



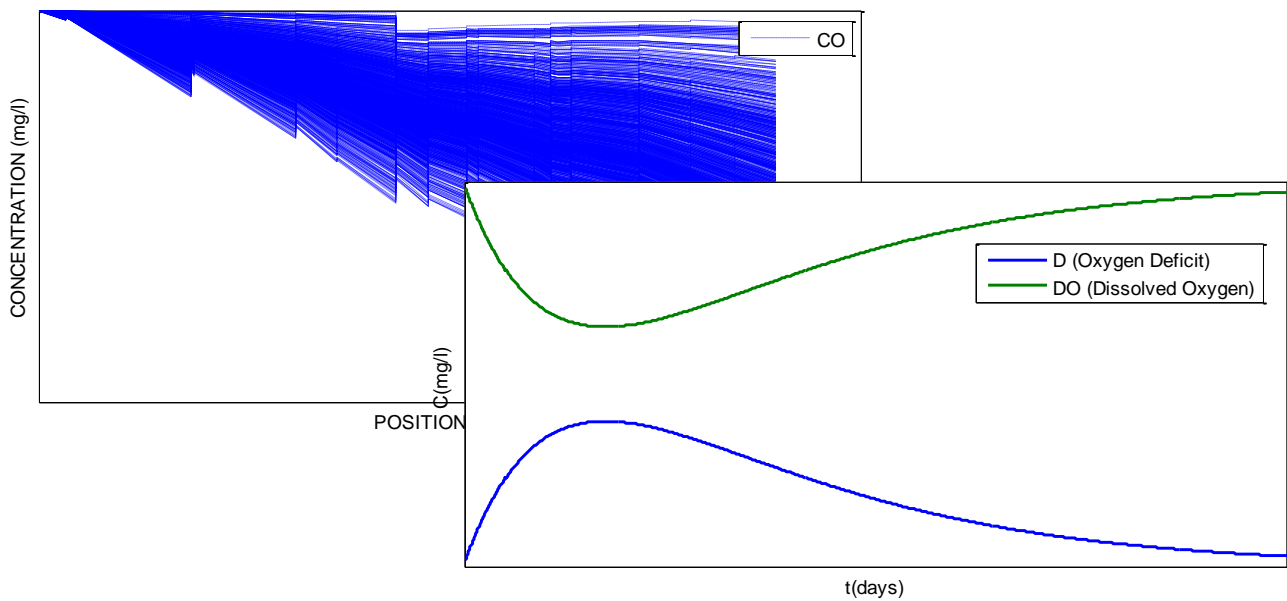
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Εκτίμηση των Επιπτώσεων των Ανθρωπογενών Πιέσεων σε Ποταμούς Μέσω Μαθηματικής Προσομοίωσης



Ιωάννης Κ. Κυπριανού

Επιβλέπων: Κ. Νουτσόπουλος, Λέκτορας ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2012



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Εκτίμηση των Επιπτώσεων των Ανθρωπογενών Πιέσεων σε
Ποταμούς Μέσω Μαθηματικής Προσομοίωσης**

Ιωάννης Κ. Κυπριανού

Επιβλέπων: Κ. Νουτσόπουλος, Λέκτορας ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2012

Αντί Προλόγου

Αυτή η μελέτη σηματοδοτεί το τέλος της πενταετούς φοίτησής μου στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Στα χρόνια των σπουδών μου είχα την ευκαιρία να αποκτήσω όχι μόνο γνώσεις αλλά και εμπειρίες, οι οποίες θα με συνοδεύσουν μέχρι το τέλος της ζωής μου. Προτού αφήσω πίσω την ιδιότητα του φοιτητή του Ε.Μ.Π, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά τους ακαδημαϊκούς εκείνους, που πάλεψαν και παλεύουν για το Ίδρυμα. Εκείνους, για τους οποίους, πέρα από την προσωπική δόξα, επιστημονική και κοινωνική, η συνεχής βελτίωση των σπουδών και η εδραίωση του Πολυτεχνείου υπήρξε σκοπός ζωής. Δραστηριότητες, όπως η εκπαιδευτική εκδρομή του τρίτου έτους, συνδεδεμένη στο μυαλό μου άρρηκτα με τον Καθηγητή Π. Μαρίνο, νιώθω ότι μου έχουν δώσει ανεκτίμητα εφόδια για τη συνέχεια... Για την πολύτιμη βοήθεια, που μου προσέφερε κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας, ευχαριστώ θερμά τον Δρ. Κ. Νουτσόπουλο, Λέκτορα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Η δουλειά μου αφιερώνεται σε όλους όσους πόνεσαν και πονούν από τον πόλεμο χωρίς να τον έχουν -συνειδητά- επιλέξει. Αν ήμουν ένας από αυτούς, θα είχα στερηθεί και εγώ χαρές, τις οποίες εκείνοι αδίκως στερήθηκαν. Οι σπουδές μου είναι πιθανό να ήταν μία από αυτές.

Ιωάννης Κ. Κυπριανού

Περίληψη

Στη μελέτη αυτή διερευνάται η συμβολή των μοντέλων ποιότητας ύδατος στη διαχείριση των υδατικών πόρων. Στα πλαίσια της έρευνας εξελίχθηκε ένα μοντέλο ποιότητας υδατορεμάτων, στο οποίο προσομοιώνεται η μεταβολή των συγκεντρώσεων του διαλυμένου οξυγόνου, του οργανικού άνθρακα και του νιτροποιησίμου αζώτου λόγω των φαινομένων της μεταγωγής και του επαναερισμού καθώς και των διεργασιών της βιοδιάσπασης του οργανικού άνθρακα και του αμμωνιακού αζώτου. Το μοντέλο κωδικοποιήθηκε και δημιουργήθηκε, εκτός από την απλή υπολογιστική έκδοση, μία πιθανοτική έκδοση βασισμένη στη μέθοδο Monte Carlo με σκοπό τη διαχείριση της αβεβαιότητας στις παραμέτρους του μοντέλου. Αφού έγινε ανάλυση ευαισθησίας του ομοιώματος, πραγματοποιήθηκε εφαρμογή του στο υδρολογικό σύστημα του ποταμού Ευρώτα με τη χρήση των δημοσιευμένων στοιχείων στα πλαίσια της διαβούλευσης γύρω από την εφαρμογή της Οδηγίας Πλαίσιο για τα Ύδατα. Οι παράμετροι διακριβώθηκαν και το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία ενός διαχειριστικού σχεδίου, ώστε να ελεγχθεί η δυνατότητα αξιοποίησής του. Η πρακτική εφαρμογή του μοντέλου ως εργαλείο στη διαχείριση των υδατικών πόρων κρίθηκε πρόσφορη, ιδίως για την εφαρμογή της ευρωπαϊκής νομοθεσίας, και προτάθηκε η αξιοποίηση ανάλογων εργαλείων για την διαμόρφωση των σχεδίων διαχείρισης των υδατικών πόρων στην Ελλάδα.

Abstract

This is a study on the role of water quality modeling in water resources management. A stream water quality model was developed as part of this study. The model estimates the concentration of the dissolved oxygen and BOD, carbonaceous and nitrogenous, by simulating the effect of transport, reaeration, carbon organic matter biodegradation and nitrogen nitrification. The model was digitalized and the issue of uncertainty in its parameters was discussed through the development of a probabilistic edition based on Monte Carlo simulation, except for the deterministic edition. The models sensitivity analysis was followed by the application in Evrotas River Basin with the use of data published as part of public discussion on the implementation of the European Water Framework Directive, in order to explore its applicability. The use of the model for water resources management purposes and especially for the implementation of the European legislation was considered convenient thus leading to the recommendation of the incorporation of similar tools in the development of the water resources management plans in Greece.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1 Μοντέλα Ποιότητας Ύδατος	3
1.1 Η σημασία της Ποιότητας του Ύδατος.....	3
1.2 Διασφάλιση της Ποιότητα Ύδατος	4
1.2.1 Διαδικασία Διασφάλισης Ποιότητας.....	4
1.3 Μαθηματικά Μοντέλα	5
1.4 Ιστορία των Μοντέλων Ποιότητας Ύδατος	6
1.5 Η Χρησιμότητα των Μαθηματικών Μοντέλων Ποιότητας Ύδατος.....	8
1.6 Τα Μαθηματικά Μοντέλα Ποιότητας Ύδατος για Υδατορέματα.....	9
1.6.1 Τύποι Μοντέλων Ποιότητας Ύδατος Υδατορεμάτων.....	9
1.6.2 Δεδομένα Εισόδου Μοντέλων Ποιότητας Ύδατος Υδατορεμάτων.....	10
1.6.2.1 Η Σημειακή Ρύπανση.....	10
1.6.2.2 Μη Σημειακή Ρύπανση	10
1.6.3 Παραδείγματα Μοντέλων Ποιότητας Ύδατος Υδατορεμάτων.....	11
1.6.3.1 Προσομοίωση Streeter-Phelps	11
1.6.3.2 Εξελίξεις της Προσομοίωσης Streeter-Phelps	13
1.6.3.3 Μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών	16
1.6.3.4 Νεότερα Μοντέλα	18
1.6.3.5 Μοντέλα με Αβεβαιότητα στα Στοιχεία Εισόδου ή/και στις Παραμέτρους.....	20
1.6.4 Συντελεστές Μοντέλων	21
1.6.4.1 Συντελεστής K_1 Βιοδιάσπασης Ανθρακούχου BOD	22
1.6.4.2 Συντελεστής Επαναερισμού K_2	23
2 Το Μοντέλο R.I.S. DO.E. (River System Dissolved Oxygen Estimation).....	26
2.1 Διεργασίες	26
2.1.1 Οξείδωση Οργανικού Άνθρακα CBOD	26

2.1.1.1	Η Διεργασία	26
2.1.1.2	Μαθηματική Περιγραφή	28
2.1.2	Νιτροποίηση Αζώτου	29
2.1.2.1	Η Διεργασία	29
2.1.2.2	Μαθηματική Περιγραφή	30
2.1.3	Ατμοσφαιρικός Επαναερισμός του Υδάτινου Σώματος.....	31
2.1.3.1	Το Φαινόμενο.....	31
2.1.3.2	Μαθηματική Περιγραφή	31
2.2	Μόρφωση της Σχέσης του Μοντέλου	32
2.3	Περιγραφή της Λειτουργίας του Μοντέλου.....	34
2.3.1	Επιλογή Γλώσσας Προγραμματισμού.....	34
2.3.2	Διαχωρισμός του Ποταμού σε Υδάτινα Τμήματα.....	34
2.3.3	Διαχείριση της Μη Σημειακής Ρύπανσης	37
2.3.4	Εισαγωγή Δεδομένων.....	38
2.3.5	Ο Κώδικας του Προγράμματος.....	39
2.3.5.1	Αρχική Έκδοση RISDOE0	39
2.3.5.2	Βελτιωμένη Έκδοση RISDOE1	42
2.3.6	Διαχείριση της Αβεβαιότητας στις Παραμέτρους του Μοντέλου-Πιθανοτική Έκδοση RISDOEPR1	44
2.3.7	Η Χρήση της Εμφωλευμένης Δομής.....	52
3	Ανάλυση Ευαισθησίας του Μοντέλου RISDOE	53
3.1	Ανάλυση Ευαισθησίας των Αποτελεσμάτων στις Παραμέτρους του Μοντέλου	53
3.1.1	Ανάλυση Ευαισθησίας ως προς την παράμετρο $K1$	55
3.1.2	Ανάλυση Ευαισθησίας ως προς την παράμετρο $K2$	59
3.1.3	Ανάλυση Ευαισθησίας ως προς την παράμετρο KN	62
3.1.4	Ανάλυση Ευαισθησίας ως προς την παράμετρο V	64
3.1.5	Συνολική Επισκόπηση της Ευαισθησίας στις 4 Παραμέτρους	68

3.2	Η Επίδραση των Ρυπαντικών Φορτίων και των Παροχών του Ποταμού	68
3.2.1	Ανάλυση Ευαισθησίας των Αποτελεσμάτων στα Φορτία	69
3.2.2	Ανάλυση Ευαισθησίας των Αποτελεσμάτων στις Παροχές	72
3.2.3	Συνολική Επισκόπηση της Ευαισθησίας στις Εισόδους του Συστήματος.....	76
4	Εφαρμογή στη Λεκάνη Απορροής του Ευρώτα	77
4.1	Η Λεκάνη Απορροής του Ευρώτα	77
4.2	Το Υδρολογικό Σύστημα του Ποταμού Ευρώτα	79
4.3	Οι Ανθρωπογενείς Πιέσεις των Υδάτινων Τμημάτων	81
4.3.1	Σημειακές Πιέσεις.....	81
4.3.1.1	Βιομηχανίες.....	84
4.3.1.2	ΧΑΔΑ	85
4.3.1.3	Ιχθυοκαλλιέργειες	86
4.3.1.4	ΕΕΛ.....	86
4.3.2	Μη Σημειακές Πιέσεις	86
4.3.2.1	Αστική Ρύπανση	87
4.3.2.2	Ποιμενική Κτηνοτροφία	88
4.3.2.3	Γεωργική Ρύπανση.....	88
4.3.2.4	Φυσική Ρύπανση.....	89
4.3.3	Συνολική Επισκόπηση Πιέσεων.....	90
4.3.3.1	Χωρική Κατανομή των Πιέσεων	92
4.4	Οι Παροχές.....	95
4.5	Δεδομένα Εισόδου του Μοντέλου	96
4.6	Διακρίβωση του Μοντέλου	97
4.7	Εφαρμογή του RISDOE στη Λεκάνη Απορροής του Ευρώτα ως Εργαλείο στη Διαχείριση της Ποιότητας Ύδατος.....	114
4.7.1	Διαχειριστικό Σενάριο.....	118
4.7.1.1	Εφαρμογή RISDOE1	119

4.7.1.2	Εφαρμογή RISDOEPR1	123
4.7.1.2.1	Διαδρομή 48-6	124
4.7.1.2.2	Διαδρομή 45-6	126
4.7.1.2.3	Διαδρομή 28-6	128
4.7.1.2.4	Διαδρομή 24-6	130
4.7.1.2.5	Διαδρομή 16-6	132
4.7.1.2.6	Διαδρομή 13-6	134
4.7.2	Σχολιασμός Αποτελεσμάτων RISDOEPR1	135
5	Συμπεράσματα	136
	Βιβλιογραφία.....	140

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 3.1: Το Σύστημα των Υδάτινων Τμημάτων του Ποταμού Αλφειού	54
Εικόνα 4.1: Βασικός Ρους και Κύριοι Παραπόταμοι του Ευρώτα (Νικολαΐδης, et al., 2009)	78
Εικόνα 4.2: : Περιοχές προστασίας της φύσης και σημαντικοί βιότοποι στη Λ.Α. Ευρώτα (Νικολαΐδης, et al., 2009).....	79
Εικόνα 4.3: Το υδρολογικό Σύστημα του Ποταμού Ευρώτα (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2011).....	80
Εικόνα 4.4: Υδάτινα Τμήματα Με Κατάσταση Κατώτερη Της Καλής.....	117

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1: Συντελεστές Μεθόδου Πεπερασμένων Διαφορών	18
Πίνακας 3.1: Δεδομένα Εισόδου Ανάλυσης Ευαισθησίας.....	55
Πίνακας 3.2: Ποσοστιαία Επιρροή Παραμέτρων στις Συγκεντρώσεις των Ποιοτικών Χαρακτηριστικών.....	68
Πίνακας 3.3: Ποσοστιαία Επιρροή των Δεδομένων Εισόδου στις Συγκεντρώσεις των Ποιοτικών Χαρακτηριστικών.....	76
Πίνακας 4.1: Στοιχεία και ρυπαντικά φορτία μονάδων ιχθυοκαλλιέργειας για την ΛΑΠ Ευρώτα (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2011).....	82
Πίνακας 4.2: Ετήσια και θερινά (Ιούνιος-Σεπτέμβριος) σημειακά ρυπαντικά φορτία μονάδων ιχθυοκαλλιέργειας στα επιφανειακά ΥΣ της ΛΑΠ Ευρώτα (GR33) (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2011).....	82
Πίνακας 4.3: Ετήσια Φορτία Στα υδάτινα Τμήματα του Υδρολογικού Συστήματος του Ευρώτα	83
Πίνακας 4.4: Ετήσια Φορτία Λόγω Λειτουργίας Βιομηχανικών Μονάδων	84
Πίνακας 4.5: Ετήσια Φορτία Λόγω Λειτουργίας ΧΑΔΑ.....	85
Πίνακας 4.6: Ετήσια Φορτία Λόγω Λειτουργίας της Μονάδας Ιχθυοκαλλιέργειας.....	86
Πίνακας 4.7: Ετήσια Φορτία Λόγω Λειτουργίας ΕΕΛ	86
Πίνακας 4.8: Ετήσια Μη Σημειακή Ρύπανση λόγω Αστικών Λυμάτων	87
Πίνακας 4.9: Ετήσια Μη Σημειακή Ρύπανση Λόγω Ποιμενικής Κτηνοτροφίας	88
Πίνακας 4.10:Ετήσια Μη Σημειακή Ρύπανση Λόγω Γεωργίας.....	89
Πίνακας 4.11:Ετήσια Μη Σημειακή Ρύπανση Λόγω Φυσικών Αιτίων	90
Πίνακας 4.12: Συνολικά Ετήσια Φορτία.....	91

Πίνακας 4.13: Ετήσιες Επιπλέον Εισροές ανά Υδάτινο Τμήμα	96
Πίνακας 4.14: Πίνακας Δεδομένων Εισόδου Σεπτεμβρίου	99
Πίνακας 4.15: Πίνακας Δεδομένων Εισόδου Μαρτίου.....	100
Πίνακας 4.16: Πίνακας Δεδομένων Εισόδου Μαΐου	101
Πίνακας 4.17: Πίνακας Αποτελεσμάτων Σεπτεμβρίου	102
Πίνακας 4.18: Πίνακας Αποτελεσμάτων Μαρτίου	105
Πίνακας 4.19: Πίνακας Αποτελεσμάτων Μαΐου.....	108
Πίνακας 4.20: Πίνακας Μέσων Τιμών Αποτελεσμάτων Σεπτεμβρίου, Μαρτίου και Μαΐου	111
Πίνακας 4.21: Πίνακας Δεδομένων Εισόδου Ιουλίου ($T = 27^{\circ}\text{C}$).....	115
Πίνακας 4.22: Πίνακας Αποτελεσμάτων Ιουλίου	116
Πίνακας 4.23: Πίνακας Δεδομένων Εισόδου Ιουλίου για το Προτεινόμενο Διαχειριστικό Σενάριο	119
Πίνακας 4.24: Πίνακας Αποτελεσμάτων Ιουλίου για το Προτεινόμενο Διαχειριστικό Σενάριο	120

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Διαδικασία Διασφάλισης Ποιότητας Ύδατος.....	5
Σχήμα 1.2: Καμπύλες Συγκέντρωσης Διαλυμένου Οξυγόνου και Ελλείμματος Διαλυμένου Οξυγόνου.....	12
Σχήμα 2.1: Ένα περιορισμένο υδρολογικό σύστημα ποταμού	35
Σχήμα 2.2: Χωρισμός του Ποταμού σε Υδάτινα Τμήματα.....	36

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διασφάλιση της ποσότητας και της ποιότητας του νερού έχει αποδειχθεί, ότι συνδέεται με την ευημερία των λαών και η διαχείριση των υδατικών πόρων αποτελεί βασικό άξονα της περιβαλλοντικής πολιτικής. Θεσμικές παρεμβάσεις, όπως η Οδηγία Πλαίσιο για τα Ύδατα της Ευρωπαϊκής Ένωσης και το Πρόγραμμα Δράσης για Καθαρά Νερά (Clean Water Act) της Υπηρεσίας για την Προστασία του Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής (EPA), έλαβαν χώρα κατά την τελευταία εικοσαετία ενσωματώνοντας στη νομοθεσία το ενδιαφέρον των κοινωνιών γύρω από την ποιότητα του υδάτινου περιβάλλοντος. Στο τεύχος αυτό, αναπτύσσεται η εξέλιξη ενός μοντέλου ποιότητας ύδατος, το οποίο επιχειρείται να αποτελέσει εργαλείο στη λήψη αποφάσεων σε σχέση με τη διαχείριση της ποιότητας του νερού.

Στο πρώτο κεφάλαιο «Μοντέλα Ποιότητας Ύδατος» περιγράφεται η έννοια της ποιότητας του νερού και η σημασία της, ενώ γίνεται και ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη της προσομοίωσης της μεταβολής των ποιοτικών χαρακτηριστικών του νερού. Επιπλέον, εξηγείται η σημασία των μοντέλων και αναλύονται περαιτέρω τα ομοιώματα ποιότητας ύδατος σε υδατορέματα με την παρουσίαση παραδειγμάτων και την επεξήγηση της σημασίας των δεδομένων εισόδου και των παραμέτρων τους.

Το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται στο μοντέλο RISEDOE, το οποίο δημιουργήθηκε με σκοπό την εκτίμηση των επιπτώσεων των ανθρωπογενών πιέσεων, που δέχεται ένα σύστημα υδατορεμάτων όσον αφορά στο φαινόμενο της αποξυγόνωσης. Αρχικά γίνεται η επισκόπηση των τριών διεργασιών, που προσομοιώνονται, και η μαθηματική περιγραφή τους, σύμφωνα με την οποία μορφώνονται οι σχέσεις του ομοιώματος. Στη συνέχεια εξηγείται η μεταφορά των σχέσεων σε γλώσσα προγραμματισμού και παρουσιάζονται οι δύο εκδόσεις του προγράμματος, η αιτιοκρατική RISDOE1 και η πιθανοτική RISDOEPR1. Ακολουθεί η

ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου στις παραμέτρους και τα δεδομένα εισόδου, η οποία αναπτύσσεται στο κεφάλαιο 3.

Στο τέταρτο κεφάλαιο δίνεται ένα παράδειγμα εφαρμογής του μοντέλου. Συγκεκριμένα, με τη χρήση στοιχείων, τα οποία έχουν δημοσιευθεί στην ιστοσελίδα wfd.opengon.gr με σκοπό τη διαβούλευση των Σχεδίων Διαχείρισης Υδατικών Πόρων της Ελλάδας για την Εφαρμογή της Οδηγίας Πλαίσιο για τα Ύδατα, έγινε η εφαρμογή του μοντέλου στο υδρολογικό σύστημα του ποταμού Ευρώτα. Αφού αναλύθηκαν οι πιέσεις και τα υδρολογικά στοιχεία του ποταμού, έγινε η διακρίβωση του μοντέλου με τη χρήση στοιχείων από εγκατεστημένους σταθμούς παρακολούθησης. Τέλος, το διακριβωμένο πλέον πρόγραμμα χρησιμοποιήθηκε ως εργαλείο για τη διαμόρφωση πιθανών μέτρων, η εφαρμογή των οποίων θα αναβάθμιζε τα υδάτινα σώματα, τα οποία εμφανίζουν έλλειμμα ποιότητας ως προς τις παραμέτρους του οργανικού άνθρακα, του νιτροποιήσιμου αζώτου και του διαλυμένου οξυγόνου, στην κλάση της καλής κατάστασης.

Στο κλείσιμο του τεύχους διατυπώνονται τα συμπεράσματα, που προέκυψαν κατά την εκπόνηση αυτής της μελέτης.

1 Μοντέλα Ποιότητας Ύδατος

1.1 Η σημασία της Ποιότητας του Ύδατος

Η ύπαρξη ζωής προϋποθέτει την ύπαρξη νερού. Η ποσότητα και η ποιότητα του είναι καθοριστικής σημασίας για την ανάπτυξη και την ευημερία όλων των οργανισμών, συμπεριλαμβανομένου και του ανθρώπου. Είναι αξιοσημείωτο, ότι οι μεγάλοι ανθρώπινοι πολιτισμοί στην Ιστορία της ανθρωπότητας αναπτύσσονταν σχεδόν πάντα σε μέρη, όπου υπήρχε άφθονη ποσότητα γλυκού νερού. Χαρακτηριστικά είναι τα παραδείγματα των Σουμέριων, των Βαβυλωνίων και των Ασύριων, οι οποίοι έζησαν στη Μεσοποταμία, και των Αιγυπτίων, των οποίων η ανάπτυξη στηρίχθηκε καθοριστικά στο νερό του ποταμού Νείλου.

Μολονότι ο άνθρωπος κατανοούσε εδώ και χιλιάδες χρόνια τη σημασία της διαθέσιμης ποσότητας του γλυκού νερού για την επιβίωσή του, ο παράγοντας της ποιότητας άρχισε να μελετάται συστηματικά μόλις τον 19^ο αιώνα, παρόλο που η υποβάθμιση της ποιότητας του νερού θεωρείται ότι οδήγησε πολιτισμούς σε παρακμή στο παρελθόν, όπως πιστεύεται ότι συνέβη στην περιοχή της Γόνιμης Ημισελήνου, λόγω της υφαλμύρυνσης των υδατικών πόρων. Το ενδιαφέρον των σύγχρονων κοινωνιών για την ποιότητα του νερού, καλλιεργήθηκε με την σύνδεση ασθενειών, όπως της χολέρας, με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι η εξάπλωση επιδημιών σχετιζόταν με το νερό, μέσα στο οποίο αναπτύσσονταν και μέσω του οποίου μεταδίδονταν παθογόνοι μικροοργανισμοί. Ως εκ τούτου, αρχικά ενασχολήθηκαν με την ποιότητα του νερού οι υγιεινολόγοι, οι οποίοι έπρεπε να εξασφαλίσουν, ότι το νερό, που κυκλοφορούσε στο υδρευτικό δίκτυο δε θα ήταν επιβλαβές για τους καταναλωτές. Από τις πρώτες μελέτες σε σχέση με την ποιότητα των υδάτων, ήταν εκείνη των Streeter και Phelps για την ποιότητα του νερού του ποταμού Οχάιο, το οποίο χρησιμοποιούταν για υδρευτικούς σκοπούς.

Σήμερα, η ποιότητα του νερού είναι βασικός παράγοντας της περιβαλλοντικής πολιτικής και επεκτείνεται σε ένα φάσμα παραμέτρων, πέρα από εκείνες που σχετίζονται με τις μολυσματικές ασθένειες, το οποίο σχετίζεται με τις επιθυμητές χρήσεις του νερού από κάθε κοινωνία. Χαρακτηριστικές χρήσεις είναι η ύδρευση, η άρδευση, η κάλυψη της βιομηχανικής

ζήτησης και η αλιεία, καθώς και χρήσεις των οποίων η σημασία χαίρει πλέον μεγάλης εκτίμησης στον δυτικό κόσμο, όπως η αναψυχή η οποία προϋποθέτει τη διατήρηση της φυσικής ομορφιάς και της οικολογικής ισορροπίας.

1.2 Διασφάλιση της Ποιότητας Ύδατος

Για τη διασφάλιση της ποιότητας του ύδατος είναι αναγκαία η λήψη κατάλληλων μέτρων ώστε τα ποιοτικά χαρακτηριστικά στα υδάτινα σώματα να ικανοποιούν καθορισμένα ποσοτικά κριτήρια ποιότητας, τα οποία διασφαλίζουν την καταλληλότητά του υδάτινου σώματος για την επιθυμητή χρήση. Ο καθορισμός των επιθυμητών χρήσεων καθώς και των ποσοτικών κριτηρίων-ορίων εξαρτώνται άμεσα από τα οικονομικά χαρακτηριστικά, τα ενδιαφέροντα και τις προτεραιότητες της κάθε κοινωνίας και εμφανίζουν μεγάλο χάσμα ανάμεσα στον αναπτυγμένο και τον αναπτυσσόμενο κόσμο.

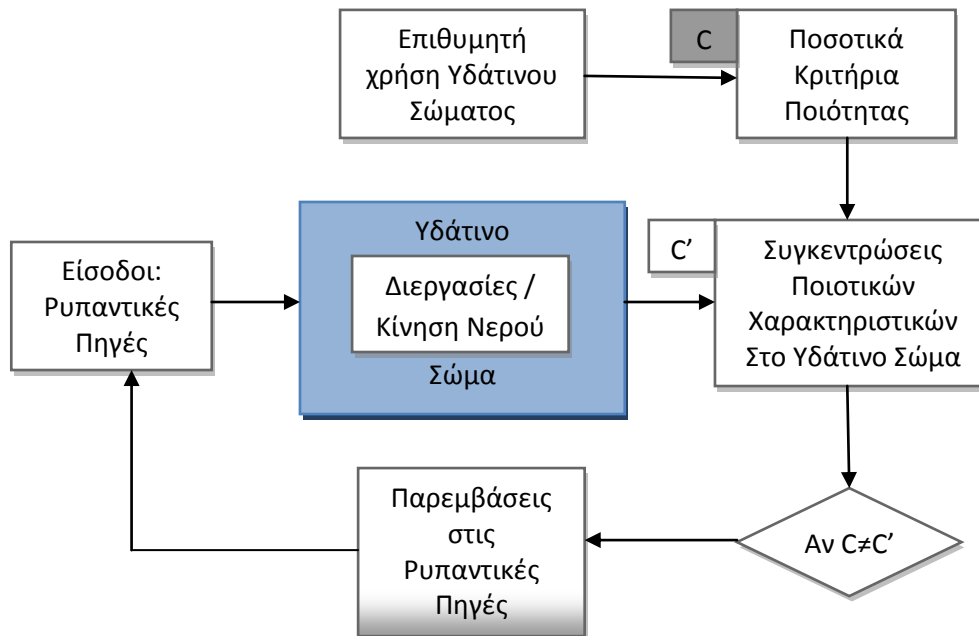
1.2.1 Διαδικασία Διασφάλισης Ποιότητας

Η αιτία της υποβάθμισης της ποιότητας του νερού των υδάτινων σωμάτων είναι η εισροή ρύπανσης σε αυτά. Ως εκ τούτου, για τη διασφάλιση της ποιότητας του νερού ενός υδάτινου σώματος είναι απαραίτητος ο καθορισμός των αποδεκτών χαρακτηριστικών των ρυπαντικών πιέσεων. Γι' αυτό το λόγο είναι αναγκαία η σύνδεση ανάμεσα στα χαρακτηριστικά της εισόδου και της εξόδου του συστήματος υδάτινου σώματος-περιβάλλοντος, δηλαδή στα ρυπαντικά φορτία, που εισρέουν από το περιβάλλον στο υδάτινο σώμα και στις συγκεντρώσεις της ρύπανσης και των ποιοτικών παραμέτρων που εμφανίζονται μέσα στο ίδιο το υδάτινο σώμα.

Απόβλητα από ανθρωπογενείς και φυσικές δραστηριότητες, τα οποία είναι οι εισοδοί του συστήματος, καταλήγουν στα υδάτινα σώματα, μέσα στο οποία συντελούνται βιοχημικές, χημικές και φυσικές διεργασίες καθώς και η κίνηση του νερού. Στις βιοχημικές διεργασίες συγκαταλέγεται η διάσπαση του οργανικού άνθρακα με την κατανάλωση οξυγόνου και η ανάπτυξη φυτοπλαγκτόν με την κατανάλωση θρεπτικών συστατικών, ενώ η καθίζηση και η διάχυση είναι φυσικά φαινόμενα. Το αποτέλεσμα των διεργασιών και των φαινομένων αυτών είναι η μεταβολή των συγκεντρώσεων των ποιοτικών χαρακτηριστικών στο υδάτινο σώμα σε σχέση με το χρόνο και το χώρο. Οι τελικές τους συγκεντρώσεις είναι τα δεδομένα εξόδου του συστήματος.

Ο μελετητής καλείται, λοιπόν, με όργανο την πραγματικότητα ή την προσομοίωση, να κρίνει ποια είναι τα αποδεκτά επίπεδα της έντασης των πηγών ρύπανσης (εισόδων του συστήματος) ώστε να εμφανίζονται στο υδάτινο σώμα συγκεντρώσεις ρύπων (εξόδοι του συστήματος), οι

οποίες να ικανοποιούν τα υφιστάμενα κριτήρια ποιότητας. Στη συνέχεια γίνονται κατάλληλες παρεμβάσεις, όπως η κατασκευή ή η τροποποίηση εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων ή η διαμόρφωση της αγροτικής πολιτικής, με στόχο την επίτευξή τους. Στο Σχήμα 1.1 απεικονίζεται σε διάγραμμα ροής η διαδικασία της διασφάλισης ποιότητας του ύδατος.



Σχήμα 1.1: Διαδικασία Διασφάλισης Ποιότητας Ύδατος

1.3 Μαθηματικά Μοντέλα

Το μαθηματικό μοντέλο είναι η μαθηματική περιγραφή μίας σειράς από φαινόμενα, τα οποία επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά ενός συστήματος ανάλογα με τις πιέσεις που δέχεται από το περιβάλλον του. Το μοντέλο δέχεται δεδομένα εισόδου, τα οποία είναι η αριθμητική αντιστοιχία των πιέσεων που δέχεται το σύστημα, και σκοπός του είναι να τα αντιστοιχίζει σε δεδομένα εξόδου, τα οποία να είναι όμοια με την αριθμητική αντιστοιχία των χαρακτηριστικών που θα παρουσίαζε το φυσικό υπό μελέτη σύστημα αν δεχόταν τις ίδιες πιέσεις. Το μοντέλο ενσωματώνει μαθηματικές εξισώσεις των οποίων οι παράμετροι πρέπει να λάβουν κατάλληλες τιμές, έτσι ώστε να περιγράφουν το σύστημα, που προσομοιώνεται. Η διαδικασία της διακρίβωσης (calibration) περιλαμβάνει τη χρήση στοιχείων από μετρήσεις πεδίου ή εργαστηρίου, δηλαδή πραγματικών τιμών των χαρακτηριστικών του συστήματος, με σκοπό την κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων του μαθηματικού μοντέλου. Τελική φάση στη διαμόρφωση του μοντέλου είναι η επαλήθευσή του (verification), δηλαδή ο έλεγχος των

αποτελεσμάτων του για διαφορετικά στοιχεία εισόδου από εκείνα της φάσης της διακρίβωσης με σύγκριση τους με πραγματικές τιμές πεδίου ή εργαστηρίου.

1.4 Ιστορία των Μοντέλων Ποιότητας Ύδατος

Το πρώτο μαθηματικό μοντέλο ποιότητας ύδατος, το οποίο χρησιμοποιήθηκε και συνεχίζει να χρησιμοποιείται ευρέως, είναι το μοντέλο, που απαρτίζεται από τις εξισώσεις Streeter-Phelps (Streeter & Phelps, 1925), και προσομοιώνει τη δίαυτα του διαλυμένου οξυγόνου κατά μήκος ενός υδατορέματος. Στην προσομοίωση Streeter-Phelps υποτίθεται σταθερή σε σχέση με το χρόνο πηγή οργανικού άνθρακα (BOD), η οποία εισρέει σημειακά σε υδατόρεμα. Συνεπώς προκύπτουν αρχικές συγκεντρώσεις στην αρχή του υδατορέματος, δηλαδή στο σημείο εισόδου της ρύπανσης, οι οποίες έπειτα μεταβάλλονται. Οι μελετητές εκτίμησαν, ότι πέρα από τη μεταγωγή, το φαινόμενο της μεταβολής της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου κατάντη της ρυπαντικής πηγής, οφείλεται και στην κατανάλωση ποσότητας οξυγόνου για την οξείδωση του ανθρακούχου οργανικού φορτίου με ταυτόχρονη συμπλήρωσή του από το περιβάλλον, λόγω της επαφής της τυρβώδους ροής του υδατορέματος με τον αέρα (επαναερισμός). Πολλές μελέτες έχουν γίνει έκτοτε για τον προσδιορισμό των συντελεστών των εξισώσεων, ενώ το ίδιο το μοντέλο αποτέλεσε τη βάση για τη δημιουργία πολλών άλλων μοντέλων, τα οποία συνεκτιμούν και άλλες διεργασίες.

Ο περιορισμός όμως της ανάγκης η ρυπαντική πηγή να είναι σημειακή και να μη μεταβάλλεται χρονικά, έτσι ώστε να λύνονται αναλυτικά οι εξισώσεις, δυσχέραινε την προσομοίωση της πραγματικότητας. Η ανάπτυξη, όμως, τη δεκαετία του 1960 των αριθμητικών υπολογιστικών μεθόδων καθώς και της πληροφορικής, κατέστησαν εφικτή την εφαρμογή των μοντέλων με συνθήκες, οι οποίες ήταν πλέον πολύ κοντά στις πραγματικές. Εν τω μεταξύ, έγιναν μεγάλες επενδύσεις στον τομέα της επεξεργασίας των λυμάτων με σκοπό την αναβάθμιση της ποιότητας των υδατικών πόρων, για την οποία εξέφραζε το ενδιαφέρον του μεγάλο μέρος της κοινωνίας. Έτσι το επιστημονικό ενδιαφέρον γύρω από τα μοντέλα ποιότητας ύδατος ενισχύθηκε.

Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα του μοντέλου Delaware Estuary Comprehensive Study, το οποίο προτάθηκε από τον Thomann το 1963. Το μοντέλο αυτό υπολογίζει το διαλυμένο οξυγόνο σε υδατόρεμα μεταβλητής διατομής βασιζόμενο στη μέθοδο των Streeter-Phelps, επιτρέποντας όμως την εισαγωγή πολλαπλών πηγών διαφορετικής έντασης καθώς και τη μεταβολή των συντελεστών. Έπειτα, το 1970, δημιουργήθηκαν αρκετά υπολογιστικά προγράμματα βασισμένα στις εξισώσεις Streeter-Phelps. Το DOSAG του οργανισμού «Texas

Water Development Board» αντιμετώπιζε το υδατόρεμα ως σύνολο πολλών τμημάτων επιτρέποντας έτσι τη χωρική διαφοροποίηση των συντελεστών, ενώ το QUAL I της εταιρίας «Masch and Associates» προσομοίωνε και τη μεταβολή της θερμοκρασίας, με την οποία συσχετίζονται οι συντελεστές της μεθόδου, οι οποίοι προσαρμόζονταν αυτόματα από το πρόγραμμα. Στην εξέλιξη του QUAL I, το QUAL II της εταιρίας «Water Resources Engineers, Inc», απαλείφτηκε ο περιορισμός της μονιμότητας της ροής, ενώ ενσωματώθηκε και η επίδραση των θρεπτικών συστατικών στη δίαιτα του οξυγόνου κατά μήκος του υδατορέματος. Ακολούθησαν αρκετές προσπάθειες για την ενσωμάτωση και άλλων διεργασιών, όπως της καθίζησης, της φωτοσύνθεσης της αναπνοής και των διεργασιών που συντελούνται στον πυθμένα του υδατορέματος, σε υπολογιστικά μοντέλα (Orlob, 1983).

Κατά τη δεκαετία του 1970 άρχισε να εξελίσσεται και η προσομοίωση λιμνών και ταμιευτήρων. Το ενδιαφέρον για τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού εξόδου των ταμιευτήρων για την κάλυψη υδρευτικών και αρδευτικών αναγκών καθώς και για το φαινόμενο του ευτροφισμού λόγω της συσσώρευσης θρεπτικών συστατικών στο υδάτινο σώμα αποτέλεσαν τη βασική δύναμη ώθησης προς την ανάπτυξη των μοντέλων ποιότητας ύδατος σε λίμνες. Στις λίμνες, η διασπορά των ρύπων λόγω της κίνησης του υδάτινου σώματος είναι δευτερεύουσας σημασίας σε αντίθεση με τα υδατορέματα, τα οποία προσομοιώνονται συνήθως ως μονοδιάστατη ροή, η οποία παίζει κυρίαρχο ρόλο στη μεταβολή της συγκέντρωσης των ρύπων. Στις λίμνες, αντιθέτως, έντονα επηρεάζεται η μεταβολή των ποιοτικών χαρακτηριστικών από τη θερμοκρασιακή μεταβολή συναρτήσει του βάθους.

Αρχικά δημιουργήθηκαν απλά μοντέλα ευτροφισμού, στα οποία η λίμνη χωριζόταν σε δύο θερμοκρασιακά στρώματα πλήρους μίξης, το επιλίμνιο και το υπολίμνιο (Vollenweider, 1969). Στην περίπτωση αυτή, το μοντέλο ήταν σύνολο της αλληλεπίδρασης δύο προσομοιώσεων μηδενικής διάστασης. Παράλληλα αναπτύχθηκαν μονοδιάστατα μοντέλα, με διάσταση τον κατακόρυφο άξονα, για την προσομοίωση της θερμοκρασιακής μεταβολής κατά το βάθος των λιμνών (Orlob, 1983).

Έπειτα, προσομοιώθηκαν οι διεργασίες, οι οποίες επηρεάζουν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού των λιμνών και μαζί με την προσομοίωση του φαινομένου της κατά βάθος θερμοκρασιακής μεταβολής οδήγησαν σε μονοδιάστατα μοντέλα προσομοίωσης της μεταβολής του διαλυμένου οξυγόνου DO και του BOD, καθώς και των θρεπτικών συστατικών και της ζωής στις λίμνες (Orlob, 1983). Περαιτέρω βελτιώσεις στην ακρίβεια της

προσομοίωσης επετεύχθησαν με την μελέτη του φαινομένου της συσσώρευσης των φερτών υλών, καθώς και της εισαγωγής της παραμέτρου του χρόνου παραμονής στην προσομοίωση. Στην προσομοίωση μεγάλων λιμνών, όπου ο άνεμος δημιουργεί σημαντική κίνηση, είναι σημαντική και η συμβολή της μεταγωγής στη μεταβολή των συγκεντρώσεων των ποιοτικών παραμέτρων του νερού. Ως εκ τούτου, σε τέτοιες περιπτώσεις είναι σκόπιμη και η προσομοίωση της κίνησης της υδάτινης μάζας λόγω του ανέμου. Τέτοια μοντέλα, αρχικά χωρίς προσομοίωση της κατακόρυφης μεταβολής της θερμοκρασίας και έπειτα τρισδιάστατα χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της μεταγωγής και της διασποράς των ρύπων και έπειτα εμπλουτίστηκαν ενσωματώνοντας και τις βιοχημικές διεργασίες (Orlob, 1983).

1.5 Η Χρησιμότητα των Μαθηματικών Μοντέλων Ποιότητας Ύδατος

Για την εξασφάλιση της ποιότητας του νερού στα υδάτινα σώματα, είναι απαραίτητο να είναι γνωστή η συμπεριφορά τους ανάλογα με τις πιέσεις που δέχονται. Με αυτό τον τρόπο, η ένταση των πιέσεων μπορεί να καθοριστεί σε τέτοιο επίπεδο, ώστε να οδηγεί σε αποδεκτά επίπεδα ποιότητας νερού στο υδάτινο σώμα, στο οποίο ασκείται. Η επίδραση της πίεσης δεν είναι συνήθως δυνατό να μετρηθεί απευθείας στο υδάτινο σώμα, αφού ο σκοπός της διαχείρισης των υδατικών πόρων σε σχέση με την ποιότητα είναι ο κατάλληλος σχεδιασμός ώστε να μην ξεπερνώντας τα επιθυμητά όρια. Συνεπώς, είναι σημαντικό τα συμπεράσματα για τον σχεδιασμό να μπορούν να προκύπτουν από ομοιώματα της πραγματικότητας και όχι κατευθείαν από την ίδια. Ως εκ τούτου, η προσομοίωση του υδάτινου σώματος, της πίεσης και των φαινομένων, από τα οποία εξαρτάται η επίδραση της στην ποιότητα του νερού του υδάτινου σώματος είναι η λύση. Τα φυσικά μοντέλα, παρόλο, που ενδέχεται να δίνουν πιο ακριβή αποτελέσματα καθώς και να είναι πιο κατανοητά από τους φορείς λήψεως αποφάσεων, παρουσιάζουν πολυάριθμα χαρακτηριστικά, τα οποία δυσχεραίνουν την εφαρμογή τους. Αρχικά επισημαίνεται το μεγάλο κόστος ενός φυσικού ομοιώματος, το οποίο προκύπτει από την ανάγκη σχεδιασμού, κατασκευής και λειτουργίας του μοντέλου για ικανό χρόνο. Εξίσου σημαντική είναι και η αδυναμία αυτών των μοντέλων να προσαρμόζονται σε διαφορετικά προβλήματα, κάτι το οποίο σημαίνει, ότι κάθε περίπτωση απαιτεί το σχεδιασμό την κατασκευή και τη λειτουργία ενός μοναδικού μοντέλου. Τέλος, δεν θα πρέπει να υποτιμηθεί, το γεγονός, ότι η εφαρμογή φυσικής προσομοίωσης για κάθε περίπτωση είναι πρακτικώς αδύνατη. Οπότε, η έλλειψη της δυνατότητας μαθηματικής προσομοίωσης θα καθιστούσε αδύνατη τη μελέτη και τη διαχείριση της ποιότητας του νερού των υδάτινων σωμάτων μικρού μεγέθους. Σε αντίθεση με τα φυσικά ομοιώματα, τα μαθηματικά μοντέλα

είναι ευέλικτα στην προσαρμογή τους, δίνοντας τη δυνατότητα περιγραφής πολλών διαφορετικών συστημάτων με την κατάλληλη επιλογή παραμέτρων. Συνεπώς, για τη μελέτη ενός συστήματος είναι δυνατή η αναζήτηση ανάμεσα σε έτοιμα μαθηματικά μοντέλα και η επιλογή και η προσαρμογή κάποιου για τους σκοπούς της μελέτης. Αξίζει επιπλέον να αναφερθεί το γεγονός, ότι τα μαθηματικά προσομοιώματα είναι δυνατό να επεκτείνονται και να εξελίσσονται με αποτέλεσμα τη συνεχή βελτίωσή τους, σε αντίθεση με την περίπτωση των εργαστηριακών μοντέλων, τα οποία συνήθως δίνουν τη θέση τους σε άλλα μετά την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

1.6 Τα Μαθηματικά Μοντέλα Ποιότητας Ύδατος για Υδατορέματα

Τα μοντέλα για υδατορέματα, που έχουν δημιουργηθεί ως σήμερα είναι πολυάριθμα και αποτελούν βασικό εργαλείο στη λήψη αποφάσεων σε σχέση με τη διαχείριση των υδατικών πόρων. Η προσομοίωση της μεταβολής της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου DO είναι το συνηθέστερο αντικείμενο των μοντέλων.

1.6.1 Τύποι Μοντέλων Ποιότητας Ύδατος Υδατορεμάτων

Τα χαρακτηριστικά των μοντέλων ποιότητας ύδατος για υδατορέματα ποικίλουν όσον αφορά στη μονιμότητα ή τη μεταβλητότητα της ροής και της ρύπανσης, των διεργασιών που προσομοιώνονται καθώς και της δυνατότητας προσομοίωσης της μη σημειακής ρύπανσης, η οποία προκύπτει κυρίως από τις απορροές αστικών και γεωργικών περιοχών, οι οποίες μεταφέρουν ρύπους. Λόγω της δυσκολίας, που παρουσιάζει ο έλεγχος της μη σημειακής ρύπανσης, σε αντίθεση με την περίπτωση της σημειακής, της οποίας η θέση και τα χαρακτηριστικά μπορούν να ελεγχθούν αλλά και να καθοριστούν, είναι αναγκαία η προσομοίωση, όχι μόνο της επίδρασης της στην ποιότητα του νερού στο υδάτινο σώμα στο οποίο καταλήγει η απορροή, αλλά και του ίδιου του μηχανισμού δημιουργίας και διάθεσης της ρύπανσης με σκοπό την εύρεση της έντασης και των υπόλοιπων χαρακτηριστικών της. Ως εκ τούτου, τα δεδομένα εξόδου από μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης της απορροής και της δημιουργίας διάχυτης ρύπανσης χρησιμεύουν ως δεδομένα εισόδου για μοντέλα ποιότητας ύδατος υδατορεμάτων, στα οποία περιλαμβάνεται και η μη σημειακή ρύπανση (Orlob, 1983).

Επιπλέον, υπάρχουν δύο κατηγορίες μοντέλων ποιότητας ύδατος υδατορεμάτων, ανάλογα με τον τύπο των δεδομένων εξόδου. Τα αιτιοκρατικά μοντέλα δουλεύουν κυρίως με μέσες τιμές και τα αποτελέσματά τους απεικονίζουν μία μέση κατάσταση. Στην άλλη μεριά, τα στοχαστικά μοντέλα ενσωματώνουν τον παράγοντα της αβεβαιότητας και δίνουν

αποτελέσματα συνοδευόμενα από πιθανότητες εμφάνισης. Μολονότι τα στοχαστικά μοντέλα περιγράφουν την κατάσταση με μεγαλύτερη πληρότητα, απαιτούν πολλαπλάσια στοιχεία για την διαδικασία της διακρίβωσης και της επαλήθευσης και οι υπολογιστικοί χρόνοι που απαιτούνται για την προσομοίωση ξεπερνούν κατά πολύ τους αντίστοιχους χρόνους των αιτιοκρατικών μοντέλων (Orlob, 1983).

Έπειτα η προσομοίωση μπορεί να γίνει σε μία, δύο ή τρεις διαστάσεις. Στα μοντέλα μίας διάστασης, θεωρείται ότι οι συγκεντρώσεις των ποιοτικών χαρακτηριστικών μεταβάλλονται μόνο κατά το μήκος του υδάτινου σώματος, ενώ στην διεύθυνση του πλάτους και του βάθους θεωρούνται συνθήκες πλήρους μίξης. Σε μοντέλα δύο διαστάσεων λαμβάνονται συνθήκες πλήρους μίξης μόνο σε μία διεύθυνση, όπως π.χ. σε ρηχό και πλατύ ποταμό κατά τη διεύθυνση του βάθους, ενώ η συγκέντρωση εμφανίζει μεταβολή κατά τις δύο άλλες διευθύνσεις. Τέλος, σπανίως κρίνεται απαραίτητη η τρισδιάστατη προσομοίωση της ροής και της μεταφοράς και διασποράς των ρύπων και χρησιμοποιούνται μοντέλα τριών διαστάσεων (Orlob, 1983).

1.6.2 Δεδομένα Εισόδου Μοντέλων Ποιότητας Ύδατος Υδατορεμάτων

Οι πηγές ρύπανσης αποτελούν τις εισόδους του συστήματος και του μοντέλου. Ο διαχωρισμός των πηγών σε δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα με τη δυνατότητα ή μη ορισμού σαφούς θέσης εφαρμογής τους είναι ουσιώδης. Συνεπώς η ρύπανση χαρακτηρίζεται είτε ως σημειακή ή ως μη σημειακή.

1.6.2.1 Η Σημειακή Ρύπανση

Η σημειακή ρύπανση είναι εκείνη, η οποία προέρχεται από πηγές, των οποίων η θέση εφαρμογής είναι δυνατό να οριστεί με ακρίβεια σε ένα συγκεκριμένο σημείο του υδάτινου σώματος. Συνηθέστερα η σημειακή ρύπανση προκύπτει από τη διάθεση των προϊόντων των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Αστικών Λυμάτων ή Βιομηχανικών λυμάτων. Στην πρώτη περίπτωση αναμένεται είσοδος μάζας BOD καθώς και θρεπτικών συστατικών ενώ δεν αποκλείεται και η είσοδος τοξικών ρύπων. Όσον αφορά στα βιομηχανικά λύματα, η σύστασή τους ποικίλει και εξαρτάται από τα προϊόντα της βιομηχανίας (Thomann & Mueller, 1987). Οι σημειακές πιέσεις είναι συνήθως μόνιμες και, δεδομένου ότι εφαρμόζεται η νομοθεσία, η αβεβαιότητα σε σχέση με τα χαρακτηριστικά τους εμφανίζεται περιορισμένη.

1.6.2.2 Μη Σημειακή Ρύπανση

Η μη σημειακή ρύπανση εφαρμόζεται σε μία έκταση (σε περίπτωση μονοδιάστατου μοντέλου σε ένα μήκος) του υδατορέματος. Χαρακτηριστικά παραδείγματα μη σημειακής ρύπανσης

είναι η γεωργική, η αστική, η φυσική. Συνήθως η μάζα των ρύπων καταλήγει στο υδάτινο σώμα μέσω της απορροής και γι' αυτό σε πολλές περιπτώσεις ή έντασή της συνδέεται με το φαινόμενο της βροχόπτωσης (Thomann & Mueller, 1987). Το γεγονός, ότι η μη σημειακή ρύπανση είναι συνήθως μη μόνιμη και τα χαρακτηριστικά της είναι δύσκολο να καθοριστούν, καθιστά την ενσωμάτωσή της στη μελέτη ιδιαίτερα απαιτητική και είναι συνήθως η ανάγκη προσομοίωσης της πορείας της προς το υδάτινο σώμα με σκοπό να εκτιμηθούν τα χαρακτηριστικά της, τα οποία αποτελούν στοιχεία εισόδου του μοντέλου (Orlob, 1983).

1.6.3 Παραδείγματα Μοντέλων Ποιότητας Ύδατος Υδατορέματων

Παρακάτω δίνονται μερικά παραδείγματα μοντέλων ποιότητας ύδατος για υδατορέματα ξεκινώντας από την απλή προσομοίωση Streeter-Phelps και καταλήγοντας σε πιο σύνθετες εκδοχές προσομοίωσης καθώς και σε στοχαστικά μοντέλα.

1.6.3.1 Προσομοίωση Streeter-Phelps

Στη μελέτη τους για τη ρύπανση του ποταμού Ohio το 1925 στις Η.Π.Α. (Streeter & Phelps, 1925), οι Streeter και Phelps κατέληξαν στο πιο ευρέως χρησιμοποιημένο μοντέλο ποιότητας ύδατος για υδατορέματα. Η προσομοίωση αναφέρεται σε υδατόρεμα με αρχική συγκέντρωση οργανικού άνθρακα BOD και διαλυμένου οξυγόνου DO και καμία άλλη πηγή ρύπανσης κατά μήκος του. Στο μοντέλο θεωρήθηκε, ότι το διαλυμένο οξυγόνο DO μειώνεται σε σχέση με το χρόνο λόγω της κατανάλωσής του για τη διάσπαση του οργανικού άνθρακα και αυξάνεται λόγω του επαναερισμού του υδάτινου σώματος εξαιτίας της επαφής του με την ατμόσφαιρα. Η κατανάλωση λόγω της οξείδωσης του οργανικού άνθρακα με τη μορφή βιολογικά απαιτούμενου οξυγόνου BOD θεωρήθηκε ότι γίνεται με ρυθμό K_1 σε μονάδες ανά μέρα, ενώ ο επαναερισμός του νερού με ρυθμό K_2 επίσης σε αντίστροφες μέρες. Οπότε η διαφορική εξίσωση, που περιγράφει τα δύο φαινόμενα είναι η σχέση (1.1):

$$\frac{dD}{dt} = K_1 BOD - K_2 D \quad (1.1)$$

Όπου $D = DO_s - DO_t$ είναι το έλλειμμα οξυγόνου

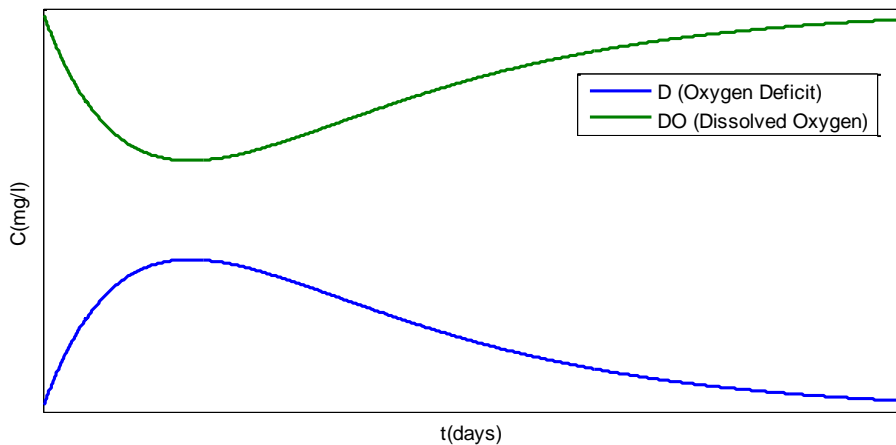
Η λύση της διαφορικής εξίσωσης δίνει το έλλειμμα του διαλυμένου οξυγόνου D στο υδατόρεμα στη θέση x στην οποία φτάνει το ρευστό σωματίδιο μετά από χρόνο ροής t ξεκινώντας από την αρχή του.

Συγκεκριμένα:

$$D_t = \frac{K_1 D}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t}) + (D_s - D_0) e^{-K_1 t} \quad (1.2)$$

Όπου DO_s είναι η τιμή κορεσμού για το διαλυμένο οξυγόνο και $t = x/V$ με x σε m την απόσταση από την αρχή του υδατορέματος και V σε m/s την ταχύτητα ροής.

Το άθροισμα της αύξησης και της μείωσης του ελλείμματος του διαλυμένου οξυγόνου ή του ίδιου του διαλυμένου οξυγόνου δίνει την καμπύλη της συγκέντρωσης του ελλείμματος του διαλυμένου οξυγόνου ή του διαλυμένου οξυγόνου. Η μορφή των καμπυλών φαίνεται στο Σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2: Καμπύλες Συγκέντρωσης Διαλυμένου Οξυγόνου και Ελλείμματος Διαλυμένου Οξυγόνου

Το ελάχιστο διαλυμένο οξυγόνο, δηλαδή το μέγιστο έλλειμμα οξυγόνου εμφανίζεται στο σημείο καμπής της καμπύλης, δηλαδή για:

$$t = t_c = \left[\frac{1}{K_2 - K_1} \ln \frac{K_2}{K_1} \left(1 - \frac{D_0 (K_2 - K_1)}{BOD_0 K_1} \right) \right] \quad (1.3)$$

με τιμή ελλείμματος σύμφωνα με τη σχέση (1.4).

$$D_c = \frac{K_2}{K_1} \text{BOD}_0 e^{-K_1 t_c} \quad (1.4)$$

Πολλές έρευνες έχουν γίνει για την εύρεση των τιμών των συντελεστών K_1 και K_2 , η οποία είναι κρίσιμη για την εφαρμογή του μοντέλου.

1.6.3.2 Εξελίξεις της Προσομοίωσης Streeter-Phelps

Από τη δημοσίευσή της το 1925 μέχρι σήμερα, η μέθοδος των Streeter και Phelps έχει υπάρξει βάση για πολλά μοντέλα, τα οποία προσομοιώνουν περισσότερες διεργασίες, οι οποίες επιδρούν στη μεταβολή της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου σε ένα υδατόρεμα, πέρα από τη διάσπαση του οργανικού άνθρακα και τον επαναερισμό.

Αρχικά, η μεταβολή της συγκέντρωσης του οξυγόνου σε σχέση με τη θέση, όταν πλέον οι συγκεντρώσεις έχουν σταθεροποιηθεί σε σχέση με το χρόνο, δηλαδή $\frac{\partial DO}{\partial t} = 0$, περιγράφεται από τη σχέση (1.5):

$$V \frac{dD}{dx} = K_1 \text{BOD} - K_2 D \quad (1.5)$$

ης οποίας η ολοκλήρωση δίνει τη Σχέση (1.6):

$$D_x = \frac{K_1 D}{K_2 - K_1} \left(e^{-K_1 \frac{x}{V}} - e^{-K_2 \frac{x}{V}} \right) + (D_s - D_0) e^{-K_1 \frac{x}{V}} \quad (1.6)$$

η οποία είναι ουσιαστικά η Streeter-Phelps με $t = \frac{x}{V}$ και δίνει την συγκέντρωση του ελλείμματος οξυγόνου κατά μήκος του υδατορέματος, όταν πλέον έχει σταθεροποιηθεί (χρονικά).

Στην παραπάνω εξίσωση προσομοιώνεται μόνο η διάσπαση οργανικού άνθρακα και ο επαναερισμός. Σε ένα υδατόρεμα όμως συντελούνται και άλλα φαινόμενα, τα οποία επηρεάζουν τη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου κατά μήκος του. Παρακάτω παρατίθεται μία γενικευμένη μορφή του μοντέλου Streeter-Phelps (Thomann & Mueller, 1987), στην οποία προσομοιώνονται οι παρακάτω διεργασίες και φαινόμενα.

1. Μείωση του ανθρακικού BOD λόγω καθίζησης.

Η καθίζηση ήταν από τις πρώτες διεργασίες, που ενσωματώθηκαν στις εξισώσεις Streeter-Phelps (Thomas, 1948). Αν θεωρηθεί, ότι η ταχύτητα καθίζησης του BOD είναι ανάλογη με τη συγκέντρωσή του, το φαινόμενο μπορεί να περιγραφεί από τη σχέση (1.7).

$$V \frac{dF}{dx} = K_3 \text{BOD} \quad (1.7)$$

2. Κατανάλωση διαλυμένου οξυγόνου για τη νιτροποίηση του αμμωνιακού αζώτου.

Θεωρείται ότι η μεταβολή του βιολογικά απαιτούμενου οξυγόνου NBOD για την μετατροπή του αμμωνιακού αζώτου NH_4 σε νιτρικά NO_3 σε σχέση με τη θέση περιγράφεται από κινητική πρώτης τάξης σύμφωνα με τη σχέση (1.8):

$$\frac{d\text{NBOD}}{dx} = K_N \text{NBOD} \quad (1.8)$$

όπου το K_N είναι ο συντελεστής νιτροποίησης και το NBOD είναι η συγκέντρωση του οργανικού αζώτου, το οποίο πρόκειται να υδρολυθεί σε αμμωνιακό, και του αμμωνιακού αζώτου ανοιγμένη σε ζήτηση οξυγόνου. Σύμφωνα με τη στοιχειομετρία των χημικών εξισώσεων της διαδικασίας της νιτροποίησης, η αναγωγή προκύπτει με τον πολλαπλασιασμό της συγκέντρωσης του αζώτου με 4,57. Οπότε $\text{NBOD} = 4,57N$.

3. Αύξηση του ανθρακικού BOD ως αποτέλεσμα ομοιόμορφης χωρικά και χρονικά μη σημειακής ρύπανσης ή/και της επαναιώρησης των ιζημάτων και της απελευθέρωσης των προϊόντων του αναερόβιου μεταβολισμού στον πυθμένα του υδατορέματος.

Η μεταβολή αυτή του BOD κατά μήκος του υδατορέματος θεωρείται ότι μπορεί να περιγραφεί με τη σχέση (1.9):

$$V \frac{dBOD}{dx} = K_a \quad (1.9)$$

όπου το K_a είναι η ταχύτητα της αύξησης του ανθρακικού BOD λόγω των παραπάνω διαδικασιών.

4. Κατανάλωση διαλυμένου οξυγόνου ως αποτέλεσμα της έκκλησης αερίων, τα οποία είναι προϊόντα των αναερόβιων διεργασιών, που συντελούνται στον πυθμένα του υδατορέματος.

Στον πυθμένα του υδατορέματος συσσωρεύεται οργανικό υλικό και οι αναερόβιες συνθήκες που υπάρχουν εκεί λόγω έλλειψης οξυγόνου και νιτρικών, οδηγούν στην αναερόβια αποσύνθεσή του. Η έκκληση των προϊόντων αερίων CO₂, CH₄, και H₂S, οδηγεί σε μείωση του διαλυμένου οξυγόνου. Μέθοδοι, όπως των Baity (Baity, 1938) και Fair (Fair, et al., 1941), έχουν προταθεί για τον υπολογισμό της κατανάλωσης οξυγόνου λόγω πυθμενικών αποθέσεων. Το φαινόμενο μπορεί να περιγραφεί με τη σχέση (1.10):

$$V \frac{dD}{dx} = S_B \quad (1.10)$$

5. Η αύξηση του διαλυμένου οξυγόνου λόγω της φωτοσύνθεσης και η μείωσή του λόγω της αναπνοής των φυτικών οργανισμών στο υδατόρεμα.

Η συνολική επίδραση των φυτικών οργανισμών μπορεί να εκφραστεί με μία έκφραση όπως η σχέση (1.11):

$$V \frac{dD}{dx} = R \quad (1.11)$$

όπου το R είναι θετικό όταν η κατανάλωση οξυγόνου υπερτερεί έναντι της φωτοσυνθετικής παραγωγής (αύξηση ελλείμματος) και αντίστροφα.

Άθροισμα όλων των παραπάνω διεργασιών δίνει:

Για το ανθρακούχο BOD:

$$V \frac{dBOD}{dx} + K_1 BOD + K_3 BOD + K_\alpha = 0 \quad (1.12)$$

Ολοκληρώνοντας προκύπτει η σχέση (1.13):

$$\text{BOD}_x = \text{BOD}_0 e^{-(K_1+K_3)\frac{x}{V}} + \frac{K_\alpha}{K_1 + K_3} \left(1 - e^{-(K_1+K_3)\frac{x}{V}}\right) \quad (1.13)$$

Για το αζωτούχο NBOD

$$V \frac{d\text{NBOD}}{dx} = K_N \text{NBOD} \quad (1.14)$$

Και με ολοκλήρωση προκύπτει η σχέση (1.15) :

$$\text{NBOD}_x = \text{NBOD}_0 * e^{-K_N \frac{x}{V}} \quad (1.15)$$

Για το έλλειμμα του διαλυμένου οξυγόνου D

$$V \frac{dD}{dx} = -K_2 D + K_1 \text{BOD} + K_N \text{NBOD} + S_B + R \quad (1.16)$$

και με ολοκλήρωση προκύπτει η σχέση (1.17):

$$\begin{aligned} D_x = & D_0 e^{-K_2 \frac{x}{V}} + \text{BOD}_0 \left[\frac{K_1}{K_2 - (K_1 + K_3)} \left(e^{-(K_1 + K_3) \frac{x}{V}} - e^{-K_2 \frac{x}{V}} \right) \right] + \\ & \text{NBOD}_0 \left[\frac{K_N}{K_2 - K_N} \left(e^{-K_N \frac{x}{V}} - e^{-K_2 \frac{x}{V}} \right) \right] + K_\alpha \left[\frac{K_1}{K_2 (K_1 + K_3)} \left(1 - e^{-K_2 \frac{x}{V}} \right) \right] - \\ & K_\alpha \left[\frac{K_1}{((K_2 - (K_1 + K_3))(K_1 + K_3))} \left(e^{-(K_1 + K_3) \frac{x}{V}} - e^{-K_2 \frac{x}{V}} \right) \right] + \left(\frac{S_B + R}{K_2} \right) \left(1 - e^{-K_2 \frac{x}{V}} \right) \end{aligned} \quad (1.17)$$

Από τις αιτίες μεταβολής του ελλείμματος οξυγόνου που αναφέρθηκαν, μπορούν να χρησιμοποιηθούν όσες επιθυμεί ο μελετητής, ανάλογα φυσικά με τη διαθεσιμότητα στοιχείων για την προσαρμογή και τη διακρίβωση (εκτίμηση παραμέτρων) του μοντέλου. Αξίζει να σημειωθεί ότι η γενικευμένη αυτή μέθοδος έχει δεχτεί κριτική όσον αφορά στην εφαρμοσιμότητα και την αξιοπιστία της λόγω της δυσκολίας στον καθορισμό των συντελεστών καθώς και της προσπάθειας να περιγραφτούν οι διεργασίες με κινητική πρώτης τάξης (Edeline & Lambert, 1974).

1.6.3.3 Μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών

Διάφορες αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης της εξίσωσης, που εκφράζει τη διατήρηση της μάζας στο υδατόρεμα, ξεπερνούν τους περιορισμούς που τίθενται όταν απαιτείται αναλυτική λύση. Παρακάτω περιγράφονται δύο μέθοδοι, οι οποίες υπολογίζουν τη μεταβολή στο χρόνο και το χώρο της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου σε υδατόρεμα λόγω της επίδρασης της

κίνησης του νερού, της διασποράς, της βιοδιάσπασης του οργανικού άνθρακα υπό τη μορφή BOD και του επαναερισμού του υδατορέματος. Στο μοντέλο γίνεται παραδοχή γραμμικότητας του υδάτινου σώματος, δηλαδή πρόκειται για μονοδιάστατη προσομοίωση. Η εξίσωση, που περιγράφει τη μεταβολή της συγκέντρωσης μίας ουσίας λόγω μεταγωγής και διασποράς σε μία διάσταση είναι:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -V \frac{\partial C}{\partial x} + E \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1.18)$$

Ένας επιπλέον όρος S μπορεί να περιγράψει τη μεταβολή της συγκέντρωσης σε σχέση με το χρόνο λόγω των υπόλοιπων φαινομένων, όπως η βιοδιάσπαση του BOD με κατανάλωση διαλυμένου οξυγόνου. Οπότε η σχέση (1.18) γίνεται:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -V \frac{\partial C}{\partial x} + E \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + S \quad (1.19)$$

όπου t είναι ο χρόνος, V η ταχύτητα ροής και E είναι ο συντελεστής διάχυσης.

Η εξίσωση μπορεί να λυθεί αριθμητικά με τη μέθοδο των διαφορικών όγκων (Versteeg & Malalasekera, 2007). Το υδατόρεμα χωρίζεται σε n τμήματα μήκους dx τα οποία έχουν ένα ανατολικό και ένα δυτικό άκρο. Σε περίπτωση υπερκρίσιμης ροής εφαρμόζεται συνήθως η μέθοδος των ανάντη διαφορών, στην οποία θεωρείται ότι η συγκέντρωση του ρύπου στο δυτικό άκρο ενός όγκου είναι ίση με τη συγκέντρωση του προηγούμενου όγκου, ενώ η συγκέντρωση στο ανατολικό του άκρο είναι ίση με του επόμενου. Αυτή η παραδοχή μειώνει δραστικά τον υπολογιστικό φόρτο. Αντιθέτως, σε υποκρίσιμες ροές χρησιμοποιείται η μέθοδος των κεντρικών διαφορών, όπου η συγκέντρωση στο δυτικό άκρο δίνεται ως μέσος όρος της συγκέντρωσης του ίδιου και του προηγούμενου διαφορικού όγκου, ενώ για το ανατολικό άκρο χρησιμοποιείται το ημίαθροισμα των συγκεντρώσεων του ίδιου και του επόμενου διαφορικού όγκου. Με αυτές τις παραδοχές η διαφορική εξίσωση της μεταβολής της συγκέντρωσης σε σχέση με το χρόνο μετατρέπεται σε σύνολο γραμμικών εξισώσεων. Οπότε προκύπτει η σχέση (1.20) για το BOD και η σχέση (1.21) για το διαλυμένο οξυγόνο αντίστοιχα (Stamou & Rutschmann, 2011).

$$\text{BOD}_i^{t+1} = a_{i-1}\text{BOD}_{i-1}^t + a_i\text{BOD}_i^t + a_{i+1}\text{BOD}_{i+1}^t - K_1\text{BOD}_i^t \quad (1.20)$$

$$\text{DO}_i^{t+1} = a_{i-1}\text{DO}_{i-1}^t + a_i\text{DO}_i^t + a_{i+1}\text{DO}_{i+1}^t - K_1\text{BOD}_i^t + K_2(\text{DO}_s - \text{DO}_i^t) \quad (1.21)$$

Ο Πίνακας 1.1 δίνει τους συντελεστές της μεθόδου ως συνάρτηση των αδιάστατων χαρακτηριστικών αριθμών:

$$\text{Peclet } p = Vdx/E, \quad \text{Courant } c = Vdt/dx, \quad \text{αριθμός διασποράς } d = Edt/dx^2$$

Πίνακας 1.1: Συντελεστές Μεθόδου Πεπερασμένων Διαφορών

Μέθοδος	UDS	UDS	UDS	CDS	CDS	CDS
Συντελεστές	a_{i-1}	a_i	a_{i+1}	a_{i-1}	a_i	a_{i+1}
$i = 1$	$c + 2d$	$1 - c - 3d$	D	$c + 2d$	$1 - 0.5c - 3d$	$d - 0.5c$
$i = 2 \text{ to } n-1$	$c + d$	$1 - c - 2d$	D	$0.5c + d$	$1 - 2d$	$d - 0.5c$
$i = n$	$c + d$	$1 - c - d$	0	$0.5c + d$	$1 - 0.5c - d$	0

Έναντι της κλασικής θεώρησης Streeter-Phelps, αυτό το μοντέλο εμφανίζει το προτέρημα της ταυτόχρονης προσομοίωσης της μεταβολής των συγκεντρώσεων με το χρόνο και το χώρο, ενώ περιλαμβάνεται και ο παράγοντας της διασποράς.

1.6.3.4 Νεότερα Μοντέλα

Κατά τα τελευταία χρόνια, λόγω των απαιτήσεων της εφαρμογής της Οδηγίας Πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τα Ύδατα, έχει διαπιστωθεί ότι τα υπάρχοντα μοντέλα είναι ανεπαρκή για την εφαρμογή των πολιτικών που έχουν ανακοινωθεί (Horn, et al., 2004). Ένας τομέας, στον οποίο υπάρχει μεγάλη κινητικότητα είναι η μοντελοποίηση μικρών ποταμών και παραπόταμων με μικρό κόστος και σε περιορισμένο χρόνο. Ο λόγος είναι το γεγονός, ότι η προσομοίωση των υδάτινων σωμάτων αποτελεί σημαντικό εργαλείο για τη λήψη αποφάσεων, αλλά δεν είναι δυνατή η εκτενής μελέτη καθενός από αυτά ξεχωριστά, καθώς τίθενται χρονικοί και οικονομικοί περιορισμοί, οι οποίοι καθιστούν αυτό το σενάριο εξαιρετικά φιλόδοξο.

Παράδειγμα τέτοιων προσπαθειών είναι το μοντέλο των Mannina και Viviani (Mannina & Viviani, 2010), το οποίο χρησιμοποιεί τη μονοδιάστατη εξίσωση της μεταγωγής και της διασποράς για την προσομοίωση της μεταβολής της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου. Στους παράγοντες, που προσομοιώνονται εντάσσονται, εκτός από τη βιοδιάσπαση του οργανικού άνθρακα, η νιτροποίηση, η απονιτροποίηση καθώς και ο μεταβολισμός των αλγών. Οι εξισώσεις του μοντέλου δίνονται παρακάτω:

Για την περιγραφή της βιοδιάσπασης του BOD

$$\frac{dBOD}{dx} = -\frac{1}{u(x)} k_D BOD \quad (1.22)$$

Για τη μεταβολή της συγκέντρωσης της αμμωνίας

$$\frac{dNH_4}{dx} = -\frac{1}{u(x)} k_N NH_4 - \frac{1}{u(x)} \delta k_{AL} \frac{NH_4}{k_f + NH_4} \quad (1.23)$$

Για τη μεταβολή της συγκέντρωσης των νιτρικών

$$\begin{aligned} \frac{dNO_3}{dx} = & -\frac{1}{u(x)} k_{Den} NO_3 + \frac{1}{u(x)} k_N NH_4 \\ & - \frac{1}{u(x)} (1 - \delta) k_{AL} \frac{NO_3}{k_f + NO_3} \end{aligned} \quad (1.24)$$

Και για τη μεταβολή της συγκέντρωσης του οξυγόνου

$$\frac{dO_2}{dx} = \frac{1}{u(x)} k_R (O_{2SAT} - O_2) - \frac{1}{u(x)} k_D BOD - Y \frac{1}{u(x)} k_N NH_4 + Ph \quad (1.25)$$

Όπου:

k_D : συντελεστής αποξυγόνωσης

k_N : συντελεστής νιτροποίησης αζώτου

k_{Den} : συντελεστής απονιτροποίησης

k_f : συντελεστής ημικορεσμού για την αμμωνία

k_R : συντελεστής επαναερισμού

O_{2SAT} : συγκέντρωση κορεσμού για το οξυγόνο

Ph : συνεισφορά της φωτοσύνθεσης στη συγκέντρωση του οξυγόνου

Η απαίτηση του μοντέλου σε στοιχεία είναι περιορισμένη και η εφαρμογή του στη λεκάνη απορροής Oreto έδειξε, ότι υπάρχουν σημαντικές διαφορές στις διεργασίες, που συντελούνται σε μικρά ποτάμια σε σχέση με τις διεργασίες που συντελούνται σε μεγάλα ποτάμια. Γι' αυτό το λόγο, διαφοροποιούνται έντονα και οι συντελεστές των μοντέλων (Mannina & Viviani, 2010).

Ένα αντίστοιχο μοντέλο μορφοποιήθηκε και εφαρμόστηκε στους παραπόταμους Sieve και Ombrone του ποταμού Arno στην Τοσκάνη (Marsili-Libelli & Giusti, 2008). Το μοντέλο δεχόταν και προσομοίωνε και μη σημειακές πηγές, ενώ μπορούσε να μοντελοποιήσει ποτάμια με ευρεία κλίμακα χαρακτηριστικών. Ενώ η ένταξη των μη σημειακών πηγών ως επιπλέον παραμέτρους στο μοντέλο εμφανίστηκε να πλήττει σημαντικά την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, έγινε η διακρίβωση και η επαλήθευση του μοντέλου για τα δύο ποτάμια και κρίθηκε δυνατή η χρήση του για τη μελέτη διαχειριστικών σεναρίων.

1.6.3.5 Μοντέλα με Αβεβαιότητα στα Στοιχεία Εισόδου ή/και στις Παραμέτρους

Η έλλειψη στοιχείων είναι ένα συνηθέστατο πρόβλημα κατά την προσαρμογή και την εφαρμογή των μοντέλων ποιότητας ύδατος. Το ζήτημα είναι η διαχείριση της αβεβαιότητας των δεδομένων εισόδου, δηλαδή των υδρολογικών δεδομένων και των ρυπαντικών πηγών, καθώς και των παραμέτρων του μοντέλου, δηλαδή των συντελεστών, που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή των φαινομένων και των διεργασιών. Το γεγονός αυτό έχει οδηγήσει στην δημιουργία μοντέλων, τα οποία δέχονται στοιχεία εισόδου ή παραμέτρους σε μορφή κατανομών. Τα αποτελέσματα αυτών των μοντέλων είναι με τη σειρά τους κατανομές. Συνεπώς, ο χρήστης μπορεί να λάβει πιθανότητες εμφάνισης και διαστήματα εμπιστοσύνης αντί μεμονωμένων τιμών. Προϋπόθεση βέβαια για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, είναι τα στατιστικά χαρακτηριστικά της κατανομής και η ίδια η κατανομή των δεδομένων εισόδου ή των παραμέτρων να αντιπροσωπεύουν την πραγματικότητα. Επειδή η περιγραφή της μεταβολής των συγκεντρώσεων οδηγεί σε μερικές διαφορικές εξισώσεις, η απόδοση κατανομών σε παραμέτρους (συντελεστές) ή αρχικές συνθήκες (δεδομένα εισόδου) οδηγεί στην ανάγκη επίλυσης μερικών διαφορικών εξισώσεων με τυχαίους συντελεστές ή/και αρχικές συνθήκες. Ενώ έχουν αναπτυχθεί τρόποι θεωρητικού υπολογισμού των κατανομών των στοιχείων εξόδου (συγκεντρώσεων ρύπων και διαλυμένου οξυγόνου), η δυσκολία αναλυτικού υπολογισμού αυξάνει δυσανάλογα με τον αριθμό των μεταβλητών που

θεωρούνται τυχαίες (Padjett, 1975). Η κατανομή όμως των συγκεντρώσεων μπορεί να εκτιμηθεί και αριθμητικά με τη χρήση προσομοίωσης Monte Carlo αντί των αναλυτικών μαθηματικών (Tung & Hathhorn, 1988). Ανάλογα οπότε με τη δυσκολία της αναλυτικής επίλυσης των εξισώσεων του μοντέλου αλλά και με τον μελετητή, τα πιθανοτικά μοντέλα ποιότητας ύδατος για υδατορέματα μπορούν να βασίζονται σε αναλυτικές λύσεις ή επαναλαμβανόμενες εκτελέσεις τυχαίων σεναρίων (Monte Carlo) και έπειτα μέτρηση των στατιστικών χαρακτηριστικών των αποτελεσμάτων.

Στην περίπτωση αναλυτικής επίλυσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία σχέση όμοια με εκείνη των Streeter-Phelps και να δοθούν κατανομές στα αρχικά φορτία καθώς και στους συντελεστές βιοδιάσπασης και επαναερισμού. Οι κατανομές μπορούν να υπολογιστούν αναλυτικά, με τη χρήση όμως αριθμητικής ολοκλήρωσης. (Padjett, 1978),(Padjett & Papadopoulos, 1979), (Chen & Papadopoulos, 1988).

Αντίστοιχα, οι κατανομές μπορούν να εκτιμηθούν με προσομοιώσεις Monte Carlo, οι οποίες χρειάζονται σίγουρα περισσότερο υπολογιστικό χρόνο, αλλά μπορούν να δώσουν αποτελέσματα ανεξάρτητα από την πολυπλοκότητα των σχέσεων του μοντέλου και του πλήθους και του είδους των τυχαίων μεταβλητών.

Στην περίπτωση, κατά την οποία υπάρχει αβεβαιότητα σε σχέση με τα φορτία και τους συντελεστές του μοντέλου, αλλά είναι επιθυμητή η εύρεση μόνο των διαστημάτων, στα οποία είναι πιθανό να βρίσκονται οι συγκεντρώσεις των ρύπων και του διαλυμένου οξυγόνου, και όχι των κατανομών τους, μπορεί να εφαρμοστεί αναλυτική μέθοδος, η οποία δίνει κατευθείαν τα ζητούμενα διαστήματα. Για την εφαρμογή της μεθόδου είναι αναγκαίο να είναι γνωστό μόνο το διάστημα στο οποίο είναι πιθανό να βρίσκονται οι μεταβλητές, οι οποίες θεωρούνται τυχαίες. Ως εκ τούτου δεν είναι αναγκαία η υπόθεση κάποιας κατανομής. Επιπλέον, ο υπολογιστικός φόρτος είναι μικρότερος από αυτόν των πιθανοτήτων μοντέλων καθιστώντας την εφαρμογή της σε πολύπλοκα συστήματα πιο εύκολη (Harrison, 1980).

1.6.4 Συντελεστές Μοντέλων

Η προσαρμογή των μοντέλων απαιτεί την κατάλληλη επιλογή των συντελεστών τους, έτσι ώστε οι μαθηματικές σχέσεις του μοντέλου να περιγράφουν όσο το δυνατό καλύτερα την πραγματική εικόνα του υδάτινου σώματος. Για την επιλογή της κατάλληλης τιμής των συντελεστών είναι σε μερικές περιπτώσεις δυνατή η εκτίμηση μέσω σχέσεων, οι οποίες προτείνονται στη βιβλιογραφία ή μέσω εργαστηριακών δοκιμών και μετρήσεων πεδίου. Οι συνηθέστεροι συντελεστές στα μοντέλα ποιότητας ύδατος για υδατορέματα είναι ο ρυθμός

βιοδιάσπασης του οργανικού άνθρακα K_1 και ο ρυθμός επαναερισμού K_2 . Ως εκ τούτου, παρακάτω θα γίνει λόγος για την εκτίμησή τους.

1.6.4.1 Συντελεστής K_1 Βιοδιάσπασης Ανθρακούχου BOD

Ο συντελεστής K_1 εκφράζει τον ρυθμό της οξείδωσης του ανθρακούχου οργανικού υλικού. Το φαινόμενο της βιοδιάσπασης του οργανικού φορτίου, θεωρείται ότι μπορεί να περιγραφεί με κινητική πρώτης τάξης όπως φαίνεται στη σχέση (1.26):

$$\frac{dBOD}{dt} = K_1 BOD \quad (1.26)$$

Ο K_1 , όπως φαίνεται από τη σχέση (1.26), έχει μονάδες αντίστροφου χρόνου και εκφράζει την ποσότητα του διαθέσιμου BOD, η οποία καταναλώνεται σε μία μονάδα χρόνου. Το μέγεθος του συντελεστή για οξείδωση στο εργαστήριο εξαρτάται από τη θερμοκρασία, καθώς η βιοδιάσπαση γίνεται από βακτήρια, πρωτόζωα και τροχόζωα και η ταχύτητα με την οποία αυτοί οι μικροοργανισμοί μεταβολίζουν είναι εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία. Η αύξηση της θερμοκρασίας του νερού οδηγεί σε αύξηση της βιοδιάσπασης και η εξάρτηση του K_1 από τη θερμοκρασία μπορεί να περιγραφεί από τη σχέση (1.27):

$$(K_1)_T = (K_1)_{20}(1.04)^{T-20} \quad (1.27)$$

Όπου T είναι η θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου, $(K_1)_{20}$ είναι ο ρυθμός βιοδιάσπασης στους 20°C και $(K_1)_T$ είναι ο ρυθμός βιοδιάσπασης στους $T^\circ\text{C}$ (Thomann & Mueller, 1987).

Όσον αφορά στην επίδραση του βαθμού επεξεργασίας των λυμάτων στην τιμή του K_1 , οι ρυθμοί βιοδιάσπασης ελαττώνονται καθώς αυξάνεται η επεξεργασία του νερού, καθώς το BOD γίνεται πιο ανθεκτικό στην οξείδωση. Η ελάττωση αυτή όμως έχει παρατηρηθεί ότι δεν είναι τόσο έντονη. Ενδεικτικά αναφέρονται οι τιμές εργαστηρίου 0.35 d^{-1} στο διάστημα $0.3 - 0.4 \text{ d}^{-1}$, 0.20 d^{-1} στο διάστημα $0.10 - 0.30 \text{ d}^{-1}$ και 0.075 d^{-1} για ανεπεξεργαστα, πρωτοβάθμια και δευτεροβάθμια επεξεργασμένα και επεξεργασμένα με σύστημα ενεργού ιλύος λύματα. (Thomann & Mueller, 1987).

Οι τιμές του ρυθμού βιοδιάσπασης ενδέχεται να ενδιαφέρουν από τις εργαστηριακές στα φυσικά υδάτινα σώματα. Αυτό συμβαίνει καθώς στην εργαστηριακή δοκιμή δεν συντελούνται όλα τα φαινόμενα που συντελούνται στη φύση και μέρος του BOD, το σωματιδιακό, δεν είναι διαλυμένο με αποτέλεσμα να καθιζάνει και να μην καταναλώνεται οξυγόνο για τη διάσπασή του. Αν λοιπόν θεωρηθεί ότι το BOD μειώνεται συνολικά με ρυθμό

K_r , ο οποίος είναι άθροισμα του ρυθμού μείωσης λόγω καθίζησης του σωματιδιακού BOD, K_p , και λόγω βιοδιάσπασης του διαλυμένου BOD, K_d , ισχύει η σχέση (1.28).

$$K_r = K_p + K_d \quad (1.28)$$

Έχει παρατηρηθεί, ότι οι τιμές του ρυθμού βιοδιάσπασης είναι ανάμεσα σε $0.1 - 0.5 \text{ d}^{-1}$ για βαθειά υδάτινα σώματα και $0.5 - 3 \text{ d}^{-1}$ για ρηχά υδατορέματα. Σχέσεις όπως οι (1.29) και (1.30) έχουν προταθεί για την σύνδεση του K_d με τα χαρακτηριστικά της ροής και της γεωμετρίας του υδάτινου σώματος.

$$K_d = 0.3 \left(\frac{H}{8} \right)^{-0.434} \quad \text{για } 0 \leq H \leq 8 \quad (1.29)$$

$$K_d = 0.3 \quad \text{για } H > 8$$

Όπου K_d είναι η τιμή του συντελεστή στους 20°C και H το βάθος σε ft .

$$K_d = 10.3Q^{-0.49} \quad (1.30)$$

Όπου K_d είναι η τιμή του συντελεστή στους 20°C και Q η παροχή σε cfs .

Τέλος προτείνεται η σχέση (1.31) για τη θερμοκρασιακή εξάρτηση του συντελεστή.

$$(K_1)_T = (K_1)_{20} (1.047)^{T-20} \quad (1.31)$$

Όπου T είναι η θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου, $(K_1)_{20}$ είναι ο ρυθμός βιοδιάσπασης στους 20°C και $(K_1)_T$ είναι ο ρυθμός βιοδιάσπασης στους $T^\circ\text{C}$ (Thomann & Mueller, 1987).

1.6.4.2 Συντελεστής Επαναερισμού K_2

Η επαφή ενός υδάτινου σώματος με την ατμόσφαιρα οδηγεί στην εισδοχή οξυγόνου, το οποίο διαλύεται μέσα στο νερό. Αν το σύστημα αφεθεί να ισορροπήσει, τότε το διαλυμένο οξυγόνο θα συνεχίσει να αυξάνεται μέχρι μία τιμή συγκέντρωσης, η οποία είναι η τιμή του κορεσμού. Συνεπώς, όταν η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου είναι μικρότερη από την τιμή κορεσμού συντελείται το φαινόμενο του επαναερισμού. Αν θεωρηθεί ότι το φαινόμενο μπορεί να περιγραφεί από κινητική πρώτης τάξης, η συμβολή του επαναερισμού στο διαλυμένο οξυγόνο διέπεται από τη σχέση (1.32).

$$\frac{dDO}{dx} = K_2(DO_s - DO) \quad (1.32)$$

Όπου DO η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου, DO_s είναι η τιμή κορεσμού για το διαλυμένο οξυγόνο και K_2 είναι ο συντελεστής επαναερισμού

Ο συντελεστής K_2 εκφράζει την ποσότητα οξυγόνου που εισρέει στο υδάτινο σώμα από την ατμόσφαιρα σε σχέση με τη διαφορά του υπάρχοντος διαλυμένου οξυγόνου και της τιμής κορεσμού του. Ο επαναερισμός, άρα και η τιμή του συντελεστή K_2 , εξαρτάται από τις συνθήκες μίξης του νερού λόγω τύρβης, τη θερμοκρασία, τον άνεμο και τις συνθήκες στο άνω στρώμα του νερού (Thomann & Mueller, 1987).

Για τον υπολογισμό του K_2 σε υδατορέματα στους 20°C έχουν προταθεί σχέσεις όπως οι παρακάτω, οι οποίες συνδέουν το ρυθμό επαναερισμού με το βάθος ή την παροχή του υδατορέματος (Thomann & Mueller, 1987).

$$K_2 = \frac{(D_L V)^{1/2}}{H^{3/2}} \quad (1.33)$$

$$K_2 = \frac{11.6V}{H^{1.67}} \quad (1.34)$$

$$K_2 = 0.88VS \quad \text{για } 10 \leq Q < 300 \quad (1.35)$$

$$K_2 = 1.8VS \quad \text{για } 1 < Q < 10$$

$$K_2 = \frac{21.6V^{0.67}}{H^{1.85}} \quad (1.36)$$

όπου K_1 είναι ο συντελεστής επαναερισμού στους 20°C σε d^{-1} , V είναι η μέση ταχύτητα ροής σε fps , D_L είναι η διαλυτότητα του νερού στους 20°C ($0.000081 ft^2/hr$), H το βάθος μέσο βάθος ροής σε ft , S η κλίση σε ft/mi και Q η παροχή σε cfs .

Η θερμοκρασιακή συσχέτιση δίνεται στη σχέση (1.37)

$$(K_2)_T = (K_2)_{20} 1.024^{T-20} \quad (1.37)$$

όπου T είναι η θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου, $(K_2)_{20}$ είναι ο ρυθμός επαναερισμού στους 20°C και $(K_2)_T$ είναι ο ρυθμός επαναερισμού στους $T^\circ\text{C}$ (Thomann & Mueller, 1987).

Για την αξιοπιστία των μοντέλων πάντως, συστήνεται να γίνεται ανάλυση ευαισθησίας των αποτελεσμάτων σε σχέση με τον συντελεστή K_2 , ο οποίος προκύπτει από διάφορες από τις μεθόδους που αναφέρθηκαν και να γίνεται επί τόπου μέτρησή του με τεχνικές ιχνηθέτησης όταν παρατηρείται μεγάλη διακύμανση (Thomann & Mueller, 1987).

2 Το Μοντέλο R.I.S. D.O.E. (River System Dissolved Oxygen Estimation)

2.1 Διεργασίες

Στο μοντέλο, υπολογίζεται η μεταβολή των συγκεντρώσεων τριών ποιοτικών παραμέτρων. Οι παράμετροι αυτοί είναι ο οργανικός άνθρακας, το οργανικό και αμμωνιακό άζωτο και το διαλυμένο οξυγόνο. Η προσομοίωση περιλαμβάνει τη μεταγωγή και τρεις διεργασίες, ως λόγους μεταβολής των συγκεντρώσεων. Συγκεκριμένα, προσομοιώνεται η οξείδωση του οργανικού άνθρακα με τη μορφή Βιολογικά Απαιτούμενου Οξυγόνου CBOD, η νιτροποίηση του αμμωνιακού αζώτου με τη μορφή Βιολογικά Απαιτούμενου Οξυγόνου NBOD, και ο επαναερισμός του ποταμού από την ατμόσφαιρα. Παρακάτω γίνεται περιγραφή των τριών διεργασιών καθώς και η αναγωγή τους σε μαθηματικές σχέσεις.

2.1.1 Οξείδωση Οργανικού Άνθρακα CBOD

2.1.1.1 Η Διεργασία

Η βιολογική απαίτηση οξυγόνου για την οξείδωση του οργανικού άνθρακα οφείλεται στην ύπαρξη των ετεροτροφικών βακτηρίων. Αυτά τα βακτήρια ζουν μέσα στα περισσότερα υδάτινα σώματα και χρησιμοποιούν το διαλυμένο οξυγόνο ώστε να οξειδώσουν τον οργανικό άνθρακα σε διοξείδιο του άνθρακα CO_2 και νερό H_2O , εξασφαλίζοντας με αυτό τον τρόπο τις ενεργειακές τους ανάγκες. Επιπλέον, οι μικροοργανισμοί καταναλώνουν τον οργανικό άνθρακα προκρινόμενου να συνθέσουν βιομάζα, δηλαδή να πολλαπλασιαστούν (Thomann & Mueller, 1987). Για να εκτιμηθεί το BOD ενός διαλύματος, πραγματοποιείται μία εργαστηριακή δοκιμή, κατά την οποία μία φιάλη με το διάλυμα σφραγίζεται και παραμένει κλειστή, ώστε να μην επαναερίζεται από το περιβάλλον, αφού έχει κορεστεί με οξυγόνο και εμπλουτιστεί με θρεπτικά συστατικά. Ενώ η συγκέντρωση του οξυγόνου στο διάλυμα σταθεροποιείται περίπου στις 20 μέρες, η κατανάλωση του CBOD περιορίζεται δραστικά την πέμπτη μέρα, κατά την οποία αρχίζει και η νιτροποίηση, για την οποία θα γίνει λόγος παρακάτω. Γι' αυτό λαμβάνεται συνήθως η τιμή του BOD_5 , δηλαδή η διαφορά της αρχικής συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου του διαλύματος (συγκέντρωση κορεσμού

DO₅) από τη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου του διαλύματος την πέμπτη μέρα, DO₅. Αν θεωρηθεί ότι η οξείδωση του ανθρακικού υλικού μπορεί να περιγραφεί με κινητική πρώτης τάξης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση (2.1) (Thomann & Mueller, 1987).

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 L \quad (2.1)$$

όπου το K_1 είναι ο ρυθμός διάσπασης της ανθρακούχου οργανικής ύλης, t είναι ο χρόνος, κατά τον οποίο το διάλυμα παραμένει σφραγισμένο, και L είναι η ανθρακούχος οργανική υλη σε όρους ζήτησης οξυγόνου στην πειραματική φιάλη.

Ολοκλήρωση της σχέσης (2.1) δίνει τη σχέση (2.2)

$$L = L_0 e^{-K_1 t} \quad (2.2)$$

όπου L_0 είναι η αρχική ανθρακούχος οργανική υλη σε όρους ζήτησης οξυγόνου στην πειραματική φιάλη.

Αν το οξυγόνο που καταναλώνεται κατά την οξείδωση δίνεται από τη σχέση (2.3)

$$O_2 = L_0 - L \quad (2.3)$$

προκύπτει η σχέση (2.4).

$$O_2 = L_0(1 - e^{-K_1 t}) \quad (2.4)$$

Συνεπώς το L_0 είναι το ολικό διαθέσιμο CBOD, L είναι το διαθέσιμο CBOD τη χρονική στιγμή t και O_2 είναι η ποσότητα οξυγόνου που καταναλώνεται για την οξείδωση του.

Σύμφωνα με τα παραπάνω η ποσότητα του CBOD, που καταναλώνεται ως την πέμπτη μέρα δίνεται από τη σχέση (2.5).

$$O_{2_5} = \text{CBOD}_5 = L_0(1 - e^{-5K_1}) \quad (2.5)$$

Αν δηλαδή ληφθεί η τιμή του συντελεστή K_1 από την εργαστηριακή δόκιμη των 5 ημερών και γίνει η παραδοχή ότι η οξείδωση περιγράφεται από κινητική πρώτης τάξης, μπορεί να βρεθεί η τιμή του συνολικού ολικού CBOD, το οποίο ισούται με την αρχική τιμή της ανθρακούχου οργανικής ύλης προς οξείδωση στο διάλυμα, L_0 . Για την εύρεση του ολικού

CBOD, διαιρείται η σχέση (2.4) κατά μέλη με το $CBOD_5$ και λαμβάνοντας $CBOD = L_0$ προκύπτει η σχέση (2.6).

$$CBOD = \frac{CBOD_5}{(1 - e^{-5K_1})} \quad (2.6)$$

Επιπλέον, για την πλήρη οξειδωση του οργανικού άνθρακα σε ένα υδάτινο σώμα απαιτούνται περίπου 2.7 mgO_2 ανά γραμμάριο ανθρακούχου οργανικής ύλης. Οπότε μπορεί προσεγγιστικά το CBOD εκτιμηθεί ως $CBOD = 2.7C_{org}$, όπου C_{org} είναι συγκέντρωση του οργανικού άνθρακα στο υδάτινο σώμα (Thomann & Mueller, 1987).

2.1.1.2 Μαθηματική Περιγραφή

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η εισαγωγή οργανικής ύλης με βάση τον άνθρακα σε ένα υδάτινο σώμα, στο οποίο υπάρχει διαλυμένο οξυγόνο, έχει ως αποτέλεσμα την κατανάλωση οξυγόνου για την οξειδωση ενός μέρους της. Το υπόλοιπο μέρος, το οποίο προκύπτει από τη σύνθεση βιομάζας, το σωματιδιακό, καθιζάνει και, στην πραγματικότητα, δεν οξειδώνεται όπως το διαλυμένο CBOD. Επιδρά όμως στη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου με μία σειρά από άλλες διεργασίες, οι οποίες σχετίζονται με τον πυθμένα του υδατορέματος. Στο μοντέλο αυτό, γίνεται η παραδοχή, όπως και στη μελέτη των Streeter-Phelps (Streeter & Phelps, 1925), ότι το σύνολο του CBOD που εισρέει στον ποταμό, οξειδώνεται με κατανάλωση ίσης ποσότητας διαλυμένου οξυγόνου. Η βιοδιάσπαση του οργανικού άνθρακα με τη μορφή CBOD έχει επίδραση στη συγκέντρωση του CBOD και του διαλυμένου οξυγόνου DO στο υδάτινο σώμα. Η κατανάλωση του οξυγόνου εκτιμάται ότι προσεγγίζεται από κινητική πρώτης τάξης. Συνεπώς, ο ρυθμός της μείωσης του οξυγόνου σε σχέση με το χρόνο θεωρείται, ότι είναι ανάλογος με τη διαφορά του υπάρχοντος διαλυμένου οξυγόνου από την τιμή κορεσμού, ενώ ο ρυθμός της μείωσης του CBOD θεωρείται ότι είναι ανάλογος του απομείναντος προς οξειδωση CBOD. Είναι σαφές ότι ο ρυθμός κατανάλωσης του βιολογικά απαιτούμενου οξυγόνου είναι ίσος με το ρυθμό αύξησης της διαφοράς του διαλυμένου οξυγόνου από την τιμή κορεσμού, δηλαδή με το ρυθμό αύξησης του ελλείμματος. Συνεπώς η οξειδωση του CBOD περιγράφεται από τις σχέσεις (2.7) και (2.8) για την κατανάλωση του CBOD και την αύξηση του ελλείμματος του διαλυμένου οξυγόνου $D = DO_s - DO$ αντίστοιχα.

$$\frac{d\text{CBOD}}{dt} = -K_1\text{CBOD} \quad (2.7)$$

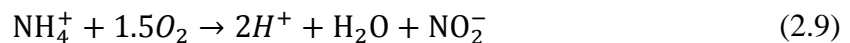
$$\frac{dD}{dt} = K_1D \quad (2.8)$$

Σημειώνεται, ότι η στην πραγματικότητα τιμή του K_1 στο υδάτινο σώμα άρα και στο μοντέλο δεν είναι ίδια με την εργαστηριακή τιμή του ρυθμού βιοδιάσπασης, καθώς στο φυσικό περιβάλλον συντελούνται και άλλες διεργασίες οι οποίες μεταβάλλουν τη συγκέντρωση του CBOD. Παρά ταύτα, η θεώρηση που έχει γίνει, εκτιμάται ότι περιγράφει την πραγματικότητα επαρκώς για τους σκοπούς του μοντέλου.

2.1.2 Νιτροποίηση Αζώτου

2.1.2.1 Η Διεργασία

Η ύπαρξη πρωτεϊνών, ουρίας και αμμωνίας και νιτρικών στα λύματα, εμπλουτίζει με άζωτο τα υδάτινα σώματα στα οποία καταλήγουν. Ο εμπλουτισμός με άζωτο επηρεάζει τη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου, λόγω της νιτροποίησης της αμμωνίας. Η νιτροποίηση γίνεται σε δύο στάδια από αυτοτροφικά βακτήρια. Κατά το πρώτο στάδιο το αμμωνιακό άζωτο οξειδώνεται σε νιτρώδη ανιόντα από το βακτήριο *Nitrosomonas* σύμφωνα με τη χημική εξίσωση:



Η στοιχειομετρία της παραπάνω αντίδρασης δείχνει, ότι χρειάζονται 3.43 g οξυγόνου για την οξείδωση σε νιτρώδη 1g αζώτου. Έπειτα, τα νιτρώδη οξειδώνονται σε νιτρικά ιόντα από το βακτήριο *Nitrobacter*. Η χημική αντίδραση δίνεται παρακάτω.



Από τη στοιχειομετρία της εξίσωσης της αντίδρασης προκύπτει, ότι απαιτούνται 1.14 g οξυγόνου για την οξείδωση 1 g νιτρωδών ιόντων. Συνεπώς, η οξείδωση 1 g NH_4 απαιτεί 4.57 g O_2 . Σημειώνεται, ότι μέρος της αμμωνίας χρησιμοποιείται από τα βακτήρια για τη σύνθεση βιομάζας, με αποτέλεσμα να καταναλώνεται στην πραγματικότητα λιγότερο οξυγόνο από 4.57 g $\text{O}_2/\text{g NH}_3$, το οποίο έχει εκτιμηθεί περίπου στα 4.2 g $\text{O}_2/\text{g NH}_3$ (Thomann & Mueller, 1987). Παρά ταύτα για τους σκοπούς του μοντέλου θα χρησιμοποιηθεί

η συντηρητική θεώρηση, ότι το σύνολο της διαθέσιμης αμμωνίας οξειδώνεται. Τα νιτροποιητικά βακτήρια είναι ετεροτροφικά βακτήρια, δηλαδή εξασφαλίζουν τον άνθρακα για τη σύνθεση τους από ανόργανες πηγές άνθρακα και κυρίως από το CO₂. Για να γίνει η νιτροποίηση, δηλαδή για να υπάρχουν τα νιτροποιητικά βακτήρια, θα πρέπει να υπάρχουν κατάλληλες συνθήκες PH, η οποίες προϋποθέτουν τιμές μεγαλύτερες του 6 και ιδανικά 8. Η απαίτηση αυτή σχετίζεται με την εξουδετέρωση των οξέων προϊόντων της διαδικασίας. Επιπλέον ως αερόβιος μεταβολισμός, η νιτροποίηση απαιτεί αερόβιες συνθήκες, δηλαδή συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου πάνω από 2 mg/l.

Ως αποτέλεσμα της νιτροποίησης, εκτός από την βιολογική απαίτηση οξυγόνου για τη διάσπαση του οργανικού άνθρακα, CBOD, υπάρχει και βιολογική απαίτηση οξυγόνου για την νιτροποίηση, NBOD. Για τη μέτρηση του NBOD μπορεί να μετρηθεί η κατανάλωση οξυγόνου με τη δοκιμή, που περιγράφηκε για το CBOD στο εδάφιο 2.1.1, σε δύο φιάλες, από τις οποίες στη μία εισάγονται πρόσθετα, τα οποία εμποδίζουν τη νιτροποίηση. Το NBOD μπορεί να προκύψει ως διαφορά των δύο καταναλώσεων οξυγόνου. Επιπλέον, μπορεί όταν είναι γνωστή η μάζα του οργανικού και του αμμωνιακού αζώτου, να εκτιμηθεί η μέγιστη τιμή του NBOD από τη στοιχειομετρία των αντιδράσεων της νιτροποίησης ως $4.57(N_{org} + NH_3)$ g δηλαδή ως το ολικό άζωτο προς νιτροποίηση ανοιγμένο σε ζήτηση οξυγόνου.

2.1.2.2 Μαθηματική Περιγραφή

Το άζωτο μπορεί να βρεθεί σε τέσσερις διαφορετικές μορφές στα υδάτινα σώματα. Συγκεκριμένα υπάρχει οργανικό άζωτο, αμμωνιακό άζωτο και νιτρικά και νιτρώδη ιόντα. Το οργανικό άζωτο, μειώνεται λόγω της καθίζησης, της υδρόλυσης και της αποσύνθεσής του σε αμμωνία. Η αμμωνία με τη σειρά της αυξάνεται λόγω της υδρόλυσης του οργανικού αζώτου και μειώνεται λόγω της νιτροποίησης και της κατανάλωσής της από τα υδρόβια φυτά. Τα νιτρώδη και τα νιτρικά ιόντα αυξάνονται λόγω της οξείδωσης της αμμωνίας και μειώνονται λόγω της απονιτροποίησης και της κατανάλωσής τους από τα φυτά. Στην περίπτωση, που μελετάται η μεταβολή της συγκέντρωσης του οξυγόνου, η πιο κρίσιμη από της πιο πάνω διαδικασίες είναι η νιτροποίηση, κατά την οποία καταναλώνεται οξυγόνο. Ως εκ τούτου, στο μοντέλο θεωρείται ότι το ολικό άζωτο προς νιτροποίηση, TKN (Total Kjeldahl Nitrogen), δηλαδή το σύνολο του οργανικού αζώτου, το οποίο υδρολύεται σε αμμωνία, και του αμμωνιακού αζώτου, οξειδώνεται με κινητική, η οποία προσεγγίζεται από την κινητική πρώτης τάξης και με ρυθμό οξείδωσης K_N σε d⁻¹ (Thomann & Mueller, 1987). Οπότε η μεταβολή της συγκέντρωσης του TKN, εκφρασμένου σε όρους βιολογικής απαίτησης

οξυγόνου, NBOD, περιγράφεται από τη σχέση (2.11), ενώ η αύξηση του ελλείμματος του διαλυμένου οξυγόνου, λόγω της κατανάλωσης του NBOD, δίνεται από τη σχέση (2.12).

$$\frac{dNBOD}{dt} = -K_N NBOD \quad (2.11)$$

$$\frac{dD}{dt} = K_1 D \quad (2.12)$$

2.1.3 Ατμοσφαιρικός Επαναερισμός του Υδάτινου Σώματος

2.1.3.1 Το Φαινόμενο

Σύμφωνα με το νόμο του Henry, το βάρος ενός αερίου, το οποίο διαλύεται σε έναν όγκο υγρού, σε μία σταθερή θερμοκρασία, είναι ευθέως ανάλογο προς την πίεση που ασκεί το αέριο στην επιφάνεια του υγρού. Ως εκ τούτου, ένα σύστημα ενός υγρού και ενός αερίου τείνει να φτάσει σε μία κατάσταση ισορροπίας, κατά την οποία ικανοποιείται ο νόμος του Henry, δηλαδή το υγρό είναι κορεσμένο με το αέριο και η συγκέντρωση του αερίου στο υγρό έχει την τιμή του κορεσμού. Στην περίπτωση του συστήματος ενός υδάτινου σώματος και της ατμόσφαιρας, το υδάτινο σώμα τροφοδοτείται με οξυγόνο από την ατμόσφαιρα μέχρι τον κορεσμό του νερού με οξυγόνο. Συνεπώς, σε ένα υδάτινο σώμα εμφανίζεται το φαινόμενο του επαναερισμού, όσο η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου είναι μικρότερη από την συγκέντρωση κορεσμού.

2.1.3.2 Μαθηματική Περιγραφή

Έχει παρατηρηθεί ότι ο ρυθμός της αύξησης της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου λόγω του επαναερισμού είναι ανάλογος της διαφοράς της υπάρχουσας συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου από τη μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει και κατά την οποία σταματάει ο επαναερισμός, δηλαδή τη συγκέντρωση κορεσμού DO_s (Thomann & Mueller, 1987). Το φαινόμενο οπότε μπορεί να περιγραφεί από τη σχέση (2.13)

$$\frac{dDO}{dt} = K_2 (DO_s - DO) \quad (2.13)$$

όπου το K_2 είναι ο ρυθμός εισροής οξυγόνου από την ατμόσφαιρα στο υδάτινο σώμα και εκφράζει την ποσότητα οξυγόνου που εισρέει στον ποταμό ανά μέρα σε σχέση με τη διαφορά

που έχει η υπάρχουσα συγκέντρωση από τη συγκέντρωση κορεσμού. Αν τεθεί τώρα $D = DO_s - DO$, όπου D είναι το έλλειμμα του οξυγόνου η σχέση (2.13) γράφεται:

$$-\frac{d((DO_s - DO) - DO_s)}{dt} = K_2(DO_s - DO) \Rightarrow$$

$$\frac{dD}{dt} = -K_2D - \frac{dDO_s}{dt} \Rightarrow$$

$$\frac{dD}{dt} = -K_2D \quad (2.14)$$

αφού η μεταβολή του DO_s σε σχέση με το χρόνο είναι μηδενική, καθώς η συγκέντρωση κορεσμού δεν εξαρτάται από το χρόνο.

2.2 Μόρφωση της Σχέσης του Μοντέλου

Για τη μόνωση της σχέσης του μοντέλου χρησιμοποιείται η μονοδιάστατη εξίσωση μεταγωγής-διασποράς κατά την διεύθυνση της ροής (σχέση (2.15)) η οποία πηγάζει από το νόμο του Fick.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -V \frac{\partial C}{\partial x} + E_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2.15)$$

όπου C είναι η συγκέντρωση της ποιοτικής παραμέτρου, V είναι η ταχύτητα ροής, t είναι ο χρόνος, x είναι η θέση (απόσταση από την αρχή) και E_x είναι ο συντελεστής διασποράς κατά x .

Αν θεωρηθεί, ότι οι συγκεντρώσεις δε μεταβάλλονται με το χρόνο, οπότε $(\partial C / \partial t) = 0$, δηλαδή έχουν σταθεροποιηθεί σε κάθε θέση του ποταμού, και προστεθεί ο όρος K , ο οποίος περιέχει όλες τις μεταβολές της συγκέντρωσης σε σχέση με τη θέση λόγω διεργασιών, η σχέση (2.15) παίρνει τη μορφή:

$$0 = -V \frac{\partial C}{\partial x} + K + E_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2.16)$$

Στη συνέχεια θα εφαρμοστεί η (2.16 με παραδοχή μηδενικής διασποράς για τις τρεις παραμέτρους, η μεταβολή της συγκέντρωσης των οποίων μελετάται, δηλαδή για το διαλυμένο οξυγόνο DO , το ανθρακούχο βιολογικά απαιτούμενο οξυγόνο $CBOD$, το οποίο χάριν απλότητας συμβολίζεται με BOD , και το ολικό άζωτο προς νιτροποίηση TKN , το οποίο χάριν απλότητας θα συμβολίζεται ως N .

Για το *BOD* προκύπτει η σχέση (2.17), ολοκλήρωση της οποίας δίνει τη σχέση (2.18).

$$0 = -V \frac{\partial \text{CBOD}}{\partial x} - K_1 \text{CBOD} \quad (2.17)$$

$$\text{CBOD}_x = e^{-K_1 \frac{x}{V}} \quad (2.18)$$

Για το *TKN* η σχέση (2.16) γίνεται:

$$0 = -V \frac{\partial \text{CN}}{\partial x} - K_N \text{CN} \quad (2.19)$$

Ολοκληρώνοντας τη σχέση (2.19) προκύπτει η σχέση (2.20)

$$\text{CN}_x = e^{-K_N \frac{x}{V}} \quad (2.20)$$

Για το διαλυμένο οξυγόνο *DO* τέλος εφαρμόζεται η σχέση (2.16) για το έλλειμμα *D* και δίνει τη σχέση (2.21)

$$0 = -V \frac{\partial D}{\partial x} - K_2 D + K_1 \text{CBOD} + K_N \text{CNBOD} \quad (2.21)$$

όπου $\text{CNBOD} = 4.57 \text{CN}$ και με αντικατάσταση των όρων $K_1 \text{CBOD}$ και $K_N \text{CNBOD}$ σύμφωνα με τις σχέσεις (2.18), (2.20) και (2.21) γίνεται:

$$0 = -V \frac{\partial D}{\partial x} - K_2 D + e^{-K_1 \frac{x}{V}} + 4.57 e^{-K_N \frac{x}{V}} \quad (2.22)$$

Ολοκληρώνοντας τη σχέση (2.22) προκύπτει η σχέση (2.23).

$$\begin{aligned} D_x = D_0 & \\ + \text{CBOD}_0 \left\{ \frac{K_1}{K_2 - K_1} \left(e^{-K_1 \frac{x}{V}} - e^{-K_2 \frac{x}{V}} \right) \right\} & \\ + 4.57 \text{CN}_0 \left\{ \frac{K_N}{K_2 - K_N} \left(e^{-K_N \frac{x}{V}} - e^{-K_2 \frac{x}{V}} \right) \right\} & \end{aligned} \quad (2.23)$$

Έπειτα μπορεί να υπολογιστεί η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου CO_x ως:

$$\text{CO}_x = \text{CO}_s - D_x \quad (2.24)$$

όπου CO_s είναι η συγκέντρωση κορεσμού για το διαλυμένο οξυγόνο.

Εφαρμόζοντας τις σχέσεις (2.18), (2.20), (2.23) και (2.24) υπολογίζονται οι συγκεντρώσεις των τριών παραμέτρων σε κάθε θέση του τμήματος ενός ποταμού, στο οποίο υπάρχει μόνο αρχική συγκέντρωση ρύπων και καμία επιπλέον ρυπαντική πηγή από την αρχή μέχρι το τέλος του.

2.3 Περιγραφή της Λειτουργίας του Μοντέλου

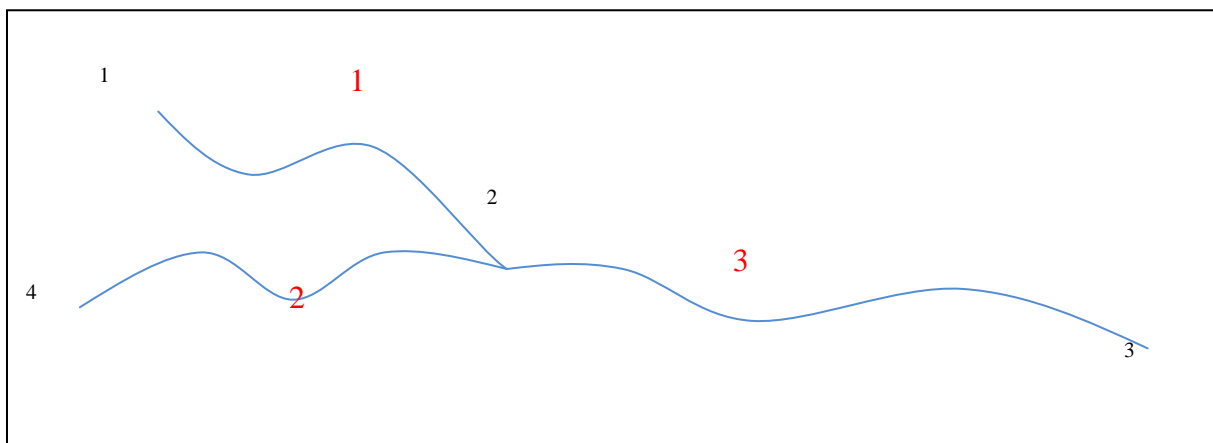
2.3.1 Επιλογή Γλώσσας Προγραμματισμού

Για την κωδικοποίηση του μοντέλου σε γλώσσα υπολογιστή χρησιμοποιήθηκε το προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab®. Η επιλογή στηρίχθηκε στην ευρεία χρήση της συγκεκριμένης εφαρμογής στον τομέα της μηχανικής. Ο χαρακτήρας του Matlab® προσφέρει ευκολία στην παραμετροποίηση των προβλημάτων λόγω της χρήσης προγραμματιστικού κώδικα, σε αντίθεση με τις εφαρμογές λογιστικών φύλλων όπως το πρόγραμμα Excel της Microsoft. Επίσης, το προγραμματιστικό αυτό περιβάλλον δίνει τη δυνατότητα χρήσης ευκολιών, που δίνονται στα προγράμματα λογιστικών φύλλων, όπως η παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε μορφή διαγραμμάτων. Συνεπώς, το Matlab® συνδυάζει τα προτερήματα ευελιξίας των γλωσσών προγραμματισμού με τα έτοιμα εργαλεία επεξεργασίας και παρουσίασης δεδομένων. Ως εκ τούτου, αξιολογήθηκε ως η βέλτιστη επιλογή και χρησιμοποιήθηκε για την ψηφιακοποίηση του μοντέλου.

2.3.2 Διαχωρισμός του Ποταμού σε Υδάτινα Τμήματα

Η εφαρμογή των σχέσεων του μοντέλου που παρουσιάζονται στο εδάφιο 2.2, προϋποθέτει την ικανοποίηση σειράς συνθηκών, οι οποίες περιγράφονται στη συνέχεια. Αρχικά, η ροή καθώς και τα χαρακτηριστικά των ρυπαντικών πηγών θα πρέπει να είναι σταθερά σε σχέση με το χρόνο. Επιπλέον, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής του ποταμού όπως και οι κλίσεις, θα πρέπει να διατηρούνται σταθερά σε όλο το μήκος του. Τέλος, τα ρυπαντικά φορτία και οι παροχές πρέπει να εισέρχονται σημειακά στην αρχή του ποταμού δημιουργώντας αρχική συγκέντρωση ρύπανσης. Συνεπώς, από την αρχή μέχρι το τέλος του ποταμού δεν εισέρχονται επιπλέον ρύποι και η παροχή παραμένει σταθερή. Όσον αφορά στις συνθήκες περί μονιμότητας της ροής και της ρύπανσης, μπορεί να θεωρηθεί ότι ισχύουν είτε σε ετήσια βάση με ετήσιες μέσες τιμές δεδομένων, ή με εφαρμογή για μηνιαία δεδομένα, στα οποία η παραδοχή της μονιμότητας είναι πιο κοντά στην πραγματικότητα. Η ικανοποίηση των υπόλοιπων συνθηκών σε έναν πραγματικό ποταμό απαιτεί τον χωρισμό του σε τμήματα, στα οποία να ικανοποιούνται οι συνθήκες. Αυτά τα τμήματα, θα ονομάζονται στο εξής «υδάτινα τμήματα» και θα χαρακτηρίζονται από έναν θετικό ακέραιο αριθμό, ο οποίος θα

είναι το όνομά τους. Κάθε υδάτινο τμήμα έχει κόμβο αρχής και κόμβο τέλους, οι οποίοι αποτελούν ταυτόχρονα τον κόμβο τέλους του προηγούμενου και τον κόμβο αρχής του επόμενου υδάτινου τμήματος αντίστοιχα. Για να εξασφαλίζονται οι συνθήκες εφαρμογής της μεθόδου στα υδάτινα τμήματα, θα πρέπει να δημιουργείται κόμβος στα σημεία εισροής ρυπαντικών πηγών και στα σημεία συμβολής παραπόταμων, στα οποία επίσης αλλάζουν οι κατόντη συγκεντρώσεις και η παροχή του ποταμού. Επιπλέον θα πρέπει να τοποθετείται κόμβος στα σημεία αλλαγής της ταχύτητας της ροής, δηλαδή εκεί όπου αλλάζει η κλίση του πυθμένα ή τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της βρεχόμενης διατομής. Τέλος, θα πρέπει να τοποθετείται κόμβος στα σημεία, όπου αλλάζουν τα χαρακτηριστικά της μη σημειακής ρύπανσης, ο τρόπος διαχείρισης της οποίας θα αναλυθεί σε επόμενο εδάφιο. Σημειώνεται, ότι στο δίκτυο ενός ποταμού μπορούν να υπάρχουν παραπάνω από ένα αρχικά τμήματα, δηλαδή τμήματα στα οποία δεν καταλήγει άλλο τμήμα, ενώ υπάρχει μοναδικό τελικό υδάτινο τμήμα, δηλαδή τμήμα το οποίο δεν καταλήγει σε άλλο υδάτινο τμήμα αλλά στον τελικό αποδέκτη (θάλασσα, λίμνη, ταμιευτήρας). Κάθε τμήμα τροφοδοτεί το επόμενο με τα φορτία και την παροχή του. Για τον υπολογισμό άρα των παροχών και των συγκεντρώσεων στην αρχή ενός υδάτινου τμήματος αρκεί να εφαρμοστεί η εξίσωση συνέχειας μεταξύ των παροχών των υδάτινων τμημάτων, τα οποία καταλήγουν σε αυτό, και της παροχής του ίδιου καθώς και το ισοζύγιο μάζας στον κόμβο αρχής του, ο οποίος αποτελεί ταυτόχρονα κόμβο τέλους των υδάτινων τμημάτων τα οποία καταλήγουν σε αυτό. Αν για παράδειγμα τα υδάτινα τμήματα 1 και 2, τα οποία φαίνονται στο Σχήμα 2.1 καταλήγουν στο τμήμα 3 και είναι γνωστές οι παροχές τους και οι συγκεντρώσεις τους στον κόμβο 2, δηλαδή στον κόμβο τέλους τους, μπορούν να υπολογιστούν η παροχή Q_3 και οι συγκεντρώσεις του ανθρακούχου BOD, $CBOD_{3start}$, του ολικού αζώτου προς απονιτροποίηση, CN_{3start} , και του διαλυμένου οξυγόνου, CO_{3start} , στον κόμβο αρχής του υδάτινου τμήματος 3.



Σχήμα 2.1: Ένα περιορισμένο υδρολογικό σύστημα ποταμού

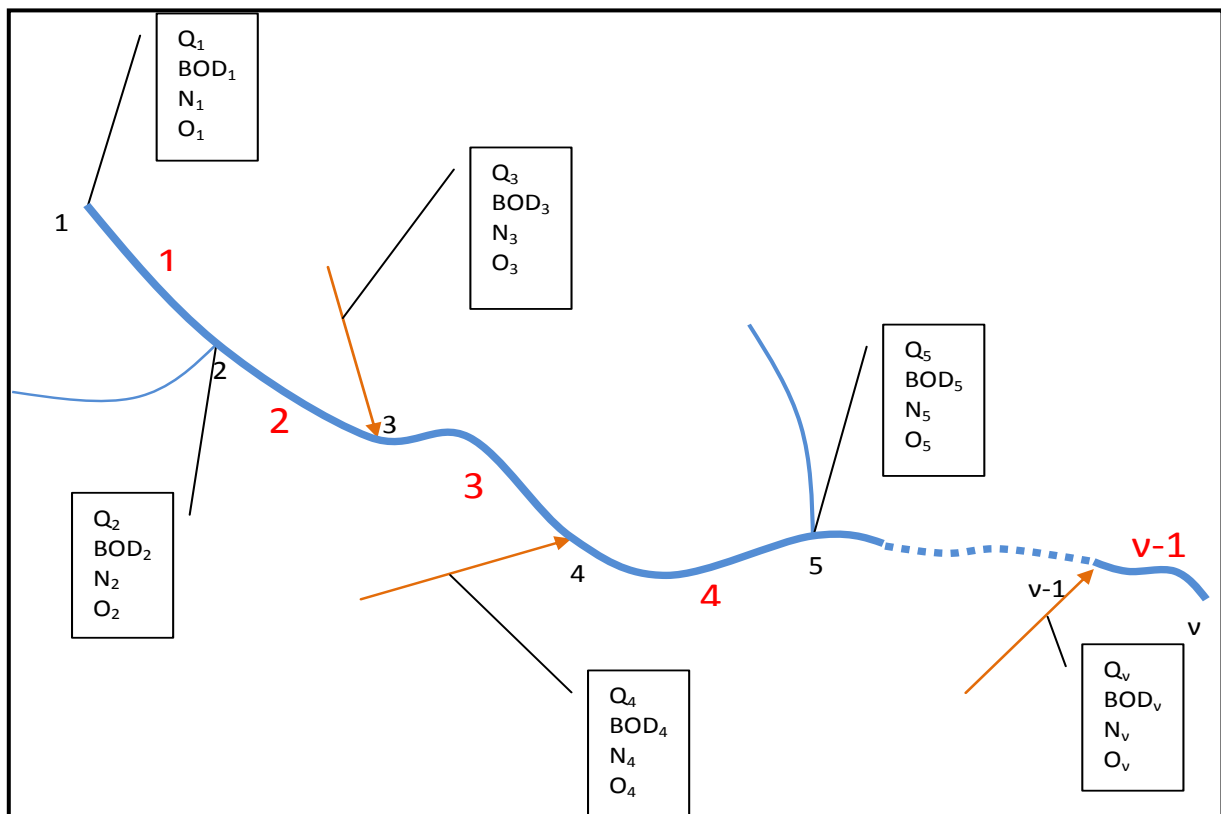
Συγκεκριμένα για την παροχή θα ισχύει η σχέση (2.25), ενώ για τις συγκεντρώσεις $CBOD_{3start}$, CN_{3start} και CO_{3start} οι σχέσεις (2.26), (2.27) και (2.28) αντίστοιχα.

$$Q_3 = Q_1 + Q_2 \quad (2.25)$$

$$CBOD_{3start} = \frac{CBOD_{1end}Q_1 + CBOD_{2end}Q_2}{Q_3} \quad (2.26)$$

$$CN_{3start} = \frac{CN_{1end}Q_1 + CN_{2end}Q_2}{Q_3} \quad (2.27)$$

$$CO_{3start} = \frac{CO_{1end}Q_1 + CO_{2end}Q_2}{Q_3} \quad (2.28)$$



Σχήμα 2.2: Χωρισμός του Ποταμού σε Υδάτινα Τμήματα

Στο Σχήμα 2.2 φαίνεται η διαδικασία του χωρισμού του ποταμού σε υδάτινα τμήματα. Με τη λεπτή μπλε γραμμή συμβολίζονται οι παραπόταμοι, ενώ με τα καφέ βέλη συμβολίζονται οι σημειακές πηγές ρύπανσης. Οι τελικές συγκεντρώσεις για κάθε υδάτινο τμήμα προκύπτουν με την εφαρμογή των σχέσεων (2.18), (2.20) και (2.23) του μοντέλου με δεδομένες τις αρχικές συγκεντρώσεις, δηλαδή τις συγκεντρώσεις για $x = 0$, οι όποιες είναι οι συγκεντρώσεις του κόμβου αρχής για κάθε τμήμα.

2.3.3 Διαχείριση της Μη Σημειακής Ρύπανσης

Μείζον θέμα κατά την εξέλιξη του μοντέλου αποτέλεσε η ένταξη της μη σημειακής ρύπανσης στους υπολογισμούς. Η λογική της θεώρησης ταχύτητας συμβολής στη συγκέντρωση του BOD, η οποία χρησιμοποιείται στη γενικευμένη μορφή της μεθόδου Streeter-Phelps, που περιγράφεται στο εδάφιο 1.6.3.2, κρίθηκε ακατάλληλη για το συγκεκριμένο μοντέλο. Ο λόγος είναι το γεγονός, ότι τα δεδομένα εισόδου για τη μη σημειακή ρύπανση δίνονται συνήθως ως μάζα ρύπων, η οποία αποτίθεται σε έκταση, η οποία με τη σειρά της τροφοδοτεί τον ποταμό μέσω της απορροής. Η μορφή αυτή των δεδομένων δεν είναι πρόσφορη για την ένταξη της μη σημειακής ρύπανσης με τη μορφή του ορισμού ταχύτητας συμβολής. Αντιθέτως, εκτιμάται ως λογική η θεώρηση, ότι η μάζα των ρύπων καταλήγει στον ποταμό διαλυμένη στο νερό που απορρέει σε αυτόν. Συνεπώς, σε κάθε υδάτινο τμήμα θεωρείται, ότι εισέρχεται η απορροή, η οποία συμβαίνει στην υπολεκάνη απορροής του και η οποία έχει συγκέντρωση ρύπων που φαίνεται στη σχέση (2.29) και τη σχέση (2.30) για το ανθρακούχο BOD και το ολικό προς νιτροποίηση άζωτο αντίστοιχα.

$$CBOD_{\text{nonpoint},v} = \frac{MBOD_{\text{nonpoint},v}}{Q_{\text{απορροής},v}} \quad (2.29)$$

$$CN_{\text{nonpoint},v} = \frac{MN_{\text{nonpoint},v}}{Q_{\text{απορροής},v}} \quad (2.30)$$

όπου $MBOD_{\text{nonpoint},v}$ και $MN_{\text{nonpoint},v}$ είναι οι μάζες των ρύπων που καταλήγουν στην υπολεκάνη απορροής του υδάτινου τμήματος v και $Q_{\text{απορροής},v}$ η συνολική απορροή της.

Θα μπορούσε να εισάγεται η απορροή, η οποία περιέχει και τη μάζα της μη σημειακής ρύπανσης κάθε τμήματος στο τέλος του με τη μορφή σημειακής ρυπαντικής πηγής. Όμως αυτή η θεώρηση απέχει πολύ από την πραγματικότητα και θα οδηγούσε σε υπερεκτίμηση των

συγκεντρώσεων των ρύπων και υποεκτίμηση της κατανάλωσης του οξυγόνου. Συνεπώς επιλέχθηκε να γίνει η παραδοχή, ότι η απορροή συμβαίνει ομοιόμορφα σε όλο το μήκος του ποταμού. Μολονότι αυτή δεν είναι η πραγματικότητα, θεωρείται ότι αυτή η παραδοχή δίνει ικανοποιητική προσέγγισή της. Η εισαγωγή της απορροής στα υδάτινα τμήματα υπό αυτή την παραδοχή μπορεί να γίνει με αριθμητική τεχνική, η οποία περιγράφεται στη συνέχεια. Κάθε υδάτινο τμήμα χωρίζεται περαιτέρω σε μ τμήματα, το καθένα από τα οποία, εκτός από το πρώτο, θα λαμβάνει στον κόμβο αρχής του παροχή $Q_{\text{απορροής}}/\mu$ με συγκέντρωση ρύπων $\text{CBOD}_{\text{nonpoint},\nu}$ και $\text{CN}_{\text{nonpoint},\nu}$. Το πρώτο τμήμα ($\mu = 1$) του κάθε υδάτινου τμήματος λαμβάνει την παροχή και τα ρυπαντικά φορτία που καταλήγουν στο υδάτινο τμήμα από τα προηγούμενα του και από τη σημειακή πηγή που εφαρμόζεται στην αρχή του, στην περίπτωση υπάρχει. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός μ των τμημάτων των υδάτινων τμημάτων, τόσο πιο ακριβής είναι η προσομοίωση. Εκτιμάται ότι η επιλογή του μ έτσι ώστε $(L/\mu) \leq 1000$, όπου L είναι το μήκος ολόκληρου του υδάτινου τμήματος, δίνει ικανοποιητική ακρίβεια. Έτσι ο κώδικας του μοντέλου μπορεί να ορίζει την αυτοματοποιημένη διεκπεραίωση της δημιουργίας και τροφοδότησης με τα αντίστοιχα φορτία των μ τμημάτων για κάθε υδάτινο τμήμα.

2.3.4 Εισαγωγή Δεδομένων

Όπως αναλύθηκε στο εδάφιο 2.3.1, για την εφαρμογή του μοντέλου σε έναν ποταμό, πρέπει να προηγηθεί ο χωρισμός του σε υδάτινα τμήματα. Τα δεδομένα εισόδου και οι παράμετροι του μοντέλου δίνονται σε μορφή πίνακα $\nu \times 17$, όπου ν είναι το σύνολο των υδάτινων τμημάτων από τα οποία αποτελείται το υδρολογικό δίκτυο του ποταμού, που μελετάται. Ο πίνακας ονομάζεται InputData. Κάθε γραμμή του πίνακα περιέχει τα στοιχεία ενός υδάτινου τμήματος και η σειρά των γραμμών δεν απαιτείται να είναι συγκεκριμένη. Στην πρώτη στήλη γράφεται το όνομα του τμήματος, το οποίο είναι, όπως έχει ήδη αναφερθεί, ένας θετικός ακέραιος αριθμός. Στη δεύτερη στήλη του πίνακα δίνεται το μήκος του τμήματος σε μέτρα ακολουθούμενο από τις συγκεντρώσεις του ανθρακούχου βιολογικά απαιτούμενου οξυγόνου CBOD, του ολικού προς νιτροποίηση αζώτου CN και του διαλυμένου οξυγόνου CO σε mg/l, οι οποίες εμφανίζονται στο νερό το οποίο απορρέει στο συγκεκριμένο υδάτινο τμήμα καθώς και την απορροή στο τμήμα σε m^3/d , στις στήλες 3, 4, 5 και 6 αντίστοιχα. Στις στήλες 7, 8, 9 και 10 συμπληρώνονται τα στοιχεία της σημειακής πηγής, η οποία εισρέει στον κόμβο αρχής του υδάτινου τμήματος. Στην περίπτωση που δεν τροφοδοτείται το τμήμα από σημειακή πηγή, τα πεδία αφήνονται κενά. Οι τέσσερις στήλες αντιστοιχούν κατά σειρά στην παροχή της πηγής σε m^3/d , και τις συγκεντρώσεις ανθρακούχου βιολογικά απαιτούμενου

οξυγόνου, ολικού προς νιτροποίηση αζώτου και διαλυμένου οξυγόνου, CBOD, CN και CO αντίστοιχα σε mg/l. Στη στήλη 11 συμπληρώνεται η ταχύτητα ροής στο υδάτινο τμήμα σε m/d και ακολουθείται από τους συντελεστές K_1 , K_2 και K_N της μεθόδου και την τιμή κορεσμού για το διαλυμένο οξυγόνο στο εν λόγω υδάτινο τμήμα στις στήλες 12, 13, 14, και 15 αντίστοιχα. Στη στήλη 16 δίνεται το όνομα του υδάτινου τμήματος, στο οποίο καταλήγει το τμήμα, του οποία τα στοιχεία δίνονται στην συγκεκριμένη γραμμή. Όταν το υδάτινο τμήμα καταλήγει στον τελικό αποδέκτη, δηλαδή είναι το τελικό τμήμα, στη στήλη 16 εισάγεται ο αριθμός 1000. Το στοιχείο της στήλης 16 είναι απαραίτητο για την αυτοματοποιημένη επίλυση της δένδροειδούς μορφής του ποταμού, δηλαδή την επίλυση των υδάτινων τμημάτων με τη σωστή σειρά και την τροφοδότησή των φορτίων και των παροχών τους στα επόμενα. Τέλος, ο πίνακας εισόδου InputData δέχεται ένα στοιχείο στη θέση (1,17), το οποίο χρησιμοποιείται για την επιλογή της διαδρομής του ποταμού, της οποίας τα ποιοτικά χαρακτηριστικά θα παρουσιαστούν σε διαγράμματα. Συγκεκριμένα, συμπληρώνεται το πεδίο με το όνομα του πρώτου υδάτινου τμήματος της διαδρομής, της οποίας επιθυμείται η διαγραμματική απεικόνιση. Για παράδειγμα, αν στο περιορισμένο δίκτυο, που φαίνεται στο Σχήμα 2.1, επιθυμείται η χάραξη των διαγραμμάτων συγκεντρώσεων-θέσεων για τη διαδρομή, που αποτελείται από τα τμήματα 2 και 3, αρκεί η συμπλήρωση του πεδίου (1,17) του πίνακα InputData με το όνομα του αρχικού τμήματος της διαδρομής, δηλαδή του 2.

2.3.5 Ο Κώδικας του Προγράμματος

Στο εδάφιο αυτό θα περιγραφεί ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για την ψηφιακοποίηση του μοντέλου. Σημειώνεται, δημιουργήθηκαν τέσσερεις εκδοχές, από τις οποίες οι δύο δίνουν αποτελέσματα με τη μορφή μεμονωμένων τιμών, ενώ τα άλλα δύο δίνουν αποτελέσματα ως στατιστικά χαρακτηριστικά των αποτελεσμάτων πολλών προσομοιώσεων Monte Carlo. Ως εκ τούτου, οι πρώτες δύο εκδοχές αποτελούν αιτιοκρατική μορφή του μοντέλου, ενώ οι άλλες δύο θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ως πιθανοτικές εκδοχές.

2.3.5.1 Αρχική Έκδοση RISDOE0

Το RISDOE0 είναι η πρώτη κωδικοποιημένη εκδοχή του μοντέλου. Σε αυτή την εκδοχή, ο διαχωρισμός των υδάτινων τμημάτων σε υποτμήματα για τη διαχείριση της μη σημειακής ρύπανσης γίνεται με την τροποποίηση του πίνακα δεδομένων εισόδου.

Αρχικά οι γραμμές του πίνακα των στοιχείων εισόδου InputData ανακατατάσσονται, έτσι ώστε η πρώτη γραμμή να περιέχει τα στοιχεία του τμήματος, από το οποίο έχει επιλεγεί να αρχίζουν τα διαγράμματα και να συνεχίζει με τα τμήματα της διαδρομής που ακολουθείται

μέχρι τον τελικό αποδέκτη. Στη συνέχεια συμπληρώνονται οι γραμμές του InputData, οι οποίες αναφέρονται στα υδάτινα τμήματα, τα οποία δεν ανήκουν στη διαδρομή, της οποίας τα ποιοτικά χαρακτηριστικά θα απεικονιστούν διαγραμματικά. Σε αντίθεση με την περίπτωση των τμημάτων της κύριας διαδρομής, η συμπλήρωση αυτή δεν γίνεται με κάποια συγκεκριμένη σειρά. Τέλος αντικαθίσταται το στοιχείο (1,17) από τη γραμμή, στην οποία βρίσκεται το τελικό υδάτινο τμήμα, δηλαδή αυτό που καταλήγει στον τελικό αποδέκτη. Ο πίνακας, ο οποίος προκύπτει από την διαδικασία της αναδιάταξης χρησιμοποιείται τελικώς ως πίνακας δεδομένων εισόδου.

Στη συνέχεια δημιουργείται νέος πίνακας με αντικατάσταση των υδάτινων τμημάτων του αρχικού πίνακα, με τα υποτμήματα για τη διαχείριση της σημειακής ρύπανσης, στα οποία αντιστοιχούν. Συγκεκριμένα, κάθε τμήμα χωρίζεται σε τόσα υποτμήματα, ώστε το καθένα από αυτά να έχει μήκος μικρότερο από 1000 μέτρα. Στο πρώτο υποτμήμα δίνεται ολόκληρη η σημειακή ρύπανση του υδάτινου τμήματος, αν υπάρχει. Επιπλέον, για όλα τα υποτμήματα, συμπληρώνεται το πεδίο της παροχής απορροής με την τιμή της παροχής του υδάτινου τμήματος διαιρεμένη με τον συνολικό αριθμό των υποτμημάτων, που δημιουργήθηκαν. Στο πεδίο του μήκους του κάθε υποτμήματος συμπληρώνεται η τιμή του μήκους του υδάτινου τμήματος διαιρεμένη διά τον συνολικό αριθμό των υποτμημάτων που δημιουργήθηκαν. Όσον αφορά στα ονόματα των υποτμημάτων ακολουθήθηκε διαδικασία, η οποία να εξασφαλίζει τη μοναδικότητα του κάθε ονόματος. Εκτιμήθηκε, συγκεκριμένα, ότι τα υδάτινα τμήματα δεν θα ξεπερνούν τα 1000. Οπότε, στο πρώτο υποτμήμα κάθε υδάτινου τμήματος αποδίδεται το όνομα του υδάτινου τμήματος ενώ στα επόμενα αποδίδεται ο αριθμός $1000n + \mu$, όπου n είναι το όνομα του υδάτινου τμήματος και μ ο αύξων αριθμός του υποτμήματος. Έπειτα, το πεδίο της στήλης 16, δηλαδή το όνομα του υποτμήματος στο οποίο καταλήγει το υποτμήμα, συμπληρώνεται με το μοναδικό όνομα του επόμενου υποτμήματος για όλα τα υποτμήματα από το 1 μέχρι το προτελευταίο, ενώ στο τελευταίο συμπληρώνεται η αντίστοιχη τιμή του αρχικού πίνακα για το συγκεκριμένο υδάτινο τμήμα. Τα υπόλοιπα πεδία του πίνακα υποτμημάτων συμπληρώνονται με τιμές ίσες με τις τιμές του υδάτινου τμήματος, στο οποίο ανήκει το κάθε υποτμήμα. Με αυτό τον τρόπο και δεδομένου ότι ο αρχικός πίνακας θα έχει λιγότερες από χίλιες εγγραφές, δημιουργείται ο τελικός πίνακας δεδομένων, στον οποίο έχουν αντικατασταθεί τα υδάτινα τμήματα από τα αντίστοιχα υποτμήματά τους.

Στη συνέχεια εφαρμόζονται για κάθε γραμμή του νέου πίνακα τέσσερις υπορουτίνες. Στη πρώτη υπορουτίνα υπολογίζεται παροχή, η οποία διαρρέει το υποτμήμα, προσθέτοντας στην αντίστοιχη παροχή του αμέσως προηγούμενου υποτμήματος, (ή των αμέσως προηγούμενων

υποτμημάτων όταν πρόκειται για θέση συμβολής παραπόταμων) και την επιπλέον παροχή του/τους λόγω της απορροής σε αυτό/αυτά. Τέλος προστίθεται η παροχή λόγω σημειακής πηγής του ίδιου του υποτμήματος, αν είναι το πρώτο του υδάτινου τμήματος.

Οι άλλες τρεις υπορουτίνες υπολογίζουν τις συγκεντρώσεις CBOD, CN και CO. Πρώτα υπολογίζονται οι αρχικές συγκεντρώσεις, δηλαδή οι συγκεντρώσεις στον κόμβο αρχής του υποτμήματος. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται με ισοζύγιο μάζας ανάμεσα στον κόμβο αρχής του υπολογιζόμενου υποτμήματος και του κόμβου τέλους των αμέσως προηγούμενων του. Έπειτα υπολογίζονται οι τελικές συγκεντρώσεις με τη σχέση (2.18) για τη CBOD, τη (2.20) για τη CN και τη (2.23) και τη (2.24) για τη CO. Για το διαλυμένο οξυγόνο υπολογίζεται επίσης η ελάχιστη τιμή της συγκέντρωσης καθώς και η σχετική θέση εμφάνισής της. Για να εξασφαλιστεί η επίλυση της δένδροειδούς μορφής του ποταμού και η αυτόματη τροφοδότηση των υδάτινων τμημάτων με τα φορτία και τις παροχές των αμέσως προηγούμενων τους, χρησιμοποιήθηκε στις υπορουτίνες εμφωλευμένη δομή, για την οποία γίνεται λόγος στο εδάφιο 2.3.7.

Τα αποτελέσματα από τις υπορουτίνες, δηλαδή η παροχή που διαρρέει το υδάτινο υποτμήμα, οι αρχικές και τελικές συγκεντρώσεις των τριών ποιοτικών παραμέτρων, η ελάχιστη τιμή του διαλυμένου οξυγόνου και η σχετική θέση (απόσταση από την αρχή του υποτμήματος) εμφάνισής της, καταχωρούνται στον πίνακα αποτελεσμάτων Output. Ο πίνακας έχει διαστάσεις ($\sum_i \mu_i \nu \times 10$), όπου ν είναι το σύνολο των υδάτινων τμημάτων του ποταμού και μ_i είναι ο αριθμός των υποτμημάτων του υδάτινου τμήματος i . Σε κάθε γραμμή δίνονται τα στοιχεία ενός υποτμήματος. Από τη στήλη 1 μέχρι τη στήλη 10 καταχωρούνται κατά σειρά το όνομα του υποτμήματος, η παροχή που το διαρρέει σε m^3/d , οι συγκεντρώσεις CBOD αρχής και τέλους σε mg/l , οι συγκεντρώσεις CN αρχής και τέλους σε mg/l , η συγκέντρωση αρχής, η ελάχιστη συγκέντρωση και η συγκέντρωση τέλους σε mg/l για το CO και η σχετική θέση εμφάνισής της ελάχιστης συγκέντρωσης οξυγόνου σε m .

Τέλος, δημιουργούνται δύο πίνακες απόλυτων θέσεων, δηλαδή του μήκους της διαδρομής από την αρχή του υδάτινου τμήματος που έχει οριστεί ως η αρχή της διαδρομής που θα απεικονιστεί με διαγράμματα μέχρι το σημείο του ποταμού, του οποίου ζητείται η απόλυτη θέση. Ο ένας πίνακας περιέχει για κάθε υποτμήμα τις απόλυτες θέσεις αρχής και τέλους, ενώ ο δεύτερος περιέχει επιπλέον την απόλυτη θέση εμφάνισής της ελάχιστης συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου. Σημειώνεται, ότι η θέση τέλους ενός υποτμήματος, συμπίπτει με τη θέση αρχής του επόμενου με αποτέλεσμα οι τιμές των θέσεων τέλους να ακολουθούνται από

ίδιες τιμές, οι οποίες είναι οι θέσεις αρχής. Η διαδικασία αυτή γίνεται για τη διαδρομή από την αρχή, που έχει οριστεί, ως τον τελικό αποδέκτη. Τέλος, δημιουργούνται τα διαγράμματα των τριών συγκεντρώσεων συναρτήσει της απόλυτης θέσης για όλα τα υποτμήματα, που ανήκουν στην ορισμένη διαδρομή με τη σειρά της πραγματικής ροής, με αποτέλεσμα να προκύπτει το προφίλ των συγκεντρώσεων για την επιλεγμένη διαδρομή.

Η έκδοση RISDOE0 απαιτεί περίπου 15-30 δευτερόλεπτα για την επίλυση ενός τυπικού συστήματος ποταμού. Επιπλέον, θεωρήθηκε ότι είναι δύσχρηστος ο πίνακας αποτελεσμάτων που προκύπτει, καθώς έχει πολλαπλάσιο αριθμό γραμμών από τον πίνακα δεδομένων εισόδου, ενώ εκτιμήθηκε, ότι δεν είναι αναγκαία η αποθήκευση των ποιοτικών χαρακτηριστικών σε επίπεδο υποτμημάτων, καθώς είναι επαρκή τα αποτελέσματα σε επίπεδο υδάτινων τμημάτων. Με σκοπό να ξεπεραστούν αυτά τα προβλήματα δημιουργήθηκε η έκδοση RISDOE1.

2.3.5.2 Βελτιωμένη Έκδοση RISDOE1

Η βασική διαφορά του RISDOE1 από το RISDOE0 είναι ο τρόπος, με τον οποίο γίνεται η διαχείριση της μη σημειακής ρύπανσης, καθώς και το στάδιο του κώδικα, κατά το οποίο αυτή γίνεται. Σε αυτή την περίπτωση ο πίνακας InputData τροποποιείται μόνο κατά τη διαδικασία της αναδιάταξης των σειρών του, έτσι ώστε να τοποθετηθούν από την αρχή του πίνακα και έπειτα, με τη σειρά που τα συναντάει η ροή, τα υδάτινα τμήματα της διαδρομής, η οποία έχει επιλεγθεί μέσω του αρχικού υδάτινου τμήματος που δηλώνεται στο πεδίο (1,17) του αρχικού πίνακα εισόδου, και στη συνέχεια να ακολουθήσουν τα υπόλοιπα. Η διαδικασία αυτή γίνεται με τον ίδιο τρόπο που γίνεται στην έκδοση RISEDO0. Επιπλέον αντικαθίσταται το όνομα του αρχικού τμήματος του πεδίου (1,17) με τον αριθμό της γραμμής, στην οποία δίνονται τα στοιχεία του τελευταίου υδάτινου τμήματος.

Έπειτα, για κάθε ένα από τα υδάτινα τμήματα, δηλαδή για τις γραμμές του πίνακα εισόδου, εφαρμόζονται δύο υπορουτίνες. Η υπορουτίνα για την εύρεση των παροχών, οι οποίες διαρρέουν τα υδάτινα τμήματα, είναι όμοια με την υπορουτίνα που χρησιμοποιείται στο RISDOE0. Για κάθε υδάτινο τμήμα, η παροχή που προκύπτει αποθηκεύεται στον πίνακα Output, που δημιουργείται και έχει διαστάσεις ($n \times 10$), όπου n είναι το σύνολο των υδάτινων τμημάτων. Για τις συγκεντρώσεις όμως των τριών ποιοτικών χαρακτηριστικών, ήταν απαραίτητη η χρήση άλλης υπορουτίνας, μέσα στην οποία να γίνεται και η διαχείριση της μη σημειακής ρύπανσης. Συνεπώς, δημιουργήθηκε μία ενιαία υπορουτίνα, η οποία υπολογίζει και τα τρία ποιοτικά χαρακτηριστικά ταυτόχρονα. Και σε αυτή την περίπτωση

χρησιμοποιήθηκε εμφωλευμένη μορφή, η οποία καθοδηγεί την επίλυση της δένδροειδούς μορφής του ποταμού. Για κάθε τμήμα βρίσκεται ο αριθμός των υποτμημάτων στα οποία θα πρέπει να χωριστεί ώστε να ικανοποιείται το κριτήριο μέγιστου μήκους 1000 m για όλα τα υποτμήματα. Έπειτα ακολουθείται επαναληπτική διαδικασία με αριθμό επαναλήψεων ίσο με τον αριθμό των υποτμημάτων για κάθε υδάτινο τμήμα. Στην πρώτη επανάληψη, επιλύεται το πρώτο υποτμήμα με μήκος $l = L/\mu$, όπου l είναι το μήκος των υποτμημάτων του συγκεκριμένου υδάτινου τμήματος, L είναι το μήκος του υδάτινου τμήματος και μ είναι ο αριθμός των υποτμημάτων, στα οποία διαιρείται το συγκεκριμένο υδάτινο τμήμα. Για την εύρεση των συγκεντρώσεων στον κόμβο αρχής του πρώτου υποτμήματος, δηλαδή του κόμβου αρχής του υδάτινου τμήματος, γίνεται ισοζύγιο μάζας μεταξύ του κόμβου αρχής του υδάτινου τμήματος, το οποίο υπολογίζεται, και των κόμβων τέλους των αμέσως προηγούμενων υδάτινων τμημάτων. Επιπλέον εισάγεται και η σημειακή πηγή του υδάτινου τμήματος προς επίλυση, αν υπάρχει. Αφού υπολογιστούν οι συγκεντρώσεις του κόμβου αρχής, υπολογίζονται οι συγκεντρώσεις του κόμβου τέλους μέσω των σχέσεων, που δίνονται στο εδάφιο 2.2. Για το διαλυμένο οξυγόνο υπολογίζεται και η ελάχιστη συγκέντρωση καθώς και η θέση εμφάνισής της. Οι αρχικές συγκεντρώσεις αποθηκεύονται στον πίνακα εξόδου, Output. Οι τελικές συγκεντρώσεις καθώς και η ελάχιστη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου και η θέση εμφάνισής της αποθηκεύονται σε προσωρινές μεταβλητές. Σε κάθε μία από τις επόμενες επαναλήψεις τροφοδοτείται το υποτμήμα, που επιλύεται με παροχή, η οποία έχει τα χαρακτηριστικά (μέγεθος και συγκεντρώσεις) εκείνης που εισρέει στο υδάτινο τμήμα που επιλύεται από τα αμέσως προηγούμενά του. Επιπλέον τροφοδοτείται με παροχή ίση με την απορροή που συντελείται στα προηγούμενα από αυτό υποτμήματα και συγκεντρώσεις τις τελικές του προηγούμενου υποτμήματος, οι οποίες είναι αποθηκευμένες στις προσωρινές μεταβλητές. Έπειτα εφαρμόζονται οι σχέσεις του μοντέλου και υπολογίζονται και καταχωρούνται στις προσωρινές μεταβλητές οι τελικές συγκεντρώσεις του υποτμήματος, ενώ η ελάχιστη τιμή για το διαλυμένο οξυγόνο αλλάζει μόνο στην περίπτωση που για το συγκεκριμένο υποτμήμα προκύπτει μικρότερη από αυτή που εμφανίζεται στα προηγούμενα υποτμήματα. Στην περίπτωση αυτή αλλάζει και η τιμή σχετικής θέση εμφάνισης της ελάχιστης τιμής του διαλυμένου οξυγόνου. Συγκεκριμένα, η σχετική θέση, που έχει βρεθεί ως απόσταση από την αρχή του υποτμήματος, μετατρέπεται σε σχετική θέση με αρχή την αρχή του επιλυόμενου υδάτινου τμήματος. Η μετατροπή αυτή γίνεται με πρόσθεση του μήκους των προηγούμενων υποτμημάτων στη σχετική θέση με αρχή την αρχή του υποτμήματος. Αν δηλαδή η σχετική θέση με αρχή την αρχή του υποτμήματος είναι X' , τότε η τελική σχετική θέση προκύπτει ως $X = X' + (\mu_i - 1)l$, όπου μ_i είναι ο αύξων αριθμός του υποτμήματος

που επιλύεται. Μετά την τελευταία επανάληψη έχουν αποθηκευτεί στις προσωρινές μεταβλητές οι τελικές τιμές του υδάτινου τμήματος για τις συγκεντρώσεις των τριών ποιοτικών παραμέτρων, την ελάχιστη τιμή του διαλυμένου οξυγόνου και την απόσταση του σημείου εμφάνισής της από την αρχή του υδάτινου τμήματος. Οι τιμές αυτές αντιγράφονται στη συνέχεια στον πίνακα εξόδου Output. Αφού έχουν επιλυθεί όλα τα υδάτινα τμήματα του ποταμού, ο πίνακας των αποτελεσμάτων είναι συμπληρωμένος και οι στήλες του περιέχουν κατά σειρά το όνομα του υδάτινου τμήματος, την παροχή που το διαρρέει σε m^3/d , τις συγκεντρώσεις CBOD αρχής και τέλους σε mg/l , τις συγκεντρώσεις CN αρχής και τέλους σε mg/l , τη συγκέντρωση αρχής, την ελάχιστη συγκέντρωση και τη συγκέντρωση τέλους σε mg/l για το CO και τη σχετική θέση εμφάνισης της ελάχιστης συγκέντρωσης οξυγόνου σε m.

Ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε διαγράμματα θέσεως-συγκέντρωσης με την ίδια διαδικασία, που ακολουθείται στο RISDOEO. Ενώ τα αποτελέσματα αυτής της έκδοσης περιορίζονται στο επίπεδο των υδάτινων τμημάτων αντί του επιπέδου των υποτμημάτων των υδάτινων υποτμημάτων και τα διαγράμματα απαρτίζονται από λιγότερα σημεία, ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται για την εκτέλεσή της είναι πολλαπλάσια μικρότερος από το χρόνο εκτέλεσης της αρχικής έκδοσης.

2.3.6 Διαχείριση της Αβεβαιότητας στις Παραμέτρους του Μοντέλου-Πιθανοτική Έκδοση RISDOEPR1

Όπως αναφέρθηκε στο εδάφιο 1.6.3.5, η ύπαρξη αβεβαιότητας δημιουργεί δυσκολία στον καθορισμό των στοιχείων εισόδου ενός μοντέλου και στην επιλογή κατάλληλων παραμέτρων για την διακρίβωσή του. Στην περίπτωση του RISEDOE, είναι αναγκαίος ο ορισμός τεσσάρων παραμέτρων για την περιγραφή του συστήματος. Συγκεκριμένα γίνεται ορισμός τριών συντελεστών για την περιγραφή των φαινομένων (επαναερισμός) και των διεργασιών (βιοδιάσπαση οργανικού άνθρακα και νιτροποίηση), που επηρεάζουν τις συγκεντρώσεις των ποιοτικών χαρακτηριστικών, και της ταχύτητας ροής. Για την διαχείριση του προβλήματος της αβεβαιότητας κατά τον ορισμό των τεσσάρων αυτών στοιχείων, επιλέχθηκε η χρήση της μεθόδου Monte Carlo. Με γνωστά τα στατιστικά χαρακτηριστικά των παραμέτρων και των κατανομών, που ακολουθούν, είναι δυνατή η επανάληψη της εκτέλεσης του κώδικα των αιτιοκρατικών μοντέλων, που περιγράφηκαν προηγουμένως, με τυχαίες τετράδες παραμέτρων, οι οποίες ακολουθούν τα δεδομένα στατιστικά χαρακτηριστικά και κατανομές. Οι κατανομές των K_1 και K_2 έχει παρατηρηθεί ότι ακολουθούν κανονική κατανομή (Padjett, 1978) ενώ οι τιμές του K_N κινούνται στα ίδια επίπεδα με τις τιμές του K_1 (Thomann & Mueller, 1987). Στη μέση ταχύτητα ροής έχει επίσης αποδοθεί κανονική κατανομή κατά τη

στοχαστική προσομοίωση υδατορεμάτων (Tung & Hathhorn, 1990). Χρησιμοποιώντας οπότε ως μέσες τιμές τις τιμές των παραμέτρων, που δίνονται στον πίνακα των δεδομένων εισόδου, και ορίζοντας επιπλέον την τιμή της τυπικής απόκλισης για κάθε παράμετρο μπορούν να γεννιούνται τυχαίες παράμετροι, οι οποίες να ακολουθούν τα δεδομένα στατιστικά χαρακτηριστικά.

Σε κάθε επανάληψη λοιπόν αποθηκεύεται ο πίνακας εισόδου σε έναν προσωρινό πίνακα και τα στοιχεία των στηλών 11, 12, 13 και 14 τροποποιούνται. Για το σκοπό αυτό γίνεται η γένεση τεσσάρων ψευδοτυχαίων αριθμών από κανονική κατανομή με μέση τιμή ίση με το 0 και τυπική απόκλιση ίση με το 1, οι οποίοι έπειτα ανάγονται σε στοιχεία της επιθυμητής κατανομής της κάθε παραμέτρου με πολλαπλασιασμό τους με την τυπική απόκλιση της παραμέτρου και πρόσθεση της μέσης τιμής της.

Υπάρχει η δυνατότητα να γίνεται γένεση διαφορετικής τετράδας ψευδοτυχαίων αριθμών για την τροποποίηση των παραμέτρων κάθε υδάτινου τμήματος, δηλαδή γραμμής, ή να χρησιμοποιείται μία τετράδα για την τροποποίηση των παραμέτρων όλων των υδάτινων τμημάτων. Στην πρώτη περίπτωση γίνεται η παραδοχή, ότι οι παράμετροι ενός υδάτινου τμήματος είναι ανεξάρτητες από τις παραμέτρους ενός άλλου υδάτινου τμήματος, του ίδιου ποταμού.

Κάτι τέτοιο όμως δεν μπορεί να ισχύει, αφού η χωρική γειτνίαση των υδάτινων τμημάτων και η συνύπαρξή τους στον ίδιο ποταμό οδηγεί στην ύπαρξη χωρικής συσχέτισης. Παραδείγματος χάρη, η αύξηση του ρυθμού επαναερισμού σε ένα υδάτινο τμήμα, η οποία συνδέεται με τις συνθήκες της ροής και του περιβάλλοντος, είναι λογικό να συνοδευτεί από ανάλογη αύξηση της αντίστοιχης παραμέτρου στο επόμενο υδάτινο τμήμα. Στην περίπτωση, που η λεκάνη απορροής του ποταμού δεν έχει εξαιρετικά μεγάλες διαστάσεις, εκτιμάται ότι θα μπορούσε να θεωρηθεί, ότι υπάρχει απόλυτη αναλογία στην μεταβολή των τιμών των όμοιων παραμέτρων για όλα τα υδάτινα τμήματα. Σε αυτή την περίπτωση αρκεί η γένεση μίας τετράδας ψευδοτυχαίων αριθμών ανά επανάληψη, η οποία χρησιμοποιείται για την προσαρμογή των παραμέτρων όλου του πίνακα.

Όσον αφορά στην χρονική αυτοσυσχέτιση, η οποία είναι αναμενόμενο να παρουσιάζεται στις χρονοσειρές των τεσσάρων παραμέτρων του μοντέλου, δεν κρίνεται αναγκαίο να διατηρηθεί στο μοντέλο, καθώς τα αποτελέσματα κάθε επανάληψης είναι ανεξάρτητα από τα αποτελέσματα των άλλων επαναλήψεων. Αυτό σημαίνει, ότι οι συγκεντρώσεις των ποιοτικών παραμέτρων, που θα προκύψουν για μία τετράδα παραμέτρων κατά την εκτέλεση μίας

επανάληψης του κώδικά του μοντέλου, δεν επηρεάζονται από τα αποτελέσματα, τα οποία προέκυψαν από τις προηγούμενες επαναλήψεις ούτε πρόκειται να επηρεάσουν τα αποτελέσματα των επαναλήψεων, που θα ακολουθήσουν. Συνεπώς η σειρά με την οποία θα γίνουν οι επαναλήψεις δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα, και έτσι η διατήρηση της χρονικής αυτοσυσχέτιση κρίνεται άσκοπη.

Επιπλέον μελετήθηκε η ετεροσυσχέτιση μεταξύ των τεσσάρων παραμέτρων. Συγκεκριμένα, στη βιβλιογραφία (Thomann & Mueller, 1987) αναφέρεται ότι ο συντελεστής βιοδιάσπασης οργανικού άνθρακα και ο συντελεστής του ρυθμού της νιτροποίησης εμφανίζονται συνήθως με παρόμοιες τιμές. Γι αυτό το λόγω θεωρήθηκε σκόπιμη η θεώρηση ετεροσυσχέτισης μεταξύ τους. Έπειτα, ο ρυθμός του επαναερισμού K_2 έχει παρατηρηθεί ότι μπορεί να εμφανίζει συντελεστή ετεροσυσχέτισης της τάξεως του 0.5 με το ρυθμό της οργανικής βιοδιάσπασης του άνθρακα (Padjett, 1978), παρόλο που οι δύο διαδικασίες είναι αποτέλεσμα διαφορετικών φαινομένων. Συγκεκριμένα, ο ρυθμός του επαναερισμού είναι συνάρτηση των φυσικών χαρακτηριστικών του ποταμού, ενώ ο ρυθμός της βιοδιάσπασης της οργανικής ύλης εξαρτάται από τη βιολογική σύσταση του ποταμού, τα χαρακτηριστικά της ρύπανσης και το περιβάλλον του ποταμού. Ως εκ τούτου έχει αμφισβητηθεί η φυσική σημασία αυτής της ετεροσυσχέτισης (Tung & Hathhorn, 1990). Τέλος, λόγω της άμεσης εξάρτησης του επαναερισμού από την τύρβη της ροής, η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από την ταχύτητα της ροής, είναι αναμενόμενο να παρατηρείται έντονη συσχέτιση ανάμεσα στις τιμές του K_2 και της ταχύτητας ροής V . Στη βιβλιογραφία προτείνεται η τιμή 0.8 για τον συντελεστή ετεροσυσχέτισης (Tung & Hathhorn, 1988).

Με βάση τα παραπάνω γράφηκε ο κατάλληλος κώδικας, ώστε να γίνουν οι επαναλήψεις του αιτιοκρατικού μοντέλου για κατάλληλο πλήθος τετράδων παραμέτρων, έτσι ώστε να μπορούν να μετρηθούν τα στατιστικά στοιχεία των αποτελεσμάτων, που αντιστοιχούν στα στατιστικά στοιχεία, που επιλέχθηκαν για τις παραμέτρους. Λόγω της ανάγκης για εκτέλεση πολλών επαναλήψεων του κώδικα ώστε να είναι το δείγμα αποτελεσμάτων, που παράγεται επαρκές για τη στατιστική του επεξεργασία, χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας του RISDOE1.

Ο πίνακας των στοιχείων εισόδου είναι ο ίδιος με τον πίνακα των αιτιοκρατικών εκδοχών RISDOE0 και RISDOE1. Εκτός από τον πίνακα InputData, συμπληρώνονται στην περίπτωση της πιθανοτικής έκδοσης και άλλες οχτώ μεταβλητές. Με τη μεταβλητή s ορίζεται ο αριθμός των επαναλήψεων που θα γίνουν. Επιπλέον, δίνονται τιμές στις μεταβλητές $stdivkn$, $stdivk1$, $stdivk2$, $stdivV$ για τον ορισμό των τυπικών αποκλίσεων των παραμέτρων K_n , K_1 ,

K_2 και V αντίστοιχα. Για να διατηρηθεί η ετεροσυσχέτιση μεταξύ των παραμέτρων, οι οποίες αναλύθηκαν προηγουμένως, δίνονται επίσης οι τιμές των συντελεστών ετεροσυσχέτισης $\rho(K_n, K_1)$, $\rho(K_1, K_2)$ και $\rho(K_2, V)$ στις μεταβλητές R_KnK1, R_K1K2 και R_K2V αντίστοιχα.

Η αρχική αναδιάταξη των γραμμών του πίνακα InputData γίνεται και εδώ, όπως ακριβώς και στις αιτιοκρατικές εκδόσεις του κώδικα. Στη συνέχεια εκτελούνται s επαναλήψεις, κατά τις οποίες χρησιμοποιούνται οι δύο υπορουτίνες, οι οποίες χρησιμοποιούνται και στο RISDOE1, για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων σε κάθε υδάτινο τμήμα του ποταμού. Στην αρχή κάθε επανάληψης, ο πίνακας δεδομένων InputData αποθηκεύεται σε μια προσωρινή μεταβλητή και στη συνέχεια τα στοιχεία των στηλών 11, 12, 13 και 14, τα οποία είναι η ταχύτητα V και οι συντελεστές K_1 , K_2 και K_n αντίστοιχα, τροποποιούνται ώστε να διατηρούνται τα στατιστικά χαρακτηριστικά, που ορίστηκαν με τις μεταβλητές εισόδου και να ακολουθούν κανονική κατανομή. Σε αυτό, το σημείο του κώδικα, πρέπει να καθοριστεί η χωρική αυτοσυσχέτιση των παραμέτρων. Όπως εξηγήθηκε και προηγουμένως, εκτιμάται, ότι υπάρχει έντονη χωρική αυτοσυσχέτιση των παραμέτρων, η οποία θα μπορούσε συντηρητικά να ληφθεί ίση με 1. Οπότε, σε κάθε επανάληψη χρησιμοποιείται ο ίδιος ψευδοτυχαίος αριθμός για την αναγωγή της ίδιας παραμέτρου όλων των υδάτινων τμημάτων του ποταμού σε τιμή από κανονική κατανομή με μέση τιμή την τιμή του πίνακα InputData και τυπική απόκλιση αυτή, που δίνεται στην αντίστοιχη μεταβλητή εισόδου. Για τη διατήρηση των ετεροσυσχέτισεων, που αναφέρθηκαν παραπάνω, μεταξύ των παραμέτρων, εξασφαλίζεται η διατήρηση των συντελεστών ετεροσυσχέτισης μεταξύ των τεσσάρων ψευδοτυχαίων αριθμών ανά ζεύγη. Συγκεκριμένα, πρώτα γεννάται ψευδοτυχαίος αριθμός από κανονική κατανομή με μέση τιμή 0 και τυπική απόκλιση 1, ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί έπειτα για τον καθορισμό των τιμών του K_n . Έπειτα γεννάται ένας νέος ψευδοτυχαίος αριθμός από κανονική κατανομή με μέση τιμή 0, ο οποίος τροποποιείται ώστε να εξασφαλίζεται η ετεροσυσχέτιση του με συντελεστή ετεροσυσχέτισης $\rho(K_n, K_1)$ με τον πρώτο ψευδοτυχαίο αριθμό. Ο αριθμός που προκύπτει από την τροποποίηση χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των τιμών του συντελεστή K_1 . Έπειτα ακολουθεί η ίδια διαδικασία για να εξασφαλιστεί η ετεροσυσχέτιση μεταξύ των K_1 , K_2 και K_2 , V . Σημειώνεται, ότι οι τιμές των υπόλοιπων συντελεστών ετεροσυσχέτισης μεταξύ των τεσσάρων μεταβλητών δε δεσμεύονται, δεδομένου ότι θεωρήθηκε εξάρτηση μόνο μεταξύ των τριών ζευγών (K_n, K_1) , (K_1, K_2) και (K_2, V) .

Στο τέλος κάθε επανάληψης τα αποτελέσματα των αποθηκεύονται σε τέσσερις πίνακες. Τα αποτελέσματα της i επανάληψης καταχωρούνται στην i στήλη του πίνακα. Ένας πίνακας

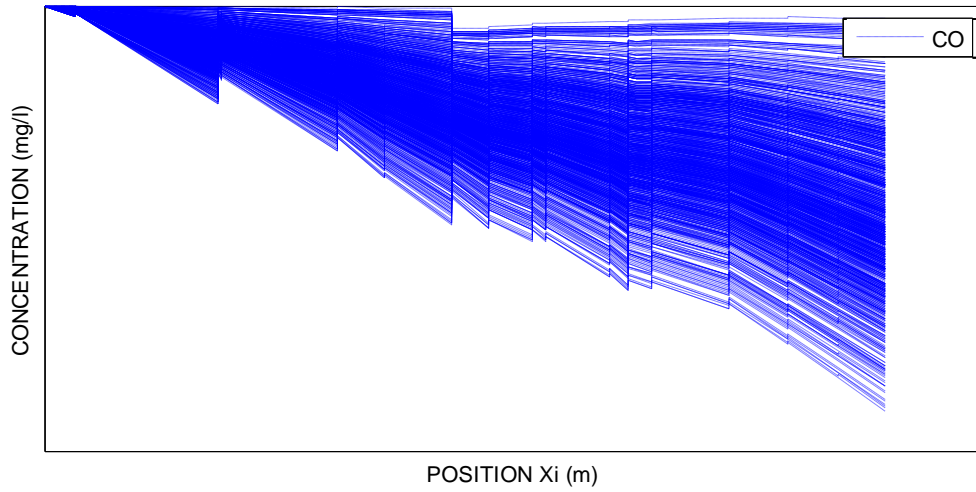
περιέχει κατά σειρά τα αποτελέσματα των συγκεντρώσεων CBOD αρχής και τέλους κάθε υδάτινου τμήματος της επιλεγμένης διαδρομής. Αντίστοιχα, ένας άλλος πίνακας περιέχει τις συγκεντρώσεις αρχής και τέλους CN. Ο πίνακας των συγκεντρώσεων του διαλυμένου οξυγόνου περιέχει εκτός από την αρχική και την τελική τιμή και την τιμή της ελάχιστης συγκέντρωσης, που εμφανίζεται σε κάθε υδάτινο τμήμα της βασικής διαδρομής. Τέλος, καταχωρούνται σε έναν πίνακα οι θέσεις εμφάνισης της ελάχιστης συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου.

Στη συνέχεια γίνεται στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Υπολογίζεται αρχικά η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση για τις τρεις συγκεντρώσεις σε κάθε υπολογισμένη θέση. Έπειτα εντοπίζεται η τιμή, πάνω από την οποία βρέθηκε η αντίστοιχη συγκέντρωση στο 95% των επαναλήψεων και η τιμή, κάτω από την οποία βρέθηκε η αντίστοιχη συγκέντρωση στο 95% των επαναλήψεων. Με αυτό τον τρόπο εκτιμάται αριθμητικά το διάστημα εμπιστοσύνης 90% για κάθε ποιοτικό χαρακτηριστικό σε κάθε θέση, που έχει υπολογιστεί.

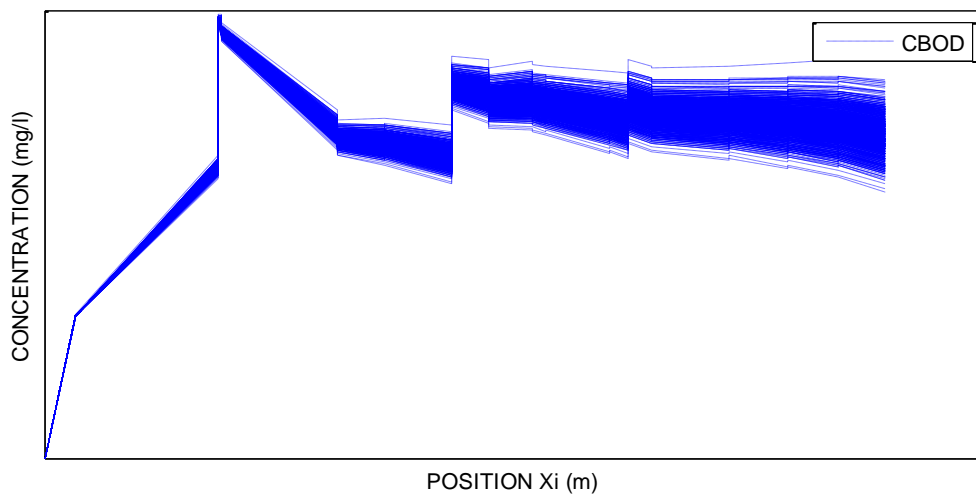
Μετά από τη στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων δημιουργούνται οι πίνακες των απόλυτων θέσεων με τη διαδικασία που ακολουθείται στα RISDOE0 και RISDOE1. Έπειτα παρουσιάζονται σε διαγράμματα τα προφίλ των συγκεντρώσεων, που υπολογίστηκαν από τις s επαναλήψεις. Το αποτέλεσμα είναι ένα νέφος, το οποίο δίνει στο χρήστη την εικόνα της κατανομής των συγκεντρώσεων. Η εικόνα αυτή φαίνεται στα διαγράμματα που ακολουθούν (Διάγραμμα 2.1, Διάγραμμα 2.2, και Διάγραμμα 2.3) για τις συγκεντρώσεις CO, CBOD και CN αντίστοιχα. Έπειτα παρουσιάζονται σε κοινά διαγράμματα για κάθε ποιοτικό χαρακτηριστικό η μέση τιμή και η τιμές, οι οποίες οριοθετούν το διάστημα εμπιστοσύνης 90%. Παρακάτω δίνονται ενδεικτικά διαγράμματα (Διάγραμμα 2.4, Διάγραμμα 2.5 και Διάγραμμα 2.6) για τις συγκεντρώσεις CO, CBOD και CN αντίστοιχα. Τέλος παρουσιάζονται σε κοινό διάγραμμα οι τυπικές αποκλίσεις και των τριών ποιοτικών παραμέτρων κατά μήκος της διαδρομής που έχει επιλεγθεί, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 2.7. Η έκδοση ονομάστηκε RISDOEPR1.

Σημειώνεται, ότι στα πλαίσια της διερεύνησης της επιρροής της χωρικής αυτοσυσχέτισης των παραμέτρων, δημιουργήθηκε το RISDOEPR0, στο οποίο θεωρούνται ανεξάρτητες οι παράμετροι κάθε θέσης από τις παραμέτρους των υπόλοιπων θέσεων. Όπως ήταν όμως αναμενόμενο, τα αποτελέσματα της εκδοχής αυτής εμφάνιζαν πολλή μικρότερη διασπορά από τα αντίστοιχα της έκδοσης RISDOEPR1, όπου θεωρείται απόλυτη χωρική αυτοσυσχέτιση μεταξύ των παραμέτρων. Συνεπώς, κρίθηκε ασφαλέστερη η χρήση της

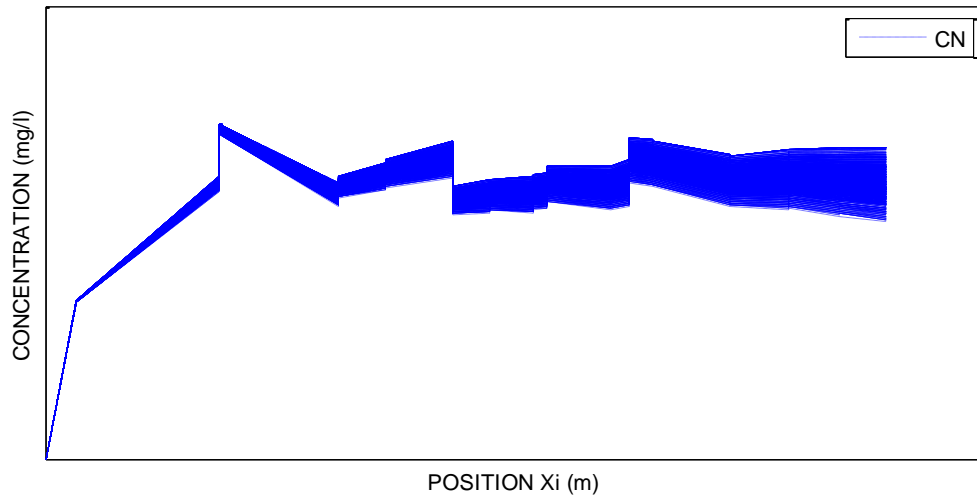
δεύτερης εκδοχής, η οποία δίνει πιο συντηρητικά αποτελέσματα και δεν αμελεί τη χωρική αυτοσυσχέτιση των παραμέτρων.



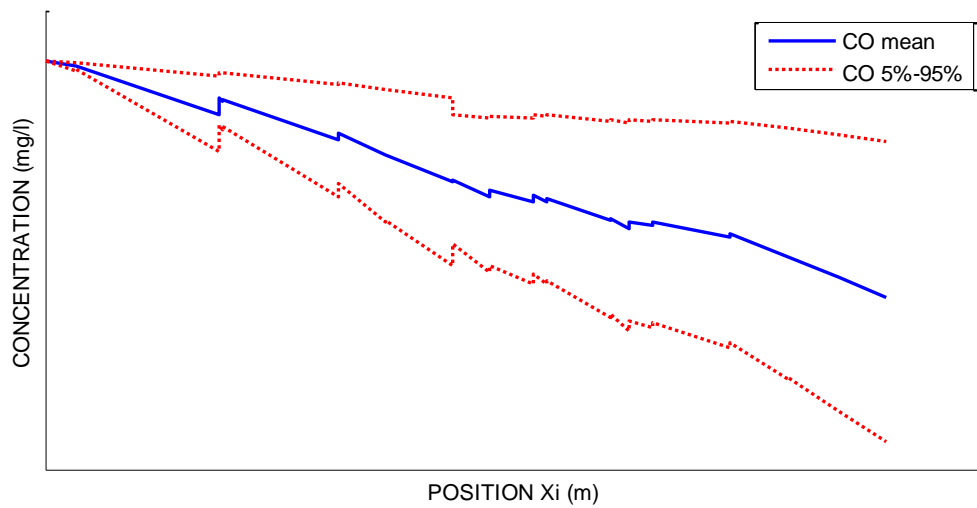
Διάγραμμα 2.1: Ενδεικτικό Διάγραμμα CO



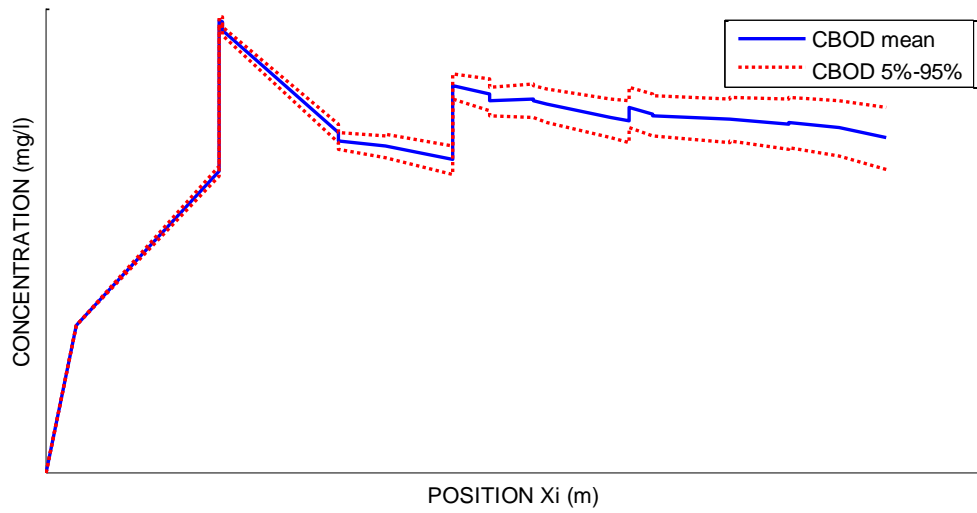
Διάγραμμα 2.2: Ενδεικτικό Διάγραμμα CBOD



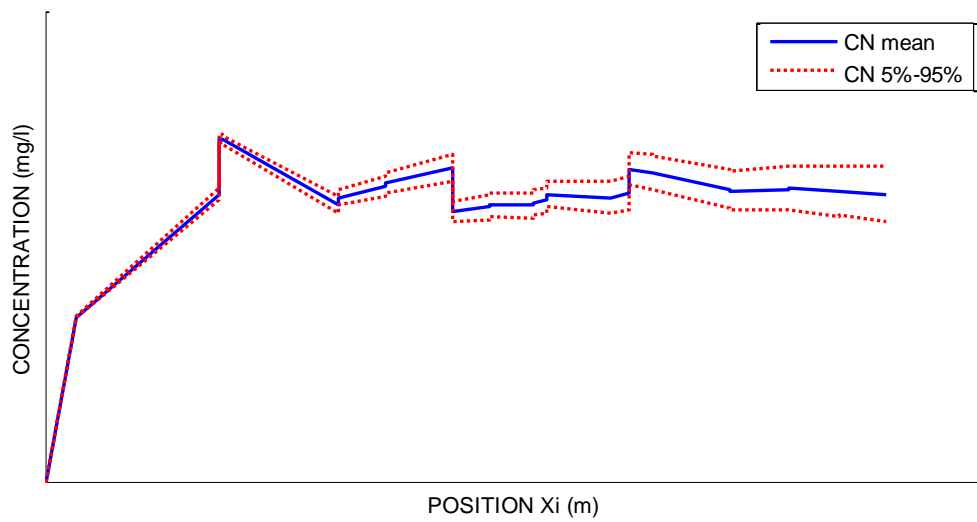
Διάγραμμα 2.3: Ενδεικτικό Διάγραμμα CN



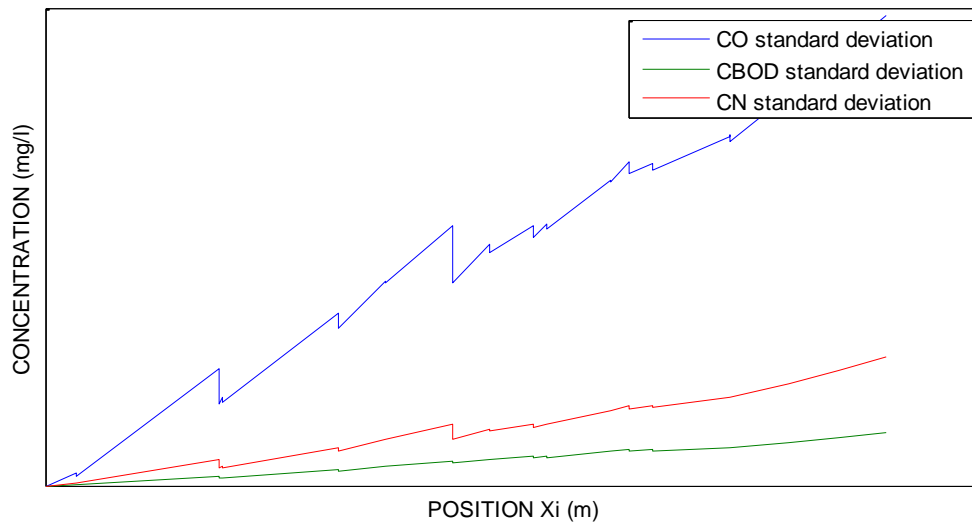
Διάγραμμα 2.4: Ενδεικτικό Διάγραμμα Μέσης Τιμής και Διαστήματος Εμπιστοσύνης CO



Διάγραμμα 2.5: Ενδεικτικό Διάγραμμα Μέσης Τιμής και Διαστήματος Εμπιστοσύνης CBOD



Διάγραμμα 2.6: Ενδεικτικό Διάγραμμα Μέσης Τιμής και Διαστήματος Εμπιστοσύνης CN



Διάγραμμα 2.7: Ενδεικτικό Διάγραμμα Τυπικών Αποκλίσεων CO, CBOD και CN

2.3.7 Η Χρήση της Εμφωλευμένης Δομής

Είναι προφανές, ότι για την επίλυση ενός υδάτινου τμήματος υπάρχει η απαίτηση να έχει ολοκληρωθεί η επίλυση όλων των προηγούμενων του. Η ικανοποίηση αυτής της συνθήκης εξασφαλίζεται με την εμφωλευμένη δομή των υπορουτίνων. Συγκεκριμένα, στην αρχή κάθε υπορουτίνας ζητείται από τον κώδικα η εκτέλεση της ίδιας της υπορουτίνας για το αμέσως προηγούμενο ή τα αμέσως προηγούμενα υδάτινα τμήματα. Με αυτό τον τρόπο, η επίλυση ενός υδάτινου τμήματος «παγώνει» μέχρι να επιλυθεί το προηγούμενο, η επίλυση του οποίου «παγώνει» μέχρι να επιλυθεί το προηγούμενο του κ.τ.λ. Η χρήση αυτής της δομής επιτρέπει στο πρόγραμμα να λύνει τη δενδροειδή μορφή του ποταμού με τη χρήση του στοιχείου της στήλης 16 του πίνακα δεδομένων εισόδου InputData, το οποίο δηλώνει σε ποιο υδάτινο τμήμα καταλήγει το κάθε υδάτινο τμήμα, χωρίς να υπάρχει περεταίρω απαίτηση για την καταχώρηση των δεδομένων εισόδου στον πίνακα InputData με κάποια συγκεκριμένη σειρά.

3 Ανάλυση Ευαισθησίας του Μοντέλου RISDOE

3.1 Ανάλυση Ευαισθησίας των Αποτελεσμάτων στις Παραμέτρους του Μοντέλου

Λόγω της αβεβαιότητας, που αναμένεται να υπάρχει κατά την εφαρμογή του μοντέλου σε σχέση με την εκλογή των τιμών των τεσσάρων παραμέτρων K_1 , K_2 , K_N και V , είναι σημαντικό να είναι γνωστός ο βαθμός, με τον οποίο επηρεάζει η τιμή της κάθε παραμέτρου τα αποτελέσματα. Ως εκ τούτου έγινε ανάλυση ευαισθησίας των αποτελεσμάτων ως προς τις τέσσερις παραμέτρους. Η ανάλυση έγινε με τη χρήση του κώδικα RISDOE1. Για κάθε μία από τις τέσσερις παραμέτρους, εξετάστηκαν τα αποτελέσματα για ένα φάσμα πιθανών τιμών που αντλήθηκαν από τη βιβλιογραφία και την έρευνα σε μετρημένες τιμές. Η εξέταση έγινε για κάθε παράμετρο ξεχωριστά με τις υπόλοιπες να διατηρούνται σταθερές. Για την ανάλυση ευαισθησίας χρησιμοποιήθηκε το υδρολογικό σύστημα του ποταμού Αλφειού (Εικόνα 3.1), στο οποίο εισήχθησαν ενδεικτικές παροχές και φορτία. Για τους σκοπούς της ανάλυσης ευαισθησίας θεωρήθηκαν τα τμήματα, που φαίνονται στην εικόνα ως υδάτινα τμήματα για την εφαρμογή του μοντέλου και εστιάστηκε η προσοχή στη διαδρομή από το υδάτινο τμήμα 57 ως τις εκβολές του ποταμού. Σημειώνεται επίσης, ότι το τμήμα του ποταμού από την τεχνητή λίμνη του Λάδωνα και ανάντη αγνοήθηκε στους υπολογισμούς, καθώς οι διεργασίες στη λίμνη απαιτούν διαφορετική προσομοίωση, και τα φορτία που δόθηκαν ως δεδομένα εισόδου δεν είναι τα πραγματικά. Για κάθε παράμετρο εξετάστηκαν εννέα τιμές. Τα αποτελέσματα των εννέα εκτελέσεων του προγράμματος για κάθε παράμετρο παρουσιάστηκαν σε συγκεντρωτικά διαγράμματα. Οι μέσες τιμές των παραμέτρων θεωρήθηκαν $0,3d^{-1}$, $0,3d^{-1}$, $0,6d^{-1}$, και $60000 m/d$ για τα K_1 , K_2 , K_N και V αντίστοιχα. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν δίνονται στη συνέχεια (Πίνακας 3.1).



Εικόνα 3.1: Το Σύστημα των Υδάτινων Τμημάτων του Ποταμού Αλφειού
 (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2011)

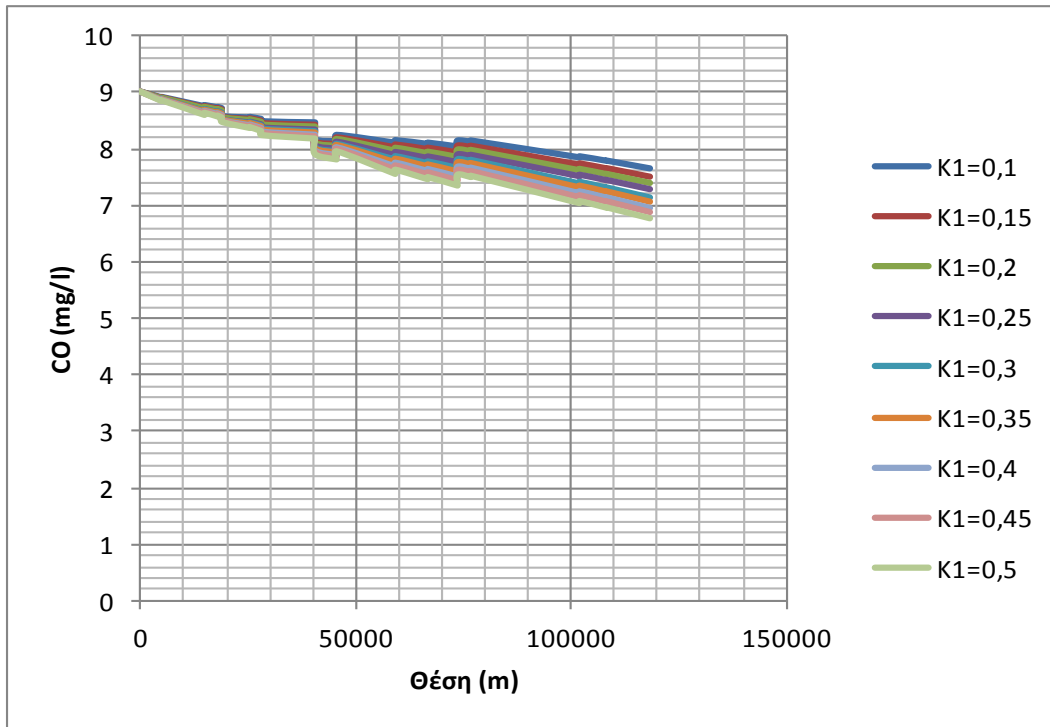
Πίνακας 3.1: Δεδομένα Εισόδου Ανάλυσης Ευαισθησίας

ΟΝΟΜΑ	ΜΗΚΟΣ (m)	ΜΗ ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΠΗΓΗ ΤΜΗΜΑΤΟΣ			Qαπορ (m ₃ /d)	ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΠΗΓΗ ΣΤΗΝ ΑΡΧΗ ΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ				V(m/d)	K ₁	K ₂	K _N	Osat (mg/l)	Καταλήγει στο
		CBOD (mg/l)	CN (mg/l)	CO (mg/l)		Q (m ₃ /d)	CBOD (mg/l)	CN (mg/l)	CO (mg/l)						
55	12693,5	2,9373116	1,6419759	9	11594,81	0	0	0	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	54
54	3047,86	1,0885244	0,8738901	9	7548,175	0	0	0	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	53
53	965,41	1,4228964	1,142331	9	117,8449	0	0	0	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	51
51	6490,42	0,984404	0,5551226	9	18567,89	4000	30	0,6	4	60000	0,3	0,6	0,3	9	50
50	2626,38	0,9235963	0,5211383	9	1040,948	0	0	0	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	44
44	12510,7	1,1379676	0,4918006	9	56952,58	0	0	0	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	43
43	5000	1,3938033	0,5978558	9	2672,513	8000	15	1	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	40
40	13602,6	1,3395538	0,5661361	9	26754,49	1	650000	50000	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	38
38	7540,1	1,4036711	0,6045734	9	12028,09	0	0	0	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	36
36	6904,99	4,7985593	2,4601937	9	13574,58	1	70000	30000	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	20
20	3046,65	3,1143476	1,7288388	9	19624,23	0	0	0	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	10
10	25246,6	4,2370425	2,5239215	9	58163,05	1000	30	0,5	2	60000	0,3	0,6	0,3	9	7
7	6175,61	0,8620832	2,3290286	9	14925,13	1	120000	3500	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	1
1	10140,4	6,0550556	6,3083154	9	10536,02	0	0	0	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	1000
59	4379,56	1,6305111	1,045797	9	2061,922	0	0	0	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	58
58	2500	2,2432015	0,9177359	9	11185,34	0	0	0	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	57
57	5000	1,6422712	0,9386906	9	8783,19	0	0	0	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	56
56	10000	3,561527	1,8602124	9	8080,802	0	0	0	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	54
52	20702,1	0,7625263	0,4719964	9	35544,68	0	0	0	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	51
49	13629,3	3,2003198	1,7765638	9	24305,34	0	0	0	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	48
48	5000	0,6547477	0,3652803	9	6799,268	0	0	0	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	47
47	5000	0	0	9	0	0	0	0	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	46
46	16668,3	1,6128358	0,7685728	9	20089,87	0	0	0	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	45
45	3331,65	1,6405447	0,781777	9	822,9395	0	0	0	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	44
42	14354,6	1,4078932	0,5974366	9	25534,56	0	0	0	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	41
41	10000	1,4191779	0,6042934	9	15557,96	1	12000	225	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	40
39	10652,3	0,7562275	0,3231172	9	14563,51	0	0	0	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	38
37	13888,8	3,7279231	1,3586601	9	8761,597	0	0	0	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	36
9	10476,1	6,7621044	4,5647485	9	13288,72	0	0	0	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	8
8	2500	3,119984	5,9215645	9	3646,548	0	0	0	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	7
25	23308,6	2,6832741	1,1497534	9	49597,76	0	0	0	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	22
22	4315,27	1,6802306	1,5273146	9	5957,594	1	10000	1200	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	21
21	5000	0,8209615	1,8745969	9	5896,646	0	0	0	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	20
24	4715,89	4,1076373	1,421554	9	4441,629	0	0	0	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	23
23	17500	2,5534038	1,1812276	9	25700,15	1	15000	10000	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	22
17	3188,99	1,9755109	0,8034475	9	6830,664	0	0	0	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	16
16	10000	2,0570258	0,8489972	9	25421,07	0	0	0	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	15
15	163,293	0	0	9	5,225236	0	0	0	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	11
11	39842,1	2,7136761	1,3574571	9	50807,7	0	0	0	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	10
14	2901,26	0	0	9	0	0	0	0	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	13
13	5000	2,327426	0,9840413	9	12273,52	0	0	0	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	12
12	2470,67	1,6838868	0,8553833	9	2520,806	0	0	0	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	11
19	4344,19	2,0776374	0,8020534	9	8050,206	2000	90	2	4	60000	0,3	0,6	0,3	9	18
18	7500	2,2353312	0,9241318	9	11968,19	0	0	0	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	15
4	17363,6	5,6991622	3,3773431	9	19141,95	0	0	0	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	3
3	4152,19	2,1610516	6,4595916	9	2073,064	0	0	0	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	2
2	2500	0,9511861	7,2870544	9	642,5124	23000	18	0,3	3	60000	0,3	0,6	0,3	9	91
6	9251,78	2,8817457	2,474713	9	15613,37	0	0	0	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	5
5	5000	1,3931802	3,219676	9	5656,867	0	0	0	0	60000	0,3	0,6	0,3	9	3

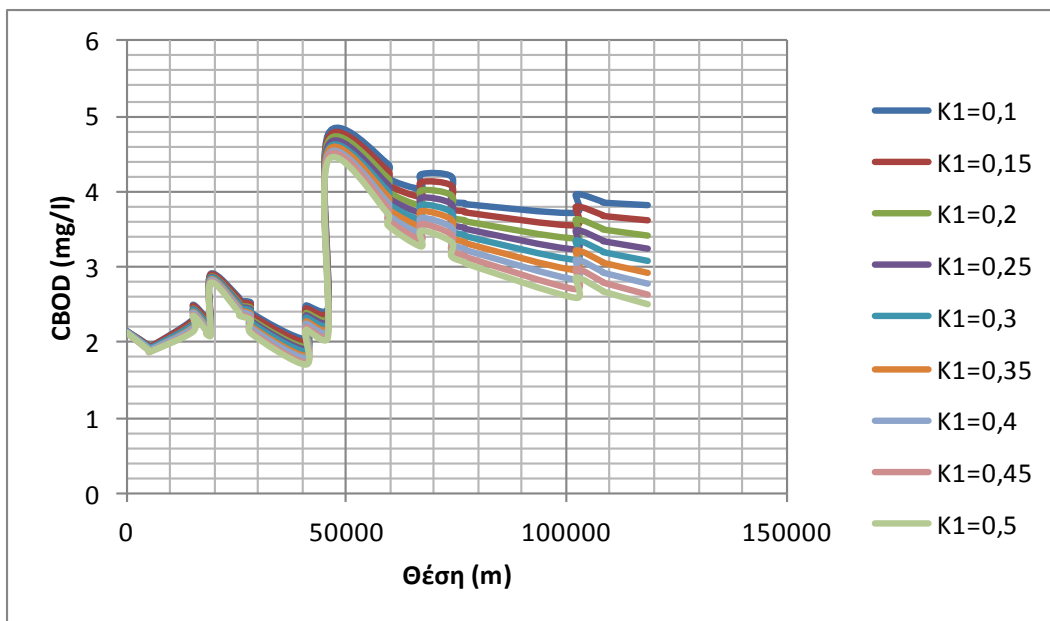
3.1.1 Ανάλυση Ευαισθησίας ως προς την παράμετρο K₁

Οι τιμές του συντελεστή βιοδιάσπασης K₁ για τη θερμοκρασία των 20°C θεωρείται ότι κυμαίνεται ανάμεσα σε 0,1 d⁻¹ και 0,5 d⁻¹ (Thomann & Mueller, 1987). Οπότε οι τιμές που εξετάστηκαν είναι οι 0,1 d⁻¹, 0,15 d⁻¹, 0,2 d⁻¹, 0,25 d⁻¹, 0,3 d⁻¹, 0,35 d⁻¹, 0,4 d⁻¹, 0,45 d⁻¹ και 0,5 d⁻¹. Τα αποτελέσματα των εννέα εκτελέσεων δίνονται στη συνέχεια.

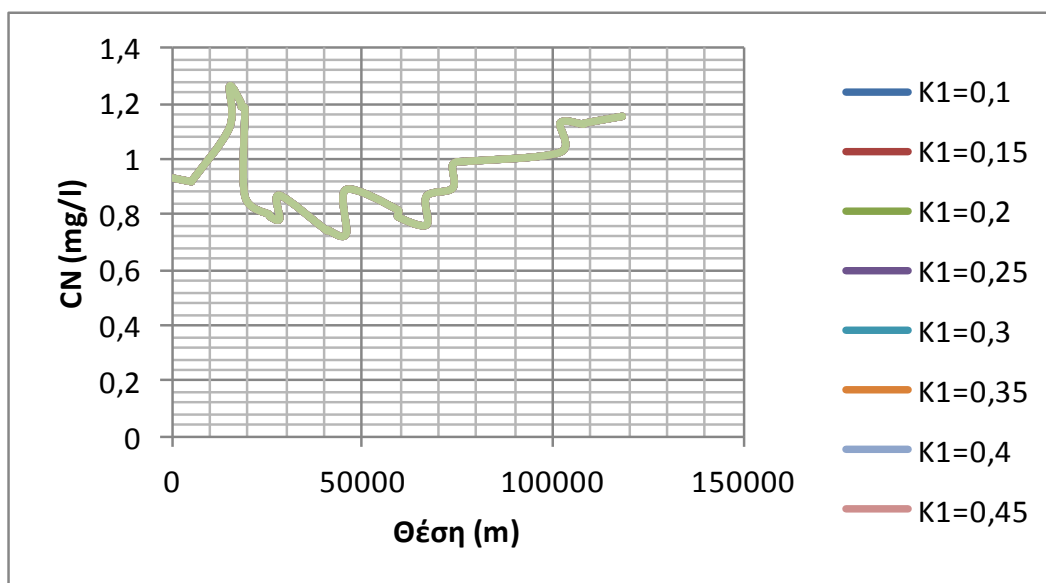
Στο Διάγραμμα 3.1 φαίνονται οι συγκεντρώσεις του διαλυμένου οξυγόνου κατά μήκος της επιλεγμένης διαδρομής (57-1) για τις εννέα τιμές του συντελεστή K₁. Οι υπόλοιπες παράμετροι είχαν τη μέση τους τιμή σε κάθε ένα από τα εννέα σενάρια. Αντίστοιχα, στο Διάγραμμα 2.2 φαίνεται η μεταβολή του προφίλ των συγκεντρώσεων CBOD ενώ στο Διάγραμμα 2.3 η μεταβολή του προφίλ των συγκεντρώσεων CN.



Διάγραμμα 3.1: Συγκεντρώσεις CO για 9 Τιμές του K_1

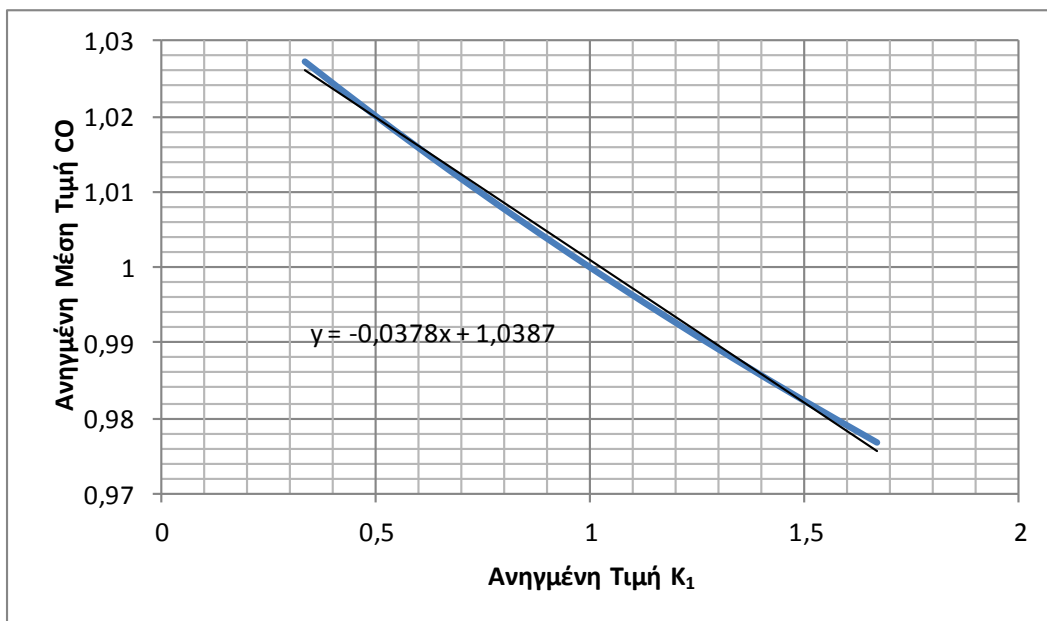


Διάγραμμα 3.2: Συγκεντρώσεις CBOD για 9 Τιμές του K_1

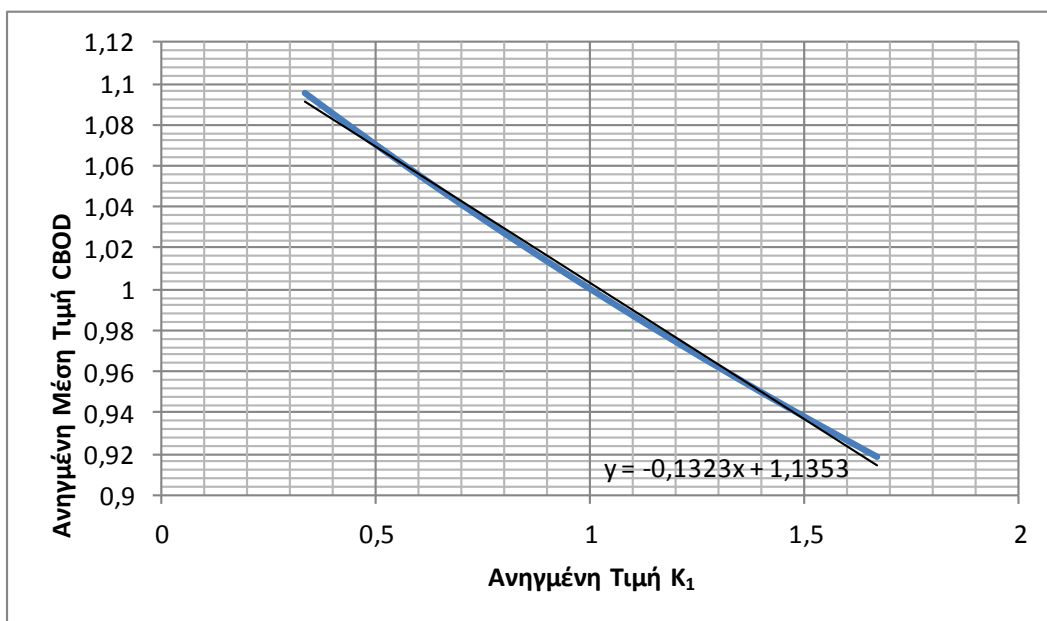


Διάγραμμα 3.3: Συγκεντρώσεις CN για 9 Τιμές του K_1

Όπως είναι αναμενόμενο, η μεταβολή του ρυθμού της διάσπασης του οργανικού άνθρακα δεν επηρεάζει τις συγκεντρώσεις του ολικού αζώτου προς νιτροποίηση κατά μήκος του ποταμού. Για τη μελέτη της επιρροής της ευαισθησίας του διαλυμένου οξυγόνου και της συγκέντρωσης του BOD έγινε σύγκριση της μεταβολής του συντελεστή με τη μεταβολή της μέσης τιμής των συγκεντρώσεων κατά μήκος της διαδρομής. Οι ανηγμένες μέσες τιμές των συγκεντρώσεων που χρησιμοποιήθηκαν, προέκυψαν με διαίρεση της κάθε μέσης τιμής συγκέντρωσης με την αντίστοιχη μέση τιμή της συγκέντρωσης, που προέκυψε για το σενάριο, όπου η παράμετρος K_1 έχει τη μέση της τιμή, δηλαδή $0,3 \text{ d}^{-1}$. Όμοια, οι ανηγμένες τιμές του K_1 προέκυψαν με διαίρεση των εννέα τιμών, που χρησιμοποιήθηκαν, με τη μέση του τιμή. Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται τα ζεύγη των ανηγμένων τιμών μέσης συγκέντρωσης και συντελεστή K_1 (Διάγραμμα 3.4 και Διάγραμμα 3.5 αντίστοιχα).



Διάγραμμα 3.4: Ανηγμένη Συγκέντρωσης CO-Ανηγμένη Τιμή K_1

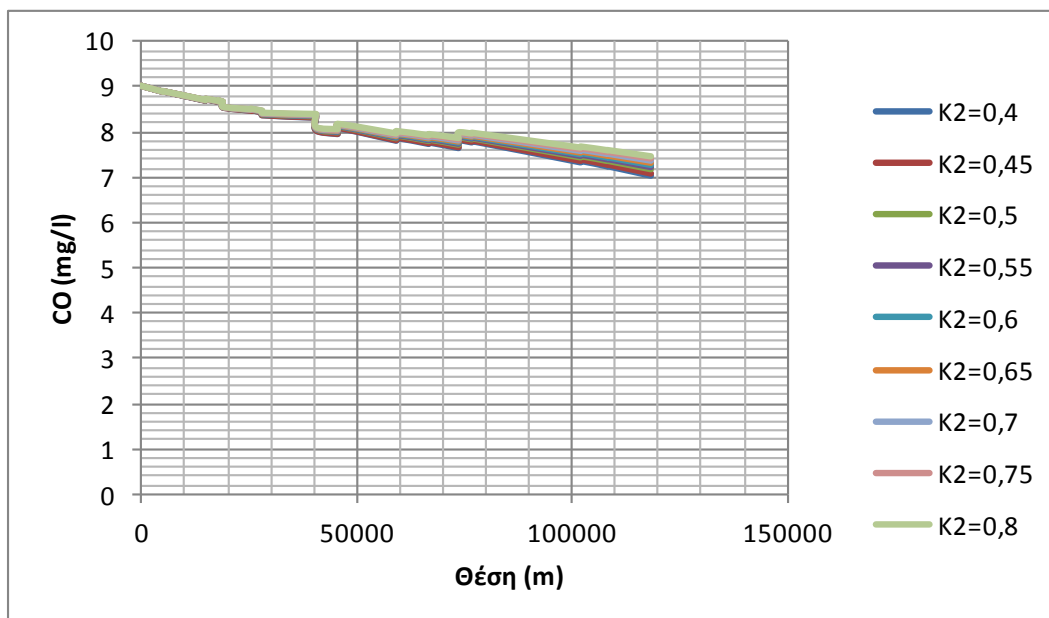


Διάγραμμα 3.5: Ανηγμένη Συγκέντρωσης CBOD-Ανηγμένη Τιμή K_1

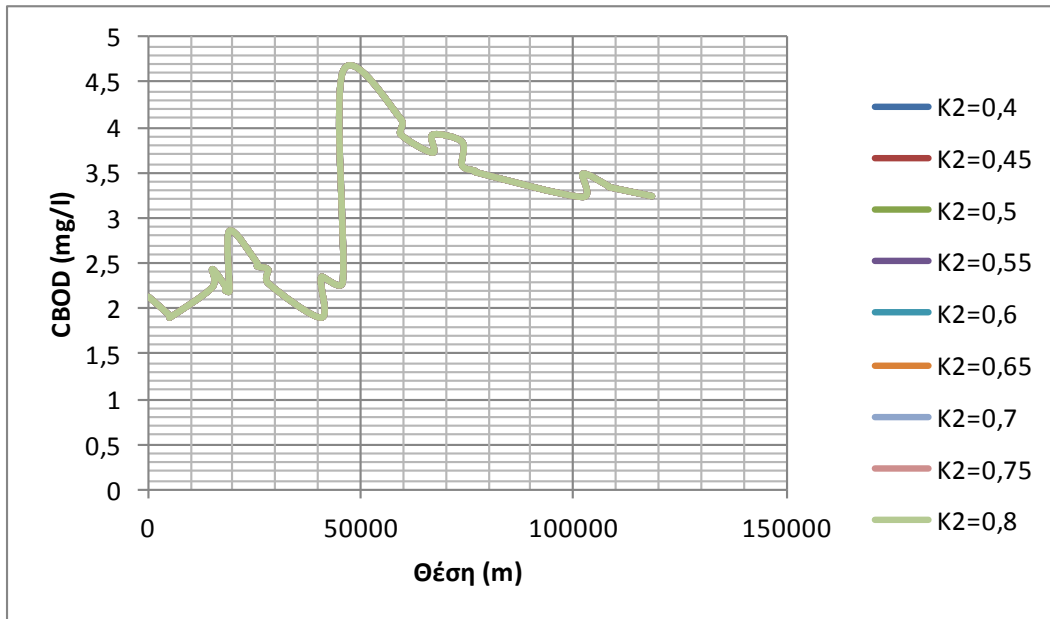
Η προσαρμογή γραμμικής σχέσης στα στοιχεία, η οποία φαίνεται στα διαγράμματα, επιτρέπει την εξαγωγή συμπερασμάτων σε σχέση με την ευαισθησία του κάθε ποιοτικού χαρακτηριστικού στη μεταβολή του συντελεστή K_1 . Συνεπώς, η αύξηση κατά 10% του K_1 , οδηγεί σε μείωση των μέσων συγκεντρώσεων διαλυμένου οξυγόνου στο ποτάμι κατά περίπου 0,4%. Η ευαισθησία του CBOD φαίνεται να είναι τριπλάσια εκείνης του CO. Συγκεκριμένα αύξηση 10% του K_1 οδηγεί σε μείωση κατά περίπου 1,3% της μέσης συγκέντρωσης CBOD.

3.1.2 Ανάλυση Ευαισθησίας ως προς την παράμετρο K_2

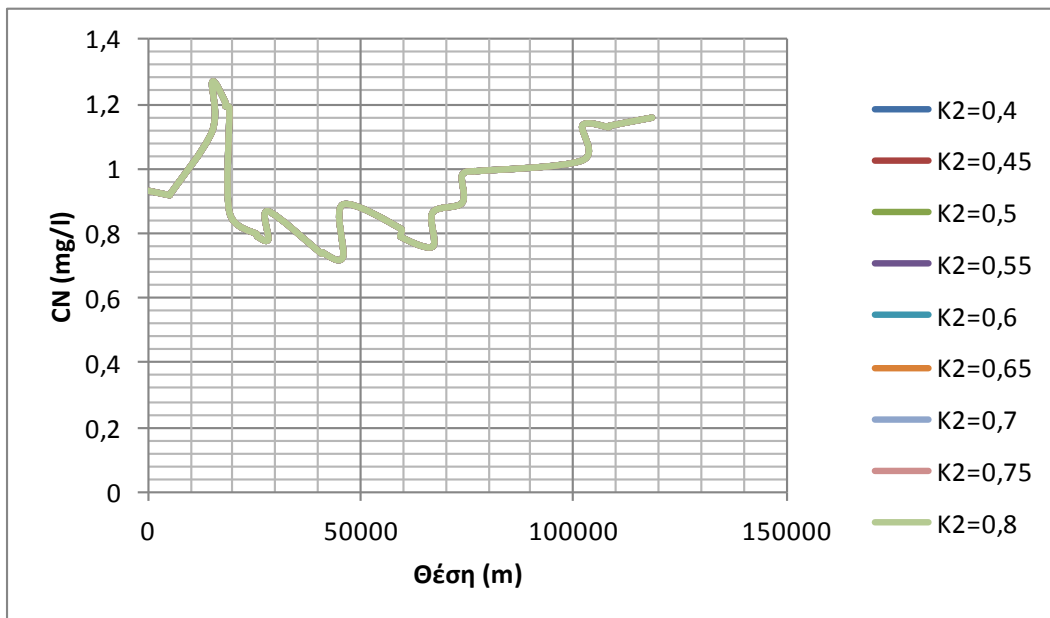
Οι τιμές του συντελεστή επαναερισμού K_2 για σε ποταμούς με μέτρια ταχύτητα κυμαίνεται συνήθως σε τιμές διπλάσιες ως και τριπλάσιες από τις τιμές του K_1 (Jolankai, 1997). Εξετάστηκαν οπότε οι τιμές ανάμεσα σε $0,4 \text{ d}^{-1}$ και $0,8 \text{ d}^{-1}$, δηλαδή οι $0,4 \text{ d}^{-1}$, $0,45 \text{ d}^{-1}$, $0,5 \text{ d}^{-1}$, $0,55 \text{ d}^{-1}$, $0,6 \text{ d}^{-1}$, $0,65 \text{ d}^{-1}$, $0,7 \text{ d}^{-1}$, $0,75 \text{ d}^{-1}$ και $0,8 \text{ d}^{-1}$. Τα αποτελέσματα των εννέα εκτελέσεων δίνονται στα παρακάτω διαγράμματα (Διάγραμμα 3.6, Διάγραμμα 3.7 και Διάγραμμα 3.8) ως τιμές των συγκεντρώσεων των τριών ποιοτικών χαρακτηριστικών CO, CBOD και CN κατά μήκος της επιλεγμένης διαδρομής για τις εννέα τιμές του συντελεστή K_2 .



Διάγραμμα 3.6: Συγκεντρώσεις CO για 9 Τιμές του K_2

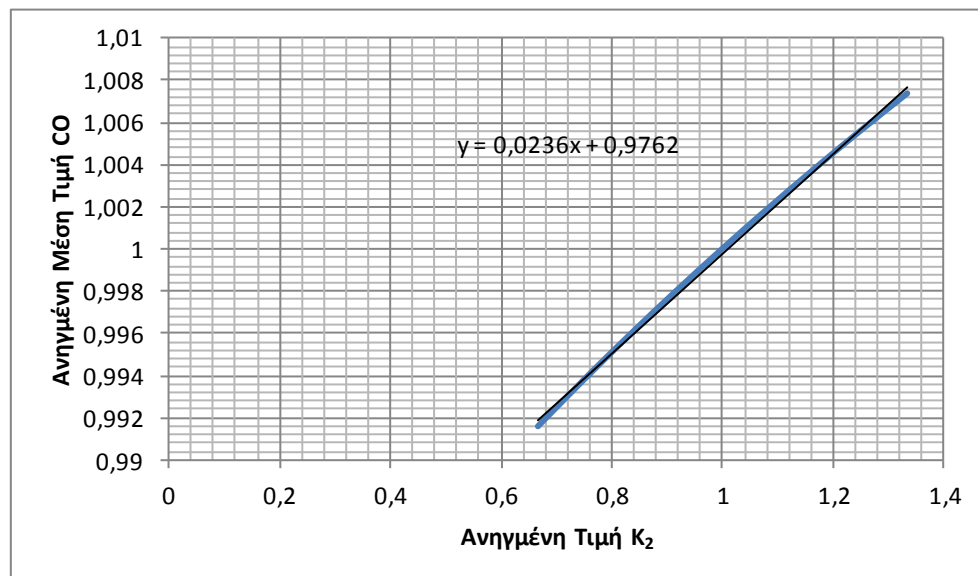


Διάγραμμα 3.7: Συγκεντρώσεις CBOD για 9 Τιμές του K_2



Διάγραμμα 3.8: Συγκεντρώσεις CN για 9 Τιμές του K_2

Είναι αναμενόμενο, η μεταβολή του ρυθμού του επαναερισμού να επηρεάζει μόνο τη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου. Για τη μελέτη της επιρροής της ευαισθησίας του διαλυμένου οξυγόνου έγινε σύγκριση της μεταβολής του συντελεστή K_2 με τη μεταβολή της μέσης τιμής της συγκέντρωσης CO κατά μήκος της διαδρομής. Οι ανηγμένες μέσες τιμές των συγκεντρώσεων που χρησιμοποιήθηκαν, προέκυψαν με διαίρεση της κάθε μέσης τιμής συγκέντρωσης με την αντίστοιχη μέση τιμή της συγκέντρωσης, που προέκυψε για το σενάριο, όπου η παράμετρος K_2 έχει τη μέση της τιμή, δηλαδή $0,6 \text{ d}^{-1}$. Για τις ανηγμένες τιμές του K_2 έγινε διαίρεση των εννέα τιμών, που χρησιμοποιήθηκαν, με τη μέση του τιμή. Στο Διάγραμμα 3.9 παρουσιάζονται τα ζεύγη των ανηγμένων τιμών της μέσης συγκέντρωσης CO και του συντελεστή K_2 .

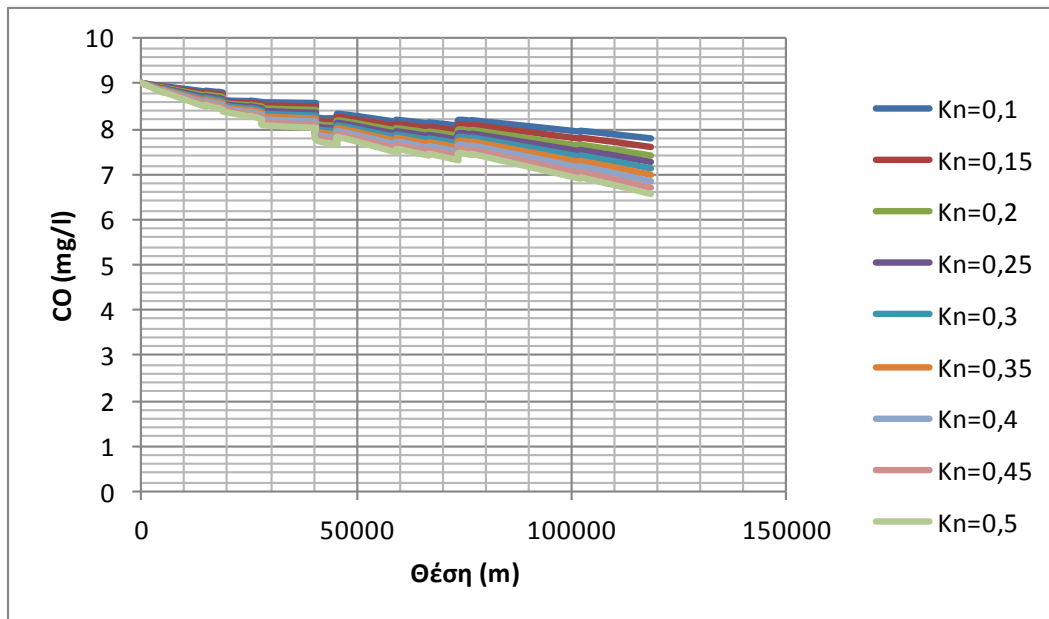


Διάγραμμα 3.9: Ανηγμένη Συγκέντρωση CO-Ανηγμένη Τιμή K_2

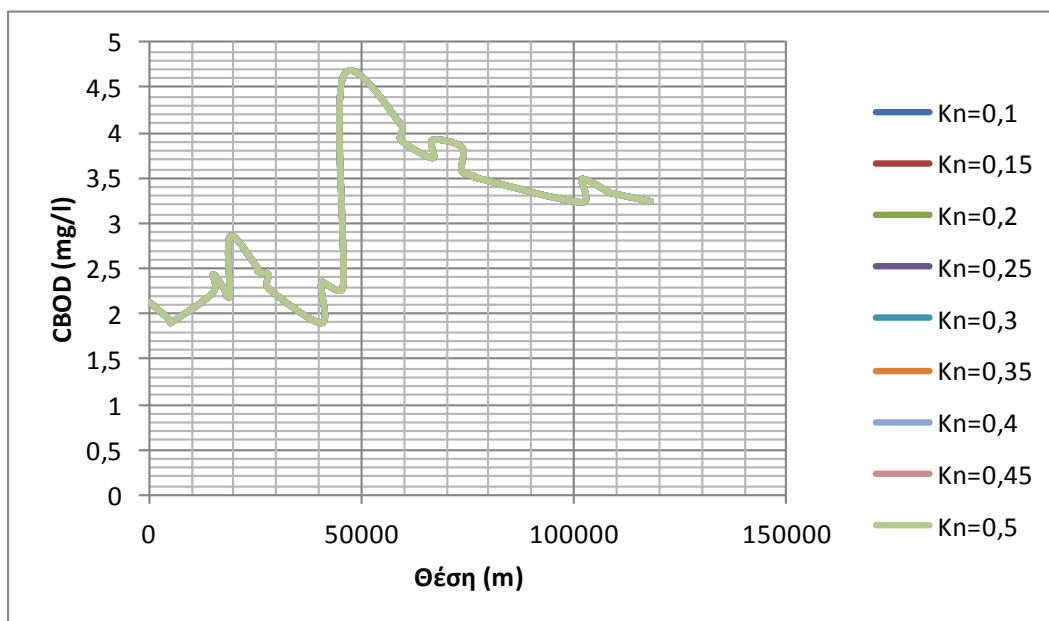
Από τη γραμμική σχέση, η οποία μπορεί να περιγράψει τη μεταβολή της μέσης ανηγμένης συγκέντρωσης CO σε σχέση με τη μεταβολή της ανηγμένης τιμής της παραμέτρου K_2 , εξάγεται το συμπέρασμα, ότι η μεταβολή του ρυθμού επαναερισμού οδηγεί σε μεταβολή των συγκεντρώσεων του διαλυμένου οξυγόνου κατά 0,02% περίπου της μεταβολής του. Οπότε, μείωση του ρυθμού επαναερισμού κατά 10% αναμένεται να οδηγήσει σε μείωση των συγκεντρώσεων του διαλυμένου οξυγόνου κατά 0,2%.

3.1.3 Ανάλυση Ευαισθησίας ως προς την παράμετρο K_N

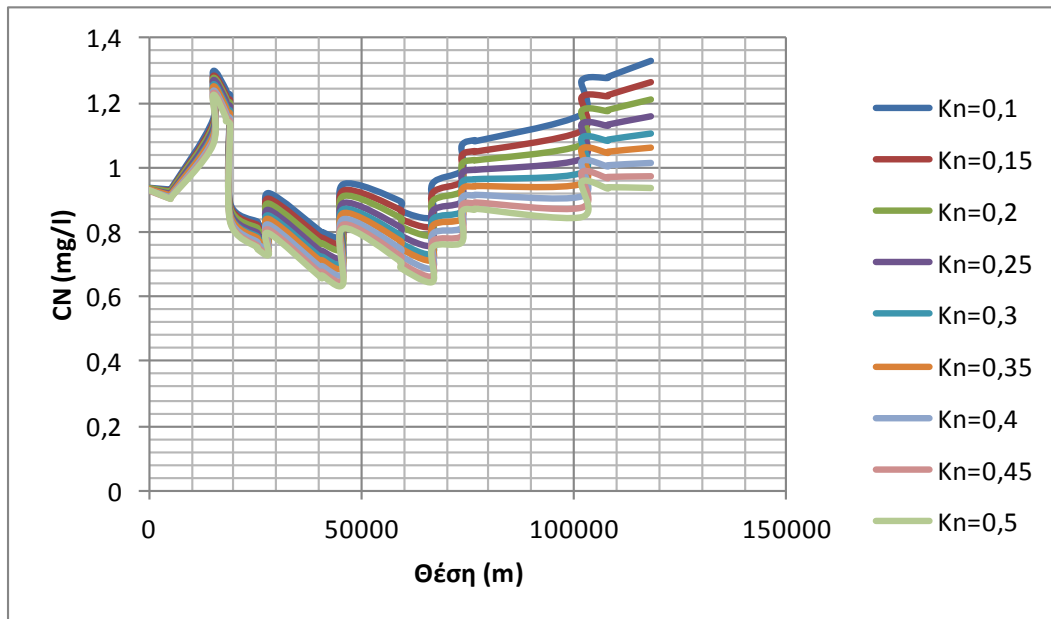
Οι τιμές του συντελεστή βιοδιάσπασης K_N έχει εκτιμηθεί ότι κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα με εκείνων του K_1 (Thomann & Mueller, 1987). Οπότε, οι τιμές που εξετάστηκαν είναι οι $0,1 \text{ d}^{-1}$, $0,15 \text{ d}^{-1}$, $0,2 \text{ d}^{-1}$, $0,25 \text{ d}^{-1}$, $0,3 \text{ d}^{-1}$, $0,35 \text{ d}^{-1}$, $0,4 \text{ d}^{-1}$, $0,45 \text{ d}^{-1}$ και $0,5 \text{ d}^{-1}$. Τα αποτελέσματα των εννέα εκτελέσεων φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα (Διάγραμμα 3.10, Διάγραμμα 3.11 και Διάγραμμα 3.12).



Διάγραμμα 3.10: Συγκεντρώσεις CO για 9 Τιμές του K_N

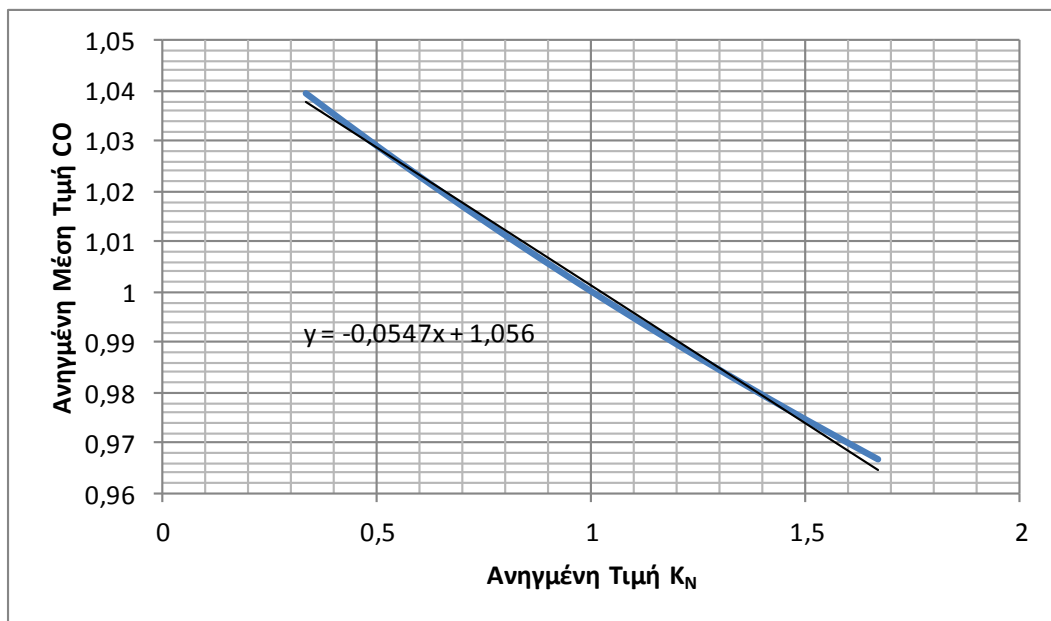


Διάγραμμα 3.11: Συγκεντρώσεις CBOD για 9 Τιμές του K_N

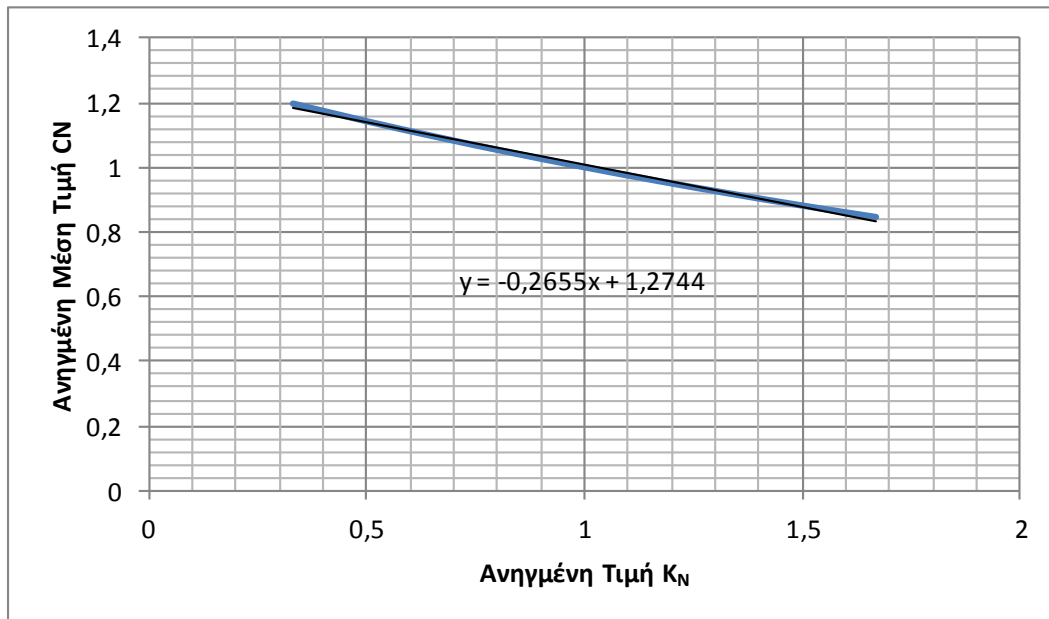


Διάγραμμα 3.12: Συγκεντρώσεις CN για 9 Τιμές του K_N

Δεδομένου, ότι ο συντελεστής K_N αφορά στη νιτροποίηση του αζώτου, η μεταβολή του δεν επηρεάζει τις συγκεντρώσεις CBOD. Η μεταβολή των μέσων ανηγμένων συγκεντρώσεων του διαλυμένου οξυγόνου και του ολικού προς απονιτροποίηση αζώτου κατά μήκος του ποταμού σε συνάρτηση με τις ανηγμένες τιμές του K_N δίνονται στο Διάγραμμα 3.13 και στο Διάγραμμα 3.14 αντίστοιχα.



Διάγραμμα 3.13: Ανηγμένη Συγκέντρωσης CO-Ανηγμένη Τιμή K_N



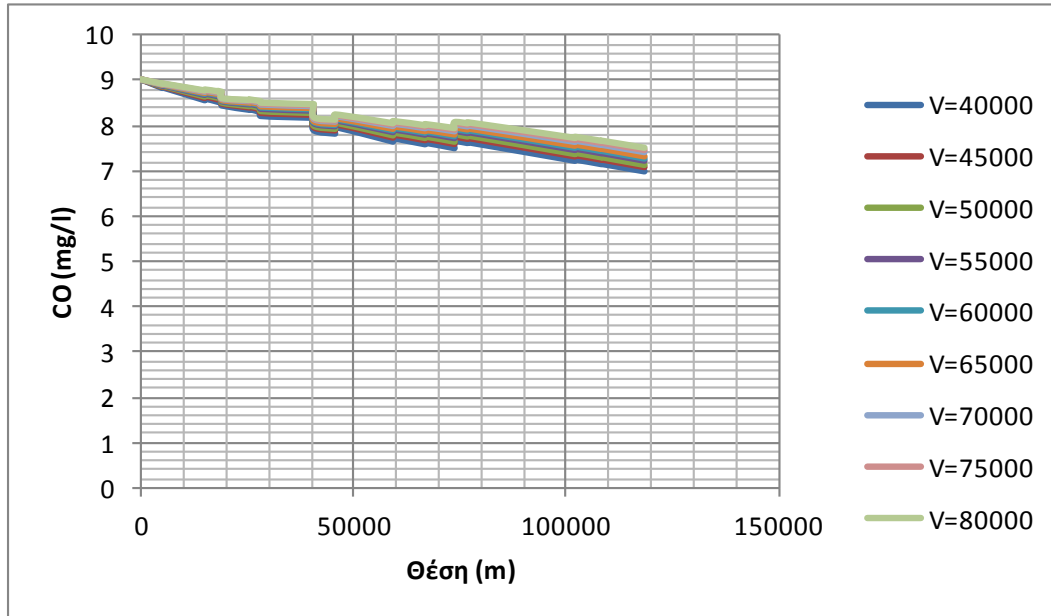
Διάγραμμα 3.14: Ανηγμένη Συγκέντρωση CN-Ανηγμένη Τιμή K_N

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει η αναλογία της μεταβολής των συγκεντρώσεων με τη μεταβολή του συντελεστή K_N . Συγκεκριμένα, αύξηση κατά 10% του ρυθμού νιτροποίησης οδηγεί σε περίπου 0,5% μείωση του διαλυμένου οξυγόνου και περίπου 2,5% μείωση του ολικού αζώτου προς νιτροποίηση. Σημειώνεται, ότι η ευαισθησία των συγκεντρώσεων CN σε μεταβολές του ρυθμού νιτροποίησης είναι μεγαλύτερη από την ευαισθησία των συγκεντρώσεων CBOD σε σχέση με τη μεταβολή του ρυθμού βιοδιάσπασης οργανικού άνθρακα. Η διαφορά αυτή οφείλεται στη διαφορά τάξης μεγέθους των δύο συγκεντρώσεων, αφού τα φορτία του αζώτου υστερούν σημαντικά των φορτίων BOD. Παρά ταύτα, ο ρυθμός της νιτροποίησης, φαίνεται να επηρεάζει πιο έντονα τις συγκεντρώσεις του διαλυμένου οξυγόνου. Αυτό συμβαίνει λόγω της αναγωγής της συγκέντρωσης CN σε όρους βιολογικής απαίτησης οξυγόνου NBOD ($NBOD = 4,57CN$, βλέπε 2.1.2.2). Για τα φορτία του οργανικού άνθρακα η αναγωγή αυτή γίνεται ήδη κατά την είσοδο των φορτίων, αφού αυτά εισάγονται στο μοντέλο ως βιολογικά απαιτούμενο οξυγόνο BOD.

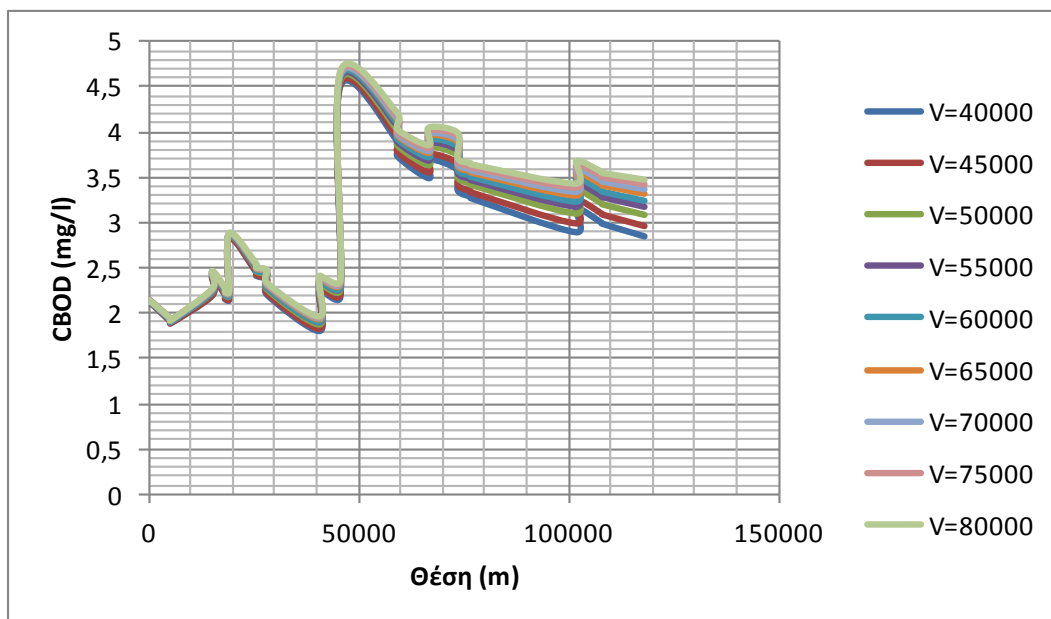
3.1.4 Ανάλυση Ευαισθησίας ως προς την παράμετρο V

Οι τιμές της ταχύτητας εκτιμήθηκε ότι κυμαίνεται ανάμεσα σε 40000 m/d και 80000 m/d. Οπότε οι τιμές που εξετάστηκαν είναι οι 40000 m/d, 45000 m/d, 50000 m/d, 55000 m/d, 60000 m/d, 65000 m/d, 70000 m/d, 75000 m/d και

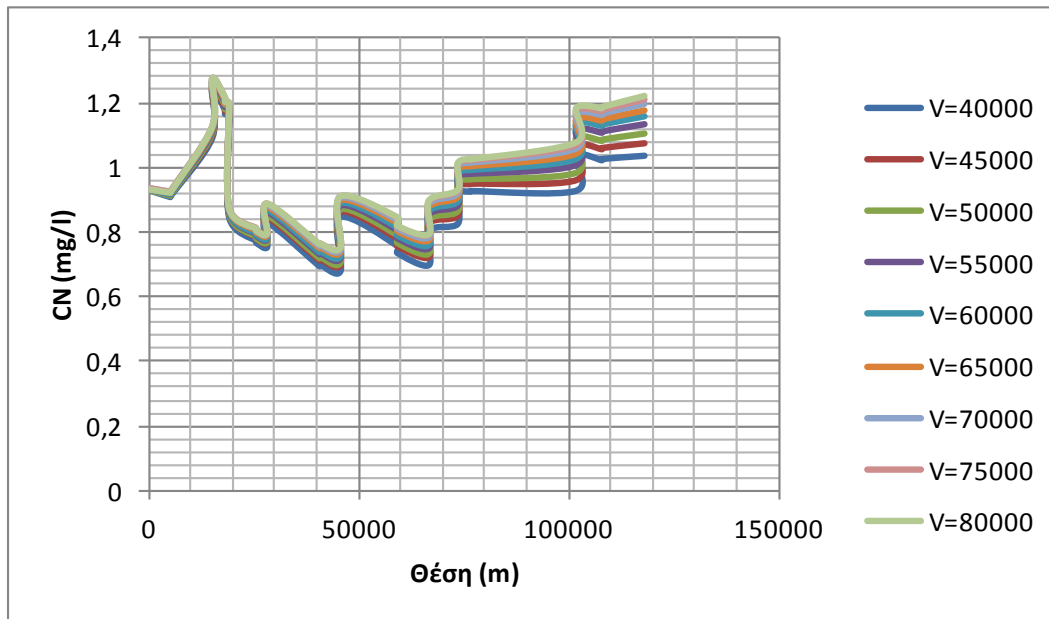
80000 m/d. Τα αποτελέσματα των εννέα εκτελέσεων δίνονται στα παρακάτω διαγράμματα (Διάγραμμα 3.15, Διάγραμμα 3.16 και Διάγραμμα 3.17).



Διάγραμμα 3.15: Συγκεντρώσεις CO για 9 Τιμές του V

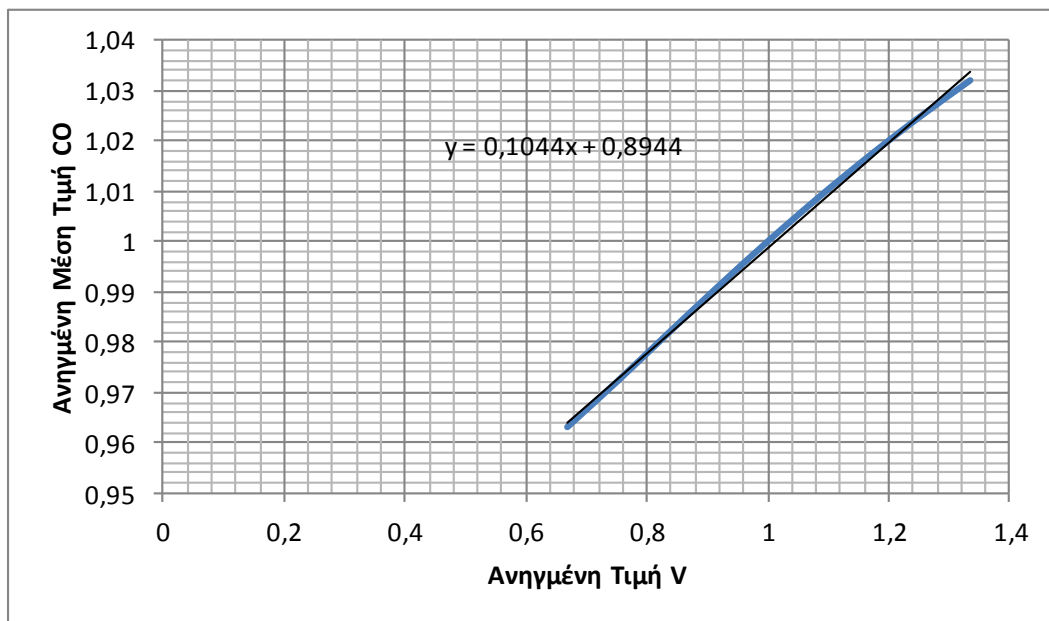


Διάγραμμα 3.16: Συγκεντρώσεις CBOD για 9 Τιμές του V

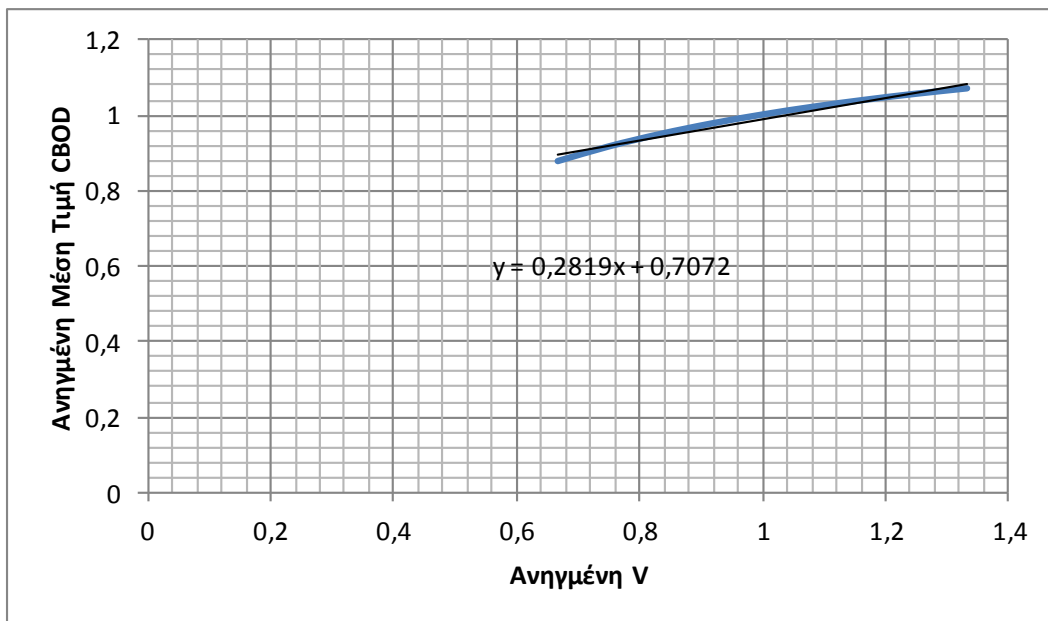


Διάγραμμα 3.17: Συγκεντρώσεις CN για 9 Τιμές του V

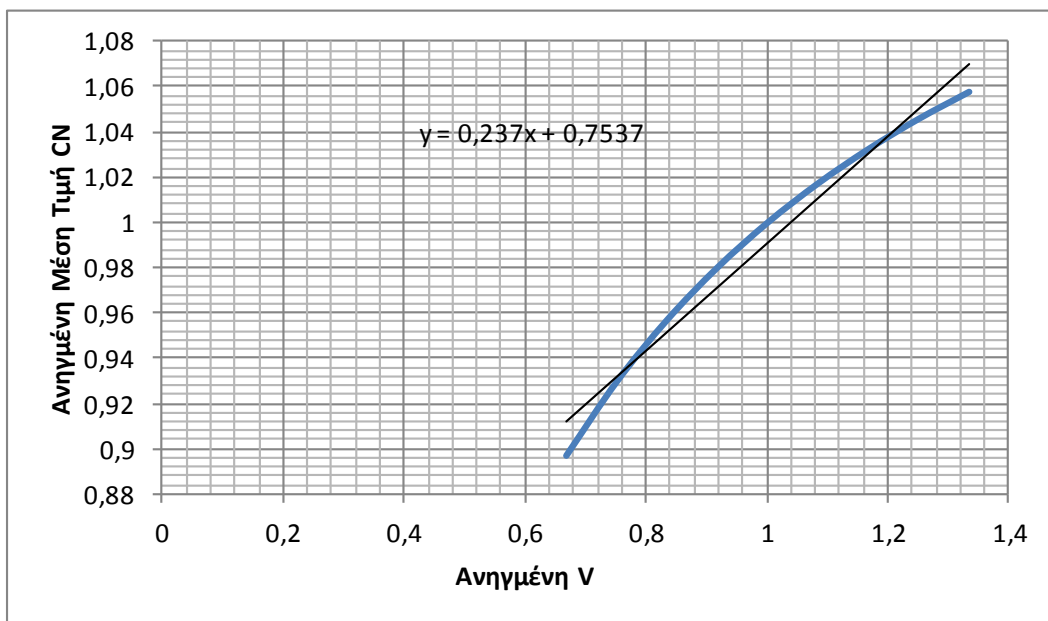
Η ταχύτητα ροής είναι η μόνη παράμετρος από τις τέσσερις, της οποίας η μεταβολή επηρεάζει τις συγκεντρώσεις και των τριών ποιοτικών χαρακτηριστικών. Στα επόμενα τρία διαγράμματα (Διάγραμμα 3.18, Διάγραμμα 3.19 και Διάγραμμα 3.20) φαίνεται η μεταβολή της ανηγμένης μέσης τιμής των συγκεντρώσεων συναρτήσει της μεταβολής της ταχύτητας ροής V .



Διάγραμμα 3.18: Ανηγμένη Συγκέντρωσης CO-Ανηγμένη Τιμή V



Διάγραμμα 3.19: Ανηγμένη Συγκέντρωσης CBOD-Ανηγμένη Τιμή V



Διάγραμμα 3.20: Ανηγμένη Συγκέντρωσης CN-Ανηγμένη Τιμή V

Όπως φαίνεται στα παραπάνω διαγράμματα η καμπύλη της μεταβολής των τριών συγκεντρώσεων σε σχέση με τη μεταβολή της ταχύτητας περιγράφεται πιο καλά από δευτεροβάθμια συνάρτηση. Παρά ταύτα εκτιμάται ότι η προσέγγιση της γραμμικής σχέσης είναι ικανοποιητική για τους σκοπούς της ανάλυσης ευαισθησίας. Παρατηρείται λοιπόν, ότι η μείωση κατά 10% της ταχύτητας οδηγεί σε περίπου 1% μείωση των συγκεντρώσεων του διαλυμένου οξυγόνου και περίπου 2,5% μείωση των συγκεντρώσεων CBOD και CN.

3.1.5 Συνολική Επισκόπηση της Ευαισθησίας στις 4 Παραμέτρους

Παρακάτω (Πίνακας 3.2) παρουσιάζονται τα ποσοστά επιρροής των τεσσάρων παραμέτρων, οι οποίες εξετάστηκαν.

Πίνακας 3.2: Ποσοστιαία Επιρροή Παραμέτρων στις Συγκεντρώσεις των Ποιοτικών Χαρακτηριστικών

Παράμετρος Ποιοτικό Χαρακτηριστικό	K_1	K_2	K_N	V
CO	-3,80%	2,40%	-5,50%	10,00%
CBOD	-13,00%	0,00%	0,00%	28,00%
CN	0,00%	0,00%	-27,00%	24,00%

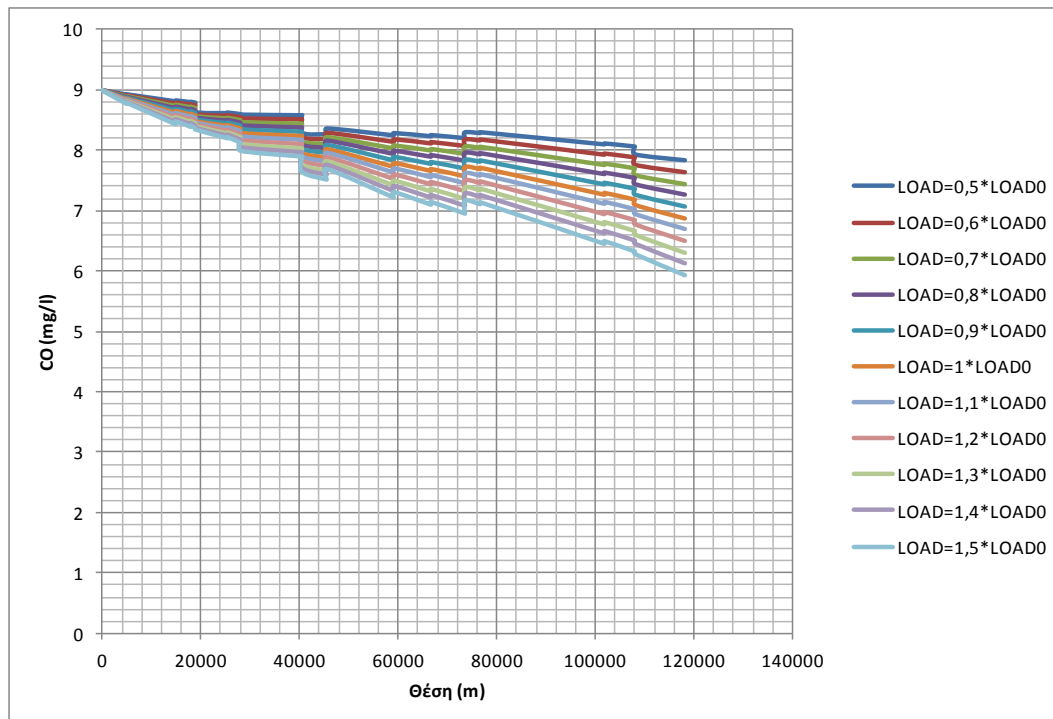
Είναι φανερό, ότι η μεγαλύτερη ευαισθησία των αποτελεσμάτων του μοντέλου είναι στην ταχύτητα ροής, η οποία επηρεάζει έντονα τις συγκεντρώσεις και των τριών ποιοτικών χαρακτηριστικών. Σημειώνεται επιπλέον η σημαντική επιρροή των συντελεστών βιοδιάσπασης οργανικού άνθρακα K_1 και νιτροποίησης K_N στις συγκεντρώσεις CBOD και CN αντίστοιχα, η οποία όμως δεν συνοδεύεται από επιρροή ανάλογης σημασίας στη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου. Συνεπώς, για την εξέταση της συγκέντρωσης του οξυγόνου πρέπει να δίνεται προσοχή στην εκλογή και των τεσσάρων παραμέτρων με ιδιαίτερη έμφαση στην ταχύτητα ροής.

3.2 Η Επίδραση των Ρυπαντικών Φορτίων και των Παροχών του Ποταμού

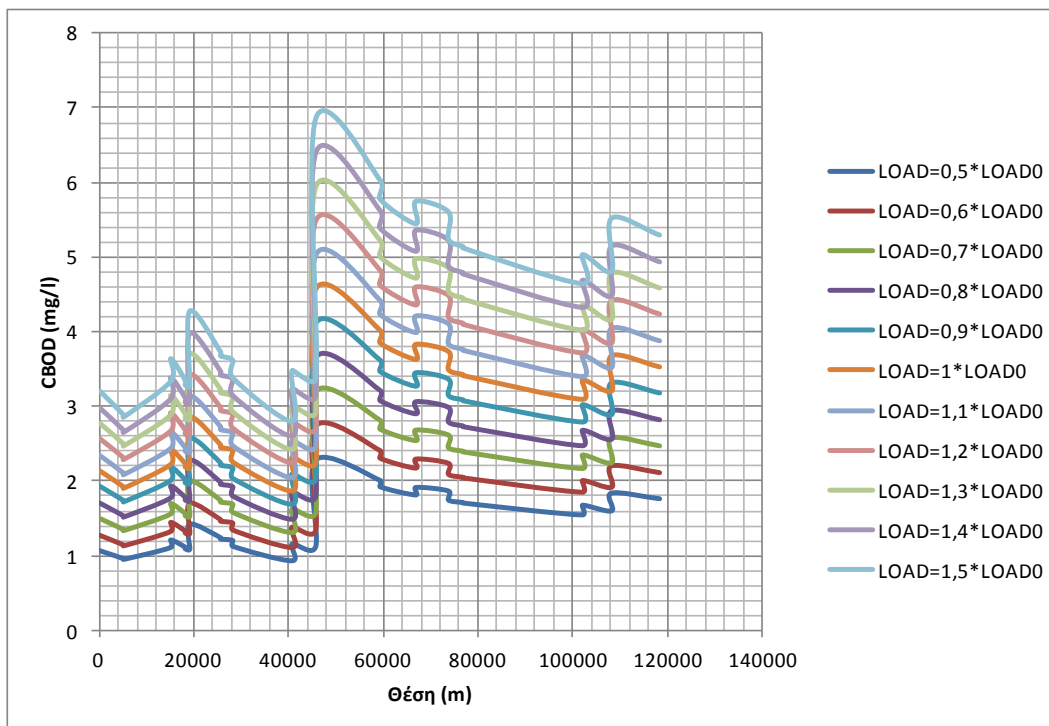
Παρακάτω παρουσιάζεται Ανάλυση Ευαισθησίας, που έγινε στα εισερχόμενα φορτία και τις παροχές του συστήματος. Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκε και πάλι το υδρολογικό σύστημα του ποταμού Αλφειού (Εικόνα 3.1). Η ανάλυση αυτή είναι σημαντική κυρίως για τον καθορισμό της σημασίας της ακρίβειας των υδρολογικών στοιχείων σε σχέση με τις παροχές και για την επίλυση προβλημάτων κατανομής διάθεσης ρύπων ως διαχειριστικό μέτρο. Για την ανάλυση εκτελέστηκαν έντεκα επαναλήψεις για τιμές φορτίων από 50% μειωμένες ως 50% αυξημένες σε σχέση με τις τιμές του πίνακα δεδομένων (Πίνακας 3.1). Έπειτα εξετάστηκε με τον ίδιο τρόπο η επιρροή των παροχών.

3.2.1 Ανάλυση Ευαισθησίας των Αποτελεσμάτων στα Φορτία

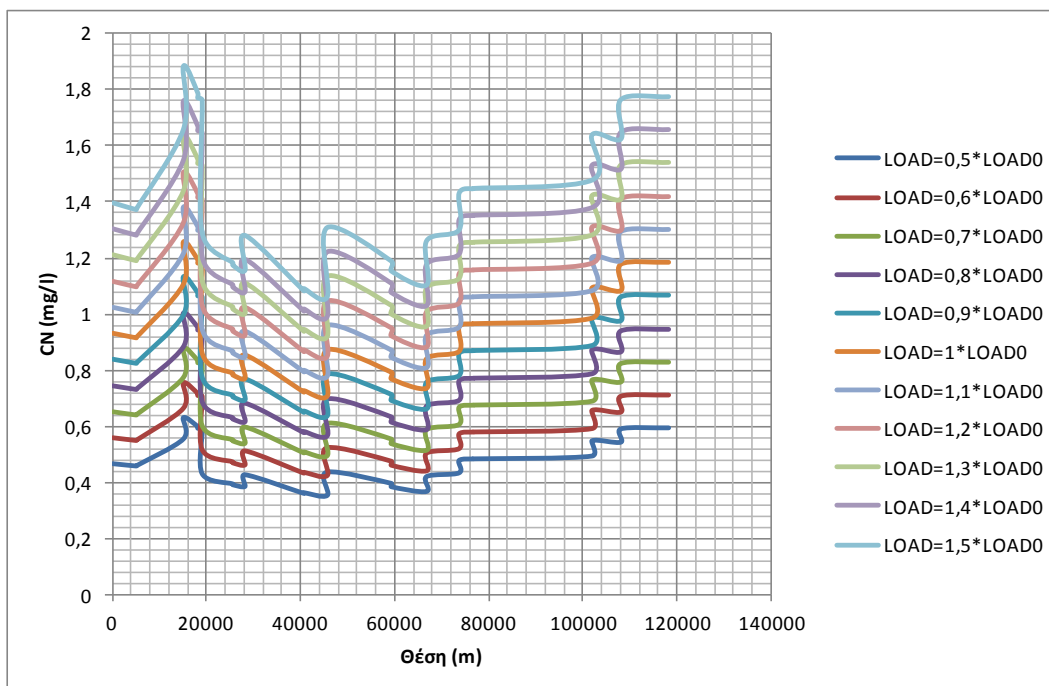
Για τη διερεύνηση της επιρροής της μεταβολής των φορτίων στα αποτελέσματα του μοντέλου RISDOE, εκτελέστηκε ο κώδικας έντεκα φορές με τον πίνακα δεδομένων, που χρησιμοποιήθηκε και στην ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων (Πίνακας 3.1). Σε κάθε επανάληψη τα στοιχεία της τρίτης, τέταρτης, όγδοης και ένατης στήλης, τα οποία αφορούν στη μη σημειακή και τη σημειακή ρύπανση αντίστοιχα αυξανόντουσαν κατά 10% σε σχέση με τα στοιχεία της προηγούμενης επανάληψης. Η πρώτη επανάληψη ήταν για τα μισά φορτία από αυτά του αρχικού πίνακα, ενώ η τελευταία επανάληψη εκτελέστηκε με αυξημένα κατά 50% τα φορτία εισόδου του συστήματος. Τα αποτελέσματα των συγκεντρώσεων του διαλυμένου οξυγόνου CO, του βιολογικά απαιτούμενου οξυγόνου για τη διάσπαση του οργανικού άνθρακα CBOD και του ολικού αζώτου προς απονιτροποίηση CN για το σύνολο των επαναλήψεων φαίνονται κατά αντίστοιχη σειρά στα πρώτα τρία διαγράμματα παρακάτω (Διάγραμμα 3.21, Διάγραμμα 3.22 και Διάγραμμα 3.23). Στα επόμενα τρία διαγράμματα δίνεται η σχέση της ποσοστιαίας μεταβολής των φορτίων (με τη μορφή του ποσοστού του Μέσου Φορτίου, δηλαδή του φορτίου του αρχικού Πίνακα Δεδομένων Εισόδου) σε σχέση με τη μεταβολή της μέσης ανηγμένης συγκέντρωσης των τριών ποιοτικών παραμέτρων (Διάγραμμα 3.24, Διάγραμμα 3.25 και Διάγραμμα 3.26).



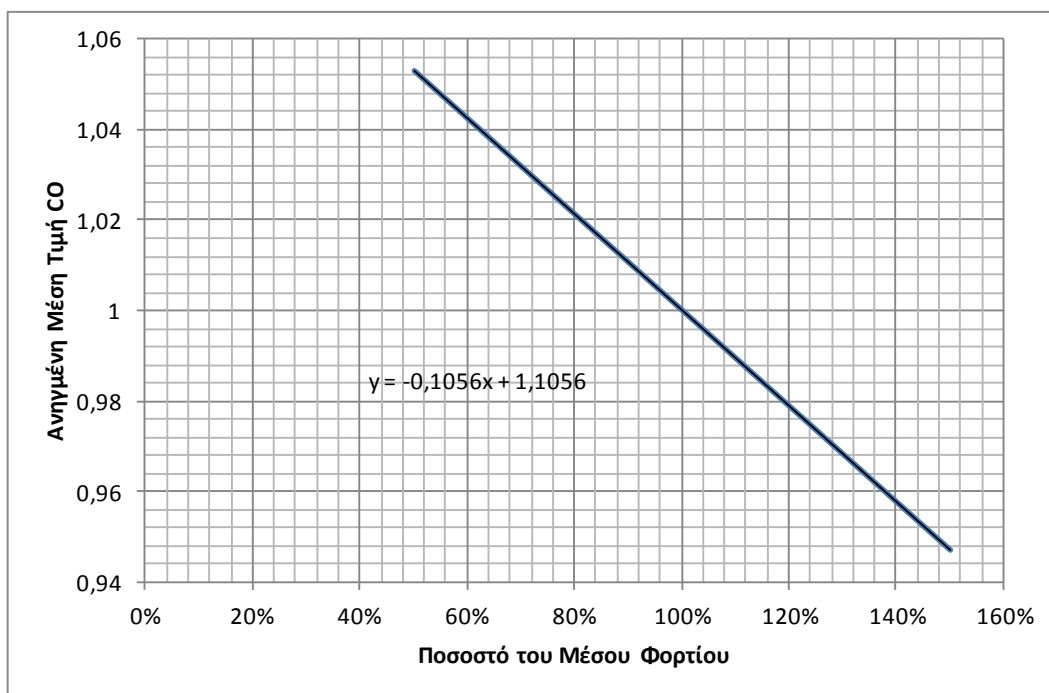
Διάγραμμα 3.21: Συγκεντρώσεις CO για 11 Σενάρια Φορτίων



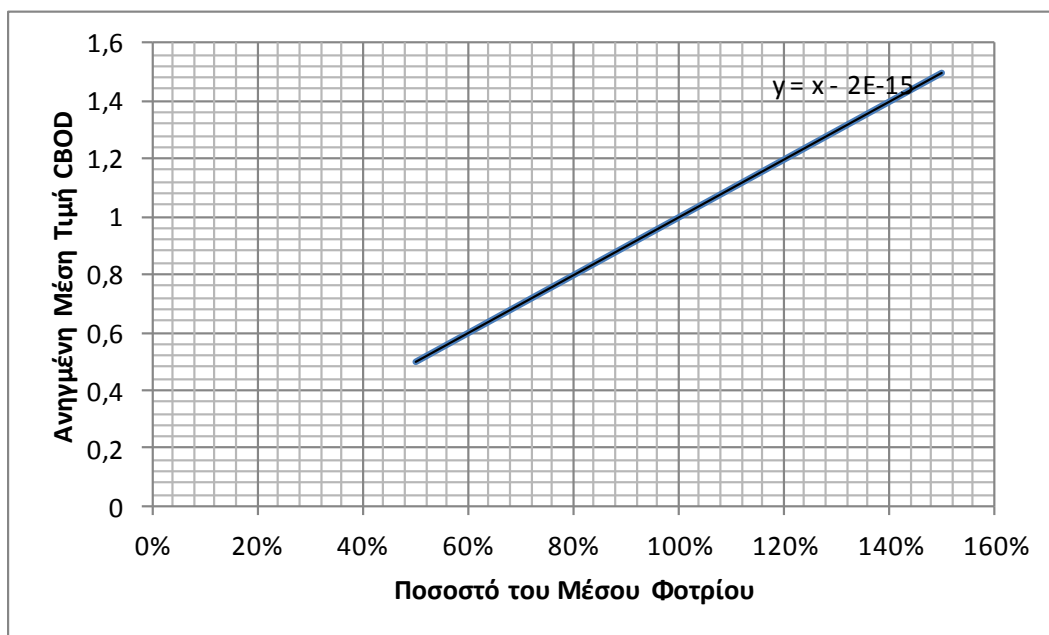
Διάγραμμα 3.22: Συγκεντρώσεις CBOD για 11 Σενάρια Φορτίων



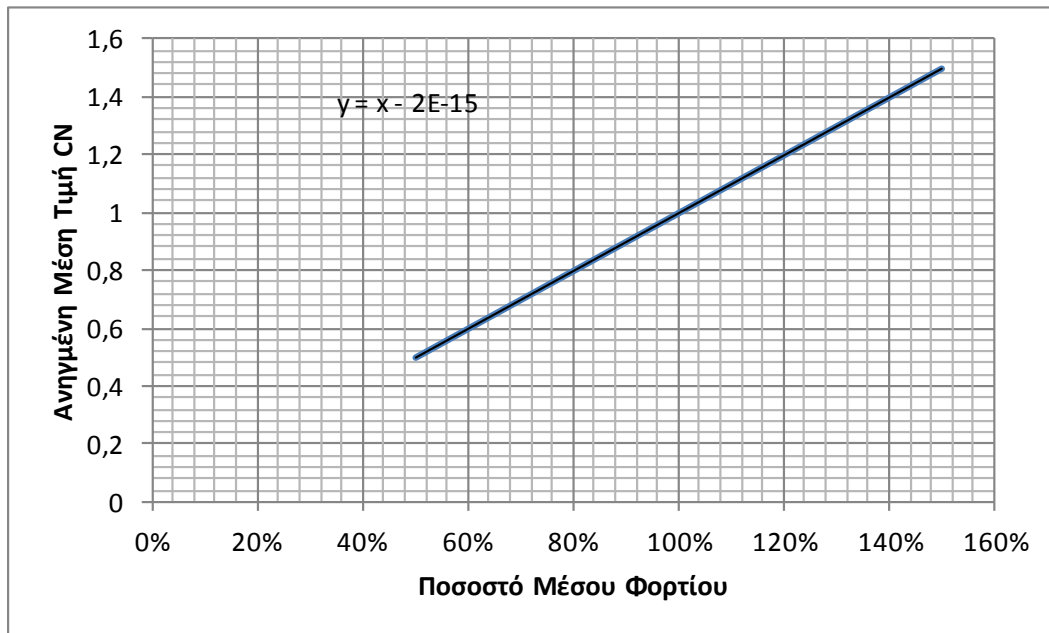
Διάγραμμα 3.23: Συγκεντρώσεις CN για 11 Σενάρια Φορτίων



Διάγραμμα 3.24: Μεταβολή της Ανηγγόμενης Μέσης Τιμής της Συγκέντρωσης CO Συναρτήσε του Ποσοστού του Μέσου Φορτίου



Διάγραμμα 3.25: Μεταβολή της Ανηγγόμενης Μέσης Τιμής της Συγκέντρωσης CBOD Συναρτήσε του Ποσοστού του Μέσου Φορτίου



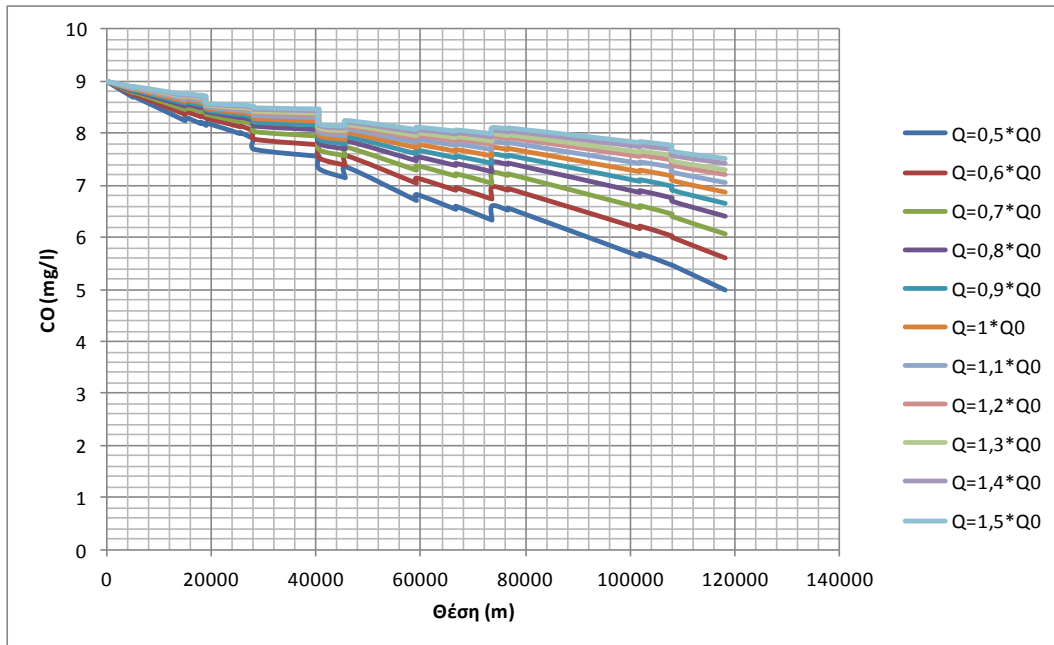
Διάγραμμα 3.26: Μεταβολή της Ανηγμένης Μέσης Τιμής της Συγκέντρωσης CN Συναρτήσει του Ποσοστού του Μέσου Φορτίου

Είναι φανερό από τα παραπάνω, ότι η μεγαλύτερη επιρροή της έντασης των ρυπαντικών πηγών ασκείται στα τελικά φορτία στον ποταμό, τα οποία επηρεάζονται κατά 100% από τις μεταβολές των ρυπαντικών φορτίων. Αυτό σημαίνει, ότι κάθε μεταβολή στην ένταση των πηγών επιφέρει ισόποση μεταβολή στη συγκέντρωση του ρύπου στο σύστημα. Επιπλέον, η μεταβολή της εισερχόμενης μάζας ρύπανσης φαίνεται να οδηγεί σε ποσοστιαία μεταβολή της τάξεως του 10% της μεταβολής των συγκεντρώσεων του διαλυμένου οξυγόνου.

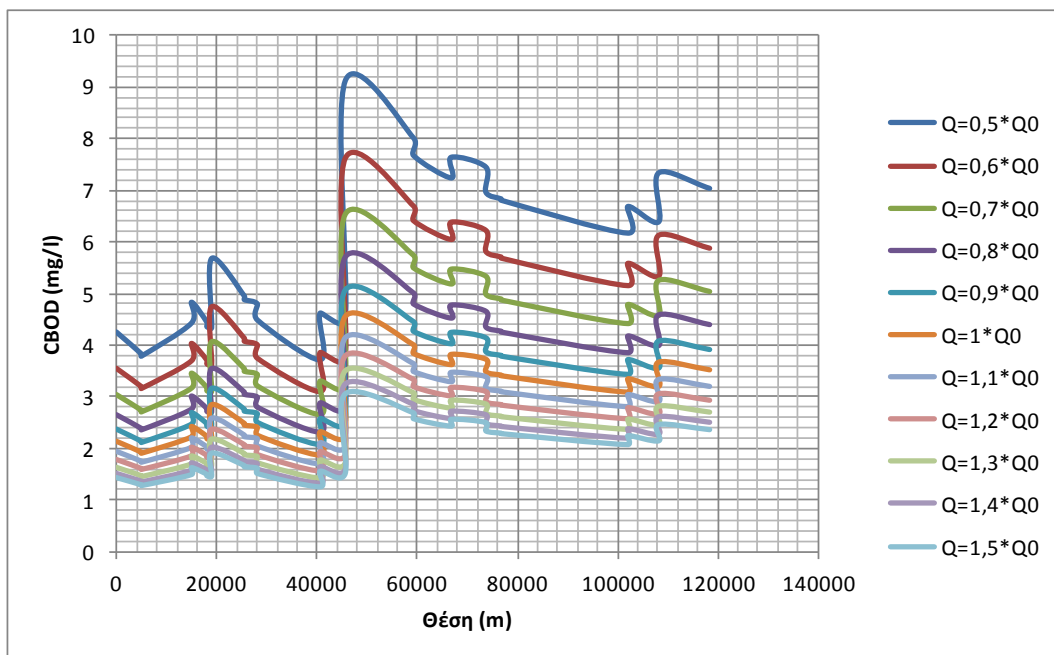
3.2.2 Ανάλυση Ευαισθησίας των Αποτελεσμάτων στις Παροχές

Για να διερευνηθεί η επίδραση των μεταβολών των παροχών στις συγκεντρώσεις των ρύπων, που υπολογίζει το μοντέλο, εκτελέστηκαν έντεκα επαναλήψεις με παροχές στο διάστημα μεταξύ της τιμής της παροχής του αρχικού Πίνακα Δεδομένων Εισόδου, η οποία παρακάτω αναφέρεται ως μέση παροχή, μειωμένης κατά 50% και αυξημένης κατά 50%. Για να μελετηθεί αποκλειστικά η επιρροή των παροχών στα αποτελέσματα έπρεπε να διατηρηθεί η ποσότητα, δηλαδή η μάζα της ρύπανσης σταθερή. Συνεπώς, η συγκέντρωση σε κάθε επανάληψη διαιρούταν με το λόγο της παροχής της επανάληψης προς τη μέση παροχή ώστε να ισχύει, ότι $M = Q * C = \text{σταθερό}$, όπου M , C είναι η μάζα και η συγκέντρωση του ρύπου αντίστοιχα και Q είναι η παροχή της επανάληψης. Παρακάτω δίνονται τα αποτελέσματα των έντεκα σεναρίων για τις τρεις ποιοτικές παραμέτρους (Διάγραμμα 3.27, Διάγραμμα 3.28 και

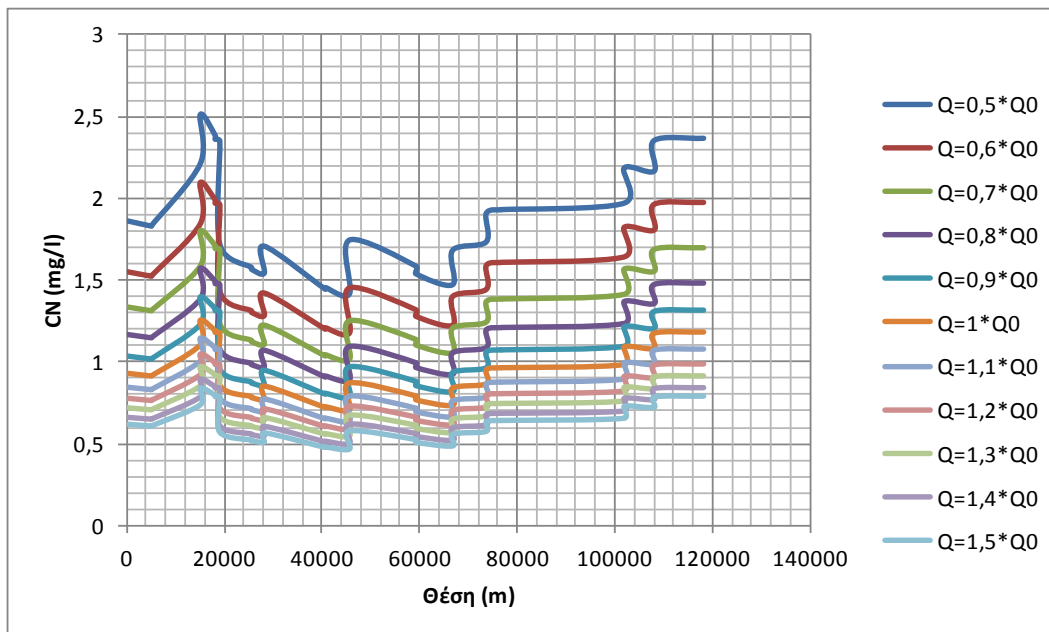
Διάγραμμα 3.29), που εξετάζονται και στη συνέχεια (Διάγραμμα 3.30, Διάγραμμα 3.31 και Διάγραμμα 3.32) παρουσιάζεται η σχέση των ανηγμένων μέσων τιμών των συγκεντρώσεων των ποιοτικών παραμέτρων συναρτήσει της παροχής ως ποσοστό της μέσης παροχής, δηλαδή της παροχής του αρχικού Πίνακα Εισόδου Δεδομένων.



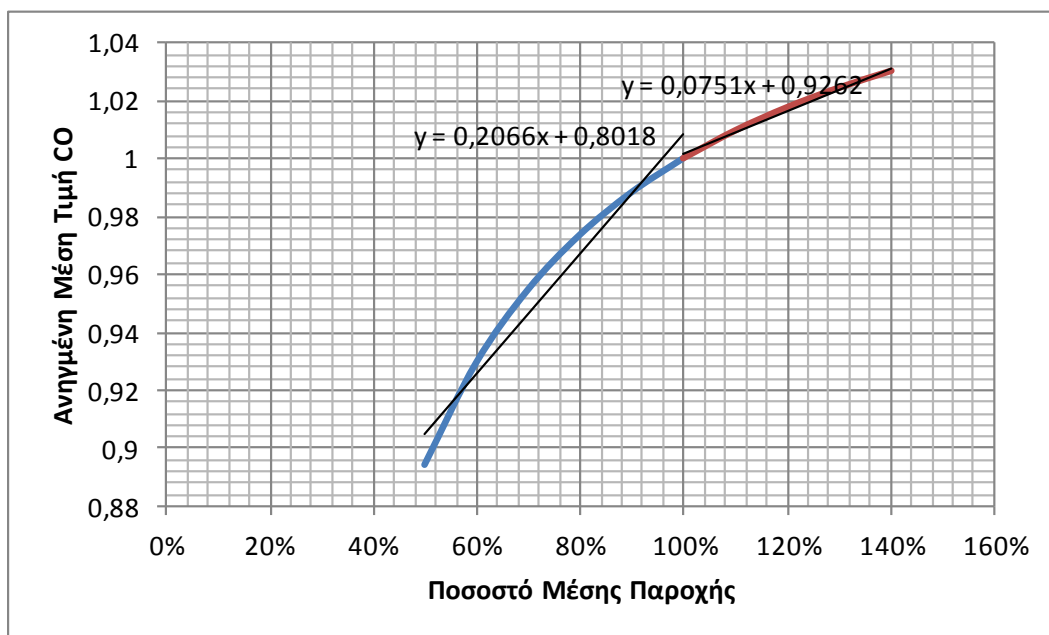
Διάγραμμα 3.27: Συγκεντρώσεις CO για 11 Σενάρια Παροχών



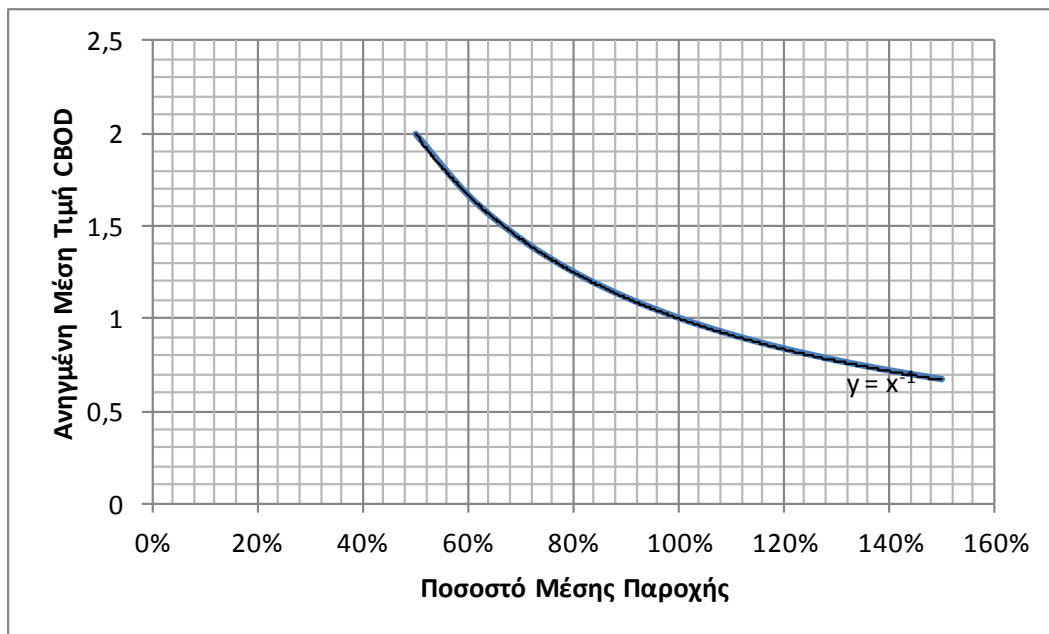
Διάγραμμα 3.28 Συγκεντρώσεις CBOD για 11 Σενάρια Παροχών



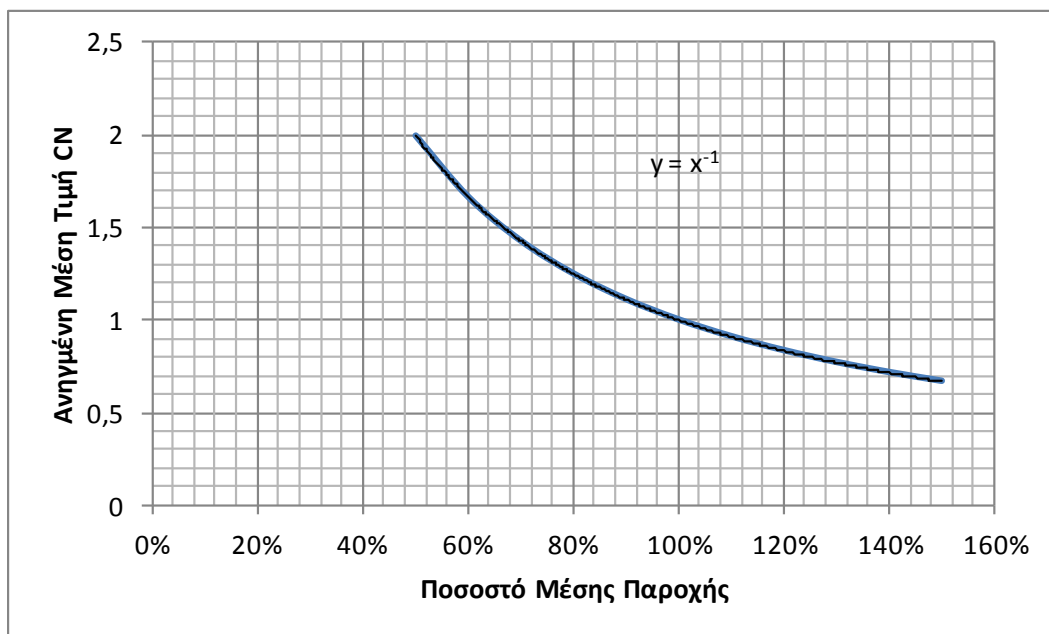
Διάγραμμα 3.29 Συγκεντρώσεις CN για 11 Σενάρια Παροχών



Διάγραμμα 3.30: Μεταβολή της Ανηγμένης Μέσης Τιμής της Συγκέντρωσης CO Συναρτήσει του Ποσοστού της Μέσης Παροχής



Διάγραμμα 3.31: Μεταβολή της Ανηγγεμένης Μέσης Τιμής της Συγκέντρωσης CBOD Συναρτήσει του Ποσοστού της Μέσης Παροχής



Διάγραμμα 3.32: Μεταβολή της Ανηγγεμένης Μέσης Τιμής της Συγκέντρωσης CN Συναρτήσει του Ποσοστού της Μέσης Παροχής

Η μεταβολή στις συγκεντρώσεις CBOD και CN είναι αντιστρόφως ανάλογη της μεταβολής των παροχών, γεγονός που οφείλεται στον ορισμό του μεγέθους της συγκέντρωσης (η οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη της παροχής) και στη διατήρηση της μάζας των ρύπων, που εξηγήθηκε στο εδάφιο 3.2.1. Η επίδραση της μεταβολής των παροχών, που εισρέουν στον ποταμό, στη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου περιγράφεται καλύτερα από δευτεροβάθμια συνάρτηση έναντι της πρωτοβάθμιας. Για να δοθεί όμως πιο άμεση εικόνα για την ένταση της επιρροής, προσαρμόστηκαν δύο γραμμές στην καμπύλη. Η πρώτη γραμμή αφορά στη μείωση των παροχών μέχρι και 50% , ενώ η δεύτερη αφορά στην αύξηση των τους μέχρι 50%. Από την καμπύλη, που φαίνεται στο Διάγραμμα 3.30, καθώς και από τις δύο γραμμικές σχέσεις, που προσαρμόστηκαν σε αυτή, είναι φανερό ότι η μείωση της παροχής προκαλεί εντονότερη μείωση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου σε σχέση με την αύξηση της συγκέντρωσης, που προκαλεί η αντίστοιχη αύξηση της παροχής. Συγκεκριμένα, κατά τη μείωση των παροχών εκτιμάται επιρροή σε βαθμό 20% περίπου, ενώ η επιρροή κατά την αύξηση των παροχών περιορίζεται σε βαθμό 8% περίπου.

3.2.3 Συνολική Επισκόπηση της Ευαισθησίας στις Εισόδους του Συστήματος

Παρακάτω (Πίνακας 3.3) παρουσιάζονται τα ποσοστά επιρροής των κατηγοριών δεδομένων εισόδου, οι οποίες εξετάστηκαν.

Πίνακας 3.3: Ποσοστιαία Επιρροή των Δεδομένων Εισόδου στις Συγκεντρώσεις των Ποιοτικών Χαρακτηριστικών

Ποιοτικό Χαρακτηριστικό	Συγκεντρώσεις Ρυπαντικών Φορτίων	Παροχές	
		Μείωση	Αύξηση
CO	-10,00%	20%	8%
CBOD	100,00%	Αντιστρόφως Ανάλογα	
CN	100,00%	Αντιστρόφως Ανάλογα	

Όπως φαίνεται, οι συγκεντρώσεις των ρύπων CBOD και CN εμφανίζουν μεγαλύτερη ευαισθησία στα δεδομένα εισόδου σε σχέση με τη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου. Όσον αφορά στο διαλυμένο οξυγόνο, η μεταβολή των φορτίων εισόδου οδηγεί σε αντίρροπη μεταβολή των συγκεντρώσεών του, της οποίας το μέγεθος εκτιμάται στο 10% της μεταβολής των συγκεντρώσεων των ρύπων. Για τις παροχές, επισημαίνεται η αύξηση της ευαισθησίας κατά τη μείωση τους. Ενώ δηλαδή η μείωση της παροχής κατά 10% οδηγεί σε μείωση των συγκεντρώσεων κατά περίπου 20%, αντίστοιχη αύξηση των παροχών συνεπάγεται αύξηση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου κατά μόλις 8% περίπου.

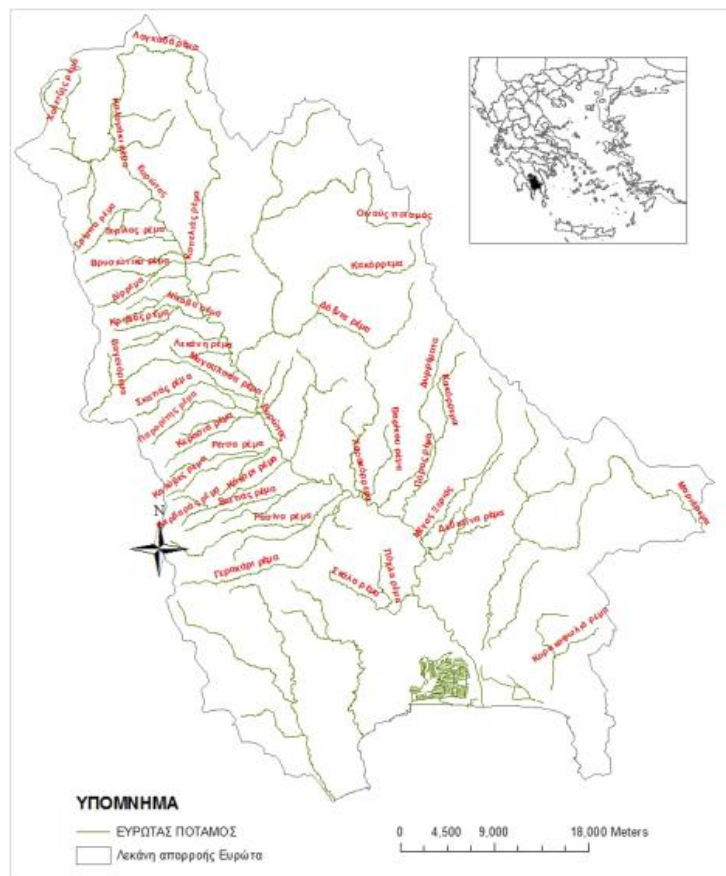
4 Εφαρμογή στη Λεκάνη Απορροής του Ευρώτα

Το μοντέλο RISDOE εφαρμόστηκε στη λεκάνη απορροής του Ευρώτα, ώστε να αξιολογηθεί η δυνατότητα χρήσης του ως εργαλείο για την χάραξη υδατικής πολιτικής στο πλαίσιο της εφαρμογής της Οδηγίας Πλαίσιο 2000/60/ΕΕ για τα Ύδατα.

4.1 Η Λεκάνη Απορροής του Ευρώτα

Η λεκάνη απορροής του ποταμού Ευρώτα έχει συνολική έκταση 2420 τετραγωνικά χιλιόμετρα και βρίσκεται στο νοτιοανατολικό άκρο της Πελοποννήσου. Διοικητικά, το μεγαλύτερο μέρος της λεκάνης ανήκει στο νομό Λακωνίας. Ο Ευρώτας ξεκινάει από οροπέδιο της Μεγαλόπολης στην Αρκαδία και καταλήγει στις εκβολές του, στον λακωνικό κόλπο. Στον ποταμό συμβάλλουν πολλοί παραπόταμοι και χείμαρροι, εκ των οποίων πολλοί εμφανίζουν διακοπτόμενη ροή. Κατά μήκος της κοίτης του Ευρώτα υπάρχουν πηγές, όπως του Σκορτσινού στην Αρκαδία, του Βιβαρίου στην κοιλάδα της Σελλασίας και του συμπλέγματος του Καστορίου. Ο ποταμός βρίσκεται ανάμεσα στους ορεινούς όγκους του Πάρνωνα και του Ταΰγετου. Σύμφωνα με την απογραφή της ΕΣΥΕ το 2001, η πυκνότητα του πληθυσμού της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα κυμαίνεται στους 26 κατοίκους ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο. Συνεπώς ο συνολικός πληθυσμός εκτιμάται στις 63000 κατοίκους. Η Σπάρτη είναι η μεγαλύτερη πόλη της λεκάνης και βρίσκεται στο βορειοδυτικό τμήμα του νομού Λακωνίας σε υψόμετρο 210 μέτρων δίπλα από τον ποταμό Ευρώτα. Εντός της λεκάνης απορροής υπάρχουν δύο κύριες κοιλάδες, η κοιλάδα της Σπάρτης και η κοιλάδα της Σκάλας. Το υδρολογικό σύστημα του Ευρώτα χαρακτηρίζεται από πολλούς παραποτάμους και ρέματα. Μέσα σε αυτό το σύστημα καταλήγουν οι απορροές του ανατολικού τμήματος του Ταΰγετου και του δυτικού τμήματος του Πάρνωνα. Ο μεγαλύτερος παραπόταμος, του οποίου η λεκάνη απορροής αποτελεί μεγάλο μέρος της λεκάνης απορροής του Ευρώτα, είναι ο Οινούς ποταμός, ο οποίος πηγάζει βορειοανατολικά της Σπάρτης. Επίσης σημαντικός παραπόταμος είναι η Μαγουλίτσα, η οποία βρίσκεται βορειοδυτικά της Σπάρτης και παρόλο το μικρό της μήκος τροφοδοτεί με σημαντικές παροχές τον Ευρώτα και είναι βασικός

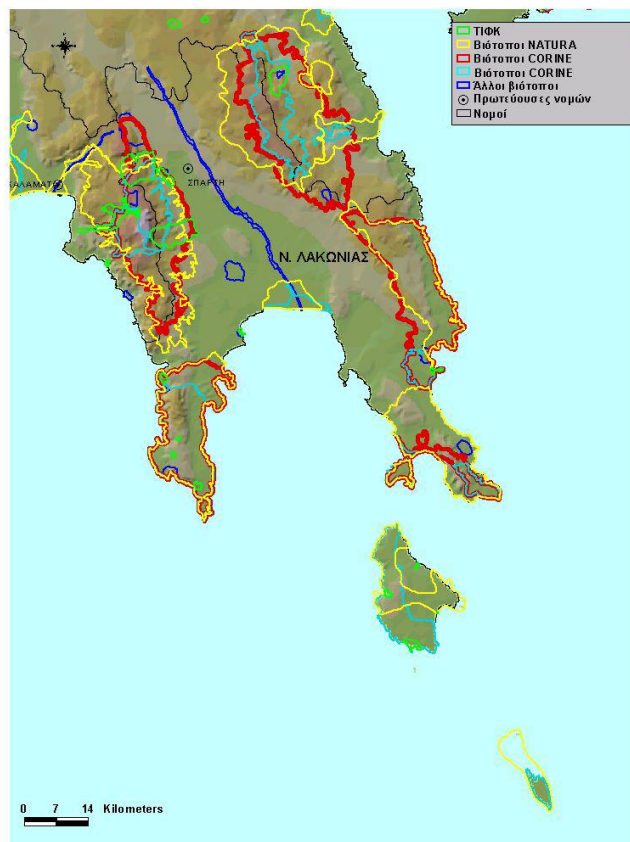
υδρευτικός και αρδευτικός πόρος για τη Σπάρτη. Στα βόρεια της λεκάνης απορροής βρίσκεται ο ποταμός Κάστωρ και το Βρυσσιώτικο ρέμα, που διαρρέεται από νερό καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Στα νότια της λεκάνης, σημαντικότερος παραπόταμος είναι ο ποταμός Σμύνους και το Μαριόρεμα, το οποίο καταλήγει στη περιοχή του δέλτα. Το ρέμα Γερακάρη, η Κάκαρη και η Ρασίνα, των οποίων η παροχή στα κατάντη διακόπτεται κατά τις ξηρές περιόδους λόγω των αντλήσεων στα ανάντη τμήματά τους, είναι τα σημαντικότερα ρέματα στην ευρύτερη περιοχή της Σπάρτης. Στην Εικόνα 4.1 φαίνεται το υδρολογικό σύστημα του Ευρώτα.



Εικόνα 4.1: Βασικός Ρους και Κύριοι Παραπόταμοι του Ευρώτα (Νικολαΐδης, et al., 2009)

Στη λεκάνη απορροής του ποταμού Ευρώτα υπάρχουν τέσσερις περιοχές, οι οποίες έχουν ενταχθεί στο Δίκτυο Natura 2000. Οι εκβολές του ποταμού είναι ο σημαντικότερος βιότοπος. Εκεί βρίσκουν καταφύγιο για να αναπαραχθούν οι χελώνες Carreta Carreta και ζουν είδη ψαριών του Ευρώτα. Επιπλέον, σε καθεστώς προστασίας λόγω του χαρακτηρισμού τους ως Τοπία Ιδιαίτερου Φυσικού Κάλλους έχουν βρισκονται τέσσερις περιοχές. Συγκεκριμένα πρόκειται για το Γύθειο, τον Κεντρικό Ταΰγετο, τη Λαγκάδα του Ταΰγету και την περιοχή

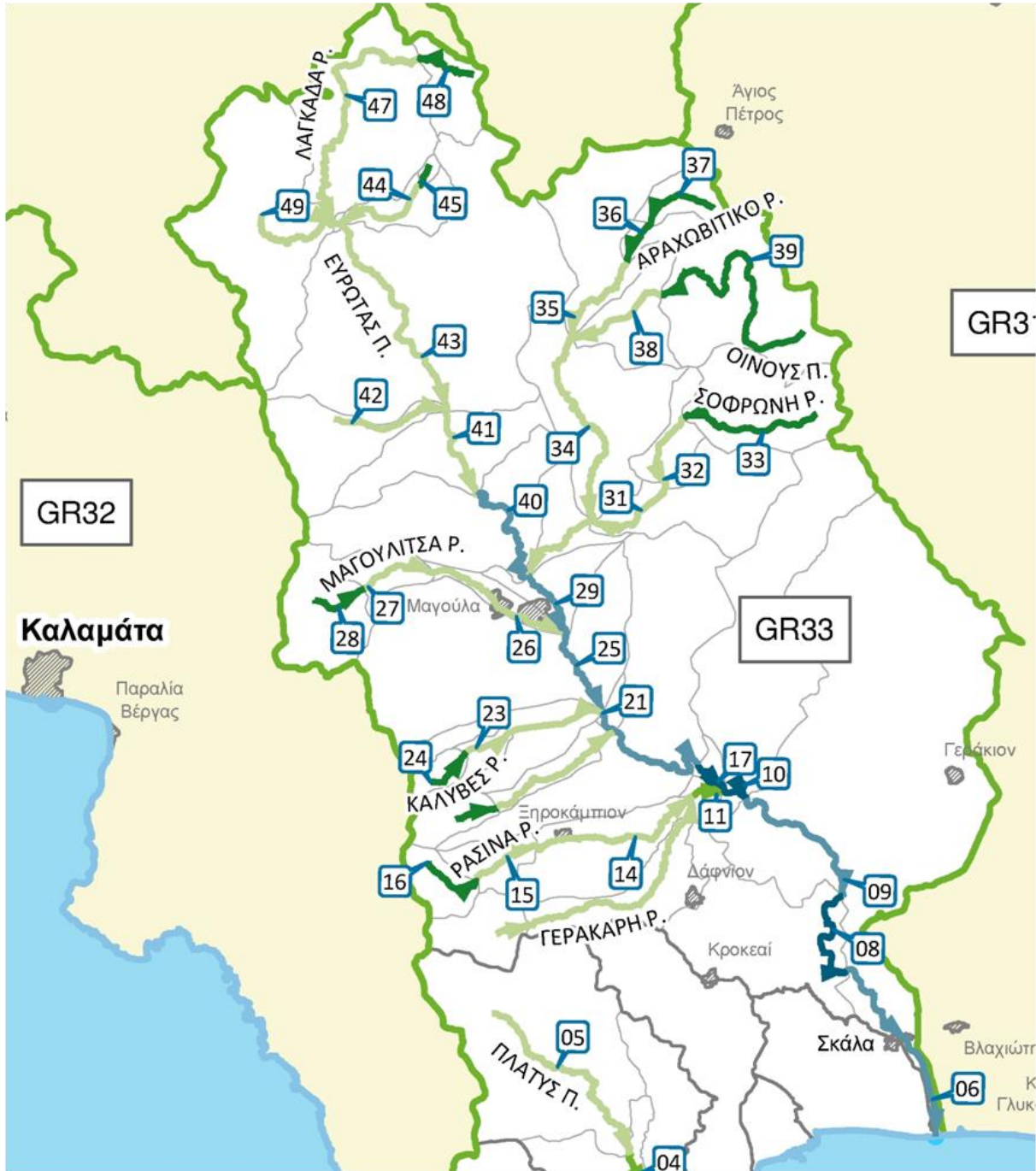
του Μυστρά. Οι προστατευόμενες περιοχές της λεκάνης φαίνονται στον παρακάτω χάρτη (Εικόνα 4.2).



Εικόνα 4.2: : Περιοχές προστασίας της φύσης και σημαντικοί βιότοποι στη Λ.Α. Ευρώτα (Νικολαΐδης, et al., 2009)

4.2 Το Υδρολογικό Σύστημα του Ποταμού Ευρώτα

Το υδρολογικό σύστημα του Ευρώτα έχει ήδη χωριστεί σε τμήματα, τα οποία θεωρείται, ότι καλύπτουν τις απαιτήσεις για την εφαρμογή του RISDOE. Ο χωρισμός έγινε κατά την εκπόνηση μελετών για το σχέδιο Διαχείρισης Υδατικών Πόρων της Λεκάνης Απορροής του Ευρώτα για λογαριασμό της Ειδικής Γραμματείας Υδάτων του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Κλιματικής Αλλαγής στο πλαίσιο των ενεργειών για την εφαρμογή της Ευρωπαϊκής Οδηγίας Πλαίσιο για τα Ύδατα. Στην Εικόνα 4.3 δίνεται η απεικόνιση του υδρολογικού συστήματος του Ευρώτα καθώς και τα τμήματα, στα οποία έχει χωριστεί. Τα αριθμημένα αυτά τμήματα χρησιμοποιήθηκαν ως υδάτινα τμήματα κατά την εφαρμογή του RISDOE.



Εικόνα 4.3: Το υδρολογικό Σύστημα του Ποταμού Ευρώτα (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2011)

4.3 Οι Ανθρωπογενείς Πιέσεις των Υδάτινων Τμημάτων

Οι πληροφορίες για τις πιέσεις, που ασκούνται σε κάθε ένα από τα υδάτινα τμήματα του ποταμού Ευρώτα, αντλήθηκαν από το κείμενο τεκμηρίωσης του Προσχεδίου Διαχείρισης Υδατικών Πόρων του ΥΔ Δυτικής Πελοποννήσου, «Ανάλυση ανθρωπογενών πιέσεων και των επιπτώσεών τους στα επιφανειακά και στα υπόγεια υδατικά συστήματα» (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2011). Οι πιέσεις χωρίζονται αρχικά σε σημειακές και μη σημειακές. Στις σημειακές πιέσεις, που εισάγουν οργανικό άνθρακα ή/και άζωτο προς νιτροποίηση στο σύστημα του Ευρώτα ανήκουν οι πιέσεις από τις βιομηχανικές μονάδες, που λειτουργούν στην περιοχή, οι πιέσεις λόγω της διαρροής ρύπανσης από τους Χώρους Ανεξέλεγκτης Διάθεσης Απορριμμάτων, η πίεση της εκροής των επεξεργασμένων λυμάτων από τις ΕΕΛ της Σπάρτης και του Γερακίου και η πίεση από τη λειτουργία μίας μονάδας Ιχθυοκαλλιέργειας στο ρέμα Καρδάρη της κοινότητας Καστορείου. Η μη σημειακή ρύπανση αποδίδεται σε τέσσερις δραστηριότητες. Αρχικά, έχει ποσοτικοποιηθεί η μάζα της ρύπανσης, που εισρέει σε κάθε τμήμα, λόγω της διάθεσης μη επεξεργασμένων λυμάτων. Αντίστοιχη ποσοτικοποίηση έχει γίνει και για τη μη σημειακή ρύπανση, η οποία προκύπτει από την ποιμενική κτηνοτροφία. Επιπλέον, δίνεται η ρύπανση, η οποία προκύπτει από τη γεωργική δραστηριότητα και παράγει άζωτο, το οποίο είναι κυρίως σε μορφή νιτρικών αλλά θεωρείται ότι περιέχει και ποσότητα σε οργανικής και αμμωνιακής μορφή. Τέλος, έχει εκτιμηθεί, ότι οι φυσικές διεργασίες παράγουν μη σημειακή ρύπανση. Στα παρακάτω εδάφια παρουσιάζονται οι μάζες των ρύπων για κάθε μία από τις δραστηριότητες, που αναφέρθηκαν, όπως προέκυψαν από τα δημοσιευμένα δεδομένα.

4.3.1 Σημειακές Πιέσεις

Παρακάτω παρουσιάζονται οι σημειακές πιέσεις της λεκάνης απορροής του Ευρώτα. Σημειώνεται, ότι στο δημοσιευμένο κείμενο (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2011), οι ρύποι εμφανίζονται ως συντηρητικοί. Δηλαδή για κάθε διαδρομή του νερού από τα ανάντη προς τα κατόντη προστίθενται τα φορτία με αποτέλεσμα το τελευταίο τμήμα να συγκεντρώνει τη ρυπαντική μάζα, η οποία εισρέει σε όλο τον ποταμό. Η θεώρηση αυτή είναι πολύ απλουστευτική, καθώς αγνοεί τη μη συντηρητικότητα των ρύπων, οδηγώντας σε υπερεκτίμηση των ρυπαντικών συγκεντρώσεων στα κατόντη. Εξαιρετικής σημασίας είναι και η πλήρης αγνόηση της κατανάλωση οξυγόνου, που οφείλεται στη διάσπαση των ρύπων και η οποία μπορεί να οδηγήσει σε αποξυγόνωση, η οποία είναι και το βασικό ζήτημα, που εξετάζεται με το μοντέλο RISDOE. Για να υπολογιστεί η σημειακή ρύπανση που αντιστοιχεί σε κάθε υδάτινο τμήμα, ακολουθήθηκε οπότε αντίστροφη πορεία. Δηλαδή η μάζα ρύπου, η

οποία εισρέει σε κάθε υδάτινο τμήμα υπολογίστηκε ως η αντίστοιχη τιμή του δημοσιευμένου πίνακα μείον τις τιμές των αμέσως προηγούμενων υδάτινων τμημάτων του. Ενδεικτικά παρουσιάζεται το παράδειγμα του δημοσιευμένου πίνακα για την πίεση λόγω μονάδων Υδατοκαλλιέργειας.

Πίνακας 4.1: Στοιχεία και ρυπαντικά φορτία μονάδων ιχθυοκαλλιέργειας για την ΛΑΠ Ευρώτα (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2011)

ΕΠΩΝΥΜΙΑ ΜΟΝΑΔΑΣ	ΚΟΙΝΟΤΗΤΑ	ΔΥΝΑΜΙΚΟΤΗΤΑ (τόνοι/έτος)	ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΑ ΕΙΔΗ	ΥΔΑΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	Φορτίο BOD (τόνοι/έτος)	Φορτίο N (τόνοι/έτος)	Φορτίο P (τόνοι/έτος)	ΤΥΠΟΣ ΙΧΘΥΟΚΑΛΙΕΡΓΕΙΑΣ
ΓΕΡΟΝΤΙΔΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ	Καστορείου	12,0	Πέστροφα, Κυπρίνος, Κέφαλος	ΚΑΡΔΑΡΗ Ρ.	3,4	1,4	0,2	Εσωτερική

Όπως είναι φανερό στον παραπάνω πίνακα (Πίνακας 4.1), στη λεκάνη απορροής του Ευρώτα έχει εντοπιστεί μόνο μία μονάδα Ιχθυοκαλλιέργειας. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.2) δίνονται τα φορτία που έχουν εκτιμηθεί σε κάθε υδάτινο σώμα της Λεκάνης Απορροής του Ευρώτα σύμφωνα με το δημοσιευμένο κείμενο.

Πίνακας 4.2: Ετήσια και θερινά (Ιούνιος-Σεπτέμβριος) σημειακά ρυπαντικά φορτία μονάδων ιχθυοκαλλιέργειας στα επιφανειακά ΥΣ της ΛΑΠ Ευρώτα (GR33) (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2011)

ΚΩΔΙΚΟΣ ΥΣ	ΥΔΑΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	BOD ετήσιο (τόνοι/έτος)	N ετήσιο (τόνοι/έτος)	P ετήσιο (τόνοι/έτος)	BOD θερινό (τόνοι/θερινή περίοδο)	N θερινό (τόνοι/θερινή περίοδο)	P θερινό (τόνοι/θερινή περίοδο)
GR0333R000201006H	ΕΥΡΩΤΑΣ Π.	3,42	1,39	0,23	1,14	0,46	0,08
GR0333R000201007N	ΕΥΡΩΤΑΣ Π.	3,42	1,39	0,23	1,14	0,46	0,08
GR0333R000201008N	ΕΥΡΩΤΑΣ Π.	3,42	1,39	0,23	1,14	0,46	0,08
GR0333R000201009N	ΕΥΡΩΤΑΣ Π.	3,42	1,39	0,23	1,14	0,46	0,08
GR0333R000201010N	ΕΥΡΩΤΑΣ Π.	3,42	1,39	0,23	1,14	0,46	0,08
GR0333R000203017N	ΕΥΡΩΤΑΣ Π.	3,42	1,39	0,23	1,14	0,46	0,08
GR0333R000203018N	ΕΥΡΩΤΑΣ Π.	3,42	1,39	0,23	1,14	0,46	0,08
GR0333R000205021N	ΕΥΡΩΤΑΣ Π.	3,42	1,39	0,23	1,14	0,46	0,08
GR0333R000207025N	ΕΥΡΩΤΑΣ Π.	3,42	1,39	0,23	1,14	0,46	0,08
GR0333R000209029N	ΕΥΡΩΤΑΣ Π.	3,42	1,39	0,23	1,14	0,46	0,08
GR0333R000211040N	ΕΥΡΩΤΑΣ Π.	3,42	1,39	0,23	1,14	0,46	0,08
GR0333R000211041N	ΕΥΡΩΤΑΣ Π.	3,42	1,39	0,23	1,14	0,46	0,08
GR0333R000212042N	ΚΑΡΔΑΡΗ Ρ.	3,42	1,39	0,23	1,14	0,46	0,08

Παρατηρείται, ότι από το υδάτινο σώμα GR0333R0000121042N, το οποίο στην Εικόνα 4.3 φαίνεται ως 42, και μέχρι το τέλος της διαδρομής που ακολουθείται από το νερό μέχρι τον τελικό αποδέκτη, δηλαδή για τα τμήματα 41, 40, 29, 25, 21, 18, 17, 10, 09, 08, 07 και 06, η ρύπανση θεωρείται σταθερή και ίση με τη μάζα που εισέρχεται στο υδάτινο τμήμα 42. Κατά την εφαρμογή του μοντέλου RISDOE όμως, στα δεδομένα εισόδου πρέπει να εισαχθεί η

ρύπανση αποκλειστικά στο τμήμα στο οποίο εισέρχεται στην πραγματικότητα. Οι συγκεντρώσεις του ρύπου στα κατάντη τμήματα προκύπτουν ως αποτελέσματα από την εφαρμογή του μοντέλου. Συνεπώς, για τη μετατροπή του παραπάνω πίνακα (Πίνακας 4.2), σε πίνακα, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό των δεδομένων εισόδου της εφαρμογής του RISDOE αφαιρέθηκε από κάθε τιμή του πίνακα η τιμή του αμέσως προηγούμενου τμήματος με αποτέλεσμα τον τελικό πίνακα (Πίνακας 4.3) ρύπανσης λόγω μονάδων Ιχθυοκαλλιέργειας στα υδάτινα τμήματα στα οποία έχει χωριστεί το υδρολογικό σύστημα του ποταμού Ευρώτα. Ο τελικός πίνακας περιέχει μη μηδενικό στοιχείο μόνο για το υδάτινο τμήμα 42, στο οποίο στο οποίο εισρέει η ρύπανση από τη μονάδα Ιχθυοκαλλιέργειας του Καστορείου.

Πίνακας 4.3: Ετήσια Φορτία Στα υδάτινα Τμήματα του Υδρολογικού Συστήματος του Ευρώτα

Υδάτινο Τμήμα	BOD (tn/year)	N (tn/year)
48	0	0
47	0	0
46	0	0
43	0	0
41	0	0
40	0	0
29	0	0
25	0	0
21	0	0
18	0	0
17	0	0
10	0	0
9	0	0
8	0	0
7	0	0
6	0	0
45	0	0
44	0	0
37	0	0
36	0	0
35	0	0
34	0	0

Υδάτινο Τμήμα	BOD (tn/year)	N (tn/year)
30	0	0
39	0	0
38	0	0
33	0	0
32	0	0
31	0	0
49	0	0
42	3,42	1,39
28	0	0
27	0	0
26	0	0
24	0	0
23	0	0
22	0	0
20	0	0
19	0	0
16	0	0
15	0	0
14	0	0
11	0	0
13	0	0
12	0	0

Με αυτό τον τρόπο δημιουργήθηκαν οι πίνακες των υπόλοιπων πιέσεων, οι οποίοι παρουσιάζονται στα παρακάτω εδάφια.

4.3.1.1 Βιομηχανίες

Στη λεκάνη απορροής του Ευρώτα λειτουργούν κυρίως μονάδες παραγωγής ελαιόλαδου και τυροκομικών. Ακολουθούν οι μονάδες παραγωγής χυμών και κρεάτων ενώ συναντώνται και μονάδες παραγωγής χημικών. Με βάση τα στοιχεία, που έχει δημοσιεύσει η Ειδική Γραμματεία Υδάτων δημιουργήθηκε ο πίνακας των φορτίων εισόδου των υδάτινων τμημάτων του υδρολογικού συστήματος του Ευρώτα εισόδου λόγω της λειτουργίας βιομηχανικών μονάδων. Σημειώνεται, ότι το ολικό άζωτο που αναφέρεται περιέχει και μορφές, που δεν νιτροποιούνται, όπως τα νιτρικά. Επειδή όμως οι περισσότερες μονάδες σχετίζονται με την παραγωγή τροφίμων θεωρήθηκε, ότι θα μπορούσε συντηρητικά να θεωρηθεί όλο το άζωτο ως *TKN*, δηλαδή οργανικό και αμμωνιακό άζωτο. Ακολουθεί ο Πίνακας 4.4 με τις ετήσιες εισροές μάζας BOD και TKN σε κάθε υδάτινο τμήμα λόγω της λειτουργίας των βιομηχανικών μονάδων.

Πίνακας 4.4: Ετήσια Φορτία Λόγω Λειτουργίας Βιομηχανικών Μονάδων

Υδάτινο Τμήμα	BOD (tn/year)	TKN (tn/year)
48	0,00	0
47	0,00	0
46	0,00	0
43	48,46	0,88
41	34,08	0,62
40	19,63	0,35
29	124,32	8,97
25	246,73	18,11
21	0,00	0
18	266,59	12,33
17	0,00	0
10	10,72	0,19
9	43,15	1,21
8	0,00	0
7	46,03	0,84
6	0,00	0
45	0,00	0
44	4,79	0,09
37	0,00	0
36	0,00	0
35	0,00	0
34	0,00	0

Υδάτινο Τμήμα	BOD (tn/year)	TKN (tn/year)
30	38,44	0,7
39	0,00	0
38	0,00	0
33	0,00	0
32	4,79	0,09
31	0,00	0
49	24,75	0,45
42	8,25	0,15
28	0,00	0
27	24,75	0,45
26	4,15	0,55
24	0,00	0
23	0,00	0
22	28,62	1,15
20	0,00	0
19	2,48	0,05
16	0,00	0
15	10,78	0,2
14	152,55	2,77
11	0,00	0
13	0,00	0
12	69,30	1,26

4.3.1.2 ΧΑΔΑ

Στη λεκάνη απορροής του Ευρώτα λειτουργούν οκτώ Χώροι Ανεξέλεγκτης Διάθεσης Απορριμμάτων. Η ανεξέλεγκτη διάθεση των απορριμμάτων είναι μία σημαντική πίεση στο περιβάλλον και σημειώνεται, ότι είναι παράτυπη δραστηριότητα και οι ΧΑΔΑ θα έπρεπε ήδη να έχουν αντικατασταθεί από κατάλληλους Χώρους Ελεγχόμενης Διάθεσης/Διαχείρισης Απορριμμάτων. Τα στραγγίδια των απορριμμάτων εκτιμάται ότι περιέχουν συγκέντρωση αμμωνίας 750 mg N/l και συγκέντρωση ολικού αζώτου 1250 mg N/l (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2011). Λόγω της έλλειψης στοιχείων σε σχέση με την ποσότητα αζώτου, που δεν ανήκει στο TKN και λόγω της υψηλής συγκέντρωσης της αμμωνίας, η οποία κυμαίνεται στο 60% της συνολικής συγκέντρωσης αζώτου, εκτιμήθηκε ότι θα μπορούσε να θεωρηθεί η συγκέντρωση του ολικού αζώτου ως συγκέντρωση TKN. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.5) δίνονται τα ετήσια φορτία, που εισέρχονται σε κάθε υδάτινο του τμήμα του υδρολογικού συστήματος του Ευρώτα λόγω της παράτυπης λειτουργία των ΧΑΔΑ.

Πίνακας 4.5: Ετήσια Φορτία Λόγω Λειτουργίας ΧΑΔΑ

Υδάτινο Τμήμα	BOD (tn/year)	TKN (tn/year)
48	0	0
47	0	0
46	0	0
43	0	0
41	0,28	1,96
40	0	0
29	0	0
25	0	0
21	0	0
18	0	0
17	0	0
10	0	0
9	0,02	0,1
8	0,42	2,94
7	0	0
6	0	0
45	0	0
44	0	0
37	0	0
36	0,06	0,39
35	0	0
34	0	0

Υδάτινο Τμήμα	BOD (tn/year)	TKN (tn/year)
30	2,25	15,66
39	0	0
38	0	0
33	0	0
32	0	0
31	0	0
49	0	0
42	0	0
28	0	0
27	0	0
26	0	0
24	0	0
23	0	0
22	0	0
20	0	0
19	0	0
16	0	0
15	0	0
14	0	0
11	0	0
13	0	0
12	0	0

4.3.1.3 Ιχθυοκαλλιέργειες

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, στη λεκάνη απορροής του Ευρώτα λειτουργεί μία μονάδα Ιχθυοκαλλιέργειας στο ρέμα Καρδάρη, στο οποίο έχει αποδοθεί το όνομα 42. Σε σχέση με την ολική μάζα του αζώτου, θεωρείται ότι η μάζα του αζώτου που έχει ήδη νιτροποιηθεί δεν υπερβαίνει το 10%. Ως εκ τούτου, θεωρήθηκε ασφαλές να ληφθεί ως μάζα του ΤΚΝ το 90% του συνολικού αζώτου. Παρακάτω (Πίνακας 4.6) δίνονται τα στοιχεία της ρύπανσης λόγω της λειτουργίας της μονάδας Ιχθυοκαλλιέργειας στο ρέμα Καρδάρη.

Πίνακας 4.6: Ετήσια Φορτία Λόγω Λειτουργίας της Μονάδας Ιχθυοκαλλιέργειας

Υδάτινο Τμήμα	BOD (tn/year)	TKN (tn/year)
42	3,42	1,251

4.3.1.4 ΕΕΛ

Στο υδρολογικό σύστημα του Ευρώτα καταλήγουν μόνο δύο Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων, η οποίες είναι της Σπάρτης και του Γερακιού. Η ΕΕΛ της Σπάρτης λειτουργεί με δευτεροβάθμια επεξεργασία, η οποία περιλαμβάνει όχι μόνο απονιτροποίηση αλλά και απομάκρυνση φωσφόρου. Ο ισοδύναμος πληθυσμός της είναι 40000. Η εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων του Γερακιού λειτουργεί με τριτοβάθμια επεξεργασία και εξυπηρετεί ισοδύναμο πληθυσμό 2500 κατοίκων. Η εγκατάσταση της Σπάρτης καταλήγει στο υδάτινο τμήμα 29 ενώ του Γερακιού στο υδάτινο τμήμα 9. Λόγω της νιτροποίησης που γίνεται κατά την επεξεργασία των λυμάτων θεωρήθηκε ότι μόνο το 10% της μάζας του αζώτου που εκρέει ανά έτος αντιστοιχεί στο ΤΚΝ. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.7) δίνονται τα φορτία που εισρέουν στο υδάτινο τμήμα 29 και στο υδάτινο τμήμα 9 λόγω της λειτουργίας των δύο ΕΕΛ.

Πίνακας 4.7: Ετήσια Φορτία Λόγω Λειτουργίας ΕΕΛ

Υδάτινο Τμήμα	BOD (tn/year)	TKN (tn/year)
29	56,44	3,225
9	2,6	0,208

4.3.2 Μη Σημειακές Πιέσεις

Η ρύπανση λόγω λυμάτων, που δεν καταλήγουν σε ΕΕΛ, της ποιμενικής κτηνοτροφίας, της γεωργίας και των φυσικών διεργασιών αποτελούν τη μη σημειακή ρύπανση της λεκάνης

απορροής του Ευρώτα. Παρακάτω περιγράφεται η κάθε κατηγορία με βάση το κείμενο τεκμηρίωσης του Προσχεδίου Διαχείρισης Υδατικών Πόρων του ΥΔ Δυτικής Πελοποννήσου, «Ανάλυση ανθρωπογενών πιέσεων και των επιπτώσεών τους στα επιφανειακά και στα υπόγεια υδατικά συστήματα» (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2011).

4.3.2.1 Αστική Ρύπανση

Δεδομένου ότι υπάρχουν μόνο δύο ΕΕΛ στη Λεκάνη Απορροής του Ευρώτα, τα λύματα πολλών οικισμών καταλήγουν σε υπόγειους και επιφανειακούς αποδέκτες. Σύμφωνα με τις παραδοχές που έχουν γίνει στο κείμενο «Ανάλυση ανθρωπογενών πιέσεων και των επιπτώσεών τους στα επιφανειακά και στα υπόγεια υδατικά συστήματα», (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2011), οι ρύποι καταλήγουν μειωμένοι στους επιφανειακούς αποδέκτες, λόγω απομάκρυνσης φορτίου κατά τη διαδρομή και απορρόφησης από τους υπόγειους αποδέκτες. Το 80% του αζώτου που καταλήγει στους επιφανειακούς αποδέκτες θεωρείται, ότι συμβάλει στο ΤΚΝ. Οι ετήσιες τιμές της μάζας των ρύπων δίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.8).

Πίνακας 4.8: Ετήσια Μη Σημειακή Ρύπανση λόγω Αστικών Λυμάτων

Υδάτινο Τμήμα	BOD (tn/year)	TKN (tn/year)
48	0,000	0,001
47	1,546	0,356
46	0,000	0,000
43	5,331	1,261
41	3,255	0,755
40	2,963	0,684
29	1,815	0,449
25	16,521	3,798
21	0,000	0,000
18	7,105	1,638
17	0,000	0,000
10	2,535	0,607
9	3,352	0,814
8	2,469	0,576
7	2,611	0,604
6	0,387	0,089
45	0,000	0,000
44	2,008	0,463
37	2,399	0,566
36	0,984	0,232
35	0,306	0,072
34	0,883	0,209

Υδάτινο Τμήμα	BOD (tn/year)	TKN (tn/year)
30	1,745893	0,407141
39	2,657629	0,650325
38	1,29595	0,330862
33	2,270682	0,540921
32	0,039618	0,010038
31	0,118854	0,030114
49	9,164046	2,155289
42	2,694047	0,631289
28	0	0
27	0,933116	0,266966
26	0,718748	0,205635
24	0	0
23	0,210405	0,048734
22	1,027273	0,237935
20	0	0
19	1,563017	0,35876
16	0	0
15	2,012164	0,461748
14	6,036493	1,385244
11	0	0
13	2,217728	0,510895
12	3,618399	0,833565

4.3.2.2 Ποιμενική Κτηνοτροφία

Η μη σημειακή ρύπανση της κτηνοτροφίας οφείλεται στην εκτροφή ζώων ελεύθερη βοσκής. Από τα συνολικά φορτία αζώτου, που έχουν εκτιμηθεί για λογαριασμό της Ειδικής Γραμματείας Υδάτων, θεωρείται ότι το 80% συμβάλει στο TKN. Τα ετήσια φορτία, που καταλήγουν σε κάθε υδάτινο τμήμα δίνονται παρακάτω (Πίνακας 4.9)

Πίνακας 4.9: Ετήσια Μη Σημειακή Ρύπανση Λόγω Ποιμενικής Κτηνοτροφίας

Υδάτινο Τμήμα	BOD (tn/year)	TKN (tn/year)
48	1,047	0,438
47	9,019	3,765
46	0,048	0,020
43	14,540	6,096
41	2,774	1,165
40	5,606	2,338
29	0,568	0,239
25	6,318	2,639
21	0,000	0,000
18	8,919	3,729
17	0,158	0,066
10	10,183	4,257
9	44,169	18,446
8	12,236	5,116
7	3,814	1,597
6	0,006	0,002
45	0,000	0,000
44	0,227	0,095
37	0,967	0,406
36	0,396	0,166
35	11,297	4,742
34	7,803	3,277

Υδάτινο Τμήμα	BOD (tn/year)	TKN (tn/year)
30	0,365618	0,153137
39	3,791743	1,591961
38	2,349118	0,986629
33	1,480902	0,621229
32	1,812836	0,759703
31	5,438509	2,279109
49	13,28759	5,5307
42	1,253912	0,526615
28	3,062273	1,277282
27	0,685821	0,285306
26	0,528265	0,219761
24	0,211027	0,088796
23	0,45318	0,19019
22	2,212587	0,928573
20	0,557252	0,233126
19	1,842631	0,770878
16	0,617524	0,258315
15	1,276137	0,53387
14	3,828411	1,60161
11	1,394803	0,582608
13	2,306809	0,964812
12	3,763741	1,574166

4.3.2.3 Γεωργική Ρύπανση

Η γεωργική ρύπανση οφείλεται κυρίως στα λιπάσματα, που χρησιμοποιούνται. Συνεπώς τα φορτία της δεν συμβάλουν στο BOD και η μεγαλύτερη ποσότητα του αζώτου τους είναι σε μορφή νιτρικών. Ως εκ τούτου λήφθηκε μόνο το 10% της παραγόμενης αζωτούχου ρύπανσης ως φορτίο TKN. Οι ετήσιες φορτίσεις δίνονται στη στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.10)

Πίνακας 4.10:Ετήσια Μη Σημειακή Ρύπανση Λόγω Γεωργίας

Υδάτινο Τμήμα	BOD (tn/year)	TKN (tn/year)
48	0,000	0,073
47	0,000	0,762
46	0,000	0,051
43	0,000	1,383
41	0,000	0,888
40	0,000	1,537
29	0,000	0,641
25	0,000	1,351
21	0,000	0,384
18	0,000	1,267
17	0,000	0,720
10	0,000	1,081
9	0,000	1,759
8	0,000	1,234
7	0,000	0,198
6	0,000	0,238
45	0,000	0,066
44	0,000	0,119
37	0,000	0,038
36	0,000	0,015
35	0,000	0,089
34	0,000	0,588

Υδάτινο Τμήμα	BOD (tn/year)	TKN (tn/year)
30	0,000	0,720
39	0,000	0,033
38	0,000	0,016
33	0,000	0,178
32	0,000	0,076
31	0,000	0,228
49	0,000	1,094
42	0,000	0,593
28	0,000	0,010
27	0,000	0,327
26	0,000	0,252
24	0,000	0,078
23	0,000	0,086
22	0,000	0,420
20	0,000	0,006
19	0,000	0,500
16	0,000	0,161
15	0,000	0,231
14	0,000	0,693
11	0,000	0,728
13	0,000	0,416
12	0,000	0,679

4.3.2.4 Φυσική Ρύπανση

Στην κατηγορία αυτή της σημειακής ρύπανσης ανήκει η ρύπανση με άζωτο και φώσφορο, η οποία προκύπτει από τα δάση, τα βοσκοτόπια, το αστικό περιβάλλον και τους δρόμους και καταλήγει στους επιφανειακούς αποδέκτες μέσω των απορροών. Από το ολικό άζωτο, που υπολογίστηκε για την Ειδική Γραμματεία Υδάτων θεωρήθηκε ότι το 10% μόνο είναι άζωτο προς νιτροποίηση. Παρακάτω δίνονται τα φορτία κάθε υδατινού τμήματος του υδρολογικού συστήματος του Ευρώτα λόγω φυσικής ρύπανσης (Πίνακας 4.11).

Πίνακας 4.11:Ετήσια Μη Σημειακή Ρύπανση Λόγω Φυσικών Αιτίων

Υδάτινο Τμήμα	BOD (tn/year)	TKN (tn/year)
48	0,000	0,121
47	0,000	0,620
46	0,000	0,003
43	0,000	0,842
41	0,000	0,138
40	0,000	0,194
29	0,000	0,033
25	0,000	0,453
21	0,000	0,004
18	0,000	0,364
17	0,000	0,005
10	0,000	0,513
9	0,000	1,151
8	0,000	0,340
7	0,000	0,082
6	0,000	0,002
45	0,000	0,007
44	0,000	0,064
37	0,000	0,068
36	0,000	0,028
35	0,000	0,297
34	0,000	0,390

Υδάτινο Τμήμα	BOD (tn/year)	TKN (tn/year)
30	0	0,016183
39	0	0,471135
38	0	0,125538
33	0	0,192556
32	0	0,088473
31	0	0,265418
49	0	0,937527
42	0	0,196288
28	0	0,19628
27	0	0,040619
26	0	0,031287
24	0	0,033694
23	0	0,02481
22	0	0,121129
20	0	0,039745
19	0	0,059243
16	0	0,064421
15	0	0,039827
14	0	0,119482
11	0	0,042812
13	0	0,072743
12	0	0,118686

4.3.3 Συνολική Επισκόπηση Πιέσεων

Σύμφωνα με τα στοιχεία, τα οποία παρουσιάστηκαν παραπάνω, στο υδρολογικό σύστημα του ποταμού Ευρώτα καταλήγουν ετησίως 1566 τόνοι BOD και 211 τόνοι TKN. Τα αθροίσματα της ρύπανσης σε όλο το μήκος του ποταμού ανά κατηγορία δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.12: Συνολικά Ετήσια Φορτία

Ρύπος	BOD	TKN
Δραστηριότητα	(tn/year)	(tn/year)
Βιομηχανίες	1.213,36	51,41
ΧΑΔΑ	3,03	21,05
Ιχθυοκαλλιέργειες	3,42	1,25
ΕΕΛ	59,04	3,43
Μη Σημειακά Αστικά Λύματα	94,79	22,24
Γεωργία	0,00	22,01
Ποιμενική Κτηνοτροφία	192,61	80,56
Φυσικές Αιτίες	0,00	9,01
Σύνολα	1.566,26	210,96

Όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 4.1, η βασική αιτία ρύπανσης με ανθρακικό οργανικό φορτίο είναι η λειτουργία των βιομηχανικών μονάδων με ποσοστό 80% επί του συνόλου. Οι περισσότερες από τις μονάδες παράγουν τρόφιμα, με αποτέλεσμα να είναι τα απόβλητά τους πλούσια σε οργανικό άνθρακα. Ακολουθούν η ρύπανση λόγω της ποιμενικής κτηνοτροφίας και των αστικών λυμάτων, τα οποία δεν καταλήγουν σε ΕΕΛ με ποσοστό 12% και 6% αντίστοιχα. Τέλος οι δύο μονάδες Επεξεργασίας Αστικών Λυμάτων συμβάλουν μόλις κατά 4% ενώ η συμβολή των άλλων δύο δραστηριοτήτων είναι αμελητέα για το σύνολο του υδρολογικού συστήματος. Σημειώνεται βέβαια, ότι η ρύπανση, της οποίας η συμβολή είναι μηδενική στο σύνολο των υδάτινων τμημάτων του ποταμού, δεν αποκλείεται να επηρεάζει σημαντικά τα υδάτινα τμήματα στα οποία καταλήγει, ιδίως αν συγκεντρώνεται σε μικρή έκταση, δηλαδή σε λίγα υδάτινα τμήματα.

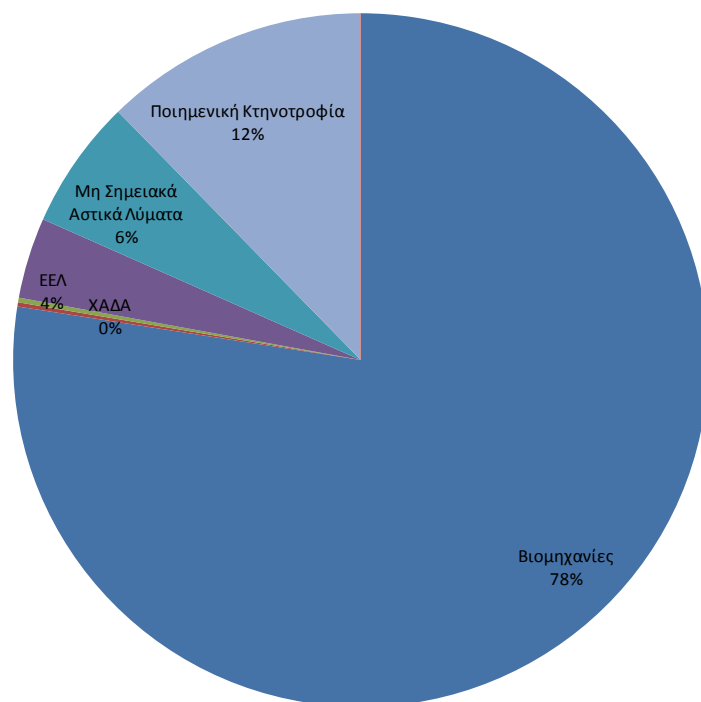
Αντίστοιχα παρουσιάζεται το Διάγραμμα 4.2, στο οποίο φαίνονται τα ποσοστά συμβολής των ρυπαντικών δραστηριοτήτων στο ολικό άζωτο προς απονιτροποίηση, που καταλήγει στον ποταμό σε ετήσια βάση. Στην περίπτωση του TKN, η συμβολή εμφανίζεται αρκετά πιο διασπαρμένη ανάμεσα στις ρυπαντικές δραστηριότητες σε σχέση με τη συμβολή των ρυπαντικών πηγών στο BOD του συστήματος. Συγκεκριμένα, η μεγαλύτερη ποσότητα αζώτου προς νιτροποίηση απελευθερώνεται από την ποιμενική κτηνοτροφία και ακολουθείται από τη λειτουργία των βιομηχανικών μονάδων με ποσοστά συμβολής 38% και 24% αντίστοιχα. Η λειτουργία των ΧΑΔΑ, η γεωργική δραστηριότητα και η μη σημειακή διάθεση αστικών λυμάτων συμβάλουν ισόποσα στο TKN με ποσοστό της τάξεως του 10%. Τέλος, αρκετά μικρότερης σημασίας είναι η προσθήκη αζώτου προς νιτροποίηση λόγω των φυσικών διεργασιών, της λειτουργίας των δύο ΕΕΛ και της μονάδας Ιχθυοκαλλιέργειας με ποσοστά 4%, 2% και 1% αντίστοιχα.

Η γνώση της αναλογίας του ρύπου που εισέρχεται στο σύστημα, που μελετάται, από κάθε δραστηριότητα σε σχέση με τη συνολική ρύπανση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στο στάδιο της κατανομής των ρυπαντικών φορτίσεων ως διαχειριστικό μέτρο για την διασφάλιση της ποιότητας του ύδατος. Για παράδειγμα, αν στο συγκεκριμένο σύστημα προέκυπτε, ότι θα πρέπει να μειωθούν δραστικά οι συγκεντρώσεις του BOD στο μεγαλύτερο μέρος του ποταμού, είναι λογικό να πρέπει να περιοριστούν οι πιέσεις των δραστηριοτήτων με μεγάλη συμβολή στο συγκεκριμένο ρύπο, όπως η βιομηχανία, η ποιμενική κτηνοτροφία και η μη σημειακή διάθεση ανεπεξέργαστων αστικών λυμάτων. Αντιθέτως δεν είναι αναμενόμενο να υπάρξει σημαντική μείωση του BOD στο υδρολογικό σύστημα από τον περιορισμό των πιέσεων από τις υπόλοιπες δραστηριότητες, παρόλη την τοπική μείωση του ρύπου που μπορεί να εμφανιστεί στη διαδρομή κατά μήκος της οποίας διατίθενται.

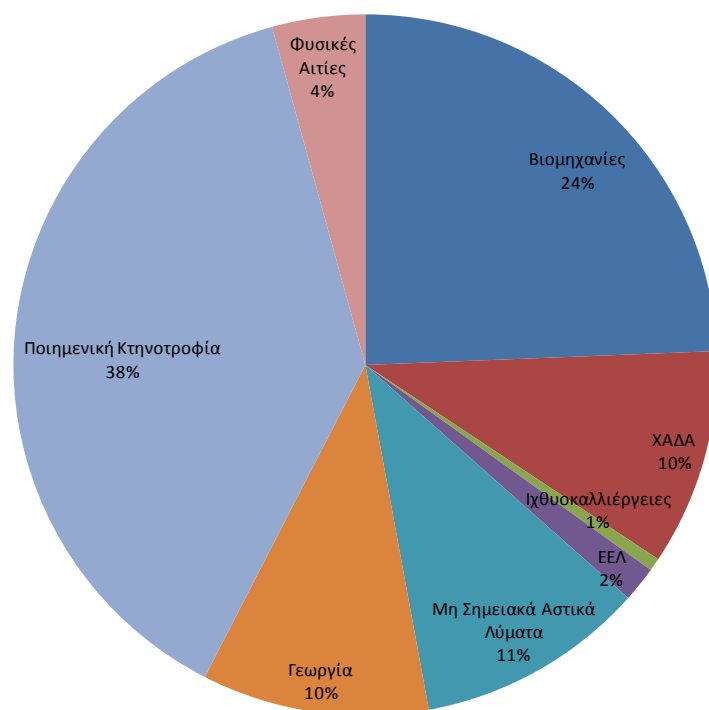
4.3.3.1 Χωρική Κατανομή των Πιέσεων

Η χωρική κατανομή της ρύπανσης με BOD εμφανίζει πύκνωση στο τμήμα της κύριας διαδρομής του ποταμού ανάμεσα την πόλη της Σπάρτης και τη Σκάλα. Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 4.3, η περισσότερη μάζα οργανικού άνθρακα εισέρχεται στο υδρολογικό σύστημα του Ευρώτα μέσω των υδάτινων τμημάτων 18, 25, 29, 9 με ποσοστά επί της συνολικής ετήσιας ρυπαντικής μάζας 18%, 17%, 12% και 6% αντίστοιχα. Η ροή του νερού συναντάει αυτά τα υδάτινα τμήματα ξεκινώντας από το 29 στη Σπάρτη και συνεχίζοντας με τα 25, 18 και 9.

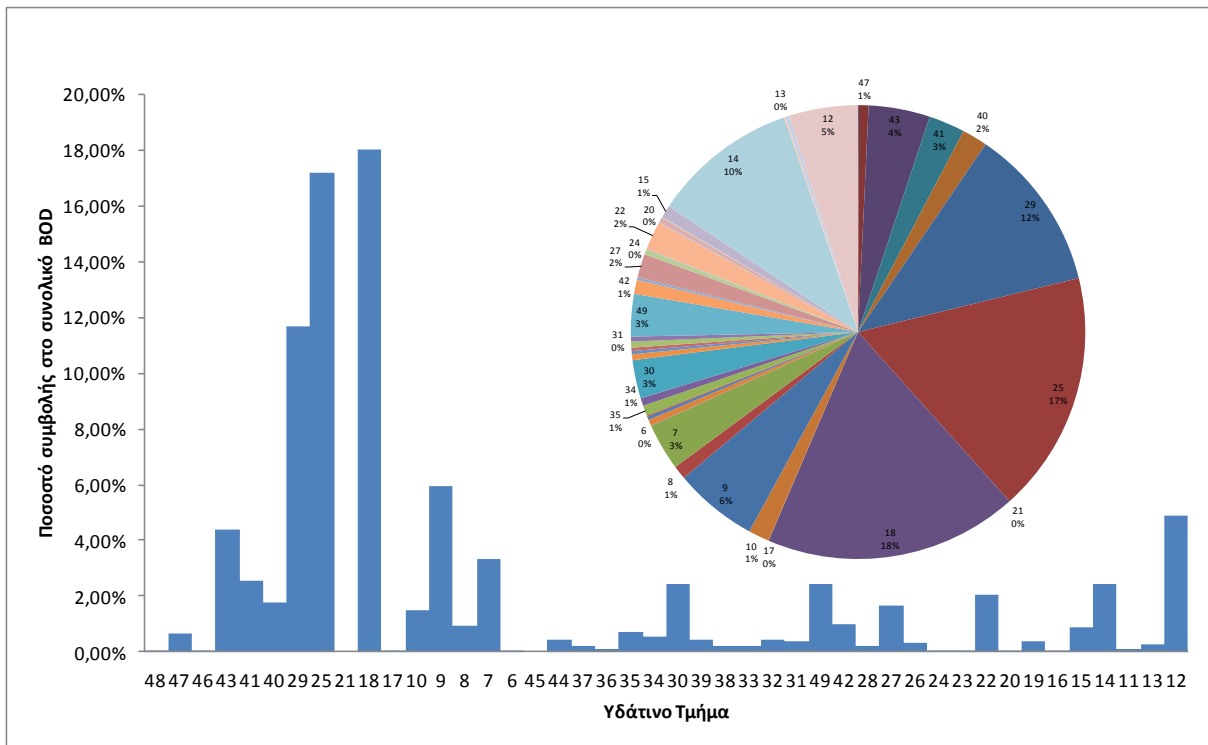
Η χωρική κατανομή της αζωτούχου ρύπανσης εμφανίζει μεγαλύτερη διασπορά. Μολονότι και στη συμβολή φορτίων νιτροποιήσιμου αζώτου υπερτερούν τα υδάτινα τμήματα 26, 9, 18, 9, 29 με ποσοστά 12%, 11%, 19% και 6%, το υπόλοιπο 60% του ρύπου εισρέει στον ποταμό από την υπόλοιπη έκταση της Λεκάνης Απορροής. Αξιόλογο ποσοστό στην ετήσια συμβολή στο TKN εμφανίζουν και τα υδάτινα τμήματα 30, 49, 43 και 8 με ποσοστά 8%, 5%, 5% και 5% αντίστοιχα, από τα οποία μόνο το 43 και το 8 ανήκουν στη βασική διαδρομή του Ευρώτα.



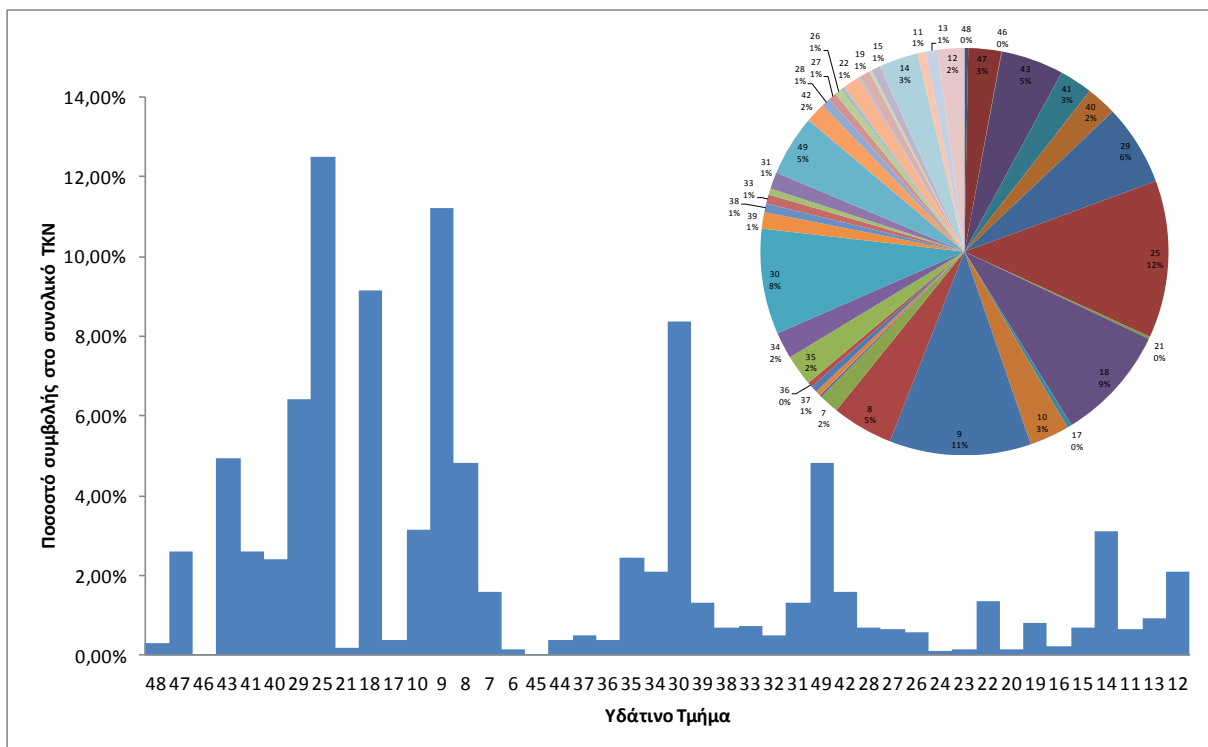
Διάγραμμα 4.1: Ετήσια Ποσοστά Συμβολής των Ρυπαντικών Πηγών στο BOD του Συστήματος



Διάγραμμα 4.2: Ετήσια Ποσοστά Συμβολής των Ρυπαντικών Πηγών στο TKN του Συστήματος



Διάγραμμα 4.3: Ετήσια Συμβολή BOD ανά Υδάτινο Τμήμα



Διάγραμμα 4.4: Ετήσια Συμβολή TKN ανά Υδάτινο Τμήμα

4.4 Οι Παροχές

Στο κείμενο τεκμηρίωσης του Προσχεδίου Διαχείρισης Υδατικών Πόρων του ΥΔ Δυτικής Πελοποννήσου «Ανάλυση ανθρωπογενών πιέσεων και των επιπτώσεών τους στα επιφανειακά και στα υπόγεια υδατικά συστήματα» (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2011) παρουσιάζεται εκτίμηση των καθαρών εισροών ανά υδάτινο σώμα, το οποίο για την εφαρμογή του RISDOE χρησιμοποιείται ως υδάτινο τμήμα. Ο καθορισμός των συνολικών εισροών σε κάθε υδάτινο σώμα υπολογίστηκε ως η διαφορά του αθροίσματος των απορροών λόγω της άμεσης απορροής των κατακρημνισμάτων και της συνεισφοράς της υποδερμικής ζώνης καθώς και των εισροών λόγω της συμβολής των πηγών από τη συνολική εξατμισοδιαπνοή στις υπολεκάνες των υδάτινων σωμάτων. Στις συνολικές εισροές, οι οποίες αναφέρονται στο δημοσιευμένο τεύχος ως «Μικτή Απορροή» είναι υπολογισμένες και πιθανές διαφυγές νερού από τη λεκάνη απορροής. Η αναγωγή από τη συνολική εισροή του υδρολογικού συστήματος του Ευρώτα στις εισροές κάθε υδάτινου σώματος έγινε σύμφωνα με την αναλογία της έκτασης της κάθε υπολεκάνης και των ανάντη υπολεκανών σε σχέση με το σύνολο των εκτάσεων των υπολεκανών, οι οποίες απορρέουν στο σύστημα του ποταμού. Συνεπώς για να υπολογιστεί από τον Πίνακα 5-6 του δημοσιευμένου τεύχους, (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2011), η επιπλέον εισροή νερού σε κάθε υδάτινο τμήμα, η οποία χρησιμοποιείται ως δεδομένο εισόδου για το μοντέλο RISDOE, αρκεί να αφαιρεθούν από την τιμή εισροής του οι αντίστοιχες τιμές των αμέσως ανάντη υδάτινων τμημάτων. Με τη διαδικασία αυτή προέκυψε ο παρακάτω πίνακας, στον οποίο φαίνονται ετήσιες εισροές ανά υδάτινο τμήμα για το υδρολογικό σύστημα του ποταμού Ευρώτα (Πίνακας 4.13).

Πίνακας 4.13: Ετήσιες Επιπλέον Εισροές ανά Υδάτινο Τμήμα

Υδάτινο Τμήμα	Ετήσια Εισροή (hm ³)	Υδάτινο Τμήμα	Ετήσια Εισροή (hm ³)
48	6,57	30	5,65
47	27,36	39	24,78
46	0,18	38	8,60
43	69,76	33	17,01
41	14,57	32	5,60
40	25,74	31	16,84
29	6,36	49	34,47
25	42,74	42	13,22
21	1,14	28	12,21
18	39,62	27	4,66
17	1,24	26	3,49
10	38,91	24	2,39
9	101,32	23	2,07
8	23,33	22	10,26
7	6,90	20	5,11
6	1,48	19	4,16
45	0,58	16	4,89
44	5,39	15	4,87
37	4,56	14	14,63
36	3,09	11	3,80
35	19,70	13	6,93
34	23,95	12	11,16

4.5 Δεδομένα Εισόδου του Μοντέλου

Για την εκτέλεση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν τα φορτία και οι παροχές που παρουσιάστηκαν στα παραπάνω εδάφια. Λόγω της εισαγωγής των πιέσεων με τη μορφή παροχών και συγκεντρώσεων, ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία. Για τις μη σημειακές πηγές ρύπανσης θεωρήθηκε συγκέντρωση στην επιπλέον παροχή κάθε τμήματος τέτοια, ώστε κάθε μέρα να καταλήγει στο τμήμα η αντίστοιχη μάζα του ρύπου. Δηλαδή, για εισερχόμενη μάζα M (kg/d) σε ένα υδάτινο τμήμα, το οποίο δέχεται ημερήσια επιπλέον παροχή λόγω απορροής ή άλλων αιτιών $Q_{\text{απορροής}}$ (m³/d) η αντίστοιχη συγκέντρωση του φορτίου είναι σύμφωνα με τη σχέση (4.1).

$$C = \frac{M}{Q_{\text{απορροής}}} 1000 \text{ (mg/l)} \quad (4.1)$$

Όσον αφορά στη χρονική διακύμανση των πιέσεων, θεωρείται ομοιόμορφη. Αντιθέτως, θεωρείται χρονική κατανομή των εισροών. Συγκεκριμένα, γίνεται σύνδεση των εισροών με τις βροχοπτώσεις, οι οποίες κατανέμονται σε 5%-10% περίπου το καλοκαίρι, 70%-75%

περίπου το χειμώνα και 20% περίπου την άνοιξη (Νικολαΐδης, et al., 2009). Συνεπώς επιλέχθηκαν οι συντελεστές αναγωγής των ετήσιων εισροών σε μηνιαίες ως 0,3 για τους μήνες από τον Ιούνιο ως τον Σεπτέμβριο, 1,5 για τον Οκτώβριο και τον Φεβρουάριο, 1,8 για τον Δεκέμβριο και τον Ιανουάριο και 0,8 για το Μάρτιο, τον Απρίλιο και το Μάιο.

Για τις σημειακές πηγές, θεωρείται ότι εισέρχονται στην αρχή των αντίστοιχων υδάτινων τμημάτων και ακολουθείται η ίδια διαδικασία με τις μη σημειακές φορτίσεις, αφού πρώτα καθοριστεί, η παροχή με την οποία συμβάλει η ρύπανση στο υδάτινο τμήμα. Για τις περιπτώσεις, που στο υδάτινο τμήμα συμβάλει ΕΕΛ θεωρείται παροχή συμβολής, η οποία προκύπτει με την παραδοχή, ότι κάθε ισοδύναμος κάτοικος παράγει $0,2 \text{ m}^3$ λυμάτων ανά μέρα. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις γίνεται η συντηρητική θεώρηση, ότι το σύνολο της ημερήσιας ρυπαντικής μάζας λόγω σημειακών πιέσεων εισέρχεται στο υδάτινο τμήμα με παροχή $1 \text{ m}^3/\text{d}$ και συγκέντρωση $1000M$ (mg/l), όπου M είναι η μάζα του ρύπου, που εισέρχεται στο τμήμα σε ημερήσια βάση.

4.6 Διακρίβωση του Μοντέλου

Με καθορισμένες τις τιμές των δεδομένων εισόδου, δηλαδή των φορτίων και των παροχών, όπως περιγράφηκαν στο εδάφιο 4.5, επιχειρήθηκε η διακρίβωση του μοντέλου με την κατάλληλη επιλογή των συντελεστών. Για το σκοπό αυτό έγινε χρήση των στοιχείων, που αναφέρονται στην έκθεση Υδρολογικής και Βιοχημικής Παρακολούθησης για τη λεκάνη απορροής του Ευρώτα (Σκουλίδης, et al., 2008). Στην έκθεση παρουσιάζονται μετρήσεις από σταθμούς παρακολούθησης κατά μήκος του ποταμού. Αρχικά συνδέθηκαν οι σταθμοί με τα υδάτινα τμήματα που χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή του μοντέλου. Έπειτα ακολουθήθηκε για τις ταχύτητες η εξής διαδικασία. Αφού βρέθηκε η μέση τιμή των μετρήσεων τριών περιόδων (Μάιος 2006, Σεπτέμβριος 2006, Μάρτιος 2007) που παρουσιάζονται στην έκθεση, η οποία προέκυψε περίπου στα $0,55 \text{ m/s}$, διαιρέθηκε κάθε τιμή με τη μέση τιμή και προέκυψαν ανηγμένες τιμές ταχύτητας. Οι τιμές αυτές χρησιμοποιήθηκαν έπειτα ως συντελεστές αναγωγής της μέσης ταχύτητας όλου του υδρολογικού συστήματος σε ταχύτητα του κάθε υδάτινου τμήματος. Ως ελάχιστη τιμή του συντελεστή αυτού θεωρήθηκε η τιμή 0,1. Όταν δηλαδή προέκυπτε από την παραπάνω διαδικασία τιμή μικρότερη από αυτήν, ο συντελεστής λαμβανόταν ίσος με 0,1. Τέθηκε επίσης μέγιστη τιμή 2,5. Ως μέση τιμή των ταχυτήτων θεωρήθηκε η τιμή 50000 m/d για όλο το έτος με κριτήριο τη μέση τιμή των μετρήσεων, που χρησιμοποιήθηκαν για τον καθορισμό των συντελεστών των ταχυτήτων. Με τις παραπάνω παραδοχές, την χρήση των τιμών

0,25 d⁻¹, 0,25 d⁻¹ και 0,8 d⁻¹ για τους συντελεστές K_1 , K_N και K_2 αντίστοιχα στους 20°C και την αναγωγή τους στην κατάλληλη θερμοκρασία σύμφωνα με τις σχέσεις (1.31) και (1.37) και την αντίστοιχη σχέση για τον συντελεστή K_N , $(K_N)_T = (K_N)_{20} 1.08^{T-20}$ (Thomann & Mueller, 1987), εκτελέστηκε ο κώδικας RISDOE1 για το Μάιο, το Σεπτέμβριο και το Μάρτιο. Για τις θερμοκρασίες επιλέχθηκαν οι τιμές των 22°C για το Σεπτέμβριο, των 18°C για το Μάρτιο και των 20°C για το Μάιο. Για την εκτίμηση της τιμής του οξυγόνου κορεσμού χρησιμοποιήθηκε η σχέση (4.2) (Thomann & Mueller, 1987).

$$DO_{SAT} = e^{-139,34411 + \frac{1,575701 \cdot 10^5}{T} - \frac{6,642308 \cdot 10^7}{T^2} + \frac{1,243800 \cdot 10^{10}}{T^3} - \frac{8,621949 \cdot 10^{11}}{T^4}} \quad (4.2)$$

Πρόέκυψαν οπότε οι παρακάτω πίνακες δεδομένων εισόδου για το Σεπτέμβριο, το Μάιο και το Μάρτιο (Πίνακας 4.14, Πίνακας 4.15 και Πίνακας 4.16).

Πίνακας 4.14: Πίνακας Δεδομένων Εισόδου Σεπτεμβρίου

ΟΝΟΜΑ	ΜΗΚΟΣ (m)	ΜΗ ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΠΗΓΗ ΤΜΗΜΑΤΟΣ			Χαλωρ (m ³ /d)	ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΠΗΓΗ ΣΤΗΝ ΑΡΧΗ ΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ				V(m/d)	K ₁	K ₂	K _N	O _{sat} (mg/l)	Καταλήγει στο
		CBOD (mg/l)	CN (mg/l)	CO (mg/l)		Q (m ³ /d)	CBOD (mg/l)	CN (mg/l)	CO (mg/l)						
48	3888,60	0,53	0,28	8,74	5401,69					5000,00	0,27	0,84	0,29	8,74	47
47	18310,80	1,29	0,62	8,74	22484,35					5000,00	0,27	0,84	0,29	8,74	46
46	465,70	0,89	1,32	8,74	149,49					28734,69	0,27	0,84	0,29	8,74	43
43	14864,70	0,95	0,43	8,74	57334,56	1,00	132767,12	2410,96	0,00	30530,61	0,27	0,84	0,29	8,74	41
41	6078,10	1,38	0,65	8,74	11972,21	1,00	94136,99	7068,49	0,00	92310,20	0,27	0,84	0,29	8,74	40
40	8602,40	1,11	0,60	8,74	21152,94	5,00	10756,16	191,78	0,00	92310,20	0,27	0,84	0,29	8,74	29
29	4573,40	1,25	0,70	8,74	5224,25	8000,00	61,90	4,18	1,00	100331,97	0,27	0,84	0,29	8,74	25
25	5795,20	1,78	0,62	8,74	35129,43	1,00	135194,52	9923,29	0,00	121404,08	0,27	0,84	0,29	8,74	21
21	1521,10	0,00	1,13	8,74	934,20					10057,14	0,27	0,84	0,29	8,74	18
18	8222,30	1,35	0,57	8,74	32567,99	1,00	146076,71	6756,16	0,00	125000,00	0,27	0,84	0,29	8,74	17
17	2499,10	0,42	2,11	8,74	1020,99					125000,00	0,27	0,84	0,29	8,74	10
10	2881,30	1,09	0,52	8,74	31980,14	1,00	29369,86	520,55	0,00	125000,00	0,27	0,84	0,29	8,74	9
9	9999,10	1,56	0,70	8,74	83280,11	500,00	250,79	8,32	0,00	55673,47	0,27	0,84	0,29	8,74	8
8	7500,00	2,10	1,00	8,74	19177,37	1,00	1150,68	8054,79	0,00	55673,47	0,27	0,84	0,29	8,74	7
7	6343,30	3,11	1,17	8,74	5667,62	1,00	126109,59	2301,37	0,00	51482,99	0,27	0,84	0,29	8,74	6
6	6156,70	0,89	0,74	8,74	1215,25					51482,99	0,27	0,84	0,29	8,74	1000
45	1485,50	0,00	0,39	8,74	476,89					5000,00	0,27	0,84	0,29	8,74	44
44	6371,30	1,38	0,43	8,74	4426,57	1,00	2624,66	49,32	0,00	5000,00	0,27	0,84	0,29	8,74	43
37	4852,50	2,46	0,75	8,74	3749,88					10476,19	0,27	0,84	0,29	8,74	36
36	2757,30	1,49	0,46	8,74	2537,20	1,00	164,38	1068,49	0,00	10476,19	0,27	0,84	0,29	8,74	35
35	6394,40	1,96	0,84	8,74	16195,51					10476,19	0,27	0,84	0,29	8,74	34
34	13630,30	1,21	0,58	8,74	19681,99					15265,31	0,27	0,84	0,29	8,74	30
30	5629,90	1,25	0,76	8,74	4641,95	1,00	111479,45	44821,92	0,00	28734,69	0,27	0,84	0,29	8,74	29
39	18009,40	0,87	0,33	8,74	20363,33					10476,19	0,27	0,84	0,29	8,74	38
38	6499,10	1,41	0,53	8,74	7065,54					15265,31	0,27	0,84	0,29	8,74	34
33	8997,50	0,74	0,27	8,74	13978,37					5000,00	0,27	0,84	0,29	8,74	32
32	5019,60	1,10	0,52	8,74	4601,16	1,00	13123,29	246,58	0,00	18557,82	0,27	0,84	0,29	8,74	31
31	5931,00	1,10	0,52	8,74	13842,21					18557,82	0,27	0,84	0,29	8,74	30
49	6988,90	2,17	0,88	8,74	28329,41	1,00	67808,22	1232,88	0,00	18557,82	0,27	0,84	0,29	8,74	46
42	7283,80	1,00	0,46	8,74	10868,07	1,00	31972,60	3838,36	0,00	29034,01	0,27	0,84	0,29	8,74	41
28	3517,40	0,84	0,37	8,74	10031,55					24544,22	0,27	0,84	0,29	8,74	27
27	4806,60	1,16	0,64	8,74	3827,91	1,00	13561,64	246,58	0,00	24544,22	0,27	0,84	0,29	8,74	26
26	9265,20	1,19	0,66	8,74	2869,15	1,00	11369,86	1506,85	0,00	26040,82	0,27	0,84	0,29	8,74	25
24	3005,80	0,29	0,25	8,74	1968,15					15265,31	0,27	0,84	0,29	8,74	23
23	3223,90	0,80	0,47	8,74	1699,46					15265,31	0,27	0,84	0,29	8,74	22
22	5642,10	0,79	0,47	8,74	8434,83					31727,89	0,27	0,84	0,29	8,74	21
20	2588,10	0,36	0,16	8,74	4201,39					31727,89	0,27	0,84	0,29	8,74	19
19	8901,90	1,73	1,09	8,74	3421,29	1,00	6794,52	136,99	0,00	31727,89	0,27	0,84	0,29	8,74	18
16	3908,80	0,42	0,30	8,74	4019,06					15265,31	0,27	0,84	0,29	8,74	15
15	4330,10	1,15	0,60	8,74	3998,85	1,00	5906,85	109,59	0,00	15265,31	0,27	0,84	0,29	8,74	14
14	11780,80	1,15	0,59	8,74	12026,07					15265,31	0,27	0,84	0,29	8,74	11
11	2599,40	1,22	1,16	8,74	3123,80					15265,31	0,27	0,84	0,29	8,74	10
13	2367,80	1,32	0,72	8,74	5694,41					6585,03	0,27	0,84	0,29	8,74	12
12	15082,00	1,34	0,73	8,74	9174,57	1,00	19178,08	690,41	0,00	6585,03	0,27	0,84	0,29	8,74	11

Πίνακας 4.15: Πίνακας Δεδομένων Εισόδου Μαρτίου

ΟΝΟΜΑ	ΜΗΚΟΣ (m)	ΜΗ ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΠΗΓΗ ΤΜΗΜΑΤΟΣ			Ζαγορ (m ³ /d)	ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΠΗΓΗ ΣΤΗΝ ΑΡΧΗ ΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ				V(m/d)	K ₁	K ₂	K _N	O ₂ (mg/l)	Καταλήγει στο
		CBOD (mg/l)	CN (mg/l)	CO (mg/l)		Q (m ³ /d)	CBOD (mg/l)	CN (mg/l)	CO (mg/l)						
48	3888,60	0,20	0,12	9,47	14404,52					5000,00	0,23	0,76	0,21	9,47	47
47	18310,80	0,48	0,25	9,47	59958,27					5000,00	0,23	0,76	0,21	9,47	46
46	465,70	0,33	0,51	9,47	398,63					28734,69	0,23	0,76	0,21	9,47	43
43	14864,70	0,36	0,17	9,47	152892,16	1,00	132767,12	2410,96	0,00	30530,61	0,23	0,76	0,21	9,47	41
41	6078,10	0,52	0,25	9,47	31925,89	1,00	94136,99	7068,49	0,00	92310,20	0,23	0,76	0,21	9,47	40
40	8602,40	0,42	0,23	9,47	56407,85	5,00	10756,16	191,78	0,00	92310,20	0,23	0,76	0,21	9,47	29
29	4573,40	0,47	0,27	9,47	13931,33	8000,00	61,90	4,18	1,00	100331,97	0,23	0,76	0,21	9,47	25
25	5795,20	0,67	0,24	9,47	93678,47	1,00	135194,52	9923,29	0,00	121404,08	0,23	0,76	0,21	9,47	21
21	1521,10	0,00	0,43	9,47	2491,21					10057,14	0,23	0,76	0,21	9,47	18
18	8222,30	0,51	0,22	9,47	86847,98	1,00	146076,71	6756,16	0,00	125000,00	0,23	0,76	0,21	9,47	17
17	2499,10	0,16	0,79	9,47	2722,64					125000,00	0,23	0,76	0,21	9,47	10
10	2881,30	0,41	0,20	9,47	85280,38	1,00	29369,86	520,55	0,00	125000,00	0,23	0,76	0,21	9,47	9
9	9999,10	0,59	0,27	9,47	222080,29	500,00	250,79	8,32	0,00	55673,47	0,23	0,76	0,21	9,47	8
8	7500,00	0,79	0,39	9,47	51139,66	1,00	1150,68	8054,79	0,00	55673,47	0,23	0,76	0,21	9,47	7
7	6343,30	1,16	0,45	9,47	15113,64	1,00	126109,59	2301,37	0,00	51482,99	0,23	0,76	0,21	9,47	6
6	6156,70	0,33	0,28	9,47	3240,66					51482,99	0,23	0,76	0,21	9,47	1000
45	1485,50	0,00	0,15	9,47	1271,70					5000,00	0,23	0,76	0,21	9,47	44
44	6371,30	0,52	0,17	9,47	11804,20	1,00	2624,66	49,32	0,00	5000,00	0,23	0,76	0,21	9,47	43
37	4852,50	0,92	0,29	9,47	9999,69					10476,19	0,23	0,76	0,21	9,47	36
36	2757,30	0,56	0,18	9,47	6765,87	1,00	164,38	1068,49	0,00	10476,19	0,23	0,76	0,21	9,47	35
35	6394,40	0,74	0,33	9,47	43188,01					10476,19	0,23	0,76	0,21	9,47	34
34	13630,30	0,45	0,23	9,47	52485,30					15265,31	0,23	0,76	0,21	9,47	30
30	5629,90	0,47	0,29	9,47	12378,54	1,00	111479,45	44821,92	0,00	28734,69	0,23	0,76	0,21	9,47	29
39	18009,40	0,33	0,13	9,47	54302,22					10476,19	0,23	0,76	0,21	9,47	38
38	6499,10	0,53	0,21	9,47	18841,43					15265,31	0,23	0,76	0,21	9,47	34
33	8997,50	0,28	0,11	9,47	37275,66					5000,00	0,23	0,76	0,21	9,47	32
32	5019,60	0,41	0,20	9,47	12269,77	1,00	13123,29	246,58	0,00	18557,82	0,23	0,76	0,21	9,47	31
31	5931,00	0,41	0,20	9,47	36912,57					18557,82	0,23	0,76	0,21	9,47	30
49	6988,90	0,81	0,35	9,47	75545,08	1,00	67808,22	1232,88	0,00	18557,82	0,23	0,76	0,21	9,47	46
42	7283,80	0,37	0,18	9,47	28981,52	1,00	31972,60	3838,36	0,00	29034,01	0,23	0,76	0,21	9,47	41
28	3517,40	0,31	0,15	9,47	26750,81					24544,22	0,23	0,76	0,21	9,47	27
27	4806,60	0,43	0,24	9,47	10207,77	1,00	13561,64	246,58	0,00	24544,22	0,23	0,76	0,21	9,47	26
26	9265,20	0,45	0,25	9,47	7651,08	1,00	11369,86	1506,85	0,00	26040,82	0,23	0,76	0,21	9,47	25
24	3005,80	0,11	0,10	9,47	5248,41					15265,31	0,23	0,76	0,21	9,47	23
23	3223,90	0,30	0,18	9,47	4531,89					15265,31	0,23	0,76	0,21	9,47	22
22	5642,10	0,29	0,18	9,47	22492,89					31727,89	0,23	0,76	0,21	9,47	21
20	2588,10	0,14	0,07	9,47	11203,70					31727,89	0,23	0,76	0,21	9,47	19
19	8901,90	0,65	0,42	9,47	9123,45	1,00	6794,52	136,99	0,00	31727,89	0,23	0,76	0,21	9,47	18
16	3908,80	0,16	0,12	9,47	10717,48					15265,31	0,23	0,76	0,21	9,47	15
15	4330,10	0,43	0,23	9,47	10663,60	1,00	5906,85	109,59	0,00	15265,31	0,23	0,76	0,21	9,47	14
14	11780,80	0,43	0,23	9,47	32069,51					15265,31	0,23	0,76	0,21	9,47	11
11	2599,40	0,46	0,44	9,47	8330,13					15265,31	0,23	0,76	0,21	9,47	10
13	2367,80	0,50	0,28	9,47	15185,10					6585,03	0,23	0,76	0,21	9,47	12
12	15082,00	0,50	0,28	9,47	24465,52	1,00	19178,08	690,41	0,00	6585,03	0,23	0,76	0,21	9,47	11

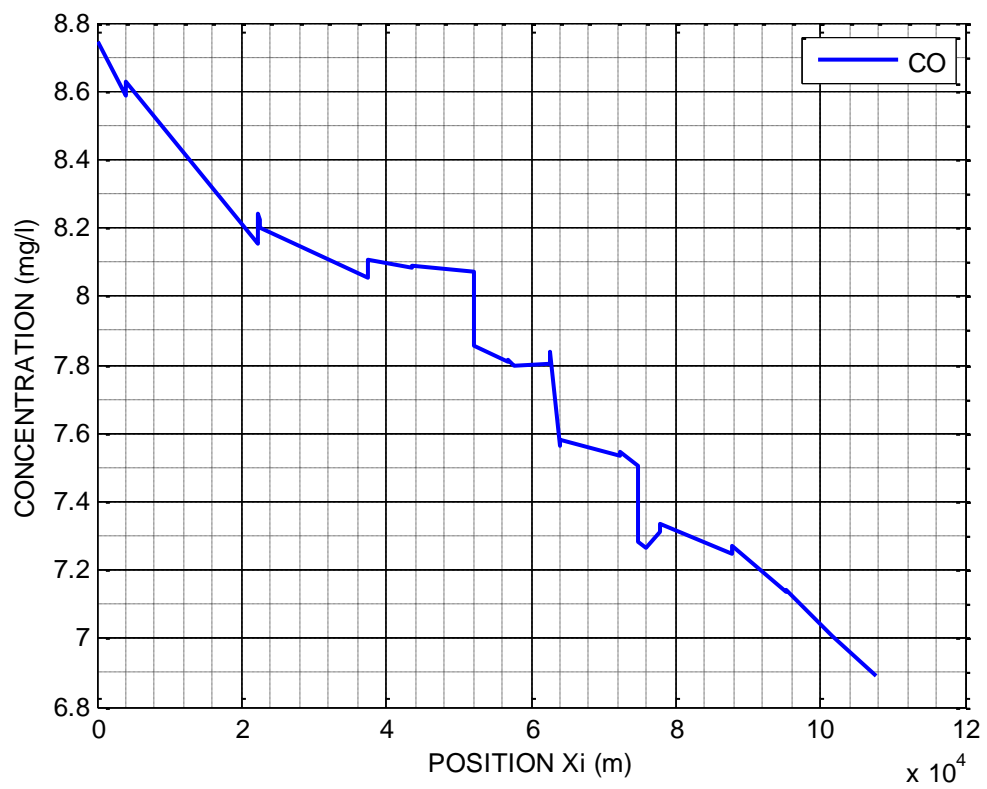
Πίνακας 4.16: Πίνακας Δεδομένων Εισόδου Μαΐου

ΟΝΟΜΑ	ΜΗΚΟΣ (m)	ΜΗ ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΠΗΓΗ ΤΜΗΜΑΤΟΣ			Ζαπορ (m ³ /d)	ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΠΗΓΗ ΣΤΗΝ ΑΡΧΗ ΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ				V(m/d)	K ₁	K ₂	K _N	O _{sat} (mg/l)	Καταλήγει στο
		CBOD (mg/l)	CN (mg/l)	CO (mg/l)		Q (m ³ /d)	CBOD (mg/l)	CN (mg/l)	CO (mg/l)						
48	3888,60	0,20	0,12	9,09	14404,52					5000,00	0,25	0,80	0,25	9,09	47
47	18310,80	0,48	0,25	9,09	59958,27					5000,00	0,25	0,80	0,25	9,09	46
46	465,70	0,33	0,51	9,09	398,63					28734,69	0,25	0,80	0,25	9,09	43
43	14864,70	0,36	0,17	9,09	152892,16	1,00	132767,12	2410,96	0,00	30530,61	0,25	0,80	0,25	9,09	41
41	6078,10	0,52	0,25	9,09	31925,89	1,00	94136,99	7068,49	0,00	92310,20	0,25	0,80	0,25	9,09	40
40	8602,40	0,42	0,23	9,09	56407,85	5,00	10756,16	191,78	0,00	92310,20	0,25	0,80	0,25	9,09	29
29	4573,40	0,47	0,27	9,09	13931,33	8000,00	61,90	4,18	1,00	100331,97	0,25	0,80	0,25	9,09	25
25	5795,20	0,67	0,24	9,09	93678,47	1,00	135194,52	9923,29	0,00	121404,08	0,25	0,80	0,25	9,09	21
21	1521,10	0,00	0,43	9,09	2491,21					10057,14	0,25	0,80	0,25	9,09	18
18	8222,30	0,51	0,22	9,09	86847,98	1,00	146076,71	6756,16	0,00	125000,00	0,25	0,80	0,25	9,09	17
17	2499,10	0,16	0,79	9,09	2722,64					125000,00	0,25	0,80	0,25	9,09	10
10	2881,30	0,41	0,20	9,09	85280,38	1,00	29369,86	520,55	0,00	125000,00	0,25	0,80	0,25	9,09	9
9	9999,10	0,59	0,27	9,09	222080,29	500,00	250,79	8,32	0,00	55673,47	0,25	0,80	0,25	9,09	8
8	7500,00	0,79	0,39	9,09	51139,66	1,00	1150,68	8054,79	0,00	55673,47	0,25	0,80	0,25	9,09	7
7	6343,30	1,16	0,45	9,09	15113,64	1,00	126109,59	2301,37	0,00	51482,99	0,25	0,80	0,25	9,09	6
6	6156,70	0,33	0,28	9,09	3240,66					51482,99	0,25	0,80	0,25	9,09	1000
45	1485,50	0,00	0,15	9,09	1271,70					5000,00	0,25	0,80	0,25	9,09	44
44	6371,30	0,52	0,17	9,09	11804,20	1,00	2624,66	49,32	0,00	5000,00	0,25	0,80	0,25	9,09	43
37	4852,50	0,92	0,29	9,09	9999,69					10476,19	0,25	0,80	0,25	9,09	36
36	2757,30	0,56	0,18	9,09	6765,87	1,00	164,38	1068,49	0,00	10476,19	0,25	0,80	0,25	9,09	35
35	6394,40	0,74	0,33	9,09	43188,01					10476,19	0,25	0,80	0,25	9,09	34
34	13630,30	0,45	0,23	9,09	52485,30					15265,31	0,25	0,80	0,25	9,09	30
30	5629,90	0,47	0,29	9,09	12378,54	1,00	111479,45	44821,92	0,00	28734,69	0,25	0,80	0,25	9,09	29
39	18009,40	0,33	0,13	9,09	54302,22					10476,19	0,25	0,80	0,25	9,09	38
38	6499,10	0,53	0,21	9,09	18841,43					15265,31	0,25	0,80	0,25	9,09	34
33	8997,50	0,28	0,11	9,09	37275,66					5000,00	0,25	0,80	0,25	9,09	32
32	5019,60	0,41	0,20	9,09	12269,77	1,00	13123,29	246,58	0,00	18557,82	0,25	0,80	0,25	9,09	31
31	5931,00	0,41	0,20	9,09	36912,57					18557,82	0,25	0,80	0,25	9,09	30
49	6988,90	0,81	0,35	9,09	75545,08	1,00	67808,22	1232,88	0,00	18557,82	0,25	0,80	0,25	9,09	46
42	7283,80	0,37	0,18	9,09	28981,52	1,00	31972,60	3838,36	0,00	29034,01	0,25	0,80	0,25	9,09	41
28	3517,40	0,31	0,15	9,09	26750,81					24544,22	0,25	0,80	0,25	9,09	27
27	4806,60	0,43	0,24	9,09	10207,77	1,00	13561,64	246,58	0,00	24544,22	0,25	0,80	0,25	9,09	26
26	9265,20	0,45	0,25	9,09	7651,08	1,00	11369,86	1506,85	0,00	26040,82	0,25	0,80	0,25	9,09	25
24	3005,80	0,11	0,10	9,09	5248,41					15265,31	0,25	0,80	0,25	9,09	23
23	3223,90	0,30	0,18	9,09	4531,89					15265,31	0,25	0,80	0,25	9,09	22
22	5642,10	0,29	0,18	9,09	22492,89					31727,89	0,25	0,80	0,25	9,09	21
20	2588,10	0,14	0,07	9,09	11203,70					31727,89	0,25	0,80	0,25	9,09	19
19	8901,90	0,65	0,42	9,09	9123,45	1,00	6794,52	136,99	0,00	31727,89	0,25	0,80	0,25	9,09	18
16	3908,80	0,16	0,12	9,09	10717,48					15265,31	0,25	0,80	0,25	9,09	15
15	4330,10	0,43	0,23	9,09	10663,60	1,00	5906,85	109,59	0,00	15265,31	0,25	0,80	0,25	9,09	14
14	11780,80	0,43	0,23	9,09	32069,51					15265,31	0,25	0,80	0,25	9,09	11
11	2599,40	0,46	0,44	9,09	8330,13					15265,31	0,25	0,80	0,25	9,09	10
13	2367,80	0,50	0,28	9,09	15185,10					6585,03	0,25	0,80	0,25	9,09	12
12	15082,00	0,50	0,28	9,09	24465,52	1,00	19178,08	690,41	0,00	6585,03	0,25	0,80	0,25	9,09	11

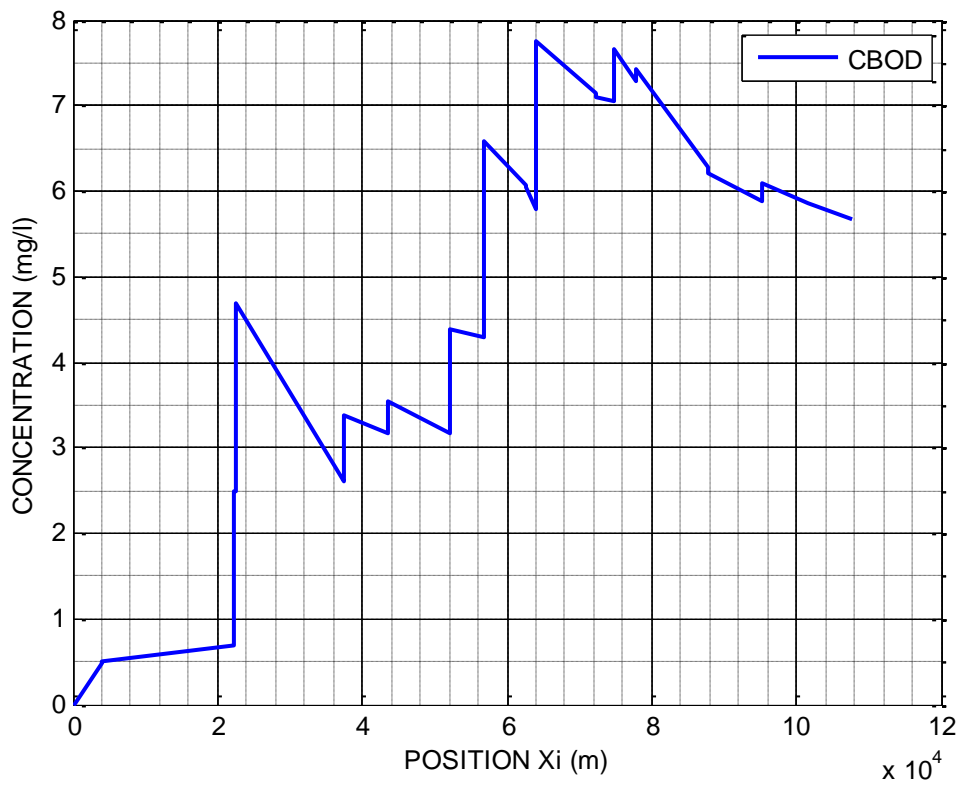
Η εκτέλεση του κώδικα με πίνακες δεδομένων InputData τους παραπάνω πίνακες έδωσε τα διαγράμματα για τη διαδρομή από το υδάτινο τμήμα 48 μέχρι το υδάτινο τμήμα 6 των συγκεντρώσεων των τριών ποιοτικών χαρακτηριστικών και του πίνακες αποτελεσμάτων, που ακολουθούν.

Πίνακας 4.17: Πίνακας Αποτελεσμάτων Σεπτεμβρίου

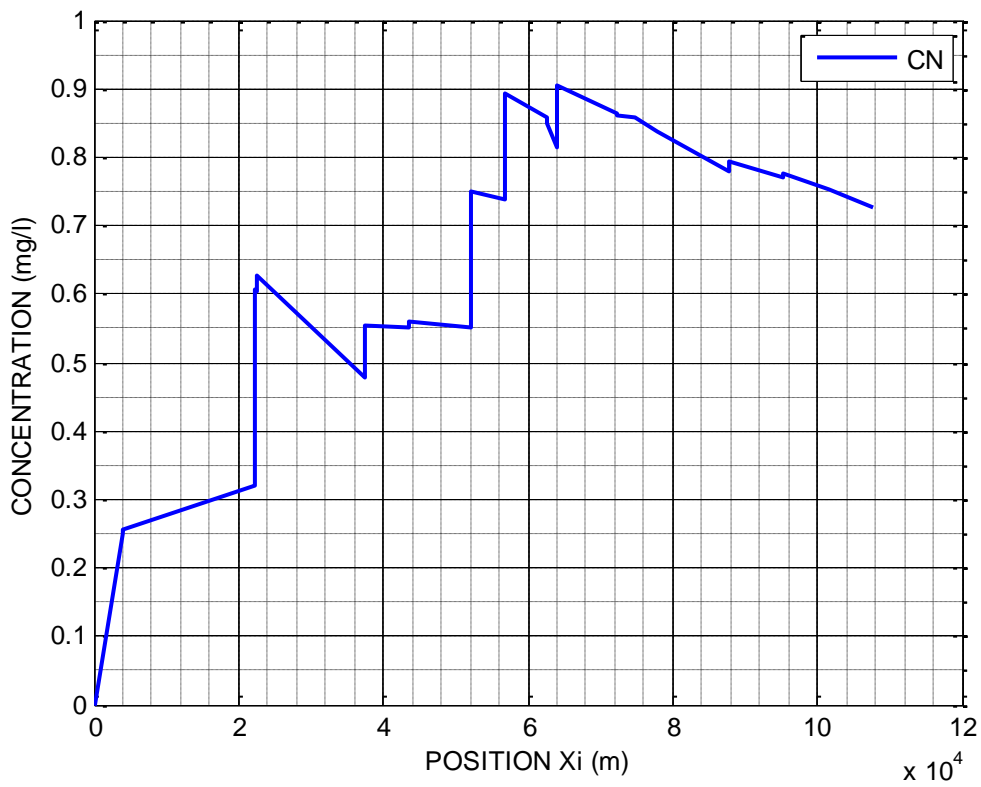
ΟΝΟΜΑ	Q (m ₃ /d)	CBOD _{start} (mg/l)	CBOD _{end} (mg/l)	CN _{start} (mg/l)	CN _{end} (mg/l)	CO _{start} (mg/l)	CO _{min} (mg/l)	CO _{end} (mg/l)	XO _{min} (m)
48	1		0,47860274		0,248855			8,587417	3888,6
47	5403,69432	0,49166564	0,68644307	0,256176	0,319959	8,624887	8,151947	8,151947	18310,8
46	56219,4533	2,49060074	2,47972603	0,606225	0,603383	8,242761	8,225781	8,225781	465,7
43	61275,4006	4,68246985	2,6064178	0,627707	0,47775	8,200665	8,055027	8,055027	14864,7
41	129480,034	3,37760217	3,17484126	0,555491	0,552398	8,105239	8,083921	8,083921	6078,1
40	141457,244	3,53321503	3,16976569	0,560363	0,550649	8,091613	8,072934	8,072934	8602,4
29	277277,336	4,39743592	4,29758523	0,749226	0,738765	7,858278	7,80819	7,80819	4573,4
25	299234,207	6,58333577	6,0775907	0,894732	0,858486	7,814521	7,797215	7,802274	965,8667
21	346470,085	6,03980997	5,79032791	0,849286	0,813234	7,835621	7,561773	7,561773	1521,1
18	355029,969	7,76270021	7,15182877	0,905725	0,86398	7,583602	7,532576	7,532576	8222,3
17	387598,961	7,0976247	7,04777995	0,861208	0,858421	7,543864	7,505454	7,505454	2499,1
10	426663,703	7,65267022	7,29494432	0,859228	0,837667	7,282888	7,267742	7,309023	960,4333
9	459143,846	7,4160352	6,28768108	0,838498	0,780351	7,334373	7,250291	7,250291	9999,1
8	542424,956	6,21725659	5,87718413	0,794009	0,770227	7,273207	7,134834	7,134834	7500
7	561603,33	6,08560666	5,86220384	0,775322	0,75156	7,141689	7,005431	7,005431	6343,3
6	567271,945	5,85825983	5,66332747	0,752158	0,726529	7,007899	6,888236	6,888236	6156,7
45	1		0		0,372298			8,644442	1
44	478,886018	27,4037861	3,21475036	0,895396	0,388492	8,675819	7,27192	7,772782	910,1857
37	1		2,31014479		0,703574			8,411238	1
36	3751,88286	2,38311108	1,97681065	0,997926	0,773658	8,475456	8,24901	8,24901	2757,3
35	6290,0846	1,91105666	1,75029506	0,730811	0,723359	8,314214	8,179515	8,179515	6394,4
34	49917,4593	1,24435785	1,00356452	0,496392	0,418147	8,330973	8,105456	8,105456	13630,3
30	102025,199	2,14796889	2,00721159	0,842548	0,793859	8,222204	8,025422	8,025422	5629,9
39	1		0,69350001		0,255695			8,423512	1
38	20365,3334	0,70263412	0,78876807	0,259334	0,291297	8,439949	8,395011	8,395011	6499,1
33	1		0,5810898		0,212948			8,462832	1
32	13980,3717	1,5368743	1,35007559	0,237356	0,279711	8,493431	8,427121	8,427121	5019,6
31	18582,5362	1,33980785	1,16189069	0,289584	0,352265	8,439733	8,414326	8,42253	988,5
49	1		4,58660588		0,875495			8,235068	998,4143
42	1		4,10376099		0,815348			8,364318	910,475
28	1		0,82023149		0,359961			8,693722	1
27	10033,5543	7,58232153	5,7739907	0,484699	0,49589	8,70535	8,331437	8,331437	4806,6
26	13862,4691	6,33887606	5,03233884	0,612405	0,56345	8,353604	7,848106	7,848106	9265,2
24	1		0,28587332		0,239309			8,700958	1
23	1970,1549	0,28769686	0,57344543	0,240956	0,341768	8,707219	8,640756	8,640756	3223,9
22	3670,6152	21,9925417	7,86603095	1,222491	0,735796	8,650318	8,243974	8,243974	5642,1
20	1		0,35927894		0,161875			8,728142	1
19	4203,38681	1,97700073	2,16588842	0,195088	0,636118	8,731253	8,494356	8,494356	8901,9
16	1		0,40655922		0,288145			8,680939	1
15	4021,05506	7,7549563	4,96133724	0,427083	0,579942	8,694466	8,263269	8,263269	4330,1
14	8020,90442	56,7976524	20,5954812	1,552807	0,961683	8,310144	4,641942	4,641942	11780,8
11	34918,9538	14,8525246	13,4540395	0,857107	0,833635	4,966763	4,859431	4,893015	866,4667
13	1		2,07344727		0,873927			8,450698	1
12	5696,41427	35,4378122	8,59457118	1,495398	0,715593	8,546852	4,228954	4,983565	7541



Διάγραμμα 4.5: CO Σεπτεμβρίου (Διαδρομή: 48-6)



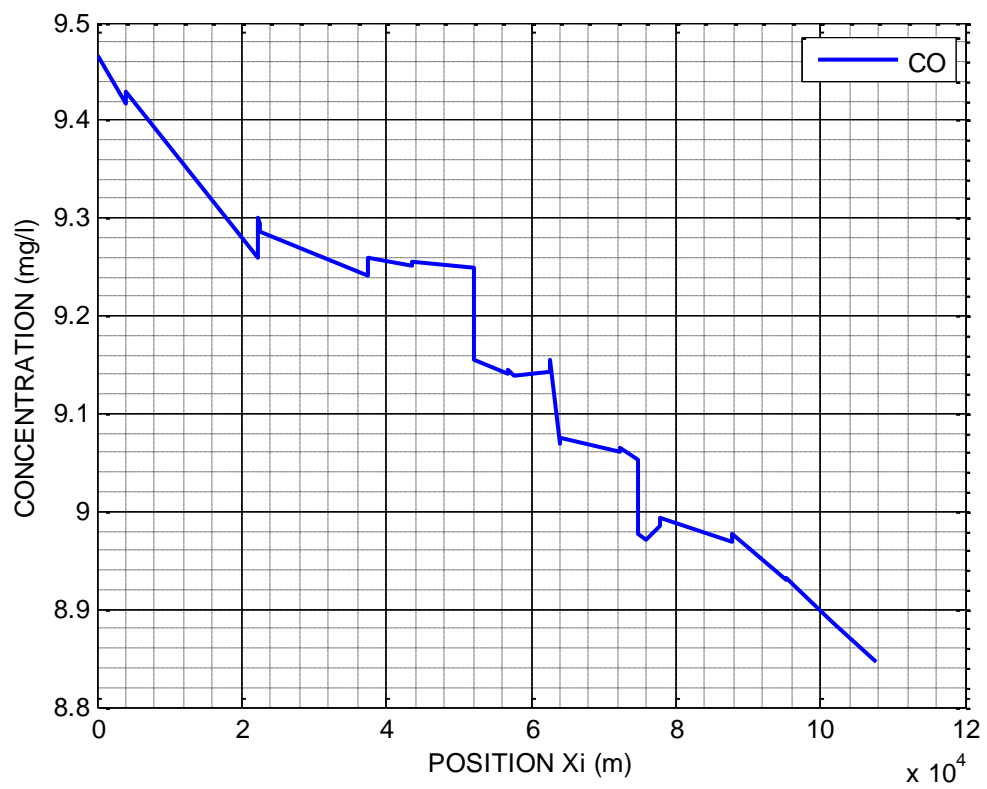
Διάγραμμα 4.6: CBOD Σεπτεμβρίου (Διαδρομή: 48-6)



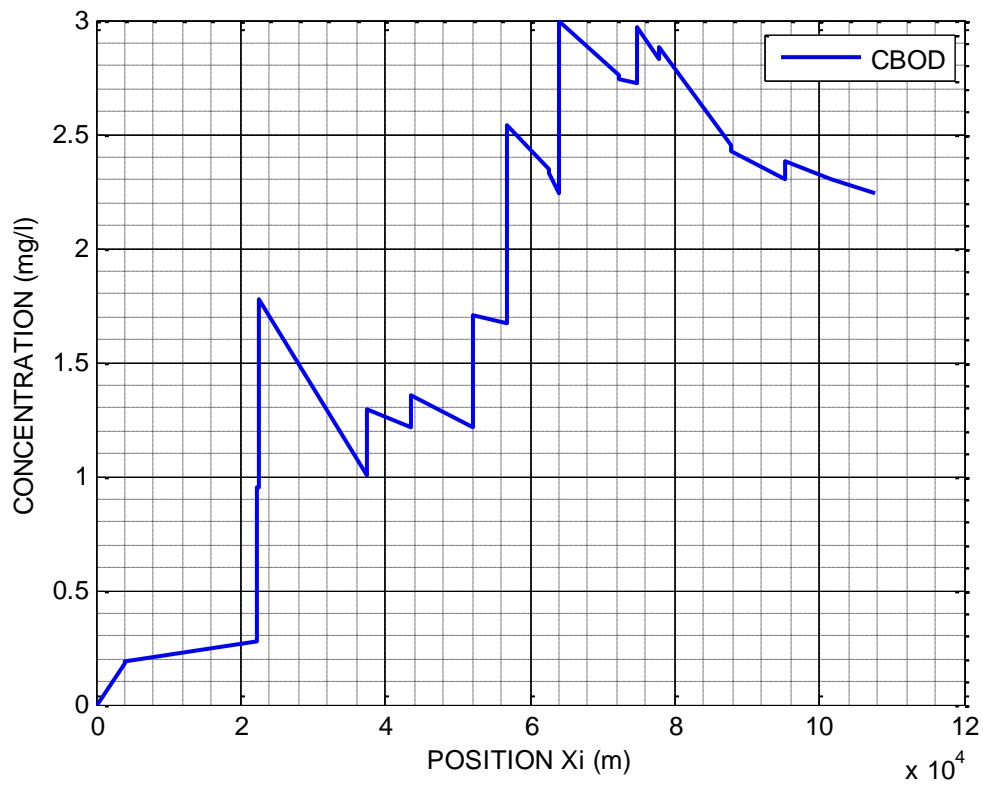
Διάγραμμα 4.7: CN Σεπτεμβρίου (Διαδρομή: 48-6)

Πίνακας 4.18: Πίνακας Αποτελεσμάτων Μαρτίου

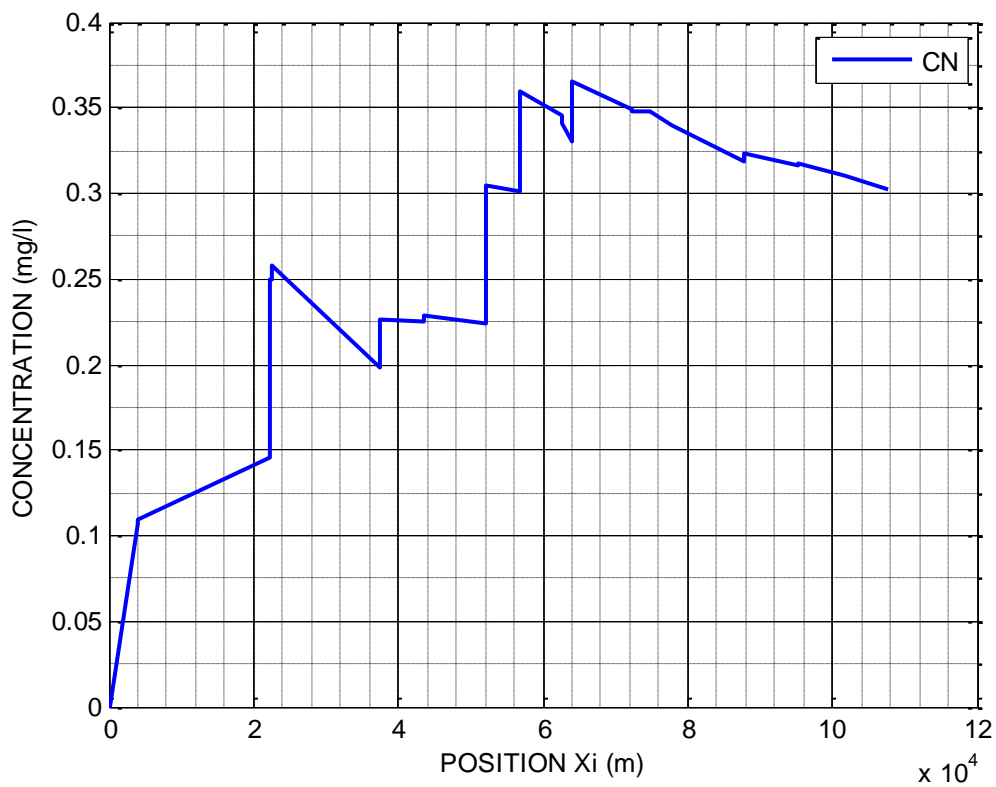
ΟΝΟΜΑ	Q (m ³ /d)	CBOD _{start} (mg/l)	CBOD _{end} (mg/l)	CN _{start} (mg/l)	CN _{end} (mg/l)	CO _{start} (mg/l)	CO _{min} (mg/l)	CO _{end} (mg/l)	XO _{min} (m)
48	1		0,18240729		0,106652			9,417277	3888,6
47	14406,5182	0,18659485	0,27666574	0,108947	0,145537	9,429052	9,25968	9,25968	18310,8
46	149911,876	0,95228117	0,94876792	0,250176	0,249308	9,300063	9,294683	9,294683	465,7
43	163389,401	1,77716033	1,0060518	0,257665	0,19858	9,286552	9,241672	9,241672	14864,7
41	345265,089	1,2930717	1,21796488	0,226828	0,225489	9,258689	9,252041	9,252041	6078,1
40	377195,983	1,35205806	1,21663605	0,22833	0,224151	9,254518	9,248824	9,248824	8602,4
29	726032,897	1,70387616	1,66780783	0,304864	0,301346	9,155369	9,140279	9,140279	4573,4
25	784577,886	2,53849374	2,34389211	0,360202	0,345732	9,144115	9,138685	9,143504	965,8667
21	910533,559	2,32679979	2,24483916	0,341462	0,330692	9,155632	9,068589	9,068589	1521,1
18	933354,918	2,99355387	2,76202956	0,365485	0,349412	9,076214	9,061711	9,061711	8222,3
17	1020203,9	2,74068291	2,72365135	0,348173	0,347477	9,065536	9,05321	9,05321	2499,1
10	1124364,87	2,96998507	2,83182813	0,348167	0,339579	8,976654	8,971725	8,986139	960,4333
9	1210145,26	2,87735706	2,45180255	0,339694	0,31817	8,993722	8,968449	8,968449	9999,1
8	1432226,55	2,42367712	2,30264311	0,323057	0,315872	8,976173	8,93017	8,93017	7500
7	1483367,21	2,38112903	2,30505219	0,317724	0,31058	8,932477	8,886075	8,886075	6343,3
6	1498481,85	2,30340773	2,23789502	0,310776	0,302862	8,886906	8,845046	8,845046	6156,7
45	1		0		0,148497			9,4344	1
44	1273,69605	10,3033119	1,26085519	0,34449	0,160451	9,443267	8,99912	9,147338	910,1857
37	1		0,87484433		0,277338			9,365821	1
36	10001,6876	0,900652	0,75310877	0,386957	0,30542	9,385116	9,316155	9,316155	2757,3
35	16768,5589	0,72692896	0,66997257	0,288074	0,289128	9,335887	9,292536	9,292536	6394,4
34	133103,225	0,47754118	0,39506664	0,202423	0,178191	9,33509	9,257513	9,257513	13630,3
30	272050,53	0,82117068	0,77329451	0,334379	0,319152	9,296347	9,235798	9,235798	5629,9
39	1		0,26899951		0,11184			9,361375	1
38	54304,2224	0,27196248	0,30599631	0,112993	0,125171	9,366762	9,35112	9,35112	6499,1
33	1		0,22580614		0,091008			9,375866	1
32	37277,6579	0,58338939	0,51676765	0,099712	0,116632	9,38574	9,364302	9,364302	5019,6
31	49548,43	0,51250076	0,44633125	0,120261	0,144821	9,368352	9,360103	9,363353	988,5
49	1		1,74115001		0,349559			9,308658	998,4143
42	1		1,55336217		0,319066			9,35096	910,475
28	1		0,30853544		0,145626			9,451694	1
27	26752,8115	2,84441711	2,18340872	0,192269	0,197294	9,455167	9,337809	9,337809	4806,6
26	36961,5842	2,39436343	1,92839184	0,240676	0,226007	9,344692	9,182663	9,182663	9265,2
24	1		0,10768983		0,099056			9,453368	1
23	5250,41307	0,10828624	0,21654447	0,099571	0,137848	9,454974	9,435097	9,435097	3223,9
22	9783,30721	8,25267299	2,97182425	0,468056	0,286701	9,437827	9,31137	9,31137	5642,1
20	1		0,13499013		0,065721			9,46198	1
19	11205,6982	0,7417495	0,81957102	0,078135	0,247865	9,462809	9,390912	9,390912	8901,9
16	1		0,15330799		0,117134			9,447707	1
15	10719,4802	2,90962507	1,88123522	0,169056	0,227585	9,451648	9,316696	9,316696	4330,1
14	21384,0785	21,3224745	7,97716087	0,592014	0,38334	9,331251	8,129562	8,129562	11780,8
11	93107,21	5,83332409	5,32061933	0,350398	0,343273	8,197824	8,159244	8,165401	866,4667
13	1		0,78352753		0,338557			9,379701	1
12	15187,1047	13,296001	3,52850272	0,570272	0,308245	9,40818	7,966811	8,149091	8483,625



Διάγραμμα 4.8: CO Μαρτίου (Διαδρομή: 48-6)



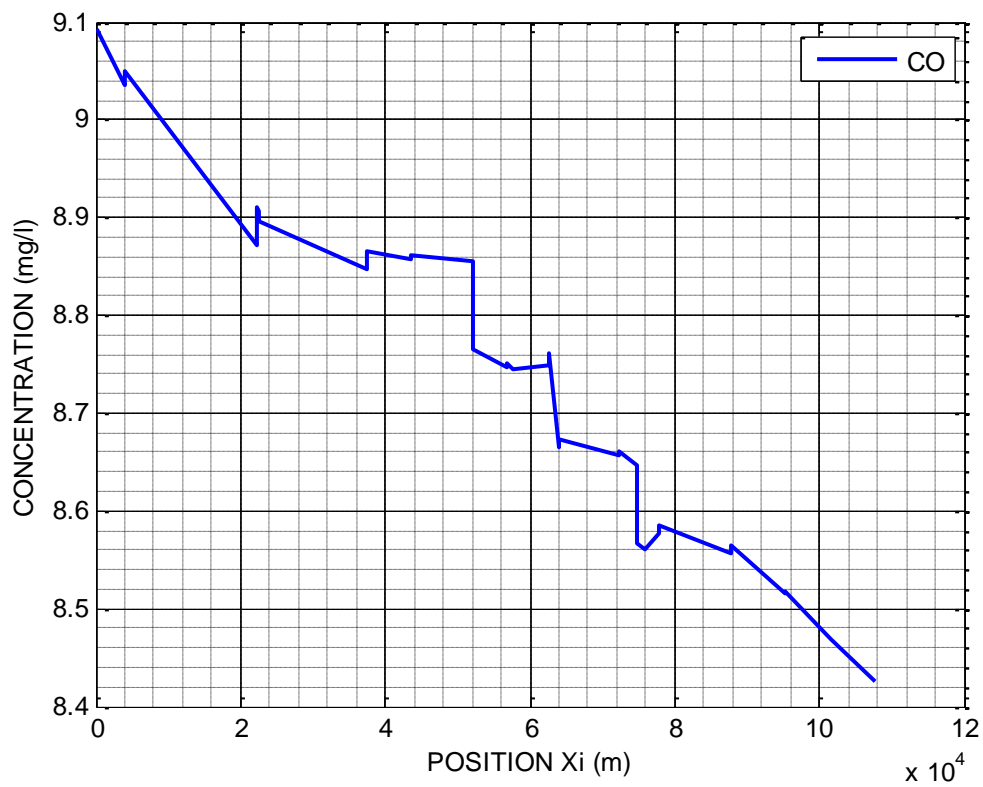
Διάγραμμα 4.9: CBOD Μαρτίου (Διαδρομή: 48-6)



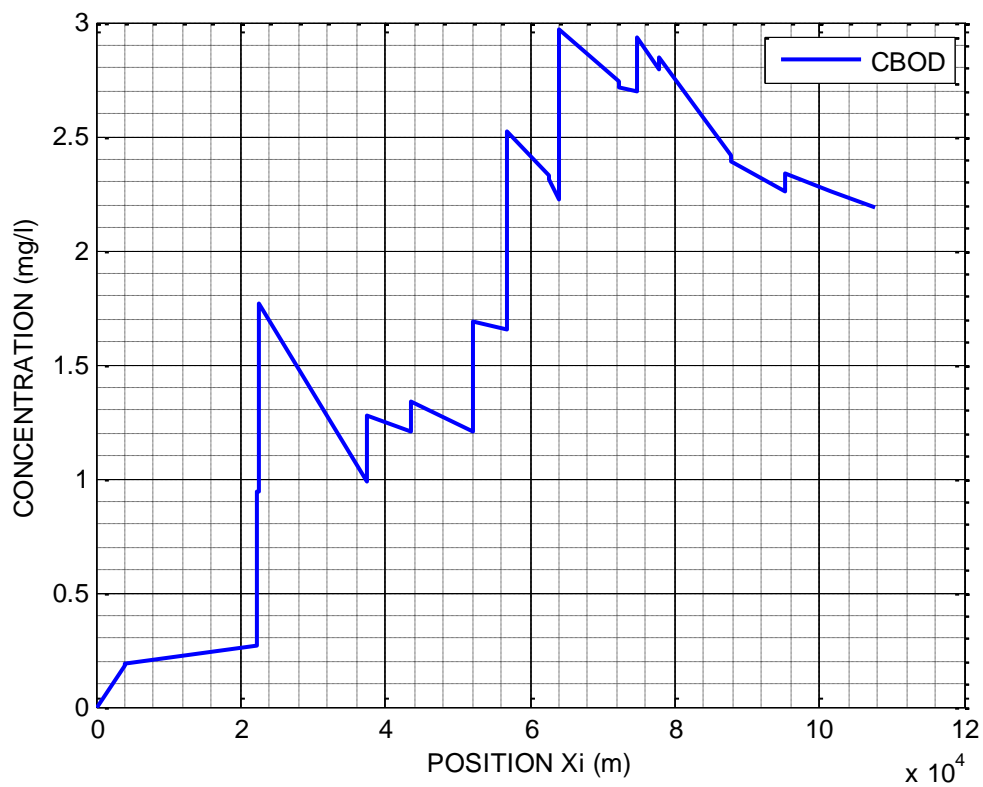
Διάγραμμα 4.10: CN Μαρτίου (Διαδρομή: 48-6)

Πίνακας 4.19: Πίνακας Αποτελεσμάτων Μαΐου

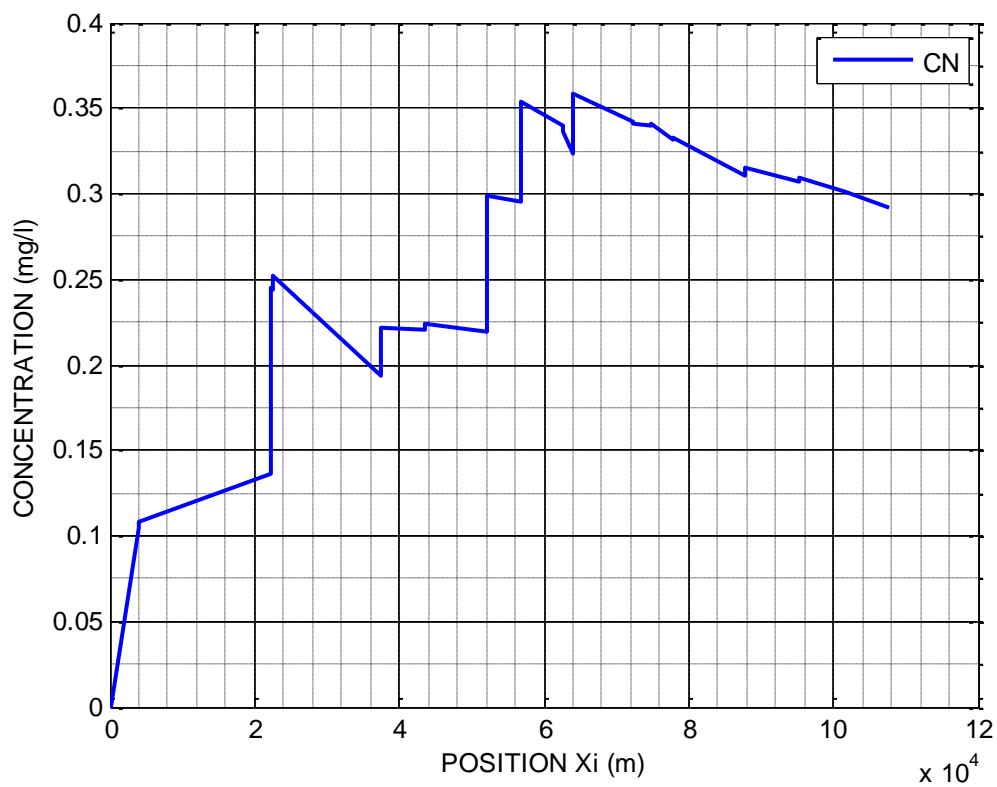
ΟΝΟΜΑ	Q (m ³ /d)	CBOD _{start} (mg/l)	CBOD _{end} (mg/l)	CN _{start} (mg/l)	CN _{end} (mg/l)	CO _{start} (mg/l)	CO _{min} (mg/l)	CO _{end} (mg/l)	XO _{min} (m)
48	1		0,18088149		0,105205			9,036285	3888,6
47	14406,5182	0,18545056	0,26635834	0,107862	0,136697	9,049691	8,872223	8,872223	18310,8
46	149911,876	0,94259468	0,93878328	0,244926	0,243935	8,911616	8,905661	8,905661	465,7
43	163389,401	1,76597061	0,99091959	0,252444	0,193344	8,896955	8,847194	8,847194	14864,7
41	345265,089	1,27910377	1,20350294	0,222036	0,220614	8,865466	8,858142	8,858142	6078,1
40	377195,983	1,33777117	1,20188021	0,223514	0,219298	8,860857	8,85457	8,85457	8602,4
29	726032,897	1,69095615	1,65356364	0,299217	0,295361	8,764645	8,747503	8,747503	4573,4
25	784577,886	2,52390357	2,32835758	0,354377	0,339927	8,750859	8,74482	8,748615	965,8667
21	910533,559	2,31172852	2,22290973	0,335911	0,323576	8,761285	8,665169	8,665169	1521,1
18	933354,918	2,97205298	2,73853929	0,358503	0,342269	8,673269	8,656559	8,656559	8222,3
17	1020203,9	2,71741484	2,69934596	0,341098	0,340203	8,660674	8,647149	8,647149	2499,1
10	1124364,87	2,93507353	2,79736099	0,340438	0,33199	8,566427	8,561059	8,57637	960,4333
9	1210145,26	2,8437138	2,41471411	0,332287	0,310181	8,584949	8,556668	8,556668	9999,1
8	1432226,55	2,3871638	2,26164731	0,315192	0,307011	8,56497	8,515467	8,515467	7500
7	1483367,21	2,34030992	2,25960429	0,308901	0,300746	8,517948	8,468553	8,468553	6343,3
6	1498481,85	2,25802534	2,18806732	0,300956	0,292061	8,469446	8,425443	8,425443	6156,7
45	1		0		0,147713			9,057096	1
44	1273,69605	10,3033119	1,23175783	0,344097	0,156273	9,067623	8,579578	8,747384	910,1857
37	1		0,87045902		0,275081			8,978618	1
36	10001,6876	0,89714402	0,74699477	0,385151	0,301651	9,000478	8,923105	8,923105	2757,3
35	16768,5589	0,72163763	0,66283258	0,284812	0,284319	8,945345	8,897815	8,897815	6394,4
34	133103,225	0,4717971	0,38513222	0,198561	0,171238	8,946507	8,864172	8,864172	13630,3
30	272050,53	0,81287815	0,76240562	0,328941	0,311976	8,906194	8,838869	8,838869	5629,9
39	1		0,26427833		0,108661			8,976037	1
38	54304,2224	0,26748986	0,30059536	0,109981	0,121544	8,981997	8,965455	8,965455	6499,1
33	1		0,22163529		0,088287			8,992106	1
32	37277,6579	0,57968206	0,51124762	0,097294	0,113945	9,003011	8,9797	8,9797	5019,6
31	49548,43	0,50720867	0,44073393	0,117685	0,142142	8,984171	8,975154	8,978494	988,5
49	1		1,73005975		0,347125			8,916126	998,4143
42	1		1,54583688		0,31701			8,962714	910,475
28	1		0,30805212		0,145255			9,075056	1
27	26752,8115	2,84405463	2,17399643	0,191991	0,195913	9,079059	8,949298	8,949298	4806,6
26	36961,5842	2,38547128	1,90680281	0,239372	0,222393	8,956961	8,779824	8,779824	9265,2
24	1		0,10745836		0,09871			9,077183	1
23	5250,41307	0,10811266	0,21580026	0,099311	0,136966	9,079264	9,056379	9,056379	3223,9
22	9783,30721	8,25201503	2,96053224	0,467276	0,285051	9,059628	8,919981	8,919981	5642,1
20	1		0,13486952		0,065625			9,086912	1
19	11205,6982	0,74166909	0,81578312	0,078071	0,24639	9,087939	9,007079	9,007079	8901,9
16	1		0,15288013		0,116603			9,07054	1
15	10719,4802	2,9093042	1,87052721	0,168658	0,22579	9,075164	8,926025	8,926025	4330,1
14	21384,0785	21,3128349	7,84370959	0,590398	0,374749	8,942203	7,646995	7,646995	11780,8
11	93107,21	5,69368229	5,17453545	0,338552	0,330555	7,741155	7,701406	7,710675	866,4667
13	1		0,7804575		0,336403			8,993549	1
12	15187,1047	13,2939544	3,36522162	0,568836	0,290757	9,025912	7,488146	7,71786	7541



Διάγραμμα 4.11: CO Μαΐου (Διαδρομή: 48-6)



Διάγραμμα 4.12: CBOD Μαΐου (Διαδρομή: 48-6)

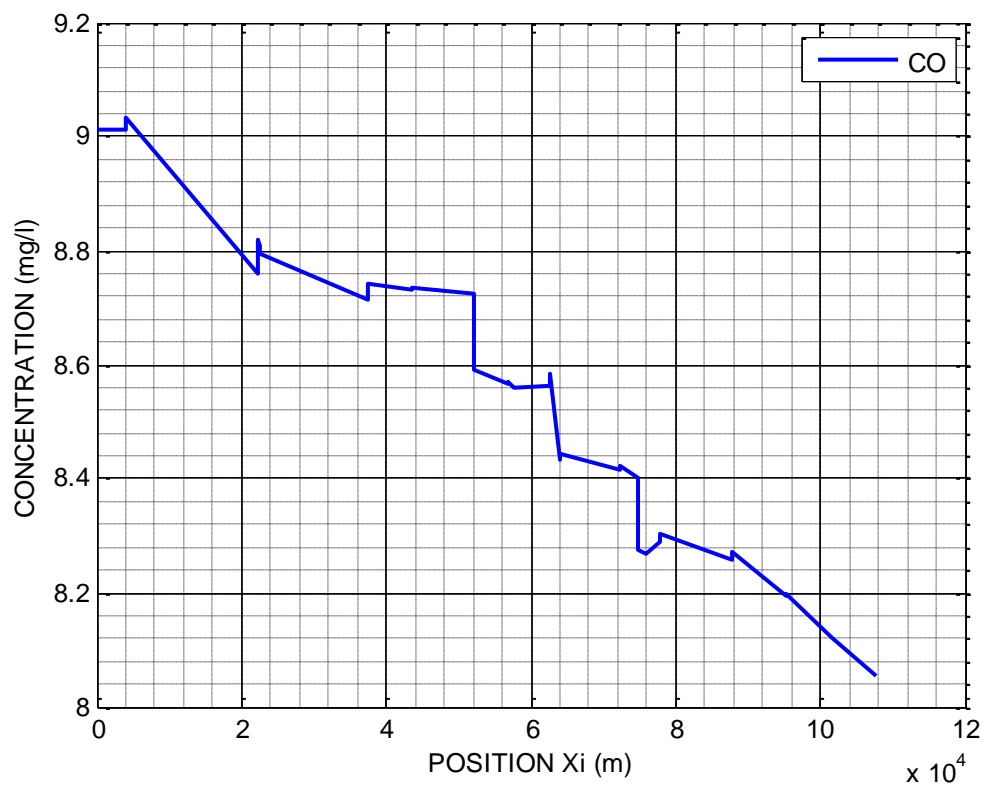


Διάγραμμα 4.13: CN Μαΐου (Διαδρομή: 48-6)

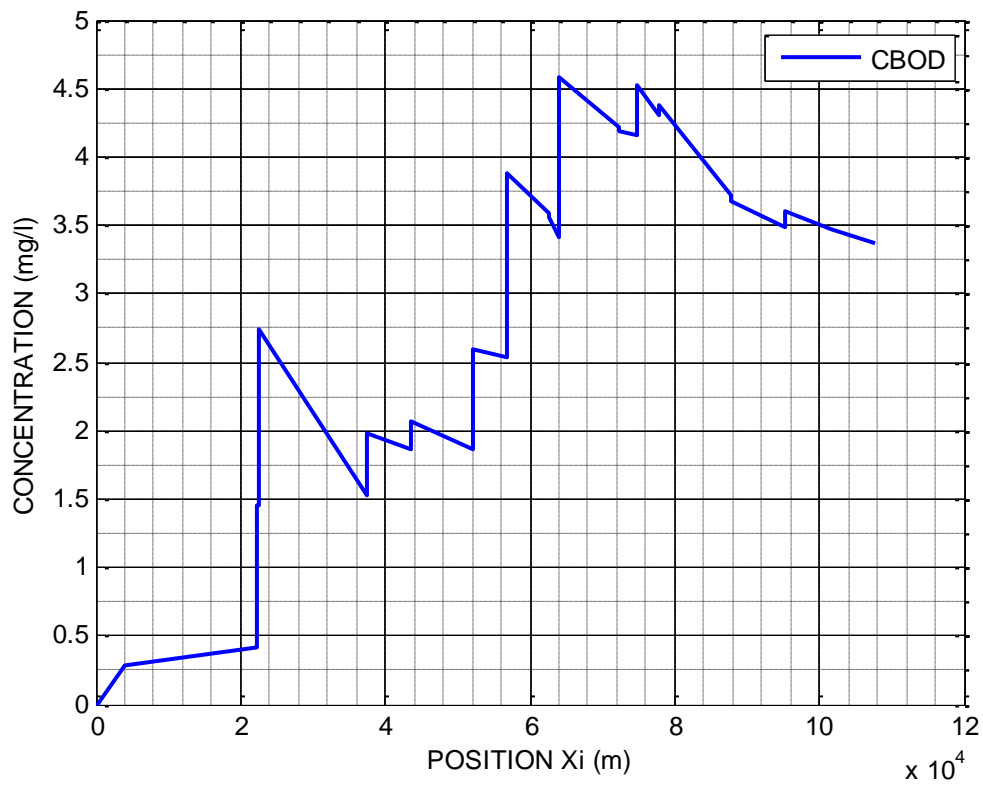
Η μέσης τιμές των τιμών των τριών περιπτώσεων δίνουν τον ακόλουθο πίνακα και τα ακόλουθα διαγράμματα.

Πίνακας 4.20: Πίνακας Μέσων Τιμών Αποτελεσμάτων Σεπτεμβρίου, Μαρτίου και Μαΐου

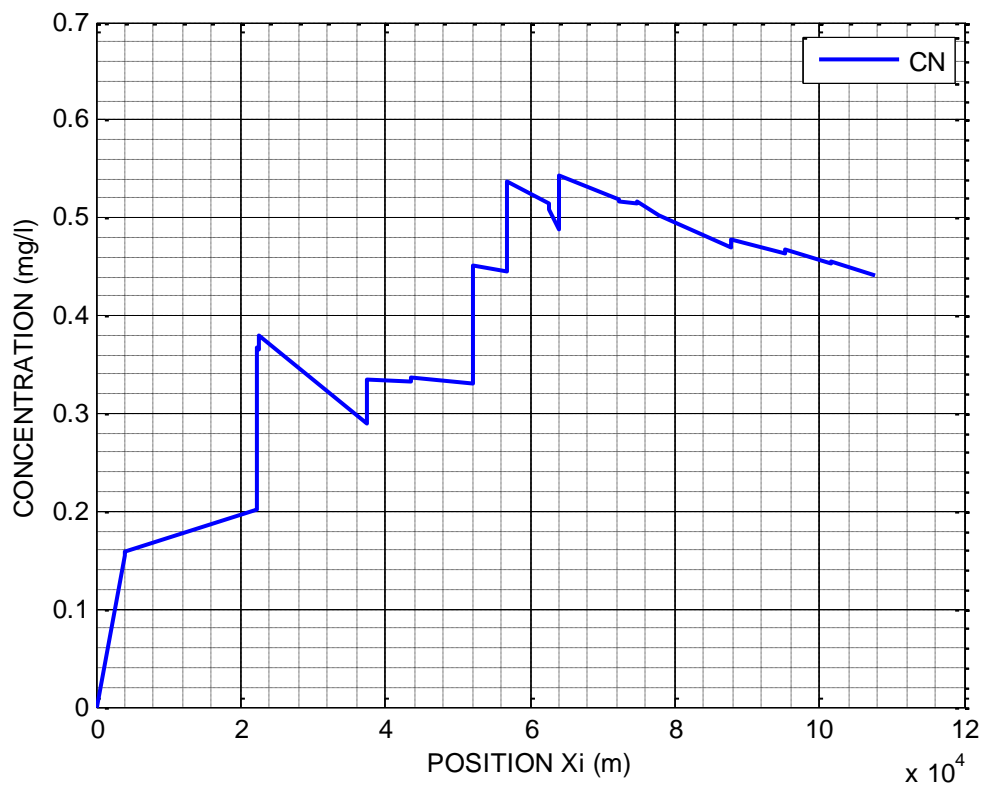
ΟΝΟΜΑ	Q (m ³ /d)	CBOD _{start} (mg/l)	CBOD _{end} (mg/l)	CN _{start} (mg/l)	CN _{end} (mg/l)	CO _{start} (mg/l)	CO _{min} (mg/l)	CO _{end} (mg/l)	XO _{min} (m)
48	1		0,2806305		0,15357			9,013659	3888,6
47	11405,5769	0,28790368	0,40982239	0,157662	0,200731	9,034543	8,761283	8,761283	18310,8
46	118681,068	1,46182553	1,45575907	0,367109	0,365542	8,818146	8,808708	8,808708	465,7
43	129351,401	2,74186693	1,53446307	0,379272	0,289891	8,794724	8,714631	8,714631	14864,7
41	273336,737	1,98325921	1,86543636	0,334785	0,332834	8,743131	8,731368	8,731368	6078,1
40	298616,403	2,07434809	1,86276065	0,337403	0,331366	8,735663	8,725443	8,725443	8602,4
29	576447,71	2,59742274	2,53965223	0,451103	0,445157	8,592764	8,565324	8,565324	4573,4
25	622796,66	3,88191103	3,58328013	0,536437	0,514715	8,569832	8,56024	8,564797	965,8667
21	722512,401	3,55944609	3,41935893	0,508886	0,489167	8,584179	8,431844	8,431844	1521,1
18	740579,935	4,57610236	4,21746587	0,543238	0,518554	8,444362	8,416949	8,416949	8222,3
17	809335,584	4,18524082	4,15692575	0,516827	0,515367	8,423358	8,401938	8,401938	2499,1
10	891797,818	4,51924294	4,30804448	0,515944	0,503078	8,275323	8,266842	8,290511	960,4333
9	959811,453	4,37903535	3,71806592	0,503493	0,469567	8,304348	8,25847	8,25847	9999,1
8	1135626,02	3,67603251	3,48049152	0,47742	0,46437	8,27145	8,19349	8,19349	7500
7	1176112,59	3,60234853	3,47562011	0,467316	0,454296	8,197371	8,120019	8,120019	6343,3
6	1188078,55	3,47323097	3,3630966	0,45463	0,440484	8,121417	8,052908	8,052908	6156,7
45	1		0		0,222836			9,045313	1
44	1008,75937	16,00347	1,90245446	0,527994	0,235072	9,062236	8,283539	8,555835	910,1857
37	1		1,35181605		0,418664			8,918559	1
36	7918,41936	1,3936357	1,1589714	0,590011	0,460243	8,953683	8,829423	8,829423	2757,3
35	13275,7342	1,11987442	1,02770007	0,434566	0,432269	8,865149	8,789955	8,789955	6394,4
34	105374,636	0,73123205	0,59458779	0,299125	0,255859	8,870857	8,74238	8,74238	13630,3
30	215375,419	1,26067257	1,18097057	0,501956	0,474996	8,808248	8,70003	8,70003	5629,9
39	1		0,40892595		0,158732			8,920308	1
38	42991,2594	0,41402882	0,46511991	0,160769	0,179337	8,929569	8,903862	8,903862	6499,1
33			0,34284374		0,130748			8,943601	1
32	29511,8958	0,89998192	0,79269695	0,144787	0,170096	8,960727	8,923708	8,923708	5019,6
31	39226,4654	0,78650576	0,68298529	0,175843	0,213076	8,930752	8,916528	8,921459	988,5
49	1		2,68593855		0,524059			8,819951	998,4143
42	1		2,40098668		0,483808			8,892664	910,475
28	1		0,47893968		0,216947			9,073491	1
27	21179,7257	4,42359776	3,37713195	0,289653	0,296366	9,079859	8,872848	8,872848	4806,6
26	29261,8792	3,70623692	2,95584449	0,364151	0,337284	8,885086	8,603531	8,603531	9265,2
24	1		0,16700717		0,145692			9,07717	1
23	4156,99368	0,16803192	0,33526339	0,146613	0,205527	9,080486	9,044077	9,044077	3223,9
22	7745,74321	12,8324099	4,59946248	0,719274	0,435849	9,049258	8,825108	8,825108	5642,1
20	1		0,20971286		0,09774			9,092345	1
19	8871,59437	1,15347311	1,26708085	0,117098	0,376791	9,094	8,964116	8,964116	8901,9
16	1		0,23758244		0,17396			9,066395	1
15	8486,6718	4,52462852	2,90436656	0,254932	0,344439	9,073759	8,83533	8,83533	4330,1
14	16929,6871	33,1443206	12,1387839	0,91174	0,573258	8,861199	6,806166	6,806166	11780,8
11	73711,1246	8,793177	7,98306477	0,515353	0,502488	6,968581	6,906694	6,92303	866,4667
13	1		1,21247743		0,516296			8,941316	1
12	12023,5412	20,6759225	5,16276517	0,878168	0,438198	8,993648	6,561304	6,950172	7855,208



Διάγραμμα 4.14: Μέσες Τιμές CO Σεπτεμβρίου, Μαρτίου και Μαΐου (Διαδρομή: 48-6)



Διάγραμμα 4.15: Μέσες Τιμές CBOD Σεπτεμβρίου, Μαρτίου και Μαΐου (Διαδρομή: 48-6)



Διάγραμμα 4.16: Μέσες Τιμές CN Σεπτεμβρίου, Μαρτίου και Μαΐου (Διαδρομή: 48-6)

Τα αποτελέσματα είναι αρκετά κοντά στις μετρήσεις. Εξαιρέση αποτελούν ορισμένες μετρήσεις, με τιμές μεγαλύτερες από την τιμή κορεσμού του οξυγόνου. Αιτία για το γεγονός αυτό θα μπορούσε να είναι η χαμηλότερη θερμοκρασία σε ορισμένα τμήματα σε σχέση με αυτή που εκτιμήθηκε για τη διακρίβωση. Επιπλέον, οι μετρήσεις αυτές ενδέχεται να έγιναν σε μέρος με πυκνή βλάστηση και σε στιγμή με έντονη φωτοσυνθετική δραστηριότητα. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί να μετρήθηκε περισσότερο οξυγόνο από το διαλυμένο. Παρά τις αποκλίσεις αυτές, το μοντέλο θεωρήθηκε, ότι διακριβώθηκε για τους σκοπούς του παρόντος. Σημειώνεται όμως, ότι η πραγματική εφαρμογή του μοντέλου απαιτεί τη λεπτομερή διακρίβωσή του σε επίπεδο υδάτινων τμημάτων, διαδικασία για την οποία χρειάζονται πολλά δεδομένα πεδίου.

4.7 Εφαρμογή του RISDOE στη Λεκάνη Απορροής του Ευρώτα ως Εργαλείο στη Διαχείριση της Ποιότητας Ύδατος

Με την παραδοχή, ότι το μοντέλο είναι διακριβωμένο, δηλαδή ότι οι αριθμητικές παράμετροι που έχουν επιλεγεί αντιπροσωπεύουν την πραγματικότητα, το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την διερεύνηση διαχειριστικών σεναρίων στη λεκάνη απορροής του Ευρώτα, τα οποία εξασφαλίζουν τη διατήρηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του νερού στον ποταμό εντός συγκεκριμένων ορίων. Για το σκοπό αυτό, θα εκτελεστεί ο κώδικας του μοντέλου για τις πιο δυσμενείς συνθήκες, οι οποίες συμβαίνουν το καλοκαίρι, καθώς τα υδάτινα τμήματα δέχονται τα ίδια φορτία που δέχονται τις υπόλοιπες εποχές ενώ οι εισροές εκτιμώνται μόλις στο 2,5% της ετήσιας τιμής ανά μήνα. Επιπλέον η αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της συγκέντρωσης του κορεσμού και την αύξηση της κατανάλωσης του διαλυμένου οξυγόνου. Ο δυσμενέστερος μήνας του έτους όσον αφορά το φαινόμενο της αποξυγόνωσης θεωρείται ο Ιούλιος, κατά τον οποίο οι θερμοκρασίες είναι ναί μεν ελαφρώς χαμηλότερες από τις μέγιστες, που εκτιμάται ότι εμφανίζονται τον Αυγούστου, αλλά οι βιομηχανίες βρίσκονται σε πλήρη λειτουργία.

Συνεπώς επιχειρήθηκε να τροποποιηθούν οι πιέσεις, έτσι ώστε τα επίπεδα του οξυγόνου και των δύο ρύπων, BOD και TKN, να βρίσκονται τον Ιούλιο εντός ορίων, τα οποία να επιτρέπουν τον χαρακτηρισμό της κατάστασης του υδάτινου σώματος ως καλής σύμφωνα με την Οδηγία Πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τα Ύδατα. Εφόσον τον Ιούλιο εκτιμάται, ότι υπάρχουν οι δυσμενέστερες συνθήκες, η εξασφάλιση των επιθυμητών επιπέδων των συγκεντρώσεων για αυτόν το μήνα συνεπάγεται τη διατήρησή τους καθ' όλη τη διάρκεια του

έτους. Ως κριτήριο για τη συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου χρησιμοποιήθηκε η συγκέντρωση των 6 mg/l, οποία είναι ανάμεσα στο όριο για τον χαρακτηρισμό της κατάστασης του υδάτινου σώματος ως καλή των 5 mg/l που χρησιμοποιείται στη Γαλλία και των 6,4 mg/l, που χρησιμοποιείται στη Νορβηγία, (Σκουλίδης, et al., 2008). Για τη συγκέντρωση του BOD θεωρήθηκε ότι θα πρέπει να βρίσκεται κάτω από τα 6 mg/l ενώ για το TKN επιλέχτηκε η συγκέντρωση του 1 mg/l.

Πίνακας 4.21: Πίνακας Δεδομένων Εισόδου Ιουλίου ($T = 27^{\circ}\text{C}$)

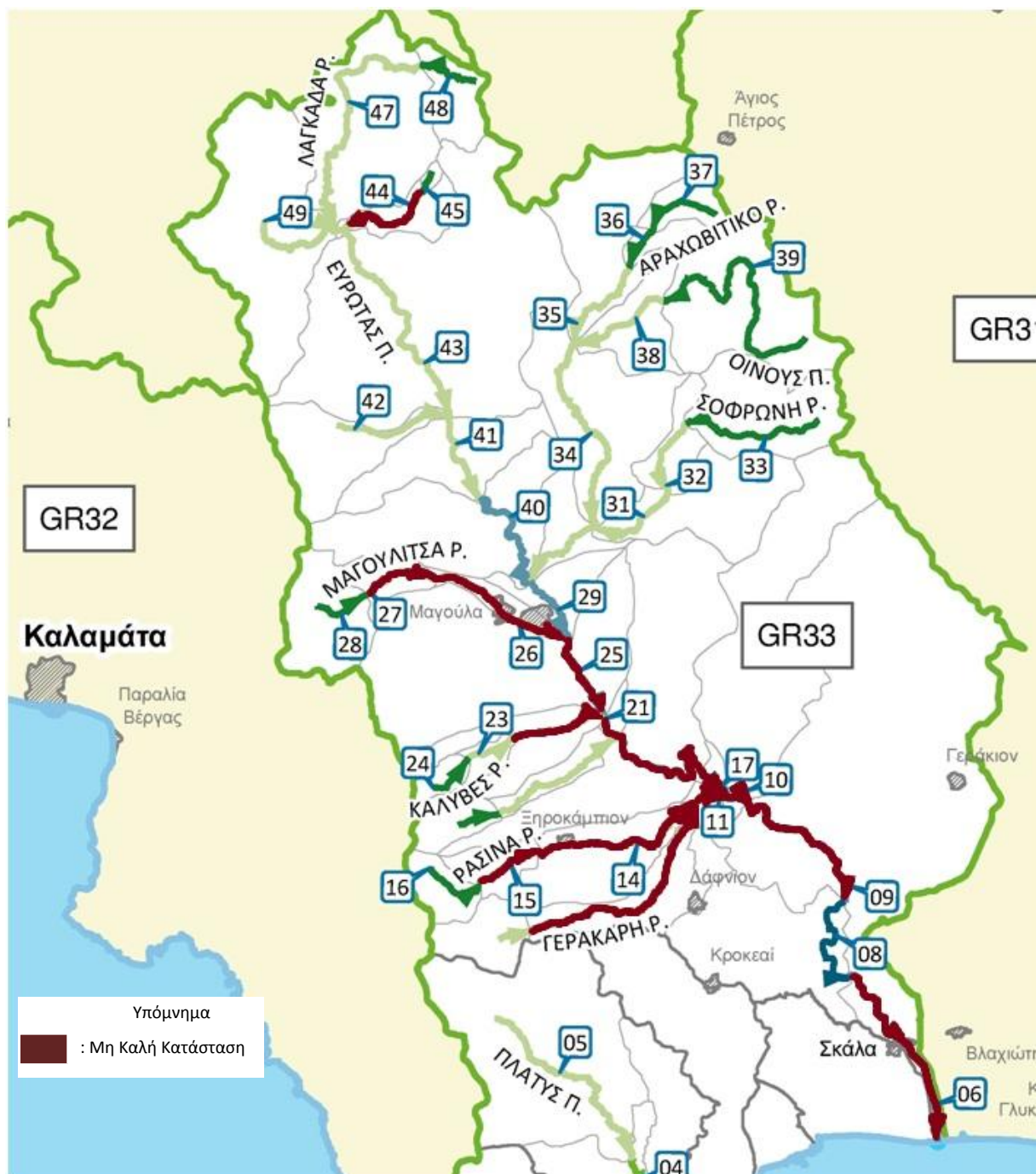
ΟΝΟΜΑ	ΜΗΚΟΣ (m)	ΜΗ ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΠΗΓΗ ΤΜΗΜΑΤΟΣ			Qαπορ (m ³ /d)	ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΠΗΓΗ ΣΤΗΝ ΑΡΧΗ ΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ				V(m/d)	K ₁	K ₂	K _N	O _{sat} (mg/l)	Καταλήγει στο
		CBOD (mg/l)	CN (mg/l)	CO (mg/l)		Q (m ³ /d)	CBOD (mg/l)	CN (mg/l)	CO (mg/l)						
48	3888,60	0,53	0,28	7,97	5401,69					5000,00	0,34	0,94	0,43	7,97	47
47	18310,80	1,29	0,62	7,97	22484,35					5000,00	0,34	0,94	0,43	7,97	46
46	465,70	0,89	1,32	7,97	149,49					28734,69	0,34	0,94	0,43	7,97	43
43	14864,70	0,95	0,43	7,97	57334,56	1,00	132767,12	2410,96	0,00	30530,61	0,34	0,94	0,43	7,97	41
41	6078,10	1,38	0,65	7,97	11972,21	1,00	94136,99	7068,49	0,00	92310,20	0,34	0,94	0,43	7,97	40
40	8602,40	1,11	0,60	7,97	21152,94	5,00	10756,16	191,78	0,00	92310,20	0,34	0,94	0,43	7,97	29
29	4573,40	1,25	0,70	7,97	5224,25	8000,00	61,90	4,18	1,00	100331,97	0,34	0,94	0,43	7,97	25
25	5795,20	1,78	0,62	7,97	35129,43	1,00	135194,52	9923,29	0,00	121404,08	0,34	0,94	0,43	7,97	21
21	1521,10	0,00	1,13	7,97	934,20					10057,14	0,34	0,94	0,43	7,97	18
18	8222,30	1,35	0,57	7,97	32567,99	1,00	146076,71	6756,16	0,00	125000,00	0,34	0,94	0,43	7,97	17
17	2499,10	0,42	2,11	7,97	1020,99					125000,00	0,34	0,94	0,43	7,97	10
10	2881,30	1,09	0,52	7,97	31980,14	1,00	29369,86	520,55	0,00	125000,00	0,34	0,94	0,43	7,97	9
9	9999,10	1,56	0,70	7,97	83280,11	500,00	250,79	8,32	0,00	55673,47	0,34	0,94	0,43	7,97	8
8	7500,00	2,10	1,00	7,97	19177,37	1,00	1150,68	8054,79	0,00	55673,47	0,34	0,94	0,43	7,97	7
7	6343,30	3,11	1,17	7,97	5667,62	1,00	126109,59	2301,37	0,00	51482,99	0,34	0,94	0,43	7,97	6
6	6156,70	0,89	0,74	7,97	1215,25					51482,99	0,34	0,94	0,43	7,97	1000
45	1485,50	0,00	0,39	7,97	476,89					5000,00	0,34	0,94	0,43	7,97	44
44	6371,30	1,38	0,43	7,97	4426,57	1,00	2624,66	49,32	0,00	5000,00	0,34	0,94	0,43	7,97	43
37	4852,50	2,46	0,75	7,97	3749,88					10476,19	0,34	0,94	0,43	7,97	36
36	2757,30	1,49	0,46	7,97	2537,20	1,00	164,38	1068,49	0,00	10476,19	0,34	0,94	0,43	7,97	35
35	6394,40	1,96	0,84	7,97	16195,51					10476,19	0,34	0,94	0,43	7,97	34
34	13630,30	1,21	0,58	7,97	19681,99					15265,31	0,34	0,94	0,43	7,97	30
30	5629,90	1,25	0,76	7,97	4641,95	1,00	111479,45	44821,92	0,00	28734,69	0,34	0,94	0,43	7,97	29
39	18009,40	0,87	0,33	7,97	20363,33					10476,19	0,34	0,94	0,43	7,97	38
38	6499,10	1,41	0,53	7,97	7065,54					15265,31	0,34	0,94	0,43	7,97	34
33	8997,50	0,74	0,27	7,97	13978,37					5000,00	0,34	0,94	0,43	7,97	32
32	5019,60	1,10	0,52	7,97	4601,16	1,00	13123,29	246,58	0,00	18557,82	0,34	0,94	0,43	7,97	31
31	5931,00	1,10	0,52	7,97	13842,21					18557,82	0,34	0,94	0,43	7,97	30
49	6988,90	2,17	0,88	7,97	28329,41	1,00	67808,22	1232,88	0,00	18557,82	0,34	0,94	0,43	7,97	46
42	7283,80	1,00	0,46	7,97	10868,07	1,00	31972,60	3838,36	0,00	29034,01	0,34	0,94	0,43	7,97	41
28	3517,40	0,84	0,37	7,97	10031,55					24544,22	0,34	0,94	0,43	7,97	27
27	4806,60	1,16	0,64	7,97	3827,91	1,00	13561,64	246,58	0,00	24544,22	0,34	0,94	0,43	7,97	26
26	9265,20	1,19	0,66	7,97	2869,15	1,00	11369,86	1506,85	0,00	26040,82	0,34	0,94	0,43	7,97	25
24	3005,80	0,29	0,25	7,97	1968,15					15265,31	0,34	0,94	0,43	7,97	23
23	3223,90	0,80	0,47	7,97	1699,46					15265,31	0,34	0,94	0,43	7,97	22
22	5642,10	0,79	0,47	7,97	8434,83					31727,89	0,34	0,94	0,43	7,97	21
20	2588,10	0,36	0,16	7,97	4201,39					31727,89	0,34	0,94	0,43	7,97	19
19	8901,90	1,73	1,09	7,97	3421,29	1,00	6794,52	136,99	0,00	31727,89	0,34	0,94	0,43	7,97	18
16	3908,80	0,42	0,30	7,97	4019,06					15265,31	0,34	0,94	0,43	7,97	15
15	4330,10	1,15	0,60	7,97	3998,85	1,00	5906,85	109,59	0,00	15265,31	0,34	0,94	0,43	7,97	14
14	11780,80	1,15	0,59	7,97	12026,07					15265,31	0,34	0,94	0,43	7,97	11
11	2599,40	1,22	1,16	7,97	3123,80					15265,31	0,34	0,94	0,43	7,97	10
13	2367,80	1,32	0,72	7,97	5694,41					6585,03	0,34	0,94	0,43	7,97	12
12	15082,00	1,34	0,73	7,97	9174,57	1,00	19178,08	690,41	0,00	6585,03	0,34	0,94	0,43	7,97	11

Η εφαρμογή του μοντέλου για τις πιέσεις και τις παραμέτρους του Ιουλίου (Πίνακας 4.21) έδωσε τα αποτελέσματα, που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.22), όπου με κόκκινο σημειώνονται οι συγκεντρώσεις εκτός ορίων. Σημειώνεται, ότι για τα αρχικά υδάτινα τμήματα εμφανίζονται μόνο οι τελικές συγκεντρώσεις, καθώς η εισροή στον κόμβο αρχής τους είναι μηδενική με αποτέλεσμα να μην έχει νόημα ο υπολογισμός συγκέντρωσης εκεί.

Πίνακας 4.22: Πίνακας Αποτελεσμάτων Ιουλίου

ΟΝΟΜΑ	Q (m ³ /d)	CBOD _{start} (mg/l)	CBOD _{end} (mg/l)	CN _{start} (mg/l)	CN _{end} (mg/l)	CO _{start} (mg/l)	CO _{min} (mg/l)	CO _{end} (mg/l)	XO _{min} (m)
48	0,00		0,47		0,24			7,76	3888,60
47	5401,69	0,48	0,61	0,25	0,26	7,81	7,30	7,31	15419,62
46	56216,45	2,42	2,40	0,57	0,56	7,37	7,35	7,35	465,70
43	61271,40	4,60	2,49	0,59	0,44	7,32	7,13	7,13	14864,70
41	129476,03	3,27	3,06	0,52	0,51	7,19	7,16	7,16	6078,10
40	141453,24	3,42	3,05	0,52	0,51	7,17	7,14	7,14	8602,40
29	277266,32	4,30	4,19	0,70	0,69	6,95	6,88	6,88	4573,40
25	299222,18	6,47	5,96	0,85	0,81	6,89	6,86	6,86	5795,20
21	346455,05	5,92	5,62	0,80	0,75	6,90	6,55	6,55	1521,10
18	355013,93	7,59	6,97	0,85	0,80	6,57	6,51	6,51	8222,30
17	387581,92	6,91	6,86	0,80	0,80	6,52	6,47	6,47	2499,10
10	426643,67	7,38	7,03	0,79	0,77	6,22	6,21	6,25	960,43
9	459123,81	7,15	6,00	0,78	0,71	6,29	6,18	6,18	9999,10
8	542404,92	5,93	5,56	0,73	0,69	6,21	6,05	6,05	7500,00
7	561583,29	5,77	5,51	0,70	0,67	6,06	5,90	5,90	6343,30
6	567250,91	5,51	5,28	0,67	0,63	5,91	5,78	5,78	6156,70
45	0,00		0,00		0,37			7,87	1485,50
44	477,89	27,46	2,98	0,89	0,35	7,90	6,12	6,81	910,19
37	0,00		2,28		0,68			7,52	4852,50
36	3750,88	2,36	1,93	0,98	0,74	7,61	7,31	7,31	2757,30
35	6288,08	1,87	1,69	0,70	0,68	7,40	7,23	7,23	6394,40
34	49912,46	1,20	0,93	0,46	0,36	7,44	7,20	7,20	13630,30
30	102018,19	2,08	1,92	0,80	0,73	7,34	7,08	7,08	5629,90
39			0,66	0,00	0,23			7,57	18009,40
38	20363,33	0,67	0,75	0,24	0,26	7,59	7,54	7,54	6499,10
33			0,55	0,00	0,19			7,62	8997,50
32	13979,37	1,51	1,31	0,21	0,26	7,66	7,58	7,58	5019,60
31	18580,53	1,30	1,12	0,27	0,33	7,60	7,56	7,57	988,50
49	1,00		4,49		0,86			7,30	998,41
42	1,00		4,05		0,80			7,47	910,48
28	0,00		0,82		0,36			7,90	3517,40
27	10032,55	7,58	5,70	0,48	0,48	7,92	7,44	7,44	4806,60
26	13861,46	6,27	4,86	0,60	0,53	7,46	6,84	6,84	9265,20
24	0,00		0,28		0,24			7,92	3005,80
23	1968,15	0,28	0,57	0,24	0,34	7,93	7,83	7,83	3223,90
22	3668,61	22,00	7,77	1,22	0,72	7,85	7,32	7,32	5642,10
20	0,00		0,36		0,16	7,97			2588,10
19	4202,39	1,97	2,13	0,19	0,62	7,96	7,64	7,64	8901,90
16	0,00		0,40		0,28	7,97			3908,80
15	4020,06	7,75	4,87	0,42	0,56	7,90	7,35	7,35	4330,10
14	8019,91	56,72	19,52	1,54	0,88	7,41	3,01	3,02	10799,07
11	34915,96	13,77	12,34	0,76	0,73	3,61	3,50	3,56	866,47
13	0,00		2,05		0,85			7,57	2367,80
12	5695,41	35,43	7,40	1,48	0,57	7,70	2,63	3,91	6598,38

Τα υδάτινα τμήματα, των οποίων η φυσικοχημική κατάσταση δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως καλή, έχουν χρωματιστεί με κόκκινο χρώμα στον χάρτη του υδρολογικού συστήματος του Ευρώτα (Εικόνα 4.3) και φαίνονται στην Εικόνα 4.4.



Εικόνα 4.4: Υδάτινα Τμήματα Με Κατάσταση Κατώτερη Της Καλής

4.7.1 Διαχειριστικό Σενάριο

Για την εξεύρεση λύσης, με την οποία να διατηρούνται τα επιθυμητά χαρακτηριστικά σε όλα τα υδάτινα τμήματα, έγιναν δοκιμές και διαμορφώθηκε ένα διαχειριστικό σενάριο, το οποίο παρουσιάζεται στη συνέχεια.

Όσον αφορά στο ανατολικό κομμάτι του υδρολογικού συστήματος, η μόνη παρέμβαση, η οποία προτείνεται είναι η μείωση κατά 80% της βιομηχανικής ρύπανσης του υδάτινου τμήματος 44. Ενώ η παραγωγή ρύπανσης είναι μόλις 4,79 tn BOD/χρόνο και 0,09 tn TKN/χρόνο, το γεγονός, ότι το υδάτινο τμήμα δέχεται ελάχιστη μόνο παροχή από το προηγούμενό του, το καθιστά ιδιαίτερα ευάλωτο στη ρύπανση.

Τα υπόλοιπα μέτρα αφορούν στα κατάντη της Σπάρτης υδάτινα τμήματα, καθώς και στα υδάτινα τμήματα που ανήκουν στα τέσσερα ρέματα, Μαγουλίτσα, Καλύβες, Ρασίνα και Γερακάρη.

Αρχικά θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στα βιομηχανικά απόβλητα για όλη την περιοχή κατάντη της Σπάρτης. Θα πρέπει δηλαδή να γίνεται επεξεργασία των λυμάτων με σκοπό την απομάκρυνση του 80% της μάζας του οργανικού άνθρακα και του αζώτου. Το μέτρο αυτό επιδρά στα φορτία των υδάτινων τμημάτων 27, 25, 18, 22, 15, και 14. Για το ρέμα Γερακάρη και συγκεκριμένα για το υδάτινο τμήμα 12 εκτιμήθηκε, ότι είναι αναγκαία η δραστικότερη μείωση των βιομηχανικών αποβλήτων σε σχέση με τα υπόλοιπα ρέματα. Συνεπώς θα πρέπει να περιοριστεί η τροφοδότηση με φορτία BOD στους 7 τόνους το χρόνο από τους 69,3, που καταλήγουν στο ρέμα σήμερα. Η μείωση κατά 80% περιορίζει το BOD των βιομηχανικών λυμάτων στους 13,86 τόνους ανά χρόνο, ποσότητα όμως που δεν επιτρέπει τη διασφάλιση της ποιότητας του ρέματος. Η περικοπή των 6 περίπου τόνων ανά έτος επιπλέον θα μπορούσε να επιτευχθεί με τη θέσπιση του ανώτατου ορίου των 7 tn BOD/χρόνο για τον ευαίσθητο αυτό αποδέκτη και τη μεταφορά των υπόλοιπων λυμάτων προς διαχείριση με βυτία σε άλλο μέρος.

Εκτός από τον περιορισμό των βιομηχανικών φορτίων, προτείνεται και η μείωση της μη σημειακής πίεσης λόγω της συμβολής αστικών λυμάτων. Η μείωση αυτή θα επιτευχθεί μέσω της κατασκευής Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων, στην οποία θα οδηγούνται τα αστικά λύματα της περιοχής μέσω βυτίων ή αποχετευτικού δικτύου. Με αυτό τον τρόπο θα μπορούσε να μειωθεί η μάζα των λυμάτων που καταλήγει στα ρέματα Καλύβες, Κάκαρη, Ρασίνα και Γερακάρη κατά 80%. Σημειώνεται, ότι πρόκειται να κατασκευαστεί Εγκατάσταση

Επεξεργασίας Λυμάτων κοντά στην πόλη του Γυθείου, με την οποία ενδέχεται να είναι δυνατή η εξυπηρέτηση και των εν λόγω περιοχών.

4.7.1.1 Εφαρμογή RISDOE1

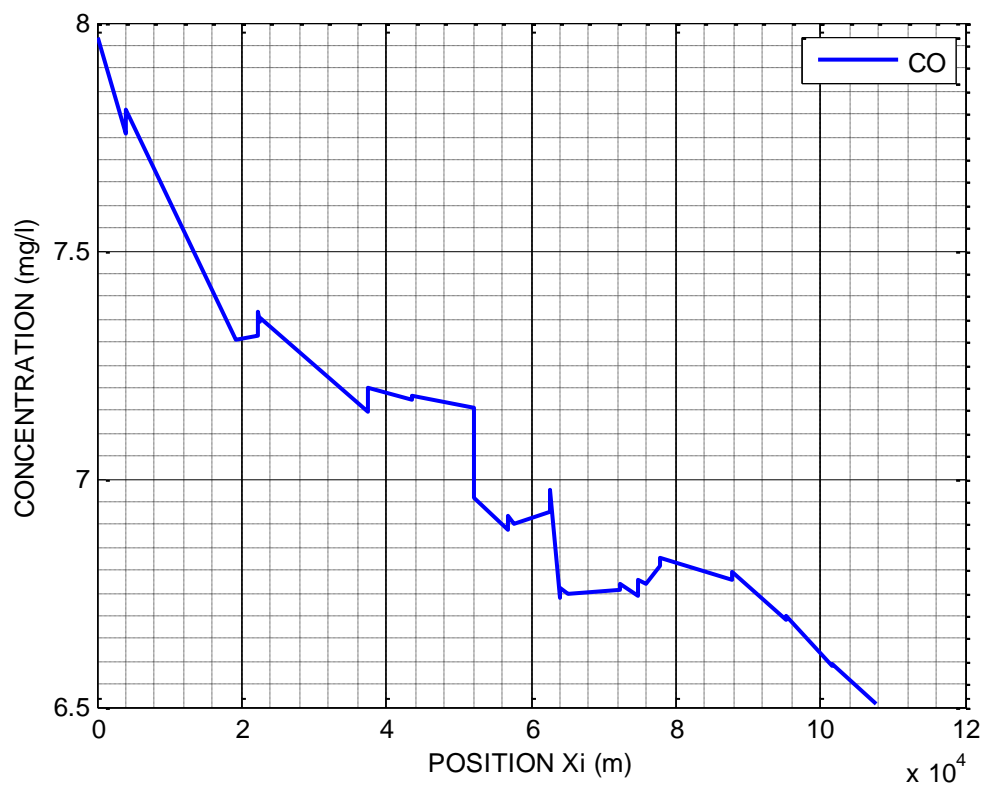
Με την παραδοχή, ότι το μοντέλο είναι σωστά διακριβωμένο και επαληθευμένο, η εισαγωγή δεδομένων τροποποιημένων σύμφωνα με τα παραπάνω μέτρα δίνει τις τελικές συγκεντρώσεις στο υδρολογικό σύστημα του Ευρώτα. Παρακάτω δίνονται οι πίνακες δεδομένων και αποτελεσμάτων καθώς και τα διαγράμματα των συγκεντρώσεων των ποιοτικών χαρακτηριστικών κατά μήκος της βασικής διαδρομής του ποταμού.

Πίνακας 4.23: Πίνακας Δεδομένων Εισόδου Ιουλίου για το Προτεινόμενο Διαχειριστικό Σενάριο

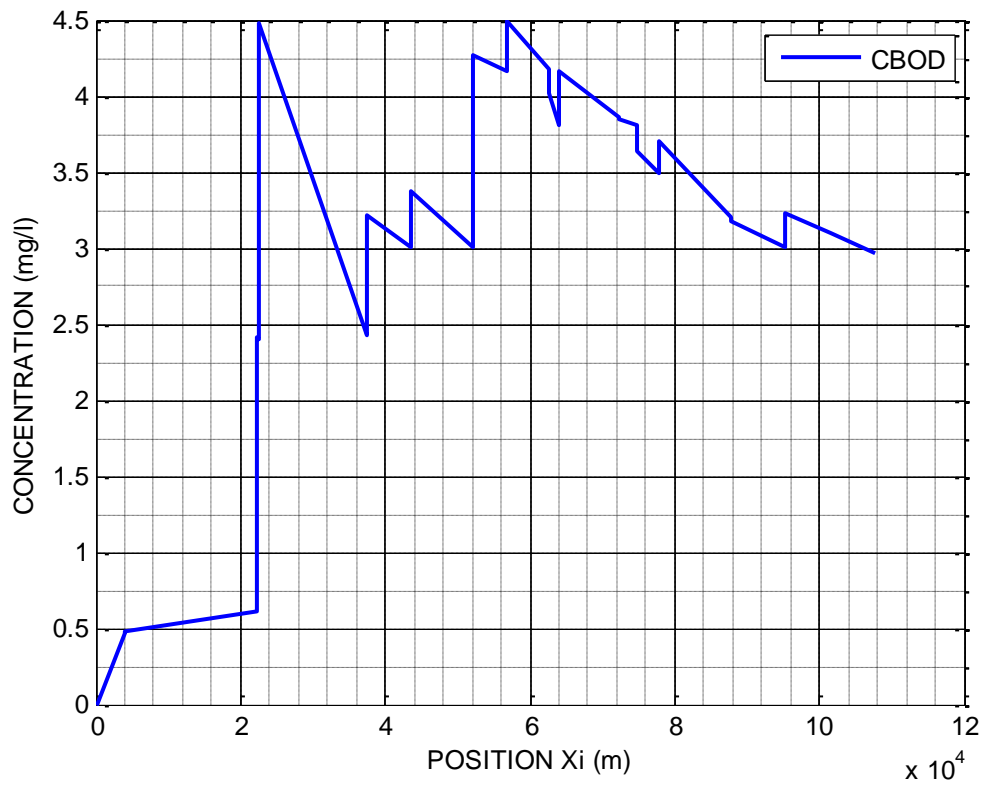
ΟΝΟΜΑ	ΜΗΚΟΣ (m)	ΜΗ ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΠΗΓΗ ΤΜΗΜΑΤΟΣ			Qαπορ (m ³ /d)	ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΠΗΓΗ ΣΤΗΝ ΑΡΧΗ ΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ				V(m/d)	K ₁	K ₂	K _N	O ₂ (mg/l)	Καταλήγει στο
		CBOD (mg/l)	CN (mg/l)	CO (mg/l)		Q (m ³ /d)	CBOD (mg/l)	CN (mg/l)	CO (mg/l)						
48	3888,60	0,53	0,28	7,97	5401,69					5000,00	0,34	0,94	0,43	7,97	47
47	18310,80	1,29	0,62	7,97	22484,35					5000,00	0,34	0,94	0,43	7,97	46
46	465,70	0,89	1,32	7,97	149,49					28734,69	0,34	0,94	0,43	7,97	43
43	14864,70	0,95	0,43	7,97	57334,56	1,00	132767,12	2410,96	0,00	30530,61	0,34	0,94	0,43	7,97	41
41	6078,10	1,38	0,65	7,97	11972,21	1,00	94136,99	7068,49	0,00	92310,20	0,34	0,94	0,43	7,97	40
40	8602,40	1,11	0,60	7,97	21152,94	5,00	10756,16	191,78	0,00	92310,20	0,34	0,94	0,43	7,97	29
29	4573,40	1,25	0,70	7,97	5224,25	8000,00	61,90	4,18	1,00	100331,97	0,34	0,94	0,43	7,97	25
25	5795,20	1,78	0,62	7,97	35129,43	1,00	135194,52	9923,29	0,00	121404,08	0,34	0,94	0,43	7,97	21
21	1521,10	0,00	1,13	7,97	934,20					10057,14	0,34	0,94	0,43	7,97	18
18	8222,30	1,35	0,57	7,97	32567,99	1,00	146076,71	6756,16	0,00	125000,00	0,34	0,94	0,43	7,97	17
17	2499,10	0,42	2,11	7,97	1020,99					125000,00	0,34	0,94	0,43	7,97	10
10	2881,30	1,09	0,52	7,97	31980,14	1,00	29369,86	520,55	0,00	125000,00	0,34	0,94	0,43	7,97	9
9	9999,10	1,56	0,70	7,97	83280,11	500,00	250,79	8,32	0,00	55673,47	0,34	0,94	0,43	7,97	8
8	7500,00	2,10	1,00	7,97	19177,37	1,00	1150,68	8054,79	0,00	55673,47	0,34	0,94	0,43	7,97	7
7	6343,30	3,11	1,17	7,97	5667,62	1,00	126109,59	2301,37	0,00	51482,99	0,34	0,94	0,43	7,97	6
6	6156,70	0,89	0,74	7,97	1215,25					51482,99	0,34	0,94	0,43	7,97	1000
45	1485,50	0,00	0,39	7,97	476,89					5000,00	0,34	0,94	0,43	7,97	44
44	6371,30	1,38	0,43	7,97	4426,57	1,00	2624,66	49,32	0,00	5000,00	0,34	0,94	0,43	7,97	43
37	4852,50	2,46	0,75	7,97	3749,88					10476,19	0,34	0,94	0,43	7,97	36
36	2757,30	1,49	0,46	7,97	2537,20	1,00	164,38	1068,49	0,00	10476,19	0,34	0,94	0,43	7,97	35
35	6394,40	1,96	0,84	7,97	16195,51					10476,19	0,34	0,94	0,43	7,97	34
34	13630,30	1,21	0,58	7,97	19681,99					15265,31	0,34	0,94	0,43	7,97	30
30	5629,90	1,25	0,76	7,97	4641,95	1,00	111479,45	44821,92	0,00	28734,69	0,34	0,94	0,43	7,97	29
39	18009,40	0,87	0,33	7,97	20363,33					10476,19	0,34	0,94	0,43	7,97	38
38	6499,10	1,41	0,53	7,97	7065,54					15265,31	0,34	0,94	0,43	7,97	34
33	8997,50	0,74	0,27	7,97	13978,37					5000,00	0,34	0,94	0,43	7,97	32
32	5019,60	1,10	0,52	7,97	4601,16	1,00	13123,29	246,58	0,00	18557,82	0,34	0,94	0,43	7,97	31
31	5931,00	1,10	0,52	7,97	13842,21					18557,82	0,34	0,94	0,43	7,97	30
49	6988,90	2,17	0,88	7,97	28329,41	1,00	67808,22	1232,88	0,00	18557,82	0,34	0,94	0,43	7,97	46
42	7283,80	1,00	0,46	7,97	10868,07	1,00	31972,60	3838,36	0,00	29034,01	0,34	0,94	0,43	7,97	41
28	3517,40	0,84	0,37	7,97	10031,55					24544,22	0,34	0,94	0,43	7,97	27
27	4806,60	1,16	0,64	7,97	3827,91	1,00	13561,64	246,58	0,00	24544,22	0,34	0,94	0,43	7,97	26
26	9265,20	1,19	0,66	7,97	2869,15	1,00	11369,86	1506,85	0,00	26040,82	0,34	0,94	0,43	7,97	25
24	3005,80	0,29	0,25	7,97	1968,15					15265,31	0,34	0,94	0,43	7,97	23
23	3223,90	0,80	0,47	7,97	1699,46					15265,31	0,34	0,94	0,43	7,97	22
22	5642,10	0,79	0,47	7,97	8434,83					31727,89	0,34	0,94	0,43	7,97	21
20	2588,10	0,36	0,16	7,97	4201,39					31727,89	0,34	0,94	0,43	7,97	19
19	8901,90	1,73	1,09	7,97	3421,29	1,00	6794,52	136,99	0,00	31727,89	0,34	0,94	0,43	7,97	18
16	3908,80	0,42	0,30	7,97	4019,06					15265,31	0,34	0,94	0,43	7,97	15
15	4330,10	1,15	0,60	7,97	3998,85	1,00	5906,85	109,59	0,00	15265,31	0,34	0,94	0,43	7,97	14
14	11780,80	1,15	0,59	7,97	12026,07					15265,31	0,34	0,94	0,43	7,97	11
11	2599,40	1,22	1,16	7,97	3123,80					15265,31	0,34	0,94	0,43	7,97	10
13	2367,80	1,32	0,72	7,97	5694,41					6585,03	0,34	0,94	0,43	7,97	12
12	15082,00	1,34	0,73	7,97	9174,57	1,00	19178,08	690,41	0,00	6585,03	0,34	0,94	0,43	7,97	11

Πίνακας 4.24: Πίνακας Αποτελεσμάτων Ιουλίου για το Προτεινόμενο Διαχειριστικό Σενάριο

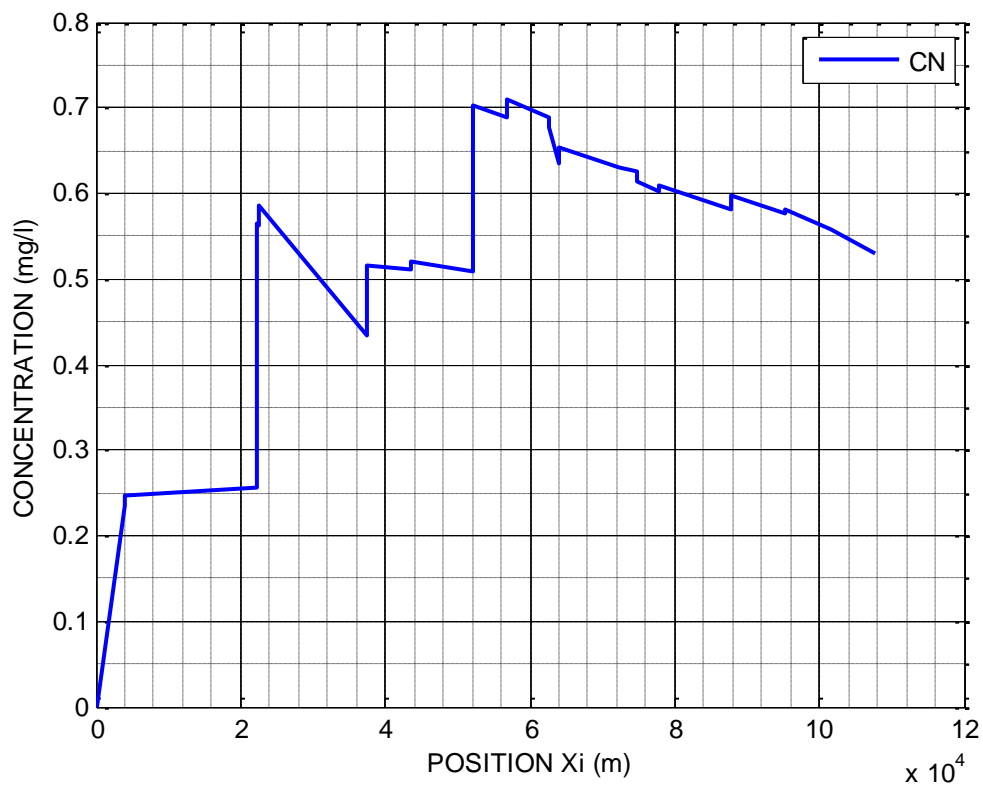
ΟΝΟΜΑ	Q (m ³ /d)	CBOD _{start} (mg/l)	CBOD _{end} (mg/l)	CN _{start} (mg/l)	CN _{end} (mg/l)	CO _{start} (mg/l)	CO _{min} (mg/l)	CO _{end} (mg/l)	XO _{min} (m)
48	0,00		0,47		0,24			7,76	3888,60
47	5401,69	0,48	0,61	0,25	0,26	7,81	7,30	7,31	15419,62
46	56216,45	2,41	2,40	0,57	0,56	7,37	7,34	7,34	465,70
43	61271,40	4,48	2,43	0,59	0,43	7,35	7,14	7,14	14864,70
41	129476,03	3,22	3,01	0,52	0,51	7,20	7,17	7,17	6078,10
40	141453,24	3,37	3,01	0,52	0,51	7,18	7,16	7,16	8602,40
29	277266,34	4,27	4,16	0,70	0,69	6,96	6,89	6,89	4573,40
25	299222,21	4,49	4,18	0,71	0,69	6,92	6,90	6,93	965,87
21	346454,08	4,02	3,81	0,68	0,64	6,98	6,74	6,74	1521,10
18	355012,97	4,17	3,87	0,65	0,63	6,76	6,75	6,76	913,59
17	387580,96	3,84	3,81	0,63	0,63	6,77	6,74	6,74	2499,10
10	426641,70	3,64	3,49	0,61	0,60	6,78	6,77	6,81	960,43
9	459121,85	3,70	3,21	0,61	0,58	6,83	6,78	6,78	9999,10
8	542402,96	3,18	3,01	0,60	0,58	6,80	6,69	6,69	7500,00
7	561581,33	3,23	3,09	0,58	0,56	6,70	6,59	6,59	6343,30
6	567248,95	3,09	2,97	0,56	0,53	6,59	6,50	6,50	6156,70
45	0,00		0,00		0,37			7,87	1485,50
44	477,89	5,49	1,39	0,48	0,32	7,90	7,34	7,34	6371,30
37	0,00		2,27		0,68			7,52	4852,50
36	3750,88	2,35	1,92	0,98	0,74	7,61	7,31	7,31	2757,30
35	6288,08	1,87	1,69	0,70	0,68	7,40	7,23	7,23	6394,40
34	49912,46	1,20	0,92	0,46	0,36	7,44	7,20	7,20	13630,30
30	102018,20	2,08	1,92	0,80	0,73	7,33	7,08	7,08	5629,90
39		0,00		0,00	0,23			7,57	18009,40
38	20363,33	0,66	0,74	0,23	0,26	7,59	7,54	7,54	6499,10
33		0,00		0,00	0,19			7,62	8997,50
32	13979,37	1,51	1,30	0,22	0,26	7,66	7,58	7,58	5019,60
31	18580,54	1,29	1,11	0,27	0,33	7,59	7,56	7,57	988,50
49	1,00		4,49		0,85			7,30	998,41
42	1,00		4,04		0,80			7,46	910,48
28	0,00		0,82		0,36			7,90	3517,40
27	10032,55	2,17	1,82	0,38	0,41	7,92	7,70	7,70	4806,60
26	13861,47	2,60	2,12	0,53	0,48	7,72	7,32	7,32	9265,20
24	0,00		0,28		0,24			7,92	3005,80
23	1968,15	0,29	0,46	0,24	0,31	7,93	7,84	7,84	3223,90
22	3667,62	0,50	0,66	0,33	0,40	7,85	7,83	7,83	5642,10
20	0,00		0,36		0,16			7,95	2588,10
19	4202,39	1,98	1,73	0,19	0,53	7,95	7,68	7,68	8901,90
16	0,00		0,40		0,28			7,88	3908,80
15	4020,06	1,88	1,43	0,31	0,40	7,90	7,69	7,69	4330,10
14	8018,90	1,40	1,04	0,42	0,42	7,72	7,41	7,41	11780,80
11	34914,95	1,19	1,13	0,42	0,43	7,17	7,13	7,13	2599,40
13	0,00		1,24		0,67			7,67	2367,80
12	5695,41	4,64	1,39	0,81	0,40	7,77	6,63	6,76	8483,63



Διάγραμμα 4.17: CO Ιουλίου Προτεινόμενο Διαχειριστικό Σενάριο (Διαδρομή: 48-6)



Διάγραμμα 4.18: CBOD Ιουλίου Προτεινόμενο Διαχειριστικό Σενάριο (Διαδρομή: 48-6)



Διάγραμμα 4.19: CN Ιουλίου Προτεινόμενο Διαχειριστικό Σενάριο (Διαδρομή: 48-6)

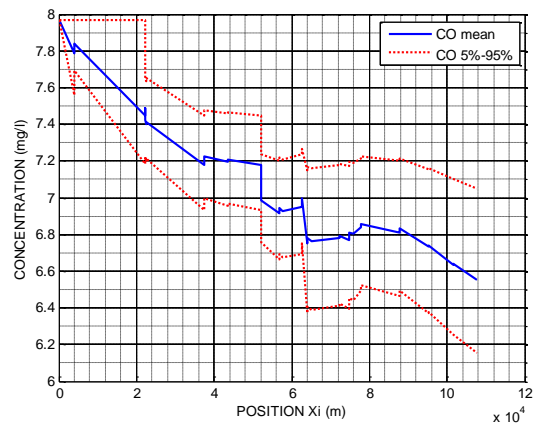
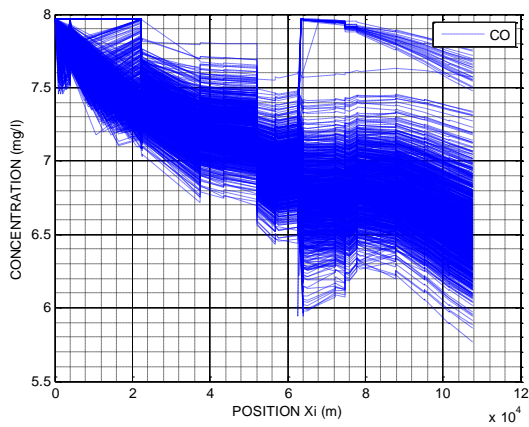
Όπως φαίνεται, μέσω των προτεινόμενων μέτρων εξασφαλίζεται η διατήρηση των τριών ποιοτικών παραμέτρων εντός των επιθυμητών ορίων συγκέντρωσης.

4.7.1.2 Εφαρμογή RISDOEPRI

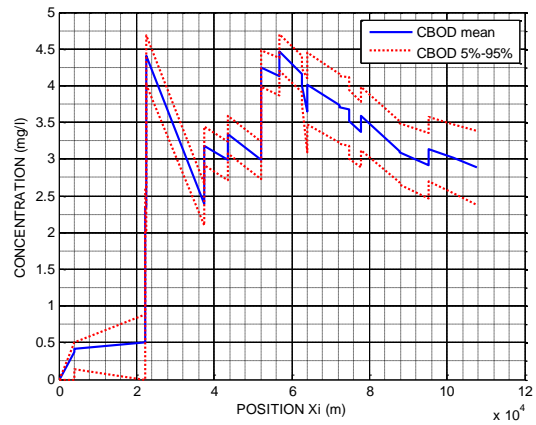
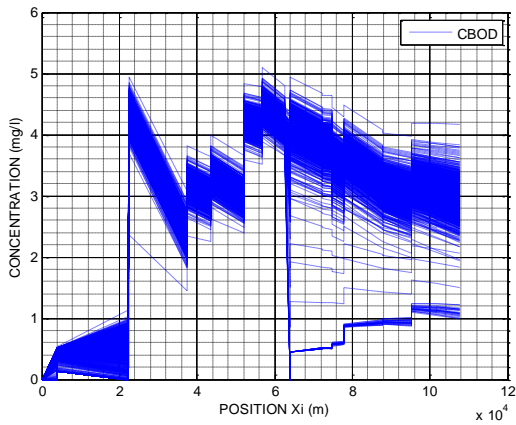
Η εφαρμογή της πιθανοτικής έκδοσης του μοντέλου έδωσε τα στατιστικά χαρακτηριστικά 1000 επαναλήψεων. Ο Πίνακας 4.23 χρησιμοποιήθηκε ως πίνακας δεδομένων, ενώ οι τυπικές αποκλίσεις θεωρήθηκαν $0,1 \text{ d}^{-1}$ για τους συντελεστές K_1 , K_2 και K_N και 5000 m/d για την ταχύτητα. Κατά τη γένεση των τυχαίων παραμέτρων διατηρήθηκαν οι συντελεστές ετεροσυσχέτισης $\rho_{K_1, K_N} = 0,9$, $\rho_{K_1, K_2} = 0,5$ και $\rho_{K_2, V} = 0,8$. Αξίζει να σημειωθεί, ότι η διατήρηση του συντελεστή ρ_{K_1, K_2} φάνηκε να μην επηρεάζει τα αποτελέσματα.

Ακολουθούν τα αποτελέσματα για τη βασική διαδρομή 48-6 και τις κρίσιμες διαδρομές, που εντοπίστηκαν κατά την εφαρμογή του μοντέλου για τα πραγματικά δεδομένα, οι οποίες είναι οι 45-6, 28-6, 24-6, 16-6 και 13-6.

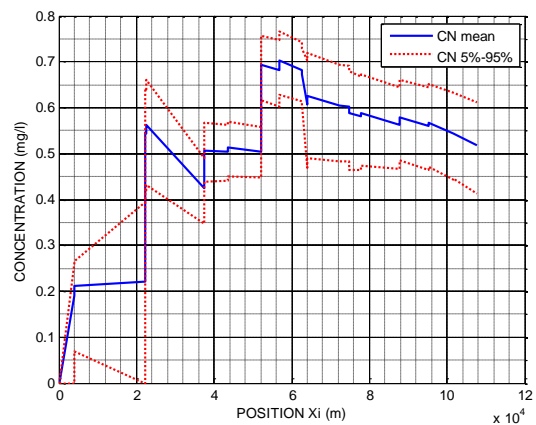
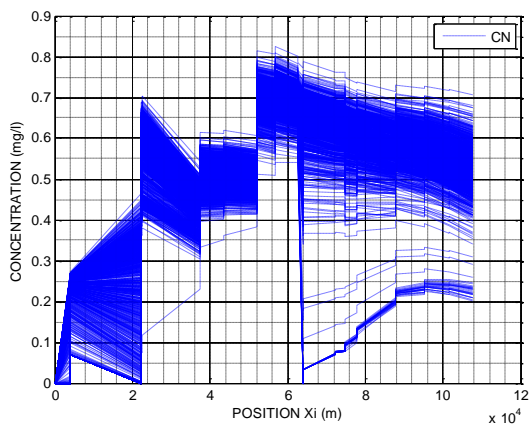
4.7.1.2.1 Διαδρομή 48-6



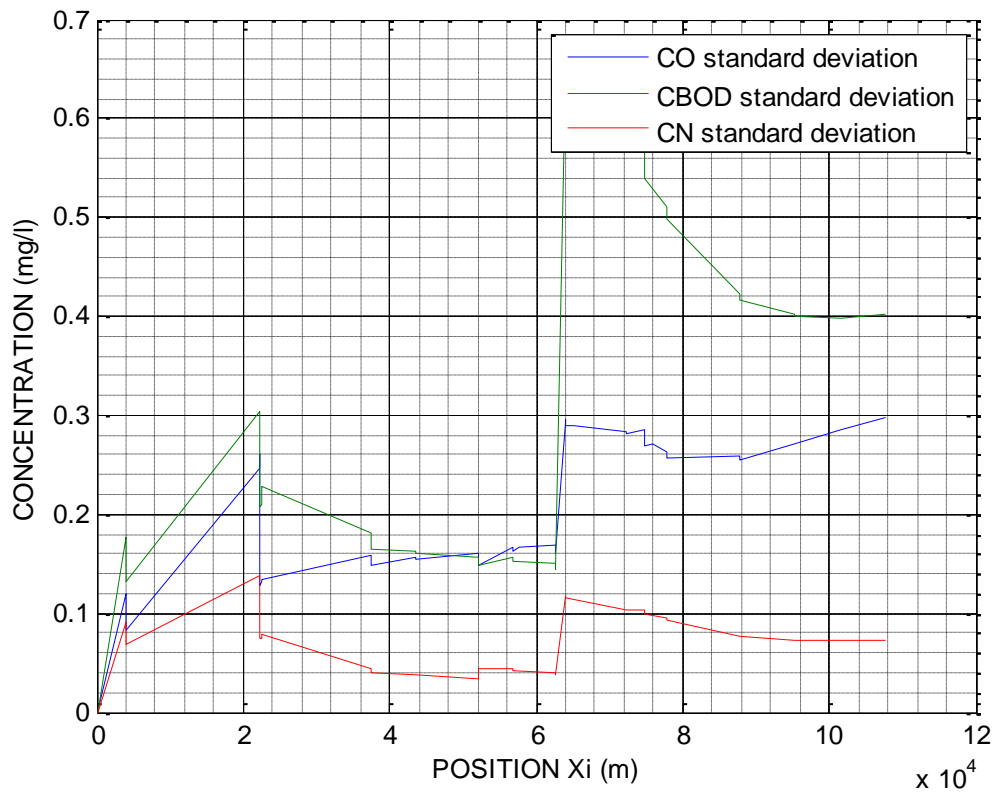
Διάγραμμα 4.20: Νέφος, Μέση Τιμή και 95% Διάστημα Εμπιστοσύνης CO (Διαδρομή: 48-6)



Διάγραμμα 4.21: Νέφος, Μέση Τιμή και 95% Διάστημα Εμπιστοσύνης CBOD (Διαδρομή: 48-6)

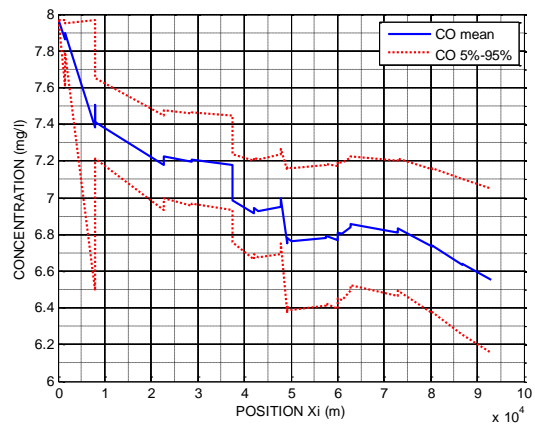
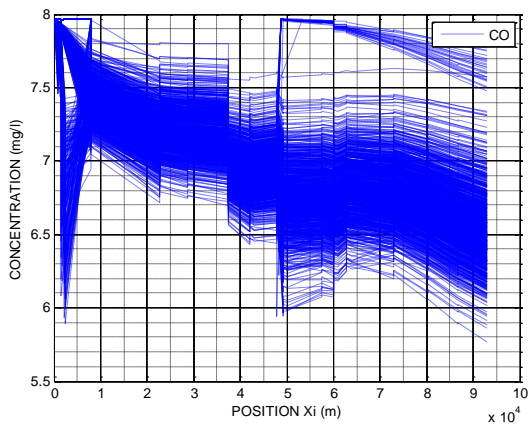


Διάγραμμα 4.22: Νέφος, Μέση Τιμή και 95% Διάστημα Εμπιστοσύνης CN (Διαδρομή: 48-6)

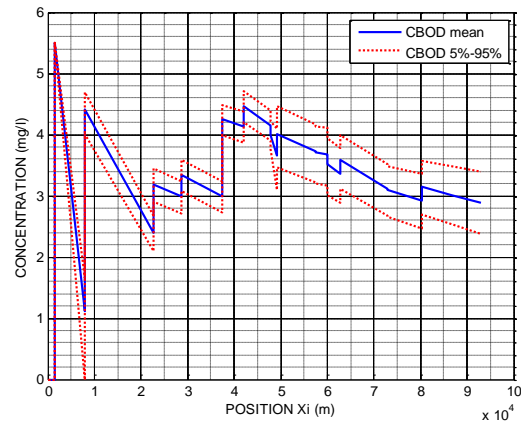
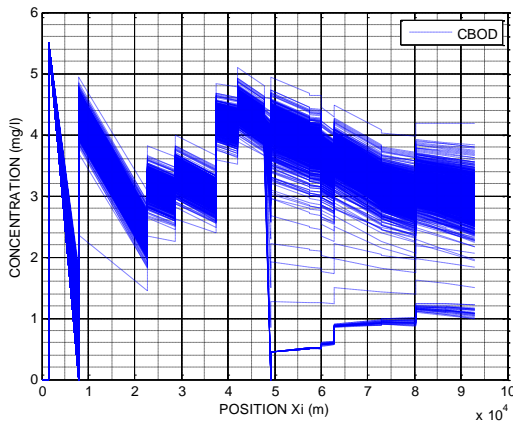


Διάγραμμα 4.23: Τυπικές Αποκλίσεις CO, CBOD και CN (Διαδρομή: 48-6)

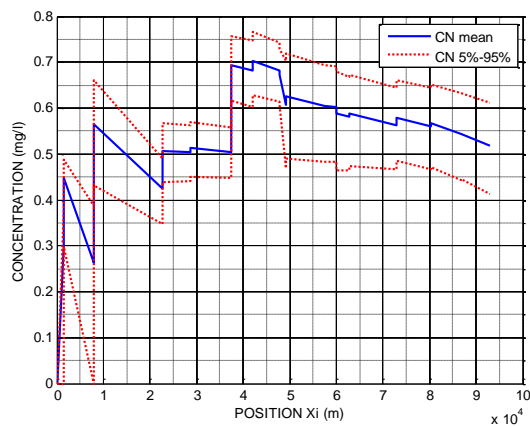
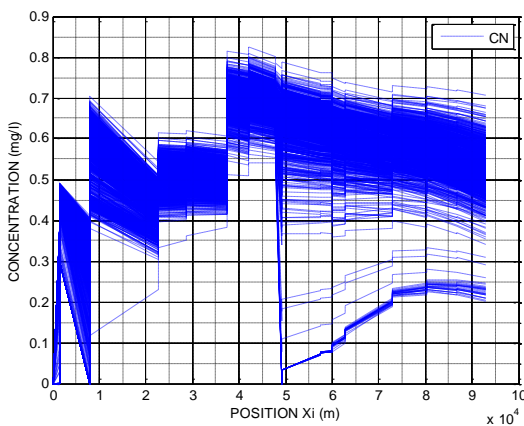
4.7.1.2.2 Διαδρομή 45-6



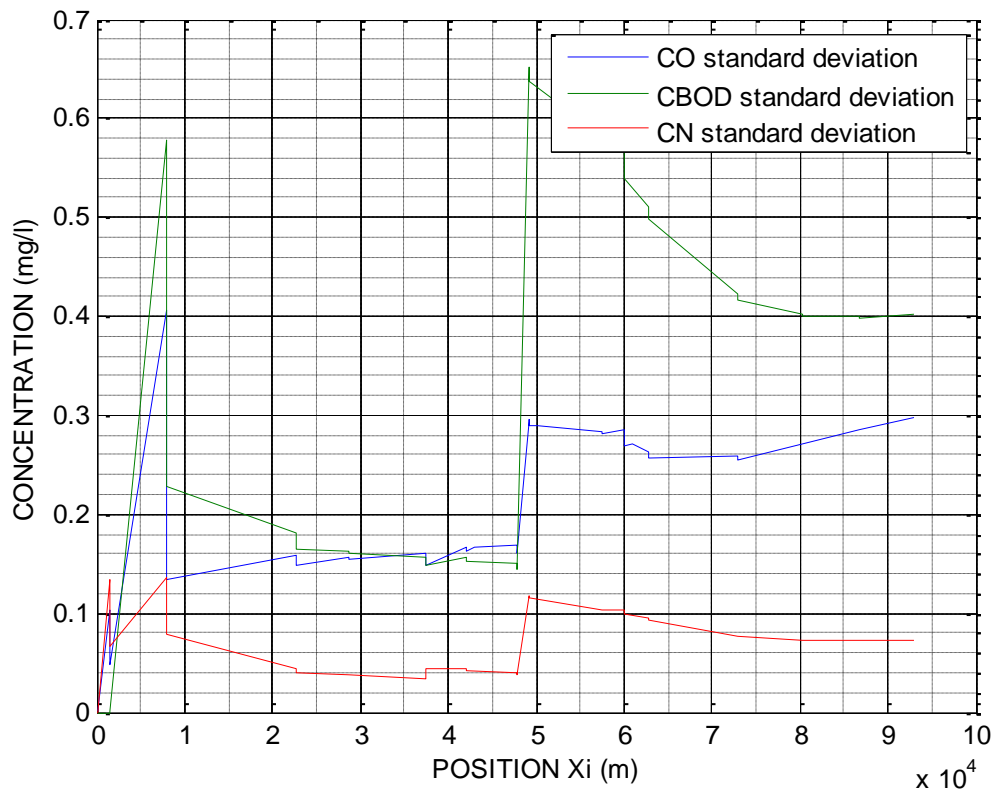
Διάγραμμα 4.24: Νέφος, Μέση Τιμή και 95% Διάστημα Εμπιστοσύνης CO (Διαδρομή: 45-6)



Διάγραμμα 4.25: Νέφος, Μέση Τιμή και 95% Διάστημα Εμπιστοσύνης CBOD (Διαδρομή: 45-6)

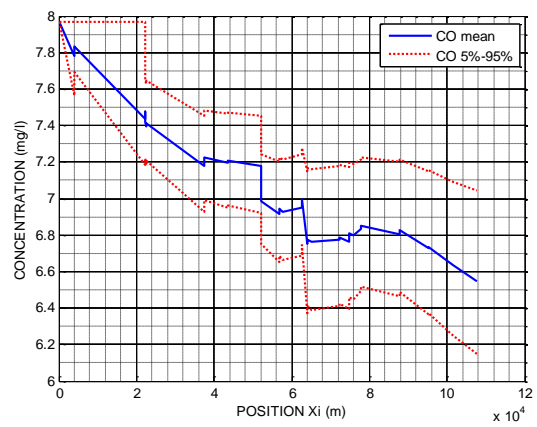
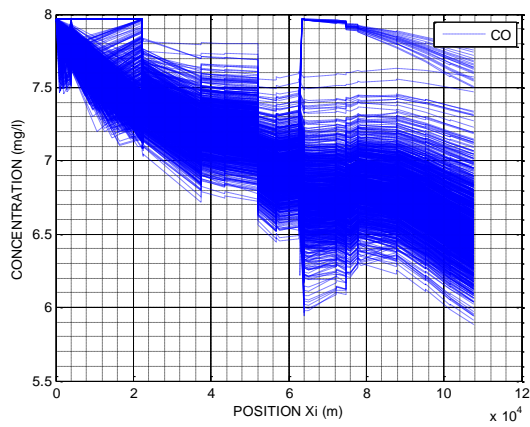


Διάγραμμα 4.26: Νέφος, Μέση Τιμή και 95% Διάστημα Εμπιστοσύνης CN (Διαδρομή: 45-6)

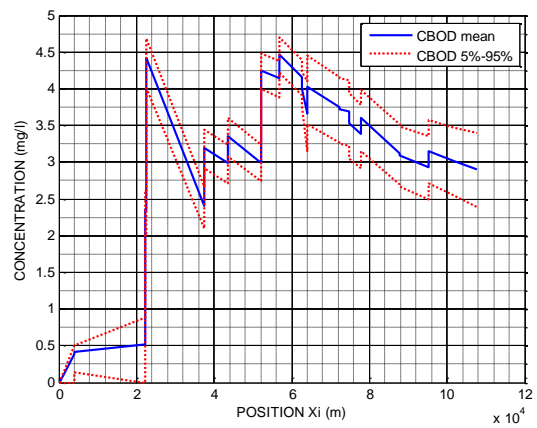
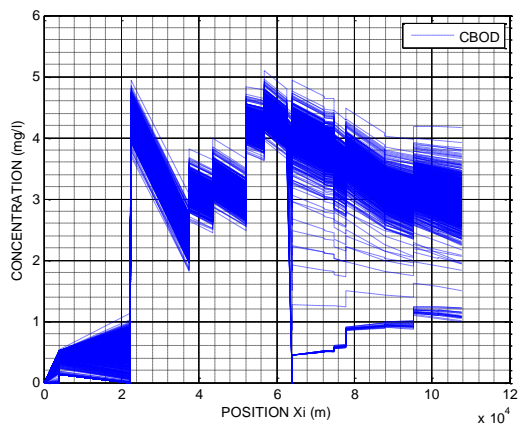


Διάγραμμα 4.27: Τυπικές Αποκλίσεις CO, CBOD και CN (Διαδρομή: 45-6)

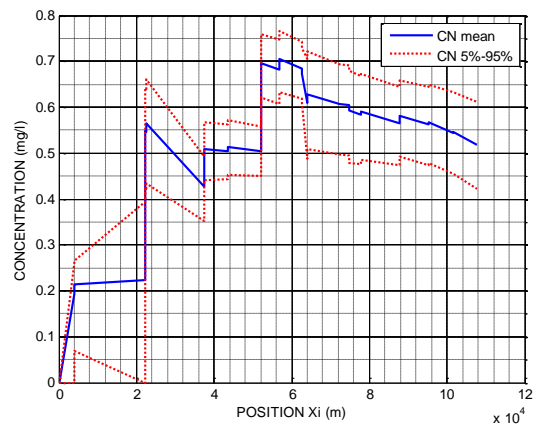
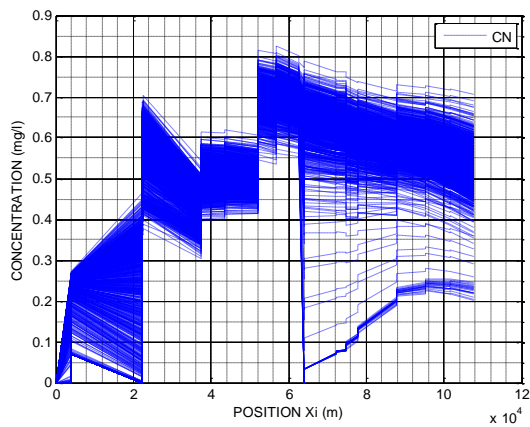
4.7.1.2.3 Διαδρομή 28-6



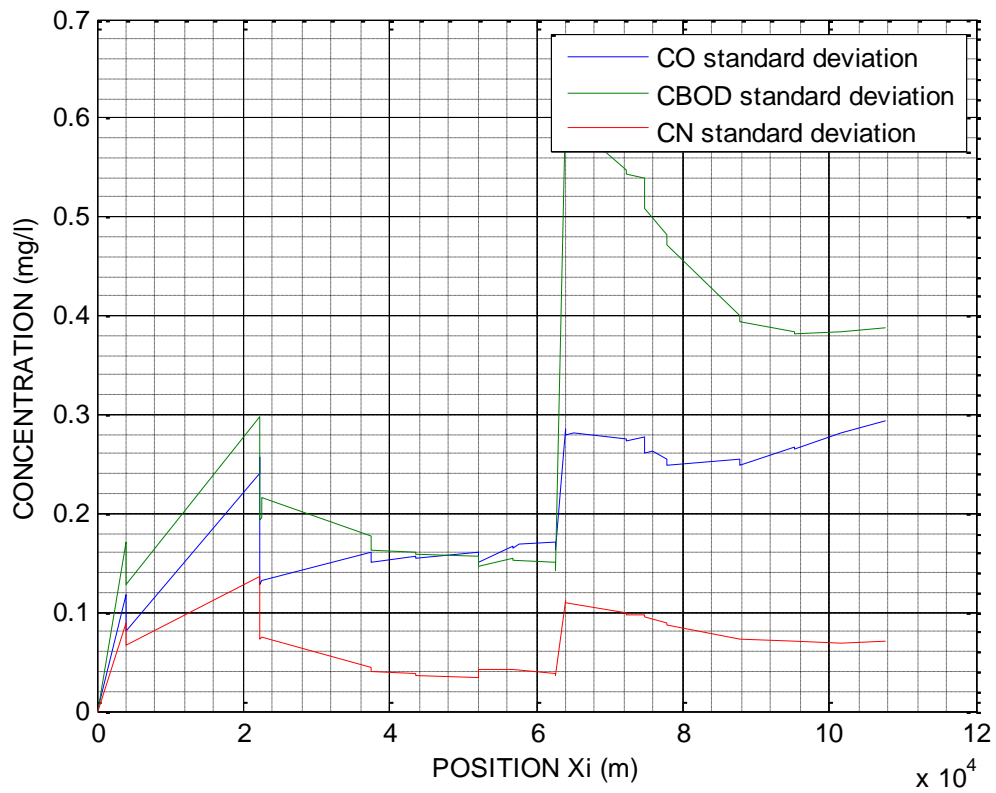
Διάγραμμα 4.28: Νέφος, Μέση Τιμή και 95% Διάστημα Εμπιστοσύνης CO (Διαδρομή: 28-6)



Διάγραμμα 4.29: Νέφος, Μέση Τιμή και 95% Διάστημα Εμπιστοσύνης CBOD (Διαδρομή: 28-6)

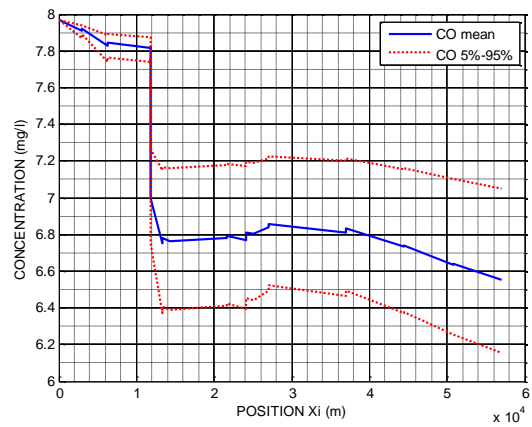
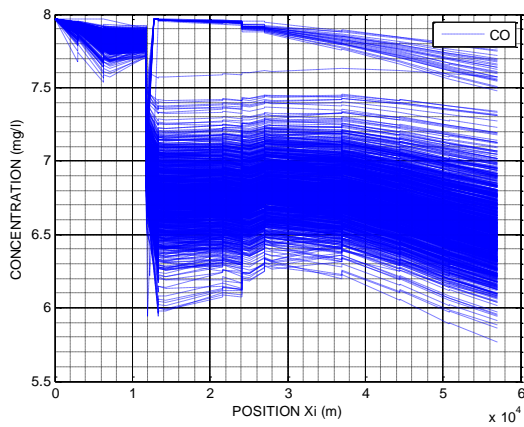


Διάγραμμα 4.30: Νέφος, Μέση Τιμή και 95% Διάστημα Εμπιστοσύνης CN (Διαδρομή: 28-6)

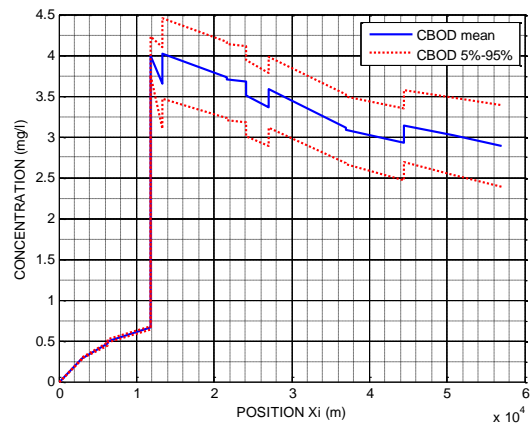
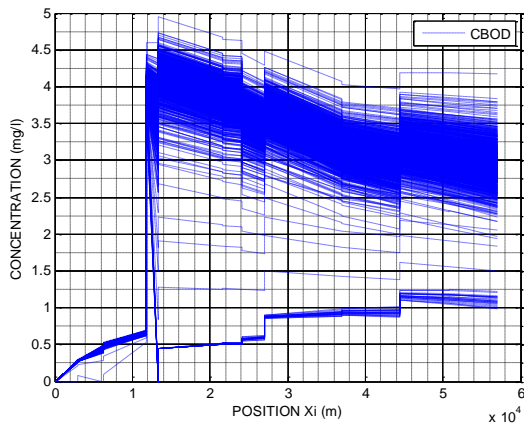


Διάγραμμα 4.31: Τυπικές Αποκλίσεις CO, CBOD και CN (Διαδρομή: 28-6)

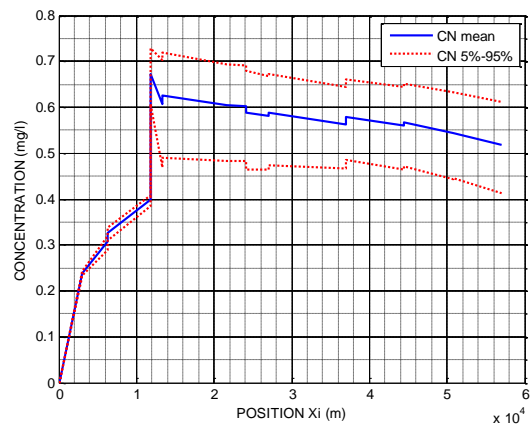
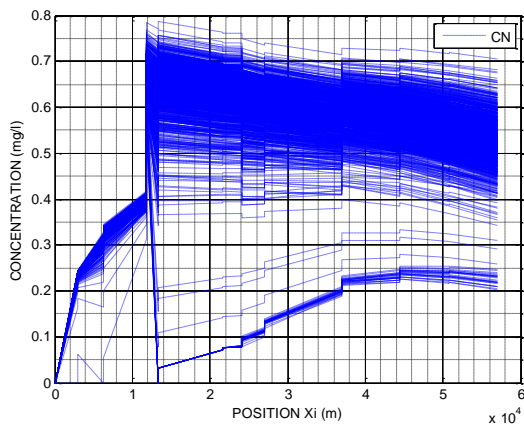
4.7.1.2.4 Διαδρομή 24-6



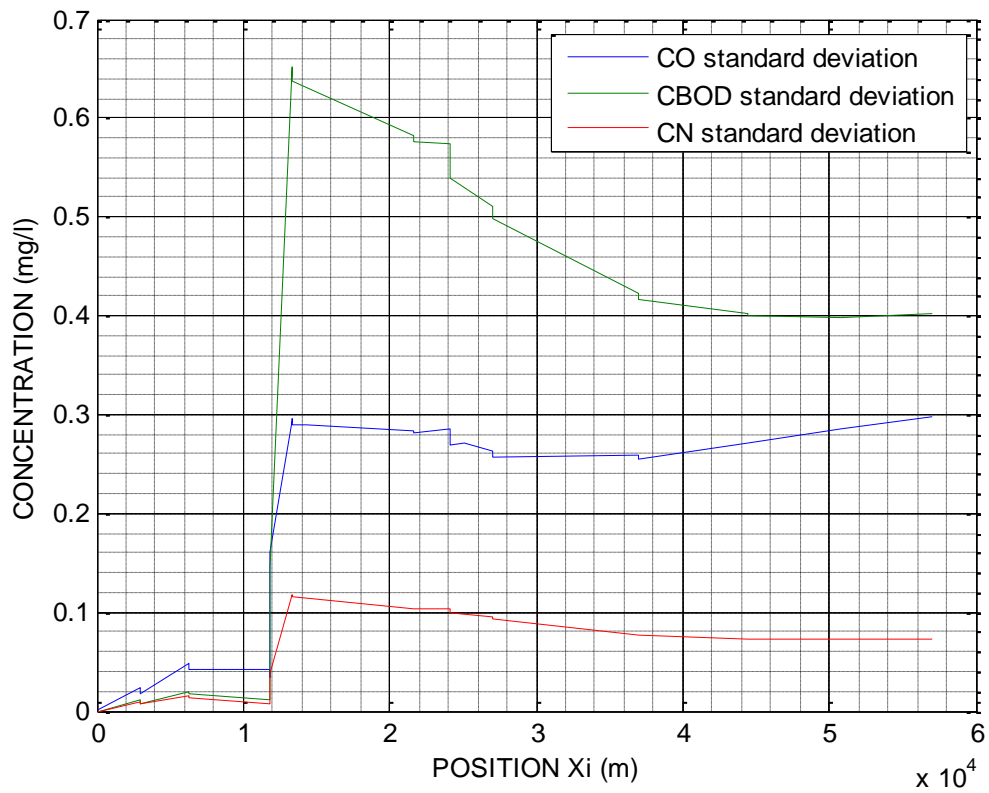
Διάγραμμα 4.32: Νέφος, Μέση Τιμή και 95% Διάστημα Εμπιστοσύνης CO (Διαδρομή: 24-6)



Διάγραμμα 4.33: Νέφος, Μέση Τιμή και 95% Διάστημα Εμπιστοσύνης CBOD (Διαδρομή: 24-6)

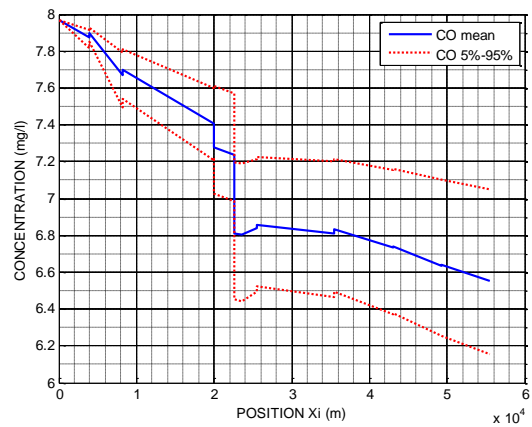
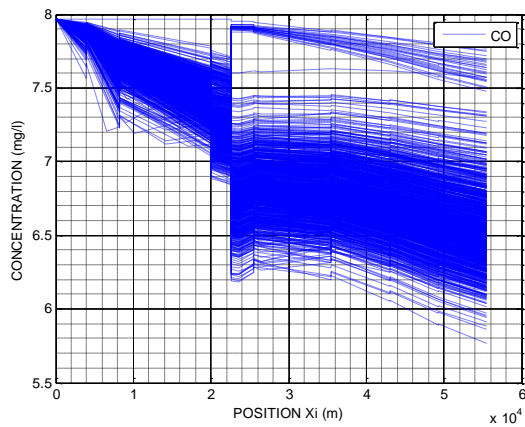


Διάγραμμα 4.34: Νέφος, Μέση Τιμή και 95% Διάστημα Εμπιστοσύνης CN (Διαδρομή: 28-6)

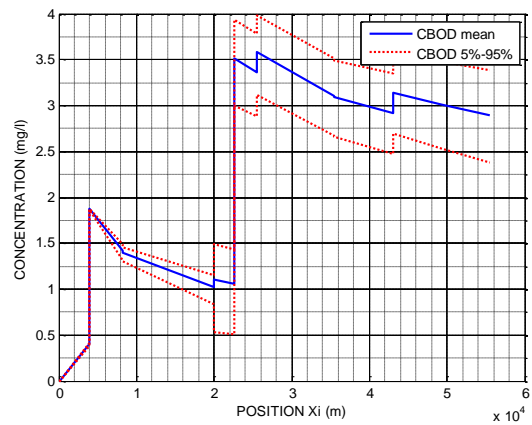
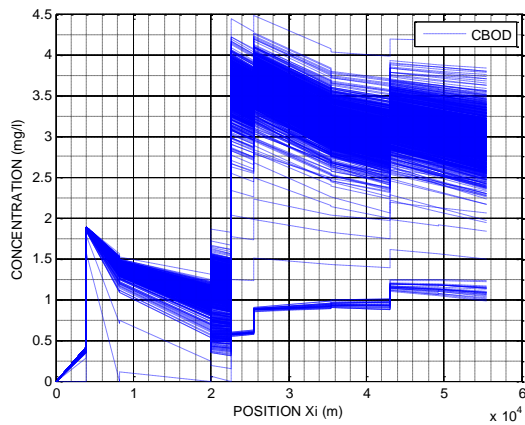


Διάγραμμα 4.35: Τυπικές Αποκλίσεις CO, CBOD και CN (Διαδρομή: 24-6)

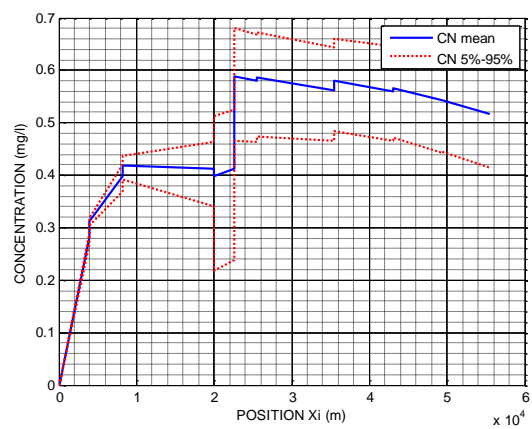
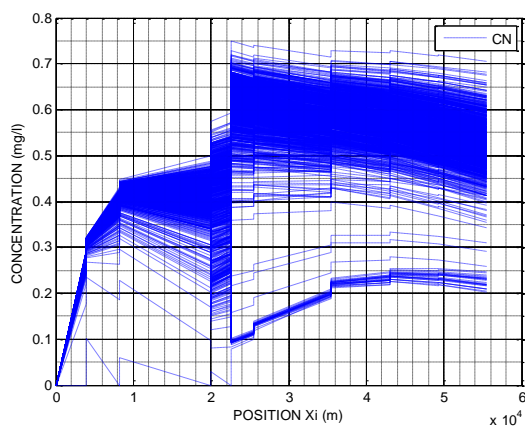
4.7.1.2.5 Διαδρομή 16-6



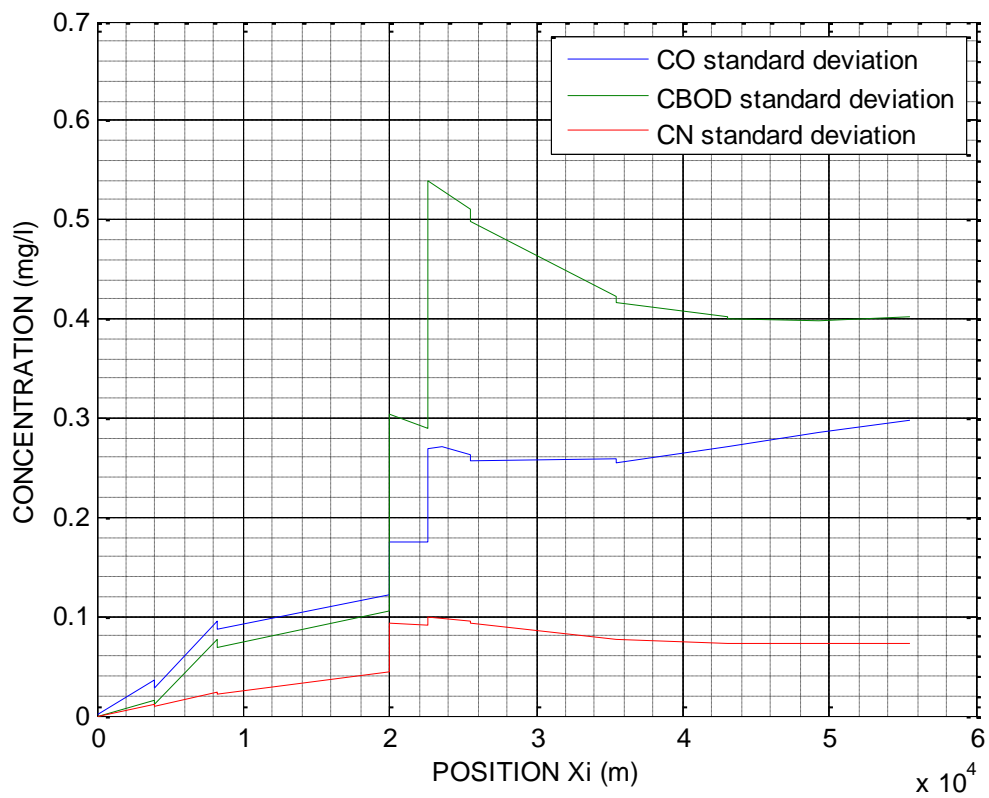
Διάγραμμα 4.36: Νέφος, Μέση Τιμή και 95% Διάστημα Εμπιστοσύνης CO (Διαδρομή: 16-6)



Διάγραμμα 4.37: Νέφος, Μέση Τιμή και 95% Διάστημα Εμπιστοσύνης CBOD (Διαδρομή: 16-6)

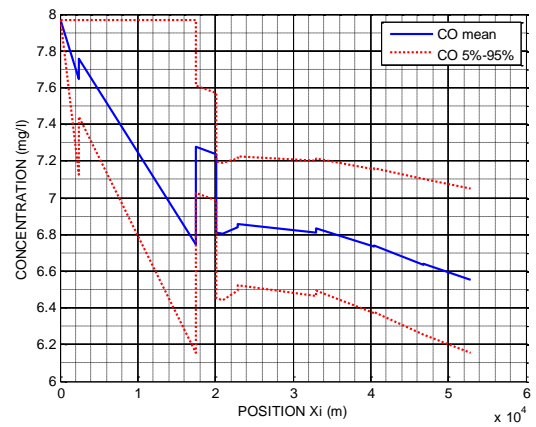
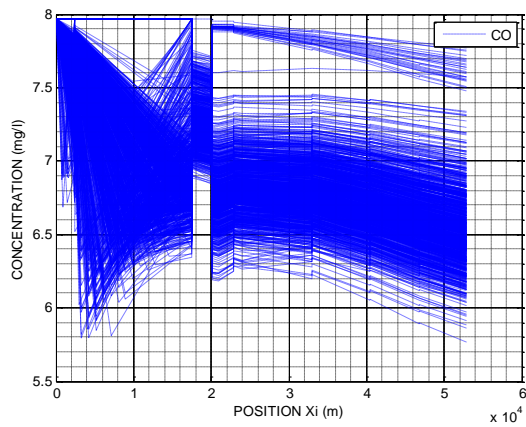


Διάγραμμα 4.38: Νέφος, Μέση Τιμή και 95% Διάστημα Εμπιστοσύνης CN (Διαδρομή: 16-6)

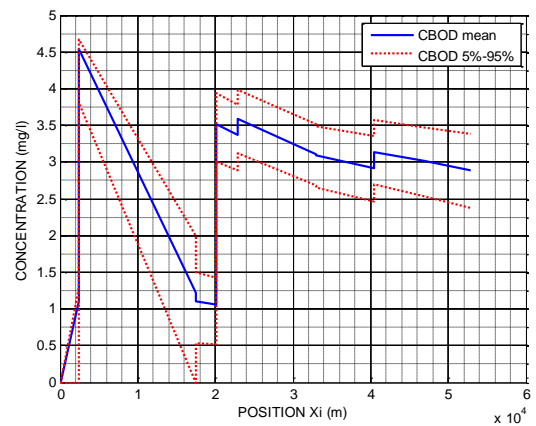
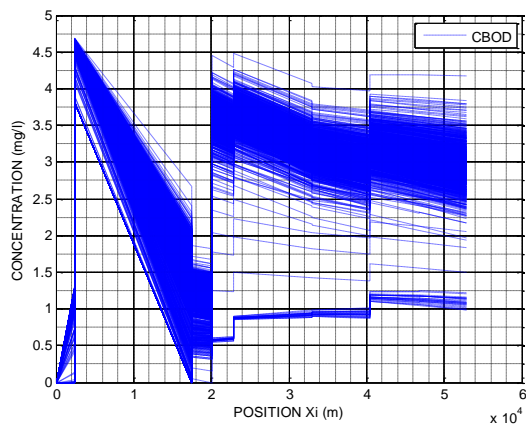


Διάγραμμα 4.39: Τυπικές Αποκλίσεις CO, CBOD και CN (Διαδρομή: 16-6)

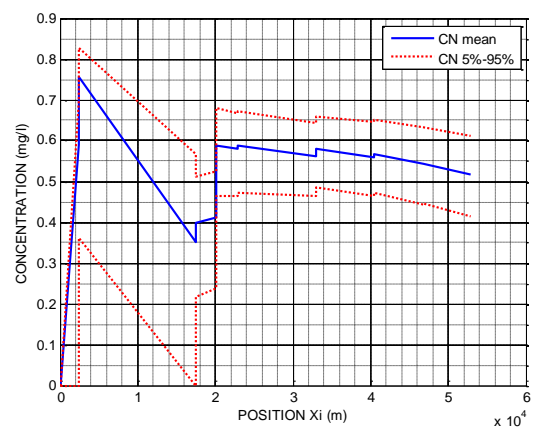
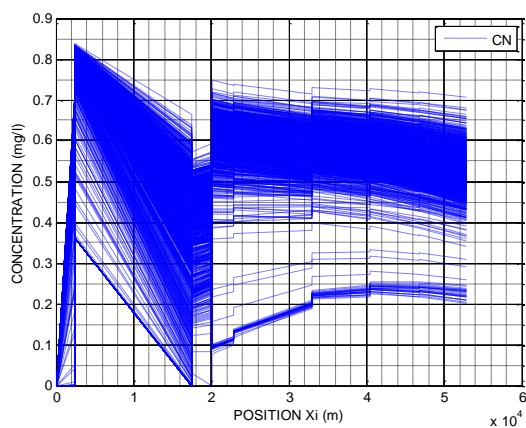
4.7.1.2.6 Διαδρομή 13-6



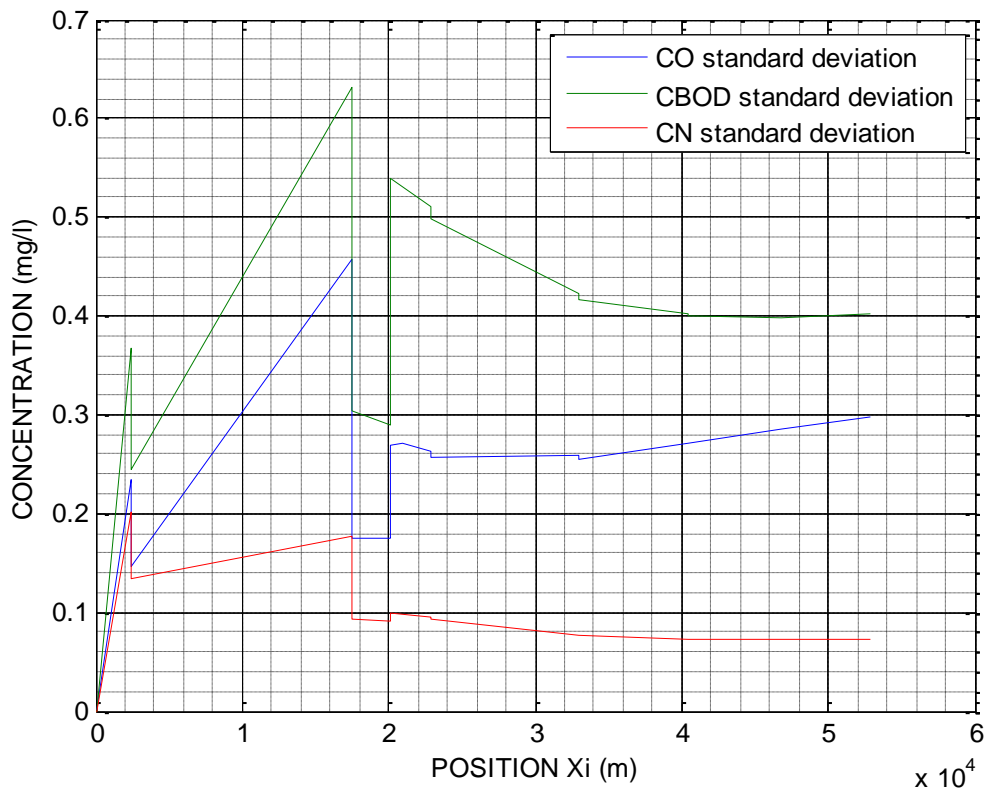
Διάγραμμα 4.40: Νέφος, Μέση Τιμή και 95% Διάστημα Εμπιστοσύνης CO (Διαδρομή: 13-6)



Διάγραμμα 4.41: Νέφος, Μέση Τιμή και 95% Διάστημα Εμπιστοσύνης CBOD (Διαδρομή: 13-6)



Διάγραμμα 4.42: Νέφος, Μέση Τιμή και 95% Διάστημα Εμπιστοσύνης CN (Διαδρομή: 13-6)



Διάγραμμα 4.43 Διάγραμμα 4.44: Τυπικές Αποκλίσεις CO, CBOD και CN (Διαδρομή: 13-6)

4.7.2 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων RISDOEPR1

Η εφαρμογή του πιθανοτικού μοντέλου, έδειξε ότι με την θέσπιση των προτεινόμενων μέτρων οι συγκεντρώσεις των τριών ποιοτικών παραμέτρων CO, CBOD και CN επιτρέπουν τον χαρακτηρισμό της κατάστασης των υδάτινων σωμάτων του υδρολογικού συστήματος του Ευρώτα ως καλή με βεβαιότητα πάνω από 95%, εφόσον θεωρηθεί ότι οι κατανομές της ταχύτητας ροής και των συντελεστών του μοντέλου περιγράφονται αξιόπιστα από τα στατιστικά χαρακτηριστικά, που ορίστηκαν.

5 Συμπεράσματα

Τα μοντέλα ποιότητας ύδατος είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο στη διαχείριση της ποιότητας των υδατικών πόρων. Μέχρι σήμερα έχουν εξελιχθεί πολυάριθμα ομοιώματα, τα οποία διαφέρουν ως προς τις παραδοχές που γίνονται και τις διεργασίες που προσομοιώνονται.

Η τάση που υπάρχει, να γίνεται η προσομοίωση ολοένα και πιο περίπλοκη οδηγεί στην ανάγκη για την εκτίμηση πολλών παραμέτρων με αποτέλεσμα να γίνεται η διακρίβωση των μοντέλων δύσκολη και απαιτητική σε χρόνο. Παρά ταύτα, η αύξηση της πολυπλοκότητας της προσομοίωσης σε συνδυασμό με την αύξηση του κόστους και των απαιτήσεων σε χρόνο δεν συνεπάγεται πάντοτε όμοια αύξηση στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Προϋπόθεση άλλωστε για την εγκυρότητα ενός μοντέλου είναι η σωστή του διακρίβωση. Ως εκ τούτου τα πολύπλοκα μοντέλα ποιότητας ύδατος δεν ανταποκρίνονται πάντα στις απαιτήσεις της πραγματικότητας, με αποτέλεσμα να μην είναι πρόσφορη η εφαρμογή τους ως εργαλεία για τη λήψη αποφάσεων σε σχέση με τη διαχείριση των υδατικών πόρων. Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός, ότι οι απλές μέθοδοι, οι οποίες έχουν αναπτυχθεί εδώ και περισσότερο από μισό αιώνα, όπως η μέθοδος των Streeter και Phelps του 1925, συνεχίζουν να εφαρμόζονται ευρέως και αποτελούν τη βάση πολλών σύγχρονων μοντέλων. Λόγω λοιπόν της έντονης αύξησης της δυσκολίας της διακρίβωσης, του κόστους και του υπολογιστικού φόρτου, που συνοδεύουν την αύξηση της πολυπλοκότητας της προσομοίωσης, συμπεραίνεται, ότι η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου για κάθε ξεχωριστή περίπτωση μελέτης είναι θέμα μείζονος σημασίας, στο οποίο θα πρέπει να δίνεται μεγάλη σημασία.

Μολονότι η διεξοδική μελέτη της ποιοτικής διαχείρισης συγκεκριμένων υδάτινων σωμάτων με εντοπισμένα προβλήματα ή/και ιδιαίτερα χαρακτηριστικά απαιτεί εξειδικευμένη και αναλυτική προσομοίωση, ένα απλό υπολογιστικό εργαλείο, όπως το RISDOE, που παρουσιάζεται εδώ, μπορεί να δώσει γρήγορα και με μικρό κόστος αποτελέσματα, τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν για τη χάραξη της διαχειριστικής πολιτικής. Ειδικά στην περίπτωση της κατάρτισης σχεδίων για την εφαρμογή της Ευρωπαϊκής Οδηγίας Πλαίσιο για

τα Ύδατα, η οποία προβλέπει την εξασφάλιση της καλής ποιότητας όλων των υδάτινων σωμάτων της Ένωσης, ενδείκνυται η χρήση απλοποιημένων εφαρμογών, οι οποίες ζητούν περιορισμένα στοιχεία και δίνουν άμεσα αποτελέσματα. Με αυτό τον τρόπο ενδέχεται να γίνονται απλοποιήσεις, όπως η παραδοχή της μονιμότητας της ροής και της ρύπανσης και η αγνόηση ορισμένων διεργασιών, αλλά αποφεύγονται υπεραπλουστευτικές εκτιμήσεις, όπως η αυτούσια μεταφορά της ρυπαντικής μάζας οργανικού άνθρακα από τα ανάντη προς τα κατάντη στο κείμενο τεκμηρίωσης του Προσχεδίου Διαχείρισης Υδατικών Πόρων του ΥΔ Δυτικής Πελοποννήσου «Ανάλυση ανθρωπογενών πιέσεων και των επιπτώσεών τους στα επιφανειακά και στα υπόγεια υδατικά συστήματα».

Στην περίπτωση του RISDOE, η χρήση στα πλαίσια της κατάρτισης σχεδίων διαχείρισης ποιότητας ύδατος σε υδατορέματα για τους σκοπούς της Οδηγίας Πλαίσιο για τα Ύδατα κρίνεται απλή και αποδοτική. Η απλότητα της εφαρμογής έγκειται στην δυνατότητα αξιοποίησης των υδάτινων σωμάτων, των οποίων ο καθορισμός υπαγορεύεται από την Οδηγία, ως τμήματα, στα οποία εφαρμόζεται η μέθοδος του μοντέλου. Το γεγονός, ότι για τους σκοπούς της Οδηγίας γίνεται εκτίμηση των πιέσεων, σημειακών και μη, και των υδρολογικών χαρακτηριστικών σε επίπεδο υδάτινων σωμάτων, καθιστά εφικτή την θεώρησή τους ως «υδάτινα τμήματα» για την εφαρμογή του RISDOE. Συνεπώς, αν εκτιμηθούν επιπλέον οι συντελεστές του επαναερισμού, της βιοδιάσπασης του οργανικού άνθρακα και της νιτροποίησης του αμμωνιακού αζώτου είναι δυνατή η εφαρμογή του μοντέλου χωρίς επιπλέον απαιτήσεις δεδομένων. Η αβεβαιότητα σε σχέση με τις τιμές των συντελεστών και της ταχύτητας ροής αντιμετωπίζεται με τη χρήση της πιθανοτικής έκδοσης RISDOEPR1, στην οποία εισάγονται οι τρεις συντελεστές και η ταχύτητα ροής ως συσχετιζόμενες κανονικές κατανομές και εκτιμάται η μέση τιμή, το 90% διάστημα εμπιστοσύνης και η τυπική απόκλιση των τριών ποιοτικών παραμέτρων CO, CBOD και CN.

Στην εφαρμογή του μοντέλου στο υδρολογικό σύστημα του ποταμού Ευρώτα ήταν δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων σε σχέση με τη δυνατότητα αξιοποίησης του. Αρχικά, επισημαίνεται η ευκολία με την οποία προσαρμόστηκε το μοντέλο στο υπό μελέτη υδρολογικό σύστημα. Συγκεκριμένα για κάθε υδάτινο τμήμα, δηλαδή για κάθε μονάδα χωρικής διακριτοποίησης του μοντέλου, αρκούσε να δηλωθεί σε ποιο υδάτινο τμήμα καταλήγει, ώστε να προσαρμοστεί το μοντέλο αυτόματα στις διαδρομές της ροής για το συγκεκριμένο υδρολογικό σύστημα. Έπειτα, η εκτίμηση των συντελεστών K_1 , K_2 και K_N ήταν απλή, καθώς έχει γίνει εκτενής έρευνα για τη διακύμανση και την εκτίμηση των τιμών και των τριών παραμέτρων με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγάλη διαθεσιμότητα πληροφοριών

σε σχέση με αυτές στη διεθνή βιβλιογραφία. Επιπλέον αξίζει να υπογραμμιστεί, ότι η ευαισθησία των αποτελεσμάτων στις τρεις παραμέτρους εμφανίζεται περιορισμένη, όπως πρόκυψε από την ανάλυση ευαισθησίας που έγινε, με αποτέλεσμα να μην είναι δεσμευτική η υπερβολικά ακριβής εκτίμηση τους για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Όσον αφορά στις ταχύτητες ροής που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εφαρμογή, χρειάστηκε να γίνουν υποθέσεις λόγω έλλειψης στοιχείων. Θεωρείται όμως, ότι θα μπορούσε η πύκνωση των σταθμών παρακολούθησης στο χώρο και της καταγραφής των μετρήσεων στο χρόνο να δώσει επαρκή στοιχεία για την ακριβή διακρίβωση του μοντέλου, ενισχύοντας ταυτόχρονα την δυνατότητα της άμεσης παρακολούθησης της ποιότητας των υδάτων και του ελέγχου της αποτελεσματικότητας των μέτρων, που λαμβάνονται. Στην περίπτωση οπότε που επιλεχτεί η εφαρμογή της μεθόδου για διαχειριστικούς σκοπούς, θεωρείται ότι είναι περιορισμένο το επιπλέον κόστος της προσομοίωσης.

Από την εφαρμογή της πιθανοτικής έκδοσης του μοντέλου στο υδρολογικό σύστημα του ποταμού Ευρώτα προέκυψαν επίσης συμπεράσματα σε σχέση με την αξιοποιησιμότητά του. Αρχικά, η χρήση της στοχαστικής προσομοίωσης για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων διευκολύνει την εφαρμογή της έκδοσης αυτής του μοντέλου, καθώς την ελευθερώνει από τους περιορισμούς των αναλυτικών λύσεων για την εκτίμηση των κατανομών των συγκεντρώσεων ποιοτικών χαρακτηριστικών. Ήταν δυνατή οπότε η εφαρμογή του μοντέλου με τα ίδια δεδομένα εισόδου και υπό τις ίδιες παραδοχές με αυτές της αιτιοκρατικής έκδοσης. Για την εφαρμογή της πιθανοτικής έκδοσης του μοντέλου RISEDOEPR1 στο υδρολογικό σύστημα του ποταμού Ευρώτα χρειάστηκε να οριστούν επιπλέον οι τυπικές αποκλίσεις των τριών συντελεστών και της ταχύτητας ροής καθώς και οι μεταξύ τους ετεροσυσχετίσεις. Η διατήρηση των ετεροσυσχετίσεων μεταξύ των παραμέτρων, οι οποίες έχουν επισημανθεί και αναφέρονται στη βιβλιογραφία, καθώς και η επιλογή των κανονικών κατανομών, οι οποίες θεωρείται, ότι περιγράφουν την πυκνότητα πιθανότητας των παραμέτρων, εξασφαλίζουν ότι τα αποτελέσματα του μοντέλου δεν παρουσιάζουν το δυνατό αλλά το πιθανό. Δεν πρόκειται δηλαδή για διερεύνηση των ακραίων τιμών, που είναι δυνατό να εμφανιστούν, αλλά για μία προσπάθεια να εισαχθεί η αβεβαιότητα σε σχέση με τις παραμέτρους στα δεδομένα εισόδου του συστήματος με σκοπό να αποδοθεί στα αποτελέσματα του μοντέλου. Συνεπώς, η εφαρμογή της έκδοσης στο υδρολογικό σύστημα του ποταμού Ευρώτα, έδωσε την πληροφορία, ότι το διαχειριστικό σενάριο, που προτάθηκε εξασφαλίζει την επιθυμητή κατάσταση στα υδάτινα σώματα με βεβαιότητα άνω του 95% ακόμη και αν οι τρεις συντελεστές και η ταχύτητα δεν έχουν τις τιμές, που εκτιμήθηκαν, αλλά κινούνται γύρω από

αυτές με τυπική απόκλιση $0,1 \text{ d}^{-1}$ και 5000 m/d για τους συντελεστές και την ταχύτητα αντίστοιχα. Η πληροφορία αυτή είναι σημαντική για την υποστήριξη ενός σχεδίου διαχείρισης υδατικών πόρων, καθώς αποτελεί ένδειξη για την αποτελεσματικότητά του.

Κλείνοντας, επισημαίνεται η ανάγκη για την εξέλιξη υπολογιστικών εργαλείων βασισμένων στην προσομοίωση, τα οποία να είναι προσαρμοσμένα στις ανάγκες των φορέων διαχείρισης ποιότητας ύδατος, έτσι ώστε να αξιοποιείται η επιστημονική γνώση στη λήψη των αποφάσεων. Το μοντέλο, που αναπτύχθηκε εδώ είναι ένα απλοποιημένο παράδειγμα προς αυτή την κατεύθυνση και θα μπορούσε να έχει πρακτική εφαρμογή στη διερεύνηση διαχειριστικών σεναρίων για την διασφάλιση της ποιότητας ύδατος.

Βιβλιογραφία

- Baity, H. G., 1938. Some Factors Affecting the Aerobic Decomposition of Sewage Sludge Deposits. *Sewage Works J.*, Volume 10, pp. 539-568.
- Chen, K.-W. & Papadopoulos, A. S., 1988. A NONPARAMETRIC METHOD FOR ESTIMATING THE JOINT PROBABILITY DENSITY OF BOD AND DO. *Ecological Modelling*, Volume 41, pp. 183-191.
- Edeline, F. & Lambert, G., 1974. A SIMPLE SIMULATION METHOD FOR RIVER SELF-PURIFICATION STUDIES. *Water Research*, Volume 8, pp. 297-306.
- Fair, G. M., Moore, E. W. & Thomas, H. A., 1941. The Natural Purification of River Muds and Pollutational Sediments. *Sewage Woks J.*, Volume 13, pp. 270-307, 756-799, 1209-1228.
- Harrison, G. W., 1980. A Stream Pollution Model with Intervals for the Rate Coefficients. *MATHEMATICAL BIOSCIENCES*, Volume 49, pp. 111-120.
- Horn, A. L., Rueda, F. J., Hoermann, G. & Fohrer, N., 2004. Implementing river water quality issues in mesoscale watershed models for water policy demands-an overview on current concepts, deficits, and future tasks. *Physics and Chemistry of the Earth*, Volume 29, pp. 725-737.
- Jolankai, G., 1997. Basic river water quality models. *Technical Documents in Hydrology*, Volume 13, pp. 1-49.
- Mannina, G. & Viviani, G., 2010. Water quality modelling for ephemeral rivers: Model development and parameter assessment. *Journal of Hydrology*, Volume 393, pp. 186-196.
- Marsili-Libelli, S. & Giusti, E., 2008. Water quality modelling for small river basins. *Environmental Modelling & Software*, Volume 23, pp. 451-463.
- Orlob, G. T., 1983. *Mathematical Modelling of Water Quality: Streams, Lakes and Reservoirs*. University of California, Davis: J. Wiley & Sons.
- Padgett, W. J., 1975. A Stochastic Model for Stream Pollution. *MATHEMATICAL BIOSCIENCES*, Volume 25, pp. 309-317.
- Padgett, W. J., 1978. A Stream-Pollution Model With Random Deoxygenation and Reaeration Coefficients. *MATHEMATICAL BIOSCIENCES*, Volume 42, pp. 137-148.
- Padgett, W. J. & Papadopoulos, A. S., 1979. STOCHASTIC MODELS FOR PREDICTION OF BOD AND DO IN STREAMS. *Ecological Modelling*, Volume 6, pp. 289-303.
- Stamou, A. I. & Rutschmann, P., 2011. Teaching simple water quality models. *Education for Chemical Engineers*, Volume 6, p. 132-141.
- Streeter, H. W. & Phelps, E. B., 1925. *A study of the pollution and natural purification of the Ohio river*, *Public Health Bulletin No. 146*. Washington, D.C.: United States Public Health Service.
- Thomann, R. V. & Mueller, J. A., 1987. *Principles of Surface Water Quality Modeling and Control*. New York: Harper & Row.
- Thomas, H. A., 1948. Pollution load capacity of streams. *Water and Sewage Works*, Volume 95, p. 409.

- Tung, Y.-K. & Hathhorn, W. E., 1988. PROBABILITY DISTRIBUTION FOR CRITICAL DO LOCATION IN STREAMS. *Ecological Modelling*, Volume 42, pp. 45-60.
- TUNG, Y.-K. & HATHHORN, W. E., 1998. Propability Distribution for critical DO Locationin Streams. *Ecological Modelling*, Volume 42, pp. 45-60.
- Tung, Y. K. & Hathhorn, W. E., 1990. Stochastic Waste Load Allocation. *Ecological Modeling* , Volume 55, pp. 29-56.
- Versteeg, H. K. & Malalasekera, W., 2007. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method, 2nd ed.* England: Pearson.
- Vollenweider, R. A., 1969. Moglichkeiten und Grenzen elementarer Modelle der Stoffbilanz von Seen. *Archiv fur Hydrobiologie*, Volume 66, pp. 1-36.
- Ειδική Γραμματεία Υδάτων, Υ.ΠΕ.ΚΑ., 2011. *Σχέδιο Διαχείρισης Υδατικών Πόρων του Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Πελοποννήσου*. [Online]
Available at:
http://wfd.opengov.gr/index.php?option=com_content&task=view&id=27&Itemid=12
[Accessed 1 06 2012].
- Νικολαΐδης, Ν. et al., 2009. *Διαχειριστικά Σχέδια Πιλοτικής Αγροτικής Λεκάνης Ευρώτα Ποταμού Τεχνική έκθεση 134*, s.l.: Νικολαΐδης Ν., Ν. Καλογεράκης, Ν. Σκουλικίδης, Κ. Τσακίρης, 2005-2009. Τεχνολογίες φιλικές προς το περιβάλλον για αγροτική ανάπτυξη. Πρόγραμμα Life-περιβάλλον, LIFE05ENV/Gr/000245 EE (EnviFriendly).
- Σκουλίδης, Ν. et al., 2008. Υδρολογική και Βιογεωχημική παρακολούθηση στη λεκάνη απορροής του Ευρώτα. Τελική Έκθεση 1. *Life Environment. Life05 ENV/GR/000245*.