

## Κεφάλαιο 6: Πεδίο Ροής στο Εσωτερικό του Κυλίνδρου

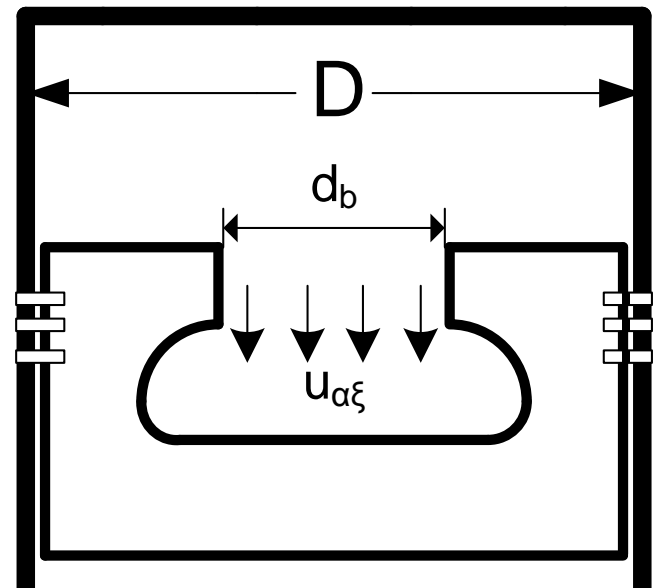
Δημήτριος Θ. Χουντάλας  
Καθηγητής ΕΜΠ  
(dx1961@central.ntua.gr)

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

# Κεφαλαίο 6: ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ

## Αξονική ταχύτητα ροής εντός κοιλότητας εμβόλου

- Απλοϊκό μοντέλο με τις ακόλουθες παραδοχές:
  - Τέλειο αέριο.
  - σταθερή πυκνότητα εντός του κυλίνδρου
  - Ομοιόμορφο πεδίο ροής στην κοιλότητα
- Συσχέτιση ταχύτητας  $u_{αξ}$  με βασικές γεωμετρικές παραμέτρους κινητήρα



# Κεφαλαίο 6: ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ

## Αξονική ταχύτητα ροής εντός κοιλότητας εμβόλου-Μεθοδολογία

- Στιγμαίος όγκος εντός κυλίνδρου:

$$V(\varphi) = V_b + V_c + \frac{\pi D^2}{4} x(\varphi) = V_b + V_c + \frac{\pi D^2}{4} x(\varphi) \frac{V_h}{\frac{\pi D^2}{4} s}$$
$$\rightarrow V(\varphi) = V_b + V_c + V_h \left[ \frac{x(\varphi)}{2r} \right]$$

- Παραγωγή ως προς  $d\varphi$ :

$$\frac{dV(\varphi)}{d\varphi} = V_h \left[ \frac{c(\varphi)}{2\omega r} \right]$$

- Για κλειστό κύκλο αμελώντας διαρροές μάζας από Θάλαμο Καύσης (ΘΚ)

$$\rho(\varphi) = \frac{m_o}{V(\varphi)}$$

# Κεφαλαίο 6: ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ

## Αξονική ταχύτητα ροής εντός κοιλότητας εμβόλου-Μεθοδολογία

- Μεταβολή πυκνότητας με γωνία στροφάλου:

$$\frac{d\rho(\varphi)}{d\varphi} = -\frac{m_o}{V^2(\varphi)} \frac{dV(\varphi)}{d\varphi} = -\frac{\rho(\varphi)}{V(\varphi)} V_h \left[ \frac{c(\varphi)}{2\omega r} \right]$$

- Μεταβολή πυκνότητας με χρόνο :

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{d\rho}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dt} = -\frac{\rho(\varphi)}{V(\varphi)} V_h \left[ \frac{c(\varphi)}{2\omega r} \right] \omega = -\frac{\rho(\varphi)}{V(\varphi)} V_h \left[ \frac{c(\varphi)}{2r} \right]$$

- Μάζα / Παροχή μάζας προς την κοιλότητα εμβόλου:

$$m_b = V_b \rho(\varphi) \qquad \dot{m}_b = \frac{dm_b}{dt} = V_b \frac{d\rho}{dt}$$

# Κεφαλαίο 6: ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ

## Αξονική ταχύτητα ροής εντός κοιλότητας εμβόλου-Μεθοδολογία

- Τελικά για την ταχύτητα εισροής/ εκροής από κοιλότητα (bowl):

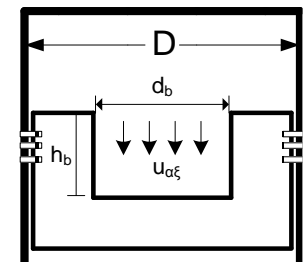
$$\dot{m}_b = V_b \frac{d\rho}{dt} = A_b \rho u_{\alpha\xi}(\varphi) = \frac{\pi}{4} d_b^2 \rho u_{\alpha\xi}(\varphi) \quad \frac{d\rho}{dt} = \frac{d\rho}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dt} = -\frac{\rho(\varphi)}{V(\varphi)} V_h \left[ \frac{c(\varphi)}{2\omega r} \right] \omega = -\frac{\rho(\varphi)}{V(\varphi)} V_h \left[ \frac{c(\varphi)}{2r} \right]$$

$$u_{\alpha\xi}(\varphi) = -V_b \frac{1}{V(\varphi)} V_h \left[ \frac{c(\varphi)}{2r} \right] \left( \frac{1}{\frac{\pi d_b^2}{4}} \right) = -\frac{\varepsilon_b \cdot s}{(d_b / D)^2} \frac{V_h}{V(\varphi)} \left[ \frac{c(\varphi)}{2r} \right]$$

Όπου ( $\varepsilon_b = V_b / V_h$ )

$$u_{\alpha\xi}(\varphi) = -h_b \frac{V_h}{V(\varphi)} \left[ \frac{c(\varphi)}{2r} \right] = -\frac{h_b}{d_b} \frac{d_b}{D} \frac{V_h}{V(\varphi)} \left[ \frac{c(\varphi)}{2r} \right] D$$

Για κυλινδρικό bowl

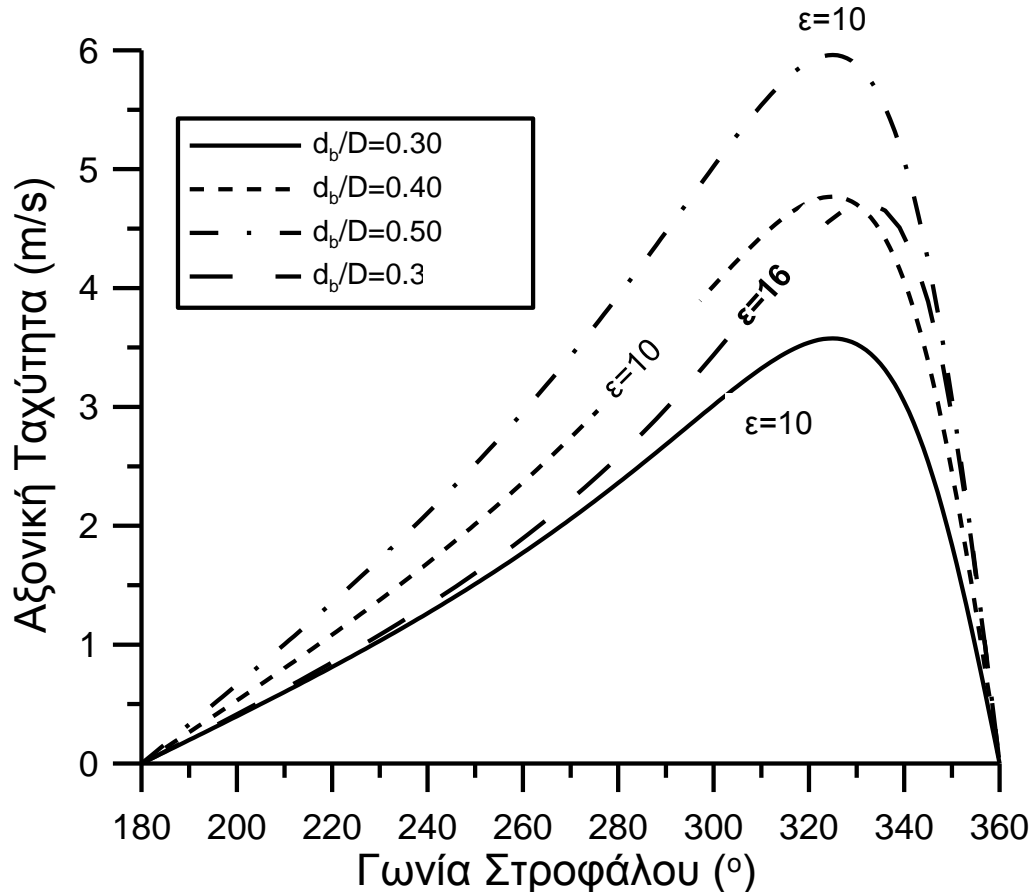


# Κεφαλαίο 6: ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ

## Αξονική ταχύτητα ροής εντός κοιλότητας εμβόλου- Παράδειγμα

- Γεωμετρικές διαστάσεις:

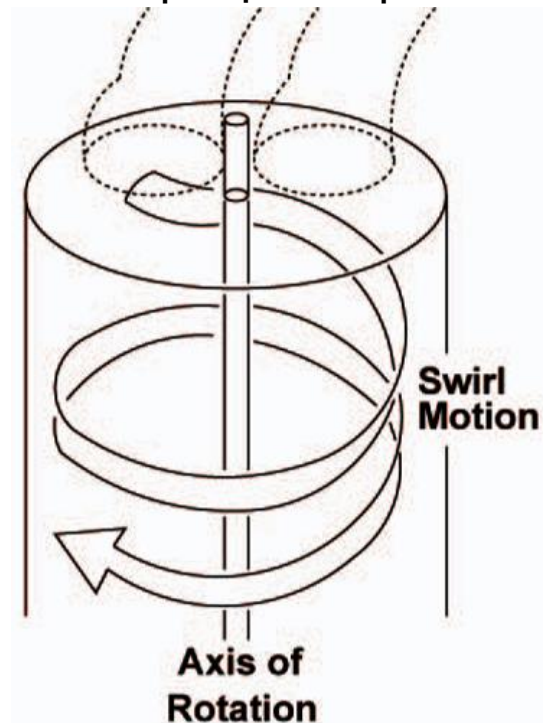
–  $D=0,1\text{m}$ ,  $s=0,11\text{m}$ ,  $\varepsilon=10$ ,  $d_b/h_b=2,5$ ,  $n=2000\text{rpm}$  και  $\lambda=r/L=0,33$



# Κεφαλαίο 6: ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ

## Συστροφή (Swirl)

- Περιστροφή φορτίου περί τον άξονα του κυλίνδρου:
  - Δημιουργείται κατά την εισαγωγή με χρήση καταλλήλων διατάξεων
  - Σε Diesel → Αυξηση ρυθμού ανάμειξης αέρα/ καυσίμου
  - Σε Otto → Αυξηση ταχύτητας μετώπου φλογας
  - Σε κινητήρες επίπεδου εμβόλου μειούται λόγω τριβών κατά τη συμπίεση
  - Bowl piston → Αυξηση swirl στο τέλος της συμπίεσης
  - Συχνότερα σε 4-Χ
  - Μείωση ογκομετρικού β.α
  - Αυξηση συναλλαγής θερμότητας με τοίχωμα
  - Ανάλογη με τη στροφορμή γόμωσης



# Κεφαλαίο 6: ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ

## Μέτρηση συστροφής/ Συντελεστής συστροφής

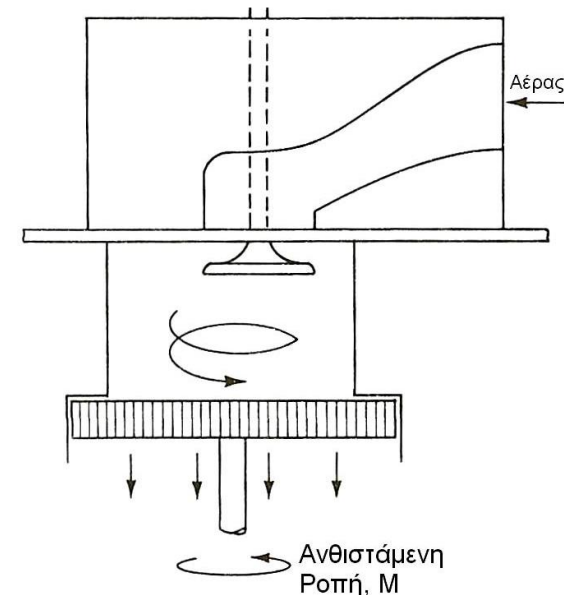
- Συντελεστής συστροφής **C<sub>s</sub>**: Σχέση στροφορμής με αξονική ορμή
- Πειραματική μέτρηση:
  - Paddle Wheel Anemometry :Μέτρηση στροφών σε περιστρεφόμενη πτερύγωση εντός του κυλίνδρου

$$C_s = \frac{\omega_p D}{u_o} \quad \text{Όπου } u_o \text{ η αξονική ταχύτητα}$$

$$u_o = \sqrt{\frac{2(p_o - p_{\text{κυλ}})}{\rho}}$$

- Μέτρηση ανθισταμένης ροπής σε στατική έλικα

$$C_s = \frac{8M}{\dot{m}u_o D} = \frac{8 \frac{d(\Theta \omega_s)}{dt}}{\dot{m}u_o D} = \frac{D^2 \omega_s (dm_o/dt)}{\dot{m}u_o D} = \frac{\omega_s D}{u_o}$$





# Κεφαλαίο 6: ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ

## Συστροφή σε 4-Χ κινητήρες

- Swirl δημιουργείται στη φάση της αναρρόφησης (Ανοιγμα-κλείσιμο βαλβίδας εισαγωγής)

- Μέση γωνιακή ταχύτητα swirl 
$$\omega_s = \left( \frac{8M}{\dot{m}D^2} \right) = \frac{8}{D^2} \cdot \frac{\int_{\text{ΑΣ}}^{\text{ΚΣ}} M d\varphi}{\int_{\text{ΑΣ}}^{\text{ΚΣ}} \dot{m} d\varphi}$$

- Λόγος Συστροφής (Swirl Ratio): 
$$R_s = \frac{\omega_s}{\omega}$$

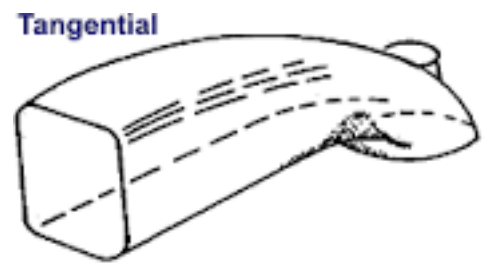
- Παραδοχές για υπολογισμό: 
$$R_s = \frac{\omega_s}{\omega} = \frac{1}{16} \pi n_{\text{vol}} D s \cdot \frac{\int_{\varphi_{\text{ΑΣ}}}^{\varphi_{\text{ΚΣ}}} c_d A_V C_s d\varphi}{\left[ \int_{\varphi_{\text{ΑΣ}}}^{\varphi_{\text{ΚΣ}}} c_d A_V d\varphi \right]^2}$$
  - Σταθερή πυκνότητα και ταχύτητα στη βαλβίδα
  - Αναφορά για  $n_{\text{vol}}$  συνθήκες εισαγωγής

Λόγος συστρόφησης ανεξάρτητος των λειτουργικών χαρακτηριστικών (π.χ. ταχύτητα περιστροφής) κινητήρα

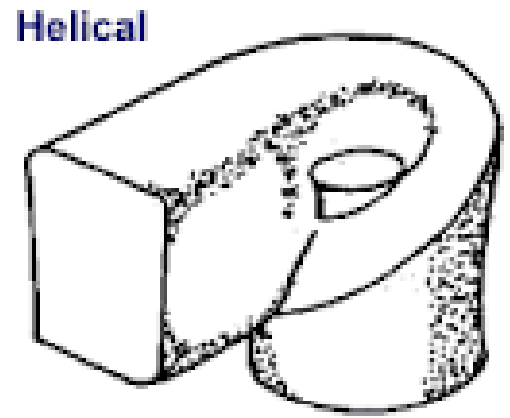
# Κεφαλαίο 6: ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ

## Δημιουργία συστροφής σε 4-Χ κινητήρες

- Εφαπτομενική εισαγωγή αερίου ως προς το τοίχωμα (tangential port)



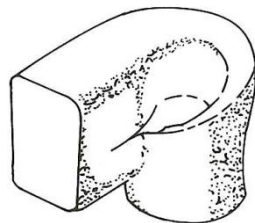
- Πρόσδοση συστροφής πρίν την είσοδο στον κύλινδρο (συνθέστερα τα ελικοειδη (helical) ports)



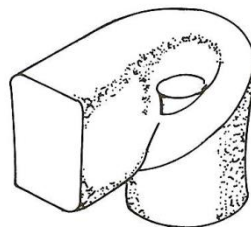
# Κεφαλαίο 6: ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ

## Συγκριση απόδοσης διατάξεων δημιουργίας συστροφής

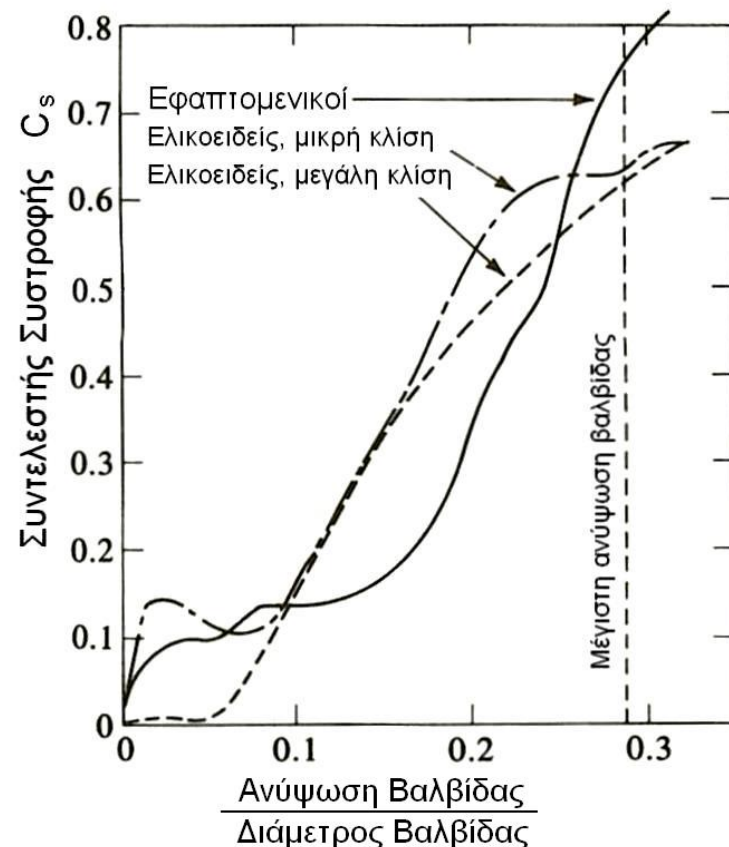
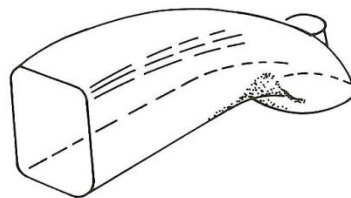
- Ελικοειδείς με μικρή κλίση:



- Ελικοειδείς με μεγάλη κλίση:



- Εφαπτομενικοί :



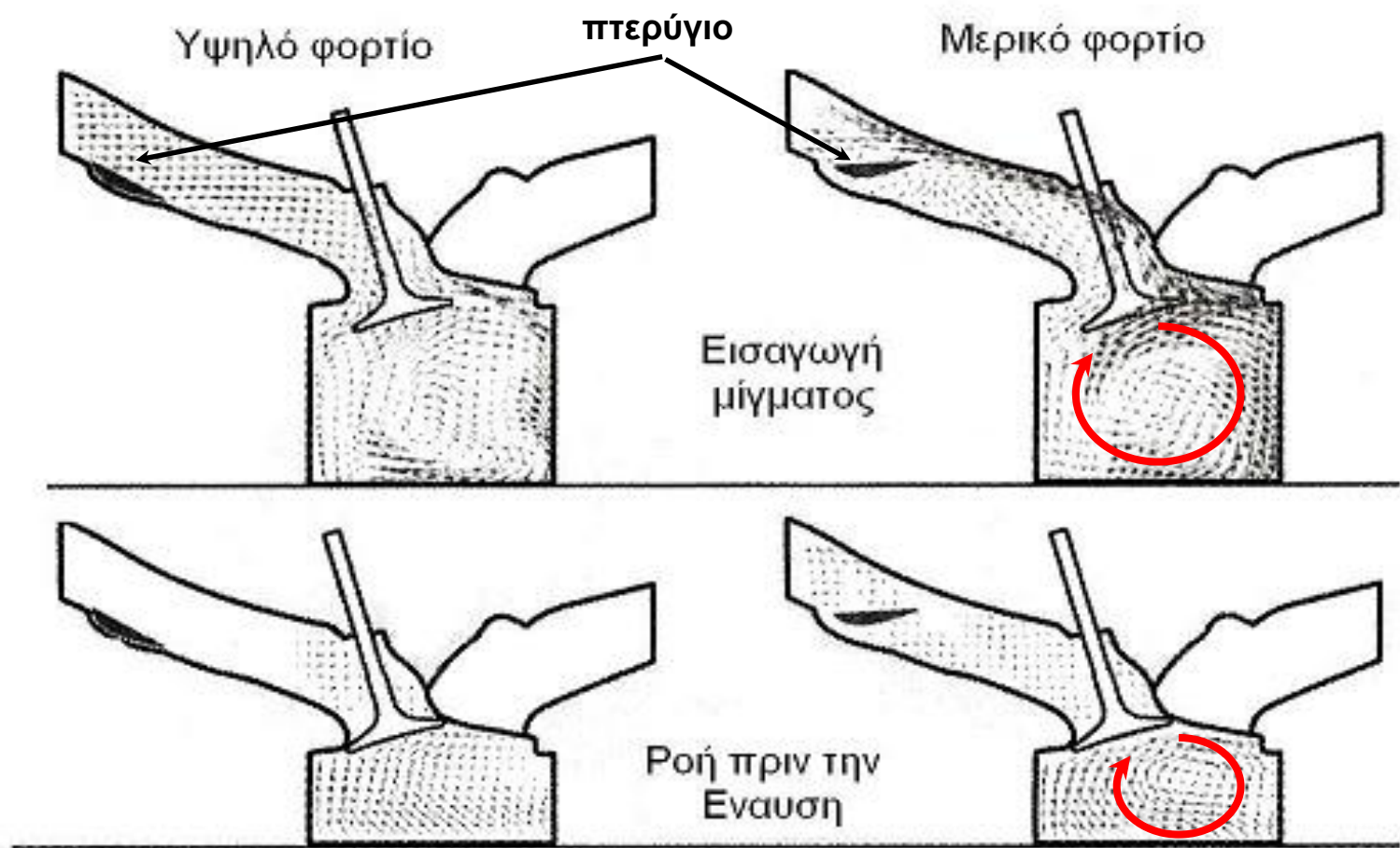
# Κεφαλαίο 6: ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ

## Πρόσδοση συστροφής με πτερύγια

- Κινητήρας Mercedes V6

Μικρή συστροφή

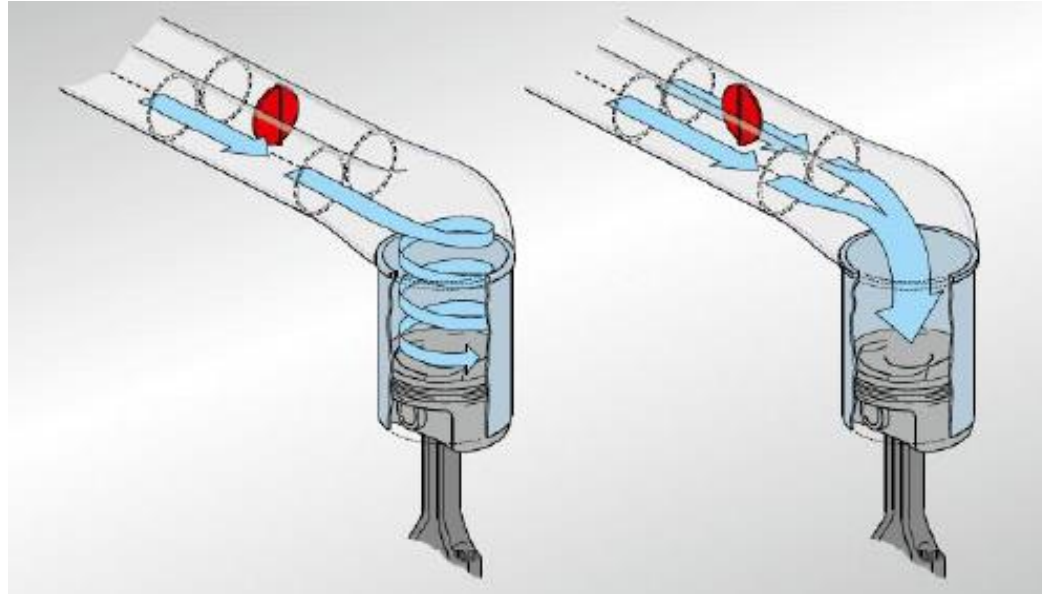
Έντονη συστροφή



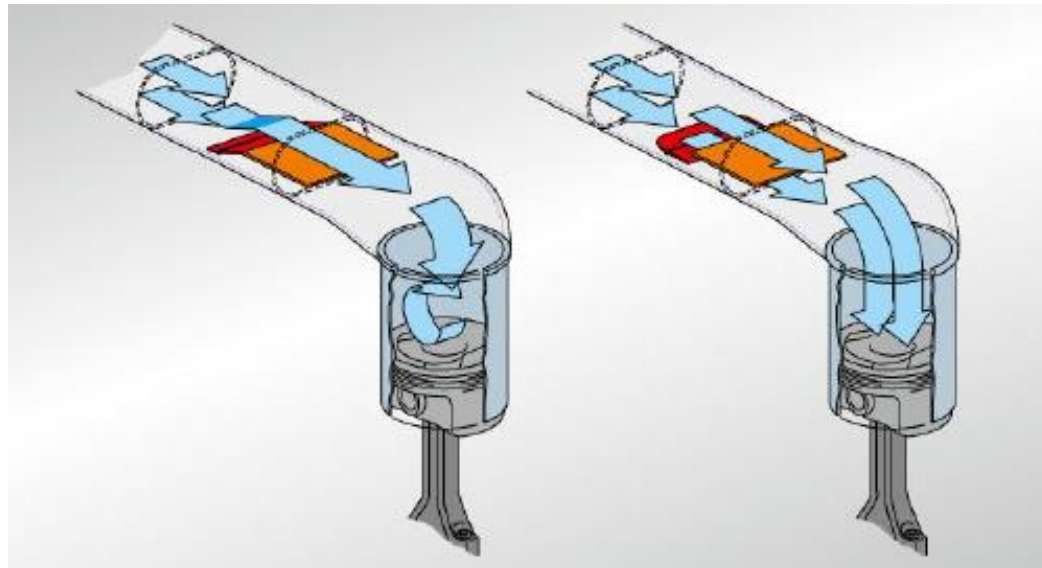
# Κεφαλαίο 6: ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ

## Πρόσδοση συστροφής

Swirl flaps



Tumble flaps



# Κεφαλαίο 6: ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ

## Στροφορμή αερίου

- Στροφορμή στοιχειώδους μάζας:  $d\Gamma = dm(\vec{r} \times \vec{u})$
- Συνολική στροφορμή:  $\Gamma(t) = \int \rho(\vec{r} \times \vec{u})dV$
- Για περιστροφή στερεού σώματος (solid body rotation) χωρίς τριβές και πηγές: Διατήρηση στροφορμής  $\Gamma = \Theta\omega = \text{σταθ}$
- Η στροφορμή μειώνεται κατά τη συμπίεση λόγω φαινομένων συνεκτικότητας:
  - Τριβή με τοιχώματα
  - Τυρβώδους διάχυσης
  - Απώλεια 35-35% της αρχικής μέχρι το τέλος της συμπίεσης
- Η συστροφή ( $\omega_s$ ) (προσοχη! :οχι η στροφορμή) αυξάνεται στο τέλος της συμπίεσης σε έμβολο με διαμόρφωση κοιλότητας

# Κεφαλαίο 6: ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ

## Στροφορμή αερίου: Ροή στη βαλβίδα εισαγωγής

- Διατήρηση στροφορμής:

( $\Theta = m_0 D^2 / 8$ )

$$\frac{d(\Theta \omega_s)}{dt} = \frac{d\Gamma}{dt} = \dot{\Gamma}_{\text{εισ}} - M_f$$

Ρυθμός εισόδου στροφορμής  
Ροπές τριβών

- Ανάλυση ταχύτητας διαμέσου βαλβίδας σε 3 συνιστώσες:

- Ακτινική  $u_r(\theta)$  και Περιφερειακή  $u_\theta(\theta)$
- Αξονική

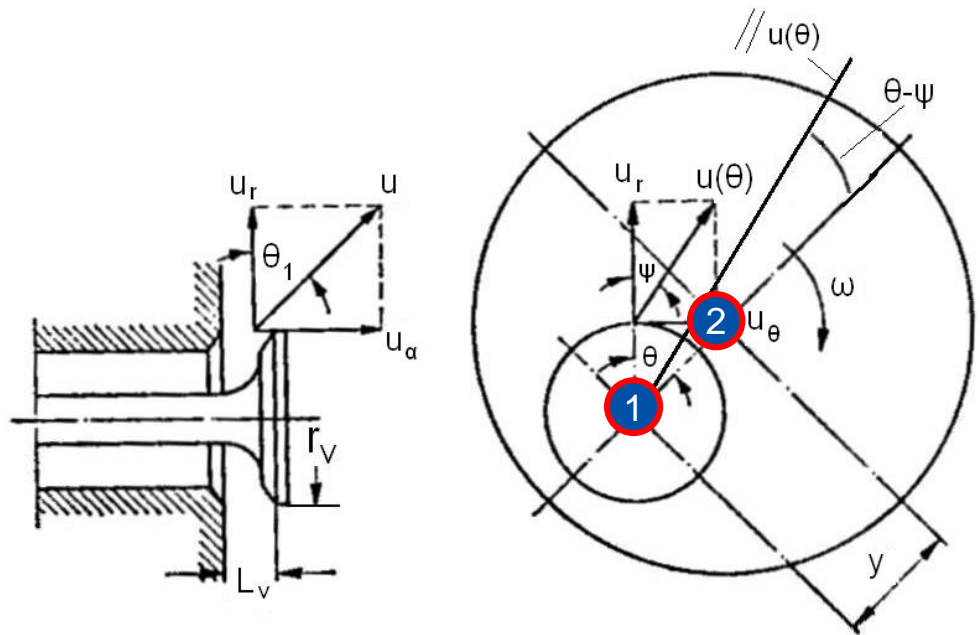
→ Ανάλυση στροφορμής περί:

- 1 Άξονα βαλβίδας:

$$\dot{\Gamma}_2 = \rho L_v r_v^2 \int_0^{2\pi} u_r(\theta) u_\theta(\theta) d\theta$$

- 2 Άξονα κυλίνδρου

$$\dot{\Gamma}_1 = \gamma \rho L_v r_v \int_0^{2\pi} \sin \theta u_r^2(\theta) d\theta$$



# Κεφαλαίο 6: ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ

## Στροφορμή αερίου: Ροή στη βαλβίδα εισαγωγής

- Αν  $u_\theta=0$  και  $u_r$  συμμετρική
  - μηδενική στροφορμή περί άξονα βαλβίδας
  - Μηδενική στροφορμή περί άξονα κυλίνδρου
- Αν  $u_r$  σταθερή και  $u_\theta \neq 0$ 
  - Στροφορμή περί τον άξονα της βαλβίδας ( helical port)
- Αν  $u_\theta=0$  και  $u_r$  ασύμμετρη
  - Στροφορμή περί άξονα κυλίνδρου

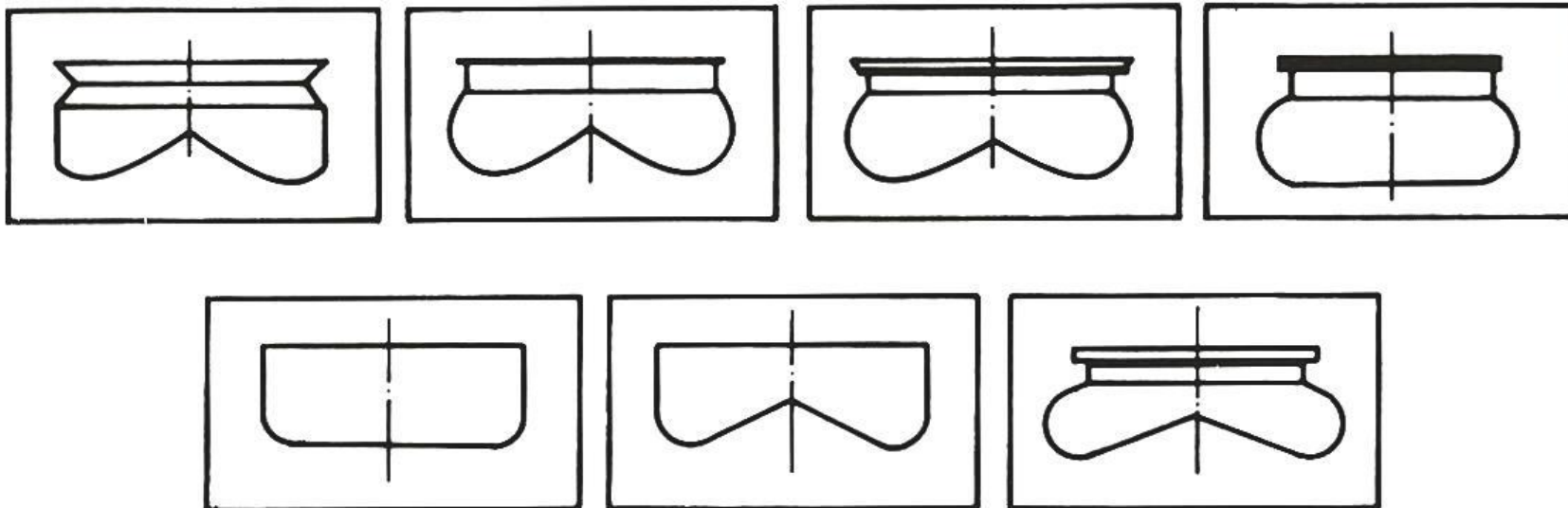


# Κεφαλαίο 6: ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ

## Αύξηση συστροφής κατά τη φάση της συμπίεσης

- Σε έμβολα με κοιλότητα (piston bowl) η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής αυξάνει στη φάση της συμπίεσης
- Κυρίως σε ταχύστρους κινητήρες Diesel:
  - Αύξηση ρυθμού ανάμειξης δέσμης καυσίμου/ αέρα
  - Μείωση ρύπων (κυρίως αιθάλης)

### Τύποι κοιλότητων εμβόλου (Piston Bowls)

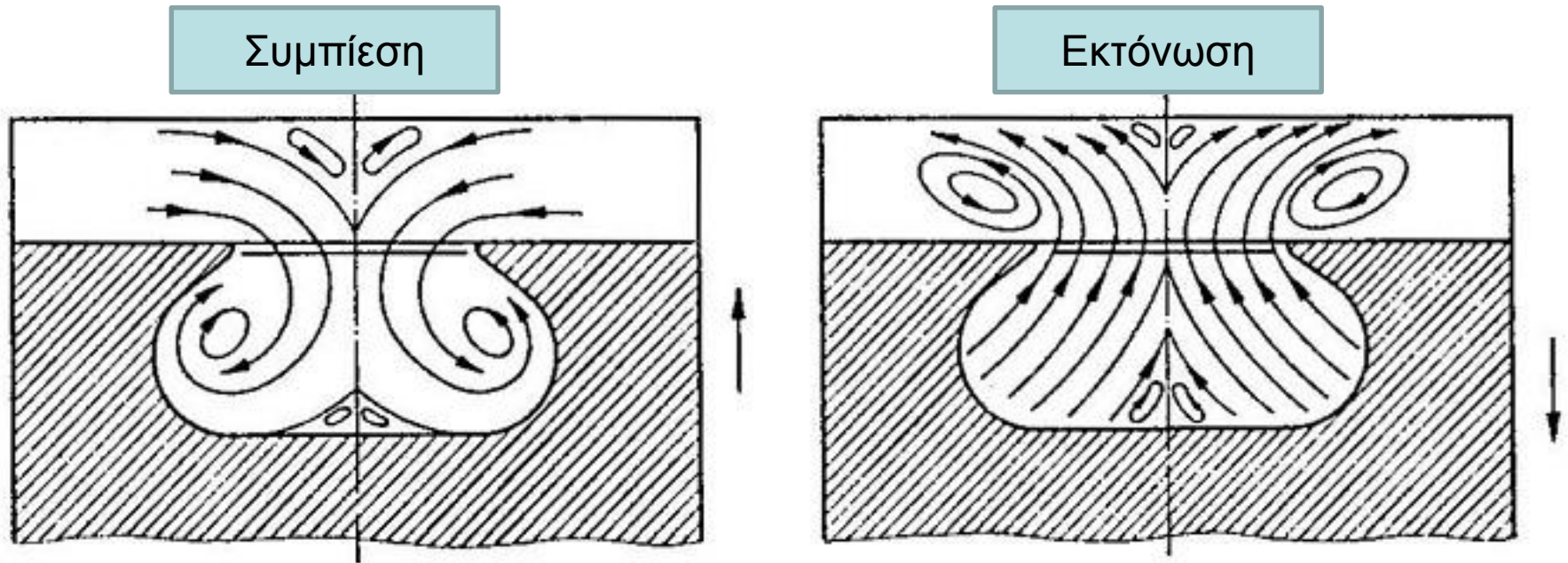


# Κεφαλαίο 6: ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ

**Αύξηση συστροφής κατά τη φάση της συμπίεσης:**

**Αρχή λειτουργίας**

- Κατά τη συμπίεση: Εισροή μάζας στην κοιλότητα
- Μείωση ροπής αδράνειας λόγω μείωσης ακτίνας
- Αύξηση γωνιακής ταχύτητας λόγω αρχής διατήρησης στροφορμής



# Κεφαλαίο 6: ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ

## Αύξηση συστροφής κατά τη φάση της συμπίεσης

- Λόγος ροπής αδράνειας αερίου  $\Theta_{\text{KN}\Sigma}/\Theta_{\text{AN}\Sigma} \approx$  αντιστροφος λόγος  $\omega_s/\omega_{sb}$  αν αμεληθούν οι τριβές.
- Θεωρητική αύξηση ταχύτητας περιστροφής

– Τυπική τιμή  $\approx 4$

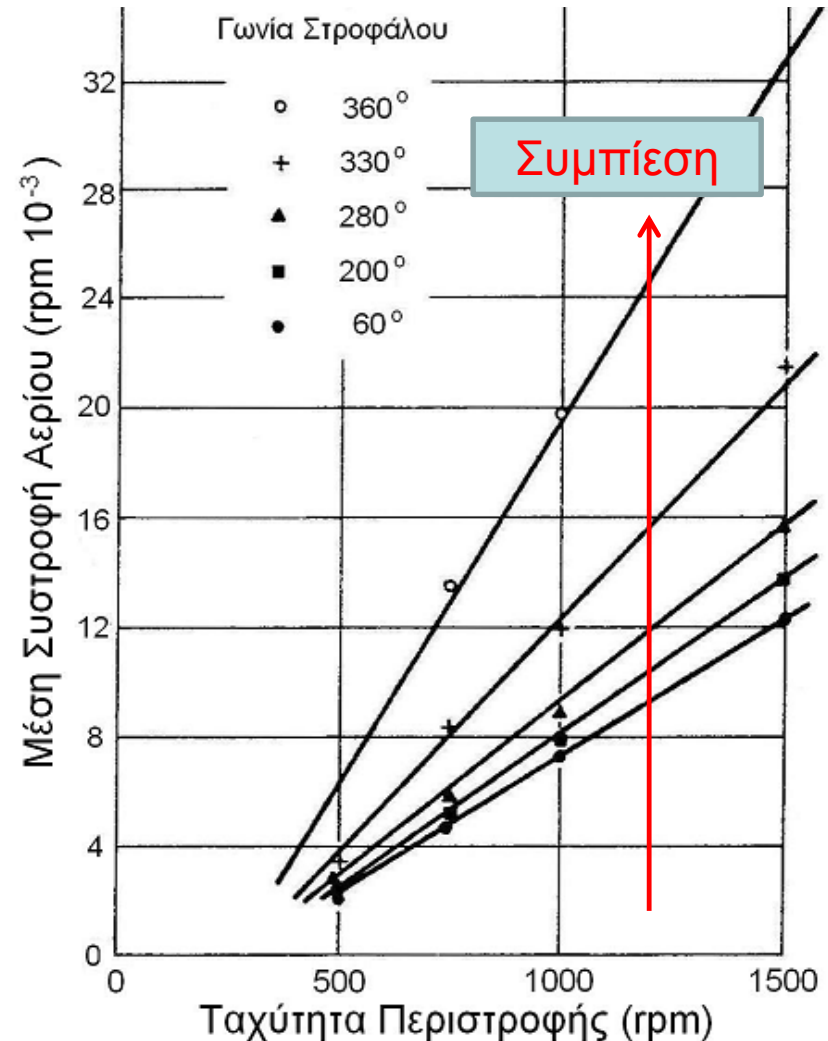
$$\frac{\Theta_{\text{AN}\Sigma}}{\Theta_{\text{KN}\Sigma}} = \frac{\frac{m_o D^2}{8} \left( \frac{x_c}{h_b} + \left( \frac{d_b}{D} \right)^4 \right)}{\frac{m_o D^2}{8} \left( \frac{x_c}{h_b} + \left( \frac{d_b}{D} \right)^2 \right)} \approx \frac{\frac{m_o d_b^2}{8}}{\frac{m_o D^2}{8}} = \left( \frac{d_b}{D} \right)^2 = \frac{\omega_s}{\omega_{sb}}$$

- Στην πράξη οι τριβές τείνουν να μειώσουν τη συστροφή, οπότε ο λόγος αύξησης καταλήγει σε τιμές 2-3

# Κεφαλαίο 6: ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ

## Αύξηση συστροφής κατά τη φάση της συμπίεσης: Πειραματικά αποτελέσματα

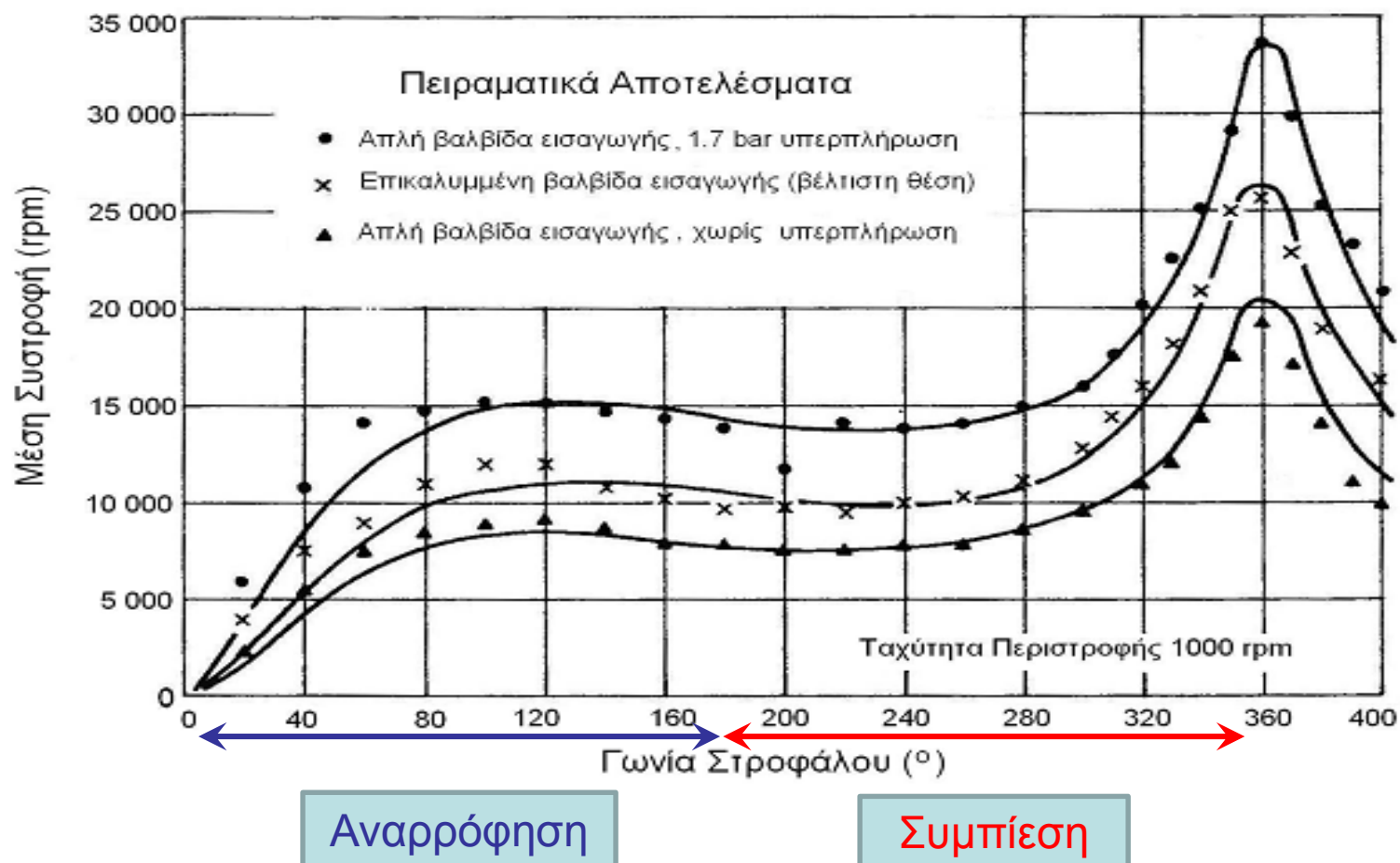
- Κινητήρας Diesel ( $D=101,6\text{mm}$ ,  $s=104,8\text{mm}$ ,  $\epsilon=16$ ,  $d_b/D=0,525$ ,  $h_b=12\text{mm}$ ),
- $AN\Sigma \rightarrow 360^\circ$ 
  - Κλίση καμπύλης  $=R_s = \text{σταθερό}$
  - Αύξηση συστροφής εντονότερη προς  $AN\Sigma$



# Κεφαλαίο 6: ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ

## Αύξηση συστροφής κατά τη φάση της συμπίεσης: Πειραματικά αποτελέσματα

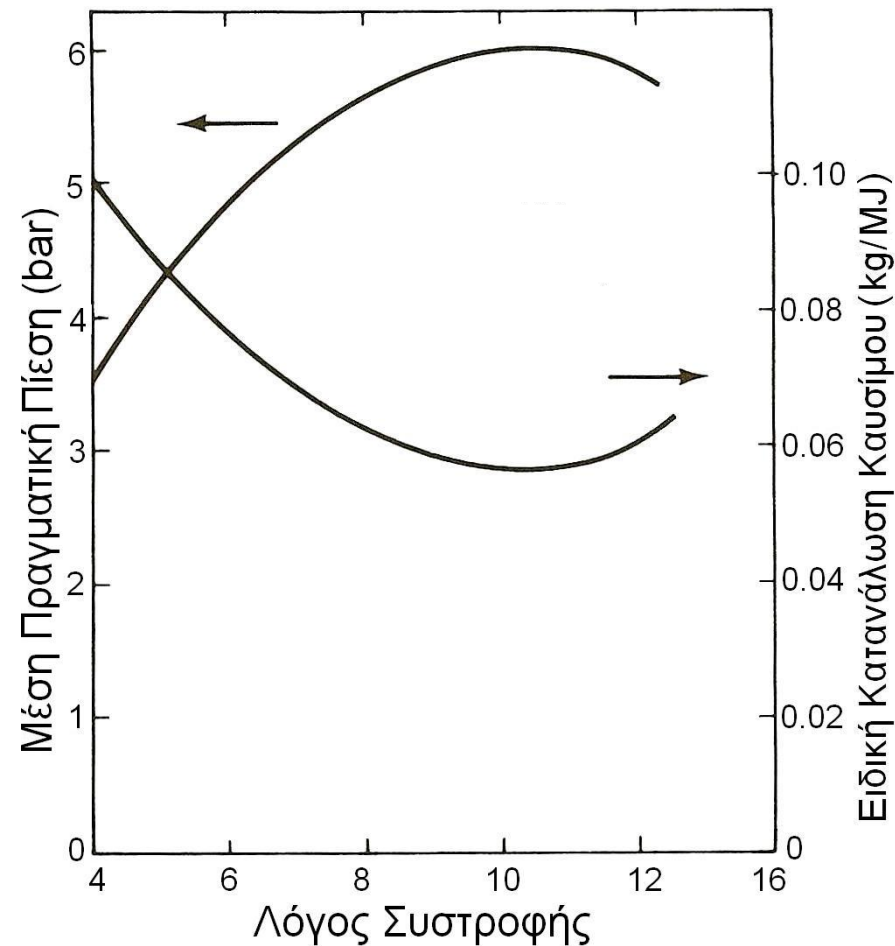
- Κινητήρας Diesel ( $D=101,6\text{mm}$ ,  $s=104,8\text{mm}$ ,  $\epsilon=16$ ,  $d_b/D=0,525$ ,  $h_b=12\text{mm}$ ),



# Κεφαλαίο 6: ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ

## Αύξηση συστροφής κατά τη φάση της συμπίεσης: Επίδραση στις επιδόσεις του κινητήρα

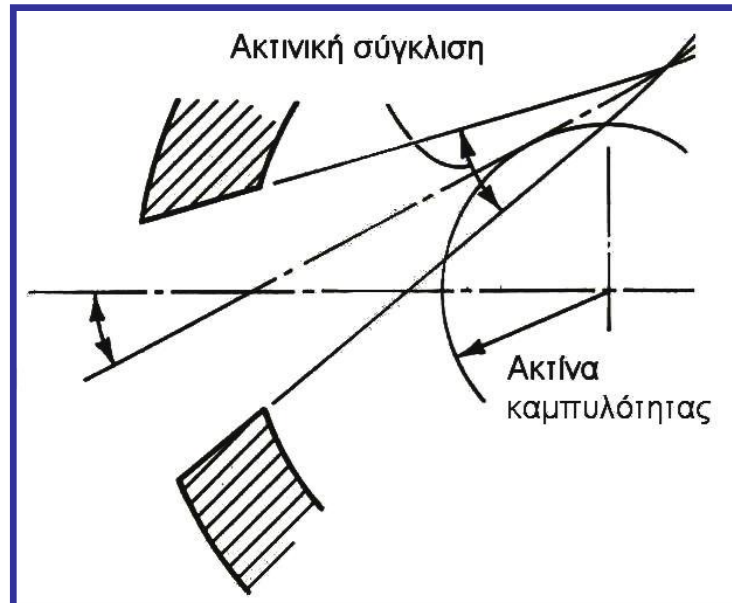
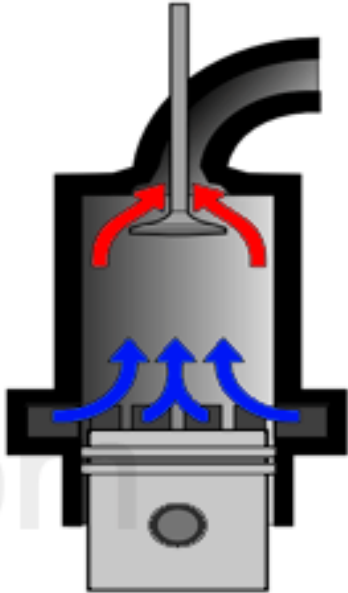
- Για χαμηλό/ μέσο λόγο συστροφής
  - Μείωση ειδικής κατανάλωσης
  - Αύξηση μέσης πραγματικής πίεσης
- Για υψηλούς λόγους συστροφής
  - Αντιστροφή τάσεων
  - Επιδείνωση επιδόσεων κινητήρα



# Κεφαλαίο 6: ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ

## Συστροφή σε 2-Χ κινητήρες

- Γενικά σε 2-Χ συστροφή δεν χρησιμοποιείται
  - Ευνοεί ανάμειξη καυσαερίου με φρέσκια γόμωση
- Εξαίρεση: Διατάξεις διαμήκους απόπλυσης
  - Περιφερειακή κλίση στις θυρίδες εισαγωγής



# Κεφαλαίο 6: ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ

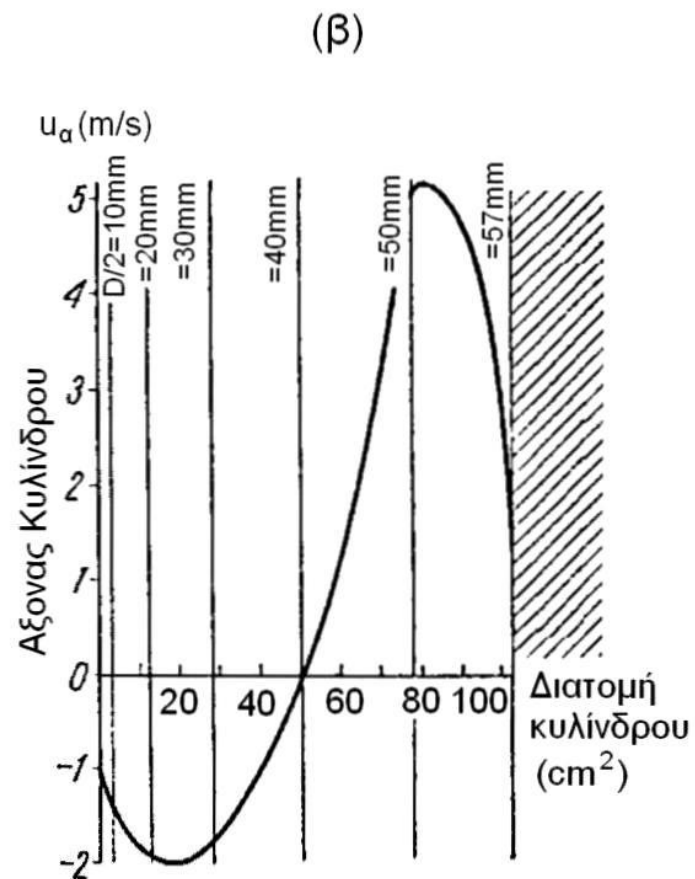
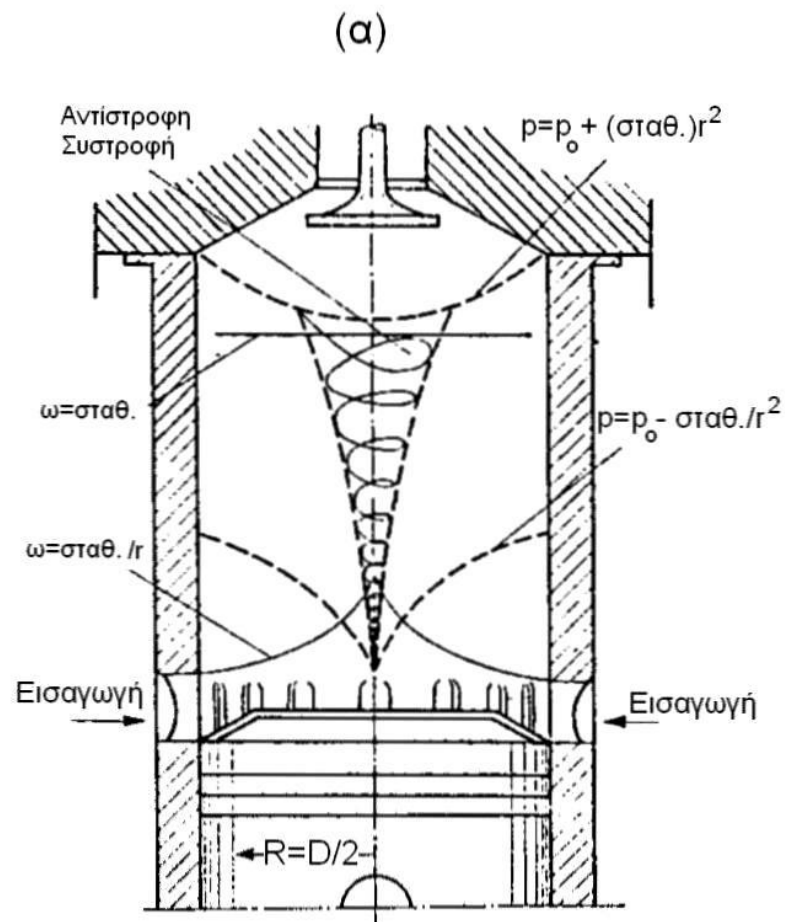
## Συστροφή σε 2-Χ κινητήρες: Οπισθοροή καυσαερίου

- Ύπαρξη συστροφής κατά την απόπλυση:
  - Καυσαέριο συσσωρεύεται στον άξονα του κυλίνδρου λόγω μικρότερης πυκνότητας
  - Στην περιοχή θυρίδων → υψηλή ταχύτητα κοντά στον άξονα → χαμηλή στατική πίεση
  - Στην πριν τη βαλβίδα → χαμηλή ταχύτητα κοντά στον άξονα → υψηλότερη στατική πίεση
  - Δημιουργία εσωτερικού στροβιλισμού ο οποίος ωθεί καυσαέριο προς το έμβολο



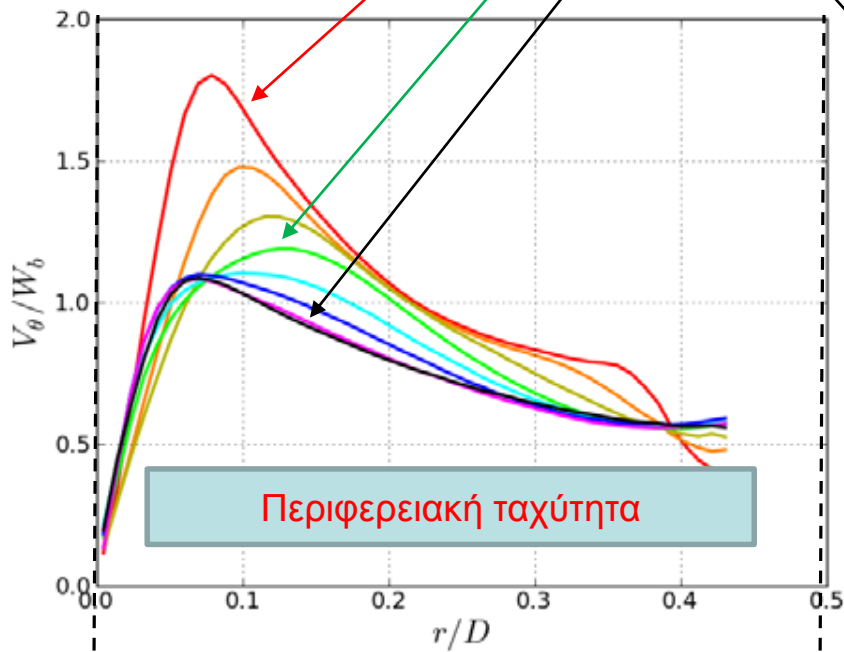
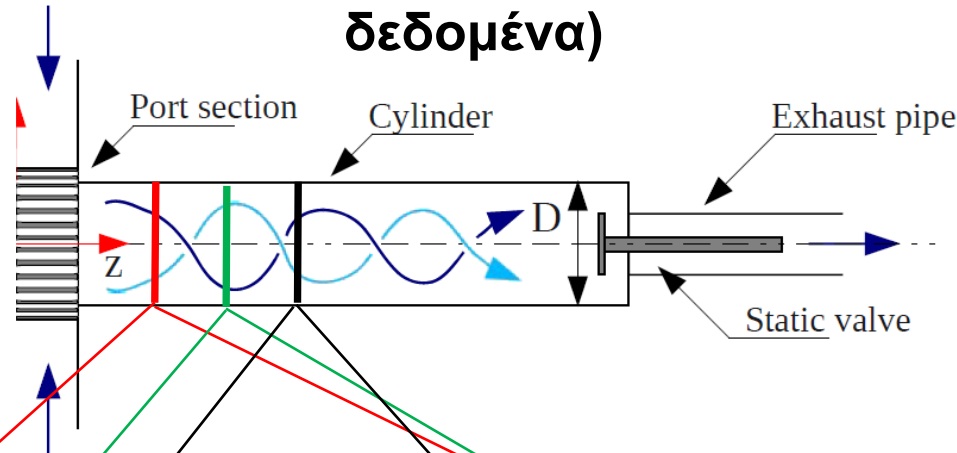
# Κεφαλαίο 6: ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ

## Συστροφή σε 2-Χ κινητήρες: Οπισθοροή καυσαερίου



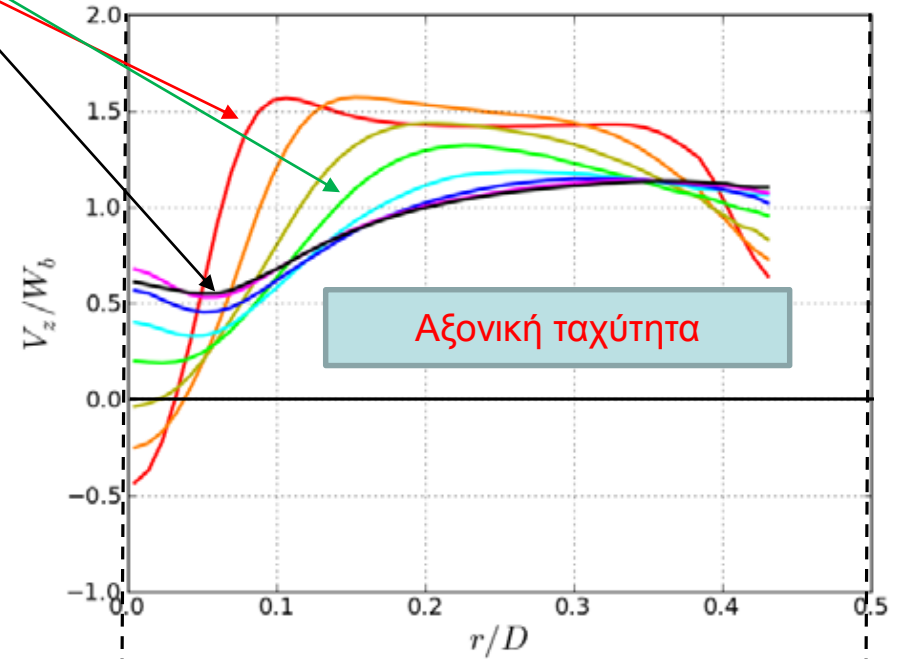
# Κεφαλαίο 6: ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ

Συστροφή σε 2-Χ κινητήρες: Οπισθοροή καυσαερίου (Πειραματικά δεδομένα)



Αξονας κυλίνδρου

Τοίχωμα κυλίνδρου



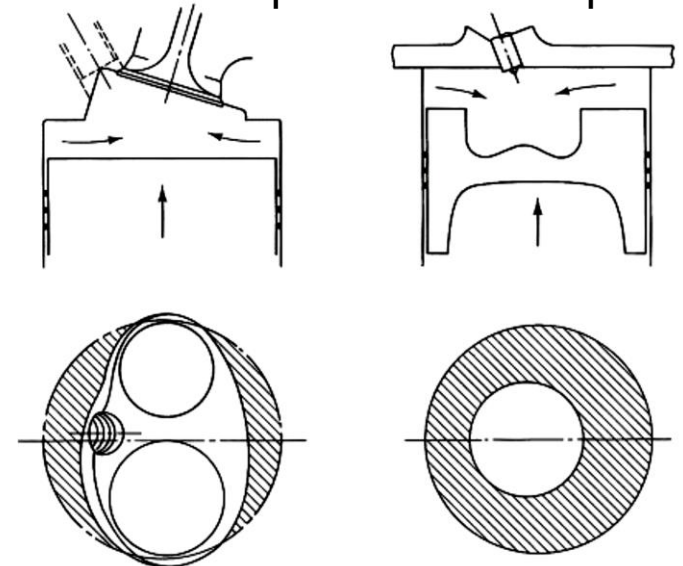
Αξονας κυλίνδρου

Τοίχωμα κυλίνδρου

# Κεφάλαιο 6: ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ

## Σύνθλιψη (Squish)

- **Σύνθλιψη (squish):**
  - Διατεταγμένη κίνηση φορτίου κατά την ακτινική κατεύθυνση στο θάλαμο καύσης στη διάρκεια της συμπίεσης/ αποτόνωσης
  - Παρατηρείται σε περιπτώσεις κοιλότητας εμβόλου/ κυλινδροκεφαλής
  - Κατά το στάδιο που το έμβολο πλησιάζει στο ΑΝΣ ο διαθέσιμος όγκος που καταλαμβάνει το αέριο ολοένα και μικραίνει ωθώντας έτσι το αέριο να κατευθυνθεί προς τον άξονα του κυλίνδρου και ουσιαστικά μέσα στο θάλαμο καύσης.
    - Κατά τη συμπίεση: ροή προς την κοιλότητα
    - Κατά την αποτόνωση: αντιστροφή ροής
  - Επίδραση στα τελευταία στάδια της καύσης σε κινητήρες Diesel

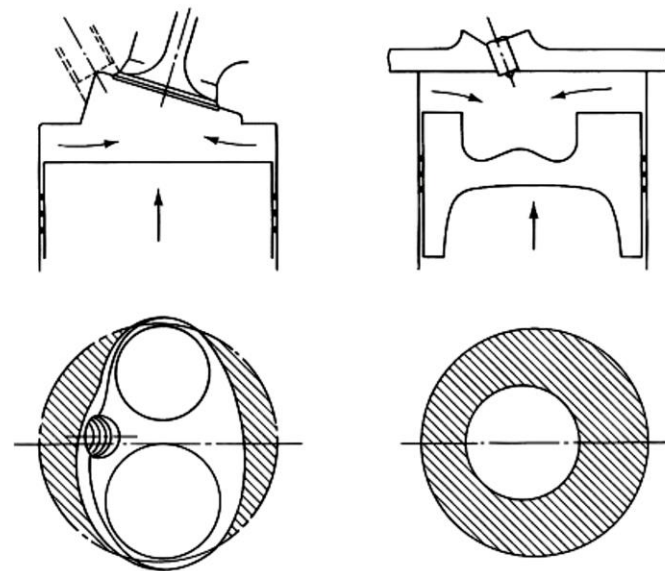


# Κεφάλαιο 6: ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ

## Σύνθλιψη (Squish)

- **Σύνθλιψη (squish)-Παραδοχές:**

- Ενιαία πίεση είναι ενιαία στο εσωτερικό του κυλίνδρου, άρα και η πυκνότητα (εφόσον και η θερμοκρασία είναι ομοιόμορφη), αγνοούμε δηλαδή τα δυναμικά φαινόμενα
- Δεν υπάρχουν τριβές,
- Αμελείται η διαρροή αέριου (μίγματος) διαμέσου των ελατηρίων ανάμεσα στο έμβολο και το τοίχωμα του κυλίνδρου (*blowby*),
- Δεν λαμβάνονται υπόψη οι όποιες απώλειες θερμότητας.



# Κεφάλαιο 6: ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ

## Σύνθλιψη σε θάλαμο κοιλότητας εμβόλου

- Γεωμετρία Κυλίνδρου:

- Όγκοι 1 και 2 μειώνονται κατά τη συμπίεση
- Όγκος κοιλότητας 3: σταθερός
- Ροή μάζας προς κοιλότητα 3 κατά τη συμπίεση
- Ταχύτητα σύνθλιψης  $u_{sq}$
- Όγκος όπου δημιουργείται η ταχύτητα  $u_{sq}$ :

$$V_{sq} = \frac{\pi}{4} (D^2 - d_b^2) X, \quad \frac{dV_{sq}}{dt} = \frac{\pi}{4} (D^2 - d_b^2) c$$

- η πυκνότητα του αερίου στο εσωτερικό της κοιλότητας είναι η ίδια με την πυκνότητα εκτός της κοιλότητας

$$\rho_{sq} = \rho \Leftrightarrow \frac{m_{sq}}{V_{sq}} = \frac{m}{V}$$

- Παραγωγίζοντας:

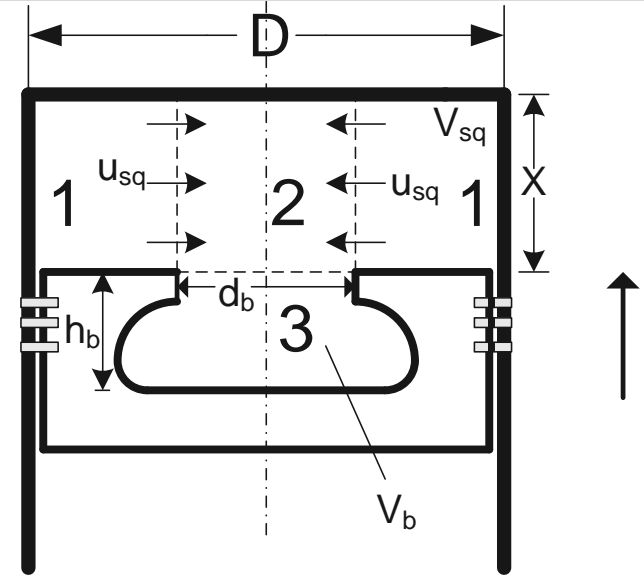
$$\dot{m}_{sq} = \frac{dm_{sq}}{dt} = -m \frac{V_{sq}}{V^2} \frac{dV}{dt} + \frac{m}{V} \frac{dV_{sq}}{dt} = -\rho \frac{V_{sq}}{V} \frac{dV}{dt} + \rho \frac{dV_{sq}}{dt}$$

- Εναλλακτική έκφραση για την παροχή μάζας

$$\dot{m} = \rho u A$$

$\rho$  η πυκνότητα του αερίου

$A$  η (ενεργός) επιφάνεια διέλευσης (μεταξύ των όγκων "1" και "2")



# Κεφάλαιο 6: ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ

## Σύνθλιψη σε θάλαμο κοιλότητας εμβόλου

- Εφαρμογή της σχέσης στην κοιλότητα :

$$\frac{dm_{sq}}{dt} = \dot{m}_{sq} = \rho u_{sq} (\pi d_b X)$$

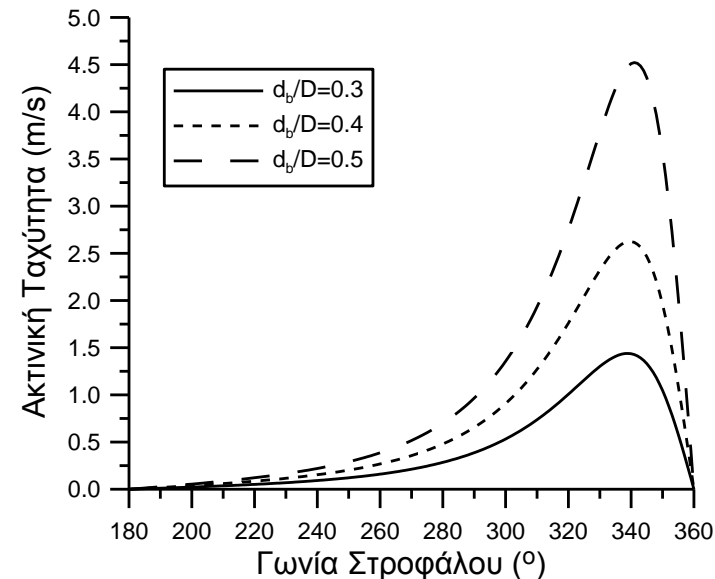
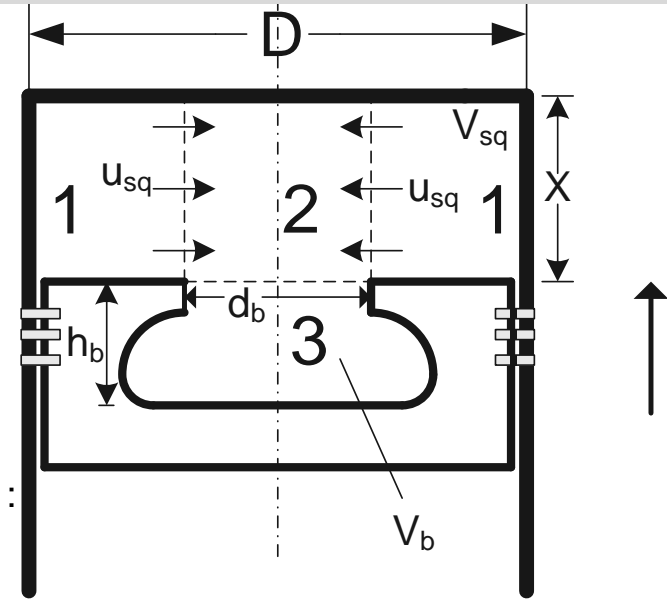
$$\dot{m}_{sq} = -\rho \frac{\pi (D^2 - d_b^2) X}{A_\varepsilon X + V_b} A_\varepsilon c + \rho \frac{\pi}{4} (D^2 - d_b^2) c \quad \text{και} \quad \frac{dV}{dt} = A_\varepsilon c$$

- Από την ισότητα των δύο παραπάνω σχέσεων για την παροχή μάζας :

$$\rho u_{sq} \pi d_b X = -\rho \frac{\pi (D^2 - d_b^2) X}{A_\varepsilon X + V_b} A_\varepsilon c + \rho \frac{\pi}{4} (D^2 - d_b^2) c \Leftrightarrow$$

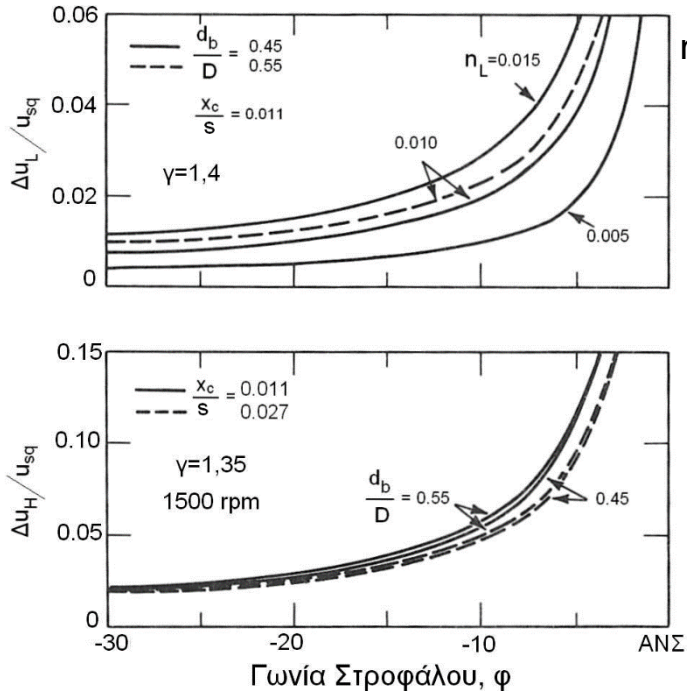
$$\frac{u_{sq}}{c} = -\frac{(D^2 - d_b^2) X}{4(A_\varepsilon X + V_b) d_b X} \frac{A_\varepsilon}{d_b X} + \frac{1}{4} \frac{(D^2 - d_b^2)}{d_b X} = \frac{(D^2 - d_b^2)}{4d_b X} \left( 1 - \frac{A_\varepsilon X}{A_\varepsilon X + V_b} \right) =$$

$$= \frac{(D^2 - d_b^2)}{4d_b X} \frac{V_b}{A_\varepsilon X + V_b} = \frac{d_b}{4X} \left[ \left( \frac{D}{d_b} \right)^2 - 1 \right] \frac{V_b}{A_\varepsilon X + V_b} = \frac{d_b}{4X} \left[ \left( \frac{D}{d_b} \right)^2 - 1 \right] \frac{V_b}{V}$$

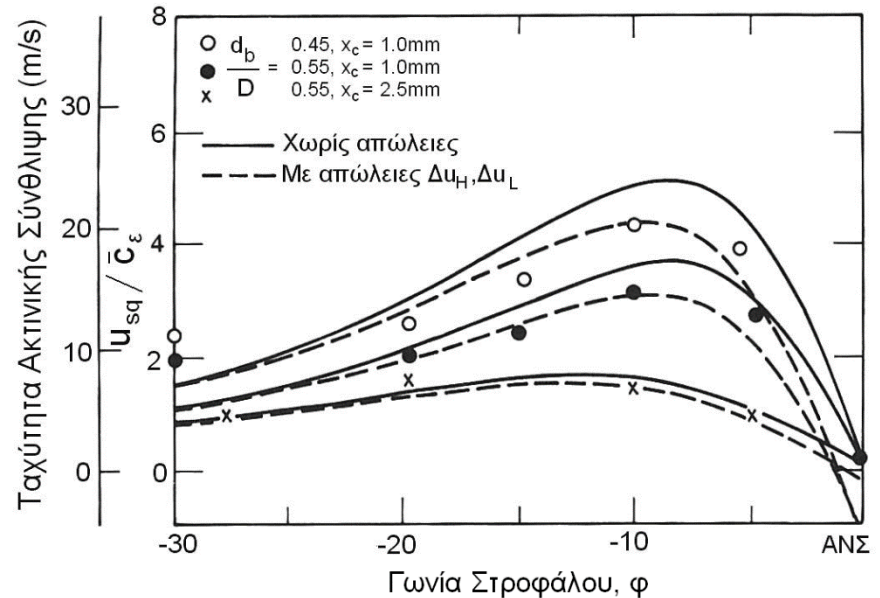
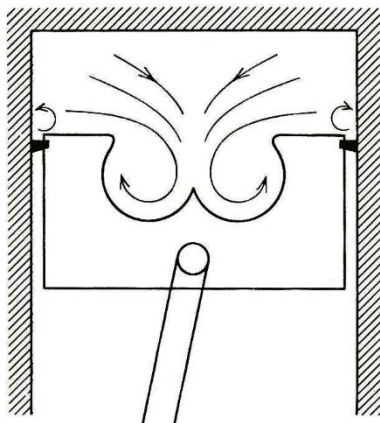
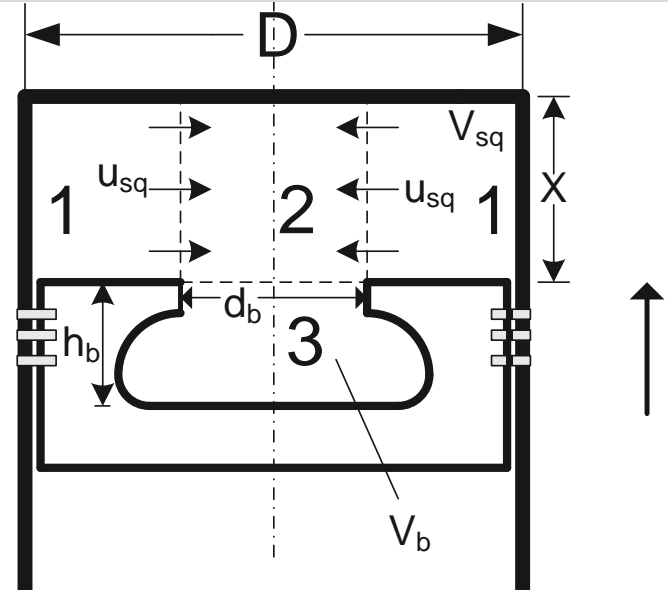


# Κεφάλαιο 6: ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ

## Σύνθλιψη σε θάλαμο κοιλότητας εμβόλου-Επίδραση των παραδοχών



$$n_L = A_{e,L} \sqrt{\gamma R T_{K\Sigma}} / n V_H$$



# Κεφάλαιο 6: ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ

## Σύνθλιψη σε σφηνοειδή θάλαμο καύσης

- Γεωμετρία Κυλίνδρου:

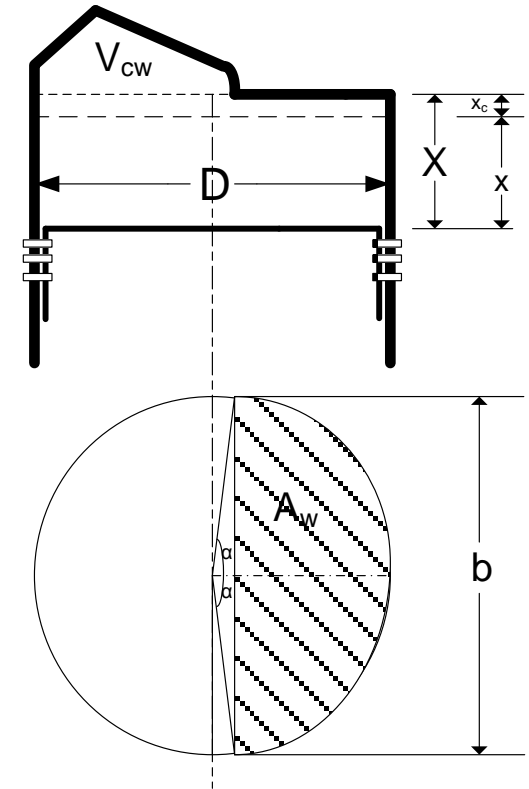
- Πανομοιότυπη ανάλυση με σύνθλιψη σε κοιλότητα εμβόλου
- Ταχύτητα σύνθλιψης  $u_{sq}$  με παραδοχή ομοιόμορφης πυκνότητας, αμελητέες διαρροές από ελατήρια και μεταφορά θερμότητας:

$$\frac{dm_{sq}}{dt} = \dot{m}_{sq} = \rho u_{sq} A_{sq} = \rho u_{sq} b(x + x_c)$$

$$\dot{m}_{sq} = -\rho \frac{A_w (x + x_c)}{V} A_\varepsilon c + \rho A_w c$$

$$\frac{dV}{dt} = A_\varepsilon c ,$$

$$V_{sq} = A_w (x + x_c) , \quad \frac{dV_{sq}}{dt} = A_w c$$





# Κεφάλαιο 6: ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ

## Σύνθλιψη σε σφηνοειδή θάλαμο καύσης

### Γεωμετρία Κυλίνδρου:

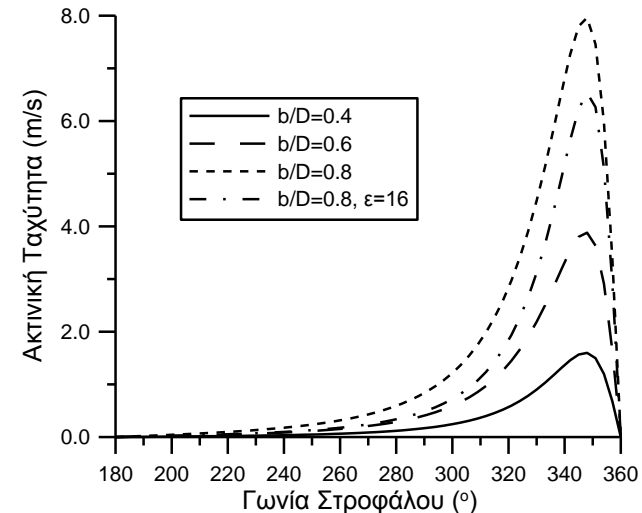
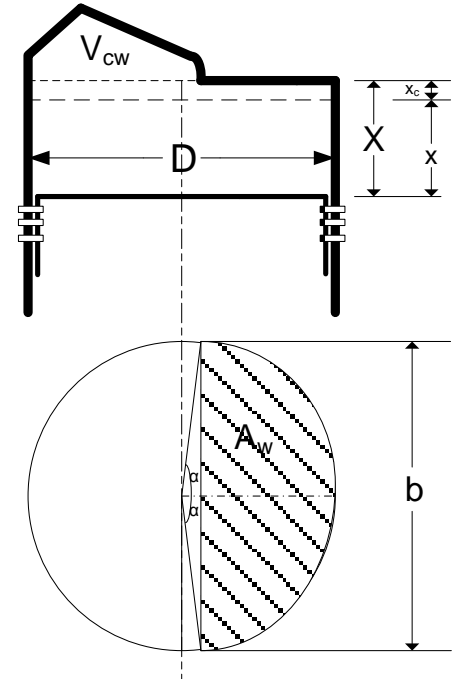
- Πανομοιότυπη ανάλυση με σύνθλιψη σε κοιλότητα εμβόλου
- Ταχύτητα σύνθλιψης  $u_{sq}$  με παραδοχή ομοιόμορφης πυκνότητας, αμελητέες διαρροές από ελατήρια και μεταφορά θερμότητας:

$$\rho u_{sq} b(x + x_c) = -\rho \frac{A_w (x + x_c)}{A_\varepsilon x + V_c} A_\varepsilon c + \rho A_w c \Leftrightarrow$$

$$\frac{u_{sq}}{c} = -\frac{A_w}{b(x + x_c)} \left( \frac{A_\varepsilon (x + x_c)}{A_\varepsilon x + V_c} - 1 \right) \Leftrightarrow$$

$$\frac{u_{sq}}{c} = -\frac{A_w}{b(x + x_c)} \left( \frac{[(x + x_c) - x] - \frac{V_c}{A_\varepsilon}}{A_\varepsilon x + V_c} \right) \Leftrightarrow$$

$$\frac{u_{sq}}{c} = -\frac{A_w}{b(x + x_c)} \left( \frac{x_c - \frac{s}{\varepsilon - 1}}{\frac{s}{\varepsilon - 1} + x} \right) = \frac{A_w}{b(x + x_c)} \left( 1 - \frac{x + x_c}{\frac{s}{\varepsilon - 1} + x} \right)$$



# Κεφάλαιο 6: ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ

## Σύνθλιψη σε σφηνοειδή θάλαμο καύσης

### Γεωμετρία Κυλίνδρου:

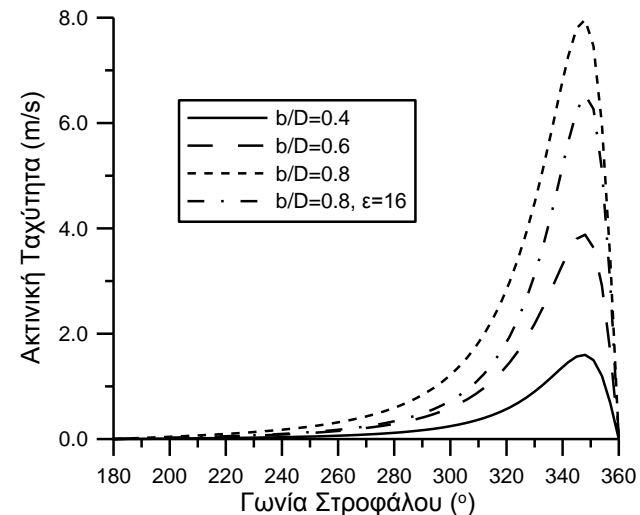
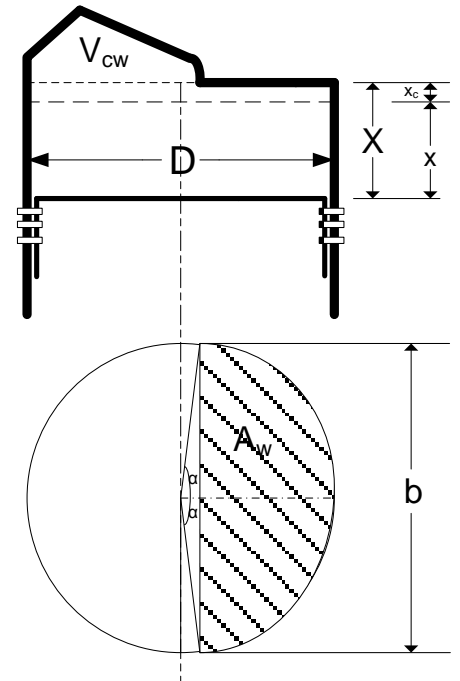
- Πανομοιότυπη ανάλυση με σύνθλιψη σε κοιλότητα εμβόλου
- Ταχύτητα σύνθλιψης  $u_{sq}$  με παραδοχή ομοιόμορφης πυκνότητας, αμελητέες διαρροές από ελατήρια και μεταφορά θερμότητας:

$$\rho u_{sq} b(x + x_c) = -\rho \frac{A_w (x + x_c)}{A_\varepsilon x + V_c} A_\varepsilon c + \rho A_w c \Leftrightarrow$$

$$\frac{u_{sq}}{c} = -\frac{A_w}{b(x + x_c)} \left( \frac{A_\varepsilon (x + x_c)}{A_\varepsilon x + V_c} - 1 \right) \Leftrightarrow$$

$$\frac{u_{sq}}{c} = -\frac{A_w}{b(x + x_c)} \left( \frac{[(x + x_c) - x] - \frac{V_c}{A_\varepsilon}}{A_\varepsilon x + V_c} \right) \Leftrightarrow$$

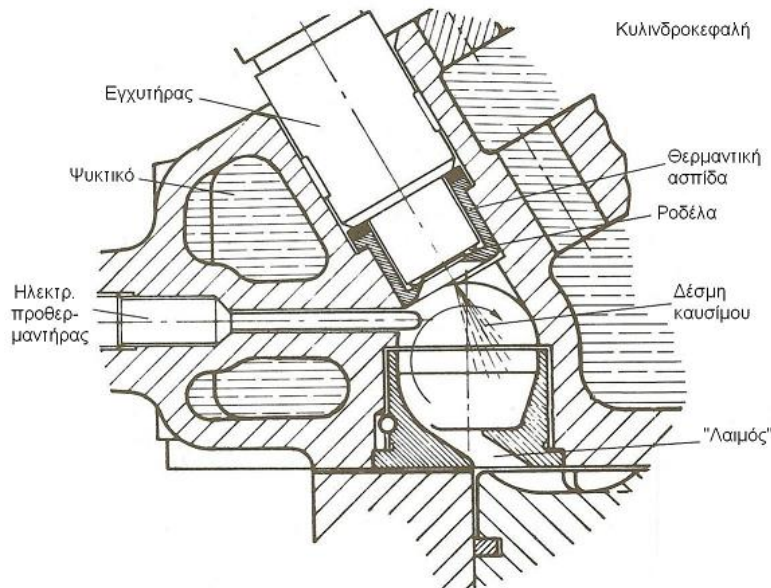
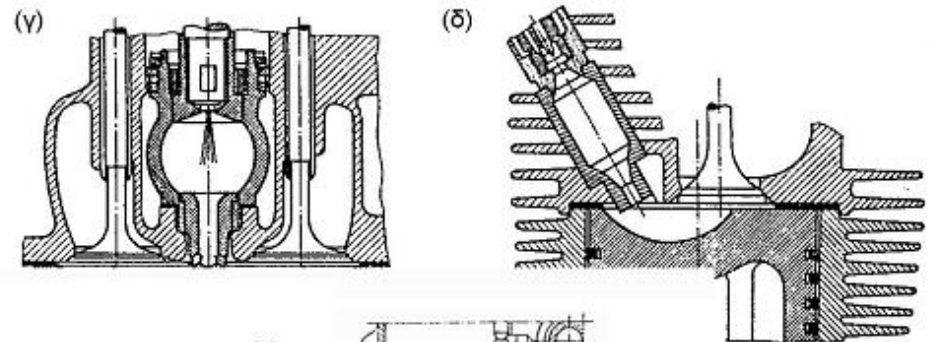
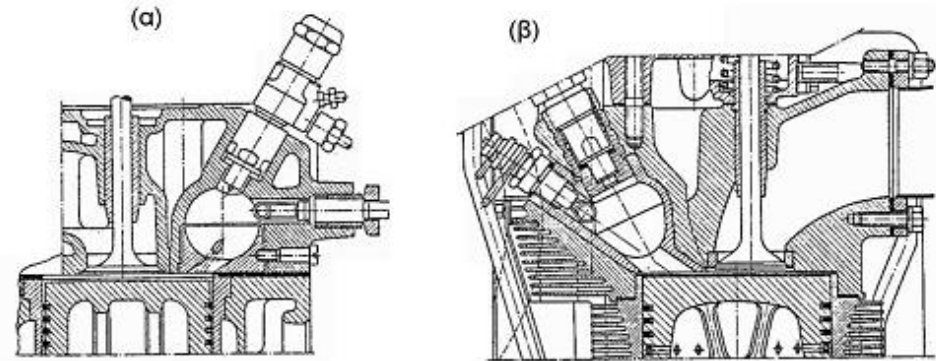
$$\frac{u_{sq}}{c} = -\frac{A_w}{b(x + x_c)} \left( \frac{x_c - \frac{s}{\varepsilon - 1}}{\frac{s}{\varepsilon - 1} + x} \right) = \frac{A_w}{b(x + x_c)} \left( 1 - \frac{x + x_c}{\frac{s}{\varepsilon - 1} + x} \right)$$



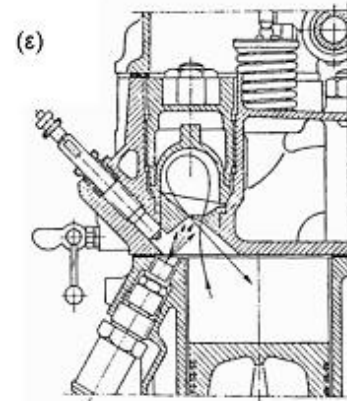
# Κεφάλαιο 6: ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ

## Ροή αερίων σε διμερή θάλαμο καύσης (έμμεσης έγχυσης)

- Τύποι θαλάμων καύσης έμμεσης έγχυσης:
  - (α) στροβιλοθάλαμος ZIS-D7
  - (β) στροβιλοθάλαμος Deutz με δημιουργία περιφερειακής συστροφής,
  - (γ) προθάλαμος Daimler-Benz,
  - (δ) προθάλαμος MAN,
  - (ε) ταμιευτής αέρα Acro



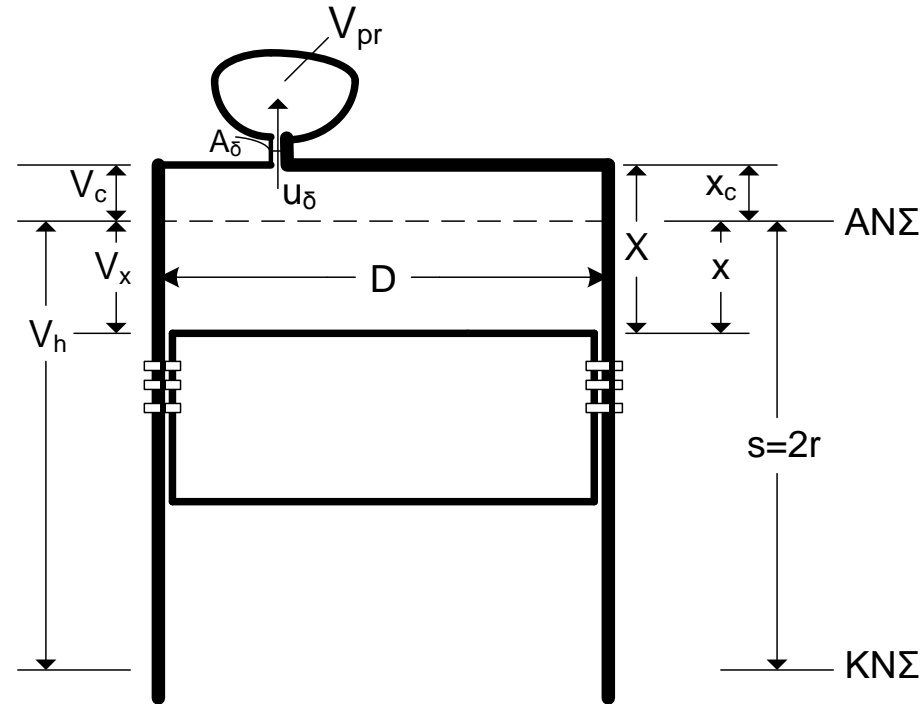
Ricardo Comet Mk.V



# Κεφάλαιο 6: ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ

## Ροή αερίων σε διμερή θάλαμο καύσης-Απλό μοντέλο ροής

- Στο τέλος της συμπίεσης, όταν δηλαδή το έμβολο πλησιάζει το ΑΝΣ, η διαφορά της πίεσης γίνεται μικρότερη
- Μπορεί τότε να εφαρμοστεί ένα απλό μοντέλο υπολογισμού της παροχής του αέρα και της ταχύτητάς
- Παραδοχές:
  - πυκνότητα του αέρα (αερίου) είναι παντού η ίδια και σταθερή
  - ισότητα πιέσεων ανάμεσα σε θύλακα και κύριο θάλαμο



$$\rho_{pr} = \rho \Leftrightarrow m_{pr} = m_o \frac{V_{pr}}{V} \quad \dot{m}_{pr} = \frac{dm_{pr}}{dt} = -\frac{m_o V_{pr}}{V^2} \frac{dV}{dt}$$

$$\frac{\dot{m}_{pr}}{m_o} \frac{sn}{30} = -\frac{V_{pr}}{V^2} \frac{\pi D^2}{4} \frac{c}{\bar{c}_\epsilon} \Leftrightarrow \frac{\dot{m}_{pr}}{m_o n} = -\frac{1}{30} \frac{(\epsilon - 1)}{\left(\frac{\pi D^2}{4} s\right)} \frac{V_{pr}}{V^2} \left(\frac{\pi D^2}{4} s\right) \left(\frac{c}{\bar{c}_\epsilon}\right) \Leftrightarrow$$

$$\frac{\dot{m}_{pr}}{m_o n} = \frac{1}{30} (1 - \epsilon) \left(\frac{V_{pr}}{V}\right) \left(\frac{V_c}{V}\right) \left(\frac{c}{\bar{c}_\epsilon}\right) \Leftrightarrow$$

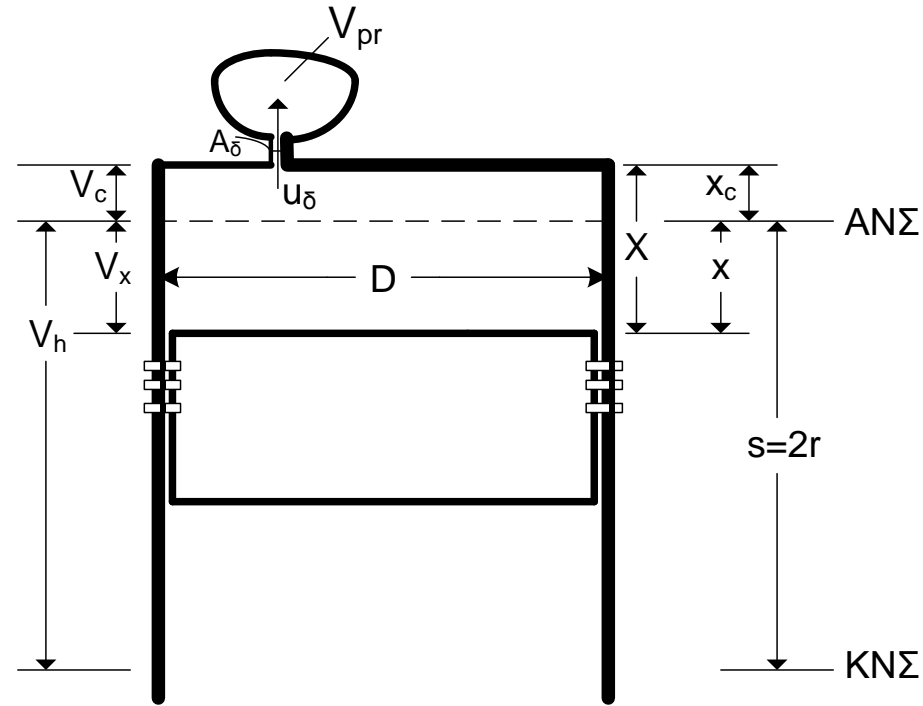
$$\frac{\dot{m}_{pr}}{m_o n} = \frac{1}{30} (1 - \epsilon) \left(\frac{V_{pr}}{V_c}\right) \left(\frac{c}{\bar{c}_\epsilon}\right) \left(\frac{V_c}{V}\right)^2$$

Παροχή

# Κεφάλαιο 6: ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ

## Ροή αερίων σε διμερή θάλαμο καύσης-Απλό μοντέλο ροής

- Στο τέλος της συμπίεσης, όταν δηλαδή το έμβολο πλησιάζει το ΑΝΣ, η διαφορά της πίεσης γίνεται μικρότερη
- Μπορεί τότε να εφαρμοστεί ένα απλό μοντέλο υπολογισμού της παροχής του αέρα και της ταχύτητάς
- Παραδοχές:
  - πυκνότητα του αέρα (αερίου) είναι παντού η ίδια και σταθερή
  - ισότητα πιέσεων ανάμεσα σε θύλακα και κύριο θάλαμο

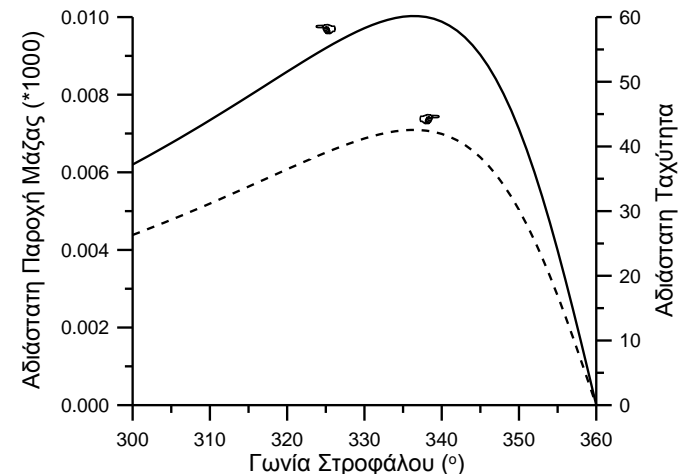


$$u_{\delta} = \frac{\dot{m}_{pr}}{\rho \bar{A}_{\delta}} = \frac{-\frac{V_{pr}}{V^2} \frac{\pi D^2}{4} \frac{c}{\bar{c}_{\epsilon}} m_o \frac{sn}{30}}{\frac{m_o}{V} \bar{A}_{\delta}} = -\frac{1}{30} \frac{\pi D^2}{V_c} s V_{pr} \frac{V_c}{V} \left( \frac{c}{\bar{c}_{\epsilon}} \right) n \Leftrightarrow$$

$$\frac{u_{\delta}}{\left( \frac{sn}{30} \right)} = -\frac{\frac{\pi D^2}{4} V_{pr} \frac{V_c}{V} \left( \frac{c}{\bar{c}_{\epsilon}} \right)}{\bar{A}_{\delta}} \Leftrightarrow \frac{u_{\delta}}{\bar{c}_{\epsilon}} = -\left( \frac{V_{pr}}{V_c} \right) \left( \frac{V_c}{V} \right) \left( \frac{c}{\bar{c}_{\epsilon}} \right) \frac{A_{\epsilon}}{\bar{A}_{\delta}}$$

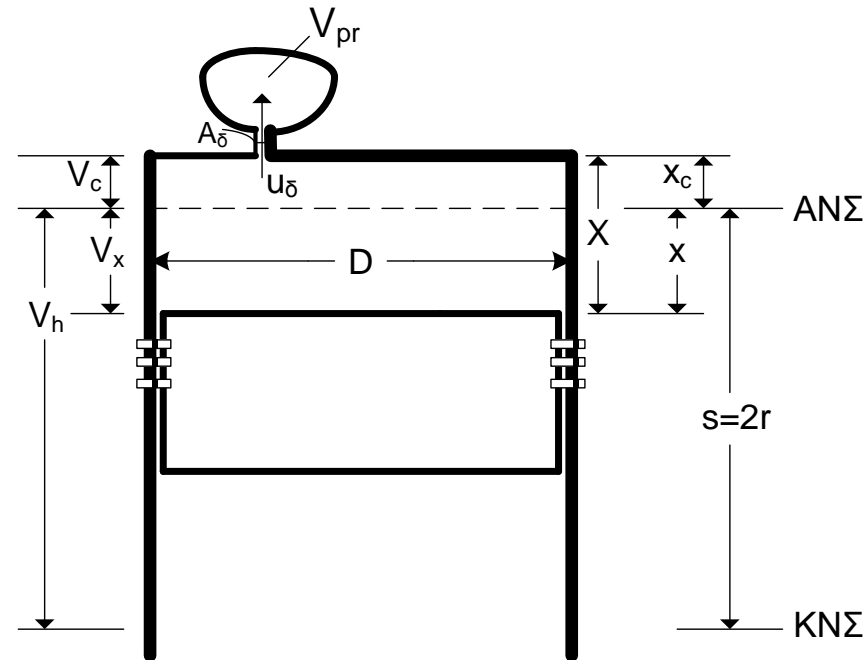
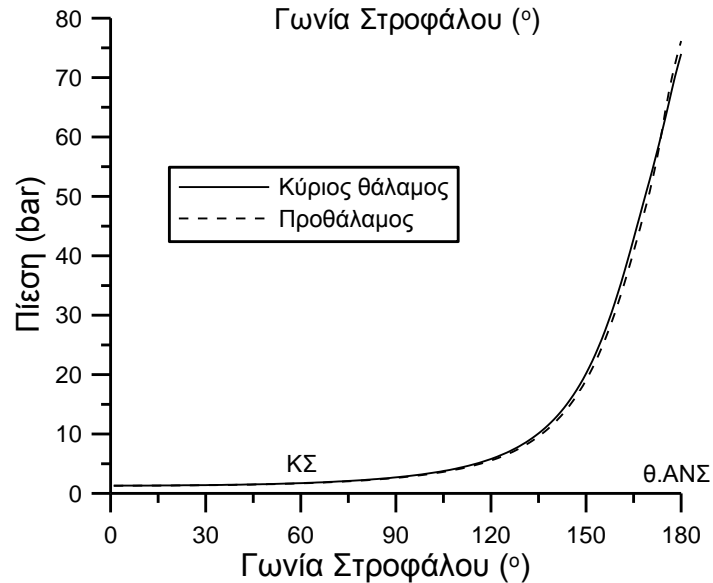
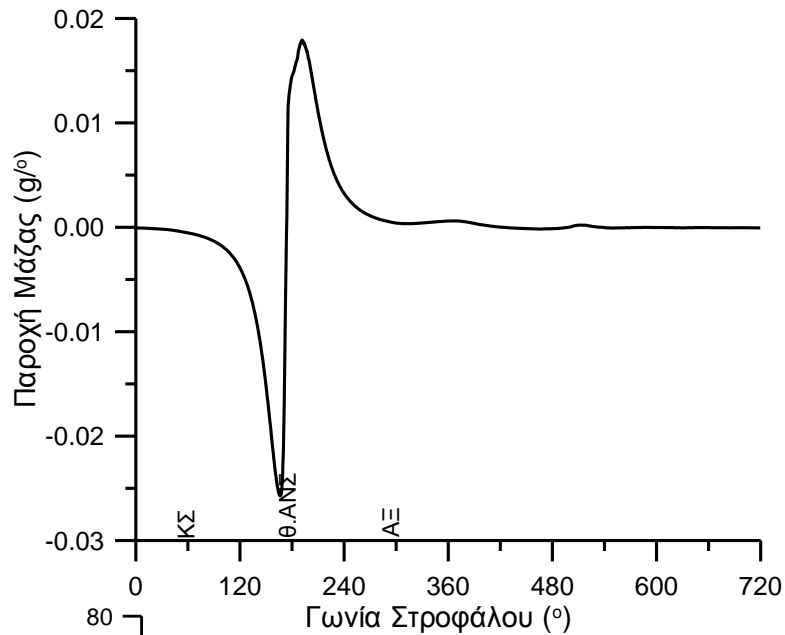
όπου  $\bar{A}_{\delta} = (c_d A_{\delta})_{\mu}$

Ταχύτητα



# Κεφάλαιο 6: ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ

## Ροή αερίων σε διμερή θάλαμο καύσης-Απλό μοντέλο ροής



# Κεφάλαιο 6: ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ

## Ροή αερίων σε διμερή θάλαμο καύσης-Συστροφή εντός στροβιλοθαλάμου

– Ταχύτητα διαμέσου του λαιμού:  $u_{\delta} = -\frac{V_{pr}}{V} \frac{A_{\varepsilon}}{A_{\delta}} c$

– Στροφορμή του περιεχομένου του προθαλάμου, όπου  $u_{pr} = r\omega_{pr} = \text{σταθ.}$

$$\Gamma_{\sigma\tau} = \Theta_{pr} \omega_{pr} = \int_0^{D_{pr}/2} r \cdot u_{pr}(r) \cdot dm_{pr} = \omega_{pr} \int r^2 dm \Leftrightarrow$$

$$\Gamma_{\sigma\tau} = \omega_{pr} \frac{1}{10} m_{pr} D_{pr}^2 = \omega_{pr} \frac{1}{10} \rho V_{pr} D_{pr}^2 \text{ για σφαίρα} = \omega_{pr} m_{pr} \beta D_{pr}^2$$
$$\Gamma_{\sigma\tau} = \omega_{pr} \frac{1}{8} m_{pr} D_{pr}^2 = \omega_{pr} \frac{1}{8} \rho V_{pr} D_{pr}^2 \text{ για κύλινδρο}$$

– Στροφορμή της εισερχόμενης μάζας αέρα:

$$\Gamma_{pr} = R_o \int_{\pi}^{2\pi} u_{\delta} dm = R_o \int_{\pi}^{2\pi} u_{\delta} (\bar{A}_{\delta} u_{\delta} \rho \frac{d\varphi}{6n}) = \frac{\pi}{180\omega} \bar{A}_{\delta} R_o \rho \int_{\pi}^{2\pi} u_{\delta}^2 d\varphi \quad \Gamma_{\sigma\tau} = \Gamma_{pr}$$

– Γωνιακή ταχύτητα συστροφής στον προθάλαμο:

$$\omega_{pr} = \frac{\pi}{180\omega} \frac{\bar{A}_{\delta} R_o}{V_{pr} \beta D_{pr}^2} \int_{\pi}^{2\pi} \left[ \frac{V_{pr}}{V} \left( \frac{A_{\varepsilon}}{\bar{A}_{\delta}} \right) c(\varphi) \right]^2 d\varphi = \frac{\pi}{180\omega} \frac{R_o V_{pr} A_{\varepsilon}^2}{\beta D_{pr}^2 \bar{A}_{\delta}} \int_{\pi}^{2\pi} \frac{c^2(\varphi)}{V^2(\varphi)} d\varphi$$

– Λόγος συστροφής:

$$R_{spr} = \frac{\omega_{pr}}{\omega} = \frac{\pi}{180\omega^2} \frac{R_o V_{pr} A_{\varepsilon}^2}{\beta D_{pr}^2 \bar{A}_{\delta}} \int_{\pi}^{2\pi} \frac{c^2(\varphi)}{V^2(\varphi)} d\varphi$$