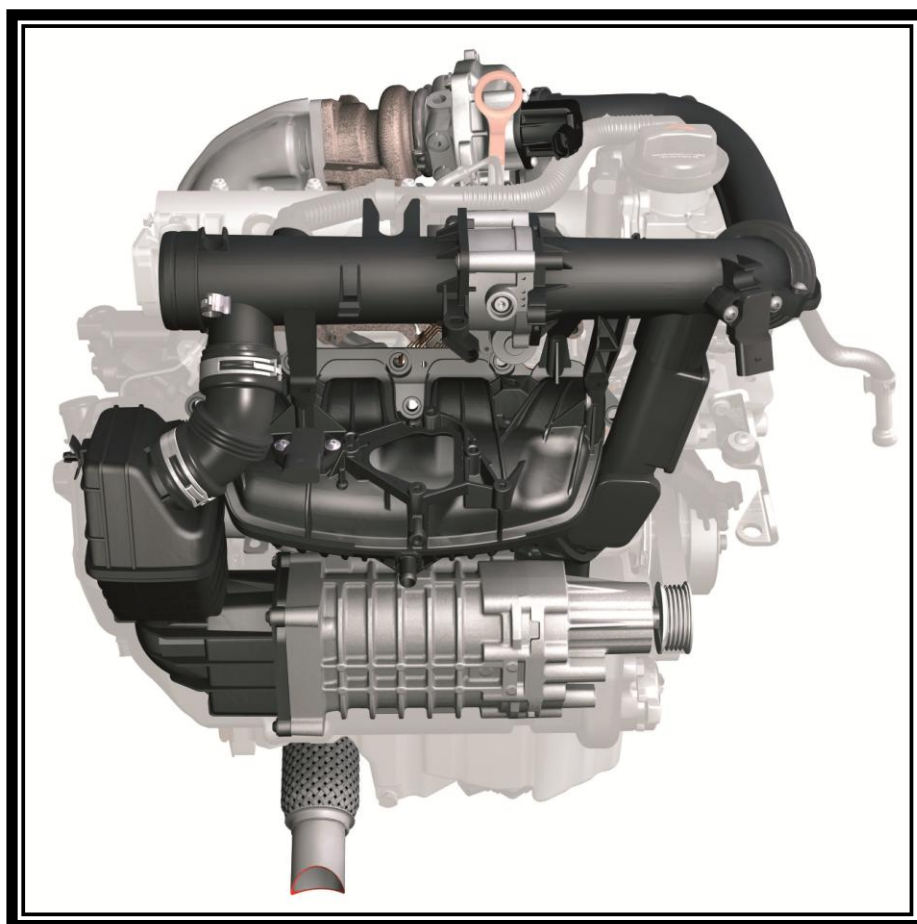




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗΣ ΣΥΝΘΕΤΗΣ ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗΣ
ΚΙΝΗΤΗΡΑ DIESEL ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ
ΠΑΚΕΤΟΥ GT-POWER**



ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Δ. ΜΑΝΤΖΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Ε.Γ. ΓΙΑΚΟΥΜΗΣ, ΕΠΙΚ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ, ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2012

Πρόλογος

Η παρούσα εργασία αναφέρεται στο θέμα της μελέτης της σύνθετης υπερπλήρωσης (δηλ. του συνδυασμού μηχανικής υπερπλήρωσης με στροβιλο-υπερπλήρωση) τόσο κατά τη μόνιμη, όσο και κυρίως κατά τη μεταβατική λειτουργία κινητήρα Diesel, μέσω προσομοίωσης των διεργασιών με τη χρήση του υπολογιστικού πακέτου GT-Power.

.....Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή κ. Κ. Ρακόπουλο και τον Καθηγητή κ. Δ. Χουντάλα, οι οποίοι συνδιδάσκουν τα μαθήματα που αφορούν τις Μηχανές Εσωτερικής Καύσης. Η διδασκαλία τους έπαιξε πρωταρχικό ρόλο στην προσπάθειά μου να εμπλουτίσω τις γνώσεις μου γύρω από τις Μηχανές Εσωτερικής Καύσης.....

.....Στο εξώφυλλο αναπαρίσταται ο κινητήρας συνδυασμένης υπερπλήρωσης TSI της Volkswagen.....

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Πίνακας Συμβόλων.....	6
1. Υπερπλήρωση	8
1.1. Ορισμός υπερπλήρωσης.....	8
1.2. Επισκόπηση των μεθόδων υπερπλήρωσης.....	10
1.3. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της υπερπλήρωσης.....	16
1.4. Βασικές αρχές της στροβιλο-υπερπλήρωσης.....	16
1.5. Ενδιάμεση ψύξη του αέρα υπερπλήρωσης.....	19
1.5.1. Βασικές αρχές.....	19
1.5.2. Ψύξη του αέρα υπερπλήρωσης και επιδόσεις του κινητήρα.....	22
1.6. Το πρόβλημα της μεταβατικής λειτουργίας ενός στροβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα.....	23
1.6.1. Η έννοια της υστέρησης του υπερπληρωτή.....	24
1.6.2. Ο χάρτης του συμπιεστή στροβιλο-υπερπλήρωσης.....	26
2. Συνδυασμένη υπερπλήρωση	28
2.1. Μηχανική υπερπλήρωση - συμπιεστές θετικής εκτόπισης.....	28
2.1.1. Κοχλιοειδείς συμπιεστές.....	28
2.1.2. Λοβοειδείς συμπιεστές.....	29
2.2. Η έννοια της συνδυασμένης υπερπλήρωσης.....	31
3. Το λογισμικό GT-Suite	36
3.1. Γνωριμία με το GT-Suite.....	36
3.2. Γενικά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος εργασίας.....	37
4. Εφαρμογή υπερπλήρωσης στο GT-Power	41
4.1. Σύντομη περιγραφή της διαδικασίας.....	41
4.2. Ο εξακύλινδρος 4-Χ κινητήρας Diesel.....	42
4.2.1. Βασικά χαρακτηριστικά του κινητήρα.....	42
4.2.2. Πολλαπλή εισαγωγής (intake manifold).....	42
4.2.3. Σωλήνες εισαγωγής (intake runners).....	43

4.2.4. Θυρίδες εισαγωγής (intake ports).....	44
4.2.5. Βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής (intake and exhaust valves)	45
4.2.6. Κύλινδροι (cylinders).....	46
4.2.7. Εγχυτήρες καυσίμου (fuel injectors).....	48
4.2.8. Θυρίδες εξαγωγής (exhaust ports).....	48
4.2.9. Πολλαπλή εξαγωγής (exhaust manifold).....	48
4.2.10. Στροφαλοφόρος άτρακτος (engine cranktrain/crankshaft).....	50
4.3. Το ζεύγος στροβιλο-υπερπλήρωσης (turbocharger).....	50
4.3.1. Συμπιεστής (compressor).....	51
4.3.2. Στρόβιλος (turbine).....	51
4.3.3. Άτρακτος ζεύγους στροβίλου-συμπιεστή (turbo shaft).....	52
4.4. Το ψυγείο ενδιάμεσης ψύξης του αέρα υπερπλήρωσης (intercooler/aftercooler).....	53
4.5. Ο μηχανικός υπερπληρωτής (supercharger).....	54
4.5.1. Συμπιεστής.....	55
4.5.2. Κιβώτιο ταχυτήτων.....	56
4.5.3. Συμπλέκτης (clutch).....	57
4.5.4. Παράκαμψη (bypass).....	57
5. Αποτελέσματα προσομοιώσεων μόνιμης λειτουργίας	59
5.1. Τελικές ρυθμίσεις προσομοίωσης.....	59
5.2. Συλλογή και επισκόπηση αποτελεσμάτων – σύγκριση μεταξύ απλής στροβιλο-υπερπλήρωσης και συνδυασμένης υπερπλήρωσης.....	60
6. Αποτελέσματα προσομοιώσεων μεταβατικής λειτουργίας	70
6.1. Επιτάχυνση από τις 1000 στις 1500rpm.....	71
6.1.1. Σύγκριση μεταξύ απλής στροβιλο-υπερπλήρωσης και συνδυασμένης υπερπλήρωσης.....	71
6.1.2. Επίδραση της διάρκειας της επιτάχυνσης από τις 1000 στις 1500rpm.....	80
6.2. Επιτάχυνση από τις 1500 στις 2000rpm.....	89
6.2.1. Σύγκριση μεταξύ απλής στροβιλο-υπερπλήρωσης και συνδυασμένης υπερπλήρωσης.....	89
6.2.2. Επίδραση της διάρκειας της επιτάχυνσης από τις 1500 στις 2000rpm.....	98
6.3. Επιτάχυνση από τις 1500 στις 2500rpm.....	106
6.3.1. Σύγκριση μεταξύ απλής στροβιλο-υπερπλήρωσης και συνδυασμένης υπερπλήρωσης.....	106

6.3.2. Επίδραση της διάρκειας της επιτάχυνσης από τις 1500 στις 2500rpm.....	114
6.4. Τελικά συμπεράσματα.....	123
Βιβλιογραφία.....	125

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

Σύμβολο	Επεξήγηση	Μονάδες
A_e	Επιφάνεια εμβόλου	m^2
\bar{c}_e	Μέση ταχύτητα εμβόλου	m/s
D	Διάμετρος εμβόλου	m
K	Σταθερά	-
n	Ταχύτητα περιστροφής κινητήρα	rpm
P_e	Πραγματική ισχύς	kW
\bar{p}_e	Μέση πραγματική πίεση	bar
r	Ακτίνα στροφάλου	m
s	Διαδρομή εμβόλου	m
T_2	Θερμοκρασία εισόδου του αέρα στο ψυγείο υπερπλήρωσης	K
T_{IN}	Θερμοκρασία εισόδου του αέρα στον κινητήρα	K
T_w	Θερμοκρασία εισόδου του ψυκτικού στο ψυγείο υπερπλήρωσης	K
V_h	Όγκος εμβολισμού	m^3
V_c	Επιζήμιος όγκος	m^3
x_c	Απόσταση ΑΝΣ από την κυλινδροκεφαλή	m
z	Αριθμός κυλίνδρων	-
η_ψ	Βαθμός εκμετάλλευσης του ψυγείου υπερπλήρωσης	-
λ_α	Λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου	-

Αρκτικόλεξα	Επεξήγηση
NO_x	Οξειδία του αζώτου
ΑΝΣ/TDC	Άνω Νεκρό Σημείο (top dead center)
ΚΝΣ/BDC	Κάτω Νεκρό Σημείο (bottom dead center)
ΜΕΚ	Μηχανή Εσωτερικής Καύσης
4-X	Τετράχρονος κινητήρας

Αρκτικόλεξα	Επεξήγηση	Μονάδες
bme _p	Μέση πραγματική πίεση (brake mean effective pressure)	bar
bsfc	Ειδική κατανάλωση καυσίμου (brake specific fuel consumption)	g/kWh
bsNO _x	Ειδικές εκπομπές οξειδίων του αζώτου (brake specific NO _x)	g/kWh

Κεφάλαιο 1 –

Υπερπλήρωση [2]

1.1 Ορισμός υπερπλήρωσης

Στο διάστημα των τελευταίων 70 χρόνων παρατηρήθηκε ένας τετραπλασιασμός της ισχύος των κινητήρων Diesel, χωρίς ουσιαστική μεταβολή του όγκου εμβολισμού τους. Συνεπώς, έχουμε και τετραπλασιασμό της χωρικής ισχύος τους ή τελικά της μέσης πραγματικής πίεσης αυτών, \bar{p}_e , με δεδομένο ότι η αντίστοιχη ταχύτητα περιστροφής n αυξήθηκε, το ίδιο χρονικό διάστημα, σε αρκετά μικρότερο βαθμό. Εκτός από τη βελτίωση των διαφόρων διεργασιών που συντελούν στην πιο αποδοτική καύση εντός των κινητήρων, π.χ. αύξηση της πίεσης του εγχυόμενου καυσίμου σε κινητήρες Diesel (και που δεν μπορούν να οδηγήσουν σε τόσο θεαματικές μεταβολές της ισχύος ή της ροπής), η βασικότερη αιτία για τον τετραπλασιασμό αυτό της ισχύος είναι η υπερπλήρωση (supercharging) σε συνδυασμό με την ενδιάμεση ψύξη του αέρα υπερπλήρωσης.

Σκοπός της υπερπλήρωσης είναι η αύξηση της γόμωσης (της πλήρωσης) του κυλίνδρου και άρα της ισχύος του κινητήρα σε επίπεδα μεγαλύτερα από αυτά του αντιστοίχων διαστάσεων 4-Χ κινητήρα φυσικής αναπνοής.

Με δεδομένο ότι στον υπερπληρωμένο κινητήρα, τόσο η πίεση εισαγωγής όσο και αυτή της εξαγωγής είναι επάνω από το επίπεδο της ατμοσφαιρικής πίεσης, και άρα μπορεί να καεί περισσότερο καύσιμο, το επίπεδο των πιέσεων κατά τη διάρκεια όλου του κύκλου λειτουργίας και, κυρίως, της καύσης είναι σημαντικά υψηλότερο. Μπορούμε να πούμε ότι:

Ως υπερπλήρωση ορίζεται η προ-συμπίεση μέρους ή όλης της γόμωσης εξωτερικά του κυλίνδρου (συνήθως σε κάποιον συμπιεστή). Συνεπώς, η γόμωση συμπιέζεται τελικά και εκτός και εντός του κυλίνδρου.

Η ισχύς ενός κινητήρα είναι, γενικά, ανάλογη με την ποσότητα του καυσίμου που μπορεί να καεί σε αυτόν, άρα και με την παροχή του αναρροφώμενου αέρα. Σε κάθε περίπτωση, σκοπός της υπερπλήρωσης είναι η αύξηση της ισχύος ενός δεδομένου κινητήρα, χωρίς αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του. Και οι 2 αυτοί παράγοντες (η υπερπλήρωση και η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής) αυξάνουν την παροχή του αναρροφώμενου από τον κινητήρα αέρα, και συνεπώς την ποσότητα καυσίμου που μπορεί να καεί, συνεπώς και την ισχύ του.

Και στις δύο περιπτώσεις, όμως, υπάρχουν τεχνολογικά όρια όσον αφορά την περαιτέρω αύξηση της αποδιδόμενης ισχύος, η οποία δίνεται από την σχέση

$$P_e = zV_h \frac{n}{30K} = zA_e s \bar{p}_e \frac{n}{30K} = zA_e \bar{p}_e \frac{\bar{c}_e}{K} \quad (1.1)$$

όπου $K=4$ για 4-Χ κινητήρα και $K=2$ για 2-Χ, z ο αριθμός των κυλίνδρων και A_e η επιφάνεια του εμβόλου.

Για δεδομένο κινητήρα, η εξαγόμενη ισχύς μπορεί να αυξηθεί είτε με αύξηση της ταχύτητας περιστροφής (ή ισοδύναμα της μέσης ταχύτητας του εμβόλου), είτε με αύξηση της μέσης πραγματικής πίεσης. Θα ήταν χρήσιμο να συγκρίνουμε τις πιθανές παρενέργειες των δύο αυτών μεθόδων αύξησης της ισχύος.

Με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής αυξάνονται οι δυναμικές φορτίσεις του κινητήρα, και μάλιστα με πιο γρήγορο ρυθμό, δηλαδή ανάλογα με το τετράγωνο της ταχύτητας περιστροφής, καθώς επίσης και οι μηχανικές απώλειες.

Αντιθέτως, με αύξηση της υπερπλήρωσης, (μέσης πραγματικής πίεσης), αυξάνουν σχεδόν γραμμικά οι δυνάμεις εξ' αερίων και σε αρκετά μικρότερο βαθμό οι μηχανικές απώλειες· συνήθως, αυξημένες δυνάμεις εξ' αερίων μπορούν να αντιμετωπιστούν ευκολότερα από ότι αυξημένες δυναμικές φορτίσεις. Από την άλλη πλευρά, το θερμικό φορτίο, σε σχέση με

την παραγόμενη ισχύ, αυξάνει περίπου ισοδύναμα, είτε με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής είτε με την υπερπλήρωση.

Στην περίπτωση αύξησης της ταχύτητας περιστροφής n , άρα και της μέσης ταχύτητας του εμβόλου, απαιτούνται κινούμενα μέρη μικρού βάρους για λόγους αδράνειας, γεγονός που μπορεί να επιτευχθεί με ακριβή σχεδιασμό και με χρήση υλικών υψηλής αντοχής. Στην περίπτωση της υπερπλήρωσης, απαιτείται στιβαρή κατασκευή για να μπορεί ο κινητήρας να αντέξει τις καταπονήσεις λόγω αυξημένων δυνάμεων εξ' αερίων. Και πάλι όμως η υπερπλήρωση, κατά κανόνα, οδηγεί σε χαμηλότερο ειδικό βάρος ανά μονάδα εξαγόμενης ισχύος του κινητήρα (δηλαδή η εξαγόμενη ισχύς αυξάνει ταχύτερα απ' ό,τι το βάρος του κινητήρα).

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η υπερπλήρωση αποτελεί μια πιο αποτελεσματική μέθοδο αύξησης της ισχύος από την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής, γι' αυτό και έχει τύχει σχεδόν καθολικής εφαρμογής όσον αφορά τους κινητήρες Diesel.

Επιπλέον, λόγοι εμπορικοί έχουν επιταχύνει τη χρήση της, αφού ένας υπερπληρωμένος κινητήρας μπορεί να εγκατασταθεί ευκολότερα σε μια ήδη υπάρχουσα σειρά, π.χ. αυτοκινήτων, χωρίς να χρειάζεται να εξελιχθούν νέα, μεγαλύτερων διαστάσεων, μοντέλα.

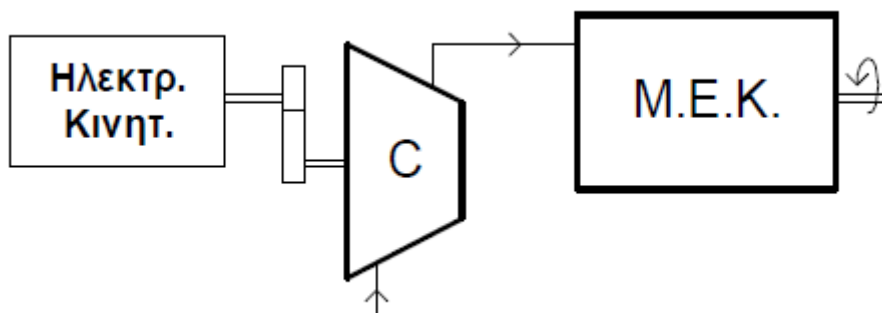
1.2 Επισκόπηση των μεθόδων υπερπλήρωσης

Ο αέρας (κινητήρες Diesel ή Otto άμεσης έγχυσης) ή το μίγμα αέρα-καυσίμου (κινητήρες Otto) προ-συμπιέζεται στο συμπιεστή υπερπλήρωσης του κυλίνδρου. Τα συστήματα υπερπλήρωσης μπορούν συνεπώς να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με:

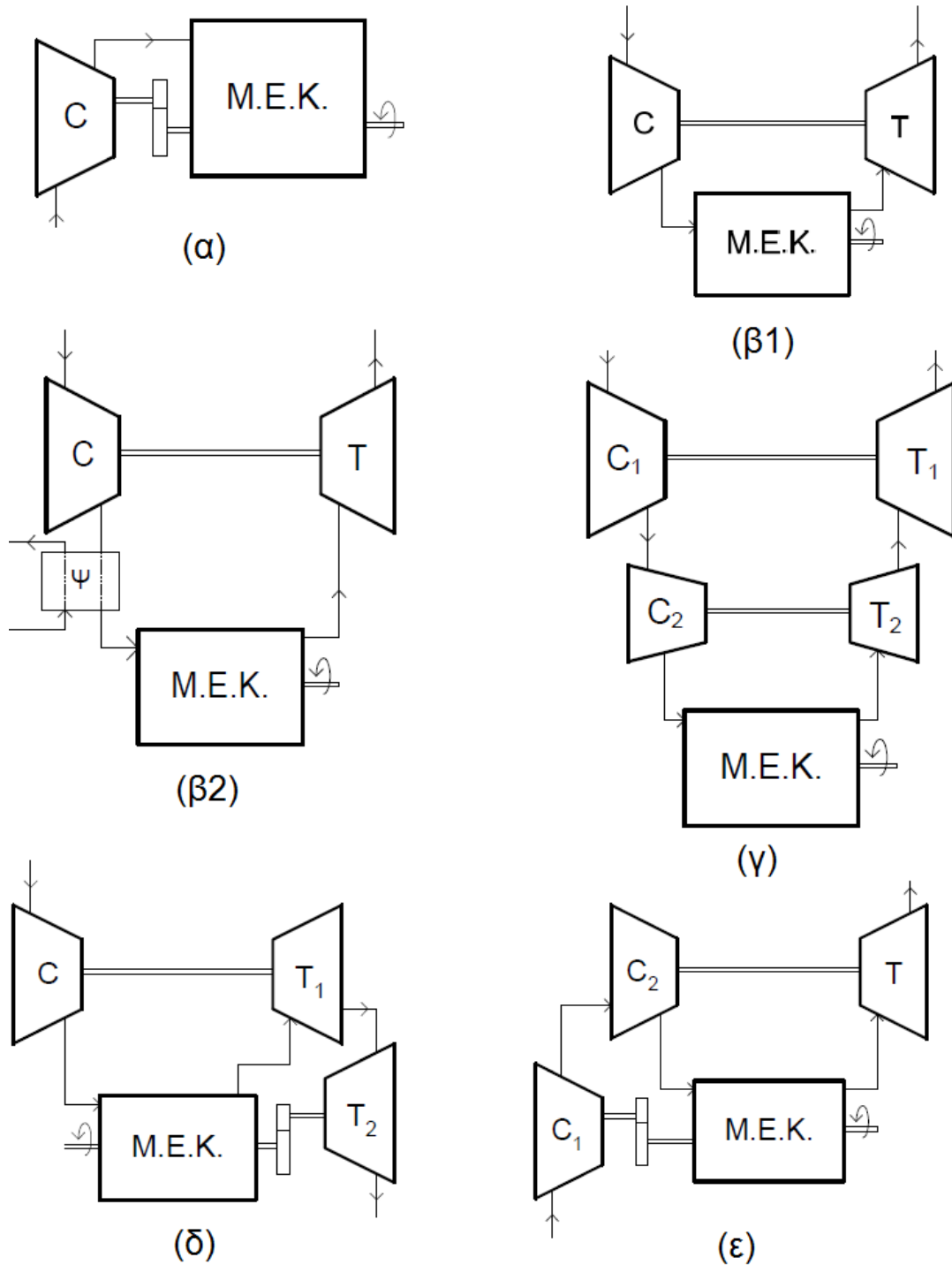
- 1) Τον τρόπο κίνησης του συμπιεστή υπερπλήρωσης,
- 2) Το σχεδιασμό του συμπιεστή,
- 3) Τη σύνδεση της μονάδας υπερπλήρωσης με τον κινητήρα ή του τρόπου μεταφοράς της ισχύος, αλλά και
- 4) Το είδος του κινητήρα.

1) Τρόπος κίνησης του συμπιεστή υπερπλήρωσης.

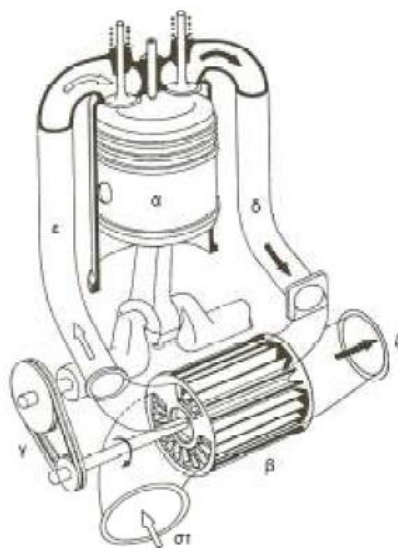
- 1.1) Εξωτερικά κινούμενος (από βοηθητικό κινητήρα ή ηλεκτροκινητήρα) → εξωτερική υπερπλήρωση. Χρησιμοποιείται κυρίως σε συστήματα υπερπλήρωσης αεροπορικών κινητήρων, ορισμένων κινητήρων Diesel, καθώς και για τη σάρωση 2-Χ κινητήρων φυσικής αναπνοής. (Σχήμα 1.1)
- 1.2) Κινούμενος από τη στροφαλοφόρο άτρακτο του κινητήρα (απορρόφηση μηχανικού έργου) → μηχανική υπερπλήρωση. Χρησιμοποιείται σε κινητήρες Otto αυτοκινήτων με ή χωρίς ενδιάμεσο ψυγείο αέρα, με σταθερή (συνήθως) ή μεταβλητή σχέση μετάδοσης κίνησης. (Σχήμα 1.2.α)
- 1.3) Κινούμενος από στρόβιλο καυσαερίου → στροβιλο-υπερπλήρωση· μονοβάθμια χωρίς ή με ενδιάμεσο ψυγείο αέρα ή διβάθμια. Είναι ο πλέον διαδεδομένος τύπος υπερπλήρωσης με σχεδόν καθολική χρήση σε κινητήρες οχημάτων, βιομηχανικούς και ναυτικούς. (Σχήματα 1.2.β1, 1.2.β2 και 1.2.γ)
- 1.4) Χωρίς τη χρήση συμπιεστή, αλλά με συμπίεση μέσω κύματος πίεσης που προέρχεται από την αποτόνωση του καυσαερίου σε δρομέα με πτερύγια, π.χ. σύστημα Comprex της εταιρίας Brown Boveri & Co. Ltd. (Σχήμα 1.3)



Σχήμα 1.1. Σύστημα υπερπλήρωσης με συμπιεστή κινούμενο από εξωτερικό (ηλεκτρο)κινητήρα



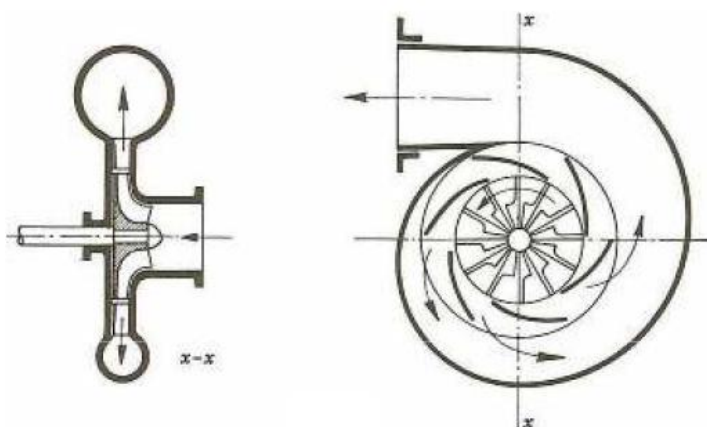
Σχήμα 1.2. Διάφορες διατάξεις υπερπλήρωσης: (α) μηχανική υπερπλήρωση, (β1) στροβιλο-υπερπλήρωση, (β2) στροβιλο-υπερπλήρωση με ενδιάμεσο ψυγείο αέρα, (γ) διβάθμια στροβιλο-υπερπλήρωση, (δ) σύνθετη στροβιλο-υπερπλήρωση (turbo-compound) με στρόβιλο ισχύος, (ε) συνδυασμένη υπερπλήρωση, με δύο συμπιεστές σε σειρά, ο ένας θετικής εκτόπισης συζευγμένος στη στροφαλοφόρο άτρακτο και ο άλλος σε ζεύγος στροβιλο-υπερπλήρωσης



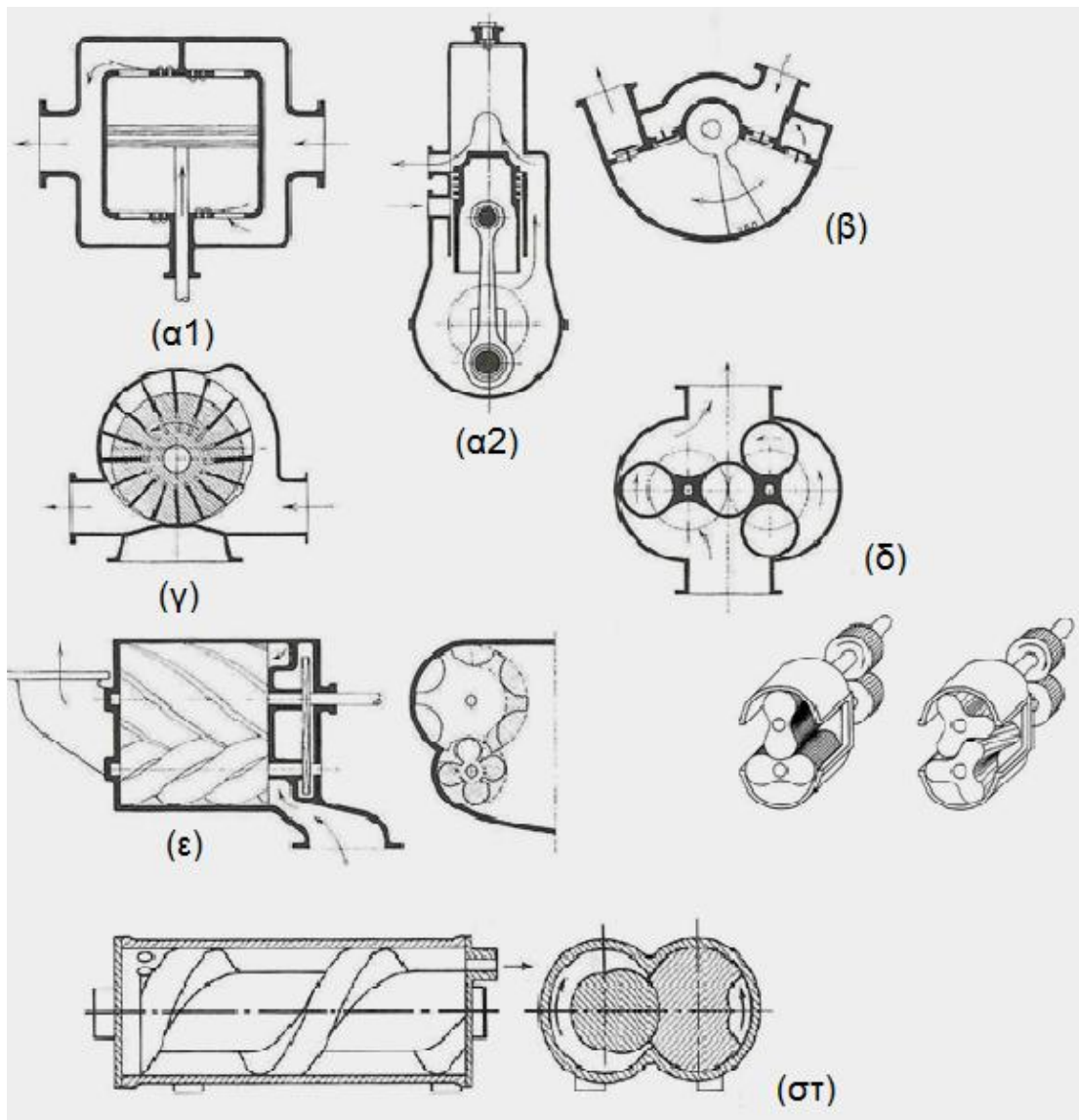
Σχήμα 1.3. Σύστημα υπερπλήρωσης με τη μέθοδο Comprex: (α) κύλινδρος Μ.Ε.Κ., (β) κυψελοειδής ρότορας, (γ) ιμάντας, (δ) καυσαέριο υψηλής πίεσης, (ε) αέρας υψηλής πίεσης, (στ) αέρας χαμηλής πίεσης, (ζ) καυσαέριο χαμηλής πίεσης

2) Σχεδιασμός του συμπιεστή.

- 2.1) Τύπου δυναμικής ροής – αεροδυναμικός συμπιεστής αξονικής, ακτινικής ή μεικτής ροής (Σχήμα 1.4).
- 2.2) Θετικής εκτόπισης (Σχήμα 1.5) με παλινδρομικό ή περιστρεφόμενο έμβολο, όπως π.χ. στην περίπτωση του λοβοειδούς ανεμιστήρα (Roots blower) ή του κοχλιοειδούς συμπιεστή (Lysholm).



Σχήμα 1.5. Συμπιεστής δυναμικής ροής, φυγοκεντρικός (ακτινικής ροής), με ένδειξη της πορείας του ρευστού

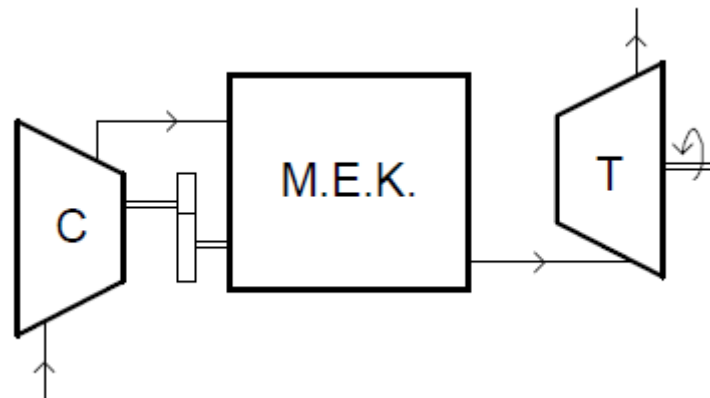


Σχήμα 1.4. Διάφοροι τύποι συμπιεστών θετικής εκτόπισης. Παλινδρομικοί: (α1) τυπικός εμβολοφόρος, (α2) τύπου στροφαλοθαλάμου, (β) τύπου ταλαντούμενων πτερυγίων. Περιστρεφόμενοι: (γ) με ολισθαίνοντα πτερύγια (sliding vane), (δ) λοβοειδούς τύπου Roots, (ε) κοχλιοειδούς τύπου Lysholm, ή (στ) κοχλιωτού τύπου (screw)

3) Σύνδεση μονάδας υπερπλήρωσης και κινητήρα, και μεταφορά ισχύος.

3.1) Συμπιεστής συζευγμένος στη στροφαλοφόρο άτρακτο του κινητήρα· η ισχύς εξάγεται από την άτρακτο του κινητήρα χωρίς τη χρήση στροβίλου → μηχανική υπερπλήρωση.

- 3.2) Συμπιεστής συζευγμένος με τον ελεύθερα περιστρεφόμενο στρόβιλο αποτόνωσης καυσαερίου· η εξαγόμενη ισχύς παράγεται μόνο από την άτρακτο του κινητήρα → στροβιλο-υπερπλήρωση.
- 3.3) Συμπιεστής και στρόβιλος μηχανικά συζευγμένοι· επίσης, η άτρακτος του κινητήρα είναι συζευγμένη στο στρόβιλο ισχύος → σύνθετοι κινητήρες (turbo-compound engines). Χρήση σε κινητήρες αεροσκαφών.
- 3.4) Συμπιεστής και άτρακτος του κινητήρα μηχανικά συζευγμένοι μεταξύ τους με επιπλέον ζεύγος στροβιλο-υπερπλήρωσης· οι δύο συμπιεστές συνδεδεμένοι σε σειρά. Χρήση σε 2-Χ στροβιλο-υπερπληρωμένους κινητήρες καθώς και σε κινητήρες οχημάτων για τη βελτίωση της μεταβατικής τους λειτουργίας.
- 3.5) Συμπιεστής και άτρακτος του κινητήρα μηχανικά συζευγμένοι μεταξύ τους· εξαγόμενη ισχύς μόνο από την άτρακτο του στροβίλου → στρόβιλος με αεριογόνο (gas generator). Είχε χρήση, κυρίως, σε μονάδες ισχύος με σύστημα ελευθέρων εμβόλων.



Σχήμα 1.6. Στρόβιλος με αεριογόνο καυσαερίων περιλαμβάνουσα Μ.Ε.Κ. και συμπιεστή

4) Είδος του κινητήρα.

- 4.1) 4-Χ ή 2-Χ κινητήρας.
- 4.2) Κινητήρας Otto ή Diesel.

1.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της υπερπλήρωσης

Τα πλεονεκτήματα της υπερπλήρωσης για δεδομένη εξαγόμενη ισχύ από έναν κινητήρα είναι:

- Μικρότερος φυσικός όγκος (μικρότερος αριθμός κυλίνδρων, μικρότερο μήκος κινητήρα – ‘downsizing’),
- Μικρότερο ποσοστό τριβών λόγω του μικρότερου αριθμού κυλίνδρων άρα και του μικρότερου αριθμού εδράνων,
- Μικρότερο βάρος, μεγαλύτερη ειδική μάζα,
- Χαμηλότερο κόστος ανά μονάδα παραγόμενης ισχύος, ειδικά για μεγαλύτερων διαστάσεων κινητήρες,
- Μειωμένος θόρυβος στην εξαγωγή λόγω του στροβίλου των καυσαερίων,
- Μικρότερη επίδραση της μείωσης της πυκνότητας του αέρα περιβάλλοντος,
- Χαμηλότερες εκπομπές καυσαερίων σε μόνιμη κατάσταση (υπό συγκεκριμένες συνθήκες), και
- Ειδικά για κινητήρες Diesel, μείωση της καθυστέρησης ανάφλεξης λόγω των αυξημένων θερμοκρασιών εντός του κυλίνδρου.

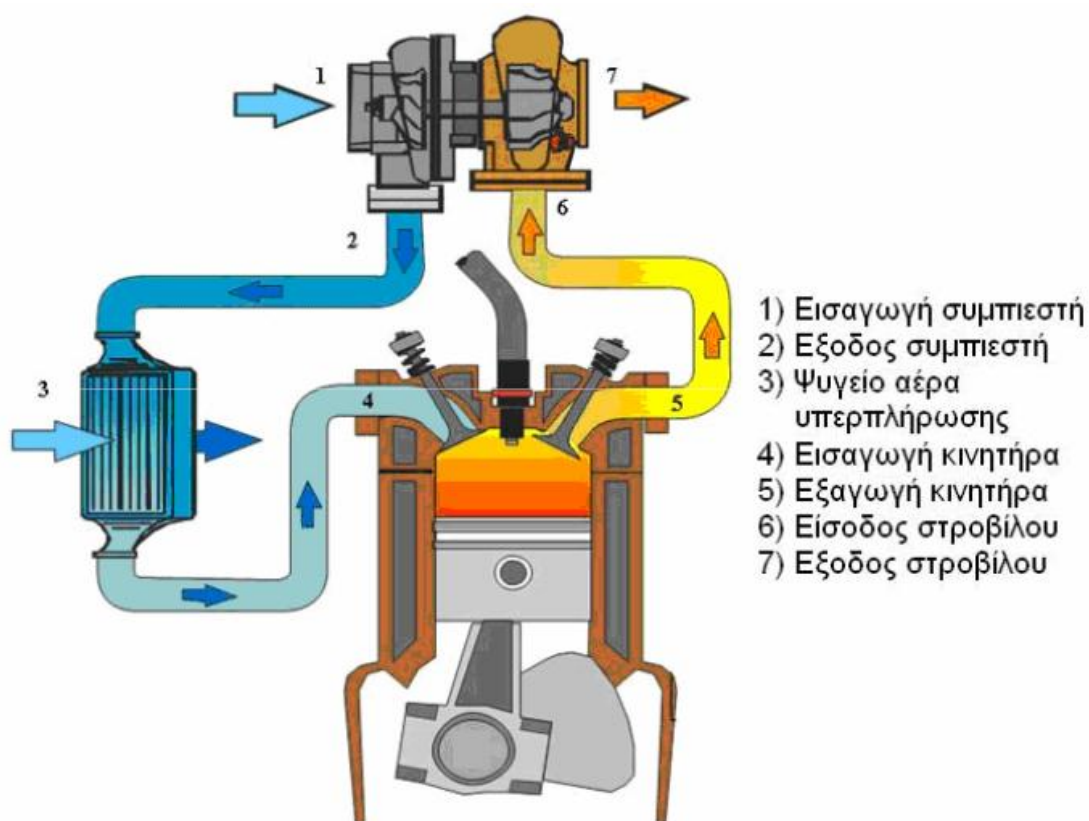
Τα μειονεκτήματα της υπερπλήρωσης είναι:

- Υψηλότερη μηχανική και θερμική φόρτιση,
- Αργή επιτάχυνση,
- Ιδιαίτερα αυξημένες εκπομπές ρύπων κατά τη μεταβατική λειτουργία,
- Ελαφρώς αυξημένες εκπομπές ρύπων κατά την εκκίνηση κινητήρων οχημάτων λόγω καθυστερημένης προθέρμανσης του καταλύτη,
- Πιθανόν αυξημένες εκπομπές οξειδίων του αζώτου NOx λόγω υψηλότερων θερμοκρασιών κύκλου (χωρίς ενδιάμεση ψύξη του αέρα υπερπλήρωσης).

1.4 Βασικές αρχές της στροβιλο-υπερπλήρωσης

Από όλους τους παραπάνω συνδυασμούς συστημάτων υπερπλήρωσης, πολλοί έχουν εξεταστεί, λίγοι όμως τελικά παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα έτσι ώστε να υλοποιηθούν και να βγουν σε μαζική παραγωγή. Ευρέως αποδεκτός θεωρείται σήμερα ο συνδυασμός

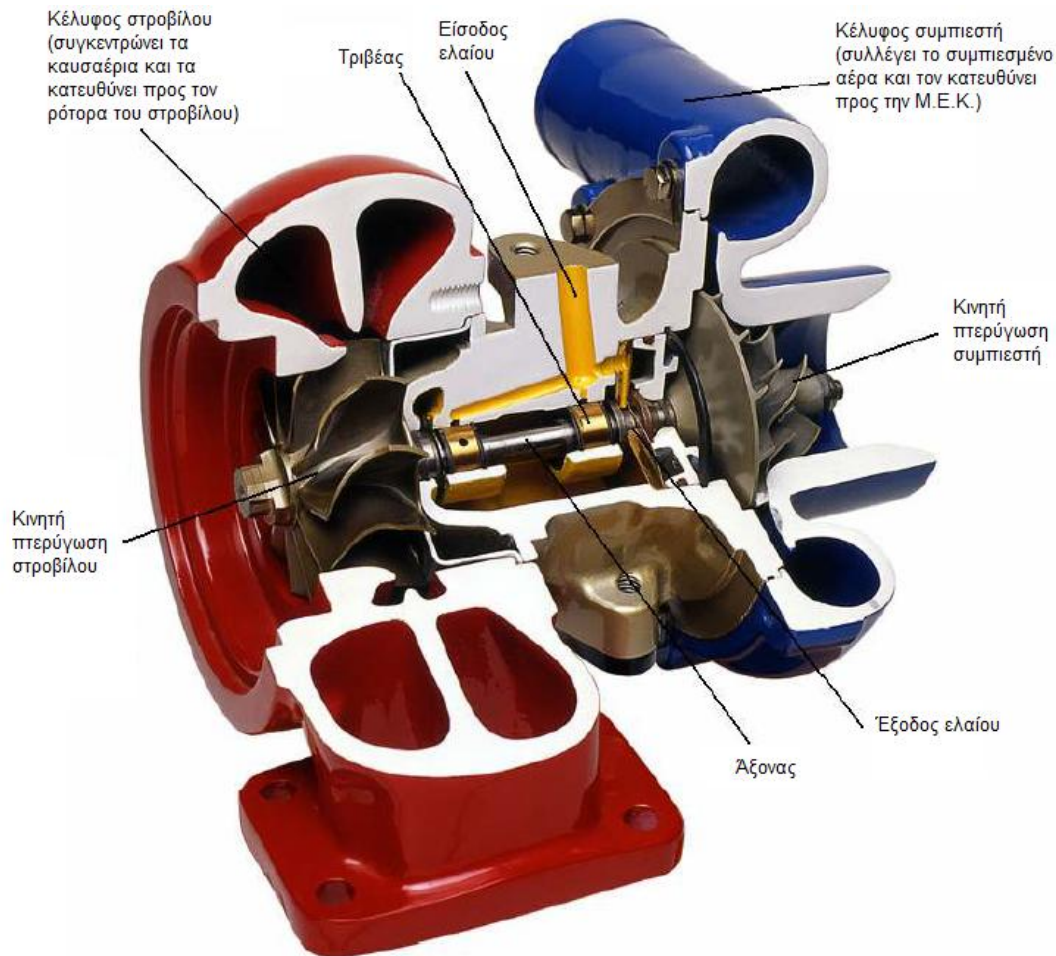
εμβολοφόρου κινητήρα Otto ή Diesel με ζεύγος στροβιλο-υπερπληρωτή (turbocharging), συνήθως με ενδιάμεσο ψυγείο του αέρα υπερπλήρωσης (aftercooler). Αυτός ο συνδυασμός κινητήρα-υπερπληρωτή αποτελείται, συνήθως, από φυγοκεντρικό (ακτινικό) συμπιεστή και αποτόνωση του καυσαερίου σε ακτινικό (για μικρούς όγκους εμβολισμού, π.χ. εφαρμογές αυτοκινήτων) ή αξονικό (για μεγαλύτερους όγκους εμβολισμού, π.χ. φορτηγά, βιομηχανικούς, ναυτικούς κινητήρες) στρόβιλο.



Σχήμα 1.7. Τυπική διάταξη στροβιλο-υπερπλήρωσης κινητήρα Otto με ενδιάμεσο ψυγείο αέρα

Συμπιεστής και στρόβιλος είναι μηχανικά συνδεδεμένοι στην ίδια άτρακτο, το οποίο σημαίνει ότι το έργο για την κίνηση του συμπιεστή παρέχεται από το στρόβιλο χωρίς να αφαιρέσει πολύτιμο μηχανικό έργο από τον κινητήρα. Το σύστημα αυτό συνδυάζει σχετικά απλή κατασκευή και δυνατότητα επίτευξης ιδιαίτερα υψηλής συγκέντρωσης ισχύος της συνδεδεμένης εμβολοφόρου Μ.Ε.Κ. Επιπλέον, παρότι κάτι τέτοιο δεν

αποτελεί πρωταρχικό στόχο της υπερπλήρωσης, συνήθως βελτιώνεται (ελαφρώς) και η ειδική κατανάλωση καυσίμου του κινητήρα.



Σχήμα 1.8. Τομή ζεύγους στροβιλο-υπερπλήρωσης

Για λόγους κόστους και χώρου, οι συμπιεστές των εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ. είναι συνήθως ακτινικοί (φυγοκεντρικοί) και πολύ σπανιότερα αξονικοί, σε αντίθεση με τους στροβίλους που απαντώνται και στις δύο μορφές. Κατασκευαστικοί, πάντως, λόγοι συνήθως περιορίζουν τους ακτινικούς στροβίλους σε μικρές μονάδες, δεδομένου ότι πρέπει να χυτευθούν με ακρίβεια και με υψηλής θερμικής ανοχής υλικά (σε μικρούς 4-Χ κινητήρες Otto αυτοκινήτων, που λειτουργούν με στοιχειομετρική αναλογία καυσίμου-αέρα, οι θερμοκρασίες μπορεί να ξεπεράσουν τους 1000°C καθορίζοντας ανάλογα και το υλικό κατασκευής, με πρόσφατη επιλογή τη χρήση κεραμικών υλικών), τεχνική η οποία είναι οικονομική μόνο σε περίπτωση παραγωγής μικρών μονάδων και σε μεγάλες ποσότητες.

Τόσο ο ακτινικός όσο και ο αξονικός στρόβιλος λειτουργούν γενικά σε αρκετά χαμηλά-αποδεκτά επίπεδα θορύβου. Στο συμπιεστή, όμως, παράγεται έντονο ηχητικό πεδίο. Η ένταση του θορύβου εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής και τον αριθμό των πτερυγίων της πτερωτής. Έτσι, ένας σημαντικός αριθμός υπερπληρωμένων κινητήρων (κυρίως μεγάλων διαστάσεων) αναρροφούν αέρα όχι κατευθείαν από το περιβάλλον, αλλά μέσω αποσιωπητήρα.

1.5 Ενδιάμεση ψύξη του αέρα υπερπλήρωσης

1.5.1 Βασικές αρχές

Ο κύριος σκοπός της υπερπλήρωσης είναι η αύξηση της παραγόμενης ισχύος από έναν κινητήρα χωρίς αύξηση του μεγέθους του. Αυτό επιτυγχάνεται αυξάνοντας την πίεση εισαγωγής (στην πολλαπλή εισαγωγής και εν συνεχεία στους κυλίνδρους), δηλαδή αυξάνοντας τη μάζα που αναρροφάται από τον κύλινδρο κατά τη φάση της εισαγωγής, επιτρέποντας έτσι περισσότερο καύσιμο να καεί, οπότε και να παραχθεί περισσότερη ισχύς. Ωστόσο, είναι αδύνατο να συμπιεστεί ο αέρας χωρίς ταυτόχρονη αύξηση της θερμοκρασίας του, εκτός εάν ο συμπιεστής ψύχεται εξωτερικά. Από τη στιγμή που σκοπός είναι η αύξηση της πυκνότητας του αέρα, η θερμοκρασιακή ανύψωση, αντισταθμίζει εν μέρει, το όφελος από την ανύψωση της πίεσης. Έτσι, σκοπός πρέπει να είναι η ανύψωση της πίεσης με την ελάχιστη δυνατή αύξηση της θερμοκρασίας.

Επισημαίνονται τα εξής:

- Το όφελος από την ανύψωση της πίεσης εισαγωγής ελαττώνεται λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας, η οποία, με τη σειρά της εξαρτάται από το βαθμό απόδοσης του συμπιεστή,
- Η συνεισφορά του υψηλού βαθμού απόδοσης του συμπιεστή στο να κρατηθεί χαμηλά η θερμοκρασιακή ανύψωση είναι μικρή αλλά αξιοσημείωτη,
- Το όφελος που προκύπτει από την ψύξη του συμπιεσμένου αέρα έως μία θερμοκρασία κοντά στη θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος είναι ουσιαστικό, και αυξάνει το λόγο πιέσεων του συμπιεστή. Είναι φανερό, ότι

η ψύξη του αέρα από την εξαγωγή του συμπιεστή έως την εισαγωγή στους κυλίνδρους είναι επωφελής.

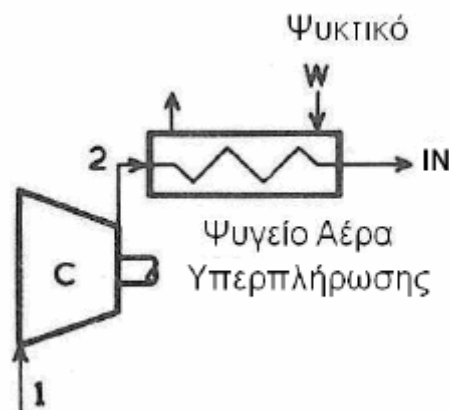
Ένα επιπλέον πλεονέκτημα της ψύξης του αέρα υπερπλήρωσης είναι ότι, λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας εισαγωγής στους κυλίνδρους, οι θερμοκρασίες του κύκλου λειτουργίας είναι χαμηλότερες (για σταθερή μέση πραγματική πίεση), οπότε και η θερμική φόρτιση του κινητήρα είναι μικρότερη, στοιχείο που είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε κινητήρες Otto λόγω του γνωστού προβλήματος της κρουστικής καύσης, αλλά και σε όλους τους κινητήρες για μειωμένες εκπομπές οξειδίων αζώτου NOx.

Χρησιμοποιώντας ψυγείο του αέρα υπερπλήρωσης μετά την εξαγωγή του από το συμπιεστή και πριν την εισαγωγή του στους κυλίνδρους του κινητήρα (aftercooling) (Σχήμα 1.10), αυξάνεται η πυκνότητα (άρα και η μάζα) του αέρα που εισέρχεται στους κυλίνδρους επιτρέποντας έτσι περισσότερο καύσιμο να καεί· ενισχύεται έτσι η έννοια της υπερπλήρωσης.

Η ελάττωση της θερμοκρασίας του αέρα στο ψυγείο είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας του ψυκτικού μέσου και του βαθμού εκμετάλλευσης του ψυγείου, που είναι ο λόγος της πραγματικά μεταδιδόμενης θερμότητας στο ψυγείο προς την μέγιστη δυνατή θερμότητα που μπορεί να μεταδοθεί σ' αυτό:

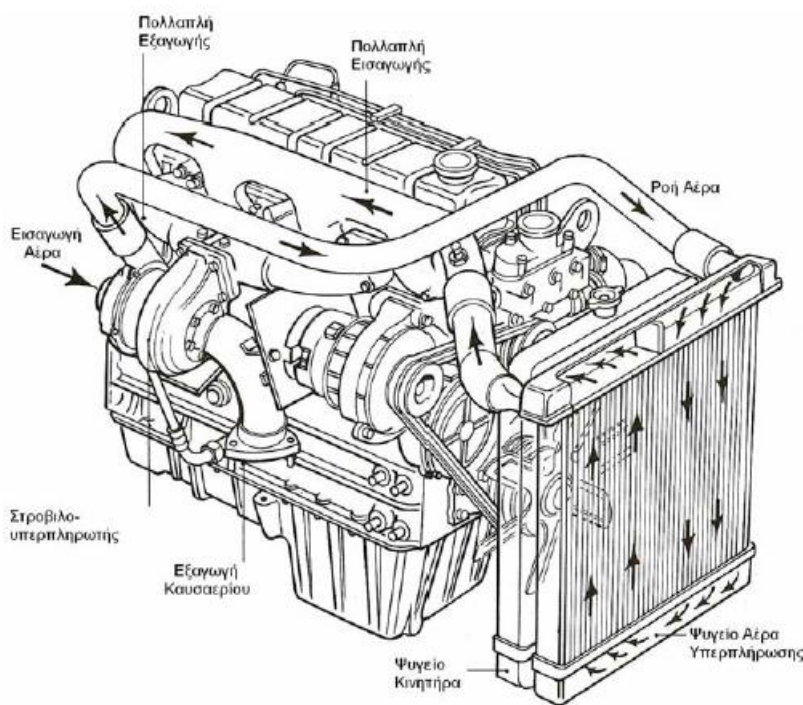
$$\eta_{\psi} = \frac{T_2 - T_{IN}}{T_2 - T_w} \quad (1.2)$$

όπου με 'w' συμβολίζεται η εισαγωγή του ψυκτικού μέσου στο ψυγείο (Σχήμα 1.9).



Σχήμα1.9. Διάταξη του ενδιάμεσου ψυγείου υπερπλήρωσης

Είναι φανερό ότι ο βαθμός εκμετάλλευσης του ψυγείου και η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ «θερμού» αέρα και «ψυχρού» ψυκτικού μέσου καθορίζουν το μέγεθος της ψύξης. Προφανώς, το ψυκτικό μέσο θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν ψυχρότερο. Γι' αυτό το λόγο, νερό ψύξης στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, ως ψυκτικό μέσο, είναι προτιμότερο από το νερό του συστήματος ψύξης του κινητήρα.



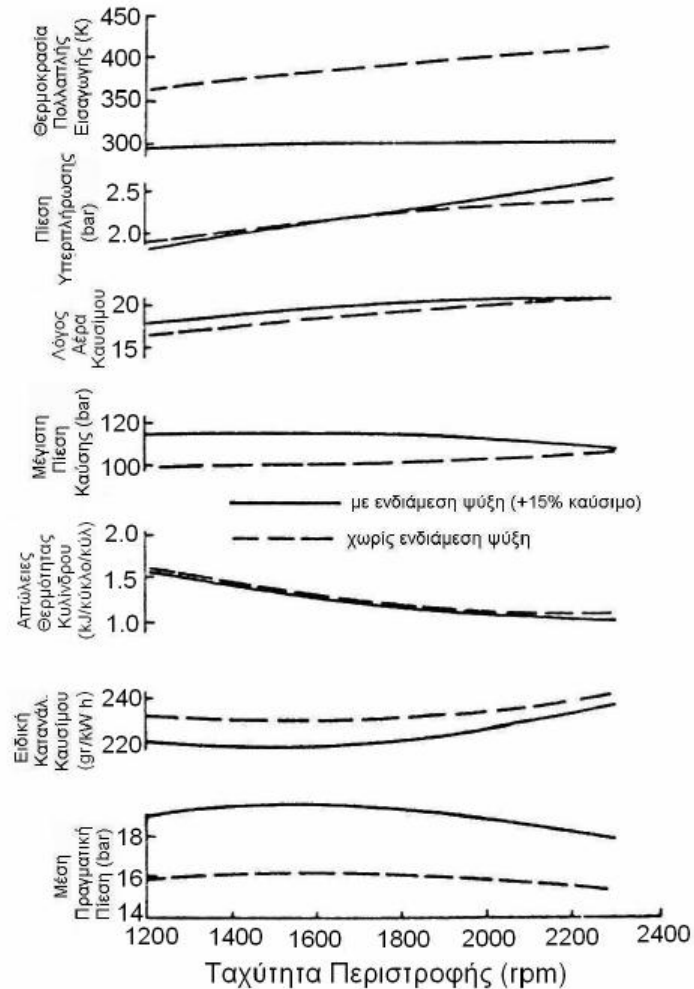
Σχήμα 1.10. Ψυγείο αέρα-αέρα υπερπληρωτή κινητήρα οχήματος

Τα πλεονεκτήματα της ψύξης του αέρα υπερπλήρωσης είναι ξεκάθαρα· παρόλα αυτά, η μέθοδος αν και εφαρμόζεται συχνά, δεν είναι καθολική σε χρήση, μια και παρουσιάζει και κάποια (κυρίως πρακτικά) μειονεκτήματα: Από την πλευρά του ψυχόμενου αέρα, η ροή αυτού διαμέσου του ψυγείου εμπεριέχει κάποιες απώλειες πίεσης, αφού γίνεται διαμέσου στενών σωληνώσεων που απαιτούνται για αποδοτική ψύξη. Αυτές οι απώλειες πίεσης οδηγούν τελικά σε ελαφρώς μικρότερη αύξηση της πυκνότητας του αέρα από την επιθυμητή. Το δεύτερο μειονέκτημα της ψύξης του αέρα υπερπλήρωσης αφορά ένα πιο πρακτικό πρόβλημα, την παροχή ψυχρού αέρα ή νερού (που είναι προτιμότερο λόγω του μεγαλύτερου συντελεστή μεταφοράς θερμότητας). Εάν η πίεση υπερπλήρωσης είναι χαμηλή, όπως ισχύει γενικά στους κινητήρες Otto, και το διαθέσιμο ψυκτικό μέσο είναι σχετικά θερμό (π.χ. το

νερό του συστήματος ψύξης του κινητήρα), τότε η ψύξη του αέρα υπερπλήρωσης παρουσιάζει σχεδόν ασήμαντο όφελος και μάλιστα μόνο στην πλήρη ισχύ, απαιτώντας μάλιστα πολύ μεγάλων διαστάσεων εναλλάκτη θερμότητας, ο οποίος επιπροσθέτως θα οδηγήσει και σε σημαντική πτώση πίεσης του αέρα υπερπλήρωσης. Τρίτο μειονέκτημα είναι το κόστος, που όμως το όφελος από την ψύξη του αέρα υπερπλήρωσης συνήθως το αντισταθμίζει. Τέλος, υπερβολική ψύξη του αέρα υπερπλήρωσης μπορεί να προκαλέσει συμπύκνωση στην πολλαπλή εισαγωγής.

1.5.2 Ψύξη του αέρα υπερπλήρωσης και επιδόσεις του κινητήρα

Για σταθερή παραγόμενη ισχύ, η ψύξη του αέρα υπερπλήρωσης μειώνει τη θερμοκρασία εισαγωγής στον κύλινδρο, άρα και τη θερμική φόρτιση, καθώς και τις θερμοκρασίες σε όλο τον κύκλο λειτουργίας του κινητήρα, γεγονός που οδηγεί σε μείωση των απωλειών θερμότητας στα τοιχώματα των κυλίνδρων. Εναλλακτικά, εφόσον η πυκνότητα του αέρα υπερπλήρωσης αυξάνει, μπορεί να καεί περισσότερο καύσιμο αυξάνοντας έτσι την παραγόμενη ισχύ σε αναλογία με την πυκνότητα, θεωρώντας τους υπόλοιπους παράγοντες σταθερούς. Το επιπλέον κόστος του συστήματος ψύξης αντισταθμίζεται από την αύξηση της ισχύος. Η ψύξη του αέρα υπερπλήρωσης, λοιπόν, επιτρέπει σημαντική αύξηση της ισχύος χωρίς αύξηση του θερμικού φορτίου. Τέλος, υπάρχει ένα όφελος στην ειδική κατανάλωση καυσίμου, λόγω της αύξησης της ισχύος χωρίς ταυτόχρονη αύξηση στις απώλειες τριβών του κινητήρα και λόγω του πιθανόν μεγαλύτερου λόγου αέρα καυσίμου. Τα πλεονεκτήματα της ψύξης του αέρα υπερπλήρωσης φαίνονται υπό τη μορφή διαγραμμάτων στο Σχήμα 1.11, που ακολουθεί.



Σχήμα 1.11. Επίδραση της ψύξης του αέρα υπερπλήρωσης στις επιδόσεις του κινητήρα (για σταθερή παροχή καυσίμου)

1.6 Το πρόβλημα της μεταβατικής λειτουργίας ενός στροβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα

Παρά τα σαφή πλεονεκτήματα της στροβιλο-υπερπλήρωσης όσον αφορά τη μόνιμη λειτουργία (κυρίως των κινητήρων Diesel), αυτή χαρακτηρίζεται και από ένα βασικό μειονέκτημα: τη μεταβατική λειτουργία.

Με τον όρο μεταβατική λειτουργία εννοούμε την εξαναγκασμένη και συνήθως απότομη μεταβολή είτε στην παροχή του εγχυόμενου καυσίμου στον κύλινδρο (μεταβολή στροφών) είτε στο φορτίο με το οποίο είναι συνδεδεμένος ο κινητήρας.

Γενικά, η μελέτη της μεταβατικής λειτουργίας των εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ. είναι μεγάλης σημασίας για τους παρακάτω λόγους:

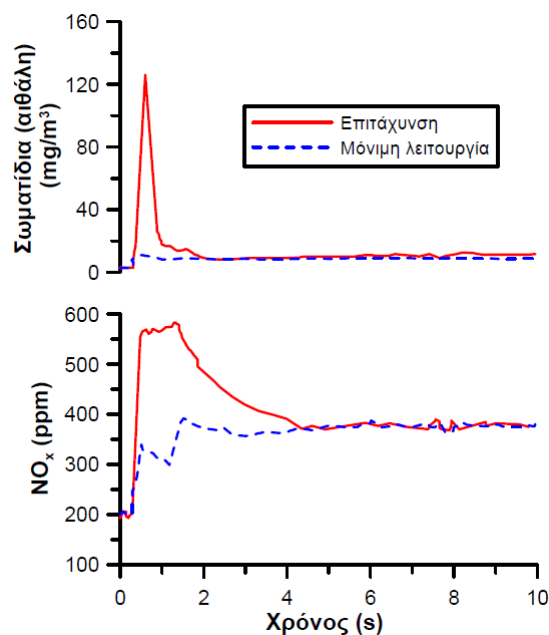
- 1) Η συντριπτική πλειοψηφία των οδηγικών συνθηκών στους δρόμους χαρακτηρίζονται από αλλεπάλληλες μεταβολές στροφών και φορτίου,
- 2) Ο κινητήρας και τα διάφορα υποσυστήματά του (σύστημα υπερπλήρωσης, αντλία καυσίμου, ρυθμιστής στροφών) βιώνουν μη-γραμμικές και μακριά από τις αντίστοιχες της μόνιμης λειτουργίας καταστάσεις,
- 3) Απαιτείται πολύ καλό ταίριασμα ανάμεσα στον κινητήρα και τα υποσυστήματα του για να υπάρχει καλή οδική συμπεριφορά και, γενικά, μεταβατική απόκριση,
- 4) Παρατηρούνται έντονα αυξημένες εκπομπές καπνού και NO_x από κινητήρες Diesel κατά τη φάση της μεταβατικής απόκρισης, συνοδευόμενες από
- 5) Όχι ευνοϊκά χαρακτηριστικά επιτάχυνσης, ιδιαίτερα αν ξεκινάμε από χαμηλό φορτίο.

1.6.1 Η έννοια της υστέρησης του υπερπληρωτή

Το βασικό μειονέκτημα της στροβιλο-υπερπλήρωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία εντοπίζεται στη μη-μηχανική σύνδεση του κινητήρα (στροφαλοφόρος άτρακτος) με το ζεύγος υπερπλήρωσης. Ως αποτέλεσμα αυτού, κατά την αύξηση των στροφών ή φορτίου του κινητήρα, το παραγόμενο από το στρόβιλο έργο πρέπει πρώτα να υπερνικήσει την αδράνεια του ζεύγους υπερπλήρωσης, ώστε στη συνέχεια να μπορέσει να επιταχύνει τον συμπιεστή, που με τη σειρά του θα τροφοδοτήσει τον κινητήρα με την αυξημένη παροχή αέρα που απαιτείται για να αντιμετωπιστεί το αυξημένο φορτίο ή για να επιτευχθεί η επιθυμητή αύξηση στροφών. Στην πράξη, η εντολή του οδηγού για αύξηση στροφών μέσω του πατήματος του πεντάλ του «γκαζιού» σε κινητήρες αυτοκινήτων οδηγεί σε σχεδόν ακαριαία αύξηση της παροχής του εγχυόμενου καυσίμου στους κυλίνδρους. Όμως, ο συμπιεστής δε μπορεί να ανταποκριθεί εξίσου άμεσα και να τροφοδοτήσει τον κινητήρα με την αναλογικά απαιτούμενη αυξημένη ποσότητα αέρα, αφού ο στρόβιλος που τον κινεί δεν έχει προλάβει να αυξήσει το παραγόμενο έργο αποτόνωσης. Αυτό συμβαίνει γιατί:

- Πρέπει πρώτα να αυξηθούν οι πιέσεις και οι θερμοκρασίες εντός του κυλίνδρου,
- Πρέπει να επιταχυνθεί το ρεύμα καυσαερίου στην πολλαπλή εξαγωγής,
- Χάνονται πολύτιμα ποσά θερμότητας προς τα πιο ψυχρά τοιχώματα του κυλίνδρου και της πολλαπλής εξαγωγής,
- Πρέπει να επιταχυνθεί ο κινηματικός μηχανισμός του κινητήρα (έμβολα, διωστήρες, στρόφαλα), και κυρίως,
- Το ποσό ενέργειας που είναι τελικά διαθέσιμο για αποτόνωση στο στρόβιλο πρέπει να υπερνικήσει την αδράνεια του ζεύγους υπερπλήρωσης, η οποία συνήθως είναι ιδιαίτερα σημαντική.

Έτσι, στους πρώτους κύκλους μετά από την απότομη αύξηση στροφών ή φορτίου, παρατηρείται ανακολουθία ανάμεσα στην (αυξημένη) παροχή καυσίμου και στην ακόμα χαμηλή ποσότητα του αναρροφώμενου αέρα, με αποτέλεσμα (σε κινητήρες Diesel) ο λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου να πέφτει σε πολύ χαμηλές τιμές (ακόμα και κάτω από τη μονάδα) οδηγώντας σε αυξημένες εκπομπές καπνού (Σχήμα 1.12).



Σχήμα 1.12. Επίδραση της επιτάχυνσης στροβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα Diesel σε εκπομπές αιθάλης (καπνού) και NOx [3]

Μετά την πάροδο μερικών δευτερολέπτων, οπότε και έχει επιταχυνθεί το ζεύγος υπερπλήρωσης, μπορεί ο συμπιεστής, κινούμενος πλέον σε αρκετά

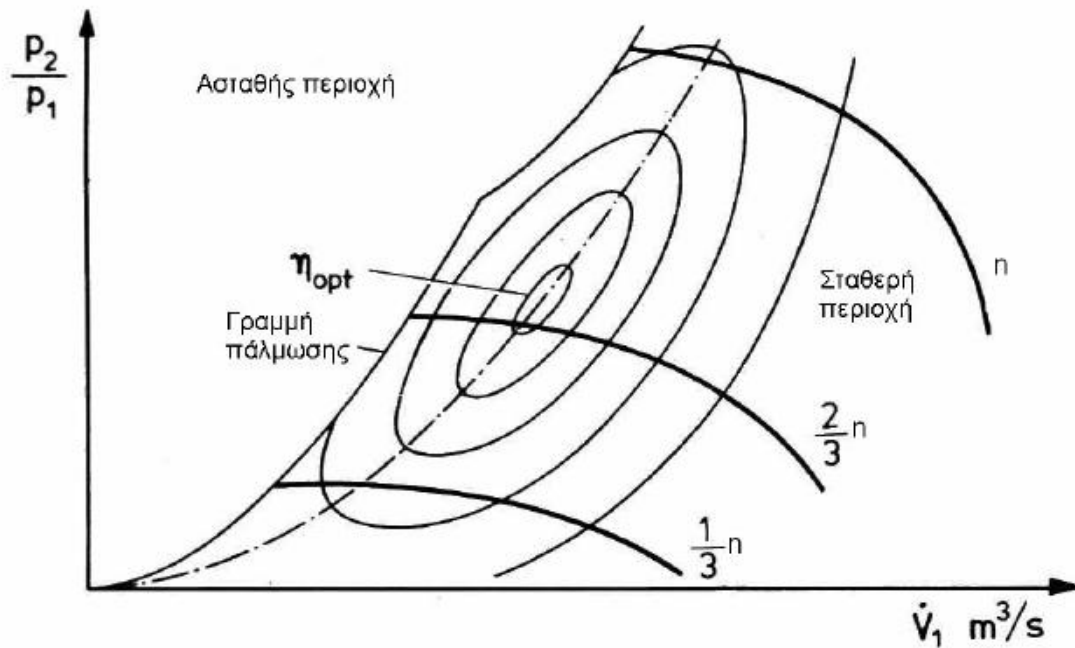
υψηλότερες στροφές, να παρέχει την επιπλέον ποσότητα αέρα στον κύλινδρο, οπότε και ο λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου επανέρχεται σε φυσιολογικά επίπεδα.

Το παραπάνω φαινόμενο είναι γνωστό με τον όρο υστέρηση του υπερπληρωτή (turbocharger lag) και απαντάται τόσο σε κινητήρες πετρελαίου όσο και βενζίνης. Η υστέρηση του υπερπληρωτή είναι τόσο εντονότερη όσο μεγαλώνει η μέση πραγματική πίεση του κινητήρα, και άρα το μέγιστο δυνατό επιβαλλόμενο φορτίο σε αυτόν, και όσο χαμηλότερο είναι το αρχικό σημείο λειτουργίας.

Πρέπει να τονιστεί ότι η περίπτωση της υστέρησης του υπερπληρωτή σε φάση μεταβολής στροφών είναι πιο εύκολα αντιμετωπίσιμη από την αντίστοιχη σε φάση αύξησης φορτίου, αφού σε αυτήν την περίπτωση η αύξηση στην ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα υποβοηθάει και την αύξηση της αναρροφώμενης από το συμπιεστή παροχής αέρα. Αντίθετα, στην περίπτωση αύξησης φορτίου, οι στροφές του κινητήρα αρχικά μειώνονται (έστω και σε μικρό ποσοστό), αποτελώντας άλλον έναν παράγοντα δυσκολίας του συστήματος.

1.6.2 Ο χάρτης του συμπιεστή στροβιλο-υπερπλήρωσης

Το δεύτερο μέρος του προβλήματος της μεταβατικής λειτουργίας έχει να κάνει με τον χάρτη λειτουργίας του συμπιεστή στροβιλο-υπερπλήρωσης. Στον χάρτη αυτόν (Σχήμα 1.13) διακρίνονται δύο περιοχές, μία ευσταθούς και μία ασταθούς λειτουργίας, που διαχωρίζονται από τη γραμμή πάλμωσης. Επίσης διακρίνεται η περιοχή στραγγαλισμού της ροής, στη δεξιά πλευρά του χάρτη, όπου οι καμπύλες σταθερών στροφών γίνονται σχεδόν κάθετες και η ροή διηχητική. Οι καμπύλες σταθερής ταχύτητας περιστροφής είναι σχεδόν οριζόντιες κοντά στην γραμμή πάλμωσης, ενώ πέφτουν απότομα καθώς απομακρύνονται από αυτήν. Οι καμπύλες σταθερού βαθμού απόδοσης ομαδοποιούνται κατά μήκος μίας καμπύλης στραγγαλισμού της ροής, ελάχιστα δεξιά της γραμμής πάλμωσης.



Σχήμα 1.13. Τυπικός χάρτης λειτουργίας ακτινικού συμπιεστή δυναμικής ροής

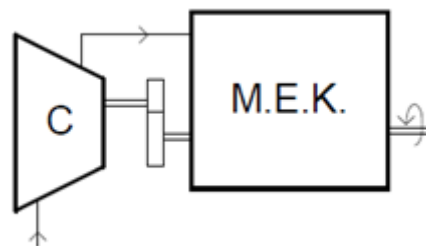
Τα βασικά χαρακτηριστικά του χάρτη λειτουργίας ενός συμπιεστή δυναμικής ροής μπορούν να συνοψισθούν ως εξής:

- Οι καμπύλες σταθερής ταχύτητας περιστροφής έχουν μεταβλητή κλίση. Για ακτινικούς συμπιεστές, είναι πρακτικά οριζόντιες κοντά στη γραμμή πάλμωσης και πέφτουν απότομα με την απομάκρυνσή τους από αυτήν.
- Ο λόγος πιέσεων σχετίζεται με την ταχύτητα περιστροφής του συμπιεστή· συγκεκριμένα, υψηλός λόγος πιέσεων (άρα και μεγάλη μέση πραγματική πίεση του κινητήρα) μπορεί να επιτευχθεί μόνο σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής του συμπιεστή.
- Υπάρχει μια περιοχή ασταθούς λειτουργίας, αριστερά της γραμμής πάλμωσης, εντός της οποίας είναι πρακτικά αδύνατη η λειτουργία του συμπιεστή. Ως εκ τούτου, είναι αδύνατον να επιτευχθεί υψηλός λόγος πιέσεων με μικρή παροχή.

Κεφάλαιο 2 – Συνδυασμένη Υπερπλήρωση

2.1 Μηχανική υπερπλήρωση - συμπιεστές θετικής εκτόπισης

Εκτός από την περίπτωση της στροβιλο-υπερπλήρωσης, μία εναλλακτική μέθοδος υπερπλήρωσης αποτελεί η μηχανική υπερπλήρωση, Σχήμα 2.1. Στην περίπτωση αυτή, ο συμπιεστής συνδέεται μηχανικά με τον κινητήρα. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται συμπιεστές θετικής εκτόπισης, οι οποίοι σε κινητήρες μικρών διαστάσεων (π.χ. αυτοκίνητα), είναι περιστροφικοί. Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες περιστροφικών συμπιεστών θετικής εκτόπισης, οι κοχλιοειδείς (Παράγραφος 2.1.1) και οι λοβοειδείς (Παράγραφος 2.1.2).

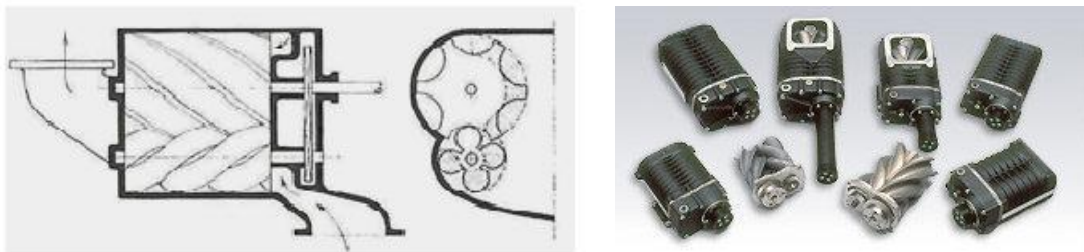


Σχήμα 2.1. Σύνδεση του συμπιεστή θετικής εκτόπισης με τη στροφαλοφόρο άτρακτο της ΜΕΚ

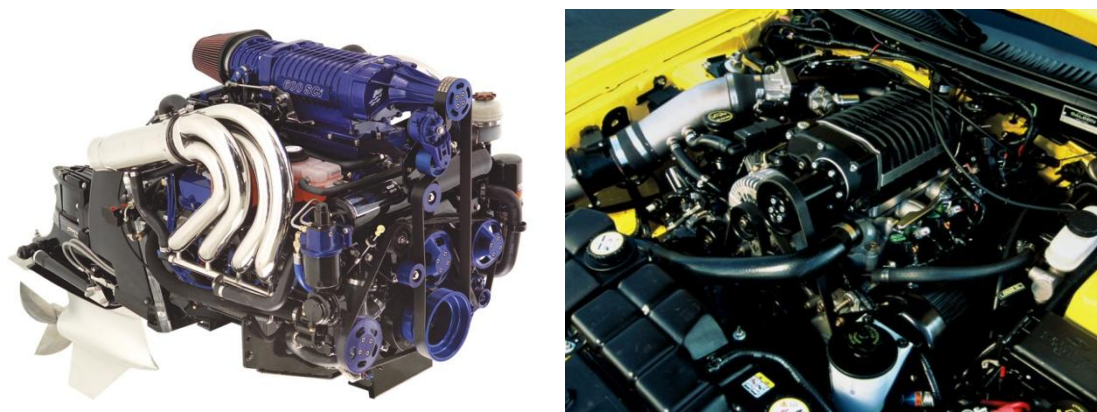
2.1.1 Κοχλιοειδείς συμπιεστές

Οι κοχλιοειδείς συμπιεστές (Lysholm) αποτελούνται από ένα ζεύγος δρομέων που έχουν τη μορφή κοχλία και βρίσκονται κλεισμένοι σε ένα κέλυφος (βλ. Σχήματα 2.2 και 2.3). Οι δρομείς περιστρέφονται χωρίς να έρχονται σε επαφή μεταξύ τους ή με το κέλυφος, ενώ τα κενά διατηρούνται

όσο το δυνατόν μικρότερα. Ο αέρας εισέρχεται στον ενδιάμεσο (κοίλο) χώρο και συμπιέζεται από το κυρτό σπείρωμα των δρομέων κατά τη ροή του από την εισαγωγή προς την εξαγωγή του συμπιεστή. Τα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου συμπιεστή είναι το μικρό του μέγεθος (που οφείλεται στην υψηλή ταχύτητα περιστροφής) και η απουσία ελαίου στο συμπιεσμένο αέρα.



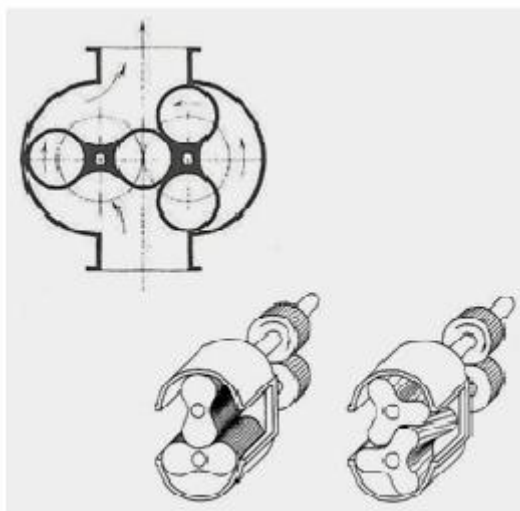
Σχήμα 2.2. Κοχλιοειδείς συμπιεστές θετικής εκτόπισης τύπου Lysholm [8]



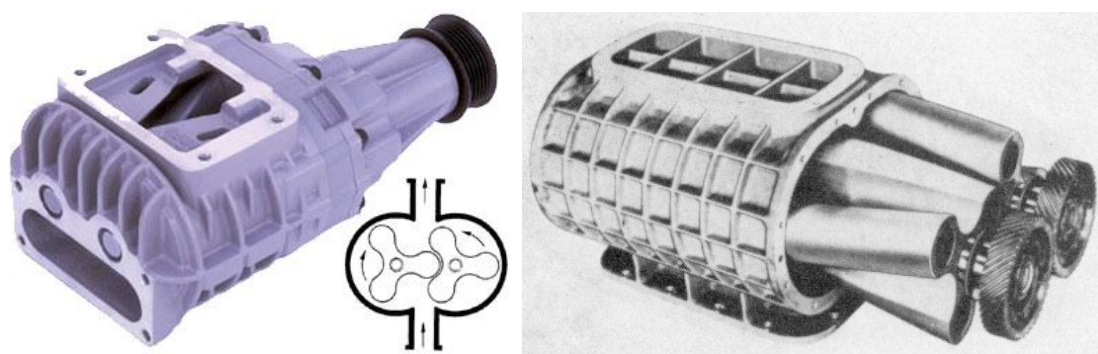
Σχήμα 2.3. Εφαρμογή μηχανικής υπερπλήρωσης με χρήση κοχλιοειδούς συμπιεστή θετικής εκτόπισης τύπου Lysholm σε ναυτικό κινητήρα (αριστερά) και σε αυτοκίνητο (δεξιά)

2.1.2 Λοβοειδείς συμπιεστές

Οι λοβοειδείς συμπιεστές (Roots blowers) αποτελούνται από δύο ή τρεις λοβούς-δρομείς που περιστρέφονται μέσα σε ένα κλειστό κέλυφος. Κατά την περιστροφή τους, σε αντίθεση με τους κοχλιοειδείς συμπιεστές, οι δρομείς ακουμπούν μεταξύ τους και με το κέλυφος, γι' αυτό και οι συμπιεστές τύπου Roots χαρακτηρίζονται από θορυβώδη λειτουργία. Επίσης, έχουν μεγαλύτερο όγκο αλλά μικρότερο κόστος από τους κοχλιοειδείς συμπιεστές τύπου Lysholm. Παρακάτω, στα Σχήματα 2.4 και 2.5, φαίνονται οι διατάξεις λοβοειδών συμπιεστών με δύο λοβούς ή τρεις κοχλιοειδείς λοβούς.



Σχήμα 2.4. Λοβοειδείς συμπιεστές τύπου Roots, με δύο λοβούς (πάνω και κάτω αριστερά) ή τρεις κοχλιοειδείς λοβούς (κάτω δεξιά)

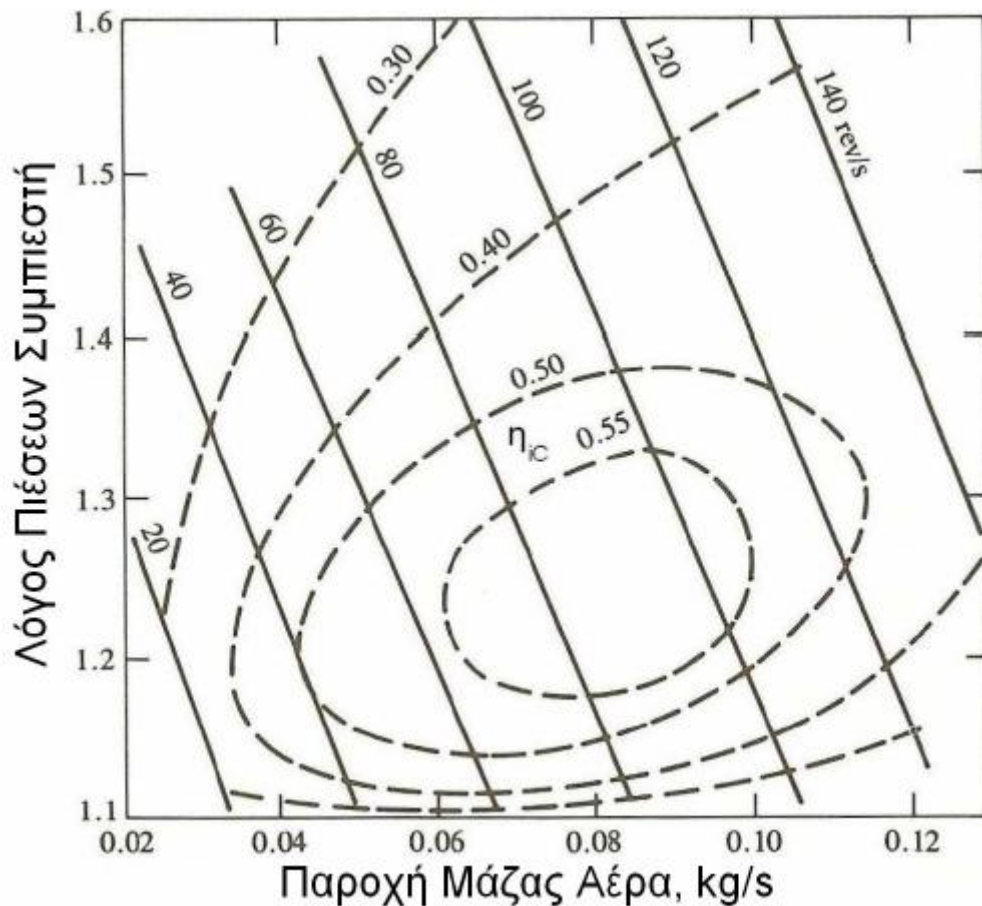


Σχήμα 2.5. Λοβοειδείς συμπιεστές τύπου Roots με τρεις κοχλιοειδείς λοβούς.

Τα χαρακτηριστικά των συμπιεστών θετικής εκτόπισης μπορούν να συνοψισθούν ως εξής (βλ. Σχήμα 2.6 για τον τυπικό χάρτη λειτουργίας):

- 1) Καμπύλες σταθερής ταχύτητας περιστροφής με μεγάλη κλίση (απότομες) στο χάρτη, δηλαδή με αύξηση του λόγου πιέσεων προκύπτει μικρή μεταβολή στην παροχή.
- 2) Ο λόγος πιέσεων δεν εξαρτάται σχεδόν καθόλου από την ταχύτητα περιστροφής, οπότε ένας μεγάλος λόγος πιέσεων μπορεί να προκύψει ακόμα και με μικρή παροχή και για χαμηλές στροφές (ιδιαίτερα χρήσιμο σε εφαρμογές αυτοκίνησης).
- 3) Δεν υπάρχει περιοχή ασταθούς λειτουργίας του συμπιεστή, οπότε όλα τα πιθανά σημεία λειτουργίας (σύμφωνα με το χάρτη του συμπιεστή) μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

- 4) Η παροχή είναι περίπου ευθέως ανάλογη προς την ταχύτητα περιστροφής και σχεδόν ανεξάρτητη του λόγου πιέσεων.

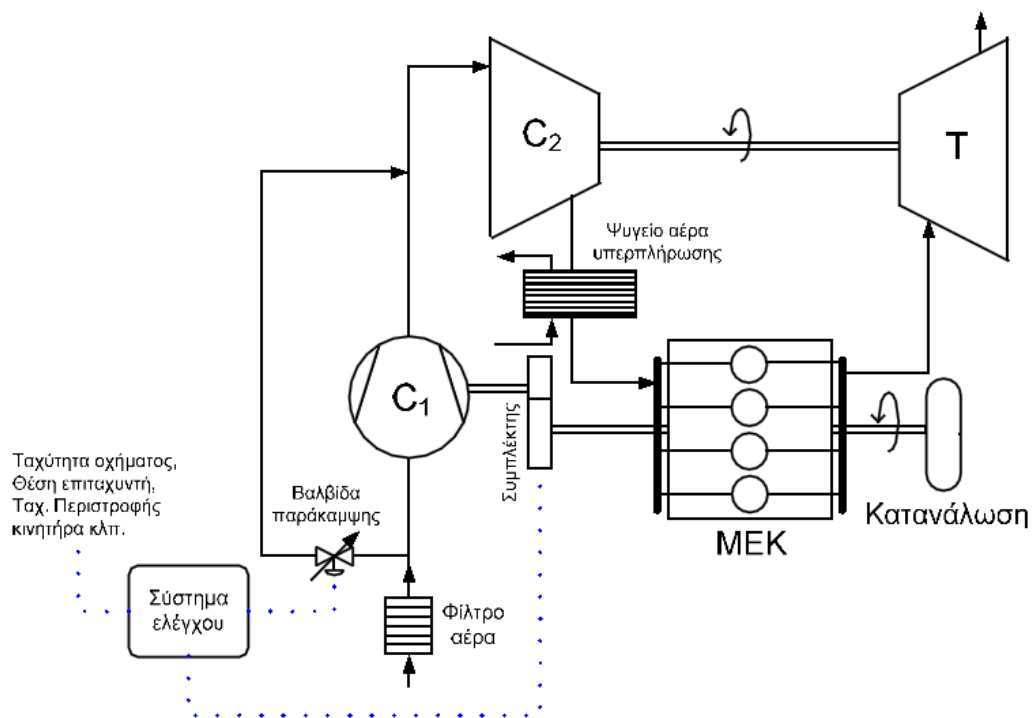


Σχήμα 2.6. Τυπικός χάρτης λειτουργίας συμπιεστή θετικής εκτόπισης

2.2 Η έννοια της συνδυασμένης υπερπλήρωσης

Με τον όρο «συνδυασμένη υπερπλήρωση» (Σχήμα 2.7), αναφερόμαστε στο σύστημα υπερπλήρωσης κατά το οποίο ένας συμπιεστής θετικής εκτόπισης κινούμενος από την στροφαλοφόρο άτρακτο του κινητήρα είναι συνδεδεμένος σε σειρά με ένα ζεύγος στροβιλο-υπερπλήρωσης. Πρόκειται δηλαδή για ένα συνδυασμό μηχανικής υπερπλήρωσης και στροβιλο-υπερπλήρωσης. Οι δύο συμπιεστές τροφοδοτούν τον κινητήρα με υψηλότερης πίεσης αέρα υπερπλήρωσης, έχοντας τη δυνατότητα να επιτύχουν υψηλότερες μέσες πραγματικές πιέσεις και μεγαλύτερη συγκέντρωση ισχύος (αν και το βασικό ζητούμενο έγκειται στη βελτίωση της μεταβατικής λειτουργίας του κινητήρα/οχήματος).

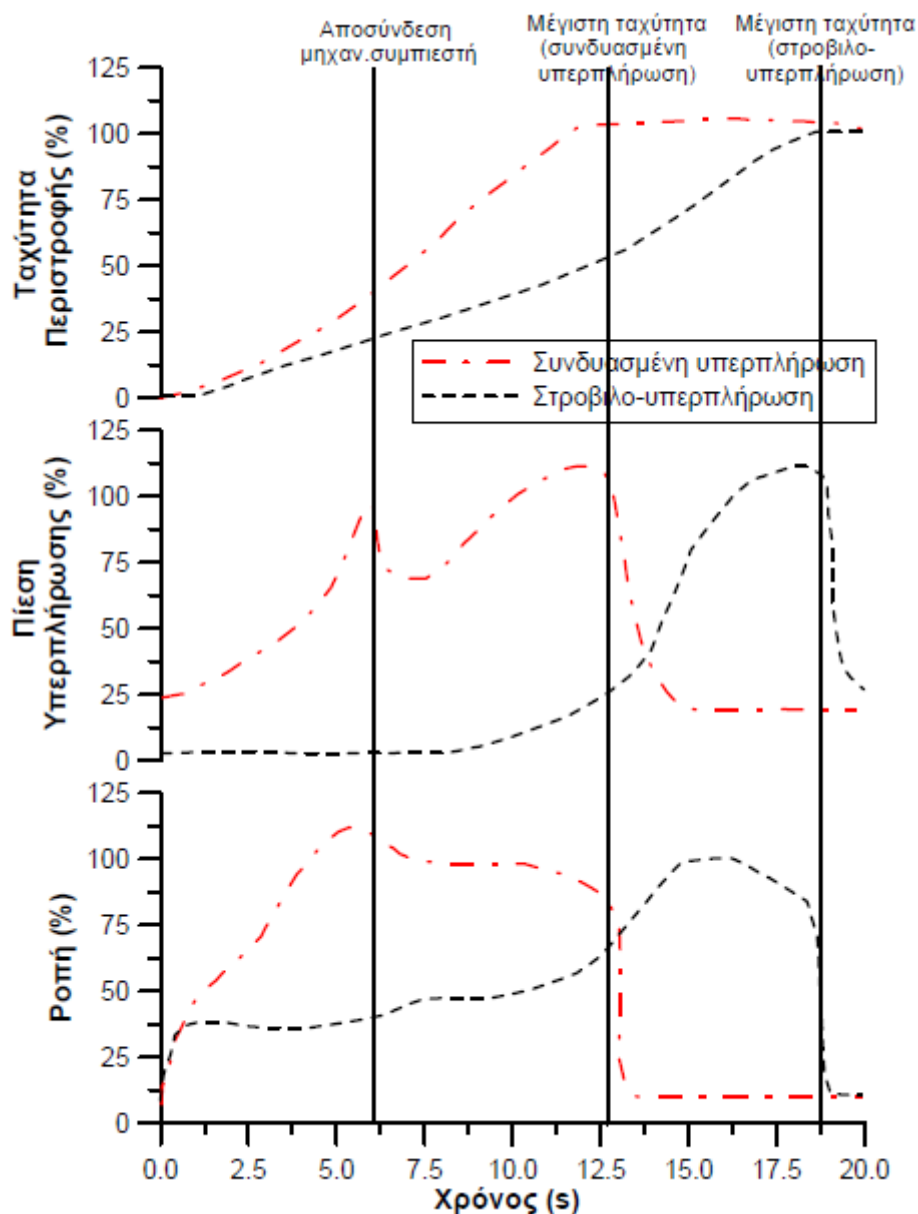
Το σύστημα συνδυασμένης υπερπλήρωσης επιδιώκει να συνδυάσει τα πλεονεκτήματα της μηχανικής υπερπλήρωσης με αυτά της στροβιλο-υπερπλήρωσης σε μία διάταξη: Ένας συμπιεστής θετικής εκτόπισης, συνήθως λοβοειδής (Roots blower) ή κοχλιοειδής (Lysholm), είναι απευθείας συνδεδεμένος με την στροφαλοφόρο άτρακτο του κινητήρα μέσω ενός κιβωτίου σταθερής σχέσης μετάδοσης κι ενός ηλεκτρομαγνητικού συμπλέκτη και τροφοδοτεί έναν συμπιεστή στροβιλο-υπερπλήρωσης δυναμικής (ακτινικής) ροής.



Σχήμα 2.7. Σύστημα συνδυασμένης υπερπλήρωσης με ζεύγος στροβιλο-υπερπληρωτή σε σειρά με συμπιεστή θετικής εκτόπισης [3]

Η χρήση ενός συστήματος συνδυασμένης υπερπλήρωσης μπορεί να αποτελέσει μια αρκετά αποδοτική λύση στο πρόβλημα της μεταβατικής λειτουργίας (βλ. π.χ. Σχήμα 2.8), ιδιαίτερα όσον αφορά τους κινητήρες οχημάτων, οι οποίοι καλούνται να λειτουργήσουν σε ένα ευρύ πεδίο στροφών/φορτίων και υπό συχνές συνθήκες επιτάχυνσης. Εντοπίζονται δύο σημεία στα οποία το εν λόγω σύστημα βελτιώνει την απόκριση του κινητήρα κατά την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής ή του φορτίου. Ειδικότερα:

- 1) Η ταχύτητα περιστροφής του συμπιεστή σχετίζεται άμεσα με την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, εξαιτίας της μηχανικής σύνδεσής του με την στροφαλοφόρο άτρακτο, και
- 2) Υψηλή πίεση υπερπλήρωσης μπορεί να επιτευχθεί ακόμα και σε χαμηλές στροφές (του κινητήρα) και παροχές αέρα χάρη στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά λειτουργίας των συμπιεστών θετικής εκτόπισης (Σχήμα 2.6).



Σχήμα 2.8. Σύγκριση επιτάχυνσης κινητήρα με απλή στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση [3]

Προφανώς, ο κινητήρας επωφελείται από αυτή τη διάταξη και σε συνθήκες σταθερής λειτουργίας, με την παροχή αέρα να είναι υψηλότερη από αυτή της απλής στροβιλο-υπερπλήρωσης, καθώς οι δύο λόγοι πίεσης πολλαπλασιάζονται λόγω της εν-σειρά διάταξης. Σε χαμηλές στροφές και φορτία, όπου η ενέργεια των καυσαερίων δεν επαρκεί ώστε να επιταχύνει τον στροβιλο-συμπιεστή, είναι ενεργός ο μηχανικός συμπιεστής. Παρόμοια, σε περίπτωση επιτάχυνσης από χαμηλές ή μέσες στροφές, ο μηχανικός συμπιεστής βοηθάει στην πιο άμεση απόκριση του κινητήρα καθώς ακολουθεί πιστά την επιτάχυνση του δεύτερου. Με τον τρόπο αυτό, τα μη-ευνοϊκά χαρακτηριστικά ροής του στροβιλο-υπερπληρωτή στις χαμηλές και μέσες στροφές που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, βελτιώνονται σημαντικά, αφού ο μηχανικός συμπιεστής παρέχει πίεση υπερπλήρωσης ανεξάρτητα του φορτίου του κινητήρα. Ακόμα, από τη στιγμή που οι λόγοι πίεσης των δύο συμπιεστών πολλαπλασιάζονται, είναι δυνατή η χρήση μικρότερου στροβιλο-υπερπληρωτή, με προφανές όφελος από τη μειωμένη αδράνεια (και επομένως την ταχύτερη απόκριση) του ζεύγους στροβιλο-υπερπλήρωσης. Σε περιπτώσεις σταθερής λειτουργίας σε μέσες και υψηλές στροφές ή μεταβατικής λειτουργίας σε υψηλές στροφές, η παροχή του αέρα παρακάμπτει τον μηχανικό συμπιεστή, ο οποίος έχει απεμπλακεί από την στροφαλοφόρο άτρακτο, και ο στροβιλο-υπερπληρωτής είναι το μόνο μέσο υπερπλήρωσης.

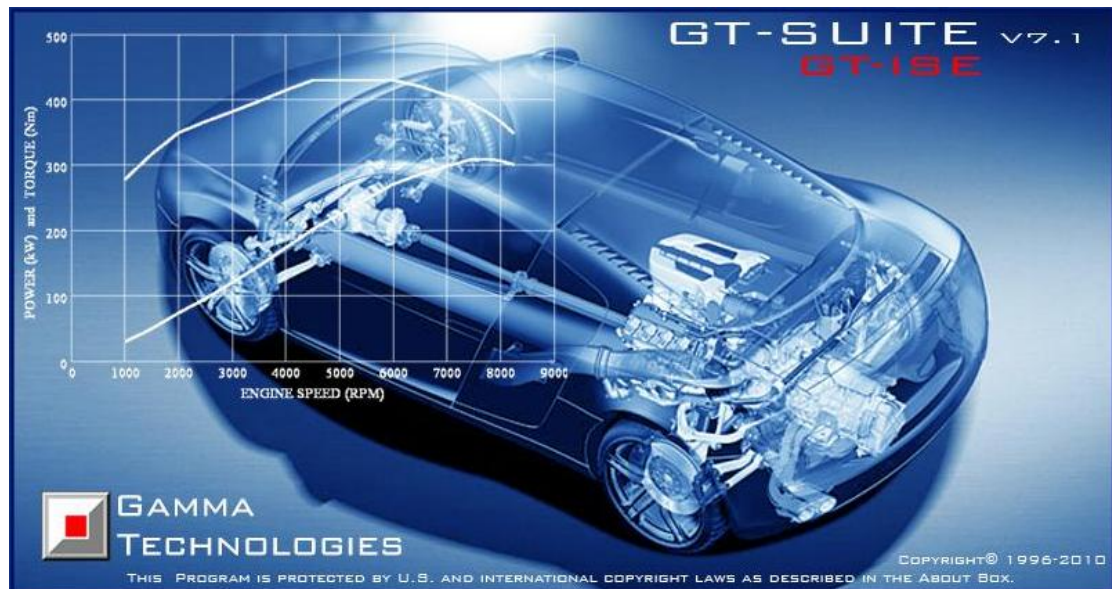
Τα πιο σοβαρά μειονεκτήματα της συνδυασμένης υπερπλήρωσης είναι η μηχανική σύνδεση μεταξύ του συμπιεστή θετικής εκτόπισης και του κινητήρα που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ωφέλιμης ισχύος του κινητήρα άρα και του βαθμού απόδοσής του, καθώς και η ανάγκη για ένα περίπλοκο σύστημα ελέγχου που να συνυπολογίζει διάφορες μεταβλητές του κινητήρα και των υπερπληρωτών (όπως στροφές και φορτίο του κινητήρα, ταχύτητα του οχήματος, πίεση υπερπλήρωσης, κ.α.).

Συνοψίζοντας, τα πλεονεκτήματα της συνδυασμένης υπερπλήρωσης είναι:

- Αρκετά ομαλή καμπύλη ροπής με σημαντική αύξηση της ροπής του κινητήρα στο πεδίο των χαμηλών στροφών σε σύγκριση με την απλή στροβιλο-υπερπλήρωση, που οδηγεί σε

- Μικρότερο εύρος εφαρμογής του περιοριστή καυσίμου (fuel limiter), και
- Κύρια χρήση του στροβιλο-υπερπληρωτή στο πεδίο των μέσων και υψηλών στροφών του κινητήρα, όπου τα χαρακτηριστικά του ταιριάζουν καλύτερα με τις απαιτήσεις ενός εμβολοφόρου κινητήρα.

Κεφάλαιο 3 – Το λογισμικό GT-Suite



3.1 Γνωριμία με το GT-Suite

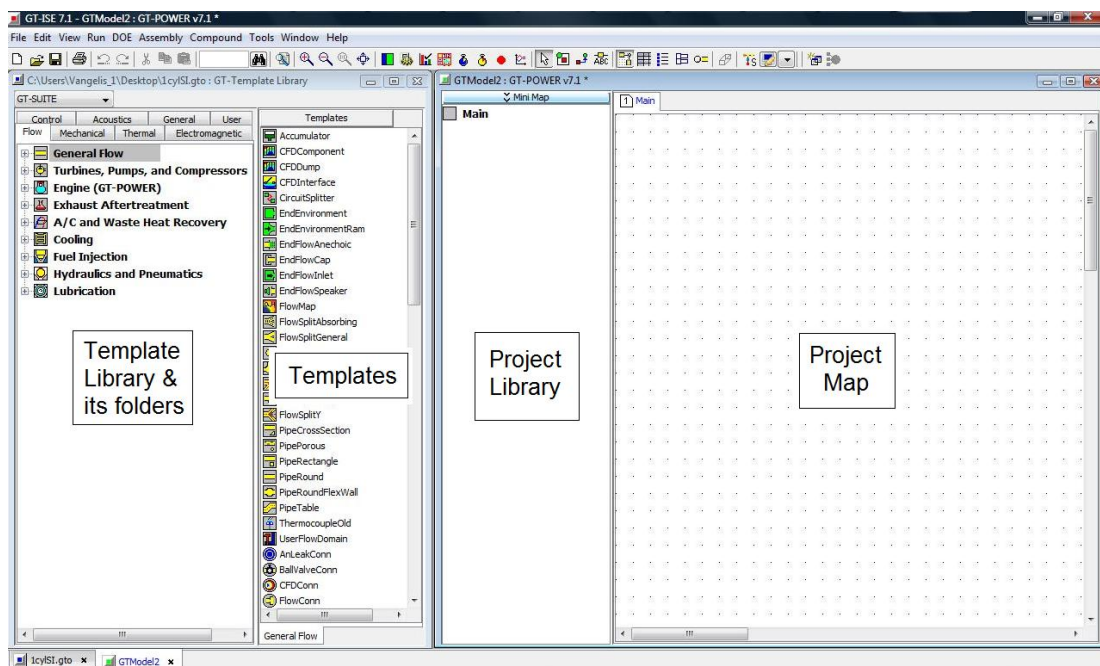
Το πρόγραμμα GT-Suite [6] είναι ένα προϊόν της εταιρίας Gamma Technologies [7], μιας εταιρίας παραγωγής εξειδικευμένων λογισμικών, η οποία απευθύνεται στην βιομηχανία κινητήρων και οχημάτων. Το GT-Suite παρέχει ένα περιβάλλον (Σχήμα 3.1) στο οποίο μπορεί να γίνει εικονική αναπαράσταση κινητήρων και συστημάτων μετάδοσης καθώς και προσομοίωση μίας μεγάλης ποικιλίας εφαρμογών που σχετίζονται με την αυτοκινητοβιομηχανία. Μερικές από αυτές είναι:

- 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 ιμαντοκίνηση

Για το σκοπό αυτό διαθέτει μια πλατφόρμα στην οποία μπορεί κανείς να σχεδιάσει όλων των ειδών τις εφαρμογές, συνδυάζοντας εργαλεία και στοιχεία από τις βιβλιοθήκες που το πρόγραμμα διαθέτει.

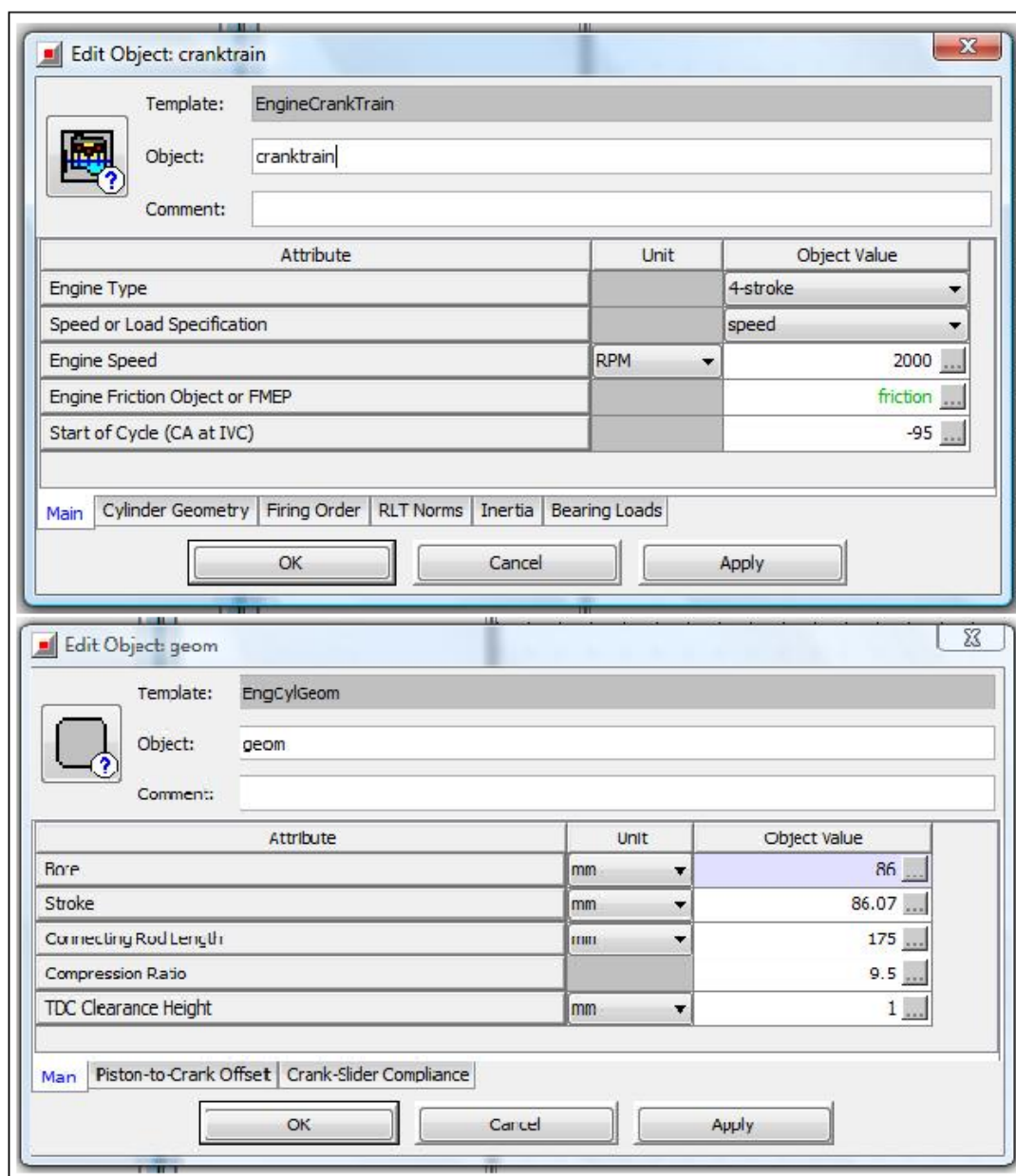
3.2 Γενικά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος εργασίας



Σχήμα 3.1. Το περιβάλλον εργασίας του GT-Power

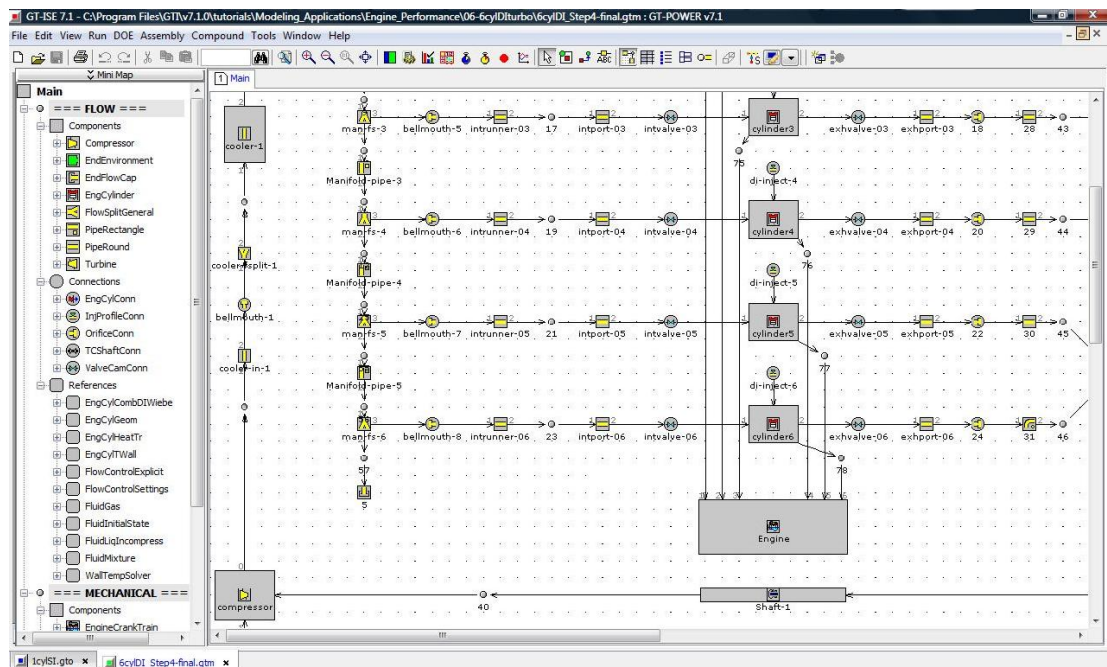
Το GT-Power έχει μία βιβλιοθήκη (library) με τα απαραίτητα πρότυπα στοιχεία και εργαλεία (templates) που χρησιμοποιούνται για να σχεδιαστεί ένας κινητήρας. Κάθε πρότυπο που παρέχεται από το πρόγραμμα συμπληρώνεται με δεδομένα που εξαρτώνται από την εκάστοτε εφαρμογή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2 (π.χ. οι διαστάσεις του κυλίνδρου, το μήκος και το υλικό κατασκευής του σωλήνα εισαγωγής, η αδράνεια του ζεύγους υπερπλήρωσης κ.λ.π.).

Αφού συμπληρωθούν τα χαρακτηριστικά κάθε προτύπου σύμφωνα με τις ανάγκες της εφαρμογής, αυτό μεταφέρεται από την βιβλιοθήκη του προγράμματος στην βιβλιοθήκη της συγκεκριμένης εργασίας (project library) και μετατρέπεται σε αντικείμενο (object) που μπορεί να διαμορφωθεί και να χρησιμοποιηθεί στην εργασία όσες φορές επιθυμεί ο χρήστης (π.χ. ο κύλινδρος σε έναν πολυκύλινδρο κινητήρα).



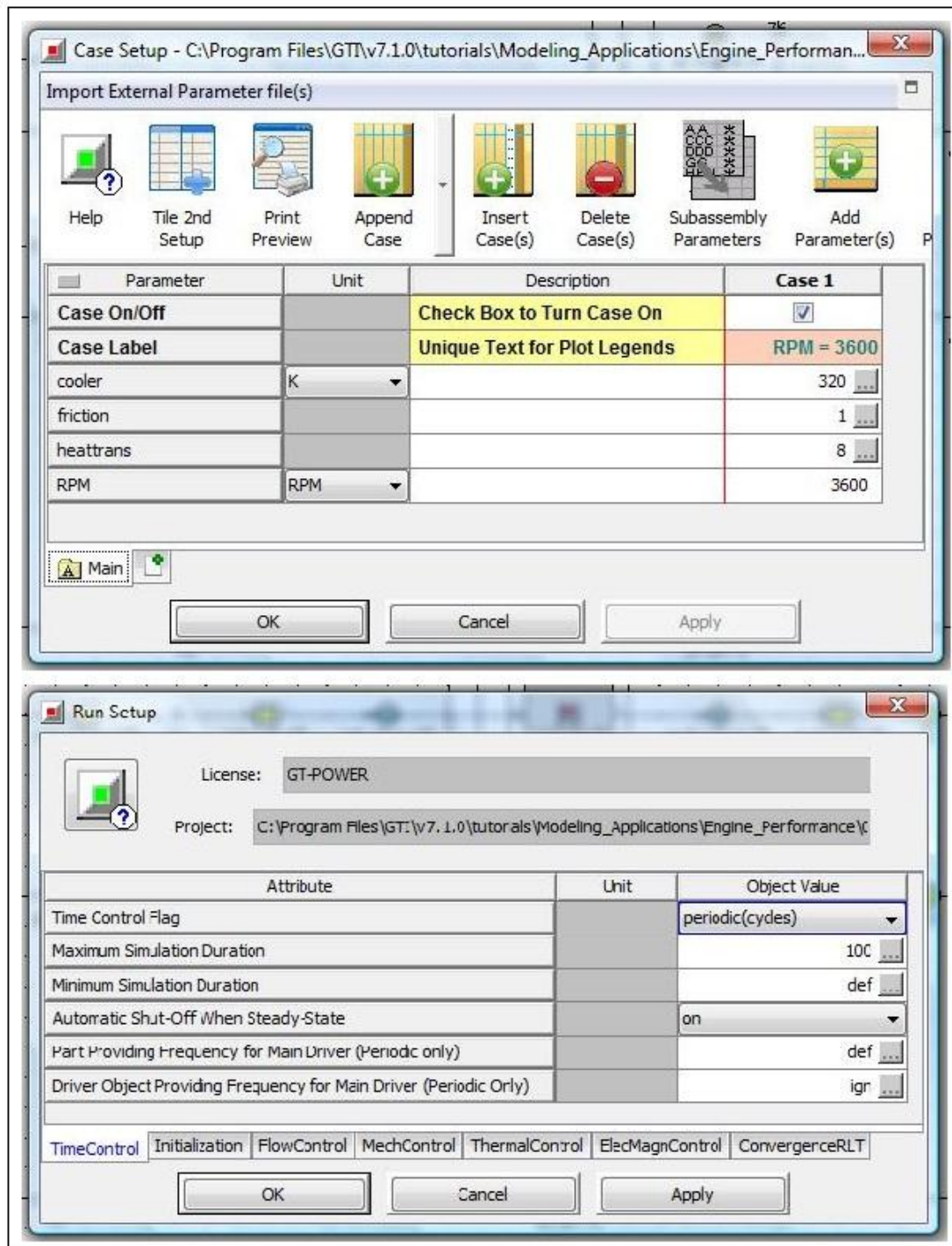
Σχήμα 3.2. Παράθυρα εισαγωγής χαρακτηριστικών προτύπου (π.χ. τύπος κινητήρα και γεωμετρία κυλίνδρου)

Στη συνέχεια, όταν τα απαραίτητα αντικείμενα είναι έτοιμα, πρέπει να μεταφερθούν ένα-ένα στον χάρτη εργασίας (project map) (Σχήμα 3.1), όπου θα γίνει η σύνδεσή τους με τρόπο τέτοιο ώστε να προσομοιώνεται σωστά ο κινητήρας. Στον χάρτη εργασίας τα αντικείμενα ονομάζονται μέρη ή κομμάτια (parts) του κινητήρα. Η εικόνα που προκύπτει (βλ. Σχήμα 3.3) μοιάζει με ένα μονογραμμικό σχέδιο στο οποίο φαίνονται τα επιμέρους κομμάτια του κινητήρα και οι συνδέσεις μεταξύ τους, επιτρέποντας έτσι στον χρήστη να μπορεί να κάνει μεμονωμένες αλλαγές για συγκεκριμένα μέρη του κινητήρα όποτε επιθυμεί, καθώς και να επιβλέπει το μοντέλο με μεγαλύτερη άνεση και ευχέρεια.



Σχήμα 3.3. Μονογραμμικό σχέδιο του κινητήρα στον χάρτη εργασίας

Όταν το μοντέλο του κινητήρα (μαζί με τα περιφερειακά του συστήματα) είναι πλήρως λειτουργικό, το GT-Power δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να τρέξει διάφορα σενάρια σταθερής ή μεταβατικής λειτουργίας, σε συνθήκες που ο ίδιος ορίζει (Σχήμα 3.4).



Σχήμα 3.4. Ο χρήστης καταστρώνει σενάρια προσομοίωσης της λειτουργίας του κινητήρα σύμφωνα με τις ανάγκες του

Τέλος, μέσω του εργαλείου GT-Post, ο χρήστης λαμβάνει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, είτε με τη μορφή αριθμητικών πινάκων είτε με τη μορφή διαγραμμάτων, για να τα επεξεργαστεί.

Κεφάλαιο 4 – Εφαρμογή υπερπλήρωσης στο GT-Power

4.1 Σύντομη περιγραφή της διαδικασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η σύγκριση των επιδόσεων ενός εξακύλινδρου 4-Χ κινητήρα Diesel με απλή στροβιλο-υπερπλήρωση και με συνδυασμένη υπερπλήρωση. Για το σκοπό αυτό, κατασκευάστηκαν δύο εικονικά μοντέλα εξακύλινδρου 4-Χ κινητήρα Diesel, με τις αντίστοιχες διατάξεις υπερπλήρωσης και ακολουθώντας τη σειρά ενεργειών που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο για το σχεδιασμό κάθε κομματιού του συστήματος. Πρώτα σχεδιάστηκε ο κινητήρας, ο οποίος στη συνέχεια συνδέθηκε με ένα ζεύγος στροβιλο-υπερπλήρωσης και αργότερα προστέθηκε ένας μηχανικός συμπιεστής θετικής εκτόπισης τύπου Lysholm. Τα δύο εικονικά μοντέλα “έτρεξαν” σενάρια προσομοίωσης σταθερής και μεταβατικής λειτουργίας και τα αποτελέσματα που προέκυψαν παραστήθηκαν σε διαγράμματα μέσω του προγράμματος Microsoft Office Excel για να γίνει η σύγκριση και η αξιολόγησή τους.

4.2 Ο εξακύλινδρος 4-Χ κινητήρας Diesel

4.2.1 Βασικά χαρακτηριστικά του κινητήρα

Ο κινητήρας που θεωρήθηκε στην ανάλυση βασίζεται στον κινητήρα Mercedes-Benz OM-366LA του εργαστηρίου MEK του Ε.Μ.Π.:

Αριθμός κυλίνδρων $z=6$

Διάμετρος (bore) εμβόλου $D=97,5\text{mm}$

Διαδρομή (stroke) εμβόλου $s=2r=133\text{mm}$

Άρα, ο όγκος εμβολισμού του κυλίνδρου είναι: $V_h = \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) s = 993,003\text{cm}^3$

Επομένως, ο συνολικός όγκος εμβολισμού του κινητήρα είναι:

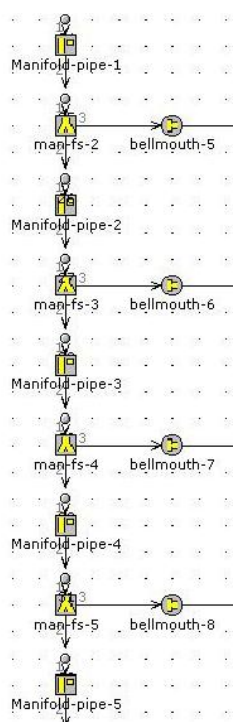
$$V_H = zV_h = 5958,018\text{cm}^3$$

Επιπλέον, οι διωστήρες των εμβόλων έχουν μήκος 230mm και ο βαθμός συμπίεσης στους κυλίνδρους είναι ίσος με 18.

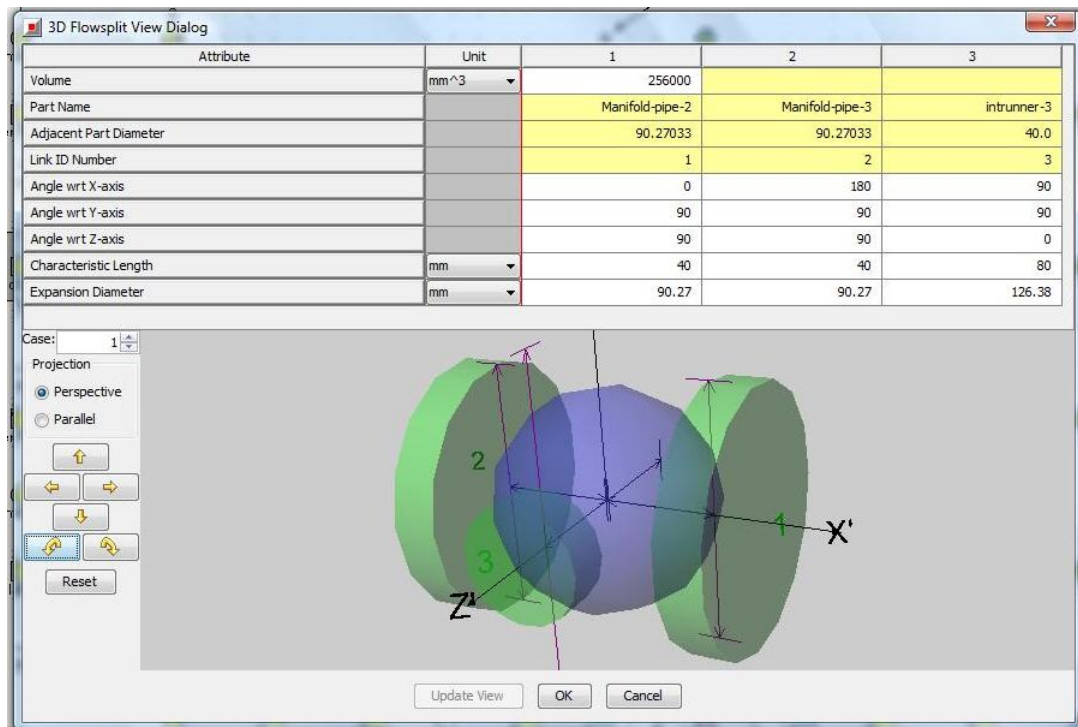
4.2.2 Πολλαπλή εισαγωγής (intake manifold)

Η πολλαπλή εισαγωγής στο GT-Power αποτελείται από μια σειρά σωλήνων (pipes) και διακλαδώσεων (flow splits) με αριθμημένες θυρίδες, έτσι ώστε να καθορίζεται αυστηρά η πορεία της ροής του αέρα προς τους

κυλίνδρους του κινητήρα (Σχήμα 4.1). Επίσης, υπάρχει δυνατότητα καθορισμού της γωνίας μεταξύ των σωλήνων εισόδου και εξόδου από αυτήν, αλλά, στο παρόν μοντέλο, για απλούστερο σχεδιασμό θεωρήθηκε ότι οι σωλήνες εισαγωγής του κινητήρα είναι κάθετοι στον σωλήνα εισόδου της πολλαπλής εισαγωγής (Σχήμα 4.2).



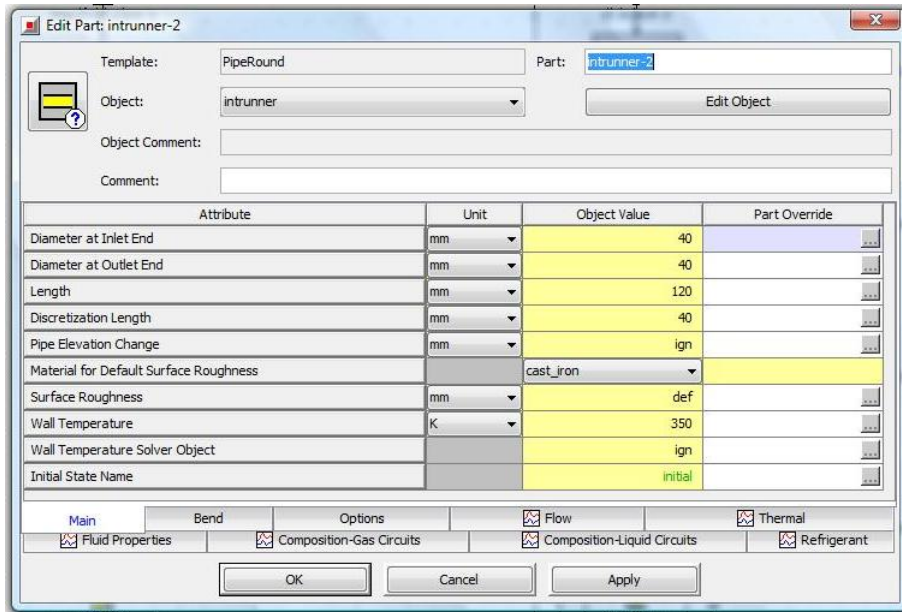
Σχήμα 4.1. Η μορφή της πολλαπλής εισαγωγής στον χάρτη εργασίας του GT-Power



Σχήμα 4.2. Τρισδιάστατη αναπαράσταση της διακλάδωσης των σωλήνων στις εξόδους της πολλαπλής εισαγωγής

4.2.3 Σωλήνες εισαγωγής (intake runners)

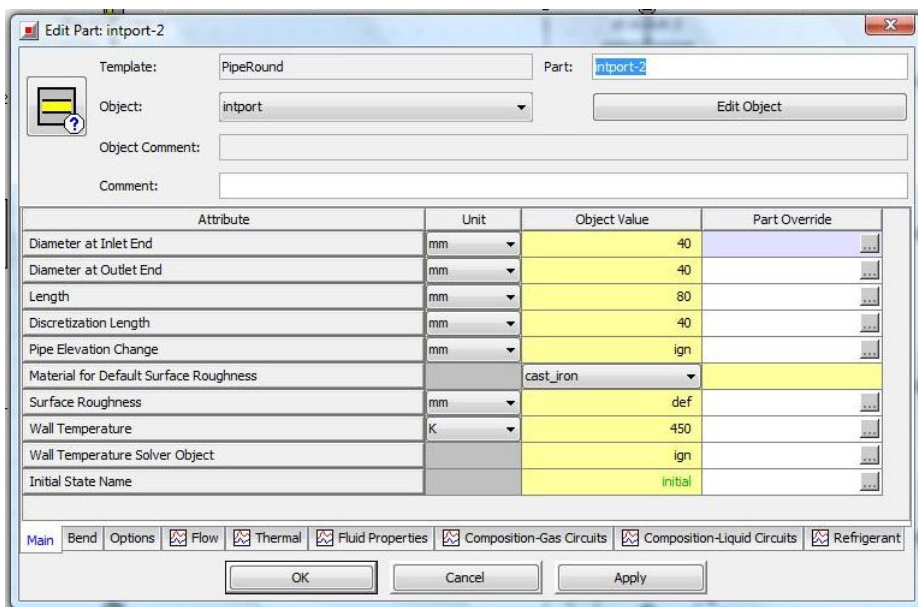
Οι σωλήνες εισαγωγής συνδέουν την πολλαπλή εισαγωγής του κινητήρα με τη θυρίδα εισαγωγής των κυλίνδρων. Επιλέχτηκε να έχουν διάμετρο 40mm και μήκος 120mm, ενώ ως υλικό κατασκευής τους χρησιμοποιήθηκε ο χυτοσίδηρος (cast iron). Αυτό δεν σημαίνει ότι το κομμάτι θα είναι πραγματικά φτιαγμένο από χυτοσίδηρο, απλά η επιφάνεια του θα έχει την τραχύτητα του χυτοσιδήρου (για τον υπολογισμό των απωλειών στη ροή) (Σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.3. Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων για τους σωλήνες εισαγωγής

4.2.4 Θυρίδες εισαγωγής (intake ports)

Οι θυρίδες εισαγωγής έχουν κι αυτές διάμετρο 40mm (καθώς πρέπει να ταιριάζουν με τους σωλήνες εισαγωγής) καθ' όλο το μήκος τους, το οποίο είναι 80mm. Θεωρούνται κι αυτές κατασκευασμένες από χυτοσίδηρο για τον παραπάνω λόγο. Οι θερμοκρασία των τοιχωμάτων τους έχει επιλεγεί στους 450K και ένας πολλαπλασιαστής μεταφοράς θερμότητας ίσος με 1,5 για να προσομοιωθεί η μεταφορά θερμότητας από τις θερμότερες βαλβίδες προς αυτά.



Σχήμα 4.4. Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων για τις θυρίδες εισαγωγής

4.2.5 Βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής (intake and exhaust valves)

Οι βαλβίδες εισαγωγής (Σχήμα 4.5.α) έχουν διάμετρο 42mm. Ανοίγουν 15° πριν την έναρξη της εισαγωγής και κλείνουν 82° μετά την έναρξη της συμπίεσης. Η μέγιστη βύθισή τους είναι 10,204mm.

Οι βαλβίδες εξαγωγής (Σχήμα 4.5.β) έχουν διάμετρο 36mm. Ανοίγουν 112° μετά την έναρξη της καύσης και κλείνουν 24° μετά την έναρξη της εισαγωγής. Η μέγιστη βύθισή τους είναι επίσης 10,204mm.

Attribute	Unit	Object Value	Part Override
Valve Reference Diameter	mm	42	
Discharge Coefficient Reference Area Definition		constant	
Valve Lash	mm	0.1	
Cam Timing Angle	Crank An...	476	
Cam Timing Anchor Reference		TDCFiring	
Cam Timing Lift Array Reference		Theta=0	

Σχήμα 4.5.α. Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων για τις βαλβίδες εισαγωγής

Attribute	Unit	Object Value	Part Override
Valve Reference Diameter	mm	36	
Discharge Coefficient Reference Area Definition		constant	
Valve Lash	mm	0.1	
Cam Timing Angle	Crank An...	238	
Cam Timing Anchor Reference		TDCFiring	
Cam Timing Lift Array Reference		Theta=0	

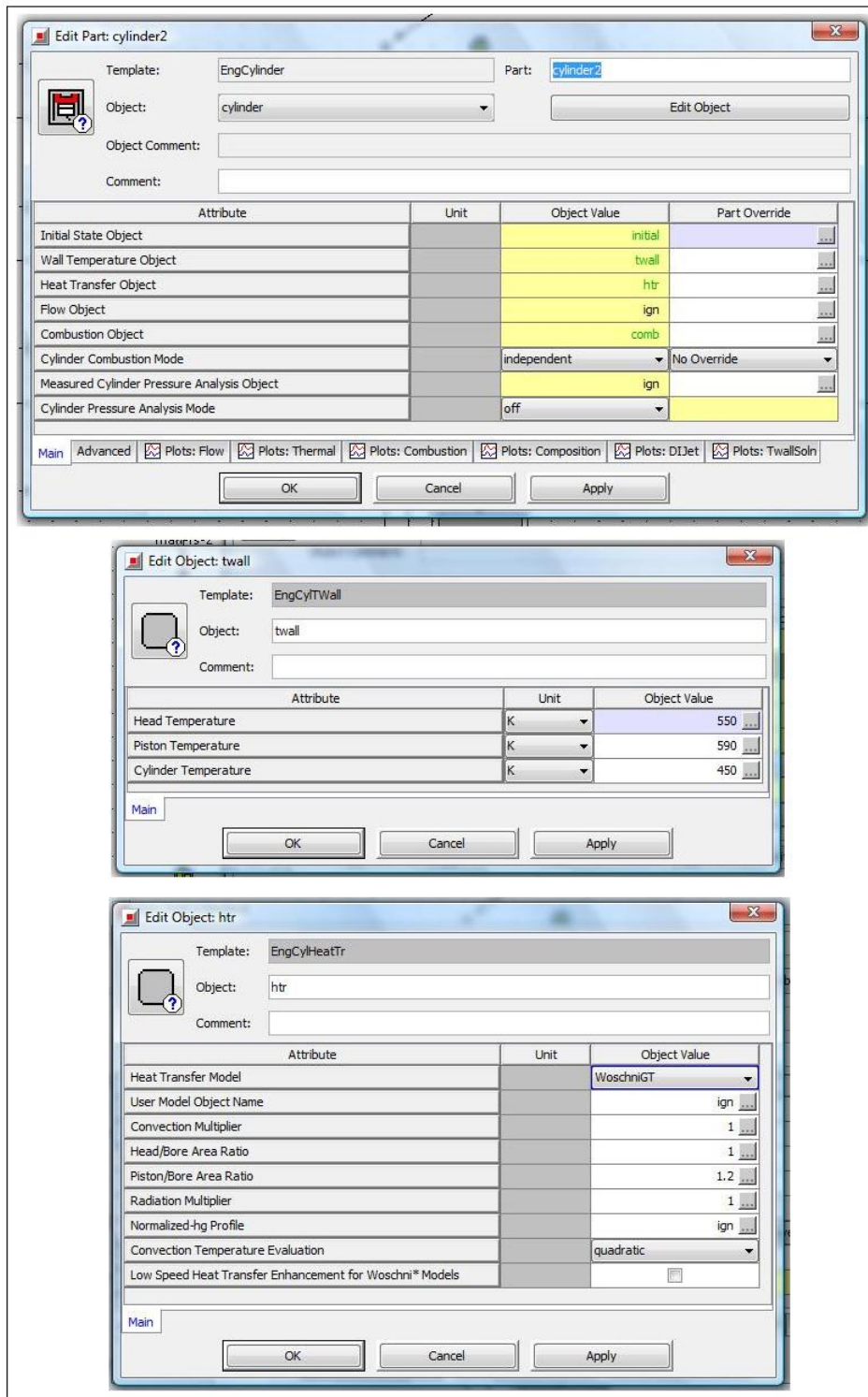
Σχήμα 4.5.β. Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων για τις βαλβίδες εξαγωγής

4.2.6 Κύλινδροι (cylinders)

Πέρα από τις βασικές διαστάσεις, οι οποίες δόθηκαν στην πρώτη παράγραφο αυτού του κεφαλαίου, σημαντικό στοιχείο για την εξαγωγή σωστών, όσο το δυνατόν πλησιέστερων στην πραγματικότητα, αποτελεσμάτων κατά την εκτέλεση των υπολογισμών από το πρόγραμμα είναι οι οριακές συνθήκες που επικρατούν στα τοιχώματα των κυλίνδρων κατά τη λειτουργία του κινητήρα. Για ένα απλό υπολογιστικό μοντέλο μεταφοράς, όπως αυτό που χρησιμοποιείται (και που αρκεί για την πλειοψηφία των προσομοιώσεων των επιδόσεων του κινητήρα), αρκούν τρεις θερμοκρασίες: μία για την κυλινδροκεφαλή (cylinder head), μία για τα έμβολα (pistons) και μία για τα περιφερειακά τοιχώματα των κυλίνδρων (cylinder walls). Έτσι, η κεφαλή θεωρείται ότι έχει θερμοκρασία 550K, τα έμβολα 590K και τα τοιχώματα 450K. Για τα τοιχώματα των κυλίνδρων η θερμοκρασία που επιλέγεται είναι αισθητά χαμηλότερη αφού η επίδραση του κυκλώματος ψύξης του κινητήρα σε εκείνο το σημείο είναι εντονότερη.

Ένα ακόμα σημείο που αξίζει να σημειωθεί όσον αφορά τη μεταφορά θερμότητας είναι δύο συντελεστές που χρησιμοποιούνται από το πρόγραμμα, ονομαζόμενοι 'λόγος κεφαλής προς διάμετρο κυλίνδρου' (head/bore area ratio) και 'λόγος εμβόλου προς διάμετρο κυλίνδρου' (piston/bore area ratio). Αυτοί οι συντελεστές χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της μεταφοράς θερμότητας προς την κεφαλή του κυλίνδρου και προς το έμβολο ανάλογα με τη γεωμετρία των επιφανειών τους, π.χ. αν δηλαδή η κεφαλή είναι σφηνοειδής ή κωνική και αν το έμβολο διαθέτει κοιλότητα ή όχι.

Τέλος, χρησιμοποιείται ένας συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μέσω ακτινοβολίας (radiation multiplier) που, αν και στην περίπτωση των κινητήρων Otto είναι μηδενικός, στους κινητήρες Diesel είναι σημαντικός και λαμβάνει την τιμή 1, καθώς στο εσωτερικό του κυλίνδρου υπάρχουν σωματίδια αιθάλης τα οποία ακτινοβολούν έντονα.



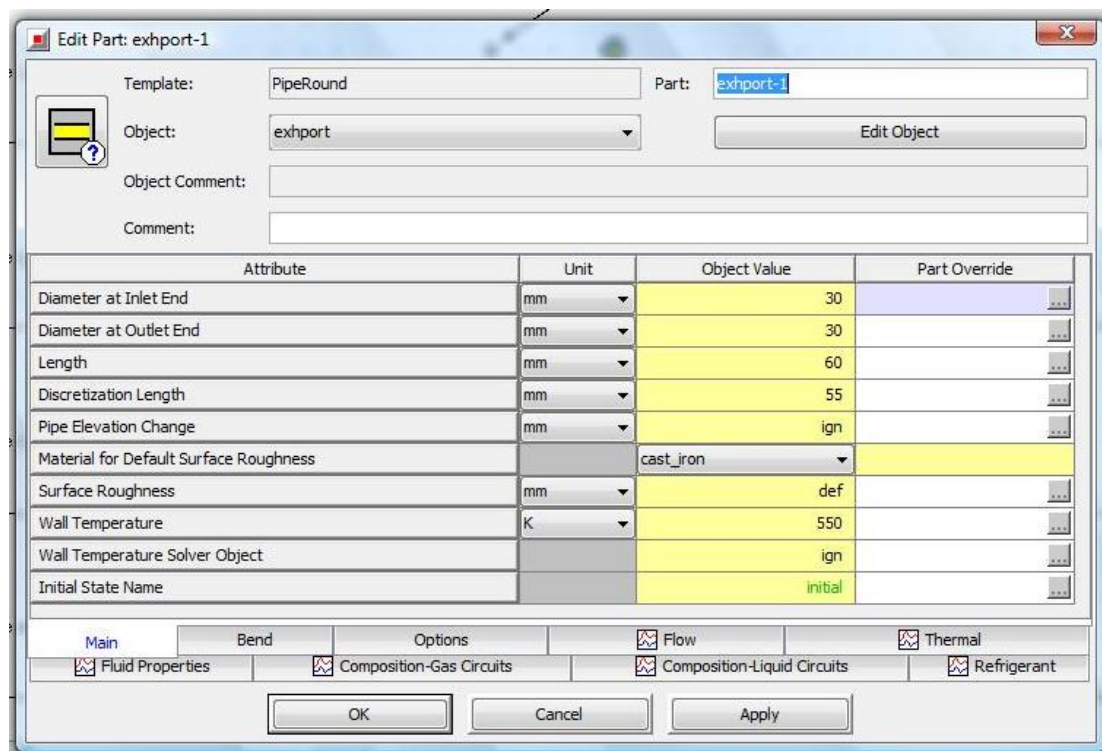
Σχήμα 4.6. Παράθυρα εισαγωγής δεδομένων για τους κυλίνδρους

4.2.7 Εγχυτήρες καυσίμου (fuel injectors)

Στο μοντέλο αυτό χρησιμοποιούνται εγχυτήρες καυσίμου 6 οπών διαμέτρου 0,3mm. Εγχύουν στους κυλίνδρους τυπικό καύσιμο diesel με μέγιστη πίεση έγχυσης τα 245 bar, ενώ η εγχυόμενη ποσότητα μεταβάλλεται ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής και το φορτίο του κινητήρα. Η έναρξη της έγχυσης γίνεται 5° πριν το άνω νεκρό σημείο και την φάση της καύσης.

4.2.8 Θυρίδες εξαγωγής (exhaust ports)

Οι θυρίδες εξαγωγής των κυλίνδρων (Σχήμα 4.7) έχουν διάμετρο 30mm και μήκος 60mm, ενώ θεωρούνται κατασκευασμένες από χυτοσίδηρο, όπως και οι θυρίδες εισαγωγής.



Σχήμα 4.7. Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων για τις θυρίδες εξαγωγής

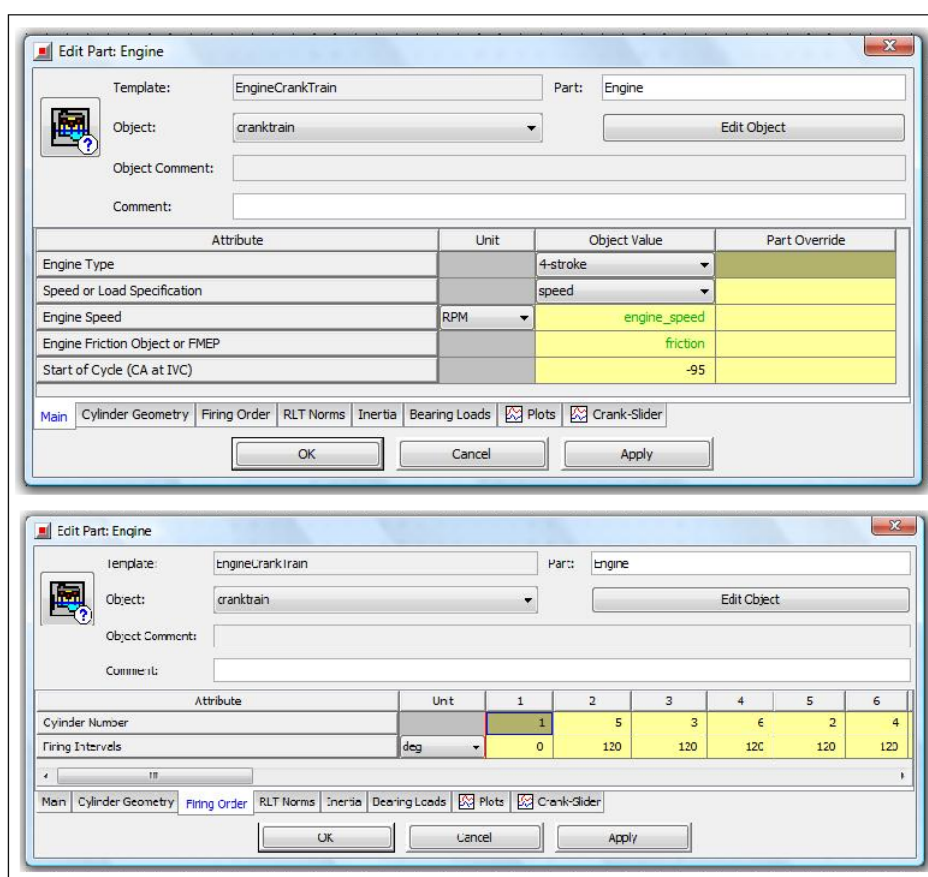
4.2.9 Πολλαπλή εξαγωγής (exhaust manifold)

Στο GT-Power, στην περίπτωση ενός στροβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα, η πολλαπλή εξαγωγής του κινητήρα σχεδιάζεται με παρόμοιο τρόπο με αυτόν της πολλαπλής εισαγωγής, αλλά εδώ υφίσταται μία ελαφρά διαφοροποίηση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.8. Αυτό συμβαίνει διότι τα καυσαέρια από τους κυλίνδρους πρέπει να κατευθυνθούν με συγκεκριμένο τρόπο στον στρόβιλο του ζεύγους στροβιλο-υπερπλήρωσης. Έτσι, στο

διπλανούς σωλήνες και να κατευθύνει το καυσαέριο προς τον στρόβιλο με όσο το δυνατόν μικρότερες απώλειες.

4.2.10 Στροφαλοφόρος άτρακτος (engine cranktrain/crankshaft)

Οι κύλινδροι συνδέονται στην στροφαλοφόρο άτρακτο, που στο GT-Power ουσιαστικά αποτελεί το μέσο ρύθμισης της λειτουργίας (ταχύτητα περιστροφής, φορτίο κλπ.) του κινητήρα. Στο στοιχείο αυτό καθορίζονται επίσης: ο τύπος του κινητήρα, ότι πρόκειται δηλαδή για έναν 4-Χ (τετράχρονο) κινητήρα, η αδράνειά του (engine effective rotating inertia), η σειρά ανάφλεξης των κυλίνδρων, η οποία για τον συγκεκριμένο εξακύλινδρο κινητήρα είναι η 1-5-3-6-2-4, καθώς και οι θέσεις των βασικών εδράνων του (Σχήμα 4.9).



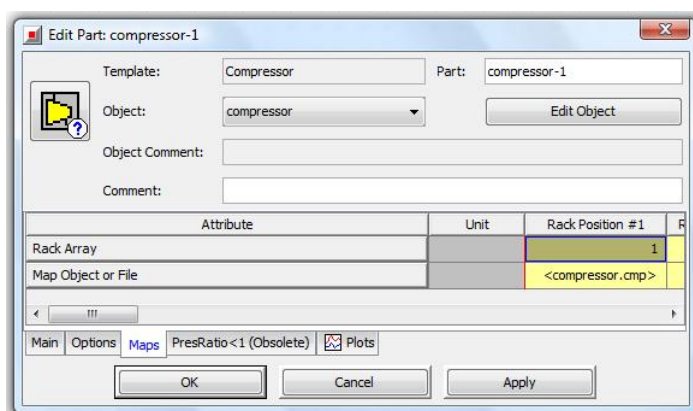
Σχήμα 4.9. Παράθυρα εισαγωγής δεδομένων για την στροφαλοφόρο άτρακτο

4.3 Το ζεύγος στροβιλο-υπερπλήρωσης (turbocharger)

Για την δημιουργία του ζεύγους στροβιλο-υπερπλήρωσης χρειάζονται τρία επιμέρους κομμάτια. Ο συμπιεστής, ο στρόβιλος και η άτρακτος που τους συνδέει.

4.3.1 Συμπιεστής (compressor)

Για τον συμπιεστή, χρησιμοποιείται το πρότυπο του συμπιεστή στο οποίο εισάγεται ένας πρότυπος χάρτης ακτινικού συμπιεστή δυναμικής ροής που παρέχεται έτοιμος από την βιβλιοθήκη του προγράμματος (Σχήμα 4.10). Το ταίριασμά του με τον κινητήρα θα γίνει μέσω ενός συντελεστή παροχής μάζας (mass multiplier), ο οποίος καθορίζει την παροχή μάζας μέσα από το συμπιεστή και έτσι κατά κάποιο τρόπο οριοθετεί το μέγεθος του. Τα αποτελέσματα δοκιμών ταιριάσματος που έγιναν κατέληξαν σε μία τιμή του συντελεστή παροχής μάζας ίση με 0,7. Η είσοδος του συμπιεστή συνδέεται με το περιβάλλον, όπου επικρατούν ατμοσφαιρικές συνθήκες πίεσης 1 bar και θερμοκρασίας 298K, ενώ η έξοδος του συνδέεται με το ψυγείο ενδιάμεσης ψύξης του αέρα υπερπλήρωσης, το οποίο θα παρουσιαστεί στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου.

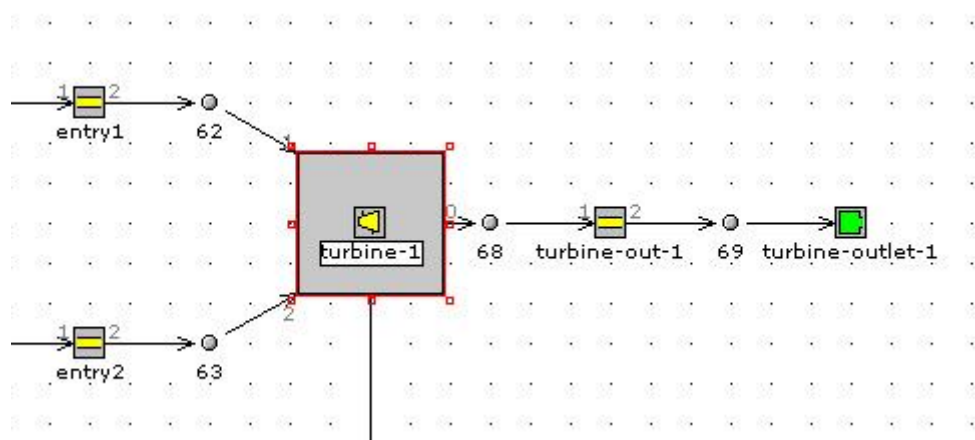


Σχήμα 4.10. Παράθυρο εισαγωγής χάρτη συμπιεστή

4.3.2 Στρόβιλος (turbine)

Όπως και με το συμπιεστή, χρησιμοποιείται και εδώ το αντίστοιχο πρότυπο του στροβίλου, σε συνδυασμό με τον πρότυπο χάρτη που δίνεται στην βιβλιοθήκη του GT-Power. Το ταίριασμα με τον κινητήρα θα γίνει και σε αυτήν την περίπτωση μέσω του αντίστοιχου συντελεστή παροχής μάζας, όπως προηγουμένως, ο οποίος μετά από αντίστοιχες δοκιμές παίρνει την τιμή 1,14. Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο για την πολλαπλή εξαγωγή του κινητήρα, το κέλυφος του στροβίλου διαθέτει δύο εισόδους, καθεμία για την αντίστοιχη τριάδα κυλίνδρων. Επομένως η εισαγωγή του στροβίλου συνδέεται με της δύο αντίστοιχες εξόδους της πολλαπλής εξαγωγής. Η έξοδος του στροβίλου συνδέεται με το περιβάλλον, όπως

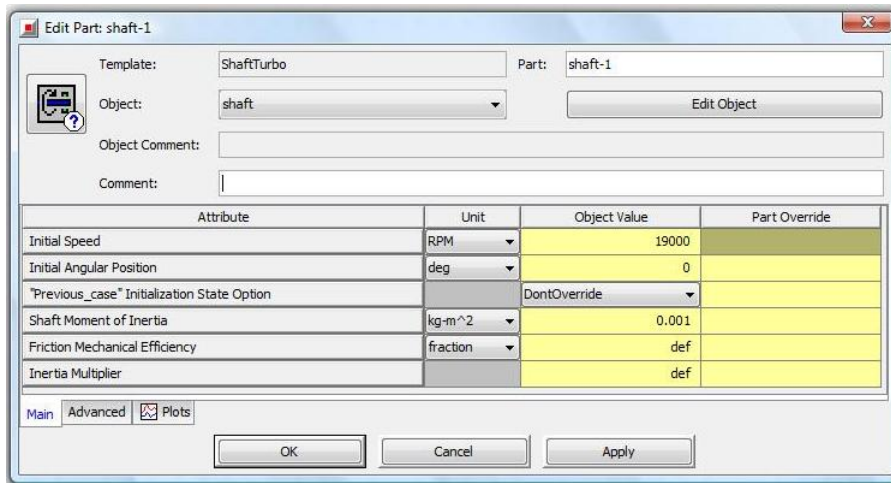
φαίνεται στο Σχήμα 4.11, όπου επικρατούν ατμοσφαιρικές συνθήκες πίεσης 1 bar και θερμοκρασίας 298K, όπως σημειώθηκε και στην περίπτωση του συμπιεστή.



Σχήμα 4.11. Αναπαράσταση του στρόβιλου του ζεύγους στροβιλο-υπερπλήρωσης στον χάρτη εργασίας του GT-Power

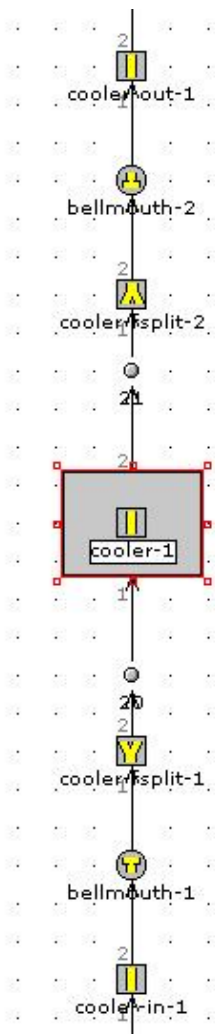
4.3.3 Άτρακτος ζεύγους στρόβιλου-συμπιεστή (turbo shaft)

Η άτρακτος του ζεύγους στρόβιλου-συμπιεστή αποτελεί το μέσο μεταφοράς της ισχύος και της ροπής από τον στρόβιλο στον συμπιεστή. Τα καυσαέρια αποτονώνονται στον στρόβιλο κι εκείνος μέσω της ατράκτου κινεί τον συμπιεστή που με τη σειρά του θα συμπιέσει τον αέρα εισαγωγής του κινητήρα. Στο GT-Power, η άτρακτος έχει μια επιπλέον λειτουργία, η οποία αφορά την προσομοίωση της αδράνειας του ζεύγους στροβιλο-υπερπλήρωσης (shaft moment of inertia) κατά την επιτάχυνση ή την επιβράδυνσή του. Επίσης, ζητείται από το πρόγραμμα μία αρχική ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου (initial speed) (βλ. Σχήμα 4.12), ανάλογα με το σενάριο που πρόκειται να “τρέξει” ο χρήστης, έτσι ώστε το μοντέλο να συγκλίνει όσο το δυνατόν πιο γρήγορα στις πραγματικές τιμές, μειώνοντας τον χρόνο των υπολογισμών (η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου του ζεύγους θα συνεχίσει να μεταβάλλεται για όσο διάστημα η ισχύς που παράγεται στον στρόβιλο είναι διαφορετική από αυτήν που απαιτεί ο συμπιεστής, μέχρι σύγκλισης).



Σχήμα 4.12. Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων για την άτρακτο του ζεύγους στροβίλο-υπερπλήρωσης

4.4 Το ψυγείο ενδιάμεσης ψύξης του αέρα υπερπλήρωσης (intercooler/aftercooler)



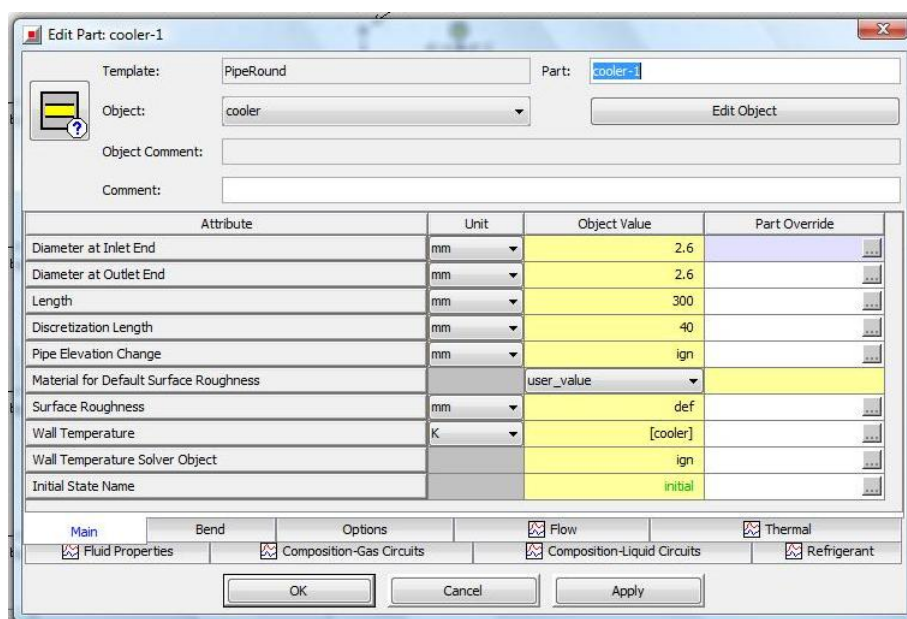
Το ψυγείο ενδιάμεσης ψύξης του αέρα υπερπλήρωσης, παρεμβάλλεται μεταξύ του στροβίλο-συμπιεστή και της πολλαπλής εισαγωγής του κινητήρα. Στο GT-Power, το ψυγείο αντιμετωπίζεται ως ένα “μαύρο κουτί” στο οποίο υφίσταται πτώση της πίεσης και της θερμοκρασίας του αέρα υπερπλήρωσης.

Στην είσοδο του ψυγείου, χρησιμοποιείται ένα στοιχείο διακλάδωσης, το οποίο αντιπροσωπεύει την μετάβαση της ροής του αέρα από τον σωλήνα που συνδέει το ψυγείο με το στροβίλο-συμπιεστή στους σωλήνες που βρίσκονται στο εσωτερικό του πρώτου. Ο όγκος του στοιχείου της διακλάδωσης αντικατοπτρίζει τον όγκο του ψυγείου, όπου στο παρόν μοντέλο είναι 190cm³.

Ως κύριο μέρος του ψυγείου, χρησιμοποιείται ένα στοιχείο πολλαπλών σωλήνων (Σχήμα 4.13), στο οποίο ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (heat transfer multiplier) και ο συντελεστής τριβής (friction multiplier) καθορίζονται με τρόπο τέτοιο ώστε να προκύπτουν οι επιθυμητές πτώσεις στη θερμοκρασία και την πίεση του

αέρα υπερπλήρωσης. Εδώ επιλέχτηκε ένα σύνολο από 1000 σωλήνες με σταθερή διάμετρο 2.6mm και μήκος 300mm.

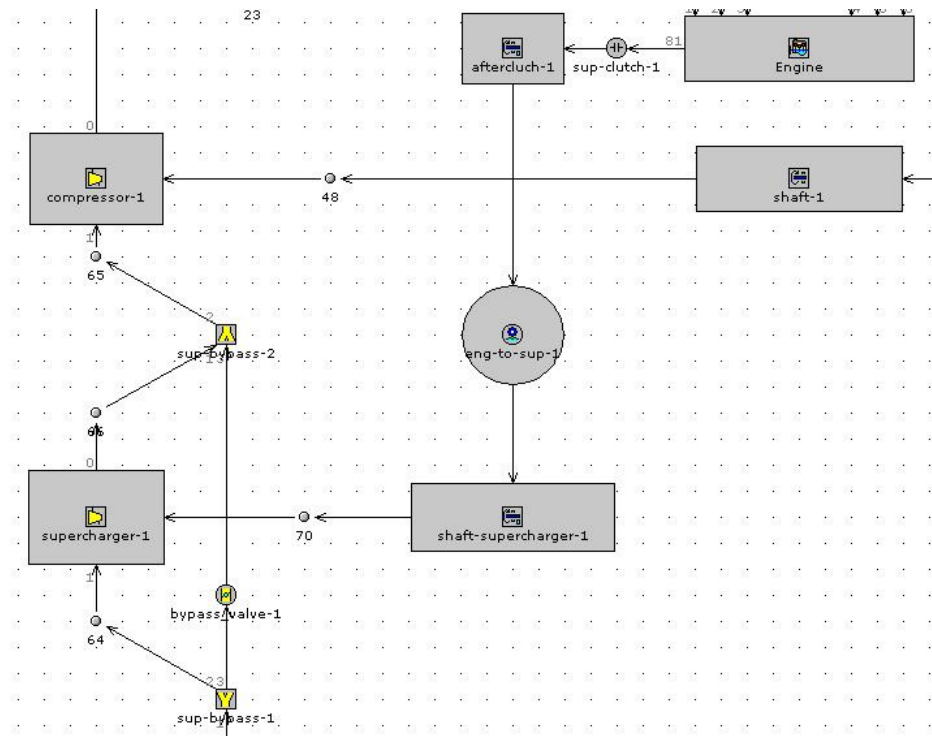
Στην έξοδο του ψυγείου υπάρχει άλλο ένα στοιχείο διακλάδωσης, πανομοιότυπο με αυτό της εισόδου, για την καθοδήγηση της ροής από το ψυγείο προς την πολλαπλή εισαγωγής του κινητήρα, πάλι μέσω ενός απλού στοιχείου σωλήνωσης.



Σχήμα 4.13. Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων για το ψυγείο ενδιάμεσης ψύξης του αέρα υπερπλήρωσης

4.5 Ο μηχανικός υπερπληρωτής (supercharger)

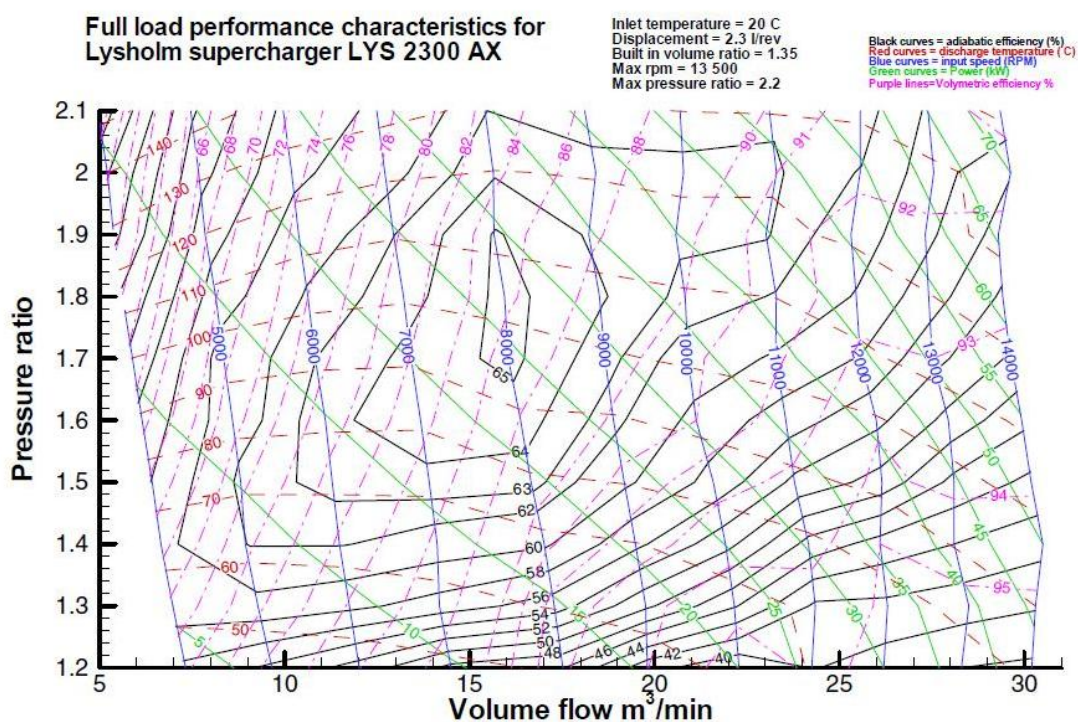
Στην περίπτωση της διάταξης συνδυασμένης υπερπλήρωσης, στο έως τώρα σύστημα προστίθεται ένας μηχανικός συμπιεστής. Αυτός θα απορροφά ισχύ για την κίνηση του από τη στροφαλοφόρο άτρακτο του κινητήρα μέσω ενός συμπλέκτη και ενός κιβωτίου ταχυτήτων σταθερού λόγου μετάδοσης. Ο μηχανικός συμπιεστής θα λειτουργεί μόνο στις χαμηλές ταχύτητες περιστροφής του κινητήρα. Σε υψηλότερες ταχύτητες περιστροφής θα αποσυμπλέκεται από αυτόν, ενώ ταυτόχρονα η ροή του αέρα θα οδηγείται μέσω μιας παράκαμψης από το περιβάλλον κατευθείαν στην εισαγωγή του συμπιεστή στροβιλο-υπερπλήρωσης (βλ. Σχήμα 4.14).



Σχήμα 4.14. Η διάταξη μηχανικής υπερπλήρωσης στον χάρτη εργασίας του GT-Power

4.5.1 Συμπιεστής

Για την αναπαράσταση του μηχανικού συμπιεστή χρησιμοποιήθηκε το πρότυπο στοιχείο του συμπιεστή από τη βιβλιοθήκη του προγράμματος, όπως στην περίπτωση του συμπιεστή στροβιλο-υπερπλήρωσης. Σ' αυτήν την περίπτωση όμως χρησιμοποιήθηκε ένας χάρτης που αντιστοιχεί σε κοχλιοειδή μηχανικό συμπιεστή θετικής εκτόπισης τύπου Lysholm από την ιστοσελίδα της εταιρίας Lysholm στο διαδίκτυο (Σχήμα 4.15) [8]. Στη συνέχεια έγινε ταίριασμα αυτού με τον κινητήρα για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, όπως πριν, με χρήση του συντελεστή παροχής μάζας, ο οποίος πήρε την τιμή 0,6.

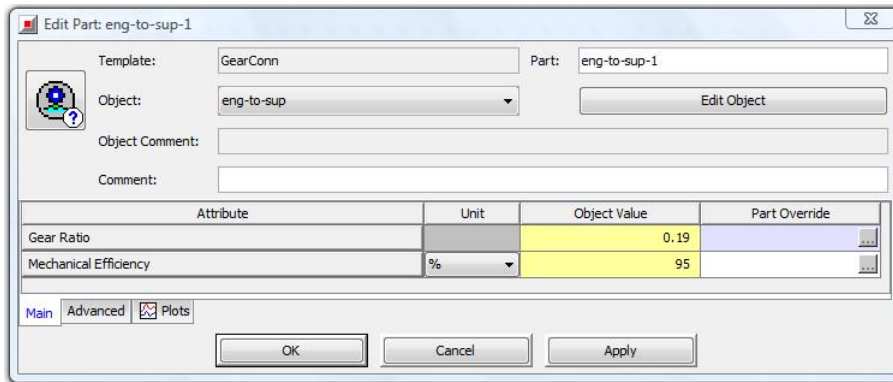


Σχήμα 4.15. Ο χάρτης του μηχανικού συμπιεστή θετικής εκτόπισης τύπου Lysholm LYS 2300 AX που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εφαρμογή [8]

4.5.2 Κιβώτιο ταχυτήτων

Η μετάδοση της ισχύος και η κίνηση του μηχανικού συμπιεστή γίνεται μέσω ενός κιβωτίου ταχυτήτων σταθερού λόγου μετάδοσης (gear ratio), ο οποίος τέθηκε, μετά από δοκιμές, ίσος με 5,26 (1:0,19). Ακόμα, θεωρείται ότι στα γρανάζια του κιβωτίου ταχυτήτων υφίστανται μηχανικές απώλειες, οπότε χρησιμοποιείται ένας μηχανικός βαθμός απόδοσης (mechanical efficiency) ίσος με 95% (Σχήμα 4.16).

Πριν και μετά το κιβώτιο, βρίσκονται τα στοιχεία δύο αξόνων, ο πρώτος συνδεδεμένος με τον συμπλέκτη που τον συνδέει με την στροφαλοφόρο άτρακτο του κινητήρα και ο δεύτερος αποτελεί τον άξονα που οδηγεί τον μηχανικό συμπιεστή. Οι δύο αυτοί άξονες αντιπροσωπεύουν και την αδράνεια του συνόλου του συστήματος μηχανικής υπερπλήρωσης. Οι αρχικές ταχύτητες των δύο αξόνων (που όπως και στην περίπτωση του άξονα του στροβιλο-συμπιεστή ζητάει το πρόγραμμα) είναι απολύτως καθορισμένες αυτή τη φορά, η πρώτη ίση με την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα και η δεύτερη μέσω του λόγου μετάδοσης στο κιβώτιο ταχυτήτων.



Σχήμα 4.16. Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων για το κιβώτιο ταχυτήτων σταθερής μετάδοσης του συστήματος μηχανικής υπερπλήρωσης

4.5.3 Συμπλέκτης (clutch)

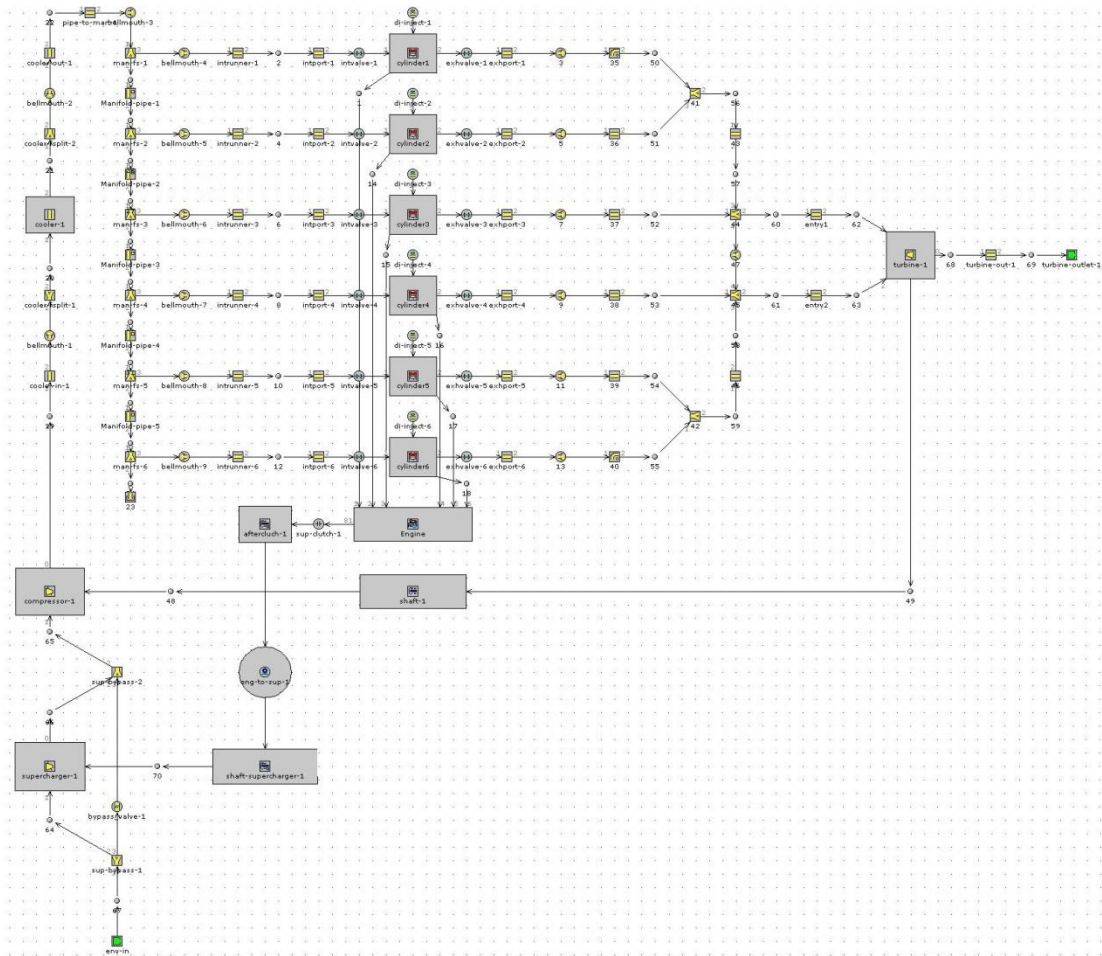
Ο συμπλέκτης του μηχανικού συμπιεστή χρησιμοποιείται για την ενεργοποίηση του συμπιεστή κατά τη λειτουργία του κινητήρα σε χαμηλές ταχύτητες περιστροφής και την απενεργοποίησή του σε υψηλότερες στροφές περιστροφής. Στον συγκεκριμένο εξακύλινδρο 4-X κινητήρα Diesel, το όριο περιστροφής του οποίου τέθηκε στις 3000rpm, επιλέχθηκε, κατόπιν δοκιμών, ο μηχανικός συμπιεστής να αποσυμπλέκεται μετά τις 2000rpm.

4.5.4 Παράκαμψη (bypass)

Στις υψηλές ταχύτητες περιστροφής του κινητήρα, όπου ο μηχανικός συμπιεστής τίθεται εκτός λειτουργίας, η ροή του αέρα εισαγωγής, κατευθυνόμενη προς την εισαγωγή του συμπιεστή στροβιλο-υπερπλήρωσης πρέπει να έχει μια εναλλακτική διαδρομή, προκειμένου να μην υφίσταται την πτώση πίεσης που θα προκαλούσε η διέλευσή της μέσα από τον ανενεργό μηχανικό συμπιεστή (βλ. και Σχήμα 2.7).

Για το λόγο αυτό, υπάρχουν δύο διακλαδώσεις, πριν και μετά τον συμπιεστή, με έναν σωλήνα παράκαμψης ο οποίος διαθέτει μια βαλβίδα παράκαμψης. Όσο ο μηχανικός συμπιεστής λειτουργεί, η βαλβίδα είναι πλήρως κλειστή, εξαναγκάζοντας τη ροή του αέρα να διέλθει μέσα από αυτόν με αποτέλεσμα την αύξηση της πίεσης. Όταν όμως αυτός αποσυμπλέκεται και σταματάει να λειτουργεί, η βαλβίδα παράκαμψης ανοίγει και ο αέρας από την εισαγωγή κατευθύνεται αμέσως στον στροβιλο-υπερπληρωτή.

Η παράκαμψη, καθώς επίσης και ο τρόπος σύνδεσης του συμπλέκτη, φαίνονται παραπάνω, στο Σχήμα 4.14.



Σχήμα 1.17. Η ολοκληρωμένη μορφή του κινητήρα με την διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης, όπως αναπαρίσταται στο χάρτη εργασίας του GT-Power

Κεφάλαιο 5 – Αποτελέσματα προσομοιώσεων μόνιμης λειτουργίας

5.1 Τελικές ρυθμίσεις προσομοίωσης

Μέσω του μενού ‘Run Setup’ του GT-Power καθορίζεται ο τρόπος με τον οποίο θα γίνουν οι υπολογισμοί και ο χρόνος που αυτοί θα διαρκέσουν. Σημαντικό είναι, ειδικά στην περίπτωση της προσομοίωσης της μεταβατικής λειτουργίας του κινητήρα (επόμενο κεφάλαιο), ο χρόνος αυτός να επαρκεί για την σύγκλιση του μοντέλου. Αλλιώς, τα αποτελέσματα δεν θα είναι ακριβή, καθώς δεν θα αντιπροσωπεύουν την τελική, μόνιμη κατάσταση του κινητήρα.

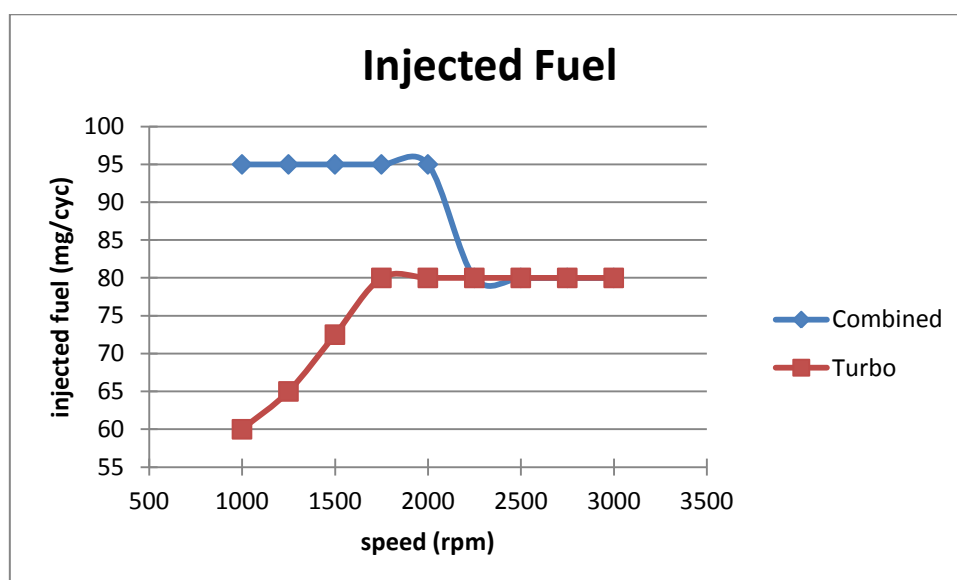
Μέσω του μενού ‘Case Setup’ εισάγονται τα σενάρια λειτουργίας και προσομοίωσης του κινητήρα. Με “τρέξιμο” πολλαπλών σεναρίων, προκύπτει μια πληθώρα αποτελεσμάτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για σύγκριση και αξιολόγηση των επιδόσεων του κινητήρα κάτω από διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας.

Αφού γίνουν όλες οι απαραίτητες ρυθμίσεις, το πρόγραμμα είναι πλέον έτοιμο να “τρέξει”. Οι υπολογισμοί γίνονται σε περιβάλλον DOS μόλις ο χρήστης πατήσει το κουμπί ‘Run Simulation’.

5.2 Συλλογή και επισκόπηση αποτελεσμάτων – σύγκριση μεταξύ απλής στροβιλο-υπερπλήρωσης και συνδυασμένης υπερπλήρωσης

Η συλλογή των αποτελεσμάτων γίνεται μέσω του GT-Post, που αποτελεί υποπρόγραμμα του GT-Suite (όπως και το GT-Power). Από εκεί, έγινε εξαγωγή τους στο Microsoft Office Excel, όπου παραστήθηκαν σε κοινά διαγράμματα για να είναι πιο εύκολη η σύγκριση και η αξιολόγησή τους.

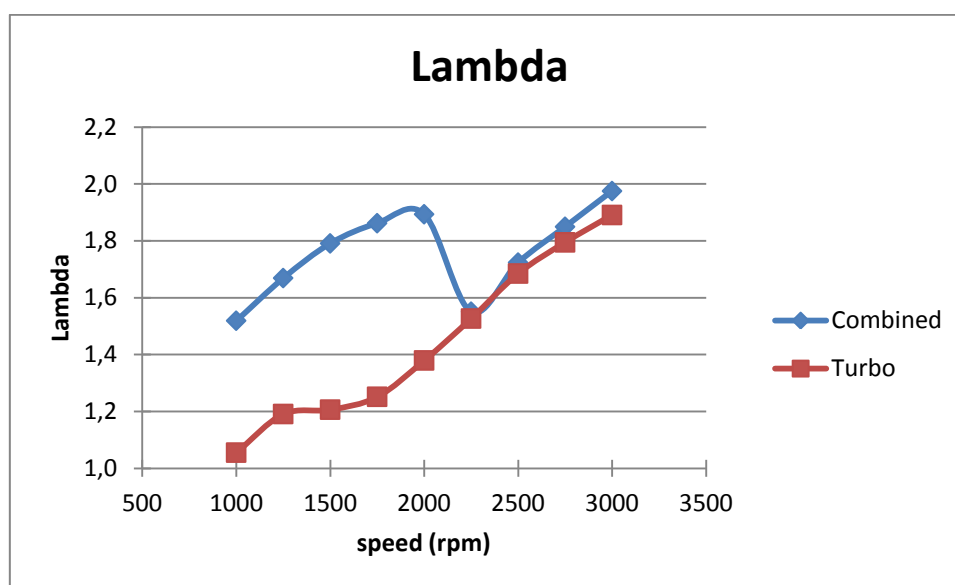
Για την μελέτη της μόνιμης λειτουργίας του κινητήρα προσομοιώθηκαν σενάρια λειτουργίας του σε ένα εύρος ταχυτήτων περιστροφής, υπό μέγιστο φορτίο. Παρακάτω, θα συγκριθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αυτών, για τις περιπτώσεις χρήσης διάταξης απλής στροβιλο-υπερπλήρωσης και συνδυασμένης υπερπλήρωσης.



Σχήμα 5.1. Σύγκριση ποσότητας εγχυόμενου καυσίμου συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση

Αρχικά, έχουμε το διάγραμμα του εγχυόμενου καυσίμου (Σχήμα 5.1). Σε χαμηλές ταχύτητες περιστροφής, όπου στην περίπτωση συνδυασμένης υπερπλήρωσης λειτουργεί και ο μηχανικός συμπιεστής, το καύσιμο που εγχύεται στον κύλινδρο υπό μέγιστο φορτίο είναι εμφανώς περισσότερο, καθώς η επιπλέον συμπίεση του αέρα εισαγωγής, οδηγεί σε αύξηση της μάζας του αέρα που εισέρχεται στους κυλίνδρους, επιτρέποντας έτσι

μεγαλύτερη ποσότητα καυσίμου, χωρίς να υπάρχει κίνδυνος το μείγμα να πλησιάσει υπερβολικά την στοιχειομετρική αναλογία, κάτι το οποίο συμβαίνει στην περίπτωση της απλής στροβιλο-υπερπλήρωσης, όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 5.2), όπου παριστάνεται ο λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου (λάμδα). Σε υψηλότερες ταχύτητες περιστροφής, το εγχυόμενο καύσιμο περιορίζεται σε μια σταθερή τιμή, λόγω κατασκευαστικών περιορισμών, μιας και αυξάνεται σημαντικά η μέγιστη πίεση στο εσωτερικό των κυλίνδρων.

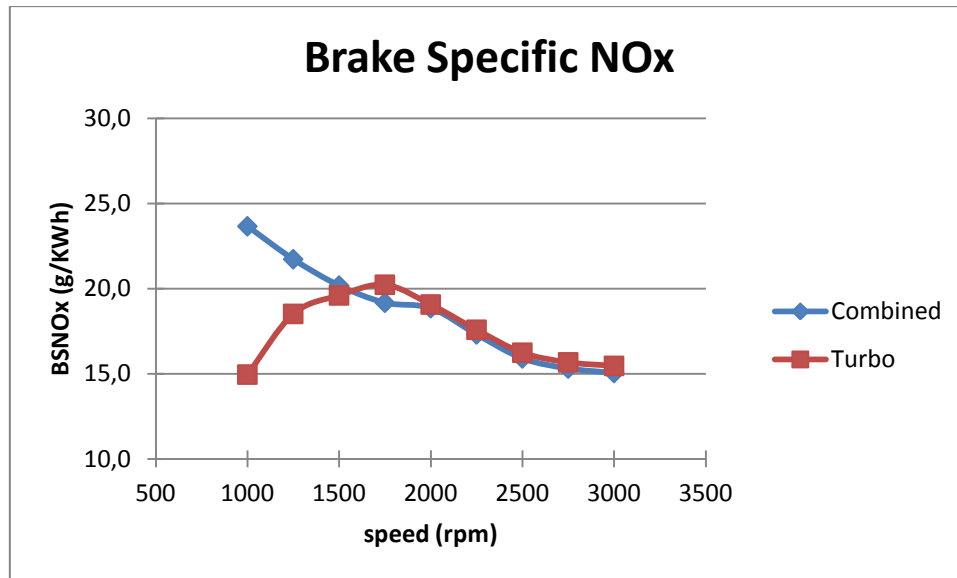


Σχήμα 5.2. Σύγκριση λόγου ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση

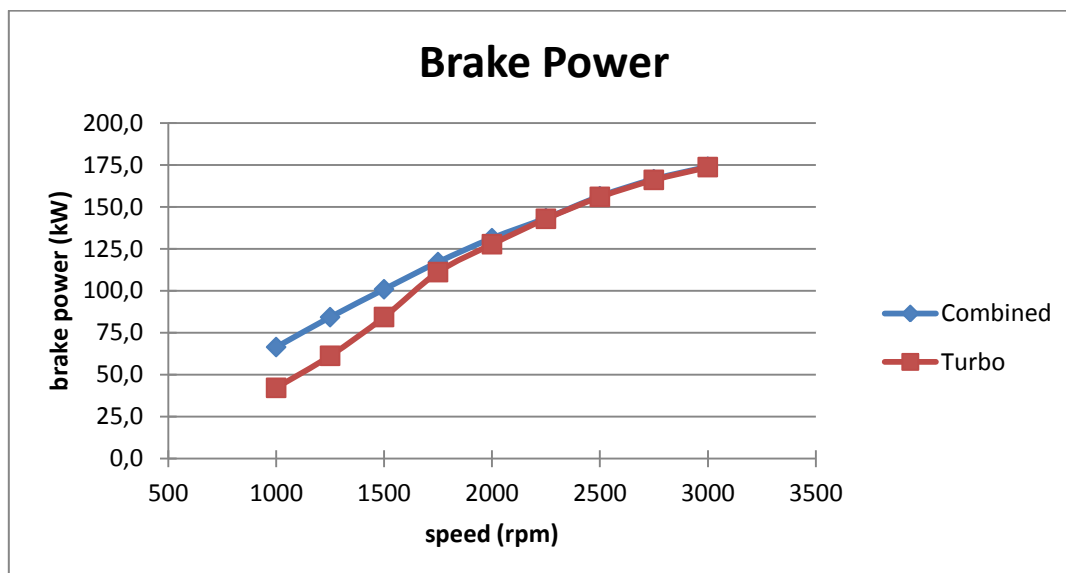
Στην περίπτωση κινητήρων Diesel, ο λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου πρέπει να είναι μεγαλύτερος από τη μονάδα (στοιχειομετρική αναλογία), δηλαδή το μίγμα αέρα-καυσίμου στους κυλίνδρους να είναι φτωχό. Μικροί λόγοι ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου συνεπάγονται έντονες εκπομπές ρύπων, και συγκεκριμένα σωματιδίων αιθάλης (soot). Για το λόγο αυτό είναι προτιμότερο ο λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου σε κινητήρες πετρελαίου να βρίσκεται σε περιοχές άνω του 1,2, όπου μπορούμε να έχουμε ικανοποιητικά “άκαπνη” λειτουργία.

Παρόλα αυτά, δεν ισχύει το ίδιο για τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου NO_x, όπου στην περίπτωση του κινητήρα με τη διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης, οι υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες στο εσωτερικό των

κυλίνδρων οδηγούν σε αυξημένες εκπομπές σε σχέση με την απλή στροβιλο-υπερπλήρωση. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών παρατίθενται στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 5.3). Σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής, οι ανηγμένες στην παραγόμενη ισχύ εκπομπές οξειδίων του αζώτου μειώνονται, αφού αυξάνεται με ταχύτερο ρυθμό η παραγόμενη από τον κινητήρα ισχύς.

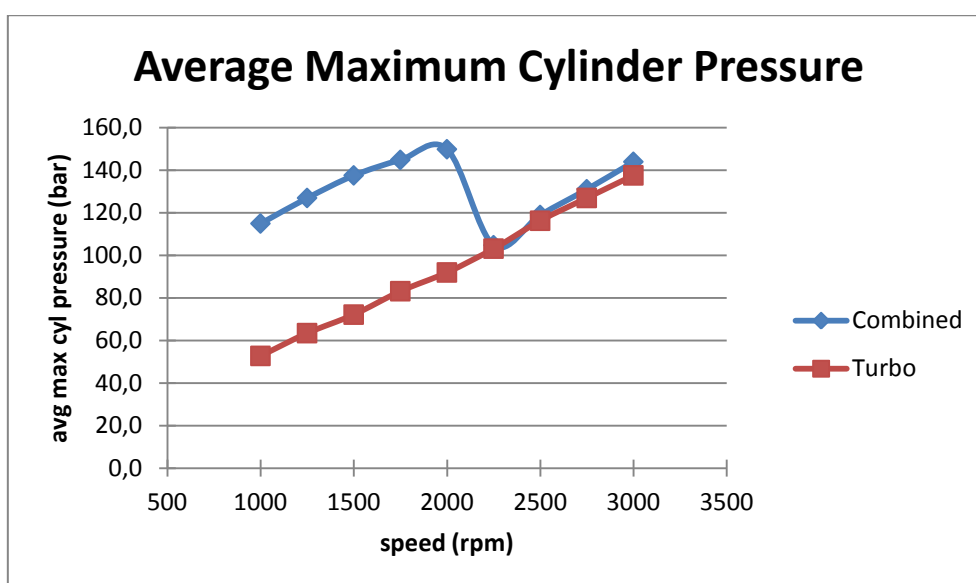


Σχήμα 5.3. Σύγκριση ειδικών εκπομπών οξειδίων του αζώτου NOx συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση



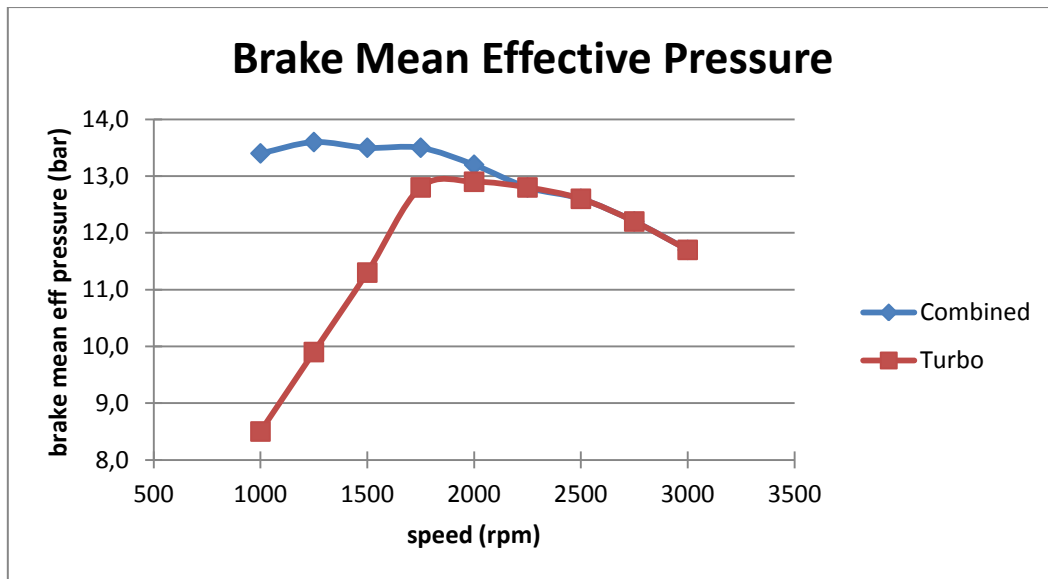
Σχήμα 5.4. Σύγκριση πραγματικής ισχύος συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση

Όσον αφορά την ισχύ του κινητήρα (Σχήμα 5.4), ήταν αναμενόμενο, στο εύρος στροφών εντός του οποίου λειτουργεί και ο μηχανικός συμπιεστής, η διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης να οδηγεί σε μεγαλύτερη παραγωγή ισχύος απ' ό τι η απλή στροβιλο-υπερπλήρωση. Αυτό εύκολα εξηγείται από τις μεγαλύτερες ποσότητες αέρα και καυσίμου που βρίσκονται στους κυλίνδρους κατά την καύση, καθώς και από τα υψηλότερα επίπεδα πίεσης που επιτυγχάνονται στο εσωτερικό του κινητήρα (Σχήμα 5.5). Στο διάγραμμα αυτό, που δείχνει τη μέση μέγιστη πίεση των κυλίνδρων, φαίνεται η συνεισφορά του μηχανικού συμπιεστή στην αύξηση της πίεσης στον κινητήρα, η οποία και οδηγεί στην παραγωγή μεγαλύτερης ισχύος.

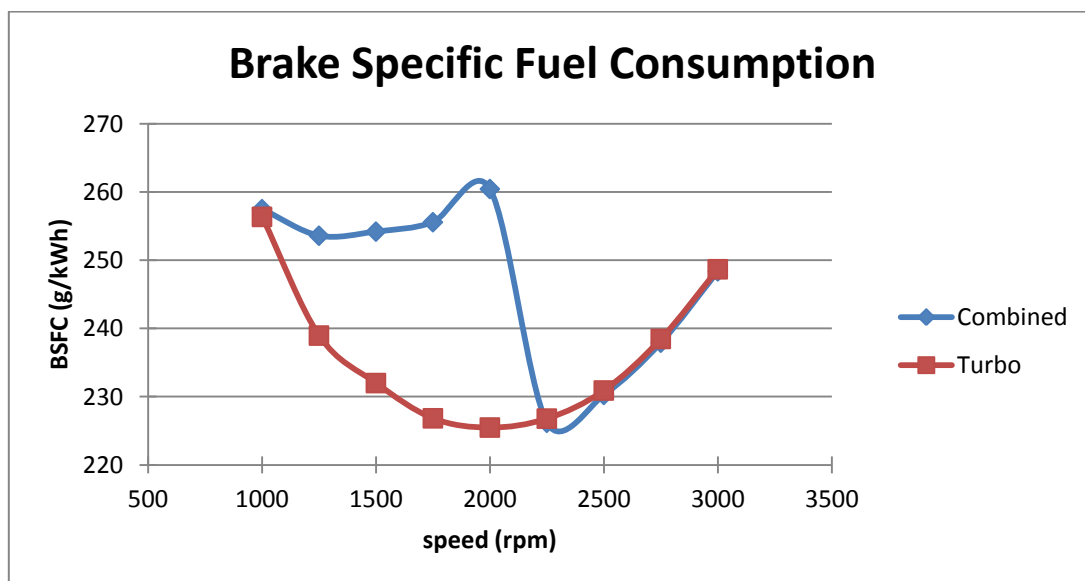


Σχήμα 5.5. Σύγκριση μέσης μέγιστης πίεσης των κυλίνδρων συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση

Αντίστοιχα, όσο λειτουργεί ο μηχανικός συμπιεστής, αυξημένη είναι και η μέση πραγματική πίεση (Σχήμα 5.6). Εδώ, παρατηρούμε και την έντονη επίδραση του περιοριστή καυσίμου (fuel limiter) στην περίπτωση της απλής στροβιλο-υπερπλήρωσης στις χαμηλές στροφές, με αποτέλεσμα την παραγωγή χαμηλής ροπής (περίπου μέχρι τις 1750rpm), η οποία συνεπάγεται δυσκολία στην επιτάχυνση του κινητήρα.



Σχήμα 5.6. Σύγκριση μέσης πραγματικής πίεσης στους κυλίνδρους συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση

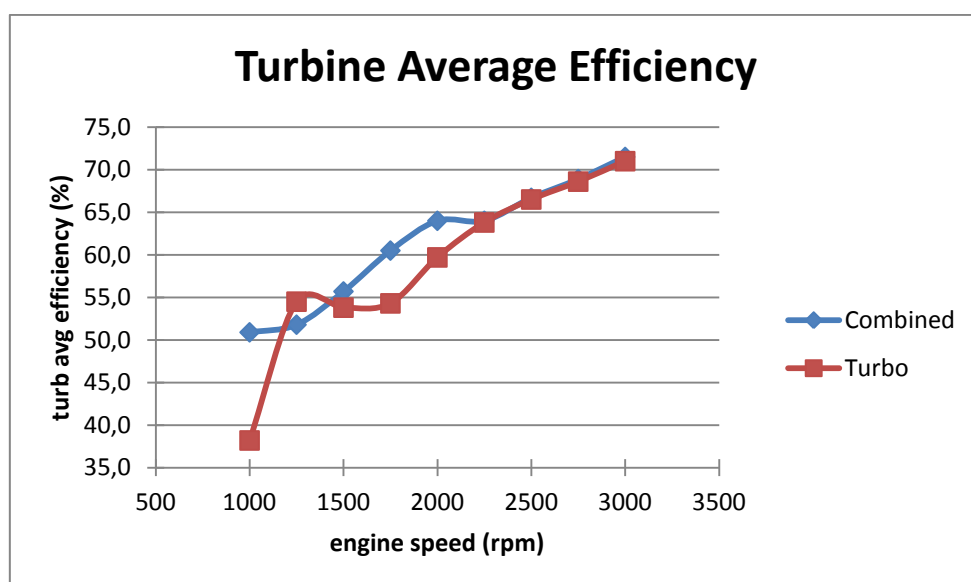


Σχήμα 5.7. Σύγκριση ειδικής κατανάλωσης καυσίμου συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση

Κλείνοντας με τις επιδόσεις του κινητήρα, έχουμε το διάγραμμα της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (Σχήμα 5.7). Στην περίπτωση του κινητήρα με την διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης παρατηρούμε ότι η ειδική κατανάλωση καυσίμου είναι αυξημένη για το εύρος στροφών κατά το οποίο ο

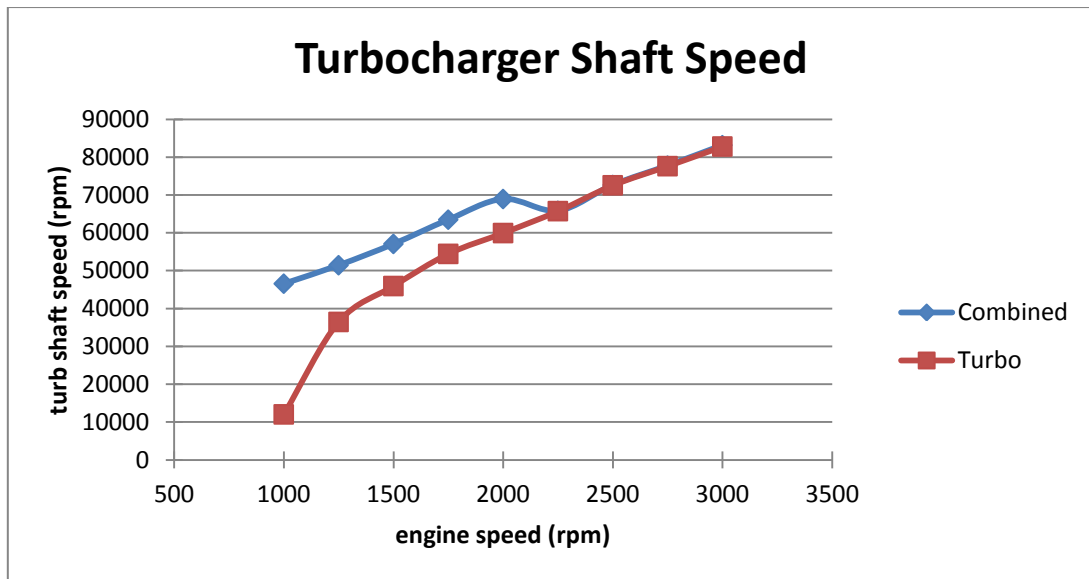
μηχανικός συμπιεστής λειτουργεί. Αν και ο κινητήρας παράγει περισσότερη ισχύ, η απορρόφηση ενός μεγάλου μέρους αυτής από τον μηχανικό συμπιεστή, σε συνδυασμό με την μεγαλύτερη ποσότητα καυσίμου που εγχύεται στους κυλίνδρους έχει ως αποτέλεσμα η ειδική κατανάλωση καυσίμου να είναι σημαντικά υψηλότερη.

Πέραν των βελτιώσεων στις επιδόσεις του κινητήρα που προσφέρει η παρεμβολή του μηχανικού συμπιεστή στην υπερπλήρωση του κινητήρα, η λειτουργία του έχει θετικά αποτελέσματα και στο σύστημα στροβιλο-υπερπλήρωσης. Η υψηλότερη πίεση εισαγωγής στους κυλίνδρους, συνεπάγεται και υψηλότερη πίεση εξαγωγής, πράγμα που βοηθάει σημαντικά στην σταθερή και αποδοτική λειτουργία του στροβίλου από πιο χαμηλές ταχύτητες περιστροφής του κινητήρα, όπως φαίνεται στο επόμενο διάγραμμα (Σχήμα 5.8).



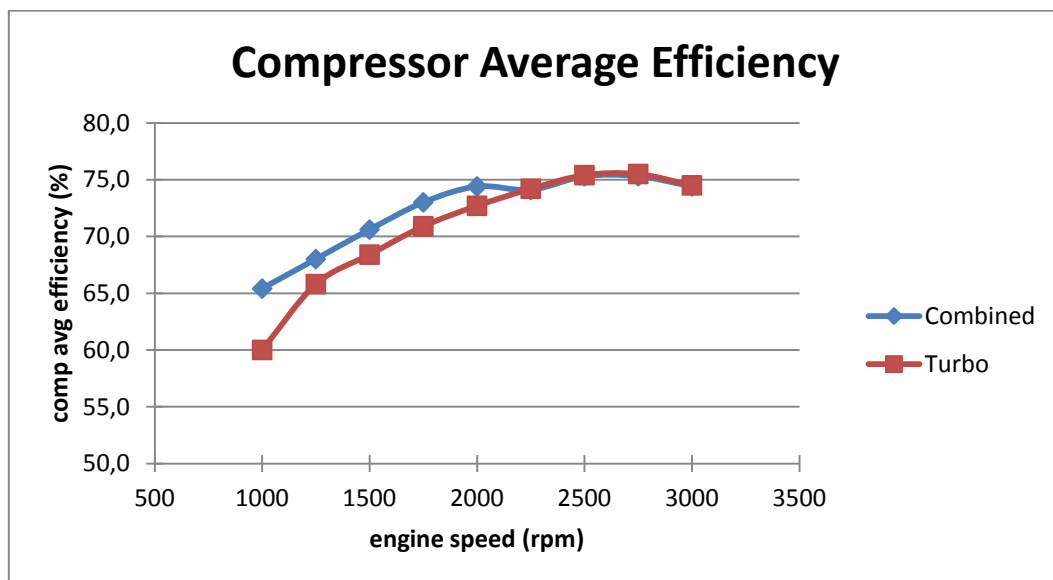
Σχήμα 5.8. Σύγκριση βαθμού απόδοσης του στροβίλου του στροβιλο-υπερπληρωτή συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση

Η σταθερότητα αυτή του στροβίλου στις χαμηλές ταχύτητες περιστροφής του κινητήρα, σε συνδυασμό με τις υψηλότερες πιέσεις, επιτρέπει στο ζεύγος στροβιλο-υπερπλήρωσης να περιστρέφεται με μεγαλύτερη ταχύτητα, όπως φαίνεται παρακάτω, στο Σχήμα 5.9.



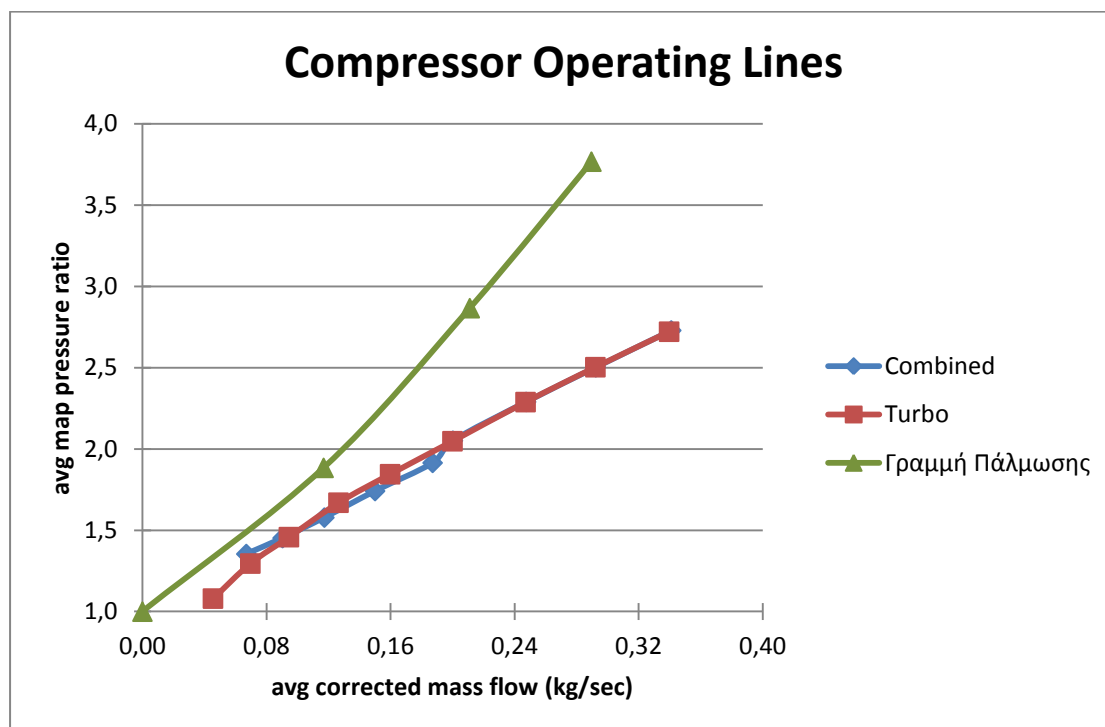
Σχήμα 5.9. Σύγκριση ταχύτητας περιστροφής του ζεύγους στροβιλο-υπερπλήρωσης συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση

Μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής συνεπάγεται και μεγαλύτερη παροχή μάζας για τον στροβιλο-συμπιεστή, ο οποίος άλλωστε δέχεται προσυμπιεσμένο αέρα εξαιτίας της λειτουργίας του μηχανικού συμπιεστή. Το γεγονός αυτό αυξάνει ικανοποιητικά τον βαθμό απόδοσης του στροβιλο-συμπιεστή, όπως φαίνεται στο διάγραμμα (Σχήμα 5.10) που ακολουθεί.



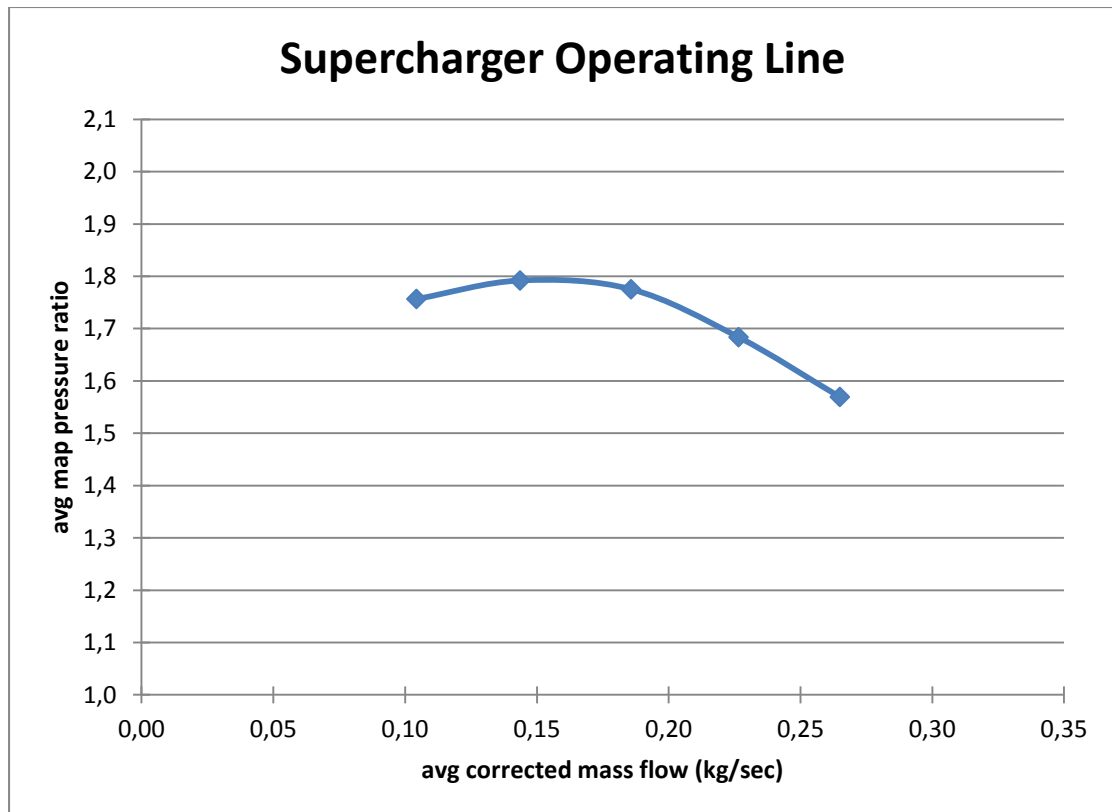
Σχήμα 5.10. Σύγκριση βαθμού απόδοσης του συμπιεστή του στροβιλο-υπερπληρωτή συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση

Η αυξημένη παροχή μάζας του αέρα στην είσοδο του στροβιλοσυμπιεστή, καθώς και η υψηλότερη πίεση που αυτός έχει, συμβάλλουν ευεργετικά και στην πιο ασφαλή λειτουργία του συμπιεστή, μακριά από τη γραμμή πάλμωσης. Αυτό καταγράφεται στον χάρτη του συμπιεστή (Σχήμα 5.11), στον οποίο παρατηρείται επίσης πως, εξαιτίας του ταιριάσματος με τον κινητήρα, ο συμπιεστής μπορεί να καλύψει ολόκληρο το εύρος των λόγων πίεσης στο οποίο είναι σχεδιασμένος να λειτουργεί αποδοτικά.



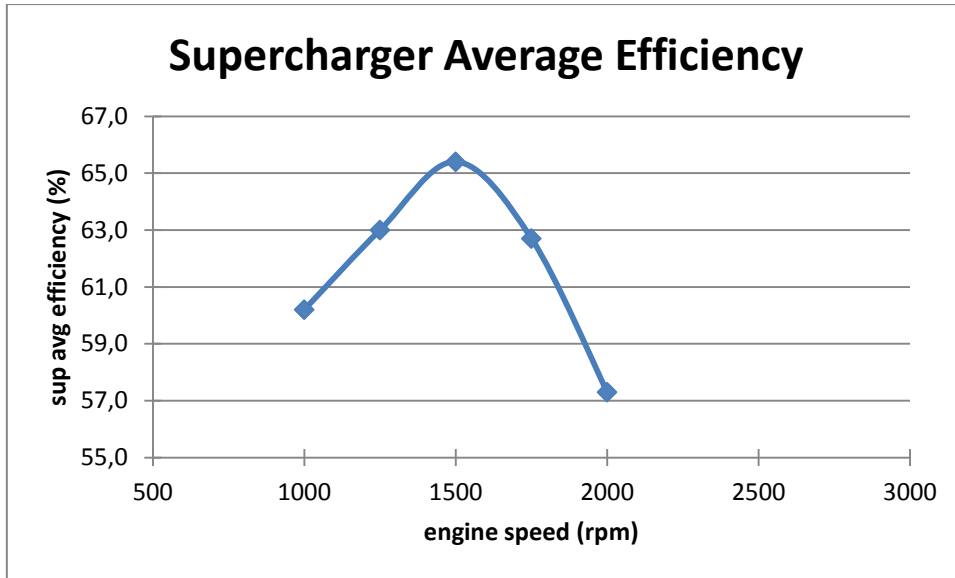
Σχήμα 5.11. Οι καμπύλες λειτουργίας του συμπιεστή στροβιλο-υπερπλήρωσης για τις περιπτώσεις της στροβιλο-υπερπλήρωσης και της συνδυασμένης υπερπλήρωσης

Εξετάζοντας τώρα τη λειτουργία του μηχανικού κοχλιοειδούς συμπιεστή θετικής εκτόπισης τύπου Lysholm της εφαρμογής μας, είναι προφανές ότι απαιτούμε από αυτόν να μας δίνει μεγάλο λόγο πίεσης του αέρα εισαγωγής και μέγιστη απόδοση στις χαμηλές ταχύτητες περιστροφής, ενώ η απόδοσή του μπορεί να πέφτει στις μεγαλύτερες ταχύτητες, οπότε και αποσυμπλέκεται από τον κινητήρα και σταματάει να λειτουργεί (ταυτόχρονα ανοίγει η βαλβίδα παράκαμψης και ο αέρας εισαγωγής οδηγείται απευθείας στον συμπιεστή του ζεύγους στροβιλο-υπερπλήρωσης). Η καμπύλη λειτουργίας του έχει τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 5.12.

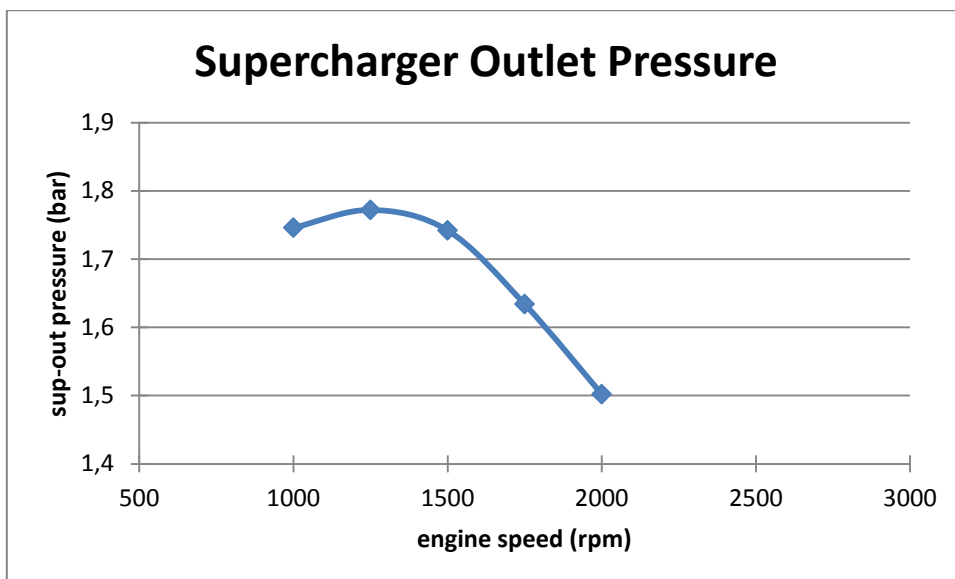


Σχήμα 5.12. Η καμπύλη λειτουργίας του μηχανικού κοχλιοειδούς συμπιεστή θετικής εκτόπισης τύπου Lysholm LYS 2300 AX για την περίπτωση της συνδυασμένης υπερπλήρωσης

Η καμπύλη αυτή, σε συνδυασμό με το χάρτη του συγκεκριμένου συμπιεστή (Lysholm LYS 2300 AX), μας δίνει μέγιστη πίεση εξόδου περί τις 1250rpm ενώ ο μέγιστος βαθμός απόδοσης επιτυγχάνεται περί τις 1500rpm (αναφέρονται οι ταχύτητες περιστροφής του κινητήρα, ενώ ο λόγος μετάδοσης είναι 5,26 (1/0,19)). Παρακάτω, δίνονται τα διαγράμματα του βαθμού απόδοσης (Σχήμα 5.13) και της πίεσης εξόδου (Σχήμα 5.14) του μηχανικού συμπιεστή θετικής εκτόπισης.



Σχήμα 5.13. Η καμπύλη του βαθμού απόδοσης του μηχανικού συμπιεστή συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα στην περίπτωση της συνδυασμένης υπερπλήρωσης



Σχήμα 5.14. Η καμπύλη της πίεσης του αέρα υπερπλήρωσης στην έξοδο του μηχανικού συμπιεστή συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα για την περίπτωση της συνδυασμένης υπερπλήρωσης

Κεφάλαιο 6 – Αποτελέσματα προσομοιώσεων μεταβατικής λειτουργίας

Επιπρόσθετα της μόνιμης λειτουργίας του κινητήρα, είναι ιδιαίτερα σημαντική η εξέταση της μεταβατικής λειτουργίας του και η σύγκριση μεταξύ απλής στροβιλο-υπερπλήρωσης και συνδυασμένης υπερπλήρωσης, καθώς σε αυτό το σημείο είναι που υστερεί σημαντικά η πρώτη. Στο κεφάλαιο αυτό, λοιπόν, θα εξετάσουμε την μεταβατική λειτουργία του κινητήρα με τις διατάξεις στροβιλο-υπερπλήρωσης και συνδυασμένης υπερπλήρωσης. Οι περιπτώσεις επιτάχυνσης που θα μελετήσουμε συνοψίζονται στον παρακάτω Πίνακα 6.1, όπου καταγράφονται η αρχική και η τελική ταχύτητα περιστροφής του, η διάρκεια της επιτάχυνσης, η αρχική παροχή καυσίμου και ο αριθμός της παραγράφου στην οποία αναλύεται κάθε περίπτωση.

Πίνακας 6.1. Περιπτώσεις μεταβατικής λειτουργίας (επιτάχυνσης) του 4-X υπερπληρωμένου κινητήρα Diesel

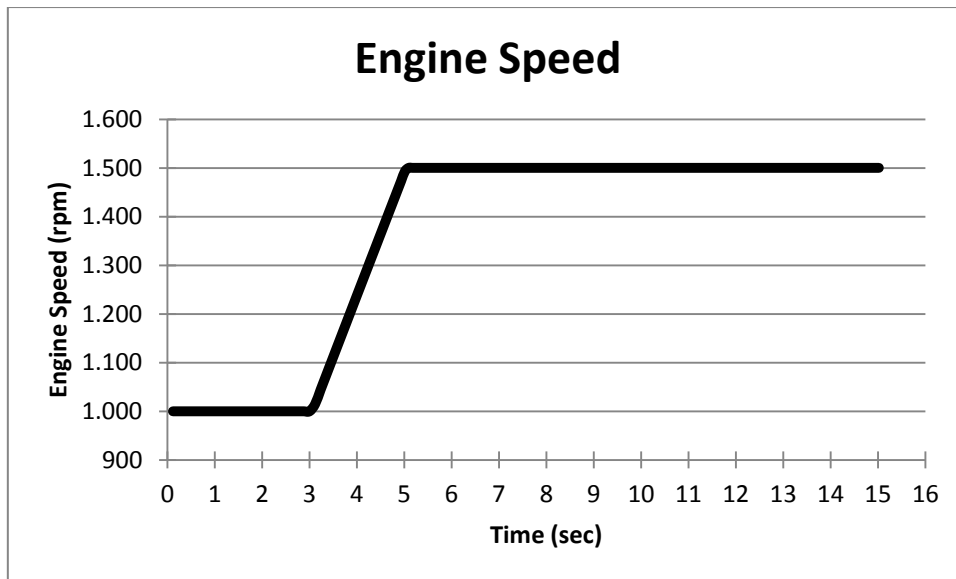
Αρχική ταχύτητα περιστροφής (rpm)	Τελική ταχύτητα περιστροφής (rpm)	Διάρκεια επιτάχυνσης (sec)	Αρχική παροχή καυσίμου (mg/κύκλο)	Παράγραφος
1000	1500	2 – turbo	10	6.1.1
1000	1500	2 – combined	30	6.1.1, 6.1.2
1000	1500	4 – combined	30	6.1.2
1000	1500	6 – combined	30	6.1.2
1500	2000	5 – turbo	70	6.2.1
1500	2000	5 - combined	55 (low)	6.2.1
1500	2000	3 - combined	80	6.2.2
1500	2000	5 – combined	80	6.2.1, 6.2.2
1500	2000	7 – combined	80	6.2.2
1500	2500	5 – turbo	70	6.3.1
1500	2500	5 – combined	70	6.3.1, 6.3.2
1500	2500	10 – combined	70	6.3.2
1500	2500	15 – combined	70	6.3.2

6.1 Επιτάχυνση από τις 1000 στις 1500rpm

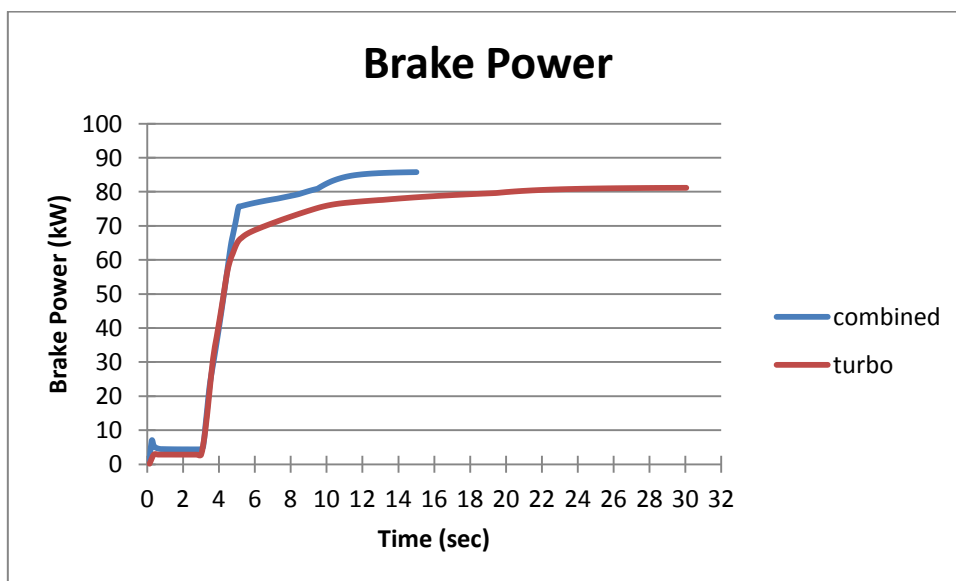
Παρακάτω, θα συγκριθούν τόσο τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις των δύο μοντέλων όσο και τα αποτελέσματα για περίπτωση μεταβατικής λειτουργίας διαφορετικής χρονικής διάρκειας με χρήση διάταξης συνδυασμένης υπερπλήρωσης.

6.1.1 Σύγκριση μεταξύ απλής στροβιλο-υπερπλήρωσης και συνδυασμένης υπερπλήρωσης

Στο σενάριο που χρησιμοποιήθηκε, εξετάσαμε την απόδοση των δύο συστημάτων υπερπλήρωσης σε περίπτωση γραμμικής αύξησης της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα από τις 1000 στις 1500rpm σε χρονικό διάστημα δύο δευτερολέπτων (Σχήμα 6.1).



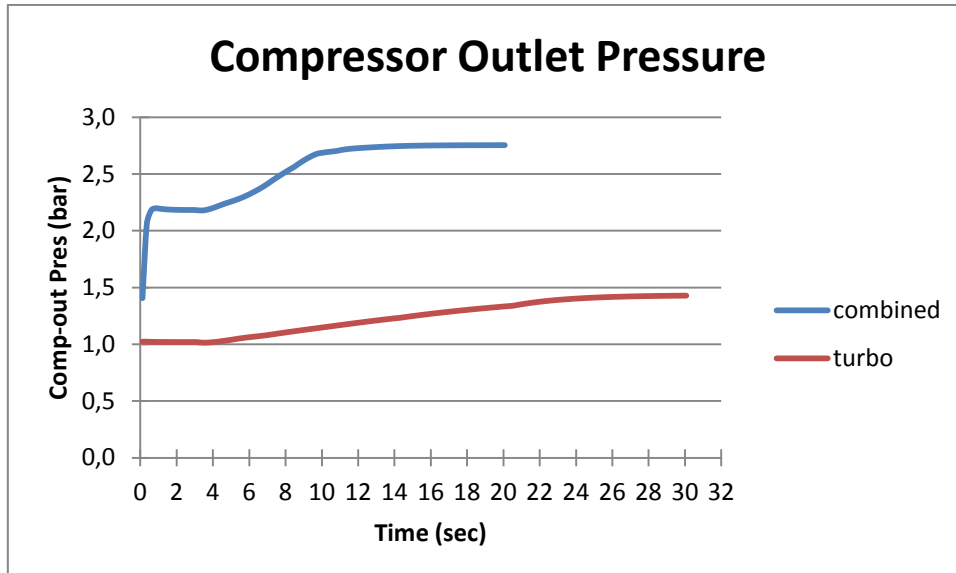
Σχήμα 6.1. Το προφίλ της ταχύτητας για το σενάριο της επιτάχυνσης του κινητήρα από τις 1000 στις 1500rpm και τη σύγκριση ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση



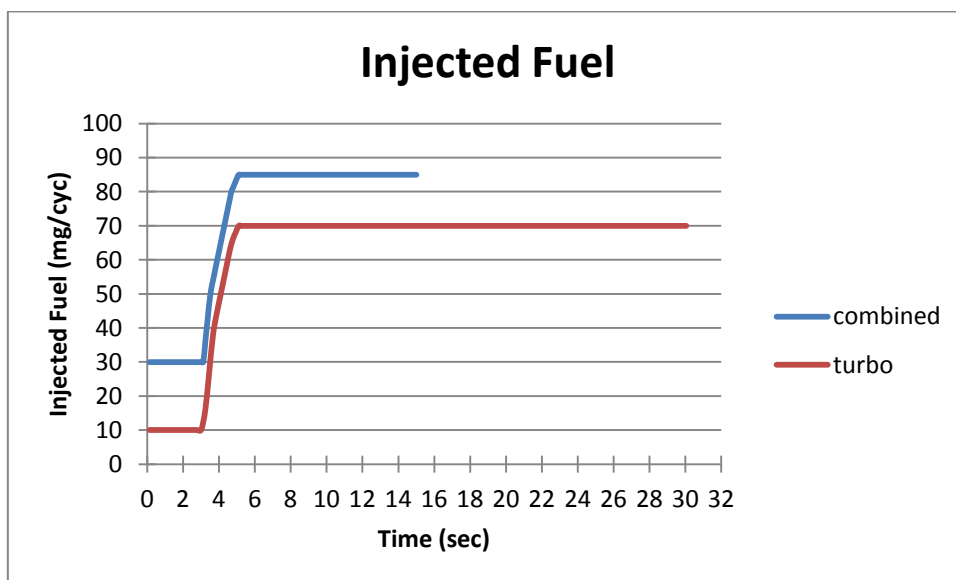
Σχήμα 6.2. Σύγκριση πραγματικής ισχύος συναρτήσει του χρόνου ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση

Στις 1000rpm ο κινητήρας θεωρούμε ότι έχει άφορτη λειτουργία (ρελαντί), οπότε πρακτικά παράγει ελάχιστη ισχύ (Σχήμα 6.2), η οποία καταναλώνεται από τα περιφερειακά του συστήματα και από τις απώλειες στο σύστημα μετάδοσης κίνησης του αυτοκινήτου. Επίσης, παρατηρούμε ότι και στις δύο περιπτώσεις έχουμε μια πρώτη, γραμμική αύξηση της ισχύος λόγω

αύξηση της ταχύτητας περιστροφής και του εγχυόμενου καυσίμου (χωρίς αύξηση αυτού δεν θα μπορούσε να επιταχυνθεί ο κινητήρας), και μία δεύτερη, σαφώς μικρότερη αύξηση, που οφείλεται στο γεγονός ότι το ζεύγος στροβιλο-υπερπλήρωσης έρχεται σιγά-σιγά σε ισορροπία (Σχήμα 6.3).



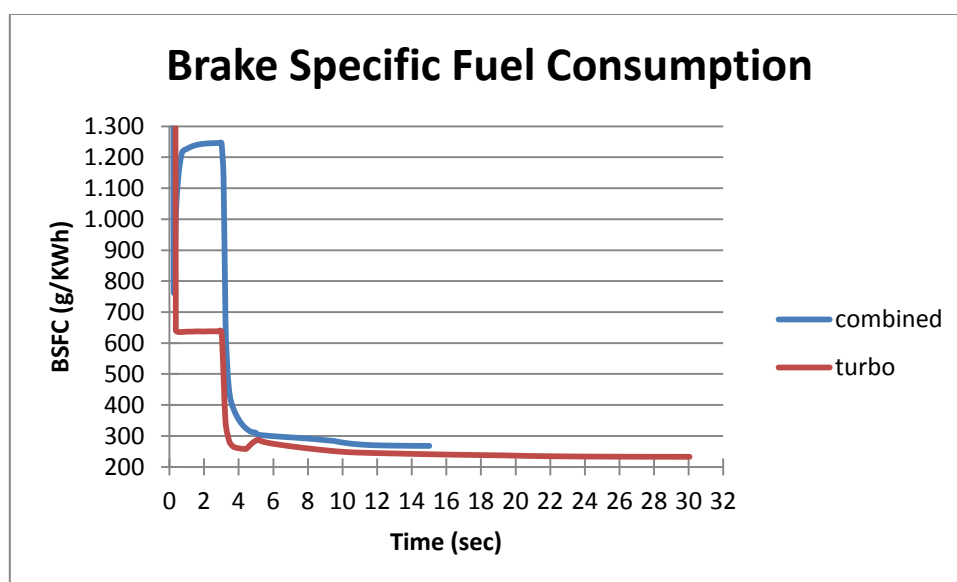
Σχήμα 6.3. Σύγκριση πίεσης του αέρα υπερπλήρωσης στην έξοδο του συμπιεστή του στροβιλο-υπερπληρωτή συναρτήσει του χρόνου ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση



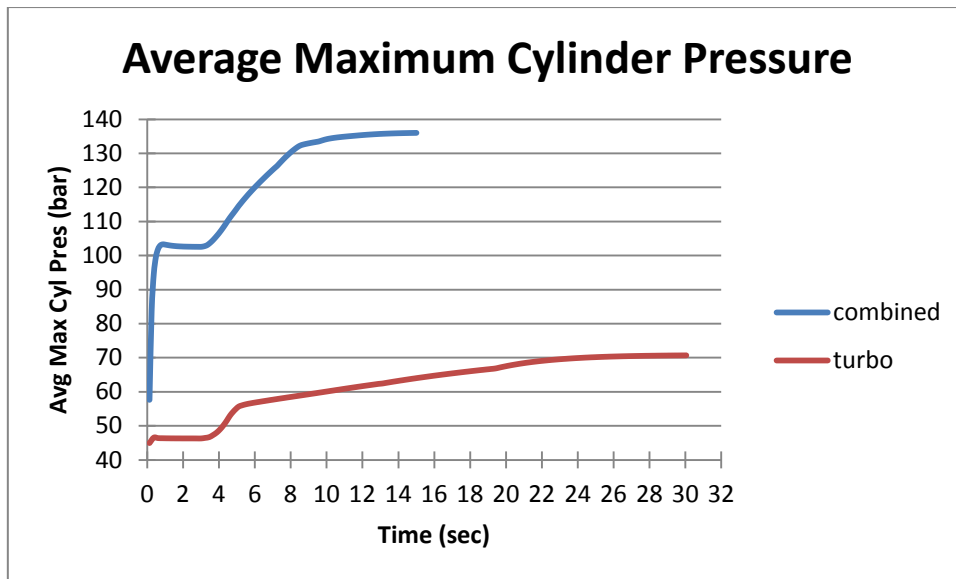
Σχήμα 6.4. Σύγκριση ποσότητας εγχυόμενου καυσίμου συναρτήσει του χρόνου ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση

Όπως αναφέρθηκε, για να επιτευχθεί επιτάχυνση του κινητήρα, χρειάζεται αύξηση του εγχυόμενου στους κυλίνδρους καυσίμου (Σχήμα 6.4). Αυτή είναι πιο έντονη στην αρχή με την έντασή της να μειώνεται κατά τη διάρκεια της επιτάχυνσης. Επίσης, παρατηρείται μία (σχετικά μεγάλη) διαφορά κατά την άφορτη λειτουργία, η οποία οφείλεται στην παρουσία του μηχανικού συμπιεστή, ο οποίος απορροφά ισχύ από τον κινητήρα, με αποτέλεσμα ο δεύτερος να απαιτεί περισσότερο καύσιμο για να μπορέσει να λειτουργήσει.

Η διαφορά αυτή στην ποσότητα του καυσίμου κατά την άφορτη λειτουργία έχει επίδραση στην ειδική κατανάλωση καυσίμου (Σχήμα 6.5), η οποία είναι εξαιρετικά υψηλή στον κινητήρα με την συνδυασμένη υπερπλήρωση, η οποία στη συνέχεια εξισορροπείται και έρχεται στα ίδια περίπου επίπεδα με αυτή του στροβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα. Σημειώνεται ότι οι ακραίες τιμές και οι έντονες μεταβολές που παρατηρούνται κατά τις πρώτες στιγμές λειτουργίας του κινητήρα οφείλονται στους πρώτους υπολογισμούς του προγράμματος για την σύγκλιση του μοντέλου στις αρχικές συνθήκες λειτουργίας και εμφανίζονται σε όλες σχεδόν τις γραφικές παραστάσεις χωρίς να έχουν κάποια ιδιαίτερη, περεταίρω σημασία.



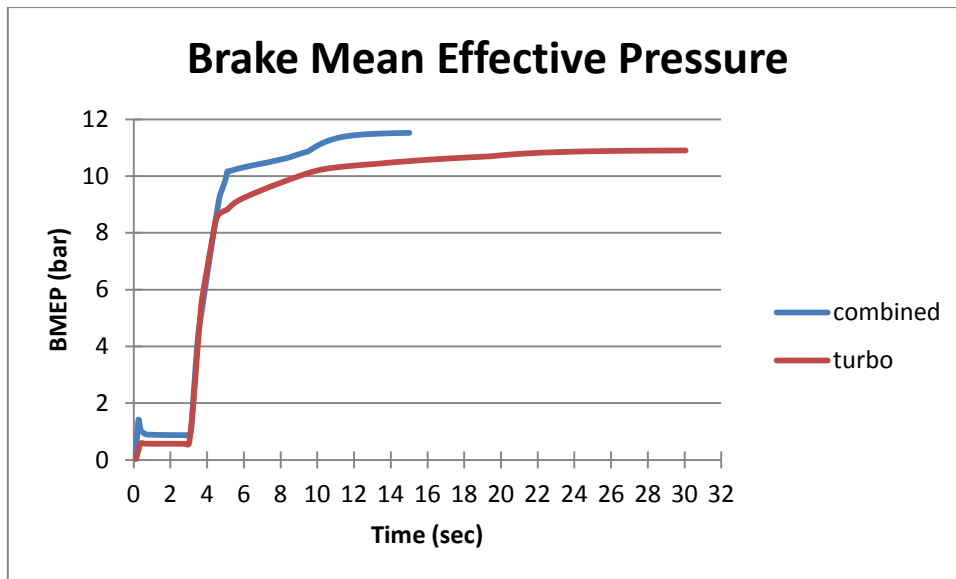
Σχήμα 6.5. Σύγκριση ειδικής κατανάλωσης καυσίμου συναρτήσει του χρόνου ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση



Σχήμα 6.6. Σύγκριση μέσης μέγιστης πίεσης των κυλίνδρων συναρτήσει του χρόνου ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση

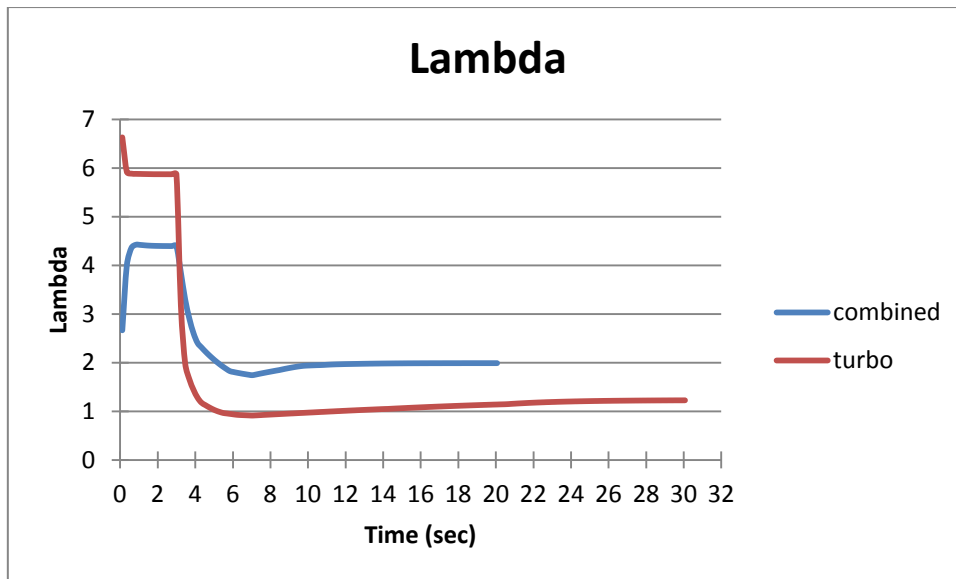
Όπως είναι φυσικό, μεγαλύτερη ποσότητα καυσίμου και μεγαλύτερη πίεση του αέρα υπερπλήρωσης οδηγούν σε αρκετά υψηλότερες μέγιστες πιέσεις στο εσωτερικό των κυλίνδρων κατά την καύση στο σύστημα συνδυασμένης υπερπλήρωσης (Σχήμα 6.6).

Το ίδιο συμβαίνει και με τη μέση πραγματική πίεση στο εσωτερικό των κυλίνδρων, η οποία, σύμφωνα με το επόμενο διάγραμμα (Σχήμα 6.7), είναι επίσης αυξημένη. Παρατηρούμε κι εδώ αυτό το δεύτερο, μικρό “άλμα” που παρατηρήθηκε και στην καμπύλη της ισχύος του κινητήρα με τη συνδυασμένη υπερπλήρωση, ως αποτέλεσμα της καλύτερης συνεργασίας των δύο συμπιεστών, οι οποίοι παρέχουν αέρα υπερπλήρωσης μεγαλύτερης πίεσης, επηρεάζοντας έτσι την μέση πραγματική πίεση στο εσωτερικό των κυλίνδρων.

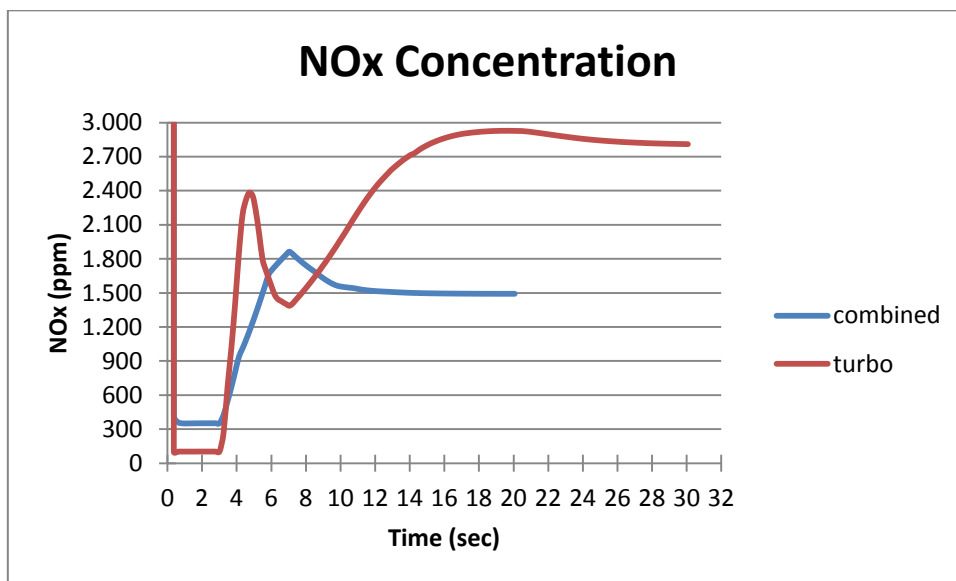


Σχήμα 6.7. Σύγκριση μέσης πραγματικής πίεσης στους κυλίνδρους συναρτήσει του χρόνου ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση

Η επιπλέον ποσότητα καυσίμου που εγχύεται στον κινητήρα με τη συνδυασμένη υπερπλήρωση, επιφέρει όλα τα παραπάνω πλεονεκτήματα, ενώ ταυτόχρονα ο λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου (Σχήμα 6.8) διατηρείται σε υψηλά επίπεδα, χάρη στην αυξημένη υπερπλήρωση που επιφέρει η λειτουργία του μηχανικού συμπιεστή. Έτσι, όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα, ακόμα και κατά τη φάση της επιτάχυνσης του κινητήρα, ο λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου παίρνει μία ελάχιστη τιμή περί το 1,7, την στιγμή που στον στροβιλο-υπερπληρωμένο κινητήρα πέφτει κάτω από τη μονάδα. Στη συνέχεια, ενώ στην περίπτωση της συνδυασμένης υπερπλήρωσης σταθεροποιείται κοντά στο 2, τα προβλήματα συνεχίζονται για την περίπτωση της στροβιλο-υπερπλήρωσης, με τις τιμές να παραμένουν ελάχιστα πάνω από τη μονάδα.



Σχήμα 6.8. Σύγκριση λόγου ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου συναρτήσει του χρόνου ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση

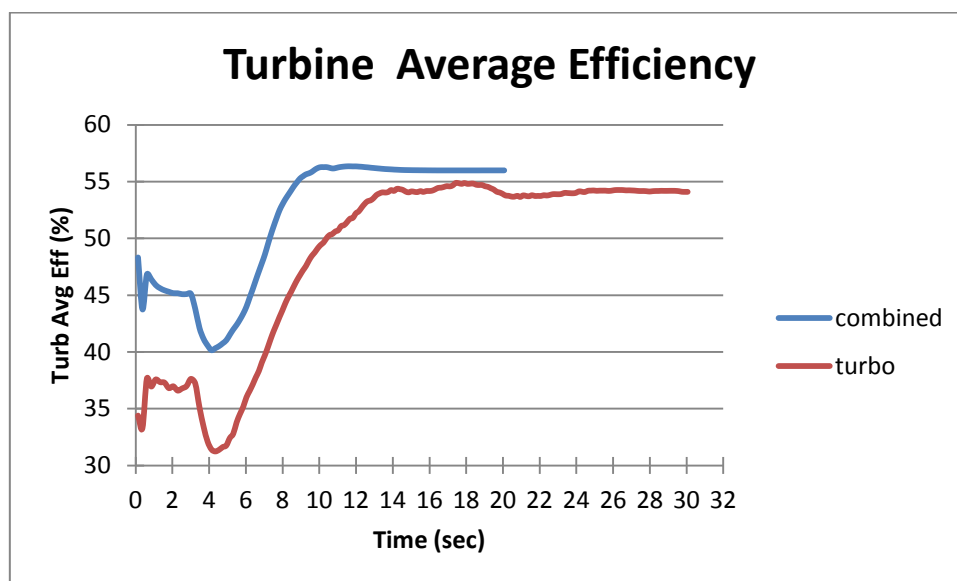


Σχήμα 6.9. Σύγκριση συγκέντρωσης οξειδίων του αζώτου NOx στα καυσαέρια συναρτήσει του χρόνου ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση

Οι χαμηλές αυτές τιμές του λόγου ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου για τον στροβιλο-υπερπληρωμένο κινητήρα, προκαλούν σημαντικά προβλήματα όσον αφορά τις εκπομπές καυσαερίων. Το πλούσιο καύσιμο κατά την επιτάχυνση θα επιφέρει υψηλές εκπομπές σωματιδίων, και η στοιχειομετρική καύση που παρατηρείται, έχει σίγουρα αντίκτυπο στην αύξηση των

θερμοκρασιών στους κυλίνδρους, όπως γίνεται αντιληπτό από το Σχήμα 6.9, όπου οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου NOx είναι πολύ υψηλότερες σε σχέση με τον κινητήρα με τη συνδυασμένη υπερπλήρωση (βασικός παράγοντας σχηματισμού των οξειδίων του αζώτου είναι οι υψηλές θερμοκρασίες).

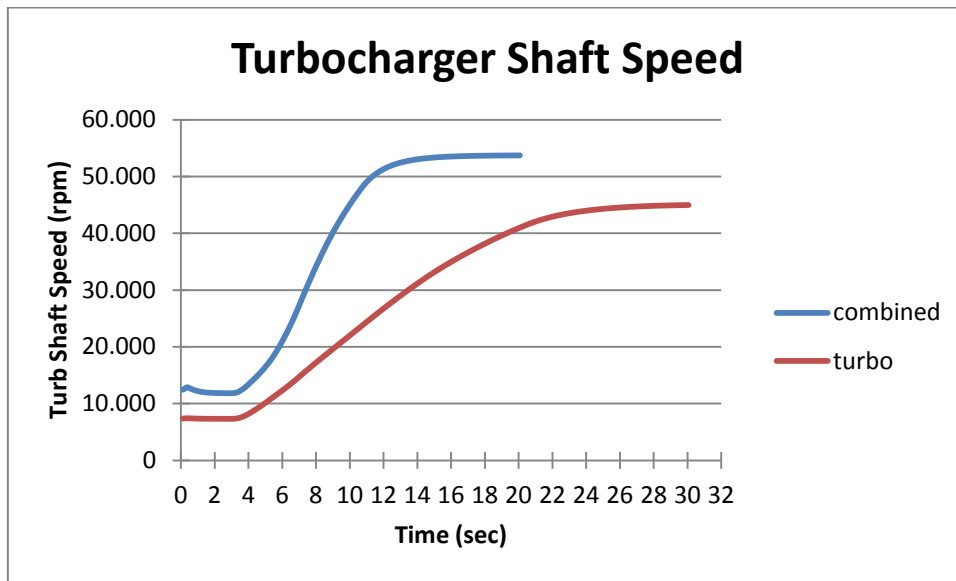
Όσον αφορά το ζεύγος στροβιλο-υπερπλήρωσης, η ευεργετική επίδραση του μηχανικού συμπίεσής φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα απόδοσης του στροβίλου (Σχήμα 6.10). Η μεγαλύτερη πίεση του αέρα υπερπλήρωσης στην συνδυασμένη υπερπλήρωση, οδηγεί σε μεγαλύτερες πιέσεις λειτουργίας του κινητήρα και αυτές με τη σειρά τους σε μεγαλύτερες πιέσεις των καυσαερίων κατά την είσοδό τους στο στρόβιλο. Ως αποτέλεσμα, η απόδοση του τελευταίου είναι αισθητά αυξημένη σε όλο το διάστημα της μετάβασης, καθώς και στις αρχικές και τελικές συνθήκες λειτουργίας. Η πτώση στην απόδοση του στροβίλου κατά την έναρξη της επιτάχυνσης, οφείλεται στην υστέρηση του στροβιλο-υπερπληρωτή (δηλαδή στην αδράνεια του ζεύγους) και, όπως φαίνεται, είναι μικρότερη στην περίπτωση της διάταξης συνδυασμένης υπερπλήρωσης.



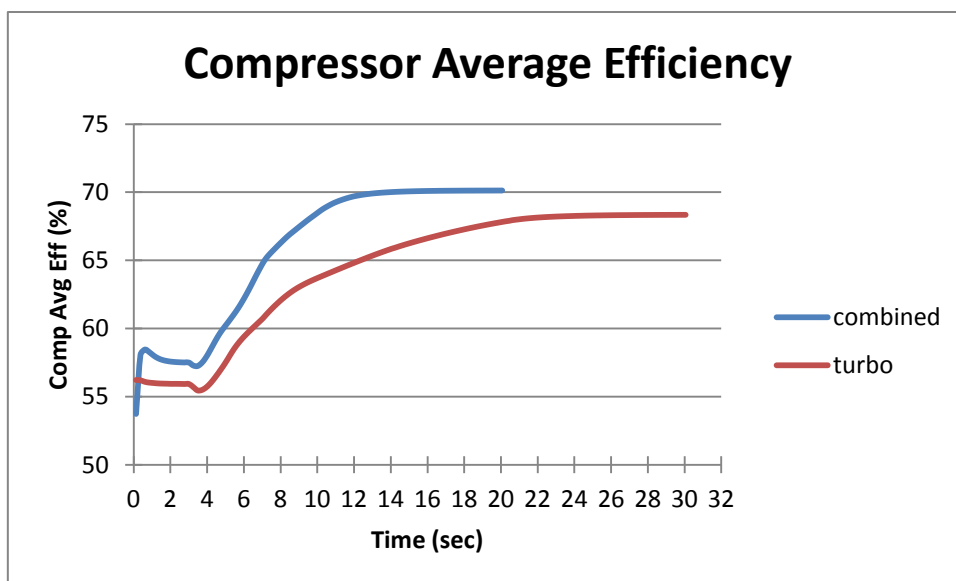
Σχήμα 6.10. Σύγκριση βαθμού απόδοσης του στροβίλου του στροβιλο-υπερπληρωτή συναρτήσεως του χρόνου ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση

Αυτό καταγράφεται και στην επόμενη γραφική παράσταση (Σχήμα 6.11), όπου είναι ξεκάθαρο πως ο στροβιλο-υπερπληρωτής επιταχύνεται με

αισθητά γρηγορότερο ρυθμό όταν διαθέτει την προσφερόμενη υποβοήθηση από τον μηχανικό συμπιεστή.



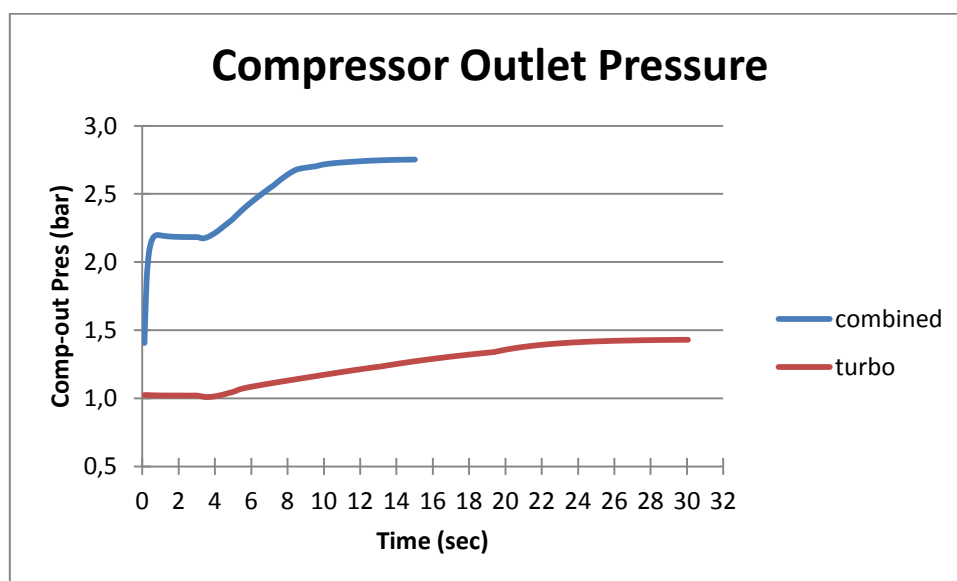
Σχήμα 6.11. Σύγκριση ταχύτητας περιστροφής του ζεύγους στροβιλο-υπερπλήρωσης συναρτήσει του χρόνου ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση



Σχήμα 6.12. Σύγκριση βαθμού απόδοσης του συμπιεστή του στροβιλο-υπερπληρωτή συναρτήσει του χρόνου ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση

Με τη σειρά του, ο συμπιεστής του ζεύγους στροβιλο-υπερπλήρωσης, λειτουργεί και εκείνος με ελαφρώς μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης (Σχήμα

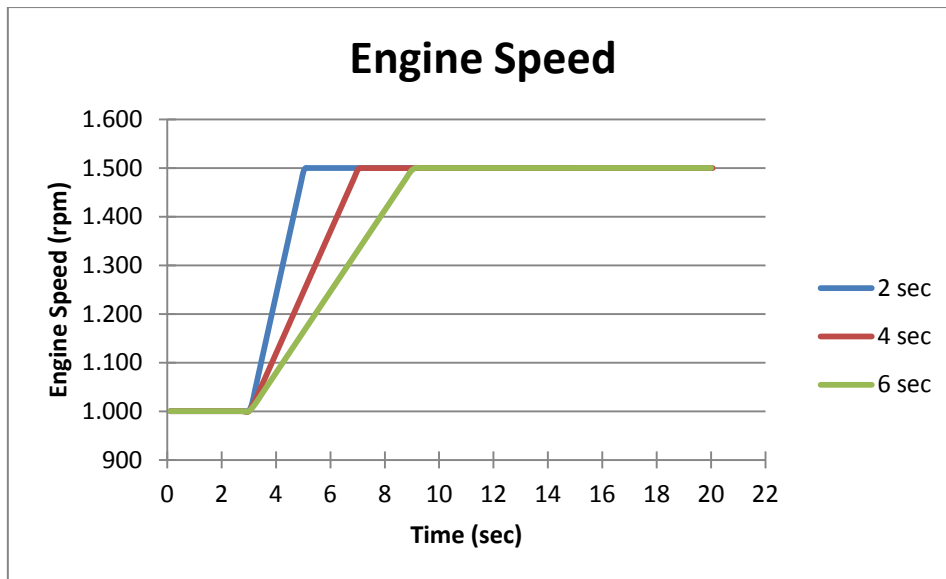
6.12), στον οποίο φτάνει πιο γρήγορα, επιτυγχάνοντας υψηλότερες πιέσεις υπερπλήρωσης (Σχήμα 6.13) και βελτιώνοντας έτσι περαιτέρω τις επιδόσεις του κινητήρα.



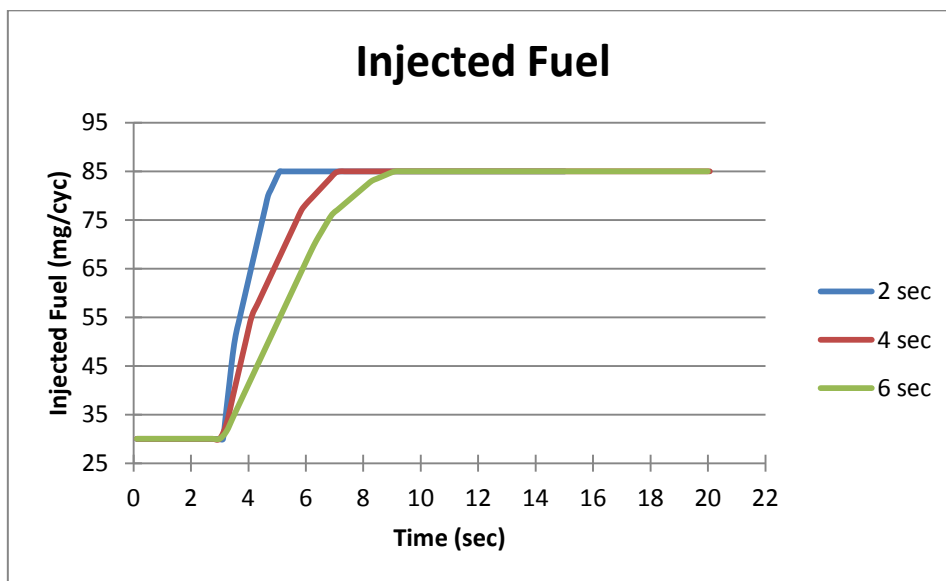
Σχήμα 6.13. Σύγκριση πίεσης του αέρα υπερπλήρωσης στην έξοδο του στροβιλο-συμπιεστή συναρτήσει του χρόνου ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση

6.1.2 Επίδραση της διάρκειας της επιτάχυνσης από τις 1000 στις 1500rpm

Έχοντας συγκρίνει την μεταβατική λειτουργία μεταξύ των συστημάτων απλής στροβιλο-υπερπλήρωσης και συνδυασμένης υπερπλήρωσης, ενδιαφέρον παρουσιάζει και η περίπτωση που η δεδομένη επιτάχυνση έχει διαφορετική διάρκεια (Σχήμα 6.14). Συγκεκριμένα, εξετάζονται διάρκειες 2, 4, και 6 δευτερολέπτων.



Σχήμα 6.14. Διαφορετικά προφίλ ταχυτήτων για επιτάχυνση του κινητήρα από τις 1000 στις 1500rpm με χρήση διάταξης συνδυασμένης υπερπλήρωσης

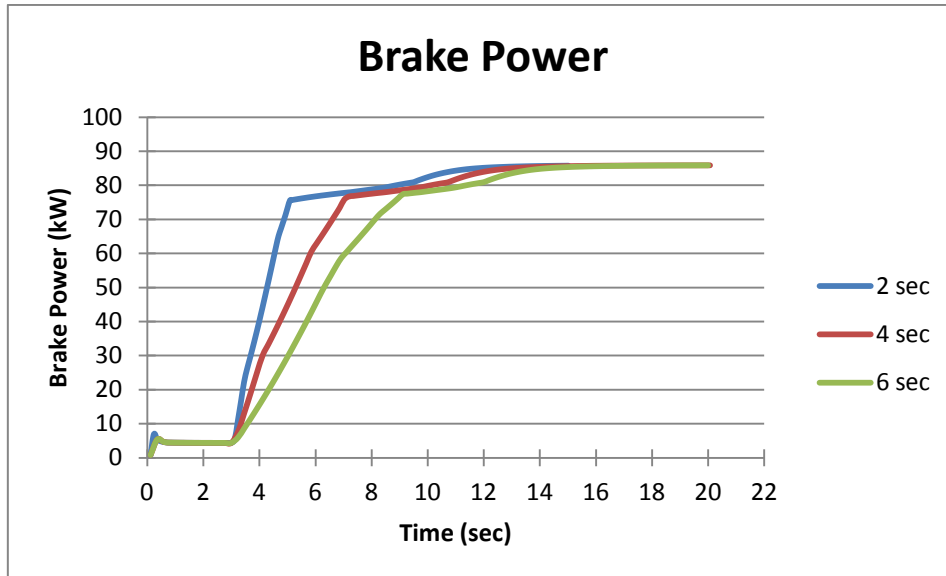


Σχήμα 6.15. Προφίλ ποσότητας εγχυόμενου καυσίμου συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές διάρκειες επιτάχυνσης με διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης

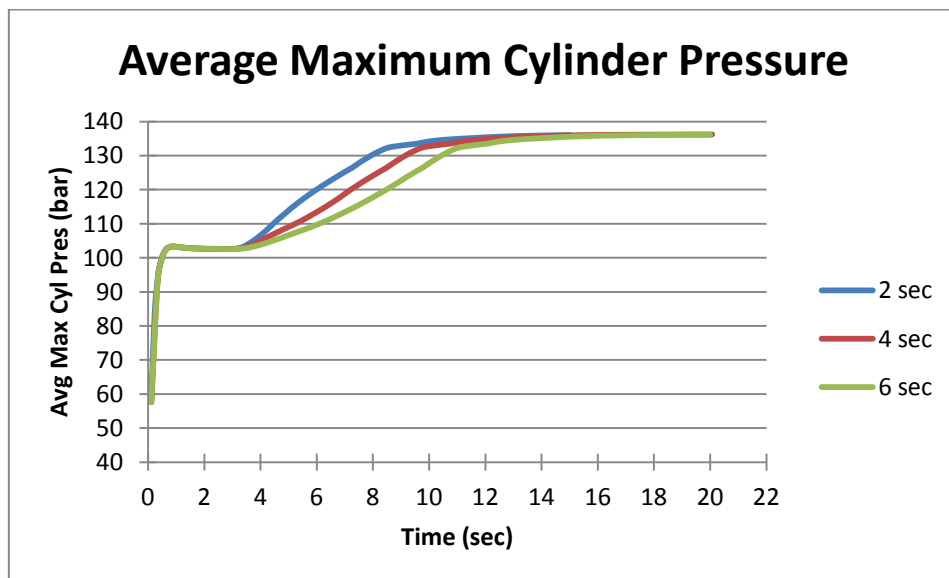
Κλιμακωτά γίνεται και η αύξηση της εγχυόμενης ποσότητας καυσίμου (Σχήμα 6.15), εντονότερη στην αρχή της επιτάχυνσης και πιο ήπια στη συνέχεια.

Το ίδιο συμβαίνει και για την ισχύ του κινητήρα (Σχήμα 6.16), με την μετάβαση να είναι πιο ομαλή στην περίπτωση που η διάρκεια της

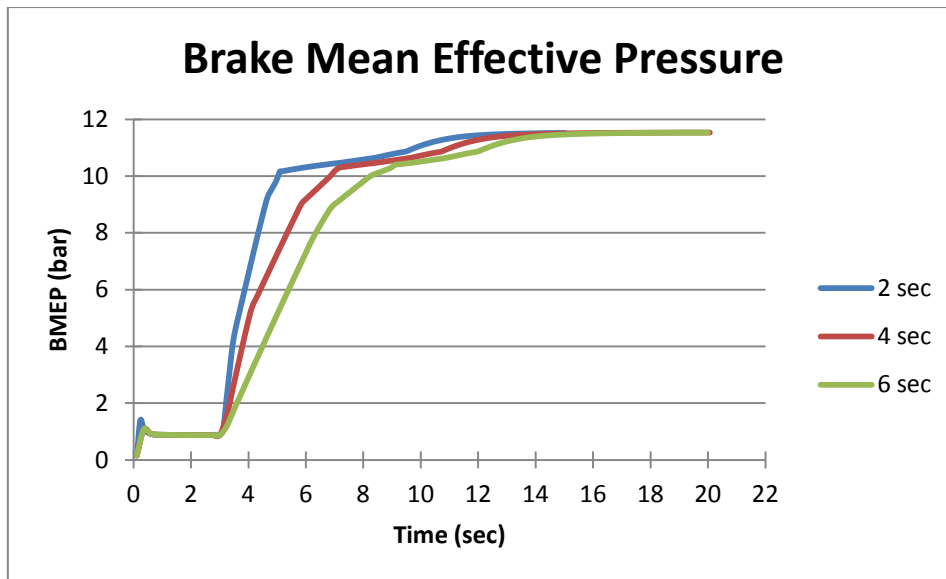
επιτάχυνσης είναι μεγαλύτερη. Παρατηρείται επίσης και στις τρεις περιπτώσεις η μικρή αύξηση της ισχύος (που εξηγήθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο) όταν ο στροβιλο-υπερπληρωτής έρχεται σε ισορροπία.



Σχήμα 6.16. Σύγκριση πραγματικής ισχύος συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές διάρκειες επιτάχυνσης με διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης

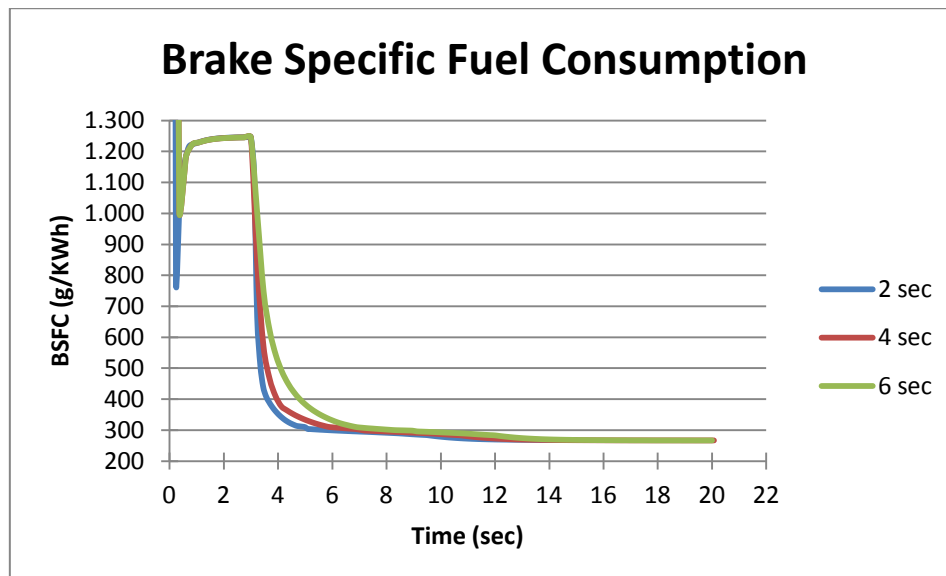


Σχήμα 6.17. Σύγκριση μέσης μέγιστης πίεσης των κυλίνδρων συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές διάρκειες επιτάχυνσης με διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης



Σχήμα 6.18. Σύγκριση μέσης πραγματικής πίεσης στους κυλίνδρους συναρτήσεως του χρόνου για διαφορετικές διάρκειες επιτάχυνσης με διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης

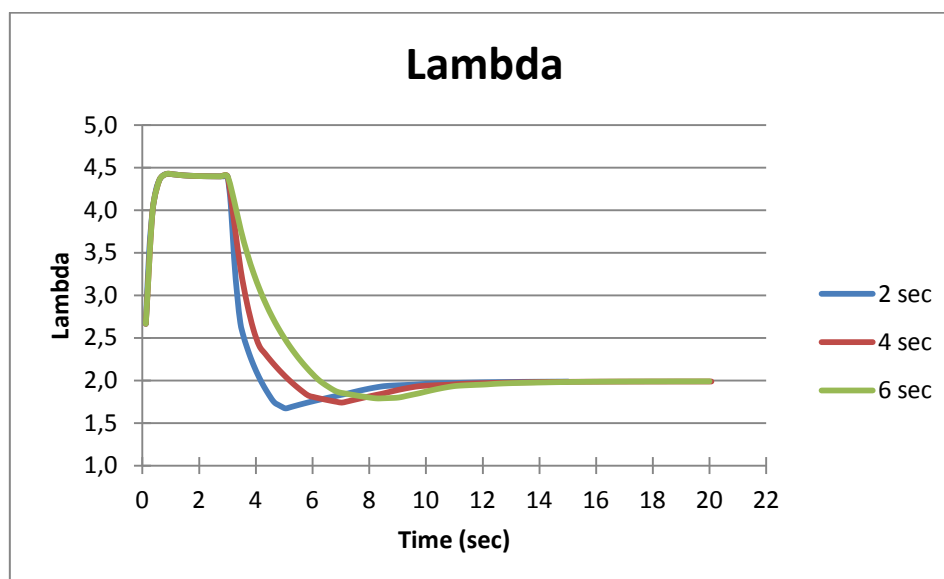
Με τον ίδιο τρόπο μεταβάλλονται η μέγιστη πίεση στους κυλίνδρους και η μέση πίεση λειτουργίας του κινητήρα, όπως φαίνεται στα παραπάνω αντίστοιχα διαγράμματα (Σχήματα 6.17 και 6.18).



Σχήμα 6.19. Σύγκριση μέσης ειδικής κατανάλωσης καυσίμου συναρτήσεως του χρόνου για διαφορετικές διάρκειες επιτάχυνσης με διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης

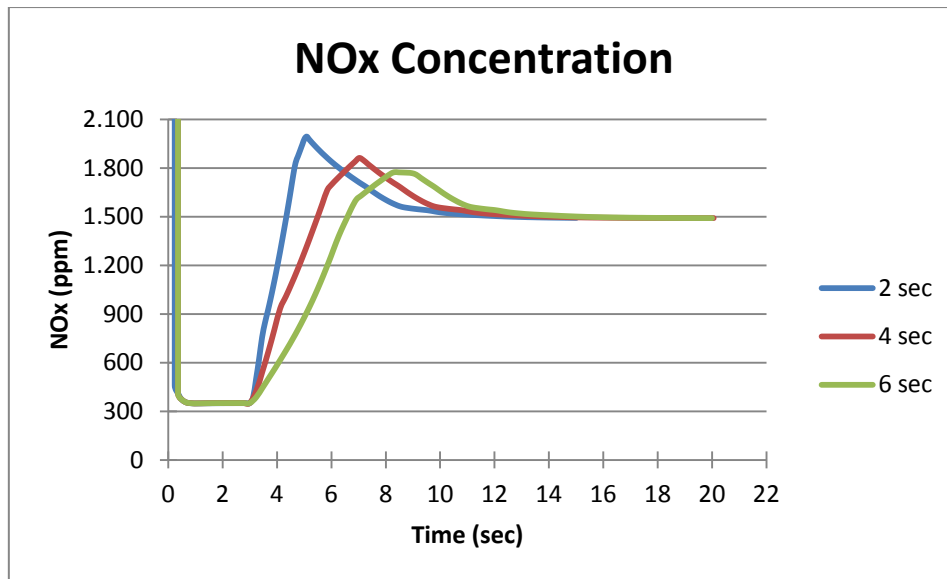
Η ειδική κατανάλωση καυσίμου (Σχήμα 6.19) είναι πρακτικά η ίδια για τις τρεις περιπτώσεις, με μόνη διαφορά την πιο ομαλή μετάβαση όσο ο χρόνος της επιτάχυνσης αυξάνεται. Για το λόγο αυτό, ίσως η γρηγορότερη επιτάχυνση να διαθέτει πλεονέκτημα, αφού επιφέρει γρηγορότερη πτώση στην ειδική κατανάλωση.

Αυτό όμως δεν ισχύει όταν αναφερόμαστε στις εκπομπές καυσαερίων. Εντονότερη επιτάχυνση οδηγεί σε μικρότερους λόγους ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου (εξαιτίας της υστέρησης του στροβιλο-υπερπληρωτή), οι οποίοι συνεπάγονται αύξηση εκπομπών σωματιδίων αιθάλης. Ευτυχώς, στην περίπτωση της συνδυασμένης υπερπλήρωσης ο λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου (Σχήμα 6.20) είναι αρκετά μεγάλος (τιμές άνω του 1,5), ώστε το πρόβλημα αυτό της επιτάχυνσης να περιορίζεται σε ικανοποιητικό βαθμό.



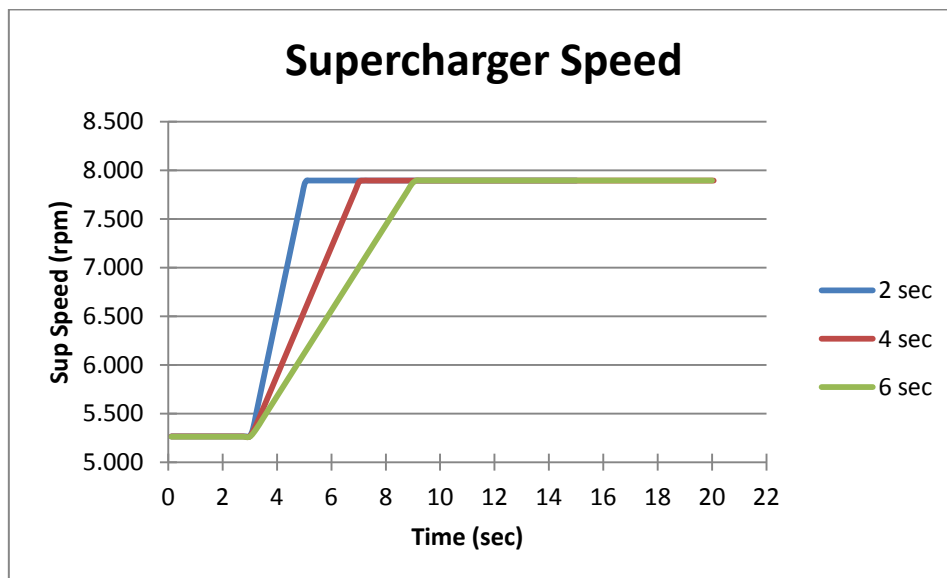
Σχήμα 6.20. Σύγκριση λόγου ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές διάρκειες επιτάχυνσης με διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης

Παρόμοια είναι τα συμπτώματα και στην περίπτωση των οξειδίων του αζώτου NOx (Σχήμα 6.21), όπου γρηγορότερη επιτάχυνση οδηγεί σε αύξηση της συγκέντρωσής τους στα καυσαέρια του κινητήρα.



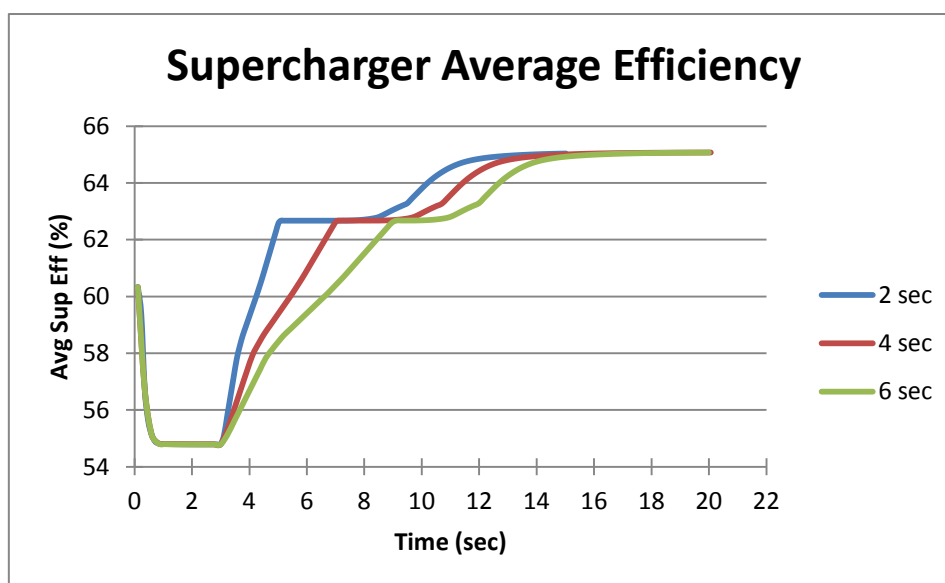
Σχήμα 6.21. Σύγκριση συγκέντρωσης οξειδίων του αζώτου NOx στα καυσαέρια συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές διάρκειες επιτάχυνσης με διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης

Η επιτάχυνση του κινητήρα, προφανώς επιταχύνει και τον μηχανικό συμπιεστή. Η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του δεύτερου θα είναι επίσης γραμμική (Σχήμα 6.22), εξαιτίας της σταθερής σχέσης μετάδοσης που χρησιμοποιείται και θα διαρκεί ακριβώς όσο και η επιτάχυνση του κινητήρα.



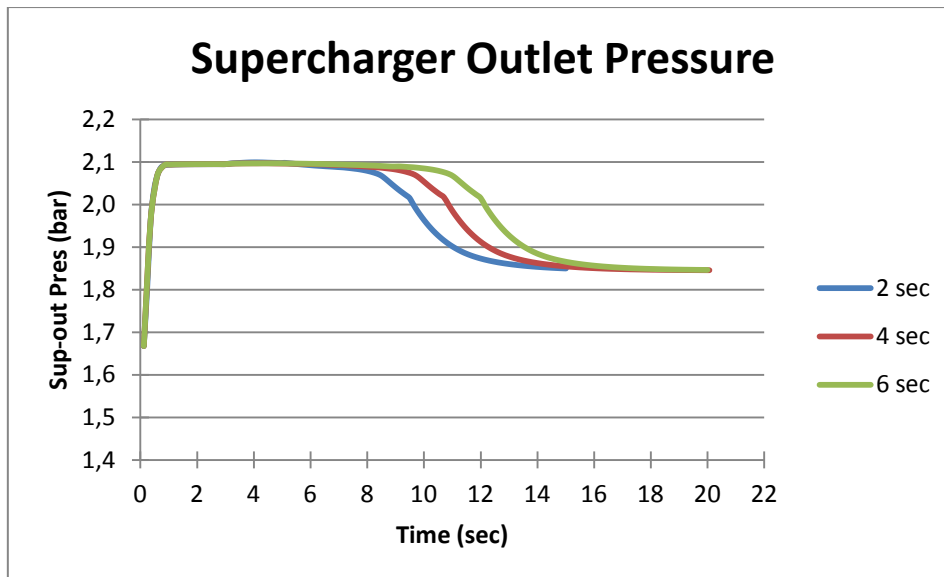
Σχήμα 6.22. Διαφορετικά προφίλ της ταχύτητας περιστροφής του μηχανικού συμπιεστή συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές διάρκειες επιτάχυνσης με διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης

Αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του μηχανικού κοχλιοειδούς συμπιεστή θετικής εκτόπισης τύπου Lysholm LYS 2300 AX (ο χάρτης του οποίου έχει χρησιμοποιηθεί στην συγκεκριμένη εφαρμογή) συνεπάγεται, για το συγκεκριμένο εύρος στροφών, βελτίωση του βαθμού απόδοσής του (Σχήμα 6.23). Επιπροσθέτως, μια επιπλέον βελτίωση σημειώνεται λίγα δευτερόλεπτα μετά την σταθεροποίηση του στην τελική ταχύτητα περιστροφής, όταν θα έρθει σε ισορροπία και ο στροβιλο-υπερπληρωτής, αφού οι δύο συμπιεστές (μηχανικός και στροβιλο-συμπιεστής) θα συνεργάζονται καλύτερα για την υπερπλήρωση του κινητήρα.

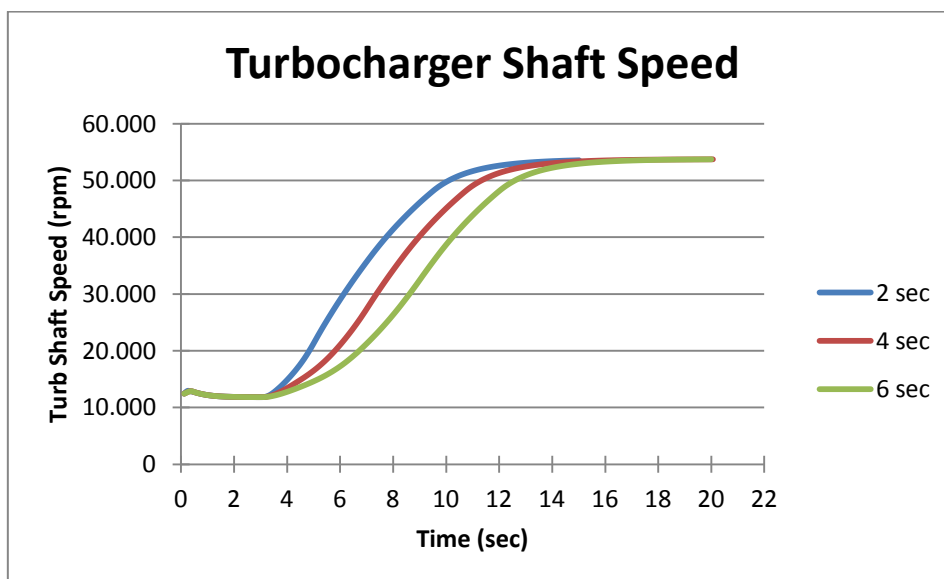


Σχήμα 6.23. Σύγκριση βαθμού απόδοσης του μηχανικού συμπιεστή συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές διάρκειες επιτάχυνσης με διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης

Αυτή η καλύτερη συνεργασία έχει αντίκτυπο και στην πίεση του αέρα στην έξοδο του μηχανικού συμπιεστή (Σχήμα 6.24), η οποία ελαττώνεται ελαφρά, καθώς η παροχή του αέρα μέσω του συμπιεστή στροβιλο-υπερπλήρωσης διευκολύνεται από την υψηλότερη ταχύτητα περιστροφής που αποκτά το ζεύγος (Σχήμα 6.25).

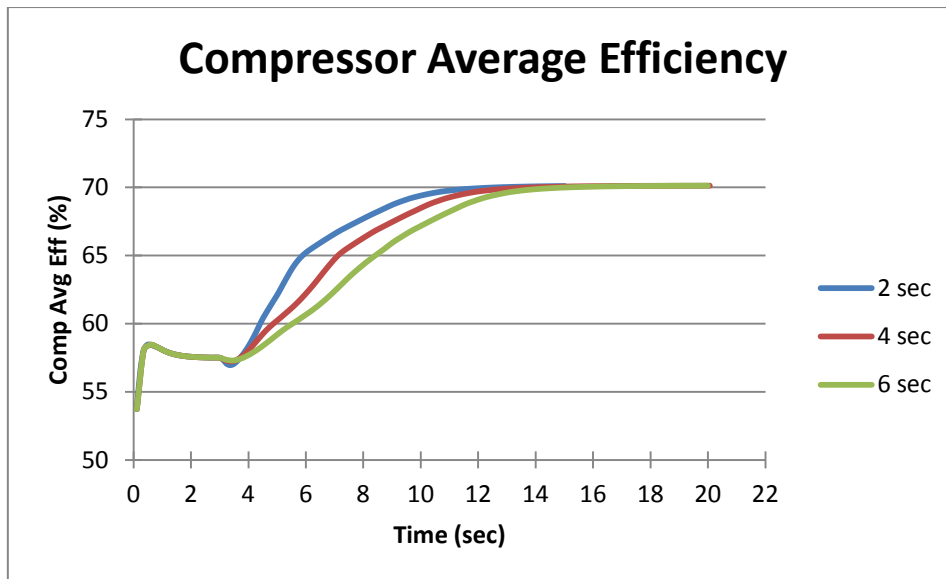


Σχήμα 6.24. Σύγκριση πίεσης του αέρα υπερπλήρωσης στην έξοδο του μηχανικού συμπιεστή συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές διάρκειες επιτάχυνσης με διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης

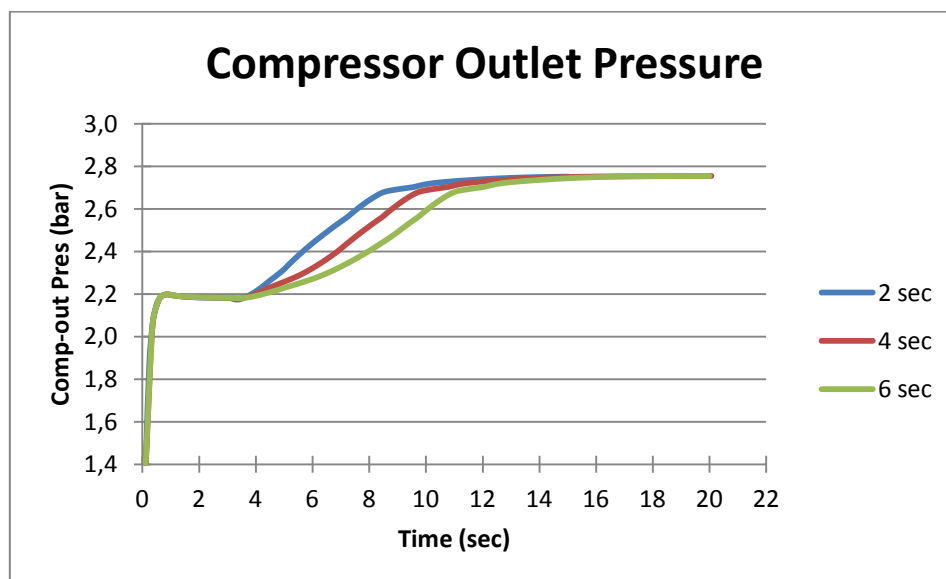


Σχήμα 6.25. Σύγκριση ταχύτητας περιστροφής του ζεύγους στροβιλο-υπερπλήρωσης συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές διάρκειες επιτάχυνσης με διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης

Η επιτάχυνση του ζεύγους στροβιλο-υπερπλήρωσης οδηγεί σε αύξηση του βαθμού απόδοσης του συμπιεστή και της συνολικής πίεσης υπερπλήρωσης του κινητήρα, όπως παριστάνεται στα επόμενα διαγράμματα (Σχήματα 6.26 και 6.27, αντίστοιχα).



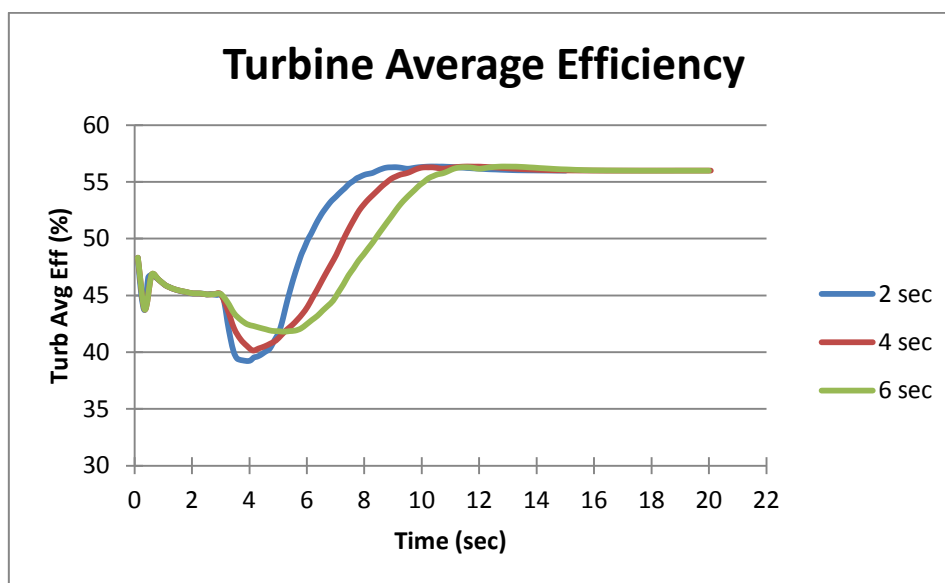
Σχήμα 6.26. Σύγκριση βαθμού απόδοσης του συμπιεστή του στροβιλο-υπερπληρωτή συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές διάρκειες επιτάχυνσης με διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης



Σχήμα 6.27. Σύγκριση πίεσης του αέρα υπερπλήρωσης στην έξοδο του συμπιεστή του στροβιλο-υπερπληρωτή συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές διάρκειες επιτάχυνσης με διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενες παραγράφους, η αύξηση στις πιέσεις και η επιτάχυνση του κινητήρα, είναι αυτές που θα παράγουν επιπλέον καυσαέριο μεγαλύτερης πίεσης, το οποίο θα εκτονωθεί στο

στρόβιλο του στροβιλο-υπερπληρωτή. Έτσι, όπως φαίνεται παρακάτω, στο Σχήμα 6.28, η απόδοση του στροβίλου θα βελτιωθεί και θα οδηγήσει στα αποτελέσματα που αναφέρθηκαν ήδη για τον συμπιεστή του ζεύγους. Σημειώνεται όμως και εδώ η υστέρηση του στροβιλο-υπερπληρωτή, με μία μικρή αρχική πτώση στην απόδοση του στροβίλου κατά την έναρξη της επιτάχυνσης, η οποία παρατηρείται εντονότερη όσο πιο απότομη είναι η επιτάχυνση. Προφανώς, η αδράνεια του ζεύγους αντιμετωπίζεται καλύτερα με πιο ομαλές μεταβολές στην κινητική κατάσταση των μερών του.

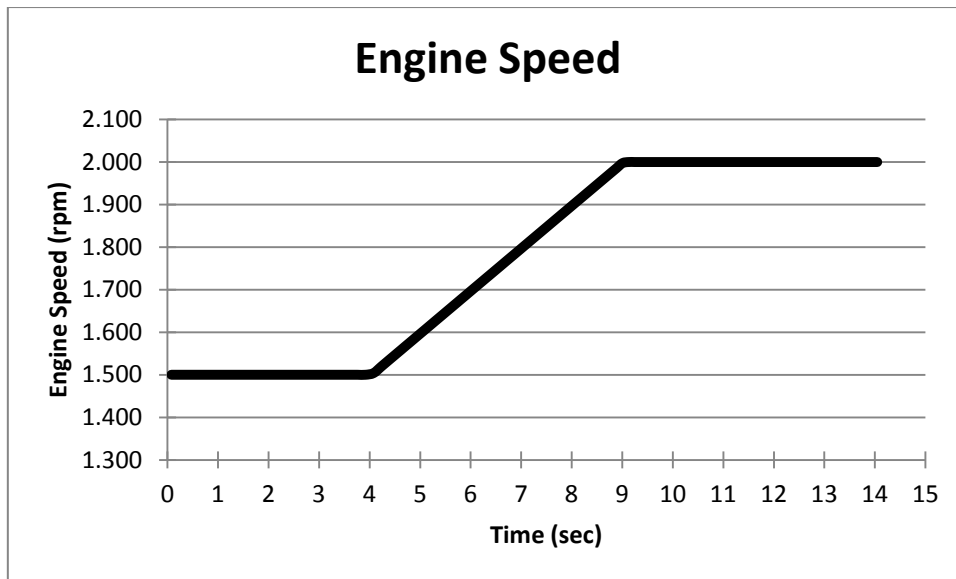


Σχήμα 6.28. Σύγκριση βαθμού απόδοσης του στροβίλου του στροβιλο-υπερπληρωτή συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές διάρκειες επιτάχυνσης με διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης

6.2 Επιτάχυνση από τις 1500 στις 2000rpm

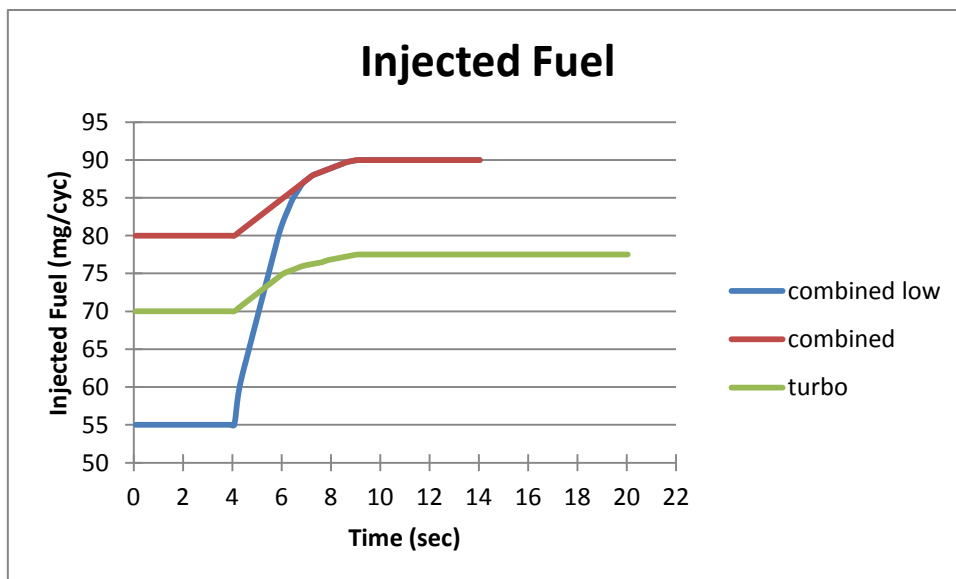
6.2.1 Σύγκριση μεταξύ απλής στροβιλο-υπερπλήρωσης και συνδυασμένης υπερπλήρωσης

Στο σενάριο αυτό συγκρίνουμε την επίδοση των δύο διατάξεων υπερπλήρωσης στην περίπτωση επιτάχυνσης του κινητήρα από τις 1500 στις 2000rpm σε χρονικό διάστημα 5 δευτερολέπτων (Σχήμα 6.29).



Σχήμα 6.29. Το προφίλ της ταχύτητας για το σενάριο της επιτάχυνσης του κινητήρα από τις 1500 στις 2000rpm και τη σύγκριση ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση

Εξετάζουμε εδώ μία επιπλέον περίπτωση, στην οποία το αρχικό φορτίο του κινητήρα είναι αρκετά χαμηλότερο.

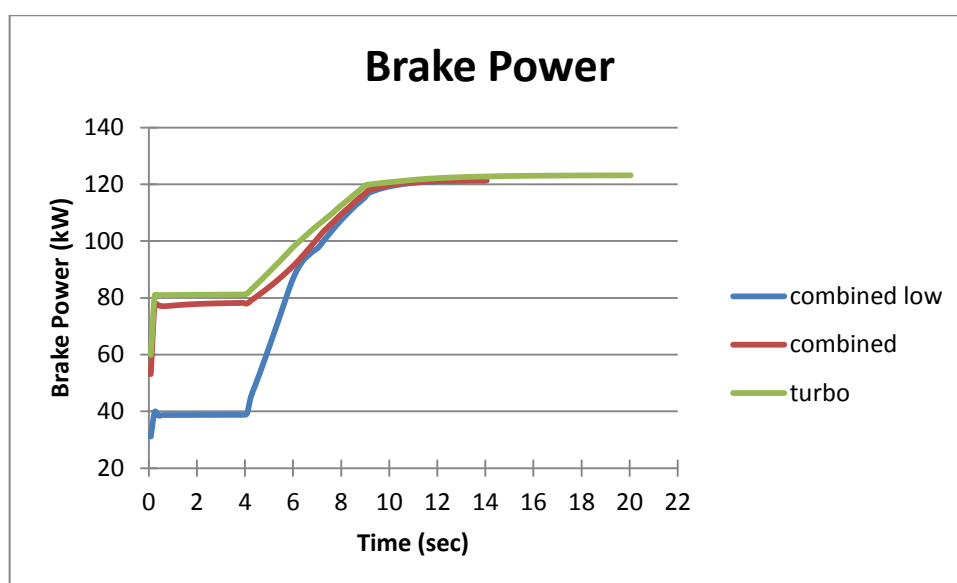


Σχήμα 6.30. Σύγκριση ποσότητας εγχυόμενου καυσίμου συναρτήσει του χρόνου ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση

Στο διάγραμμα του εγχυόμενου καυσίμου (Σχήμα 6.30) βλέπουμε ξεκάθαρα την περίπτωση λειτουργίας του κινητήρα με τη διάταξη της συνδυασμένης υπερπλήρωσης σε χαμηλό φορτίο, καθώς επίσης και τη

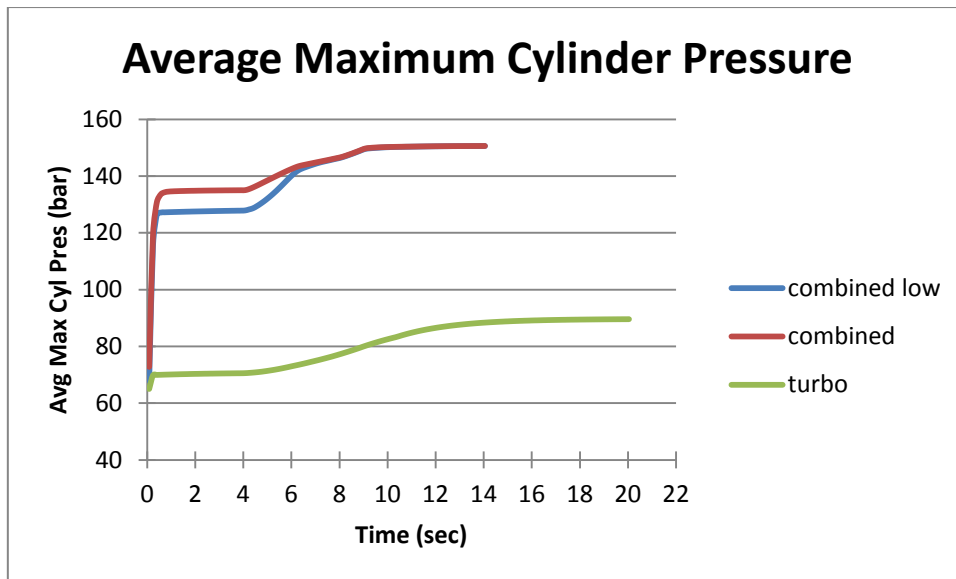
δυνατότητα έγχυσης μεγαλύτερης ποσότητας καυσίμου που μας επιτρέπει η μεγαλύτερη πίεση του αέρα εισαγωγής, σε σχέση με την απλή στροβιλο-υπερπλήρωση.

Από το Σχήμα 6.31, βλέπουμε ότι και στις τρεις περιπτώσεις η αύξηση στην ισχύ είναι άμεση, με γρήγορη σταθεροποίηση στην τελική της τιμή. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι η τελική ισχύς για τη συνδυασμένη υπερπλήρωση είναι ελαφρώς μικρότερη, πράγμα που οφείλεται στην χαμηλή πλέον απόδοση του μηχανικού συμπιεστή στις 2000rpm (μετά τις οποίες είναι προγραμματισμένος να αποσυμπλέκεται από τον κινητήρα), ενώ ταυτόχρονα απορροφά ισχύ από τη στροφαλοφόρο άτρακτο για την λειτουργία του.

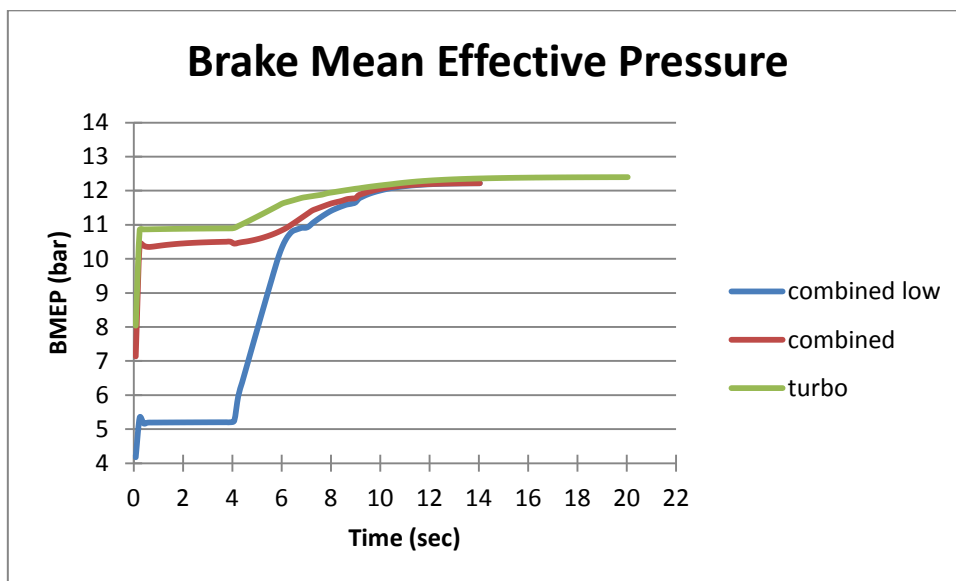


Σχήμα 6.31. Σύγκριση πραγματικής ισχύος συναρτήσει του χρόνου ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση

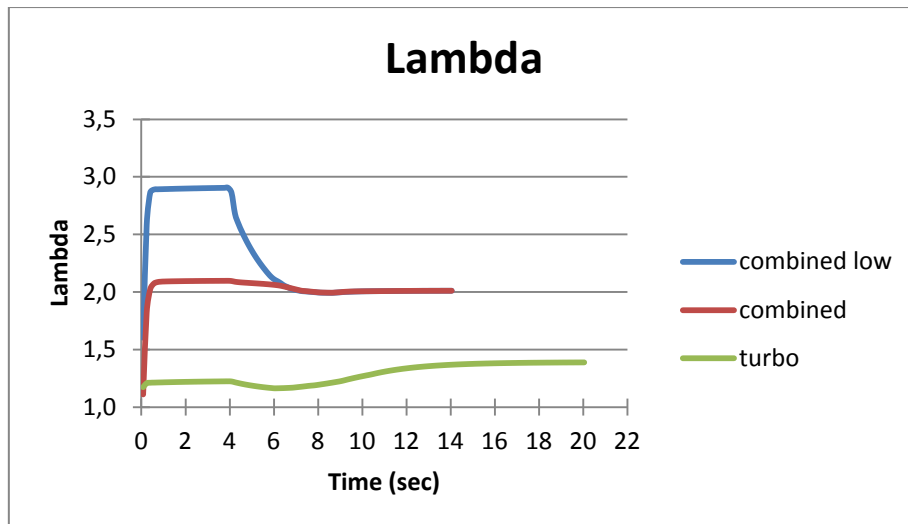
Η μέγιστη πίεση στους κυλίνδρους (Σχήμα 6.32) παραμένει σαφώς υψηλότερη με το σύστημα συνδυασμένης υπερπλήρωσης, αν και, η μέση πραγματική πίεση του κινητήρα (Σχήμα 6.33) κυμαίνεται σε παρόμοια επίπεδα, με την απλή στροβιλο-υπερπλήρωση μάλιστα να υπερτερεί ελαφρώς.



Σχήμα 6.32. Σύγκριση μέσης μέγιστης πίεσης των κυλίνδρων συναρτήσει του χρόνου ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση

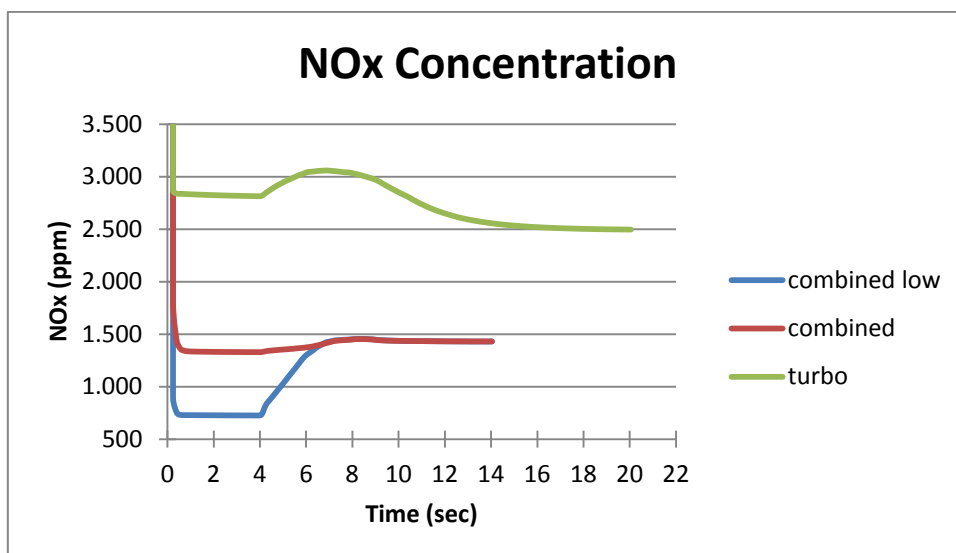


Σχήμα 6.33. Σύγκριση μέσης πραγματικής πίεσης στους κυλίνδρους συναρτήσει του χρόνου ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση



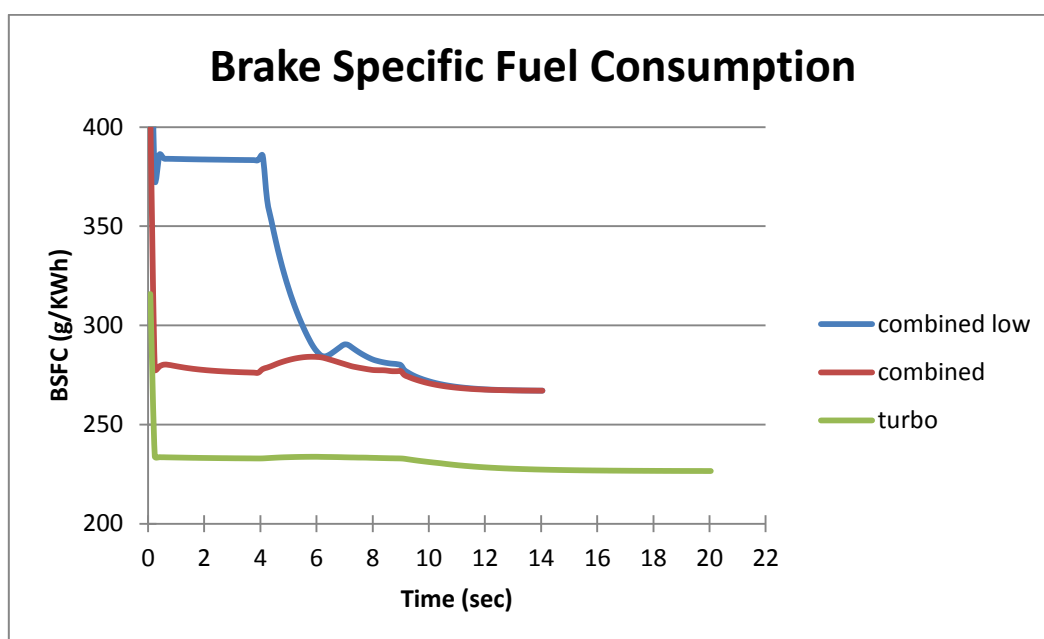
Σχήμα 6.34. Σύγκριση λόγου ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου συναρτήσει του χρόνου ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση

Έτσι, ακόμα και με περισσότερο καύσιμο, ο λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου (Σχήμα 6.34) παραμένει σημαντικά μεγαλύτερος, ενώ στο μοντέλο απλής στροβιλο-υπερπλήρωσης εξακολουθεί να βρίσκεται επικίνδυνα κοντά στη μονάδα (στοιχειομετρική καύση), πράγμα που συνεπάγεται αυξημένες εκπομπές σωματιδίων αιθάλης (καπνού) και οξειδίων του αζώτου NO_x (υδρογονανθράκων και αιθάλης επίσης), όπως καταγράφεται στο Σχήμα 6.35, ιδιαίτερα κατά την διάρκεια της επιτάχυνσης.



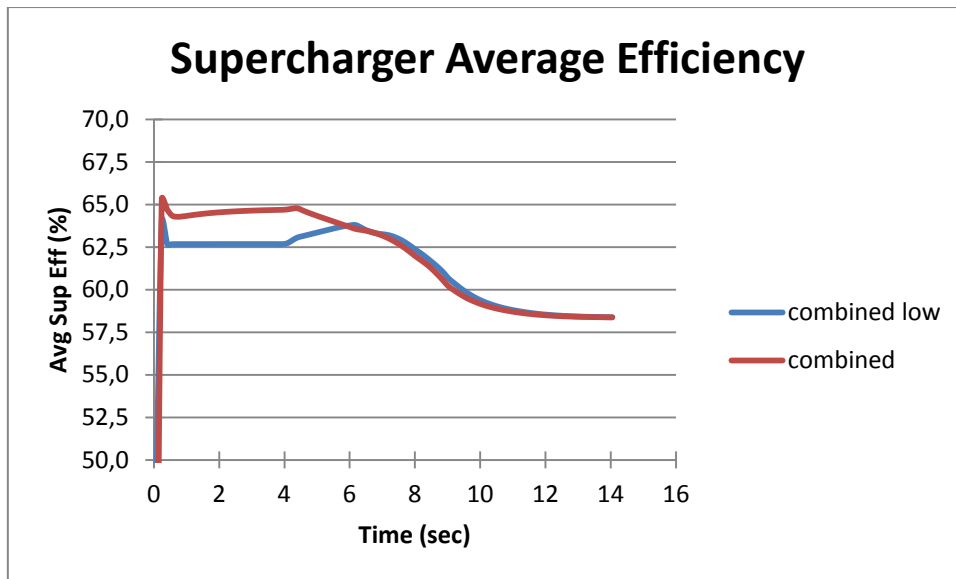
Σχήμα 6.35. Σύγκριση συγκέντρωσης οξειδίων του αζώτου NO_x στα καυσαέρια συναρτήσει του χρόνου ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της απλής στροβιλο-υπερπλήρωσης αφορά στην σημαντικά χαμηλότερη ειδική κατανάλωση καυσίμου (Σχήμα 6.36), γεγονός που δικαιολογείται πλήρως, αφού, όπως είδαμε, ο κινητήρας σε αυτή την περίπτωση παράγει την ίδια πρακτικά ισχύ (ή και ελαφρώς μεγαλύτερη), με έγχυση σαφώς μικρότερης ποσότητας καυσίμου. Είναι ξεκάθαρο ότι ο μηχανικός συμπιεστής της διάταξης της συνδυασμένης υπερπλήρωσης έχει πλέον (στις 2000rpm) αρχίσει να επιβαρύνει τη λειτουργία του κινητήρα.

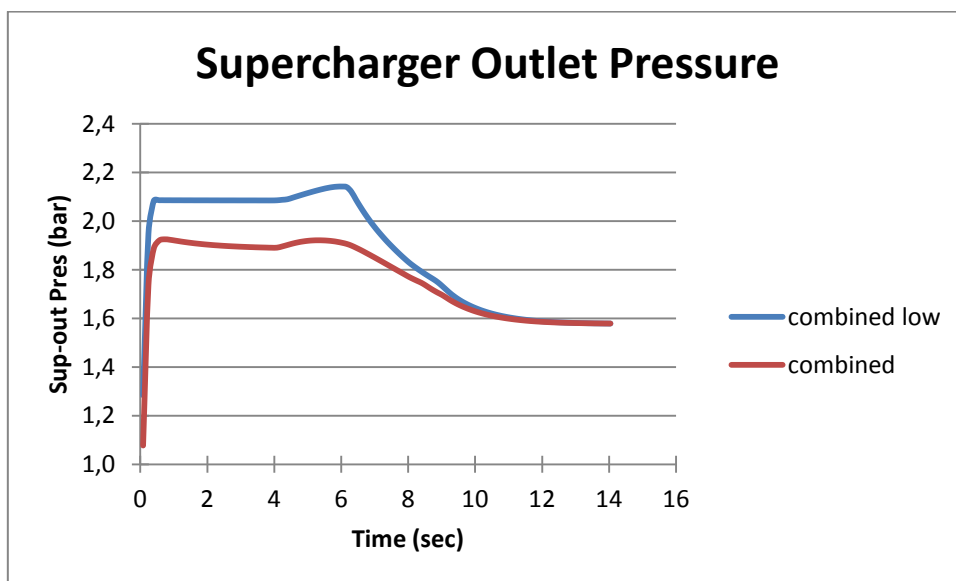


Σχήμα 6.36. Σύγκριση ειδικής κατανάλωσης καυσίμου συναρτήσει του χρόνου ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση

Πράγματι, στα επόμενα διαγράμματα είναι φανερό ότι τόσο η απόδοση (Σχήμα 6.37) όσο και η πίεση εξόδου του αέρα από το μηχανικό συμπιεστή (Σχήμα 6.38) έχουν ελαττωθεί αισθητά. Ο μηχανικός συμπιεστής πλησιάζει στο όριο της λειτουργίας του και η αποσύμπλεξη του από τον κινητήρα μετά τις 2000rpm επιβάλλεται.



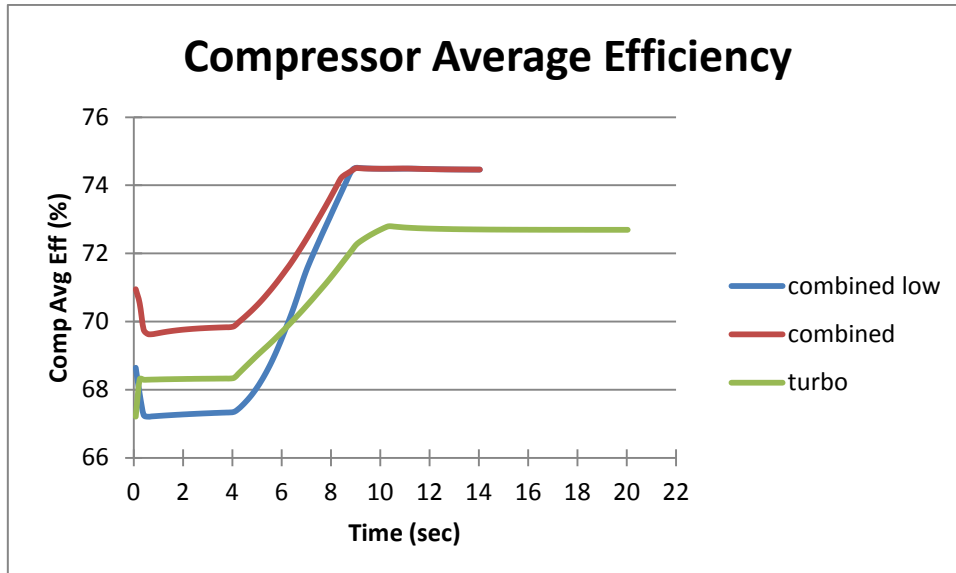
Σχήμα 6.37. Σύγκριση βαθμού απόδοσης του μηχανικού συμπιεστή συναρτήσει του χρόνου ανάμεσα σε περιπτώσεις υπερπλήρωσης με χαμηλό και υψηλό αρχικό φορτίο λειτουργίας



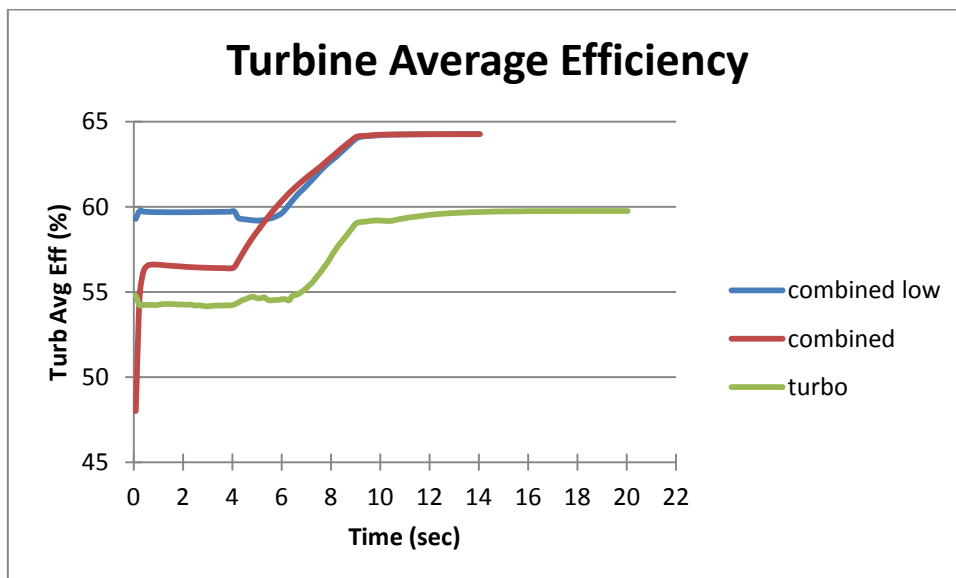
Σχήμα 6.38. Σύγκριση πίεσης αέρα υπερπλήρωσης στην έξοδο του μηχανικού συμπιεστή συναρτήσει του χρόνου ανάμεσα σε περιπτώσεις υπερπλήρωσης με χαμηλό και υψηλό αρχικό φορτίο λειτουργίας

Αντίθετα, ο στροβιλο-υπερπληρωτής, σε αυτό το εύρος στροφών (1500-2000rpm), δέχεται πλέον αρκετά μεγάλη παροχή καυσαερίων υψηλής πίεσης, ώστε να μπορεί να λειτουργήσει αποδοτικά από μόνος του. Τόσο ο συμπιεστής όσο και ο στρόβιλος του ζεύγους έχουν υψηλούς βαθμούς

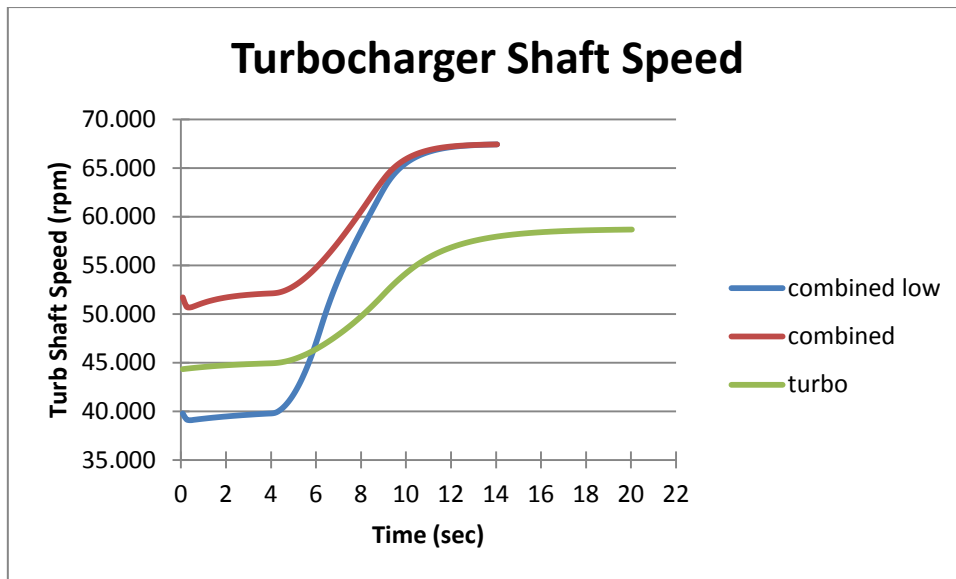
απόδοσης (Σχήματα 6.39 και 6.40, αντίστοιχα), με τις περιπτώσεις της συνδυασμένης υπερπλήρωσης να βρίσκονται σε ελαφρώς υψηλότερα επίπεδα, χάρη στην μεγαλύτερη πίεση του αέρα εισαγωγής και των καυσαερίων στην εισαγωγή του συμπιεστή και του στροβίλου αντίστοιχα.



Σχήμα 6.39. Σύγκριση βαθμού απόδοσης του συμπιεστή στροβιλο-υπερπλήρωσης συναρτήσει του χρόνου ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση

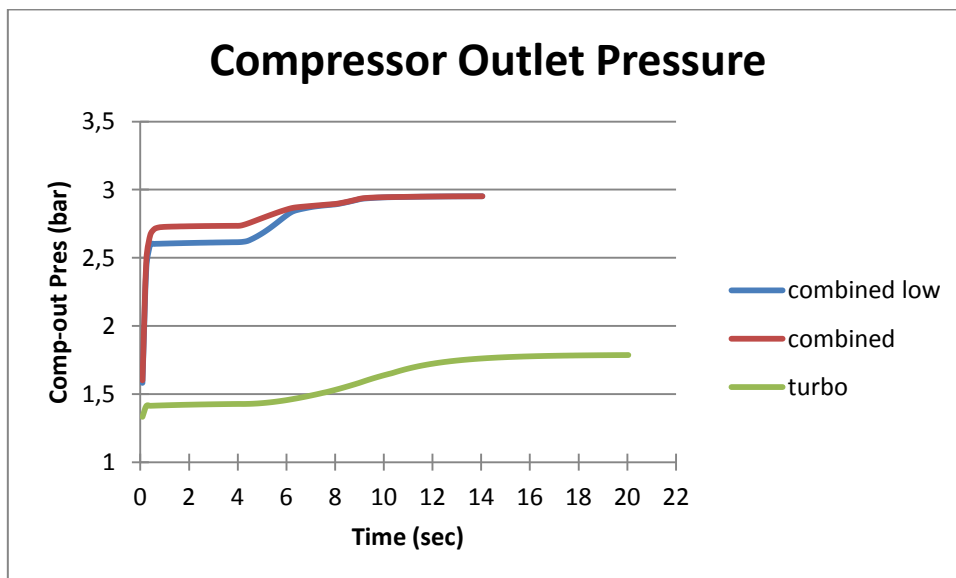


Σχήμα 6.40. Σύγκριση βαθμού απόδοσης του στροβίλου του στροβιλο-υπερπληρωτή συναρτήσει του χρόνου ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση



Σχήμα 6.41. Σύγκριση ταχύτητας περιστροφής του ζεύγους στροβιλο-υπερπλήρωσης συναρτήσει του χρόνου ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση

Το πρόβλημα της καθυστερημένης μεταβατικής λειτουργίας είναι επίσης αρκετά μειωμένο, με την επιτάχυνση του ζεύγους να γίνεται πρακτικά άμεσα, πιο γρήγορα στις περιπτώσεις της συνδυασμένης υπερπλήρωσης (Σχήμα 6.41).

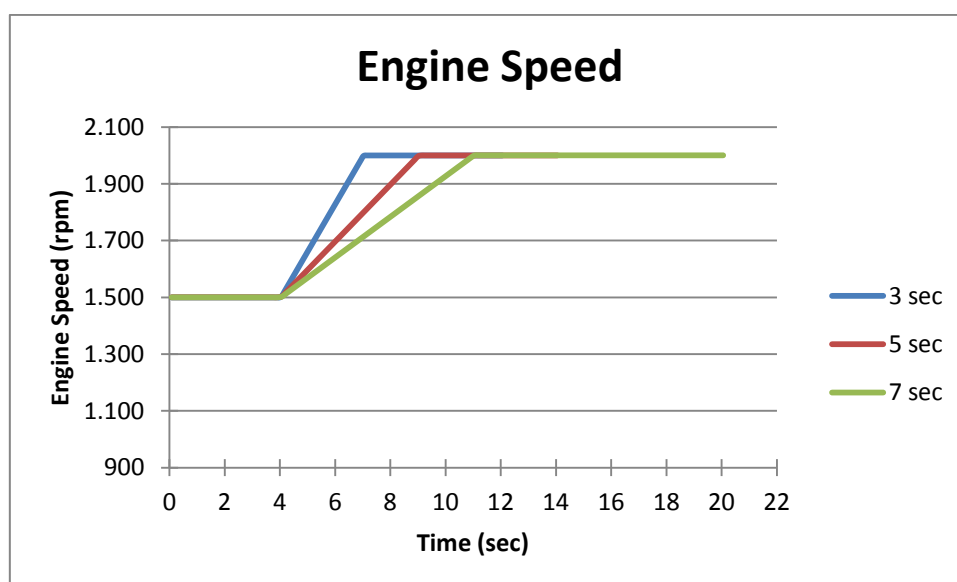


Σχήμα 6.42. Σύγκριση πίεσης του αέρα υπερπλήρωσης στην έξοδο του στροβιλο-συμπιεστή συναρτήσει του χρόνου ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση

Τέλος, χάρη στη συνδυασμένη υπερπλήρωση, όπου οι λόγοι πίεσης των δύο συμπιεστών (μηχανικού και στροβιλο-συμπιεστή) πολλαπλασιάζονται, η πίεση του αέρα υπερπλήρωσης στην εισαγωγή του κινητήρα είναι υψηλότερη συγκριτικά με αυτή της απλής στροβιλο-υπερπλήρωσης (Σχήμα 6.42).

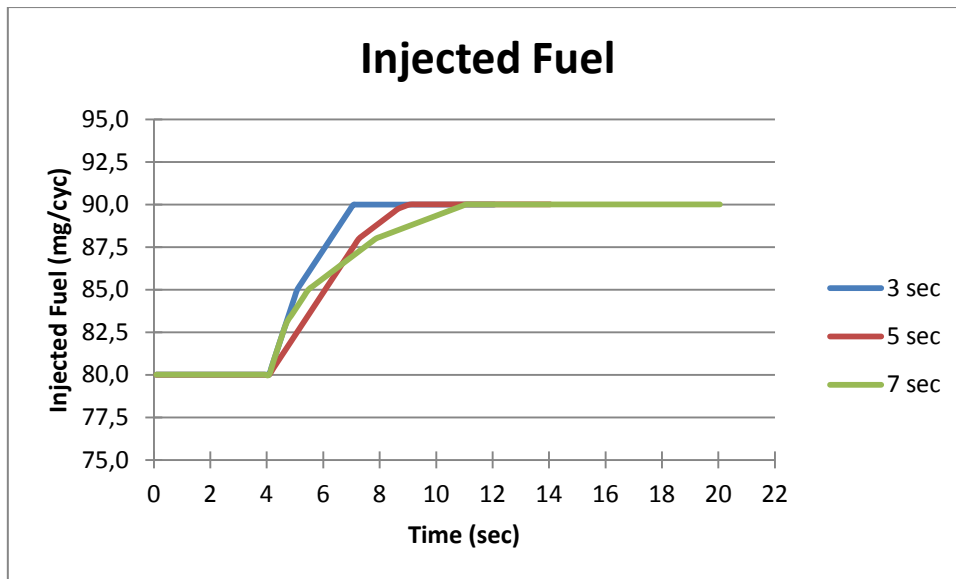
6.2.2 Επίδραση της διάρκειας της επιτάχυνσης από τις 1500 στις 2000rpm

Όπως και στο προηγούμενο (παράγραφος 6.1.2), έτσι και σε αυτό το σενάριο προσομοίωσης, συγκρίνουμε την γραμμική επιτάχυνση του κινητήρα με συνδυασμένη υπερπλήρωση από τις 1500 στις 2000rpm για διαφορετικές διάρκειες επιτάχυνσης, συγκεκριμένα 3, 5 και 7 δευτερόλεπτα, στοιχείο που περιγράφει τον τρόπο οδήγησης (drive aggressiveness) (Σχήμα 6.43).

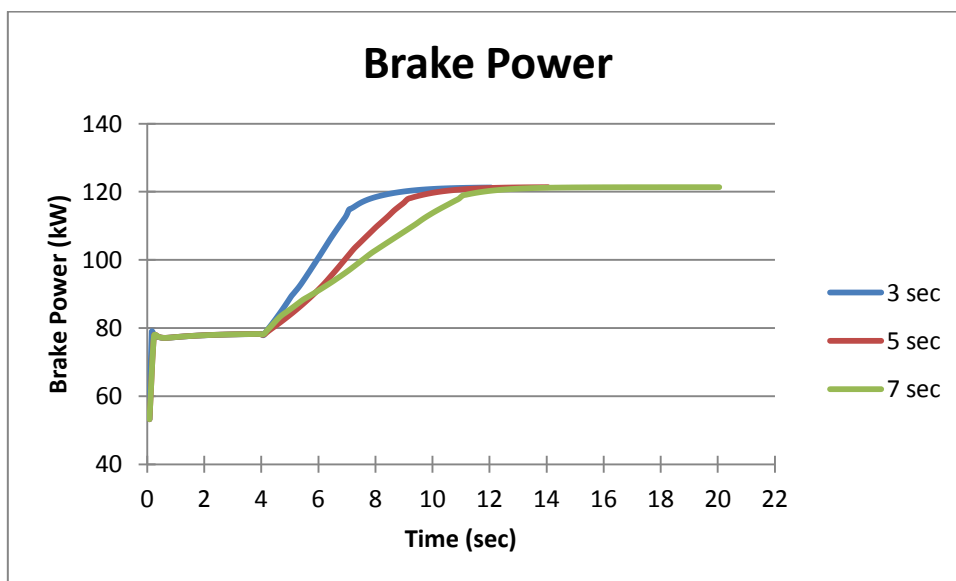


Σχήμα 6.43. Διαφορετικά προφίλ ταχυτήτων για επιτάχυνση του κινητήρα από τις 1500 στις 2000rpm με χρήση διάταξης συνδυασμένης υπερπλήρωσης

Η αύξηση της ποσότητας του εγχυόμενου καυσίμου διαρκεί όσο και η επιτάχυνση, ενώ γίνεται στην αρχή με μεγαλύτερο ρυθμό και στη συνέχεια πιο ομαλά (Σχήμα 6.44), όσο πιο απότομη είναι η επιτάχυνση.

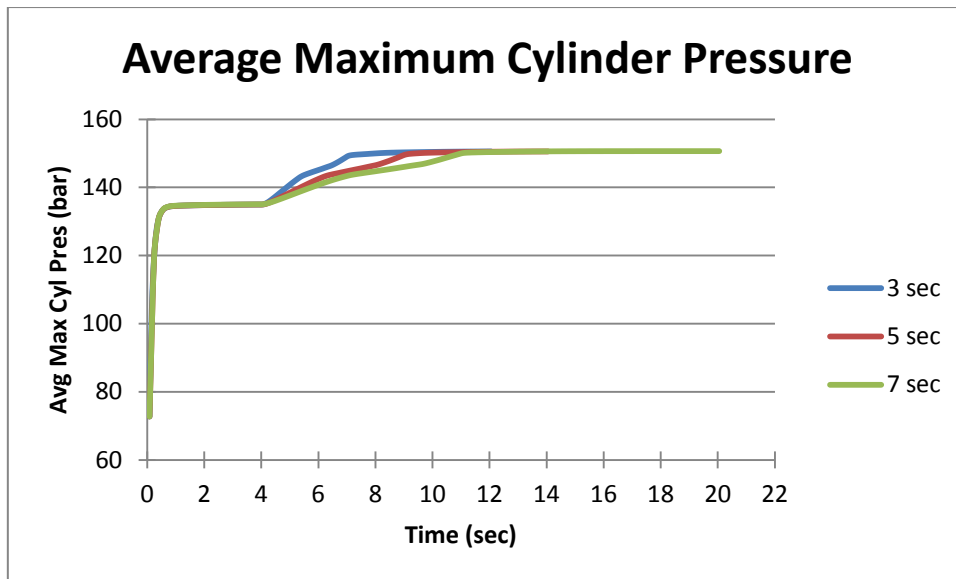


Σχήμα 6.44. Προφίλ ποσότητας εγχυόμενου καυσίμου συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές διάρκειες επιτάχυνσης με διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης

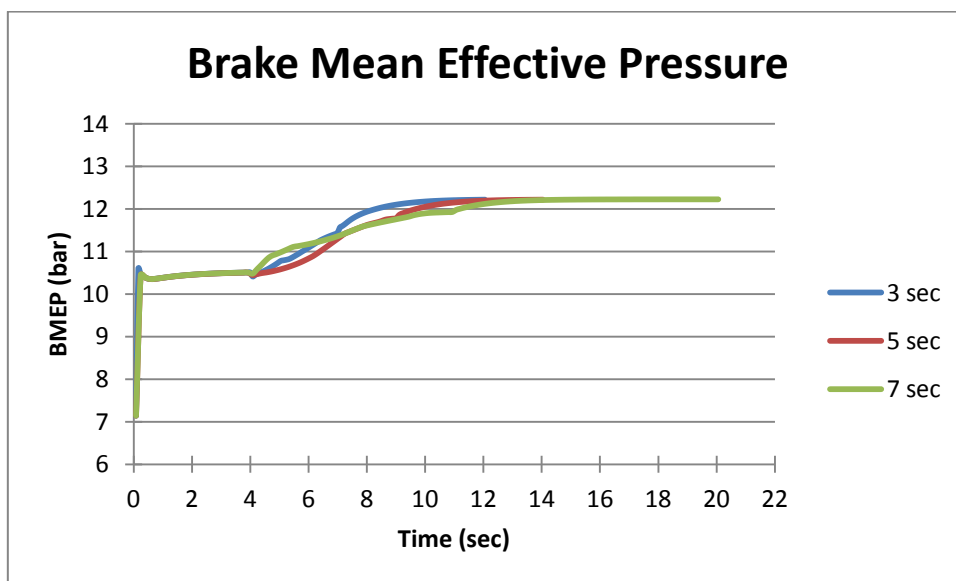


Σχήμα 6.45. Σύγκριση πραγματικής ισχύος συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές διάρκειες επιτάχυνσης με διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης

Παρατηρούμε ότι η παραγόμενη από τον κινητήρα ισχύς (Σχήμα 6.45) αυξάνεται σχεδόν γραμμικά, ιδιαίτερα στην περίπτωση της επιτάχυνσης σε επτά δευτερόλεπτα, όπως περίπου συμβαίνει και με την μέγιστη και μέση πραγματική πίεση στους κυλίνδρους (Σχήματα 6.46 και 6.47, αντίστοιχα).

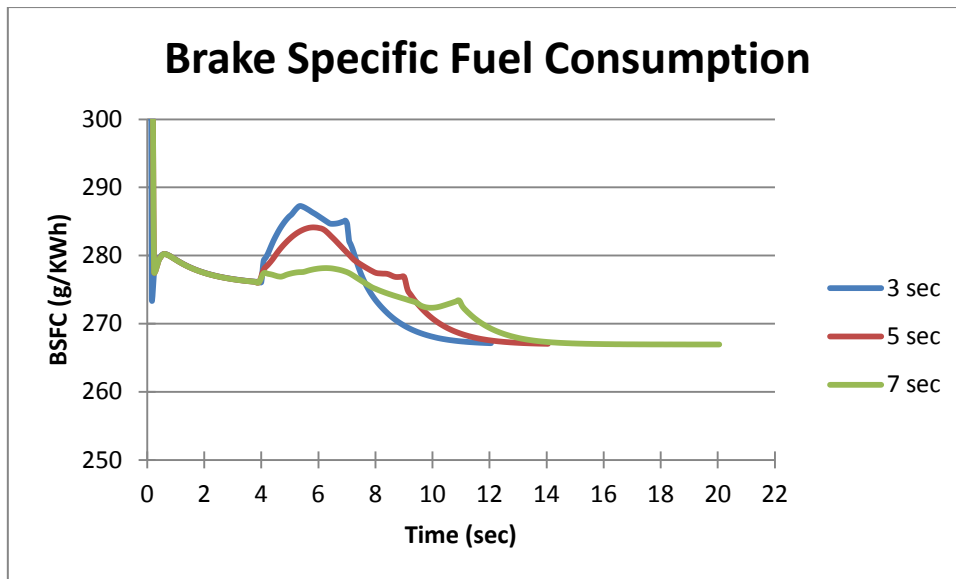


Σχήμα 6.46. Σύγκριση μέσης μέγιστης πίεσης των κυλίνδρων συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές διάρκειες επιτάχυνσης με διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης



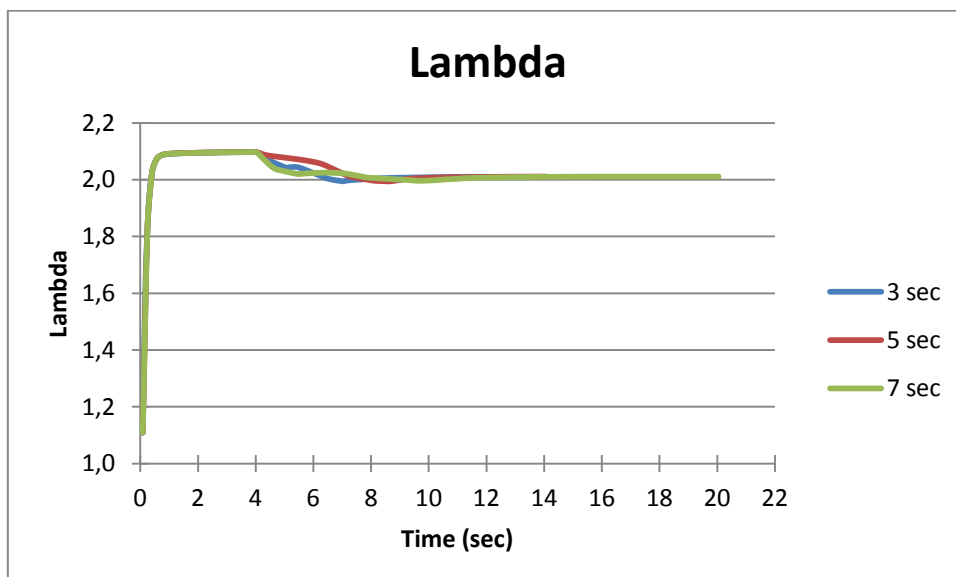
Σχήμα 6.47. Σύγκριση μέσης πραγματικής πίεσης στους κυλίνδρους συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές διάρκειες επιτάχυνσης με διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης

Όσον αφορά την ειδική κατανάλωση καυσίμου, όπως βλέπουμε στο Σχήμα 6.48 που ακολουθεί, ο ρυθμός της επιτάχυνσης την επηρεάζει αρκετά. Έτσι (όπως ίσως αναμενόταν), όσο πιο ομαλή και αργή είναι η επιτάχυνση, τόσο πιο χαμηλή είναι η ειδική κατανάλωση του κινητήρα.

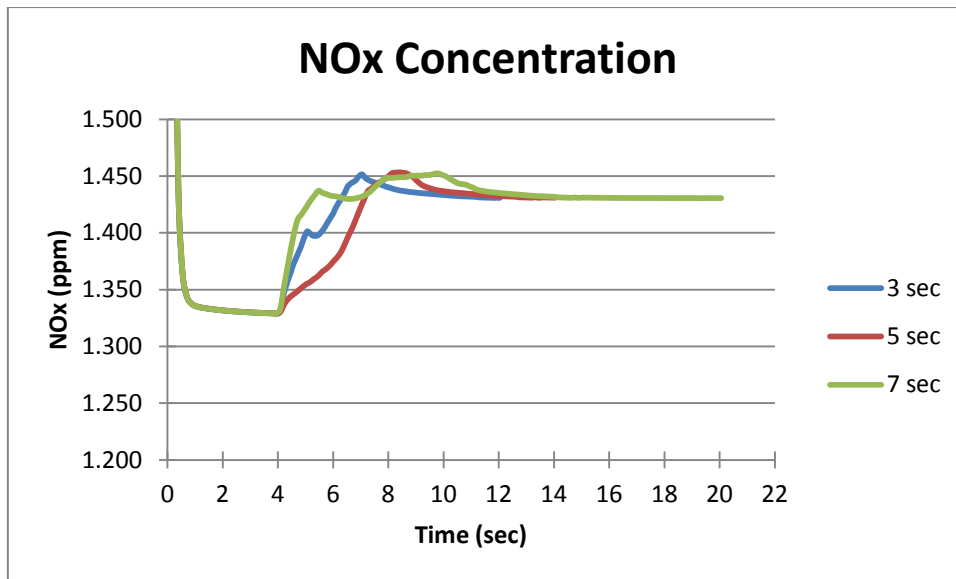


Σχήμα 6.48. Σύγκριση ειδικής κατανάλωσης καυσίμου συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές διάρκειες επιτάχυνσης με διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης

Επίσης, πολύ μικρή είναι η μεταβολή του λόγου ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου, σύμφωνα με το διάγραμμα του Σχήματος 6.49, ο οποίος πρακτικά δεν πέφτει κάτω από την τιμή 2, γεγονός που οδηγεί στο ασφαλές συμπέρασμα πως η λειτουργία του κινητήρα δεν συνοδεύεται από εκπομπές αιθάλης.



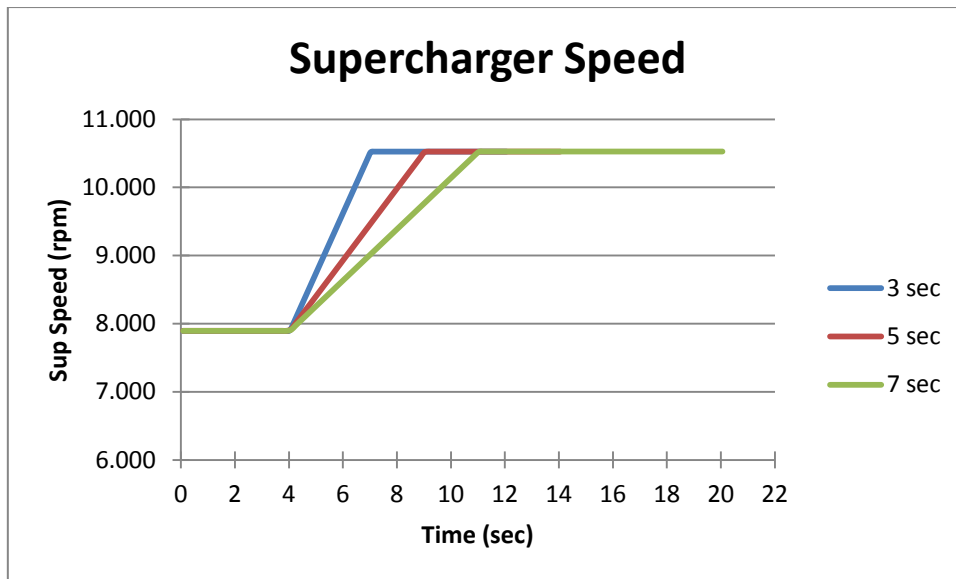
Σχήμα 6.49. Σύγκριση λόγου ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές διάρκειες επιτάχυνσης με διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης



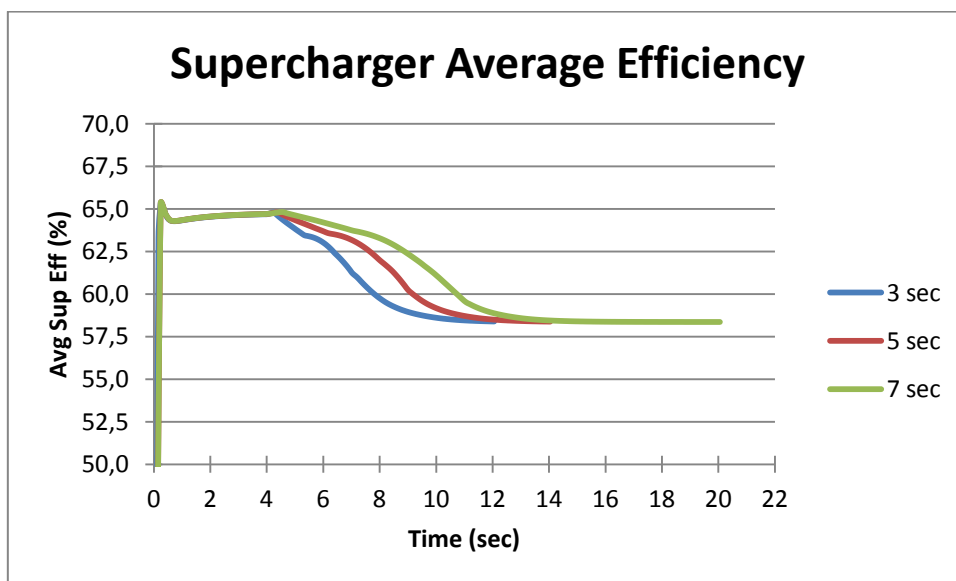
Σχήμα 6.50. Σύγκριση συγκέντρωσης οξειδίων του αζώτου NOx στα καυσαέρια συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές διάρκειες επιτάχυνσης με διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης

Στο Σχήμα 6.50, βλέπουμε ότι η συγκέντρωση των οξειδίων του αζώτου NOx βρίσκεται πρακτικά σε ίδια επίπεδα και στις τρεις περιπτώσεις, με μόνες διαφορές τη χρονική στιγμή κατά την οποία εμφανίζεται η μέγιστη τιμή και, στην περίπτωση της επιτάχυνσης σε επτά δευτερόλεπτα, την αρχική απότομη αύξησή της, που οφείλεται στην αρχικά απότομη αύξηση της ποσότητας εγχυόμενου καυσίμου που είδαμε παραπάνω στο Σχήμα 6.44.

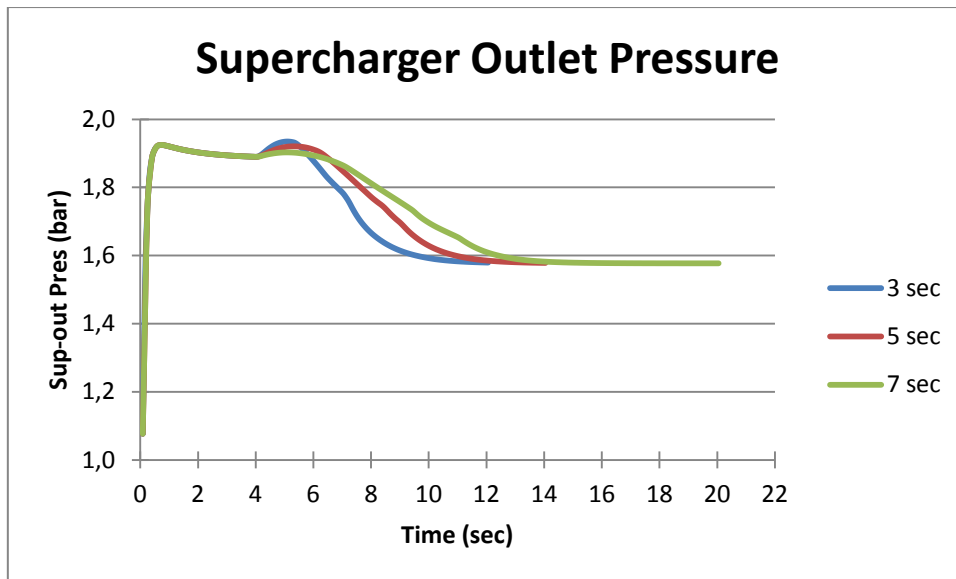
Ο μηχανικός συμπιεστής επιταχύνεται κι εκείνος γραμμικά (Σχήμα 6.51), μέσω του κινητήρα, με το σταθερό λόγο μετάδοσης 5,26. Στην τελική του όμως ταχύτητα περιστροφής, η οποία είναι 10.526,32rpm, ο μηχανικός συμπιεστής έχει πλέον χαμηλό βαθμό απόδοσης (Σχήμα 6.52), με αποτέλεσμα και η πίεση του αέρα στην έξοδο από αυτόν (Σχήμα 6.53) να είναι μειωμένη σε σχέση με αυτήν στην αρχική ταχύτητα περιστροφής.



Σχήμα 6.51. Διαφορετικά προφίλ της ταχύτητας περιστροφής του μηχανικού συμπιεστή συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές διάρκειες επιτάχυνσης με διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης

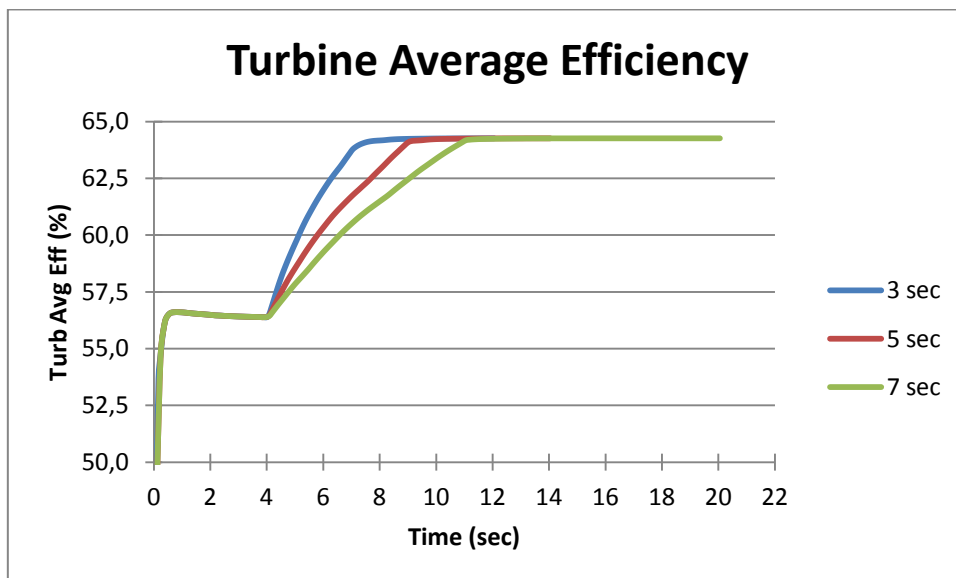


Σχήμα 6.52. Σύγκριση βαθμού απόδοσης του μηχανικού συμπιεστή συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές διάρκειες επιτάχυνσης με διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης

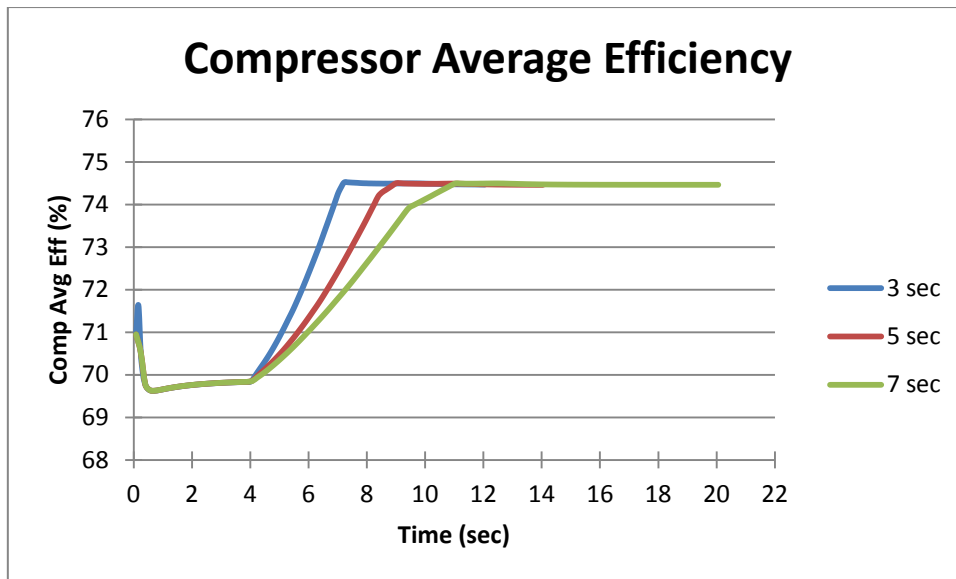


Σχήμα 6.53. Σύγκριση πίεσης του αέρα υπερπλήρωσης στην έξοδο του μηχανικού συμπιεστή συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές διάρκειες επιτάχυνσης με διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης

Αντίθετα, στρόβιλος και συμπιεστής στο ζεύγος στροβιλο-υπερπλήρωσης λειτουργούν με πολύ υψηλό βαθμό απόδοσης, χωρίς να αντιμετωπίζουν προβλήματα κατά τη μεταβατική λειτουργία, σύμφωνα με τα Σχήματα 6.54 και 6.55, αντίστοιχα.

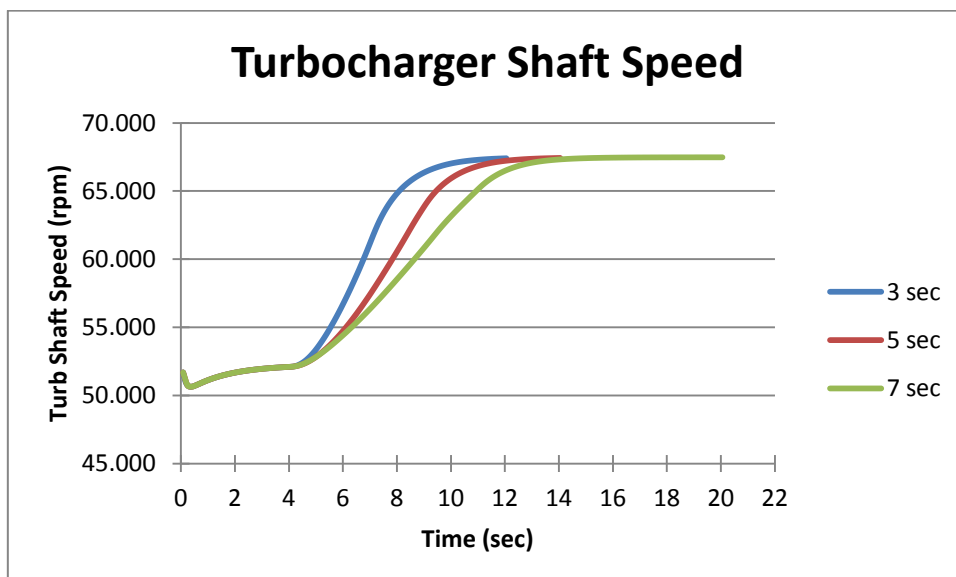


Σχήμα 6.54. Σύγκριση βαθμού απόδοσης του στρόβιλου του στροβιλο-υπερπληρωτή συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές διάρκειες επιτάχυνσης με διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης

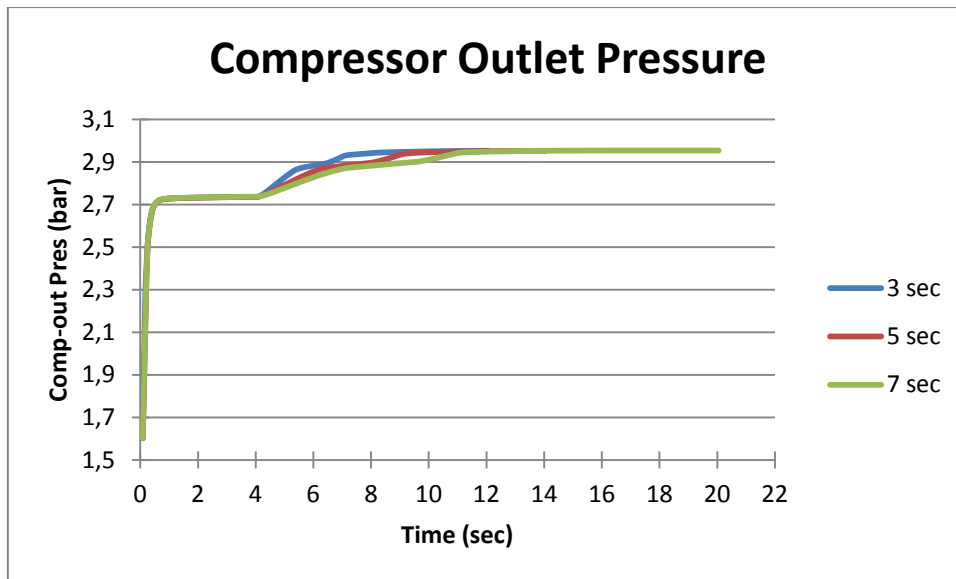


Σχήμα 6.55. Σύγκριση βαθμού απόδοσης του συμπιεστή του στροβιλο-υπερπληρωτή συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές διάρκειες επιτάχυνσης με διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης

Οι υψηλοί αυτοί βαθμοί απόδοσης, συμβάλλουν στην καλή λειτουργία του στροβιλο-υπερπληρωτή και κατά την επιτάχυνση (Σχήμα 6.56), χωρίς να εμφανίζονται πλέον σημαντικά προβλήματα υστέρησης, πράγμα αναμενόμενο, δεδομένης της αυξημένης ταχύτητας περιστροφής του στροβιλο-υπερπληρωτή.



Σχήμα 6.56. Σύγκριση ταχύτητας περιστροφής του ζεύγους στροβιλο-υπερπλήρωσης συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές διάρκειες επιτάχυνσης με διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης



Σχήμα 6.57. Σύγκριση πίεσης του αέρα υπερπλήρωσης στην έξοδο του στροβιλο-συμπιεστή συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές διάρκειες επιτάχυνσης με διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης

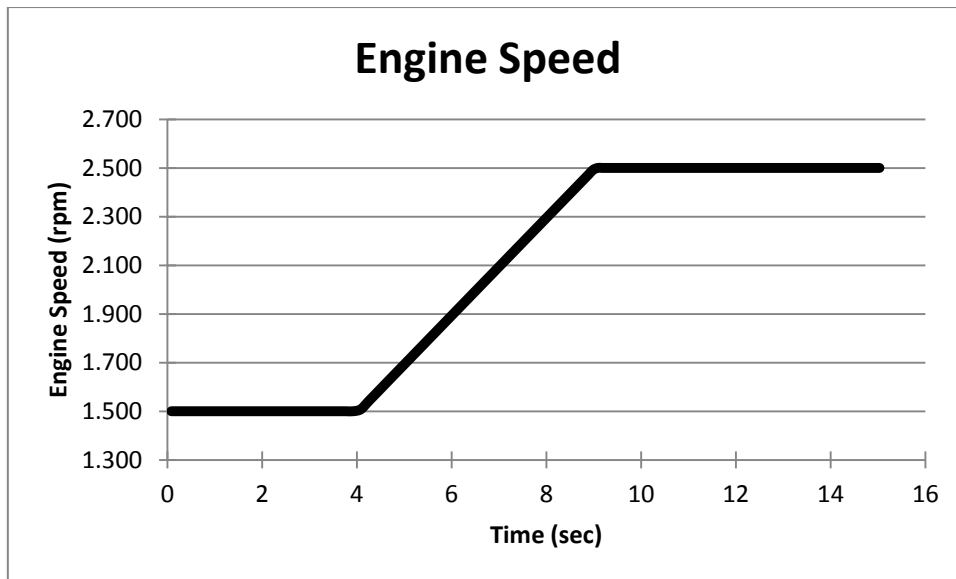
Για το λόγο αυτό, μια μικρή αύξηση στην πίεση του αέρα υπερπλήρωσης στην έξοδο του συμπιεστή είναι ομαλή, με την τελική της τιμή να φτάνει λίγο κάτω από τα 3 bar στις 2000rpm, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.57.

6.3 Επιτάχυνση από τις 1500 στις 2500rpm

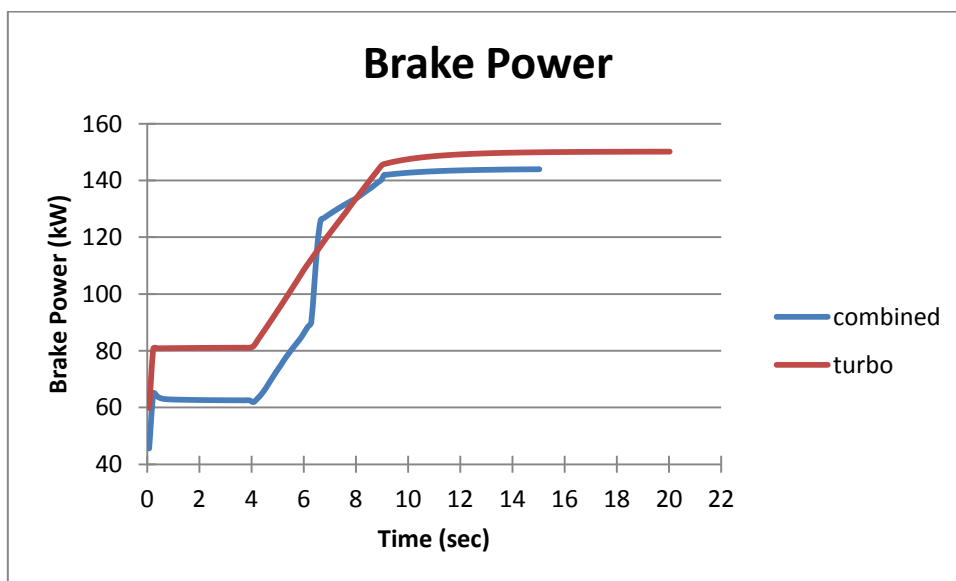
Το τελευταίο σενάριο προσομοίωσης του μοντέλου του κινητήρα που κατασκευάσαμε αφορά την γραμμική επιτάχυνσή του από τις 1500 στις 2500rpm. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις (παράγραφοι 6.1 και 6.2), έχουμε δύο πεδία σύγκρισης, ένα μεταξύ των δύο μεθόδων υπερπλήρωσης που εξετάζονται (στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση), και ένα για διαφορετικές διάρκειες επιτάχυνσης στην περίπτωση της συνδυασμένης υπερπλήρωσης.

6.3.1 Σύγκριση μεταξύ απλής στροβιλο-υπερπλήρωσης και συνδυασμένης υπερπλήρωσης

Για τη σύγκριση των δύο μεθόδων υπερπλήρωσης, όπως βλέπουμε στο Σχήμα 6.58, η επιτάχυνση του κινητήρα υποτίθεται γραμμική από τις 1500 στις 2500rpm, μέσα σε χρονικό διάστημα 5 δευτερολέπτων.



Σχήμα 6.58. Το προφίλ της ταχύτητας για το σενάριο της επιτάχυνσης του κινητήρα από τις 1500 στις 2500rpm και τη σύγκριση ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση

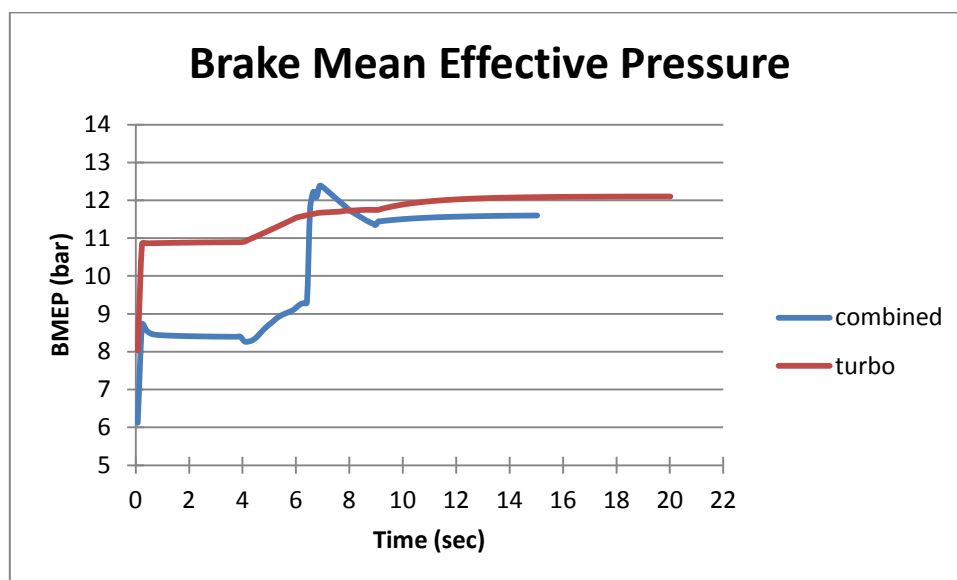


Σχήμα 6.59. Σύγκριση πραγματικής ισχύος συναρτήσει του χρόνου ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση

Η ισχύς του κινητήρα (Σχήμα 6.59) αυξάνεται γραμμικά στην περίπτωση της στροβιλο-υπερπλήρωσης, δεν συμβαίνει όμως το ίδιο για την συνδυασμένη υπερπλήρωση. Στη δεύτερη, όταν ο κινητήρας φτάσει στις 2000rpm, παρατηρούμε μία πολύ απότομη αύξηση της ισχύος. Αυτό συμβαίνει διότι στις 2000rpm έχουμε αποσύμπλεξη του μηχανικού συμπιεστή

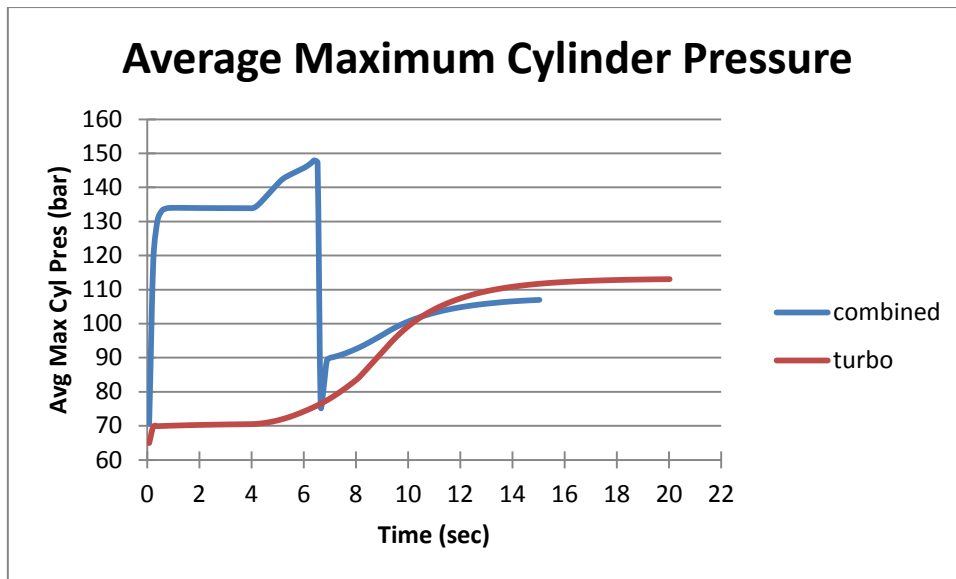
από τη στροφαλοφόρο άτρακτο, με αποτέλεσμα η ισχύς που απορροφούνται από αυτόν να είναι διαθέσιμη για αξιοποίηση.

Το ίδιο συμβαίνει και στην περίπτωση της μέσης πραγματικής πίεσης (Σχήμα 6.60), με αποτέλεσμα ο κινητήρας να διαθέτει πλέον μεγαλύτερη ροπή για την κίνηση του εκάστοτε εξωτερικού φορτίου (οι γραφικές παραστάσεις μέσης πραγματικής πίεσης και ροπής είναι πανομοιότυπες).

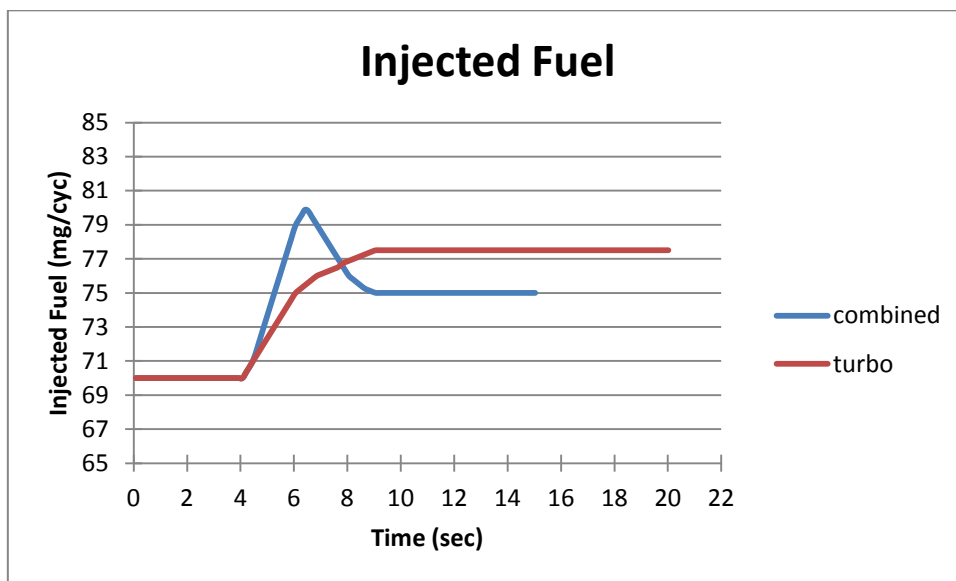


Σχήμα 6.60. Σύγκριση μέσης πραγματικής πίεσης στους κυλίνδρους συναρτήσει του χρόνου ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση

Αντίθετα, στην περίπτωση της μέγιστης πίεσης στο εσωτερικό των κυλίνδρων (Σχήμα 6.61), ενώ στην στροβιλο-υπερπλήρωση βλέπουμε μια πολύ ομαλή αύξηση της πίεσης, στην περίπτωση της συνδυασμένης υπερπλήρωσης έχουμε μία αρχική αύξηση λόγω της επιτάχυνσης του μηχανικού συμπιεστή, αλλά στη συνέχεια υπάρχει μία εξαιρετικά απότομη πτώση, η οποία παρουσιάζει και μία αστάθεια κατά το πέρας της και που οφείλεται στην πτώση πίεσης του αέρα υπερπλήρωσης από τη διακοπή της λειτουργίας του μηχανικού συμπιεστή (θυμίζουμε ότι κατά την αποσύμπλεξή του, ανοίγει η βαλβίδα παράκαμψης και πλέον ο αέρας κατευθύνεται αμέσως στον στροβιλο-συμπιεστή, έχουμε δηλαδή απλή στροβιλο-υπερπλήρωση).



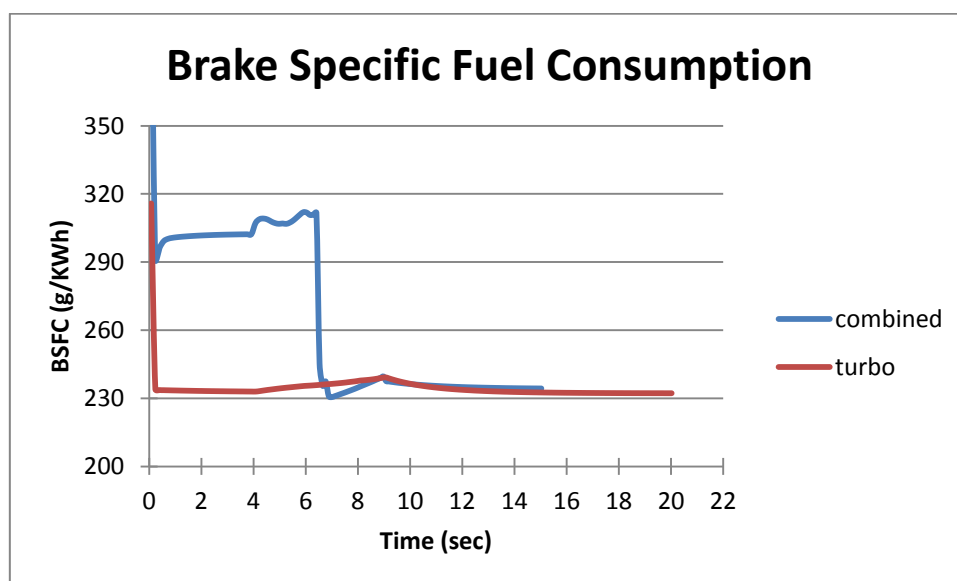
Σχήμα 6.61. Σύγκριση μέσης μέγιστης πίεσης των κυλίνδρων συναρτήσει του χρόνου ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση



Σχήμα 6.62. Σύγκριση ποσότητας εγχυόμενου καυσίμου συναρτήσει του χρόνου ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση

Η αποσύμπλεξη του μηχανικού συμπιεστή από το σύστημα, έχει ως άμεση συνέπεια την μείωση της ποσότητας του αέρα που εισέρχεται στους κυλίνδρους του κινητήρα. Επομένως, μετά τις 2000rpm, πρέπει να υπάρξει και μείωση της ποσότητας του εγχυόμενου σε αυτούς καυσίμου (Σχήμα 6.62), αλλιώς το μίγμα θα γίνει πλούσιο, με ότι αυτό συνεπάγεται για τις εκπομπές σωματιδίων αιθάλης και άλλων ρύπων. Από την άλλη, στην απλή στροβιλο-

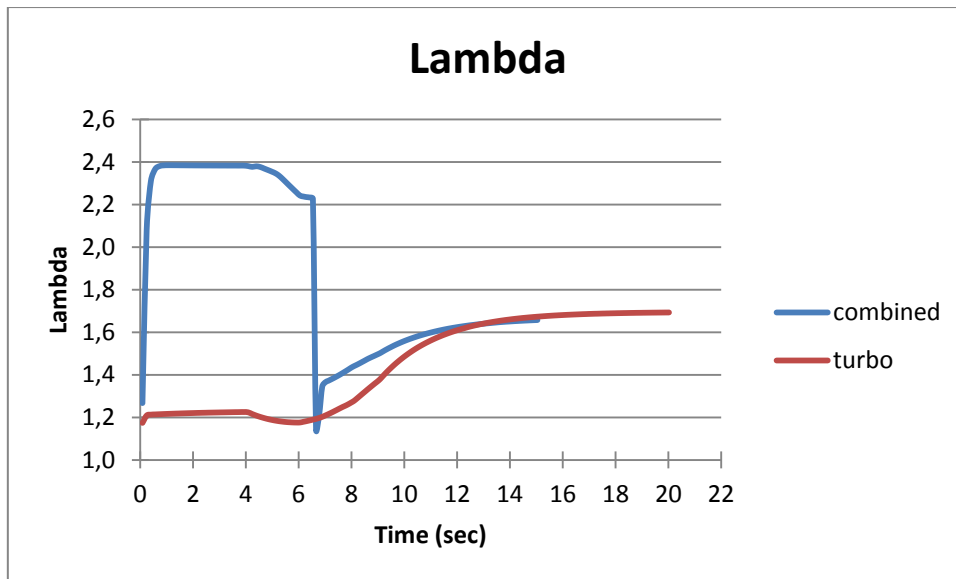
υπερπλήρωση, έχουμε μια ομαλή αύξηση της εγχυόμενης ποσότητας καυσίμου, ανάλογη με την αυξανόμενη πίεση του αέρα υπερπλήρωσης που θα δούμε στη συνέχεια.



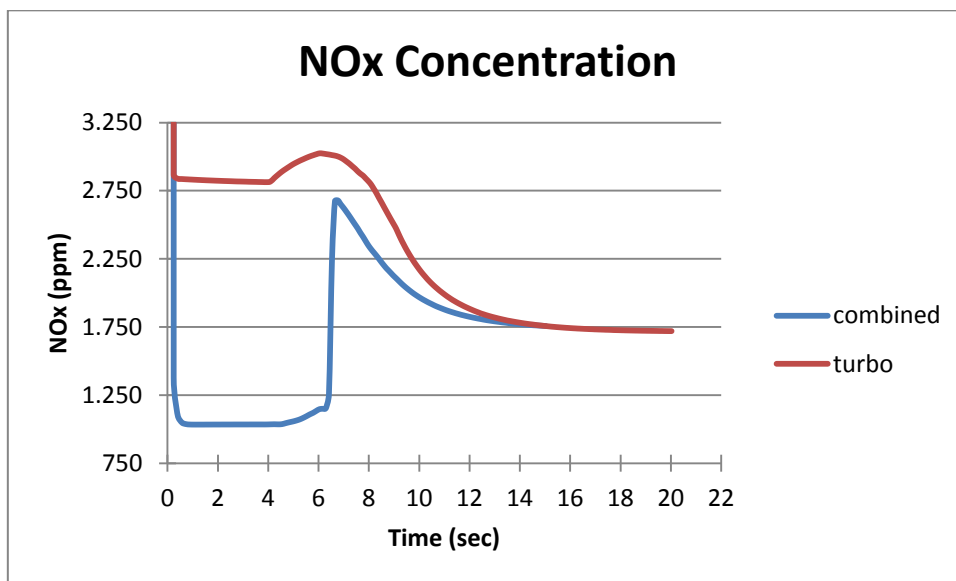
Σχήμα 6.63. Σύγκριση ειδικής κατανάλωσης καυσίμου συναρτήσει του χρόνου ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση

Η μείωση αυτή στην ποσότητα του εγχυόμενου καυσίμου έχει άμεση επίδραση στην ειδική κατανάλωση καυσίμου, όπως φαίνεται παραπάνω, στο διάγραμμα του Σχήματος 6.63. Αυτή έρχεται στα επίπεδα της απλής στροβιλο-υπερπλήρωσης, στην περίπτωση της οποίας παραμένει πρακτικά σταθερή, με μία ανεπαίσθητη αύξηση κατά τη διάρκεια της επιτάχυνσης.

Απότομη πτώση έχουμε και στον λόγο ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου (Σχήμα 6.64), ακριβώς τη στιγμή που ο μηχανικός συμπιεστής παύει να λειτουργεί, αλλά στη συνέχεια, με την μείωση στην ποσότητα του εγχυόμενου καυσίμου, η τιμή του αρχίζει πάλι να αυξάνεται, πάνω από τη μονάδα.



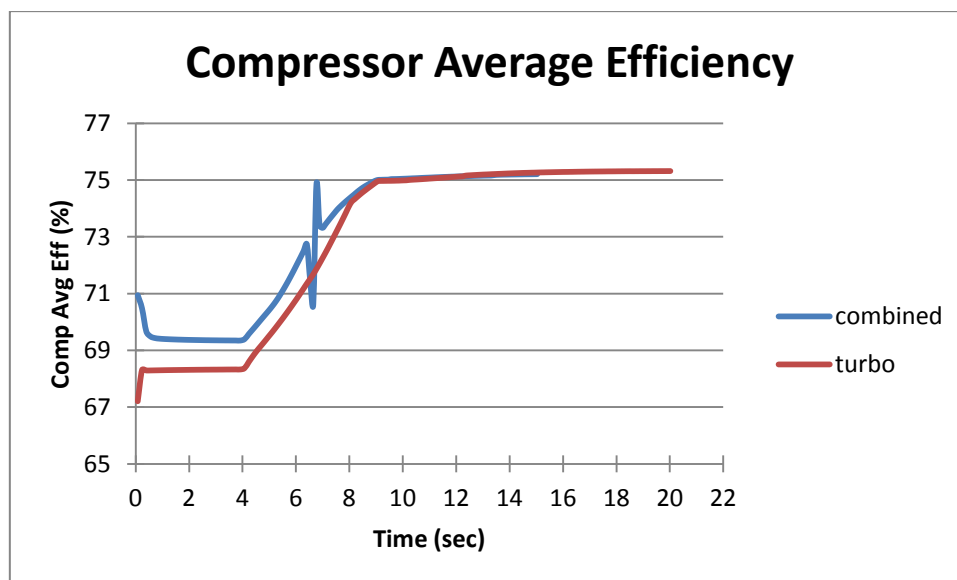
Σχήμα 6.64. Σύγκριση λόγου ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου συναρτήσει του χρόνου ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση



Σχήμα 6.65. Σύγκριση συγκέντρωσης οξειδίων του αζώτου NOx στα καυσαέρια συναρτήσει του χρόνου ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση

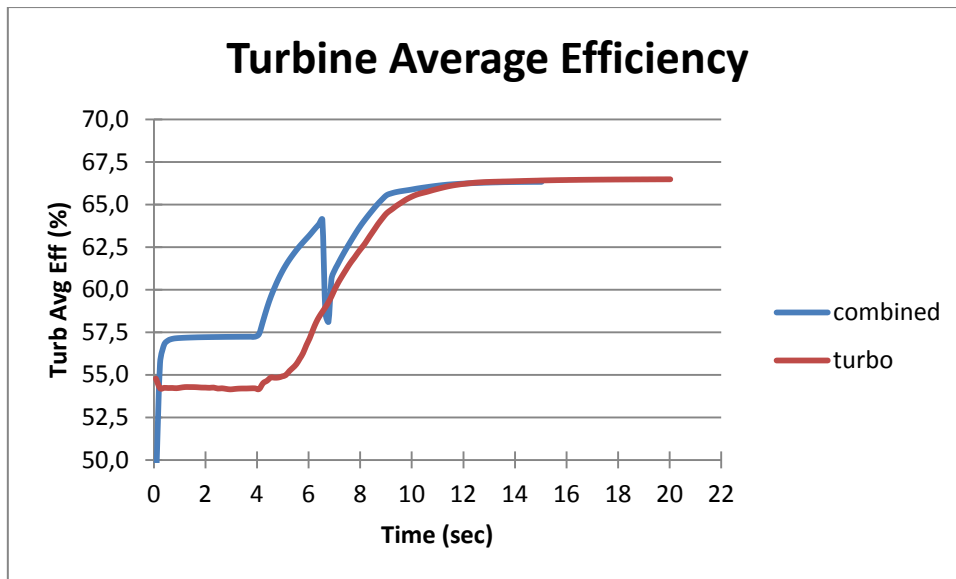
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.65, πράγματι, όταν το μίγμα αέρα-καυσίμου στους κυλίνδρους πλησίασε τη στοιχειομετρική περιοχή, οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου NOx αυξήθηκαν δραματικά, πράγμα που ισχύει και για τις δύο εφαρμογές υπερπλήρωσης.

Όσον αφορά το ζεύγος στροβιλο-υπερπλήρωσης, και συγκεκριμένα τον συμπιεστή, η λειτουργία του είναι τελείως ομαλή στον στροβιλο-υπερπληρωμένο κινητήρα. Αντίθετα, υπάρχει μία έντονη αυξομείωση του βαθμού απόδοσής του (Σχήμα 6.66) κατά την αποσύμπλεξη του μηχανικού συμπιεστή, στην περίπτωση της διάταξης συνδυασμένης υπερπλήρωσης.

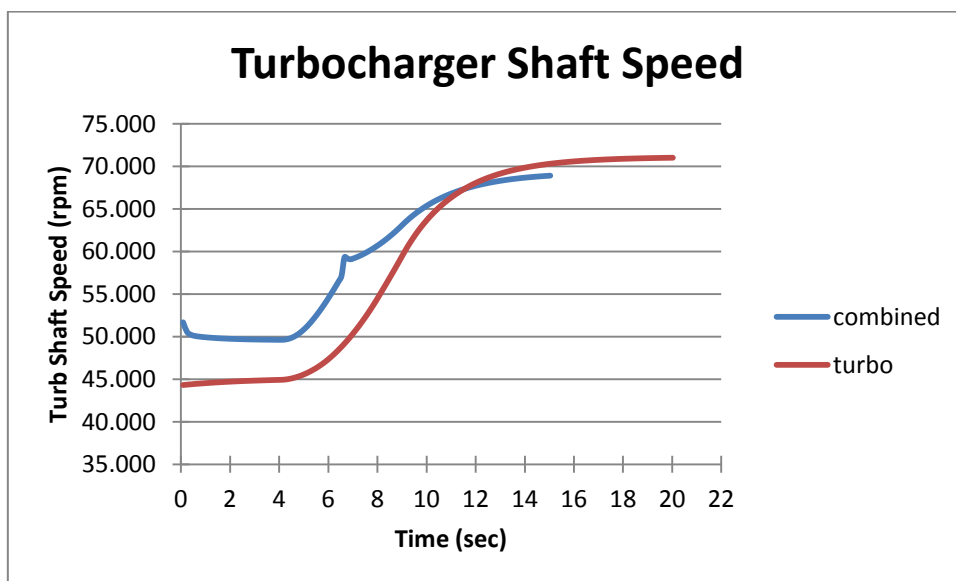


Σχήμα 6.66. Σύγκριση βαθμού απόδοσης του συμπιεστή του στροβιλο-υπερπληρωτή συναρτήσεως του χρόνου ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση

Κάτι παρόμοιο συμβαίνει και στο στρόβιλο του ζεύγους, ο οποίος επηρεάζεται από την αντίστοιχη μεταβολή στην πίεση και την παροχή των καυσαερίων. Αρχικά λοιπόν παρατηρείται μία απότομη πτώση στο βαθμό απόδοσης του στροβίλου (Σχήμα 6.67), αλλά στη συνέχεια οι τιμές επανέρχονται στο επίπεδο αυτών της απλής στροβιλο-υπερπλήρωσης, όπως γίνεται και στην περίπτωση του συμπιεστή, παραπάνω. Άλλωστε, μετά τις 2000rpm, ο κινητήρας ουσιαστικά λειτουργεί ως στροβιλο-υπερπληρωμένος.



Σχήμα 6.67. Σύγκριση βαθμού απόδοσης του στροβίλου του στροβιλο-υπερπληρωτή συναρτήσει του χρόνου ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση

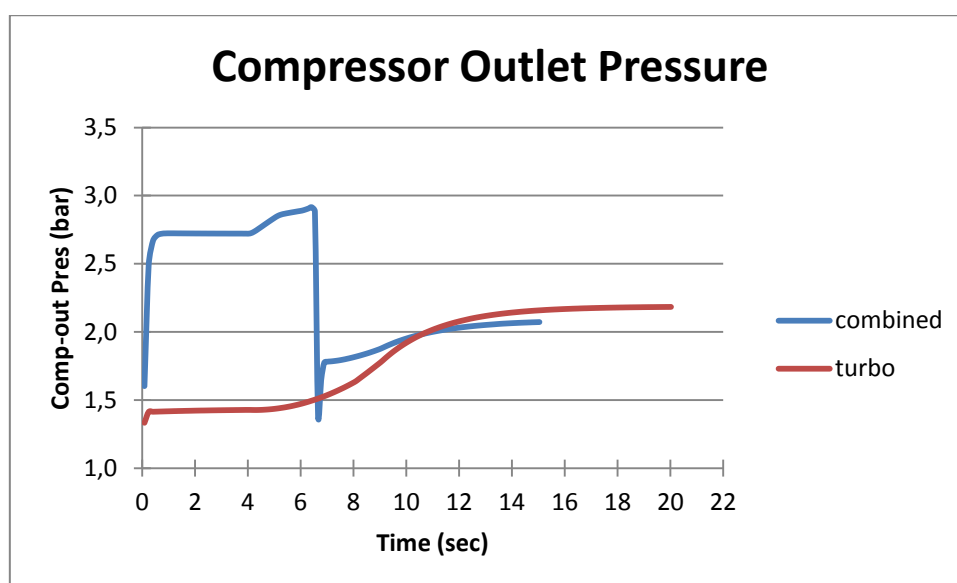


Σχήμα 6.68. Σύγκριση ταχύτητας περιστροφής του ζεύγους στροβιλο-υπερπλήρωσης συναρτήσει του χρόνου ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση

Οι αναταραχές αυτές στους βαθμούς απόδοσης του συμπιεστή και του στροβίλου, δεν έχουν ιδιαίτερο αντίκτυπο στην επιτάχυνση του ζεύγους στροβιλο-υπερπλήρωσης, το οποίο λόγω της αδράνειάς του δεν προλαβαίνει, ουσιαστικά, να “αντιληφθεί” την απότομη μεταβολή. Έτσι, η ταχύτητα

περιστροφής του αυξάνεται σχετικά ομαλά, όπως στην περίπτωση της απλής στροβιλο-υπερπλήρωσης (Σχήμα 6.68).

Η μεγαλύτερη μεταβολή που υφίσταται στο σύστημα συνδυασμένης υπερπλήρωσης κατά την αποσύμπλεξη του μηχανικού συμπιεστή, έχει φυσικά να κάνει με την τελική πίεση του αέρα εισαγωγής, μετά την έξοδο του από τον στροβιλο-συμπιεστή (Σχήμα 6.69). Αυτή παρουσιάζει μία πολύ μεγάλη πτώση και τελικά σταθεροποιείται κοντά στα επίπεδα της απλής στροβιλο-υπερπλήρωσης, και συγκεκριμένα λίγο πιο χαμηλά από αυτήν λόγω κάποιων μικρών απωλειών που προκύπτουν από τη σωλήνωση και τη βαλβίδα παράκαμψης του μηχανικού συμπιεστή.

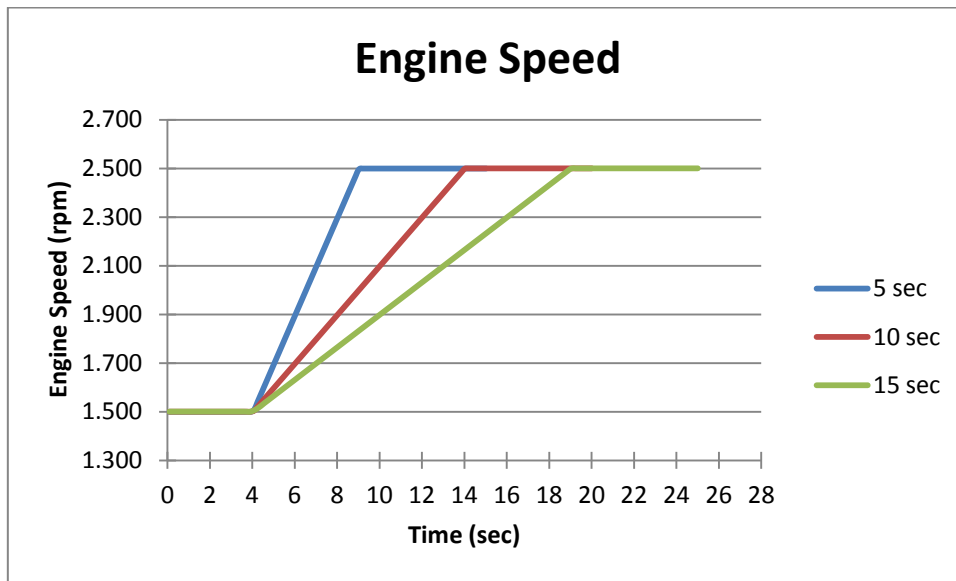


Σχήμα 6.69. Σύγκριση πίεσης αέρα υπερπλήρωσης στην έξοδο του στροβιλο-συμπιεστή συναρτήσει του χρόνου ανάμεσα σε στροβιλο-υπερπλήρωση και συνδυασμένη υπερπλήρωση

6.3.2 Επίδραση της διάρκειας της επιτάχυνσης από τις 1500 στις 2500rpm

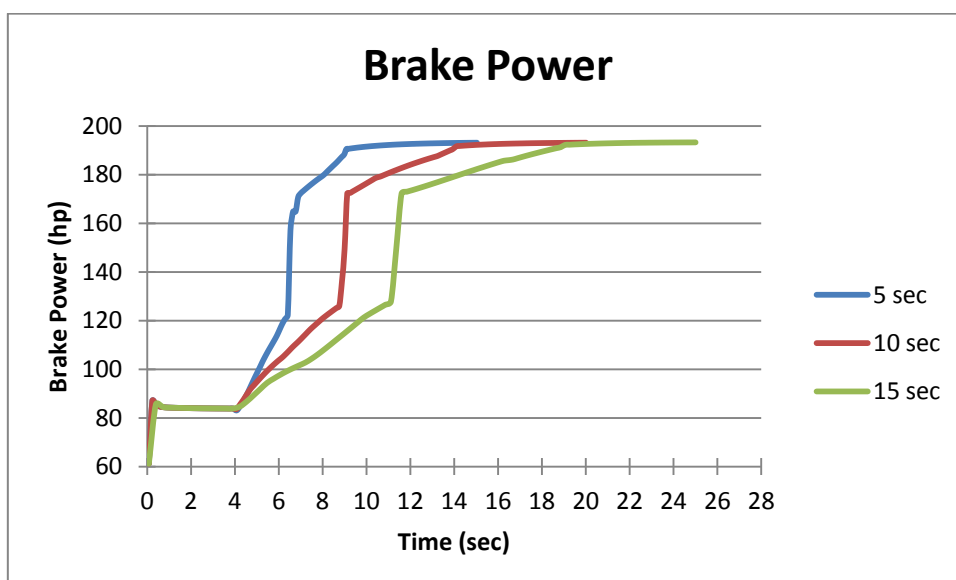
Για την σύγκριση αυτή επιλέξαμε ο κινητήρας να επιταχύνει γραμμικά από τις 1500 στις 2500rpm σε 5, 10 και 15 δευτερόλεπτα αντίστοιχα (Σχήμα 6.70). Τα χρονικά διαστήματα αυτά είναι μεγαλύτερα από εκείνα που χρησιμοποιήθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, αφενός επειδή η απόσταση μεταξύ αρχικού και τελικού σημείου λειτουργίας είναι μεγαλύτερη, αφετέρου διότι συνήθως η επιτάχυνση στο συγκεκριμένο εύρος στροφών δεν χρειάζεται και δεν ζητείται να είναι τόσο απότομη (π.χ. σε εφαρμογή

αυτοκινήτου, η εκκίνηση απαιτεί πιο άμεση επιτάχυνση απ' ότι οι υψηλότερες ταχύτητες).



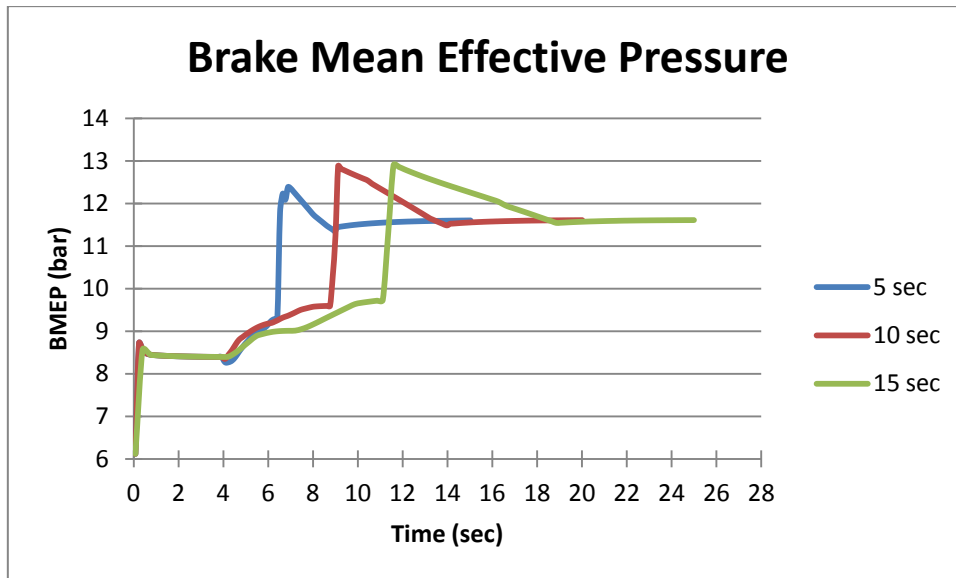
Σχήμα 6.70. Διαφορετικά προφίλ ταχυτήτων για επιτάχυνση του κινητήρα από τις 1500 στις 2500rpm με χρήση διάταξης συνδυασμένης υπερπλήρωσης

Κι εδώ, η παραγόμενη από τον κινητήρα ισχύς (Σχήμα 6.71) παρουσιάζει την απότομη αύξηση που αναλύθηκε προηγουμένως, τη στιγμή της αποσύμπλεξης του μηχανικού συμπιεστή από τη στροφαλοφόρο άτρακτο του κινητήρα, οπότε και σταματάει να απορροφά από αυτόν πολύτιμη ισχύ.

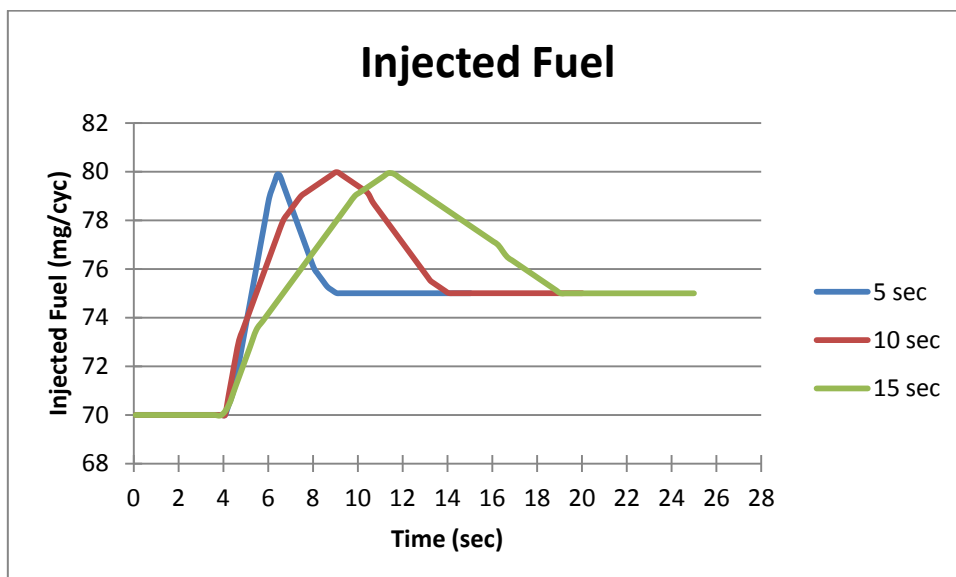


Σχήμα 6.71. Σύγκριση πραγματικής ισχύος συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές διάρκειες επιτάχυνσης με διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης

Το ίδιο συμβαίνει και με την μέση πραγματική πίεση του κινητήρα (Σχήμα 6.72), η οποία αρχικά αυξάνεται έντονα και στη συνέχεια μειώνεται ελαφρώς, λόγω του περιορισμού που θέτουμε στην ποσότητα του εγχυόμενου καυσίμου (Σχήμα 6.73), μιας και η ένταση της υπερπλήρωσης δεν είναι πλέον τόσο μεγάλη.

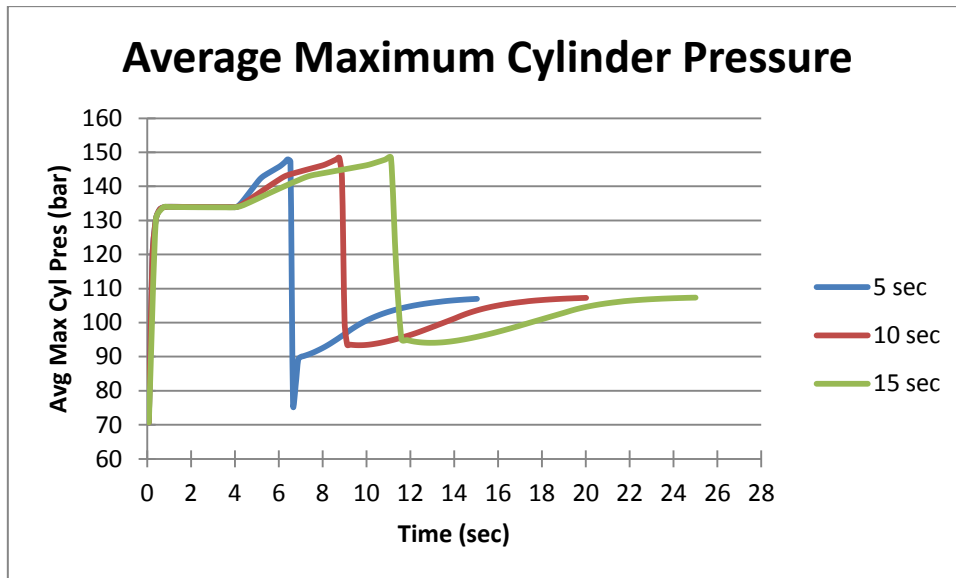


Σχήμα 6.72. Σύγκριση μέσης πραγματικής πίεσης στους κυλίνδρους συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές διάρκειες επιτάχυνσης με διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης

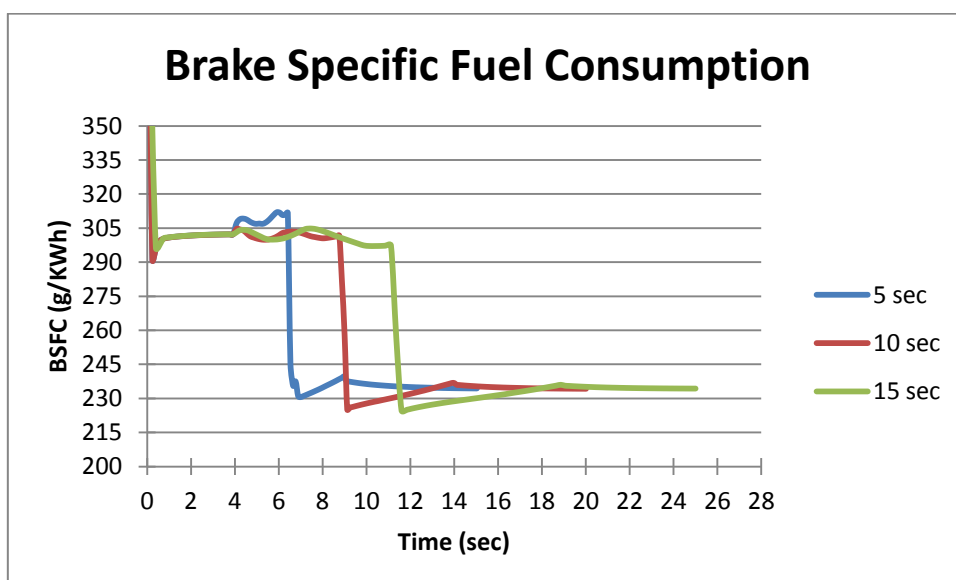


Σχήμα 6.73. Προφίλ ποσότητας εγχυόμενου καυσίμου συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές διάρκειες επιτάχυνσης με διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης

Η απουσία του μηχανικού συμπιεστή, επιφέρει μείωση στην πίεση του αέρα υπερπλήρωσης, η οποία συνεπάγεται, προφανώς, μείωση και στην μέγιστη πίεση των κυλίνδρων. Η πτώση αυτή της πίεσης συντελείται πιο απότομα και με μία διαταραχή κατά το πέρας της, στην περίπτωση της πιο γρήγορης επιτάχυνσης, σύμφωνα με το διάγραμμα του Σχήματος 6.74.



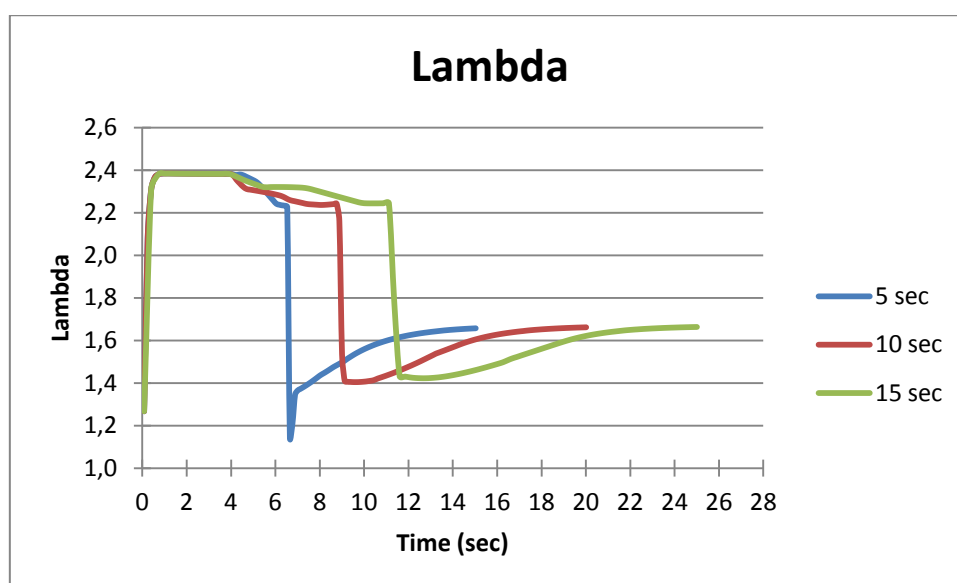
Σχήμα 6.74. Σύγκριση μέσης μέγιστης πίεσης των κυλίνδρων συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές διάρκειες επιτάχυνσης με διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης



Σχήμα 6.75. Σύγκριση ειδικής κατανάλωσης καυσίμου συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές διάρκειες επιτάχυνσης με διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης

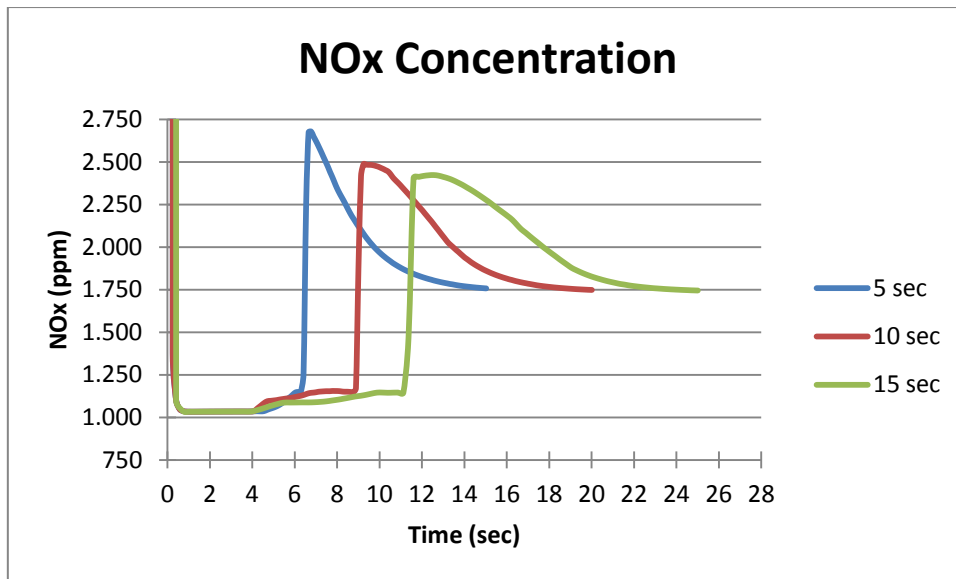
Επίσης, η μείωση στην παροχή καυσίμου με ταυτόχρονη αύξηση στην ισχύ επιφέρει σημαντική μείωση στην ειδική κατανάλωση, παρόμοια και στις τρεις περιπτώσεις (Σχήμα 6.75).

Η παύση της λειτουργίας του μηχανικού συμπιεστή, επιφέρει άμεση πτώση της πίεσης και της παροχής του αέρα εισαγωγής, πράγμα που σε συνδυασμό με την μεγάλη ποσότητα εγχυόμενου καυσίμου στους κυλίνδρους, μειώνει επικίνδυνα τον λόγο ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου (Σχήμα 6.76) και, ειδικά στην περίπτωση επιτάχυνσης σε 5 δευτερόλεπτα, τον φέρνει πολύ κοντά στη μονάδα. Στη συνέχεια όμως, με τον περιορισμό του καυσίμου, έχουμε επάνοδό του, με τελική τιμή κοντά στο 1,65.

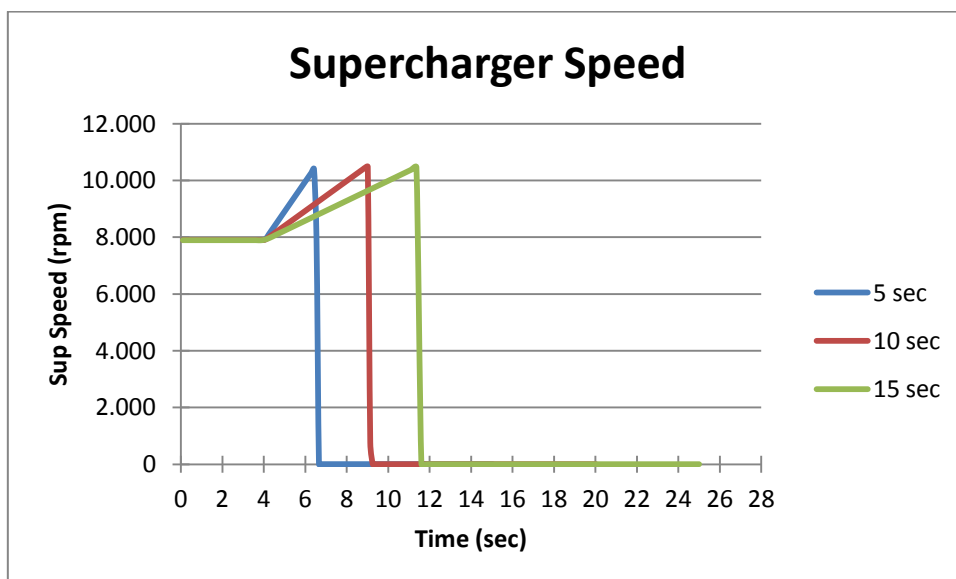


Σχήμα 6.76. Σύγκριση λόγου ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου συναρτήσεως του χρόνου για διαφορετικές διάρκειες επιτάχυνσης με διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης

Άμεσα είναι τα συμπτώματα αυτής της πτώσης του λ_a στις εκπομπές οξειδίων του αζώτου NO_x (Σχήμα 6.77), που, όπως έχουμε ήδη πει, ευνοούνται από την άνοδο της θερμοκρασίας σε περιβάλλον στοιχειομετρικής καύσης. Βλέπουμε ότι με την επάνοδο του λόγου ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου, οι εκπομπές αυτές μειώνονται ξανά.



Σχήμα 6.77. Σύγκριση συγκέντρωσης οξειδίων του αζώτου NOx στα καυσαέρια συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές διάρκειες επιτάχυνσης με διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης

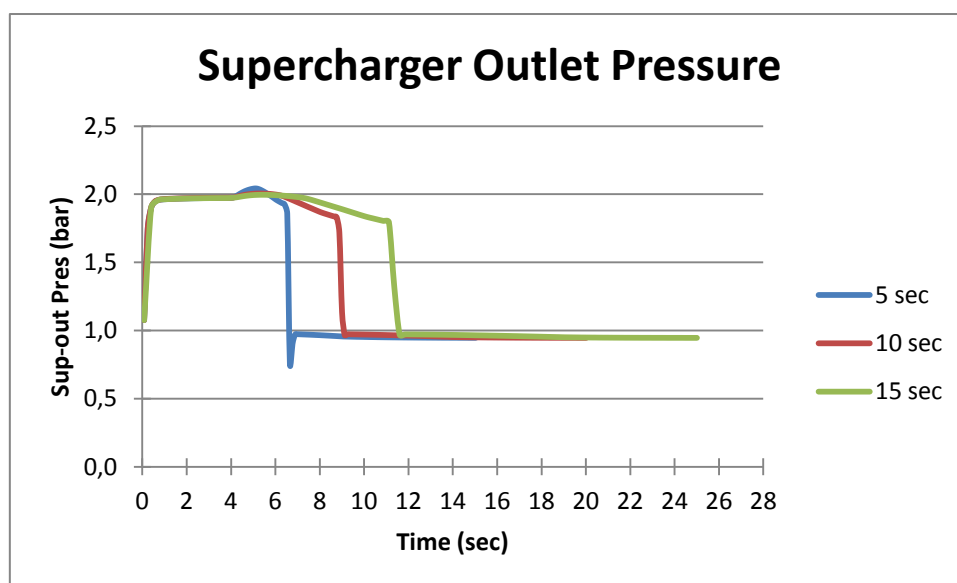


Σχήμα 6.78. Διαφορετικά προφίλ της ταχύτητας περιστροφής του μηχανικού συμπιεστή συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές διάρκειες επιτάχυνσης με διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης

Ο μηχανικός συμπιεστής είναι συνδεδεμένος με την στροφαλοφόρο άτρακτο του κινητήρα (με σταθερή σχέση μετάδοσης 1:0,19) μέχρι τις 2000rpm. Στο σημείο εκείνο αποσυμπλέκεται από αυτήν και σταματάει να λειτουργεί. Η ταχύτητα περιστροφής του (Σχήμα 6.78) πρακτικά μηδενίζεται,

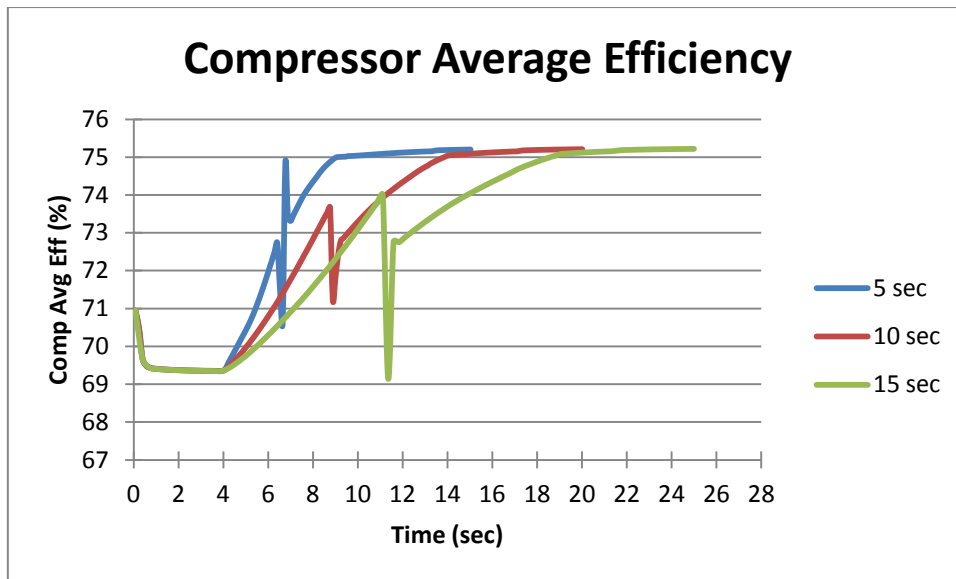
και ο αέρας εισαγωγής τον παρακάμπτει μέσω του σωλήνα και της βαλβίδας παράκαμψης.

Αναμενόμενο είναι, με την παύση της λειτουργίας του μηχανικού συμπιεστή, η πίεση του αέρα εισαγωγής στην έξοδο του να γίνεται ίση με την ατμοσφαιρική (στην πραγματικότητα είναι ελαφρώς μικρότερη εξαιτίας των απωλειών στην παράκαμψη). Παρατηρούμε επίσης από το Σχήμα 6.79, πως, στην περίπτωση της επιτάχυνσης σε 5 δευτερόλεπτα, το απότομο σταμάτημα του συμπιεστή επιφέρει ένα κύμα ροής από την έξοδο προς το εσωτερικό του συμπιεστή, ως αποτέλεσμα της υποπίεσης που δημιουργείται.

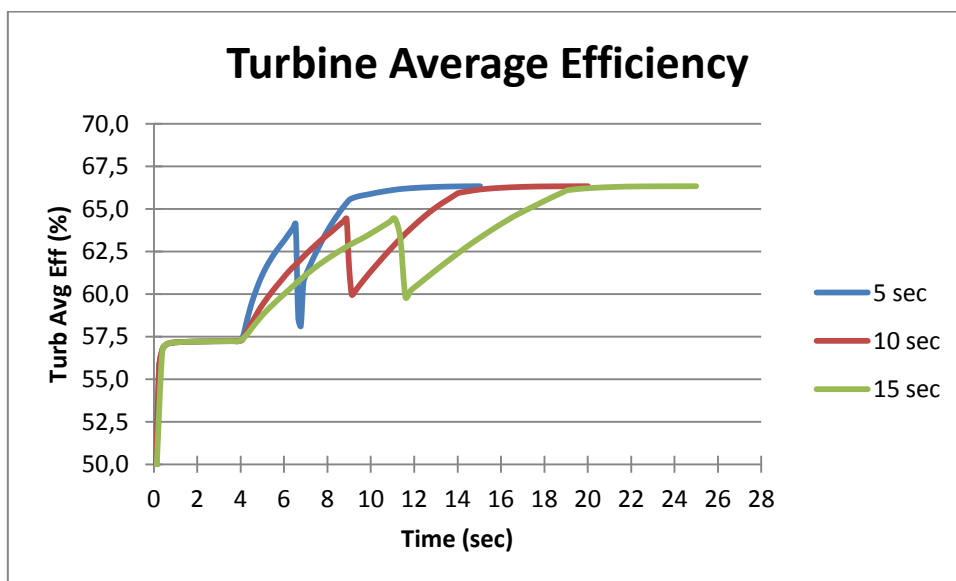


Σχήμα 6.79. Σύγκριση πίεσης του αέρα υπερπλήρωσης στην έξοδο του μηχανικού συμπιεστή συναρτήσεως του χρόνου για διαφορετικές διάρκειες επιτάχυνσης με διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης

Και στις τρεις περιπτώσεις, συμπιεστής και στρόβιλος του ζεύγους στροβιλο-υπερπλήρωσης υφίστανται διαταραχές και αστάθεια στη λειτουργία και την απόδοσή τους (Σχήματα 6.80 και 6.81, αντίστοιχα), από την απότομη πτώση στην πίεση και την παροχή του αέρα εισαγωγής και των καυσαερίων αντίστοιχα. Το πρόβλημα αυτό όμως αντιμετωπίζεται γρήγορα, αφού πλέον στις 2000rpm ο στροβιλο-υπερπληρωτής μπορεί να δουλέψει πολύ αποδοτικά από μόνος του, οπότε και το ζεύγος έρχεται γρήγορα ξανά σε ισορροπία.

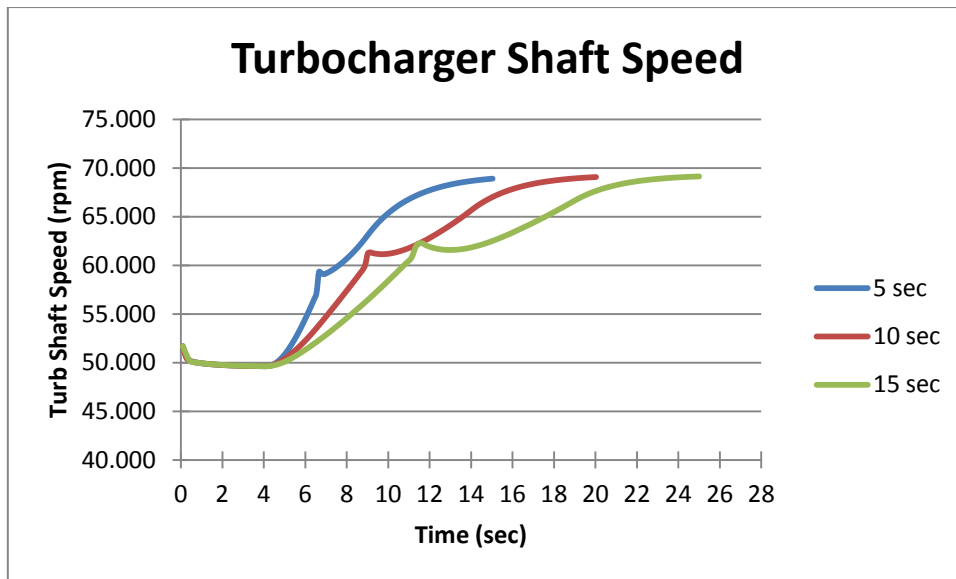


Σχήμα 6.80. Σύγκριση βαθμού απόδοσης του συμπιεστή του στροβιλο-υπερπληρωτή συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές διάρκειες επιτάχυνσης με διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης



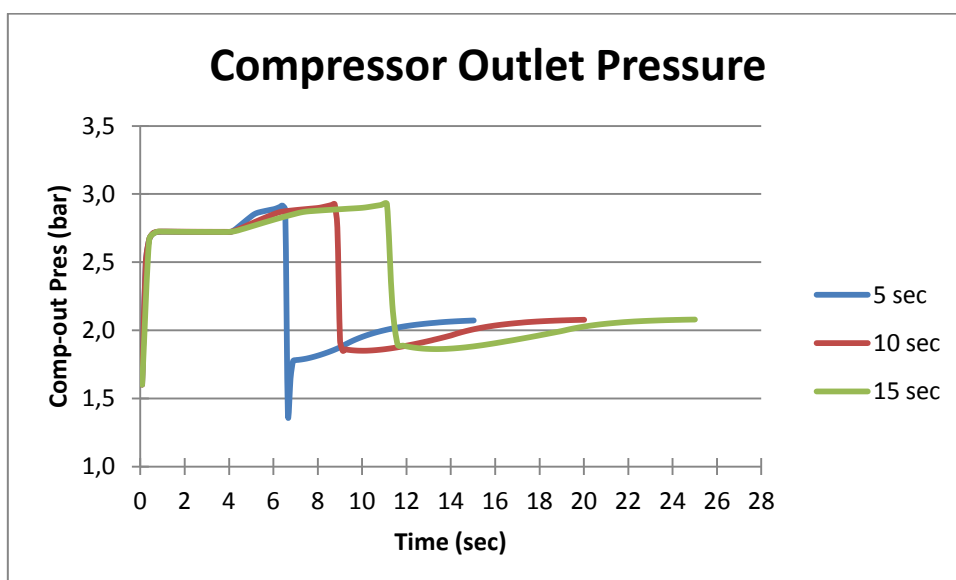
Σχήμα 6.81. Σύγκριση βαθμού απόδοσης του στροβίλου του στροβιλο-υπερπληρωτή συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές διάρκειες επιτάχυνσης με διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης

Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 6.82, όπου, μετά την αναταραχή από το σταμάτημα του μηχανικού συμπιεστή, το ζεύγος επανέρχεται γρήγορα σε ισορροπία και επιταχύνει μέχρι την τελική ταχύτητα περιστροφής του στη μόνιμη λειτουργία του κινητήρα στις 2500rpm.



Σχήμα 6.82. Σύγκριση ταχύτητας του ζεύγους στροβιλο-υπερπλήρωσης συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές διάρκειες επιτάχυνσης με διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης

Τέλος, στο Σχήμα 6.83 παριστάνονται οι γραφικές παραστάσεις της συνολικής πίεσης υπερπλήρωσης του αέρα εισαγωγής στην έξοδο του συμπιεστή της στροβιλο-υπερπλήρωσης, ο οποίος, από την αρχική τιμή του, λίγο κάτω από τα 3 bar, πέφτει σε μια τελική τιμή λίγο πάνω από 2 bar, όμοια με την περίπτωση της απλής στροβιλο-υπερπλήρωσης.



Σχήμα 6.83. Σύγκριση πίεσης του αέρα υπερπλήρωσης στην έξοδο του στροβιλο-συμπιεστή συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές διάρκειες επιτάχυνσης με διάταξη συνδυασμένης υπερπλήρωσης

6.4 Τελικά συμπεράσματα

Σκοπός της συνδυασμένης υπερπλήρωσης είναι να βελτιώσει τις επιδόσεις του κινητήρα και ταυτόχρονα να λύσει τα προβλήματα που παρουσιάζει η στροβιλο-υπερπλήρωση στα χαμηλά φορτία και στις χαμηλές ταχύτητες περιστροφής, καθώς και στην μεταβατική λειτουργία του (αργή επιτάχυνση, υψηλές εκπομπές αιθάλης και οξειδίων του αζώτου NOx).

Όπως είδαμε από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που έγιναν με χρήση του υπολογιστικού πακέτου GT-Power, τόσο η ισχύς όσο και η ροπή του κινητήρα (η οποία προκύπτει από τα διαγράμματα της μέσης πίεσης αυτού) αυξάνονται με τη χρήση συνδυασμένης υπερπλήρωσης. Ταυτόχρονα, μειώνονται οι εκπομπές ρύπων, πιο συγκεκριμένα οξειδίων του αζώτου NOx και σωματιδίων αιθάλης (τα συμπεράσματα για τα οποία προέκυψαν από τα διαγράμματα για τον λόγο ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου (λ_a)). Επιπλέον, η λειτουργία του μηχανικού κοχλιοειδούς συμπιεστή τύπου Lysholm, που χρησιμοποιήθηκε στην εφαρμογή αυτή, επέτρεψε την ομαλότερη και πιο αποδοτική λειτουργία του στροβιλο-υπερπληρωτή, από της χαμηλές κιάλας στροφές του κινητήρα, σημείο στο οποίο ο ίδιος υστερούσε αισθητά.

Οι βελτιώσεις αυτές όμως έρχονται με ένα τίμημα. Αυτό έχει να κάνει με την κατανάλωση καυσίμου, η οποία αυξάνεται σημαντικά σε σχέση με την απλή στροβιλο-υπερπλήρωση. Κάτι τέτοιο βέβαια ήταν αναμενόμενο, καθώς μεγαλύτερη πίεση του αέρα εισαγωγής επιτρέπει έγχυση στους κυλίνδρους μεγαλύτερης ποσότητας καυσίμου. Σε κάθε περίπτωση, η αύξηση αυτή δεν μπορεί να αντισταθμίσει την αύξηση στην ισχύ του κινητήρα, αφού ένα ποσοστό αυτής δαπανάται από τον μηχανικό συμπιεστή για την περιστροφή και την λειτουργία του (δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι αυτός είναι σταθερά συνδεδεμένος με την στροφαλοφόρο άτρακτο του κινητήρα).

Ακόμα, προσοχή απαιτείται στο σημείο που θα επιλεγεί να γίνει αποσύμπλεξη του μηχανικού συμπιεστή και η παύση της λειτουργίας του. Από τη μία, αν αυτό γίνει σε χαμηλές στροφές, τότε μπορεί να χάσουμε μέρος των ευεργετικών συνεπειών της συνδυασμένης υπερπλήρωσης στις επιδόσεις του κινητήρα. Από την άλλη, καθυστέρηση στην αποσύμπλεξη του μηχανικού συμπιεστή μπορεί να οδηγήσει σε πτώση αυτών των επιδόσεων, αφού από κάποιο σημείο λειτουργίας και μετά, η απόδοσή του μειώνεται αισθητά και αρχίζει να επιβαρύνει τη λειτουργία του κινητήρα, καθώς

απορροφά ισχύ από αυτόν χωρίς να μπορεί να προσφέρει το αντίστοιχο έργο. Σημαντικό ρόλο παίζει επίσης και η “αστάθεια” που παρατηρείται κατά την αποσύμπλεξη του μηχανικού συμπιεστή, αλλά και, αντίστοιχα, κατά την σύμπλεξη του όταν πέφτουν οι στροφές του κινητήρα, με ό,τι άλλο αυτό μπορεί να συνεπάγεται στην ταχύτητα του οχήματος και στην άνεση οδήγησης.

Συμπεραίνουμε λοιπόν πως, συνολικά, η συνδυασμένη υπερπλήρωση έχει θετικά αποτελέσματα τόσο για τη μόνιμη όσο και για την μεταβατική λειτουργία ενός κινητήρα, αλλά αυτό πάντα προϋποθέτει το ταίριασμα του στροβιλο-υπερπληρωτή αλλά και του μηχανικού συμπιεστή θετικής εκτόπισης να έχει γίνει σωστά και να συμβαδίζει με τον εκάστοτε κινητήρα και κυρίως την εκάστοτε εφαρμογή.

Περαιτέρω επιβεβαίωση αυτών των συμπερασμάτων μπορεί να γίνει σε επίπεδο Κύκλου Πόλης, όπου θα συν-υπολογιστούν από τη μία πλευρά το όφελος όσον αφορά τις εκπομπές ρύπων και από την άλλη πλευρά το μειονέκτημα της αυξημένης κατανάλωσης καυσίμου άρα και εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

Βιβλιογραφία

- 1) Κ. Δ. Ρακόπουλος (1988), «Αρχές εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης. Εισαγωγή–Λειτουργία–Θερμοδυναμική», Εκδόσεις «Γρηγ. Φούντας», Αθήνα.
- 2) Κ.Δ. Ρακόπουλος, Ε.Γ. Γιακουμής (2011), «Εναλλαγή αερίων και υπερπλήρωση ΜΕΚ», Εκδόσεις «Γρηγ. Φούντας», Αθήνα.
- 3) C.D. Rakopoulos, E.G. Giakoumis (2009), «Diesel engine transient operation», Springer, London
- 4) Κ. Δ. Ρακόπουλος (2000), «Εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσης II. Εμβάθυνση στην κατασκευή και λειτουργία», Εκδόσεις «Γρηγ. Φούντας», Αθήνα.
- 5) Κ.Δ. Ρακόπουλος, Δ.Θ. Χουντάλας (1998), «Καύση ρύπανση εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης», Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- 6) Gamma Technologies, Inc. (2010), «GT-Suite Engine Performance Tutorials, Version 7.1», Gamma Technologies, Inc.
- 7) Gamma Technologies, www.gtisoft.com
- 8) Lysholm Twin-Screw Superchargers, www.lysholm.us