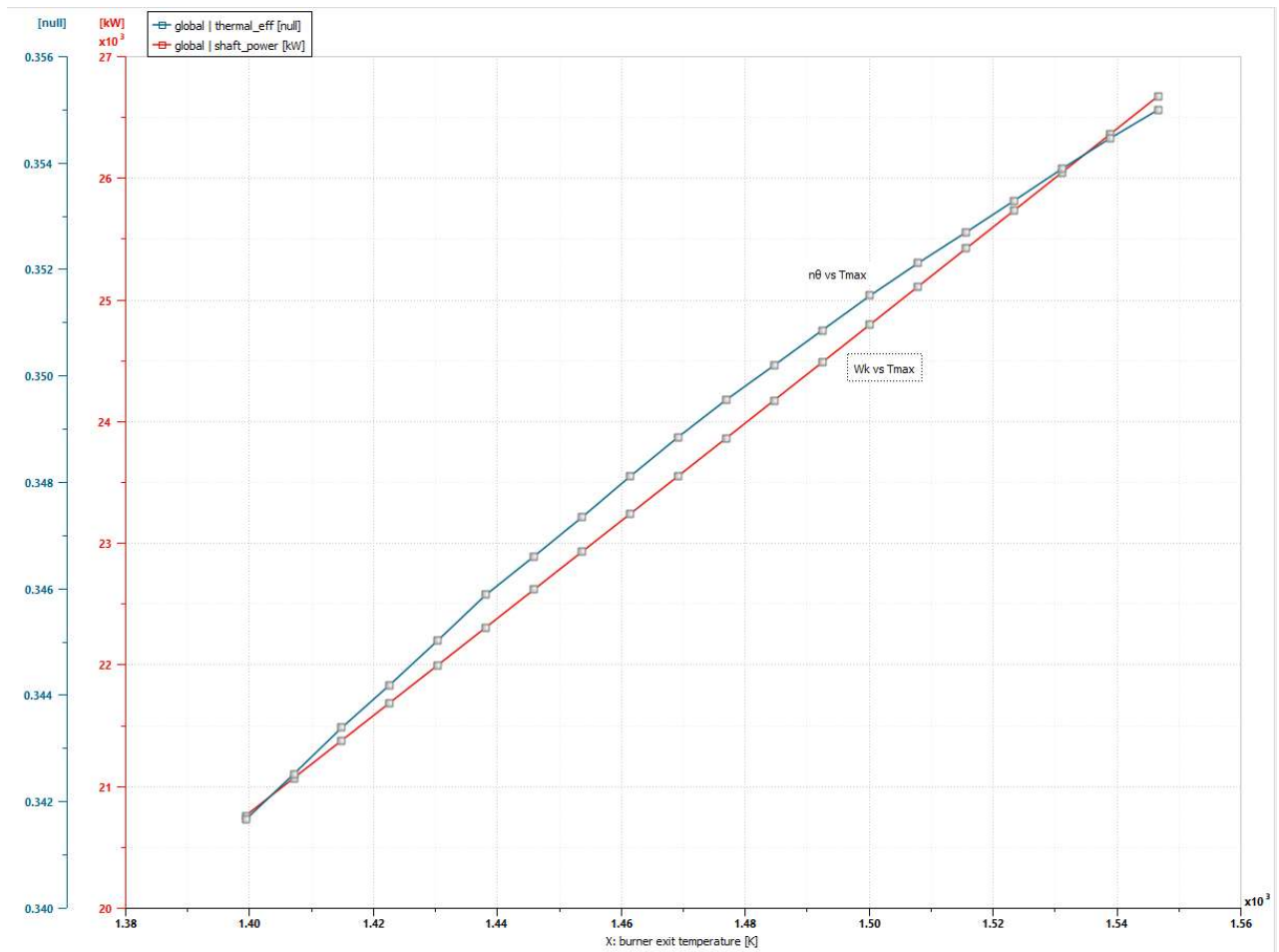
Στην συγκεκριμένη περίπτωση, για 5% αύξηση του λόγου πίεσης pc , παρατηρείται μικρή ποσοστιαία μείωση του καθαρού ειδικού έργου Wk της τάξης του 0.4% περίπου, ενώ αντίθετα υπάρχει αύξηση του βαθμού απόδοσης κατά 0.78%. Αφετέρου, εάν ο λόγος πίεσης pc μειωθεί κατά 5%, παρατηρείται αύξηση στο καθαρό ειδικό έργο περίπου 0.33%, ενώ ο βαθμός απόδοσης $n\theta$ θα μειωθεί κατά 0.88%. Γενικότερα, η μεταβολή του λόγου πίεσης pc δεν επιδρά σημαντικά στις επιδόσεις του αεριοστροβίλου ενός άξονα όπως ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του συμπιεστή, κάτι το οποίο φαίνεται και από τις ποσοστιαίες αποκλίσεις των επιδόσεων, που είναι μικρότερες από 1%.

4.3.5 Επίδραση μέγιστης θερμοκρασίας T_{max} στις επιδόσεις

Ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιήθηκε και στην μεταβλητή $T4$ ή T_{max} , προκειμένου να φανεί η επίδρασή της στις επιδόσεις του κύκλου. Ακολουθώντας παρόμοια διαδικασία, έχουμε ως εξής:

	Μεταβολή T_{max}
Κάτω άκρο K (-5%)	1399.35
Ονομαστική τιμή παραμέτρου (O)	1473
Άνω άκρο A (+5%)	1546.65

Στο λογισμικό *Amesim* ορίζοντας εύρος τιμών $T_{max}(K) = 1399.35 K$ και $T_{max}(A) = 1546.65 K$ και απεικόνιση ειδικού έργου και βαθμού απόδοσης, προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 4.5: Μεταβολή Wk και $n\theta$ σε συνάρτηση με T_{max} (K).

Παρατηρείται ότι αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου των καυσαερίων από τον θάλαμο καύσης, επιφέρει αύξηση των Wk και $n\theta$, που είναι άλλωστε λογικό, καθώς μεγαλύτερη θερμοκρασία καυσαερίων οδηγεί σε καλύτερες επιδόσεις. Επιπλέον, όταν η θερμοκρασία T_{max} υπερβεί τους 1540 βαθμούς K, ο θερμοκός βαθμός απόδοσης συνεχίζει να αυξάνεται, ωστόσο με μικρότερο ρυθμό σε σχέση με το καθαρό ειδικό έργο. Σύμφωνα με το διάγραμμα, οι επιδόσεις για 5% αύξηση και μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

	Μεταβολή T_{max}	Wk (kW)	$n\theta$
Κάτω άκρο K (-5%)	1399.35	20760.78	0.341664
Ονομαστική τιμή παραμέτρου	1473	23706.7	0.3492
Άνω άκρο A (+5%)	1546.65	26676.41	0.355003

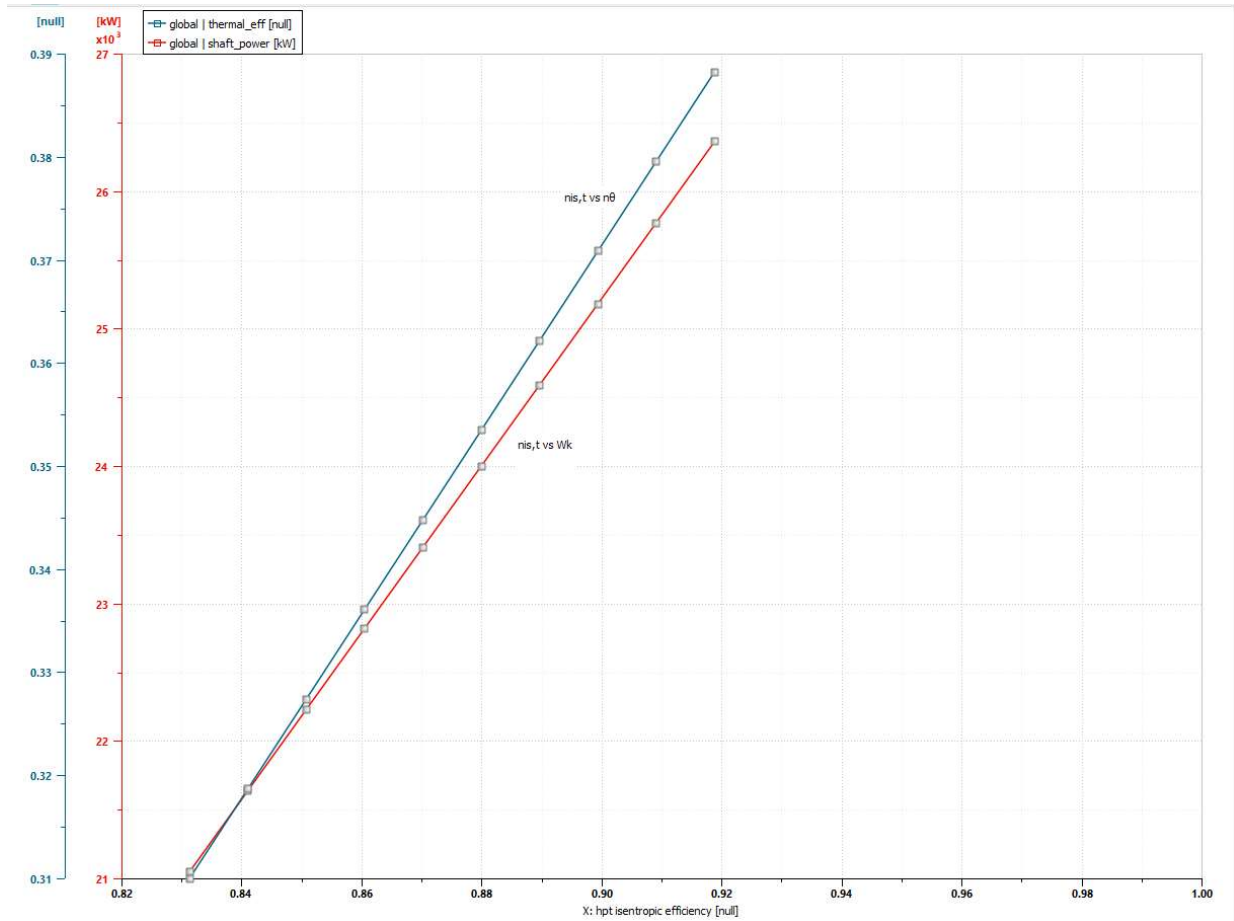
Οι ποσοστιαίες μεταβολές του καθαρού έργου Wk και του θερμοκός βαθμού απόδοσης $n\theta$ στο άνω και κάτω όριο της μέγιστης θερμοκρασίας T_{max} (+5% και -5% αντίστοιχα) παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Αποκλίσεις άκρων από ονομαστική τιμή (%)			
$dWk(K) =$	-12.427	$dn\theta(K) =$	-2.158
$dWk(A) =$	12.527	$dn\theta(A) =$	1.662

Στην συγκεκριμένη περίπτωση, για 5% αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας T_{max} , παρατηρείται μία αρκετά μεγάλη ποσοστιαία αύξηση στο καθαρό ειδικό έργο, της τάξης του 12% σε σχέση με την ονομαστική τιμή, ενώ αντίθετα η αύξηση του βαθμού απόδοσης είναι μικρότερη, περίπου 1.6%. Επιπρόσθετα, για 5% μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας του κύκλου, το καθαρό ειδικό έργο μειώνεται κατά 12.4%, ενώ ο βαθμός απόδοσης παρουσιάζει αντίστοιχα μείωση κατά 2.15%.

4.3.6 Επίδραση ισεντροπικού βαθμού απόδοσης στροβίλου $n_{is,t}$ στις επιδόσεις

Η ανάλυση ευαισθησίας των επιδόσεων του αεριοστροβίλου σε ότι αφορά την μεταβολή του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης στροβίλου $n_{is,t}$, πραγματοποιήθηκε όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, με την βοήθεια του *Amesim*. Τα αποτελέσματα και το διάγραμμα μεταβολών παρουσιάζονται παρακάτω:



Σχήμα 4.6: Μεταβολή Wk και $n\theta$ σε συνάρτηση με nis,t .

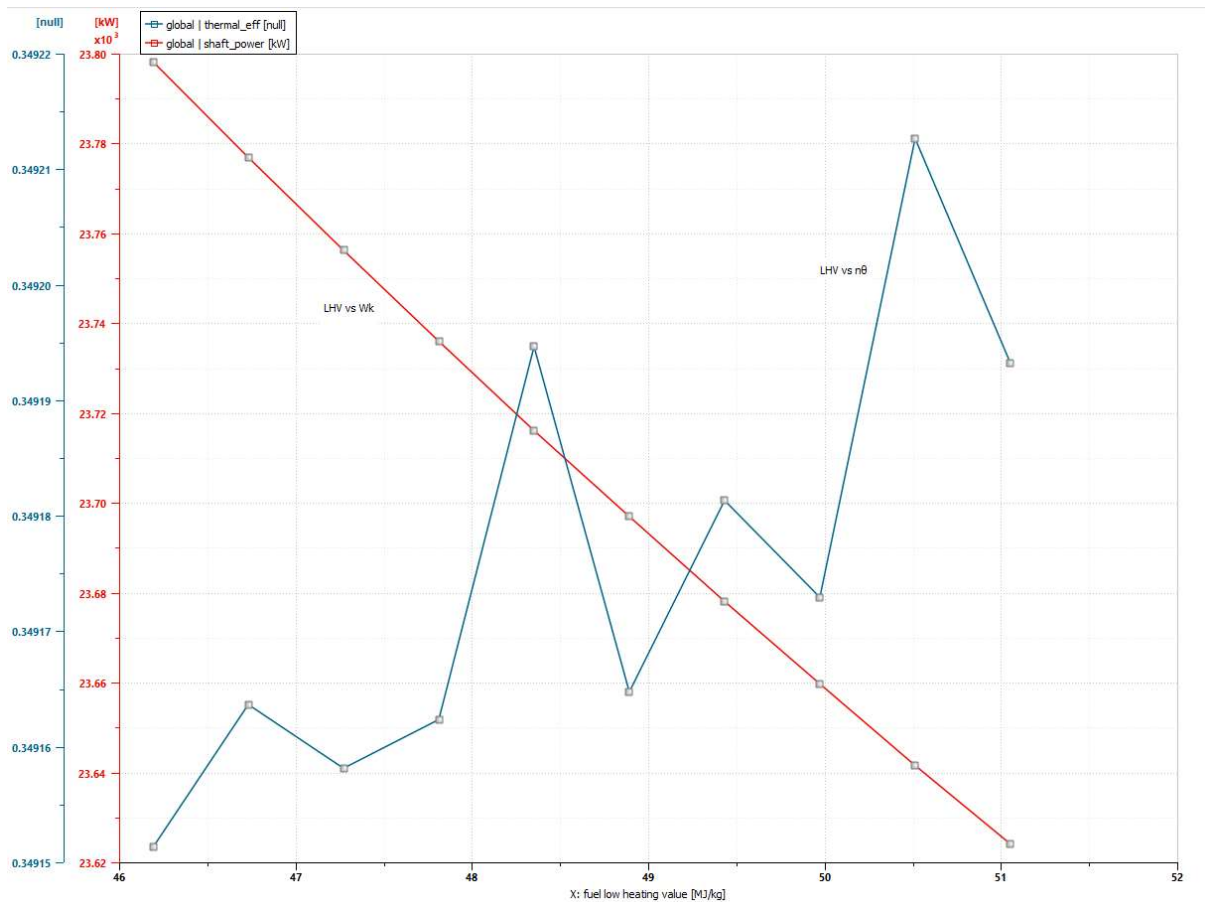
	Μεταβολή nis,t	Wk (kW)	$n\theta$
Κάτω άκρο Κ (-5%)	0.83125	21050.61	0.310034
Ονομαστική τιμή παραμέτρου	0.875	23706.7	0.3492
Άνω άκρο Α (+5%)	0.91875	26362.84	0.388272

Αποκλίσεις άκρων από ονομαστική τιμή (%)			
$dWk(K) =$	-11.204	$dn\theta(K) =$	-11.216
$dWk(A) =$	11.204	$dn\theta(A) =$	11.189

Στην συγκεκριμένη περίπτωση, ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του στροβίλου αποτελεί σημαντική παράμετρο στην μεταβολή των επιδόσεων του αεριοστροβίλου, καθώς τόσο το ειδικό έργο όσο και ο θερμικός βαθμός απόδοσης αυξάνονται κατά περίπου 11%, για 5% αύξηση του nis,t , και αντίστοιχα μειώνονται κατά 11% σε 5% μείωση του nis,t .

4.3.7 Επίδραση κατώτερης θερμογόνου δύναμης LHV στις επιδόσεις

Τέλος, θα ελεγχθεί και η επίδραση της αλλαγής καυσίμου στις επιδόσεις του κύκλου. Το κάθε καύσιμο έχει την δική του μοναδική τιμή της κατώτερης θερμογόνου δύναμης *LHV*. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, θεωρήθηκε η εικονική αλλαγή καυσίμου, ουσιαστικά απλώς μέσω του *Amesim*, μεταβλήθηκε +5% και -5% η κατώτερη θερμογόνος δύναμη, προκειμένου να φανεί η επίδρασή της στις επιδόσεις του κύκλου. Παρακάτω παρουσιάζονται το διάγραμμα και οι πίνακες με τα αποτελέσματα.



Σχήμα 4.7: Μεταβολή *Wk* και *nθ* σε συνάρτηση με *LHV* (MJ/kg).

	Μεταβολή <i>LHV</i> (MJ/kg)	<i>Wk</i> (kW)	<i>nθ</i>
Κάτω άκρο K (-5%)	46.189	23798.33	0.349151
Ονομαστική τιμή παραμέτρου	48.62	23706.7	0.3492
Άνω άκρο A (+5%)	51.051	23624.2	0.349193

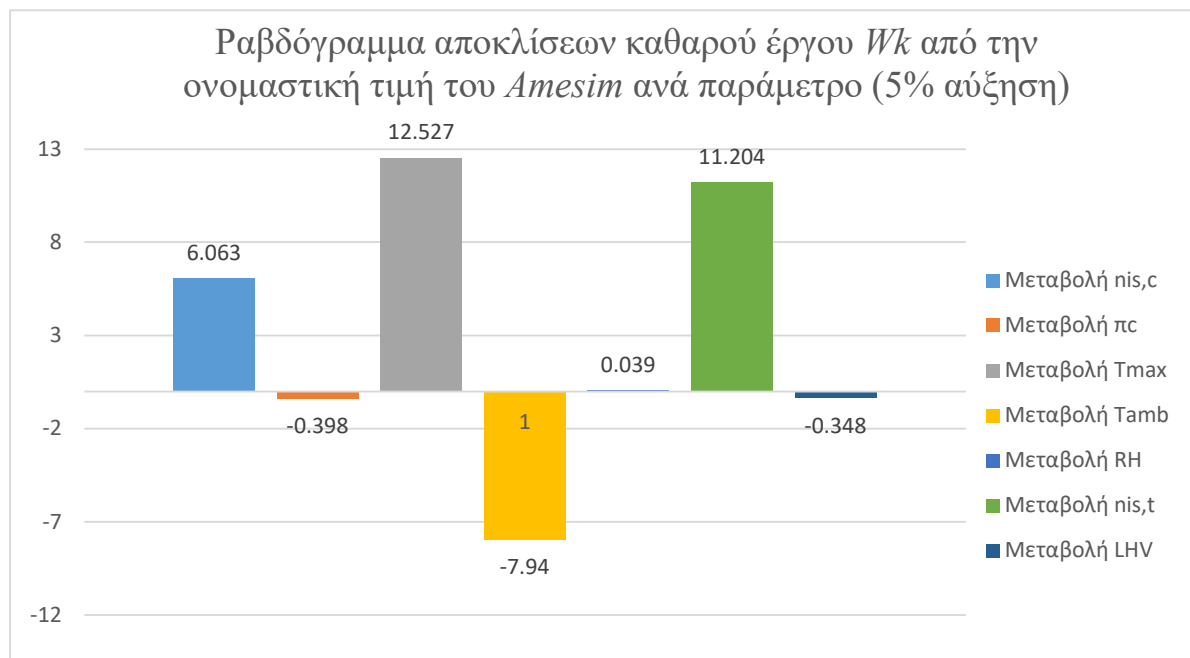
Αποκλίσεις άκρων από ονομαστική τιμή (%)			
<i>dWk(K)</i> =	0.387	<i>dnθ(K)</i> =	-0.014
<i>dWk(A)</i> =	-0.348	<i>dnθ(A)</i> =	-0.002

Σύμφωνα με το λογισμικό *Amesim*, αυξάνοντας την κατώτερη θερμογόνο δύναμη κατά 5%, παρατηρείται μία αρκετά μικρή μείωση του ειδικού έργου, της τάξης του 0.348%, ενώ μειώνοντας το ίδιο μέγεθος κατά 5%, το καθαρό ειδικό έργο αυξάνεται ελαφρώς, κατά 0.387%. Όσον αφορά τον θερμικό βαθμό απόδοσης $\eta\theta$, παρατηρείται μία ακανόνιστη συμπεριφορά κατά την μεταβολή της θερμογόνου δύναμης *LHV*. Ωστόσο, όπως και στην περίπτωση του ειδικού έργου, οι ποσοστιαίες μεταβλητές μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες, επομένως η κατώτερη θερμογόνος ικανότητα δεν επηρεάζει σημαντικά τις επιδόσεις του μοντέλου αεριοστροβίλου.

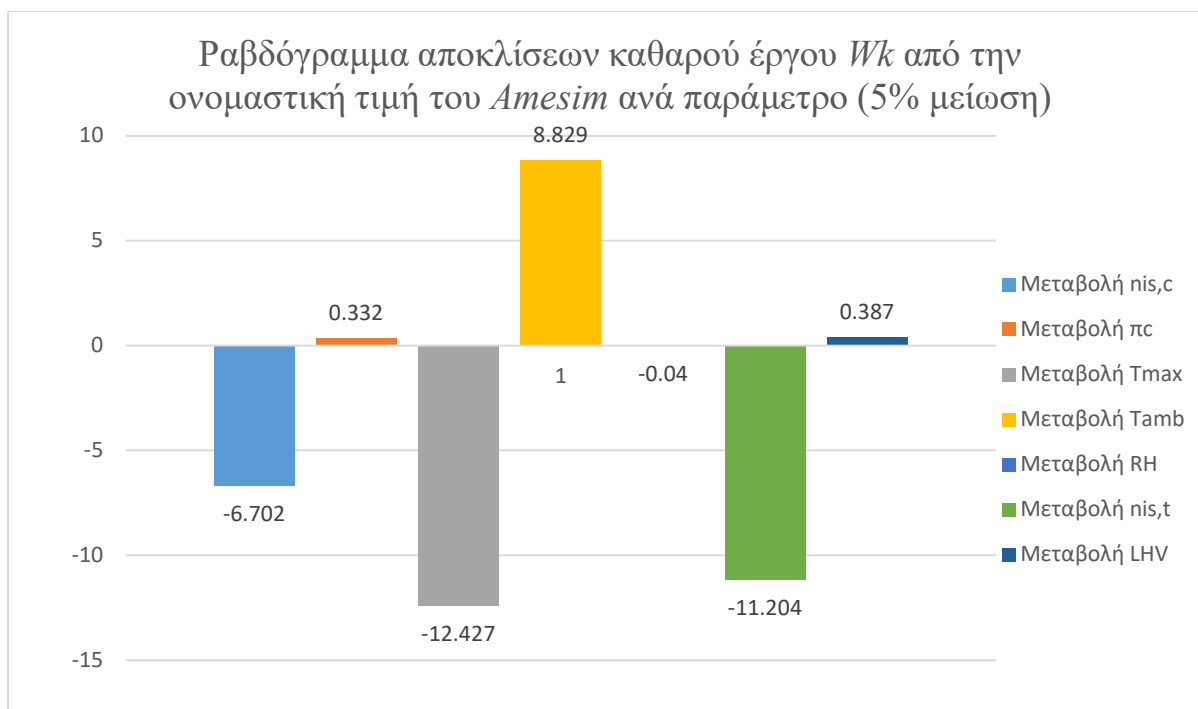
Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας ως προς το καθαρό ειδικό έργο *Wk*, σε πίνακες και ραβδογράμματα.

Παράμετρος		
Αύξηση/Μείωση Παραμέτρου	+5.00%	-5.00%
	Μεταβολή <i>Wk</i> (%)	
<i>nis,c</i>	6.063	-6.702
<i>pc</i>	-0.398	0.332
<i>Tmax</i>	12.527	-12.427
<i>Tamb</i>	-7.94	8.829
<i>RH</i>	0.039	-0.04
<i>nis,t</i>	11.204	-11.204
<i>LHV</i>	-0.348	0.387

Πίνακας 4.9: Ποσοστιαία μεταβολή *Wk* συναρτήσει των παραμέτρων.



Διάγραμμα 4.1: Αποκλίσεις *Wk* από την ονομαστική τιμή ανά παράμετρο (5% αύξηση).



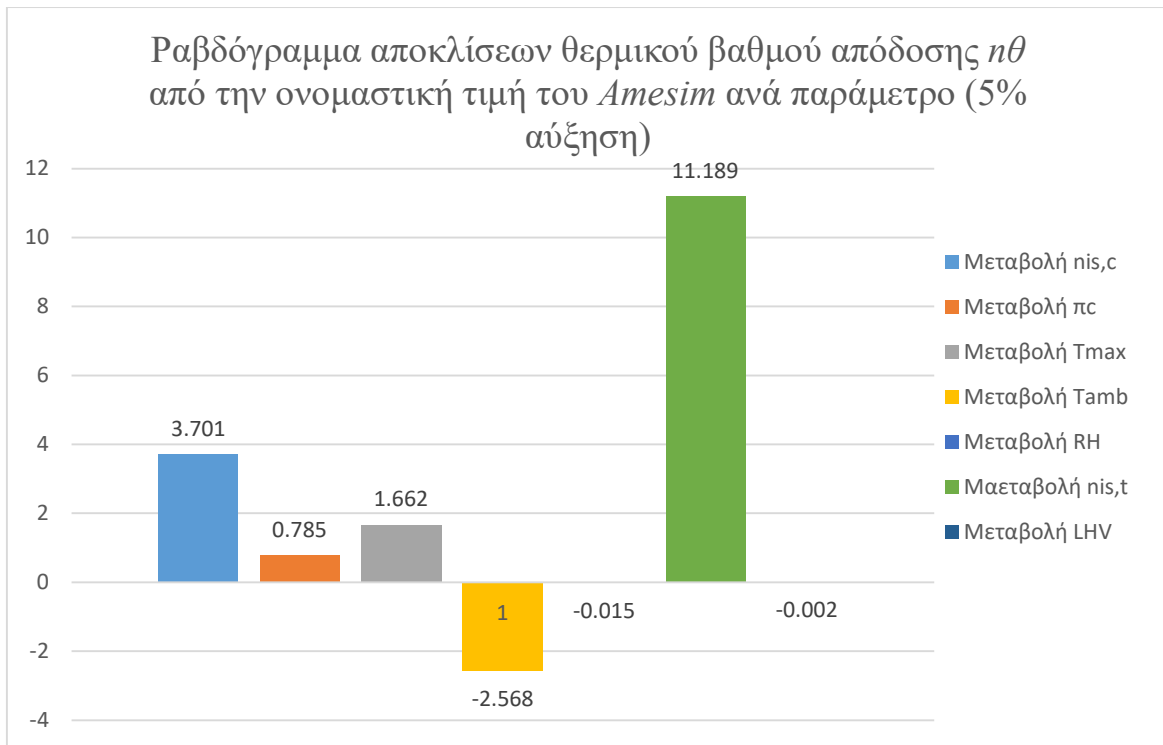
Διάγραμμα 4.2: Αποκλίσεις W_k από την ονομαστική τιμή ανά παράμετρο (5% μείωση).

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα και με τα ραβδογράμματα, προκύπτει ότι οι παράμετροι που επιδρούν περισσότερο στην μεταβολή του καθαρού ειδικού έργου είναι η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου T_{max} , η θερμοκρασία περιβάλλοντος T_{amb} και ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του στροβίλου $n_{is,t}$. Αντίθετα, οι παράμετροι που έχουν την μικρότερη επίδραση στο καθαρό ειδικό έργο είναι ο λόγος πίεσης συμπιεστή pc , η σχετική υγρασία RH και η κατώτερη θερμογόνος δύναμη LHV .

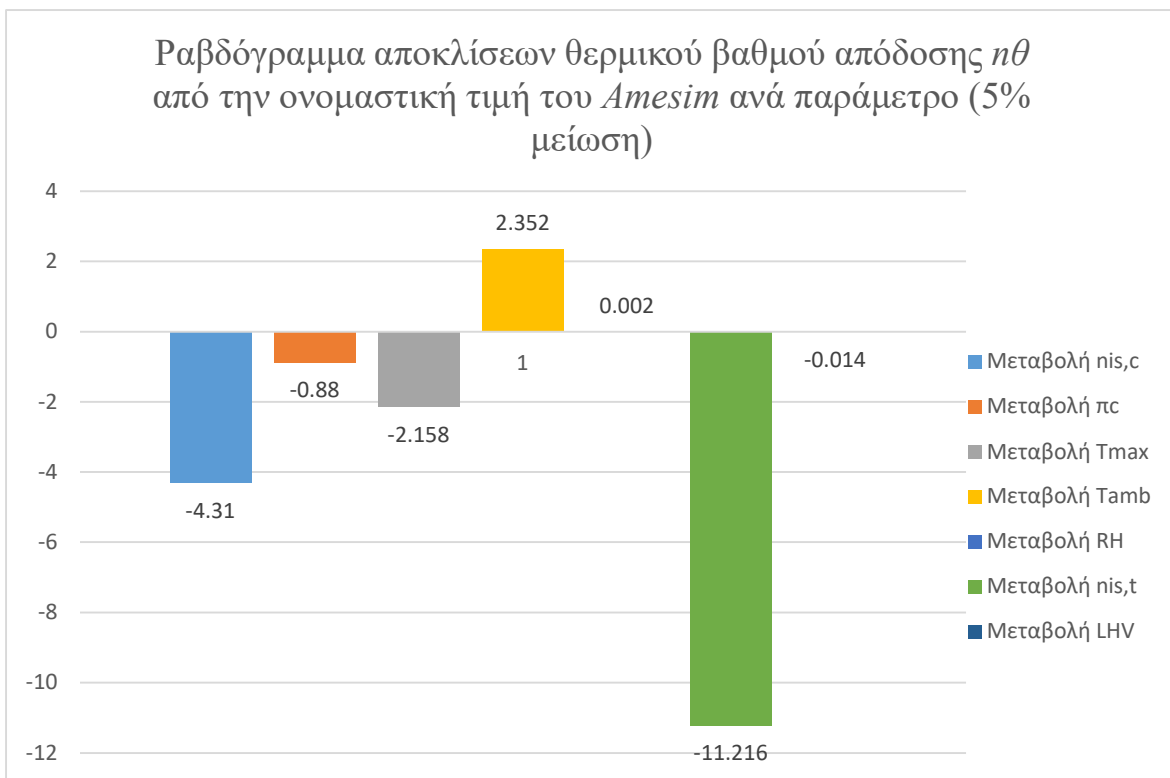
Εν συνεχεία παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας ως προς τον θερμικό βαθμό απόδοσης η_{th} σε πίνακες και ραβδογράμματα.

Παράμετρος	Μεταβολή η_{th} (%)	
	+5.00%	-5.00%
$n_{is,c}$	3.701	-4.31
pc	0.785	-0.88
T_{max}	1.662	-2.158
T_{amb}	-2.568	2.352
RH	-0.015	0.002
$n_{is,t}$	11.189	-11.216
LHV	-0.002	-0.014

Πίνακας 4.10: Ποσοστιαία μεταβολή η_{th} συναρτήσει των παραμέτρων.



Διάγραμμα 4.3: Αποκλίσεις $n\theta$ από την ονομαστική τιμή ανά παράμετρο (5% αύξηση).



Διάγραμμα 4.4: Αποκλίσεις $n\theta$ από την ονομαστική τιμή ανά παράμετρο (5% μείωση).

Η παράμετρος που επιδρά περισσότερο στην μεταβολή του θερμικού βαθμού απόδοσης είναι ο ισηντροπικός βαθμός απόδοσης του στροβίλου $n_{is,t}$. Αντίθετα, οι παράμετροι που έχουν την

μικρότερη επίδραση στην εν λόγω επίδοση είναι η σχετική υγρασία RH και η κατώτερη θερμογόνος δύναμη LHV .

4.4 Σύγκριση επιδόσεων με χρήση παραμέτρων από πηγές σε σχέση με τις επιδόσεις

Στα πλαίσια της εργασίας, πραγματοποιήθηκε μία επιπλέον σύγκριση επιδόσεων, χρησιμοποιώντας αρχικά τις παραμέτρους από την διπλωματική εργασία του Ιάκωβου Ρήγου στο λογισμικό *Amesim*, συγκρίνοντας τις επιδόσεις που προκύπτουν με τις αντίστοιχες από το προηγούμενο κεφάλαιο (Ρήγος, 2021). Επιπλέον, θα πραγματοποιηθεί σύγκριση των παραπάνω επιδόσεων του κύκλου με τις αντίστοιχες από τον κατασκευαστή (*General Electric*).

Συγκεκριμένα, οι παράμετροι της εργασίας του Ιάκωβου Ρήγου που τοποθετήθηκαν στο λογισμικό *Amesim*, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Θέσεις (Stations)	Παράμετροι	Τιμές	Μονάδες Μέτρησης
01	<i>Pamb</i>	101325	<i>Pa</i>
	<i>Tamb</i>	288.15	<i>K</i>
	<i>Relative Humidity</i>	60%	
02	<i>mcorr</i>	69.64	<i>kg/s</i>
	<i>mair</i>	68.75	<i>kg/s</i>
	<i>Kin</i>	0.985	
03	<i>pc</i>	18	
	<i>n (shaft speed)</i>	3600	<i>rpm</i>
	<i>nis,c</i>	0.83	
	<i>nm, hpt</i>	1	
04	<i>Tmax</i>	1249.8	
	<i>nb</i>	0.98	
	<i>Kb</i>	0.96	
	<i>LHV</i>	48620	<i>KJ/kg</i>
43	<i>ni,t</i>	0.9	
06	<i>Kout</i>	0.97	
08	<i>P8/Pamb</i>	1.04	
<i>Bleed</i>	<i>Turbine Stages</i>	6	

Πίνακας 4.11: Παράμετροι ανά θέση σύμφωνα με εξωτερική πηγή.

Στον παρακάτω συγκεντρωτικό πίνακα αναγράφονται τα αποτελέσματα των επιδόσεων, χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους της διπλωματικής του Ρήγου (εξωτερική πηγή). Παράλληλα στον ίδιο πίνακα παρουσιάζονται οι επιδόσεις του πραγματικού αεριοστροβίλου, σύμφωνα με τον κατασκευαστή του *LM 2500*, καθώς και οι αντίστοιχες επιδόσεις του αρχικού

μοντέλου ενός άξονα. Τέλος, στον πίνακα έχουν προσαρτηθεί οι αποκλίσεις των επιδόσεων μεταξύ της εργασίας του Ρήγου και του υπάρχοντος μοντέλου στο *Amesim*, και αντίστοιχα με τις αποκλίσεις των επιδόσεων από τον κατασκευαστή. Οι αποκλίσεις προέκυψαν χρησιμοποιώντας την γνωστή μαθηματική σχέση της μεταβολής ενός μεγέθους X , συγκεκριμένα $dX = \frac{|X1-X2|}{X1}$, όπου $X1$ η τιμή του μεγέθους X που αφορά είτε το μοντέλο της εργασίας, είτε τις επιδόσεις του κατασκευαστή και $X2$ η τιμή του μεγέθους X που αφορά την εργασία του Ρήγου.

	Αποτελέσματα <i>Amesim</i> (τιμές εξωτερικής πηγής)	Αποτελέσματα <i>Amesim</i>	Επιδόσεις <i>LM 2500</i>		Αποκλίσεις τιμών εξωτερικής πηγής - μοντέλου εργασίας (%)	Αποκλίσεις επιδόσεων κατασκευαστή - εξωτερικής πηγής (%)
<i>Wk (kW)</i>	14262.6	23706.7	25060	<i>dWk</i>	39.837	43.086
<i>nθ</i>	0.3245	0.3492	0.347	<i>dnθ</i>	7.073	6.484
<i>sfc</i> (<i>kg/kWh</i>)	0.2282	0.2121	0.2269	<i>dsfc</i>	7.591	0.573
<i>mg</i> (<i>kg/s</i>)	69.68	70.36	70.3	<i>dmg</i>	0.966	0.882
<i>Texh (K)</i>	690.8267	851.4786	839.15	<i>dTexh</i>	18.867	17.675

Πίνακας 4.12: Αποτελέσματα και αποκλίσεις μεταξύ εξωτερικής πηγής, εργασίας και επιδόσεων.

Εάν εισαχθούν οι παράμετροι της εργασίας του Ρήγου στο μοντέλο του λογισμικού *Amesim*, παρατηρούμε ότι υπάρχει μεγάλη διαφορά, τόσο με τα αποτελέσματα του κατασκευαστή, όσο και με τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης εργασίας, κυρίως στο καθαρό ειδικό έργο *Wk*, όπου οι ποσοστιαίες διαφορές είναι αρκετά μεγάλες.

4.5 Συμπεράσματα

Ύστερα από την μελέτη του μοντέλου αεριοστροβίλου ενός άξονα στο λογισμικό *Amesim* και την δοκιμή της υπολογιστικής μεθόδου, προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα, τα οποία παρουσιάζονται συνοπτικά στους παρακάτω πίνακες:

Υπολογιστική Μέθοδος		Μέθοδος Λογισμικού <i>Amesim</i>		Επιδόσεις <i>LM 2500</i> (κατασκευαστής)	
<i>Wk (kW)</i>	22353.01	<i>Wk (kW)</i>	23706.7	<i>Wk (kW)</i>	25060
<i>nθ</i>	0.313534	<i>nθ</i>	0.3492	<i>nθ</i>	0.347
<i>sfc (kg/kWh)</i>	0.236158	<i>sfc (kg/kWh)</i>	0.2121	<i>sfc (kg/kWh)</i>	0.2269
<i>mg (kg/s)</i>	70.43345	<i>mg</i>	70.3	<i>mg (kg/s)</i>	70.3
<i>Texh (K)</i>	833.19	<i>Texh (K)</i>	851.4786	<i>Texh (K)</i>	839.15

Πίνακας 4.13: Αποτελέσματα υπολογιστικής μεθόδου, *Amesim* και πραγματικές επιδόσεις.

Αποκλίσεις υπολογιστικής μεθόδου - <i>Amesim</i> (%)		Αποκλίσεις επιδόσεων κατασκευαστή - υπολογιστικής μεθόδου (%)		Αποκλίσεις <i>Amesim</i> - Επιδόσεων κατασκευαστή (%)	
<i>dWk</i>	6.056	<i>dWk</i>	10.802	<i>dWk</i>	5.400
<i>dnθ</i>	11.376	<i>dnθ</i>	9.644	<i>dnθ</i>	0.634
<i>dsfc</i>	10.187	<i>dsfc</i>	4.080	<i>dsfc</i>	6.523
<i>dmg</i>	0.189	<i>dmg</i>	0.190	<i>dmg</i>	0.000
<i>dTexh</i>	2.195	<i>dTexh</i>	0.710	<i>dTexh</i>	1.470

Πίνακας 4.14: Αποκλίσεις μεθόδων – επιδόσεων.

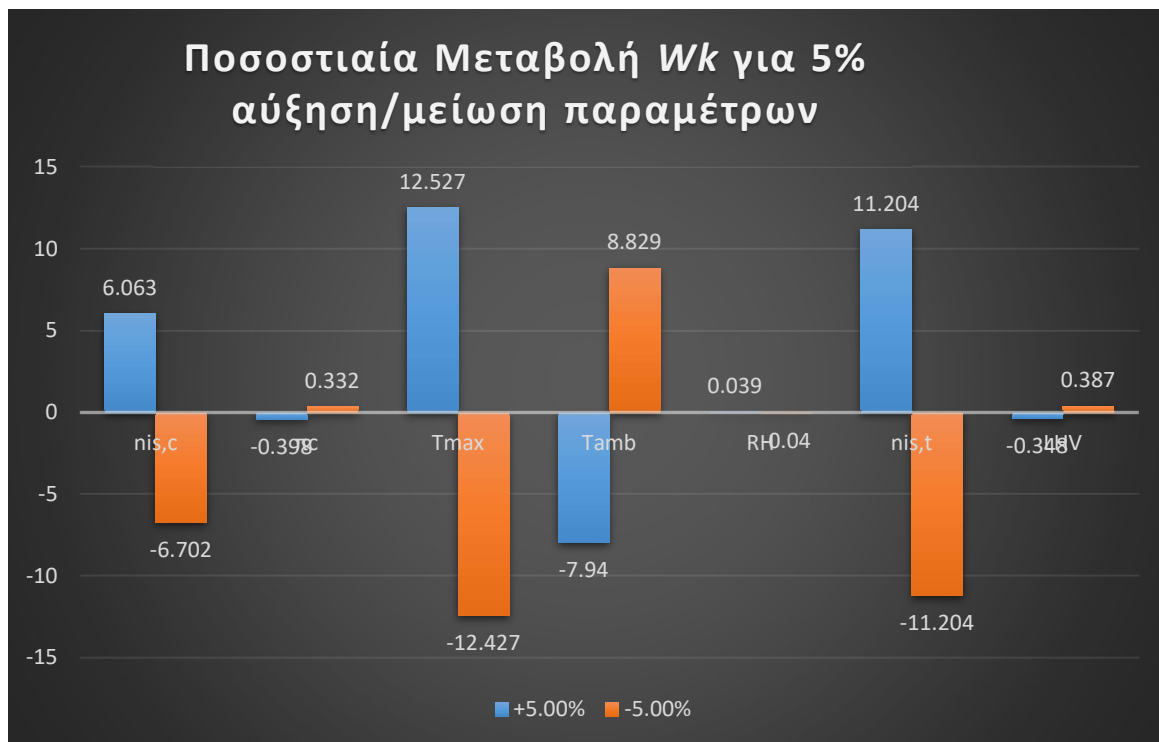
Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα παραπάνω αποτελέσματα συνοψίζονται ως εξής:

- Η μέθοδος που προσφέρει το λογισμικό *Amesim* φαίνεται πιο ακριβής σε σχέση με την απλή υπολογιστική μέθοδο, ώστε να επιτευχθεί μία καλή προσέγγιση των επιδόσεων του πραγματικού αεριοστροβίλου *LM 2500*.
- Τόσο η υπολογιστική μέθοδος, όσο και η μέθοδος του λογισμικού, παρουσιάζουν καλή προσέγγιση στην θερμοκρασία των καυσαερίων *Texh* και στην παροχή μάζας *mg*.
- Η μέθοδος του *Amesim* διαθέτει καλύτερη προσέγγιση στον θερμικό βαθμό απόδοσης *nθ* σε σχέση με την υπολογιστική μέθοδο.
- Όσον αφορά το καθαρό ειδικό έργο *Wk* και την ειδική κατανάλωση καυσίμου *sfc*, παρατηρούνται σημαντικές διαφορές και στις δύο μεθόδους σε σχέση με τον πραγματικό κύκλο αεριοστροβίλου, ωστόσο σαφώς καλύτερα αποτελέσματα δίνει η το *Amesim*, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως.

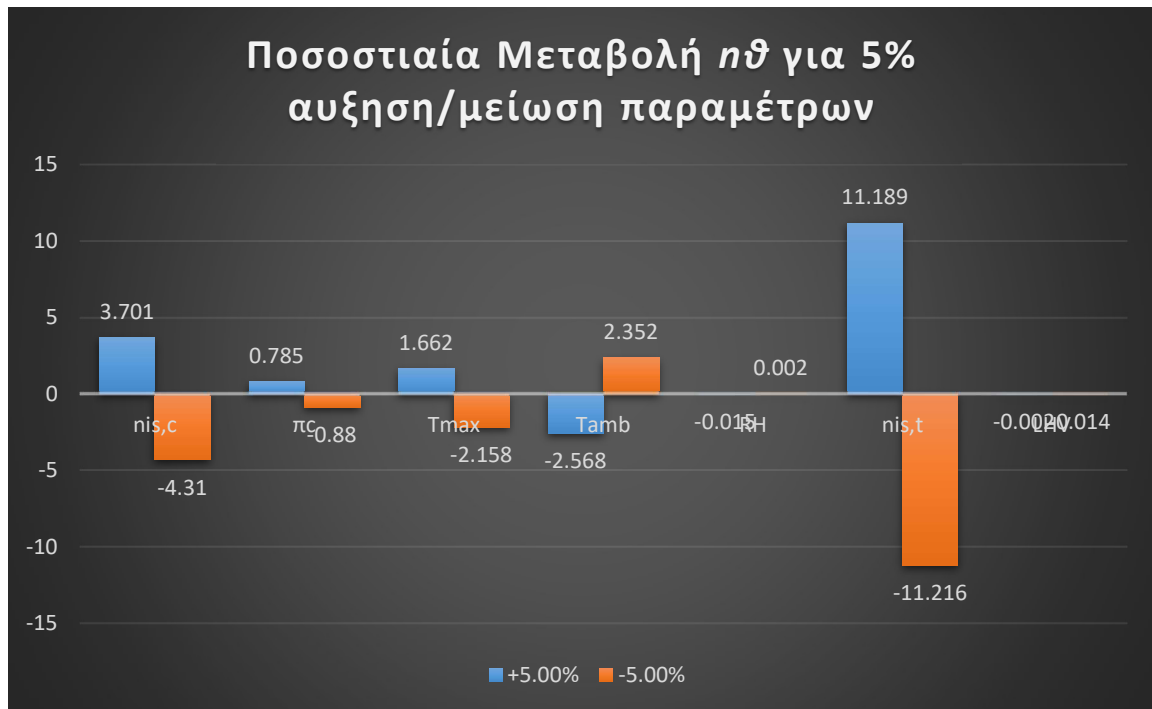
Όσον αφορά την ανάλυση ευαισθησίας, τα αποτελέσματα συνοψίζονται στους παρακάτω πίνακες και διαγράμματα.

Παράμετρος Αύξηση/Μείωση Παραμέτρου				
	+5.00%	-5.00%	+5.00%	-5.00%
	Μεταβολή Wk (%)		Μεταβολή $n\theta$ (%)	
nis,c	6.063	-6.702	3.701	-4.31
πc	-0.398	0.332	0.785	-0.88
$Tmax$	12.527	-12.427	1.662	-2.158
$Tamb$	-7.94	8.829	-2.568	2.352
RH	0.039	-0.04	-0.015	0.002
nis,t	11.204	-11.204	11.189	-11.216
LHV	-0.348	0.387	-0.002	-0.014

Πίνακας 4.15: Ανάλυση ευαισθησίας.



Διάγραμμα 4.5: Ραβδόγραμμα μεταβολής Wk για 5% αύξηση/μείωση παραμέτρων.



Διάγραμμα 4.6: Ραβδόγραμμα μεταβολής $\eta\theta$ για 5% αύξηση/μείωση παραμέτρων.

Όσον αφορά το καθαρό ειδικό έργο W_k , τα συμπεράσματα συνοψίζονται ως εξής:

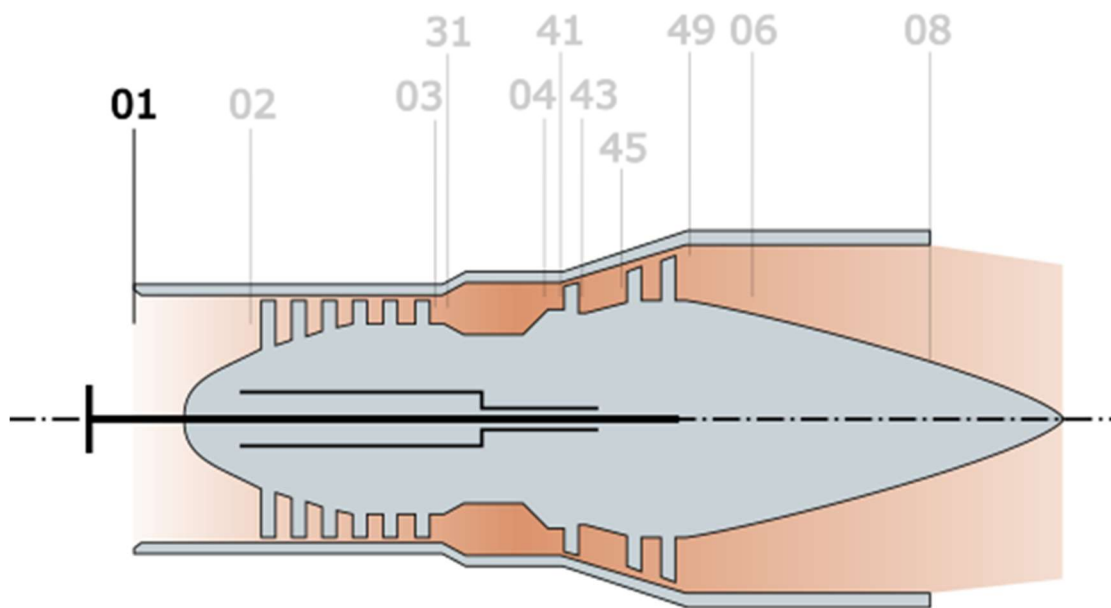
- Η παράμετρος που επιδρά περισσότερο στο καθαρό ειδικό έργο είναι η μέγιστη θερμοκρασία T_{max} , ή διαφορετικά η θερμοκρασία του καυσαερίου αμέσως μετά τον θάλαμο καύσης.
- Σημαντική επίδραση στην μεταβολή του καθαρού ειδικού έργου έχουν οι ισεντροπικοί βαθμοί απόδοσης συμπιεστή και στροβίλου ($\eta_{is,c}$ και $\eta_{is,t}$), καθώς και η εξωτερική θερμοκρασία T_{amb} .
- Οι παράμετροι με την μικρότερη επίδραση είναι ο λόγος πίεσης του συμπιεστή pc , η σχετική υγρασία RH και η κατώτερη θερμογόνος ικανότητα LHV (πρακτικά το καύσιμο που χρησιμοποιείται).

Αντίστοιχα, όσον αφορά τον θερμικό βαθμό απόδοσης $\eta\theta$, τα συμπεράσματα συνοψίζονται ως εξής:

- Η παράμετρος που επιδρά περισσότερο στον θερμικό βαθμό απόδοσης είναι ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του στροβίλου $\eta_{is,t}$, όπως φαίνεται και από το ραβδόγραμμα.
- Αντιθέτως, οι παράμετροι με την μικρότερη επίδραση είναι η σχετική υγρασία RH και η κατώτερη θερμογόνος ικανότητα LHV .

5. Αεριοστρόβιλος δύο αξόνων (2-shaft)

Επιστρέφοντας στο λογισμικό *Amesim*, γίνεται η αντίστοιχη διαδικασία, αυτή την φορά επιλέγοντας μοντέλο αεριοστροβίλου δύο αξόνων, 2 – *Spool Turbohaft*. Η διαφορά με την προηγούμενη περίπτωση του αεριοστροβίλου ενός άξονα, είναι η ύπαρξη δύο στροβίλων, ενός υψηλής πίεσης (*high pressure turbine*) που συνδέεται με κοινό άξονα με τον συμπιεστή, και ενός στροβίλου ισχύος (*power turbine*), που συνδέεται με τον στρόβιλο υψηλής πίεσης. Στο λογισμικό, προστίθενται δύο νέες θέσεις. Η θέση 43 πλέον είναι η είσοδος στον στρόβιλο υψηλής πίεσης *hpt*, στην συνέχεια ακολουθεί η θέση 45, η είσοδος στον στρόβιλο ισχύος *pt*, ενώ ακολουθεί η θέση 49, δηλαδή η έξοδος από τον στρόβιλο ισχύος. Τέλος, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, ακολουθούν οι θέσεις 06 και 08, η είσοδος και η έξοδος από το ακροφύσιο αντίστοιχα.



Εικόνα 5.1: Σχηματική απεικόνιση αεριοστροβίλου δύο αξόνων.

Σύμφωνα με το *datasheet* της *General Electric*, η ταχύτητα του άξονα στον στρόβιλο ισχύος (*power turbine*) ισούται με 3600 *rpm*, ενώ η ταχύτητα του άξονα που συνδέει συμπιεστή με στρόβιλο υψηλής πίεσης (*high pressure turbine*) ισούται με 9400 *rpm*. Μεταβάλλοντας τις τιμές της μέγιστης θερμοκρασίας του κύκλου και των ισεντροπικών βαθμών απόδοσης συμπιεστή (*hpc*), στροβίλου υψηλής πίεσης (*hpt*) και στροβίλου ισχύος (*pt*),

πραγματοποιήθηκαν ορισμένες δοκιμές ώστε να προσεγγίσουμε τις επιδόσεις του αεριοστροβίλου LM 2500. Στους συγκεκριμένους «σταθμούς» (*stations*), οι παράμετροι ορίστηκαν ως εξής:

Station 01

- Πίεση περιβάλλοντος (*total & ambient pressure*): 101325 Pa
- Θερμοκρασία περιβάλλοντος (*total temperature*): 288.15 K (15 Celsius + 273.15 για μετατροπή σε Kelvin)
- Σχετική υγρασία (*Relative Humidity*): 60% (μία μέση τιμή υγρασίας στο εξωτερικό περιβάλλον)

Station 02 – Inlet

- Διορθωμένη παροχή μάζας (*Inlet corrected mass flow rate*): 70.15 kg/s (Στα αποτελέσματα θα προκύψει ότι: παροχή μάζας αέρα = 68.9671 kg/s και παροχή μάζας καυσαερίων = 70.3636 kg/s, τιμές αρκετά κοντά στις αντίστοιχες του πίνακα 1)
- Συντελεστής απωλειών αγωγού πίεσης εισόδου (*Intake pressure ratio*): 0.985 (Επί της ουσίας; η πίεση στην θέση 02 είναι 0.15% μικρότερη από την πίεση της Θέσης 01).

Station 03 – Compressor Outlet

- Λόγος πίεσης συμπίεστή (*hpc pressure ratio*): 18
- Ταχύτητα στροβίλου υψηλής πίεσης (*High Pressure Shaft Rotary Speed*): 9400 rpm
- Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης συμπίεστή (*hpc isentropic efficiency*): **Μεταβλητή τιμή**
- Μηχανικός βαθμός απόδοσης άξονα (*High pressure shaft mechanical efficiency*): 1

Station 04 – Burner

- Μέγιστη θερμοκρασία κύκλου (*Burner exit temperature*): **Μεταβλητή τιμή**
- Βαθμός απόδοσης θαλάμου καύσης (*Burner efficiency*): 0.98
- Συντελεστής απωλειών πίεσης θαλάμου καύσης (*Burner pressure ratio*): 0.96
- Κατώτερη θερμογόνο δύναμη καυσίμου: 48620 kJ/kg ή 48.62 MJ/kg

Station 43 – High Pressure Turbine Outlet

- Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου υψηλής πίεσης (*hpt isentropic efficiency*): **Μεταβλητή τιμή**

Station 45 – Power Turbine Inlet

- Συντελεστής απωλειών πίεσης στον αγωγό μεταξύ στροβίλου υψηλής πίεσης και στροβίλου ισχύος (K_{pt}): 1

Εδώ θεωρούμε ότι δεν υπάρχουν απώλειες πίεσης στον αγωγό μεταξύ των δύο στροβίλων, δηλαδή η πίεση μετά τον στροβίλο hpt και πριν τον pt , ταυτίζονται.

Station 49 – Power Turbine Outlet

- Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου ισχύος (pt isentropic efficiency): **Μεταβλητή τιμή**
- Ταχύτητα στροβίλου ισχύος ($Power\ turbine\ shaft\ rotary\ speed$): 3600 rpm
- Μηχανικός βαθμός απόδοσης άξονα στροβίλου ισχύος ($Power\ turbine\ shaft\ mechanical\ efficiency$): 1

Station 06 – Core nozzle inlet (έξοδος στροβίλου, είσοδος στο ακροφύσιο)

- Συντελεστής απωλειών πίεσης αγωγού εξόδου ($turbine\ exit\ duct\ pressure\ ratio$): 0.97

Station 08 – Core nozzle throat

- Λόγος πίεσης εξόδου προς την ατμοσφαιρική ($exhaust\ pressure\ ratio\ P8/Pamb$): 1.04

Bleed (Διαρροές)

- Βαθμίδες στροβίλου υψηλής πίεσης ($HP\ Turbine\ stages$): 2
- Βαθμίδες στροβίλου ισχύος ($Power\ Turbine\ stages$): 6

Πιο συνοπτικά, οι τιμές των παραμέτρων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Θέσεις (Stations)	Παράμετροι	Τιμές	Μονάδες Μέτρησης
01	$Pamb$	101325	Pa
	$Tamb$	288.15	K
	$Relative\ Humidity$	60%	
02	$m\dot{c}_{orr}$	70.15	kg/s
	K_{in}	0.985	
03	π_c	18	
	n, h_{pt}	9400	rpm
	$n_{is,c}$	Μεταβλητή	

	<i>nm, hpt</i>	1	
04	<i>Tmax</i>	Μεταβλητή	<i>K</i>
	<i>nb</i>	0.98	
	<i>Kb</i>	0.96	
	<i>LHV</i>	48620	<i>kJ/kg</i>
43	<i>nis, hpt</i>	Μεταβλητή	
45	<i>Kpt</i>	1	
49	<i>nis,pt</i>	Μεταβλητή	
	<i>n,pt</i>	3600	<i>rpm</i>
	<i>nm, pt</i>	1	
06	<i>Kout</i>	0.97	
08	<i>P8/Pamb</i>	1.04	
Bleed	<i>HP Turbine Stages</i>	2	
	<i>Power Turbine Stages</i>	6	

Πίνακας 5.1: Τιμές παραμέτρων στο Amesim για αεριοστροβίλο δύο αξόνων.

Μεταβάλλοντας τις τιμές των ισεντροπικών βαθμών απόδοσης συμπιεστή, στροβίλου υψηλής πίεσης, στροβίλου ισχύος και την μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου, προκύπτουν διαφορετικές τιμές στις επιδόσεις του αεριοστροβίλου. Ύστερα από αρκετές δοκιμές στο λογισμικό, παρουσιάζονται παρακάτω οι τιμές των παραμέτρων που προσεγγίζουν τις πραγματικές επιδόσεις του LM 2500, για μοντέλο αεριοστροβίλου δύο αξόνων:

1^η Περίπτωση

Τιμές Παραμέτρων		Αποτελέσματα		Αποκλίσεις (%)	
<i>Tmax (K)</i>	1500	<i>Wk (kW)</i>	24839.2	<i>dWk</i>	0.881085
<i>nis,c</i>	0.85	<i>nθ</i>	0.3456	<i>dnθ</i>	0.403458
<i>nis,hpt</i>	0.85	<i>sfc (kg/kWh)</i>	0.2142	<i>dsfc</i>	5.597179
<i>nis,pt</i>	0.85	<i>Texh (K)</i>	874.2166	<i>dTexh</i>	4.178824

2^η Περίπτωση

Τιμές Παραμέτρων		Αποτελέσματα		Αποκλίσεις (%)	
<i>Tmax (K)</i>	1490	<i>Wk (kW)</i>	24420	<i>dWk</i>	2.553871
<i>nis,c</i>	0.85	<i>nθ</i>	0.3447	<i>dnθ</i>	0.662824
<i>nis,hpt</i>	0.85	<i>sfc (kg/kWh)</i>	0.2148	<i>dsfc</i>	5.332746
<i>nis,pt</i>	0.85	<i>Texh (K)</i>	867.5602	<i>dTexh</i>	3.385593

3^η Περίπτωση

Τιμές Παραμέτρων		Αποτελέσματα		Αποκλίσεις (%)	
------------------	--	--------------	--	----------------	--

$T_{max} (K)$	1480	$Wk (kW)$	24000.8	dWk	4.226656
nis,c	0.85	$n\theta$	0.3438	$dn\theta$	0.92219
nis,hpt	0.85	$sfc (kg/kWh)$	0.2154	$dsfc$	5.068312
nis,pt	0.85	$Texh (K)$	860.9091	$dTexh$	2.592993

4^η Περίπτωση

Τιμές Παραμέτρων		Αποτελέσματα		Αποκλίσεις (%)	
$T_{max} (K)$	1480	$Wk (kW)$	24363.6	dWk	2.778931
nis,c	0.86	$n\theta$	0.347	$dn\theta$	0
nis,hpt	0.85	$sfc (kg/kWh)$	0.2134	$dsfc$	5.949758
nis,pt	0.85	$Texh (K)$	861.0267	$dTexh$	2.607007

5^η Περίπτωση

Τιμές Παραμέτρων		Αποτελέσματα		Αποκλίσεις (%)	
$T_{max} (K)$	1480	$Wk (kW)$	24177	dWk	3.523543
nis,c	0.87	$n\theta$	0.3501	$dn\theta$	0.893372
nis,hpt	0.85	$sfc (kg/kWh)$	0.2115	$dsfc$	6.787131
nis,pt	0.85	$Texh (K)$	861.1477	$dTexh$	2.621426

6^η Περίπτωση

Τιμές Παραμέτρων		Αποτελέσματα		Αποκλίσεις (%)	
$T_{max} (K)$	1470	$Wk (kW)$	24299.7	dWk	3.033919
nis,c	0.87	$n\theta$	0.3493	$dn\theta$	0.662824
nis,hpt	0.85	$sfc (kg/kWh)$	0.212	$dsfc$	6.56677
nis,pt	0.85	$Texh (K)$	854.4993	$dTexh$	1.829149

7^η Περίπτωση

Τιμές Παραμέτρων		Αποτελέσματα		Αποκλίσεις (%)	
$T_{max} (K)$	1475	$Wk (kW)$	24150.8	dWk	3.628093
nis,c	0.845	$n\theta$	0.3496	$dn\theta$	0.74928
nis,hpt	0.86	$sfc (kg/kWh)$	0.2118	$dsfc$	6.654914
nis,pt	0.86	$Texh (K)$	850.9439	$dTexh$	1.405458

Οι αποκλίσεις σε κάθε περίπτωση προκύπτουν σύμφωνα με τα παραπάνω, ακριβώς όπως στον αεριοστρόβιλο ενός άξονα, ενώ οι πραγματικές επιδόσεις του αεριοστροβίλου LM 2500, σύμφωνα με τον κατασκευαστή, είναι οι εξής:

Επιδόσεις LM 2500 (2 shaft)		
Καθαρή Παραγόμενη Ισχύς (Wk)	25060	kW
Θερμικός Βαθμός Απόδοσης ($n\theta$)	0.347	
Ειδική Κατανάλωση Καυσίμου (sfc)	0.2269	kg/kWh
Θερμοκρασία Αποβολής Καυσαερίων ($Texh$)	839.15	K

Πίνακας 5.2: Επιδόσεις LM 2500.

Αντίστοιχα με το μοντέλο αεριοστροβίλου για έναν άξονα, έτσι και στο μοντέλο δύο αξόνων, υπάρχουν 7 περιπτώσεις για τις τιμές των μεταβλητών παραμέτρων. Με τον ίδιο τρόπο, δηλαδή με το άθροισμα της μέγιστης και της μέσης τιμής των αποκλίσεων $M + A$, η περίπτωση με το μικρότερο άθροισμα $M + A$ θα χρησιμοποιηθεί για την συνέχεια της μελέτης του μοντέλου στο λογισμικό *Amesim*.

Πιο συγκεκριμένα, για μοντέλο αεριοστροβίλου δύο αξόνων, σύμφωνα με τις παραπάνω αποκλίσεις, έχουμε τα εξής αποτελέσματα:

	1η Περίπτωση	2η Περίπτωση	3η Περίπτωση	4η Περίπτωση	5η Περίπτωση	6η Περίπτωση	7η Περίπτωση
dWk (%)	0.881	2.554	4.227	2.779	3.524	3.034	3.628
$dn\theta$ (%)	0.403	0.663	0.922	0.000	0.893	0.663	0.749
$dsfc$ (%)	5.597	5.333	5.068	5.950	6.787	6.567	6.655
$dTexh$ (%)	4.179	3.386	2.593	2.607	2.621	1.829	1.405
M	5.597	5.333	5.068	5.950	6.787	6.567	6.655
A	2.765	2.984	3.203	2.834	3.456	3.023	3.109
$A+M$	8.362	8.317	8.271	8.784	10.243	9.590	9.764

Πίνακας 5.3: Κριτήριο Επιλογής Βέλτιστων Παραμέτρων.

Τελικώς προκύπτει ότι η βέλτιστη περίπτωση είναι η 3^η, καθώς διαθέτει το μικρότερο άθροισμα $A + M$. Επομένως, για μοντέλο αεριοστροβίλου δύο αξόνων στο λογισμικό *Amesim*, οι τιμές των παραμέτρων που προσεγγίζουν τις επιδόσεις του αεριοστροβίλου LM 2500 είναι οι ακόλουθες:

Δεδομένα προσομοίωσης (2 – shaft)		Μονάδες Μέτρησης
Μέγιστη Θερμοκρασία κύκλου T_{max}	1480	K
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης συμπιεστή $\eta_{is,c}$	0.85	
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου υψηλής πίεσης $\eta_{is,hpt}$	0.85	
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου ισχύος $\eta_{is,pt}$	0.85	
Λόγος πίεσης συμπιεστή p_c	18	
Παροχή μάζας αέρα	69.4	kg/s
Παροχή μάζας καυσαερίων	70.3	kg/s
Ταχύτητα στροβίλου ισχύος	3600	rpm
Ταχύτητα στροβίλου υψηλής πίεσης	9400	rpm
Αριθμός βαθμίδων συμπιεστή	16	
Αριθμός βαθμίδων στροβίλου υψηλής πίεσης	2	
Αριθμός βαθμίδων στροβίλου ισχύος	6	
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	15	$Celsius$
Πίεση περιβάλλοντος	1.013 ή 101300	Bar ή Pa
Κατώτερη Θερμογόνος δύναμη καυσίμου	48620	kJ/kg
Βαθμός απόδοσης θαλάμου καύσης	0.98	
Μηχανικός βαθμός απόδοσης άξονα	1	
Συντελεστής απωλειών αγωγού εισόδου (<i>intake pressure ratio</i>)	0.985	
Συντελεστής απωλειών θαλάμου καύσης (<i>μείωση πίεσης στον θάλαμο καύσης</i>)	0.96	

Συντελεστής απωλειών αγωγού εξόδου καυσαερίων (<i>turbine exit duct pressure</i>)	0.97	
--	------	--

Πίνακας 5.4: Δεδομένα προσομοίωσης για μοντέλο δύο αξόνων στο Amesim.

Αποτελέσματα προσομοίωσης (2 – shaft)		Μονάδες Μέτρησης
Καθαρή παραγόμενη ισχύς (<i>Wk</i>)	24000.8	<i>kW</i>
Θερμικός βαθμός απόδοσης (<i>nθ</i>)	0.3438	
Ειδική κατανάλωση καυσίμου (<i>sfc</i>)	0.2154	<i>Kg/kWh</i>
Θερμοκρασία αποβολής καυσαερίων (<i>Texh</i>)	860.9091	<i>K</i>

Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα προσομοίωσης για μοντέλο δύο αξόνων στο Amesim.

Όπως και στην περίπτωση του αεριοστροβίλου ενός άξονα, πραγματοποιήθηκε αντίστοιχος υπολογισμός με τις σχέσεις του προηγούμενου κεφαλαίου, προκειμένου να γίνει μία σύγκριση μεταξύ του λογισμικού και των υπολογιστικών σχέσεων στην περίπτωση του μοντέλου με δύο άξονες. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στους παρακάτω πίνακες:

Υπολογιστική Μεθοδος		Μέθοδος Λογισμικού <i>Amesim</i>		Αποκλίσεις υπολογιστικής μεθόδου - <i>Amesim</i> (%)	
<i>Wk (kW)</i>	26877.548	<i>Wk (kW)</i>	24000.8	<i>dWk</i>	10.703
<i>nθ</i>	0.378	<i>nθ</i>	0.3438	<i>dnθ</i>	8.977
<i>sfc (kg/kWh)</i>	0.196	<i>sfc (kg/kWh)</i>	0.2154	<i>dsfc</i>	9.878
<i>mg</i>	70.431	<i>mg</i>	70.3	<i>dmg</i>	0.186
<i>Texh (K)</i>	775.742	<i>Texh (K)</i>	860.9091	<i>dTexh</i>	10.979

Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα και αποκλίσεις μεταξύ υπολογιστικής μεθόδου και Amesim.

Παρατηρούνται μεγάλες αποκλίσεις σχεδόν σε όλα τα μεγέθη μεταξύ των δύο μεθόδων, επομένως, όπως και στην περίπτωση του μοντέλου με έναν άξονα, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των μεθόδων με βάση τις επιδόσεις από τον κατασκευαστή.

Υπολογιστική Μεθοδος		Επιδόσεις LM 2500 (κατασκευαστής)		Αποκλίσεις επιδόσεων κατασκευαστή - υπολογιστικής μεθόδου (%)	
<i>Wk (kW)</i>	26877.548	<i>Wk (kW)</i>	25060	<i>dWk</i>	7.253
<i>nθ</i>	0.378	<i>nθ</i>	0.347	<i>dnθ</i>	8.849
<i>sfc (kg/kWh)</i>	0.196	<i>sfc (kg/kWh)</i>	0.2269	<i>dsfc</i>	13.603
<i>mg</i>	70.431	<i>mg</i>	70.3	<i>dmg</i>	0.186
<i>Texh (K)</i>	775.742	<i>Texh (K)</i>	839.15	<i>dTexh</i>	7.556

Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα και αποκλίσεις μεταξύ υπολογιστικής μεθόδου και επιδόσεων πραγματικού κύκλου.

Επαναλαμβάνοντας την διαδικασία σύγκρισης με την μέγιστη (M) και την μέση (A) τιμή των αποκλίσεων, προκειμένου να αποφανθούμε ποια μέθοδος εκ των δύο προσεγγίζει καλύτερα τις επιδόσεις του πραγματικού κύκλου, τα αποτελέσματα είναι τα εξής (χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η παροχή μάζας καυσαερίων):

	Αποκλίσεις - μέθοδος <i>Amesim</i> (%)	Αποκλίσεις - μέθοδος υπολογισμών (%)
<i>dWk</i>	4.227	7.253
<i>dnθ</i>	0.922	8.849
<i>dsfc</i>	5.068	13.603
<i>dmg</i>	0.000	0.186
<i>dTexh</i>	2.593	7.556
<i>M</i>	5.068	13.603
<i>A</i>	2.562	7.489
<i>A+M</i>	7.630	21.092

Πίνακας 5.8: Ποσοστιαίες διαφορές μεθόδου υπολογισμών – *Amesim* – Πραγματικών επιδόσεων.

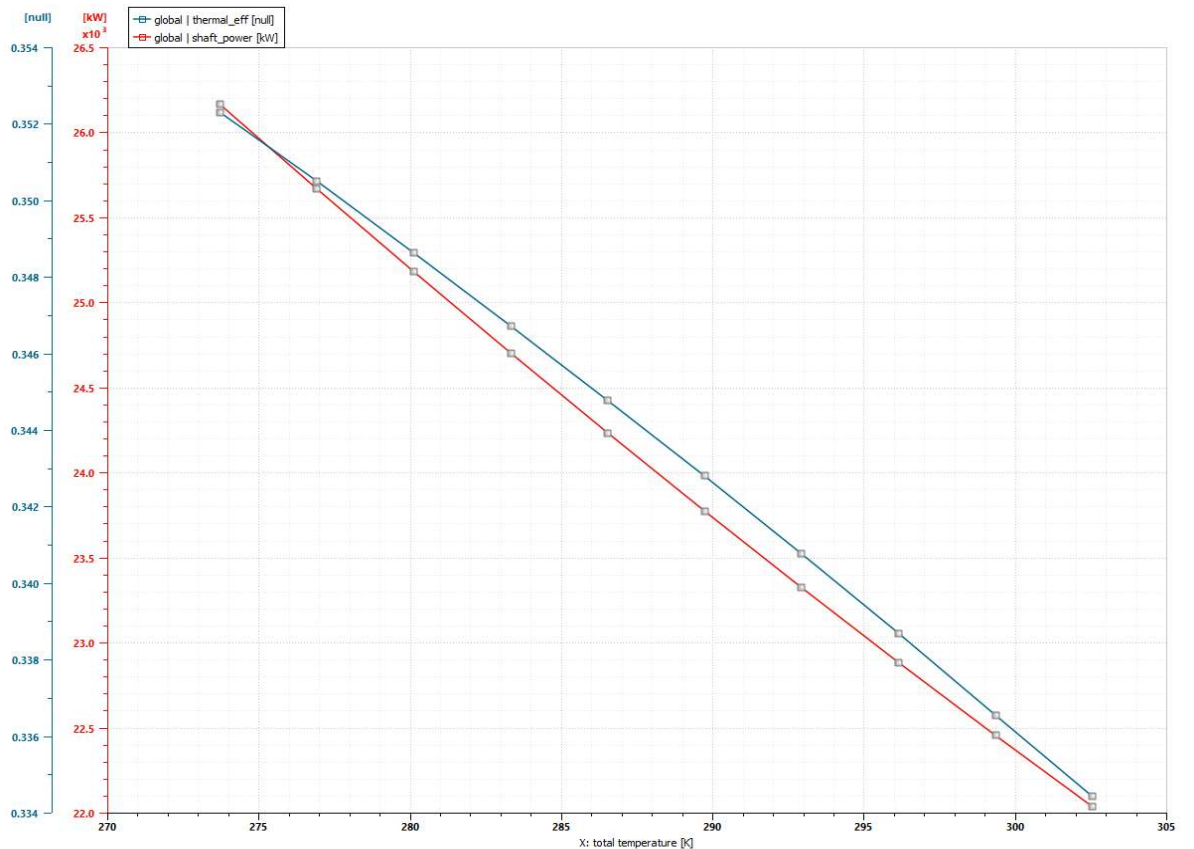
Τελικώς, όπως και στην περίπτωση αεριοστροβίλου ενός άξονα, προκύπτει ότι το λογισμικό *Amesim* εξάγει περισσότερο αξιόπιστα αποτελέσματα, τα οποία προσεγγίζουν καλύτερα τις επιδόσεις του μοντέλου *LM 2500* στην πραγματικότητα.

5.2 Ανάλυση ευαισθησίας

Αντίστοιχα με την περίπτωση στο μοντέλο αεριοστροβίλου ενός άξονα, θα πραγματοποιηθεί ανάλυση ευαισθησίας και στο μοντέλο δύο αξόνων, προκειμένου να αποφανθούμε ποια παράμετρος επιδρά περισσότερο στις επιδόσεις του κύκλου, συγκεκριμένα στο καθαρό ειδικό έργο *Wk* και στον θερμικό βαθμό απόδοσης *nθ*. Με την βοήθεια της επιλογής «1 way parameters» του λογισμικού *Amesim*, καθορίζεται η μεταβολή των επιδόσεων κατά την ποσοστιαία μεταβολή ορισμένων παραμέτρων του κύκλου. Όπως και στην περίπτωση του προηγούμενου μοντέλου αεριοστροβίλου, η κόκκινη καμπύλη στο γράφημα του λογισμικού αναφέρεται στο καθαρό ειδικό έργο *Wk*, ενώ η μπλε καμπύλη αναφέρεται στην μεταβολή του θερμικού βαθμού απόδοσης *nθ*.

5.2.1 Επίδραση θερμοκρασίας περιβάλλοντος στις επιδόσεις

Για δεδομένη αυξομείωση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος κατά 5 ποσοστιαίες μονάδες, η μεταβολή του ειδικού έργου και του θερμικού βαθμού απόδοσης παρουσιάζεται αναλυτικά στους παρακάτω πίνακες και στο γράφημα που ακολουθεί.



Σχήμα 5.1: Μεταβολή Wk και $n\theta$ σε συνάρτηση με την T_{amb} (K).

	Μεταβολή T_{amb}	Wk (kW)	$n\theta$
Κάτω άκρο Κ (-5%)	273.7	26167.74	0.352317
Ονομαστική τιμή παραμέτρου (Ο)	288.15	24000.8	0.3438
Άνω άκρο Α (+5%)	302.55	22037.38	0.334431

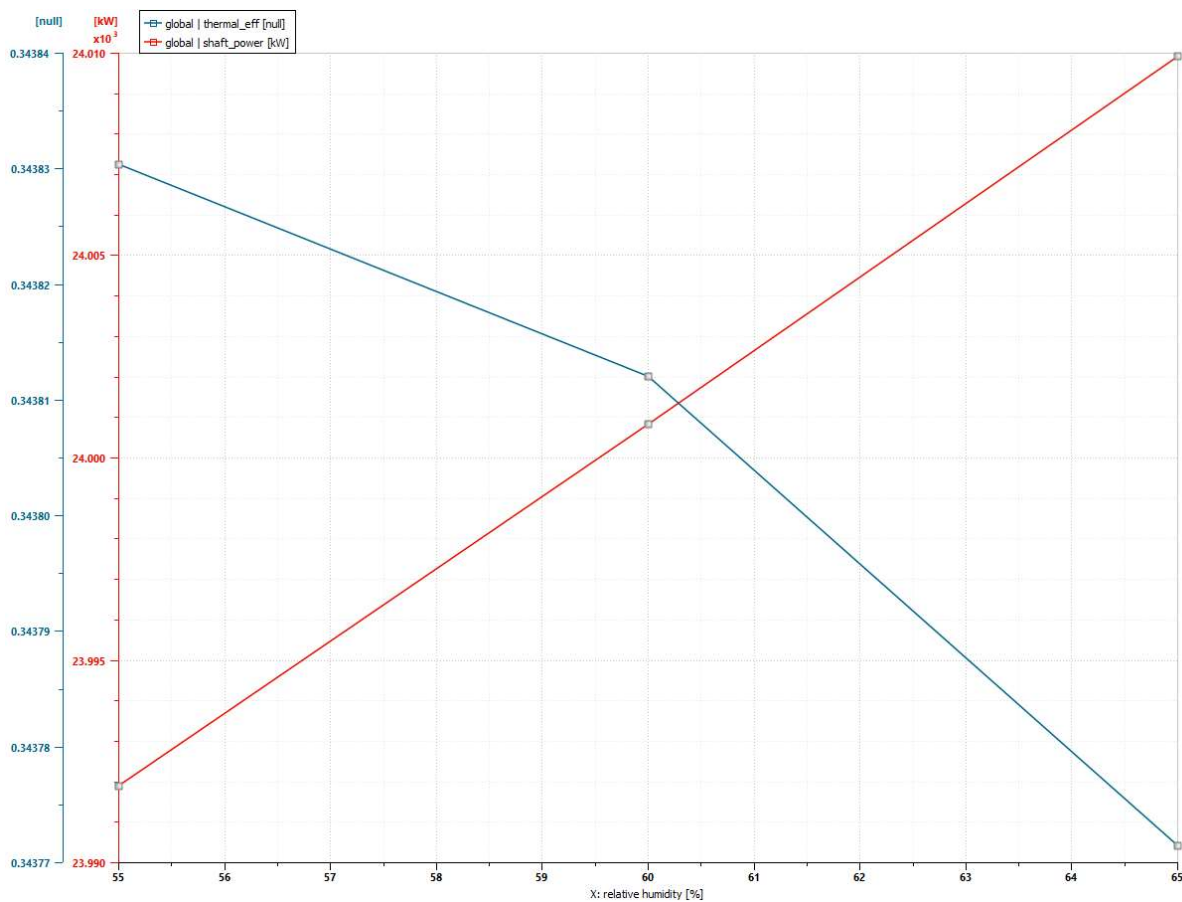
Αποκλίσεις άκρων από ονομαστική τιμή (%)			
$\Delta Wk(K) =$	9.029	$\Delta n\theta(K) =$	2.477
$\Delta Wk(A) =$	-8.181	$\Delta n\theta(A) =$	-2.725

Όπως συμβαίνει και στην περίπτωση του ενός άξονα, αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος οδηγεί σε σημαντική μείωση του καθαρού ειδικού έργου και του βαθμού

απόδοσης. Αυτό μπορεί να επιβεβαιωθεί από τις τιμές και τις ποσοστιαίες αποκλίσεις των μεγεθών στους προηγούμενους πίνακες.

5.2.2 Επίδραση σχετικής υγρασίας στις επιδόσεις

Αντίστοιχα με την μεταβολή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας με μεταβαλλόμενο παράγοντα την σχετική υγρασία. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης από το λογισμικό παρουσιάζονται στο παρακάτω γράφημα και στους πίνακες που ακολουθούν.



Σχήμα 5.2: Μεταβολή W_k και $n\theta$ σε συνάρτηση με την RH .

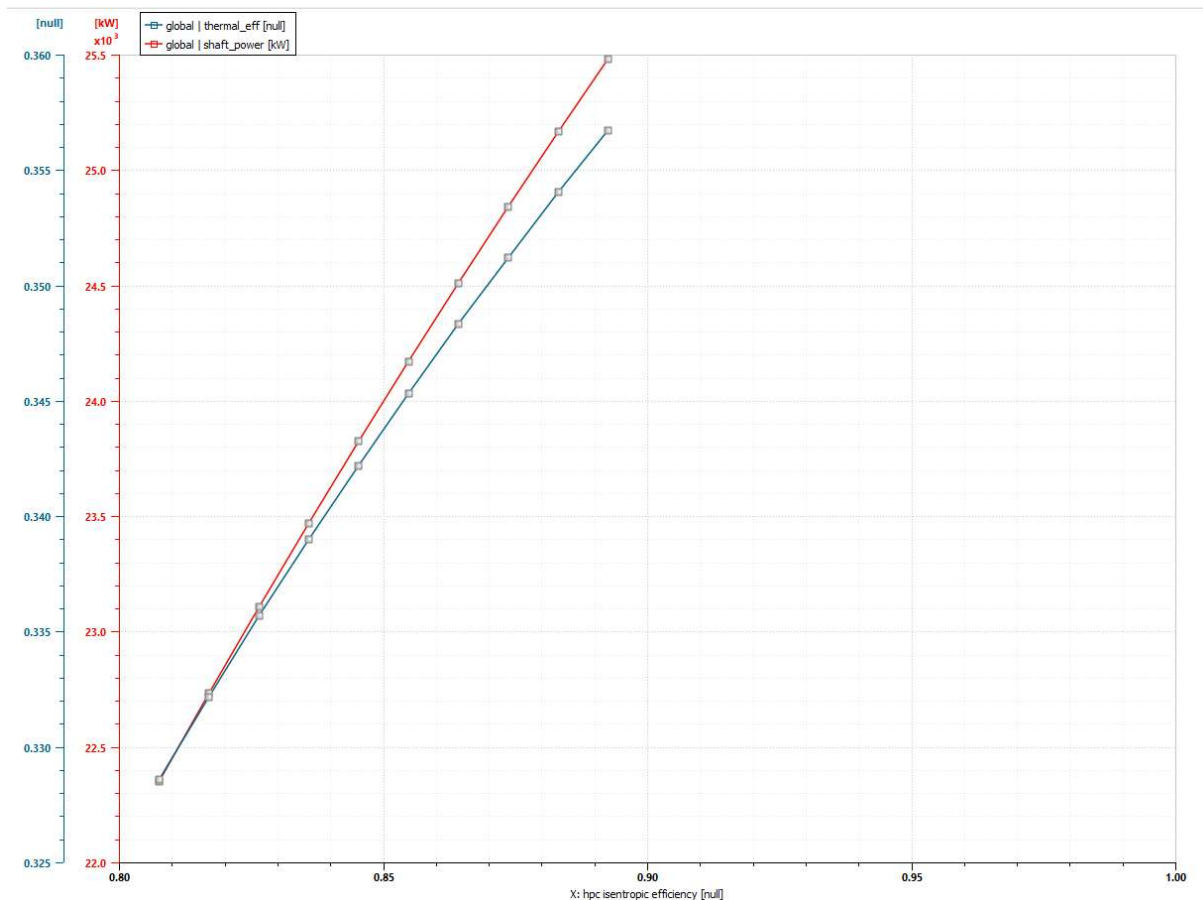
	Μεταβολή RH (%)	W_k (kW)	$n\theta$
Κάτω άκρο Κ (-5%)	55	23991.9	0.34383
Ονομαστική τιμή παραμέτρου (Ο)	60	24000.8	0.3438
Άνω άκρο Α (+5%)	65	24009.92	0.34377

Αποκλίσεις άκρων από ονομαστική τιμή (%)			
$\Delta Wk(K) =$	-0.037	$\Delta \eta\theta(K) =$	0.009
$\Delta Wk(A) =$	0.038	$\Delta \eta\theta(A) =$	-0.008

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δείχνουν ότι η αύξηση της σχετικής υγρασίας, οδηγεί σε αύξηση του καθαρού ειδικού έργου, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται ο θερμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου. Βέβαια, όπως φαίνεται και από τους παραπάνω πίνακες, οι ποσοστιαίες μεταβολές των επιδόσεων είναι αρκετά μικρές, κάτι που σημαίνει ότι η σχετική υγρασία δεν επηρεάζει σημαντικά τις επιδόσεις του αεριοστροβίλου.

5.2.3 Επίδραση ισεντροπικού βαθμού απόδοσης συμπίεστη στις επιδόσεις

Μεταβάλλοντας κατά 5% τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης συμπίεστη $\eta_{is,c}$ (αύξηση και μείωση), τα αποτελέσματα και η μεταβολή στις επιδόσεις του αεριοστροβίλου δύο αξόνων παρουσιάζονται παρακάτω:



Σχήμα 5.3: Μεταβολή Wk και $\eta\theta$ σε συνάρτηση με τον $\eta_{is,c}$.

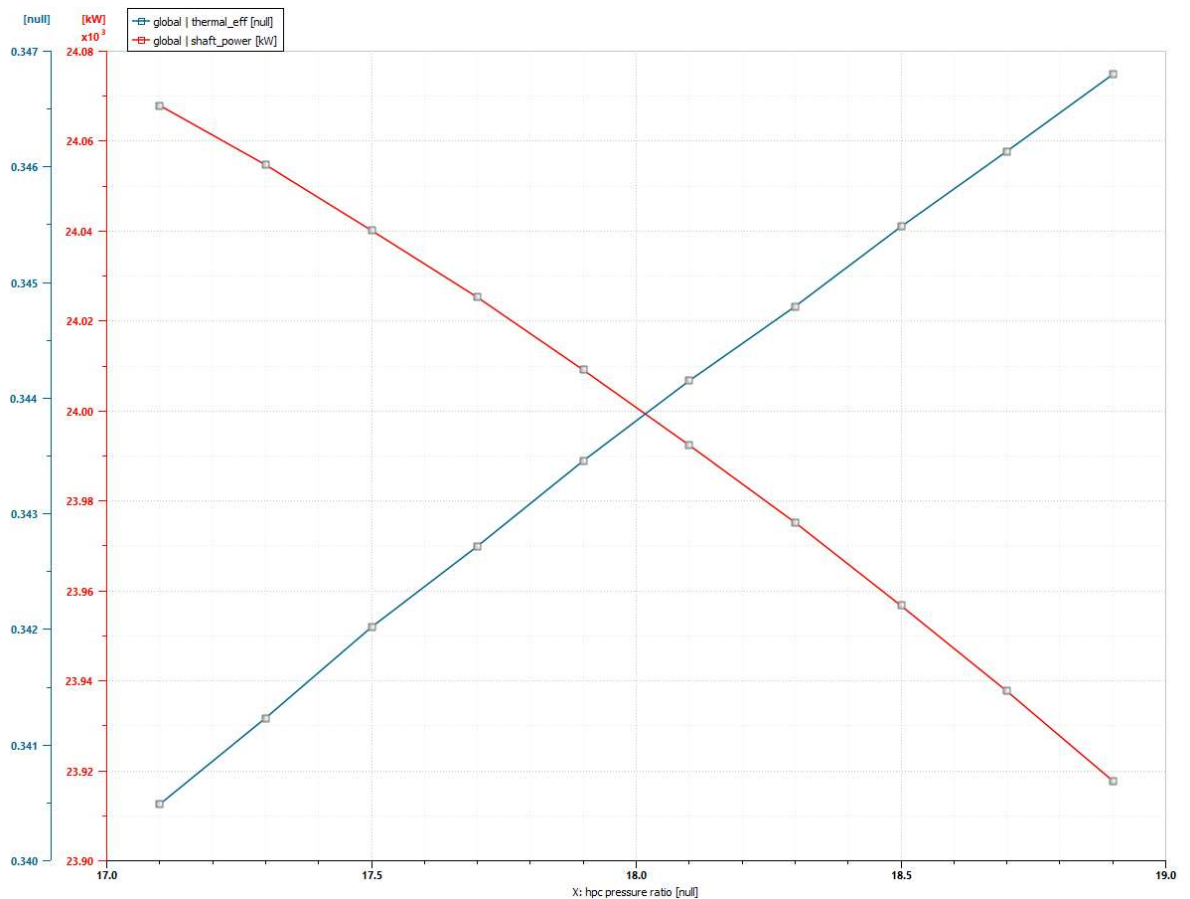
	Μεταβολή $\eta_{is,c}$	Wk (kW)	$\eta\theta$
Κάτω άκρο Κ (-5%)	0.8075	22352.87	0.328608
Ονομαστική τιμή παραμέτρου (Ο)	0.85	24000.8	0.3438
Άνω άκρο Α (+5%)	0.8925	25483.7	0.356745

Αποκλίσεις άκρων από ονομαστική τιμή (%)			
$\Delta Wk(K) =$	-6.866	$\Delta \eta\theta(K) =$	-4.419
$\Delta Wk(A) =$	6.179	$\Delta \eta\theta(A) =$	3.765

Το συμπέρασμα που προκύπτει από το παραπάνω γράφημα και από τους πίνακες, είναι η αύξηση του ειδικού έργου και του θερμικού βαθμού απόδοσης με την αύξηση του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης συμπιεστή. Συγκεκριμένα, για 5% μείωση του $\eta_{is,c}$ το ειδικό έργο Wk μειώνεται κατά περίπου 6.9% και ο βαθμός απόδοσης του κύκλου κατά 4.4 %. Αντίστοιχα, για 5% αύξηση του $\eta_{is,c}$, παρατηρείται αύξηση του ειδικού έργου κατά 6.2 % και αύξηση θερμικού βαθμού απόδοσης κατά 3.7 %.

5.2.4 Επίδραση λόγου πίεσης συμπιεστή στις επιδόσεις

Για δεδομένη αύξηση και μείωση του λόγου πίεσης συμπιεστή p_c κατά 5%, η μεταβολή των επιδόσεων του κύκλου παρουσιάζεται παρακάτω ως εξής:



Σχήμα 5.4: Μεταβολή Wk και $n\theta$ σε συνάρτηση με τον pc .

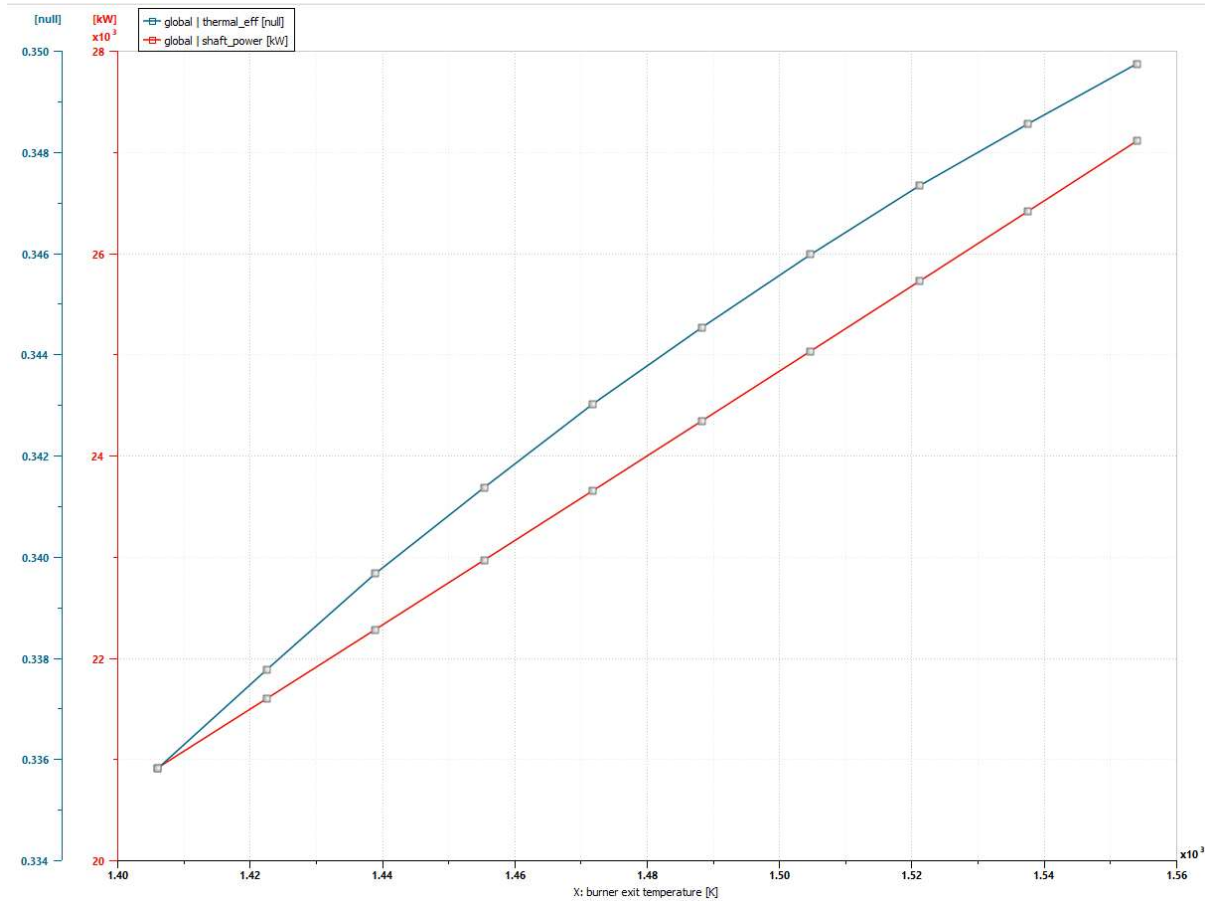
Όπως φαίνεται και από το παραπάνω γράφημα, αύξηση του λόγου πίεσης συμπιεστή pc οδηγεί σε μείωση του καθαρού ειδικού έργου Wk , ωστόσο αυξάνεται ο θερμικός βαθμός απόδοσης $n\theta$. Από τους παρακάτω πίνακες, προκύπτει ότι η μεταβολή του λόγου πίεσης συμπιεστή pc δεν επιδρά σημαντικά στις επιδόσεις του κύκλου, καθώς οι ποσοστιαίες μεταβολές είναι αρκετά μικρές που μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες.

	Μεταβολή pc	Wk (kW)	$n\theta$
Κάτω άκρο K (-5%)	17.1	24067.94	0.340488
Ονομαστική τιμή παραμέτρου (O)	18	24000.8	0.3438
Άνω άκρο A (+5%)	18.9	23917.76	0.346799

Αποκλίσεις άκρων από ονομαστική τιμή (%)			
$\Delta Wk(K) =$	0.280	$\Delta n\theta(K) =$	-0.963
$\Delta Wk(A) =$	-0.346	$\Delta n\theta(A) =$	0.872

5.2.5 Επίδραση μέγιστης θερμοκρασίας T_{max} στις επιδόσεις

Από την ανάλυση ευαισθησίας με μεταβαλλόμενη παράμετρο την θερμοκρασία εξόδου από τον θάλαμο καύσης (T_{max} ή T_4), προκύπτουν τα εξής:



Σχήμα 5.5: Μεταβολή Wk και $n\theta$ συναρτήσει της T_{max} (K).

	Μεταβολή T_{max}	Wk (kW)	$n\theta$
Κάτω άκρο Κ (-5%)	1406	20916.59	0.335819
Ονομαστική τιμή παραμέτρου (Ο)	1480	24000.8	0.3438
Άνω άκρο Α (+5%)	1554	27113.91	0.349753

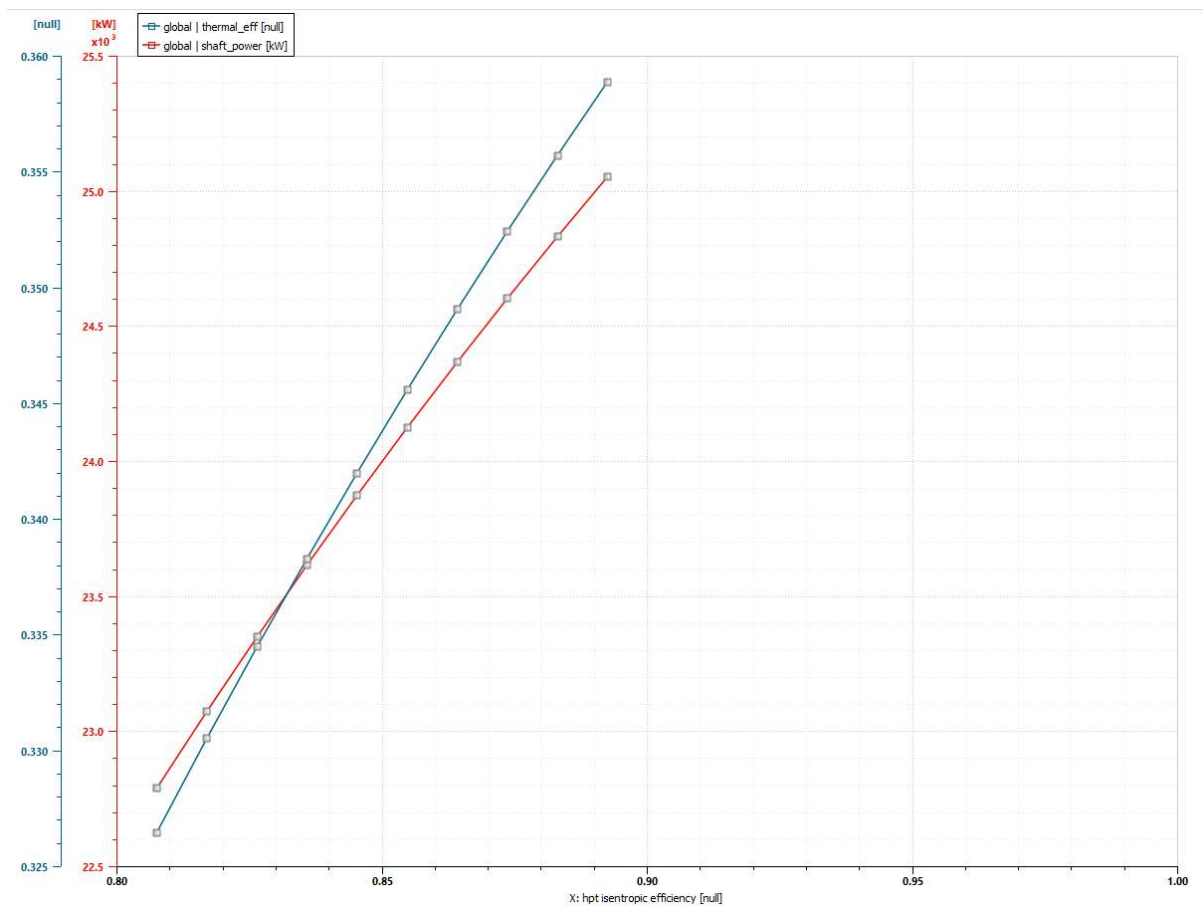
Αποκλίσεις άκρων από ονομαστική τιμή (%)			
$\Delta Wk(K) =$	-12.850	$\Delta n\theta(K) =$	-2.321
$\Delta Wk(A) =$	12.971	$\Delta n\theta(A) =$	1.732

Σύμφωνα με τα γραφήματα και τους παραπάνω πίνακες, παρατηρείται μία αυξητική τάση στις επιδόσεις του αεριοστροβίλου, αυξάνοντας την θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από τον

θάλαμο καύσης T_{max} . Επιπλέον, θεωρείται σημαντική παράμετρος καθώς οι αποκλίσεις των επιδόσεων από την ονομαστική τους τιμή έχουν σχετικά μεγάλες ποσοστιαίες τιμές.

5.2.6 Επίδραση ισεντροπικού βαθμού απόδοσης στροβίλου υψηλής πίεσης (*hpt*) στις επιδόσεις

Ένας ακόμη παράγοντας που επιδρά στις επιδόσεις του αεριοστροβίλου είναι ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του στροβίλου υψηλής πίεσης (*high pressure turbine*), εφόσον η εγκατάσταση διαθέτει δύο άξονες, άρα δύο στροβίλους. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας με μεταβαλλόμενη παράμετρο τον βαθμό απόδοσης στροβίλου υψηλής πίεσης, *n_{is,hpt}*, παρουσιάζονται παρακάτω:



Σχήμα 5.6: Μεταβολή Wk και $n\theta$ συναρτήσει του $n_{is,hpt}$.

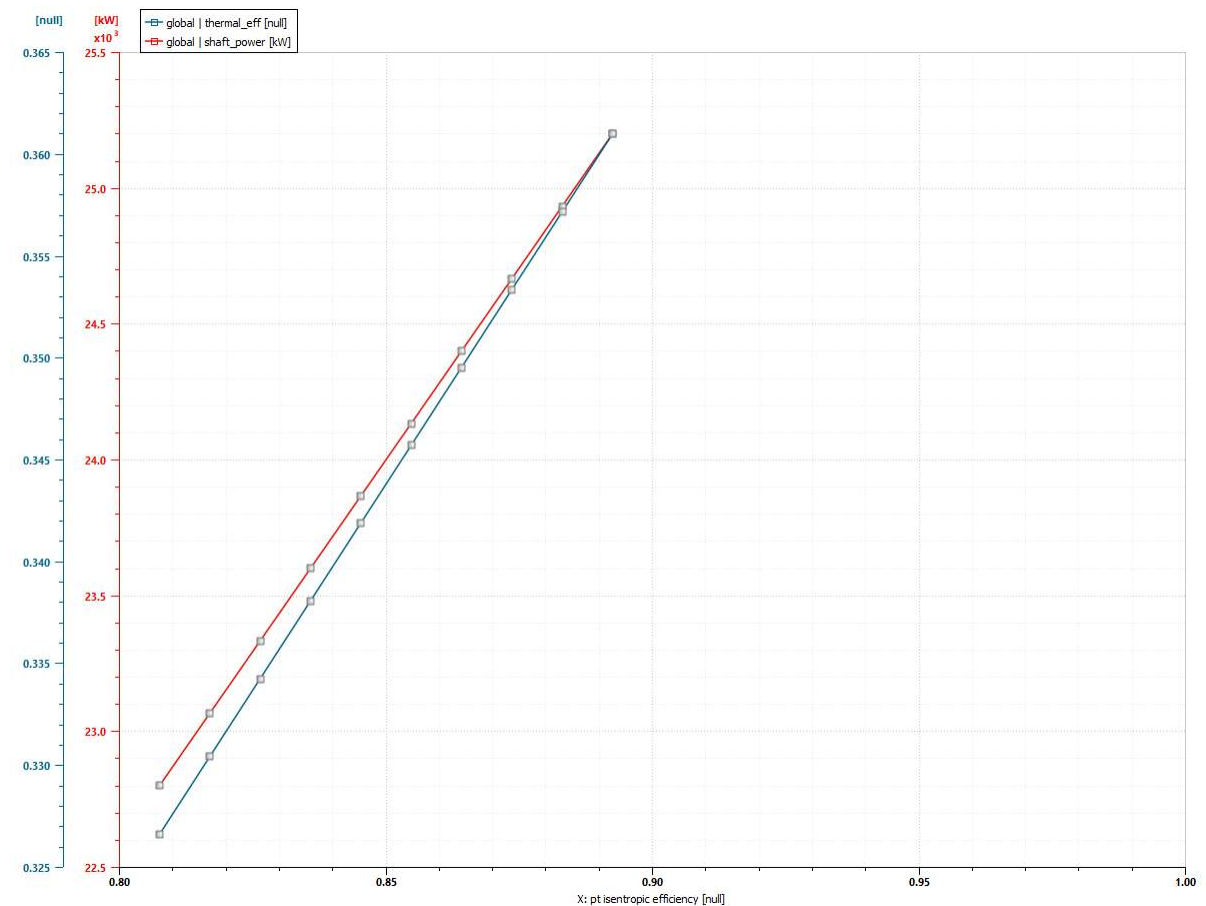
	Μεταβολή $n_{is,hpt}$	Wk (kW)	$n\theta$
Κάτω άκρο Κ (-5%)	0.8075	22790.09	0.326468
Ονομαστική τιμή παραμέτρου (Ο)	0.85	24000.8	0.3438
Άνω άκρο Α (+5%)	0.8925	25054.25	0.358902

Αποκλίσεις άκρων από ονομαστική τιμή (%)			
$\Delta Wk(K) =$	-5.044	$\Delta n\theta(K) =$	-5.041
$\Delta Wk(A) =$	4.389	$\Delta n\theta(A) =$	4.393

Πιο συγκεκριμένα, αύξηση του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης στροβίλου υψηλής πίεσης, αυξάνει τόσο το καθαρό ειδικό έργο Wk , όσο και τον θερμικό βαθμό απόδοσης $n\theta$, με σημαντικές ποσοστιαίες αποκλίσεις από τις ονομαστικές τιμές.

5.2.7 Επίδραση ισεντροπικού βαθμού απόδοσης στροβίλου ισχύος (ρt) στις επιδόσεις

Όσον αφορά τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης στροβίλου ισχύος, η ανάλυση ευαισθησίας παρουσιάζεται στο παρακάτω γράφημα και στους πίνακες που ακολουθούν.



Σχήμα 5.7: Μεταβολή Wk και $n\theta$ συναρτήσει του nis,pt .

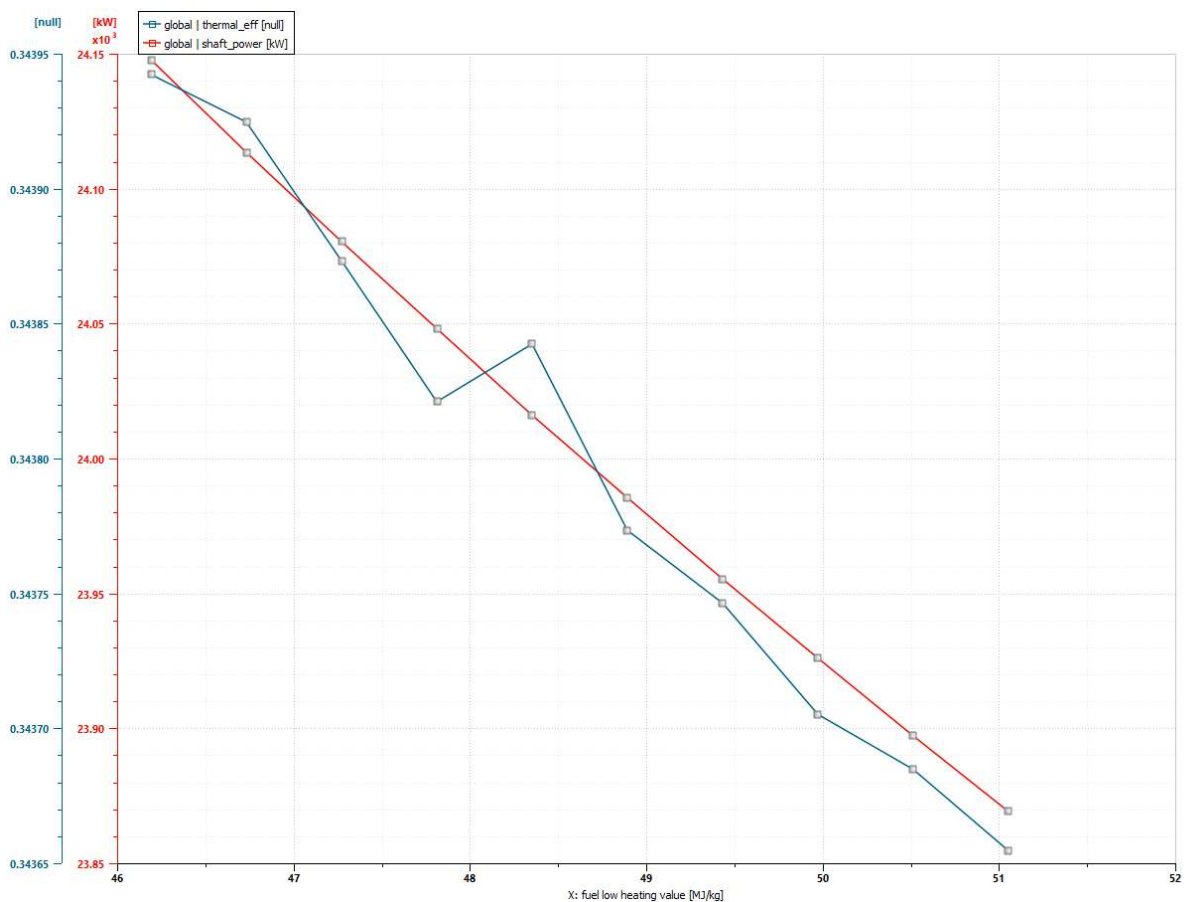
	Μεταβολή nis,pt	Wk (kW)	$n\theta$
Κάτω άκρο K (-5%)	0.8075	22800.79	0.326622
Ονομαστική τιμή παραμέτρου (O)	0.85	24000.8	0.3438
Άνω άκρο A (+5%)	0.8925	25200.88	0.361003

Αποκλίσεις άκρων από ονομαστική τιμή (%)			
$\Delta Wk(K) =$	-5.000	$\Delta \eta\theta(K) =$	-4.997
$\Delta Wk(A) =$	5.000	$\Delta \eta\theta(A) =$	5.004

Όπως συμβαίνει και με τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης στροβίλου υψηλής πίεσης, αύξηση του $\eta_{is,pt}$ συνεπάγεται αύξηση του καθαρού ειδικού έργου Wk και του θερμικού βαθμού απόδοσης, με σημαντικές ποσοστιαίες αποκλίσεις από τις ονομαστικές τιμές.

5.2.8 Επίδραση κατώτερης θερμογόνου δύναμης LHV στις επιδόσεις.

Τέλος, όπως και στην περίπτωση του απλού αεριοστροβίλου, μελετήθηκε η επίδραση της μεταβολής της θερμογόνου δύναμης LHV στις επιδόσεις του αεριοστροβίλου δύο αξόνων, όπως φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 5.8: Μεταβολή Wk και $\eta\theta$ συναρτήσει της LHV .

	Μεταβολή LHV (MJ/kg)	Wk (kW)	$\eta\theta$
Κάτω άκρο Κ (-5%)	46.189	24147.93	0.343943
Ονομαστική τιμή παραμέτρου (Ο)	48.62	24000.8	0.3438
Άνω άκρο Α (+5%)	51.051	23869.37	0.343655

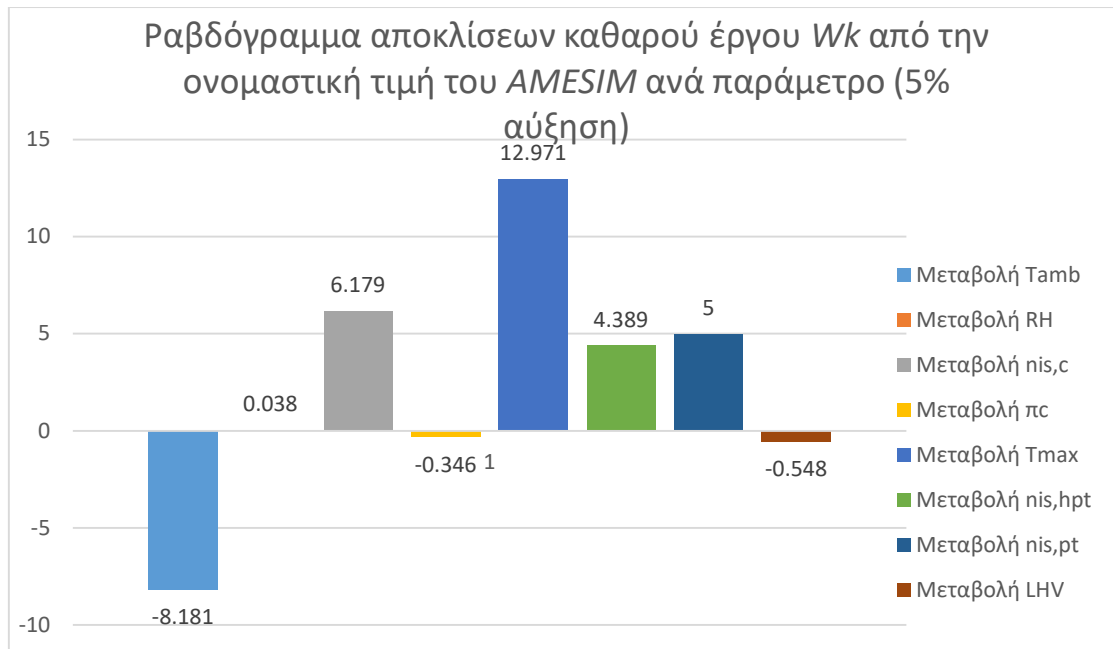
Αποκλίσεις άκρων από ονομαστική τιμή (%)			
$\Delta Wk(K) =$	0.613	$\Delta \eta\theta(K) =$	0.041
$\Delta Wk(A) =$	-0.548	$\Delta \eta\theta(A) =$	-0.042

Σύμφωνα με το διάγραμμα που προέκυψε από το λογισμικό *Amesim*, αύξηση της LHV προκαλεί μείωση του καθαρού ειδικού έργου Wk , ωστόσο ο θερμικός βαθμός απόδοσης παρουσιάζει διακυμάνσεις. Επιπλέον, οι αποκλίσεις των επιδόσεων από τις ονομαστικές τιμές μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες για 5% αυξομείωση της LHV , επομένως η επίδραση του συγκεκριμένου παράγοντα στις επιδόσεις του κύκλου δεν θεωρείται σημαντική.

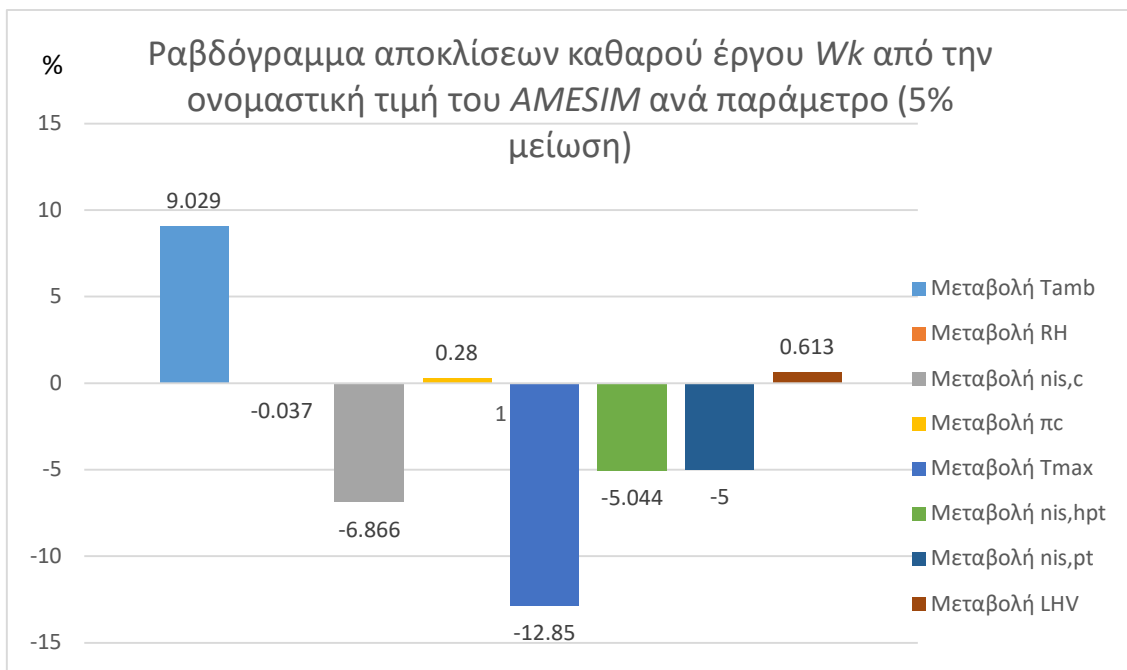
Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας ως προς το καθαρό ειδικό έργο Wk , σε πίνακες και ραβδογράμματα, για μοντέλο αεριοστροβίλου δύο αξόνων.

Παράμετρος		
	+5.00%	-5.00%
Αύξηση/Μείωση Παραμέτρου	+5.00%	-5.00%
	Μεταβολή Wk (%)	
T_{amb}	-8.181	9.029
RH	0.038	-0.037
$\eta_{is,c}$	6.179	-6.866
π_c	-0.346	0.28
T_{max}	12.971	-12.85
$\eta_{is,hpt}$	4.389	-5.044
$\eta_{is,pt}$	5	-5
LHV	-0.548	0.613

Πίνακας 5.9: Ποσοστιαία μεταβολή Wk συναρτήσει των παραμέτρων.



Διάγραμμα 5.1: Αποκλίσεις W_k από την ονομαστική τιμή ανά παράμετρο (5% αύξηση).



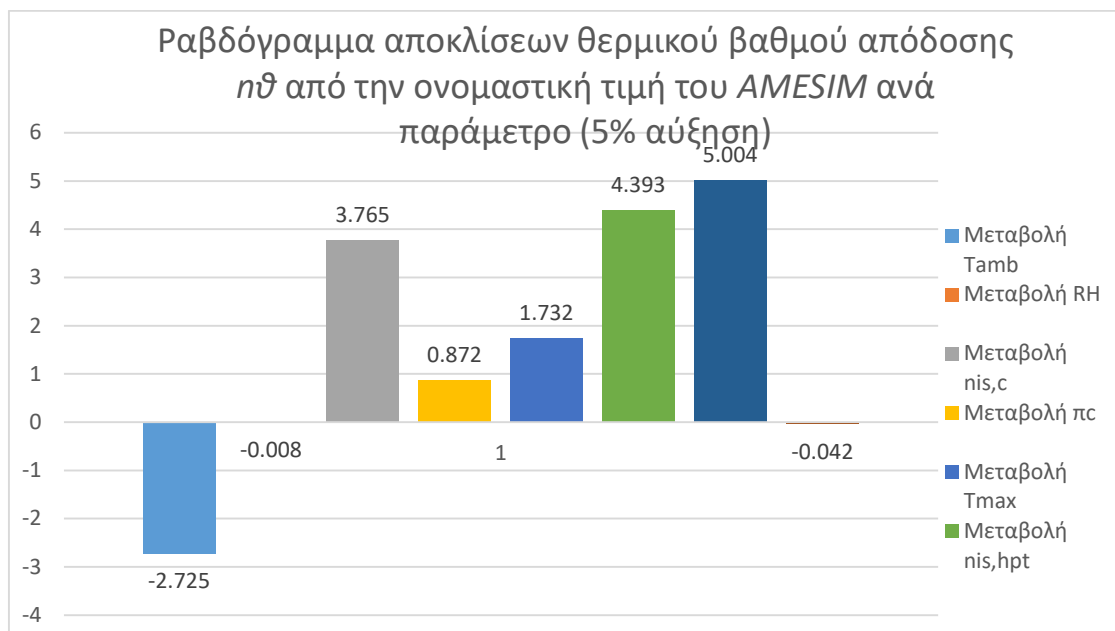
Διάγραμμα 5.2: Αποκλίσεις W_k από την ονομαστική τιμή ανά παράμετρο (5% μείωση).

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα και με τα ραβδογράμματα, στην περίπτωση του κύκλου αεριοστροβίλου με δύο άξονες, προκύπτει ότι οι παράμετροι που επιδρούν περισσότερο στην μεταβολή του καθαρού ειδικού έργου είναι η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου T_{max} , η θερμοκρασία περιβάλλοντος T_{amb} και ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του συμπιεστή $n_{is,c}$. Αντίθετα, οι παράμετροι που έχουν την μικρότερη επίδραση στο καθαρό ειδικό έργο είναι ο λόγος πίεσης συμπιεστή pc , η σχετική υγρασία RH και η κατώτερη θερμογόνος δύναμη LHV .

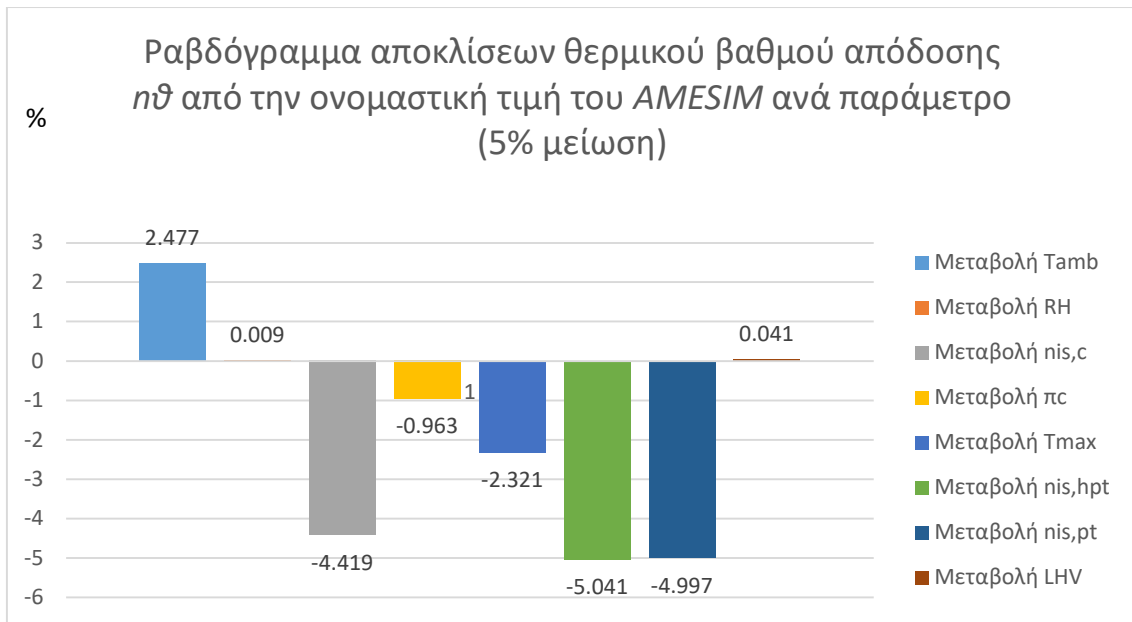
Εν συνεχεία παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας ως προς τον θερμικό βαθμό απόδοσης $\eta\theta$ σε πίνακες και ραβδογράμματα.

Παράμετρος		
Αύξηση/Μείωση Παραμέτρου	+5.00%	-5.00%
	Μεταβολή $\eta\theta$ (%)	
T_{amb}	-2.725	2.477
RH	-0.008	0.009
$\eta_{is,c}$	3.765	-4.419
πc	0.872	-0.963
T_{max}	1.732	-2.321
$\eta_{is,hpt}$	4.393	-5.041
$\eta_{is,pt}$	5.004	-4.997
LHV	-0.042	0.041

Πίνακας 5.10: Ποσοστιαία μεταβολή $\eta\theta$ συναρτήσει των παραμέτρων.



Διάγραμμα 5.3: Αποκλίσεις $\eta\theta$ από την ονομαστική τιμή ανά παράμετρο (5% αύξηση).



Διάγραμμα 5.4: Αποκλίσεις $n\theta$ από την ονομαστική τιμή ανά παράμετρο (5% μείωση).

Από τα προηγούμενα, προκύπτει ότι οι παράμετροι που επιδρούν περισσότερο στην μεταβολή του θερμικού βαθμού απόδοσης $n\theta$, είναι η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου T_{max} , καθώς και οι βαθμοί απόδοσης των δύο στροβίλων, $n_{is,hpt}$ και $n_{is,pt}$. Αντίθετα, η σχετική υγρασία RH και η κατώτερη θερμογόνος δύναμη LHV , έχουν ελάχιστη επίδραση στην μεταβολή του θερμικού βαθμού απόδοσης, όπως και στην περίπτωση του αεριοστροβίλου ενός άξονα.

5.3 Συμπεράσματα

Ύστερα από την μελέτη του μοντέλου αεριοστροβίλου δύο αξόνων στο λογισμικό *Amesim* και την δοκιμή της υπολογιστικής μεθόδου, προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα, τα οποία παρουσιάζονται συνοπτικά στους παρακάτω πίνακες:

Υπολογιστική Μέθοδος		Μέθοδος Λογισμικού <i>Amesim</i>		Επιδόσεις LM 2500 (κατασκευαστής)	
Wk (kW)	26877.548	Wk (kW)	24000.8	Wk (kW)	25060
$n\theta$	0.378	$n\theta$	0.3438	$n\theta$	0.347
sfc (kg/kWh)	0.196	sfc (kg/kWh)	0.2154	sfc (kg/kWh)	0.2269
mg	70.431	mg	70.3	mg	70.3
T_{exh} (K)	775.742	T_{exh} (K)	860.9091	T_{exh} (K)	839.15

Πίνακας 5.11: Αποτελέσματα υπολογιστικής μεθόδου, *Amesim* και πραγματικές επιδόσεις.

Αποκλίσεις υπολογιστικής μεθόδου - <i>Amesim</i> (%)		Αποκλίσεις επιδόσεων κατασκευαστή - υπολογιστικής μεθόδου (%)		Αποκλίσεις <i>Amesim</i> - Επιδόσεων κατασκευαστή (%)	
<i>dWk</i>	10.703	<i>dWk</i>	7.253	<i>dWk</i>	4.227
<i>dnθ</i>	8.977	<i>dnθ</i>	8.849	<i>dnθ</i>	0.922
<i>dsfc</i>	9.878	<i>dsfc</i>	13.603	<i>dsfc</i>	5.068
<i>dmg</i>	0.186	<i>dmg</i>	0.186	<i>dmg</i>	0.000
<i>dTexh</i>	10.979	<i>dTexh</i>	7.556	<i>dTexh</i>	2.593

Πίνακας 5.12: Αποκλίσεις μεθόδων – επιδόσεων.

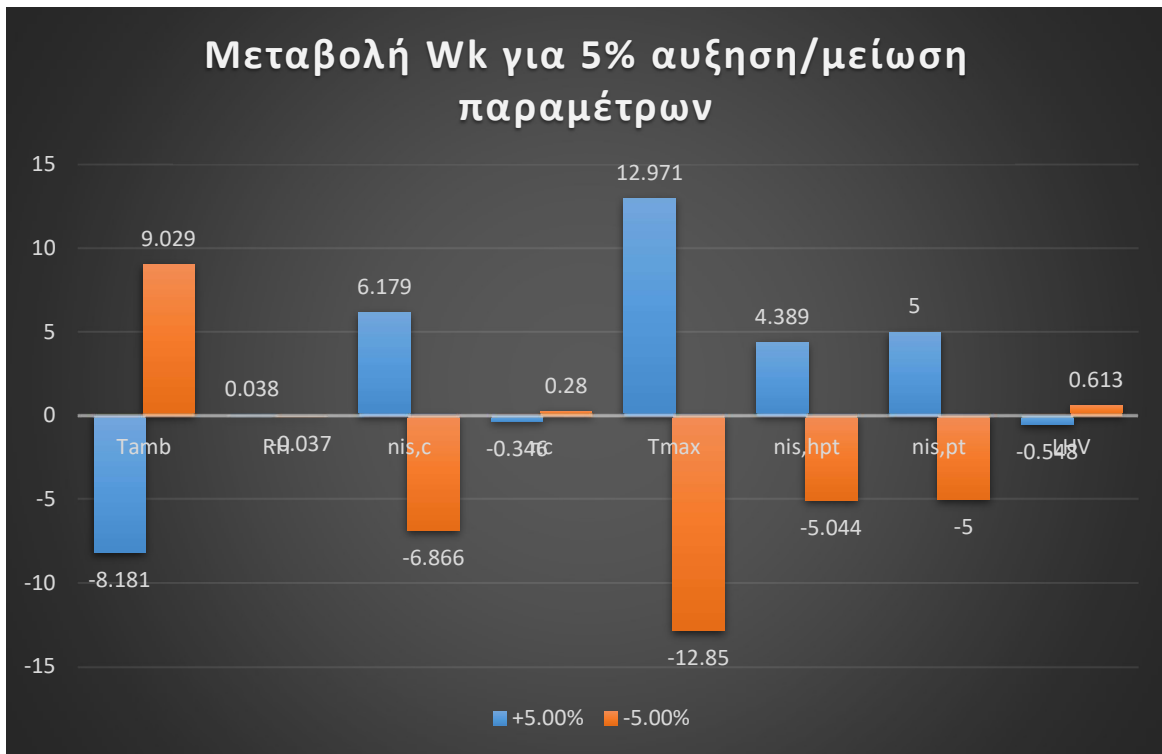
Τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι τα εξής:

- Αντίστοιχα με την περίπτωση του ενός άξονα, η χρήση του *Amesim* προσεγγίζει με εμφανώς καλύτερο τρόπο τις επιδόσεις του πραγματικού κύκλου αεριοστροβίλου *LM 2500*, σε σχέση με την υπολογιστική μέθοδο.
- Συγκεκριμένα, στην μέθοδο με χρήση *Amesim*, ο βαθμός απόδοσης που προέκυψε είναι αρκετά κοντά με τον αντίστοιχο του πραγματικού αεριοστροβίλου.
- Εκτός από την παροχή μάζας καυσαερίων, τα υπόλοιπα μεγέθη έχουν αρκετά μεγάλη απόκλιση σε σχέση με τα αντίστοιχα του πραγματικού αεριοστροβίλου, στην υπολογιστική μέθοδο (από περίπου 7% και άνω).

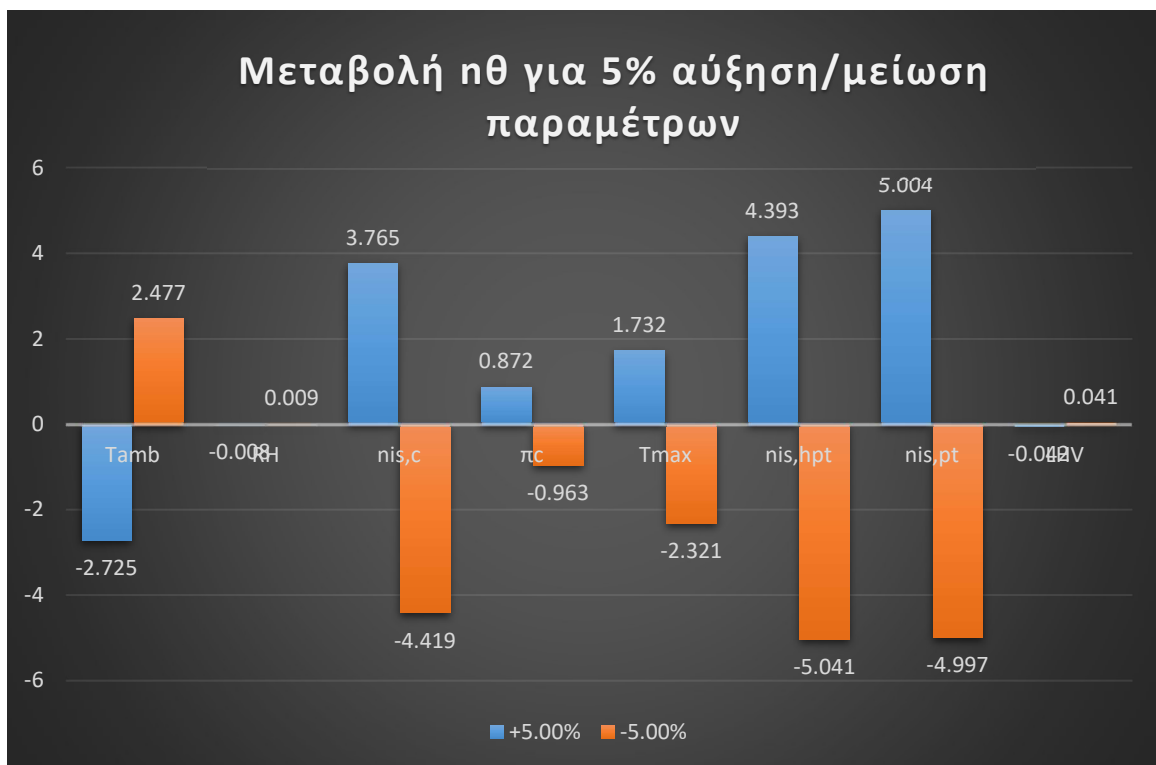
Όσον αφορά την ανάλυση ευαισθησίας, τα αποτελέσματα συνοψίζονται στους παρακάτω πίνακες και διαγράμματα.

Παράμετρος Αύξηση/Μείωση Παραμέτρου				
	+5.00%	-5.00%	+5.00%	-5.00%
	Μεταβολή <i>Wk</i> (%)		Μεταβολή <i>nθ</i> (%)	
<i>Tamb</i>	-8.181	9.029	-2.725	2.477
<i>RH</i>	0.038	-0.037	-0.008	0.009
<i>nis,c</i>	6.179	-6.866	3.765	-4.419
<i>πc</i>	-0.346	0.28	0.872	-0.963
<i>Tmax</i>	12.971	-12.85	1.732	-2.321
<i>nis,hpt</i>	4.389	-5.044	4.393	-5.041
<i>nis,pt</i>	5	-5	5.004	-4.997
<i>LHV</i>	-0.548	0.613	-0.042	0.041

Πίνακας 5.13: Ανάλυση ευαισθησίας.



Διάγραμμα 5.5: Ραβδόγραμμα μεταβολής Wk για 5% αύξηση/μείωση παραμέτρων.



Διάγραμμα 5.6: Ραβδόγραμμα μεταβολής nθ για 5% αύξηση/μείωση παραμέτρων.

Όσον αφορά το καθαρό ειδικό έργο Wk, παρατηρούνται τα εξής:

- Όπως και στον αεριοστρόβιλο ενός άξονα, περισσότερο επιδραστική παράμετρος στην μεταβολή του καθαρού ειδικού έργου φαίνεται ότι είναι η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου T_{max} . Συγκεκριμένα, για 5% αύξηση/μείωση της συγκεκριμένης παραμέτρου, το ειδικό έργο μεταβάλλεται κατά περίπου +/- 13%.
- Η αμέσως επόμενη παράμετρος που επιδρά εξίσου σημαντικά στο ειδικό έργο είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος T_{amb} , ενώ εξίσου σημαντικές παράμετροι κρίνονται οι βαθμοί απόδοσης των στροβίλων $n_{is,hpt}$ και $n_{is,pt}$ και του συμπιεστή $n_{is,c}$.
- Οι παράμετροι που επιδρούν λιγότερο στην μεταβολή του ειδικού έργου είναι η σχετική υγρασία RH , ο λόγος πίεσης pc και η κατώτερη θερμογόνος ικανότητα LHV (πρακτικά το καύσιμο που χρησιμοποιείται).

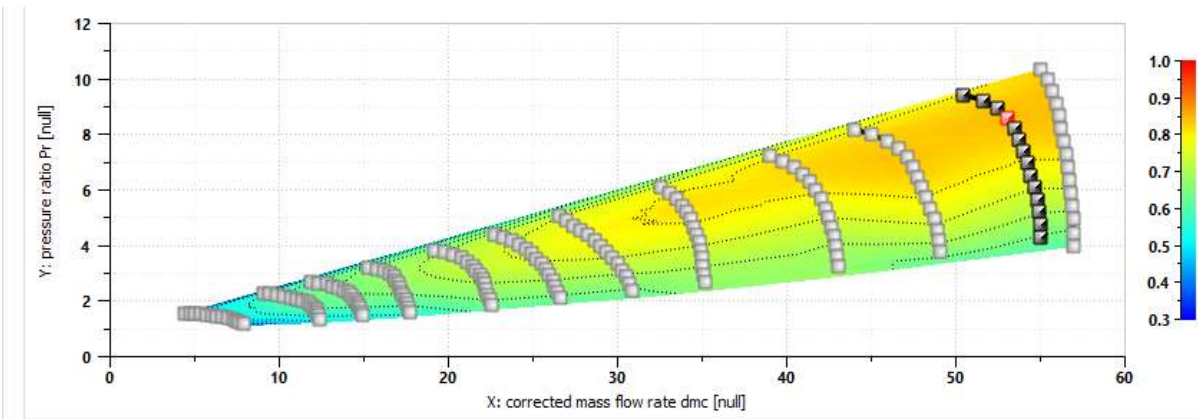
Όσον αφορά τον θερμικό βαθμό απόδοσης του κύκλου η_{th} , από τα ραβδογράμματα προκύπτουν οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

- Οι ισεντροπικοί βαθμοί απόδοσης των δύο στροβίλων $n_{is,hpt}$ και $n_{is,pt}$ επηρεάζουν σημαντικά τον θερμικό βαθμό απόδοσης του κύκλου.
- Από το παραπάνω ραβδόγραμμα φαίνεται επίσης ότι 5% αύξηση/μείωση του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης συμπιεστή $n_{is,c}$, συμβάλλει σε περίπου +/- 4% μεταβολή του η_{th} .
- Η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου T_{max} και η θερμοκρασία περιβάλλοντος T_{amb} , φαίνεται ότι δεν επιδρούν σημαντικά στην μεταβολή του θερμικού βαθμού απόδοσης η_{th} , όσο στο καθαρό ειδικό έργο W_k .
- Οι παράμετροι που επιδρούν λιγότερο στην μεταβολή του ειδικού έργου είναι η σχετική υγρασία RH , ο λόγος πίεσης pc και η κατώτερη θερμογόνος ικανότητα LHV .

6. Μελέτη *off design points* στο *Amesim* (2-shaft)

Στα κεφάλαια 4 και 5 πραγματοποιήθηκε η μελέτη μοντέλου αεριοστροβίλου ενός και δύο αξόνων στο λογισμικό *Amesim*. Συγκεκριμένα, έγινε προσπάθεια προσέγγισης των επιδόσεων του εμπορικού αεριοστροβίλου *LM 2500*, εκτενής μελέτη στο σημείο λειτουργίας (*design point*) και ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων. Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζεται η μελέτη και η συμπεριφορά του μοντέλου αεριοστροβίλου δύο αξόνων στο *Amesim* όσον αφορά την λειτουργία του εκτός του *design point*, σε διαφορετικές στροφές και παροχή μάζας.

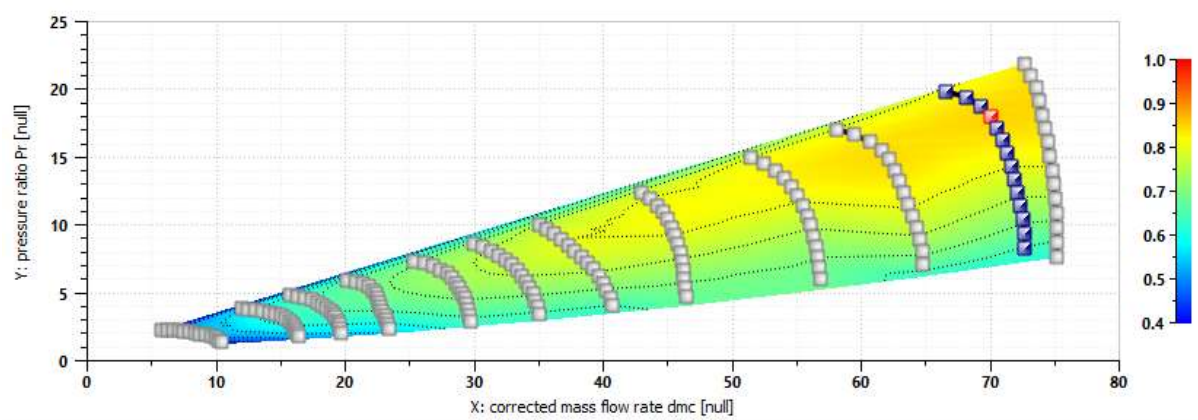
Συνεχίζοντας τα βήματα στην εφαρμογή *Gas Turbine Performance* στο μοντέλο αεριοστροβίλου δύο αξόνων, έχοντας καταλήξει στα δεδομένα του πίνακα 5.3 για το σημείο λειτουργίας, το επόμενο βήμα είναι ο ορισμός των *off-design parameters*. Στο περιβάλλον του λογισμικού εμφανίζονται οι χάρτες του συμπιεστή και των στροβίλων, συγκεκριμένα δύο για κάθε στοιχείο. Στον αριστερό χάρτη γίνεται η επιλογή ενός σημείου αναφοράς (*reference point*) επάνω στις χαρακτηριστικές καμπύλες του συμπιεστή ή των στροβίλων. Επιλέγοντας ένα συγκεκριμένο σημείο στο αριστερό διάγραμμα, οι χαρακτηριστικές καμπύλες για το σημείο λειτουργίας μεταβάλλονται στο δεξί διάγραμμα, το οποίο στην ουσία πρόκειται για το διάγραμμα με τα ανηγμένα ή διορθωμένα μεγέθη. Συνήθως το σημείο αναφοράς επιλέγεται να απεικονιστεί στο διάγραμμα του συμπιεστή, επάνω στην καμπύλη ανηγμένων στροφών $100\% \times \frac{N}{\sqrt{T}}$, ή σύμφωνα με το λογισμικό *Amesim* στην καμπύλη $N/N_{ref} = 1$. Επιπλέον, η απόσταση από την γραμμή πάλμωσης (*surge line*) ή διαφορετικά το όριο πάλμωσης (*Surge Margin*) απαιτείται να υπερβαίνει το 10%, αλλά ταυτόχρονα να μην είναι ιδιαίτερα μεγάλο, ώστε ο αεριοστροβίλος να μην ταλανίζεται από φαινόμενα πάλμωσης, αλλά ταυτόχρονα να επιτευχθεί ένας ικανοποιητικός βαθμός απόδοσης. Εν τέλει, το σημείο αναφοράς που επιλέχθηκε με βάση τις καμπύλες του συμπιεστή, φαίνεται στις παρακάτω εικόνες:



Reference map - selected point

Normalized operating speed N/N_{ref} [null]	1.00
Corrected mass flow rate dmc [null]	53.029
Pressure ratio Pr [null]	8.602
Isentropic efficiency eff [null]	0.844
Surge margin SM [%]	15.724

Εικόνα 6.1: Σημείο αναφοράς και τιμές παραμέτρων στον χάρτη του συμπιεστή.



Design point parameters

Corrected operating speed ω_c [null]	9400.000
Corrected mass flow rate dmc [null]	70.017
Pressure ratio Pr [null]	18.000
Isentropic efficiency eff [null]	0.850

Εικόνα 6.2: Χαρακτηριστικές καμπύλες συμπιεστή και δεδομένα σημείου λειτουργίας στον ανηγμένο χάρτη συμπιεστή.

Στο διάγραμμα της εικόνας 6.2, όπου απεικονίζεται το σημείο λειτουργίας του αεριοστροβίλου με βάση τις χαρακτηριστικές καμπύλες του συμπιεστή, μπορούν να εξαχθούν συγκεκριμένες πληροφορίες. Αρχικά, λαμβάνεται η τιμή του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης του συμπιεστή $\eta_{is,c}$, όπως επίσης και ο λόγος πίεσης π_c . Επιπλέον, δίνεται η τιμή της διορθωμένης παροχής μάζας αέρα dmc , η οποία προκύπτει ως εξής:

$$dmc = \dot{m}a \times \sqrt{\frac{T_{02}}{T_{std}}} \frac{P_{02}}{P_{std}}$$

όπου $\dot{m}a$ η παροχή μάζας αέρα, T_{02} η θερμοκρασία εισόδου του αέρα στον συμπιεστή, T_{std} η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, P_{02} η πίεση πριν την είσοδο στον συμπιεστή και P_{std} η εξωτερική πίεση περιβάλλοντος. Τέλος, από το παραπάνω διάγραμμα εξάγεται η διορθωμένη ταχύτητα συμπιεστή και στροβίλου υψηλής πίεσης ω_c , η οποία δίνεται από την σχέση:

$$\omega_c = \frac{\omega}{\sqrt{\frac{T_{02}}{T_{std}}}}, \text{ όπου } \omega \text{ είναι η περιστροφική ταχύτητα του άξονα του συμπιεστή, } T_{02} \text{ η}$$

θερμοκρασία εισόδου του αέρα στον συμπιεστή και T_{std} η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Εφόσον έχει οριστεί η μορφή των χαρακτηριστικών καμπυλών του συμπιεστή και των στροβίλων, στη συνέχεια ορίζονται τα *off design points*, ενώ αναγράφονται αναλυτικά οι θερμοκρασίες και οι πιέσεις σε κάθε θέση του κύκλου, καθώς και οι επιδόσεις σε κάθε *off design point*.

Το λογισμικό *Amesim* δίνει στον χρήστη την δυνατότητα ορισμού των *off design points*. Αρχικά, ορίζονται τιμές για την πίεση και την θερμοκρασία περιβάλλοντος, καθώς και για την σχετική υγρασία *RH (Relative Humidity)*. Οι τιμές των προαναφερθέντων μεγεθών απεικονίζονται στην παρακάτω εικόνα.

Off-design study parameters	Value	Unit	Default value
▼ <input type="checkbox"/> Ambient conditions			
boundary conditions type	total conditions and ambient pressure		
total pressure	101325	PaA	101325
total temperature	288.15	K	288.15
ambient pressure	101325	PaA	101325
relative humidity	60	%	0

Εικόνα 6.3: Τιμές σχετικής υγρασίας, πίεσης και θερμοκρασίας περιβάλλοντος για *off-design points*.

Τα *off-design points* ορίζονται μεταβάλλοντας ένα συγκεκριμένο ζεύγος παραμέτρων σύμφωνα με το λογισμικό (*Handles*). Τα ζεύγη παραμέτρων που μεταβάλλονται είναι τα εξής:

- Μέγιστη θερμοκρασία κύκλου (T_{04}) και ταχύτητα άξονα (*spool speed*) σε ποσοστό %.
- Παροχή μάζας καυσίμου (*fuel flow rate*) και ταχύτητα άξονα στροβίλου ισχύος (*pt spool speed*) σε ποσοστό %.
- Φορτίο ή ισχύς (*shaft power*) και ταχύτητα άξονα στροβίλου ισχύος (*pt spool speed*), και τα δύο μεγέθη εκφράζονται σε ποσοστό %.

6.1. Εμφάνιση επιδόσεων σε τυχαίο *off-design point*

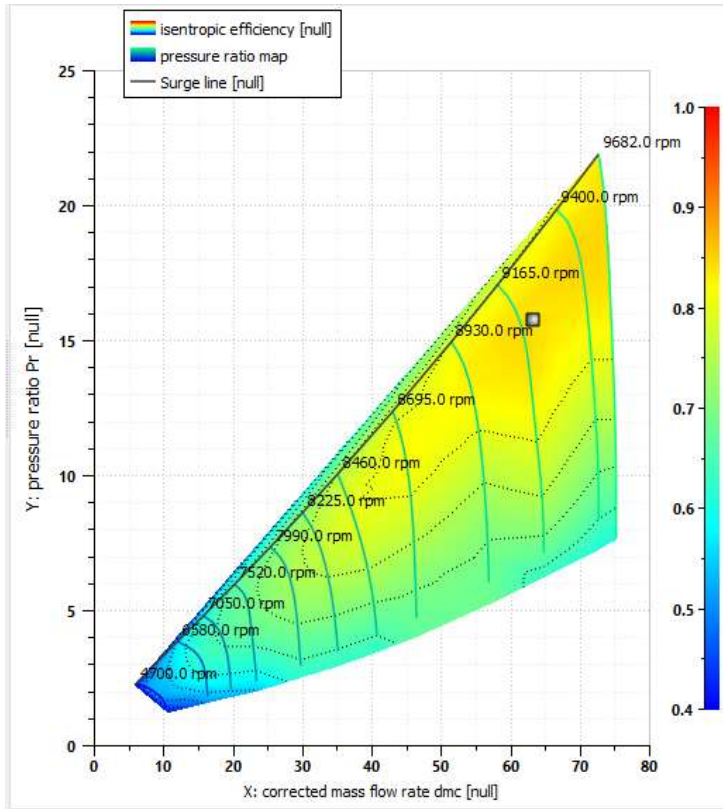
Σε πρώτη φάση, ορίζονται οι περιβαλλοντικές συνθήκες σύμφωνα με την εικόνα 6.3, επιλέγεται ένα τυχαίο *off-design* σημείο, με *handles* την μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου T_{04} και την ταχύτητα του άξονα στροβίλου ισχύος *pt* σε ποσοστό %.

Επιλέγεται τυχαία η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου $T_{04} = 1400\text{ K}$ και $N_{pt}(\%) = 100\%$, δηλαδή ο άξονας του στροβίλου υψηλής πίεσης να λειτουργεί στο 100% των ονομαστικών στροφών του. Οι επιδόσεις του συγκεκριμένου *off-design point* συνοψίζονται ως εξής στον παρακάτω πίνακα:

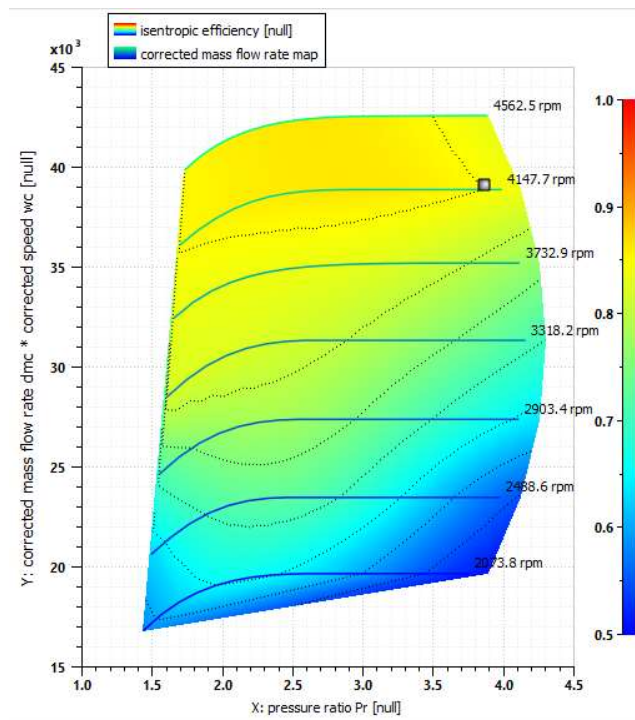
Μεγέθη	Αποτελέσματα <i>Amesim</i>
Wk (kW)	18897.5
mf (kg/s)	1.1866
sfc (kg/kWh)	0.226
$n\theta$	0.3276
T_{exh} (K)	828.2617

Πίνακας 6.1: Επιδόσεις *off-design point* στο *Amesim*

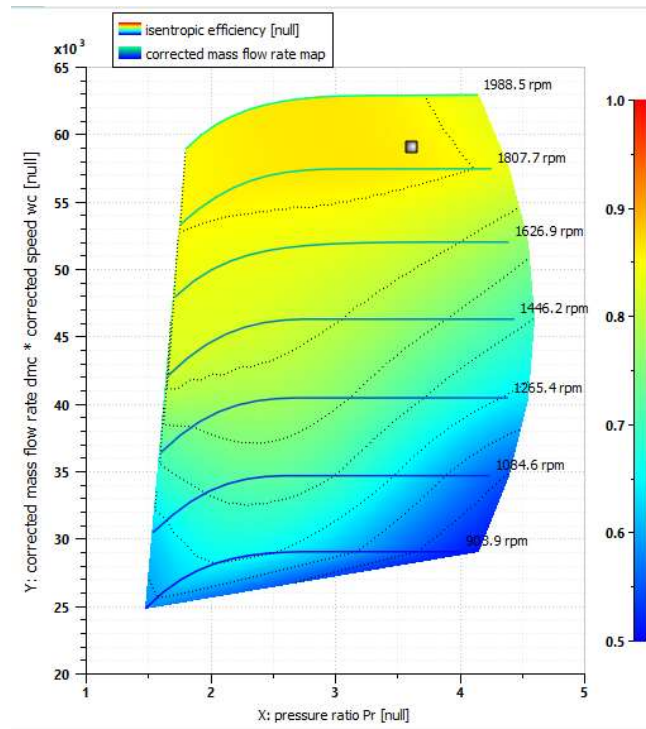
Το λογισμικό παρέχει επιπλέον την δυνατότητα προβολής του συγκεκριμένου σημείου πάνω στους χάρτες με τις χαρακτηριστικές καμπύλες του συμπιεστή και των στροβίλων.



Εικόνα 6.4: Off-design point στον χάρτη του συμπιεστή.



Εικόνα 6.5: Off-design point στον χάρτη του στροβίλου υψηλής πίεσης.



Εικόνα 6.6: Off-design point στον χάρτη του στροβίλου ισχύος.

Από τους παραπάνω χάρτες μπορούν να εξαχθούν σημαντικές πληροφορίες για τα μεγέθη του εκάστοτε μηχανήματος, είτε είναι συμπιεστής είτε στρόβιλος, όπως για παράδειγμα τους ισηντροπικούς βαθμούς απόδοσης, τους λόγους πίεσης, την διορθωμένη παροχή μάζας και τις περιστροφικές ταχύτητες του κάθε άξονα. Μεταβάλλοντας τις τιμές των *handles*, μεταβάλλονται και οι τιμές των επιδόσεων. Ωστόσο κρίνεται απαραίτητη μία περισσότερο λεπτομερής ανάλυση με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων.

6.2 Ανάλυση των επιδόσεων του κύκλου στα off-design points

Στη συνέχεια, με την βοήθεια του *Amesim* μελετήθηκε η συμπεριφορά των επιδόσεων του κύκλου αεριοστροβίλου δύο αξόνων, σε συγκεκριμένα off-design σημεία. Αρχικά ορίζονται οι περιβαλλοντικές συνθήκες:

Συνθήκες Περιβάλλοντος	
Πίεση P_{t1} (bar)	1.01325
Θερμοκρασία T_{t1} (K)	288.15
Σχετική Υγρασία (RH %)	60

Πίνακας 6.2: Περιβαλλοντικές συνθήκες.

Ακολουθώντας, στην καρτέλα *off-design results*, επιλέγεται κάθε φορά ένα ζεύγος μεταβλητών παραμέτρων (*handles*). Διατηρώντας σταθερή την μία από τις δύο και μεταβάλλοντας την δεύτερη, κάθε φορά σε ποσοστό επί της % (από 60% έως 105 ή 110%), παρατηρείται η θέση κάθε *off-design* σημείου στους χάρτες καθώς και η μεταβολή των επιδόσεων του κύκλου. Οι επιδόσεις που επιλέγεται να απεικονιστούν είναι το καθαρό ειδικό έργο Wk , η ειδική κατανάλωση καυσίμου sfc , ο θερμικός βαθμός απόδοσης $n\theta$ και η θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων $Texh$.

6.2.1 Μελέτη Περίπτωσης 1 – T04 σταθερή

Επιλέγοντας το ζεύγος παραμέτρων T04 (θερμοκρασία εξόδου από τον θάλαμο καύσης) και N_{pt} (%) (ταχύτητα άξονα στροβίλου ισχύος σε ποσοστό), αρχικά διατηρούμε την μέγιστη θερμοκρασία T04 σταθερή, ενώ η ταχύτητα του άξονα στον στροβίλο ισχύος μεταβάλλεται ποσοστιαία, από το 105% των στροφών μέχρι το 60%. Επομένως, εάν $T04 = 1480 K$, παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των επιδόσεων.

	$N_{pt}(\%)$	Wk (kW)	sfc (g/kWh)	$n\theta$	$Texh(K)$
<i>off-design point 1</i>	105	23473.6	0.2182	0.3394	865.2082
<i>off-design point 2</i>	100	24000.8	0.2154	0.3438	860.9091
<i>off-design point 3</i>	90	22423.1	0.2308	0.3209	879.552
<i>off-design point 4</i>	80	20805.3	0.2492	0.2972	899.2544
<i>off-design point 5</i>	70	18848.4	0.2746	0.2696	922.2824
<i>off-design point 6</i>	60	16263.7	0.3186	0.2324	953.137

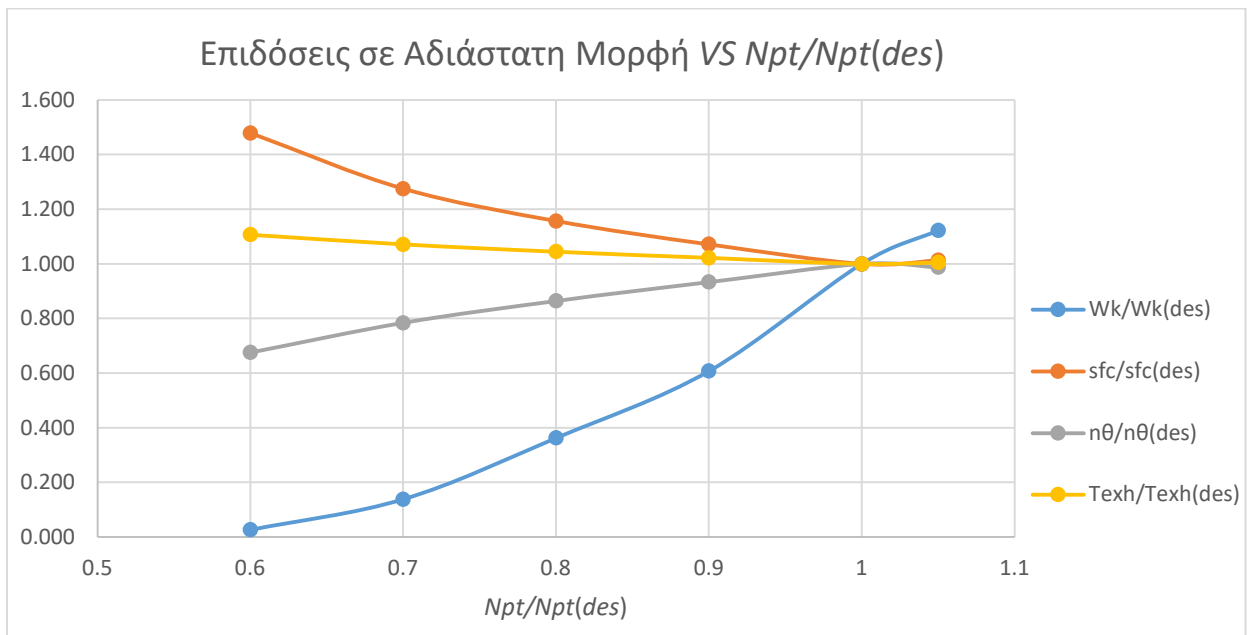
Πίνακας 6.3: Μεταβολή των επιδόσεων με T04 σταθερή και N_{pt} (%) μεταβαλλόμενο.

Προκειμένου να επιτευχθεί μία παρόμοια σύγκριση για την συμπεριφορά των τεσσάρων επιδόσεων του κύκλου σε *off design* σημεία, όλα τα μεγέθη του πίνακα 6.3 για κάθε *off design* σημείο διαιρέθηκαν με τις αντίστοιχες τιμές στο *design point*. Συγκεκριμένα, οι τιμές των επιδόσεων του κύκλου, των στροφών του στροβίλου ισχύος σε ποσοστό και της μέγιστης θερμοκρασίας του κύκλου T04 στο σημείο λειτουργίας παρουσιάζονται στον πίνακα 6.4.

Μέγεθος	Τιμή στο <i>Design Point</i>
Στροφές του άξονα στον στρόβιλο ισχύος p_t ($N_{pt}(\%)$)	100%
Μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου T_{04} (K)	1480
Καθαρό ειδικό έργο Wk (kW)	24000.8
Ειδική κατανάλωση καυσίμου sfc (kg/kWh)	0.2154
Θερμικός βαθμός απόδοσης $\eta\theta$	0.3438
Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων T_{exh} (K)	860.9091

Πίνακας 6.4: Τιμές μεγεθών και επιδόσεων στο *Design Point*.

Η συγκεκριμένη διαδικασία πραγματοποιήθηκε προκειμένου να απεικονιστούν οι επιδόσεις του αεροστροβίλου διαγραμματικά σε ένα γράφημα σε αδιάστατη μορφή (X/X_{design}), ούτως ώστε η συμπεριφορά τους να είναι συγκρίσιμη και να εξαχθούν καλύτερα συμπεράσματα.

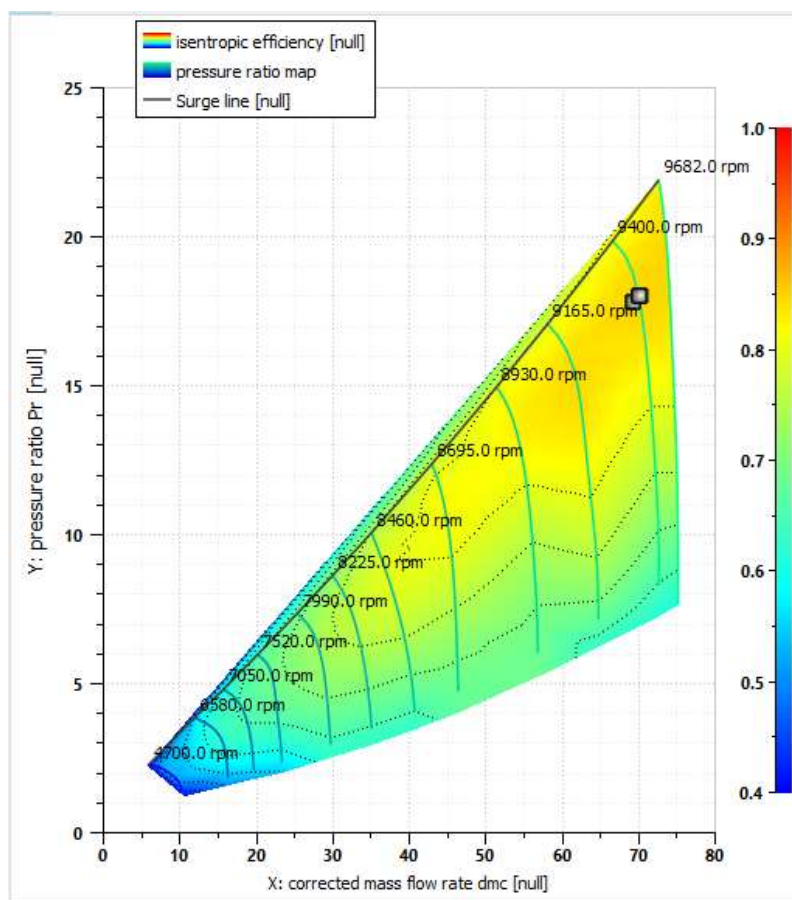


Διάγραμμα 6.1: Μεταβολή επιδόσεων σε αδιάστατη μορφή συναρτήσει του $N_{pt}/N_{pt}(des)$.

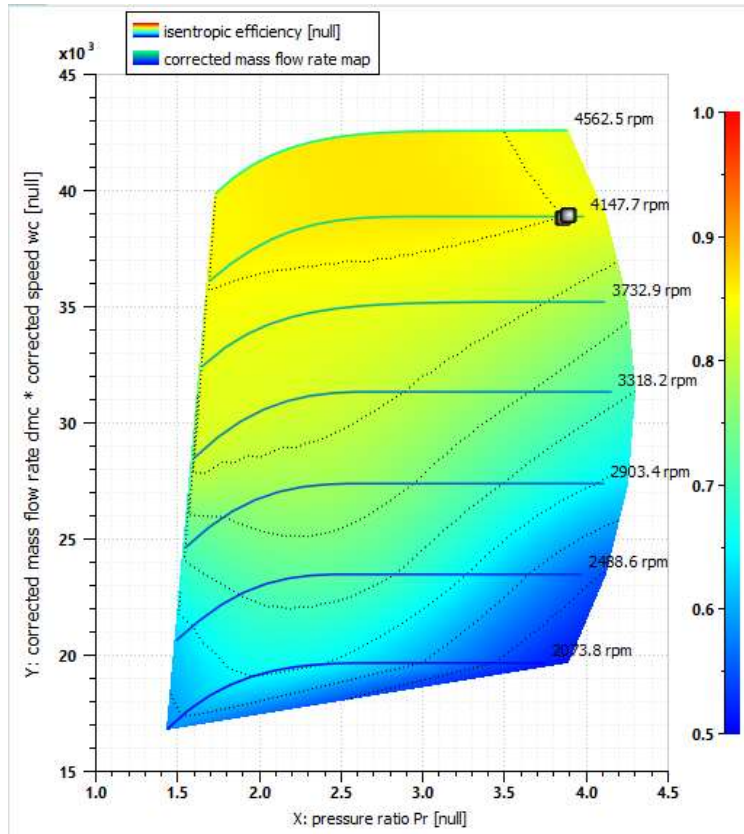
Μελετώντας το διάγραμμα 6.1, παρατηρείται ότι η αύξηση της ταχύτητας του άξονα στον στρόβιλο ισχύος οδηγεί σε αύξηση της ισχύος και του βαθμού απόδοσης, και ταυτόχρονα σε μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου και της θερμοκρασίας καυσαερίων, μέχρι το 100%

των στροφών (*design point*). Αυξάνοντας περαιτέρω την ταχύτητα του άξονα στον στρόβιλο ισχύος, παρατηρείται μία μικρή μείωση στον βαθμό απόδοσης, ενώ αντίθετα η ειδική κατανάλωση και η θερμοκρασία καυσαερίων αυξάνονται σε μικρότερο βαθμό. Γενικά η επίδοση που φαίνεται να παρουσιάζει την μεγαλύτερη μεταβολή σε συνάρτηση με την ταχύτητα του άξονα στον στρόβιλο ισχύος είναι η ισχύς Wk , ενώ η μεταβολή της θερμοκρασίας καυσαερίων μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

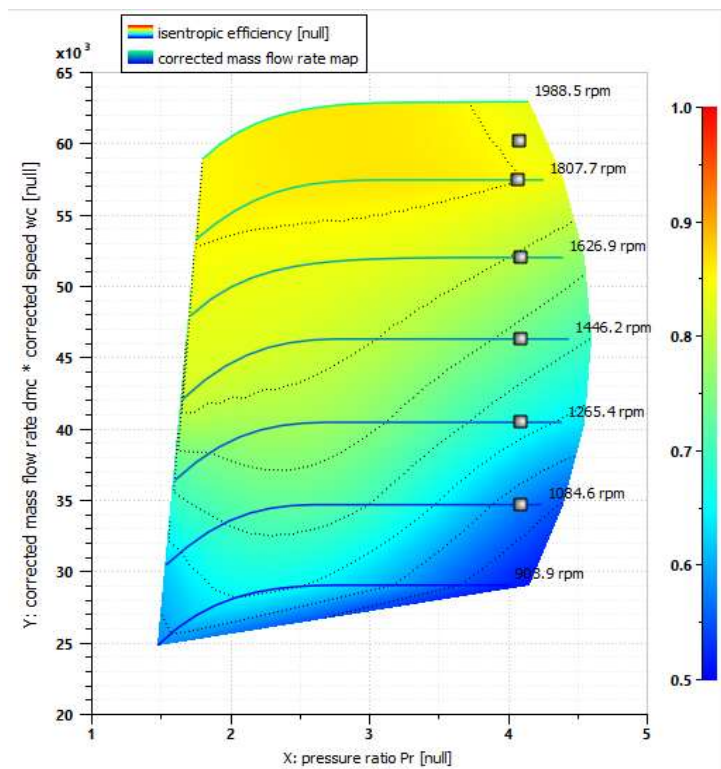
Τα αποτελέσματα του πίνακα 6.3 απεικονίζονται στο *Amesim* στις χαρακτηριστικές καμπύλες συμπίεστη και στροβίλων ως εξής:



Εικόνα 6.7: *Off-design points* στον χάρτη συμπίεστη.



Εικόνα 6.8: Off-design points στον χάρτη στροβίλου.



Εικόνα 6.9: Off-design points στον χάρτη στροβίλου ισχύος.

Επιπλέον, παρατηρώντας τις θέσεις των *off-design points* πάνω στον χάρτη του συμπιεστή, κανένα σημείο δεν πλησιάζει αρκετά την γραμμή πάλμωσης, επομένως δεν παρατηρείται κίνδυνος για φαινόμενα *surging* και ανεπιθύμητων ταλαντώσεων. Όσον αφορά τους χάρτες του στροβίλου υψηλής πίεσης και του στροβίλου ισχύος, προκύπτει το συμπέρασμα ότι είναι ακτινικής μορφής, καθώς οι καμπύλες σταθερών στροφών δεν συγχωνεύονται σε μία και μοναδική, όπως συμβαίνει στους αξονικούς στροβίλους. Όλα τα *off-design points* βρίσκονται εντός των χαρτών των δύο στροβίλων, ωστόσο κάθε σημείο αντιστοιχεί σε έναν λόγο πίεσης που οδηγεί στην εμφάνιση φραγμού (*chocking*) σε κάποιο σημείο της ροής στον εκάστοτε στρόβιλο.

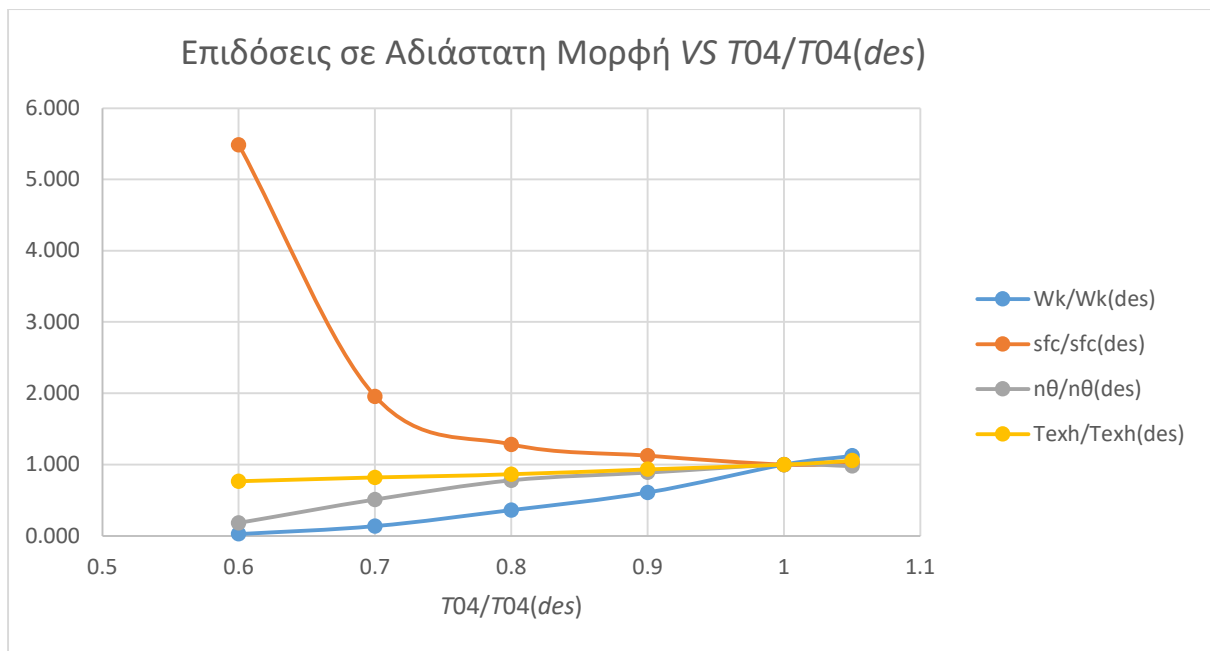
6.2.2 Μελέτη Περίπτωσης 2 – *Npr* σταθερό

Διατηρώντας σταθερή την περιστροφική ταχύτητα του στροβίλου ισχύος στο 100%, και μεταβάλλοντας την μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου *T04*, λαμβάνονται τα εξής αποτελέσματα:

		<i>Tt4</i> (K)	<i>Wk</i> (kW)	<i>sfc</i> (kg/kWh)	<i>nθ</i>	<i>Texh</i> (K)
<i>off-design point 1</i>	105%* <i>Tt4</i>	1554	26939.9	0.22	0.3366	908.2367
<i>off-design point 2</i>	100%* <i>Tt4</i>	1480	24000.8	0.2154	0.3438	860.9091
<i>off-design point 3</i>	90%* <i>Tt4</i>	1332	14588.9	0.2422	0.3058	804.7477
<i>off-design point 4</i>	80%* <i>Tt4</i>	1184	8708.065	0.2762	0.2681	743.7295
<i>off-design point 5</i>	70%* <i>Tt4</i>	1036	3320.953	0.4212	0.1758	705.1232
<i>off-design point 6</i>	60%* <i>Tt4</i>	888	643.9803	1.1817	0.0627	659.9622

Πίνακας 6.5: Μεταβολή των επιδόσεων με *Npr*(%) σταθερή και *T04* μεταβαλλόμενη.

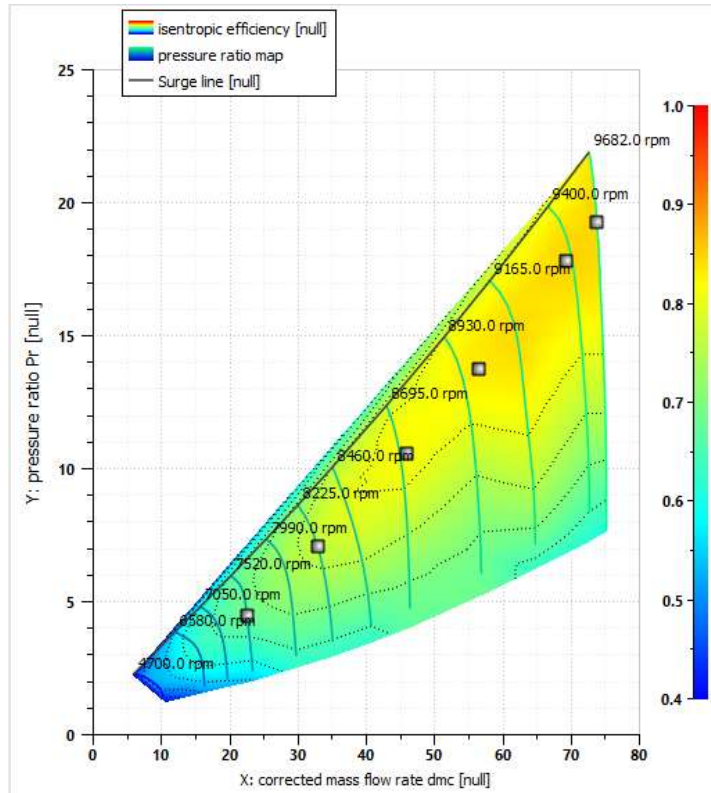
Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία, οι επιδόσεις του κύκλου σε συνάρτηση με τον αδιάστατο λόγο *T04/T04(des)* απεικονίζονται ως εξής:



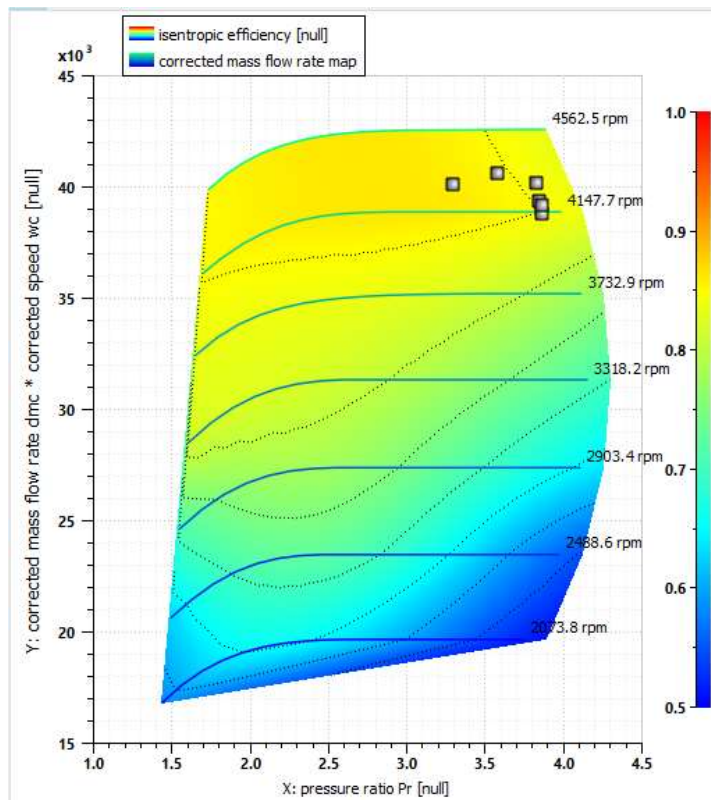
Διάγραμμα 6.2: Μεταβολή επιδόσεων σε αδιάστατη μορφή συναρτήσει της $T04/T04(des)$.

Αυξάνοντας την μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου, παρατηρείται μία λογική μείωση στην κατανάλωση καυσίμου, αρχικά με μεγάλο ρυθμό, η οποία τείνει να συγκλίνει σε μία σταθερή τιμή. Η ισχύς του κύκλου αυξάνεται με την αύξηση της $T04$, με μειούμενο ρυθμό μετά το *design point*, ενώ ο βαθμός απόδοσης επίσης αυξάνεται, ωστόσο μετά το 100% της $T04$, παρατηρείται μία μικρή μείωση. Η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων αυξάνεται με την αύξηση της $T04$, ωστόσο ο ρυθμός μεταβολής θεωρείται αμελητέος, επομένως το εν λόγω μέγεθος δεν επηρεάζεται.

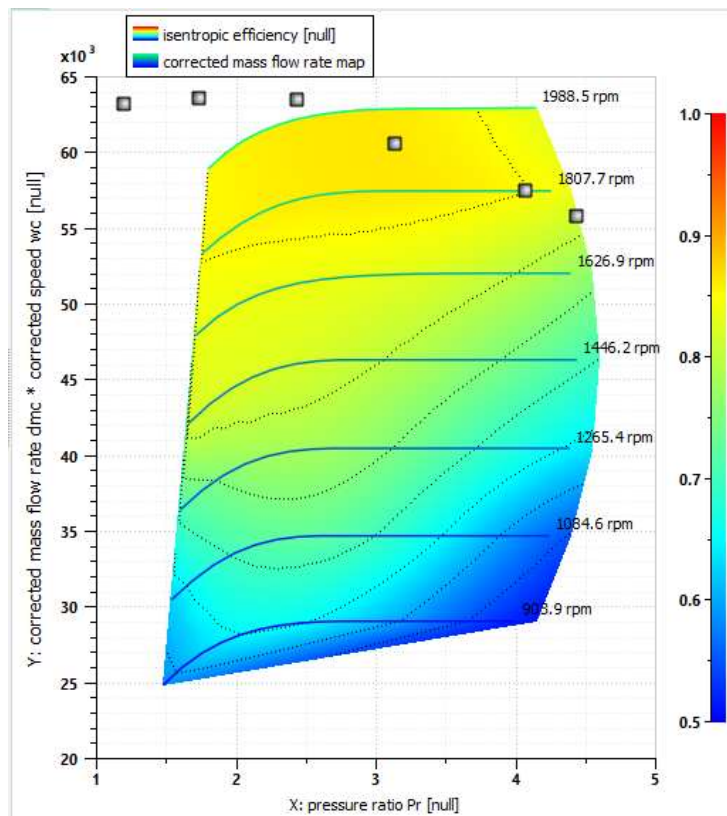
Παρακάτω παρουσιάζονται οι χάρτες του συμπιεστή και των στροβίλων με τα συγκεκριμένα *off-design points*:



Εικόνα 6.8: Off-design points στον χάρτη συμπίεστή.



Εικόνα 6.9: Off-design points στον χάρτη στροβίλου.



Εικόνα 6.10: Off-design points στον χάρτη στροβίλου ισχύος.

Παρατηρώντας τις θέσεις των *off-design points* στον χάρτη του συμπιεστή, κανένα σημείο δεν πλησιάζει την γραμμή πάλμωσης, ενώ μεταβάλλοντας την θερμοκρασία $T04$, αλλάζει και η τιμή του λόγου πίεσης p_c . Στον στρόβιλο υψηλής πίεσης, όλα τα *off-design points* βρίσκονται εντός του χάρτη, ωστόσο κάθε σημείο αντιστοιχεί σε μία τιμή του λόγου πίεσης που οδηγεί στην εμφάνιση φραγμού (*chocking*) σε κάποιο σημείο της ροής. Στον στρόβιλο ισχύος, τα *off-design* σημεία 4, 5 και 6 βρίσκονται εκτός διαγράμματος, καθώς όπως φαίνεται έχουν αρκετά μικρή τιμή λόγου πίεσης, και μεγάλη τιμή στο γινόμενο της διορθωμένης παροχής μάζας επί την διορθωμένη ταχύτητα του άξονα.

6.2.3 Μελέτη Περίπτωσης 3 – Shaft Power σταθερή / $N_{pt}(\%)$ μεταβαλλόμενο

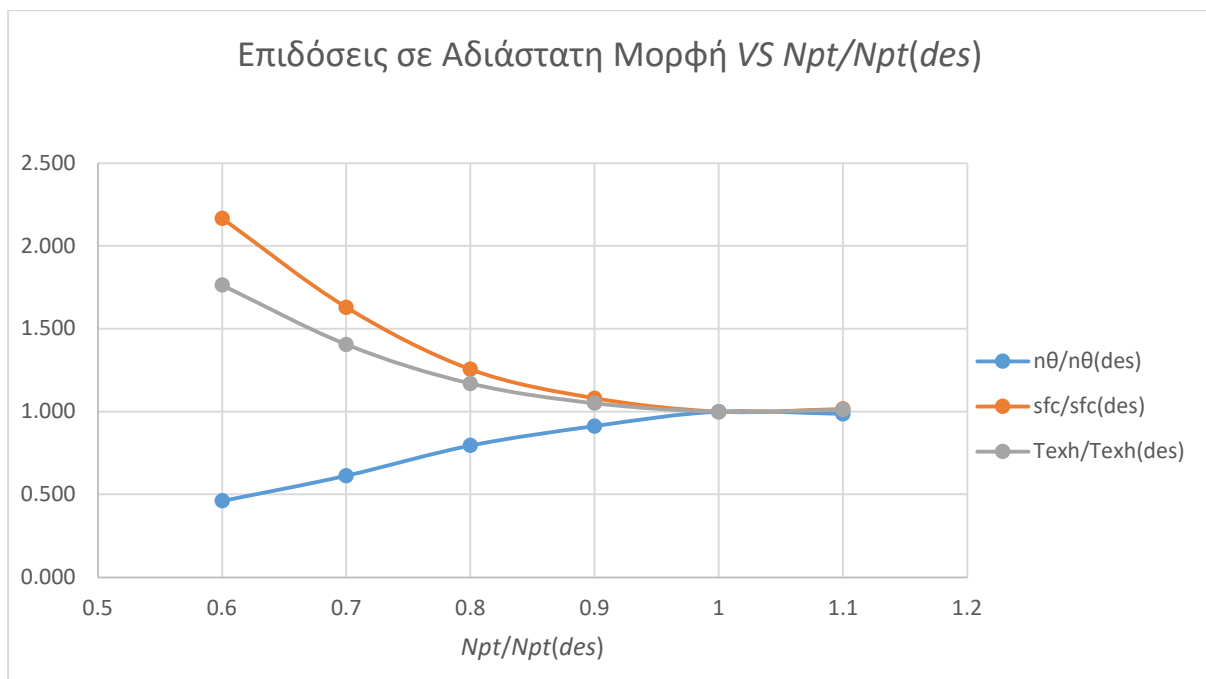
Επιλέγοντας το δεύτερο ζεύγος παραμέτρων, την ισχύ (Wk ή *shaft power*) με την ταχύτητα του άξονα στον στρόβιλο ισχύος σε ποσοστό ($N_{pt}(\%)$), διατηρώντας σταθερή την ισχύ στο 100% της τιμής στο *design point* και μεταβάλλοντας την ταχύτητα του άξονα στον στρόβιλο ισχύος, λαμβάνονται τα εξής αποτελέσματα για τις επιδόσεις στα *off-design points*.

	$N_{pt}(\%)$	W_k (kW)	sfc (kg/kWh)	$n\theta$	$T_{exh}(K)$
<i>off-design point 1</i>	110	24000.8	0.2189	0.3389	871.8068
<i>off-design point 2</i>	100	24000.8	0.2154	0.3438	860.9091
<i>off-design point 3</i>	90	24000.8	0.2329	0.3139	904.8896
<i>off-design point 4</i>	80	23804.3	0.2705	0.2737	1007.246
<i>off-design point 5</i>	70	22737.5	0.3511	0.2109	1209.666
<i>off-design point 6</i>	60	23290.7	0.4668	0.1586	1518.575

Πίνακας 6.6: Μεταβολή των επιδόσεων με *shaft power* σταθερή και $N_{pt}(\%)$ μεταβαλλόμενη.

Στα *off-design points* 4, 5 και 6 παρατηρείται μία διαφορά στην τιμή της ισχύος, το οποίο συμβαίνει διότι σύμφωνα με το *Amesim*, επιλέγοντας τα συγκεκριμένα *off-design* σημεία δεν υπάρχει σωστή σύγκλιση στην τιμή της ισχύος, με κάποιο ποσοστό σφάλματος κάθε φορά.

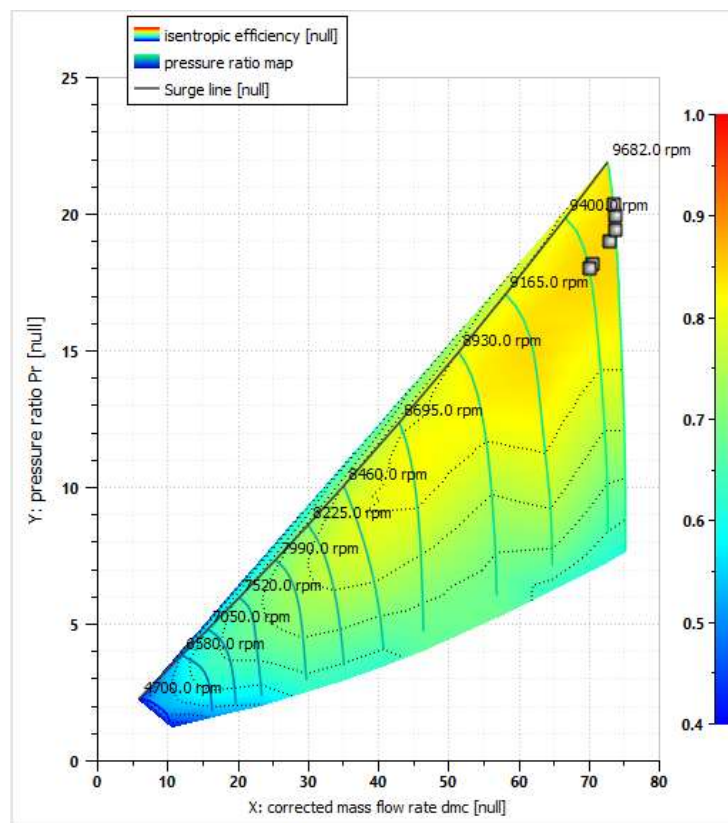
Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία, οι επιδόσεις του κύκλου σε συνάρτηση με τον αδιάστατο λόγο $N_{pt}/N_{pt}(des)$ απεικονίζονται ως εξής:



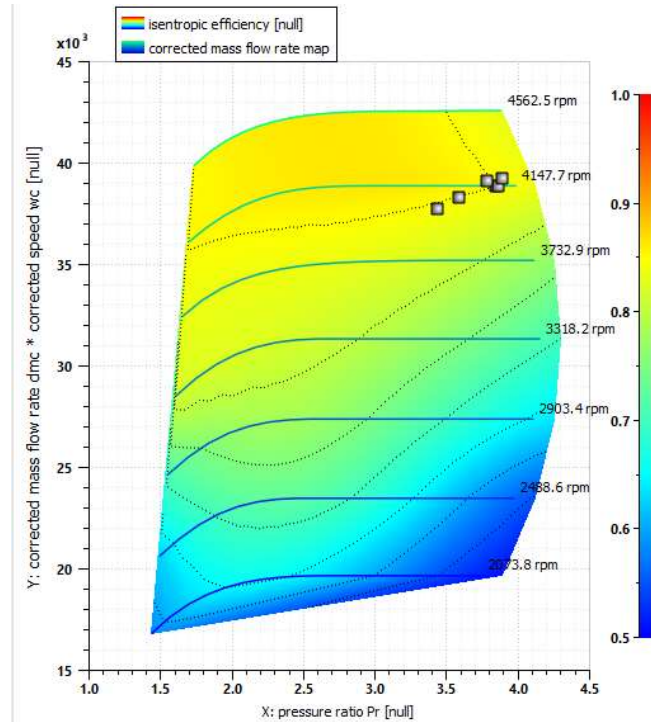
Διάγραμμα 6.3: Μεταβολή επιδόσεων σε αδιάστατη μορφή συναρτήσει του $N_{pt}/N_{pt}(des)$.

Σύμφωνα με το γράφημα 6.3, προκύπτει ότι διατηρώντας σταθερή την ισχύ και αυξάνοντας την ταχύτητα του άξονα στον στρόβιλο ισχύος, ο βαθμός απόδοσης αυξάνεται, ενώ η ειδική κατανάλωση καυσίμου και η θερμοκρασία των καυσαερίων μειώνονται, μέχρι το 100% του N_{prt} . Αυξάνοντας περαιτέρω το ποσοστό του N_{prt} , παρατηρείται μία μικρή αύξηση στην κατανάλωση καυσίμου και στην θερμοκρασία καυσαερίων, ενώ ο θερμοκός βαθμός απόδοσης έχει υποστεί μείωση. Οι τελευταίες μεταβολές καθώς είναι πολύ μικρές, μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες.

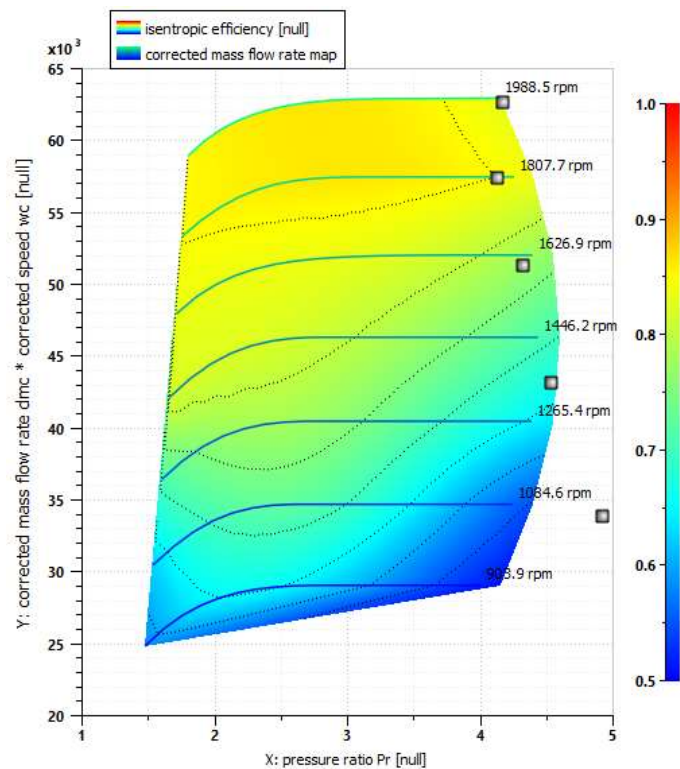
Παρακάτω παρουσιάζονται οι χάρτες του συμπιεστή και των στροβίλων με τα συγκεκριμένα *off-design points*:



Εικόνα 6.11: *Off-design points* στον χάρτη συμπιεστή.



Εικόνα 6.12: Off-design points στον χάρτη στροβίλου.



Εικόνα 6.13: Off-design points στον χάρτη στροβίλου ισχύος.

Παρατηρώντας τα *off-design points* στους χάρτες, συμπεραίνεται ότι τα σημεία 5 και 6, ενώ βρίσκονται εντός του χάρτη συμπιεστή, έχουν αρκετά μικρό ποσοστό *surge margin* μικρότερο από 15%, επομένως υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα, εάν λειτουργήσει ο κύκλος στα

συγκεκριμένα σημεία, να εμφανίσει ανεπιθύμητες ταλαντώσεις και φαινόμενο πάλμωσης. Τα συγκεκριμένα δύο σημεία, βρίσκονται εκτός του χάρτη στρόβιλου ισχύος. Σε γενικές γραμμές, σε όλα τα *off-design* σημεία υπάρχει κίνδυνος παρατήρησης του φαινομένου του φραγμού (*chocking*).

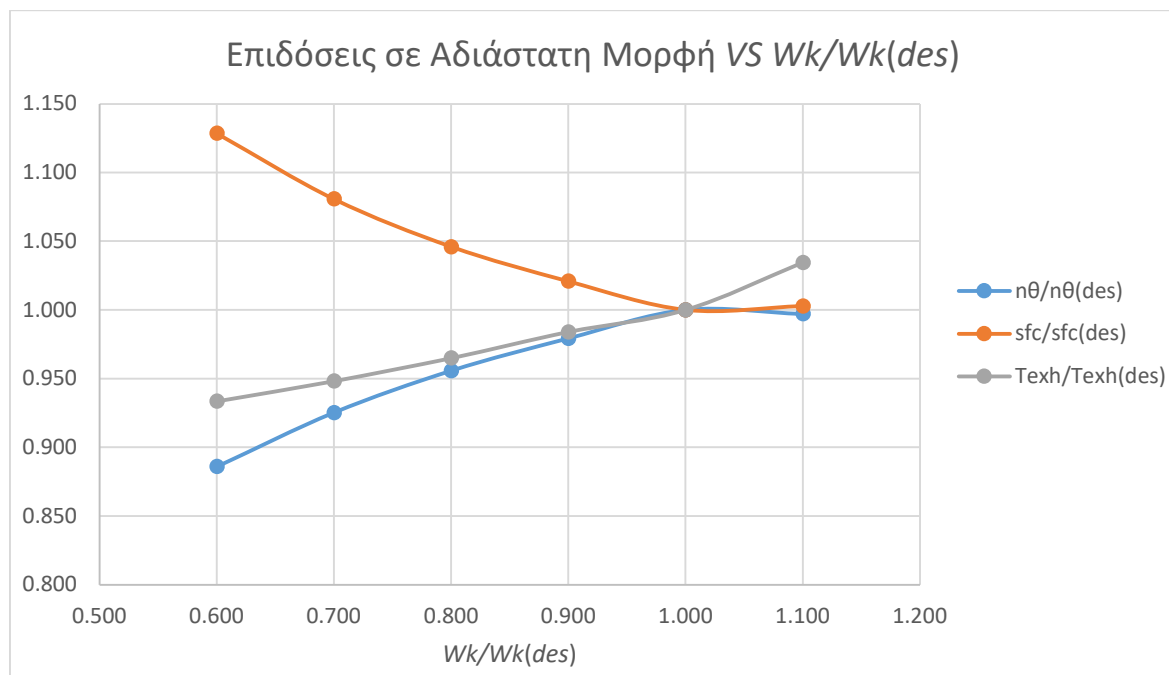
6.2.4 Μελέτη Περίπτωσης 4 – $N_{pr}(\%)$ σταθερή / *Shaft Power* μεταβαλλόμενη

Στο ίδιο ζεύγος μεταβλητών παραμέτρων (*handles*), διατηρώντας την ταχύτητα του άξονα στον στρόβιλο ισχύος σταθερή στο 100% των στροφών, με μεταβαλλόμενη την ισχύς W_k , με βήμα 10%, λαμβάνονται τα εξής αποτελέσματα:

	$W_k(\%)$	W_k (kW)	sfc (kg/kWh)	$n\theta$	$Texh(K)$
<i>off-design point 1</i>	110	26400.9	0.216	0.3428	890.6678
<i>off-design point 2</i>	100	24000.8	0.2154	0.3438	860.9091
<i>off-design point 3</i>	90	21600.8	0.2199	0.3367	847.0884
<i>off-design point 4</i>	80	19200.7	0.2253	0.3286	830.7868
<i>off-design point 5</i>	70	16800.6	0.2328	0.3181	816.311
<i>off-design point 6</i>	60	14400.5	0.2431	0.3046	803.6439

Πίνακας 6.7: Μεταβολή των επιδόσεων με *shaft power* μεταβαλλόμενη και $N_{pr}(\%)$ σταθερή.

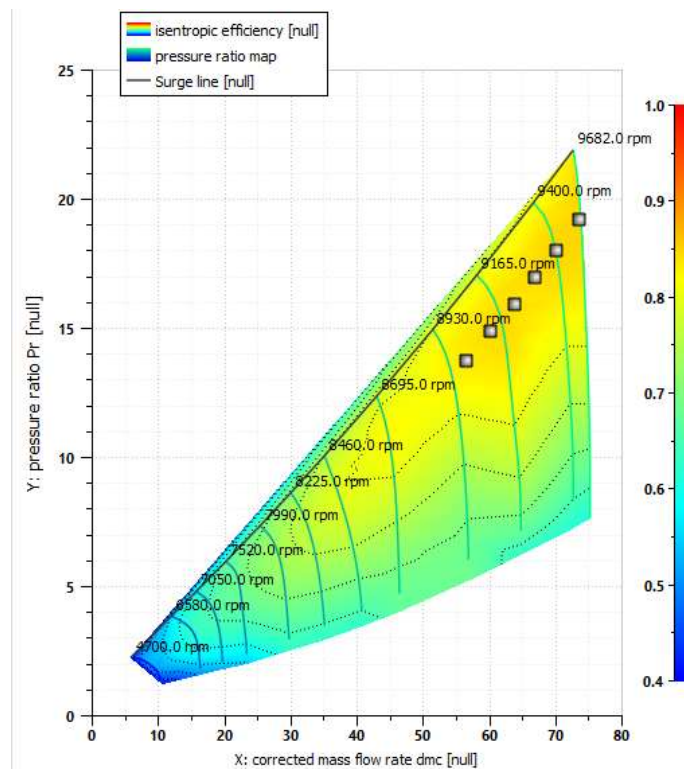
Οι επιδόσεις του κύκλου σε συνάρτηση με τον αδιάστατο λόγο $W_k/W_k(des)$ απεικονίζονται ως εξής:



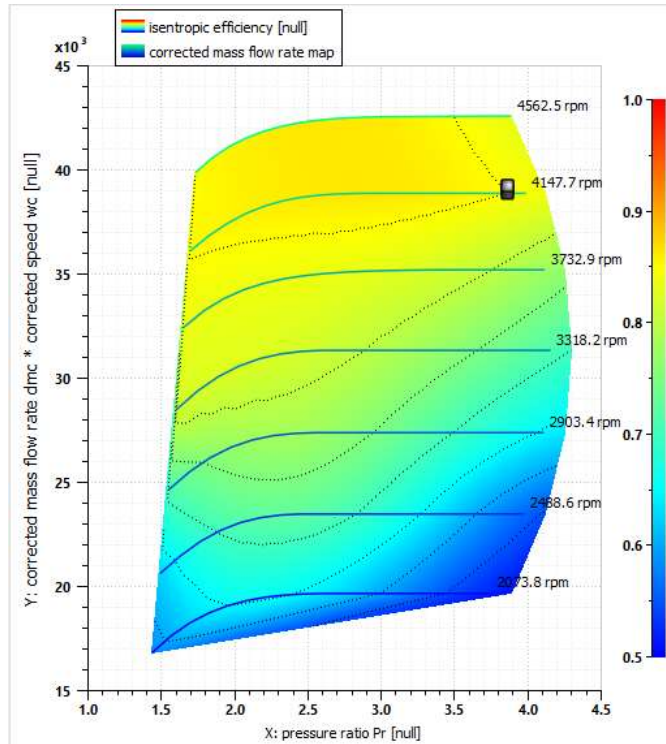
Διάγραμμα 6.4: Μεταβολή επιδόσεων σε αδιάστατη μορφή συναρτήσει του $W_k/W_k(des)$.

Αύξηση του ποσοστού της ισχύος έως το 100% οδηγεί σε αύξηση του βαθμού απόδοσης και της θερμοκρασίας καυσαερίων, ενώ η ειδική κατανάλωση καυσίμου μειώνεται. Εάν η διάταξη επιλεγεί στο να παρέχει ισχύς άνω του 100%, δηλαδή άνω των 24000.8 kW , τότε παρατηρείται για ακόμα μία φορά το φαινόμενο μείωσης του βαθμού απόδοσης και αύξησης της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου, με μικρότερο ρυθμό μεταβολής.

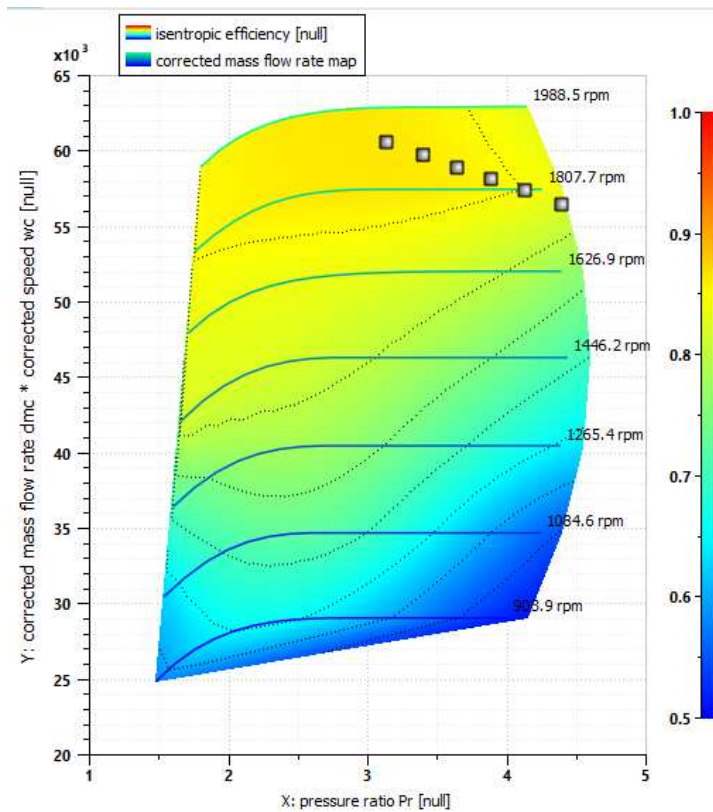
Παρακάτω παρουσιάζονται οι χάρτες του συμπιεστή και των στροβίλων με τα *off-design points*:



Εικόνα 6.14: *Off-design points* στον χάρτη συμπιεστή.



Εικόνα 6.15: Off-design points στον χάρτη στροβίλου.



Εικόνα 6.16: Off-design points στον χάρτη στροβίλου ισχύος.

Διατηρώντας σταθερή την ταχύτητα του άξονα στον στρόβιλο ισχύος και μεταβάλλοντας κάθε φορά την παραγόμενη ισχύ, με βήμα 10%, τα off-design σημεία που προκύπτουν έχουν αρκετά

ικανοποιητικό *surge margin* και βαθμό απόδοσης συμπίεστή, ενώ όπως και στις υπόλοιπες περιπτώσεις, στα συγκεκριμένα σημεία υπάρχει πιθανότητα εμφάνισης του φαινομένου του φραγμού.

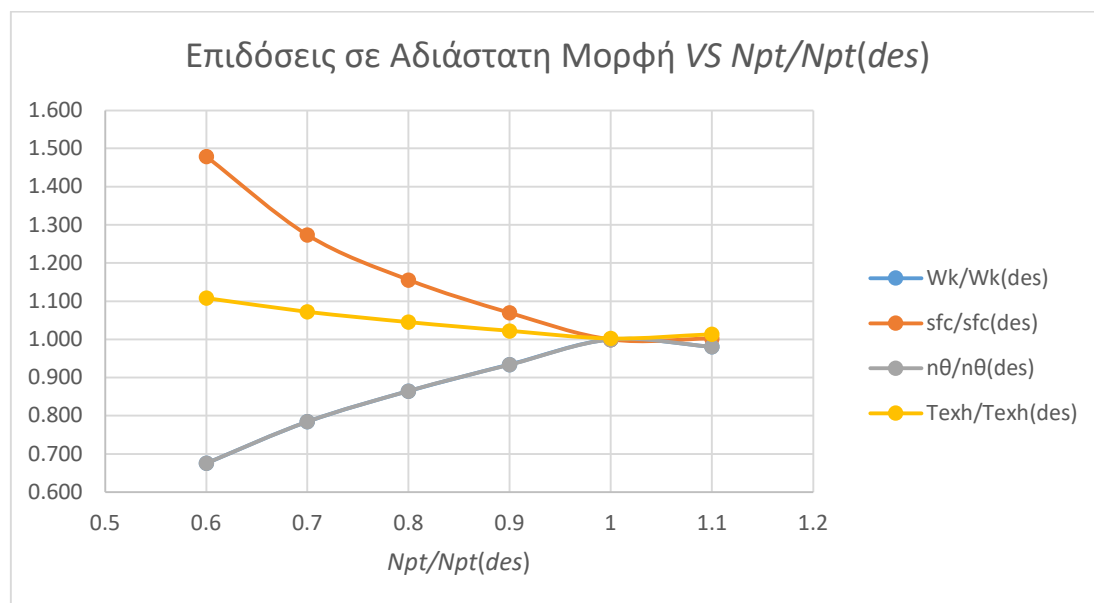
6.2.5 Μελέτη Περίπτωσης 5 – *mf* σταθερή / *N_{pt}*(%) μεταβαλλόμενη

Στην συγκεκριμένη περίπτωση, πρόκειται να απεικονιστούν ορισμένα σημεία *off-design* μεταβάλλοντας την ταχύτητα του άξονα στον στρόβιλο ισχύος, και διατηρώντας σταθερή την παροχή μάζας καυσίμου *mf*. Μεταβάλλοντας την ταχύτητα *N_{pt}*(%) από 60% έως 110%, και διατηρώντας σταθερή την παροχή μάζας καυσίμου στα 1.4358 kg/s, λαμβάνονται τα παρακάτω αποτελέσματα:

	<i>N_{pt}</i> (%)	<i>mf</i> (kg/s)	<i>W_k</i> (kW)	<i>sfc</i> (kg/kWh)	<i>n_θ</i>	<i>T_{exh}</i> (K)
<i>off-design point 1</i>	110	1.4358	23544.1	0.2159	0.3373	872.9538
<i>off-design point 2</i>	100	1.4358	24001	0.2154	0.3438	863.357
<i>off-design point 3</i>	90	1.4358	22425.9	0.2305	0.3212	880.3339
<i>off-design point 4</i>	80	1.4358	20758.6	0.249	0.2974	900.1502
<i>off-design point 5</i>	70	1.4358	18835.3	0.2744	0.2698	923.3305
<i>off-design point 6</i>	60	1.4358	16224.8	0.3186	0.2324	954.3396

Πίνακας 6.8: Μεταβολή των επιδόσεων με *N_{pt}*(%) μεταβαλλόμενη και *mf* σταθερή.

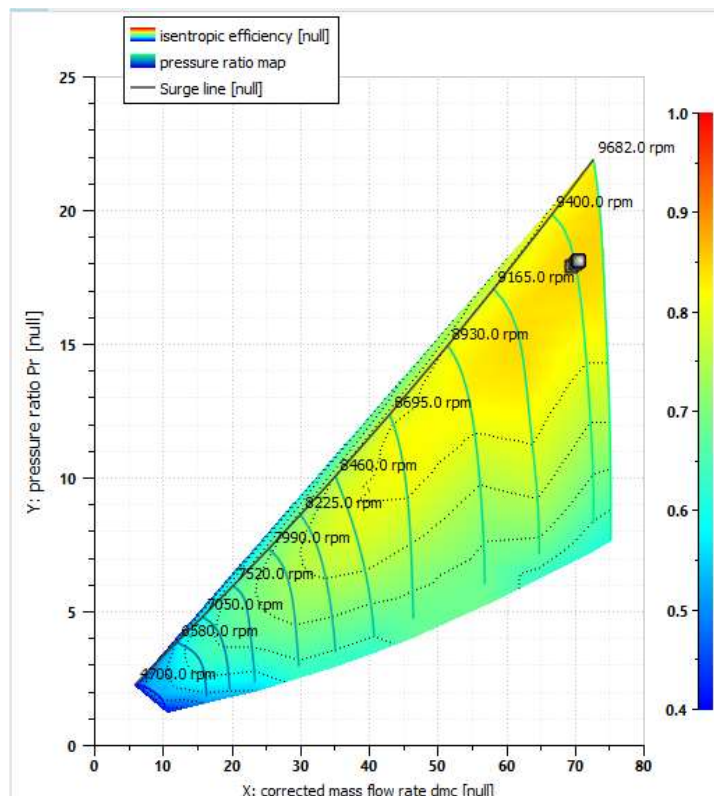
Οι επιδόσεις του κύκλου σε συνάρτηση με τον αδιάστατο λόγο *N_{pt}*/*N_{pt}*(*des*) συνοψίζονται ως εξής:



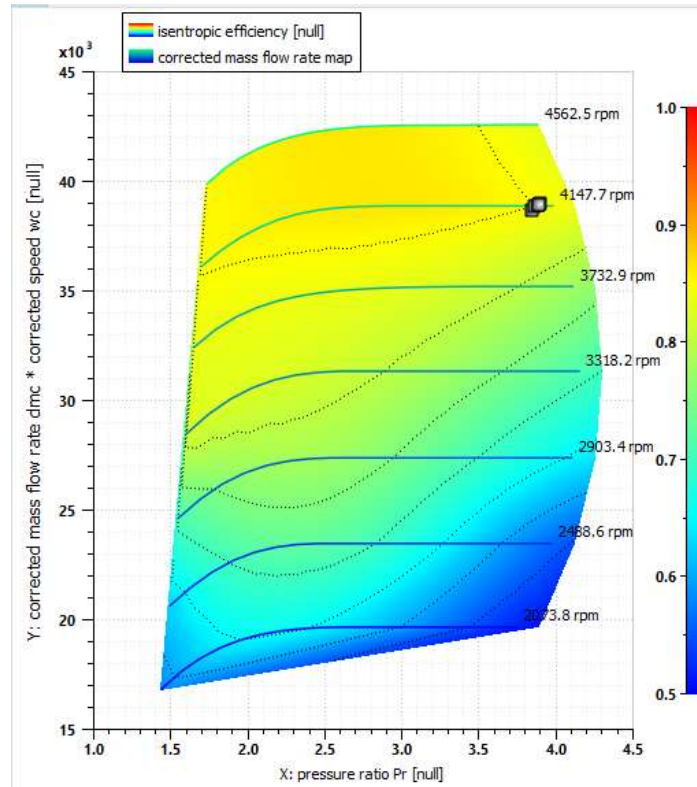
Διάγραμμα 6.5: Μεταβολή επιδόσεων σε αδιάστατη μορφή συναρτήσει του *N_{pt}*/*N_{pt}*(*des*).

Παρατηρείται ότι αυξάνοντας τις στροφές του άξονα στον στρόβιλο ισχύος έως και το 100%, παρατηρείται σταδιακή αύξηση της ισχύος Wk και του βαθμού απόδοσης η , ενώ αντίθετα η ειδική κατανάλωση καυσίμου sfc και η θερμοκρασία καυσαερίων T_{exh} μειώνονται. Εάν η ταχύτητα του άξονα υπερβεί το 100% της τιμής στο *design point*, τότε η ισχύς και ο βαθμός απόδοσης μειώνονται, ενώ η ειδική κατανάλωση και η θερμοκρασία αυξάνονται, σε μικρότερο βαθμό.

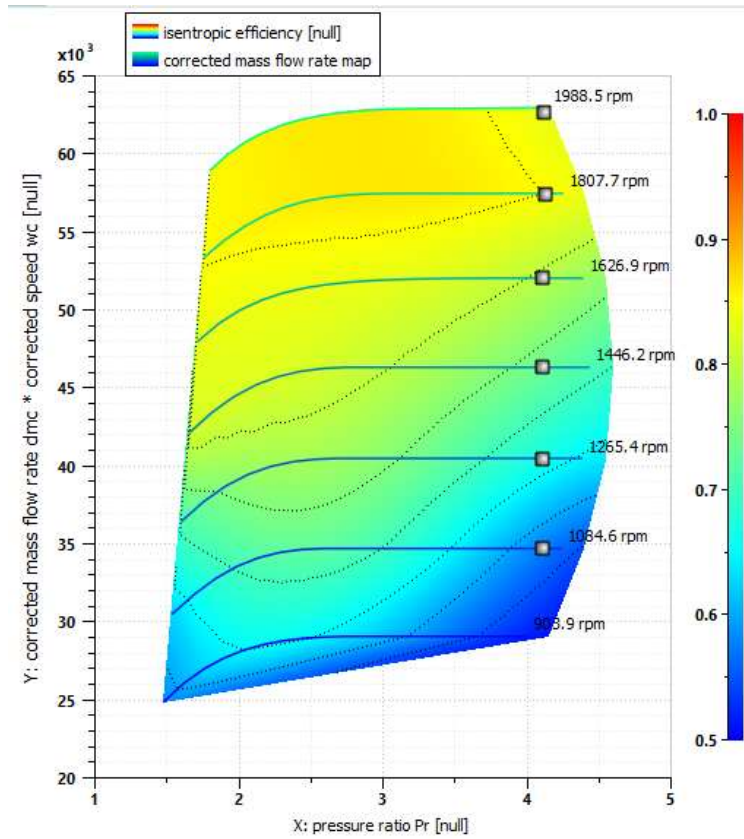
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι χάρτες του συμπιεστή και των στροβίλων που απεικονίζουν τα *off-design points*:



Εικόνα 6.17: *Off-design points* στον χάρτη συμπιεστή.



Εικόνα 6.18: Off-design points στον χάρτη στροβίλου.



Εικόνα 6.19: Off-design points στον χάρτη στροβίλου ισχύος.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση, τα *off-design* σημεία που προκύπτουν έχουν αρκετά ικανοποιητικό *surge margin* και βαθμό απόδοσης συμπίεστή, ενώ όπως και στις υπόλοιπες περιπτώσεις, υπάρχει πιθανότητα εμφάνισης του φαινομένου του φραγμού. Επιπλέον, τα συγκεκριμένα σημεία έχουν σχεδόν παρόμοια τιμή του λόγου πίεσης στον στρόβιλο ισχύος, όπως φαίνεται και από το αντίστοιχο διάγραμμα.

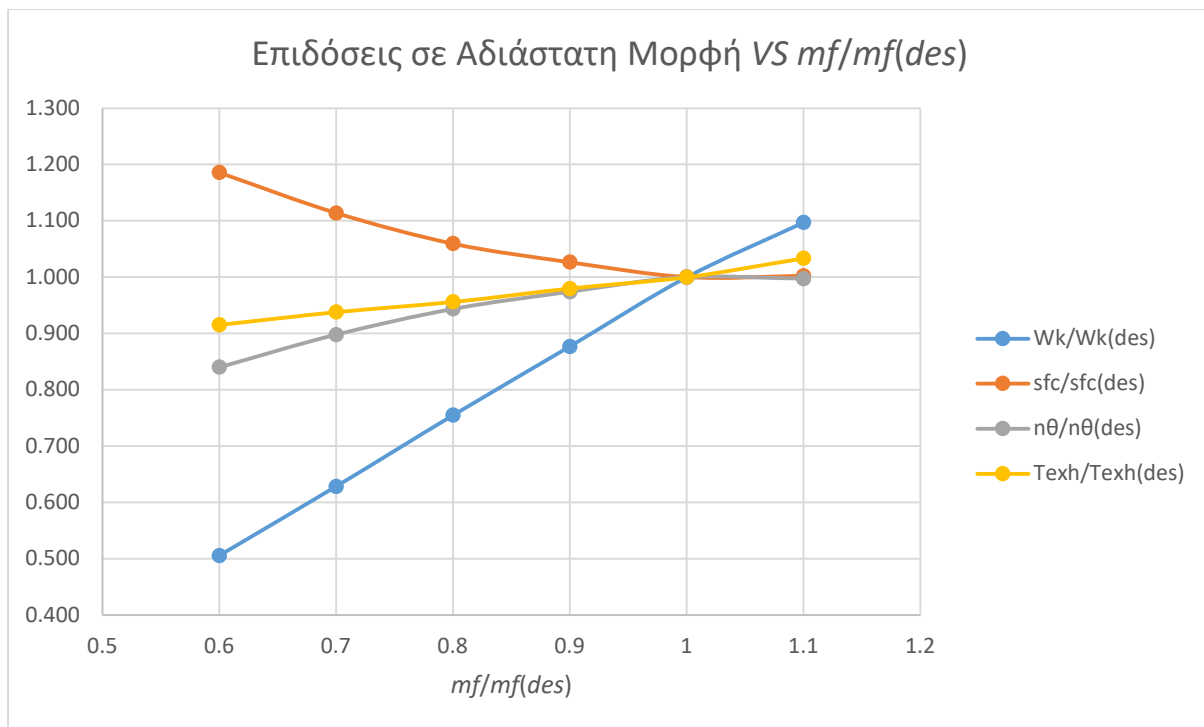
6.2.6 Μελέτη Περίπτωσης 6 – $N_{pr}(\%)$ σταθερή / mf μεταβαλλόμενη

Στην παρούσα μελέτη περίπτωσης, οι στροφές του άξονα στον στρόβιλο ισχύος διατηρούνται σταθερές στο 100% της αρχικής τιμής, 3600 *rpm*, ενώ η παροχή μάζας καυσίμου εκφράζεται σε ποσοστό % της τιμής στο *design point* ($mf = 1.4358 \text{ kg/s}$), έχοντας ένα εύρος από 60% έως 110%. Επομένως, λαμβάνονται τα παρακάτω αποτελέσματα:

mf *100%	mf (kg/s)	Wk (kW)	sfc (kg/kWh)	$n\theta$	$Texh(K)$
110	1.57938	26329.3	0.2159	0.3429	889.6311
100	1.4358	24000.4	0.2154	0.3438	860.8958
90	1.29222	21043.6	0.2211	0.3349	843.5102
80	1.14864	18117.1	0.2282	0.3244	823.019
70	1.00506	15083.7	0.2399	0.3087	807.5066
60	0.86148	12142.2	0.2554	0.2889	787.9253

Πίνακας 6.9: Μεταβολή των επιδόσεων με $mf(\%)$ μεταβαλλόμενη και $N_{pr}(\%)$ σταθερή.

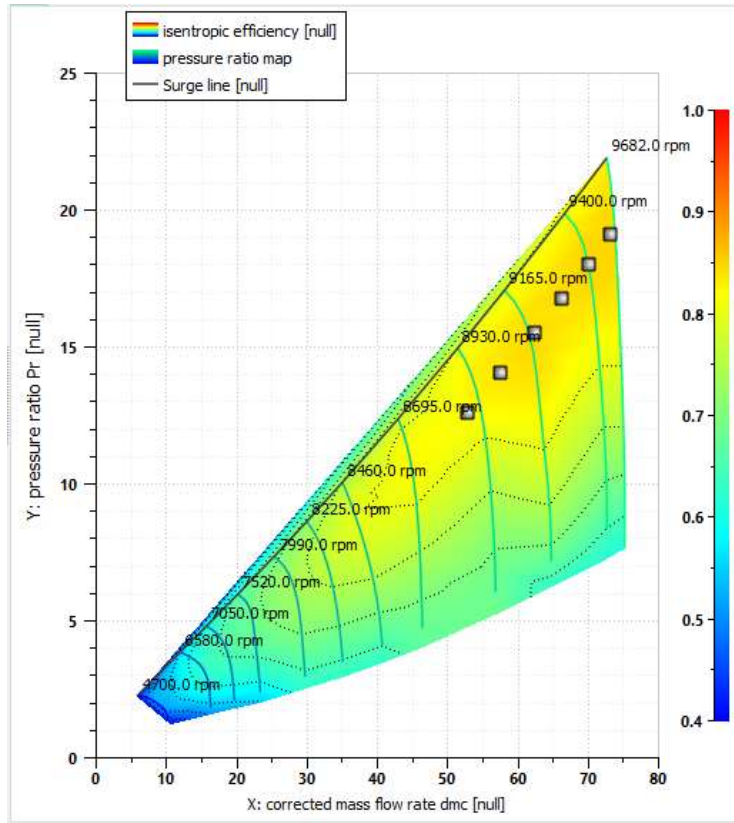
Οι επιδόσεις του κύκλου σε συνάρτηση με τον αδιάστατο λόγο $mf/mf(des)$ συνοψίζονται ως εξής:



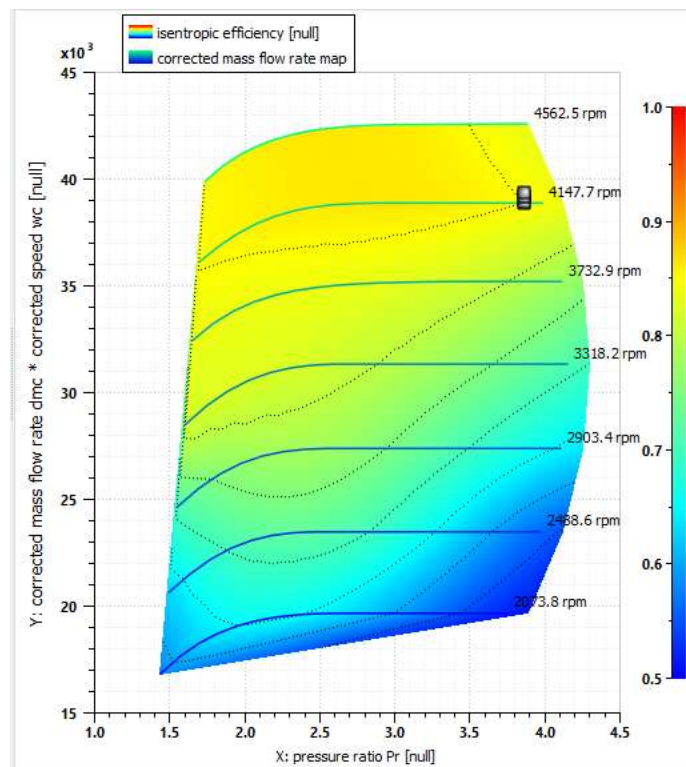
Διάγραμμα 6.6: Μεταβολή επιδόσεων σε αδιάστατη μορφή συναρτήσει του $mf/mf(des)$.

Σύμφωνα με το παραπάνω γράφημα, αυξάνοντας την παροχή μάζας καυσίμου, αυξάνεται και ο λόγος αέρα-καυσίμου, επομένως εξασφαλίζεται καλύτερη ποιότητα καύσης και η ισχύς (καθαρό ειδικό έργο) αυξάνεται, ενώ επιπλέον αυξάνεται και η θερμοκρασία των καυσαερίων. Ακόμη, αυξάνοντας την παροχή μάζας καυσίμου μέχρι και την τιμή της στο *design point* (100%), η ειδική κατανάλωση καυσίμου μειώνεται, ενώ μετά το 100% παρατηρείται μία μικρή αύξηση. Ανάλογη συμπεριφορά εντοπίζεται και στον βαθμό απόδοσης του συστήματος, δηλαδή αυξάνεται σταδιακά, μεγιστοποιείται στο 100% της παροχής μάζας καυσίμου, ενώ μετά από το συγκεκριμένο σημείο παρατηρείται μία μείωση.

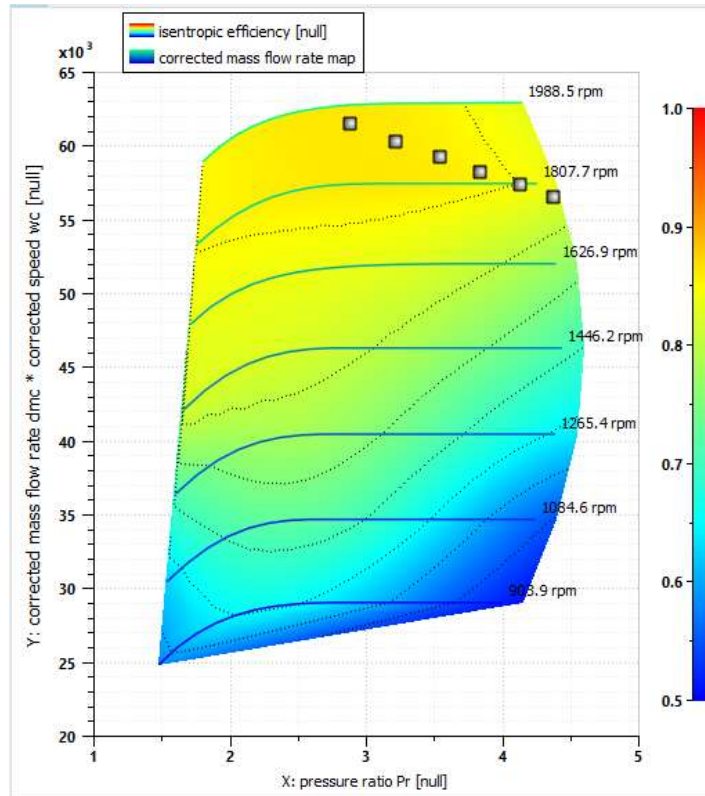
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα *off-design points* που απεικονίζονται στους χάρτες του συμπιεστή και των στροβίλων:



Εικόνα 6.20: Off-design points στον χάρτη συμπίεση.



Εικόνα 6.21: Off-design points στον χάρτη στρόβιλο.



Εικόνα 6.22: Off-design points στον χάρτη στρόβιλο ισχύος.

Αντίστοιχα με τις προηγούμενες περιπτώσεις, τα συγκεκριμένα *off-design points* βρίσκονται αρκετά κάτω από την γραμμή πάλμωσης, ενώ επιπλέον υπάρχει πιθανότητα εμφάνισης του φαινομένου του φραγμού (*chocking*) σε κάποιο σημείο της ροής.

7. Συμπεράσματα και Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Οι αεριοστρόβιλοι αποτελούν βασική διάταξη μετατροπής κινητικής ενέργειας, την οποία λαμβάνουν μέσω της ροής του αέρα, σε ωφέλιμο έργο. Έχουν μεγάλη εφαρμογή κυρίως στην βιομηχανία, αλλά τελευταία η εφαρμογή τους εντοπίζεται και στην ναυτιλία, κυρίως σε πολεμικά πλοία. Η ραγδαία ανάπτυξη των αεριοστροβίλων σε συνδυασμό με την υψηλή σε κόστος και διάρκεια μελέτη λειτουργίας του, οδήγησε στην ανάπτυξη εμπορικών λογισμικών προκειμένου να απλοποιηθεί σημαντικά η πολυπλοκότητα μελέτης ενός κύκλου αεριοστροβίλου. Στην παρούσα εργασία, μελετείται το εμπορικό λογισμικό *Simcenter Amesim*, το οποίο αγοράστηκε από το Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, αρχικά εξετάζοντας τις δυνατότητες που έχει ως προς τις διατάξεις αεριοστροβίλου γενικότερα. Στην συνέχεια, πραγματοποιήθηκε προσπάθεια προσέγγισης των επιδόσεων στο σημείο λειτουργίας (*design point*) ενός εμπορικού αεριοστροβίλου, του *LM 2500*, αξιοποιώντας έτοιμο μοντέλο ενός και δύο αξόνων στο *Amesim*. Η ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε τόσο στο μοντέλο *1-shaft* όσο και στο μοντέλο *2-shaft* έδειξε ότι η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου *T04* επιδρά σημαντικά στην τελική ισχύς που παράγεται, ενώ η μεταβολή των ισεντροπικών βαθμών απόδοσης των στροβίλων επιδρούν σημαντικά στην μεταβολή του θερμικού βαθμού απόδοσης. Τέλος, μέσω του λογισμικού *Amesim* πραγματοποιήθηκε ανάλυση λειτουργίας σε σημεία εκτός του *design point*, σε μοντέλο αεριοστροβίλου δύο αξόνων, μεταβάλλοντας συγκεκριμένες παραμέτρους, με απώτερο σκοπό την κατανόηση της συμπεριφοράς των επιδόσεων του κύκλου *Wk*, *nθ*, *sfc* και *Texh*.

Κατά την διάρκεια της ανωτέρω μελέτης, προέκυψαν ενδιαφέροντα θέματα, κυρίως όσον αφορά το λογισμικό, τα οποία λόγω της φύσης τους ή λόγω χρονικού περιορισμού δεν ήταν εφικτό να αναλυθούν στην παρούσα εργασία. Ως προτάσεις για μελλοντική έρευνα και εξέλιξης της εργασίας, μπορούν να εφαρμοστούν οι κάτωθι:

- Σύζευξη του κύκλου αεριοστροβίλου σε συνδυασμό με τον κύκλο *Rankine* (αξιοποίηση καυσαερίων) και εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων με σκοπό την επίτευξη ικανοποιητικού βαθμού απόδοσης.
- Μελέτη προφίλ λειτουργίας για ένα δεδομένο πλοίο με συγκεκριμένο ταξίδι, προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα για τις καταναλώσεις του, μέσω του λογισμικού *Amesim*.

8. Βιβλιογραφία

1. *Amesim 4.2 User Manual*. (2004).
2. Electric, G. (2021). *LM 2500 Marine Gas Turbine Datasheet*. General Electric.
3. HIH Saravanamuttoo, H.Cohen, GFC Rogers. (χ.χ.). *Gas Turbine Theory* (5th εκδ.). India: Pearson Education Ltd.
4. (2021). *Simcenter Amesim 2021.1 - Gas Turbine Engine Library User's Guide*. Siemens.
5. Πολυζάκης, Α. (2018). *Λειτουργία Αεριοστροβίλων: Προώθηση και Ισχύς*. Πτολεμαΐδα: Power Heat Cool.
6. Ρακόπουλος, Κ. Δ. (2000). *Αρχές Βιομηχανικών Αεριοστροβίλων*. Foundas.
7. Ρήγος, Ι. (2021). *Συστήματα πρόωσης φορτηγών πλοίων μεταφοράς LNG - Έμφαση σε κινητήρα συνδυασμένου κύκλου αεριοστροβίλου - ατμοστροβίλου*. Αθήνα.
8. *Στρόβιλος*. (2023, February 8). Ανάκτηση από Wikipedia: <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A3%CF%84%CF%81%CF%8C%CE%B2%CE%B9%CE%BB%CE%BF%CF%82>
9. Στυλιανή, Ρ. (2010). *Η Χρήση των Αεριοστροβίλων ως Μέσο Πρόωσης στην Εμπορική Ναυτιλία*. Πειραιάς. Ανάκτηση Ιούνιος 2023
10. Σημειώσεις Μαθήματος Ειδικά Κεφάλαια Θερμικών Στροβιλομηχανών, Δρ. Κουμπογιάννης Δημήτριος, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανικών, ΠΑΔΑ.

