



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ ΤΜΗΜΑ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΑΛΕΙΑ ΠΟΥΛΗ

***ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΙ ΡΥΠΟΙ ΣΤΟΥΣ  
ΠΟΤΑΜΟΥΣ***



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## ΣΕΛΙΔΑ

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
1.2	ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	5
1.3	ΑΝΑΠΑΝΤΗΤΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ	5
1.4	ΕΞΙΣΩΣΗ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΜΑΖΑΣ	6
1.5	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΠΟΤΑΜΙ	7

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.1	Η ΕΞΙΣΩΣΗ STREETER-PHELPS	10
2.2	ΕΞΙΣΩΣΗ ΕΛΛΕΙΜΑΤΟΣ ΔΙΑΛΥΜΕΝΟΥ ΟΞΥΓΟΝΟΥ	11
2.3	ΛΥΣΗ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΕΛΛΕΙΜΑΤΟΣ ΟΞΥΓΟΝΟΥ	11
2.4	ΚΡΙΣΙΜΟ ΕΛΛΕΙΜΑ ΟΞΥΓΟΝΟΥ	12
2.5	ΚΡΙΣΙΜΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗ	12
2.6	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ	12
2.7	ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΕΠΑΝΑΕΡΙΣΜΟΥ	12
2.8	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΥΞΗΣΗΣ ΤΗΣ ΡΟΗΣ	12
2.9	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΥΞΗΣΗΣ ΤΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ	12
2.10	ΣΤΑΘΕΡΑ ΡΥΘΜΟΥ ΕΠΑΝΑΕΡΙΣΜΟΥ	13
2.11	ΕΞΙΣΩΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΡΥΘΜΟΥ ΕΠΑΝΑΕΡΙΣΜΟΥ	13
2.12	ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΕΞΙΣΩΣΗ STREETER-PHELPS	13

<b>2.13 ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΗΓΕΣ ΠΟΥ ΑΡΧΙΚΑ ΑΓΝΟΗΘΗΚΑΝ</b>	<b>14</b>
<b>2.14 ΠΡΟΤΩΓΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗ –ΑΝΑΠΝΟΗ</b>	<b>14</b>
<b>2.15 BOD ΒΑΣΗΣ</b>	<b>14</b>
<b>2.16 ΕΠΙΛΥΣΗ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΕΛΛΕΙΜΑΤΟΣ</b>	<b>16</b>
<b>2.17 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ</b>	<b>17</b>

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**

<b>3.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ</b>	<b>25</b>
<b>3.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΡΩΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ</b>	<b>26</b>
<b>3.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΤΕ CARLO</b>	<b>27</b>

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

<b>4.1 ΔΙΑΛΥΜΕΝΟ ΟΞΥΓΟΝΟ ΣΕ ΜΕΓΑΛΑ ΠΟΤΑΜΙΑ ΚΑΙ ΕΚΒΟΛΕΣ.</b>	
<b>4.2 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΣΕ ΕΚΒΟΛΕΣ ΠΟΤΑΜΩΝ</b>	

### **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

### **ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕ ΤΑ ΕΥΡΗ ΤΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΕΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ ΣΕ ΕΚΒΟΛΕΣ ΠΟΤΑΜΩΝ**

### **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η απομάκρυνση των συμβατικών ρύπων αποτελεί κυρίαρχη επιδίωξη κατά τη διαχείριση των αστικών αποβλήτων . Όταν γίνεται συζήτηση για συμβατικούς ρύπους, ουσιαστικά πρόκειται για το BOD [ βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (Biochemical Oxygen Demand - BOD)], το αμμωνιακό άζωτο, τα ολικά αιωρούμενα στερεά καθώς και τα κολοβακτηρίδια ,Σημαντικότερος ρύπος, είναι το BOD, καθώς αποτελεί δείκτη τόσο για τα βιοδιασπώμενα μόρια στο νερό όσο και για την απαίτηση σε οξυγόνο κατά διάσπαση αυτών. Με τη σειρά του το διαλυμένο οξυγόνο εκφράζει την κατάσταση στην οποία βρίσκεται ο αποδέκτης και το κατά πόσο υγιές είναι το νερό σε αυτόν με αποτέλεσμα να αποτελεί και σημείο αναφοράς στη διαδικασία οριοθέτησης των επιτρεπτών συγκεντρώσεων σε αποδέκτες ανά τον πλανήτη. Η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου έχει συμφωνηθεί να είναι μεγαλύτερη ή ίση των  $0,5\text{mgL}^{-1}$  κατά κανόνα και  $4,0\text{mgL}^{-1}$  σε κάθε στιγμή. Οριακές επιτρεπτές τιμές ( $0,2\text{mgNL}^{-1}$  ) πρέπει να υπάρχουν και για την αμмония καθώς αποτελεί ουσία τοξική ακόμα και σε περιπτώσεις χαμηλών συγκεντρώσεων. Όταν γίνεται προσπάθεια απομάκρυνσής της με μεθόδους νιτροποίησης θα πρέπει να δίνεται μεγάλη προσοχή καθώς αναποτελεσματικότητα στη διαδικασία της νιτροποίησης δεν αποτρέπει τις συγκεντρώσεις αμμονίας στο νερό. Τα ολικά αιωρούμενα στερεά πέραν από την αύξηση απαίτησης οξυγόνου και της θολότητας που προκαλούν στο νερό είναι φορείς παθογόνων οργανισμών κάτι που προφανώς επιδρά αρνητικά στην υγεία και ασφάλεια του νερού αποδέκτη.Τέλος, τα κολοβακτηρίδια συνοδεύουν συνήθως την παρουσία των παθογόνων μικροοργανισμών , γεγονός που επιδρά ακόμα περισσότερο αρνητικά στην ποιότητα του νερού. Θα μπορούσαν να απομακρυνθούν χρησιμοποιώντας μεθόδους χλωρίωσης για το οποίο απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή για αποφυγή δημιουργίας χλωριωμένων οργανικών ενώσεων. Επιπλέον, ο φυσικός τους θάνατος επιτυγχάνεται περισσότερο στη θάλασσα.

## 1.2 ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Μια από τις βασικότερες σχέσεις αναφορικά με το ισοζύγιο ενέργειας στο πλαίσιο της βιολογικής διαχείρισης υγρών αποβλήτων είναι η παρακάτω:  
**:Διαλυτό ΒΟ + D.O.(O<sub>2</sub>) = CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O + Αλκαλικότητα + Αμμώνιο + Κύτταρα \*** (Κύριος στόχος είναι η κατά το δυνατόν μετατόπιση της παραπάνω αντίδρασης προς τα δεξιά καθώς έτσι οδηγούμαστε σε μείωση του BOD και σε καθίζηση των ολικών αιωρούμενων στερεών, επομένως και σε καλύτερη ποιότητα νερού. Σε περιπτώσεις όπου αναμένεται να μην τηρούνται τα όρια των συγκεντρώσεων των διαφόρων ρύπων κρίνεται απαραίτητη η κατανομή του φορτίου των αποβλήτων με χρήση μαθηματικών μοντέλων τα οποία έχουν στόχο να καθορίσουν επιτρεπτές τιμές συγκεντρώσεων στις διάφορες αποβολές.

## 1.3 ΑΝΑΠΑΝΤΗΤΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

Το αντικείμενο των περιβαλλοντικών προβλημάτων και ειδικότερα της αντιμετώπισης της παρουσίας των συμβατικών ρύπων είναι μείζονος σημασίας και χαιρει περαιτέρω έρευνας. Ως χαρακτηριστικά θέματα που διατηρούνται αναπάντητα αναφέρονται τα εξής :

1. Διακριτή καθίζηση σωματιδίων εντός του νερού στους αποδέκτες έναντι δημιουργίας συσσωματωμάτων σωματιδίων.
2. Τα ολικά αιωρούμενα σωματίδια έχουν την τάση να απορροφούν τόσο παθογόνους μικροοργανισμούς όσο και τοξικές οργανικές ουσίες και μέταλλα. Όλες αυτές οι διαδικασίες δημιουργούν απαίτηση οξυγόνου και θα πρέπει να διερευνηθούν και να είναι γνωστές προκειμένου να γίνουν περισσότερο πλήρεις οι μελέτες και πιθανότατα να προστεθούν συναρτήσεις και εξισώσεις που θα περιγράφουν τέτοιου είδους φαινόμενα.
3. Σημαντικό θέμα είναι και η υποβάθμιση του BOD όπου θα πρέπει να μελετηθεί σε συνδυασμό με τις αρχές της φωτοχημείας.

## 1.4 ΕΞΙΣΩΣΗ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΜΑΖΑΣ : ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΜΒΟΛΙΚΗΣ ΡΟΗΣ

Η παρουσία των συμβατικών ρύπων στους διάφορους αποδέκτες συνήθως οφείλεται στην κίνηση τους μέσω ρευμάτων μέσω μιας διαδρομής που αφετηρία έχει την υδρολυπτική πηγή. Στις εξισώσεις ισοζυγίου εξετάζεται κάθε φορά ένας στοιχειώδης όγκος ενώ η μορφή τους είναι όπως φαίνεται παρακάτω :

**Ρυθμός Συσσώρευσης** = Εισροές – Εκροές ± Αντιδράσεις

$$\frac{d(VC)}{dt} = QC - Q(C + \Delta C) \pm rV$$

Όπου :  $V$  : στοιχειώδης όγκος

$C$  : η συγκέντρωση

$Q$ : η παροχή

$r$  : ο ρυθμός αντίδρασης

Υπο συνθήκες σταθερής ροής, σταθερό εμβαδό διατομής, σταθερή ταχύτητα ροής και σταθερό όγκο  $V = A \Delta x$  διαιρώντας με αυτόν τον όγκο την εξίσωση θα έχουμε :

$$\frac{dC}{dt} = \frac{QC}{A\Delta x} - \frac{Q(C + \Delta C)}{A\Delta x} \pm r \quad \text{και καθώς το } \Delta x \rightarrow 0 \text{ θα έχουμε}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{Q}{A} \frac{\partial C}{\partial x} \pm r$$

$$u = \frac{Q}{A}$$

Οπότε η γενική εξίσωση ισοζυγίου μάζας σε συστήματα εμβολικής ροής με αντίδραση γίνεται :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u \frac{\partial C}{\partial x} \pm r$$

Όμως σε μόνιμη κατάσταση η μεταβολή της συγκέντρωσης με το χρόνο θα είναι μηδενική οπότε τελικά προκύπτει η διαφορική εξίσωση :

$$\frac{\partial C}{\partial x} = \pm \frac{r}{u}$$

$$\int \partial C = \pm \frac{1}{u} \int r \partial x$$

$$\frac{\partial C}{\partial x} = -\frac{k}{u} C$$

$$\int_{C_0}^C \frac{\partial C}{C} = -\frac{k}{u} \int_0^x \partial x$$

$$\ln C \Big|_{C_0}^C = \frac{-kx}{u}$$

$$\ln \frac{C}{C_0} = \frac{-kx}{u}$$

Επομένως προκύπτει η γενική Λύση :  $C = C_0 e^{(-\frac{kx}{u})}$

### 1.5 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΠΟΤΑΜΙ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΒΟΔ ΠΡΩΤΗΣ ΤΑΞΗΣ.

Έστω ότι θα θέλαμε να υπολογιστεί η υπολειπόμενη συγκέντρωση  $[C/C_0]$  μετά από μία, δύο και τρεις "σταθερές χρόνου" κατάντη μεταφοράς με 1<sup>η</sup> διάσπασης υλικού σε μόνιμη κατάσταση. Ως σταθερά χρόνου είναι ο αδιάστατος αριθμός ( χωρίς μονάδα μέτρησης ) στον εκθέτη της παραπάνω εξίσωσης  $kx/u$ .

Προκύπτει λοιπόν ο παρακάτω πίνακας.

$Kx/u$	$C/C_0$
0	1.0
1	0.368
2	0.135
3	0.050

Τα συμπεράσματα μας από τον παραπάνω πίνακα είναι ότι μετά από συγκεκριμένη χρονική μεταβολή απομένει το 5% του αρχικού υλικού.



Γραμμικοποιώντας τα δεδομένα που βρέθηκαν από το ποτάμι μέσω της παραπάνω εξίσωσης και αντιστοιχίζοντας το  $\ln[C/C_0]$  με το  $x/u$  θα μπορέσουμε να υπολογίσουμε τη σταθερά του ρυθμού της αντίδρασης αποσύνθεσης. Δεδομένης μέσης ταχύτητας  $0,4 \text{ m/s}$  και  $k = 0,3 \text{ ημέρα}^{-1}$  θα υπολογίσουμε την σταθερά του ρυθμού κατανάλωσης BOD για την αποβολή υγρών αποβλήτων στη θέση  $x=0$ .

Θα έχουμε λοιπόν τον παρακάτω πίνακα.

<b>x,km</b>	<b>C/C<sub>0</sub></b>	<b>lnC/C<sub>0</sub></b>	<b>x/u,days</b>
0	1.0	0.0	0
5	0.94	-0.062	0.145
10	0.91	-0.094	0.289
20	0.84	-0.174	0.579
30	0.76	-0.274	0.868
50	0.64	-0.446	1.447
100	0.42	-0.868	2.894
200	0.19	-1.661	5.787

Γραφική παράσταση δεδομένων BOD( $\text{mgL}^{-1}$ ) συναρτήσει της προς τα κάτω απόστασης ( $x$  σε km). ( **ΓΡΑΦΗΜΑ 1.1** )

Ημιλογαριθμικό διάγραμμα BOD συναρτήσει του  $x/u$  για τον υπολογισμό της σταθεράς του ρυθμού αποξυγόνωσης.( **ΓΡΑΦΗΜΑ 1.2** )Στην περίπτωση που έχουμε προβλήματα με συντελεστές ( $Q, A, u, k$ ) που μεταβάλλονται με το χρόνο ή με την απόσταση ή μπορεί να έχουμε το εμβαδόν διατομής να αλλάζει και η ροή .Έστω λοιπόν ο ρυθμός ροής και το εμβαδόν διατομής να αυξάνονται με  $Q = Q_0 e^{qx}$  και  $A = A_0 e^{ax}$  ; όπου  $Q_0$  και  $A_0$  η παροχή και η διατομή στη θέση  $x=0$  ,  $q$  και  $a$  εκθετικοί συντελεστές .Η εξίσωση του ισοζυγίου μάζας γύρω από τον στοιχειώδη όγκο γίνεται :

$$\frac{\partial(VC)}{\partial t} = QC - (Q + \Delta Q)(C + \Delta C) - rV$$

$$C \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial C}{\partial t} = -(\Delta Q)C - Q(\Delta C) - (\Delta Q)(\Delta C) - rV$$

Διαιρώ την σχέση με στοιχειώδη όγκο  $V = A \Delta x$  και θα έχουμε :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{(\Delta Q)C}{A(\Delta x)} - \frac{Q \Delta C}{A \Delta x} - \frac{(\Delta Q)(\Delta C)}{A(\Delta x)} - r$$

Επειδή  $\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{1}{A} C \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{Q}{A} \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{(\partial Q)(\partial C)}{A \partial x} - r$

Επομένως  $\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{1}{A} \frac{\partial(QC)}{\partial x} - r$

Για οποιοδήποτε χρόνο και απόσταση η εξίσωση γίνεται :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{1}{A(x,t)} \frac{\partial[Q(x,t)C(x,t)]}{\partial x} - r(C,x,t)$$

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### 2.1 Η ΕΞΙΣΩΣΗ STREETER-PHELPS

Οι δυο επιστήμονες απέδειξαν πως η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου μειωνόταν καθώς η απόσταση από την πηγή μεγάλωνε ταυτόχρονα με τη διάσπαση του BOD ενώ πρότειναν και την εφαρμογή ενός μαθηματικού μοντέλου που περιγράφει ακριβώς αυτή τη διαδικασία. Όσον αφορά τη διαδικασία οξείδωσης του BOD ισχύει η εξίσωση :

$$u \frac{dL}{dx} = -k_d L$$

Όπου:  $L$  = η τελική συγκέντρωση BOD ,  $ML^{-3}$ ,  $u$  = η μέση ταχύτητα  $LT^{-1}$ ,  $k_d$  = σταθερά αποξυγόνωσης πρώτης τάξης  $T^{-1}$ .

### 2.2 Εξίσωση ελλείματος διαλυμένου οξυγόνου.

Ενώ για το διαλυμένο οξυγόνο μπορεί να γραφτεί μία εξίσωση ισοζύγιου μάζας,

$$u \frac{dC}{dx} = -k_d L + k_a(C_s - C)$$

Με  $K_d L$  : αποξυγόνωση,  $k_a(C_s - C)$  : επαναερισμός,  $C$ : συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου  $ML^{-3}$ ,  $L$ : τελική συγκέντρωση BOD,  $ML^{-3}$ ,  $C_s$ : συγκέντρωση κορεσμού του διαλυμένου οξυγόνου  $ML^{-3}$  και τέλος  $k_a$  : σταθερά επαναερισμού πρώτης τάξης  $T^{-1}$

Παρατηρούμε ότι οι δύο όροι στο δεξιό μέλος της εξίσωσης παριστάνουν αντικρουόμενες διεργασίες, την αποξυγόνωση λόγω ανθρακούχου BOD και τον επαναερισμό. Η διαφορά τώρα  $C_s - C$  θα είναι η κινούσα δύναμη για την αναπλήρωση της συγκέντρωσης στο νερό από το οξυγόνο της ατμόσφαιρας μέσω της διεπιφάνειας αέρα – νερού. Είναι προτιμότερο πολλές φορές η παραπάνω εξίσωση να γράφεται ως προς το έλλειμα διαλυμένου οξυγόνου :

$$u \frac{dD}{dx} = +k_d L - k_a D$$

Να παρατηρηθεί ότι τα πρόσημα των όρων αποξυγόνωσης και επαναερισμού έχουν αλλάξει καθώς το έλλειμα διαλυμένου οξυγόνου είναι η κινούσα δύναμη του επαναερισμού.

### 2.3 Λύση εξίσωσης ελλείματος οξυγόνου.

Οι δύο παραπάνω εξισώσεις θα πρέπει να λυθούν ταυτόχρονα για να αναπαραχθεί η εξίσωση Streeter – Phelps.

Όσον αφορά το διαλυμένο οξυγόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια εξίσωση ισοζυγίου η οποία περιλαμβάνει όρους που περιγράφουν και την αποξυγόνωση λόγω ανθρακούχου BOD και τον επαναερισμό. Συνηθίζεται η έκφραση να γίνεται ως προς το έλλειμα του διαλυμένου οξυγόνου και όχι ως προς την συγκέντρωσή του. Τελικά η εξίσωση που μας ενδιαφέρει διαμορφώνεται ως εξής Streeter – Phelps . Επρόκειτο για κανονικές διαφορικές εξισώσεις οι οποίες είναι ασύζευκτες .Λύνουμε λοιπόν την πρώτη εξίσωση ως προς τη συγκέντρωση BOD ( $L$ ) και έτσι θα έχουμε :

$$\int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = -\frac{k_d}{u} \int_0^x dx$$

$$L = L_0 e^{-k_d x/u}.$$

Με αντικατάσταση στη δεύτερη εξίσωση μπορούμε να επιλύσουμε ως προς το έλλειμα διαλυμένου οξυγόνου ( $D$ ) με την μέθοδο χωριζομένων μεταβλητών ή με παράγοντες ολοκλήρωσης και θα έχουμε :

$$u \frac{dD}{dx} = +k_d L_o e^{-k_a x/u} - k_a D$$

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να αναδιαταχθεί ώστε όλοι οι όροι που αφορούν την εξαρτημένη μεταβλητή (D) να είναι στο αριστερό μέλος και ο παράγοντας εξαναγκασμού στο δεξί μέλος :

$$u \frac{dD}{dx} + k_a D = k_d L_o e^{-k_a x/u}$$

Χρησιμοποιώντας την μέθοδο του παράγοντα ολοκλήρωσης η παραπάνω εξίσωση θα πάρει την μορφή :  $\frac{dy}{dt} + p(t)y = q(t)$ . Λύνοντας αυτό στο διάστημα από 0 έως t θα είναι :

$$y = y_0 e^{-\mu(t)} + e^{-\mu(t)} \int_0^t e^{\mu(t)} q(t) dt$$

Όπου  $\mu(t) = \int p(t) dt$ , ο παράγοντας ολοκλήρωσης,  $q(t)$  είναι ο παράγοντας εξαναγκασμού,  $y$  είναι η εξαρτημένη μεταβλητή και  $t$  είναι η ανεξάρτητη μεταβλητή.

Συγκρίνοντας τις εξισώσεις μας επιτρέπονται οι ακόλουθοι ορισμοί :

$$y = D$$

$$t = x$$

$$p(t) = k_a/u$$

$$q(t) = \frac{k_d L_o}{u} e^{-k_a x/u}$$

Η λύση λοιπόν μπορεί να καθοριστεί από τα παρακάτω :

$$D = D_o e^{-k_a x/u} + e^{-k_a x/u} \int_0^x e^{\frac{k_a x}{u}} \left( \frac{k_d L_o}{u} e^{-\frac{k_d x}{u}} \right) dx$$

$$D = D_o e^{-\frac{k_a x}{u}} + \frac{k_d L_o}{u} e^{-k_a x/u} \left| \frac{u}{k_a - k_d} \right|$$

$$D = D_o e^{-k_a x/u} + \frac{k_d L_o}{k_a - k_d} e^{-k_a x/u} (e^{(k_a - k_d)x/u} - 1)$$

$$D = D_o e^{-k_a x/u} + \frac{k_d L_o}{k_a - k_d} \left( e^{-\frac{k_d x}{u}} - e^{-\frac{k_a x}{u}} \right)$$

Η τελική λύση του ελλείματος διαλυμένου οξυγόνου συναρτήσει της απόστασης μετά από μια σημειακή απόρριψη BOD σε ένα μονοδιάστατο

σύστημα εμβολικής ροής σε μόνιμη κατάσταση . Τέλος η παραπάνω εξίσωση θα μπορούσε να λυθεί ως προς τη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου αντί για το έλλειμα . Αντικαθιστώντας το D με το  $(C_s - C)$  θα έχουμε :

$$C = C_s - (C_s - C_o)e^{-\frac{k_a x}{u}} - \frac{k_d L_o}{k_a - k_d} (e^{-\frac{k_d x}{u}} - e^{-k_a x/u})$$

Σημειώνεται επίσης το γεγονός ότι οι παραπάνω εξισώσεις και οι λύσεις τους μπορούν να περιγραφούν και να προκύψουν αντίστοιχα και διαγραμματικά όπως φαίνεται στις καμπύλες STREETER -PHELPS **(βλέπε διάγραμμα 2.1)** Από τα διαγράμματα προκύπτουν ουσιαστικά λύσεις των διαφορικών εξισώσεων που εξετάστηκαν παραπάνω. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την περιγραφή των διαγραμμάτων είναι σημαντικά και περισσότερο κατανοητά από τις μαθηματικές λύσεις όπως προκύπτουν από την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων. Στο πρώτο σχήμα είναι φανερή η εκθετική μείωση της συγκέντρωσης του BOD καθώς αυξάνεται η απόσταση από την πηγή. Για το έλλειμα του διαλυμένου οξυγόνου παρατηρείται αρχικά μια αύξηση μέχρι την κρίσιμη απόσταση οπότε και παρατηρείται το κρίσιμο έλλειμα ενώ μετά το σημείο αυτό η πορεία είναι καθοδική και τείνει ασυμπτωτικά στον οριζόντιο άξονα της απόστασης. Αντιθέτως η καμπύλη της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου έχει ως αφετηρία την κατάσταση κορεσμού, μειώνεται ως την κρίσιμη απόσταση οπότε και ελαχιστοποιείται, ενώ στην τελική της πορεία τείνει ασυμπτωτικά στην ευθεία που εκφράζει την τιμή της συγκέντρωσης στην κατάσταση κορεσμού. Μία ακόμα ιδιαίτερα σημαντική πληροφορία που λαμβάνεται από τα παραπάνω διαγράμματα έχει να κάνει με την σχέση μεταξύ του ρυθμού επαναερισμού και του ρυθμού αποξυγόνωσης. Αρχικά και πριν την κρίσιμη κατάσταση υπερισχύει ο ρυθμός αποξυγόνωσης ενώ αμέσως μετά συμβαίνει το αντίθετο. Στην κρίσιμη κατάσταση τα δυο φαινόμενα πραγματοποιούνται με τον ακριβώς ίδιο ρυθμό όμως λόγω της εμφάνισης ακροτάτου στη γραφική παράσταση, γνωρίζουμε ότι ο ρυθμός συγκέντρωσης οξυγόνου ή εναλλακτικά ο ρυθμός ελλείματος του οξυγόνου είναι ίσος με το μηδέν. Σε συνέχεια των παραπάνω μπορούν να προκύψουν και οι τιμές για το κρίσιμο έλλειμα και για την κρίσιμη απόσταση. Κρίσιμο έλλειμα και κρίσιμη απόσταση παρατηρείται προφανώς όταν η τιμή του ελλείματος μεγιστοποιείται ή εναλλακτικά όταν η τιμή της συγκέντρωσης ελαχιστοποιείται. Ακριβώς λόγω της εμφάνισης ακροτάτου γνωρίζουμε ότι στην κρίσιμη κατάσταση ο ρυθμός μεταβολής της συγκέντρωσης αλλά και

του ελλείματος είναι μηδενικός. Παρακάτω οι εξισώσεις έχουν εκφραστεί βάσει του ελλείματος και για τον λόγο αυτό στην προκειμένη περίπτωση μας ενδιαφέρει ο μηδενισμός του ρυθμού αλλαγής του ελλείματος. Τελικά λοιπόν προκύπτει για το κρίσιμο έλλειμα :

**2.4 Κρίσιμο έλλειμα οξυγόνου** Για τον προσδιορισμό της κρίσιμης απόστασης χρησιμοποιείται η βασική εξίσωση του ελλείματος σε συνδυασμό με την λύση του κρίσιμου ελλείματος με το αποτέλεσμα να φαίνεται παρακάτω :

$$x_c = \frac{u}{k_a - k_d} \ln \frac{k_a}{k_d} \left( 1 - \frac{(k_a - k_d) D_o}{k_d L_0} \right)$$

**2.5 Κρίσιμη απόσταση** .Τόσο η τιμή του κρίσιμου ελλείματος όσο και της κρίσιμης απόστασης επηρεάζονται σημαντικά από τον λόγο των συντελεστών του ρυθμού επαναερισμού και αποξυγόνωσης.

Επίσης η κρίσιμη τιμή του ελλείματος εξαρτάται από την αρχική συγκέντρωση του BOD σε απόσταση  $x=0$  και μπορεί να υπολογιστεί με διάφορους τρόπους αναλόγως των συνθηκών που επικρατούν.

**2.6 Επίδραση της θερμοκρασίας.** Η θερμοκρασία μπορεί να επηρεάσει τις σταθερές αποξυγόνωσης και επαναερισμού  $k_d$  και  $k_a$  μέσω σχέσεων που βασίζονται στις τιμές των σταθερών αυτών σε θερμοκρασία 20° C.

$$K_d = k_{d,20} \theta^{(T-20)}$$

$$k_a = k_{a,20} \theta^{(T-20)}$$

**2.7 Μεταβολή σταθερών επαναερισμού, αποξυγόνωσης λόγω θερμοκρασίας.**

Οι τιμές της θερμοκρασίας T αφορούν ένα εύρος τιμών μεταξύ 0 και 30.

**2.8 Επίδραση της αύξησης της ροής** Λόγω της αύξησης της ροής το αποτέλεσμα είναι η μείωση της αρχικής συγκέντρωσης του BOD ενώ γενικότερα εξαιτίας της μεταβολής της παροχής , μεταβάλλονται οι σταθερές ρυθμού επαναερισμού μέσω εκθετικών σχέσεων ταχύτητας ή αντιστρόφως εκθετικών σχέσεων μέσου βάθους.

**2.9 Επίδραση της αύξησης της παροχής**

Στην περίπτωση αύξησης της παροχής κύριο αποτέλεσμα είναι η μείωση του κρίσιμου ελλείματος. (Βλέπε καμπύλες 2.2)

## 2.10 Σταθερά ρυθμού επαναερισμού.

Η σταθερά του ρυθμού επαναερισμού είναι μια παράμετρος που συμμετέχει στην εξίσωση Streeter – Phelps και ο προσδιορισμός της κρίνεται ιδιαίτερα σημαντικός. Αξιοσημείωτη θεωρείται η μεταβολή της παραμέτρου ανάλογα με τις αναταράξεις που γίνονται στην επιφάνεια του υγρού. Πιο συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερη η αναταραχή, τόσο πιο μεγάλη και η αύξηση της τιμής της παραμέτρου  $k_a$ .

Λόγω της μεγάλης σημασίας της παραμέτρου, έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες και έχουν προκύψει διάφορες εμπειρικές σχέσεις για τον υπολογισμό της με σημαντικότερες από αυτές να φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

## 2.11 Εξίσωση υπολογισμού σταθερών ρυθμού επαναερισμού.

O' Connor-Dobbins	$Ka = \frac{12.9u^{0.5}}{H^{1.5}}$
Owens – Edwards – Gibbs	$Ka = \frac{23u^{0.73}}{H^{1.75}}$ για $H = 1-2,5$ $u = 0.1-0.5$ , $Q = 4-36$
Churchill- Elmore – Buckingham (TVA)	$Ka = \frac{11u}{H^{1.67}}$ για $H=2-11$ $u = 2-5$ , $Q = 1000-17000$
USGS	$Ka = \frac{7.6u}{H^{1.33}}$
Tsivoglou	$Ka = \frac{0.048\Delta S}{t}$ για $Q=5-3000$
Όπου	$Ka =$ σταθερά ρυθμού αερισμού ( βάση το e ) , $d^{-1}$ $u =$ μέση ταχύτητα ρεύματος $H =$ μέσο βάθος ρεύματος $\Delta S =$ μεταβολή του ύψους της επιφανειακής στάθμης του νερού. $Q =$ ογκομετρική παροχή $t =$ χρόνος κίνησης, μέρες .

Από τις παραπάνω σχέσεις η Churchill – Elmore – Buckingham εφαρμόζεται περισσότερο ειδικά σε περιπτώσεις μεγάλων ποταμών.

**2.12 Τροποποιήσεις στην εξίσωση Streeter – Phelps.** Όταν για πρώτη φορά αναπτύχθηκε από τους Streeter – Phelps η βασική εξίσωση για τη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου οι καταναλώσεις και οι πηγές που λαμβάνονταν υπόψη ήταν ιδιαίτερα περιορισμένες . Στην πραγματικότητα υπάρχει ένα μεγάλο πλήθος επιπρόσθετων παραγόντων που επηρεάζουν τόσο τις καταναλώσεις όσο και τις πηγές διαλυμένου οξυγόνου στο νερό των αποδεκτών. Για τον λόγο αυτό κρίνεται ως αναγκαία η παρέμβαση και η διόρθωση της εξίσωσης Streeter – Phelps προκειμένου η μαθηματική της

προσέγγιση να γίνει περισσότερο ακριβής και πλησιέστερη σε πραγματικές συνθήκες..

### 2.13 ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΗΓΕΣ ΠΟΥ ΑΡΧΙΚΑ ΑΓΝΟΗΘΗΚΑΝ.

Καταναλώσεις Δ.Ο.	Πηγές Δ.Ο.
Ανθρακούχο BOD	Επαναερίωση .
Αζωτούχο BOD	Πρωτογενής παραγωγή - Αναπνοή
Απαίτηση του ιζήματος σε οξυγόνο	
Αρχικό έλλειμμα D.O.	
Προυπάρχον BOD	
( μη σημειακή πηγή επιφανειακής ροής ).	

Τα νιτροποιητικά βακτήρια είναι πάντα παρόντα στα νερά των αποδεκτών. Παρατηρούνται γύρω από φυτά ή σε βράχους . Τα νιτροποιητικά είναι συνήθως αυτότροφοι οργανισμοί και χρησιμοποιούν το CO<sub>2</sub> ως πηγή άνθρακα. Οι νιτροποιητικοί οργανισμοί εξαρτώνται ιδιαίτερα από τη θερμοκρασία και ειδικά στο εύρος 10 έως 30.

Το οξυγόνο που απαιτεί το ιζήμα είναι σημαντική απώλεια σε μολυσμένα νερά . Επιπλέον λόγω της σωματιδιακής μορφής του BOD και της άλγης που καθιζάνει προκύπτει το συμπέρασμα ότι η λάσπη μπορεί να αυξήσει επιπρόσθετα τις απαιτήσεις σε οξυγόνο.

### 2.14 Πρωτογενής παραγωγή – Αναπνοή

Η καθαρή πρωτογενής παραγωγή ορίζεται ως η ολική πρωτογενής παραγωγή μείον την αναπνοή. Γενικώς στα μοντέλα οξυγόνου θεωρούνται συνθήκες μόνιμης κατάστασης και η καθαρή πρωτογενής παραγωγή είναι μια μέση ημερήσια τιμή.

Από την άλλη η φωτοσύνθεση θεωρείται μεταβαλλόμενη διαδικασία και η αναπνοή αμετάβλητη. Η δυσμενέστερη κατάσταση και η ιδανικότερη κατάσταση για λήψη αποτελεσμάτων είναι όταν η άλγη καταναλώσει μεγάλες ποσότητες οξυγόνου δηλαδή κατά τη νύχτα και οπωσδήποτε πριν ξημερώσει.

### 2.15 BOD βάσης

Το BOD βάσης αποτελεί δείκτη μόλυνσης στους αποδέκτες από μη σημειακές πηγές . Το CBOD μπορεί να οφείλεται σε απορροές κοντά σε αγροτικές περιοχές, από όμβρια ύδατα και απορροές αυτοκινητοδρόμων. Για



μια θεώρηση μόνιμης κατάστασης όλες αυτές οι απορροές δημιουργούν επιπλέον απαιτήσεις οξυγόνου.

Αναλυτικότερα θα εξεταστούν δύο περιπτώσεις αναλύσεων μετά από τροποποιήσεις στις οποίες λαμβάνονται πολλά περισσότερα στοιχεία υπόψη σε σχέση με την αρχική μορφή των γνωστών διαφορικών εξισώσεων.

Η πρώτη τροποποίηση αναφορικά με την εξίσωση Streeter – Phelps πραγματοποιείται προκειμένου να ληφθεί υπόψη η καθίζηση του CBOD. Σύμφωνα με τις εξισώσεις Streeter – Phelps το CBOD διαλύεται εντελώς από το ρεύμα λόγω της αποξυγόνωσης . Απαιτείται όμως ιδιαίτερη προσοχή καθώς το CBOD που λαμβάνει τη μορφή σωματιδίων μπορεί να εκλυθεί και στις εκβολές των ποταμών.

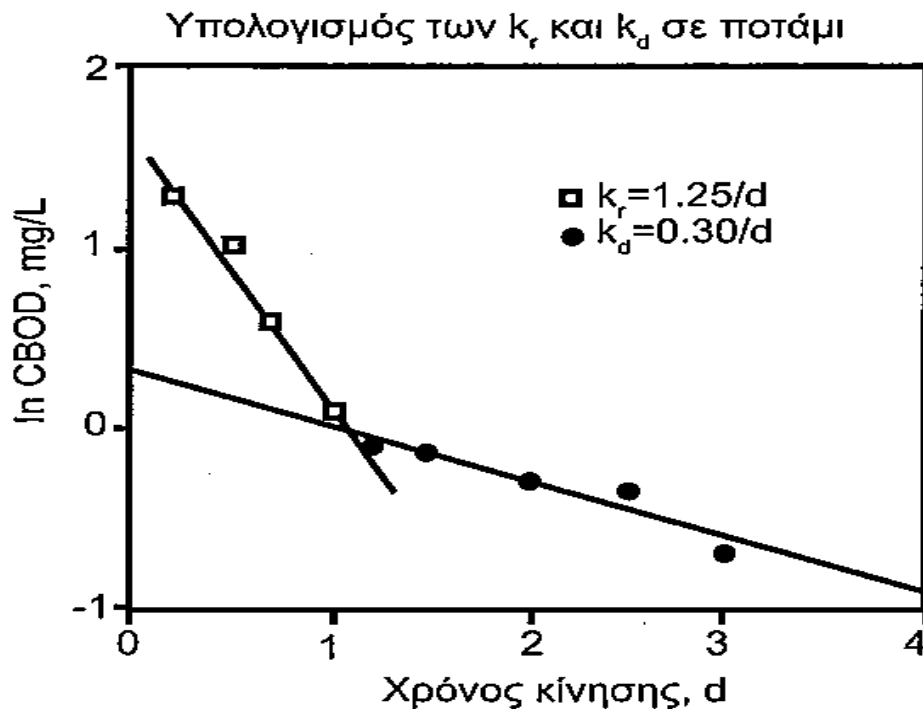
Στόχος λοιπόν είναι να πραγματοποιηθεί μια τροποποίηση η οποία θα λαμβάνει υπόψη την καθίζηση του CBOD.

Η διόρθωση στην οποία καταλήγουμε περιγράφεται με την παρακάτω εξίσωση η οποία διαφέρει σε σχέση με τη βασική – αρχική εξίσωση των Streeter – Phelps ως προς τη σταθερά  $k_d$  η οποία αντικαθίσταται από την σταθερά  $k_r$  η οποία εκφράζει τον ρυθμό απώλειας του συνολικού CBOD.

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-k_a x}{u}\right) + \frac{k_d L_0}{k_a - k_r} \left[ \exp\left(\frac{-k_r x}{u}\right) - \exp\left(\frac{-k_a x}{u}\right) \right]$$

Τροποποιημένη εξίσωση ελλείματος.

Η σχέση μεταξύ των  $k_d$  και  $k_r$  μπορεί να περιγραφεί μέσω ενός διαγράμματος ημιλογαριθμικής κλίμακας το οποίο φέρει στον κατακόρυφο άξονά του τη συγκέντρωση CBOD ενώ στον οριζόντιο άξονά του τον χρόνο κίνησης. Το προαναφερθέν διάγραμμα παρουσιάζεται αμέσως παρακάτω.



Η δεύτερη τροποποίηση αποτελεί στην ουσία μια μεθοδολογία η οποία μπορεί να εφαρμοστεί προκειμένου να πραγματοποιηθεί με όσο το δυνατό ευκολότερο τρόπο ως συνδυασμός των πολλών καταναλώσεων και πηγών. Πρόκειται για την εφαρμογή της αρχής της επαλληλίας η οποία μπορεί να εφαρμοστεί ακριβώς επειδή το ισοζύγιο μάζας του διαλυμένου οξυγόνου στο νερό αποτελεί μια γραμμική διαφορική εξίσωση .

Η εξίσωση του ισοζυγίου στη γενική της διατύπωση έχει την μορφή :

$$\frac{\partial D}{\partial t} = -u \frac{\partial D}{\partial x} - k_a D + k_d L + k_n N + \frac{S}{H} + (R - P)$$

**Ρυθμός** Συσσώρευσης = μεταφορά – κατανάλωση + πηγές ελλείμματος

Εξίσωση ισοζυγίου μάζας.

Το αποτέλεσμα της δεύτερης τροποποίησης με χρήση και εφαρμογή της αρχής της επαλληλίας καθώς επίσης και η λύση αυτής είναι η παρακάτω εξίσωση. (Πως λύνεται αυτή ;) Αμέσως μετά την παρουσίαση της εξίσωσης σχολιάζεται η συνεισφορά κάθε όρου της λύσης.

Τροποποίηση με χρήση αρχής της επαλληλίας

$$D = D_0 e^{-k_a x/u} + \frac{k_d L_0}{k_a - k_r} \left( e^{-\frac{k_r x}{u}} - e^{-\frac{k_a x}{u}} \right) + \frac{k_n N_0}{k_a - k_n} \left( e^{-\frac{k_n x}{u}} - e^{-\frac{k_a x}{u}} \right) + \frac{S}{k_a H} \left( 1 - e^{-\frac{k_a x}{u}} \right) + \frac{R - P}{k_a} \left( 1 - e^{-\frac{k_a x}{u}} \right) + \frac{k_d L_b}{k_a}$$

## 2.16 Επίλυση εξίσωσης ελλείματος

Στην λύση της εξίσωσης που αφορά το έλλειμα του διαλυμένου οξυγόνου υπάρχουν διάφοροι όροι καθένας εκ των οποίων εκφράζει μια συγκεκριμένη κατανάλωση ή μια συγκεκριμένη πηγή.

Εκφράζονται λοιπόν με την παρακάτω σειρά η κατανάλωση λόγω επαναερισμού, το αρχικό CBOD, το αρχικό NBOD, η απαίτηση του ιζήματος σε οξυγόνο, η καθαρή φωτοσύνθεση και το BOD βάσης

Τέλος, οι λύσεις για το CBOD και NBOD δίνονται από τις παρακάτω

εξισώσεις :  $D = D_0 e^{-k_a x/u} + \frac{k_d L_0}{k_a - k_r} \left( e^{-\frac{k_r x}{u}} - e^{-\frac{k_a x}{u}} \right)$

$$N = N_0 e^{-\frac{k_n x}{u}}$$

Η απαίτηση του ιζήματος σε οξυγόνο, η καθαρή πρωτογενής παραγωγή και το BOD βάσης θεωρούνται σταθερές κατά την έκταση του ποταμού που προσομοιώνεται. Στην περίπτωση που οι πηγές/καταναλωτές μεταβάλλονται τότε το ποτάμι θα πρέπει να χωριστεί σε τμήματα σταθερών συντελεστών και η παραπάνω εξίσωση θα χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση κάθε τμήματος με την βοήθεια της κατανομής αποβλήτων.

## 2.17 Κατανομή φορτίου αποβλήτων.

Η κατανομή του φορτίου αποβλήτων είναι απαραίτητη σε περιπτώσεις που υπάρχει υψηλή πιθανότητα το νερό να υποβαθμιστεί ποιοτικά λόγω υψηλής συγκέντρωσης συμβατικών ρύπων. Μάλιστα ο έλεγχος αυτός θα πρέπει να πραγματοποιηθεί ακόμα και όταν οι πηγές τηρούν τις απαιτήσεις και δεν ξεπερνιέται κανένα όριο συγκέντρωσης.

Η πραγματοποίηση της κατανομής φορτίου αποβλήτων επιτυγχάνεται μέσω μοντέλων ποιότητας νερού και πάντα για τις κρίσιμες συνθήκες ροής όπως για παράδειγμα σε καλοκαιρινές περιόδους και κυρίως κατά τη διάρκεια της νύχτας οπότε και είναι ιδιαίτερα μηδενισμένη και οποιαδήποτε δραστηριότητα αφορά την πρωτογενή παραγωγή. Ένα από τα γνωστότερα χρησιμοποιούμενα μοντέλα είναι το QUAL-2EU το οποίο λαμβάνει πολλούς όρους υπόψη, έχει την ικανότητα να αυξάνει ή να μειώνει την συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου και τέλος μπορεί να προβλέψει τη διασπορά και

να λαμβάνοντας υπ όψιν την ανάλυση αβιβαιοτητας Monte Carlo και με χρήση επιμέρους μοντέλων ειδικών για αυτό το έργο. Παρακάτω παρουσιάζεται ένας πίνακας από συνεισφορές πηγών και καταναλωτών ελλείμματος διαλυμένου οξυγόνου ,η εξίσωση ισοζυγίου μάζας καθώς και η λύση τους για ποταμούς σταθερής εμβολικής ροής.

Πηγές ελλείμματος	Εξίσωση ισοζυγίου μάζας	Λύση
Αρχικό έλλειμμα ,Do	$u \frac{dD}{dx} = -k_a D$	$D = D_o e^{-k_a x/u}$
CBOD,L	$u \frac{dD}{dx} = -k_a D + k_d L$	$D = \frac{k_d L_o}{k_a - k_r} (e^{-\frac{k_r x}{u}} - e^{-\frac{k_a x}{u}})$
NBOD,N	$u \frac{dD}{dx} = -k_a D + k_n N$	$D = \frac{k_n N_o}{k_a - k_n} (e^{-\frac{k_n x}{u}} - e^{-\frac{k_a x}{u}})$
Απαίτηση ιζήματος σε οξυγόνο.	$u \frac{dD}{dx} = -k_a D + \frac{S}{H}$	$D = \frac{S}{k_a H} (1 - e^{-k_a x/u})$
Καθαρή (παραγωγή - αναπνοή)	$u \frac{dD}{dx} = -k_a D + (R - P)_{avg}$	$D = \frac{R - P}{k_a} (1 - e^{-\frac{k_a x}{u}})$
Έλλειμμα υποβάθρου, Db	$u0 = -k_a D_b + k_d L_b$	$D_b = \frac{k_d L_b}{k_a}$

Κατά τη διαδικασία της κατανομής του φορτίου αποβλήτων μπορεί να προκύψει ως αναγκαία η τμηματοποίηση του αποδέκτη. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε κάποια μεταβολή των αρχικών συνθηκών λόγω απόρριψης λυμάτων ή λόγω παρουσίας κάποιου φράγματος. Ως αρχικές συνθήκες θεωρούνται οι τιμές των Do, Lo και No οι οποίες στην περίπτωση κάποιας μεταβολής υπολογίζονται βάσει μαθηματικών σχέσεων και εισάγονται ως αρχικές τιμές στις πιθανές τμηματοποιήσεις του αποδέκτη.

Στην περίπτωση που έχουμε εισαγωγή απορροής λυμάτων στο ποτάμι όταν αφορά τη ροή για τα ρεύματα και τις νέες αρχικές συνθήκες θα προκύψει η παρακάτω εξίσωση :

$$L_o = \frac{W + L_s Q}{Q + Q_w}$$

Όπου

$L_0$  = αρχική συγκέντρωση BOD, για  $x=0$ ,  $ML^{-3}$

$W$  = απορροές λυμάτων,  $MT^{-1}$

$L_s$  = συγκέντρωση εισερχόμενου CBOD από ανάντη,  $x = 0$ ,  $ML^{-3}$

$Q$  = ογκομετρική παροχή ποταμού,  $L^3T^{-1}$

$Q_w$  = ογκομετρική παροχή λυμάτων,  $L^3T^{-1}$

Στην περίπτωση που η συγκέντρωση CBOD είναι αρκετά μικρή η παραπάνω εξίσωση απλοποιείται στην ακόλουθη :

$$L_0 = \frac{W}{Q}$$

Παρόμοια εξίσωση με την παραπάνω εκτελείται και για το NBOD λαμβάνοντας υπ όψιν το  $N_0$  για  $x=0$ . Όσον αφορά τις νέες συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου και τις νέες θερμοκρασίες, οι εξισώσεις είναι οι παρακάτω :

$$C_0 = \frac{Q_1 C_1 + Q_2 C_2}{Q_1 + Q_2}$$

Όπου

$C_0$  = αρχική συγκέντρωση αναμεμιγμένου διαλυμένου οξυγόνου,  $ML^{-3}$

$Q_1$  = παροχή κυρίως ποταμού,  $L^3T^{-1}$

$C_1$  = εισερχόμενη συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στον κυρίως ποταμό σε  $x=0$   $ML^{-3}$

$Q_2$  = παροχή πλευρικής εισροής,  $L^3T^{-1}$

$C_2$  = εισερχόμενη συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στην πλευρική εισροή σε  $x=0$ ,  $ML^{-3}$ .

$$T = \frac{Q_1 T_1 + Q_2 T_2}{Q_1 + Q_2}$$

Με  $D_0 = (C_{sat} - C_0)$

Όπου

$T_0$  = αρχική θερμοκρασία μετά την ανάμειξη , °C

$T_1$  = θερμοκρασία κυρίως ποταμού , °C

$T_2$  = θερμοκρασία πλευρικής εισροής , °C

$D_0$  = αρχικό έλλειμμα διαλυμένου οξυγόνου μετά την ανάμειξη ,  $ML^{-3}$

$C_{sat}$  = συγκέντρωση κορεσμού του διαλυμένου οξυγόνου για  $T_0$  ,  $ML^{-3}$ .

Οποιαδήποτε άλλη παράμετρος εκτός των τριών παραπάνω λαμβάνεται ως σταθερή και δεν επηρεάζεται από πιθανή τμηματοποίηση και αυτό συμβαίνει είτε γιατί υπάρχει μεγάλη δυσκολία στον προσδιορισμό τους είτε γιατί δεν υπάρχει λόγος να θεωρηθούν ως διαφορετικές . Παράμετροι που παραμένουν σταθερές είναι η ταχύτητα, η απαίτηση οξυγόνου από το ίζημα , η πρωτογενής παραγωγή, CBOD βάσης λόγω μόλυνσης μη σημειακών πηγών και η σταθερά ρυθμού επαναερισμού. Σύμφωνα λοιπόν με τα όσα ειπώθηκαν παραπάνω ακολουθεί ένα παράδειγμα για την τμηματοποίηση ενός ποταμού σε 4 τμήματα με σταθερούς συντελεστές για την προσομοίωση του διαλυμένου οξυγόνου .Έστω λοιπόν ένας παραπόταμος που διασταυρώνεται με έναν ποταμό. Θα θέλαμε λοιπόν να υπολογίσουμε τις αρχικές συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου , το έλλειμμα διαλυμένου οξυγόνου , το CBOD και τη θερμοκρασία στη συμβολή για χρήση σε μοντέλο διαλυμένου οξυγόνου.

Δίνεται ο παρακάτω πίνακας :

Ποταμός	Παραπόταμος
$T = 26,3^{\circ} C$	$T = 24,9^{\circ} C$
$C_{sat,r} = 8,4 mgL^{-1}$	$C_{sat,t} = 8,6 mgL^{-1}$
$C_r = 7,3 mgL^{-1} (D.O.)$	$C_t = 6,8 mgL^{-1} (D.O.)$
$L_r = 3,0 mgL^{-1} (CBOD)$	$L_t = 6,0 mgL^{-1} (C.B.O.D.)$
$Q_r = 2000 cfs$	$Q_t = 500 cfs$

Θα χρησιμοποιήσουμε τις μέσες και σταθμισμένες με τη ροή συγκεντρώσεις υποθέτοντας την πλήρη ανάμειξη και στα δύο ρεύματα. Επιπλέον , οι συγκεντρώσεις και η θερμοκρασία θα λαμβάνονται για  $x = 0$  στο νέο τμήμα που ξεκινάει από την συμβολή. Τέλος, ο δείκτης r αναφέρεται στον κυρίως

ποταμό ενώ το t στον παραπόταμο. Με αντικατάσταση των τιμών του πίνακα στις παραπάνω εξισώσεις θα έχουμε :

$$L_o = \frac{Q_r L_r + Q_t L_t}{Q_r + Q_t} = \frac{(2000)(3.0) + (500)(6.0)}{2000 + 500}$$

$$L_o = 3.6 \text{ mgL}^{-1} \text{ (CBOD)}$$

$$C_o = \frac{Q_r C_r + Q_t C_t}{Q_r + Q_t} = \frac{(2000)(7.3) + (500)(6.8)}{2000 + 500}$$

$$C_o = 7.2 \text{ mgL}^{-1} \text{ (Συγκέντρωση Δ. Ο.)}$$

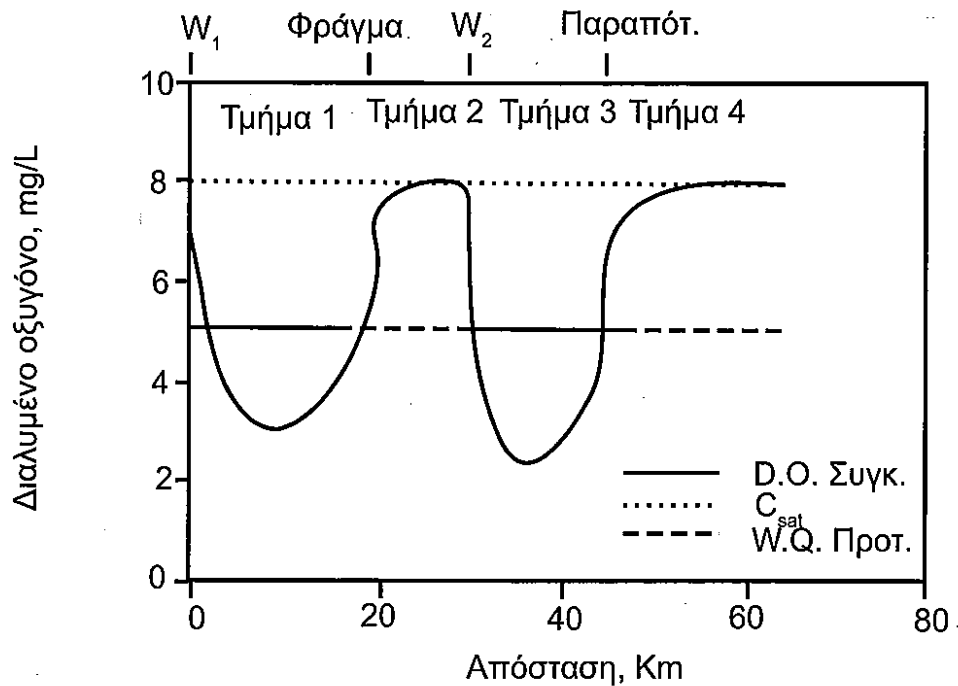
Υπολογίζουμε τώρα τη θερμοκρασία μετά την ανάμειξη των δύο ποταμών .

$$T_o = Q_r T_r + \frac{Q_t T_t}{Q_r + Q_t} = \frac{(2000)(26.3) + (500)(24.9)}{2000 + 500}$$

$$T_o = 26.02^\circ \text{C}$$

Επομένως το αρχικό έλλειμμα του διαλυμένου οξυγόνου υπολογίζεται από τον τύπο :

$$D_o = C_{sat} - C_o = 8.5 - 7.2 = 1.3 \text{ mgL}^{-1}$$



Όπως σχολιάστηκε και παραπάνω, κατά τη διαδικασία της κατανομής φορτίου αποβλήτων είναι απαραίτητο να λαμβάνονται κρίσιμες συνθήκες ροής. Στη διάρκεια της ημέρας τόσο η παραγωγικότητα της άλγης όσο και οι διάφορες μεταβολές στη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου δυσχεραίνουν τη διαδικασία. Η αντιμετώπιση αυτής της κατάστασης επιτυγχάνεται επιλύοντας και πάλι τη διαφορική εξίσωση του ελλείμματος όμως μέσω ενός ισοζυγίου μάζας που λαμβάνει υπόψη τη χρονική μεταβολή. Με αυτόν τον τρόπο και οι λύσεις που προκύπτουν κατά την επίλυση είναι χρονικά μεταβαλλόμενες όπως και θα έπρεπε άλλωστε καθώς θα πρέπει οι απαιτήσεις συγκεντρώσεων να ελέγχονται και να είναι εντός επιτρεπτών ορίων σε κάθε στιγμή στη διάρκεια της ημέρας. Με το να λαμβάνεται υπόψη η χρονική μεταβολή μπορεί να προκύψει τελικά και η ελάχιστη συγκέντρωση στη διάρκεια της ημέρας σε οποιοδήποτε σημείο του αποδέκτη. Με βάση όλα τα παραπάνω θα πρέπει να συμπεριληφθεί η δυσκολία εκτίμησης της πρωτογενούς παραγωγής  $P(x,t)$  και της αναπνοής  $R(x)$  όπου θα πρέπει να μετριοούνται κατά την διάρκεια της ημέρας και σε κάθε σταθμό μέτρησης μέσα στο ποτάμι. Ο παρακάτω τύπος δίνει τον ρυθμό φωτοσυνθετικής παραγωγής οξυγόνου :

$$P(t) = P_m \sin\left(\frac{\pi}{f}(t - t_s)\right)$$



όπου  $t_s \leq t \leq (t_s + f)$  και  $P(t)=0$  όπου  $(t_s + f) \leq t \leq t_s$

όπου

$P_m$  = μέγιστος ρυθμός πρωτογενούς παραγωγής οξυγόνου ,  $mgL^{-1}d^{-1}$

$t_s$  = χρόνος στον οποίο η πηγή ξεκινά , days, d

$f$  = κλάσμα της ημέρας κατά το οποίο η πηγή είναι ενεργή ( συνήθως  $\frac{1}{2}$  ημέρες )

Στην περίπτωση που θέλουμε να υπολογίσουμε την πρωτογενή παραγωγή οξυγόνου για παραπάνω από μια ημέρα εξυπηρετεί καλύτερα η παρακάτω σειρά Fourier :

$$P(t) = P_m \left( \frac{2f}{\pi} + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos \left[ 2\pi n \left( t - t_s - \frac{f}{2} \right) \right] \right)$$

Όπου  $b_n = \cos(n\pi f) \times \frac{4\pi/f}{(\frac{\pi}{f})^2 - (2n\pi)^2}$

$n$  = αριθμός των κύκλων .

Όσον αφορά την ημερήσια μεταβολή συγκέντρωσης οξυγόνου υπολογίζεται από τον τύπο :

$$C_o(t) = \frac{A_0}{2} + A_1 \cos\left(\frac{\pi}{12}t\right) + B_1 \sin\left(\frac{\pi}{12}t\right) + A_2 \cos\left(\frac{\pi}{6}t\right) + B_2 \sin\left(\frac{\pi}{6}t\right)$$

Όπου  $A_0, A_1, A_2, B_1,$  και  $B_2$  είναι οι παράμετροι προσαρμογής που καθορίζουν τη καλύτερη αναπαραγωγή του ημερήσιου κύκλου της συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου στο ανώτατο όριο. Για την καλύτερη κατανόηση των όσων έχουν ειπωθεί παραπάνω παρουσιάζουμε μια έρευνα που έγινε στην βορειοδυτική Βιρτζίνια από τους Deb και Bowers για το South Fork του ποταμού Shenandoah .

Βάζοντας λοιπόν στην παραπάνω εξίσωση τους συντελεστές

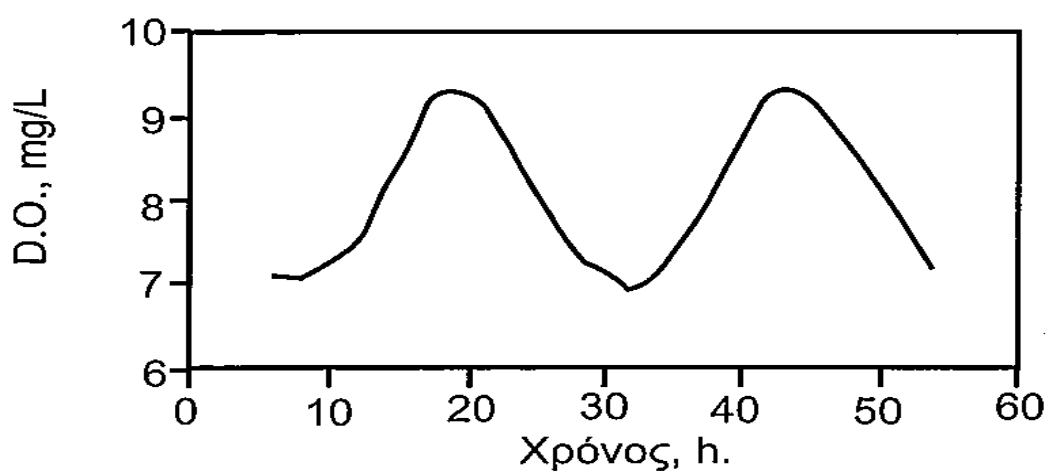
$$A_o = 16, 16,$$

$$A_1 = 0,575,$$

$$A_2 = -0,1, B_1 = -1,025 \text{ και } B_2 = 0.$$

Η χρονική καθυστέρηση μεταξύ μέγιστης παραγωγής και μέγιστης συγκέντρωσης καθορίζεται από τις παραμέτρους  $K_a$ ,  $R(x)$  και  $P(x,t)$  του μοντέλου καθώς επίσης η καλύτερη προσομοίωση της ανάντη ημερήσιας μεταβολής σε διαλυμένο οξυγόνο επηρεάζει σημαντικά την πρόβλεψη της μεταβολής στους κατάντη σταθμούς.

Έχοντας λοιπόν το παρακάτω διάγραμμα :



### Παρατηρούνται τα εξής :

Η συγκέντρωση οξυγόνου ελαχιστοποιείται στις 7-8 π.μ. ( ώρες 7 και 31 ) διότι η αναπνοή ήταν ενεργή κατά τη διάρκεια της νύχτας χωρίς πρωτογενής παραγωγή.

1. Η συγκέντρωση οξυγόνου μεγιστοποιείται στις 7-8 μ.μ. ( ώρες 19 και 43 )

2. Η μέγιστη φωτοσυνθετική παραγωγή παρατηρείται στις 12 – 4 μ.μ.

**Σχόλιο :** η μέγιστη συγκέντρωση οξυγόνου δε συμπίπτει με την περίοδο μέγιστης φωτοσυνθετικής παραγωγής διότι υπάρχει καθυστέρηση που σχετίζεται με τη συσσώρευση διαλυμένου οξυγόνου από την πρωτογενή παραγωγή και τον επαναερισμό.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### **3.1 Ανάλυση αβεβαιότητας**

Σε οτιδήποτε αφορά προσομοιώσεις περιβαλλοντικού χαρακτήρα όπως είναι η κατανομή του φορτίου αποβλήτων, παρατηρείται αβεβαιότητα. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, οι ελεγκτικοί μηχανισμοί να έχουν στη διάθεση τους μόνο αποτελέσματα για τις συγκεντρώσεις των διαφόρων ρύπων και πολλές φορές να μη γνωρίζουν με σιγουριά ότι τα αποτελέσματα αυτά είναι ακριβή εντός ενός πλαισίου που ορίζεται από την στατιστική απόκλιση. Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται στις περιβαλλοντικές προσομοιώσεις διαμορφώνονται μετά από απλοποιήσεις που έχουν στόχο να προσεγγίσουν τη ρεαλιστική κατάσταση και για αυτόν ακριβώς τον λόγο εμπεριέχουν σφάλματα. Όταν υπάρχει κάποιο σφάλμα σε ένα μοντέλο τότε αμέσως προκαλείται αβεβαιότητα στα αποτελέσματα που προκύπτουν και αυτό με τη σειρά του αλυσιδωτά οδηγεί στη λήψη λανθασμένων πρακτικών μέτρων για αντιμετώπιση της εκάστοτε κατάστασης. Οι περισσότερες διαδεδομένες μορφές σφαλμάτων είναι τα σφάλματα που αφορούν το μοντέλο αυτό καθαυτό, τα σφάλματα στις εξαρτημένες μεταβλητές των συναρτήσεων καθώς επίσης και στις αρχικές συνθήκες που διαμορφώνουν το μοντέλο, σφάλματα στα δεδομένα εισόδου του μοντέλου που μπορεί να οφείλονται σε ανθρώπινο παράγοντα και τέλος σφάλματα στις ανεξάρτητες μεταβλητές. Με άλλα λόγια ο κίνδυνος του σφάλματος υπάρχει σε όλα τα βήματα εφαρμογής και λειτουργίας του μοντέλου και ενισχύεται και από τον ανθρώπινο παράγοντα. Ιδιαίτερη αναφορά αξίζει να γίνει για τα σφάλματα του μοντέλου δηλαδή αυτά που προκαλούν διαφοροποίηση του αποτελέσματος του μοντέλου από την πραγματική κατάσταση στο περιβάλλον. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην χρήση εξισώσεων που περιγράφουν φαινόμενα που αναμένουμε να πραγματοποιούνται αλλά τελικά δεν λαμβάνουν χώρα ή και το ακριβώς αντίστροφο. Η δυσκολία με αυτήν την κατηγορία σφαλμάτων έγκειται στο γεγονός ότι δεν υπάρχει καμία ένδειξη για το που έχει γίνει το σφάλμα καθώς το μοναδικό ορατό στοιχείο είναι τα λανθασμένα αποτελέσματα τα οποία παρουσιάζουν απόκλιση σε σχέση με τις μετρήσεις που πραγματοποιούνται στο πεδίο. Ο μοναδικός τρόπος για να πραγματοποιηθούν έλεγχοι και να εντοπιστεί το σφάλμα ενός μοντέλου που αποδεδειγμένα αποκλίνει από τις μετρήσεις του πεδίου είναι να χρησιμοποιηθεί ένα μοντέλο για το οποίο είναι γνωστή η αποτελεσματικότητά του και βήμα προς βήμα να γίνουν συγκρίσεις σε διάφορες εφαρμογές μεταξύ των δύο αυτών μοντέλων. Αυτή η διαδικασία μπορεί να οδηγήσει στην εξερεύνηση του σφάλματος μέσω της επαλήθευσης του από το άλλο μοντέλο. Η διαδικασία αυτή σίγουρα χαρακτηρίζεται από

μεγάλο χρονικό κόστος καθώς δεν υπάρχει κάποια συγκεκριμένη κατεύθυνση εντοπισμού του σφάλματος πέρα από τις διαδοχικές δοκιμές. Οι υπόλοιπες κατηγορίες σφαλμάτων είναι ευκολότερο και να εντοπιστούν και να διορθωθούν μέσω εφαρμογής συγκεκριμένων μεθοδολογιών . Τέτοιες μεθοδολογίες είναι η ανάλυση πρώτου βαθμού και οι προσομοιώσεις Monte Carlo.

### 3.2 Ανάλυση πρώτου βαθμού

Σε αυτή τη μεθοδολογία στόχος είναι να προσεγγιστεί η μεταβολή των εξαρτημένων μεταβλητών με τη μεταβολή των ανεξάρτητων μέσω μετρήσεων που αφορούν τη στατιστική διακύμανση των μεγεθών αυτών. Η ονομασία της μεθόδου αυτής προέρχεται από το γεγονός ότι στο ανάπτυγμα Taylor που χρησιμοποιούνται μόνο οι όροι πρώτου βαθμού και αγνοούνται όλοι οι υπόλοιποι. Στις μετρήσεις της στατιστικής διακύμανσης παίζουν σημαντικό ρόλο οι διακυμάνσεις των επιμέρους μεταβλητών, οι ευαισθησίες σε σχέση με τις ανεξάρτητες μεταβλητές καθώς και ο τρόπος με τον οποίο συσχετίζονται οι διαφορετικές μεταβλητές μεταξύ τους μέσω συντελεστών συσχέτισης. Το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου εξηγείται και πάλι μέσω του ονόματός της καθώς έχει να κάνει με την αγνόηση των όρων υψηλότερης ( πέραν της πρώτης ) τάξης. Το μειονέκτημα αυτό όμως δεν είναι ικανό να αποτρέψει τη μέθοδο από το να δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα, τουλάχιστον όσον αφορά περιβαλλοντικά μοντέλα λόγω της χρήσης μέσων τιμών και τυπικών αποκλίσεων. Ακολουθεί ένα **παράδειγμα με την ανάλυση πρώτου βαθμού**. Η εξίσωση Streeter – Phelps για το BOD σε ποταμούς περιέχει τις παραμέτρους  $L_0$  και  $k_d$  για το αρχικό BOD και την αποξυγόνωση αντίστοιχα. **Ας υποθέσουμε λοιπόν ότι μετά από ένα αρκετά μεγάλο αριθμό μετρήσεων των  $L_0$  και  $k_d$  για τον ποταμό που προσομοιώνεται , οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις θα είναι οι εξής :**

$$L_0 = 10.0 \pm 2.0 \text{mgL}^{-1}$$

$$k_d = 0.6 \pm 0.1 \text{day}^{-1}$$

Όπου η ταχύτητα ροής είναι  $0,305 \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  και η εξίσωση είναι  $L = L_0 e^{-k_d x/u}$

Καθώς το  $L_0$  είναι αρκετά μεγάλο υπάρχει τάση για γρηγορότερη αποξυγόνωση .  $\rho_{L_0 k_d} = +0.7$

Χρησιμοποιώντας λοιπόν τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει ο πίνακας :

X, km	Χρόνος ταξιδιού days	$\bar{L}$ , mgL <sup>-1</sup> Μέση τιμή	$S_L$ , mgL <sup>-1</sup> Τυπική απόκλιση
0	0	10.000	2.000
10	0,3795	7.9637	1.817
20	0,7590	6.3421	1.850
40	1,5179	4.0222	1.3067
60	2,2769	2.5509	1.0062
100	3,7948	1.0261	0.5528

Έχουμε λοιπόν να παρατηρήσουμε τα εξής :

1. Η μέση τυπική απόκλιση του BOD στα 20 km κατάντη της απόρριψης είναι  $6,342 \pm 1,850 \text{ mgL}^{-1}$ . Υπάρχει αρκετά μεγάλη αβεβαιότητα λόγω της μεταβολής του  $L_0$  και της θετικής συσχέτισης μεταξύ  $L_0$  και  $k_d$
2. Ο όρος του σφάλματος ( τυπική απόκλιση ) δεν αυξάνεται, αλλά ο συντελεστής απόκλισης ( τυπική απόκλιση / μέσος όρος ) αυξάνεται από το 20% σε 53,9% μεταξύ του  $\chi=0$  και  $\chi=100$  km

**3.3 Ανάλυση Monte Carlo.** Η μέθοδος αυτή αποτελεί μια ακόμα λύση για τον εντοπισμό των διαφόρων σφαλμάτων στα περιβαλλοντικά προβλήματα και ειδικά στην κατανομή φορτίου αποβλήτων. Κατά την ανάλυση αυτή χρησιμοποιούνται συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας, συνθετικές δειγματοληψίες και ακολουθούνται επαναλαμβανόμενες διαδικασίες έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί μεγάλος αριθμός προσομοιώσεων από τις οποίες στο τέλος λαμβάνεται μια μέση τιμή και μια τυπική απόκλιση η οποία μπορεί και εκφράζει τη συνολική αβεβαιότητα κάθε σφάλματος.

Βασικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι το μεγάλο υπολογιστικό κόστος ειδικά σε μοντέλα μεγάλης έκτασης. Για τις διάφορες παραμέτρους επιλέγονται κατανομές όπως η κανονική και η λογαριθμική. Συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη η λογαριθμοκανονική η οποία χαρακτηρίζεται από το επιπλέον πλεονέκτημα της ικανότητας κάλυψης μετρήσεων που αφορούν περιβαλλοντικά μεγέθη με ασυμμετρία. Ένα ακόμα πλεονέκτημα τους, η

ικανότητα μετατροπής ανά πάσα στιγμή σε κατανομές τύπου Gauss μέσω λογαρίθμισης των δεδομένων τους. Συγκριτικά με την ανάλυση πρώτου βαθμού η ανάλυση Monte Carlo μειώνει τις υπολογιστικές μονάδες και για το λόγο αυτό στις τάξεις των μηχανικών είναι και η επικρατέστερη. Περισσότερο αναλυτικά και συγκεκριμένα η διαδικασία της ανάλυσης Monte Carlo μπορεί να περιγραφεί μέσω των παρακάτω βημάτων.

1. Επιλέγεται το είδος της κατανομής κάθε παραμέτρου και κάθε μεταβλητής του προβλήματος.
2. Συνθετική δειγματοληψία από κάθε κατανομή λαμβάνοντας υπόψη την πιθανότητα κάθε τιμής.
3. Εκτέλεση της πρώτης προσομοίωσης με βάση τις πρώτες τιμές των διαφόρων παραμέτρων και μεταβλητών.
4. Επαναληπτική διαδικασία έως ότου προκύψει ικανοποιητικός αριθμός προσομοιώσεων .
5. Λήψη τελικών αποτελεσμάτων καθώς επίσης και παρουσίαση μέσης τιμής και αποκλίσεων

Για την καλύτερη κατανόηση των παραπάνω ακολουθεί ένα παράδειγμα για το μοντέλο Monte Carlo . Από δειγματοληψίες πεδίου , οι σταθερές των ρυθμών αποξυγόνωσης και επαναερισμού ακολουθούν κανονική κατανομή με τις μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις που γράφονται παρακάτω :

$$k_a = 2.0 \pm 0.3 \text{ day}^{-1}$$

$$k_d = 0.6 \pm 0.1 \text{ day}^{-1}$$

Με τη βοήθεια λοιπόν ενός προγράμματος που παράγει τις τιμές των παραμέτρων και τις καταγράφει έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν ως είσοδοι για το πρόγραμμα προσομοίωσης της Streeter – Phelps παράγονται λοιπόν **50 τιμές** όπου οι τιμές των  **$k_a$  και  $k_d$**  θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν ανά ζεύγη για να **παραχθούν 50 αποτελέσματα για το έλλειμα διαλυμένου οξυγόνου συναρτήσει της απόστασης.**

Η τιμή της συγκέντρωσης του ελλείματος θα καταγράφεται ανά 5 χιλιόμετρα για 50 επαναλήψεις καθώς οι συγκεντρώσεις αποθηκεύονται και εξάγονται οι μέσες και τεταρτημοριακές τιμές. Συνδυάζοντας λοιπόν την αναμενόμενη τιμή με την αβεβαιότητα ( **τιμές  $\pm 25\%$** ) δίνονται στους

ελεγκτικούς μηχανισμούς περισσότερες πληροφορίες στις οποίες μπορούν να βασίσουν τις αποφάσεις τους για τη διαχείριση ποιότητας νερού. Από τα διαγράμματα παρακάτω φαίνεται το εύρος αβεβαιότητας για το BOD και για το έλλειμα διαλυμένου οξυγόνου συναρτήσει της κατώτερης απόστασης. Παρατηρούμε λοιπόν ότι το κρίσιμο σημείο για το έλλειμα του διαλυμένου οξυγόνου είναι στα  $1,76 \pm 0,15 \text{mgL}^{-1}$  με 50% διάστημα εμπιστοσύνης. Η σημασία της ανάλυσης αβεβαιότητας είναι συνεχώς αυξανόμενη και αναμένεται στο μέλλον να υπάρξει τεράστιο ενδιαφέρον προς την κατεύθυνση αυτή καθώς οι πρακτικές λύσεις για την αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών προβλημάτων αποτελούν αποφάσεις των ανθρώπων που καλούνται να λάβουν αποφάσεις και να αναλάβουν τις ευθύνες των αποτελεσμάτων τους. Συνεπώς για όλους τους υπεύθυνους είναι σημαντική η γνώση με μεγάλη βεβαιότητα των αποτελεσμάτων των μοντέλων και η ταύτιση αυτών με τις συνθήκες της πραγματικότητας. Προκύπτουν λοιπόν τα διαγράμματα (βλέπε διαγράμματα 3.1 και 3.2)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### **4.1 ΔΙΑΛΥΜΕΝΟ ΟΞΥΓΟΝΟ ΣΕ ΜΕΓΑΛΑ ΠΟΤΑΜΙΑ ΚΑΙ ΕΚΒΟΛΕΣ.**

BOD – Έλλειμα διαλυμένου οξυγόνου σε μόνιμη κατάσταση. Σε μεγάλα ποτάμια ή εκβολές ποταμού όπου υπάρχει σημαντική ανάμειξη θα μπορούσαμε με την προσέγγιση του όγκου ελέγχου να γράψουμε ισοζύγιο μάζας για το BOD και το διαλυμένο οξυγόνο (ή το έλλειμα του). Πραγματοποιούνται λοιπόν οι παρακάτω αντιδράσεις :

$$L \frac{k_d}{k_a} D \frac{k_a}{k_a} 0$$

Όπου :

**L** = συγκέντρωση BOD,  $\text{mgL}^{-1}$

**D** = έλλειμα διαλυμένου οξυγόνου  $\text{mgL}^{-1}$

**K<sub>d</sub>** = σταθερά του ρυθμού αποξυγόνωσης ,  $\text{d}^{-1}$

**K<sub>a</sub>** = σταθερά του ρυθμού επαναερισμού ,  $\text{d}^{-1}$

Ισχύει λοιπόν ότι : Συσσώρευση = Εισροές – Εκροές ± Αντιδράσεις. Όπου οι εισροές και εκροές οφείλονται στη συναγωγή και στη διασπορά ενώ το

απειροστό λεπτό κομμάτι του ποταμού / εκβολής έχει όγκο  $V = A \cdot \Delta x$ , όπου  $A$  η διατομή και  $\Delta x$  η στοιχειώδη απόσταση στην κατά μήκος διεύθυνση.

Εξίσωση ισοζυγίου μάζας για το BOD :

$$V \frac{\partial L}{\partial t} = QL - Q \left[ L + \frac{\partial L}{\partial x} \Delta x \right] - EA \frac{\partial L}{\partial x} + EA \left[ \frac{\partial L}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial L}{\partial x} \right) \Delta x \right] - k_d LV$$

**Εισροή συναγωγής    εκροή συναγωγής    εισροή διασποράς    εκροή διασποράς    αποξυγόνωση**

Όπου :

**E**= συντελεστής κατά μήκος διασποράς,  $L^2T^{-1}$

**Q** = ογκομετρική παροχή,  $L^3T^{-1}$

**t** = χρόνος.

Ο όρος " εκροή συναγωγής " περιγράφει την εκροή BOD από τον όγκο ελέγχου . Στην κάτω πλευρά του όγκου ελέγχου η συγκέντρωση BOD είναι διαφορετική από αυτή στην πάνω πλευρά, καθώς έχει μεταβληθεί κατά αλλαγή στη συγκέντρωση BOD κατά μήκος της στοιχειώδους απόστασης ,  $(+dL/dx) \cdot \Delta x$ .

1. Ο όρος της εισροής με διασπορά έχει αρνητικό πρόσημο επειδή η διάχυση μάζας προς τα θετικά της διεύθυνσης  $x$  λαμβάνει μόνο όταν το διαφορικό του BOD σε αυτή την κατεύθυνση  $(dL/dx)$  είναι αρνητικό.
2. Ο όρος για την εκροή με διασπορά είναι θετικός γιατί η μάζα μεταφέρεται προς τα έξω όταν το διαφορικό είναι αρνητικό.
3. Ο όρος της εκροής με διασπορά περιέχει μια έκφραση για την αλλαγή του διαφορικού κλίσης του BOD κατά μήκος της στοιχειώδους απόστασης  $(d/dx)(dL/dx) \cdot \Delta x$ .
4. Ο όρος των αντιδράσεων καλύπτει την κατανάλωση του BOD και την αποξυγόνωση στο ποτάμι / εκβολή.

Απλοποιώντας λοιπόν την παραπάνω εξίσωση και διαιρώντας και τα δυο μέλη με τον όγκο ελέγχου ( $V = A \cdot \Delta x$ ) καταλήγουμε στην εξίσωση για μονοδιάστατη μεταφορά και κατανάλωση BOD σε μεγάλο ποτάμι ή εκβολή ποταμού.

$$\frac{\partial L}{\partial t} = -\frac{Q}{A} \frac{\partial L}{\partial x} + E \frac{\partial^2 L}{\partial x^2} - k_d L$$



Η οποία ισχύει για την περίπτωση χρονικά μεταβλητού BOD σε ποτάμι ή εκβολή με σταθερή παροχή, διατομή και συντελεστή διασποράς. Είναι μια παραβολική, μερική διαφορική εξίσωση ισοζυγίου μάζας και μια πιο γενική της μορφή θα είναι η εξίσωση :

$$\frac{\partial D}{\partial t} = -\frac{1}{A} \frac{\partial(QD)}{\partial x} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left( EA \frac{\partial C}{\partial x} \right) - k_d L$$

Στην οποία η διατομή, η παροχή και ο συντελεστής διασποράς μπορούν να μεταβάλλονται χρονικά και χωρικά. Η εξίσωση τώρα για το έλλειμα του διαλυμένου οξυγόνου εξάγεται παρόμοια με την παραπάνω :

$$\frac{\partial D}{\partial t} = -\frac{Q}{A} \frac{\partial D}{\partial x} + E \frac{\partial^2 D}{\partial x^2} + k_d L - k_a D$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} = -\frac{1}{A} \frac{\partial(QD)}{\partial x} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left( EA \frac{\partial D}{\partial x} \right) + k_d L - k_a D$$

Τώρα σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης και με σταθερούς συντελεστές οι εξισώσεις μετατρέπονται σε συστήματα μερικών διαφορικών εξισώσεων :

$$+E \frac{d^2 L}{dx^2} - u \frac{dL}{dx} - k_d L = 0$$

$$+E \frac{d^2 D}{dx^2} - u \frac{dD}{dx} - k_a D + k_d L = 0$$

Όπου  $u$  η μέση ταχύτητα στο ποτάμι ή την εκβολή ( $LT^{-1}$ ). Η μέση ταχύτητα ισούται με την ογκο

Οι παραπάνω εξισώσεις είναι οι διατυπώσεις μόνιμης κατάστασης για το BOD και το

έλλειμα διαλυμένου οξυγόνου σε συστήματα εμβολικής ροής με διασπορά και είναι

ανάλογες της εξίσωσης Streeter - Phelps για ποτάμια με ταχεία ροή. Η αναλυτική λύση για το B

δευτέρου βαθμού με σταθερούς συντελεστές. Είναι ομογενής

(χωρίς παράγοντα εξαναγκασμού)

της γενικής αλγεβρικής τετραγωνικής μορφής :

$$ay'' + by' + cy = 0$$

όπου  $a = E(100 \alpha)$ ,  $b = -u(100\beta)$  και  $c = -k_d(100 \gamma)$

Προκύπτει λοιπόν η γενική λύση :  $Y = Ae^{gx} + Be^{jx}$  όπου A και B οι σταθερές ολοκλήρωσης που προσδιορίζονται από τις οριακές συνθήκες και g και j οι ρίζες της αλγεβρικής εξίσωσης

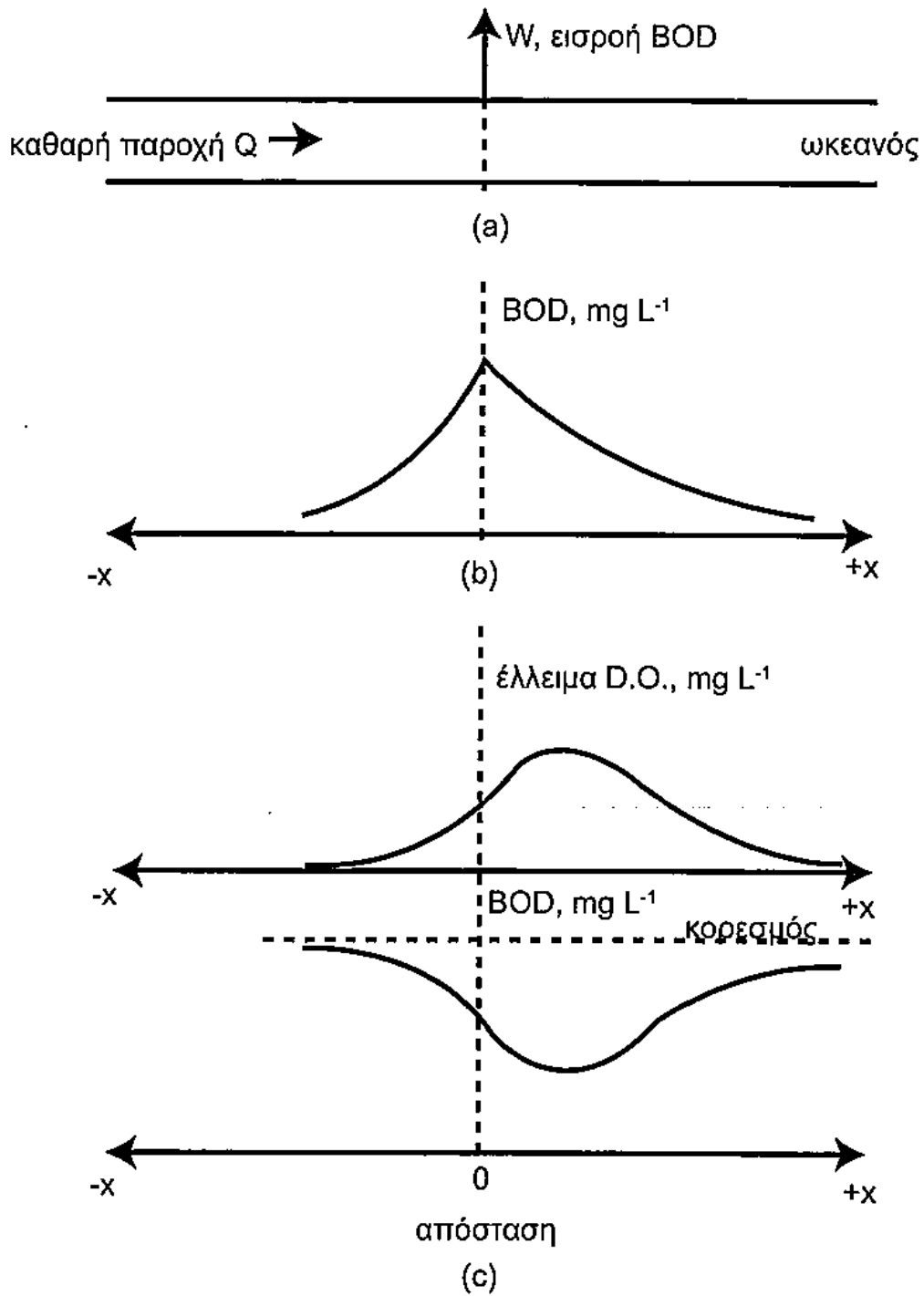
$$g \cdot j = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} = \frac{u \pm \sqrt{u^2 + 4k_d E}}{2E}$$

$$g \cdot j = \frac{u}{2E} \left[ 1 \pm \sqrt{1 + \frac{4k_d E}{u^2}} \right]$$

$$g \cdot j = \frac{u}{2E} [1 \pm m]$$

Όπου  $m = \sqrt{1 + \frac{4k_d E}{u^2}}$ , και τα A,B προσδιορίζονται χρησιμοποιώντας τις προς τα επάνω και προς τα κάτω οριακές συνθήκες.

Παρακάτω παρουσιάζεται η σχηματική λύση του προβλήματος :



Η αναλυτική λύση λοιπόν χωρίζεται σε δύο μέρη ,:

1. Ένα τμήμα προς την πάνω πλευρά της απόρριψης των λυμάτων  $W$
2. Ένα τμήμα προς την κάτω πλευρά της απόρριψης , το οποίο εκτείνεται μέχρι τη θάλασσα για την περίπτωση επίπεδης εκβολής ποταμού.

3. Όπως είναι αναμενόμενο η συγκέντρωση του BOD θα είναι μηδέν πολύ ψηλά ανάντη ενώ στο σημείο απόρριψης δηλαδή στη θέση  $x=0$  η συγκέντρωση θα είναι η μέγιστη  $L_0$ .

Για την πάνω (πριν την απόρριψη) λύση της εξίσωσης όπου το  $x$  είναι αρνητικό θα ισχύουν οι παρακάτω συνοριακές συνθήκες :

BC 1: για  $x = -\infty$ ,  $L = 0$

BC 2 : για  $x=0$ ,  $L = L_0$

Με βάση λοιπόν την πρώτη οριακή συνθήκη ο συντελεστής ολοκλήρωσης  $B=0$  διότι η λύση  $g$  είναι πάντα θετική και η  $j$  πάντα αρνητική. Από τη δεύτερη οριακή συνθήκη προκύπτει ότι ο συντελεστής ολοκλήρωσης  $A = L_0$ . Επομένως, η λύση που προκύπτει για το BOD θα είναι :

$$L = L_0 e^{gx} \text{ για } x \leq 0$$

$$\text{Όπου } g = \frac{u}{2E} [1 + m] \text{ και } m = \sqrt{1 + \frac{4k_d E}{u^2}}$$

Με παρόμοιο τρόπο η λύση της εξίσωσης για το κάτω τμήμα βασίζεται στις παρακάτω οριακές συνθήκες :

BC 1 : για  $x = +\infty$ ,  $L = 0$

BC 2 : για  $x=0$ ,  $L = L_0$

Από την πρώτη οριακή συνθήκη προκύπτει ότι  $A = 0$ , ενώ από την δεύτερη οριακή συνθήκη προκύπτει ότι  $B = L_0$ . Επομένως, η λύση που προκύπτει αυτή τη φορά για το BOD θα είναι :

$$L = L_0 e^{jx} \text{ για } x \geq 0$$

$$\text{Όπου } j = \frac{u}{2E} [1 - m], \quad m = \sqrt{1 + \frac{4k_d E}{u^2}} \text{ και } |g| > |j|$$

Από το παραπάνω σχήμα λοιπόν καταλήγουμε σε κάποια συγκεκριμένα συμπεράσματα .

1. Η μείωση του BOD λόγω μεταφοράς και κατανάλωσης, είναι πολύ πιο απότομη στην πάνω κατεύθυνση από ότι στην κάτω ..
2. Η συγκέντρωση του BOD μειώνεται εκθετικά και στις δύο κατευθύνσεις εξαιτίας της ανάμιξης με διασπορά και της αποξυγόνωσης ( κατανάλωσης ).

Καλούμαστε λοιπόν τώρα να αντιμετωπίσουμε το εξής πρόβλημα : μας είναι άγνωστη η συγκέντρωση του BOD στην πηγή των λυμάτων και δεν μπορούμε να θεωρήσουμε την συγκέντρωση ίση με το λόγο της μαζικής εισροής του BOD προς την ογκομετρική παροχή κάτι που δεχτήκαμε στην περίπτωση του καναλιού εμβολικής ροής .Θα πρέπει λοιπόν εδώ να γίνει ισοζύγιο μάζας γύρω από ένα απειροστό λεπτό κομμάτι του ποταμού στη θέση  $x = 0$  Η μάζα του BOD που εισέρχεται από την πάνω πλευρά στο σημείο απόρριψης ( $x=0$ ) είναι  $Q \cdot L_0$  . Η μάζα που μεταφέρεται προς την πάνω κατεύθυνση δίνεται από την αναλογία προς το νόμο του Fick .

$$\left( QL_0 - EA \frac{dL_1}{dx} \Big|_{x=0} + W \right) \rightarrow \Big|_{x=0, \Delta x} \rightarrow \left( QL_0 - EA \frac{dL_2}{dx} \Big|_{x=0} \right)$$

Όπου:

Για συνθήκες μόνιμης κατάστασης οι εισροές μάζας = εκροές μάζας.

**Q** : η παροχή ,  $L^3T^{-1}$

**L<sub>0</sub>** : η συγκέντρωση BOD στο  $x=0$  ,  $ML^{-3}$

**E** : ο μέσος λόγω παλίνρροιας συντελεστής κατά μήκους διασποράς ,  $L^2T^{-1}$

**A** : το μέσο εμβαδό διατομής  $L^2$

**L<sub>1</sub>** : η προς τα ανάντη λύση για τη συγκέντρωση του BOD , με την παράγωγο να υπολογίζεται για  $x = 0$  όπου  $x$  η κατά μήκος απόσταση  $L$ .

**W** : ο ρυθμός απόρριψης μάζας ,  $MT^{-1}$

**L<sub>2</sub>** : η κατάντη λύση του οποίου η παράγωγος υπολογίζεται στο σημείο απόρριψης ,  $x = 0$ .

Υπολογίζοντας τις παραγώγους  $dL_1/dx$  και  $dL_2/dx$  στο σημείο απόρριψης προκύπτουν

$$\frac{dL_1}{dx} \Big|_{x=0} = gL_0$$

$$\frac{dL_2}{dx} \Big|_{x=0} = jL_0$$

Αντικαθιστώντας στην παραπάνω εξίσωση θα έχουμε :

$$-gEAL_0 + W = -jEAL_0$$

Αναδιατάσσοντας την παραπάνω εξίσωση και με αντικατάσταση των ορισμών  $g$  και  $j$  θα έχουμε :

$$L_0 = \frac{W}{EA(g-j)} = \frac{W}{EA \left[ \frac{u}{2E}(1+m) - \frac{u}{2E}(1-m) \right]}$$

Επειδή λοιπόν τώρα η παροχή ισούται με το γινόμενο της μέσης ταχύτητας και του εμβαδού διατομής, η τελική λύση για τη συγκέντρωση του BOD στο σημείο απόρριψης θα είναι :

$$L_0 = \frac{W}{Qm}$$

Όπου  $m = \sqrt{1 + \frac{4k_d E}{u^2}}$

Έτσι λοιπόν η συγκέντρωση του BOD στο σημείο απόρριψης θα είναι μικρότερη από αυτή της απλής εμβολικής ροής καθώς το  $m$  θα είναι πάντα μεγαλύτερο της μονάδας. Μπορεί λοιπόν να παρατηρηθεί από το παραπάνω σχήμα ότι το BOD αναμειγνύεται προς την επάνω πλευρά λόγω της κατά μήκος διασποράς. Έχει παρατηρηθεί ότι στις εκβολές των ποταμών η παλίρροια ωθεί την ανάμειξη και πάνω από το σημείο απόρριψης. Θα δημιουργηθεί έλλειμα διαλυμένου οξυγόνου και προς αυτή τη κατεύθυνση. Θέλουμε τώρα να λύσουμε την παραπάνω εξίσωση για το έλλειμα διαλυμένου οξυγόνου σε ποτάμι ή εκβολή ποταμού. Εύκολα παρατηρούμε ότι η διαφορική εξίσωση είναι πλέον μη – ομογενής.

$$E \frac{d^2 D}{dx^2} - u \frac{dD}{dx} - k_a D = -k_a L$$

Όπου ο παράγοντας εξαναγκασμού στη δεξιά πλευρά της εξίσωσης περιλαμβάνει τη συγκέντρωση BOD οπότε θα πρέπει να αντικατασταθούν οι εξισώσεις για την πάνω και την κάτω λύση της εξίσωσης του ελλείματος διαλυμένου οξυγόνου. Οι λύσεις που θα προκύψουν θα είναι της γενικής μορφής  $y = Ae^{gx} + Be^{jx} + y_p(x)$

Όπου  $y_p(x)$  είναι μια ειδική λύση της μη – ομογενούς εξίσωσης .Λύνοντας λοιπόν ως προς  $y_p$  και με την χρήση των οριακών συνθηκών προκύπτει η παρακάτω εξίσωση : $y_p = \frac{k_d W}{(k_a - k_d) Q m_1} \exp \left[ \frac{u x}{2 E} (1 \pm m_1) \right]$

Όπου  $m_1 = \sqrt{1 + \frac{4 k_d E}{u^2}}$  το οποίο είναι ίδιο με προηγουμένως . Θα χρειαστεί όμως να διαχωρίσουμε τη ρίζα της ειδικής λύσης από αυτή της ομογενούς εξίσωσης. Θα χρησιμοποιήσουμε λοιπόν τη θετική ρίζα για την πάνω λύση ( $x \leq 0$ ) και την αρνητική ρίζα για την κάτω λύση ( $x \geq 0$ ). Για τον προσδιορισμό λοιπόν των σταθερών Α και Β επάνω και κάτω από το σημείο απόρριψης θα χρησιμοποιηθούν οι οριακές συνθήκες :

$$\text{BC 1 : για } x = +\infty, D = 0$$

$$\text{BC 2 : για } x = 0, D = D_0$$

$$\text{BC 3 : για } x = -\infty, D = 0$$

Για να εκτιμήσουμε το  $D_0$  χρησιμοποιούμε το ισοζύγιο μάζας γύρω από ένα απειροστά λεπτό κομμάτι στο σημείο απόρριψης . Θα θεωρήσουμε ότι η απόρριψη είναι κορεσμένη σε διαλυμένο οξυγόνο και θα έχουμε εισροές και εκροές ελλείματος λόγω διασποράς και συναγωγής. Στο εσωτερικό του απειροστού λεπτού κομματιού, οι αντιδράσεις θεωρούνται αμελητέες.

$$\left[ -EA \frac{dD_1}{dx} \Big|_{x=0} + QD_0 \right] \rightarrow |Dx| \rightarrow \left[ -EA \frac{dD_2}{dx} \Big|_{x=0} + QD_0 \right]$$

Είσοδοι

έξοδοι

Αξιίζει να παρατηρήσουμε τα εξής :

1. Οι όροι της συναγωγής αλληλοαναιρούνται.
2. Η εξίσωση μας δείχνει ότι η ροή μάζας ελλείματος διαλυμένου οξυγόνου = με τη ροή μάζας που εξέρχεται από αυτό .
3. Φαίνεται να είναι ένα ομαλό προφίλ ελλείματος διαλυμένου οξυγόνου παρόλο που υπάρχει σημείο καμψής στη θέση  $x=0$  του προφίλ του BOD.

Τελική αναλυτική λύση για το έλλειμα διαλυμένου οξυγόνου :

$$D = \frac{k_d W}{(k_a - k_d)} \left[ \frac{1}{m_1} \exp \left\{ \frac{ux}{2E} (1 \pm m_1) \right\} - \frac{1}{m_2} \exp \left\{ \frac{ux}{2E} (1 \pm m_2) \right\} \right]$$

Όπου :

$$m_2 = \sqrt{1 + \frac{4k_d E}{u^2}}$$

$$m_1 = \sqrt{1 + \frac{4k_d E}{u^2}}$$

Στην παραπάνω εξίσωση χρησιμοποιούμε θετικά πρόσημα εκεί που  $x \leq 0$  ( ανάντη ) και αρνητικά πρόσημα εκεί που  $x \geq 0$  (κατάντη της απόρριψης ). Όσον αφορά τις τιμές των  $m_1$  και  $m_2$  περιέχουν σημαντικούς διαστατικούς αριθμούς που βοηθούν στο να προσδιοριστεί η σχετική σημασία της διασποράς και της συναγωγής σε ποτάμια και εκβολές ποταμών με βιοχημικές αντιδράσεις. Υπεριοχύνει η διασπορά όταν  $\frac{k_d E}{u^2} > 20$  ενώ υπεριοχύνει η συναγωγή όταν  $\frac{k_d E}{u^2} < 0.05$ . Για παράδειγμα μια συνηθισμένη εκβολή ποταμού στις Η.Π.Α. όπου ο ρυθμός αποξυγόνωσης λόγω BOD  $\approx 0,1d^{-1}$ , ο συντελεστής κατά μήκος διασποράς λόγω της παλίρροιας θα ήταν της τάξης των  $25 \text{ m}^2 d^{-1}$  και η ( μέση λόγω παλίρροιας ) ταχύτητα του νερού θα ήταν  $-2 \text{ m} d^{-1}$ .

$$\frac{k_d E}{u^2} = \frac{(0.1)(25)}{(2^2)} = 0.63$$

Σύμφωνα με τον παραπάνω υπολογισμό φαίνεται πόσο σημαντική για την μεταφορά του BOD είναι η διασπορά όσο και η συναγωγή σε εκβολές με μικρή κλίση. Για την καλύτερη κατανόηση όλων των παραπάνω δίνεται ένα παράδειγμα , με BOD – έλλειμα διαλυμένου οξυγόνου σε εκβολή ποταμού σε μόνιμη κατάσταση . Με συνεχής απόρριψη λυματικού BOD εκλύεται σε μια



εκβολή ποταμού με μικρή κλίση . Οι παράμετροι που δίνονται παρακάτω έχουν προσδιοριστεί από εργαστηριακές μετρήσεις και μετρήσεις πεδίου.

Συντελεστής διασποράς.	$E = 15 \text{ m}^2 \text{ d}^{-1}$
Σταθερά του ρυθμού αποξυγόνωσης	$K_d = 0.15 \text{ d}^{-1}$
Σταθερά του ρυθμού επαναερισμού.	$K_a = 0.18 \text{ d}^{-1}$
Καθαρή (μέση λόγω παλίρροιας) ταχύτητα.	$u = 3.57 \text{ m d}^{-1}$
Ρυθμός απόρριψης μάζας BOD μέσα στα λύματα διά παροχή.	$W/Q = 18.5 \text{ mg L}^{-1}$

Θα θέλαμε λοιπόν να υπολογιστεί η συγκέντρωση του BOD και το έλλειμα του διαλυμένου οξυγόνου σε μόνιμη κατάσταση , τόσο ανάντη όσο και κατόντη του σημείου απόρριψης στη θέση δηλαδή  $x = 0$  καθώς επίσης να γίνουν τα διαγράμματα :

A) BOD ως προς  $x$

B) ελλείματος διαλυμένου οξυγόνου ως προς  $x$ .

Γ)  $k_d \cdot L$  και  $k_a \cdot D$  ως προς  $x$

Δ) των ροών λόγω συναγωγής και λόγω διασποράς

$$uL, uD, -E \frac{dL}{dx}, -E \frac{dD}{dx}$$

Η συγκέντρωση BOD και το έλλειμα διαλυμένου οξυγόνου υπολογίζονται με την χρήση των παραπάνω εξισώσεων και της εξίσωσης :

$$L = L_0 \exp \left[ \frac{ux}{2E} (1 \pm m_1) \right].$$

Το θετικό πρόσημο χρησιμοποιείται όταν  $x \leq 0$  (πάνω) και το αρνητικό όταν  $x \geq 0$  (κάτω).

$$D = \frac{k_d W}{(k_a - k_d) Q} \left\{ \frac{\exp \left[ \frac{ux}{2E} (1 \pm m_1) \right]}{m_1} - \frac{\exp \left[ \frac{ux}{2E} (1 \pm m_2) \right]}{m_2} \right\}$$

Όπου :

$$m_1 =$$

$$\sqrt{1 + \frac{4k_d E}{u^2}} = 1.31$$

$$m_2 = \sqrt{1 + \frac{4k_a E}{u^2}} = 1.36$$

$$L_0 = \frac{W}{Qm_1} 14.16mgL^{-1}$$

Για  $\chi \leq 0$  ( πάνω πλευρά )  $L = 14.16e^{0.2744x}$

Για  $\chi \geq 0$  ( κάτω πλευρά )  $L = 14.16e^{-0.0364x}$

Και

$$D = 92.5(0.763e^{0.2744x} - 0.735e^{0.2808x}) \text{ για } \chi \leq 0$$

$$D = 92.5(0.763e^{-0.369x} - 0.735e^{-0.0428x}) \text{ για } \chi \geq 0$$

Επιπλέον θα έχουμε :

$$\frac{dL}{dx} = -0.515e^{-0.0364x} \text{ για } \chi > 0$$

$$\frac{dD}{dx} = 92.5(0.209e^{0.2744x} - 0.206e^{0.2808x}) \text{ για } \chi \leq 0$$

$$\frac{dD}{dx} = 92.5(-0.028e^{-0.369x} + 0.0315e^{-0.0428x}) \text{ για } \chi \geq 0$$

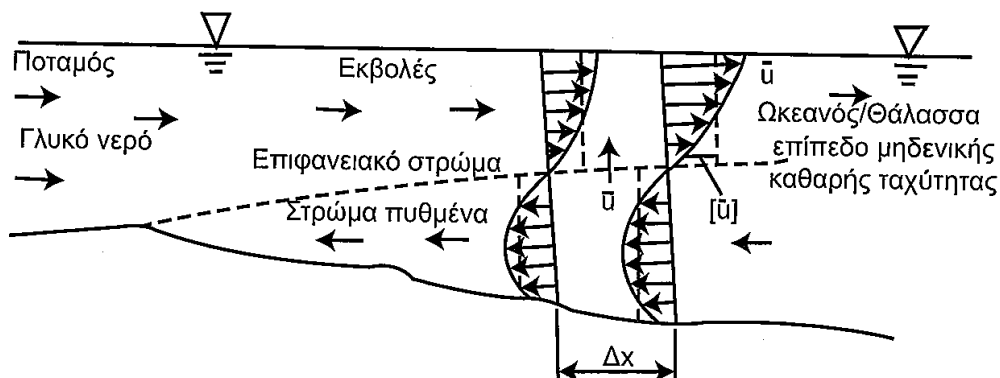
Με την βοήθεια λοιπόν του προγράμματος matlab προκύπτουν τα γραφήματα (Βλέπε γραφήματα 1.3 -1.4 -1.5 και 1.6 σελίδα 58 -59)

Έχουμε λοιπόν να παρατηρήσουμε τα εξής:

1. Το σημείο καμψής στη θέση  $\chi = 0$  για το BOD δημιουργεί απροσδιοριστία στην ροή λόγω διασποράς σε εκείνο το σημείο.
2. Ο ρυθμός αποξυγόνωσης ( $k_a \cdot L$ ) ισούται με το ρυθμό επαναερισμού ( $k_a \cdot L$ ) για  $\chi = 25\text{mi}$ .
3. Το παραπάνω σημείο είναι λίγο κατάντη του σημείου όπου παρατηρείται το κρίσιμο έλλειμα  $D_c$  στο  $\chi_c = 20\text{mi}$  λόγω της ανάμειξης με διασπορά.
4. Οι ροές μάζας λόγω συναγωγής ( $u \cdot L$  και  $v \cdot L$ ) είναι μεγαλύτερες από αυτές λόγω διασποράς, αλλά και οι δύο τρόποι μεταφοράς είναι σημαντικοί.

#### 4.2 Εκτίμηση παραμέτρων και ανακυκλοφορίας σε εκβολές ποταμών.

Η ανακυκλοφορία σε εκβολές ποταμών προκύπτει από τη διαφορά πυκνότητας που προκαλείται από την 'εισβολή' θαλάσσιων υδάτων στο στρώμα του πυθμένα. Εάν αγνοήσουμε τις **δυνάμεις Coriolis**, προκύπτει ένα πιο απλό πρόβλημα στο δισδιάστατο χώρο το οποίο παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα το οποίο είναι αποτέλεσμα της πρωτοποριακής δουλειάς του O' Connor και των συνεργατών του.



Σύμφωνα λοιπόν με το παραπάνω σχήμα, τα θαλάσσια νερά εισέρχονται κάτω από το επίπεδο μηδενικής καθαρής ροής, προκαλώντας αντιστροφή της ροής στο βάθος του δέλτα. Από την αρχή της συνέχειας απαιτείται η κατακόρυφη ανάμειξη των βαθύτερων στρωμάτων προς τα επάνω, πράγμα

που αυξάνει τη διασπορά , όπως και την κατακόρυφη διατμητική ταχύτητα. Η ταχύτητα της παλίρροιας μπορεί να είναι και πέντε φορές την καθαρή ( μέση λόγω παλίρροιας ) κατά μήκος ταχύτητα  $u$ . Ο τύπος της ταχύτητας είναι :

$$u = \frac{Q_f}{A}$$

Όπου :

$u$  = καθαρή ( μέση λόγω παλίρροιας ) ταχύτητα γλυκού νερού ,  $L T^{-1}$ .

$Q_f$  = παροχή γλυκού νερού ,  $L^3 T^{-1}$ .

$A$  = μέσο εμβαδό διατομής ,  $L^2$ .

Παρακάτω παρουσιάζεται σχηματικά ο παλιρροιακός κύκλος για εκβολή ποταμού όπου :Α) κανονικοποιημένη στάθμη , Β ) ταχύτητα άμπωτης και πλημμυρίδα, Γ) συγκέντρωση αλατότητας. **(βλέπε σχήμα 1 σελίδα 60 )**

Να παρατηρηθεί ότι στο δεύτερο διάγραμμα που παρουσιάζεται η ταχύτητα πλημμυρίδας και αμφοτής για ένα παλιρροιακό κύκλο σε ένα σημείο της εκβολής ενός ποταμού , η μέση ταχύτητα είναι σταθερή με το χρόνο και προστίθεται στην ταχύτητα πλημμυρίδας και αμφοτής για να δώσει την πραγματική ταχύτητα κατάντη ροής ανά πάσα στιγμή. Σε εκβολές ποταμού που έχουν μικρή κλίση , η μέση κατακόρυφη αλατότητα είναι χοντρικά σύγχρονη με τη στάθμη. Η στάθμη όμως έχει καθυστέρηση  $90^\circ$  ( το ένα τέταρτο ενός παλιρροιακού κύκλου ) ως προς την ταχύτητα λόγω παλίρροιας. Λόγω της παλιρροιακής δράσης προκαλείται αρκετά μεγάλη κατά μήκος διασπορά , με τη ροή στην εκβολή κατεύθυνση κατά τη διάρκεια του κύκλου. Λαμβάνοντας λοιπόν υπόψιν τη δυναμική των εκβολών θα ήταν αρκετά δύσκολη η μέτρηση της καθαρής παλιρροιακής ταχύτητας των γλυκών νερών. Οι τρόποι με τους οποίους μπορεί να εκτιμηθεί η παραπάνω ταχύτητα είναι δύο :

1. Χρησιμοποιώντας την παραπάνω εξίσωση , η παροχή γλυκού νερού θα υπολογιστεί στον τελευταίο σταθμό μέτρησης του ποταμού και το μέσο εμβαδό διατομής το οποίο θα εκτιμηθεί και αυτό από βυθομετρικούς χάρτες της εκβολής.
2. Με τη βοήθεια της χρήσης φθορίζουσας χρωστικής (π.χ. Rhodamine WT ) που μπορεί να μετρηθεί με ευαισθησία από φθορόμετρο. Σε αυτήν την περίπτωση συνιστάται η έκλυσή της καθώς και η

διεξαγωγή των μετρήσεων να γίνεται στο τέλος της πλημμυρίδας ( η μέγιστη στάθμη φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα ), ή της αμποτής ( η ελάχιστη στάθμη ), όταν η παλιρροιακή ταχύτητα είναι ελάχιστη. Μπορεί λοιπόν να μετρηθεί με αρκετή ακρίβεια η καθαρή , μη παλιρροιακή ταχύτητα.

Η καθαρή ταχύτητα υπολογίζεται με βάση των παρακάτω τύπο :

$$u = \frac{x_p}{t_n}$$

Παρατηρούμε ότι η καθαρή ταχύτητα βασίζεται στην απόσταση  $x_p$  μεταξύ του σημείου απόρριψης της χρωστικής μέχρι το σημείο μέγιστης συγκέντρωσής της και  $t_n$  ο χρόνος από την απόρριψή της (  $n$  ο αριθμός παλιρροιακών κύκλων ). Ο μέσος παλιρροιακός κύκλος διαρκεί 12,42 ώρες . Αν η μάζα της χρωστικής μεταφέρθηκε κατά 14km σε πέντε πλήρεις κύκλους , η μέση ταχύτητα θα είναι  $14 / (5 * 12,42)$  ή  $0,22 \text{ kmh}^{-1}$ . Ο συντελεστής κατά μήκους διασποράς σε εκβολή ποταμού μπορεί να εκτιμηθεί με έναν από τους παρακάτω τρεις τρόπους :

1. Από τα δεδομένα αλατότητας
2. Από πειράματα χωρικής κατανομής χρωστικής ( δείκτη ) .
3. Από πειράματα χρονικής κατανομής χρωστικής ( δείκτη ) .

Για τον υπολογισμό του  $E$  αρχικά χρησιμοποιούνται δεδομένα αλατότητας . Η αλατότητα είναι ένας φυσικός δείκτης της κατά μήκους διάχυσης στην εκβολή και μειώνεται εκθετικά από την πηγή ( θάλασσα ) προς την ανάντη κατεύθυνση. Το θαλασσινό νερό περιέχει περίπου 35.000ppm ολικών διαλυμένων στερεών με ιοντική ισχύ  $0,65 \text{ M}$  και συγκέντρωση  $\text{NaCl} \approx 0.5 \text{ M}$ . Οι ποταμοί πολύ συχνά εκβάλουν σε κόλπους ή στενά καλυμμένα από νησιά , έτσι λοιπόν η αλατότητα της πηγής θα είναι χαμηλότερη ( 20,000 – 25,000 ppm). Το ισοζύγιο μάζας για την αλατότητα , μια αδρανή ουσία στη μόνιμη κατάσταση είναι :

$$E \frac{d^2 S}{dx^2} - u \frac{dS}{dx} = 0$$

Όπως είναι γνωστό , για την επίλυση μίας διαφορικής εξίσωσης δευτέρου βαθμού χρειάζονται δύο οριακές συνθήκες :

$$\text{BC 1 : } S = S_0 \text{ για } x = 0$$

$$\text{BC 2 : } S = 0 \text{ για } x = - \infty$$

Όπου  $S$  η συγκέντρωση αλατότητας και  $S_0$  η συγκέντρωσή της στην πηγή ( θάλασσα ) στη θέση  $x = 0$  Η λύση της παραπάνω εξίσωσης αναφέρεται στην κίνηση στην ανάντη κατεύθυνση , δηλαδή για αρνητικές τιμές της απόστασης .

$$S = S_0 e^{\frac{ux}{E}} \quad \text{για } x \leq 0$$

Επιπλέον, θα πρέπει να γνωρίζουμε ότι ένα ημιλογαριθμικό διάγραμμα αλατότητας ως προς την απόσταση θα πρέπει να έχει κλίση  $u/E$  και τετμημένη επί της αρχής  $S_0$ .

$$\ln S = \frac{ux}{E} + \ln S_0$$

Από την κλίση του ημιλογαριθμικού διαγράμματος μπορούμε να λύσουμε ως προς τον συντελεστή κατά μήκους διασποράς. Για την καλύτερη κατανόηση όλων αυτών που ειπώθηκαν παραπάνω ακολουθεί ένα παράδειγμα εκτίμησης του συντελεστή διασποράς από δεδομένα αλατότητας σε εκβολή ποταμού . Στην προς τα επάνω πλευρά απόσταση από το στόμιο του ποταμού James στη Βιρτζίνια , έχουμε κάνει κάποιες μετρήσεις αλατότητας και θέλουμε να υπολογίσουμε τον συντελεστή κατά μήκους διασποράς  $E$  , σε  $\text{mi}^2\text{d}^{-1}$  και  $\text{cm}^2\text{s}^{-1}$  όπου η ταχύτητα του γλυκού νερού έχει βρεθεί ότι από μετρήσεις χρωστικής στα  $1,8 \text{ mi}\text{d}^{-1}$ .

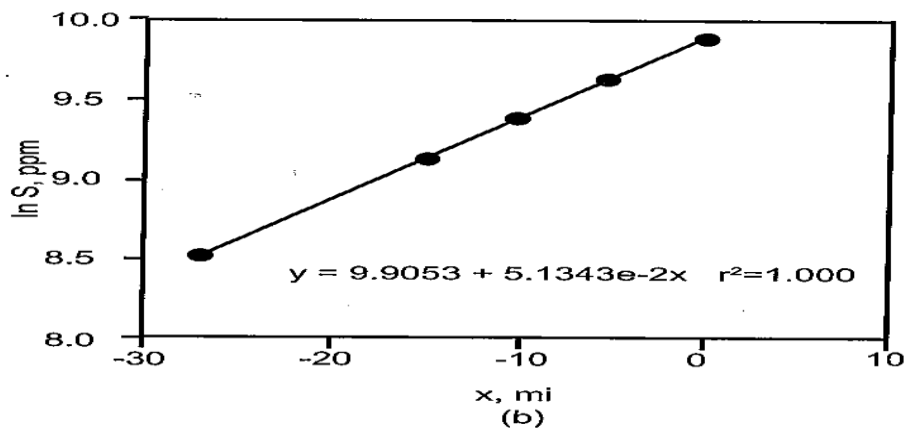
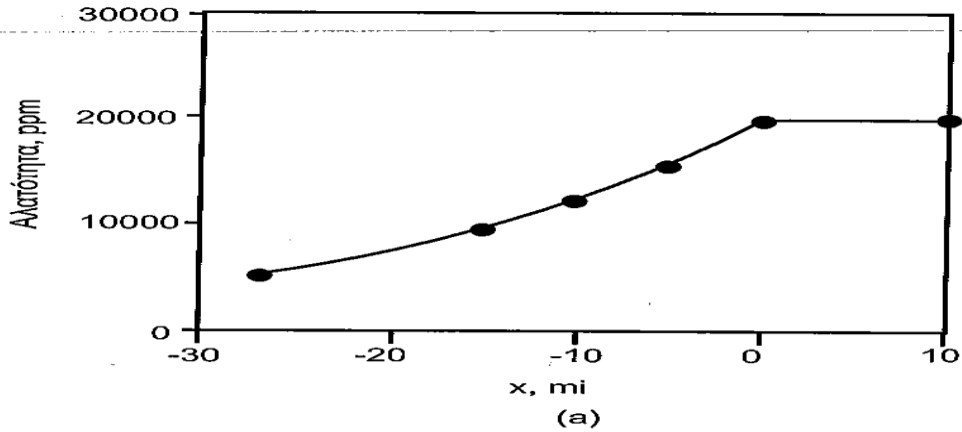
Προκύπτει ο παρακάτω πίνακας :

Μίλια από το στόμιο	$X, \text{mi}$	Συγκέντρωση αλατότητας, ppm
0	0	20.000
5	-5	15.500
10	-10	12.000
15	-15	9.300
27	-27	5.000

Παρουσιάζονται λοιπόν τα σχεδιαγράμματα όπου : Το πρώτο αναφέρεται στη συγκέντρωση αλατότητας στις εκβολές του ποταμού James , που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση του συντελεστή κατά μήκους διασποράς  $E$  και η πηγή αλατότητας βρίσκεται στο στόμιο δηλαδή εκεί που το  $x = 0$

Ενώ το δεύτερο είναι το ημιλογαριθμικό διάγραμμα αλατότητας ως προς την απόσταση για τον υπολογισμό του  $E$  ( όπου η κλίση ισούται με  $u/E$ ).

$$\frac{u}{E} = 0.051 \text{mi}^{-1}$$



Λύνοντας ως προς E ,

$$E = \frac{1.8 \text{ mi d}^{-1}}{0.051 \text{ mi}^{-1}} = 35.3 \text{ mi}^2 \text{ d}^{-1}$$

Όταν η τιμή του E είναι αρκετά μεγάλη υποδηλώνεται υπεροχή της παλιρροιακής δράσης. Ένας δεύτερος τρόπος με τον οποίο μπορούμε να υπολογίσουμε το συντελεστή κατά μήκος διασποράς είναι από μελέτες χρωστικών (δεικτών). Μπορούμε να ριζούμε με παλμική ή με συνεχή τροφοδοσία χρωστική από μια γέφυρα ή από κάποιο άλλο σημείο ανάντη του ποταμού η οποία παρακολουθείται από σκάφη με τη βοήθεια φθορομέτρου για αρκετούς παλιρροιακούς κύκλους. Η παρακάτω εξίσωση δίνει το ισοζύγιο μάζας όταν επρόκειτο για παλμική απόρριψη χρωστικής σε εκβολή με μονοδιάστατη ροή :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left( EA \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} (QC) - kC$$

Οι οργανικές χρωστικές εμφανίζουν μικρούς ρυθμούς διάσπασης λόγω φωτόλυσης , προσρόφησης σε σωματίδια ή σε βιομετατροπές .

$$\frac{\partial C}{\partial t} = E \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - u \frac{\partial C}{\partial x} - kC$$

Επομένως σε μονοδιάστατη εκβολή ποταμού για παλμική τροφοδοσία δείκτη θα έχουμε :

$$C = \frac{M}{2A\sqrt{\pi Et}} e^{\left[-\frac{(x-ut)^2}{4Et} - kt\right]}$$

Όπου :

**C** : η συγκέντρωση της χρωστικής ( $ML^{-3}$ )

**K** : άθροισμα των πρώτης τάξης σταθερών αντίδρασης για την κατανάλωση της χρωστικής ,  $T^{-1}$

**M** : μάζα χρωστικής που τροφοδοτείται , M

**A** : μέσο εμβαδό διατομής ,  $L^2$

**E** : συντελεστής κατά μήκους διασποράς,  $L^2T^{-1}$

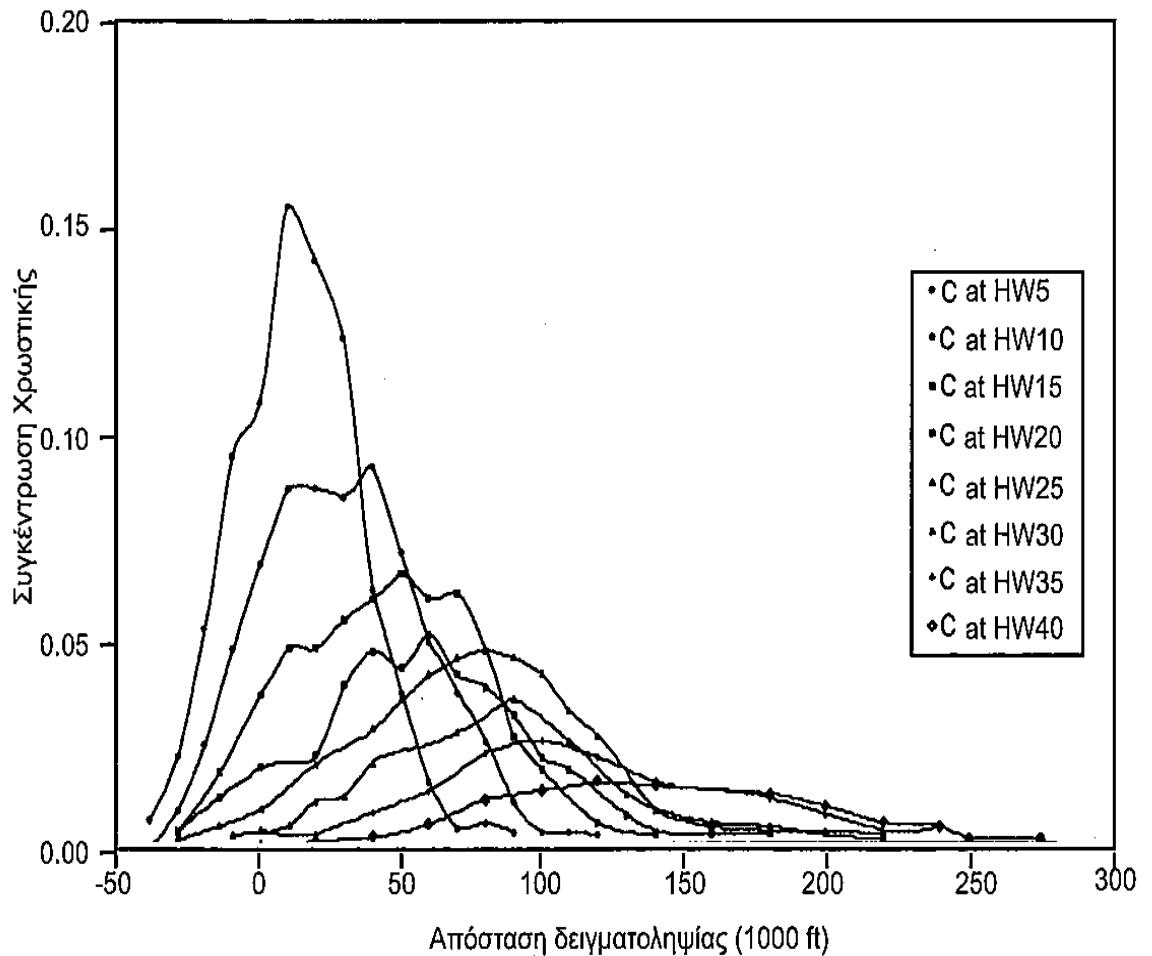
**t** : χρόνος από την τροφοδοσία της χρωστικής , Tα

**x** : κατά μήκος απόσταση , όπου στη θέση  $x=0$  είναι το σημείο τροφοδοσίας και τα θετικά κατάντη , L .

**u** : η καθαρή ταχύτητα ,  $LT^{-1}$

Στις περιπτώσεις που έχουμε φωτόλυση , προσρόφηση σε σωματίδια και βιομετατροπές παρατηρείται μικρός ρυθμός διάσπασης των χρωστικών. Η καλύτερη ώρα που θα πρέπει να γίνονται οι μετρήσεις και η τροφοδοσία της χρωστικής είναι όταν η ταχύτητα της παλίρροιας είναι σχεδόν μηδενική. Σύμφωνα με την θεωρία, η χωρική κατανομή της χρωστικής έχει γκαουσιανό ( κανονικό ) προφίλ μετά από μια αρχική περίοδο κατανομής. Στο παρακάτω σχεδιάγραμμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ενός πειράματος που πραγματοποιήθηκε στις εκβολές του ποταμού Delaware, όπου φαίνεται η συγκέντρωση χρωστικής ( $\mu$ ) για συνεχόμενα τέλη πλημμυρίδας μετά από βηματική τροφοδοσία της. ( Το HW5 αναφέρεται στον 5ο παλιρροιακό κύκλο ).





Από το παραπάνω σχεδιάγραμμα προκύπτουν κάποιες παρατηρήσεις – συμπεράσματα :

1. Οι κατανομές συγκεντρώσεων είναι χοντρικά γκαουσιανές.
2. Η τυπική απόκλιση των χωρικών κατανομών συνδέεται με το συντελεστή διασποράς  $\sigma_x = \sqrt{2Et}$  όπου  $\sigma_x$  η τυπική απόκλιση της κατανομής με μονάδες μήκους.
3. Επιπλέον η τυπική απόκλιση θα είναι ίση με την απόσταση κατά μήκος κάθε κωδωνοειδούς προφίλ συγκέντρωσης κάτω από το οποίο θα βρίσκεται το 68,3% της μάζας της χρωστικής.
4. Η διάδοση της χρωστικής φαίνεται και από την παραπάνω εξίσωση ότι είναι ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου  $t$ .
5. Με ολοκλήρωση του εμβαδού κάτω από κάθε προφίλ συγκέντρωσης και την γραφική παράσταση του  $1M$  συναρτήσει του χρόνου μπορεί να υπολογιστεί η κατανάλωση ή η εξαφάνιση της χρωστικής.

6. Είναι εύκολο να παρατηρήσουμε ότι η κλίση του ημιλογαριθμικού διαγράμματος μας δίνει τη σταθερά ταχύτητας της αντίδρασης πρώτης τάξης, κ.

$$M_t = A \int_{-\infty}^{+\infty} C dx$$

$$M_t = M e^{-kt}$$

$$\ln M_t = -kt + \ln M$$

Όπου  $M_t$  η μάζα που προκύπτει από την ολοκλήρωση σε οποιοδήποτε παλιρροιακό κύκλο. Με την βοήθεια της συγκέντρωσης αιχμής ( $C_{px}$ ) της χρωστικής για κάθε παλιρροιακό κύκλο μπορούμε να υπολογίσουμε την καθαρή ταχύτητα καθώς επίσης και το συντελεστή διασποράς κάνοντας βέβαια τους κατάλληλους μετασχηματισμούς στις παρακάτω εξισώσεις :

$$C_{px} = \frac{M}{2A\sqrt{\pi Et}} e^{-kt}$$

$$C = C_{px} e^{\left(\frac{-\varphi^2}{4Et}\right)}$$

Όπου :  $C_{px}$  = συγκέντρωση αιχμής σε χωρική κατανομή της χρωστικής σε δεδομένο παλιρροιακό κύκλο,  $ML^{-3}$ .  $\varphi$  = απόσταση της μέτρησης χρωστικής από το σημείο αιχμής L.

$$\varphi = x - ut$$

Λογαριθμίζοντας την παραπάνω εξίσωση θα έχουμε :

$$\ln C = -\frac{\varphi^2}{4Et} + \ln\left(\frac{M}{2A\sqrt{\pi Et}}\right) - kt$$

Το διάγραμμα  $\ln C$  ως προς  $\varphi^2$  θα μας δώσει μια ευθεία με κλίση  $-1/4Et$  για μια χωρική κατανομή από δεδομένο παλιρροιακό κύκλο. Με παρόμοιο τρόπο και μέσα από αρκετές μετρήσεις σε συγκεκριμένο σημείο για διαφορετικούς παλιρροιακούς κύκλους. Ένα τελευταίο παράδειγμα για να εκτιμήσουμε τον συντελεστή διασποράς από δεδομένα χρωστικής σε εκβολές ενός ποταμού είναι το παρακάτω :Στις εκβολές ενός τμήματος του ποταμού Delaware έχουμε ρίξει με παλμική τροφοδοσία χρωστική, η οποία γινόταν στο τέλος της πλημμυρίδας στη θέση  $x = 0$  και οι μετρήσεις σημειώνονταν ανά πέντε παλιρροιακούς κύκλους.Ο μέσος κύκλος διαρκούσε 12,42 ώρες . Θέλουμε

λοιπόν να εκτιμήσουμε τον συντελεστή διασποράς της χρωστικής στον 30<sup>ο</sup> παλιρροιακό κύκλο και για  $x = 100.000\text{ft}$  κατάντη. Προκύπτουν λοιπόν οι παρακάτω πίνακες :

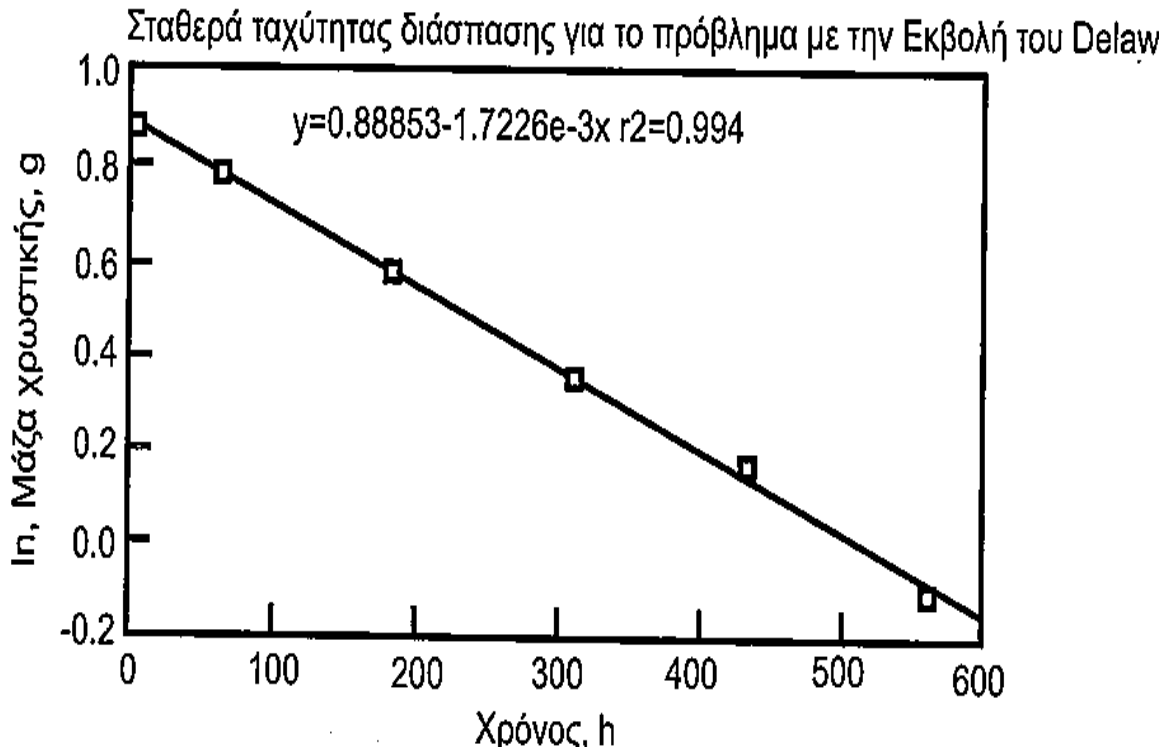
**ΧΩΡΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΣΤΟΝ 30<sup>ο</sup> ΠΑΛΙΡΡΟΙΑΚΟ ΚΥΚΛΟ.**

<b>ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΧΡΩΣΤΙΚΗΣ ΟΥΣΙΑΣ ,mgL<sup>-1</sup></b>	<b>ΑΠΟΣΤΑΣΗ ,ft</b>
0.003	-10.000
0.005	10.000
0.011	20.000
0.012	40.000
0.020	50.000
0.027	80.000
0.035	100.000
0.025	120.000
0.012	140.000
0.005	160.000
0.004	180.000
0.002	200.000
0.001	220.000

**ΧΡΟΝΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΙΑ ΤΟ ΣΗΜΕΙΟ X = 100,000 ft**

<b><u>ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΑΛΙΡΡΟΙΑΚΩΝ ΚΥΚΛΩΝ</u></b>	<b><u>ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΧΡΩΣΤΙΚΗΣ ΟΥΣΙΑΣ mgL<sup>-1</sup></u></b>
10	0.003
15	0.018
20	0.031
25	0.041
30	0.035
40	0.025
50	0.013

Πρώτα θέλουμε να υπολογίσουμε την μάζα της χρωστικής λόγω αντιδράσεων. Καταλήγουμε λοιπόν στο παρακάτω ημιλογαριθμικό διάγραμμα ως προς το χρόνο όπου η κλίση ισούται με  $0,041\text{d}^{-1}$  . Το εμβαδόν κάθε κύκλου παριστάνεται σε αυτό το ημιλογαριθμικό διάγραμμα.



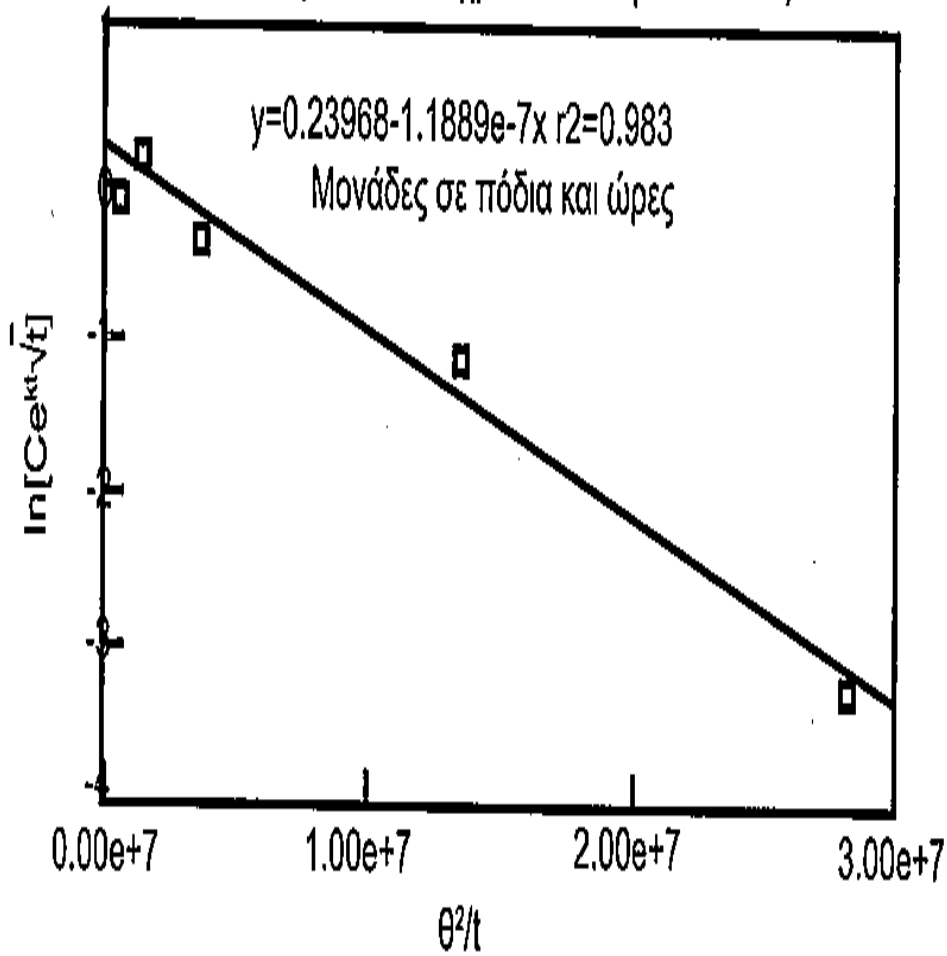
Να παρατηρηθεί ότι η χρωστική ανοικοδομούνται σε κάθε κύκλο όσο διαρκούσε το πείραμα ενώ η σταθερά του ρυθμού αντίδρασης (κλίση ευθείας) ισούταν με  $0,041d^{-1}$ . Δεύτερον, παρακάτω παρουσιάζεται το ημιλογαριθμικό διάγραμμα της συγκέντρωσης της χρωστικής ως προς  $\theta^2$ .

$$\text{κλίση} = -1/4Et = -2,1583 \cdot 10^{-10}$$

$$E = 3.109 \cdot 10^6 \text{ft}^2 \text{h}^{-1} = 2.68 \text{mi}^2 \text{d}^{-1}$$

$R^2 = 0,859$  συντελεστής παλινδρόμησης ελαχίστων τετραγώνων ( υπήρξε κάποια διασπορά στα δεδομένα ). Για όλα τα παραπάνω χρησιμοποιήθηκαν τα χωρικά δεδομένα για την κατανομή της χρωστικής ουσίας στον 30° κύκλο. Τρίτον, παρουσιάζεται το ημιλογαριθμικό διάγραμμα της χρωστικής ουσίας ως προς  $\theta^2/\tau$ .

Προσδιορισμός του  $E_x$  από χρονικά δεδομένα  $x=100,00\text{ft}$



$$\text{Κλίση} = -1/4E = 1,1889 \cdot 10^{-7}$$

$$E = 2,103 \cdot 10^6 \text{ft}^2 \text{h}^{-1} = 1.81 \text{mi}^2 \text{d}^{-1}$$

Για όλα τα παραπάνω , αυτή τη φορά χρησιμοποιήθηκαν τα χρονικά δεδομένα στο  $x = 100,000\text{ft}$ . Αξίζει να σημειωθεί ότι στον δεύτερο και στο τρίτο τρόπο οι τιμές του  $E$  είναι διαφορετικές για αυτόν τον λόγο σε αυτή την περίπτωση επιλέγουμε την μέση τιμή των αποτελεσμάτων.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΜΑΣ :

1. Ο συντελεστής επαναερισμού είναι από τους περισσότερο δύσκολους να υπολογιστούν λόγω της δυναμικής φύσης των εκβολών είτε αναφερόμαστε σε μεγάλα ποτάμια είτε σε εκβολές ποταμών. Δυστυχώς για τον υπολογισμό του δεν υπάρχουν εμπειρικές ή θεμελιώδεις εξισώσεις. Ένας τρόπος ώστε να υπολογιστεί ο συντελεστής επαναερισμού θα ήταν μέσω της βαθμονόμησης του μοντέλου , με BOD και διαλυμένο οξυγόνο να συλλέγονται σε όλη την έκταση των εκβολών κα σε ώρες όπου η ταχύτητα ροής της παλίρροιας γίνεται ελάχιστη. Αυτό συμβαίνει στα άκρα του παλιρροιακού κύκλου. Θα μπορούσε να υπολογιστεί με τεχνικές μη – γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων ή με την βαθμονόμηση του μοντέλου. Όπως είναι γνωστό , η δράση της παλίρροιας επηρεάζει τον συντελεστή επαναερισμού ο οποίος θα μπορούσαμε χοντρικά να τον προσεγγίσουμε αν διαιρούσαμε μεταφορά μάζας  $3\text{md}^{-1}$  με το μέσο βάθος της εκβολής του ποταμού. Έχει παρατηρηθεί το εξής : οι εκβολές ποταμών εμφανίζουν παλιρροιακή δράση και αλατότητα σε αντίθεση με τα μεγάλα ποτάμια όπου δεν εμφανίζουν τίποτα από τα δύο . Τέλος, τα παλιρροιακά ποτάμια εμφανίζουν εννοείται παλιρροιακή δράση αλλά σχεδόν καθόλου αλατότητα. Θα μπορούσε λοιπόν η παραπάνω έρευνα καθώς και τα μοντέλα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν, να βοηθήσουν και σε άλλα προβλήματα ποιότητας νερού όπως για παράδειγμα στα τοξικά μέταλλα και στις οργανικές χημικές ενώσεις..

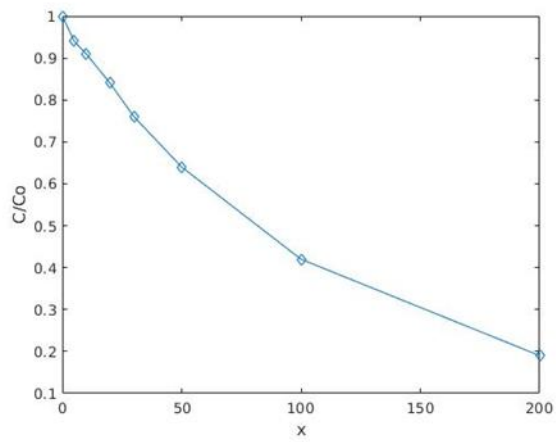
### ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕ ΤΑ ΕΥΡΗ ΤΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΕΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ ΣΕ ΕΚΒΟΛΕΣ ΠΟΤΑΜΩΝ

<b>Αποξυγόνωση</b>	$K_d=0.05-0.5 \text{ day}^{-1}$
<b>Επαναερισμός</b>	$K_a = k_L/ \text{βάθος} = (3\text{md}^{-1})/H$
<b>Διασπορά , μεγάλα ποτάμια</b>	$E = 0.1 - 1.0\text{mi}^2\text{d}^{-1}$

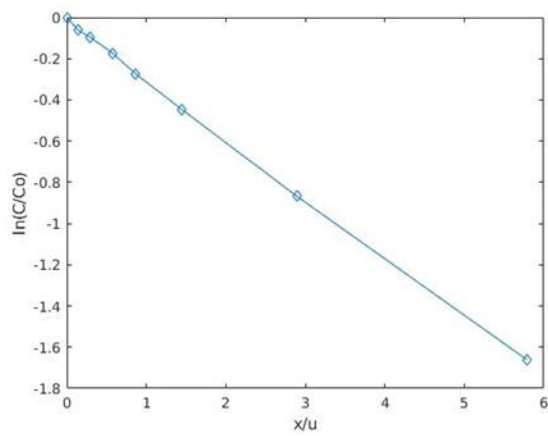
<b>Διασπορά , παλιρροιακά ποτάμια</b>	$E = 1-5 \text{ mi}^2\text{d}^{-1}$
<b>Διασπορά , εκβολές ποταμών</b>	$E = 5 - 40 \text{ mi}^2\text{d}^{-1}$
<b>Συναγωγή , εκβολές ποταμών</b>	$u = Q_f / A = x_p / t_n$

# ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ

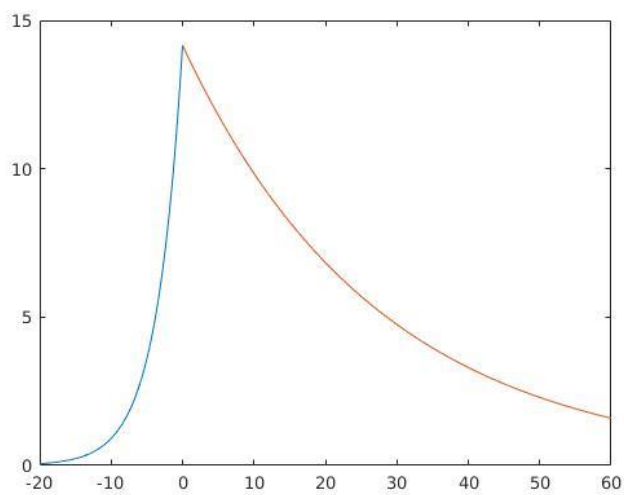
## 1.1 ΓΡΑΦΗΜΑ



## 1.2 ΓΡΑΦΗΜΑ

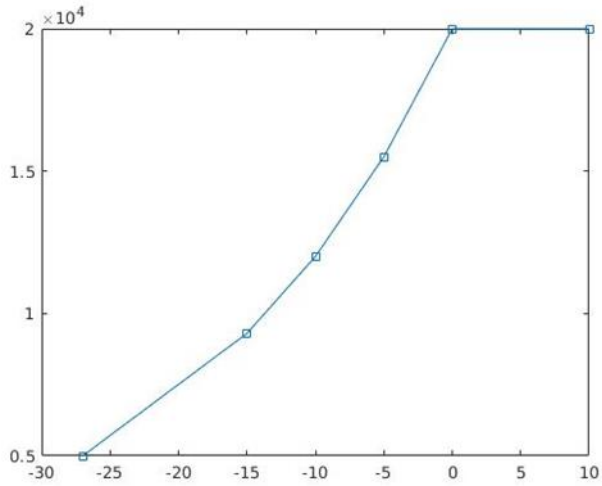


## 1.3 ΓΡΑΦΗΜΑ

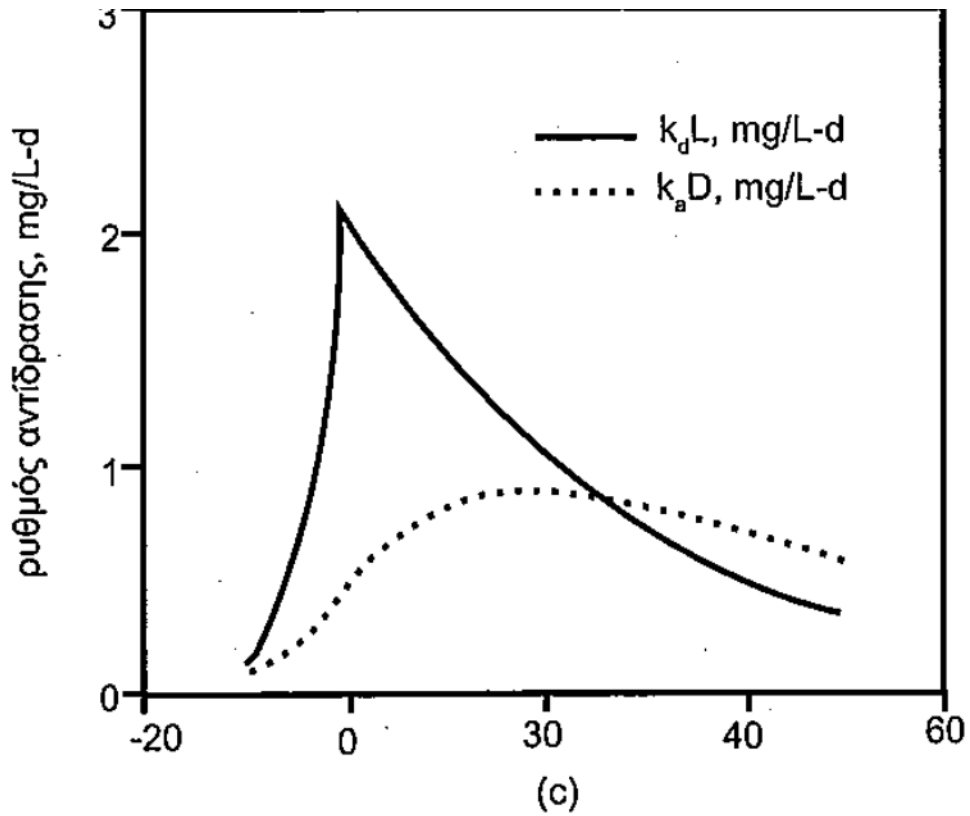




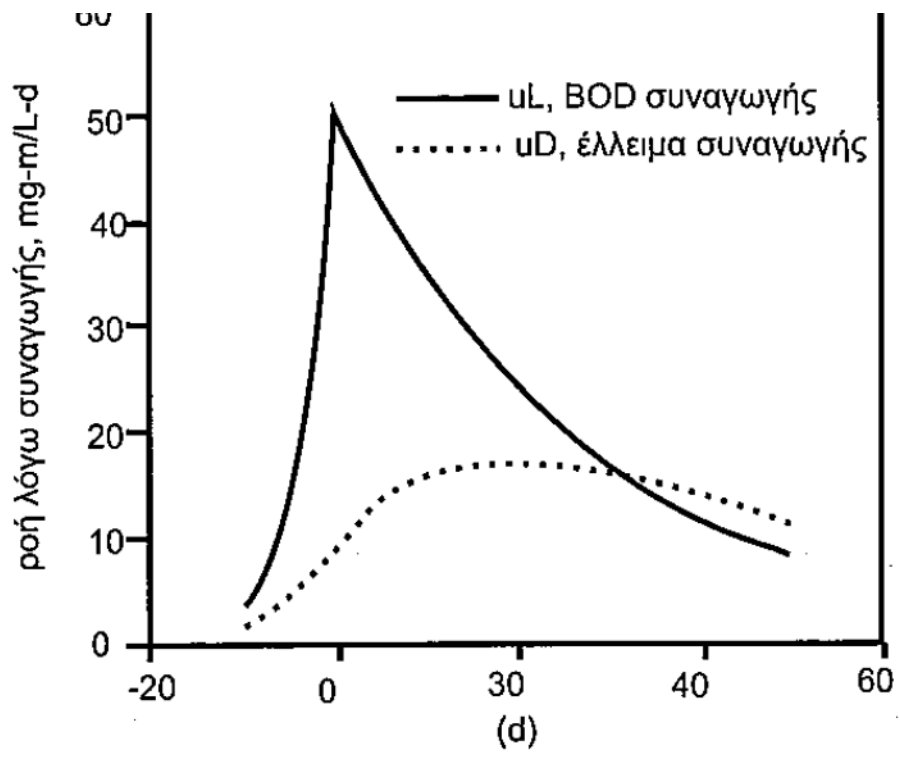
### 1.4 ΓΡΑΦΗΜΑ



### 1.5 ΓΡΑΦΗΜΑ

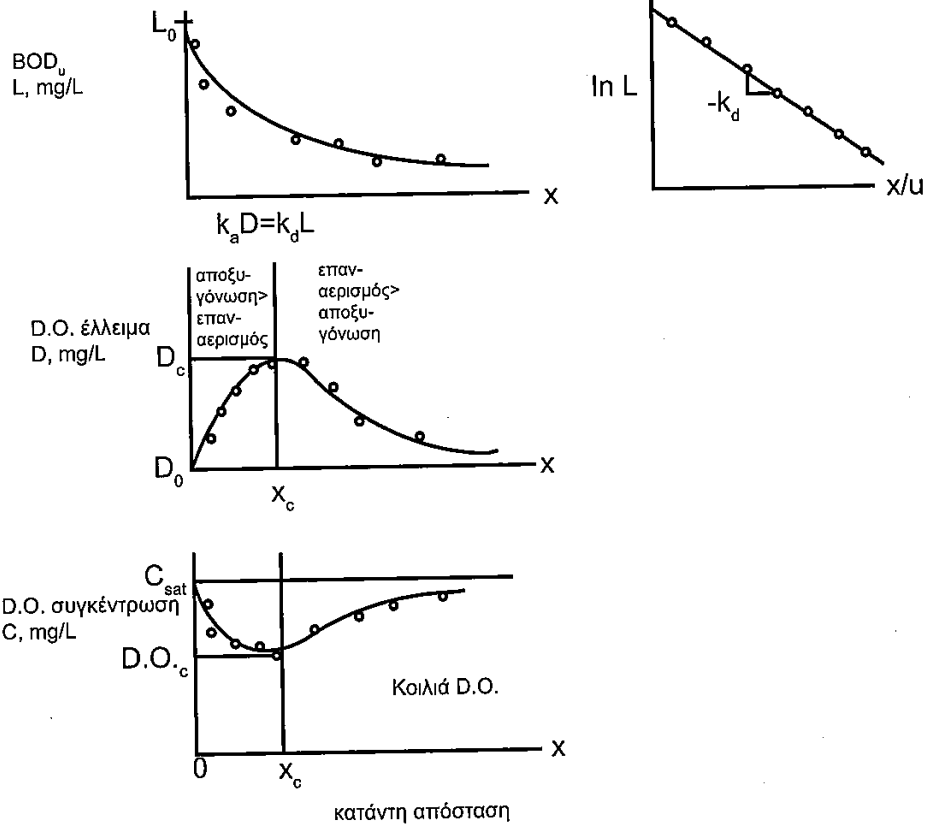


### 1.6 ΓΡΑΦΗΜΑ



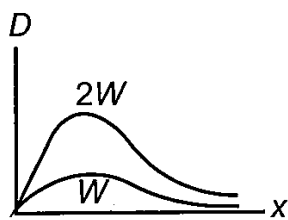
# ΚΑΜΠΥΛΕΣ – ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

## 2.1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ

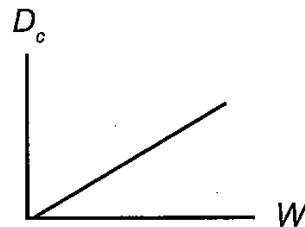


## ΚΑΜΠΥΛΕΣ

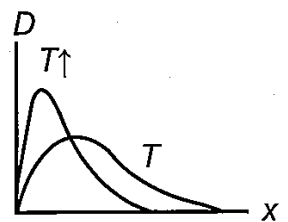
### 2.2 ΚΑΜΠΥΛΗ



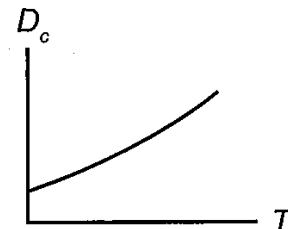
(a)



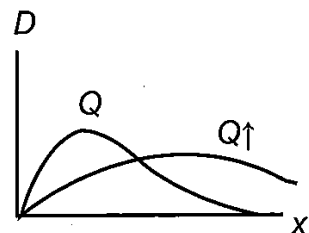
Επίδραση της απορριπτόμενης μάζας  $W$ , kg/d



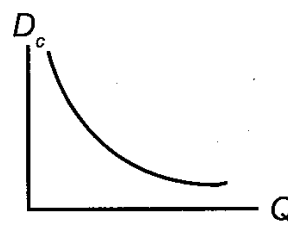
(b)



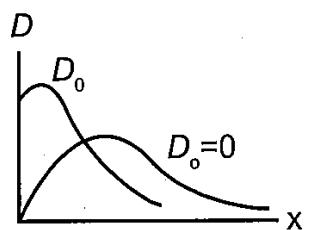
Επίδραση της θερμοκρασίας πάνω στο  $D_c$



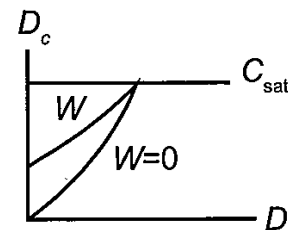
(c)



Επίδραση της (ογκομετρικής) παροχής  $Q$  πάνω στο  $D_c$



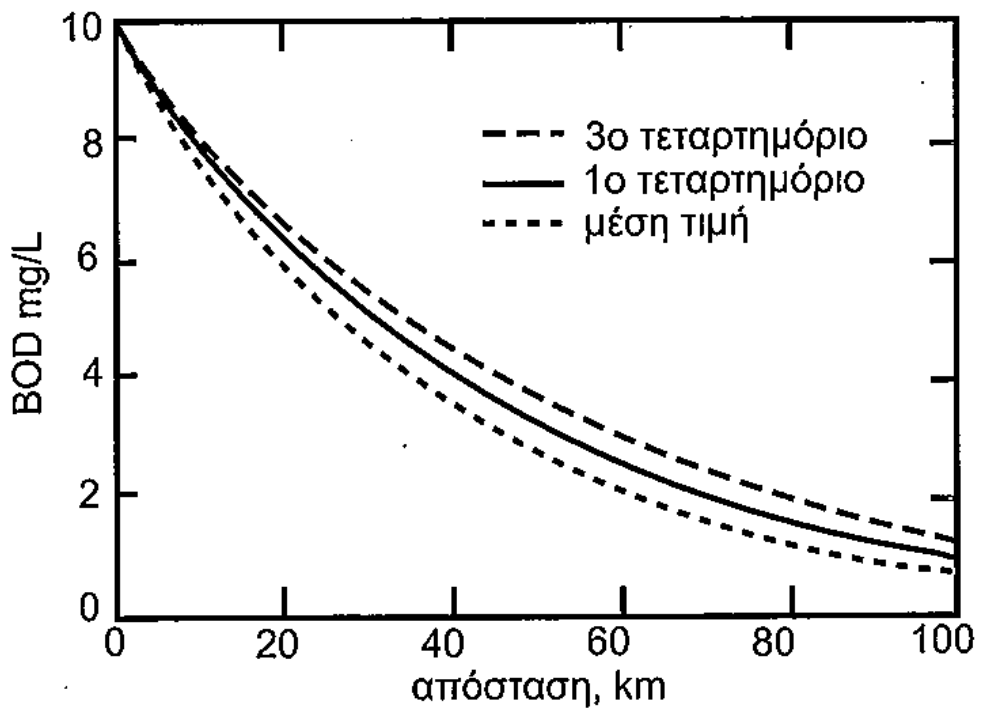
(d)



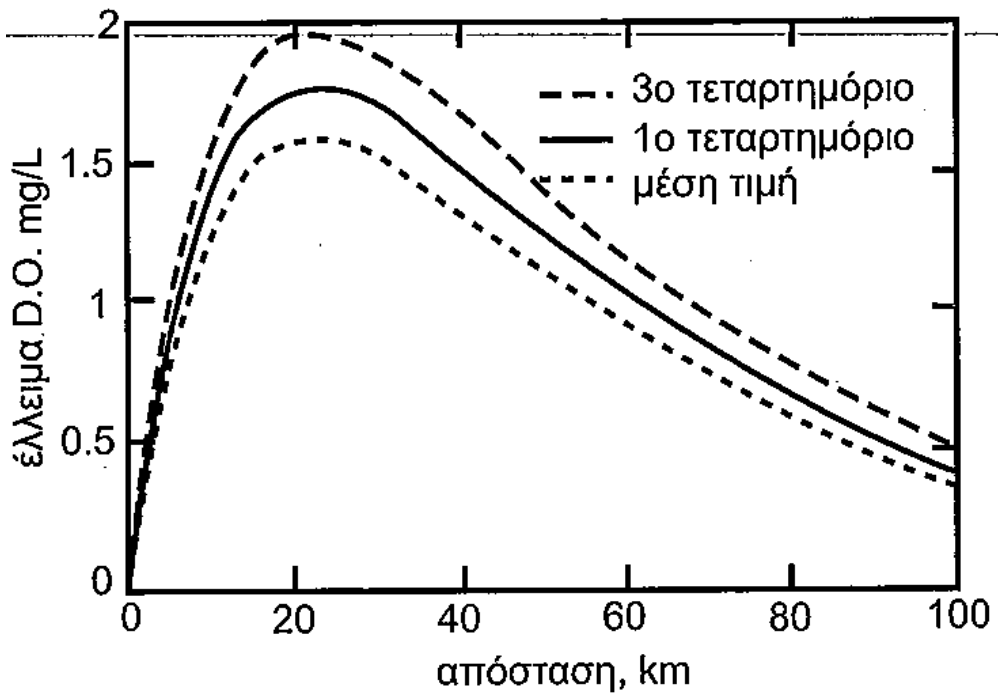
Επίδραση του αρχικού ελλείματος  $D_0$  πάνω στο  $D_c$

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ 3.1 ΚΑΙ 3.2

BOD vs. απόσταση

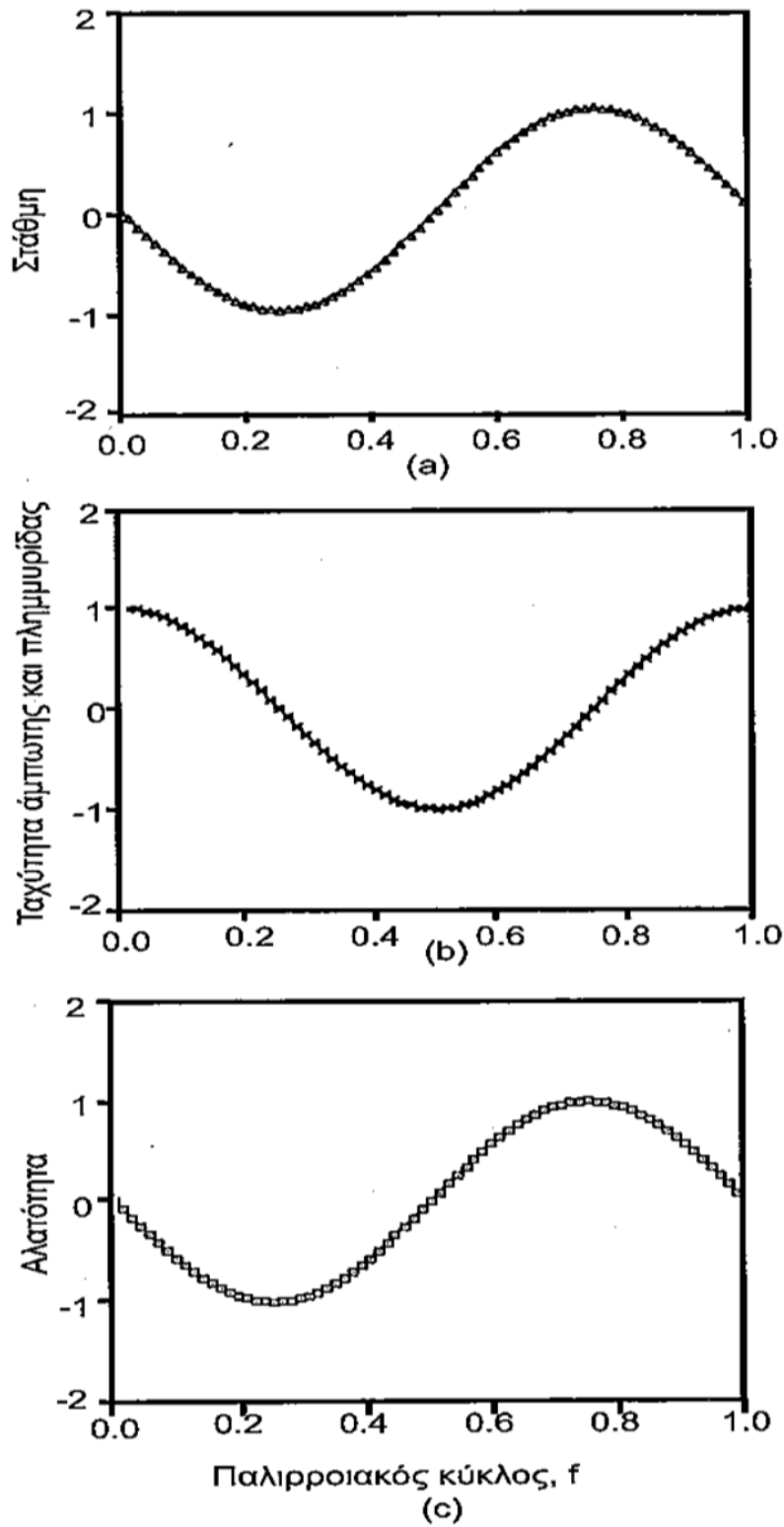


έλλειμα D.O. vs. απόσταση



# ΣΧΗΜΑΤΑ

## ΣΧΗΜΑ 1



## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .**

### **ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

Διπλωματική εργασία του Σισκού Παναγιώτη με θέμα μοντελοποίηση ρίσκου και αβεβαιότητας στη διοίκηση έργων . Πανεπιστήμιο Πειραιά Τμήμα βιομηχανικής διοίκησης και τεχνολογίας.

Χ.Βασιλάτος , < Προσδιορισμός φυσικοχημικών παραμέτρων υγρών αποβλήτων και υδάτων >

Κούγκολος Α. (2007) , < Εισαγωγή στην Περιβαλλοντική Μηχανική > , Εκδόσεις Τζιόλα , Θεσσαλονίκη

Στάμου Α.Ι. , Βογιατζής Γ. (1986) , <Βασικές αρχές και σχεδιασμός συστημάτων επεξεργασίας αποβλήτων > , ΤΕΕ Αθήνας.

### **ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

*Alleman, J.E., and Prakasam, T.B.S., Water Pollut . Control Fed.,* ,55,436(1983)

Metcalf and Eddy, Inc., Wastewater Engineering, 2<sup>nd</sup> ed., McGraw – Hill, New York ( 1978).

Mills, W.B. , et al., Stream Sampling for Waste Load Allocation Applications, EPA/625/6-86/013, U.S. Environmental Protection Agency, Washington,DC (1986)

Sawyer, C.N., McCarty , P.L., and Parkin , G.F., Chemistry for Environmental Engineers, 3<sup>rd</sup> ed., McGraw – Hill, New York (1994)

Weilenmann, U., O' Melia, C.R. and Stumm, W., Limnology and Oceanography, 34,1 (1989 )

Streeter , H.W., and Phelps, E.B., U.S. Public Health Service, Bulletin No.146 (1925).

Stones , T., Effluent and Water Treatment J. , 22, 75 (1982)

- Fair , G.M., Geyer.J.C., and Okum, D.A., Water and Wastewater Engineering, Wiley, New York (1968)
- O' Connor, D.J., and Dobbins, W.E., Trans.Am.Soc.Civ.Eng.,123,655(1958)
- Owens ,M.,Edwards, R.W., and Gibbs,J.W.,Air and Water Pollut.Int.J. , 8,469(1974)
- Churchill, M.A., Elmore, H.L., and Buckingham, R.A., Air and Water Pollut.Int.J., 6,467(1962)
- DiToro, D.M., Sediment Flux Modeling, Wiley – Interscience , New York (1996)
- Thomann , R.V., and Mueller, J.A.,Principles of Surface Water Quality Modeling and Control, Harper and Row, New York(1987)
- O' Connor,D.J., and DiToro, D.M., J. Sanit. Eng.Div., ASCE, 96,547(1970)
- Deb, A.K., and Bowers, D.,J.Water Pollut. Control Fed. , 55,1476(1983)
- Erdmann, J.B., J Water Pollut. Control Fed., 51,7 (1979)
- Benjamin, J.R., and Cornell, C. A., Probability, Statistics, and Decision for Civil Engineers, McGraw-Hill, New York (1970)
- Reckhow, K.H., and Chapra , S.C.,Engineering Approaches for Lake Management , Vol.1,Butterworth, Boston (1983)
- Beck, M.B., and van Straten, G., Uncertainty and Forecasting of Water Quality, Pergamon Press, New York (1982)
- O' Connor, D.J., Fate of Toxic Substances in Natural Waters, Manhattan College Summer Institute Notes,Riverdale , NY,(1977)
- O' Connor, D.J.,Mueller, J.A., and Farley, K.J.,J. Environ.Eng.,ASCE,109,396(1983)