



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΥΨΟΜΕΤΡΟΥ ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΑΙ ΤΙΣ
ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΡΥΠΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟ-ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΕ
ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ GT-POWER**



ΓΚΟΡΤΣΑ Α. ΑΡΕΤΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Ε.Γ.ΓΙΑΚΟΥΜΗΣ, ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2018

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ευάγγελο Γιακουμή για τη δυνατότητα που μου έδωσε να εκπονήσω αυτό το θέμα, τον χρόνο που διέθεσε για την καθοδήγησή μου καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής καθώς και για τις γνώσεις και το έναυσμα που μου μετέδωσε κατά την διάρκεια του προπτυχιακού κύκλου σπουδών να ασχοληθώ με τον τομέα των μηχανών εσωτερικής καύσης.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω την εκτίμησή μου στο πρόσωπο του καθηγητή κ. Δ. Χουντάλα καθώς η συνδιδασκαλία με τον κ. Ε. Γιακουμή στα μαθήματα αυτού του τομέα έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη ενδιαφέροντος για το αντικείμενο αυτό.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω και την οικογένειά μου για τα εφόδια και την συμπαράσταση που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια του μαθητικού και φοιτητικού βίου μου.

Στο εξώφυλλο αναπαρίσταται η τομή του συστήματος στροβιλο-υπερπλήρωσης του κινητήρα AMG 4-litre V8 biturbo.

Πίνακας Περιεχομένων

| | |
|---|----|
| Εισαγωγή..... | 5 |
| Abstract..... | 6 |
| | |
| 1. Υπερπλήρωση Μ.Ε.Κ. | 7 |
| 1.1. Ορισμός υπερπλήρωσης..... | 7 |
| 1.2. Κατηγοριοποίηση μεθόδων υπερπλήρωσης:..... | 9 |
| 1.2.1. Με βάση τον τρόπο κίνησης του συμπιεστή..... | 9 |
| 1.2.2. Με βάση τον σχεδιασμό του συμπιεστή..... | 12 |
| 1.2.3. Με βάση τον τρόπο σύνδεσης κινητήρα και συστήματος υπερπλήρωσης..... | 14 |
| | |
| 2. Στροβιλο-υπερπλήρωση..... | 18 |
| 2.1. Ορισμός στροβιλο-υπερπλήρωσης..... | 18 |
| 2.2. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα στροβιλο-υπερπλήρωσης..... | 18 |
| 2.3. Διάταξη στροβιλο-υπερπληρωτή..... | 20 |
| 2.4. Επίδραση ψύξης του αέρα υπερπλήρωσης..... | 25 |
| | |
| 3. Διβάθμια στροβιλο-υπερπλήρωση..... | 28 |
| 3.1. Διάταξη στροβιλο-υπερπληρωτών..... | 28 |
| 3.2. Έλεγχος στροβιλο-υπερπληρωτών..... | 29 |
| | |
| 4. Επίδραση Υψομέτρου..... | 33 |
| 4.1. Επίδραση στην ατμοσφαιρική πίεση..... | 33 |
| 4.2. Επίδραση στη θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα..... | 34 |
| 4.3. Επίδραση στην περιεκτικότητα κατά μάζα του αέρα σε οξυγόνο..... | 36 |
| | |
| 5. Σχηματισμός και εκπομπή ρύπων..... | 37 |
| 5.1. Γενικά..... | 37 |
| 5.2. Σχηματισμός οξειδίων του αζώτου NO _x | 38 |
| 5.2.1. Γενικά..... | 38 |
| 5.2.2. Μηχανισμός σχηματισμού μονοξειδίου του αζώτου NO..... | 39 |
| 5.2.3. Μηχανισμός σχηματισμού διοξειδίου του αζώτου NO ₂ | 40 |
| 5.2.4. Σχηματισμός και απορρύπανση των NO _x σε κινητήρες Diesel..... | 41 |
| 5.3. Σχηματισμός σωματιδίων αιθάλης..... | 43 |
| 5.3.1. Γενικά..... | 43 |
| 5.3.2. Μηχανισμός σχηματισμού σωματιδίων αιθάλης..... | 44 |
| 5.3.3. Σχηματισμός αιθάλης σε κινητήρες Diesel..... | 47 |
| | |
| 6. Μοντελοποίηση στροβιλο-υπερπλήρωσης με το λογισμικό GT-Suite..... | 48 |
| 6.1. Εισαγωγή στο GT-Suite..... | 48 |
| 6.2. Εισαγωγή στο υποπρόγραμμα GT-Power..... | 49 |
| 6.3. Περιγραφή του μοντέλου προσομοίωσης..... | 50 |
| 6.3.1. Χαρακτηριστικά κινητήρα προς μοντελοποίηση..... | 50 |

| | |
|--|-----|
| 6.3.2. Μοντελοποίηση τμημάτων κινητήρα..... | 51 |
| 7. Αποτελέσματα προσομοίωσης σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας..... | 63 |
| 7.1. Εισαγωγή..... | 63 |
| 7.2. Προσομοίωση συνθηκών περιβάλλοντος..... | 64 |
| 7.3. Επίδραση των προς εξέταση υψομέτρων..... | 65 |
| 7.3.1. Μονοβάθμιο σύστημα στροβιλο-υπερπλήρωσης..... | 65 |
| 7.3.2. Διβάθμιο σύστημα στροβιλο-υπερπλήρωσης..... | 76 |
| 7.3.3. Σύγκριση αποτελεσμάτων μονοβάθμιας και διβάθμιας στροβιλο-υπερπλήρωσης..... | 93 |
| 8. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα..... | 98 |
| 9. Παράρτημα-Πίνακας Συμβόλων..... | 101 |
| 10. Βιβλιογραφία..... | 103 |

Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται το θέμα της επίδρασης του υψομέτρου στην απόδοση και τις εκπομπές ρύπων ενός εξακύλινδρου 4-Χ στροβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα Diesel. Η επίδραση του υψομέτρου έγκειται στην μεταβολή της πίεσης και της θερμοκρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα που εισάγεται στην διάταξη του κινητήρα.

Στόχος της εργασίας είναι η κατάλληλη προσομοίωσης του στροβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα και του περιβάλλοντος μέσω του υπολογιστικού πακέτου GT-Power. Το εξειδικευμένο αυτό λογισμικό παρέχεται από την εταιρία Gamma Technologies Inc και χρησιμοποιείται ευρέως στην βιομηχανία.

Η διερεύνηση περιλαμβάνει την μεταβολή των συνθηκών του περιβάλλοντος και την καταγραφή για τις διάφορες περιπτώσεις των επιδόσεων του κινητήρα και των εκπομπών ρύπων. Η μελέτη των ρύπων επικεντρώνεται στους δύο βασικότερους ρύπους των κινητήρων Diesel, τα οξείδια του αζώτου και τα σωματίδια αιθάλης. Τέλος, γίνεται αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, που προκύπτουν από το υπολογιστικό πακέτο, και οδηγούν στο συμπέρασμα ότι οι υπερπληρωμένοι κινητήρες αντισταθμίζουν την μείωση της πυκνότητας του αέρα λόγω της αύξησης του υψομέτρου.

Abstract

This diploma thesis deals with the effect of altitude on the performance and emissions of a six-cylinder 4-stroke turbocharged Diesel engine. The effect of the altitude is to vary the pressure and temperature of the air introduced into the engine assembly.

The aim of the thesis is to properly simulate the turbocharged engine and the environment through the GT-Power computational package. This specialized software is provided by Gamma technologies Inc. and is widely used in the industry.

The investigation involves changing environmental conditions and recording for different cases the engine performance and pollutant emissions. The pollutant study focuses on the two main pollutants of Diesel engines, nitrogen oxides and soot particles. Finally, the results obtained from the computational package are evaluated, which lead to the conclusion that overcharged engines compensate for the decrease in air density due to altitude increase.

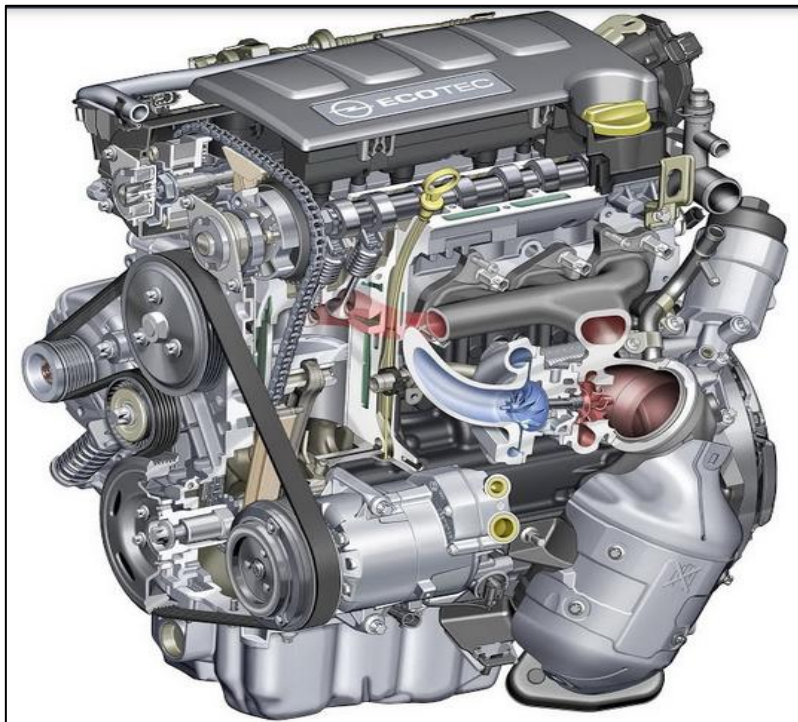
Κεφάλαιο 1

Υπερπλήρωση

Μ.Ε.Κ.

1.1. Ορισμός υπερπλήρωσης

Ως υπερπλήρωση ορίζεται η προ-συμπίεση μέρους ή όλης της γόμωσης εξωτερικά του κυλίνδρου με χρήση κατάλληλου μηχανικού μέσου (συμπιεστής). Στους κινητήρες Diesel ή τους Otto άμεσης έγχυσης, για παράδειγμα, γίνεται προ-συμπίεση μέρους της γόμωσης, εννοώντας τον αέρα που θα εισαχθεί στον κύλινδρο και στην συνέχεια θα αναμειχθεί με το καύσιμο. Συνεπώς, η γόμωση συμπιέζεται σε δύο φάσεις στους υπερπληρωμένους κινητήρες, εντός (φάση συμπίεσης) και εκτός (συμπιεστής) κυλίνδρου (Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1: Μερική τομή υπερπληρωμένου κινητήρα Opel Corsa Ecotec 1,4L

Σκοπός της υπερπλήρωσης είναι η αύξηση της πυκνότητας του αέρα σε σχέση με τον ατμοσφαιρικό. Η αύξηση της πυκνότητας δίνει τη δυνατότητα εισαγωγής στον κινητήρα μεγαλύτερης ποσότητας αέρα και άρα και αύξησης στην ποσότητα του καυσίμου που μπορεί

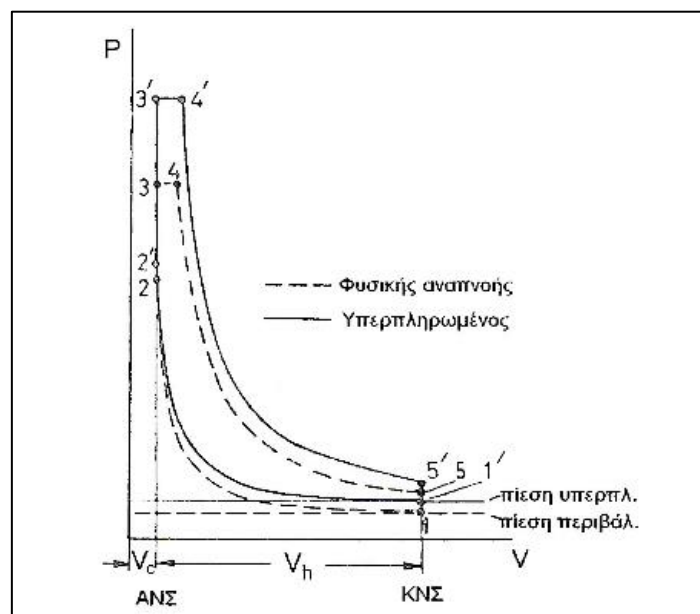
να εγχυθεί και να καεί. Η αύξηση στην ποσότητα του καυσίμου συνεπάγεται αύξηση της παραγόμενης από τον κινητήρα ισχύος και ροπής.

Η αύξηση αυτή στην ισχύ και την ροπή καταγράφεται και στον παρακάτω πίνακα 1.1 [1], στον οποίο φαίνεται η ανοδική πορεία της ισχύος και της ροπής κινητήρων βαρέων οχημάτων Diesel κατά το χρονικό διάστημα 1930-1996. Από τον πίνακα απορρέει ότι αν και ο όγκος εμβολισμού διατηρήθηκε σε σχεδόν σταθερά επίπεδα η ισχύς τετραπλασιάστηκε. Ο τετραπλασιασμός της ισχύος είχε αντίκτυπο και στην χωρική ισχύ (p_H) και στην μέση πραγματική πίεση (\bar{p}_e), με τον επίσης τετραπλασιασμό αυτών. Στο χρονικό αυτό διάστημα η ταχύτητα περιστροφής δεν σημείωσε αξιοσημείωτη αύξηση.

Πίνακας 1.1: Χαρακτηριστικά κινητήρων Diesel βαρέων οχημάτων (1930-1996) [1]

| | | | | | | | |
|------------------------------|----------|---------|----------|----------|---------|-----------|-----------|
| Μέγιστη Ισχύς (kW) | 70-110 | 92-110 | 110-125 | 107-132 | 140-154 | 283-304 | 309-441 |
| Μέγιστη Ροπή (Nm) | 520-1010 | 610-660 | 660-1050 | 620-1050 | 680-760 | 1285-1300 | 1850-2700 |
| Όγκος εμβολισμού (lt) | 16,6 | 13,5 | 18,1 | 11,6 | 18,7 | 18,3 | 18,3 |
| Έτος | 1930 | 1936 | 1939 | 1955/6 | 1960 | 1985 | 1996 |

Η αύξηση του επιπέδου των πιέσεων καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου λειτουργίας ενός υπερπληρωμένου κινητήρα σε σχέση με έναν φυσικής αναπνοής είναι το αποτέλεσμα της εισαγωγής προ-συμπιεσμένου αέρα σε πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής. Η σύγκριση αυτή αναπαρίσταται στο Σχήμα 1.2. Στο Σχήμα 1.2 αποτυπώνεται ο ιδανικός μικτός κύκλος ενός κινητήρα φυσικής αναπνοής (123451) και ενός υπερπληρωμένου (1'2'3'4'5'1') με τον ίδιο βαθμό συμπίεσης ϵ .



Σχήμα 1.2: Μικτός ιδανικός κύκλος κινητήρων φυσικής αναπνοής και υπερπληρωμένου με ίδιο βαθμό συμπίεσης [1]

Για κινητήρα με z αριθμό κυλίνδρων, με όγκο εμβολισμού V_h ο καθένας τους, που περιστρέφεται με ταχύτητα περιστροφής n , η αποδιδόμενη ισχύς δίνεται από τον τύπο 1.1:

$$P_e = zV_h \frac{n}{30K} = z \frac{\pi d^2}{4} s \bar{p}_e \frac{n}{30K} \quad (1.1)$$

Όπου $K=2$ για 2-Χ κινητήρα και $K=4$ για 4-Χ κινητήρα, d η διάμετρος του εμβόλου και s η διαδρομή αυτού.

Από τον παραπάνω τύπο (1.1) αποδεικνύεται ότι η αύξηση της ισχύος για δεδομένο κινητήρα γίνεται είτε με αύξηση της ταχύτητας περιστροφής είτε με αύξηση της μέσης πραγματικής πίεσης. Κι αυτό διότι τα χαρακτηριστικά του κινητήρα z , d , s , K είναι δεδομένα και αμετάβλητα.

Ωστόσο, οι δύο αυτές μέθοδοι έχουν αντίκτυπο στην αντοχή και τις απώλειες του κινητήρα. Πιο συγκεκριμένα, η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των δυναμικών φορτίσεων του κινητήρα. Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται είναι ανάλογες με το τετράγωνο της ταχύτητας περιστροφής συνεπώς μπορεί να είναι καταστροφικές για τον κινητήρα. Παράλληλα, αυξάνονται και οι μηχανικές απώλειες. Όσον αφορά την αύξηση της μέσης πραγματικής πίεσης, όπως έχει προαναφερθεί, μπορεί να γίνει μέσω της υπερπλήρωσης του κινητήρα. Η αύξηση της \bar{p}_e έχει ως απόρροια την αύξηση των δυνάμεων εξ' αερίων και σε μικρότερο βαθμό των μηχανικών απωλειών. Τέλος, και στις δύο μεθόδους η θερμική φόρτιση του κινητήρα είναι περίπου ισοδύναμη.

Η μεγάλες δυνάμεις εξ' αερίων μπορούν να αντιμετωπιστούν ευκολότερα από τις αυξημένες δυναμικές φορτίσεις άρα η υπερπλήρωση είναι προτιμότερη. Όμως, η υπερπλήρωση απαιτεί και πιο στιβαρή κατασκευή, η οποία μέσω των εξελίξεων στον τομέα των υλικών έχει οδηγήσει σε χαμηλότερο ειδικό βάρος κινητήρα σε σχέση με την αύξηση της ισχύος αυτού.

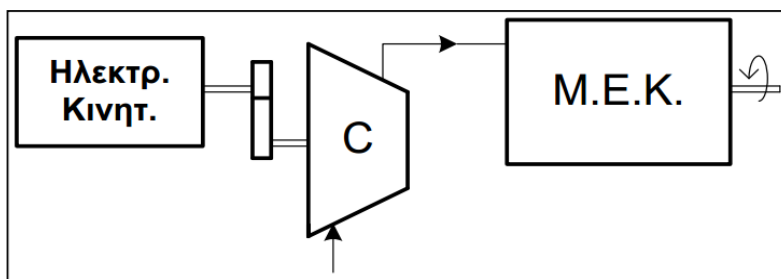
1.2. Κατηγοριοποίηση μεθόδων υπερπλήρωσης

Για την προ-συμπύεση τμήματος ή ολόκληρης της γόμωσης έχουν αναπτυχθεί διαφόρων ειδών τεχνικές. Οι τρόποι συμπύεσης διακρίνονται σε κατηγορίες με βάση τα κάτωθι κριτήρια.

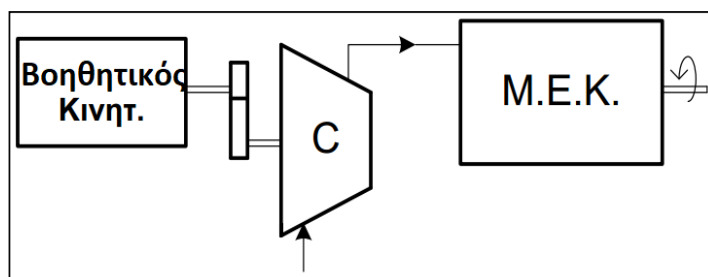
1.2.1. Με βάση τον τρόπο κίνησης του συμπιεστή

Τα συστήματα υπερπλήρωσης διακρίνονται σε δύο κατηγορίες με βάση τον τρόπο κίνησης του συμπιεστή.

- Εξωτερικά κινούμενος συμπιεστής μέσω σύνδεσης με βοηθητικό κινητήρα ή ηλεκτροκινητήρα (Σχήμα 1.3α και 1.3β). Στην κατηγορία αυτή ανήκουν και τα βοηθητικά συστήματα υπερπλήρωσης κινητήρων που χρησιμοποιούν την ενέργεια κατά την πέδη και οι φυσητήρες των μεγάλων 2-Χ κινητήρων που χρησιμοποιούνται για καλύτερη απόπλυση του καυσαερίου από τον κύλινδρο.

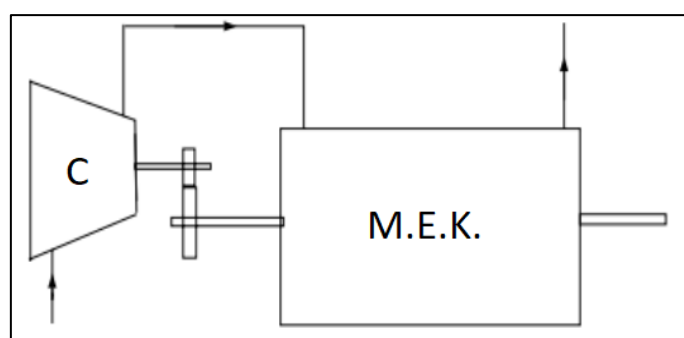


Σχήμα 1.3α: Διάγραμμα εξωτερικά κινούμενου συμπιεστή μηχανικά συνδεδεμένου με ηλεκτροκινητήρα [3]



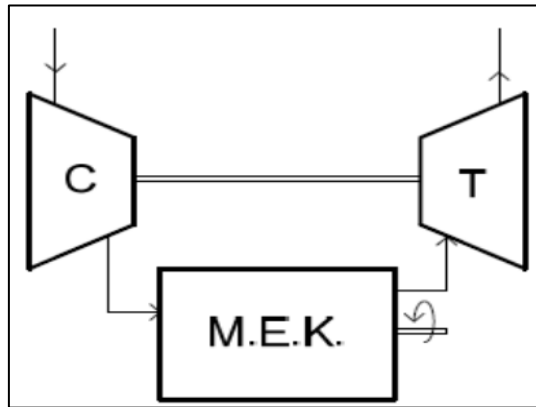
Σχήμα 1.3β: Διάγραμμα εξωτερικά κινούμενου συμπιεστή μηχανικά συνδεδεμένου με βοηθητικό κινητήρα [3]

- Συμπιεστής κινούμενος από τη στροφαλοφόρο άτρακτο του κινητήρα (γνωστή και ως μηχανική υπερπλήρωση) (Σχήμα 1.4). Η χρήση τέτοιου είδους υπερπλήρωσης επικεντρώνεται σε κινητήρες Otto επιβατικών αυτοκινήτων, που λειτουργούν ως επί το πλείστον σε μεταβατικές συνθήκες και σε χαμηλά φορτία, στα οποία ανταποκρίνεται ικανοποιητικά η μηχανική υπερπλήρωση. Ένα μειονέκτημα αυτού του τρόπου είναι η απορρόφηση σημαντικού μηχανικού έργου από το ήδη χαμηλό έργο που παράγει ο κινητήρας στα χαμηλά φορτία, με αποτέλεσμα τη σταδιακή εγκατάλειψή τους τα τελευταία χρόνια.

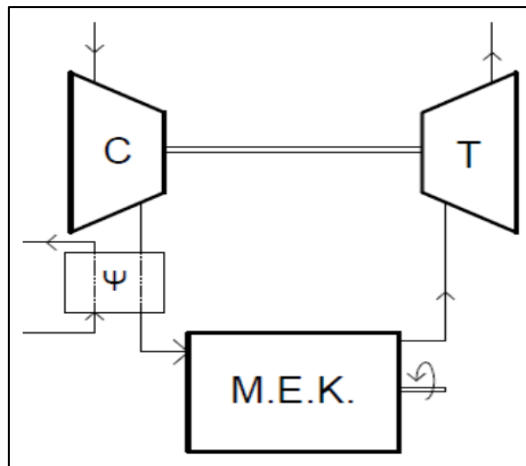


Σχήμα 1.4: Διάγραμμα μηχανικά υπερπληρωμένου κινητήρα [3]

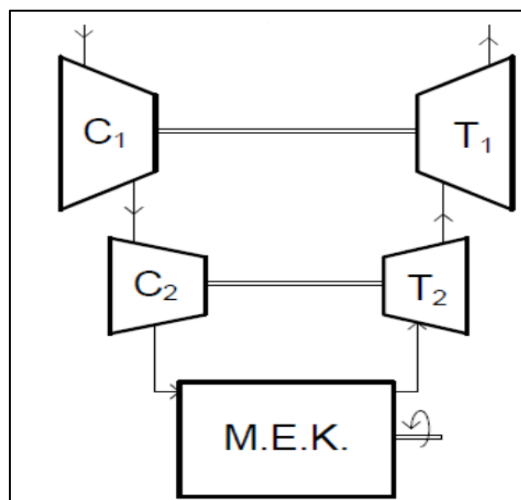
- Συμπιεστής κινούμενος από στρόβιλο καυσαερίου, τρόπος γνωστός και ως στροβιλο-υπερπλήρωση (Σχήμα 1.5, 1.6, 1.7). Είναι ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος τρόπος υπερπλήρωσης σε σχεδόν όλες της εφαρμογές (οχήματα, βιομηχανικούς και ναυτικούς κινητήρες). Εφαρμόζεται σαν μονοβάθμια, με ένα ζεύγος στροβιλο-υπερπλήρωσης, ή διβάθμια ή και πολυβάθμια, σε εξαιρετικές περιπτώσεις μόνο κινητήρων Diesel, με ή χωρίς την ύπαρξη ψυγείου του αέρα υπερπλήρωσης.



Σχήμα 1.5: Διάγραμμα μονοβάθμια στροβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα χωρίς ψυγείο [3]



Σχήμα 1.6: Διάγραμμα μονοβάθμια στροβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα με ψυγείο [3]



Σχήμα 1.7: Διάγραμμα διβάθμια στροβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα χωρίς ψυγείο [3]

- Σύστημα υπερπλήρωσης με κύματα πίεσης: στην ειδική αυτή κατηγορία ανήκουν τα συστήματα χωρίς διάταξη συμπίεστη (μέθοδος Complex), που συμπιέζουν τον εισερχόμενο αέρα μέσω ανταλλαγής κυμάτων πίεσης από το καυσαέριο που

αποτονώνεται σε δρομέα με πτερύγια (Σχήμα 1.8α και 1.8β). Στους χώρους που σχηματίζονται από τα πτερύγια περνάει αέρας και καυσαέρια που δημιουργεί το μειονέκτημα ότι θα υπάρχουν μικρές διαρροές και ανάμιξη της γόμωσης ή μέρους αυτής με καυσαέριο.



Σχήμα 1.8α: Σύστημα υπερπλήρωσης Comprex

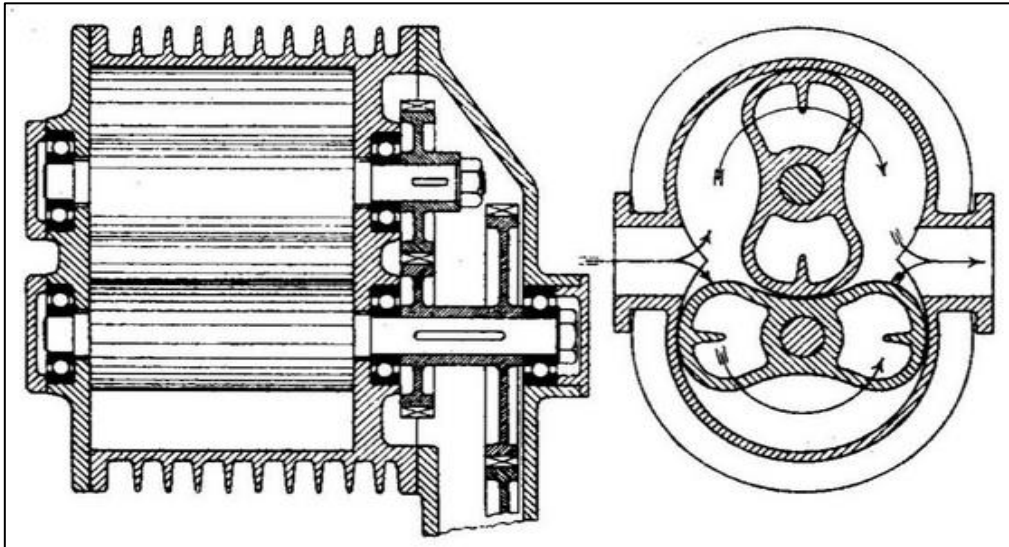


Σχήμα 1.8β: Σύστημα υπερπλήρωσης Comprex σε εφαρμογή σε Mazda 626 Capella 2,0L Diesel

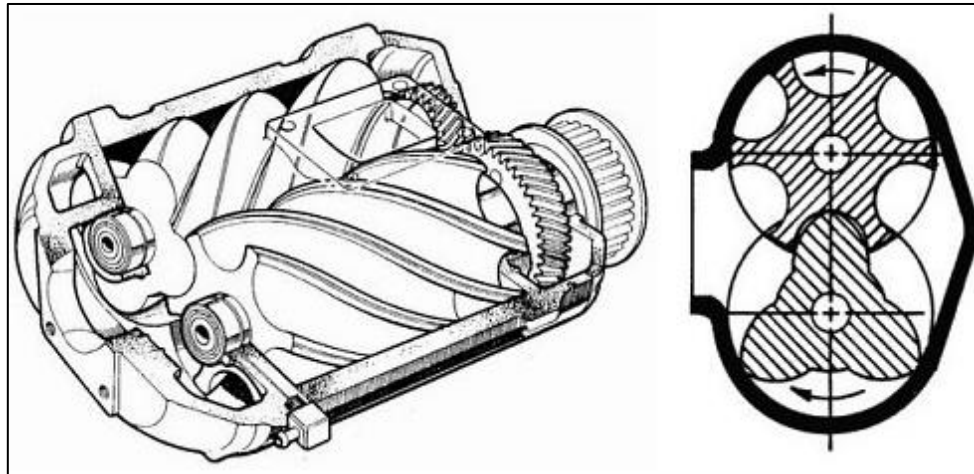
1.2.2. Με βάση τον σχεδιασμό του συμπιεστή

Ο σχεδιασμός του μέσου συμπίεσης του συστήματος υπερπλήρωσης παίζει πρωταρχικό ρόλο στην επιλογή του συμπιεστή για την εκάστοτε εφαρμογή, ώστε να είναι αποδοτική η χρήση αυτού. Οι κατηγορίες στις οποίες διακρίνονται οι συμπιεστές είναι οι παρακάτω αναφερόμενες:

- Συμπιεστές θετικής εκτόπισης: διαθέτουν παλινδρομικό ή περιστρεφόμενο έμβολο. Οι πλέον γνωστοί τύποι συμπιεστών με περιστρεφόμενο έμβολο που χρησιμοποιούνται ευρέως και σε επιβατικά αυτοκίνητα είναι αυτός του λοβοειδούς ανεμιστήρα (Roots Blower-Σχήμα 1.9) και του κοχλιοειδούς συμπιεστή (Lysholm - Σχήμα 1.10). Αυτοί οι τύποι συμπιεστών χρησιμοποιούνται ειδικά σε επιβατικά αυτοκίνητα.

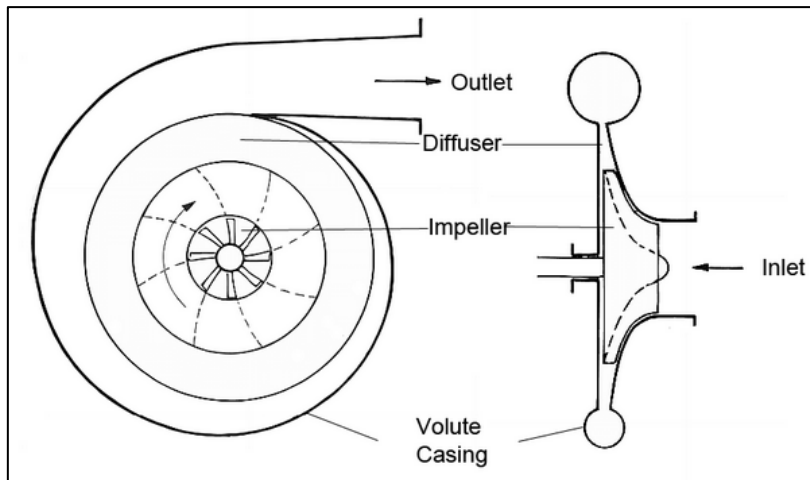


Σχήμα 1.9: Συμπιεστής θετικής εκτόπισης τύπου Roots

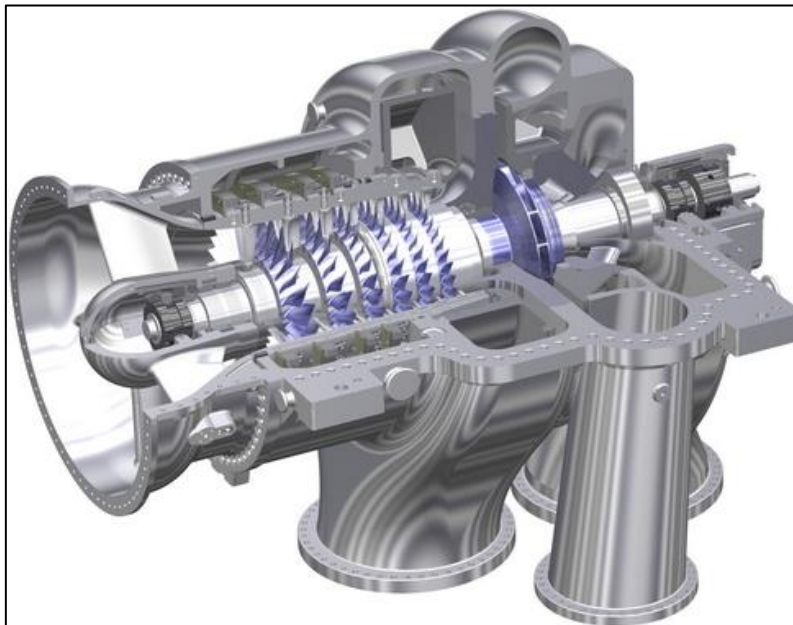


Σχήμα 1.10: Συμπιεστής θετικής εκτόπισης τύπου Lysholm

- Συμπιεστής δυναμικής ροής: στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι αεροδυναμικοί συμπιεστές αξονικής, ακτινικής ή μικτής ροής. Ανάλογα την εφαρμογή χρησιμοποιείται η εκάστοτε μορφή συμπιεστή. Συνεπώς, σε επιβατικά αυτοκίνητα χρησιμοποιούνται ακτινικής μορφής συμπιεστές (Σχήμα 1.11) λόγω του περιορισμένου χώρου, ενώ σε βιομηχανικές εφαρμογές ή σε κινητήρες τραίνων (Σχήμα 1.12) μπορούν να χρησιμοποιηθούν και αξονικοί.



Σχήμα 1.11: Σχηματική απεικόνιση ακτινικού συμπιεστή

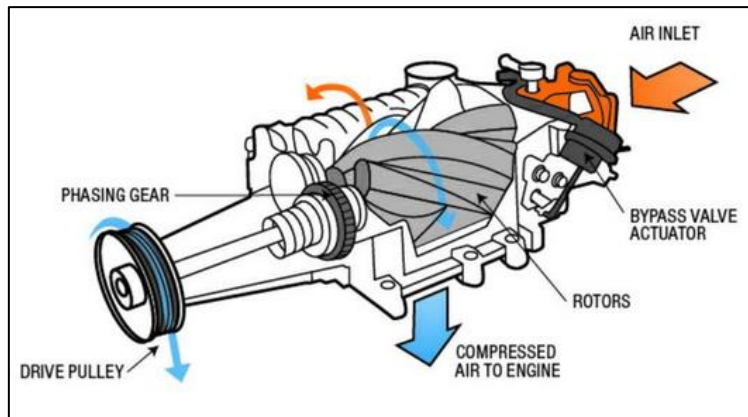


Σχήμα 1.12: Αξονικός συμπιεστής δυναμικής ροής για εφαρμογή σε υπερπληρωμένα τράινα

1.2.3. Με βάση τον τρόπο σύνδεσης κινητήρα και συστήματος υπερπλήρωσης

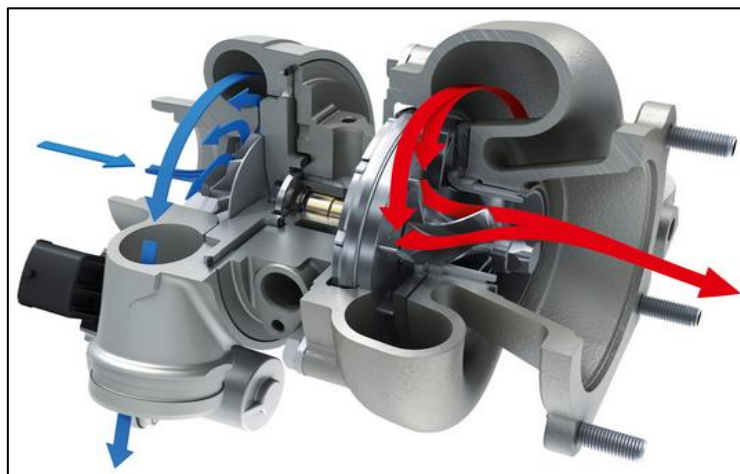
Ο τρόπος υπερπλήρωσης κατατάσσεται, επίσης, σε κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης ή μη του συστήματος υπερπλήρωσης με τον κινητήρα. Συνεπώς, υφίστανται οι εξής ευρέως διαδεδομένες κατηγορίες:

- **Μηχανική Υπερπλήρωση:** ο συμπιεστής είναι συζευγμένος με την στροφαλοφόρο άτρακτο του κινητήρα και η ισχύς που απαιτείται για την λειτουργία του μεταφέρεται από τον κινητήρα προς τον συμπιεστή χωρίς την παρεμβολή κάποιου στροβίλου για απόδοση ισχύος (Σχήμα 1.4 και 1.13). Στο σχήμα 1.13 φαίνεται χαρακτηριστικά το σύστημα μαντοκίνησης που συνδέει το συμπιεστή με τον κινητήρα. Η ωφέλιμη ισχύς αποδίδεται από την άτρακτο του κινητήρα, και είναι το ποσό ισχύος που παράγει ο κινητήρας μειωμένο κατά την ισχύ που χρειάζεται ο συμπιεστής.



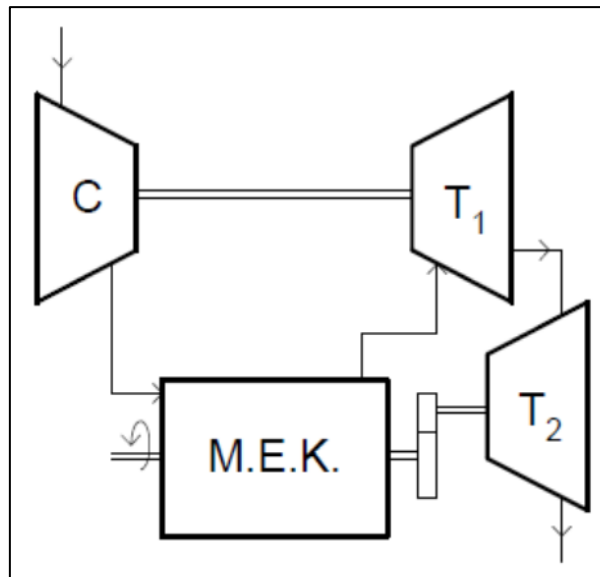
Σχήμα 1.13: Απεικόνιση συστήματος μηχανικής υπερπλήρωσης

- Στροβιλο-υπερπλήρωση: ο συμπιεστής είναι συζευγμένος στην ίδια άτρακτο με τον ελεύθερα περιστρεφόμενο, από το αποτονούμενο καυσαέριο, στρόβιλο (Σχήμα 1.14). Η ωφέλιμη ισχύς λαμβάνεται από την άτρακτο του κινητήρα. Η στροβιλο-υπερπλήρωση είναι η πλέον διαδεδομένη μέθοδος υπερπλήρωσης.

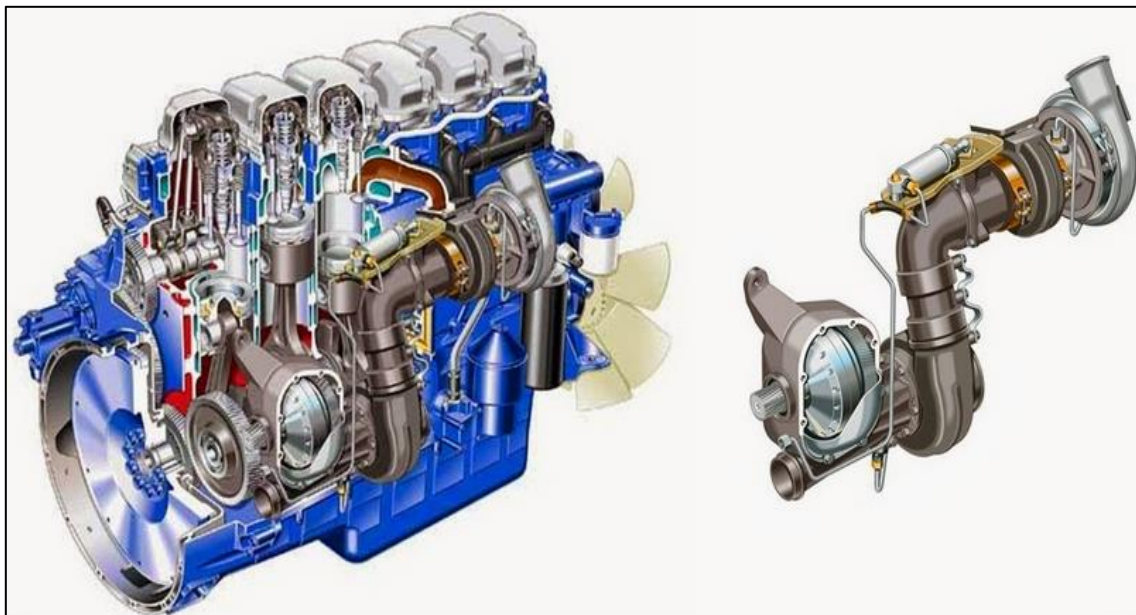


Σχήμα 1.14: Απεικόνιση ροών εντός συστήματος στροβιλο-υπερπλήρωσης με ακτινικό συμπιεστή και στρόβιλο στην ίδια άτρακτο

- Σύνθετη στροβιλο-υπερπλήρωση (turbo-compound): στην περίπτωση αυτή ο συμπιεστής και ο στρόβιλος είναι μηχανικά συζευγμένοι και παράλληλα η άτρακτος του κινητήρα είναι μηχανικά συζευγμένη με στρόβιλο ισχύος (Σχήμα 1.15). Η κύρια εφαρμογή αυτών των συστημάτων είναι σε κινητήρες αεροσκαφών καθώς λειτουργούν σε υψηλά φορτία για μεγάλο χρονικό διάστημα και δίνουν την δυνατότητα στον στρόβιλο ισχύος να παράγει αποδοτικά επιπλέον ισχύ εκτός αυτής που εξέρχεται από την άτρακτο του κινητήρα.

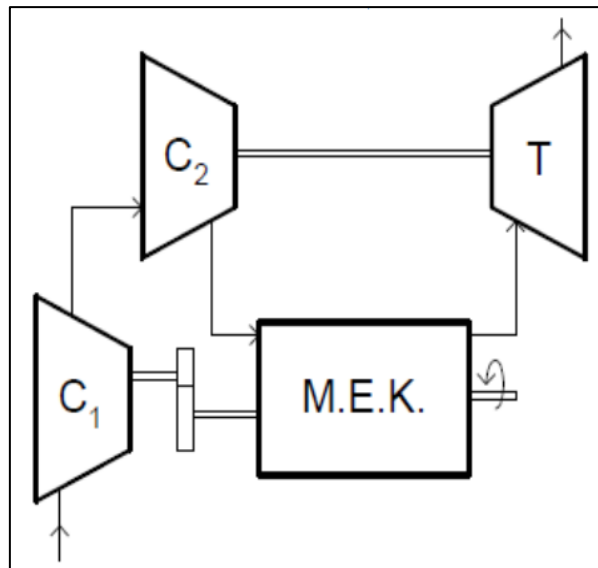


Σχήμα 1.15: Σχηματική απεικόνιση σύνθετης στροβιλο-υπερπλήρωσης [3]



Σχήμα 1.15: Μερική τομή σύνθετης στροβιλο-υπερπλήρωσης σε κινητήρα φορτηγού Volvo D12D 500HP με έμφαση στο σύστημα turbo-compound.

- Συνδυασμένη υπερπλήρωση (compined supercharging): στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα συστήματα στα οποία ο συμπιεστής και η άτρακτος του κινητήρα είναι μηχανικά συζευγμένοι μεταξύ τους, ενώ υπάρχει και ζεύγος στροβιλο-υπερπλήρωσης, με τον συμπιεστή σε σειρά με τον προηγούμενο, που συνδέεται με τον κινητήρα (Σχήμα 1.17). Η χρήση αυτών εντοπίζεται κυρίως σε επιβατικά οχήματα για βελτίωση της μεταβατικής λειτουργίας και σε 2-Χ ναυτικούς στροβιλο-υπερπληρωμένους κινητήρες για καλύτερη απόπλυση του καυσαερίου στα χαμηλά φορτία.



Σχήμα 1.17: Σχηματική απεικόνιση συνδυασμένης στροβιλο-υπερπλήρωσης [3]



Σχήμα 1.18: Φωτογραφία συστήματος compined supercharging, 2-βάθμιο με μηχανικό συμπιεστή Roots, Duramax LB7.

- Στρόβιλος με αεριογόνο (gas generator): ο συμπιεστής και ο κινητήρας είναι μηχανικά συζευγμένοι και τα καυσαέρια του κινητήρα αποτονώνονται σε στρόβιλο ισχύος από τον οποίο εξάγεται όλη η ωφέλιμη ισχύς. Η κατηγορία αυτή υπερπλήρωσης χρησιμοποιείται κυρίως στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, και η Μ.Ε.Κ. εξυπηρετεί μόνο στην παροχή καυσαερίου.

Κεφάλαιο 2

Στροβιλο- υπερπλήρωση

2.1. Ορισμός στροβιλο-υπερπλήρωσης

Η πλέον διαδεδομένη μέθοδος υπερπλήρωσης είναι η στροβιλο-υπερπλήρωση (Σχήμα 2.1), όπως έχει προαναφερθεί. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται ευρέως σε βιομηχανικές, ναυτικές και αεροπορικές εφαρμογές, καθώς και σε κινητήρες Otto και Diesel επιβατικών οχημάτων, μεγάλων φορτηγών και off-road οχημάτων (π.χ. εκσκαφείς). Η χρήση αυτής παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις άλλες μεθόδους και με την αντίστοιχη εφαρμογή ατμοσφαιρικού κινητήρα, αλλά και δυσκολίες στον έλεγχο του συστήματος για αποδοτική λειτουργία ανάλογα την εφαρμογή.



Σχήμα 2.1: Διάταξη στροβιλο-υπερπλήρωσης

2.2. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα στροβιλο-υπερπλήρωσης

Τα πλεονεκτήματα της στροβιλο-υπερπλήρωσης ενός κινητήρα με δεδομένη ισχύ σε σχέση με έναν 'φυσικής αναπνοής' (ατμοσφαιρικό) έχουν εντοπιστεί, με την πάροδο του χρόνου και δεδομένων των εξελίξεων στην τεχνολογία των υλικών, κυρίως στα κάτωθι σημεία:

- Μικρότερος φυσικός όγκος κινητήρα: αφορά χαρακτηριστικά όπως ο αριθμός κυλίνδρων και το μήκος του κινητήρα, που στην περίπτωση της υπερπλήρωσης γενικά είναι μικρότερα. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σήμερα κατά κόρον στις αυτοκινητοβιομηχανίες και είναι γνωστή ως 'downsizing'.

- Μικρότερο ποσοστό τριβών: λόγω του μικρότερου αριθμού κυλίνδρων και άρα κινούμενων μηχανικών μερών (π.χ. εδράνων), οι τριβές είναι λιγότερες και άρα ο μηχανικός βαθμός απόδοσης η_m , λόγω σταθερής ισχύος, είναι μεγαλύτερος.
- Μικρότερο βάρος: Σε συνδυασμό με την σταθερή ισχύ σε σχέση με τον φυσικής αναπνοής ο υπερπληρωμένος έχει μεγαλύτερη ειδική μάζα.
- Χαμηλότερο κόστος ανά μονάδα εξαγόμενης ενέργειας: το πλεονέκτημα αυτό εντοπίζεται κυρίως στην κατασκευή και λειτουργία κινητήρων μεγαλύτερων διαστάσεων.
- Μειωμένος θόρυβος στην εξαγωγή: λόγω της παρεμβολής του στροβίλου στη ροή των καυσαερίων μέχρι το περιβάλλον.
- Μικρότερη επίδραση της μεταβολής της πυκνότητας του αέρα περιβάλλοντος: κυρίως αυτό αφορά την μείωση στην πυκνότητα του αέρα περιβάλλοντος, στην είσοδο του κινητήρα, με την μείωση της ατμοσφαιρικής πίεσης. Κάτι τέτοιο συμβαίνει σε περιπτώσεις αύξησης του υψομέτρου στο οποίο λειτουργεί ο κινητήρας, γεγονός που ώθησε και την πραγματοποίηση της παρούσας μελέτης.
- Χαμηλότερες εκπομπές καυσαερίων σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας: υπό συγκεκριμένες συνθήκες λόγω και της επίδρασης στην καύση του καυσίμου εντός του κυλίνδρου.
- Μείωση της καθυστέρησης ανάφλεξης ειδικά σε κινητήρες Diesel: λόγω αυξημένων θερμοκρασιών εντός του κυλίνδρου.

Ωστόσο, οφείλουν να αναφερθούν και τα μειονεκτήματα της στροβιλο-υπερπλήρωσης σε σχέση με την εισαγωγή ατμοσφαιρικού αέρα:

- Υψηλότερη μηχανική και θερμική φόρτιση: κυρίως λόγω των μεγαλύτερων πιέσεων που αναπτύσσονται.
- Αυξημένες εκπομπές οξειδίων του αζώτου NO_x: λόγω αύξησης των πιέσεων και κατά συνέπεια και των θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια του κύκλου, με την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχει ενδιάμεση ψύξη του αέρα υπερπλήρωσης (δηλαδή πιέσεις υπερπλήρωσης μεγαλύτερες των 2 bar).

Παράλληλα, τα πλεονεκτήματα της στροβιλο-υπερπλήρωσης σε σχέση με τις άλλες μεθόδους υπερπλήρωσης εντοπίζονται κυρίως στα εξής σημεία:

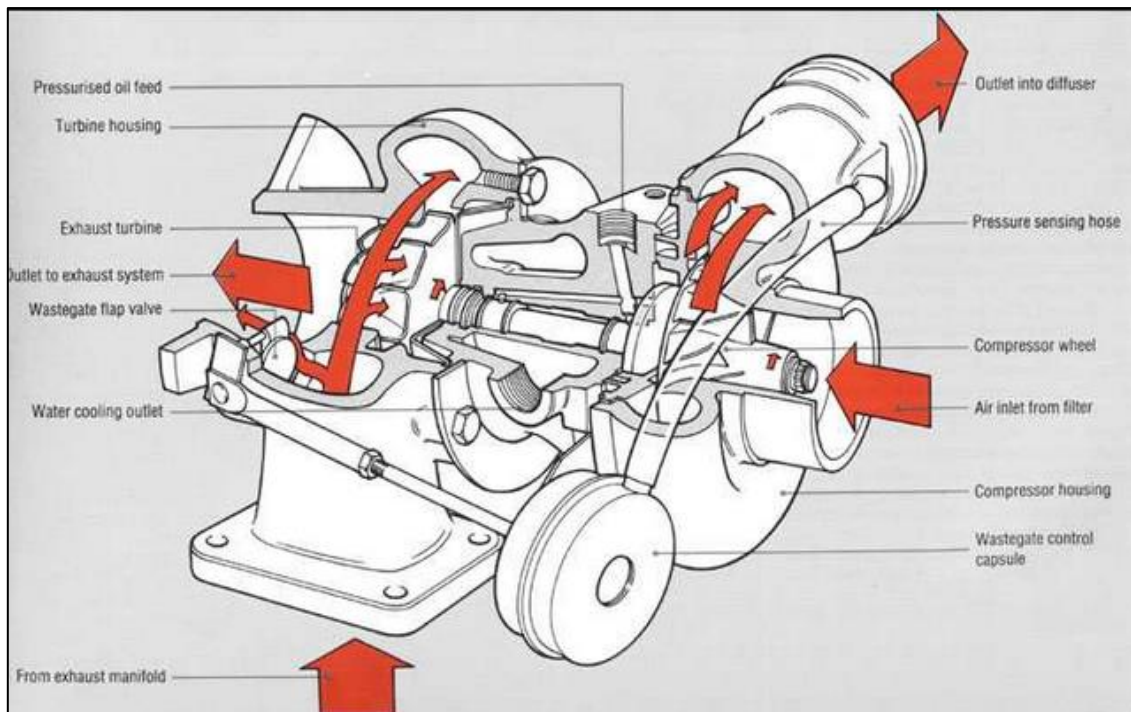
- Δεν αφαιρείται πολύτιμο μηχανικό έργο από τον κινητήρα: το ζεύγος συμπιεστή-στροβίλου είναι συζευγμένα στην ίδια άτρακτο άρα ο συμπιεστής λαμβάνει, με κάποιες απώλειες μηχανικές βέβαια, την ισχύ που παράγει ο στροβίλος.
- Σχετικά απλή κατασκευή: λόγω της μη σύνδεσης του συμπιεστή με τον κινητήρα μηχανικά.
- Επίτευξη ιδιαίτερα υψηλής συγκέντρωσης ισχύος από τον κινητήρα λόγω των πολύ υψηλών ταχυτήτων περιστροφής του ζεύγους στροβιλο-υπερπλήρωσης.
- Βελτίωση ειδικής κατανάλωσης καυσίμου.
- Ανεξαρτησία μηχανική συμπιεστή και κινητήρα: επειδή τα δύο συστήματα δεν έχουν άμεση (μηχανική) σύζευξη, οι ταχύτητες περιστροφής αυτών δεν αλληλεξαρτώνται άμεσα.

Οι δυσκολίες, ωστόσο, που παρουσιάζονται από την εφαρμογή της στροβιλο-υπερπλήρωσης οφείλουν επίσης να αναφερθούν.

- Αυξημένες εκπομπές ρύπων και πιο αργή επιτάχυνση κατά τη μεταβατική λειτουργία: λόγω της αδράνειας του ζεύγους συμπιεστή-στροβίλου που πρέπει να υπερνικηθεί από την ορμή του καυσαερίου που αποτονώνεται. Στη μεταβατική λειτουργία και ειδικά στα χαμηλά φορτία, που η ποσότητα καυσαερίου από τον κινητήρα είναι μικρή, η επιτάχυνση του ζεύγους υστερεί (Turbo-lag). Η αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού γίνεται μέσω τεχνικών, όπως βοηθητικού ηλεκτροκινητήρα στην άτρακτο του ζεύγους συμπιεστή-στροβίλου, η εγκατάσταση στροβίλου μικρότερης διαμέτρου σε συνδυασμό με βαλβίδα παράκαμψης καυσαερίου (wastegate), η κατασκευή πτερωτής στροβίλου από προηγμένα κεραμικά υλικά, η χρήση στροβίλου μεταβλητής γεωμετρίας (VGT) κτλ.[1]
- Ύπαρξη περιοχών ασταθούς λειτουργίας στον χάρτη του συμπιεστή: ο συνδυασμός κινητήρα με ζεύγος στροβιλο-υπερπλήρωσης οφείλει να γίνει έτσι ώστε τα σημεία λειτουργίας να μην κινδυνεύουν να μπούνε στις περιοχές πάλμωσης ή 'παγώματος' της ροής.

2.3. Διάταξη στροβιλο-υπερπληρωτή

Το σύστημα στροβιλο-υπερπλήρωσης αποτελείται από τον στρόβιλο, τον συμπιεστή, την άτρακτο που τους συνδέει και τα υπόλοιπα μηχανικά στοιχεία που βοηθούν στην σωστή και αποδοτική λειτουργία αυτών (Σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2: Σχηματική περιγραφή μηχανικών μερών στροβιλο-συμπιεστή

Συμπιεστής: αποτελείται από την πτερωτή ή ρότορα (impeller) και το κέλυφος ή διαχύτη (housing) (Σχήμα 2.3). Ο διαχύτης μπορεί να διαθέτει πτερύγια για την καλύτερη καθοδήγηση

της ροής ή όχι. Η κινητή πτερωτή (ρότορας) συνδέεται με την άτρακτο που είναι κοινή για συμπιεστή και στρόβιλο. Ο ρόλος του ρότορα είναι η αναρρόφηση αέρα και η πρόσδοση κινητικής ενέργειας σε αυτόν μέσω της περιστροφικής κίνησης. Στην συνέχεια, η υψηλή ταχύτητα μετατρέπεται εντός του κελύφους σε υψηλή πίεση καθώς το ρευστό επιβραδύνεται.

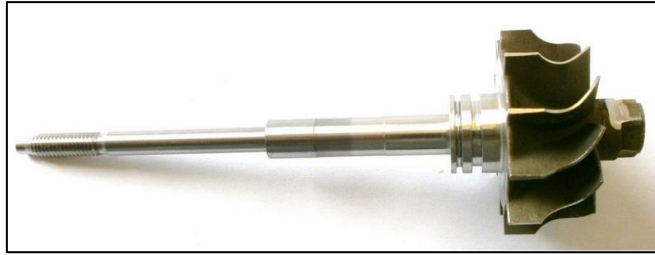
Οι πτερωτές των συμπιεστών κατασκευάζονται συνήθως από χυτά υλικά ή από σφυρήλατα, όπως κράματα αλουμινίου, χάλυβας ή τιτάνιο (επιλογή υψηλότετου κόστους). Το κέλυφος κατασκευάζεται συνήθως από χυτό αλουμίνιο.



Σχήμα 2.3: Πτερωτή και κέλυφος συμπιεστή της εταιρείας Holset (HX40)

Στρόβιλος: είναι διάταξη παρόμοια με τον συμπιεστή, αλλά εκτελεί την αντίστροφη λειτουργία. Η υψηλή πίεση του ρευστού (καυσαέριο) μετατρέπεται, καθώς εισέρχεται από το κέλυφος στην πτερωτή, σε υψηλή κινητική ενέργεια. Η μεγάλη ορμή του ρευστού ωθεί την πτερωτή σε περιστροφική κίνηση μεταφέροντας ισχύ στον συμπιεστή, που είναι, επίσης, συνδεδεμένος στην ίδια άτρακτο (Σχήμα 2.4). Το σταθερό κέλυφος μπορεί να διαθέτει δύο εισόδους του καυσαερίου (Σχήμα 2.5) στον ρότορα για καλύτερη εκμετάλλευση αυτών και ανάλογα τον αριθμό των σωληνώσεων πολλαπλής εξαγωγής (Σχήμα 2.6). Το κέλυφος διαθέτει, ακόμη, βαλβίδα (wastegate), η οποία ανοίγει μηχανικά και είναι ελεγχόμενη από την πίεση υπερπλήρωσης του συμπιεστή (Σχήμα 2.7). Επίσης, σήμερα επικρατεί η χρήση στρόβιλου μεταβλητής γεωμετρίας (VGT)/ρυθμιζόμενων πτερυγίων (VGN) (Σχήμα 2.8). Τέλος, σε μεγάλους ναυτικούς κινητήρες, το κέλυφος διαθέτει ειδικές κοιλότητες από τις οποίες περνάει ψυκτικό συνήθως νερό, καθώς αναπτύσσονται πολύ υψηλές θερμοκρασίες (Σχήμα 2.9).

Η επιλογή υλικών για την πτερωτή του στρόβιλου αποτελεί κομβικό σημείο καθώς δέχεται τη μεγαλύτερη θερμική φόρτιση. Ο ρότορας κατασκευάζεται με χύτευση ακριβείας αν πρόκειται για ακτινικό, και με δίσκο από κράμα χάλυβα-χρωμίου-νικελίου/πτερύγια από κράμα νικελίου-χρωμίου-τιτανίου-αλουμινίου αν πρόκειται για αξονικό στρόβιλο. Η επιλογή των υλικών εξαρτάται ακόμη και από το είδος του κινητήρα, καθώς στους κινητήρες Otto που λειτουργούν κοντά στη στοιχειομετρία οι θερμοκρασίες μπορεί να φτάσουν και τους 1000° C. Για το κέλυφος του στρόβιλου χρησιμοποιείται σίδηρος με προσμίξεις γραφίτη.



Σχήμα 2.4: Άτρακος και πτερωτή ακτινικού στροβίλου



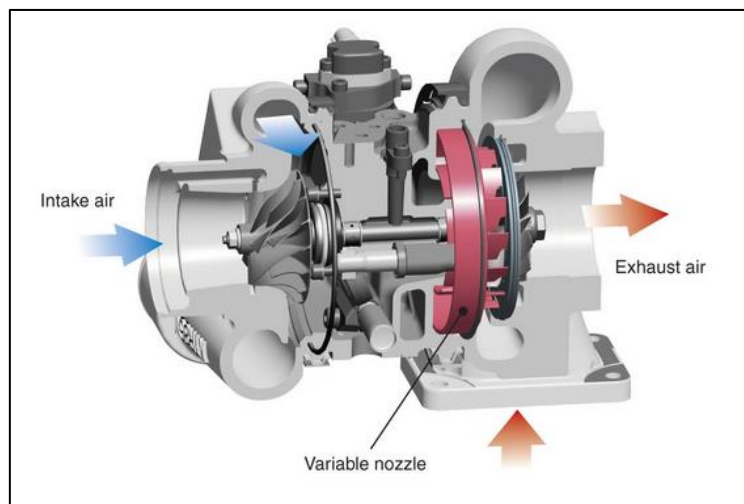
Σχήμα 2.5: Κέλυφος ακτινικού στροβίλου με δύο εισόδους



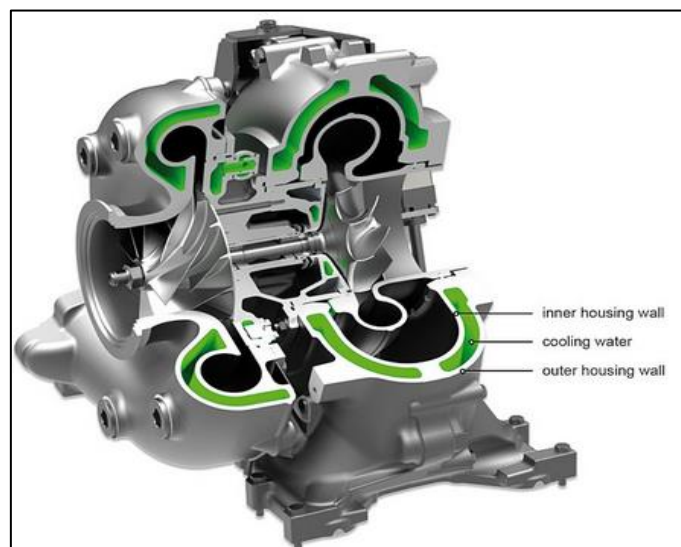
Σχήμα 2.6: Πολλαπλή εξαγωγής κινητήρα (4→2→1)



Σχήμα 2.7: Κέλυφος στροβίλου και βαλβίδα παράκαμψης καυσαερίου (wastegate) της εταιρείας Garrett



Σχήμα 2.8: Στρόβιλος ρυθμιζόμενων πτερυγίων (VGN)



Σχήμα 2.9: Κέλυφος στροβίλου- συμπιεστή με κοιλότητες για ψύξη με νερό

Άτρακτος: ο συνδετικός κρίκος μεταξύ συμπιεστή και στροβίλου είναι η άτρακτος. Η άτρακτος διαθέτει συστήματα λίπανσης και ειδικούς υδροστατικούς τριβείς. Το κέλυφος των τριβέων είναι κατασκευασμένο από χυτοσίδηρο, ενώ οι τριβείς από ειδικά κράματα ορείχαλκου για να αντέχουν τις καταπονήσεις σε υψηλότερες ταχύτητες περιστροφής της άτρακτου (n_{TC}) της τάξεως των 200.000 rpm. Η λίπανση αυτού πραγματοποιείται με τη διοχέτευση ελαίου από ειδικές υποδοχές μέσω της αντλίας λιπαντικού του κινητήρα.

Βαλβίδα παράκαμψης καυσαερίου: γνωστή στη βιομηχανία σαν wastegate αποτελεί δικλείδα ασφαλείας για τον στρόβιλο. Μπορεί να είναι ενσωματωμένη στον στρόβιλο (εσωτερική- Σχήμα 2.10) ή εντελώς ανεξάρτητη (εξωτερική- Σχήμα 2.11). Η εσωτερική wastegate βρίσκεται πάνω στο κέλυφος του στροβίλου και έχει σαν ενεργοποιητή την πίεση υπερπλήρωσης μετά τον συμπιεστή. Στην περίπτωση της εξωτερικής wastegate αποτελεί αυτόνομη βαλβίδα και ελέγχεται από την ίδια πίεση με πριν. Σε κάθε περίπτωση, υπάρχει ελατήριο που ωθείται από την πίεση υπερπλήρωσης, για να ξεκινήσει το άνοιγμα της βαλβίδας σε ένα προκαθορισμένο επίπεδο ώθησης. Συνεπώς, ποσοστό των καυσαερίων παρακάμπτεται από τον στρόβιλο κατευθείαν στην εξάτμιση ή σε δεύτερο σύστημα στροβίλου σε εξαιρετικές περιπτώσεις, περιορίζοντας την ισχύ που μπορεί να παράγει ο στρόβιλος, και άρα να λάβει ο συμπιεστής. Η λειτουργία του συμπιεστή στα χαμηλά φορτία περιορίζει και την ταχύτητα περιστροφής αυτού άρα και την πίεση υπερπλήρωσης εντέλει, εμποδίζοντας τις υπερβολικές πιέσεις εντός των κυλίνδρων.



Σχήμα 2.10: Εσωτερική βαλβίδα παράκαμψης καυσαερίου (internal wastegate)



Σχήμα 2.11: Εξωτερική βαλβίδα παράκαμψης καυσαερίου (external wastegate)

2.4. Επίδραση ψύξης του αέρα υπερπλήρωσης

Σκοπός της στροβιλο-υπερπλήρωσης, όπως απορρέει από τα άνωθεν στοιχεία, είναι η αύξηση της παραγόμενης ισχύος του κινητήρα μέσω αύξησης της πίεσης της γόμωσης. Μέσω της καταστατικής εξίσωσης των αερίων (Σχέση 2.1) η αύξηση της πίεσης έχει αντίκτυπο στην πυκνότητα. Η αύξηση της πυκνότητας ή αλλιώς του ειδικού όγκου οδηγεί στην εισαγωγή μεγαλύτερης μάζας αέρα ή γόμωσης στον κύλινδρο δίνοντας την δυνατότητα να καεί περισσότερο καύσιμο.

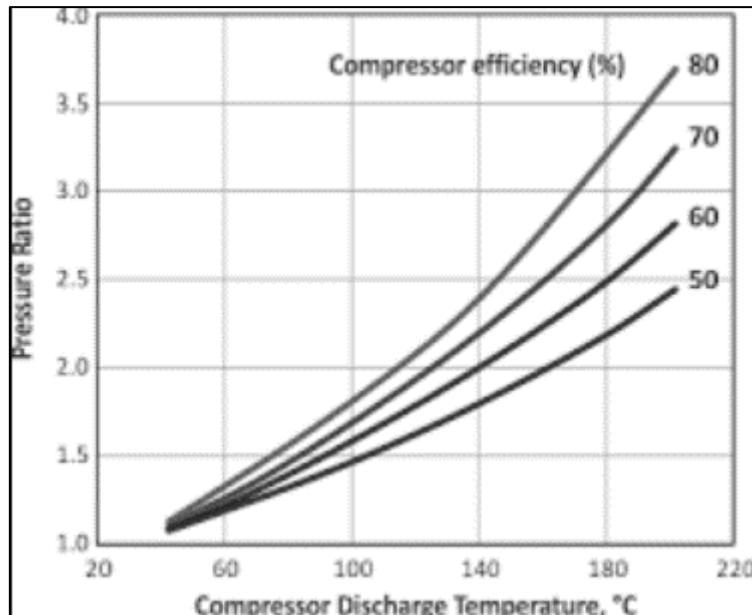
$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (2.1)$$

Η αύξηση όμως της πίεσης οδηγεί και σε αύξηση της θερμοκρασίας (σχέση 2.1), η οποία υποβιβάζει το όφελος σε ισχύ από την αύξηση της πίεσης. Συνεπώς, κρίνεται αναγκαία η ανύψωση της πίεσης με όσο το δυνατόν μικρότερη θερμοκρασιακή ανύψωση.

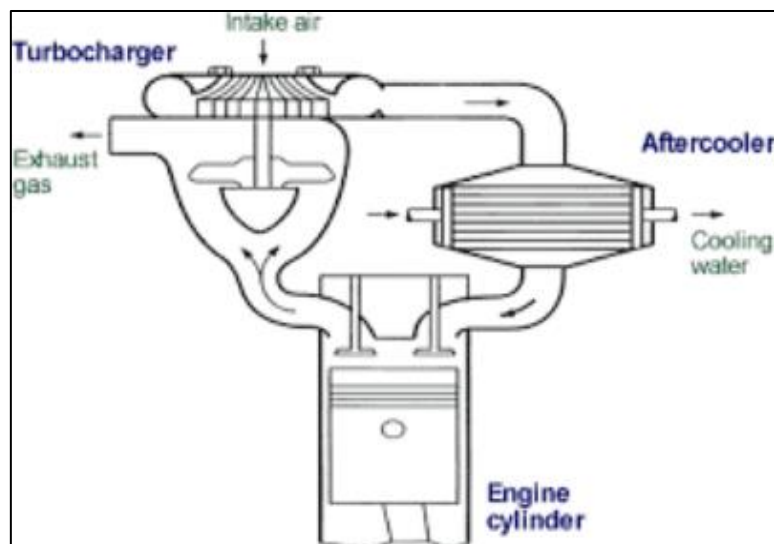
Υποθέτοντας ότι το ρευστό που συμπιέζεται είναι τέλειο αέριο και ο συμπιεστής πραγματοποιεί συμπίεση με ισηντροπικό βαθμό η_{is} , ισχύει (Σχέση 2.2):

$$\Delta T = \frac{T_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]}{\eta_{ic}} \quad (2.2)$$

Γίνεται φανερό ότι όσο ο ισηντροπικός βαθμός απόδοσης του συμπιεστή μικραίνει τόσο μεγαλώνει η θερμοκρασιακή ανύψωση και μειώνεται το όφελος από την ανύψωση της πίεσης (Σχήμα 2.12). Κρίνεται λοιπόν αναγκαία η ύπαρξη συστήματος ψύξης μετά τον συμπιεστή (aftercooler), ώστε να αντισταθμιστεί η θερμοκρασιακή ανύψωση (Σχήμα 2.13). Συνήθως, κρίνεται απαραίτητη η ψύξη σε πιέσεις μεγαλύτερες των 2 bar. Η μείωση της θερμοκρασίας, ιδανικά μέχρι την θερμοκρασία του περιβάλλοντος, μειώνει και την πυκνότητα του εισερχόμενου αέρα στον κινητήρα (Σχέση 2.1).



Σχήμα 2.12: Επίδραση του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης του συμπιεστή στην θερμοκρασιακή ανύψωση του αέρα στην πολλαπλή εισαγωγής



Σχήμα 2.13: Σύστημα στροβιλο-υπερπλήρωσης με ενδιάμεση ψύξη του αέρα πριν τον κύλινδρο

Τα κύρια οφέλη που παρατηρούνται από την ψύξη του αέρα υπερπλήρωσης καταγράφονται παρακάτω:

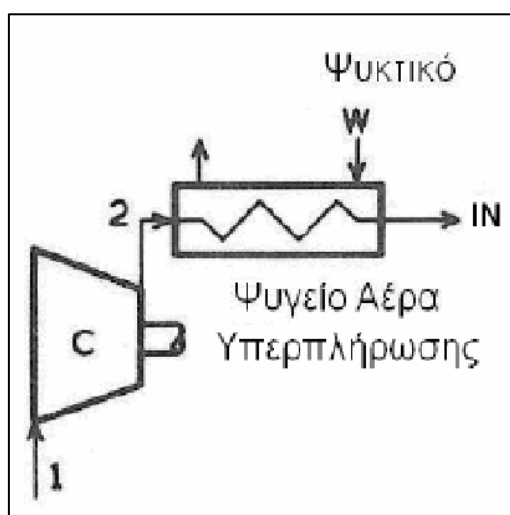
- Χαμηλές θερμοκρασίες του κύκλου λειτουργίας: για σταθερή μέση πραγματική πίεση και λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας εισαγωγής του αέρα στους κυλίνδρους.
- Μικρότερη θερμική φόρτιση κινητήρα: λόγω των γενικά χαμηλότερων θερμοκρασιών που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια του κύκλου λειτουργίας. Αποτελεί κομβικό σημείο κυρίως για τους κινητήρες Otto που εμφανίζουν αυξημένο κίνδυνο κρουστικής καύσης.
- Λιγότερες εκπομπές οξειδίων του αζώτου NO_x: λόγω των μικρότερων θερμοκρασιών που αναπτύσσονται.

- Ενίσχυση έννοιας υπερπλήρωσης: λόγω πτώσης της θερμοκρασίας μετά το ψυγείο αυξάνεται η πυκνότητα και άρα η εισερχόμενη μάζα αέρα στον κύλινδρο, οπότε δίνεται η δυνατότητα καύσης μεγαλύτερης ποσότητας καυσίμου.

Η θερμοκρασία εξόδου του αέρα από το ψυγείο εξαρτάται άμεσα και από τον βαθμό εκμετάλλευσης του ίδιου του ψυγείου (η_ψ), όπως φαίνεται από την σχέση 2.3.

$$\eta_\psi = \frac{T_2 - T_{in}}{T_2 - T_w} \quad (2.3)$$

Για την καλύτερη ψύξη του θερμού ρεύματος του αέρα υπερπλήρωσης, το ρεύμα του ψυκτικού μέσου οφείλει να είναι όσο το δυνατόν πιο ψυχρό καθώς εισέρχεται στο ψυγείο (Σχήμα 2.14). Συνεπώς, είναι προτιμότερο νερό ψύξης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος από το νερό του συστήματος ψύξης του κινητήρα. Ανάλογα με την εφαρμογή, το ψυγείο μπορεί να ψύχεται με αέρα ή με νερό, όπως προαναφέρθηκε. Σε μεγάλες εγκαταστάσεις προτιμάται η ψύξη με νερό, όπως στους ναυτικούς κινητήρες. Στον τομέα των αυτοκινήτων υπάρχουν και αερόψυκτα και υδρόψυκτα οχήματα.



Σχήμα 2.14: Σχηματική αναπαράσταση συστήματος ψύξης αέρα υπερπλήρωσης, όπου διακρίνεται η θέση του ψυγείου και ο συμβολισμός των ρευμάτων

Κεφάλαιο 3

Διβάθμια στροβιλο- υπερπλήρωση

3.1. Διάταξη στροβιλο-υπερπληρωτών

Η ανάγκη για μεγαλύτερη ισχύ σε συνδυασμό με μεγαλύτερη μέση ειδική πίεση (BMEP) έχει σαν αντίκτυπο την ανάγκη εισαγωγής στους κυλίνδρους μεγαλύτερης ποσότητας καυσίμου. Αν θεωρηθεί ότι ο λόγος αέρα-καυσίμου διατηρείται στο ίδιο επίπεδο, και η εισαγόμενη ποσότητα αέρα πρέπει να αυξηθεί. Αυτό, όμως, θα μπορούσε να οδηγήσει, σε έναν στροβιλο-υπερπληρωμένο κινητήρα, να λειτουργεί ο συμπιεστής του σε πιέσεις μεγαλύτερες των 3-3,5 bar. Απόρροια αυτού μπορεί να είναι είτε σημείο λειτουργίας εκτός του χάρτη του συμπιεστή είτε η μειωμένη απόδοση του στροβιλο-υπερπληρωτή.

Τα παραπάνω προβλήματα σε συνδυασμό με τον έλεγχο των εκπεμπόμενων ρύπων σύμφωνα με την νομοθεσία οδηγούν στην χρήση διβάθμιας διάταξης στροβιλο-υπερπληρωτών (Εικόνα 3.1).

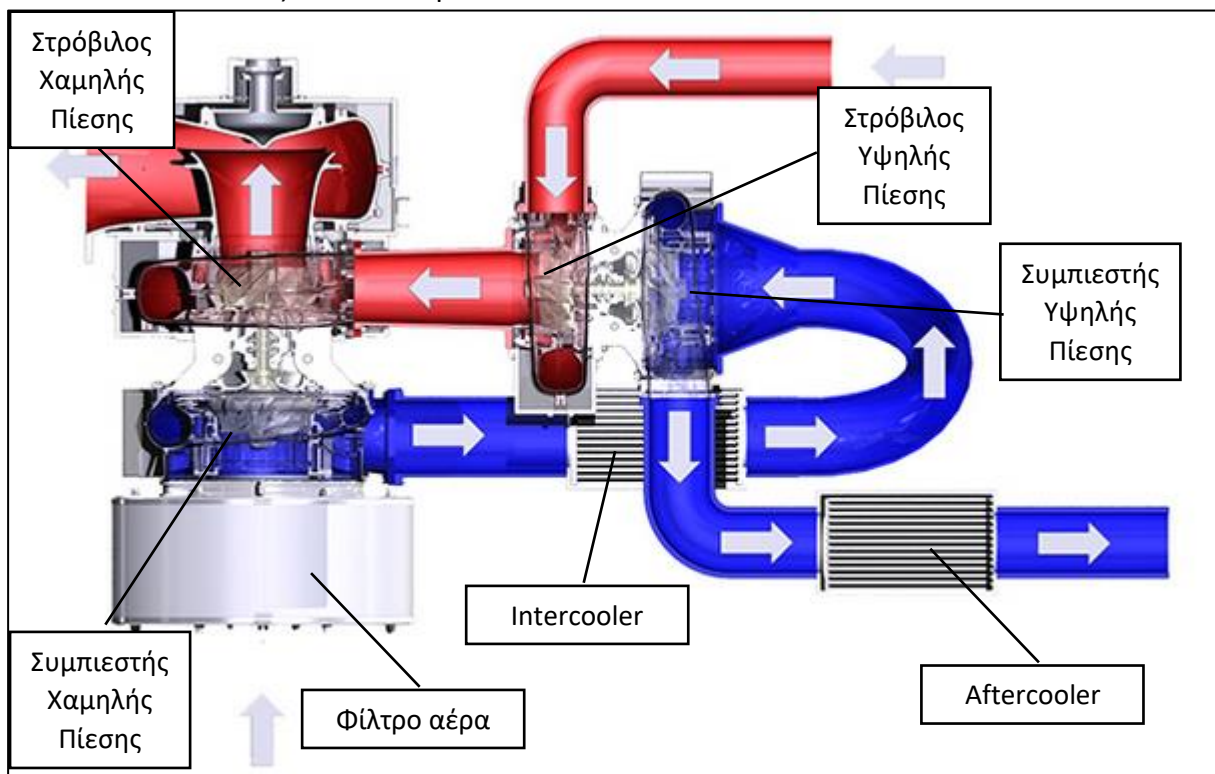


Εικόνα 3.1: Διβάθμια διάταξη στροβιλο-υπερπληρωτών της εταιρείας ABB

Η διάταξη αυτή περιλαμβάνει την συνεργασία δύο συμπιεστών σε σειρά και δύο στροβίλων σε σειρά, επίσης. Αναλυτικότερα, ο αέρας του περιβάλλοντος εισέρχεται στον πρώτο συμπιεστή (Low pressure compressor), όπου ανεβαίνει η πίεση του, και στην συνέχεια

εισέρχεται προσυμπιεσμένος πλέον στον δεύτερο συμπιεστή (High pressure Compressor). Ακολουθούν τα στάδια της καύσης εντός του θαλάμου της μηχανής εσωτερικής καύσης και η εξαγωγή των καυσαερίων από την πολλαπλή εξαγωγής. Αρχικά, τα καυσαέρια εκτονώνονται στον πρώτο στρόβιλο υψηλής πίεσης (High Pressure Turbine) και στην συνέχεια στον δεύτερο χαμηλής πίεσης (Low Pressure Turbine). Η παραπάνω διάταξη δεν πρέπει να συγχέεται με την παράλληλη σύνδεση (biturbo), όπου δύο συμπιεστές συμπιέζουν ταυτόχρονα, όντας παράλληλα συνδεδεμένοι, τον αέρα του περιβάλλοντος.

Λόγω των υψηλών λόγων πίεσης που επιτυγχάνονται, οι θερμοκρασίες είναι πολύ υψηλές, γεγονός με αρνητικά αποτελέσματα για την απόδοση του κινητήρα, όπως αναπτύχθηκε και στην παράγραφο 2.4. Η επίλυση αυτού του προβλήματος γίνεται μέσω ενός (intercooler) ή και δύο (intercooler-aftercooler) ιδανικά ψυγείων του αέρα στην πολλαπλή εισαγωγής (Εικόνα 3.2). Οφείλει, επίσης, να επισημανθεί ότι η διβάθμια στροβιλο-υπερπλήρωση έχει κυρίως εφαρμοστεί σε κινητήρες Diesel λόγω των υψηλών πιέσεων και θερμοκρασιών που αναπτύσσονται εντός των κυλίνδρων.



Εικόνα 3.2: Διβάθμια στροβιλο-υπερπλήρωση με Intercooler και Aftercooler

3.2. Έλεγχος στροβιλο-υπερπληρωτών

Η επιλογή των στροβιλο-συμπιεστών καθώς και των συστημάτων ελέγχου αυτών έχει σαν σκοπό την επίτευξη των στόχων, είτε αυτοί αφορούν υψηλή ισχύ είτε ροπή, στη μόνιμη ή τη μεταβατική κατάσταση λειτουργίας. Παράλληλα όμως, ο κινητήρας πρέπει να λειτουργεί και εντός κάποιων ορίων που αφορούν κυρίως την αντοχή των υλικών και τις εκπομπές ρύπων. Τέτοια όρια τίθενται από την θερμοκρασία πολλαπλής εξαγωγής, την υπερτάχυνση των

στροβίλο-συμπιεστών, τις εκπομπές αιθάλης που συνδέονται άμεσα με τον λόγο αέρα-καυσίμου και τις αναπτυσσόμενες πιέσεις και θερμοκρασίες εντός των κυλίνδρων.

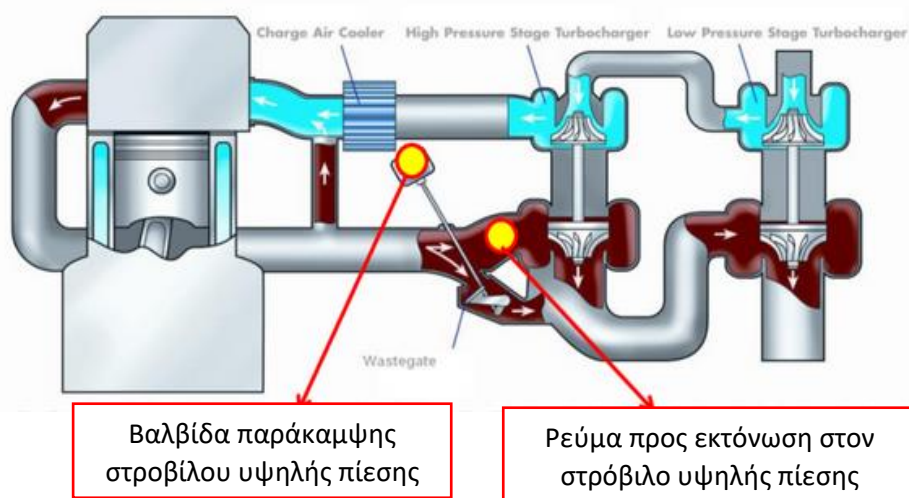
Τα συστήματα ελέγχου ενός συστήματος στροβίλο-υπερπλήρωσης αναφέρονται κυρίως στον έλεγχο της πίεσης υπερπλήρωσης. Για να λειτουργεί ο κινητήρας αποδοτικά και εντός ορίων, όπως αυτά που αναφέρθηκαν παραπάνω, η πίεση υπερπλήρωσης περιορίζεται συνήθως σε χαμηλότερα επίπεδα από τα μέγιστα που μπορούν να επιτευχθούν μέσω διαφόρων τρόπων (regulated two-stage turbocharging). Παρακάτω παρατίθενται μερικοί από τους τρόπους που έχουν εφαρμοστεί από διάφορες εταιρείες για τον έλεγχο της πίεσης.

Βαλβίδα παράκαμψης στο ζεύγος υψηλής πίεσης

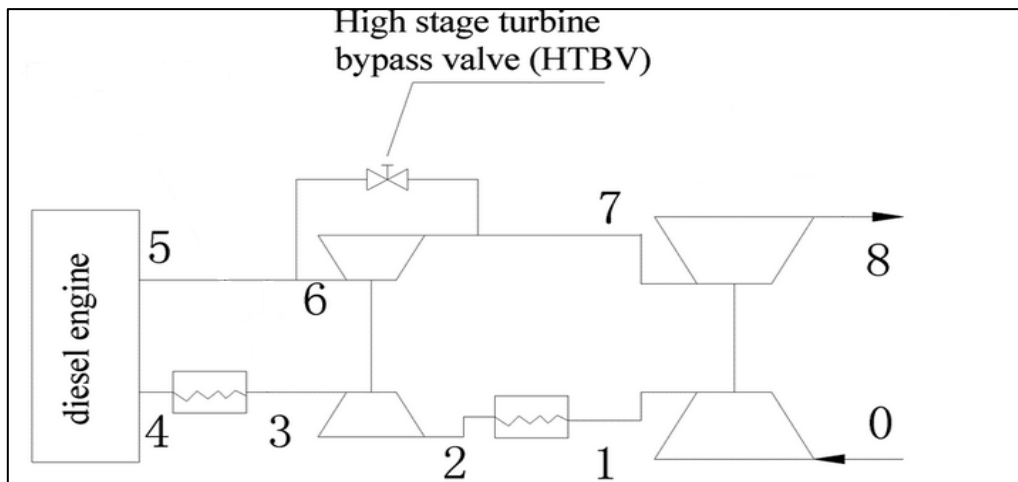
Είναι από τους απλούστερους τρόπους ελέγχου του συστήματος και εφαρμόζεται συνήθως στον στρόβιλο του ζεύγους (Εικόνα 3.3). Η εφαρμογή αυτής της μεθόδου απαιτεί την ύπαρξη αισθητήρα πίεσης στην σωλήνωση εισαγωγής μετά τον συμπιεστή υψηλής πίεσης, ενός ηλεκτρονικού συστήματος ελέγχου του ανοίγματος της βαλβίδας παράκαμψης και ενός επενεργητή (Εικόνα 3.4).

Αρχικά, ο αισθητήρας λαμβάνει μέτρηση της πίεσης μετά τον συμπιεστή υψηλής πίεσης. Το σήμα αυτό μέσω του ηλεκτρονικού συστήματος ελέγχου (controller) μεταφράζεται σε ποσοστό ανοίγματος της βαλβίδας παράκαμψης στον στρόβιλο. Το άνοιγμα της βαλβίδας μέσω του επενεργητή έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της διαθέσιμης ισχύς προς τον συμπιεστή, καθώς δεν εκτονώνεται στον στρόβιλο όλη η ποσότητα των καυσαερίων. Ο συμπιεστής δεν συμπιέζει περαιτέρω τον αέρα και άρα η πίεση υπερπλήρωσης διατηρείται σε επιτρεπτά όρια με το σημείο λειτουργίας να είναι μακριά από την γραμμή πάλμωσης.

Η ποσότητα του καυσαερίου που παρακάμφθηκε από τον στρόβιλο υψηλής πίεσης θα εισέλθει για εκτόνωση στον στρόβιλο χαμηλής πίεσης μαζί με το εκτονωμένο ρεύμα. Το ζεύγος χαμηλής πίεσης που χρησιμοποιείται σε αυτήν την περίπτωση είναι μεγαλύτερο από αυτό της επόμενης περίπτωσης (βαλβίδα παράκαμψης στον στρόβιλο χαμηλής πίεσης), έτσι ώστε να μπορεί να διαχειριστεί τον μεγάλο όγκο των καυσαερίων με αυξημένους λόγους πίεσης στις υψηλές στροφές. Υστερεί, ωστόσο, στις χαμηλές στροφές λόγω της μεγάλης αδράνειάς του. Το ταίριασμα κινητήρα και στροβίλο-υπερπληρωτών μπορεί να αποδώσει ένα πολύ ισορροπημένο σύστημα με πολύ καλή απόδοση [7].



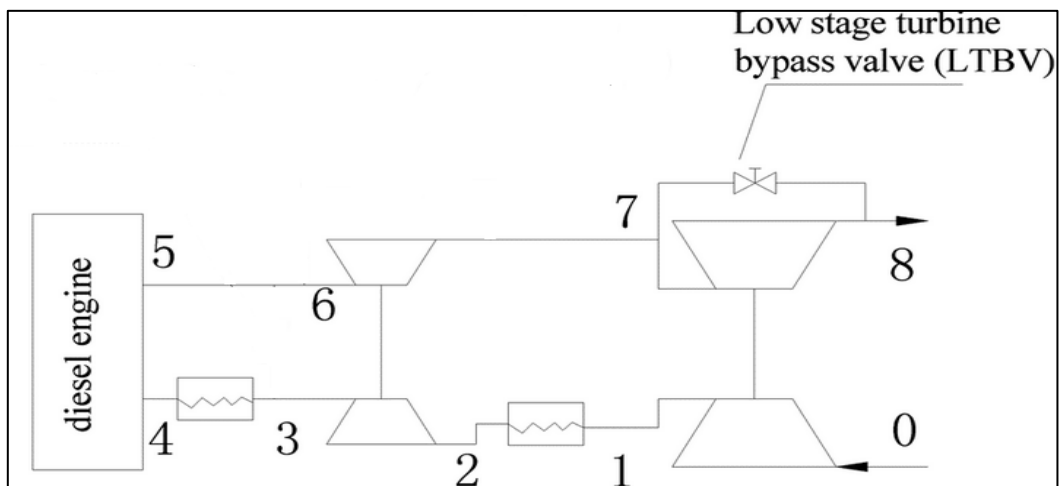
Εικόνα 3.3: Διάταξη ελέγχου με βαλβίδα παράκαμψης στο ζεύγος υψηλής πίεσης της εταιρείας Borgwarner



Εικόνα 3.4: Διάταξη Μ.Ε.Κ. διβάθμιας στροβιλο-υπερπλήρωσης με δύο ψυγεία και βαλβίδα παράκαμψης στο ζεύγος υψηλής πίεσης

Βαλβίδα παράκαμψης στο ζεύγος χαμηλής πίεσης

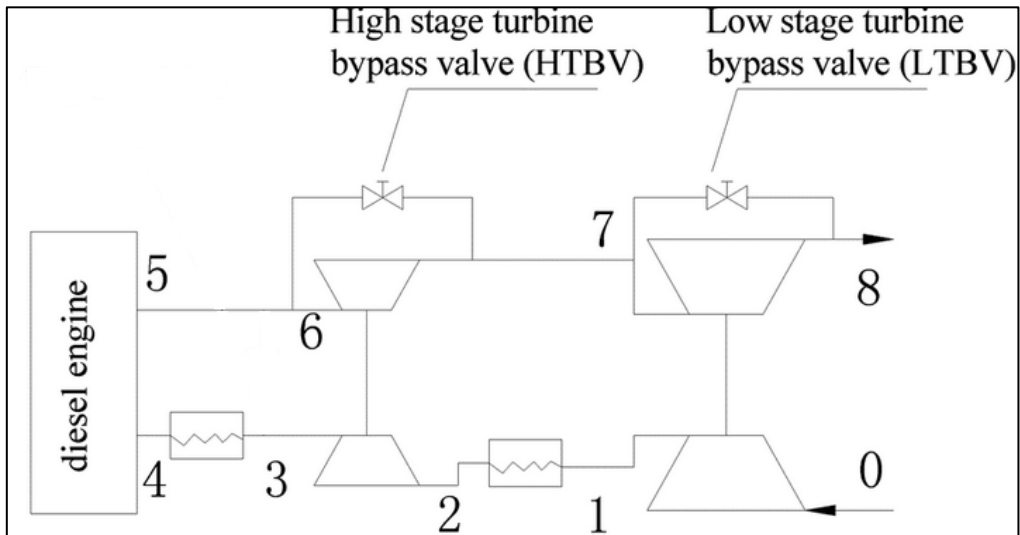
Ακολουθεί την σχεδίαση της παραπάνω περίπτωσης με τον αισθητήρα να λαμβάνει το σήμα της πίεσης από την σωλήνωση ακριβώς μετά τον συμπιεστή χαμηλής πίεσης. Το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου επενεργεί στο άνοιγμα της βαλβίδας παράκαμψης που βρίσκεται στον στρόβιλο χαμηλής πίεσης (Εικόνα 3.5). Υπό την ίδια φιλοσοφία, μειώνει την διαθέσιμη ισχύ προς τον συμπιεστή χαμηλής πίεσης συμβάλλοντας στην συνολική μείωση της πίεσης υπερπλήρωσης. Όπως προαναφέρθηκε, το ζεύγος χαμηλής πίεσης είναι σχετικά μικρό, με τον συμπιεστή να είναι παρόμοιου μεγέθους με αυτόν της υψηλής πίεσης. Οι δύο συμπιεστές συμβάλουν περίπου κατά το ίδιο ποσοστό στην συμπίεση του αέρα κατά τη λειτουργία τους.



Εικόνα 3.5: Διάταξη Μ.Ε.Κ. διβάθμιας στροβιλο-υπερπλήρωσης με δύο ψυγεία και βαλβίδα παράκαμψης στο ζεύγος χαμηλής πίεσης

Βαλβίδα παράκαμψης στο ζεύγος υψηλής πίεσης και στο ζεύγος χαμηλής πίεσης

Η διάταξη αυτή θα μπορούσε να λεχθεί ότι είναι συνδυασμός των δύο παραπάνω διατάξεων. Αποτελείται από βαλβίδες παράκαμψης και στα δύο ζεύγη στρόβιλο-υπερπληρωτών (Εικόνα 3.6). Η βαλβίδα που κατέχει πρωταρχική θέση στον έλεγχο της πίεσης υπερπλήρωσης είναι αυτή του ζεύγους υψηλής πίεσης. Η βαλβίδα του ζεύγους χαμηλής πίεσης υφίσταται κυρίως για την αποφυγή υπερταχύνσεων του αντίστοιχου ζεύγους.



Εικόνα 3.6: Διάταξη Μ.Ε.Κ. διβάθμιας στρόβιλο-υπερπλήρωσης με δύο ψυγεία και βαλβίδα παράκαμψης στο ζεύγος υψηλής πίεσης και χαμηλής.

Κεφάλαιο 4

Επίδραση Υψομέτρου

Η παρούσα διπλωματική επικεντρώνεται στην επίδραση του υψομέτρου. Για την μελέτη αυτή απαιτείται ανάλυση της επίδρασης της αλλαγής υψομέτρου στα θερμοδυναμικά μεγέθη της πίεσης και της θερμοκρασίας, όπως παρουσιάζεται παρακάτω. Η ανάλυση αφορά ένα κομμάτι της τροπόσφαιρας, μέχρι τα 3000m υψόμετρο, καθώς κρίνεται ότι μέχρι τέτοιου ύψους χρησιμοποιούνται πρακτικά οχήματα με υπερπληρωμένους κινητήρες.

4.1. Επίδραση στην ατμοσφαιρική πίεση

Η ατμοσφαιρική πίεση παίζει καθοριστικό ρόλο στην πυκνότητα του αέρα που θα εισέλθει στους κυλίνδρους. Κρίνεται συνεπώς απαραίτητη η διερεύνηση και μοντελοποίηση της μεταβολής αυτής με αξιόπιστο τρόπο για να προκύψουν ρεαλιστικά αποτελέσματα.

Η μεταβολή της πίεσης συναρτήσει της απόστασης h , ακτινικά εντός της τροπόσφαιρας, από την επιφάνεια της θάλασσας περιγράφεται από μαθηματικό πρότυπο του τύπου (Σχέση 4.1):

$$P_h = P_0 e^{-\frac{gh}{RT}} \quad (4.1)$$

Λαμβάνοντας τυπική τιμή της θερμοκρασίας τροπόσφαιρας μία μέση τιμή της τάξεως των 250K, η σχέση (4.1) γράφεται:

$$P_h = P_0 e^{-\frac{h}{17}} \quad (4.2)$$

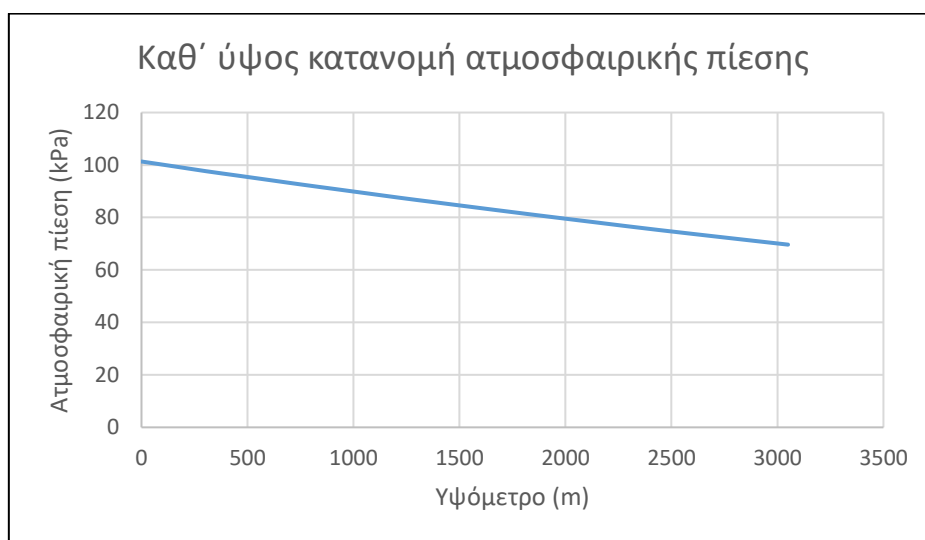
Η τιμή της ατμοσφαιρικής πίεσης στο επίπεδο της θάλασσας (μηδενικό υψόμετρο) μπορεί να ληφθεί ίση με 1 atm.

Στον παρακάτω πίνακα 4.1 καταγράφονται τιμές της πίεσης για υψόμετρα από 0m έως 3050m με βήμα 153 m.

Πίνακας 4.1: Καταγραφή τιμών πίεσης για υψόμετρα 0 ft έως 10000 ft (0 m έως 3050m)

| Altitude above Sea level | | Atmospheric Pressure | |
|--------------------------|--------|----------------------|--------|
| feet | meters | PSIA | kPa |
| 0 | 0 | 14,70 | 101,33 |
| 500 | 153 | 14,43 | 99,49 |
| 1000 | 305 | 14,16 | 97,63 |
| 1500 | 458 | 13,91 | 95,91 |

| | | | |
|-------|------|-------|-------|
| 2000 | 610 | 13,66 | 94,19 |
| 2500 | 763 | 13,41 | 92,46 |
| 3000 | 915 | 13,17 | 90,81 |
| 3500 | 1068 | 12,93 | 89,15 |
| 4000 | 1220 | 12,69 | 87,49 |
| 4500 | 1373 | 12,46 | 85,91 |
| 5000 | 1526 | 12,23 | 84,33 |
| 6000 | 1831 | 11,78 | 81,22 |
| 7000 | 2136 | 11,34 | 78,19 |
| 8000 | 2441 | 10,91 | 75,22 |
| 9000 | 2746 | 10,5 | 72,40 |
| 10000 | 3050 | 10,1 | 69,64 |



Διάγραμμα 4.1: Καθ' ύψος μεταβολή ατμοσφαιρικής πίεσης

4.2. Επίδραση στη θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα

Γενικά εντός της ατμόσφαιρας η θερμοκρασία του αέρα και ελαττώνεται και αυξάνεται καθ' ύψος. Άρα, ο ζητούμενος ρυθμός προκύπτει αρνητικός και θετικός αντίστοιχα. Για την εκτίμηση του ρυθμού αυτού χρησιμοποιείται η παράμετρος της 'κατακόρυφης θερμοβαθμίδας' (γ). Αυτή ορίζεται ως η μεταβολή της θερμοκρασίας (ϑ) του αέρα ανά μονάδα ύψους (h) (Σχέση 4.3):

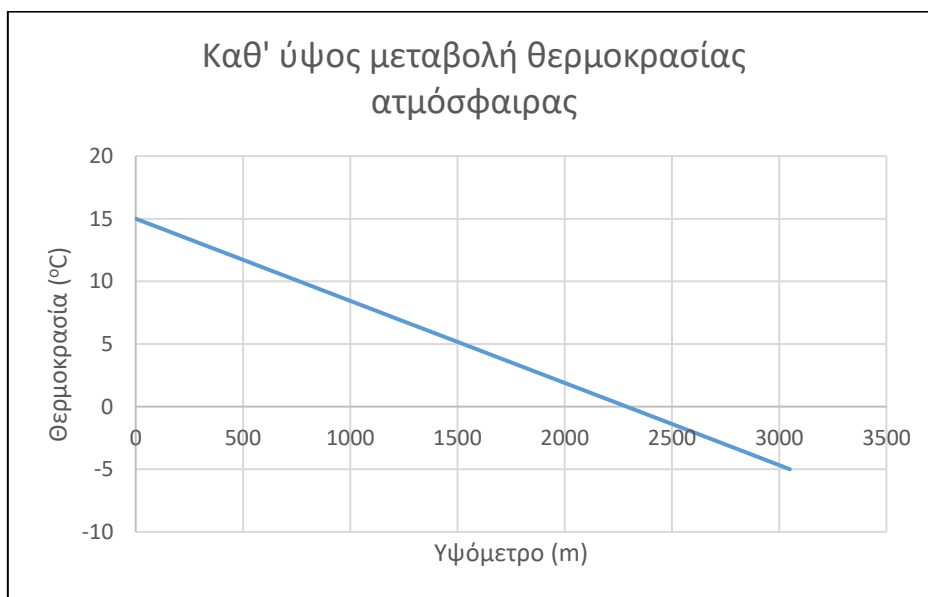
$$\gamma = \delta\vartheta / \delta h \quad (4.3)$$

Για την τροπόσφαιρα ισχύει $\gamma = -0,6^\circ\text{C}/100\text{m}$. Το αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει ότι η θερμοκρασία ελαττώνεται μέσα στην τροπόσφαιρα με το ύψος. Αν και υπάρχουν περιοχές εμφάνισης θετικών θερμοβαθμίδων, που η θερμοκρασία αυξάνει με το ύψος (περιοχές αναστροφής), αυτές δεν θα ληφθούν υπόψιν στην παρούσα ανάλυση. Τέλος, η μείωση της θερμοκρασίας με το ύψος, συνολικά μέσα στην τροπόσφαιρα, είναι αποτέλεσμα του ενεργειακού ελλείματος που παρουσιάζεται, καθώς η ακτινοβολία που εκπέμπεται από την τροπόσφαιρα είναι μεγαλύτερη ποσοτικά από εκείνη που απορροφά σε κάθε χρονική στιγμή.

Στον παρακάτω πίνακα 4.2 καταγράφονται οι τιμές της θερμοκρασίας καθ' ύψος.

Πίνακας 4.2: Τιμές θερμοκρασίας ατμοσφαιρικού αέρα καθ' ύψος

| Altitude above Sea level | | Temperature |
|--------------------------|--------|-------------|
| feet | meters | ° C |
| 0 | 0 | 15 |
| 500 | 153 | 14 |
| 1000 | 305 | 13 |
| 1500 | 458 | 12 |
| 2000 | 610 | 11 |
| 2500 | 763 | 10 |
| 3000 | 915 | 9 |
| 3500 | 1068 | 8 |
| 4000 | 1220 | 7 |
| 4500 | 1373 | 6 |
| 5000 | 1526 | 5 |
| 6000 | 1831 | 3 |
| 7000 | 2136 | 1 |
| 8000 | 2441 | -1 |
| 9000 | 2746 | -3 |
| 10000 | 3050 | -5 |



Διάγραμμα 4.2: Καθ' ύψος μεταβολή θερμοκρασίας ατμόσφαιρας

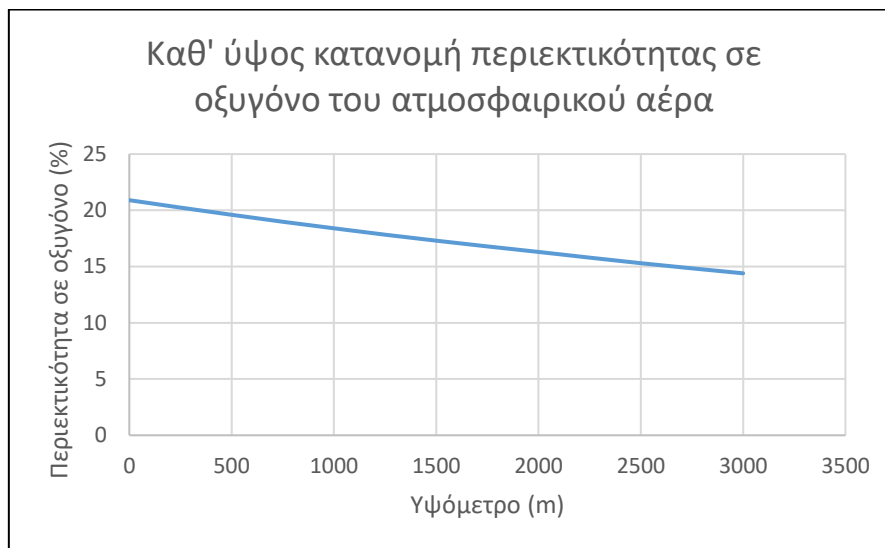
Είναι φανερό ότι η μεταβολή στην πίεση και την θερμοκρασία από το επίπεδο της θάλασσας, στα 3 km περίπου είναι αρκετή για να επηρεαστεί η πυκνότητα και συνεπώς η λειτουργία του κινητήρα. Το γεγονός αυτό ωθεί στην εφαρμογή της στροβιλο-υπερπλήρωσης και την μελέτη αυτής όχι μόνο στην απόδοση του κινητήρα, αλλά και στις εκπομπές ρύπων. Ο τρόπος σχηματισμού και η εκπομπή ρύπων μελετάται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 5.

4.3 Επίδραση στην περιεκτικότητα κατά μάζα του αέρα σε οξυγόνο

Η σύσταση της ατμόσφαιρας δεν είναι σταθερή. Το κατώτερο τμήμα της ατμόσφαιρας, δηλαδή ο αέρας, αποτελείται κυρίως από άζωτο, οξυγόνο και ίχνη από αργό, υδρατμούς, διοξείδιο του άνθρακα και άλλα αέρια.

Η σύσταση του αέρα εξαρτάται από παράγοντες, όπως η τοπική μορφολογία του εδάφους, το κλίμα και το υψόμετρο. Όσον αφορά το υψόμετρο, στο επίπεδο της θάλασσας η σύσταση του καθαρού και ξηρού αέρα (χωρίς υδρατμούς κονιορτούς και αερολύματα) είναι άζωτο 78%, οξυγόνο 21% και άλλα αέρια 1%. Για την υγρασία του αέρα καθοριστικοί παράγοντες είναι η μορφολογία του εδάφους και το κλίμα. Για την ανάλυση της λειτουργίας του εξεταζόμενου κινητήρα στην παρούσα διπλωματική γίνεται η παραδοχή τυπικών τιμών υγρασίας.

Τα ποσοστά περιεκτικότητας σε οξυγόνο κατά μάζα του ατμοσφαιρικού αέρα απεικονίζονται ανά 500m στο διάγραμμα 4.3:



Διάγραμμα 4.3: Καθ' ύψος κατανομή περιεκτικότητας κατά μάζα σε οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα

Κεφάλαιο 5

Σχηματισμός

και

εκπομπή ρύπων

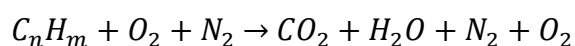
5.1. Γενικά

Το πρόβλημα της εκπομπής ρύπων ήρθε στο προσκήνιο την δεκαετία του 1970 και κορυφώθηκε το 1980. Η απαρχή του προβληματισμού πάνω σε αυτό το αντικείμενο έγινε την δεκαετία του '60 μετά την έντονη εκδήλωση φωτοχημικού νέφους στην πόλη του Los Angeles (ΗΠΑ). Το νέφος προερχόταν κυρίως από τις εκπομπές ρύπων των κινητήρων Otto των αυτοκινήτων. Τα μέτρα αντιμετώπισης αυτού επικεντρώθηκαν κυρίως στην βελτίωση του μηχανισμού καύσης είτε με κατάλληλο σχεδιασμό του θαλάμου είτε με μέσα περιστολής, όπως παγίδες και καταλύτες.

Η ανάλυση της εκπομπής ρύπων αποτελεί αντικείμενο και της παρούσας διπλωματικής, όπως και η παρατήρηση της επίδρασης της υπερπλήρωσης σε αυτήν.

Ο σχηματισμός των ρυπογόνων ουσιών είναι αποτέλεσμα της χημικής διάστασης των προϊόντων της καύσης λόγω των αναπτυσσόμενων υψηλών θερμοκρασιών στον θάλαμο καύσης. Οι μέγιστες θερμοκρασίες και το θερμοκρασιακό προφίλ γενικά εντός του θαλάμου αποτελεί σύνθετο φαινόμενο με επίδραση από την ορμή, την θερμοχημική κατάσταση του ρευστού, τις ρυθμίσεις του κινητήρα, την σχεδίαση αυτού κ.α. και μπορεί να φτάσουν τοπικά ακόμη και τους 3000 K.

Τα προϊόντα της καύσης, με την παραδοχή ότι αυτή είναι τέλεια και δεν υφίσταται χημική διάσταση, δίνονται από την ακόλουθη ολική χημική αντίδραση:



στην οποία παραλείπονται οι στοιχειομετρικοί συντελεστές και συνεπώς έχει μόνο ποιοτική αξία.

Η πραγματοποίηση, όμως, διάστασης των παραπάνω χημικών ενώσεων, των προϊόντων της τέλει καύσης, έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση ριζών και μερικών ασταθών ενώσεων στα προϊόντα. Τέτοιες ενώσεις είναι οι ακόλουθες: H₂O, H₂, O₂, N₂, N, O, OH, H, CO, CO₂, NO, HC, O₃, αλδεΐδες, κετόνες κ.α..

Από αυτές τις ενώσεις ρυπογόνες θεωρούνται κυρίως τα NO_x, το CO και οι HC. Για τους κινητήρες Diesel προστίθεται και η αιθάλη που εκπέμπεται από την καύση. Οι παραπάνω ρυπογόνες ουσίες αποτελούν τους λεγόμενους 'ελεγχόμενους ρύπους' (regulated emissions). Η εξαγωγή από την εξάτμιση του οχήματος των ελεγχόμενων ρύπων περιορίζεται και

υπαγορεύεται από την νομοθεσία σε συγκεκριμένα επίπεδα συγκέντρωσης. Η ύπαρξη νομοθεσίας για τους ρύπους υφίσταται κυρίως σε ανεπτυγμένες χώρες, όπως οι Η.Π.Α., η Ε.Ε., η Κίνα και η Ιαπωνία. Η μέτρηση αυτών γίνεται με προδιαγεγραμμένες μεθόδους και συσκευές.

5.2. Σχηματισμός οξειδίων του αζώτου NO_x

5.2.1. Γενικά

Το άζωτο αποτελεί κύριο συστατικό της ατμόσφαιρας και μάλιστα αδρανές αέριο εντός του ατμοσφαιρικού αέρα. Παρόλο, όμως, που είναι αδρανές στις συνήθεις συνθήκες της ατμόσφαιρας, στις συνθήκες που επικρατούν μέσα στον θάλαμο καύσης με τις θερμοκρασίες να φτάνουν τους 2500-3000 K, ποσοστό του αζώτου του καύσιμου μείγματος αντιδράει με το οξυγόνο και παράγει οξείδια του αζώτου (NO_x).

Οι αντιδράσεις που περιλαμβάνουν οξείδια του αζώτου εξελίσσονται πιο αργά από τις αντιδράσεις οξειδωσης των καυσίμων. Αυτός είναι και ο λόγος που ο σχηματισμός των οξειδίων αυτών πραγματοποιείται κυρίως σε υψηλές θερμοκρασίες κατά την καύση, όταν έχει αρχίσει και οξειδώνεται το καύσιμο και αποδίδει θερμότητα εντός του κυλίνδρου.

Η συγκέντρωση των NO_x στην εξαγωγή του κινητήρα εμφανίζεται σε ποσοστά ίδιας τάξης μεγέθους σε κινητήρες Otto και Diesel, με τους κινητήρες Otto να εμφανίζουν συγκριτικά λίγο μεγαλύτερες τιμές.

Ο όρος οξείδια του αζώτου περιλαμβάνει το μονοξείδιο του αζώτου NO, το NO₂ και ίχνη άλλων οξειδίων όπως N₂O₅.

Τα NO_x αποτελούν κύριο παράγοντα σχηματισμού του φωτοχημικού νέφους και καταστροφής της οζονόσφαιρας([12],[13],[14]). Πιο συγκεκριμένα, το NO είναι υπεύθυνο για το φαινόμενο της όξινης βροχής και το N₂O για την καταστροφή του όζοντος. Ταυτόχρονα, τα οξείδια του αζώτου αντιδρούν στην ατμόσφαιρα με άλλες οργανικές ενώσεις και δημιουργούν τοξικές ενώσεις, όπως οι νιτροζαμίνες.

Η όξινη βροχή, στον σχηματισμό της οποίας συμμετέχουν τα οξείδια του αζώτου, είναι υπεύθυνη για σημαντικές καταστροφές στη χλωρίδα και στην πανίδα, καθώς μεταβάλλει το pH του εδάφους και των λιμνών-ποταμών. Παρεμποδίζεται η απορρόφηση σημαντικών ουσιών των φυτών από το έδαφος και μειώνεται η βιοποικιλότητα.

Όσον αφορά την καταστροφή του όζοντος, η λωρίδα του όζοντος χρησιμεύει στην προστασία της χλωρίδας, της πανίδας και γενικά των ζώντων οργανισμών από την απευθείας έκθεση στην υπεριώδη ακτινοβολία. Η λέπτυνση της ζώνης αυτής μπορεί να αποβεί καταστροφική για τα φυτά, τις υδρόβιες μορφές ζωής και τον ίδιο τον άνθρωπο.

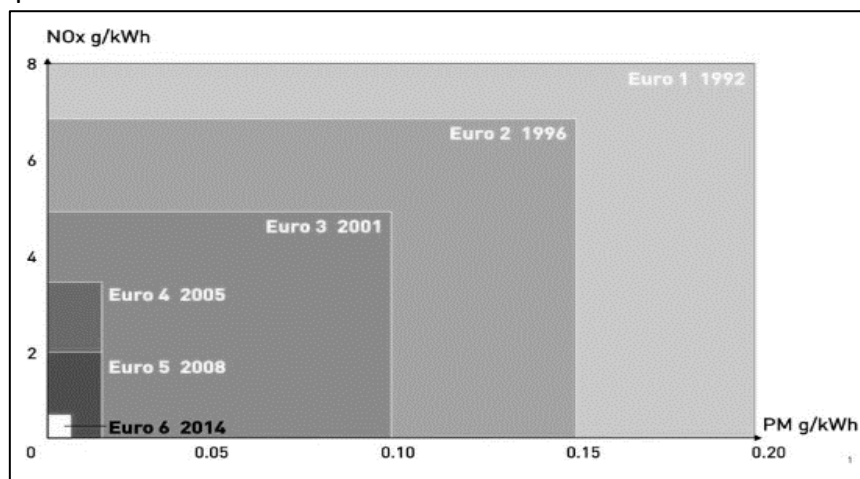
Πιο αναλυτικά για τον άνθρωπο η επίδραση των σχηματιζόμενων ενώσεων στα καυσαέρια είναι:

Το NO είναι άχρωμο αέριο που για σύντομη έκθεση του ανθρώπου σε αυτό προκαλεί οπτικές διαταραχές και ενοχλήσεις του αναπνευστικού συστήματος, ναυτία και πονοκέφαλο. Για μακροχρόνια έκθεση σε αυτό και μάλιστα σε υψηλές συγκεντρώσεις προκαλεί σοβαρές βλάβες στην αναπνευστική οδό και μπορεί να οδηγήσει και σε πρόωρο θάνατο.

Το NO₂ έχει έντονη οσμή και είναι άκρως οξειδωτικό. Η εισπνοή αυτού σε μεγάλες συγκεντρώσεις μπορεί να προκαλέσει ακόμα σοβαρότερα προβλήματα από αυτά του NO, όπως πνευμονίτιδα και οιδήματα στην αναπνευστική οδό. Όμως, οι συγκεντρώσεις των ρύπων αυτών είναι γενικά χαμηλές στην ατμόσφαιρα αποτελώντας όχι τόσο άμεσο κίνδυνο για την υγεία και την σωματική ακεραιότητα του ανθρώπου.

Όσον αφορά τα σωματίδια, το μέγεθος αυτών έχει ένα ευρύ πεδίο 20nm έως 10 μm, γεγονός που τα καθιστά αναπνεύσιμα. Η εισπνοή σωματιδίων και η συσσώρευση αυτών στο αναπνευστικό σύστημα είναι άκρως επιβλαβής. Όσο μικρότερη η διάμετρος των σωματιδίων τόσο πιο τοξικά και όσο μεγαλύτερη τόσο πιο εύκολα επικάθονται στις διόδους της αναπνευστικής οδού, όπως τα τριχοειδή αγγεία.

Η εξέλιξη της τεχνολογίας, όμως, αποτέλεσε εμπόδιο στην διαιώνιση αυτού του φαινομένου. Η θέσπιση νομοθεσίας για την υπαγόρευση των επιτρεπτών ορίων εκπομπής των μετρούμενων ρύπων αποτέλεσε κομβικό σημείο στην εξέλιξη των μέσων αντιμετώπισης της ρύπανσης. Στο Σχήμα 5.1 φαίνεται η διαχρονική εξέλιξη στον περιορισμό της επιτρεπόμενης συγκέντρωσης των NO_x και των σωματιδίων αιθάλης στους κινητήρες Diesel. Η μείωση των ορίων ώθησε την εξέλιξη των μέσων μέτρησης της συγκέντρωσης των ελεγχόμενων ρύπων.



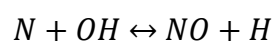
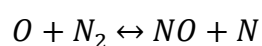
Σχήμα 5.1: Διαχρονική μείωση επιτρεπόμενων ορίων [NO_x] και σωματιδίων [PM]

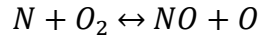
Παρατηρείται από το 2014, περιορισμός των NO_x στο 1:16 της αρχικής επιτρεπόμενης τιμής του προτύπου Euro 1 (1992).

5.2.2. Μηχανισμός σχηματισμού μονοξειδίου του αζώτου NO

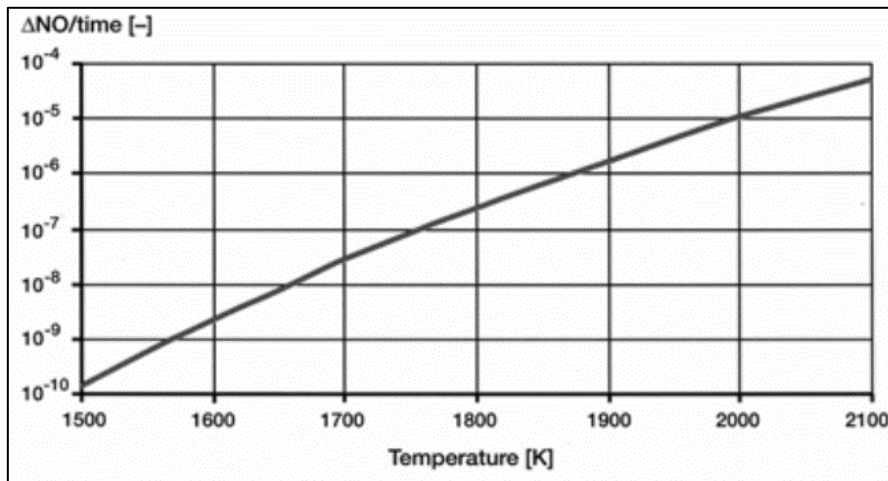
Το NO προέρχεται κυρίως από την οξείδωση του αζώτου του ατμοσφαιρικού αέρα σε συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας, και σε πολύ μικρότερο βαθμό (έως αμελητέο) από την οξείδωση του αζώτου που μπορεί να περιέχεται μέσα στο καύσιμο.

Οι στοιχειώδεις αντιδράσεις που περιγράφουν τον σχηματισμό του NO είναι οι ακόλουθες τρεις (μοντέλο Zeldovich):





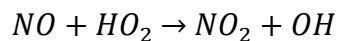
Το NO σχηματίζεται σε περιοχές υψηλής θερμοκρασίας εντός της καϊόμενης ζώνης λόγω, όπως προαναφέρθηκε, της οξείδωσης του αζώτου του καϊόμενου μείγματος (αέρα και αεριοποιημένου καυσίμου). Κατά την φάση της αποτόνωσης στον κύκλο λειτουργίας, με ανοιχτή την βαλβίδα εξαγωγής πέφτει η πίεση και η θερμοκρασία εντός του κυλίνδρου και συνεπώς κάποιες αντιδράσεις που ενεργοποιούνται σε υψηλές θερμοκρασίες 'παγώνουν'. Σταματάει λοιπόν και ο σχηματισμός του NO και η περαιτέρω οξείδωση αυτού σε NO₂. Συνεπώς, στην εξαγωγή του κινητήρα εντοπίζονται πολύ μεγαλύτερες συγκεντρώσεις NO απ' ό,τι οι συγκεντρώσεις ισορροπίας. Συμπερασματικά, η χημική κινητική είναι αυτή που καθορίζει την εξέλιξη του φαινομένου και όχι η χημική ισορροπία, ενώ ο ρυθμός σχηματισμού του NO είναι άμεσα εξαρτώμενος από την θερμοκρασία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2.



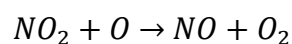
Σχήμα 5.2: Ρυθμός σχηματισμού NO συναρτήσει της θερμοκρασίας (για συγκέντρωση O₂ στα καυσαέρια 3%) [5]

5.2.3. Μηχανισμός σχηματισμού διοξειδίου του αζώτου NO₂

Κύριος μηχανισμός σχηματισμού του διοξειδίου του αζώτου (NO₂) είναι η ταχύτερη οξείδωση του NO, που έχει δημιουργηθεί εντός του θαλάμου καύσης, σύμφωνα με την παρακάτω χημική αντίδραση:



Αντιστρόφως, το NO₂ μπορεί να μετατραπεί σε NO σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση:



Η παραπάνω αντίδραση προωθείται προς τα δεξιά, με εξαίρεση περιοχές όπου το NO₂ αναμειγνύεται με ψυχρότερο ρευστό. Τέτοιες περιοχές εντοπίζονται στα χαμηλά φορτία των κινητήρων Diesel που υπάρχουν έντονα ανομοιόμορφες κατανομές καυσίμου στις ψυχρές περιοχές και τα ποσοστά του NO₂ γενικά δεν μπορούν να θεωρηθούν αμελητέα. Πιο

συγκεκριμένα, στα χαμηλά φορτία των κινητήρων Diesel τα NO₂ αποτελούν το 10-25% των συνολικά εκπεμπόμενων οξειδίων του αζώτου.

5.2.4. Σχηματισμός και απορρόπηση των NO_x σε κινητήρες Diesel

Εφόσον, η παρούσα μελέτη διαπραγματεύεται την επίδραση του υψομέτρου σε κινητήρες υπερπληρωμένους και ο κινητήρας που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση είναι Diesel, κρίνεται απαραίτητη η εμβάθυνση στους μηχανισμούς σχηματισμού των ρύπων στους κινητήρες αυτούς.

Το πρώτο στάδιο της καύσης στους κινητήρες Diesel περιλαμβάνει την προετοιμασία του υγρού εγχυόμενου στον θάλαμο καυσίμου. Η ατμοποίηση του υγρού καυσίμου ακολουθεί την έγχυση. Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών και πίεσης έγχυσης που επικρατούν, το υγρό εξατμίζεται και στην συνέχεια αναμειγνύεται με τον αέρα που έχει ήδη εισαχθεί. Λόγω της ανομοιομόρφης ανάμειξης παρατηρείται μεγάλη στρωμάτωση στην κατανομή της θερμοκρασίας καθώς και της συγκέντρωσης του καυσίμου εντός του κυλίνδρου.

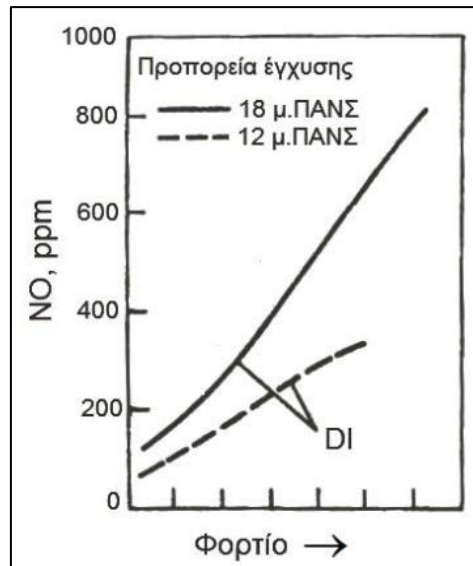
Στο δεύτερο στάδιο της καύσης λαμβάνει χώρα ανεξέλεγκτη καύση του αέριου μείγματος. Επειδή η καύση είναι ανεξέλεγκτη, η φλόγα είναι τοπικά προανάμειξης και επικρατούν τιμές του λόγου ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα κοντά στην στοιχειομετρία. Για τον λόγο αυτό η θερμοκρασία είναι ιδιαίτερα υψηλή και συνεπώς σχηματίζεται μεγάλη ποσότητα οξειδίων του αζώτου.

Κατά το τρίτο στάδιο, η καύση γίνεται ελεγχόμενη και υφίσταται συνεχής εξάπλωση της δέσμης του καυσίμου και καύση στα όρια αυτής. Οι ζώνες αντίδρασης (φλόγα) έρχονται σε επαφή με τον ψυχρότερο αέρα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την πτώση της θερμοκρασίας και το 'πάγωμα' των αντιδράσεων οξείδωσης του NO ή διάσπασης αυτού στα συστατικά του.

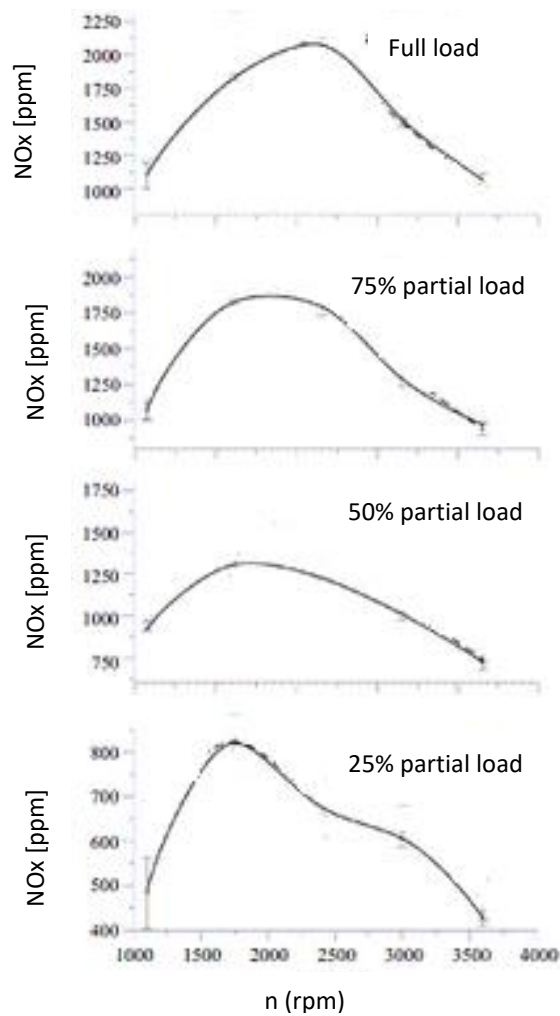
Επίδραση παραμέτρων λειτουργίας

- **Φορτίο:** το φορτίο στους κινητήρες Diesel ρυθμίζεται ποιοτικά με το εύρος του λόγου ισοδυναμίας καυσίμου να κυμαίνεται από 1,3 περίπου στο πλήρες φορτίο έως 7 στο κενό φορτίο. Επειδή στο πλήρες φορτίο η τιμή πλησιάζει την στοιχειομετρική, οι θερμοκρασίες θα είναι υψηλότερες και οι εκπομπές NO_x μεγαλύτερες. Ακόμη, επειδή υπάρχει ανομοιομόρφη ανάμειξη αέρα και καυσίμου, υπάρχουν περιοχές που πλησιάζουν την στοιχειομετρία. Και σε αυτήν την περίπτωση όπως και πριν, τα οξείδια του αζώτου θα είναι αυξημένα.

Στους κινητήρες Diesel άμεσης έγχυσης (DI) παρατηρείται ότι η εκπομπή NO αυξάνεται συνεχώς αυξανόμενου του φορτίου. Οι παραπάνω παρατηρήσεις φαίνονται στα Σχήματα 5.3 και 5.4.



Σχήμα 5.3: Επίδραση φορτίου στην παραγωγή NO_x σε κινητήρα Diesel άμεσης έγχυσης με παράμετρο την προπορεία έγχυσης. [2]



Σχήμα 5.4: Επίδραση φορτίου και ταχύτητας περιστροφής κινητήρα στις εκπομπές NO_x κινητήρα Diesel

- Προπορεία Έγχυσης: με την αύξηση της προπορείας παρατηρείται αύξηση των εκπομπών NOx σε κινητήρες Diesel άμεσης έγχυσης, λόγω της αύξησης της πίεσης και της θερμοκρασίας του καύσιμου και του αέρα εντός του κυλίνδρου, όπως φανερώνεται και από το Σχήμα 5.3.
- Ποσοστό παραμένουτος καυσαερίου: η αύξηση του ποσοστού του παραμένουτος καυσαερίου στον θάλαμο καύσης έχει σαν αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση της συγκέντρωσης των NOx. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην απορρόφηση ενέργειας εντός του θαλάμου καύσης από το 'αδρανές' καυσαέριο. Επίσης, η αύξηση της ειδικής θερμοχωρητικότητας του ρευστού εντός του κυλίνδρου οδηγεί σε πτώση της πίεσης και της θερμοκρασίας εντός της ζώνης αντίδρασης. Το γεγονός αυτό εκμεταλλεύεται και η ανακυκλοφορία καυσαερίου (EGR).

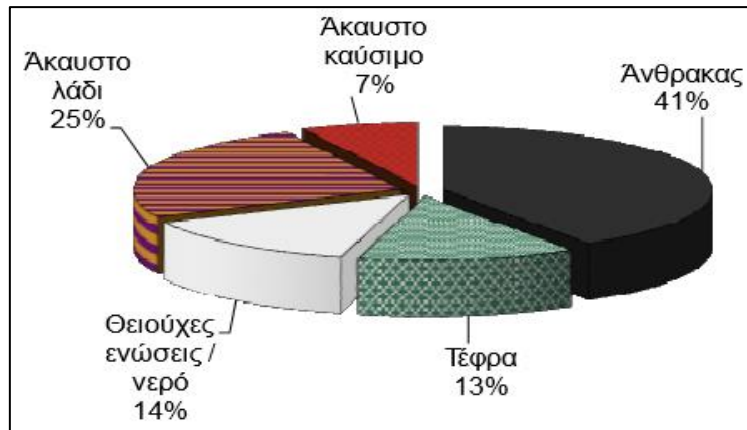
5.3. Σχηματισμός σωματιδίων αιθάλης

5.3.1. Γενικά

Τα σωματίδια αιθάλης (soot) είναι ίσως ο πιο χαρακτηριστικός εκπεμπόμενος ρύπος των κινητήρων Diesel. Κι αυτό γιατί είναι υπεύθυνα για τον μαύρο καπνό που εκπέμπεται ιδιαίτερα στα υψηλά φορτία. Τα σωματίδια αιθάλης είναι γνωστά στην διεθνή βιβλιογραφία ως 'PM' (Particulate Matter) και η αιθάλη γενικότερα ως 'soot'.

Κύριο συστατικό των σωματιδίων είναι ο στερεός ατομικός άνθρακας και πτητικές ενώσεις υδρογονανθράκων προσκολλημένες γύρω από αυτόν. Τα σωματίδια, που προέρχονται από την καύση του πετρελαίου, αποτελούνται δηλαδή από ανθρακούχο υλικό (αιθάλη) παραγόμενο κατά τη διάρκεια της καύσης, στο οποίο έχουν απορροφηθεί κάποια οργανικά συστατικά. Τα συστατικά αυτά προέρχονται από άκαυστο καύσιμο και το λιπαντικό έλαιο του κινητήρα. Περιέχονται, επίσης, ουσίες όπως ρινίσματα μετάλλων, λόγω φθοράς των μηχανικών μερών, και άλατα του καυσίμου.

Συνήθως, ο διαχωρισμός των σωματιδίων γίνεται σε ένα διαλυτό οργανικό μέρος και σε ένα μη διαλυτό, εκ των οποίων το μη διαλυτό χρησιμοποιείται συχνά για την εκτίμηση του ποσού αιθάλης. Το ποσοστό αιθάλης που περιέχεται στα σωματίδια στην εξάτμιση κινητήρα Diesel ποικίλει. Συνήθως, όμως, κυμαίνεται σε ποσοστά υψηλότερα του 40-50%. Τυπική σύσταση καυσαερίων στην εξάτμιση κινητήρα Diesel οχήματος βαρέος τύπου κατά τη διάρκεια δοκιμής σε κύκλο πόλης φαίνεται στο Σχήμα 5.7:

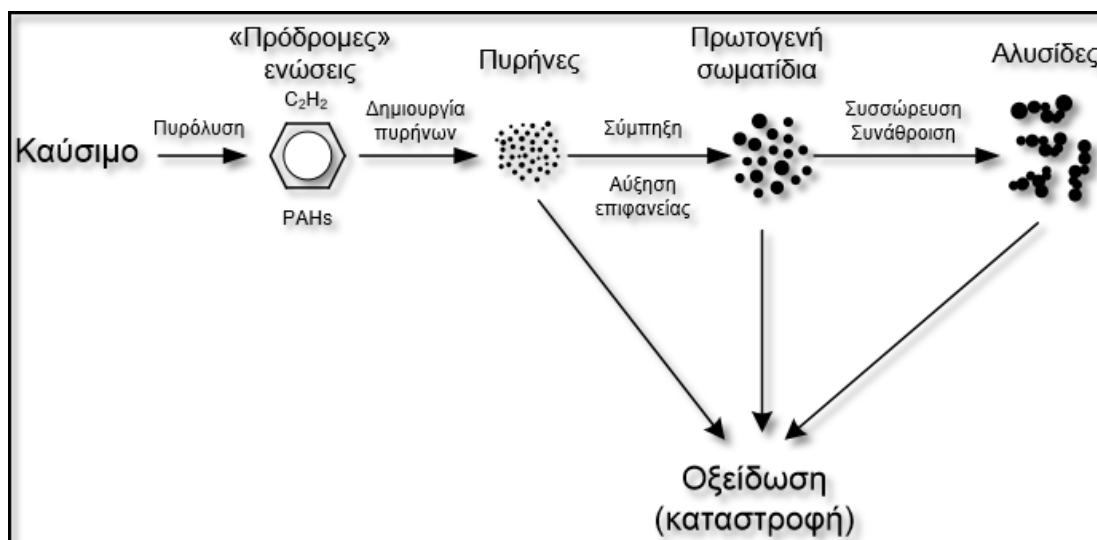


Σχήμα 5.7: Σύσταση καυσαερίων κινητήρα Diesel φορτηγού κατά τη διάρκεια κύκλου Πόλης[3]

Το κλάσμα των θειούχων ενώσεων είναι προσεγγιστικά ανάλογο με το κλάσμα του περιεχόμενου στο καύσιμο θείου, άρα εξαιρετικά μειωμένο τα τελευταία χρόνια με βάση τα επιτρεπόμενα από τη νομοθεσία όρια. Το κλάσμα που σχετίζεται με το άκαυστο καύσιμο και λιπαντικό του κινητήρα ποικίλει ανάλογα με τη σχεδίαση του κινητήρα και τις συνθήκες λειτουργίας αυτού. Το εύρος αυτού ξεκινάει από τιμές μικρότερες του 10% και μπορεί να ξεπεράσει το 90%, αναλόγως το καύσιμο.

5.3.2. Μηχανισμός σχηματισμού σωματιδίων αιθάλης

Η αιθάλη δημιουργείται από άκαυστο καύσιμο το οποίο σχηματίζει σωματίδια από την αέρια φάση στη στερεά σε περιοχές πλούσιες σε καύσιμο και με υψηλές θερμοκρασίες. Ανάλογα με τις περιβάλλουσες συνθήκες που επικρατούν, υδρογονάνθρακες ή άλλα διαθέσιμα μόρια συμπυκνώνονται ή απορροφώνται από την αιθάλη. Η εξέλιξη της υγρής ή αέριας φάσης των υδρογονανθράκων σε στερεά σωματίδια αιθάλης περιλαμβάνει έξι κοινά αναγνωρισμένες διαδικασίες (Σχήμα 5.8):



Σχήμα 5.8: Μηχανισμός δημιουργίας και καταστροφής σωματιδίων εντός θαλάμου κινητήρα Diesel [3]

- Πυρόλυση (Pyrolysis): αποτελεί ενδόθερμη διαδικασία, η οποία μεταβάλλει τη μοριακή δομή του καυσίμου υπό υψηλή θερμοκρασία και παράγει ενώσεις, όπως οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs), που θεωρούνται πρόδρομοι της αιθάλης.
- Δημιουργία Πυρήνων (Nucleation): περιλαμβάνει σχηματισμό πυρήνων ή νανοσωματιδίων από ασταθή υλικά, όπως οι υδρογονάνθρακες.
- Επιφανειακή αύξηση (Surface growth): είναι η διαδικασία προσθήκης μάζας στην επιφάνεια ενός σωματιδίου αιθάλης.
- Σύμπληξη (Coagulation): χαρακτηρίζει τις βίαιες συγκρούσεις των σφαιρικών σωματιδίων που οδηγούν στην ένωσή τους και το σχηματισμό μεγαλύτερων σωματιδίων.
- Συσσώρευση (Agglomeration): Τα σωματίδια παραμένουν ενωμένα για να σχηματίσουν μεγάλες ομάδες σε δομή αλυσίδας.
- Οξειδωση (Oxidation): διαδικασία που λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια κάθε σταδίου από τα παραπάνω, κυρίως όταν επικρατούν θερμοκρασίες υψηλότερες των 1300K, όπου η αιθάλη καίγεται υπό την παρουσία οξειδωτικών στοιχείων (κυρίως ρίζας υδροξυλίου) και σχηματίζει αέρια προϊόντα όπως CO, CO₂, H₂O.

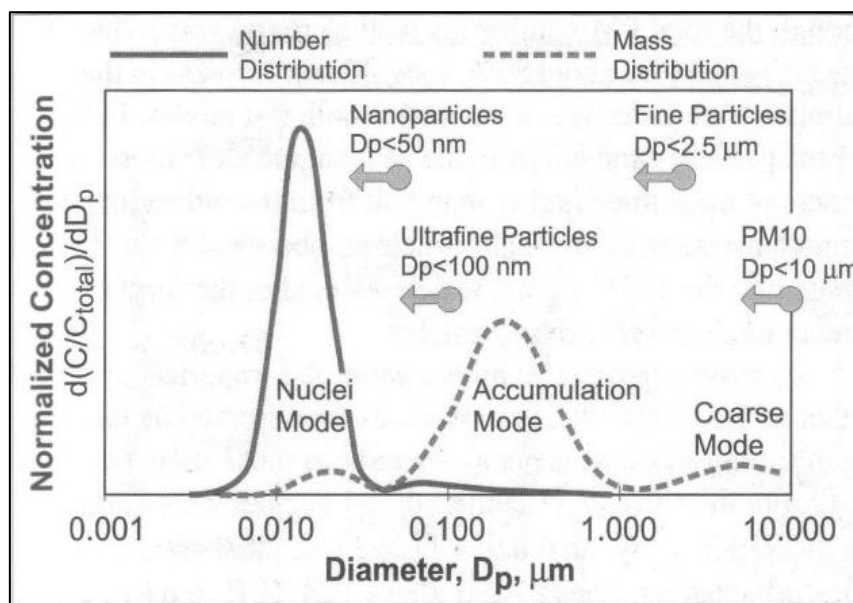
Κατανομή μεγέθους σωματιδίων

Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 5.5, τα επιτρεπόμενα επίπεδα σωματιδίων αναφέρονται σε g/Km. Δηλαδή οι υπό εφαρμογή κανονισμοί για τις εκπομπές σωματιδίων στην Ευρωπαϊκή Ένωση και τις Η.Π.Α. αφορούν την εκπεμπόμενη μάζα σωματιδίων και όχι τον αριθμό αυτών. Όμως, εφόσον η τοξικότητα αυξάνεται μειούμενου του μεγέθους των σωματιδίων, η κατανομή που ακολουθεί το μέγεθός τους κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική για την ανάλυση της ποιότητας του αέρα. Τα σωματίδια αιθάλης, της τάξης των 100nm, είναι επικίνδυνα για την ανθρώπινη υγεία, καθώς το μέγεθός τους είναι αρκετά μικρό ώστε να αναρροφώνται από τη μύτη, αλλά και αρκετά μεγάλο ώστε να επικάθονται στους πνεύμονες.

Σε αντίθεση με τη μάζα, ο αριθμός των εκπεμπόμενων σωματιδίων δεν είναι σταθερός. Μέσα στο σωλήνα της εξαγωγής ενός κινητήρα Diesel, οι συνεχώς μεταβαλλόμενες συνθήκες πίεσης και κυρίως θερμοκρασίας μπορούν να προκαλέσουν το σχηματισμό σωματιδίων, με απόρροια την αύξηση του αριθμού και της συγκέντρωσης μάζας των σωματιδίων. Αντιθέτως, αν λάβουν χώρα διαδικασίες συμπύκνωσης και σύμπληξης, η συγκέντρωση μάζας μειώνεται και αυξάνεται το μέγεθος των σωματιδίων. Τα προαναφερθέντα φαινόμενα παρατηρούνται και κατά τη διάρκεια της αραιώσης και της δειγματοληψίας, καθιστώντας πολύ δύσκολη την εξαγωγή σαφών συμπερασμάτων και το σχεδιασμό ενός κατάλληλου πρότυπου αναφοράς.

Ακολουθεί Σχήμα (5.9) στο οποίο απεικονίζεται η κατανομή του αριθμού και της μάζας των σωματιδίων από την εξαγωγή κινητήρα Diesel, για ιδανικές συνθήκες, σε λογαριθμική κλίμακα συναρτήσει της διαμέτρου. Η συγκέντρωση των σωματιδίων σε οποιοδήποτε εύρος μεγέθους είναι ανάλογη προς την περιοχή κάτω από την αντίστοιχη καμπύλη σε αυτό το εύρος. Το μεγαλύτερο μέρος της μάζας σωματιδίων συναντάται στην αποκαλούμενη κατάσταση συσσώρευσης (accumulation mode) για εύρος διαμέτρων 0,1-0,3 μm. Στην

περιοχή αυτή βρίσκονται τα συσσωματώματα και τα σχετικά προσροφημένα υλικά. Η κατάσταση νανοσωματιδίων (nuclei mode) αποτελείται από σωματίδια με εύρος διαμέτρου 0,005-0,05 μm . Απαρτίζεται συνήθως από τις πτητικές οργανικές ενώσεις υδρογονανθράκων και θείου και μπορεί επίσης να περιέχει και στερεές ενώσεις άνθρακα και μετάλλων. Ένα ποσοστό μεγαλύτερο από 90% των εκπεμπόμενων σωματιδίων από ένα κινητήρα Diesel εμπίπτει στην κατάσταση νανοσωματιδίων, το οποίο αντιστοιχεί όμως μόνο στο 1-20% της συνολικής μάζας των σωματιδίων. Η “χονδροκόκκη” κατάσταση περιέχει το 5-20% της μάζας των σωματιδίων και αποτελείται από τα σωματίδια της φάσης συσσώρευσης, τα οποία έχουν επικαθίσει στην επιφάνεια των κυλίνδρων και της πολλαπλής εξαγωγής και στη συνέχεια συμπαρασύρονται. Στο Σχήμα 5.9 φαίνονται επίσης και οι κατηγορίες στις οποίες διακρίνονται τα σωματίδια με βάση την διάμετρό τους.



Σχήμα 5.9: Τυπική κατανομή πλήθους και μάζας σωματιδίων στην εξαγωγή κινητήρα Diesel συναρτήσει της διαμέτρου αυτών.

Το μέγεθος των σωματιδίων αποτελεί παράγοντα της επίδρασης των εκπομπών των κινητήρων στο φυσικό περιβάλλον ως εξής:

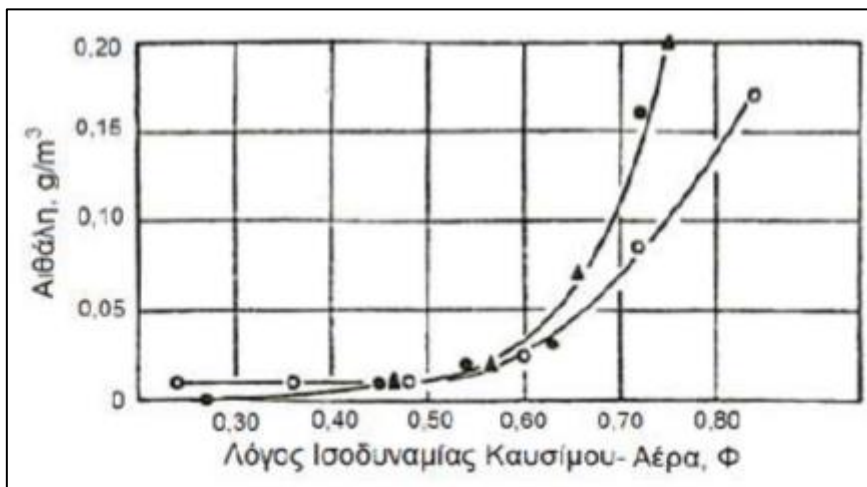
- Στο χρόνο παραμονής των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα
- Στις οπτικές ιδιότητες του αέρα
- Στην επιφάνεια των σωματιδίων
- Στις επιπτώσεις στην υγεία

Πιο αναλυτικά ο χρόνος παραμονής των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα είναι μεγαλύτερος για τα σωματίδια με διάμετρο 0,1-10 μm και υπολογίζεται σε περίπου μια εβδομάδα. Τα μεγαλύτερα μόρια απομακρύνονται αρκετά γρήγορα από την ατμόσφαιρα με επικάθηση, ενώ τα μικρότερα με τη διάχυση και τη σύμπτυξη. Ένας χαρακτηριστικός χρόνος παραμονής για τα σωματίδια με διάμετρο 10 nm είναι μόλις 15 min. Ο κύριος μηχανισμός για την απομάκρυνση των σωματιδίων αυτών των διαμέτρων είναι η σύμπτυξη με αυτά της φάσης συσσώρευσης.

5.3.3. Σχηματισμός αιθάλης σε κινητήρες Diesel

Κατά τη διάρκεια της μόνιμης λειτουργίας του κινητήρα Diesel, σχηματίζονται συνήθως τα σωματίδια της φάσης συσώρευσης (80-110 nm). Στην αρχή της καύσης, το μεγαλύτερο ποσοστό των σωματιδίων είναι στο εύρος διαμέτρων (80-90nm), ενώ στη συνέχεια τα σωματίδια της αιθάλης συσσωματώνονται και σχηματίζουν έτσι σωματίδια μεγαλύτερης διαμέτρου. Κατά τη διάρκεια της οξείδωσης της αιθάλης, ο αριθμός των σωματιδίων μειώνεται δραστικά σε ολόκληρο το φάσμα μεγεθών.

Αυξανόμενου του φορτίου, αυξάνεται αντίστοιχα η ποσότητα του εγχυόμενου καυσίμου, με αποτέλεσμα να ευνοείται ο σχηματισμός μεγαλύτερων σωματιδίων. Αντίθετα, κατά την άφορτη λειτουργία (ρελαντί) ευνοείται ο σχηματισμός νανοσωματιδίων. Στο Σχήμα 5.10 απεικονίζεται η μεταβολή των εκπεμπόμενων σωματιδίων συναρτήσει του λόγου ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα, που αποτελεί άμεση απεικόνιση του φορτίου.



Σχήμα 5.10: Μεταβολή συγκέντρωσης αιθάλης συναρτήσει του λόγου ισοδυναμίας με βάση πειραματικά δεδομένα

Κεφάλαιο 6

Μοντελοποίηση

στροβιλο-

υπερπλήρωσης με το

λογισμικό GT-Suite

6.1. Εισαγωγή στο GT-Suite

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό GT-Suite της εταιρείας Gamma Technologies (Εικόνα 6.1), άδεια του οποίου υπάρχει στο εργαστήριο Μ.Ε.Κ. του Ε.Μ.Π.. Το λογισμικό αυτό απευθύνεται στην βιομηχανία κινητήρων και οχημάτων παρέχοντας ένα περιβάλλον στο οποίο μπορεί να γίνει προσομοίωση κινητήρων, συστημάτων μετάδοσης και μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών που σχετίζονται με την αυτοκινητοβιομηχανία. Μερικές από αυτές καταγράφονται παρακάτω:

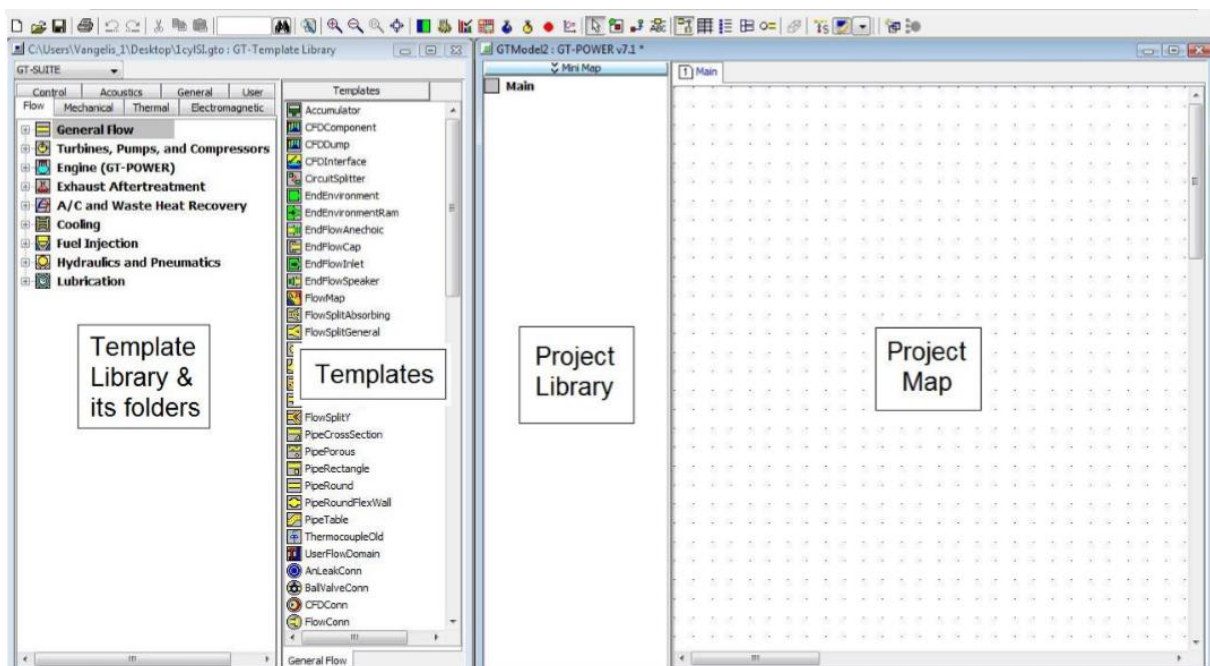
- Μοντελοποίηση κινητήρων (GT-Power)
- Επεξεργασία δυναμοδεικτικών διαγραμμάτων
- Ακουστική συστήματος εισαγωγής και εξαγωγής
- Επεξεργασία καυσαερίων
- Δυναμική οχήματος
- Υβριδικά συστήματα, ηλεκτροκίνητα οχήματα και κυψέλες καυσίμου
- Συστήματα ψύξης κινητήρων
- Συστήματα λίπανσης
- Συστήματα έγχυσης καυσίμου
- Υδραυλικά και πνευματικά συστήματα
- Κινηματική και δυναμική εκκεντροφόρου και συστήματος βαλβίδων
- Κινηματική και δυναμική στροφαλοφόρου
- Συστήματα μετάδοσης, κιβώτια ταχυτήτων και μαντοκίνηση

Στην παρούσα διπλωματική έγινε χρήση του υποπρογράμματος GT-Power, που αφορά την προσομοίωση κινητήρων, κατά την έκδοση 7.5.

6.2. Εισαγωγή στο υποπρόγραμμα GT-Power

Το λογισμικό GT-Power δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να προσομοιώσει πλήρως τις διατάξεις και την λειτουργία ενός κινητήρα. Για την επίτευξη της προσομοίωσης του κινητήρα διαθέτει μία βιβλιοθήκη (Library) με όλα τα πρότυπα στοιχεία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Ο χρήστης επιλέγει από ποια πρότυπα στοιχεία και εργαλεία (templates) θα αποτελείται το δικό του μοντέλο προσομοίωσης και τα αντιγράφει στην βιβλιοθήκη της συγκεκριμένης εφαρμογής (project library) (Εικόνα 6.1).

Το κάθε στοιχείο (object) μπορεί να οριστεί πλήρως μέσω του προγράμματος σε διάφορες καρτέλες που ανοίγουν αν ο χρήστης επιλέξει το στοιχείο. Μπορεί για παράδειγμα να ορίσει το μήκος και την διάμετρο μίας σωλήνωσης, την τραχύτητα και την θερμοκρασία του τοιχώματος ή τις διαστάσεις του κυλίνδρου, την ταχύτητα περιστροφής του ζεύγους υπερπλήρωσης και άλλα χαρακτηριστικά. Το κάθε στοιχείο μπορεί να το σύρει εντός του χάρτη εργασίας (project map) όσες φορές θέλει και έτσι να δημιουργήσει τα μέρη του μοντέλου του κινητήρα που απαιτούνται. Επίσης, τα χαρακτηριστικά των στοιχείων που αποτελούν το μοντέλο μπορούν να αλλάξουν όποια στιγμή ο χρήστης το επιθυμεί.



Εικόνα 6.1: Περιβάλλον εργασίας προγράμματος GT-Power

Αφού εισάγει στον χάρτη του μοντέλου όλα τα απαραίτητα στοιχεία που χρειάζεται μπορεί στην συνέχεια να τα ενώσει μεταξύ τους (create new link) και να ορίσει την ροή της πληροφορίας μέσα στο μοντέλο του κινητήρα. Η διαδικασία αυτή απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή ειδικά σε διακλαδώσεις ή στην σύνδεση του στροφαλοφόρου με τους κυλίνδρους για παράδειγμα, καθώς μπορεί να μην επιλύεται το μοντέλο αν έστω και ένα στοιχείο δεν έχει συνδεθεί σωστά.

Όταν πλέον το μοντέλο είναι έτοιμο, ο χρήστης μπορεί να το επιλύσει (Run) για διάφορες αρχικές συνθήκες και καταστάσεις (π.χ. μεταβατική λειτουργία ή σταθερές συνθήκες λειτουργίας), δημιουργώντας διάφορα σενάρια (cases). Καθώς το πρόγραμμα επιλύει το μοντέλο, ο χρήστης βλέπει στην οθόνη του ένα παράθυρο στο οποίο καταγράφονται οι επαναλήψεις μέχρι να συγκλίνει. Παράλληλα, στο παράθυρο αυτό καταγράφονται διάφορες προειδοποιήσεις και το σφάλμα σύγκλισης. Ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων που θα κάνει το πρόγραμμα, εκτός και αν συγκλίνει νωρίτερα, καθορίζεται από τον χρήστη και αποτελεί σημείο κομβικής σημασίας.

Τα αποτελέσματα μπορούν να απεικονιστούν μέσω του εργαλείου GT-Post πατώντας 'View Results', σε μορφή πίνακα για τα διάφορα σενάρια που 'έτρεξε' το πρόγραμμα (πχ για διάφορες ταχύτητες περιστροφής του κινητήρα) ή σε μορφή διαγράμματος.

6.3. Περιγραφή του μοντέλου προσομοίωσης

Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία βασίστηκαν σε μοντέλα που είχαν δημιουργηθεί σε προηγούμενη διπλωματική εργασία [7], και προσαρμόστηκαν στις ανάγκες της παρούσας εργασίας με κάποιες αλλαγές στα χαρακτηριστικά τους. Οι αλλαγές αυτές αφορούσαν την προσομοίωση του περιβάλλοντος που επικρατεί σε κάθε υψόμετρο καθώς και τις ρυθμίσεις της βαλβίδας παράκαμψης των στροβίλων, όπως θα περιγραφεί παρακάτω. Το ταίριασμα του κινητήρα έγινε για το υψόμετρο που αφορά την στάθμη της θάλασσας για να μελετηθεί η επίδραση της αύξησης του υψομέτρου στην λειτουργία και τις εκπομπές ρύπων αυτού.

Η επίδραση του υψομέτρου μελετήθηκε για σύστημα μονοβάθμιας και διβάθμιας στροβιλο-υπερπλήρωσης και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν και μεταξύ των δύο περιπτώσεων. Όλα τα σενάρια που 'έτρεξαν' αφορούσαν παραμετρική αλλαγή της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα, του υψομέτρου και αφορούσαν σταθερές συνθήκες λειτουργίας.

Είναι σημαντικό, επίσης, να επισημανθεί ότι στο παρόν μοντέλο όλες οι διεργασίες εντός του κυλίνδρου γίνονται σε επίπεδο γωνίας στροφάλου (Filling and emptying method). Παράλληλα, για την μοντελοποίηση της καύσης χρησιμοποιήθηκαν οι εξισώσεις του Wiebe και για τις απώλειες θερμότητας η σχέση του Woschni. Τέλος, όσον αφορά την επίλυση των εξισώσεων της πολλαπλής εξαγωγής χρησιμοποιείται η μέθοδος των χαρακτηριστικών (Pressure Wave Action Simulation).

6.3.1. Χαρακτηριστικά κινητήρα προς μοντελοποίηση

Ο κινητήρας που μοντελοποιήθηκε έχει βασιστεί στο μοντέλο OM-366 LA της εταιρείας Mercedes-Benz, ο οποίος βρίσκεται στο Εργαστήριο Μ.Ε.Κ. του Ε.Μ.Π.. Τα βασικά χαρακτηριστικά του κινητήρα αυτού δίνονται στον παρακάτω Πίνακα 6.1:

Πίνακας 6.1: Βασικά χαρακτηριστικά κινητήρα OM-366 LA της Mercedes-Benz

| | |
|--------------------------------------|-------------------------|
| Αριθμός Κυλίνδρων (z) | 6 |
| Διάμετρος (bore) εμβόλου (D) | 97,5 mm |
| Διαδρομή (Stroke) εμβόλου (s) | 133 mm |
| Μήκος διωστήρα (L) | 230 mm |
| Συνολικός όγκος εμβολισμού (V_H) | 5958,01 cm ³ |

Παρατήρηση: Ο συνολικός όγκος εμβολισμού του κινητήρα υπολογίσθηκε από την σχέση 6.1:

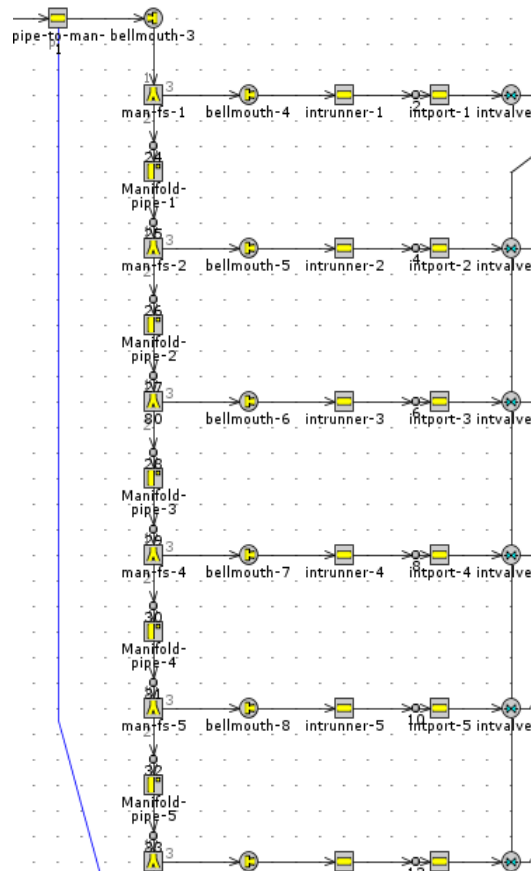
$$V_H = z \frac{\pi D^2}{4} s \quad (6.1)$$

6.3.2. Μοντελοποίηση τμημάτων κινητήρα

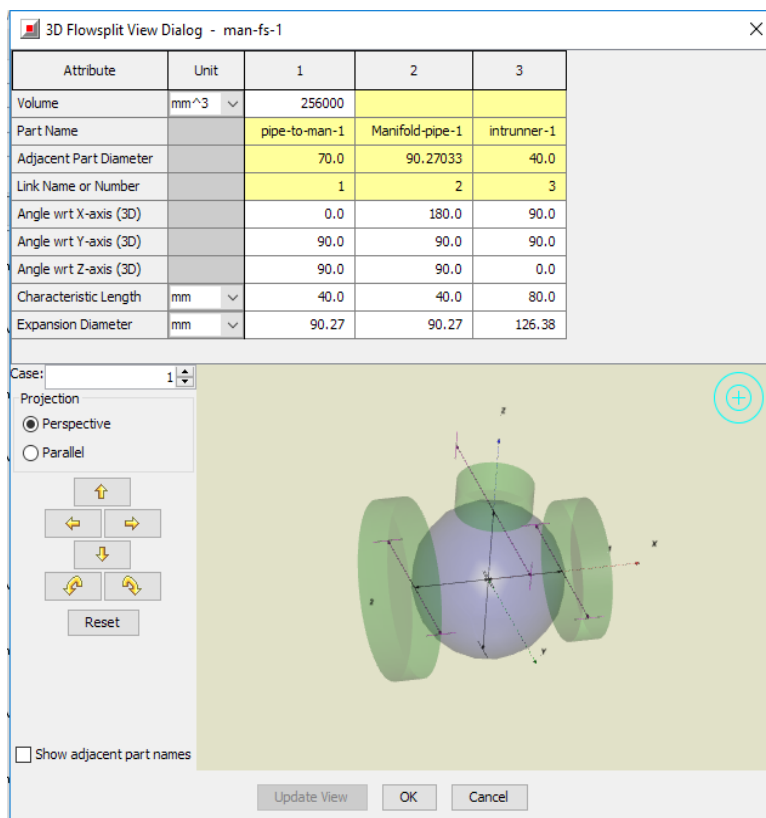
Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μία σύντομη αναφορά στα στοιχεία που απαρτίζουν τα δύο μοντέλα (μονοβάθμιας και διβάθμιας στροβιλο-υπερπλήρωσης) και μία αναλυτικότερη αναφορά στη διάταξη των στροβιλο-υπερπληρωτών και το σύστημα ελέγχου αυτών.

Πολλαπλή εισαγωγής, σωληνώσεις, θυρίδες και βαλβίδες

Η πολλαπλή εισαγωγής στο πρόγραμμα GT-Power αποτελείται από σωλήνες (pipes) και διακλαδώσεις (flow splits) (Εικόνα 6.2). Τα στοιχεία αυτά διαθέτουν αριθμημένες θυρίδες, έτσι ώστε να καθορίζεται αυστηρά η πορεία της ροής του αέρα μέσα από τις σωληνώσεις και μέχρι τους κυλίνδρους του κινητήρα. Ακόμη, δίνεται η δυνατότητα καθορισμού της γωνίας μεταξύ των σωλήνων εισόδου και εξόδου της ροής αέρα, ωστόσο, στο παρόν μοντέλο για απλοποίηση του σχεδιασμού θεωρήθηκε ότι οι σωλήνες εισαγωγής του κινητήρα είναι κάθετοι στον σωλήνα εισόδου της πολλαπλής εισαγωγής (Εικόνα 6.3).

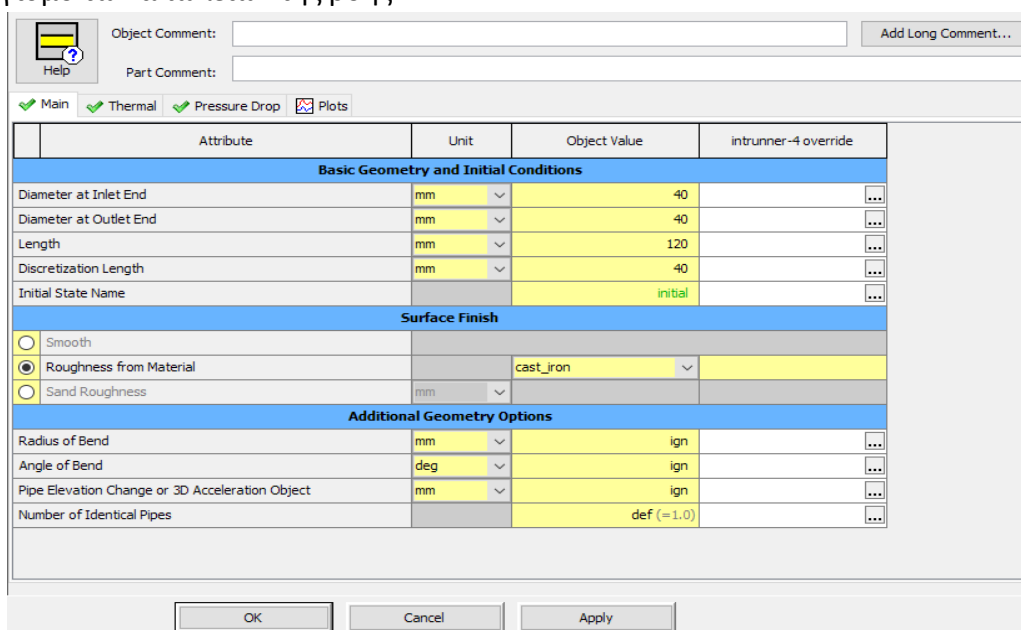


Εικόνα 6.2: Τμήμα μοντέλου που περιλαμβάνει μέρος της πολλαπλής εισαγωγής και τις θυρίδες εισαγωγής



Εικόνα 6.3: Τρισδιάστατη απεικόνιση καθετότητας των σωλήνων που συνδέονται σε μία διακλάδωση της πολλαπλής εισαγωγής

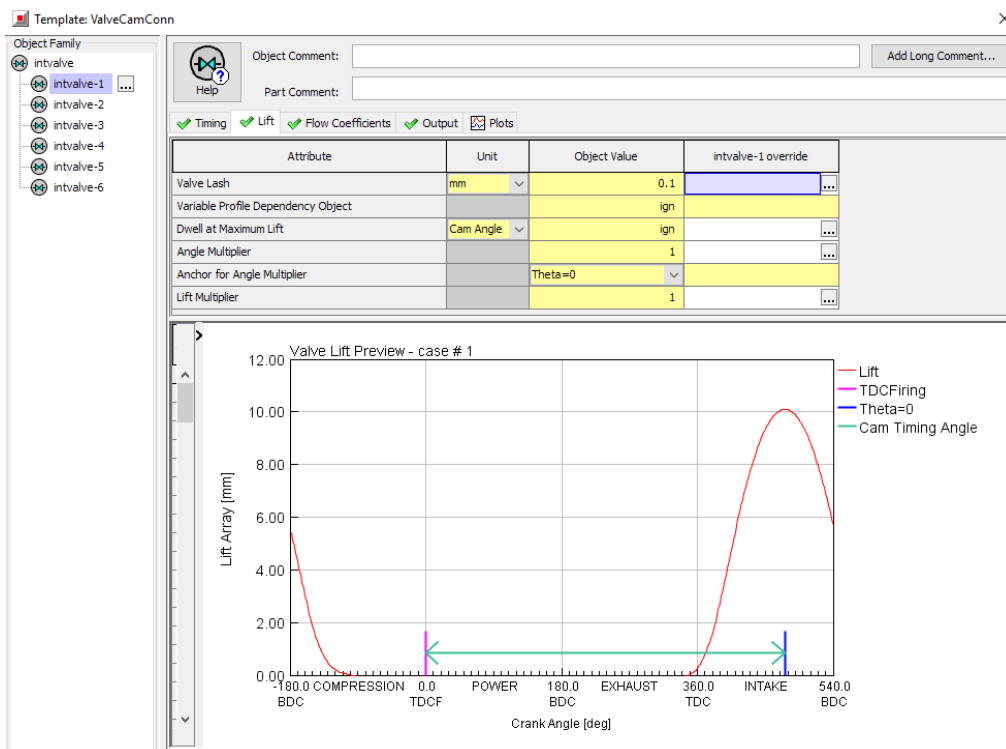
Οι σωλήνες εισαγωγής (intake runners) είναι ο συνδετικός κρίκος μεταξύ της πολλαπλής εισαγωγής του κινητήρα και των θυρίδων εισαγωγής των κυλίνδρων. Οι διαστάσεις τους είναι 40 mm διάμετρος και 120 mm μήκος, ενώ η τραχύτητα της επιφάνειάς τους προσομοιώθηκε μέσω αυτής που θα είχε ένα κομμάτι από χυτοσίδηρο (cast iron) (Εικόνα 6.4). Ο ορισμός του υλικού αυτού δεν συνδέεται με το υλικό κατασκευής των σωληνώσεων αλλά με τον υπολογισμό των απωλειών της ροής.



Εικόνα 6.4: Παράθυρο καθορισμού των χαρακτηριστικών των σωληνώσεων

Όσον αφορά τις θυρίδες εισαγωγής (intake ports), έχει οριστεί στα 40 mm η διάμετρος τους για να ταιριάζει με αυτή των σωλήνων εισαγωγής. Η διάμετρος αυτή διατηρείται σταθερή καθ'όλο το μήκος τους, που ορίστηκε στα 80mm. Η τραχύτητα αυτών προσομοιώνεται, επίσης, με αυτήν του χυτοσιδήρου. Οι θερμοκρασίες των τοιχωμάτων τους έχουν οριστεί στους 450 K, και για την μοντελοποίηση της μεταφοράς θερμότητας από τις θερμότερες βαλβίδες προς τις θυρίδες εισαγωγής χρησιμοποιείται συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ίσος με 1,5.

Τέλος, οι βαλβίδες εισαγωγής (intake valves) έχουν διάμετρο 42mm, ανοίγουν 15° πριν το ΑΝΣ και κλείνουν 82° μετά το ΚΝΣ. Η μέγιστη βύθισή τους ορίζεται στα 10,204 mm (Εικόνα 6.5α,β).



Εικόνα 6.5α: Ορισμός προφίλ ανύψωσης βαλβίδων εισαγωγής συναρτήσει της γωνίας στροφάλου

| Attribute | Unit | Object Value | intvalve-1 override |
|--|-------------|--------------|---------------------|
| Cam Timing Angle | Crank An... | 476 | ... |
| Cam Timing Anchor Reference | | TDCFiring | ... |
| Cam Timing Lift Array Reference | | Theta=0 | ... |
| Source of Angle | | | |
| <input checked="" type="radio"/> Attached Cylinder | | | |
| <input type="radio"/> Part on Map | | | |
| <input type="radio"/> Driver Reference Object | | | |

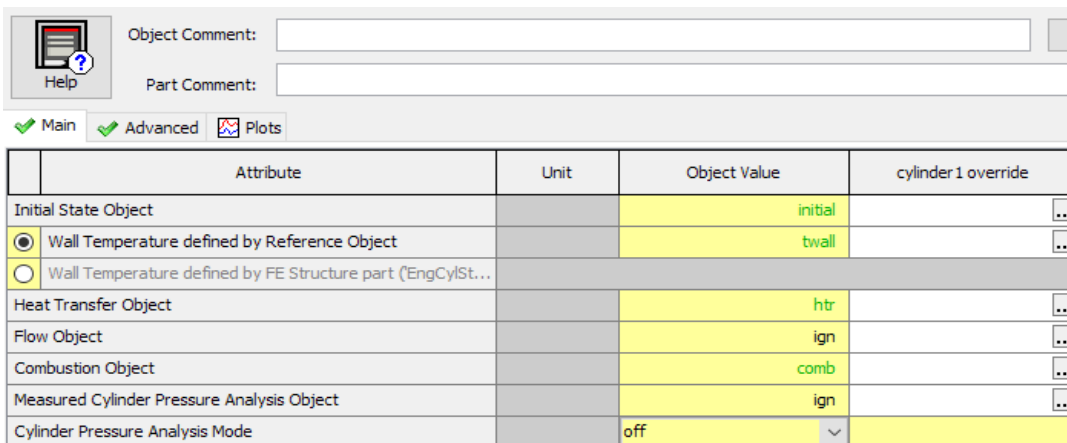
Εικόνα 6.5β: Ορισμός χαρακτηριστικών βαλβίδων εισαγωγής

Κύλινδροι

Οι κύριες διαστάσεις (διάμετρος και διαδρομή εμβόλου), οι οποίες έχουν προαναφερθεί, δηλώνονται στα χαρακτηριστικά των κυλίνδρων εντός του προγράμματος. Παράλληλα, το πρόγραμμα δίνει ιδιαίτερη βαρύτητα και στις αρχικές συνθήκες που επικρατούν εντός του κυλίνδρου και στα τοιχώματα αυτού. Ο σωστός ορισμός αυτών δίνει ακριβέστερα αποτελέσματα και συνεπώς πιο ρεαλιστικά συμπεράσματα.

Για ένα απλό υπολογιστικό μοντέλο σαν και αυτό που χρησιμοποιείται, αρκεί ο ορισμός τριών θερμοκρασιών: κυλινδροκεφαλής (cylinder head), εμβόλων (pistons) και περιφερειακών τοιχωμάτων των κυλίνδρων (cylinder walls). Αναλυτικότερα, οι θερμοκρασίες αυτές ορίζονται στους 550 K, 590 K και 450 K αντίστοιχα (Εικόνα 6.6).

Επίσης, ορίζονται δύο συντελεστές, ο 'λόγος κεφαλής προς διάμετρο κυλίνδρου' (head/bore area ratio) και ο 'λόγος εμβόλου προς διάμετρο' (piston/bore area ratio), που χρησιμοποιούνται για τον ακριβέστερο προσδιορισμό της μεταφοράς θερμότητας προς την κεφαλή του κυλίνδρου και προς το έμβολο αντίστοιχα. Οι δύο αυτοί συντελεστές λαμβάνουν υπόψιν την γεωμετρία των επιφανειών, όπως για παράδειγμα μια κοιλότητα στην κεφαλή του εμβόλου, καθώς και τον τρόπο με τον οποίο αυτή επηρεάζει την μεταφορά θερμότητας προς αυτά τα τμήματα του κυλίνδρου.

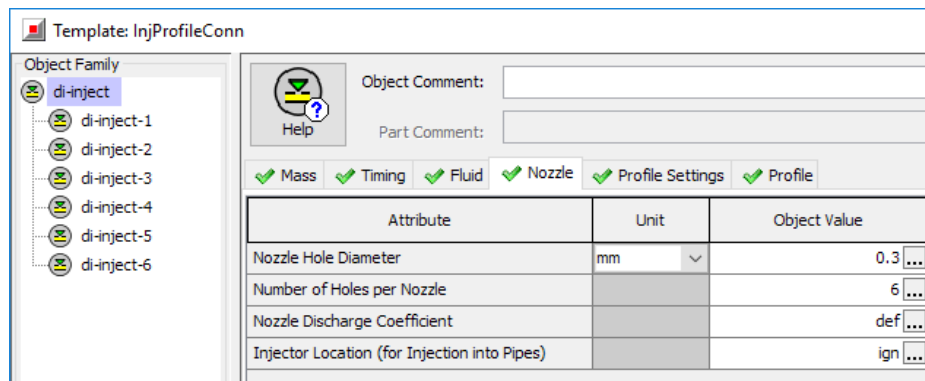


| Attribute | Unit | Object Value | cylinder 1 override |
|--|------|--------------|---------------------|
| Initial State Object | | initial | ... |
| <input checked="" type="radio"/> Wall Temperature defined by Reference Object | | twall | ... |
| <input type="radio"/> Wall Temperature defined by FE Structure part (EngCylSt... | | | |
| Heat Transfer Object | | htr | ... |
| Flow Object | | ign | ... |
| Combustion Object | | comb | ... |
| Measured Cylinder Pressure Analysis Object | | ign | ... |
| Cylinder Pressure Analysis Mode | | off | ... |

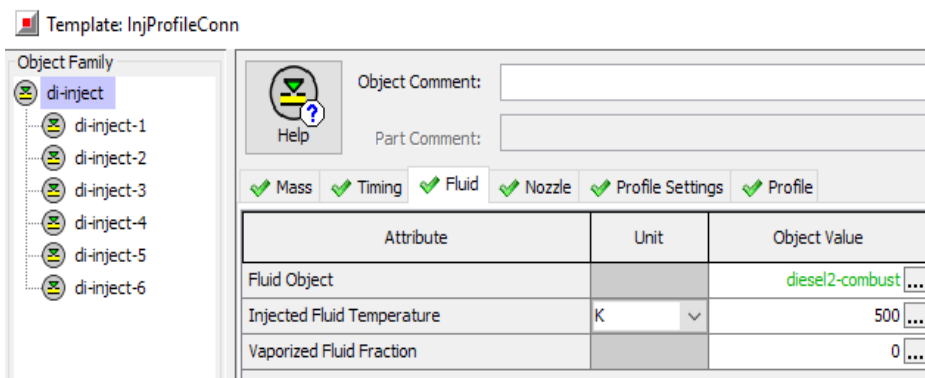
Εικόνα 6.6: Ορισμός χαρακτηριστικών κυλίνδρων (Οι χαρακτηριστικές θερμοκρασίες ορίστηκαν σαν μεταβλητές πχ twall)

Εγχυτήρες καυσίμου

Στο παρόν μοντέλο χρησιμοποιήθηκαν εγχυτήρες καυσίμου 6 οπών διαμέτρου 0,3 mm η κάθε μία (Εικόνα 6.7α). Γίνεται έγχυση τυπικού καυσίμου Diesel σε θερμοκρασία 500 K εντός των κυλίνδρων (Εικόνα 6.7β). Η ποσότητα του εγχυόμενου καυσίμου ορίστηκε σαν παράμετρος και παίρνει τιμή κατά το 'Case setup'. Η εγχυόμενη ποσότητα σχετίζεται με το πάτημα του πεντάλ του γκαζιού από τον οδηγό του οχήματος.



Εικόνα 6.7α: Ορισμός αριθμού οπών και διαμέτρου αυτών



Εικόνα 6.7β: Ορισμός καυσίμου και θερμοκρασία εισαγωγής αυτού

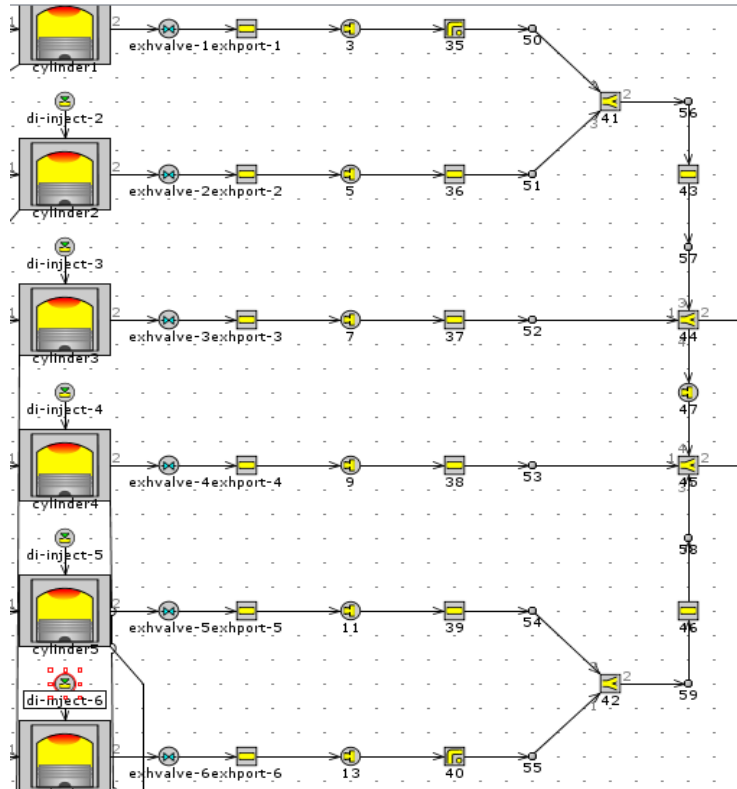
Πολλαπλή εξαγωγή, σωληνώσεις, θυρίδες και βαλβίδες

Η πολλαπλή εξαγωγή δημιουργείται με παρόμοιο τρόπο όπως και η πολλαπλή εισαγωγή με κάποιες ιδιαιτερότητες. Αποτελείται από σωληνώσεις, διακλαδώσεις, θυρίδες και, τέλος, βαλβίδες. Λόγω του συστήματος υπερπλήρωσης δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην ομαδοποίηση των σωληνών εξαγωγής των κυλίνδρων, έτσι ώστε τα καυσαέρια να κατευθύνονται στον στρόβιλο ως κύματα πίεσης. Η ομαδοποίηση υλοποιείται σύμφωνα με τον αριθμό εισόδων στον στρόβιλο (twin entry) καθώς και με την σειρά ανάφλεξης των κυλίνδρων (δηλώνει την σειρά εξαγωγής των καυσαερίων από τους κυλίνδρους). Σύμφωνα με τα παραπάνω οι κύλινδροι 1,2,3 εξαγουν καυσαέρια που ενώνονται σε μία κοινή σωληνώση και οι 4,5,6 σε άλλη (Εικόνα 6.8). Για να είναι πιο ρεαλιστικά τα αποτελέσματα και λόγω ύπαρξης μικρών διαρροών κατά την είσοδο των δύο ρευμάτων στον στρόβιλο, το μοντέλο τις προσομοιώνει με μια κοινή σύνδεση μεταξύ των δύο σωληνώσεων που διαθέτει μια μικρή οπή (Εικόνα 6.9).

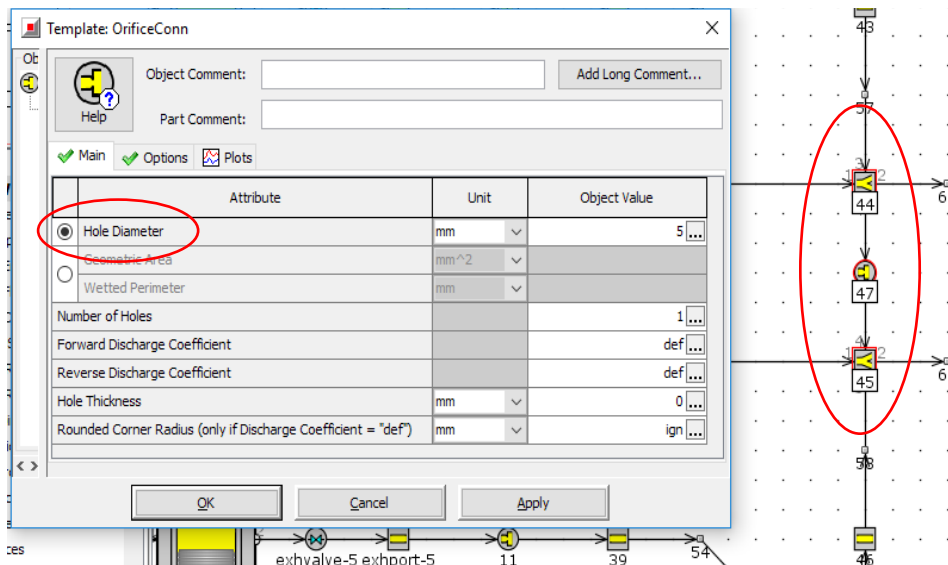
Όσον αφορά τις θυρίδες εξαγωγής των κυλίνδρων, αυτές έχουν διάμετρο 30 mm και μήκος 60 mm και η τραχύτητά τους θεωρείται ότι είναι σαν αυτή του χυτοσιδήρου.

Ακόμη, για τις βαλβίδες εξαγωγής, έχουν διάμετρο 36 mm, ανοίγουν 112° μετά το "θερμό" ΑΝΣ και κλείνουν 24° μετά το "ψυχρό" ΑΝΣ. Η μέγιστη βύθιση αυτών ορίζεται στα 10,204 mm, όπως και στις βαλβίδες εισαγωγής.

Τέλος, η οριακή συνθήκη που δίνεται για την θερμοκρασία τοιχωμάτων της πολλαπλής εξαγωγής είναι 900 K, για την προσομοίωση της μετάδοσης θερμότητας από τα θερμότερα καυσαέρια.



Εικόνα 6.8: Ομαδοποίηση σωληνώσεων πολλαπλής εξαγωγής



Εικόνα 6.9: Κοινή σωλήνωση με οπή για προσομοίωση απωλειών και παράθυρο ελέγχου χαρακτηριστικών αυτής

Στροφαλοφόρος άτρακτος

Ένα ακόμη απαραίτητο κομμάτι του μοντέλου είναι η στροφαλοφόρος άτρακτος. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στην σειρά σύνδεσης των κυλίνδρων σε αυτήν, αφού μέσω αυτής ορίζεται η σειρά ανάφλεξης των κυλίνδρων (1-5-3-6-2-4). Τα χαρακτηριστικά του κινητήρα που

ορίζονται μέσω του πίνακα ελέγχου αυτής είναι η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα (ορίστηκε ως μεταβλητή speed), η αδράνεια του άξονα αυτού, καθώς και ο τύπος του κινητήρα (εδώ 4-X) (Εικόνα 9.10).

| Attribute | Unit | Object Value |
|--------------------------------|------------|--------------|
| Engine Type | | 4-stroke |
| Speed or Load Specification | | speed |
| Engine Speed | See Cas... | [RPM] ... |
| Engine Friction Object or FMEP | | friction ... |
| Start of Cycle (CA at IVC) | | -95 ... |

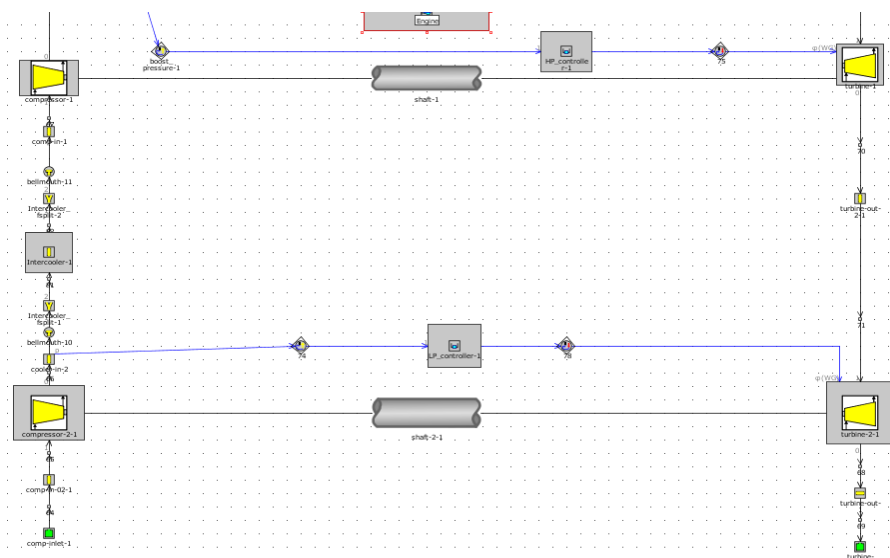
Εικόνα 6.10: Ορισμός χαρακτηριστικών στροφαλοφόρου άξονα

Ζεύγος στροβιλο-υπερπλήρωσης

Εφόσον το μοντέλο είναι προσομοίωση διβάθμιας στροβιλο-υπερπλήρωσης, αποτελείται από δύο ζεύγη στροβιλο-υπερπληρωτών, ένα χαμηλής και ένα υψηλής πίεσης.

Γενικά η διάταξη, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.11, περιλαμβάνει τα εξής: τον συμπιεστή χαμηλής πίεσης που η είσοδός του είναι ο αέρας του περιβάλλοντος και παίρνει κίνηση από τον στρόβιλο χαμηλής πίεσης, τον συμπιεστή υψηλής πίεσης που η είσοδός του είναι η έξοδος του συμπιεστή χαμηλής πίεσης, ενώ η έξοδός του στέλνει τον αέρα στους κυλίνδρους του κινητήρα. Τον συμπιεστή υψηλής πίεσης κινεί ο στρόβιλος υψηλής πίεσης. Τα δύο ζεύγη διαθέτουν το καθένα το δικό του σύστημα ελέγχου.

Το ταίριασμα στροβιλο-υπερπληρωτών με τον κινητήρα έγινε για τις συνθήκες περιβάλλοντος που αντιστοιχούν στο επίπεδο της θάλασσας έτσι ώστε να μελετηθεί στη συνέχεια η επίδραση της αύξησης του υψομέτρου.



Εικόνα 6.11: Τμήμα μοντέλου που απεικονίζει τα ζεύγη στροβιλο-υπερπλήρωσης

Ζεύγος χαμηλής πίεσης

Ο συμπιεστής του ζεύγους αυτού έχει πίεση εισόδου αυτήν του περιβάλλοντος μείον τις απώλειες της σωλήνωσης εισόδου, και πίεση εξόδου όπως αυτή ορίζεται από τον λόγο πίεσης του σημείου λειτουργίας του συμπιεστή. Η σχεδίασή του περιλαμβάνει ακτινικό συμπιεστή σταθερής γεωμετρίας. Το μέγεθός του είναι μεγαλύτερο από αυτό του συμπιεστή υψηλής πίεσης για να δίνει μεγαλύτερες παροχές αέρα κατά τα χαμηλά και μεσαία φορτία του κινητήρα. Το μέγεθος του συμπιεστή (όπως και του στρόβιλου) ορίζεται μέσω του συντελεστή mass multiplier, ο οποίος πολλαπλασιάζει τα μεγέθη του αδιάστατου χάρτη (που παρέχεται από το πρόγραμμα) και ορίζει την παροχή μάζας που διέρχεται από τον συμπιεστή. Ο συντελεστής αυτός διατηρήθηκε στο 0,9 για τον συμπιεστή χαμηλής πίεσης και στο 1,05 για τον στρόβιλο καθώς όπως προαναφέρθηκε το ταίριασμα έγινε για συνθήκες περιβάλλοντος σε μηδενικό υψόμετρο.

Ο στρόβιλος χαμηλής πίεσης κινεί τον αντίστοιχο συμπιεστή. Έχει σαν πίεση εισόδου την πίεση εξόδου του στρόβιλου υψηλής πίεσης μειωμένη κατά τις απώλειες στις σωληνώσεις που τους συνδέουν μεταξύ τους. Επειδή δεν συνδέεται άμεσα με την πολλαπλή εξαγωγής δεν είναι διπλής εισόδου (twin entry). Η έξοδος αυτού 'βλέπει' το περιβάλλον και άρα την πίεση που επικρατεί σ' αυτό. Η πίεση αυτή όσο αυξάνεται το υψόμετρο, μειώνεται, δημιουργώντας λιγότερη πίεση αντίθλιψης, επηρεάζοντας την λειτουργία του ζεύγους στρόβιλο-υπερπλήρωσης, γενικά είτε πρόκειται για μονοβάθμιο είτε πρόκειται για το ζεύγος χαμηλής πίεσης σε ένα διβάθμιο.

Το μέσο μεταφοράς της ισχύος από τον στρόβιλο στον συμπιεστή είναι η άτρακτος του ζεύγους. Η άτρακτος προσομοιώνεται στο πρόγραμμα από το αντίστοιχο εικονίδιο. Τα χαρακτηριστικά του στοιχείου (object) της ατράκτου που πρέπει να δηλώσει ο χρήστης είναι η ροπή αδράνειας, κυρίως για τις μεταβατικές καταστάσεις λειτουργίας, και μια αρχική ταχύτητα περιστροφής. Η ταχύτητα περιστροφής αυτή του ζεύγους μπορεί να οριστεί για κάθε σενάριο (case) ξεχωριστά και αποτελεί κομβικό σημείο απόφασης από τον χρήστη καθώς το πρόγραμμα την χρησιμοποιεί, για να συγκλίνει, σαν αρχική συνθήκη. Αν το πρόγραμμα δεν συγκλίνει ο χρήστης οφείλει να εξετάσει και το κατά πόσο είναι ρεαλιστική η τιμή της ταχύτητας περιστροφής της ατράκτου αυτής. Όσο πιο κοντά είναι στην πραγματική τιμή τόσο πιο γρήγορα και με μικρότερο σφάλμα θα συγκλίνει το πρόγραμμα.

Ζεύγος υψηλής πίεσης

Παρόμοια με το ζεύγος χαμηλής πίεσης, το ζεύγος υψηλής αποτελείται από τον συμπιεστή, τον στρόβιλο και την άτρακτο του ζεύγους. Οι χάρτες του συμπιεστή και του στρόβιλου είναι οι ίδιοι πρότυποι χάρτες που χρησιμοποιήθηκαν και για το ζεύγος χαμηλής πίεσης. Μόνο που στο ζεύγος αυτό πολλαπλασιάζονται τα μεγέθη τους με τους εξής συντελεστές (mass multipliers): 0,7 για τον συμπιεστή και 0,9 για τον στρόβιλο. Όπως γίνεται φανερό το ζεύγος υψηλής πίεσης είναι μικρότερο σε μέγεθος από αυτό της χαμηλής.

Ο συμπιεστής του ζεύγους αυτού έχει σαν είσοδο την πίεση εξόδου του συμπιεστή χαμηλής πίεσης μείον τις απώλειες στις σωληνώσεις και το ενδιάμεσο ψυγείο. Η πίεση εξόδου αυτού μειώνεται κατά τις απώλειες στην πολλαπλή εισαγωγής και το δεύτερο ψυγείο και είναι η πίεση εισόδου στους κυλίνδρους, που ονομάζεται πίεση υπερπλήρωσης (boost pressure). Ο λόγος πίεσης συνολικά για τους δύο συμπιεστές είναι το γινόμενο των επιμέρους

λόγων πίεσης. Συνεπώς, η πίεση υπερπλήρωσης, οριζόμενη σε σχέση με αυτήν του περιβάλλοντος αποτελεί το γινόμενο των λόγων πίεσης των δύο συμπιεστών.

Ο στρόβιλος του ζεύγους υψηλής πίεσης καθώς συνδέεται άμεσα με την πολλαπλή εξαγωγή, η οποία διαθέτει δύο σωληνώσεις, αποτελείται από δύο εισόδους (twin entry). Η είσοδος αυτού του στροβίλου είναι το ρεύμα εξόδου από τους κυλίνδρους. Απόρροια αυτού είναι η βαθμίδα του ακτινικού σταθερής γεωμετρίας στροβίλου να δέχεται υψηλή θερμική καταπόνηση και υψηλές πιέσεις. Τέλος, ο στρόβιλος υψηλής πίεσης, όπως και ο χαμηλής διαθέτουν βαλβίδες παράκαμψης καυσαερίου (wastegate).

Το ζεύγος υψηλής πίεσης διαθέτει την δική του άτρακτο. Όπως και στο αντίστοιχο στοιχείο της χαμηλής πίεσης, ο χρήστης πρέπει να ορίσει στο πρόγραμμα την ροπή αδρανείας και κυρίως την αρχική συνθήκη για την ταχύτητα περιστροφής.

Σύστημα ελέγχου στροβιλο-υπερπληρωτών

Στην περίπτωση της διβάθμιας εγκατάστασης στροβιλο-υπερπληρωτών για να λειτουργήσει ο κινητήρας αρμονικά με τα δύο ζεύγη, με κριτήρια την μέγιστη πίεση στους κυλίνδρους, την ταχύτητα των ατράκτων των ζευγών και την θερμοκρασία των καυσαερίων, κρίθηκε αναγκαία η "συνεργασία" με ένα σύστημα ελέγχου.

Το σύστημα ελέγχου απαρτίζεται από τα εξής στοιχεία:

- Αισθητήρας πίεσης (Sensor): λαμβάνει ως είσοδο την πίεση υπερπλήρωσης και δίνει σήμα στον ελεγκτή αναλόγως της τιμής αυτής. Η σωλήνωση από την οποία παίρνει δείγμα της πίεσης είναι ακριβώς μετά το δεύτερο ψυγείο και πριν την είσοδο στην πολλαπλή εισαγωγής.
- Ελεγκτής (PID-Controller): ορίζει κατά πόσο θα ανοίξει ή θα κλείσει η βαλβίδα παράκαμψης καυσαερίων του στροβίλου αναλόγως της πίεσης υπερπλήρωσης και των ορίων που ο χρήστης έχει εισάγει. Στο συγκεκριμένο μοντέλο, η μέγιστη διάμετρος της βαλβίδας παράκαμψης καυσαερίων για τον στρόβιλο χαμηλής πίεσης ορίστηκε στα 30 mm, και για τον στρόβιλο υψηλής πίεσης στα 75 mm. Τα όρια της πίεσης υπερπλήρωσης πάνω από τα οποία ανοίγει η βαλβίδα του στροβίλου είναι μεταβλητά με τις στροφές λειτουργίας του κινητήρα και σταθερά για κάθε υψόμετρο.
- Ενεργοποιητής (Actuator): επενεργεί σύμφωνα με το σήμα του ελεγκτή στο άνοιγμα της βαλβίδας.

Ψυγείο ψύξης αέρα υπερπλήρωσης

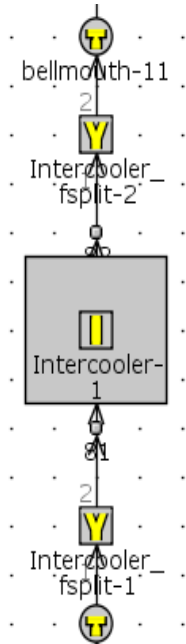
Η εγκατάσταση διαθέτει δύο ψυγεία του αέρα υπερπλήρωσης για την διβάθμια εγκατάσταση και ένα για την μονοβάθμια περίπτωση εγκατάστασης.

Η χρησιμότητα των ψυγείων έχει αναλυθεί και στην παράγραφο 2.4. Γενικότερα, η ψύξη του αέρα υπερπλήρωσης κρίνεται αναγκαία για να αποφευχθούν οι υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις και οι υψηλές συγκεντρώσεις των δημιουργούμενων ρύπων. Η τοποθέτηση του ψυγείου, πιο συγκεκριμένα, γίνεται απαραίτητη σε περιπτώσεις υπερπλήρωσης με πιέσεις εισόδου στους κυλίνδρους που ξεπερνούν τα 2 bar. Και στις δύο περιπτώσεις υπερπλήρωσης η πίεση υπερπλήρωσης ξεπερνάει το όριο αυτό για μεγάλο εύρος ταχυτήτων λειτουργίας του κινητήρα οπότε και κρίνεται ότι οφείλει να τοποθετηθεί ψυγείο.

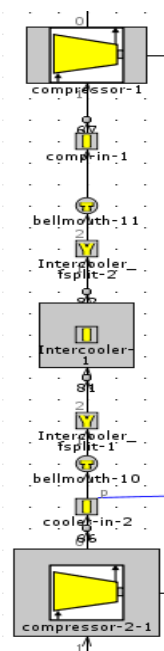
Στο σύστημα διβάθμια στροβιλο-υπερπλήρωσης τοποθετείται επιπλέον ένα ενδιάμεσο των δύο συμπιεστών ψυγείο, καθώς ο συμπιεστής χαμηλής πίεσης λειτουργεί σε υψηλούς λόγους πίεσης και άρα σε υψηλές θερμοκρασίες. Οι υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να αποβούν καταστροφικές και για τον συμπιεστή υψηλής πίεσης που ακολουθεί.

Ενδιάμεσο ψυγείο (Intercooler)

Για την προσομοίωση του ψυγείου από το πρόγραμμα απαιτούνται διακλαδώσεις και η εισαγωγή ενός στοιχείου που μοντελοποιεί τους σωληνίσκους του (Εικόνα 6.12). Στην είσοδο του στοιχείου αυτού ο χρήστης πρέπει να ενώσει μια διακλάδωση, όπως και στο τέλος αυτού. Οι διακλαδώσεις μοντελοποιούν την μετάβαση της ροής από τον συμπιεστή στο ψυγείο και τον διαμοιρασμό σε πολλούς μικρότερους σωλήνες και το αντίστροφο για την έξοδο αυτού, δηλαδή την συνένωση των πολλών μικρών ρευμάτων σε ένα κύριο και την κοινή έξοδο προς τον συμπιεστή υψηλής πίεσης.

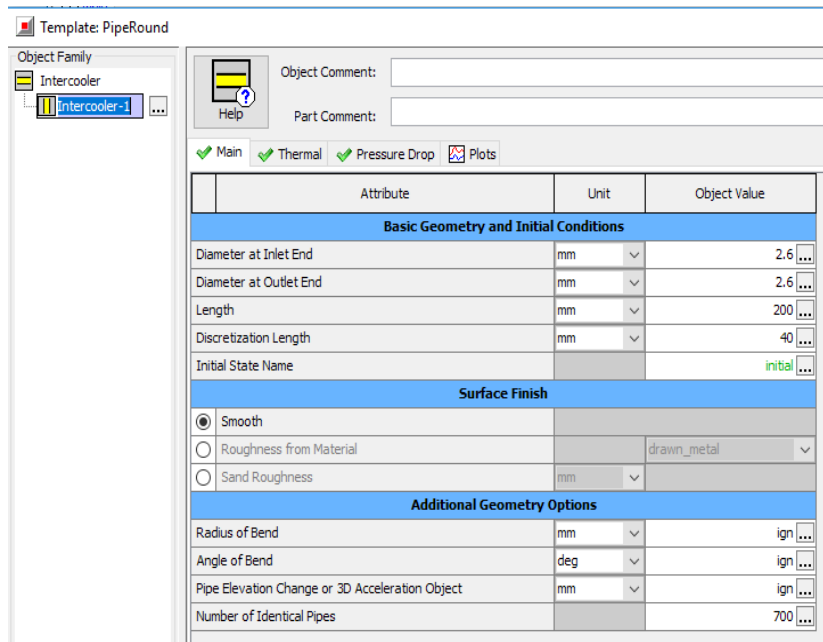


Εικόνα 6.12α: Διάταξη Ψυγείου αέρα (εστίαση)



Εικόνα 6.12β: Διάταξη ενδιάμεσου ψυγείου αέρα (Διβάθμια στροβιλο-υπερπλήρωση-γενικό πλάνο διάταξης)

Τα χαρακτηριστικά που ορίζονται για το στοιχείο αυτό είναι: ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (heat transfer) ως 8,0 και ο συντελεστής τριβής (friction multiplier) ως 1,0. Επίσης, το ψυγείο αποτελείται από 700 σωληνίσκους διαμέτρου 2,6 mm και μήκους 200 mm, των οποίων η θερμοκρασία τοιχώματος ορίζεται σαν μεταβλητή καθοριζόμενη από τον χρήστη (Εικόνα 6.13).



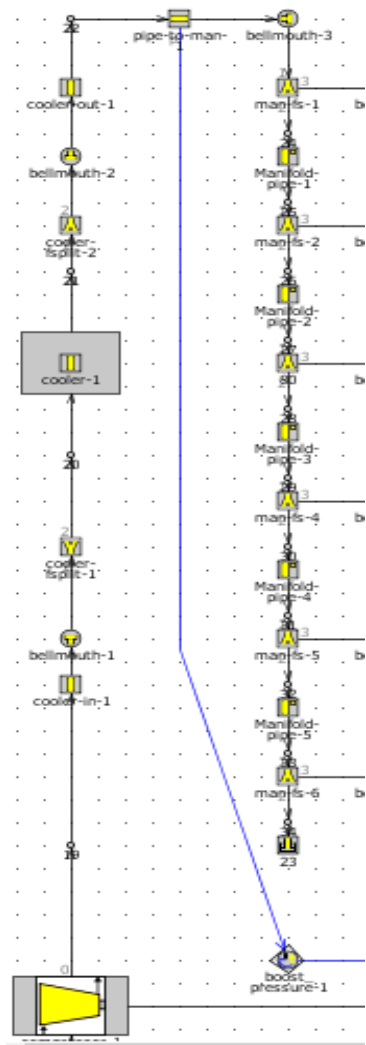
Εικόνα 6.13: Χαρακτηριστικά ενδιάμεσου ψυγείου ψύξης

Όσον αφορά την διάταξη μονοβάθμιας στροβιλο-υπερπλήρωσης το ψυγείο του αέρα αποτελείται από 1000 σωληνίσκους με διάμετρο 2,6 mm και μήκος 300 mm.

Δεύτερο ψυγείο αέρα υπερπλήρωσης (aftercooler)

Η σκοπιμότητα του δεύτερου ψυγείου είναι, όπως αναλυτικά ειπώθηκε παραπάνω, η προστασία του κινητήρα από την ανάπτυξη καταστροφικών θερμοκρασιών και πιέσεων. Η θέση του στην εγκατάσταση στην περίπτωση της διβάθμιας στροβιλο-υπερπλήρωσης είναι μετά τον συμπιεστή υψηλής πίεσης, ενώ στην περίπτωση της μονοβάθμιας εγκατάστασης δεν υπάρχει. Η διάταξή του είναι ίδια με του ενδιάμεσου ψυγείου, με τα χαρακτηριστικά αυτού να διαμορφώνονται ως εξής: 1000 σωληνίσκοι με διάμετρο 2,6 mm και μήκος 300 mm (Εικόνες 2.14 & 6.14).

Το μεγαλύτερο μέγεθος αυτού του ψυγείου αιτιολογείται από το μεγαλύτερο ψυκτικό φορτίο που πρέπει να παραλάβει καθώς το ρεύμα του αέρα υπερπλήρωσης έχει σε σύγκριση με το ρεύμα πριν το ενδιάμεσο ψυγείο μεγαλύτερη θερμοκρασία. Ο μεγάλος αριθμός των πολύ λεπτών σωληνίσκων δεν ενέχει ωστόσο τον κίνδυνο μεγάλων απωλειών στην πίεση, καθώς αυτή φτάνει ως και τα 5 bar μετά τον συμπιεστή υψηλής πίεσης. Στο παρόν μοντέλο οι απώλειες αυτές είναι της τάξεως του 0,5%. Παράλληλα, η θερμότητα που συναλλάσσεται πρέπει να είναι τόση ώστε να επιτυγχάνεται η θερμοκρασία τοιχωμάτων μετά το ψυγείο που έχει ορίσει ο χρήστης, μεταβαλλόμενη με το φορτίο και κυμαινόμενη στο εύρος 305-340 K.



Εικόνα 6.14: Διάταξη δεύτερου ψυγείου αέρα σε διβάθμιο σύστημα υπερπλήρωσης

Προσομοίωση εκπεμπόμενης αιθάλης

Για τον υπολογισμό της εκπεμπόμενης αιθάλης λόγω πολυπλοκότητας των σχετικών συστημάτων που την υπολογίζουν στο πρόγραμμα GT-Power, αυτή θα υπολογισθεί μέσω της προσεγγιστικής σχέσης :

$$y = 380,190 * AFR^{-3,25}$$

Η σχέση αυτή αντλήθηκε από παλαιότερη μελέτη [18], όπου χρησιμοποιήθηκε σε παρόμοιο κινητήρα και συσχετίζει τις εκπομπές της αιθάλης, και ειδικότερα την αδιαφάνεια αυτής, με τον λόγο αέρα-καυσίμου (AFR). Η σχέση αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι επειδή αναπτύχθηκε για να καλύπτει και περιπτώσεις μεταβατικής λειτουργίας όπου η υστέρηση του υπερπληρωτή δημιουργεί λ_a ίσο ή και μικρότερο του ένα, μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα για τις χαμηλές ταχύτητες του κινητήρα στα μεγάλα υψόμετρα.

Κεφάλαιο 7

Αποτελέσματα

προσομοίωσης σε

μόνιμη κατάσταση

λειτουργίας


7.1. Εισαγωγή

Το παρόν κεφάλαιο πραγματεύεται την σύγκριση της απόκρισης του κινητήρα μεταξύ μονοβάθμιας και διβάθμιας στροβιλο-υπερπλήρωσης με την αύξηση του υψομέτρου σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας (steady-state). Αναλυτικότερα, παρατίθενται τα αποτελέσματα της μονοβάθμιας στροβιλο-υπερπλήρωσης για λειτουργία σε διάφορα υψόμετρα. Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του προγράμματος για την διβάθμια στροβιλο-υπερπλήρωση. Τέλος, γίνεται σύγκριση των δύο εγκαταστάσεων μεταξύ τους, ως προς βασικά χαρακτηριστικά του κινητήρα, όπως η ισχύς, η μέση ενδεικνύμενη πίεση και η απόδοση των συστημάτων στροβιλο-υπερπλήρωσης.

Τα δύο συστήματα στροβιλο-υπερπλήρωσης εφαρμόζονται σε κινητήρα με τον ίδιο όγκο εμβολισμού, ίδιο αριθμό κυλίνδρων, αλλά διαφορετικό βαθμό συμπίεσης, ώστε να είναι πιο ρεαλιστικά τα αποτελέσματα σύγκρισης μεταξύ τους. Συγκεκριμένα, ο βαθμός συμπίεσης (compression ratio) πέφτει από το 18 στην μονοβάθμια στροβιλο-υπερπλήρωση, στο 14 στην διβάθμια. Αυτό γίνεται γιατί αναπτύσσονται πολύ μεγαλύτερες πιέσεις υπερπλήρωσης και υπάρχει κίνδυνος ανάπτυξης καταστροφικών πιέσεων εντός του κυλίνδρου.

Για να 'τρέξει' το πρόγραμμα πρέπει ο χρήστης να ορίσει τιμές για όλες τις μεταβλητές που έχει δημιουργήσει. Μία από τις βασικές μεταβλητές που πρέπει να ορίσει ο χρήστης είναι η ποσότητα του εγχυόμενου καυσίμου. Στο παρόν μοντέλο δεν εφαρμόστηκε κάποιο σύστημα περιορισμού του καυσίμου (fuel limiter) συναρτήσεως του υψομέτρου. Η κατανομή της ποσότητας του εγχυόμενου καυσίμου διατηρείται σταθερή για όλα τα υψόμετρα και είναι τέτοια η ποσότητα που ο κινητήρας να δουλεύει στο μέγιστο δυνατό φορτίο (100%). Η μεταβλητή που αλλάζει όσο το υψόμετρο αυξάνεται είναι το άνοιγμα των βαλβίδων 'wastegate' και το όριο της πίεσης στο οποίο ενεργοποιείται το άνοιγμα αυτών.

7.2. Προσομοίωση συνθηκών περιβάλλοντος

Η προσομοίωση του υψομέτρου στο πρόγραμμα GT-Power διευκολύνεται δεδομένου ότι δίνει την δυνατότητα να ορίσει ο χρήστης κατευθείαν υψόμετρο και να μην εισάγει χειροκίνητα τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Για να γίνει αυτό ο χρήστης πηγαίνει στα στοιχεία που προσομοιώνουν το περιβάλλον  και ορίζει στην καρτέλα 'Main' την πίεση (P_0) και την θερμοκρασία (T_0) αναφοράς. Στην συνέχεια στην καρτέλα 'Altitude and Humidity' επιλέγει την ρύθμιση του υψομέτρου και εισάγει σαν δεδομένα το υψόμετρο, το υψόμετρο αναφοράς και επιλέγει την διόρθωση της πίεσης και της θερμοκρασίας ταυτόχρονα με βάση τα ανωτέρω. Η διόρθωση που κάνει το πρόγραμμα για την πίεση βασίζεται στον τύπο (7.1):

$$P = P_i e^{\frac{-g_0 W_0 (z - z_i)}{RT_i}} \quad (7.1)$$

Με P την διορθωμένη πίεση, $P_i = P_0$ την πίεση στην αρχή της εκάστοτε ζώνης υψομέτρου, g_0 την επιτάχυνση της βαρύτητας, W_0 το μοριακό βάρος του αέρα ίσο με 28,9644 kg/kmol και R την παγκόσμια σταθερά των αερίων ίση με 8.314,32 J/kmol K.

Η διόρθωση της θερμοκρασίας γίνεται μέσω της σχέσης (7.2):

$$T = T_i + L_i (z - z_i) \quad (7.2)$$

Με T την διορθωμένη θερμοκρασία, $T_i = T_0$ την θερμοκρασία αναφοράς στην αρχή της εκάστοτε ζώνης υψομέτρου, L_i την θερμοκρασιακή βαθμίδα (εδώ ίση με -6,5 K/km), z το εκάστοτε γεωδυναμικό υψόμετρο (όπως ορίζεται από το χρήστη) και z_i το γεωδυναμικό υψόμετρο στην αρχή της εκάστοτε ζώνης υψομέτρου (εδώ το επίπεδο της θάλασσας).

Το γεωδυναμικό υψόμετρο ορίζεται μέσω της σχέσης (7.3) και χρησιμοποιείται για τον ορισμό της ζώνης υψομέτρου στην οποία λειτουργεί κάθε φορά ο κινητήρας, λόγω διαφοροποιήσεων στην επιτάχυνση της βαρύτητας.

$$z = \frac{r_0 h}{r_0 + h} \quad (7.3)$$

όπου z το γεωδυναμικό υψόμετρο, r_0 η ακτίνα της Γης (ίση με 6,356 km) και h το γεωμετρικό υψόμετρο.

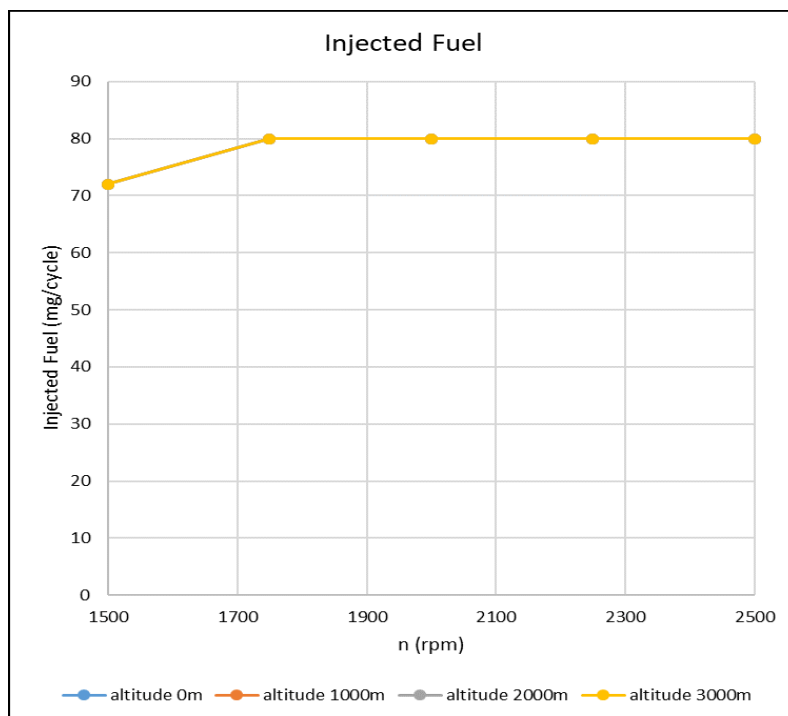
Στην παρούσα διπλωματική εργασία, ως υψόμετρο αναφοράς ορίστηκε το επίπεδο της θάλασσας με πίεση αναφοράς το 1 bar και θερμοκρασία αναφοράς 298 K. Το υψόμετρο που εξετάζεται κάθε φορά κρίθηκε ότι διευκολύνει το χρήστη περισσότερο και ορίστηκε σαν μεταβλητή. Τα υψόμετρα που μελετήθηκαν είναι 0, 1000, 2000, 3000 m, καθώς μέχρι τα 3 km θεωρείται ότι δουλεύουν πρακτικά κινητήρες επίγειων οχημάτων.

7.3. Επίδραση των προς εξέταση υψομέτρων

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τα ανωτέρω αναφερθέντα υψόμετρα. Αρχικά γίνεται αναφορά στα αποτελέσματα της μονοβάθμιας εγκατάστασης και στην συνέχεια στις διβάθμιας. Τέλος ακολουθεί η σύγκριση μεταξύ τους με κατάλληλα διαγράμματα.

7.3.1. Μονοβάθμιο σύστημα στροβιλο-υπερπλήρωσης

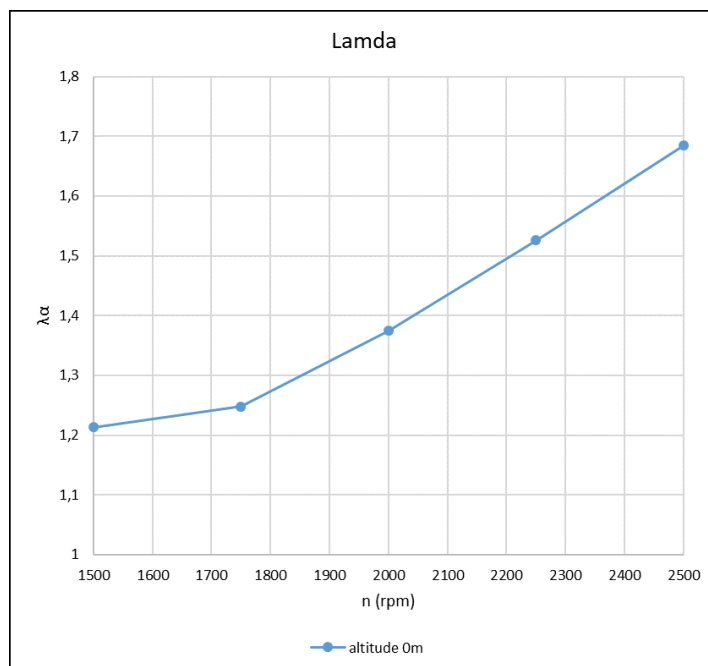
Αρχικά, παρατίθεται η κατανομή καυσίμου για την οποία μελετήθηκε η περίπτωση μονοβάθμιας στροβιλο-υπερπλήρωσης (Διάγραμμα 7.1α).



Διάγραμμα 7.1α: Κατανομή ποσότητας εγχυόμενου καυσίμου στους κυλίνδρους

Η κατανομή του καυσίμου αντιστοιχεί σε λειτουργία στο μέγιστο φορτίο και διατηρείται σταθερή για όλα τα εξεταζόμενα υψόμετρα. Τα υψόμετρα που εξετάζονται είναι 1000, 2000, 3000 και συγκρίνονται τόσο μεταξύ τους όσο και με το επίπεδο της θάλασσας. Το εύρος ταχυτήτων που θα μελετηθεί είναι [1500,2500] rpm.

Η επιλογή της συγκεκριμένης παροχής καυσίμου έγινε έτσι ώστε ο λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου να είναι σε αποδεκτά επίπεδα, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο παρακάτω Σχήμα 7.1β.

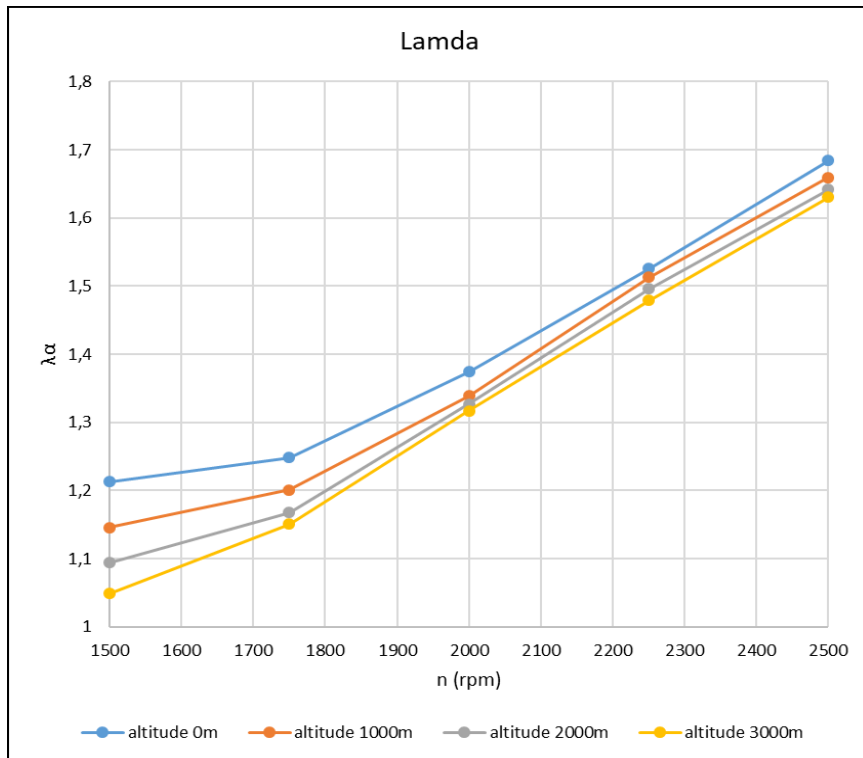


Διάγραμμα 7.1β: Μεταβολή λόγου ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα για μηδενικό υψόμετρο

Ακολουθεί το συγκριτικό μεταξύ των διαφόρων υψομέτρων Διάγραμμα 7.2, στο οποίο φαίνεται πως ο λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου (λ_α) στις χαμηλές στροφές είναι σε πολύ χαμηλά επίπεδα, γεγονός που έχει αρνητική επίδραση στις εκπομπές σωματιδίων, ενώ στις μεσαίες και υψηλές αυξάνεται με τις στροφές του κινητήρα και ανέρχεται περίπου στο 1,65.

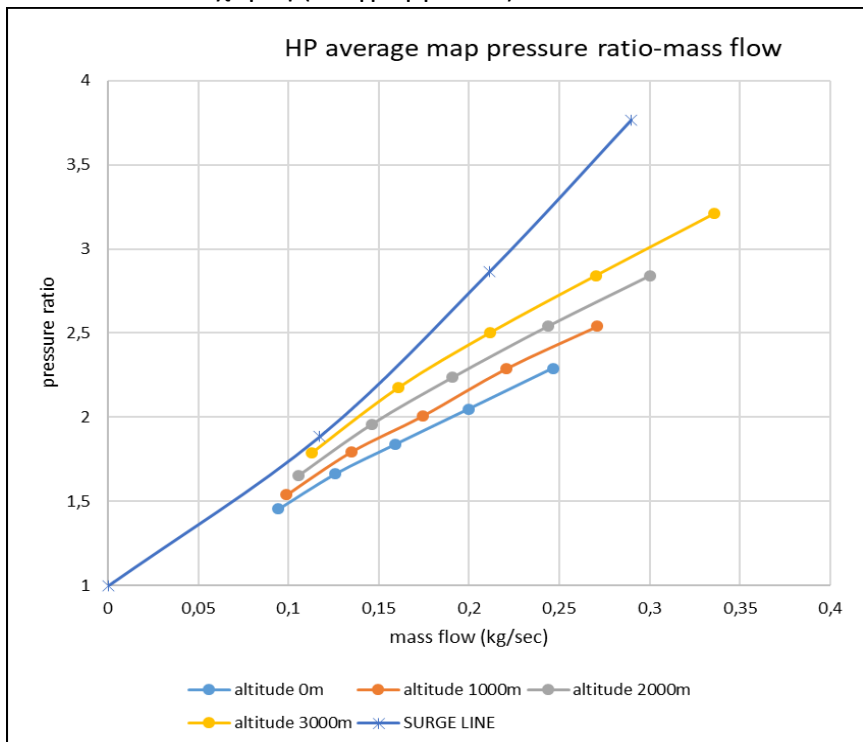
Στις χαμηλές στροφές του κινητήρα όσο το υψόμετρο αυξάνεται επειδή ο συμπιεστής δεν παρέχει ικανοποιητική ποσότητα αέρα ακόμα, το λ_α είναι στα όρια εκπομπών του χαρακτηριστικού μαύρου καπνού-αιθάλης, δηλαδή περίπου στο 1,2, για το επίπεδο της θάλασσας. Όσο το υψόμετρο αυξάνεται, για το ίδιο εύρος στροφών, το φαινόμενο εντείνεται με το λ_α να μειώνεται σημαντικά ακόμα και σε τιμές κάτω από 1,1. Αυτό έχει άμεση σχέση με την χαμηλή πίεση υπερπλήρωσης και την μειωμένη πυκνότητα με την οποία εισέρχεται ο αέρας στον κινητήρα. Έτσι, όσο το υψόμετρο αυξάνεται, μειώνεται η θερμοκρασία ευνοώντας την πυκνότητα του αέρα, αλλά η μείωση της πίεσης υπερτερεί και παίζει καθοριστικό ρόλο στην μείωση της πυκνότητας του αέρα (ρ).

Στις μεσαίες και υψηλές στροφές, όπου το ζεύγος στροβιλο-συμπιεστή δουλεύει "καλύτερα" και, όπως φάνηκε σε προηγούμενο διάγραμμα, η πίεση υπερπλήρωσης σε μεγάλα υψόμετρα φτάνει αυτήν του επιπέδου της θάλασσας, η παροχή μάζας αυξάνεται σημαντικά. Αυτό έχει σαν άμεση συνέπεια να αυξάνεται η πυκνότητα του αέρα που εισέρχεται στον κύλινδρο. Άρα, ενώ η ποσότητα καυσίμου διατηρείται σταθερή στα 80mg/cycle, η παροχή μάζας στους κυλίνδρους αυξάνεται με την αύξηση των στροφών και του υψομέτρου, συνεπώς και το λ_α έχει θετική κλίση.



Διάγραμμα 7.2: Λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα για διάφορα υψόμετρα

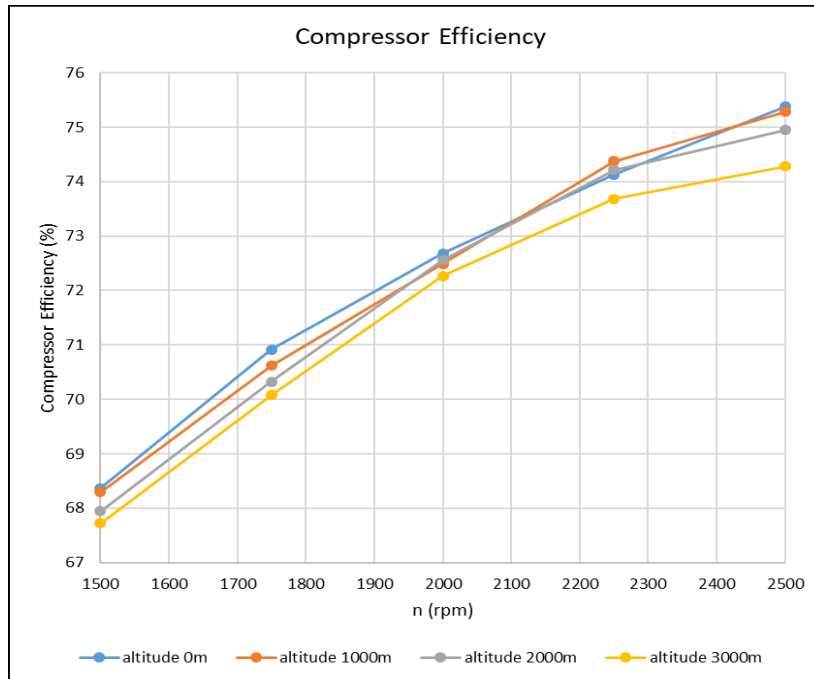
Ακολούθως, εξετάζεται η λειτουργία του συμπιεστή με την αναπαράσταση των σημείων λειτουργίας αυτού πάνω στο χάρτη (Διάγραμμα 7.3):



Διάγραμμα 7.3: Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή με καμπύλες λειτουργίας για διάφορα υψόμετρα

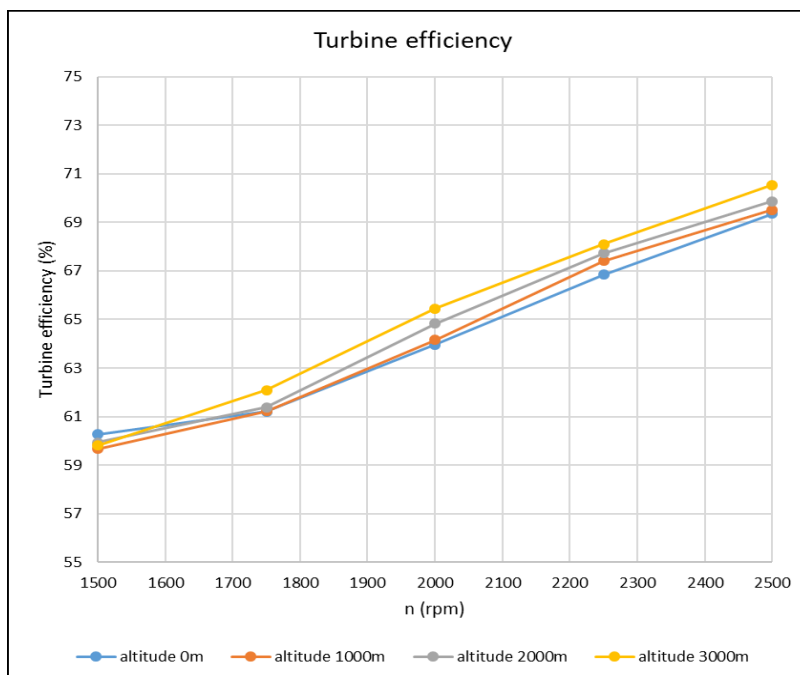
Παρατηρείται ότι η λειτουργία του κινητήρα σε συνεργασία με το ζεύγος στροβιλο-υπερπλήρωσης δεν μεταπίπτει στην περιοχή της πάλμωσης και άρα λειτουργεί φυσιολογικά. Ωστόσο, όσο το υψόμετρο αυξάνεται, αυξάνεται και ο λόγος πίεσης του συμπιεστή λόγω μείωσης της πίεσης του περιβάλλοντος, και τα αρχικά σημεία λειτουργίας πλησιάζουν την γραμμή πάλμωσης. Όσο οι στροφές αυξάνονται ο συμπιεστής παρέχει μεγαλύτερη παροχή αέρα με μεγαλύτερο λόγο πίεσης.

Στην συνέχεια παρατίθεται το διάγραμμα του βαθμού απόδοσης στον οποίο λειτουργεί ο συμπιεστής και ο στρόβιλος.

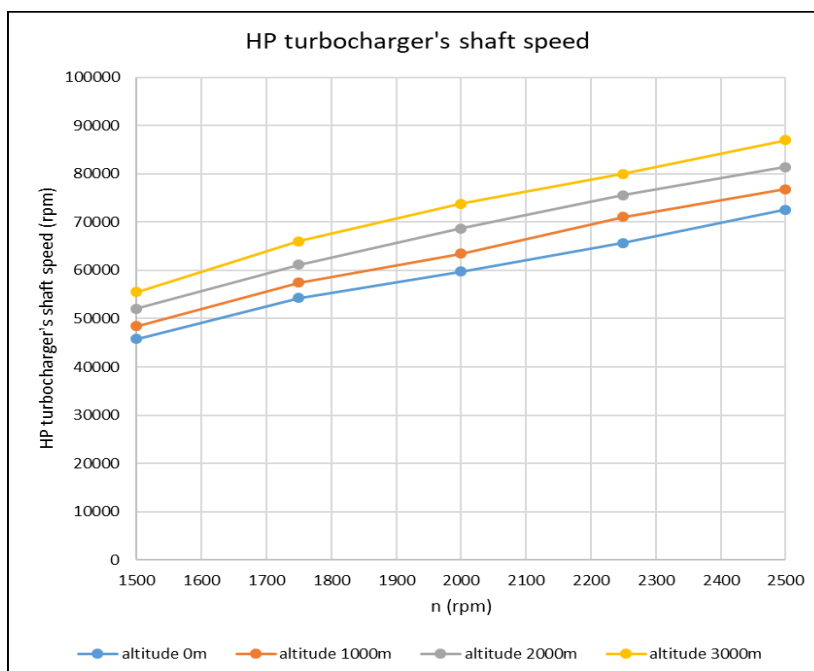


Διάγραμμα 7.4: Απόδοση συμπιεστή μονοβάθμιας στροβιλο-υπερπλήρωσης συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα για διάφορα υψόμετρα

Όσον αφορά την απόδοση του συμπιεστή στα διάφορα υψόμετρα, σε όλο το φάσμα ταχυτήτων οι σχετικές διαφορές είναι σχεδόν αμελητέες μεταξύ των διαφόρων υψομέτρων και του επιπέδου της θάλασσας. Γίνεται φανερό ότι όσο η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα αυξάνεται, ο συμπιεστής λειτουργεί καλύτερα και η απόδοση διατηρείται σε ικανοποιητικά επίπεδα.



Διάγραμμα 7.5: Απόδοση στροβίλου συστήματος μονοβάθμιας στροβιλο-υπερπλήρωσης συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα για διάφορα υψόμετρα



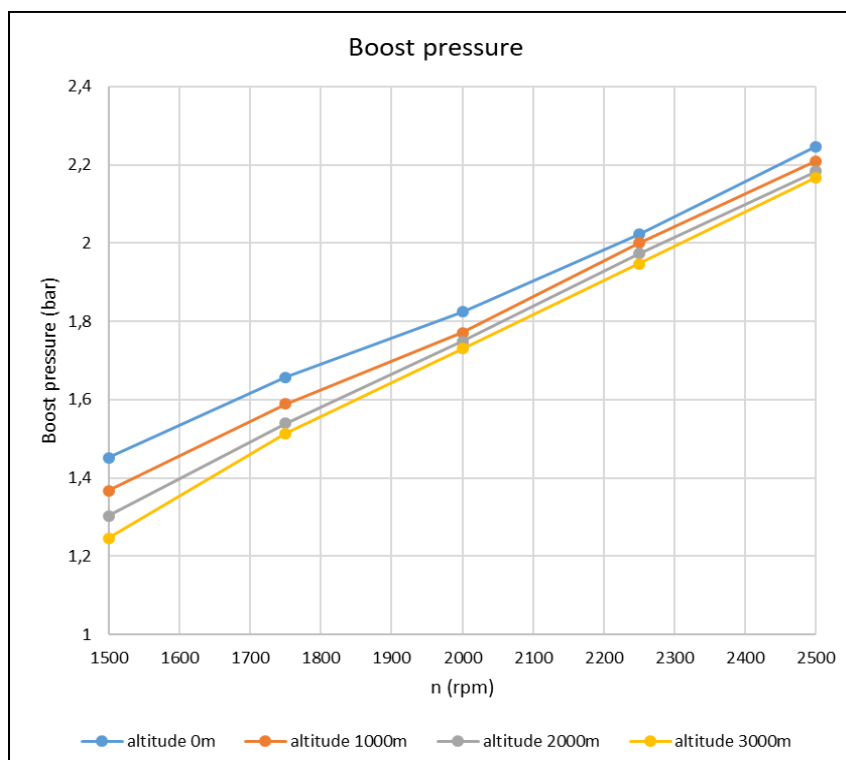
Διάγραμμα 7.6: Ταχύτητα περιστροφής ζεύγους στροβιλο-υπερπλήρωσης συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα για διάφορα υψόμετρα

Από τα διαγράμματα 7.5 και 7.6 απορρέει ότι όσο η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα αυξάνεται, αυξάνεται και η ταχύτητα περιστροφής του ζεύγους στροβιλο-συμπιεστή με τον στρόβιλο να λειτουργεί με αυξανόμενο βαθμό απόδοσης. Ο στρόβιλος δουλεύει σε ικανοποιητικούς βαθμούς απόδοσης και οι ταχύτητες περιστροφής του ζεύγους δεν ξεπερνούν τις 90.000 rpm, όντας εντός ορίων φυσιολογικής λειτουργίας.

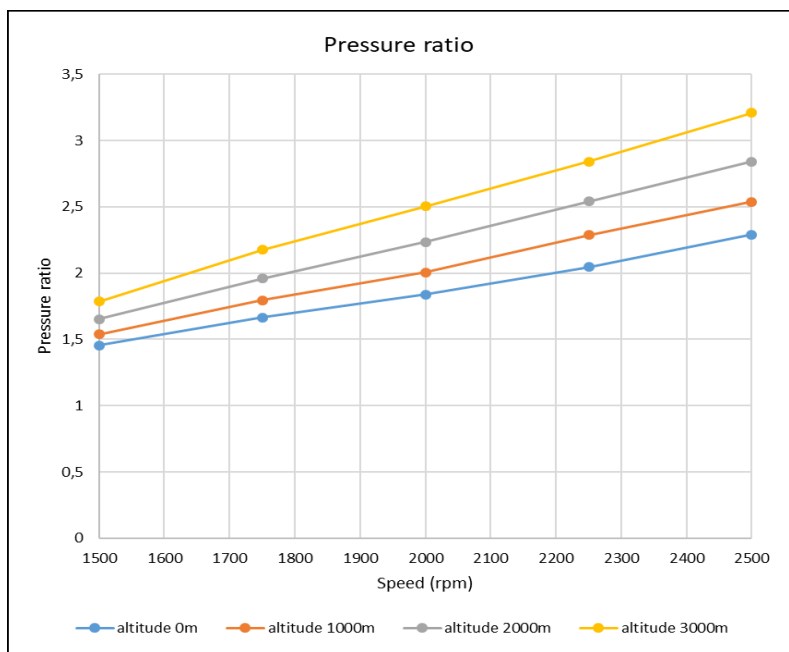
Παρατηρείται, επίσης, ότι όσο το υψόμετρο αυξάνεται για σταθερή ταχύτητα περιστροφής, αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής του ζεύγους στρόβιλου-συμπιεστή. Αυτό οφείλεται στο ότι πέφτει η πίεση αντίθλιψης-περιβάλλοντος που αντιλαμβάνεται ο στρόβιλος και συνεπώς λειτουργεί αποδοτικότερα. Για να παρέχει όμως την μεγαλύτερη παροχή που απαιτείται πρέπει να λειτουργήσει σε μεγαλύτερες στροφές.

Οφείλει, ωστόσο, να παρουσιαστεί αναλυτικά και η πίεση υπερπλήρωσης που παρέχει ο συμπιεστής στον κινητήρα. Η διαστατή μεταβολή (σε bar) αυτής συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα φαίνεται στο διάγραμμα 7.7, ενώ στο διάγραμμα 7.8 φαίνεται η αδιάστατη, ως προς την πίεση εισαγωγής στον συμπιεστή, πίεση υπερπλήρωσης, δηλαδή ο λόγος πίεσης.

Το συμπέρασμα που εξάγεται από τα διαγράμματα αυτά είναι ότι η πίεση υπερπλήρωσης μειώνεται όσο το υψόμετρο αυξάνεται για σταθερές στροφές του κινητήρα, ωστόσο ο λόγος πίεσης αυξάνεται, διότι μειώνεται η πίεση του περιβάλλοντος-εισαγωγής στον συμπιεστή. Άρα, ενώ ο συμπιεστής δίνει περίπου στα ίδια επίπεδα πίεση υπερπλήρωσης με μικρές διαφορές μεταξύ των διαφόρων υψομέτρων, οι οποίες όλο και μειώνονται όσο αυξάνονται οι στροφές του κινητήρα, η πίεση εισόδου στον συμπιεστή μειώνεται άρα ο λόγος πίεσης αυξάνεται. Ο λόγος πίεσης σχεδόν σε όλο το εύρος ταχυτήτων είναι μεγαλύτερος του 2 και μάλιστα φτάνει ως και το 3 στις 2500rpm, με την πίεση στα 2,3 bar, γεγονός που δικαιολογεί και την ύπαρξη ψυγείου του αέρα υπερπλήρωσης.



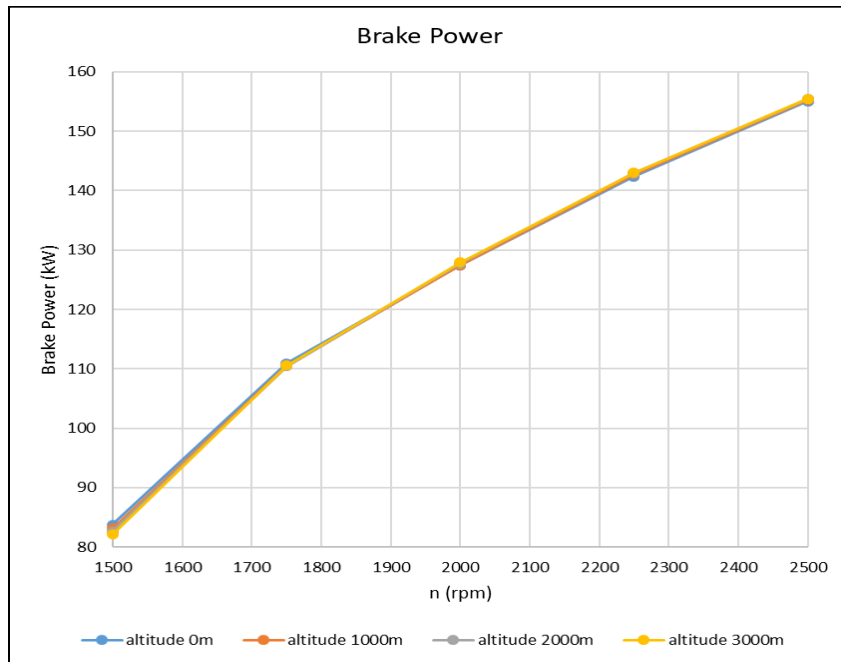
Διάγραμμα 7.7: Πίεση υπερπλήρωσης συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα για διάφορα υψόμετρα



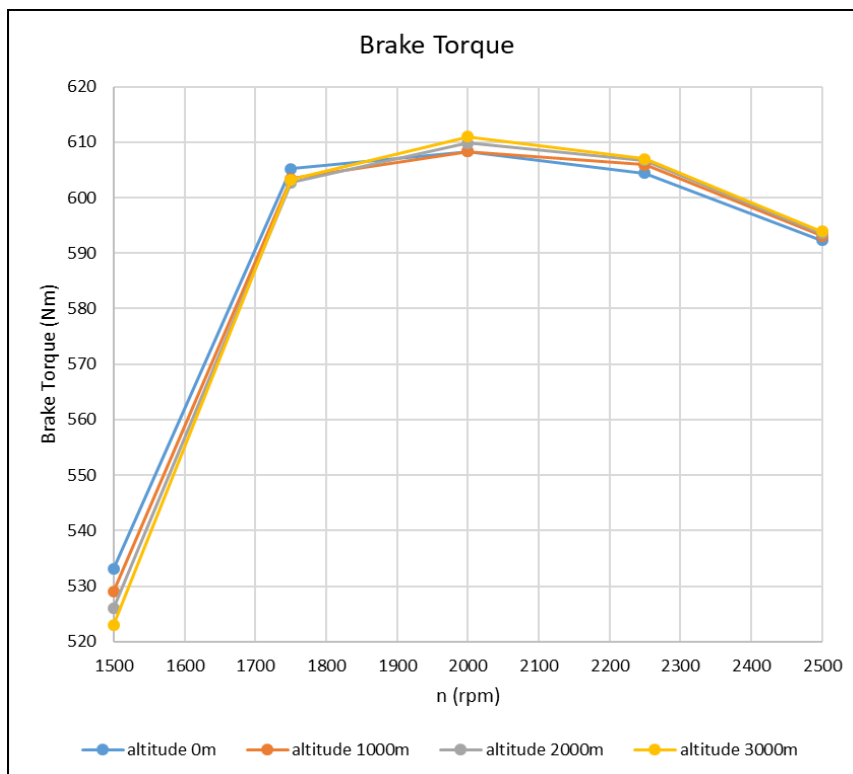
Διάγραμμα 7.8: Λόγος πίεσης συμπιεστή συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα για διάφορα υψόμετρα

Ακολουθούν τα διαγράμματα της ισχύος και της ροπής του κινητήρα. Το συμπέρασμα που απορρέει είναι ότι ο κινητήρας έχει την ικανότητα να ανακτά την ισχύ που είχε στο επίπεδο της θάλασσας για όλα τα υψόμετρα. Αυτό οφείλεται στο φαινόμενο γνωστό ως 'self compensation ability' σύμφωνα με το οποίο μπορεί ο συμπιεστής να βλέπει στην είσοδό του μικρότερη πίεση, λόγω της μικρότερης πίεσης του περιβάλλοντος όσο το υψόμετρο αυξάνεται, αλλά ο στρόβιλος 'βλέπει' μικρότερη πίεση στην έξοδό του με αποτέλεσμα να εκτονώνει τα καυσαέρια αποτελεσματικότερα. Ο όρος 'αποτελεσματικότερα' αναφέρεται στον καλύτερο βαθμό απόδοσης του στρόβιλου που σε συνδυασμό με τον συμπιεστή παρέχουν την αναγκαία ποσότητα αέρα.

Λόγω του παραπάνω φαινομένου και η ροπή διαφέρει ελάχιστα μεταξύ των διαφόρων υψομέτρων. Το μέγιστο της ροπής εμφανίζεται κοντά στις 2000rpm.



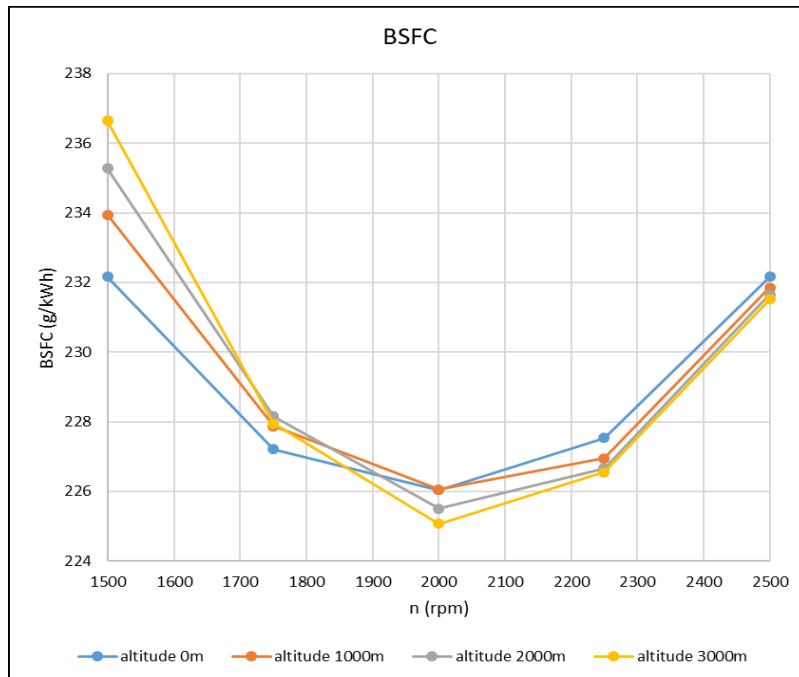
Διάγραμμα 7.9: Παραγόμενη ισχύς συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα για διάφορα υψόμετρα



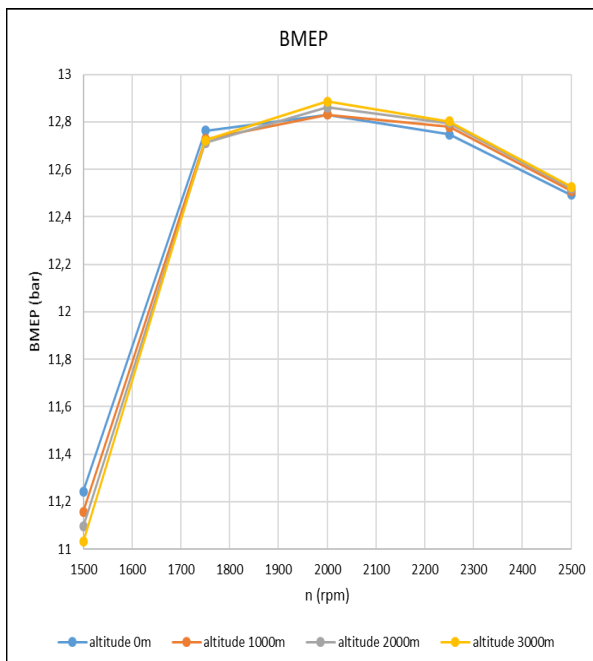
Διάγραμμα 7.10: Ροπή κινητήρα συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής για διάφορα υψόμετρα

Από το διάγραμμα 7.11 συμπεραίνεται πως στις χαμηλές στροφές ο χαμηλός λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου σε μεγάλα υψόμετρα δημιουργεί μεγάλη ειδική κατανάλωση, λόγω και της χαμηλής αναλογικά παραγόμενης ισχύος (Διάγραμμα 7.9). Στις υψηλότερες στροφές οι διαφορές μεταξύ των υψομέτρων είναι σχεδόν αμελητέες, με τις καμπύλες που

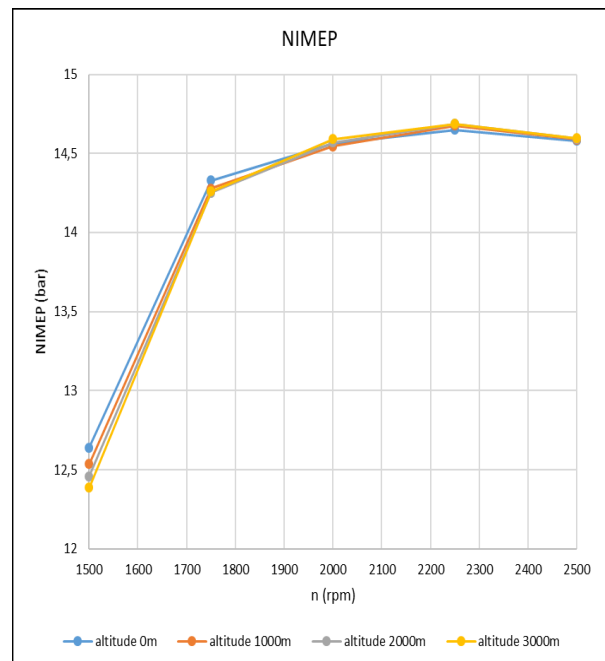
αντιστοιχούν σε μεγαλύτερα υψόμετρα να υποδεικνύουν ελαφρώς μικρότερη κατανάλωση της τάξης του 0,1-0,5 g/kWh σε σχέση με το επίπεδο της θάλασσας.



Διάγραμμα 7.11: Ειδική κατανάλωση καυσίμου συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα για διάφορα υψόμετρα



Εικόνα 7.12α: Μέση πραγματική πίεση συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα για διάφορα υψόμετρα



Εικόνα 7.12β: Μέση ενδεικνυόμενη πίεση συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα για διάφορα υψόμετρα

Στα διαγράμματα 7.12 φαίνεται ότι στις χαμηλές στροφές το ζεύγος στροβιλο-υπερπλήρωσης δεν λειτουργεί αποδοτικά και δίνει χαμηλή μέση πραγματική πίεση και μέση

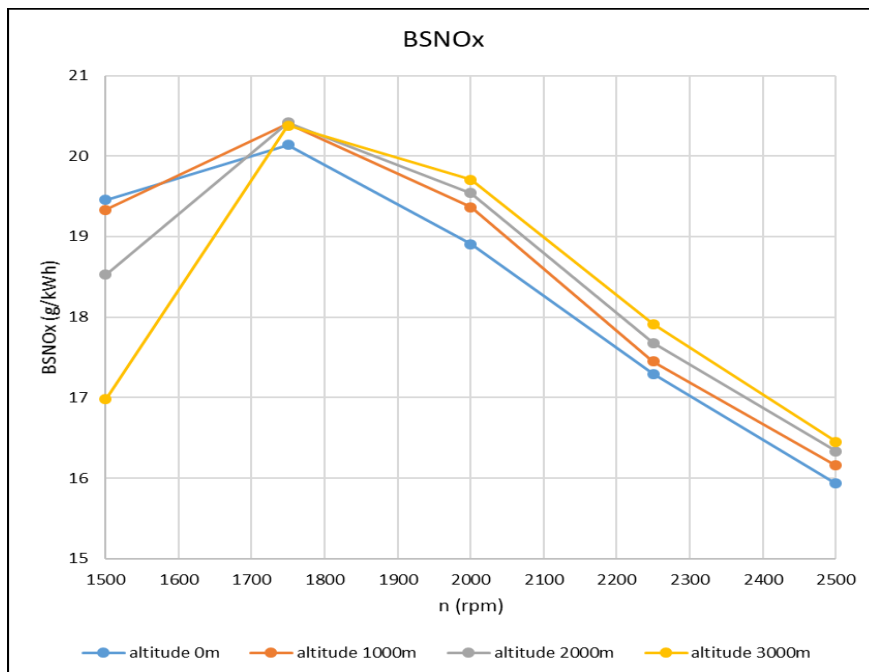
ενδεικνυόμενη πίεση. Στις υψηλότερες στροφές που παρέχεται η απαιτούμενη ποσότητα αέρα η μέση ειδική πίεση αυξάνεται ραγδαία, ωστόσο δεν φτάνει σε επίπεδα υψηλά (κοντά στα 30 bar είναι το κατασκευαστικό όριο σήμερα). Προφανώς το Διάγραμμα 7.12α είναι ίδιας μορφής με το 7.10 (με διαφορετικές μονάδες).

Αναφορικά με τις εκπομπές ρύπων εξετάζονται μόνο οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου και οι εκπομπές αιθάλης καθώς οι υπόλοιποι θερμοθετημένοι ρύποι (CO, H_xC_y κτλ) θεωρούνται αμελητέοι, ενώ είναι και εξαιρετικά δύσκολο να προσομοιωθούν επιτυχώς.

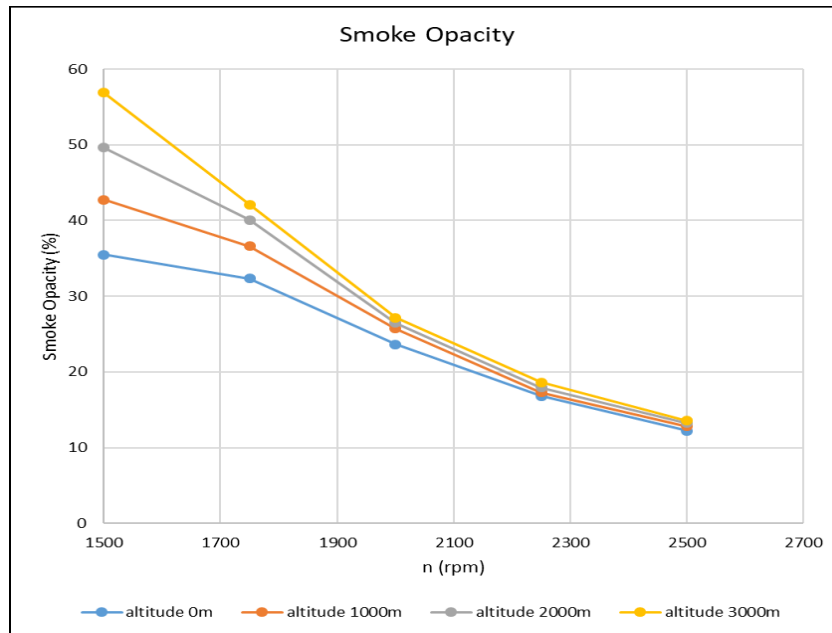
Στο διάγραμμα 7.13α, όπου παρουσιάζεται η μεταβολή των ειδικών εκπομπών NO_x, φαίνεται ότι στις χαμηλές στροφές λόγω του ότι το λ_α πλησιάζει την στοιχειομετρία και άρα οι θερμοκρασίες είναι υψηλές (διάγραμμα 7.14) ευνοείται ο σχηματισμός του ρύπου αυτού. Αναλογικά όμως με την παραγόμενη ισχύ, όσο το υψόμετρο αυξάνεται για σταθερές στροφές οι εκπομπές μειώνονται σημαντικά. Επίσης, σε χαμηλές στροφές, όσο το υψόμετρο αυξάνεται πέφτει σημαντικά η μέγιστη πίεση στους κυλίνδρους με αποτέλεσμα την καταστολή της δημιουργίας οξειδίων του αζώτου.

Μετά τις 2000 rpm περίπου, η κλίση των καμπυλών είναι αρνητική. Η πτωτική αυτή τάση οφείλεται στην μείωση της θερμοκρασίας των καυσαερίων, που οδηγεί στην χαμηλή συγκέντρωση NO_x, καθώς και στην ραγδαία αύξηση της ισχύος συναρτήσει των στροφών του κινητήρα. Η διαίρεση μίας ποσότητας (συγκέντρωση NO_x) ήδη μικρής με μία ποσότητα μεγάλη (ισχύς) οδηγεί σε μικρούς αριθμούς ειδικών εκπομπών οξειδίων του αζώτου.

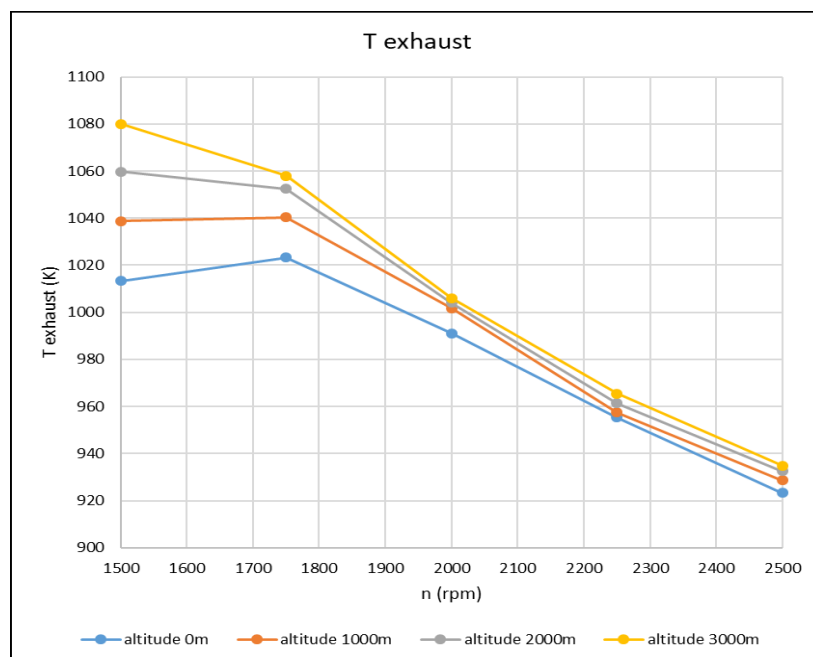
Στο διάγραμμα 7.13β που παρουσιάζεται η μεταβολή της αδιαφάνειας της αιθάλης φαίνεται ότι η αύξηση του υψομέτρου ευνοεί των σχηματισμό σωματιδίων αιθάλης. Αυτό οφείλεται στο ότι ο λόγος αέρα καύσης μειώνεται προσεγγίζοντας την μονάδα με την αύξηση του υψομέτρου (βλ. Σχήμα 7.2).



Διάγραμμα 7.13α: Ειδικές εκπομπές οξειδίων του αζώτου συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα για διάφορα υψόμετρα

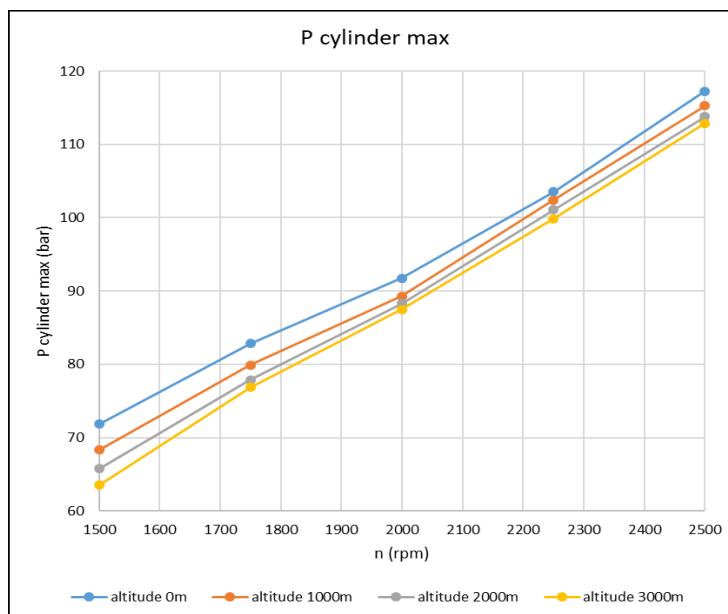


Διάγραμμα 7.13β: Αδιαφάνεια εκπεμπόμενης αιθάλης συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα για διάφορα υψόμετρα



Διάγραμμα 7.14: Θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων (εισόδου στον στρόβιλο) συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα για διάφορα υψόμετρα

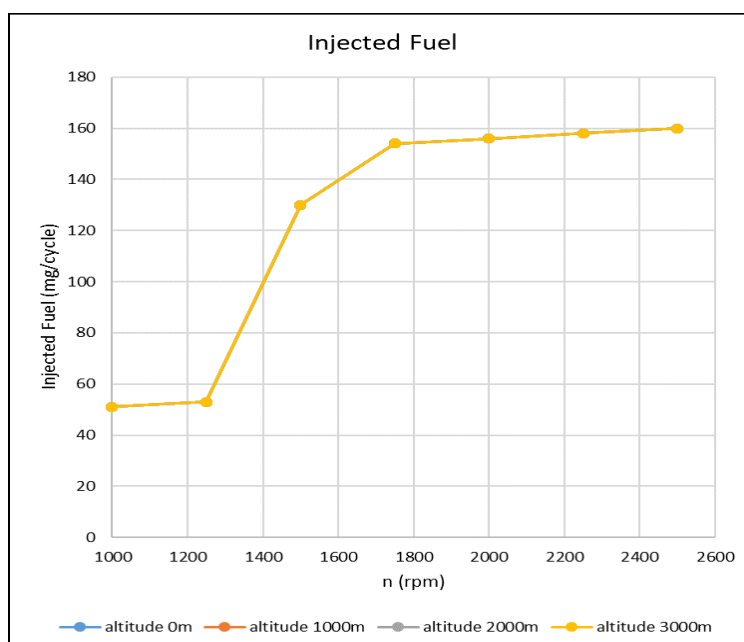
Από το διάγραμμα 7.14 φαίνεται πως η θερμοκρασία των καυσαερίων, κατά την είσοδό τους στον στρόβιλο, είναι εντός ορίων αντοχής των υλικών, όπως αυτά διαμορφώνονται σήμερα. Εντός κατασκευαστικών ορίων (μικρότερη των 200 bar) είναι και η μέγιστη πίεση που αναπτύσσεται στους κυλίνδρους (Διάγραμμα 7.15).



Διάγραμμα 7.15: Μέγιστη πίεση κυλίνδρων συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα για διάφορα υψόμετρα

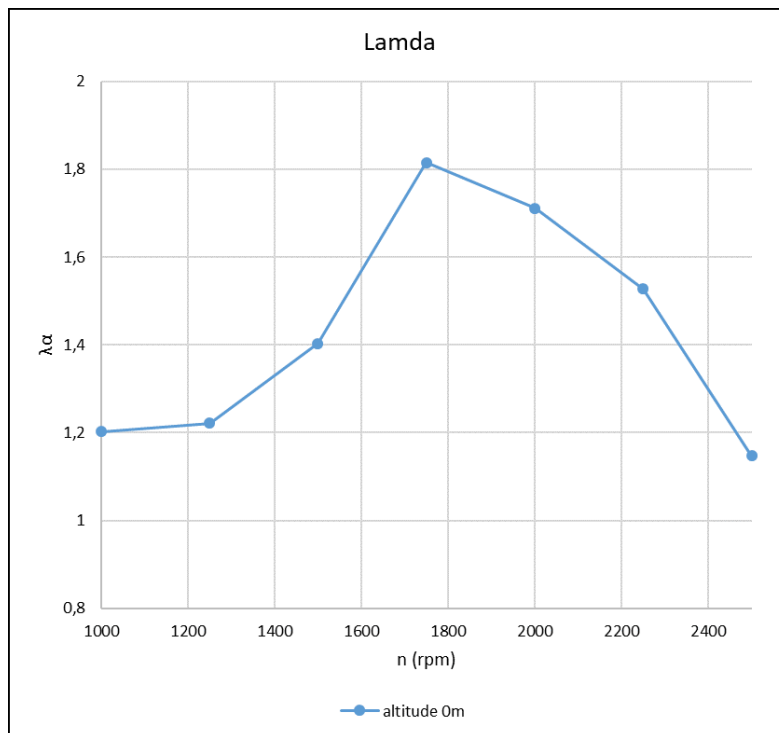
7.3.2. Διβάθμιο σύστημα στροβιλο-υπερπλήρωσης

Η μελέτη της απόκρισης του διβάθμιου συστήματος στροβιλο-υπερπλήρωσης γίνεται σε ένα ευρύτερο πεδίο ταχυτήτων σε σχέση με το μονοβάθμιο σύστημα, στο εύρος [1000, 2500] rpm. Στο εύρος αυτό η κατανομή της εγχεόμενης ποσότητας καυσίμου συναρτήσει των στροφών του κινητήρα είναι ίδια για όλα τα εξεταζόμενα υψόμετρα και οδηγεί σε λειτουργία του κινητήρα στο 100% του φορτίου (Διάγραμμα 7.16α).



Διάγραμμα 7.16: Κατανομή εγχεόμενης ποσότητας καυσίμου συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα για διάφορα υψόμετρα

Η επιλογή της συγκεκριμένης παροχής καυσίμου έγινε έτσι ώστε ο λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου να είναι σε αποδεκτά επίπεδα, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο παρακάτω Σχήμα 7.16β.



Διάγραμμα 7.16β: Μεταβολή λόγου ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα για μηδενικό υψόμετρο

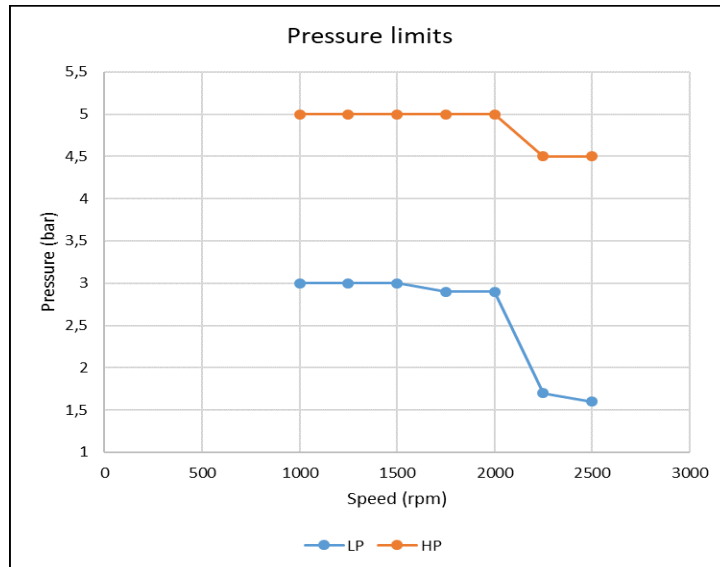
Καταρχήν, οφείλουν να εξεταστούν τα σημεία λειτουργίας των δύο συμπιεστών, υψηλής και χαμηλής πίεσης. Στα δύο επόμενα διαγράμματα που παρατίθενται, παρίστανται οι καμπύλες λειτουργίας των δύο συμπιεστών για διάφορα υψόμετρα και οι καμπύλες πάλμωσης. Όπως γίνεται φανερό οι δύο συμπιεστές λειτουργούν σε ασφαλή περιοχή σε σχέση με την γραμμή πάλμωσης.

Στις υψηλές στροφές λειτουργίας του κινητήρα, η πτώση στον λόγο πίεσης και την παροχή μάζας που παρατηρείται οφείλεται στο σύστημα ελέγχου των δύο συμπιεστών. Συγκεκριμένα, το σύστημα ελέγχου των δύο συμπιεστών όσο οι στροφές του κινητήρα αυξάνονται ορίστηκε να ανοίγει τις βαλβίδες wastegate των αντίστοιχων στροβίλων σε μικρότερες πιέσεις από τα 5 bar για τον συμπιεστή υψηλής και 3 bar για τον συμπιεστή χαμηλής πίεσης. Αυτό γίνεται για την αποφυγή της υπερτάχυνσης των ζευγών στροβιλο-υπερπλήρωσης και της υπερβολικής αύξησης πίεσης υπερπλήρωσης (overboosting). Το χαρακτηριστικό αυτό στην λειτουργία των δύο ζευγών υπερπλήρωσης επεξηγείται παρακάτω.

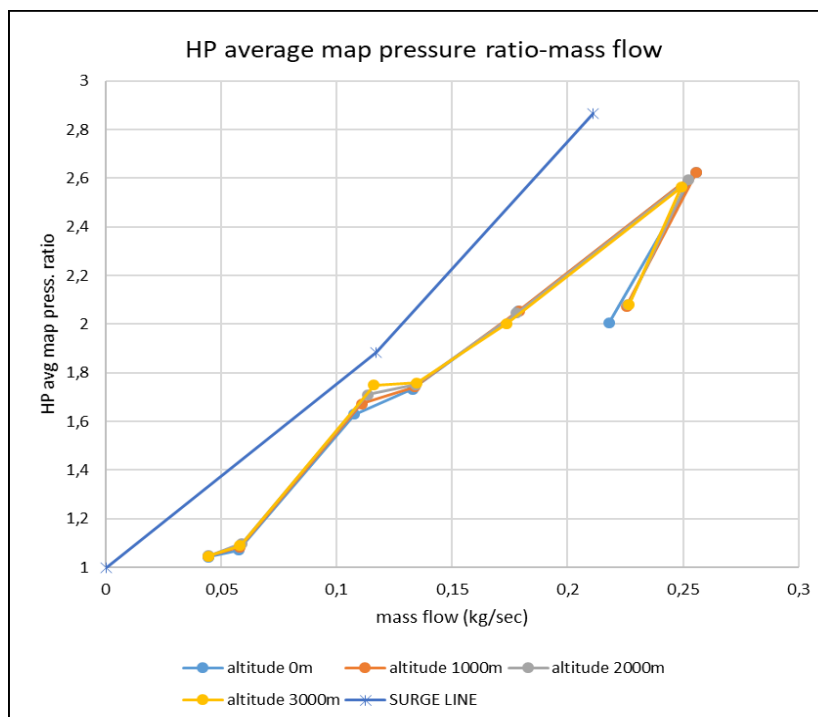
Το διάγραμμα 7.17 δείχνει τα όρια πιέσεων στα οποία γίνεται ο έλεγχος των βαλβίδων παράκαμψης καυσαερίου, τα οποία παραμένουν σταθερά για όλα τα υψόμετρα για να υπάρχει επί κοινής βάσεως σύγκριση των διαφόρων υψομέτρων. Το διάγραμμα αυτό δείχνει για παράδειγμα ότι στις 2250 rpm στο ζεύγος υψηλής πίεσης η βαλβίδα wastegate ανοίγει

όταν η πίεση είναι μεγαλύτερη ίση των 4,5 bar και αντίστοιχα στο ζεύγος χαμηλής πίεσης η βαλβίδα του στροβίλου ανοίγει όταν η πίεση αυξηθεί πάνω από τα 1,6 bar.

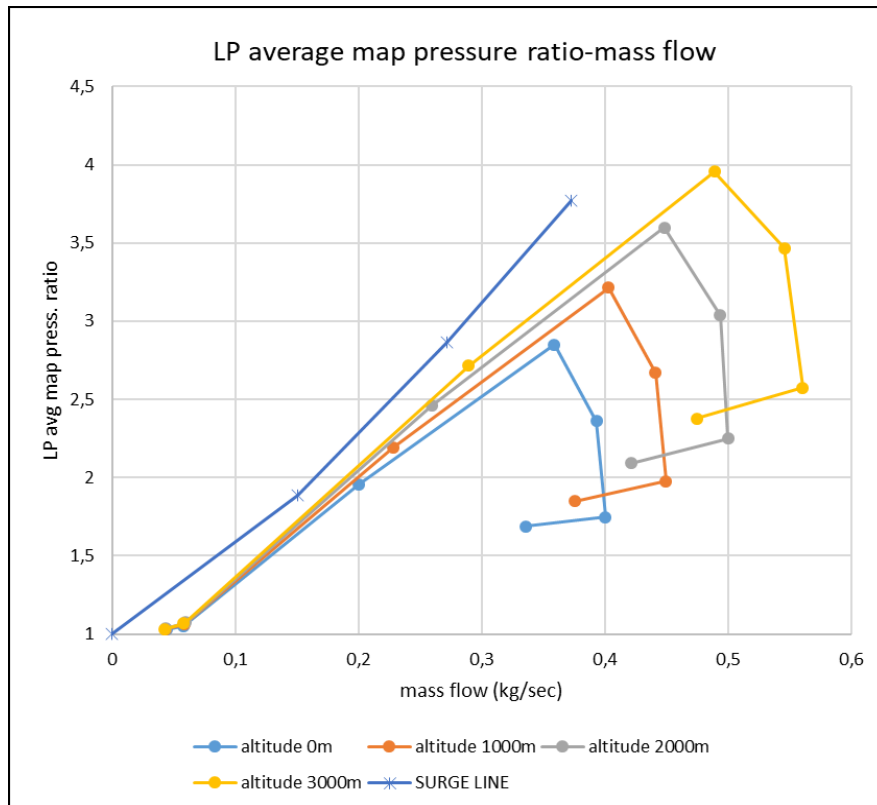
Μπορεί η πίεση στην οποία ανοίγουν οι βαλβίδες, στις υψηλές στροφές, να μειώνεται ραγδαία, όμως οφείλει να εξεταστεί και σε συνδυασμό με τις αποδόσεις του κινητήρα, δηλαδή την ισχύ, την κατανάλωση και τον λόγο ισοδυναμίας αυτού.



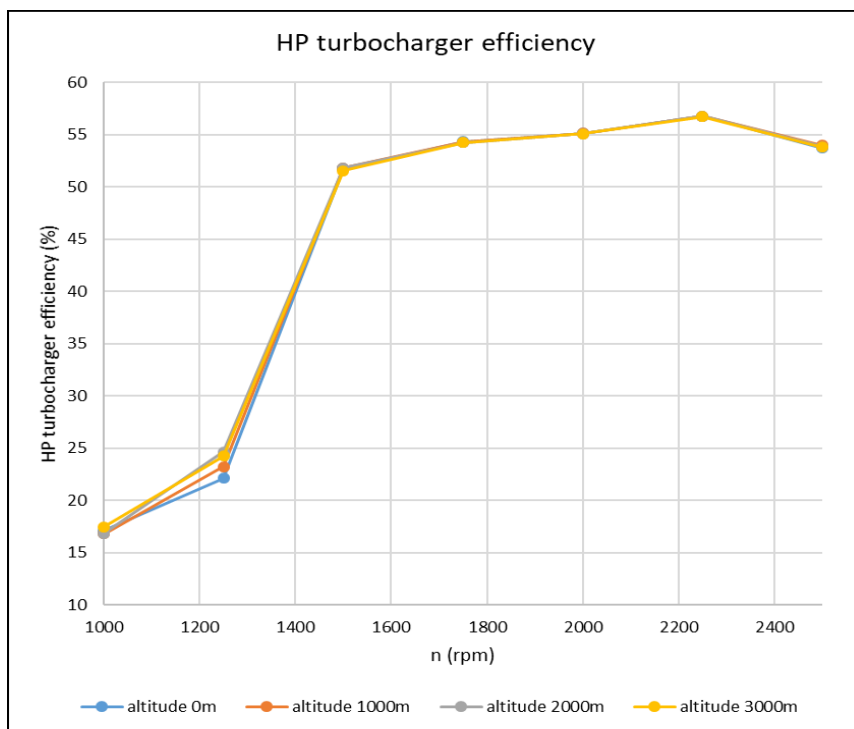
Διάγραμμα 7.17: Όρια πιέσεων για τον έλεγχο των βαλβίδων παράκαμψης καυσαερίου για το ζεύγος υψηλής και χαμηλής πίεσης συναρτήσεσι των στροφών του κινητήρα. (Το διάγραμμα ισχύει για όλα τα εξεταζόμενα υψόμετρα.)



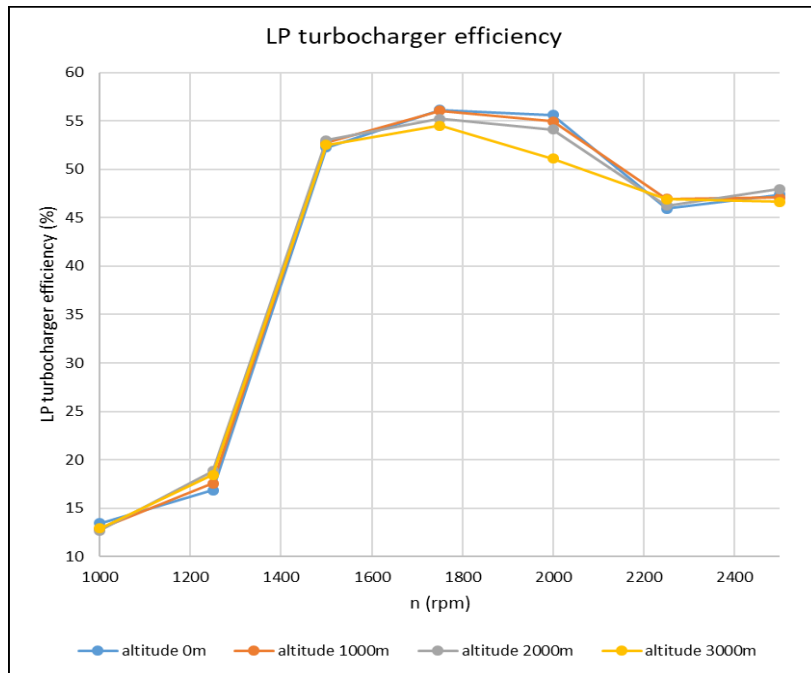
Διάγραμμα 7.18: Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή υψηλής πίεσης για διάφορα υψόμετρα



Διάγραμμα 7.19: Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή χαμηλής πίεσης για διάφορα υψόμετρα

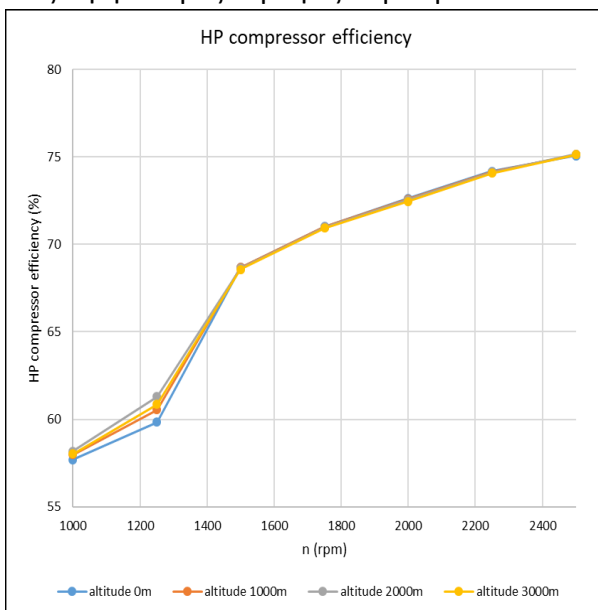


Διάγραμμα 7.20: Απόδοση στροβιλο-υπερπληρωτή υψηλής πίεσης συναρτήσει των στροφών του κινητήρα για διάφορα υψόμετρα

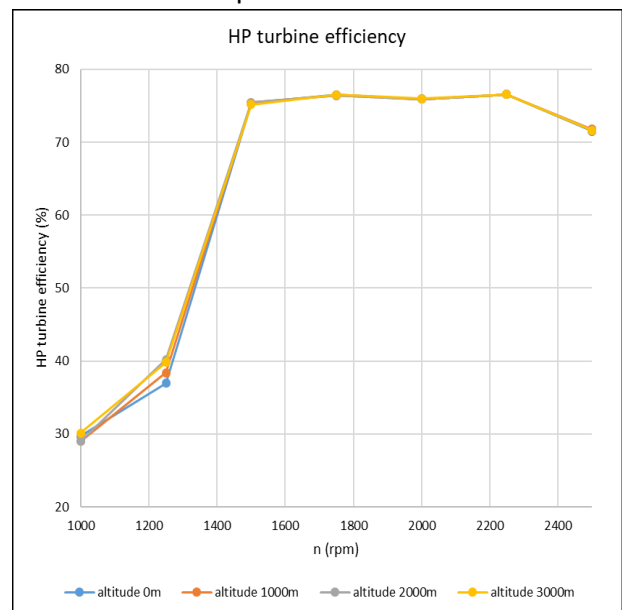


Διάγραμμα 7.21: Απόδοση στροβιλο-υπερπληρωτή χαμηλής πίεσης συναρτήσει των στροφών του κινητήρα για διάφορα υψόμετρα

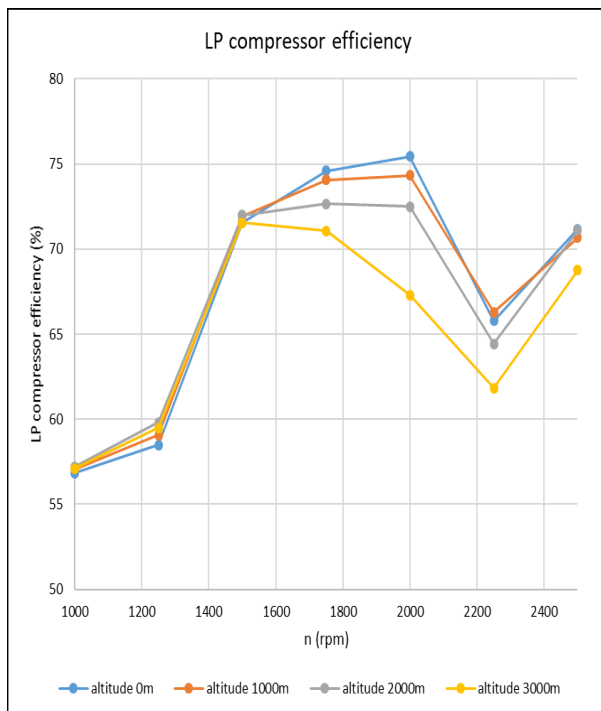
Στα Διαγράμματα 7.20 και 7.21 φαίνονται οι υψηλοί βαθμοί απόδοσης των ζευγών στροβιλο-υπερπλήρωσης που επιτυγχάνονται για διάφορες στροφές του κινητήρα και υψόμετρα. Στις χαμηλές στροφές παρατηρούνται ιδιαίτερα μειωμένοι βαθμοί απόδοσης, καθώς όπως φαίνεται και στα Διαγράμματα 7.22 και 7.23 που ακολουθούν οι βαθμοί απόδοσης των στροβίλων είναι χαμηλοί. Κατά συνέπεια το γινόμενο του βαθμού απόδοσης του συμπιεστή επί αυτόν του στροβίλου πέφτει σε εξαιρετικά χαμηλές τιμές. Παρόλα αυτά, στις υψηλότερες στροφές οι βαθμοί απόδοσης είναι σε ικανοποιητικά επίπεδα.



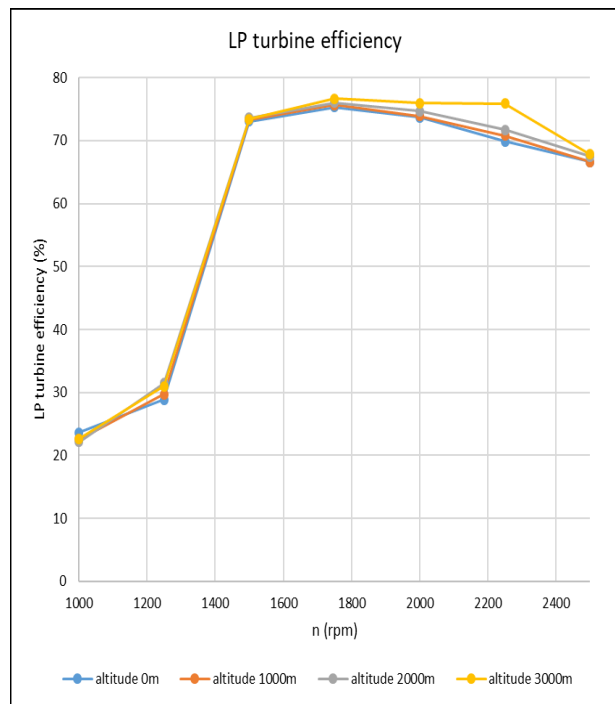
Διάγραμμα 7.22α: Απόδοση συμπιεστή υψηλής πίεσης συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής για διάφορα υψόμετρα



Εικόνα 7.22β: Απόδοση στροβίλου υψηλής πίεσης συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής για διάφορα υψόμετρα



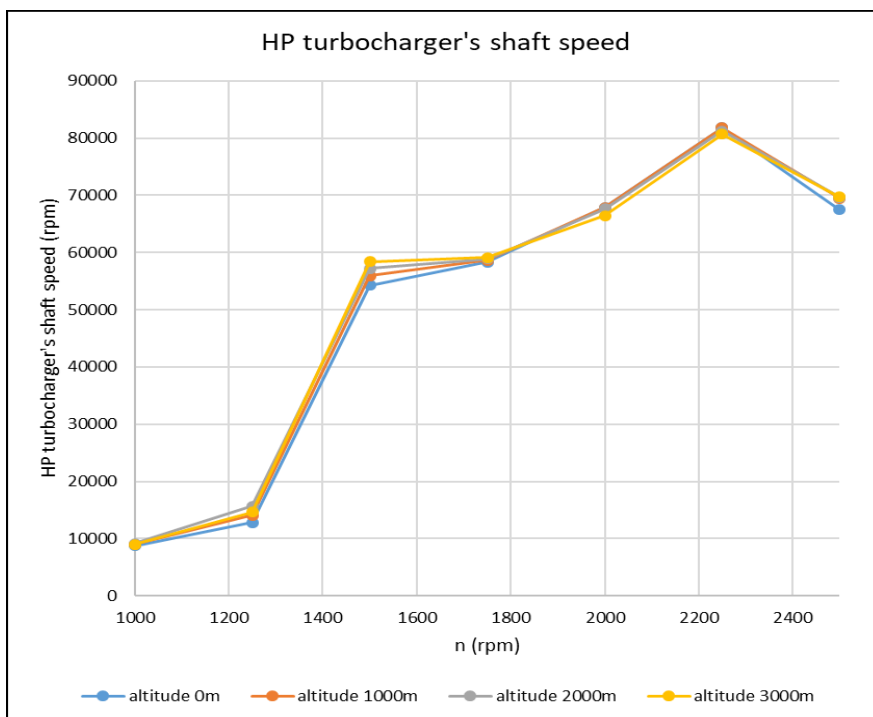
Εικόνα 7.23α: Απόδοση συμπιεστή χαμηλής πίεσης συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής για διάφορα υψόμετρα



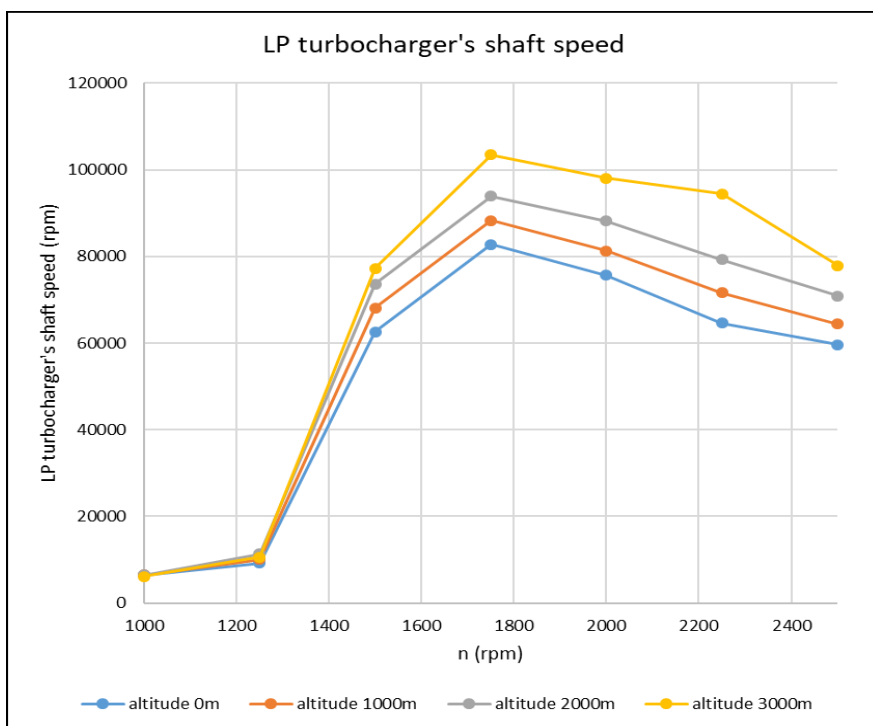
Εικόνα 7.23β: Απόδοση στροβίλου χαμηλής πίεσης συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής για διάφορα υψόμετρα

Παρατήρηση: Οι μειωμένοι βαθμοί απόδοσης στον συμπιεστή χαμηλής πίεσης στις υψηλές ταχύτητες οφείλονται στους υψηλούς λόγους πίεσης που αναπτύσσονται λόγω και της μείωσης της ατμοσφαιρικής πίεσης που έχει σαν είσοδο ο συμπιεστής. Επίσης, όπως φαίνεται από τον αντίστοιχο χάρτη του συμπιεστή, στις υψηλές στροφές όσο το υψόμετρο αυξάνεται τα σημεία λειτουργίας απομακρύνονται από το κέντρο του χάρτη στο οποίο επικρατούν οι υψηλότεροι βαθμοί απόδοσης.

Στην συνέχεια (Διαγράμματα 7.23 και 7.24) εξετάζεται η μεταβολή των στροφών των δύο στροβιλο-υπερπληρωτών συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα. Απορρέει το συμπέρασμα ότι και τα δύο ζεύγη λειτουργούν, ύστερα και από το έλεγχο μέσω του ανοίγματος της βαλβίδας παράκαμψης καυσαερίου, σε φυσιολογικές τιμές ταχυτήτων. Λειτουργούν, δηλαδή, σε στροφές μικρότερες του ορίου των 110.000 rpm που τέθηκε σαν όριο στην παρούσα διπλωματική. Παράλληλα, παρατηρείται ότι το ζεύγος χαμηλής πίεσης στρέφεται με περισσότερες στροφές γενικότερα από αυτό της υψηλής πίεσης. Παράγοντας αυτού είναι και το μεγαλύτερο μέγεθος του στροβίλου υψηλής από αυτό της χαμηλής πίεσης και οι υψηλότεροι λόγοι πίεσης στους οποίους λειτουργεί το ζεύγος χαμηλής.

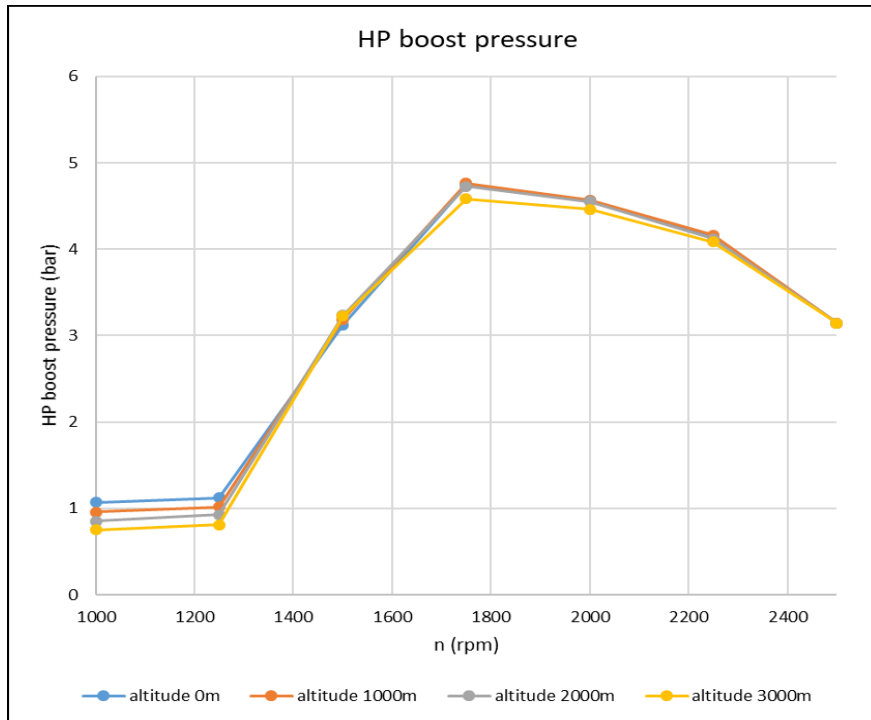


Διάγραμμα 7.23: Ταχύτητα περιστροφής ζεύγους στροβιλο-υπερπλήρωσης υψηλής πίεσης για διάφορα υψόμετρα

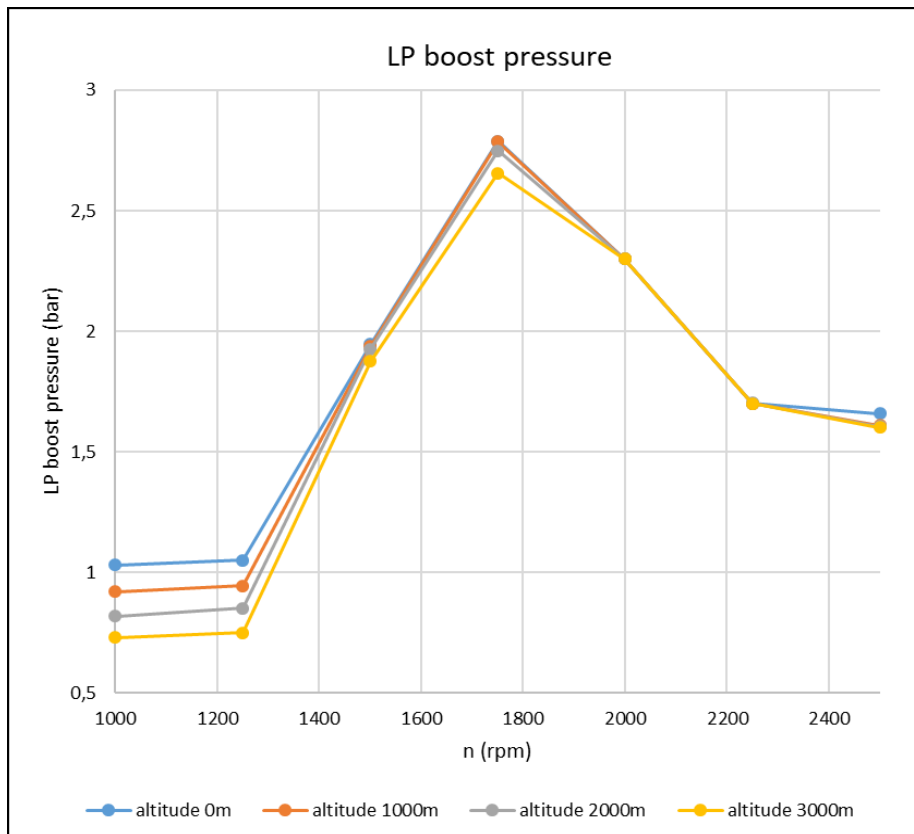


Διάγραμμα 7.24: Ταχύτητα περιστροφής ζεύγους στροβιλο-υπερπλήρωσης χαμηλής πίεσης για διάφορα υψόμετρα

Ακολουθεί η πίεση υπερπλήρωσης που δίνουν τα δύο ζεύγη στροβιλο-υπερπλήρωσης. Για το μεν ζεύγος χαμηλής πίεσης είναι η πίεση στην έξοδο του συμπιεστή για το δε ζεύγος υψηλής πίεσης είναι η πίεση υπερπλήρωσης στην έξοδο του συμπιεστή και είσοδο στην πολλαπλή εισαγωγής του κινητήρα.



Διάγραμμα 7.25: Πίεση υπερπλήρωσης συναρτήσει των στροφών του κινητήρα για διάφορα υψόμετρα

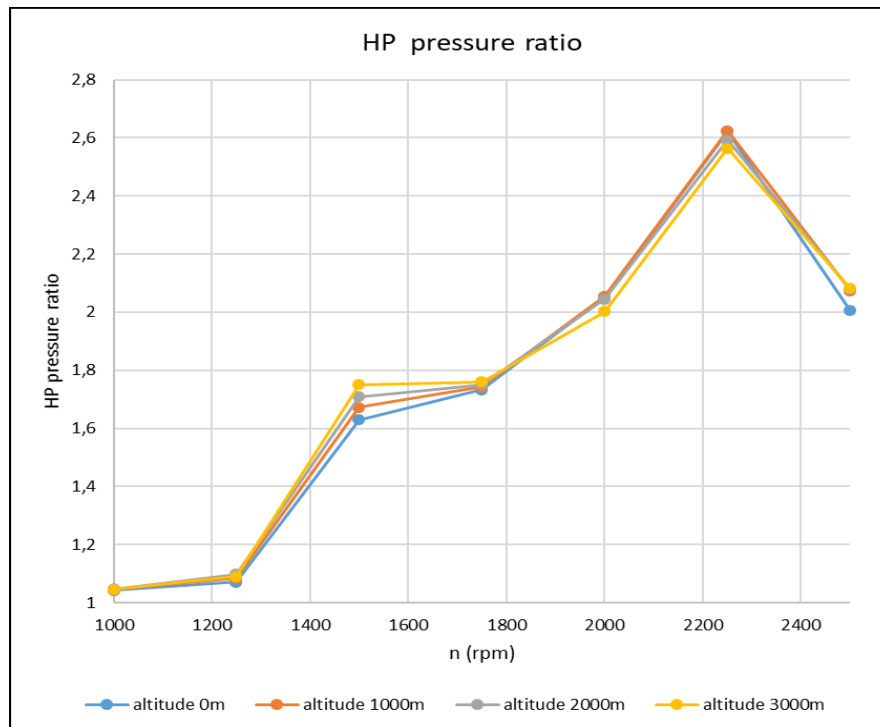


Διάγραμμα 7.26: Πίεση στην έξοδο του συμπιεστή χαμηλής πίεσης συναρτήσει των στροφών του κινητήρα για διάφορα υψόμετρα

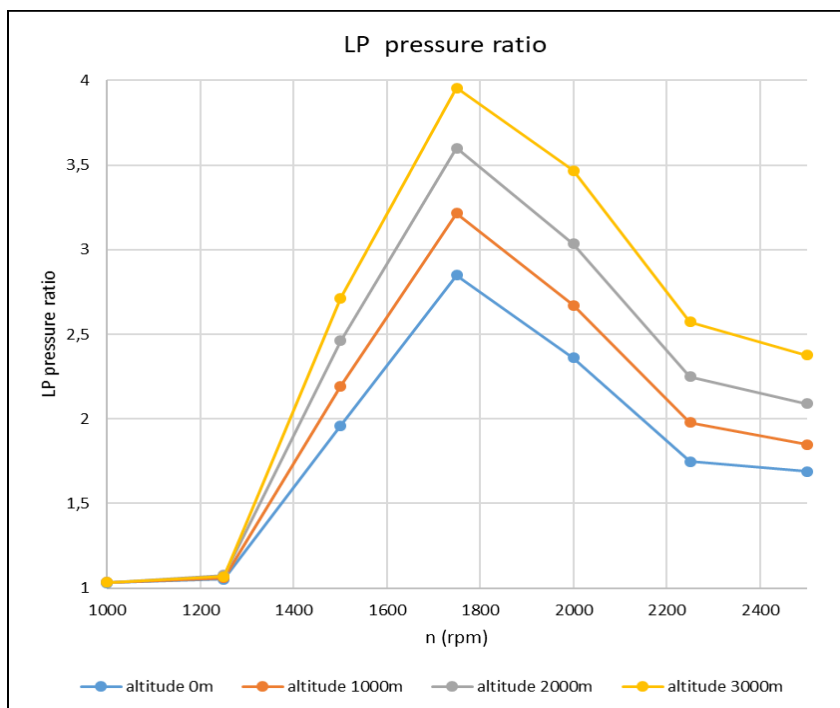
Οι πιέσεις στις χαμηλές στροφές που είναι κοντά ή και χαμηλότερες του 1 bar οφείλονται στους μικρούς λόγους πίεσης στις χαμηλές στροφές του συμπιεστή χαμηλής πίεσης σε συνδυασμό με την πίεση περιβάλλοντος που όσο το υψόμετρο αυξάνεται πέφτει κάτω από την 1 atm.

Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και στον συμπιεστή υψηλής πίεσης, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα που προηγήθηκε (διάγραμμα 7.25).

Οι απόλυτες τιμές της πίεσης στην οποία φτάνει η πίεση υπερπλήρωσης δεν δίνουν τόσο αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα όσο οι αντίστοιχοι λόγοι πίεσης των συμπιεστών. Οι λόγοι πιέσεων φαίνονται στα διαγράμματα 7.27 και 7.28 που ακολουθούν.



Διάγραμμα 7.27: Λόγος πιέσεων συμπιεστή υψηλής πίεσης συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα για διάφορα υψόμετρα

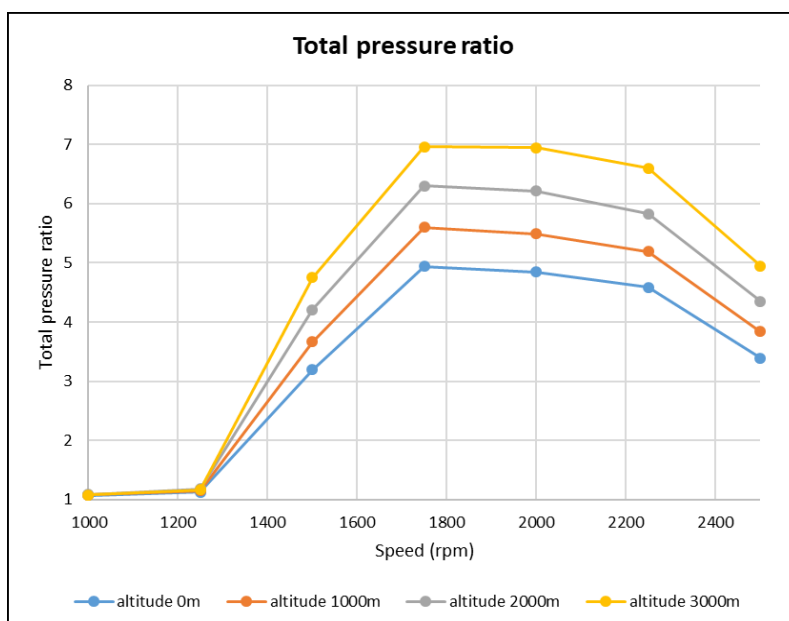


Διάγραμμα 7.28: Λόγος πιέσεων συμπιεστή χαμηλής πίεσης συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα για διάφορα υψόμετρα

Πληρέστερη εικόνα μπορεί επίσης να δώσει και ο συνολικός λόγος πίεσης των δύο συμπιεστών, που ορίζεται ως εξής:

$$\pi_{\text{Ctot}} = \pi_{\text{CLP}} * \pi_{\text{CHP}}$$

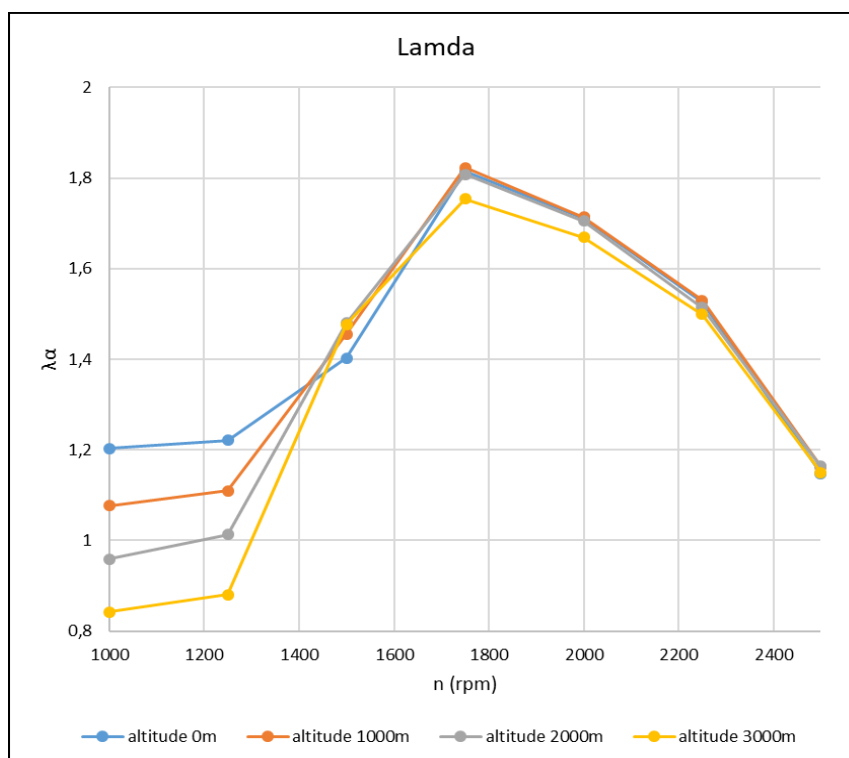
και παριστάνεται γραφικά στο διάγραμμα 7.29. Όσο το υψόμετρο, αυξάνεται ο κινητήρας και το σύστημα στροβιλο-υπερπλήρωσης λειτουργούν σε λόγους πίεσης (συνολικούς) ως και 7. Από το ίδιο διάγραμμα φαίνεται και ότι το σύστημα αρχίζει να αποδίδει ικανοποιητικά μετά τις 1250 rpm.



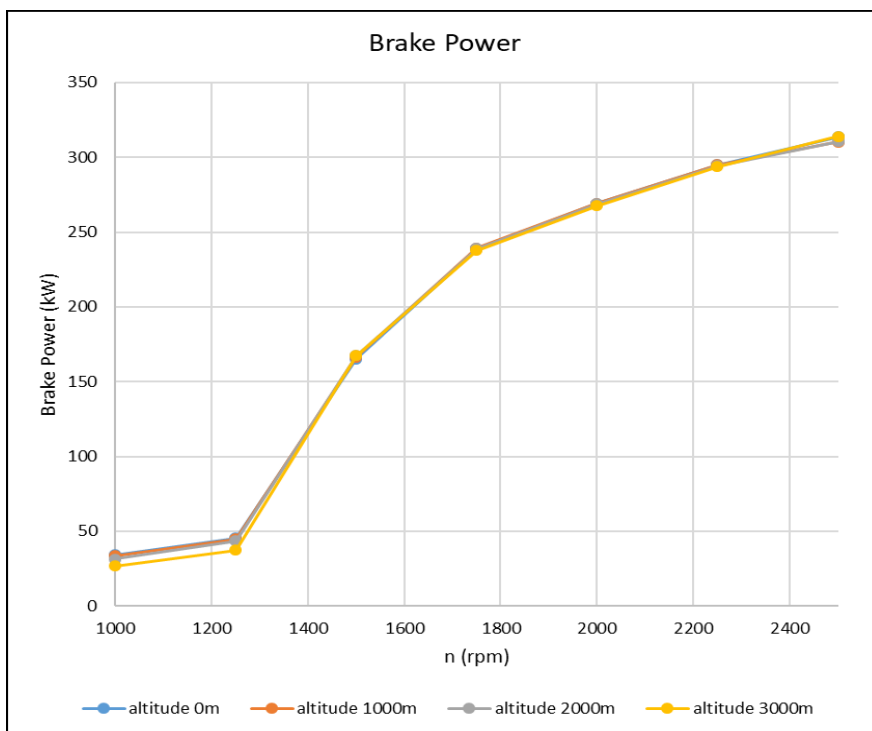
Διάγραμμα 7.29: Συνολικός λόγος πίεσης των δύο συμπιεστών συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα για διάφορα υψόμετρα

Στο διάγραμμα 7.30 παρουσιάζεται ο λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου του κινητήρα για τα διάφορα υψόμετρα στο εύρος ταχυτήτων που εξετάζεται.

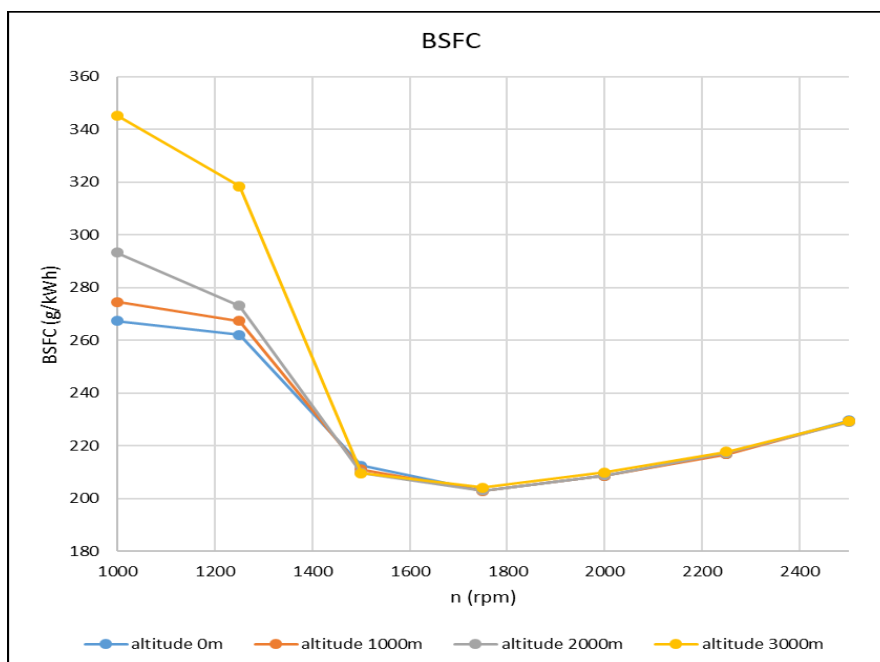
Η μορφή του διαγράμματος αυτού δικαιολογείται από την παροχή μάζας αέρα διαμέσου των συμπιεστών και την κατανομή καυσίμου συναρτήσει των στροφών του κινητήρα. Συγκεκριμένα, στις χαμηλές στροφές λειτουργίας ο λόγος λ_a φτάνει το όριο 1,2 για εκπομπές σωματιδίων αιθάλης (καπνού), ενώ για τα μεγαλύτερα των 0m υψόμετρα πέφτει ακόμα και κάτω από 1. Αυτό οφείλεται στην μεγάλη ποσότητα καυσίμου συγκριτικά με την ελάχιστη ποσότητα αέρα που μπορούν να παρέχουν οι δύο συμπιεστές που δεν έχουν αρχίσει ακόμα να λειτουργούν αποδοτικά. Στην συνέχεια, όσο οι στροφές αυξάνονται το λ_a αυξάνεται και δεν παρουσιάζει αισθητές διαφορές μεταξύ των διαφόρων υψομέτρων. Μετά τις 1750 rpm, όπου και αρχίζει ο έλεγχος των στροβίλο-συμπιεστών η ισχύς που παρέχουν τα καυσαέρια στους στροβίλους μειώνεται. Αυτό οφείλεται στο άνοιγμα των βαλβίδων που έχει σαν συνέπεια μεγάλη ποσότητα να φεύγει ανεκμετάλλευτη. Μειώνεται, όμως και η ισχύς που παρέχει ο κάθε στροβίλος στον συμπιεστή του. Συνεπώς, οι συμπιεστές δεν μπορούν να αποδώσουν ικανοποιητικά και παρέχουν μικρότερη μάζα αέρα. Στο γεγονός αυτό οφείλεται και η πτωτική τάση του λόγου ισοδυναμίας στις υψηλές στροφές λειτουργίας του κινητήρα. Οι επιδόσεις του κινητήρα επικεντρώνονται στην ειδική κατανάλωση καυσίμου (διάγραμμα 7.31) και την παραγόμενη ισχύ (διάγραμμα 7.32).



Διάγραμμα 7.30: Λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου συναρτήσει των στροφών του κινητήρα για διάφορα υψόμετρα.



Διάγραμμα 7.31: Παραγόμενη ισχύς από τον κινητήρα συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα για διάφορα υψόμετρα



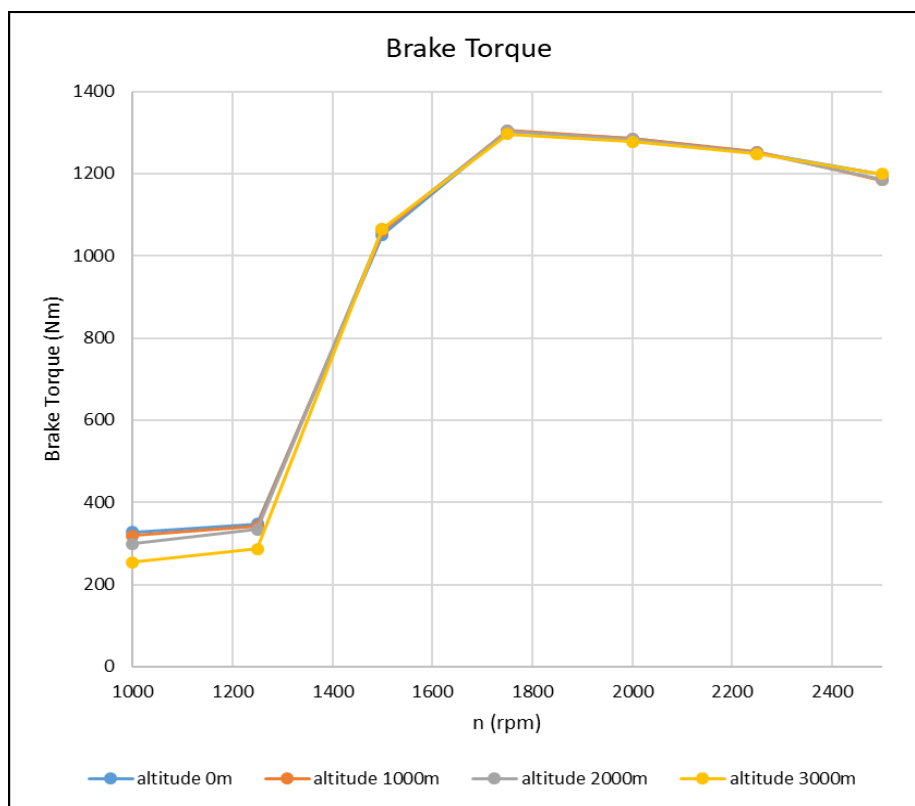
Διάγραμμα 7.32: Ειδική κατανάλωση καυσίμου συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα για διάφορα υψόμετρα

Από το διάγραμμα 7.31 φαίνεται η επίδραση του φαινομένου 'self-compensation ability', όπως περιγράφηκε στην περίπτωση της μονοβάθμιας στροβιλο-υπερπλήρωσης. Υπενθυμίζεται πως σύμφωνα με το φαινόμενο αυτό, μπορεί η πίεση του περιβάλλοντος, που μειώνεται όσο το υψόμετρο αυξάνεται, να επηρεάζει αρνητικά τον συμπιεστή χαμηλής πίεσης στην είσοδό του, όμως ο στρόβιλος χαμηλής πίεσης δέχεται μικρότερη πίεση

αντίθλιψης στην έξοδό του στο περιβάλλον και εκτονώνει με μεγαλύτερους λόγους πίεσης και βαθμούς απόδοσης. Η λειτουργία του ζεύγους χαμηλής πίεσης επηρεάζει όμως και το ζεύγος υψηλής πίεσης που αντιδρά παρόμοια και σε συνεργασία με τον κινητήρα φτάνει να ανακτάται η ισχύς που έχει ο κινητήρας στο μηδενικό υψόμετρο. Στις χαμηλές ταχύτητες που τα ζεύγη στροβιλο-συμπιεστών δεν έχουν αρχίσει να λειτουργούν ικανοποιητικά και η χαμηλής πίεσης του περιβάλλοντος είναι αυτή που καθορίζει την έκβαση των πραγμάτων, η ισχύς μειώνεται με το υψόμετρο.

Σε γενικές γραμμές με την διβάθμια στροβιλο-υπερπλήρωση ανακτάται σχεδόν πλήρως η ισχύς και κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα για όλα τα εξεταζόμενα υψόμετρα.

Το ίδιο ισχύει και για την παραγόμενη από τον κινητήρα ροπή (Διάγραμμα 7.33) η οποία επηρεάζεται στις χαμηλές στροφές από την πίεση του περιβάλλοντος, ενώ σε μεγαλύτερες στροφές ανεξαρτητοποιείται από το υψόμετρο.

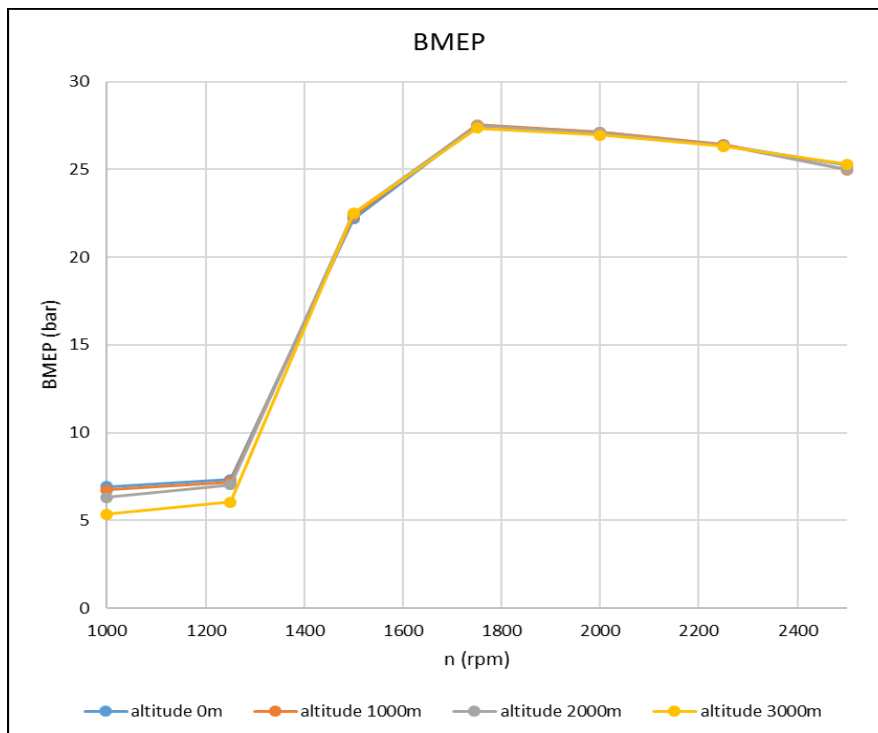


Διάγραμμα 7.33: Παραγόμενη από τον κινητήρα ροπή συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα για τα εξεταζόμενα υψόμετρα

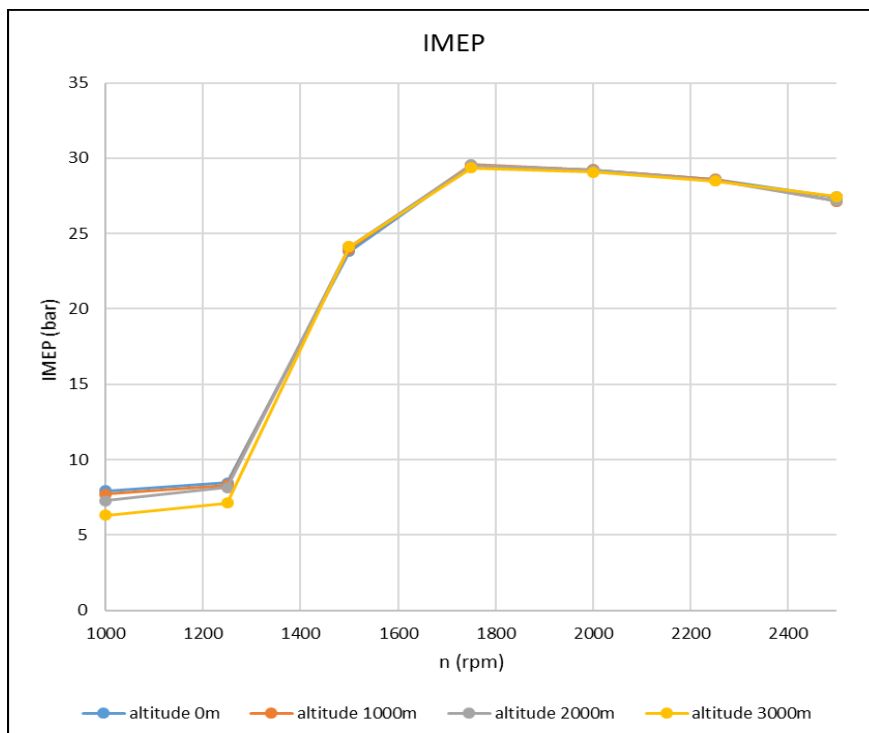
Ακολουθούν η μεταβολή της μέσης πραγματικής πίεσης και της μέσης ενδεικνύμενης πίεσης (Διάγραμμα 7.34 και 7.35). Στα δύο διαγράμματα αυτά παρουσιάζεται η ίδια εικόνα με παραπάνω. Η μέση πραγματική πίεση του επιπέδου της θάλασσας έχει αμελητέα διαφορά από αυτήν των 1000 ή των 3000 μέτρων πάνω από τη θάλασσα. Το γεγονός αυτό παίζει καθοριστικό ρόλο και στην μεταβολή της ισχύος καθ' ύψος, όπως αναλύθηκε παραπάνω.

Η μέση πραγματική πίεση δεν ξεπερνάει το όριο των 28 bar, νούμερο πολύ κοντά στο άνω όριο για τις σημερινές τεχνολογικές εφαρμογές. Σε χαμηλές στροφές, όμοια με προηγουμένως, το σύστημα των δύο ζευγών δεν λειτουργεί αποδοτικά και ο κινητήρας αποδίδει χαμηλές μέσες πραγματικές πιέσεις, ενώ στην συνέχεια υπάρχει ραγδαία αύξηση.

Η πτώση της μέσης πραγματικής πίεσης και της ενδεικνύμενης σε μεγάλες στροφές του κινητήρα οφείλεται στο “καλιμπράρισμα” του κινητήρα “βάσης”, ο οποίος ως κινητήρας μικρού λεωφορείου έχει βελτιστοποιηθεί σε χαμηλές και μεσαίες ταχύτητες περιστροφής.



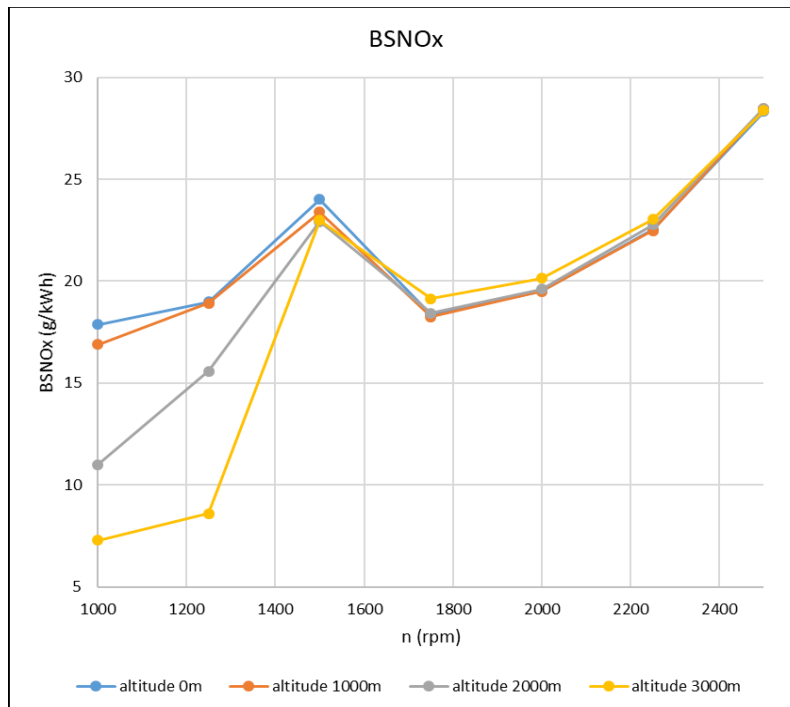
Διάγραμμα 7.34: Μέση πραγματική πίεση κινητήρα συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα για διάφορα υψόμετρα



Διάγραμμα 7.35: Μέση ενδεικνύμενη πίεση κινητήρα συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα για διάφορα υψόμετρα

Εκπομπές Ρύπων

Όπως και στην περίπτωση της μονοβάθμιας στροβιλο-υπερπλήρωσης, παρουσιάζονται τα Διαγράμματα (7.36 και 7.39) εκπομπών οξειδίων του αζώτου και αιθάλης.

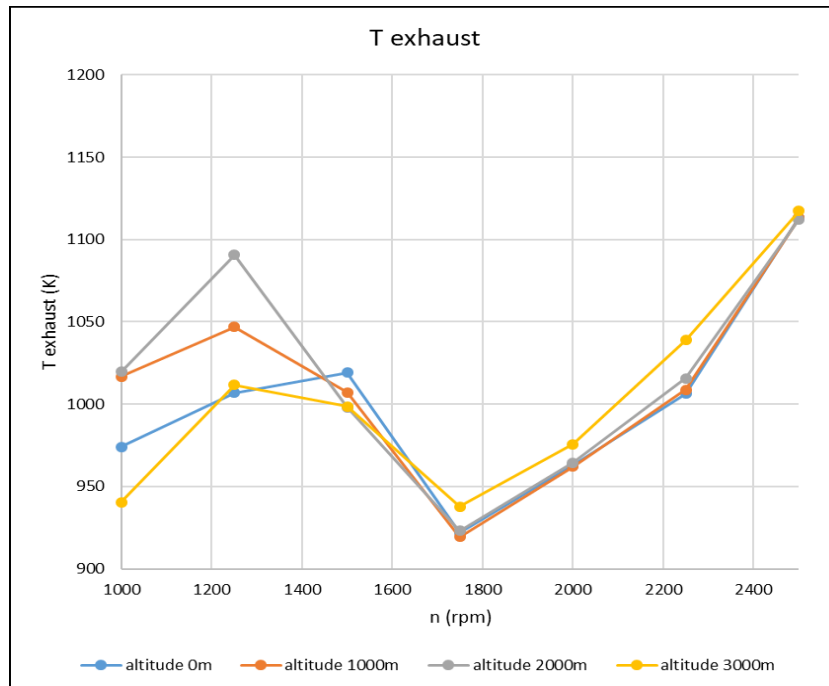


Διάγραμμα 7.36: Εκπομπές οξειδίων του αζώτου συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα για διάφορα υψόμετρα

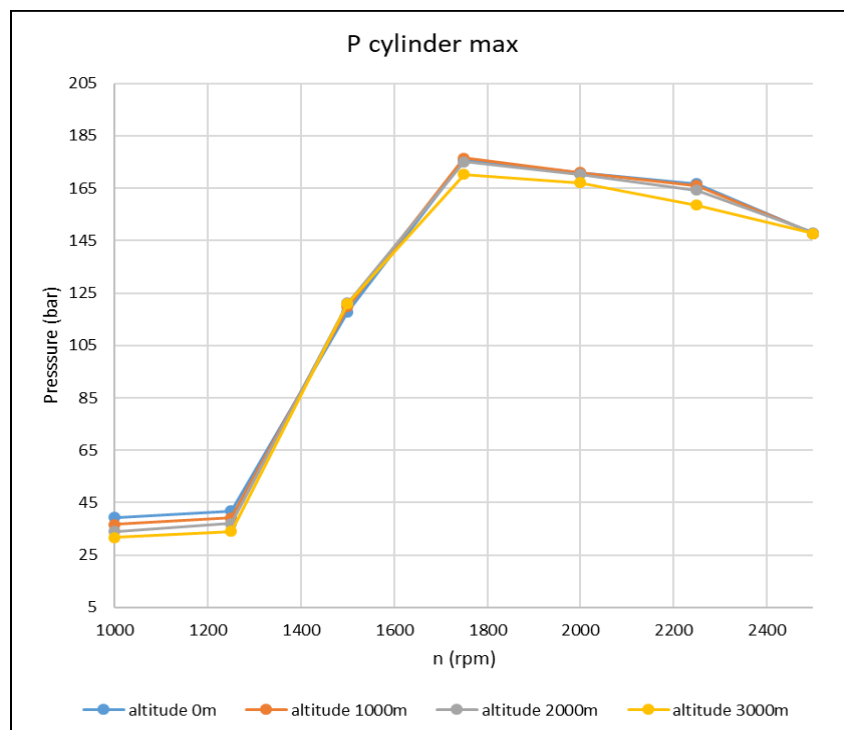
Οι εκπομπές κινητήρα Diesel επηρεάζονται πρωτίστως από τον λόγο ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου. Στις χαμηλές ταχύτητες περιστροφής του κινητήρα, η μορφή του διαγράμματος είναι παρόμοια με αυτήν του λόγου λ_a (Διάγραμμα 7.30). Παρόλο που η θερμοκρασία των καυσαερίων αυξάνεται όσο το υψόμετρο αυξάνεται, παράγοντας που επηρεάζει σημαντικά την δημιουργία οξειδίων του αζώτου, στο διάγραμμα 7.36 φαίνεται ότι οι ειδικές εκπομπές οξειδίων του αζώτου μειώνονται καθ' ύψος. Αυτό οφείλεται στο ότι το μείγμα γίνεται πολύ πλούσιο σε καύσιμο και παράλληλα η μάζα του οξυγόνου μειώνεται, γιατί μειώνεται η περιεκτικότητα του αέρα σε οξυγόνο. Η μικρή περιεκτικότητα σε O_2 αποτελεί κατασταλτικό παράγοντα για την δημιουργία οξειδίων του αζώτου [2]. Ακόμη, η μειούμενη πίεση υπερπλήρωσης καθ' ύψος (για τα διάφορα υψόμετρα) μειώνει την μέγιστη πίεση καύσης (Διάγραμμα 7.38). Παράλληλα, και η ισχύς αυξάνεται με μεγάλο ρυθμό. Όλα τα παραπάνω συντελούν στην σχετική μείωση των NO_x όσο το υψόμετρο αυξάνεται για σταθερά χαμηλές στροφές.

Στις υψηλότερες στροφές όμως, η παρεχόμενη μάζα αυξάνεται και ο λόγος αέρα-καυσίμου αυξάνεται κατά πολύ. Συνέπεια αυτού είναι να υπάρχει πολύ περισσότερο O_2 ιδιαίτερα στις μεσαίες στροφές λειτουργίας του κινητήρα όπου και κορυφώνονται οι συγκεντρώσεις NO_x . Όσο οι στροφές αυξάνονται λόγω μείωσης της θερμοκρασίας καύσης, μειώνονται οι ειδικές εκπομπές. Η καθ' ύψος μεταβολή των ειδικών εκπομπών ακολουθεί

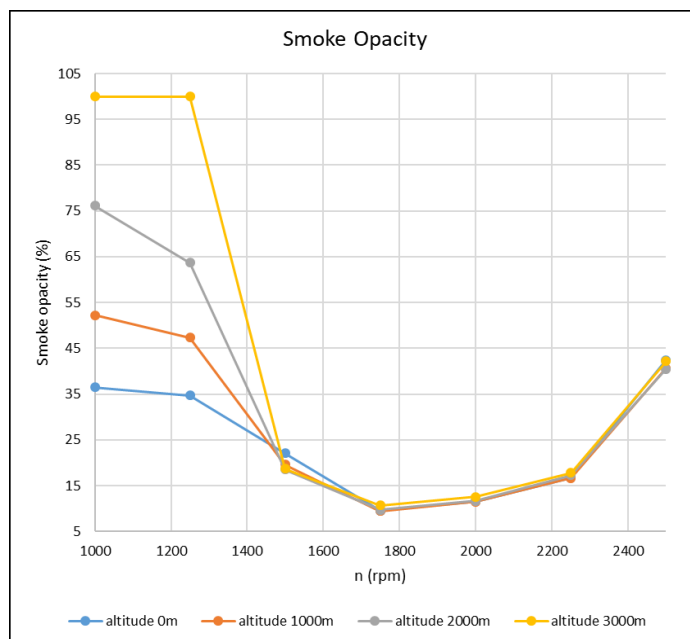
μειούμενη τάση, καθώς μειώνεται η μέγιστη πίεση και η θερμοκρασία καύσης όσο το υψόμετρο αυξάνεται, όπως φαίνεται στα Σχήματα 7.37 και 7.38.



Διάγραμμα 7.37: Μεταβολή θερμοκρασίας εξόδου καυσαερίων συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα για διάφορα υψόμετρα

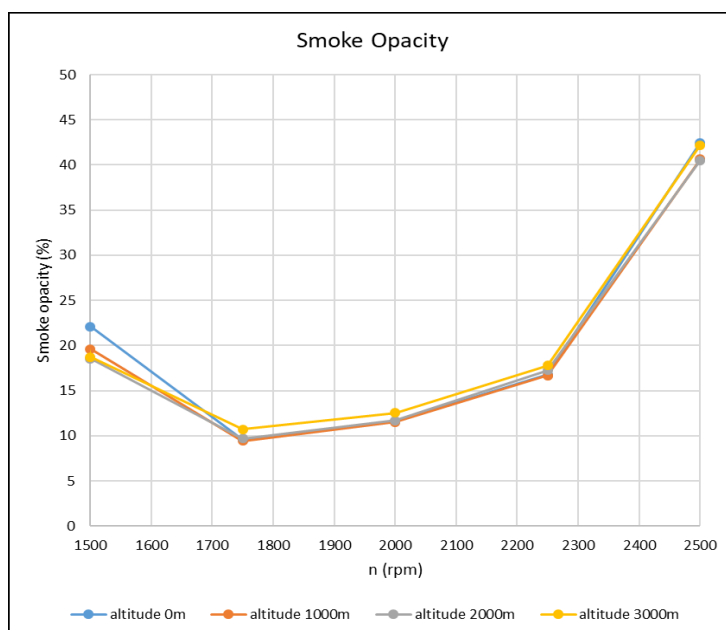


Διάγραμμα 7.38: Μεταβολή της μέγιστης πίεσης που αναπτύσσεται στους κυλίνδρους του κινητήρα συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα για διάφορα υψόμετρα



Διάγραμμα 7.39: Εκπομπές αιθάλης συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα για τα εξεταζόμενα υψόμετρα

Από το διάγραμμα των εκπομπών αιθάλης φαίνεται ότι τα σωματίδια μειώνουν την διαφάνεια του αέρα, όσο το υψόμετρο αυξάνεται, στις χαμηλές ταχύτητες περιστροφής του κινητήρα. Σ' αυτό καθοριστικός παράγοντας είναι η ποσότητα οξυγόνου της ατμόσφαιρας που στις χαμηλές στροφές του κινητήρα είναι λιγοστή. Συντελεί επομένως στην πυρόλυση μεγαλύτερης ποσότητας καυσίμου και στην χειρότερη καύση. Όσο οι στροφές αυξάνονται, οι διαφορές μειώνονται και μετά τις 1750 rpm φτάνουν να γίνουν αμελητέες (Διάγραμμα 7.40). Οι απειροελάχιστα αυξημένες εκπομπές αιθάλης στο διάστημα αυτό οφείλονται στη μείωση της θερμοκρασίας και πίεσης καύσης και της ποσότητας οξυγόνου όσο το υψόμετρο αυξάνεται.



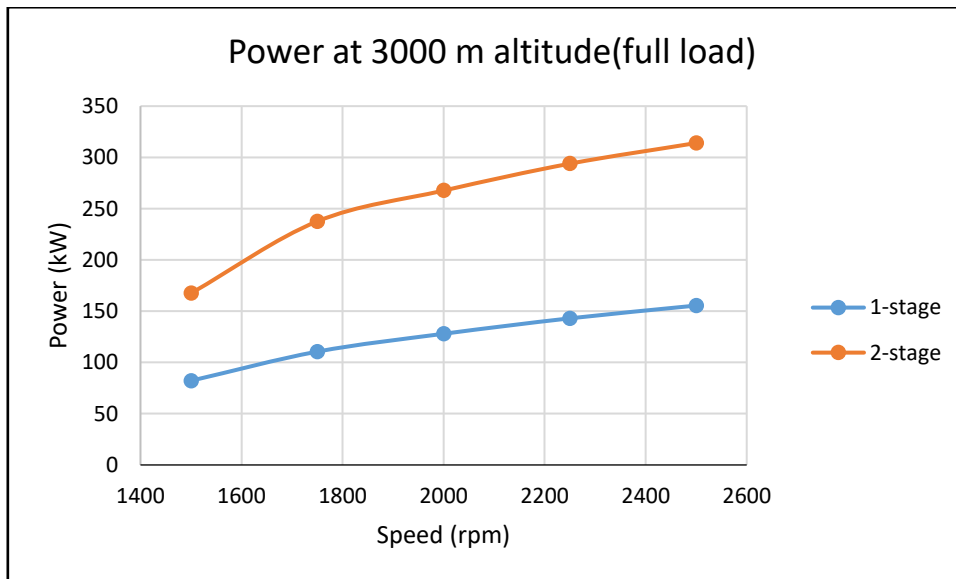
Διάγραμμα 7.40: Εκπομπές αιθάλης συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα για τα εξεταζόμενα υψόμετρα με έμφαση στις στροφές μεγαλύτερες των 1500 rpm

7.3.3. Σύγκριση αποτελεσμάτων μονοβάθμιας και διβάθμιας στροβιλο-υπερπλήρωσης

Μετά την αναλυτική παρουσίαση της επίδρασης του υψομέτρου σε μονοβάθμιο και διβάθμιο σύστημα στροβιλο-υπερπλήρωσης εφαρμοζόμενο σε εξακύλινδρο κινητήρα, ακολουθεί η συγκριτική αξιολόγηση των δύο συστημάτων.

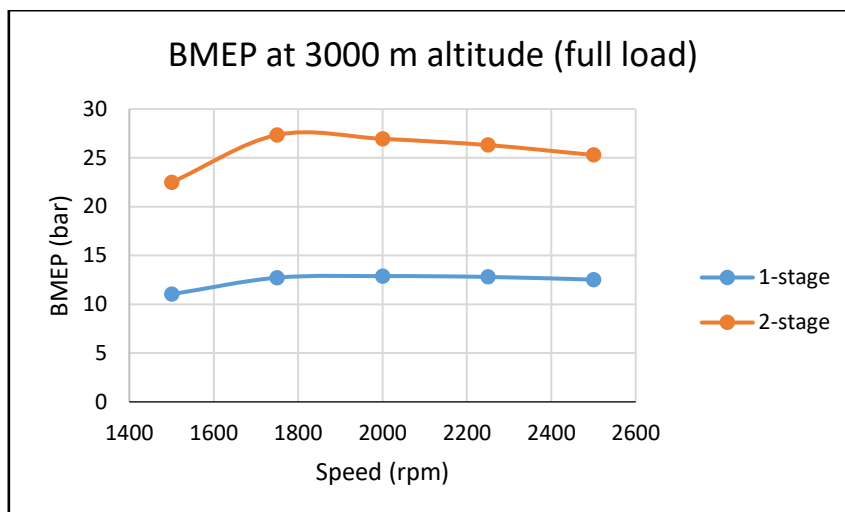
Παρακάτω παρουσιάζονται, για πλήρες φορτίο λειτουργίας, οι καμπύλες μεταβολής των διαφόρων μεγεθών, σε υψόμετρο 3000 m, όπου επικρατούν οι δυσμενέστερες συνθήκες.

Αρχικά, παρατίθεται το συγκριτικό διάγραμμα (Διάγραμμα 7.41) της ισχύος για τα δυο είδη στροβιλο-υπερπλήρωσης, και από αυτό γίνεται άμεσα φανερό ότι το διβάθμιο σύστημα στροβιλο-υπερπλήρωσης υπερτερεί σε ισχύ, όπως και αναμενόταν άλλωστε.



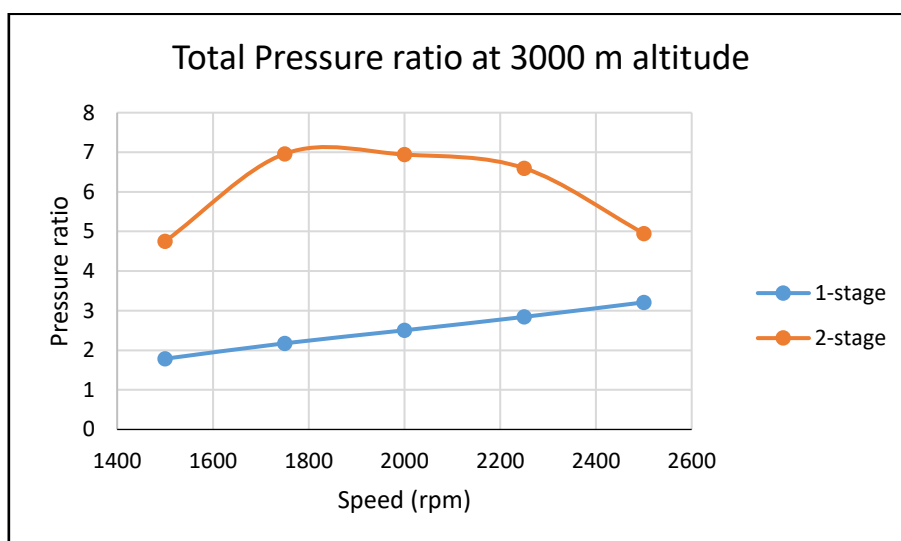
Διάγραμμα 7.41: Συγκριτικό διάγραμμα ισχύος για μονοβάθμιο και διβάθμιο σύστημα υπερπλήρωσης

Πιο αντιπροσωπευτικό μέγεθος του κινητήρα είναι η μέση πραγματική πίεση που αναπτύσσεται (Διάγραμμα 7.42). Όπως φαίνεται στο διάγραμμα παρακάτω, αυτή είναι ιδιαίτερα αυξημένη στην περίπτωση των δύο ζευγών στροβιλο-συμπίεστών.



Διάγραμμα 7.42: Σύγκριση μέσης πραγματικής πίεσης για μονοβάθμια και διβάθμια στροβιλο-υπερπλήρωση

Επειδή, όμως, τα δύο συστήματα δεν είναι όμοια στον βαθμό συμπίεσης του κινητήρα στον οποίο εφαρμόζονται για λόγους κινδύνου από υπερπιέσεις, αντιπροσωπευτικά είναι τα διαγράμματα που αφορούν την λειτουργία των ζευγών στροβιλο-υπερπλήρωσης. Το πρώτο από αυτά δείχνει τον λόγο πίεσης που βγάζει/ουν ο/οι συμπιεστής/ές συνολικά στο σημείο πριν την είσοδο του αέρα στην πολλαπλή εισαγωγής (Διάγραμμα 7.43).

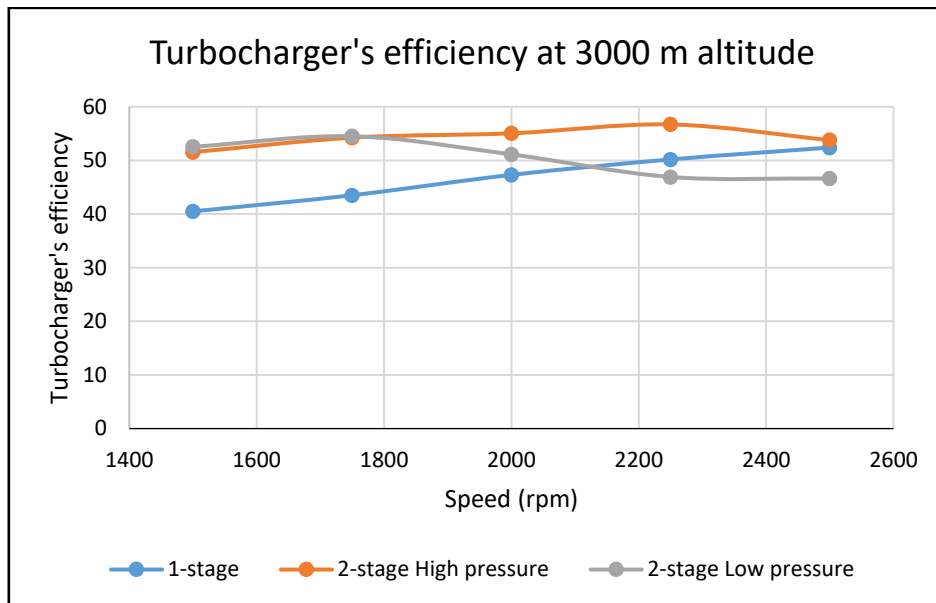


Διάγραμμα 7.43: Συγκριτικό διάγραμμα λόγου πίεσης συμπιεστή στην περίπτωση μονοβάθμιας στροβιλο-υπερπλήρωσης και συνολικού λόγου πίεσης για διβάθμιο στροβιλο-υπερπληρωτή

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ξεκάθαρα ότι οι λόγοι πίεσης που μπορούν να εξαχθούν από τα διβάθμια συστήματα στροβιλο-υπερπλήρωσης είναι πολύ μεγαλύτεροι από αυτά των μονοβάθμιων. Στο μονοβάθμιο σύστημα η αύξηση του λόγου πίεσης από το μοναδικό ζεύγος στροβιλο-υπερπληρωτή είναι γραμμική με τις στροφές του κινητήρα και οφείλεται στην αποδοτικότερη λειτουργία του στροβίλου λόγω της μεγαλύτερης μάζας καυσαερίων όσο οι στροφές αυξάνονται. Στο διβάθμιο σύστημα στροβιλο-υπερπλήρωσης,

αρχικά λόγω της μικρής απόδοσης των στροβίλων ο λόγος πίεσης συνολικά είναι χαμηλός, φυσικά ανώτερος από τον αντίστοιχο του μονοβάθμιου συστήματος. Καθώς οι στροφές αυξάνονται τα δύο ζεύγη στροβιλο-συμπιεστών συνεργάζονται αποδοτικότερα και ο συνολικός λόγος πίεσης φτάνει μέχρι και το 7. Η πτωτική τάση στον συνολικό λόγο πίεσης στην περίπτωση διβάθμιας στροβιλο-υπερπλήρωσης οφείλεται στον περιορισμό που υφίσταται το σύστημα για να αποφευχθεί η υπερτάχυνση.

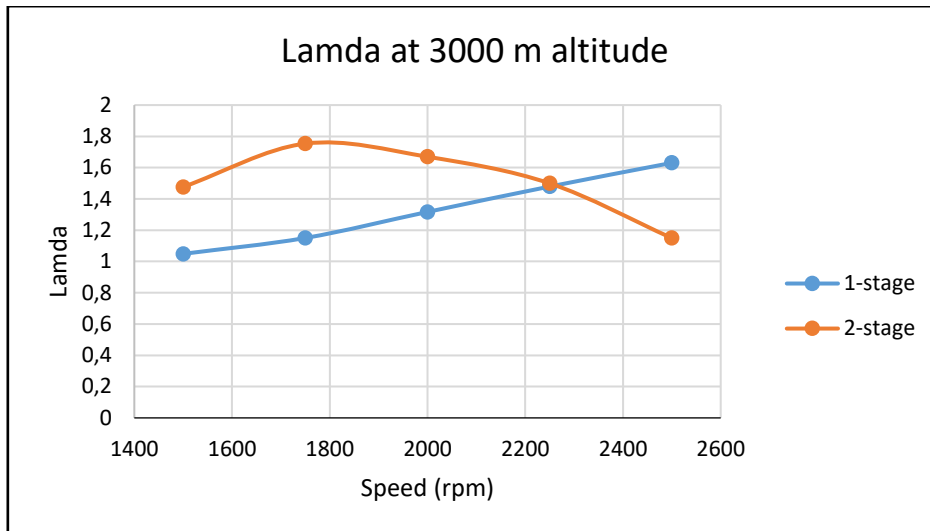
Στο επόμενο διάγραμμα (Διάγραμμα 7.44) φαίνεται η απόδοση για το μοναδικό ζεύγος στο μονοβάθμιο σύστημα και για καθένα από τα δύο ζεύγη στο διβάθμιο σύστημα στροβιλο-υπερπλήρωσης (HP και LP).



Διάγραμμα 7.44: Βαθμός απόδοσης για κάθε ζεύγος στροβιλο-υπερπλήρωσης για μονοβάθμιο και διβάθμιο σύστημα

Από το διάγραμμα των βαθμών απόδοσης δεν εξάγεται σαφές συμπέρασμα υπεροχής κάποιου από τα δύο συστήματα στροβιλο-υπερπλήρωσης. Παρόλα αυτά παρατηρείται ότι το ζεύγος υψηλής πίεσης υπερτερεί στις υψηλές στροφές λόγω και του μεγέθους του σε σχέση με το ζεύγος χαμηλής πίεσης και μπορεί να διαχειριστεί αποδοτικότερα τις μεγάλες παροχές μάζας. Στις χαμηλές στροφές το ζεύγος από το μονοβάθμιο σύστημα έχει την μικρότερη απόδοση, ενώ στις υψηλές στροφές το ζεύγος χαμηλής πίεσης του διβάθμιου συστήματος έχει τον χαμηλότερο βαθμό απόδοσης, λόγω του περιορισμού που υφίσταται στο όριο της πίεσης στο οποίο ανοίγει η βαλβίδα παράκαμψης καυσαερίων.

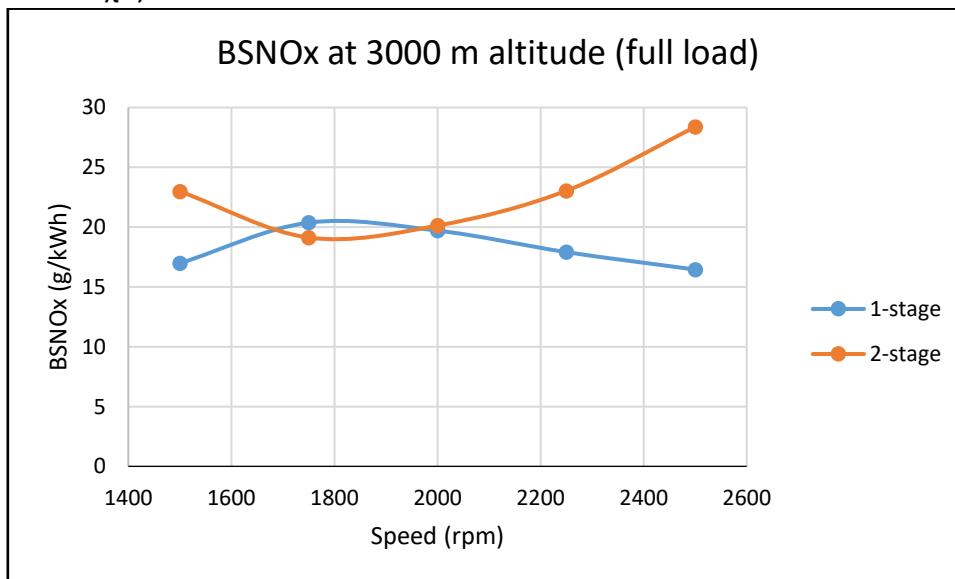
Συνολική εικόνα της κατάστασης μπορεί να εξαχθεί και από το συγκριτικό διάγραμμα του συνολικού λόγου αέρα καύσης (Διάγραμμα 7.45) για τα δύο συστήματα στροβιλο-υπερπλήρωσης συναρτήσει των στροφών του κινητήρα.



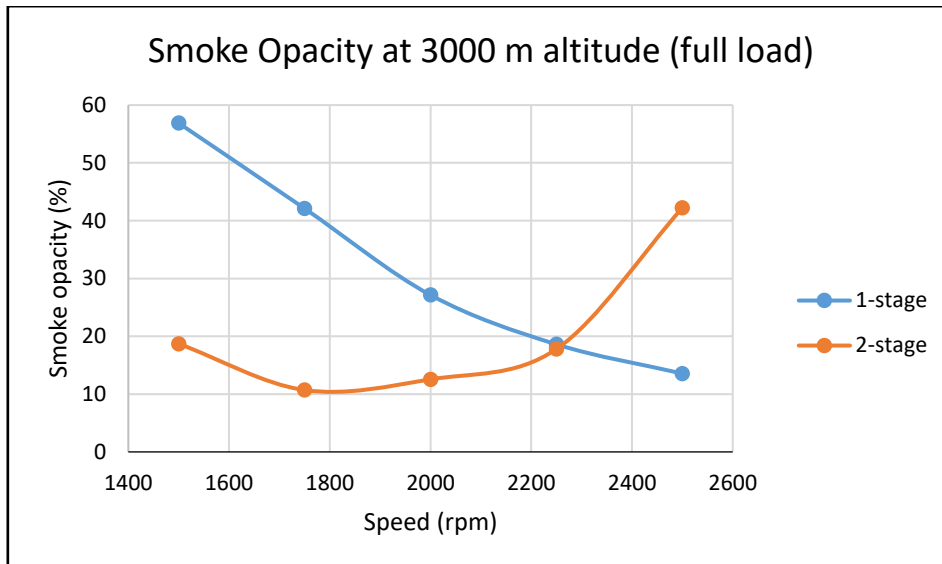
Διάγραμμα 7.45: Συγκριτική απεικόνιση του λόγου αέρα καύσης για μονοβάθμιο και διβάθμιο σύστημα στροβιλο-υπερπλήρωσης

Οι μεγαλύτερες πιέσεις που αναπτύσσονται με το διβάθμιο σύστημα στροβιλο-υπερπλήρωσης αυξάνουν την πυκνότητα του αέρα άρα και την μάζα που εισάγεται στους κυλίνδρους. Ο λόγος αέρα καύσης, επομένως, στο διβάθμιο είναι υψηλότερος από αυτόν του μονοβάθμιου ακόμα και αν στην περίπτωση του διβάθμιου το εγχυόμενο καύσιμο είναι περισσότερο συγκριτικά. Στις υψηλές στροφές που ο λόγος αέρα καύσης του διβάθμιου πέφτει ακόμη και χαμηλότερα από αυτόν του μονοβάθμιου συστήματος, κύρια επίδραση σε αυτό έχει ο περιορισμός μέσω της βαλβίδας 'wastegate' του υψηλού λόγου πίεσης, όπως έχει αναλυθεί και σε προηγούμενη παράγραφο.

Από την συγκριτική ανάλυση δεν μπορούν να λείψουν τα διαγράμματα που αφορούν τους εκπεμπόμενους ρύπους, και συγκεκριμένα των NO_x και των σωματιδίων (Διαγράμματα 7.46 και 7.47 αντίστοιχα).



Διάγραμμα 7.46: Συγκριτικό διάγραμμα εκπεμπόμενων οξειδίων του αζώτου



Διάγραμμα 7.47: Συγκριτικό διάγραμμα διαφάνειας αιθάλης

Δεδομένου ότι στο διβάθμιο σύστημα στροβιλο-υπερπλήρωσης αναπτύσσονται μεγαλύτερες πιέσεις και θερμοκρασίες απ' ό τι στο μονοβάθμιο οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου θα είναι αυξημένες συγκριτικά. Το σημείο στο οποίο οι εκπομπές πέφτουν λίγο κάτω από αυτές του μονοβάθμιου συστήματος είναι, γιατί η κλίση της καμπύλης ισχύος είναι πολύ μεγάλη και επομένως οι ειδικές εκπομπές πολύ χαμηλές. Επίσης, κοντά στις μεσαίες στροφές ο λόγος αέρα καύσης είναι αρκετά μακριά από τη μονάδα επομένως δεν αναπτύσσονται οι μέγιστοι δυνατοί ρύποι.

Όσον αφορά την αιθάλη στις χαμηλές στροφές είναι έως και τρεις φορές μικρότερη στο διβάθμιο σύστημα απ' ό τι στο μονοβάθμιο. Στις υψηλές στροφές όπου ο λόγος αέρα καύσης στο διβάθμιο σύστημα πέφτει πολύ χαμηλά, χαμηλότερα από αυτόν στο μονοβάθμιο, τα σωματίδια που δημιουργούνται προκαλούν μεγάλη αδιαφάνεια.

Κεφάλαιο 8

Αξιολόγηση

αποτελεσμάτων και συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναλύθηκε το θέμα της επίδρασης του υψομέτρου σε στροβιλο-υπερπληρωμένους κινητήρες Diesel. Οι περιπτώσεις που μελετήθηκαν είναι ένας μονοβάθμια και ένας διβάθμια στροβιλο-υπερπληρωμένος κινητήρας Diesel. Το θέμα που εξετάστηκε ήταν η επίδραση του υψομέτρου στην απόδοση και τις εκπομπές ρύπων και για τις δύο προαναφερθείσες περιπτώσεις σε σταθερές συνθήκες λειτουργίας. Τέλος, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των δύο μοντέλων ως προς την απόδοση του κινητήρα, τα ζεύγη στροβιλο-υπερπλήρωσης και ως προς τις εκπομπές ρύπων.

Τα κύρια συμπεράσματα που εξάγονται από την μελέτη συνοψίζονται παρακάτω:

- Στην μονοβάθμια στροβιλο-υπερπλήρωση, το φαινόμενο 'self compensation ability' οδηγεί στην προσέγγιση της απόδοσης που έχει ο κινητήρας σε μηδενικό υψόμετρο ακόμα και αν αυτός λειτουργεί σε υψόμετρο 3000 m. Συγκεκριμένα, η καμπύλη για την ισχύ και τη μέση πραγματική πίεση στα διάφορα υψόμετρα δεν μειώνεται περισσότερο από 3% περίπου σε σχέση με την καμπύλη που αντιστοιχεί στο επίπεδο της θάλασσας .

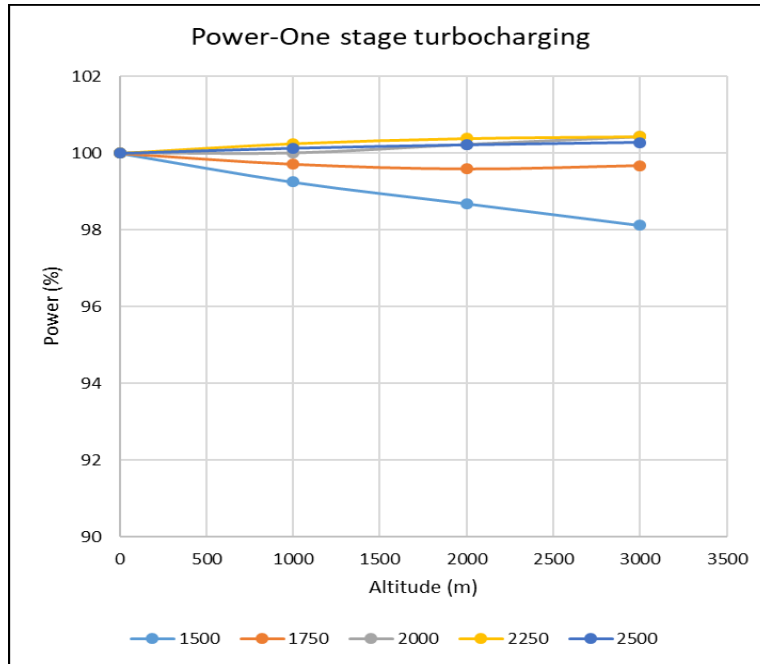
Παράλληλα, ο λόγος πίεσης υπερπλήρωσης αυξάνεται με την αύξηση του υψομέτρου, γιατί η πίεση εισόδου που 'βλέπει' ο συμπιεστής φτάνει, ιδιαίτερα στα 3000 m, πολύ κάτω από την ατμοσφαιρική.

Διαπιστώθηκε, επίσης, ότι η λειτουργία τόσο του κινητήρα όσο και των ζευγών στροβιλο-υπερπλήρωσης δεν προσεγγίζει επικίνδυνα τα επιτρεπτά κατασκευαστικά όρια.

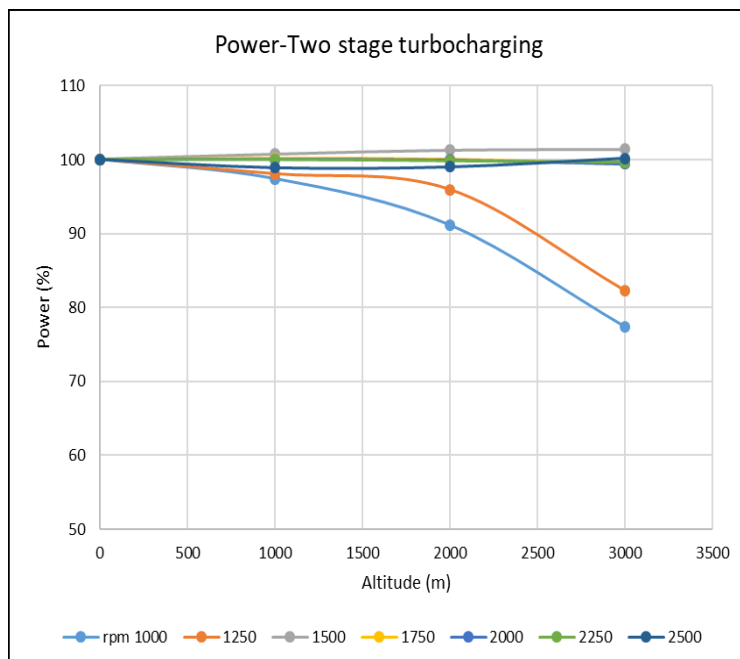
Ακόμη, οι εκπεμπόμενοι ρύποι και ιδιαίτερα τα NO_x στις χαμηλές στροφές μειώνονται όσο αυξάνεται το υψόμετρο λόγω έλλειψης οξυγόνου (ανασταλτικός παράγων) και στις μεσαίες και υψηλές στροφές αυξάνονται καθώς αυξάνονται οι πιέσεις και οι θερμοκρασίες εντός των κυλίνδρων. Όσον αφορά την αιθάλη, λόγω της μείωσης του

λόγου αέρα καύσης με την αύξηση του υψομέτρου και την προσέγγιση της στοιχειομετρίας η αδιαφάνεια αυτής είναι υψηλή για τα μεγάλα υψόμετρα.

- Για την περίπτωση της διβάθμιας στροβιλο-υπερπλήρωσης του ίδιου κινητήρα Diesel, το ίδιο φαινόμενο με παραπάνω, συγκεκριμένα η μείωση της πίεσης του περιβάλλοντος που βλέπει σαν αντίθλιψη ο στρόβιλος χαμηλής πίεσης οδηγεί στην αποδοτικότερη λειτουργία των δύο ζευγών όσο το υψόμετρο αυξάνεται. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να ανακτάται έως και 100% η ισχύς που παράγεται στην περίπτωση υψηλών υψομέτρων σε σχέση με την περίπτωση του μηδενικού.
Επιπρόσθετα, για την εντός κατασκευαστικά επιτρεπτών ορίων λειτουργία τόσο του κινητήρα όσο και των στροβιλο-συμπιεστών τέθηκε εφαρμογή ελέγχου της πίεσης στην οποία ανοίγουν οι βαλβίδες 'wastegate' των δύο στροβίλων.
Τέλος, τα οξειδία του αζώτου που εκπέμπονται στις χαμηλές ταχύτητες, όπως και παραπάνω, λόγω έλλειψης οξυγόνου (χαμηλή αποδοτικότητα ζευγών στροβιλο-υπερπλήρωσης), μειώνονται αυξανόμενου του υψομέτρου. Σε μεγαλύτερες στροφές όμως οι καμπύλες συγκλίνουν και δεν παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση για τα διάφορα υψόμετρα. Δεν διαπιστώνεται, ωστόσο, η ίδια εικόνα και για τα σωματίδια. Η εκπομπή αιθάλης είναι στενά συνδεδεμένη με την μεταβολή του λόγου αέρα καύσης. Στις χαμηλές στροφές που το λ_a πλησιάζει την στοιχειομετρική τιμή οι εκπομπές αιθάλης είναι έντονες και αυξάνονται αυξανόμενου του υψομέτρου. Στις μεσαίες στροφές μειώνεται συνολικά η αδιαφάνεια, ενώ ο περιορισμός που τίθεται στην βαλβίδα παράκαμψης του στροβίλου αυξάνει έμμεσα τις εκπομπές.
- Από την συγκριτική αξιολόγηση μονοβάθμια και διβάθμια στροβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα διαπιστώθηκε ότι η διβάθμια στροβιλο-υπερπλήρωση υπερτερεί ως προς τις υψηλότερα αναπτυσσόμενες πιέσεις στροβιλο-υπερπλήρωσης, την αποδοτικότητα των ζευγών και την υψηλή ισχύ που μπορεί να παράγει ο κινητήρας, ενώ η μονοβάθμια υπερτερεί στο ότι η ανάκτηση ισχύος σε σχέση με το επίπεδο της θάλασσας είναι πολύ μεγαλύτερη συγκριτικά με την πρώτη (Διαγράμματα 8.1 και 8.2).



Διάγραμμα 8.1: Ποσοστό ανάκτησης ισχύος μηδενικού υψομέτρου για τα διάφορα υψόμετρα παραμετρικά ως προς την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα για μονοβάθμια στροβίλο-υπερπλήρωση



Διάγραμμα 8.2: Ποσοστό ανάκτησης ισχύος μηδενικού υψομέτρου για τα διάφορα υψόμετρα παραμετρικά ως προς την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα για 2-βάθμια στροβίλο-υπερπλήρωση

Κεφάλαιο 9

Παράρτημα-Πίνακας

Συμβόλων

| Μέγεθος | Επεξήγηση | Μονάδες |
|-----------------|--|------------------|
| D | Διάμετρος εμβόλου | m |
| D _p | Διάμετρος σωματιδίων | m |
| g | Επιτάχυνση της βαρύτητας | m/s ² |
| h | Ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας | Km |
| L | Μήκος διωστήρα | m |
| n | Ταχύτητα περιστροφής κινητήρα | rpm |
| n _{TC} | Ταχύτητα περιστροφής ζεύγους συμπιεστή-στροβίλου | rpm |
| \bar{p}_e | Μέση πραγματική πίεση | bar |
| P _h | Πίεση σε υψόμετρο h | bar |
| P ₀ | Πίεση σε υψόμετρο μηδενικό | bar |
| p ₁ | Πίεση στην είσοδο του συμπιεστή | bar |
| p ₂ | Πίεση στην έξοδο του συμπιεστή (Πίεση υπερπλήρωσης) | |
| r | Ακτίνα στροφάλου | m |
| R | Παγκόσμια σταθερά αερίων | KJ/kgK |
| s | Διαδρομή εμβόλου | m |
| T | Θερμοκρασία σε υψόμετρο h | K |
| V _h | Όγκος εμβολισμού | m ³ |
| z | Αριθμός κυλίνδρων | - |
| γ | Ισεντροπικός εκθέτης | - |
| η _{ic} | Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης συμπιεστή | - |
| η _m | Μηχανικός βαθμός απόδοσης | - |
| η _ψ | Βαθμός εκμετάλλευσης ψυγείου αέρα υπερπλήρωσης | - |
| Θ _T | Ροπή αδράνειας στροβίλου | Kgm ² |
| θ | Θερμοκρασία σε υψόμετρο h | °C |
| T ₁ | Θερμοκρασία στην είσοδο του συμπιεστή | K |
| T ₂ | Θερμοκρασία στην έξοδο του συμπιεστή | K |
| T _{in} | Θερμοκρασία αέρα υπερπλήρωσης στην έξοδο του ψυγείου | K |
| T _w | Θερμοκρασία ψυκτικού υγρού στην έξοδο του ψυγείου | K |
| λ _α | Λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου | - |
| AFR | Λόγος αέρα-καυσίμου | - |

| | | |
|------|--|-----|
| ΑΝΣ | Άνω νεκρό σημείο | - |
| ΚΝΣ | Κάτω νεκρό σημείο | - |
| ΒΜΕΡ | Μέση ενδεικνύμενη πίεση ($\overline{p_e}$) | bar |

Κεφάλαιο 10

Βιβλιογραφία

[1]: Κ.Δ. Ρακόπουλος, Ε.Γ. Γιακουμής, “Εναλλαγή αερίων και Υπερπλήρωση Μ.Ε.Κ.”, Εκδόσεις Γρ. Φούντας, Αθήνα, 2011

[2]: Κ.Δ. Ρακόπουλος, Δ.Θ. Χουντάλας, “Καύση-Ρύπανση Εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ.”, Εκδόσεις Γρ. Φούντας, Αθήνα, 1998

[3]: Ε.Γ. Γιακουμής, Σημειώσεις παρουσιάσεων μαθήματος “Εναλλαγή Αερίων και Υπερπλήρωση ΜΕΚ”, ΕΜΠ, Αθήνα, 2017

[4]: Ιστοσελίδα: <http://www.geo.auth.gr>

[5]: Σ.Ε.Γλάρος, “Εφαρμογή και αξιολόγηση πολυζωνικού μοντέλου καύσης σε κινητήρα Diesel ηλεκτροπαραγωγής για την εκτίμηση της λειτουργίας και των εκπομπών NO_x”, ΕΜΠ, Αθήνα, 2008

[6]: Κ.Δ. Μάντζος, “Μελέτη προσομοίωσης σύνθετης υπερπλήρωσης κινητήρα Diesel με τη χρήση του υπολογιστικού πακέτου GT-Power”, ΕΜΠ, Αθήνα, 2012

[7]: Γ.Π. Καλορίτης, “Προσομοίωση διβάθμιας στροβιλο-υπερπλήρωσης σε μόνιμη και μεταβατική λειτουργία με χρήση του υπολογιστικού πακέτου GT-Power”, ΕΜΠ, Αθήνα, 2014

[8]: Β.Τζιόλας, “Προσομοίωση στροβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα Diesel με στρόβιλο μεταβλητής γεωμετρίας σε μόνιμη και μεταβατική κατάσταση”, ΕΜΠ, Αθήνα, 2014

[9]: Η. Παπαχριστόπουλος, “Προσομοίωση κινητήρα διπλού καυσίμου με χρήση του υπολογιστικού πακέτου GT-Power”, ΕΜΠ, Αθήνα, 2016

[10]: Γ.Δ. Τριανταφύλλου, “Ανάπτυξη μοντέλου οχήματος με υπερπληρωμένο κινητήρα Diesel με σκοπό τη μελέτη επιδόσεων και εκπομπών ρύπων κατά τη διάρκεια διαφόρων μεταβατικών διεργασιών”, ΕΜΠ, Αθήνα, 2015

[11]: Hualei Li, Lei Shi, Kangyao Deng, “Development of turbocharging system for diesel engines of power generation application at different altitudes”, Journal of the Energy Institute, 2016

[12]: Περιοδικό οργανισμού: U.S. Environmental Protection Agency, "Nitrogen dioxide", 2011

[13]: Ιστοσελίδα: <https://el.wikipedia.org>

[14]: Ιστοσελίδα οργανισμού: Green Way Structure, "Επιπτώσεις των ρύπων στην υγεία", 2009

[15]: Α. Πανταζάκης, "Μετρήσεις λειτουργίας παγίδων αιθάλης με ταυτόχρονη επιλεκτική αναγωγή οξειδίων του αζώτου", Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, 2014

[16]: I. Nova, E. Tronconi, "Urea-SCR Technology for deNOx After Treatment of Diesel Exhausts", Springer, Berlin-Heidelberg-New York, 2014

[17]: D.E. Winterbone, R.S. Benson, A.G. Mortimer, P.Kenyon, A. Stotter, "Transient response of turbocharged diesel engines", SAE Paper 770122, 1977.

[18]: J. Agudelo, A. Agudelo, J. Perez, "Energy and exergy analysis of a light duty diesel engine operating at different altitudes", Antioquia, 2009