



Μηχανική Περιβάλλοντος

Ενότητα 6: Διαχείριση Υδατικών Πόρων II

Δρ. Ελένη Γκριλλα
Μηχανικός Περιβάλλοντος

e-mail. elen.grilla@gmail.com

Χημικά Χαρακτηριστικά – Οργανικά Συστατικά

Στα απόβλητα περίπου το 75% αποτελείται από οργανικές ουσίες, σε μορφή αιωρούμενων σωματιδίων που προέρχονται από φυτά, ζώα και ανθρώπινες δραστηριότητες.

Οι οργανικές ουσίες αποτελούνται συνήθως από άνθρακα, υδρογόνο, οξυγόνο και άζωτο, αλλά και άλλα σημαντικά στοιχεία όπως θείο, φώσφορος και σίδηρος.

- Για τη **μέτρηση του οργανικού φορτίου** χρησιμοποιείται η ποσότητα του οξυγόνου που απαιτείται για να οξειδώσει πλήρως τα οργανικά συστατικά του.

Χημικά Χαρακτηριστικά – Οργανικά Συστατικά

Η απαιτούμενη ποσότητα οξυγόνου εκφράζεται με τις παρακάτω παραμέτρους οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν ως δείκτες για τη ποσότητα των οργανικών ουσιών που υπάρχουν στο νερό:

- Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (BOD)
- Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (COD)
- Θεωρητικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (Thod)
- Συνολικός Οργανικός Άνθρακας (TOC)

-
- Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (BOD)

Η ποσότητα οξυγόνου που απαιτείται για την οξείδωση των οργανικών συστατικών ενός αποβλήτου από μικροοργανισμούς σε αερόβιες συνθήκες.

Χημικά Χαρακτηριστικά – Οργανικά Συστατικά

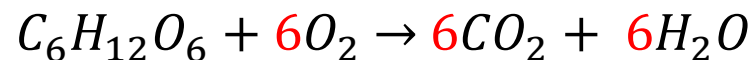
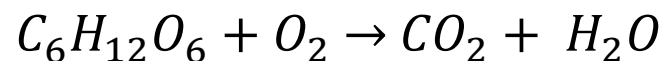
➤ Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (COD)

Η ποσότητα οξυγόνου που απαιτείται για η πλήρη χημική οξείδωση των οργανικών συστατικών ενός αποβλήτου σε CO₂ και H₂O από ισχυρό οξειδωτικό μέσο (διχρωμικό κάλιο ή υπερμαγγανικό κάλιο) και σε όξινες συνθήκες.

Οξειδώνονται όλες οι οργανικές ουσίες, ανεξάρτητα αν είναι βιολογικά διασπάσιμες ή όχι.

➤ Θεωρητικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (Thod)

Η ποσότητα οξυγόνου που απαιτείται θεωρητικά για την οξείδωση κάποιας οργανικής ουσίας και υπολογίζεται από το μοριακό τύπο της ουσίας αυτής.



Χημικά Χαρακτηριστικά – Οργανικά Συστατικά

➤ Συνολικός Οργανικός Άνθρακας (TOC)

Η ποσότητα άνθρακα που βασίζεται στην μέτρηση του CO_2 που παράγεται κατά τη πλήρη οξείδωση του άνθρακα των οργανικών ουσιών σε υψηλή θερμοκρασία παρουσία καταλύτη.

➤ Λόγος BOD/COD

Ο λόγος BOD/COD βοηθάει να δοθεί μια εικόνα για το οργανικό φορτίο των αποβλήτων. Ο λόγος αυτός κυμαίνεται από 0.3-0.8 για αστικά υγρά απόβλητα.

- > 0.5 → εύκολα βιοαποδομήσιμα (καλά για βιολογικό καθαρισμό)
- $0.3 - 0.5$ → μέτρια βιοαποδομήσιμα
- < 0.3 → δύσκολα βιοαποδομήσιμα (πιθανώς βιομηχανικά ή τοξικά συστατικά στα απόβλητα)

Θρεπτικά

Ως **θρεπτικά** ορίζονται οι ενώσεις που έχουν ως βάση στοιχεία όπως το άζωτο, τον φώσφορο, το ασβέστιο, το νάτριο, το μαγνήσιο και το θείο και τα οποία είναι βασικά για την ανάπτυξη των ζωντανών οργανισμών.

Οι συγκεκριμένες ενώσεις θεωρούνται ρυπαντές σε περιπτώσεις που οι συγκεντρώσεις τους είναι τέτοιες που ευνοούν την υπερανάπτυξη των υδρόβιων φυτών και κυρίως των αλγών.

Κατά την αποσύνθεση των αλγών καταναλώνονται μεγάλες ποσότητες οξυγόνου, με συνέπεια τη σταδιακή μείωση των επιπέδων του οξυγόνου στο νερό, καθιστώντας το ανεπαρκές για τη διατήρηση των υπολοίπων μορφών ζωής (*ευτροφισμός*).

Η αυξημένη συγκέντρωση αλγών και αποσυντιθέμενου οργανικού υλικού συντελεί στο χρωματισμό των νερών και στη δημιουργία οσμών και γεύσεων καθιστώντας το ακατάλληλο για αστική χρήση.

Θρεπτικά

Μεγαλύτερο ενδιαφέρον από τα παραπάνω στοιχεία παρουσιάζουν το **άζωτο** και ο **φώσφορος**.

Οι κυριότερες ανθρωπογενείς πηγές αζώτου και φωσφόρου στα νερά είναι τα αστικά λύματα, οι ζωοτροφές και τα χημικά λιπάσματα.

Η οξείδωση των ενώσεων του αζώτου συμβάλλει στην αύξηση της απαιτούμενης ποσότητας οξυγόνου. Συγκεκριμένα, οι οργανικές μορφές του αζώτου μετατρέπονται σε αμμωνία από τα βακτήρια και τους μύκητες. Στη συνέχεια, η μικροβιακή οξείδωση της αμμωνίας πραγματοποιείται σε δύο στάδια.

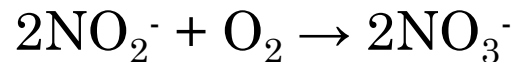
Σε καθένα από αυτά εμπλέκονται διαφορετικά είδη χημιο-αυτότροφων μικροοργανισμών, που χρησιμοποιούν το CO_2 ως πηγή άνθρακα για τη βιοσύνθεση και την οξείδωση των ενώσεων του αζώτου ως πηγή ενέργειας.

Θρεπτικά

Κατά το **πρώτο στάδιο**, που καταλύεται από το γένος *Nitrosomonas*, συντελείται οξείδωση των αμμωνιακών ιόντων σε νιτρώδη.



Κατά το **δεύτερο στάδιο**, που καταλύεται από το γένος *Nitrobacter*, τα νιτρώδη οξειδώνονται σε νιτρικά:



Η παραπάνω μετατροπή της αμμωνίας σε νιτρικά ονομάζεται **νιτροποίηση**.

Η απαίτηση σε οξυγόνο για την πραγματοποίηση της παραπάνω διεργασίας καλείται νιτρογενής απαίτηση σε οξυγόνο (NBOD).

Θρεπτικά – Άσκηση

Αστικά λύματα περιέχουν συγκέντρωση 30 mg/l αζώτου ως NH_3 . Θεωρώντας ότι δεν χρησιμοποιείται άζωτο για την κυτταρική σύνθεση, να βρεθεί η νιτρογενής απαίτηση σε οξυγόνο, NBOD.

Δίνονται τα ατομικά βάρη του αζώτου (ΑΒ:14), του υδρογόνου (ΑΒ:1) και του οξυγόνου (ΑΒ:16).

Διάθεση Λυμάτων σε Ποταμό

Η **συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου (DO)** στο νερό είναι μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους που υποδεικνύουν την κατάσταση του υδάτινου σώματος.

Σε περιπτώσεις που η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου μειώνεται σε επίπεδα μικρότερα των 4 ή 5 mg/l, οι μορφές ζωής που μπορούν να επιβιώσουν ελαττώνονται. Σε ακραίες περιπτώσεις αναερόβιων συνθηκών οι περισσότερες μορφές ζωής εκλείπουν.

Η απλούστερη προσέγγιση για τη μεταβολή της συγκέντρωσης του οξυγόνου στα ποτάμια λαμβάνει υπόψη της δύο κύριες διεργασίες:

- α) τη **μείωση της συγκέντρωσης του DO** από τους μικροοργανισμούς κατά την αποδόμηση των οργανικών ενώσεων και
- β) την **αναπλήρωση του DO** εξαιτίας του επαναερισμού που πραγματοποιείται στη διεπιφάνεια μεταξύ ποταμού και ατμόσφαιρας.

Στο παραπάνω μοντέλο θεωρείται ότι υπάρχει συνεχής διάθεση αποβλήτων σε συγκεκριμένη θέση του ποταμού και η μίξη λυμάτων και νερού είναι πλήρης.

Διάθεση Λυμάτων σε Ποταμό – Αποδόμηση

Η **ταχύτητα αποξυγόνωσης** λόγω αποδόμησης των οργανικών ενώσεων σε κάθε σημείο του ποταμού θεωρείται ότι είναι ανάλογη με την υπολειμματική συγκέντρωση BOD στο συγκεκριμένο σημείο:

$$\text{Ταχύτητα Αποξυγόνωσης} = k_d \times L_t$$

Όπου:

k_d = η σταθερά ταχύτητας αποξυγόνωσης (ημέρες⁻¹)

L_t = η υπολειμματική συγκέντρωση BOD t ημέρες μετά την είσοδο των λυμάτων στον ποταμό (mg/l)

Η σταθερά ταχύτητας αποξυγόνωσης, k_d , συχνά θεωρείται ότι έχει την ίδια τιμή (για τη δεδομένη θερμοκρασία) με τη σταθερά μεταβολής του BOD, k.

Διάθεση Λυμάτων σε Ποταμό – Αναπλήρωση

Η **ταχύτητα αναπλήρωσης του οξυγόνου** θεωρείται ότι είναι ανάλογη της διαφοράς μεταξύ της πραγματικής συγκέντρωσης του οξυγόνου στον ποταμό DO και της τιμής κορεσμού του οξυγόνου για τη δεδομένη θερμοκρασία. Η διαφορά αυτή καλείται έλλειμμα οξυγόνου, D .

$$\text{Ταχύτητα Επαναερισμού} = k_r \times D$$

Όπου:

k_r = σταθερά επαναερισμού στους 20 °C (ημέρες⁻¹)

D = έλλειμμα οξυγόνου = $(DO_{\text{κορεσμού}} - DO)$

$DO_{\text{κορεσμού}}$ = η συγκέντρωση κορεσμού του διαλυμένου οξυγόνου για τη συγκεκριμένη θερμοκρασία

DO = η πραγματική συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στη δεδομένη θέση του ποταμού

Διάθεση Λυμάτων σε Ποταμό – Αναπλήρωση

Η συγκέντρωση κορεσμού του διαλυμένου οξυγόνου στο νερό εξαρτάται από τη **θερμοκρασία**, την **ατμοσφαιρική πίεση** και την **αλατότητα**. Η μεταβολή της διαλυτότητας του οξυγόνου στο νερό σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία δίνεται στον Πίνακα.

Η σταθερά επαναερισμού, k_r , επηρεάζεται από διάφορες παραμέτρους όπως την ταχύτητα ροής του ποταμού και το βάθος του.

Θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$)	Διαλυμένο Οξυγόνο (mg/l)
0	14,62
5	12,77
10	11,29
15	10,08
20	9,1
25	8,26
30	7,56

Διάθεση Λυμάτων σε Ποταμό

Μία εμπειρική εξίσωση για τον υπολογισμό της σταθεράς επαναερισμού:

$$k_r = \frac{(3,9 \times u^{1/2})}{H^{3/2}}$$

Όπου:

k_r = η σταθερά επαναερισμού στους 20 °C (ημέρες⁻¹)

u = η μέση ταχύτητα του ποταμού (m/s)

H = το μέσο βάθος του ποταμού (m)

Η **αποξυγόνωση** που προκαλείται από τη μικροβιακή αποδόμηση των οργανικών αποβλήτων και η **οξυγόνωση** λόγω επαναερισμού είναι **ανταγωνιστικές διεργασίες** που ταυτόχρονα απομακρύνουν και προσθέτουν οξυγόνο σε ένα υδάτινο ρεύμα.

Η **ταχύτητα αύξησης του ελλείμματος οξυγόνου** υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\text{Ταχύτητα Αύξησης Ελλείμματος } O_2 = \text{Ταχύτητα Αποξυγόνωσης} - \text{Ταχύτητα Επαναερισμού}$$

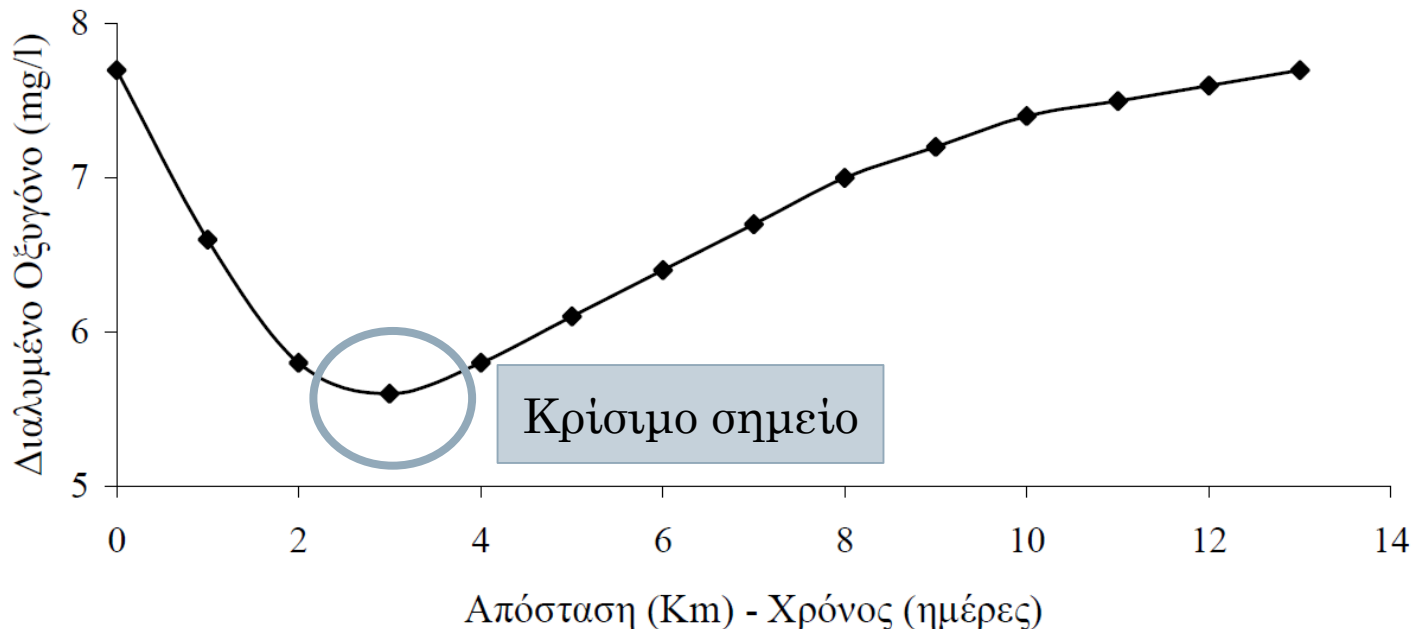
Διάθεση Λυμάτων σε Ποταμό

Ταχύτητα Αύξησης Ελλείμματος O_2 = Ταχύτητα Αποξυγόνωσης –
Ταχύτητα Επαναερισμού

$$\frac{dD}{dt} = (k_d \times L_0 e^{-k_d \times t}) - (k_r \times D)$$

$$D = \frac{(k_d \times L_0) \times (e^{-k_d \times t} - e^{-k_r \times t})}{(k_r - k_d)} + D_0 e^{-k_r \times t}$$

Εξίσωση Streeter-Phelps



Διάθεση Λυμάτων σε Ποταμό – Αναπλήρωση

Διαφορίζοντας την εξίσωση Streeter-Phelps και θέτοντάς την ίση με το μηδέν, υπολογίζεται ο κρίσιμος χρόνος, t_c , στον οποίο θα παρατηρηθεί το μέγιστο έλλειμμα διαλυμένου οξυγόνου.

$$t_c = \frac{1}{k_r - k_d} \ln \left\{ \frac{k_r}{k_d} \left[1 - \frac{D_0(k_r - k_d)}{k_d L_0} \right] \right\}$$

Στο **κρίσιμο σημείο** η ταχύτητα απομάκρυνσης διαλυμένου οξυγόνου ισούται με την ταχύτητα προσθήκης του.

Πέρα από αυτό το σημείο, η συγκέντρωση του οργανικού φορτίου έχει μειωθεί τόσο, ώστε το οξυγόνο να προστίθεται στο νερό (λόγω επαναερισμού) με ρυθμό ταχύτερο από ότι απομακρύνεται (λόγω βιοαποδόμησης) και ως συνέπεια η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου αυξάνει.

Διάθεση Λυμάτων σε Ποτάμι – Άσκηση

Τα επεξεργασμένα λύματα μιας μονάδας επεξεργασίας αστικών λυμάτων εκβάλλουν σε ένα ποτάμι. Το ολικό τελικό BOD του ποταμού αμέσως μετά την ανάμιξη των λυμάτων είναι 10 mg/L και το διαλυμένο οξυγόνο 7 mg/L. Να υπολογιστεί το διαλυμένο οξυγόνο στο ποτάμι μετά από 1 ημέρα, ο χρόνος στον οποίο θα παρατηρηθεί η ελάχιστη συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου και η ελάχιστη τιμή διαλυμένου οξυγόνου στο ποτάμι.

Δίνονται: $k_d = 0.1 \text{ d}^{-1}$, $k_r = 0.3 \text{ d}^{-1}$, διαλυμένο οξυγόνο κορεσμού $DO_s = 9 \text{ mg/L}$

$$t_c = \frac{1}{k_r - k_d} \ln \left\{ \frac{k_r}{k_d} \left[1 - \frac{D_0(k_r - k_d)}{k_d L_0} \right] \right\}$$

$$D = \frac{(k_d \times L_0) \times (e^{-k_d \times t} - e^{-k_r \times t})}{(k_r - k_d)} + D_0 e^{-k_r \times t}$$

Ισοδύναμο Πληθυσμού

Ο όρος ισοδύναμο πληθυσμού είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται για να αντιστοιχίσουμε το οργανικό φορτίο που παράγεται από μια πηγή ρύπων με τον αριθμό των ατόμων που θα παράγαν και θα διέθεταν στο δίκτυο την ίδια ποσότητα οργανικού φορτίου.

- Η μέση τιμή του BOD_5 για κάθε άτομο εκτιμάται περίπου για την Ευρώπη σε $BOD_5 = 54 \text{ g/άτ. ημ.}$
- Για την Αμερική προτείνεται η τιμή 60 g/άτ. ημ.
- Με βάση την άνοδο του βιοτικού επιπέδου και τις καταναλωτικές συνήθειες που επικρατούν, χρησιμοποιείται για την Ελλάδα η τιμή **60 g/άτ. ημ.**
- Αν διαιρεθεί το συνολικό ημερήσιο BOD_5 μιας πηγής ρύπανσης με το ποσό που αντιστοιχεί στο άτομο, προκύπτει το **πληθυσμιακό ισοδύναμο** της πηγής από άποψη οργανικού φορτίου.

Ισοδύναμο Πληθυσμού – Ασκήσεις

1. Να βρεθεί το πληθυσμιακό ισοδύναμο βιομηχανίας που παράγει απόβλητα $50 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$ με BOD_5 ίσο προς 1200 mg/L .

Λύση

Το συνολικό BOD_5 που παράγει η βιομηχανία σε μια ημέρα ισούται με $1200 \text{ mg/L} \times 50 \times 10^3 \text{ L} = 60 \times 10^6 \text{ mg/ημ} = 60000 \text{ g/ημ}$.

Αν διαιρέσω με την μέση τιμή του BOD_5 για κάθε άτομο που εκτιμάται ότι είναι περίπου 60 g/άτ. ημ , δίνει πληθυσμιακό ισοδύναμο 1000 άτομα .

2. Σε μια πόλη 20000 κατοίκων να υπολογιστεί το BOD_5 στην εισροή της Μονάδας Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων. Στη πόλη αυτή η μέση ημερήσια κατανάλωση νερού είναι στα 200 L/άτ. ημ .

Ισοδύναμο Πληθυσμού

Η έννοια του πληθυσμιακού ισοδύναμου είναι πολύ σημαντική για τη διαστασιολόγηση των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ). Για τον υπολογισμό του ισοδύναμου πληθυσμού πρέπει να λάβουμε υπόψη τα παρακάτω:

- Αν υπάρχει επεξεργασία από υγρά απόβλητα που προέρχονται από βιομηχανίες, πρέπει να υπολογίσουμε και αυτά που αυξάνουν τη παροχή αλλά και το οργανικό φορτίο στην ΕΕΛ.
- Για να διαστασιολογήσουμε τις δεξαμενές της ΕΕΛ πρέπει να υπολογίσουμε όχι μόνο το σημερινό πληθυσμό της περιοχής, αλλά και το πληθυσμό μετά από 20-30 χρόνια.
- Η Μονάδα Επεξεργασίας Λυμάτων πρέπει να έχει διαστασιολογηθεί ώστε να υποδέχεται τα λύματα κατά τη περίοδο του χρόνου που ο πληθυσμός έχει τη μέγιστη τιμή.

Διάθεση Λυμάτων σε Ποταμό – Άσκηση

Μονάδα επεξεργασίας υγρών αστικών αποβλήτων απορρίπτει επεξεργασμένα λύματα συγκέντρωσης 50 mg/l ως BOD και παροχής $1,1 \text{ m}^3/\text{s}$ σε χειμάρρο. Η παροχή του χειμάρρου και η συγκέντρωση του BOD ανάντη του σημείου εκβολής είναι $8,7 \text{ m}^3/\text{s}$ και 6 mg/l , αντίστοιχα. Θεωρώντας ότι πραγματοποιείται πλήρης και άμεση μίξη νερού και λυμάτων (δεν υπάρχει μετατροπή του ρύπου) να υπολογιστεί η συγκέντρωση του BOD στο σημείο εκβολής. Αν η ταχύτητα του χειμάρρου είναι σταθερή και ίση με $0,3 \text{ m/s}$ να υπολογιστεί το υπολειμματικό BOD σε μία απόσταση 3000 m από το σημείο εκβολής των λυμάτων. Να θεωρηθεί ότι η σταθερά k , ισούται με $0,2 \text{ d}^{-1}$.