



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΝΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Δ.Π.Μ.Σ. «Επιστήμη και τεχνολογία υδατικών πόρων»

Μεταπτυχιακή εργασία

*Προσομοίωση ποιοτικών χαρακτηριστικών
ποταμού μέσω του λογισμικού
MIKE 11/ ECO Lab*

Τσιγαρίδα Αναστασία

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Νουτσόπουλος

ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

Αθήνα, Δεκέμβριος 2013

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΙΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΝΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Δ.Π.Μ.Σ. «Επιστήμη και τεχνολογία υδατικών πόρων»

Μεταπτυχιακή εργασία: «Προσομοίωση ποιοτικών χαρακτηριστικών ποταμού μέσω του λογισμικού MIKE 11/ECO Lab»

Αναστασία Τσιγαρίδα

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Νουτσόπουλος

Το περιεχόμενο της ανά χείρας μεταπτυχιακής εργασίας αποτελεί προϊόν της δικής μου πνευματικής προσπάθειας. Η ενσωμάτωση σε αυτήν υλικού τρίτων, δημοσιευμένου ή μη, γίνεται με δόκιμη αναφορά στις πηγές, που δεν επιτρέπει ασάφειες ή παρερμηνείες.

Αναστασία Τσιγαρίδα

Αθήνα, Δεκέμβριος 2013

Πρόλογος

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Διατμηματικού – Διεπιστημονικού Προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών των πολιτικών μηχανικών ‘Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων’.

Με την ολοκλήρωση αυτού του καθοριστικού για την εξέλιξή μου κύκλου σπουδών θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Νουτσόπουλο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην διετέλεση της παρούσης εργασίας καθώς επίσης και για τη βοήθειά του στην ολοκλήρωσή της.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές κ. Μαμάση και κ. Κουκουβίνο για την παροχή πληροφοριών και δεδομένων σχετικά με τον Κηφισό ποταμό.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Ηλία Μουσούλη για την πολύτιμη βοήθειά του και την υποστήριξή του σε όλα τα θέματα που αφορούσαν το λογισμικό MIKE.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω προς τους Γιάννη και Πάνο Κολλινιάτη για τις πολύτιμες συμβουλές τους στα ζητήματα που αφορούσαν το υδραυλικό κομμάτι και την υποστήριξη σε όλα τα επίπεδα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την αμέριστη συμπαράστασή της σε κάθε στάδιο της ζωής μου.

Αθήνα, Δεκέμβριος 2013

Αναστασία Τσιγαρίδα

Περίληψη

Τα μοντέλα προσομοίωσης φυσικών συστημάτων είναι εργαλεία που χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο τόσο για την μελέτη όσο και την διαχείριση των συστημάτων που εξετάζονται. Αν και κάθε μοντέλο μπορεί να δώσει μόνο μια απλοποιημένη αναπαράσταση της πραγματικότητας παρ' όλα αυτά τα συμπεράσματα των προσομοιώσεων μπορεί να είναι καθοριστικά για τη μελλοντική κατάσταση του φυσικού συστήματος που εξετάζεται.

Το MIKE 11 αποτελεί ένα τέτοιο εργαλείο και προσομοιάζει την μονοδιάστατη ροή σ' ένα ποτάμι. Οι δυνατότητές του δεν περιορίζονται μόνο στην προσομοίωση της υδροδυναμική συμπεριφοράς του συστήματος αλλά και στην μελέτη της ποιοτικής κατάστασης του ποταμού για πολλές μεταβλητές, στην προσομοίωση της μεταφοράς των ιζημάτων, στη μελέτη πλημμύρων κ.α. Αποτελεί ένα από τα πιο σύγχρονα και ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα σήμερα.

Στη παρούσα εργασία μελετήθηκε και εφαρμόστηκε το MIKE 11/ECO Lab στον Κάτω Ρου του Βοιωτικού Κηφισού με σκοπό την ανάδειξη των δυνατοτήτων του. Το MIKE 11/ECO Lab περιλαμβάνει τρία μοντέλα: το υδροδυναμικό μοντέλο (HD), το μοντέλο μεταφοράς - διασποράς (AD) και το ποιοτικό μοντέλο (ECO Lab).

Το HD μοντέλο βασίζεται στις εξισώσεις Saint Venant που περιγράφουν τη ροή σ' ένα ποτάμι ενώ η αριθμητική μέθοδος που χρησιμοποιεί είναι το σχήμα 6 σημείων γνωστό ως Σχήμα Abbott 6-σημείων (6-point Abbott scheme). Το μοντέλο δέχεται ως δεδομένα εισόδου το ψηφιακό ανάγλυφο της περιοχής μελέτης, τη παροχή εισόδου (οριακή συνθήκη ανάντη) και τη γεωμετρία του ποταμού. Η βαθμονόμηση του μοντέλου γίνεται με γνωστές καμπύλες στάθμης – παροχής και την επιλογή κατάλληλου συντελεστή τραχύτητας.

Το AD μοντέλο αφορά τη συμμεταφορά με τη κύρια ροή και τη διασπορά λόγω διαφοράς συγκέντρωσης. Δέχεται ως δεδομένα εισόδου τις συγκεντρώσεις των, υπό εξέταση, ουσιών και τον συντελεστή διασποράς. Το AD μοντέλο είναι δυναμικά συνδεδεμένο με το ECO Lab

ώστε οι συγκεντρώσεις σε κάθε χρονικό βήμα να λαμβάνουν υπόψη εκτός από τις διάφορες βιολογικές και βιοχημικές διαδικασίες και τα φαινόμενα μεταφοράς-διασποράς.

Το ECO Lab περιέχει διάφορα μοντέλα ποιοτικής ανάλυσης. Ένα από αυτά είναι το μοντέλο Ποιότητας νερού (Water Quality module, WQ) που περιλαμβάνει μεταξύ άλλων τις παραμέτρους BOD, DO, νιτρικά, φωσφορικά και βαρέα μέταλλα. Ανάλογα με τις διεργασίες (αερισμός, οξείδωση οργανικής ύλης, νιτροποίηση, φωτοσύνθεση κ.α.) που επιλέγεται να εξεταστούν διαμορφώνεται η πολυπλοκότητα και οι απαιτήσεις του μοντέλου. Στη παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί το WQ1 και θα εξεταστούν οι μεταβλητές BOD και DO και οι διεργασίες επαναερισμού και οξείδωσης της οργανικής ύλης.

Συγκεκριμένα, το MIKE 11/ECO Lab εφαρμόστηκε στο κύριο ρεύμα του Βοιωτικού Κηφισού για διάφορα υποθετικά σενάρια ώστε να αναδειχθούν οι κρίσιμοι παράμετροι μέσω της ανάλυσης ευαισθησίας. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε μόνο το HD μοντέλο και εφαρμόστηκαν διάφοροι περίοδοι επαναφοράς. Στη συνέχεια, προστέθηκε το AD μοντέλο και μελετήθηκαν διάφορα υποθετικά σενάρια στον Βοιωτικό Κηφισό για μια ουσία. Σκοπός των σεναρίων ήταν η ανάδειξη των παραμέτρων που επηρεάζουν περισσότερο στη μεταφορά και διασπορά της ουσίας κατάντη σημειακής πηγής. Οι παράμετροι που ελέγχθηκαν ήταν η παροχή και η συγκέντρωση του ρύπου στη σημειακή πηγή, η παροχή εισροής ανάντη της σημειακής πηγής και οι συντελεστές διασποράς και Manning n.

Στη συνέχεια, εφαρμόστηκαν υποθετικά σενάρια με τα τρία μοντέλα (HD, AD, ECO Lab) στον Βοιωτικό Κηφισό ώστε να προσδιοριστούν οι παράμετροι που επηρεάζουν περισσότερο την ποιοτική κατάσταση ενός ποταμού. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια για την προσομοίωση του Βοιωτικού Κηφισού εισάγοντας πλέον τις πραγματικές πιέσεις που υφίσταται σύμφωνα με το Σχέδιο Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας (ΥΠΕΚΑ, 2013). Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με μετρήσεις στην έξοδο του Βοιωτικού Κηφισού ώστε να διαπιστωθεί η εγκυρότητα του μοντέλου και να βαθμονομηθεί εφόσον απαιτείται.

Τα συμπεράσματα από την μελέτη και την εξοικείωση με το λογισμικό MIKE 11 ήταν ικανοποιητικά. Αν και αποτελεί ένα ιδιαίτερα πολύπλοκο λογισμικό όσον αφορά τις δυνατότητές του μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά και για την προσομοίωση απλών μοντέλων. Επιπλέον, δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να εξετάσει από απλά συστήματα αποξυγόνωσης μέχρι πολύπλοκα συστήματα που περιλαμβάνουν πολλές μεταβλητές και διεργασίες. Συμπερασματικά, το MIKE 11 κρίνεται ως ένα αξιόλογο εργαλείο για την ποιοτική προσομοίωση ποιοτικών χαρακτηριστικών ποτάμιων συστημάτων.

Abstract

Hydrological and Water quality models of natural systems are tools that are used increasingly for both the study and management of the systems tested. Despite the fact that each model can only give a simplified representation of reality, the conclusions of the simulations nevertheless can be decisive for the future state of the natural system under consideration.

MIKE 11 is such a tool that simulates the one-dimensional flow in a river. Its capabilities are not limited to the simulation of the hydrodynamic behavior of the system but extend to the study of the qualitative status of the river for many variables in the simulation of sediment transport, the study of floods etc. It is one of the most modern and widely used models today.

In the present study MIKE 11/ECO Lab was applied in the lower reaches of the Vioticos Kifissos River in order to demonstrate its capabilities. MIKE 11/ECO Lab includes three models: the hydrodynamic model (HD), the transport / dispersion model (AD) and the quality model (ECO Lab).

The HD model is based on the Saint Venant equations that describe the flow in a river, while the numerical method used is a 6-point scheme known as the 6-point Abbott scheme. The model accepts as input a digital terrain study, the inflow (upstream boundary condition) and the geometry of the river. The model calibration is set using known curves of water levels / inflow and choice of an appropriate roughness coefficient.

The AD model concerns the co-transport in the main flow and dispersion due to concentration differences. It accepts as input the concentrations of the tested substances and the coefficient of dispersion. The AD model is dynamically related to ECO Lab so that concentrations at each time step take into account transport - dispersion phenomena as well as the various biological, biochemical and natural processes.

The ECO Lab contains various models of qualitative analysis. One of these is the Water Quality module, WQ, which includes among other parameters BOD, DO, nitrates, phosphates and heavy metals. The complexity and the requirements of the model depend on the processes

(aeration, oxidation of organic matter, nitrification, photosynthesis, etc.) chosen to examine. In this thesis we examine WQ1 involving the state variables BOD and DO and processes of re-aeration, photosynthesis, oxidation of organic matter, respiration and sediment oxygen demand.

Initially, MIKE 11/ ECO Lab was applied in mainstream Vioticos Kifissos River for various scenarios to identify the critical parameters via sensitivity analysis. Then MIKE 11/ECO Lab was applied in Vioticos Kifissos River.

Originally a test of the HD was performed by applying various return periods and then comparing them to known curves of water level / inflow and the choice of an appropriate roughness coefficient. Then the AD model was added to MIKE11 and various scenarios were studied in Vioticos Kifissos River regarding a specific substance (benzene). The purpose of the scenarios was to highlight the parameters that most affect the transport and dispersion of the substance downstream from a point source. The parameters tested were the provision and the concentration of the pollutant at the point source, the provision input upstream of the point source and the coefficient of dispersion. Following this they were studied.

Then hypothetical scenarios were applied with the three models (HD, AD, ECO Lab) in Vioticos Kifissos River to identify the parameters that most affect the qualitative state of a river. The results of the sensitivity analysis was then used to simulate Vioticos Kifissos River using the actual pressures in accordance with the Management Plan for River Basin Water District of Eastern Continental Greece.

The overall experience from using and learning MIKE 11 was very satisfying. Even though MIKE 11 is a rather complicated modeling package, it's capabilities allow the simulation of models ranging from simple water quality models to complicated models including many processes and variables. In conclusion, MIKE 11 is a very useful tool for the study and management of rivers.

Περιεχόμενα

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	Γενικά	1
1.2	Οδηγία πλαίσιο για τα νερά	1
1.3	ΜΙΚΕ 11/ ECO Lab	3
1.4	Η εργασία	3
2	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	5
2.1	Γενικά	5
2.2	Κατηγορίες μοντέλων	6
2.3	Μοντέλα ποιότητας ποταμού	7
3	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΜΙΚΕ 11/ECO Lab	10
3.1	Σύντομη περιγραφή του ΜΙΚΕ 11	10
3.2	Μοντέλα ΜΙΚΕ 11	10
3.3	Απαιτούμενα δεδομένα	12
3.4	Λειτουργία ΜΙΚΕ 11	16
3.5	Αποτελέσματα ΜΙΚΕ	16
3.6	Υδροδυναμικό μοντέλο	17
3.6.1	Γενικά	17
3.6.2	Εξισώσεις Saint Venant	17
3.6.3	Αριθμητικό σχήμα	19
3.6.4	Περιγραφή ροής	20
3.6.5	Συνθήκες σταθερότητας	21
3.6.6	Άλλες παράμετροι	22
3.7	Μοντέλο μεταφοράς και διασποράς	23
3.7.1	Θεωρητικό υπόβαθρο	23
3.7.2	Μονοδιάστατη εξίσωση μεταφοράς- διασποράς	24
3.7.3	Συντελεστής διασποράς	25
3.7.4	Μεταφορά μάζας	25
3.7.5	Αριθμητικό σχήμα	27
3.7.6	Συνθήκες ευστάθειας	27
3.8	Ποιοτικό μοντέλο ECO Lab	29
3.8.1	Γενικά	29
3.8.2	Σχέση ECO Lab και AD μοντέλου	29
3.8.3	Διεργασίες	30
3.8.4	Διαφορικές εξισώσεις ECO Lab	30
3.8.5	Αριθμητικό σχήμα	32
3.8.6	Περιγραφή ECO Lab WQ1	33
4	ΕΦΑΡΜΟΦΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΜΙΚΕ 11/ECO Lab	43
4.1	Υδροδυναμικό μοντέλο	43
4.1.1	Εισαγωγή δεδομένων	43
4.1.2	Εφαρμογή υδροδυναμικού μοντέλου	52

4.2	Μοντέλο διασποράς.....	55
4.2.1	Σενάριο πρώτο.....	55
4.2.2	Σενάριο δεύτερο.....	60
4.2.3	Ανάλυση ευαισθησίας.....	66
4.3	Ποιοτικό μοντέλο	70
4.3.1	Αποδόμηση οργανικής ύλης	70
4.3.2	Επαναερισμός.....	74
4.3.3	Θερμοκρασία.....	78
4.3.4	Ανάλυση ευαισθησίας ποιοτικών παραμέτρων	81
4.3.5	Εφαρμογή στον Βοιωτικό Κηφισό.....	82
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	91
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	93
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	97

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Το νερό αποτελεί την αρχή όλων των παραμέτρων του συστήματος της Γης. Αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για το περιβάλλον και για τη ζωή στη Γη αλλά και για την προώθηση και στήριξη της οικονομικής ανάπτυξης. Αν και αποτελεί θεωρητικά ανανεώσιμο πόρο, οι συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες για τις ανθρώπινες δραστηριότητες οδηγούν σε αυξανόμενη ζήτηση και χρήση του πόσιμου νερού. Η αύξηση του πληθυσμού, η βιομηχανική ανάπτυξη, η αστικοποίηση, οι καλλιέργειες, η κακή διαχείριση του νερού και η κλιματική αλλαγή αποτελούν παράγοντες πίεσης όσον αφορά τα αποθέματα νερού και υποβάθμισης των επιφανειακών και υπόγειων νερών.

Η διαχείριση των υδατικών πόρων αφορά σε όλες τις αποφάσεις και τα μέτρα που έχουν ως σκοπό την βελτίωση ή τη διατήρηση της ποιοτικής κατάστασης κάθε υδάτινου συστήματος και στην Ελλάδα πραγματοποιείται με βάση την Οδηγία Πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τα νερά 200/60/EC.

1.2 Οδηγία πλαίσιο για τα νερά

Η Οδηγία Πλαίσιο για τα νερά εφάρμοσε μια ρηξικέλευθη προσέγγιση όσον αφορά στην διαχείριση και προστασία των υδάτων που βασίζεται στους διάφορους φυσικούς και υδρολογικούς σχηματισμούς, δηλαδή τις λεκάνες απορροής. Βασικό σημείο αλλά και το μέτρο εφαρμογής της Οδηγίας Πλαίσιο είναι η κατάρτιση σχεδίων διαχείρισης των λεκανών απορροής των ποταμών.

Συγκεκριμένα, για τα ποτάμια κάθε κράτος μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης πρέπει να καταρτίσει σχέδια διαχείρισης τα οποία θα περιλαμβάνουν τη γενική περιγραφή των χαρακτηριστικών της περιοχής της Λεκάνης απορροής του ποταμού (ΛΑΠ), όπως η θέση και τα όρια των υδατικών συστημάτων, χάρτες των οικοπεριοχών και των τύπων των

συστημάτων επιφανειακών υδάτων εντός της περιοχής της ΛΑΠ και τον προσδιορισμό και την περιγραφή των πιέσεων λόγω ανθρωπογενών δραστηριοτήτων στην εν λόγω περιοχή. Επιπλέον, θα περιλαμβάνονται οι προστατευόμενες περιοχές που θα προσδιοριστούν, τα δίκτυα παρακολούθησης και οι περιβαλλοντικοί στόχοι που καθορίζονται σύμφωνα με το Άρθρο 4 της Οδηγίας Πλαίσιο.

Σύμφωνα με το Άρθρο 4 οι στόχοι για τα επιφανειακά ύδατα περιλαμβάνουν την πρόληψη της υποβάθμισης της κατάστασης των συστημάτων, την προστασία, αναβάθμιση και αποκατάσταση των συστημάτων επιφανειακών υδάτων, συμπεριλαμβανομένων των Τεχνητών και Ιδιαίτερος Τροποποιημένων υδατικών συστημάτων, με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτευχθεί η καλή τους κατάσταση. Επιπλέον, αναφέρει ότι τα κράτη μέλη πρέπει να εφαρμόσουν κατάλληλα μέτρα με στόχο τη μείωση της ρύπανσης από τις ουσίες προτεραιότητες και τη σταδιακή εξάλειψη των εκπομπών, των απορρίψεων και των διαρροών επικίνδυνων ουσιών προτεραιότητας.

1.3 MIKE 11/ ECO Lab

Τα μοντέλα προσομοίωσης φυσικών συστημάτων είναι εργαλεία που χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο τόσο για την μελέτη όσο και την διαχείριση των συστημάτων που εξετάζονται. Το MIKE 11/ECO Lab είναι ένα από τα πιο σύγχρονα και ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα για την προσομοίωση της μονοδιάστατης ροής σ' ένα ποτάμι και της ποιοτικής κατάστασης του. Έχει αναπτυχθεί από το Υδραυλικό Ινστιτούτο της Δανίας (Danish Hydraulic Institute, DHI) και αποτελεί μέρος ενός πακέτου λογισμικών που λέγεται MIKE.

1.4 Η εργασία

Η διπλωματική εργασία διαρθρώνεται ως εξής: Αρχικά, παρουσιάζονται τα μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης της ποιότητας των υδάτων και ειδικά των ποταμών. Συγκεκριμένα, γίνεται μια σύντομη περιγραφή της σημασίας των αριθμητικών μοντέλων στην διαχείριση των υδατικών πόρων και παρουσιάζονται τα ευρέως χρησιμοποιούμενα αριθμητικά μοντέλα και τα χαρακτηριστικά τους. Ο αναγνώστης αποκτάει μια γενική εικόνα των δυνατοτήτων των αριθμητικών μοντέλων προσομοίωσης της ποιότητας των υδάτων και παρέχεται σχετική βιβλιογραφία για την πιθανή περαιτέρω εμβάθυνση (Κεφάλαιο 2).

Στη συνέχεια, ακολουθεί η περιγραφή του μοντέλου MIKE 11/ECO Lab. Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας, η γενική δομή του και τα απαιτούμενα δεδομένα. Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται το υδροδυναμικό μοντέλο (HD). Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι διαφορικές εξισώσεις συνέχειας και ορμής (Saint Venant εξισώσεις) και οι παραδοχές που γίνονται. Επιπλέον, παρουσιάζεται το πεπερασμένο σχήμα διαφορών που χρησιμοποιείται από το MIKE, δηλαδή το σχήμα 6 σημείων γνωστό ως Σχήμα Abbott 6-σημείων (6-point Abbott scheme) και οι προϋποθέσεις για την επίτευξη ευστάθειας του μοντέλου.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται οι διαφορικές εξισώσεις και το αριθμητικό σχήμα που χρησιμοποιείται από το μοντέλο μεταφοράς-διασποράς (AD) και οι συνθήκες ευστάθειας.

Στη συνέχεια ακολουθεί η περιγραφή των δυνατοτήτων του μοντέλου ECO Lab, οι διαφορικές εξισώσεις και το αριθμητικό σχήμα που χρησιμοποιείται. Παρουσιάζονται αναλυτικά οι διεργασίες και οι μεταβλητές που περιλαμβάνει το (υπο)μοντέλο Ποιότητας Νερού επιπέδου 1 (Water Quality Level 1) καθώς επίσης και ο τρόπος που συντρέχει μαζί με το μοντέλο AD (Κεφάλαιο 6).

Σημειώνεται ότι το MIKE 11 είναι ένα πολύπλοκο και σύνθετο εργαλείο και η αναλυτική περιγραφή των χαρακτηριστικών του και των δυνατοτήτων του δεν θα ήταν εφικτή στα πλαίσια της παρούσης εργασίας ούτε επιθυμητή. Στα Κεφάλαια 3-6 έγινε μια προσπάθεια για την καταγραφή των βασικών χαρακτηριστικών του MIKE 11 και ειδικά του MIKE 11/ECO Lab με σκοπό ο ενδιαφερόμενος να αποκτήσει μια ολοκληρωμένη εικόνα των απαιτήσεων και των αναγκών του προγράμματος αλλά όχι της όλης λειτουργίας του.

Στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται αναλυτικά τα βήματα για την κατάστρωση του μοντέλου, τα σενάρια που εφαρμόστηκαν, οι παραδοχές που έγιναν και τα αποτελέσματα που προέκυψαν. Παρουσιάζεται επίσης η βαθμονόμηση σε κάθε μοντέλο (όπου αυτό ήταν δυνατό) και η επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων με πραγματικές μετρήσεις. Το μοντέλο εφαρμόστηκε στη συνέχεια στον ποταμό Βοιωτικό Κηφισό.

Τέλος, ακολουθούν τα συμπεράσματα όσον αφορά την λειτουργία του συγκεκριμένου μοντέλου και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του.

2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Γενικά

Η διαχείριση των υδατικών πόρων αφορά σε όλες τις αποφάσεις και τα μέτρα που έχουν ως σκοπό την βελτίωση ή τη διατήρηση της ποιοτικής κατάστασης ενός υδάτινου συστήματος. Για την επίτευξη των περιβαλλοντικών πολιτικών και την ορθή διαχείριση των υδατικών πόρων, απαιτούνται αξιόπιστες μέθοδοι που μπορούν να εκτιμήσουν τις διάφορες πηγές που συμβάλλουν σ ένα περιβαλλοντικό πρόβλημα όπως και μέθοδοι που υπολογίζουν την αναμενόμενη επίδραση ενός μέτρου.

Τα μαθηματικά μοντέλα ποιότητας νερού είναι τέτοια εργαλεία και χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο τόσο για την μελέτη και το σχεδιασμό όσο και για την διαχείριση των συστημάτων και την εκτίμηση των μέτρων διαχείρισης της ποιότητας των νερών. Αν και τα μοντέλα εξ ορισμού αποτελούν μόνο μια ανακατασκευή της φύσης, η υποθετική αυτή αναπαράσταση του συστήματος είναι αρκετά ρεαλιστική ώστε να εξυπηρετήσει τους σκοπούς της εκάστοτε μελέτης (Χατζήμπιρος Κ.,2007). Μάλιστα, γι' αυτόν ακριβώς το λόγο αποτελούν δυνατά εργαλεία, διότι έχουν τη δυνατότητα να προσομοιάσουν το κάθε περιβάλλον και τα αποτελέσματά τους να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη και τη βελτίωση της ποιότητας των υδάτων (B.Arheimer and Jonas Olsson, 2001).

Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται για πλήθος εφαρμογών όπως για την εκτίμηση της υπάρχουσας πίεσης από ΕΕΛ, για την πρόβλεψη του μελλοντικού περιεχομένου ρύπανσης μίας λίμνης ή ενός ποταμού λόγω καλλιεργήσιμων εκτάσεων ή για να εκτιμήσουν τις υπάρχουσες πιέσεις που δέχεται ένα σύστημα από ΕΕΛ, βιομηχανίες, καλλιεργήσιμες εκτάσεις και άλλες ανεξέλεγκτες πηγές ρύπανσης. (Riecken Sarah, 1995).

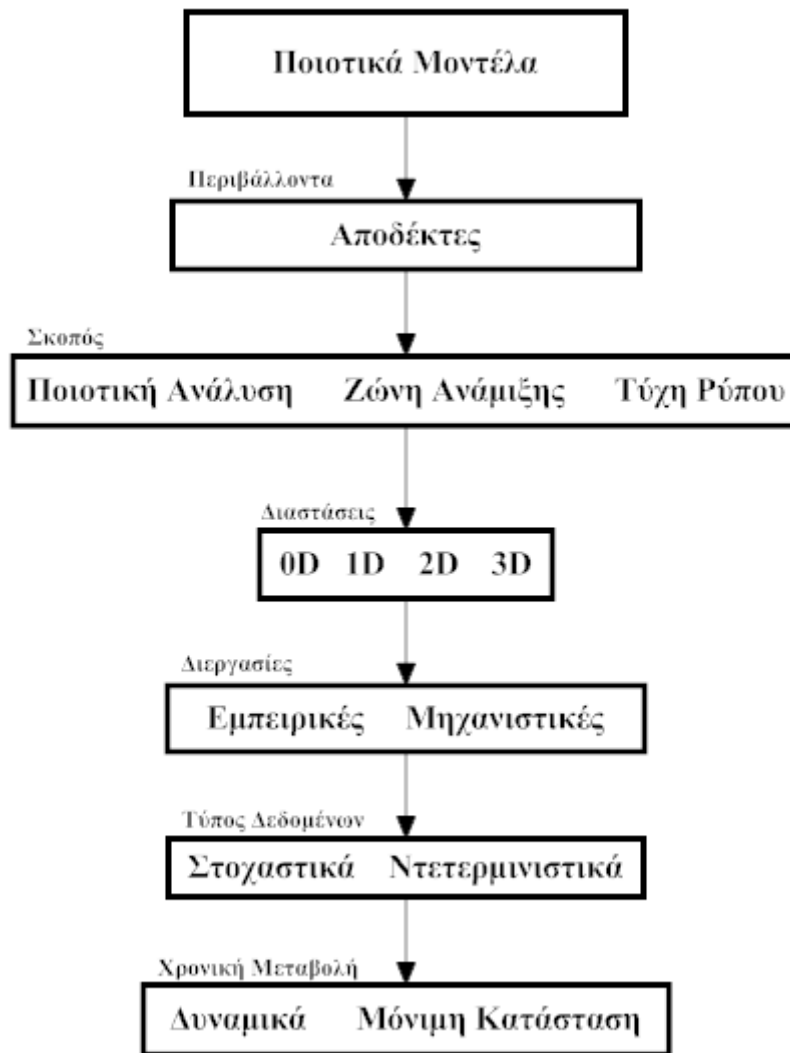
Κάποια από τα περιβαλλοντικά προβλήματα που έχουν μελετηθεί με μαθηματικά μοντέλα περιλαμβάνουν το φαινόμενο του ευτροφισμού και της αποξυγόνωσης. Ο ευτροφισμός είναι ένα παγκόσμιο φαινόμενο το οποίο συνδέεται άμεσα με την αστικοποίηση και τη

βιομηχανική και αγροτική δραστηριότητα. Το αποτέλεσμα του ευτροφισμού είναι παραγωγή αλγών, υπερανάπτυξη των φυκών και μακροάλγη τα οποία με τη σειρά τους οδηγούν στην έλλειψη οξυγόνου το οποίο με τη σειρά του οδηγεί στο θάνατο ψαριών, στη μείωση της βιοποικιλότητας και στην εμφάνιση τοξικών ουσιών στο νερό. Συνήθως το φαινόμενο του ευτροφισμού οφείλεται στις υψηλές συγκεντρώσεις αζώτου και φωσφόρου (B.Arheimer and Jonas Olsson, 2001)

2.2 Κατηγορίες μοντέλων

Τα μοντέλα προσομοίωσης υδατικών πόρων μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με τη περιοχή εφαρμογής. Για παράδειγμα υπάρχουν μοντέλα που προσομοιώνουν ένα ποτάμι ή ένα υδρογραφικό δίκτυο και μοντέλα λεκάνης απορροής που περικλείουν τις φυσικές υδρολογικές διεργασίες στα όρια της λεκάνης. Τα μοντέλα που εξειδικεύονται στην ποιοτική ανάλυση των υδάτων ονομάζονται μοντέλα ποιότητας ποταμών. Άλλες κατηγορίες μοντέλων είναι τα μοντέλα υπόγειων υδάτων και τα μοντέλα προσομοίωσης της πλημμύρας (X. X. Σκουληκάρης, 2008, Wurbs R. A., 1998)

Διακρίνονται επίσης σε στοχαστικά ή προσδιοριστικά, αν θα είναι δυναμική η προσομοίωση ή σε σταθερές συνθήκες, σε μονοδιάστατα, δισδιάστατα ή τρισδιάστατα αλλά ακόμα και βάση τις απαιτήσεις των δεδομένων (εκτενής βάση δεδομένων ή ελάχιστων απαιτήσεων μοντέλα (minimum requirements models)) (Tsakiris et al, 2012, Τσιτσιλώνης Σωτήριος, 2008). Τα μοντέλα σταθερών συνθηκών δεν συμπεριλαμβάνουν τον χρόνο αλλά περιγράφουν μέσες συνθήκες για τη περίοδο που εξετάζεται ενώ τα δυναμικά μοντέλα συμπεριλαμβάνουν τη διάσταση του χρόνου με συγκεκριμένους ρυθμούς για κάθε διεργασία και χρονοσειρές για τις χρονικά μεταβαλλόμενες μεταβλητές. (B.Arheimer and Jonas Olsson, 2001).



Σχήμα 2.1. Κατηγοριοποίηση των μοντέλων (Πηγή: Cox B.A., 2003)

Η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου ώστε να ανταποκρίνεται στους σκοπούς της εκάστοτε μελέτης είναι φυσικά μια πολύπλοκη διαδικασία και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως οι στόχοι της μελέτης, πόσα και τι στοιχεία υπάρχουν στη διάθεση του μελετητή καθώς επίσης και ο χρόνος που έχει στη διάθεσή του (Riecken Sarah, 1995, W. Rauch et al., 1998).

2.3 Μοντέλα ποιότητας ποταμού

Τα πρώτα μαθηματικά μοντέλα ποιοτικής ανάλυσης αποσκοπούσαν στην απλή εξέταση της μείωσης του οξυγόνου λόγω του οργανικού υλικού που προέρχεται από τη ρύπανση των

αποβλήτων. Παρ' όλα αυτά η ανάγκη για μαθηματικά μοντέλα που αποσκοπούν σε διαφορετικά προβλήματα οδήγησε στην ανάπτυξη ποικίλων μαθηματικών μοντέλων με διαφορετική προσέγγιση το καθένα.

Τα μοντέλα ανάλυσης της ποιοτικής κατάστασης των υδατικών συστημάτων αποσκοπούν στη περιγραφή των χωρικών και χρονικών μεταβολών που υπόκεινται τα υπό εξέταση συστατικά. Προσομοιώνουν ανάλογα με τη πολυπλοκότητά τους μεταξύ άλλων τη δίαυτα του οξυγόνου, τα νιτρικά, το φώσφορο και άλλα τοξικά συστατικά όπως το χρώμιο ή άλλα βαρέα μέταλλα. Υπάρχουν απλά μοντέλα όπως το μοντέλο των Streeter-Phelps με μόνο δύο μεταβλητές, μοντέλα που περιγράφουν τους κύκλους του οξυγόνου, του αζώτου και του φωσφόρου με περίπου 10 μεταβλητές και πολύπλοκα μαθηματικά μοντέλα οικοσυστημάτων που περιλαμβάνουν επιπλέον τα αιωρούμενα στερεά, πολλές κλάσεις αλγών, το ζωοπλαγκτόν, ασπόνδυλα φυτά και ψάρια.

Οι Berit Arheimer και Jonas Olsson (2001) αναφέρουν ως τα πιο συχνά χρησιμοποιημένα μοντέλα στην Ευρώπη για ποιοτική ανάλυση τα AGNPS, HBV-N, INCA, MAGIC, MERLIN, MIKE SHE, SHETRAN, SMART και SWAT. Πιο συγκεκριμένα για προσομοίωση ποιότητας σε ποτάμια έχουν επιλέξει τα AQUASIM, CE-QUAL, MIKE11, PC-QUASAR, QUAL2E και TELEMAC.

Το 2012 οι Zieminska-Stolarska A. and Skrzypski J. στην εργασία τους 'Review of mathematical models of water quality' παρουσιάζουν 16 μοντέλα προσομοίωσης επιφανειακών υδάτων. Από τα 16 μοντέλα τα έξι (AQUATOX, CE-QUAL-RIV1 1D, DUFLOW 1D, MIKE 11, WASP, COASTOX,) αφορούν τη προσομοίωση μονοδιάστατης ροής και ποιοτικής ανάλυσης σε ποτάμια. Τα μοντέλα CE-QUAL-RIV1 1D, WASP και MIKE 11 είναι μοντέλα που μελετάνε τη μονοδιάστατη ροή και τη ποιοτική κατάσταση σε ποτάμια. Και τα τρία μοντέλα αποτελούνται ουσιαστικά από δυο μέρη το υδροδυναμικό και το ποιοτικό μοντέλο, με εφαρμογή πρώτα του υδροδυναμικού μοντέλου τα αποτελέσματα του οποίου χρησιμοποιούνται στη συνέχεια στο ποιοτικό μοντέλο. Οι μεταβλητές που περιλαμβάνουν είναι η θερμοκρασία, το BOD, το DO, το αμμωνιακό και νιτρικό άζωτο, ο οργανικός και διαλυτός φώσφορος, τα άλγη, και τα κολοβακτηρίδια.

Το QUAL-RIV1 1D περιλαμβάνει επίσης το οργανικό άζωτο και τα βαρέα μέταλλα σίδηρος και μαγγάνιο ενώ το MIKE 11 περιλαμβάνει ένα υπομοντέλο βαρέων μετάλλων το οποίο μπορεί να προσαρμοστεί για κάθε μέταλλο αρκεί να οριστούν οι παράμετροι που το περιγράφουν (DHI,2012). Τα μοντέλα MIKE 11, DUFLOW 1D και WASP έχουν τη δυνατότητα να προσομοιάσουν την μεταφορά των ιζημάτων. Επιπλέον, εξετάζονται τα φαινόμενο του ευτροφισμού (MIKE 11,WASP) και της υδρόλυσης και φωτόλυσης (WASP). Άλλα μοντέλα περιλαμβάνουν τη μεταφορά ραδιονουκλιδίων (COASTOX) (Zieminska-Stolarska A. and Skrzypski J., 2012)

Το AQUATOX 3.1 είναι ένα γενικό οικολογικό μοντέλο που μελετάει τη τύχη και την επίδραση συντηρητικών ρύπων. Στις παραμέτρους που προσομοιώνει περιλαμβάνονται εκτός από τα γνωστά θρεπτικά και διάφορες κλάσεις αλγών, ασπόνδυλα, πτηνά και ψάρια (EPA, 2012).

Άλλα μοντέλα που αναφέρονται στην βιβλιογραφία είναι τα AGNPS, HBV-N, INCA, MAGIC, MERLIN, SHETRAN και SMART (Erika Ruskule, 2011). Οι Moriassi et al.(2012) επιλέγουν ως μοντέλα ποιότητας υδάτων τα ADAPT, BASINS/HSPF, CREAMS/GLEAMS, CoupModel, Daisy, EPIC, APEX, HYDRUS, MACRO, MIKE-SHE, MT3DMS, RZWQM, SWAT, SWIM, VS2DI, WAM, WARMF. Οι Wang Q. et al (2013) παρουσιάζουν τα μοντέλα ποιότητας επιφανειακών αποδεκτών Streeter-Phelps, QUAL, WASP, QUASAR, MIKE, BASINS, EFDC. Μάλιστα σημειώνουν ότι εκτός από τα παραπάνω έχουν αναπτυχθεί κι άλλα μοντέλα ποιότητας υδάτων όπως το μοντέλο INCA που ανέπτυξαν οι Whitehead et al., (1997).

3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ MIKE 11/ECO LAB

Το MIKE έχει αναπτυχθεί από το Υδραυλικό Ινστιτούτο της Δανίας (Danish Hydraulic Institute, DHI). Αποτελεί ένα πακέτο λογισμικών και οι δυνατότητες του είναι ποικίλλες και περιλαμβάνουν την μοντελοποίηση μονοδιάστατων (MIKE 11), δισδιάστατων (MIKE 21) και τρισδιάστατων (MIKE 3) υδάτινων συστημάτων, την μελέτη και διαχείριση της ποιοτικής κατάστασης του υπό εξέταση υδάτινου αποδέκτη (ECO Lab) και την μελέτη πλημμυρών και υπόγειων και επιφανειακών υδάτινων αποδεκτών (FLOOD, SHE, LITPACK).

Το MIKE 11 αποτελεί μέρος του MIKE της DHI και αφορά στην μονοδιάστατη προσομοίωση της ροής, της ποιοτικής κατάστασης και της μεταφοράς των ιζημάτων σε διάφορα υδάτινα οικοσυστήματα. Παρακάτω, περιγράφονται αναλυτικά τα βασικά χαρακτηριστικά, οι απαιτήσεις και το θεωρητικό υπόβαθρο στο οποίο βασίζεται το MIKE 11 και κυρίως το υδροδυναμικό μοντέλο HD, το μοντέλο μεταφοράς-διασποράς AD και το μοντέλο ECO Lab.

3.1 Σύντομη περιγραφή του MIKE 11

Το MIKE 11 επιτρέπει τον σχεδιασμό και τη προσομοίωση απλών και σύνθετων ποταμών. Ο χρήστης ανάλογα με τις ανάγκες της μελέτης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει είτε το σχεδιασμό ενός απλού υδροδυναμικού μοντέλου είτε να προσθέσει επιπλέον μοντέλα, όπως το μοντέλο μεταφοράς-διασποράς, το ποιοτικό μοντέλο ή το μοντέλο μεταφοράς ιζημάτων.

3.2 Μοντέλα MIKE 11

Το MIKE 11 περιλαμβάνει 8 (υπο) μοντέλα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1. Μοντέλα πακέτου λογισμικού MIKE 11.

Μοντέλο	Συντομογραφία
Υδροδυναμικό μοντέλο	HD
Μοντέλο μεταφοράς-διασποράς	AD
Μοντέλο μεταφοράς ιζημάτων	ST
Μοντέλο ECO Lab	ECO Lab
Μοντέλο Βροχοπτώσεων	RR
Μοντέλο Πλημμύρας	FF
Μοντέλο προσομοίωσης δεδομένων	DA

Το κύριο μοντέλο που τελικά θα προσομοιωθεί μπορεί να αποτελείται από ένα ή περισσότερα υπομοντέλα. Μερικά μοντέλα (HD) είναι ανεξάρτητα και μπορούν να εκτελεστούν μεμονωμένα. Άλλα μοντέλα, όπως το ECO Lab, απαιτούν την ένταξη στο κύριο μοντέλο περισσότερων υπομοντέλων. Για παράδειγμα, στη περίπτωση του ECO Lab η προσομοίωση θα εκτελεστεί μόνον εφόσον έχουν επιλεγεί και κατασκευαστεί επιπλέον τα υπομοντέλα HD και AD.

Συγκεκριμένα, το υδροδυναμικό μοντέλο (MIKE 11 HD) αποτελεί τον πυρήνα του MIKE 11 και μπορεί να εκτελεστεί για διάφορες εφαρμογές όπως για τη πρόβλεψη πλημμύρας, τη διαχείριση ενός ταμιευτήρα, το σχεδιασμό ενός καναλιού κ.α.. Το Υδροδυναμικό κομμάτι περιλαμβάνει το σχεδιασμό του δικτύου ή ποταμού, τον καθορισμό των διατομών και των αρχικών και οριακών συνθηκών καθώς επίσης και τις διάφορες υδροδυναμικές παραμέτρους. Το Υδροδυναμικό μοντέλο, όπως αναφέρθηκε, είναι δυναμικό και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση και συνεταιριστικά με άλλα μοντέλα που αφορούν την υδρολογία, φαινόμενα μεταφοράς και διασποράς, τη ποιότητα του νερού και τη μεταφορά ιζημάτων.

Η μεταφορά ουσιών προσομοιώνεται με το μοντέλο μεταφοράς-διασποράς (Advection – Dispersion module) το οποίο χρησιμοποιεί την ίδια μονοδιάστατη εξίσωση της διατήρησης της μάζας. Το μοντέλο αυτό μπορεί να προσομοιάσει τη επίδραση της μεταφοράς και

διασποράς στη συγκέντρωση των ουσιών ενδιαφέροντος αλλά για πιο προχωρημένες προσομοιώσεις απαιτείται επιπλέον η εφαρμογή του μοντέλου ποιότητας υδάτων.

Το μοντέλο ποιότητας υδάτων (Ecolab Module) περιλαμβάνει διάφορα υπομοντέλα όπως το μοντέλο βαρέων μετάλλων και το μοντέλο ευτροφισμού και ποιότητας υδάτων, με τρία και έξι επίπεδα αντίστοιχα, ανάλογα τη πολυπλοκότητα της προσομοίωσης που επιλέγεται.

Στη παρούσα εργασία θα μελετηθούν πιο ειδικά το Υδροδυναμικό μοντέλο (HD) και τα επιπρόσθετα μοντέλα Μεταφοράς-Διασποράς (AD) και Ποιότητας νερού (WQ Ecolab).

3.3 Απαιτούμενα δεδομένα

Το MIKE 11 αποτελείται από διάφορους διαχειριστές (editors). Οι διαχειριστές είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους και επιτρέπουν την εισαγωγή και επεξεργασία δεδομένων. Ο κάθε διαχειριστής μπορεί να συμπεριλαμβάνει μέρος ή το σύνολο των απαραίτητων παραμέτρων ενός υπομοντέλου ή να αφορά περισσότερα του ενός υπομοντέλα και αφού αποθηκευτεί αποτελεί ένα αρχείο με ειδική κατάληξη. Για παράδειγμα ο σχεδιασμός του ποταμού ή του δικτύου πραγματοποιείται από τον διαχειριστή του δικτύου (Network editor), αποτελεί ένα από τα τέσσερα (4) απαραίτητα αρχεία για τη προσομοίωση του μοντέλου HD και το αρχείο έχει κατάληξη "*.nwk11".

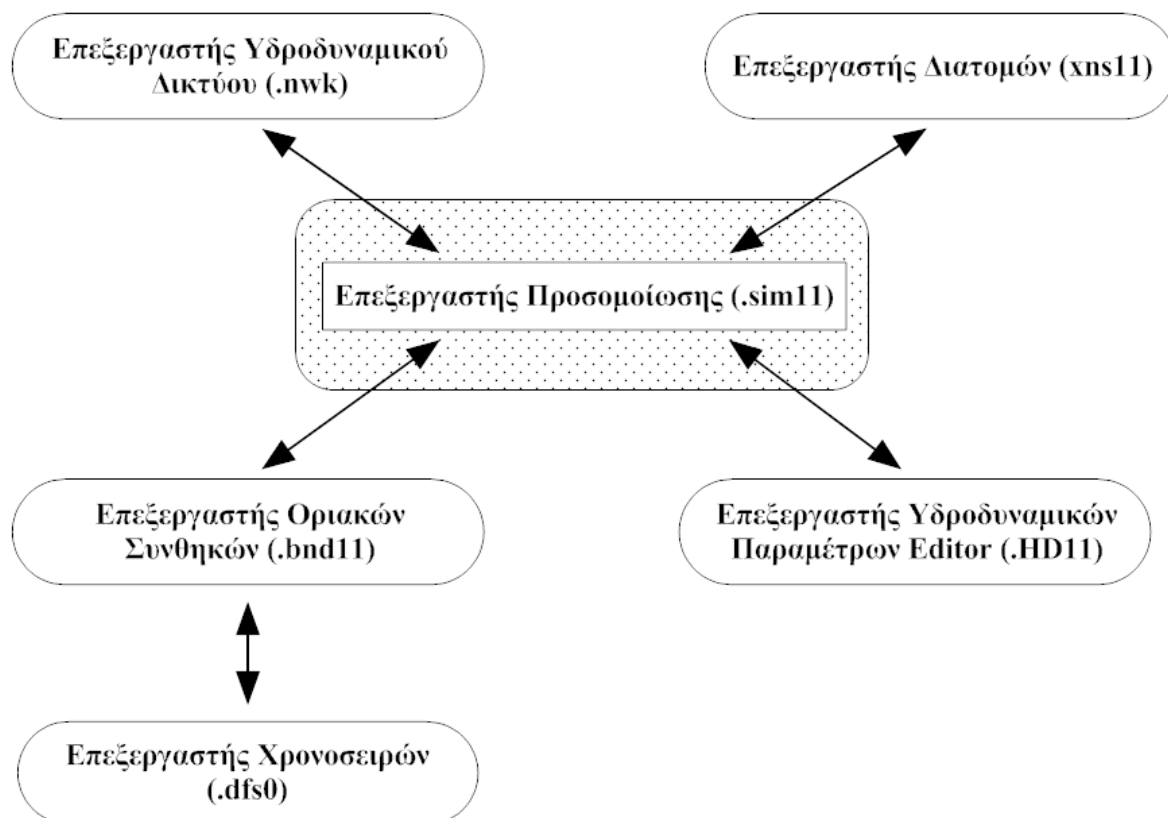
Απαραίτητη προϋπόθεση για να αποτελέσουν οι ανεξάρτητοι αυτοί διαχειριστές ένα ολοκληρωμένο μοντέλο ικανό για προσομοίωση είναι η σύνδεση των διάφορων διαχειριστών ώστε να είναι δυνατή η αλληλεπίδραση και μεταφορά πληροφοριών από τον ένα διαχειριστή στον άλλο. Για παράδειγμα θα είναι δυνατή η απ' ευθείας εισαγωγή ενός σημείου από το υδρογραφικό δίκτυο του διαχειριστή του δικτύου στον διαχειριστή διατομών (Cross section editor) για επεξεργασία της διατομής του συγκεκριμένου σημείου.

Στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι διαχειριστές που χρησιμοποιούνται για τη προσομοίωση ενός μοντέλου που εξετάζει την ποιοτική κατάσταση σ' ένα ποτάμι.

Πίνακας 3.2. Διαχειριστές ποιοτικών μοντέλων.

Διαχειριστής	Στόχος	Κατάληξη
Διαχειριστής δικτύου	Σχεδιασμός υδρογραφικού δικτύου	*.nwk
Διαχειριστής διατομών	Σχεδιασμός διατομών	*.xns
Διαχειριστής οριακών συνθηκών	Ορισμός οριακών συνθηκών	*.bnd
Διαχειριστής υδροδυναμικών παραμέτρων	Εισαγωγή υδροδυναμικών παραμέτρων	*.hdp
Διαχειριστής μεταφοράς-διασποράς	Ορισμός δεδομένων διασποράς	*.ad
Διαχειριστής ECO Lab	Ορισμός αρχικών τιμών και παραμέτρων ποιοτικού μοντέλου	*.ecolab
Διαχειριστής προσομοίωσης	Σύνδεση διαχειριστών, πληροφορίες προσομοίωσης	*.sim

Η σύνδεση των διαχειριστών γίνεται από τον διαχειριστή προσομοίωσης (Simulation editor). Ο διαχειριστής προσομοίωσης αποτελεί το συνδετικό κρίκο μεταξύ των διαχειριστών των διαφόρων μοντέλων. Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται σχηματικά η σχέση μεταξύ των διάφορων διαχειριστών.



Σχήμα 3.1. Ο διαχειριστής προσομοίωσης του MIKE 11.ως συνδετικός κρίκος (DHI, 2012 a)

Τα δεδομένα που απαιτούνται για τη προσομοίωση του MIKE 11/ECO Lab αφορούν στις συνθήκες προσομοίωσης, στο υδρογραφικό δίκτυο, στις υδροδυναμικές παραμέτρους, στις οριακές και αρχικές συνθήκες, στις παραμέτρους μεταφοράς και διασποράς και στις μεταβλητές, σταθερές και άλλες παραμέτρους που ορίζονται στο ECO Lab μοντέλο.

Το MIKE 11 HD περιλαμβάνει το σχεδιασμό του δικτύου ή ποταμού, τον καθορισμό των διατομών, των αρχικών και οριακών συνθηκών καθώς επίσης και τις διάφορες υδροδυναμικές παραμέτρους. Συνεπώς, ο χρήστης πρέπει να εισάγει τα τοπογραφικά δεδομένα, τα δεδομένα των διατομών και του συντελεστή τριβής, τις υδροδυναμικές παραμέτρους και τις οριακές και αρχικές συνθήκες.

Συγκεκριμένα, το υδρογραφικό δίκτυο μπορεί να ψηφιοποιηθεί με δυο τρόπους. Ο χρήστης επιλέγει το σύστημα συντεταγμένων και εισάγει είτε σε μορφή αρχείου (*.txt) είτε από κάποιο υπολογιστικό φύλλο τις απόλυτες συντεταγμένες (X, Y). Σε αντίθετη περίπτωση δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να εισάγει με τη βοήθεια ενός μενού επεξεργασίας επί

τόπου σημεία σ' ένα πλέγμα καθορισμένων ή μη συντεταγμένων. Ο χρήστης μπορεί να εισάγει τα σημεία είτε αυθαίρετα είτε με οδηγό μια εικόνα (π.χ. raster αρχείο) της περιοχής ενδιαφέροντος που τοποθετείται πίσω από το πλέγμα σαν υπόστρωμα. Ο πρώτος τρόπος ενδείκνυται όταν η περιοχή μελέτης είναι μεγάλη και αποτελείται από πολλούς παραπόταμους. Ο δεύτερος τρόπος ενδείκνυται μόνο στη περίπτωση που δεν απαιτείται μεγάλη ακρίβεια στον καθορισμό του δικτύου ή δεν υπάρχουν τα απαιτούμενα δεδομένα. Αφού εισαχθούν τα σημεία και οριστεί ο κλάδος το MIKE υπολογίζει τη χιλιομετρική θέση σε κάθε σημείο.

Στο διαχειριστή των διατομών ορίζονται οι διατομές κατά μήκος του ποταμού καθώς επίσης και ο κατάλληλος συντελεστής τραχύτητας. Από το πρόγραμμα απαιτούνται τουλάχιστον οι διατομές στην είσοδο και στην έξοδο. Οι διατομές μπορούν να εισαχθούν είτε από το χρήστη μέσω υπολογιστικού φύλλου είτε χειροκίνητα.

Οι τιμές απορροών, οι σχέσεις παροχής και στάθμης νερού, οι χρονοσειρές βροχοπτώσεων και όποιο άλλο δεδομένο είναι διαθέσιμο, όπως τα σημεία που αποτελούν είσοδο ή έξοδο στο κεντρικό ρεύμα ή αποτελούν ενδιάμεσα σημεία (π.χ. σημειακή πηγή) ορίζονται στις οριακές συνθήκες. Συνήθως οριακή συνθήκη στην είσοδο είναι μια σταθερή παροχή ή ένα υδρογράφημα ενώ στην έξοδο τοποθετείται είτε καμπύλη στάθμης νερού-παροχής είτε η στάθμη νερού.

Στις υδροδυναμικές παραμέτρους ορίζονται προαιρετικά οι αρχικές συνθήκες και η Εξίσωση Saint Venant που θα χρησιμοποιηθεί (Δυναμικό κύμα, Κινηματικό κύμα ή Διάχυτο κύμα).

Τα απαιτούμενα δεδομένα για το MIKE 11 AD είναι ο καθορισμός των συστατικών που θα προσομοιωθούν και οι συντελεστές συναγωγής-διασποράς.

Όσον αφορά τις παραμέτρους του ποιοτικού μοντέλου αυτές εισάγονται στο αρχείο του Ecolab. Σημειώνεται ότι το MIKE όταν επιλέγεται το μοντέλο ποιοτικής κατάστασης που θα χρησιμοποιηθεί δίνει αρχικά προτεινόμενες τιμές για τις διάφορες παραμέτρους.

Οι συγκεντρώσεις, οι συντελεστές τριβής, διασποράς και ορισμένες ποιοτικές παράμετροι μπορούν να οριστούν είτε τοπικά, σε συγκεκριμένη χιλιομετρική θέση (συγκεκριμένο σημείο) είτε καθολικά.

Τέλος, στο αρχείο της προσομοίωσης εισάγονται τα αρχεία διαχειριστών των τριών μοντέλων HD, AD, ECOLAB και επιλέγεται η περίοδος και το χρονικό βήμα της προσομοίωσης. Επιπλέον, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να ορίσει το χρονικό βήμα με το οποίο θα αποθηκεύονται δεδομένα. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγεται η συσσώρευση αρχείων με μεγάλο όγκο δεδομένων.

3.4 Λειτουργία MIKE 11

Αρχικά, ολοκληρώνεται η προσομοίωση του υδροδυναμικού μοντέλου μόνο. Στη συνέχεια, και εφόσον το υδροδυναμικό μοντέλο ολοκληρωθεί με επιτυχία, ακολουθεί η προσομοίωση του μοντέλου μεταφοράς διασποράς για την προσομοίωση της μεταφοράς των ουσιών στο ποτάμι χρησιμοποιώντας ήδη υπάρχοντα υδροδυναμικά δεδομένα. Μόλις ολοκληρωθεί κι αυτό το μοντέλο με επιτυχία τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται τελικά από το ποιοτικό μοντέλο για την προσομοίωση της ποιοτικής κατάστασης του ποταμού. Με αυτό τον τρόπο το MIKE επιτυγχάνει την εξοικονόμηση χρόνου προσομοίωσης.

3.5 Αποτελέσματα MIKE

Εφόσον ολοκληρωθεί με επιτυχία η προσομοίωση, τα αποτελέσματα που παίρνει ο χρήστης, τα οποία αφορούν χρονοσειρές της ροής, του βάθους νερού και των συγκεντρώσεων για κάθε παράγοντα που εξετάζεται, μπορούν να επεξεργαστούν μέσω του προγράμματος MIKE View.

3.6 Υδροδυναμικό μοντέλο

3.6.1 Γενικά

Το MIKE 11 HD επιλύει τις κάθετα ολοκληρωμένες εξισώσεις συνέχειας και ορμής, γνωστές ως Saint Venant εξισώσεις με συγκεκριμένες παραδοχές. Οι παραδοχές που γίνονται είναι οι εξής:

- α. Το νερό είναι ασυμπίεστο και ομογενοποιημένο (αμελητέες διαφοροποιήσεις στην πυκνότητα)
- β. Η κλίση του πυθμένα είναι μικρή.
- γ. Το μήκος κύματος είναι μεγαλύτερο συγκριτικά με το βάθος νερού. Μ' αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι η ροή παντού μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει κατεύθυνση παράλληλη με το πυθμένα (δεν λαμβάνεται υπόψη οι κάθετες επιταχύνσεις και η υδροστατική πίεση μεταβάλλεται στον κάθετο άξονα)
- δ. Η ροή είναι υποκρίσιμη.

3.6.2 Εξισώσεις Saint Venant

Οι Saint Venant εξισώσεις, που περιγράφουν τη ροή του νερού σ' ένα ποτάμι, έχουν αποκτηθεί μέσω της ολοκλήρωσης των τρισδιάστατων εξισώσεων Navier-Stokes (W. Rauch et al., 1998). Οι εξισώσεις, που τελικά χρησιμοποιούνται από το λογισμικό MIKE 11, είναι αυτές που περιγράφονται παρακάτω όπου η εξίσωση (1) είναι η εξίσωση συνέχειας και η εξίσωση (2) είναι η εξίσωση ορμής.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(a \frac{Q^2}{A} \right) + gA \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) + g \frac{Q|Q|}{C^2 AR} = 0 \quad (3.2)$$

όπου:

- Q: η παροχή ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
A: η βρεχόμενη επιφάνεια (m^2)
a: ο συντελεστής διόρθωσης ορμής

g:	η επιτάχυνση της βαρύτητας ($m \cdot s^{-2}$)
R:	η υδραυλική ακτίνα (m)
C:	ο συντελεστής τριβής Chezy
H:	στάθμη νερού (m)
q:	πλευρική εισροή ($m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$)
t:	ο χρόνος (t)
x:	η απόσταση (m)

Για την ρεαλιστική απεικόνιση του ποταμού πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και παραπόταμοι και διακλαδώσεις που βρίσκονται εντός της περιοχής ενδιαφέροντος. Οι εξισώσεις Saint Venant λαμβάνουν υπόψη την αλλαγή της ροής του κεντρικού ποταμού με την εισαγωγή ενός επιπλέον όρου q που απεικονίζει σημεία εισροής ή εκροής. Στην εξίσωση (3.1) ο όρος του όγκου νερού που προστίθεται εξισορροπείται με μια αύξηση στη βρεχόμενη επιφάνεια.

Ο όρος που αφορά την αντίσταση λόγω τριβής μπορεί να διαμορφωθεί ανάλογα τον συντελεστή τριβής που επιλέγεται (Κεφάλαιο 4.6.1).

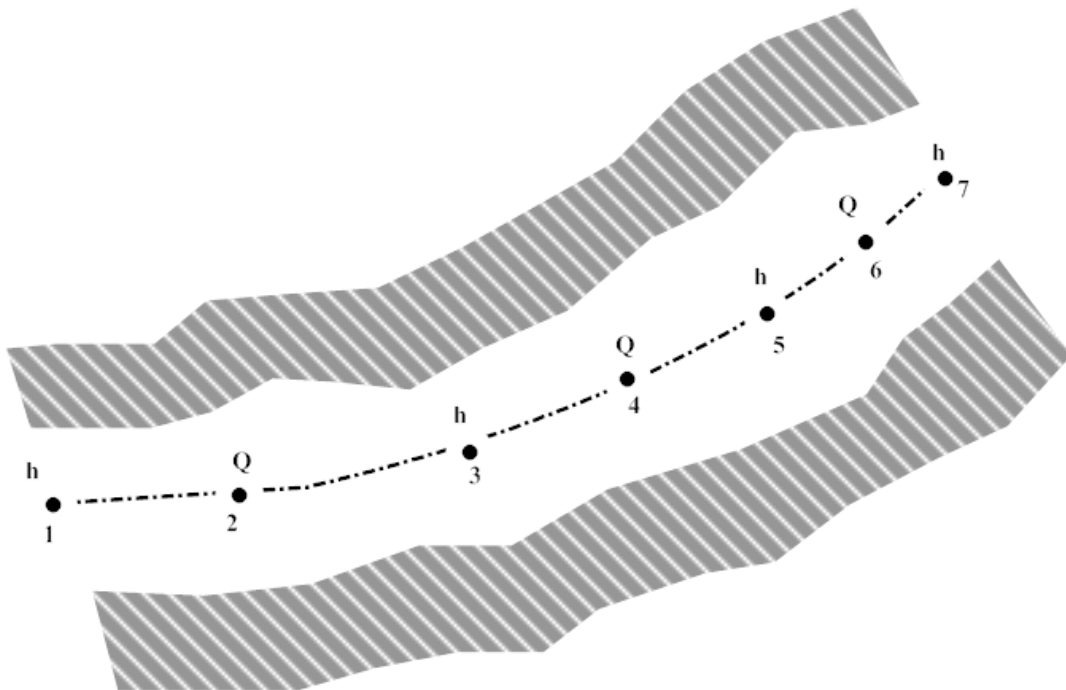
Το υδροδυναμικό μοντέλο επιλύει είτε τις εξισώσεις Saint Venant εξισώσεις (Fully Dynamic Wave, εξισώσεις (3.1) και (3.2)) ή μια από τις δύο απλουστευμένες εκδοχές που ονομάζονται Διάχυση κύματος (Diffusive wave) και Κινηματικές εξισώσεις κυμάτων (Kinematic wave equations). Αν και το MIKE 11 χρησιμοποιεί ένα αποτελεσματικό άρρητο σχήμα πεπερασμένων διαφορών για την επίλυση των εξισώσεων, η επίλυση του ολοκληρωμένου υδροδυναμικού μοντέλου μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα μεγάλους χρόνους προσομοίωσης. Γι' αυτό οι πιο απλές εκδοχές συνήθως χρησιμοποιούνται σε ποτάμια με μεγάλες κλίσεις όπου δεν εμφανίζεται υπερύψωση στα ανάντη του ποταμού (backwater effects).

Στις εξισώσεις (3.1) και (3.2) δυο παράμετροι είναι άγνωστοι, η παροχή (Q) και η στάθμη νερού (H). Αν και το παραπάνω σύστημα θα μπορούσε να υπολογίσει τις τιμές της στάθμης του νερού και της παροχής παρ' όλα αυτά η πολυπλοκότητα που τις διέπει θα αποτελούσε εμπόδιο για την επίτευξη ακριβούς ανάλυσης. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται αριθμητικές μέθοδοι που μπορούν να βρουν λύσεις κατά προσέγγιση.

3.6.3 Αριθμητικό σχήμα

Η επίλυση των εξισώσεων (3.1) και (3.2) βασίζεται στο άρρητο σχήμα πεπερασμένων διαφορών που έχει αναπτυχθεί από τους Abbott και Ionescu (1967, MIKE_11_REF). Το σχήμα είναι διαμορφωμένο με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι ανεξάρτητο από την εξίσωση που θα χρησιμοποιηθεί (Πλήρως δυναμικό κύμα, Διάχυση κύματος ή Κινηματικές εξισώσεις κυμάτων).

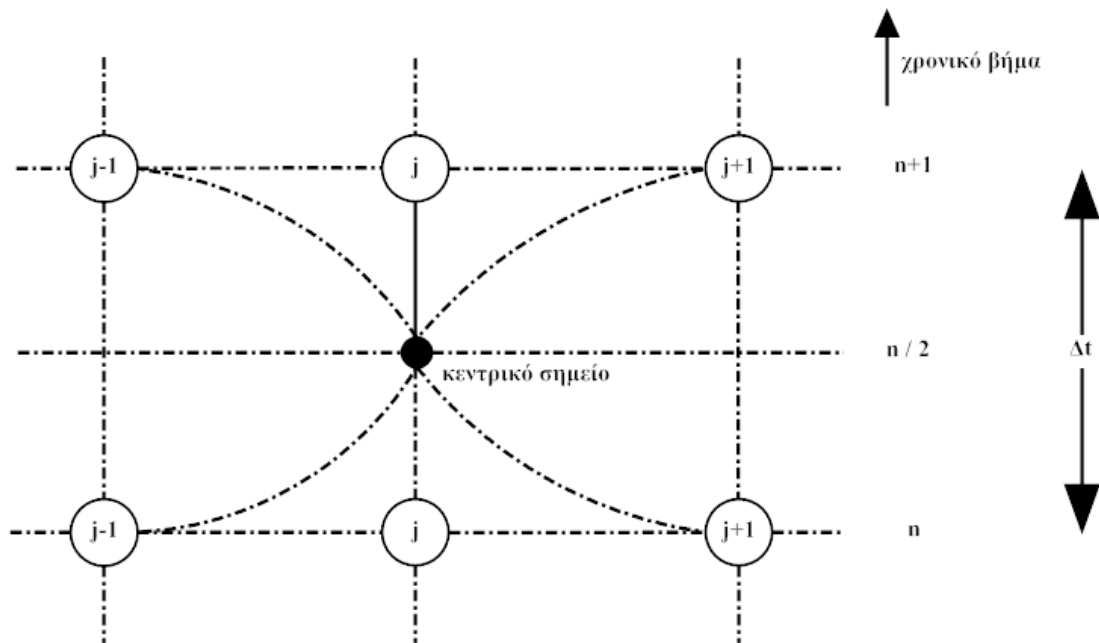
Η μετατροπή των Saint venant εξισώσεων σε μια ομάδα εξισώσεων άρρητων πεπερασμένων διαφορών πραγματοποιείται σ' ένα υπολογιστικό πλέγμα που αποτελείται από εναλλασσόμενα σημεία παροχών (Q) και σταθμών νερού (H), δηλαδή σε σημεία που η παροχή Q και το επίπεδο νερού αντίστοιχα είναι υπολογισμένα σε κάθε χρονικό βήμα.



Σχήμα 3.2. Τμήμα ποταμού με υπολογισμένα σημεία παροχών και στάθμης νερού. (Πηγή: DHI, 2012. Reference Manual)

Τα σημεία παροχών είναι πάντα τοποθετημένα ανάμεσα από γειτονικά σημεία στάθμης νερού. Η απόσταση μεταξύ δυο H σημείων μπορεί να διαφέρει ενώ η παροχή θεωρείται θετική στη κατεύθυνση x (όσο αυξάνεται η χιλιομετρική θέση).

Το σχήμα που έχει υιοθετηθεί είναι ένα σχήμα 6 σημείων γνωστό ως Σχήμα Abbott 6-σημείων (6-point Abbott scheme) (βλ. Σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.3. Κεντρικό σχήμα Abbott 6-σημείων (6-point Abbott scheme).

3.6.4 Περιγραφή ροής

Το MIKE, όπως προαναφέρθηκε, δίνει τρεις επιλογές για τη περιγραφή της ροής: το Δυναμικό κύμα (Dynamic wave approach), το Διάχυτο κύμα (Diffusive wave approach) και το κινηματικό κύμα (Kinematic wave approach). Το Δυναμικό κύμα χρησιμοποιεί ολόκληρη την εξίσωση ορμής Saint Venant, το διάχυτο κύμα περιλαμβάνει μόνο τους όρους του συντελεστή τριβής, της δύναμης λόγω βαρύτητας και τον υδροστατικό όρο και το κινηματικό κύμα στο οποίο η ροή υπολογίζεται με την παραδοχή ότι υπάρχει ισορροπία μεταξύ του συντελεστή τριβής και της δύναμης λόγω βαρύτητας

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{\alpha Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gA(S_g - S_f) = 0$$

τοπική επιτάχυνση
επιτάχυνση λόγω συμμεταφοράς
δύναμη πίεσης
δύναμη βαρύτητας και τριβής

Σχήμα 3.4. Οι όροι της εξίσωσης Saint Venant και οι απλοποιήσεις που γίνονται στην περίπτωση Δυναμικού και Διάχυτου κύματος. (Πηγή: Cox B. A., 2003)

Το Δυναμικό κύμα χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις που προσομοιώνεται πλημμύρα ή που το ποτάμι χαρακτηρίζεται από μικρή κλίση και μικρό συντελεστή τριβής. Το Διάχυτο κύμα είναι κατάλληλο για την μελέτη φαινομένων που εμφανίζεται υπερύψωση στα ανάντη του ποταμού (backwater effect) ενώ το Κινηματικό κύμα αφορά ποτάμια με μεγάλες κλίσεις, που δεν εμφανίζουν υπερύψωση στο ανάντη τμήμα του ποταμού. Συνήθως, χρησιμοποιείται το Δυναμικό κύμα εκτός από τις περιπτώσεις που είναι γνωστό ότι η περιγραφή με το Διάχυτο ή το κινηματικό κύμα είναι η κατάλληλη.

3.6.5 Συνθήκες σταθερότητας

Για την απόκτηση σταθερής και ακριβής λύσης σε άρρητο σχήμα πεπερασμένων διαφορών πρέπει να ισχύουν κάποιες συνθήκες. Αρχικά, η τοπογραφική ανάλυση πρέπει να είναι αρκετά υψηλή ώστε να είναι δυνατή η επίλυση μη γραμμικοτήτων στη στάθμη νερού και στις παροχές. Επιπλέον, θα πρέπει να επιλέγεται τέτοιο χρονικό βήμα Δt ώστε να είναι δυνατή η ακριβής προσομοίωση του κύματος.

Η συνθήκη Courant μπορεί αν χρησιμοποιηθεί ως οδηγός για την σωστή επιλογή χρονικού βήματος Δt τέτοιο ώστε να ικανοποιείτε η παρακάτω συνθήκη:

$$C_r = \frac{V\Delta t}{\Delta x} \leq 1 \tag{3.3}$$

όπου:

C_r : ο αριθμός Courrant

V : η ταχύτητα ($m \cdot s^{-1}$)

Το άρρητο σχήμα που χρησιμοποιείται στο MIKE 11 (6-pont Abbott scheme) επιτρέπει, στη περίπτωση που η ροή είναι καθαρά υποκρίσιμη, τη χρήση Courrant αριθμών μέχρι και 10-20 φορές πάνω. Μάλιστα υπολογισμοί με Courant = 250 έχουν δώσει αποτελέσματα με το λάθος να είναι μικρότερο από 2% σε μερικές πολύ ειδικές περιπτώσεις (DHI, 2012).

3.6.6 Άλλες παράμετροι

3.6.6.1 Συντελεστής τριβής

Ο συντελεστής τριβής εκτιμάται με τη χρήση εμπειρικών σχέσεων όπως ο Manning M , ο Manning n και ο Chezy.

Ο Manning M εκφράζεται στην εξίσωση ορμής ως:

$$\frac{gQ|Q|}{M^2 AR^{4/3}} \quad (3.4)$$

όπου:

Q : η παροχή ($m^3 \cdot s^{-1}$)

A : η βρεχόμενη επιφάνεια (m^2)

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας ($m \cdot s^{-2}$)

R : η υδραυλική ακτίνα (m)

M : ο Manning M

Ο συντελεστής Manning n είναι ο αντίστροφος του Manning M ($1/M$). Τυπικές τιμές του n είναι από 0.01 έως 0.10 ενώ οι αντίστοιχες για τον M κυμαίνονται από 10 έως 100.

Ο συντελεστής Chezy συνδέεται με τους συντελεστές Manning M , n μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$C = MR^{1/6} = \frac{R^{1/6}}{n} \quad (3.5)$$

όπου:

R: η υδραυλική ακτίνα (m)

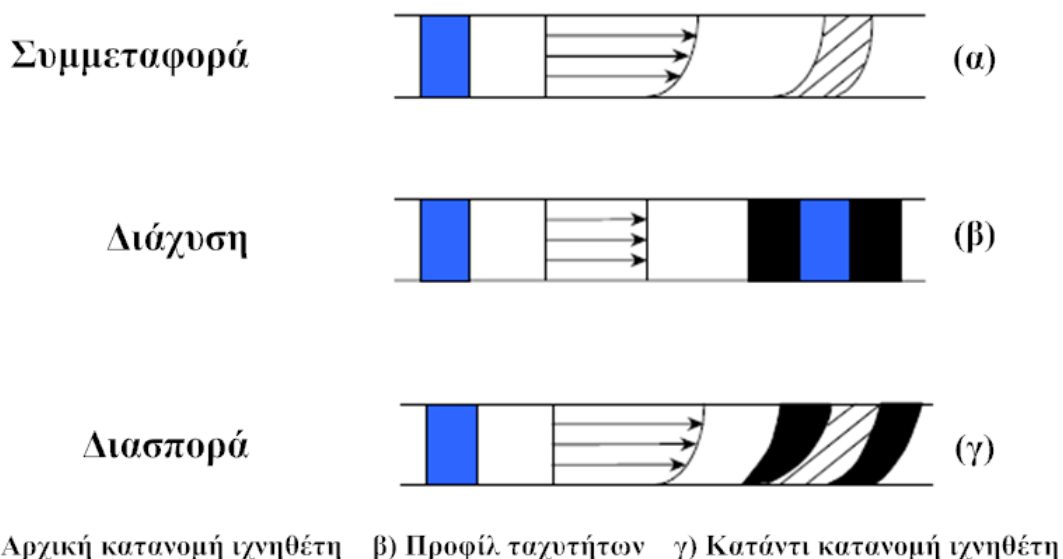
Στη μονοδιάστατη ροή είναι σκόπιμο να χρησιμοποιείται ο συντελεστής Manning ο οποίος μπορεί να θεωρηθεί ανεξάρτητος του βάθους του νερού σε αντίθεση με τον συντελεστή Chezy.

3.7 Μοντέλο μεταφοράς και διασποράς

3.7.1 Θεωρητικό υπόβαθρο

Οι βασικοί μηχανισμοί μεταφοράς ποσότητας ρυπαντή είναι η συµµεταφορά (advection), η διάχυση (diffusion) και η υδροδυναµική διασπορά (ή διασκορπισµός) (dispersion). Η συµµεταφορά αφορά στην µακροσκοπική κίνηση του ρευστού και συγκεκριµένα χρησιµοποιείται στη παρούσα εργασία για να εκφράσει τη συµµεταφορά ποσότητας ρυπαντή µε ένα ρευστό. Αντίθετα η διάχυση αφορά στη µικροσκοπική κίνηση των µορίων. Η υδροδυναµική διασπορά είναι παρόµοια ως προς την µαθηµατική περιγραφή µε τη διάχυση και ως προς την προέλευση µε τη συµµεταφορά. (Γκέκας Β. και Πρωιµάκη Σ., 2000)

Η διάχυση είναι το φαινόµενο κατά το οποίο οι ρυπαντικές ουσίες διαλύονται στο νερό και µετακινούνται από περιοχές υψηλής συγκέντρωσης σε περιοχές χαµηλής συγκέντρωσης.



Σχήμα 3.5. Κατανομή συγκέντρωσης ενός ιχνηλάτη κατά μήκος ενός ποταμού λόγω της μεταφοράς μάζας λόγω διασποράς. (Πηγή: Jobson, 1996).

3.7.2 Μονοδιάστατη εξίσωση μεταφοράς- διασποράς

Στο MIKE 11 εφαρμόζεται η παρακάτω μονοδιάστατη εξίσωση (ολοκληρωμένη κάθετα και πλευρικά) συµμεταφοράς-διασποράς:

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(QC) - \frac{\partial}{\partial x}\left(AE_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) = -AKC + C_2q \quad (3.6)$$

όπου:

- C: η συγκέντρωση της ουσίας ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
- A: η βρεχόμενη επιφάνεια (m^2)
- K: ο γραμμικός φθίνων συντελεστής
- E_x : ο συντελεστής της διαμήκους διασποράς ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
- C_2 : ο όρος πηγής (παραγωγή η απώλεια μέσω αντίδρασης)
- q: η πλευρική ροή (m^3/s)
- x: η απόσταση (m)
- t: ο χρόνος (s)

Η εξίσωση αφορά δυο τρόπους μεταφοράς, τη συµμεταφορά με τη κύρια ροή και τη διασπορά λόγω διαφοράς συγκέντρωσης. Ο συντελεστής διασποράς E_x περιλαμβάνει το συντελεστή μοριακής διάχυσης D_x , και τυρβώδους διάχυσης. Επιπλέον, η απόσταση d εξαρτάται από το πλάτος του ποταμού, το βάθος του νερού H και τον συντελεστή διασποράς. Αξίζει να σημειωθεί, ότι αν αυξηθεί η ταχύτητα ροής του ποταμού τότε μπορεί να αυξηθεί και η απόσταση d στην οποία θα επιτευχθεί πλήρης ανάμειξη (Jobson, 1996).

Οι παραδοχές που γίνονται στην εξίσωση συµμεταφοράς –διασποράς είναι οι παρακάτω:

- i. Η υπό εξέταση ουσία είναι πλήρως αναμειγμένη σ' όλες τις διατομές,
- ii. Η ουσία είναι συντηρητική ή ακολουθεί πρώτης κινητικής αντίδραση (γραμμική φθίνουσα)
- iii. Εφαρμόζεται ο Νόμος του Fick, δηλαδή η διάχυση είναι ανάλογη της ανομοιομορφίας της συγκέντρωσης στο χώρο (όσο μεγαλύτερη ανομοιομορφία στη συγκέντρωση παρουσιάζεται τόσο πιο έντονο το φαινόμενο της διάχυσης)

3.7.3 Συντελεστής διασποράς

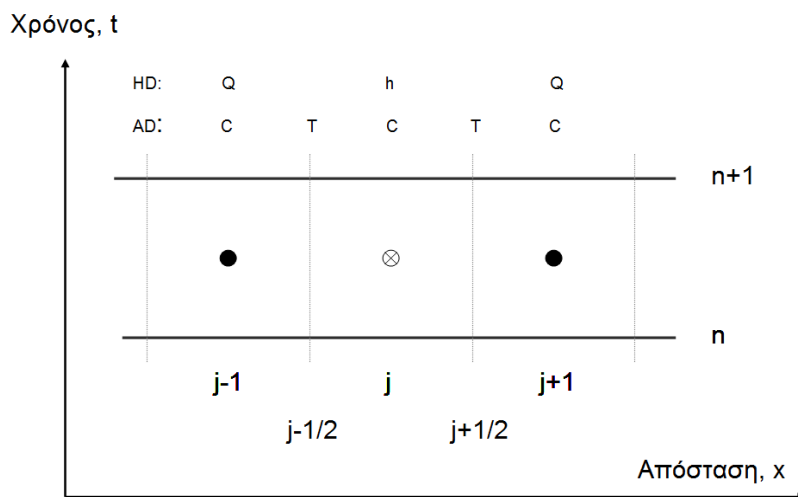
Ο συντελεστής διασποράς εξαρτάται από τη μέση ταχύτητα ροής και εκφράζεται από τη σχέση:

$$D_j^{n+1} = a \left| \frac{Q^{n+1/2}}{A^{n+1/2}} \right|_j^b \quad (3.7)$$

Οι σταθερές a , b καθορίζονται από το χρήστη. Σε περίπτωση που ο συντελεστής διασποράς επιλέγεται σταθερός τότε η σταθερά b είναι ίση με 0 ($b=0$). Τυπικές τιμές του συντελεστή διασποράς σε ποτάμια είναι $5-100 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

3.7.4 Μεταφορά μάζας

Το μοντέλο μεταφοράς-διασποράς υπολογίζει τη συγκέντρωση της ουσίας που εξετάζεται σε κάθε σημείο.



Σχήμα 3.6. Υπολογιστικό σχήμα στο MIKE 11 (Πηγή: DHI, 2012. Τροποποιημένο).

Η μάζα, M , σ' ένα σημείο υπολογίζεται ως εξής:

$$M_j^{n+1} = stv_j^{n+1} \cdot C_j^{n+1} \quad (3.8)$$

όπου:

Stv: ο όγκος νερού (m^3)

C: η συγκέντρωση ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

M: η μάζα (kg)

Η μεταφορά, T, μιας ουσίας δεν υπολογίζεται σε κάθε σημείο (j σημείο) αλλά από το όριο πριν το j σημείο και το όριο πριν το j+1 σημείο (Σχήμα 3.6).

3.7.4.1 Συμμεταφορά

Η συμμεταφορά, AT, περιγράφεται από τη παρακάτω εξίσωση στην οποία έχει προστεθεί ένας συντελεστής διόρθωσης:

$$AT_{j+1/2}^{n+1/2} = \frac{1}{2}(q_j^{n+1/2} + q_{j+1}^{n+1/2}) \cdot \left(\frac{1}{4}(C_j^{n+1} + C_{j+1}^{n+1} + C_j^n + C_{j+1}^n) + Corr \right) \quad (3.9)$$

Ο συντελεστής διόρθωσης Corr υπολογίζεται από τη παρακάτω σχέση:

$$Corr = (C_{j-1}^{n+1/2} - C_j^{n+1/2} + C_{j+1}^{n+1/2}) Corfac \quad (3.10)$$

και

$$Corfac = \begin{cases} \frac{1}{6} \left(1 + \frac{1}{2} \sigma^2 \right), & \text{για } \sigma \leq 1 \\ \frac{1}{4\sigma}, & \text{για } \sigma > 1 \end{cases} \quad (3.11)$$

όπου:

q: η παροχή ($m^3 \cdot s^{-1}$)

σ: ο αριθμός Courant

3.7.4.2 Μεταφορά λόγω διασποράς

Η μεταφορά λόγω διασποράς, DT, μεταξύ δυο γειτονικών όγκων υπολογίζεται ως εξής:

$$DT_{j+1/2}^{n+1/2} = \frac{1}{4}(A_j^{n+1} + A_{j+1}^{n+1}) \cdot (Diff_j + Diff_{j+1}) \cdot \frac{1}{2}((C_j^n + C_{j+1}^{n+1}) - (C_j^{n+1} + C_{j+1}^n)) \quad (3.12)$$

όπου:

A: η επιφάνεια (m)

Diff: ο συντελεστής διασποράς

3.7.4.3 Ισορροπία μάζας

Η ισορροπία μάζας, MB, υπολογίζεται ως η διαφορά της μάζας σε χρόνο n προστιθέμενης όλης της μάζας που έχει μεταφερθεί στον όγκο ελέγχου και της μάζας σε χρόνο n+1 προστιθέμενης όλης της μάζας που έχει μεταφερθεί έξω από τον όγκο ελέγχου, όπως φαίνεται παρακάτω:

$$MB_j^{n+1} = M_j^n - M_j^{n+1} + \left(DT_{j+1/2}^{n+1/2} + AT_{j-1/2}^{n+1/2} - DT_{j-1/2}^{n+1/2} - AT_{j+1/2}^{n+1/2} + LAT_j^{n+1/2} - D_j^{n+1/2} \right) \cdot \Delta t \quad (3.13)$$

όπου:

D: ο πρώτης τάξης φθίνων συντελεστής

3.7.5 Αριθμητικό σχήμα

Το αριθμητικό σχήμα που εφαρμόζεται για την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων του μοντέλου AD είναι ένα κεντρικό άρρητο σχήμα πεπερασμένο διαφορών ώστε να ελαχιστοποιείται η τεχνητή διασπορά. Επιπλέον, η διακριτοποίηση γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζει την ισορροπία μάζας.

Η ροή μάζας θεωρείται στο κέντρο του όγκου ελέγχου γύρω από το σημείο j. Δηλαδή, τα όρια του όγκου ελέγχου είναι ο πυθμένας, η επιφάνεια του νερού και τα σημεία j-1/2 και j+1/2 που είναι τα σημεία των δυο διαδοχικών διατομών.

Οι διαφορικές εξισώσεις που επιλύονται είναι η εξίσωση συνέχειας και η εξίσωση μεταφοράς-διασποράς. Η επίλυση των εξισώσεων με το άρρητο σχήμα αναλύονται στο Παράρτημα Β.

3.7.6 Συνθήκες ευστάθειας

Για τον καθορισμό του φαινομένου που υπερισχύει (μεταφορά ή διασπορά) συνήθως χρησιμοποιείται κάποιο κριτήριο που βασίζεται στον αριθμό Peclet. Ο αριθμός Peclet είναι ένας αδιάστατος αριθμός που συσχετίζει την αποτελεσματικότητα της μεταφοράς μάζας λόγω συμμεταφοράς και της αποτελεσματικότητας της μεταφοράς μάζας λόγω διάχυσης ή υδροδυναμικής διασποράς. Δηλαδή, ο αριθμός Peclet χρησιμοποιείται ως κριτήριο σχετικά με το πιο φαινόμενο μεταφοράς μάζας θα υπερισχύσει (Γκέκας Β. και Πρωιμάκη Σ., 2000).

Ο αριθμός Peclet εκφράζεται ως ο λόγος της συµµεταφοράς µιας ποσότητας από τη ροή προς τη διασπορά της ίδιας ποσότητας όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$Pe = \frac{\text{Συµµεταφορά}}{\text{Διασπορά}} = v \frac{\Delta x}{D} > 2 \quad (3.14)$$

όπου:

v : μέση ταχύτητα ($m \cdot s^{-1}$)

D : ο συντελεστής διασποράς ($m^2 \cdot s^{-1}$)

Δx : το μήκος μεταξύ των δυο σημείων (m)

Το υπολογιστικό σχήμα που εφαρµόζεται στο MIKE 11 έχει τη δυνατότητα να είναι σταθερό ακόµα και για µεγάλους αριθµούς Peclet ($Pe > 2$).

Εκτός από τον αριθµό Peclet θα πρέπει να δίνεται προσοχή και στον αριθµό Courant που αναπτύχθηκε µε σκοπό να επιτυγχάνεται σύγκλιση των αποτελεσµάτων και συνεπώς να µην µειώνεται η ευστάθεια της προσοµοίωσης. Η µέγιστη απόσταση µεταξύ δυο υπολογίσιµων σημείων και το χρονικό βήµα θα πρέπει να επιλεγθούν µε τέτοιο τρόπο ώστε ο αριθµός Courant να είναι µικρότερος από 1. Η επιλογή των δυο αυτών παραµέτρων δεν θα πρέπει να γίνεται αυθαίρετα αλλά µε γνώµονα να επιτυγχάνεται τόσο ο περιορισµός του Courant όσο και η υψηλή εκτελεστική ταχύτητα του µοντέλου.

Σηµειώνεται ότι το μήκος Δx στο AD µοντέλο δεν είναι το ίδιο µε το αντίστοιχο στο HD µοντέλο. Στο AD µοντέλο οι υπολογισµοί γίνονται σε όλα τα σηµεία Q και h µε αποτέλεσµα το Δx που υπολογίζεται στο AD µοντέλο να είναι το µισό Δx στο HD µοντέλο.

3.8 Ποιοτικό μοντέλο ECO Lab

3.8.1 Γενικά

Η ποιοτική προσομοίωση στο MIKE πραγματοποιείται με τη χρήση του «πακέτου» του ECO Lab (ECO Lab module). Το ECO Lab έχει τη δυνατότητα να τροποποιείται εύκολα και με τέτοιο τρόπο ώστε να προσομοιάζει διαφορετικά μοντέλα ποιοτικής προσομοίωσης υδάτων όπως το μοντέλο ποιότητας νερού (Water Quality, WQ), ευτροφισμού (Eutrofication template) και βαρέων μετάλλων (Heavy Metals template). Έχει αναπτυχθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να περιγράφει τις διάφορες διεργασίες και αλληλεπιδράσεις μεταξύ των φυσικών και χημικών μεταβλητών και των ποιοτικών παραμέτρων του υπό εξέταση συστήματος. (Ecolab_Short Scientific Description)

3.8.2 Σχέση ECO Lab και AD μοντέλου

Το μοντέλο του ECO Lab είναι συζευγμένο με το μοντέλο Συμμεταφοράς - Διασποράς (Advection-Dispersion module) ώστε οι μηχανισμοί κίνησης του ρευστού που οφείλονται στα φαινόμενα διασποράς και συμμεταφοράς να λαμβάνονται υπόψη κατά την ποιοτική προσομοίωση. (Ecolab_Short Scientific Description)

Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης ολοκληρώνεται κάθε φορά ένα χρονικό βήμα. Αρχικά, ένας διερμηνέας μεταφράζει τις εξισώσεις του προτύπου (template) σε μια λίστα οδηγιών που επιτρέπει στο γενικό μοντέλο τον υπολογισμό των διάφορων παραμέτρων. Σε κάθε χρονικό βήμα προσομοιώνεται η μεταφορά και διασπορά των υπό εξέταση μεταβλητών με χρήση του υδροδυναμικού μοντέλου. Οι αρχικές (ή οι επόμενες/ανανεωμένες) συγκεντρώσεις, συντελεστές, σταθερές καθώς και οποιαδήποτε άλλη παράμετρος, φορτώνονται στο ECO Lab. Το ECO Lab στη συνέχεια υπολογίζει τις εξισώσεις του προτύπου (που έχουν μεταφραστεί από τον διερμηνέα), ολοκληρώνει ένα χρονικό βήμα και επιστρέφει στο γενικό μοντέλο τις ανανεωμένες τιμές το οποίο προχωράει κατά ένα χρονικό βήμα. (Ecolab_Short Scientific Description)

3.8.3 Διεργασίες

Κάθε μεταβλητή περιγράφεται από μια συνήθη διαφορική εξίσωση η οποία περιλαμβάνει τις διάφορες διεργασίες που λαμβάνουν μέρος για την συγκεκριμένη μεταβλητή. Στη περίπτωση που μια διεργασία επηρεάζει περισσότερες από μια μεταβλητές τότε οι διαφορικές εξισώσεις των δυο μεταβλητών συνδέονται μεταξύ τους. (Ecolab_Short Scientific Description)

Οι διεργασίες (processes) περιέχουν μαθηματικές εκφράσεις και μπορούν να περιέχουν τις μεταβλητές (κατάστασης) (state variables), σταθερές (constants) ή εξωτερικές μεταβλητές (forcings). Οι σταθερές παραμένουν σταθερές με το χρόνο ενώ η τιμή των εξωτερικών μεταβλητών εξαρτάται από το χρόνο. Οι διεργασίες περιγράφουν το ρυθμό με τον οποίο αλλάζει μια μεταβλητή και μπορούν να περιγραφούν με τη παρακάτω εξίσωση: (Ecolab_Short Scientific Description)

$$P_c = \frac{dc}{dt} = \sum_{i=1}^n process_i \quad (3.15)$$

όπου:

- c: η συγκέντρωση της μεταβλητής του ECO Lab
- n: ο αριθμός των διεργασιών που εμπλέκονται για τη συγκεκριμένη μεταβλητή
- P_c: οι διεργασίες του ECO Lab

3.8.4 Διαφορικές εξισώσεις ECO Lab

3.8.4.1 Εξίσωση συνέχειας

Όπως προαναφέρθηκε, η ποιότητα του νερού αλλάζει στα ποτάμια λόγω της φυσικής μεταφοράς και των διαδικασιών ανταλλαγής όπως της μεταφοράς-διασποράς καθώς επίσης και λόγω των βιολογικών, βιοχημικών και φυσικών δραστηριοτήτων. Οι παραπάνω διαδικασίες στην υδάτινη φάση περιγράφονται από ένα σύνολο διαφορικών εξισώσεων (W. Rauch et al., 1998)

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + P_c + S_c \quad (3.16)$$

όπου:

- c: η συγκέντρωση της μεταβλητής (παρατήρησης) του ECO Lab
u, v, w: η ταχύτητα ροής
Dx, Dy, Dz: ο συντελεστής διασποράς
P_c: οι διεργασίες του ECO Lab
S_c: πηγές και καταναλώσεις (sources and sinks)

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφτεί και ως εξής:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = AD_c + P_c \quad (3.17)$$

Ο όρος AD_c αφορά τον ρυθμό αλλαγής της συγκέντρωσης μιας μεταβλητής λόγω των φαινομένων μεταφοράς/διασποράς (συμπεριλαμβανομένων των πηγών και καταναλώσεις).

Το ECO Lab όταν υπολογίζει τη συγκέντρωση του επόμενου χρονικού βήματος θεωρεί τον όρο AD_c σταθερό σε κάθε χρονικό βήμα για να υπολογίσει προσεγγιστικά μια λύση με τη χρήση ρητού σχήματος με την παραπάνω εξίσωση. (Ecolab_Short Scientific Description) Στη περίπτωση που όπως αναφέρθηκε δυο διαφορικές εξισώσεις συνδέονται μεταξύ τους επιλύονται ολοκληρώνοντας το ρυθμό της αλλαγής που οφείλεται και στις δύο διεργασίες καθώς επίσης και στις διεργασίες μεταφοράς και διασποράς. (Ecolab_Short Scientific Description)

$$\frac{\partial c}{\partial t} = AD_c + P_c \quad (3.18)$$

όπου:

$$AD_c = \frac{c^* + (t + \Delta t) - c^n(t)}{\Delta t} \quad (3.19)$$

Η συγκέντρωση c* προέρχεται μεταφέροντας την μεταβλητή κατάστασης από το ECO Lab ως μια συντηρητική παράμετρο κατά τη χρονική περίοδο Δt χρησιμοποιώντας το μοντέλο AD. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι η ρητή προσέγγιση επιλύει συνδεδεμένα και μη γραμμικά προβλήματα που προκύπτουν από το πολύπλοκο όρο P_c.

Μ' αυτό το τρόπο το ECO Lab και η μεταφορά-διασπορά μπορούν να χειρίζονται ξεχωριστά. (Ecolab_Short Scientific Description)

3.8.4.2 Συνήθεις διαφορικές εξισώσεις

Για την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων είναι δυνατή η επιλογή μεταξύ τριών μεθόδων ολοκλήρωσης: Euler, Runge Kutta 4 (RK4) και Runge Kutta 5 με ποιοτικό έλεγχο (RKQC). Η μέθοδος Euler αποτελεί τη πιο απλή αριθμητική μέθοδο για την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων και απαιτεί μικρούς χρόνους προσομοίωσης. Αντίθετα, η Runge Kutta 4 απαιτεί μεγαλύτερους χρόνους έχει όμως το πλεονέκτημα ότι έχει μεγαλύτερη ακρίβεια αφού απαιτεί 4 αξιολογήσεις σε κάθε χρονικό βήμα. Στην Runge Kutta 5 αξιολογείται η ακρίβεια και σε περίπτωση που τα αποτελέσματα δεν είναι αρκετά ικανοποιητικά προσαρμόζει το χρονικό βήμα κατάλληλα. Η χρήση της RKQC εξασφαλίζει ότι όλα τα συστατικά υπολογίζονται με ακρίβεια $1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου γίνεται βάση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων σε συνδυασμό με το χρόνο προσομοίωσης. Σε περίπτωση που τα αποτελέσματα είναι όμοια με μια από τους απλούστερες μεθόδους τότε η χρήση τους μπορεί να μειώσει το χρόνο προσομοίωσης. Συνήθως, οι μέθοδοι Euler και RK4 χρησιμοποιούνται στα πρώτα στάδια που πραγματοποιείται η βαθμονόμηση του μοντέλου.

3.8.5 Αριθμητικό σχήμα

Η ισορροπία μάζας κάθε συστατικού που εμπλέκεται στο μοντέλο υπολογίζεται για όλα τα σημεία και σε κάθε χρονικό βήμα ως εξής:

- i. Αποτέλεσμα συγκέντρωσης στο AD σε χρόνο $n+1$: $C_{n+1,AD}$
- ii. Αποτέλεσμα κλίσης στο AD σε χρόνο $n+1$: $LC_{n+1,AD} = (C_{n+1,AD} - C_{n,AD})/Lt$
- iii. Αποτέλεσμα συγκέντρωσης στο WQ σε χρόνο $n+1$: $C_{n+1,WQ}$
- iv. Ολοκλήρωση του $LC_{n+1,WQ} = LC_{n+1,WQ} + LC_{n+1,AD}$

Η τελική τιμή συγκέντρωσης, C_{n+1} , που επιστρέφεται από την ολοκλήρωση των διαφορικών εξισώσεων υπολογίζεται ως μια αριθμητική ολοκλήρωση της κλίσης του χρονικού βήματος των AD και ECO Lab διαφορικών εξισώσεων.

3.8.6 Περιγραφή ECO Lab WQ1

Το WQ μοντέλο δίνει τη δυνατότητα να εξεταστούν οι εξής μεταβλητές (state variables):

- Διαλυμένο BOD (BOD_d)
- Αιωρούμενο BOD (BOD_s)
- Σωματιδιακό BOD (BOD_b)
- Αμμωνιακό άζωτο (NH_3)
- Νιτρικό άζωτο (NO_2)
- Διαλυμένο οξυγόνο (DO)
- Φωσφορικά (PO_4)
- Κολοβακτηρίδια (C_F)
- Ολικά κολοβακτηρίδια (C_T)
- Άλλοι ρυπαντές ορισμένοι από το χρήστη

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει είτε το πιο απλό μοντέλο που περιλαμβάνει μόνο το BOD και το DO μέχρι και το Επίπεδο 6 που το BOD διαχωρίζεται στα τρία κλάσματα (αιωρούμενο, διαλυτό και καθιζάνων) και αποτελεί ένα σύνθετο μαθηματικό μοντέλο.

Τα επίπεδα και οι καταστατικές μεταβλητές που συμπεριλαμβάνονται σ' αυτά φαίνονται στον Πίνακα 3.3.

Πίνακας 3.3. Μεταβλητές που συμπεριλαμβάνονται σε κάθε επίπεδο.

Μεταβλητή	Επίπεδο μοντέλου					
	1 ¹	2	3 ²	4	5	6
BOD	x	x	x	x		
DO	x	x	x	x	x	x
Θερμοκρασία	x	x	x	x	x	x
Αμμωνία			x	x		x
Νιτρικά			x	x		x
BOD διαλυμένο					x	x
BOD αιωρούμενο					x	x
BOD καθιζάνων					x	x

¹Δεν λαμβάνεται υπόψη η επαναιώρηση και καθίζηση του BOD

²Δεν λαμβάνεται υπόψη η επαναιώρηση και καθίζηση του BOD και η απονιτροποίηση

(Πηγή: DHI, 2012)

Πίνακας 3.4. Βιοχημικές διεργασίες ποταμού με το μοντέλο MIKE 11 ECO Lab.

Συστατικά		1	2	3	4	5	7	Ρυθμός Διεργασίας [M·L ⁻³ T ⁻¹]
Διεργασία		DO	BODd	BODs	BODb	NH ₃	NO ₃	
1	Επαναερισμός	1						K2(DOs - DO)
2α	BODd βιοαποικοδόμηση	-1	-1					Kd3 BODd
2β	BODs βιοαποικοδόμηση	-1		-1				Ks3 BODs
2γ	BODb βιοαποικοδόμηση	-1			-1			Kb3 BODb
3	BOD καθίζηση			-1	1			K5 BODs / d
4	BOD επαναιώρηση			1	-1			S1 BODb / d
5	Ζήτηση ιζήματος DO	-1						b1
6	Αζωτοποίηση	0				-1	1	K4 NH ₃ ^{e4}
7	Απονιτροποίηση						-1	K6 NO ₃ ^{e6}
8	Φωτοσύνθεση	-1				-0.066		Pmax cos[2π(τ/α)]
9	Αναπνοή	-1				0.066		R

(Πηγή: *W. Rauch et al., 1998*)

Από τα παραπάνω επίπεδα προσομοίωσης στη παρούσα εργασία μελετήθηκε το επίπεδο 1 το οποίο περιγράφεται πιο αναλυτικά παρακάτω.

3.8.6.1 Μεταβλητές WQ1

Κάθε μοντέλο αποτελείται από ένα σύνολο εξισώσεων που περιγράφουν το οικοσύστημα. Η μαθηματική περιγραφή των διεργασιών που διέπουν το οικοσύστημα πραγματοποιείται με τη χρήση διάφορων μεταβλητών που στο MIKE έχουν διαχωριστεί σε κατηγορίες (σταθερές, εξωτερικές, καταστατικές, βοηθητικές κ.α.).

Το WQ1 περιλαμβάνει 3 καταστατικές μεταβλητές (ή απλώς μεταβλητές), 25 σταθερές, 16 βοηθητικές, και 4 εξωτερικές μεταβλητές ενώ οι διεργασίες που εξετάζει είναι έξι. Οι μεταβλητές είναι οι παράμετροι που ο χρήστης θέλει να εξετάσει και στο συγκεκριμένο μοντέλο είναι το BOD, το DO και η θερμοκρασία. Οι σταθερές μεταβλητές είναι συνήθως

συντελεστές θερμοκρασίας, και ρυθμοί (π.χ. ρυθμός καθίζησης BOD) ενώ οι εξωτερικές μεταβλητές αφορούν παραμέτρους που εισάγονται στο ECO Lab είτε αφού πρώτα έχουν υπολογιστεί σε άλλο μοντέλο του MIKE (π.χ. κλίση ποταμού από HD μοντέλο) είτε από δεδομένα πεδίου. Οι βοηθητικές μεταβλητές δεν ορίζονται από το χρήστη. Όπως δηλώνει και η ονομασία τους είναι βοηθητικές παράμετροι και χρησιμοποιούνται για την ευκολότερη κατάστρωση του μοντέλου και την αποφυγή σφαλμάτων. Τέλος, οι διεργασίες αφορούν τα διάφορα φαινόμενα που επιδρούν στο οικοσύστημα και επηρεάζουν θετικά ή αρνητικά τη συγκέντρωση των μεταβλητών που εξετάζονται, δηλαδή στη περίπτωση του WQ1, τη συγκέντρωση του DO και του BOD.

3.8.6.2 Διεργασίες WQ1

Οι διεργασίες που επηρεάζουν τη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου είναι ο επαναερισμός, η οξείδωση του οργανικού άνθρακα, η φωτοσύνθεση, η αναπνοή και η απαίτηση σε οξυγόνο από τις πυθμενικές αποθέσεις. Η κατανάλωση οξυγόνου λόγω της οξείδωσης της οργανικής ύλης δεν επηρεάζει άμεσα την ισορροπία μάζας του BOD. Παρ' όλα αυτά οι διεργασίες που περιγράφουν το BOD συνδέονται άμεσα με αυτές του διαλυμένου οξυγόνου. Σε περίπτωση που το διαλυμένο οξυγόνο μηδενιστεί, το νερό θα αποκτήσει αναερόβιες συνθήκες και η οξείδωση του BOD θα σταματήσει.

Επανερισμός

Ο επαναερισμός (R) είναι η διαδικασία που περιγράφει την ανταλλαγή οξυγόνου μεταξύ της επιφάνειας του νερού και της ατμόσφαιρας και δίνεται από την εξίσωση:

$$Re\ aeration = K_2 \cdot (C_s - DO) \quad (3.20)$$

όπου:

C_s : συγκέντρωση κορεσμού οξυγόνου ($mg \cdot L^{-1}$)

K_2 : σταθερά επαναερισμού στους $20\ ^\circ C$ (d^{-1})

Η συγκέντρωση κορεσμού του οξυγόνου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C_s = 14.652 + T \cdot [-0.41022 + T \cdot (0.007991 - 0.000077774 \cdot T)] \quad (3.21)$$

όπου:

T: η θερμοκρασία του νερού (°C)

Η σταθερά επαναερισμού, K_2 , βασίζεται σε εμπειρικές σχέσεις μεταξύ της σταθεράς επαναερισμού και της ταχύτητας ροής, του βάθους νερού και της κλίσης του ποταμού. Το ΜΙΚΕ 11 περιλαμβάνει τρεις εμπειρικές σχέσεις που έχουν δεδομένη μορφή και τρεις εμπειρικές σχέσεις που μπορεί να καθορίσει ο χρήστης τη μορφή τους:

$$K_2 = 27185 \cdot u^{0.931} \cdot h^{-0.692} \cdot I^{1.09} \quad (3.22)$$

$$K_2 = 23.9 \cdot u^{0.5} \cdot h^{-1.5} \quad (3.23)$$

$$K_2 = 5.233 \cdot u \cdot h^{-1.67} \quad (3.24)$$

$$K_2 = a_1 \cdot u^{b_1} \cdot h^{c_1} \cdot I^{d_1} \quad (3.25)$$

$$K_2 = a_2 \cdot u^{b_2} \cdot h^{c_2} \cdot I^{d_2} \quad (3.26)$$

$$K_2 = a_3 \cdot u^{b_3} \cdot h^{c_3} \cdot I^{d_3} \quad (3.27)$$

όπου:

u: η ταχύτητα ροής ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

h: το βάθος νερού (m)

I: η κλίση του ποταμού ($\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$)

Σε περίπτωση που επιλεγθεί μια από τις εξισώσεις (3.25), (3.26) ή (3.27) οι σταθερές a_i , b_i , c_i και d_i ($i=1-3$), πρέπει να οριστούν από τον χρήστη. Η πρώτη εξίσωση (6.8) ονομάζεται εξίσωση Thyssen και προτείνεται για μικρά ποτάμια, η δεύτερη εξίσωση (6.9) ονομάζεται εξίσωση O'Connor-Dubbins και συνήθως χρησιμοποιείται για κανονικά ποτάμια ενώ η τρίτη εξίσωση (6.10), που ονομάζεται εξίσωση Churchill, αφορά σε ποτάμια που παρουσιάζουν μεγάλες ταχύτητες ροής.

Φωτοσύνθεση

Η παραγωγή οξυγόνου λόγω του φαινομένου της φωτοσύνθεσης από τα άλγη εξαρτάται κάθε φορά από την θερμοκρασία και την ώρα και διάρκεια της ημέρας στην οποία υπολογίζεται η διεργασία της φωτοσύνθεσης. Η μέγιστη παραγωγή οξυγόνου είναι το μεσημέρι ενώ τις ώρες μεταξύ δύσης και ανατολής ηλιαίου η παραγωγή οξυγόνου είναι μηδενική. Το φαινόμενο της φωτοσύνθεσης περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$C_s = 14.652 + T \cdot [-0.41022 + T \cdot (0.007991 - 0.000077774 \cdot T)] \quad (3.28)$$

όπου:

P: πραγματική παραγωγή ($\text{gO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)

P_{\max} : μέγιστη παραγωγή το μεσημέρι ($\text{gO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)

τ : πραγματική ώρα συσχετιζόμενη με το απόγευμα

α : πραγματική σχετική διάρκεια της ημέρας

t_{up} : χρόνος ανατολής

t_{down} : χρόνος δύσης

Σημειώνεται ότι η περίοδος της προσομοίωσης παίζει καθοριστικό ρόλο στη σωστή προσομοίωση του φαινομένου της φωτοσύνθεσης πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να συνάδει με τα υπόλοιπα στοιχεία που εισάγονται κατά τη κατάστρωση του μοντέλου. Όμοια, θα πρέπει να ορίζεται και η σταθερά P_{\max} καθώς επίσης και το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής μελέτης.

Αναπνοή

Η αναπνοή από αυτότροφους και ετερότροφους οργανισμούς (φυτά, βακτήρια και ζώα) έχει σαν αποτέλεσμα τη κατανάλωση οξυγόνου. Η αναπνοή των οργανισμών εξαρτάται από την θερμοκρασία αλλά δεν εξαρτάται από την ώρα αλλά πραγματοποιείται όλο το εικοσιτετράωρο.

$$\text{Αναπνοή} = R_1 \cdot F_1(N,P) \cdot \theta_1^{(T-20)} + R_2 \cdot \theta_2^{(T-20)} \quad (3.29)$$

όπου:

Respiration:	ρυθμός αναπνοής των φυτών, βακτηριδίων και ζώων ($\text{gO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)
R_1 :	ρυθμός αναπνοής φωτοσυνθετών στους 20 °C ($\text{gO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)
θ_1 :	θερμοκρασιακός συντελεστής για φωτοσυνθετική αναπνοή/παραγωγή
R_2 :	ρυθμός αναπνοής ζώων και βακτηριδίων ($\text{gO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)
θ_2 :	θερμοκρασιακός συντελεστής για ετεροτροφική αναπνοή
$F_1(N,P)$:	Φωτοπερίοδος (light dampening function)
k :	συντελεστής εκμηδένισης φωτός (m^{-1})

Η φωτοπερίοδος, $F_1(N,P)$, προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$F(N,P) = \frac{2}{\frac{IN}{IN + KSN} + \frac{PO_4}{PO_4 + KSP}} \quad (3.30)$$

όπου:

IN:	συνολικό ανόργανο άζωτο ($\text{mg N} \cdot \text{L}^{-1}$)
KSP:	συγκέντρωση ημικορεσμού φωσφόρου ($\text{mg P} \cdot \text{L}^{-1}$)
KSN:	συγκέντρωση ημικορεσμού αζώτου ($\text{mg N} \cdot \text{L}^{-1}$)

Απόδομηση οργανικού άνθρακα

Το Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (Biochemical Oxygen Demand, BOD) χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της ποσότητας του οργανικού φορτίου που περιέχεται στο υπό εξέταση δείγμα ή αποδέκτη (πχ ρυπασμένα νερά) και εκφράζει τη μάζα του οξυγόνου που καταναλώνεται κατά τη βιολογική της οξείδωση ($\text{gO}_2 \cdot \text{m}^{-3}$). Συνήθως, χρησιμοποιείται το BOD_5 δηλαδή η μάζα του οξυγόνου που καταναλώνεται σε διάστημα 5 ημερών.

Η οξείδωση του οργανικού άνθρακα εξαρτάται από τη θερμοκρασία, τη συγκέντρωση οξυγόνου και τη συγκέντρωση της οργανικής ύλης όπως φαίνεται στις εξισώσεις που ακολουθούν:

Αν επιλεγθεί ένα κλάσμα BOD:

$$BOD_{decay} = K_3 \cdot BOD \cdot \theta_3^{(T-20)} \cdot \frac{DO}{DO + HS_BOD} \quad (3.31)$$

ενώ αν επιλεγθούν τρία κλάσματα BOD:

$$\begin{aligned} BOD_d decay &= K_{d3} \cdot BOD_d \cdot \theta_{d3}^{(T-20)} \cdot \frac{DO}{DO + HS_BOD} \\ BOD_s decay &= K_{s3} \cdot BOD_s \cdot \theta_{s3}^{(T-20)} \cdot \frac{DO}{DO + HS_BOD} \\ BOD_b decay &= K_{b3} \cdot BOD_b \cdot \theta_{b3}^{(T-20)} \cdot \frac{DO}{DO + HS_BOD} \end{aligned} \quad (3.32)$$

όπου:

BOD:	συγκέντρωση BOD ($\text{mg O}_2 \cdot \text{L}^{-1}$)
K_3 :	σταθερά αποδόμηση οργανικής ύλης στους 20°C (d^{-1})
θ_3 :	θερμοκρασιακός συντελεστής Arrhenius
DO:	συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου ($\text{mg O}_2 \cdot \text{L}^{-1}$)
HS_BOD:	συγκέντρωση ημικορεσμού οξυγόνου για το BOD ($\text{mg O}_2 \cdot \text{L}^{-1}$)
BOD_d :	συγκέντρωση διαλυμένης οργανικής ύλης ($\text{mg O}_2 \cdot \text{L}^{-1}$)
BOD_s :	συγκέντρωση αιωρούμενης οργανικής ύλης ($\text{mg O}_2 \cdot \text{L}^{-1}$)
BOD_b :	συγκέντρωση σωματιδιακής οργανικής ύλης στο πυθμένα ($\text{mg O}_2 \cdot \text{L}^{-1}$)
K_{d3} :	σταθερά αποδόμησης διαλυμένης οργανικής ύλης στους 20°C (d^{-1})
θ_{d3} :	θερμοκρασιακός συντελεστής Arrhenius (διαλυμένο BOD)
K_{s3} :	σταθερά αποδόμησης αιωρούμενης οργανικής ύλης (d^{-1})
θ_{s3} :	θερμοκρασιακός συντελεστής Arrhenius (αιωρούμενο BOD)
K_{b3} :	σταθερά αποδόμησης σωματιδιακής οργανικής ύλης (d^{-1})
θ_{b3} :	θερμοκρασιακός συντελεστής Arrhenius (σωματιδιακό BOD)

Απαίτηση σε οξυγόνο από τις πυθμενικές αποθέσεις

Η απαίτηση σε οξυγόνο από τις πυθμενικές αποθέσεις υπολογίζεται από τη σχέση:

$$SOD = \frac{DO}{DO + HS_SOD} \cdot \theta_3^{(T-20)} \quad (3.33)$$

όπου:

HS_SOD: συγκέντρωση ημικορεσμού οξυγόνου για το SOD ($\text{mg O}_2 \cdot \text{L}^{-1}$)

θ_3 : θερμοκρασιακός συντελεστής Arrhenius (SOD)

3.8.6.3 Ισορροπία μάζας

Ισορροπία μάζας DO

Η ισορροπία μάζας του DO μπορεί να περιγραφεί από τις διεργασίες επαναερισμού και φωτοσύνθεσης, που επηρεάζουν θετικά τη δίαιτα του οξυγόνου και από τις διεργασίες οξείδωσης του οργανικού άνθρακα, της ενδογενής αναπνοής του φυτοπλαγκτόν και της ζήτησης οξυγόνου των πυθμενικών αποθέσεων, που επηρεάζουν αρνητικά.

Η συνολική δίαιτα του διαλυμένου οξυγόνου μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\frac{dDO}{dt} = + \text{Επαναερισμός} - \text{Οξείδωση οργανικού άνθρακα} + \text{Φωτοσύνθεση} - \text{Αναπνοή} - \text{Απαίτηση οξυγόνου από πυθμενικές αποθέσεις} \quad (3.34)$$

Σημειώνεται ότι η ισορροπία μάζας για το διαλυμένο οξυγόνο εξαρτάται από τις διεργασίες που συμμετέχουν στο μοντέλο. Στο WQ1 μοντέλο οι πυθμενικές αποθέσεις δεν λαμβάνονται υπόψη. Επιπλέον, ο επαναερισμός λαμβάνει χώρα μόνο στην επιφάνεια του νερού ενώ οι πυθμενικές αποθέσεις στον πυθμένα.

Ισορροπία μάζας BOD

Η ισορροπία μάζας για την οργανική ύλη μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

Αν επιλεγθεί ένα κλάσμα BOD:

$$\frac{dBOD}{dt} = -BODdecay \quad (3.35)$$

ενώ αν επιλεχθούν τρια κλάσματα BOD:

$$\begin{aligned}\frac{dBOD_d}{dt} &= -BOD_d \text{ decay} \\ \frac{dBOD_s}{dt} &= -BOD_s \text{ decay} + \text{επανααιώρηση} - \text{καθίζηση} \\ \frac{dBOD_b}{dt} &= -BOD_b \text{ decay} + \text{επανααιώρηση} - \text{καθίζηση}\end{aligned}\quad (3.36)$$

όπου:

$$\text{Επανααιώρηση} = S_1 \cdot BOD_b / H$$

$$\text{Καθίζηση} = K_s \cdot BOD_s / H \quad (3.37)$$

όπου:

S_1 : ρυθμός επανααιώρησης για το σωματιδιακό BOD_b ($m \cdot d^{-1}$)

K_s : ρυθμός καθίζησης για το αιωρούμενο BOD_s ($m \cdot d^{-1}$)

Η επανααιώρηση θεωρείται ότι πραγματοποιείται όταν η ταχύτητα ροής, V , ξεπερνάει τη κρίσιμη τιμή V_1 και θεωρείται σταθερή με το χρόνο. Στη περίπτωση που η ταχύτητα ροής είναι μικρότερη της κρίσιμης τιμής θα προκύψει καθίζηση.

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τη συμπεριφορά του BOD και του DO είναι συνδεδεμένες και επιλύονται ταυτόχρονα.

3.8.6.4 Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία υπολογίζεται ως η διαφορά της ηλιακής ενέργειας που εισέρχεται κατά τη διάρκεια της ημέρας και της απώλειας ενέργειας κατά τη διάρκεια της νύχτας λόγω της εκπεμπόμενης θερμικής ακτινοβολίας. Έτσι υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\frac{dT}{dt} = I_s - I_r \quad (3.38)$$

όπου:

T : η θερμοκρασία

t : ο χρόνος

- I_s : η εισερχόμενη ηλιακή ενέργεια και
 I_r : η εκπεμπόμενη θερμική ακτινοβολία

4 ΕΦΑΡΜΟΦΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΜΙΚΕ 11/ECO LAB

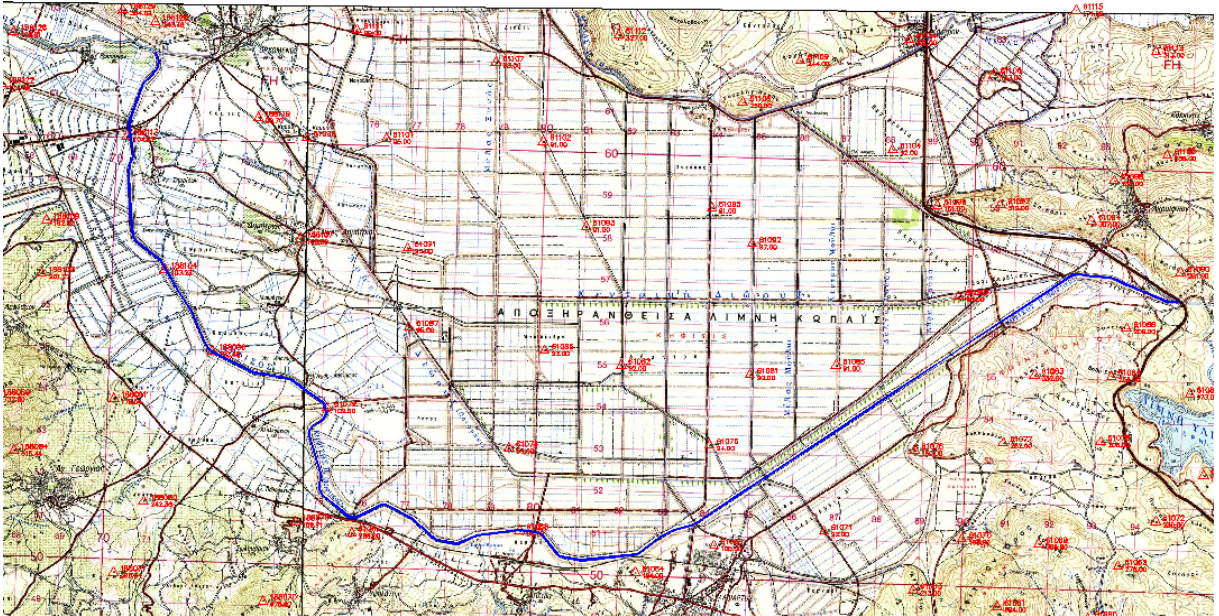
4.1 Υδροδυναμικό μοντέλο

4.1.1 Εισαγωγή δεδομένων

4.1.1.1 Υδρογραφικό δίκτυο

Το μοντέλο ΜΙΚΕ χρειάζεται την εισαγωγή ενός Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους που θα αποτελέσει το υδρογραφικό δίκτυο της υπό εξέτασης περιοχής. Για τους σκοπούς της εργασίας θα χρησιμοποιηθεί ενδεικτικά το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους του Κάτω Ρου του Βοιωτικού Κηφισού. Τα δεδομένα για την ψηφιοποίηση του υδρογραφικού δικτύου που σχεδιάστηκε με το ΜΙΚΕ 11 απαιτούν τις συντεταγμένες X, Y ή το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους της περιοχής που θα μελετηθεί και το σύστημα συντεταγμένων. Αν και εξετάστηκαν και οι δυο τρόποι εισαγωγής των δεδομένων εισόδου στην φόρμα εισαγωγής στοιχείων του υδρογραφικού δικτύου, παρακάτω παρουσιάζεται η 'χειροκίνητη' εισαγωγή των δεδομένων.

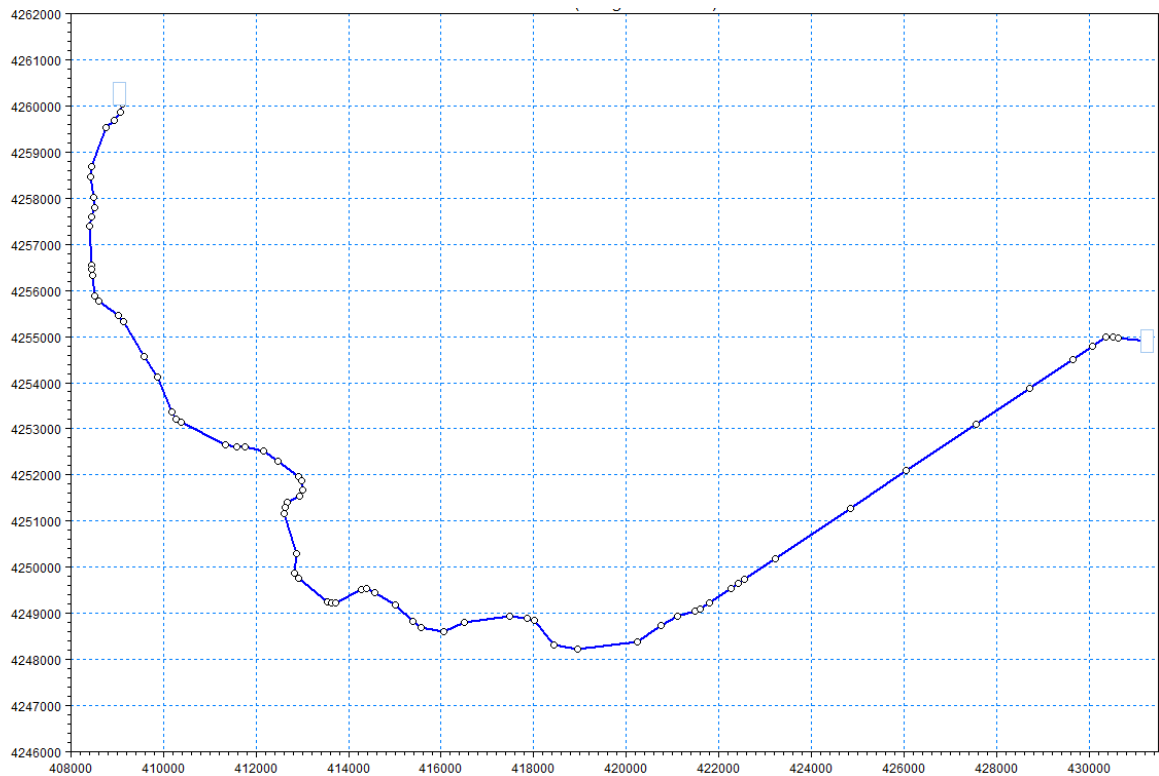
Δεδομένης της ευρείας του χρήσης, χρησιμοποιήθηκε ως σύστημα συντεταγμένων το ΕΓΣΑ'87. Τα δεδομένα των υψομέτρων έχουν εξαχθεί από χάρτες της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (ΓΥΣ) κλίμακας 1:5.000. Τα φύλλα χαρτών της ΓΥΣ χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των δεδομένων όσον αφορά στη χάραξη του άξονα του ποταμού, στα πλάτη των διατομών κατά μήκος του Κάτω ρου του Κηφισού και για τα σχετικά υψόμετρα στα ίδια σημεία. Ο χάρτης στη συνέχεια ψηφιοποιήθηκε και τροποποιήθηκε στο πρόγραμμα Autocad κατάλληλα ώστε να περιέχει τις πληροφορίες των συντεταγμένων. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε χάρτης κλίμακας 1:50.000 που χρησίμευσε για την αποτύπωση της γενικής εικόνας της περιοχής και τον προσδιορισμό σημείων ενδιαφέροντος (π.χ. παραπόταμοι).



Σχήμα 4.1. Χάρτης της Κοπαΐδας σε κλίμακα 1:50.000 (Πηγή: ΓΥΣ)

Οι πληροφορίες που εξήχθησαν από το Autocad είναι οι συντεταγμένες X, Y (75 σημεία συντεταγμένων) στη περιοχή 408000 - 431500 κατά X και 4246000 - 4262000 κατά Y και η χιλιομετρική θέση κατά μήκος του ποταμού Κηφισού από τον Ορχομενό έως τη διώρυγα Καρδίτσας για την επαλήθευση των σημείων από το ΜΙΚΕ.

Μετά την εισαγωγή των δεδομένων εισόδου (X, Y, ΕΓΣΑ'87) στο ΜΙΚΕ ακολούθησε η χάραξη του άξονα του ποταμού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2:



Σχήμα 4.2. Αξονας του ποταμού Β. Κηφισού.

Το MIKE υπολογίζει τη χιλιομετρική θέση σε κάθε σημείο, με αρίθμηση από το υψηλότερο σημείο προς το χαμηλότερο σε κάθε σημείο. Τα σημεία που εισήχθησαν ως δεδομένα εισόδου στον διαχειριστή δικτύου και οι χιλιομετρικές θέσεις των σημείων, όπως υπολογίστηκαν από το MIKE, παρουσιάζονται στο Παράρτημα Δ.

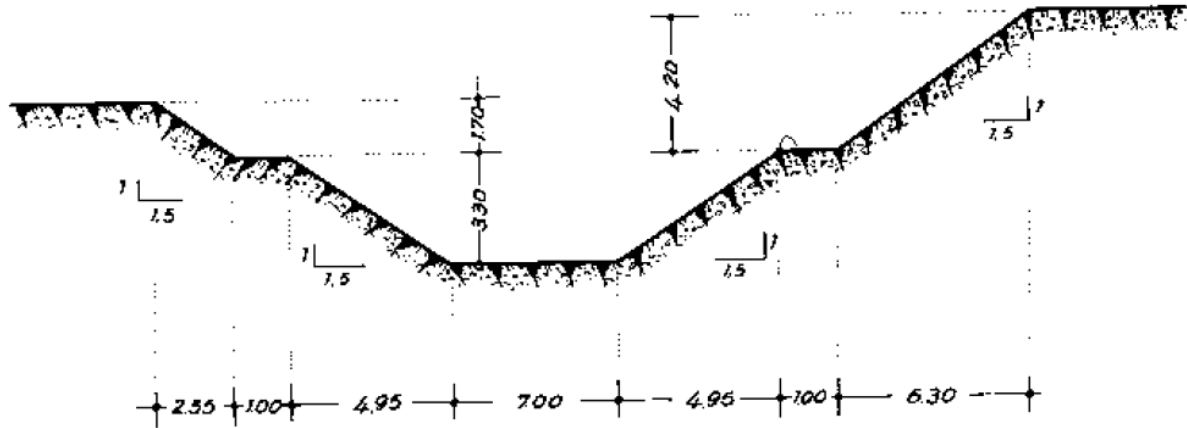
Σημειώνεται ότι οι παραπόταμοι Ερκύνα και Πόντζα δεν σχεδιάστηκαν ως παραπόταμοι αλλά θα εισαχθούν στο μοντέλο ως σημειακές πηγές και θα εξεταστούν μόνο όσον αφορά στις πιέσεις που εισάγουν στον κεντρικό ποταμό Κηφισό. Η επιλογή αυτή οφείλεται σε έλλειψη στοιχείων όσον αφορά στη γεωμορφολογία των δύο παραπόταμων και στην αποφυγή ένταξης στο μοντέλο επιπλέον ασαφειών και υποθέσεων (Chapra and Reckhow, 1983).

4.1.1.2 Διατομές ποταμού (Cross sections)

Μορφολογικά στοιχεία διατομών

Το τμήμα του Β. Κηφισού ποταμού που θα χρησιμοποιηθεί ως δίκτυο αναφοράς στις εφαρμογές που θα ακολουθήσουν είναι διευθετημένο με αποτέλεσμα οι διατομές του να είναι

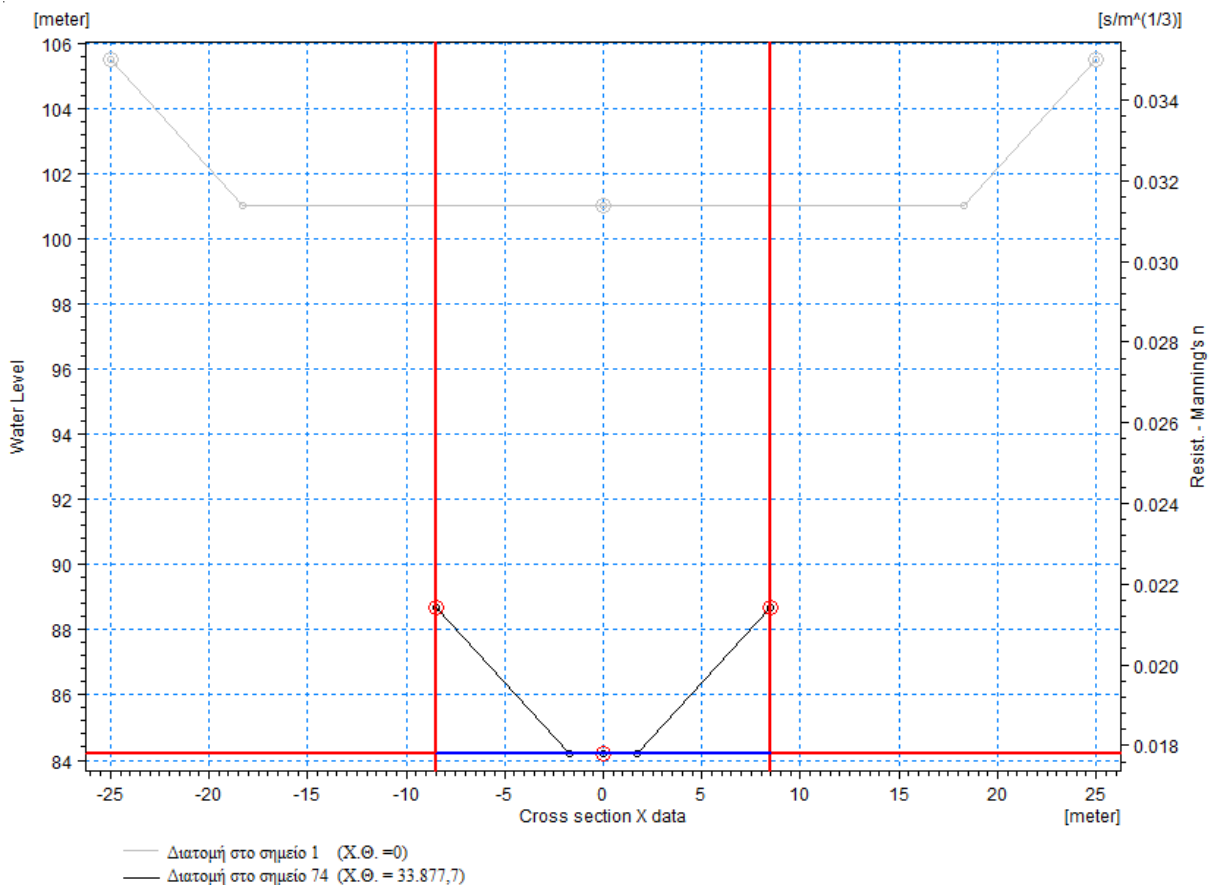
καθορισμένες. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.3, η τυπική διατομή στο ύψος της διώρυγας Καρδίτσας έχει σύνθετο τραπεζοειδές σχήμα (Σ.Μ. Παπαλεξίου και Α. Ευστρατιάδης, 2009· Μαμάσης Ν. και Κουτσογιάννης Δ., 2004).



Σχήμα 4.3. Τυπική διατομή Βοιωτικού Κηφισού στο ύψος της διώρυγας Καρδίτσας.

Δυστυχώς, στη βιβλιογραφία δεν βρέθηκαν πληροφορίες για τη διατομή του ποταμού σε άλλα σημεία εκτός της διώρυγας Καρδίτσας. Θεωρήθηκε ότι η διατομή στα υπόλοιπα σημεία του ποταμού, από τον Ορχομενό μέχρι τη διώρυγα Καρδίτσας, έχει το ίδιο τραπεζοειδές σχήμα και τροποποιήθηκε σύμφωνα με τα στοιχεία που έχουν εξαχθεί από τους χάρτες ΓΥΣ ώστε να ανταποκρίνεται στο εκάστοτε πλάτος κατά μήκος του ποταμού. Συγκεκριμένα, λήφθηκε υπόψη μόνο το κάτω τραπέζιο της διατομής όπου θεωρήθηκε κλίση πρανών 1:1.5 και με γνωστό το πλάτος του ποταμού σε κάθε σημείο έγινε αναγωγή για τον υπολογισμό του πλάτους του πυθμένα σε κάθε διατομή.

Στο Σχήμα 4.4 φαίνεται η απλοποιημένη τυπική διατομή που εισήχθη στο μοντέλο στην αρχή του δικτύου (πρώτο σημείο, Χ.Θ. = 0) και στη διώρυγα Καρδίτσας (σημείο 74, Χ.Θ. = 33.877,7).



Σχήμα 4.4. Τυπικές διατομές Κηφισού στα σημεία 1 ($X.Θ. = 0$) και 74 ($X.Θ. = 33877.7$).

Εκτός από την εισαγωγή των γεωμετρικών στοιχείων των διατομών απαιτείται και ο ορισμός των βασικών σημείων της κάθε διατομής. Ορίστηκαν το αριστερό και δεξί ανάχωμα και το χαμηλότερο σημείο σε κάθε διατομή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.4.

Συντελεστές τραχύτητας

Η επιλογή κατάλληλου συντελεστή τραχύτητας παίζει καθοριστικό ρόλο στην ορθή λειτουργία του μοντέλου. Σύμφωνα με τον Chow et al. (1988) μπορεί να γίνει μια προσέγγιση του συντελεστή Manning ενός ποταμού, ή τμήματός του, βάσει της εικόνας που παρουσιάζει (ποιότητα πρανών, ύπαρξη βλάστησης στις όχθες, κ.α.). Έτσι, βάσει της εικόνας που παρουσιάζει ο Β. Κηφισός (βλ. Σχήμα 4.5) μπορεί, κατά παραδοχή, να επιλεγθεί συντελεστής Manning n ίσος με 0.035.



Σχήμα 4.5. Αεροφωτογραφία του Β. Κηφισού σε τμήμα του κάτω ρου.

Εξαιρεση αποτελεί του τελευταίο τμήμα του Κηφισού, περίπου στο ύψος της διώρυγας Καρδίτσας, στο οποίο η διατομή είναι διαμορφωμένη με μπετόν και επομένως μπορεί να θεωρηθεί τιμή Manning n ίση με 0.02 (βλ. Σχήμα 4.6). Τα στοιχεία αυτά συμφωνούν και με τη μελέτη των Μαμάσης Ν., Κουτσογιάννης Δ. (2004) που αναφέρεται ότι το 1978 είχε εκτιμηθεί, με βάση μόνο μια υδρομέτρηση στη διώρυγα Καρδίτσας, ο συντελεστής τραχύτητας Manning M ίσος με 55 ή αλλιώς Manning n ίσος με 0.018.



Σχήμα 4.6. Αποψη του Β. Κηφισού ανάντι της διώρυγας Καρδίτσας.

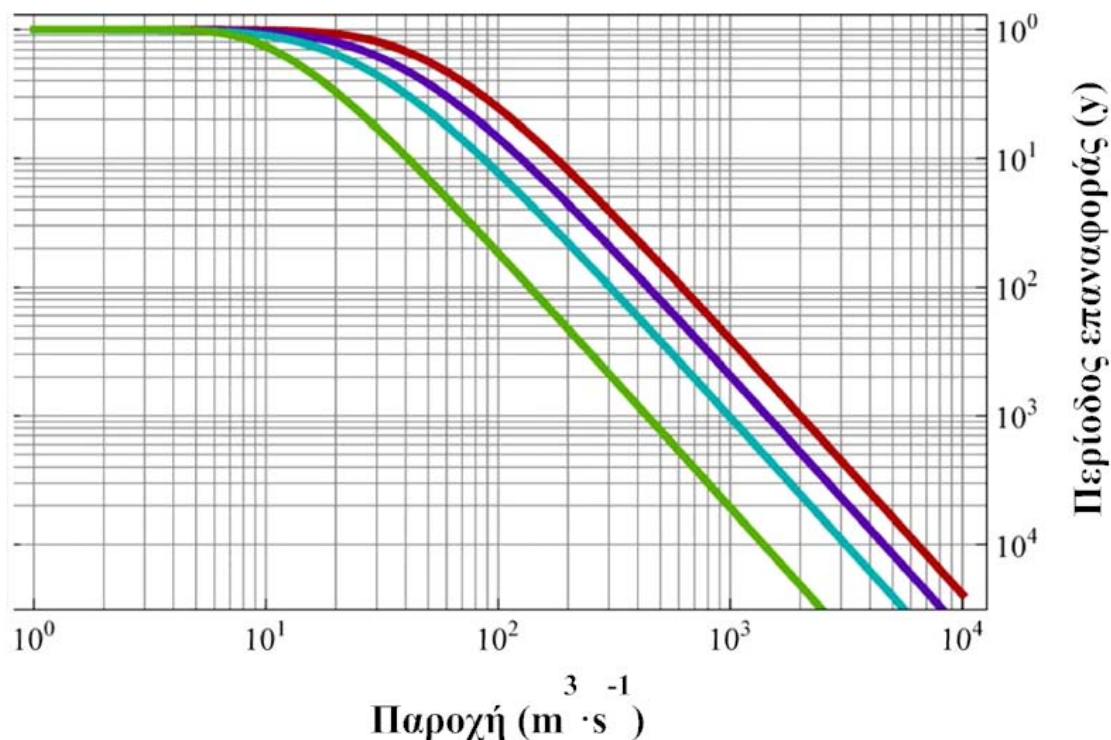
4.1.1.3 Οριακές συνθήκες (Boundary Conditions)

Στην εφαρμογή ορίστηκαν ως σημεία εισόδου και εξόδου τα σημεία στις χιλιομετρικές θέσεις 0 m και 33.877,7 m αντίστοιχα. Στην είσοδο θα ορίζεται κάθε φορά η επιλεγμένη παροχή ενώ στην έξοδο έχει οριστεί η καμπύλη παροχών – στάθμης νερού (Μαμάσης Ν., Κουτσογιάννης Δ., 2004). Σημειώνεται ότι για την κατάρτιση των καμπύλων αυτών έχει θεωρηθεί συντελεστής τραχύτητας $M=55$.

Όταν η προσομοίωση περιλαμβάνει το μοντέλο AD πρέπει να εισάγονται οριακές συνθήκες των συγκεντρώσεων των υπό εξέταση ουσιών. Οι οριακές συνθήκες θα παρουσιαστούν στα αντίστοιχα σενάρια των μοντέλων HD-AD.

Παροχή

Οι Παπαλεξίου και Ευστρατιάδης (2009) στα πλαίσια του προγράμματος Βασικής έρευνας “Κωνσταντίνος Καραθεοδώρη” έχουν πραγματοποιήσει υδραυλική μελέτη στο Β. Κηφισό με στόχο την εκτίμηση και πρόγνωση του πλημμυρικού κινδύνου. Κατέληξαν στην δημιουργία πιθανοτικού διαγράμματος μέσω ημερήσιων παροχών στην διώρυγα Καρδίτσας (έξοδος λεκάνης) (βλ. Σχήμα 4.7).



Σχήμα 4.7. Πιθανοτικό διάγραμμα μέσης ημερήσιας παροχής στην έξοδο της λεκάνης. Οι συμπαγείς γραμμές, από αριστερά προς τα δεξιά, αναπαριστούν τις θεωρητικές κατανομές της παροχής στους κόμβους, Αμφίκλειας, Ανθοχωρίου, Αγίου Βλασίου και στην έξοδο της λεκάνης, αντίστοιχα. (Πηγή: Παπαλεξίου και Ευστρατιάδης, 2009.

Το Πιθανοτικό διάγραμμα για την έξοδο της λεκάνης προέρχεται από τιμές μετρήσεων για τις περιόδους 1/4/1978-13/5/1991 και 1/10/1994-17/7/2003. Οι εν λόγω μετρήσεις προέρχονται από παρατηρήσεις στάθμης της ΕΥΔΑΠ τις οποίες ανήγαγαν σε παροχή, με εφαρμογή της σχέσης ομοιόμορφης ροής του Manning.

Η περιοχή μελέτης δεν έχει οικισμούς κοντά ενώ οι εκτάσεις της χρησιμοποιούνται κυρίως για γεωργική χρήση και κτηνοτροφία. Για τους παραπάνω λόγους κρίθηκε σκόπιμο να μην χρησιμοποιηθεί μεγάλη περίοδος επαναφοράς που θα υποδήλωνε περιοχή σημαντικού κινδύνου αλλά η επιλογή μιας περιόδου επαναφοράς που θα αντικατοπτρίζει τις συνήθεις συνθήκες στο ποτάμι.

Σύμφωνα με το διάγραμμα για περίοδο επαναφοράς ενός έτους η παροχή κυμαίνεται από 1 έως $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Επιπλέον, σύμφωνα με το Σχέδιο διαχείρισης η φυσική ετήσια παροχή του Κηφισού κατάντη του Ορχομενού είναι $12.3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Κρίθηκε σκόπιμο η παροχή αυτή ($12,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) να χρησιμοποιηθεί ως παροχή αναφοράς για τις προσομοιώσεις της παρούσας εργασίας ενώ θα μελετηθεί η συμπεριφορά του ποταμού στις ακραίες παροχές $1, 100, 145 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ που αποτελεί τη μέγιστη ιστορική παροχή μέχρι το 2002 και $315 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ που αποτελεί την παροχευτικότητα της διώρυγας Καρδίτσας και σε αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς 40 έτη (Παπαλεξίου και Ευστρατιάδη, 2009).

Σε περίπτωση που τα στοιχεία είναι ανεπαρκή και επομένως δεν είναι δυνατός ο ορισμός καμπύλης παροχής-στάθμης από το χρήστη, το MIKE έχει τη δυνατότητα να υπολογίζει ενδεικτική καμπύλη παροχής-στάθμης. Απαραίτητη προϋπόθεση για τον υπολογισμό της καμπύλης από το πρόγραμμα είναι ο χρήστης να έχει ήδη ορίσει παροχή στην είσοδο, συντελεστή τριβής Manning και να έχει σχεδιάσει τις διατομές στον διαχειριστή των διατομών.

Ενδεικτικά, η καμπύλη παροχής στάθμης για τη διώρυγα Καρδίτσας ($X.Θ. = 33.877,7 \text{ m}$) όπως υπολογίστηκε από το MIKE παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1. Πίνακας στάθμης - παροχής για τη διώρυγα Καρδίτσας.

Παροχή $Q (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	Στάθμη $H (\text{m})$	Παροχή $Q (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	Στάθμη $H (\text{m})$
89,70	0,00	91,84	98,14
89,71	0,03	91,98	110,19
89,73	0,09	92,11	122,98
89,75	0,25	92,25	136,52
89,89	1,86	92,39	150,82
90,03	4,36	92,53	165,91
90,17	7,59	92,67	181,78
90,31	11,50	92,81	198,44
90,45	16,06	92,95	215,92
90,58	21,27	93,09	234,22
90,72	27,13	93,23	253,36
90,86	33,64	93,37	273,33
91,00	40,81	93,50	294,17
91,14	48,64	93,64	315,86
91,28	57,15	93,78	338,43
91,42	66,34	93,92	361,89
91,56	76,23	94,06	386,25
91,70	86,83	94,20	411,51

Τονίζεται, ωστόσο, ότι λόγω των ελλειπών στοιχείων και των παραδοχών που έχουν γίνει (υψόμετρα, μορφολογικά χαρακτηριστικά διατομών, συντελεστές Manning) για τον σχεδιασμό

του υδρογραφικού δικτύου του Βοιωτικού Κηφισού, αυτό θεωρείται, στα πλαίσια της παρούσης εργασίας, ενδεικτικό και χρησιμοποιείται με επιφύλαξη για την εφαρμογή των μοντέλων AD και ECO Lab.

4.1.1.4 Υδροδυναμικές παράμετροι (Hydrodynamic Conditions)

Οι βασικές παράμετροι που ορίστηκαν στο MIKE 11 είναι η χρήση του δυναμικού κύματος για την προσομοίωση, η τιμή της alpha παραμέτρου η οποία τέθηκε ίση με 1 και η delta ως 0.5. Οι υπόλοιπες παράμετροι στο διαχειριστή των υδροδυναμικών παραμέτρων είναι ορισμένες από το MIKE και απαιτείται η προσαρμογή τους κατά τη ρύθμιση του μοντέλου.

4.1.2 Εφαρμογή υδροδυναμικού μοντέλου

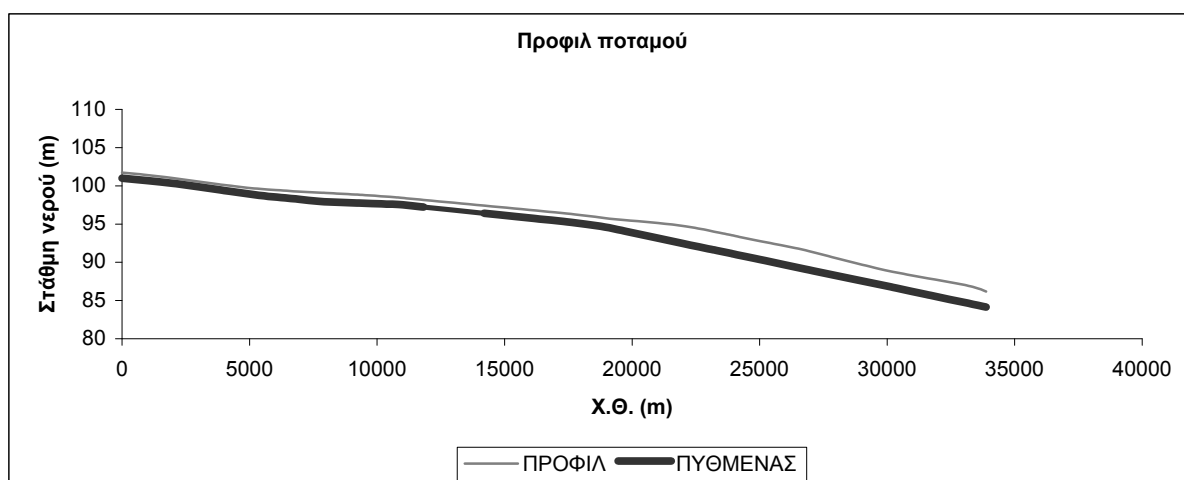
Αρχικά, πραγματοποιήθηκαν μια σειρά από προσομοιώσεις-ελέγχους ώστε να επιλεγεί το κατάλληλο χρονικό βήμα, Δt , και η κατάλληλη απόσταση, Δx . Στόχος των ελέγχων ήταν το μοντέλο να ικανοποιεί τη συνθήκη του αριθμού Courant ($Cr \leq 1$) και παράλληλα ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης και η μέγιστη απόσταση υπολογισμών (Δx) να είναι ικανοποιητικοί. Τελικά, επιλέχθηκε χρονικό βήμα $\Delta t = 60\text{sec}$ και μέγιστη απόσταση $\Delta x = 300\text{m}$.

Στη συνέχεια, ακολούθησε η πρώτη προσομοίωση η οποία πραγματοποιήθηκε για περίοδο 5 ημερών. Τα δεδομένα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2. Τα δεδομένα αυτά στο εξής μπορούν να θεωρηθούν και ως δεδομένα ή συνθήκες αναφοράς του HD μοντέλου.

Πίνακας 4.2. Συνθήκες αναφοράς για τη διεξαγωγή προσομοίωσης υδροδυναμικού μοντέλου.

Παράμετρος	Τιμή
Μοντέλο	HD
Χρόνος προσομοίωσης (d)	5 μέρες
Περίοδος	1/1/2013-10/1/2013
Χρονικό βήμα (s)	60
Max Δx (m)	300
Συντελεστής Manning n	0.035/0.018*
Παροχή εισροής ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	12.3
Καμπύλη Q-h	από μελέτη Ε.Μ.Π.
Προσέγγιση κύματος	Κινηματικό

Το υδραυλικό προφίλ του ποταμού, όπως υπολογίστηκε για τις συνθήκες αναφοράς που επιλέχθηκαν παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.8.



Σχήμα 4.8. Υδραυλικό προφίλ του τμήματος μελέτης του Β. Κηφισού.

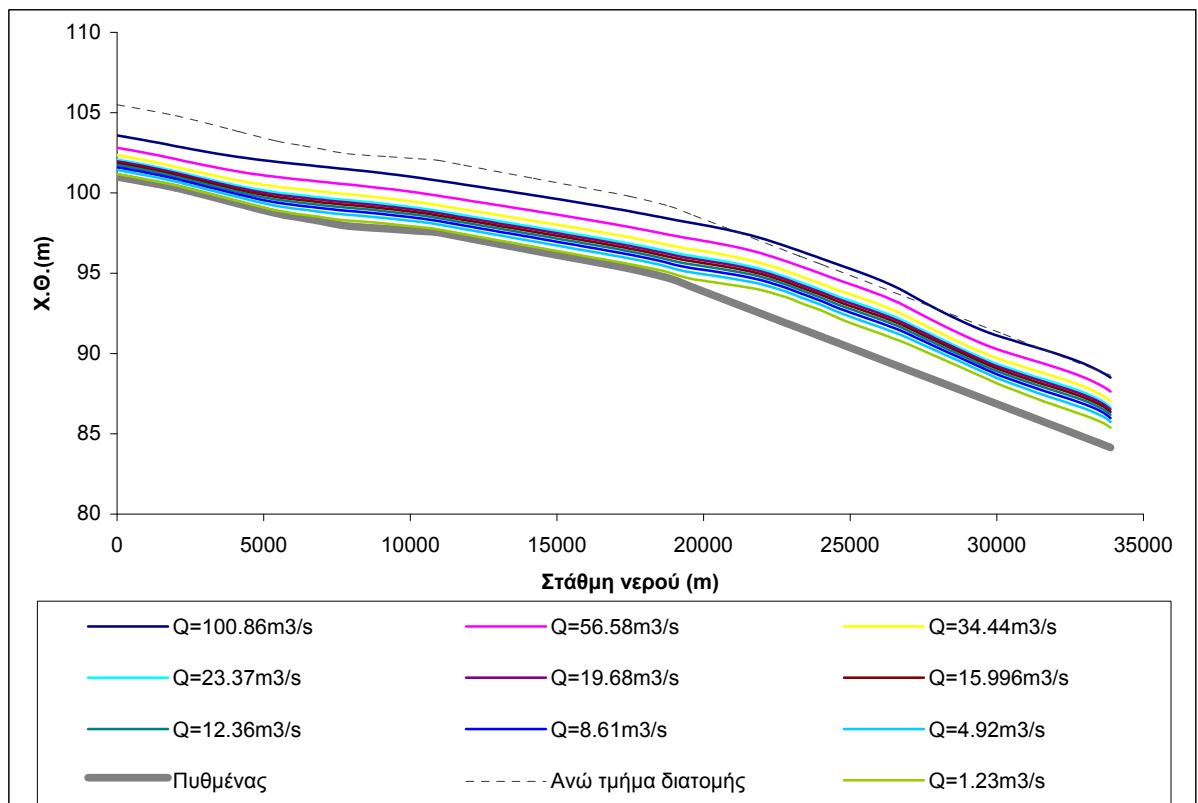
Όσον αφορά στο υδραυλικό προφίλ, παρατηρείται μια ανύψωση της στάθμης μετά τη χιλιομετρική θέση 20.000m. Η ανύψωση θεωρείται φυσιολογική αφού το ποτάμι στενεύει στη κατάντη πλευρά του. Επιπλέον, παρατηρείται στη χιλιομετρική θέση 9287 m ανύψωση της στάθμης συμπεριφορά που κρίνεται ομαλή αφού η κλίση σ' εκείνη τη περιοχή μειώνεται. Αντίστοιχη συμπεριφορά παρατηρείται στο σημείο 47 (Χ.Θ. =10.929 m) όπου η στάθμη του νερού μειώνεται λόγω αλλαγής της κλίσης του πυθμένα σε μεγαλύτερη. Σύμφωνα με τη ποιοτική αξιολόγηση του Διαγράμματος το προφίλ του ποταμού κρίνεται ικανοποιητικό.

Πίνακας 4.3. Εφαρμογή HD μοντέλου για διάφορες παροχές.

% Αύξησης/Μείωσης	720	360	180	90	60	30	0 ¹	-30	-60	-90
Q (m ³ /s)	100.86	56.58	34.44	23.37	19.68	15.99	12.3	8.61	4.92	1.23

¹ Η δεδομένη παροχή (τιμή αναφοράς).

Στη συνέχεια, ελέγχθηκε η επίδραση της παροχής εισόδου στην στάθμη του νερού και υπολογίστηκε η παροχευτικότητα του ποταμού. Επιλέχθηκαν οκτώ παροχές (Πίνακας) από $1 - 100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται στο Διάγραμμα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι για παροχή μεγαλύτερη των $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ το ποτάμι ξεχειλίζει.



Σχήμα 4.9. Υδραυλικό προφίλ για τις διάφορες παροχές..

4.2 Μοντέλο διασποράς

Στη συνέχεια προστέθηκε στο γενικό μοντέλο και το μοντέλο AD. Εξετάστηκαν 2 σενάρια. Στο πρώτο σενάριο θα χρησιμοποιηθεί το μοντέλο HD (Πίνακας 7.2), όπως περιγράφηκε με τη διαφορά ότι το υδρογραφικό δίκτυο είναι μεν το γνωστό αλλά έχει προστεθεί μια σημειακή πηγή στις οριακές συνθήκες. Η σημειακή πηγή ορίζεται σε συγκεκριμένο σημείο (X.Θ) και χαρακτηρίζεται από τη δική της παροχή και τη συγκέντρωση του ρύπου. Στο δεύτερο σενάριο, εκτός από τη σημειακή πηγή, προστίθεται στην ανάντη οριακή συνθήκη εισερχόμενο φορτίο ρύπου. Θα εξεταστεί τυχαίος συντηρητικός ρύπος. Στο ποτάμι στην αρχή την προσομοίωσης σε όλο το μήκος του, γίνεται η παραδοχή ότι, η συγκέντρωση του βενζολίου θα είναι ίση με μηδέν.

Στο πρώτο σενάριο εξετάζεται η χωρική μεταβολή της συγκέντρωσης του ρύπου κατάντη της σημειακής πηγής και πως αυτή επηρεάζεται συναρτήσει διάφορων παραμέτρων. Συγκεκριμένα, θα γίνει ανάλυση ευαισθησίας για την παροχή και τη συγκέντρωση στη σημειακή πηγή και για το συντελεστή διασποράς. Στο δεύτερο σενάριο εξετάζεται η επίδραση που έχει ένα φορτίο ανάντη της σημειακής πηγής και η αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο ‘‘προωθήσεων’’ του ρύπου. Στο δεύτερο σενάριο θα γίνει ανάλυση ευαισθησίας για την παροχή και τη συγκέντρωση στην ανάντη οριακή συνθήκη.

Σε κάθε εφαρμογή θα εξετάζεται μια μεταβλητή για καθορισμένες τιμές ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι θα μένουν σταθερές και ίσες με τις παραμέτρους αναφοράς. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα δεδομένα εισόδου και οι συνθήκες αναφοράς για κάθε εφαρμογή και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

4.2.1 Σενάριο πρώτο

Τα δεδομένα εισόδου για την εφαρμογή του HD μοντέλου είναι όμοια με αυτά που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 4.1.2. Στο μοντέλο AD θα οριστεί επιπλέον ο συντελεστής

διασποράς με τιμή αναφοράς ίση με 10. Ο συντελεστής διασποράς αποτελεί και τη βασική παράμετρο που χρησιμοποιείται για την βαθμονόμηση του μοντέλου μεταφοράς-διασποράς.

Στις οριακές συνθήκες του μοντέλου μεταφοράς-διασποράς εισάγεται η σημειακή πηγή στη Χ.Θ. = 3.929,49 m με παροχή $0.4\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ και συγκέντρωση ρύπου $100\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. Ορίζεται επίσης ως αρχική συνθήκη η εξής: η συγκέντρωση του ρύπου θα θεωρηθεί μηδενική σε όλο το μήκος του ποταμού τη χρονική στιγμή $t=0$ πριν ξεκινήσει η προσομοίωση.



Σχήμα 4.10. Ενδεικτική θέση της σημειακής πηγής ως προς το ποτάμι..

Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται τα δεδομένα εισαγωγής που χρησιμοποιήθηκαν για την πρώτη προσομοίωση του σεναρίου 1 (εφαρμογή αναφοράς) και τα οποία θα αποτελούν στο εξής τα δεδομένα αναφοράς για το μοντέλο AD και το Σενάριο 1.

Πίνακας 4.4. Συνθήκες αναφοράς για τη διεξαγωγή προσομοίωσης AD μοντέλου.

Μοντέλο	Παράμετρος	Τιμή
Υδροδυναμικό μοντέλο	Χρόνος προσομοίωσης (d) ¹	10 μέρες
	Περίοδος	1/1/2013-10/1/2013
	Χρονικό βήμα (sec)	60
	Max Δx	300
	Συντελεστής Manning n	0.035/0.018*
	Προσέγγιση κύματος	Κινηματικό
	Οριακές συνθήκες:	
	Παροχή εισροής (m ³ /s)	12.3
	Καμπύλη Q-h	ΕΜΠ

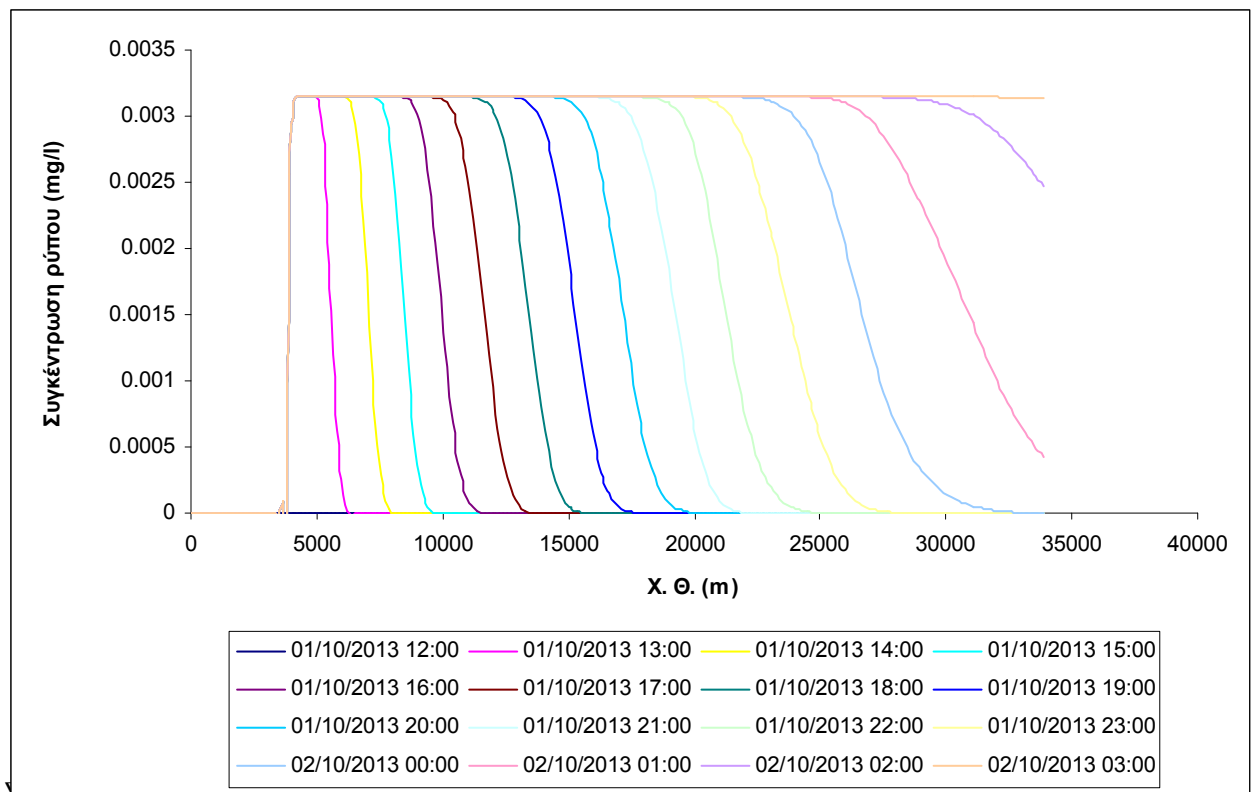
Συντελεστής διασποράς ²	10
Παροχή σημειακής πηγής (m ³ /s) ²	0.4
Οριακές συνθήκες:	
Συγκέντρωση ρύπου στη σημειακή πηγή (μg/l) ²	100
Μοντέλο μεταφοράς-διασποράς Συγκέντρωση ρύπου στη Χ.Θ.=0 (μg/l)	0
Συγκέντρωση ρύπου στην Χ.Θ.= 33877.7 (μg/l)	3.25
Αρχικές συνθήκες:	
Συγκέντρωση ρύπου (μg/l) ³	0

¹ Η περίοδος θα επανεκτιμηθεί.

² Η παράμετρος θα χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση ευαισθησίας.

³ Η συγκέντρωση ρύπου αναφέρεται κατά μήκος του ποταμού τη χρονική στιγμή $t=0$.

Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης - αναφοράς παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.11.



σημειακή πηγή είναι ίση με 100μg/l και η παροχή 0.4m³/s.

Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για 10 μέρες αλλά τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το σύστημα φτάνει σε μόνιμη κατάσταση ύστερα από 17 ώρες (στις 2/10/2013 05:00 π.μ.) όπως

φαίνεται και στο Σχήμα 4.11, στο οποίο παρουσιάζεται η χωρική μεταβολή του ρύπου κάθε ώρα. Ο ρύπος εμφανίζεται στην κατάντη πλευρά 14 ώρες μετά την αρχή της προσομοίωσης.

Οι προσομοιώσεις που θα ακολουθήσουν θα εξετάζουν μια μεταβλητή ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι θα μένουν σταθερές και ίσες με τις παραμέτρους αναφοράς.

Στη συνέχεια εξετάστηκε η σχέση της παροχής και της συγκέντρωσης στη σημειακή πηγή και πως αυτή μπορεί, ή όχι, να επηρεάσει τη συγκέντρωση σε κάποια θέση κατάντη της σημειακής πηγής.

Οι τιμές παροχής, συγκέντρωσης και μάζας για κάθε σημείο στις συνθήκες αναφοράς παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.5 που ακολουθεί. Με έντονα γράμματα συμβολίζονται οι δυο παράμετροι που θα εξεταστούν ως προς την επίδραση στη χωρική μεταβολή του ρύπου.

Πίνακας 4.5. Συνθήκες αναφοράς για τη διεξαγωγή προσομοιώσεων στο Σενάριο 1.

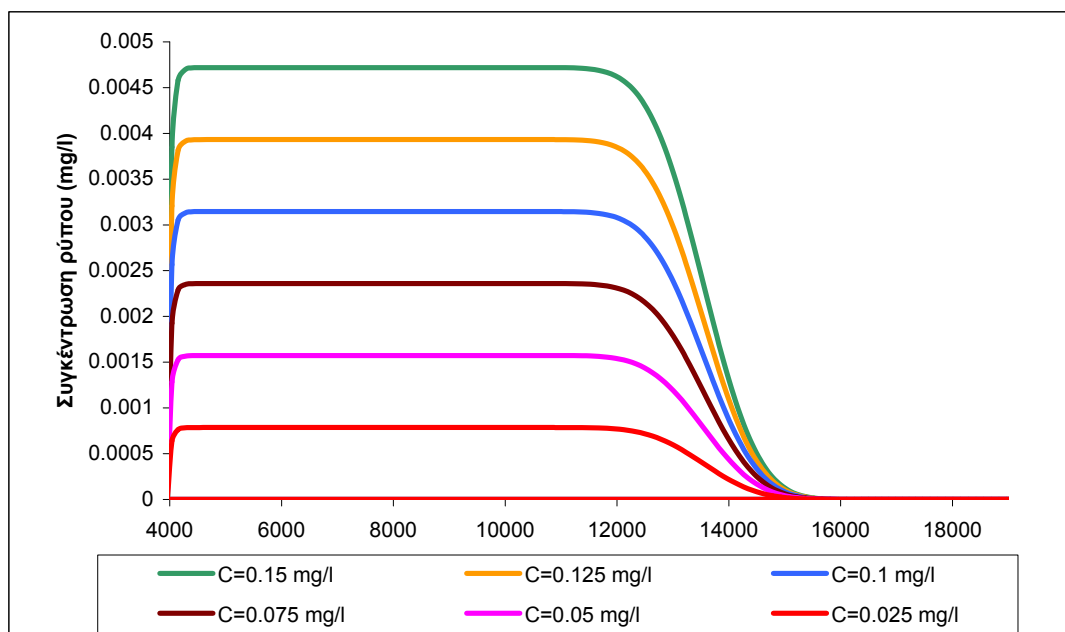
	C(mg/m³)	Q(m³/s)	M (mg/s)
1	0	12.3	0
2	100	0.4	40
3	3.1	12.7	40

Η πρώτη εφαρμογή του μοντέλου στο σενάριο 1 πραγματοποιήθηκε για διάφορες συγκεντρώσεις στη σημειακή πηγή, ενώ η παροχή έμεινε σταθερή (Πίνακας 4.6).

Πίνακας 4.6. Συγκεντρώσεις που εξετάστηκαν για την πρώτη εφαρμογή (Σενάριο 1).

% Αύξηση/Μείωση	75%	50%	25%	0%	-25%	-50%	-75%
C2 (μg/l)(mg/m ³)	175	150	125	100	75	50	25
Q2 (m ³ /s)				0.4			

Τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις σε χρόνο t = 6 h (1/10/2013 18:00:00) μετά την αρχή της προσομοίωσης φαίνονται παρακάτω (Σχήμα 7.13):

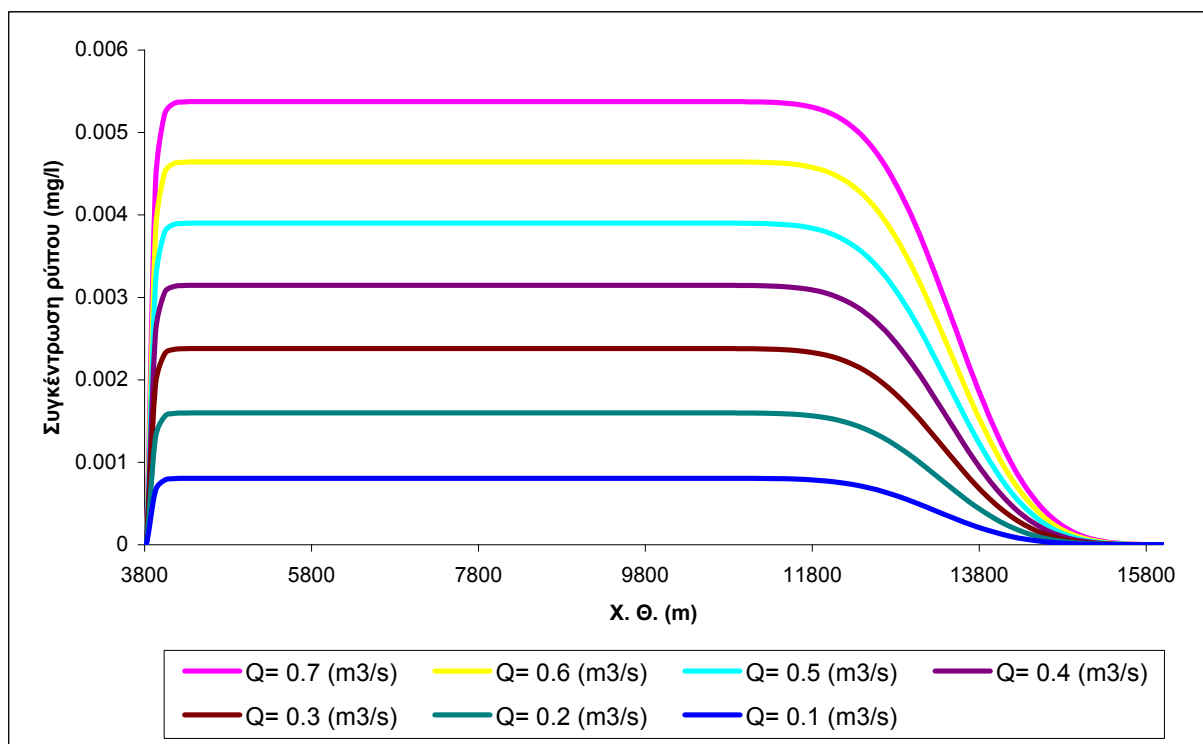


Σχήμα 4.12. Χωρική μεταβολή ρύπου για διάφορες συγκεντρώσεις ρύπου στη σημειακή πηγή έξι ώρες μετά την έναρξη της προσομοίωσης.

Πίνακας 4.7. Παροχές που εξετάστηκαν για την δεύτερη εφαρμογή (Σενάριο 1).

% Αύξηση/Μείωση	75%	50%	25%	0%	-25%	-50%	-75%
C_2 ($\mu\text{g/l}$)(mg/m^3)				100			
Q_2 (m^3/s)	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1

Στη συνέχεια, έγινε εφαρμογή για διάφορες παροχές ενώ η συγκέντρωση έμεινε σταθερή και ίση με τη συγκέντρωση αναφοράς (Πίνακας 4.7).

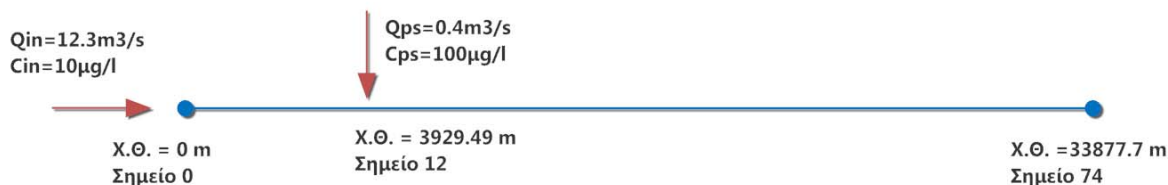


Σχήμα 4.13. Χωρική μεταβολή ρύπου για διάφορες παροχές στη σημειακή πηγή 6 ώρες μετά την έναρξη της προσομοίωσης.

Τόσο το Σχήμα 4.12 όσο και το Σχήμα 4.13 δείχνει ότι η μάζα που εισέρχεται δεν επηρεάζει τη χωρική μεταβολή του ρύπου, δηλαδή τη μεταφορά του με συμμεταφορά και διασπορά. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι η σχέση παροχής-συγκέντρωσης δεν αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη συγκέντρωση του ρύπου κατάντη της σημειακής πηγής.

4.2.2 Σενάριο δεύτερο

Στο δεύτερο σενάριο θεωρήθηκε ότι ο ποταμός έχει μια περιεκτικότητα ανάντη της συμβολής και εξετάστηκε η επίδραση φόρτισης από τη σημειακή πηγή στη χωρική μεταβολή της συγκέντρωσης του ρύπου (βλ. Σχήμα 4.14).



Σχήμα 4.14. Ενδεικτική άποψη του Σεναρίου 2.

Οι συνθήκες αναφοράς παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.8 και είναι όμοιες με τις συνθήκες αναφοράς του πρώτου σεναρίου με εξαίρεση τη συγκέντρωση στο ανάντη όριο που τέθηκε ίση με $10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ και το χρόνο προσομοίωσης που μειώθηκε στις 5 μέρες.

Πίνακας 4.8. Συνθήκες αναφοράς για τη διεξαγωγή προσομοίωσης AD μοντέλου.

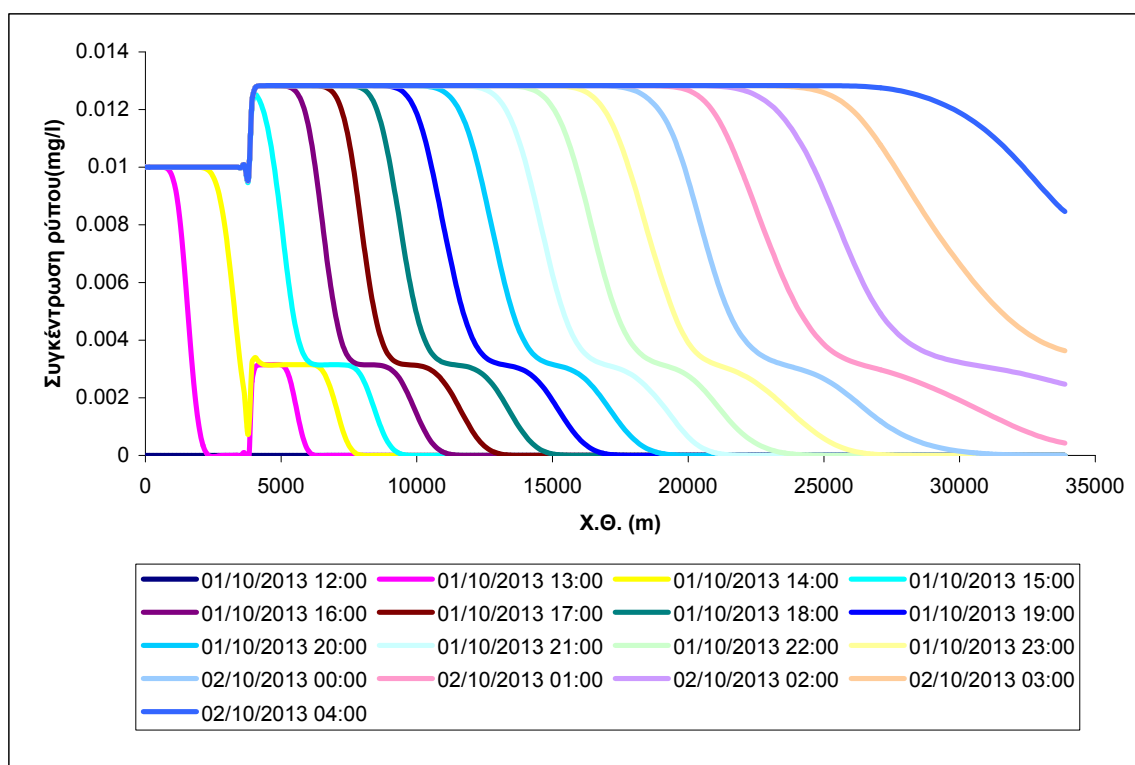
Μοντέλο	Παράμετρος	Τιμή
Υδροδυναμικό μοντέλο	Χρόνος προσομοίωσης (d) ¹	5 μέρες
	Περίοδος	1/1/2013-10/1/2013
	Χρονικό βήμα (sec)	60
	Max Δx	300
	Συντελεστής Manning n	0.035/0.018*
	Προσέγγιση κύματος	Κινηματικό
	Οριακές συνθήκες:	
	Παροχή εισροής (m³/s)	12.3
	Καμπύλη Q-h	ΕΜΠ
	Συντελεστής διασποράς ²	10
Μοντέλο μεταφοράς-διασποράς	Παροχή σημειακής πηγής (m³/s) ²	0.4
	Οριακές συνθήκες:	
	Συγκέντρωση ρύπου στη σημειακή πηγή (μg/l) ²	100
	Συγκέντρωση ρύπου στη Χ.Θ.=0 (μg/l)	10
	Συγκέντρωση ρύπου στην Χ.Θ.= 33877.7 (μg/l)	3.25
Αρχικές συνθήκες:		
Συγκέντρωση ρύπου (μg/l) ³	0	

¹ Η περίοδος θα επανεκτιμηθεί.

² Η παράμετρος θα χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση ευαισθησίας.

³ Η συγκέντρωση ρύπου αναφέρεται κατά μήκος του ποταμού τη χρονική στιγμή $t=0$.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στις συνθήκες αναφοράς παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.15 που ακολουθεί:



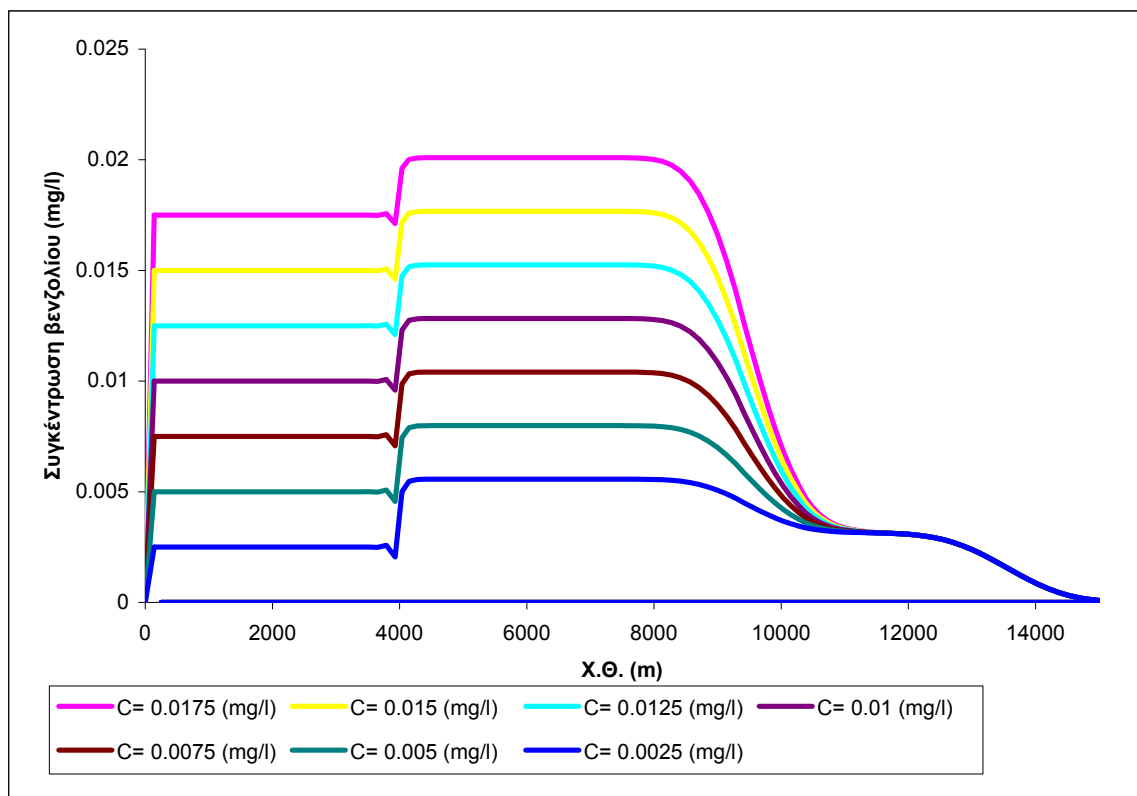
Σχήμα 4.15. Χωρική και χρονική μεταβολή του ρύπου για τις συνθήκες αναφοράς του σεναρίου 2. Οι πηγές βρίσκονται στην αρχή του άξονα του ποταμού (X.Θ. =0 m.) και στη X.Θ. =3929.49 m.

Στο δεύτερο σενάριο μελετήθηκε, όμοια με το πρώτο, η επίδραση της παροχής και της συγκέντρωσης εισόδου στην κατάντη κατανομή των συγκεντρώσεων του βενζολίου. Οι συνθήκες αναφοράς στα τρία σημεία ενδιαφέροντος (αρχή ποταμού, θέση σημειακής πηγής, έξοδος ποταμού) για τις δυο παραμέτρους (παροχή και συγκέντρωση) που θα εξεταστούν παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.9.

Πίνακας 4.9. Συνθήκες αναφοράς για τη διεξαγωγή προσομοίωσης του Σεναρίου 2.

	C (μg/l)(mg/m ³)	Q(m ³ /s)	M (mg/s)
1	10	12.3	123
2	100	0.4	40
3	12.835	12.7	163

Η πρώτη εφαρμογή του μοντέλου στο σενάριο 2 πραγματοποιήθηκε για διάφορες συγκεντρώσεις στη σημειακή πηγή, ενώ η παροχή έμεινε σταθερή (βλ. Πίνακας 4.6). Τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις, για χρόνο $t = 6 \text{ h}$ (1/10/2013 18:00:00) μετά την αρχή της προσομοίωσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.16 που ακολουθεί.

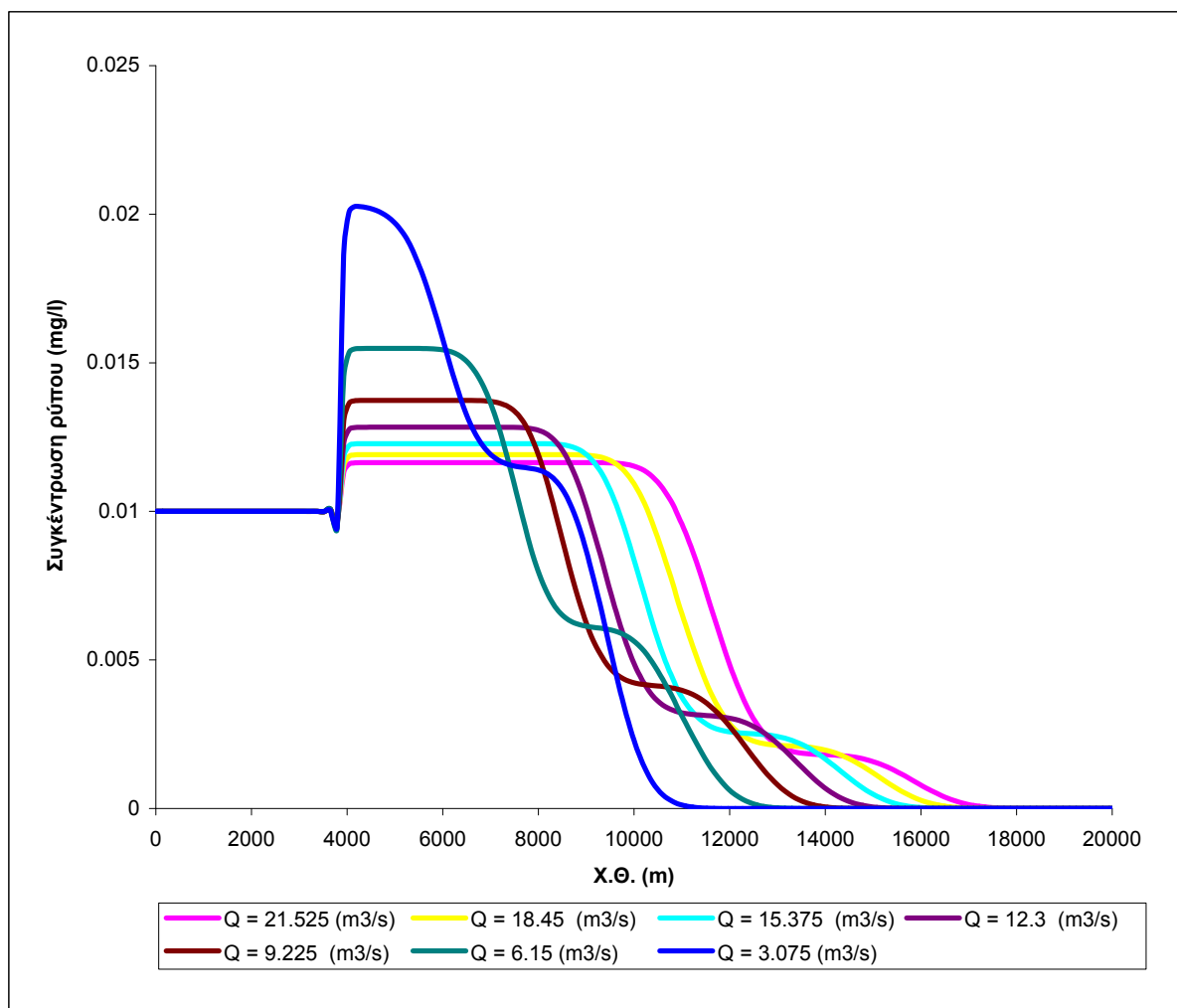


Σχήμα 4.16. Χωρική μεταβολή ρύπου για διάφορες συγκεντρώσεις για το σενάριο 2.

Πίνακας 4.10. Παροχές που εξετάστηκαν για την δεύτερη εφαρμογή (Σενάριο 1).

% Αύξηση/Μείωση	75%	50%	25%	0%	-25%	-50%	-75%
C1(mg/l)				0.01			
Q1(m ³ /s)	21.525	18.45	15.375	12.3	9.225	6.15	3.075

Στη συνέχεια, έγινε εφαρμογή του μοντέλου για διάφορες παροχές ενώ η συγκέντρωση έμεινε σταθερή και ίση με τη συγκέντρωση αναφοράς (Πίνακας 4.7).



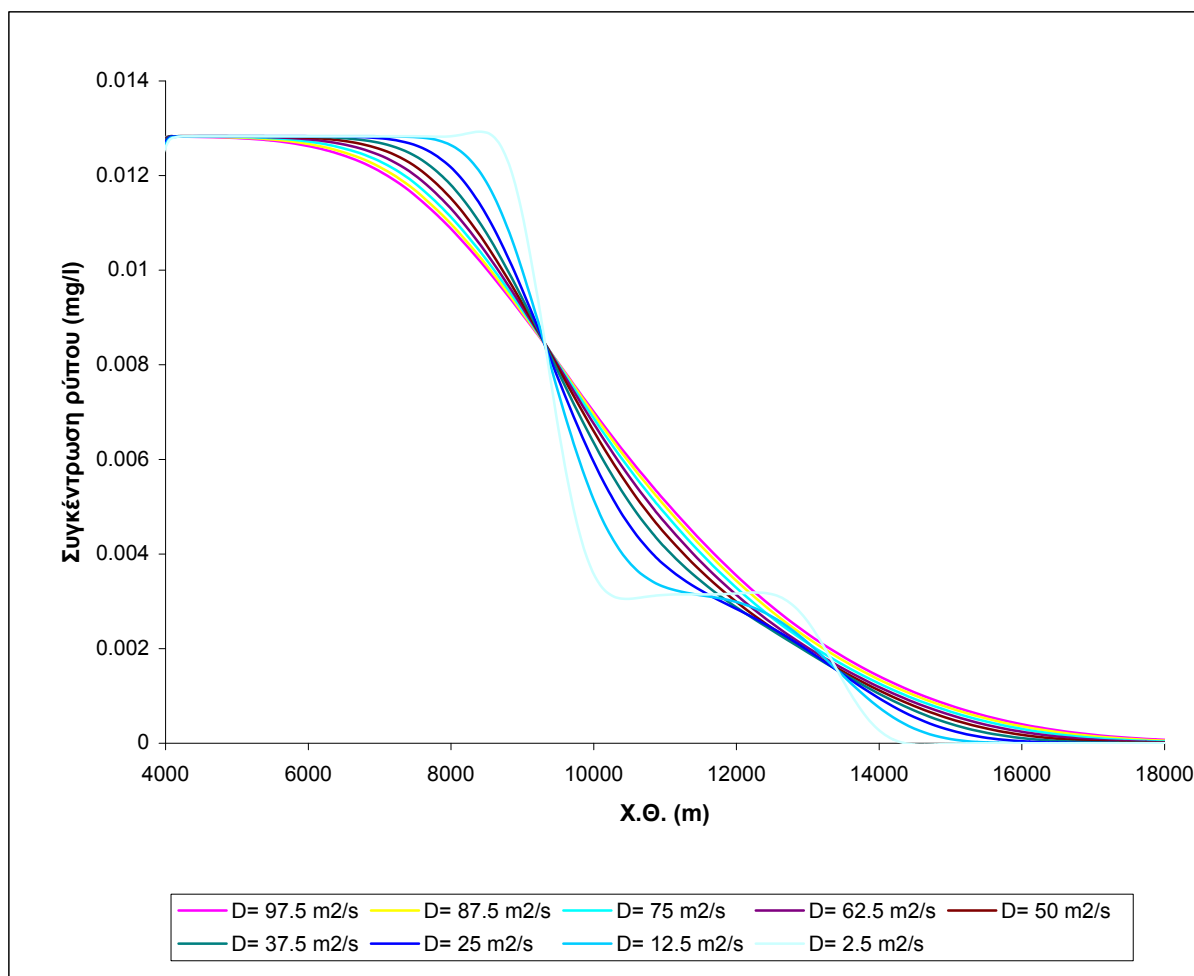
Σχήμα 4.17. Χωρική μεταβολή ρύπου για διάφορες παροχές για το σενάριο 2.

Εκτός από τα παραπάνω μελετήθηκε η επίδραση του συντελεστή διασποράς και του συντελεστή τραχύτητας στη χωρική και χρονική μεταβολή του ρύπου. Έτσι, η επόμενη εφαρμογή πραγματοποιήθηκε για 9 συντελεστές διασποράς (Πίνακας 4.11) σε συνθήκες αναφοράς.

Πίνακας 4.11. Συντελεστές διασποράς που εξετάστηκαν για την δεύτερη εφαρμογή (Σενάριο 1).

% Αύξησης/ Μείωσης	0.95	0.75	0.5	0.25	0	-0.25	-0.5	-0.75	-0.95
Συντελεστής διασποράς (m ² /s)	97.5	87.5	75	62.5	50	37.5	25	12.5	2.5

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.18 που ακολουθεί:



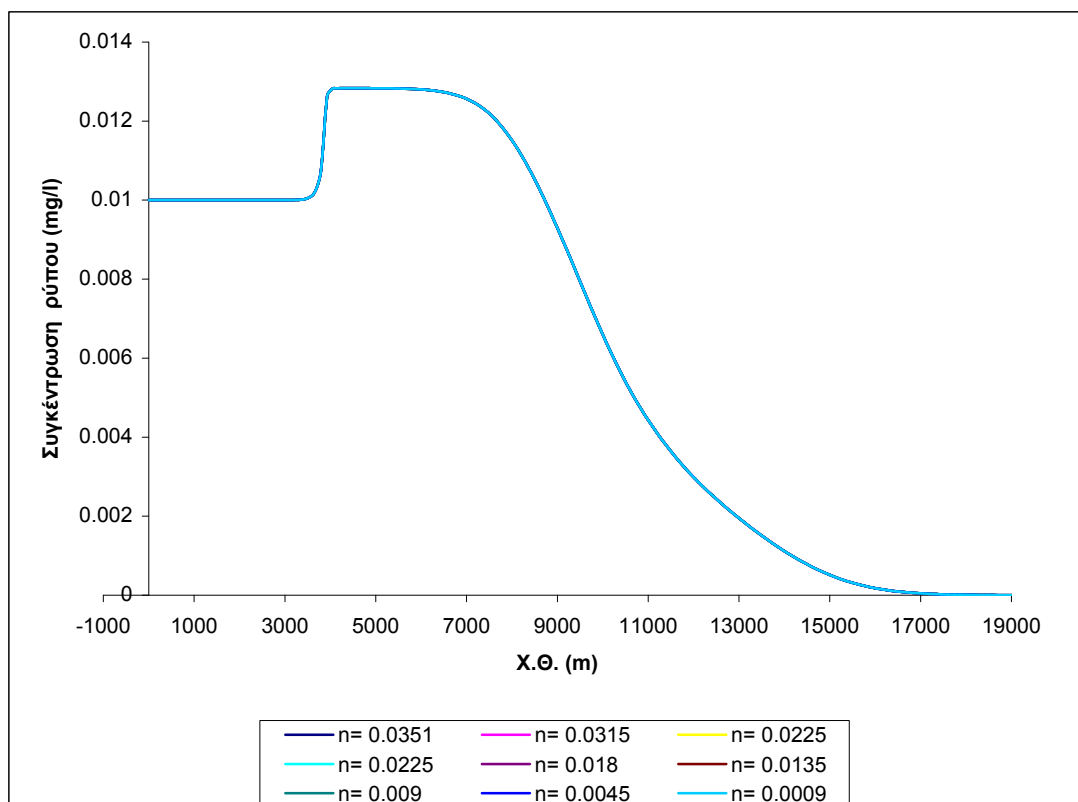
Σχήμα 4.18. Χωρική μεταβολή ρύπου για διάφορους συντελεστές διασποράς έξι ώρες μετά την έναρξη της προσομοίωσης.

Συνήθως, δεν συνίσταται η επιλογή μεγάλου συντελεστή διασποράς διότι μπορεί να επιφέρει αστάθεια στο μοντέλο (Αnon., 2012c). Σ' αυτή τη περίπτωση φαίνεται να ισχύει το αντίθετο αφού το σύστημα γίνεται ασταθές για πολύ μικρούς συντελεστές διασποράς ($D=2.5\text{m}^2/\text{s}$). Αυτό ίσως οφείλεται στο επιλεγμένο χρονικό βήμα και την ανάλυση του πλέγματος (Δx) αφού η ευστάθεια του συστήματος εξαρτάται από το συντελεστή διασποράς και τον αριθμό Courant.

Τέλος, μελετήθηκε η επίδραση του αριθμού Manning στη χωρική μεταβολή του ρύπου.

Πίνακας 4.12. Συντελεστές Manning n που εξετάστηκαν για την δεύτερη εφαρμογή (Σενάριο 1).

% Αύξησης/ Μείωσης	0.95	0.75	0.5	0.3	0	-0.3	-0.5	-0.75	-0.95
Manning n	0.0351	0.0315	0.027	0	0.018	0	0.009	0.0045	0.0009



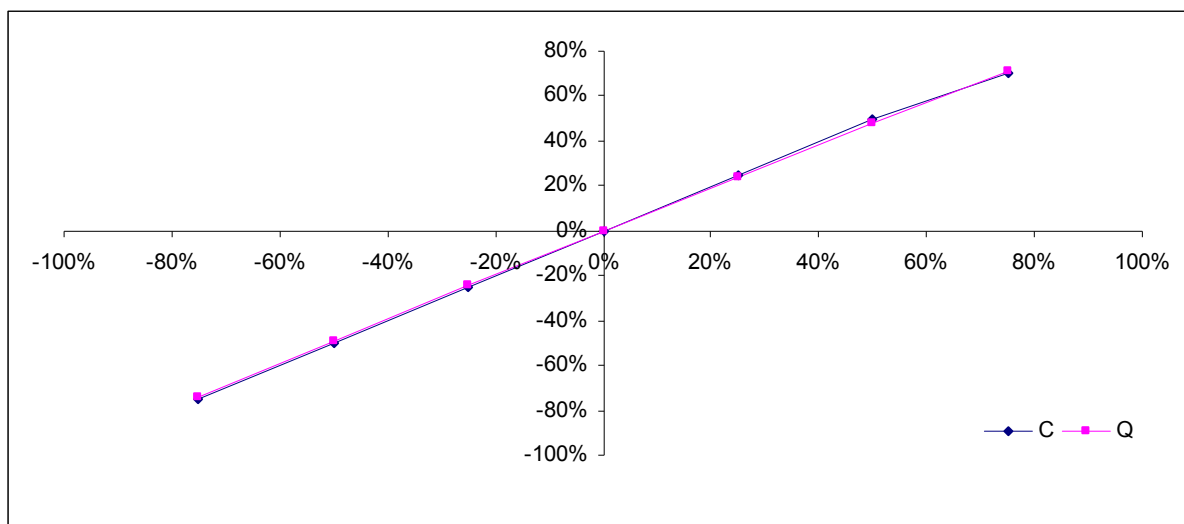
Σχήμα 4.19. Χωρική μεταβολή ρύπου για διάφορες τιμές του συντελεστής τραχύτητας Manning n έξι ώρες μετά την έναρξη της προσομοίωσης.

Ο Manning n εξετάστηκε για μείωση και αύξηση αντίστοιχα κατά 25%, 50%, 75% και 95% της τιμής αναφοράς. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.19. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι ο συντελεστής τραχύτητας παίζει πολύ μικρό ρόλο στην μεταβολή του ρύπου κατά μήκος του ποταμού. Φυσικά, η παρατήρηση αυτή δεν είναι απόλυτη αφού είναι πιθανό για μεγαλύτερους συντελεστές Manning (ποσοστό αύξησης μεγαλύτερο του 100%) να παρατηρηθεί μεταβολή της συγκέντρωσης.

4.2.3 Ανάλυση ευαισθησίας

Αρχικά μελετήθηκε η σχέση μεταξύ της επίδραση της συγκέντρωσης και της επίδρασης της παροχής στη συγκέντρωση του ρύπου στην έξοδο του ποταμού και στο Σενάριο 1.

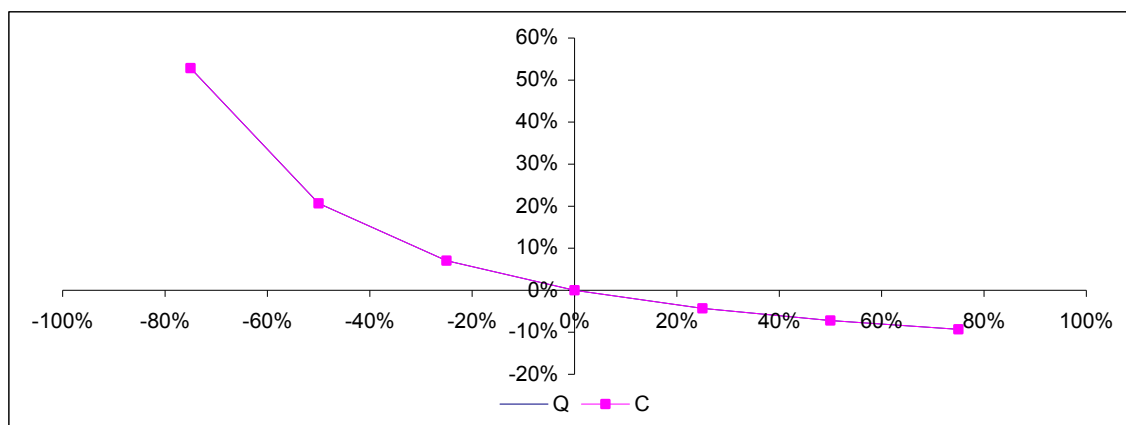
Έγινε ανάλυση ευαισθησίας ως προς τις δύο αυτές παραμέτρους, παροχή (Q) και συγκέντρωση ρύπου (C) της σημειακής πηγής. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας για το Σενάριο 1 παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.20 που ακολουθεί.



Σχήμα 4.20. Ανάλυση ευαισθησίας για παροχή (Q) και συγκέντρωση ρύπου (C) της σημειακής πηγής ως προς τη συγκέντρωση ρύπου στην έξοδο του ποταμού.

Στη συνέχεια, εξετάστηκε η σχέση μεταξύ της επίδραση της συγκέντρωσης του ρύπου και της επίδρασης της παροχής του κυρίως ποταμού στη συγκέντρωση του ρύπου στην έξοδο του ποταμού. Σημειώνεται ότι σε κάθε προσομοίωση υπήρχε σταθερή φόρτιση του ίδιου ρύπου και από κατάντη σημειακή πηγή που δε μεταβαλλόταν μεταξύ των προσομοιώσεων.

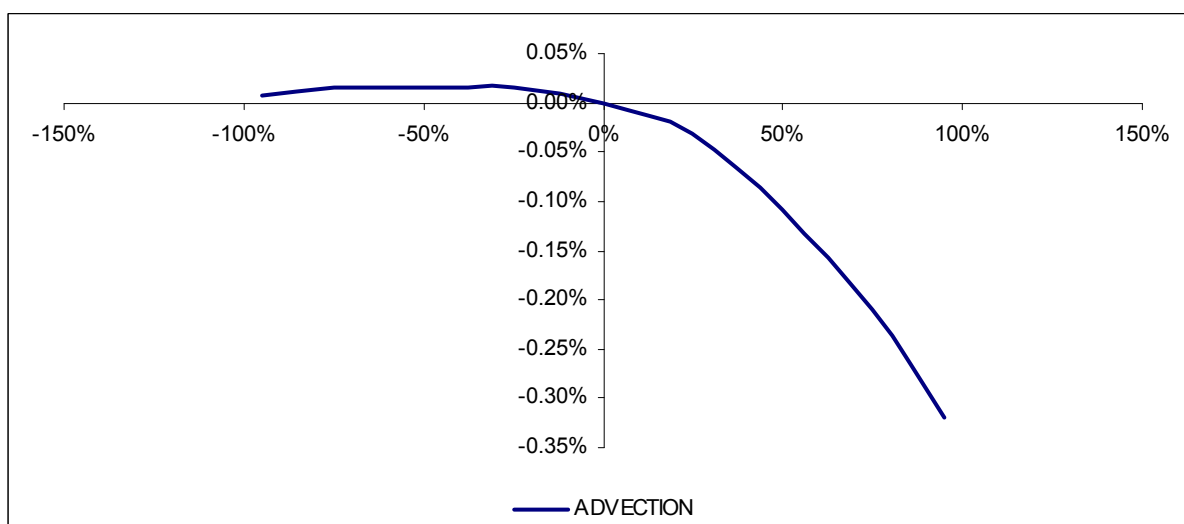
Έγινε ανάλυση ευαισθησίας ως προς τις δύο αυτές παραμέτρους, παροχή (Q) και συγκέντρωση ρύπου (C) του κυρίως ποταμού. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας στο Σενάριο 2 παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.21 που ακολουθεί.



Σχήμα 4.21. Ανάλυση ευαισθησίας για παροχή (Q) και συγκέντρωση ρύπου (C) του κυρίως ρεύματος ποταμού ως προς τη συγκέντρωση ρύπου στην έξοδο του ποταμού.

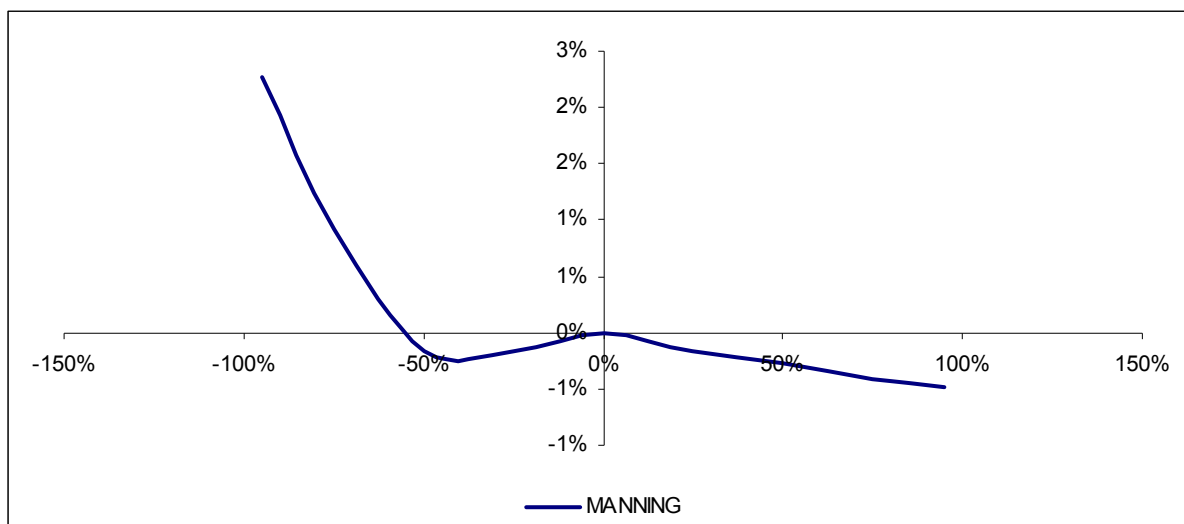
Παρατηρείται ότι και στις δύο περιπτώσεις, είτε δηλαδή εξετάζεται η φόρτιση δια μέσω του κυρίως ποταμού είτε δια μέσω σημειακής πηγής, η επίδραση που έχουν η συγκέντρωση και η παροχή είναι πρακτικά η ίδια. Μεταβολή των παραμέτρων αυτών έχει προφανώς επίδραση στη μάζα του ρύπου που μεταφέρεται κατάντη, ωστόσο τα φαινόμενα διασποράς και διάχυσης δε φαίνεται να έχουν καμία περαιτέρω επίδραση στη μεταφορά του ρύπου.

Στη συνέχεια εξετάστηκε η επίδραση του συντελεστή διασποράς (Advection Coefficient) στην κατάντη συγκέντρωση του ρύπου. Τα αποτελέσματα προσομοιώσεων για μεταβαλλόμενο συντελεστή διασποράς παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.22 που ακολουθεί.



Σχήμα 4.22. Επίδραση συντελεστή διασποράς (advection coefficient) στην κατάντη συγκέντρωση του ρύπου.

Αντίστοιχα, εξετάστηκε η επίδραση του συντελεστή Manning στην κατάντη συγκέντρωση του ρύπου. Τα αποτελέσματα προσομοιώσεων με μεταβαλλόμενο συντελεστή Manning παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.23 που ακολουθεί.



Σχήμα 4.23. Επίδραση συντελεστή Manning στην κατάντη συγκέντρωση του ρύπου.

Και στις δύο περιπτώσεις παρατηρείται ότι η μεταβολή του συντελεστή διασποράς και του συντελεστή Manning επηρεάζει την κατάντη συγκέντρωση του ρύπου.

Όσον αφορά στο συντελεστή διασποράς, αν και η επίδρασή του είναι πρακτικά αμελητέα, είναι αναμενόμενο να οδηγεί σε μεταβολές των κατάντη συγκεντρώσεων. Ουσιαστικά, η διασπορά του ρύπου οδηγεί στην αραίωσή του στον κυρίως όγκο νερού του ποταμού σε σύγκριση με τη μετωπική συγκέντρωσή του στην περίπτωση που δεν υπάρχει διασπορά.

Όσον αφορά στο συντελεστή Manning, εμφανίζεται μια τάση μείωσης της κατάντη συγκέντρωσης του ρύπου με την αύξησή του αν και αυτή είναι επίσης πρακτικά αμελητέα. Είναι πιθανό η χρήση μεγαλύτερων (ή αντίστοιχα μικρότερων τιμών) από αυτές που επιλέχθηκαν να αναδείξουν τη σημασία του Manning στην μεταβολή των κατάντη συγκεντρώσεων. Παρ' όλα αυτά, ο Chow (1988) για κατασκευασμένα κανάλια (όπως το κατάντη τμήμα του άξονα του ποταμού) προτείνει τιμές Manning n από 0.01 έως 0.5.

4.3 Ποιοτικό μοντέλο

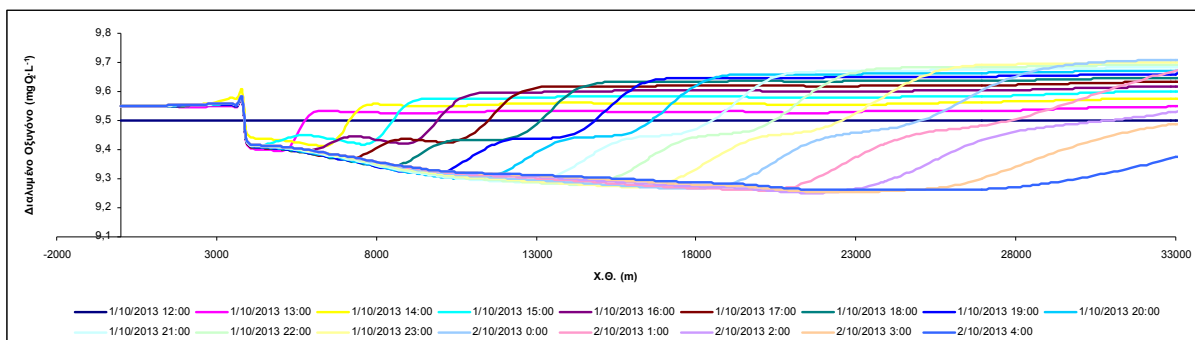
4.3.1 Αποδόμηση οργανικής ύλης

Εξετάστηκε η απόκριση του μοντέλου για την περίπτωση που είναι ενεργή η διεργασία της αποδόμησης οργανικής ύλης. Πραγματοποιήθηκε προσομοίωση υπό τις ίδιες συνθήκες με το Σενάριο 2 (βλ. Κεφ. 4.2.2). Σημειώνεται ότι η είσοδος του BOD γίνεται σε χρόνο $t=0$ τόσο όσον αφορά στη σημειακή πηγή όσο και στον κύριο όγκο του ποταμού.

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης προκύπτει μια σαφής εικόνα της χωρικής και χρονικής μεταβολής της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου και του BOD.

4.3.1.1 Διαλυμένο οξυγόνο

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης όσον αφορά στην κατανομή του DO παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.24.



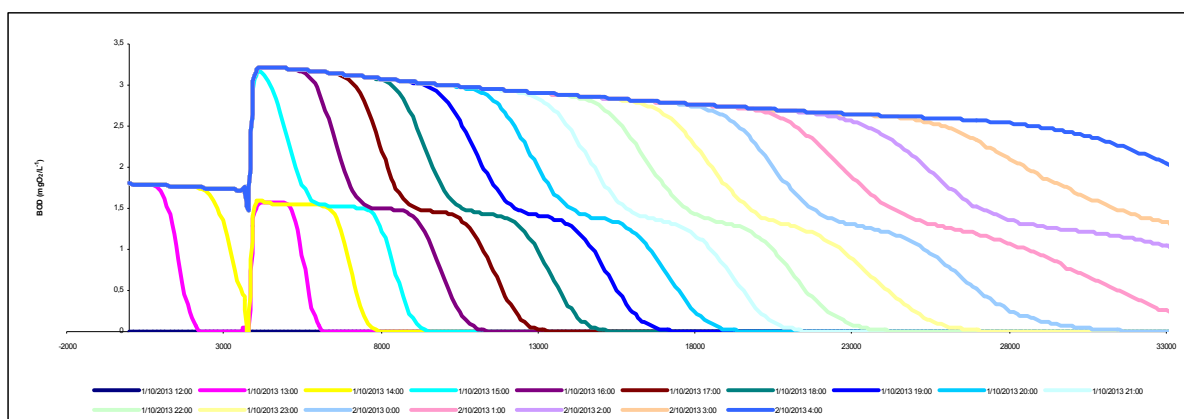
Σχήμα 4.24. Χωρική και χρονική κατανομή των συγκεντρώσεων Διαλυμένου Οξυγόνου με ενεργή τη διεργασία Αποδόμησης οργανικής ύλης.

Εξετάζοντας το φαινόμενο χωρικά, παρατηρείται μια έντονη μείωση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου κατάντη της θέσης όπου εισέρχεται το οργανικό φορτίο από τη σημειακή πηγή ($X.Θ. = 3.929,49$ m). Κάτι τέτοιο είναι αναμενόμενο καθώς το οξυγόνο καταναλώνεται κατά την οξείδωση της οργανικής ύλης που εισέρχεται στη συγκεκριμένη θέση.

Εξετάζοντας την κατανομή συγκεντρώσεων από χρονικής απόψεως, παρατηρείται μια σταδιακή μείωση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου κατάντι της θέσης συμβολής. Η εικόνα αυτή, στην ουσία αποτυπώνει τη σταδιακή διάδοση του οργανικού φορτίου κατάντι της θέσης συμβολής μέσω συμμεταφοράς και διασποράς, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα τη σταδιακή μείωση του διαλυμένου οξυγόνου σε θέσεις στα κατάντι του ποταμού.

4.3.1.2 BOD

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης όσον αφορά στην κατανομή του BOD παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.24.



Σχήμα 4.25. Χωρική και χρονική κατανομή των συγκεντρώσεων BOD με ενεργή τη διεργασία Αποδόμησης οργανικής ύλης.

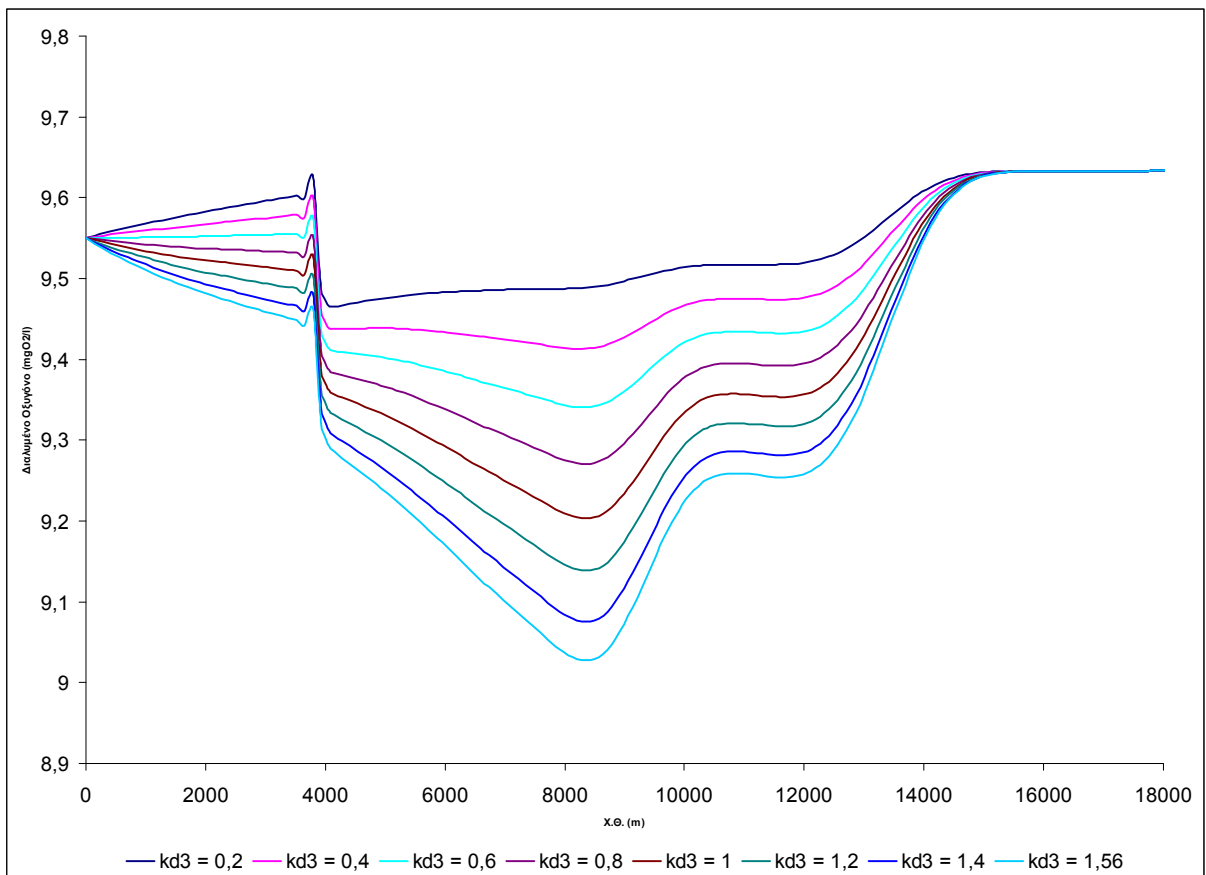
Εξετάζοντας το φαινόμενο χωρικά, παρατηρείται μια έντονη αύξηση της συγκέντρωσης του BOD κατάντι της θέσης όπου εισέρχεται το οργανικό φορτίο από τη σημειακή πηγή (Χ.Θ. = 3.929,49 m). Κάτι τέτοιο είναι αναμενόμενο καθώς η συγκέντρωση του BOD από το ρεύμα της σημειακής πηγής είναι σημαντικά μεγαλύτερη αυτής του κυρίως όγκου του ποταμού.

Εξετάζοντας την κατανομή συγκεντρώσεων από χρονικής απόψεως, αρχικά παρατηρείται συγχρόνως η αύξηση των συγκεντρώσεων των κατάντι θέσεων λόγω μεταφοράς του BOD από τον κύριο όγκο του ποταμού, και στη συνέχεια γίνεται μια περαιτέρω αύξηση λόγω της έγχυσης του φορτίου BOD από τη σημειακή πηγή. Προκύπτει επομένως η κατανομή που φαίνεται στο Σχήμα 4.25, που αντιστοιχεί σε δύο αλεπάλληλες βηματικές επιβολές φορτίου BOD (μία από τον κύριο όγκο του ποταμού και μία από τη σημειακή πηγή). Ωστόσο,

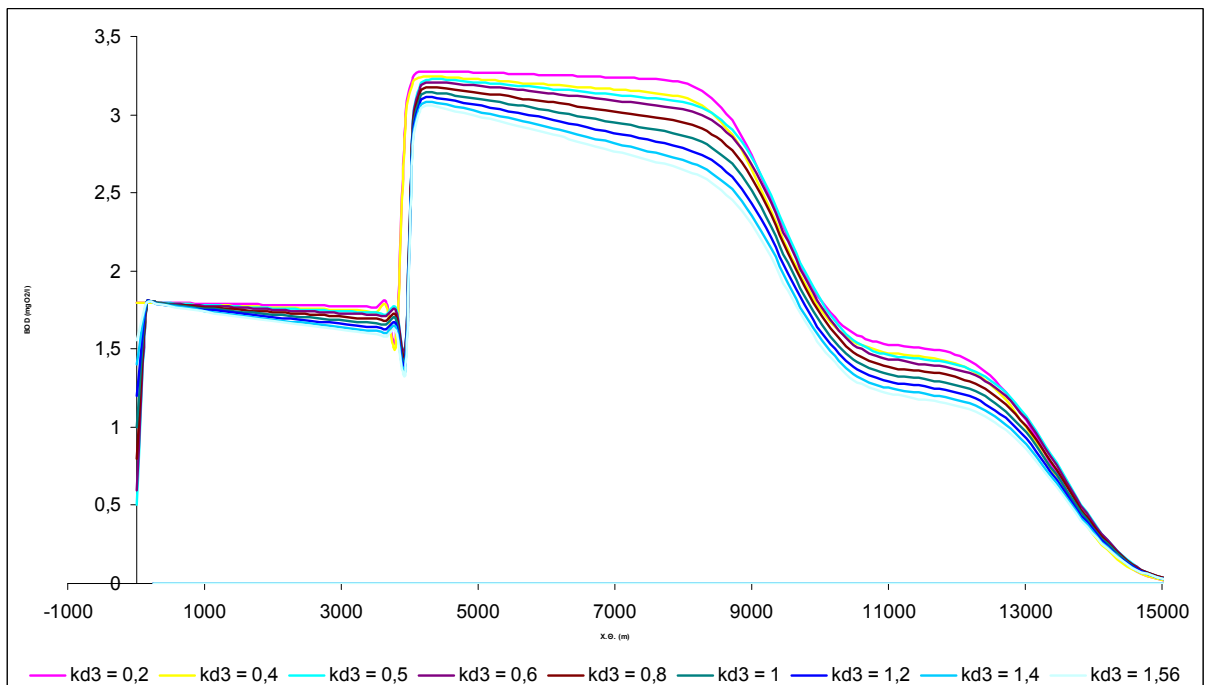
παράλληλα με το φαινόμενο της μεταφοράς του BOD στις κατάντη θέσεις, είναι φανερή η κατανάλωση του BOD με αποτέλεσμα οι συγκεντρώσεις που τείνουν να διαμορφωθούν να είναι χαμηλότερες από εκείνη της θέσης σημειακής πηγής.

4.3.1.3 Αξιολόγηση επίδρασης συντελεστή Αποδόμησης οργανικής ύλης (K3)

Όπως προέκυψε από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τις συγκεντρώσεις BOD και DO, αυτή επηρεάζεται όχι μόνο από τα φαινόμενα μεταφοράς αλλά και από τη διεργασία αποδόμησης οργανικής ύλης οδηγώντας σε μείωση των συγκεντρώσεων BOD και DO. Ο ρυθμός με τον οποίο πραγματοποιείται η συγκεκριμένη διεργασία ρυθμίζεται από το συντελεστή αποδόμησης οργανικής ύλης (K3). Επιχειρήθηκε η αξιολόγηση της επίδρασης του συγκεκριμένου συντελεστή στις συγκεντρώσεις DO και BOD. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν διαδοχικές προσομοιώσεις για διάφορες τιμές του συντελεστή K3 και εξετάστηκε η χωρική κατανομή του DO και του BOD για μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή από την έναρξη της προσομοίωσης ($t = 6h$). Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αυτών όσον αφορά στο DO και στο BOD παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.26 και Σχήμα 4.27 αντίστοιχα.



Σχήμα 4.26. Χωρική επίδραση του συντελεστή K_3 στη συγκέντρωση Διαλυμένου Οξυγόνου.



Σχήμα 4.27. Χωρική επίδραση του συντελεστή K_3 στη συγκέντρωση BOD.

Από τα παραπάνω σχήματα προκύπτει το συμπέρασμα ότι η μεταβολή του συντελεστή K_3 επηρεάζει σημαντικά τις συγκεντρώσεις τόσο του DO όσο και του BOD. Συγκεκριμένα, αύξηση του συντελεστή K_3 οδηγεί σε μείωση των συγκεντρώσεων του DO και του BOD. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς, όπως φαίνεται από τη σχέση 3.31, ο ρυθμός της διεργασίας αποδόμησης οργανικού άνθρακα είναι ανάλογος του συντελεστή K_3 .

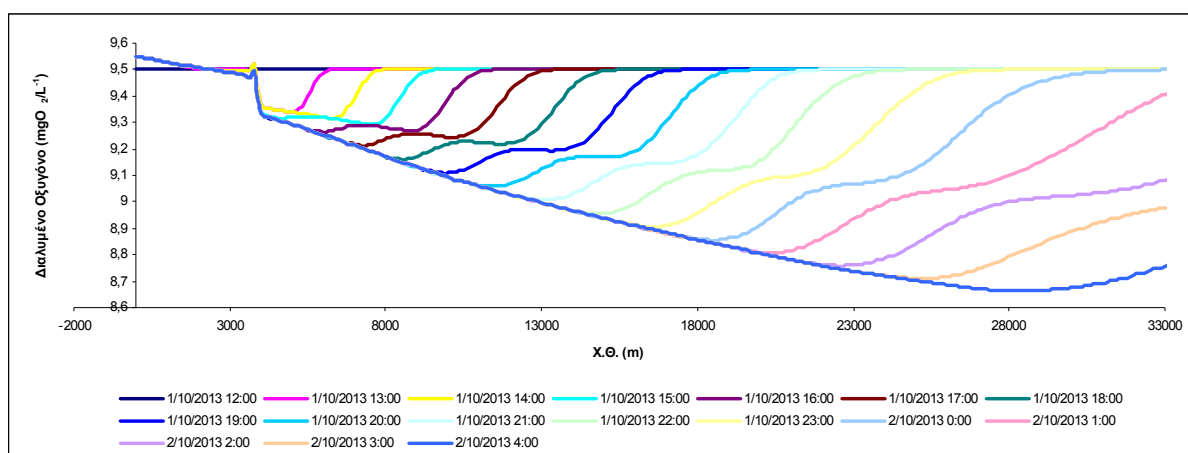
4.3.2 Επαναερισμός

Εξετάστηκε η απόκριση του μοντέλου για την περίπτωση που είναι ενεργή και η διεργασία του επαναερισμού πέρα από τη διεργασία αποδόμησης οργανικής ύλης. Οι συνθήκες προσομοίωσης διατηρήθηκαν όμοιες με αυτές των προηγούμενων σεναρίων.

Σημειώνεται ότι η είσοδος του BOD γίνεται σε χρόνο $t=0$ τόσο όσον αφορά στη σημειακή πηγή όσο και στον κύριο όγκο του ποταμού.

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης προκύπτει μια σαφής εικόνα της χωρικής και χρονικής μεταβολής της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου και του BOD.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης όσον αφορά στην κατανομή του DO παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.28.



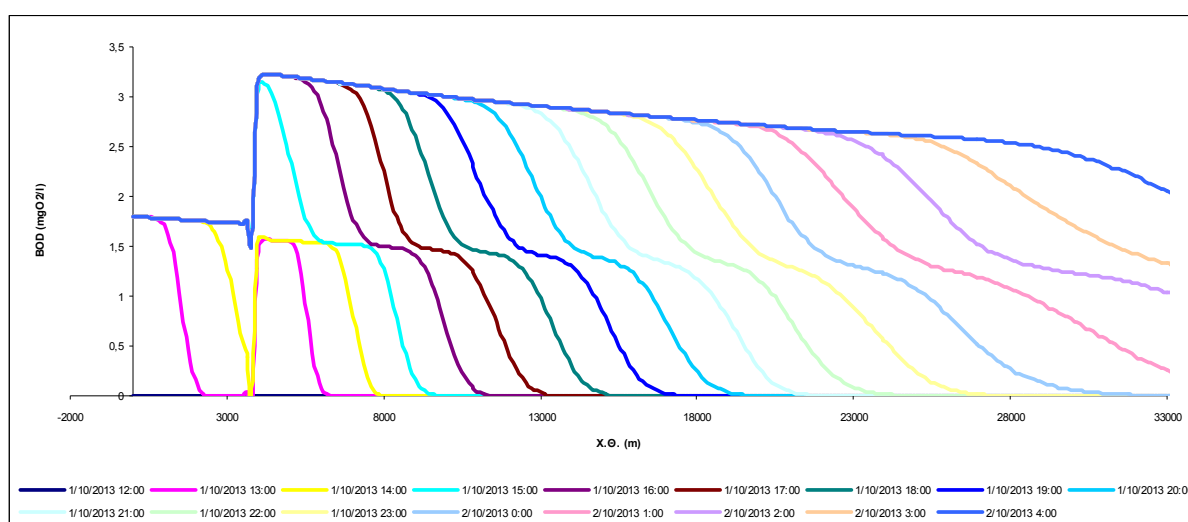
Σχήμα 4.28. Χωρική και χρονική κατανομή των συγκεντρώσεων Διαλυμένου Οξυγόνου με ενεργή τη διεργασία Επαναερισμού.

Εξετάζοντας το φαινόμενο χωρικά, παρατηρείται μια έντονη μείωση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου κατάντη της θέσης όπου εισέρχεται το οργανικό φορτίο από τη

σημειακή πηγή, όπως δηλαδή και στο προηγούμενο όπου ήταν ενεργοποιημένη μόνο η διεργασία της αποδόμησης οργανικού άνθρακα. Ωστόσο, δεν παρατηρούνται αυξημένες συγκεντρώσεις DO στις διάφορες θέσεις κατάντη της σημειακής πηγής σε σχέση με τις συγκεντρώσεις που προέκυψαν από την αντίστοιχη προσομοίωση χωρίς επαναερισμό.

Εξετάζοντας το φαινόμενο χρονικά, επίσης δεν παρατηρείται κάποια αξιοσημείωτη αλλαγή των συγκεντρώσεων DO σε σχέση με τις συγκεντρώσεις που προέκυψαν από την αντίστοιχη προσομοίωση χωρίς επαναερισμό

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης όσον αφορά στην κατανομή του BOD παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.24.



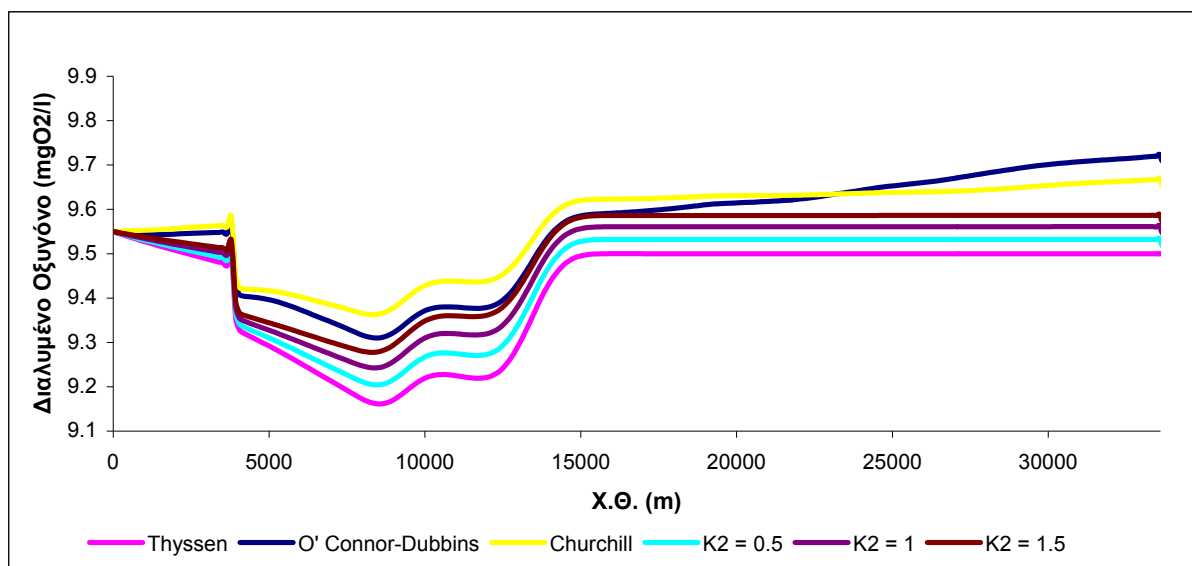
Σχήμα 4.29. Χωρική και χρονική κατανομή των συγκεντρώσεων BOD με ενεργή τη διεργασία Επαναερισμού.

Εξετάζοντας το φαινόμενο χωρικά, παρατηρείται μια έντονη αύξηση της συγκέντρωσης του BOD κατάντη της θέσης όπου εισέρχεται το οργανικό φορτίο από τη σημειακή πηγή (X.Θ. = 3.929,49 m), αντίστοιχα με την προσομοίωση χωρίς επαναερισμό. Και σε αυτή την περίπτωση δηλαδή, ο επαναερισμός δε φαίνεται να επηρέασε τις συγκεντρώσεις BOD.

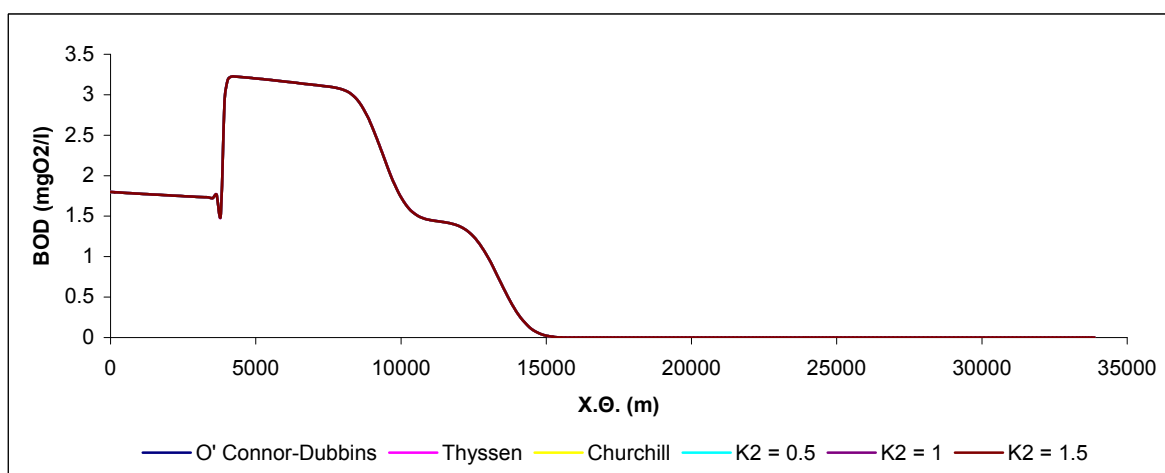
Αντίστοιχα, και από χρονικής άποψης, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δεν εμφανίζουν κάποια διαφορά σε σχέση με την προσομοίωση χωρίς επαναερισμό.

Το φαινόμενο της μη επίδρασης της διεργασίας επαναερισμού μπορεί, ενδεχομένως, να αποδοθεί σε δύο παράγοντες. Αφ'ενός, υπάρχει το ενδεχόμενο οι συνθήκες ροής του ποταμού (υποκρίσιμη ροή, χαμηλές ταχύτητες ροής, μεγάλες στάθμες) να οδηγούν σε μειωμένες τιμές της σταθεράς επαναερισμού, καταργώντας πρακτικά την επίδραση της συγκεκριμένης διεργασίας. Αφ'ετέρου, υπάρχει το ενδεχόμενο η εξίσωση επαναερισμού που χρησιμοποιήθηκε, η εξίσωση Ο' Connor-Dubbins (βλ. Σχέση 3.23) να είναι ακατάλληλη για τις συνθήκες ροής του ποταμού της προσομοίωσης. Για να αποκλειστεί αυτό το ενδεχόμενο, έγινε δοκιμή προσομοίωσης της διεργασίας επαναερισμού χρησιμοποιώντας εναλλακτικά και τους υπόλοιπους συντελεστές επαναερισμού ώστε να διαπιστωθεί η επίδρασή τους στα αποτελέσματα του μοντέλου όσον αφορά στις συγκεντρώσεις BOD και DO.

Για το σκοπό της αξιολόγησης της επίδρασης των εκάστοτε συντελεστών επαναερισμού (K_2) στις συγκεντρώσεις DO και BOD, πραγματοποιήθηκαν διαδοχικές προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας τις διάφορες σχέσεις υπολογισμού του συντελεστή K_2 , (βλ. σχέσεις 3.23 έως (3.27)) και εξετάστηκε η χωρική κατανομή του DO και του BOD για μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή από την έναρξη της προσομοίωσης ($t = 6h$). Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αυτών όσον αφορά στο DO και στο BOD παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.26 και Σχήμα 4.27 αντίστοιχα.



Σχήμα 4.30. Κατανομή συγκεντρώσεων DO βάσει των διαφόρων σχέσεων υπολογισμού του συντελεστή επαναερισμού (K_2).



Σχήμα 4.31. Κατανομή συγκεντρώσεων BOD βάσει των διαφόρων σχέσεων υπολογισμού του συντελεστή επαναερισμού (K_2).

Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, όσον αφορά στο DO, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η επιλογή μεταξύ των διαφόρων σχέσεων υπολογισμού του συντελεστή K_2 έχει μια μικρή επίδραση στις υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις DO. Προκύπτει μάλιστα, ότι η εξίσωση O' Connor-Dubbins που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της προηγούμενης ενότητας οδηγεί σε μειωμένη επίδραση της διεργασίας επαναερισμού στις συγκεντρώσεις DO.

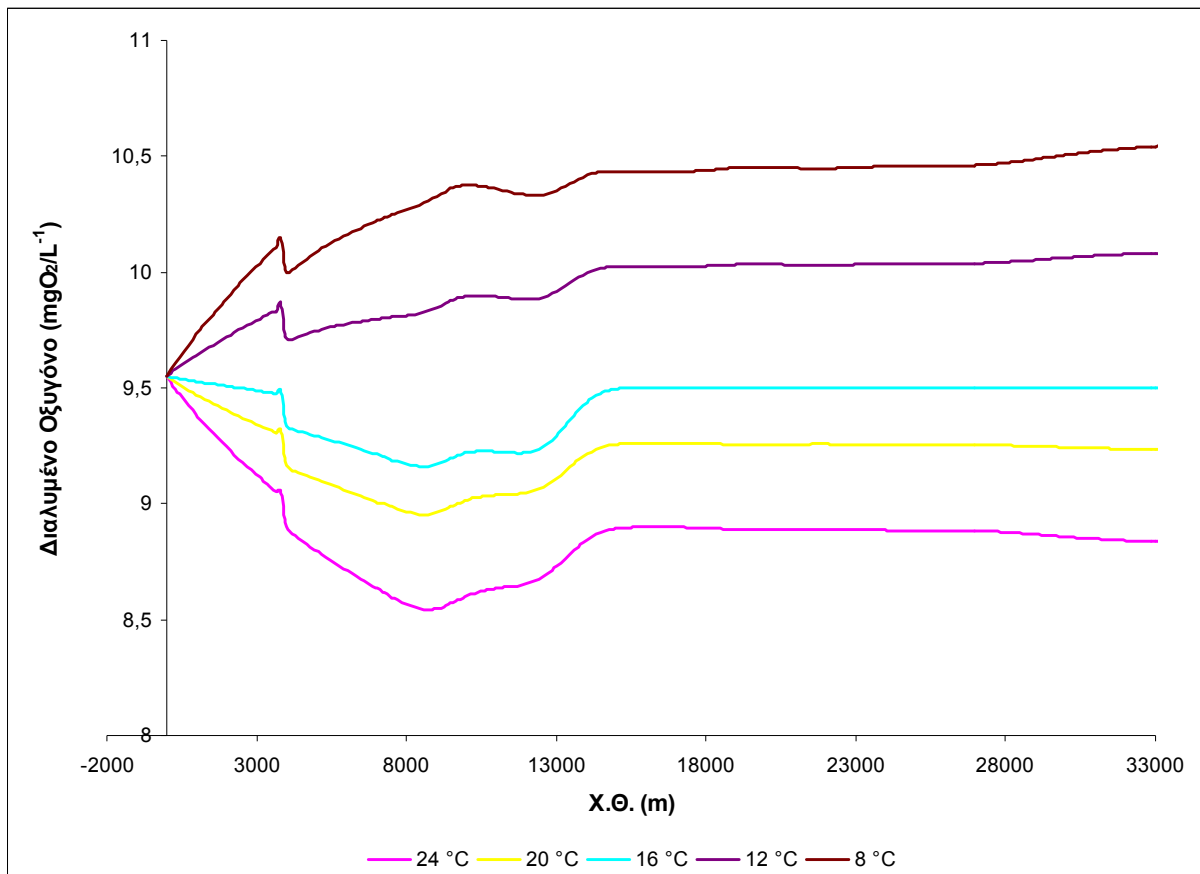
Αντίθετα, όσον αφορά στο BOD, από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων (βλ. Σχήμα 4.31), η επιλογή μεταξύ των διαθέσιμων σχέσεων υπολογισμού του συντελεστή K_2 δεν έχει πρακτικά καμία επίδραση στις συγκεντρώσεις του DO για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Προκύπτει τελικά το συμπέρασμα ότι οι αμελητέες επιδράσεις της διεργασίας επαναερισμού στις συγκεντρώσεις του BOD και DO στις προσομοιώσεις που διεξήχθησαν δεν οφείλονται σε αδόκιμη επιλογή της σχέσης υπολογισμού του συντελεστή K_2 , αλλά στο γεγονός ότι οι συνθήκες ροής του ποταμού δεν επιτρέπουν στη διεργασία επαναερισμού να ασκήσει έντονη επίδραση στο ποτάμι.

4.3.3 Θερμοκρασία

Εξετάστηκε η επίδραση της θερμοκρασίας στις συγκεντρώσεις DO και BOD στο ποτάμι τόσο χωρικά όσο και χρονικά. Για το σκοπό αυτό, εκτελέστηκαν προσομοιώσεις σε συνθήκες ίδιες με αυτές των σεναρίων των προηγούμενων ενοτήτων σε διάφορες θερμοκρασίες (8, 12, 16, 20 και 24 °C).

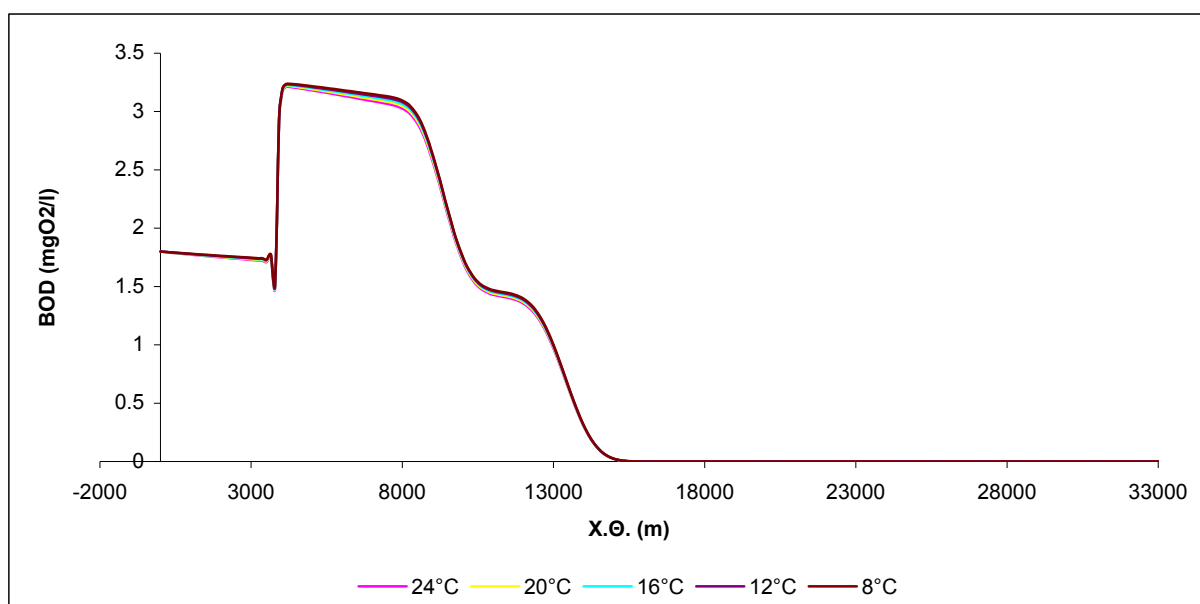
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης όσον αφορά στην κατανομή του DO παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.32, όπου καταγράφεται η κατανομή των συγκεντρώσεων Διαλυμένου Οξυγόνου κατά μήκος του ποταμού για μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή από την έναρξη της προσομοίωσης ($t = 6 \text{ h}$).



Σχήμα 4.32. Κατανομή συγκεντρώσεων DO βάση των διαφόρων θερμοκρασιών.

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι φανερό ότι η επίδραση της θερμοκρασίας στις συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου είναι ιδιαίτερα έντονη. Αυτό ήταν άλλωστε αναμενόμενο για τη συγκεκριμένη εφαρμογή και μπορεί να αποδοθεί σε δύο λόγους. Αφ'ενός η μεταβολή της θερμοκρασίας οδηγεί σε μεταβολή του ρυθμού της διεργασίας αποδόμησης οργανικού άνθρακα και κατ'επέκταση στο ρυθμό κατανάλωσης διαλυμένου οξυγόνου, κάτι που έχει την αντίστροφη επίδραση στη συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου. Δηλαδή μείωση της θερμοκρασίας οδηγεί σε μείωση του ρυθμού κατανάλωσης διαλυμένου οξυγόνου και κατά συνέπεια άυξηση των συγκεντρώσεων διαλυμένου οξυγόνου κατά μήκος του ποταμού. Αφετέρου, η μεταβολή της θερμοκρασίας οδηγεί σε μεταβολή της συγκέντρωσης κορεσμού για το οξυγόνο στο νερό. Έτσι, στην εφαρμογή που εκτελέστηκε, δεδομένου ότι η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στο νερό ήταν ήδη κοντά στη συγκέντρωση κορεσμού ($DO_{in} = 9,55$), αυτός ο παράγοντας είχε ιδιαίτερη βαρύτητα.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης όσον αφορά την επίδραση της θερμοκρασίας στην κατανομή του BOD παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.33.

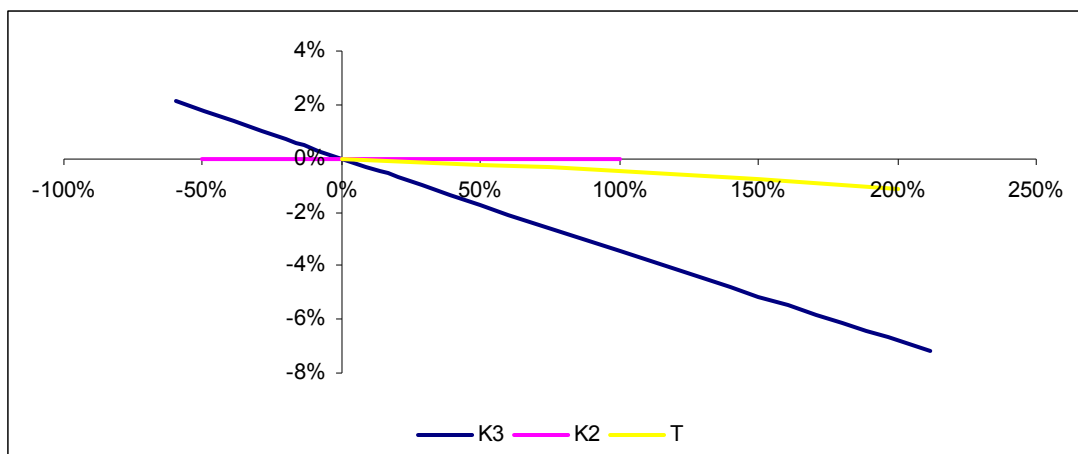


Σχήμα 4.33. Κατανομή συγκεντρώσεων BOD βάση των διαφόρων θερμοκρασιών.

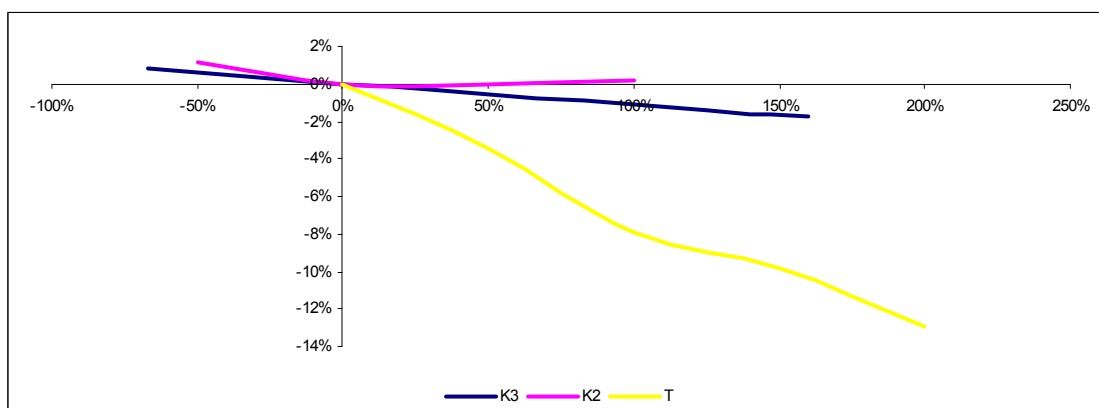
Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, η επίδραση της θερμοκρασίας όσον αφορά στις συγκεντρώσεις BOD είναι πολύ μικρή. Αν και αυτό είναι αντίθετο από το αναμενόμενο αποτέλεσμα, μια πιθανή εξήγηση που μπορεί να δοθεί είναι ότι η ποιοτική μεταβολή του DO είναι αντίθετη αυτής του ρυθμού αποδόμησης οργανικού άνθρακα με αποτέλεσμα ο συνδυασμός των δυο φαινομένων να οδηγεί σε μικρές μεταβολές του BOD στο ποτάμι. Για παράδειγμα, η αύξηση της θερμοκρασίας, οδηγεί σε αύξηση της σταθεράς του ρυθμού αποδόμησης οργανικού άνθρακα λόγω θερμοκρασιακής εξάρτησης αυτού μέσω της συνάρτησης Arrhenius. Παράλληλα όμως, η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε μείωση των συγκεντρώσεων DO στο ποτάμι, ειδικά αν αυτές κυμαίνονται σε επίπεδα κοντά στον κορεσμό. Η μείωση του DO έχει την αντίθετη επίδραση στο ρυθμό αποδόμησης οργανικού άνθρακα. Έτσι, ενδεχομένως ο συνδυασμός των δύο αυτών φαινομένων να είναι η αιτία της συνολικά αμελητέας επίδρασης της θερμοκρασίας στις συγκεντρώσεις BOD.

4.3.4 Ανάλυση ευαισθησίας ποιοτικών παραμέτρων

Στο ποιοτικό μοντέλο εξετάστηκε η επίδραση των συντελεστών K3 (σταθερά αποδόμησης οργανικής ύλης στους 20 °C), K2 (σταθερά επαναερισμού) και T (θερμοκρασία), στη κατάντη συγκέντρωση του BOD και του DO. Έγινε ανάλυση ευαισθησίας ως προς τις τρεις αυτές παραμέτρους, αρχικά ως προς το BOD και στη συνέχεια ως προς το DO, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται στα Σχήματα που ακολουθούν.



Σχήμα 4.34. Επίδραση των συντελεστών K3, K2 και T στην κατάντη συγκέντρωση του BOD.



Σχήμα 4.35. Επίδραση των συντελεστών K3, K2 και T στην κατάντη συγκέντρωση του DO.

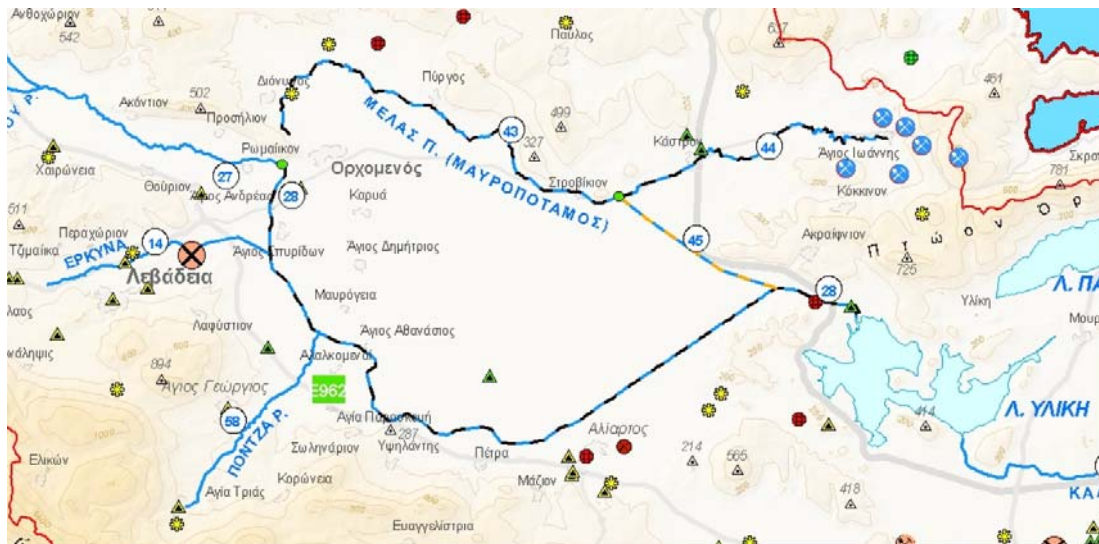
Από την ανάλυση ευαισθησίας προκύπτει το συμπέρασμα ότι και οι τρεις παράμετροι έχουν αρνητική επίδραση στην κατάντη συγκέντρωση του ρύπου, δηλαδή αύξησή τους οδηγεί σε μείωση της συγκέντρωσης.

Στην περίπτωση του BOD, σημαντικότερη επίδραση έχει ο συντελεστής K3 (συντελεστής αποδόμησης οργανικού άνθρακα), ακολουθούμενος από τη θερμοκρασία ενώ ο συντελεστής επαναερισμού (K2) φαίνεται να μην επηρεάζει.

Στην περίπτωση του DO, σημαντικότερη επίδραση έχει θερμοκρασία ακολουθούμενη από το συντελεστή K3 (BOD Degradation) τη θερμοκρασία ενώ ο συντελεστής επαναερισμού (K2) φαίνεται να μην επηρεάζει. Εντούτοις, για χαμηλές τιμές των παραμέτρων αυτών υπερίσχυει η επίδραση του συντελεστή επαναερισμού (K2).

4.3.5 Εφαρμογή στον Βοιωτικό Κηφισό

Επόμενο ακόλουθο των παραπάνω εφαρμογών είναι η προσομοίωση ενός πραγματικού ποτάμιου συστήματος. Η εφαρμογή θα πραγματοποιηθεί στον Βοιωτικό Κηφισό αφ' ενός γιατί έχει ήδη σχεδιαστεί το υδροδυναμικό μοντέλο και αφ' ετέρου γιατί είναι μια περιοχή που βρίσκεται υπό μεγάλη πίεση: στη Λεκάνη απορροής του Βοιωτικού Κηφισού έχουν βάση Βιομηχανικές μονάδες, Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ), ζωοτροφικές μονάδες καθώς επίσης και ΧΥΤΑ. Επιπλέον, οι οικισμοί που δεν εξυπηρετούνται από ΕΕΛ, η ελεύθερη κτηνοτροφία και οι καλλιέργειες αποτελούν μη σημειακές επιφανειακές πηγές ρύπανσης.



Υπόμνημα / Legend	
Χώρος Υγειονομικής Ταφής Απορριμάτων/ Waste Landfill	Κτηνοτροφικές Μονάδες IPPC/ Livestock Units IPPC
Ενεργός/ Active	Κτηνοτροφικές Μονάδες/ Livestock Units
Χώρος Ανεξέλεγκτης Διάθεσης Απορριμάτων/ Area of uncontrolled waste disposal	Θέση Λατομείου/ Quarry Site
Ενεργός/ Active	Θέση Μεταλλείου/ Mining Site
Ανενεργός/ Inactive	Βιομηχανικές Μονάδες IPPC/ IPPC Industrial Units
Ενεργοί ΕΕΛ/ Active UWWTP	Βιομηχανικές Μονάδες/ Industrial Units
Προτεραιότητας Α/ Priority A	
Προτεραιότητας Β/ Priority B	
Προτεραιότητας Γ/ Priority C	

Σχήμα 4.36. Πηγές ρύπανσης στη περιοχή του Βοιωτικού Κηφισού (ΥΠΕΚΑ, 2013)

Στην παρούσα εργασία θα θεωρηθούν οι εξής πηγές:

- i. Σημειακή πηγή στον Έρκυνα ποταμό (ΕΕΛ και βιομηχανία)
- ii. Διάχυτες πηγές στο κατάντη τμήμα του ποταμού λόγω κτηνοτροφικών μονάδων
- iii. Εισροή στην ανάντη οριακή συνθήκη (σύμφωνα με μετρήσεις)

Τα φορτία από τις επι μέρους πηγές παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.13 που ακολουθεί:

Πίνακας 4.13. Φορτία για τις επι μέρους πηγές.

	Μετρήσεις	DO (mg·L ⁻¹)	BOD (mg·L ⁻¹)	Q (m ³ ·s ⁻¹)
Σημειακή πηγή Έρκυνα: Βιομηχανία	ΕΜΠ ¹	5.00	10.00	0.40
Σημειακή πηγή Έρκυνα: ΕΕΛ	ΥΠΕΚΑ ²	0	0.05	0.40
Εισροή ανάντη	ΕΜΠ ¹	9.55	1.80	12.30
Διάχυτες πηγές	ΥΠΕΚΑ ²	0	92.85	0.1

¹Μετρήσεις από το ΕΜΠ

²Μετρήσεις ΥΠΕΚΑ(2013)

Για τον υπολογισμό του διάχυτου φορτίου ρύπανσης έγινε η θεώρηση ότι από τους 292.8 tn BOD/y που απορρέουν επιφανειακά στην ΛΑΠ του Βοιωτικού Κηφισού το 10% αφορά στο τελευταίο τμήμα του ποταμού. Στο τμήμα μελέτης θεωρήθηκε ότι εισέρχεται μόνο το 10% της συνολικής φόρτισης της λεκάνης διότι το τελευταίο τμήμα του Βοιωτικού Κηφισού αποτελεί μόνο ένα μικρό τμήμα της ΛΑΠ του Βοιωτικού Κηφισού και στη περιοχή εδράζονται κυρίως καλλιέργειες και σε μικρότερο ποσοστό ζωοτροφικές μονάδες και οικισμοί που δεν εξυπηρετούνται από ΕΕΛ.

Βάσει των δεδομένων του Πίνακα 4.13 και των συμπερασμάτων από την ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, πραγματοποιήθηκε η σταδιακή προσομοίωση του Βοιωτικού Κηφισού με σκοπό τα αποτελέσματα του μοντέλου να καταλήξουν σε τελικές τιμές εξόδου τις εξής: BOD = 0.5-2.4 mg·L⁻¹ και DO = 8-11 mg·L⁻¹

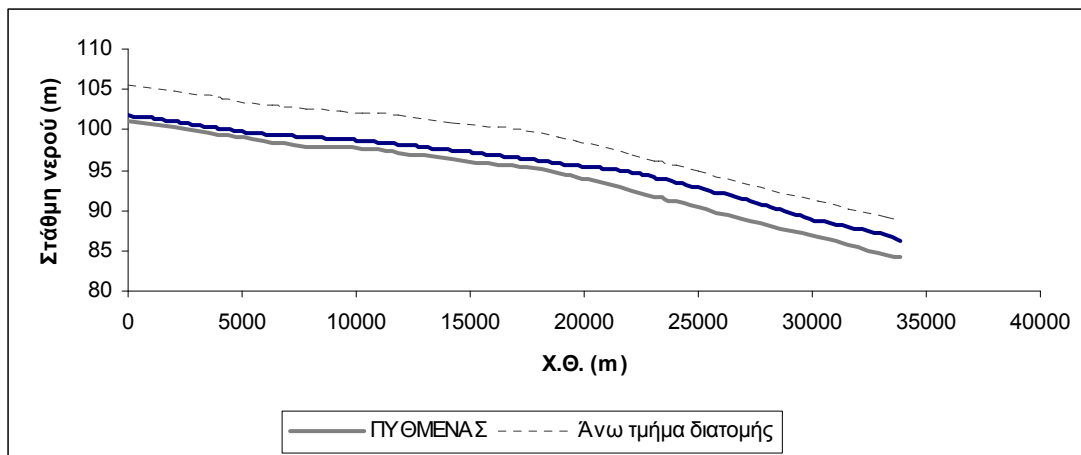
4.3.5.1 Υδροδυναμικό μοντέλο

Το υδροδυναμικό μοντέλο για την εφαρμογή στο Βοιωτικό Κηφισό είναι όμοιο με το υδροδυναμικό μοντέλο που καταστρώθηκε στο Κεφάλαιο 4.1 (άξονας ποταμού, οριακές συνθήκες, υδροδυναμικές παράμετροι) με την εξαίρεση ότι έχει προστεθεί μια επιπλέον οριακή συνθήκη, για κατανεμημένα φορτία, η οποία αντιπροσωπεύει τις διάχυτες πηγές ρύπανσης. Συνοπτικά, παρατίθενται παρακάτω οι οριακές συνθήκες για το μοντέλο HD:

Πίνακας 4.14. Οριακές Συνθήκες HD μοντέλου

Τύπος οριακής συνθήκης	Δεδομένο Εισόδου	Τιμή (m ³ ·s ⁻¹)	Χ.Θ. (m)	(εως) Χ.Θ.(m)
Ανοιχτό όριο	Παροχή	12.3	0	-
Ανοιχτό όριο	Q-h καμπύλη	-	33877.763	-
Σημειακή πηγή	Παροχή	0.4	3929.4929	-
Διάχυτη πηγή	Παροχή	0.01	22119.254	26940.43115

Η προσομοίωση του Βοιωτικού Κηφισσού μόνο με το HD μοντέλο δίνει ως αποτέλεσμα το υδραυλικό προφίλ του ποταμού σε μόνιμη κατάσταση όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.37:



Σχήμα 4.37. Υδραυλικό προφίλ Βοιωτικού Κηφισσού.

Οι βασικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.15:

Πίνακας 4.15. Παράμετροι προσομοίωσης

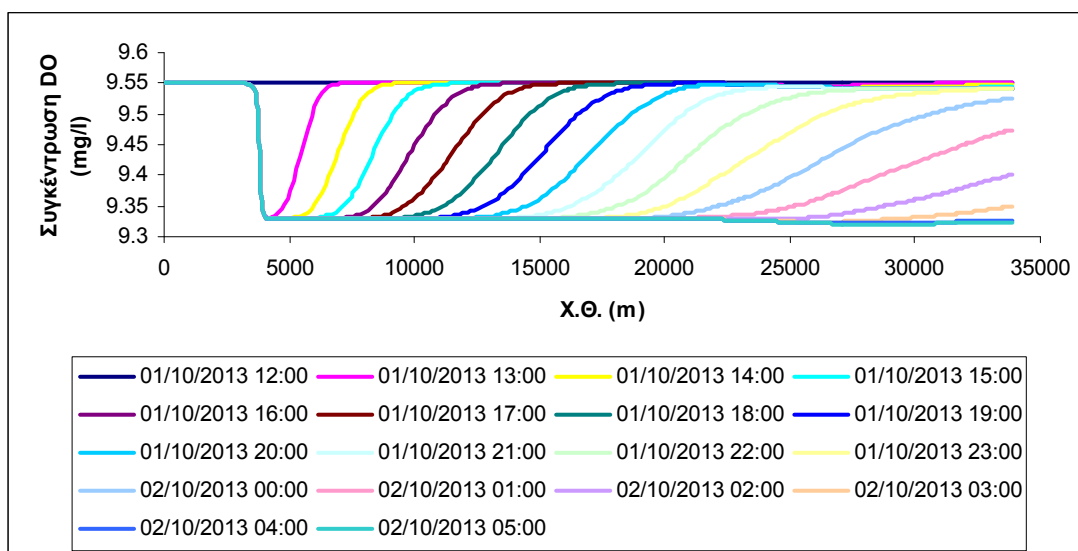
Παράμετρος	Τιμή
Μοντέλο	HD
Χρόνος προσομοίωσης (d)	5 μέρες
Περίοδος	1/1/2013-10/1/2013
Χρονικό βήμα (sec)	60
Max Δx	300
Συντελεστής Manning n	0.035/0.018*
Παροχή εισροής (m ³ /s)	12.3
Καμπύλη Q-h	ΕΜΠ
Προσέγγιση κύματος	Κινηματικό

4.3.5.2 Μοντέλο μεταφοράς-διασποράς

Στη συνέχεια προστέθηκε το μοντέλο AD. Σύμφωνα με την ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε αποδεκτά αποτελέσματα δίνουν όλοι οι συντελεστές διασποράς εκτός πολύ μικρών ή πολύ μεγάλων τιμών. Επιλέχθηκε τιμή συντελεστή διασποράς ίση με 50. Οι οριακές συνθήκες για το AD μοντέλο παρατίθενται στον Πίνακα 4.14.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του ποταμού για το μοντέλο HD-AD παρουσιάζονται παρακάτω.

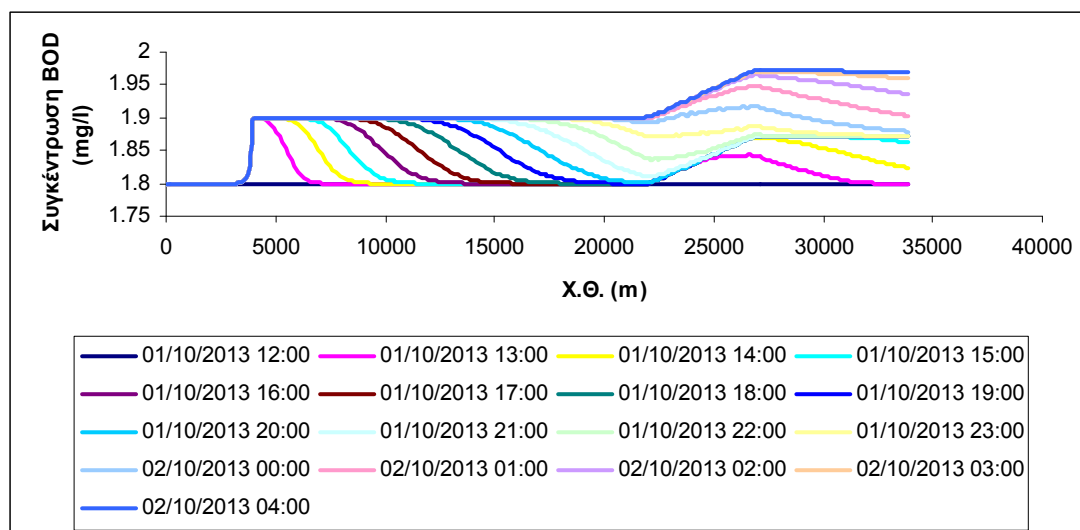
Όσον αφορά στη χωρική και χρονική μεταβολή της συγκέντρωσης DO στο ποτάμι, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.38.



Σχήμα 4.38. Χρονική και χωρική κατανομή του DO για το μοντέλο HD-AD

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης προκύπτει ότι η συγκέντρωση του DO μειώνεται έντονα κατάντη της θέσης της σημειακής πηγής ενώ η μεταβολή αυτή μεταδίδεται στις κατάντη θέσεις του ποταμού σταδιακά μέσω των φαινομένων μεταφοράς (συμμεταφορά και διασπορά). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη σταδιακή μείωση της συγκέντρωσης του DO σε όλες τις κατάντη θέσεις μετά τη σημειακή πηγή μέχρι να αποκατασταθεί μια σταθερή συγκέντρωση σε κάθε θέση του ποταμού (μόνιμη κατάσταση) περίπου 16 ώρες μετά την επιβολή της φόρτισης. Δεδομένου ότι σε αυτή την προσομοίωση δε λαμβάνονται υπόψη διεργασίες αποδόμησης οργανικού φορτίου, η μείωση του DO κατάντη της σημειακής πηγής μπορεί να αποδοθεί στην αραιώση που προκύπτει από την είσοδο ρεύματος με χαμηλή συγκέντρωση σε DO από τη σημειακή πηγή.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ως προς τη χωρική και χρονική μεταβολή της συγκέντρωσης BOD στο ποτάμι (Σχήμα 4.39).



Σχήμα 4.39. Χρονική και χωρική κατανομή του BOD για το μοντέλο HD-AD

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ως προς τη συγκέντρωση του BOD, παρατηρείται μια έντονη αύξηση της συγκέντρωσής του στη θέση της σημειακής πηγής, ενώ χρονικά αποτυπώνεται η σταδιακή μεταφορά του BOD στις κατάντη θέσεις μέσω συμμεταφοράς και διασποράς. Επίσης, αποτυπώνεται και η επίδραση των διάχυτων πηγών οργανικού φορτίου από τη Χ.Θ. = 22.119,25 μέχρι τη Χ.Θ. = 26.940,43, που οδηγεί σε περαιτέρω αύξηση της συγκέντρωσης BOD λόγω της εισερχόμενης μάζας ενώ η παροχή των διάχυτων πηγών είναι πρακτικά αμελητέα ($0,4 \text{ m}^3/\text{s}$).

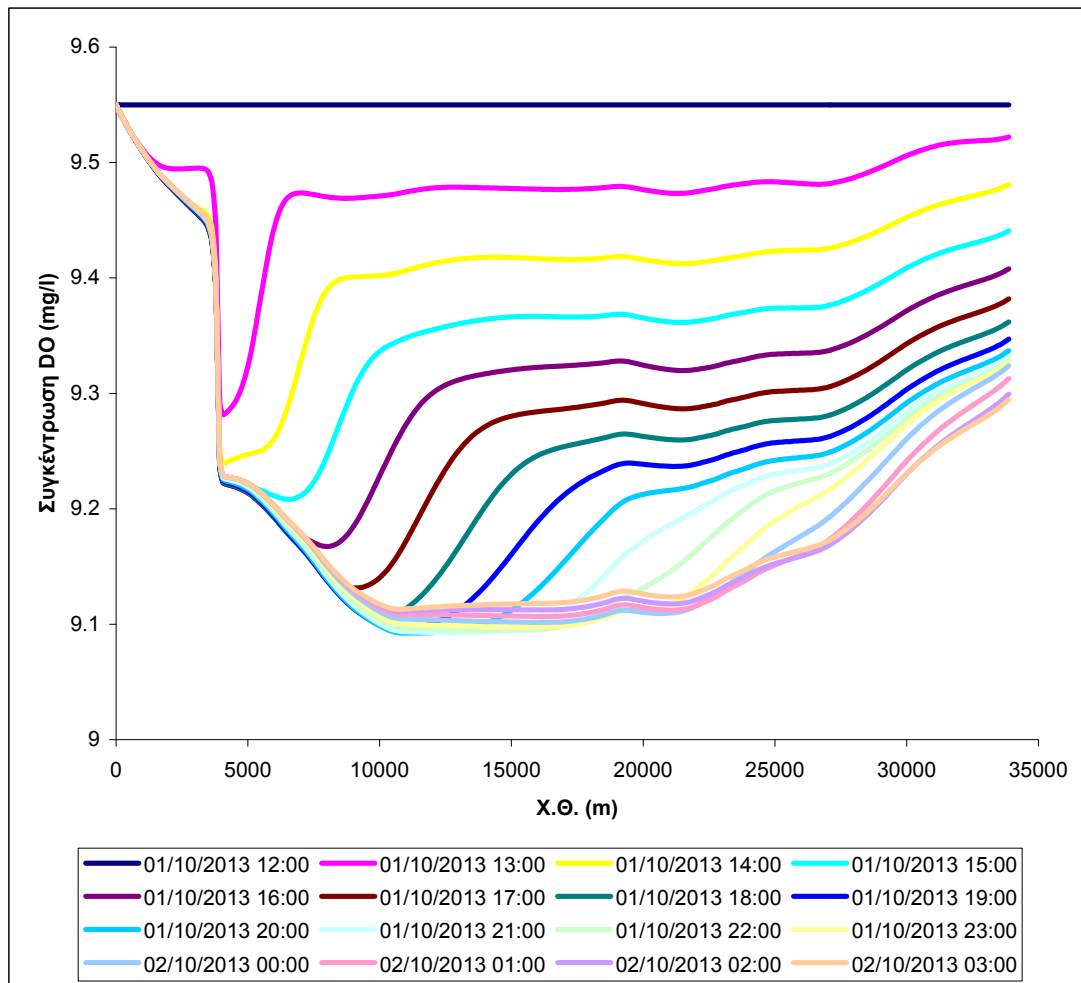
4.3.5.3 Ποιοτικό Μοντέλο ECO Lab

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε εφαρμογή του ποιοτικού μοντέλου, μέσω του οποίου μελετήθηκε η επίδραση των διεργασιών αποδόμησης οργανικού άνθρακα και επαναερισμού στις συγκεντρώσεις των DO και BOD.

Για τις προσομοιώσεις του ποιοτικού μοντέλου, εφαρμόστηκαν μεγάλες τιμές για το συντελεστή αποδόμησης οργανικού άνθρακα ($K_3 = 1,56 \text{ gO}_2/\text{m}^2/\text{d}$) ενώ ο συντελεστής επαναερισμού (K_2) προσδιορίστηκε μέσω της εξίσωσης Churchill που δίνει μεγάλους ρυθμούς επαναερισμού σε σχέση με τις υπόλοιπες εξισώσεις υπολογισμού του ρυθμού

επαναερισμού. Οι συγκεκριμένες επιλογές έγιναν καθώς οι τιμές για τους συντελεστές αυτούς που είχαν χρησιμοποιηθεί στις προσομοιώσεις των προηγούμενων σεναρίων έδιναν πολύ μικρούς ρυθμούς αποδόμησης οργανικού άνθρακα και επαναερισμού αντίστοιχα.

Όσον αφορά στην προσομοίωση των συγκεντρώσεων DO, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.40 που ακολουθεί:



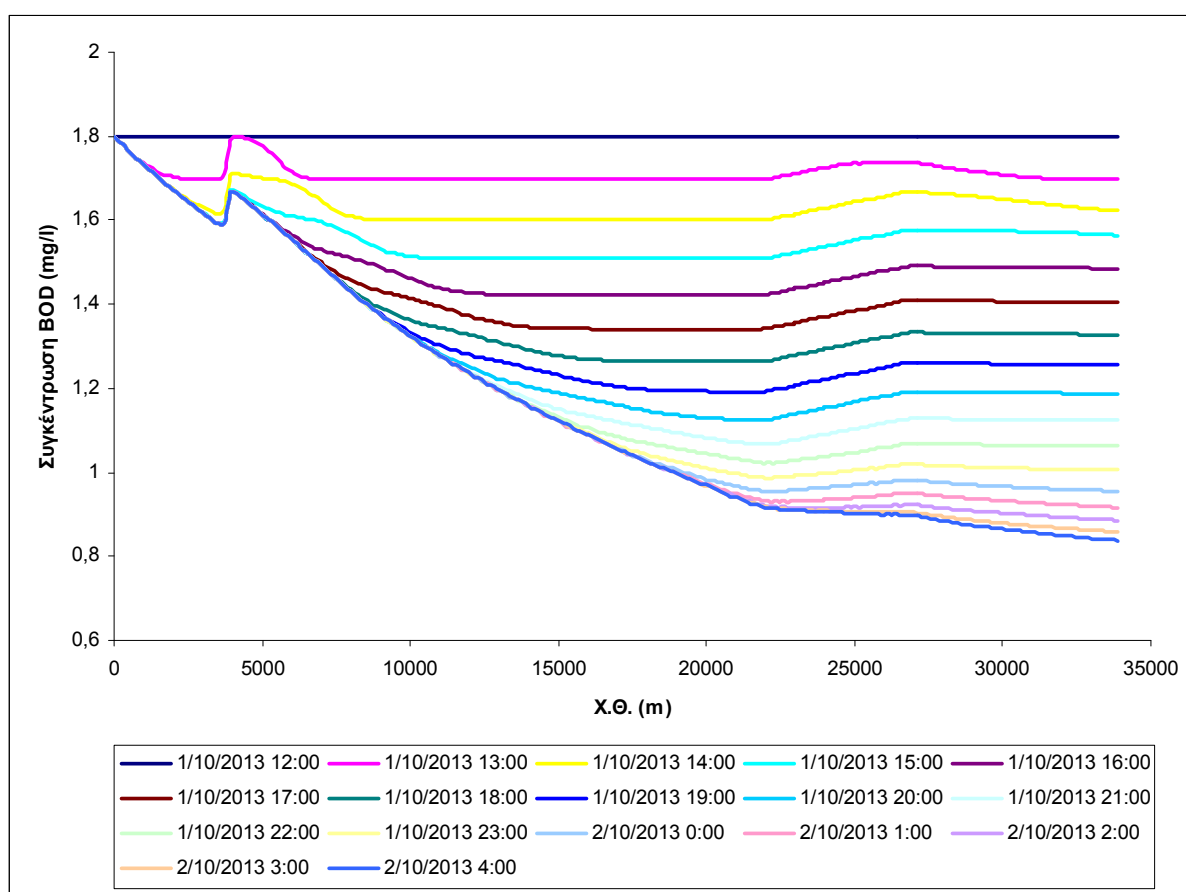
Σχήμα 4.40. Χρονική και χωρική κατανομή του DO από την εφαρμογή του HD-ECO Lab.

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, αρχικά παρατηρείται μια έντονη μείωση του DO κατάντη της θέσης της σημειακής πηγής. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην κατανάλωση DO που προκύπτει λόγω διεργασιών αποδόμησης του οργανικού άνθρακα που εισέρχεται από τη σημειακή πηγή και εν μέρει στην αραίωση του DO που προκύπτει λόγω της μειωμένης συγκέντρωσης του DO που εισέρχεται από τη σημειακή πηγή.

Επιπλέον, διακρίνεται μια περαιτέρω ελαφρά μείωση του DO κατάντη της θέσης Χ.Θ. = 22.119,25 που αντιστοιχεί στη θέση όπου βρίσκονται κατανεμημένες οι διάχυτες πηγές οργανικής φόρτισης. Και πάλι, η επακόλουθη μείωση μπορεί να αποδοθεί στη διεργασία αποδόμησης του εισερχόμενου οργανικού άνθρακα.

Τέλος, έντονη παρατηρείται η επίδραση της διεργασίας επαναερισμού, που αποτυπώνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης DO στα κατάντη τμήματα του ποταμού. Να σημειωθεί ότι σε αυτή την προσομοίωση ο συντελεστής επαναερισμού (K2) προσδιορίστηκε μέσω της εξίσωσης Churchill, που δίνει αυξημένους ρυθμούς επαναερισμού σε σχέση με την εξίσωση O' Connor-Dubbins που χρησιμοποιήθηκε στις εφαρμογές του προηγούμενου κεφαλαίου.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης όσον αφορά στις συγκεντρώσεις του BOD (βλ. Σχήμα 4.41)



Σχήμα 4.41. Χρονική και χωρική κατανομή του BOD από την εφαρμογή του HD-ECO Lab.

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης όσον αφορά στην κατανομή των συγκεντρώσεων BOD, παρατηρείται καταρχήν μια αύξηση του BOD στο σημείο όπου βρίσκεται η σημειακή πηγή, καθώς και μια αυξητική τάση στο σημείο όπου εισήχθησαν οι διάχυτες πηγές, κάτι που ήταν αναμενόμενο. Εντούτοις, ιδιαίτερα έντονη εμφανίστηκε η επίδραση του συντελεστή αποδόμησης οργανικού φορτίο όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Παρά την ύπαρξη τόσο της σημειακής πηγής όσο και των διάχυτων πηγών οργανικού άνθρακα, οι συγκεντρώσεις του BOD στην έξοδο του ποταμού διαμορφώνονται σε ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα μέσα σε διάστημα 16 ωρών όπου και αποκαθίστανται μόνιμες συνθήκες. Το αποτέλεσμα αυτό βρίσκεται σε συμφωνία και με τις υψηλές συγκεντρώσεις DO που αποκαθίστανται στο τέλος της προσομοίωσης (βλ. Σχήμα 4.40).

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν ο έλεγχος και η εφαρμογή του λογισμικού MIKE 11/ ECO Lab σε ποτάμια συστήματα. Τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την μελέτη και εφαρμογή του λογισμικού είναι τα εξής:

- Το MIKE 11/ ECO Lab είναι ένα πολύπλοκο λογισμικό το οποίο μπορεί να προσαρμοστεί και να ανταποκριθεί ικανοποιητικά και σε απλά μοντέλα προσομοίωσης.
- Το MIKE 11/ ECO Lab αφορά στη προσομοίωση της μονοδιάστατης ροής και της ποιοτικής κατάστασης ενός ποτάμιου συστήματος.
- Ο πυρήνας της προσομοίωσης είναι το υδροδυναμικό μοντέλο το οποίο αποτελεί το συνδυαστικό κρίκο με το μοντέλο μεταφοράς-διασποράς (προσομοίωση φυσικών διεργασιών μεταφοράς-διασποράς) και το ποιοτικό μοντέλο (ποιοτική ανάλυση).
- Τα δεδομένα εισαγωγής που απαιτούνται για να τρέξει ικανοποιητικά το ποιοτικό μοντέλο MIKE 11/ECO Lab είναι τα ελάχιστα δυνατά. Οι υπόλοιπες παράμετροι είναι δυνατό να προσδιοριστούν έμμεσα ή από σχετική βιβλιογραφία . Εναλλακτικά μπορούν να εισαχθούν απευθείας οι προτεινόμενες, από την DHI, τιμές.
- Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στις προτεινόμενες τιμές των παραμέτρων καθώς αποτελούν είτε γενικές τιμές ή μέσους όρους που πιθανώς δεν ανταποκρίνονται στο υπό εξέταση σύστημα είτε τιμές που αφορούν συνθήκες που επικρατούν στη Δανία (πχ περιβαλλοντικές συνθήκες).
- Η πολυπλοκότητα του λογισμικού απαιτεί είτε έμπειρο χρήστη είτε καλή γνώση του θεωρητικού υπόβαθρου πριν την έναρξη προσομοιώσεων με το λογισμικό.

Όσον αφορά τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του λογισμικού MIKE 11/ ECO Lab είναι τα εξής:

- Πραγματοποιήθηκαν για το υδροδυναμικό μοντέλο προσομοιώσεις σε διάφορες παροχές και εξετάστηκε η επίδραση της στάθμης του νερού. Το μοντέλο ανταποκρίθηκε ικανοποιητικά.

- Πραγματοποιήθηκαν για το HD-AD δύο σενάρια. Το πρώτο σενάριο αφορά μια σημειακή πηγή σε ένα ποτάμι και εξετάστηκε η επίδραση της συγκέντρωσης και της παροχής στη συγκέντρωση τυχαίου συντηρητικού ρύπου κατάντη της σημειακής πηγής. Το δεύτερο σενάριο αφορά εισροή ρυπαντικού φορτίου στην αρχή του άξονα του ποταμού και ταυτόχρονη σημειακή πηγή κατάντη της αρχής του άξονα. Εξετάζεται η αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο 'κυμάτων' του ρύπου. Επιπλέον, εξετάζεται η επίδραση της παροχής και της συγκέντρωσης στην εισροή και οι συντελεστές διασποράς και Manning.
- Από την ανάλυση ευαισθησίας για το μοντέλο μεταφοράς-διασποράς προέκυψε ότι η παράμετρος που καθορίζει τη χωροχρονική μεταβολή του ρύπου είναι η εισερχόμενη μάζα ανεξάρτητα από το μέγεθος της παροχής και της συγκέντρωσης.
- Πραγματοποιήθηκαν για το HD-ECO Lab προσομοιώσεις για διάφορες τιμές των μεταβλητών K2 (συντελεστής επαναερισμού), K3 (ρυθμός αποδόμησης οργανικού άνθρακα). και T (θερμοκρασία). Για κάθε μεταβλητή που εξετάστηκε, οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν σταθερές και ίσες με τις τιμές αναφοράς.
- Από την ανάλυση ευαισθησίας προέκυψε το συμπέρασμα ότι εκ των παραμέτρων K2 (συντελεστής επαναερισμού), K3 (ρυθμός αποδόμησης οργανικού άνθρακα). και T (θερμοκρασία), τη μεγαλύτερη επίδραση στη συγκέντρωση του BOD την έχει ο συντελεστής K3 (ρυθμός αποδόμησης οργανικού άνθρακα). Όσον αφορά στη συγκέντρωση DO τη μεγαλύτερη επίδραση την έχει η θερμοκρασία.
- Τέλος, έγινε εφαρμογή στο Βοιωτικό Κηφισό. Τα δεδομένα εισόδου προέρχονται από μετρήσεις του ΕΜΠ ανάντη της Κωπαίδας, στο ποταμό Έρκυνα και στην διώρυγα Καρδίτσας. Σκοπός της προσομοίωσης ήταν οι τελικές τιμές του DO και BOD να είναι εντός του εύρους τιμών που έχουν μετρηθεί στην έξοδο Καρδίτσας ύστερα από τη τροποποίηση των παραμέτρων σύμφωνα με τις αναλύσεις ευαισθησίας.
- Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ήταν ικανοποιητικά και οι τιμές στην έξοδο (διώρυγα Καρδίτσας) βρίσκονται εντός των ορίων για το BOD = $0,83 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (εύρος $0.5\text{-}2.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) και το DO = 9,29 (εύρος $8\text{-}11 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) αντίστοιχα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Γκέκας Β. και Πρωιμάκη Σ., 2000. *Φαινόμενα Μεταφοράς*. Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.
- Κυριάκου, Γ., Νικολάου, Α., Χρυσάφοπούλου, Ε., 2009. *Παρεμβάσεις για την ποιοτική και ποσοτική διαχείριση του υδάτινου δυναμικού των λεκανών απορροής του Κηφισού ποταμού*, ΤΕΕ, Λαμία.
- Μαμάσης, Ν., Κουτσογιάννης, Δ., 2004. *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας, Τεύχος 16: Μετρητικό σύστημα*. Ε.ΥΔ.Α.Π., Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Υ.Π.Ε.Κ.Α., 2013. *Σχέδιο διαχείρισης υδάτων: Υδατικό διαμέρισμα Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας (GR07)*, Ειδική γραμματεία υδάτων, Υ.Π.Ε.Κ.Α., Αθήνα
- Παπαλεξίου, Σ.Μ., Ευστρατιάδης, Α., 2009. *Εκτίμηση και πρόγνωση του πλημμυρικού κινδύνου με τη χρήση υδρολογικών μοντέλων και πιθανοτικών μεθόδων*, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Σκουληκάρης Χ.Χ., 2008. *Μαθηματική προσομοίωση για την βιώσιμη διαχείριση έργων υδατικών πόρων σε κλίμακα λεκάνης απορροής: Η περίπτωση του ποταμού Νέστου*. Τομέας Υδραυλικής και Τεχνικής Περιβάλλοντος, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- Τσιτσιλώνης, Σ., 2008. *Μεταπλημμυρική έρευνα και μελέτη αστραπιαίων πλημμυρών: Προσομοίωση του πλημμυρικού γεγονότος της 17/10/2006 στην Αλμυρίδα*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Χανιά.
- Χατζήμπρος, Κ., 2007. *Οικολογία – Οικοσυστήματα και προστασία του περιβάλλοντος*, Εκδόσεις Συμμετρία.
- Abbott, M.B., Ionescu, R., 1967. On the numerical computation of nearly horizontal flows, *Journal of Hydraulic Research* 5(2): 97-117.

- Anon., 2003. *MIKE 11 – A modeling system for Rivers and Channels: Short Introduction*, Danish Hydraulic Institute, Horsholm, Denmark.
- Anon., 2012. *Water quality WQ Templates – ECO Lab: Scientific Description*, Danish Hydraulic Institute, Horsholm, Denmark.
- Anon., 2012. *WQ Templates: Scientific Description*, Danish Hydraulic Institute, Horsholm, Denmark.
- Anon., 1996. *MIKE21: User Guide and Reference Manual*, Danish Hydraulic Institute, Horsholm, Denmark.
- Anon., 1996. *MIKE 3: Eutrophication Module, User Guide and Reference Manual*, Release 2.7, Danish Hydraulic Institute, Horsholm, Denmark.
- Anon., 2012. *AQUATOX: Modelling environmental fate and ecological effects in aquatic ecosystems. Volume 1: User's manual*, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Office of science and technology, Washington DC 20460.
- Anon., 2012. Heavy metal template, ECOlab Scientific Description, Danish Hydraulic Institute, Horsholm, Denmark.
- Arheimer, B., Olsson, J., 2001. *Integration and Coupling of Hydrological Models with Water Quality Models: Applications in Europe*. Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI).
- Chapra, S.C., Reckhow, K.H., 1983. Comment on "The effect of changes in the nutrient income on the condition of Lake Washington", *Society of Limnology and Oceanography*, Edmondson and Lehman.
- Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W., 1988. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill International Editions, Civil Engineering Series.
- Cox, B.A., 2003. A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland rivers, *The Science of the Total Environment*, 314–316, 303–334

- Cox, B.A., 2003. A review of currently available in-stream water-quality models and their applicability for simulating dissolved oxygen in lowland rivers, *The Science of the Total Environment* 314 –316, 335–377
- Jobson, H.E., 1996. *Prediction of Traveltime and Longitudinal Dispersion in Rivers and Streams*. USGS Water-Resources Investigations Report 96-4013.
- Moriasi, D.N, Wilson, B.N., Douglas-Mankin, K.R., Arnold, J.G., Gowda, P.H., 2012. Hydrologic and water quality models: use. calibration and validation, *American Society of Agricultural and Biological Engineers - Transactions of the ASABE*, Vol. 55(4): 1241-1247.
- Riecken, S., 1995. *A compendium of Water Quality Models*. Water quality branch environmental protection department, Ministry of environment, lands and parks, E.P.A.
- Rauch, W., Henze, M., Koncsos, L., Reichert, P., Shanahan, P., Somlyody, L., Vanrolleghem, P., 1998. *River water quality modeling: I. State of the art*, I.A.W.Q. Biennial International Conference, Vancouver, British Columbia, Canada.
- Ruskule, E., 2011. Water quality model description, *Environmental Technology Resources*, Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference, Volume 1.
- Streeter, H.W., Phelps, E.B., 1958. *A Study of the Pollution and Natural Purification of the Ohio River*, United States Department of Health.
- Tsakiris, G., Alexakis, D., 2012. *Water quality models: An overview*. European Water, E.W. Publications.
- Wang, Q., Li, S., Jia, P., Qi, C., Ding, F., 2013. A Review of Surface Water Quality Models, *The ScientificWorld Journal*, Volume 2013, Article ID 231768, 7 pages
- Whitehead, P.G., Williams, R.J., Lewis, D.R., 1997. Quality simulation along river systems (QUASAR): model theory and development, *Science of the Total Environment*, Vol. 194-195, pp. 447–456.

Wurbs, R.A., 2009. Dissemination of Generalized Water Resources Models in the United States, *Water International*, 23:3, 190-198

Zieminska-Stolarska, A., Skrzypski, J., 2012. Review of mathematical models of water quality, *Ecological Chemistry and Engineering*, 19(2):197-211.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Πίνακας 0.1. Πίνακας συμβόλων.

Σύμβολο	Περιγραφή	Μονάδες
Q	παροχή	$m^3 \cdot s^{-1}$
A	βρεχόμενη επιφάνεια	m^2
BOD	συγκέντρωση BOD	$mg \ O_2 \cdot L^{-1}$
BOD _b	συγκέντρωση σωματιδιακής οργανικής ύλης στο πυθμένα	$mg \ O_2 \cdot L^{-1}$
BOD _d	συγκέντρωση διαλυμένης οργανικής ύλης	$mg \ O_2 \cdot L^{-1}$
BOD _s	συγκέντρωση αιωρούμενης οργανικής ύλης	$mg \ O_2 \cdot L^{-1}$
C _i	συγκέντρωση της μεταβλητής i	$mg \cdot L^{-1}$
C	συντελεστής τριβής Chezy	
C ₂	όρος πηγής (παραγωγή η απώλεια μέσω αντίδρασης)	
C _r	ο αριθμός Cougntant	
C _s	συγκέντρωση κορεσμού οξυγόνου	$mg \ O_2 \cdot L^{-1}$
D	συντελεστής διασποράς	$m^2 \cdot s^{-1}$
Diff	συντελεστής διασποράς	
DO	συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου	$mg \ O_2 \cdot L^{-1}$
Dx, Dy, Dz	συντελεστής διασποράς	
F ₁ (H)	Φωτοπερίοδος (light dampening function)	
g	η επιτάχυνση της βαρύτητας	$m \cdot s^{-2}$
H	στάθμη νερού	m
HS_BOD	συγκέντρωση ημικορεσμού οξυγόνου για το BOD	$mg \ O_2 \cdot L^{-1}$
HS_SOD	συγκέντρωση ημικορεσμού οξυγόνου για το SOD	$mg \ O_2 \cdot L^{-1}$
I _r	εκπεμπόμενη θερμική ακτινοβολία	
I _s	η εισερχόμενη ηλιακή ενέργεια και	
k	συντελεστής εκμηδένισης φωτός	m^{-1}
K ₃	σταθερά αποδόμησης οργανικής ύλης στους 20 °C	d^{-1}
K _{b3}	σταθερά αποδόμησης σωματιδιακής οργανικής ύλης	d^{-1}
K _{d3}	σταθερά αποδόμησης διαλυμένης οργανικής ύλης στους 20 °C	d^{-1}
K _s	ρυθμός καθίζησης για το αιωρούμενο BOD _s	$m \cdot d^{-1}$
K _{s3}	σταθερά αποδόμησης αιωρούμενης οργανικής ύλης	d^{-1}
KSN	συγκέντρωση ημικορεσμού αζώτου	$mg \ N \cdot L^{-1}$
KSP	συγκέντρωση ημικορεσμού φωσφόρου	$mg \ P \cdot L^{-1}$
M	η μάζα	mg
n	αριθμός των διεργασιών που εμπλέκονται για τη συγκεκριμένη μεταβλητή	
P	πραγματική παραγωγή	$g \ O_2 \cdot m^2 \cdot d^{-1}$
Pc	Διεργασίες του ECO Lab	

Πίνακας 0.2. Πίνακας συμβόλων (συνέχεια).

Σύμβολο	Περιγραφή	Μονάδες
P_{max}	μέγιστη παραγωγή οξυγόνου το μεσημέρι	$g\ O_2 \cdot m^2 \cdot d^{-1}$
q	πλευρική εισροή	$m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$
q	η παροχή	$m^3 \cdot s^{-1}$
$q:$	η πλευρική ροή	
R	η υδραυλική ακτίνα	m
R_1	ρυθμός αναπνοής φωτοσυνθετών στους $20^\circ C$	$g\ O_2 \cdot m^2 \cdot d^{-1}$
R_2	ρυθμός αναπνοής ζώων και βακτηριδίων	$g\ O_2 \cdot m^2 \cdot d^{-1}$
Respiration	ρυθμός αναπνοής των φυτών, βακτηριδίων και ζώων	$g\ O_2 \cdot m^2 \cdot d^{-1}$
S_1	ρυθμός επαναιώρησης για το σωματιδιακό BOD_b	$m \cdot d^{-1}$
Sc	πηγές και δεξαμενές (sources and sinks)	
$Stv:$	όγκος νερού	m^3
T	θερμοκρασία του νερού	$^\circ C$
T_{amb}	η θερμοκρασία περιβάλλοντος	
t	ο χρόνος	s
t_{down}	χρόνος δύσης	
t_{up}	χρόνος ανατολής	
u, v, w	ταχύτητα ροής	$m \cdot s^{-1}$
v	μέση ταχύτητα	$m \cdot s^{-1}$
V	ταχύτητα	$m \cdot s^{-1}$
x	απόσταση	m
α	πραγματική σχετική διάρκεια της ημέρας	
A	η επιφάνεια της διατομής	m^2
α	συντελεστής διόρθωσης ορμής	
A	η επιφάνεια	m^2
Δx	το μήκος μεταξύ των δυο σημείων	m
E_x	ο συντελεστής της διαμήκους διασποράς	$m^2 \cdot s^{-1}$
θ_1	θερμοκρασιακός συντελεστής για φωτοσυνθετική αναπνοή/παραγωγή	
θ_2	θερμοκρασιακός συντελεστής για ετεροτροφική αναπνοή	
θ_3	θερμοκρασιακός συντελεστής Arrhenius	
θ_3	θερμοκρασιακός συντελεστής Arrhenius (SOD)	
θ_{b3}	θερμοκρασιακός συντελεστής Arrhenius (σωματιδιακό BOD)	
θ_{d3}	θερμοκρασιακός συντελεστής Arrhenius (διαλυμένο BOD)	
θ_{s3}	θερμοκρασιακός συντελεστής Arrhenius (αιωρούμενο BOD)	
I	κλίση του ποταμού	$m \cdot m^{-1}$
IN	συνολικό ανόργανο άζωτο	$mg\ N \cdot L^{-1}$
K	γραμμικός φθίνων συντελεστής	
K_2	σταθερά επαναερισμού στους $20^\circ C$	d^{-1}
M	συντελεστής Manning M	
σ	αριθμός Courant	
T	θερμοκρασία	$^\circ C$
T_a	πραγματική ώρα συσχετιζόμενη με το απόγευμα	
$\Phi:$	συντελεστής θερμοκρασίας	

