

Ειδικά θέματα

□ Ατμοσφαιρικοί Μηχανισμοί Απομάκρυνσης Ρύπων

- Χημικοί μετασχηματισμοί*
- Βαρυτική καθίζηση σωματιδίων*
- Ξηρή εναπόθεση*
- Υγρή εναπόθεση*

□ Πηγές Αβεβαιότητας των Μοντέλων Θυσάνου του Gauss

Ατμοσφαιρικοί μηχανισμοί απομάκρυνσης των ρύπων

Σταδιακή ελάττωση της μάζας των ρύπων στην ατμόσφαιρα

Συνεισφορά στη μείωση των συγκεντρώσεων των ρύπων

- *Χημικοί μετασχηματισμοί*
- *Βαρυτική καθίζηση των στερεών σωματιδίων ή των σταγόνων*
- *Κατακράτηση στο έδαφος μέσω πρόσκρουσης*
- *Απορρόφηση και υγρή εναπόθεση σε συνδυασμό με βροχή ή άλλη μορφή νετού*

Όχι πάντοτε ευεργετικό αποτέλεσμα

π.χ. μερικά από τα προϊόντα των χημικών μετασχηματισμών μπορεί να είναι ατμοσφαιρικοί ρύποι πιο επικίνδυνοι από τα αντιδρώντα, όξινη βροχή

Περιγραφή απομάκρυνσης ενός ρύπου από την ατμόσφαιρα λόγω των μηχανισμών απομάκρυνσης: Πολλαπλασιασμός της δεξιάς πλευράς της εξίσωση Gauss με μια εκθετική συνάρτηση του χρόνου της μορφής:

$$D(x) = e^{-\psi \frac{x}{u}} \quad \psi > 0$$

$$D(x) = 1 \quad \psi = 0$$

***D:** Μείωση της συγκέντρωσης*

***ψ :** Συντελεστής μείωσης = $0.693/T_{1/2}$ (s^{-1})*

***$T_{1/2}$:** Χρόνος ημιζωής*

***x :** απόσταση από την πηγή*

***x/u_s :** Χρόνος μεταφοράς από την πηγή*

***Χρόνος ημιζωής $T_{1/2}$:** Ο χρόνος που απαιτείται για να μειωθεί η συγκέντρωση του συγκεκριμένου ρύπου στο 50% της αρχικής*

***Ρεαλιστικά αποτελέσματα** όταν η μείωση των συγκεντρώσεων να λαμβάνει χώρα σε ολόκληρο τον θύσανο χωρίς να εξαρτάται από την συγκέντρωση του ρύπου*

➤ *Χημικοί Μετασχηματισμοί*

• *Φωτοχημικές Αντιδράσεις*

Αντιδράσεις που συμβαίνουν λόγω απορρόφησης ενέργειας από την ηλιακή ακτινοβολία

• *Θερμοχημικές Αντιδράσεις*

Αντιδράσεις που όταν συμβαίνουν απορροφούν ή εκλύουν θερμότητα (ενέργεια)

Ομογενείς αντιδράσεις: Τα αντιδρώντα είναι στην ίδια φάση (αέριο-αέριο, υγρό-υγρό, στερεό-στερεό)

Ετερογενείς αντιδράσεις: Τα αντιδρώντα είναι σε διαφορετική φάση (αέριο-υγρό, αέριο-στερεό, υγρό-στερεό)

Υπαρξη χιλιάδων χημικών ενώσεων και χημικών αντιδράσεων
Αδύνατη η συμπερίληψη όλων των αντιδράσεων σε μοντέλο →
Προσέγγιση των χημικών μετασχηματισμών

α) Αναλυτικοί ή λεπτομερείς μηχανισμοί

Λεπτομερής περιγραφή φωτοχημικών μηχανισμών των χημικών ενώσεων

β) Απλοποιημένοι ή συμπυκνωμένοι μηχανισμοί

Ομαδοποίηση ενώσεων με βάση

- Το χημικό τους χαρακτήρα ή
- Τη δομή τους

➤ **Βαρυτική καθίζηση**

Πτώση λόγω βαρύτητας των σχετικά μεγάλων και βαρέων σωματιδίων

Ταχύτητες ελεύθερης πτώσης παραπλήσιες ή μεγαλύτερες των κάθετων ταχυτήτων των στροβίλων

Σωματίδια διαμέτρου $< 0.2 \mu\text{m}$ → Παραμονή για μεγάλα χρονικά διαστήματα στην ατμόσφαιρα

Μεγαλύτερα σωματίδια → μη αμελητέες ταχύτητες πτώσης

Ταχύτητα καθίζησης των σωματιδίων

$$V_g = \frac{(\rho_{PAR} - \rho_{AIR}) g d_{PAR}^2 c_2}{18\mu} S_{CF}$$

ρ_{PAR} : πυκνότητα των σωματιδίων (g/cm^3)

ρ_{AIR} : πυκνότητα του περιβάλλοντα αέρα ($\sim 1.2 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$)

d_{PAR} : διάμετρος του σωματιδίου (μm)

μ : ιξώδες του αέρα ($\sim 1.81 \times 10^{-4} \text{ g/cm/s}$)

c_2 : σταθερά μετατροπής μονάδων ($1 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\mu\text{m}^2$)

S_{CF} : συντελεστής διόρθωσης

Υπολογισμός S_{CF}

$$S_{CF} = 1 + \frac{2x_2(a_1 + a_2e^{-a_3d_{PAR}/x_2})}{10^{-4}d_{PAR}}$$

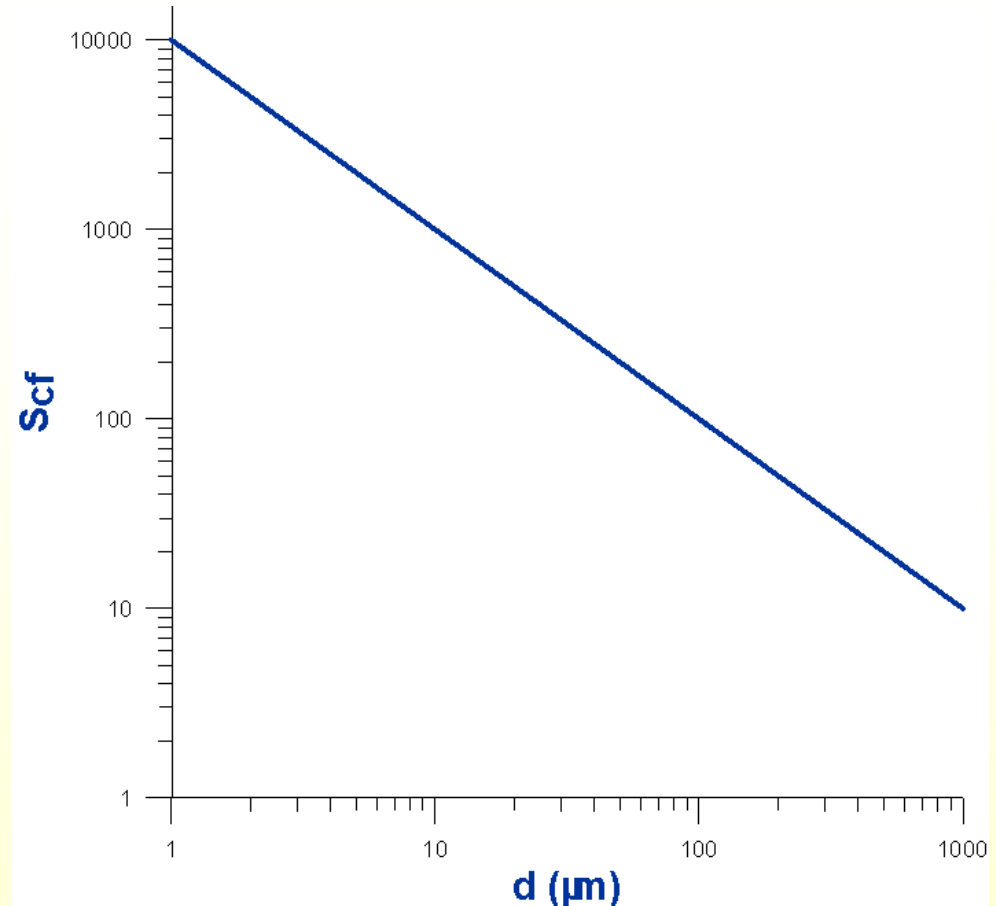
Σταθερές x_2 , a_1 , a_2 , a_3

$$x_2 = 6.5 \times 10^{-6}$$

$$a_1 = 1.257$$

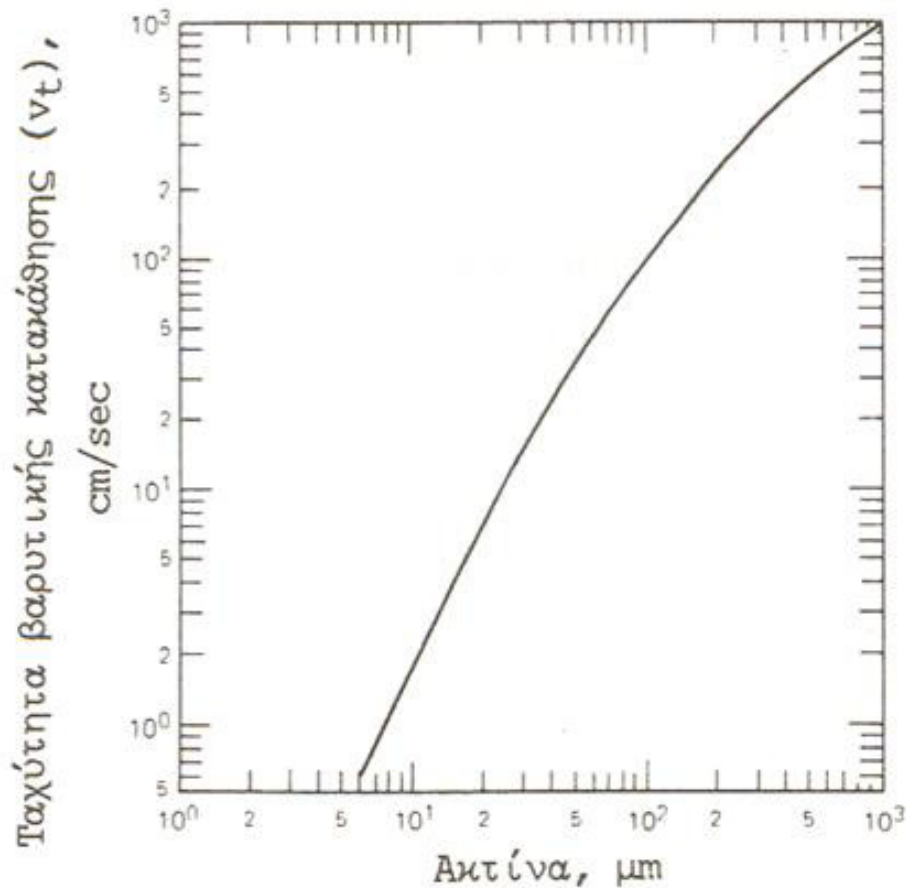
$$a_2 = 0.4$$

$$a_3 = 0.55 \times 10^{-4}$$



Εφαρμογή μοντέρνων τεχνικών αντιρύπανσης: Περιορισμός βαρυτικής καθίζησης των σωματιδίων στις τεχνολογικά εξελιγμένες χώρες

Απομάκρυνση ποσοστού 99% ή και περισσότερο των σωματιδίων με διάμετρο μεγαλύτερη από 5 μm



Βαρυτική ταχύτητα καθίζησης σαν συνάρτηση της ακτίνας για σωματίδια με πυκνότητα 5 g/cm^3 κοντά στην επιφάνεια της γης

Αν $5 \text{ cm/s} \leq v_g \leq 100 \text{ cm/s}$ ισχύει

$c = c_0/2$ σε απόσταση $s_{1/2} = H u_s / v_g$

Χρόνος ημιζωής $T_{1/2}$

$$T_{1/2} = \frac{s_{1/2}}{v_g} = \frac{\frac{H \cdot u_s}{v_g}}{v_g} \Rightarrow T_{1/2} = \frac{H \cdot u_s}{v_g^2}$$

Μείωση της συγκέντρωσης D

$$D = \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} \frac{x}{u_s}\right) = \exp\left(-\frac{\ln 2}{\frac{H \cdot u_s}{v_g^2}} \frac{x}{u_s}\right) \Rightarrow$$

$$D = \exp\left[-\ln 2 \frac{x}{H} \left(\frac{v_g}{u_s}\right)^2\right]$$

➤ **Απόθεση**

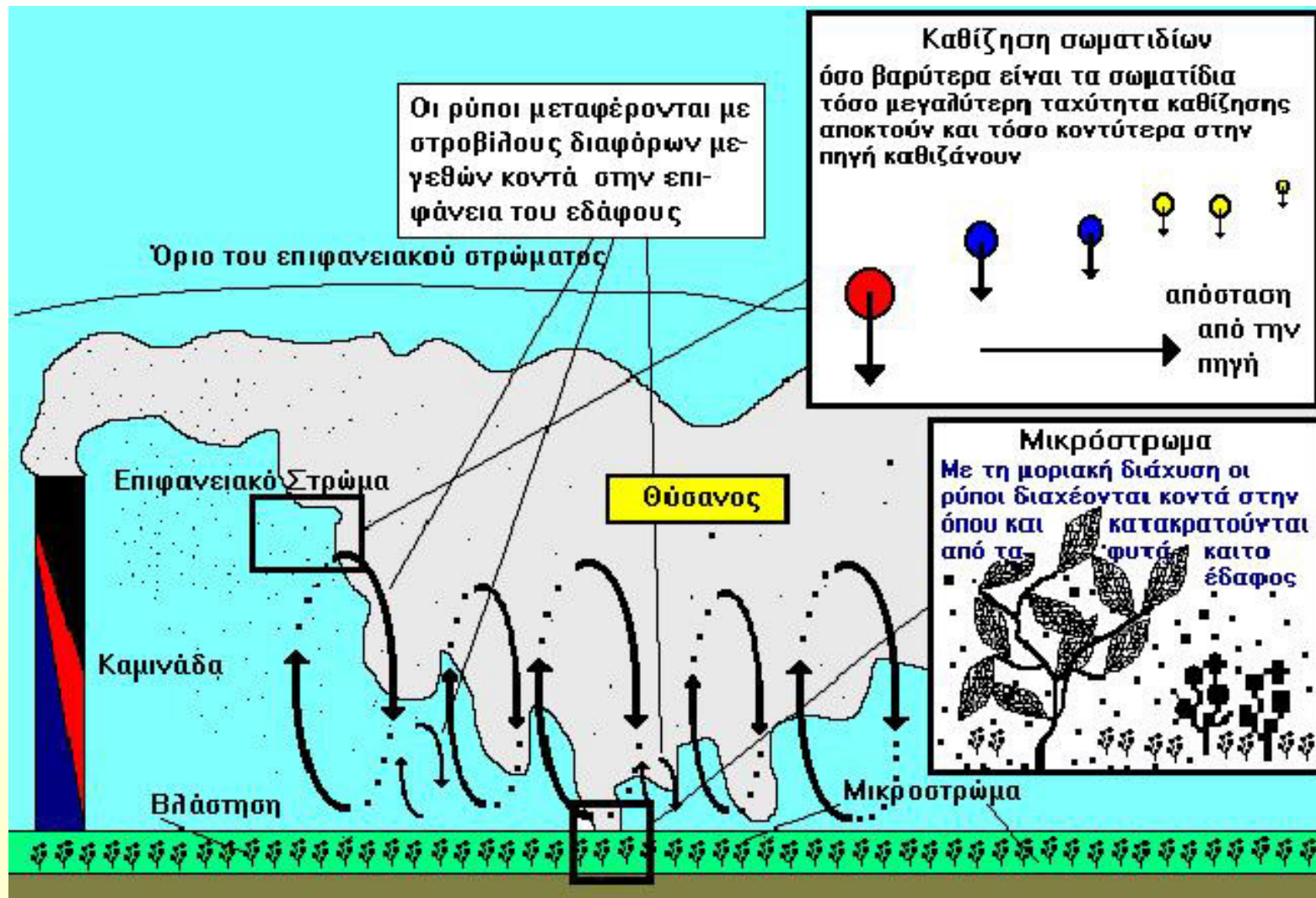
Η απομάκρυνση αερίων ρύπων και μικρών σωματιδίων από την ατμόσφαιρα και μεταφορά τους στο έδαφος

i) Ξηρή απόθεση: Κατακράτηση ρύπων από την επιφάνεια όταν έρχονται σε επαφή

ii) Υγρή απόθεση: Σάρωση ρύπων από τη συμπυκνωμένη φάση του νερού

Στάδια ξηρής απόθεσης

- *Μεταφορά του υλικού κοντά στο έδαφος με την βοήθεια των τυρβωδών στροβίλων*
- *Διάχυση του υλικού μέσα στο ιξώδες υπόστρωμα (πάχος 0.1 cm)*
- *Κατακράτηση από το έδαφος μέρους του υλικού μέσω απορρόφησης ή διάλυσης*



Ξηρή απόθεση

Προσεγγίσεις

• **Ρυθμός απομάκρυνσης ανάλογος των συγκεντρώσεων**

Ποσότητα ρύπου που αποτίθεται

$$F_d = C_d \cdot v_d$$

F_d : ροή απόθεσης (g/m^2), C_d : συγκέντρωση του ρύπου ($\mu g/m^3$), v_d : ταχύτητα απόθεσης του ρύπου (cm/s) για ύψος αναφοράς z_d

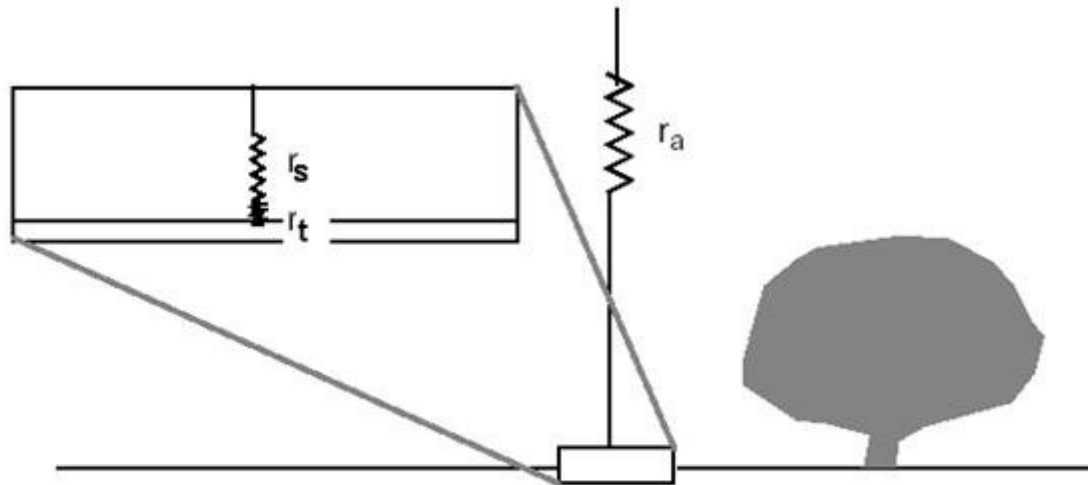
Εξάρτηση ταχύτητας απόθεσης από *ρύπο, μετεωρολογικές συνθήκες, επιφάνεια*

Υπολογισμός ταχύτητας εναπόθεσης: Γραμμική αναλογία αντιστάσεων ή Μέθοδος 3 αντιστάσεων

- **Αεροδυναμική μεταφορά r_a** – Μεταφορά ρύπων κοντά στο έδαφος λόγω τυρβώδους διάχυσης

- **Αντίσταση του ιξώδους υποστρώματος r_s** – Μεταφορά λόγω μοριακών συγκρούσεων

- **Αντίσταση μεταφοράς r_t** – εξάρτηση από την φυσικοχημική αλληλεπίδραση του υλικού και της επιφάνειας



Σχηματική αναπαράσταση των αντιστάσεων στην απόθεση των ρύπων στο έδαφος. r_a : αεροδυναμική αντίσταση, r_s : αντίσταση του υποστρώματος και r_t : αντίσταση μεταφοράς

Ταχύτητα απόθεσης v_d : αντίστροφη του αθροίσματος των επιμέρους αντιστάσεων

$$v_d = \frac{1}{r_a + r_s + r_t}$$

Ταχύτητα ξηρής απόθεσης μεγάλων σωματιδίων

$$v_d = \frac{1}{r_a + r_s + r_a r_s v_g} + v_g$$

v_g : ταχύτητα καθίζησης

Παράγοντες που επιδρούν στη ξηρή απόθεση και το ρυθμό απομάκρυνσης αερίων ρύπων και σωματιδίων

<i>Ατμοσφαιρικές μεταβλητές</i>	<i>Ιδιότητες υλικού που αποτίθεται</i>		<i>Ιδιότητες επιφάνειας</i>
	<i>Αέρια</i>	<i>Σωματίδια</i>	
<i>Ταχύτητα ανέμου 10 m Ταχύτητα τριβής Ατμοσφαιρική ευστάθεια Τυρβώδεις στρόβιλοι Θερμοκρασία αέρα Σχετική υγρασία</i>	<i>Χημική δραστικότητα Διαλυτότητα Μοριακή διαχυτικότητα Μερική πίεση</i>	<i>Διάμετρος Σχήμα Πυκνότητα Υδροσκοπικότητα Διαλυτότητα Ηλεκτροστατικές ιδιότητες</i>	<i>Αεροδυναμική τραχύτητα Τοπογραφία Υγρότητα Ύψος φυλλώματος Γεωμετρία και δομή φυλλώματος Απορροφητικότητα Πορώδης υφή Ηλεκτροστατικές ιδιότητες</i>

Αεροδυναμική αντίσταση

Συνθήκες ουδέτερης στρωμάτωσης

$$r_a = \frac{[\ln(z/z_0)]^2}{k^2 \cdot \bar{u}}$$

k : σταθερά von Karman ($k=0.4$)

z_0 : αεροδυναμικό μήκος τραχύτητας

\bar{u} : μέση ταχύτητα του ανέμου σε ύψος z

Υπόλοιπες συνθήκες στρωμάτωσης

$$r_a = \frac{[\ln(z/z_0) - \psi]^2}{k^2 \cdot \bar{u}}$$

ψ : συνάρτηση των παραμέτρων που προσδιορίζουν την ατμοσφαιρική ευστάθεια

Συνθήκες αστάθειας: θετικές τιμές-μικρότερη αεροδυναμική r_a

Συνθήκες ευστάθειας: αρνητικές τιμές-μεγαλύτερη αεροδυναμική r_a .

Αντίσταση υποστρώματος

Εξάρτηση από

- μοριακή διαχυτικότητα του υλικού (αερίου ή σωματιδιακού)
- κινηματικό ιξώδες του αέρα

Εμπειρική εξίσωση

$$r_s = \frac{A}{ku_*}$$

A: σταθερά με 2.0-2.6, *u*_{*}: ταχύτητα τριβής

Συνθήκες ουδέτερης στρωμάτωσης

$$r_s = \frac{A \ln(z / z_0)}{k^2 \cdot \bar{u}}$$

Αντίσταση μεταφοράς

Η πιο αβέβαιη συνιστώσα της συνολικής αντίστασης απόθεσης

Εξάρτηση απορρόφησης μορίων ή πρόσληψης σωματιδίων από μια επιφάνεια από

- *Χημική σύσταση επιφάνειας*
- *Φυσική δομή επιφάνειας*
- *Φυσικοχημικές ιδιότητες του διαχεόμενου υλικού*

Αέριοι ρύποι

Εξάρτηση πρόσληψης από βιολογικούς παράγοντες σε περιοχή με φυτά και από υγρασία εδάφους

Επιφάνεια	v_d (cms⁻¹)
Χαμηλό γρασίδι	0.5
Φυτά μεσαίου ύψους	0.7
Ασβεστούχο έδαφος	0.8
Ξηρό όξινο έδαφος	0.4
Υγρό όξινο έδαφος	0.6
Ξηρό χιόνι	0.1
Νερό	0.7
Ύπαιθρος	0.8
Πόλη	0.7

Ταχύτητα απόθεσης για SO₂

Σχετική συνεισφορά των επιμέρους αντιστάσεων

$$v_d = \frac{1}{r_a + r_s + r_t}$$

Εξάρτηση r_a , r_s από

- **ταχύτητα του ανέμου**
- **συνθήκες ευστάθειας (μέγεθος τύρβης)**
- **ύψος και γεωμετρία/δομή του φυλλώματος**

Μείωση $r_a + r_s$ με αύξηση ταχύτητας του ανέμου και ύψους βλάστησης

r_a , r_s μεγαλύτερες τιμές σε συνθήκες ευστάθειας → μικρότερες ροές απόθεσης

r_s : Μικρότερες διακυμάνσεις από τις άλλες δύο συνιστώσες της αντίστασης

r_a : Πολύ μεγάλες τιμές σε συνθήκες ευστάθειας → μεγαλύτερη συνεισφορά στη συνολική αντίσταση

r_t : Πολύ μεγάλες τιμές σε κάποιες περιπτώσεις → μεγαλύτερη συνεισφορά στη συνολική αντίσταση

Μεγαλύτερες ταχύτητες απόθεσης σε συνθήκες μεγάλης αστάθειας πάνω από διαπνέουσα βλάστηση

*Τυπικές τιμές των ταχυτήτων ξηρής απόθεσης για μερικά ατμοσφαιρικά
αέρια*

v_d (cm s^{-1})			
Στοιχείο	Επιφάνεια		
	Ήπειρος	Ωκεανός	Πάγος/χιόνι
CO	0.03	0	0
N ₂ O	0	0	0
NO	0.016	0.003	0.002
NO ₂	0.1	0.02	0.01
HNO ₃	4	1	0.5
O ₃	0.4	0.07	0.07

Υγρή απόθεση: Φυσική διεργασία σύμφωνα με την οποία οι ρύποι σαρώνονται και απομακρύνονται από την ατμόσφαιρα από κατακρημνίσματα (συμπυκνωμένη φάση του νερού: βροχή, χιόνι, σταγονίδια νεφών και ομίχλης)

Στάδια υγρής απόθεσης

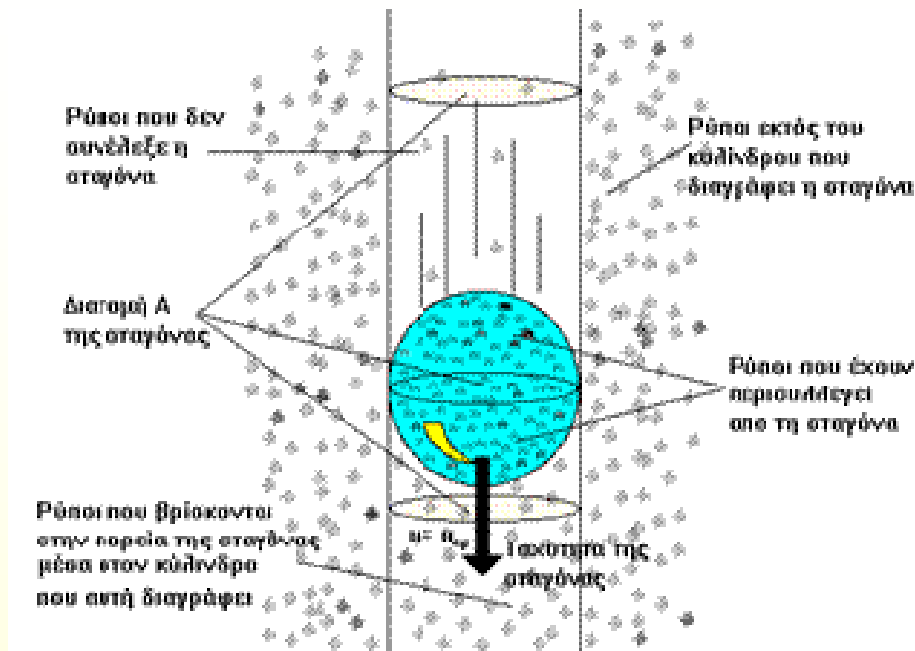
- Παρουσία ρύπων (αέριοι ή σωματιδιακοί) σε σημείο της ατμόσφαιρας όπου υπάρχουν υγροποιημένοι υδρατμοί
- Απορρόφηση ρύπων από τα μετέωρα σταγονίδια
- Πτώση ρύπων στο έδαφος μαζί με τα σταγονίδια

Τύποι υγρής απόθεσης

- Απόθεση των ρύπων από υετό μέσω διεργασιών κάτω από τα νέφη
- Απόθεση των ρύπων από υετό μέσω διεργασιών εντός των νεφών

Τοπική κλίμακα: Μεγαλύτερη επίπτωση από τη σάρωση ρύπων κάτω από το σύννεφο – επίδραση σε ρύπους με μικρό χρόνο ζωής (π.χ. οξείδια του αζώτου)

Μεγάλες χωρικές κλίμακες: Μεγαλύτερη επίπτωση από τη σάρωση ρύπων εντός των νεφών – επίδραση σε ρύπους με μεγάλο χρόνο ζωής (π.χ. διοξείδιο του θείου)



Σχηματική παράσταση της υγρής εναπόθεσης των χημικών ενώσεων στην επιφάνεια της γης με την απόπλυση τους από την ατμόσφαιρα.

Δεδομένα που απαιτούνται για τον υπολογισμό της υγρής εναπόθεσης:

- Θερμοκρασία του αέρα**
- Ρυθμός νετού**
- Ρυθμός σάρωσης**
- Κατακόρυφη κατανομή νερού**
- Πεδίο ανέμου**

Μεθοδολογία υπολογισμού της απόπλυσης σε τοπική κλίμακα

Παράμετροι επίδρασης στη σάρωση και στην υγρή απόθεση: Ένταση, διάρκεια, τύπος νετού.

Νόμος εκθετικής μείωσης:

$$C(t) = C_0 e^{-t\Lambda}$$

C_0 : αρχική συγκέντρωση ρύπου (πριν την βροχόπτωση)

$C(t)$: συγκέντρωση του ρύπου στην ατμόσφαιρα ύστερα από βροχόπτωση διάρκειας χρόνου t

Λ : παράγοντας απόπλυσης (s^{-1})

$$\Lambda = a\lambda^b$$

λ : ρυθμός βροχόπτωσης (mm/hr),

a, b : συντελεστές που εξαρτώνται τα χαρακτηριστικά του ρύπου

Ευγενή αέρια: $a=0, b=0$

Σωματίδια: $a= 8.0 \cdot 10^{-5}, b= 0.8$

Πιο πολύπλοκες προσεγγίσεις: εξάρτηση συντελεστών a, b και από το είδος νετού

Πηγές αβεβαιότητας των μοντέλων του θυσάνου του Gauss

Βασικές παραδοχές για την εφαρμογή των μοντέλων

- *Σταθερές μετεωρολογικές συνθήκες*
- *Επίπεδο έδαφος*
- *Διατήρηση της μάζας των ρύπων*
- *Ιδεατή γεωμετρία και κατανομή του θυσάνου*

Απαραίτητη η γνώση των περιορισμών και των πιθανών σφαλμάτων στους υπολογισμούς

Αβεβαιότητα στον υπολογισμό των συγκεντρώσεων λόγω της *τυχειότητας* των ατμοσφαιρικών διεργασιών (εγγενής αβεβαιότητα) και των *στοιχείων εισαγωγής*

Σφάλμα στους υπολογισμούς της συγκέντρωσης ρύπων λόγω των σφαλμάτων εισαγωγής

$$\frac{\Delta c}{c} = \frac{\Delta Q}{Q} - \frac{\Delta \bar{u}}{\bar{u}} - \frac{\Delta \sigma_y}{\sigma_y} - \frac{\Delta \sigma_z}{\sigma_z} - \Delta \left(\frac{H^2}{2\sigma_z^2} \right)$$

Τυχαία σφάλματα: Συνολικό σφάλμα στη συγκέντρωση ίσο με το άθροισμα όλων των σφαλμάτων στην δεξιά μεριά της εξίσωσης

Αβεβαιότητα σε καθένα $\pm 10\%$ \rightarrow Συνολική αβεβαιότητα των μέγιστων συγκεντρώσεων εδάφους στο $\pm 50\%$.

Αβεβαιότητα στον προσδιορισμό του ρυθμού εκπομπής των ρύπων

Σφάλματα στον υπολογισμό του ρυθμού εκπομπής προκαλούν αντίστοιχα σφάλματα στις υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις. Αβεβαιότητα στις εκπομπές 30% \rightarrow Ίδια αβεβαιότητα στη συγκέντρωση

Λάθη στον υπολογισμό της αρχικής ανύψωσης του θυσάνου

Αβεβαιότητα της τάξης του 20% στην ανύψωση του θυσάνου →
Εισαγωγή περίπου διπλάσιας αβεβαιότητας στις υπολογιζόμενες
συγκεντρώσεις

Λάθη στην εκτίμηση του ανέμου στο ύψος του κεντρικού άξονα
του θυσάνου

Αναγωγή ταχύτητας στο ύψος του θυσάνου με εκθετική σχέση.

Αβεβαιότητα στην υπολογιζόμενη ταχύτητα του ανέμου 10-15%
→ Αβεβαιότητα στη διασπορά και στον υπολογισμό της
ανύψωσης του θυσάνου

Αβεβαιότητα στη διεύθυνση του ανέμου

Μικρά λάθη στη διεύθυνση του ανέμου → σημαντικά λάθη στις
υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις

Λάθος όχι κυρίως στη συγκέντρωση, αλλά στην γεωγραφική
περιοχή στην οποία εμφανίζεται.

Λάθη στον υπολογισμό των συντελεστών διασποράς

➤ Διαφορά μεταξύ των χρονικών περιόδων υπολογισμού συντελεστών διασποράς (λίγα έως 15' λεπτά) και υπολογισμών μοντέλων (ωριαία βάση). Μεταβολή της διεύθυνσης του ανέμου στο διάστημα αυτό προκαλεί υπερεκτίμηση στις υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις μέχρι 2.5 φορές μεγαλύτερες.

➤ Μεταβολή στην κλάση ευστάθειας → Σημαντική αλλαγή στις υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις, ιδιαίτερα σε μεγαλύτερες αποστάσεις.

➤ Εμπειρική φύση των εξισώσεων για τον υπολογισμό των συντελεστών → Αβεβαιότητα στους υπολογισμούς περίπου $\pm 25\%$

Μεγαλύτερα λάθη σε συνθήκες ακραίας αστάθειας ή ευστάθειας

Μεγάλα λάθη προκύπτουν σε μικρές αποστάσεις (μέχρι λίγες εκατοντάδες μέτρα) από την πηγή.

Αβεβαιότητα στον υπολογισμό του σ_z είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του σ_y .