



Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας  
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

ΜΜ900

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΣΗΣ

2<sup>η</sup> ΕΝΟΤΗΤΑ, Μέρος 1  
ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ  
- ΚΥΚΛΩΝΕΣ

Νίκος Ανδρίτσος  
Καθ. Τμ. Μηχ. Μηχ. Π.Θ.



## Μέθοδοι Ελέγχου ΑΣ

- **Μηχανικοί διαχωριστές:** βαρυτική καθίζηση (gravity settler), κυκλώνες (cyclone)  
[σχετικά φθηνοί, χαμηλή απόδοση]
- **Σακόφιλτρα** (fabric filter, baghouse)  
[δαπανηροί, υψηλή απόδοση]
- **Ηλεκτροστατικοί κατακρημνιστές** (electrostatic precipitator - ηλεκτροστατικά «φίλτρα»)  
[δαπανηροί, υψηλή απόδοση, όχι ευέλικτοι]
- **Πλυντρίδες υγρού καθαρισμού** (wet scrubbers)  
[δαπανηρές, υψηλή απόδοση, παραγωγή λάσπης]

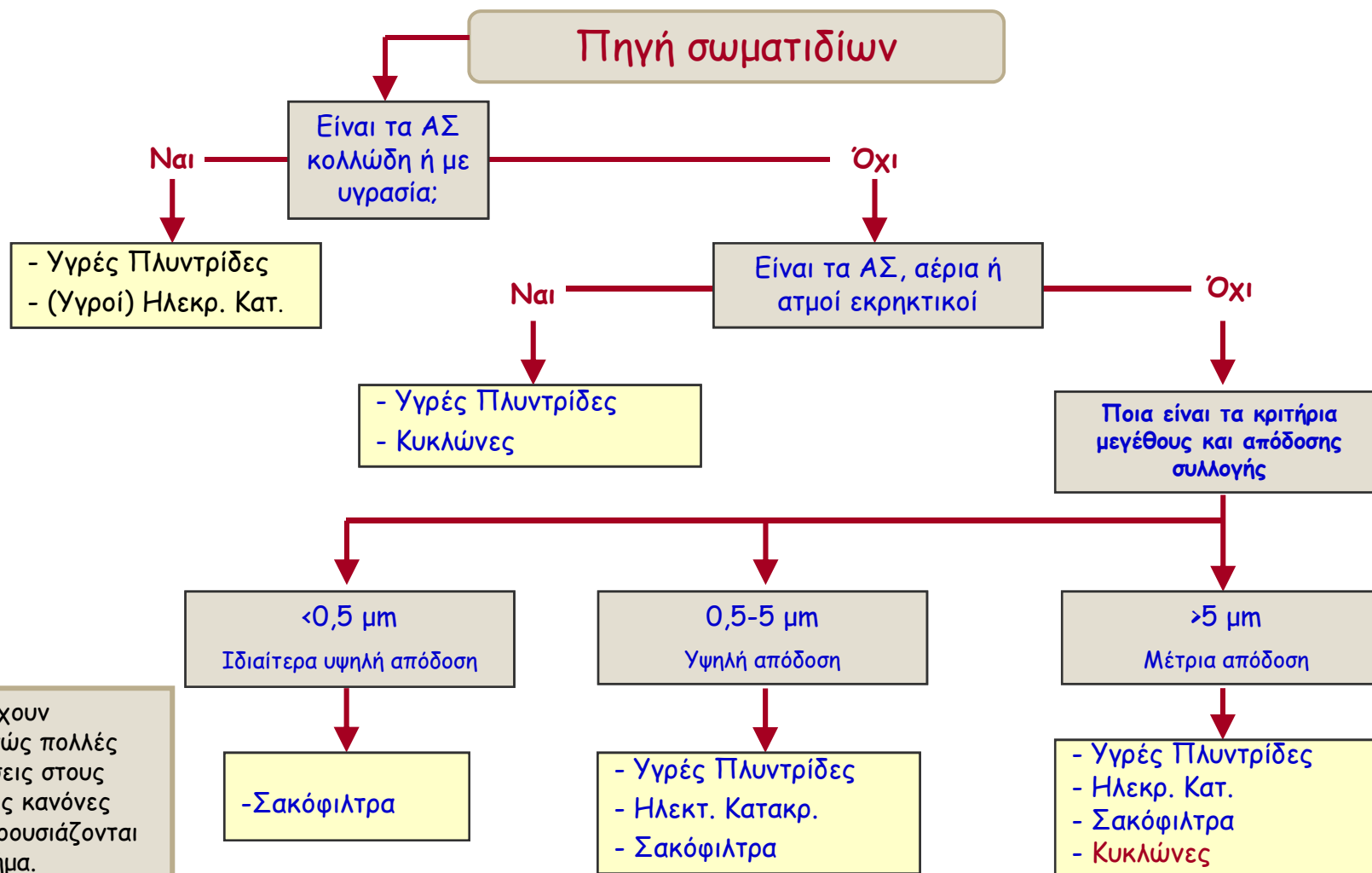


## Παράγοντες που επιδρούν στην επιλογή της Τεχνολογίας Ελέγχου

- Συγκέντρωση σωματιδίων (και η διακύμανσή της ή της παροχής)
- Χαρακτηριστικά σωματιδίων (μέγεθος, σχήμα, πυκνότητα)
- Χημικές και φυσικές ιδιότητες (αν φορτίζονται με στατικό ηλεκτρισμό, εκρηκτικά, κολλώδη)
- Υγροσκοπικότητα
- Τοξικότητα (απαιτείται αρνητική πίεση)
- Θερμοκρασία αέριου ρεύματος
- Βαθμός απόδοσης - Κόστος



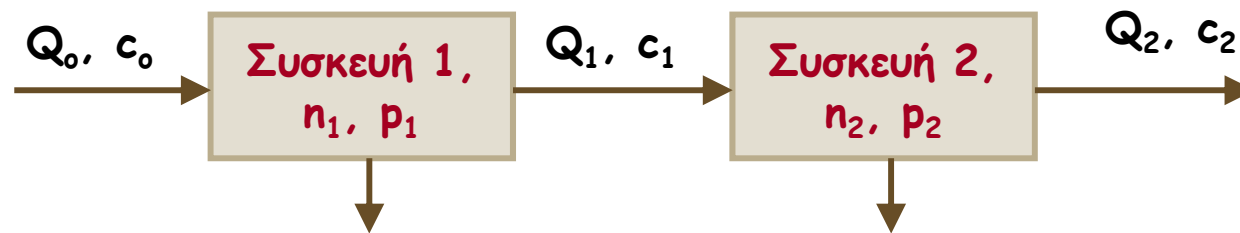
# Επιλογή συστήματος συλλογής\*



\* Υπάρχουν προφανώς πολλές εξαιρέσεις στους γενικούς κανόνες που παρουσιάζονται στο σχήμα.



# Ορισμοί



- Απόδοση (efficiency):

$$\eta_1 = \frac{Q_0 c_0 - Q_1 c_1}{Q_0 c_0} = 1 - \frac{Q_1 c_1}{Q_0 c_0}$$

- Διείσδυση (penetration):

$$p = 1 - \eta_1 = \frac{Q_1 c_1}{Q_0 c_0}$$

- Βαθμός «αντιρρύπανσης»:

$$DF = \frac{1}{p} = \frac{Q_0 c_0}{Q_1 c_1}$$

$$p_{\text{overall}} = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \dots$$

$$\eta_{\text{overall}} = 1 - (1 - \eta_1) \cdot (1 - \eta_2) \cdot (1 - \eta_3) \dots$$



## Μέτρηση των σωματιδίων

- Γιατί απαιτείται μέτρηση των σωματιδίων;
- Τι συσκευές δειγματοληψίας και ανάλυσης χρησιμοποιούμε;





## ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

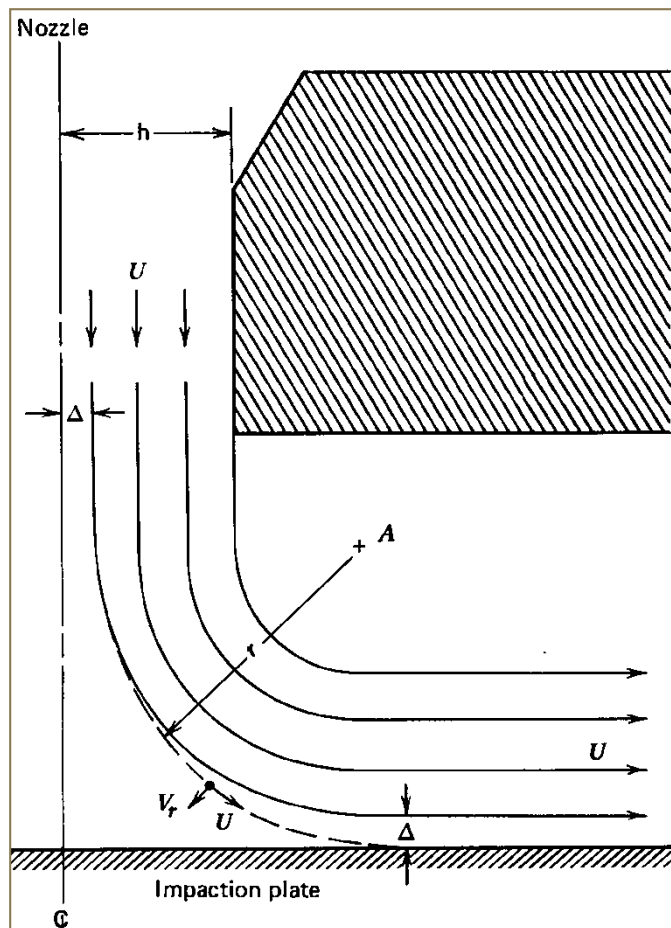
Ποικιλία οργάνων για τη μέτρηση των αιωρούμενων σωματιδίων:

- Κλασματικός διαχωριστής (fractionator)
- Αναλυτής μάζας με τη μέθοδο της ταλάντωσης (TEOM, tapered element oscillating microbalance)
- Μετρητής με ακτινοβολία βήτα
- Μετρητές σκέδασης του φωτός





## Προσκραστήρας - εκτροπέας (Impactor)



Όταν ένα ρευστό ρέει γύρω από ένα αντικείμενο, οι ροϊκές γραμμές θα εκτραπούν, ενώ, λόγω αδρανείας, τα σωματίδια δεν θα ακολουθήσουν επακριβώς τις ροϊκές γραμμές.

**Πρόσκραση** συμβαίνει όταν το κέντρο βάρους του σωματιδίου χτυπήσει ένα ακίνητο εμπόδιο.

Απόδοση πρόσκρασης =  $f(Stk)$

**Αριθμός Stokes ή παράμετρος πρόσκρασης:** ο λόγος του μήκους στάσης ή ακινητοποίησης (stopping distance),  $S$ , ενός σωματιδίου ως προς το χαρακτηριστικό μήκος του εμποδίου,  $d_c$

$$Stk = \frac{S}{d_c} = \frac{\rho_p d_p^2 u C}{9 \mu d_c}$$

$\rho_p$  = πυκνότητα σωματιδίου

$u$  = ταχύτητα σωματιδίου

$C$  = συντελεστής διόρθωσης Cunningham

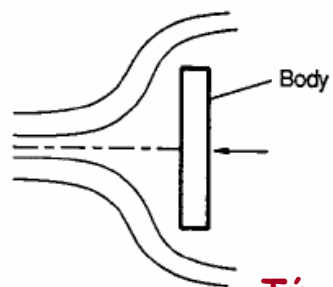
$\mu$  = ιξώδες αέρα

$d_c$  = διάμετρος οπής (nozzle)

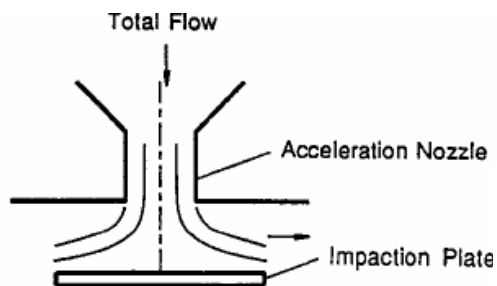




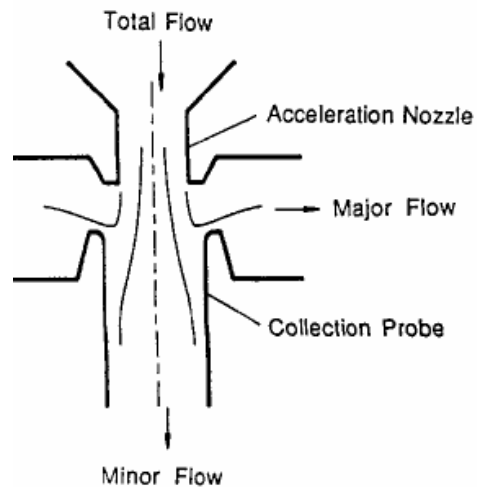
# Προσκρουστήρας - εκτροπέας (Impactor)



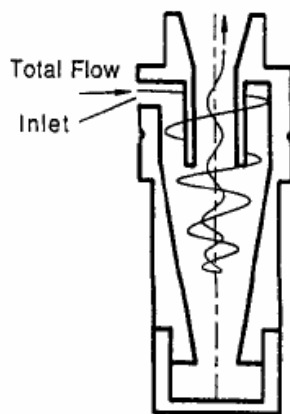
a) Body Impactor



b) Conventional Impactor

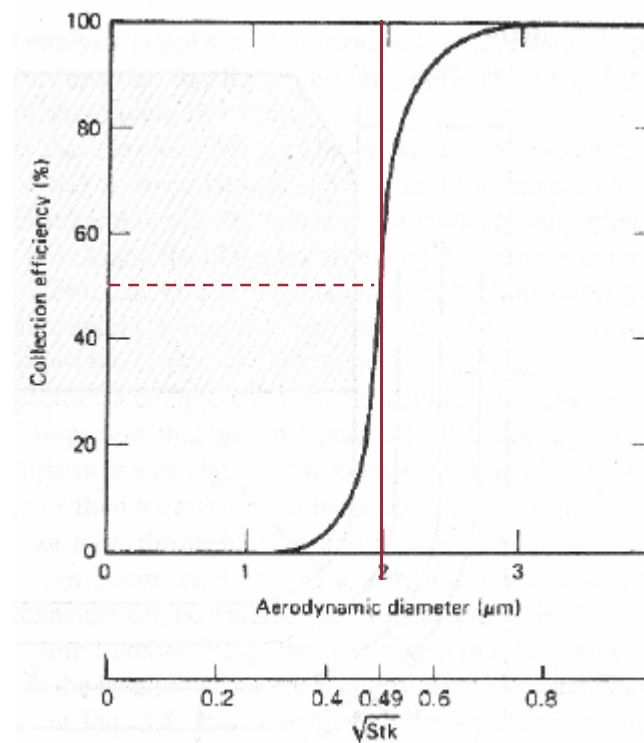


c) Virtual Impactor



d) Cyclone

## Τύποι προσκρουτήρων



Τυπική απόδοση  
προσκρουστήρα



## Προσκρουστήρας - εκτροπέας (Impactor)

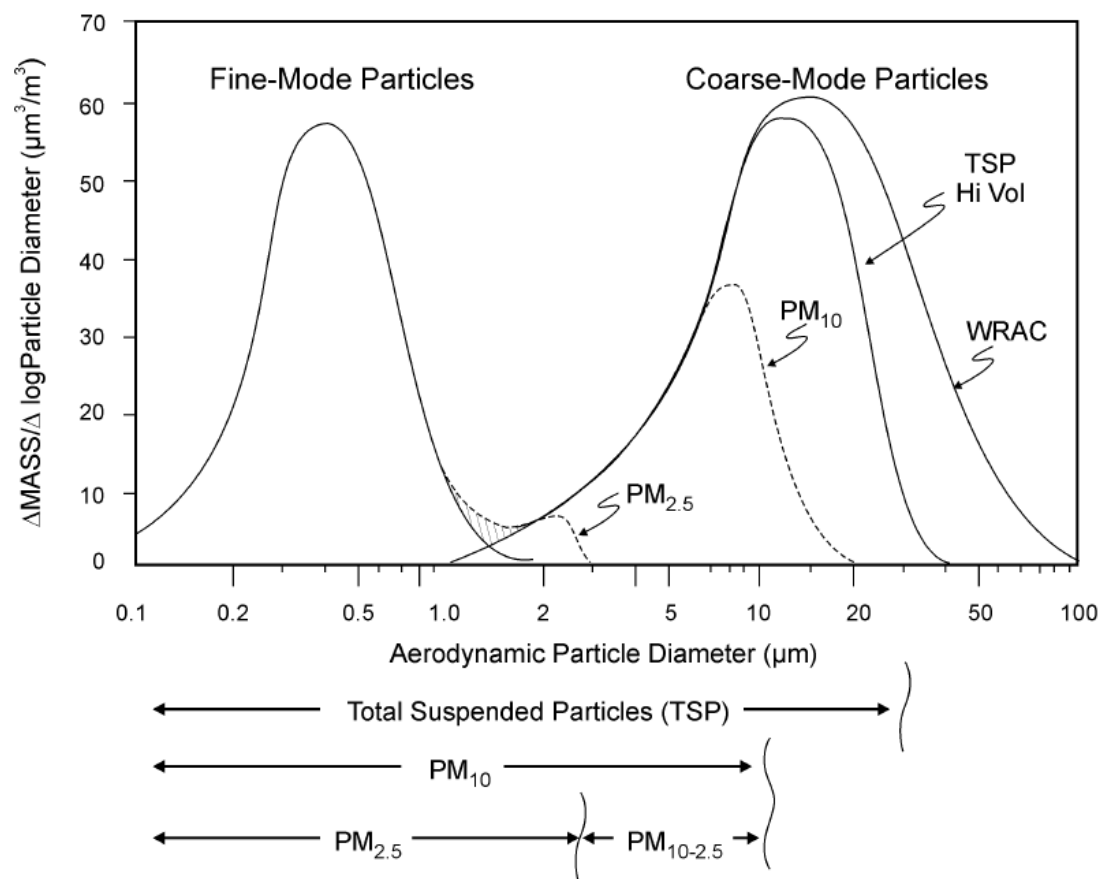


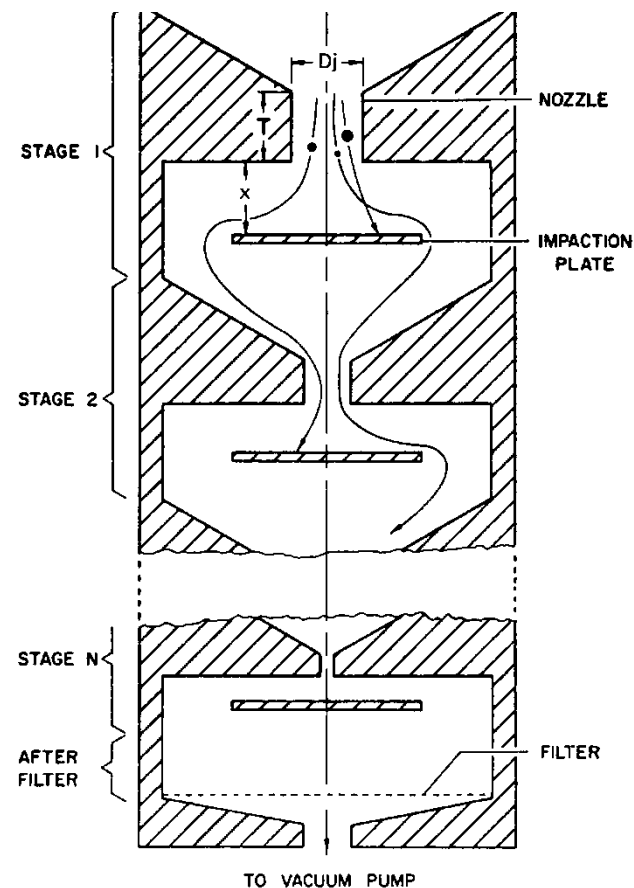
Figure 2-5. An idealized distribution of ambient particulate matter showing fine-mode particles and coarse-mode particles and the fractions collected by size-selective samplers. (WRAC is the Wide Range Aerosol Classifier which collects the entire coarse mode [Lundgren and Burton, 1995].)



## Πολυβάθμιος Προσκραστήρας (Multistage Impaction)

- Μέτρηση κατανομής μεγέθους.
- 6,8 ή και 10 βαθμίδες, για να καλυφθεί η περιοχή 0,01 μέχρι 20 μm.
- Πολύ σημαντική εμπορική και διαδεδομένη συσκευή

$$d_{50} \sqrt{C_c} = \sqrt{\frac{9\mu D_j S t k_{50}}{\rho_p U}}$$





## Κλασματικός διαχωριστής (fractionator)

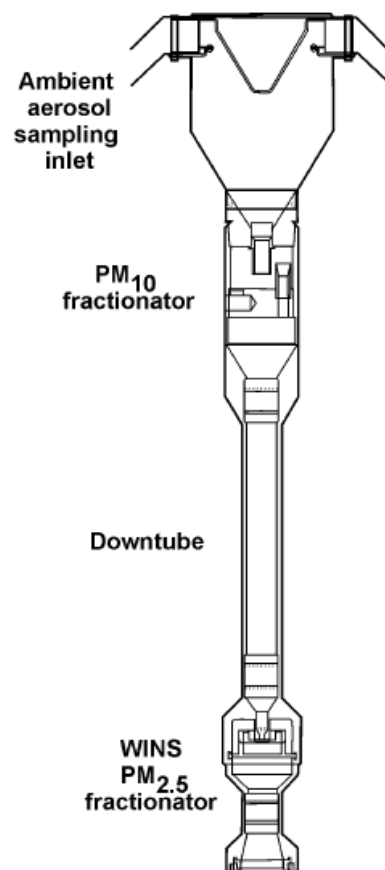


Figure 2-14. Schematic diagram of the sample collection portion of the PM<sub>2.5</sub> FRM sampler.



## Προσκρουστήρας WINS (Multistage Impaction)

WINS Impactor  
(Well Impactor Ninety-Six)

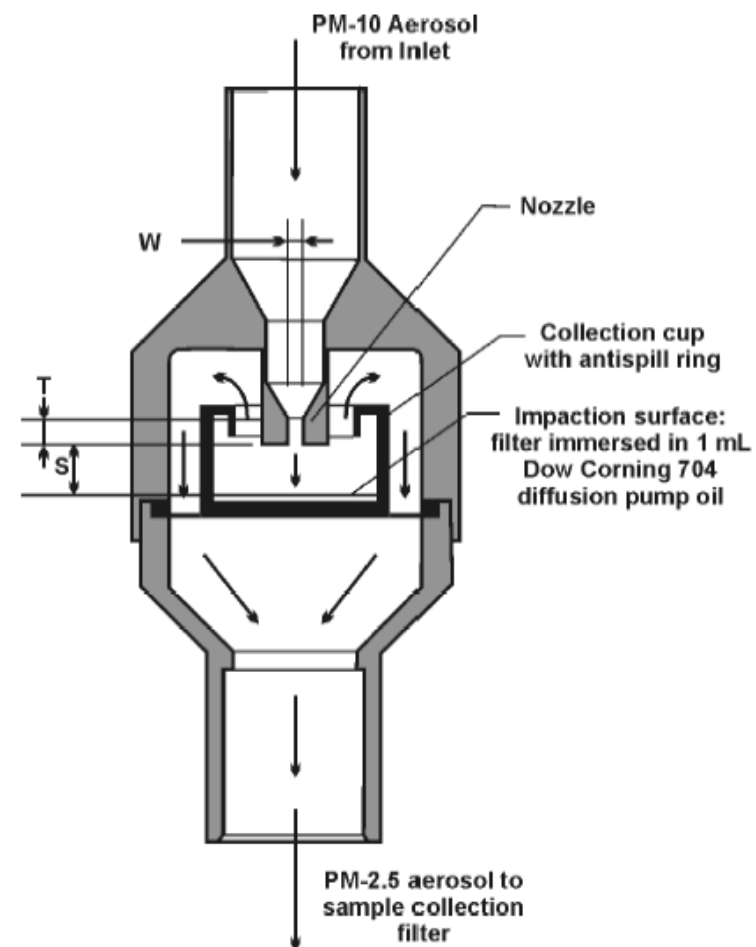


Figure 2-15. Schematic view of the final design of the WINS.

Source: Peters et al. (2001a).



## Εικονικός Προσκρουστήρας (Virtual Impaction)

Μειώνει το πρόβλημα της  
ανάκλασης των σωματιδίων

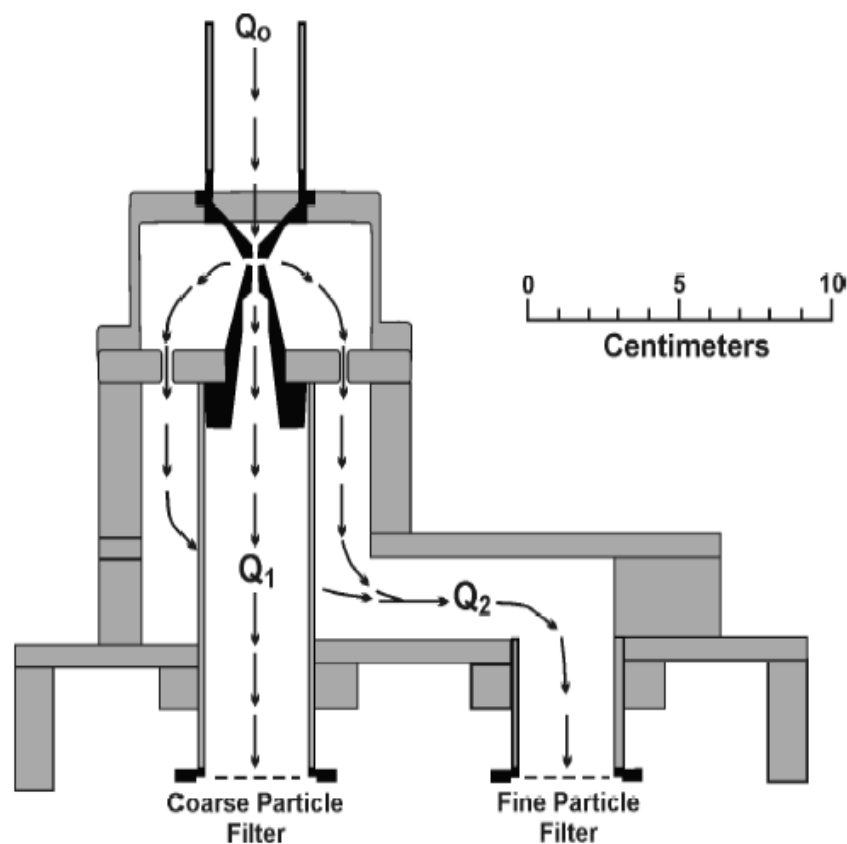
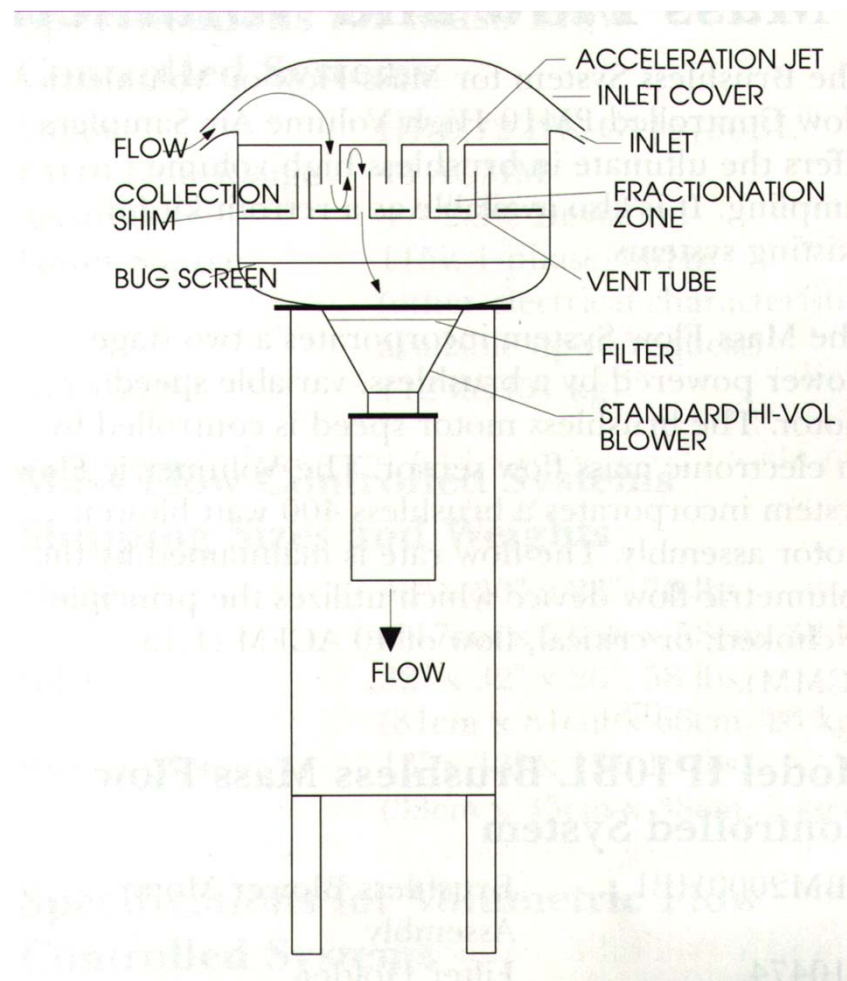
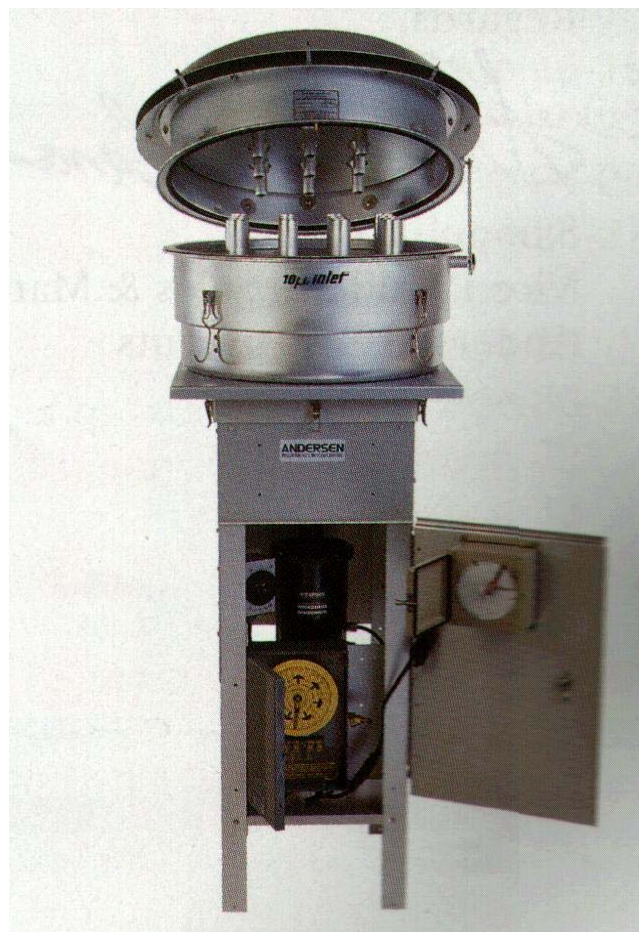


Figure 2-17. Schematic diagram showing the principle of virtual impaction. The initial flow,  $Q_0$ , is split into a minor flow,  $Q_1$ , which carries the larger particles, which impact into the hole, to the coarse particle filter and a major flow,  $Q_2$ , which carries the smaller particles, which can follow the airflow, to the fine particle filter (Loo et al., 1976).



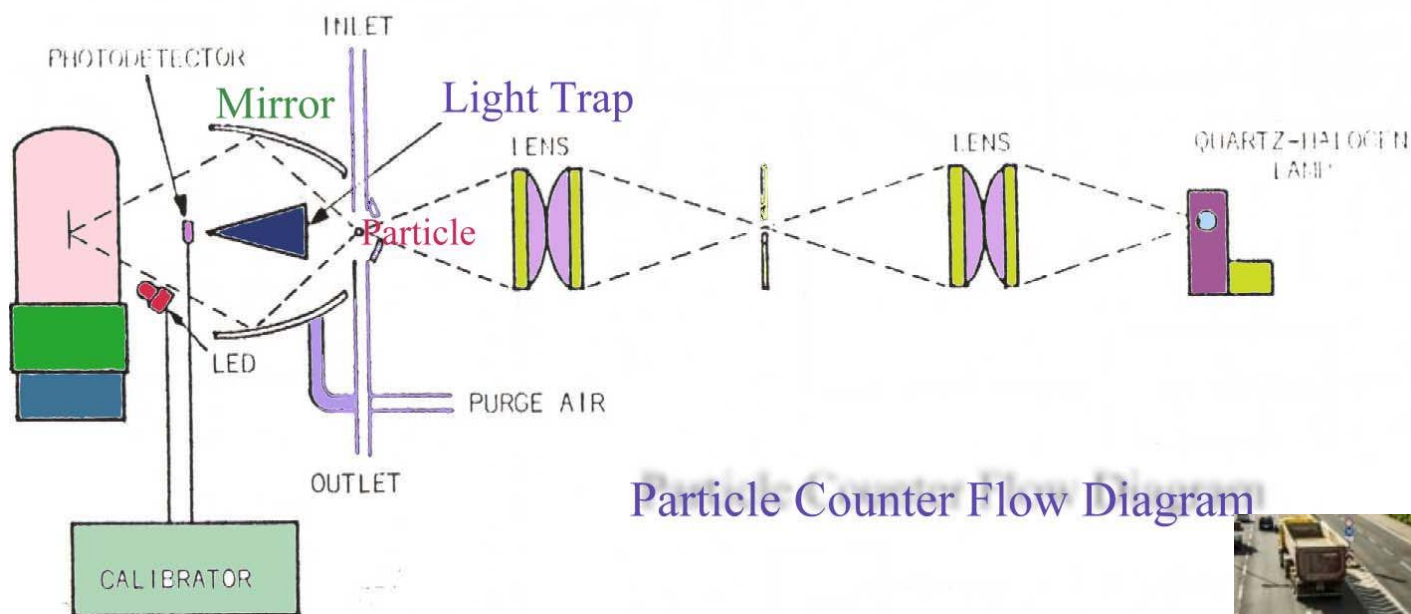
## Δειγματολήπτης αναπνεύσιμων αιωρούμενων σωματιδίων





## ΆΛΛΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ

- Μετρητής σκέδασης του φωτός (Light Scattering Particle Counter & Aerosol/Dust Monitor).



Particle Counter Flow Diagram





**Συλλέκτες Βαρυτικής καθίζησης**

(gravity settlers)

**Αδρανειακοί διαχωριστές**

(inertial separators)

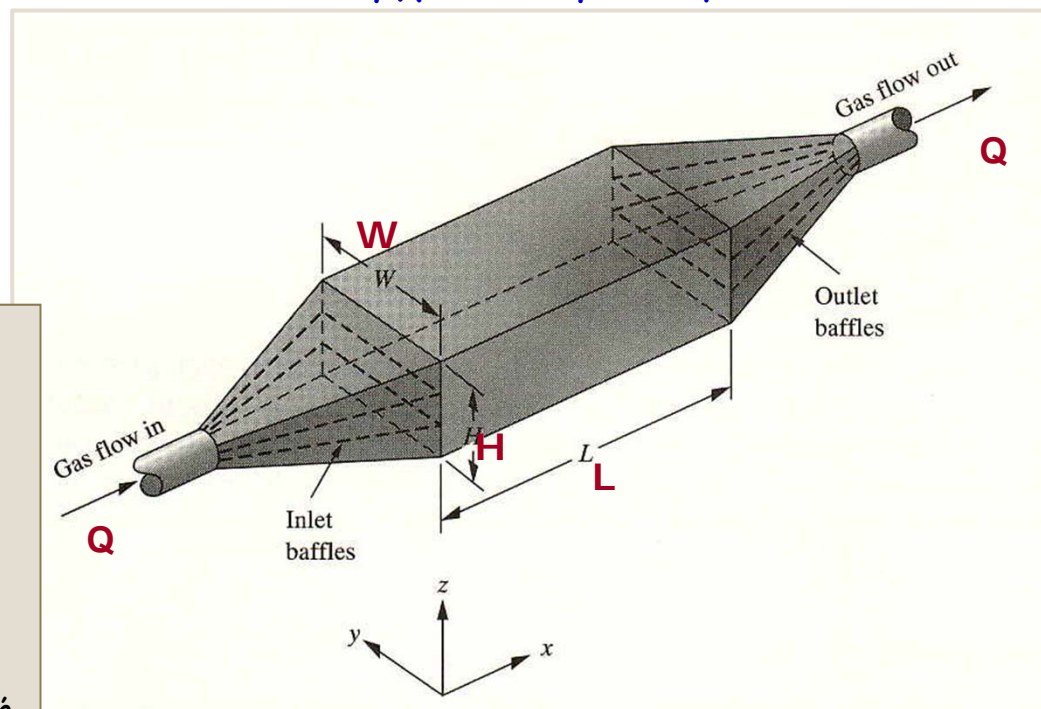


## Συσκευές βαρυτικής καθίζησης

- Ουσιαστικά ένας μακρύς θάλαμος από τον οποίον διέρχεται το ρυπασμένο ρεύμα με μικρή ταχύτητα
- Παλιά τεχνολογία
- Μεγάλοι χώροι
- Καθαρίζεται περιοδικά

### Πλεονεκτήματα

- Μικρό κόστος κατασκευής και συντήρησης
- Χαμηλή πτώση πίεσης
- Περιορισμοί σε πίεση & θερμοκρασία μόνο από τα κατασκευαστικά υλικά
- Διάθεση των σωματιδίων σε ξηρή μορφή



(de Nevers, 1995)

Για να χαρακτηρίσουμε τη ροή μπορεί να βασιστούμε σε 2 μοντέλα:

- 1) Μοντέλο εμβολικής ή μη-αναμεμιγμένης ροής (plug flow model, block model)
- 2) Μοντέλο αναμεμιγμένης ροής (mixed model). Εδώ υποθέτουμε ολική ανάμιξη, είτε σε όλη τη συσκευή ή σε μια διατομή κάθετη στη ροή.

## Συσκευές βαρυτικής καθίζησης - Μοντέλο εμβολικής ροής (plug flow model)



Μέση ταχύτητα (οριζόντια ταχ.)

$$V_{av} = \frac{Q}{W \times H}$$

### Υποθέσεις

- Η  $V_{av}$  παντού ίδια στη συσκευή
- Κατακόρυφη ταχύτητα  
(οριακή ταχύτητα καθίζησης)

**Υποθ.:** Δεν υπάρχει «επανεισαγωγή» σωματιδίων

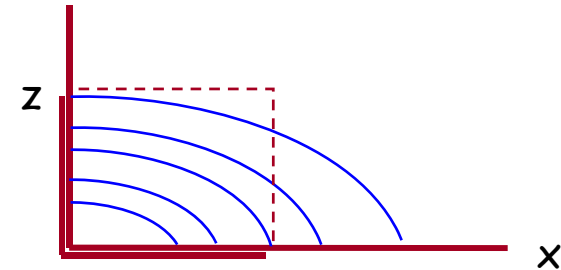
- Χρόνος για τη διέλευση

$$t = \frac{L}{V_{av}}$$

- Απόσταση (κατακόρυφη) καθίζησης  
(στο ίδιο χρονικό διάστημα)

$$s = tV_t = \frac{L}{V_{av}} V_t$$

- **Εάν  $s > H$**   $\Rightarrow$  το σωματίδιο θα «συλληφθεί» στον πυθμένα



Αν υποθέσουμε ότι όλα τα σωματίδια είναι ίδια ( $V_t$  ίδια), η αρχική κατανομή είναι ομοιόμορφη και δεν υπάρχει αλληλεπίδραση τότε το **κλάσμα που καθιζάνει**:

$$n = \frac{s}{H} = \frac{LV_t}{HV_{av}} = \frac{Lgd_p^2 \rho_p}{HV_{av} 18\mu}$$

Με την εφαρμογή του νόμου του Stokes

$$V_t = \frac{gd_p^2 (\rho_p - \rho_{air})}{18\mu}$$

## Συσκευές βαρυτικής καθίζησης - Μοντέλο αναμεμιγμένης ροής (mixed flow model)



- Η αέρια ροή πλήρως αναμεμιγμένη στην κατεύθυνση  $z$ , όχι στη  $x$ .
- Έστω τμήμα της συσκευής μήκους  $dx$  (ένα σωματίδιο το διασχίζει σε  $dt$ )
- Σε αυτό το τμήμα, το κλάσμα των σωματιδίων που φτάνουν στον πυθμένα θα είναι ίσο με την κατακόρυφη απόσταση που πέφτει ένα μέσο σωματίδιο ( $V_{\dagger} dt$ ) διά το ύψος της συσκευής

$$n = \frac{V_{\dagger} dt}{H}$$

- Η αλλαγή της συγκέντρωσης που περνάει από το  $dx$ :

$$dc = -c \cdot n = -\frac{cV_{\dagger} dt}{H}$$

- Ο χρόνος που κάνει ένα σωματιδίο να περάσει από το  $dx$ :

$$dt = \frac{dx}{V_{\text{avg}}}$$

- Συνδυάζοντας τα παραπάνω βρίσκουμε:

$$\frac{dc}{c} = -\frac{V_{\dagger}}{HV_{\text{avg}}} dx$$

- Μπορούμε να ολοκληρώσουμε από  $x=0$  μέχρι  $x=L$ :

$$\ln \frac{c_{\text{out}}}{c_{\text{in}}} = -\frac{V_{\dagger} L}{HV_{\text{avg}}}$$

$$n = 1 - \left( \frac{c_{\text{out}}}{c_{\text{in}}} \right) = 1 - \exp \left[ -\frac{V_{\dagger} L}{HV_{\text{avg}}} \right] = 1 - \exp \left[ -n_{\text{plug flow}} \right]$$

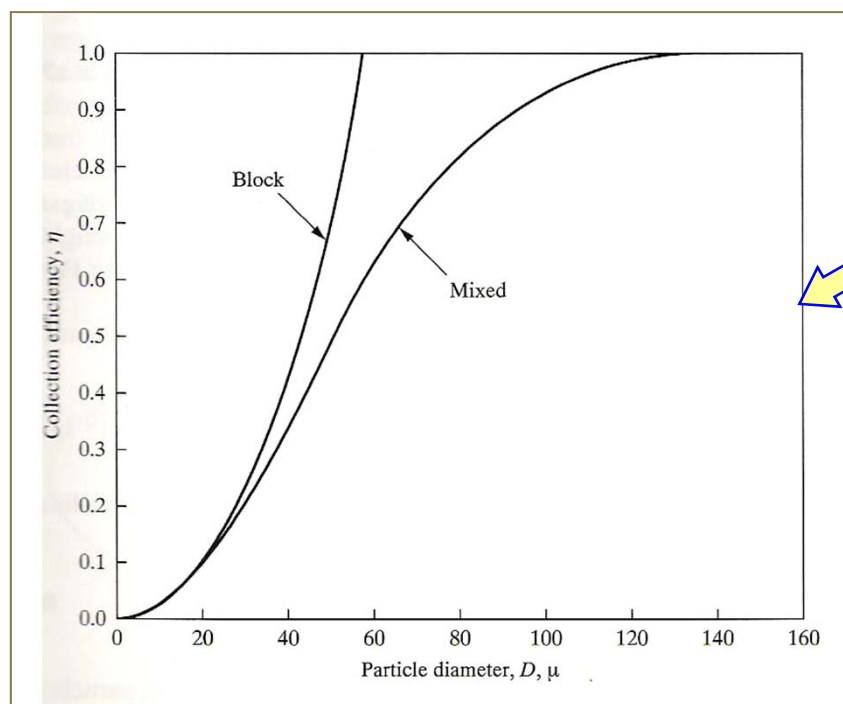


## Συσκευές βαρυτικής καθίζησης: παράδειγμα

Απόδοση ενός συστήματος βαρυτικής καθίζησης (de Nevers, 1995).

$H=2\text{ m}$ ,  $L=10\text{ m}$ ,  $V_{av}=1\text{ m/s}$ , Νόμος Stokes

Από τα 2 τα μοντέλα προκύπτει:



Particle diameter, $\mu$	$\eta_{\text{block}}$	$\eta_{\text{mixed}}$
1	0.000303	0.000303
10	0.0303	0.0298
30	0.273	0.239
50	0.76	0.53
57.45	1.00	0.63
80	—	0.86
100	—	0.95
120	—	0.99

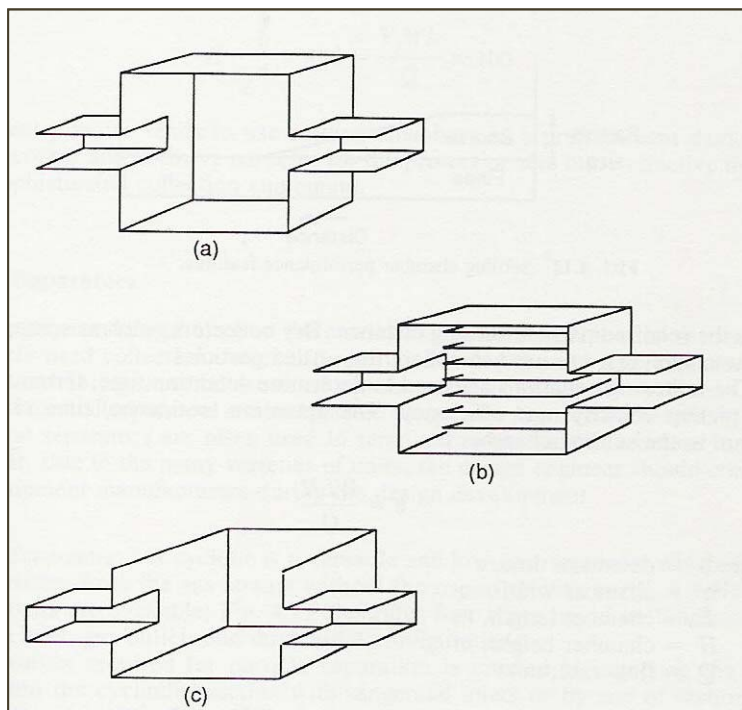


## Συσκευές βαρυτικής καθίζησης

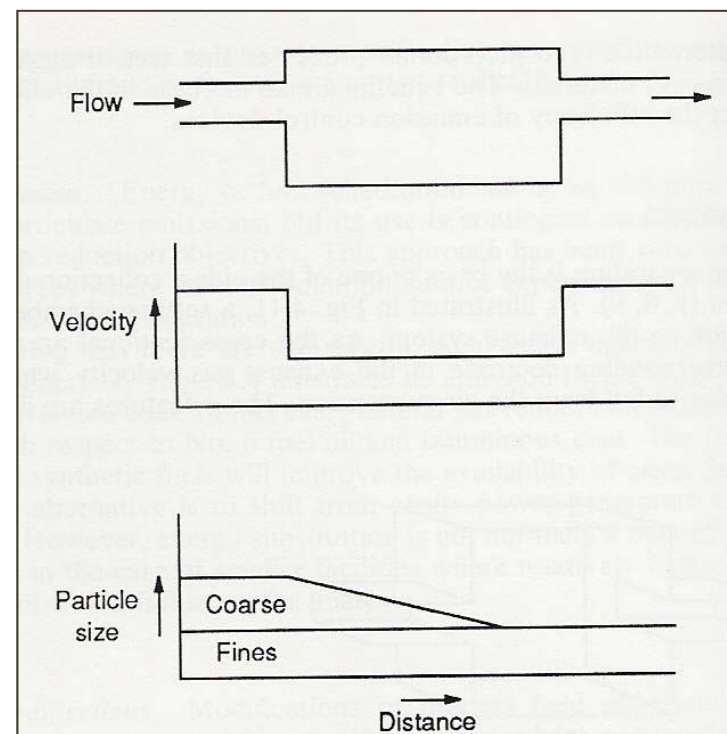
- Καλές για συλλογή σωμα.  $> 100 \mu\text{m}$
- Μικρή απόδοση ( $\sim 50\%$ )
- Πώς μπορούμε να αυξήσουμε την απόδοση;  
Αύξηση  $L$  (εφικτό?), μείωση  $H$ , μείωση  $V_{av}$ , αύξηση  $g$
- Χρησιμοποιείται σε μεταλλευτικές δραστηριότητες, σε χυτήρια, σε μονάδες τροφίμων και για την συλλογή άκαυστου άνθρακα σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας



## Συσκευές βαρυτικής καθίζησης



Γεωμετρίες δοχείων καθίζησης:  
(a) «κουτί», (b) τύπου πλακών και  
(c) επίπεδο κουτί (Corbitt, 1990)



Χαρακτηριστικά απόδοσης δοχείου  
καθίζησης (Corbitt, 1990)



## Συσκευές βαρυτικής καθίζησης

Οι κυριότεροι παράγοντες στις

συσκευές αυτές είναι:

- η διαθέσιμη επιφάνεια για καθίζηση
- η οριακή ταχύτητα κατακάθισης
- η παροχή του αέρα.

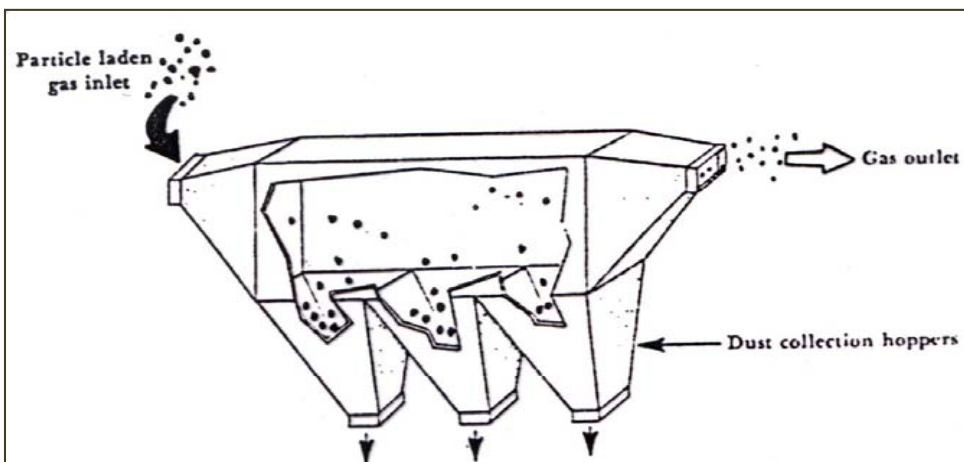


Figure 1 Horizontal flow settling chamber.

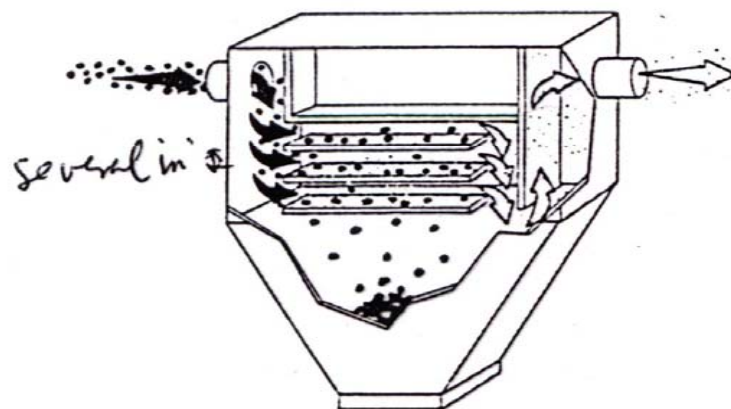


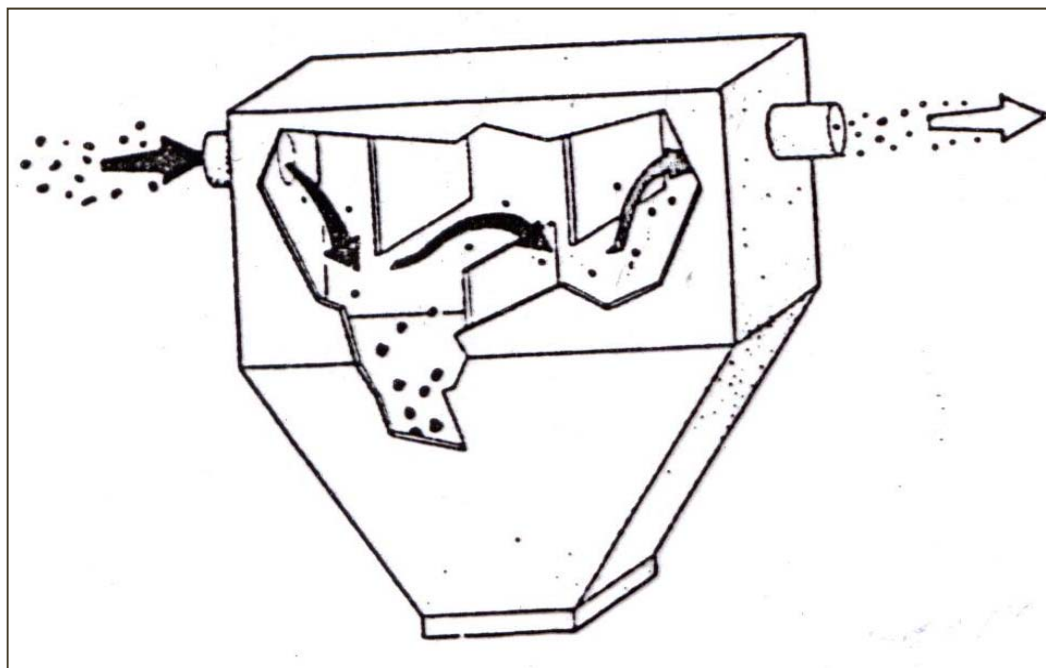
Figure 2 Howard settling chamber (multiple tray).





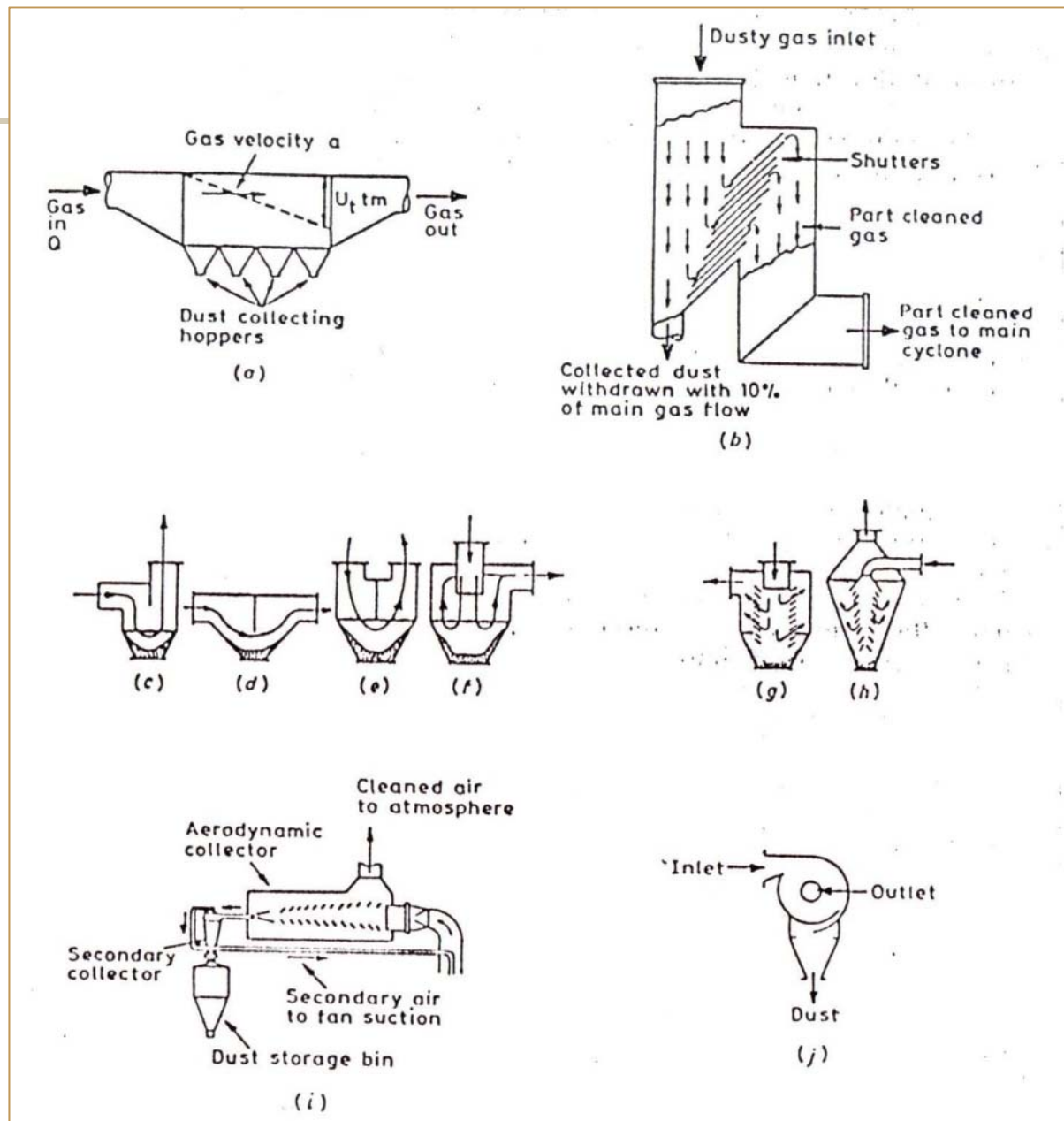
## Άλλες γεωμετρίες: με πλάκες εκτροπής

- Αλλαγή της κατεύθυνσης του αέρα με πλάκες εκτροπής (baffles).
- Μεγάλοι χώροι
- Σπάνια χρησιμοποιούνται σήμερα

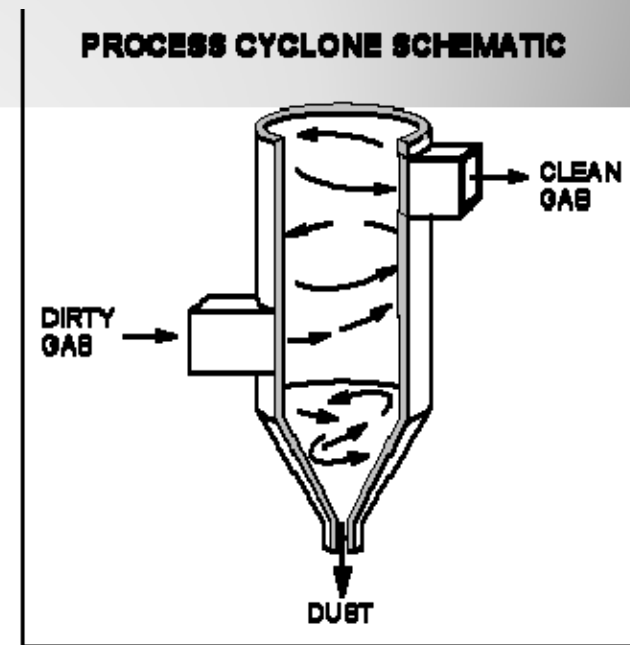




Βαρυτικοί και  
αδρανειακοί  
διαχωριστές  
σωματιδίων



# Φυγοκεντρικοί διαχωριστές - Κυκλώνες



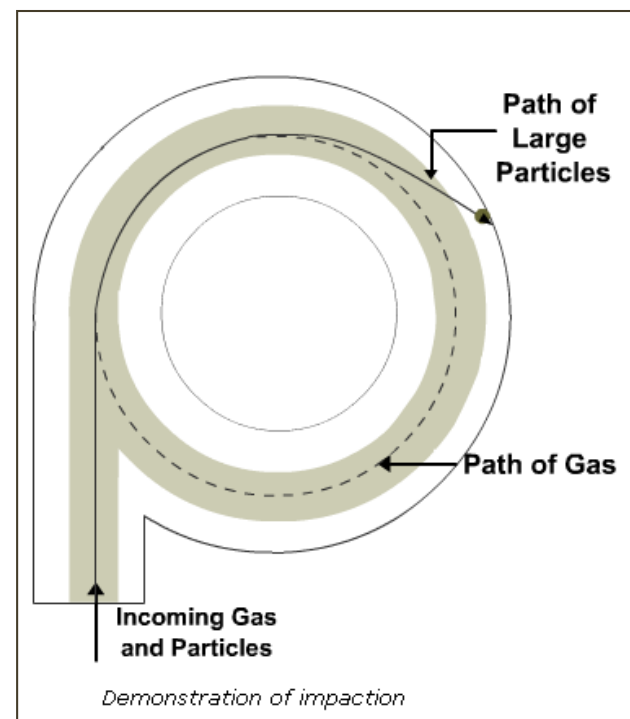


## Κυκλώνες

- Ευρύτατα διαδεδομένοι
- Ο σχεδιασμός τους δεν έχει αλλάξει τα τελευταία 60 χρόνια
- Οικονομικοί, χωρίς κινούμενα μέρη, αντέχουν σε σκληρές συνθήκες λειτουργία
- Σωματίδια στην περιοχή 5-15 μm μπορούν να απομακρυνθούν αποδοτικά

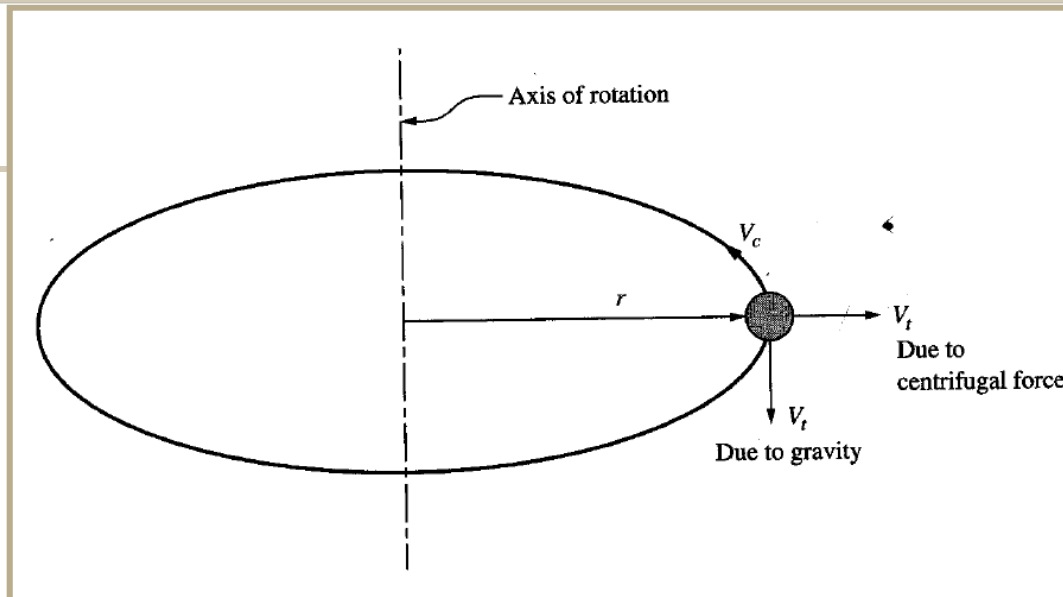
### Μηχανισμοί:

- Η φυγοκεντρική (ψευδο)-δύναμη είναι σημαντικά υψηλότερη από τη δύναμη της βαρύτητας
- Το φορτισμένο με σωματίδια αέριο ρεύμα εισέρχεται εφαπτομενικά κοντά (συνήθως) στην κορυφή του κυκλώνα
- Το αέριο περιστρέφεται μέσα στον κυκλώνα
- Λόγω της φυγόκεντρης δύναμη τα σωματίδια προσκρούουν στα τοιχώματα και η βαρύτητα τα οδηγεί με περιστροφή στον πυθμένα



## Κυκλώνες

Εάν ένα σώμα κινείται σε μία κυκλική τροχιά ακτίνας  $r$  με ταχύτητα  $V_c$ , έχει γωνιακή ταχύτητα  $\omega = V_c/r$  και φυγόκεντρο δύναμη



$$\text{Φυγόκεντρος δύναμη} = \frac{mV_c^2}{r} = m\omega^2 r$$

$$\text{Δύναμη βαρύτητας} = mg$$

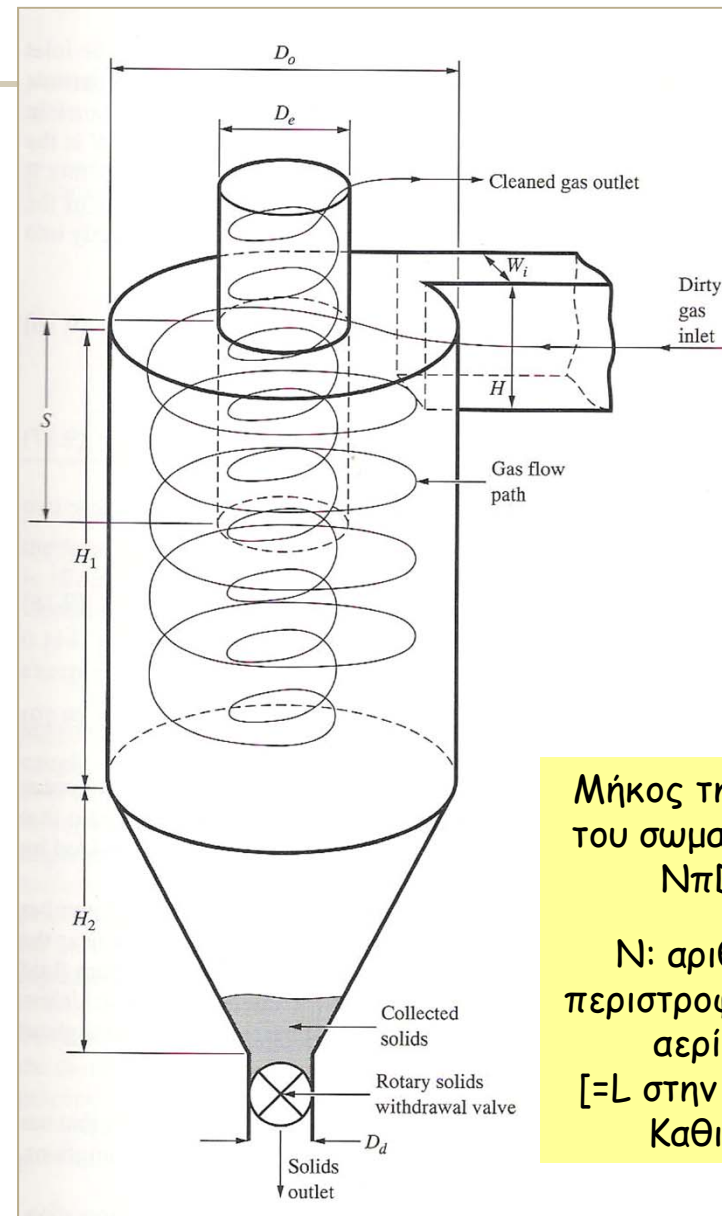
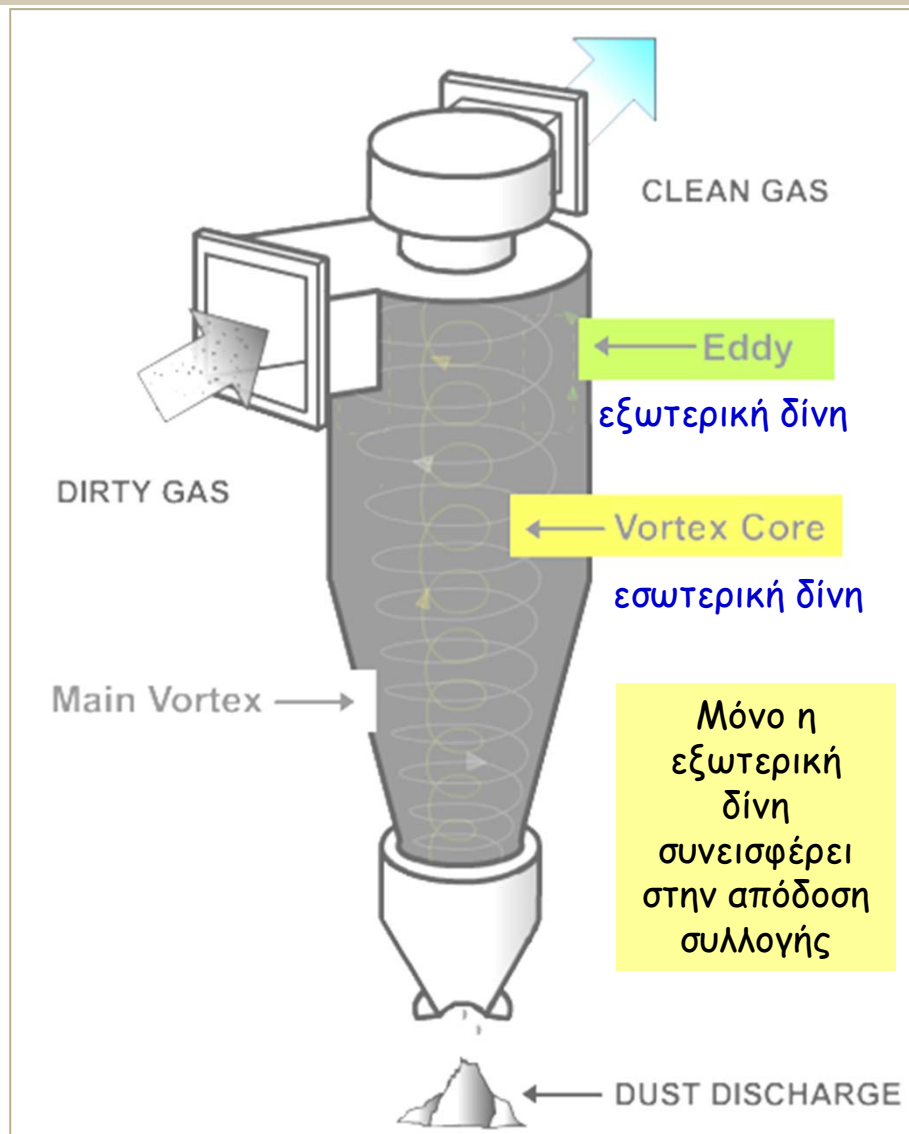
Για σωματίδιο με  $V_c = 20 \text{ m/s}$  και  $r = 0,30 \text{ m}$   $\Rightarrow$

$$\frac{\text{Φυγόκεντρος δύναμη}}{\text{Δύναμη βαρύτητας}} = 133 !!!$$

$$\text{Φυγόκεντρος επιτάχυνση} = \frac{V_c^2}{r}$$



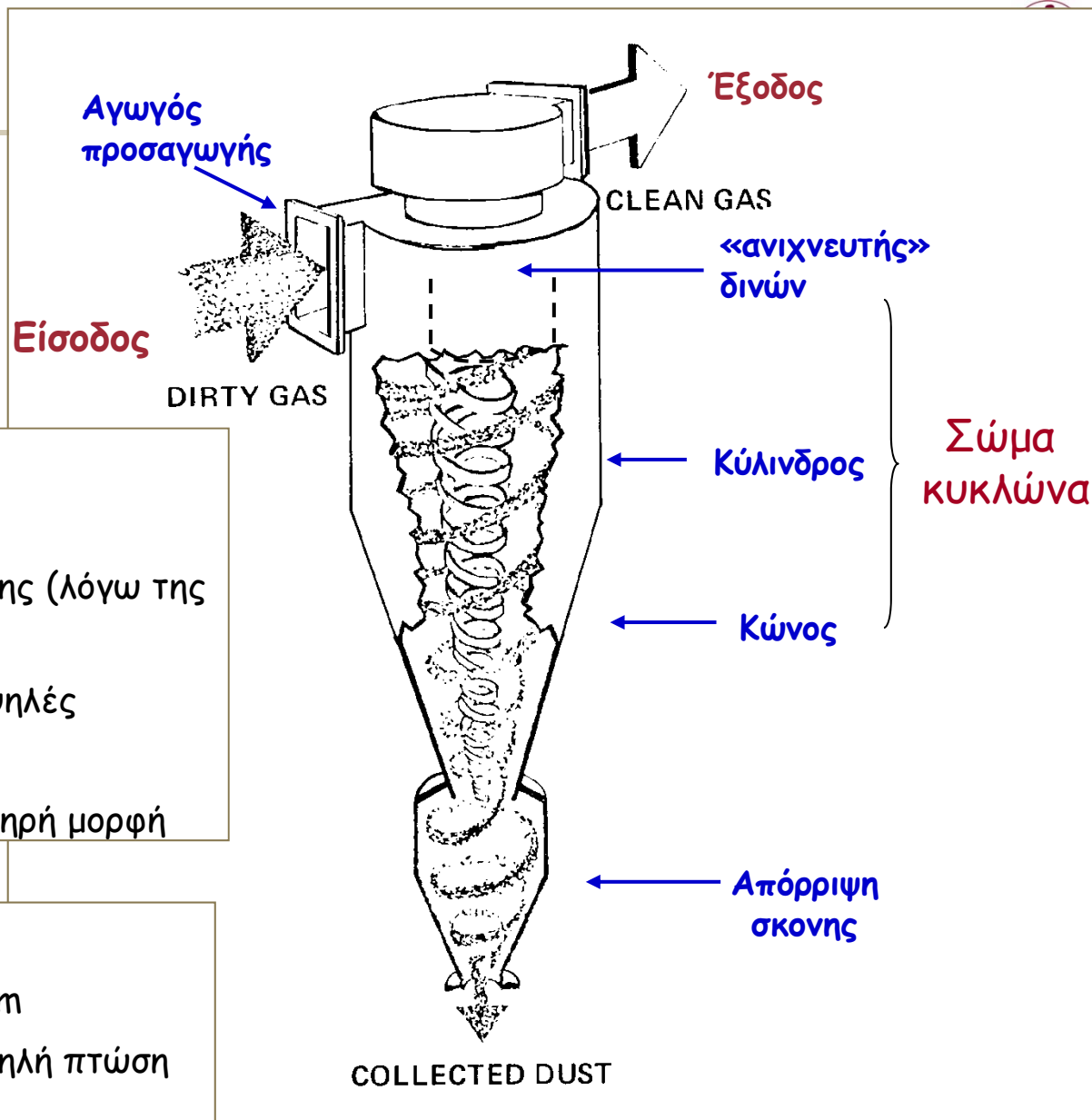
# Κυκλώνες



Μήκος της ροής του σωματιδίου =  $N\pi D_o$

$N$ : αριθμός περιστροφών του αερίου  
[ $=L$  στην βαρυτ. Καθιζ.]

# Κυκλώνες



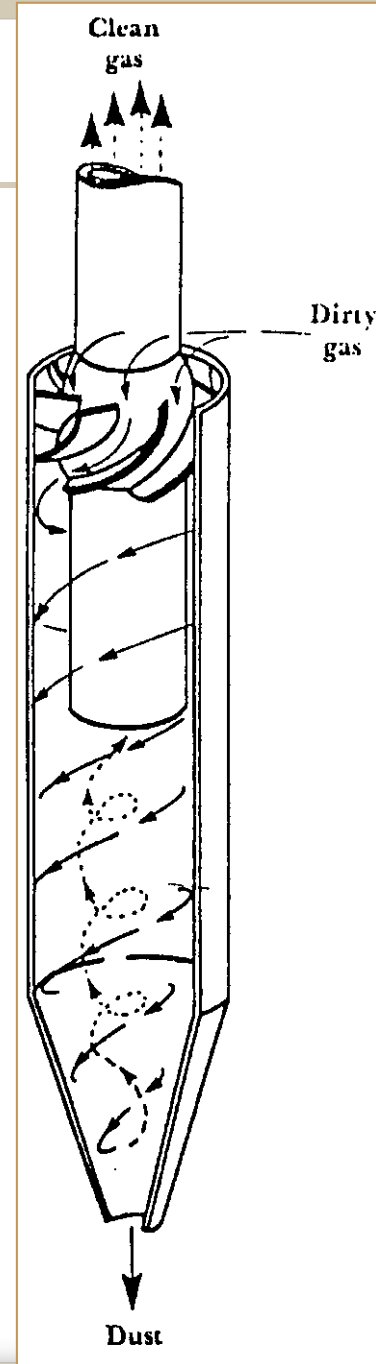
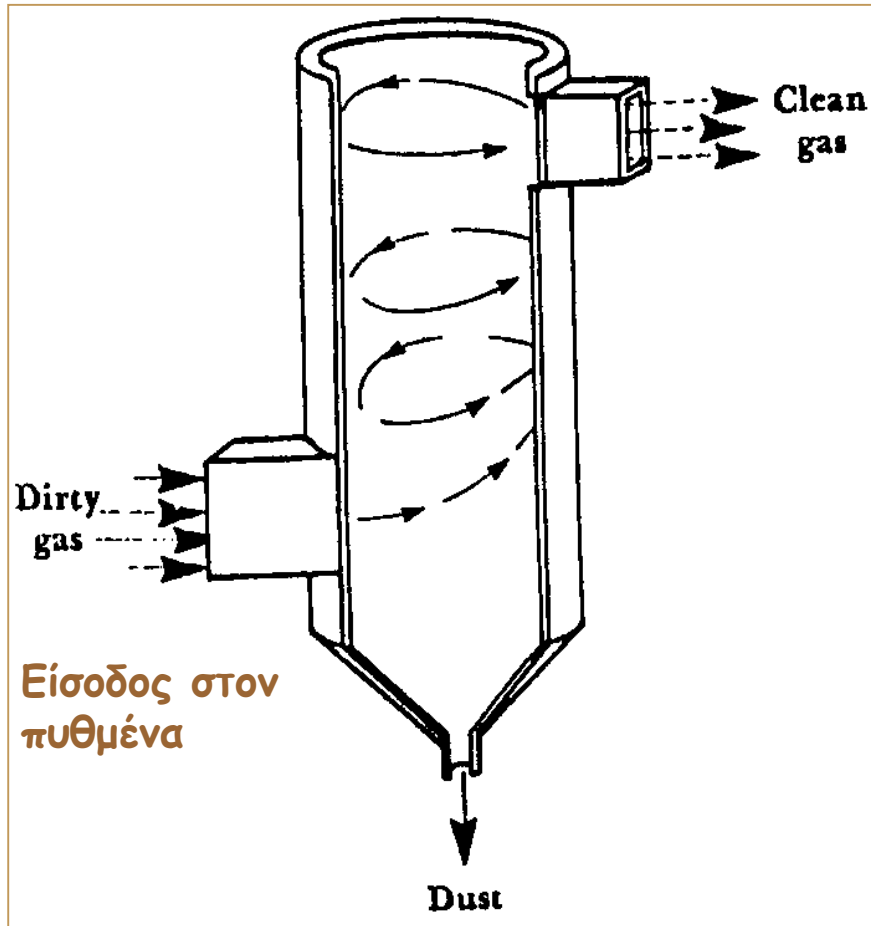
## Πλεονεκτήματα

- Μικρό κόστος κατασκευής
- Χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης (λόγω της απουσίας κινούμενων μερών)
- Δυνατότητα λειτουργίας σε υψηλές θερμοκρασίες
- Διάθεση των σωματιδίων σε ξηρή μορφή

## Μειονεκτήματα

- Χαμηλές αποδόσεις για  $d < 10 \mu\text{m}$
- Υψηλό κόστος λειτουργίας (Υψηλή πτώση πίεσης)

# Κυκλώνες



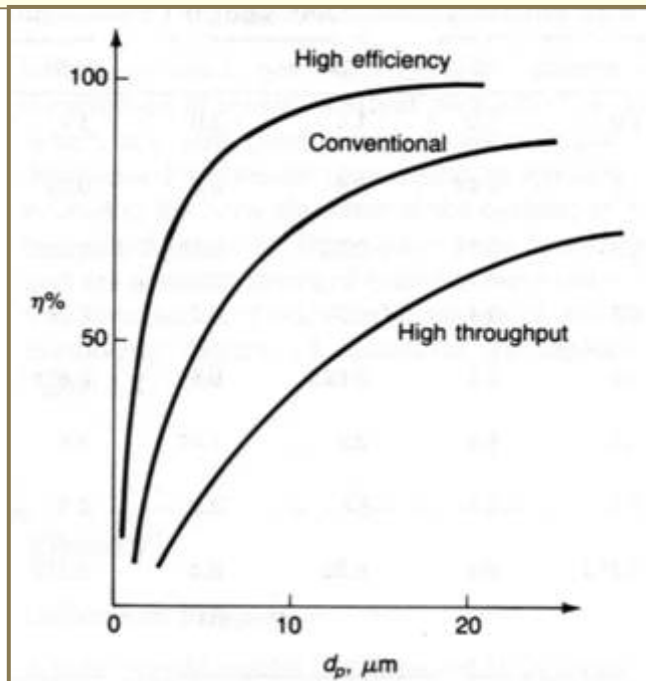
Αξονική  
είσοδος



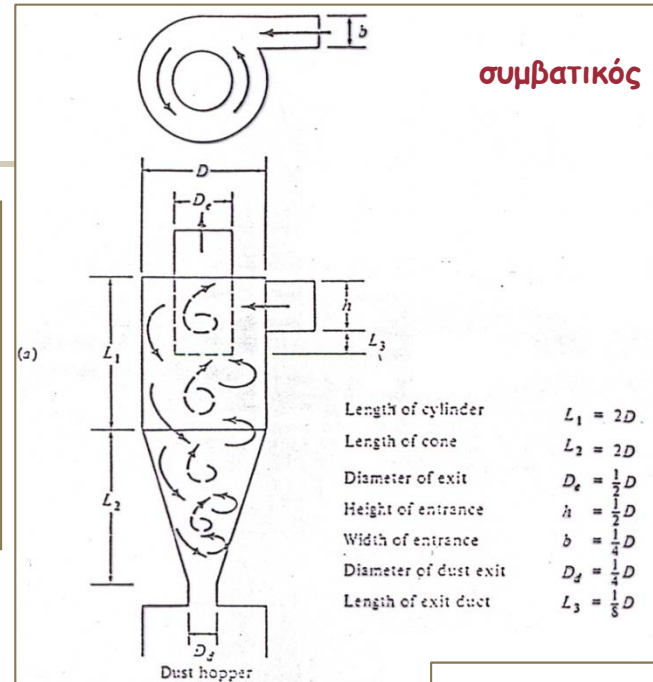
# Κυκλώνες

## Τύποι κυκλώνα

- Συμβατικός κυκλώνας
- Κυκλώνας υψηλής απόδοσης
- Κυκλώνας υψηλής δυναμικότητας (μεγάλης ογκομετρικής παροχής)

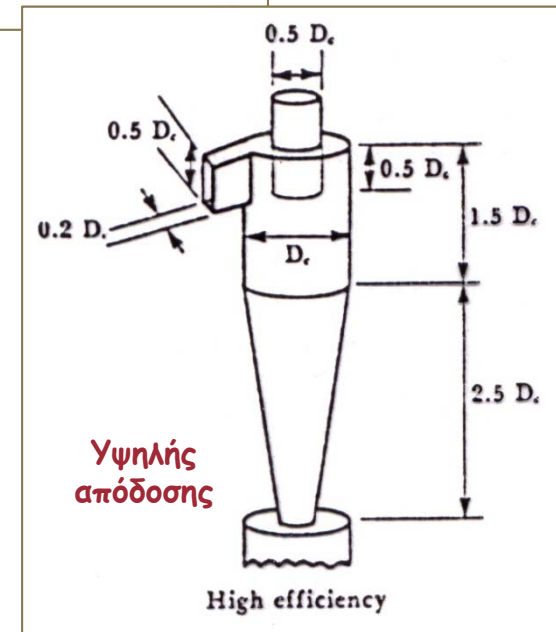


Γενική σχέση της απόδοσης συλλογής σε σχέση με το μέγεθος των σωματιδίων.



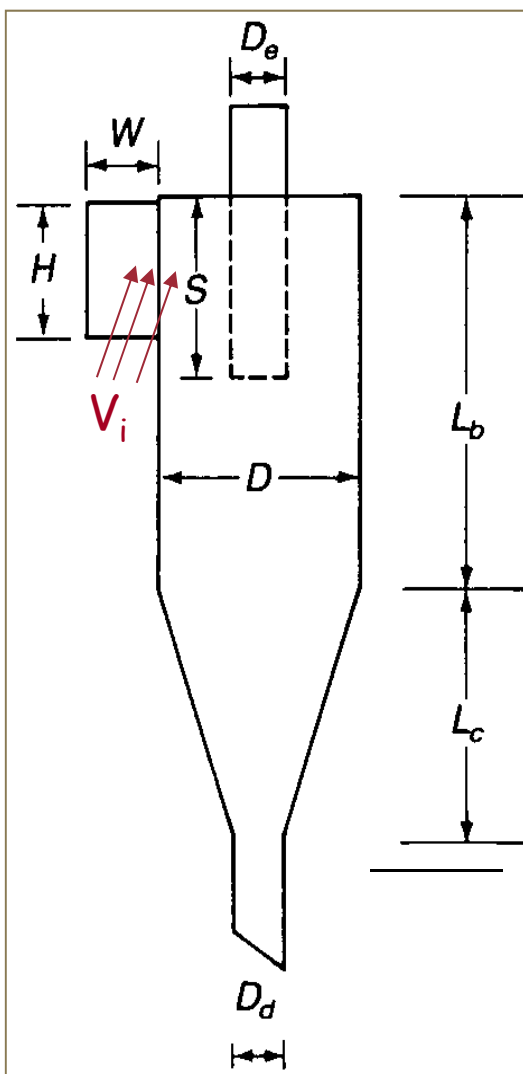
## Ο σχεδιασμός ενός κυκλώνα θεωρεί:

- Απόδοση συλλογής
- Πτώση πίεσης
- Μέγεθος συσκευής





# Τυπικές διαστάσεις κυκλώνα



## Βασική παράμετρος η διάμετρος του σώματος

	Τύπος Κυκλώνα					
	Υψηλής Απόδοσης		Συμβατικός		Υψηλής Δυναμικότητας	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Διάμετρος Σώματος $D/D$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Ύψος Στομίου Εισόδου $H/D$	0.5	0.44	0.5	0.5	0.75	0.8
Πλάτος Στομίου Εισόδου $W/D$	0.2	0.21	0.25	0.25	0.375	0.35
Διάμετρος Εξόδου Αερίου $D_e/D$	0.5	0.4	0.5	0.5	0.75	0.75
Μήκος Ανιχνευτή Δίνης $S/D$	0.5	0.5	0.625	0.6	0.875	0.85
Μήκος Σώματος $L_b/D$	1.5	1.4	2.0	1.75	1.5	1.7
Μήκος Κώνου $L_c/D$	2.5	2.5	2.0	2.0	2.5	2.0
Διάμ. Εξόδου Σωματιδίων $D_d/D$	0.375	0.4	0.25	0.4	0.375	0.4

(1) (5) Stairmand (1951)

(2), (4), (6): Swift (1969)

(3) Lapple (1951)



## Απόδοση συλλογής: Θεωρία του Lapple (plug flow)

Ο αριθμός των (ενεργών) περιστροφών είναι περίπου:

$$N_e = \frac{1}{H} \left[ L_b + \frac{L_c}{2} \right]$$

Χρόνος παραμονής αερίων (στην εξωτερική δίνη):

$$\Delta t = \frac{\pi D N_e}{V_i} \quad (1) \quad V_i = \text{ταχύτητα εισαγωγής αερίου (10-25 m/s)}$$

Για να συλληχθούν τα σωματίδια πρέπει να κτυπήσουν στο τοίχωμα.

**Οριακή ταχύτητα καθίζησης** (λόγω της φυγόκεντρης)

στην ακτινική διεύθυνση

[η μέγιστη ακτινική απόσταση που πρέπει να διανύσει ένα σωματ. είναι  $W$ ]

$$V_t = \frac{W}{\Delta t} = \frac{d_p^2 (\rho_p - \rho_g)}{18\mu} \left( \frac{V_i^2}{R} \right) = \frac{d_p^2 (\rho_p - \rho_g) V_i^2}{9\mu D} \quad (2)$$

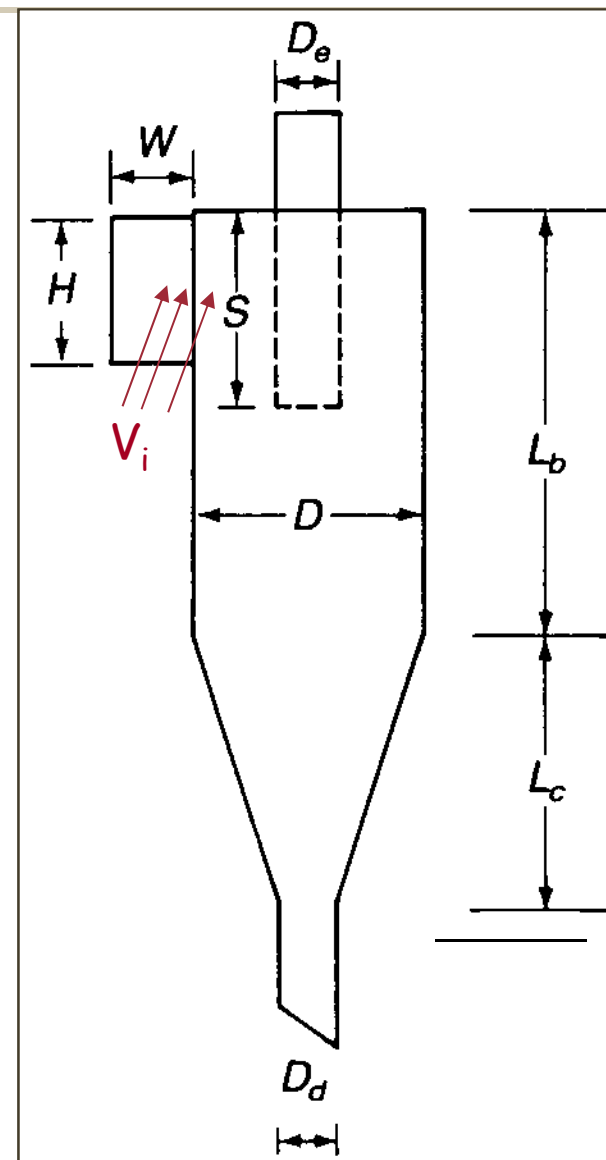
Υπόθεση: ροή Stokes

Μικρότερη συλλεγόμενη διάμετρος [από (1) και (2)], εάν το σωματίδιο ξεκινήσει από απόσταση  $W$ .

$$d_p = \sqrt{\frac{9\mu W}{\pi N_e V_i (\rho_p - \rho_g)}}$$

Εξίσωση Rosin-Rammler

**Πως μπορούμε να μειώσουμε τη μικρότερη διάμετρο συλλογής:**





## Απόδοση συλλογής

Η εξίσωση Rosin-Rammler δε μπορεί να δώσει την απόδοση συλλογής.

Ο Larple (1951) πρότεινε τη διάμετρο «αποκοπής» 50% (50% cut size) [ημιεμπειρική μέθοδος]

$$d_{pc} = \sqrt{\frac{9\mu W}{2\pi N_e V_i \rho_p}}$$

$d_{pc}$  = διάμετρος σωματιδίων που συλλέχθηκαν με 50% απόδοση (cut diameter)

Η (εμπειρική) απόδοση συλλογής για το μέγεθος (εύρος)  $d_{pj}$

$$\eta_j = \frac{1}{1 + (d_{pc} / d_{pj})^2}$$

προσαρμογή

Theodore & DiPaola (1980)

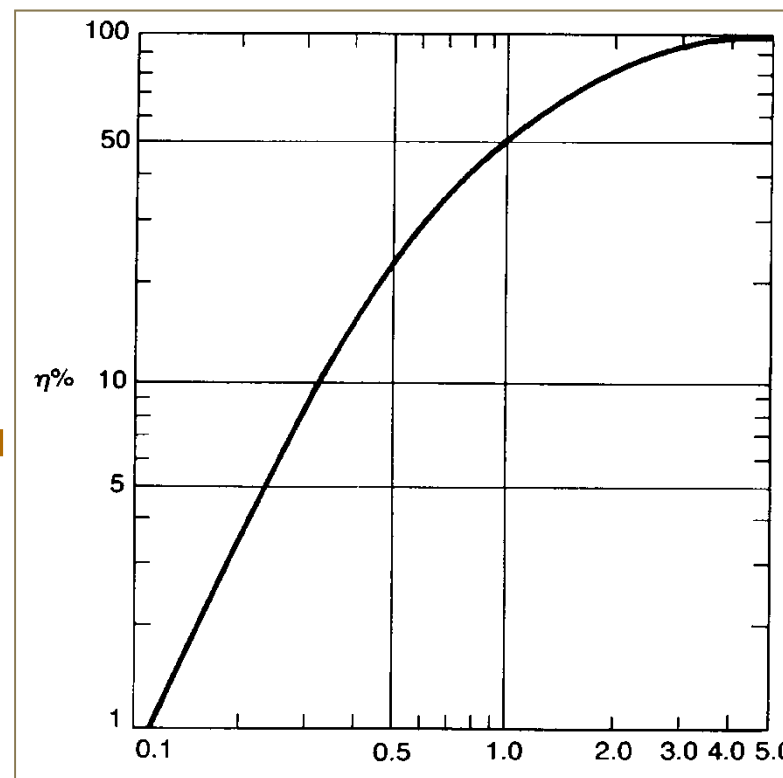
**Συνολική απόδοση**

$$\eta = \sum \eta_j m_j$$

$m_j$  = κλάσμα μάζας των σωματιδίων στο εύρος μεγέθους  $j$

**Διείσδυση**

$$p = 1 - \eta$$



Particle size ratio  $d_p/d_{p50\%}$

Έχουν αναπτυχθεί και περισσότερα πολύπλοκα μοντέλα.

## Απόδοση κυκλώνα για διάφορες διεργασίες\*

Μεγαλύτερη θερμοκρασία εισόδου οδηγεί σε μεγαλύτερη ταχύτητα εισόδου (καλύτερη απόδοση), αλλά και αύξηση του ιξώδους του αέρα (χειρότερη απόδοση), και σε μεγαλύτερη πτώση πίεσης !

\* *Air Pollution Control Equipment*, Theodore & Buonicore, CRC Press, 1988.

Efficiency vs. particle size	% Of particles below 10 $\mu\text{m}$ in size	Efficiency range
Fly ash (power)		
Spreader stoker-fired boilers	20	90—95
PC-fired boilers	42	75—90
Cyclone-fired boilers	65	55—65
Nonmetallic minerals (when collector is part of process and collector catch is reusable)		
Cement (kilns and process)	40	70—85
Asphalt plant	10	80—95
Lightweight aggregate (kiln)	30—40	80—90
Refractory clays (kiln)	40—50	70—80
Lime (kiln)	40—50	75—80
Fertilizer plant (process equipment)	40	80—85
Steel (ore beneficiation)		
Pelletizing (vertical shaft and rotary kiln)	10—40	80—95
Foundry (general)	10—40	80—95
Chemical process (drying, calcining)	10—40	80—95
Incinerators (municipal)	20—40	65—75
Coal processing (thermal drying)	10	90—97
Petroleum (catalytic cracking process)	0.6	99+
General industrial application (in plant)	10—60	65—95



## Παράδειγμα

**4.1.** Θεωρήστε ένα **συμβατικό κυκλώνα τύπου Larple (1951)** με διάμετρο σώματος **1 m**. Για παροχή αέρα  $150 \text{ m}^3/\text{min}$  στους  $T=350 \text{ K}$  και  $1 \text{ atm}$  που περιέχει σωματίδια πυκνότητας  $1600 \text{ kg/m}^3$  και κατανομή μεγέθους όπως δίνεται παρακάτω, να υπολογιστεί η συνολική απόδοση.

Εύρος μεγέθους, $\mu\text{m}$	Ποσοστό μάζας στο εύρος μεγ.
0-2	1
2-4	9
4-6	10
6-10	30
10-18	30
18-30	14
30-50	5
50-100	1

	Τύπος Κυκλώνα				Υψηλής Δυναμικότητας	
	Υψηλής Απόδοσης		Συμβατικός			
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Διάμετρος Σώματος $D/D$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Ύψος Στομίου Εισόδου $H/D$	0.5	0.44	0.5	0.5	0.75	0.8
Πλάτος Στομίου Εισόδου $W/D$	0.2	0.21	0.25	0.25	0.375	0.35
Διάμετρος Εξόδου Αερίου $D_e/D$	0.5	0.4	0.5	0.5	0.75	0.75
Μήκος Ανιχνευτή Δίνης $S/D$	0.5	0.5	0.625	0.6	0.875	0.85
Μήκος Σώματος $L_b/D$	1.5	1.4	2.0	1.75	1.5	1.7
Μήκος Κώνου $L_c/D$	2.5	2.5	2.0	2.0	2.5	2.0
Διάμ. Εξόδου Σωματιδίων $D_d/D$	0.375	0.4	0.25	0.4	0.375	0.4

$$d_{pc} = \sqrt{\frac{9\mu W}{2\pi N_e V_i \rho_p}} = 6.3 \mu\text{m}$$



## Παράδειγμα

$$\eta_j = \frac{1}{1 + (d_{pc} / d_{pj})^2}$$

j	Εύρος μεγέθους (μm)	Μέση τιμή d <sub>j</sub> (μm)	d <sub>j</sub> /d <sub>pc</sub>	η <sub>j</sub> (%)	m <sub>j</sub> , %	η <sub>j</sub> m <sub>j</sub> , %
1	0-2	1	0.159	0.02	1	0.02
2	2-4	3	0.476	0.18	9	1.66
3	4-6	5	0.794	0.39	10	3.86
4	6-10	8	1.270	0.62	30	18.52
5	10-18	14	2.222	0.83	30	24.95
6	18-30	24	3.810	0.94	14	13.10
7	30-50	40	6.349	0.98	5	4.88
8	50-100	75	11.905	0.99	1	0.99
					<b>100</b>	<b>68.0</b>

$$\eta = \sum \eta_j m_j$$



# Πτώση πίεσης

- Τυπική ταχύτητα εισόδου  $V_i \sim 20$  m/s
- Σχετικά υψηλή πτώση πίεσης. Γιατί;
- Γενικά από 25-400 mm (1-16 in) νερού.
- Αρκετές προσεγγίσεις
- Ικανοποιητικό το (εμπειρικό) μοντέλο των Shepherd & Lapple (1940)

**Πτώση πίεσης** (σε σχέση με την πτώση πίεση της εισερχόμενης ταχύτητας)

$$\frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho_g V_i^2} = H_u = K_c \frac{HW}{D_e^2}$$

$\Delta P$ = πτώση πίεσης, Pa  
 $\rho_g$ = πυκνότητα αερίου, kg/m<sup>3</sup>  
 $V_i$ = ταχύτητα εισόδου αερίου, m/s  
 $K_c$  = σταθερά που εξαρτάται από τον τύπο του κυκλώνα,  
τυπική τιμή για αέρια ρύπανση 16 (περιοχή 7,5-18,5)

Μοντέλο των Casal & Martinez (1983)

$$\frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho_g V_i^2} = 3,33 + 11,8 \frac{HW}{D_e^2}$$

**Απαίτηση σε ενέργεια, W**

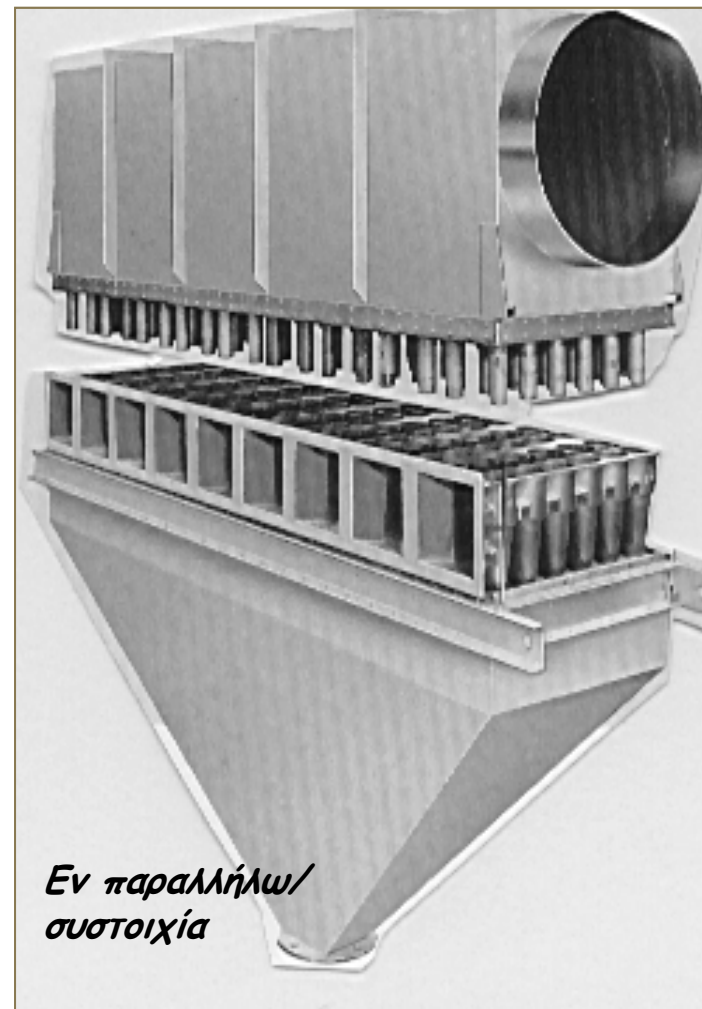
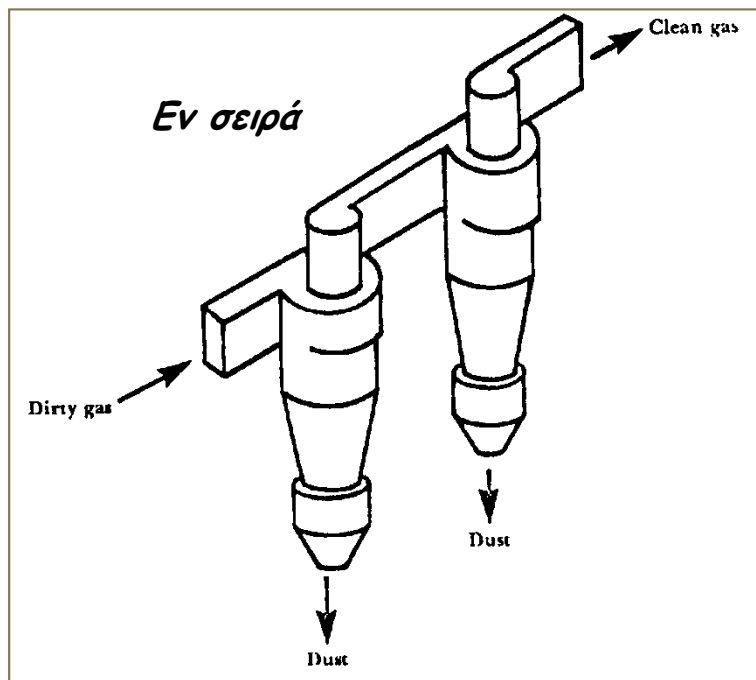
$$\dot{w}_f(W) = Q(\text{m}^3 / \text{s}) \cdot \Delta P(\text{Pa})$$

Common ranges for pressure drops are:

low efficiency cyclone	2 to 4 in. of water.
medium efficiency cyclone	4 to 8 in. of water.
high efficiency cyclone	8 to 10 in. of water.



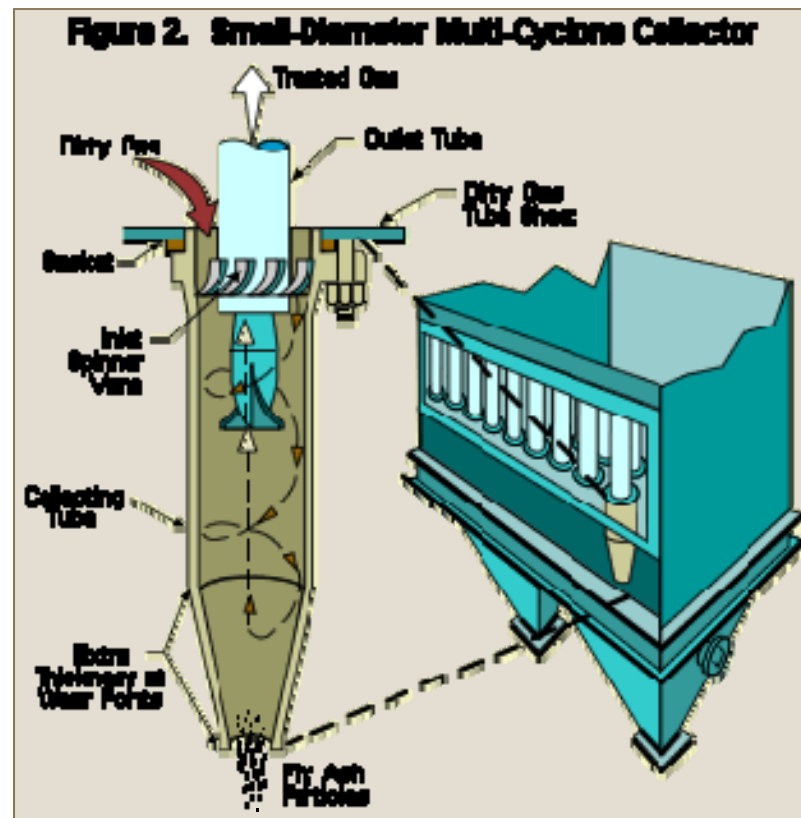
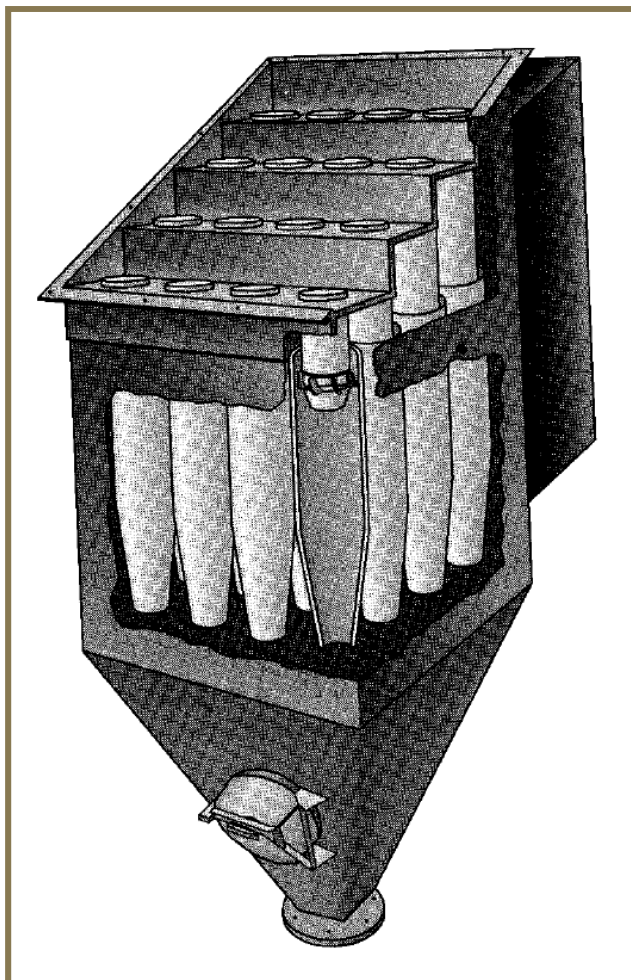
# Τοποθέτηση κυκλώνων



Air Pollution Control Equipment, Theodore & Buonicore, CRC Press, 1988



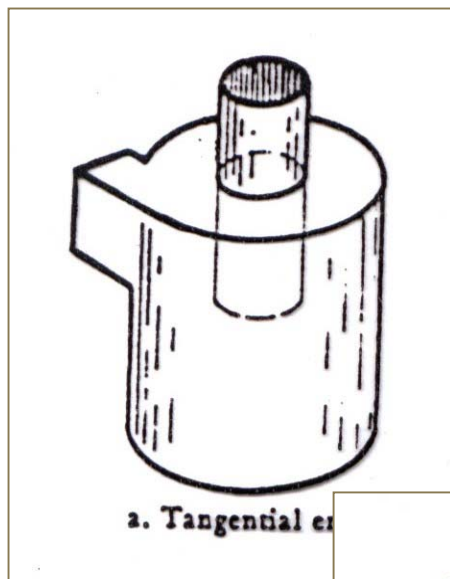
## Τοποθέτηση κυκλώνων



Πολυκωνικό σύστημα: μεγάλος αριθμός μικρών κυκλώνων εν παραλλήλω.

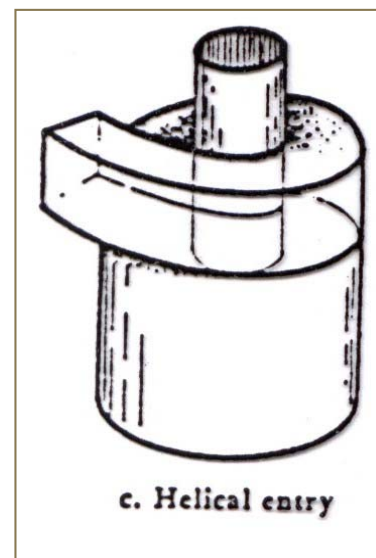
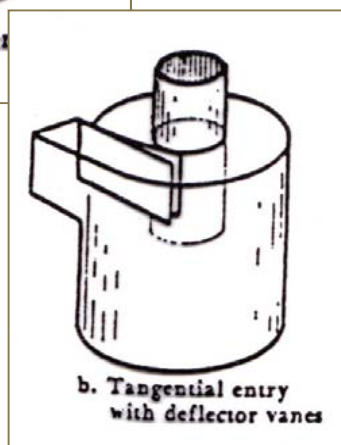


## Είσοδος της σκόνης



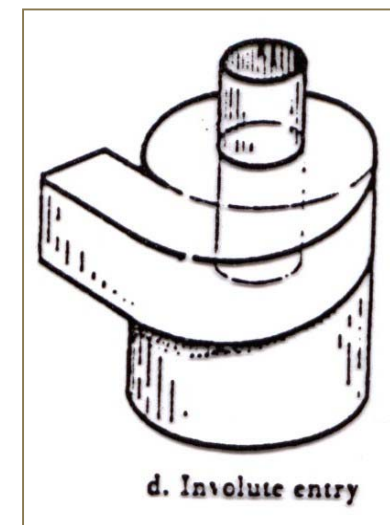
### Εφαπτομενική

- Απλός σχεδιασμός και κατασκευή
- Χαμηλό κόστος
- Χαμηλή απόδοση
- Σχετικά υψηλή πτώση πίεσης



### Ελικοειδής

- Δίνει εφαπτομενική ταχύτητα στο αέριο
- Σχετικά περίπλοκος σχεδιασμός
- Υψηλότερο κόστος

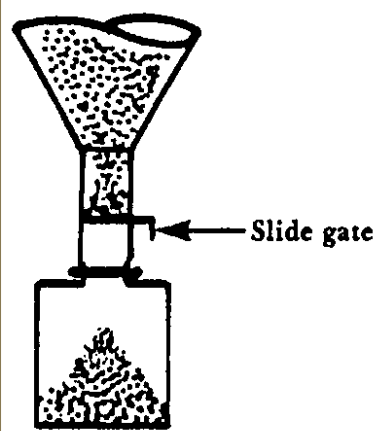


### Ενεστραμμένη

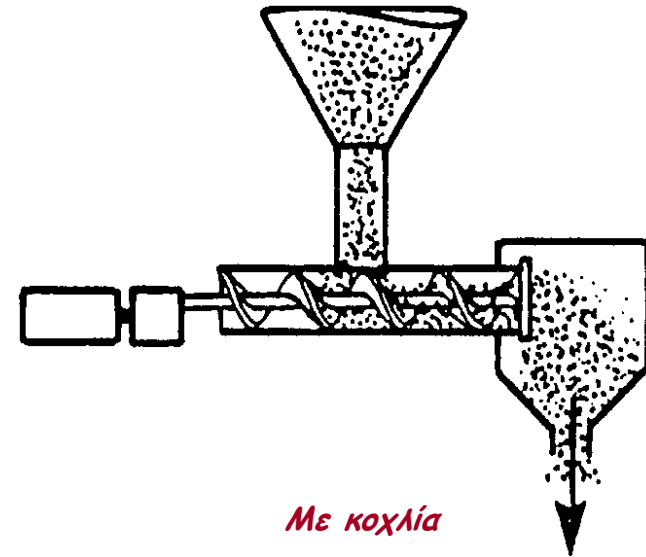
- Επιτρέπει να εισέλθει το αέριο με την ελάχιστη τύρβη και χαμηλή πτώση πίεσης
- Υψηλότερη απόδοση από την εφαπτομενική είσοδο
- Μεγαλύτερες συσκευές - κόστος

*Handbook of Air Pollution Control Engineering & Technology, Mycock, McKenna and Theodore, Lewis Publishers, 1995.*

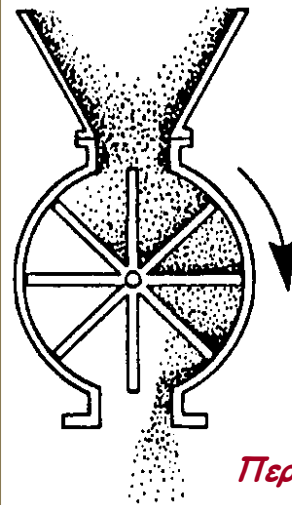
# Απόρριψη σκόνης



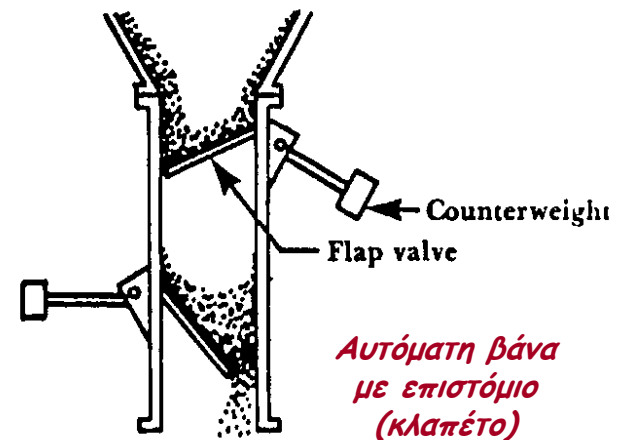
a. Simple manual slide gate  
*Χειρονακτικά*



c. Discharge screw feeder  
*Με κοχλία*



b. Rotary valve  
*Περιστροφική βάνα*



d. Automatic flap valve  
*Αυτόματη βάνα με επιστόμιο (κλαπέτο)*

Handbook of Air Pollution Control Engineering & Technology, Mycock, McKenna and Theodore, Lewis Publishers, 1995.

# Κυκλώνες



Κυκλώνες για απομάκρυνση της σκόνης

# Κυκλώνες



# Κυκλώνες

