



# Μηχανική Περιβάλλοντος

## Ενότητα 3: Ισοζύγια Ενέργειας

Δρ. Ελένη Γκριλλα  
Μηχανικός Περιβάλλοντος

e-mail. [elen.grilla@gmail.com](mailto:elen.grilla@gmail.com)

# Ισοζύγιο Ενέργειας

## Πρώτος Θερμοδυναμικός Νόμος

Για κάθε σύστημα ισχύει:

$$\text{Εισρέουσα } E = \text{Εκρέουσα } E + \text{Μεταβολή αποθηκευμένης } E$$

Σε περιβαλλοντικά συστήματα η αποθηκευμένη ενέργεια περιλαμβάνει:

- εσωτερική ενέργεια (θερμοκρασία)
- δυναμική ενέργεια
- κινητική ενέργεια

$$\Delta E_{\text{εσωτ}} = m c \Delta T$$

$\Delta E_{\text{εσωτ}}$ : μεταβολή  $E_{\text{εσωτ}}$

$m$ : μάζα (kg)

$c$ : ειδική θερμότητα (kcal/kg °C)

$\Delta T$ : μεταβολή θερμοκρασίας (°C)

*Η ενέργεια ούτε δημιουργείται ούτε καταστρέφεται, αλλά αλλάζει μορφές.*

# Ισοζύγιο Ενέργειας

Συστήματα στα οποία παρατηρείται μεταφορά ενέργειας και μάζας θεωρούνται *ανοικτά συστήματα*, ενώ συστήματα στα οποία πραγματοποιείται μόνο μεταφορά ενέργειας θεωρούνται *κλειστά συστήματα*.

Στα ανοικτά συστήματα η εξίσωση μετατρέπεται ως εξής:

$$\text{Ρυθμός μεταφοράς ενέργειας } \Delta^{\circ}E_{\text{εσωτ}} = m^{\circ} c \Delta T$$

$\Delta^{\circ}E_{\text{εσωτ}}$ : ο ρυθμός μεταφοράς ενέργειας (J/s ή W)

$m^{\circ}$ : ο ρυθμός μεταφοράς μάζας στο σύστημα (kg/s)

$c$ : ειδική θερμότητα (kcal/kg °C)

$\Delta T$ : μεταβολή θερμοκρασίας (°C)

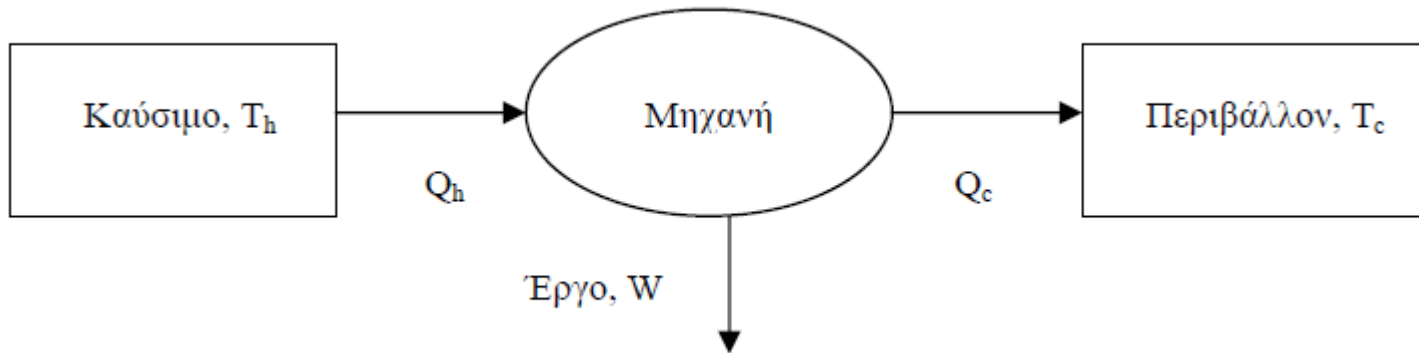
Για παράδειγμα, αν χρησιμοποιείται νερό για την ψύξη ενός εργοστασίου παραγωγής ενέργειας, τότε  $m^{\circ}$  θα είναι ο ρυθμός μεταφοράς της μάζας του νερού και  $\Delta T$  η αύξηση της θερμοκρασίας του νερού ψύξης καθώς περνά μέσα από το εργοστάσιο.

# Ισοζύγιο Ενέργειας

## Δεύτερος Θερμοδυναμικός Νόμος

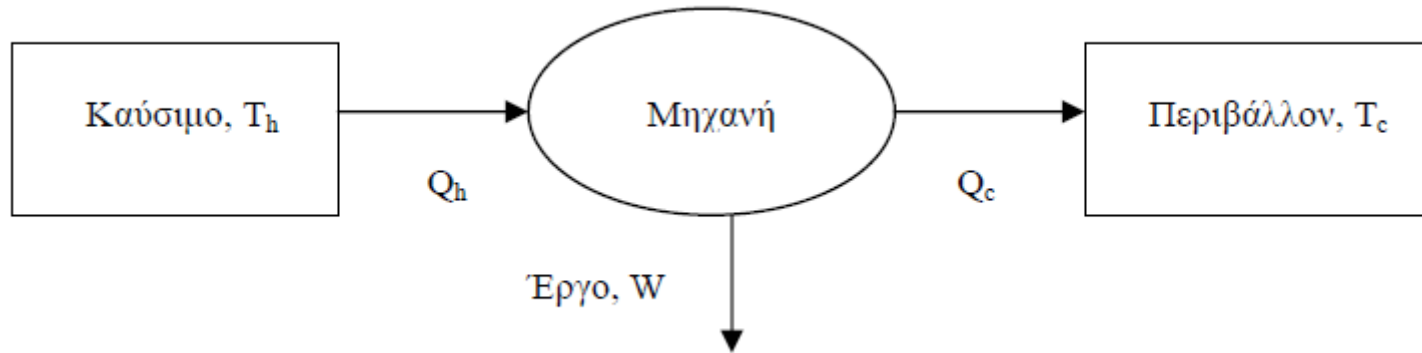
*Καμία μετατροπή ενέργειας δεν είναι απόλυτα αποδοτική, αλλά πάντα υπάρχουν απώλειες ενέργειας*

**Απώλεια ενέργειας** αναφερόμαστε στη μετατροπή της σε μορφές ενέργειας “χαμηλότερης ποιότητας”, όπως για παράδειγμα σε θερμική ενέργεια που απελευθερώνεται στο περιβάλλον.



Η απόδοση της συγκεκριμένης μηχανής,  $\eta$  ισούται με το λόγο του έργου που παράχθηκε,  $W$  προς το ποσό της θερμικής ενέργειας που προσφέρθηκε από την πηγή υψηλής θερμότητας,  $Q_h$

# Ισοζύγιο Ενέργειας



Απόδοση της συγκεκριμένης μηχανής:  $n = \frac{W}{Q_h} = \frac{(Q_h - Q_c)}{Q_h} = 1 - \frac{Q_c}{Q_h}$

Η πλέον αποδοτική θερμομηχανή ονομάζεται *μηχανή Carnot*, από το Γάλλο μηχανικό Sadi Carnot που τη σχεδίασε το 1820. Η απόδοση μίας τέτοιας θερμομηχανής δίνεται από την παρακάτω εξίσωση, όπου οι απόλυτες θερμοκρασίες μετρούνται σε Kelvin:

$$n_{\max} = 1 - \frac{T_c}{T_h}$$

Η μέση απόδοση των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δεν ξεπερνά το 33%, δηλαδή για κάθε 3 μονάδες ενέργειας που εισέρχονται, η μία μετατρέπεται σε ηλεκτρική και οι άλλες δυο αποβάλλονται στο περιβάλλον.

# Ισοζύγιο Ενέργειας - Παράδειγμα

---

- Ατμοηλεκτρικός σταθμός παραγωγής ενέργειας καίει κάρβουνο που έχει ενεργειακό περιεχόμενο  $24 \text{ kJ/g}$  και μέσω περιεχόμενο σε άνθρακα  $62\%$ . Το συγκεκριμένο καύσιμο περιέχει επίσης  $2\%$  S και  $10\%$  τέφρα. Η νομοθεσία που ισχύει για τις εκπομπές αερίων ρύπων επιτρέπει την εκπομπή  $260 \text{ g SO}_2$  ( $130 \text{ g S}$ ) και  $13 \text{ g}$  αιωρούμενων σωματιδίων ανά  $10^6 \text{ KJ}$  θερμικής ενέργειας που εισέρχονται στον ατμοηλεκτρικό σταθμό. Υποθέστε ότι για την παραγωγή μίας μονάδας ηλεκτρικής ενέργειας απαιτούνται τρεις μονάδες θερμικής ενέργειας.

A) Να βρεθούν οι επιτρεπόμενες εκπομπές  $\text{SO}_2$  και αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα ανά κιλοβατώρα ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται.

# Ισοζύγιο Ενέργειας - Παράδειγμα

---

Β) Να υπολογιστούν οι εκπομπές C στην ατμόσφαιρα αν υποθεθεί ότι όλος ο C απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα.

Γ) Να υπολογιστούν οι εκπομπές SO<sub>2</sub>.

Δ) Να υπολογιστούν οι εκπομπές τέφρας. Το 70% της τέφρας απελευθερώνεται ως ιπτάμενη τέφρα, ενώ το 30% κατακρημνίζεται και καταλήγει στο έδαφος.

Ε) Να παρασταθεί γραφικά το ισοζύγιο μάζας και ενέργειας στο συγκεκριμένο ατμοηλεκτρικό σταθμό για την παραγωγή 1 KWhr ηλεκτρικής ενέργειας.

Θεωρείστε ότι το 85% της αποβαλλόμενης θερμότητας απομακρύνεται με το νερό ψύξης, ενώ το υπόλοιπο 15% με τα απαέρια.

# Ισοζύγιο Ενέργειας - Άσκηση

---

- Το πετρέλαιο που τροφοδοτεί μία μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας περιέχει 20 Kg C ανά  $10^9$  J εισερχόμενης ενέργειας. Αν η απόδοση της μονάδας είναι 40%, να βρεθούν οι εκπομπές C ανά KWhr ηλεκτρικού ρεύματος που παράγεται, υποθέτοντας ότι το σύνολο του C εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα. Σύμφωνα με τη νέα νομοθεσία, οι εκπομπές  $\text{SO}_2$  και  $\text{NO}_x$  περιορίζονται στα 86 mg  $\text{SO}_2$  και 130 mg  $\text{NO}_x$  ανά MJ εισερχόμενης ενέργειας. Να εκτιμηθεί η μέγιστη επιτρεπόμενη εκπομπή  $\text{SO}_2$  και  $\text{NO}_x$  ανά KWh.

# Ισοζύγιο Ενέργειας

## Μεταφορά Θερμότητας

Όταν δύο αντικείμενα έχουν διαφορετική θερμοκρασία μεταφέρεται θερμότητα από το θερμότερο στο ψυχρότερο. Η μεταφορά θερμότητας μπορεί να γίνει α) *μέσω επαφής*, όταν υπάρχει φυσική επαφή των δύο αντικειμένων, β) *μέσω ακτινοβολίας* και γ) *δια μέσου* του υγρού ή αέριου μέσου που παρεμβάλλεται μεταξύ των δύο αντικειμένων.

Για τον υπολογισμό του συνολικού ρυθμού μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιείται η εξίσωση:

$$q = \frac{A(T_i - T_o)}{R}$$

Όπου:

$q$  = ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας (W)

$A$  = η επιφάνεια μεταφοράς ( $m^2$ )

$T_i$  = η θερμοκρασία στη μία πλευρά της επιφάνειας ( $^{\circ}C$ )

$T_o$  = η θερμοκρασία στην άλλη πλευρά της επιφάνειας ( $^{\circ}C$ )

$R$  = η ολική θερμική αντίσταση ( $m^2 \text{ }^{\circ}C/W$ )

# Ισοζύγιο Ενέργειας - Άσκηση

- Ένα διαμέρισμα βρίσκεται σε περιοχή όπου για 8 μήνες το έτος επικρατούν χαμηλές θερμοκρασίες ( $40^{\circ}\text{F}$ ), με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η λειτουργία του καλοριφέρ, ώστε να διατηρείται θερμοκρασία ίση με  $70^{\circ}\text{F}$  εντός του διαμερίσματος. Προτείνεται στον ιδιοκτήτη να ξοδέψει 1000 Ευρώ για να βελτιώσει τη μόνωση της οροφής, αυξάνοντας την ολική θερμική αντίστασή της από 11 σε  $40\text{ ft}^2\text{ }^{\circ}\text{F}$  ώρα/Btu. Αν θεωρηθεί ότι η οροφή έχει εμβαδόν  $1500\text{ ft}^2$  και το διαμέρισμα θερμαίνεται με ηλεκτρικό ρεύμα που κοστίζει 0,08 Ευρώ/KWhr, σε πόσα χρόνια θα αποσβεσθεί η επένδυση; Αν υποθεθεί ότι 1.000.000 σπίτια που τροφοδοτούνται ηλεκτρικά από τη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος βελτιώνουν τη μόνωση της οροφής τους, όπου κατά την παραγωγή 1 KWhr ηλεκτρικού ρεύματος εκπέμπονται τελικά 0,14 g τέφρας, 2,8 g  $\text{SO}_2$  και 280 g C. Να εκτιμηθεί η ετήσια μείωση σε εκπομπές  $\text{SO}_2$ , σωματιδίων και C.

$$1\text{ Btu}=0.0002931\text{ kWh}$$

$$q = \frac{A(T_i - T_o)}{R}$$

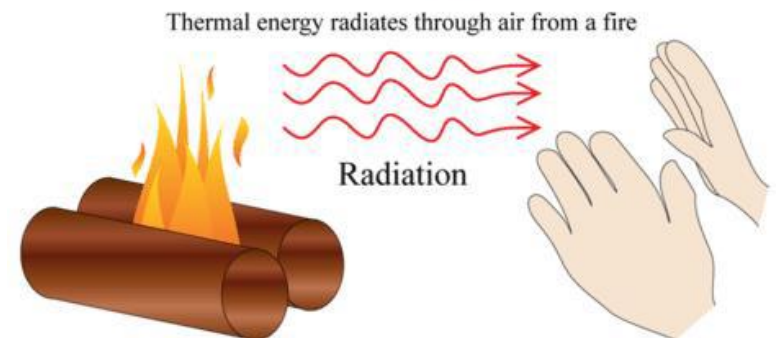
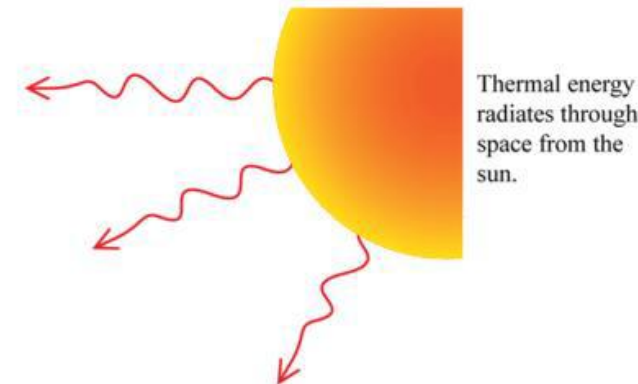
# Ισοζύγιο Ενέργειας

Μεταφορά θερμότητας *μέσω ακτινοβολίας*

Ο πιο διαδεδομένος τρόπος για να περιγραφεί το ποσό της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από ένα αντικείμενο είναι να συγκριθεί με το ποσό της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από ένα *μέλαν σώμα*.

Με τον όρο αυτό χαρακτηρίζεται ένα αντικείμενο που λειτουργεί ως τέλειος πομπός και δέκτης ενέργειας.

- Τέλειος **πομπός**, ακτινοβολεί περισσότερη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας από κάθε άλλο αντικείμενο της ίδιας θερμοκρασίας.
- Τέλειος **δέκτης** απορροφά όλη την ακτινοβολία που καταλήγει σε αυτό.



# Ισοζύγιο Ενέργειας

Μεταφορά θερμότητας *μέσω ακτινοβολίας*

Για τον υπολογισμό της μέγιστης ενέργειας εκπομπής από μέλαν σώμα χρησιμοποιείται ο νόμος των Stefan – Boltzmann:

$$E_{\max} = \sigma A T^4$$

Όπου:

$E_{\max}$  = ο μέγιστος ρυθμός εκπομπής ενός μέλαν σώματος (W)

$\sigma$  = η σταθερά Stefan – Boltzmann =  $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$

$T$  = η απόλυτη θερμοκρασία του αντικειμένου (K)

$A$  = η επιφάνεια του αντικειμένου ( $\text{m}^2$ )

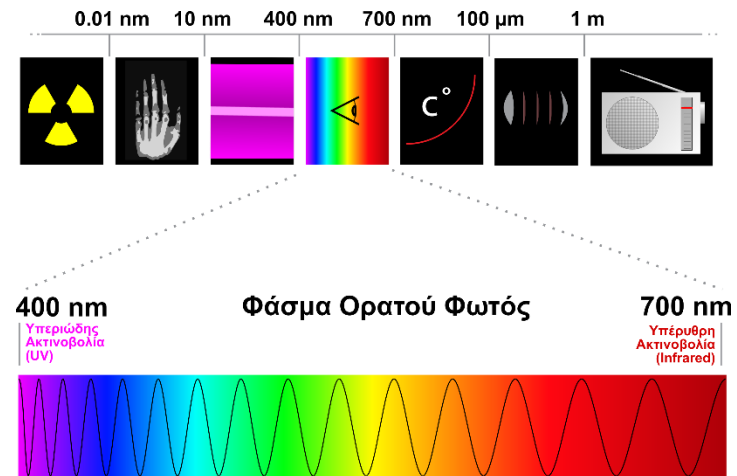
Για τον υπολογισμό του μήκους κύματος,  $\lambda_{\max}$  όπου παρατηρείται η μέγιστη εκπομπή ενός μέλαν σώματος χρησιμοποιείται ο κανόνας του Wien.

Στη συγκεκριμένη εξίσωση το μήκος κύματος υπολογίζεται σε  $\mu\text{m}$  και η θερμοκρασία σε Kelvin.

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T}$$

# Ισοζύγιο Ενέργειας - Άσκηση

- Θεωρείστε τη γη ως μέλαν σώμα με μέση θερμοκρασία  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  και εμβαδόν  $5,1 \times 10^{14}\text{ m}^2$ . Να βρεθεί ο ρυθμός με τον οποίο εκπέμπεται ενέργεια από τη γη και το μήκος κύματος στο οποίο ακτινοβολείτε η μέγιστη ποσότητα ενέργειας. Συγκρίνετε το συγκεκριμένο μήκος κύματος με το μήκος κύματος που εκπέμπεται η μέγιστη ακτινοβολία από τον ήλιο (θερμοκρασία ηλίου,  $5800\text{ K}$ ).



$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T} \quad E_{\max} = \sigma A T^4$$

$\sigma = 5,67 \times 10^{-8}\text{ W/m}^2\text{ K}^4$

# Ισοζύγιο Ενέργειας - Άσκηση

- Υποθέστε ότι ένα ανθρώπινο σώμα έχει συνολική επιφάνεια  $1,35 \text{ m}^2$ , μέση θερμοκρασία  $36,6 \text{ }^\circ\text{C}$  και βρίσκεται σε δωμάτιο που έχει θερμοκρασία  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ . Θεωρώντας το ανθρώπινο σώμα ως μέλαν σώμα, να βρεθεί η καθαρή απώλεια θερμότητας από ακτινοβολία (σε Watt).

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T} \quad E_{\max} = \sigma A T^4$$
$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$$

# Ισοζύγιο Ενέργειας - Άσκηση

- Σε έναν ηλιακό συλλέκτη με εμβαδόν επιφάνειας  $32 \text{ ft}^2$ , ρέει νερό με παροχή  $1 \text{ gal/min}$ , ενώ προσπίπτει ηλιακή ακτινοβολία έντασης  $300 \text{ Btu/ft}^2 \cdot \text{h}$ . Το 50% της ηλιακής ακτινοβολίας δεσμεύεται στο συλλέκτη και θερμαίνει το νερό που ρέει μέσα σε αυτόν. Ποια θα είναι η αύξηση της θερμοκρασίας του νερού που εξέρχεται από το συλλέκτη.

Δίνεται ότι  $1 \text{ gal}$  νερού έχει μάζα ίση με  $8,34 \text{ lb}$  και  $c_{\text{νερού}} = 1 \text{ Btu/lb} \cdot ^\circ\text{F}$

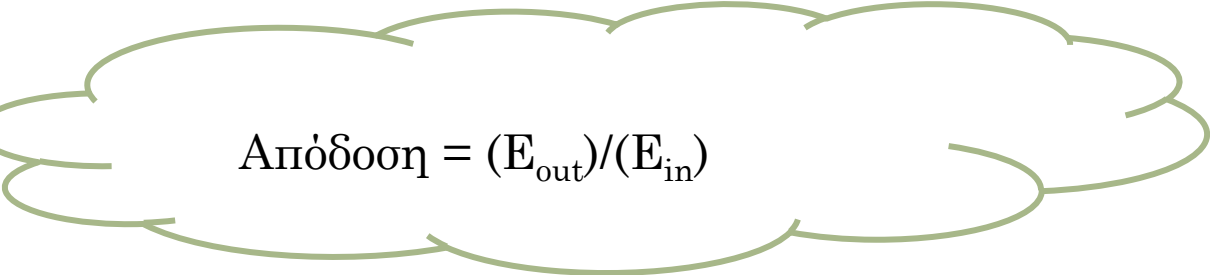
$$\Delta^\circ E_{\text{εσωτ}} = m^\circ c \Delta T \quad \text{Ισχύς} = (\text{Ένταση}) \times (\text{Εμβαδόν})$$

$$^\circ\text{F} = 1,8^\circ\text{C} + 32$$

# Ισοζύγιο Ενέργειας - Άσκηση

---

- Ένας ατμοηλεκτρικός σταθμός χρησιμοποιεί 1000 Mg κάρβουνου την ημέρα. Το ενεργειακό περιεχόμενο του κάρβουνου είναι 28000 KJ/Kg. Αν ο σταθμός παράγει  $2.8 \cdot 10^6$  KWh ηλεκτρικής ενέργειας την ημέρα, ποια είναι η απόδοσή του?


$$\text{Απόδοση} = (E_{\text{out}})/(E_{\text{in}})$$

# Ισοζύγιο Μάζας - Άσκηση

- Θεωρείστε τη λίμνη του προηγούμενου παραδείγματος ( $V=10 \times 10^6 \text{ m}^3$ ), στην οποία βρέθηκε ότι η συγκέντρωση του ρύπου σε σταθερές συνθήκες ισούται με  $3,5 \text{ mg/l}$ . Ο ρύπος θεωρείται μετατρέψιμος με  $K=0,2/\text{ημέρα}$ . Επειδή η συγκεκριμένη συγκέντρωση του ρύπου θεωρείται πολύ υψηλή αποφασίζεται να διακοπεί η απόρριψη λυμάτων σε αυτόν. Ως αποτέλεσμα στη λίμνη πλέον καταλήγει μόνο ο χείμαρρος που έχει παροχή ίση με  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  και συγκέντρωση του ρύπου ίση με  $10 \text{ mg/l}$ . Θεωρώντας συνθήκες πλήρους μίξης να βρεθεί η συγκέντρωση του ρύπου στη λίμνη μία εβδομάδα μετά τη διακοπή απόρριψης των λυμάτων.

$$(Q \times C_{in}) = (Q \times C) + \left( V \times \frac{dC}{dt} \right) + (K \times C \times V)$$

$$C_t = C_\infty + (C_0 - C_\infty) e^{-(K+Q/V)t}$$

Εισροές = Εκροές + Συσσωρεύσεις + Μετατροπές

$$C_\infty = \frac{(Q \times C_{in})}{(Q + KV)}$$

# Ισοζύγιο Μάζας - Άσκηση

- Δεξαμενή όγκου  $1200 \text{ m}^3$  δέχεται συνεχώς απόβλητα με παροχή  $100 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$ . Στα απόβλητα υπάρχει ρύπος που θεωρείται μη μετατρέψιμο χημικό είδος και έχει συγκέντρωση  $10 \text{ mg/l}$ . Θεωρώντας ότι το σύστημα έχει φτάσει σε κατάσταση ισορροπίας και σε αυτό επικρατούν συνθήκες πλήρους μίξης να υπολογιστεί η συγκέντρωση του ρύπου στα εξερχόμενα απόβλητα. Αν η συγκέντρωση του ρύπου στα εισερχόμενα απόβλητα αυξηθεί στα  $100 \text{ mg/l}$ , ποια θα είναι η συγκέντρωσή του στην έξοδο της δεξαμενής 7 ημέρες αργότερα; Αν ο ρύπος θεωρηθεί μετατρέψιμο χημικό είδος με  $K=0,2/\text{ημέρα}$ , ποια θα είναι η συγκέντρωσή του στην έξοδο της δεξαμενής 7 ημέρες αργότερα;

$$C_t = C_\infty + (C_0 - C_\infty) e^{-(K+Q/V)t}$$

$$(Q \times C_{in}) = (Q \times C) + \left( V \times \frac{dC}{dt} \right) + (K \times C \times V)$$

Εισροές = Εκροές + Συσσωρεύσεις + Μετατροπές

$$C_\infty = \frac{(Q \times C_{in})}{(Q + KV)}$$