



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Εργαστήριο Ναυτικής Μηχανολογίας

---

Λειτουργία κινητήρα CAT C9.3 και  
ηλεκτρικού κινητήρα ABB πειραματικής  
κλίνης HIPPO-2 σε διάφορες συνθήκες  
φορτίου-στροφών και σύγκριση με μοντέλο  
προσομοίωσης

---

Διπλωματική Εργασία

Μουτζουράκης Δημήτριος

Επιβλέπων: Καθηγητής Ν. Π. Κυρτάτος

Μέλος Επιτροπής: Καθηγητής Λ. Καϊκτσής

Μέλος Επιτροπής: Επίκουρος Καθηγητής Γ. Παπαλάμπρου

Αθήνα, Ιούνιος 2020



# Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	3
Περίληψη.....	5
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	7
1.1 Θερμοδυναμική μοντελοποίηση κινητήρων.....	7
1.2 Στόχος εργασίας.....	8
1.3 Βιβλιογραφική επισκόπηση.....	9
Κεφάλαιο 2: Μηχανή και πειραματική διάταξη.....	11
2.1 CAT C9.3 ACERT.....	11
2.1.1 Γενική περιγραφή.....	11
2.1.2 Μονάδα ελέγχου.....	13
2.1.3 Στρόβιλος-συμπιεστής.....	13
2.1.4 Σύστημα καυσίμου.....	14
2.1.5 Σύστημα απορρύπανσης.....	15
2.2 Πειραματική κλίση HIPPO-2.....	17
2.2.1 Ηλεκτρική πέδη.....	17
2.2.2 Ηλεκτροκινητήρας.....	18
2.2.3 Συλλογή δεδομένων.....	19
2.3 Μετρήσεις και αισθητήρες.....	22
2.3.1 Αισθητήρες CAT C9.3 ACERT.....	22
2.3.2 Αισθητήρες ηλεκτρικής πέδης και ηλεκτροκινητήρα.....	26
Κεφάλαιο 3: Θερμοδυναμική μοντελοποίηση.....	27
3.1 Αρχή λειτουργίας.....	27
3.2 Βασικά μηχανολογικά στοιχεία και μοντέλα.....	29
3.2.1 Μοντέλα κυλίνδρων.....	31
3.2.2 Μοντέλο συμπιεστή.....	37
3.2.3 Μοντέλο στροβίλου.....	39
3.2.4 Μοντέλα δοχείων, βαλβίδων και εξωτερικών συνθηκών.....	39
Κεφάλαιο 4: Μοντελοποίηση ηλεκτροκινητήρα.....	41
4.1 Γενικά στοιχεία.....	41
4.2 Προσέγγιση Willans.....	42

Κεφάλαιο 5: Ανάπτυξη μοντέλου προσομοίωσης .....	45
5.1 Διάρθρωση δομής .....	45
5.2 Διαδικασία ανάπτυξης μοντέλου .....	46
5.3 Υπολογισμός ροής EGR.....	48
5.4 Εξίσωση ροπής ηλεκτροκινητήρα .....	50
5.5 Σχεδιασμός σεναρίων λειτουργίας (Case Studies).....	51
5.6 Συνεργασία μοντέλων κύριας μηχανής και ηλεκτροκινητήρα .....	55
Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα προσομοιώσεων .....	57
6.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων σταθερής λειτουργίας .....	57
6.2 Παρουσίαση transient αποτελεσμάτων.....	61
6.2.1 Αποτελέσματα 1400 RPM .....	62
6.2.2 Αποτελέσματα 1800 RPM .....	66
6.3 Παρουσίαση υβριδικών αποτελεσμάτων .....	70
6.3.1 Case Study A .....	71
6.3.2 Case Study B .....	77
6.4 Συμπεράσματα .....	83
6.5 Προτάσεις για μελλοντική εργασία.....	84
Παράρτημα Α: Λίστα Διαγραμμάτων .....	87
Παράρτημα Β: Λίστα Πινάκων .....	89
Βιβλιογραφία .....	91

# Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ναυτικής Μηχανολογίας (Ε. Ν. Μ.) της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου υπό την επίβλεψη του Καθηγητή Νικόλαου Κυρτάτου.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή κύριο Νικόλαο Κυρτάτο για την ευκαιρία που μου έδωσε στο να πραγματοποιήσω την διπλωματική μου εργασία στο Ε. Ν. Μ. Η καθοδήγηση, οι συμβουλές και τα εργαλεία που προσέφερε αποτέλεσαν πολύ σημαντικά τμήματα της διαδικασίας ανάπτυξης της εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, τον κύριο Λάμπρο Καϊκτσή, Καθηγητή της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών και τον κύριο Γεώργιο Παπαλάμπρου, Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω θερμά τους Δ. Μιχάλη Φωτεινό και Υ.Δ. Νικόλαο Πλανάκη για την συνεχή στήριξη, καθοδήγηση και συνεργασία που παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια και το εύρος της εργασίας, χωρίς την συνδρομή των οποίων η εν λόγω διπλωματική εργασία δεν θα μπορούσε να ολοκληρωθεί.

Τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου. Η στήριξη και η κατανόησή τους καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της πολύ σημαντικής περιόδου της φοιτητικής μου ζωής ήταν καθοριστική.



# Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται παρουσίαση της διαδικασίας θερμοδυναμικής μοντελοποίησης της διάταξης της πειραματικής κλίνης HIPPO-2 του Εργαστηρίου Ναυτικής Μηχανολογίας σε διάφορα σενάρια λειτουργίας.

Αρχικά, γίνεται μια σύντομη αναφορά στην σημασία της διαδικασίας της μοντελοποίησης και των εργαλείων που προκύπτουν από αυτή για τη μελέτη και την ανάπτυξη κινητήρων.

Στη συνέχεια, η πειραματική κλίση αναλύεται σε επιμέρους συστήματα και περιγράφεται η λειτουργία του καθενός. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στο κομμάτι της κύριας μηχανής και των τμημάτων από τα οποία αποτελείται. Επιπλέον, περιγράφονται οι μονάδες της ηλεκτρικής πέδης και του ηλεκτροκινητήρα καθώς και το σύστημα συλλογής δεδομένων από αυτά. Όσον αφορά τις μετρήσεις της κύριας μηχανής, τα μεγέθη κατηγοριοποιούνται και αναφέρονται οι θέσεις των αισθητήρων από όπου λαμβάνονται.

Ακολουθεί η παρουσίαση του λογισμικού μέσω του οποίου πραγματοποιήθηκε η θερμοδυναμική μοντελοποίηση της κύριας μηχανής. Παράλληλα, παρουσιάζονται τα υπό μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν και οι αντίστοιχες εξισώσεις.

Ομοίως, γίνεται η ανάλυση της μεθόδου μοντελοποίησης του ηλεκτροκινητήρα και της συσχέτισης των αντίστοιχων μεγεθών που εμπλέκονται στην διαδικασία των πειραματικών μετρήσεων.

Ύστερα, περιγράφεται η τελική μορφή του μοντέλου, η διαδικασία που ακολουθήθηκε με βάση τα όσα έχουν αναλυθεί προηγουμένως και οι υπολογισμοί που πραγματοποιήθηκαν για την ολοκλήρωσή του. Στους υπολογισμούς αυτούς περιλαμβάνονται και τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης του ηλεκτροκινητήρα. Επίσης, αναφέρεται ο τρόπος και τα κριτήρια με τα οποία σχεδιάστηκαν τα σενάρια λειτουργίας, μέσω των οποίων εξετάζεται η απόκριση του μοντέλου που δημιουργήθηκε.

Τέλος, παρουσιάζεται το σύνολο των αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα αφορούν την προσομοίωση της πειραματικής λειτουργίας και την επικύρωση του μοντέλου. Εξετάζεται, επίσης, η συμπεριφορά του μοντέλου στα σενάρια λειτουργίας που προαναφέρθηκαν. Με βάση τα παραπάνω, συγκεντρώνονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν και γίνονται προτάσεις για μελλοντική εργασία.





# Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

## 1.1 Θερμοδυναμική μοντελοποίηση κινητήρων

Η χρήση των θερμοδυναμικών μοντέλων των κινητήρων αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα τμήματα στην διαδικασία ανάπτυξης αυτών. Είτε πρόκειται για την αρχική σχεδίαση της διάταξης και των προδιαγραφών μιας μηχανής εσωτερικής καύσης, ή για την μελέτη της αποδοτικότητας και της αξιοπιστίας της, τα θερμοδυναμικά μοντέλα είναι συχνά η ταχύτερη και οικονομικότερη λύση για την προσέγγιση των προβλημάτων αυτών.

Η λειτουργία των μηχανών εσωτερικής καύσης είναι περίπλοκη. Γι' αυτό το λόγο, με τη βοήθεια των θερμοδυναμικών μοντέλων, αυτή η πολυδιάστατη διαδικασία μπορεί να αναλυθεί σε επιμέρους τμήματα. Με αυτόν τον τρόπο, δίνεται η δυνατότητα για μελέτη παραμέτρων που δεν δύναται ή είναι δύσκολο να μετρηθούν ή να παρατηρηθούν πειραματικά. Φαινόμενα που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της καύσης εντός των κυλίνδρων αποτελούν παράδειγμα στοιχείων των οποίων η μελέτη διευκολύνεται από τη χρήση των μεθόδων των θερμοδυναμικών μοντέλων σε πολλές περιπτώσεις.

Εκτός των παραπάνω, η θερμοδυναμική μοντελοποίηση αποτελεί την καλύτερη επιλογή όσον αφορά την οικονομική εκτέλεση εκτενών παραμετρικών μελετών της λειτουργίας των μηχανών. Η διαδικασία δοκιμών της λειτουργίας ενός κινητήρα υπό διαφορετικές συνθήκες αποτελεί σημαντικό τμήμα στη διαδικασία ανάπτυξης αυτού· μια διαδικασία ιδιαίτερα χρονοβόρα σε πειραματικό επίπεδο.

Τέλος, η χρήση των μεθόδων αυτών επιτρέπει τον καθορισμό του συνδυασμού των σχεδιαστικών παραμέτρων ενός κινητήρα με τρόπο τέτοιο, ώστε να προκύπτει η βέλτιστη δυνατή λύση ανάλογα με τους στόχους σχεδιασμού. Το ίδιο ισχύει και για το στάδιο χρήσης της μηχανής από την οπτική του χειριστή. Ο συνδυασμός παραμέτρων όπως το φορτίο και οι στροφές της μηχανής αποτελούν αντικείμενο μελέτης για την αποδοτικότερη χρήση και λειτουργία αυτής.

Συνολικά, η θερμοδυναμική μοντελοποίηση των μηχανών αποτελεί μια διαδομένη, πλέον, μέθοδο ανάλυσης και αξιολόγησης της λειτουργίας αυτής καθώς και των υποσυστημάτων από τα οποία αποτελείται. Τα πλεονεκτήματα που προσφέρει περιλαμβάνουν (1):

- Μικρότερη διάρκεια σχεδιασμού
- Μείωση του κόστους ανάπτυξης
- Βελτιστοποίηση της λειτουργίας (κατανάλωση, εκπομπές αερίων κ.α.)
- Δημιουργία βάσης δεδομένων για μελλοντική ανάπτυξη
- Παροχή ολοκληρωμένης εικόνας όσον αφορά τις παραμέτρους των υποσυστημάτων, την επίδρασή τους στην λειτουργία της μηχανής και τα περιθώρια βελτίωσης αυτών

## 1.2 Στόχος εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μοντελοποίηση της λειτουργίας συστήματος μηχανής εσωτερικής καύσης και ηλεκτροκινητήρα σε κατάσταση σταθερής λειτουργίας και σε μεταβατική απόκριση. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στο τμήμα της λειτουργίας της κύριας μηχανής και στην θερμοδυναμική μοντελοποίηση αυτής, αποδεδειγμένη από την σύζευξη μέσω κοινού άξονα με τον ηλεκτροκινητήρα. Επιπλέον, η παρούσα εργασία στοχεύει στην μελέτη της λειτουργίας της μηχανής τόσο ως μοναδικό μέσο παραγωγής ροπής, όσο και σε συνδυασμό με τη χρήση ενός ηλεκτροκινητήρα σε προσομοίωση υβριδικής λειτουργίας.

Όπως και στην περίπτωση της κύριας μηχανής, έτσι και στο κομμάτι του ηλεκτροκινητήρα γίνεται προσπάθεια δημιουργίας ενός μοντέλου πρόβλεψης των παραγόμενων μεγεθών κατά τη λειτουργία του. Με αυτόν τον τρόπο, τα δύο κύρια τμήματα του συστήματος μελετώνται ξεχωριστά πριν την σύζευξή τους και την παραγωγή ροπής σε κοινό άξονα.

Η ορθότητα των αποτελεσμάτων της μοντελοποίησης οφείλουν να αξιολογούνται με βάση ένα σημείο αναφοράς. Γι' αυτό το λόγο, τα αποτελέσματα της προαναφερθείσας μελέτης συγκρίνονται με τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα για επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων.

Η επικύρωση των μοντέλων πραγματοποιήθηκε μέσω της λήψης πειραματικών μετρήσεων στην εγκατεστημένη διάταξη HIPPO-2 του Εργαστηρίου Ναυτικής Μηχανολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών. Οι μετρήσεις λήφθηκαν θέτοντας τη λειτουργία της μηχανής σε διάφορα σενάρια, ώστε να προσομοιάζονται τα steady-state και τα transient φαινόμενα. Το σύνολο των αρχείων των μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν αποτελείται από μετρήσεις που λήφθηκαν για την εξυπηρέτηση της παρούσας εργασίας (λειτουργία του κινητήρα) και από μετρήσεις που διέθετε το αρχείο του εργαστηρίου (λειτουργία ηλεκτροκινητήρα).

Σκοπός της προαναφερθείσας διαδικασίας είναι η δημιουργία ενός εργαλείου για την πρόβλεψη και την αξιολόγηση των κύριων μεγεθών που προκύπτουν από την λειτουργία της πειραματικής κλίνης του εργαστηρίου σε ένα εύρος καταστάσεων. Με βάση τα παραπάνω, δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας σεναρίων λειτουργίας πέραν αυτών που έχουν πραγματοποιηθεί πειραματικά, όπως για τη μελέτη της απόκρισης του συστήματος και σε χαμηλά φορτία.

### 1.3 Βιβλιογραφική επισκόπηση

Η διπλωματική εργασία βασίστηκε σε ένα σύνολο βιβλιογραφικών πηγών που αφορούν τόσο το θεωρητικό υπόβαθρο των μοντέλων που αναπτύχθηκαν όσο και την άντληση πληροφοριών από εργασίες που πραγματοποιήθηκαν πάνω στο αντικείμενο. Έτσι, παρουσιάζονται αρχικά οι πηγές που παρείχαν τις θεωρητικές γνώσεις που χρειάστηκαν για την παρούσα εργασία, ενώ στη συνέχεια γίνεται μια σύντομη αναφορά στις εργασίες που πραγματοποιήθηκαν στο E.N.M. οι οποίες συνέβαλαν στην δόμηση των μοντέλων του θέματος του παρόντος κειμένου.

Η κατανόηση των βασικών στοιχείων της διαδικασίας της μοντελοποίησης καθώς και της σημασίας αυτής έγινε μέσω του (1) όπου περιγράφονται οι αρχές της θερμοδυναμικής μοντελοποίησης κινητήρων. Επιπλέον, μέσω αυτού γίνεται και η ανάλυση του μοντέλου της καύσης που χρησιμοποιείται, ενώ εξάγονται και σημαντικά συμπεράσματα για τη συμπεριφορά των καμπυλών των αντίστοιχων αποτελεσμάτων, όπως περιγράφεται στο 323.2.1.2.

Επιπλέον, γίνεται χρήση πληροφοριών μέσω των (6), (14), (15), (16) όσον αφορά τη λειτουργία των τμημάτων του κινητήρα Diesel αλλά και των σχέσεων που χρησιμοποιούνται για τα μοντέλα που περιγράφουν τις λειτουργίες της μεταφοράς θερμότητας και των τριβών που λαμβάνουν χώρα. Η άντληση των δεδομένων αυτών δίνει την δυνατότητα για καλύτερη κατανόηση των διεργασιών της λειτουργίας του κινητήρα πέρα από την απλή χρήση τους μέσω του λογισμικού μοντελοποίησης.

Όσον αφορά το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για τη θερμοδυναμική μοντελοποίηση, το σύνολο των δυνατοτήτων και των επιλογών που προσφέρει καθώς και το πλήθος των μοντέλων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν περιγράφονται αναλυτικά στο (12). Το εγχειρίδιο αυτό, εκτός από οδηγίες για τη χρήση του λογισμικού, προσφέρει και το κατάλληλο θεωρητικό υπόβαθρο που απαιτείται για κάθε ένα από τα μοντέλα που διατίθενται.

Από την πλευρά του ηλεκτροκινητήρα, αλλά και όσον αφορά το σύνολο των θεμάτων που προκύπτουν κατά την υβριδική λειτουργία της πειραματικής διάταξης, η χρήση του μοντέλου που παρουσιάζεται στην εργασία έγινε σύμφωνα με τις πληροφορίες που δίνονται στα (17) και (18). Επιπλέον, γίνεται σύγκριση των πληροφοριών των πειραματικών αποτελεσμάτων της λειτουργίας του ηλεκτροκινητήρα με τα αντίστοιχα δεδομένα που προκύπτουν μέσω του (17).

Αναφορικά με άλλες διπλωματικές εργασίες που έχουν πραγματοποιηθεί στον τομέα του E.N.M., παρουσιάζονται αυτές στις οποίες βασίστηκε η παρούσα δουλειά.

Στο (19), περιγράφεται η δημιουργία ενός μοντέλου που αποτελείται από το θερμοδυναμικό τμήμα του κινητήρα Diesel το οποίο αναπτύσσεται σε περιβάλλον Matlab/Simulink και το

τμήμα της φόρτισης της έλικας που περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά της αντίστασης, της πρόωσης και της αδράνειας πλοίου αντίστοιχης προωστικής εγκατάστασης με αυτή της πειραματικής διάταξης του εργαστηρίου. Το κάθε ένα από τα υποσυστήματα που χρησιμοποιούνται, συνεργάζονται μεταξύ τους για την παραγωγή αποτελεσμάτων που συμφωνούν με τα αντίστοιχα της βιβλιογραφίας. Στόχος της εργασίας είναι η παραγωγή αποτελεσμάτων που ανταποκρίνονται σε δυναμική λειτουργία της κύριας μηχανής του πλοίου σε διάφορες κινήσεις αυτού.

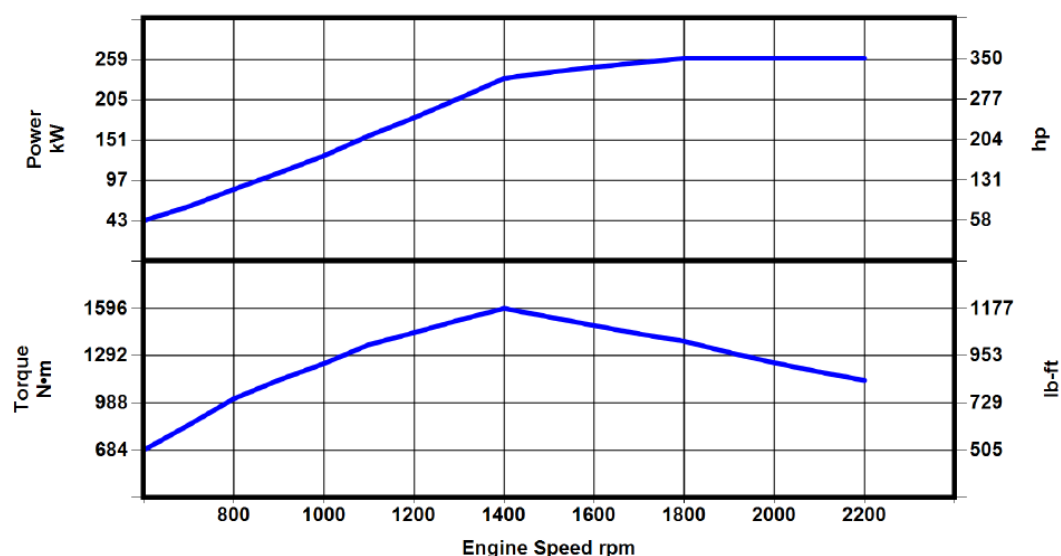
Τέλος, στο (20) παρουσιάζεται η μοντελοποίηση του κινητήρα Diesel της πειραματικής κλίνης του E.N.M. μέσω ενός Mean Values μοντέλου. Το περιβάλλον ανάπτυξης αυτού είναι το Matlab/Simulink ενώ η επικύρωση των αποτελεσμάτων σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας γίνεται μέσω των αντίστοιχων πειραματικών δεδομένων. Κάθε ένα από τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του συνολικού, παρουσιάζεται μαζί με το θεωρητικό υπόβαθρο που προκύπτει από τη βιβλιογραφία.

## Κεφάλαιο 2: Μηχανή και πειραματική διάταξη

### 2.1 CAT C9.3 ACERT

#### 2.1.1 Γενική περιγραφή

Η μηχανή εσωτερικής καύσης που μελετήθηκε είναι το μοντέλο C9.3 ACERT της Caterpillar. Πρόκειται για έναν υπερπληρωμένο, τετράχρονο κινητήρα Diesel 6 κυλίνδρων σε σειρά, με μέγιστη ισχύ ίση με 261 kW στις 1800-2200 RPM και μέγιστη ροπή 1596 Nm στις 1400 RPM. Χρησιμοποιεί ηλεκτρονικό σύστημα έγχυσης καυσίμου υψηλής πίεσης, ενώ η ποσότητα του καυσίμου ελέγχεται ηλεκτρονικά μέσω του ECU (2.1.2). Το εύρος των στροφών του είναι 600-2200 RPM. Τα παραπάνω στοιχεία συνοψίζονται στα διαγράμματα απόδοσης αυτού (2).

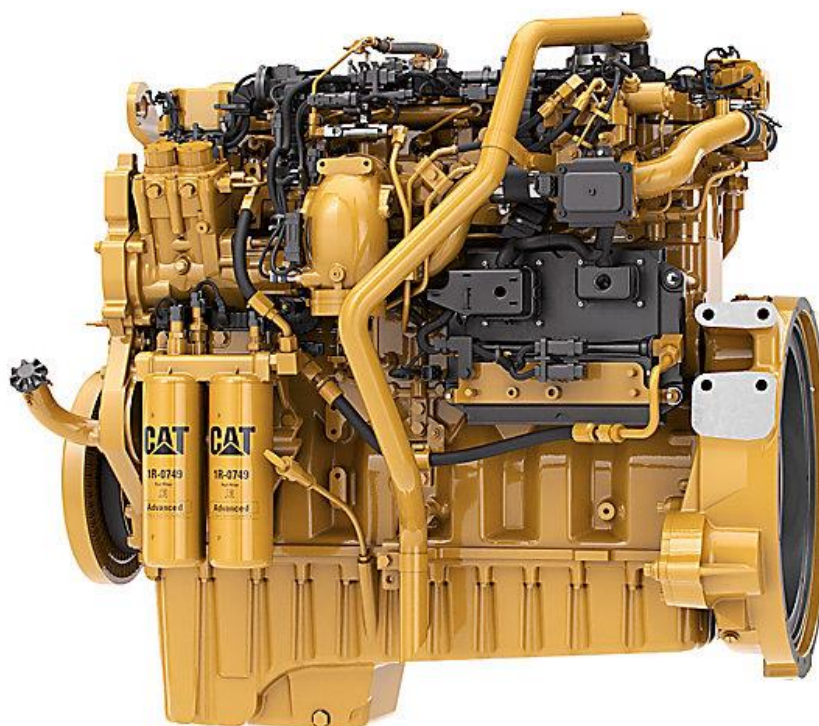


Διάγραμμα 2.1.1: Απόδοση ροπής και ισχύος CAT C9.3 ACERT

Ομοίως, το σύνολο των χαρακτηριστικών της μηχανής παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1.1 (3).

Πίνακας 2.1.1: Χαρακτηριστικά CAT C9.3 ACERT

Παράμετρος	Τιμή
Μέγιστη ισχύς (kW)	261
Μέγιστη ροπή (Nm)	1596
Εύρος στροφών (RPM)	600-2200
Αριθμός κυλίνδρων	6
Διάτρημα (mm)	115
Διαδρομή εμβόλου (mm)	149
Σχέση συμπίεσης	17.0:1
Μήκος (mm)	1150
Πλάτος (mm)	827
Ύψος (mm)	1123
Βάρος (kg)	885



Εικόνα 2.1.1: CAT C9.3 ACERT

Στη συνέχεια, γίνεται σύντομη περιγραφή των κύριων τμημάτων που απαρτίζουν το σύνολο της μηχανής καθώς και της συμβολής αυτών στη λειτουργία του κινητήρα (4).

### 2.1.2 Μονάδα ελέγχου

Ο κινητήρας ρυθμίζει ένα μεγάλο εύρος των λειτουργιών της μέσω της κεντρικής μονάδας ελέγχου ή αλλιώς ECU (Engine Control Unit). Το ECU αποτελεί τον “εγκέφαλο” της μηχανής ορίζοντας τα όρια της λειτουργίας της είτε σε σταθερά φορτία είτε σε μεταβατικά φαινόμενα.

Ένας από τους κύριους ρόλους του ECU είναι η ρύθμιση του εγχεόμενου σε κάθε κύκλο καυσίμου. Λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους όπως η ταχύτητα της μηχανής και ο εισαγόμενος στους κυλίνδρους αέρας, υπολογίζει την κατάλληλη ποσότητα καυσίμου η οποία τροφοδοτείται εν τέλει στους θαλάμους καύσης μέσω της αντίστοιχης εντολής.

Ακόμη, το ECU χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της απαιτούμενης ποσότητας καυσαερίων που θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν από το σύστημα ανακυκλοφορίας καυσαερίων για την διατήρηση των παραγώγων της καύσης στα επιθυμητά επίπεδα. Άλλες λειτουργίες του αφορούν τον υπολογισμό μεγεθών με βάση τις τιμές που προκύπτουν από τους αισθητήρες της μηχανής και την έκδοση των κατάλληλων εντολών με γνώμονα την ασφάλη κι αποδοτική λειτουργία της μηχανής.

### 2.1.3 Στρόβιλος-συμπιεστής

Όπως προαναφέρθηκε, ο κινητήρας λειτουργεί με υπερπλήρωση, κατά την οποία ο συμπιεστής ωθεί μεγαλύτερη μάζα αέρα στην πολλαπλή της εισαγωγής και στη συνέχεια στους κυλίνδρους, επιτρέποντας για παραγωγή της απαιτούμενης ισχύος με χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου. Μεταξύ του συμπιεστή και της πολλαπλής εισαγωγής παρεμβάλλεται ένα ψυγείο για την διατήρηση της θερμοκρασίας του εισερχόμενου αέρα στους κυλίνδρους σε χαμηλά επίπεδα, με αποτέλεσμα την διατήρηση της υψηλής πυκνότητας του μείγματος που οδηγείται στους κυλίνδρους και επομένως τη δυνατότητα για εισαγωγή μεγαλύτερης ποσότητας αέρα και καυσίμου ανά κύκλο λειτουργίας. Τα παράγωγα αέρια της καύσης με τη σειρά τους στρέφουν τον στρόβιλο στην έξοδο της πολλαπλής της εξαγωγής, ο οποίος είναι συνδεδεμένος μέσω κοινού άξονα με τον συμπιεστή δίνοντάς του κινητική ενέργεια κατά τη διαδικασία. Το μοντέλο του συμπιεστή-στροβίλου με το οποίο είναι εξοπλισμένος ο κινητήρας είναι το Garrett GTB3782 (5).

Πίνακας 2.1.2: Χαρακτηριστικές διαστάσεις GTB3782

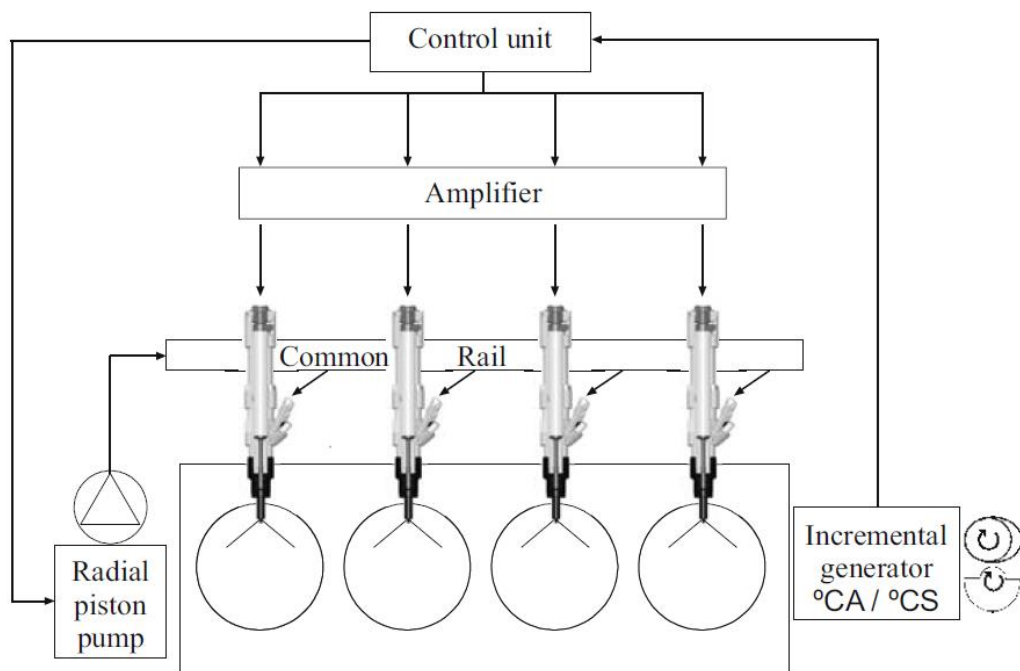
Συμπιεστής		Στρόβιλος
Διάμετρος εισαγωγής φτερωτής (mm)	Διάμετρος εξαγωγής φτερωτής (mm)	Διάμετρος φτερωτής (mm)
59.10	82.00	72.50



Εικόνα 2.1.2: Garrett GTB3782

#### 2.1.4 Σύστημα καυσίμου

Η υπό μελέτη μηχανή χρησιμοποιεί το σύστημα του “common rail injector” για τη ρύθμιση της έγχυσης του καυσίμου. Το καύσιμο τροφοδοτείται σε ένα κοινό για όλους του κυλίνδρους σωληνοειδή χώρο (common rail) μέσω της αντλίας καυσίμου υψηλής πίεσης. Με τη σειρά του αυτός συνδέεται με τον εγχυτήρα του κάθε κυλίνδρου. Στο common rail, το οποίο λειτουργεί ως ένας συσσωρευτής πίεσης, συγκεντρώνεται το καύσιμο σε υψηλές πιέσεις για τον ψεκασμό του στους κυλίνδρους (6).



Εικόνα 2.1.3: Γενική διάταξη τυπικού συστήματος common rail

Κάθε εγχυτήρας είναι εξοπλισμένος με μια ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα για τον έλεγχο του εγχεόμενου καυσίμου σε κάθε κύκλο. Αυτή η διάταξη είναι υπεύθυνη για την ποσότητα καυσίμου που στέλνεται στον θάλαμο καύσης μέσω του αντίστοιχου σήματος από το ECU. Η ενεργοποίηση των εγχυτήρων σε κάθε κύκλο για την τροφοδοσία των κυλίνδρων γίνεται



μέσω ηλεκτρικών σημάτων υψηλών τάσεων (της τάξεως των 70V) και τιμών της έντασης του ρεύματος.

Τέλος, το σύστημα καυσίμου της μηχανής είναι εξοπλισμένο με διάταξη διπλού φίλτρου. Τα φίλτρα αυτά εξυπηρετούν τον καθαρισμό του καυσίμου που οδηγείται στο common rail.

### 2.1.5 Σύστημα απορρύπανσης

Στην πλευρά των καυσαερίων, η μηχανή διαθέτει ένα σύνολο υποσυστημάτων απορρύπανσης για την επίτευξη των απαιτούμενων περιβαλλοντολογικών κριτηρίων που τίθενται σύμφωνα με τους κανονισμούς. Το σύνολο αυτό αποτελεί το aftertreatment unit της μηχανής με την ονομασία CEM (Clean Emissions Module). Μεταξύ άλλων το CEM περιλαμβάνει ένα Selective Catalytic Reducer (SCR) και ένα φίλτρο κατακράτησης στερεών σωματιδίων (DPF). Επιπλέον, η μηχανή κάνει χρήση της τεχνολογίας ανακυκλοφορίας καυσαερίων (EGR) για την μείωση των εκπομπών των οξειδίων του αζώτου που θα αναλυθεί περαιτέρω στη συνέχεια. Είναι σχεδιασμένη για να πληροί τα κριτήρια των U.S. EPA Tier 4 και EU Tier VI.

Ο περιορισμός του U.S. EPA Tier 4, αφορά τα κριτήρια που παρουσιάστηκαν το 2004 και τέθηκαν σε ισχύ σταδιακά στο διάστημα 2008-2015 από το γραφείο της προστασίας περιβάλλοντος της Αμερικής U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency). Το σύνολο των ρυθμίσεων αυτών στοχεύει στην περαιτέρω μείωση των εκπομπών αιωρούμενων σωματιδίων και οξειδίων του αζώτου (PM και NO<sub>x</sub> αντίστοιχα) κατά 90% σε σχέση με τα επίπεδα των αντίστοιχων κανονισμών Tier 3. Όσον αφορά τους κανονισμούς EU Tier VI, οι περιορισμοί για τις “non-road mobile machinery” (NRMM) μηχανές όπου εμπίπτει η μηχανή της παρούσας μελέτης, εναρμονίζονται πλήρως με τους κανονισμούς του U.S. EPA Tier 4 (7). Οι τιμές των επιτρεπόμενων εκπομπών εμφανίζονται στον Πίνακα 2.1.3 (8):

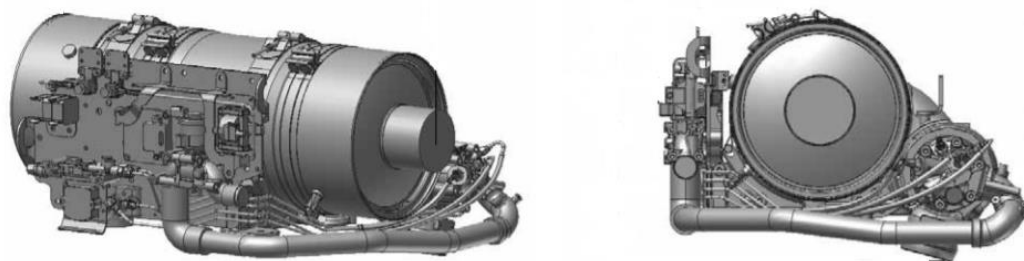
Πίνακας 2.1.3: Απαιτήσεις USA EPA Tier 4 (g/kWh)

Maximum engine power	Application	PM	NO <sub>x</sub>	NMHC	NO <sub>x</sub> + NMHC	CO
kW <19	All	0.40			7.5	6.6
19 ≤kW <56	All	0.03			4.7	5.0
56 ≤kW <130	All	0.02	0.40	0.19		5.0
130 ≤kW ≤560	All	0.02	0.40	0.19		3.5
	Generator sets	0.03	0.67	0.19		3.5
kW >560	All except generator sets	0.04	3.5	0.19		3.5

Η τεχνολογία ανακυκλοφορίας καυσαερίων είναι μια μέθοδος μείωσης των εκπομπών των οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>) από τα καυσαέρια που παράγονται από τις μηχανές εσωτερικής καύσης. Η λειτουργία της βασίζεται στην ώθηση ενός τμήματος των καυσαερίων που παράγονται ανά κύκλο λειτουργίας της μηχανής στους θαλάμους καύσης, αναμειγνύοντάς το με καθαρό αέρα εισαγωγής. Το μείγμα αυτό επιδρά στη καύση εντός των κυλίνδρων μειώνοντας την μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύσσεται, η οποία αποτελεί σημαντικό

παράγοντα σχηματισμού των NO<sub>x</sub>. Συνήθως, το σύστημα της ανακυκλοφορίας συνδυάζεται και με ψύξη του τμήματος των καυσαερίων που επανεισάγονται στους κυλίνδρους σε επίπεδα θερμοκρασίας παρόμοια με αυτά του αέρα εισαγωγής. Το σύστημα ψύξης βρίσκεται εφαρμογή και στην περίπτωση της υπό μελέτη μηχανής. Πιο συγκεκριμένα, η υπό μελέτη μηχανή χρησιμοποιεί το σύστημα ανακυκλοφορίας καυσαερίων υψηλής πίεσης. Σύμφωνα με αυτό, τα καυσαέρια που χρησιμοποιούνται για ανακυκλοφορία λαμβάνονται πριν το στρόβιλο και αναμειγνύονται με τη ροή καθαρού αέρα μετά τον συμπιεστή. Σε αντίθεση με τα συστήματα χαμηλής πίεσης, όπου τα καυσαέρια που χρησιμοποιούνται για ανακυκλοφορία λαμβάνονται σε σχεδόν ατμοσφαιρικές συνθήκες (δηλαδή λαμβάνονται μετά τον στρόβιλο), η ψύξη στα συστήματα υψηλής πίεσης είναι απαραίτητη έτσι ώστε η θερμοκρασία να συμβαδίζει με αυτή της ροής του καθαρού αέρα. Γενικά, αν και το σύστημα αυτό προσδίδει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα στη διάταξη (λόγω του ψυγείου), συνδέεται με σημαντικά πλεονεκτήματα όπως η αποφυγή κυκλοφορίας καυσαερίων μέσα από τον συμπιεστή, η οποία μπορεί να επιταχύνει τις φθορές αυτού.

Η μέθοδος SCR αποτελεί και αυτή έναν τρόπο μείωσης των NO<sub>x</sub> από τα παραγόμενα καυσαέρια. Βασίζεται στην χρήση ουρίας, η οποία μετατρέπεται σε αμμωνία και αντιδρά με τα NO<sub>x</sub>. Σε συνδυασμό με την δράση του DPF για την συγκράτηση των στερεών σωματιδίων στην εξαγωγή των αερίων, τα δύο αυτά συστήματα αποτελούν το κύριο τμήμα του συστήματος απορρύπανσης. Η λειτουργία του φίλτρου συντηρείται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της μηχανής μέσω συχνών καθαρισμών από τα σωματίδια που συγκρατούνται σε αυτό. Ο καθαρισμός αυτός γίνεται μέσω της ανάπτυξης υψηλών θερμοκρασιών στην περιοχή του φίλτρου με τη βοήθεια του μείγματος καυσίμου-καυσαερίων που εξυπηρετεί την οξείδωση των σωματιδίων και τροφοδοτείται σε αυτό. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, το σύστημα SCR δεν συμπεριλήφθηκε στην μοντελοποίηση του κινητήρα.

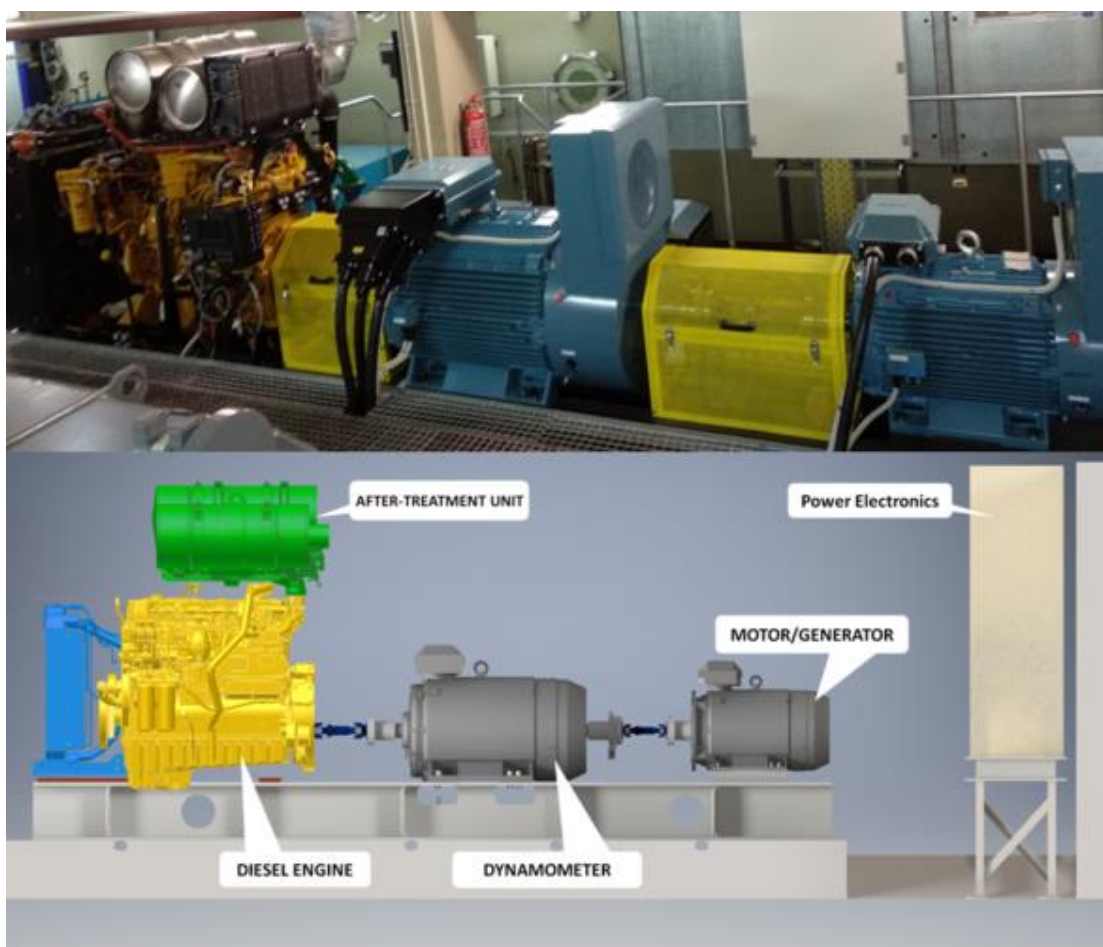


Εικόνα 2.1.4: Σύστημα απορρύπανσης

## 2.2 Πειραματική κλίνη HIPPO-2

Η μηχανή είναι εγκατεστημένη στην πειραματική κλίνη HIPPO-2 του Εργαστηρίου Ναυτικής Μηχανολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών. Η εγκατάσταση αποτελείται από την εν λόγω μηχανή εσωτερικής καύσης, μία ηλεκτρική πέδη και ένα ηλεκτρικό κινητήρα/γεννήτρια. Οι μονάδες αυτές είναι τοποθετημένες σε κοινή βάση συνδεδεμένες σε σειρά με κοινό άξονα.

Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά σε κάθε ένα από τα συστήματα της πειραματικής κλίνης ξεχωριστά, αναλύοντας τη λειτουργία και τα κύρια χαρακτηριστικά τους (9).



Εικόνα 2.2.1: Γενική διάταξη HIPPO-2

### 2.2.1 Ηλεκτρική πέδη

Για την προσομοίωση των φορτίων της έλικας σε σενάρια πειραμάτων πρόωσης, χρησιμοποιείται ένας τριφασικός, ασύγχρονος ηλεκτροκινητήρας, μέγιστης ισχύος 315 kW. Η λειτουργία της ηλεκτρικής πέδης είναι η προσομοίωση του συνολικού φορτίου που απαιτείται από την έλικα για τη διατήρηση της επιθυμητής κατάστασης λειτουργίας σε

σενάρια ναυτικών εφαρμογών. Ο ηλεκτροκινητήρας κατασκευάζεται από την ABB και τα χαρακτηριστικά του συνοψίζονται στον Πίνακας 2.2.1 (10).

Πίνακας 2.2.1: Χαρακτηριστικά ηλεκτρικής πέδης ABB

Παράμετρος	Τιμή
Μέγιστη ισχύς (kW)	315
Μέγιστη ροπή (Nm)	2021
Ροπή αδρανείας (kgm <sup>2</sup> )	6.9



Εικόνα 2.2.2: Ηλεκτρική πέδη ABB

## 2.2.2 Ηλεκτροκινητήρας

Ο ηλεκτρικός κινητήρας/γεννήτρια χρησιμοποιείται για την προσομοίωση των υβριδικών διατάξεων σε πειραματικό περιβάλλον. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την υποβοήθηση της μηχανής εσωτερικής καύσης στην επίτευξη των επιθυμητών τιμών της ροπής (λειτουργία κινητήρα), αλλά και για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, όταν η κύρια μηχανή είναι ικανή να παραλάβει ολόκληρο το απαιτούμενο φορτίο στον άξονα (λειτουργία γεννήτριας). Τα διάφορα σενάρια της υβριδικής λειτουργίας εξετάζονται περαιτέρω στη συνέχεια.

Στην παρούσα εφαρμογή, η πειραματική κλίση είναι εξοπλισμένη με έναν ασύγχρονο τριφασικό ηλεκτροκινητήρα ABB μέγιστης ισχύος 90 kW στις 1483-2200 RPM και μέγιστης ροπής 579 Nm στις 1483 RPM. Τα χαρακτηριστικά του συνοψίζονται στον Πίνακας 2.2.2 (11).

Πίνακας 2.2.2: Χαρακτηριστικά ηλεκτροκινητήρα ABB

Παράμετρος	Τιμή
Μέγιστη ισχύς (kW)	90
Μέγιστη ροπή (Nm)	579
Ροπή αδρανείας (kgm <sup>2</sup> )	1.73



Εικόνα 2.2.3: Ηλεκτροκινητήρας ABB

### 2.2.3 Συλλογή δεδομένων

Η πειραματική διάταξη του HIPPO-2 δίνει τη δυνατότητα για συλλογή πληθώρας δεδομένων σχετικά με τη λειτουργία της κύριας μηχανής, της ηλεκτρικής πέδης και του ηλεκτροκινητήρα. Ο έλεγχος και η παρακολούθηση των δεδομένων της ηλεκτρικής πέδης και του ηλεκτροκινητήρα πραγματοποιούνται από τους ABB drives (Εικόνα 2.2.4). Το μοντέλο των ABB drives είναι το ACS 800 το οποίο συνεργάζεται με το πρωτόκολλο επικοινωνίας CANopen για τη λήψη και αποθήκευση των δεδομένων. Η διάταξη των ABB drives και όλων των σχετικών ηλεκτρονικών τμημάτων είναι εγκατεστημένα ξεχωριστά από την πειραματική κλίση.

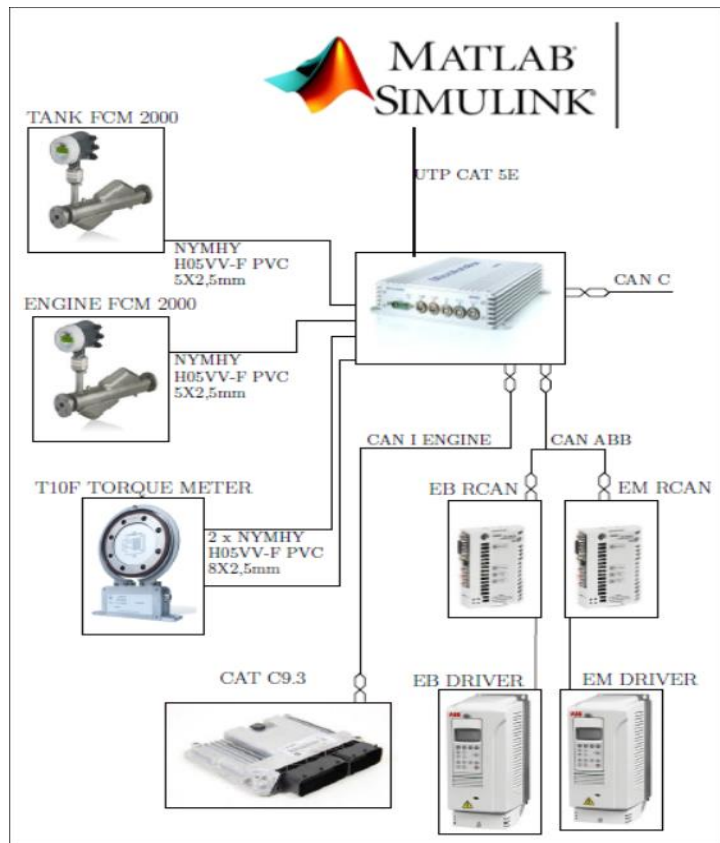


**Εικόνα 2.2.4: ABB ACS 800 drives**

Η πλατφόρμα που επιτρέπει την λήψη των δεδομένων είναι το dSpace Micro Autobox II DS1401/1511 το οποίο είναι προγραμματισμένο σε περιβάλλον MATLAB/Simulink. Στην συνέχεια παρουσιάζεται η γενική διάταξη του ολικού συστήματος λήψης δεδομένων του HIPPO-2 (Εικόνα 2.2.6).

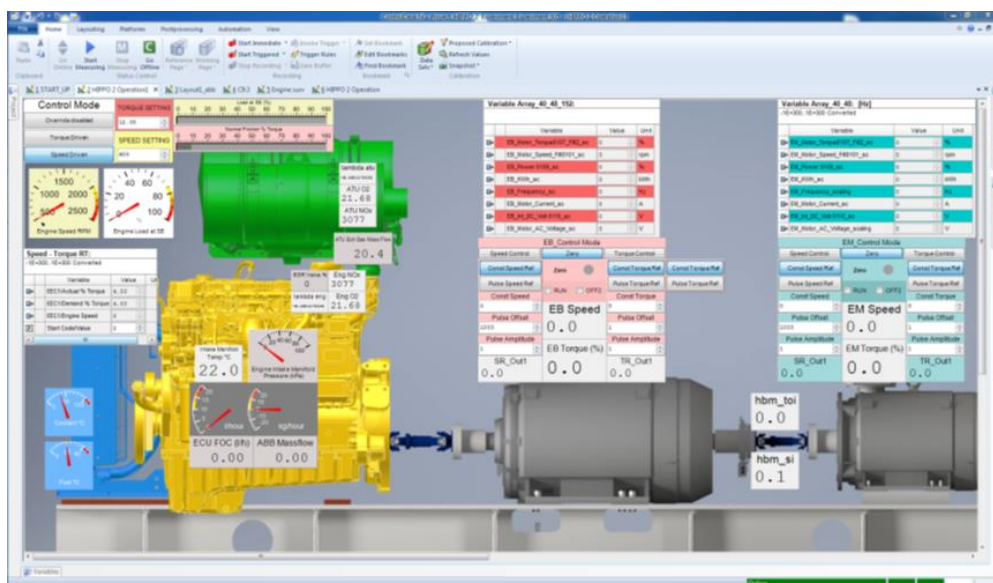


**Εικόνα 2.2.5: dSpace Micro Autobox II DS1401/1511**

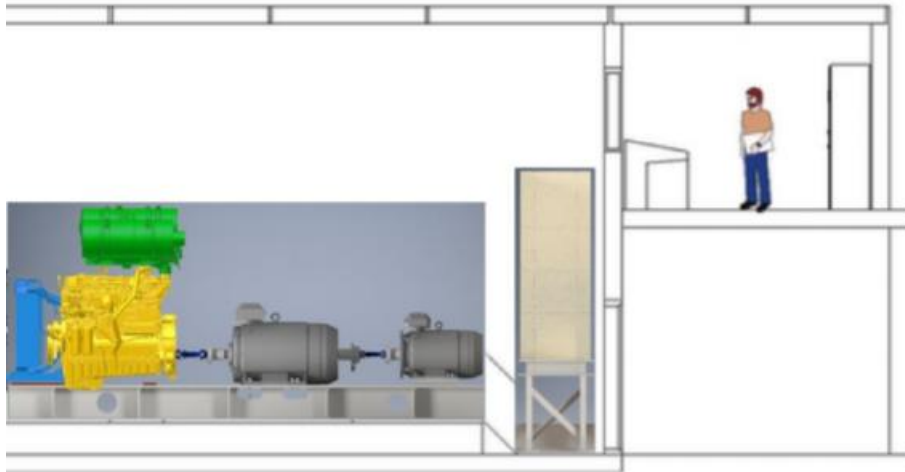


Εικόνα 2.2.6: Γενική διάταξη συστήματος λήψης δεδομένων

Μέσω της οθόνης διεπαφής της πλατφόρμας ο χειριστής έχει τη δυνατότητα να ελέγχει τις παραμέτρους του πειράματος όπως ο αριθμός των στροφών ή το φορτίο του κινητήρα. Η εικόνα διεπαφής της πλατφόρμας που επικοινωνεί με τις μετρήσεις της εγκατάστασης μέσω υπολογιστή παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.2.7. Τέλος, το δωμάτιο ελέγχου επιβλέπει την εγκατάσταση όπως στην Εικόνα 2.2.8.



Εικόνα 2.2.7: Εικόνα διεπαφής πλατφόρμας ελέγχου



Εικόνα 2.2.8: Διάταξη εγκατάστασης

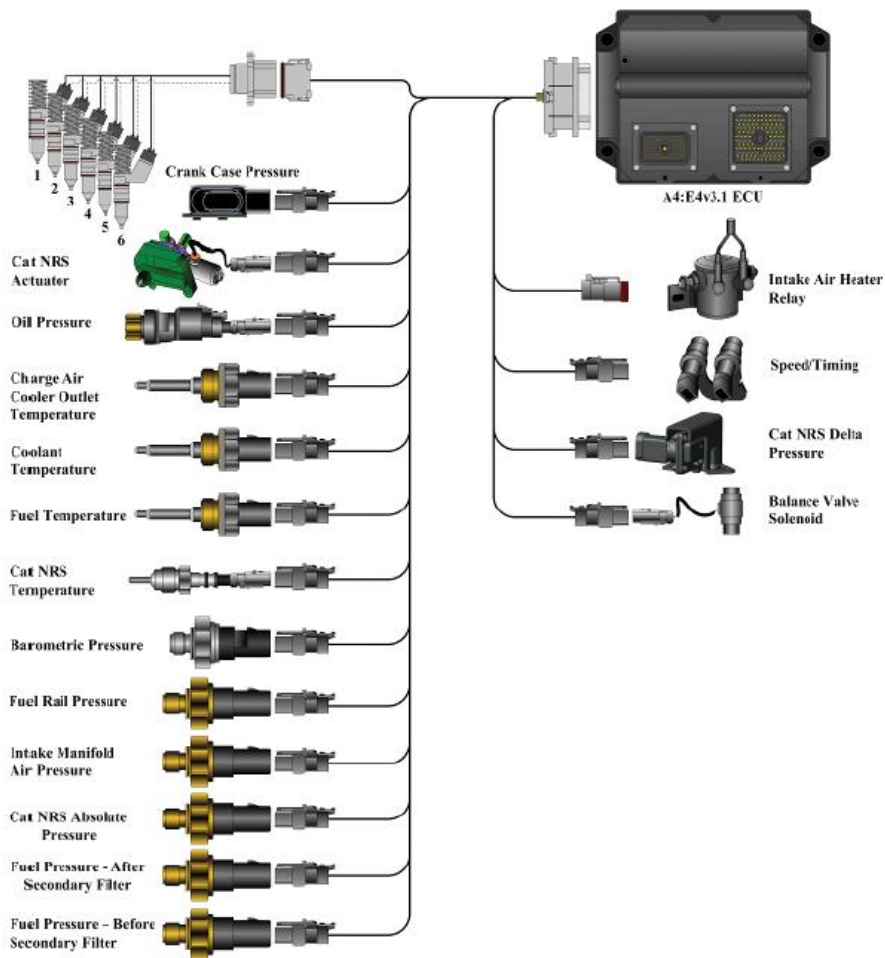
## 2.3 Μετρήσεις και αισθητήρες

Το σύνολο της πειραματικής κλίνης HIPPO-2 είναι εξοπλισμένο με ένα πλήθος αισθητήρων για την λήψη όλων των απαραίτητων μετρήσεων που ορίζουν την λειτουργία αυτού. Οι μετρήσεις αυτές εξυπηρετούν τόσο τις ανάγκες του πειράματος για παραγωγή αποτελεσμάτων, όσο και την ικανότητα του συστήματος να ρυθμίζει την λειτουργία του και να ισορροπεί στα επιθυμητά επίπεδα. Τα δεδομένα που λαμβάνονται από τις μετρήσεις αυτές αφορούν και τα τρία υποσυστήματα της διάταξης: τον κινητήρα, την ηλεκτρική πέδη και τον ηλεκτροκινητήρα. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται συνοπτικά οι κύριες κατηγορίες των μεγεθών αυτών.

### 2.3.1 Αισθητήρες CAT C9.3 ACERT

Ο κινητήρας διαθέτει μια πληθώρα αισθητήρων τόσο για την εξυπηρέτηση της λειτουργίας του όσο και για την παραγωγή πειραματικών αποτελεσμάτων. Οι αισθητήρες αυτοί χωρίζονται σε ορισμένες κατηγορίες που αναλύονται στη συνέχεια.





Εικόνα 2.3.1: Γενική διάταξη αισθητήρων CAT C9.3 ACERT

### 2.3.1.1 Σύστημα ταχύτητας και χρονισμού

Οι αισθητήρες ταχύτητας και χρονισμού χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της ταχύτητας της μηχανής αλλά και του χρονισμού έγχυσης καυσίμου. Οι αισθητήρες αυτοί λειτουργούν σε συνεργασία με ένα δαχτυλίδι χρονισμού το οποίο εγκαθίσταται σε έναν περιστρεφόμενο άξονα. Η υπό μελέτη μηχανή διαθέτει διπλή τέτοια διάταξη εγκατεστημένη στον εκκεντροφόρο άξονα. Έτσι, το “δόντι” ανίχνευσης επί του εκκεντροφόρου ενεργοποιεί και τους δύο αισθητήρες που είναι τοποθετημένοι σε κοντινή απόσταση από αυτόν. Σε κάθε περιστροφή του άξονα, η φορά του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από τον αισθητήρα αλλάζει κατά την κίνηση του “δοντιού” ανίχνευσης προς και από το σημείο του αισθητήρα. Η μεταβολή αυτή μετατρέπεται σε ηλεκτρικά σήματα τα οποία στέλνονται στο ECU για τον υπολογισμό της θέσης και της ταχύτητας του άξονα.

### 2.3.1.2 Αισθητήρες πίεσης

Η μηχανή λαμβάνει μετρήσεις της πίεσης σε διάφορα σημεία της διάταξης. Οι τιμές που λαμβάνονται είναι σημαντικές για τον έλεγχο της ορθής λειτουργίας της μηχανής και της απόδοσης των επιμέρους τμημάτων της.

Κατά την είσοδο του αέρα στη μηχανή λαμβάνεται η μέτρηση της βαρομετρικής ατμοσφαιρικής πίεσης. Ο αντίστοιχος αισθητήρας είναι εκτεθειμένος στις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Η μέτρηση της ατμοσφαιρικής πίεσης χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της βέλτιστης τιμής αυτής σε διάφορα υψόμετρα λειτουργίας του κινητήρα.

Στη συνέχεια, η τιμή της πίεσης του αέρα λαμβάνεται στην πολλαπλή εισαγωγής του κινητήρα. Η τιμή που φτάνει στον χειριστή προκύπτει από την αφαίρεση της βαρομετρικής πίεσης από την τιμή της μέτρησης. Το αποτέλεσμα δηλώνει την απόλυτη πίεση του αέρα πριν την εισαγωγή του στους κυλίνδρους. Η τιμή της πίεσης αυτής επηρεάζεται και από την ροή των καυσαερίων που οδηγούνται εκεί μέσω του συστήματος ανακυκλοφορίας για την μείωση των NO<sub>x</sub> στα παράγωγα της καύσης. Επιπλέον, η τιμή της πίεσης στην πολλαπλή της εισαγωγής χρησιμοποιείται από τον κινητήρα κατά τη λειτουργία του για τον υπολογισμό ροπής και του λόγου αέρα-καυσίμου εντός των κυλίνδρων. Με την ανάλογη ρύθμιση της έγχυσης του καυσίμου, αποτρέπεται η παραγωγή μαύρου καπνού που εμφανίζεται κυρίως σε μεταβατικά φαινόμενα της λειτουργίας της μηχανής και προκύπτει από την περίσσεια καυσίμου στον θάλαμο καύσης σε σχέση με τον παρεχόμενο αέρα (φαινόμενο ατελούς καύσης).

Όσον αφορά το σύστημα ανακυκλοφορίας των καυσαερίων, λαμβάνονται δύο τιμές της πίεσης. Ένας αισθητήρας είναι τοποθετημένος πριν τη στένωση του σωλήνα Βεντούρι του EGR (5.3), ενώ ένας δεύτερος χρησιμοποιείται μετά από αυτή. Η τιμή της διαφοράς της πίεσης μαζί με άλλα στοιχεία χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της μάζας της ροής των καυσαερίων ανακυκλοφορίας ανά μονάδα χρόνου.

Η τελευταία μέτρηση της πίεσης του αέρα λαμβάνεται στην είσοδο του DPF. Η τιμή εξυπηρετεί τον έλεγχο της ποσότητας των εγκλωβισμένων στο φίλτρο στερεών σωματιδίων που μεταφέρονται μαζί με τα καυσαέρια. Έτσι, ενεργοποιείται με την παρέμβαση του ECU η λειτουργία της οξειδωσης αυτών.

Εκτός των παραπάνω, μέτρηση πίεσης λαμβάνεται και στον χώρο του στροφαλοφόρου άξονα μέσω ενός αισθητήρα διαφοράς πίεσης. Οι τιμές αυτές στο ανοιχτό σύστημα του άξονα χρησιμοποιούνται για να εντοπίσουν πιθανές αστοχίες που απαιτούν επισκευή.

Ακόμη, μετρήσεις της πίεσης λαμβάνονται στο σύστημα έγχυσης καυσίμου. Για την διατήρηση της επιθυμητής ποσότητας του καυσίμου στο σωληνοειδή χώρο συγκέντρωσης αυτού και κατά συνέπεια στους κυλίνδρους, είναι σε αυτόν εγκατεστημένος ένας αισθητήρας πίεσης ο οποίος λαμβάνει τις αντίστοιχες τιμές και τις τροφοδοτεί στο ECU της μηχανής

ρυθμίζοντας την αντλία καυσίμου αναλόγως. Επιπλέον, το ECU λαμβάνει τιμές για την διαφορά πιέσεων πριν και μετά το δευτερεύον φίλτρο καθαρισμού του καυσίμου. Έτσι, παρακολουθείται η κατάσταση του φίλτρου για την αποφυγή φαινομένων συσσώρευσης σωματιδίων. Αισθητήρες πίεσης είναι επίσης εγκατεστημένοι στην έξοδο των εγχυτήρων του κάθε κυλίνδρου. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται έλεγχος της ποσότητας του εγχόμενου pilot και main καυσίμου σύμφωνα με αντίστοιχους χάρτες ροής-πίεσης.

Τέλος, μετρείται η πίεση του λαδιού της μηχανής. Η μέτρηση αυτή σχετίζεται με την ταχύτητα της μηχανής και χρησιμοποιείται ως μέσο παρακολούθησης και προστασίας αυτής.

### 2.3.1.3 Αισθητήρες θερμοκρασίας

Ομοίως με τις τιμές της πίεσης, οι τιμές της θερμοκρασίας λαμβάνονται και αυτές σε διάφορα σημεία της μηχανής. Πιο συγκεκριμένα, αναφέρονται οι κύριες μετρήσεις αυτών.

Η θερμοκρασία του αέρα ελέγχεται αρχικά κατά την είσοδό του στην μηχανή. Η τιμή αυτή χρησιμοποιείται για την ρύθμιση του συστήματος ανακυκλοφορίας καυσαερίων της μηχανής.

Για τον πλήρη καθορισμό της κατάστασης στην πολλαπλή εισαγωγής, απαιτείται εκτός από την τιμή της πίεσης, να είναι γνωστή και η τιμή της θερμοκρασίας. Ο αισθητήρας της μηχανής σε αυτό το σημείο λαμβάνει την θερμοκρασία του μείγματος καθαρού αέρα με την ροή των καυσαερίων ανακυκλοφορίας. Η τιμή αυτή χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της απόδοσης της μηχανής.

Στην πλευρά των καυσαερίων, η τιμή της θερμοκρασίας λαμβάνεται στην είσοδο της βαλβίδας EGR, μετά το αντίστοιχο ψυγείο. Σε συνδυασμό με την διαφορά πίεσης, η τιμή της θερμοκρασίας χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ποσότητας της ανακυκλοφορούμενης μάζας καυσαερίων.

Οι αισθητήρες θερμοκρασίας είναι απαραίτητοι και στο σύστημα έγχυσης καυσίμου. Οι τιμές της θερμοκρασίας του καυσίμου χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της απόδοσης και κατάλληλης ρύθμισης των εξαρτημάτων του συστήματος έγχυσης καυσίμου. Αυτός ο έλεγχος είναι σημαντικός, καθώς τα χαρακτηριστικά του καυσίμου θα διαφέρουν καθ' όλο το εύρος των επιτρεπτών τιμών της θερμοκρασίας αυτού.

Επιπλέον, γίνεται έλεγχος της κατάστασης του ψυκτικού που χρησιμοποιείται από τον κινητήρα κατά την λειτουργία του. Η θερμοκρασία του ψυκτικού λαμβάνεται στην έξοδό του από τη μηχανή και χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της σωστής λειτουργίας της μηχανής.

### 2.3.2 Αισθητήρες ηλεκτρικής πέδης και ηλεκτροκινητήρα

Στο κομμάτι της ηλεκτρικής πέδης και του ηλεκτροκινητήρα, η διάταξη είναι αρκετά πιο απλή σε σχέση με την κύρια μηχανή, τουλάχιστον όσον αφορά τις μετρήσεις που λαμβάνονται. Οι αισθητήρες που είναι εγκατεστημένοι δίνουν τα απαραίτητα μεγέθη για την πλήρη περιγραφή της λειτουργίας των δύο αυτών μονάδων. Κατά την πραγματοποίηση πειραμάτων στην κλίνη θέτοντας σε λειτουργία μόνο τον κινητήρα CAT C9.3 ACERT (συνεργασία κύριας μηχανής-ηλεκτρικής πέδης), οι μετρήσεις περιλαμβάνουν τις τιμές της ροπής που προσομοιάζει την ζήτηση της έλικας σε ναυτικές εφαρμογές και των στροφών του κοινού άξονα. Όταν η διάταξη απομονώνεται, ώστε να μελετηθεί μόνο η λειτουργία του ηλεκτρικού κινητήρα, τότε η ηλεκτρική πέδη μπορεί να λειτουργήσει είτε ως κινητήρια μονάδα με τον τελευταίο σε σειρά ηλεκτροκινητήρα (βλ. Εικόνα 2.2.1) να λειτουργεί ως γεννήτρια, είτε αντιστρόφως. Σε αυτή την περίπτωση, ο χειριστής λαμβάνει επιπλέον πληροφορία για την τάση και την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, την παραγόμενη ενέργεια, την ισχύ καθώς και την ροπή και στροφές, όπως προηγουμένως, και για τις δύο μονάδες (ηλεκτρική πέδη-ηλεκτροκινητήρας).

# Κεφάλαιο 3: Θερμοδυναμική μοντελοποίηση

## 3.1 Αρχή λειτουργίας

Για την περιγραφή της ολικής λειτουργίας, των πολλών υπό-διεργασιών της μηχανής και τον υπολογισμό των τιμών των διαφόρων μεγεθών που εμπλέκονται σε αυτές, έγινε χρήση του λογισμικού θερμοδυναμικής μοντελοποίησης μηχανών εσωτερικής καύσης “MOTHERmodynamics” (MOTHER). Το εν λόγω λογισμικό είναι ικανό για προσομοίωση λειτουργίας μιας ποικιλίας διατάξεων κινητήρων σε σταθερά ή μεταβατικά φαινόμενα (12).

Το MOTHER εντάσσεται στην κατηγορία των μεθόδων θερμοδυναμικής μοντελοποίησης μηδενικών διαστάσεων (0-D). Έτσι, θεωρεί την ολική διάταξη ως μια σειρά διασυνδεδεμένων όγκων ελέγχου όπου οι ιδιότητες των ρευστών είναι χωρικά ομοιογενείς χωρίς περαιτέρω πληροφορία για την χωρική ανάλυση και την μηχανική των ρευστών σε αυτούς. Επιπλέον, βασίζεται στην θεώρηση ότι οι ιδιότητες των ρευστών μεταβάλλονται με σταθερό ρυθμό στους όγκους ελέγχου για κάθε χρονικό υπολογιστικό βήμα. Οι όγκοι ελέγχου συνδέονται μέσω περιορισμών όπως βαλβίδες και θυρίδες. Στην θερμοδυναμική μοντελοποίηση κινητήρων με την μέθοδο των όγκων ελέγχου θεωρείται ότι το έργο και η μεταφορά θερμότητας και μάζας λαμβάνουν μέρος στα όρια των όγκων αυτών.

Το λογισμικό βασίζει όλες τις διεργασίες που πραγματοποιούνται στην διάταξη σε τέσσερις βασικές εξισώσεις το σύστημα των οποίων επιλύεται αριθμητικά:

- Διατήρηση της ενέργειας:

$$\dot{T} = f(\dot{U}, \dot{H}, \dot{\phi}, \dot{Q}, \dot{W}) \quad (3.1.1)$$

Ο ρυθμός μεταβολής της εσωτερικής ενέργειας  $\dot{U}$  και ενθαλπίας  $\dot{H}$  του εργαζόμενου ρευστού λαμβάνεται με βάση ορισμένες γνωστές θερμοδυναμικές ιδιότητες για μείγματα αέρα-καυσίμου. Ο ρυθμός μεταβολής του λόγου ισοδυναμίας  $\dot{\phi}$  λαμβάνεται μέσω της άθροισης των συναλλαγών αέρα και καυσίμου. Ο ρυθμός μεταβολής της θερμότητας  $\dot{Q}$  βασίζεται στο ποσό της θερμότητας που απελευθερώνεται από την καύση και σε αυτό που χάνεται λόγω απωλειών. Ο ρυθμός μεταβολής του έργου  $\dot{W}$  εξαρτάται από τον ρυθμό μεταβολής του όγκου ελέγχου με βάση τη γεωμετρία της μηχανής και την στιγμιαία πίεση.

- Ψευδοστατική ροή:

$$\dot{m} = f(P, T, g, R, A_{flow}, C_d) \quad (3.1.2)$$

Όπως φαίνεται και από τη σχέση, η ροή της μάζας ανάμεσα στους διασυνδεδεμένους όγκους ελέγχου εξαρτάται από την στιγμιαία πίεση  $P$ , την θερμοκρασία  $T$ , τις ιδιότητες του

μείγματος σε κάθε όγκο ελέγχου, την εξαρτώμενη από τη γεωμετρία επιφάνεια ροής  $A_{flow}$  και του συντελεστή εκκένωσης  $C_d$  των περιορισμών μεταξύ των όγκων ελέγχου.

- Διατήρηση μάζας:

$$\dot{m} = \sum \dot{m}_j \quad (3.1.3)$$

Ύστερα από κάθε υπολογιστικό βήμα πραγματοποιείται άθροιση των ανταλλαγών μάζας σε κάθε όγκο ελέγχου.

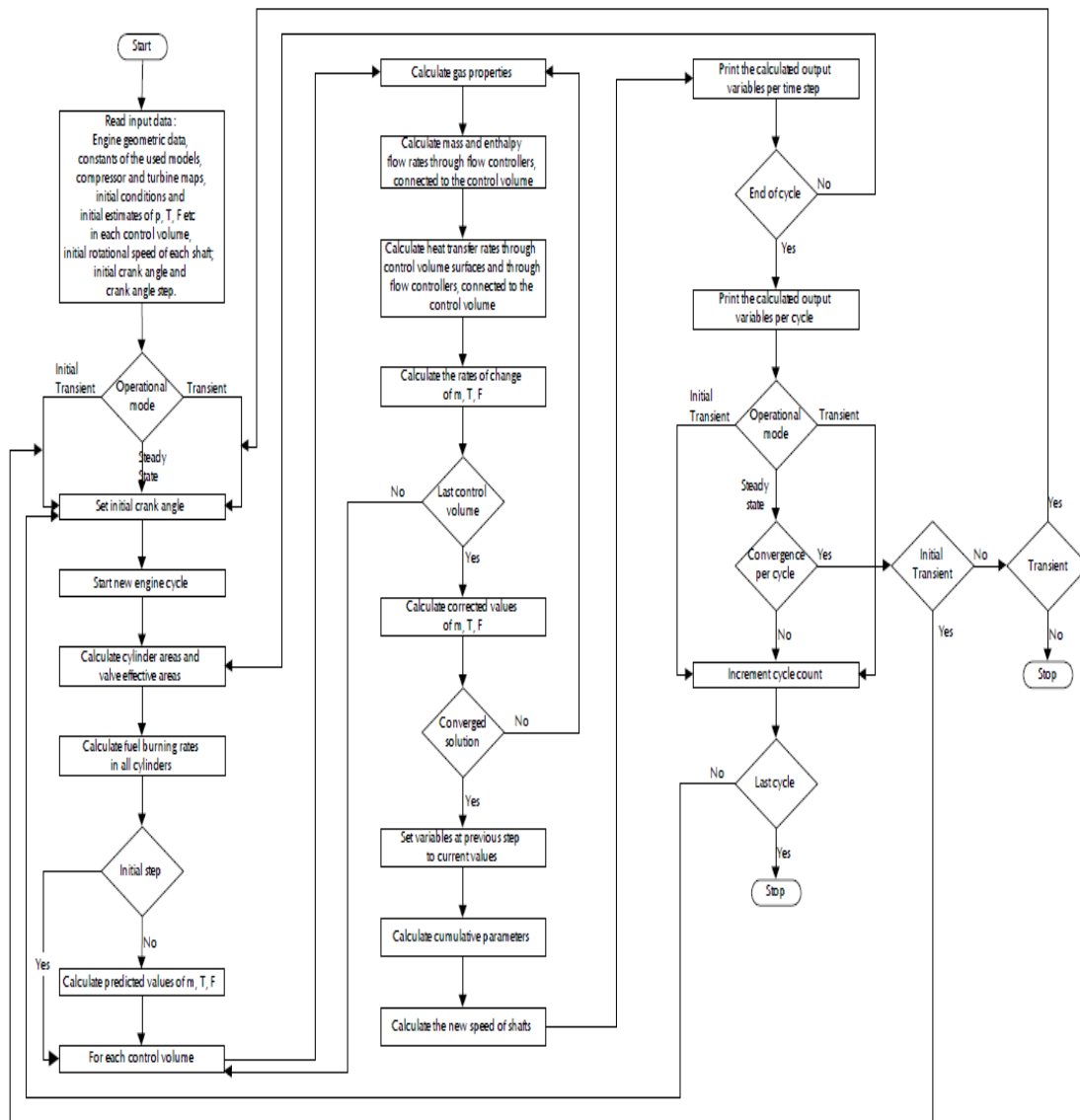
- Καταστατική εξίσωση:

$$P = f(m, R, T, V) \quad (3.1.4)$$

Τέλος, υπολογίζεται η στιγμιαία πίεση μέσω της καταστατικής εξίσωσης βάσει της μάζας  $m$ , των ιδιοτήτων των ρευστών, της θερμοκρασίας  $T$  και του όγκου  $V$ .

Το εν λόγω λογισμικό πραγματοποιεί τη διαδικασία του υπολογισμού όλων των απαραίτητων παραμέτρων λειτουργίας της κάθε υπό μελέτης μηχανής μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας όπως αυτή περιγράφεται συνοπτικά στο Διάγραμμα 3.1.1. Αρχή της επαναληπτικής αυτής διαδικασίας αποτελεί η είσοδος των αρχικών τιμών στο σύστημα (όπως πιέσεις και θερμοκρασίες εντός των κυλίνδρων κ.α.) για την παραγωγή των λύσεων του επόμενου κύκλου υπολογισμών.

Η λειτουργία του χωρίζεται σε δύο κύριες κατηγορίες ανάλογα με τις ανάγκες του χρήστη κάθε φορά: i) λειτουργία σταθερής κατάστασης (steady state) και ii) λειτουργία μεταβατικού φαινομένου (transient). Στην λειτουργία σταθερής κατάστασης, η επαναληπτική διαδικασία πραγματοποιείται για σταθερό φορτίο του άξονα, στροφές του κινητήρα και έγχυση καυσίμου και συνεχίζεται μέχρι να υπάρξει σύγκλιση των λύσεων. Από την άλλη, στην λειτουργία μεταβατικού φαινομένου η διαδικασία επίλυσης λαμβάνει χώρα στο πεδίο του χρόνου και τερματίζεται στο χρονικό όριο που έχει τεθεί από τον χρήστη.



Διάγραμμα 3.1.1: Επαναληπτική διαδικασία επίλυσης MOTHER

### 3.2 Βασικά μηχανολογικά στοιχεία και μοντέλα

Η μεθοδολογία μοντελοποίησης του MOTHER βασίζεται στην μέθοδο βασικών μηχανολογικών στοιχείων “Basic Engineering Elements” (BEEs). Μέσω της μεθόδου αυτής μπορούν να κατασκευαστούν διάφορες μηχανολογικές διατάξεις ροής προσδιορίζοντας το είδος της σύνδεσης μεταξύ των τμημάτων τους. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα για κατασκευή ενός μεγάλου εύρους μηχανολογικών διατάξεων χρησιμοποιώντας περιορισμένο αριθμό μηχανολογικών στοιχείων, ρυθμιστών ροής και συνδέσεων.

Η βιβλιοθήκη του λογισμικού MOTHER διαθέτει τα εξής μηχανολογικά στοιχεία:

Πίνακας 3.2.1: Βασικά μηχανολογικά στοιχεία MOTHER

Θερμοδυναμικά στοιχεία		Μηχανικά στοιχεία	Στοιχεία ελέγχου
Αποδέκτες ροής	Ελεγκτές ροής		
Κύλινδρος Δοχείο Ρευστό σταθερών ιδιοτήτων	Βαλβίδα Εναλλάκτης θερμότητας Συμπιεστής Στρόβιλος	Στροφαλοφόρος άξονας Άξονας Φορτίο άξονα Συμπλέκτης Κιβώτιο ταχυτήτων	Ρυθμιστής ταχύτητας Ελεγκτής PID

Το σύνολο των παραπάνω στοιχείων μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ποικίλους τρόπους για το σχεδιασμό διαφόρων διατάξεων αλλά και σεναρίων λειτουργίας, ανάλογα με τη σειρά και τη σύνδεση αυτών. Το λογισμικό επιτρέπει ελευθερία σχεδίασης της διάταξης με βάση τους εξής κανόνες:

**Γενικοί κανόνες:**

- Τα μηχανολογικά στοιχεία μπορούν να συνδέονται το ένα με το άλλο μόνο όταν εμπίπτουν στο ίδιο επίπεδο ιεραρχίας ή μέσω της χρήσης ενοτήτων.

**Κανόνες στοιχείων ροής:**

- Ένας ελεγκτής ροής θα πρέπει να είναι πάντα συνδεδεμένος εκατέρωθεν με στοιχεία της κατηγορίας των αποδεκτών ροής.
- Η σύνδεση δύο ή περισσότερων ελεγκτών ροής στη σειρά απαγορεύεται.
- Ένας αποδέκτης ροής μπορεί να είναι συνδεδεμένος με έναν ή περισσότερους ελεγκτές ροής.

**Κανόνες μηχανικών στοιχείων:**

- Σε κάθε διάταξη θα πρέπει πάντα να υπάρχει ένας στροφαλοφόρος άξονας. Ο άξονας αυτός θα πρέπει να είναι μοναδικός για κάθε διάταξη.
- Για την σύνδεση συμπιεστή και στροβίλου θα πρέπει να καθορίζεται ο λόγος μείωσης μεταξύ κάθε στοιχείου και του κοινού άξονα.

Για κάθε ένα από τα προαναφερθέντα μηχανολογικά στοιχεία το λογισμικό χρησιμοποιεί ένα πλήθος υπό-μοντέλων για τον υπολογισμό των απαραίτητων μεγεθών μοντελοποίησης της διαδικασίας. Τα μοντέλα αυτά αφορούν την μελέτη φαινομένων όπως η καύση εντός των κυλίνδρων, οι αναπτυσσόμενες τριβές μεταξύ των κινούμενων σωμάτων, η μεταφορά θερμότητας μεταξύ των επιφανειών κ.α. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται συνοπτικά τα κυριότερα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διαμόρφωση του ολικού συστήματος.



### 3.2.1 Μοντέλα κυλίνδρων

Οι κύλινδροι της μηχανής μοντελοποιούνται στο MOTHER ως αποδέκτες ροής. Αυτό σημαίνει, ότι μπορούν να συνδέονται με μια πληθώρα ελεγκτών ροής που στην παρούσα περίπτωση βρίσκει εφαρμογή στη σύνδεση των κυλίνδρων με τις βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής. Η ενότητα των κυλίνδρων περιέχει ένα πλήθος υπολογισμών οι οποίοι ομαδοποιούνται με βάση το σκοπό τους. Οι κατηγορίες αυτές είναι:

- Μοντέλο γεωμετρίας
- Μοντέλο καύσης
- Μοντέλο τριβής
- Μοντέλα μεταφοράς θερμότητας

#### 3.2.1.1 Μοντέλο γεωμετρίας

Το μοντέλο γεωμετρίας των κυλίνδρων περιλαμβάνει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για την περιγραφή των κύριων μερών του θαλάμου καύσης. Οι κύριες σχέσεις των μεγεθών που χρησιμοποιούνται παρουσιάζονται επιγραμματικά.

Ο λόγος συμπίεσης  $r_c$  δίνεται από:

$$r_c = \frac{V_d + V_c}{V_c} \quad (3.2.1)$$

όπου:

$V_d$  ο όγκος εμβολισμού ( $m^3$ )

$V_c$  ο όγκος συμπίεσης ( $m^3$ )

Η διαδρομή του εμβόλου  $L$  συνδέεται με την ακτίνα του στροφάλου  $a$  μέσω:

$$L = 2a \quad (3.2.2)$$

Ο όγκος του κυλίνδρου  $V$  συναρτήσει της γωνίας του στροφαλοφόρου άξονα  $\theta$ :

$$V = V_c + \frac{\pi \cdot B^2}{4} \cdot (l + a - s) \quad (3.2.3)$$

όπου:

$B$  η διάμετρος του κυλίνδρου (m)

$s$  η απόσταση μεταξύ του άξονα του στροφαλοφόρου και του άξονα του πείρου του εμβόλου (m) και υπολογίζεται ως εξής:

$$s = a \cdot \cos\theta + \sqrt{l^2 - a^2 \cdot \sin^2\theta} \quad (3.2.4)$$

όπου:

$l$  το μήκος του διωστήρα

### 3.2.1.2 Μοντέλο καύσης

Το μοντέλο της καύσης του συστήματος μελετά την μεταφορά της παραγόμενης από την καύση ενέργεια που πραγματοποιείται στους κυλίνδρους. Η προσέγγιση αυτή γίνεται με τον υπολογισμό του ποσοστού της μάζας του καυσίμου που καίγεται κατά την καύση σε σχέση με την συνολική ποσότητα εγχεόμενου καυσίμου  $x_b$ . Το ποσοστό αυτό ορίζεται ως:

$$x_b = \frac{m_{f \text{ burned}}}{m_{f \text{ total}}} \quad (3.2.5)$$

όπου:

$m_{f \text{ burned}}$  η μάζα του καυσίμου που καίγεται (kg)

$m_{f \text{ total}}$  η μάζα του συνολικού εγχεόμενου καυσίμου (kg)

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση Wiebe (13), σύμφωνα με την οποία το  $x_b$  υπολογίζεται:

$$x_b = 1 - \exp(-a \cdot y^{m+1}) \quad (3.2.6)$$

όπου:

$a, m$  παράμετροι της καύσης

$y$  μία αδιάστατη μεταβλητή του χρόνου που εκφράζεται ως:

$$y = \frac{\theta - \theta_o}{\Delta\theta} \quad (3.2.7)$$

όπου:

$\theta$  η γωνία του στροφαλοφόρου άξονα σε κάθε χρονική στιγμή (deg)

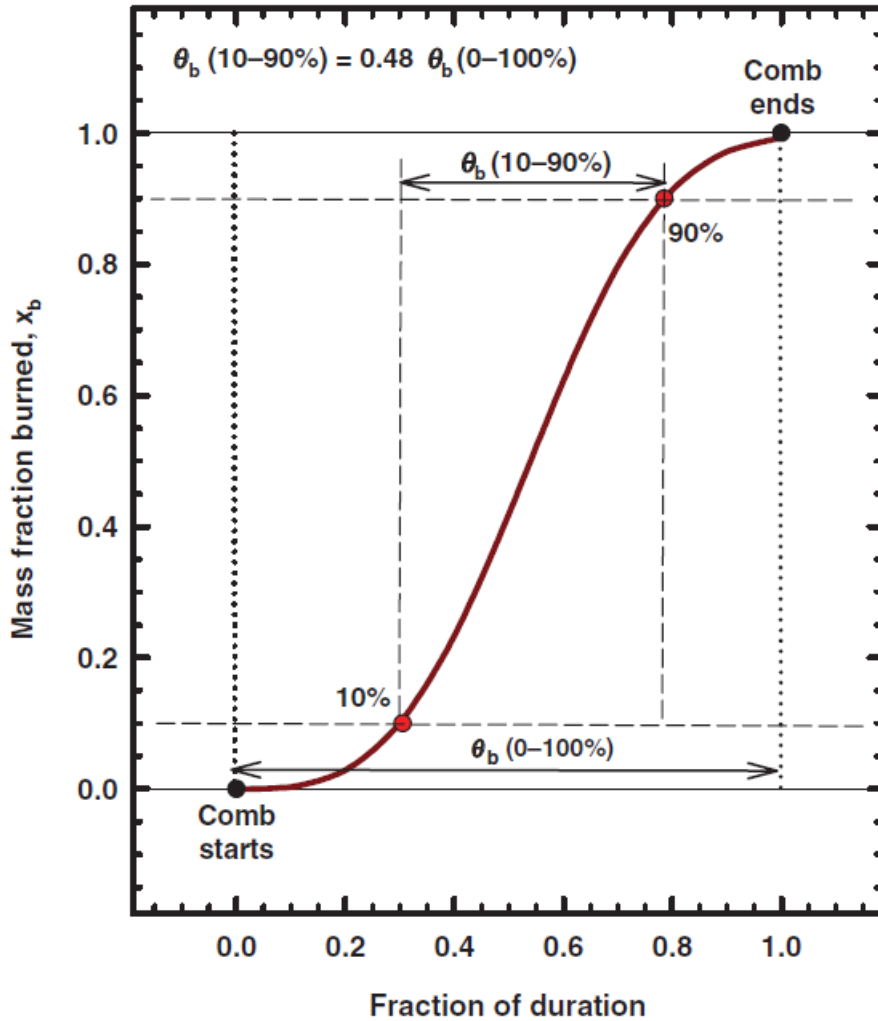
$\theta_o$  η γωνία του στροφαλοφόρου άξονα κατά την έναρξη της καύσης (deg)

$\Delta\theta$  η συνολική διάρκεια της καύσης εκφρασμένη σε μεταβολή της γωνίας του στροφαλοφόρου άξονα (deg)

Η παραπάνω προσέγγιση δίνει τη δυνατότητα για την ανάλυση της πλήρους διαδικασίας της καύσης χρησιμοποιώντας την συνάρτηση Wiebe για κάθε μία από τις φάσεις της. Σύμφωνα με αυτή, η καύση αποτελείται από τρεις φάσεις: i) την προκαταρκτική καύση, ii) το κύριο στάδιο της καύσης και iii) το τέλος της καύσης. Κάθε μία από τις φάσεις εκφράζεται με την αντίστοιχη ποσότητα της μάζας του καμένου καυσίμου. Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής

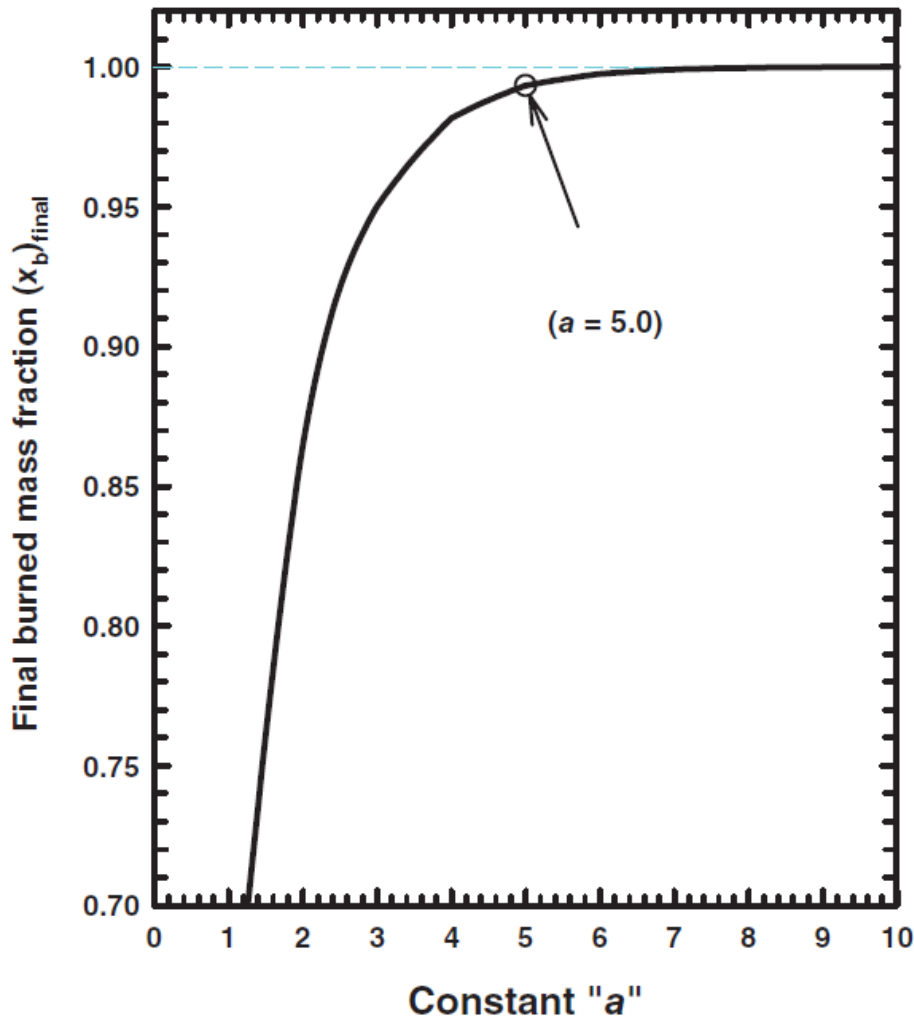
εργασίας, το φαινόμενο της καύσης αντιμετωπίστηκε με χρήση της μονής συνάρτησης Wiebe (3.2.6), λόγω απουσίας πειραματικών μεγεθών περιγραφής των διεργασιών εντός του κυλίνδρου.

Το αποτέλεσμα της ανάλυσης μέσω της εξίσωσης Wiebe είναι μια σιγμοειδής καμπύλη (S-curve) που δείχνει την ταχύτητα αύξησης του  $x_b$  κατά την διάρκεια της καύσης. Από την μορφή της σιγμοειδούς καμπύλης μπορούν να εξαχθούν πολλά συμπεράσματα όπως η σχέση μεταξύ του χρόνου καύσης ολόκληρης της ποσότητας του καυσίμου και μεταξύ των θέσεων για τις οποίες ισχύει  $x_b=10\%$  και  $x_b=90\%$ . Η σύγκριση αυτή παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 3.2.1 για  $a=5.0$  και  $m=2.0$  από την οποία παρατηρείται ότι η διάρκεια  $\theta_b$  (10-90%) είναι σημαντικά μικρότερη από την  $\theta_b$  (0-100%) λαμβάνοντας υπόψη και τη σχέση των αντίστοιχων  $x_b$ . Από τα παραπάνω προκύπτει, ότι η ταχύτητα καύσης αυξάνεται με χαμηλούς ρυθμούς κατά την έναρξη και τη λήξη της, ενώ είναι μεγαλύτερη στο ενδιάμεσο τμήμα που παρεμβάλλεται. Τα φαινόμενα αυτά σχετίζονται με την ικανότητα της ανάπτυξης της φλόγας στα αρχικά στάδια της καύσης λόγω χαμηλών θερμοκρασιών και στο στάδιο όπου η ποσότητα του καυσίμου που δεν έχει χρησιμοποιηθεί ακόμα είναι μικρή (αρχικό και τελικό τμήμα της καύσης αντίστοιχα), σε σύγκριση με την πλήρως ανεπτυγμένη φλόγα (ενδιάμεσο τμήμα).



Διάγραμμα 3.2.1: Καμπύλη συνάρτησης Wiebe

Οι παράμετροι “a” και “m” της εξίσωσης Wiebe χρησιμοποιούνται για την καλύτερη προσέγγιση των χαρακτηριστικών της καύσης. Πιο συγκεκριμένα, η παράμετρος “a” επηρεάζει το συνολικό ποσό του καυσίμου που αναφλέγεται κατά τη διάρκεια του κύκλου. Όπως προκύπτει και από την συνάρτηση Wiebe (3.2.6), η τιμή του  $x_{b,final}$  τείνει στο 1 για αυξανόμενες τιμές της παραμέτρου “a”. Στη συνέχεια, παρατίθεται η συσχέτιση της παραμέτρου “a” με την τιμή του  $x_{b,final}$  σύμφωνα με την οποία προκύπτει ότι για τιμές του “a” μεγαλύτερες του 7, το  $x_{b,final}$  είναι σχεδόν 1 (1).



Διάγραμμα 3.2.2: Σχέση παραμέτρου "a" και  $x_{b,final}$

### 3.2.1.3 Μοντέλο τριβής

Ο υπολογισμός της τριβής γίνεται υπό τη μορφή του υπολογισμού μέσης πίεσης λόγω τριβών f.m.e.p. Για το σκοπό αυτό, γίνεται χρήση της σχέσης που προτάθηκε από τους Mc Auly et al. (14). Σύμφωνα με αυτή, οι συνολικές απώλειες λόγω τριβών αποτελούν συνάρτηση της μέγιστης πίεσης και της μέσης ταχύτητας του εμβόλου ως εξής:

$$f.m.e.p. = k_1 + k_2 \cdot P_{max} + k_3 \cdot V_p \quad (3.2.8)$$

όπου:

$P_{max}$  η μέγιστη πίεση εντός του κυλίνδρου (Pa)

$V_p$  η μέση ταχύτητα του εμβόλου (m/sec)

$k_1$  (Pa),  $k_2$  (Pa/RPM),  $k_3$  (Pa/(m/sec)) σταθερές που αφορούν τη συγκεκριμένη σε κάθε μελέτη μηχανή

### 3.2.1.4 Μοντέλα μεταφοράς θερμότητας

Ο υπολογισμός της μεταφοράς θερμότητας αφορά τη μελέτη του φαινομένου i) μεταξύ των καυσαερίων και των τοιχωμάτων του κυλίνδρου και ii) μεταξύ των τοιχωμάτων του κυλίνδρου και του ψυκτικού.

Το ποσό της στιγμιαίας ροής θερμότητας μεταξύ καυσαερίων και τοιχωμάτων δίνεται από τη σχέση:

$$q = h \cdot A \cdot (T_{gas} - T_{wall}) \quad (3.2.9)$$

όπου:

$h$  ο στιγμιαίος συντελεστής μέσης χωρικής μεταφοράς θερμότητας (kW/m<sup>2</sup>K)

$A$  το εμβαδόν της επιφάνειας του κυλίνδρου που πραγματοποιείται το φαινόμενο (m<sup>2</sup>)

$T_{gas}$  η στιγμιαία θερμοκρασία των καυσαερίων (K)

$T_{wall}$  η θερμοκρασία της επιφάνειας του τμήματος του κυλίνδρου που πραγματοποιείται το φαινόμενο (K)

Για την προσέγγιση του στιγμιαίου συντελεστή μέσης χωρικής μεταφοράς θερμότητας  $h$  γίνεται χρήση της εξίσωσης του Woschni (15) σύμφωνα με την οποία ο υπολογισμός γίνεται ως εξής:

$$h = 0.00326 \cdot B^{-0.2} \cdot P^{0.8} \cdot T^{-0.55} \cdot w^{0.8} \quad (3.2.10)$$

όπου:

$B$  η διάμετρος του κυλίνδρου (m)

$P$  η πίεση των καυσαερίων του κυλίνδρου (kPa)

$T$  η θερμοκρασία των καυσαερίων του κυλίνδρου (K)

$w$  η μέση τοπική ταχύτητα των καυσαερίων του κυλίνδρου (m/sec)

Όσον αφορά το μοντέλο μεταφοράς θερμότητας μεταξύ τοιχωμάτων του κυλίνδρου και ψυκτικού, έγινε χρήση του απλού μοντέλου (Simple Model) που διαθέτει το MOTHER. Σύμφωνα με αυτό, γίνεται η θεώρηση ότι η θερμοκρασία της επιφάνειας κάθε τμήματος του κυλίνδρου (κεφαλή, ανώτερο ή κατώτερο κομμάτι χιτωνίου, έμβολο) θα πρέπει να είναι μεταξύ της θερμοκρασίας του ψυκτικού και μιας θεωρητικής θερμοκρασίας, την αδιαβατική θερμοκρασία του τοιχώματος. Επιπλέον, ισχύει ότι ο μέγιστος ρυθμός μεταφοράς θερμότητας από τα καυσαέρια προς τα τοιχώματα θα λαμβάνει μέρος όταν η θερμοκρασία των τοιχωμάτων θα έχει την χαμηλότερη δυνατή τιμή, δηλαδή θερμοκρασία ίση με αυτή του ψυκτικού. Έτσι, προκύπτει ότι η πραγματική θερμοκρασία του τοιχώματος του κάθε τμήματος του κυλίνδρου  $T_w$  θα κινείται ανάμεσα στη θερμοκρασία του ψυκτικού και στην αδιαβατική θερμοκρασία των τοιχωμάτων:

$$T_w = HTF \cdot T_c + (1 - HTF) \cdot T_{w,a} \quad (3.2.11)$$

όπου:

$T_c$  η θερμοκρασία του ψυκτικού (K)

$T_{w,a}$  η αδιαβατική θερμοκρασία του τοιχώματος (K)

HTF παράγοντας μεταφοράς θερμότητας

Σημειώνεται ότι ο παράγοντας μεταφοράς θερμότητας λαμβάνει τιμές από 0 έως 1. Για τιμή ίση με 0, η θερμοκρασία του τοιχώματος θα είναι ίση με την αδιαβατική που σημαίνει ότι δεν θα υπάρχει μεταφορά θερμότητας. Αντίστοιχα, αν η τιμή του παράγοντα ισούται με 1, η θερμοκρασία του τοιχώματος θα είναι ίση με αυτή του ψυκτικού μέσου και θα λάβει μέρος η μέγιστη δυνατή μεταφορά θερμότητας.

### 3.2.2 Μοντέλο συμπιεστή

Η λειτουργία του συμπιεστή μοντελοποιείται με τη βοήθεια ψηφιακών χαρτών που περιγράφουν την επίδρασή τους στη ροή του αέρα. Οι χάρτες αυτοί είναι αποτέλεσμα πειραματικών μετρήσεων και συσχετίζουν την ταχύτητα του συμπιεστή, τη ροή του αέρα, το λόγο συμπίεσης και την αποδοτικότητα του συμπιεστή.

Οι μονάδες μέτρησης που χρησιμοποιούνται στους χάρτες των συμπιεστών, όσον αφορά την ροή του αέρα, μπορεί να διαφέρουν ανάλογα τον κατασκευαστή. Στην παρούσα εφαρμογή, ο χάρτης κάνει χρήση του μεγέθους της διορθωμένης ροής μάζας αέρα  $m_{corr}$  σε lb/min. Η διορθωμένη ροή αέρα εκφράζει την ποσότητα μάζας που θα περνούσε από τον συμπιεστή ανά μονάδα χρόνου αν οι συνθήκες που επικρατούσαν στην είσοδο αυτού ήταν ίδιες με τις συνθήκες αναφοράς που ορίζονται για κάθε εφαρμογή:

$$m_{corr} = m \cdot \frac{\sqrt{\frac{T}{T_{ref}}}}{\frac{P}{P_{ref}}} \quad (3.2.12)$$

όπου:

$m$  η ροή αέρα (lb/min)

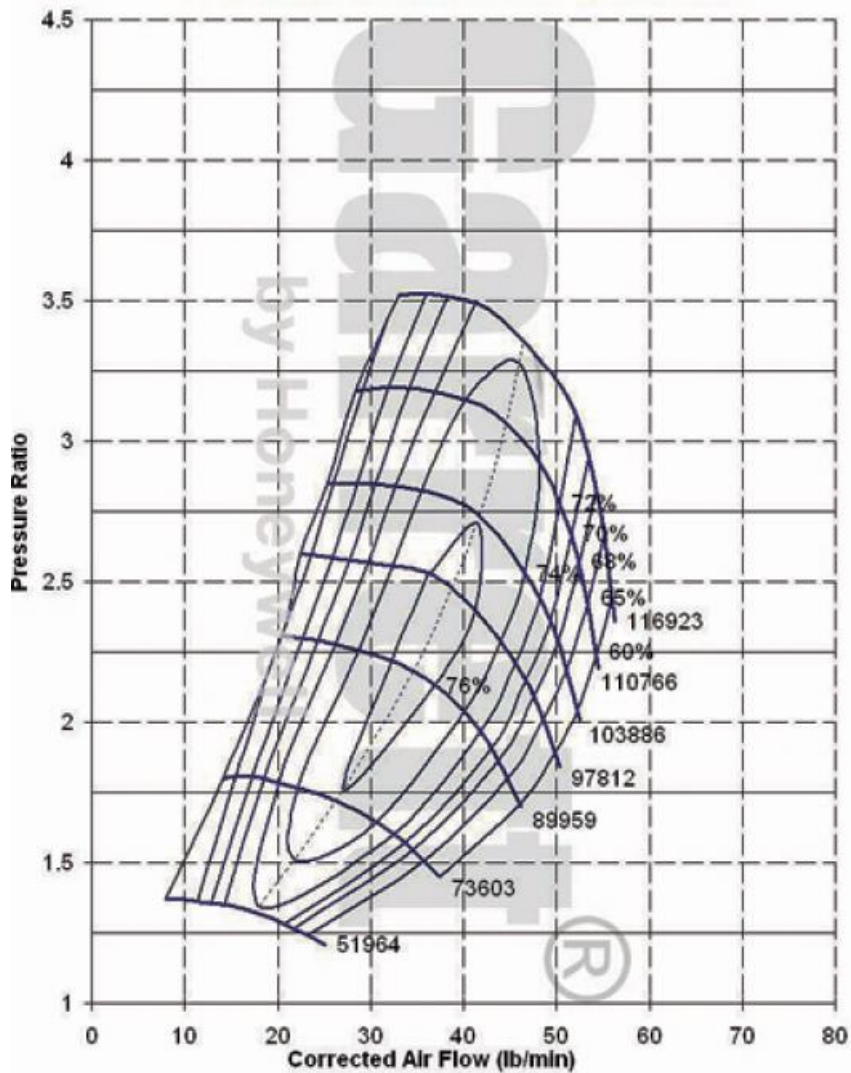
$T$  η θερμοκρασία του αέρα (K)

$T_{ref}$  η θερμοκρασία αναφοράς (K)

$P$  η πίεση του αέρα (kPa)

$P_{ref}$  η πίεση αναφοράς (kPa)

Ο χάρτης του συμπιεστή που ψηφιοποιήθηκε και εισήχθη στο λογισμικό MOTHER παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 3.2.3:



Διάγραμμα 3.2.3: Χάρτης συμπίεστή

Στο διάγραμμα του χάρτη του συμπίεστή μπορούν να εντοπιστούν οι εξής περιοχές:

- η περιοχή κάτω της χαμηλότερης ισοταχούς ταχύτητας
- η περιοχή άνω της υψηλότερης ισοταχούς ταχύτητας
- η περιοχή αριστερά των ορίων του χάρτη (surge region)
- η περιοχή δεξιά των ορίων του χάρτη (choking region)
- η περιοχή εντός των ορίων λειτουργίας του χάρτη

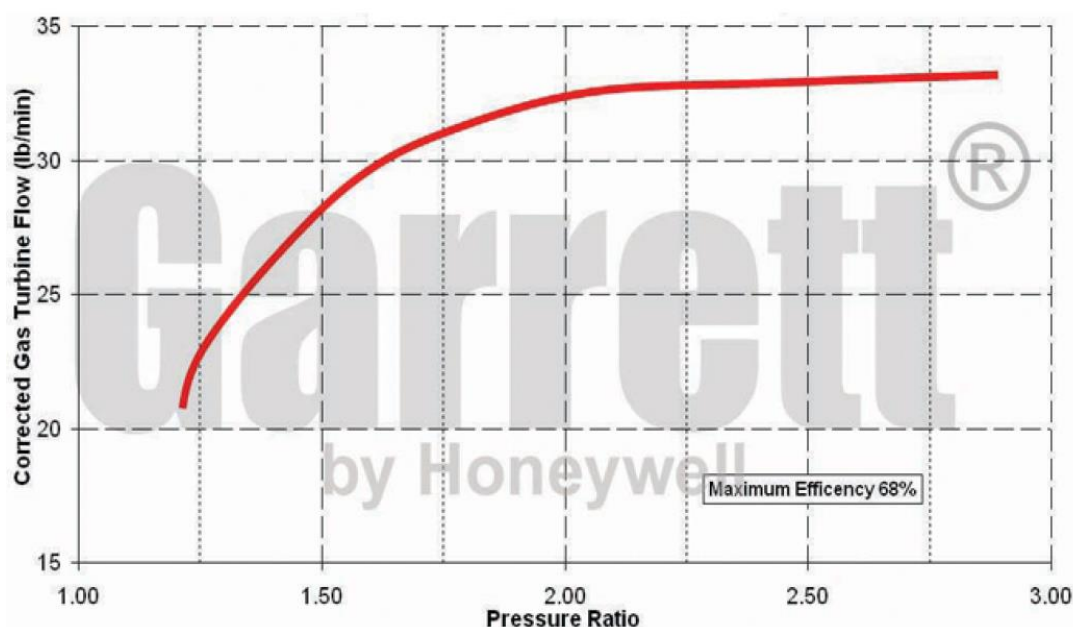
Οι ακριβείς τιμές των μεγεθών που δίνονται από τον χάρτη του συμπίεστή για κάθε σημείο λειτουργίας λαμβάνονται από γραμμική παρεμβολή μεταξύ αυτού και των δύο κοντινότερων σημείων του πλέγματος. Σε περίπτωση που η λειτουργία της διάταξης οδηγήσει σε σημείο εκτός των ορίων του χάρτη, τότε λαμβάνεται ως σημείο λειτουργίας το κοντινότερο σημείο των ορίων του.



### 3.2.3 Μοντέλο στροβίλου

Ομοίως με την μέθοδο μοντελοποίησης του συμπιεστή, η λειτουργία του στροβίλου εντός του λογισμικού MOTHER βασίζεται σε ένα σύνολο πειραματικά προσδιορισμένων σημείων λειτουργίας του. Τα μεγέθη που χρησιμοποιούνται για την πλήρη περιγραφή της λειτουργίας του στροβίλου είναι η ταχύτητα του στροβίλου, η ροή του αέρα, ο λόγος πιέσεων πριν και μετά τον στροβίλο και η αποδοτικότητα αυτού. Όσον αφορά τη ροή του αέρα που δέχεται ο συμπιεστής, ακολουθείται η ίδια λογική με αυτή του στροβίλου (3.2.2) χρησιμοποιώντας τη διορθωμένη ροή μάζας μέσω της ίδιας διαδικασίας υπολογισμού.

Ο χάρτης του στροβίλου όπως προκύπτει από τον κατασκευαστή δίνεται στο Διάγραμμα 3.2.4:



Διάγραμμα 3.2.4: Χάρτης στροβίλου

### 3.2.4 Μοντέλα δοχείων, βαλβίδων και εξωτερικών συνθηκών

Οι διεργασίες που λαμβάνουν μέρος εκτός των κυλίνδρων και του τμήματος του στροβιλοσυμπιεστή, αφορούν κυρίως την ροή του αέρα ή των καυσαερίων στα διάφορα δοχεία υποδοχής των ρευστών (πολλαπλή εισαγωγής και πολλαπλή εξαγωγής) διαμέσου των αντίστοιχων βαλβίδων (βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής, βαλβίδα EGR). Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αυτής, τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας μοντελοποιούνται από το MOTHER τόσο όσον αφορά τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ αέρα και των εκάστοτε τοιχωμάτων, όσο και μεταξύ των τοιχωμάτων και του ψυκτικού.

Πιο συγκεκριμένα σχετικά με την μεταφορά θερμότητας μεταξύ αέρα και τοιχωμάτων, το ποσό της στιγμιαίας ροής θερμότητας  $q$  υπολογίζεται ως εξής:

$$q = h_{gas} \cdot A_{gas} \cdot (T_{gas} - T_{wall}) \quad (3.2.13)$$

όπου:

$h_{gas}$  ο στιγμιαίος συντελεστής μέσης χωρικής μεταφοράς θερμότητας του αέρα (kW/m<sup>2</sup>K)

$A_{gas}$  το εμβαδόν της επιφάνειας που πραγματοποιείται το φαινόμενο (m<sup>2</sup>)

$T_{gas}$  η στιγμιαία θερμοκρασία του αέρα (K)

$T_{wall}$  η θερμοκρασία της επιφάνειας του τμήματος που πραγματοποιείται το φαινόμενο (K)

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στην παρούσα εφαρμογή υπολογίζεται μέσω της συσχέτισης των αριθμών Nu-Re-Pr (16):

$$Nu = C_1 \cdot Re^{C_2} \cdot Pr^{C_3} \quad (3.2.14)$$

όπου:

$C_1 = 0.021 - 0.023$  για την πολλαπλή εισαγωγής

0.035 - 0.045 για την πολλαπλή εξαγωγής

$C_2 = 0.75 - 0.85$

$C_3 = 0.3 - 0.5$

# Κεφάλαιο 4: Μοντελοποίηση ηλεκτροκινητήρα

## 4.1 Γενικά στοιχεία

Η μοντελοποίηση των ηλεκτροκινητήρων διαφέρει αρκετά από την διαδικασία που ακολουθήθηκε για την κύρια μηχανή κυρίως λόγω της διαφοράς σε διάταξη μεταξύ μιας μηχανής εσωτερικής καύσης και ενός ηλεκτρικού κινητήρα. Γενικά, το σύστημα περιγράφεται από τις μεταβλητές εισόδου και εξόδου όπως αυτές φαίνονται στην Εικόνα 4.1.1.



Εικόνα 4.1.1: Γενική περιγραφή συστημάτων ηλεκτροκινητήρων

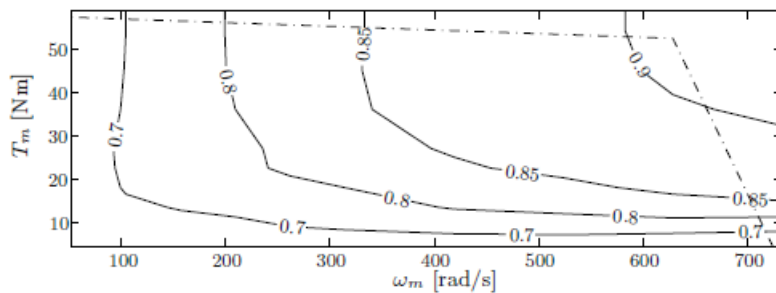
Οι μεταβλητές εισόδου είναι η ροπή  $T_m$  και η ταχύτητα  $\omega_m$  που απαιτούνται στον άξονα. Η μεταβλητή εξόδου είναι η ηλεκτρική ισχύς  $P_m$  που αποδίδει το σύστημα.

Η σχέση μεταξύ της ηλεκτρικής ισχύος και της μηχανικής ισχύος στον άξονα μπορεί να προσδιορισθεί πλήρως μέσω ενός λεπτομερούς χάρτη της απόδοσης  $\eta_m$  συναρτήσει της ροπής και της ταχύτητας, όπου:

$$P_m(t) = \frac{T_m(t) \cdot \omega_m(t)}{\eta_m(\omega_m(t), T_m(t))}, \quad T_m(t) \geq 0 \quad (4.1.1)$$

$$P_m(t) = T_m(t) \cdot \omega_m(t) \cdot \eta_m(\omega_m(t), T_m(t)), \quad T_m(t) < 0 \quad (4.1.2)$$

Οι χάρτες απόδοσης  $\eta_m$  των ηλεκτροκινητήρων έχουν μορφή παρόμοια με αυτήν του Διάγραμμα 4.1.1 (17).



Διάγραμμα 4.1.1: Παράδειγμα χάρτη απόδοσης ηλεκτροκινητήρα

Η μέθοδος μοντελοποίησης ηλεκτρικών κινητήρων με τη μέθοδο χαρτών συνδέεται με ορισμένα προβλήματα. Πιο συγκεκριμένα, σε χαμηλά φορτία η τιμή  $\eta_m$  δεν ορίζεται σαφώς, καθώς αποτελεί το λόγο δύο μεγεθών που προσεγγίζουν το μηδέν, γεγονός που καθιστά δύσκολη τη μέτρηση ή την εκτίμηση της ακριβούς τιμής σε εκείνη την περιοχή. Επιπλέον, η χρήση των εν λόγω χαρτών δεν αποτελεί πάντα επιλογή, διότι αυτού του είδους τα δεδομένα συχνά δεν είναι διαθέσιμα. Μια εναλλακτική στην παραπάνω μέθοδο αποτελεί η ομολογουμένως πιο απλοϊκή, αλλά ιδιαίτερα χρήσιμη προσέγγιση του Willans.

## 4.2 Προσέγγιση Willans

Η προσέγγιση του Willans για εφαρμογές ηλεκτροκινητήρων αποτελεί μια συσχέτιση μεταξύ της ισχύος του ηλεκτροκινητήρα και του γινομένου ροπής-στροφών στον άξονα αυτού. Η συσχέτιση αυτή γίνεται γραμμικά και λαμβάνει υπόψη την αποδοτικότητα του κινητήρα και τις απώλειες λόγω τριβών (18).

$$T_m(t) \cdot \omega_m(t) = e \cdot P_m(t) - P_0, \quad P_m(t) \geq 0 \quad (4.2.1)$$

$$T_m(t) \cdot \omega_m(t) = \frac{P_m(t)}{e} - P_0, \quad P_m(t) < 0 \quad (4.2.2)$$

όπου:

$e$  η ενδεικνυόμενη αποδοτικότητα

$P_0$  οι απώλειες ισχύος που λαμβάνουν μέρος μετά την μετατροπή ενέργειας (τριβές, απώλειες θερμότητας)

Όπως φαίνεται από τις παραπάνω σχέσεις, η τιμή της  $e$  αποτελεί τη μέγιστη αποδοτικότητα που μπορεί να επιτευχθεί από τον ηλεκτροκινητήρα όταν οι τιμές των απωλειών  $P_0$  είναι μηδέν. Έτσι, προκύπτει ότι η τιμή της αποδοτικότητας αφορά μόνο τη διαδικασία μετατροπής της ενέργειας χωρίς να λαμβάνει υπόψη τις τριβές και τις απώλειες θερμότητας σε αντίθεση με την τιμή  $\eta_m$  της μεθόδου χρήσης χάρτη αποδοτικότητας (4.1). Οι εξισώσεις (4.2.1), (4.2.2) υποδεικνύουν ότι οι ευθείες της προσέγγισης Willans δεν είναι ίδιες για την λειτουργία της μηχανής ως κινητήρας (motor mode) και ως γεννήτριας (generator mode). Παρ' όλα αυτά, για τιμές του  $e$  κοντά στο 1, οι κλίσεις των δύο ευθειών δεν διαφέρουν σημαντικά η μία από την άλλη.

Οι τιμές των  $e$  και  $P_0$  εξαρτώνται κατά κανόνα από την ταχύτητα του άξονα του κινητήρα και δεν είναι συνάρτηση μόνο της ισχύος. Παρ' όλα αυτά είναι δυνατό να βρεθούν οι μέσες τιμές των  $e$  και  $P_0$  οι οποίες δίνουν καλή προσέγγιση στις πραγματικές ποσότητες σε όλο το εύρος λειτουργίας του ηλεκτροκινητήρα. Για την εκλογή των μέσω τιμών υπάρχουν δύο μεθοδολογίες αναφορικά με τη συλλογή δεδομένων (17). Σύμφωνα με την μεθοδολογία Α, λαμβάνεται ένα μεγάλο πλήθος τιμών ροπής και αντίστοιχων ταχυτήτων, για τα ζεύγη των οποίων εκτιμάται η απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς και εν τέλει εξάγεται η γραμμική σχέση της μορφής  $P_m = f(\omega_m \cdot T_m)$ . Η μεθοδολογία Β περιλαμβάνει τον διαχωρισμό ορισμένων προφίλ

λειτουργίας του ηλεκτρικού κινητήρα, την λήψη των μέσων τιμών για τα μεγέθη  $P_m$ ,  $\omega_m \cdot T_m$  και τελικά την εξαγωγή από τις τιμές που προκύπτουν της γραμμικής σχέσης της μορφής  $P_m = f(\omega_m \cdot T_m)$ .

Γενικά, η προσέγγιση Willans χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή μίας σχέσης μεταξύ ισχύος και ροπής-ταχύτητας για τον ηλεκτροκινητήρα. Με αυτόν τον τρόπο, ολοκληρώνεται το μοντέλο της πειραματικής διάταξης HIPPO-2, τα αποτελέσματα του οποίου μπορούν να επικυρωθούν πειραματικά και τελικά να χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση της υβριδικής λειτουργίας της διάταξης σε κατάλληλα σενάρια.

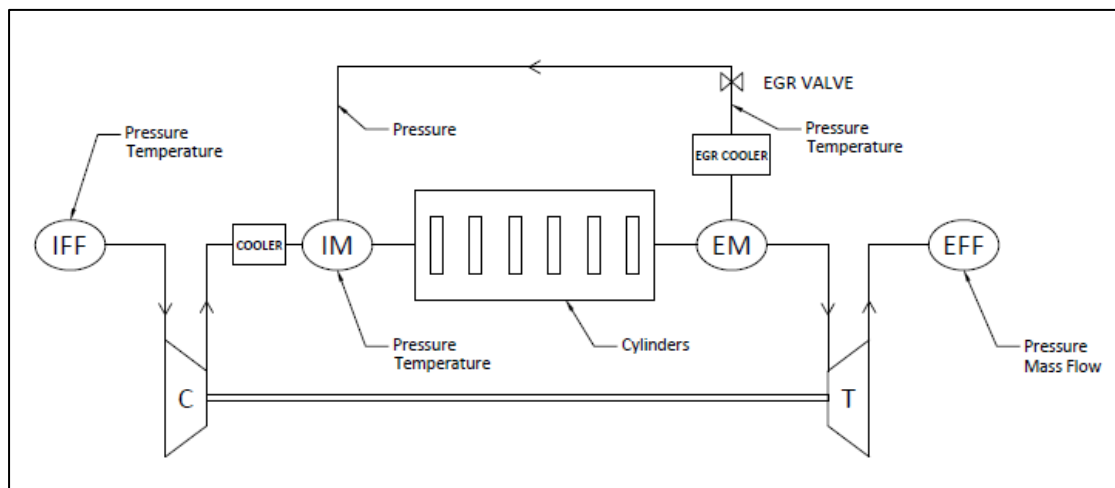


## Κεφάλαιο 5: Ανάπτυξη μοντέλου προσομοίωσης

Σημαντικό κομμάτι της διαδικασίας εξαγωγής των επιθυμητών αποτελεσμάτων είναι, εκτός από τη χρήση των απαραίτητων εργαλείων όπως αυτά συζητήθηκαν προηγουμένως, και η κατάλληλη δόμηση του συστήματος που θα χρησιμοποιηθεί. Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των διαδικασιών μέσω των οποίων ρυθμίστηκαν οι παράμετροι των μοντέλων, τέθηκαν τα όρια αυτών και σχεδιάστηκαν τα σενάρια λειτουργίας.

### 5.1 Διάρθρωση δομής

Το μοντέλο της μηχανής που σχεδιάζεται από το λογισμικό του MOTHER αποτελείται από τα επιμέρους στοιχεία της βιβλιοθήκης αυτού όπως αυτά περιγράφηκαν στην παράγραφο 3.2. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η σχηματική απεικόνιση της διάταξης καθώς και οι θέσεις των κύριων σημείων στα οποία λαμβάνονται οι μετρήσεις που χρησιμοποιούνται ως επικύρωση για το συνολικό μοντέλο.



Εικόνα 5.1.1: Γενική διάταξη μοντέλου κινητήρα

όπου:

IFF οι συνθήκες στην είσοδο της διάταξης (Inlet Fixed Fluid)

EFF οι συνθήκες στην έξοδο της διάταξης (Exhaust Fixed Fluid)

C ο συμπιεστής (Compressor)

T ο στρόβιλος (Turbine)

IM η πολλαπλή εισαγωγής (Intake Manifold)

EM η πολλαπλή εξαγωγής (Exhaust Manifold)

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, η διάταξη αποτελείται από έναν εξακύλινδρο, υπερπληρωμένο κινητήρα με δυνατότητα ανακυκλοφορίας των καυσαερίων με χρήση του συστήματος EGR.

Ο αέρας εισέρχεται μέσω της εισαγωγής της διάταξης που μοντελοποιείται μέσω του IFF λαμβάνοντας την ατμοσφαιρική θερμοκρασία και πίεση. Στη συνέχεια, ο αέρας συμπιέζεται μέσω της δράσης του συμπιεστή και ψύχεται στο αντίστοιχο ψυγείο για την διατήρηση της θερμοκρασίας σε χαμηλά επίπεδα. Έπειτα, η ροή συγκεντρώνεται στην πολλαπλή εισαγωγής από όπου και εισέρχεται εντός των κυλίνδρων. Ο χρονισμός και η ποσότητα του αέρα που φτάνει στους κυλίνδρους σε κάθε κύκλο ελέγχεται μέσω της κίνησης των έξι βαλβίδων εισαγωγής που διαθέτουν τα σώματα των κυλίνδρων. Μετά από την πραγματοποίηση της καύσης, οι αντίστοιχες βαλβίδες εξαγωγής ανοίγουν για την έξοδο των καυσαερίων από τους θαλάμους των κυλίνδρων. Η ροή συγκεντρώνεται στην πολλαπλή εξαγωγής. Από εκεί, ένα τμήμα της ψύχεται στο ψυγείο του συστήματος EGR και οδηγείται και πάλι στην πολλαπλή εισαγωγής. Η ποσότητα των ανακυκλοφορούμενων καυσαερίων ελέγχεται μέσω της βαλβίδας του EGR. Η υπόλοιπη ροή περνάει μέσα από τον στρόβιλο ο οποίος παραλαμβάνει κινητική ενέργεια από την κίνηση των καυσαερίων, περιστρέφεται και μεταδίδει την κίνηση μέσω κοινού άξονα στον συμπιεστή για την διατήρηση της λειτουργίας της υπερπλήρωσης. Τέλος, τα καυσαέρια συνεχίζουν προς την έξοδο της διάταξης, οι συνθήκες της οποίας μοντελοποιούνται μέσω του EFF. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας το σύστημα απορρύπανσης της μηχανής δεν μελετάται. Γι' αυτό τον λόγο, στις συνθήκες του EFF έχει ληφθεί υπόψη και το backpressure που δέχεται η διάταξη από το σύστημα απορρύπανσης, όπως αυτό έχει προκύψει από τη μέτρηση της πίεσης στην είσοδο του DPF.

## 5.2 Διαδικασία ανάπτυξης μοντέλου

Αντικείμενο της εργασίας είναι η δημιουργία ενός μοντέλου το οποίο να μπορεί να παράγει τα αποτελέσματα της λειτουργίας της μηχανής, όπως αυτά προκύπτουν από πειραματικές μετρήσεις. Το μοντέλο θα πρέπει να μπορεί να ανταποκρίνεται σε σταθερή λειτουργία (steady state), σε μεταβατικά φαινόμενα (transient) και σε λειτουργία προσομοίωσης υβριδικής διάταξης. Ο αριθμός των πιθανών αποτελεσμάτων της λειτουργίας του μοντέλου σε συνδυασμό με το πλήθος των σχεδιαστικών παραμέτρων, υποδεικνύει την ανάγκη για διάσπαση της διαδικασίας της μοντελοποίησης σε μικρότερα τμήματα. Σημειώνεται, επίσης, ότι τα σενάρια λειτουργίας στα οποία επικυρώθηκαν τα μοντέλα στο MOTHER σύμφωνα με τις πειραματικές μετρήσεις είναι: i) για τα steady state από 1000 RPM έως 1900 RPM (σύνολο δέκα προφίλ λειτουργίας), ii) για τα transient ένα φαινόμενο μετάβασης φορτίου από 100% σε 80% με σταθερή ταχύτητα 1400 RPM και ένα φαινόμενο μετάβασης φορτίου από 85% σε 100% με σταθερή ταχύτητα 1800 RPM (σύνολο δύο προφίλ λειτουργίας). Επιπλέον, σχεδιάστηκαν δύο ξεχωριστά υβριδικά σενάρια λειτουργίας στα οποία δοκιμάστηκε το μοντέλο. Τα αποτελέσματα των σεναρίων αυτών δεν επικυρώθηκαν εξ' ολοκλήρου μέσω πειραματικών δεδομένων. Αντ' αυτού χρησιμοποιήθηκαν τιμές αναφοράς για τα χρονικά διαστήματα όπου η κατάσταση λειτουργίας είναι σταθερή και όχι για τις μεταβάσεις του φορτίου και των στροφών. Περισσότερες πληροφορίες για τη διαδικασία που ακολουθήθηκε περιέχονται στη συνέχεια (5.5).



Το πρώτο στάδιο της διαδικασίας μοντελοποίησης αποτέλεσε η δημιουργία της μονοκύλινδρης διάταξης. Σε αυτό το κομμάτι, το μοντέλο περιέχει τα απολύτως απαραίτητα στοιχεία και δεν γίνεται χρήση του συστήματος EGR, ενώ το προφίλ λειτουργίας περιορίζεται σε σταθερά φαινόμενα. Σκοπός του σταδίου αυτού είναι η προκαταρκτική προσέγγιση των παραμέτρων των μοντέλων της καύσης και της μεταφοράς θερμότητας καθώς και ο έλεγχος της επίδρασης παραμέτρων όπως ο χρονισμός των βαλβίδων και η μεταβολή των πιέσεων και θερμοκρασιών στην πολλαπλή εισαγωγής σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές της πολλαπλής εξαγωγής.

Στη συνέχεια, δημιουργήθηκε η εξακύλινδρη διάταξη σε προσομοίωση σταθερών φαινομένων λειτουργίας. Πλέον, στο σύστημα εισάγεται και το ζεύγος του στροβιλοσυμπιεστή δίνοντας καλύτερη προσέγγιση στις συνθήκες εντός των δοχείων υποδοχής του αέρα πριν και μετά τους κυλίνδρους (πολλαπλή εισαγωγής και εξαγωγής αντίστοιχα). Σε αυτό το κομμάτι δόθηκε έμφαση στην περιοχή λειτουργίας του στροβίλου και του συμπιεστή αναφορικά με τους χάρτες που έχουν εισαχθεί στο σύστημα. Η επικύρωση της λειτουργίας στα προφίλ που μελετήθηκαν έγινε με κύριο γνώμονα τις τιμές της πίεσης στην πολλαπλή εισαγωγής και την πολλαπλή εξαγωγής.

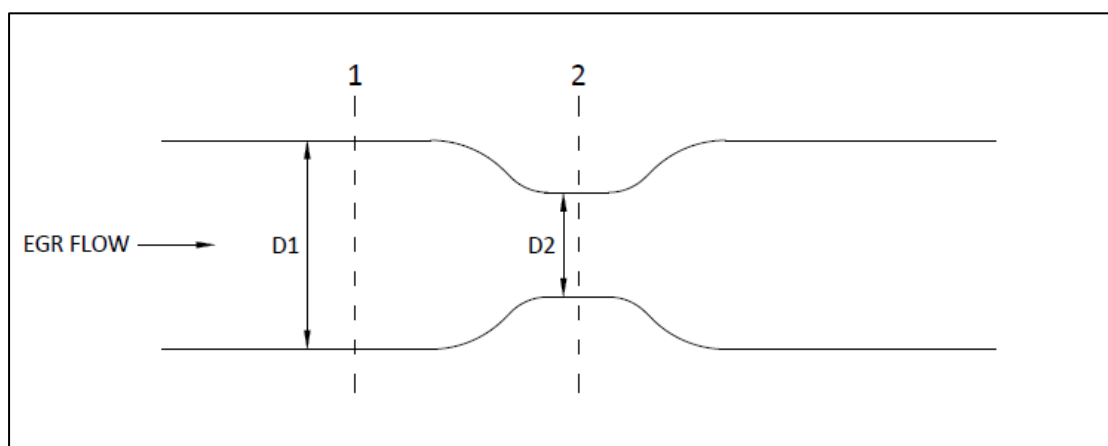
Οι προσεγγίσεις των παραμέτρων σχεδίασης του μοντέλου που προέκυψαν από τα προηγούμενα βήματα χρησιμοποιήθηκαν για την αρχική εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου πλήρους διάταξης. Σε αυτό χρησιμοποιείται το σύστημα του EGR και η μορφή του μοντέλου είναι αυτή της Εικόνας 5.1.1. Σε αυτό το σημείο υπολογίστηκαν τα τελικά αποτελέσματα όσον αφορά τα προφίλ σταθερής λειτουργίας. Η προσομοίωση του ακριβούς σημείου λειτουργίας της μηχανής σύμφωνα με τα πειράματα, πραγματοποιείται μέσω της εισαγωγής της ακριβούς ποσότητας καυσίμου ανά κύλινδρο για τις δεδομένες ανά περίπτωση στροφές της μηχανής.

Με βάση τις τιμές των προφίλ σταθερής λειτουργίας των αντίστοιχων ταχυτήτων (1400 RPM και 1800 RPM) δημιουργήθηκαν και ρυθμίστηκαν καταλλήλως τα προφίλ προσομοίωσης μεταβατικών φαινομένων. Για τη διατήρηση των ταχυτήτων σε σταθερές τιμές έγινε χρήση του ελεγκτή PID από τη βιβλιοθήκη του MOTHER για την προσομοίωση της λειτουργίας του ελεγκτή στροφών. Με αυτόν τον τρόπο, οι στροφές του κινητήρα ελέγχονται μέσω της ποσότητας του εγχεόμενου καυσίμου ανά κύκλο. Η ποσότητα αυτή ρυθμίζεται από τον ελεγκτή στροφών και δεν δίνεται σαν input από το χρήστη. Η προσομοίωση των μεταβατικών φαινομένων και η διαφοροποίηση με τις προηγούμενες καταστάσεις λειτουργίας υλοποιείται μέσω της εφαρμογής ενός φορτίου ροπής, μεταβαλλόμενο καταλλήλως στο χρόνο, στο άκρο του άξονα, ομοίως με την ροπή που απαιτεί η ηλεκτρική πέδη από τη μηχανή στην πειραματική διάταξη. Έτσι, ο ελεγκτής στροφών ελέγχει και μεταβάλλει την ποσότητα του καυσίμου αναλόγως με το φορτίο που απαιτείται στον άξονα διατηρώντας την ταχύτητά του.

### 5.3 Υπολογισμός ροής EGR

Η εισαγωγή του συστήματος EGR στην διάταξη του μοντέλου πλήρους διάταξης σύμφωνα με την αλληλουχία των σταδίων ανάπτυξης αυτής (5.2) σημαίνει τη διαφοροποίηση της ποσότητας ροής μάζας που δέχεται ο στρόβιλος αλλά και την αλλαγή της μάζας ροής και της θερμοκρασίας του μείγματος στην πολλαπλή εισαγωγής και επομένως την είσοδο των κυλίνδρων. Όπως φαίνεται από την Εικόνα 5.1.1 η διάταξη της πειραματικής κλίνης προσφέρει μέτρηση της ποσότητας ροής μάζας μόνο στην έξοδο του συστήματος και όχι στο κύκλωμα του EGR. Για τον λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος που ακολουθεί για την εκτίμηση των τιμών της ζητούμενης ροής μάζας.

Η ροή των καυσαερίων στο σύστημα EGR της CAT C9.3 ACERT διέρχεται μέσα από ένα σωλήνα Βεντούρι (Venturi Tube Εικόνα 5.3.1) όπου λαμβάνονται οι τιμές της πίεσης στην είσοδο και την έξοδο αυτού. Για τον υπολογισμό της ροής έχει γίνει η θεώρηση ότι η τιμή της πίεσης στην εισαγωγή της στένωσης ισούται με την μέτρηση που λαμβάνεται στην είσοδο του EGR και ότι η σταθερά των αερίων ισούται με  $R=287 \text{ J/kgK}$ . Οι διαστάσεις της διαμέτρου του σωλήνα στη μέτρηση εισόδου και στην μέτρηση εξόδου του σωλήνα λήφθηκαν  $D_1=20 \text{ mm}$  και  $D_2=10 \text{ mm}$  αντίστοιχα.



Εικόνα 5.3.1: Σωλήνας Βεντούρι

Ο υπολογισμός της ροής στο σωλήνα Βεντούρι βασίζεται στην εξίσωση Μπερνούλι σύμφωνα με την οποία στην παρούσα εφαρμογή προκύπτει:

$$p_1 - p_2 = \Delta p = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_2^2 - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_1^2 \quad (5.3.1)$$

όπου:

$p$  η πίεση της ροής στα αντίστοιχα σημεία (kPa)

$\rho$  η πυκνότητα της ροής καυσαερίων ( $\text{kg/m}^3$ )

$V$  η ταχύτητα της ροής καυσαερίων

Δεδομένου ότι:

$$Q = V_1 \cdot A_1 = V_2 \cdot A_2 \quad (5.3.2)$$

όπου:

Q η ογκομετρική παροχή της ροής καυσαερίων (m<sup>3</sup>/h)

A η εγκάρσια προς τη ροή εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα (m<sup>2</sup>)

Προκύπτει:

$$\Delta p_{EGR} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_1^2 \cdot \left[ \left( \frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1 \right] \quad (5.3.3)$$

Και για την παροχή ισχύει:

$$Q_{EGR} = \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p_{EGR}}{\rho}} \cdot \frac{A_1}{\sqrt{\left( \frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1}} \cdot 113832 \quad (5.3.4)$$

Η πυκνότητα που απαιτείται στους υπολογισμούς λαμβάνεται μέσω της καταστατικής εξίσωσης:

$$\rho = \frac{p_1}{R \cdot T_1} \cdot 1000 \quad (5.3.5)$$

όπου:

R η ειδική σταθερά αερίων (J/kgK)

T η θερμοκρασία των καυσαερίων μετά το ψυγείο του EGR (K)

Εν τέλει η ροή της μάζας των καυσαερίων  $m_{EGR}$  δίνεται από:

$$m_{EGR} = Q_{EGR} \cdot \rho \quad (5.3.6)$$

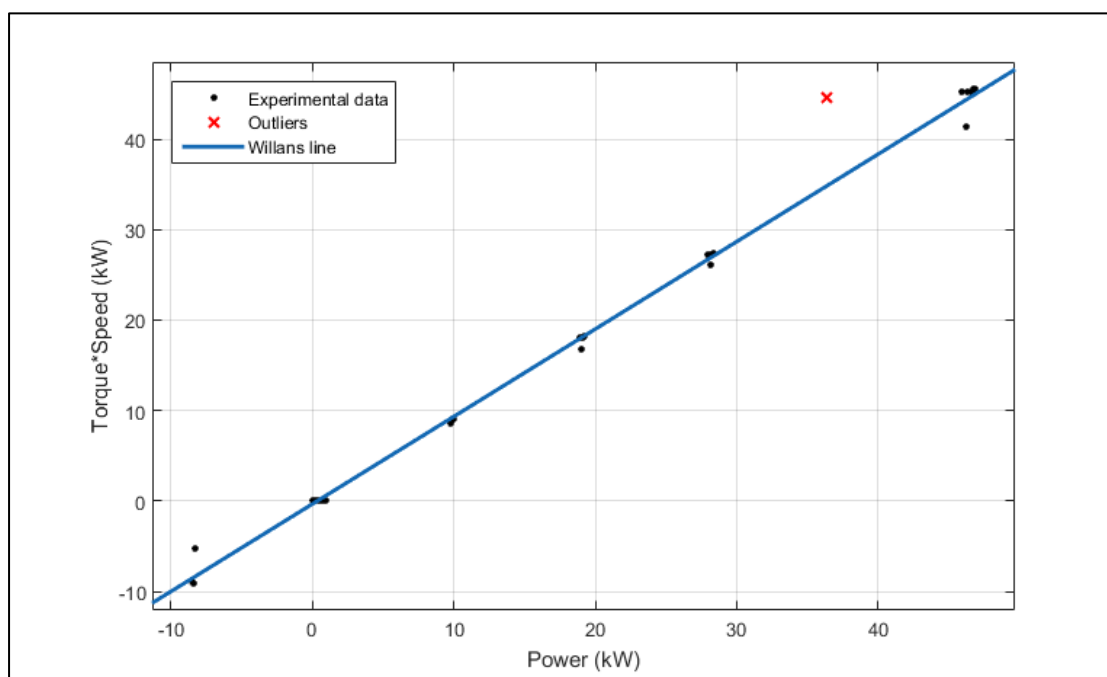
Η τιμή της ροής μάζας που προκύπτει από τους υπολογισμούς χρησιμοποιείται για την επικύρωση του αντίστοιχου μεγέθους στα αποτελέσματα του θερμοδυναμικού μοντέλου. Επιπλέον, η εισαγωγή του στη διάταξη επηρεάζει τις τιμές των πιέσεων και των θερμοκρασιών των πολλαπλών εισαγωγής και εξαγωγής καθώς και, όπως είναι λογικό, της ποσότητας καυσαερίων που διέρχονται ανά κύκλο λειτουργίας από τον στρόβιλο.

## 5.4 Εξίσωση ροπής ηλεκτροκινητήρα

Στην παράγραφο 4.2 έγινε περιγραφή της προσέγγισης Willans, της μεθόδου δηλαδή μέσω της οποίας εξάγεται η σχέση μεταξύ ροπής/στροφών και ισχύος του ηλεκτροκινητήρα. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας που αναλύθηκε.

Η μέθοδος που ακολουθήθηκε για την μοντελοποίηση του ηλεκτροκινητήρα στην παρούσα εφαρμογή είναι η μεθοδολογία Α. Σύμφωνα με αυτήν, από ένα εύρος ταχυτήτων λειτουργίας λήφθηκαν 33 ζεύγη των τιμών των μεγεθών  $P_m$ ,  $\omega_m \cdot T_m$ , απορρίπτοντας όσες τιμές απέκλιναν σημαντικά από την ευθεία των fitted σημείων.

Τα αποτελέσματα της προσέγγισης Willans συνίστανται από τη γραφική αναπαράσταση της ευθείας που δημιουργείται από το fitting των πειραματικών σημείων και την εξίσωση που τη συνοδεύει. Το fitting των σημείων πραγματοποιήθηκε με χρήση του αντίστοιχου toolbox του λογισμικού “MATLAB 2015a”.



Διάγραμμα 5.4.1: Fit σημείων ηλεκτροκινητήρα

Η παραπάνω ευθεία περιγράφεται από την εξίσωση:

$$T_m(t) \cdot \omega_m(t) = 0.967 \cdot P_m(t) - 0.326 \quad (5.4.1)$$

Προκύπτει, δηλαδή,  $e=0.967$  και  $P_o=0.326$  kW που συμβαδίζουν με τις αντίστοιχες τιμές της βιβλιογραφίας (17).

Έχοντας ορίσει τη σχέση μεταξύ των κύριων μεγεθών του ηλεκτροκινητήρα, μένει η οριοθέτηση της λειτουργίας αυτού λόγω των δυνατοτήτων της διάταξης σε διάφορες στροφές. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή, το μέγιστο, από άποψη ροπής και ισχύος, σημείο λειτουργίας του κινητήρα είναι 579 Nm @ 1483 RPM ισχύος 90 kW @ 1483-2200 RPM. Για την παρούσα εφαρμογή, τα όρια του ηλεκτροκινητήρα που εξετάζονται αφορούν τα επίπεδα ταχύτητας στροφών τα οποία είναι χαμηλότερα του σημείου που προαναφέρθηκε (των 1483 RPM). Αυτό συμβαίνει, διότι τα σενάρια δοκιμών του μοντέλου που πραγματοποιούνται αφορούν επίπεδα λειτουργίας της συνολικής διάταξης χαμηλών στροφών και φορτίου, όπως αυτά αναλύονται περαιτέρω στη συνέχεια (5.5). Έτσι, η καμπύλη της ροπής της λειτουργίας του ηλεκτροκινητήρα διαγράμματος ροπής-στροφών σε σημεία πριν το rated point αυτού θεωρείται ευθεία και παράλληλη με τον οριζόντιο άξονα έτσι ώστε να ισχύει  $T_{max}=579$  Nm για όλα τα υπό μελέτη σενάρια.

Τα σενάρια λειτουργίας που εξετάζονται στη συνέχεια είναι σχεδιασμένα λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς που θέτει το όριο λειτουργίας του ηλεκτροκινητήρα.

## 5.5 Σχεδιασμός σεναρίων λειτουργίας (Case Studies)

Εκτός των σεναρίων λειτουργίας σταθερής κατάστασης (steady state) και μεταβατικών φαινομένων (transient) το υπό μελέτη μοντέλο δοκιμάστηκε και σε υβριδικές καταστάσεις λειτουργίας. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η κύρια μηχανή και ο ηλεκτροκινητήρας λειτουργούν ταυτοχρόνως παράγοντας συνολική ροπή στον άξονα ίση με το άθροισμά τους.

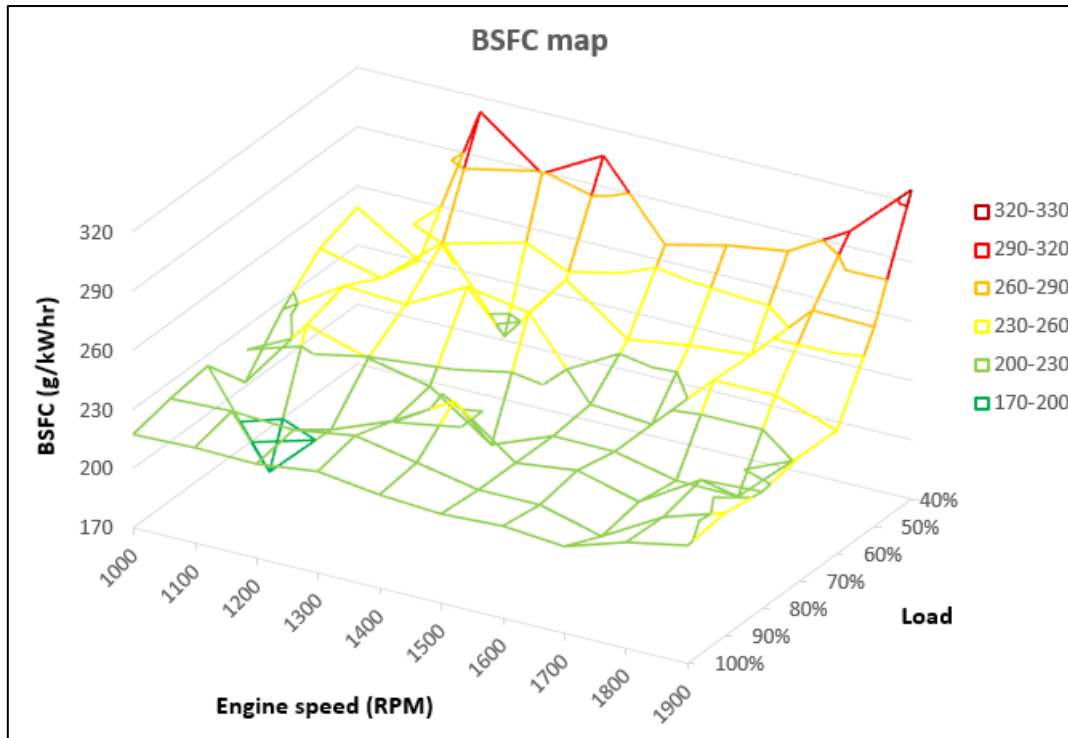
Τα Case Studies που μελετήθηκαν, σχεδιάστηκαν με τρόπο τέτοιο ώστε:

- Να προσομοιάζουν τη λειτουργία της μηχανής σε χαμηλά φορτία και χαμηλές στροφές.
- Να προσομοιάζουν τη λειτουργία σε καταστάσεις επιτάχυνσης.
- Να θέτουν τη μηχανή σε σημεία λειτουργίας με χαμηλή κατανάλωση, χαμηλή απόδοση ροπής αλλά και ικανοποιητικής απόδοσης αναφορικά με την ειδική κατανάλωση.

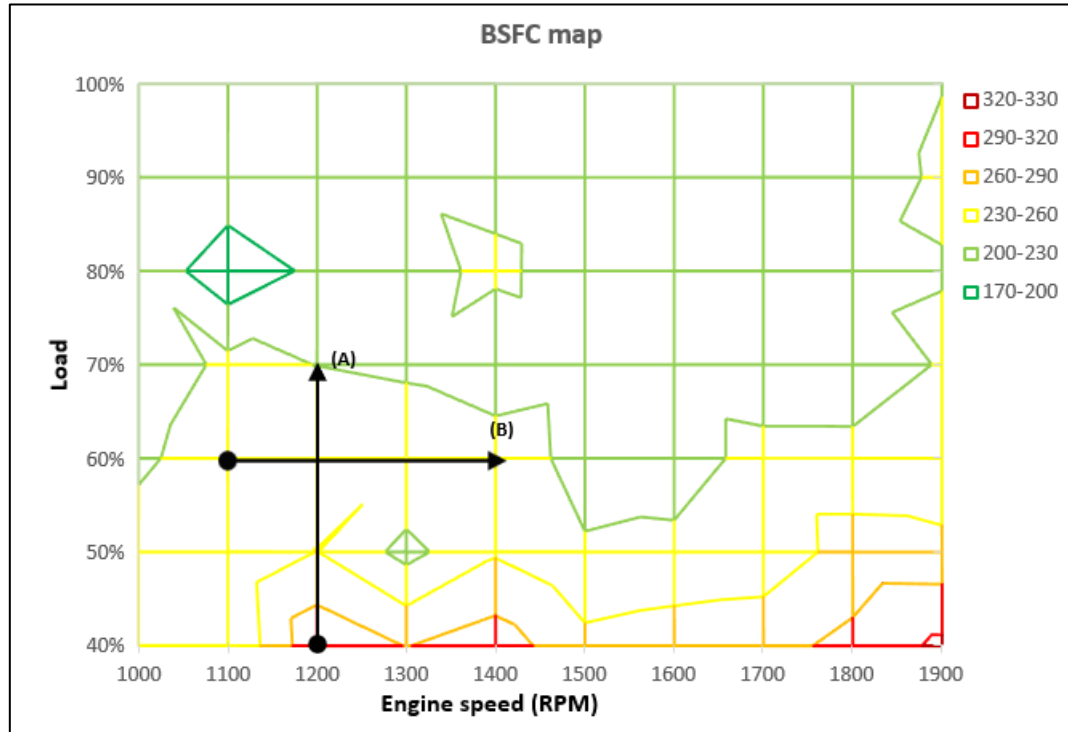
Η λογική των παραπάνω σημείων αφορά τη χρήση της διάταξης κύρια μηχανή-ηλεκτροκινητήρας σε εφαρμογές που η χρήση ηλεκτροκινητήρα θα ήταν ευεργετική για την οικονομία και την απόδοση της κύριας μηχανής και θα μπορούσε να προσεγγίζει πιθανά σενάρια ναυτικών εφαρμογών. Σημειώνεται, βεβαίως, ότι η προσέγγιση αυτή, στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιείται μόνο με γνώμονα την οικονομική λειτουργία της κύριας μηχανής και όχι απαραίτητα αυτή του ηλεκτροκινητήρα.

Με βάση τα παραπάνω, παρουσιάζονται οι τρισδιάστατοι χάρτες της ειδικής κατανάλωσης, της κατανάλωσης καυσίμων και της ροπής του κινητήρα. Επιπλέον, εμφανίζεται η κάτοψη των χαρτών αυτών για την καλύτερη κατανόηση της πορείας του κάθε Case Study. Οι πορείες αυτών συμβολίζονται από τα βέλη επί των κατόψεων των χαρτών. Το βέλος με ετικέτα "(A)"

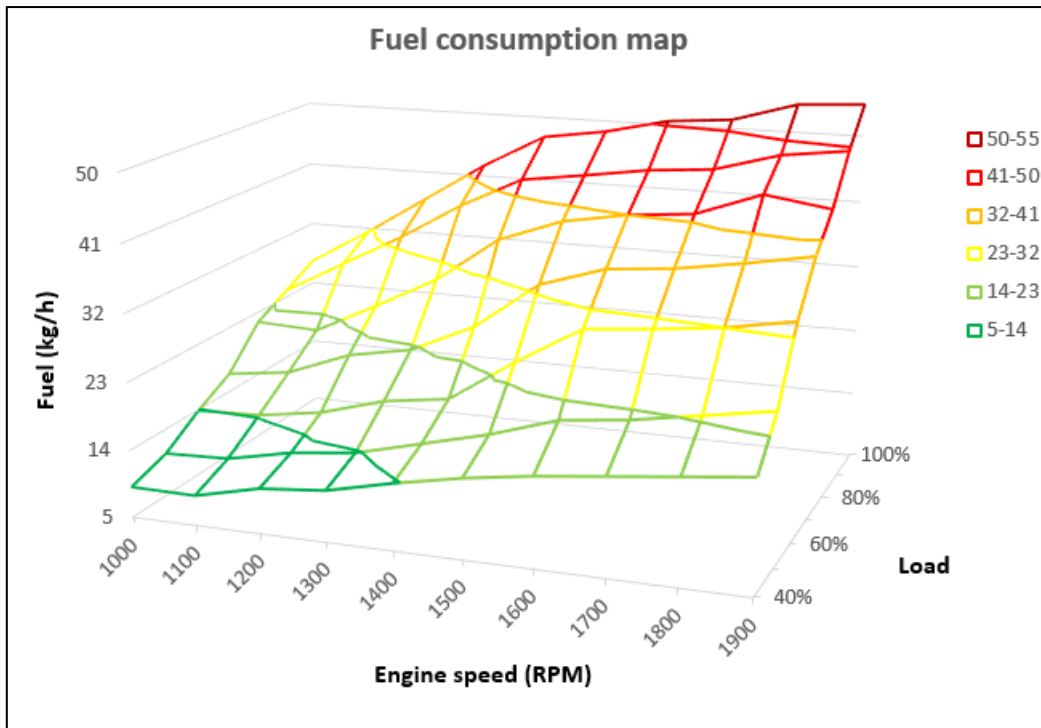
συμβολίζει την πορεία του Case Study A, ενώ αντίστοιχα το βέλος με ετικέτα “(B)” συμβολίζει την πορεία του Case Study B.



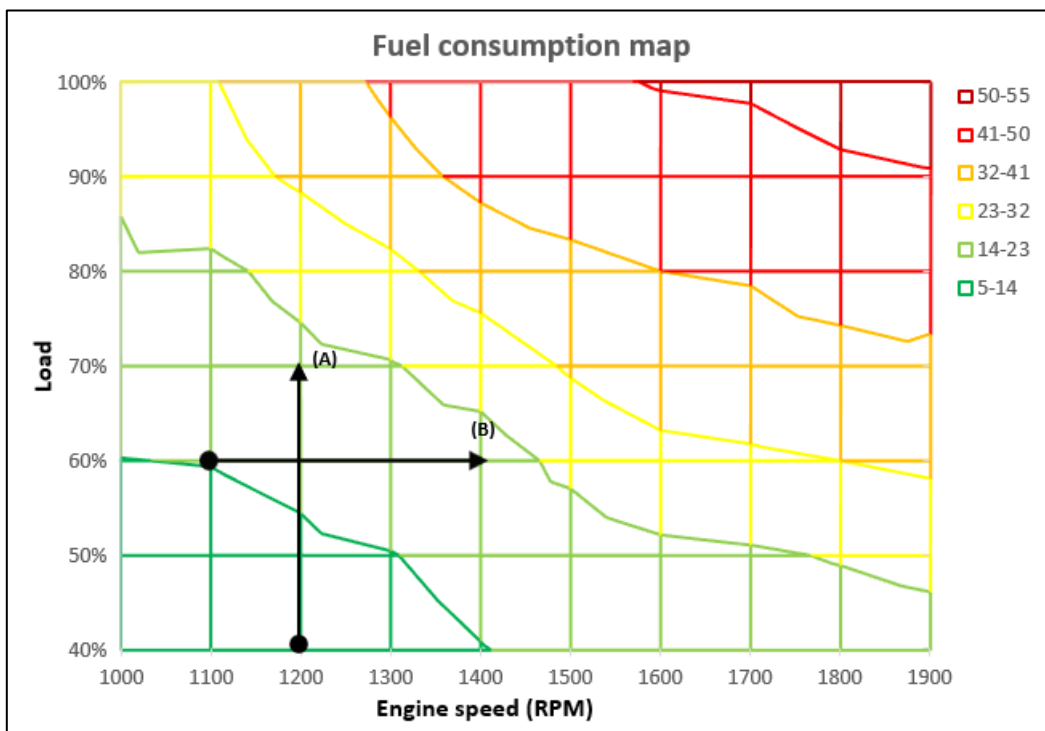
Διάγραμμα 5.5.1: Τρισδιάστατος χάρτης ειδικής κατανάλωσης



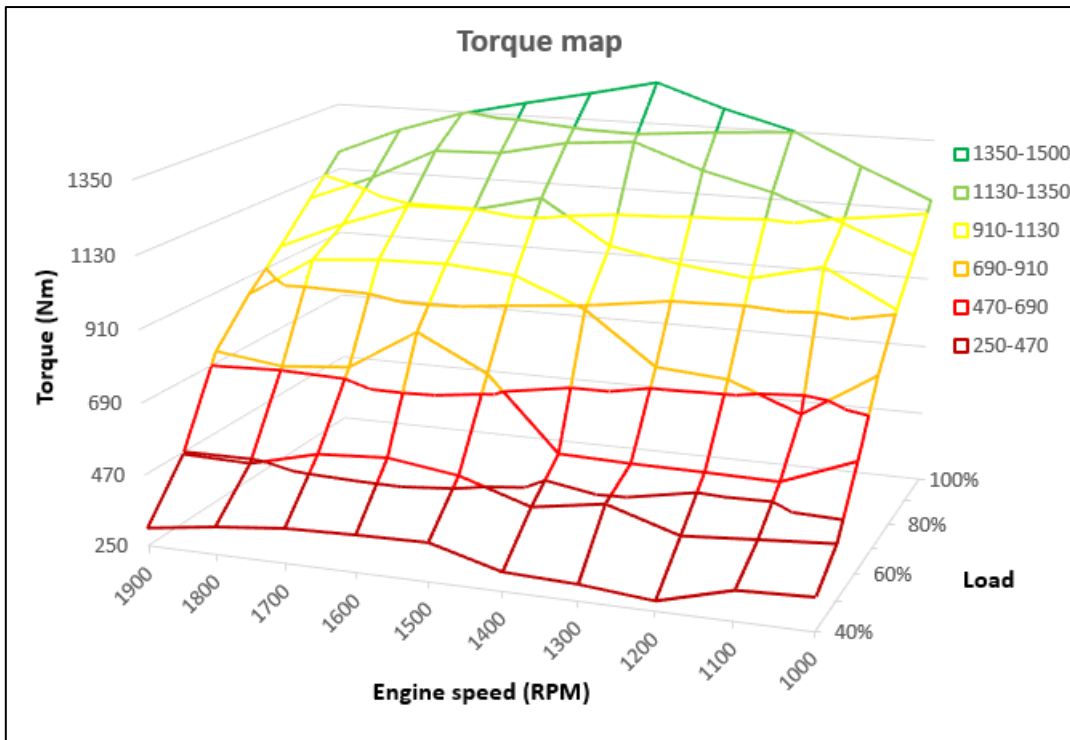
Διάγραμμα 5.5.2: Χάρτης ειδικής κατανάλωσης και πορεία Case Study



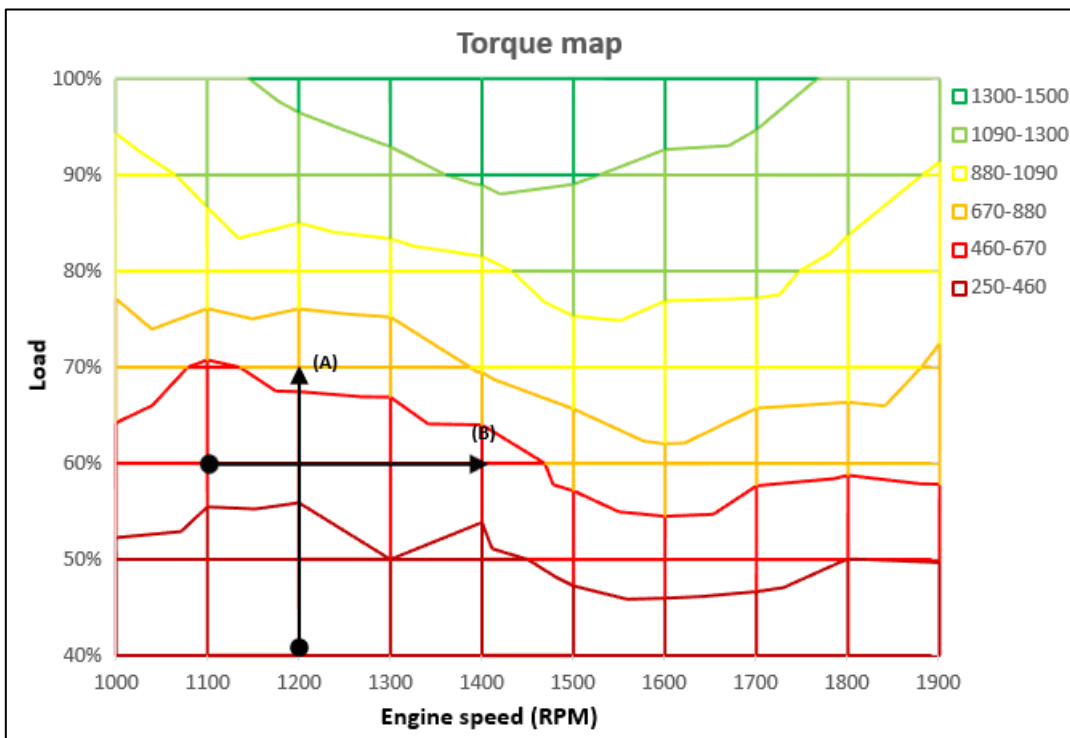
Διάγραμμα 5.5.3: Τρισδιάστατος χάρτης κατανάλωσης καυσίμου



Διάγραμμα 5.5.4: Χάρτης κατανάλωσης και πορεία Case Study



Διάγραμμα 5.5.5: Τρισδιάστατος χάρτης ροπής



Διάγραμμα 5.5.6: Χάρτης ροπής και πορεία Case Study



Από την πλευρά του ηλεκτροκινητήρα κάθε Case Study αναλύεται σε δύο περιπτώσεις: i) τη λειτουργία του στο μέγιστο δυνατό φορτίο για την παραγωγή της μέγιστης δυνατής ροπής στον άξονα και ii) τη λειτουργία σε μεταβαλλόμενο φορτίο (αναλόγως τη λειτουργία της κύριας μηχανής) για παραγωγή σταθερής ροπής στον άξονα.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, τα σενάρια λειτουργίας που εκλέχθηκαν είναι:

- Case Study A: @ 1200 RPM: 40% -> 70% load
  - i) Σταθερό φορτίο ηλεκτροκινητήρα (100%)
  - ii) Μεταβαλλόμενο φορτίο ηλεκτροκινητήρα – ζήτηση ροπής 725 Nm
- Case Study B: @ 1100 -> 1400 RPM: 60% load
  - i) Μέγιστο φορτίο ηλεκτροκινητήρα (100%)
  - ii) Μεταβαλλόμενο φορτίο ηλεκτροκινητήρα – ζήτηση ροπής 600 Nm

Παρατηρείται, ότι το Case Study A αποτελεί αύξηση του φορτίου της μηχανής διατηρώντας σταθερές στροφές ενώ στο Case Study B το φορτίο διατηρείται σταθερό με τις στροφές να μεταβάλλονται. Με αυτόν τον τρόπο, δίνεται η δυνατότητα για μελέτη περισσότερων πιθανών ειδών μεταβατικών φαινομένων που μπορεί να συναντήσει η μηχανή.

## 5.6 Συνεργασία μοντέλων κύριας μηχανής και ηλεκτροκινητήρα

Στα προηγούμενα κεφάλαια, έγινε η περιγραφή των μοντέλων που περιγράφουν τη λειτουργία του κινητήρα Diesel μέσω του λογισμικού “MOTHER” και του ηλεκτροκινητήρα μέσω της προσέγγισης Willans. Στην παρούσα παράγραφο, παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο τα δύο συστήματα συνεργάζονται, καθώς και το πώς το ένα σύστημα επηρεάζει τη λειτουργία του άλλου.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η πειραματική κλίνη συνδέει το σύστημα του κινητήρα Diesel, της ηλεκτρικής πέδης και του ηλεκτροκινητήρα σε σειρά μέσω κοινού άξονα. Αυτό σημαίνει, ότι η όποια αλληλεπίδραση λαμβάνει χώρα μεταξύ των συστημάτων πραγματοποιείται διαμέσου του κοινού άξονα. Τα μεγέθη της κύριας μηχανής και του ηλεκτροκινητήρα που συνδέονται με τη λειτουργία του άξονα είναι η περιστροφική ταχύτητα και η αποδιδόμενη ροπή. Όπως είναι λογικό, λοιπόν, η ταχύτητα του άξονα επιβάλλει ότι τα δύο συστήματα θα πρέπει να έχουν τον ίδιο αριθμό στροφών κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της πειραματικής διάταξης. Αναφορικά με το μέγεθος της ροπής, η συνολική τιμή αυτής στον άξονα ισούται με το άθροισμα των αντίστοιχων τιμών της αποδιδόμενης ροπής των συστημάτων όταν και τα δύο λειτουργούν ως κινητήρες. Η σχέση της συνολικής ροπής T του κοινού άξονα που προκύπτει από τη συνεργασία των συστημάτων δίνεται:

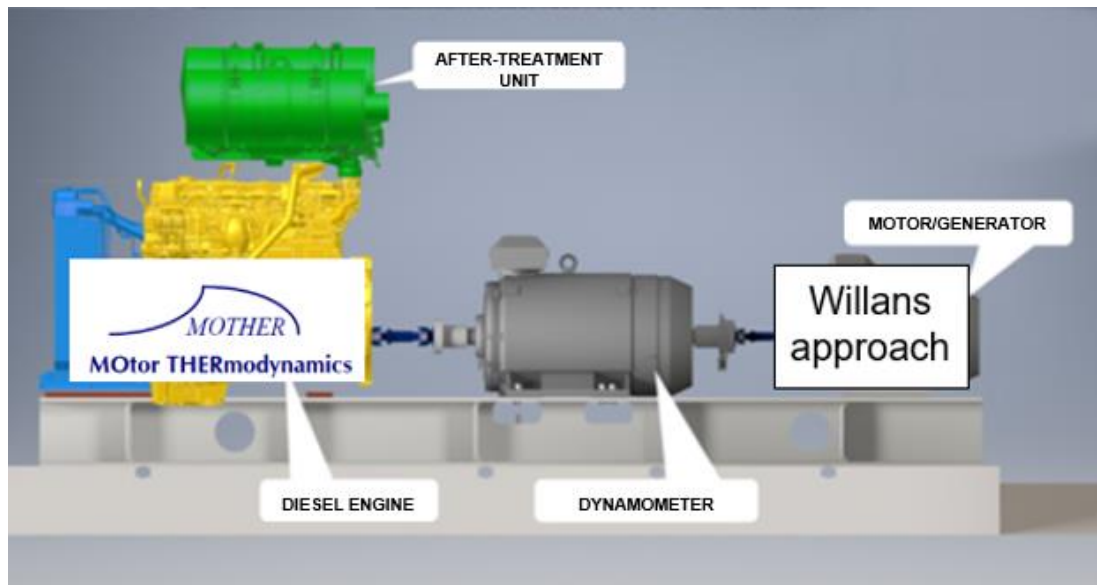
$$T = T_{eng} + T_{motor} \quad (5.6.1)$$

όπου:

$T_{eng}$  η τιμή της απόδοσης ροπής του κινητήρα Diesel

$T_{motor}$  η τιμή της απόδοσης ροπής του ηλεκτροκινητήρα

Η περιγραφή της λειτουργίας της διάταξης συνοψίζεται μέσω της παρακάτω απεικόνισης:



Εικόνα 5.6.1: Συνεργασία συστημάτων πειραματικής κλινής

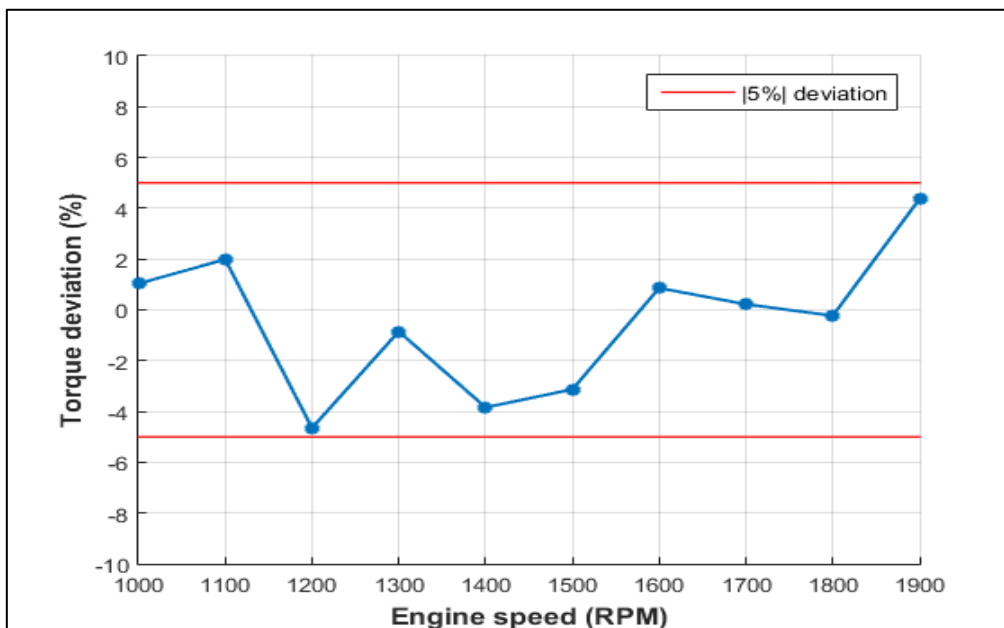
Με βάση τα παραπάνω, ο υπολογισμός των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα εντός της κύριας μηχανής πραγματοποιείται μέσω της θερμοδυναμικής μοντελοποίησης του λογισμικού “MOTHER”, ενώ τα αντίστοιχα μεγέθη που περιγράφουν τη λειτουργία του ηλεκτροκινητήρα υπολογίζονται από την εξίσωση που προέκυψε για την προσέγγιση Willans. Το επίπεδο των στροφών ορίζει τη λειτουργία των δύο συστημάτων αναφορικά με την ταχύτητά τους. Όσον αφορά τη ροπή, αυτή μπορεί να παραχθεί, ανάλογα με τις απαιτήσεις του κάθε σεναρίου λειτουργίας, από την κύρια μηχανή, τον ηλεκτροκινητήρα είτε από τον συνδυασμό των δύο. Η συνεργασία των συστημάτων εξετάζεται στο τμήμα της υβριδικής λειτουργίας. Στην παρούσα μελέτη, τα επίπεδα της λειτουργίας του κάθε συστήματος καθώς και ο διαμερισμός του φορτίου της ροπής που απαιτείται από τον άξονα κατά τη διάρκεια των αντίστοιχων σεναρίων λειτουργίας αποτελεί αντικείμενο σχεδιασμού και η διαδικασία περιγράφεται στην παράγραφο 5.5.

## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα προσομοιώσεων

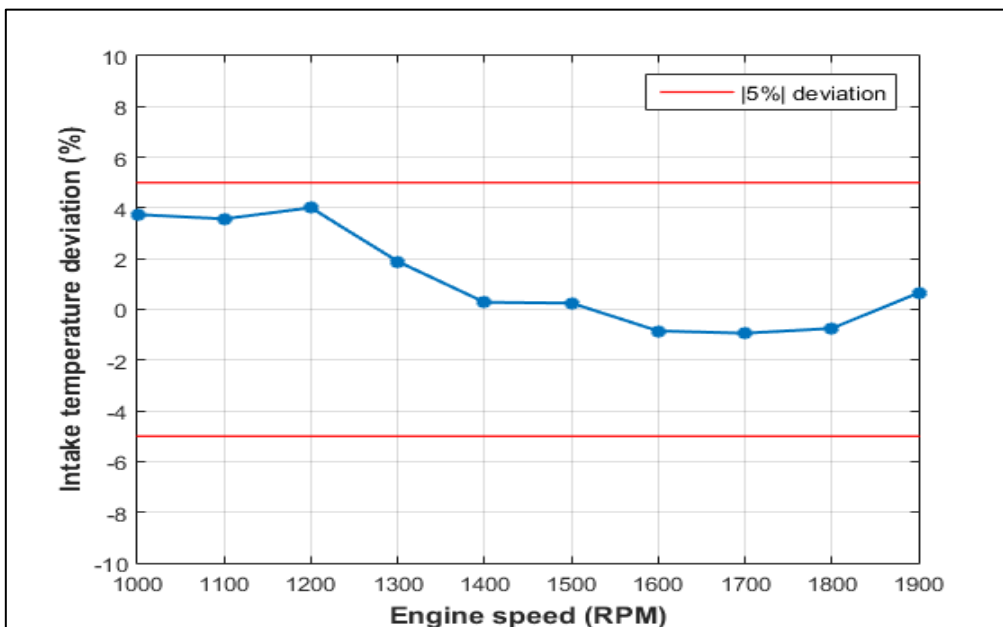
Στο παρόν κεφάλαιο, γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την προσομοίωση της λειτουργίας της μηχανής CAT C9.3 ACERT στο λογισμικό MOTHER. Τα αποτελέσματα αυτά ομαδοποιούνται αναλόγως με το σενάριο λειτουργίας σε σταθερής λειτουργίας (steady state), λειτουργίας μεταβατικών φαινομένων (transient) και υβριδικής λειτουργίας. Η παρουσίαση των αντίστοιχων διαγραμμάτων συνοδεύεται από σύντομο σχολιασμό σχετικά με τη μορφή αυτών και τους λόγους που μπορεί να οφείλονται για πιθανές αποκλίσεις.

### 6.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων σταθερής λειτουργίας

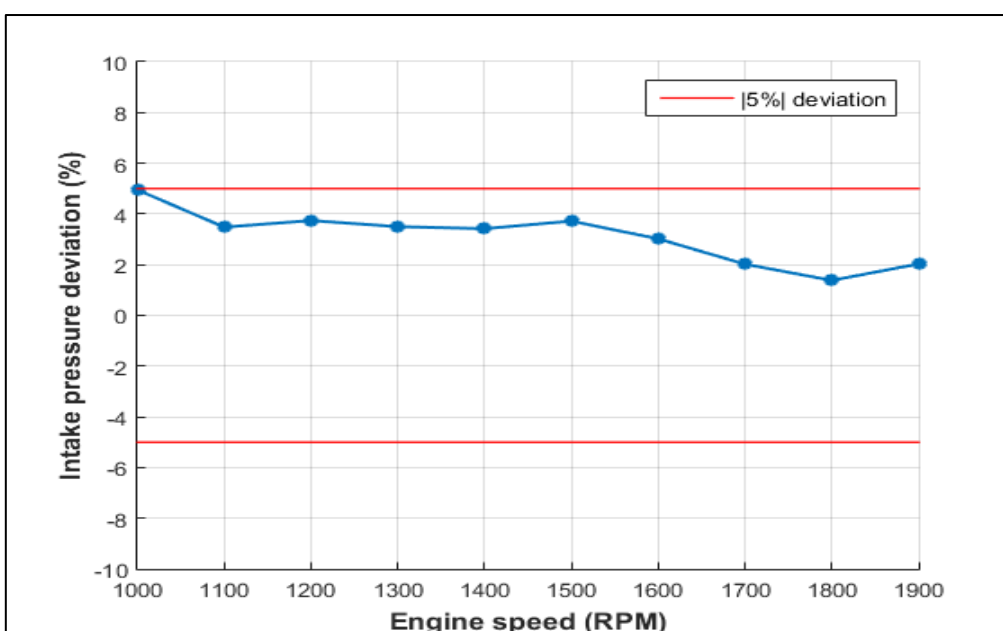
Τα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζουν τις αποκλίσεις των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης της λειτουργίας της μηχανής στο MOTHER σε σχέση με τις τιμές που προέκυψαν πειραματικά. Αφού πρόκειται για μελέτη κατάστασης σταθερής λειτουργίας, για κάθε μετρούμενο μέγεθος προέκυψε μία τιμή που δεν μεταβάλλεται στο χρόνο. Έτσι, οι αποκλίσεις εμφανίζονται συγκεντρωτικά σε ένα διάγραμμα για κάθε μέγεθος καθ' όλο το εύρος των προφίλ λειτουργίας. Πιο συγκεκριμένα, στον οριζόντιο άξονα δίνονται οι τιμές της ταχύτητας της μηχανής που αντιστοιχίζονται σε κάθε προφίλ λειτουργίας ενώ στον κατακόρυφο εμφανίζεται η ποσοστιαία διαφορά των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης σε σχέση με τις πειραματικές τιμές για κάθε ένα από τα προφίλ αυτά. Επιπλέον, στα διαγράμματα εμφανίζονται τα όρια των αποκλίσεων που έχουν τεθεί ως στόχοι κατά τη διαδικασία μοντελοποίησης.



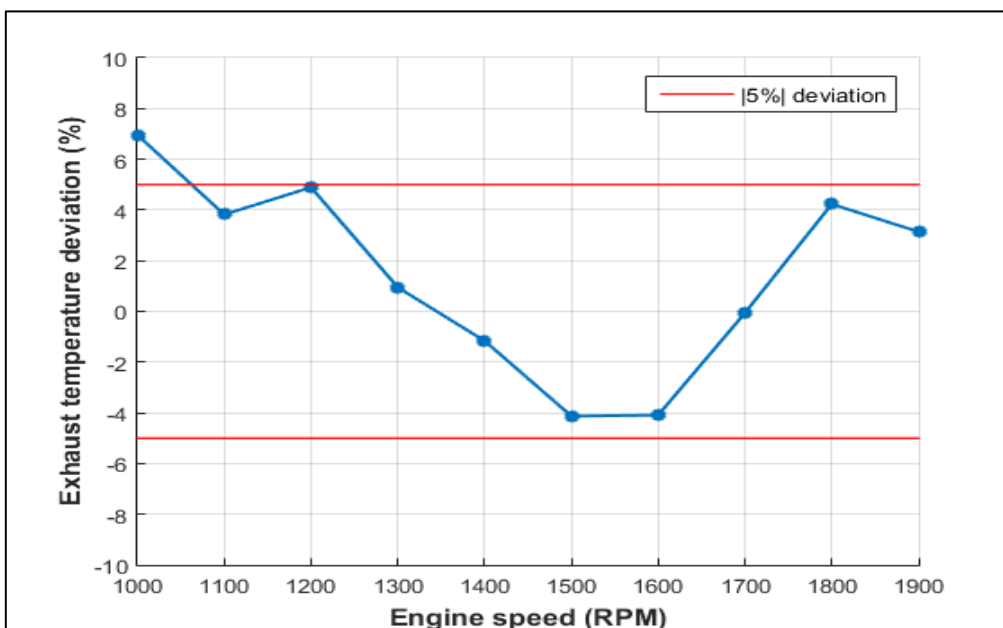
Διάγραμμα 6.1.1: Αποκλίσεις ροπής-steady state



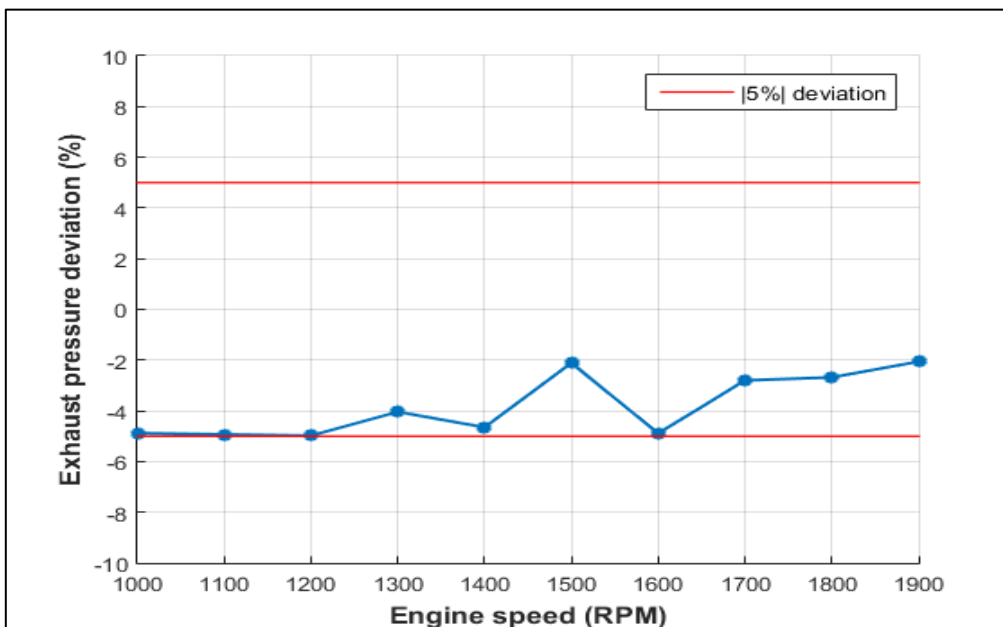
Διάγραμμα 6.1.2: Αποκλίσεις θερμοκρασίας πολλαπλής εισαγωγής-steady state



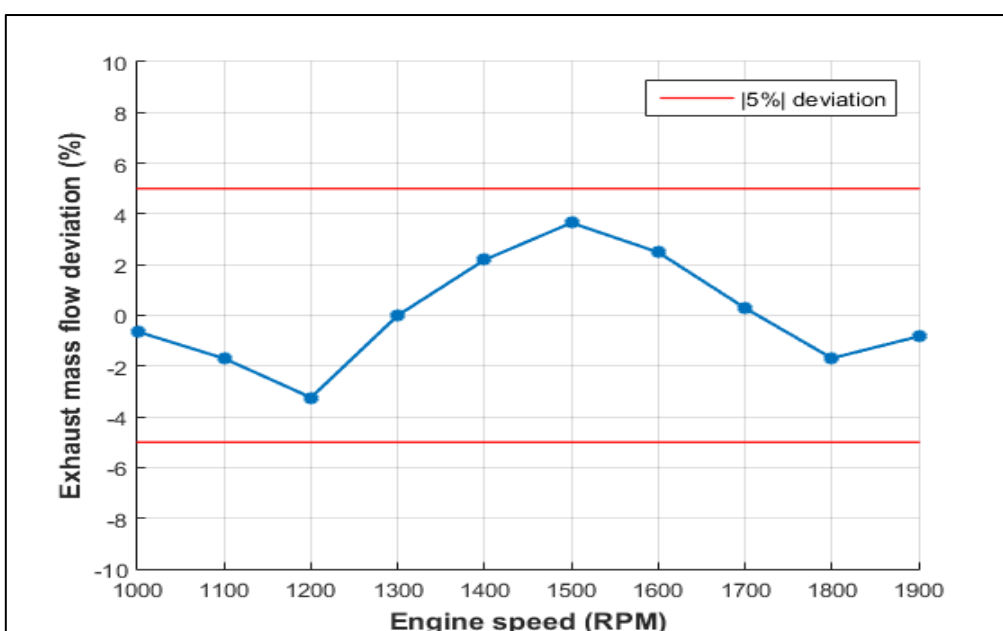
Διάγραμμα 6.1.3: Αποκλίσεις πίεσης πολλαπλής εισαγωγής-steady state



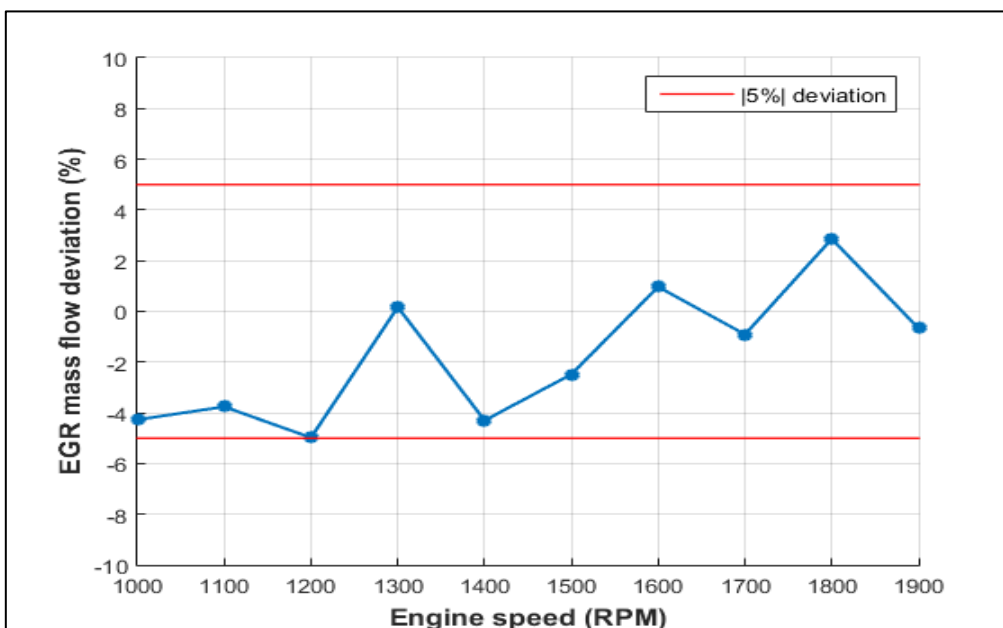
Διάγραμμα 6.1.4: Αποκλίσεις θερμοκρασίας πολλαπλής εξαγωγής-steady state



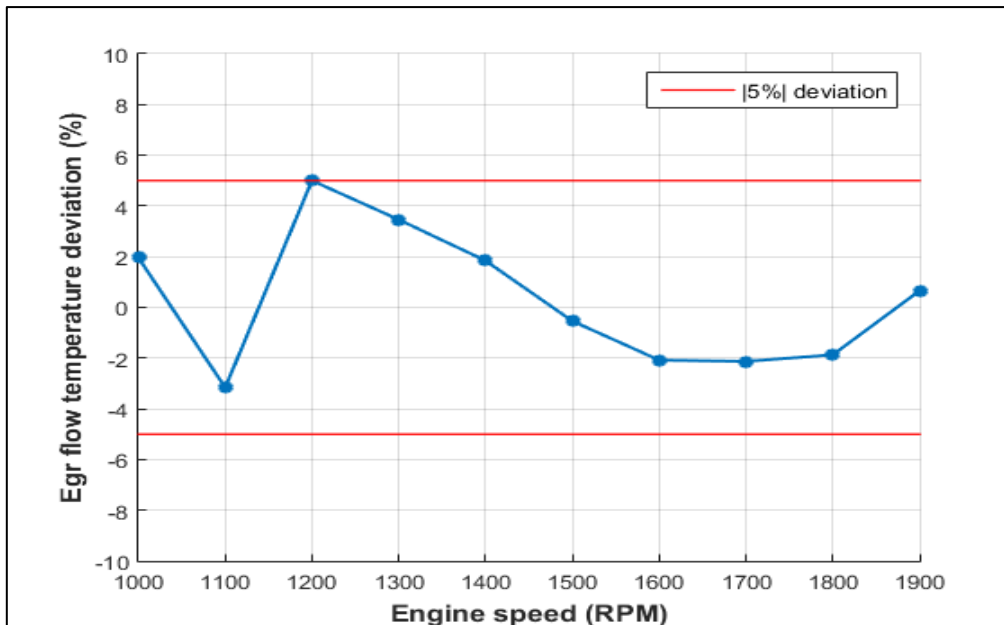
Διάγραμμα 6.1.5: Αποκλίσεις πίεσης πολλαπλής εξαγωγής-steady state



Διάγραμμα 6.1.6: Αποκλίσεις ροής μάζας καυσαερίων-steady state



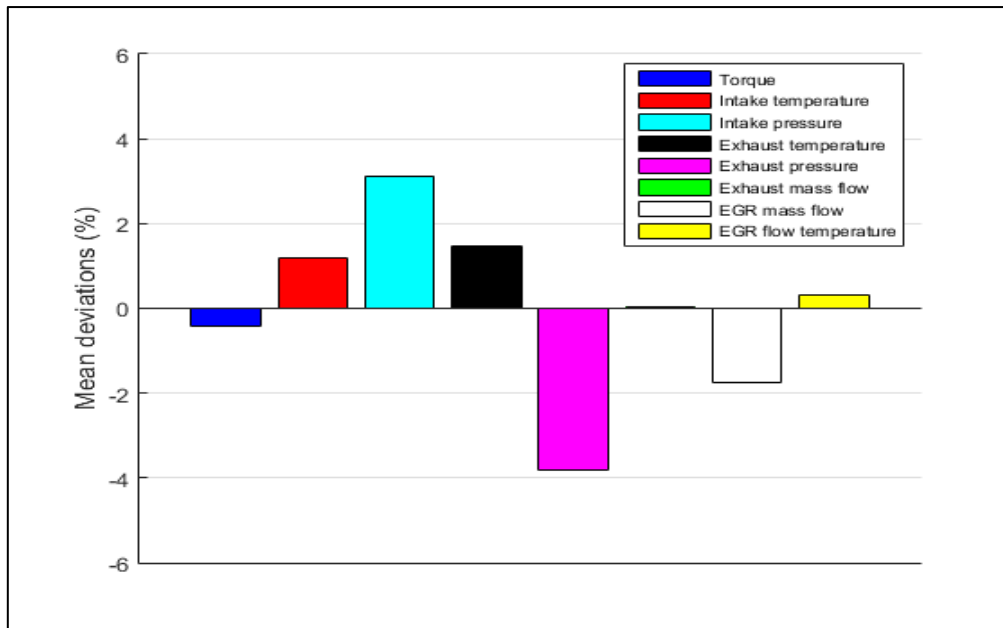
Διάγραμμα 6.1.7: Αποκλίσεις ροής μάζας EGR-steady state



Διάγραμμα 6.1.8: Αποκλίσεις θερμοκρασίας ροής EGR-steady state

Όπως προαναφέρθηκε, τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν επικυρώνονται με σημείο αναφοράς τις τιμές που προέκυψαν από την λειτουργία της πειραματικής κλίνης HIPPO-2 του εργαστηρίου. Εξαίρεση αποτελεί η τιμή της θερμοκρασίας των καυσαερίων στην πολλαπλή εξαγωγής. Οι τιμές αναφοράς για αυτό το μέγεθος λήφθηκε από το Data Sheet της κατασκευάστριας εταιρείας (2) στο οποίο δίνονται οι τιμές διάφορων μεγεθών που προκύπτουν από τη λειτουργία της μηχανής στο μέγιστο φορτίο για κάθε προφίλ στροφών.

Σημειώνεται, επίσης, ότι οι τιμές αναφοράς της πίεσης στην πολλαπλή εξαγωγής δεν προκύπτουν από άμεσες πειραματικές μετρήσεις στο σημείο εκείνο. Λόγω έλλειψης δεδομένων, χρησιμοποιήθηκε η πίεση στην είσοδο της βαλβίδας του EGR εφαρμόζοντας προσαύξηση της τάξης των 0.05 bar για την κάλυψη της πτώσης πίεσης λόγω της απόστασης της σωλήνωσης από την πολλαπλή εξαγωγής έως την μέτρηση πίεσης στο EGR. Η τιμή αυτή προέκυψε ύστερα από δοκιμές σε όλο το υπό μελέτη εύρος λειτουργίας της μηχανής.



Διάγραμμα 6.1.9: Μέσες τιμές αποκλίσεων-steady state

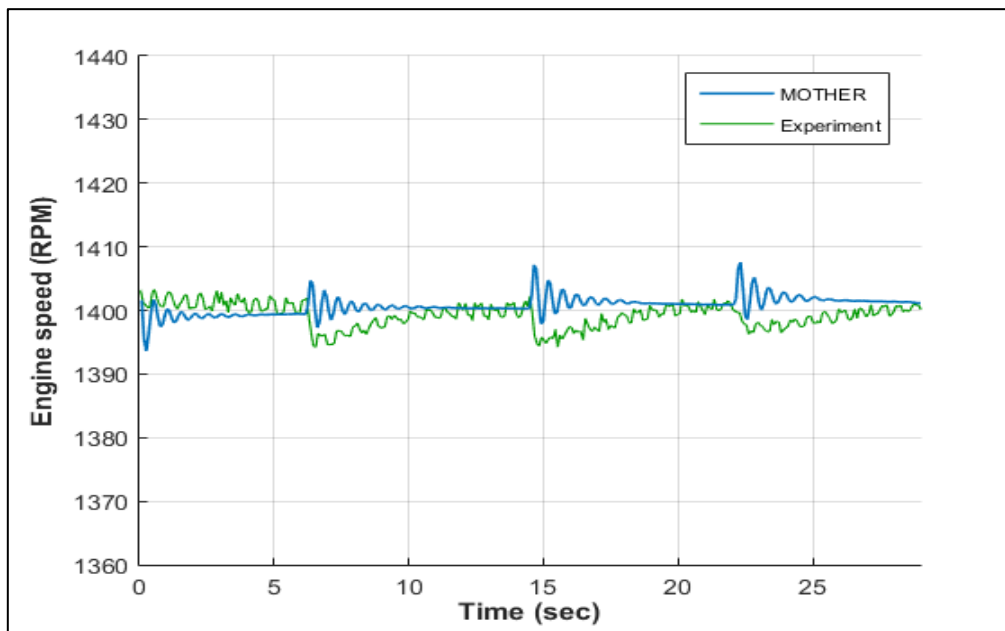
Στο Διάγραμμα 6.1.9 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των αποκλίσεων των μεγεθών που μοντελοποιήθηκαν. Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των μέσων τιμών προέρχονται από όλα τα προφίλ στροφών λειτουργίας που προαναφέρθηκαν. Όπως προκύπτει και από τα επιμέρους διαγράμματα των μεγεθών, οι αποκλίσεις περιορίζονται στο εύρος του  $|5\%|$  από τις τιμές αναφοράς. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί η τιμή της θερμοκρασίας στην πολλαπλή εξαγωγής στο προφίλ λειτουργίας των 1000 RPM, όπου η απόκλιση από την αντίστοιχη τιμή αναφοράς ξεπερνά οριακά το 5%. Η απόκλιση αυτή μπορεί εν μέρει να εξηγηθεί από το γεγονός, ότι οι τιμές αναφοράς αυτού του μεγέθους δεν έχουν ληφθεί πειραματικά, συνεπώς μπορεί να εμφανίζουν διαφορές από τις αντίστοιχες που θα προέκυπταν από το σετ των πειραματικών μετρήσεων. Γενικά, τα αποτελέσματα του μοντέλου παρουσιάζουν ικανοποιητικά επίπεδα αποκλίσεων, με τα μεγαλύτερα σφάλματα, σύμφωνα με την απεικόνιση των μέσω αποκλίσεων, να εμφανίζονται στις πιέσεις στην πολλαπλή εισαγωγής και στην πολλαπλή εξαγωγής.

## 6.2 Παρουσίαση transient αποτελεσμάτων

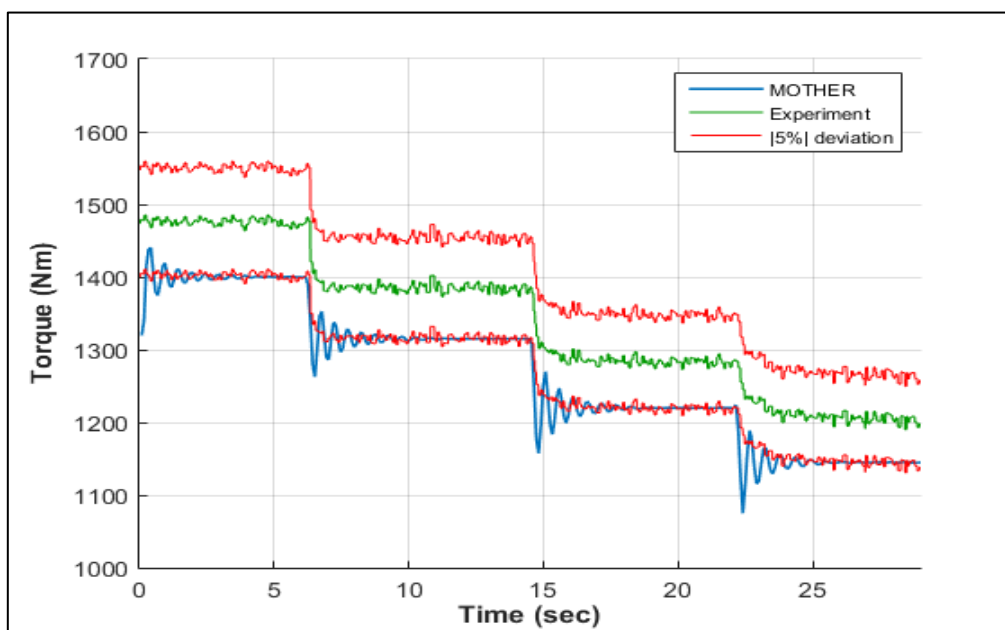
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών μεταβατικών φαινομένων. Όπως έχει προαναφερθεί, τα transient προφίλ λειτουργίας που μελετήθηκαν είναι δύο. Στο πρώτο οι στροφές παραμένουν σταθερές στις 1400 RPM και το φορτίο μεταβάλλεται από 100% σε 80% της μέγιστης ικανότητας της μηχανής για τη δεδομένη ταχύτητα. Στο δεύτερο η ταχύτητα διατηρείται στις 1800 RPM και το φορτίο μεταβάλλεται από 85% σε 100%. Στα διαγράμματα που ακολουθούν εμφανίζονται οι τιμές των αποτελεσμάτων όπως προέκυψαν από το λογισμικό MOTHER, μαζί με τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές. Η απεικόνιση αυτή επιτρέπει την οπτική παρατήρηση των αποκλίσεων μεταξύ των δύο, καθώς και την ικανότητα του μοντέλου να ανταποκριθεί στις μεταβολές φορτίου με τρόπο όμοιο με αυτόν της

μηχανής. Η ποσοτικοποίηση των αποκλίσεων πραγματοποιείται μέσω των καμπυλών που ακολουθούν τη μορφή των πειραματικών μετρήσεων και έχουν δεχθεί ποσοστιαία αύξηση (και αντίστοιχα μείωση) ώστε να θέτουν όρια-στόχους της διαδικασίας της μοντελοποίησης. Σημειώνεται, ότι οι τιμές της ταχύτητας της μηχανής παρουσιάζονται στην μορφή της μέσης τιμής ανά κύκλο λειτουργίας της μηχανής για την καλύτερη απεικόνιση της πορείας τους στο χρόνο. Τα παραπάνω ισχύουν τόσο για τις πειραματικές τιμές όσο και για τα αποτελέσματα του μοντέλου.

### 6.2.1 Αποτελέσματα 1400 RPM

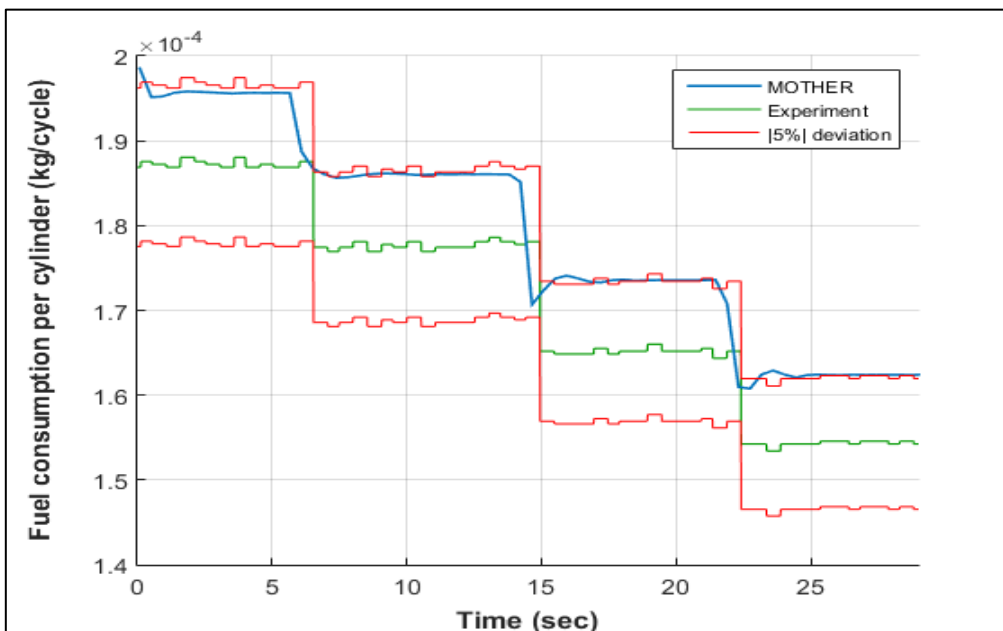


Διάγραμμα 6.2.1: Ταχύτητα μηχανής-transient 1400 RPM

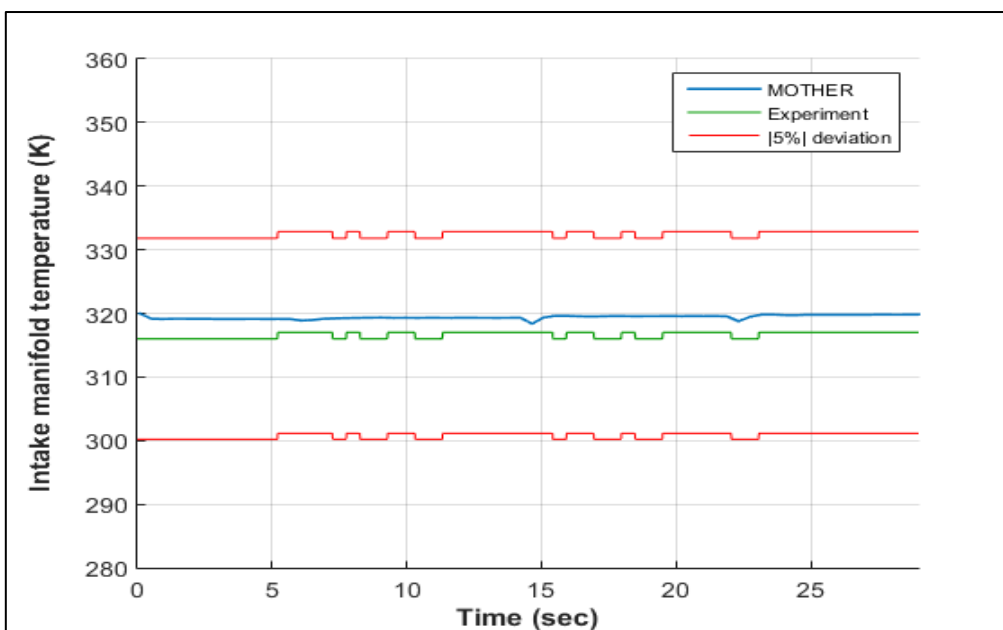


Διάγραμμα 6.2.2: Ροπή-transient 1400 RPM

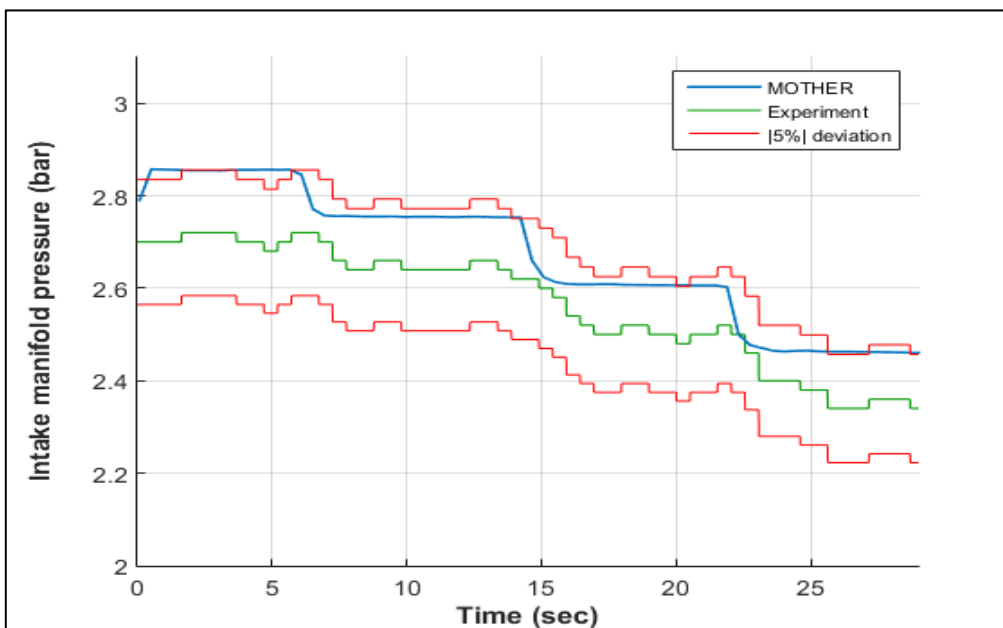




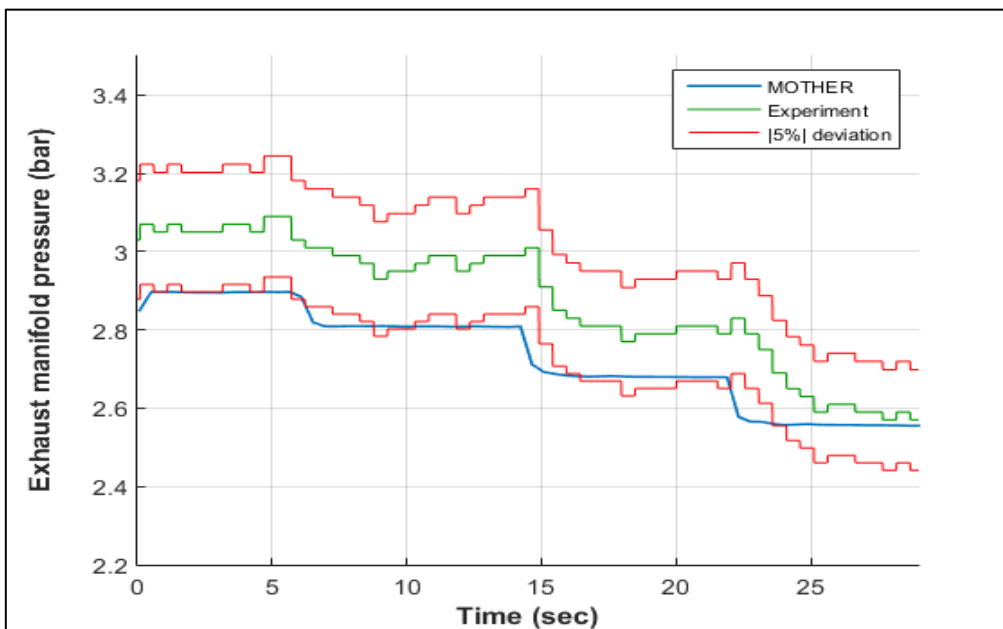
Διάγραμμα 6.2.3: Κατανάλωση καυσίμου-transient 1400 RPM



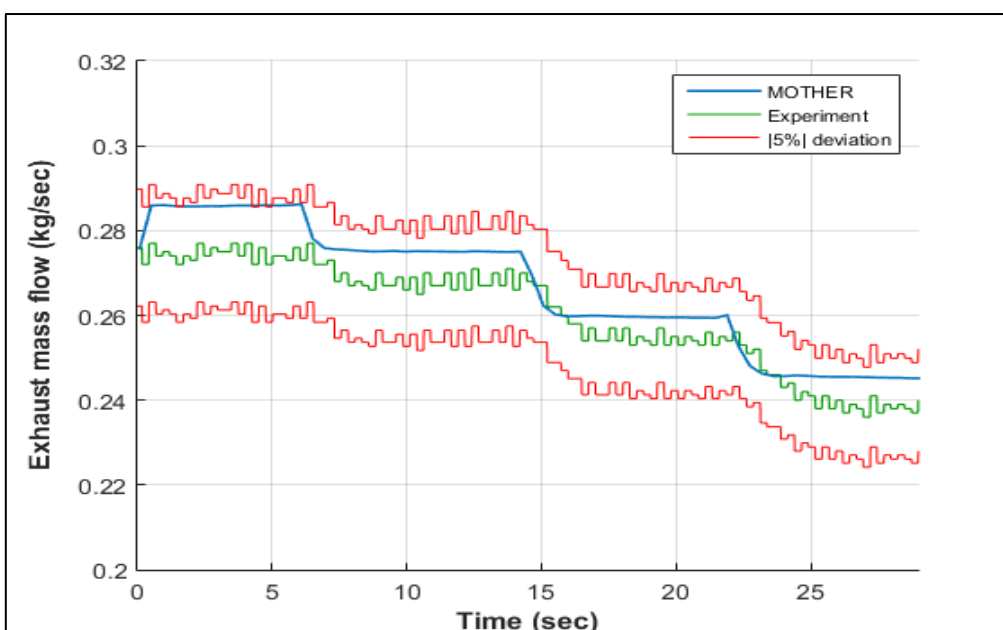
Διάγραμμα 6.2.4: Θερμοκρασία πολλαπλής εισαγωγής-transient 1400 RPM



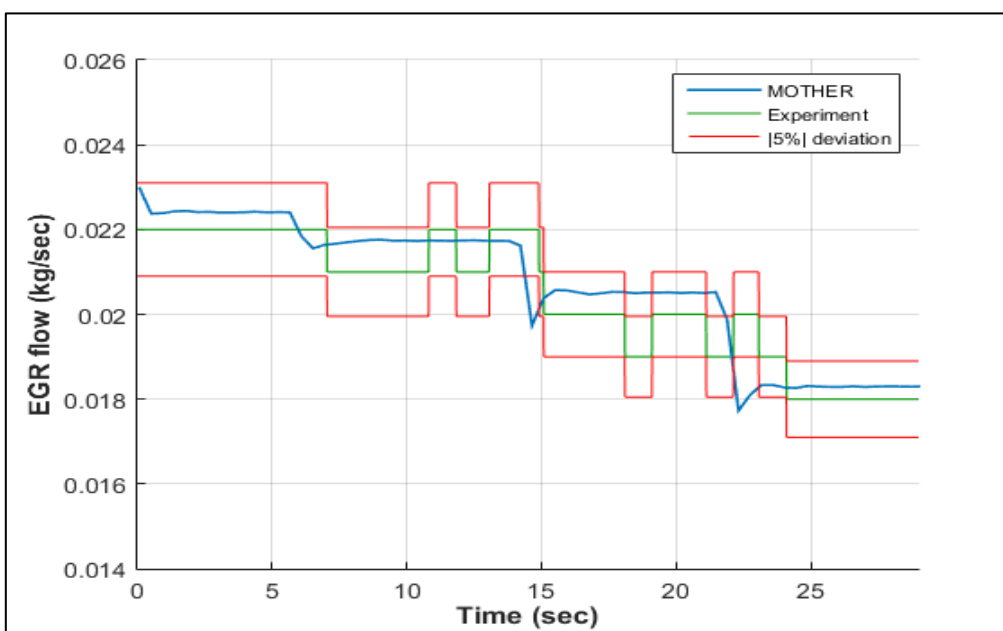
Διάγραμμα 6.2.5: Πίεση πολλαπλής εισαγωγής-transient 1400 RPM



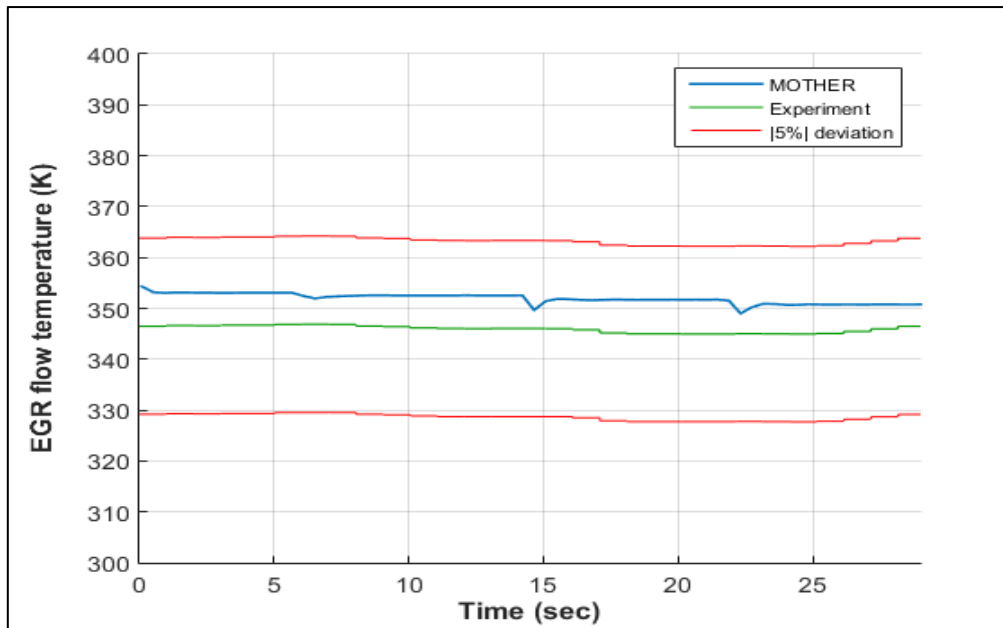
Διάγραμμα 6.2.6: Πίεση πολλαπλής εξαγωγής-transient 1400 RPM



Διάγραμμα 6.2.7: Ροή μάζας καυσαερίων-transient 1400 RPM



Διάγραμμα 6.2.8: Ροή μάζας EGR-transient 1400 RPM



Διάγραμμα 6.2.9: Θερμοκρασία EGR-transient 1400 RPM

Σε σχέση με την κατάσταση σταθερής λειτουργίας, από τα διαγράμματα μεταβατικών φαινομένων απουσιάζει το μέγεθος της θερμοκρασίας της πολλαπλής εξαγωγής. Αυτό συμβαίνει, γιατί τα διαθέσιμα δεδομένα από τον κατασκευαστή δεν αφορούν τις τιμές του εν λόγω μεγέθους για φορτία χαμηλότερα από τα μέγιστα και συνεπώς δεν έδιναν πληροφορίες για τις μεταβάσεις μεταξύ αυτών.

Όσον αφορά τις τιμές της πίεσης στην πολλαπλή της εξαγωγής, ισχύουν οι παραδοχές της κατάστασης σταθερής λειτουργίας σύμφωνα με τις οποίες οι τιμές αναφοράς του σημείου αυτού λαμβάνονται ως αυτές της εισαγωγής του EGR με μια προσαύξηση 0.05 bar.

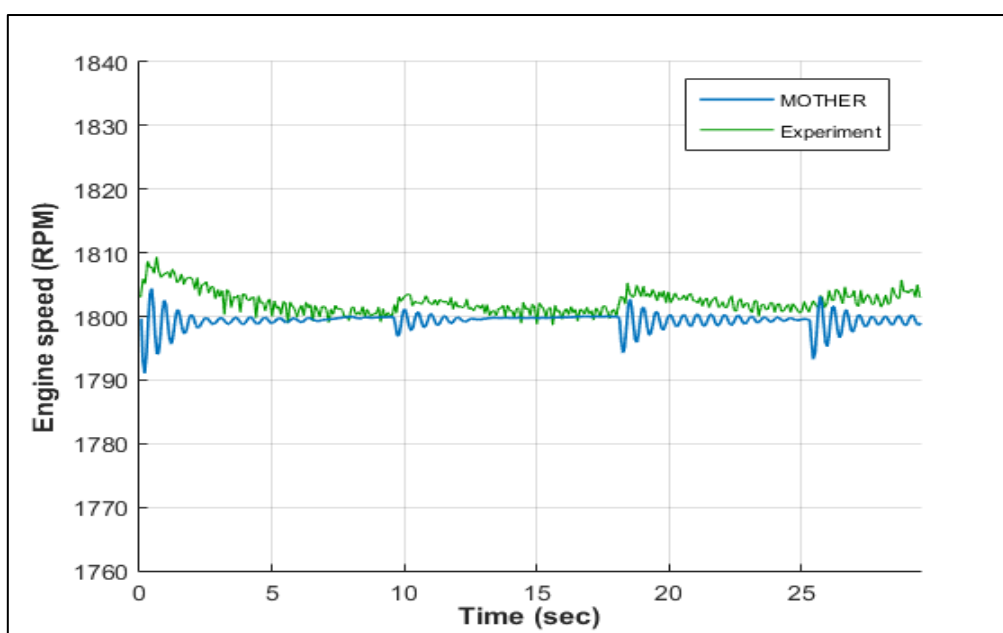
Αναφορικά με το διάγραμμα της ταχύτητας, παρατηρείται μια απόκλιση της καμπύλης αποτελεσμάτων του μοντέλου σε σχέση με την καμπύλη των πειραματικών μετρήσεων. Η απόκλιση αυτή εμφανίζει ένα είδος συμμετρίας ως προς τον οριζόντιο άξονα που ορίζει η ευθεία των 1400 RPM. Δεδομένης της πτώσης του φορτίου κατά τη διάρκεια της χρονικής ιστορίας του προφίλ λειτουργίας σε συνδυασμό με τη διατήρηση της ταχύτητας της μηχανής σε σταθερό επίπεδο, αναμένεται η καμπύλη των στροφών να εμφανίζει μικρά overshoot σε κάθε αλλαγή του φορτίου. Η ερμηνεία του γεγονότος αυτού βασίζεται στο γεγονός, ότι η αλλαγή του φορτίου της μηχανής πραγματοποιείται μέσω της αλλαγής στα επιθυμητά χρονικά σημεία ζήτησης του φορτίου στον άξονα. Έτσι, σε κάθε αλλαγή του φορτίου, ο ελεγκτής στροφών ρυθμίζει την ποσότητα του καυσίμου σύμφωνα με τα νέα δεδομένα. Η καθυστέρηση της δράσης του, οδηγεί για ένα μικρό χρονικό διάστημα τη μηχανή να λειτουργεί με περισσότερο από το απαιτούμενο για τη δεδομένη ζήτηση ροπής καύσιμου, με αποτέλεσμα οι στροφές της να παρουσιάζουν μια μικρή αύξηση. Η συμμετρική διαφορά της μορφής των πειραματικών αποτελεσμάτων σε σχέση με αυτή που συζητήθηκε, οφείλεται στη δράση του speed control της ηλεκτρικής πέδης της πειραματικής διάταξης.

Επιπλέον, στο διάγραμμα της ταχύτητας των πειραματικών αποτελεσμάτων παρατηρείται μια μικρή διαταραχή των τιμών των στροφών σε σχέση με το στόχο των 1400 RPM. Για την καλύτερη δυνατή προσέγγιση των τιμών αναφοράς, το μοντέλο ρυθμίστηκε με τρόπο τέτοιο, ώστε να παρουσιάζει παρόμοια διαταραχή με αυτή του πειράματος. Παρατηρείται ότι η διαταραχή αυτή εμφανίζεται και στο διάγραμμα της ροπής και οφείλεται στις εναλλαγές που παρουσιάζονται στις στροφές του κινητήρα.

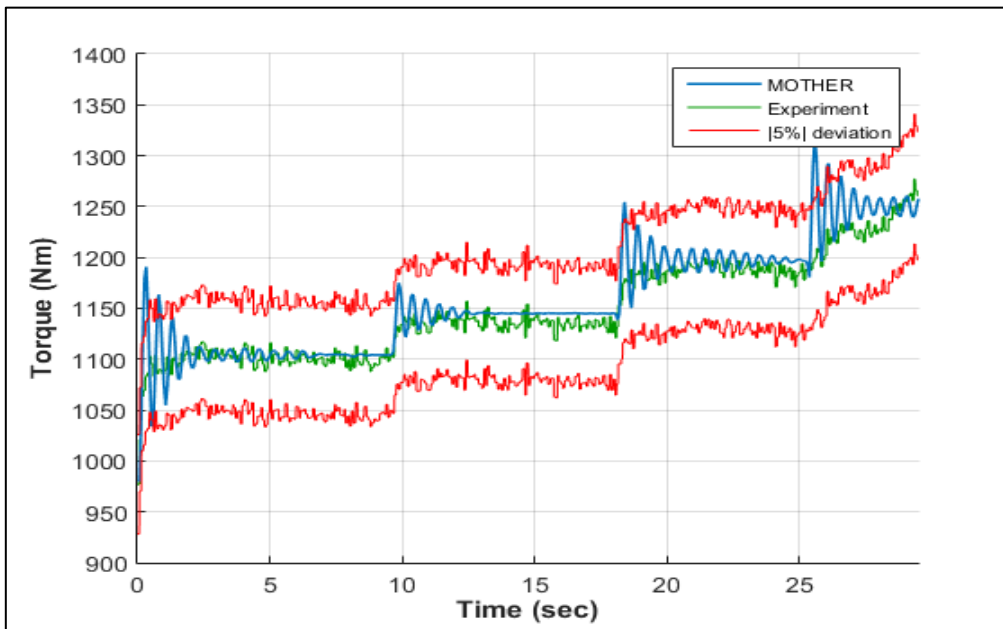
Όπως προαναφέρθηκε και είναι φανερό από τη μορφή των διαγραμμάτων, το προφίλ λειτουργίας των 1400 RPM παρουσιάζει πτώση του φορτίου κατά τη διάρκειά του. Η πτώση αυτή εμφανίζεται σε όλα τα μεγέθη, ενώ φαίνεται να έχει την μικρότερη επιρροή στις τιμές της θερμοκρασίας.

Συνολικά, όλα τα μεγέθη παρουσιάζουν αποκλίσεις μικρότερες του  $|5\%|$ . Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων είναι ποιοτική και πραγματοποιείται μέσω των ορίων που θέτουν οι καμπύλες του  $\pm 5\%$  βάσει των πειραματικών. Σημειώνεται, επίσης, ότι οι ρυθμίσεις του μοντέλου έγιναν με τρόπο τέτοιο, ώστε όλα τα μεγέθη να κινούνται εντός των ορίων των στόχων. Έτσι, ορισμένα μεγέθη κινούνται στα όρια των διαγραμμάτων για την ικανοποίηση των απαιτήσεων και των υπολοίπων μεγεθών.

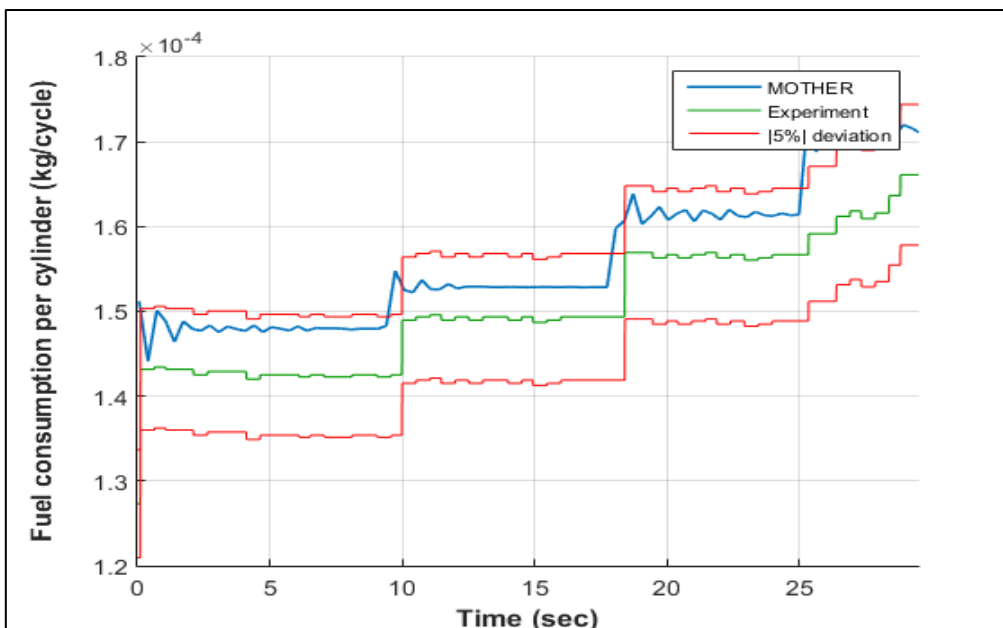
## 6.2.2 Αποτελέσματα 1800 RPM



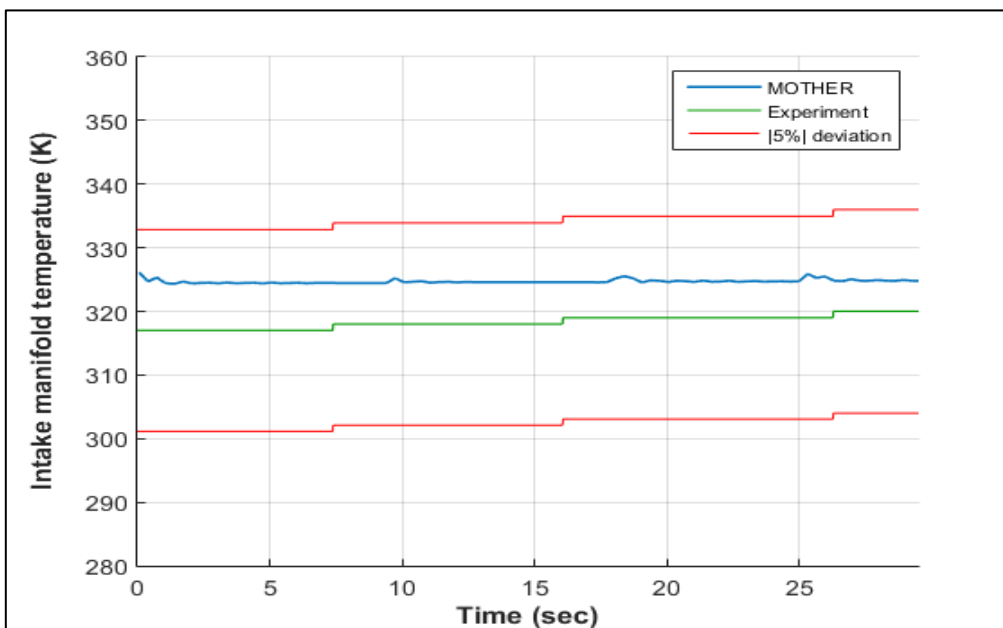
Διάγραμμα 6.2.10: Ταχύτητα μηχανής-transient 1800 RPM



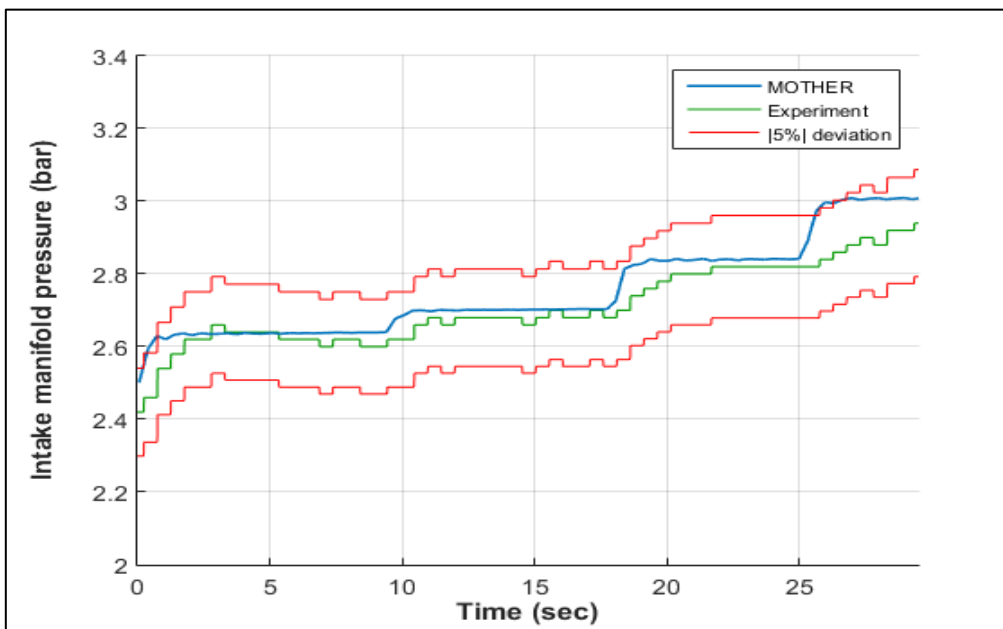
Διάγραμμα 6.2.11: Ροπή-transient 1800 RPM



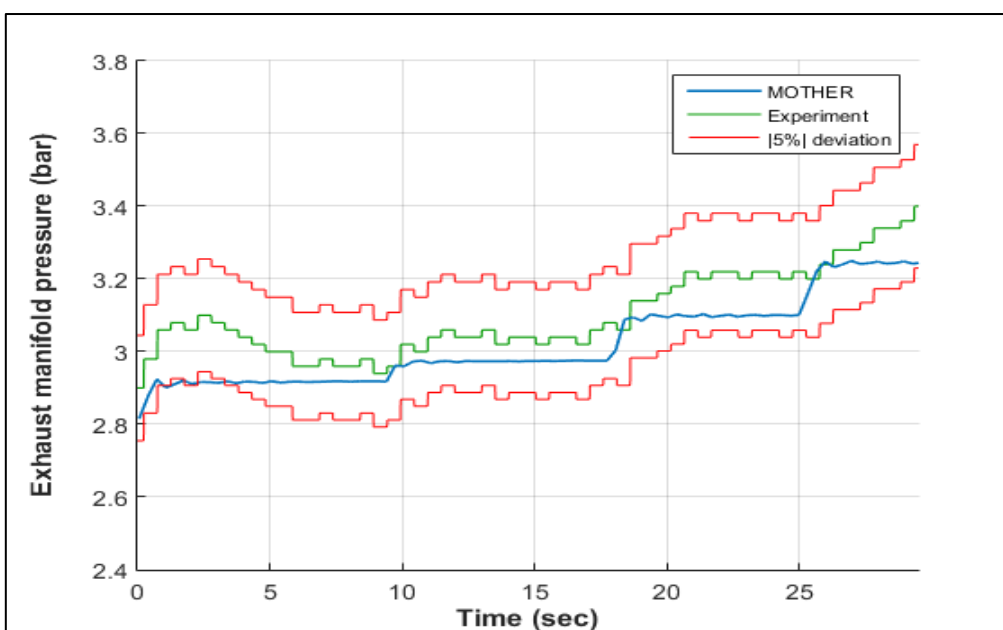
Διάγραμμα 6.2.12: Κατανάλωση καυσίμου-transient 1800



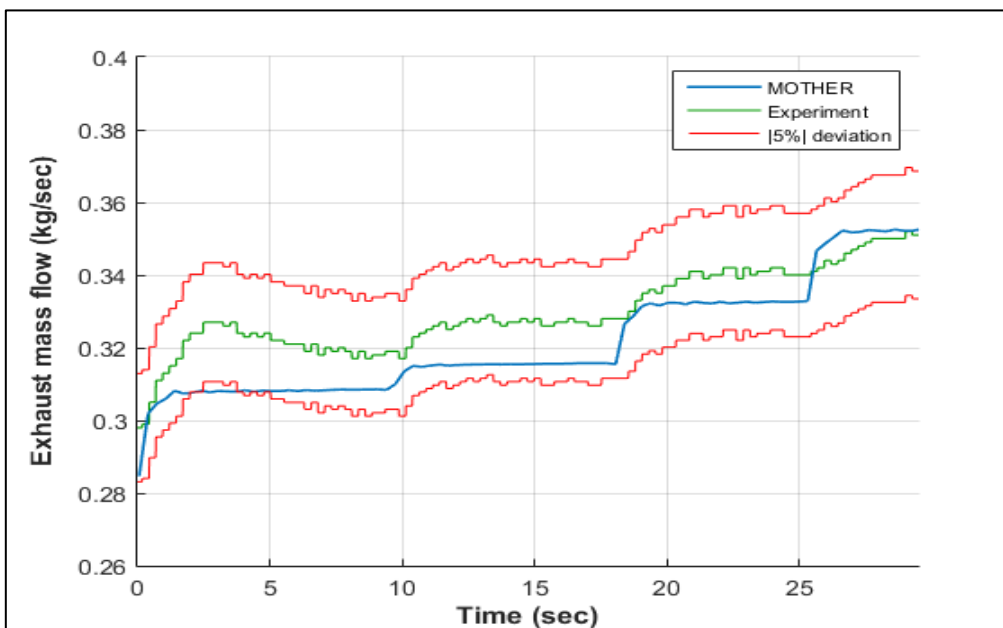
Διάγραμμα 6.2.13: Θερμοκρασία πολλαπλής εισαγωγής-transient 1800 RPM



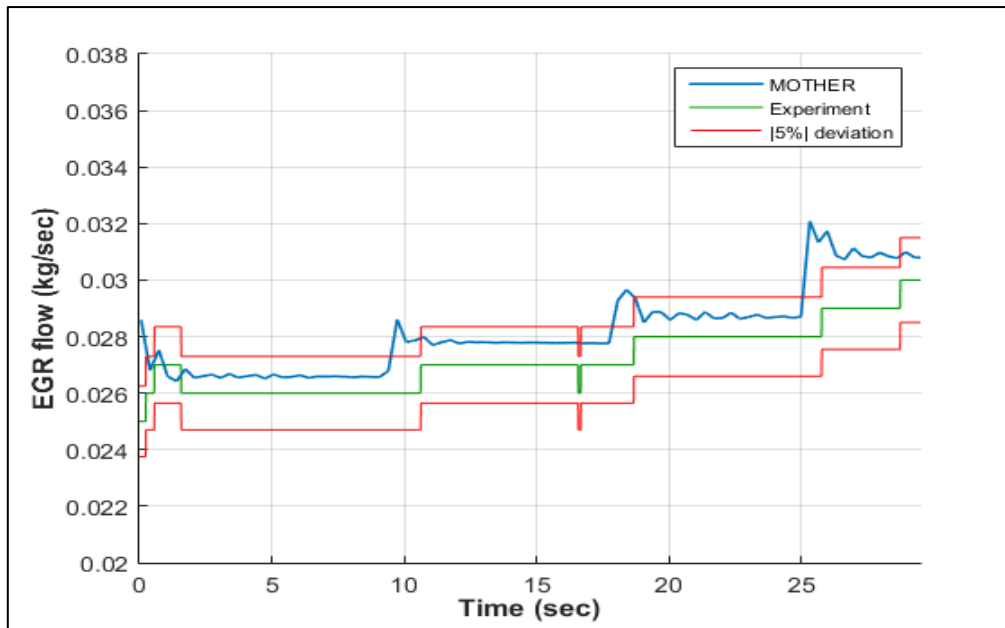
Διάγραμμα 6.2.14: Πίεση πολλαπλής εισαγωγής-transient 1800 RPM



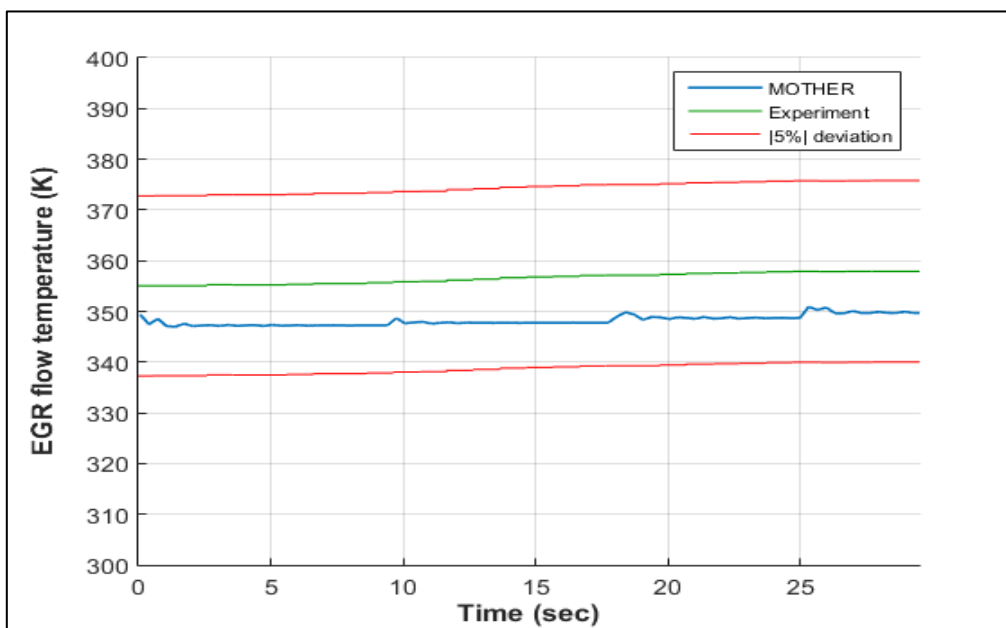
Διάγραμμα 6.2.15: Πίεση πολλαπλής εξαγωγής-transient 1800 RPM



Διάγραμμα 6.2.16: Ροή μάζας καυσαερίων-transient 1800 RPM



Διάγραμμα 6.2.17: Ροή μάζας EGR-transient 1800 RPM



Διάγραμμα 6.2.18: Θερμοκρασία EGR-transient 1800 RPM

Όπως και προηγουμένως, έτσι και στο προφίλ των 1800 RPM, απουσιάζει το διάγραμμα της θερμοκρασίας της πολλαπλής εξαγωγής λόγω έλλειψης των απαραίτητων δεδομένων από τον κατασκευαστή. Επιπλέον, η παραδοχή της προσαύξησης της τιμής της πίεσης στην εισαγωγή του EGR κατά 0.05 bar ως τιμή αναφοράς της πίεσης στην πολλαπλή εξαγωγής ισχύει και σε αυτήν την περίπτωση.

Το διάγραμμα της ταχύτητας παρουσιάζει συμπεριφορά αντίστοιχη με αυτή του προφίλ των 1400 RPM. Σε αυτήν την περίπτωση, λόγω της αύξησης του φορτίου και της διατήρησης της ταχύτητας σε σταθερό επίπεδο, παρατηρούνται μικρές πτώσεις της ταχύτητας σε κάθε

εναλλαγή λόγω της μικρής καθυστέρησης επαναφοράς του καυσίμου στα επιθυμητά επίπεδα. Η απόκλιση των αποτελεσμάτων του μοντέλου σε σχέση με τις πειραματικές μετρήσεις παρουσιάζουν την αντίστοιχη συμμετρία ως προς τον οριζόντιο άξονα που ορίζει η τιμή των 1800 RPM, όπως αναμενόταν.

Η εναλλαγή του φορτίου σε αυτήν την περίπτωση παρουσιάζει αύξηση σε δεδομένα χρονικά σημεία. Την αύξηση αυτή ακολουθούν και τα υπόλοιπα μεγέθη, ενώ και πάλι παρατηρείται ότι η τιμή της θερμοκρασίας επηρεάζεται λιγότερο από τις υπόλοιπες.

Η διαταραχή που παρουσιάζει η τιμή της ταχύτητας της μηχανής, επηρεάζει και άλλα μεγέθη όπως η απόδοση της ροπής στον άξονα και η κατανάλωση του καυσίμου. Η ρύθμιση του μοντέλου επιτρέπει την εμφάνιση της διαταραχής αυτής ώστε να προσομοιάζονται όσο γίνεται καλύτερα οι συνθήκες του πειράματος.

Γενικά, παρατηρείται καλή προσέγγιση των τιμών αναφοράς από τα αποτελέσματα του μοντέλου με τις τιμές των περισσότερων μεγεθών να μην αποκλίνουν ιδιαίτερα από τις πειραματικές.

### 6.3 Παρουσίαση υβριδικών αποτελεσμάτων

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων της υβριδικής λειτουργίας χωρίζεται σε δύο τμήματα. Αρχικά, θα γίνει η παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την θερμοδυναμική μοντελοποίηση του κινητήρα. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν το επίπεδο φόρτισης του ηλεκτροκινητήρα ανάλογα με την κάθε κατάσταση λειτουργίας της συνολικής διάταξης.

Όσον αφορά τα θερμοδυναμικά αποτελέσματα, η παρουσίαση των τιμών που προέκυψαν ακολουθεί γενικώς την μορφή των αποτελεσμάτων μεταβατικής λειτουργίας της μηχανής (6.2). Πιο συγκεκριμένα, τα υπό μελέτη μεγέθη παρουσιάζονται συναρτήσει του χρόνου για το σύνολο της διάρκειας του κάθε σεναρίου. Η χρονική διάρκεια αυτή χωρίζεται ισομερώς σε τέσσερα τμήματα σταθερής λειτουργίας της διάταξης. Οι μεταβάσεις μεταξύ των εν λόγω τμημάτων προσομοιάζουν τα μεταβατικά φαινόμενα της μηχανής. Το κάθε διάγραμμα περιλαμβάνει τη χρονική ιστορία των αποτελεσμάτων της μοντελοποίησης, τις αντίστοιχες τιμές αναφοράς καθώς και τα όρια που ορίζουν οι αποκλίσεις του  $|5\%|$  σε σχέση με τις τιμές αναφοράς.

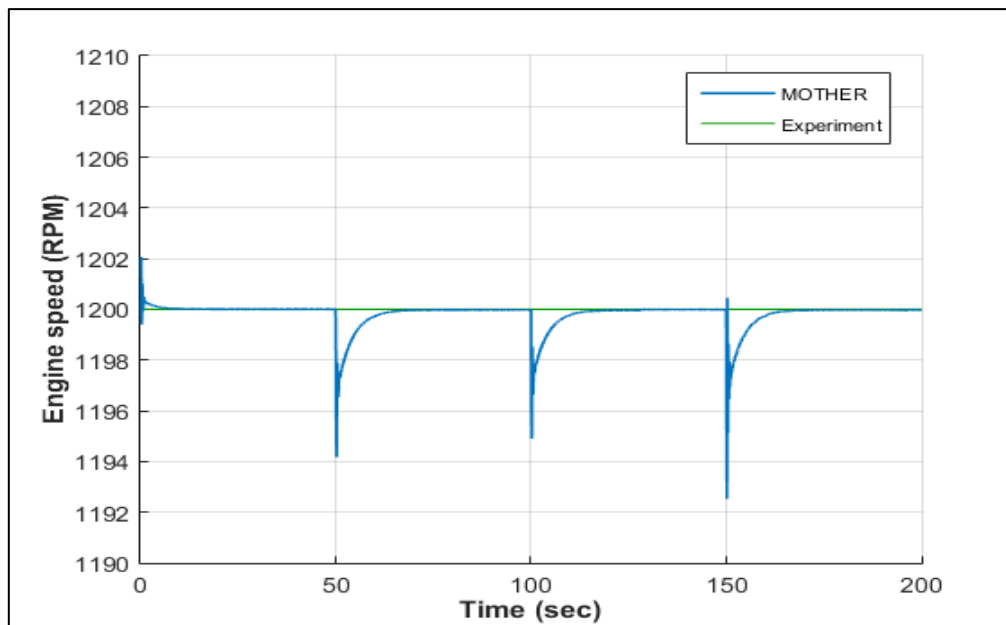
Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, τα σενάρια υβριδικής λειτουργίας δεν αποτελούν ακριβή επικύρωση πειραματικών μετρήσεων και μπορούν να θεωρηθούν περισσότερο ως επέκταση της διαδικασίας επικύρωσης. Οι τιμές αναφοράς των σεναρίων αφορούν τα επιμέρους τμήματα σταθερής λειτουργίας και δεν περιγράφουν την ικανότητα απόκρισης του μοντέλου από το ένα τμήμα στο άλλο. Αυτό συμβαίνει, διότι τα σενάρια λειτουργίας είναι αποτέλεσμα σχεδιασμού με στόχο την προσομοίωση της λειτουργίας της μηχανής σε χαμηλά



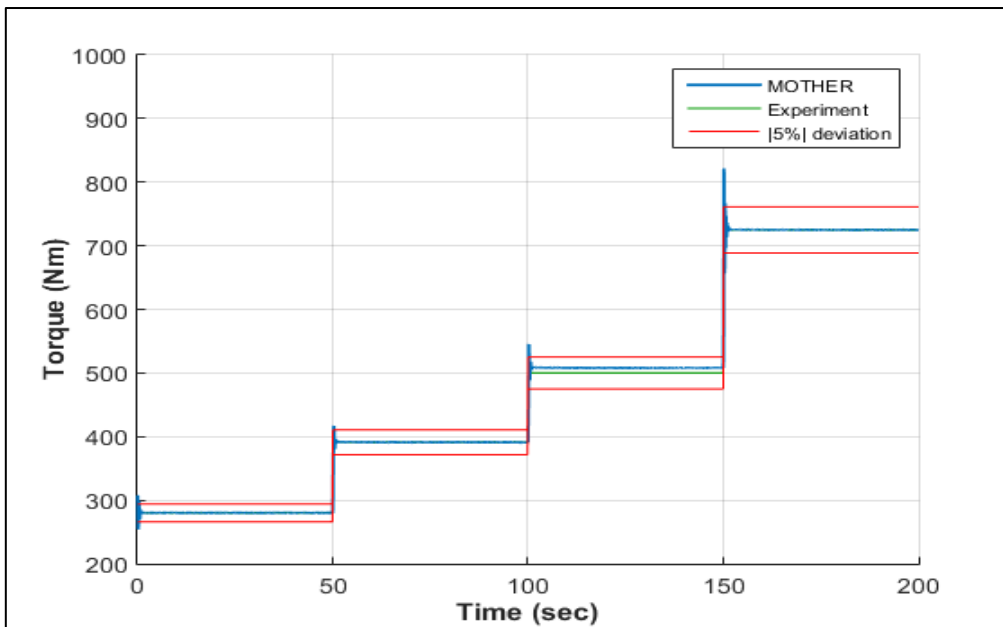
φορτία, μια περιοχή όπου τα αρχεία των πειραματικών μετρήσεων δεν ανταποκρίνονταν στις απαιτήσεις που έχουν αναλυθεί προηγουμένως (5.5). Έτσι, η χρήση των πειραματικών δεδομένων περιορίζεται στον ορισμό των τιμών αναφοράς για κάθε τμήμα σταθερής λειτουργίας, οι οποίες έχουν ληφθεί από αντίστοιχα τμήματα σταθερής πειραματικής λειτουργίας της μηχανής σε σενάρια διαφορετικά από τα υπό μελέτη Case Studies.

Στο κομμάτι του ηλεκτροκινητήρα, για κάθε Case Study, παρουσιάζονται τα διαγράμματα της απόδοσης ροπής και του επιπέδου του φορτίου αυτού συναρτήσει του χρόνου. Σε κάθε σενάριο εξετάζονται δύο υποπεριπτώσεις αναφορικά με τα επίπεδα φόρτισης του ηλεκτροκινητήρα, οι οποίες θα αναλυθούν περαιτέρω στη συνέχεια.

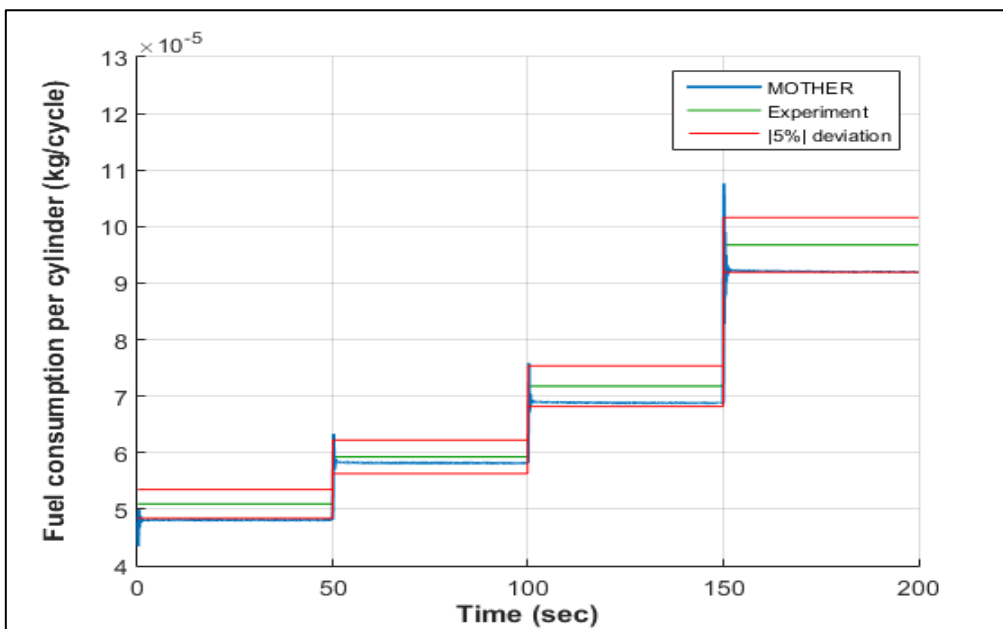
### 6.3.1 Case Study A



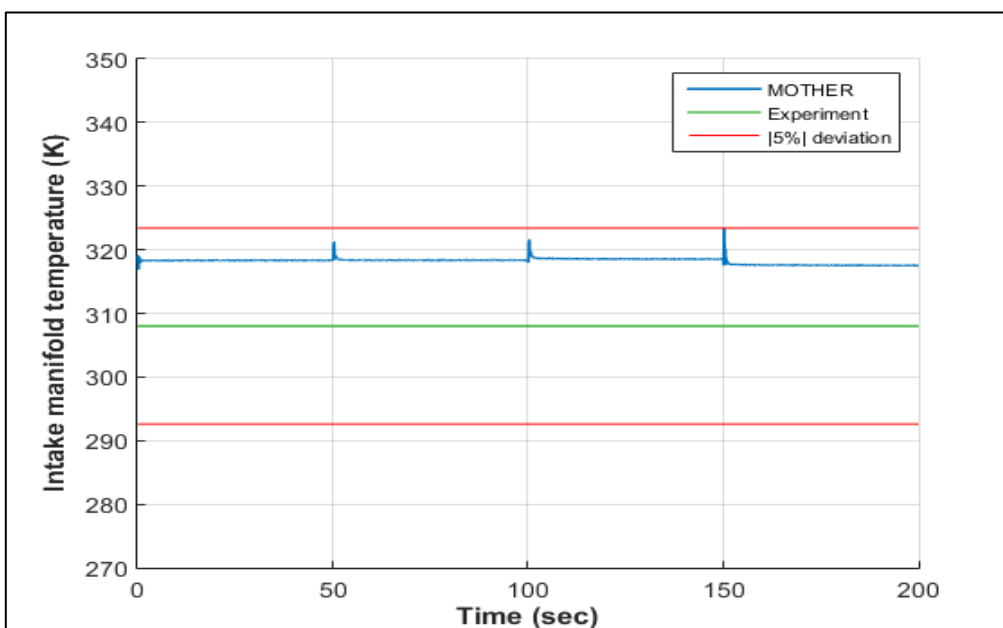
Διάγραμμα 6.3.1: Ταχύτητα μηχανής-Case Study A



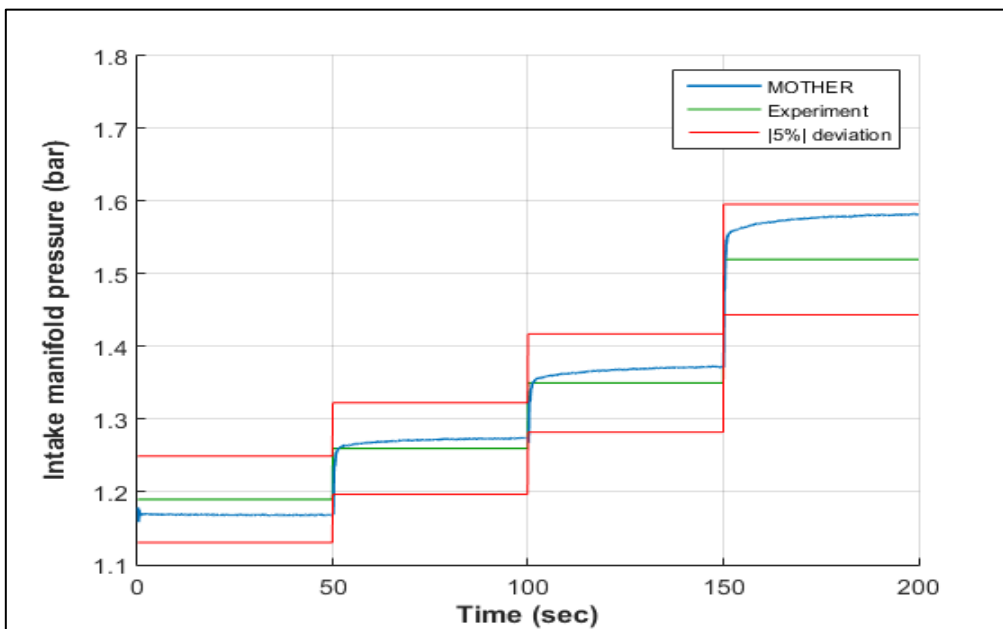
Διάγραμμα 6.3.2: Ροπή-Case Study A



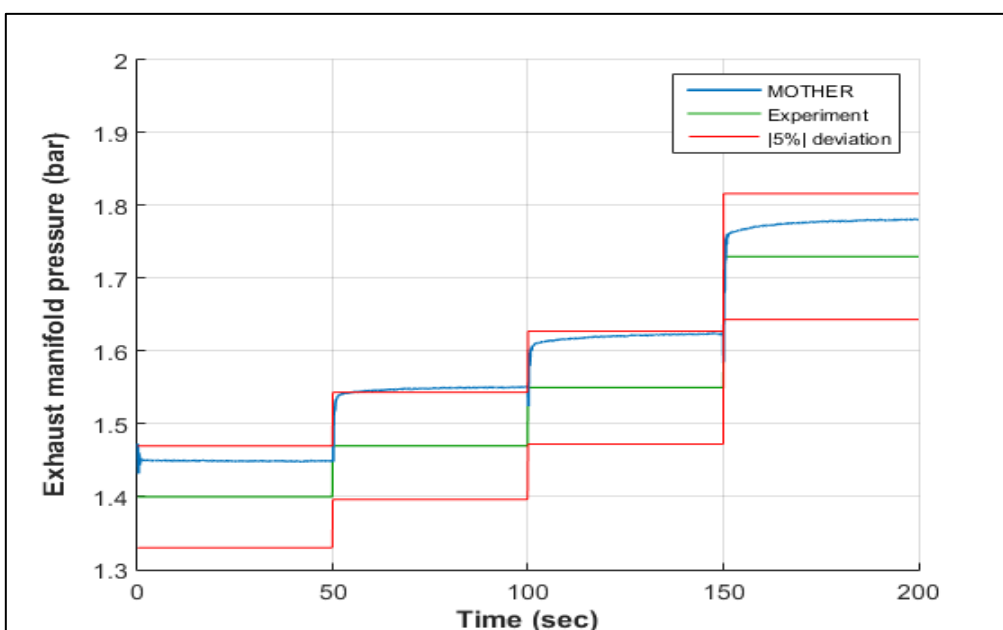
Διάγραμμα 6.3.3: Κατανάλωση καυσίμου-Case Study A



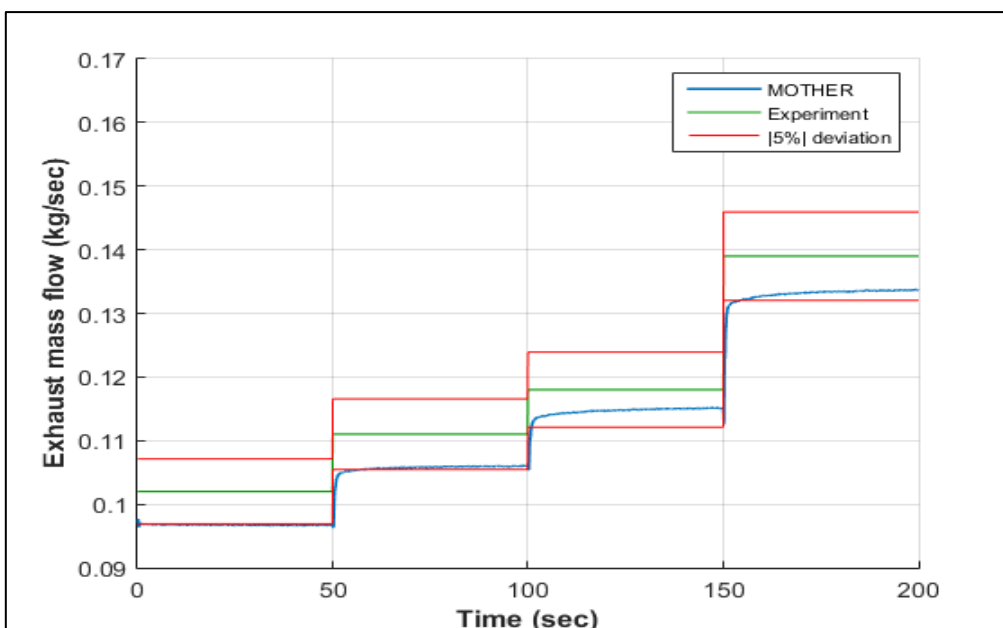
Διάγραμμα 6.3.4: Θερμοκρασία πολλαπλής εισαγωγής-Case Study



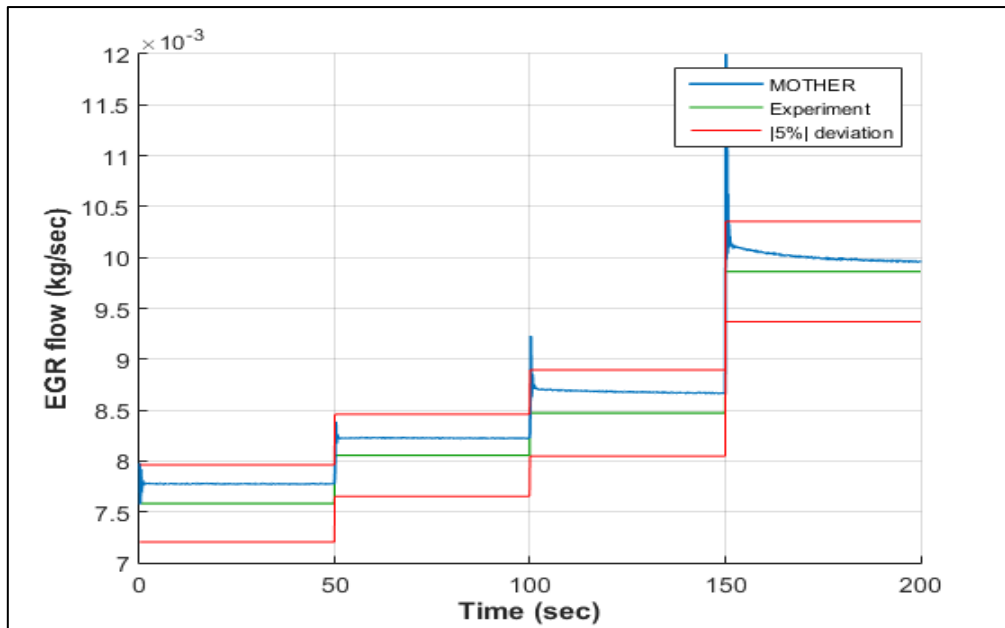
Διάγραμμα 6.3.5: Πίεση πολλαπλής εισαγωγής-Case Study A



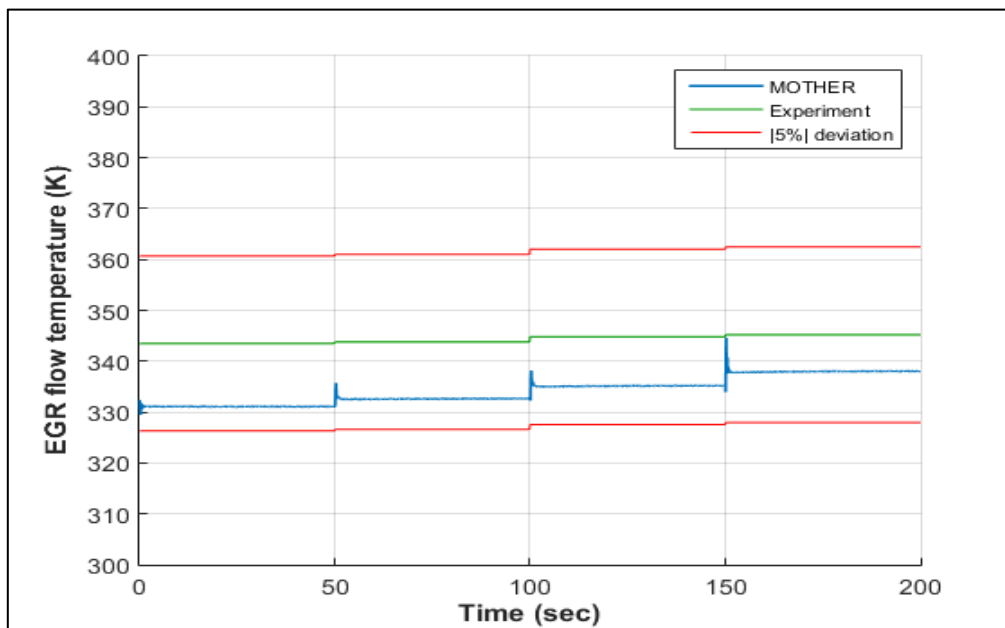
Διάγραμμα 6.3.6: Πίεση πολλαπλής εξαγωγής-Case Study A



Διάγραμμα 6.3.7: Ροή μάζας καυσαερίων-Case Study A



Διάγραμμα 6.3.8: Ροή μάζας EGR-Case Study A



Διάγραμμα 6.3.9: Θερμοκρασία EGR-Case Study A

Σημειώνεται, αναφορικά με το διάγραμμα των στροφών, ότι πλέον η διακύμανση των τιμών δεν υπάρχει. Αυτό συμβαίνει, διότι δεν χρησιμοποιούνται τα ακριβή αρχεία των πειραματικών αποτελεσμάτων και έτσι δεν υπάρχουν οι διαταραχές των προηγούμενων περιπτώσεων. Με αυτόν τον τρόπο, δίνεται έμφαση κυρίως στην προσέγγιση των επιπέδων των τιμών στα επιμέρους τμήματα των σεναρίων λειτουργίας και όχι τόσο στα δυναμικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα. Το αποτέλεσμα των παραπάνω είναι εμφανές στα διαγράμματα της ταχύτητας της μηχανής και της απόδοσης ροπής.

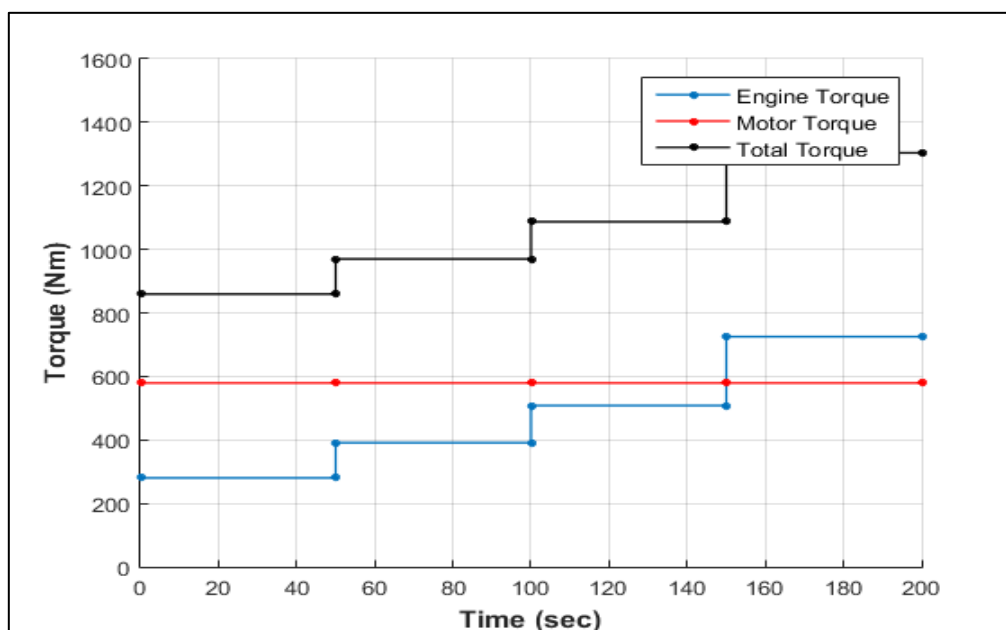
Το σενάριο λειτουργίας είναι ομοιόμορφα χωρισμένο σε τέσσερα τμήματα, το μήκος των οποίων είναι σημαντικά μεγαλύτερο από τις περιπτώσεις των σεναρίων της προηγούμενης

ενότητας (6.2). Ο χρόνος λειτουργίας επιλέχθηκε έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η σταθεροποίηση όλων των μεγεθών για την καλύτερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

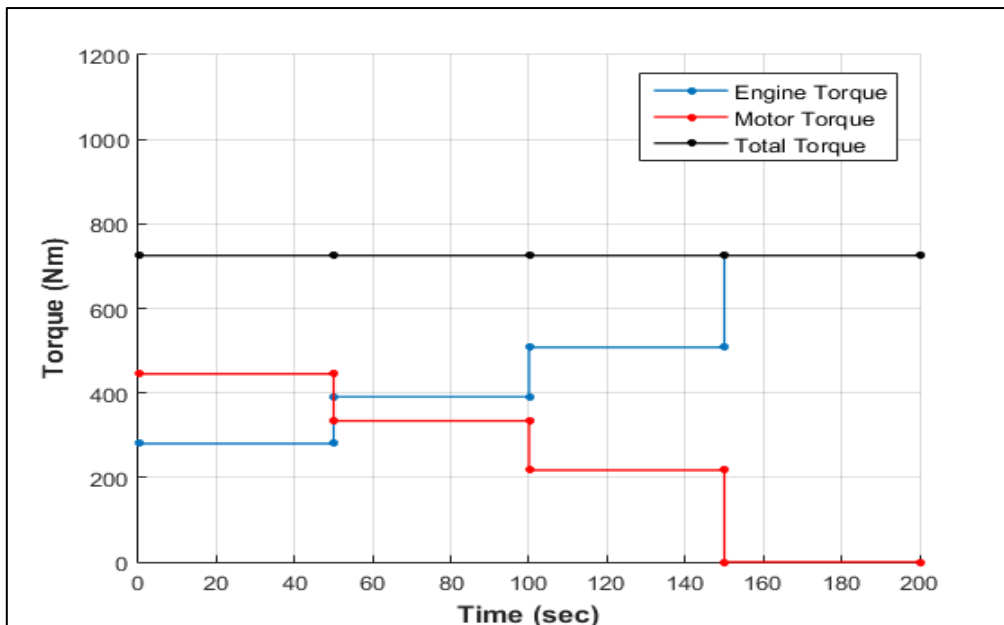
Τα μεταβατικά φαινόμενα της λειτουργίας της μηχανής λαμβάνουν μέρος παρά το γεγονός ότι οι στροφές παραμένουν σταθερές. Η αλλαγή του φορτίου γίνεται μέσω της αλλαγής της ζήτησης ροπής στον άξονα και γίνεται αντιληπτό σε όλα τα διαγράμματα. Ιδιαίτερα στο διάγραμμα της ταχύτητας, εμφανίζεται το φαινόμενο της διακύμανσης των στροφών σε κάθε χρονικό σημείο αλλαγής του φορτίου σύμφωνα με τις παρατηρήσεις των προφίλ μεταβατικής λειτουργίας.

Όσον αφορά το κομμάτι των αποκλίσεων, παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα κινούνται εντός των ορίων όπως και προηγουμένως. Οι οριακές τιμές των αποκλίσεων που εμφανίζονται σε ορισμένες περιπτώσεις οφείλονται στη ρύθμιση του μοντέλου με τρόπο τέτοιο ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις για όλα τα μεγέθη.

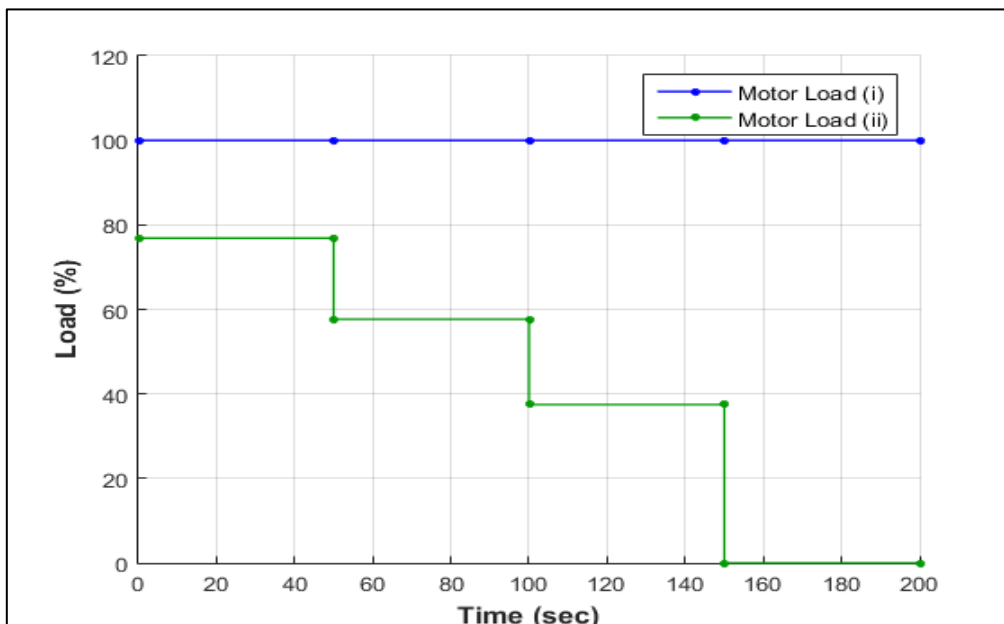
Από την πλευρά του ηλεκτροκινητήρα προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα:



Διάγραμμα 6.3.10: Ροπή άξονα-Case Study A(i)



Διάγραμμα 6.3.11: Ροπή άξονα-Case Study A(ii)



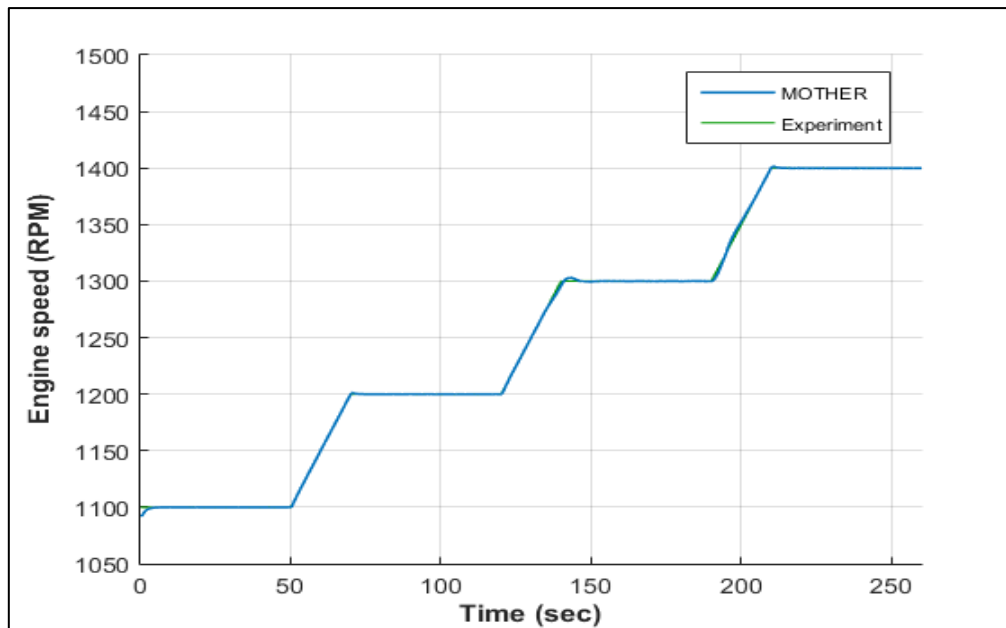
Διάγραμμα 6.3.12: Φορτίο ηλεκτροκινητήρα-Case Study A

Τα παραπάνω διαγράμματα αναλύουν δύο υποπεριπτώσεις λειτουργίας του ηλεκτροκινητήρα σε συνεργασία με την κύρια μηχανή. Στην περίπτωση (i) ο ηλεκτροκινητήρας τίθεται σε λειτουργία παραγωγής της μέγιστης δυνατής, για τις δεδομένες στροφές, ροπής. Στην περίπτωση (ii) το φορτίο του ηλεκτροκινητήρα είναι μεταβαλλόμενο στο χρόνο προσομοιάζοντας την περίπτωση που η απαίτηση της ροπής στον άξονα είναι σταθερή και οι δύο διατάξεις συνεργάζονται για την ικανοποίηση της ζήτησης.

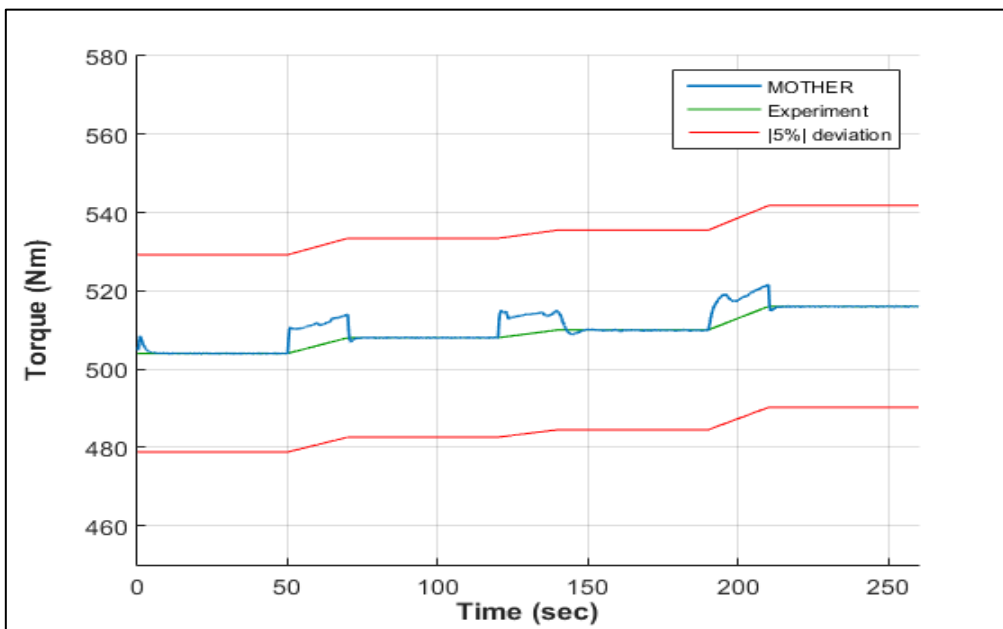
Η περίπτωση παραγωγής μέγιστης ροπής ουσιαστικά παρουσιάζει τις ικανότητες φόρτισης της ολικής διάταξης για το δεδομένο σενάριο λειτουργίας της κύριας μηχανής. Στο εν λόγω παράδειγμα ο ηλεκτροκινητήρας λειτουργεί σε σημείο μέγιστης παραγωγής ροπής του.

Αντίθετα, στην δεύτερη περίπτωση αναδεικνύεται η ικανότητα της διάταξης σε επιτάχυνση του συστήματος με υποβοήθηση της ηλεκτρογεννήτριας μέχρι τη στιγμή που η κύρια μηχανή φτάσει στο επιθυμητό επίπεδο ροπής. Η ροπή στον άξονα είναι σταθερή και ίση με 725 Nm καθ' όλη τη διάρκεια του σεναρίου. Έτσι, παρατηρείται η μεταβολή του φορτίου του ηλεκτροκινητήρα από το 100% της ικανότητάς του για τις δεδομένες στροφές, σε χαμηλότερα επίπεδα και τελικά στο 0, όπου η κύρια μηχανή πλέον μπορεί να παράγει την απαιτούμενη ροπή. Το επίπεδο της απαιτούμενης ροπής είναι ενδεικτικό. Χαμηλότερες τιμές αυτής θα έθεταν τη λειτουργία του ηλεκτροκινητήρα σε φορτία χαμηλότερα, με την παύση της λειτουργίας του να πραγματοποιείται νωρίτερα, θεωρώντας ότι το προφίλ λειτουργίας της μηχανής παραμένει το ίδιο.

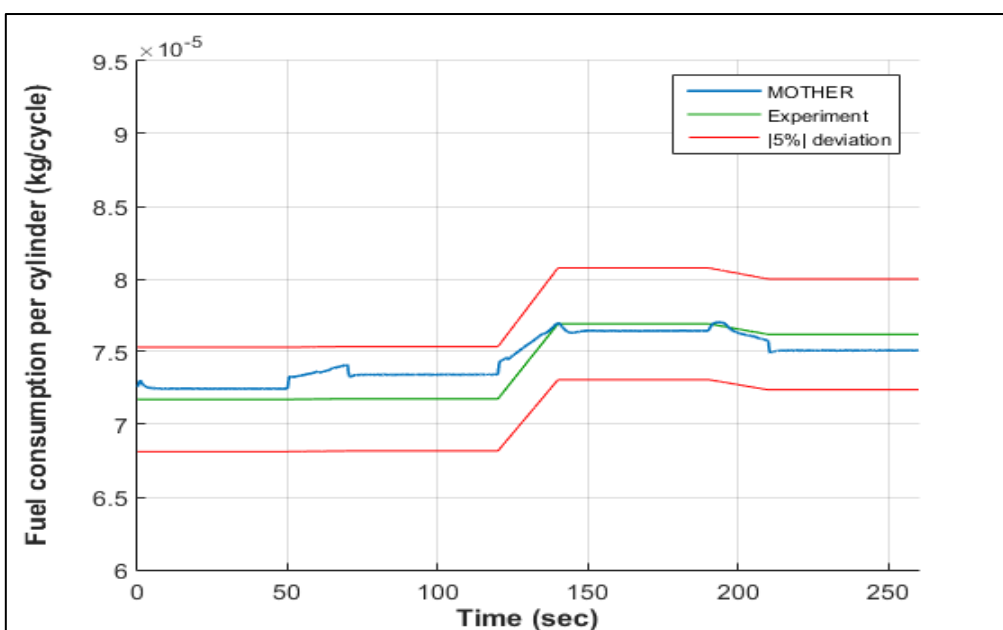
### 6.3.2 Case Study B



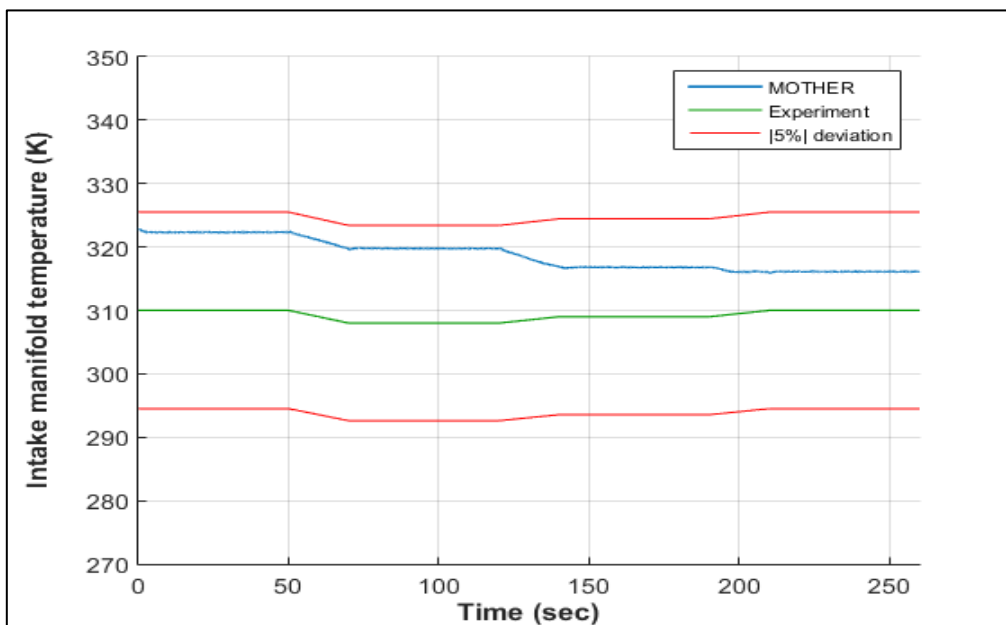
Διάγραμμα 6.3.13: Ταχύτητα μηχανής-Case Study B



Διάγραμμα 6.3.14: Ροπή-Case Study B

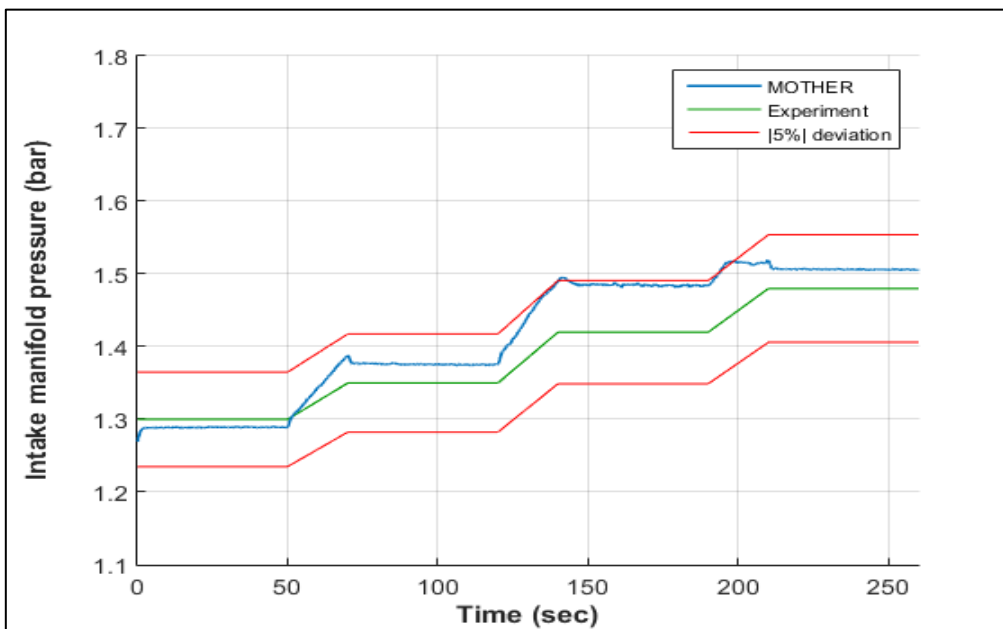


Διάγραμμα 6.3.15: Κατανάλωση καυσίμου-Case Study B

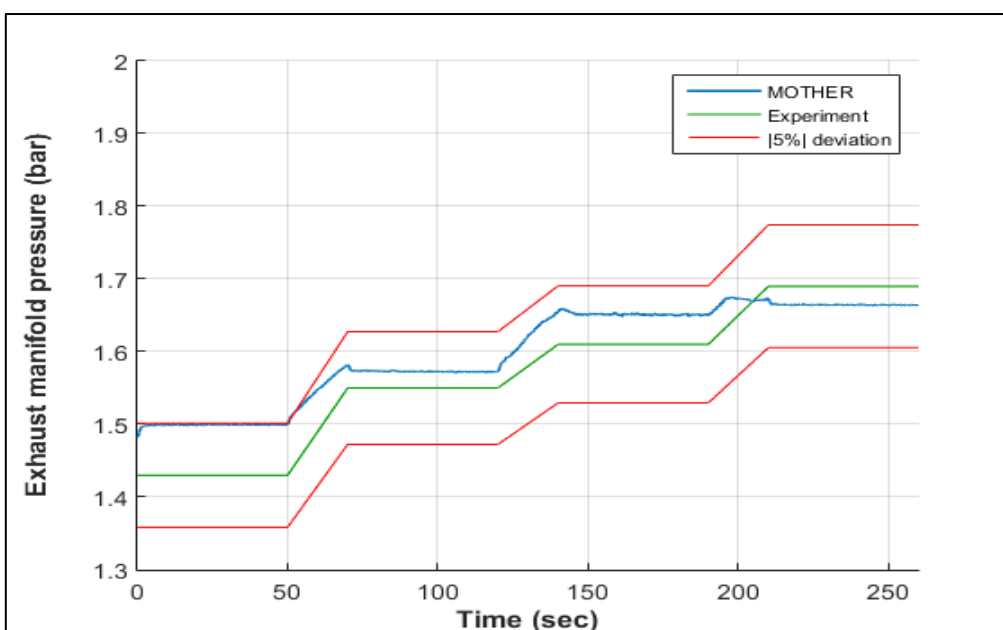


Διάγραμμα 6.3.16: Θερμοκρασία πολλαπλής εισαγωγής-Case Study B

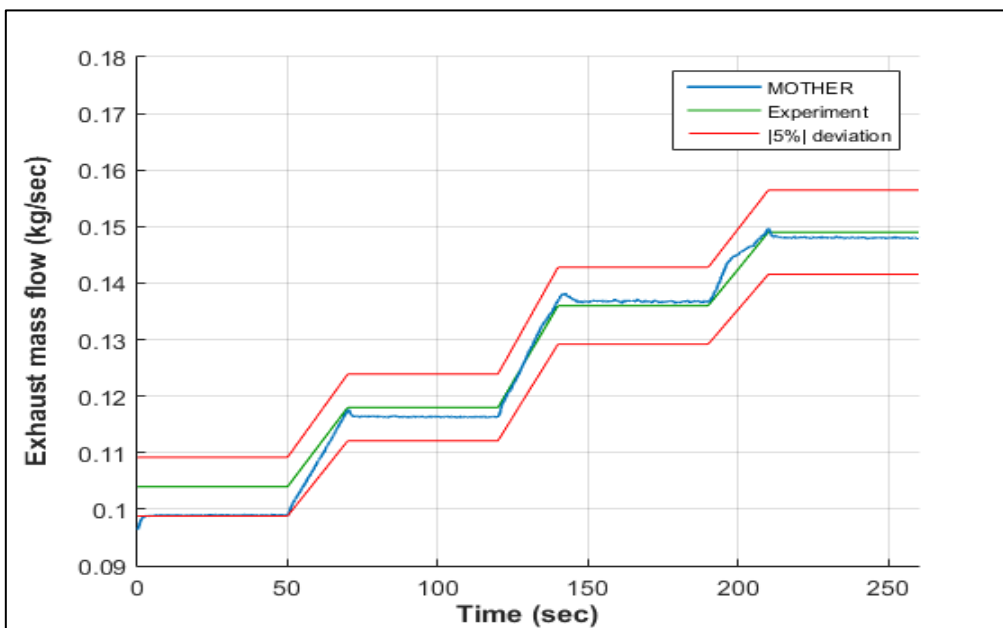




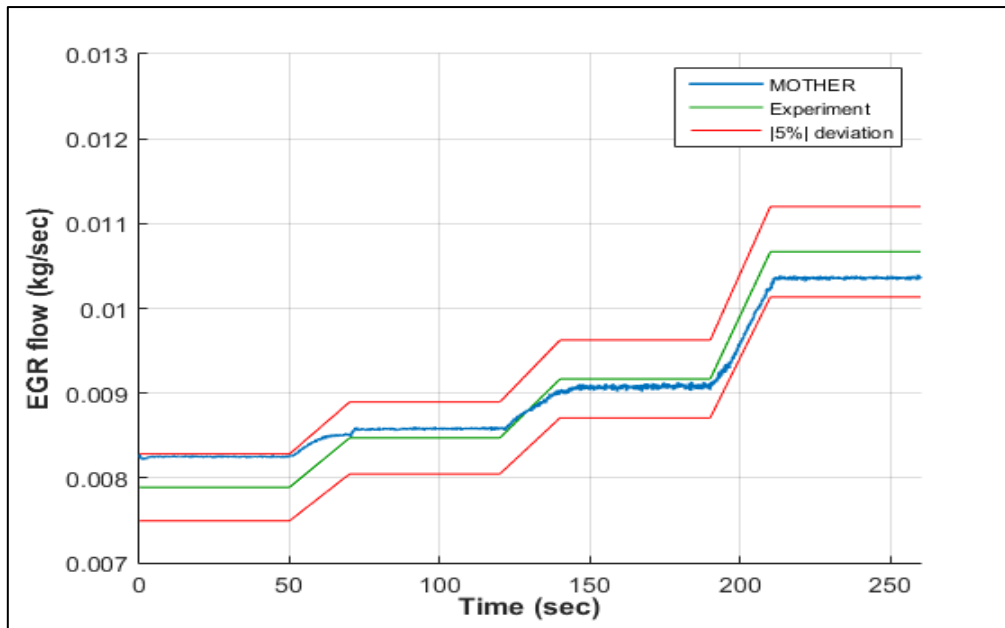
Διάγραμμα 6.3.17: Πίεση πολλαπλής εισαγωγής-Case Study B



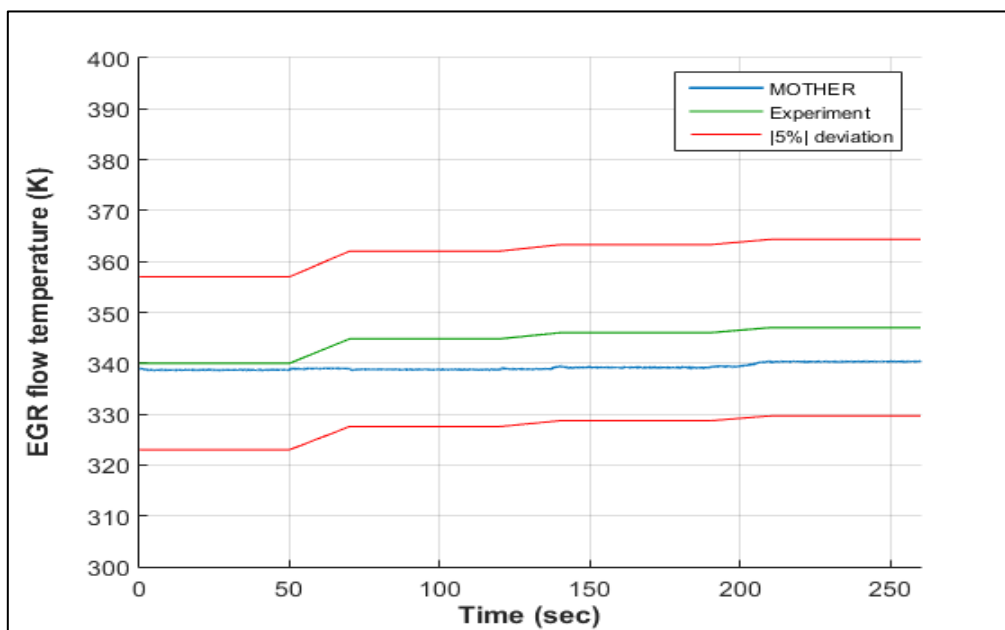
Διάγραμμα 6.3.18: Πίεση πολλαπλής εξαγωγής-Case Study B



Διάγραμμα 6.3.19: Ροή μάζας καυσαερίων-Case Study B



Διάγραμμα 6.3.20: Ροή μάζας EGR-Case Study B

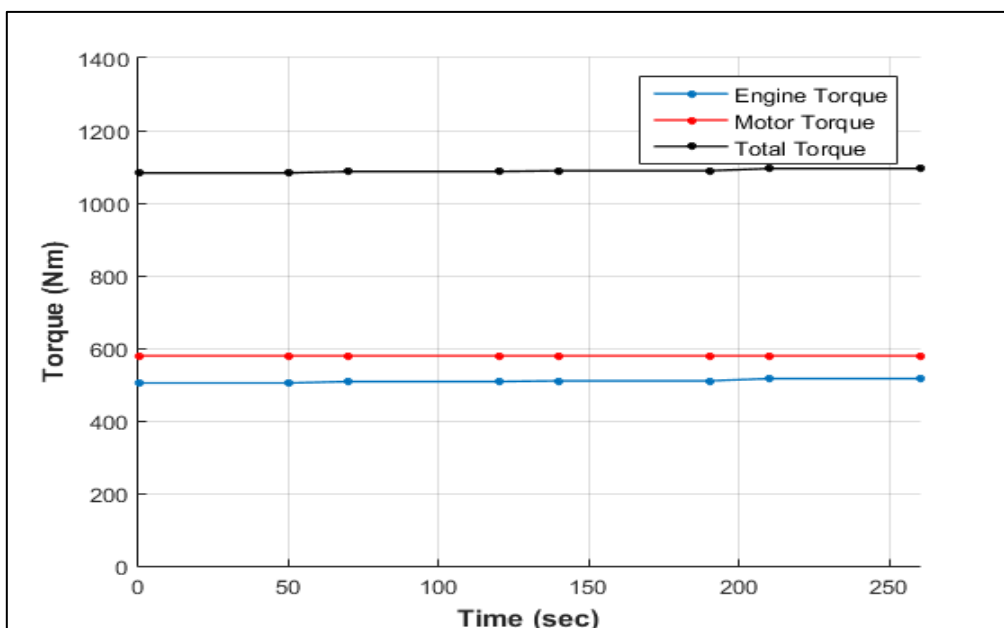


Διάγραμμα 6.3.21: Θερμοκρασία EGR-Case Study B

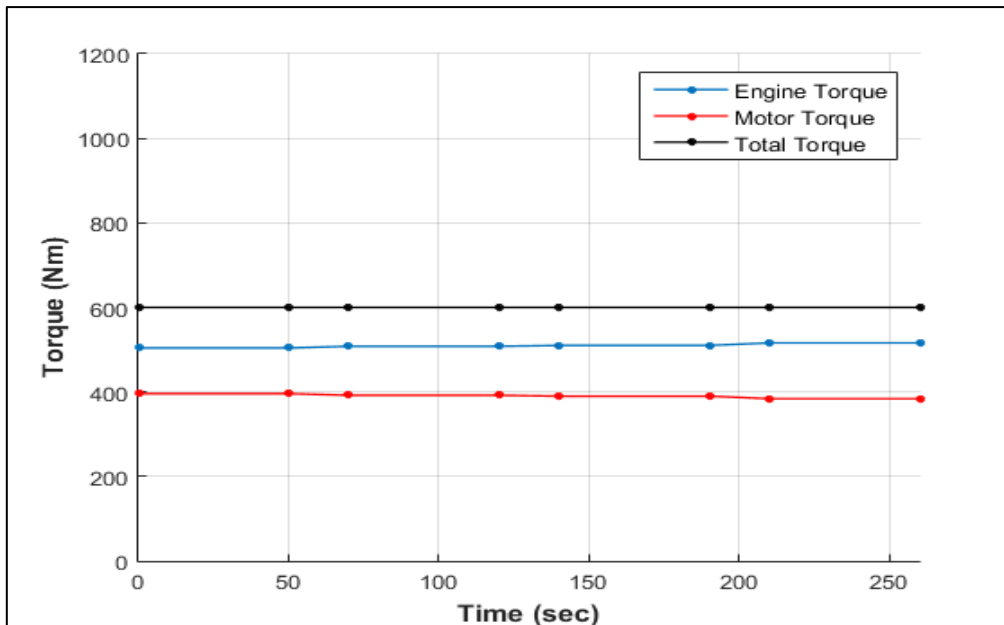
Οι κύριες διαφοροποιήσεις στην περίπτωση του Case Study B σε σχέση με το Case Study A και τα σενάρια μεταβατικής λειτουργίας, αφορούν τον τρόπο μεταβολής του φορτίου και τη διάσπαση της χρονικής ιστορίας του σεναρίου ανάμεσα στα τμήματα σταθερής λειτουργίας από τα οποία αυτό αποτελείται. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της μηχανής, οι στροφές μεταβάλλονται ενώ το φορτίο παραμένει σταθερό με μικρές μεταβολές των τιμών της ροπής κατά την εναλλαγή της ταχύτητας. Επιπλέον, η μετάβαση μεταξύ των τμημάτων σταθερής λειτουργίας επιλέχθηκε, μετά από δοκιμές, να γίνει γραμμικά σε χρονικό διάστημα 20 δευτερολέπτων για την κατά το δυνατό βέλτιστη απόκριση του συστήματος.

Όσον αφορά τα διαγράμματα που προκύπτουν από τη διαδικασία της μοντελοποίησης της μηχανής, παρατηρείται η έλλειψη διαταραχών των τιμών μέσω της ανάλογης ρύθμισης του μοντέλου λόγω της αδυναμίας σύγκρισης με αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα. Όπως αναμενόταν, οι κύριες αποκλίσεις παρατηρούνται στα τμήματα αλλαγής της ταχύτητας της μηχανής. Καθώς οι τιμές αναφοράς προκύπτουν με τον ίδιο τρόπο που αναλύθηκε στην περίπτωση του Case Study A, τα τμήματα μετάβασης είναι λογικό να μην ανταποκρίνονται στις πραγματικές τιμές, ενώ και η απόκριση του μοντέλου σε τέτοιου είδους μεταβατικά φαινόμενα παρατηρείται ότι δεν ακολουθεί τη γραμμικότητα μεταξύ των τιμών αναφοράς. Οι αποκλίσεις αυτές είναι κυρίως εμφανείς στα διαγράμματα ροπής και κατανάλωσης καυσίμου.

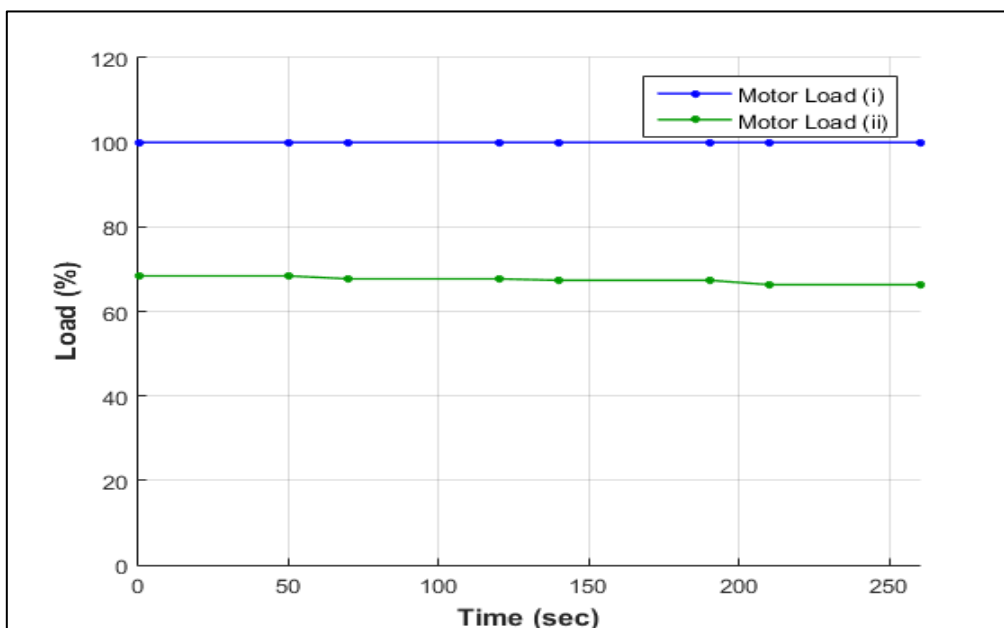
Από την πλευρά της λειτουργίας του ηλεκτροκινητήρα προκύπτει:



Διάγραμμα 6.3.22: Ροπή άξονα-Case Study B(i)



Διάγραμμα 6.3.23: Ροπή άξονα-Case Study B(ii)



Διάγραμμα 6.3.24: Φορτίο ηλεκτροκινητήρα-Case Study B

Όπως και στο προηγούμενο Case Study, έτσι και εδώ διακρίνονται δύο υποπεριπτώσεις λειτουργίας του ηλεκτροκινητήρα. Στην περίπτωση (i) ο ηλεκτροκινητήρας λειτουργεί παράγοντας τη μέγιστη δυνατή, για το δεδομένο επίπεδο στροφών, ροπή. Λόγω του ότι οι στροφές δεν παραμένουν σταθερές κατά τη διάρκεια του σεναρίου, έτσι και η αντίστοιχη παραγόμενη ροπή του κινητήρα μεταβάλλεται ελαφρώς σύμφωνα με τη λειτουργία του. Το ίδιο συμβαίνει και για τη συνολική ροπή στον άξονα σύμφωνα με το Διάγραμμα 6.3.22. Στην περίπτωση (ii) η συνολική απαίτηση ροπής είναι σταθερή, οπότε ο ηλεκτροκινητήρας προσαρμόζεται αναλόγως με τη λειτουργία της κύριας μηχανής.

Λόγω του ότι τα επίπεδα ροπής της μηχανής δεν παρουσιάζουν μεγάλη διαφοροποίηση μεταξύ των τμημάτων σταθερής λειτουργίας, η καμπύλες των παραπάνω διαγραμμάτων είναι σχεδόν γραμμικές. Σημειώνεται, επίσης, ότι στην δεύτερη υποπερίπτωση λειτουργίας του Case Study B, η ζήτηση ροπής στον άξονα έχει τεθεί στα 600 Nm. Όπως και προηγουμένως, το μέγεθος αυτό μπορεί να λάβει οποιαδήποτε τιμή εντός των ορίων λειτουργίας του ηλεκτροκινητήρα για την εξέταση διαφορετικών σεναρίων λειτουργίας.

## 6.4 Συμπεράσματα

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η δημιουργία ενός μοντέλου πρόβλεψης των παραμέτρων λειτουργίας της πειραματικής κλίνης HIPPO-2 του Εργαστηρίου Ναυτικής Μηχανολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών. Έτσι, έγινε μελέτη της λειτουργίας του κάθε συστήματος που την αποτελεί ξεχωριστά (κύρια μηχανή και ηλεκτροκινητήρας) αλλά και της διάταξης ως σύνολο.

Μέσω της διαδικασίας μοντελοποίησης της κύριας μηχανής, μελετήθηκε η λειτουργία αυτής σε όλο το εύρος της. Τόσο για τις καταστάσεις σταθερής λειτουργίας όσο και στις περιπτώσεις λειτουργίας μεταβατικών φαινομένων, παράχθηκαν αποτελέσματα υψηλών και χαμηλών επιπέδων ταχύτητας και φορτίου. Από τα παραπάνω και την επικύρωση των αποτελεσμάτων μέσω των πειραματικών μετρήσεων, συνεπάγεται ότι το μοντέλο ανταποκρίνεται καλύτερα σε υψηλότερες στροφές και φορτία, γεγονός που αποδεικνύεται και από τις αποκλίσεις που προκύπτουν στα σημεία αυτά. Αντιθέτως, σε χαμηλότερα φορτία, συχνά δημιουργείται η ανάγκη για συμβιβασμό μεταξύ των διαφόρων μεγεθών της ακρίβειας των αποτελεσμάτων τους ώστε να κινούνται εντός των αποκλίσεων από τις τιμές αναφοράς.

Όσον αφορά τις αποκρίσεις των τιμών των μεγεθών σε μεταβατικά φαινόμενα, εξετάστηκαν σενάρια βηματικής μεταβολής του φορτίου και σενάρια γραμμικής μεταβολής μεταξύ των τμημάτων σταθερής λειτουργίας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προκύπτουν, η διακύμανση των τιμών συγκλίνει σε γενικές γραμμές σε σύντομο χρονικό διάστημα σε σταθερά επίπεδα. Αξίζει να σημειωθεί η συμπεριφορά των τιμών ροπής και κατανάλωσης καυσίμου στην περίπτωση που γίνεται προσομοίωση λειτουργίας της μηχανής με μεταβολή των στροφών. Σε αυτήν την περίπτωση, τα εν λόγω μεγέθη εμφανίζουν μεγαλύτερες αποκλίσεις από τις υπόλοιπες περιπτώσεις, γεγονός που δηλώνει την δυσκολία μοντελοποίησης των μεταβάσεων αυτών σε τέτοια σενάρια. Παρ' όλα αυτά, τα μεγέθη εν τέλει συγκλίνουν στις επιθυμητές τιμές αναφοράς στα σημεία σταθερής λειτουργίας των μοντέλων.

Από την πλευρά της μελέτης λειτουργίας του ηλεκτροκινητήρα πραγματοποιήθηκε η συσχέτιση των μεγεθών ισχύος, στροφών και ροπής στον άξονα. Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα, παρατηρήθηκε ότι η σχέση των παραπάνω μεγεθών παρουσιάζει μια

γραμμικότητα, κάτι που ανέδειξε την προσέγγιση Willans ως μια καλή εναλλακτική των χαρτών απόδοσης για τη διαδικασία της μοντελοποίησης.

Ο συνδυασμός της λειτουργίας των δύο διατάξεων στην πειραματική κλίνη, προσδίδει ένα είδος ευελιξίας στον τρόπο απόδοσης της συνολικής ισχύος στον άξονα με τρόπους που δεν θα μπορούσε να επιτευχθεί με τη λειτουργία μόνο της κύριας μηχανής. Εκτός από την ικανότητα για μεγαλύτερη μέγιστη ροπή, η συνεργασία των δύο συστημάτων δίνει τη δυνατότητα για την επιλογή λειτουργίας της κύριας μηχανής σε πιο οικονομικά ή αποδοτικά επίπεδα σε σταθερή λειτουργία. Επιπλέον, παρέχει την ικανότητα παραγωγής μεγαλύτερης ροπής σε σημεία όπου ο κινητήρας αδυνατεί να ανταποκριθεί εγκαίρως σε πιθανές απαιτήσεις, όπως το σενάριο επιτάχυνσης από χαμηλά φορτία.

Τέλος, προκύπτει ότι το μοντέλο παράγει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε όλο το εύρος λειτουργίας που δοκιμάστηκε. Οι αποκλίσεις δεν υπερβαίνουν το |5%| σε σχέση με τις πειραματικές τιμές αναφοράς, κάτι που ισχύει και για τη σταθερή λειτουργία και για τις μεταβάσεις των καταστάσεων που μελετήθηκαν. Έτσι, ακόμα και στις περιπτώσεις όπου τα μεγέθη παρουσιάζουν δυναμική συμπεριφορά, οι τιμές κινούνται εντός των ορίων και συγκλίνουν σύντομα στις επιθυμητές.

## 6.5 Προτάσεις για μελλοντική εργασία

Το αντικείμενο της μοντελοποίησης μηχανών αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο τόσο για την κατανόηση της λειτουργίας των υπό μελέτη διατάξεων, όσο και σε ερευνητικό επίπεδο στο κομμάτι της ανάπτυξης νέων λύσεων με βάση τα ήδη υπάρχοντα συστήματα. Με βάση αυτό, προτείνονται ορισμένες προσεγγίσεις για επέκταση της παρούσας προσέγγισης μέσω μελλοντικών εργασιών:

- Μεγαλύτερη ακρίβεια θα μπορούσε να εισαχθεί στο μοντέλο μέσω περαιτέρω ρύθμισης αυτού για στόχους αποκλίσεων της τάξης του |3%|. Σε αυτό θα έπαιζε καθοριστικό ρόλο η χρήση επιπλέον δεδομένων όπως τιμές για την ανάπτυξη μεγεθών εντός του κυλίνδρου για καλύτερη περιγραφή του φαινομένου της καύσης.
- Ενδιαφέρον παρουσιάζει το σύστημα απορρύπανσης της μηχανής το οποίο δεν έχει συμπεριληφθεί στο παρόν μοντέλο. Μέσω μετρήσεων πίεσης και θερμοκρασίας στα διάφορα τμήματα που το αποτελούν αλλά και των επιπέδων των παραγόμενων ρύπων, θα δοθεί η δυνατότητα εξέτασης και αξιολόγησης των σημείων λειτουργίας της μηχανής με γνώμονα τον αντίκτυπό της στο περιβάλλον.
- Μέσω επιπλέον πειραματικών μετρήσεων θα μπορούσε να γίνει περαιτέρω ρύθμιση του μοντέλου για καταστάσεις μεταβατικών φαινομένων και μεταβλητής ταχύτητας. Έτσι, οι αποκλίσεις που εμφανίζονται στα αντίστοιχα σενάρια λειτουργίας που εξετάστηκαν, θα μπορέσουν να αξιολογηθούν και να επεξεργαστούν καταλλήλως.

Αποτέλεσμα των παραπάνω θα αποτελούσε ένα πλήρες εργαλείο για τη μελέτη της μηχανής, από την άποψη της ικανότητας να ανταποκρίνεται σε όλα τα πιθανά σενάρια και καταστάσεις λειτουργίας.

- Αναφορικά με τον ηλεκτροκινητήρα, θα παρουσίαζε ενδιαφέρον η σύγκριση της συσχέτισης των μεγεθών ισχύος ροπής και στροφών μέσω της προσέγγισης Willans με την αντίστοιχη που προκύπτει από την χρήση χαρτών αποδοτικότητας. Μέσω αυτού, δίνεται η δυνατότητα δοκιμών της διάταξης με μεγαλύτερη ακρίβεια, τουλάχιστον όσον αφορά το κομμάτι των ορίων λειτουργίας του ηλεκτροκινητήρα.
- Μελετώντας την διάταξη της πειραματικής κλίνης σαν σύνολο, προτείνεται η πραγματοποίηση πειραμάτων λειτουργίας παρόμοιας δομής με αυτήν της εργασίας, αλλά κάνοντας χρήση και των δύο συστημάτων μαζί (κύρια μηχανή, ηλεκτροκινητήρας). Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας μπορούν να συγκριθούν με τα νέα πειραματικά δεδομένα και το μοντέλο να τροποποιηθεί αναλόγως.
- Τέλος, προτείνεται η διερεύνηση της συνεργασίας της διάταξης, με γνώμονα όχι μόνο την οικονομική λειτουργία της μηχανής αλλά και την αποδοτική λειτουργία του ηλεκτροκινητήρα. Μέσω της διαδικασίας αυτής θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν συστήματα ελέγχου για τον καθορισμό του διαμερισμού του απαιτούμενου φορτίου από τη βιβλιογραφία ή κατασκευή νέων για την ικανοποίηση των αναγκών που έχουν τεθεί.





# Παράρτημα Α: Λίστα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 2.1.1: Απόδοση ροπής και ισχύος CAT C9.3 ACERT	11
Διάγραμμα 3.1.1: Επαναληπτική διαδικασία επίλυσης MOTHER	29
Διάγραμμα 3.2.1: Καμπύλη συνάρτησης Wiebe	34
Διάγραμμα 3.2.2: Σχέση παραμέτρου "a" και $x_{b,final}$	35
Διάγραμμα 3.2.3: Χάρτης συμπίεσής	38
Διάγραμμα 3.2.4: Χάρτης στροβίλου	39
Διάγραμμα 4.1.1: Παράδειγμα χάρτη απόδοσης ηλεκτροκινητήρα	41
Διάγραμμα 5.4.1: Fit σημείων ηλεκτροκινητήρα	50
Διάγραμμα 5.5.1: Τρισδιάστατος χάρτης ειδικής κατανάλωσης	52
Διάγραμμα 5.5.2: Χάρτης ειδικής κατανάλωσης και πορεία Case Study	52
Διάγραμμα 5.5.3: Τρισδιάστατος χάρτης κατανάλωσης καυσίμου	53
Διάγραμμα 5.5.4: Χάρτης κατανάλωσης και πορεία Case Study	53
Διάγραμμα 5.5.5: Τρισδιάστατος χάρτης ροπής	54
Διάγραμμα 5.5.6: Χάρτης ροπής και πορεία Case Study	54
Διάγραμμα 6.1.1: Αποκλίσεις ροπής-steady state	57
Διάγραμμα 6.1.2: Αποκλίσεις θερμοκρασίας πολλαπλής εισαγωγής-steady state	58
Διάγραμμα 6.1.3: Αποκλίσεις πίεσης πολλαπλής εισαγωγής-steady state	58
Διάγραμμα 6.1.4: Αποκλίσεις θερμοκρασίας πολλαπλής εξαγωγής-steady state	58
Διάγραμμα 6.1.5: Αποκλίσεις πίεσης πολλαπλής εξαγωγής-steady state	59
Διάγραμμα 6.1.6: Αποκλίσεις ροής μάζας καυσαερίων-steady state	59
Διάγραμμα 6.1.7: Αποκλίσεις ροής μάζας EGR-steady state	59
Διάγραμμα 6.1.8: Αποκλίσεις θερμοκρασίας ροής EGR-steady state	60
Διάγραμμα 6.1.9: Μέσες τιμές αποκλίσεων-steady state	61
Διάγραμμα 6.2.1: Ταχύτητα μηχανής-transient 1400 RPM	62
Διάγραμμα 6.2.2: Ροπή-transient 1400 RPM	62
Διάγραμμα 6.2.3: Κατανάλωση καυσίμου-transient 1400 RPM	63
Διάγραμμα 6.2.4: Θερμοκρασία πολλαπλής εισαγωγής-transient 1400 RPM	63
Διάγραμμα 6.2.5: Πίεση πολλαπλής εισαγωγής-transient 1400 RPM	63
Διάγραμμα 6.2.6: Πίεση πολλαπλής εξαγωγής-transient 1400 RPM	64
Διάγραμμα 6.2.7: Ροή μάζας καυσαερίων-transient 1400 RPM	64
Διάγραμμα 6.2.8: Ροή μάζας EGR-transient 1400 RPM	64
Διάγραμμα 6.2.9: Θερμοκρασία EGR-transient 1400 RPM	65
Διάγραμμα 6.2.10: Ταχύτητα μηχανής-transient 1800 RPM	66
Διάγραμμα 6.2.11: Ροπή-transient 1800 RPM	67
Διάγραμμα 6.2.12: Κατανάλωση καυσίμου-transient 1800	67
Διάγραμμα 6.2.13: Θερμοκρασία πολλαπλής εισαγωγής-transient 1800 RPM	67
Διάγραμμα 6.2.14: Πίεση πολλαπλής εισαγωγής-transient 1800 RPM	68
Διάγραμμα 6.2.15: Πίεση πολλαπλής εξαγωγής-transient 1800 RPM	68
Διάγραμμα 6.2.16: Ροή μάζας καυσαερίων-transient 1800 RPM	68
Διάγραμμα 6.2.17: Ροή μάζας EGR-transient 1800 RPM	69
Διάγραμμα 6.2.18: Θερμοκρασία EGR-transient 1800 RPM	69
Διάγραμμα 6.3.1: Ταχύτητα μηχανής-Case Study A	71
Διάγραμμα 6.3.2: Ροπή-Case Study A	72
Διάγραμμα 6.3.3: Κατανάλωση καυσίμου-Case Study A	72
Διάγραμμα 6.3.4: Θερμοκρασία πολλαπλής εισαγωγής-Case Study	72

Διάγραμμα 6.3.5: Πίεση πολλαπλής εισαγωγής-Case Study A	73
Διάγραμμα 6.3.6: Πίεση πολλαπλής εξαγωγής-Case Study A	73
Διάγραμμα 6.3.7: Ροή μάζας καυσαερίων-Case Study A	73
Διάγραμμα 6.3.8: Ροή μάζας EGR-Case Study A	74
Διάγραμμα 6.3.9: Θερμοκρασία EGR-Case Study A	74
Διάγραμμα 6.3.10: Ροπή άξονα-Case Study A(i)	75
Διάγραμμα 6.3.11: Ροπή άξονα-Case Study A(ii)	76
Διάγραμμα 6.3.12: Φορτίο ηλεκτροκινητήρα-Case Study A	76
Διάγραμμα 6.3.13: Ταχύτητα μηχανής-Case Study B	77
Διάγραμμα 6.3.14: Ροπή-Case Study B	78
Διάγραμμα 6.3.15: Κατανάλωση καυσίμου-Case Study B	78
Διάγραμμα 6.3.16: Θερμοκρασία πολλαπλής εισαγωγής-Case Study B	78
Διάγραμμα 6.3.17: Πίεση πολλαπλής εισαγωγής-Case Study B	79
Διάγραμμα 6.3.18: Πίεση πολλαπλής εξαγωγής-Case Study B	79
Διάγραμμα 6.3.19: Ροή μάζας καυσαερίων-Case Study B	79
Διάγραμμα 6.3.20: Ροή μάζας EGR-Case Study B	80
Διάγραμμα 6.3.21: Θερμοκρασία EGR-Case Study B	80
Διάγραμμα 6.3.22: Ροπή άξονα-Case Study B(i)	81
Διάγραμμα 6.3.23: Ροπή άξονα-Case Study B(ii)	82
Διάγραμμα 6.3.24: Φορτίο ηλεκτροκινητήρα-Case Study B	82

## Παράρτημα Β: Λίστα Πινάκων

Πίνακας 2.1.1: Χαρακτηριστικά CAT C9.3 ACERT	12
Πίνακας 2.1.2: Χαρακτηριστικές διαστάσεις GTB3782	13
Πίνακας 2.1.3: Απαιτήσεις USA EPA Tier 4	15
Πίνακας 2.2.1: Χαρακτηριστικά ηλεκτρικής πέδης ABB	18
Πίνακας 2.2.2: Χαρακτηριστικά ηλεκτροκινητήρα ABB	19
Πίνακας 3.2.1: Βασικά μηχανολογικά στοιχεία MOTHER	30



# Βιβλιογραφία

1. **Caton, Jerald A.** An Introduction to Thermodynamic Cycle Simulations for Internal Combustion Engines. 2006.
2. **Caterpillar.** OIL AND GAS - Performance Data Sheet.
3. **Caterpillar .** C9.3 ACERT (TIER 4I/STAGE IIIB). CAT. [Online] Caterpillar.  
[https://www.cat.com/en\\_US/products/new/power-systems/oil-and-gas/well-service-engines/18435311.html](https://www.cat.com/en_US/products/new/power-systems/oil-and-gas/well-service-engines/18435311.html).
4. **Caterpillar.** Cat C4.4 ACERT - C18 ACERT Tier 4 Interim Industrial Engines electronics application & installation guide. 2013.
5. **Limit Engineering.** High Performance Turbocharger Specialist. [Online]  
<http://www.limitengineering.com/Turbos/GT3782/GT3782.html>.
6. **Merker, Günter P., et al.** Simulating Combustion: Simultaneous of combustion and pollutant formation for engine-development. 2005.
7. **Wikipedia.** [Online]  
[https://en.wikipedia.org/wiki/European\\_emission\\_standards#Emission\\_standards\\_for\\_non-road\\_mobile\\_machinery](https://en.wikipedia.org/wiki/European_emission_standards#Emission_standards_for_non-road_mobile_machinery).
8. **U.S. EPA.** e-CFR. [Online] 2004. <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=5bd49186c6de428e7d6446a56baab96c&mc=true&node=pt40.36.1039&rgn=div5>.
9. **Kyratatos, N.P., et al.** HIPPO-2: The new Hybrid Integrated Propulsion Powertrain testbed at the Laboratory of Marine Engineering, NTUA.
10. **ABB .** Low voltage Process performance motors. [Online]  
<https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK105944&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>.
11. **ABB.** ABB. [Online] <https://new.abb.com/products/3GBP282220-ADG/m3bp-bp-cast-iron-motor-y-4-poles-imb3-im1001>.
12. **MOtor THERmodynamics** USERS MANUAL. Version 2.1. 2013.
13. **Vibe, I.** Breunverlauf und Kreisprozess von Verbrennungsmotoren. 1970.

14. **Ciuli, E.** A Review of Internal Combustion Engine Losses. 1992. Vols. Part 1: Specific Studies on the Motion of Pistons, Valves and Bearings.
15. **Woschni, G.** Universally Applicable Equation for the Instantaneous Heat Transfer Coefficient in the Internal Combustion Engine. SAE Paper. 1967.
16. **Rohsenow, W. M., Hartnett, J. P. and Ganic, E.** Handbook of Heat Transfer Fundamentals. 2nd Edition. 1985.
17. **Guzzella, Lino and Sciarretta, Antonio.** Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimization. Third Edition. 2012.
18. **Rizzoni, G., Guzzella, L. and Baumann, B.** Unified modeling of hybrid electric vehicle drivetrains. 1999.
19. **Varsamis, D.** Load Simulation of Marine Propulsion System during Vessel's Motion on Hybrid Diesel-Electric Testbed. 2019.
20. **Sideris, G.** Caterpillar C9.3 HIPPO-2, LME, NTUA MVEM. 2019.