

# Μάθημα: Ατμοσφαιρική Ρύπανση

## Διάλεξη: Ασκήσεις διεργασιών απομάκρυνσης αιωρούμενων σωματιδίων



Διδάσκων: Ανέστης Βλυσίδης  
Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος  
Πανεπιστήμιο Πατρών  
E-mail: [anestisvlysidis@gmail.com](mailto:anestisvlysidis@gmail.com)

# Σχεδιασμός κυκλώνων

- Το μέγεθος των φυγόκεντρων δυνάμεων που ασκούνται στα σωματίδια εξαρτάται από τη:
- **Μάζα των σωματιδίων,**
- **Την ταχύτητα των αερίων αποβλήτων μέσα στον κυκλώνα και**
- **Την διάμετρο του κυκλώνα**

$$F_c = M_p \frac{u_i^2}{R}$$

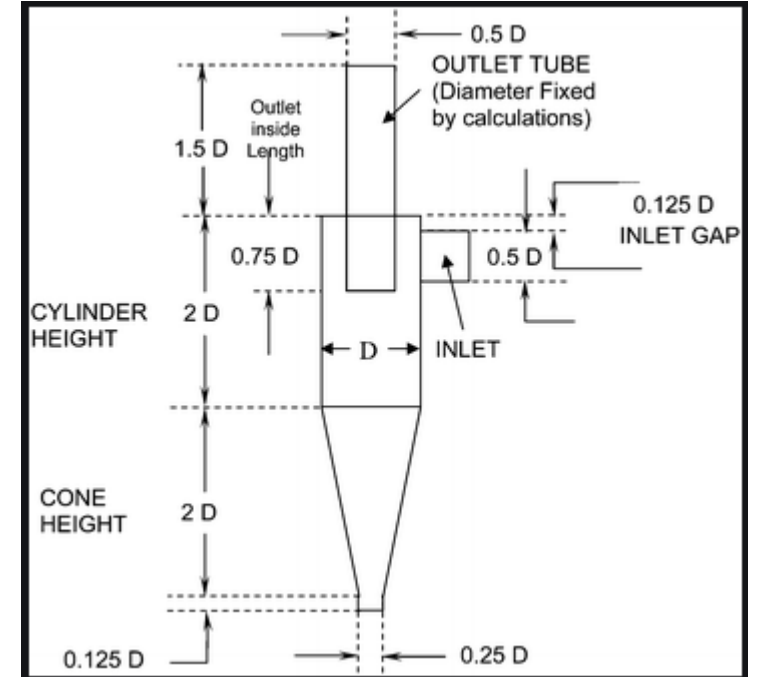
$F_c$  : η φυγόκεντρος δύναμη (N),

$M_p$  : η μάζα των σωματιδίων (kg),

$u_i^2/R$  : η φυγόκεντρος επιτάχυνση ( $m/s^2$ ) με

$u_i$  : την ταχύτητα των σωματιδίων και

$R$  : την ακτίνα του κυκλώνα (m).



Από την εξίσωση αυτή φαίνεται ότι η **φυγόκεντρος δύναμη**, και συνεπώς η **απόδοση του κυκλώνα**:  
**Αυξάνει με μείωση της ακτίνας του κυκλώνα.**

Μείωση της ακτίνας του κωνικού τμήματος του κυκλώνα οδηγεί και σε μείωση της απόστασης που τα σωματίδια πρέπει να διανύσουν μέχρι να καταλήξουν στο συλλέκτη.

# Σχεδιασμός κυκλώνων

- Κυκλώνες μεγάλης **διαμέτρου**, ίσης με **1 m**, (κυκλώνες τυπικής απόδοσης) έχουν ικανοποιητική απόδοση για σωματίδια με διάμετρο 40 – 50  $\mu\text{m}$ , ενώ για σωματίδια διαμέτρου κοντά στα 20  $\mu\text{m}$  η απόδοση πέφτει στο 50%.
- Οι κυκλώνες υψηλής απόδοσης, με **διάμετρο <23 cm** (συνήθως 15 – 23cm), παρουσιάζουν καλές αποδόσεις για σωματίδια διαμέτρου 15 – 20  $\mu\text{m}$  και αποδόσεις γύρω στο 80% για σωματίδια μικρότερα των 10  $\mu\text{m}$ .
- Η απόδοση πολλαπλών κυκλώνων που λειτουργούν σε **παραλληλία** φτάνει ως και **90%** για σωματίδια με διάμετρο 5 – 10 $\mu\text{m}$ .
- Οι **πολύ μικροί κυκλώνες** συχνά αντιμετωπίζουν **προβλήματα φθοράς** των τοιχωμάτων λόγω:
  - Της υψηλής ταχύτητας και των τριβών που αναπτύσσονται, καθώς και
  - Απόφραξης όταν το ρυπαντικό φορτίο (σωματίδια) είναι πολύ υψηλό.

# Σχεδιασμός κυκλώνων

- Ο υπολογισμός της απόδοσης του κυκλώνα για σωματίδια διαφορετικών διαμέτρων είναι **αρκετά σύνθετη διαδικασία**.
- Για το λόγο αυτό ως **σωματίδια αναφοράς** λαμβάνονται συνήθως τα σωματίδια εκείνης της διαμέτρου που **κατακρατούνται με απόδοση 50%**.
- Το μέγεθος των σωματιδίων αυτών δίδεται από την εξίσωση του **Lapple**:

$$d_{50} = \left( \frac{9 \cdot \mu \cdot b}{2 \cdot \pi \cdot N_e \cdot u_i \cdot \rho_p} \right)^{1/2}$$

$d_{50}$ : η διάμετρος των σωματιδίων που κατακρατούνται με απόδοση 50% (m),  
 $\mu$ : το ιξώδες των αερίων αποβλήτων (kg/m-s),  
 $b$ : η διάμετρος (ή το πλάτος) της εισόδου του κυκλώνα (m),  
 $N_e$ : ο αριθμός των περιδινήσεων στον εξωτερικό έλικα του κυκλώνα,  
 $u_i$ : η ταχύτητα εισόδου των αερίων αποβλήτων (m/s) και  
 $\rho_p$ : η πυκνότητα των στερεών σωματιδίων (kg/m<sup>3</sup>).

# Σχεδιασμός κυκλώνων

- Η απόδοση κατακράτησης για σωματίδια μικρότερης ή μεγαλύτερης διαμέτρου μπορεί να υπολογιστεί από τον **λόγο της διαμέτρου τους προς την  $d_{50}$**  (βλέπε επόμενο Σχήμα).
- Οι Theodore και DePaola (1980) προσάρμοσαν στην παραπάνω καμπύλη μια **αλγεβρική σχέση**, καθιστώντας τον υπολογισμό της απόδοσης πιο εύκολο και ακριβή:

$$n_j = \frac{1}{1 + (d_{50} / \overline{d}_{pj})^2}$$

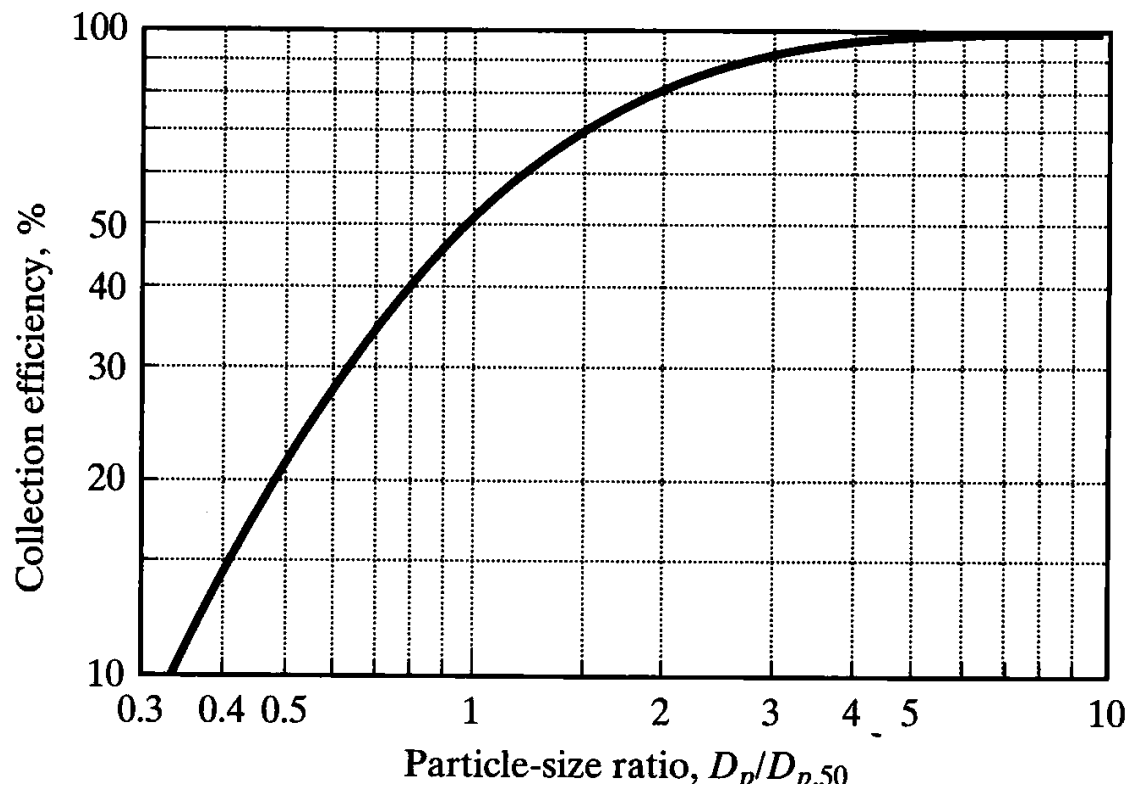
$n_j$ : η απόδοση του κυκλώνα για σωματίδια **συγκεκριμένης ομάδας** και  
 $\overline{d}_{pj}$ : η **χαρακτηριστική διάμετρος** των σωματιδίων της ομάδας αυτής.

Η ολική απόδοση του κυκλώνα υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$n_o = \sum n_j \cdot m_j$$

$n_o$ : η ολική απόδοση του κυκλώνα και  
 $m_j$ : το ποσοστό, κατά βάρος, των σωματιδίων συγκεκριμένης ομάδας.

# Διάγραμμα απόδοσης αεροκυκλώνα με βάση τις σχετικές διαστάσεις των σωματιδίων



$$d_{50} = \left( \frac{9 \cdot \mu \cdot b}{2 \cdot \pi \cdot N_e \cdot u_i \cdot \rho_p} \right)^{1/2}$$

$d_{50}$ : η διάμετρος των σωματιδίων που κατακρατούνται με απόδοση 50% (m),

$\mu$ : το ιξώδες των αερίων αποβλήτων (kg/m-s),

$b$ : η διάμετρος (ή το πλάτος) της εισόδου του κυκλώνα (m),  
 $N_e$ : ο αριθμός των περιδινήσεων στον εξωτερικό έλικα του κυκλώνα,

$u_i$ : η ταχύτητα εισόδου των αερίων αποβλήτων (m/s) και

$\rho_p$  η πυκνότητα των στερεών σωματιδίων (kg/m<sup>3</sup>).

$n_j$ : η απόδοση του κυκλώνα για σωματίδια συγκεκριμένης ομάδας και

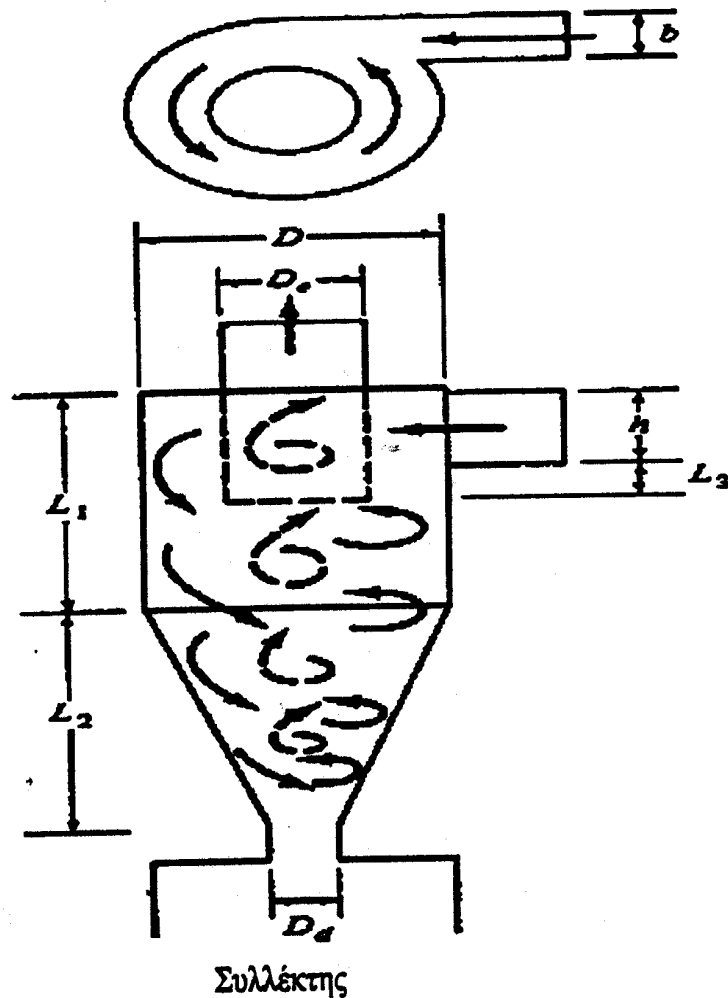
$$n_j = \frac{1}{1 + (d_{50} / \overline{d_{pj}})^2}$$

$\overline{d_{pj}}$ : η χαρακτηριστική διάμετρος των σωματιδίων της ομάδας αυτής.

# Σχεδιασμός κυκλώνων

- Γενικά, **υψηλές αποδόσεις** επιτυγχάνονται όταν το ρεύμα αερίου εισέρχεται με **μεγάλη ταχύτητα** στον κυκλώνα.
- Ταυτόχρονα, όμως, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η δημιουργούμενη **πτώση πίεσης**.
- Καθώς αυξημένη πτώση πίεσης μέσα στον κυκλώνα συνεπάγεται **αύξηση και του έργου του ανεμιστήρα**
- Κατά τον σχεδιασμό θα πρέπει να αναζητάμε τη βέλτιστη λύση, **ισοσταθμίζοντας** τους δύο αυτούς παράγοντες.

# Σχεδιαστικές παράμετροι κυκλώνα τυπικής απόδοσης:



- Διάμετρος κυκλώνα  $D$
- Μήκος (ή ύψος) κυλίνδρου  $L_1 = 2D$
- Μήκος κώνου  $L_2 = 2D$
- Διάμετρος εξόδου  $D_e = D/2 = h$
- Ύψος εισόδου  $h = D/2$
- Διάμετρος εισόδου (ή πλάτος)  $b = D/4 = L_3 = D_d$
- Διάμετρος εξόδου σωματιδίων  $D_d = D/4 = b = L_3$
- Μήκος αγωγού εξόδου αερίων  $L_3 + h = 5D/8$
- Αριθμός περιδινήσεων  $N_e = (L_1 + L_2/2)/h$



# Αδιάστατες σχεδιαστικές παράμετροι για κυκλώνες εφαπτομενικής εισόδου

Συμβολισμός	Παράμετρος	Τυπικής απόδοσης	Χαμηλής απόδοσης	Υψηλής απόδοσης
<b>D</b>	Διάμετρος κυκλώνα	1.0	1.0	1.0
<b>h</b>	Ύψος εισόδου	0.5	0.75	0.5
<b>b</b>	Διάμετρος εισόδου	0.25	0.375	0.2
<b>L<sub>3</sub>+h</b>	Μήκος εξόδου	0.625	0.875	0.5
<b>D<sub>e</sub></b>	Διάμετρος εξόδου	0.5	0.75	0.5
<b>L<sub>1</sub></b>	Μήκος κυλίνδρου	2.0	1.5	1.5
<b>L<sub>2</sub></b>	Μήκος κώνου	2.0	2.5	2.5

# Υπολογισμός της πτώσης πίεσης μέσα στον κυκλώνα.

- Υπάρχουν πολλά μοντέλα για τον υπολογισμό της **πτώσης πίεσης μέσα στον κυκλώνα**.
- Το απλούστερο και, ταυτόχρονα αποδεκτής ακρίβειας, είναι αυτό που προτείνουν οι Shepherd και Lapple:

$$H_v = K \cdot \frac{h \cdot b}{D_e^2}$$

$H_v$ : η **πτώση πίεσης** (αδιάστατο), εκφρασμένη σε αριθμούς πιεζομετρικού ύψους ταχύτητας εισαγωγής και

$K$  **σταθερά** η οποία εξαρτάται από την διάταξη του κυκλώνα και τις συνθήκες λειτουργίας του.

Ύψος εισόδου ( $h$ )

Διάμετρος εισόδου (ή πλάτος) ( $b$ )

$D_e$ : Διάμετρος εξόδου

- Θεωρητικά η τιμή του  $K$  μπορεί να ποικίλει.
- Όμως, στην περίπτωση ελέγχου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και για τυπικούς κυκλώνες με εφαπτομενική είσοδο του αέρα, οι τιμές του  $K$  είναι στο διάστημα 12 – 18.
- Ο Licht (1984) συστήνει τιμή της σταθεράς  $K$  ίση με 16 και κρίνει τα αποτελέσματα της εφαρμογής της παραπάνω απλής εξίσωσης πολύ ικανοποιητικά.

# Στατική πτώση πίεσης

- Η προηγούμενη πτώση πίεσης μετατρέπεται σε στατική πτώση πίεσης με τη χρήση της εξίσωσης:

$$\Delta P = \frac{1}{2} \cdot \rho_g \cdot u_i^2 \cdot H_v$$

$\Delta P$ : η πτώση πίεσης (N/m<sup>2</sup>)

$u_i$ : η ταχύτητα εισόδου των αερίων αποβλήτων (m/s)

$\rho_g$ : η πυκνότητα του αερίου (kg/m<sup>3</sup>)

$H_v$ : η πτώση πίεσης

- Η πτώση πίεσης στους κυκλώνες συνήθως ποικίλει από 250 - 4000 Pa ή (N/m<sup>2</sup>).
- Τέλος, από την πτώση πίεσης μπορεί να υπολογιστεί ο απαιτούμενος ρυθμός κατανάλωσης ενέργειας:

$$\frac{dw_f}{dt} = Q \cdot \Delta P$$

$\frac{dw_f}{dt}$  : ο ρυθμός κατανάλωσης ενέργειας (W) και

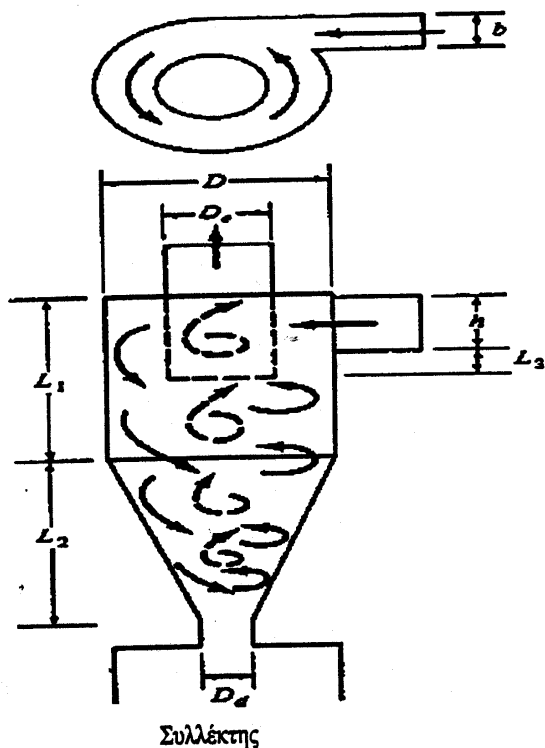
$Q$  : η ογκομετρική παροχή του αερίου (m<sup>3</sup>/s).

# Μεθοδολογία σχεδιασμού

- Ο σχεδιασμός συστημάτων κυκλώνων αποτελεί ένα συμβιβασμό ανάμεσα σε τρεις παράγοντες:
  - Την **απόδοση**,
  - Την **απώλεια ενέργειας** και
  - Το **μέγεθος του κυκλώνα**.
- Μία δόκιμη μεθοδολογία σχεδιασμού κυκλώνα είναι η χρήση διαδικασίας **δοκιμής-σφάλματος**:
- Αρχικά επιλέγεται τιμή για την **διάμετρο** του κυκλώνα.
- Στην συνέχεια υπολογίζεται η **συνολική απόδοση**.
- Εάν η απόδοση είναι πολύ **χαμηλή**, επιλέγεται μικρότερη διάμετρος και επαναλαμβάνεται η παραπάνω διαδικασία.
- Εφόσον η απόδοση είναι ικανοποιητική, ελέγχεται η **πτώση πίεσης**.
- Εάν αυτή είναι πολύ υψηλή, θα πρέπει είτε να επιλεγθεί διαφορετικός τύπος κυκλώνα ή να μοιραστεί η ροή του αερίου σε δύο **παράλληλους κυκλώνες**.

# Άσκηση 1

Αέρια απόβλητα με ρυθμό ροής  $8 \text{ m}^3/\text{s}$  καθαρίζονται από κυκλώνα συμβατικών διαστάσεων. Η διάμετρος του κυκλώνα είναι  $2 \text{ m}$ , και η θερμοκρασία του αέρα  $77^\circ\text{C}$ . Να υπολογιστεί η απόδοση του κυκλώνα για σωματίδια πυκνότητας  $1,6 \text{ g/cm}^3$  και διαμέτρου  $9 \mu\text{m}$ .

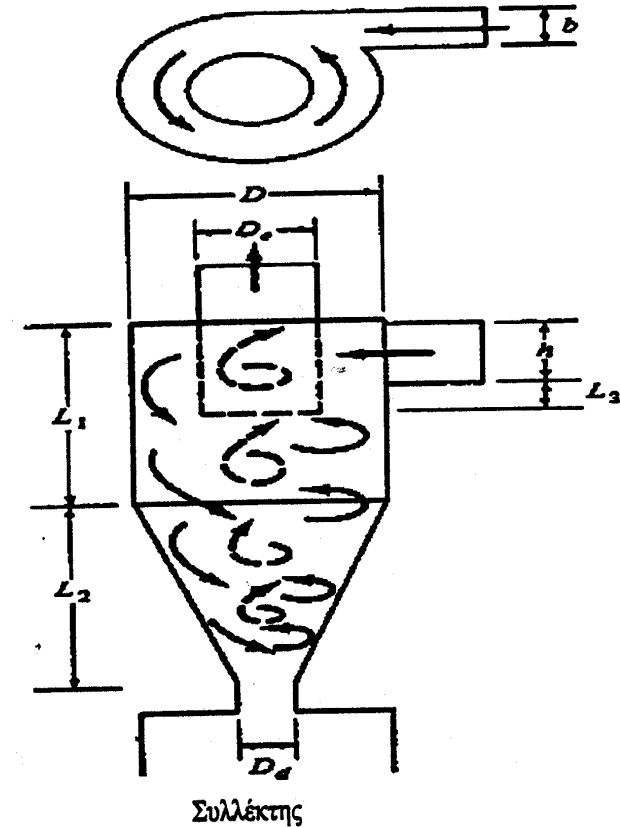


- Διάμετρος κυκλώνα  $D$
- Μήκος (ή ύψος) κυλίνδρου  $L_1 = 2D$
- Μήκος κώνου  $L_2 = 2D$
- Διάμετρος εξόδου  $D_e = D/2 = h$
- Ύψος εισόδου  $h = D/2$
- Διάμετρος εισόδου (ή πλάτος)  $b = D/4 = L_3 = D_d$
- Διάμετρος εξόδου σωματιδίων  $D_d = D/4 = b = L_3$
- Μήκος αγωγού εξόδου απαερίων  $L_3 + h = 5D/8$
- Αριθμός περιδινήσεων  $N_e = (L_1 + L_2/2)/h$

# Λύση Άσκησης 1

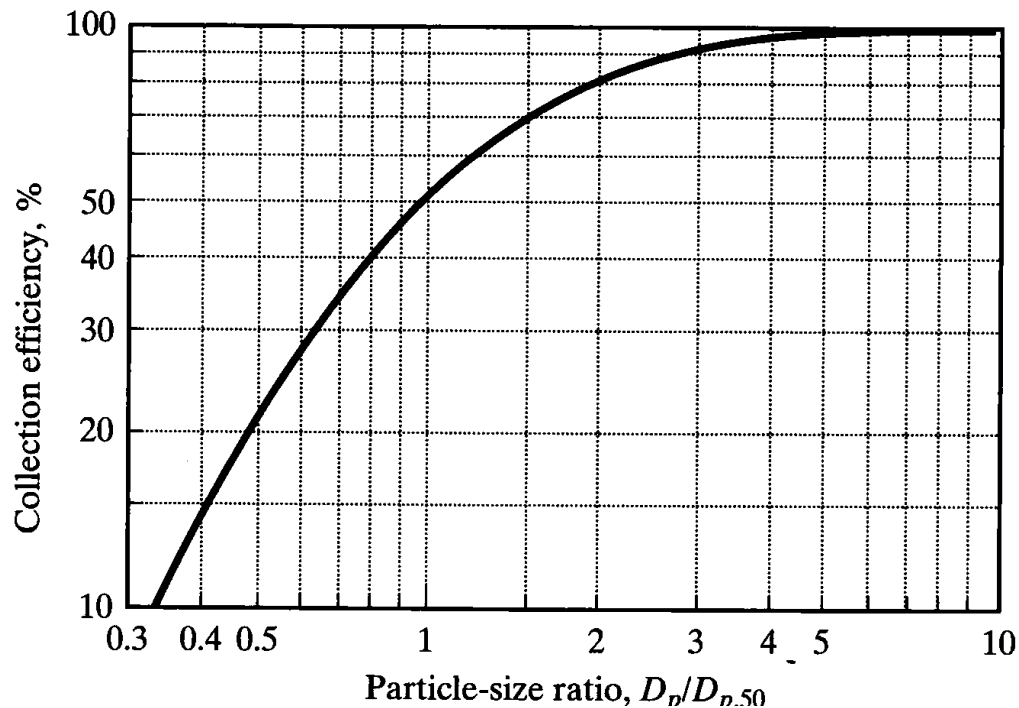
- Αρχικά υπολογίζουμε την  $d_{50}$  → Σωματίδια αναφοράς (m) που κατακρατούνται με απόδοση 50%.
- Από το σχήμα έχουμε:  $b = D/4 = 0,5\text{m}$ ,  $h = D/2 = 1,0\text{ m}$  και  $N_e = 6$
- Η επιφάνεια εισόδου είναι:  $A = 0,5\text{ m}^2$
- $u_i = Q/A = 8\text{ (m}^3/\text{s)} / 0,5\text{ (m}^2) = 16\text{ m/s} = 960\text{ m/min}$
- Σχόλιο: Η ταχύτητα εισόδου συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 15-30 m/s)
  
- Στους 77°C είναι  $\mu = 2,1 \cdot 10^{-5}\text{kg/m}\cdot\text{s}$
- Από την εξίσωση του Lapple:

$$d_{50} = \left( \frac{9 \cdot \mu \cdot b}{2 \cdot \pi \cdot N_e \cdot u_i \cdot \rho_p} \right)^{1/2} = \left( \frac{9 \cdot 0,5 \cdot 2,1 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot \pi \cdot 6 \cdot 16 \cdot 1600} \right)^{1/2} \text{ m} = 9,9 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 9,9 \mu\text{m}$$



# Λύση Άσκησης 1 (συνέχ')

- Για τα σωματίδια με διάμετρο 9  $\mu\text{m}$  έχουμε  $d/d_{50} = 9/9,9 = 0,91$
- Από το σχήμα, βλέπουμε ότι η απόδοση για τα σωματίδια αυτά είναι περίπου 47%.



## Άσκηση 2

Ρεύμα αέρα, με ρυθμό ροής  $150 \text{ m}^3/\text{min}$ , θερμοκρασίας  $T=350\text{K}$  και πίεσης  $P=1 \text{ atm}$ , περιέχει σωματίδια πυκνότητας  $1600 \text{ kg}/\text{m}^3$  και με την κατανομή μεγέθους που δίνεται παρακάτω. Υπολογίστε την ολική απόδοση κυκλώνα τυπικής απόδοσης και διαμέτρου  $1 \text{ m}$ .

Δίνεται επίσης το ιξώδες του αέρα  $\mu = 0,075 \text{ kg}/\text{m h}$

Μέγεθος σωματιδίων ( $\mu\text{m}$ )	ποσοστό κατά βάρος (%)
0 – 2	1
2 – 4	9
4 – 6	10
6 – 10	30
10 – 18	30
18 – 30	14
30 – 50	5
50 – 100	1



# Λύση Άσκησης 2

- Για κυκλώνα τυπικής απόδοσης:

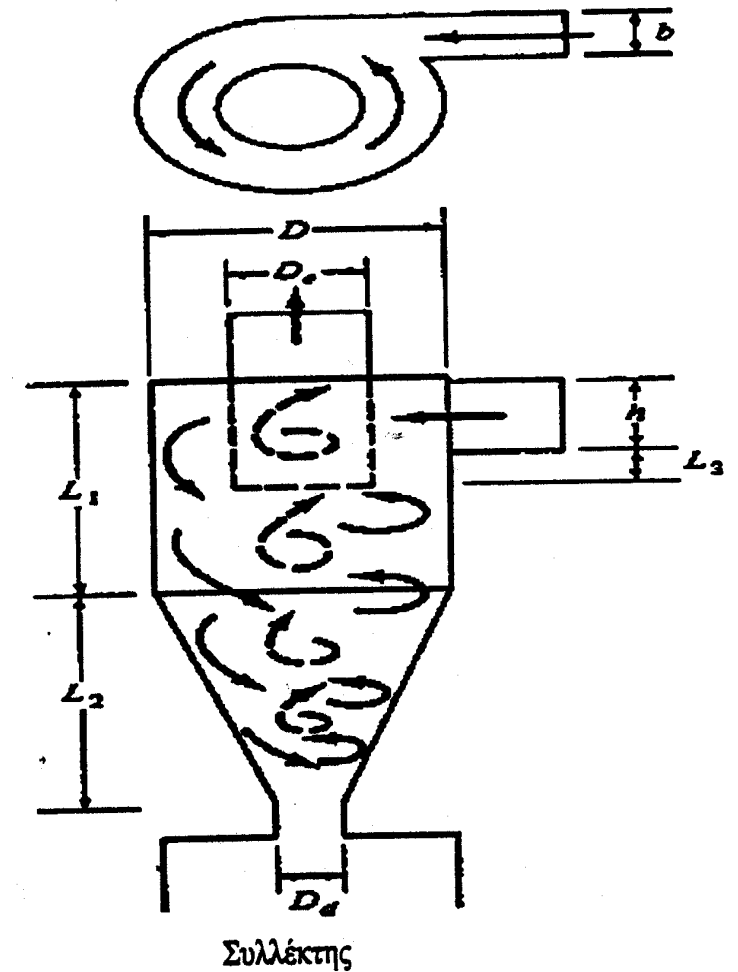
$$h = \frac{1}{2} D = \frac{1}{2} m$$

$$b = \frac{1}{4} D = \frac{1}{4} m$$

$$N_e = 6$$

- Η ταχύτητα εισόδου του αέρα ισούται με:

$$u_i = \frac{Q}{h \cdot b} = \frac{150 m^3 / \text{min} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 s}}{\frac{1}{2} m \cdot \frac{1}{4} m} = 20 m / s$$



# Λύση Άσκησης 2 (συνέχ')

Σωματίδια αναφοράς (m) που κατακρατούνται με απόδοση 50%.

- Από την εξίσωση του Lapple υπολογίζεται η  $d_{50}$ :

$$d_{50} = \left( \frac{9 \cdot \mu \cdot b}{2 \cdot \pi \cdot N_e \cdot u_i \cdot \rho_p} \right)^{1/2} = \left( \frac{9 \cdot 0,075 \frac{kg}{m \cdot hr} \cdot \frac{hr}{3600s} \cdot \frac{1}{4} m}{2 \cdot \pi \cdot 6 \cdot 20 \frac{m}{s} \cdot 1600 \frac{kg}{m^3}} \right)^{1/2} = 6,23 \cdot 10^{-6} m = 6,23 \mu m$$

# Λύση Άσκησης 2 (συνέχ')

Στην συνέχεια υπολογίζουμε την **απόδοση** για τα σωματίδια **διαφορετικών μεγεθών**, από τις παρακάτω εξισώσεις.

Σαν χαρακτηριστικό μέγεθος χρησιμοποιείται ο **αριθμητικός μέσος** κάθε διαστήματος.

$$n_j = \frac{1}{1 + (d_{50} / \overline{d}_{pj})^2}$$

$n_j$ : η απόδοση του κυκλώνα για σωματίδια **συγκεκριμένης ομάδας** και

$\overline{d}_{pj}$ : η **χαρακτηριστική διάμετρος** των σωματιδίων της ομάδας αυτής.

$$n_o = \sum n_j \cdot m_j$$

$n_o$ : η **ολική απόδοση** του κυκλώνα και

$m_j$ : το ποσοστό, κατά βάρος, των σωματιδίων συγκεκριμένης ομάδας.

# Λύση Άσκησης 2 (συνέχ')

$$n_j = \frac{1}{1 + (d_{50} / \overline{d}_{pj})^2}$$

$$n_o = \sum n_j \cdot m_j$$

- Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι υπολογισμοί:

j	Πεδίο μεγέθους ( $\mu\text{m}$ )	$\overline{d}_{pj}$ ( $\mu\text{m}$ )	$d_{50} / \overline{d}_{pj}$	$n_j$	$m_j$ (%)	$n_j m_j$ (%)
1	0 – 2	1	6.23	0.02	1	0.02
2	2 – 4	3	2.08	0.18	9	1.62
3	4 – 6	5	1.25	0.39	10	3.9
4	6 – 10	8	0.779	0.62	30	18.6
5	10 – 18	14	0.445	0.83	30	24.9
6	18 – 30	24	0.260	0.94	14	13.2
7	30 – 50	40	0.156	0.98	5	4.9
8	50 – 100	75	0.083	0.99	1	<u>1</u>
						68.1

- Επομένως, η συνολική απόδοση ισούται με:  $n_o = \sum_{j=1}^8 n_j \cdot m_j = 68.1\%$

# Σχεδιασμός σακκόφιλτρων

- Ο σχεδιασμός ενός συστήματος σακκόφιλτρων διαφέρει από τις άλλες μεθόδους ως προς το ότι **η απόδοση του συστήματος δεν αποτελεί σχεδιαστικό πρόβλημα.**
- Ο λόγος είναι ότι ένα σωστά σχεδιασμένο και σωστά συντηρημένο σύστημα σακκόφιλτρων, το οποίο λειτουργεί σύμφωνα με τις προδιαγραφές του, **συλλέγει σωματίδια διαμέτρων  $< 1 \mu\text{m}$  μέχρι και μερικών εκατοντάδων  $\mu\text{m}$  με απόδοση μεγαλύτερη από 99%.**
- Ο σχεδιασμός ενός συστήματος σακκόφιλτρων, επομένως, περιλαμβάνει την **βέλτιστη επιλογή της ταχύτητας φιλτραρίσματος** έτσι ώστε να εξισορροπηθούν το **κόστος κεφαλαίου** (που σχετίζεται με το μέγεθος των σακκόφιλτρων) με το **κόστος λειτουργίας** (που σχετίζεται με την πτώση πίεσης σε αυτά).

# Σχεδιασμός σακκόφιλτρων

- Η ταχύτητα φιλτραρίσματος (**μέση ταχύτητα εισόδου του αερίου στο φίλτρο**) είναι ίση με το λόγο του ρυθμού ροής του αερίου προς την καθαρή επιφάνεια του φίλτρου:

$$V = \frac{Q}{A}$$

V: η ταχύτητα φιλτραρίσματος (m/min)

Q: ο ρυθμός ροής του αερίου (m<sup>3</sup>/min)

A: η καθαρή επιφάνεια υφάσματος (m<sup>2</sup>)

- Συχνά η ταχύτητα φιλτραρίσματος ονομάζεται λόγος αέρα ή αερίου προς επιφάνεια υφάσματος (air-to-cloth ratio ή gas-to-cloth ratio) και χρησιμοποιείται για τη σύγκριση διαφόρων τύπων σακκόφιλτρων.

Μέγιστες  
ταχύτητες  
φιλτραρίσματος  
για σακκόφιλτρα  
τινάγματος  
(Shaker) και  
αναστροφής αέρα  
(Reverse Air)

Είδος σωματιδίων	Μέγιστη ταχύτητα φιλτραρίσματος (m/min)
Ενεργός άνθρακας, Μαύρος άνθρακας, Απορρυπαντικά, Ατμοί μετάλλων	0.46
Οξείδιο του αλουμινίου, Άνθρακας, Λιπάσματα, Γραφίτης, Σιδηρομεταλλεύματα, Ασβέστης, Χρωστικές ουσίες, Ιπτάμενη τέφρα, Βαφές	0.61
Αλουμίνιο, Άργιλος, Κωκ, Κάρβουνο, Κακάο, Οξείδιο του μολύβδου, Mica, Σάπωνες, Ζάχαρη, Τάλκης	0.69
Βωξίτης, Κεραμικά, Μεταλλεύματα Χρωμίου, Άλευρα, Πυρόλιθος, Γυαλί, Γύψος, Πλαστικά, Τσιμέντο	0.76
Αμιαντος, Ασβεστόλιθος, Χαλαζίας, Οξείδιο του πυριτίου	0,84
Σπόροι δημητριακών, Μάρμαρο, Γη διατόμων, Αλάτι	0.91 – 0.99
Δέρμα, Χαρτί, Φύλλα καπνού, Ξύλο	1.07

Μέγιστες  
ταχύτητες  
φιλτραρίσματος  
για σακκόφιλτρα  
με παλμικά  
ακροφύσια  
(Pulse-Jet)

Είδος σωματιδίων	Μέγιστη ταχύτητα φιλτραρίσματος (m/min)
Άνθρακας, Γραφίτης, Ατμοί μεταλλουργίας, Σάπωνες, Απορρυπαντικά, Οξείδιο του ψευδαργύρου	1.5 – 1.8
Τσιμέντο (κοινό), Άργιλος (κοινή), Πλαστικά, Χρωστικές ουσίες, Άμυλο, Ζάχαρη, Ψευδάργυρος (μεταλλικός)	2.1 – 2.4
Οξείδιο του αλουμινίου, Σκόνες τσιμέντου, Άργιλος (επεξεργασμένη), Ασβέστης, Ασβεστόλιθος, Γύψος, Μίκα, Χαλαζίας, Σόγια, Τάλκης	2.7 – 3.4
Κακάο, Σοκολάτα, Αλεύρι, Σπόροι, Σκόνη δέρματος, Πριονίδι, Φύλλα καπνού	3.7 – 4.3



# Υπολογισμός πτώσης πίεσης

- Η πτώση πίεσης σε ένα φίλτρο αυξάνει με το χρόνο, την ταχύτητα του αερίου και τη **συγκέντρωση των σωματιδίων**.
- Η ολική πτώση πίεσης μέσω του φίλτρου και του στρώματος των σωματιδίων που δημιουργείται για χρόνο λειτουργίας ισούται με:
- $\Delta P_{ολ} = \Delta P_{φιλ} + \Delta P_{στρ} = K_1 \cdot V + K_2 \cdot c_0 \cdot V^2 \cdot t$  όπου:  $K_1$  και  $K_2$  σταθερές.
- Τιμές της  $K_1$  μπορούν να δοθούν από τους **κατασκευαστές των φίλτρων** ή από πειραματικά δεδομένα.
- Ο Calvert (1984) προτείνει την τιμή  $K_1 = 350 \text{ N min m}^{-3}$  σε περίπτωση έλλειψης τέτοιων δεδομένων.
- Η  $K_2$  ονομάζεται **ειδική αντίσταση** του στρώματος των σωματιδίων στο φίλτρο (dust cake) και συνήθως εκφράζεται σε  $s^{-1}$ .
- Οι τιμές της  $K_2$  ποικίλουν και ακριβείς τιμές για κάθε περίπτωση μπορούν να ληφθούν μόνο από πειραματικά δεδομένα.

# Χρόνος φιλτραρίσματος

- Τα σακκόφιλτρα τινάγματος και αναστροφής αέρα κατασκευάζονται αποτελούμενα από αρκετά **ανεξάρτητα διαμερίσματα**.
- Για λόγους συντήρησης (π.χ. καθαρισμού των σάκων από τα συλλεγόμενα σωματίδια) **ένα κάθε φορά** διαμέρισμα τίθεται εκτός γραμμής λειτουργίας για ένα χρονικό διάστημα  $t_c$  (**χρόνος καθαρισμού & συντήρησης ενός διαμερίσματος**).
- Εάν υπάρχουν  $N$  **διαθέσιμα διαμερίσματα σακκόφιλτρων** σε όλη την εγκατάσταση (δλδ σε ένα baghouse) **ο συνολικός χρόνος φιλτραρίσματος**  $t_f$  για ένα διαμέρισμα πριν αυτό σταματήσει για τον επόμενο καθαρισμό του (αφού ήδη έχουν υποστεί καθαρισμό διαδοχικά όλα τα υπόλοιπα διαμερίσματα) θα είναι ίσος με:

$$t_f = t_c \cdot (N - 1)$$

Ο χρόνος καθαρισμού κάθε διαμερίσματος  $t_c$  μπορεί να κυμαίνεται από 1 έως 5 min ενώ ο συνολικός χρόνος λειτουργίας ενός διαμερίσματος μεταξύ δύο διαδοχικών καθαρισμών του  $t_f$  κυμαίνεται από 30 min έως 2h

# Χρόνος φιλτραρίσματος

- Ο καθορισμός του χρονικού κύκλου καθαρισμού και λειτουργίας κάθε διαμερίσματος του σακκόφιλτρου αποτελεί **σημαντική σχεδιαστική παράμετρο**.
- Με καθορισμένο καταρχήν τον **αριθμό διαμερισμάτων** ο μηχανικός πρέπει να επιλέξει χρονικό κύκλο ισορροπώντας μεταξύ της **μέγιστης αποδεκτής  $\Delta P_{ολ}$**  και της **αναμενόμενης φυσικής φθοράς των σάκων** από το συχνό καθαρισμό.

# Αριθμός διαμερισμάτων συναρτήσει της καθαρής επιφάνειας υφάσματος

Καθαρή επιφάνεια υφάσματος (m <sup>2</sup> )	Αριθμός διαμερισμάτων
0.1 – 400	2
400 – 1100	3
1100 – 2300	4 - 5
2300 – 3700	6 - 7
3700 – 5600	8 - 10
5600 – 7400	11 - 13
7400 – 10200	14 - 16
10200 – 13900	17 - 20
> 13900	> 20

# Υπολογισμός κόστους αγοράς και εγκατάστασης

- Η βασική τιμή αγοράς ενός συστήματος σακκόφιλτρων υπολογίζεται με βάση την **καθαρή επιφάνεια υφάσματος**.
- Το **συνολικό κόστος** εξαρτάται από:
- τον **τύπο** του σακκόφιλτρου (τινάγματος, αναστροφής αέρα ή με παλμικά ακροφύσια),
- το βασικό **υλικό κατασκευής** (κοινός ή ανοξείδωτος χάλυβας),
- τη θέση και αντίστοιχα τον τρόπο λειτουργίας του ανεμιστήρα των απαερίων (με αναρρόφηση ή όχι) και
- την ύπαρξη ή όχι εξωτερικής μόνωσης.

# Υπολογισμός κόστους αγοράς και εγκατάστασης

- Ο τυπικός εμπορικός τύπος σακκόφιλτρου είναι κατασκευασμένος από κοινό χάλυβα, χωρίς εξωτερική μόνωση και με τον ανεμιστήρα να λειτουργεί στην είσοδο των αερίων.
- Στην περίπτωση αυτή η βασική τιμή αγοράς δίδεται από την εξίσωση:

$$BBP = a_1 + b_1 \cdot NCA$$

BBP: η βασική τιμή αγοράς χωρίς το κόστος των σάκων  
(basic baghouse price)

NCA: η καθαρή επιφάνεια υφάσματος (net cloth area) (m<sup>2</sup>)

$a_1$ ,  $b_1$  σταθερές που δίδονται από σχετικούς πίνακες

# Υπολογισμός κόστους αγοράς και εγκατάστασης

Για βελτιωμένους τύπους σακκόφιλτρων κάθε φορά προστίθεται το κόστος της συγκεκριμένης βελτίωσης:

$$SSA = a_2 + b_2 \cdot NCA$$

όπου: *SSA* το πρόσθετο κόστος για σκελετό από ανοξείδωτο χάλυβα (stainless-steel add-on) και  $a_2, b_2$  σταθερές που δίδονται από σχετικούς πίνακες.

$$INS = a_3 + b_3 \cdot NCA$$

όπου: *INS* το πρόσθετο κόστος της εξωτερικής μόνωσης (insulation add-on) και  $a_3, b_3$  σταθερές που δίδονται από σχετικούς πίνακες.

$$SAO = a_4 + b_4 \cdot NCA$$

όπου: *SAO* το πρόσθετο κόστος της λειτουργίας του ανεμιστήρα με αναρόφηση (suction add-on) και  $a_4, b_4$  σταθερές που δίδονται από σχετικούς πίνακες.

Τελικά για τη συνολική τιμή κατασκευής (*FEC*) πρέπει να προστεθεί και το κόστος των σάκων που θα χρησιμοποιηθούν ( $C_b$ ) όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$FEC = BBP + SSA + INS + SAO + C_b$$

Τιμές των σταθερών που εμφανίζονται στα διάφορα είδη κόστους και για διαφορετικούς τύπους σακκόφιλτρων

		Είδος σακκόφιλτρου		
Σταθερά		Τινάγματος	Αναστροφής αέρα	Παλμικών ακροφυσίων
(BBP)	$a_1$	\$6600	\$25680	\$5370
	$b_1$	\$35.7/m <sup>2</sup>	\$32.3/m <sup>2</sup>	\$81.8/m <sup>2</sup>
(SSA)	$a_2$	\$7340	\$11620	\$1650
	$b_2$	\$20.5/m <sup>2</sup>	\$19.3/m <sup>2</sup>	\$53.8/m <sup>2</sup>
(INS)	$a_3$	\$2280	\$11200	\$4910
	$b_3$	\$19.1/m <sup>2</sup>	\$17.7/m <sup>2</sup>	\$25.8/m <sup>2</sup>
(SAO)	$a_4$	\$2260	\$1960	0
	$b_4$	\$2.7/m <sup>2</sup>	\$3.4/m <sup>2</sup>	0



# Κόστος αγοράς σάκων

Υφασμα	Τινάγματος <1900m <sup>2</sup>	Είδος σακκόφιλτρου <sup>1</sup>	
		Αναστροφής αέρα ή τινάγματος >1900m <sup>2</sup>	Παλμικών ακροφυσιών
Cotton	4.8	4.3	-
Nylon	8.1	7.5	-
Polypropylene	7.0	5.9	7.5
Orlon	7.0	5.9	10.2
Dacron	4.3	3.8	6.5
Nomex	12.4	11.3	14.0
Glass	5.4	4.8	-

<sup>1</sup> Οι τιμές είναι σε δολάρια, ανά μονάδα επιφάνειας (m<sup>2</sup>) του σάκου.

# Υπολογισμός κόστους αγοράς και εγκατάστασης

- Μια άλλη κατηγορία κόστους είναι η **τιμή προμήθειας** του συστήματος (PEC) που είναι συνήθως υψηλότερη της **τιμής κατασκευής** (FEC) και δίδεται από τη σχέση:

$$PEC = \frac{FEC}{0.82}$$

- PEC: η τιμή προμήθειας (purchased equipment cost) και
  - FEC: η τιμή κατασκευής (fabricated equipment cost).
- 
- Το συνολικό κόστος εγκατάστασης (TIC) που περιλαμβάνει όλες τις προηγούμενες κατηγορίες είναι:

$$TIC = \text{κόστος}_{\text{τελικής}_{\text{εγκατάστασης}}} + PEC \approx 2 \cdot PEC$$

## Άσκηση 3

- Αέρια απόβλητα με ρυθμό ροής  $12 \text{ m}^3/\text{s}$  πρέπει να καθαριστούν. Για τον καθαρισμό τους χρησιμοποιείται φίλτρο από σάκους διαμέτρου  $0,4 \text{ m}$  και μήκους  $8,0 \text{ m}$ . Η ταχύτητα διόδου από το φίλτρο καθορίζεται στα  $2,4 \text{ m}/\text{min}$ . Να υπολογιστεί ο αριθμός των σάκων που απαιτούνται για συνεχή καθαρισμό του ρεύματος των αερίων αποβλήτων.

# Λύση Άσκησης 3

- Αρχικά υπολογίζουμε την επιφάνεια του υφάσματος που χρειάζεται:

$$A = \frac{Q}{V} = \frac{12 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot \frac{60 \text{ min}}{\text{min}}}{2.4 \frac{\text{m}}{\text{min}}} = 300 \text{m}^2$$

- Η επιφάνεια κάθε σάκου είναι:  $\pi * d * h = \pi * 0,4\text{m} * 8\text{m} = 10 \text{ m}^2$ 
  - Υποθέτοντας κυλινδρικό σχήμα παίρνοντας υπόψιν την μεγάλη επιφάνεια μόνο.
- Άρα ο συνολικός αριθμός σάκων είναι:

$$\frac{300 \text{m}^2}{10 \text{m}^2} = 30 \text{ _ σάκοι}$$

# Άσκηση 4

- Υπολογίστε την **απαιτούμενη επιφάνεια υφάσματος** συστήματος σακκόφιλτρων τινάγματος (Shaker), το οποίο επεξεργάζεται  $1100 \text{ m}^3/\text{min}$  αέρα που περιέχει σκόνη βιομηχανικού άλευρου.
- Καθορίστε επίσης τον **αριθμό των διαμερισμάτων** καθώς και τον **αριθμό των σάκων** που χρειάζονται, εάν γνωρίζετε ότι κάθε σάκος έχει μήκος  $2,4 \text{ m}$  και διάμετρο  $0,15 \text{ m}$ .

# Λύση Άσκησης 4

- Από τον Πίνακα βλέπουμε ότι η μέγιστη επιτρεπτή ταχύτητα φιλτραρίσματος για τα σακκόφιλτρα τινάγματος στην περίπτωση αλεύρου είναι:

$$V = 0.76 \text{ m/min}$$

- Επομένως, η καθαρή επιφάνεια του υφάσματος του φίλτρου ισούται με:

$$A = Q/V = (1100 \text{ m}^3/\text{min}) / (0,76 \text{ m/min}) = 1447 \text{ m}^2$$

- Βάσει πινάκων και για  $1447 \text{ m}^2$  καθαρή επιφάνεια υφάσματος, επιλέγεται η χρήση 4 διαμερισμάτων, με  $362 \text{ m}^2$  το καθένα.
- Η επιφάνεια κάθε σάκου ισούται με:

$$\pi * d * h = \pi \cdot 2,4 \text{ m} \cdot 0,15\text{m} = 1,1 \text{ m}^2$$

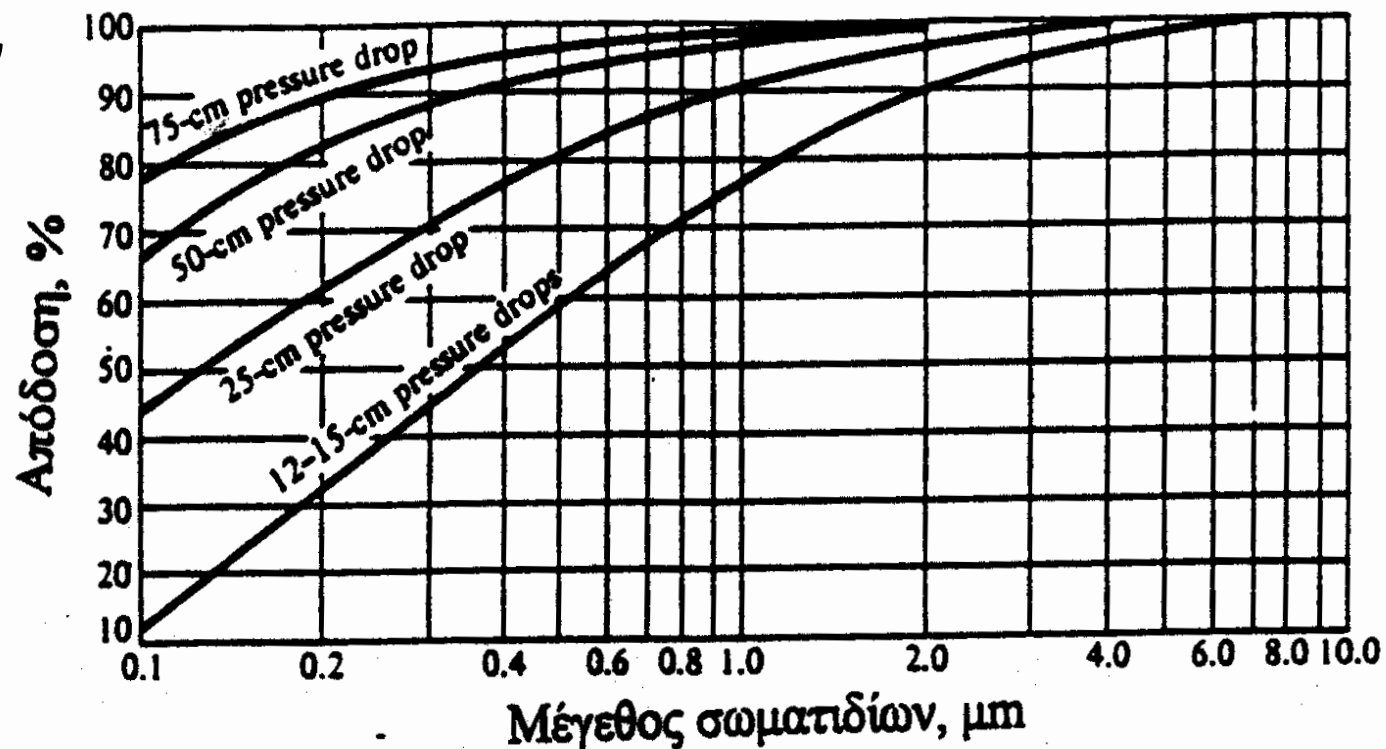
- Άρα, ο απαιτούμενος αριθμός σάκων είναι:  
 $(4 \cdot 362 \text{ m}^2) / (1,1 \text{ m}^2/\text{σάκο}) = 1316 \text{ σάκοι}$

Είδος σωματιδίων	Μέγιστη ταχύτητα φιλτραρίσματος (m/min)
Ενεργός άνθρακας, Μαύρος άνθρακας, Απορρυπαντικά, Ατμοί μετάλλων	0.46
Οξείδιο του αλουμινίου, Άνθρακας, Λιπάσματα, Γραφίτης, Σιδηρομεταλλεύματα, Ασβέστης, Χρωστικές ουσίες, Ιπτάμενη τέφρα, Βαφές	0.61
Αλουμίνιο, Αργίλος, Κωκ, Κάρβουνο, Κακάο, Οξείδιο του μολύβδου, Mica, Σάπωνες, Ζάχαρη, Τάλκης	0.69
Βωξίτης, Κεραμικά, Μεταλλεύματα Χρωμίου, Άλευρα, Πυρόλιθος, Γυαλί, Γύψος, Πλαστικά, Τσιμέντο	0.76
Αμιάντος, Ασβεστόλιθος, Χαλαζίας, Οξείδιο του πυριτίου	0,84
Σπόροι δημητριακών, Μάρμαρο, Γη διατόμων, Αλάτι	0.91 – 0.99
Δέρμα, Χαρτί, Φύλλα καπνού, Ξύλο	1.07

Καθαρή επιφάνεια υφάσματος (m <sup>2</sup> )	Αριθμός διαμερισμάτων
0.1 – 400	2
400 – 1100	3
1100 – 2300	4 - 5
2300 – 3700	6 - 7
3700 – 5600	8 - 10
5600 – 7400	11 - 13
7400 – 10200	14 - 16
10200 – 13900	17 - 20
> 13900	> 20

# Υγροί καθαριστές

- Η απόδοση των **υγρών καθαριστήρων** εξαρτάται κυρίως από την **πτώση πίεσης**, γι' αυτό και διαφορετικού τύπου υγροί καθαριστήρες που λειτουργούν σε παρόμοιες πτώσεις πίεσης έχουν και **παραπλήσιες αποδόσεις**.
- Το άλλο στοιχείο που επηρεάζει την απόδοση των υγρών καθαριστήρων είναι το **μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων**.
- Η απόδοση των υγρών καθαριστήρων συνήθως δίδεται από **διαγράμματα**



Διάγραμμα απόδοσης υγρών καθαριστήρων ως προς την πτώση πίεσης και το μέγεθος των σωματιδίων

# Σχεδιασμός υγρών καθαριστήρων

- Σημαντική παράμετρος κατά το σχεδιασμό ενός υγρού καθαριστήρα είναι η **ικανότητα διείσδυσης** των σωματιδίων μέσω του υγρού καθαριστήρα, η οποία ορίζεται ως:

$$p_t = 1 - n$$

$p_t$ : η ικανότητα διείσδυσης  
 $n$ : η απόδοση του καθαριστήρα

**Για την περίπτωση αντιρροής σε κατακόρυφο θάλαμο, ο Calvert (1977) ανέπτυξε την παρακάτω εξίσωση:**

$$p_{t_d} = \exp\left(-\frac{3 \cdot Q_L \cdot V_{t_d} \cdot z \cdot n_d}{4 \cdot Q_G \cdot r_d \cdot (V_{t_d} - V_G)}\right) = \exp\left(-0.25 \cdot \frac{A_d \cdot V_{t_d} \cdot n_d}{Q_G}\right)$$



# Σχεδιασμός υγρών καθαριστήρων

- Για την περίπτωση αντιρροής σε κατακόρυφο θάλαμο, ο Calvert (1977) ανέπτυξε την παρακάτω εξίσωση:

$$p_{td} = \exp\left(-\frac{3 \cdot Q_L \cdot V_{td} \cdot z \cdot n_d}{4 \cdot Q_G \cdot r_d \cdot (V_{td} - V_G)}\right) = \exp\left(-0.25 \cdot \frac{A_d \cdot V_{td} \cdot n_d}{Q_G}\right)$$

Η εξίσωση του Calvert υποθέτει ότι τα σταγονίδια που δημιουργούνται κατά τον ψεκασμό είναι:

**Ομοιόμορφου μεγέθους** και αποκτούν **αμέσως** την τελική ταχύτητα κατακάθισης.

$p_{td}$ : η ικανότητα διείσδυσης μιας συγκεκριμένης ομάδας μεγέθους σωματιδίων (κυμαίνεται μεταξύ 0 και 1.0),

$Q_L$ : ο ρυθμός ροής του υγρού ( $m^3/s$ ),

$Q_G$ : ο ρυθμός ροής του αερίου ( $m^3/s$ ),

$V_G$ : η επιφανειακή ταχύτητα του αερίου ( $cm/s$ ),

$V_{td}$ : η τελική ταχύτητα κατακάθισης των σταγονιδίων ( $cm/s$ ),

$n_d$ : η ικανότητα συλλογής ενός σταγονιδίου (κυμαίνεται μεταξύ 0 και 1.0),

$r_d$ : η ακτίνα ενός σταγονιδίου ( $cm$ ),

$z$ : το μήκος της ζώνης επαφής ( $cm$ ) και

$A_d$ : η προβαλλόμενη επιφάνεια όλων των σταγονιδίων ( $cm^2$ )

# Σχεδιασμός υγρών καθαριστήρων

- Η προβαλλόμενη επιφάνεια των σταγονιδίων υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$A_d = \frac{3 \cdot Q_L \cdot z}{r_d \cdot (V_{td} - V_G)}$$

$Q_L$ : ο ρυθμός ροής του υγρού ( $m^3/s$ ),  
 $V_G$ : η επιφανειακή ταχύτητα του αερίου ( $cm/s$ ),  
 $V_{td}$ : η τελική ταχύτητα κατακάθισης των σταγονιδίων ( $cm/s$ ),  
 $r_d$ : η ακτίνα ενός σταγονιδίου ( $cm$ ),  
 $z$ : το μήκος της ζώνης επαφής ( $cm$ ) και

- Η ικανότητα συλλογής κάθε σταγονιδίου ισούται με:

$$n_d = \left( \frac{K_p}{K_p + 0.7} \right)^2 \quad K_p = \frac{d_a^2 \cdot V_p}{9 \cdot \mu_G \cdot d_d}$$

όπου  $K_p$  ο συντελεστής πρόσκρουσης, ο οποίος υπολογίζεται από την εξίσωση

$V_p$ : η, σχετική προς τα σταγονίδια, ταχύτητα των σωματιδίων ( $cm/s$ ),  
 $d_d$ : η διάμετρος των σταγονιδίων ( $cm$ ),  
 $\mu_G$ : το ιξώδες του αερίου (poise)  
 $d_a$ : η αεροδυναμική διάμετρος των σωματιδίων ( $cm$ ).

# Άσκηση 5

- Υπολογίστε την **ικανότητα διείσδυσης** σωματιδίων φυσικής διαμέτρου ( $d_p$ ) 8  $\mu\text{m}$ , μοναδιαίας πυκνότητας, μέσω κατακόρυφου πύργου ψεκασμού αντισροής.
- Δίνονται:  $Q_L/Q_G = 1 \text{ L/m}^3$ ,  $V_G = 20 \text{ cm/s}$ ,  $d_d = 300 \mu\text{m}$ ,  $V_{td} = 120 \text{ cm/s}$ ,  $\mu_G = 0,00018 \text{ poise}$  και  $z = 3 \text{ m}$ .

# Λύση Άσκησης 5

Υποθέτουμε ότι  $V_p = V_{t_d} = 120 \text{ cm} / \text{s}$

Υποθέτοντας ότι  $d_a = d_p$

$$K_p = \frac{d_a^2 \cdot V_p}{9 \cdot \mu_G \cdot d_d} = \frac{(8 \cdot 10^{-4} \text{ cm})^2 \cdot 120 \text{ cm} / \text{s}}{9 \cdot 0,00018 \text{ poise} \cdot 0,03} = 1,58$$

$n_d$ : η ικανότητα συλλογής ενός σταγονιδίου

$$n_d = \left( \frac{K_p}{K_p + 0,7} \right)^2 = \left( \frac{1,58}{1,58 + 0,7} \right)^2 = 0,48$$

$$p_{t_d} = \exp\left(-\frac{3 \cdot Q_L \cdot V_{t_d} \cdot z \cdot n_d}{4 \cdot Q_G \cdot r_d \cdot (V_{t_d} - V_G)}\right) = \exp\left(-\frac{3 \cdot 0,001 \cdot 120 \text{ cm} / \text{s} \cdot 300 \text{ cm} \cdot 0,48}{4 \cdot 0,015 \text{ cm} \cdot (120 - 20) \text{ cm} / \text{s}}\right) = 0,00018$$

$$n = 1 - p_{t_d} = 1 - 0,00018 = 0,9998 = 99,98\%$$

$V_{t_d}$ : η τελική ταχύτητα κατακάθισης των σταγονιδίων (cm/s)

$V_p$ : η, σχετική προς τα σταγονίδια, ταχύτητα των σωματιδίων (cm/s),

$d_a$  : η αεροδυναμική διάμετρος των σωματιδίων (cm).

$d_p$  : φυσική διάμετρο 8 μm

$d_d$ : η διάμετρος των σταγονιδίων (cm),

$p_{t_d}$ : η **ικανότητα διείσδυσης** μιας συγκεκριμένης ομάδας μεγέθους σωματιδίων (κυμαίνεται μεταξύ 0 και 1.0),

$Q_L$ : ο ρυθμός ροής του υγρού (m<sup>3</sup>/s),

$Q_G$ : ο ρυθμός ροής του αερίου (m<sup>3</sup>/s),

$V_G$ : η επιφανειακή ταχύτητα του αερίου (cm/s),

$r_d$ : η ακτίνα ενός σταγονιδίου (cm),

$z$ : το μήκος της ζώνης επαφής (cm) και

# Λύση Άσκησης 5

- Εάν υποτεθεί ότι μόνο το 20% του υγρου ψεκασμού χρησιμοποιείται, τότε:

$$Q_L / Q_G = 0,2 \cdot 0,001 = 0,0002$$

$$p_{t_d} = \exp\left(-\frac{3 \cdot 0,0002 \cdot 120 \text{cm} / \text{s} \cdot 300 \text{cm} \cdot 0,48}{4 \cdot 0,015 \text{cm} \cdot (120 - 20) \text{cm} / \text{s}}\right) = 0,178$$

- Στην περίπτωση αυτή η απόδοση του καθαριστήρα ισούται με:

$$n = 1 - p_{t_d} = 1 - 0,178 = 0,82 = 82\%$$

# Σχεδιασμός ηλεκτροστατικών φίλτρων

- Κατά το σχεδιασμό ενός ηλεκτροστατικού φίλτρου σημαντικές παράμετροι είναι οι **ειδικές αντιστάσεις του αέρα** και των **σωματιδίων**, καθώς αυτές **προσδιορίζουν την ταχύτητα φόρτισης των σωματιδίων και το μέγεθος του δημιουργούμενου δυναμικού του πεδίου**.
- Οι τιμές των ειδικών αντιστάσεων εξαρτώνται από τη θερμοκρασία και την χημική σύσταση του προς καθαρισμό ρεύματος.

- Η **απόδοση** ενός ηλεκτρόφιλτρου δίνεται από την εξίσωση Anderson-Deutsch:

$$n = 1 - e^{-\frac{w \cdot A}{Q}}$$

- **n**: η απόδοση του ηλεκτρόφιλτρου,
- **Q**: ο ρυθμός ροής των αερίων αποβλήτων (m<sup>3</sup>/s),
- **A**: η επιφάνεια των ηλεκτροδίων συλλογής (m<sup>2</sup>) και
- **w**: η οριακή ταχύτητα κίνησης των σωματιδίων προς τα ηλεκτρόδια συλλογής (m/s).

# Σχεδιασμός ηλεκτροστατικών φίλτρων

- Η προηγούμενη σχέση αυτή χρησιμοποιείται **ευρύτατα** για τον σχεδιασμό, την ανάλυση και τη σύγκριση απόδοσης των μονάδων.
- Ισχύει κανονικά μόνο για σωματίδια με κανονικό σχήμα και μέγεθος, κάτι το οποίο δεν συμβαίνει στην πράξη.
- Εκτός από τις παραμέτρους της εξίσωσης αυτής η **απόδοση** των ηλεκτρόφιλτρων εξαρτάται και από **παράγοντες που επηρεάζουν το δυναμικό του πεδίου**, όπως είναι η σύσταση των αερίων αποβλήτων, η πυκνότητα των σωματιδίων και η ηλεκτρική αγωγιμότητα των σωματιδίων.
- Η πραγματική ταχύτητα κίνησης των σωματιδίων προς τα ηλεκτρόδια συλλογής κυμαίνεται μεταξύ 0,04 και 0,2 m/s.
- Στην πραγματικότητα η ταχύτητα κίνησης ( $w$ ) των σωματιδίων προς τα ηλεκτρόδια συλλογής δεν είναι σταθερή. Η ταχύτητα αυτή καθορίζεται από διάφορους παράγοντες, και μια απλή εξίσωση για τον υπολογισμό της είναι η ακόλουθη:

$$w = \frac{qV}{6(\pi)r\mu}$$

**q:** το φορτίο των σωματιδίων (C),

**r:** η ακτίνα των σωματιδίων (m),

**V:** το δυναμικό του πεδίου (V/m) και

**$\mu$ :** το ιξώδες των αερίων αποβλήτων (kg/m s).

# Υπολογισμός κόστους αγοράς και εγκατάστασης

Η τιμή προμήθειας ενός ηλεκτροστατικού φίλτρου δίδεται από την εξίσωση:

$$PEC = a \cdot A^b$$

όπου:  $PEC$  η τιμή προμήθειας (purchased equipment cost)

$A$  η καθαρή επιφάνεια των πλακών ( $m^2$ ) και

$a, b$  σταθερές οι οποίες παίρνουν τις τιμές που φαίνονται παρακάτω

- όταν  $900m^2 < A < 4600m^2$ ,  $a = 4278$  και  $b = 0.628$
- όταν  $4600m^2 < A < 95000m^2$ ,  $a = 671.6$  και  $b = 0.843$

Το συνολικό κόστος εγκατάστασης ( $TIC$ ) υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$TIC = 2.22 \cdot PEC$$

όπου:  $TIC$  το συνολικό κόστος εγκατάστασης (total installed cost).



# Άσκηση 6

- Ένα ηλεκτροστατικό φίλτρο πρόκειται να εγκατασταθεί για την απομάκρυνση αιωρούμενων σωματιδίων από τα αέρια απόβλητα μονάδας παραγωγής τσιμέντου, η οποία εκπέμπει με ρυθμό  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ . Η ταχύτητα κίνησης των σωματιδίων προς τα ηλεκτρόδια συλλογής υπολογίζεται ίση με  $0,12 \text{ m/s}$ .
- Να υπολογιστεί η απαιτούμενη επιφάνεια συλλογής του ηλεκτροστατικού φίλτρου
  - (α) για απόδοση 90%, και
  - (β) για απόδοση 99%.

# Λύση Άσκησης 6

**Q:** ο ρυθμός ροής των αερίων αποβλήτων ( $m^3/s$ ),  
**A:** η επιφάνεια των ηλεκτροδίων συλλογής ( $m^2$ ) και  
**w:** η οριακή ταχύτητα κίνησης των σωματιδίων προς τα ηλεκτρόδια συλλογής ( $m/s$ ).

Η απόδοση δίνεται από την εξίσωση Anderson-Deutsch:

$$n = 1 - e^{-\frac{w \cdot A}{Q}}$$

(α) Για  $n = 90\%$ , με αντικατάσταση έχουμε:

$$0.90 = 1 - e^{-\frac{0.12A}{50}}$$

$$-A \frac{0.12}{50} = \ln(1 - 0.90)$$

$$A = -\frac{50}{0.12} \ln(0.10) = -416.7 \ln(0.1) = 959 m^2$$

# Λύση Άσκησης 6

**Q:** ο ρυθμός ροής των αερίων αποβλήτων ( $m^3/s$ ),  
**A:** η επιφάνεια των ηλεκτροδίων συλλογής ( $m^2$ ) και  
**w:** η οριακή ταχύτητα κίνησης των σωματιδίων προς τα ηλεκτρόδια συλλογής ( $m/s$ ).

$$n = 1 - e^{-\frac{w \cdot A}{Q}}$$

(β) Για  $n = 99\%$ , με αντικατάσταση έχουμε

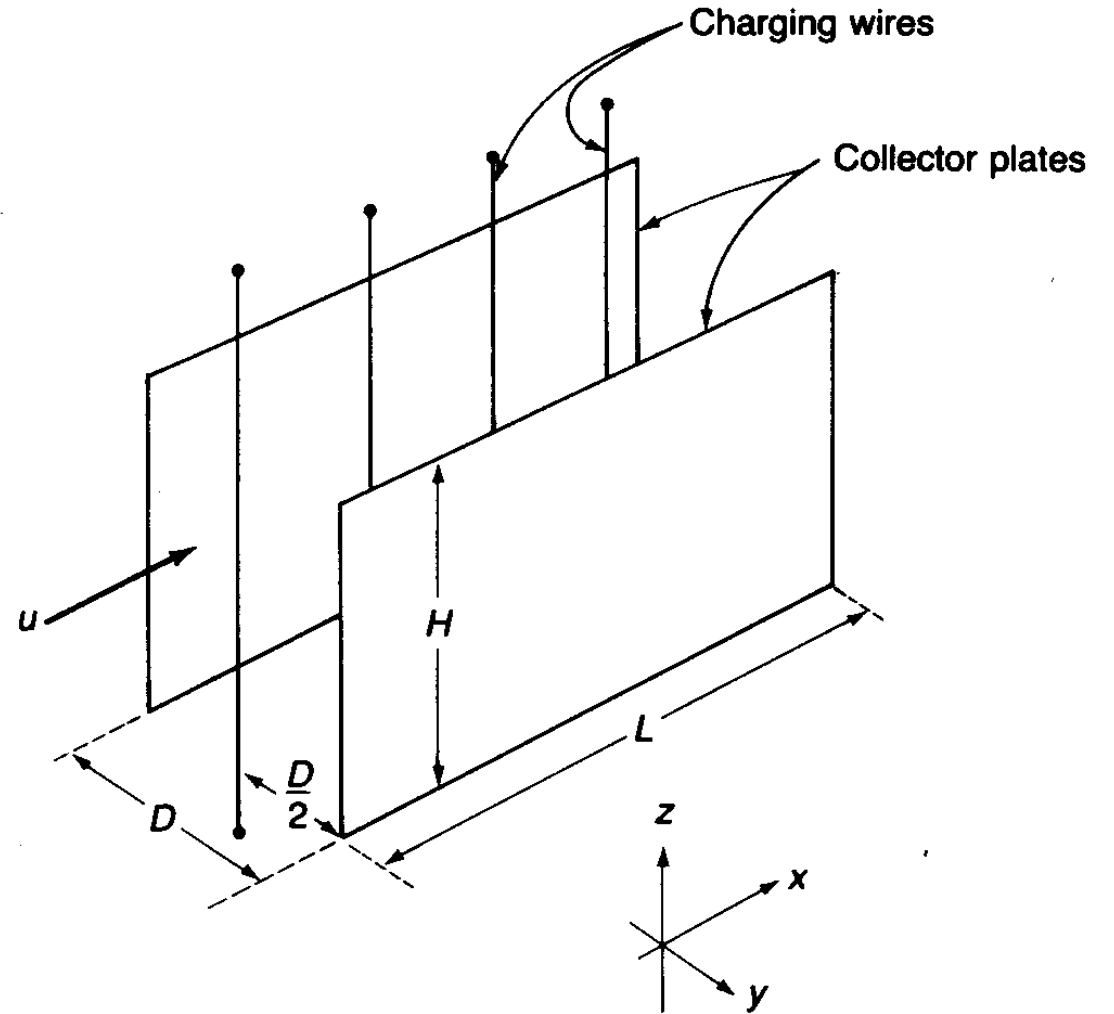
$$0.99 = 1 - e^{-\frac{0.12A}{50}}$$

$$-A \frac{0.12}{50} = \ln(1 - 0.99)$$

$$A = -\frac{50}{0.12} \ln(0.01) = -416.7 \ln(0.01) = 1919m^2 = 2 \cdot 959m^2$$

# Άσκηση 7

- Υπολογίστε την **συνολική επιφάνεια** συλλογής ηλεκτρόφιльтρου το οποίο επεξεργάζεται  $10000 \text{ m}^3/\text{min}$  αέρα, με απόδοση 98%. Η ταχύτητα κίνησης των σωματιδίων προς τα ηλεκτρόδια είναι  $6 \text{ m}/\text{min}$ .
- Εάν υποθέσουμε ότι οι πλάκες έχουν ύψος  $6 \text{ m}$  και μήκος  $3 \text{ m}$ , υπολογίστε τον **απαιτούμενο αριθμό παράλληλων πλακών**.



Σχηματική αναπαράσταση της ροής αερίου ρεύματος μεταξύ δύο πλακών ηλεκτροστατικού φίλτρου

## A. Υπολογισμός της συνολικής επιφάνεια συλλογής

Δεδομένα:  $n = 98\%$

$$Q = 10000 \frac{m^3}{\text{min}} \text{ αέρια}$$

$$w = 6.0 \frac{m}{\text{min}}$$

$$n = 1 - e^{-\frac{w \cdot A}{Q}}$$

$$n = 1 - e^{-\frac{w \cdot A}{Q}} \Rightarrow 1 - n = e^{-\frac{w \cdot A}{Q}} \Rightarrow \ln(1 - n) = -\frac{w \cdot A}{Q}$$

$$\Rightarrow A = -\frac{Q}{w \cdot A} \cdot \ln(1 - n) \Rightarrow A = -\frac{10000 \frac{m^3}{\text{min}}}{6.0 \frac{m}{\text{min}}} \cdot \ln(1 - 0,98)$$

$$\Rightarrow A = -1666,67 m^2 \cdot \ln(0,02) \Rightarrow A = 6520 m^2$$

**Q:** ο ρυθμός ροής των αερίων αποβλήτων ( $m^3/s$ ),  
**A:** η επιφάνεια των ηλεκτροδίων συλλογής ( $m^2$ ) και  
**w:** η οριακή ταχύτητα κίνησης των σωματιδίων προς τα ηλεκτρόδια συλλογής ( $m/s$ ).

# Λύση Άσκησης 7

- Όλες οι εσωτερικές πλάκες έχουν δύο επιφάνειες συλλογής, ενώ οι δύο εξωτερικές πλάκες έχουν μόνο μία. Επομένως:
- $A_{\text{total}} = N * A_p - A_p$
- όπου:  $A_p$  η διπλής όψης επιφάνεια κάθε πλάκας και  
N ο αριθμός των πλακών.
- Άρα:
- $N = (A_{\text{total}} / A_p) + (A_p / A_p) = 6520 \text{ m}^2 / (2 * 3\text{m} * 6\text{m}) + 1 = 181 + 1 = 182$   
πλάκες

# Άσκηση 8

- Ηλεκτροστατικό φίλτρο επεξεργάζεται  $9000 \text{ m}^3/\text{min}$  αερίου, με απόδοση
  - (α) 98% και
  - (β) 99.8%
- 
- Υπολογίστε την απαιτούμενη ισχύ κορώνας σε kW.

# Λύση Άσκησης 8

Η κατανάλωση ενέργειας σε ένα ηλεκτροστατικό φίλτρο σχετίζεται κυρίως με την ενέργεια της κορώνας και, κατά δεύτερο λόγο, με την πτώση πίεσης. Η ισχύς κορώνας που απαιτείται υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$n = 1 - e^{(-kP_c/Q)}$$

$n$  η απόδοση του φίλτρου,

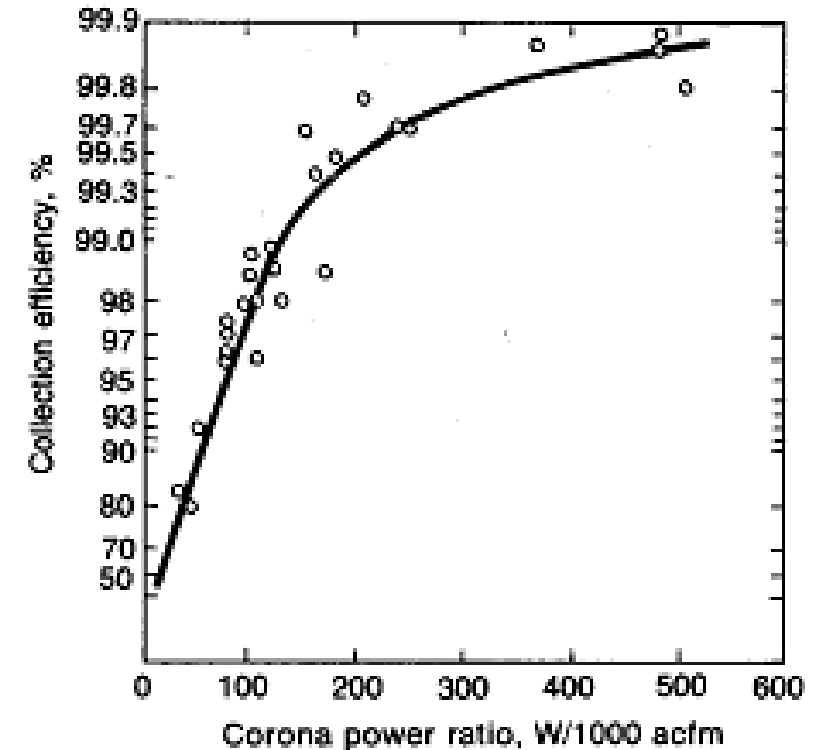
$P_c$  η ισχύς κορώνας (W),

$k$  μία προσαρμόσιμη σταθερά 0.5 – 0.7

$Q$  ο ρυθμός ροής του αερίου ( $\text{ft}^3/\text{s}$ ). ( $1\text{m}^3 = 35.3\text{ft}^3$ )

Για αποδόσεις μέχρι και 98.5%, έχει αποδειχθεί ότι  $k = 0.55$  (για τις μονάδες που δίνονται παραπάνω).

Για μεγαλύτερες αποδόσεις, η απαιτούμενη ενέργεια κορώνας βρίσκεται από το Σχήμα



Απόδοση ηλεκτροστατικού φίλτρου  
συναρτήσεϊ του λόγου ισχύος  
κορώνας



# Λύση Άσκησης 8

(α) Για  $n = 98\%$ , η ισχύς κορώνας υπολογίζεται από την εξίσωση

$$\ln(1-n) = -kP_c/Q$$

$$P_c = -Q \ln(1-n)/k =$$

$$= \frac{-9000 \text{ m}^3 / \text{min}}{0.55} \cdot \frac{35.3 \text{ ft}^3}{\text{m}^3} \cdot \frac{\text{min}}{60 \text{ s}} \ln(1 - 0.98) = 37.6 \text{ kW}$$

(β) Για  $n = 99.8\%$ , από το Σχήμα 3.2.11, βρίσκουμε:

$$P_c = \frac{330 \text{ W}}{1000 \text{ ft}^3 / \text{min}} \cdot \frac{35.3 \text{ ft}^3}{\text{m}^3} \cdot 9000 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} = 104841 \text{ W} \approx 105 \text{ kW}$$