



σχολήχημικώνμηχανικών
εθνικόμετσόβιοπολυτεχνείο

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

(1ο Φροντιστηριακό μάθημα)

Δρ. Κωνσταντίνα Παπαδοπούλου (ΕΔΙΠ)

kpapado@chemeng.ntua.gr

14 Μαρτίου 2025



ΔΟΜΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗΣ

01

Υγρά Απόβλητα: Προεπεξεργασία (σχάρισμα, εξάμμωση, λιποσυλλογή και εξισορρόπηση)

02

Στερεά Απόβλητα: Αστικά Στερεά Απορρίμματα (Συλλογή στην πηγή)

03

Αέρια Απόβλητα: Καμινάδες

Με την προεπεξεργασία **στοχεύουμε** να **προστατεύσουμε** τις κυρίως διεργασίες της μονάδας από **ορισμένα χαρακτηριστικά** των αποβλήτων που ενδέχεται να δημιουργήσουν **πρόβλημα** στη λειτουργία τους.

Μικρή επίδραση στη μείωση του BOD_5

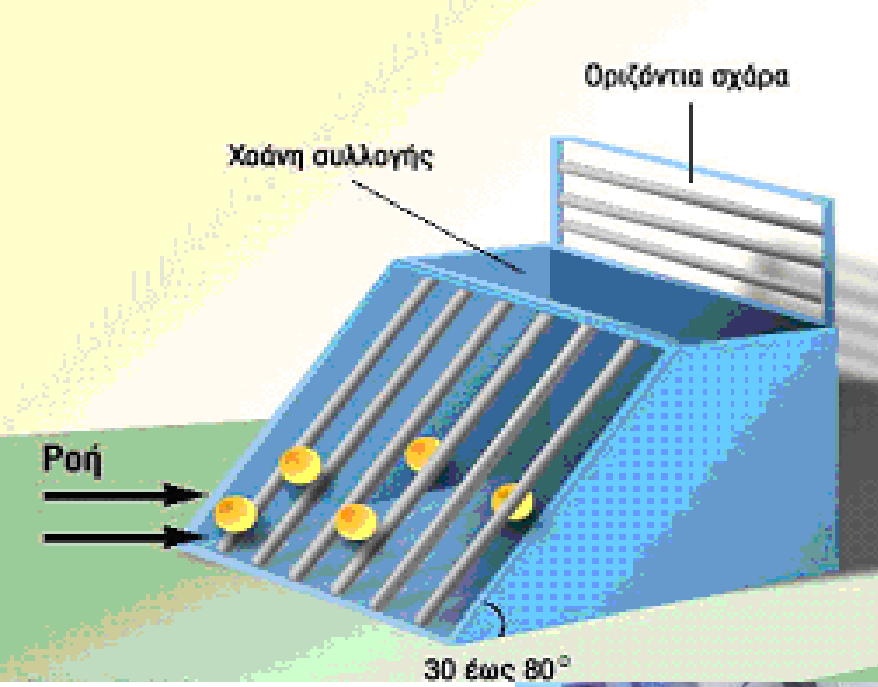
Οι διεργασίες αυτές για ΑΥΑ είναι:

- Σχάρισμα
- Αμμοσυλλογή
- Λιπσυλλογή
- Εξισορρόπηση Παροχής

Για Βιομηχανικά ΥΑ
συνήθως χρειάζεται και
εξουδετέρωση.

Εσχαρισμός

- Ο διαχωρισμός των στερεών από τα υγρά απόβλητα με βάση το μέγεθος γίνεται με τη χρήση εσχαρών ή κοσκίνων.
- Τα ογκώδη στερεά που μπορεί να περιέχονται στα απόβλητα (ιδίως τα αστικά) όπως κουρέλια, κομμάτια ξύλων, σακούλες κλπ, μπορεί να προκαλέσουν ζημιά στις αντλίες και τον υπόλοιπο εξοπλισμό των μονάδων επεξεργασίας αποβλήτων, οπότε πρέπει να απομακρύνονται.
- Η απομάκρυνση γίνεται με διατάξεις εσχαρισμού που είναι είτε στοιχεία με παράλληλες ράβδους (bars) ή σύρματα, είτε κόσκινα, είτε διάτρητοι δίσκοι.
- Τα ανοίγματα μπορεί να έχουν οποιοδήποτε σχήμα, συνήθως όμως είναι είτε παραλληλόγραμμα είτε κυκλικά.
- Οι χονδρές σχάρες (screen) έχουν διάκενα από 1 έως 5 cm. Τα λεπτά κόσκινα (sieve) με διάκενα μικρότερα του 1,5 cm έως μερικά μικρά μπορούν να αντικαταστήσουν και την καθίζηση.



Σχεδιασμός σχάρας

Πάχος διακένων	δ	2,5-5cm
Πλάτος ράβδου	d	0,5-2cm
Βάθος ροής*	h	0,4m
Ταχύτητα ανάντη σχάρας	v	0,4-0,6m/s
Ταχύτητα διακένων	$v_{\text{διακ}}$	<1,2m/s

-*5.000-20.0000 κατοίκους, για μεγαλύτερο πληθυσμό κατασκευάζονται περισσότερα κανάλια.

-Αν δεν είναι γνωστή η μέγιστη παροχή Q_{max} , τότε υπολογίζεται ο συντελεστής αιχμής:

Αν δεν είναι γνωστή η μέγιστη παροχή $Q_{\max}$, τότε υπολογίζεται ο συντελεστής αιχμής, σχέση 2.1.11:

$$C_P = 1,5 + \frac{2,5}{\sqrt{Q_{\text{ave}}}}$$

όπου Q_{ave} η μέση παροχή σε L/s. Τότε σχέση 2.1.12 :

$$Q_{\max} = C_P \cdot Q_{\text{ave}}$$

Έστω, επίσης το κλάσμα διέλευσης f σχέση 2.1.13 :

$$f = \frac{\delta}{d + \delta}$$

τότε η απαιτούμενη επιφάνεια ροής είναι σχέση 2.1.14:

$$A = \frac{Q_{\max}}{v \cdot f \cdot c}$$

όπου το c συντελεστής με τιμή 0,1-0,3 για απλές σχάρες και 0,4-0,5 για αυτόματες μηχανικές σχάρες.

Το απαιτούμενο πλάτος είναι τότε, σχέση 2.1.15:

$$W = \frac{A}{h}$$

Αν η σχάρα έχει κλίση γωνίας ϕ , τότε το απαιτούμενο ύψος H της σχάρας (μήκος ράβδων) είναι σχέση 2.1.16 :

$$H = \frac{h}{\eta \mu \phi}$$

Η ταχύτητα ροής στα διάκενα σχέση 2.1.17, δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 1,2m/s.:

$$V_{\text{διακ}} = \frac{V}{f}$$

Η υδραυλική απώλεια (πτώση πίεσης Δp) δια μέσου της σχάρας σε m δίδεται από την σχέση 2.1.18:

$$\Delta p = 2,34 \cdot \left(\frac{d}{\delta}\right)^{\frac{4}{3}} \cdot \left(\frac{v^2}{2 \cdot g}\right) \cdot \eta \mu \phi$$

Η πτώση πίεσης Δp μπορεί να υπολογιστεί και από τύπους όπως οι παρακάτω σχέσεις:

- **Για σχάρες** σχέση 2.1.19:

$$\Delta p = \frac{1}{0,7} \cdot \left(\frac{v_{\text{διακ}}^2 - v^2}{2 \cdot g} \right)$$

Όπου,

$v_{\text{διακ}}$ η ταχύτητα του ρευστού μέσα από τα ανοίγματα, m/s

v η ταχύτητα του ρευστού ανάντη της διάταξης, m/s

g η επιτάχυνση της βαρύτητας, m/s²

0,7 εμπειρικός συντελεστής (τύρβες και απώλειες)

- **Για λεπτές σήτες** σχέση 2.1.20:

$$\Delta p = \frac{1}{c} \cdot \frac{1}{2 \cdot g} \cdot \left(\frac{Q_{\text{max}}}{A_{\text{διακ}}} \right)^2$$

Όπου,

Q_{max} η μέγιστη παροχή του ρευστού, m³/s

$A_{\text{διακ}}$ η ελεύθερη επιφάνεια (ανοίγματα) του βυθισμένου τμήματος, m² (=f*A)

c εμπειρικός συντελεστής (τυπική τιμή 0,6).

Ο εμπειρικός αυτός συντελεστής δίδεται συνήθως από τον κατασκευαστή. Οι σχέσεις αυτές αναφέρονται σε καθαρή διάταξη, ενώ όσο συσσωρεύονται στερεά τόσο αυξάνεται η πτώση πίεσης.

Άσκηση 1. Εσχαρισμός



Υπολογίστε την πτώση πίεσης μιας σχάρας με κλίση γωνίας 30° , πλάτος ράβδων 2 cm, πάχος διακένων 3 cm και ταχύτητα ροής 0,5 m/s.

Πάχος διακένων	δ	3cm
Πλάτος ράβδου	d	2cm
Ταχύτητα ροής	v	0,5m/s

Από την σχέση 2.1.18

$$\Delta p = 2,34 \cdot \left(\frac{d}{\delta}\right)^{\frac{4}{3}} \cdot \left(\frac{v^2}{2 \cdot g}\right) \cdot \eta \mu \varphi$$

$$\Delta p = 2,34 \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{4}{3}} \cdot \left(\frac{0.5^2}{2 \cdot 9,81}\right) \cdot \eta \mu 30^\circ$$

$$\Delta p = 0,0087 \text{ m} = 0,87 \text{ cm}$$

Αν μετά από κάποιο χρονικό διάστημα φράξει το 30% της σχάρας, πόση θα είναι τότε η πτώση πίεσης;

$$\text{Τότε } \delta' = 0,7 \cdot \delta = 2,1 \text{ cm}$$

$$f' = \frac{\delta'}{d + \delta'} = \frac{2,1}{2 + 2,1} = 0,51$$

$$v_{\text{διακ}} = \frac{v}{f'} = \frac{0,5 \text{ m/s}}{0,51} = 0,98 \text{ m/s} < 1,2 \text{ m/s}$$

Υπολογίστε την πτώση πίεσης μιας σχάρας με κλίση γωνίας 30°

$$\Delta p' = 2,34 \cdot \left(\frac{d}{\delta'} \right)^{\frac{4}{3}} \cdot \left(\frac{v^2}{2 \cdot g} \right) \cdot \eta \mu \varphi$$

$$\Delta p' = 2,34 \cdot \left(\frac{2}{2,1} \right)^{\frac{4}{3}} \cdot \left(\frac{0,5^2}{2 \cdot 9,81} \right) \cdot \eta \mu 30^\circ$$

$$\Delta p' = 0,014 \text{ m} = 1,4 \text{ cm}$$

ΕΞΑΜΜΩΣΗ

- Με τον όρο εξάμωση περιγράφεται η **διεργασία καθίζησης/απομάκρυνσης ανόργανων σωματιδίων** στα **φυσικά νερά** ή στα **υγρά απόβλητα**.
- Αυτά τα ανόργανα σωματίδια είναι **κόκκοι άμμου, σωματίδια αργίλου κλπ**, με **διάμετρο** από 200 μm έως μερικά χιλιοστά, **ταχύτητες καθίζησης** σημαντικά μεγαλύτερες από αυτές των οργανικών στερεών (ειδικό βάρος από 2,7 kg/L για καθαρή άμμο μέχρι 1,3 kg/L όταν είναι μίγμα με οργανικά) και συνήθως ονομάζονται «**άμμος**».
- Η **απομάκρυνση της άμμου** επιβάλλεται γιατί δημιουργεί **ποθέσεις** στον πυθμένα των αγωγών με ταύτων μανάδων επεξεργασίας και επιφάνειες φθορά του μηχανολογικού εξοπλισμού.
- Η **απομάκρυνση της άμμου** ακολουθεί **καθίζηση τύπου I** (διακρίμνων σωματιδίων). Το μέγεθος που ενδιαφέρει για το σχεδιασμό των μανάδων εξάμμωσης είναι η ταχύτητα καθίζησης των σωματιδίων.

Ο υπολογισμός της **ταχύτητας καθίζησης (vr)** μπορεί να γίνει αναλυτικά αν θεωρήσουμε ότι έχουμε **σφαιρικά σωματίδια**. Οι **δυνάμεις που ασκούνται** πάνω σε ένα σωματίδιο είναι **το βάρος του, η άνωση** και η **τριβή** (οπισθέλκουσα) λόγω της καθόδου του μέσα στο νερό. Η κίνησή του λοιπόν θα οφείλεται στη συνισταμένη δύναμη σύμφωνα με τη θεμελιώδη σχέση:

$$\sum F = m \cdot \frac{dv}{dt} \quad (2.1.21)$$

και θα διέπεται από τη σχέση:

$$\frac{\pi}{6} \cdot d_p^3 \cdot \rho_p \cdot \frac{dv_p}{dt} = \frac{\pi}{6} \cdot d_p^3 \cdot g \cdot (\rho_p - \rho_w) - C_D \cdot A_p \cdot \rho_w \cdot \frac{v_p^2}{2} \quad (2.1.22)$$

όπου	d_p	η διάμετρος του σωματιδίου
	ρ_p	η πυκνότητά του
	v_p	η ταχύτητα καθόδου (καθίζησης)
	ρ_w	η πυκνότητα του νερού
	A_p	η επιφάνεια του σωματιδίου, προβαλλόμενη κάθετα στην κατεύθυνση της ροής.

Το σωματίδιο κατά την καθίζηση έχει σταθερή διάμετρο, όμως η **συνισταμένη δύναμη μεταβάλλεται (ελαττώνεται) κατά την κάθοδό του**, λόγω μεταβάλλεται (αυξάνεται) η τριβή, ως ανάλογη της (αυξανόμενης) ταχύτητάς του. Όταν η συνισταμένη δύναμη μηδενίζεται, το σωματίδιο καθιζάνει με σταθερή ταχύτητα, την οριακή του. Αυτή υπολογίζεται από τη σχέση (2.1.23) για μικρή επιτάχυνση και είναι η

$$v_p = \sqrt{\frac{g}{C_D} \cdot \frac{\rho_p - \rho_w}{\rho_w} \cdot \frac{4 \cdot d_p}{3}} \quad (2.1.23)$$

Ο συντελεστής οπισθέλκουσας C_D εξαρτάται από τον αριθμό Re του σωματιδίου

$$Re = \frac{v_p \cdot d_p}{\nu}$$

όπου ν το κινηματικό ιξώδες (δυναμικό ιξώδες / πυκνότητα), m^2s^{-1} .

Για **στρωτή ροή** (στην περιοχή Stokes), με $Re < 0.1$ υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad (2.1.25a)$$

και η σχέση (2.1.23) γίνεται:

$$v_p = \frac{g}{18} \cdot \left(\frac{\rho_p - \rho_w}{\rho_w} \cdot \frac{1}{\nu} \right) \cdot d_p^2 \quad (2.1.26)$$

Για **τυρβώδη ροή** (Newton), με $10^3 < Re < 3,5 \cdot 10^5$ υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C_D = 0,44 \quad (2.1.25b)$$

Άσκηση 2. Εξάμμωση

Εργοστάσιο επεξεργασίας πόσιμου νερού διαθέτει κυλινδρική δεξαμενή βάθους 3,5 m και διαμέτρου 21 m για να επεξεργάζεται $11370 \text{ m}^3/\text{d}$ νερού από παραπλήσιο ποτάμι. Όταν βρέχει, το ποτάμι συχνά μεταφέρει λάσπη σε μορφή σωματιδίων διαμέτρου 0,01 mm και πυκνότητας $2,2 \text{ g/cm}^3$ που πρέπει να απομακρυνθεί.

1. Να υπολογισθεί ο χρόνος παραμονής στη δεξαμενή.
2. Θα απομακρυνθεί όλη η λάσπη, αν το νερό έχει θερμοκρασία 15°C , πυκνότητα $0,999 \text{ kg/L}$ και ιξώδες $0,00114 \text{ kg/m/s}$;

Δεδομένα:

$$H = 3,5 \text{ m}$$

$$D = 21 \text{ m}$$

$$Q = 11370 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$d_p = 0,01 \text{ mm}$$

$$\rho_p = 2,2 \text{ g/cm}^3$$

$$T_w = 15^\circ\text{C}$$

$$\rho_w = 0,999 \text{ kg/L}$$

$$\mu_w = 0.00114 \text{ kg/m/s}$$

Λύση:

Χρόνος Παραμονής

$$\tau = \frac{V}{Q} = \frac{\pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot H}{Q} = \frac{3,14 \cdot \frac{21^2}{4} \cdot 3,5\text{m}}{11370\text{m}^3/\text{d}} = 0,107\text{d} = 2,55\text{h}$$

Για **στρωτή ροή** (στην περιοχή Stokes), με $Re < 0,1$ ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$v_p = \sqrt{\frac{g \cdot \rho_p - \rho_w}{C_D} \cdot \frac{4 \cdot d_p}{3}} = 5,74 \cdot 10^{-5} \text{ m/s} = 0,207 \text{ m/h}$$

$$C_D = \frac{24}{Re}$$

Γίνεται εδώ η παραδοχή

- ότι όσα σωματίδια συναντούν τον πυθμένα, παραμένουν εκεί (δηλαδή δεν έχουμε επαναιώρηση).
- δεχόμαστε ότι το στρώμα της λάσπης έχει πάχος αμελητέο συγκρινόμενο με το βάθος του καναλιού.

$$v = \mu / \rho$$

Έλεγχος παραδοχής στρωτής ροής:

$$Re = \frac{v_p \cdot d_p}{v} = \frac{5,74 \cdot 10^{-5} \text{ m/sec} \cdot 0,01 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{1,14 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}} = 0,0005 < 0,1$$

$$v_{ps} = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\frac{\pi \cdot D^2}{4}} = 32,84 \text{ m/d} = 1,36 \text{ m/h}$$

$v_p < v_{ps} \rightarrow$ Δε θα καθιζάνει όλη η λάσπη αλλά $v_p/v_{ps} = 15\%$

Εξισορρόπηση παροχής-συγκέντρωσης

Σ τις εξ φινές εξισορρόπησης (με μεταβλητή παροχή εξόδου) μπορεί να επιτευχθεί, ανάλογα με το σχεδιασμό:

- εξ φιλύηση (μείωση ή εξάλειψη της χρονικής διακύμανσης) της υδραυλικής παροχής εξόδου, με ή χωρίς ταυτόχρονη σχετική εξομάλυνση της συγκέντρωσης των ρύπων.

Η συχνά χρησιμοποιούμενη ανάδευση στη δεξαμενή εξισορρόπησης εξυπηρετεί:

- την ομογενοποίηση του περιεχομένου της,
- την αποτελεσματική διασπορά των τυχόν χημικών που έχουν προστεθεί και
- την αποφυγή καθίζησης των αιωρούμενων στερεών
- εξασφαλίζει και τον απαραίτητο αερισμό ώστε να μην έχουμε αναερόβια βιολογική δραστηριότητα
- καταστάσεις με επακόλουθη παραγωγή δύσσομων αερίων

Εξισορρόπηση παροχής-συγκέντρωσης

Κατά το σχεδιασμό πρέπει να αποφασισθούν τα εξής:

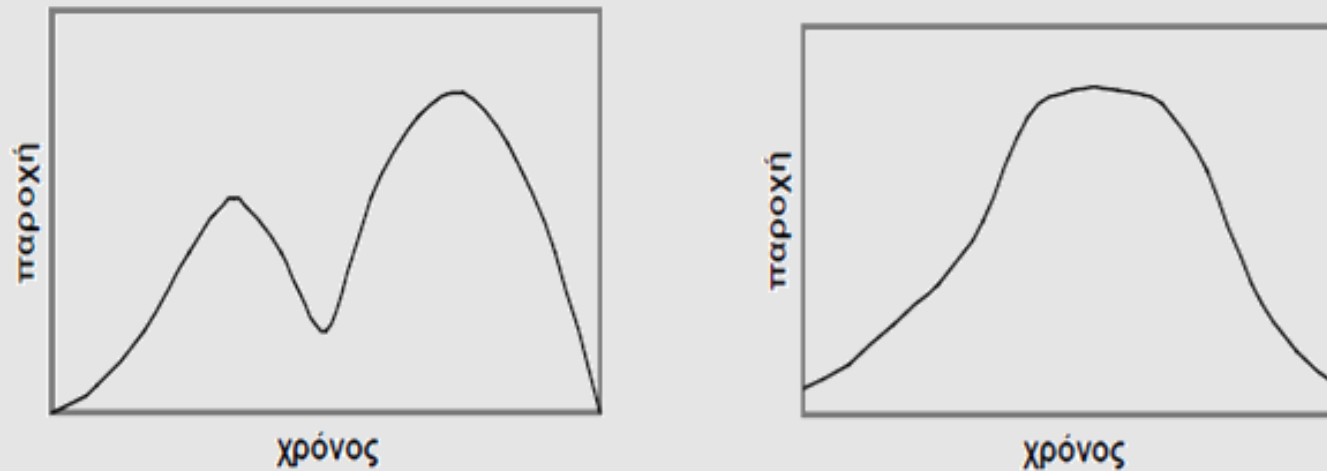
- ☐ αν θα είναι πάνω στη γραμμή επεξεργασίας ή σε παράκαμψη (on- ή off-line)
- ☐ το σημείο που θα τοποθετηθεί η δεξαμενή μέσα στο σύστημα επεξεργασίας
- ☐ ο όγκος της.

Σωλήθη σημεία τοποθέτησης είναι είτε στην αρχή είτε μετά την πρωτοβάθμια επεξεργασία, όπου λειτουργεί ουσιαστικά σαν "ασπίδα" του δευτεροβάθμιου – βιολογικού καθαρισμού.

Για τον υπολογισμό του όγκου της δεξαμενής εξισορρόπησης θεωρούμε ότι έχουμε ένα δοχείο πλήρους ανάμειξης.

Εξισορρόπηση παροχής-συγκέντρωσης

Έστω π έχουμε ~~ε~~ ένα στιγμιαίων (ή ωριαίων ή ανά ό σο χρονικό διάστημα Δt) έχουμε μετρήσει παροχών εισόδου στη δεξαμενή εξισορρόπησης σύμφωνα με το ακόλουθο:



Σχήμα 1. Πιθανά σενάρια μεταβλητής παροχής στην είσοδο της δεξαμενής εξισορρόπησης

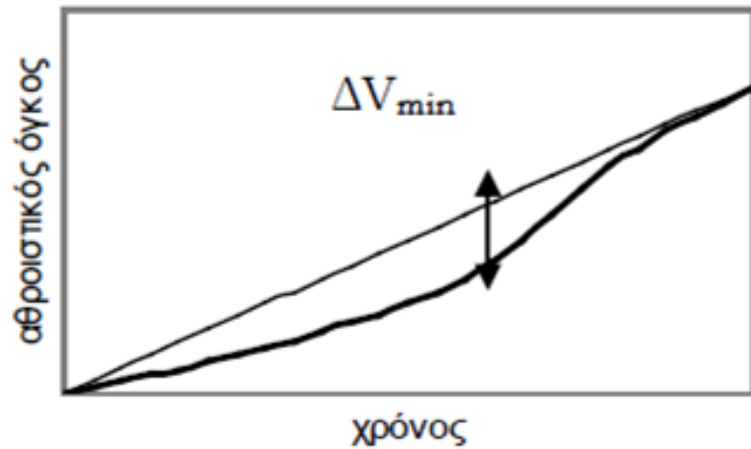
Από τα παραπάνω δεδομένα κατασκευάζουμε το διάγραμμα αθροιστικού όγκου λυμάτων που έχει εισρεύσει στη δεξαμενή (V_i), βάσει της σχέσης 2.1.1:

$$V_i = \sum_{i=1}^i (Q_i \cdot \Delta t_i)$$

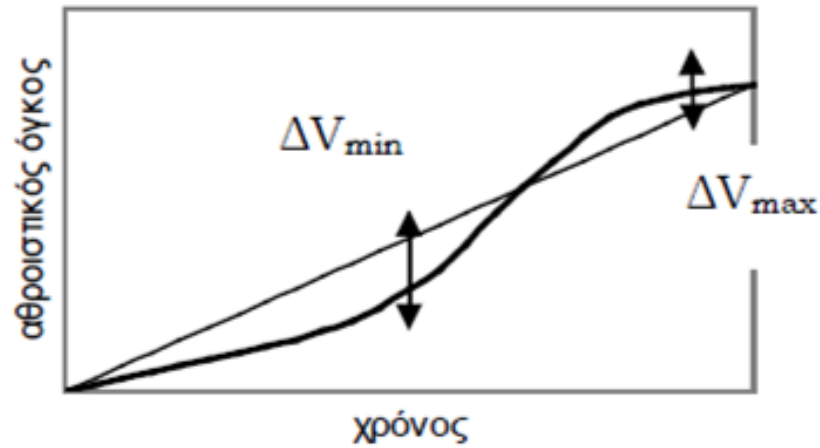
όπου,

Q_i =η μετρημένη (μέση) ογκομετρική παροχή εισόδου κατά το χρονικό διαστημα Δt_i .
Αν έχουμε συνεχή μέτρηση παροχής, το άθροισμα αντικαθιστάται από το αντίστοιχο ολοκλήρωμα.

Το διάγραμμα αυτό θα έχει μια από τις μορφές που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2



(a)



(b)

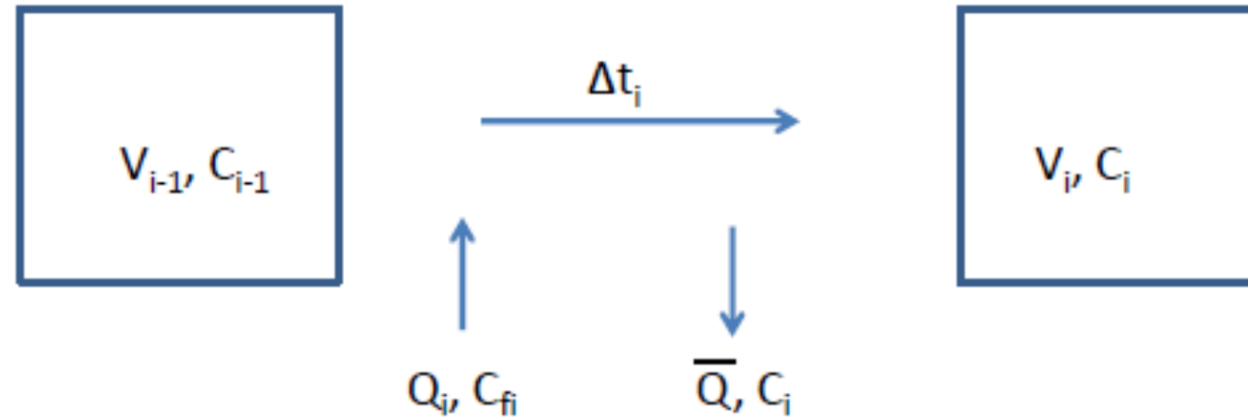
Σχήμα 2. Πιθανές μορφές διαγράμματος αθροιστικού όγκου που έχει εισρεύσει

- Η έντονη γραμμή παριστά τον αθροιστικό όγκο και
- η κλίση της λεπτής ευθείας γραμμής παριστά τη σταθερή παροχή εξόδου από τη δεξαμενή (το πηλίκο του όγκου που έχει εισρεύσει προς το συνολικό χρόνο εισροής), που δίνεται από τη σχέση 2.1.2:

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{i=1}^i (Q_i \cdot \Delta t_i)}{\sum_{i=1}^i \Delta t_i} \quad \text{ή} \quad \frac{\int_0^{\sum \Delta t_i} Q(t) dt}{\int_0^{\sum \Delta t_i} dt} \quad (2.1.2)$$

- $\Delta V_{\max} \geq 0$, μέγιστη αύξηση ενεργού όγκου της δεξαμενής (γεμάτη).
- $\Delta V_{\min} \leq 0$, μέγιστη ελάττωση του ενεργού όγκου της δεξαμενής (άδεια).

Το Σχήμα 3 δείχνει την μεταβολή κατά το χρονικό διάστημα Δt_i .



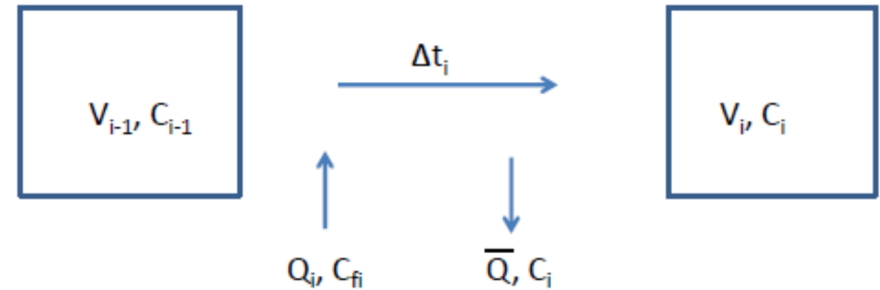
Σχήμα 3. Μεταβολή κατά ένα χρονικό διάστημα Δt_i

Θα έχουμε παροχή εισόδου Q_i με συγκέντρωση ρύπου C_{fi} ενώ θα εκρέι η μέση παροχή $\bar{Q}$ με συγκέντρωση C_i . Ο όγκος V_i του ψεύρου παύεται κάθε χρονική στιγμή μέσα στη δεξαμενή θα δίνεται από την σχέση 2.1.3

$$V_i = V_{i-1} + \left(Q_i - \bar{Q} \right) \cdot \Delta t_i$$

Από το ισοζύγιο για τον ρύπο σε αυτό το χρονικό διάστημα, (σχέση 2.1.4)

$$C_{fi} \cdot Q_i \cdot \Delta t_i - C_i \cdot \bar{Q} \cdot \Delta t_i = C_i \cdot V_i - C_{i-1} \cdot V_{i-1}$$



προκύπτει η συγκέντρωση εξόδου C_i (σχέση 2.1.5):

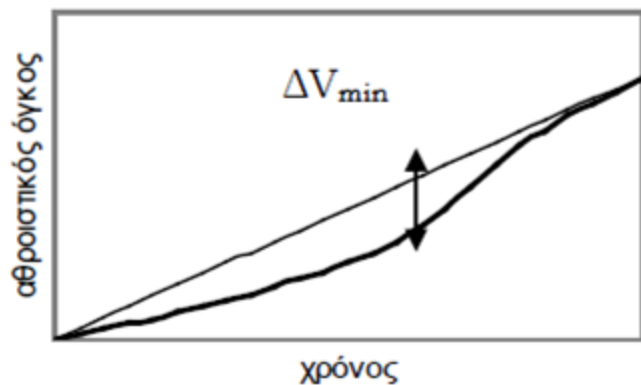
$$C_i = \frac{C_{fi} \cdot Q_i \cdot \Delta t_i + C_{i-1} \cdot V_{i-1}}{\bar{Q} \cdot \Delta t_i + V_i}$$

όπου, $V_i=0$. (Αυτό σημαίνει ότι οι υπολογισμοί ξεκινάνε τη χρονική περίοδο όπου η δεξαμενή είναι άδεια).

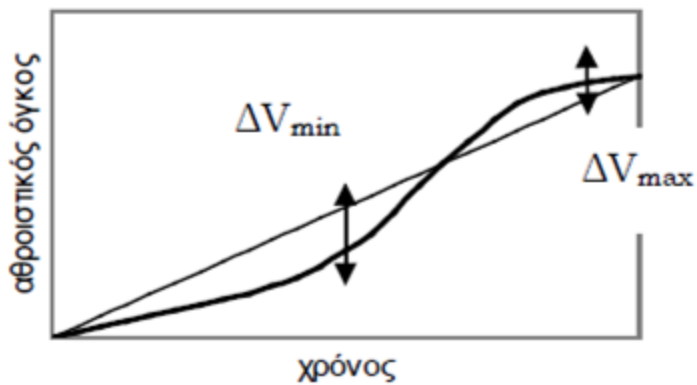
Η σχέση 2.1.5 μετασχηματίζεται χρησιμοποιώντας τη σχέση 2.1.3 στην ακόλουθη (σχέση 2.1.6):

$$C_i = \frac{C_{fi} \cdot Q_i \cdot \Delta t_i + C_{i-1} \cdot V_{i-1}}{Q_i \cdot \Delta t_i + V_{i-1}}$$

Η διαφορά $(V_i - V_{i-1})$ μπορεί να είναι είτε θετική, οπότε η δεξαμενή γεμίζει, είτε αρνητική, οπότε η δεξαμενή αδειάζει.



(a)



(b)

Σχήμα 2. Πιθανές μορφές διαγράμματος αθροιστικού όγκου που έχει εισρεύσει

Από το Σχήμα 2 μπορεί να υπολογισθεί και η μέγιστη τιμή της διαφοράς αυτής ($\Delta V_{\max} \geq 0$) που αντιστοιχεί στη μέγιστη αύξηση ενεργού όγκου της δεξαμενής, καθώς και η ελάχιστη τιμή της διαφοράς αυτής ($\Delta V_{\min} \leq 0$) που αντιστοιχεί στη μέγιστη ελάττωσή του δηλαδή τότε που η δεξαμενή είναι τελείως άδεια. Οι ακραίες αυτές διαφορές συμβολίζονται με τα διπλά βέλη, (Στο Σχήμα 2a , θα είναι $\Delta V_{\max} = 0$).

Είναι προφανές ότι ο ελάχιστος απαιτούμενος όγκος της δεξαμενής εξισορρόπησης θα δίνεται από το άθροισμα των δύο ακραίων τιμών διαφοράς, δηλαδή (σχέση 2.1.7):

$$V_{\text{δεξαμενης}} = |\Delta V_{\min}| + |\Delta V_{\max}|$$

Στην ειδική περίπτωση που έχουμε σταθερή παροχή εισόδου Q, ορίζοντας τον χρόνο παραμονής (σχέση 2.1.8)

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

Προκύπτει η μέση συγκέντρωση (σχέση 2.1.9) :

$$C_i = \frac{C_{fi} + C_{i-1} \cdot \theta}{1 + \theta}$$

Η σχέση αυτή δείχνει ότι η εξομάλυνση είναι πρακτικά πλήρης για πολύ μεγάλο θ ($C_i = C_{i-1}$) και μηδενική για $\theta=0$ ($C_i = C_{0i}$). Μια αδιάστατη παράμετρος που χαρακτηρίζει την εξισορρόπηση είναι ο συντελεστής αιχμής (peak factor, PF) που δίνεται από τη σχέση

$$PF = \frac{\text{μέγιστη τιμή του χαρακτηριστικού μεγέθους}}{\text{ελάχιστη τιμή του χαρακτηριστικού μεγέθους}}$$

μέσα στον πλήρη κύκλο. Στην περίπτωσή μας, το χαρακτηριστικό μέγεθος είναι η συγκέντρωση και μπορούμε να συγκρίνουμε το συντελεστή αιχμής στην είσοδο με αυτόν στην έξοδο.

Διατίθενται τα ακόλουθα δεδομένα ενός πλήρους 24-ώρου για ένα απόβλητο.

Να υπολογισθεί:

- ο απαιτούμενος όγκος της δεξαμενής εξισορρόπησης παροχής,
- η μέση παροχή εξόδου καθώς και
- η συγκέντρωση στην έξοδό της.

Χρόνος ώρες	Μέση παροχή Q_i (L/s)	Χρόνος ώρες	Μέση παροχή Q_i (L/s)	Χρόνος ώρες	Μέση παροχή Q_i (L/s)
0-1	275	8-9	353	4-5	325
1-2	221	9-10	410	5-6	325
2-3	164	10-11	426	6-7	328
3-4	130	11-12	430	7-8	365
4-5	105	12-1	426	8-9	399
5-6	99.1	1-2	405	9-10	399
6-7	119	2-3	385	10-11	379
7-8	204	3-4	351	11-12	345

- Για να υπολογίσουμε τον όγκο της εξωτερικής εξισορρόπησης θα πρέπει να σχεδιάσουμε το διάγραμμα συνολικού όγκου παροχετευμένων αποβλήτων συναρτήσει του χρόνου.
- Για το σκοπό αυτό διασφύνομε πίνακα και διαγράμμιση τη χρονική εξέλιξη της παροχής εισόδου και του όγκου αποβλήτων που έχει εισρεύσει.

Βήμα 1°: Ορισμός της περιοδικότητας του φαινομένου και της χρονικής στιγμής $t=0$.

Βήμα 2°: Επιλέγουμε χρονικά διαστήματα Δt_i με κατ'ήρα ο το σταθερό Q_i χωρίς να έχουν απρότατη την ίδια διάρκεια.

Βήμα 3ο: Για τον υπολογισμό του όγκου V της δεξαμενής εξισορρόπησης καθιερώνεται ο ακόλουθος πίνακας.

Χρόνος (h)	Δt_i (h)	Q_i (m ³ /h)	V_{in-i} (m ³)	$V_{tot,in-i}$ (m ³)	V_{out-i} (m ³)	$V_{tot,out-i}$ (m ³)	ΔV	V_i (m ³)
			$Q_i \Delta t_i$	ΣV_{in-i}	$\bar{Q} \cdot \Delta t_i$	ΣV_{out-i}	$V_{totin-i} - V_{totout-i}$	V_i (2.1.3)
1	Δt_1							
...							$\Delta V_{min} / \Delta V_{max}$	$0/V_{δεξαμενής}$
	Δt_i							

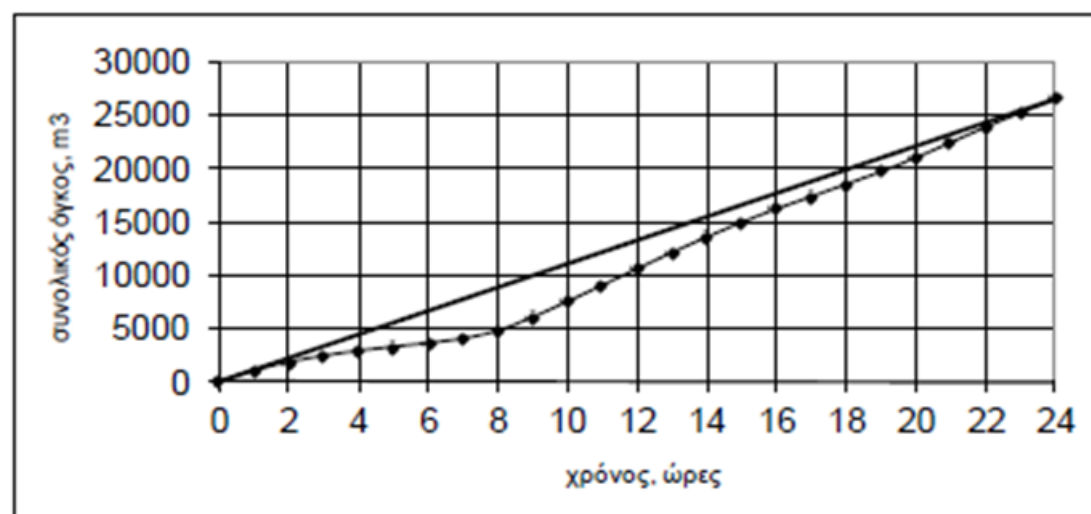
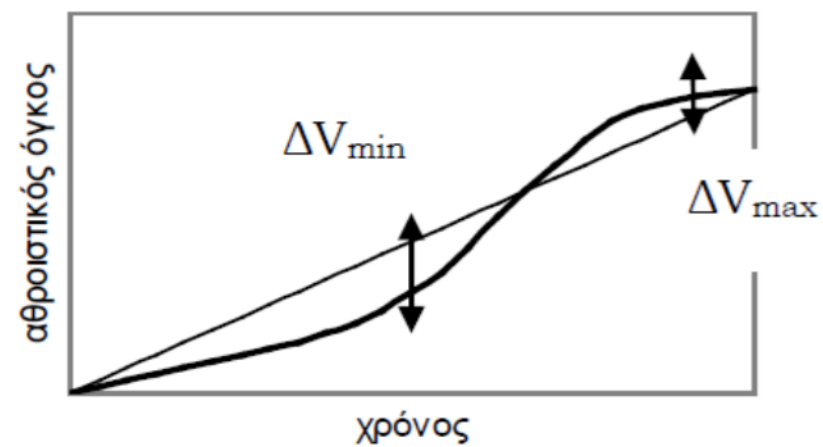
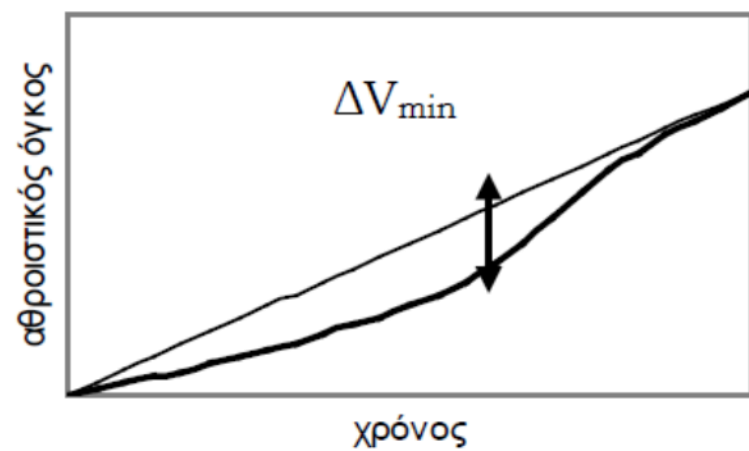
$$\bar{Q} = \frac{\sum_{i=1}^i (Q_i \cdot \Delta t_i)}{\sum_{i=1}^i \Delta t_i} \quad \text{ή} \quad \frac{\int_0^{\Sigma \Delta t_i} Q(t) dt}{\int_0^{\Sigma \Delta t_i} dt}$$

(2.1.2)

$$V_{δεξαμενής} = |\Delta V_{min}| + |\Delta V_{max}| \quad (2.1.7)$$

$$\Delta V_{min} \leq 0 \text{ και } \Delta V_{max} \geq 0$$

$$V_i = V_{i-1} + \left(Q_i - \bar{Q} \right) \cdot \Delta t_i \quad (2.1.3)$$



Βήμα 4^ο: Για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης εξόδου καθορίζεται ο ακόλουθος πίνακας.

Χρόνος (h)	Δt (h)	Q_i (m ³ /h)	C_{fi} (mg/L)	V_i (m ³)	C_i (mg/L)
				V_i (2.1.3)	C_i (2.1.5)
1	Δt_1				
...				0	0
	Δt_i				



$$V_i = V_{i-1} + (Q_i - \bar{Q}) \cdot \Delta t_i \quad (2.1.3)$$

$$C_i = \frac{C_{fi} \cdot Q_i \cdot \Delta t_i + C_{i-1} \cdot V_{i-1}}{\bar{Q} \cdot \Delta t_i + V_i} \quad (2.1.5)$$

$$C_i = \frac{C_{fi} \cdot Q_i \cdot \Delta t_i + C_{i-1} \cdot V_{i-1}}{Q_i \cdot \Delta t_i + V_{i-1}} \quad (2.1.6)$$

Άσκηση 3 Εξισορρόπηση παροχής

Από μία ομάδα βολαντικής επεξεργασίας έχουμε τα εξής δεδομένα. Βρίτε τον απαιτούμενο όγκο δεξαμενής της εξισορρόπησης παροχής.

t (h)	Q (L/s)	t (h)	Q (L/s)
0-1	275	12-13	426
1-2	221	13-14	405
2-3	164	14-15	385
3-4	130	15-16	351
4-5	105	16-17	325
5-6	99.1	17-18	325
6-7	119	18-19	328
7-8	204	19-20	365
8-9	353	20-21	399
9-10	410	21-22	399
10-11	426	22-23	379
11-12	430	23-24	345

Μεθοδολογία λύσης ασκήσεων για Εξισορρόπηση παροχής-συγκέντρωσης

Βήμα 1^ο: Ορισμός της περιοδικότητας του φαινομένου και της χρονικής στιγμής $t=0$.

Βήμα 2^ο: Επιλέγω χρονικά διαστήματα Δt_i με κριτήριο το σταθερό Q_i χωρίς να έχουν απαραίτητα την ίδια διάρκεια.

Βήμα 1^ο: Περιοδικότητα φαινομένου: 24h
 $t = 0$

Βήμα 2^ο: $\Delta t_i = 1h$

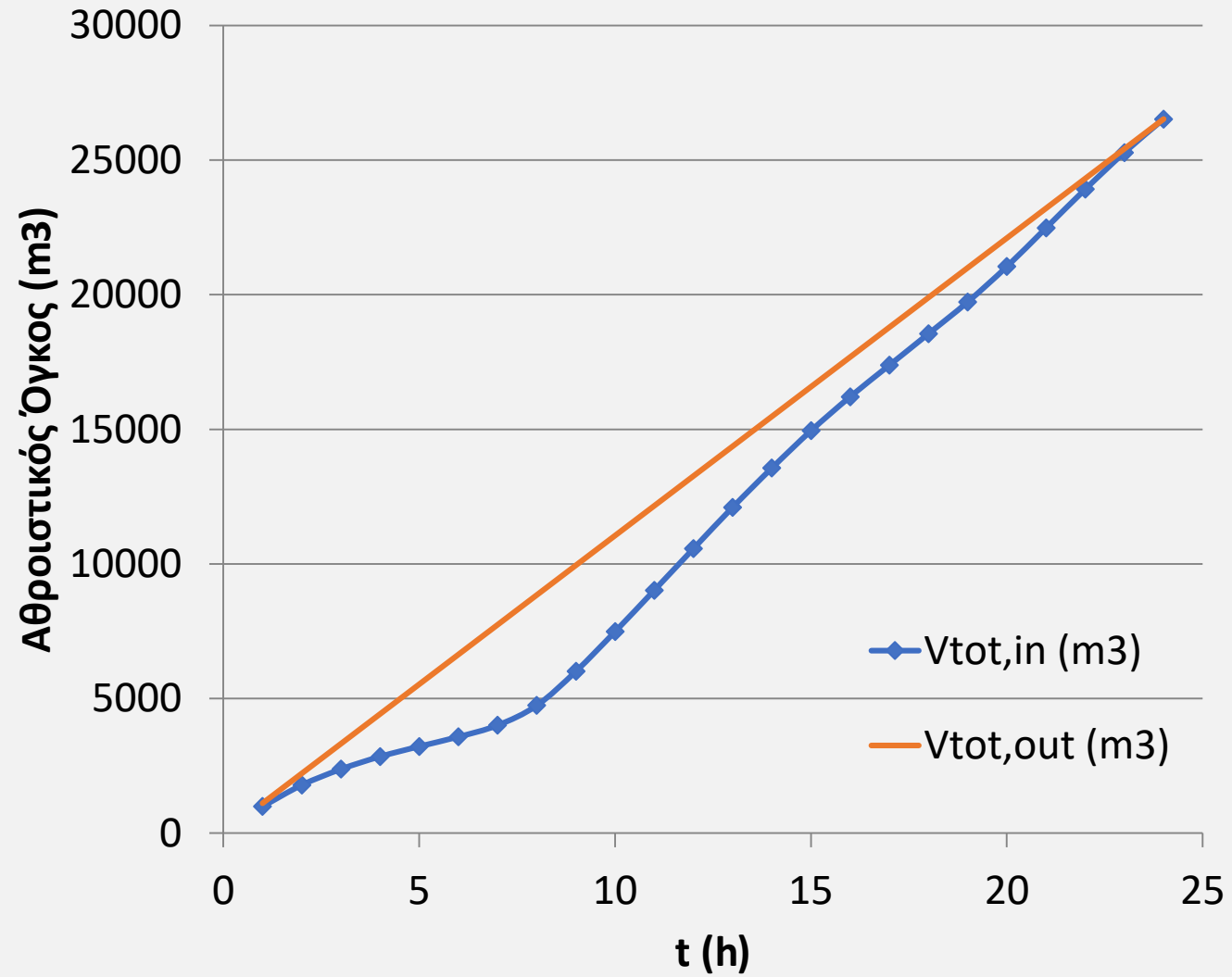
	Δt (h)	Q (L/s)	Q (m ³ /h)	$Q_i \Delta t_i$ V _{in-i} (m ³)	ΣV_{in-i} V _{tot,in} (m ³)	$\bar{Q} \cdot \Delta t_i$ V _{out-i} (m ³)	ΣV_{out-i} V _{tot,out} (m ³)	$V_{totin-i} - V_{totout-i}$ ΔV (m ³)	V _i (m ³)
0-1	1	275	990	990	990	1105	1105	-115	3984
1-2	1	221	795,6	796	1785,6	1105	2210	-425	3674
2-3	1	164	590,4	590	2376	1105	3315	-939	3160
3-4	1	130	468	468	2844	1105	4420	-1576	2523
4-5	1	105	378	378	3222	1105	5525	-2303	1796
5-6	1	99,1	356,76	357	3579	1105	6630	-3052	1047
6-7	1	119	428,4	428	4007	1105	7735	-3728	371
7-8	1	204	734,4	734	4742	1105	8841	-4099	0
8-9	1	354	1274,4	1271	6016	1105	9946	-3930	169
9-10	1	410	1476	1476	7492	1105	11051	-3559	540
10-11	1	425	1530	1534	9022	1105	12156	-3134	965
11-12	1	430	1548	1548	10570	1105	13261	-2691	1408
12-13	1	425	1530	1534	12100	1105	14366	-2266	1833
13-14	1	405	1458	1458	13558	1105	15471	-1913	2186
14-15	1	385	1386	1386	14944	1105	16576	-1632	2467
15-16	1	351	1263,6	1264	16208	1105	17681	-1473	2625
16-17	1	325	1170	1170	17378	1105	18786	-1409	2690
17-18	1	325	1170	1170	18548	1105	19891	-1344	2755
18-19	1	328	1180,8	1181	19728	1105	20996	-1268	2831
19-20	1	365	1314	1314	21042	1105	22101	-1059	3040
20-21	1	399	1436,4	1436	22479	1105	23206	-728	3371
21-22	1	399	1436,4	1436	23915	1105	24311	-396	3703
22-23	1	379	1364,4	1364	25280	1105	25416	-137	3962
23-24	24 h	345	1242	1242	26522	1105	26522	0	4099

$$\bar{Q} = \frac{26522}{24} = 1105 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$V_{\text{δεξαμενής}} = 4099 \text{ m}^3$$

$$V_i = V_{i-1} + (Q_i - \bar{Q}) \cdot \Delta t_i \quad (2.1.3)$$

Γραφική Λύση



Βήμα 3^ο: Κατάρτιση πίνακα

$$(\alpha) V_{in-i} = Q_i \cdot \Delta t_i$$

$$(\beta) \bar{Q} = \frac{\sum Q_i \cdot \Delta t_i}{\sum \Delta t_i}$$

$$(\gamma) V_{tot,in-i} = \sum V_{in-i}$$

$$(\delta) V_{out,i} = \bar{Q} \cdot \Delta t_i$$

$$(\epsilon) V_{tot,out-i} = \sum V_{out-i}$$

$$(\sigma\tau) \Delta V = V_{tot,in-i} - V_{tot,out-i}$$

$$(\zeta) V_i = V_{i-1} + \left(Q_i - \bar{Q} \right) \cdot \Delta t_i \quad \begin{array}{l} \text{από όταν η δεξαμενή} \\ \text{είναι άδεια} \end{array}$$

	Δt (h)	Q (L/s)	Q (m³/h)	Cfi (mg/L)	V _i (m³)	C _i (mg/L)
0-1	1	275	990	150	3984	214
1-2	1	221	796	115	3674	198
2-3	1	164	590	75	3160	181
3-4	1	130	468	50	2523	164
4-5	1	105	378	45	1796	148
5-6	1	99,1	357	60	1047	134
6-7	1	119	428	90	371	121
7-8	1	204	734	130	0	127
8-9	1	353	1274	175	169	175
9-10	1	410	1476	200	540	197
10-11	1	426	1530	215	965	210
11-12	1	430	1548	220	1408	216
12-13	1	426	1530	220	1833	218
13-14	1	405	1458	210	2186	215
14-15	1	385	1386	200	2467	209
15-16	1	351	1264	190	2625	203
16-17	1	325	1170	180	2690	196
17-18	1	325	1170	170	2755	188
18-19	1	328	1181	175	2831	184
19-20	1	365	1314	210	3040	192
20-21	1	399	1436	280	3371	220
21-22	1	399	1436	305	3703	246
22-23	1	379	1364	245	3962	245
23-24	1	345	1242	180	4099	230

Ο υπολογισμός της συγκέντρωσης εξόδου θα γίνει με βάση τη σχέση (2.1.6). Αρχή των υπολογισμών θα είναι η χρονική στιγμή που η δεξαμενή θα είναι εντελώς άδεια, δηλαδή, σύμφωνα με το διάγραμμα την αρχή της 9ης ώρας.

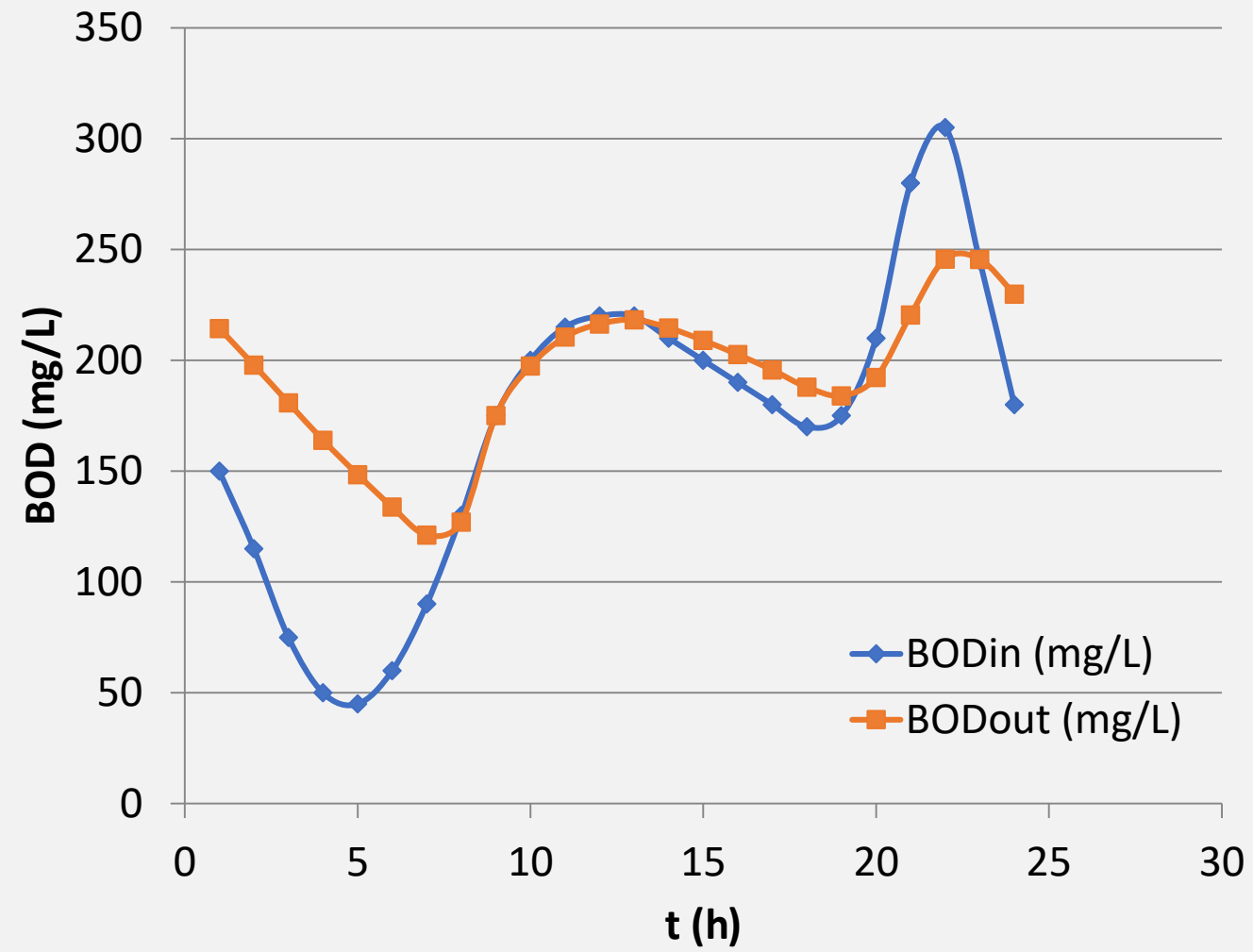
Στο τέλος της 9ης ώρας θα είναι

$$C_9 = \frac{353 \text{ L/s} \cdot 3600 \text{ s} \cdot 175 \text{ mg/l}}{353 \text{ L/s} \cdot 3600 \text{ s}} = 175 \text{ mg/L}$$



$$C_i = \frac{C_{fi} \cdot Q_i \cdot \Delta t_i + C_{i-1} \cdot V_{i-1}}{\overline{Q} \cdot \Delta t_i + V_i}$$

(2.1.6)



Συντελεστής αιχμής

$$PF = \frac{\text{μέγιστη τιμή μεγέθους}}{\text{ελάχιστη τιμή μεγέθους}}$$

Για την είσοδο θα είναι:

$$PF_{in} = \frac{BOD_{in\ max}}{BOD_{in\ min}} = \frac{305 \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{45 \frac{\text{mg}}{\text{L}}} = 6,78$$

$$PF_{out} = \frac{BOD_{out\ max}}{BOD_{out\ min}} = \frac{246 \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{121 \frac{\text{mg}}{\text{L}}} = 2,03$$

Άσκηση 4

Σε μία πόλη 200.000 κατοίκων η παραγωγή απορριμμάτων είναι 1 kg ανά κάτοικο και ημέρα. Στην πόλη εφαρμόζεται σύστημα συλλογής που περιλαμβάνει διαχωρισμό 3 ρευμάτων (1^ο ρεύμα χαρτί/χαρτόνι σε κίτρινους κάδους, 2^ο ρεύμα τα πλαστικά + μέταλλα σε κόκκινους κάδους, και 3^ο ρεύμα το γυαλί σε πορτοκαλί κάδους) ενώ τα υπόλοιπα απορρίπτονται σύμμεικτα σε πράσινους κάδους. Η απόδοση του συστήματος συλλογής, η συχνότητα αποκομιδής καθώς και η χωρητικότητα των κάδων έχουν ως εξής:

- 1^ο ρεύμα: 60% για το χαρτί/χαρτόνι (κίτρινοι κάδοι), συχνότητα συλλογής ανά 4 ημέρες & κάδοι 1100 L
- 2^ο ρεύμα: 30% για τα πλαστικά / μέταλλα (κόκκινοι κάδοι), συχνότητα συλλογής ανά 3 ημέρες και κάδοι 1100 L
- 3^ο ρεύμα: 70% για το γυαλί (πορτοκαλί κάδοι), συχνότητα συλλογής ανά 14 ημέρες και κάδοι 2500 L
- 100% για τα υπόλοιπα απόβλητα (πράσινοι κάδοι), καθημερινή συλλογή και κάδοι 1100L

Υπολογίστε τα εξής:

- (α) Τις ποσότητες απορριμμάτων που διαχωρίζονται στην πηγή
- (β) Τις ποσότητες απορριμμάτων που απορρίπτονται στον πράσινο κάδο
- (γ) Τη συνολική μάζα των απορριμμάτων κατά την αποκομιδή ανά είδος κάδου
- (δ) Τον αριθμό των απαιτούμενων κάδων για την συλλογή των απορριμμάτων (δείκτης ασφαλείας πληρότητας κάδων: 0,8)

Άσκηση 3 (συνέχεια)

Σύσταση και πυκνότητα των απορριμμάτων

Απορρίμματα	Σύσταση ΑΣΑ (% κ.β.)	Πυκνότητα (kg/m³)
Βιοαπόβλητα	47 %	500
Χαρτί/χαρτόνι	20%	250
Πλαστικά	17%	75
Μέταλλα	3%	300
Γυαλί	3%	400
Λοιπά υλικά	10%	480

Παραγωγή απορριμμάτων

Συνολική Παραγωγή = 200.000κάτ.· 1 $\frac{kg}{κάτ \cdot d}$ = 200.000 $\frac{kg}{κάτ \cdot d}$

Απορρίμματα	Σύσταση ΑΣΑ (% κ.β.)	Παραγωγή (kg/d)
Βιοαπόβλητα	47%	94.000
Χαρτί/χαρτόνι	20%	40.000
Πλαστικά	17%	34.000
Μέταλλα	3%	6.000
Γυαλί	3%	6.000
Λοιπά υλικά	10%	20.000
Σύνολο	100%	200.000

200.000*47%=94.000 kg/d

(α) Ποσότητες απορριμμάτων που διαχωρίζονται στην πηγή

		(1)	(2)	(3) = (1)*(2)
Κατηγορία ΑΣΑ	Σύσταση ΑΣΑ (% κ.β.)	Παραγωγή (kg/d)	ΔσΠ (% κ.β.)	ΔσΠ (kg/d)
Βιοαπόβλητα	47%	94.000	0%	0
Χαρτί/χαρτόνι	20%	40.000	60%	24.000
Πλαστικά	17%	34.000	30%	10.200
Μέταλλα	3%	6.000	30%	1.800
Λευκοσίδηρος	0%	0	0%	0
Γυαλί	3%	6.000	70%	4.200
Λοιπά υλικά	10%	20.000	0%	0
Σύνολο	100%	200.000		40.200

(β) ποσότητες απορριμμάτων που απορρίπτονται στον πράσινο κάδο

		(1)	(2)	(3) = (1)*(2)	(4)= (1)-(3)
Κατηγορία ΑΣΑ	Σύσταση ΑΣΑ (% κ.β.)	Παραγωγή (kg/d)	ΔσΠ (% κ.β.)	ΔσΠ (kg/d)	Πράσινο Κάδο/ΧΥΤΑ (kg/d)
Βιοαπόβλητα	47%	94.000	0%	0	94.000
Χαρτί/χαρτόνι	20%	40.000	60%	24.000	16.000
Πλαστικά	17%	34.000	30%	10.200	23.800
Μέταλλα	3%	6.000	30%	1.800	4.200
Λευκοσίδηρος	0%	0	0%	0	0
Γυαλί	3%	6.000	70%	4.200	1.800
Λοιπά υλικά	10%	20.000	0%	0	20.000
Σύνολο	100%	200.000		40.200	159.800

(γ) συνολική μάζα των απορριμμάτων κατά την αποκομιδή ανά είδος κάδου

		(1)	(2)	(3) = (1)*(2)	(4)= (1)-(3)
Κατηγορία ΑΣΑ	Σύσταση ΑΣΑ (% κ.β.)	Παραγωγή (kg/d)	ΔσΠ (% κ.β.)	ΔσΠ (kg/d)	Πράσινο Κάδο (kg/d)
Βιοαπόβλητα	47%	94.000	0%	0	94.000
Χαρτί/χαρτόνι	20%	40.000	60%	24.000	16.000
Πλαστικά	17%	34.000	30%	10.200	23.800
Μέταλλα	3%	6.000	30%	1.800	4.200
Λευκοσίδηρος	0%	0	0%	0	0
Γυαλί	3%	6.000	70%	4.200	1.800
Λοιπά υλικά	10%	20.000	0%	0	20.000
Σύνολο	100%	200.000		40.200	159.800

$$\text{Πράσινος κάδος} = \frac{159.800}{200.000} = \mathbf{79,90\%}$$

(δ) αριθμός κάδων για την συλλογή των απορριμμάτων

			Ποσότητα συλλογής					
Κάδος	Μάζα (kg/d)	Συχνότητα συλλογής (d)	kg	Πυκνότητα (kg/m3)	m ³ m ³ =kg/πυκνότητα=96000/250=384m ³		Όγκος κάδων (x 0,8) (m3)	Αριθμός Κάδων Αριθμός κάδων = m ³ /όγκος κάδων=384/0.88=437 αριθμός κάδων
Κίτρινος (ΔσΠ)								
Χαρτί/Χαρτόνι	24.000	4	96.000	250	384	384	1,1 x 0,8 = 0,88	437
Κόκκινος (ΔσΠ)								
Πλαστικό	10.200	3	30.600	75	408	426	1,1 x 0,8 = 0,88	464
Μέταλλα	1.800		5.400	300	18			
Πορτοκαλί (ΔσΠ)								
Γυαλί	4.200	14	58.800	400	147,0	147,0	2,5 x 0,8 = 2	74
Πράσινος (Σύμμεικτα)								
Βιοαπόβλητα	94.000	1	94.000	500	188	630	1,1 x 0,8 = 0,88	716
Χαρτί/χαρτόνι	16.000	1	16.000	250	64			
Πλαστικά	23.800	1	23.800	75	317			
Μέταλλα	4.200	1	4.200	300	14			
Γυαλί	1.800	1	1.800	400	5			
Λοιπά υλικά	20.000	1	20.000	480	42			

Άσκηση 5

Καμινάδες

Μία βιομηχανία χρησιμοποιεί ένα καύσιμο με ρυθμό $2,7 \text{ kg/s}$ για παραγωγή ατμού. Το καύσιμο περιέχει θείο. Το μεσημέρι μιας ηλιόλουστης μέρας του καλοκαιριού, με έναν φορητό μετρητή συγκέντρωσης του SO_2 στην ατμόσφαιρα ξεκινάμε από τη βάση της καμινάδας της βιομηχανίας και καταγράφουμε τις μετρήσεις ακολουθώντας την διεύθυνση του ανέμου. Τη μεγαλύτερη ένδειξη συγκέντρωσης SO_2 ίση με $40 \mu\text{g/m}^3$ τη λαμβάνουμε σε απόσταση 612 m από την καμινάδα. Υπολογίστε:

- (α) το ύψος της καμινάδας και
- (β) την % περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο

Δίνεται:

- Η ταχύτητα ανέμου στα 10 m ύψος μετρήθηκε $1,5 \text{ m/s}$
- Διάμετρος της καμινάδας: $D=1,2 \text{ m}$
- Μαζική ειδική παραγωγή καυσαερίων: $25,2 \text{ kg/kg}$ καυσίμου
- Ογκομετρική ειδική παραγωγή καυσαερίων υπό Κ.Σ.: $53,9 \text{ m}^3/\text{kg}$ καυσίμου
- Θερμοκρασία καυσαερίων στην κορυφή της καμινάδας: 430°C
- Μοριακό βάρος καυσαερίων: 29
- Ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση των καυσαερίων $c_p = 0,006931 \text{ kcal/mol/}^\circ\text{K}$

Συνολικά δεδομένα άσκησης:

Ρυθμός χρήσης καυσίμου $Q_{\text{fuel}}=2,7 \text{ kg/s}$

Μέγιστη συγκέντρωση SO_2 $C_{\text{max}}=40\mu\text{g/m}^3$

Απόσταση από την καμινάδα μέγιστης συγκέντρωσης $x_{\text{max}}=612\text{m}$

Διάμετρος καμινάδας $D= 1,2 \text{ m}$

Μαζική ειδική παραγωγή καυσαερίων $Q_{\text{μαζ.ειδ.παρ.}} = 25,2 \text{ kg/kg fuel}$

Ογκομετρική ειδική παραγωγή καυσαερίων υπό ΚΣ $Q_{\text{ογκ.ειδ.παρ.}} = 53,9 \text{ Nm}^3/\text{kg fuel}$

Ταχύτητα ανέμου στα 10m $V_{10} = 1,5\text{m/s}$

Θερμοκρασία στην κορυφή της καμινάδας $T_{\text{top}}=430^\circ\text{C}$

Μοριακό Βάρος καυσαερίων $MB_{\text{αερολ.}}=29$

Ειδική θερμότητα υπο σταθερή πίεση των καυσαερίων $c_p=0,006931 \text{ kcal/mol/}^\circ\text{K}$

$$h_s = h_e - \Delta h \quad (\text{Εξίσωση 4.1})$$

$$\Delta h = \frac{1,5 \cdot V_{\alpha\epsilon\rho\omicron\lambda} \cdot D + 4 \cdot 10^{-5} \cdot Q_h}{V_{h_e}} \quad (\text{Εξίσωση 4.2})$$

$$V_{he} = V_{10} \times \left(\frac{h_e}{z_{10}} \right)^{0,5} \quad (\text{Εξίσωση 4.5})$$

$$\sigma_z = 0,707 \cdot h_e \quad (\text{Εξίσωση 4.6})$$

$$C_{x,0,0} = \frac{\dot{M}}{\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot v} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h_e}{\sigma_z} \right)^2 \right] \quad (\text{Εξίσωση 4.4})$$

όπου,

Δh = υπερύψωση (m)

$V_{\alpha\epsilon\rho\omicron\lambda}$ = ταχύτητα εξόδου καυσαερίων από την καμινάδα (m/s)

D = διάμετρος καμινάδας (m)

Q_h = ρυθμός εκπομπής θερμότητας (cal/s)

V_{he} = ταχύτητα ανέμου στο ύψος h_e (m/s)

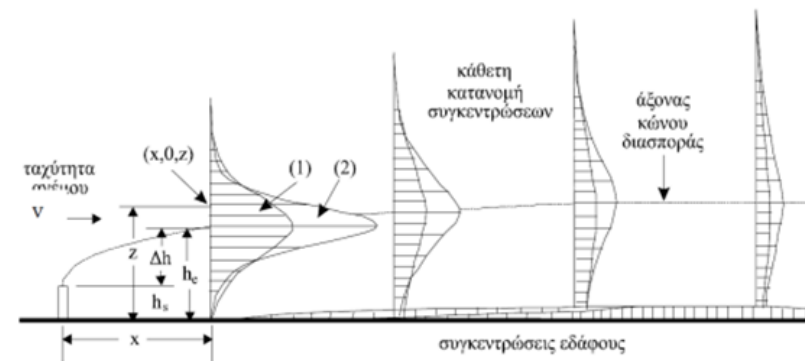
h_s = ύψος καμινάδας

h_e = ενεργό ύψος καμινάδας

σ_y, σ_z = συντελεστές διασποράς καυσαερίων

$\dot{M}$ = μαζική παροχή εξόδου καυσαερίων

Δίνει την ταχύτητα του ανέμου στο h_e (V_{he}) αν γνωρίζουμε την ταχύτητα ανέμου v σε κάποιο ύψος z



Σχήμα 4.2.2 Κατανομή συγκεντρώσεων και θέση του άξονα του κώνου διασποράς για μικρή (1) και μεγάλη (2) διαταραχή της ατμόσφαιρας

Υπολογισμός συντελεστών διασποράς σ_y και σ_z

Πίνακας 4.2.1 Εκτίμηση της ατμοσφαιρικής σταθερότητας

Επιφανειακός άνεμος στα 10 μέτρα m / s	Ημέρα			Νύχτα	
	Ηλιακή ακτινοβολία			κάλυψη με σύννεφα	
	Ισχυρή	Μέτρια	Λίγη	>4/8	<3/8
<2	A	A - B	B		
2 - 3	B	B	C	E	F
3 - 5		B - C	C	D	E
5 - 6		C - D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

=1,5m/s

$$\sigma_y = \alpha \cdot x_{\max}^p = 0,55202 \cdot 612m^{0,85927} = 136,94m$$

$$\sigma_z = b \cdot x_{\max}^q = 0,000218 \cdot 612m^{2,1057} = 160,89m$$

Πίνακας 4.2.2 Συντελεστές για τα μαθηματικά μοντέλα $\sigma_y = a \cdot x^p$ και $\sigma_z = b \cdot x^q$ ανάλογα με τον τύπο της διασποράς.

Τύπος διασποράς	σ_y		σ_z		Εύρος εφαρμογής για το σ_z , x σε m
	a	p	b	q	
A	0,55202	0,85927	0,07791	1,1148	100-300
			0,01036	1,4787	300-500
			0,000218	2,1057	500-3000
B	0,38267	0,87024	0,1186	0,9711	100-500
			0,05419	1,1028	500-20000
			0,11486	0,9074	100-20000
C	0,22759	0,88812	0,09261	0,8529	100-500
			0,25616	0,6727	500-3000
			0,52179	0,6020	3000-20000
D	0,16209	0,87944	0,08182	0,8178	100-500
			0,22387	0,6575	500-3000
			0,74895	0,5052	3000-20000
E	0,11826	0,88167	0,05498	0,8101	100-500
			0,1549	0,6485	500-3000
			0,92323	0,4234	3000-20000
F	0,07948	0,88144	0,05498	0,8101	100-500
			0,1549	0,6485	500-3000
			0,92323	0,4234	3000-20000

$$h_s = h_e - \Delta h \quad (\text{Εξίσωση 4.1})$$

$$\Delta h = \frac{1,5 \cdot V_{\alpha\epsilon\rho\omicron\lambda} D + 4 \cdot 10^{-5} \cdot Q_h}{V_{h_e}} \quad (\text{Εξίσωση 4.2})$$

$$V_{he} = V_{10} \times \left(\frac{h_e}{Z_{10}} \right)^{0,5} \quad (\text{Εξίσωση 4.5})$$

$$\sigma_z = 0,707 \cdot h_e \quad (\text{Εξίσωση 4.6})$$

$$C_{x,0,0} = \frac{\dot{M}}{\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot V} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h_e}{\sigma_z} \right)^2 \right] \quad (\text{Εξίσωση 4.4})$$

όπου,

Δh = υπερύψωση (m)

$V_{\alpha\epsilon\rho\omicron\lambda}$ = ταχύτητα εξόδου καυσαερίων από την καμινάδα (m/s)

D = διάμετρος καμινάδας (m)

Q_h = ρυθμός εκπομπής θερμότητας (cal/s)

V_{he} = ταχύτητα ανέμου στο ύψος h_e (m/s)

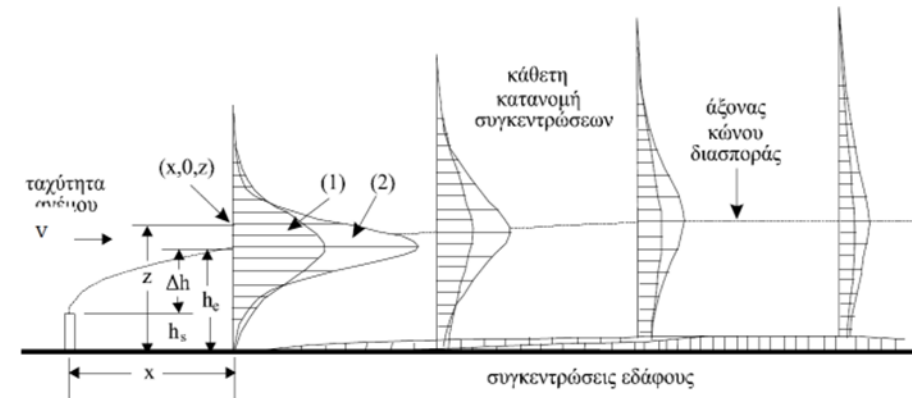
h_s = ύψος καμινάδας

h_e = ενεργό ύψος καμινάδας

σ_y, σ_z = συντελεστές διασποράς καυσαερίων

$\dot{M}$ = μαζική παροχή εξόδου καυσαερίων

Δίνει την ταχύτητα του ανέμου στο h_e (V_{he}) αν γνωρίζουμε την ταχύτητα ανέμου v σε κάποιο ύψος z



Σχήμα 4.2.2 Κατανομή συγκεντρώσεων και θέση του άξονα του κώνου διασποράς για μικρή (1) και μεγάλη (2) διαταραχή της ατμόσφαιρας

Υπολογισμός ενεργού ύψους καμινάδας (h_e)

$$(Εξ. 4.6) \sigma_z = 0,707 \cdot h_e$$

$$h_e = \frac{\sigma_z}{0,707} = \frac{136,94\text{m}}{0,707} = 227,56\text{m}$$

Υπολογισμός ταχύτητα ανέμου στο ενεργό ύψος της καμινάδας (V_{he})

$$(Εξ. 4.5) V_{he} = V_{10} \times \left(\frac{h_e}{Z_{10}} \right)^{0,5} = 1,5 \text{ m/s} \times \left(\frac{227,56\text{m}}{10\text{m}} \right)^{0,5} = 7,16 \text{ m/s}$$

$$h_s = h_e - \Delta h \quad (\text{Εξίσωση 4.1})$$

$$\Delta h = \frac{1,5 \cdot V_{\alpha\epsilon\rho\omicron\lambda} \cdot D + 4 \cdot 10^{-5} \cdot Q_h}{V_{h_e}} \quad (\text{Εξίσωση 4.2})$$

$$V_{h_e} = V_{10} \times \left(\frac{h_e}{z_{10}} \right)^{0,5} \quad (\text{Εξίσωση 4.5})$$

$$\sigma_z = 0,707 \cdot h_e \quad (\text{Εξίσωση 4.6})$$

$$C_{x,0,0} = \frac{\dot{M}}{\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot v} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h_e}{\sigma_z} \right)^2 \right] \quad (\text{Εξίσωση 4.4})$$

όπου,

Δh = υπερύψωση (m)

$V_{\alpha\epsilon\rho\omicron\lambda}$ = ταχύτητα εξόδου καυσαερίων από την καμινάδα (m/s)

D = διάμετρος καμινάδας (m)

Q_h = ρυθμός εκπομπής θερμότητας (cal/s)

V_{h_e} = ταχύτητα ανέμου στο ύψος h_e (m/s)

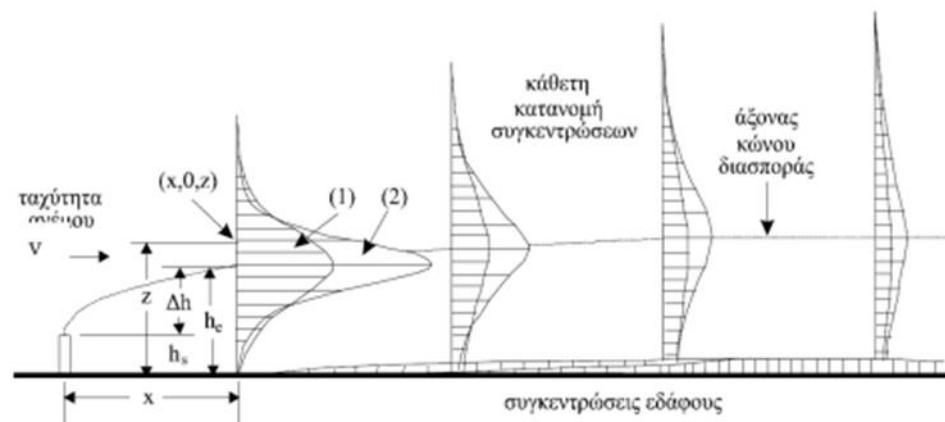
h_s = ύψος καμινάδας

h_e = ενεργό ύψος καμινάδας

σ_y, σ_z = συντελεστές διασποράς καυσαερίων

$\dot{M}$ = μαζική παροχή εξόδου καυσαερίων

Δίνει την ταχύτητα του ανέμου στο h_e (V_{h_e}) αν γνωρίζουμε την ταχύτητα ανέμου v σε κάποιο ύψος z



Σχήμα 4.2.2 Κατανομή συγκεντρώσεων και θέση του άξονα του κώνου διασποράς για μικρή (1) και μεγάλη (2) διαταραχή της ατμόσφαιρας

Υπολογισμός ταχύτητας εξόδου καυσαερίων (αερολυμάτων) ($V_{\alpha\epsilon\rho\omicron\lambda}$)

$$V_{\alpha\epsilon\rho\omicron\lambda} = \frac{Q_{\alpha\epsilon\rho\omicron\lambda}}{A}$$

$$A = \left(\pi \cdot \frac{D^2}{4} \right) = \left(\pi \cdot \frac{1,2^2 \text{m}^2}{4} \right) = 1,13 \text{m}^2$$

$$Q_{\alpha\epsilon\rho\omicron\lambda} = Q_{\text{fuel}} \times Q_{\text{ογκ.ειδ.παρ.}} \times \left(\frac{273 + T_{\text{top}}}{273} \right) = 2,7 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 53,9 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \times \left(\frac{273 + 430}{273} \right) = 374,75 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad \Rightarrow$$

$$V_{\alpha\epsilon\rho\omicron\lambda} = \frac{374,75 \text{ m}^3/\text{s}}{1,13 \text{m}^2} = \mathbf{331,35 \text{ m/s}}$$

$$h_s = h_e - \Delta h \quad (\text{Εξίσωση 4.1})$$

$$\Delta h = \frac{1,5 \cdot V_{\alpha\epsilon\rho\omicron\lambda} \cdot D + 4 \cdot 10^{-5} \cdot Q_h}{V_{h_e}} \quad (\text{Εξίσωση 4.2})$$

$$V_{he} = V_{10} \times \left(\frac{h_e}{z_{10}} \right)^{0,5} \quad (\text{Εξίσωση 4.5})$$

$$\sigma_z = 0,707 \cdot h_e \quad (\text{Εξίσωση 4.6})$$

$$C_{x,0,0} = \frac{\dot{M}}{\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot v} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h_e}{\sigma_z} \right)^2 \right] \quad (\text{Εξίσωση 4.4})$$

όπου,

Δh = υπερύψωση (m)

$V_{\alpha\epsilon\rho\omicron\lambda}$ = ταχύτητα εξόδου καυσαερίων από την καμινάδα (m/s)

D = διάμετρος καμινάδας (m)

Q_h = ρυθμός εκπομπής θερμότητας (cal/s)

V_{he} = ταχύτητα ανέμου στο ύψος h_e (m/s)

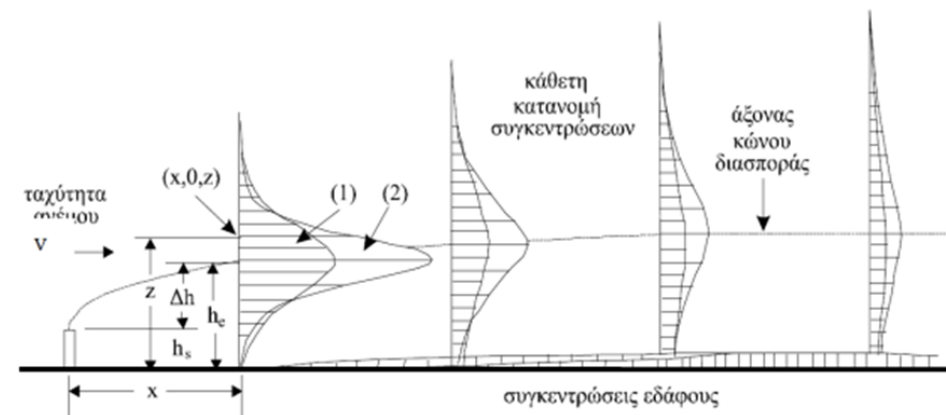
h_s = ύψος καμινάδας

h_e = ενεργό ύψος καμινάδας

σ_y, σ_z = συντελεστές διασποράς καυσαερίων

$\dot{M}$ = μαζική παροχή εξόδου καυσαερίων

Δίνει την ταχύτητα του ανέμου στο h_e (V_{he}) αν γνωρίζουμε την ταχύτητα ανέμου v σε κάποιο ύψος z



Σχήμα 4.2.2 Κατανομή συγκεντρώσεων και θέση του άξονα του κώνου διασποράς για μικρή (1) και μεγάλη (2) διαταραχή της ατμόσφαιρας

Υπολογισμός ρυθμού εκπομπής θερμότητας (Q_h)

$$Q_h = c_p \times Q_{\text{mole}} \times \Delta T$$

$$Q_{\text{mole}} = Q_{\text{μαζ.παρ.}} / MB_{\text{αερολ}}$$

$$Q_{\text{μαζ. παρ.}} = Q_{\text{μαζ.ειδ.παρ.}} \times Q_{\text{fuel}}$$

$$\left. \begin{array}{l} Q_h = c_p \times Q_{\text{mole}} \times \Delta T \\ Q_{\text{mole}} = Q_{\text{μαζ.παρ.}} / MB_{\text{αερολ}} \\ Q_{\text{μαζ. παρ.}} = Q_{\text{μαζ.ειδ.παρ.}} \times Q_{\text{fuel}} \end{array} \right\} Q_h = c_p \times (Q_{\text{μαζ.ειδ.παρ.}} \times Q_{\text{fuel}}) / MB_{\text{αερολ}} \times \Delta T$$

$$Q_h = 0,006931 \frac{\text{kcal}}{\text{mole } ^\circ\text{K}} \times \left(25,2 \frac{\text{kg}_{\text{αερολ}}}{\text{kg}_{\text{fuel}}} \times 2,7 \frac{\text{kg}_{\text{fuel}}}{\text{s}} \right) \times \frac{1000 \frac{\text{g}_{\text{αερολ}}}{\text{kg}_{\text{αερολ}}}}{29 \frac{\text{g}_{\text{αερολ}}}{\text{mole}}} \times (273 + (430 - 25))^\circ\text{K}$$

$$Q_h = \mathbf{1,10 \times 10^7 \text{ cal/s}}$$

$$h_s = h_e - \Delta_h \quad (\text{Εξίσωση 4.1})$$

$$\Delta_h = \frac{1,5 \cdot V_{\alpha\epsilon\rho\omicron\lambda} \cdot D + 4 \cdot 10^{-5} \cdot Q_h}{V_{h_e}} \quad (\text{Εξίσωση 4.2})$$

$$V_{he} = V_{10} \times \left(\frac{h_e}{z_{10}} \right)^{0,5} \quad (\text{Εξίσωση 4.5})$$

$$\sigma_z = 0,707 \cdot h_e \quad (\text{Εξίσωση 4.6})$$

$$C_{x,0,0} = \frac{\dot{M}}{\pi \cdot \sigma_v \cdot \sigma_z \cdot v} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h_e}{\sigma_z} \right)^2 \right] \quad (\text{Εξίσωση 4.4})$$

όπου,

Δ_h = υπερύψωση (m)

$V_{\alpha\epsilon\rho\omicron\lambda}$ = ταχύτητα εξόδου καυσαερίων από την καμινάδα (m/s)

D = διάμετρος καμινάδας (m)

Q_h = ρυθμός εκπομπής θερμότητας (cal/s)

V_{he} = ταχύτητα ανέμου στο ύψος h_e (m/s)

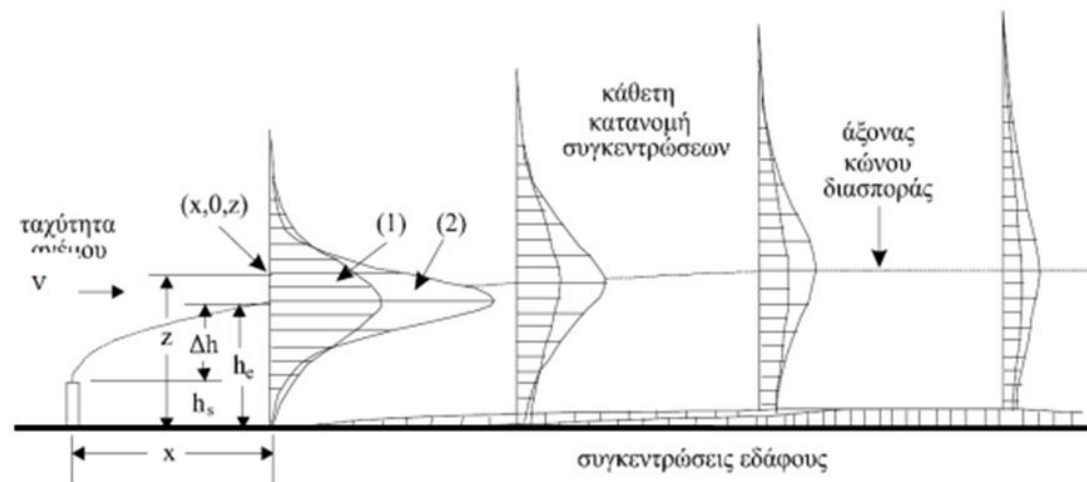
h_s = ύψος καμινάδας

h_e = ενεργό ύψος καμινάδας

σ_v, σ_z = συντελεστές διασποράς καυσαερίων

$\dot{M}$ = μαζική παροχή εξόδου καυσαερίων

Δίνει την ταχύτητα του ανέμου στο h_e (V_{he}) αν γνωρίζουμε την ταχύτητα ανέμου v σε κάποιο ύψος z



Σχήμα 4.2.2 Κατανομή συγκεντρώσεων και θέση του άξονα του κώνου διασποράς για μικρή (1) και μεγάλη (2) διαταραχή της ατμόσφαιρας

Υπολογισμός υπερύψωσης (Δ_h)

$$(Εξ. 4.2) \quad \Delta_h = \frac{1,5 \cdot V_{\alphaερολ} \cdot D + 4 \cdot 10^{-5} \cdot Q_h}{V_{he}} = \frac{1,5 \cdot 331,35 \text{m/s} \cdot 1,2 \text{m} + 4 \cdot 10^{-5} \cdot 1,10 \cdot 10^7 \text{cal/s}}{7,16 \text{m/s}} = 144,99 \text{m}$$

Υπολογισμός ύψους καμινάδας (h_s)

$$(Εξ. 4.1) \quad h_s = h_e - \Delta_h = 227,56 - 144,99 = 82,58 \text{m}$$

$$h_s = h_e - \Delta h \quad (\text{Εξίσωση 4.1})$$

$$\Delta h = \frac{1,5 \cdot V_{\alpha\epsilon\rho\omicron\lambda} D + 4 \cdot 10^{-5} \cdot Q_h}{V_{h_e}} \quad (\text{Εξίσωση 4.2})$$

$$V_{he} = V_{10} \times \left(\frac{h_e}{Z_{10}} \right)^{0,5} \quad (\text{Εξίσωση 4.5})$$

$$\sigma_z = 0,707 \cdot h_e \quad (\text{Εξίσωση 4.6})$$

$$C_{x,0,0} = \frac{\dot{M}}{\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot v} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h_e}{\sigma_z} \right)^2 \right] \quad (\text{Εξίσωση 4.4})$$

όπου,

Δh = υπερύψωση (m)

$V_{\alpha\epsilon\rho\omicron\lambda}$ = ταχύτητα εξόδου καυσαερίων από την καμινάδα (m/s)

D = διάμετρος καμινάδας (m)

Q_h = ρυθμός εκπομπής θερμότητας (cal/s)

V_{h_e} = ταχύτητα ανέμου στο ύψος h_e (m/s)

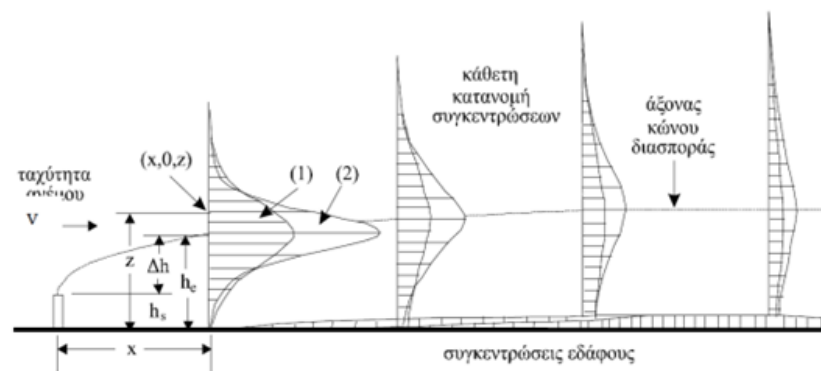
h_s = ύψος καμινάδας

h_e = ενεργό ύψος καμινάδας

σ_y, σ_z = συντελεστές διασποράς καυσαερίων

$\dot{M}$ = μαζική παροχή εξόδου καυσαερίων

Δίνει την ταχύτητα του ανέμου στο h_e (V_{he}) αν γνωρίζουμε την ταχύτητα ανέμου v σε κάποιο ύψος z



Σχήμα 4.2.2 Κατανομή συγκεντρώσεων και θέση του άξονα του κώνου διασποράς για μικρή (1) και μεγάλη (2) διαταραχή της ατμόσφαιρας

Υπολογισμός παροχής εξόδου SO_2 ($\dot{M}_{\text{SO}_2}$)

Εξ. 4.3

$$C_{x,0,0} = \frac{\dot{M}}{\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot v} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h_e}{\sigma_z} \right)^2 \right]$$

$$\dot{M}_{\text{SO}_2} = \frac{C_{\text{SO}_2 \text{ max}} \cdot \pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot V_{\text{αερολ}}}{\exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{h_e}{\sigma_z} \right)^2 \right]}$$

$$\dot{M}_{\text{SO}_2} = \frac{40 \cdot 10^{-6} \text{ g/m}^3 \cdot 3,14 \cdot 136,94 \text{ m} \cdot 160,89 \text{ m} \cdot 331,35 \text{ m/s}}{\exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{227,56}{160,89} \right)^2 \right]}$$

$$\dot{M}_{\text{SO}_2} = \mathbf{53,87 \text{ g/s}}$$

Υπολογισμός παροχής εξόδου S ($\dot{M}_S$)

$$\begin{array}{ccc} S + O_2 & \rightarrow & SO_2 \\ 32 & & 64 \\ \dot{M}_S & & \dot{M}_{SO_2} \end{array} \quad \dot{M}_S = \frac{32}{64} \cdot \dot{M}_{SO_2} = 26,93 \text{ g/s}$$

Υπολογισμός περιεκτικότητας του καυσίμου σε S (% S)

$$\% S = \frac{\dot{M}_S}{Q_{\text{fuel}}} \times 100 = \frac{26,93 \text{ g/s}}{2,7 \cdot 10^3 \text{ g/s}} \cdot 100 = 1\%$$



σχολήχημικώνμηχανικών
εθνικόμετσόβιοπολυτεχνείο

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

(1ο Φροντιστηριακό μάθημα)

Δρ. Κωνσταντίνα Παπαδοπούλου (ΕΔΙΠ)

kpapado@chemeng.ntua.gr

14 Μαρτίου 2025