

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι θερμικές μηχανές μπορούν να ταξινομηθούν σε μηχανές εξωτερικής και εσωτερικής καύσης. Στις πρώτες το λειτουργόν ρευστό είναι εσωτερικά διαχωρισμένο από το μίγμα καυσίμου-αέρα και η θερμότητα καύσης μεταφέρεται από τα τοιχώματα του περιέχοντος δοχείου ή λέβητα. Στις μηχανές εσωτερικής καύσης το λειτουργούν ρευστό συνιστάται από τα παράγωγα της καύσης του μίγματος καυσίμου-αέρα.

Ο πίνακας 1.1 δείχνει μια κατάταξη των σπουδαιότερων τύπων θερμικών μηχανών καθώς και τα πεδία εφαρμογής των. Σήμερα οι παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης και οι ατμοστρόβιλοι είναι οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενες θερμικές μηχανές, ενώ ο αεριοστρόβιλος χρησιμοποιείται στην πρόωση αεροσκαφών υψηλών ταχυτήτων και τώρα τελευταία εμφανίζεται η χρήση του σε φορτηγά αυτοκίνητα μεγάλου tonage.

Ένα θεμελιώδες πλεονέκτημα των εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης είναι η απουσία εναλλακτών στην ροή του λειτουργούντος ρευστού όπως χρησιμοποιούνται στους λέβητες και συμπυκνωτές σταθμών παραγωγής. Αυτό σημαίνει μηχανική απλοποίηση και εξάλειψη απωλειών στην διαδικασία μεταφοράς και μετατροπής ενέργειας στους εναλλάκτες.

Ένα άλλο θεμελιώδες πλεονέκτημα των εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ σε σχέση με τους αεριοστρόβιλους είναι ότι όλα τα τμήματα τους μπορούν να λειτουργούν σε θερμοκρασίες πολύ χαμηλότερες της μέγιστης θερμοκρασίας του κύκλου. Έτσι επιτρέπουν πολύ υψηλές θερμοκρασίες του κύκλου και κατά συνέπεια είναι δυνατόν να επιτευχθούν υψηλές θερμοδυναμικές αποδόσεις. Στον σημερινό σχεδιασμό αυτές οι θεμελιώδεις διαφορές δίνουν τα ακόλουθα πλεονεκτήματα στις εμβολοφόρες Μ.Ε.Κ. αν συγκριθούν με τους ατμοστρόβιλους για παραγωγή ισχύος:

- 1) Υψηλότερη μέγιστη απόδοση
- 2) Χαμηλότερο λόγο βάρους κατασκευής ως προς το αποδιδόμενο έργο (εκτός πιθανόν στην περίπτωση μονάδων παραπάνω των 10000 hp).
- 3) Μηχανική απλότητα
- 4) Το σύστημα ψύξεως σε μια Μ.Ε.Κ αντιμετωπίζει ένα μικρότερο ποσό θερμότητας από ένα συμπυκνωτή ενός ατμοστρόβιλου της ίδιας ιπποδύναμης και κανονικά λειτουργεί σε υψηλότερες επιφανειακές θερμοκρασίες.

Το μικρότερο μέγεθος του εναλλάκτη θερμότητας είναι μεγάλο πλεονέκτημα σε οχήματα μεταφορών και σε άλλες εφαρμογές στις οποίες η ψύξη πρέπει να συμπληρώνεται από τον ατμοσφαιρικό αέρα. Αυτά τα πλεονεκτήματα είναι ιδιαίτερα εμφανή σε μικρές μονάδες. Από την άλλη μεριά πρακτικά πλεονεκτήματα των ατμοστροβίλων σε σχέση με τις παλινδρομικές ΜΕΚ είναι:

- 1) Οι ατμοστρόβιλοι μπορούν να χρησιμοποιήσουν μεγαλύτερη ποικιλία καυσίμων συμπεραλαμβανομένων και των στερεών καυσίμων.
- 2) Μικρότερο πρόβλημα κραδασμών.
- 3) Οι ατμοστρόβιλοι βρίσκουν πρακτικές εφαρμογές σε μονάδες πολύ μεγάλης ισχύος (πάνω από 20000 hp) με μονό άξονα.

Τα πλεονεκτήματα των εμβολοφόρων ΜΕΚ είναι μεγάλης σπουδαιότητας στο πεδίο των χερσαίων μεταφορών όπου το μικρό βάρος και του όγκου της μηχανής και των καυσίμων είναι πάντοτε ουσιώδεις παράγοντες. Στο σημερινό πολιτισμό μας ο αριθμός των μονάδων και η συνολική ισχύς των ΜΕΚ που χρησιμοποιούνται στα μέσα μεταφοράς είναι πολύ μεγαλύτερες από τα υπόλοιπα συστήματα ισχύος που χρησιμοποιούνται για τον σκοπό αυτό.

ΓΕΝΙΚΟΙ ΟΡΙΣΜΟΙ

Στην μελέτη της θερμοδυναμικής η απόδοση μιας κυκλικής διαδικασίας ορίζεται ως ακολούθως:

$$\eta = W/JQ$$

όπου W είναι το χρήσιμο έργο που αποδίδεται κατά την διαδικασία, J είναι το ισοδύναμο $Joule=4.1868 \text{ KJoule/kcal}$ και Q η θερμότητα που εισέρχεται στο σύστημα κατά την διαδικασία.

Οι ΜΕΚ λειτουργούν καίγοντας καύσιμο το δε θερμοδυναμικό ρευστό δεν επανέρχεται στην αρχική κατάσταση. Έτσι ο θερμοδυναμικός κύκλος δεν είναι κλειστός και η θερμοδυναμική έκφραση της απόδοσης δεν ισχύει.

Εν τούτοις είναι εύκολη η χρησιμοποίηση ενός ορισμού της απόδοσης βασισμένου στις χαρακτηριστικές ποσότητες θερμότητας που σχετίζονται με το καύσιμο. Η μέθοδος προσδιορισμού αυτής της ποσότητας που καλείται "θερμογόνο δύναμη" του καυσίμου είναι κάπως αυθαίρετη αλλά γενικά παραδεκτή όταν ασχολούμαστε με θερμικές μηχανές (Η ενεργειακή ανάλυση των θερμικών συστημάτων μας επιτρέπει την χρήση μιας πιο γενικής έκφρασης του ποσού

θερμότητας όπως θα δούμε στο κεφάλαιο 4.

Εάν λοιπόν Q_c είναι αυτή η θερμότητα καύσης τότε $\eta = P/Jm_f Q_c$ όπου P είναι η ισχύς και m_f είναι η μάζα του καυσίμου ανά μονάδα χρόνου. Εάν η ισχύς P είναι η ισχύς πέδησης, P_b , η οποία μετράται στον άξονα εξόδου, η παραπάνω εξίσωση ορίζει την θερμική απόδοση πέδησης.

Εάν η ισχύς υπολογίζεται από το έργο που αποδίδεται στο έμβολο ή στα πτερύγια ενός στροβίλου τότε ονομάζεται ενδεικνυμένη, P_i , και σ'αυτήν την περίπτωση η εξίσωση εκφράζει την θερμική απόδοση. Ο λόγος της ισχύος πέδησης προς την ενδεικνυμένη ισχύ καλείται μηχανική ισχύς.

Μια άλλη έκφραση της ανωτέρω εξίσωσης ισχύος-απόδοσης είναι η

$$sfc = m_f/P = 1/J*Q_c*\eta$$

που καλείται ειδική καταναλωση καυσίμου (Specific Fuel Consumption) και ανάλογα με την χρησιμοποιούμενη ισχύ (P_b ή P_i) έχουμε και $isfc$ ή $bsfc$. Στις παραπάνω εξισώσεις η ισχύς εκφράζεται σε μονάδες (δύναμη x μήκος / χρόνος). Οι μονάδες hp μετατρέπονται σε μονάδες SI με τον συντελεστή $P=k_p*hp$ όπου $k_p=76.04$ (kg m/sec hp).

ΠΙΝΑΚΑΣ 1

ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

Εξωτερικής καύσης	Εσωτερικής καύσης
(Το θερμοδυναμικό ρευστό δεν έρχεται σε επαφή με το μίγμα καυσίμου-αέρα)	(Το θερμοδυναμικό ρευστό προέρχεται από την καύση και αποτελείται από τα προϊόντα καύσης)

ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

<u>Κατηγορία</u>	<u>Όνομα</u>	<u>Εμβολοφόρος ή συν. ροής</u>	<u>Χρήση</u>	<u>Κατάσταση</u>	
Εξωτερικής καύσης	Ατμομηχανή	Ε	Οχήματα	Εκτός	
	Ατμοστρόβιλος	Σ	Ηλεκτ. Ενεργ.	Εν ενέργεια	
			Πλοία	Εκτός	
	Αεριοστρόβιλος κλειστού κύκλου	Σ	Ηλεκτ. Ενεργ.- Πλοία	Εν ενέργεια	
Εσωτερικής καύσης	Βενζινομηχανές	Ε	Αυτ/τα	Εν ενέργεια	
			μικρά πλοία		
			μικρά αεροπλάνα		
			Μικρές βιομηχανίες		
		Ντηζελομηχανές	Ε	Αυτ/τα, πλοία	Εν ενέργεια
		Αεριοστρόβιλοι	Σ	Ηλεκτ. Ενεργ. Πρόωση	Εν ενέργεια
		Μηχανές jet	Σ	Πρόωση	Εν ενέργεια
	Πυραυλοκινητήρες	Σ	Πρόωση	Εν ενέργεια	

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΒΑΣΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΜΗΧΑΝΩΝ ΓΕΝΙΚΑ ΛΕΤΟΥΡΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Οι κύριοι τύποι μηχανών που θα εξετάσουμε είναι οι παλινδρομικές (εμβολοφόρες) όπου το έμβολο κινείται εντός κυλίνδρου και μεταβάλλει συνεχώς τον όγκο του αερίου καθώς κινείται. Χρόνος (stroke) λέγεται μια πλήρης διαδρομή του εμβόλου που αντιστοιχεί σε στροφή 180° του στροφαλοφόρου άξονα (crank-shaft). Εάν ο κύκλος χρειάζεται για να συμπληρωθεί τέσσερις χρόνους η μηχανή λέγεται τετράχρονη, εάν δύο χρόνους δίχρονη. Το αέριο εισέρχεται και εξέρχεται στο κύλινδρο από τις οπές εισόδου/εξόδου όταν ανοιγοκλείνουν οι βαλβίδες με την βοήθεια εκκέντρων.

Η ανάφλεξη του μίγματος γίνεται ή με την βοήθεια σπινθηριστή (μηχανές έναυσης δια σπινθηριστού (spark ignition-SI)), ή απλώς με την υψηλή θερμοκρασία που αναπτύσσεται λόγω συμπίεσης του αέρα (μηχανές έναυσης δια συμπίεσης (compression ignition-CI)). Ο τρόπος που δημιουργείται το μίγμα καυσίμου-αέρα διαφέρει στις δύο μηχανές και τα εξαρτήματα ρύθμισης ή δημιουργίας του μίγματος, ελέγχουν και τις στροφές της μηχανής. Οι μηχανές αποτελούνται συνήθως από περισσότερους του ενός κυλίνδρους και η διάταξη τους έχει διάφορες μορφές.

1.1 ΤΕΤΡΑΧΡΟΝΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ SI

Οι τέσσερις χρόνοι μιας τετράχρονης μηχανής φαίνονται στο Σχ.1.1 (Taylor, 1968). Έχουμε τους χρόνους:

1. Χρόνος εισόδου: Εισαγωγή του μίγματος από την οπή εισόδου.
2. Χρόνος συμπίεσης: Αύξηση της θερμοκρασίας και της πίεσης του μίγματος δια συμπίεσης (βαλβίδες κλειστές).
3. Χρόνος ανάφλεξης: Ανάφλεξη, καύση και εκτόνωση των καυσαερίων.

Στο χρόνο αυτό παράγεται έργο(ισχύς) και γι'αυτό λέγεται και χρόνος ισχύος (βαλβίδες κλειστές).

4. Χρόνος εξόδου: Τα προϊόντα της καύσης εξέρχονται του κυλίνδρου από την οπή εξαγωγής.

Εδώ πρέπει να υπενθυμίσουμε ότι οι χρόνοι αυτοί επικρατούν στις ιδανικές μηχανές ενώ στην πραγματικότητα έχουμε διαφορετικές καταστάσεις, π.χ. κατά τον χρόνο εισαγωγής του νέου μίγματος αυτό αναμιγνύεται με το υπόλοιπο των καυσαερίων (residual gas, f) που δεν πρόλαβαν να εξέλθουν.

Εν γένει ο στροφαλοφόρος, ο διωστήρας, το έμβολο και η κεφαλή, παριστάνονται σχηματικά από τον μηχανισμό του σχήματος 1.2. Στη θέση του στροφάλου όπου $\theta=0^\circ$ το έμβολο ευρίσκεται στο ανώτατο σημείο (άνω νεκρό σημείο, ΑΝΣ ή TDC). Ο όγκος του κυλίνδρου στο σημείο αυτό είναι ο ελάχιστος και λέγεται όγκος συμπίεσης ή όγκος εμβολισμού (clearance volume), V_o . Αντίστοιχα όταν $\theta=180^\circ$ το έμβολο βρίσκειται στο κάτω νεκρό σημείο (ΚΝΣ ή BDC) και ο αντίστοιχος όγκος είναι V_1 . Ο λόγος συμπίεσης ορίζεται ως

$$r = V_1/V_o \quad (1.1)$$

και ο όγκος εκτόπισης, V_d (displacement volume) ως

$$V_d = V_1 - V_o = \frac{\pi}{4} b^2 s \quad (1.2)$$

Για πολλούς κυλίνδρους ο όγκος εκτόπισης πολλαπλασιάζεται με τον αριθμό των κυλίνδρων N_c . Ο λόγος (ή βαθμός) συμπίεσης στις τετράχρονες μηχανές SI κυμαίνεται από 7-12. Οι στροφές της μηχανής, R_s , αναφέρονται στην ταχύτητα περιστροφής του στροφαλοφόρου και συνήθως εκφράζονται σε στροφές ανά λεπτό της ώρας. Επειδή η ισχύς δίδεται μόνο σε συγκεκριμένο χρόνο (μια φορά κάθε τέσσερις χρόνους) οι μηχανές είναι εφοδιασμένες με σφόνδυλο (flywheel) για την απόσβεση των διακυμάνσεων των στροφών της μηχανής. Η μέση ταχύτητα του εμβόλου η οποία είναι σημαντικό μέγεθος λειτουργίας του συστήματος εκφράζεται ως

$$U_p = 2sR_s \quad (1.3)$$

Η γωνιακή ταχύτητα του στροφάλου εκφράζεται ως

$$\omega = 2\pi R_s / 60 \quad (\text{radians/sec}) \quad (1.4)$$

Στις επόμενες παραγράφους θα συζητηθούν μερικά γενικά λειτουργικά χαρακτηριστικά διαφόρων τμημάτων τυπικών κινητήρων. Τα (σχημ. 1.3, 1.4, 1.5 και ο πίνακας 1.1) δίδουν μερικά τεχνικά χαρακτηριστικά σύγχρονων κινητήρων.

Για βελτίωση της στεγανότητας του κυλίνδρου το έμβολο φέρει ελατήρια τα οποία όμως έχουν κάποιο διάκενο από το τοίχωμα και συνεπώς επιτρέπουν κάποια διαρροή καυσαερίων ή μίγματος από τον θάλαμο καύσης (blowby), ενώ παρομοίως λιπαντικό μπορεί να διαρρεύσει μέσα στο θάλαμο καύσης. Το άκαυστο μίγμα και τα καυσαέρια εισέρχονται και εξέρχονται από τον κύλινδρο μέσω των οπών εισαγωγής και εξαγωγής κατά το άνοιγμα των αντίστοιχων βαλβίδων. Η ρύθμιση του χρονισμού των βαλβίδων (των χρόνων στους οποίους ανοιγοκλείνουν οι βαλβίδες) επιτυγχάνεται μέσω του εκκεντροφόρου άξονα που περιστρέφεται στο ήμισυ των στροφών της τετράχρονης μηχανής. Στην τομή της τετράχρονης μηχανής του σχήματος 1.3 (Ρακόπουλος, 1995) π.χ. η κίνηση της βαλβίδας ελέγχεται από μια σειρά εξαρτημάτων όπως έκκεντρο, ωστήριο, ζύγωθρο, σώμα βαλβίδας, ελατήρια κλπ. Οι πιο σύγχρονες μηχανές χρησιμοποιούν εκκεντροφόρο επικεφαλής ελαττώνοντας τον αριθμό των απαιτούμενων εξαρτημάτων. Το σχήμα των εκκέντρων ρυθμίζει επακριβώς τον χρονισμό των βαλβίδων στις διάφορες διατάξεις. Η περίοδος που και οι δύο βαλβίδες είναι ανοιχτές συγχρόνως καλείται επικάλυψη βαλβίδων (overlap. Ο όρος ανύψωση βαλβίδας (lift) αναφέρεται στην μετατόπιση της βαλβίδας από την επιφάνεια επικάλυψης.

Το μίγμα αέρα-καυσίμου δημιουργείται στις μηχανές SI στην συσκευή ανάμιξης (εξαερωτής ή carburetor, σχήμα 1.6, που έχει την δυνατότητα να δίνει ένα σταθερό λόγο καυσίμου-αέρα $\approx 15:1$. Η παροχή του αέρα ρυθμίζεται μέσω μιας 'πεταλούδας' (throttle) και η παροχή του καυσίμου ρυθμίζεται ανάλογα με τον παροχεταιυόμενο αέρα. Με τον εξαεριωτή συνεπώς μπορούμε να επιτύχουμε ρύθμιση των στροφών της μηχανής και συνεπώς της ισχύος της. Η πολλαπλή εισαγωγή (intake manifold) είναι σύστημα αγωγών που διανέμουν το μίγμα στους κυλίνδρους. Το καυσαέριο απομακρύνεται μέσω της πολλαπλής εξαγωγής (exhaust manifold) από τους κυλίνδρους προς την εξάτμιση. Εδώ
επι τη ευκαιρία της συζήτησης της προσαγωγής του μίγματος και

της ρύθμισης της ισχύος θα αναφέρουμε παρενθετικά μερικές παραμέτρους λειτουργίας του κινητήρα.

Η ροπή στρέψης τ είναι ένα μέτρο του παραγόμενου από τον στροφαλοφόρο έργου ανά μονάδα περιστροφής του (radians). Η ισχύς πέδησης, P_b , εκφράζει το ρυθμό παραγωγής έργου από τον στροφαλοφόρο. Τα δύο συνδέονται από τον τύπο

$$P_b = 2\pi\tau R_s \quad (1.5)$$

Όπως είδαμε και στην εισαγωγή ένα μέτρο της απόδοσης της μηχανής είναι και η ειδική κατανάλωση καυσίμου-πεδήσεως bsfc όπου

$$bsfc = m_f / P_b \quad (1.6)$$

και m_f είναι η παροχή καυσίμου.

Μιά άλλη σημαντική παράμετρος της λειτουργίας του κινητήρα είναι η ογκομετρική απόδοση ή βαθμός πλήρωσης (volumetric efficiency, Ferguson (1986)), e_v , και ορίζεται ως η μάζα του αναρροφούμενου στον κύλινδρο μίγματος καυσίμου και αέρα (όταν έχουμε έγχυση αναφερόμαστε στον αέρα μόνο) διαιρούμενη δια της μάζας που θα κατελάμβανε τον όγκο εκτόπισης με πυκνότητα, ρ_i , ίση με την πυκνότητα στην πολλαπλή εισαγωγή.

$$e_v = \frac{4\pi(m_a + m_f)}{\rho_i V_d R_s} = \frac{2(m_a + m_f)}{\rho_i V_d R_s} \quad (1.7)$$

Η έκφραση της e_v συναρτήσει των μονάδων είναι:

$$e_v = \frac{(2 \frac{rev}{cycle}) (\frac{2\pi rad}{rev}) (\frac{g}{s})}{(\frac{g}{cm^3}) (\frac{cm^3}{cycle}) (\frac{rad}{s})} \quad (1.8)$$

Μιά άλλη παράμετρος παρεμφερής με την e_v είναι ο λόγος παροχетеύσης (delivery ratio), D_r που ορίζεται όπως η e_v αλλά αντί για $m_a + m_f$ χρησιμοποιείται μόνο το m_a και αντί για ρ_i

χρησιμοποιείται το ρ_{∞} η πυκνότητα περιβάλλοντος. Παρατηρούμε ότι για δίχρονη μηχανή έχουμε 1 περιστροφή/κύκλο. Είναι επιθυμητό να μεγιστοποιείται η ογκομετρική απόδοση εφ'όσον το ποσό καυσίμου που μπορεί να καεί για δεδομένο εκτόπισμα V_d μηχανής (δηλαδή μέγεθος και βάρος) μεγιστοποιείται.

Ένα σημαντικό στοιχείο για τον σχεδιασμό της πολλαπλής εισαγωγής είναι η παροχέτευση ομοιόμορφου μίγματος (ομοιόμορφου λόγου καυσίμου αέρα) σε όλους τους κυλίνδρους. Διάφορες διατάξεις πολλαπλής εισαγωγής φαίνονται στο σχήμα 1.7 για μηχανή Ford V-6. Συνήθως ο σχεδιασμός των αγωγών της πολλαπλής εισαγωγής γίνεται με την βοήθεια υπολογιστικών μεθόδων και για λειτουργία υπό πλήρες φορτίο (WOT : wide open throttle ή αλλιώς unthrottled δηλαδή με πλήρως ανοιχτή την πεταλούδα του εξαεριωτή).

Μιά άλλη παράμετρος λειτουργίας που χρησιμοποιείται

$$bmep = \frac{4\pi\tau}{V_d} = \frac{2P_d}{V_d R_s} \quad (1.9)$$

ευρύτητα είναι η μέση ενεργός πίεση, μεπ, (mean effective pressure, mep, Taylor (1968), Ferguson (1986)) που είναι το παραγόμενο έργο ανά μονάδα όγκου εκτόπισης και εκφράζει την δυνατότητα παραγωγής έργου ανεξαρτήτως του μεγέθους του κινητήρα. Η μέση ενεργός πίεση πέδησης εκφράζεται ως Η ειδική ισχύς (η ισχύς ανα μονάδα επιφάνειας του εμβόλου, A_p) και η μάζα ανα μονάδα όγκου εκτόπισης είναι άλλες δύο κατασκευαστικές παράμετροι της μηχανής. Ο πίνακας 1.1 (Ferguson, 1986) συγκρίνει σύγχρονους κινητήρες διαφόρων εφαρμογών.

Δύο περιφερειακά συστήματα του κυρίως κινητήρα είναι τα συστήματα λίπανσης και ψύξης. Το σύστημα λίπανσης ενός κινητήρα General Motors δείχνεται στο σχήμα 1.8. Το λάδι αντλείται από την ελαιολεκάνη και μέσω του φίλτρου διανέμεται από τον κύριο αγωγό ελαίου και λιπαίνει όλα τα εξαρτήματα του συστήματος κίνησης των βαλβίδων την αλυσίδα (χρονισμού), τα έδρανα του εκκεντροφόρου και κατόπιν τα κύρια έδρανα του στροφαλοφόρου και του διωστήρα. Κατά τον καταιονισμό προς την ελαιολεκάνη, το λάδι εκτινάσσεται από τον περιστρεφόμενο βραχίονα του στροφάλου και του διωστήρα και λιπαίνει τα

τοιχώματα του κυλίνδρου και τον πείρο του εμβόλου υπό την μορφή σταγονιδίων.

Μια τυπική ψυκτική διάταξη μηχανής φαίνεται στο σχήμα 1.9. Το ψυκτικό αντλείται μέσω διόδων στο σώμα του κυλίνδρου και της κεφαλής και κατόπιν εξερχόμενο με υψηλότερη θερμοκρασία προθερμαίνει και υποβοηθεί στην εξάτμιση του καυσίμου στους αγωγούς της πολλαπλής εισαγωγής. Εν συνεχεία περνά από το θερμαντικό σώμα και οδηγείται πίσω στο ψυγείο. Όταν η μηχανή είναι κρύα μέσω ενός θερμοστάτη παρακάμπτεται το ψυγείο και το ψυκτικό ανακυκλώνεται συνεχώς.

1.2 ΤΕΤΡΑΧΡΟΝΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ CI

Οι μηχανές SI συχνά ονομάζονται και βενζινομηχανές ενώ οι μηχανές CI ονομάζονται και ντηζελομηχανές από τον πρώτο τους κατασκευαστή Roudolf Diesel το 1892. Και εδώ έχουμε τέσσερεις χρόνους όπως στις μηχανές SI με την διαφορά ότι κατά τον χρόνο εισόδου εισέρχεται στο κύλινδρο μόνο αέρας. Στον δεύτερο χρόνο ο αέρας συμπιέζεται και στο τέλος της συμπίεσης γίνεται η έγχυση του καυσίμου.

Επειδή χρειάζεται υψηλή θερμοκρασία για την έναυση του μίγματος ο λόγος συμπίεσης εδώ είναι μεγαλύτερος και κυμένεται μεταξύ 10-20. Εάν ο λόγος συμπίεσης στις μηχανές SI είναι πολύ υψηλός τότε θα υπάρξουν περιοχές του μίγματος στον κύλινδρο που θα αυταφλεγούν και θα αρχίσουν την καύση πρόωρα με αποτέλεσμα υψηλές πιέσεις σε διάφορες υποπεριοχές του μίγματος και θα αρχίσουν την δημιουργηθούν κύματα πιέσεως που αντανακλώνται στα τοιχώματα του κυλίνδρου και προκαλούν δονήσεις και το φαινόμενο της κρούσης (knock). Η αυτανάφλεξη του μίγματος προκαλείται από την υψηλή θερμοκρασία λόγω της υψηλής συμπίεσης. Έτσι ο σχεδιαστής αναγκάζεται να μειώσει τον λόγο συμπίεσης για να αποφευχθεί το knock περιορίζοντας την απόδοση της βενζινομηχανής.

Οι ντηζελομηχανές (CI) μπορούν και εργάζονται σε υψηλότερους λόγους συμπίεσης εφ'όσον το καύσιμο και ο αέρας αναμιγνύονται την χρονική στιγμή έναρξης της καύσης. Ο λόγος συμπίεσης σκόπιμα επιλέγεται αρκετά υψηλός ούτως ώστε τα αέρια κατά το τέλος του χρόνου συμπίεσης να είναι αρκετά θερμά και το καύσιμο να αναφλεγεί αμέσως μετά την έναρξη της έγχυσης.

Το υπόλοιπο εγχυόμενο καύσιμο τότε καίγεται σύμφωνα με τον ρυθμό έγχυσης. Η περίοδος μεταξύ της έναρξης της έγχυσης και της αυτανάφλεξης λέγεται βραδύτητα ανάφλεξης (ignition delay) και εξαρτάται από το σχεδιασμό της μηχανής και το καύσιμο, (Taylor, 1968). Ένα βασικό λοιπόν εξάρτημα των ντηζελομηχανών είναι η συσκευή έγχυσης του καυσίμου (fuel injection system).

Επειδή υπάρχει καθορισμένος χρόνος για την δημιουργία του μίγματος, πρέπει το καύσιμο να εισέλθει στον κύλινδρο υπό μορφή λεπτών σταγόνων (spray) και αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας πολύ υψηλές πιέσεις (135-2000 atm) και ειδικά ακροφύσια (atomizers), σχήματα 1.10, 1.11. Δύο διαδεδομένοι τρόποι έγχυσης είναι η άμεση, όπου η έγχυση γίνεται κατευθείαν στον κύλινδρο (ενιαίος θάλαμος) και η έμμεση όπου η έγχυση γίνεται σε προθάλαμο καύσης (διηρημένος θάλαμος) και συνήθως συνοδεύεται από διαφόρους τρόπους αύξησης της ανάμιξης του καυσίμου με τον αέρα (π.χ. στροβιλισμό, swirl-squish). Οι δύο περιπτώσεις φαίνονται στα σχήματα 1.12 και 1.13. Στις μηχανές που χρησιμοποιούνται διατάξεις αύξησης της ανάμιξης αέρα-καυσίμου ο ρυθμός απωλειών θερμότητας αυξάνει σημαντικά. Για να υποβοηθηθεί η αρχική έναυση και το ξεκίνημα όταν η μηχανή είναι κρύα χρησιμοποιείται για πολύ μικρή περίοδο ένας 'σπινθηριστής' αντίστασης (glow plug).

Εν γένει οι μηχανές Diesel έχουν περιορισμούς στην μέγιστη ισχύ τους (δηλαδή στην μέγιστη ποσότητα καυσίμου που μπορούν να καταναλώσουν) λόγω της παραγωγής καπνού. Αυτό θα εξετασθεί με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στο κεφάλαιο 9.

1.3 ΔΙΧΡΟΝΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

Στις δίχρονες μηχανές ο κύκλος συμπληρώνεται σε δύο χρόνους δηλαδή σε μια στροφή του στροφαλοφόρου άξονα. Οι μηχανές αυτές σχεδιάστηκαν με την ιδέα να αυξηθεί η ισχύς του για δεδομένες διαστάσεις και να γίνει απλοποίηση στο σύστημα των βαλβίδων. Ο πρώτος δίχρονος κύκλος επινοήθηκε από τον Dugald Clerk το 1878 και χρησιμοποιείται σε μηχανές SI και CI. Στις μηχανές αυτές υπάρχει ένας χρόνος ισχύος για κάθε περιστροφή αντί για κάθε δύο περιστροφές όπως στις τετράχρονες μηχανές. Η αρχή λειτουργίας φαίνεται σχηματικά σχ.1.14.

Κατά την συμπίεση δημιουργείται υπατμοσφαιρική πίεση

στον στροφαλοθάλαμο (crankcase) και μια βαλβίδα (π.χ. Reed, Annand και Roe, 1974, Taylor, 1968)) εκεί επιτρέπει αναρρόφηση αέρα. Στο σημείο αυτό αρχίζει καύση και εκτόνωση και καθώς το έμβολο κατέρχεται σε κάποιο σημείο αφήνει ένα άνοιγμα ώστε να αρχίσουν τα καυσαέρια να εξέρχονται και ταυτόχρονα συμπιέζει τον αέρα στο περίβλημα του στροφαλοφόρου. Καθώς το έμβολο κατεβαίνει και άλλο ο συμπιεσμένος αέρας μέσα στον στροφαλοθάλαμο εισρέει μέσα στο θάλαμο καύσης και σπρώχνει τα υπόλοιπα καυσαέρια. Αυτό το σπρώξιμο των καυσαερίων από τον νεοεισερχόμενο αέρα λέγεται σάρωση (scavenging). Εδώ όμως κείται και ένα από τα προβλήματα αυτών των μηχανών: η σάρωση δεν είναι τέλεια και μέρος του αέρα (μηχανές CI) ή του μίγματος (μηχανές SI) θα διαφύγει από την έξοδο και στην δεύτερη περίπτωση έχουμε απώλεια άκαυστου μίγματος και εκπομπή υδρογοναθράκων. Έτσι ο κύκλος αυτός χρησιμοποιείται στις μηχανές SI μόνο όταν είναι μικρής ισχύος για την κίνηση πλοιαρίων, δικύκλων κλπ. όπου η κατανάλωση δεν είναι κύριας σημασίας.

1.4 ΜΗΧΑΝΕΣ ΜΕ ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗ ΚΑΙ ΣΤΡΟΒΙΛΟΠΛΗΡΩΣΗ

Όλες οι μηχανές που παρουσιάστηκαν μέχρι τώρα είναι φυσικής αναπνοής (naturally aspirated). Η ιδέα της υπερπλήρωσης και της στροβιλοπλήρωσης (turbocharging) φαίνεται σχηματικά στο σχήμα 1.15. Τα καυσαέρια εκτονώνονται περαιτέρω διαμέσου ενός στροβίλου που οδηγεί ένα συμπιεστή, (Stone, 1985). Ο συμπιεστής αυξάνει την πυκνότητα του εισερχόμενου μίγματος έτσι ώστε επιπλέον καύσιμο και αέρας να παροχετεύονται στον κύλινδρο για να αυξηθεί η ισχύς. Το κέρδος είναι διπλό:

- 1) Η μηχανή είναι πιο αποδοτική διότι η ενέργεια των καυσαερίων αναχρησιμοποιείται κατά ένα μέρος.
- 2) Μιά μικρότερη μηχανή μπορεί να κατασκευαστεί για να παράγει μια δεδομένη ισχύ αφού η πυκνότητα του μίγματος αυξάνεται αυτή η αύξηση καλείται και boost, (Lichty, 1967).

Οι υπερπληρωτές (superchargers) χρησιμοποιούν έναν συμπιεστή οδηγούμενο από την ίδια την μηχανή αντί από κάποιο στρόβιλο και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου η αύξηση ισχύος-πυκνότητας είναι επιθυμητή σε όλες τις στροφές της

μηχανής όπως π.χ. στους αγώνες ταχύτητας. Εν γένει περιορισμούς στην αύξηση της ισχύος μέσω υπερπλήρωσης θέτουν τα θερμικά όρια των υλικών.

Κατά την στροβιλοπλήρωση η ισχύς που διατίθεται για την κίνηση του συμπιεστή είναι μη γραμμική συνάρτηση των στροφών. Έτσι σε χαμηλές στροφές προσφέρεται πολύ λίγο ή καθόλου boost ενώ σε υψηλές στροφές προσφέρεται μέγιστο boost. Το boost είναι επίσης χαμηλό υπό μερικό φορτίο (part throttle) και υψηλό υπό πλήρες φορτίο (WOT).

Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι απολύτως θετικά για μηχανές αυτοκινήτων διότι οι απώλειες άντλησης (pumping losses) που θα δούμε στο κεφάλαιο 2.9 ελαχιστοποιούνται. Αποτέλεσμα αυτής της μη γραμμικότητας είναι η αίσθηση του οδηγού ότι ο στροβιλοπληρωτής αντιδρά αργά. Ένας τρόπος να βελτιωθεί ο ρυθμός αντίδρασης (ενεργοποίησης) του turbocharger είναι μέσω ρύθμισης της διατομής του ακροφυσίου εισαγωγής του στροβίλου ανάλογα με την παροχή καυσαερίων (δηλαδή ανάλογα με τις στροφές της μηχανής) έτσι ώστε για όλες τις στροφές να προσφέρεται υψηλό boost.

1.5 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΟΓΚΟΥ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ ΜΕ ΤΗ ΓΩΝΙΑ ΤΟΥ ΣΤΡΟΦΑΛΟΥ

Σε μια παλινδρομική κίνηση μας ενδιαφέρει η μεταβολή του όγκου του κυλίνδρου συναρτήσει της γωνίας θ του στροφαλοφόρου άξονα διότι έτσι θα μπορέσουμε να υπολογίσουμε την πίεση εντός του κυλίνδρου συναρτήσει αυτής της γωνίας και άλλων στοιχείων όπως της ταχύτητας και της επιτάγχνυσης του εμβόλου πράγμα που μας επιτρέπει την θεώρηση της δυναμικής κατάστασης του συστήματος (Ferguson (1986), Ρακόπουλος (1995), Stone (1985)). Η κατωτέρω ανάλυση αναφέρεται στο σχήμα 1.2.

Για σταθερές στροφές ισχύει $d\theta/dt=\omega$ και $\theta=\omega t$ (εφ'όσον $\theta=0$ σε $t=0$). Έχουμε ότι

$$V_l = V_o + \frac{\pi b^2}{4} L(\theta) \quad (1.9\alpha)$$

όπου $L(\theta)$ είναι η διαδρομή του εμβόλου

$$L(\theta) = \frac{S}{2}(1 - \cos \theta) + l(1 - \cos \phi)$$

με

$$\sin \phi = S \sin \theta / 2l$$

και

$$\cos \phi = \sqrt{1 - \left(\frac{S}{2l} \sin \theta\right)^2} \quad (1.9\beta)$$

Άρα

$$V_1 = V_o + \frac{\pi b^2}{4} \left(\frac{S}{2} + l\right) - \frac{\pi b^2 S}{24} \left[\cos \theta - \frac{2l}{S} \sqrt{1 - \left(\frac{S}{2l} \sin \theta\right)^2} \right]$$

ή

$$\frac{dV_1}{d\theta} = \frac{\pi b^2 S}{8} \left[\sin \theta + \frac{\varepsilon \sin 2\theta}{2\sqrt{1 - \varepsilon^2 \sin^2 \theta}} \right] \quad (1.10)$$

όπου $\varepsilon = S/2l$ και σε σύγχρονες μηχανές ο λόγος ε κυμαίνεται μεταξύ 0.2-0.32.

Η σχέση αυτή μας δίνει επίσης και την ταχύτητα του εμβόλου διότι

$$U_p = \frac{dL}{dt} = \frac{dL}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = \omega \frac{dL}{d\theta}$$

όπου $\omega = \pi R_s / 30$ (rad/sec), επομένως

$$U_p(\theta) = \frac{dL}{d\theta} = \omega \frac{S}{2} \left[\sin \theta + \frac{\varepsilon \sin 2\theta}{2\sqrt{1 - \varepsilon^2 \sin^2 \theta}} \right] \quad (1.11)$$

και από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει η σχέση

$$U_p(\theta) = \frac{\omega S}{(r-1)V_o} \frac{dV}{d\theta} \quad (1.12)$$

όπου $V_o = V(0)$ και $r = V(\pi) / V(0) = V_1 / V_o$

Περαιτέρω ανάλυση των αρμονικών στην κίνηση του εμβόλου μπορεί να γίνει αν η σχέση 1.9β αναπτυχθεί σε σειρά Taylor ως

$$\cos\phi = 1 - \frac{\varepsilon^2 \sin^2\theta}{2} - \frac{\varepsilon^4 \sin^4\theta}{8} - \frac{\varepsilon^6 \sin^6\theta}{16}$$

ακολουθως (για μικρό ε):

και με την χρήση των τριγωνομετρικών σχέσεων

$$\sin^2\theta = 1/2 - \cos(2\theta/2)$$

$$\sin^4\theta = 3/8 - (1/2)\cos 2\theta + (1/8)\cos 4\theta$$

$$\sin^6\theta = 5/16 - (15/32)\cos 2\theta + (3/16)\cos 4\theta - (1/32)\cos 6\theta \quad \text{κλπ.}$$

έχουμε την σχέση

$$\cos\phi = \alpha_0' + \alpha_2' \cos 2\theta + \alpha_4' \cos 4\theta + \dots$$

από όπου βρίσκουμε κατόπιν πράξεων ότι

$$\begin{aligned} \alpha_0' &= 1 - \frac{\varepsilon^2}{2} \left(1 + \frac{3}{32}\varepsilon^2 + \frac{5}{128}\varepsilon^4 + \dots \right) \\ \alpha_2' &= \frac{\varepsilon^2}{4} \left(1 + \frac{\varepsilon^2}{4} + \frac{15}{128}\varepsilon^4 + \dots \right) \\ \alpha_4' &= -\frac{\varepsilon^4}{64} \left(1 + \frac{3}{4}\varepsilon^2 + \dots \right) \end{aligned}$$

Άρα

$$L = 0.5S + 1 - 0.5S(\cos\theta + \cos\phi/\varepsilon)$$

και

$$L = 0.5*S + 1 - 0.5*S*[\cos\theta + (1/\varepsilon)(\alpha_0' + \alpha_2' \cos 2\theta + \alpha_4' \cos 4\theta + \dots)]$$

ή

$$dL/dt = \omega S/2 (\sin\theta + 2\alpha_2' \sin 2\theta + 4\alpha_4' \sin 4\theta + \dots)$$

όπου $\alpha_2 = \alpha_2' / \varepsilon$, $\alpha_4 = \alpha_4' / \varepsilon$ κλπ.

Άρα

$$\frac{dL}{dt} = \omega \frac{S}{2} \left[\sin \theta + \frac{\varepsilon}{2} \left(1 + \frac{\varepsilon^2}{4} + \frac{15}{128} \varepsilon^4 + \dots \right) \sin 2\theta - \frac{\varepsilon^3}{16} \left(1 + \frac{3}{4} \varepsilon^2 + \dots \right) \sin 4\theta + \dots \right] \quad (1.13)$$

Για την μεταβολή του όγκου έχουμε $dV/d\theta = (\pi b^2/\omega) dL/dt$.

Παρατηρούμε από την παραπάνω έκφραση ότι η ταχύτητα του εμβόλου μηδενίζεται στο ΑΝΣ και στο ΚΝΣ ($\theta=0^\circ, 180^\circ$) και ότι και η μέγιστη ταχύτητα δεν είναι στο $\theta=\pi/2$ αλλά μετατοπίζεται λόγω ύπαρξης άλλων αρμονικών κινήσεων. Για τον υπολογισμό των δυνάμεων, μας χρειάζεται και η επιτάχυνση του εμβόλου που προκύπτει ως

$$\frac{d^2L}{dt^2} = \omega \frac{d}{d\theta} \left(\frac{dL}{dt} \right) = \omega^2 \frac{S}{2} \frac{d}{d\theta} [\sin \theta + \dots]$$

ή

$$\frac{dU(\theta)}{dt} = \frac{\omega^2 S}{2} \left(\cos \theta + \frac{\varepsilon (\cos \theta + \varepsilon^2 \sin^4 \theta)}{(1 - \varepsilon^2 \sin^2 \theta)^{3/2}} \right) \quad (1.14)$$

Η μέση ταχύτητα του εμβόλου είναι (Ferguson, 1986)

$$U_p = \frac{\omega S}{2\pi} \int_0^\pi \sin \theta d\theta = \frac{\omega S}{\pi} \quad (1.15)$$

Επίσης πρέπει να παρατηρήσουμε ότι καθώς $\varepsilon \rightarrow 0$ (πολύστροφες μηχανές)

$$\frac{V(\theta)}{V(0)} \approx 1 + \frac{r-1}{2} (1 - \cos \theta) \quad (1.16)$$

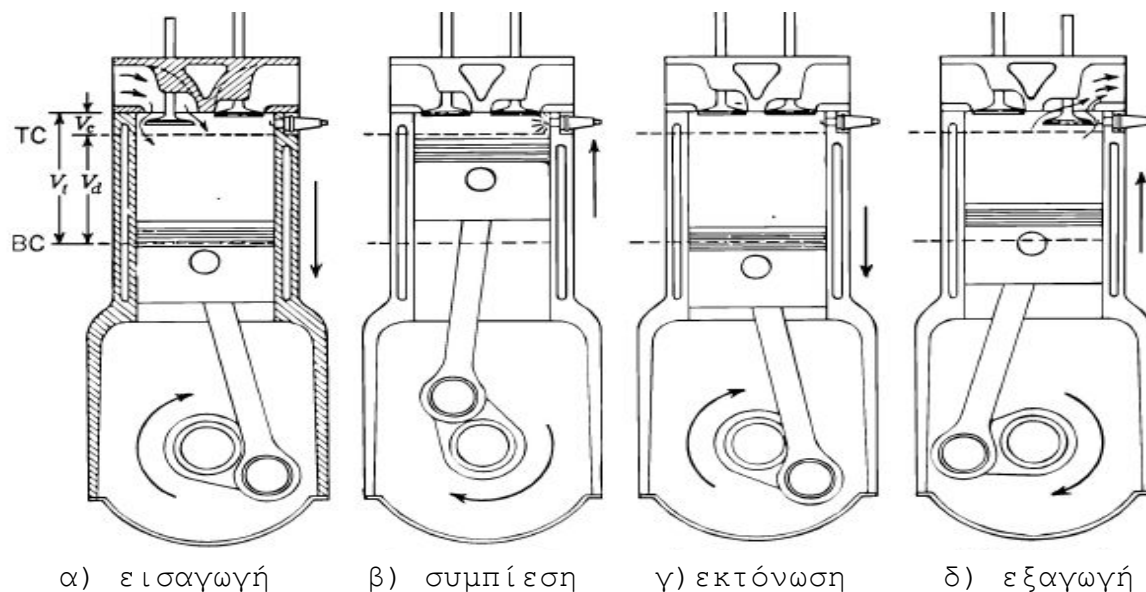
Πίνακας 1.1 Σύγκριση μεγάλης μηχανής Diesel με μηχανή SI αυτοκινήτου και μηχανή αεροπλάνου, Ferguson, 1986

CHARACTERISTICS	MODEL AIRPLANE ^a	AUTOMOTIVE ^b	LARGE DIESEL ^a
Extensive			
Bore, mm	12.6	89	737
Stroke, mm	13.1	80	1016
Displacement (one cylinder), l	1.6×10^{-3}	0.498	433
Power per cylinder, watt	100	1.68×10^4	5.29×10^5
Engine speed, rpm	11,400	5000	164
Mass per cylinder, kg	0.12	34.3	3.56×10^4
Power per liter ³ , Watt/l	6.25×10^4	3.37×10^4	1.22×10^3
Intensive			
Bmep, atm	3.2	8.0	4.5
Mean piston speed, m/s	5.0	13.3	5.6
Specific output, Watt/cm ²	80	270	124
Mass/displacement, kg/l	75	82	69

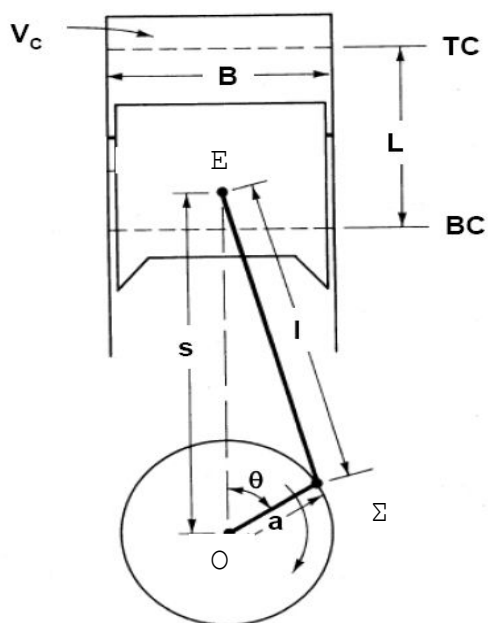
^aFrom Taylor (1977), Chapter 11. (Both engines are two-stroke, loop scavenged. Model airplane has crankcase compression.)

^bGM, L-4 engine, four stroke.

Εισαγωγή Εξαγωγή



Σχήμα 1.1 Αρχή λειτουργίας τετράχρονης μηχανής SI



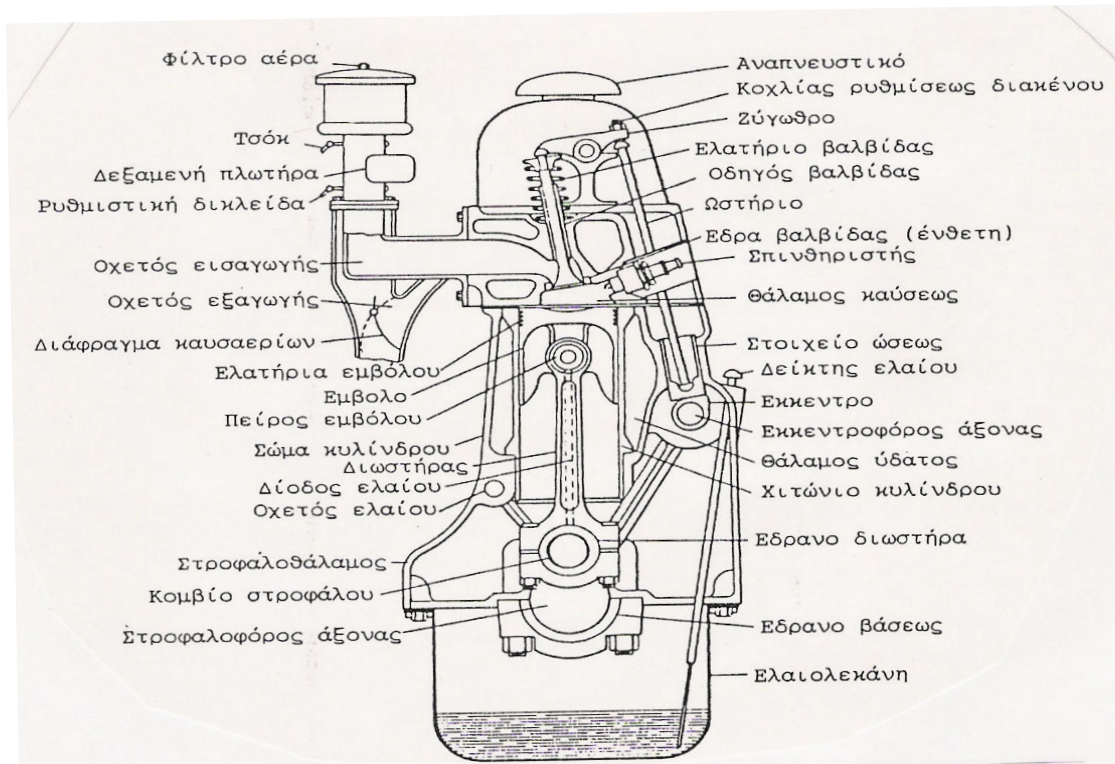
B, b =διάμετρος κυλίνδρου
 l =μήκος διωστήρα
 $a=s/2$ =ακτίνα στροφαλοφόρου
 s =διαδρομή εμβόλου

Αρθρώσεις:

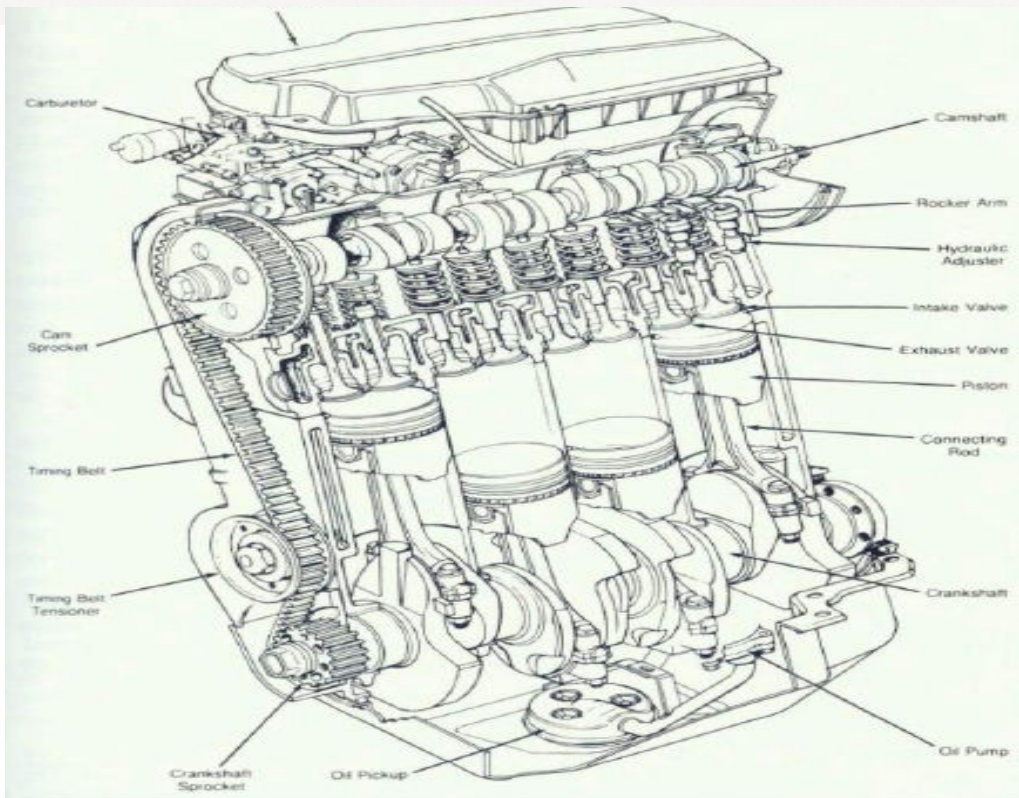
- E: πείρου εμβόλου-άνω κεφαλής διωστήρα
- Σ: κομβίου στροφάλου-κάτω κεφαλής διωστήρα
- O: κομβίο βάσεως-εδράνου βάσεως

TC η TDC: Άνω Νεκρο Σημείο (ΑΝΣ),
 BC η BDC: Κάτω Νεκρο Σημείο (ΚΝΣ)

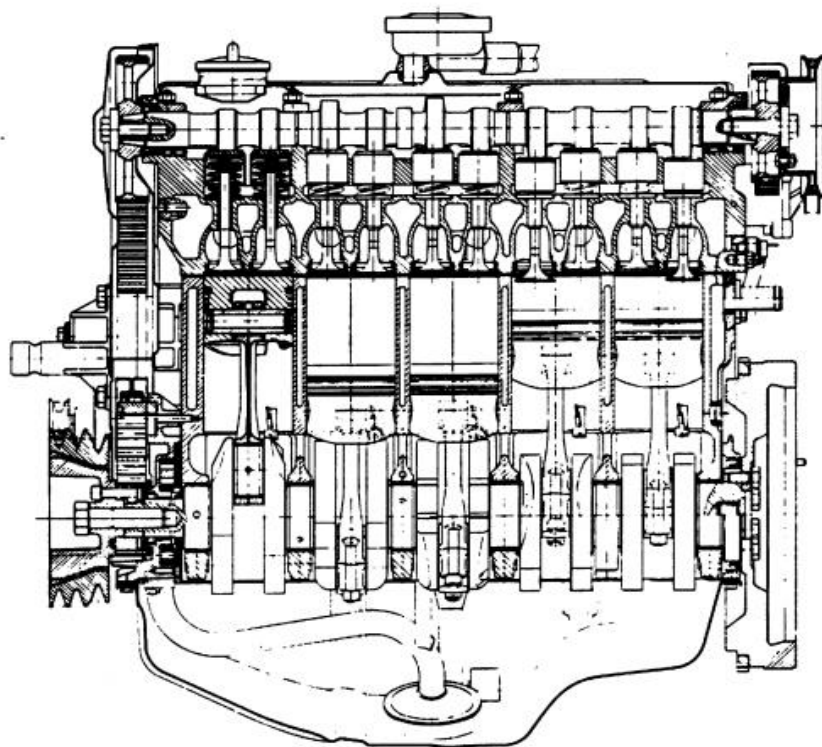
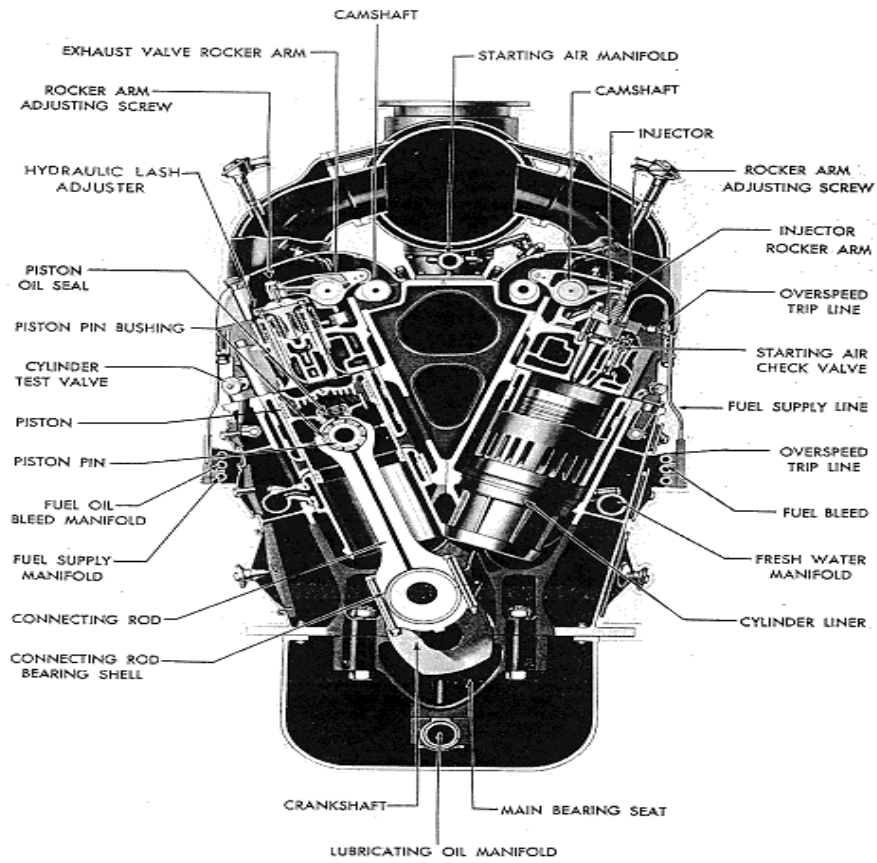
Σχήμα 1.2 Κύριος κινηματικός μηχανισμός



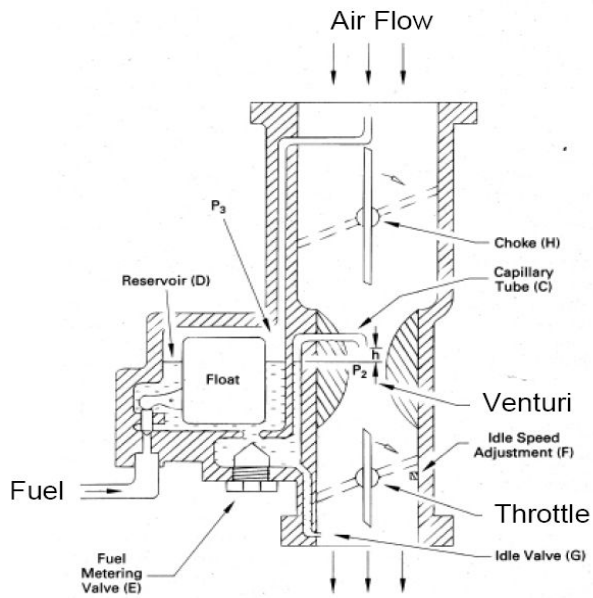
Σχhμα 1.3 Εγκάρσια τομή τετραχρονου κινητηρα Otto



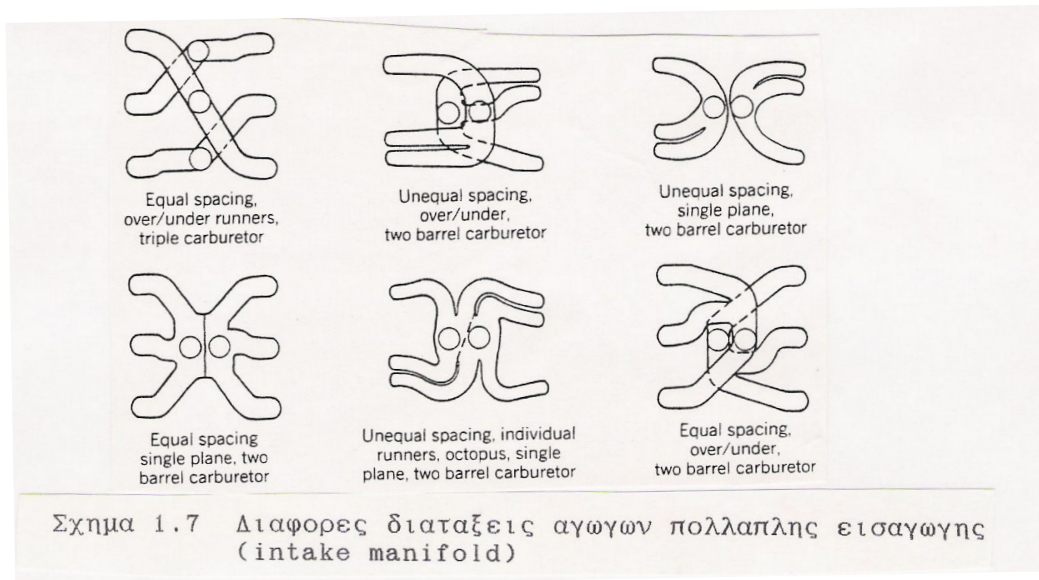
Σχhμα 1.4 Τομή τετρακύλινδρης μηχανής SI 2.2L. $b=87\text{mm}$, $s = 9\text{mm}$, $r=9$, $65\text{kW}@5000 \text{ RPM}$, (Taylor, 1986)



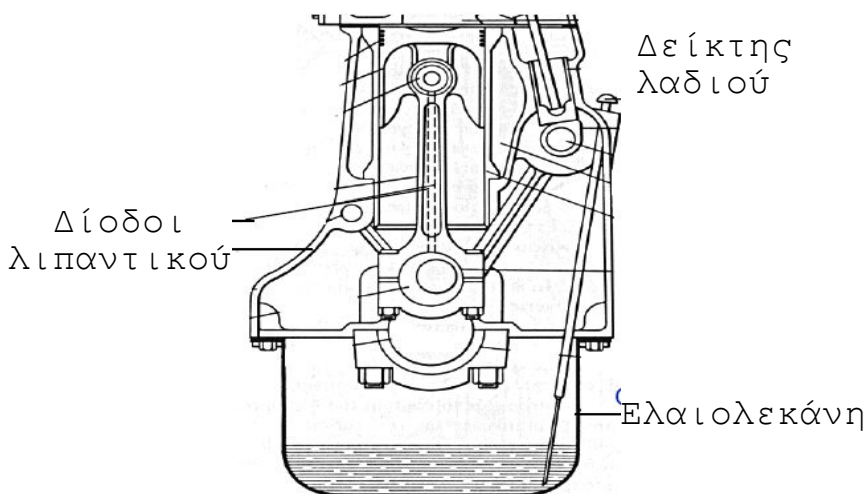
Σχήμα 1.5 Τομές τετράχροτων μηχανών,
 SAE (1982)



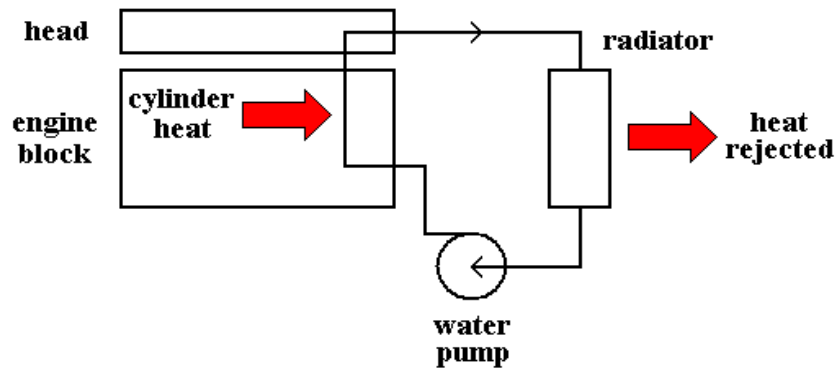
Σχήμα 1.6 Αρχή λειτουργίας εξαεριοτή (carburetor)



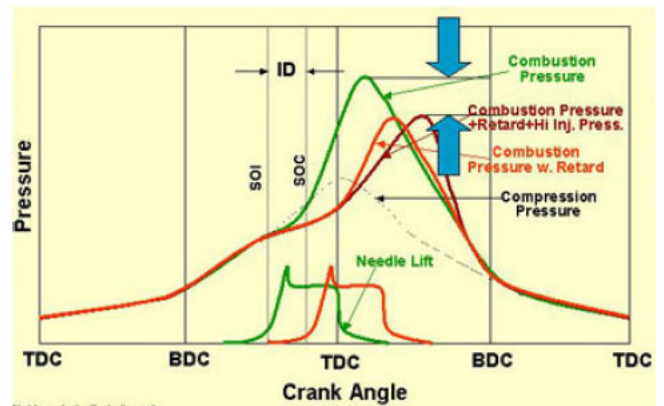
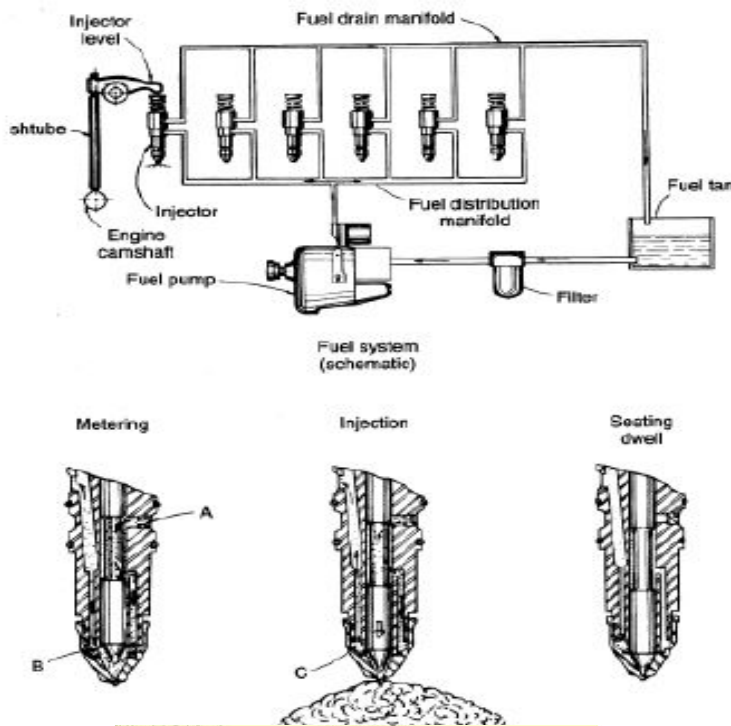
Σχήμα 1.7 Διαφορες διαταξεις αγωγων πολλαπλης εισαγωγης (intake manifold)



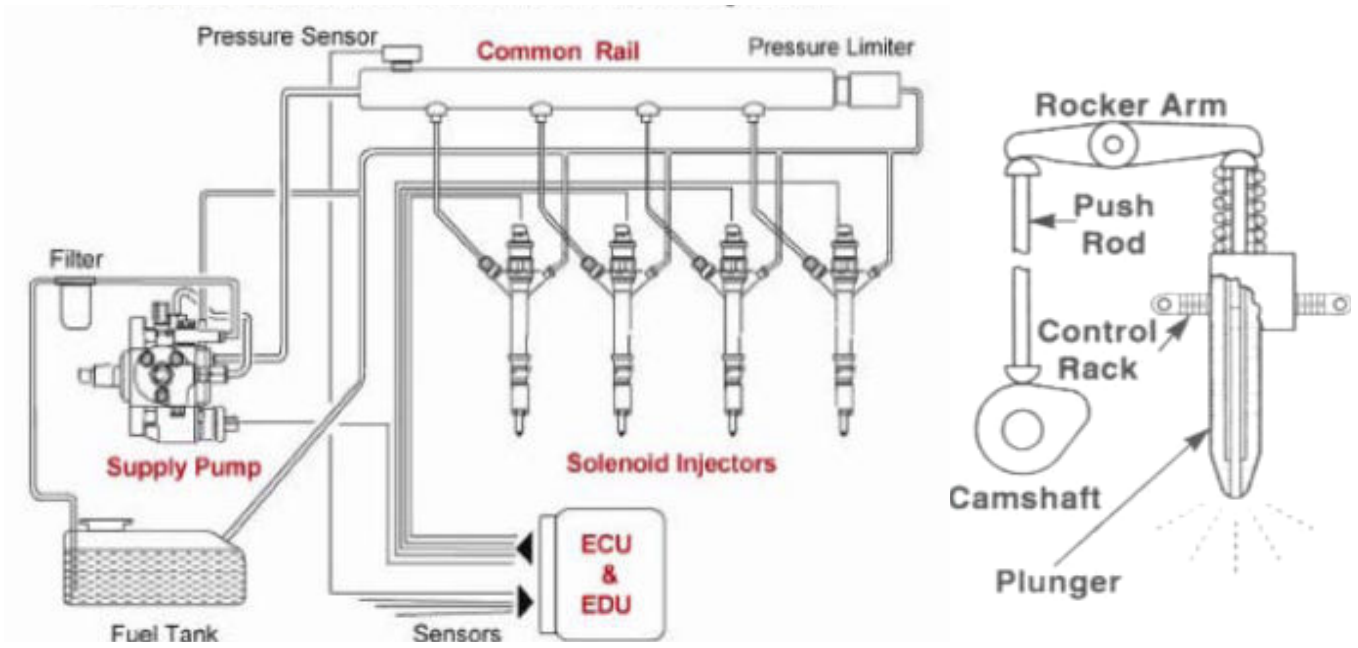
Σχήμα 1.8 Σύστημα λίπανσης μηχανής



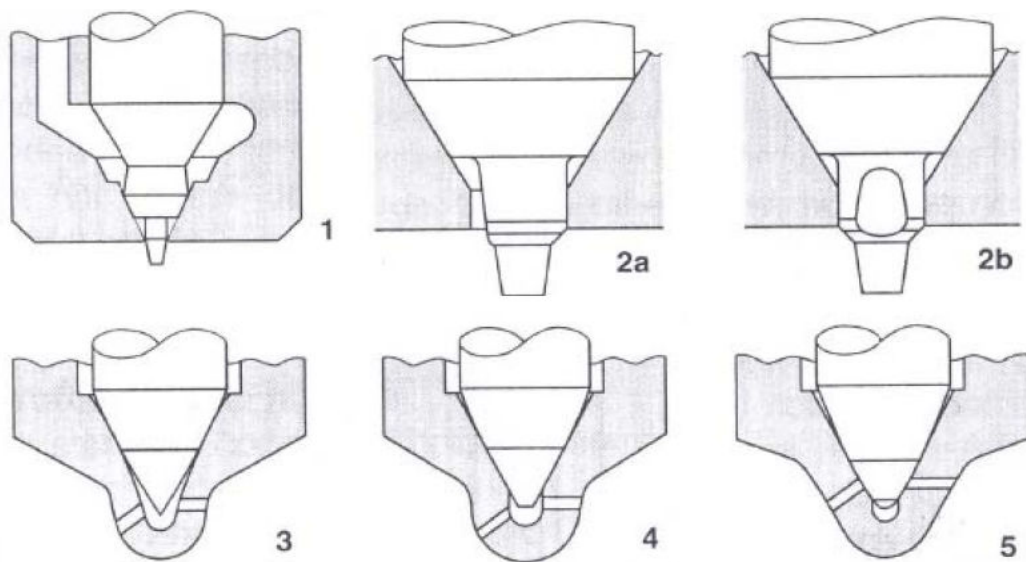
Σχήμα 1.9 Ψυκτική διάταξη μηχανής



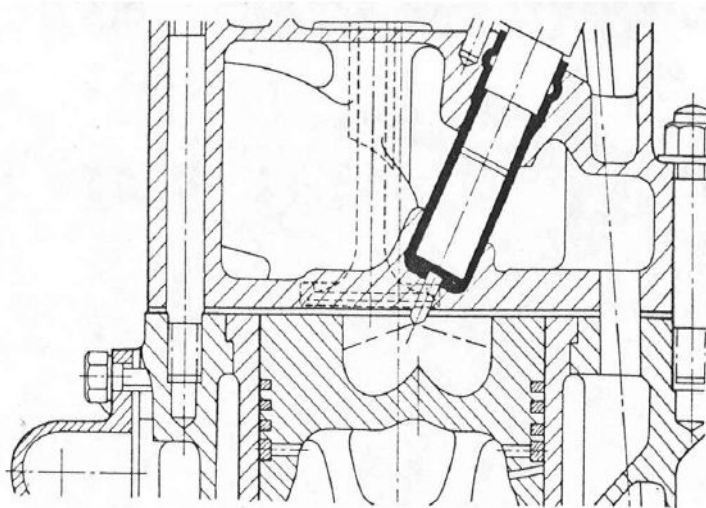
Σχήμα 1.10 Συσκευή έγχυτήρα και κύκλος έγχυσης, $P=F(\theta)$, μηχανής Diesel, (Cummins Inc)



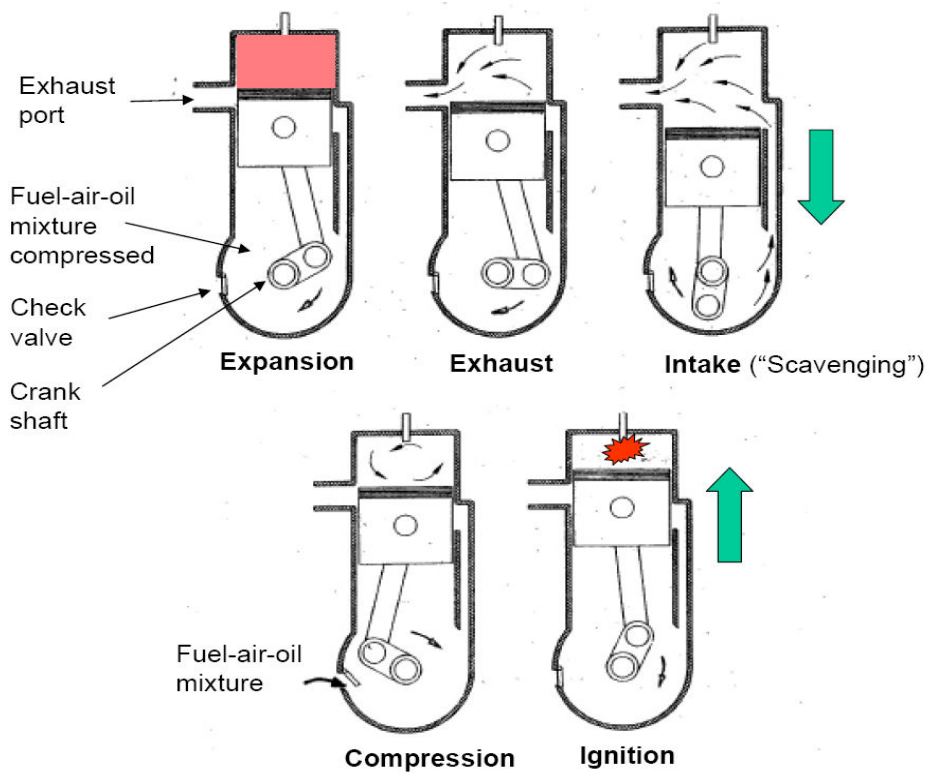
Σχήμα 1.11 Διατάξεις εγχυτήρων τύπου common rail και μονού στελέχους έγχυσης



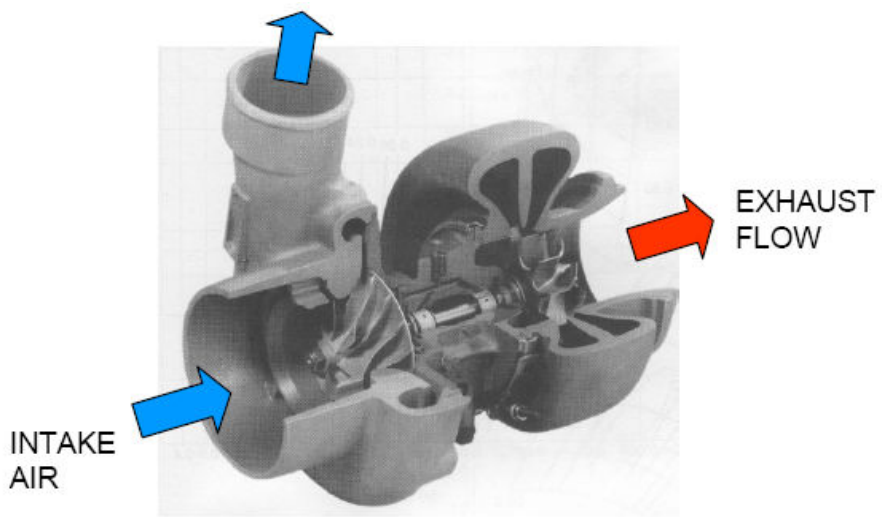
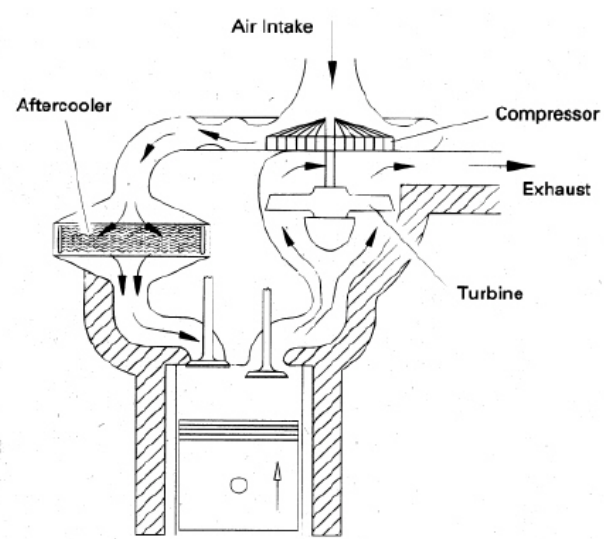
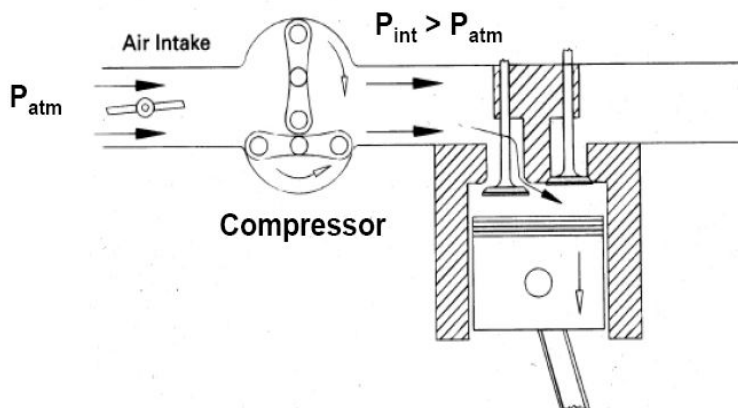
Σχήμα 1.12 Διαμορφώσεις ακροφυσίων εγχυτήρων



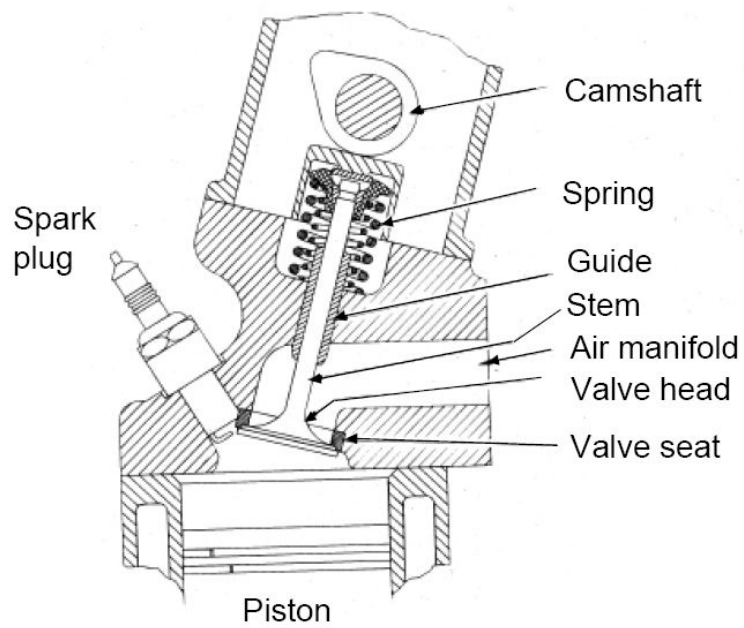
Σχήμα 1.13 Διάταξη κυλινδροκεφαλής Diesel άμεσης έγχυσης



Σχήμα 1.14 Λειτουργία δίχρονης μηχανής σταυροσάρωσης (cross-scavenged)

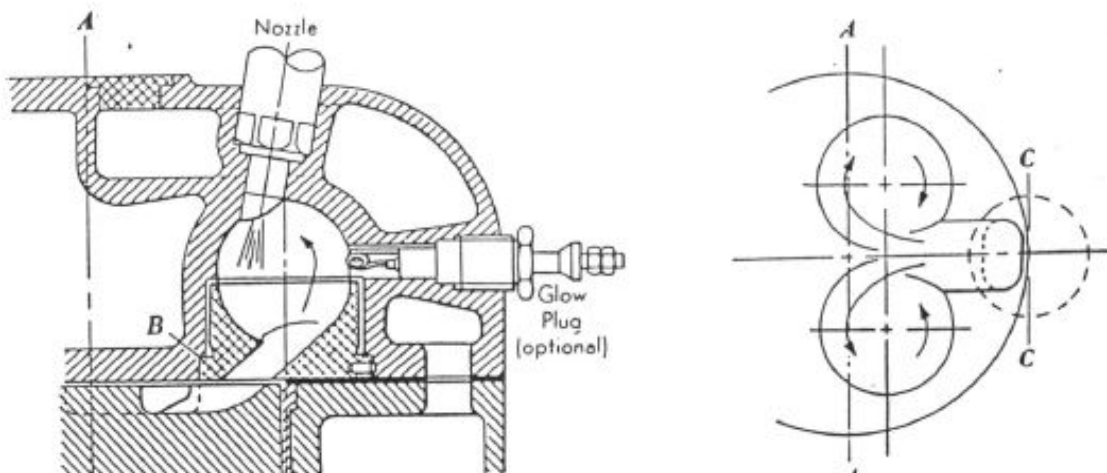


Σχήμα 1.15 Διατάξεις υπέρ- και στροβιλο-πλήρωσης μηχανής, (Stone, 1985, Taylor, 1968)

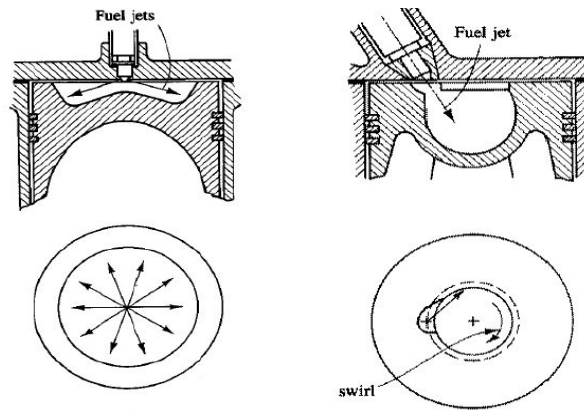


Σχήμα 1.18 Κυλινδροκεφαλή με εκκεντροφόρο επικεφαλής

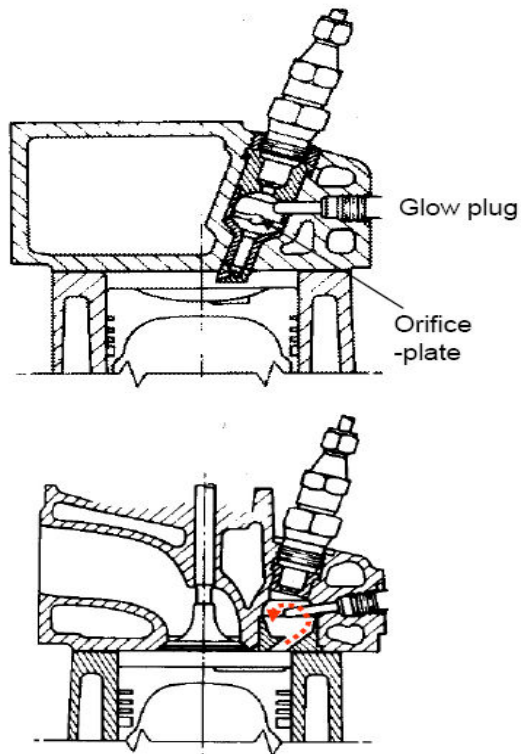
Ricardo Swirl Chamber



Σχήμα 1.17 Διάταξη κυλίνδρου μηχανής Diesel έμμεσης έγχυσης με στροβιλισμό, (Ricardo Co)

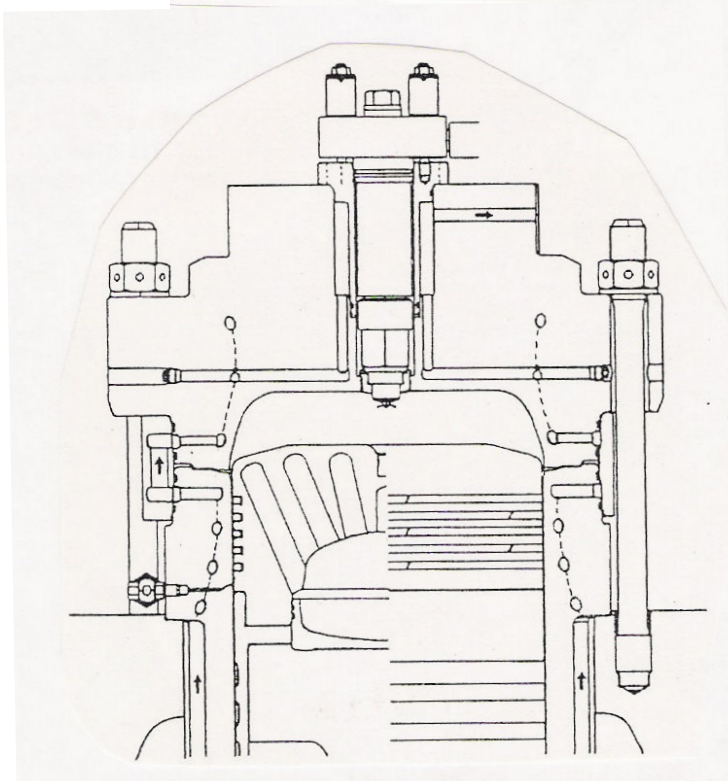
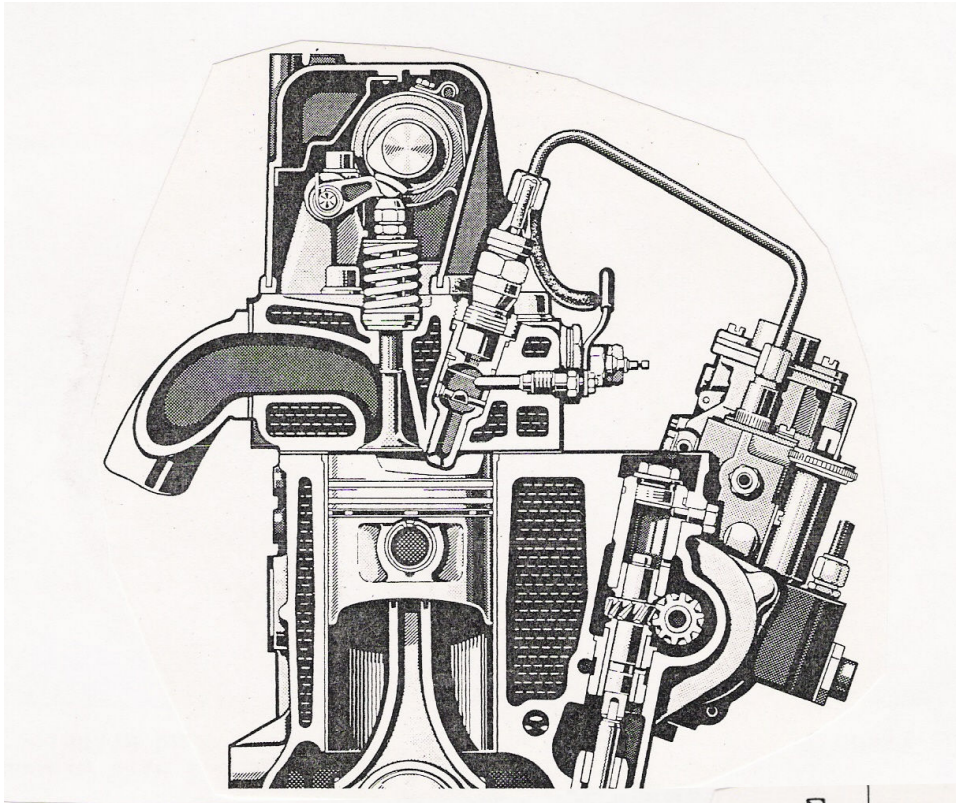


Διατάξεις άμμεσης έγχυσης με και χωρίς στροβιλισμό

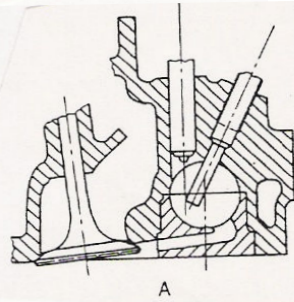


Διατάξεις έμμεσης έγχυσης με τύρβη και με προθάλαμο στροβιλισμού

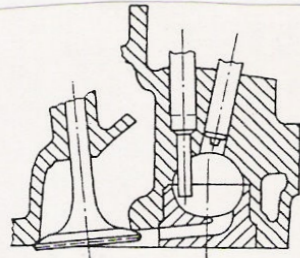
Σχήμα 1.18 Διατάξεις κυλινδροκεφαλών με διαφορετικού τύπου διαμορφώσεις εγχυτήρων



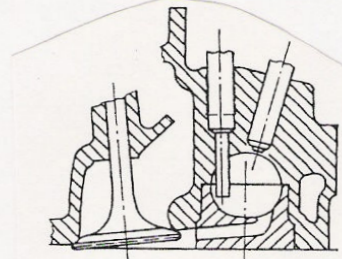
Σχημα 1.20 Μηχανη (Sulzer RLA-56)
αμεσου εγχυσεως



A

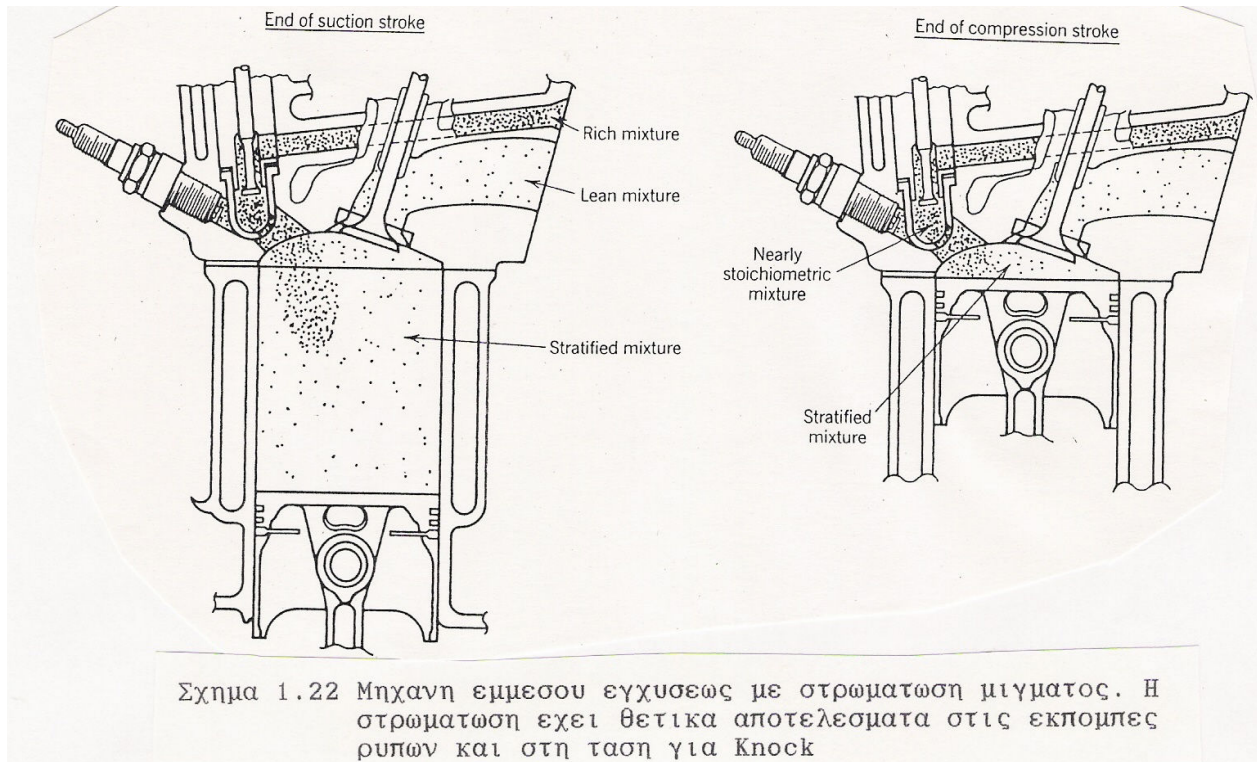


B

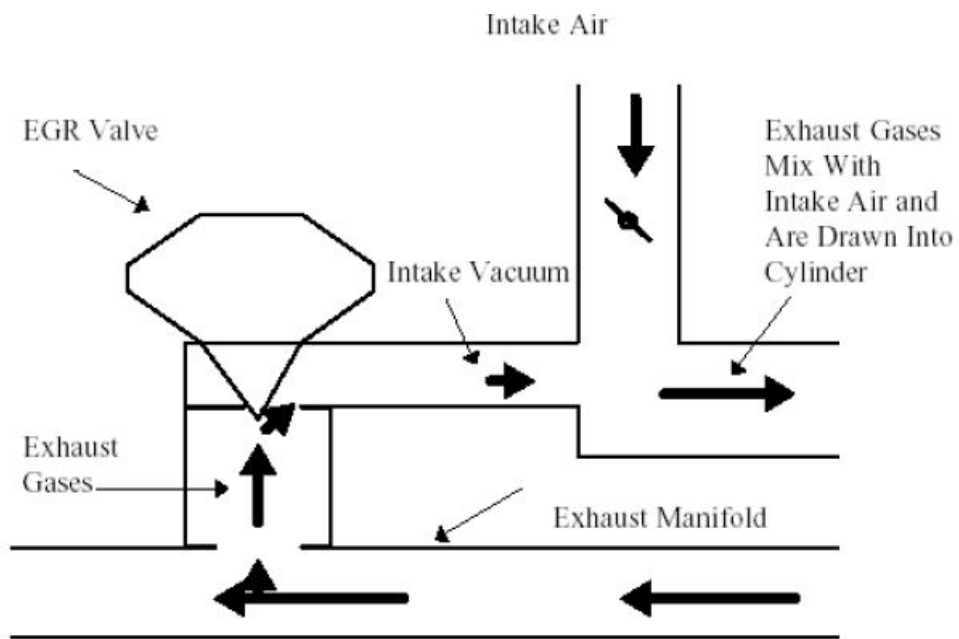


C

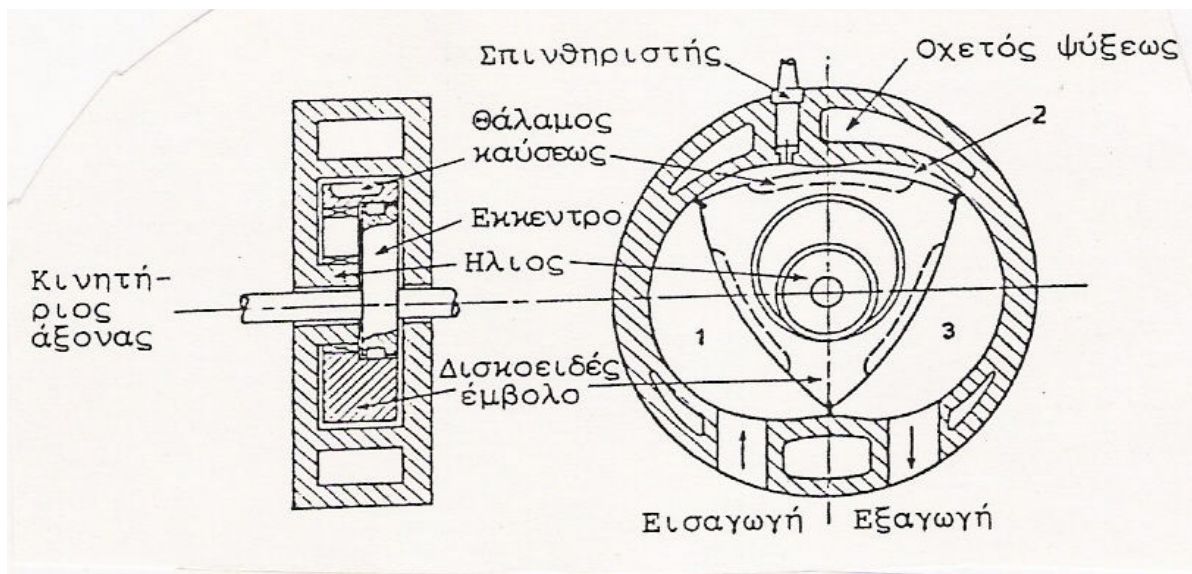
Σχημα 1.21 Διαφορετικες
διαμορφωσεις
προθαλαμου



[Dates (1974), (SAE), από αναφορά του Ferguson (1986)]



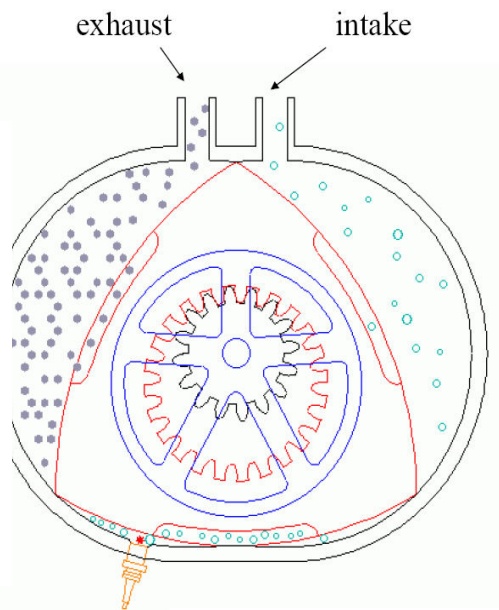
Σχῆμα 1.23 Διάταξη ανακυκλοφορίας καυσαερίων, EGR



+: No valves needed

Χωρίς βαλβίδες-
λιγότερες
δονήσεις

Διαρροές από
τους θαλάμους-
χαμηλότερη
συμπίεση,
υψηλότερες
εκπομπές



Σχήμα 1.28 Αρχή λειτουργίας τετράχρονης μηχανής Wankel