

Κεφαλαίο 2: Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Δημήτριος Θ. Χουντάλας
Καθηγητής ΕΜΠ
(dx1961@central.ntua.gr)

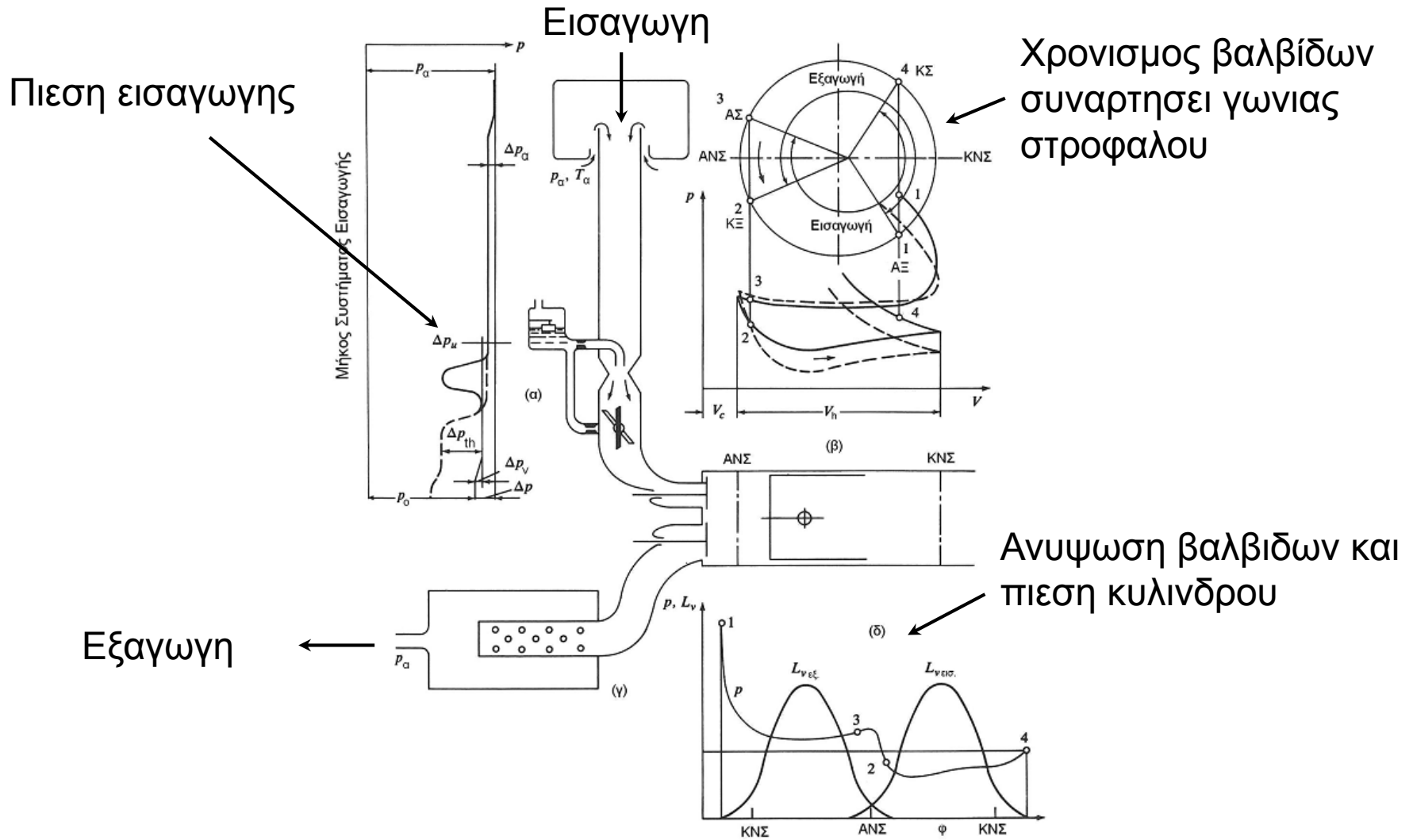
Γεώργιος Μαυρόπουλος
Αναπληρωτής Καθηγητής ΜΕΚ ΑΣΠΑΙΤΕ
Επιστημονικός Συνεργάτης
Εργαστήριο ΜΕΚ ΕΜΠ
(mavrop1@central.ntua.gr)

Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

- **Συστημα εισόδου αερίων σε 4-Χ κινητηρα:**
 - Φιλτρο άερα.
 - Συμπιεστης (σε υπερπληρωμενους κινητηρες).
 - Συστημα προετοιμασίας μείγματος:
 - Εξαεριωτης/ ρυθμιστικη δικλειδα (παλαιοτεροι κινητηρες).
 - Αντλια-εγχυτηρας/ ρυθμιστικη δικλειδα (συγχρονοι κινητηρες).
 - Πολλαπλη σωληνωση εισαγωγης.
 - Βαλβιδα/ ες εισαγωγης.
- **Συστημα εξαγωγης:**
 - Βαλβιδα/ ες εξαγωγης.
 - Αγωγοι εξαγωγης.
 - Στροβιλος (σε υπερπληρωμενους κινητηρες).
 - Καταλυτικος μετατροπεας.
 - Αποσιωπητήρας.

Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

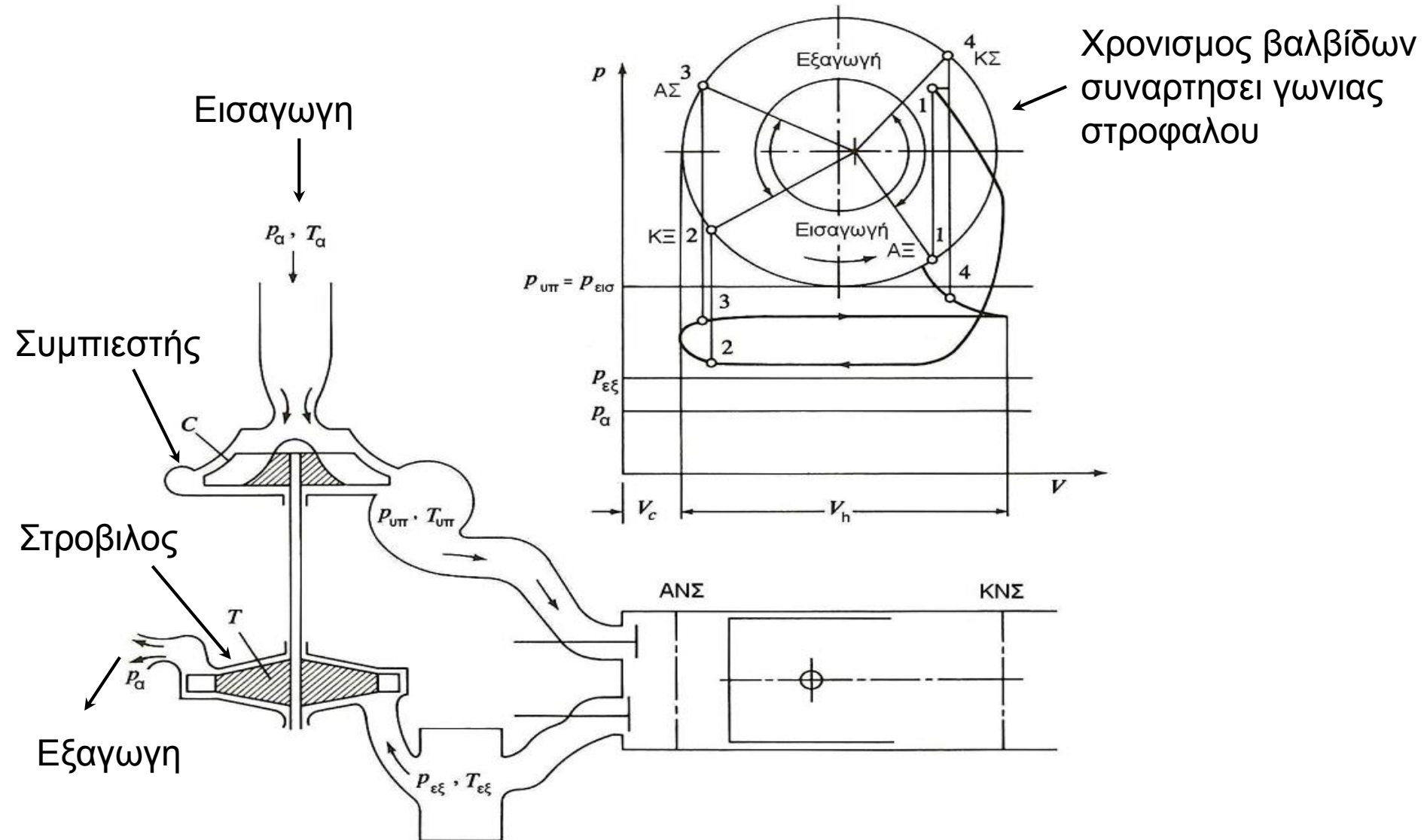
Συστημα εισόδου/ εξόδου αερίων σε μονοκυλινδρο κινητήρα Otto φυσικής αναπνοής:



Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Συστημα εισόδου/ εξόδου αερίων σε κινητήρα Diesel:

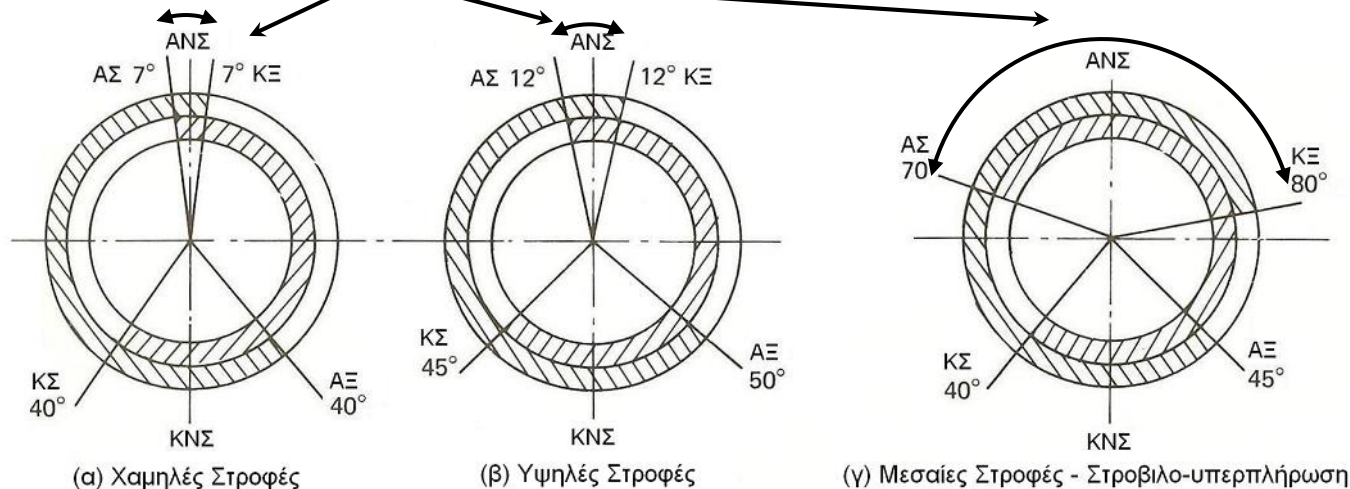
- Ελλειψη στραγγαλισμού στην εισαγωγή (ποιοτική ρυθμιση φορτίου)



Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Βαλβίδες εισαγωγής/ εξαγωγής:

- Ανοίγμα και κλείσιμο δεν πραγματοποιείται ακαριαία λόγω αδρανείας.
- Για αυτό το λόγο, ανοίγμα και κλείσιμο βαλβίδων όχι στο ΑΝΣ και ΚΝΣ, αλλά σε γωνίες οι οποίες βελτιστοποιούν την διαδικασία εναλλαγής αερίων.
- Χρονισμοί βαλβίδων απεικονίζονται συναρτησει γωνίας στροφαλου σε διαγράμματα χρονισμού (διανομής).
- Όταν οι βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής είναι ανοιχτές: Περίοδος επικάλυψης (overlap).



Κινητήρας φυσικής αναπνοής

Υπερπληρωμένος κινητήρας

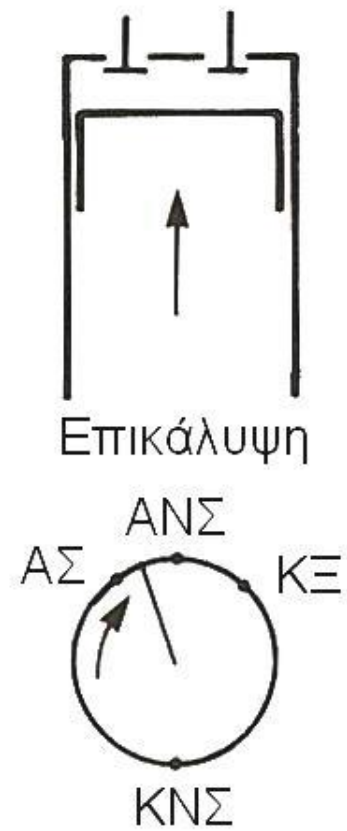
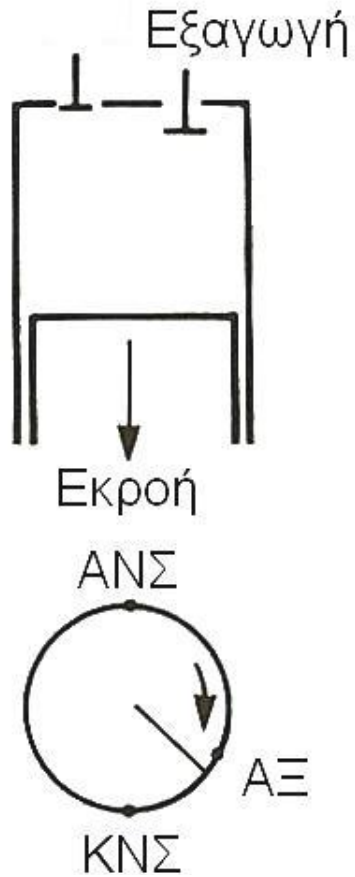
Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Διαδικασία Εξαγωγής:

- Τυπικό ανοιγμα βαλβιδας εξαγωγής 0-60° πριν το ΚΝΣ
- Εκτελεται σε 2 φασεις:
 - 1. Εκροή (blowdown)
 - Προκαλείται λόγω διαφορας πίεσης κυλίνδρου- εξαγωγής
 - Αρχικα υπερκριτικη ροή διαμεσω βαλβίδας εξαγωγής (Mach>1) λόγω υψηλού λόγου πίεσης κυλίνδρου/ εξαγωγής
 - Όταν το εμβολο φτανει κοντα στο ΚΝΣ → πτωση πιεσης εντος του κυλίνδρου → Υποκριτικη ροή
 - 2. Εκτόπιση (displacement)
 - Προκαλείται λόγω εκτοπιστικής δρασης εμβόλου.
 - Ελαφρα υπερπίεση εντος κυλίνδρου λόγω απωλειών ροής στη βαλβίδα εξαγωγής (~0.1 bar)
- Τυπικό κλεισιμο βαλβιδας εξαγωγής:
 - 15-35° μετα το ΑΝΣ σε φυσικής αναπνοής κινητήρες.
 - 70-90° μετα το ΑΝΣ σε υπερπληρωμένους κινητήρες για θερμική ανακουφιση κυλινδρου, μείωση θερμοκρασίας καυσαερίου.

Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

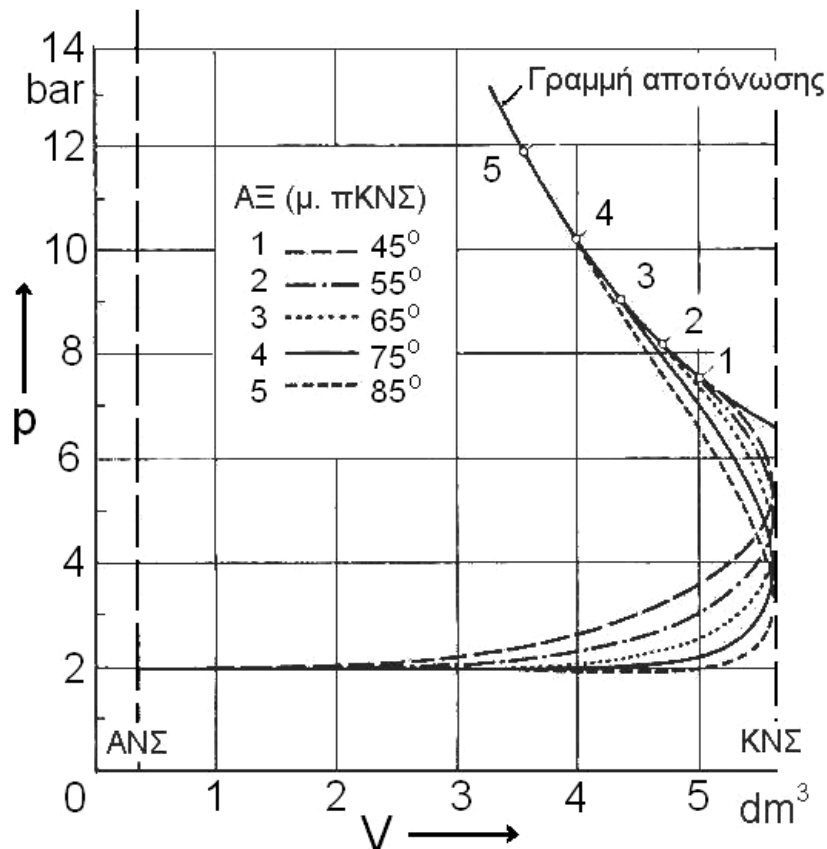
Εξαγωγή αερίων σε 4-Χ κινητήρα:



Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Εξαγωγή αερίων σε 4-Χ κινητήρα: Επιδραση χρονισμού βαλβίδας εξαγωγής

- Όσο νωρίτερα ανοίγει η βαλβίδα → μείωση (θετικού) έργου αποτονωσης & μείωση (αρνητικού) έργου εξωθησεως.
- Προσδιορισμος βελτιστου χρονισμού για μεγιστοποίηση βαθμού απόδοσης



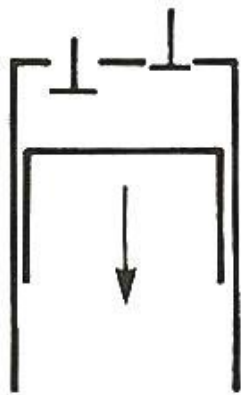
Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Εισαγωγή:

- Τυπικό ανοίγμα βαλβίδας εισαγωγής 10-20° πριν το ΑΝΣ.
- Οσο υπαρχει επικαλυψη βαλβιδων εισαγωγής/ εξαγωγής: Απόπλυση κυλίνδρου (scavenging).
- Αναρροφηση λογω εκτοπιστικης δρασης εμβόλου κατα την κινηση προς το ΚΝΣ → Πληρωση όγκου κυλίνδρου από φρεσκια γόμωση.
- Υποπίεση στον κύλινδρο λόγω πτώσης πίεσης στη βαλβίδα εισαγωγής (~0.1 bar)
- Στο τέλος της αναρόφησης η πίεση κυλίνδρου \approx πιεση εισαγωγής
 - Σε ατμοσφαιρικούς Diesel η Otto με ανοιχτή ρυθμιστική δικλείδα $\approx P_{atm}$
- Λίγο πριν το κλείσιμο της βαλβίδας εισαγωγής (40–70° μετα το ΚΝΣ): υπερπληρωση ανακοπής λόγω αδράνειας του εργαζόμενου μέσου (παλμοί πίεσης στην εισαγωγή)

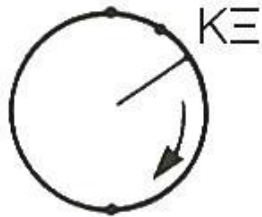
Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Εισαγωγή αερίων σε 4-Χ κινητήρα:

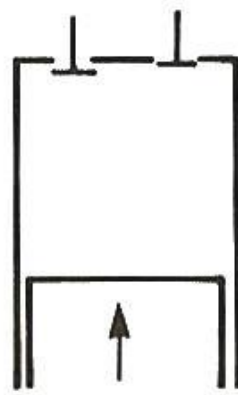


Αναρρόφηση

ΑΝΣ

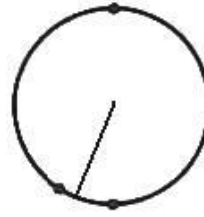


ΚΝΣ

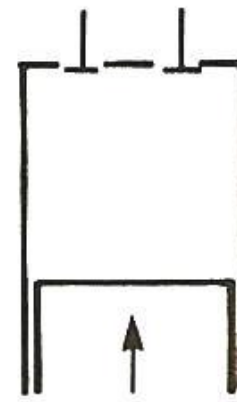


"Υπερπλήρωση" ανακοπής

ΑΝΣ

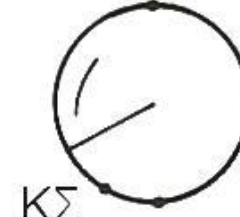


ΚΝΣ



Συμπίεση

ΑΝΣ

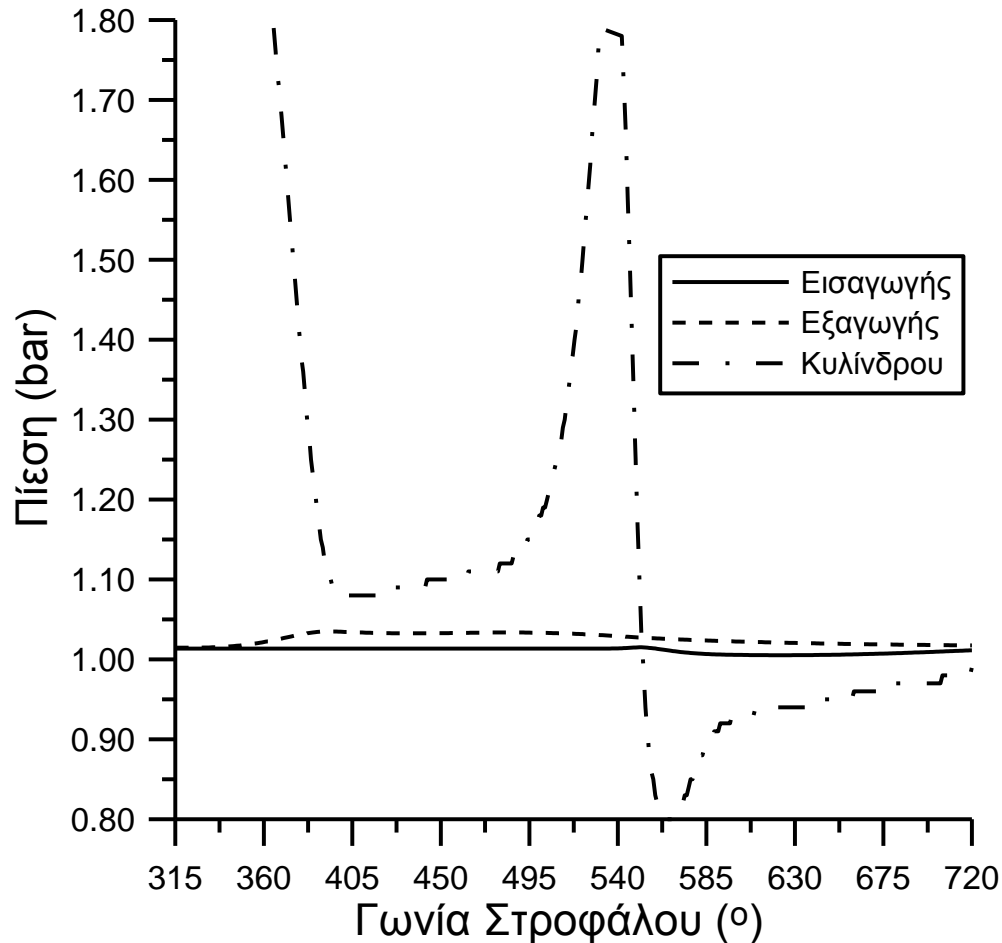


ΚΝΣ

Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Διακύμανση πιέσεων εισαγωγής/ κυλίνδρου/ εξαγωγής κατά τη φαση εναλλαγής αερίων

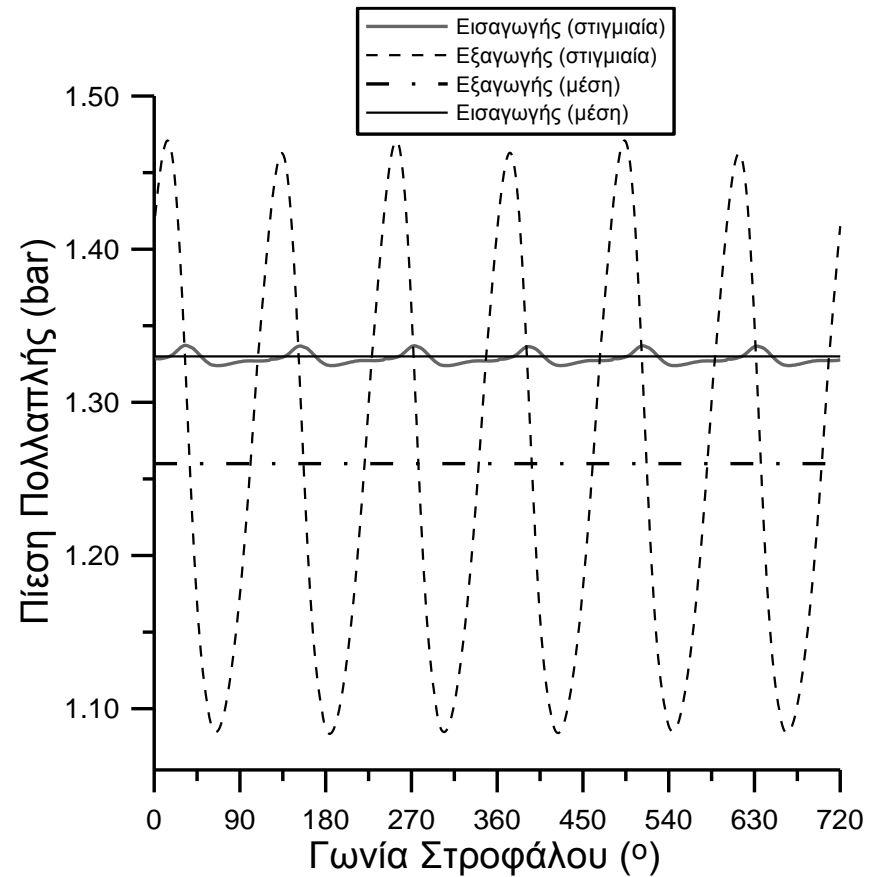
- Δεδομένα απο πειραματικό κινητήρα φυσικής αναπνοής κινητήρα Diesel Ricardo E-6, Εργαστηρίου Μ.Ε.Κ. Ε.Μ.Π.



Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Διακύμανση πιέσεων εισαγωγής/ κυλίνδρου/ εξαγωγής κατά τη φασή εναλλαγής αερίων σε υπερπληρωμένο κινητήρα

- Διακυμανση εξαγωγής >> διακυμανση εισαγωγής (συστημα υπερπλήρωσης παλμών)
- Εφόσον μεση πίεση εισαγωγής > Μεση πίεση εξαγωγής → Απόπλυση κυλινδρου στη φασή επικαλυψης βαλβίδων.



Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Ογκομετρικός βαθμός απόδοσης

- Δεικτης αποτελεσματικότητας εναλλαγής αερίων.
- Τυπικές τιμές για κινητήρες φυσικής αναπνοής (Diesel και Otto σε πλήρες φορτίο) 80–90%.
- Γενικά: ογκομετρικός β.α Diesel > Otto λόγω ελλειψης στραγγαλισμού στην εισαγωγή.
- Ολικός ογκομετρικός β.α: Η μαζα που εισρέει στον κυλινδρο προς αυτήν η οποία θα καταλαμβάνε τον ογκο εμβολισμού σε συνθήκες περιβάλλοντος

$$\eta_{vol} = \frac{\dot{m}_{AC}}{\dot{m}_{αε}} = \frac{\dot{m}_{AC}}{\rho_{α} V_h \left(\frac{n}{30K} \right)} = \frac{K \cdot \dot{m}_{AC}}{\rho_{α} A_{ε} \bar{c}_{ε}}$$

- Αν η μαζα του παρονομαστή αναφέρεται σε συνθήκες της εισαγωγής: ογκομετρικός β.α είναι ενδεικτικός της απόδοσης των βαλβίδων εισαγωγής

Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Ογκομετρικός βαθμός απόδοσης

- Συσχέτιση ογκομετρικού β.α (η_{vol}) και βαθμού πλήρωσεως (η_λ) / παγίδευσεως (η_γ) :

$$\eta_{vol} = \frac{\dot{m}_{AC}}{\dot{m}_{\alpha\epsilon}} = \frac{\dot{m}_{AC} / \dot{m}_o}{\dot{m}_{\alpha\epsilon} / \dot{m}_o} = \frac{(\eta_\gamma)^{-1}}{(\eta_\lambda)^{-1}} = \frac{\eta_\lambda}{\eta_\gamma}$$

Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Ογκομετρικός βαθμός απόδοσης

- Παράγοντες που επιδρούν σε ογκομετρικό β.α:
 - Τυπος καυσίμου, λόγος A/F.
 - Σε κινητήρες Otto: ατμοποίηση καυσίμου/ θερμοκρασία μείγματος
 - Λόγος πιέσεων εισαγωγής/ εξαγωγής
 - Βαθμός συμπίεσης
 - Ταχύτητα περιστροφής
 - Γεωμετρία/ θερμοκρασία οχετών εισαγωγής/ εξαγωγής.
 - Γεωμετρία/ χρονισμός βαλβίδων.
 - Κατάλοιπο καυσαέριο.
- Ορισμένοι παραγοντες επιδρούν κατα ημι-στατικό τρόπο (χωρις εξαρτηση απο ταχύτητα περιστροφής)
- Άλλοι επιδρούν κατα δυναμικό τρόπο (εξαρτηση απο ταχύτητα περιστροφής & παλμούς πίεσης εισαγωγής/ εξαγωγής)

Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Ογκομετρικός βαθμός απόδοσης: Ημι-στατικά (quasi-static) φαινόμενα:

- Παραδοχή ιδανικού κύκλου Otto σε πλήρες φορτίο (οχι στραγγαλισμός στην εισαγωγή)

$$\eta_{vol} = \left(\frac{M}{M_\alpha} \right) \left(\frac{p_{\epsilon\iota\sigma}}{p_\alpha} \right) \left(\frac{T_\alpha}{T_{\epsilon\iota\sigma}} \right) \frac{1}{(1+FA)} \left\{ \frac{\epsilon}{\epsilon-1} - \frac{1}{\gamma(\epsilon-1)} \left[\left(\frac{p_{\epsilon\xi}}{p_{\epsilon\iota\sigma}} \right) + \gamma - 1 \right] \right\}$$

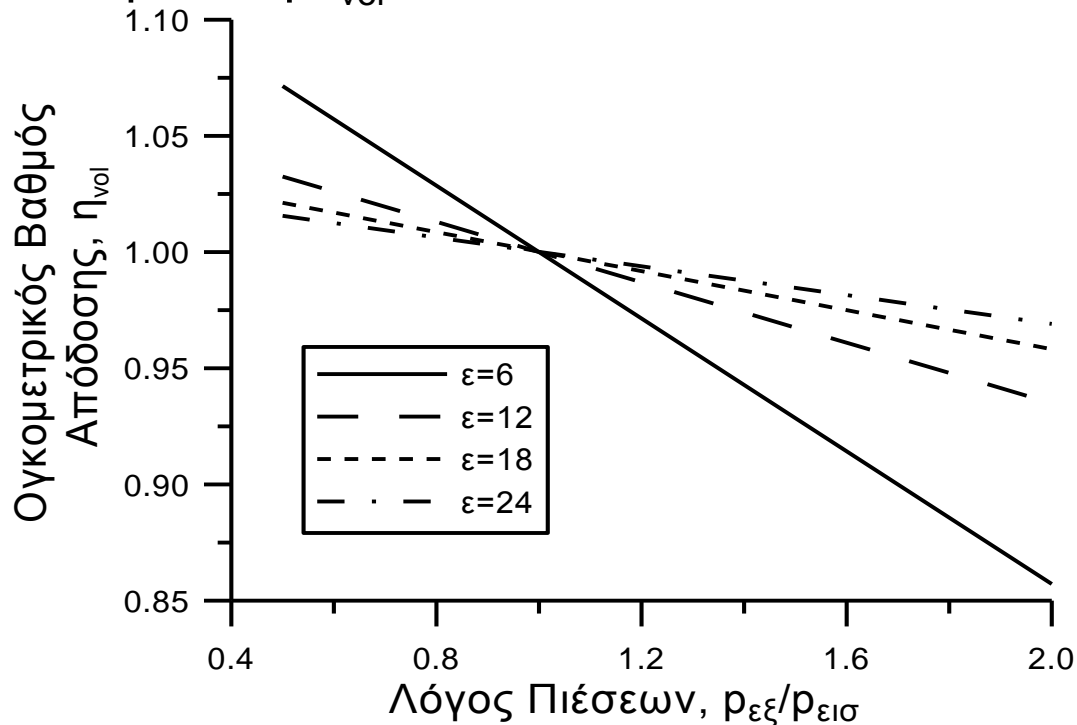
- Εξαρτηση η_{vol} από πίεση/ θερμοκρασια παγιδευμενης γομωσης, λόγο F/A , βαθμό συμπίεσης και MB μειγματος και πίεση εξαγωγής/ εισαγωγής

- Αν επιπλέον $p_{\epsilon\iota\sigma} = p_{\epsilon\xi} \rightarrow \eta_{vol} = \left(\frac{M}{M_\alpha} \right) \left(\frac{p_{\epsilon\iota\sigma}}{p_\alpha} \right) \left(\frac{T_\alpha}{T_{\epsilon\iota\sigma}} \right) \frac{1}{(1+FA)}$

Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Ογκομετρικός βαθμός απόδοσης: Ημι-στατικά (quasi-static) φαινόμενα:

- Εξάρτηση η_{vol} από λόγο πιέσεων εξαγωγής/ εισαγωγής για διαφορες τιμες βαθμού συμπίεσης ϵ :
- Αυξηση λόγου πιέσεων \rightarrow μείωση η_{vol}
- Αν $p_{εξ} > p_{εισ}$ \rightarrow ελλιπής απόπλυση \rightarrow αυξημένο παραμενον καυσαέριο στον επιζημιο όγκο V_c . Επειδή V_c αυξανει όσο το ϵ μειώνεται \rightarrow μείωση ϵ οδηγεί σε μείωση η_{vol}



Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Ογκομετρικός βαθμός απόδοσης: Ημι-στατικά (quasi-static) φαινόμενα:

Κινητήρας Otto:

- Ολική πίεση μίγματος κατά την εισαγωγή: Αθροισμα μερικών πιέσεων αέρα, ατμών καυσίμου, υδρατμών

$$p_{\text{εισ}} = p_{\alpha,\text{εισ}} + p_{f,\text{εισ}} + p_{w,\text{εισ}}$$

- Με χρήση της: $M_{\alpha}/M_w = 28,96/18 = 1,61$ η ανωτέρω μετασχηματίζεται

$$\begin{aligned} \frac{p_{\alpha,\text{εισ}}}{p_{\text{εισ}}} &= \frac{p_{\alpha,\text{εισ}}}{p_{\alpha,\text{εισ}} + p_{f,\text{εισ}} + p_{w,\text{εισ}}} = \frac{m_{AC} / M_{\alpha}}{\frac{m_{AC}}{M_{\alpha}} + \frac{m_f}{M_f} + \frac{m_w}{M_w}} = \\ &= \frac{1}{1 + FA \left(\frac{M_{\alpha}}{M_f} \right) + \left(\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_{AC}} \right) \left(\frac{M_{\alpha}}{M_w} \right)} = \frac{1}{1 + FA \left(\frac{M_{\alpha}}{M_f} \right) + 1,61 \left(\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_{AC}} \right)} \end{aligned}$$

Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Ογκομετρικός βαθμός απόδοσης: Ημι-στατικά (quasi-static) φαινόμενα:

Κινητήρας Otto:

- Με χρήση καταστατικής Τ.Α

$$\rho_{\alpha, \epsilon\text{ισ}} = \frac{M_{\alpha} \rho_{\epsilon\text{ισ}}}{R_{\text{mol}} T_{\epsilon\text{ισ}}} \left[\frac{1}{1 + \text{FA} \left(\frac{M_{\alpha}}{M_f} \right) + 1,61 \left(\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_{\text{AC}}} \right)} \right]$$

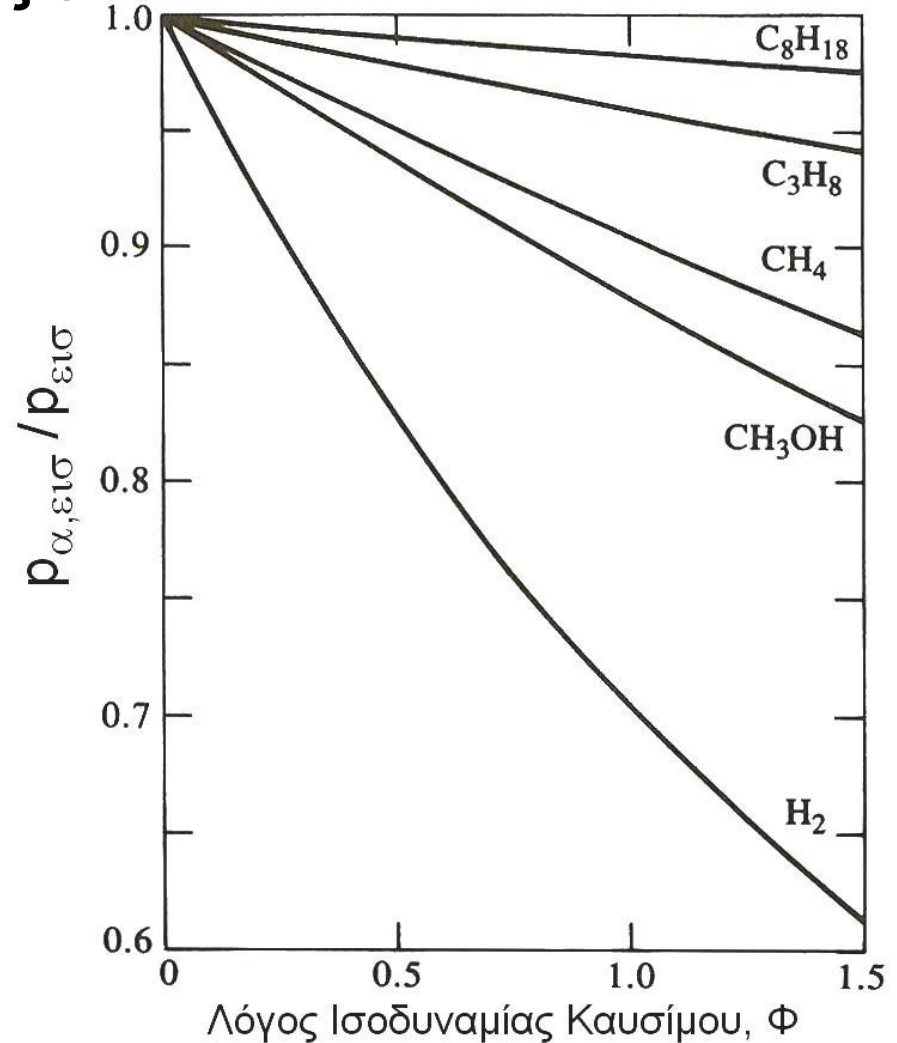
- Αυξηση ΜΒ καυσίμου $M_f \rightarrow$ Αυξηση n_{vol}
- Αυξηση FA (οποτε και Φ) \rightarrow Μειωση n_{vol} (πρακτικά πολύ μικρή, διότι ούτως ή άλλως το πεδίο του Φ είναι αρκετά περιορισμένο σε κινητήρες Otto-λειτουργία του καταλυτικού μετατροπέα: $\lambda=1$)

Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Ογκομετρικός βαθμός απόδοσης: Ημι-στατικά (quasi- static) φαινόμενα:

Κινητήρας Otto:

- Διάγραμμα εξάρτησης λόγου μερικών πιέσεων αέρα/ όλική πίεσης (επομένως και ογκομετρικού β.α) κατά την εισαγωγή από λογο ισοδυναμίας Φ για διάφορα καυσίμα



Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Ογκομετρικός βαθμός απόδοσης: Ημι-στατικά (quasi-static) φαινόμενα:

Κινητήρας Otto:

Επίδραση ατμοποίησης καυσίμου/μεταφοράς θερμότητας κατά την προετοιμασία μίγματος

- Ισολογισμός ενεργειας για ατμοποίηση:

$$\left[\dot{m}_\alpha h_\alpha + (1 - x_e) \dot{m}_f h_{f,L} + x_e \dot{m}_f h_{f,V} \right]_A = \dot{Q} + (\dot{m}_\alpha h_\alpha + \dot{m}_f h_{f,L})_B$$

- Αν $\Delta h = c_p \Delta T$ και $h_{f,V} - h_{f,L} = h_{f,LV}$ η λανθανουσα θερμότητα ατμοποίησης:

$$T_A - T_B = \frac{(\dot{Q} / \dot{m}_\alpha) - x_e (FA) h_{f,LV}}{c_{p\alpha} + (FA) c_{f,L}}$$

- B: κατάσταση πριν την εξάτμιση του καυσίμου
- A: μετά την εξάτμιση του καυσίμου

Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Ογκομετρικός βαθμός απόδοσης: Ημι-στατικά (quasi-static) φαινόμενα:

Κινητήρας Otto:

Επίδραση ατμοποίησης καυσίμου/μεταφοράς θερμότητας κατά την προετοιμασία μείγματος

- Τυπική μείωση θερμοκρασίας $T_A - T_B = -19$ για ισοοκτανιο, -128 για μεθανόλη χωρίς πρόσδοση εξωτερικής θερμότητας για την ατμοποίηση.
- Μείωση θερμοκρασίας μείγματος \rightarrow Αύξηση ογκομετρικού β.α (θετική επίδραση)
- Εξάτμιση του καυσίμου \rightarrow μείωση της μερικής πίεσης του αέρα στο μίγμα (αρνητική επίδραση)

Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Ογκομετρικός βαθμός απόδοσης: Ημι-στατικά (quasi-static) φαινόμενα:

Κινητήρας Diesel:

- Μονο αέρας/ καταλοιπο καυσέριο κατα την αναρρόφηση και εγχυση μετα το κλείσιμο της βαλβίδας εισαγωγής \rightarrow Αμηλετέα επίδραση τύπου καυσίμου
- Αυξηση Φ \rightarrow Αυξηση θερμοκρασιών τοιχωμάτων/καταλοιπου καυσαερίου \rightarrow μείωση $\rho_{\alpha, \text{εισ}}$ \rightarrow μείωση η_{vol}

Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Ογκομετρικός β.α: Συνδυασμός ημιστατικών και δυναμικών φαινομένων:

- **Δυναμεις τριβής στην εισαγωγή/ εξαγωγή:**

- Εκφραζονται μεσω του συντελεστή απωλειών $\zeta = \lambda \frac{L}{d_h}$
- Οι απώλειες λόγω πτώσης πίεσης μειώνουν την πίεση στην εισαγωγή → μείωση ογκομετρικού β.α
- Η ταχύτητα του ρευστού κατά το στάδιο της αναρρόφησης μπορεί να συνδεθεί με την ταχύτητα του εμβόλου, η οποία είναι ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής για μόνιμη ροή, με τη σχέση (για ρ σταθερό)

$$u_j A_j = \bar{c}_\varepsilon A_\varepsilon$$

- Δηλ. η ταχύτητα ροής είναι αναλογη της μεσης ταχύτητας εμβόλου
- Σε κάθε υποσύστημα η πτώση πίεσης είναι

$$\Delta p_j = \zeta_j \rho u_j^2$$

- δηλ. παρουσιάζει εξάρτηση με το τετράγωνο της ταχύτητας ροής

Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Ογκομετρικός β.α: Συνδυασμός ημιστατικών και δυναμικών φαινομένων:

- **Δυναμεις τριβής στην εισαγωγή/ εξαγωγή:**

- Συνολική πτώση πίεσης= αθροισμα επιμερους πτωσεων. Στον Otto η μεγαλύτερη πτώση πίεσης προκαλείται από τη ρυθμιστική δικλείδα (πεταλουδα) σε χαμηλό/ μέσο φορτίο
- Τελικα μπορεί να υπολογιστεί η πίεση εντός του κυλινδρου από την παρακατω σχέση (A =διατομή), υπολογίζοντας τη συνολική πτώση πίεσης στην εισαγωγή

$$p_{\alpha} - p_{\text{κυλ}} = \sum \Delta p_j = \sum \zeta_j \rho u_j^2 = \rho \bar{c}_{\varepsilon}^2 \sum \left[\zeta_j \left(\frac{A_{\varepsilon}}{A_j} \right)^2 \right]$$

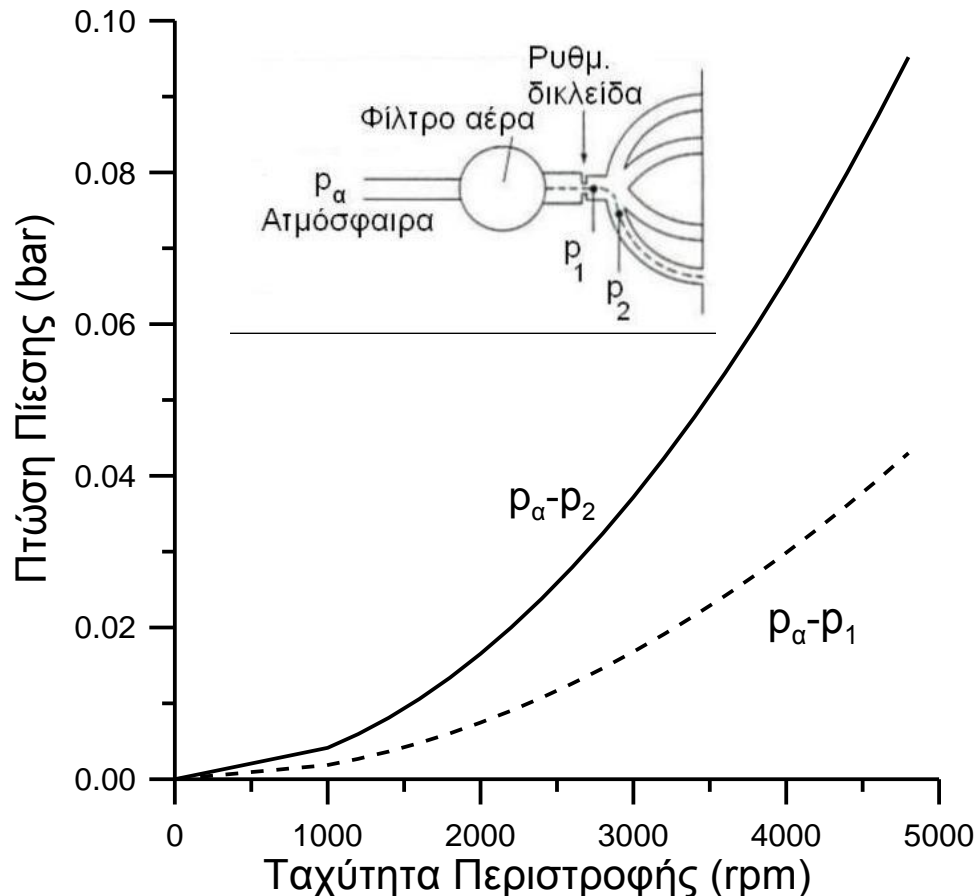
- Μεγιστοποιηση διατομών ροής ελαχιστοποιεί απώλειες πίεσης
- Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα περιστροφής n (άρα και η μέση ταχύτητα του εμβόλου από τη σχέση εξάρτησής τους) τόσο μεγαλύτερες είναι και οι απώλειες

$$\Delta p_{\text{ολ}} = f(\bar{c}_{\varepsilon}^2) = f(n^2)$$

Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Ογκομετρικός β.α: Συνδιασμός ημιστατικών και δυναμικών φαινομένων:

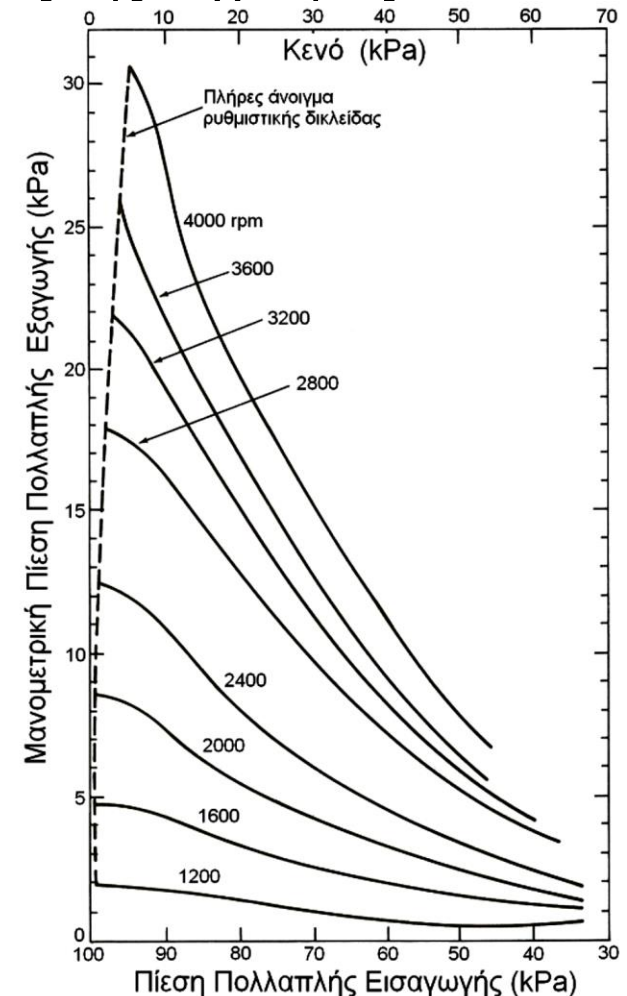
- Δυνάμεις τριβής: Τυπικό διάγραμμα εξαρτησης πτώσης πίεσης στην εισαγωγή από την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα



Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Ογκομετρικός β.α: Συνδιασμός ημιστατικών και δυναμικών φαινομένων:

- Δυναμεις τριβής: Τυπικό διάγραμμα πίεσης πολλαπλής εξαγωγής συναρτήσει πίεσης εισαγωγής για διάφορες τιμές της ταχύτητας περιστροφής κιν. Otto.



Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Ογκομετρικός β.α: Συνδυασμός ημιστατικών και δυναμικών φαινομένων:

- Δυνάμεις πίεσης: Διαφορά πίεσης ρευστού από σημείο σε σημείο.
 - Για κάθε υποσυστήμα: $F_j = A_j \Delta p_j$
 - Συνολική δύναμη: $F_{ολ} = \sum F_j = \sum A_j \Delta p_j = (p_\alpha - p_{κυλ}) A_\mu$
- Δυνάμεις αδράνειας:
- Φαινόμενο ανακοπής (ram effect):
 - Τοπική και στιγμιαία αύξηση πίεσης λίγο πριν τη βαλβίδα εισαγωγής στο τέλος της αναρρόφησης λόγω αδράνειας καυσαερίου → Αύξηση ογκομετρικού β.α. Συμβαίνει σε συγκεκριμένο εύρος στροφών κινητήρα
 - Το φαινόμενο μπορεί να έχει και αρνητική επίδραση, μειώνοντας την πίεση πριν τη βαλβίδα και προκαλώντας οπισθοροή από τον κύλινδρο στην εισαγωγή

Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

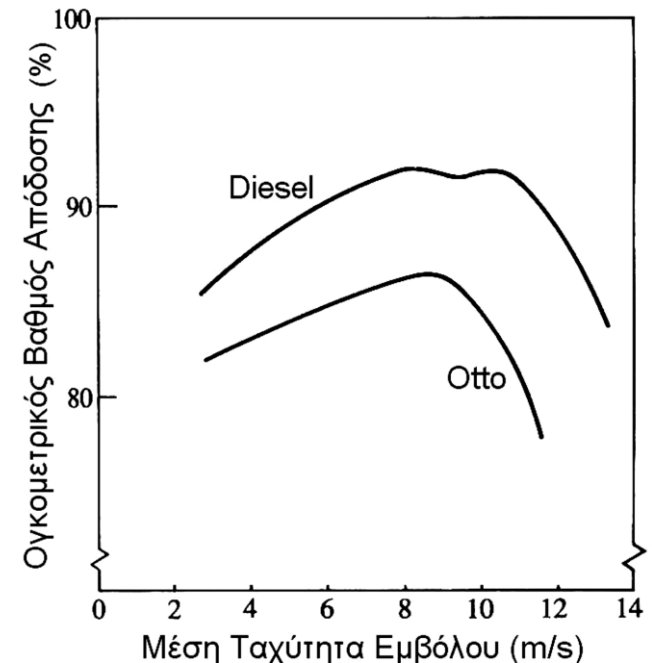
Ογκομετρικός β.α: Συνδιασμός ημιστατικών και δυναμικών φαινομένων:

- Συγχρονισμός (Tuning)
 - Κύματα πίεσης στην εισαγωγή/ εξαγωγή πολυκύλινδρων κινητήρων ανακλώνται στις διακλαδώσεις της πολλαπλής και αλληλεπιδρούν μεταξύ τους.
 - Ανάλογα με γεωμετρία πολλαπλής/ ταχύτητα περιστροφής κινητήρα η επίδραση μπορεί να είναι θετική στην εναλλαγή αερίων → Συντονισμένο σύστημα.
 - Σε ένα συντονισμένο σύστημα ο ογκομετρικός βαθμός απόδοσης αυξάνει σημαντικά στην περιοχή της ταχύτητας συντονισμού.
 - Ο Ογκομετρικός Β.Α μειώνεται σημαντικά σε περιοχή εκτός της ταχύτητας συντονισμού → διαστασιολογήση οχετών με σκοπό την βελτιστοποίηση επιδόσεων (ροπής- μεταβατικής απόκρισης) κινητήρα σε συγκεκριμένο εύρος στροφών.
 - Το μήκος των αγωγών διαδραματίζει σημαντικό ρόλο, και για κάθε κινητήρα μπορεί να βρεθεί το ιδανικότερο, έτσι ώστε ο ογκομετρικός βαθμός απόδοσης να διατηρηθεί σε υψηλές σχετικές τιμές για όλο το εύρος των στροφών του κινητήρα

Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Ογκομετρικός β.α: Συνδιασμός ημιστατικών και δυναμικών φαινομένων:

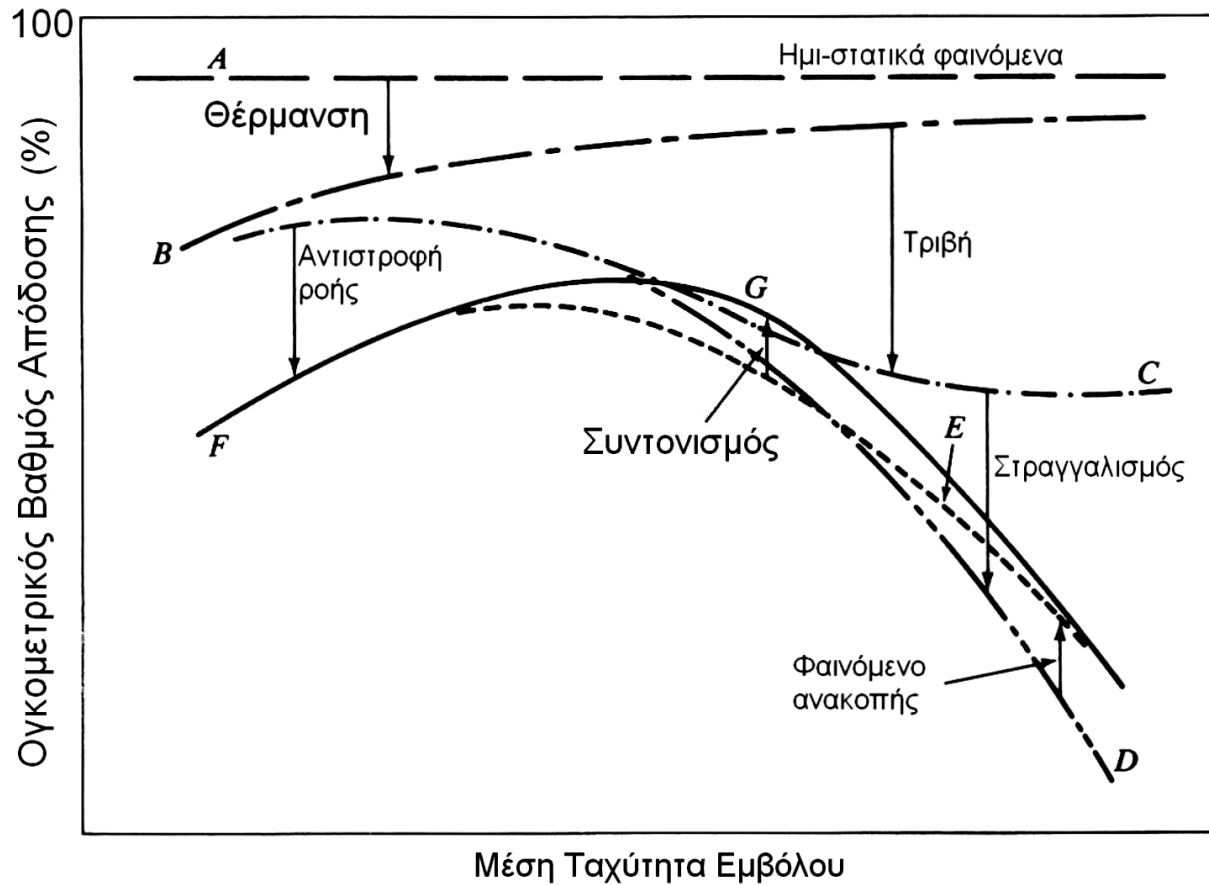
- Εξάρτηση του ογκομετρικού βαθμού απόδοσης από την ταχύτητα περιστροφής, την επιφάνεια, ανύψωση και χρονισμό των βαλβίδων:
- Ογκομετρικός β.α Ντίζελ > Otto
 - Πτώσεις πίεσης στην ρυθμιστική βαλβίδα (πεταλούδα) και εξαεριωτη (καρμπυρατέρ) στον Otto
 - Απώλειες θέρμανσης στην εισαγωγή για εξατμηση καυσίμου
 - Περισσότερο κατάλοιπο καυσαέριο.



Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Ογκομετρικός β.α:

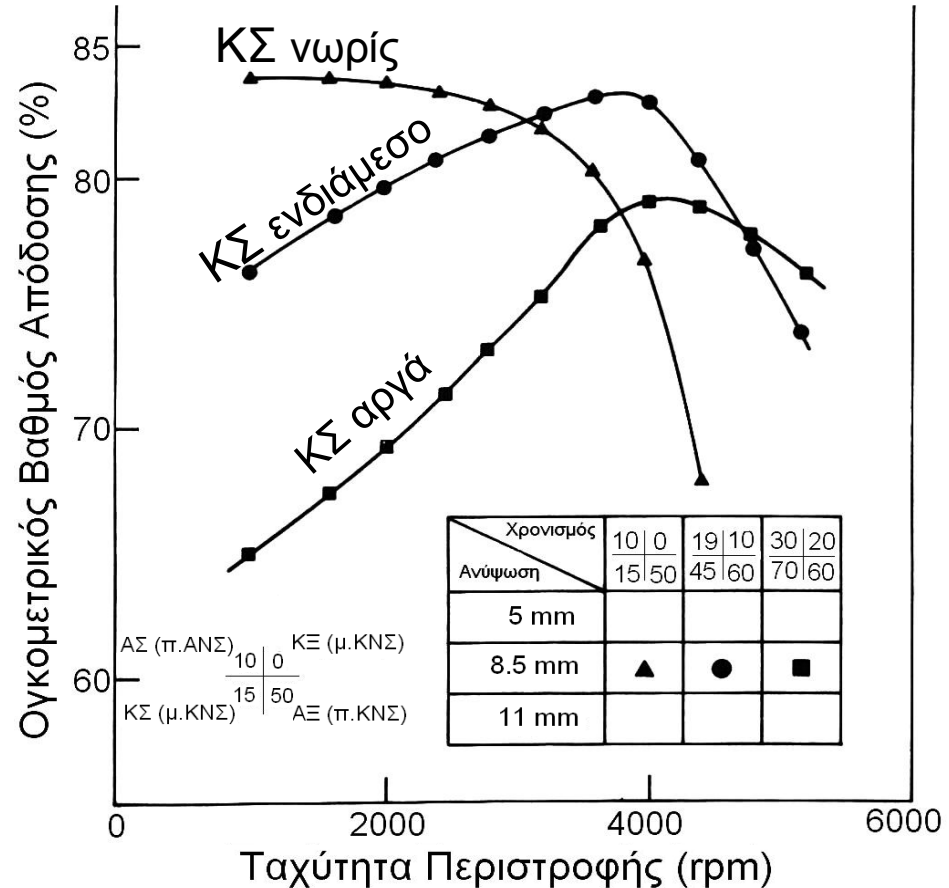
- Επιδράσεις διάφορων παραγόντων στη διαμόρφωση του ογκομετρικού β.α



Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Ογκομετρικός β.α:

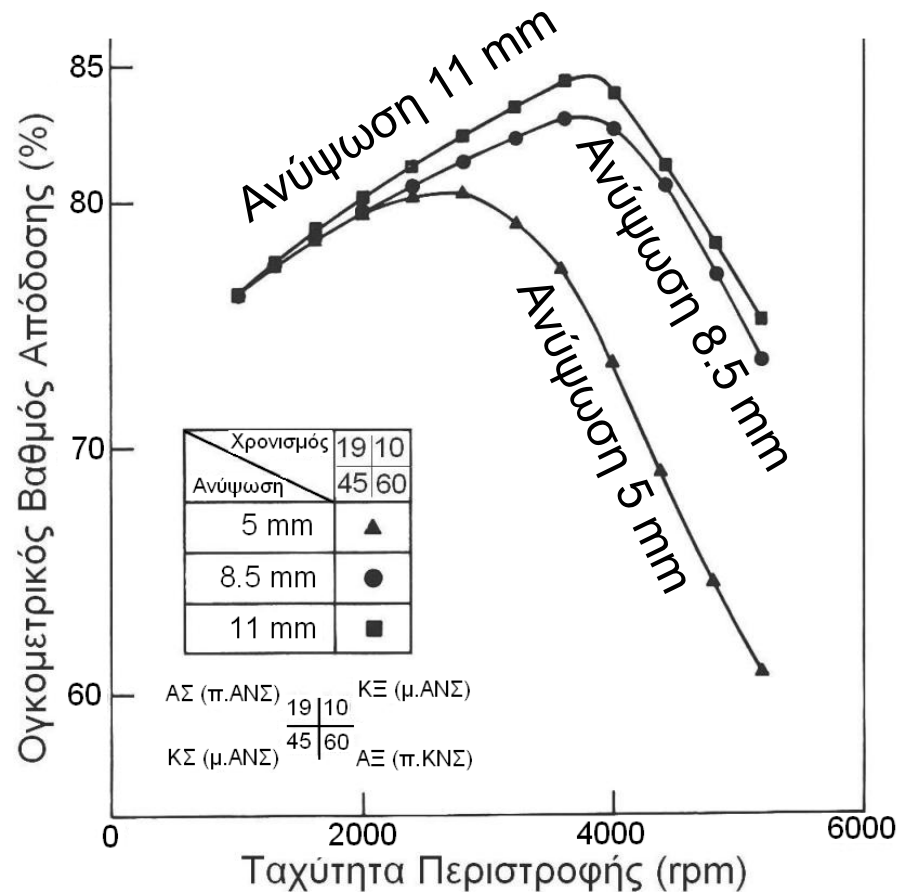
- Εξάρτηση του ογκομετρικού βαθμού απόδοσης από χρονισμό/ ανύψωση βαλβίδων:
- Επίδραση χρονισμού βαλβίδας εισαγωγής
- Κλείσιμο νωρίς → μεγιστοποίηση η_{vol} σε χαμηλότερες ταχύτητες περιστροφής



Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Ογκομετρικός β.α:

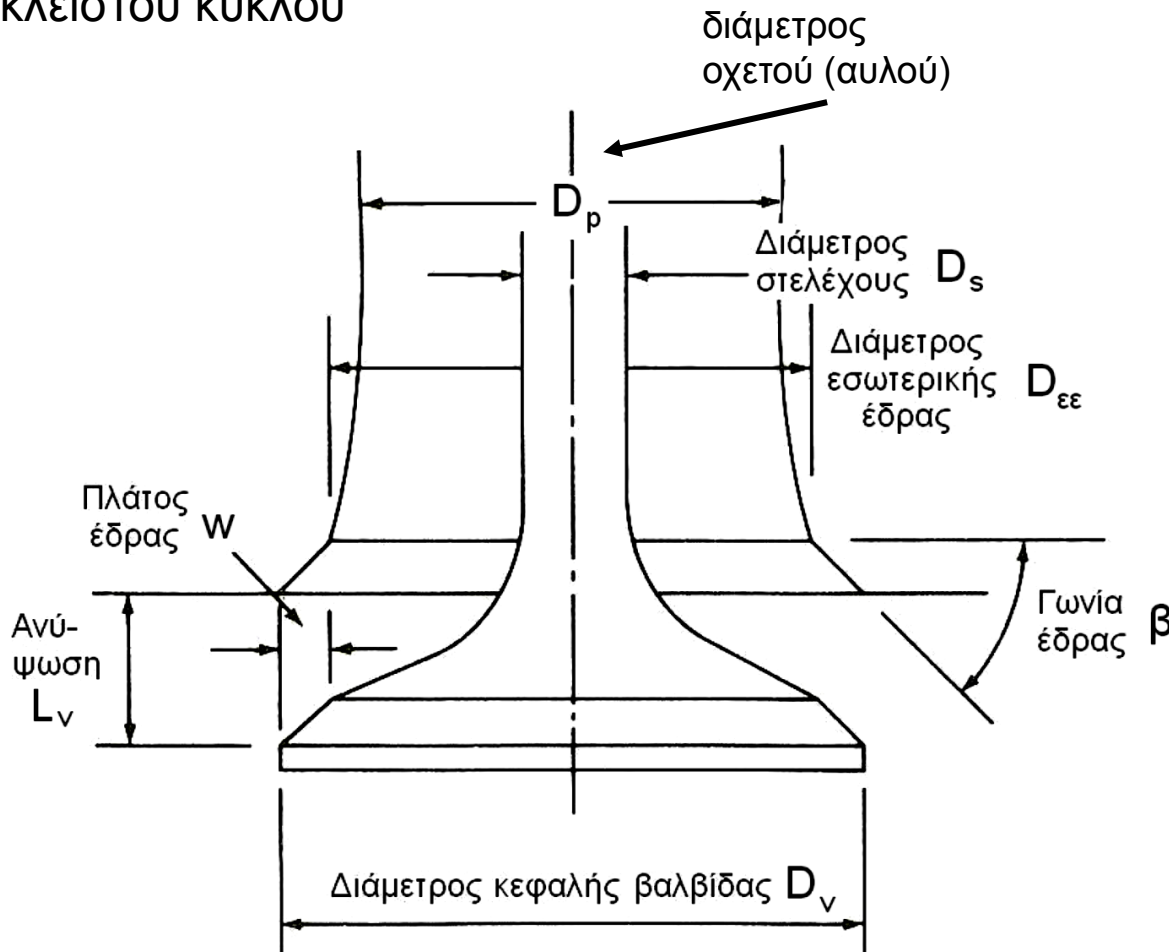
- Εξάρτηση του ογκομετρικού βαθμού απόδοσης από χρονισμό/ ανύψωση βαλβίδων:
 - Επίδραση ανύψωσης βαλβίδας εισαγωγής
 - Όσο αυξάνει η ανύψωση → αύξηση n_{vol}



Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Βαλβίδες εισαγωγής/ εξαγωγής:

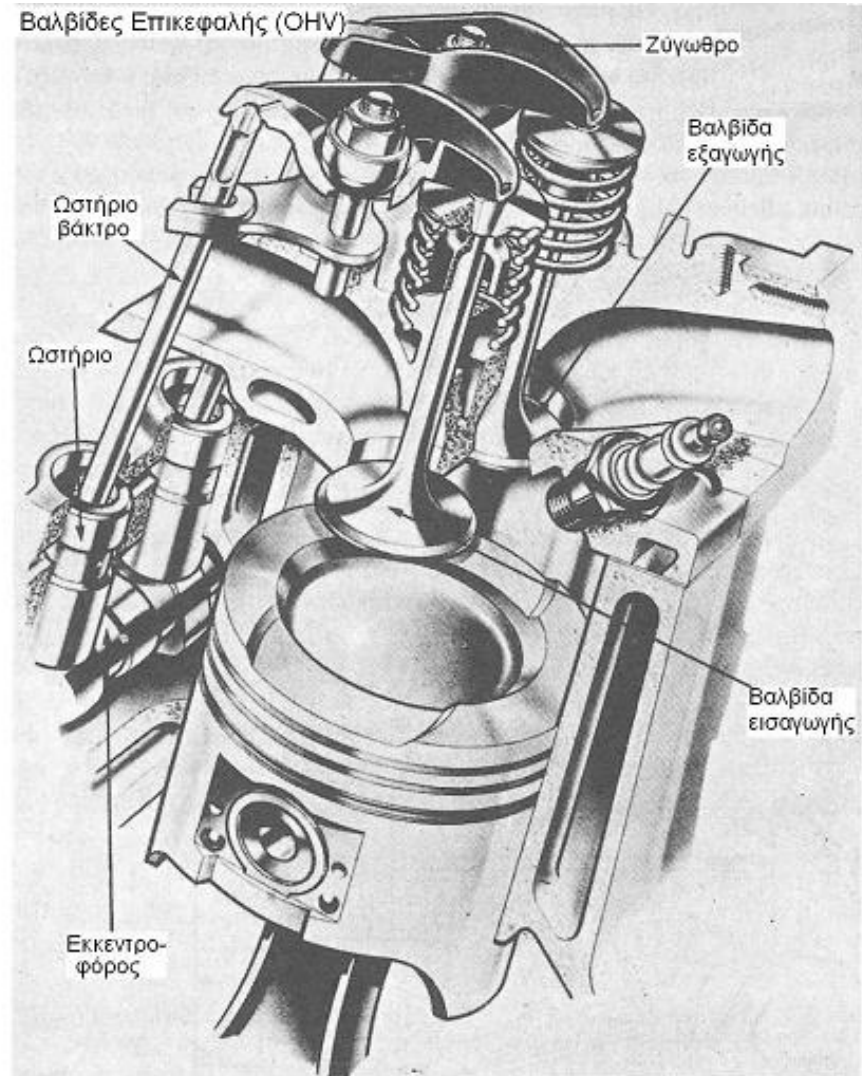
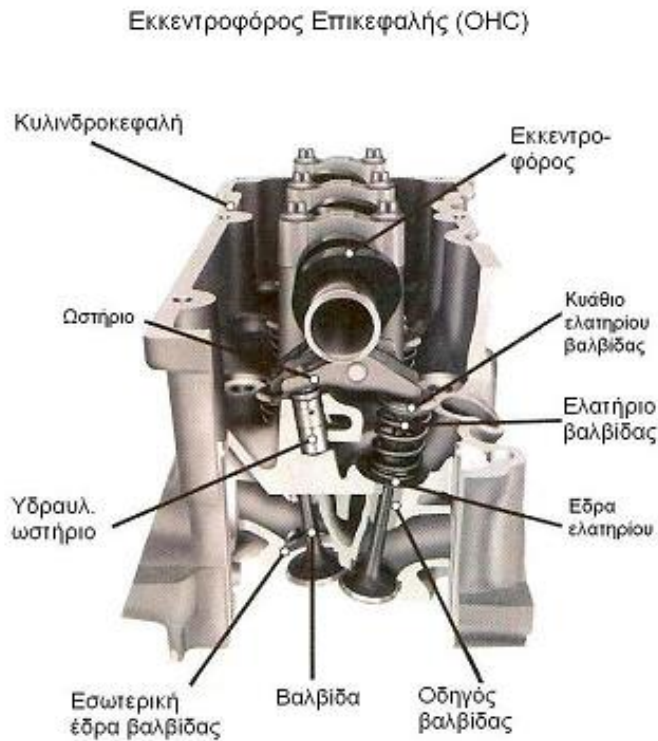
- Χαρακτηριστικά βαλβίδας:
 - Άνοιγμα μέσω ωστηριου (με επενεργηση έκκεντρου)
 - Κλείσιμο με ελατήριο το οποίο κρατά τη βαλβίδα κλειστή κατά τη διάρκεια του κλειστού κύκλου



Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Βαλβίδες εισαγωγής/ εξαγωγής:

- Σύστημα κυλινδροκεφαλής-βαλβιδας-εκκεντρου-ωστηριου



Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Βαλβίδες εισαγωγής/ εξαγωγής:

- Τυπικές διαστάσεις βαλβίδων εισαγωγής/ εξαγωγής συναρτήσει διαμέτρου εμβόλου.

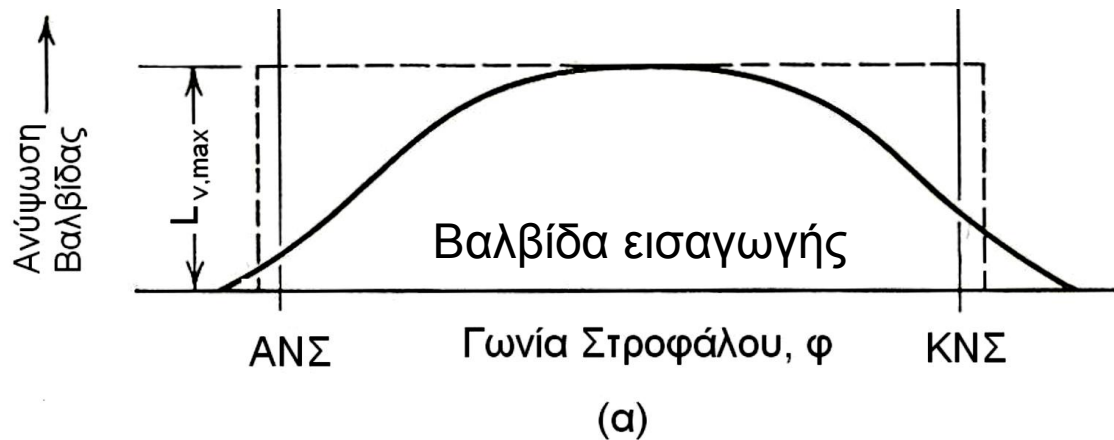
Σχήμα θαλάμου καύσης	D_v , εισαγωγής	D_v , εξαγωγής	Μέγιστη ταχ. εμβόλου (m/s) στη μέγιστη ισχύ
Σφηνοειδής ή κοιλότητας καλύμματος κυλίνδρου	0,43–0,46 D	0,35–0,37 D	15
Κοιλότητας εμβόλου	0,42–0,44 D	0,34–0,37 D	14
Ημισφαιρικός	0,48–0,50 D	0,41–0,43 D	18
Τετραβάλβιδος στεγοειδής (pentroof)	0,35–0,37 D	0,28–0,32 D	20

- Οι βαλβίδες εξαγωγής είναι μικρότερες από τις βαλβίδες εισαγωγής, αφού σημαντικό μέρος της εξαγωγής του καυσαερίου γίνεται είτε υπό σημαντική διαφορά πίεσης (φάση εκροής) είτε με τη βοήθεια της εκτοπιστικής δράσης του εμβόλου (φάση εξώθησης)

Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Βαλβίδες εισαγωγής/ εξαγωγής:

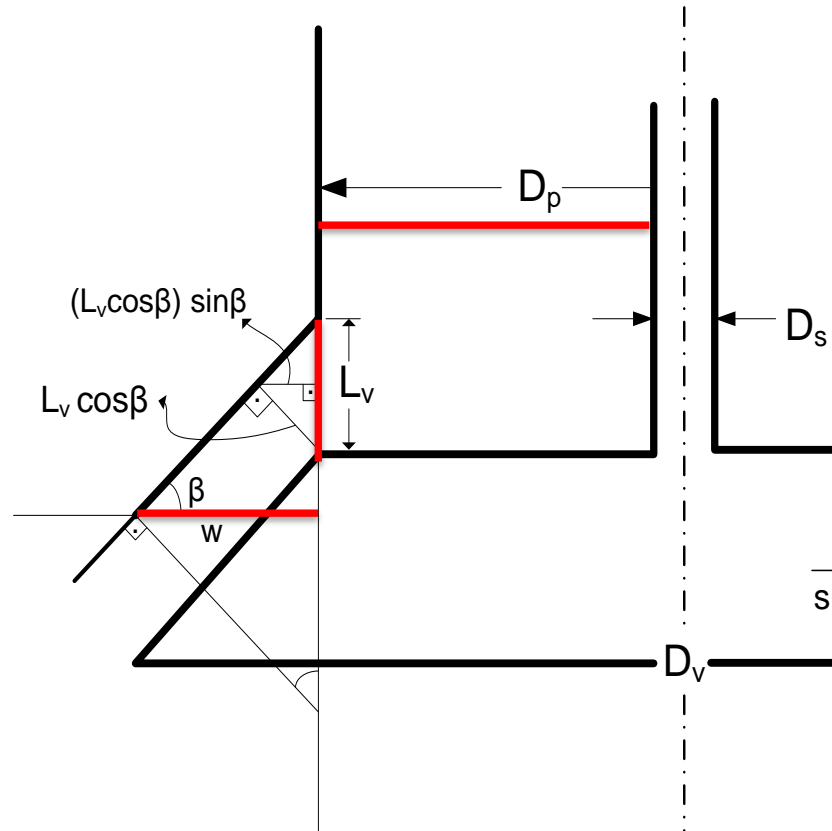
- Επιφάνεια ροής διαμέσου βαλβίδας:
 - Ιδεατή ανύψωση εισαγωγής= «τετραγωνικής» μορφής (ακαριαίο άνοιγμα/ κλείσιμο) → Απειρισμος επιταχύνσεων/ δυνάμεων → Στην πράξη σταδιακό άνοιγμα/ κλείσιμο



Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Βαλβίδες εισαγωγής/ εξαγωγής:

- Στιγμαιαία επιφάνεια ροής εξαρτάται από την διάμετρο- ανύψωση- γεωμετρία της βαλβίδας
- Η ελάχιστη διατομή μπορεί να εμφανιστεί σε τρία διαφορετικά σημεία ανάλογα με την ανύψωση της βαλβίδας



Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Βαλβίδες εισαγωγής/ εξαγωγής:

- Στάδια ανύψωσης βαλβίδας:

L_v : ανύψωση

A_v : ελάχιστη γεωμετρική επιφάνεια

- 1^ο στάδιο ('μικρή' ανύψωση)

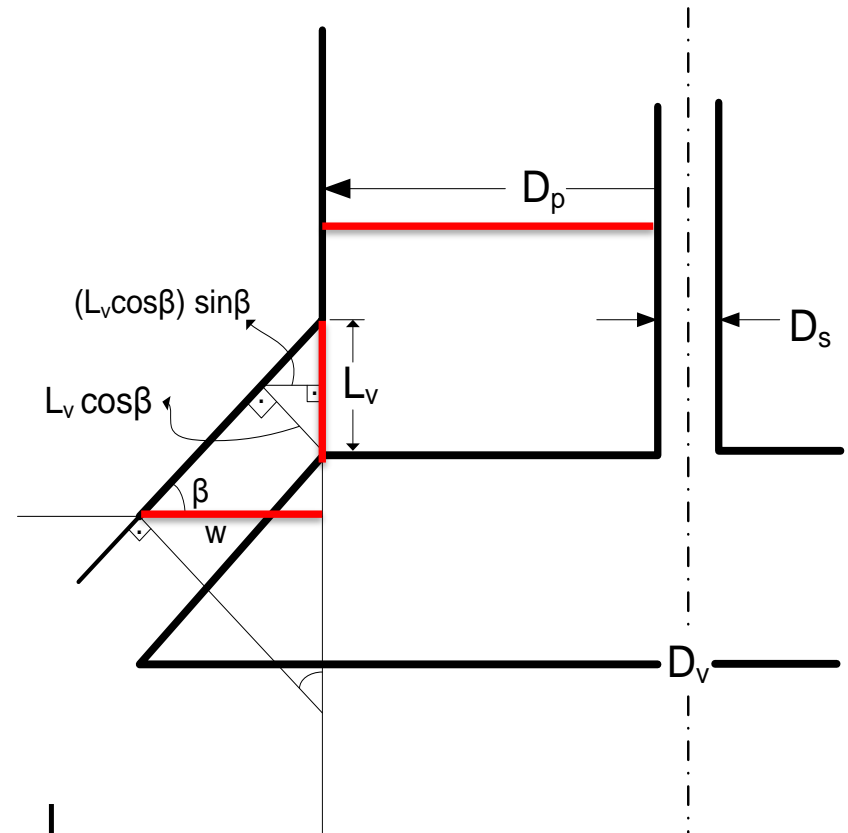
$$\text{Εάν } \frac{w}{\sin\beta \cos\beta} > L_v > 0$$

Τότε:

$$A_v = \pi L_v \cos\beta \left(D_v - 2w + \frac{L_v}{2} \sin 2\beta \right)$$

Π.χ. με $\beta=45^\circ$ και $w=D_p/16$

$$0 < L_v / D_p < 0,125 \quad \text{και} \quad A_v = \frac{\pi L_v}{\sqrt{2}} \left(D_p + \frac{L_v}{2} \right)$$



Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Βαλβίδες εισαγωγής/ εξαγωγής:

- Στάδια ανύψωσης βαλβίδας:

L_v : ανύψωση

A_v : ελάχιστη γεωμετρική επιφάνεια

- 2^ο στάδιο ('ενδιάμεση' ανύψωση)

Εάν

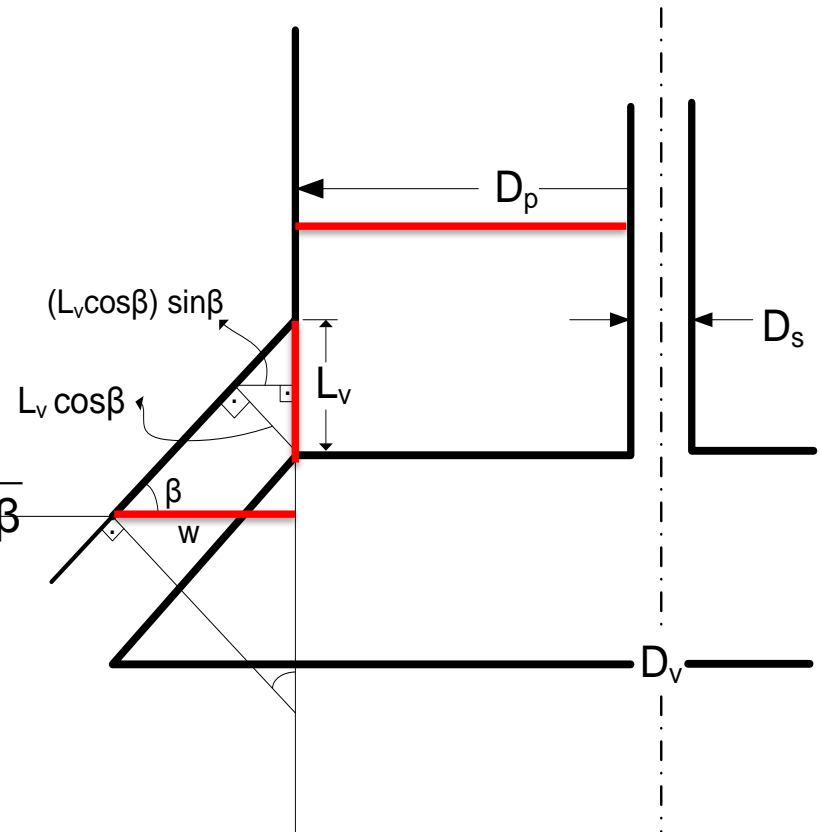
$$\left[\left(\frac{D_p^2 - D_s^2}{4D_m} \right)^2 - w^2 \right]^{1/2} + w \tan \beta \geq L_v > \frac{w}{\sin \beta \cos \beta}$$

Τότε:

$$A_v = \pi D_m \left[(L_v - w \tan \beta)^2 + w^2 \right]^{1/2}$$

Π.χ. με $\beta=45^\circ$ και $w=D_p/16$ και $D_s=D_p/4$

$$0,125 < L_v / D_p < 0,2735 \quad \text{και} \quad A_v = \frac{17}{16} \pi D_p \left[L_v^2 - \frac{L_v D_p}{8} + \frac{D_p^2}{128} \right]^{1/2}$$



Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Βαλβίδες εισαγωγής/ εξαγωγής:

- Στάδια ανύψωσης βαλβίδας:

L_v : ανύψωση

A_v : ελάχιστη γεωμετρική επιφάνεια

- 3^ο στάδιο ('τελική' ανύψωση)

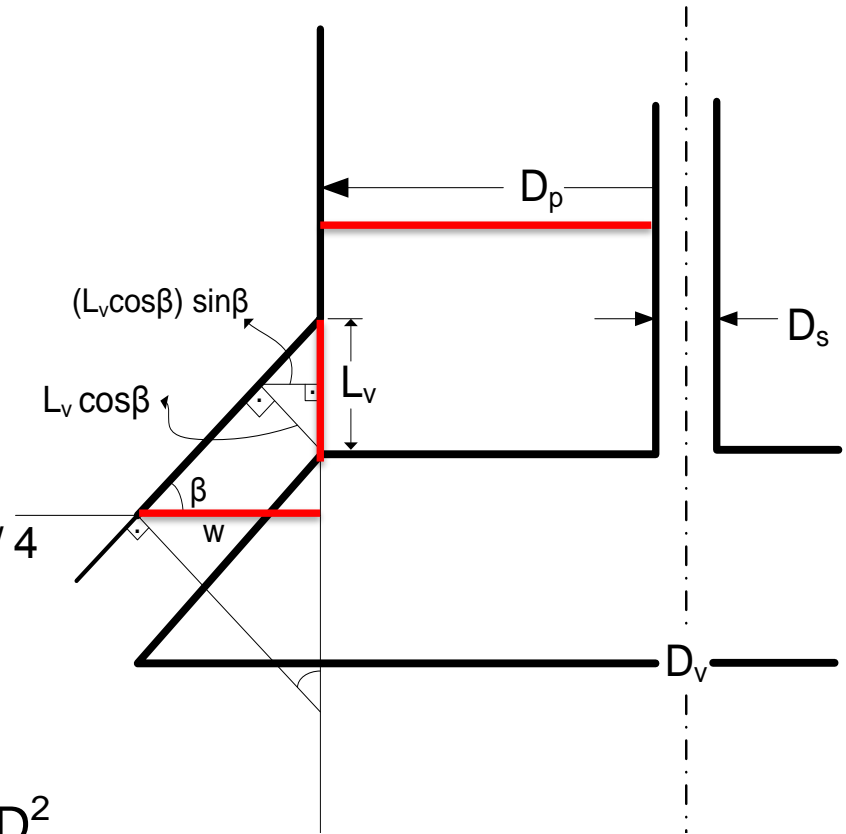
Εάν

$$L_v > \left[\left(\frac{D_p^2 - D_s^2}{4D_m} \right)^2 - w^2 \right]^{1/2} + w \tan \beta, \text{ ή}$$

$$L_v / D_p > 0,2735 \text{ για } \beta = 45^\circ \text{ } w = D_p / 16, D_s = D_p / 4$$

Τότε:

$$A_v = \frac{\pi}{4} (D_p^2 - D_s^2) \approx \frac{\pi}{4} (D_p^2 - D_p^2 / 16) = 0,736 D_p^2$$



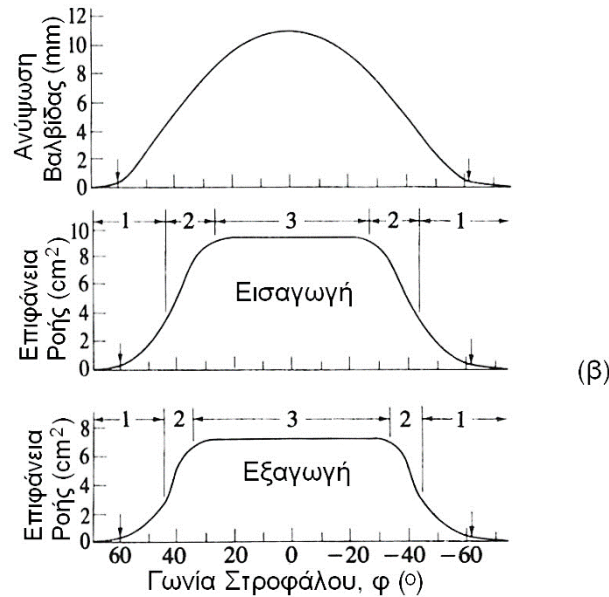
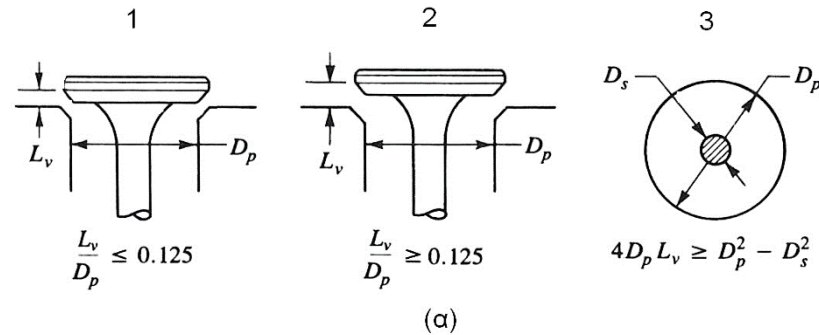
Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Βαλβίδες εισαγωγής/ εξαγωγής:

- Στάδια ανύψωσης βαλβίδας:

L_v : ανύψωση

A_v : ελάχιστη γεωμετρική επιφάνεια



Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

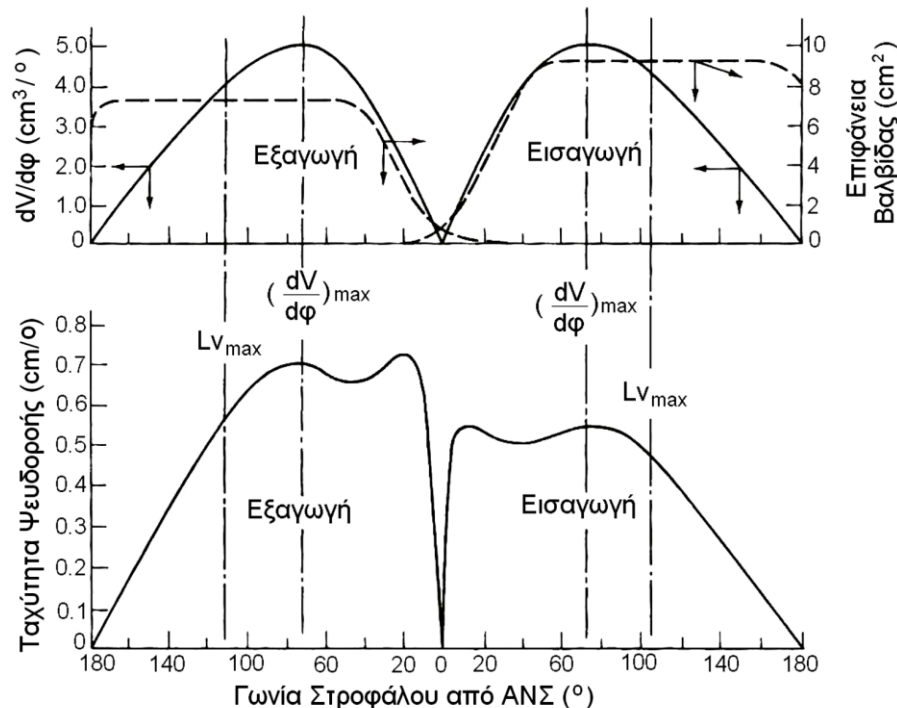
Βαλβίδες εισαγωγής/ εξαγωγής:

- Γεωμετρία και χρονισμός βαλβίδων επηρεάζουν την ροή αερίων

- Ταχύτητα ψευδοροής:

$$u_{ps} = \frac{1}{A_V} \frac{dV}{d\phi} = \frac{\pi D^2}{4A_V} \frac{dX}{d\phi} = \frac{A_\varepsilon}{A_V} c(\phi)$$

- Πρώτο μέγιστο στη μέγιστη ταχύτητα εμβόλου
- Δεύτερο μέγιστο κοντά στο ΑΝΣ λόγω πολύ χαμηλής τιμής ανύψωσης βαλβίδας
- Για την εξαγωγή → Υψηλή ταχύτητα ψευδοροής → Υψηλές απώλειες στην πραγματική ροή → παγίδευση ποσότητας παραμένουστος καυσαερίου



Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Βαλβίδες εισαγωγής/ εξαγωγής:

- Παροχή μάζας διαμέσου βαλβίδας:
 - Η ροής διαμέσω βαλβίδας μπορεί να εξιδανικευθεί στην **ισεντροπική συμπιεστή ροή μέσω ακροφυσίου**, με την παροχή μάζας να δίδεται από τον ακόλουθο τύπο.

$$\dot{m} = \frac{c_d A_v p_u}{\sqrt{RT_u}} \left(\frac{p_d}{p_u} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{p_d}{p_u} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]} \quad \text{Για υποηχητική ροή: } p_d / p_u \geq [2 / (\gamma + 1)]^{\gamma/(\gamma-1)}$$

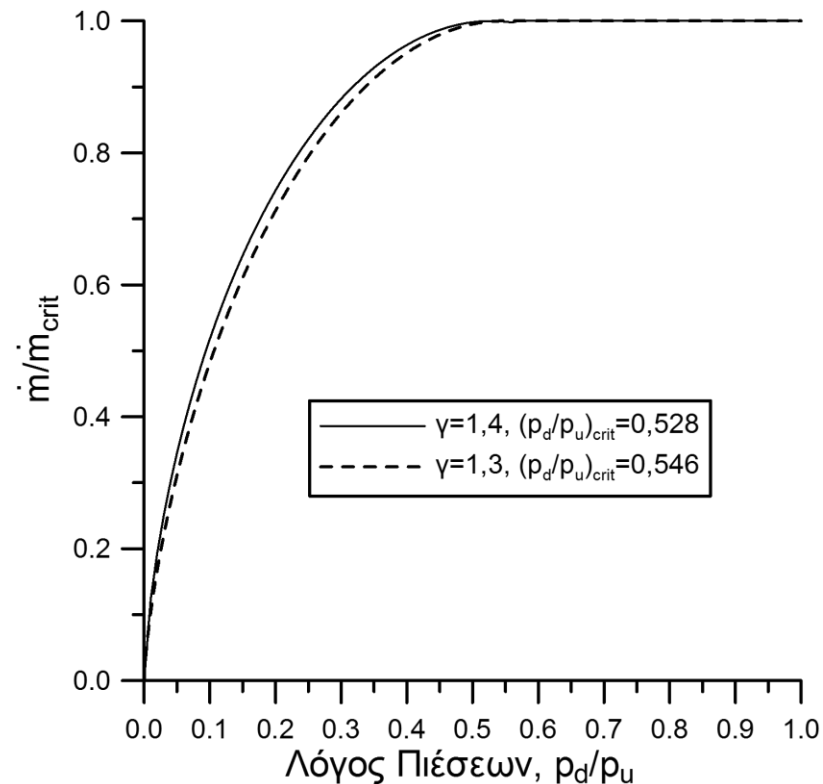
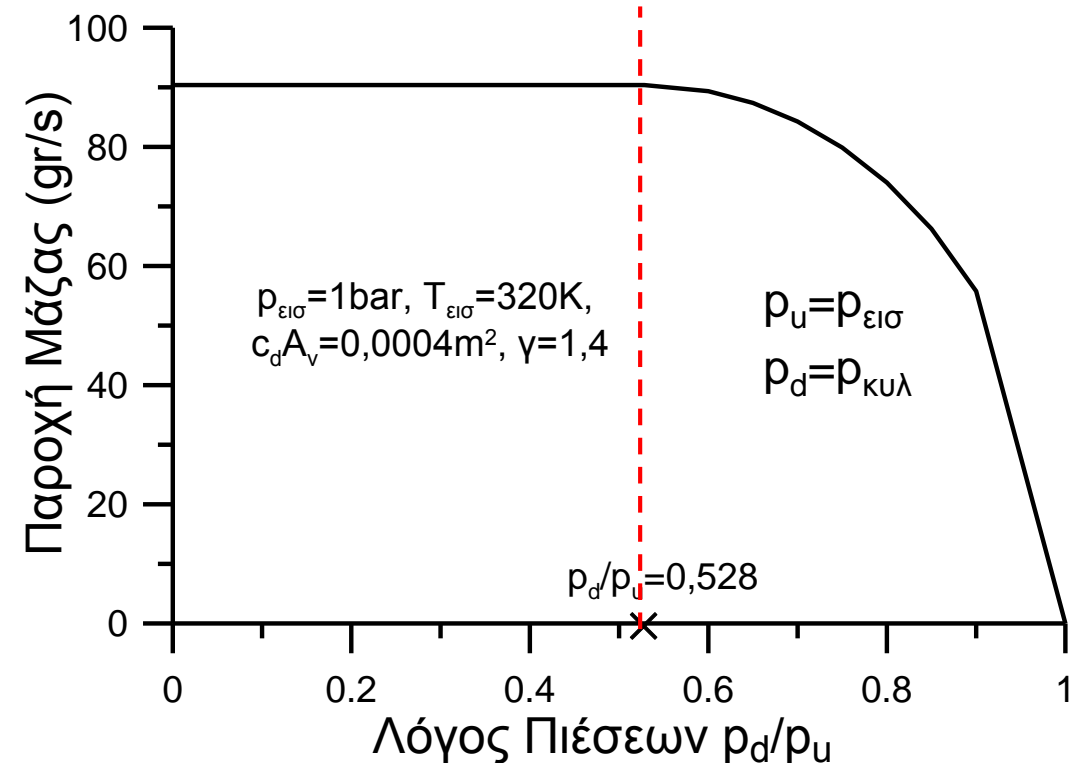
$$\dot{m}_{\text{crit}} = \frac{c_d A_v p_u}{\sqrt{RT_u}} \sqrt{\gamma \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad \text{Για υπερηχητική ροή: } p_d / p_u \leq [2 / (\gamma + 1)]^{\gamma/(\gamma-1)}$$

- Αν είναι η στιγμιαία γεωμετρική επιφάνεια, $C_d A_v$ είναι η ενεργός επιφάνεια ροής και **C_d ο συντελεστής εκροής**
- C_d εξαρτάται από τριβές, αποκολλήσεις ροής και δευτερεύουσες ροές

Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Βαλβίδες εισαγωγής/ εξαγωγής:

- Παράδειγμα εφαρμογής σχέσης συμπιεστής ισεντροπικής ροής
 - Για δεδομένες συνθήκες εισόδου, η παροχή μαζας μετά τον κρίσιμο λόγο πίεσης ανεξάρτητη της κατάντι πίεσης P_d
 - Πολύ μικρή εξάρτηση από γ



Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Βαλβίδες εισαγωγής/ εξαγωγής:

- Περίοδος επικάλυψης των βαλβίδων:
 - Ισοδύναμη επιφάνεια ροής
 - Παραδοχές
 - Ασυμπίεστη ροή.
 - Βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής: ίδιο Cd
 - Κινητική ενέργεια στην πρώτη βαλβίδα πλήρως καταστρεφόμενη

$$A_{V,eq} = \frac{A_{V,εισ} A_{V,εξ}}{\sqrt{A_{V,εισ}^2 + A_{V,εξ}^2}}$$

Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Βαλβίδες εισαγωγής/ εξαγωγής:

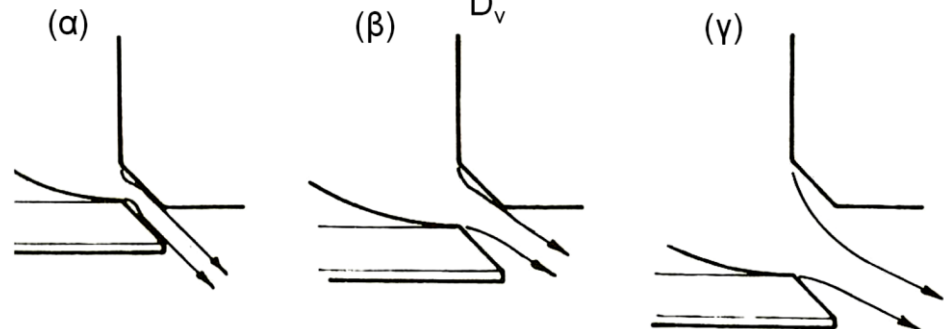
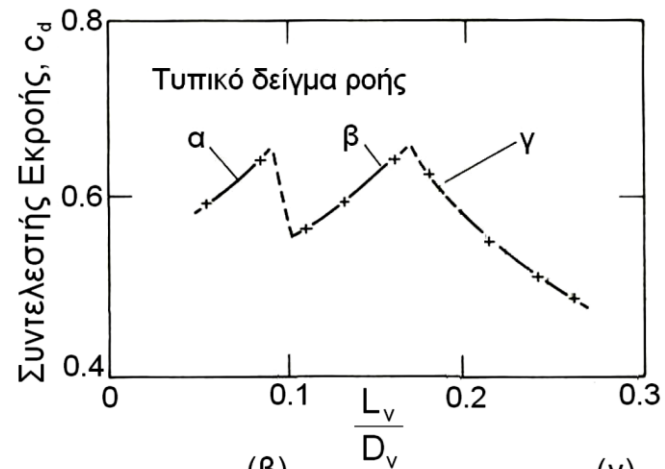
Γεωμετρική επιφάνεια ροής:

- Για την επιφάνεια ροής στη σχέση υπολογισμού μάζας μπορεί να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές γεωμετρικές επιφάνειες:
 - Επιφάνεια κεφαλής βαλβίδας
 - Επιφάνεια οχετού εισαγωγής στη βαλβίδα
 - Επιφάνεια πετάματος $A_C = \pi D_V L_V$
- Συχνά χρησιμοποιούνται 2 βαλβίδες εξαγωγής και 2 εισαγωγής αντί για μία :
 - Μικρότερη μάζα βαλβίδας → γρηγορότερη ανύψωση
 - Μεγαλύτερη επιφάνεια ροής εξόδου/ εισόδου (θετική επίδραση)
 - Χαμηλότερες ταχύτητες ρευστού (αρνητική επίδραση)

Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Βαλβίδες εισαγωγής/ εξαγωγής: Συντελεστές εκροής:

- Τυπικές τιμές συντελεστή εκροής βαλβίδας εισαγωγής συναρτήσει το λόγου ανύψωσης/ διάμετρο βαλβίδας:
- Μεταβολή στη συμπεριφορά ανάλογα με τη μορφολογία της ροής
- Στην πράξη και άλλες παράμετροι επιδρούν σε Cd
 - Πλάτος έδρας
 - Γωνίες/ καμπυλότητα
 - Σχεδιασμός οχετού
 - Σχεδιασμός κυλινδροκεφαλής



Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Βαλβίδες εισαγωγής/ εξαγωγής:

- Ηχητική ροή διαμέσου την βαλβίδας εισαγωγής → δραματική μείωση ογκομετρικού β.α.
 - Η βαλβίδα πρέπει να διαστασιολογηθεί ώστε να αποφευχθεί αυτή η κατάσταση
 - Δεικτής αριθμού Mach με χρήση μέσης ταχύτητας ροής διαμέσου της βαλβίδας ($\alpha = \sqrt{\gamma RT}$ η ταχύτητα του ήχου):

$$Z = \frac{A_\varepsilon \bar{c}_\varepsilon}{\bar{c}_d A_v \alpha}$$

- Για τιμές $Z > 0.5 \rightarrow$ πτώση ογκομετρικού β.α
- Εναλλακτικά ορίζεται ο μέσος αριθμός Mach κατά την εισαγωγή

$$\bar{M} = \frac{\bar{u}}{\alpha}$$

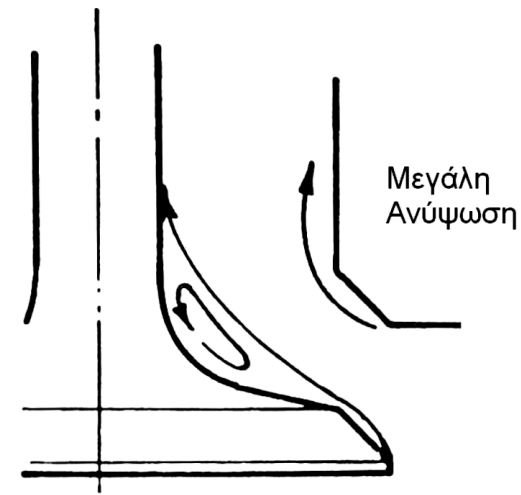
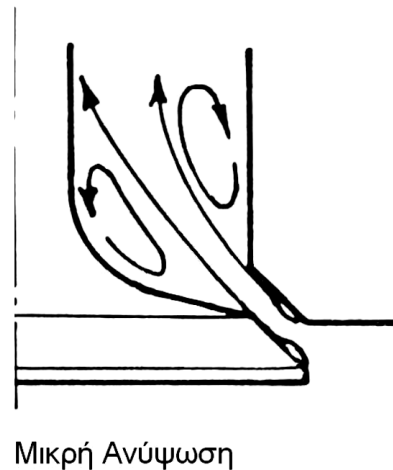
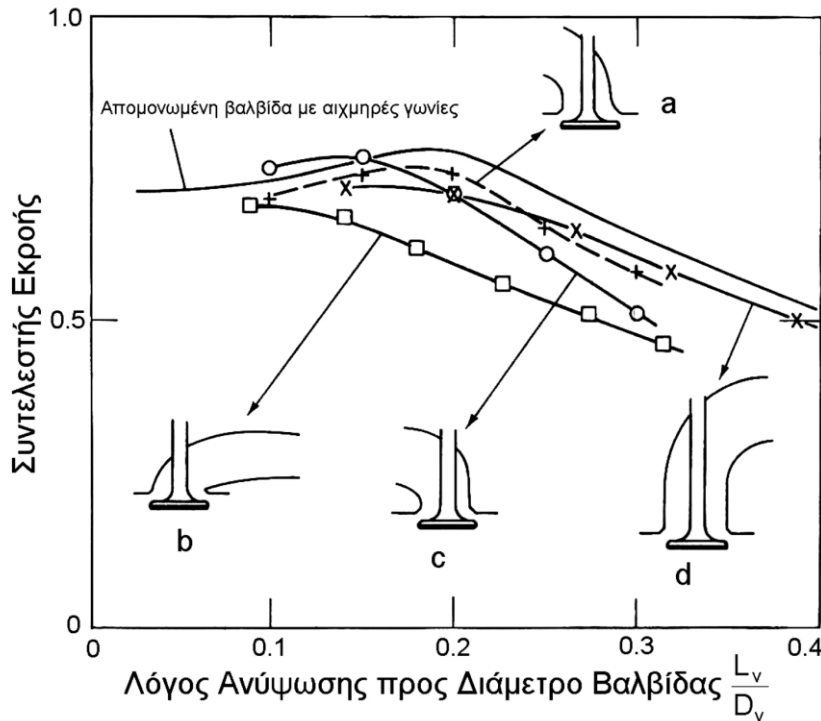
- συσχέτιση των μεγεθών Z και \bar{M}

$$\bar{M} = \frac{Z \cdot \eta_{vol} 180}{\varphi_{K\Sigma} - \varphi_{A\Sigma}}$$

Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

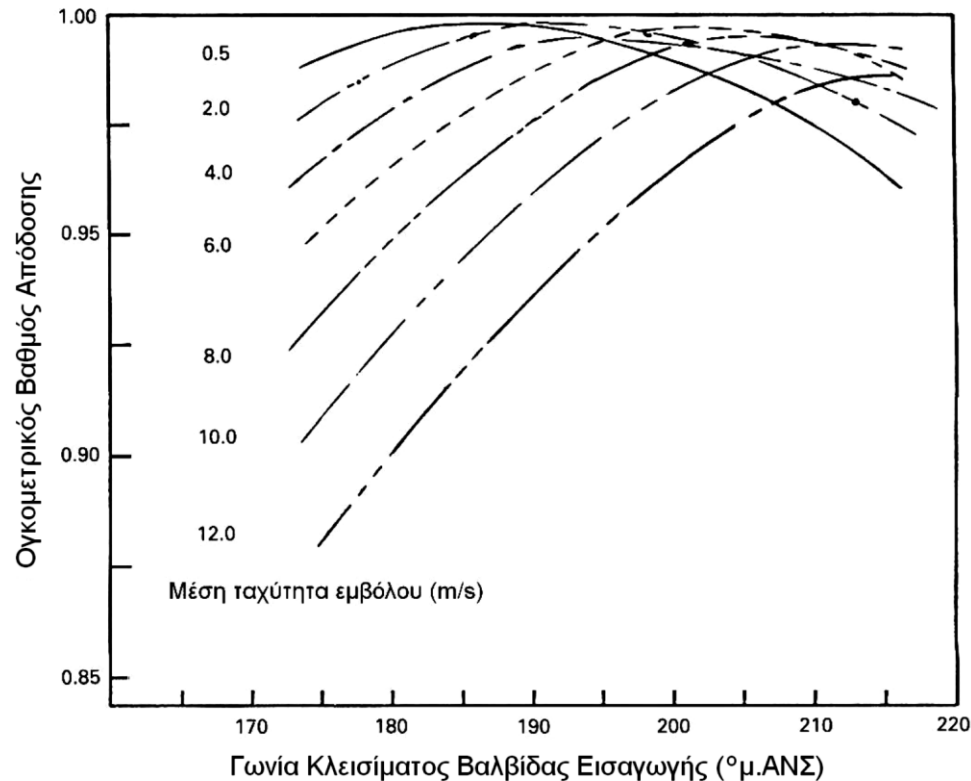
Βαλβίδες εισαγωγής/ εξαγωγής:

- Βαλβίδα εξαγωγής: Πολύ μικρότερη επίδραση στον ογκομετρικό β.α
 - Χαμηλή αντίσταση στη ροή επιθυμητή για ελαχιστοποίηση έργου εξωθήσεως.
 - Διαφορετική μορφή πεδίου ροής ανάλογα με ανύψωση βαλβίδας & εξάρτηση C_d από ανύψωση βαλβίδας (όπως και για τη βαλβίδα εισαγωγής)



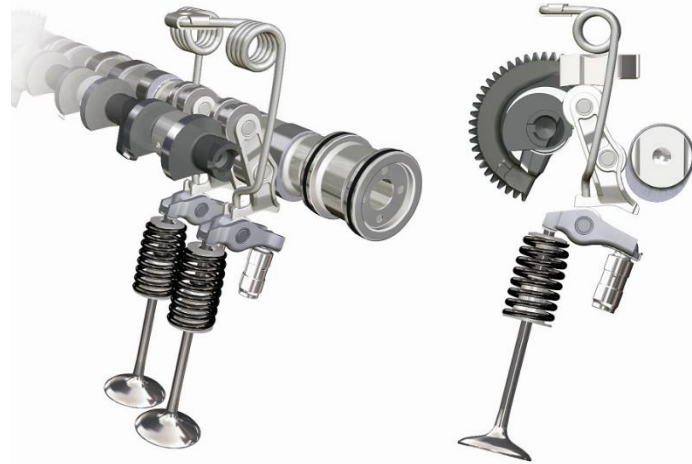
Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

- Συστήματα μεταβλητού χρονισμού/ ανύψωση βαλβίδων: Για κάθε ταχύτητα περιστροφής κινητήρα (μέση ταχύτητα εμβόλου) υπάρχει βέλτιστο σημείο κλεισίματος βαλβίδας εισαγωγής για $\max \eta_{vol}$
- Νωρίτερο κλείσιμο σε χαμηλές στροφές \rightarrow αύξηση η_{vol}



Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

- Συστήματα μεταβλητού χρονισμού/ ανύψωση βαλβίδων: Valvetronic της BMW



- Μοχλός μεταξύ εκκεντροφόρου και βαλβίδων εισαγωγής για την επιλογή του βέλτιστου χρονισμού.
- Η απόστασή του από τον εκκεντροφόρο άξονα να ρυθμίζεται συνέχεια από έναν έκκεντρο άξονα που παίρνει κίνηση από μικρό ηλεκτροκινητήρα.
- Μη-ανάγκη ύπαρξης ρυθμιστικής δικλείδας

Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

Κατάλοιπο (παραμένον) καυσαέριο

- Ποσοστό προϊόντων καύσης προηγούμενου κύκλου παραμένει στον κύλινδρο.
- Παράγοντες που επηρεάζουν το ποσοστό κατάλοιπου καυσαερίου:
 - Πίεση εισαγωγής/ εξαγωγής (μείωση πίεσης εξαγωγής/ αύξηση εξαγωγής αυξάνουν το κατάλοιπο καυσαέριο)
 - Βαθμός συμπίεσης (μείωση του αυξάνει το κατάλοιπο)
 - Επικάλυψη βαλβίδων (εξάρτηση επίδρασης από πιέσεις εισαγωγής εξαγωγής και χρονισμό)
 - Ταχύτητα περιστροφής
 - Ποιότητα διαδικασίας εναλλαγής αερίων γενικά (χρονισμός/ ανύψωση βαλβίδων)
- Αύξηση παραμένοντος καυσαερίου → μείωση ογκομετρικού β.α
- Περισσότερο κατάλοιπο σε Otto σε χαμηλό φορτίο. Σε Diesel μικρό ποσοστό κατάλοιπου
- Υπολογίζεται πειραματικά από μέτρηση συγκέντρωσης CO₂ κατά την συμπίεσης και εξαγωγή:

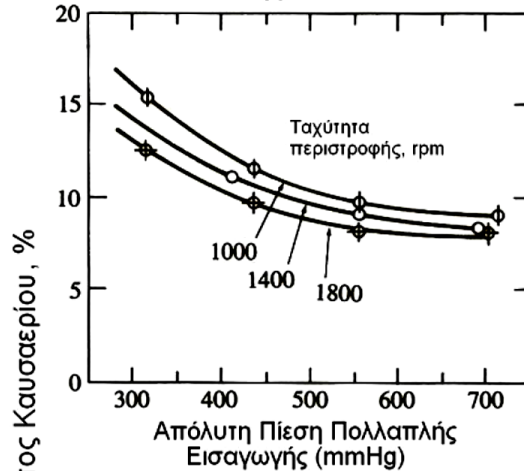
$$f_r = \frac{(x_{\text{CO}_2})_c}{(x_{\text{CO}_2})_e}$$

Εναλλαγή Αερίων σε 4-Χ Κινητήρες

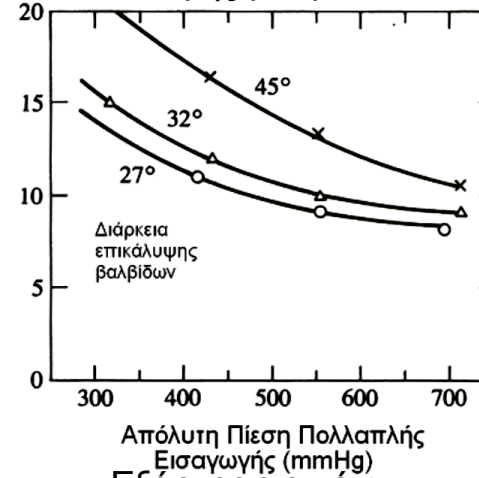
Κατάλοιπο (παραμένον) καυσαέριο

- Πειραματικές συσχετίσεις για κατάλοιπο καυσαέριο σε κινητήρα Otto

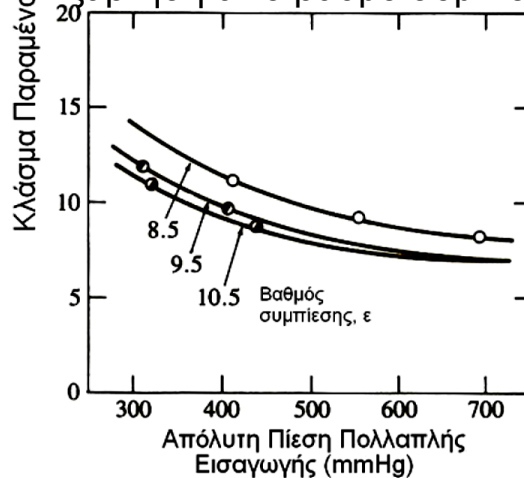
Εξάρτηση από ταχύτητα περιστροφής



Εξάρτηση από διάρκεια επικάλυψης βαλβίδων



Εξάρτηση από βαθμό συμπίεσης



Εξάρτηση από n_{vol}

