



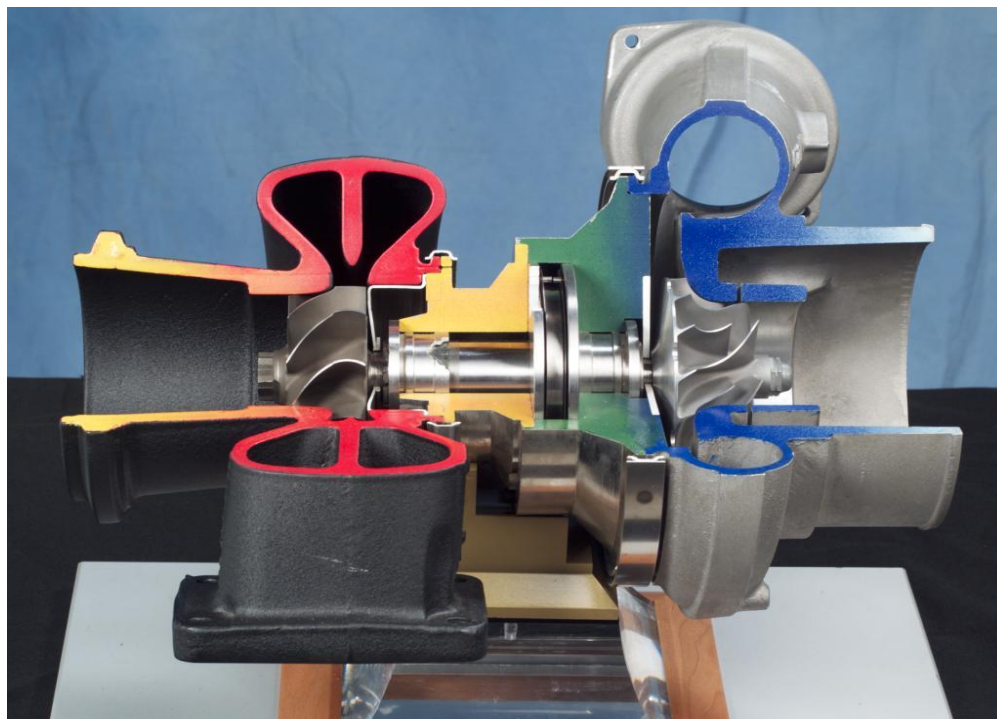
**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΘΕΜΑ: ΣΤΡΟΒΙΛΟ-ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΟΤΤΟ**



**ΟΝΟΜΑ: ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΠΟΥΛΟΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Ε.Γ. ΓΙΑΚΟΥΜΗΣ, ΛΕΚΤΟΡΑΣ, ΕΜΠ**

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2010

## Πρόλογος

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ευάγγελο Γιακουμή για την ανάθεση του θέματος και για τη συνεχή και πολύτιμη καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής αυτής. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Κ. Ρακόπουλο και τον Καθηγητή κ. Δ. Χουντάλα, οι οποίοι συνδιδάσκουν τα μαθήματα που αφορούν στις Μηχανές Εσωτερικής Καύσης. Η διδασκαλία τους μου κίνησε το ενδιαφέρον για την περαιτέρω ενασχόλησή μου με τη μελέτη των Μηχανών Εσωτερικής Καύσης και συγκεκριμένα των στροβιλο-υπερπληρωμένων κινητήρων, οι οποίοι είναι και το αντικείμενο της παρούσης εργασίας.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – Θεωρητική Ανάλυση

1. Εισαγωγή .....	5
2. Καύση και κρουστική καύση σε ένα κινητήρα Otto .....	5
3. Βαθμός συμπίεσης και πίεση υπερπλήρωσης .....	10
4. Χρονισμός έναυσης και κρουστική καύση .....	15
5. Ψύξη αέρα υπερπλήρωσης .....	23
6. Εξαεριωτής και έγχυση καυσίμου .....	24
7. Πολλαπλής εισαγωγής και εξαγωγής .....	37
8. Σύστημα ελέγχου πίεσης υπερπλήρωσης στροβιλο-υπερπληρωτή.....	40
8.1 Επιλέγοντας το σωστό στροβιλο-υπερπληρωτή για την επιθυμητή μέγιστη πίεση υπερπλήρωσης .....	41
8.2 Σύστημα παράκαμψης καυσαερίων .....	42
8.3 Στρόβιλοι μεταβλητής γεωμετρίας .....	44
9. Χρονισμός βαλβίδων.....	45
10. Απόδοση μηχανής.....	48
11. Εκπομπές καυσαερίου .....	59
12. Αγωνιστικοί Κινητήρες.....	64
13. Κινητήρες αεροσκαφών .....	66

14. Στρωματοποιημένοι Κινητήρες Υπερπλήρωσης .....	68
15. Υστέρηση (καθυστέρηση) υπερπλήρωσης .....	70

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - Αριθμητική Ανάλυση**

1. Εισαγωγή .....	78
2. Περιγραφή της διαδικασίας υπολογισμού.....	78
3. Αποτελέσματα .....	83
Βιβλιογραφία .....	87

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## *Στροβιλο-υπερπλήρωση κινητήρα Otto (βενζινοκινητήρα) – Θεωρητική ανάλυση*

### **1. Εισαγωγή**

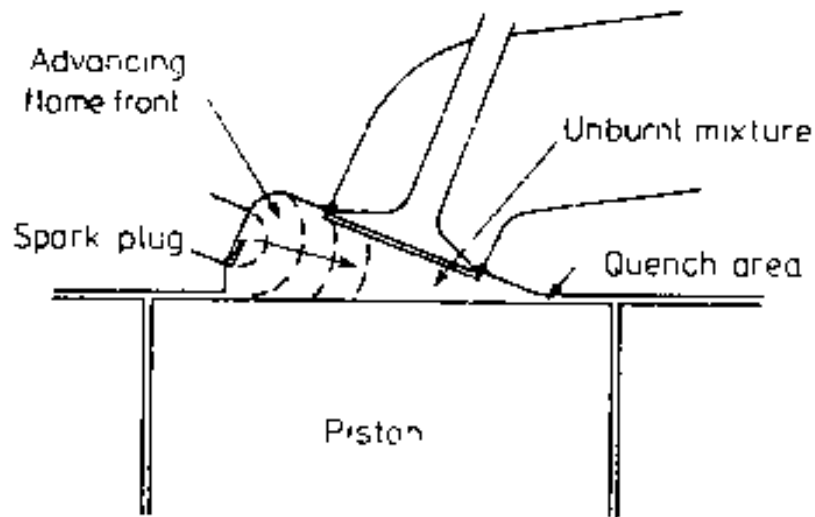
Εδώ και πολλά χρόνια οι στροβιλο-υπερπληρωτές χρησιμοποιούνται κυρίως σε κινητήρες diesel. Αντίθετα, κατασκευάζονταν λίγοι στροβιλο-υπερπληρωμένοι κινητήρες Otto και δεν είναι πολύ πιθανό να λειτουργούν πολλοί βενζινοκινητήρες κατά αυτόν τον τρόπο στο μέλλον. Αυτό που δυσκολεύει τη στροβιλο-υπερπλήρωση ενός βενζινοκινητήρα σε σχέση με ένα κινητήρα diesel, είναι η διαφορά στη διαδικασία της καύσης.

### **2. Καύση και κρουστική καύση σε ένα κινητήρα Otto**

Η μέθοδος προετοιμασίας του καυσίμου σε ένα κινητήρα Otto είναι εντελώς διαφορετική από αυτή σε ένα κινητήρα diesel. Ο αέρας εισέρχεται στον κύλινδρο μιας μηχανής diesel, στη συνέχεια συμπιέζεται και το καύσιμο εγχέεται μόνο όταν είναι απαραίτητο για την καύση. Ο αέρας και το καύσιμο αναμιγνύονται και γίνεται η αυτανάφλεξη, εφόσον η θερμοκρασία του συμπιεσμένου αέρα είναι υψηλή. Σε ένα βενζινοκινητήρα ο αέρας και το καύσιμο αναμιγνύονται πριν εισέλθει ο αέρας στους κυλίνδρους. Είτε χρησιμοποιείται σύστημα με εξαεριωτή, είτε με έγχυση βενζίνης πολλαπλών

σημείων (multi-point injection), ο κύλινδρος συμπιέζει ένα ομογενές μίγμα αέρα/καυσίμου, με την αναλογία του καυσίμου να είναι ελεγχόμενη πολύ προσεκτικά και κοντά στη στοιχειομετρική αναλογία. Εξαιρέση αποτελούν οι κινητήρες «στρωματοποιημένης καύσης» οι οποίοι προσεγγίζουν περισσότερο του κινητήρες diesel. Το ομογενές μίγμα αναφλέγεται με τη βοήθεια του σπινθηριστή (μπουζί). Σε αντίθεση με τους κινητήρες diesel, ο ρυθμός με τον οποίο εξελίσσεται η καύση δεν επηρεάζεται από τη διαδικασία ανάμιξης αέρα/καυσίμου αλλά από τη μεταφορά θερμότητας και μάζας από μια περιοχή που καίγεται προς μια άλλη που δεν καίγεται καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται λόγω της συνεχούς καύσης. Έτσι, η φλόγα επεκτείνεται μέσα στο θάλαμο καύσης, από το σπινθηριστή, μέχρι να καεί ολόκληρο το καύσιμο.

Η αυτανάφλεξη αποφεύγεται κρατώντας το βαθμό συμπίεσης τόσο χαμηλό, ώστε η θερμοκρασία του μίγματος να διατηρείται κάτω από το σημείο αυτανάφλεξης του καυσίμου, αλλά και χρησιμοποιώντας καύσιμο με υψηλή θερμοκρασία αυτανάφλεξης. Ας αναλογιστούμε τι θα συνέβαινε αν ο βαθμός συμπίεσης ήταν πολύ υψηλός και η αυτανάφλεξη πραγματοποιείτο πριν τη δράση του σπινθηριστή. Καθώς ο αέρας και το καύσιμο υπάρχουν σε ένα ομοιόμορφο μίγμα, συμπεραίνουμε ότι όλο το καύσιμο θα αυτανάφλεγεί σχεδόν ακαριαία. Η καύση σίγουρα θα ήταν αρκετά γρήγορη ώστε να προκληθεί έκρηξη και είναι σχεδόν βέβαιο ότι η μηχανή μετά από πολύωρη τέτοια λειτουργία θα καταστρεφόταν. Η καύση πρέπει να είναι γρήγορη, καθώς δεν υπάρχει πολύς διαθέσιμος χρόνος, αλλά όχι ακαριαία.



Σχ. 1 Διάδοση φλόγας σε μηχανή με σπινθηριστή

Στο Σχήμα 1 φαίνεται το μέτωπο της φλόγας, καθώς διαδίδεται από το σπινθηριστή μέσω του θαλάμου καύσης. Ο ρυθμός διάδοσής του εξαρτάται από την τοπική τύρβη, τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ καιγόμενης και άκαυστης περιοχής, τη θέρμανση λόγω συμπίεσης του άκαυστου καυσαερίου εξαιτίας της κίνησης του εμβόλου και τη διάδοση του καιγόμενου μίγματος, του λόγου αέρα/καυσίμου και της μεταφοράς θερμότητας στα τοιχώματα (κάτι που θα επιβραδύνει την διαδικασία της καύσης). Καθώς το άκαυστο μίγμα, που βρίσκεται μακριά από το αναπτυσσόμενο μέτωπο φλόγας (συχνά το αποκαλούμε και «τελικό αέριο μίγμα» (end gas)), θερμαίνεται από την συμπίεση και σε ένα βαθμό και από την ακτινοβολία, το μίγμα αυτό μπορεί να φτάσει τη θερμοκρασία αυτανάφλεξης πριν φτάσει το μέτωπο φλόγας. Ένα μεγάλο μέρος αυτού του μίγματος μπορεί να φτάσει σε αυτή την κατάσταση, με αποτέλεσμα το τελικό αέριο μίγμα, πιθανώς, να προκαλέσει έκρηξη. Αυτή η πολύ απότομη καύση δημιουργεί μεγάλη αύξηση της πίεσης στον κύλινδρο, ασκώντας τέτοια δύναμη που μπορεί να προκαλέσει στα έδρανα «κρουστική

καύση» knock ή detonation· εξ ου και η γενική καθιέρωση του όρου (αλλιώς καλείται «πυράκια»).

Η απότομη κρουστική καύση προκαλεί έντονη πίεση στο εσωτερικό του θαλάμου καύσης και μεγάλο ρυθμό τοπικής μεταφοράς θερμότητας στα μετωπικά τοιχώματα του εμβόλου και του κυλίνδρου. Καθώς η κρουστική καύση είναι πιο πιθανό να συμβεί στο μακρινότερο σημείο από το σπινθηριστή, σε αυτές τις περιοχές συνήθως παρουσιάζονται βλάβες.

Προκειμένου να μειωθεί η πιθανότητα να συμβεί κρουστική καύση σε μια μηχανή εφαρμόζονται διάφορες μέθοδοι:

- 1) Ο λόγος συμπίεσης πρέπει να διατηρηθεί αρκετά χαμηλά ώστε να κρατήσει την αύξηση της θερμοκρασίας λόγω συμπίεσης σε ικανοποιητικό επίπεδο.
- 2) Τα καύσιμα που έχουν υψηλή θερμοκρασία αυτανάφλεξης είναι συγκεκριμένα. Η θερμοκρασία αυτανάφλεξης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, με σημαντικότερους τις ιδιότητες του καυσίμου, το λόγο αέρα/καυσίμου και την πίεση. Γενικά, η «αντίσταση στην κρουστική καύση» («αντικτυπική» ικανότητα) ενός καυσίμου μετράται με βάση τον αριθμό οκτανίων (RON)· όσο περισσότερα οκτάνια περιέχει ένα καύσιμο, τόσο υψηλότερη θερμοκρασία αυτανάφλεξης έχει. Τα καύσιμα πολλών οκτανίων παράγονται με κατάλληλη διεργασία και επιλογή ακολουθώντας φιλτράρισμα του βασικού αργού πετρελαίου και χρήση διάφορων προσθέτων, όπως, παλαιότερα, του τετρααιθυλιούχου μολύβδου.

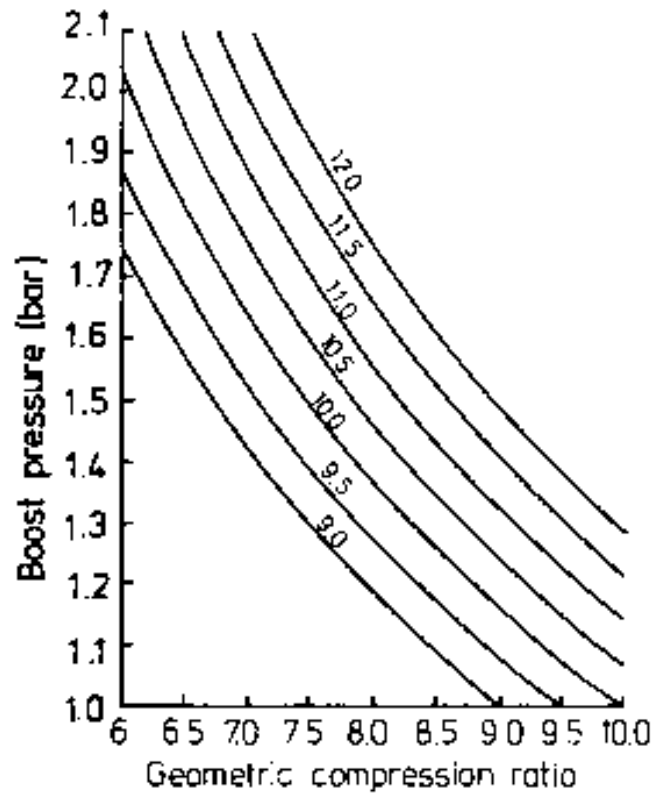


3) Μια τρίτη μέθοδος για τη μείωση της πιθανότητας κρουστικής καύσης είναι η μείωση της μέγιστης απόστασης του σπινθηριστή από το ακραίο σημείο του θαλάμου καύσης. Τέλος, το τελικό αέριο μπορεί να διατηρείται σχετικά κρύο με την τοποθέτηση τοιχωμάτων μεγάλης επιφάνειας, για το αέριο, στα ακραία σημεία του θαλάμου καύσης. Η μεταφορά θερμότητας προς τα τοιχώματα έχει την τάση να «σβήσει» το αέριο, εξ ου και η ονομασία «μέτωπο σβησίματος φλόγας».

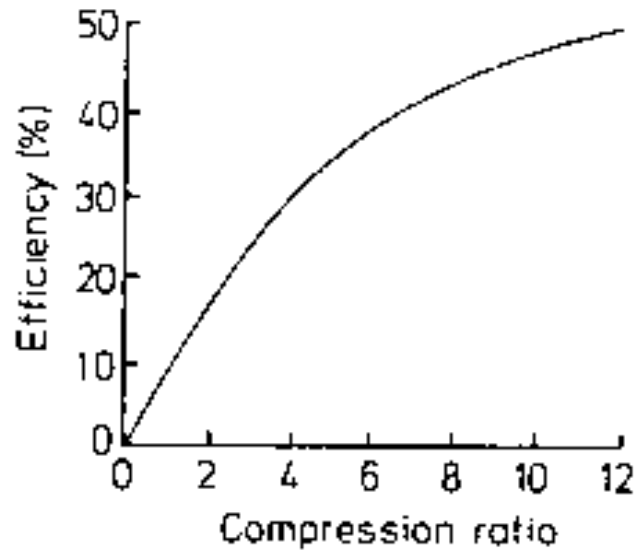
Το σημαντικό είναι ότι οποιαδήποτε μέτρα μπορούν να αυξήσουν τη θερμοκρασία του μίγματος κατά το τέλος του χρόνου συμπίεσης, είναι ανεπιθύμητα. Δυστυχώς, όμως, η υπερπλήρωση κάνει ακριβώς αυτό. Αυξάνοντας τη θερμοκρασία και την πίεση πολλαπλής εισαγωγής, η θερμοκρασία και η πίεση του μίγματος μέσα στον κύλινδρο θα αυξηθούν κατά τη διάρκεια της συμπίεσης. Εφόσον ο κατασκευαστής έχει αρχικά επιτρέψει ένα συγκεκριμένο περιθώριο ελεύθερο από κρουστική καύση, είναι πιθανό να υπερπληρωθεί, ελαφρώς, η μηχανή χωρίς να προκληθεί κρουστική καύση, αλλά έτσι θα μειωθεί το περιθώριο ασφαλείας. Σε άλλη περίπτωση, μέτρα όπως ο χαμηλός γεωμετρικός βαθμός συμπίεσης, η βραδυπορία του χρονισμού έναυσης ή η ψύξη του αέρα υπερπλήρωσης, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για να αντισταθμίσουμε την επίδραση της αύξησης της πίεσης του αερίου μίγματος.

### 3. Βαθμός συμπίεσης και πίεση υπερπλήρωσης

Πολλές στροβιλο-υπερπληρωμένες μηχανές Otto έχουν χαμηλό βαθμό συμπίεσης προκειμένου να αποφύγουν την κρουστική καύση. Το Σχήμα 2 απεικονίζει τη σχέση μεταξύ του γεωμετρικού βαθμού συμπίεσης της μηχανής και του ολικού πραγματικού βαθμού συμπίεσης καθώς η πίεση υπερπλήρωσης αυξάνεται. Για παράδειγμα, ένας βαθμός συμπίεσης της τάξης του 9/1 για μια μηχανή φυσικής αναπνοής θα πρέπει να μειωθεί στο 6,7/1 για μια αύξηση πίεσης 0,5 bar, χωρίς αλλαγή στις παραμέτρους ελέγχου της κρουστικής καύσης. Αυτή η μείωση του βαθμού συμπίεσης δε μειώνει τη μάζα του μίγματος που βρίσκεται μέσα στον κύλινδρο όταν η βαλβίδα εισαγωγής κλείνει (τουλάχιστον όχι σημαντικά), αλλά αντισταθμίζει την άνοδο της θερμοκρασίας από το συμπιεστή του στροβιλο-υπερπληρωτή. Έτσι μειώνοντας το γεωμετρικό βαθμό συμπίεσης εξασφαλίζεται ένα περιθώριο ασφαλείας για λειτουργία χωρίς κρουστική καύση. Επιπροσθέτως, μειώνοντας την πίεση του θαλάμου καύσης, το αυξημένο μηχανικό φορτίο της μηχανής θα ελέγχεται καλύτερα.



Σχ. 2 Σχέση μεταξύ της αύξησης πίεσης, του γεωμετρικού βαθμού συμπίεσης και του πραγματικού βαθμού συμπίεσης (οι καμπύλες γραμμές δείχνουν τον πραγματικό βαθμό συμπίεσης)



Σχ. 3 Βαθμός απόδοσης ιδανικού κύκλου Otto με στοιχειομετρική καύση

Ο βαθμός απόδοσης (και άρα η ισχύς εξόδου για συγκεκριμένη ποσότητα καυσίμου) του θερμοδυναμικού κύκλου λειτουργίας της μηχανής εξαρτάται από το βαθμό συμπίεσης (ή αντίστοιχα βαθμό αποτόνωσης). Έτσι, μειώνοντας το βαθμό συμπίεσης για να αποφύγουμε την κρουστική καύση, η απόδοση του θερμοδυναμικού κύκλου μειώνεται. Ως αποτέλεσμα, είναι πιθανό, αλλά όχι βέβαιο, η συνολική απόδοση της μηχανής να είναι μειωμένη. Η πτώση του βαθμού απόδοσης και η μείωση του βαθμού συμπίεσης δε συνδέονται γραμμικά. Στο Σχήμα 3 φαίνεται ο βαθμός απόδοσης του απλού ιδανικού κύκλου Otto συναρτήσει του βαθμού συμπίεσης. Αν και δεν είναι εντελώς ρεαλιστικό, δείχνει ότι μείωση του βαθμού συμπίεσης κατά 25%, συνεπάγεται μείωση του βαθμού απόδοσης μόνο κατά 10%. Σε συνδυασμό με τις απώλειες κατά τη θερμοδυναμική διαδικασία, οι τριβές στα έδρανα και άλλες μηχανικές απώλειες μειώνουν την ισχύ εξόδου που μεταδίδεται στη στροφαλοφόρο άτρακτο. Από τη στιγμή που ο μειωμένος βαθμός συμπίεσης αντισταθμίζει, εν μέρει, την αύξηση της πίεσης του κυλίνδρου λόγω της στροβιλο-υπερπλήρωσης, το μηχανικό φορτίο (άρα και οι απώλειες τριβών) δε θα αλλάξει σημαντικά με τη στροβιλο-υπερπλήρωση. Οπότε η απόλυτη απώλεια ισχύος λόγω τριβών θα παραμείνει περίπου σταθερή.

Ας θεωρήσουμε σε ένα απλοποιημένο παράδειγμα, μια μηχανή με βαθμό συμπίεσης 10/1, που παράγει ισχύ εξόδου 100 kW, με ενδεικνύμενο βαθμό απόδοσης ίσο με 46% και μηχανικό βαθμό απόδοσης 70%. Η ισχύς είναι 312 kW εκ των οποίων τα 143 kW είναι η ωφέλιμη ισχύς και 43 kW χάνονται λόγω μηχανικών απωλειών ( $312 \times 0,46 = 143$  ,  $143 \times 0,7 = 100$ ). Έστω ότι η μηχανή είναι στροβιλο-υπερπληρωμένη, έτσι ώστε 1,5 φορά περισσότερο μίγμα να βρίσκεται στον κύλινδρο και ο βαθμός συμπίεσης μειωθεί στο 7,5

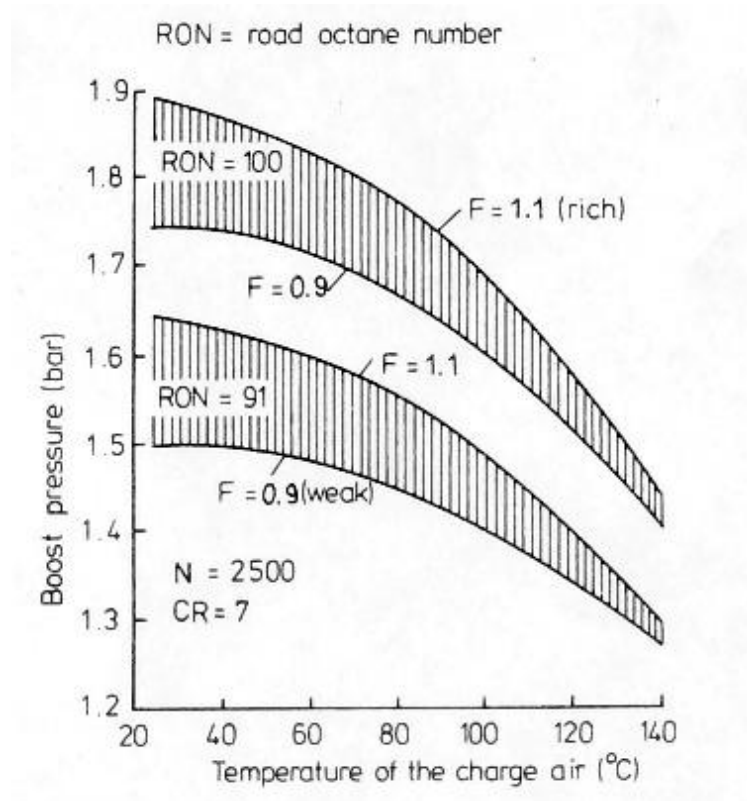
(ενδεικνύμενος βαθμός απόδοσης 42%, Σχήμα 3). Η ισχύς είναι 468 kW και η ωφέλιμη ισχύς είναι 196 kW ( $312 \times 1,5 = 468$ ,  $468 \times 0,42 = 196$ ). Αν οι μηχανικές απώλειες παραμείνουν σταθερές στα 43 kW, τότε η ισχύς εξόδου στην άτρακτο είναι 153 kW ( $196 - 43 = 153$ ) και ο ολικός βαθμός απόδοσης είναι 32,7% ( $153/468$ ), ενώ για τον απλό κινητήρα είναι 32,1% ( $100/312$ ). Έτσι η ισχύς εξόδου αυξήθηκε σημαντικά, με μία μικρή αύξηση στο βαθμό απόδοσης. Μπορεί, βέβαια, το συγκεκριμένο να μην είναι πολύ ρεαλιστικό παράδειγμα, καθώς οι βαθμοί απόδοσης των πραγματικών μηχανών είναι χαμηλότεροι, ωστόσο δείχνει ότι η στροβιλο-υπερπλήρωση μπορεί να βελτιώσει την απόδοση, με εξαίρεση κάποιες περιπτώσεις.

Για συγκεκριμένη ισχύ εξόδου θα επιλεγεί η κατάλληλη πίεση υπερπλήρωσης λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες ισχύος λόγω του χαμηλού βαθμού συμπίεσης. Ο βαθμός συμπίεσης που πραγματικά χρησιμοποιείται μπορεί να καθοριστεί μόνο πειραματικά, ώστε να αφήσει ένα κατάλληλο περιθώριο για αποφυγή της κρουστικής καύσης. Εναλλακτικά, ο βαθμός συμπίεσης μπορεί να μειωθεί και η πίεση υπερπλήρωσης να προσαρμοστεί σε τέτοιο βαθμό, ώστε να έχουμε το επιθυμητό περιθώριο αποφυγής της κρουστικής καύσης. Η τελευταία τεχνική χρησιμοποιείται συνήθως κατά την αρχική ανάπτυξη, ενώ η πρώτη για την προ-παραγωγή. Δυστυχώς, δεν υπάρχουν γενικοί κανόνες για την επιλογή του βαθμού συμπίεσης καθώς αυτός εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος της εκάστοτε μηχανής, το λεπτομερή σχεδιασμό της, το σύστημα προετοιμασίας καυσίμου μίγματος, το σύστημα ελέγχου της πίεσης υπερπλήρωσης και από τη φύση των διαθέσιμων καυσίμων. Συνήθως, ένας βαθμός συμπίεσης 2 μονάδες κάτω από το

φυσιολογικό χρησιμεύει σε μια μέτρια πίεση υπερπλήρωσης (0,5 bar) αν δε χρησιμοποιηθεί καμία άλλη τεχνική για την αποφυγή της κρουστικής καύσης.

Το πιο σημαντικό είναι το γεγονός ότι οποιεσδήποτε τροποποιήσεις και να γίνουν στη μηχανή, η θερμοκρασία υπερπλήρωσης πρέπει να κρατηθεί όσο το δυνατόν χαμηλότερα ώστε ο βαθμός συμπίεσης να διατηρηθεί όσο γίνεται υψηλότερα αναλόγως με την ανάγκη για μη ύπαρξη κρουστικής καύσης. Αυτή η θεώρηση εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, με σημαντικότερους, το σύστημα ελέγχου πίεσης υπερπλήρωσης, την ανάμιξη του αέρα με τη βενζίνη και το αν γίνεται χρήση ψυγείου του αέρα υπερπλήρωσης.

Στο Σχήμα 4 απεικονίζεται η σχέση μεταξύ πίεσης υπερπλήρωσης, θερμοκρασίας αέρα υπερπλήρωσης, λόγου αέρα/καυσίμου και αριθμού οκτανίων καυσίμου (RON) στο όριο κρουστικής καύσης, υπό σταθερό βαθμό συμπίεσης και βέλτιστο χρονισμό έναυσης. Όπως ήταν αναμενόμενο ο αριθμός οκτανίων έχει μεγάλη επίδραση στην επιτρεπτή πίεση υπερπλήρωσης, κάτι που συμβαίνει και με την ψύξη του αέρα υπερπλήρωσης. Επιπροσθέτως, μεγαλύτεροι λόγοι καυσίμου/αέρα επιτρέπουν υψηλότερη πίεση υπερπλήρωσης.

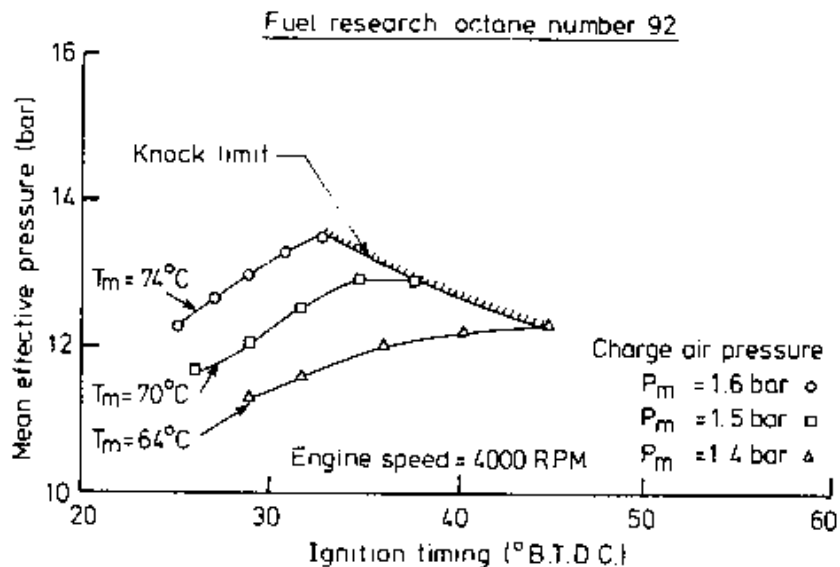


Σχ. 4 Επίδραση της θερμοκρασίας του αέρα υπερπλήρωσης στην πίεση υπερπλήρωσης, σε διαφορετικούς λόγους αέρα/καυσίμου και διάφορες ποσότητες καυσίμου

#### 4. Χρονισμός έναυσης και κρουστική καύση

Μια τεχνική, για μείωση της τάσης της μηχανής για κρουστική καύση, η οποία αποτελεί εναλλακτική ή συμπληρωματική λύση της μείωσης του βαθμού συμπίεσης, είναι ο αργοπορημένος χρονισμός έναυσης. Επιβραδύνοντας την καύση, μειώνουμε τη θερμοκρασία του τελικού αερίου καθυστερώντας τη μεταφορά θερμότητας όταν το έμβολο βρίσκεται στη θέση του άνω νεκρού σημείου (ΑΝΣ). Έτσι ο όγκος του κυλίνδρου αυξάνεται σε ένα κρίσιμο χρονικό σημείο μειώνοντας τη συμπίεση και την άνοδο της θερμοκρασίας που θα

είχαμε σε αντίθετη περίπτωση. Η καθυστερημένη έναυση μειώνει, όμως, την απόδοση της μηχανής, συντομεύοντας την πραγματική εκτόνωση. Παρ' όλο που είναι σχετική με τη μείωση του βαθμού συμπίεσης, η μέθοδος αυτή είναι πιο ευέλικτη καθώς είναι σχετικά εύκολο να καθυστερήσουμε το χρονισμό έναυσης όταν η πίεση υπερπλήρωσης είναι αρκετά υψηλή ώστε να αποφευχθεί η κρουστική καύση.



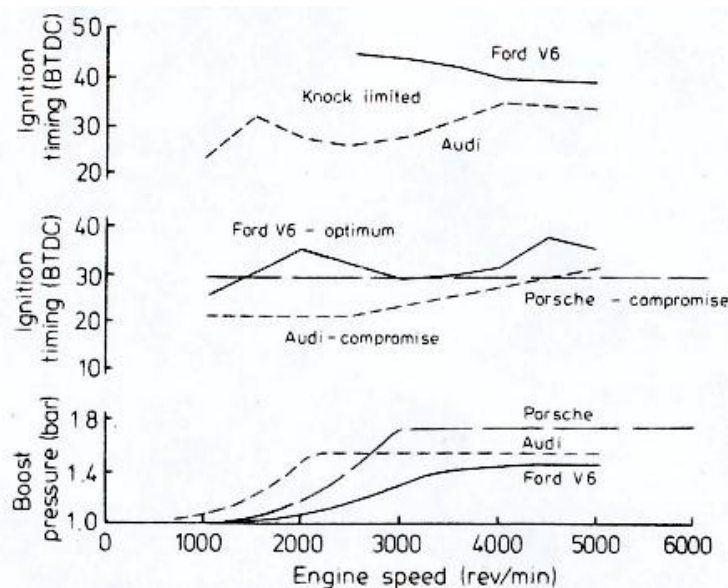
Σχ. 5 Επίδραση της περιορισμένης κρουστικής καύσης στο χρονισμό του σπινθηριστή, στη θερμοκρασία αέρα υπερπλήρωσης και στην πίεση αέρα υπερπλήρωσης

Το Σχήμα 5 δείχνει το χρονισμό έναυσης περιορισμένης κρουστικής καύσης στροβιλο-υπερπληρωμένης μηχανής με σταθερό βαθμό συμπίεσης ίσο με 6,9. Σε πίεση υπερπλήρωσης 1,4 , 1,5 και 1,6 bar η θερμοκρασία αέρα είναι 64, 70 και 74 °C, αντίστοιχα. Ο συνδυασμός της επίδρασης της αυξημένης πίεσης και της αυξημένης θερμοκρασίας καθιστά απαραίτητη την καθυστέρηση του χρονισμού έναυσης κατά 45 μοίρες γωνίας στροφάλου πριν το άνω νεκρό σημείο για πίεση υπερπλήρωσης 1,4 bar, 38 μοίρες γωνίας στροφάλου για πίεση 1,5 bar και 33 μοίρες γωνίας στροφάλου για πίεση 1,6 bar. Η καθυστέρηση στο χρονισμό έναυσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για υψηλότερη



πίεση υπερπλήρωσης χωρίς κρουστική καύση. Στο Σχήμα 5 φαίνεται ότι η αύξηση της πίεσης υπερπλήρωσης από 1,4 σε 1,6 προκάλεσε αύξηση της μέσης πραγματικής πίεσης (mean effective engine) από 12,3 bar σε 13,5 bar.

Προκειμένου να αποφύγουμε αύξηση κατανάλωσης καυσίμου με την καθυστέρηση έναυσης, η τεχνική αυτή πρέπει να εφαρμόζεται μόνο όταν ο στροβιλο-υπερπληρωτής αναπτύσσει υψηλή πίεση υπερπλήρωσης. Έτσι, για χαμηλές ταχύτητες και μεσαίο φορτίο διατηρείται ο κανονικός χρονισμός. Η απλούστερη μέθοδος για να το επιτύχουμε είναι η δημιουργία συστήματος πίεσης υπερπλήρωσης με χρονική υστέρηση στο εσωτερικό κενό διάφραγμα του διαμοιραστή έναυσης.

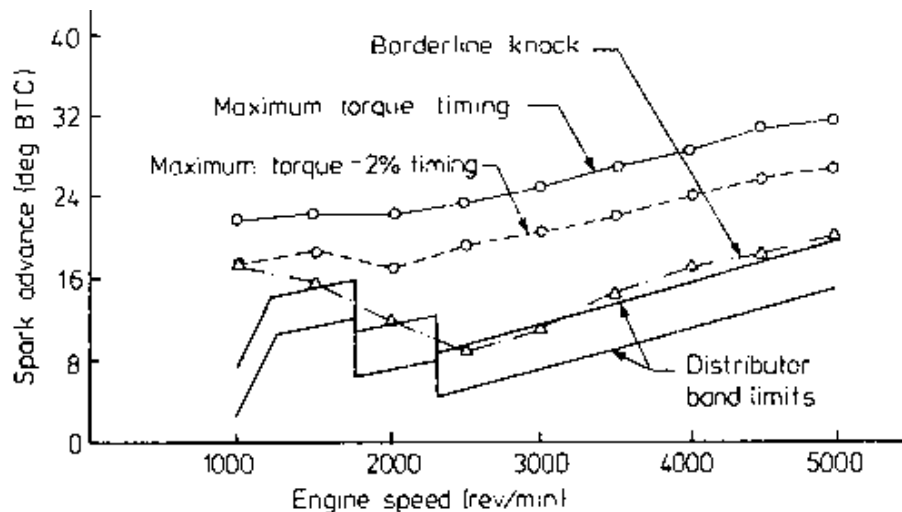


Σχ. 6 Απαιτήσεις του χρονισμού έναρξης για στροβιλο-υπερπληρωμένες μηχανές (Porsche, Ford, Audi)

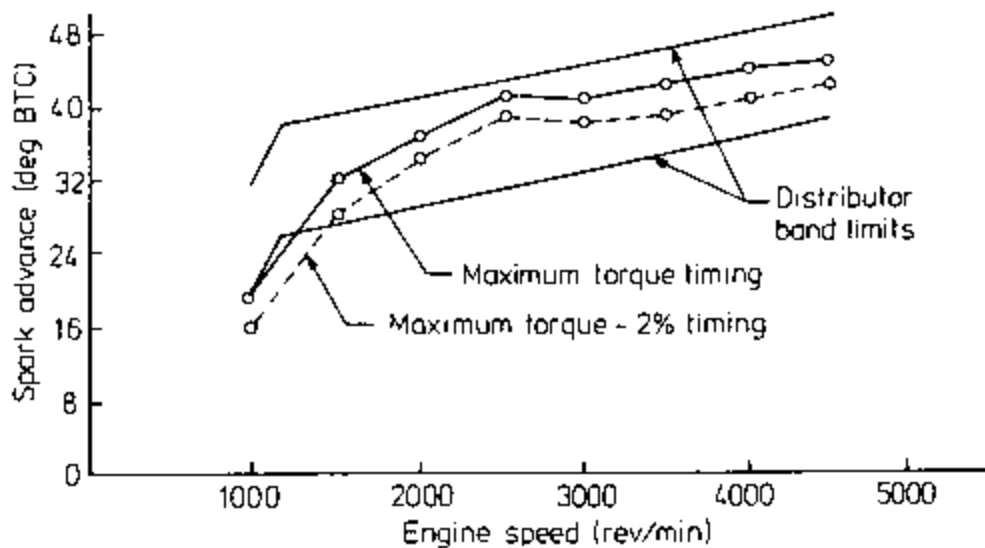
Το Σχήμα 6 δείχνει το βέλτιστο και το μέσο χρονισμό έναυσης με περιορισμένη κρουστική καύση, σε τρεις διαφορετικούς πειραματικούς στροβιλο-υπερπληρωμένους κινητήρες. Συγκρίνοντας τους κινητήρες Audi και Ford παρατηρούμε ότι στον δεύτερο, η πίεση υπερπλήρωσης αναπτύσσεται σε

χαμηλότερη ταχύτητα απαιτώντας υστέρηση πίεσης υπερπλήρωσης πάνω από 1500 rpm για το Audi, αλλά 200 rpm για το Ford.

Τα Σχήματα 7 και 8 αναφέρονται στο χρονοισμό έναυσης του κινητήρα της Ford Mustang. Με ανοιχτή τη ρυθμιστική δικλείδα («πεταλούδα»), ο χρονοισμός της μέγιστης πραγματικής ροπής στρέψης μειωμένος κατά 2% συμπίπτει με την καμπύλη κρουστικής καύσης στις 1000 rpm. Όσο αυξάνεται η ταχύτητα, αυξάνεται και η πίεση υπερπλήρωσης, οπότε για να αποφευχθεί η κρουστική καύση, πρέπει ο χρονοισμός έναυσης να καθυστερήσει ανάλογα με τη μέγιστη πραγματική στρεπτική ροπή. Η έναυση στη μηχανή της Ford αντιλαμβάνεται την πίεση υπερπλήρωσης και την καθυστέρηση του χρονοισμού σε δύο διακριτά βήματα, όπως φαίνεται από τις καμπύλες του διαμοιραστή στο Σχήμα 7. Σε μικρά ανοίγματα της ρυθμιστικής δικλείδας (Σχήμα 8), η προπορία του χρονοισμού της μέγιστης πραγματικής στρεπτικής ροπής, γίνεται χωρίς κρουστική καύση, καθώς ο στροβιλο-υπερπληρωτής δεν έχει πίεση υπερπλήρωσης.



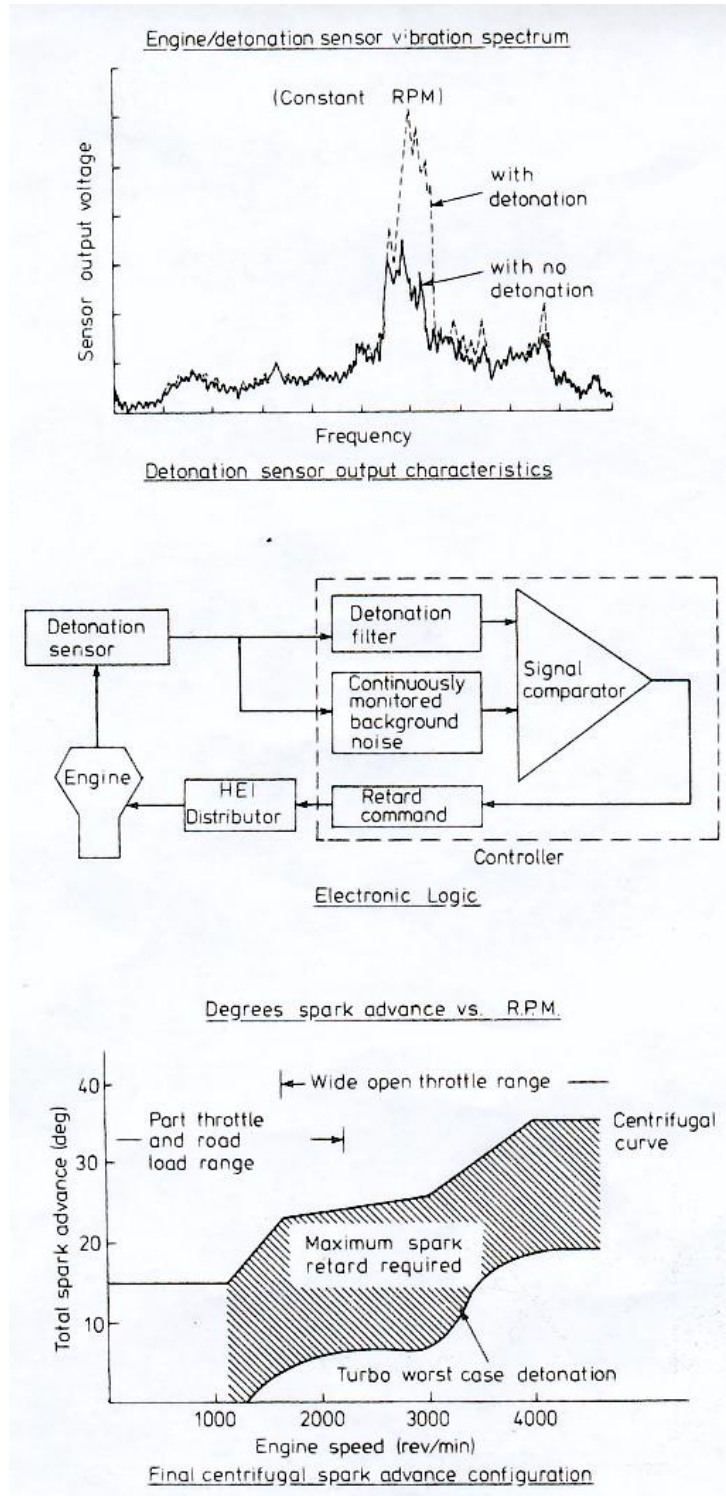
Σχ. 7 Χρονοισμός έναυσης με ανοιχτή ρυθμιστική δικλείδα



Σχ. 8 Χρονισμός έναυσης με κατάθλιψη 30 cm Hg

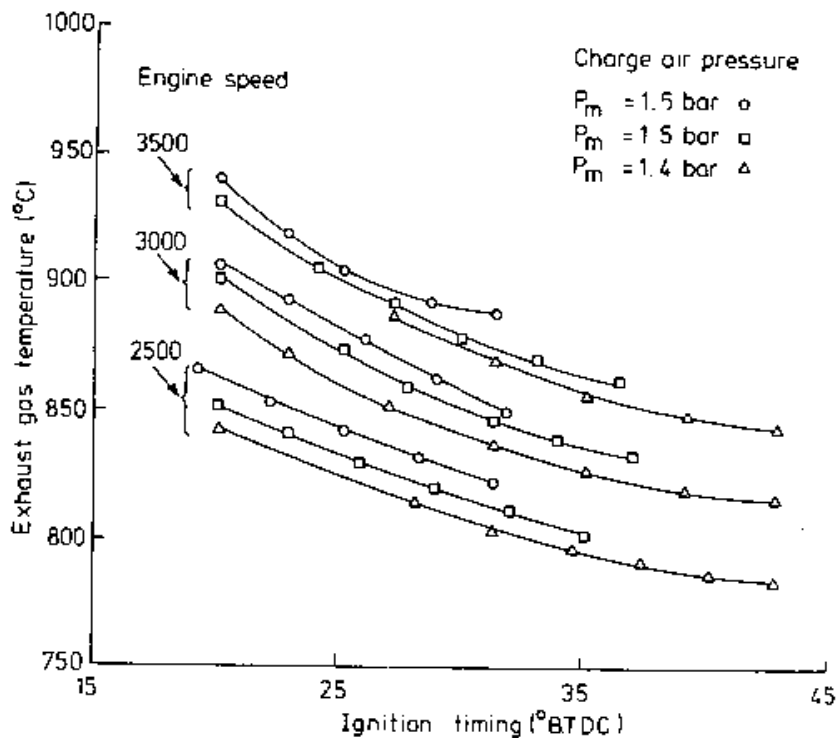
Ένα πιο περίπλοκο σύστημα χρονισμού χρησιμοποιείται από το στροβιλο-υπερπληρωμένο κινητήρα Buick V6. Λόγω του ότι ο σκοπός της καθυστέρησης του χρονισμού είναι η αποφυγή της κρουστικής καύσης, ο Buick έχει συνδέσει το χρονισμό έναυσης με ένα αισθητήρα ανίχνευσης κρουστικής καύσης. Ο αισθητήρας αναγνωρίζει τα επίπεδα δονήσεων που είναι πάνω από το φυσιολογικό, κάτι που συμβαίνει κατά την απότομη καύση και τη γρήγορη ταλάντωση της πίεσης του κυλίνδρου, όταν το μίγμα προαναφλέγεται. Με κατάλληλη ρύθμιση της ευαισθησίας του συστήματος, μπορεί να ανιχνευθεί η κατάσταση στην οποία υπάρχει αρχή κρουστικής καύσης. Ένας ηλεκτρονικός ελεγκτής καθυστερεί το χρονισμό έναυσης μπροστά στον κίνδυνο κρουστικής καύσης. Το Σχήμα 9 δείχνει τη φυγόκεντρη προπορία του χρονισμού που χρησιμοποιείται στο Buick και την τιμή της καθυστέρησης που είναι

απαραίτητη για την αποφυγή της κρουστικής καύσης κάτω από τις πιο δυσμενείς συνθήκες λειτουργίας σε κάθε ταχύτητα. Σε αντίθεση με τα αποτελέσματα που προβάλλονται στο Σχήμα 5, ο κινητήρας Buick με στροβιλο-υπερπλήρωση διατηρεί το βαθμό συμπίεσης (8/1) των μηχανών φυσικής αναπνοής. Ωστόσο, μεγάλος λόγος καυσίμου/αέρα χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της κρουστικής καύσης σε πλήρες φορτίο (Σχήμα 4).



Σχ. 9 Αισθητήρας κρουστικής καύσης Buick και ηλεκτρονικός έλεγχος σπινθηριστή

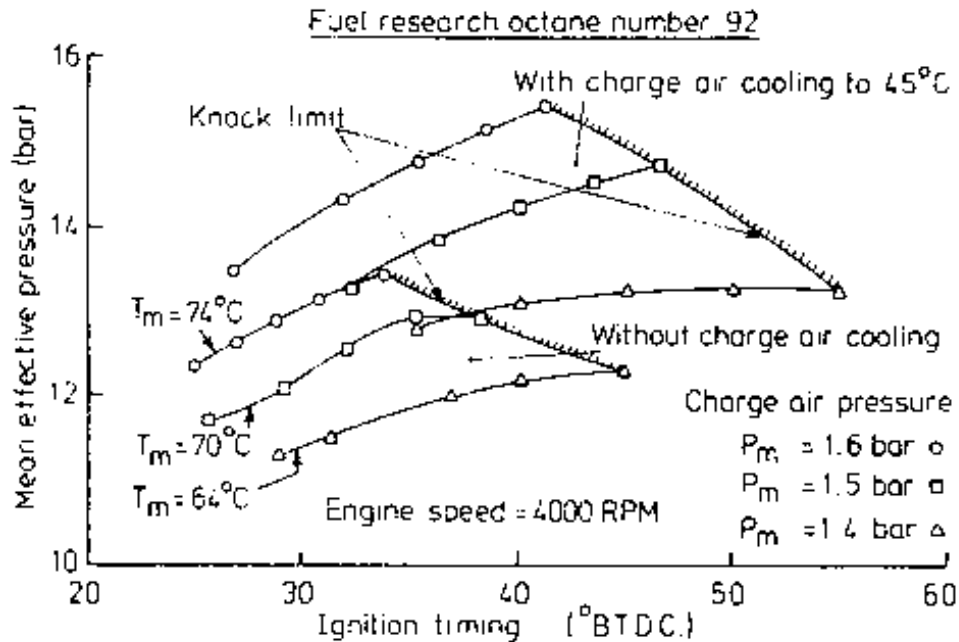
Ανεπιθύμητη στο χρονισμό έναυσης είναι η αύξηση της απόρριψης θερμότητας στο σύστημα καυσαερίων, καθώς καθυστερεί ολόκληρη η διαδικασία της καύσης και της αποτόνωσης. Με αυτό τον τρόπο αυξάνεται η θερμοκρασία εισόδου του στροβίλου (Σχήμα 10). Παρ' όλο που η αύξηση είναι μικρή, η πολύ υψηλή θερμοκρασία του καυσαερίου μηχανής Otto (έως 1000 °C) είναι πρόβλημα για την κατασκευή του στροβίλου και μπορεί να προκαλέσει οξείδωση του λιπαντικού λαδιού. Περιορισμένη είναι, επίσης, η αύξηση της δυναμικής ισχύος που μπορεί να αποκτηθεί με τη στροβιλο-υπερπλήρωση λόγω καθυστέρησης χρονισμού. Συνήθως, μια αλλαγή σε λιγότερο θερμό σπινθηριστή απαιτείται για να κρατήσει την ανώτατη θερμοκρασία σε φυσιολογικά επίπεδα.



Σχ. 10 Εξάρτηση θερμοκρασίας καυσαερίων από την έναυση του σπινθηριστή και την πίεση του αέρα υπερπλήρωσης

## 5. Ψύξη αέρα υπερπλήρωσης

Η αύξηση της θερμοκρασίας στο συμπιεστή και η επίδρασή της στην κρουστική καύση αντισταθμίζεται από την ψύξη του αέρα υπερπλήρωσης. Η σύγκριση των Σχημάτων 5 και 11 δείχνει ότι η ψύξη του αέρα υπερπλήρωσης έως μια θερμοκρασία 45 °C επιτρέπει την προπορία του χρονισμού έναυσης περιορισμένης κρουστικής καύσης κατά 10° γωνίας στροφάλου. Το γεγονός, όμως, ότι η πίεση υπερπλήρωσης της στροβιλο-υπερπληρωμένης μηχανής Otto είναι χαμηλή, σημαίνει ότι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ συμπιεσμένου και εξωτερικού αέρα είναι μικρή. Έτσι, ένα μεγάλο σύστημα ψύξης αέρα είναι απαραίτητο για να επιτύχει μεγάλη μείωση της θερμοκρασίας και μικρή απώλεια πίεσης. Το κέρδος όσον αφορά στην ισχύ εξόδου φαίνεται από τη σύγκριση των Σχημάτων 5 και 11, αλλά είναι αμφίβολο αν το πρόσθετο κόστος, η πολυπλοκότητα και ο όγκος είναι απαιτούμενα για συμβατικά αυτοκίνητα ή μόνο για ακριβά σπορ αυτοκίνητα. Ένα πρόσθετο μειονέκτημα είναι η χειροτέρευση της απόκρισης της μηχανής εξ αιτίας της αύξησης του συνολικού όγκου πολλαπλής εισαγωγής και της απώλειας πίεσης στο σύστημα ψύξης.



Σχ. 11 Εξάρτηση της περιορισμένης κρουστικής καύσης από τον χρονισμό του σπινθηριστή και από την πίεση αέρα υπερπλήρωσης με σύστημα ψύξης

## 6. Εξαεριωτής και έγχυση καυσίμου

Σε γενικές γραμμές, οι κατασκευαστές των στροβιλο-υπερπληρωμένων μηχανών Otto, έχουν τέσσερις επιλογές σχετικά με το σύστημα καυσίμου. Αρχικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε εξαεριωτής, είτε σύστημα έγχυσης καυσίμου. Δεύτερον, ο αέρας και το καύσιμο μπορούν να αναμιχθούν είτε πριν, είτε μετά τη συμπίεση. Στη μεγάλη πλειοψηφία, οι μηχανές Otto είναι εξοπλισμένες με εξαεριωτές καθώς είναι αρκετά απλούστεροι και φθηνότεροι από τα συστήματα έγχυσης καυσίμου. Για το λόγο αυτό οι περισσότεροι κατασκευαστές επιθυμούν να διατηρήσουν τους εξαεριωτές στις στροβιλο-υπερπληρωμένες μηχανές. Τα συστήματα έγχυσης καυσίμου χρησιμοποιούνται σε ακριβές μηχανές υψηλής απόδοσης, αλλά λόγω της ενσωμάτωσής τους σε



στροβιλο-υπερπληρωμένες μηχανές, μπορούν να ξεπεραστούν ορισμένες δυσκολίες που σχετίζονται με τους εξαεριωτές.

Είτε χρησιμοποιείται εξαεριωτής, είτε σύστημα έγχυσης καυσίμου ο στόχος είναι να μετρηθεί η παροχή μάζας του αέρα που εισέρχεται στη μηχανή, αλλά και η ακριβής ποσότητα καυσίμου η οποία αφού πάρει αέρια μορφή, θα αναμιχθεί με τον αέρα ώστε να γίνει ένα ομογενές μίγμα σωστών αναλογιών και να εισέλθει στον κύλινδρο. Αν υπάρχει ασυμπίεστος αέρας, τότε:

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho (C_2^2 - C_1^2)$$

όπου,

$P_1 - P_2$ : η πτώση πίεσης από την είσοδο στην έξοδο

$C_1, C_2$ : οι ταχύτητες εισόδου και εξόδου του καυσίμου

$\rho$ : η πυκνότητα του αέρα

Αν είναι γνωστή η παροχή μάζας του αέρα, τότε:

$$\dot{m} = \rho AC = \rho A_1 C_1 = \rho A_2 C_2$$

όπου A : το εμβαδόν της διατομής

Άρα,

$$P_1 - P_2 = \Delta P = \frac{1}{2} \frac{\dot{m}^2}{\rho} \left( \frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2} \right)$$

Οπότε, η πτώση πίεσης εξαρτάται από την παροχή μάζας αέρα και χρησιμοποιείται για να ελέγχει την παροχή μάζας καυσίμου. Δυστυχώς, ακόμα

κι αν η πτώση πίεσης μέσα στο venturi είναι αρκετά μικρή ώστε η προϋπόθεση της μη συμπιεσμένης ροής, να είναι λογική, η σχέση της πτώσης πίεσης και της ταχύτητας παροχής αέρα εξαρτάται από την πίεση στο στόμιο εισαγωγής. Έτσι οι εξαεριωτές που βασίζονται στο απλό σύστημα venturi τείνουν να αποκλίνουν από τη σωστή απόδοση μέτρησης αέρα – καυσίμου όταν η πυκνότητα του αέρα εισαγωγής αλλάζει. Αυτό ήδη είναι ένα πρόβλημα λόγω αλλαγής θερμοκρασίας κάτω από το κάλυμμα των κινητήρων φυσικής αναπνοής, αλλά γίνεται πιο σημαντικό σε στροβιλο-υπερπληρωμένους κινητήρες. Συγκεκριμένα αν ο εξαεριωτής τοποθετηθεί μετά το συμπιεστή, οι αλλαγές πυκνότητας του αέρα είναι πολύ μεγάλες. Όσο μεγαλύτερη είναι η αλλαγή πυκνότητας, τόσο πιο δύσκολο είναι για τον εξαεριωτή να δουλέψει σωστά. Αν χρησιμοποιηθεί ένας κανονικός τύπος εξαεριωτή πρέπει να δεχθούμε ότι δεν θα αποδίδει σωστή μέτρηση καυσίμου σε όλο το εύρος απόδοσης του κινητήρα. Ενώ η επίδραση θα είναι μικρή σε βενζινοκινητήρες με ελαφρά στρόβιλο –υπερπλήρωση, αυτό το είδος εγκατάστασης θα είναι λιγότερο ικανοποιητικό σε κινητήρες με υψηλότερη πίεση υπερπλήρωσης.

Τα συστήματα ψεκασμού καυσίμου στην πολλαπλή εισαγωγής συνήθως δεν χρησιμοποιούν συστήματα μετρήσεως ροής venturi, παρόλο που οι εναλλακτικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται ποικίλουν ευρέως. Έχουν όμως το προτέρημα ότι η μέτρηση ροής δεν πρέπει να γίνει στο ίδιο σημείο με την έγχυση καυσίμου. Έτσι η ροή του αέρα μπορεί να μετρηθεί πριν το συμπιεστή, ακόμη κι αν το καύσιμο εγχέεται μετά το συμπιεστή. Οπότε, είναι απλούστερο να προσαρμοστούν τα συστήματα ώστε να αντεπεξέρχονται σε μεγαλύτερο εύρος πιέσεων πολλαπλής εισαγωγής, από το κενό στο ρελαντί, έως την πίεση

υπό πλήρες φορτίο και ταχύτητα. Μπορεί, όμως, να χρειαστούν μεγαλύτερες πιέσεις καυσίμου.

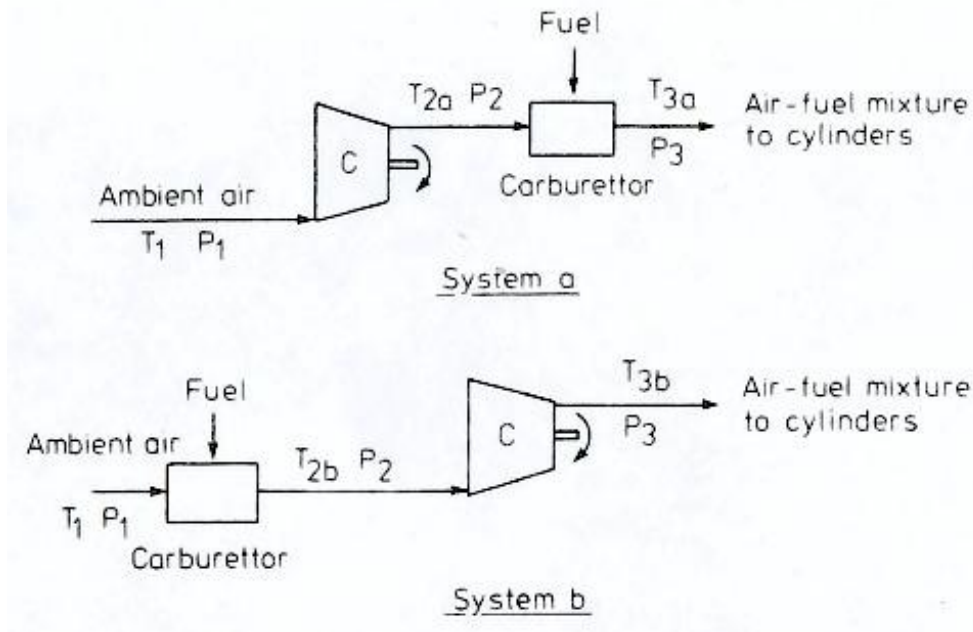
Λόγω έλλειψης σωστής αντιστάθμισης της πυκνότητας, η χρήση εξαεριωτή που τοποθετείται μετά το συμπιεστή γίνεται λιγότερο ελκυστική με υψηλές πιέσεις υπερπλήρωσης. Παρ' όλα αυτά, το σύστημα έχει άλλα προτερήματα. Το κύριο προτέρημα είναι ότι ο κατασκευαστής μπορεί να προσφέρει μία έκδοση του κινητήρα με υπερπλήρωση (υψηλότερη ισχύ) βασιζόμενος σε κινητήρα που κανονικά είναι φυσικής αναπνοής, με πολύ μικρό επιπρόσθετο κόστος. Είναι φυσικό ότι εάν η πολλαπλή εισαγωγής και ο εξαεριωτής μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως έχουν, μπορεί να επιτευχθεί σημαντική μείωση κόστους. Εφόσον ο κινητήρας βασίζεται, με ελάχιστες τροποποιήσεις, σε ένα ατμοσφαιρικό κινητήρα, είναι απίθανο να χρησιμοποιηθεί πολύ ψηλή πίεση υπερπλήρωσης και ο εξαεριωτής μπορεί να τροφοδοτηθεί ώστε να μπορεί να αντεπεξέλθει, παρόλο που μπορεί να μην αποδίδει τον ιδανικό λόγο αέρα/καυσίμου σε όλο το εύρος ταχυτήτων φορτίου. Το καύσιμο στον πλωτήρα πρέπει να παραμένει στην πίεση του συμπιεστή ώστε να διατηρηθεί η πίεση κατά την έγχυση του καυσίμου. Γενικά κάποιο είδος απόσβεσης ή αεραγωγός θα χρειαστεί για να εξαλείψει δίνες στον αέρα όπως βγαίνει από το συμπιεστή και να αποκτήσει «στατική» πίεση στην είσοδο του εξαεριωτή. Αυτή η στατική πίεση πρέπει να τροφοδοτηθεί στον πλωτήρα. Ένας τρόπος να επιτευχθεί αυτό είναι να τοποθετηθεί όλος ο εξαεριωτής εντός ενός μεγάλου αεραγωγού· θα πρέπει όμως τα καλώδια ελέγχου (ρυθμιστικής δικλίδας, καυσίμου) να είναι σφραγισμένα καθώς περνούν από τα τοιχώματα του αεραγωγού. Ανεξαρτήτως

ακριβής θέσης του αεραγωγού, αυτός πρέπει να σχεδιαστεί ώστε να εξαλείφει και όχι να προκαλεί δίνες στη ροή του αέρα, διαφορετικά η κατανομή του μίγματος καυσίμου – αέρα μπορεί να διαφέρει από κύλινδρο σε κύλινδρο. Συνήθως χρησιμοποιούνται πιο εκλεπτυσμένες μέθοδοι.

Εφόσον ο εξαεριωτής είναι υπό πίεση, δημιουργείται η ανάγκη ύπαρξης αντλίας καυσίμου υψηλής πίεσης ώστε να τροφοδοτεί αρκετό καύσιμο στον εξαεριωτή. Όταν η μηχανή λειτουργεί στο ρελαντί, η πίεση υπερπλήρωσης θα είναι μηδενική και η βαλβίδα καυσίμου στον πλωτήρα μπορεί να αδυνατεί να αντισταθεί στην υψηλή πίεση του καυσίμου. Έτσι η πίεση του καυσίμου πρέπει να ρυθμίζεται ώστε η τιμή της να είναι 20 – 30 kN/m<sup>2</sup> υψηλότερη της πίεσης υπερπλήρωσης, όποια τιμή κι αν έχει αυτή. Μια απλή τριοδική ρυθμιστική βαλβίδα μπορεί να χρησιμοποιηθεί, ώστε η υψηλή πίεση εισαγωγής να διαφοροποιείται επιστρέφοντας το πλεονάζον καύσιμο στη δεξαμενή καυσίμου.

Οι «πεπιεσμένοι» εξαεριωτές έχουν κι άλλα μειονεκτήματα εκτός από το πρόβλημα κακής μέτρησης αέρα – καυσίμου. Δύο από αυτά έχουν ήδη συζητηθεί, συγκεκριμένα η ανάγκη ενός πολύπλοκου συστήματος τροφοδοσίας καυσίμου και η ανάγκη φραγής των οπών απ' όπου περνούν καλώδια από τον αεραγωγό στον εξαεριωτή, αν ο εξαεριωτής είναι αποκομμένος από τον αεραγωγό. Οι κινητήρες πετρελαίου με στροβιλο-υπερπλήρωση συχνά υποφέρουν από υψηλές θερμοκρασίες στο θάλαμο του κινητήρα λόγω των μεγάλων και πολύ ζεστών επιφανειών της εξάτμισης. Εάν χρησιμοποιηθεί πεπιεσμένος εξαεριωτής, δημιουργείται επιπρόσθετη θερμότητα από την αύξηση της θερμοκρασίας λόγω συμπίεσης, ιδιαίτερα εάν ο εξαεριωτής

τοποθετηθεί μέσα στον αεραγωγό. Ο πλωτήρας μπορεί να ζεσταθεί υπερβολικά με αποτέλεσμα το βρασμό του καυσίμου, ιδιαίτερα όταν ο κινητήρας δουλεύει στο ρελαντί μετά από χρήση υψηλής ταχύτητας. Πρέπει να γίνει μεγάλη προσπάθεια να κρατηθούν οι θερμοκρασίες του κινητήρα χαμηλές με καλό εξαερισμό και θερμομόνωση. Τα προβλήματα άνισης κατανομής καυσίμου και αέρα μπορούν συνήθως να ξεπεραστούν με κατάλληλο σχεδιασμό του αεραγωγού, πιθανόν με την τοποθέτηση διαφραγμάτων. Παρόλο που αυτό είναι πρόβλημα στα αρχικά σχεδιαστικά στάδια, δεν είναι, τελικά, δύσκολο να ξεπεραστεί. Τέλος, αναφορικά με το πρόβλημα της κρουστικής καύσης, η χρήση εξαεριωτή, τοποθετημένου μετά το συμπιεστή, θα έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερη θερμοκρασία μίγματος κατά την εισαγωγή του και ακολούθως ελαφρώς χαμηλότερη πίεση υπερπλήρωσης εκτός ορίου κρουστικής καύσης από αυτήν που θα προέκυπτε λόγω της τοποθέτησης του εξαεριωτή πριν το στροβιλο-υπερπληρωτή. Αυτό συμβαίνει λόγω της επίδρασης της εξάτμισης καυσίμου (λανθάνουσα θερμότητα). Ας θεωρήσουμε τα δύο εναλλακτικά συστήματα στο Σχήμα 12.



Σχ. 12 Αύξηση πίεσης σε πεπιεσμένους και μη πεπιεσμένους εξαεριστές

Αγνοώντας την πτώση πίεσης μέσα από τον εξαεριστή μπορούν να καθοριστούν οι παρακάτω σχέσεις:

$$T_{2a} = T_1 \left( 1 + \frac{\left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\eta_c}} - 1}{\eta_c} \right)$$

που μπορεί να εκφραστεί και ως:

$$T_{2a} = T_1 \left( 1 + K_c \right)$$

Αν η ενθαλπία εξάτμισης του καυσίμου έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του  $\Delta T_{carb}$  στον εξαεριστή, τότε:

$$T_{3a} = T_1 \left( 1 + K_c \right) - \Delta T_{carb} \quad (1)$$

Αν στο σύστημα b έχουμε ίσες παροχές μάζας αέρα και καυσίμου και ο λόγος συμπίεσης παραμείνει ο ίδιος, δηλαδή:

$$\left(\frac{P_3}{P_2}\right)_b = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)_a$$

τότε,

$$T_{3b} = T_{2b} \left( 1 + \frac{\left(\frac{P_3}{P_2}\right)^{\kappa-1} - 1}{\eta_c} \right)$$

Άρα  $T_{3b} = T_{2b} (\kappa + K)$ , οπότε  $T_{3b} = (T_1 - \Delta T_{carb}) (\kappa + K)$ , ή

$$T_{3b} = T_1 (\kappa + K) - \Delta T_{carb} (\kappa + K) \quad (2)$$

Συγκρίνοντας τις σχέσεις (1) και (2), φαίνεται ότι:

$$T_{3b} < T_{3a},$$

οπότε στο σύστημα b μπορεί να χρησιμοποιηθεί υψηλότερη αύξηση πίεσης ή βαθμός συμπίεσης περιορισμένης κρουστικής καύσης.

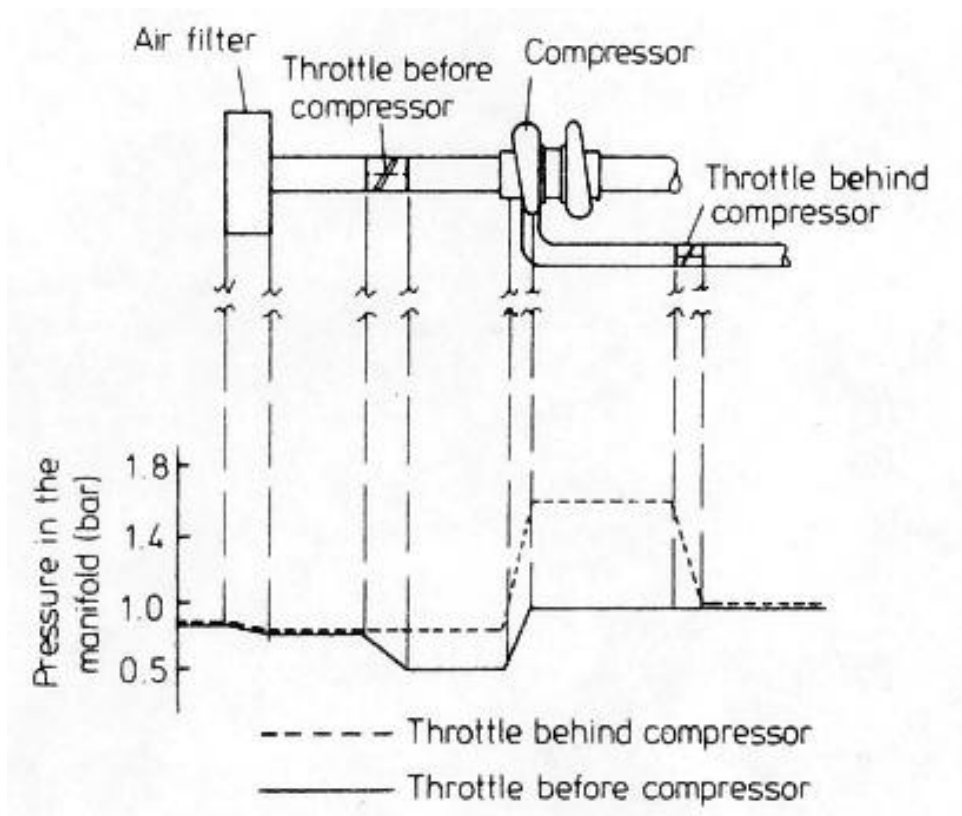
Τοποθετώντας τον εξαεριωτή πριν τον στροβιλο-υπερπληρωτή, αυτός θα δουλεύει υπό πίεση περιβάλλοντος έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα κανονικό σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου και ο εξαεριωτής όταν τροφοδοτείται κανονικά να λειτουργήσει φυσιολογικά σε όλο το εύρος ταχύτητας και φορτίου. Μπορεί να γίνει πλήρης εκμετάλλευση της ενθαλπίας εξάτμισης παρόλο που αυτό μπορεί να προκαλέσει κακό ξεκίνημα της κρύας μηχανής και (κακή) κατανομή μίγματος. Μπορεί να χρειαστεί ένα υδατοθερμαινόμενο περίβλημα, το οποίο εξαλείφει το πλεονέκτημα της εξάτμισης, αλλά σε αντίθετη περίπτωση το καύσιμο που φτάνει στο στροβιλο-υπερπληρωτή θα είναι σε ρευστή φάση και θα τείνει να συγκεντρώνεται στο κατώτερο σημείο του κελύφους, με αποτέλεσμα την ύπαρξη στιγμιαία

αδύνατου μίγματος στους κυλίνδρους. Κάποιοι στροβιλο-υπερπληρωτές μπορούν να εξοπλιστούν με ενσωματωμένο υδάτινο περίβλημα στο κάλυμμά τους. Παρ' όλα αυτά, η θέρμανση με νερό πρέπει να αποφεύγεται εάν είναι δυνατόν. Επιπλέον, σταγονίδια καυσίμου μπορούν να προκαλέσουν διάβρωση στο μπροστινό άκρο του στροβιλο-υπερπληρωτή με πρόσπτωση. Σημαντικότερο είναι το γεγονός ότι τοποθετώντας τον εξαεριωτή πριν το στροβιλο-υπερπληρωτή αυξάνεται σημαντικά η ύγρανση της επιφάνειας της πολλαπλής εισαγωγής με καύσιμο. Αυτό μειώνει αισθητά το λόγο καυσίμου/αέρα του μίγματος που εισάγεται στους κυλίνδρους κατά τη διάρκεια της θέρμανσης μετά από κρύο ξεκίνημα, όπου το υδάτινο περίβλημα είναι μη αποτελεσματικό. Έχει προταθεί ένα ηλεκτρικά θερμαινόμενο πλέγμα μετά τον εξαεριωτή για τη βελτίωση της οδηγισιμότητας και μείωση ρύπων μετά από κρύο ξεκίνημα. Το κέλυφος του στροβιλο-υπερπληρωτή μπορεί να χρειάζεται περαιτέρω σφράγιση στα σημεία όπου ενώνεται με το σώμα του υπερπληρωτή προς αποφυγήν διαρροής καυσίμων. Πολλοί εξαεριωτές πραγματοποιούν μια αντίδραση διόρθωσης για να εξουδετερώνουν τον εμπλουτισμό σε χαμηλή ταχύτητα υπό βαρέως παλλόμενη ροή αέρα, όμως ο συμπιεστής και οι πολλαπλοί εισαγωγείς μπορεί να τα αποσβέσουν σε κάποιο βαθμό, οπότε μπορεί να χρειαστεί τροποποιημένη ισορροπία αντίδρασης. Επιπλέον, ένας εκκινήτης μικρής διαμέτρου χρησιμοποιείται σε κάποιες περιπτώσεις για να δώσει τη μέγιστη βελτίωση ισχύος, δημιουργώντας μια μεγαλύτερη από τη συνήθεις πτώση πίεσης μέσα στον εξαεριωτή.

Η διαρροή λιπαντικού από το στροβιλο-υπερπληρωτή στην πολλαπλής εισαγωγής είναι αναπόφευκτη αν βασιστούμε μόνο στον απλό τύπο δακτυλίου εμβόλου που βρίσκουμε στους υπερπληρωτές μηχανών πετρελαίου. Αυτό είναι

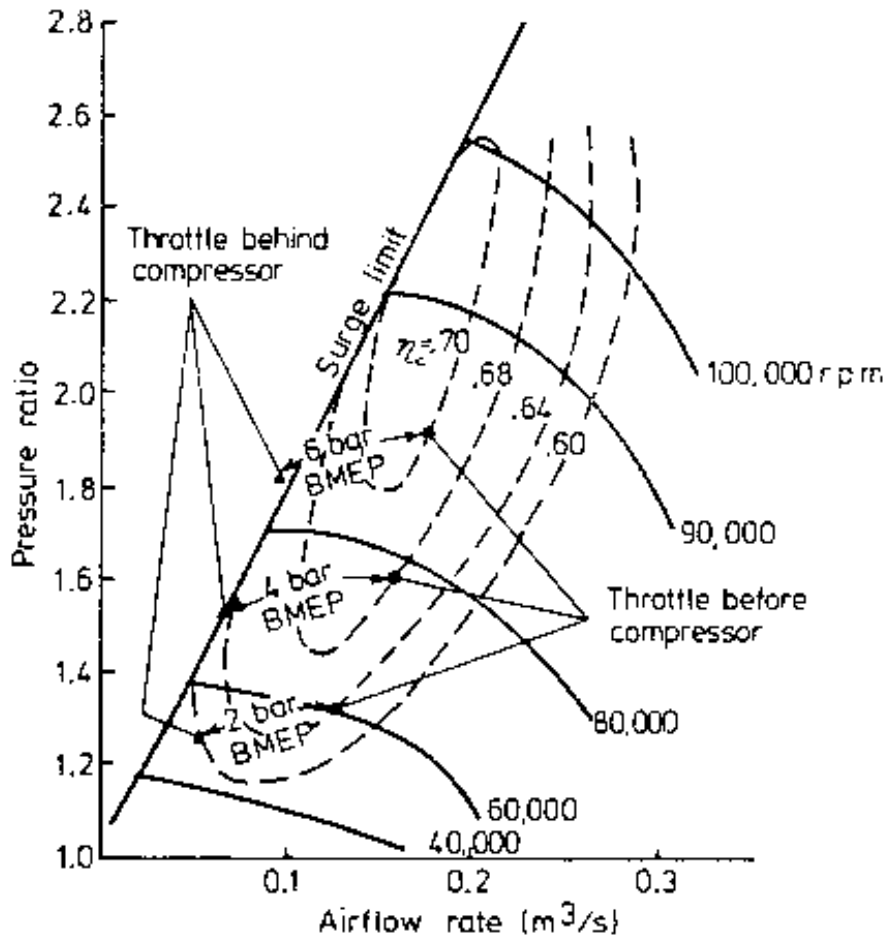


αποτέλεσμα του μεγάλου κενού που δημιουργείται στο συμπιεστή όταν η ρυθμιστική δικλείδα του εξαεριωτή είναι κλειστή (το πρόβλημα αυτό δεν υπάρχει εάν ο εξαεριωτής τοποθετείται μεταξύ του συμπιεστή και της μηχανής). Το κενό έλκει λιπαντικό από το στρώμα του στροβιλο-υπερπληρωτή μέσω του δακτυλίου εμβόλου στο άκρο του συμπιεστή. Παρόλο που έχουν γίνει προσπάθειες να εξαεριστεί η περιοχή πίσω από το σφράγισμα του δακτυλίου εμβόλου, αυτό αλλάζει το τελικό μίγμα στο ρελαντί στην πολλαπλής εισαγωγής λόγω της μεγάλης ποσότητας αέρα που μπορεί να εισέλθει. Η πιο αποτελεσματική εναλλακτική λύση είναι η χρήση μηχανικού σφραγίσματος μετώπου, σχεδιασμένου για λειτουργία πολύ υψηλής ταχύτητας. Ένα μικρό σταθερό δακτυλίδι από άνθρακα φορτίζεται ελαφρά απέναντι σε ένα περιστρεφόμενο, ελαφρώς τριμμένο μέτωπο ώσης, δημιουργώντας μία στεγανή φραγή. Οι περισσότεροι κατασκευαστές μικρών στροβιλο-υπερπληρωτών προσφέρουν αυτή τη δυνατότητα αλλά αυτό αυξάνει το κόστος τους.



Σχ. 13 Η πίεση στο σύστημα εισαγωγής ενός στροβιλο-υπερπληρωμένου βενζινοκινητήρα με τη ρυθμιστική δικλίδα εισαγωγής πριν ή πίσω από το συμπιεστή

Ένα πρόβλημα που μπορεί να δημιουργηθεί λόγω της τοποθέτησης της ρυθμιστικής δικλίδας μετά το συμπιεστή είναι η πάλμωση, όταν η ρυθμιστική δικλίδα κλείσει. Αν η ρυθμιστική δικλίδα τοποθετηθεί πριν το συμπιεστή ο αέρας που εισέρχεται στο συμπιεστή είναι χαμηλής πυκνότητας (χαμηλής πίεσης, Σχήμα 13). Για την ίδια επίδοση της μηχανής με μερικό φορτίο, η ροή του αέρα μέσα από τη μηχανή πρέπει να είναι παρόμοια, είτε η ρυθμιστική δικλίδα είναι τοποθετημένη πριν ή μετά το συμπιεστή. Έτσι, η τοποθέτηση της ρυθμιστικής δικλίδας πριν το συμπιεστή αυξάνει την ταχύτητα της ογκομετρικής παροχής αέρα μέσα στο συμπιεστή.



Σχ. 14 Παροχή αέρα σε διαφορετικά φορτία με τη ρυθμιστική δικλίδρα πριν (before) ή πίσω (behind) από το συμπιεστή

Το Σχήμα 14 δείχνει τις χαρακτηριστικές της παροχής αέρα μηχανής σε μερικό φορτίο, οι οποίες υπερτίθενται στο χάρτη του συμπιεστή, όπου οι δυο θέσεις της ρυθμιστικής δικλίδρας δείχνουν την υψηλότερη ογκομετρική ροή με τη ρυθμιστική δικλίδρα να προηγείται του συμπιεστή. Εάν τοποθετηθεί μετά το συμπιεστή η ογκομετρική ροή αέρα θα είναι χαμηλή, οδηγώντας σε πάλμωση του συμπιεστή καθώς κλείνει η ρυθμιστική δικλίδρα. Αυτή προκαλείται από την αδράνεια του στροβιλο-υπερπληρωτή που στιγμιαία διατηρεί την υψηλή ταχύτητα περιστροφής και πολύ υψηλό λόγο πίεσης, αλλά η ροή μειώνεται

ακαριαία όταν η ρυθμιστική δικλείδα κλείσει. Αυτό μπορεί να αποφευχθεί αφήνοντας μεγάλο όριο πάλμωσης ή τοποθετώντας βοηθητική ρυθμιστική δικλείδα πριν το συμπιεστή.

Αν το καύσιμο και ο αέρας μετρώνται και αναμειγνύονται πριν το συμπιεστή, τότε είναι σημαντικό να κρατηθούν οι πολλαπλές μεταξύ συμπιεστή και θυρών εισόδου κοντές και η επιφάνεια και ο όγκος τους σε χαμηλές τιμές. Συγκεκριμένα η όποια διαστολή σε ένα μεγάλο θάλαμο θα έχει ως αποτέλεσμα τη συμπύκνωση του ατμού καυσίμου και την αποβολή του από το ρεύμα αέρα. Αυτό και οι μεγάλες επιφάνειες βρεγμένες από καύσιμο μπορούν να καταλήξουν σε ανεπαρκή κατανομή μίγματος, αφού το υγρό καύσιμο θα πέφτει κυρίως στην πιο κοντινή και κατώτερη θύρα εισόδου, ιδιαίτερα κατά την επιτάχυνση. Παρόλα αυτά ένας κοντός και στενός αυλός τείνει να διατηρεί την περιστροφική ροή που φεύγει από το συμπιεστή κατά το οποίο μπορεί να καταλήξει σε δυσμενή κατανομή μίγματος. Απαιτείται προσεκτική σχεδίαση για να σταματήσει η περιστροφική ροή χωρίς αυτό να προκαλέσει συμπύκνωση σταγονιδίων.

Γενικά μπορεί να ειπωθεί ότι η τοποθέτηση του εξαεριωτή πριν το συμπιεστή αποτελεί καλύτερο σύστημα αφού επιτρέπει τον καλύτερο έλεγχο του λόγου αέρα/καυσίμου. Παρ' όλα αυτά αν το σύστημα δεν έχει σχεδιαστεί καλά από όλες τις απόψεις, δεν θα υπερέχει του πεπιεσμένου εξαεριωτή, ιδιαίτερα όταν η πίεση υπερπλήρωσης είναι χαμηλή.

## 7. Πολλαπλής εισαγωγής και εξαγωγής

Η σχεδίαση του συστήματος εισαγωγής μπορεί να είναι αισθητά διαφορετική από αυτή των κινητήρων φυσικής αναπνοής, ιδιαίτερα αν ο εξαεριωτής έχει τοποθετηθεί πριν το συμπιεστή. Οι βασικοί στόχοι είναι η ελαχιστοποίηση του όγκου μεταξύ του εξαεριωτή και της κυλινδροκεφαλής (για να βελτιωθεί η απόκριση), η ενθάρρυνση της διάσπασης και ανάμιξης των σταγονιδίων καυσίμου, η αποφυγή συμπύκνωσης του καυσίμου, η επιδίωξη ίσης κατανομής του μίγματος καυσίμου μεταξύ των κυλίνδρων, η εξάλειψη περιστροφικής κίνησης αέρα και η διατήρηση της θερμοκρασίας του μείγματος χαμηλά. Αυτοί οι στόχοι κάποιες φορές επιτυγχάνονται όταν δεχόμαστε απώλεια πίεσης η οποία δεν θα ήταν ανεκτή σε ατμοσφαιρικούς κινητήρες. Αυτό οφείλεται στο μεγάλο ποσό διαθέσιμης ενέργειας στο σύστημα εξάτμισης υπό πλήρες φορτίο, το οποίο επιτρέπει την παραγωγή πίεσης υπερπλήρωσης πολύ πάνω από την τιμή που περιορίζει η κρουστική καύση. Κάποια απώλεια ροής υπό πλήρες φορτίο και ταχύτητα, μειώνει την πίεση υπερπλήρωσης. Μια τέτοια απώλεια είναι χαμηλή όταν η πίεση υπερπλήρωσης, άρα και ο λόγος παροχής – μάζας, είναι χαμηλά. Μια διάτρητη μεταλλική πλάκα θα μπορούσε να τοποθετηθεί στην είσοδο της πολλαπλής εισαγωγής για να μειώσει την περιστροφική κίνηση αέρα και να βοηθήσει την κατανομή του μίγματος, αλλά αυτή η μέθοδος δεν πρέπει να ενθαρρύνεται αφού οι περιοριστές μειώνουν την πίεση, αλλά όχι τη θερμοκρασία.

Παρόλο που η ενδεχόμενη πίεση υπερπλήρωσης από τον στροβιλο-υπερπληρωτή είναι υπερβολική υπό πλήρες φορτίο και ταχύτητα του κινητήρα, το αντίθετο ισχύει σε χαμηλές ταχύτητες (η πλήρης ανάλυση του προβλήματος δίνεται αργότερα). Ως εκ τούτου η πολλαπλή εξαγωγής πρέπει να σχεδιάζεται

ώστε να υπάρχει πλήρης εκμετάλλευση της ενέργειας των καυσαερίων σε σχετικά μικρές ταχύτητες κινητήρα. Επομένως, η στροβιλο-υπερπλήρωση με σύστημα παλμών πίεσης πρέπει να υιοθετηθεί με κοντούς λεπτούς αγωγούς καυσαερίων και ει δυνατόν όχι περισσότερους από τρεις κυλίνδρους συνδεδεμένους σε κάθε εισαγωγή στο στρόβιλο. Μεγαλύτεροι αγωγοί έχουν χρησιμοποιηθεί για να επιτραπεί κάποια ψύξη των καυσαερίων πριν φτάσουν στο στρόβιλο, αλλά η δράση κυμάτων πίεσης μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα, η διαθέσιμη ενέργεια για διαστολή μέσω του στροβίλου μειώνεται σε μικρές ταχύτητες, οι θερμοκρασίες του κινητήρα αυξάνονται και η απόκριση του στροβιλο-υπερπληρωτή δυσχεραίνεται. Γενικά, με δεδομένο ότι η διάμετρος του αγωγού δεν θα πέσει κάτω από τη μέγιστη επιφάνεια της βαλβίδας, όσο στενότεροι και κοντότεροι είναι οι σωλήνες, τόσο καλύτερη είναι η απόδοση σε χαμηλές ταχύτητες. Συνήθως, αγωγοί εξάτμισης μεγάλου διαμετρήματος χρησιμοποιούνται από την εξαγωγή του στροβίλου και πέρα, μαζί με σιγαστήρα χαμηλής απώλειας. Ένα σύστημα μικρού διαμετρήματος δημιουργεί περιορισμούς παροχής και πίεση αντίθλιψης στην έξοδο του στροβίλου. Παρόλο που αυτό δε συνιστά απαραίτητως πρόβλημα διότι ο στροβιλο-υπερπληρωτής μπορεί να επιλεγεί αντίστοιχα, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί σύστημα εξαγωγής χαμηλής απώλειας· αυτό όμως μπορεί να είναι αδύνατο με την παρουσία καταλύτη καυσαερίων.

Στροβιλο-υπερπληρωτές μονής ή διπλής εισόδου (twin entry) μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε τετρακύλινδρους κινητήρες παρόλο που οι τελευταίοι, με διαιρεμένη πολλαπλής εξαγωγής θα παράγουν καλύτερη ροή σε χαμηλές ταχύτητες. Εξακύλινδροι κινητήρες αντιστοιχίζονται εύκολα με διαιρεμένη πολλαπλής και στρόβιλο διπλής εισόδου, ενώ οι κινητήρες V8 μπορούν να

εξοπλιστούν με έναν στροβιλο-υπερπληρωτή διπλής εισόδου (4 κύλινδροι σε κάθε εισαγωγή) ή 2 μικρότερους διπλής εισόδου με την πολλαπλή εισαγωγής διαιρεμένη σε ζευγάρια. Πρακτικά είναι δύσκολο να συνδυαστεί στρόβιλος διπλής εισόδου με ένα σύστημα ελέγχου της βαλβίδας παράκαμψης καυσαερίων. Επιπλέον, οι θερμικές καταπονήσεις είναι πολύ υψηλές σε ένα διαιρεμένο περίβλημα, ως εκ τούτου οι περισσότεροι βενζινοκίνητοι κινητήρες με στροβιλο-υπερπληρωτή χρησιμοποιούν στροβίλους μονής εισόδου (single entry).

Ο συνολικός όγκος της πολλαπλής εισαγωγής και εξαγωγής εξαρτάται από τη διάταξη κυλίνδρων του κινητήρα. Επομένως, ένας εν σειρά εξακύλινδρος κινητήρας μπορεί να έχει ένα πολύ συμπαγές σύστημα αντίθετα με την εξαγωγή ενός κινητήρα V8. Παρ' όλα αυτά, συστήματα μικρού όγκου μπορούν να σχεδιαστούν για κινητήρες V με σωστή τοποθέτηση του στροβιλο-υπερπληρωτή και των αγωγών της εξαγωγής.

Είναι ιδιαίτερα κρίσιμο μέρος της πολλαπλής εισαγωγής και εξαγωγής σε βενζινοκίνητους με στροβιλο-υπερπληρωτή η επιλογή του παρεμβύσματος (τσιμούχα). Το σύστημα εισαγωγής πρέπει να αντέχει πιέσεις ανώτερες των κανονικών, ενώ το σύστημα εξαγωγής πρέπει να αντέχει όχι μόνο υψηλότερες πιέσεις αλλά και υψηλότερες θερμοκρασίες και φορτία λόγω του βάρους του στροβιλο-υπερπληρωτή. Δεν είναι συνήθως επιθυμητό να φέρεται όλο το βάρος του από την πολλαπλή εξαγωγής αλλά κάθε βραχίονας υποστήριξης πρέπει να σχεδιάζεται έτσι ώστε να μην αντιστέκεται σε θερμική διαστολή του συστήματος. Υπό πλήρες φορτίο η θερμοκρασία της εξαγωγής μπορεί να φτάσει και τους 900 °C, οπότε θερμικές καταπονήσεις στην πολλαπλή

εισαγωγής θα προκαλέσουν ρήξη κάθε στοιχείου που δεν έχει σχεδιαστεί καλά. Μπορεί να χρειαστούν αρμοί διαστολής. Πρέπει να γίνει κάθε προσπάθεια ώστε να διοχετευθεί ψυχρός αέρας γύρω από την πολλαπλής εισαγωγής και το στρόβιλο και να διευκολυνθεί η έξοδος αυτού του αέρα από το χώρο του κινητήρα ώστε να κρατηθεί η θερμοκρασία αυτού χαμηλά.

## **8. Σύστημα ελέγχου πίεσης υπερπλήρωσης στροβιλο-υπερπληρωτή**

Για να γίνει κατανοητή η ανάγκη για το σύστημα ελέγχου πίεσης υπερπλήρωσης σε στροβιλο-υπερπληρωμένους βενζινοκινητήρες, θα είναι χρήσιμο να δούμε την αντιστοιχία με τους στροβιλο-υπερπληρωμένους κινητήρες diesel. Καταρχάς, η βενζινοκινητήρες λειτουργούν σε μεγαλύτερο εύρος στροφών συνήθως μέχρι 5.000 ή 6.000 στροφές ανά λεπτό. Δεύτερον, το μίγμα αέρα/καυσίμου πρέπει να είναι, σήμερα, στη στοιχειομετρική τιμή του αντί να κυμαίνεται σε μεγάλο εύρος, για λόγους που σχετίζονται με την αποδοτική λειτουργία του τριοδικού καταλύτη. Τρίτον, η πίεση υπερπλήρωσης πρέπει να περιορίζεται για να αποφεύγεται η κρουστική καύση. Τα προβλήματα που δημιουργούνται προσπαθώντας να συγχρονίσουμε τον στροβιλο-υπερπληρωτή στο εύρος ταχύτητας περιστροφής ενός πετρελαιοκινητήρα αυτοκινήτου, γίνονται ακόμα πιο σοβαρά με το μεγαλύτερο εύρος ταχύτητας περιστροφής του βενζινοκινητήρα. Εφόσον ο λόγος αέρα/καυσίμου είναι πολύ πιο πλούσιος από αυτόν του πετρελαιοκινητήρα ακόμα και υπό πλήρες φορτίο, η θερμοκρασία εξαγωγής είναι υψηλότερη. Επομένως, για την ίδια τιμή παροχής μάζας, η διαθέσιμη ενέργεια των καυσαερίων στην είσοδο του στροβίλου είναι μεγαλύτερη, ενώ η μέγιστη



επιτρεπόμενη πίεση υπερπλήρωσης είναι χαμηλότερη. Υπάρχει περίσσεια ενέργειας στο σύστημα εξαγωγής (υπό πλήρες φορτίο) και η πίεση υπερπλήρωσης πρέπει να περιορίζεται. Επιπλέον, το αποτέλεσμα του μεγάλου εύρους παροχής αέρα από μικρές σε μεγάλες ταχύτητες, ενισχύει το πρόβλημα της ανεπαρκούς πίεσης υπερπλήρωσης σε χαμηλές ταχύτητες. Γενικά πρέπει να προσπαθήσουμε να περιορίσουμε την πίεση υπερπλήρωσης στις μεγάλες ταχύτητες αλλά να την ανεβάσουμε σε χαμηλές ταχύτητες.

### **8.1 Επιλέγοντας το σωστό στροβιλο-υπερπληρωτή για την επιθυμητή μέγιστη πίεση υπερπλήρωσης**

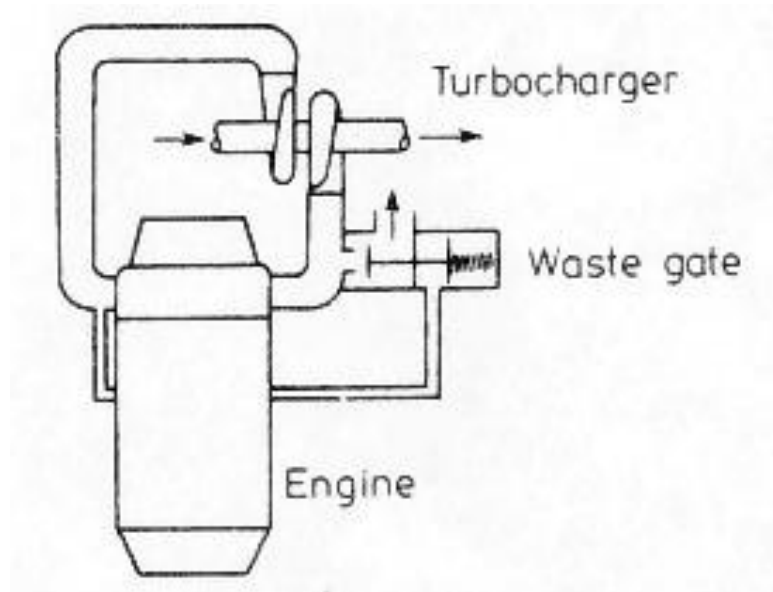
Η απλούστερη μέθοδος για να επιτύχουμε μία συγκεκριμένη πίεση υπερπλήρωσης στη μέγιστη ταχύτητα και φορτίο είναι να ταιριάξουμε το στροβιλο-υπερπληρωτή αναλόγως. Η πίεση υπερπλήρωσης μπορεί να περιοριστεί χρησιμοποιώντας μεγάλο στρόβιλο, αυτή η τεχνική όμως έχει μεγάλα μειονεκτήματα και δεν συνιστάται. Η επιφάνεια του στροβίλου διέπεται από τη ροή μάζας μέσα από αυτόν υπό πλήρες φορτίο. Από τη στιγμή που ο βενζινοκινητήρας λειτουργεί σε πολύ μεγάλο εύρος ταχυτήτων, η ροή μάζας θα είναι πολύ μικρότερη σε μικρές ταχύτητες. Υπό αυτές τις συνθήκες η επιφάνεια του στροβίλου θα είναι σχετικά μεγάλη και η ενέργεια διαθέσιμη για διαστολή θα είναι αντιστοίχως μικρή, έχοντας ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μικρής ή ανύπαρκτης πίεσης υπερπλήρωσης. Η κατάσταση χειροτερεύει με χαμηλότερη αποδοτικότητα του στροβιλο-υπερπληρωτή λόγω λειτουργίας του εκτός συνθηκών σχεδίασης του συμπιεστή. Το τελικό αποτέλεσμα θα είναι η απότομη αύξηση της πίεσης υπερπλήρωσης και της καμπύλης ροπής της

μηχανής σε υψηλές ταχύτητες, με χαμηλή πίεση υπερπλήρωσης σε χαμηλές ταχύτητες. Μια τέτοια καμπύλη με μηδαμινή ροπή χαμηλά, δεν είναι αποδεκτή αυτοκινητιστική εφαρμογή αφού θα σήμαινε συνεχή αλλαγή ταχυτήτων.

Μπορεί να είναι δυνατή η δημιουργία ροπής αποθέματος σε ταχύτητες χαμηλότερες της μέγιστης εάν ο στροβιλο-υπερπληρωτής επιλεγεί ώστε να μπορεί να συνδυαστεί στην (χαμηλής απόδοσης) περιοχή στραγγαλισμού στη μέγιστη ταχύτητα της μηχανής. Όσο η ταχύτητα μειώνεται, το σημείο λειτουργίας θα περάσει μέσα από μια περιοχή υψηλότερης απόδοσης του στροβιλο-υπερπληρωτή και αυτό μπορεί να αντισταθμίσει τη μείωση της διαθέσιμης ενέργειας στο στρόβιλο, ιδιαίτερα εφόσον η πολλαπλή εξαγωγής έχει σχεδιαστεί για τη μέγιστη εκμετάλλευση παλμών σε χαμηλότερες ταχύτητες. Παρόλα αυτά είναι απίθανο να διατηρηθεί η ροπή αποθέματος σε κανονικές ταχύτητες χωρίς να υπερβαίνει το όριο περιστροφής του στροβίλου στις μέγιστες ταχύτητες της μηχανής και μη αποτελεσματική συμπίεση ανεβάζει τη θερμοκρασία υπερπλήρωσης, κάτι το οποίο πρέπει να αποφεύγεται.

## **8.2 Σύστημα παράκαμψης καυσαερίων**

Το σύστημα παράκαμψης καυσαερίων αποτελείται από μια βαλβίδα που επιτρέπει στα καυσαέρια να παρακάμψουν τον στρόβιλο. Βεβαίως, εφόσον η ενέργεια των καυσαερίων των στροβιλο-υπερπληρωμένων βενζινοκινητήρων είναι υπερβολική υπό πλήρες φορτίο και ταχύτητα, αυτή είναι μια άριστη μέθοδος ελέγχου της πίεσης υπερπλήρωσης.



Σχ. 15 Πίεση υπερπλήρωσης - Σύστημα βαλβίδας παράκαμψης καυσαερίων

Η Εικόνα 15 δείχνει αυτή την αρχή, στην οποία η πίεση υπερπλήρωσης δρα σε ένα διάφραγμα, ανοίγοντας την βαλβίδα παράκαμψης καυσαερίων όταν η πίεση υπερπλήρωσης φτάνει ένα προδιαγεγραμμένο όριο. Αυτό το σύστημα έχει πολλά προτερήματα σε σχέση με την βαλβίδα ευθείας εκτόνωσης. Το κύριο όφελος είναι ότι, εφόσον δεν περνάνε όλα τα καυσαέρια μέσα από το στρόβιλο, και μόνο ο απαιτούμενος για τη μηχανή αέρας περνά μέσα από το συμπιεστή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μικρότερος στροβιλο-υπερπληρωτής (συγκεκριμένα: στρόβιλος). Ο μικρός στροβιλο-υπερπληρωτής είναι πιο ικανός να παρέχει επαρκή πίεση υπερπλήρωσης σε μικρές ταχύτητες (όταν η βαλβίδα παράκαμψης καυσαερίων είναι κλειστή) και μειώνει την υστέρηση του στροβιλο-υπερπληρωτή λόγω της χαμηλότερης του αδράνειας, ιδιαίτερα όταν η βαλβίδα παράκαμψης καυσαερίων είναι κλειστή κατά την επιτάχυνση. Με προσεκτικό σχεδιασμό της βαλβίδας παράκαμψης καυσαερίων, η καμπύλη πίεσης υπερπλήρωσης μπορεί να προσαρμοστεί για να παράγει τη βέλτιστη

καμπύλη ροπής μέσα στα όρια κρουστικής καύσης. Η SAAB προτείνει τη χρήση ενός αισθητήρα κρουστικής καύσης για το άνοιγμα της βαλβίδας παράκαμψης καυσαερίων αντί της πίεσης υπερπλήρωσης.

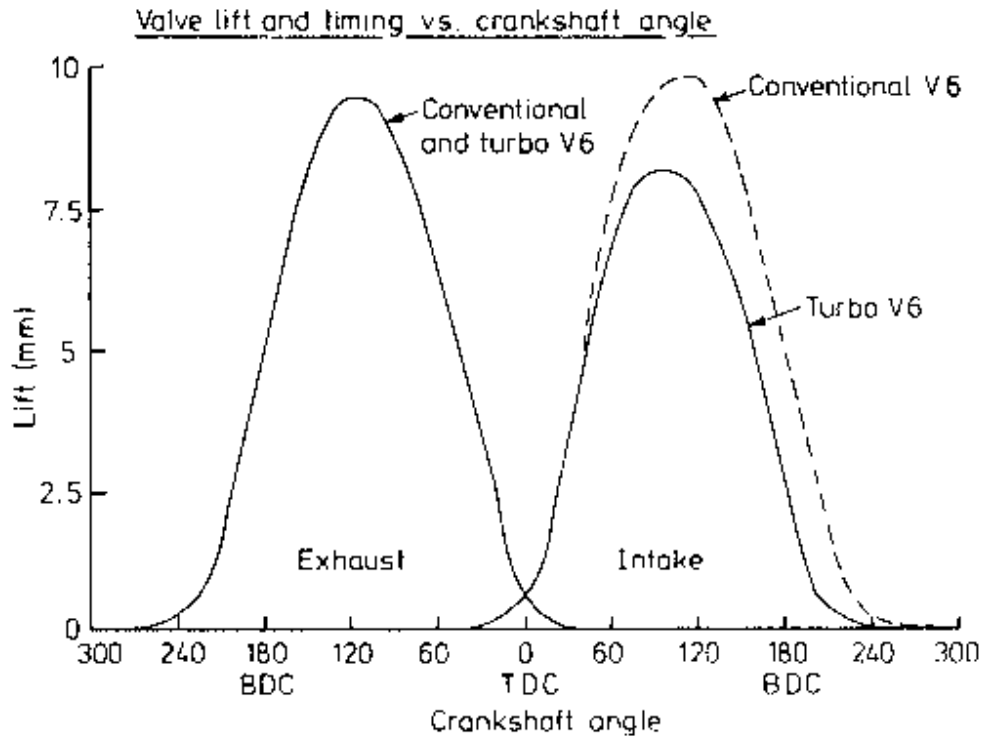
Τα κύρια προβλήματα των βαλβίδων παράκαμψης καυσαερίων είναι το κόστος και η πιθανή αναξιοπιστία, λόγω των πολύ μεγάλων θερμοκρασιών και του διαβρωτικού περιβάλλοντος στο οποίο δρουν. Η ικανοποίηση των δύο αυτών περιορισμών είναι ένα δύσκολο σχεδιαστικό πρόβλημα, αλλά κατάλληλοι στροβιλο-υπερπληρωτές με ενσωματωμένα συστήματα βαλβίδων παράκαμψης καυσαερίων είναι, σήμερα, διαθέσιμα.

### **8.3 Στρόβιλοι μεταβλητής γεωμετρίας**

Αλλάζοντας τη γωνία των στομιών εισόδου του στροβίλου αλλάζει τόσο η ενεργός επιφάνεια του στροβίλου (άρα και η διαθέσιμη ενέργεια) όσο και τα χαρακτηριστικά απόδοσης. Ανοίγοντας τα στόμια στη μέγιστη ταχύτητα της μηχανής και κλείνοντάς τα σε χαμηλή ταχύτητα η χρησιμοποίηση της ενέργειας των καυσαερίων μπορεί να προσαρμοστεί για χαμηλής και μέσης ταχύτητας επιδόσεις ενώ την ίδια στιγμή αποτρέπει το στρόβιλο να υπερβεί το ανώτατο όριο περιστροφής. Σήμερα, τέτοια συστήματα είναι πλέον ιδιαίτερα διαδεδομένα σε στροβιλο-υπερπληρωμένους κινητήρες diesel και αρχίζει σταδιακά η εφαρμογή τους και σε κινητήρες Otto.

## 9. Χρονισμός βαλβίδων

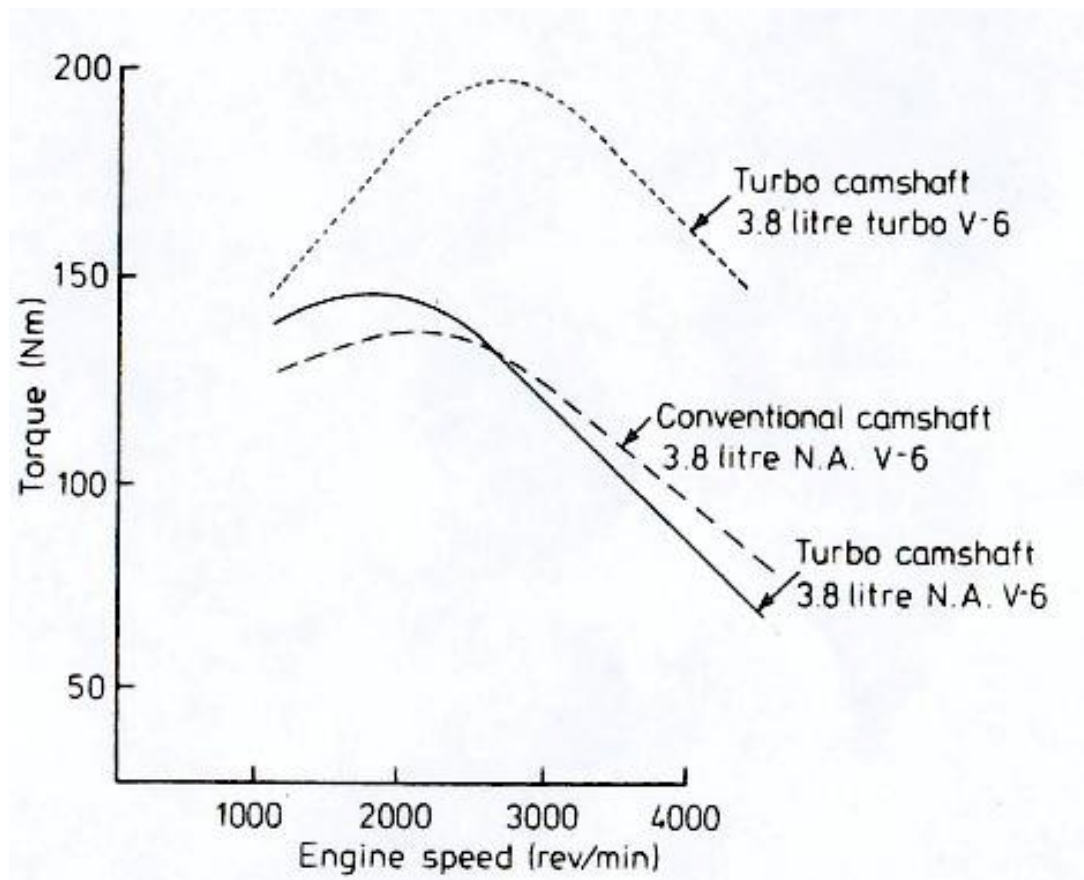
Κατά τη διαστασιολόγηση του στροβιλο-υπερπληρωτή και της βαλβίδας παράκαμψης καυσαερίων, πρέπει να συμβιβαστούμε ανάμεσα στην ανάγκη για ένα μικρό στρόβιλο, ώστε να επιτευχθεί ώθηση σε χαμηλές ταχύτητες, και της παροχής καυσίμου μέσω του στροβίλου και της βαλβίδας παράκαμψης καυσαερίων, σε υψηλές ταχύτητες. Η χρήση ενός πολύ μικρού στροβίλου οδηγεί σε μεγάλη ροή παράκαμψης για να αποτραπεί η υπερβολικά υψηλή πίεση πολλαπλής εξαγωγής, και έτσι είναι δύσκολο να επιτευχθεί η επιθυμητή πίεση υπερπλήρωσης και οι καμπύλες ροπής. Κατά συνέπεια, ενώ καταβάλλονται προσπάθειες να υπάρξει καλή υπερπλήρωση (ώθηση) σε χαμηλές ταχύτητες, είναι δύσκολο να επιτευχθεί αρκετή πίεση υπερπλήρωσης κάτω από τις 1500 στροφές/λεπτό. Είναι επομένως επιθυμητό να επιλεγεί ο χρονισμός και ανύψωση βαλβίδων ώστε να ταιριάζει σε λειτουργία χαμηλής ταχύτητας της μηχανής από ότι θα συνέβαινε κανονικά σε μια μηχανή φυσικής αναπνοής. Κατά συνέπεια, πρέπει να επιλεγεί ο χρονισμός βαλβίδων για ροπή σε χαμηλές ταχύτητες, και ο στροβιλο-υπερπληρωτής να αντισταθμίζει οποιαδήποτε επακόλουθη απώλεια σε απόδοση υψηλών ταχυτήτων.



Σχ. 16 Εκκεντροφόρος άξονας κινητήρα Buick φυσικής αναπνοής και υπερπληρωμένου

Το Σχήμα 16 συγκρίνει τα διαγράμματα ανύψωσης βαλβίδων για κινητήρα φυσικής αναπνοής και στροβιλο-υπερπληρωμένη μηχανή Buick 3.8L. Καμία αλλαγή δεν γίνεται στην ανύψωση βαλβίδων εξαγωγής ή το χρονισμό, ώστε να συντηρηθεί η καλή ενεργειακή μεταφορά στο στρόβιλο. Εντούτοις η ανύψωση βαλβίδων εισαγωγής και ο χρόνος ανοίγματος μειώνονται. Το προφίλ του εκκεντροφόρου μικρότερης διάρκειας και χαμηλής ανύψωσης (turbo V6) αυξάνει την ογκομετρική απόδοση κάτω από τις 2400 rpm και την μειώνει στις υψηλότερες ταχύτητες (έτσι, ο χρονισμός και η ανύψωση βαλβίδων βελτιστοποιούνται στις χαμηλές ταχύτητες). Αυτό οδηγεί σε υψηλότερη ροπή σε χαμηλές ταχύτητες λόγω του εκκεντροφόρου και μόνο (Σχήμα 17). Οι στροβιλο-υπερπληρωμένες εκδόσεις των μηχανών φυσικής αναπνοής υψηλής απόδοσης χρειάζονται λιγότερη επικάλυψη βαλβίδων, όχι μόνο για να

επηρεάσουν τη βέλτιστη ογκομετρική απόδοση στις χαμηλότερες ταχύτητες, αλλά και για να αποφευχθεί το να περάσει μίγμα στο σύστημα εξαγωγής, κάτω από συγκεκριμένες μηχανικές συνθήκες, αλλά και να αντιστραφεί η ροή από την εξαγωγή στην εισαγωγή όταν υπερβαίνει η πίεση εξόδου την πίεση εισαγωγής. Έτσι, για παράδειγμα, η επικάλυψη βαλβίδων στη Porsche 911 μειώθηκε από  $100^\circ$  σε  $82^\circ$ , ούσα υπερτροφοδοτούμενη.

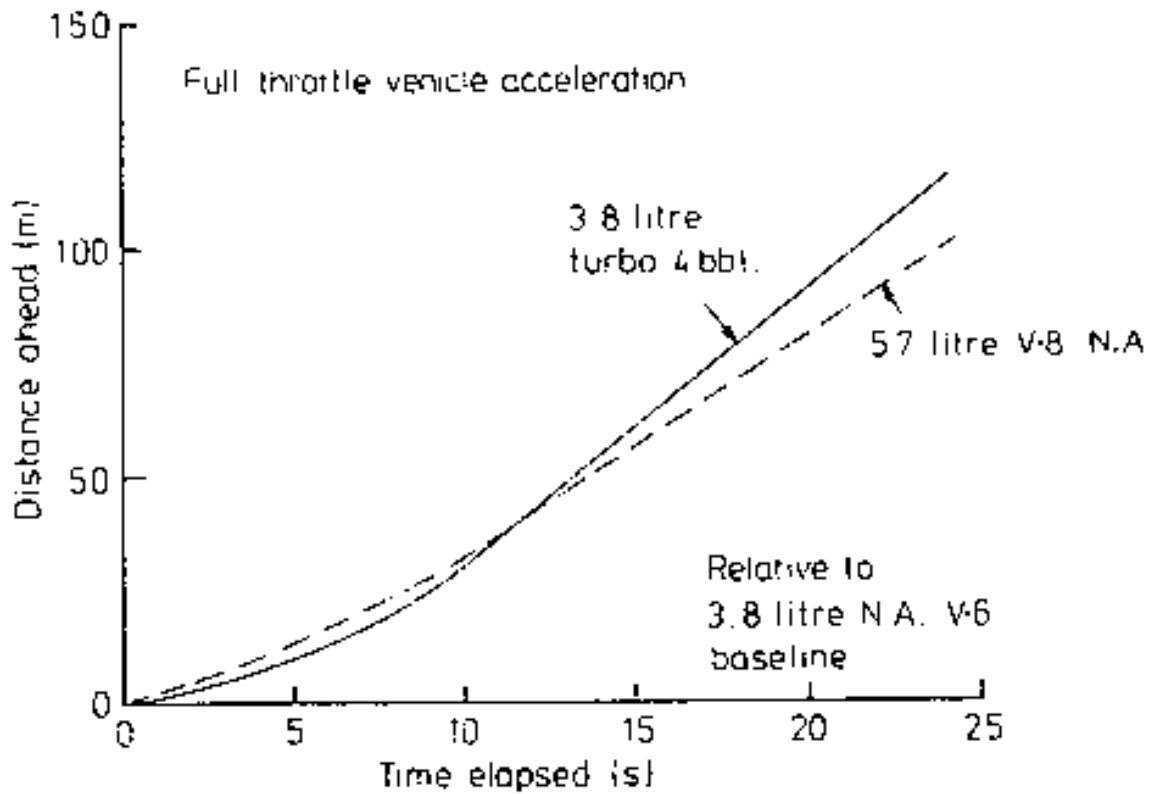


Σχ. 17 Επίδραση αλλαγής εκκεντροφόρου στη ροπή για κινητήρα Buick

## 10. Απόδοση μηχανής

Ένας περιορισμένος αριθμός στροβιλο-υπερπληρωμένων επιβατικών αυτοκινήτων κατασκευάστηκε από την Buick και την Oldsmobile στις Ηνωμένες Πολιτείες στις αρχές της δεκαετίας του '60. Πιο πρόσφατα, η Audi, η BMW, η Porsche, Saab, η GM και η Ford έχουν προσφέρει στροβιλο-υπερπληρωμένα αυτοκίνητα στο κοινό. Η Audi, η BMW, η Porsche και η Saab είναι υψηλής απόδοσης εκδόσεις των αυτοκινήτων που κατασκευάζονται κανονικά υπό ατμοσφαιρική μορφή. Έχουν κατασκευαστεί σε περιορισμένους αριθμούς και πωλούνται έναντι αυξημένης τιμής από τα κανονικά, αλλά είναι εξοπλισμένα με ψεκασμό καυσίμου και παρόμοιο εξοπλισμό που βρίσκουμε συνήθως στα ακριβά οχήματα απόδοσης. Αντίθετα, η GM Buick δεν προορίζεται για υψηλής απόδοσης όχημα - είναι μια προσπάθεια να συνδυαστεί η λογική απόδοση με την καλή οικονομία καυσίμων, χρησιμοποιώντας μια μηχανή αρκετά μικρότερη από αυτήν που θα εγκαθίστατο κανονικά σε ένα αυτοκίνητο του μεγέθους του, όμως στροβιλο-υπερπληρωμένη ώστε να διατηρεί την απόδοση η οποία συνδέεται κυρίως με μεγαλύτερους κινητήρες. Κατά συνέπεια η στροβιλο-υπερπληρωμένη μηχανή Buick 3.8L V6 δίνει την ίδια επιτάχυνση με μια μηχανή 5.7L V8 όταν εγκαθίσταται στο ίδιο όχημα (Σχήμα 18) μαζί με μια μείωση βάρους της μηχανής από 40 έως 50 κιλά, και μείωση κατανάλωσης καυσίμων 5 τοις εκατό.

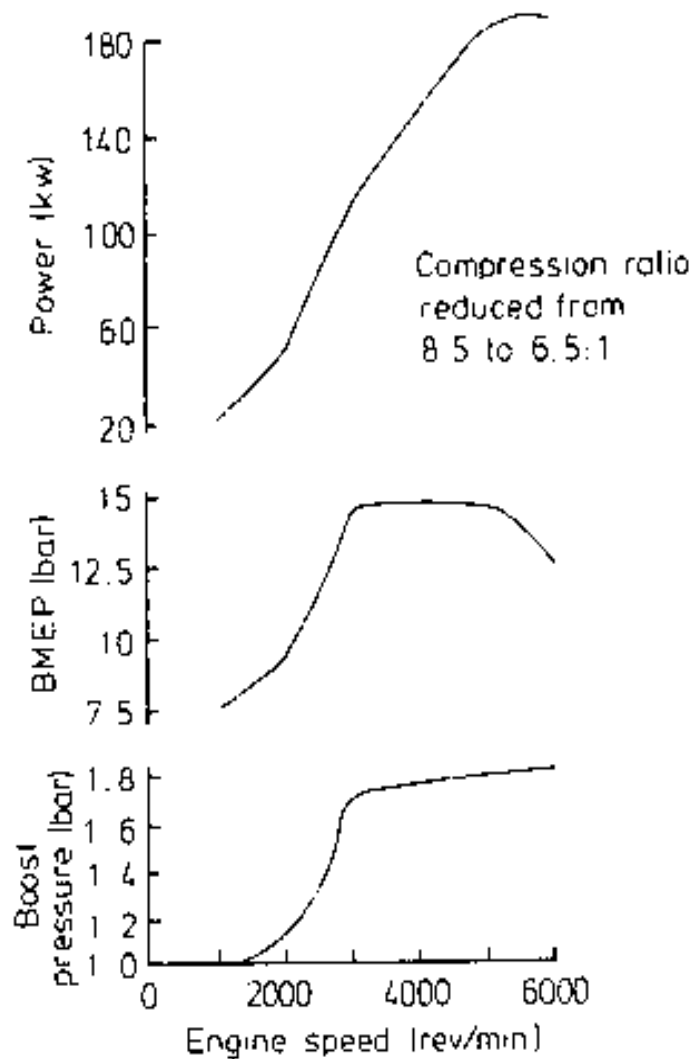




Σχ. 18 Σύγκριση απόδοσης κινητήρα φυσικής αναπνοής 5,7 λίτρων και στροβίλο-υπερπληρωμένου κινητήρα 3,8 λίτρων

Οι αυξήσεις της ισχύος και της ροπής είναι 59 και 43 τοις εκατό αντίστοιχα (λιγότερο με έναν διπλό εξαεριοτή) με μέγιστο βαθμό συμπίεσης 1.6:1.

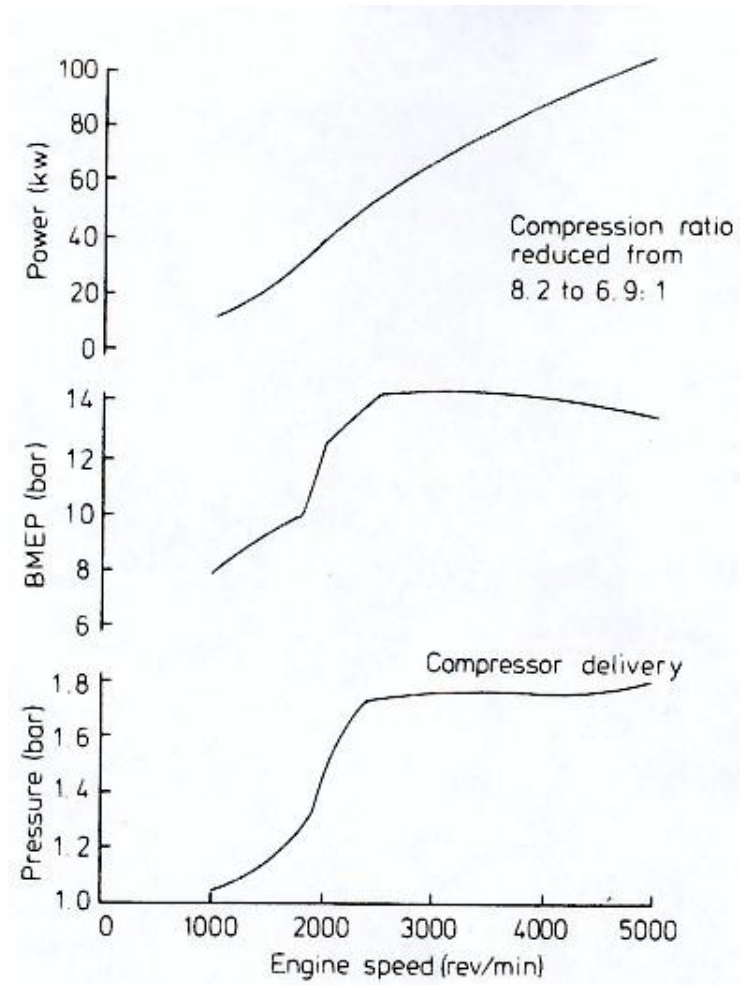
Η συμβατικότερη τεχνική αποφυγής κρουστικής καύσης με μείωση του βαθμού συμπίεσης, έχει χρησιμοποιηθεί από την Porsche (Σχήμα 19) για το σπορ μοντέλο της, 911.



Σχ. 19 Απόδοση της Porsche 911 Turbo (με έλεγχο της βαλβίδας παράκαμψης καυσαερίων)

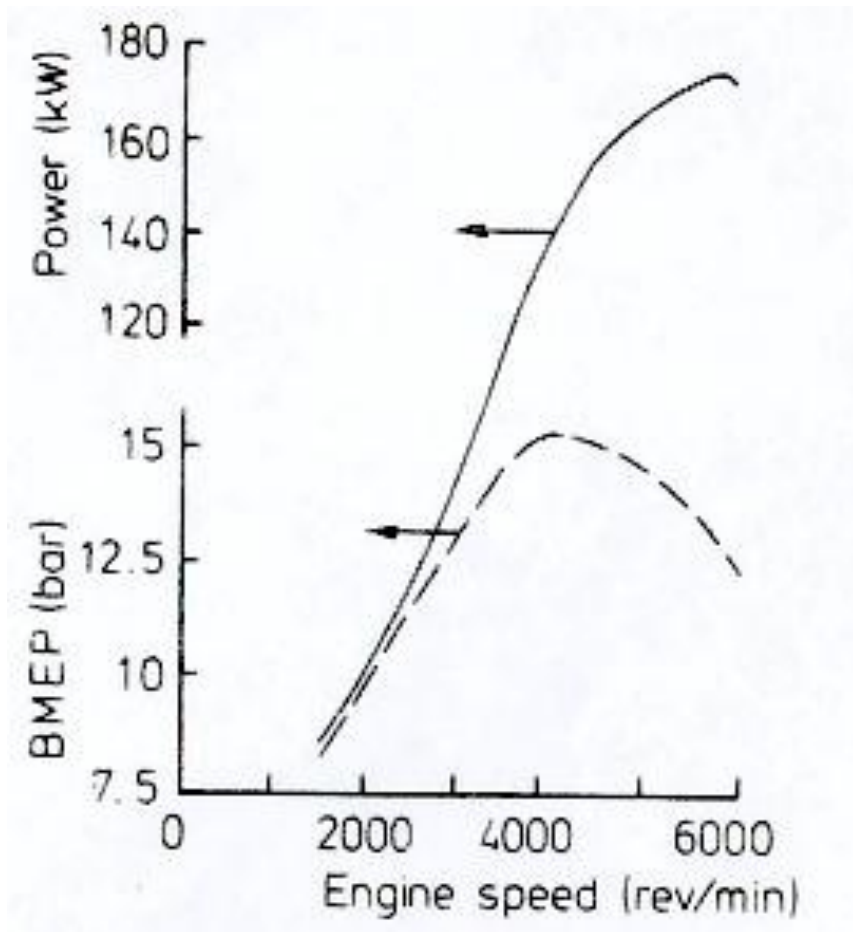
Σε αυτήν την εφαρμογή, το σχέδιο της βαλβίδας παράκαμψης καυσαερίων και η αντιστοιχία του στροβιλο-υπερπληρωτή είναι τέτοια που η πίεση

υπερπλήρωσης ανεβαίνει πολύ γρήγορα πάνω από τις 2000 rpm, αλλά έπειτα ελέγχεται αισθητά.



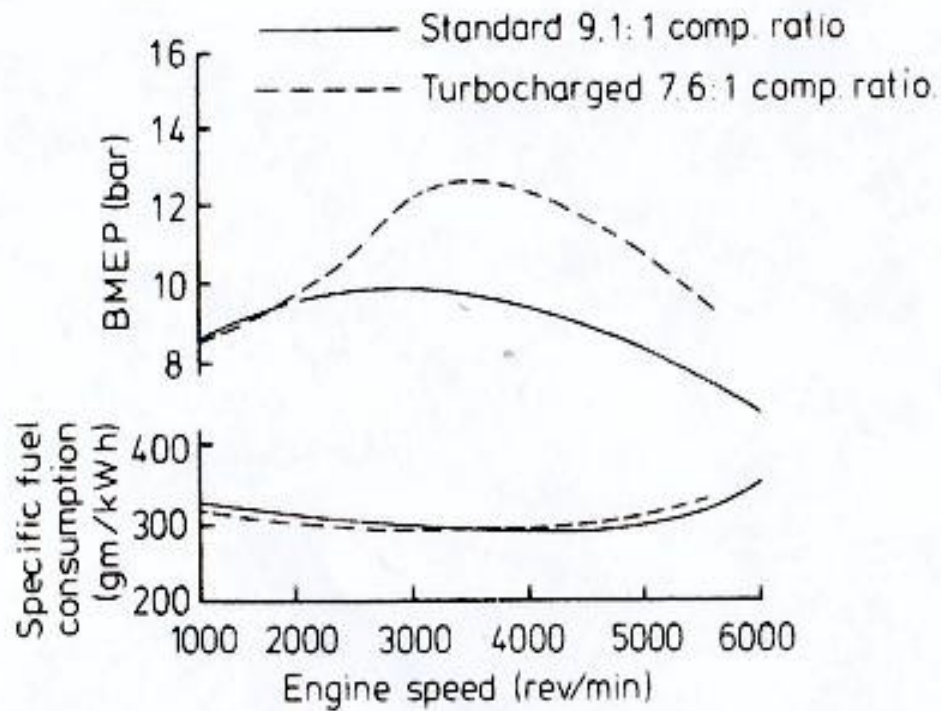
Σχ. 20 Απόδοση στροβίλο-υπερπληρωμένου Audi 100, με καύσιμο υψηλών οκτανίων (ελεγχόμενη απώλεια καυσίμων)

Αυτό δίνει μια μάλλον απότομη αλλαγή στην καμπύλη ροπής (μέση πραγματική πίεση). Ένα παρόμοιο χαρακτηριστικό παρουσιάζεται στο σχήμα 20.



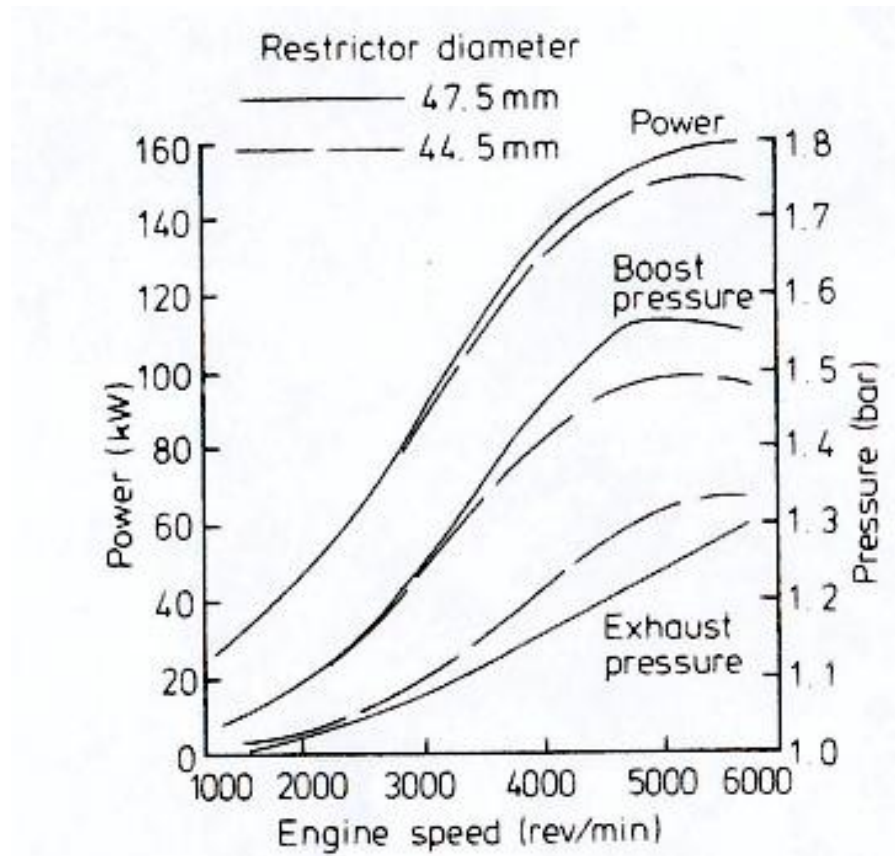
Σχ. 21 Απόδοση BMW 2002 Turbo (ελεγχόμενη βαλβίδα ανακούφισης)

Αντίθετα, η βαλβίδα ανακούφισης πίεσης στην πολλαπλής εισαγωγής που χρησιμοποιήθηκε από την BMW αρκετά χρόνια πριν (Σχήμα 21), είχε ως αποτέλεσμα προοδευτικότερη άνοδο στην μέση πραγματική πίεση από χαμηλές σε μέσες ταχύτητες μηχανής, αλλά γρήγορη πτώση σε υψηλές ταχύτητες.



Σχ. 22 Στροβίλο-υπερπληρωμένο Ford V6 (ελεγχόμενος περιοριστής εξάτμισης)

Το σύστημα περιορισμού καυσαερίων που χρησιμοποιήθηκε, παρήγαγε ένα παρόμοιο χαρακτηριστικό (Σχήμα 22) αλλά στόχευε σε χαμηλότερη αύξηση μέσης πραγματικής πίεσης από ότι το υπερπληρωμένο σύστημα.

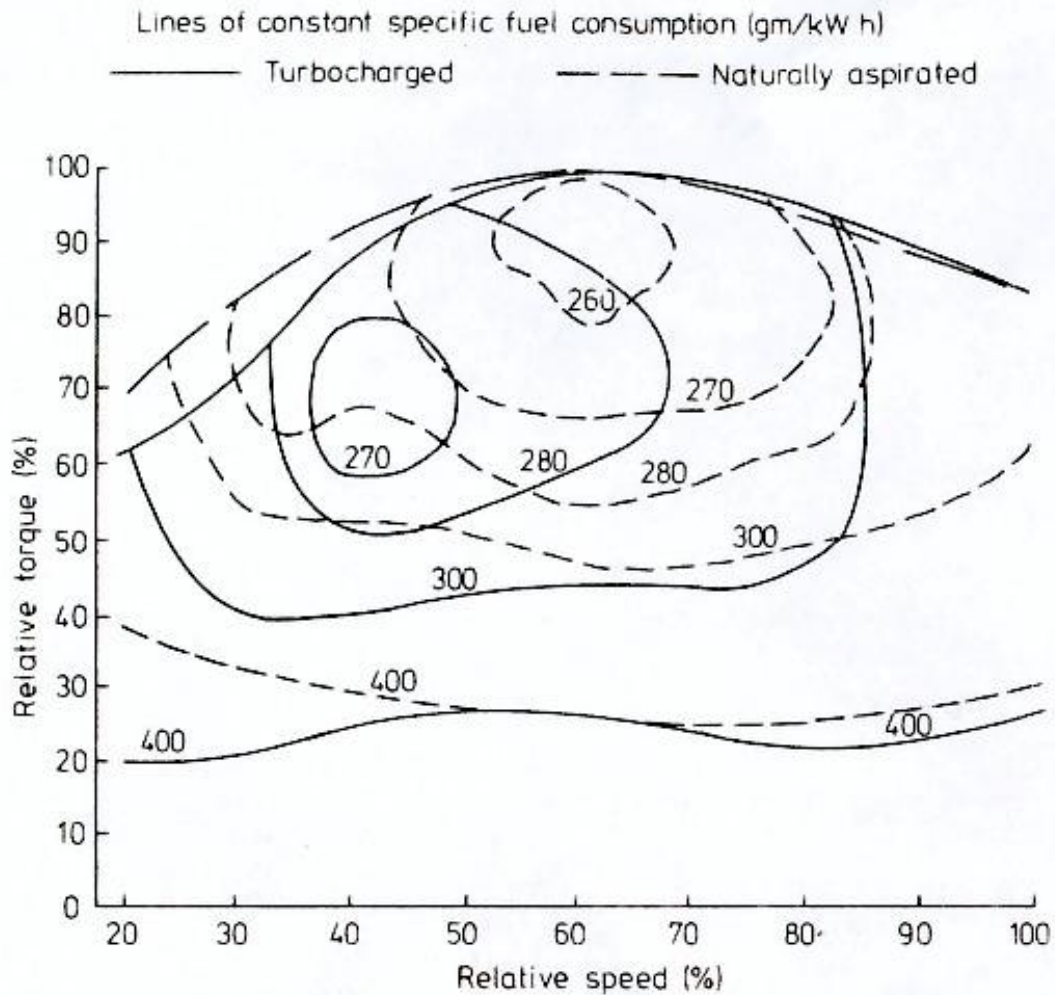


Σχ. 23 Ford V6 στροβιλο-υπερπληρωμένο: η επίδραση του πολλαπλού περιορισμού καυσαερίων στην ώθηση, την πίεση εξάτμισης και την παραγωγή δύναμης

Το Σχήμα 23 παρουσιάζει την επίδραση της ποικιλίας του μεγέθους του περιορισμού καυσαερίων στην πίεση εξόδου του στροβίλου. Ο μικρότερος περιοριστής (διάμετρος 44.5 mm) αυξάνει την πίεση αντίθλιψης και μειώνει το έργο του στροβίλου, κάτι που οδηγεί σε μείωση της πίεσης υπερπλήρωσης. Η παραγωγή ισχύος της μηχανής μειώνεται λόγω της συνδυασμένης επιρροής της χαμηλότερης υπερπλήρωσης και του αυξανόμενου έργου εναλλαγής αερίων.

Οι περισσότεροι στροβιλο-υπερπληρωμένοι κινητήρες αυτοκινήτων χρησιμοποιούν τώρα το σύστημα ελέγχου υπερπλήρωσης της βαλβίδας παράκαμψης καυσαερίων της εξαγωγής, με περίπου 30% έως 40% της παροχής μάζας να παρακάμπτει το στρόβιλο με μέγιστη ταχύτητα και φορτίο. Επιπλέον,

τα περισσότερα από αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούν την πίεση πολλαπλής εισαγωγής, ενεργώντας σε ένα διάφραγμα για να ανοίγουν και να διαμορφώνουν την βαλβίδα παράκαμψης καυσαερίων. Μια εξαίρεση είναι η παλιά 2λιτρη μηχανή Saab στην οποία η πίεση πολλαπλής εξαγωγής χρησιμοποιείται ως μέσο ελέγχου. Ο στόχος είναι να χρησιμοποιηθεί η συνεχής άνοδος της πίεσης εξαγωγής ώστε να ανοίγει η βαλβίδα παράκαμψης καυσαερίων περαιτέρω καθώς η ταχύτητα της μηχανής αυξάνεται, με ένα απλό σχέδιο βαλβίδας παράκαμψης καυσαερίων. Κατά συνέπεια η πίεση υπερπλήρωσης μπορεί να μειωθεί βαθμιαία σε πολύ υψηλές ταχύτητες, παράγοντας μια λογική μορφή καμπύλης της ροπής. Είναι εφικτό αλλά δυσκολότερο να καλυφθεί αυτή η απαίτηση με προσεκτικό σχεδιασμό της ίδιας της βαλβίδας παράκαμψης καυσαερίων με έλεγχο της πίεσης της πολλαπλής εισαγωγής.

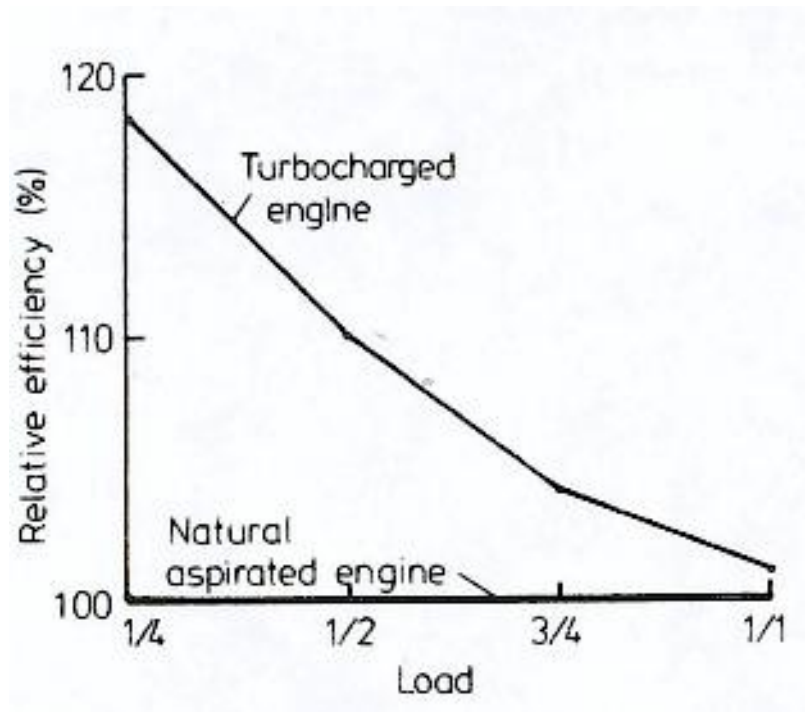


Σχ. 24 Συγκριτική ειδική κατανάλωση καυσίμου ενός στροβιλο-υπερπληρωμένου και ενός βενζινοκινητήρα φυσικής αναπνοής, κλιμακούμενη για την ίδια μέγιστη ροπή (προσαρμοσμένη από Csallner και Spindler)

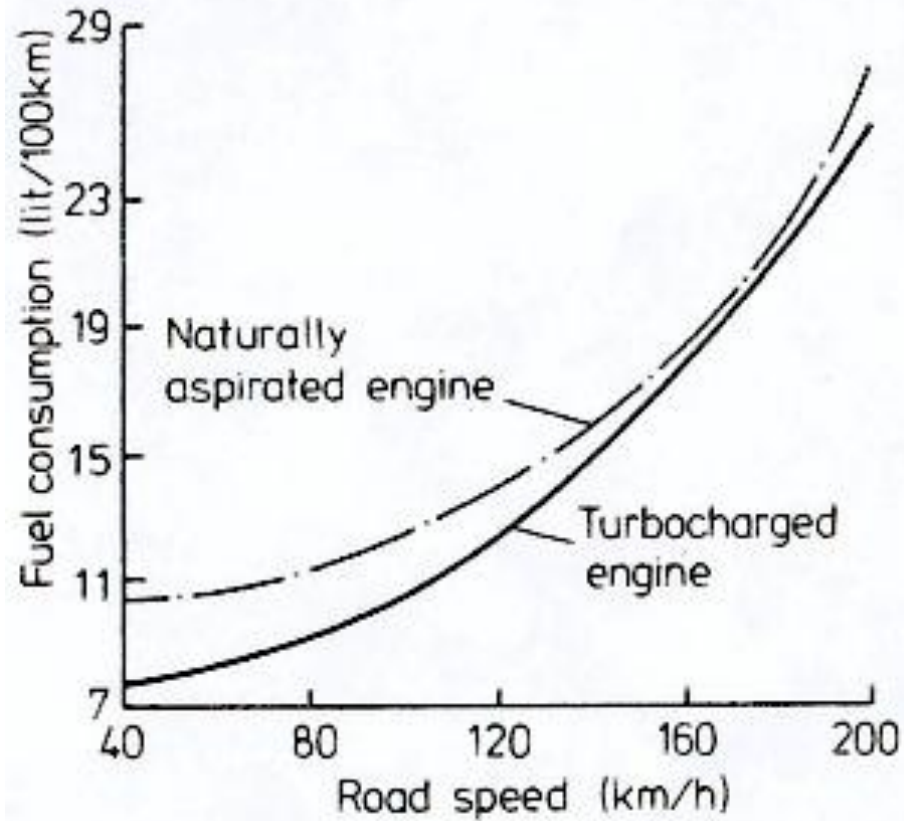
Οι συγκεκριμένες καμπύλες και περιγράμματα κατανάλωσης καυσίμων μιας μηχανής φυσικής αναπνοής και μιας στροβιλο-υπερπληρωμένης μηχανής Audi, συγκρίνονται στο Σχήμα 24, στην οποία τα στοιχεία έχουν υπολογιστεί σε κλίμακα ώστε να απεικονίζουν μηχανές διαφορετικών ικανοτήτων, αλλά ίδιας μέγιστης ροπής. Σε αυτήν την περίπτωση, ο χαμηλός βαθμός συμπίεσης της στροβιλο-υπερπληρωμένης μηχανής δίνει μια χρήσιμη μείωση της ειδικής



κατανάλωσης καυσίμου σε χαμηλές ταχύτητες. Η μηχανή φυσικής αναπνοής είναι καλύτερη στις υψηλές ταχύτητες. Κατά συνέπεια οποιοδήποτε όφελος μιας μηχανής έναντι της άλλης, θα εξαρτηθεί από την οδική συμπεριφορά του οχήματος εν λειτουργία. Συνήθως η κατανάλωση καυσίμου σε χαμηλές ταχύτητες είναι σημαντικότερη δεδομένου ότι οι οδηγοί σπάνια «τρέχουν» τους κινητήρες τους σε υψηλές ταχύτητες για μεγάλες χρονικές περιόδους.



Σχ. 25 Σύγκριση του πλεονεκτήματος αποδοτικότητας ενός στροβιλο-υπερπληρωμένου βενζινοκινητήρα με έναν κινητήρα φυσικής αναπνοής της ίδιας ισχύος, συναρτήσει του φορτίου



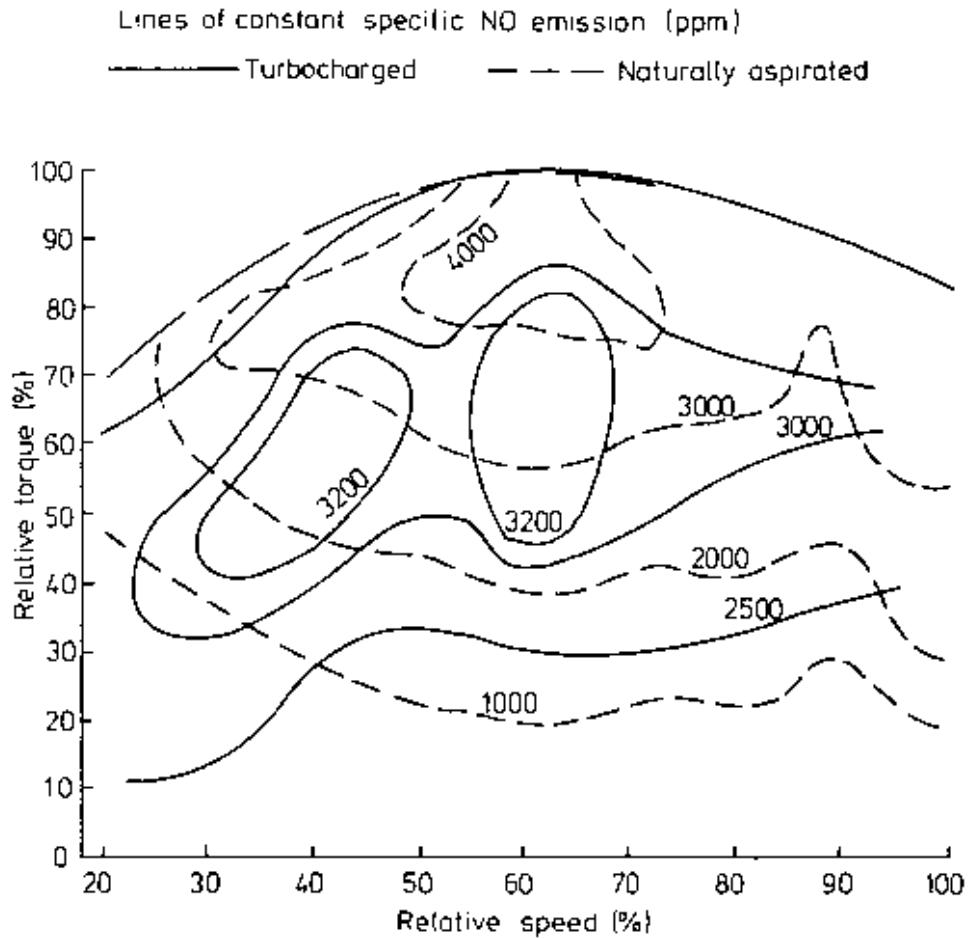
Σχ. 26 Σύγκριση των επιπέδων κατανάλωσης καυσίμου στον δρόμο μεταξύ ενός στροβιλο-υπερπληρωμένου βενζινοκινητήρα με έναν κινητήρα φυσικής αναπνοής της ίδιας ισχύος

Τα Σχήματα 25 και 26 επεξηγούν πώς η βελτίωση στην κατανάλωση καυσίμου αυξάνεται καθώς το φορτίο μειώνεται σε μια στροβιλο-υπερπληρωμένη μηχανή, και πώς αυτό απεικονίζεται όταν το όχημα λειτουργεί σε σταθερή ταχύτητα. Σημαντική είναι, επίσης, και η μείωση στο βάρος της μηχανής, σχετικά με έναν κινητήρα φυσικής αναπνοής της ίδιας ισχύος, η οποία μείωση παίζει μεγάλο ρόλο στην οικονομία καυσίμου του οχήματος κατά την επιτάχυνση. Σημαντικά οφέλη είναι εφικτά εάν το βάρος του πλαισίου μειωθεί επίσης λόγω της απαίτησης να φέρει μια ελαφρύτερη μηχανή.

## 11. Εκπομπές καυσαερίου

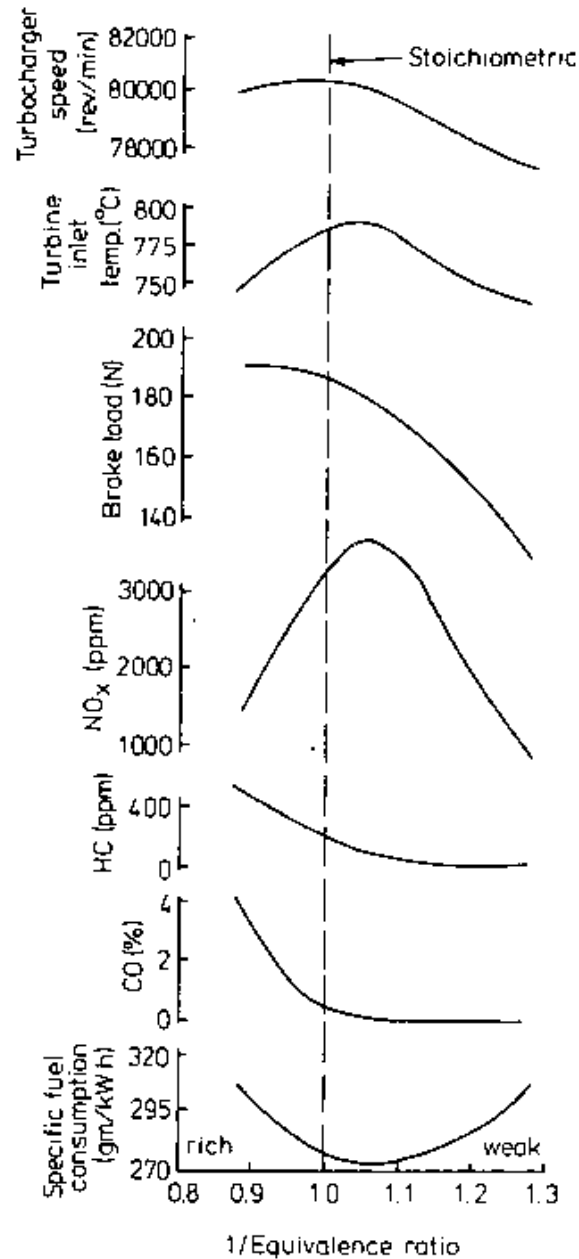
Η στροβιλο-υπερπλήρωση μπορεί να μειώσει ελάχιστα συγκεκριμένες εκπομπές HC, CO και NO<sub>x</sub> από ένα βενζινοκινητήρα σε συγκεκριμένες, αλλά όχι σε όλες, τις περιστάσεις. Οι αντιδράσεις οξείδωσης των HC και CO εξαρτώνται από την πίεση, θερμοκρασία και τον χρόνο. Τα στοιχεία αποδεικνύουν ότι η πολλαπλή εξαγωγή και ο σρόβιλος ενεργούν, μερικώς, ως θερμοκοί αντιδραστήρες ενισχύοντας περαιτέρω την οξείδωση. Το όφελος, εντούτοις, θα είναι μικρό ή ανύπαρκτο σε ένα κακοσχεδιασμένο σύστημα.

Τα οξείδια του αζώτου (NO<sub>x</sub>) είναι κατά ένα μεγάλο μέρος μη αντιμετωπίσιμα στα χαμηλά φορτία (Σχήμα 27) αλλά μπορούν να μειωθούν σημαντικά στο πλήρες φορτίο, κάτι που πιθανώς οφείλεται στο χαμηλότερο βαθμό συμπίεσης.



Σχ. 27 Σύγκριση ειδικής εκπομπής NO ενός στροβιλο-υπερπληρωμένου και ενός βενζινοκινητήρα φυσικής αναπνοής, σε κλίμακα για την ίδια μέγιστη ροπή (προσαρμοσμένη από τους Csallner και Spindler)

Στα χαμηλά φορτία, η επίδραση του βαθμού συμπίεσης θα αντισταθμιστεί με το μεγαλύτερο άνοιγμα της ρυθμιστικής δικλείδας που απαιτείται για να αντισταθμίσει τη χαμηλότερη παραγωγή ισχύος, δεδομένου ότι ο στροβιλο-υπερπληρωτής θα παραμένει αδρανής.



Σχ. 28 Η ευαισθησία της απόδοσης στην αλλαγή του λόγου αέρα/καυσίμου ενός στροβιλο-υπερπληρωμένου βενζινοκινητήρα

Οι στροβιλο-υπερπληρωμένοι βενζινοκινητήρες παρουσιάζουν την ίδια ευαισθησία εκπομπών στην αναλογία αέρα/καυσίμου (Σχήμα 28) όπως οι κινητήρες φυσικής αναπνοής, αλλά η κατάσταση συντίθεται από επακόλουθες αλλαγές στη θερμοκρασία της εισαγωγής του στροβίλου. Η θερμοκρασία

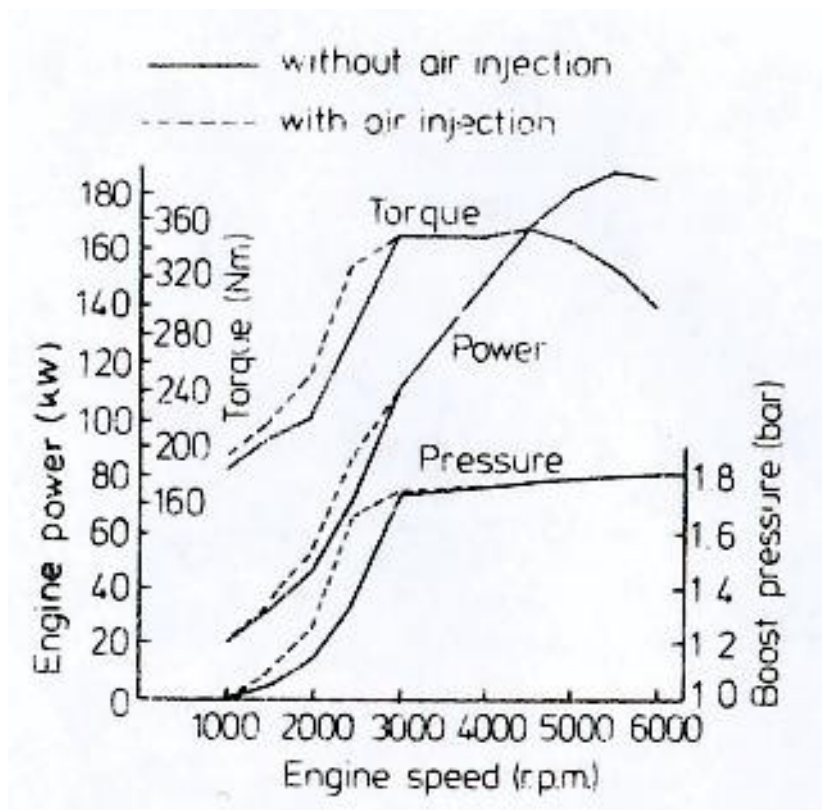
εξαγωγής θα πέσει εάν το μίγμα είναι υπερβολικά ασθενές ή πλούσιο. Εάν η βαλβίδα παράκαμψης καυσαερίων δεν είναι ανοικτή, η ταχύτητα του στροβιλο-υπερπληρωτή και ως εκ τούτου η πίεση υπερπλήρωσης θα πέσει εάν το μίγμα εξασθενίσει. Κατά συνέπεια, η πτώση στην ισχύ θα είναι γρηγορότερη από αυτή μιας μηχανής φυσικής αναπνοής. Με πλούσια μίγματα η ταχύτητα υπερπλήρωσης θα φθίνει πιο αργά, και ως εκ τούτου το όφελος της ισχύος, με ένα μίγμα ελαφρώς πλουσιότερο από το στοιχειομετρικό, θα παραμείνει.

Έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες ώστε να εκμεταλλευθεί η υψηλή πίεση πολλαπλής εξαγωγής ενός στροβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα σε μια θερμική αντίδραση οξειδωσης μεταξύ του στροβίλου και της μηχανής. Εντούτοις, τα οφέλη αντισταθμίζονται από την έλλειψη χρησιμοποίησης του ενεργειακού παλμού στις πολλαπλές τύπου-αντιδραστήρα που έχει ως αποτέλεσμα την χαμηλή αποδοτικότητα του στροβιλο-υπερπληρωμένου συστήματος. Ωστόσο, εάν χρησιμοποιούνται αρκετά πλούσια μίγματα, η σημαντική οξειδωση του HC και του CO μπορεί να συνδυαστεί με τα χαμηλά επίπεδα του NO<sub>x</sub> τα οποία συσχετίζονται κανονικά με τα πλούσια μίγματα, αλλά εις βάρος της κατανάλωσης καυσίμου.

Για χαμηλά επίπεδα εκπομπής, χαρακτηριστικά εκείνων που απαιτήθηκαν στις περισσότερες Πολιτείες των Η.Π.Α προς το τέλος της δεκαετίας του '70, οι εκπομπές NO<sub>x</sub> ελέγχθηκαν από την επανακυκλοφορία καυσαερίου όπως σε έναν κινητήρα φυσικής αναπνοής με ένα ελαφρώς πλούσιο μίγμα καυσίμου. Ένας καταλύτης οξειδωσης χρησιμοποιήθηκε για να ελέγξει το HC και το CO, συν μια αεραντλία στο σύστημα εξάτμισης για να λάβει το απαραίτητο πρόσθετο οξυγόνο. Για να πληροί τις προϋποθέσεις της πιο αυστηρής

νομοθεσίας της δεκαετίας του '80, χρειάζονταν τριπλά (HC, CO και NO<sub>x</sub>) ή διπλά συστήματα. Κατά συνέπεια, η επεξεργασία καυσαερίου είναι παρόμοια με αυτή μιας μηχανής φυσικής αναπνοής, αλλά η απώλεια υψηλής πίεσης μέσω του καταλυτικού μετατροπέα έχει επιπτώσεις στην επιλογή της αντιστοιχίας στροβίλο-υπερπληρωτών.

Εάν ένα ελαφρώς πλούσιο μίγμα χρησιμοποιείται για να ελέγξει τα NO<sub>x</sub> στο πλήρες φορτίο και μια αεραντλία εγκατασταθεί για να βοηθήσει την οξείδωση του CO και HC του σωλήνα εξάτμισης, τότε η έγχυση αέρα μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ώστε να ενισχύσει την υπερπλήρωση σε χαμηλές ταχύτητες. Με την έγχυση του αέρα πριν από το στρόβιλο, η περαιτέρω αντίδραση του πλούσιου μίγματος αυξάνει τη θερμοκρασία της εισαγωγής του στροβίλου (και η παροχή μάζας αυξάνεται), αυξάνοντας το έργο του στροβίλου και επομένως την πίεση υπερπλήρωσης (Σχήμα 29).



Σχ. 29 Η επίδραση της δευτερεύουσας έγχυσης αέρα (στην πολλαπλή εξάτμισης) στην απόδοση στροβιλο-υπερπληρωμένου βενζινοκινητήρα

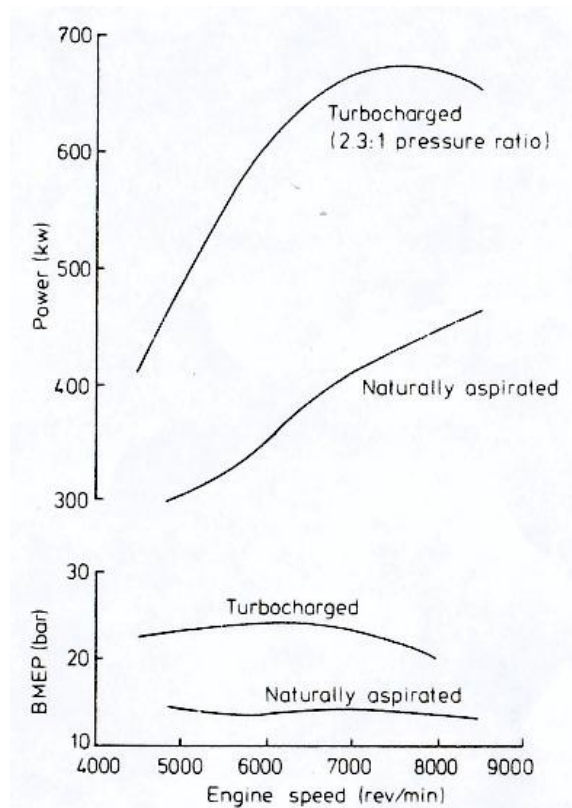
## 12. Αγωνιστικοί Κινητήρες

Οι στροβιλο-υπερπληρωμένοι βενζινοκινητήρες έχουν υπάρξει αρκετά επιτυχείς στον τομέα των αγωνιστικών κινητήρων. Συγκεκριμένα, στον αναγνωρισμένου κύρους αμερικάνικο αγώνα, Indianapolis 500, είχαν υπερισχύσει και έχουν επικρατήσει οι στροβιλο-υπερπληρωμένοι κινητήρες στο παρελθόν. Οι μηχανές 2.8L παράγουν μέχρι 600 KW με την έγχυση καυσίμου και σύστημα ελέγχου παράκαμψης καυσαερίου. Εντούτοις, οι όροι του αγώνα είναι μακριά από τα χαρακτηριστικά της κανονικής ευρωπαϊκής πρακτικής. Συγκεκριμένα, κανένας περιορισμός (στο παρελθόν) δεν έχει επιβληθεί στα



καύσιμα, επιτρέποντας την χρήση πρόσθετων ουσιών μεθανόλης και προσθετικά αντίστασης κρουστικής καύσης. Κατά συνέπεια αυτές οι μηχανές δεν έχουν υποβληθεί στις χαμηλές πιέσεις υπερπλήρωσης περιορισμένης κρουστικής καύσης που περιορίζουν κανονικά την απόδοση των μηχανών.

Άλλοι υπερπληρωμένοι βενζινοκινητήρες έχουν αγωνιστεί επιτυχώς με κανονικά καύσιμα οκτανίου, για παράδειγμα, η 5λίτρη CAN-AM Porsche. Η παραγωγή ισχύος έχει περιοριστεί από την αξιοπιστία μηχανών και την κατανάλωση καυσίμων, εντούτοις έχει καταγραφεί ισχύς πάνω από 700 KW (Σχήμα 30).



Σχ. 30 Απόδοση της 5λίτρης Porsche 917

Χρησιμοποιήθηκαν σημαντικά χαμηλότερες πιέσεις υπερπλήρωσης, έναντι των κανονικών τιμών της Ινδιανάπολις, και επομένως η μέση πραγματική πίεση

ήταν πολύ χαμηλότερη. Η Porsche έχει αγωνιστεί επίσης με υπερπληρωμένες εκδόσεις των κανονικών επιβατικών αυτοκινήτων της, αλλά χωρίς υπερβολικές πιέσεις υπερπλήρωσης και χρησιμοποιώντας ψύξη αέρα υπερπλήρωσης. Στην πραγματικότητα, θα ήταν χρήσιμο να ψύχεται ο αέρας μετά ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί όσο το δυνατόν υψηλότερη πίεση υπερπλήρωσης χωρίς πρόκληση κρουστικής καύσης.

Επίσης κατά το παρελθόν (δεκαετία 1980), υπερπληρωτές με συστήματα ψύξης αέρα μηχανών 1.5L της F1 ανταγωνίστηκαν κινητήρες φυσικής αναπνοής 3L, με μεγάλη επιτυχία.

### **13. Κινητήρες αεροσκαφών**

Οι στροβιλο-υπερπληρωμένοι κινητήρες είναι ικανοί για λειτουργία σε υψόμετρο. Ένας κανονικός βενζινοκινητήρας φυσικής αναπνοής θα υποστεί σημαντική υποβάθμιση της απόδοσής του σε υψόμετρο λόγω της σταδιακής μείωσης της πυκνότητας του αέρα. Η μερική αποκατάσταση των προβλημάτων λόγω υψομέτρου κάνει τη χρησιμοποίηση της υπερπλήρωσης σε ελαφριά σκάφη με βενζινοκινητήρες μια αρκετά ελκυστική πρόταση. Με τον κατάλληλο σχεδιασμό ενός υπετροφοδοτούμενου συστήματος, είναι δυνατό να διατηρηθεί η απόδοση του κινητήρα, στα ίδια επίπεδα, τόσο στο επίπεδο της θάλασσας έως και σε αρκετά υψηλό υψόμετρο.

Ας θεωρήσουμε έναν κινητήρα φυσικής αναπνοής που παράγει ένα συγκεκριμένο επίπεδο ισχύος στη στάθμη της θάλασσας. Μπορεί να εγκατασταθεί ένα υπερπληρωμένο σύστημα με έλεγχο βαλβίδας παράκαμψης

καυσαερίου, έτσι ώστε η βαλβίδα αυτή να είναι πλήρως ανοικτή στη στάθμη της θάλασσας και ο στροβιλο-υπερπληρωτής να παράγει χαμηλή πίεση υπερπλήρωσης. Εάν η βαλβίδα ελέγχεται από την απόλυτη πίεση πολλαπλής εισαγωγής, η βαλβίδα θα κλείσει βαθμιαία κατά το αυξανόμενο ύψος. Κατά συνέπεια, η παραγωγή ισχύος του στροβίλου θα αυξηθεί έτσι ώστε ο συμπιεστής να διατηρεί την αρχική απόλυτη πίεση στους κυλίνδρους χωρίς την απώλεια παραγωγής ισχύος του κινητήρα. Φυσικά, δεν υπάρχει κανένας λόγος να μην εκμεταλλευτούμε το πλεονέκτημα αυτό, δηλαδή να υπερπληρωθεί ο κινητήρας προς την περιορισμένη κρουστική καύση της πίεσης υπερπλήρωσης στη στάθμη της θάλασσας· και τότε θα είναι αυτή η απόλυτη πίεση πολλαπλής που θα κρατηθεί στο υψόμετρο.

Ο στροβιλο-υπερπληρωτής θα διατηρήσει μόνο την ισχύ του κινητήρα μέχρι το σημείο στο οποίο η βαλβίδα παράκαμψης καυσαερίων είναι πλήρως κλειστή. Το ύψος στο οποίο αυτό εμφανίζεται (το «κρίσιμο υψόμετρο») θα εξαρτηθεί από τον κινητήρα, τον υπερπληρωτή και την αντίστοιχη βαλβίδα παράκαμψης καυσαερίου. Αυτό θα εξαρτηθεί κανονικά από την αρχική επιλογή του μεγέθους του στροβίλου, με το τελικό όριο να αποτελεί η ταχύτητα του υπερπληρωτή στο συγκεκριμένο υψόμετρο. Πέρα από το κρίσιμο υψόμετρο, η παραγωγή ισχύος του κινητήρα θα πέσει, αν και λιγότερο γρήγορα από ότι θα συνέβαινε με έναν (μεγαλύτερο) κινητήρα φυσικής αναπνοής που αναπτύσσει την ίδια ισχύ στο συγκεκριμένο υψόμετρο.

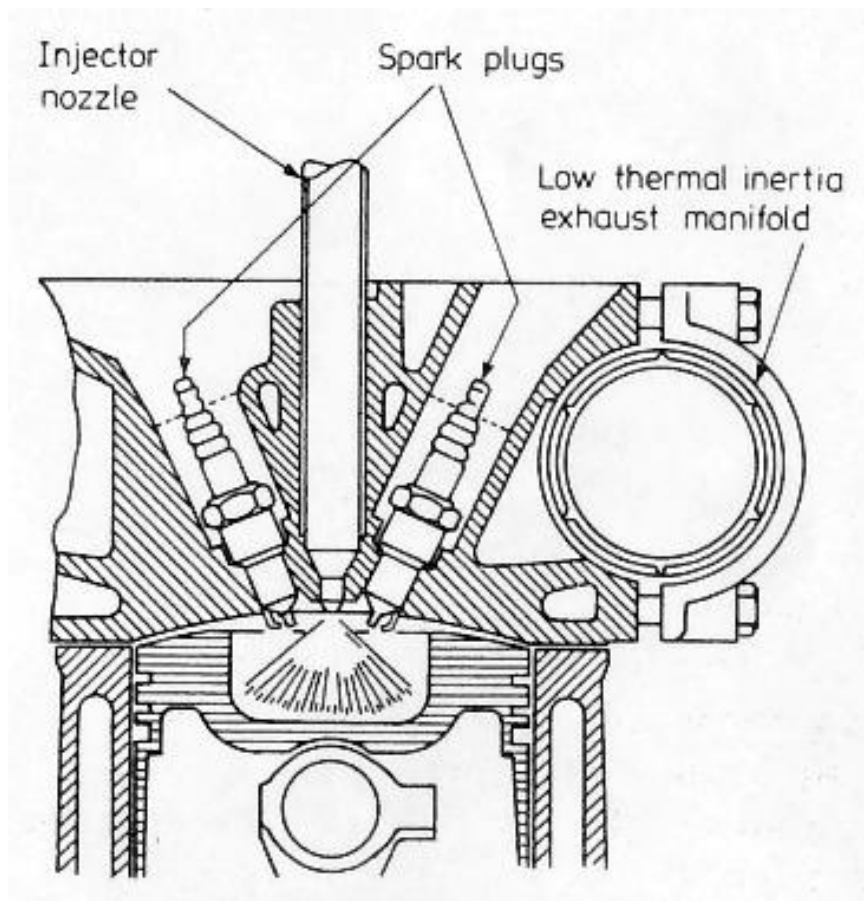
Σε ύψη πάνω από τα 6000 έως 7000 m είναι επιτακτικό να διατηρηθεί σταθερή η ατμοσφαιρική πίεση στις καμπίνες των αεροσκαφών για την άνεση των επιβατών. Αν και μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωριστοί συμπιεστές

«Roots» ή φυγοκεντρικοί συμπιεστές, είναι εφικτό να «διαρρεύσει» ο συμπιεσμένος αέρας από το συμπιεστή του στροβιλο-υπερπληρωτή, υπό τον όρο ότι το υπερπληρωμένο σύστημα ταιριάζει για αυτή την λειτουργία.

## **14. Στρωματοποιημένοι Κινητήρες Υπερπλήρωσης**

Αν και η μηχανή diesel μπορεί να θεωρηθεί ως στρωματοποιημένη μηχανή υπερπλήρωσης, δεδομένου ότι το μίγμα της κατά τη διάρκεια της καύσης είναι ανομοιογενές, ο όρος αναφέρεται γενικά στους βενζινοκινητήρες. Το ειδικό χαρακτηριστικό είναι ότι δεν χρησιμοποιούν ένα ομοιογενές μίγμα αέρα/καυσίμου, αλλά ένα μίγμα στο οποίο η αναλογία αέρα/καυσίμου ποικίλλει στο θάλαμο καύσης. Μερικές εκδόσεις χρησιμοποιούν ένα θάλαμο καύσης που έχει δύο διασυνδεδεμένες μονάδες όπως ένας diesel με προ-θάλαμο. Ένα πλούσιο (ομοιογενές) μίγμα διαχέεται στον προ-θάλαμο, και ένα ασθενές μίγμα στον κύριο θάλαμο. Η ανάφλεξη ενός μίγματος πλουσιότερου από το στοιχειομετρικό πραγματοποιείται στον προ-θάλαμο, και ένα πύρινο μέτωπο που διαχέεται στον κύριο θάλαμο καίει το πιο ασθενές μίγμα. Αυτές οι μηχανές έχουν αναπτυχθεί λόγω αναζήτησης χαμηλών εκπομπών NO<sub>x</sub> – χαρακτηριστικό παράδειγμα ήταν η μηχανή Honda CVCC.

Κάπως πιο κοντά στην έννοια κινητήρα diesel είναι ο στρωματοποιημένος κινητήρας με σπινθηριστή (ή μπουζί) που χρησιμοποιεί την άμεση έγχυση καυσίμου στον κύλινδρο. Ένα παλαιότερο γνωστό παράδειγμα είναι το Ford PROCO (Σχήμα 31).



Σχ. 31 Εγκάρσια τομή ενός τυπικού θαλάμου καύσης PROCO

Η αρχή είναι ότι ένα μίγμα αναλογίας κοντά στη στοιχειομετρική διαμορφώνεται τοπικά στην περιοχή των σπινθηριστών. Το υπόλοιπο του θαλάμου περιέχει το σταδιακά πιο πτωχό μίγμα, τον αέρα, ή τα καμένα προϊόντα της καύσης. Εκτός από το όφελος των χαμηλών εκπομπών καυσαερίου, κοινό όλων των στρωματοποιημένων κινητήρων υπερπλήρωσης είναι ότι δεν απαιτείται ρύθμιση εισαγωγής στο μέρος της υπερπλήρωσης, επιτρέποντας τη χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου. Ένα ακόμα πλεονέκτημα αυτής της τελευταίας κατηγορίας μηχανών είναι η ανοχή τους στη χρήση των καυσίμων με διαφορετικές ιδιότητες. Ο συνδυασμός άμεσης έγχυσης

καυσίμου, μπουζί και προοδευτικής τοπικής ανάφλεξης καθώς το καύσιμο εγχέεται, σχεδόν εξαλείφει το πρόβλημα που συνδέεται με την καθυστέρηση ανάφλεξης (στη μηχανή diesel) και κρουστική καύση (στη μηχανή βενζίνης). Το τελευταίο είναι το σημαντικότερο στο παρόν πλαίσιο επειδή αφαιρεί το σημαντικότερο περιοριστικό παράγοντα του στροβιλο-υπερπληρωμένου βενζινοκινητήρα με σπινθηριστή, με το να επιτρέπει να χρησιμοποιηθεί υψηλότερη πίεση υπερπλήρωσης.

Η στρωματοποιημένη μηχανή υπερπλήρωσης μπορεί να παράγει σημαντικά λιγότερη ισχύ από ένα βενζινοκινητήρα ισοδύναμης μετατόπισης. Αυτό προκύπτει από τη βασική διαδικασία ανάμιξης αέρα/καυσίμου με τοπική ανάφλεξη. Για να επιτύχει την ίδια παραγωγή ισχύος θα απαιτείτο ένα εξίσου πλούσιο μίγμα (στην πλήρη υπερπλήρωση), αλλά αυτό δύσκολα μπορεί να συνυπάρξει με σωστή ανάφλεξη, χωρίς ομοιογενές μίγμα. Η στροβιλο-υπερπλήρωση έχει χρησιμοποιηθεί από την TEXACO, την MAN και άλλους για να αναπληρώσει αυτήν την απώλεια ισχύος, και σε μερικές περιπτώσεις για να παράγει ένα πλεονέκτημα ισχύος. Εντούτοις, το γενικό κόστος της μηχανής, συμπεριλαμβανομένου του συστήματος ψεκασμού καυσίμου και του στροβιλο-υπερπληρωτή, είναι υψηλό.

## **15. Υστέρηση (καθυστέρηση) υπερπλήρωσης**

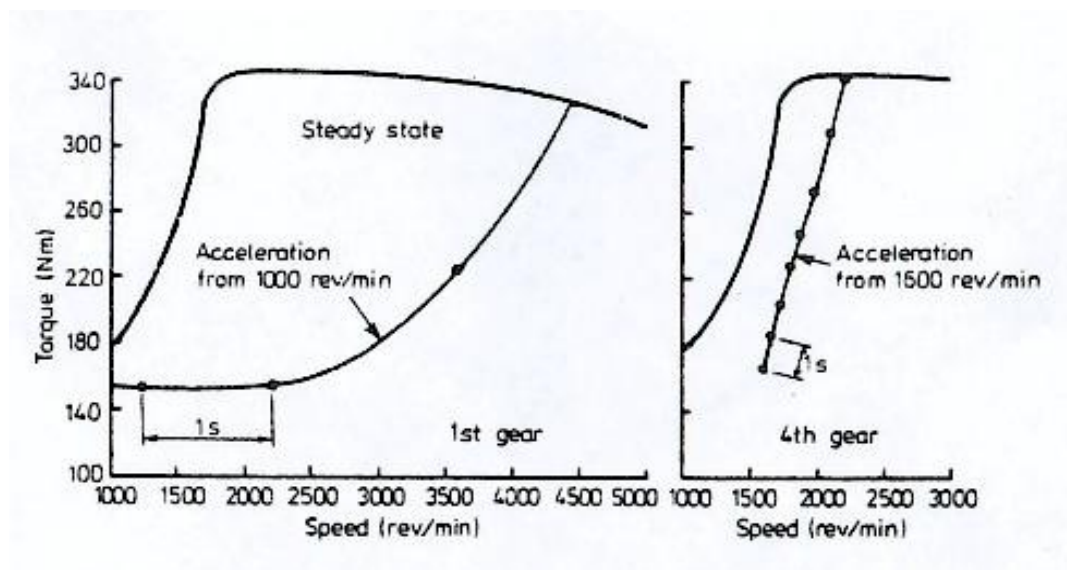
Υπάρχουν ορισμένα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του στροβιλο-υπερπληρωμένου βενζινοκινητήρα που οδηγούν στο να υπάρχει υστέρηση υπερπλήρωσης (turbocharger lag) χειρότερη από αυτή ενός κινητήρα diesel. Πρώτον, οι βενζινοκινητήρες είναι ελαφρύτεροι και ομαλότεροι, κάτι που

επιτρέπει την χρησιμοποίηση ελαφρύτερων σφονδύλων. Κατά συνέπεια οι βενζινοκινητήρες ανταποκρίνονται γενικά καλύτερα από τις μηχανές diesel και η καθυστέρηση του στροβιλο-υπερπληρωτή στην αύξηση της παροχής αέρα στη μηχανή γίνεται πιο ορατή. Δεύτερον, ο βενζινοκινητήρας λειτουργεί σε ευρύτερο φάσμα παροχής μάζας, ανεβάζοντας στροφές (υπερπλήρωση) από χαμηλή ταχύτητα (λειτουργία στο ρελαντί) μέχρι να φτάσει σε πλήρη ταχύτητα. Κατά συνέπεια η απαίτηση παροχής αέρα μπορεί να αλλάξει πολύ γρήγορα όταν ξαφνικά η ρυθμιστική βαλβίδα ανοίξει και τότε η υστέρηση υπερπλήρωσης γίνεται αντιληπτή εύκολα από τον οδηγό.

Αν και γίνονται από καιρό σε καιρό διάφορες υπερβολικές δηλώσεις σχετικά με τα συστήματα που «εξαλείφουν» την στέρηση υπερπλήρωσης, πρέπει να προσφύγουμε σε κάποια πρόσθετη ενεργειακή εισαγωγή, εάν θέλουμε να αποβάλουμε (εξαλείψουμε) την καθυστέρηση αυτή. Εντούτοις, μπορεί βεβαίως να μειωθεί απλά και με λογικό σχεδιασμό. Οι σημαντικότεροι παράγοντες είναι η αδράνεια του στροβιλο-υπερπληρωτή, ο χρονισμός έναυσης, το σύστημα ελέγχου ώθησης (πίεσης υπερπλήρωσης), το μήκος και η διάμετρος των συστημάτων της πολλαπλής εισαγωγής και της εξαγωγής και η θέση των ρυθμιστικών βαλβίδων σε σχέση με τον εξαεριστή. Παραδείγματος χάριν, μια μηχανή με βαλβίδα παράκαμψης καυσαερίων, επιτρέπει την εγκατάσταση ενός μικρού στροβιλο-υπερπληρωτή (χαμηλής αδράνειας) με συνέπεια γρηγορότερη απόκριση από αυτή που θα είχαμε σε μια μηχανή χωρίς την βαλβίδα και με μεγαλύτερο στροβιλο-υπερπληρωτή.

Οι μηχανές επιβατικών αυτοκινήτων λειτουργούν πραγματικά υπό ασταθείς όρους τις περισσότερες φορές. Μόνο κατά τη διάρκεια σταθερής οδήγησης σε

αυτοκινητοδρόμους, οι συνθήκες αυτές και ομαλοποιούνται. Κατά συνέπεια είναι πάρα πολύ σημαντικό να ρυθμίσουμε τον στροβιλο-υπερπληρωτή για τις παροδικές αυτές συνθήκες, κάτι το οποίο σημαίνει συνήθως την προσαρμογή ενός ελαφρώς μικρότερου στροβιλο-υπερπληρωτή από αυτόν που θεωρείται καλύτερος για συνθήκες σταθερής ταχύτητας. Λόγω της υστέρησης του στροβιλο-υπερπληρωτή, όταν ξαφνικά ανοίγει η ρυθμιστική βαλβίδα, ο κινητήρας συμπεριφέρεται όπως ένας φυσικής αναπνοής.



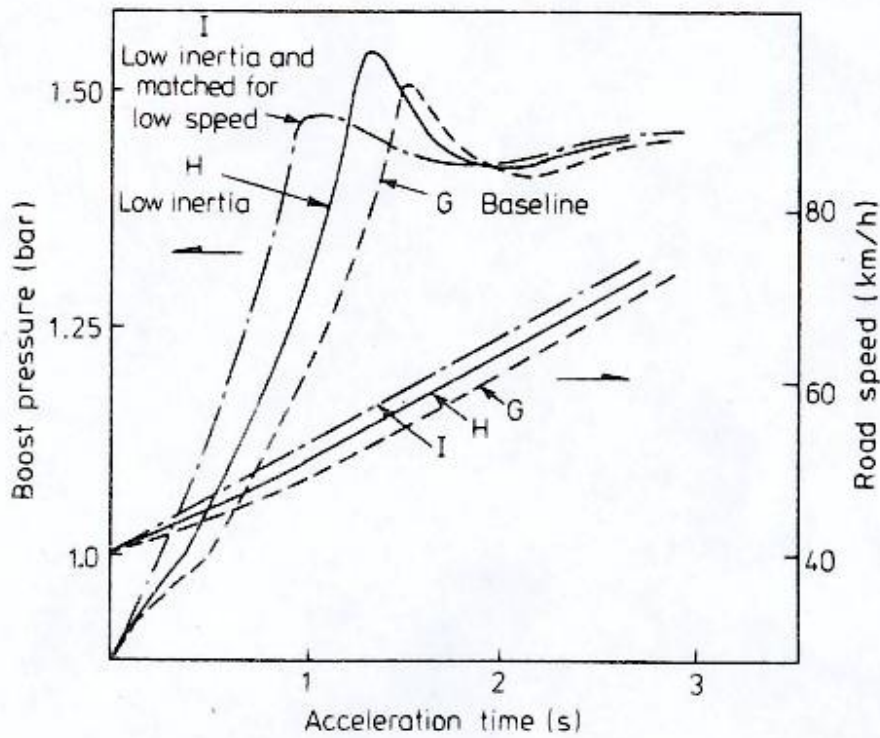
Σχ. 32 Σύγκριση ροπής του κινητήρα σε μόνιμη λειτουργία και κατά τη διάρκεια πλήρους επιτάχυνσης κατά την πρώτη και τετάρτη ταχύτητα

Το Σχήμα 32 συγκρίνει τη ροπή μόνιμης λειτουργίας μιας μηχανής 2.8L, με τη στιγμιαία ροπή που αναπτύσσεται επιταχύνοντας από χαμηλή ταχύτητα και φορτίο. Σε αυτές τις δοκιμές η μηχανή οδηγεί ένα αδρανές φορτίο, που προσομοιάζει ένα όχημα, μέσω ενός κιβωτίου ταχυτήτων. Στην πρώτη ταχύτητα, η ροπή που αναπτύσσεται είναι αυτή μιας μηχανής φυσικής αναπνοής για τουλάχιστον 1 sec, επιταχύνοντας από τις 1000rpm στις 4500



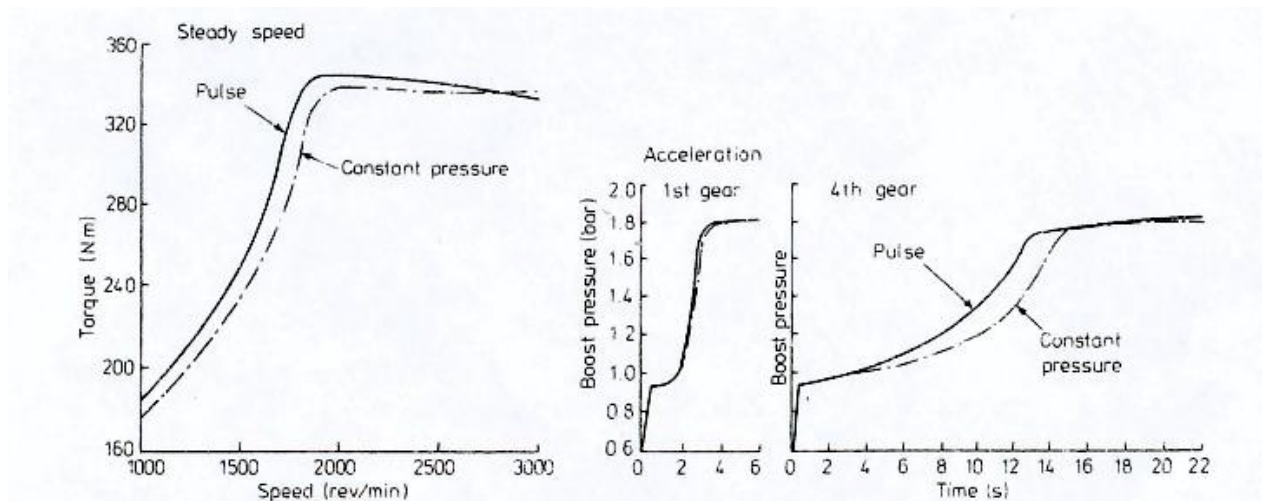
rpm. Στην τέταρτη ταχύτητα η αρχική καθυστέρηση δεν είναι τόσο σοβαρή, αλλά η στιγμιαία ροπή που αναπτύχθηκε είναι ουσιαστικά μικρότερη από την πιθανή ροπή κατά τη μόνιμη λειτουργία.

Η ταχύτητα της μηχανής στην οποία η ώθηση αναπτύσσεται στη χαρακτηριστική της μηχανής σε μόνιμη λειτουργία, θα επηρεάσει την απόκριση. Παραδείγματος χάριν, στην επιτάχυνση κατά την πρώτη ταχύτητα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 32, η πιθανή διαθέσιμη ροπή με μηδενική καθυστέρηση του στροβιλο-υπερπληρωτή, είναι χαμηλή. Το Σχήμα 33 παρουσιάζει την πλήρη επιτάχυνση του οχήματος και την απόκριση της πίεσης υπερπλήρωσης του στροβιλο-υπερπληρωτή με τους στροβιλο-υπερπληρωτές να έχουν συνδυαστεί για να αναπτύξουν πλήρη ώθηση με σταθερές ταχύτητες της τάξεως των 2050 (H) και 1740 rpm(I). Ο χρόνος απόκρισης για να επιτύχουμε την μέγιστη πίεση υπερπλήρωσης μειώνεται κατά 20% με τον συνδυασμό (I) και η επιτάχυνση του οχήματος ωφελείται ανάλογα.



Σχ. 33 Αποτελέσματα των χαρακτηριστικών ροπής και η στιγμή αδράνειας κατά την επιτάχυνση του οχήματος

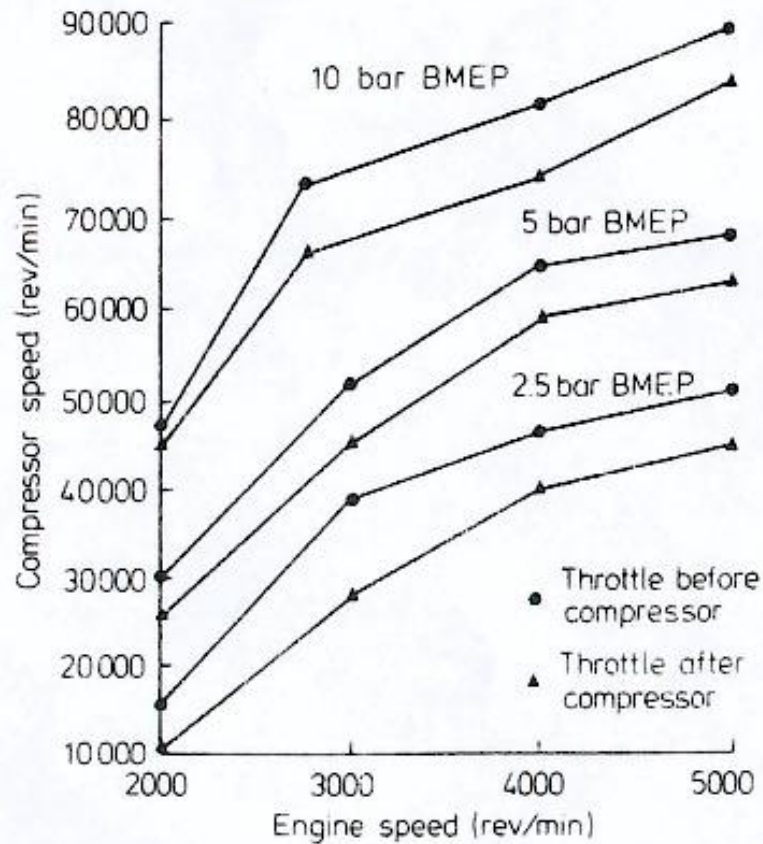
Επίσης στο Σχήμα 33 παρουσιάζεται το όφελος της χαμηλής αδράνειας υπερπλήρωσης, δεδομένου ότι η διαφορά μεταξύ των αντιστοιχιών H και G είναι 25% χαμηλότερη αδράνεια για τον υπερπληρωτή H.



Σχ. 34 Σύγκριση καμπύλης ροπής μόνιμης λειτουργίας και επιτάχυνσης με παλμική και συνεχή πίεση υπερπλήρωσης

Το Σχήμα 34 παρουσιάζει την επίδραση της παλμικής και ημι-σταθερής πίεσης των στροβιλο-υπερπληρωμένων συστημάτων στη μόνιμη λειτουργία της καμπύλης ροπής καθώς και την απόκριση. Με το κατάλληλο σύστημα παλμών πίεσης στροβιλο-υπερπλήρωσης, η ροπή χαμηλής ταχύτητας και η απόκριση είναι καλύτερες. Φαίνεται μια μικρή διαφορά στην επιτάχυνση με πρώτη ταχύτητα, δεδομένου ότι η απόκριση της μηχανής είναι πάρα πολύ γρήγορη ώστε να διακρίνουμε διαφορές, αλλά στην τέταρτη ταχύτητα με το σύστημα παλμών πίεσης ο χρόνος απόκρισης μειώνεται κατά 14%.

Μια στροβιλο-υπερπληρωμένη μηχανή με υψηλό βαθμό συμπίεσης και μεταβλητό χρονισμό έναυσης θα αντιδράσει γρηγορότερα από μια μηχανή χαμηλής συμπίεσης λόγω της επίδρασης του βαθμού συμπίεσης και του χρονισμού στην ισχύ εξόδου. Το πλεονέκτημα της βέλτιστης έναυσης είναι διαθέσιμο ελλείψει της πίεσης υπερπλήρωσης.



Σχ. 35 Ταχύτητα συμπιεστή σε τρία φορτία, με την τροφοδοτική βαλβίδα τοποθετημένη πριν ή πίσω από τον συμπιεστή

Η απόκριση της μηχανής είναι καλύτερη με τη τροφοδοτική βαλβίδα τοποθετημένη πριν από το συμπιεστή παρά όταν τοποθετείται μετά. Το Σχήμα 35 δείχνει ότι η χαμηλή πυκνότητα του αέρα στο συμπιεστή, με τη τροφοδοτική βαλβίδα πριν από το συμπιεστή, κινεί το λειτουργούν σημείο προς τα δεξιά στο χάρτη του συμπιεστή, προς υψηλότερες ταχύτητες του συμπιεστή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ταχύτητα στροβιλο-υπερπληρωτή 5000 έως 8000 rpm για την ίδια ταχύτητα μηχανής και φορτίο. Δεδομένου ότι η τελική (πλήρες φορτίο) ταχύτητα στροβιλο-υπερπλήρωσης στο τέλος μιας επιτάχυνσης θα είναι σχεδόν η ίδια ανεξαρτήτως της θέσης των ρυθμιστικών βαλβίδων, η αλλαγή ταχύτητας του στροβιλο-υπερπληρωτή που απαιτείται θα είναι λιγότερη με τη ρυθμιστική

βαλβίδα τοποθετημένη πριν από το συμπιεστή. Αυτό βελτιώνει καταφανώς την απόκριση, υπό την προϋπόθεση ότι ο όγκος της πολλαπλής μεταξύ της ρυθμιστικής βαλβίδας και των βαλβίδων εισαγωγής θα είναι μικρός.

Κατά συνέπεια η καλή απόκριση συνδέεται με την υψηλό βαθμό συμπίεσης μηχανής, τη ρυθμιστική βαλβίδα πριν από το συμπιεστή, την βαλβίδα παράκαμψης καυσίμων ή τη μεταβλητή γεωμετρία, το σύστημα χαμηλής αδράνειας στροβιλο-υπερπλήρωσης με σύστημα παλμών πίεσης, το οποίο έχει μικρό μήκος σωλήνων στην εισαγωγή και την εξαγωγή. Το μικρό μήκος σωλήνων της εισαγωγής είναι ιδιαίτερα σημαντικό εάν χρησιμοποιείται εξαεριωτής πριν από το συμπιεστή, για να περιορίσει τις ποτισμένες από καύσιμο επιφάνειες στο ελάχιστο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### *Αριθμητική ανάλυση χάρτη λειτουργίας συμπιεστή*

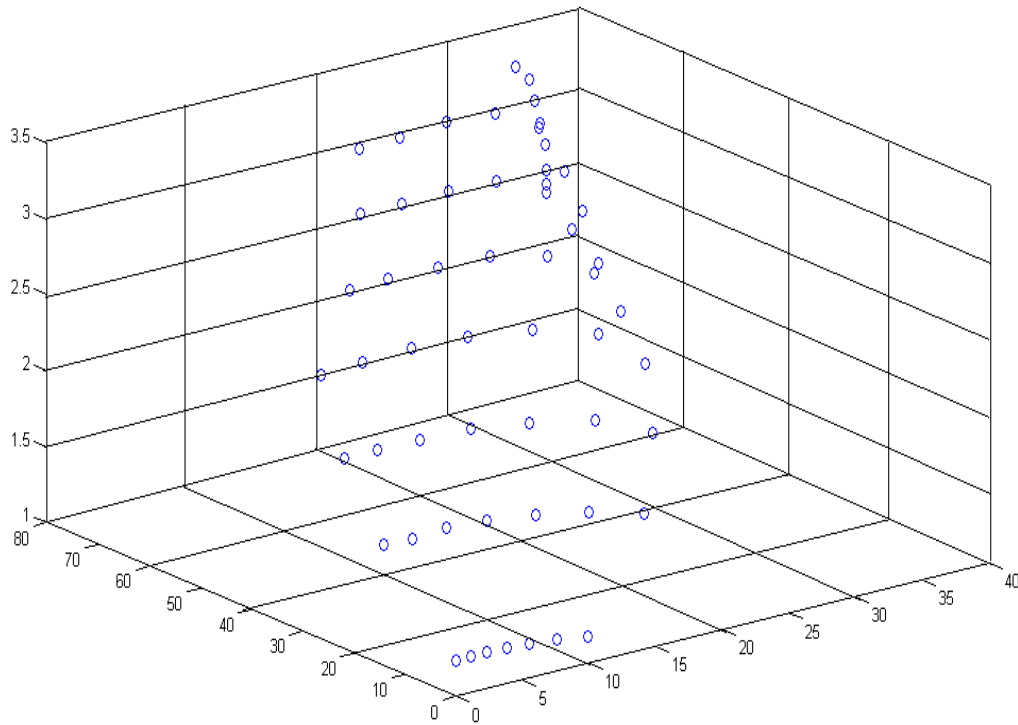
#### **1. Εισαγωγή**

Σκοπός αυτής της αριθμητικής ανάλυσης του χάρτη λειτουργίας ενός στροβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα είναι ο υπολογισμός του λόγου πιέσεων σε όλο το εύρος λειτουργίας του. Για να γίνει αυτό εφικτό χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό πρόγραμμα Matlab R2009a.

#### **2. Περιγραφή της διαδικασίας υπολογισμού**

Ο χάρτης λειτουργίας του κινητήρα που βρίσκεται στην επόμενη σελίδα έχει προκύψει βάσει κάποιων διακεκριμένων τιμών που προέκυψαν πειραματικά, για λειτουργία του κινητήρα σε συγκεκριμένο αριθμό στροφών (rpm), λόγο πιέσεων και παροχή μάζας αέρα (lbs/min). Επίσης, στο χάρτη απεικονίζονται και οι καμπύλες του βαθμού απόδοσης του εξεταζόμενου κινητήρα, χωρίς ωστόσο, να μας επηρεάζουν στην ανάλυσή μας. Το ζητούμενο είναι να βρεθεί ένα μοντέλο για την απεικόνιση όλων των ενδιαμέσων τιμών ώστε με δεδομένα τον αριθμό στροφών και την παροχή μάζας αέρα, να υπολογίζεται ο λόγος πιέσεων του κινητήρα.

Τα σημεία λειτουργίας του κινητήρα που είναι σημειωμένα στο χάρτη και που προέκυψαν από πειραματικές μετρήσεις περάστηκαν υπό τη μορφή πινάκων στον κώδικα της Matlab, ώστε το πρόγραμμα να μπορέσει, καταρχήν, να «αποτυπώσει» το χάρτη λειτουργίας του κινητήρα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 36.



Σχ. 36 Γραφική απεικόνιση των σημείων που δόθηκαν στη Matlab, ώστε να «αντιληφθεί» το χάρτη.

Στη συνέχεια δίνουμε ένα ζεύγος τιμών (παροχής μάζας – αριθμού στροφών) ώστε να υπολογιστεί ο αντίστοιχος λόγος πιέσεων. Αυτή η διαδικασία γίνεται με τη βοήθεια μιας έτοιμης μεθόδου που εμπεριέχεται στη Matlab, της “griddata”.

Παρακάτω παρατίθεται ο κώδικας που γράφτηκε για τον υπολογισμό του λόγου πιέσεων.

```

function pr = pratio(x,y)

    X = [4.36 5.44 6.66 8.14 9.88 11.95 14.26 7.94 10.11 12.65 15.69 19.31 ...
        23.36 27.45 10.50 12.99 16.18 19.97 24.37 29.31 33.65 13.46 16.55 ...
        20.20 24.49 29.36 34.25 37.75 19.19 22.05 25.83 29.74 34.01 37.51 ...
        39.55 23.10 26.19 29.74 33.29 37.05 39.77 40.92 25.67,28.67,32.16 ...
        35.87 39.15 41.07 41.61 39.46 40.54 40.87 41.34 41.67 41.79 41.791];

    Y = [46280*ones(1,7) 69762*ones(1,7) 84099*ones(1,7) 96406*ones(1,7) ...
        105721*ones(1,7) 113837*ones(1,7) 120731*ones(1,7) ...
        126191*ones(1,7)];

    Z = [1.24 1.24 1.24 1.24 1.23 1.21 1.18 1.59 1.58 1.59 1.57 1.53 1.46 ...
        1.36 1.89 1.89 1.89 1.88 1.82 1.73 1.55 2.20 2.22 2.23 2.21 2.15 ...
        2.01 1.74 2.50 2.51 2.50 2.49 2.40 2.21 1.91 2.80 2.80 2.80 2.79 ...
        2.69 2.45 2.08 3.07 3.08 3.11 3.08 2.92 2.59 2.19 3.23 3.12 2.98 ...
        2.82 2.67 2.50 2.35];

    Y = Y / 1000;

    minX = min(X(:));
    minY = min(Y(:));

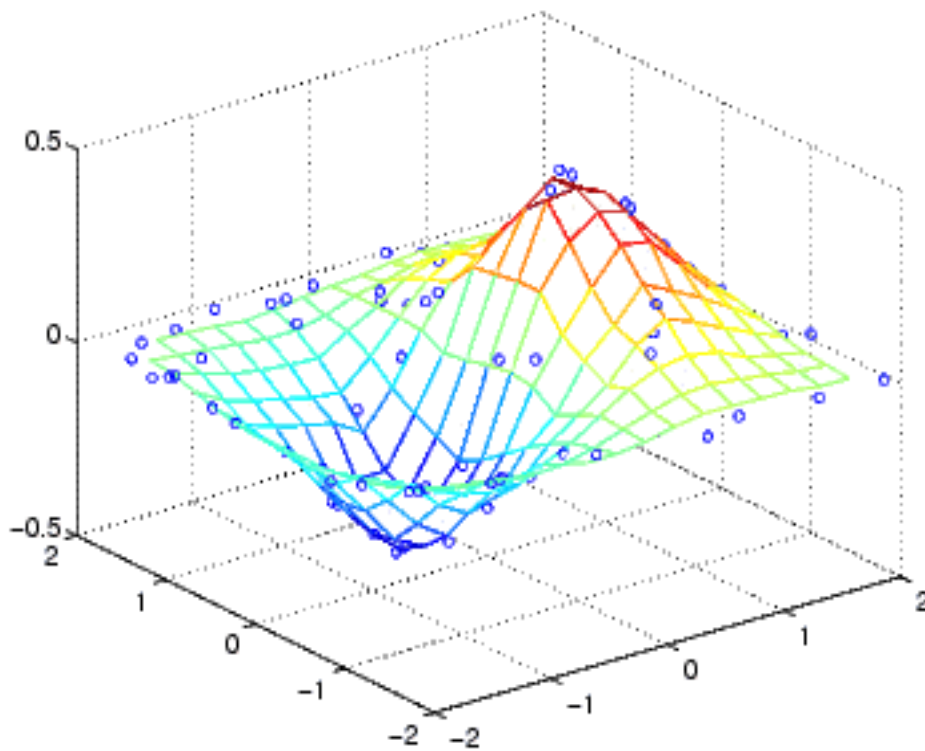
    X = X - minX;
    Y = Y - minY;

    pr = griddata(X,Y,Z, x - minX,y/1000 - minY, 'linear'); % enallaktika: 'cubic'

```



Αυτό που κάνει, σε γενικές γραμμές, η `griddata` είναι να χωρίζει το χάρτη σε τριγωνικά χωρία και μέσω των διανυσμάτων που ορίζουν τα γνωστά σημεία του χάρτη, να κάνει παρεμβολή είτε γραμμική, είτε κυβική ώστε να βρει τις ενδιάμεσες τιμές (Σχήμα 37).



Σχ. 37 Η μέθοδος `griddata` της Matlab

### 3. Αποτελέσματα

Η μέθοδος που χρησιμοποιεί η Matlab είναι αρκετά πολύπλοκη αλλά πολύ ακριβής. Ο προγραμματιστής, μάλιστα, έχει τη δυνατότητα να επιλέξει το είδος της παρεμβολής που θα κάνει το πρόγραμμα, ανάλογα με τις απαιτήσεις που έχει και τη μορφή του σχήματος που θέλει να εξετάσει. Στη συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκε γραμμική παρεμβολή, και όχι κυβική, χωρίς βλάβη των αποτελεσμάτων . Συγκεκριμένα, κάποιες από τις γνωστές τιμές που δίνονται από τον κατασκευαστή φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Τιμές δοσμένες από τον κατασκευαστή:

<b>παροχή μάζας (lbs/min)</b>	<b>αριθμός στροφών (rpm)</b>	<b>λόγος πιέσεων</b>
29.74	105721	2.49
37.05	113837	2.69
15.69	69762	1.57

Οι παραπάνω τιμές συμπίπτουν απόλυτα με τα αποτελέσματα της Matlab, και μάλιστα με μηδενικό σφάλμα.

Τα αποτελέσματα όπως προέκυψαν από τη Matlab:

```
>> pratio (29.74,105721)
```

```
ans = 2.4900
```

```
>> pratio (37.05,113837)
```

```
ans = 2.6900
```

```
>> pratio (15.69,69762)
```

```
ans = 1.5700
```

όπου,

pratio: η συνάρτηση που υπολογίζει το λόγο πίεσης με βάση ένα ζεύγος τιμών (παροχή αέρα , αριθμός στροφών)

ans: η ζητούμενη τιμή, δηλαδή ο λόγος πιέσεων

Όπως θα παρατηρήσουμε και στις ενδιάμεσες τιμές, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την επεξεργασία της Matlab, επίσης επαληθεύονται με μεγάλη ακρίβεια από το χάρτη λειτουργίας που έχουμε από τον κατασκευαστή. Επιλέγουμε, λοιπόν, τυχαία ζεύγη τιμών (παροχής μάζας – αριθμού στροφών) ώστε να προκύψουν οι λόγοι πιέσεων. Για τα ζεύγη τιμών (16.87 , 51255) , (22.34 , 80699) , (33.86 , 121080) προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

```
>> pratio (16.87,71255)
ans = 1.5908

>> pratio (22.34,80699)
ans = 1.7590

>> pratio (33.86,121080)
ans = 3.1077
```

Επομένως από την ανάλυση της Matlab τα αποτελέσματα για τα τυχαία ζεύγη τιμών συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Τυχαία ζεύγη τιμών (παροχής – στροφών):

<b>παροχή μάζας (lbs/min)</b>	<b>αριθμός στροφών (rpm)</b>	<b>λόγος πιέσεων</b>
16.87	71255	1.5908
33.86	80699	1.7590
33.86	121080	3.1077

Τα παραπάνω αποτελέσματα, πράγματι, επαληθεύονται και από την εξέταση του χάρτη λειτουργίας του κινητήρα.

## Βιβλιογραφία

- 1) N. Watson, Janota MS. (1982), «Turbocharging the internal combustion engine», London: MacMillan.
- 2) Κ. Δ. Ρακόπουλος (1988), «Αρχές εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης. Εισαγωγή–Λειτουργία–Θερμοδυναμική», Εκδόσεις «Γρηγ. Φούντας», Αθήνα.
- 3) Κ. Δ. Ρακόπουλος (2000), «Εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσης II. Εμβάθυνση στην κατασκευή και λειτουργία», Εκδόσεις «Γρηγ. Φούντας», Αθήνα.
- 4) Κ. Δ. Ρακόπουλος (1994), «Εργαστηριακές δοκιμές και μετρήσεις εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης», Εκδόσεις «Γρηγ. Φούντας», Αθήνα.
- 5) Κ.Δ. Ρακόπουλος, Δ.Θ. Χουντάλας (1998), «Καύση ρύπανση εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης», Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- 6) Κ.Δ. Ρακόπουλος, Ε.Γ. Γιακουμής (2006), «Εναλλαγή αερίων και υπερπλήρωση ΜΕΚ», Εκδόσεις ΕΜΠ.
- 7) C.D. Rakopoulos, E.G. Giakoumis (2009), «Diesel engine transient operation», Springer, London.
- 8) K. Zinner (1978), «Supercharging of internal combustion engines», Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag.