



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΕΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Τμήμα Χημικών Μηχανικών

ΑΝΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΥΔΑΤΙΝΩΝ
ΑΠΟΔΕΚΤΩΝ ΣΤΗΝ ΟΡΓΑΝΙΚΗ
ΡΥΠΑΝΣΗ

ΒΛΥΣΙΔΗΣ ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ
Αναπληρωτής Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ 2000

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι απαιτήσεις για επεξεργασία ενός αποβλήτου εξαρτάται από την ικανότητα αυτοκαθαρισμού του αποδέκτη όπου εκρέει. Η ικανότητα αυτοκαθαρισμού ενός αποδέκτη εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως την θερμοκρασία, το οικοσύστημα που έχει αναπτυχθεί στη περιοχή, τα χαρακτηριστικά της ροής κ.ά. Επομένως για κάθε αποδέκτη πρέπει να υπάρχουν κατάλληλοι σταθμοί που θα μετρούν συνεχώς την ικανότητα αυτοκαθαρισμού του και θα υπολογίζουν θεωρητικά τα επιτρεπτά όρια συγκεντρώσεων των ρυπαντών και έτσι θα καθορίζεται η απαιτούμενη απορρύπανση των βιομηχανικών και αστικών αποβλήτων καθώς και οι μέθοδοι απορρύπανσης που πρέπει να εφαρμοστούν.

Η διατήρηση υψηλών συγκεντρώσεων οξυγόνου σ' έναν υδάτινο αποδέκτη αποτελεί προϋπόθεση για την επιβίωση ανώτερων μορφών ζωής και επομένως διατήρησης υψηλού βαθμού βιοποικιλίας του οικοσυστήματος. Οι περισσότερες κατηγορίες ψαριών χρειάζονται τουλάχιστον 5 mg/l συγκέντρωση οξυγόνου στο υδάτινο οικοσύστημα για να μπορούν να επιβιώνουν (πίνακας 1). Αυτή η συγκέντρωση στη θερμοκρασία 20-21 °C αντιστοιχεί περίπου στο 56% της συγκέντρωσης κορεσμού (πίνακας 2).

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. Παραδείγματα οριακών συγκεντρώσεων οξυγόνου για την επιβίωση υδάτινων οργανισμών (Poole et al., 1978)

Οργανισμοί	Θερμοκρασί α °C	Συγκέντρωση οξυγόνου mg/l
Πέστροφα brown	6 - 24	1.3 – 2.9
Σολομός Coho	16 - 24	1.3 – 2.0
Πέστροφα rainbow	11 - 20	1.1 – 3.7
Σκουλήκια : Nereis grubei και Capitella capitata	22 - 26	1.5 – 3.0
Αμφίποδα : Hygllella azteca	-	0.7

Η μέθοδος προσδιορισμού της ικανότητας αυτοκαθαρισμού ενός υδάτινου αποδέκτη ,που εφαρμόζεται παγκοσμίως εδώ και 60 χρόνια, είναι η μέθοδος των Streeter-Phelps ή η απλοποιημένη μορφή της του Thomas. Τα τελευταία χρόνια εφαρμόζεται με αρκετή επιτυχία η μέθοδος του Churchill που βασίζεται στην θεωρία των Time Series Analysis και χρησιμοποιεί δεδομένα χρονοσειρών παροχής, θερμοκρασίας ,BOD και διαλυμένου οξυγόνου για να προβλεψει την μεταβολή τους στο μέλλον μέσω γραμμικών πολυονυμικών μαθηματικών μοντέλων.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2: Συγκέντρωση κορεσμού οξυγόνου (mg/l), σε καθαρό νερό, σε υφάλμυρο νερό και σε νερό θαλάσσης σε σχέση με τη θερμοκρασία και την περιεκτικότητα σε χλωριόντα.

οC	0 %	0.2 %	0.4 %	0.6 %	0.8 %	1.0 %	1.2 %	1.4 %	1.6 %	1.8 %	2.0 %
1	14.24	13.87	13.54	13.22	12.91	12.58	12.29	11.99	11.70	11.42	11.15
2	13.74	13.50	13.18	12.88	12.56	12.26	11.98	11.69	11.40	11.13	10.86
3	13.45	13.14	12.84	12.55	12.25	11.69	11.68	11.39	11.12	10.85	10.59
4	13.09	12.79	12.51	12.22	11.93	11.65	11.38	11.1	10.83	10.59	10.34
5	12.75	12.45	12.17	11.91	11.63	11.36	11.09	10.83	10.57	10.33	10.10
6	12.44	12.15	11.86	11.60	11.33	11.07	10.82	10.56	10.32	10.09	9.86
7	12.13	11.85	11.58	11.32	11.06	10.82	10.56	10.32	10.07	9.84	9.63
8	11.85	11.56	11.29	11.05	10.80	10.56	10.32	10.07	9.84	9.61	9.40
9	11.56	11.29	11.02	10.77	10.54	10.30	10.08	9.84	9.61	9.40	9.20
10	11.29	11.03	10.77	10.53	10.30	10.07	9.84	9.61	9.40	9.20	9.00
11	11.05	10.77	10.53	10.29	10.06	9.84	9.63	9.41	9.20	9.00	8.80
12	10.80	10.53	10.29	10.06	9.84	9.63	9.41	9.21	9.00	8.80	8.61
13	10.56	10.30	10.07	9.84	9.63	9.41	9.21	9.01	9.81	8.61	8.42
14	10.33	10.07	9.86	9.63	9.41	9.21	9.01	8.81	8.62	8.44	8.25
15	10.10	9.86	9.64	9.43	9.23	9.03	8.83	8.64	8.44	8.27	8.09
16	9.89	9.66	9.44	9.24	9.03	8.84	8.64	8.47	8.28	8.11	7.94
17	9.67	9.46	9.26	9.05	8.85	8.65	8.47	8.30	8.11	7.94	7.78
18	9.47	9.27	9.07	8.87	8.67	8.48	8.31	8.14	7.97	7.79	7.64
19	9.28	9.08	8.88	8.68	8.50	8.31	8.15	7.98	7.80	7.65	7.49
20	9.11	8.90	8.70	8.51	8.32	8.15	7.99	7.84	7.66	7.51	7.36
21	8.93	8.72	8.54	8.35	8.17	7.99	7.84	7.69	7.52	7.38	7.23
22	8.75	8.55	8.38	8.19	8.02	7.85	7.69	7.54	7.39	7.25	7.11
23	8.60	8.40	8.22	8.04	7.87	7.71	7.65	7.41	7.26	7.12	6.99
24	8.44	8.25	8.07	7.89	7.72	7.56	7.42	7.28	7.13	6.99	6.86
25	8.27	8.09	7.92	7.75	7.58	7.44	7.29	7.15	7.01	6.88	6.85
26	8.12	7.94	7.78	7.62	7.45	7.31	7.16	7.03	6.89	6.86	6.63
27	7.98	7.79	7.64	7.49	7.32	7.18	7.03	6.91	6.78	6.65	6.52
28	7.84	7.65	7.51	7.36	7.19	7.06	6.92	6.79	6.66	6.53	6.40
29	7.69	7.52	7.38	7.23	7.08	6.95	6.82	6.68	6.55	6.42	6.29
30	7.56	7.39	7.25	7.12	6.96	6.83	6.70	6.58	6.45	6.32	6.19

2. ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΟΞΥΓΟΝΟΥ Σ' ΕΝΑ ΠΟΤΑΜΙ

Η συγκέντρωση του οξυγόνου στα νερά ενός ποταμού εξαρτάται από πολλούς παράγοντες που οι σπουδαιότεροι είναι:

α). **Βιοοξείδωση οργανικών ενώσεων:** Από την κατανάλωση των μικροοργανισμών για την βιοαποικοδόμηση των οργανικών ενώσεων. Η κινητική της βιοαποικοδόμησης ακολουθεί την εξίσωση πρώτης τάξεως ως προς την συγκέντρωση των οργανικών :

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 \cdot L \quad [1]$$

$$\int_0^t \frac{dL}{dt} = \int_0^t -K_1 \cdot dt \quad [2]$$

$$\ln \frac{L_t}{L_0} = -K_1 \cdot t \quad [3]$$

όπου : L_t = η συγκέντρωση των οργανικών ενώσεων στη χρονική στιγμή t , (mg/l)

L_0 = αρχική συγκέντρωση των οργανικών ενώσεων, (mg/l)

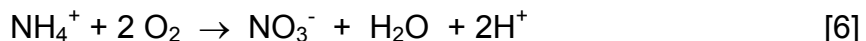
K_1 = σταθερά ρυθμού βιοαποικοδόμησης, (χρόνος⁻¹)

Η συγκέντρωση των οργανικών συνήθως εκφράζεται εμμέσως με το BOD_5 το οποίο αντιπροσωπεύει την κατανάλωση του οξυγόνου κατά την διάρκεια πέντε ημερών από τους μικροοργανισμούς του περιβάλλοντος για την βιοαποικοδόμηση των οργανικών ενώσεων που περικλείονται σε ένα λίτρο του υδάτινου οικοσυστήματος σε θερμοκρασία 20°C. Στις πέντε ημέρες βιοαποικοδομούνται περίπου το 70% των ολικών οργανικών ενώσεων που μπορούν να βιοαποικοδομηθούν επομένως το συνολικό BOD ($BOD_{ultimate}=BOD_u$) δίδεται από την σχέση:

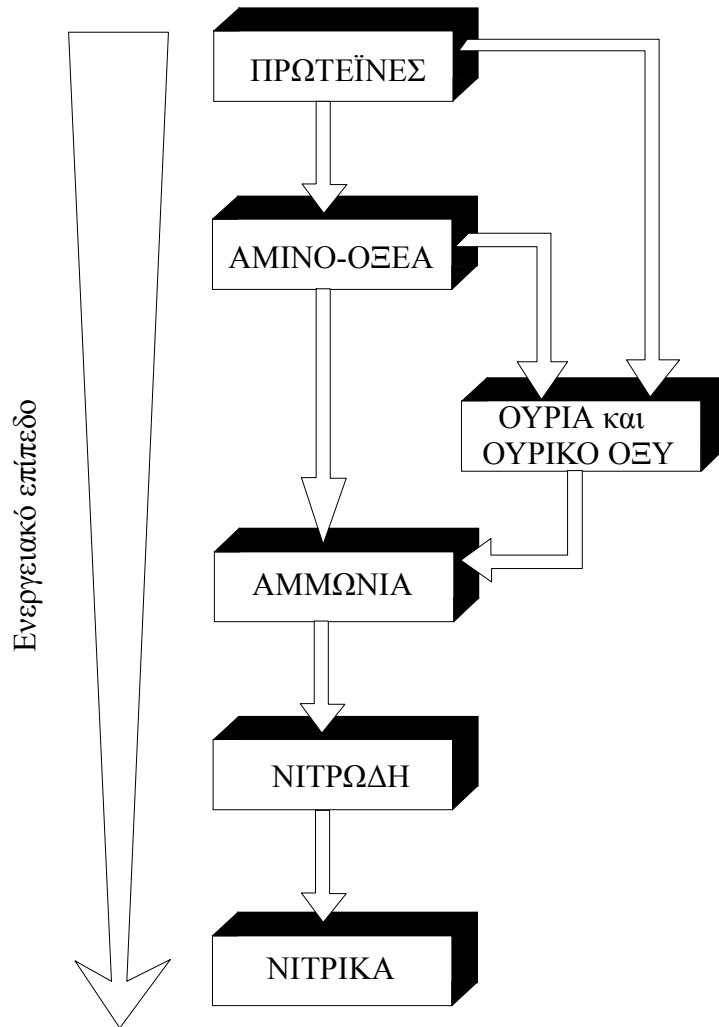
$$BOD_u = 1.46 BOD_5 \quad [5]$$

Το BOD_5 των αστικών λυμάτων είναι συνήθως από 80-250 mg O_2/l , ενώ των επεξεργασμένων λυμάτων μετά από μία πρωτογενή και δευτερογενή επεξεργασία είναι 10-20 mg O_2/l .

β) Νιτροποίηση: Από την κατανάλωση των νιτροβακτηρίων για την βιοαποικοδόμηση του οργανικού αζώτου (άζωτο κατά kjeldahl) σε νιτρικά σύμφωνα με την συνολική βιοαντίδραση:



Η αμμωνία σχηματίζεται από την αποσύνθεση των οργανικών ενώσεων. Πρωτεΐνες και άλλες οργανικές ενώσεις που περιέχουν άζωτο αποσυντίθενται σε απλούστερα οργανικά μόρια όπως είναι τα αμινοξέα τα οποία με την σειρά τους αποσυντίθενται σε αμμωνία. Η ουρία και το ουρικό οξύ που προέρχονται από απόβλητα ζώων επίσης διασπώνται σε αμμωνία. Η αμμωνία κατόπιν χρησιμοποιείται σαν πηγή ενέργειας από τους νιτροποιητικούς μικροοργανισμούς οι οποίοι την μετατρέπουν κατ'αρχή σε νιτρώδη ιόντα και κατόπιν σε νιτρικά. Στο σχήμα 1 φαίνεται παραστατικά η διαδικασία αποσύνθεσης του οργανικού αζώτου καθώς επίσης και η κατεύθυνση υποβιβασμού της ενεργειακής στάθμης των ενδιαμέσων προϊόντων.



Σχήμα 1: Διαδικασία βιοαποικοδόμησης οργανικού αζώτου σε νιτρικά

Η νιτροποίηση του οργανικού αζώτου ακολουθεί επίσης την κινητική πρώτης τάξεως ως προς την συγκέντρωση οργανικού αζώτου :

$$\frac{dN}{dt} = -K_N \cdot N \quad [7]$$

όπου : N_t = η συγκέντρωση οργανικού αζώτου στη χρονική στιγμή t , (mg/l)
 N_o = αρχική συγκέντρωση του οργανικού αζώτου, (mg/l)
 K_N = σταθερά ρυθμού νιτροποίησης, (χρόνος -1)

$$\int_0^t \frac{dN}{dt} = \int_0^t -K_N \cdot dt \quad [8]$$

$$\ln \frac{N_t}{N_o} = -K_N \cdot t \quad [9]$$

$$\text{ή} \quad N_t = N_o \cdot e^{-K_N t} \quad [10]$$

Τα N_t και N_o στις παραπάνω εξισώσεις μπορούν να εκφραστούν σαν καταναλώσεις οξυγόνου που απαιτούνται για την νιτροποίηση του οργανικού αζώτου έτσι ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο ισοζύγιο του οξυγόνου.

Τιμές για μερικές χαρακτηριστικές περιπτώσεις για τα K_1 , K_N , L_o και N_o δίδονται στον πίνακα 3.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3: Χαρακτηριστικές τιμές των K_1 , K_N , L_o και N_o (20 °C)

Περιπτώσεις	K_1 day-1	K_N day-1	L_o mg/l	N_o mg/l
Αστικά λύματα	0.35-0.40	0.15-0.25	80-130	150-250
Αστικά λύματα που έχουν υποστεί πρωτογενή επεξεργασία	0.35	0.10-0.25	70-120	75-150
Αστικά λύματα που έχουν υποστεί δευτερογενή επεξεργασία	0.10-0.25	0.05-0.20	60-120	10-80
Πόσιμο νερό	0.05-0.10	0.05	0-1	0-1
Νερό ποταμού	0.05-0.15	0.05-0.10	0.2	0.5

Η σχέση μεταξύ συγκέντρωσης αμμωνιακού αζώτου και κατανάλωσης οξυγόνου προκύπτει από την στοιχειακή αντίδραση [6] και υπολογίζεται σε 4.6 mg O_2 /mg NH_4^+-N αλλά εξ' αιτίας του ότι ένα ποσοστό του αμμωνιακού αζώτου ενσωματώνεται στην κυτταρική μάζα που παράγεται κατά την νιτροποίηση, στη πράξη, η παραπάνω αντιστοιχία ελαττώνεται σε 4.3 mg O_2 /mg NH_4^+-N .

Τα K_1 και K_N εξαρτώνται από την θερμοκρασία σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$K_1 = K_1^{20^{\circ}C} \cdot 1.05^{(T-20)} \quad [11]$$

$$K_N = K_N^{20^{\circ}C} \cdot (\text{από } 1.06 \text{ έως } 1.08)^{(T-20)} \quad [12]$$

Γ) **Η αραίωση:** Η ικανότητα αραίωσης ενός ποταμού μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας το ισοζύγιο των παροχών σύμφωνα με τη σχέση:

$$L_s \cdot Q_s + L_w \cdot Q_w = L_m \cdot Q_m \quad [13]$$

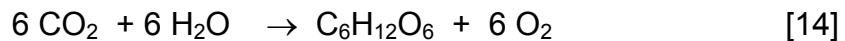
όπου: L = συγκέντρωση, (μάζα/όγκος)

Q = παροχή, (όγκος/χρόνο)
 s = νερό
 w = απόβλητο
 m = μίγμα

δ) **Η καθίζηση αιωρούμενων στερεών:** η καθίζηση είναι μία φυσική μέθοδος απομάκρυνσης αιωρούμενων σωματιδίων από το νερό. Τα μεγαλύτερα σωματίδια και τα βαρύτερα απομακρύνονται γρηγορότερα ενώ τα κολλοειδή συσσωματώματα απομακρύνονται με πολύ αργότερους ρυθμούς.

ε) **Η αναδιασπορά στερεών που έχουν καθιζάνει:** η επαναμεταφορά στερεών που έχουν καθιζάνει από τον πυθμένα σε υδάτινη διασπορά είναι ένα συνηθισμένο φαινόμενο που μπορεί να οφείλεται σε διάφορες φυσικές καταστάσεις όπως είναι οι καταιγίδες, ισχυροί άνεμοι κ.ά.

στ) **Η φωτοσύνθεση:** η φωτοσύνθεση η οποία οφείλεται στα άλγεια και η οποία παράγει οξυγόνο σύμφωνα με την γενική αντίδραση:



ζ) **Η αναπνοή:** απαιτείται οξυγόνο για την αναπνοή όλων των φυτών και των ζώων του οικοσυστήματος του νερού.

η) **Η οξείδωση των ιζημάτων:** το οργανικό περιεχόμενο των ιζημάτων απορροφά οξυγόνο κατά την οξείδωση τους και την παραγωγή αμμωνίας σύμφωνα με τη γενική αντίδραση:



θ) **Η επανα-οξυγόνωση του νερού:** όταν η συγκέντρωση του οξυγόνου είναι μικρότερη από την συγκέντρωση κορεσμού του στην συγκεκριμένη θερμοκρασία (Βλέπε πίνακα και την εξίσωση προσαρμογής) τότε μεταφέρεται οξυγόνο από την ατμόσφαιρα στο νερό. Η ισορροπία μεταξύ συγκέντρωσης οξυγόνου της ατμόσφαιρας και του νερού καθορίζεται από την σχέση του Henry (Henry's law):

$$p_{[\text{O}_2]} = H_{[\text{O}_2]} \cdot x_{[\text{O}_2]} \quad [16]$$

όπου: $p_{[\text{O}_2]}$ = μερική πίεση οξυγόνου στην ατμόσφαιρα, (atm)
 $H_{[\text{O}_2]}$ = σταθερά Henry για το οξυγόνο, (atm)
 $x_{[\text{O}_2]}$ = μοριακό κλάσμα οξυγόνου στο νερό

Η σταθερά Henry εξαρτάται από την θερμοκρασία όπως φαίνεται στον πίνακα 4

Στον πίνακα 5 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις κορεσμού του οξυγόνου στο καθαρό νερό σε συνάρτηση με την θερμοκρασία και τα δεδομένα αυτά προσαρμόζονται ικανοποιητικά ($r=0.995$) στην εξίσωση [17] και η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για υπολογισμούς σε προγράμματα Η/Υ.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4: Η σταθερά Henry για το οξυγόνο σε συνάρτηση με την θερμοκρασία

Σταθερά Henry	Θερμοκρασία, °C						
	0	5	10	15	20	25	30
$\times 10^{-3}$ atm	0.25	0.29	0.33	0.36	0.40	0.44	0.48

ΠΙΝΑΚΑΣ 5: Συγκεντρώσεις κορεσμού οξυγόνου σε καθαρό νερό σε συνάρτηση με την θερμοκρασία

θερμοκρασία °C	Διαλυμένο οξυγόνο mg/l	θερμοκρασία °C	Διαλυμένο οξυγόνο mg/l	θερμοκρασία °C	Διαλυμένο οξυγόνο mg/l
0	14.62	18	9.54	36	7.0
2	13.84	20	9.17	38	6.8
4	13.13	22	8.83	40	6.6
6	12.48	24	8.53	42	6.4
8	11.87	26	8.22	44	6.2
10	11.33	28	7.92	46	6.0
12	10.83	30	7.63	48	5.8
14	10.37	32	7.4	50	5.6
16	9.95	34	7.2		

$$DO_K = 13.71734 \cdot e^{-0.018578 \cdot T} \quad [17]$$

όπου: DO_K = συγκέντρωση κορεσμού του οξυγόνου στο νερό ,mg/l
 T = θερμοκρασία νερού , °C

Η επαναοξυγόνωση του υδάτινου αποδέκτη εξαρτάται από την διαφορά συγκέντρωσης κορεσμού από την συγκέντρωση του οξυγόνου στον αποδέκτη, την θερμοκρασία, την παροχή του νερού και το βάθος του νερού. Η συσχέτιση των παραμέτρων αυτών εκφράζονται με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$K_{a(20)} = \frac{2.26 \cdot u}{R^{2/3}} \quad [18]$$

$$K_{a(T)} = K_{a(20)} \cdot e^{0.024(T-20)} \quad [19]$$

$$R_a = K_a (C_s - C_t) \quad [20]$$

όπου: $K_{a(20)}$ = ρυθμός επανααερισμού στους 20°C, (days⁻¹)
 $K_{a(T)}$ = ρυθμός επανααερισμού στους T°C, (days⁻¹)
 U = ταχύτητα ροής, (m/s)

R = βάθος νερού, (m)
 R_a = ρυθμός μεταφοράς οξυγόνου, (mg/l-day)
 C_s = συγκέντρωση κορεσμού οξυγόνου, (mg/l)
 C_t = συγκέντρωση οξυγόνου στο νερό την χρονική στιγμή t, (mg/l)

Η σχέση [19] ισχύει για $15^\circ\text{C} \leq T \leq 25^\circ\text{C}$

Μία εναλλακτική εξίσωση της [18], επίσης αρκετά ικανοποιητική, δίδεται από την παρακάτω εξίσωση των O'Connor και Dobbins:

$$K_{a(20)} = 649 \cdot \frac{\sqrt{D} \cdot S^{1/4}}{R^{5/4}} \quad [21]$$

όπου: D = συντελεστής μοριακής διάχυσης, (m^2/day)
 S = κλίση εδάφους, (m/m)

Όλες οι παραπάνω διεργασίες εμπλουτισμού και κατανάλωσης οξυγόνου σ' έναν υδάτινο αποδέκτη συνδυαζόμενες μαζί αποδίδονται στη παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{dC_t}{dt} = P - R - K_1 \cdot L_t - K_N \cdot N_t + K_a(C_s - C_t) - S \quad [22]$$

όπου: P = η παραγωγή του οξυγόνου από την φωτοσύνθεση.
 R = η κατανάλωση του οξυγόνου από την αναπνοή των ζωντανών οργανισμών του υδάτινου οικοσυστήματος
 S = η κατανάλωση του οξυγόνου από την αποσύνθεση των ιζημάτων

Ο προσδιορισμός των παραμέτρων της εξίσωσης [22] είναι δύσκολη. Μπορούμε να ακολουθήσουμε την παρακάτω μεθοδολογία:

Κατά μήκος της ροής ενός ποταμού τοποθετούνται δύο σταθμοί μέτρησης του διαλυμένου οξυγόνου. Αν η μεταξύ τους απόσταση είναι μικρή τότε μπορούμε να αγνοήσουμε την κατανάλωση οξυγόνου τόσο από την βιολογική αποικοδόμηση των οργανικών ενώσεων όσο και από την νιτροποίηση καθώς και από την αποσύνθεση των ιζημάτων. Έτσι η εξίσωση [22] απλοποιείται στην παρακάτω σχέση:

$$\frac{dC_t}{dt} = P - R + K_a(C_s - C_t) \quad [23]$$

$$\text{ή} \quad \frac{\Delta C_t}{\Delta t} = \frac{C_2 - C_1}{t_2 - t_1} = \bar{P} - \bar{R} + K_a(\bar{C}_s - \bar{C}_t) \quad [24]$$

όπου: $\bar{P}, \bar{R}, (\bar{C}_s - \bar{C}_t)$ = οι μέσες τιμές μέτρησης των P, R και ($C_s - C_t$) αντίστοιχα και

$t_2 - t_1$ = ο χρόνος ροής του νερού μεταξύ των δύο σταθμών

Αν οι μετρήσεις γίνονται κατά τη διάρκεια της νύχτας τότε μπορεί να απαλειφθεί και η παραγωγή οξυγόνου από την φωτοσύνθεση και έτσι η εξίσωση [24] μπορεί να απλοποιηθεί :

$$\frac{\Delta C_t}{\Delta t} = \frac{C_2 - C_1}{t_2 - t_1} = K_a (\bar{C}_s - \bar{C}_t) - \bar{R} \quad [25]$$

Έτσι από την στατιστική ανάλυση μιας σειράς μετρήσεων διαλυμένου οξυγόνου στους δύο σταθμούς κατά την διάρκεια ενός εικοσιτετραώρου μπορούν να εκτιμηθούν οι τιμές των P, R και K_a .

Αρκετές άλλες εναλλακτικές εξισώσεις των [18] και [21] υπολογισμού του $K_{a(20)}$ έχουν κατά καιρούς παρουσιαστεί προσπαθώντας να γίνει μία περισσότερο εμπειριστατωμένη ανάλυση των μηχανισμών μεταφοράς οξυγόνου (Gromiec, 1983). Όμως τα μαθηματικά αυτά μοντέλα διαθέτουν πλήθος εμπειρικών και φυσικοχημικών σταθερών που είναι δύσκολο να προσδιοριστούν αξιόπιστα στη πράξη ώστε αυτά να καταστούν εφαρμόσιμα.

Από το 1940 οι Streeter και Phelps πρότειναν ένα πολύ απλό μοντέλο το οποίο περιλαμβάνει μόνο δύο διεργασίες, την κατανάλωση οξυγόνου και την ανανέωση οξυγόνου σ' έναν υδάτινο αποδέκτη. Οι δύο αυτές διεργασίες θεωρήθηκαν πρώτης τάξεως ως προς την «ελλειμματική» συγκέντρωση του οξυγόνου και στις αυτές διεργασίες ενσωματώθηκαν όλες οι προαναφερόμενες διεργασίες που μπορούν να μεταβάλλουν είτε θετικά είτε αρνητικά τη συγκέντρωση του οξυγόνου. Το μοντέλο αυτό των Streeter και Phelps εφαρμόζεται μέχρι σήμερα με αρκετή επιτυχία λόγω της απλότητας εφαρμογής του και της ικανοποιητικής αποτελεσματικότητάς του και κανένα άλλο από τα προτεινόμενα μοντέλα, αν και περισσότερο αναλυτικά, δεν μπόρεσε να το αντικαταστήσει στη πράξη.

3. ΜΟΝΤΕΛΟ Streeter-Phelps

Το μοντέλο των Streeter-Phelps εκφράζεται με τη παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{dD}{dt} = K_1 \cdot L_t - K_2 \cdot D \quad [26]$$

όπου: $D = C_s - C_t$, mg/l

L_t = συγκέντρωση βιοαποικοδομήσιμου οργανικού φορτίου μετρούμενο σαν BOD_u ($BOD_u \approx BOD_\infty$), mg/l

K_1, K_2 = ρυθμοί κατανάλωσης και εμπλουτισμού αντίστοιχα σε οξυγόνο του υδάτινου αποδέκτη, $days^{-1}$

Στον συντελεστή K_1 έχουν ενσωματωθεί όλοι ρυθμοί βιο-οξειδωσης όπως η βιο-οξειδωση των οργανικών ενώσεων, η βιο-οξειδωση των αμμωνιακών και

η βιο-οξειδωση των ιζημάτων. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο σαν συγκέντρωση βιοαποικοδομήσιμων οργανικών ενώσεων λαμβάνεται το BOD_u και όχι το BOD_5 . Στον συντελεστή K_2 έχουν ενσωματωθεί όλοι οι ρυθμοί επαναεμπλουτισμού του νερού σε οξυγόνο όπως η μεταφορά οξυγόνου από την ατμόσφαιρα στην υγρή φάση είτε με διαδικασίες φυσικής διάχυσης (ισορροπία Henry) είτε με βεβιασμένες διαδικασίες διάχυσης (εγκλωβισμός με φαινόμενα Bernoulli πχ σε καταρράκτες) και η παραγωγή οξυγόνου από τις διαδικασίες φωτοσύνθεσης. Με αυτό τον τρόπο ομαδοποίησης των διεργασιών, απλοποιείται πολύ το μοντέλο Streeter-Phelps αλλά για να μπορέσει να γίνει αποτελεσματικό απαιτείται μία ορθολογική διαδικασία προσδιορισμού των σταθερών K_1 και K_2 στην πράξη ώστε να ενσωματωθούν σ' αυτές όλες οι παράμετροι, γνωστοί και άγνωστοι, που επηρεάζουν το ισοζύγιο του οξυγόνου. Έτσι οι σταθερές K_1 και K_2 όταν προσδιοριστούν για κάποιο υδάτινο οικοσύστημα, αποτελούν μοναδιαία έκφρασή του.

Ένα άλλο πλεονέκτημα του μοντέλου Streeter-Phelps, λόγω της απλότητάς του και του εμπειρικού προσδιορισμού του μπορεί να εκφράσει αποτελεσματικά μεγαλύτερες εκτάσεις του υδάτινου οικοσυστήματος.

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση [3] στην εξίσωση [26] λαμβάνεται η παρακάτω σχέση:

$$\frac{dD}{dt} + K_2 \cdot D = K_1 \cdot L_0 \cdot e^{K_1 \cdot t} \quad [27]$$

Επειδή το BOD_u εκτιμάται από μαθηματικές προσεγγίσεις των μετρήσεων BOD_5 (Thomas, 1951) οι οποίες χρησιμοποιούν \log_{10} και όχι \log_e γι' αυτό και η εξίσωση [27] είναι ορθότερο να εκφραστεί με δεκαδική βάση:

$$\frac{dD}{dt} + K_2 \cdot D = K_1 \cdot L_0 \cdot 10^{K_1 \cdot t} \quad [28]$$

Λύνοντας την εξίσωση [28] για $D = D_0$ όταν $t=0$ λαμβάνεται η εξίσωση [29]:

$$D_t = \frac{K_1 \cdot L_0}{K_2 - K_1} (10^{-K_1 \cdot t} - 10^{-K_2 \cdot t}) + D_0 \cdot 10^{-K_2 \cdot t} \quad [29]$$

Για $K_1 = K_2$ η εξίσωση [29] δεν έχει λύση. Στην περίπτωση αυτή εφαρμόζεται η παρακάτω προσεγγιστική λύση:

$$D_t = (K_1 \cdot L_0 \cdot t + D_0) \cdot 10^{-K_1 \cdot t} \quad [30]$$

Όταν ένας ποταμός υφίσταται μία ρύπανση σε κάποιο σημείο του ($t=0$) τότε κατά μήκος του ποταμού μετά το σημείο ρύπανσης, μετρούμενης της απόστασης σε μονάδες t , η συγκέντρωση του οξυγόνου, σύμφωνα με την εξίσωση [29], ελαττώνεται μέχρι ενός σημείου, το οποίο ονομάζεται κρίσιμο σημείο, και κατόπιν αρχίζει και πάλι να αυξάνεται σταδιακά όπως φαίνεται στο σχήμα 2. Για να εκτιμηθεί το μέγεθος της ρύπανσης, πρέπει να γίνει γνωστό το κρίσιμο αυτό σημείο, όχι μόνο σαν θέση αλλά και σαν ελάχιστη

συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου. Ο προσδιορισμός του σημείου αυτού μπορεί να γίνει με επίλυση της εξίσωσης [29] για :

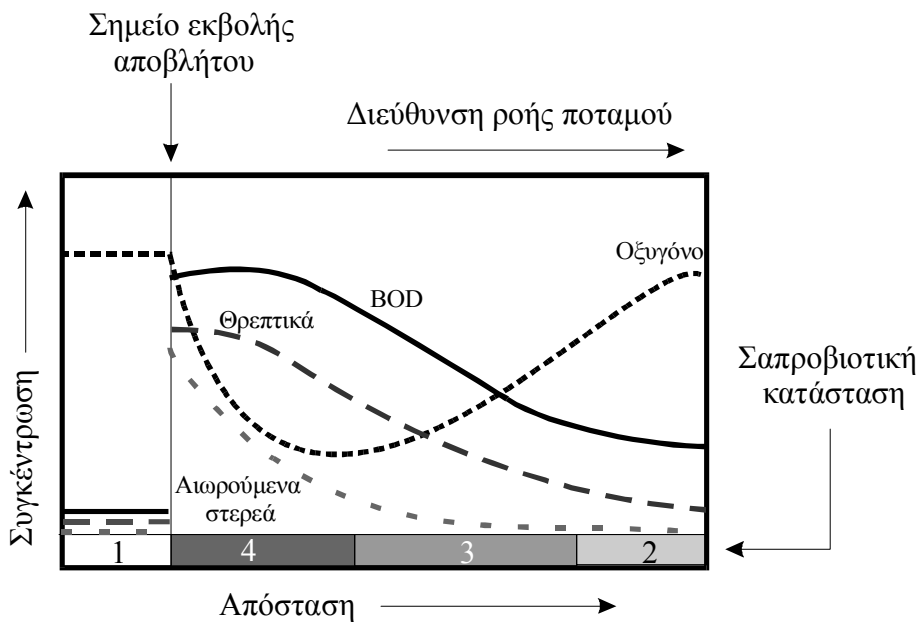
$$\frac{dD}{dt} = 0, \quad \frac{d^2D}{dt^2} < 0 \quad (\text{minimum}) \quad [31]$$

οπότε η επίλυση της εξίσωσης [29] κάτω από τις παραπάνω συνθήκες δίδεται από την σχέση [32]:

$$t_c = \frac{1}{K_2 - K_1} \cdot \log_{10} \left(\frac{K_2}{K_1} - \left(\frac{K_2}{K_1} - 1 \right) \cdot \frac{D_o}{L_o} \right) \quad [32]$$

και
$$D_c = \frac{K_1 \cdot L_o}{K_2} \cdot 10^{-K_1 \cdot t_c} \quad [33]$$

όπου t_c και D_c ο κρίσιμος χρόνος και το κρίσιμο έλλειμμα οξυγόνου αντίστοιχα.



Σχήμα 2: Συγκέντρωση οξυγόνου, θρεπτικών (N, P), BOD, και αιωρούμενων στερεών μετά από ρύπανση σε ένα σημείο του ποταμού

Η απόσταση από το σημείο ρύπανσης υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$x = u \cdot t \quad [34]$$

όπου: x = απόσταση από το σημείο ρύπανσης, (m)
 u = ταχύτητα ποταμού, (m/day)

Η συγκέντρωση του οποιουδήποτε συστατικού (y) αμέσως μετά την ανάμιξη του αποβλήτου με τα νερά του ποταμού, καθορίζεται από το ισοζύγιο των μαζών πριν και μετά την ανάμιξη και δίδεται από την παρακάτω σχέση:

$$C_y = \frac{Q_w \cdot C_{w,y} + Q_r \cdot C_{r,y}}{Q_w + Q_r} \quad [35]$$

όπου: Q_w = παροχή αποβλήτου, (m^3/s)
 Q_r = παροχή ποταμού, (m^3/s)
 $C_{w,y}$ = συγκέντρωση του συστατικού (y) στα απόβλητα, (kg/m^3)
 $C_{r,y}$ = συγκέντρωση του συστατικού (y) στο ποτάμι πριν από την ανάμιξη, (kg/m^3)
 C_y = συγκέντρωση του συστατικού (y) στο ποτάμι αμέσως μετά την ανάμιξη των νερών του ποταμού με τα απόβλητα, (kg/m^3)

4. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ Streper-Phelps

Κατά την μέθοδο αυτή, από δεδομένα συγκεντρώσεων BOD_5 και διαλυμένου οξυγόνου, καθώς και της παροχής και θερμοκρασίας του υδάτινου αποδέκτη μιάς συστηματικής δειγματοληψίας σε δύο διαφορετικά σημεία του που απέχουν μεταξύ τους τουλάχιστον δύο χιλιόμετρα, προσδιορίζουμε δύο συντελεστές: τον ρυθμό αποοξυγόνωσης K_1 ($days^{-1}$) και τον ρυθμό επαναοξυγόνωσης K_2 ($days^{-1}$) που αποτελούν και την ``οικολογική`` ταυτότητα του αποδέκτη. Αν τα K_1 και K_2 ενός ποταμού είναι γνωστά, τότε μπορεί να υπολογιστεί θεωρητικά η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου σε οποιοδήποτε σημείο του αποδέκτη και κατ'επέκταση να υπολογιστεί η ανεκτικότητα του σε πρόσθετη οργανική ρύπανση (BOD_5).

Για τον υπολογισμό των K_1 και K_2 χρησιμοποιούνται οι παρακάτω εξισώσεις:

$$K_1 = \frac{1}{\Delta t} \cdot \log_{10} \left(\frac{L_A}{L_B} \right) \quad [36]$$

$$K_2 = K_1 \cdot \frac{\bar{L}}{D} - \frac{\Delta D}{2.3 \cdot \Delta t \cdot \bar{D}} \quad [37]$$

όπου : K_1 = ρυθμός αποοξυγόνωσης, $days^{-1}$
 K_2 = ρυθμός επαναοξυγόνωσης, $days^{-1}$
 L_A = μαζική παροχή BOD_u (ultimate) στο σταθμό A, kg/d
 ($BOD_u = 1.46 BOD_5$)
 L_B = μαζική παροχή BOD_u στο σταθμό B, kg/d
 \bar{D} = μέση τιμή μαζικής παροχής ελλείμματος διαλυμένου οξυγόνου μεταξύ των δύο σταθμών, kg/d

\bar{L} = μέση τιμή μαζικής παροχής BODu μεταξύ των δύο σταθμών, kg/d

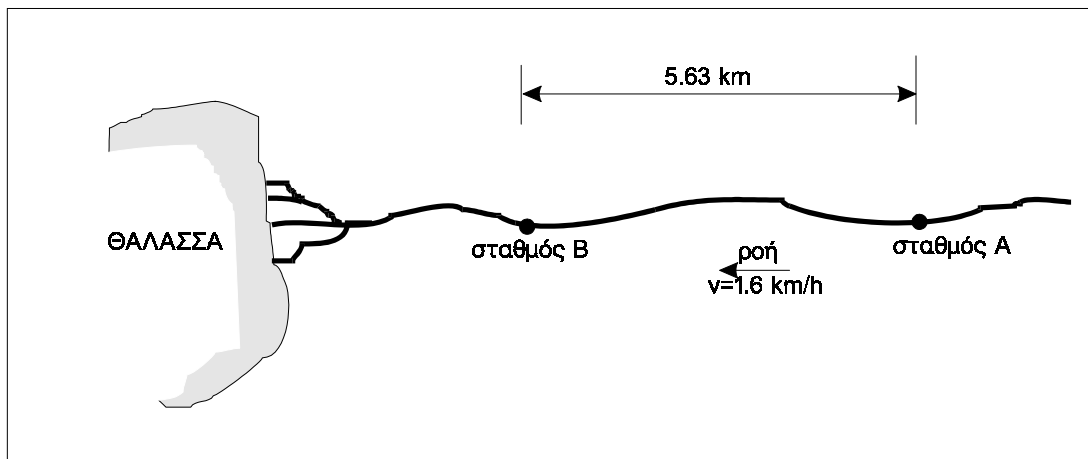
ΔD = μεταβολή μαζικής παροχής ελλείμματος οξυγόνου από τον σταθμό A στο σταθμό B, kg/d

Δt = χρόνος διαδρομής νερού από τον σταθμό A στο σταθμό B, days

Ο τρόπος υπολογισμών των K_1 και K_2 θα διευκρινιστεί περισσότερο με το παρακάτω παράδειγμα :

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1

Σ' ένα ποτάμι τοποθετούνται δύο σταθμοί δειγματοληψίας - ανάλυσης που απέχουν μεταξύ τους 5.63 km. Η μέση ταχύτητα του ποταμού μεταξύ των δύο σταθμών είναι 1.6 km/hr. Στον πίνακα 6 παρατίθενται οι μετρήσεις δύο δειγμάτων που ελήφθησαν δύο διαφορετικές ημέρες.



Σχήμα 3 : σχηματική παράσταση του παραδείγματος 1

ΠΙΝΑΚΑΣ 6: Δεδομένα μετρήσεων των δύο σταθμών για το παράδειγμα 1

ΣΤΑΘΜΟΙ	ΔΕΙΓΜΑΤΑ	Θερμοκρασία °C	Παροχή m ³ /s	BOD ₅ mg/l	Διαλυμένο οξυγόνο mg/l
ΣΤΑΘΜΟΣ A	Δείγμα 1	20	1.7	36	4.1
	Δείγμα 2	17	1.53	10.35	5.2
ΣΤΑΘΜΟΣ B	Δείγμα 1	20	1.46	21.2	2.6
	Δείγμα 2	16.5	1.87	5.83	2.8

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

Από τον πίνακα 6 (ή την εξίσωση 17) υπολογίζουμε τις συγκεντρώσεις κορεσμού του διαλυμένου οξυγόνου για τις δεδομένες θερμοκρασίες των δειγμάτων και κατόπιν τις ελλειμματικές συγκεντρώσεις του διαλυμένου οξυγόνου όπως φαίνεται στον πίνακα 7.

ΠΙΝΑΚΑΣ 7: Υπολογισμοί συγκεντρώσεων οξυγόνου για το παράδειγμα 1

ΣΤΑΘΜΟΙ	ΔΕΙΓΜΑΤΑ	συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου mg/l	συγκέντρωση οξυγόνου κορεσμού mg/l	συγκέντρωση ελλειμματικού οξυγόνου mg/l
Σταθμός Α	δείγμα 1	4.1	9.2	5.1
	δείγμα 2	5.2	9.8	4.6
Σταθμός Β	δείγμα 1	2.6	9.2	6.6
	δείγμα 2	2.8	9.9	7,1

Απο τους πίνακες 6 και 7 γίνονται οι παρακάτω υπολογισμοί:

$$\Delta t = \frac{5.63}{1.6 \cdot 24} = 0.146 \text{ days}$$

$$L_A = \frac{(1.7 \cdot 0.036 + 1.53 \cdot 0.01035) \cdot 1.46}{2} \cdot 86400 = 4859 \text{ kg/d}$$

$$L_B = \frac{(1.46 \cdot 0.0212 + 1.87 \cdot 0.00583) \cdot 1.46}{2} \cdot 86400 = 2640 \text{ kg/d}$$

$$\bar{D} = \frac{(5.1 \cdot 1.7 + 4.6 \cdot 1.53 + 6.6 \cdot 1.46 + 7.1 \cdot 1.87) \cdot 10^{-3}}{4} \cdot 86400 = 867 \text{ kg/d}$$

$$\bar{L} = \frac{(1.7 \cdot 0.036 + 1.53 \cdot 0.01035 + 1.46 \cdot 0.0212 + 1.87 \cdot 0.00563) \cdot 1.46}{4} \cdot 86400 = 3749 \text{ kg/d}$$

$$\Delta D = \frac{(6.6 \cdot 1.46 + 7.1 \cdot 1.87 - 5.1 \cdot 1.7 - 4.6 \cdot 1.53) \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 86400 = 311 \text{ kg/d}$$

Επομένως:

$$K_1 = \frac{1}{0.1466} \cdot \log_{10} \left(\frac{4859}{2640} \right) = 1.8 \text{ days}^{-1}$$

$$K_2 = 1.8 \cdot \frac{3749}{834} - \frac{311}{2.3 \cdot 0.146 \cdot 834} = 6.98 \text{ days}^{-1}$$

Ο λόγος K_2/K_1 ονομάζεται λόγος του Fair και βάσει αυτού διαχωρίζονται οι υδάτινοι αποδέκτες σε κατηγορίες. Όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος του Fair τόσο πιά επιδεκτικός σε ρύπανση είναι ο αποδέκτης.

4.2. Υπολογισμός ανεκτικότητας ενός αποδέκτη σε οργανικό φορτίο

Γνωρίζοντας τα K_1 και K_2 , την ταχύτητα των νερών σε συνάρτηση με την παροχρητευτικότητα και την θερμοκρασία για οποιοδήποτε σημείο κατά μήκος ροής ενός ποταμού καθώς επίσης το BOD_u και το διαλυμένο οξυγόνο σε ένα σημείο του (π.χ. σταθμός Α) ,μπορούμε να προβλέψουμε την συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου καθ' όλο το μήκος του ποταμού από το σημείο Α μέχρι τις εκβολές του σύμφωνα με την παρακάτω σχέση η οποία προκύπτει από την εξίσωση [29] :

$$D_t = \frac{K_1 \cdot L_A}{K_2 - K_1} \cdot [10^{-K_1 \cdot t} - 10^{-K_2 \cdot t}] + D_A \cdot 10^{-K_2 \cdot t} \quad [38]$$

όπου:

t = χρόνος διαδρομής του νερού από το σημείο Α, days
 D_t = έλλειμμα διαλυμένου οξυγόνου μετά από διαδρομή t
 χρόνου από το σημείο Α, kg/d

Η χρήση της εξίσωσης [38] στον υπολογισμό της ανεκτικότητας του αποδέκτη σε οργανική ρύπανση θα διευκρινιστεί με το παρακάτω παράδειγμα:

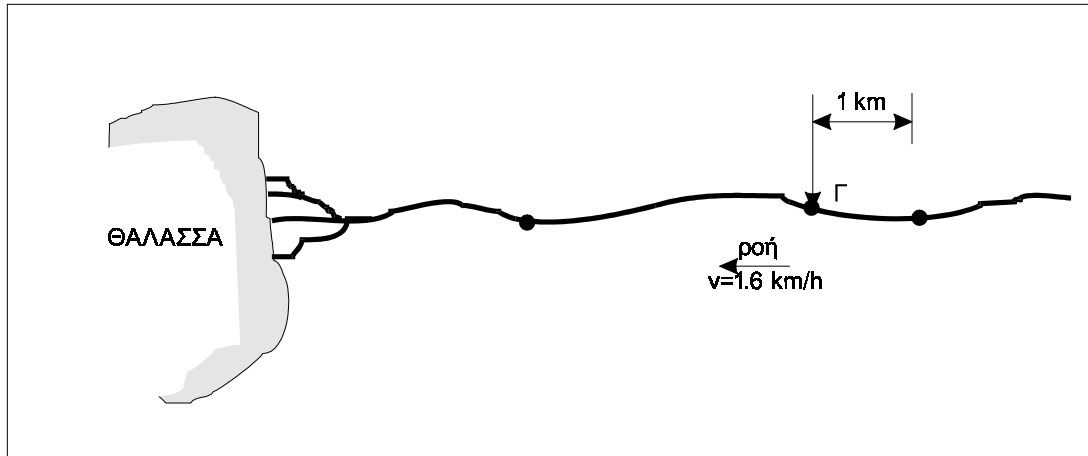
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2

Εστω ότι ανάμεσα στους σταθμούς Α και Β του παραδείγματος 1 και σε απόσταση ενός χιλιομέτρου από τον σταθμό Α, θέλει να εκβάλλει τα απόβλητά του ένας οικισμός. Η παροχή των λυμάτων είναι $6000 \text{ m}^3/\text{d}$ και η συγκέντρωση του ρυπαντικού φορτίου ανέρχεται στα $350 \text{ mg BOD}_5/\text{l}$. Το ερώτημα είναι αν επιτρέπεται η απόρριψη των λυμάτων αυτών στον αποδέκτη χωρίς καθαρισμό και αν όχι τότε ποιό το απαιτούμενο επίπεδο καθαρισμού για να διατηρηθεί η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου πάνω από 4 mg/l σε όλο το μήκος του ποταμού.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

Κατ'αρχήν υπολογίζονται τα L_T (πρό), L_T (μετά), και D_T όπου:

L_T (πρό) = το οργανικό ρυπαντικό φορτίο σε kg BOD_u/d λίγο προ του σημείου Γ
 L_T (μετά)= το οργανικό ρυπαντικό φορτίο σε kg BOD_u/d λίγο μετά το σημείο Γ
 D_T = το έλλειμμα του οξυγόνου λίγο προ του σημείου Γ σε kg/d



Σχήμα 4. Σχηματική παράσταση παραδείγματος 2

Απο την εξίσωση [36] υπολογίζεται το $L_{\Gamma}(\text{προ})$:

$$L_{\Gamma}(\text{προ}) = \frac{L_A}{10^{K_1 \cdot \Delta t_{\text{ΑΓ}}}} = 4363 \text{ kg/d} \quad [39]$$

όπου:

$$\Delta t_{\text{ΑΓ}} = \frac{1}{1.6 \cdot 24} = 0.026 \text{ days}$$

$$L_A = 4859 \text{ kg/d}$$

Το $L_{\Gamma}(\text{μετά})$ υπολογίζεται από την σχέση :

$$L_{\Gamma}(\text{μετά}) = L_{\Gamma}(\text{προ}) + L \cdot (1 - E/100) = 7429 \text{ kg/d} \quad [40]$$

όπου: $L = 0.35 \cdot \frac{\text{kg BOD}_5}{\text{m}^3} \cdot 1.46 \cdot \frac{\text{BOD}_u}{\text{BOD}_5} \cdot 6000 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{d}} = 3066 \text{ kg/d}$ και

$E =$ επι τις % επεξεργασία του αποβλήτου ($E=0$)

Το D_{Γ} υπολογίζεται από την εξίσωση [38]

$$D_{\Gamma} = \frac{1.8 \cdot 4859}{6.98 - 1.8} \cdot [10^{-1.8 \cdot 0.026} - 10^{-6.98 \cdot 0.026}] + D_A \cdot 10^{-6.98 \cdot 0.026} = 609.3 \text{ kg/d}$$

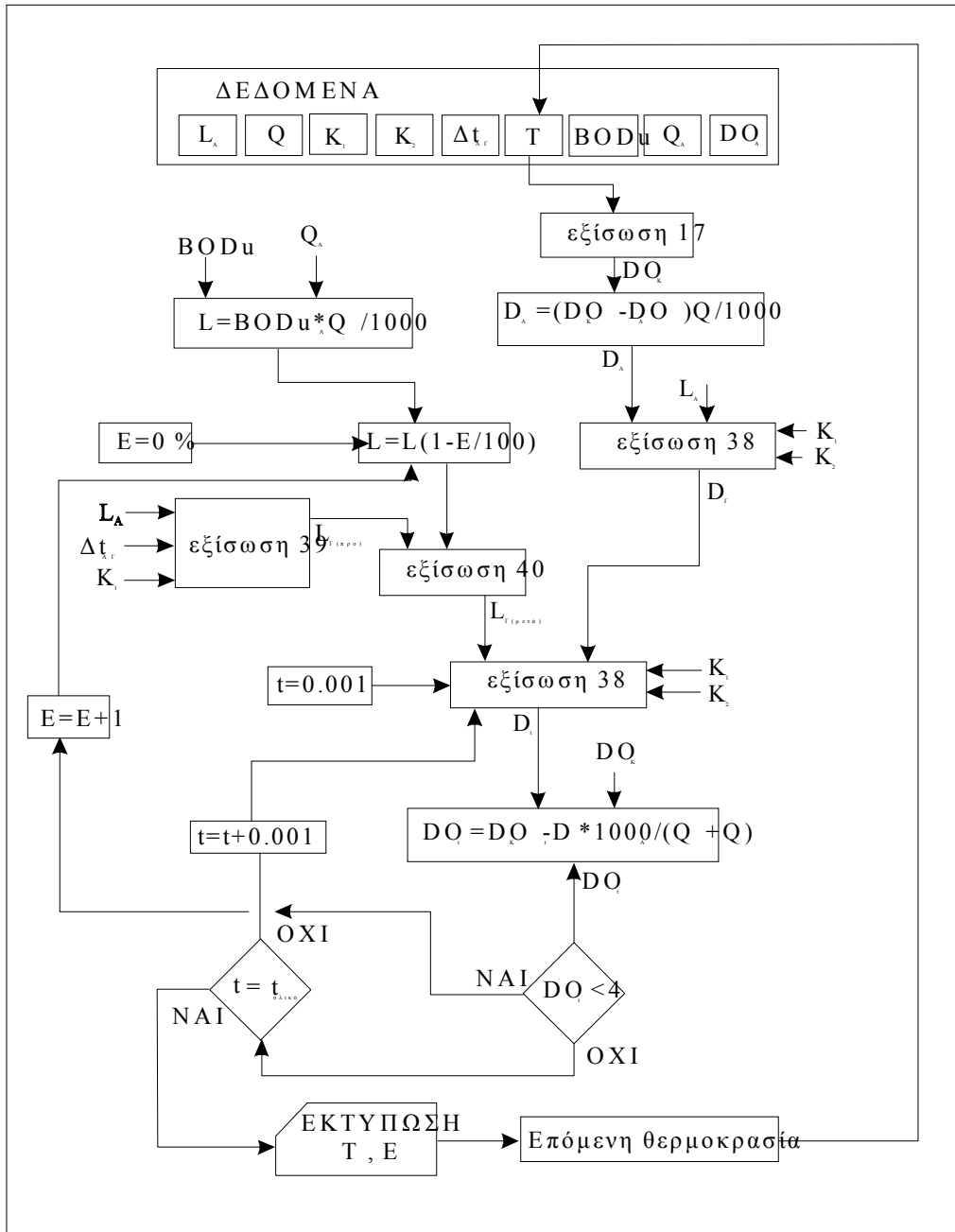
όπου:

$$D_A = \frac{(5.1 \cdot 1.7 + 4.6 \cdot 1.53)}{2} \cdot 10^{-3} \cdot 86400 = 678.6 \text{ kg/d}$$

Θεωρώντας στο σημείο Γ ότι $t = 0$, τότε υπολογίζω το διαλυμένο οξυγόνο από το σημείο Γ μέχρι την θάλασσα χρησιμοποιώντας το λογικό διάγραμμα του σχήματος 5.

Στο Παράρτημα 1 παρατίθεται η επίλυση του παραπάνω λογικού διαγράμματος σε γλώσσα προγραμματισμού BASIC. Αποτελέσματα

απαιτήσεων επεξεργασίας των αποβλήτων του παραδείγματος 2 για θερμοκρασία του ποταμού $T=12^{\circ}\text{C}$, δίδονται στον πίνακα 4 και στο σχήμα 6. Στον πίνακα 8 και στο σχήμα 7 παρατίθενται οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις οξυγόνου που επιτυγχάνονται σε συνάρτηση με την θερμοκρασία και τον βαθμό επεξεργασίας του αποβλήτου. Στον πίνακα 9 και στο διάγραμμα του σχήματος 8 παρατίθεται ο ελάχιστος βαθμός επεξεργασίας των αποβλήτων, που απαιτείται σε συνάρτηση με την θερμοκρασία, ώστε η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου να μην κατέλθει κάτω από 4 mg/l σε κανένα σημείο του ποταμού.

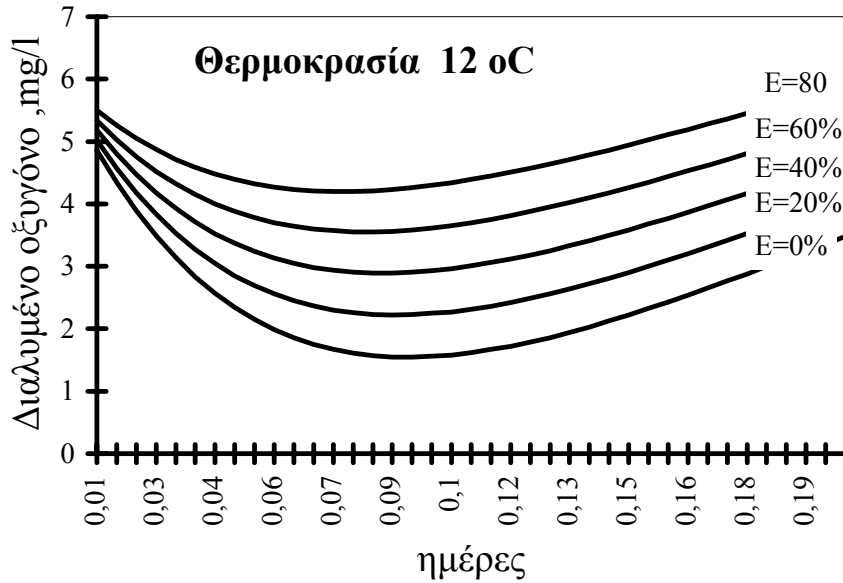


Σχήμα 5: Λογικό διάγραμμα υπολογισμού ανεκτικότητας ποταμού σε οργανική ρύπανση (Q = παροχή του ποταμού, Q_A = παροχή του αποβλήτου)

ΠΙΝΑΚΑΣ 4: Συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου συναρτήσει της χρονικής

απόστασης Δt από το σημείο Γ και του ποσοστού επεξεργασίας των αποβλήτων Ε στην θερμοκρασία των 12°C (παράδειγμα 2)

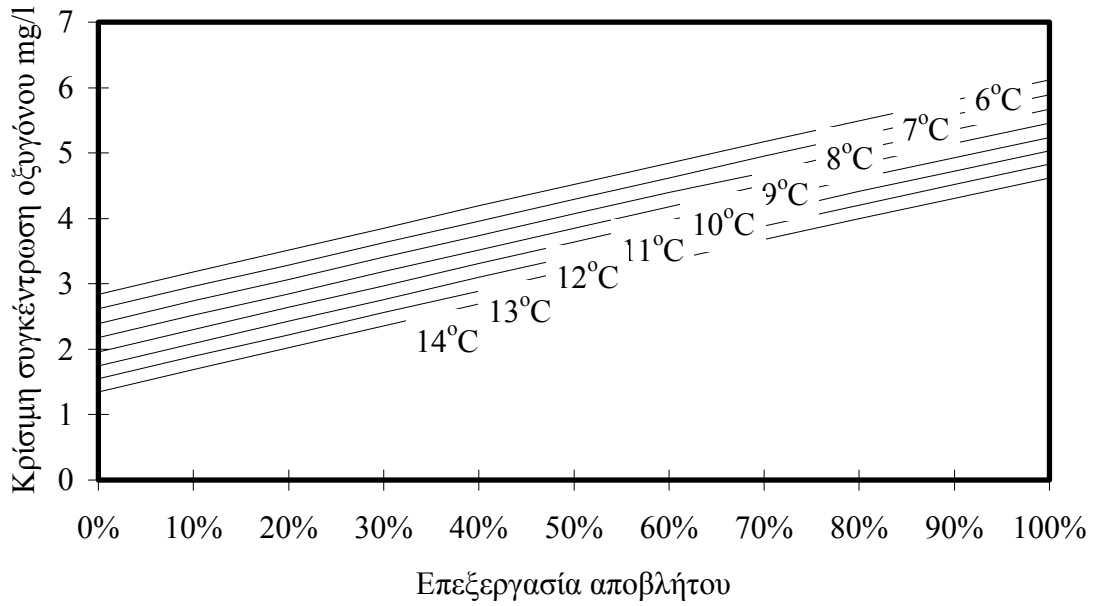
Δt days	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΟΞΥΓΟΝΟΥ									
	E=0 %	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100 %
0,01	4.86	5.02	5.1	5.18	5.26	5.34	5.42	5.5	5.58	5.65
0.015	4.35	4.57	4.69	4.8	4.92	5.03	5.14	5.26	5.37	5.48
0.02	3.89	4.18	4.33	4.47	4.61	4.76	4.9	5.05	5.19	5.34
0.025	3.49	3.84	4.01	4.18	4.35	4.52	4.7	4.87	5.04	5.21
0.03	3.14	3.53	3.73	3.93	4.12	4.32	4.52	4.71	4.91	5.11
0.035	2.83	3.27	3.49	3.71	3.93	4.15	4.37	4.59	4.8	5.02
0.04	2.57	3.05	3.29	3.52	3.76	4.00	4.24	4.48	4.72	4.96
0.045	2.34	2.85	3.11	3.37	3.62	3.88	4.14	4.39	4.65	4.9
0.05	2.15	2.69	2.96	3.24	3.51	3.78	4.05	4.32	4.59	4.87
0.055	1.99	2.56	2.84	3.13	3.42	3.7	3.99	4.27	4.56	4.84
0.06	1.86	2.45	2.75	3.05	3.34	3.64	3.94	4.23	4.53	4.83
0.065	1.75	2.37	2.67	2.98	3.29	3.6	3.9	4.21	4.52	4.83
0.07	1.67	2.3	2.62	2.94	3.25	3.57	3.88	4.2	4.52	4.83
0.075	1.61	2.26	2.58	2.91	3.23	3.55	3.88	4.2	4.53	4.85
0.08	1.57	2.23	2.56	2.89	3.22	3.55	3.88	4.21	4.54	4.87
0.085	1.55	2.22	2.56	2.89	3.23	3.56	3.9	4.23	4.57	4.9
0.09	1.55	2.23	2.57	2.91	3.24	3.58	3.92	4.26	4.6	4.94
0.095	1.56	2.34	2.59	2.93	3.27	3.61	3.96	4.3	4.64	4.99
0.100	1.58	2.27	2.62	2.96	3.31	3.65	4.00	4.34	4.69	5.03
0.105	1.62	2.31	2.66	3.01	3.35	3.7	4.05	4.39	4.74	5.09
0.110	1.67	2.36	2.71	3.06	3.41	3.75	4.1	4.45	4.8	5.14
0.115	1.72	2.42	2.77	3.12	3.46	3.81	4.16	4.51	4.86	5.21
0.120	1.79	2.49	2.83	3.18	3.53	3.88	4.23	4.57	4.92	5.27
0.125	1.86	2.56	2.91	3.25	3.6	3.95	4.29	4.64	4.99	5.34
0.130	1.94	2.64	2.98	3.33	3.68	4.02	4.37	4.71	5.06	5.41
0.135	2.03	2.72	3.07	3.41	3.75	4.1	4.44	4.79	5.13	5.48
0.140	2.13	2.81	3.15	3.5	3.84	4.18	4.52	4.86	5.21	5.55
0.145	2.22	2.9	3.24	3.58	3.92	4.26	4.6	4.94	5.28	5.62
0.150	2.33	3.00	3.34	3.68	4.01	4.35	4.69	5.03	5.36	5.7
0.155	2.43	3.10	3.44	3.77	4.1	4.44	4.77	5.11	5.44	5.78
0.160	2.54	3.2	3.54	3.87	4.2	4.53	4.86	5.19	5.52	5.85
0.165	2.65	3.31	3.64	3.97	4.29	4.62	4.95	5.28	5.61	5.93
0.170	2.77	3.42	3.74	4.07	4.39	4.71	5.04	5.36	5.69	6.01
0.175	2.88	3.53	3.85	4.17	4.49	4.81	5.13	5.45	5.77	6.09
0.180	3.00	3.64	3.95	4.27	4.59	4.9	5.22	5.54	5.85	6.17
0.185	3.12	3.75	4.06	4.37	4.68	5	5.31	5.62	5.94	6.25
0.190	3.24	3.86	4.17	4.48	4.78	5.09	5.4	5.71	6.02	6.33
0.195	3.36	3.97	4.27	4.58	4.88	5.19	5.49	5.8	6.1	6.41
0.200	3.48	4.08	4.38	4.68	4.98	5.28	5.58	5.88	6.18	6.48



Σχήμα 4. Συγκέντρωση οξυγόνου σε συνάρτηση του βαθμού επεξεργασίας και της χρονικής απόστασης από το σημείο Γ στην θερμοκρασία των 12°C.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5: Ελάχιστη συγκέντρωση οξυγόνου σε συνάρτηση του βαθμού επεξεργασίας των αποβλήτων και της θερμοκρασίας.

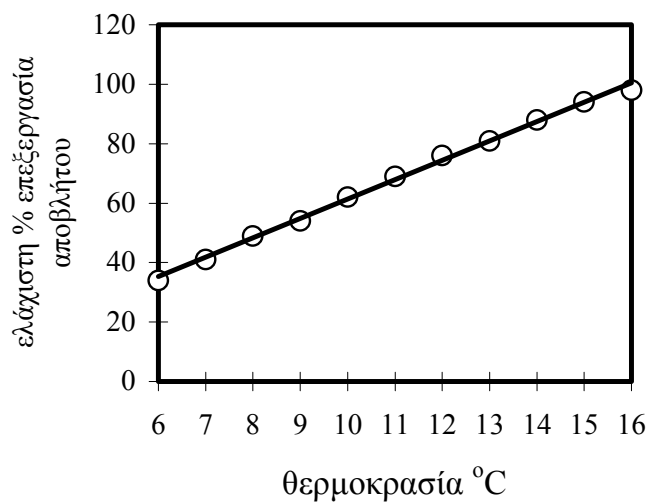
E %	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ Α								
	6 °C	7 °C	8 °C	9 °C	10 °C	11 °C	12 °C	13 °C	14 °C
0%	2.84	2.62	2.39	2.18	1.96	1.75	1.55	1.35	1.15
10%	3.18	2.96	2.74	2.52	2.3	2.09	1.89	1.69	1.49
20%	3.52	3.29	3.07	2.85	2.64	2.43	2.22	2.02	1.82
30%	3.85	3.63	3.41	3.19	2.97	2.76	2,56	2.36	2.16
40%	4.19	3.96	3.74	3.52	3.31	3.1	2.89	2.69	2.49
50%	4.52	4.29	4.07	3.85	3.64	3.43	3.22	3.02	2.82
60%	4.85	4.62	4.4	4.18	3.97	3.76	3.55	3.35	3.15
70%	5.17	4.95	4.7	4.51	4.29	4.08	3.88	3.68	3.48
80%	5.49	5.27	5.05	4.83	4.62	4.41	4.2	4	3.8
90%	5.81	5.59	5.36	5.15	4.93	4.72	4.52	4.31	4.12
100%	6.12	5.89	5.67	5.46	5.24	5.03	4.83	4.62	4.42



Σχήμα 5: Η ελάχιστη συγκέντρωση οξυγόνου σε συνάρτηση με την θερμοκρασία και τον βαθμό επεξεργασίας

ΠΙΝΑΚΑΣ 6:

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ οC	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Ελάχιστη επεξεργασία %	34	41	49	54	62	69	76	81	88	94	98



Σχήμα 6: Ελάχιστη απαίτηση βαθμού επεξεργασίας του αποβλήτου σε συνάρτηση με την θερμοκρασία ώστε η συγκέντρωση του

διαλυμένου οξυγόνου να μη γίνει μικρότερη από 4 mg/l σε κανένα σημείο του ποταμού.

Ο κρίσιμος χρόνος t_c κατα τον οποίο η συγκέντρωση του οξυγόνου γίνεται ελάχιστη (ή το έλλειμμα του οξυγόνου μέγιστο) από το σημείο αναφοράς A, μπορεί να υπολογιστεί απ'ευθείας από την σχέση 7, η οποία προκύπτει από την εξίσωση της παραγώγου της σχέσης 4 με το μηδέν ($d(D_t)=0$).

$$t_c = \frac{1}{K_2 - K_1} \cdot \log \left[\frac{K_2}{K_1} \cdot \left(1 - \frac{K_2 - K_1}{K_1} \cdot \frac{D_A}{L_A} \right) \right] \quad [7]$$

Το δε κρίσιμο έλλειμμα οξυγόνου D_c υπολογίζεται από την σχέση 8 η οποία προκύπτει με αντικατάσταση του κρίσιμου χρόνου στην σχέση 4.

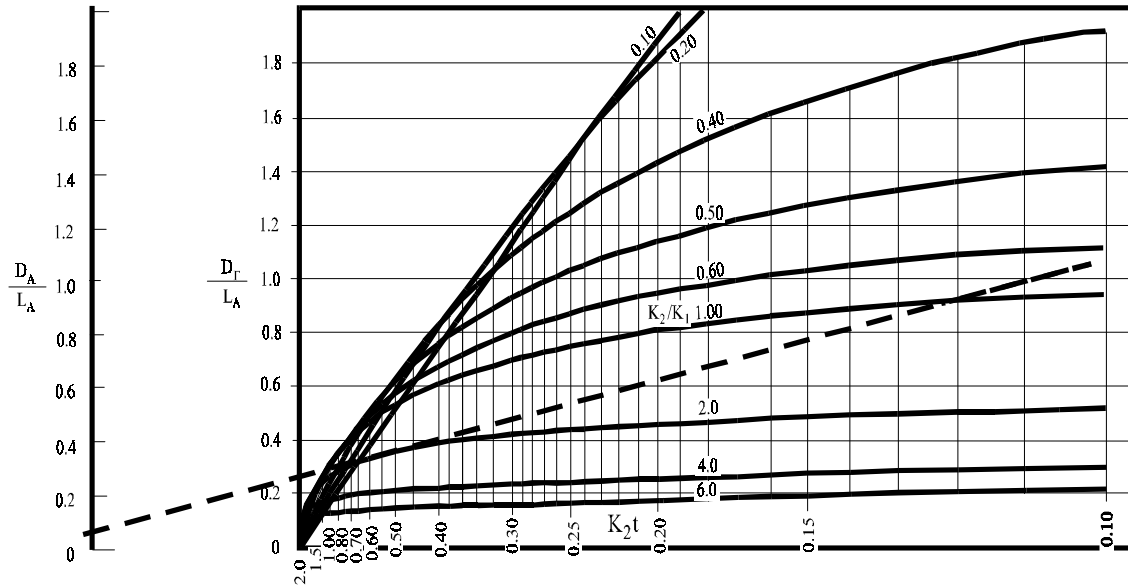
$$D_c = \frac{K_1}{K_2} \cdot L_A \cdot 10^{K_2 t_c} \quad [8]$$

3. Η μέθοδος Thomas

Ο Thomas προσπαθώντας να απλοποιήσει την μέθοδο Streeter-Phelps συνδύασε τις εξισώσεις 7 και 8 και με προσεγγιστικές μεθόδους κατέληξε στη σχέση [9].

$$\log(L_A) = \log(D_c) + \left[1 + \frac{K_1}{K_2 - K_1} \cdot \left(1 - \frac{D_A}{D_c} \right)^{0.418} \right] \cdot \log \left(\frac{K_2}{K_1} \right) \quad [9]$$

Από την σχέση 9, εύκολα μπορούμε προσεγγιστικά να υπολογίσουμε το μέγιστο φορτίο BOD₅ (L_A) που επιτρέπεται να απορριφθεί σε ποτάμι με βάση το υπάρχον αρχικό έλλειμμα διαλυμένου οξυγόνου (D_A), τον συντελεστή fair (K_2/K_1) και το επιτρεπτό κρίσιμο έλλειμμα (D_c) κατάντι του σημείου αποχέτευσης σε συνδυασμό με την υδραυλική παροχή του ποταμού.



Σχήμα : Νομογράφημα Thomas υπολογισμού του ελλείμματος οξυγόνου (D_T) σε οποιοδήποτε σημείο που απέχει χρονικά t από το σημείο αναφοράς A για το οποίο γνωρίζουμε το L_A (BOD_u , kg/d) και το έλλειμμα οξυγόνου του, D_A (kg/d) καθώς επίσης γνωρίζουμε και τις σταθερές K_1 και K_2 του ποταμού.

Η χρήση του Νομογραφήματος Thomas του σχήματος έχει ως εξής:

- βρίσκουμε το σημείο που έχει συντεταγμένες ($K_2 t$, K_2/K_1)
- ενώνουμε το σημείο αυτό με το σημείο D_A/L_A του άξονα D_A/L_A .
- η ευθεία αυτή τέμνει τον άξονα D_T/L_A σε κάποιο σημείο από το οποίο υπολογίζουμε το D_T .

ΠΙΝΑΚΑΣ 7 : Χαρακτηρισμός επιφανειακών νερών

Κατηγορία	Είδη	Χαρακτηριστικά
Ολιγο-σαπροβιοτικά	Βακτήρια Φύκη Εντομα Ψάρια	<100 germs/ml Cladophora typical Λίγα Gammarus pulex, Hydropsyche Σολομός, πέστροφα
Βήτα-μεσο-σαπροβιοτικά	Βακτήρια Φύκη Φυτά Εντομα Ψάρια	<100 000 germs/ml π.χ. Cladophora, Spirogyra Potamogeton, Elodea, Bactrachium κ.ά. Tubifex, Chironimus και Asellus Gammarus pulex. Baetis Eal Helobdella, Glossiphonia, Sphaerium Pisidium, Planorbis, Ancyclus
Αλφα-μεσο-σαπροβιοτικά	Βακτήρια Φύκη Φυτά Εντομα Ψάρια	Αερόβια, >100 000 germs/ml (Sphaerotilus), Protozoans Green, diatoms, bluegreen Potamogeton crispus Tubifex, Chironimus, Asellus aquaticus, Sialis Stickleback, Sphaerium, Herbobdella
Πολυ-σαπροβιοτικά	Βακτήρια Φύκη Εντομα Ψάρια	Αναερόβια, >1 000 000 germs/ml Beggiatoa, Sphaerotilus, Apodyalactea, Fusarium, Aqueductum, Protozaus: Carchesium, Vorticella, Bodo, Euglena, Colpidium, Glaucoma Bluegreen π.χ. Oscillatoria Tubifex, Chironimus dominating Eristatis, Ptychoptera, Psycoda κανένα

ΠΙΝΑΚΑΣ 8: Σαπροβιοτικά συστήματα και φυσικοχημικοί παράμετροι

Παράμετροι	Πολύ-Σαπροβιοτικό	Αλφα-μέσο-σαπροβιοτικό	Βήτα-μέσο-σαπροβιοτικό	Ολιγο-σαπροβιοτικό
Διαλυμένο οξυγόνο	0 –3 mg/l ή <50% του σημείου κορεσμού	- Αυξανόμενο το BOD ₅ ⇒ >70% του σημείου κορεσμού - Ελαττούμενο το BOD ₅ ⇒ <30% του σημείου κορεσμού	>60% του σημείου κορεσμού	>90% του σημείου κορεσμού
BOD ₅	υψηλό	Αυξανόμενου <5 mg/l Ελαττωμένου >20 mg/l	<5 mg/l	<3 mg/l
NH ₄ ⁺	0.5 – 2 mg/l	0.3 –1.2 mg/l	<0.2mg/l	<0.1 mg/l
NO ₂ ⁻	0 – 0.2 mgN/l	0 – 0.2 mg N/l	~0.2 mg N/l	<0.05 mg N/l
NO ₃ ⁻	Πολύ χαμηλό	1 - 2 mg N/l	2 - 6 mg N/l	υψηλό
Θολερότητα	υψηλή	χαμηλή	Πολύ χαμηλή	Πολύ καθαρό

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Nelson L. Nemerow (1971) `Liquid waste of Industry; Theories, Practices and treatment` 1st edition, Addison Wesley Publishing Co
2. Cohen, J.B. and R.L. O`Connell (1963) `The analog computer as an aid to stream self-purification computations` Journal W.P.C.F. 35, 951
3. Camp T.R. (1966) `Field estimates of oxygen balance parameters` J. Sanit. Eng. Div. Am. Soc. Civil Engrs 92, 115
4. Liebman, J.C. and Louks, D.P. (1967) `A note on oxygen sag equations` Journal W.P.C.F. 38, 1963