



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**



**Μαθηματική Προσομοίωση της Ρύπανσης στον
Ποταμό Καλαμά**

Γιαννούλης – Νικολάτος Σάββας

**Επιβλέπων: Α. Ι. Στάμου, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Αθήνα, Ιούλιος 2013**

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	3
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	5
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	6
ABSTRACT	7
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
1.1 Γενικά.....	8
1.2 Στόχος εργασίας	8
1.3 Περιγραφή διπλωματικής εργασίας	9
1.4 Δυσκολίες κατά τη μελέτη	9
1.5 Δομή εργασίας	9
2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	11
2.1 Γενικά.....	11
2.2 Κύρια τμήματα του ποταμού.....	14
2.3 Παραπόταμοι Καλαμά	15
3 ΔΙΑΘΕΣΙΜΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	17
3.1 Γενικά.....	17
3.2 Γεωμετρικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά	17
3.3 Παροχές.....	19
3.4 Πηγές ρύπανσης.....	22
3.4.1 Γενικά.....	22
3.4.2 Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ).....	22
3.4.3 Κτηνοτροφικές μονάδες.....	23
3.4.4 Βιομηχανικές μονάδες	25
3.4.5 Χώροι Ανεξέλεγκτης Διάθεσης Απορριμμάτων (ΧΑΔΑ)	26
3.4.6 Αστικά απόβλητα	27
3.4.7 Γεωργία.....	28
3.5 Μετρήσεις συγκέντρωσης και θερμοκρασίες.....	28
3.5.1 Γενικά.....	28
3.5.2 Συγκεντρώσεις ποιοτικών παραμέτρων.....	29
3.5.3 Θερμοκρασίες	32
4 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ	32
4.1 Μοντέλο υδραυλικής συμπεριφοράς.....	32
4.1.1 Γενικά.....	32
4.1.2 Υδροδυναμικά χαρακτηριστικά	33
4.1.3 Συντελεστής διασποράς D.....	33
4.1.4 Μετάβαση μεταξύ τμημάτων.....	34
4.2 Μοντέλο προσομοίωσης ποιοτικών χαρακτηριστικών	36
4.2.1 Γενικά.....	36
4.2.2 Διαφορικές εξισώσεις	36

4.2.3	Συντελεστής k	41
4.2.4	Λειτουργία μοντέλου.....	42
4.3	Επιβεβαίωση ορθότητας του μοντέλου.....	43
4.3.1	Γενικά.....	43
4.3.2	Αναλυτική λύση.....	43
4.3.3	Εφαρμογή αναλυτικής λύσης.....	44
4.3.4	Αποτελέσματα επιβεβαίωσης.....	44
4.4	Μοντέλο για μεταβλητό dx	48
5	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	53
5.1	Γενικά.....	53
5.2	Βαθμονόμηση του μοντέλου	53
5.3	Επιβεβαίωση.....	55
5.4	Σχολιασμός	59
6	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	60
6.1	Γενικά.....	60
6.2	Διακοπή απορροής κλειστής λεκάνης Ιωαννίνων	61
6.2.1	Περιγραφή και αποτελέσματα.....	61
6.2.2	Επιπτώσεις.....	62
6.3	Εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων στην υπολεκάνη Άσπρο	63
6.3.1	Περιγραφή και αποτελέσματα.....	63
6.3.2	Επιπτώσεις.....	65
6.4	Εγκατάσταση μεγάλης βιομηχανικής μονάδας στον Παραπόταμο ...	65
6.4.1	Περιγραφή και αποτελέσματα.....	65
6.4.2	Επιπτώσεις.....	67
6.5	Περίοδος χαμηλών παροχών	68
6.5.1	Περιγραφή και αποτελέσματα.....	68
6.5.2	Επιπτώσεις.....	70
7	ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	71
7.1	Αποτελέσματα προσομοίωσης	71
7.2	Αξιολόγηση ποιοτικής κατάστασης υδάτινων σωμάτων	71
8	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	74
8.1	Συμπεράσματα.....	74
8.2	Προτάσεις.....	75
9	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	76
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ		77
Εισαγωγή.....		77
Σημειακές πιέσεις.....		77
Πρόσθετα σχήματα από τη διαδικασία προσομοίωσης.....		90
Αποτελέσματα προσομοίωσης για την Τάφρο Λαψίστας.....		96
Προσδιορισμός πλάτους – Φωτογραφική τεκμηρίωση.....		100

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Αναστάσιο Στάμου, καθηγητή Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, ο οποίος υπήρξε ο επιβλέπων καθηγητής αυτής της εργασίας, για το χρόνο που μου αφιέρωσε και για το γεγονός ότι ήταν πάντα πρόθυμος να με βοηθήσει σε οποιοδήποτε πρόβλημα προέκυπτε.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους υποψήφιους διδάκτορες Ανθή Γκεσούλη, Γεωργία Παπαδονικολάκη και Γιάννη Νικηφοράκη για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφεραν.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την υποστήριξη που μου προσέφεραν σε όλη τη διάρκεια της φοίτησης μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διάθεση ρυπαντικών φορτίων στους ποταμούς επιφέρει σημαντικές επιπτώσεις στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των νερών τους και για το λόγο αυτό η προσομοίωση της μεταφοράς και κατανομής τους αποτελεί αντικείμενο έρευνας.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η δόμηση, βαθμονόμηση και επιβεβαίωση ενός μονοδιάστατου μαθηματικού μοντέλου για την προσομοίωση της ρύπανσης στον ποταμό Καλαμά. Το μοντέλο αυτό προσομοιώνει ορισμένα από τα βασικά ποιοτικά χαρακτηριστικά του ποταμού (διαλυμένο οξυγόνο, οργανικό φορτίο, φώσφορο και αμμωνία), λαμβάνοντας υπόψη τα γεωμορφολογικά και τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά του.

Αρχικά, συγκεντρώθηκαν όλα τα απαραίτητα στοιχεία που αφορούν στα χαρακτηριστικά του ποταμού και στις περιβαλλοντικές πιέσεις που ασκούνται στην περιοχή μελέτης. Παράλληλα, έγινε καταγραφή των διαθέσιμων μετρήσεων των ποιοτικών παραμέτρων κατά μήκος του ποταμού ώστε να είναι εφικτή η σύγκριση με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Έπειτα, δομήθηκε το μοντέλο, βαθμονομήθηκε με βάση μία περίοδο μετρήσεων ώστε να προσδιοριστούν οι τιμές των συντελεστών του και επιβεβαιώθηκε με βάση τις τιμές δύο άλλων περιόδων.

Τέλος, έγινε εφαρμογή του μοντέλου ώστε να εκτιμηθούν οι επιπτώσεις στον ποταμό Καλαμά για διάφορα σενάρια περιβαλλοντικών πιέσεων.

ABSTRACT

The disposal of pollutant loads in rivers entails substantial impact on the quality characteristics of their water and, therefore, the simulation of their transportation and distribution constitutes a subject of research.

The aim of the present dissertation was the structure, calibration and confirmation of a one-dimensional mathematical model to simulate the pollution of the Kalamas River. This model simulates some of the basic quality characteristics of the river (dissolved oxygen, organic load, phosphorus and ammonia), taking its geomorphologic and hydrodynamic characteristics into account.

First, the necessary data concerning the characteristics of the river as well as the environmental pressures exerted on the studied area were collected. In parallel, the available measurements of the quality parameters along the river were recorded in order for the comparison with the results of the simulation to be feasible.

Then, the model was structured, calibrated on the basis of a period of measurements so that the values of its factors could be determined, and was confirmed on the basis of the values of two other periods.

Finally, the model was applied so that the impact on the Kalamas River could be evaluated for different scenarios of environmental pressures.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Η προσομοίωση και η μελέτη της ρύπανσης ενός ποταμού αποτελεί σημαντική και δύσκολη διαδικασία. Πολλοί φορείς και μεγάλες εταιρείες ασχολούνται με την προσομοίωση ποιοτικών χαρακτηριστικών των ποταμών για την πρόβλεψη των πιθανών επιπτώσεων από μελλοντικές δράσεις ή ακόμα και για την εκτίμηση της παρούσας κατάστασης.

Η διαδικασία της προσομοίωσης είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη, καθώς οι ποταμοί δεν έχουν σταθερά χαρακτηριστικά, ούτε κατά μήκος ούτε κατά τη διάρκεια του έτους και μάλιστα οι αποκλίσεις είναι μεγάλες. Έτσι, πρέπει να δομηθεί ένα μοντέλο που να περιλαμβάνει και να αναπαράγει όσο δυνατόν περισσότερες από αυτές τις μεταβολές, ώστε να επιτευχθεί ικανοποιητική προσομοίωση της πραγματικότητας.

Επίσης, οι λεκάνες απορροής εκτείνονται σε χιλιάδες τετραγωνικά χιλιόμετρα και η καταγραφή όλων των ρυπαντών είναι δύσκολη, κάτι που επιδεινώνεται ακόμα περισσότερο από τις παράνομες απορροές που καταλήγουν στον ποταμό και δε μπορούν να εντοπιστούν εύκολα.

Στην παρούσα διπλωματική εξετάζεται ο ποταμός Καλαμάς, στοιχεία του οποίου δίνονται παρακάτω:

Ο ποταμός Καλαμάς (ο αρχαίος Θυαμής) αποτελεί τον μεγαλύτερο σε μήκος ποταμό της Ηπείρου και έβδομο μεγαλύτερο της Ελλάδας. Η σημασία του είναι σημαντική από την αρχαιότητα όπου στις όχθες και στις εκβολές του άκμασαν μεγάλες πόλεις, κάτι που συνεχίζεται μέχρι και σήμερα που εξακολουθεί να συγκεντρώνει τις οικιστικές δραστηριότητες.

Το φυσικό τμήμα της εκβολής του Καλαμά κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών πλημμύριζε την πεδιάδα στην περιοχή της Ηγουμενίσσας προκαλώντας σημαντικές καταστροφές. Έτσι, την δεκαετία του 1960 κατασκευάστηκε ανοιχτή διώρυγα για την εκβολή του ποταμού δημιουργώντας νέο δέλτα. Παράλληλα, για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών κατασκευάστηκε φράγμα στη θέση Ράγιο, από όπου παροχετεύεται ο κύριος όγκος στο τεχνητό τμήμα της εκβολής και ένα μέρος καταλήγει στο φυσικό τμήμα.

Στα τέλη της δεκαετίας του 1980, αποφασίστηκε τα λύματα του λεκανοπεδίου Ιωαννίνων να καταλήγουν στον Καλαμά με αποτέλεσμα την υποβάθμιση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του ποταμού. Πολλοί φορείς από τότε ασχολούνται με δράσεις για την προστασία του καθώς συχνά εγείρονται θέματα λόγω της ανεξέλεγκτης ρύπανσης από παράνομες απορρίψεις.

1.2 Στόχος εργασίας

Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο τη δόμηση, βαθμονόμηση και επιβεβαίωση ενός μονοδιάστατου μοντέλου για την προσομοίωση της ποιότητας των νερών του ποταμού Καλαμά.

Η βαθμονόμηση και επιβεβαίωση πραγματοποιούνται με πολύ περιορισμένα δεδομένα και διαθέσιμες μετρήσεις πεδίου από τα έτη 2007 και 2008, και με υδραυλικά στοιχεία τα οποία προέκυψαν από το σχέδιο διαχείρισης του υδατικού διαμερίσματος Ηπείρου και από αυτοψία που πραγματοποιήθηκε τον Μάρτιο 2013 κατά μήκος του ποταμού.

1.3 Περιγραφή διπλωματικής εργασίας

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία είναι η εξής:

Αρχικά έγινε συλλογή γεωμορφολογικών και υδρολογικών στοιχείων που αφορούν το πεδίο μελέτης. Η κύρια κοίτη του ποταμού Καλαμά έχει διαχωριστεί σε 9 τμήματα, κάθε τμήμα θεωρείται πως έχει σταθερά χαρακτηριστικά κατά μήκος (κλίση, παροχή, κτλ).

Συγκεντρώθηκαν τα στοιχεία των πιέσεων που βρίσκονται στην περιοχή μελέτης. Οι πιέσεις προέρχονται είτε σημειακά (π.χ. βιομηχανικές, κτηνοτροφικές μονάδες), είτε ως φορτίο απορροής (π.χ. γεωργικές δραστηριότητες).

Δομήθηκε το μοντέλο προσομοίωσης των ποιοτικών χαρακτηριστικών του ποταμού με βάση κάποιες παραδοχές λόγω της πολυπλοκότητας και της έλλειψης στοιχείων.

Τέλος, έγινε βαθμονόμηση για τον προσδιορισμό συντελεστών του μοντέλου και επιβεβαίωση με πραγματικά δεδομένα που διατίθενται για τον ποταμό.

1.4 Δυσκολίες κατά τη μελέτη

Η προσπάθεια υλοποίησης της συγκεκριμένης εργασίας αποτελεί μία επίπονη διαδικασία αφενός λόγω της δυσκολίας προσομοίωσης του ποταμού, όπου τα στοιχεία του μεταβάλλονται συνεχώς, και αφετέρου λόγω των εξαιρετικά περιορισμένων διατιθέμενων στοιχείων.

Η προσομοίωση του ποταμού Καλαμά αποτελεί ιδιαίτερα δύσκολο εγχείρημα καθώς κατά μήκος του παρατηρούνται σημαντικές μεταβολές στα γεωμορφολογικά του στοιχεία όπου δεν είναι εύκολο να αποτυπωθούν σε ένα απλό μονοδιάστατο μοντέλο.

Για την βαθμονόμηση και την επιβεβαίωση είναι απαραίτητη η ύπαρξη μετρήσεων ανά τακτά χρονικά διαστήματα σε διάφορες θέσεις του ποταμού κάτι που δεν υφίσταται στη συγκεκριμένη περίπτωση. Έτσι, πραγματοποιήθηκαν με τα ιδιαίτερος περιορισμένα διαθέσιμα στοιχεία.

Εδώ πρέπει να σημειωθεί πως εξαιτίας όλων των παραπάνω δυσχερειών έγιναν ορισμένες παραδοχές ώστε να καταστεί δυνατή η υλοποίηση της εργασίας, όπως αναφέρονται λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 3.

1.5 Δομή εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από 9 Κεφάλαια και το Παράρτημα.

Στο **1^ο Κεφάλαιο** γίνεται μία εισαγωγή και αναφέρεται ο σκοπός της εργασίας.

Στο **2^ο Κεφάλαιο** παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης και τα γενικότερα χαρακτηριστικά της.

Στο **3^ο Κεφάλαιο** παρατίθενται όλα τα απαραίτητα στοιχεία που συλλέχθηκαν για την υλοποίηση της εργασίας, όπως τα γεωμορφολογικά και υδραυλικά στοιχεία του ποταμού, καθώς και οι πηγές ρύπανσης.

Στο **4^ο Κεφάλαιο** παρουσιάζεται το μαθηματικό μοντέλο που κατασκευάστηκε, με βάση το οποίο έγινε η προσομοίωση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του ποταμού

και η επιβεβαίωση που έγινε για να ελεγχθεί η ορθότητά του. Επίσης, δίνεται και το μοντέλο υδραυλικής συμπεριφοράς που ακολουθήθηκε.

Στο **5^ο Κεφάλαιο** αναλύεται η διαδικασία της βαθμονόμησης, δηλαδή του προσδιορισμού των παραμέτρων που συμμετέχουν στην προσομοίωση, και της επιβεβαίωσης.

Στο **6^ο Κεφάλαιο** παρουσιάζονται εφαρμογές του μοντέλου, δηλαδή εξετάζονται οι επιπτώσεις που θα είχαν υποθετικά σενάρια που αφορούν την περιοχή μελέτης.

Στο **7^ο Κεφάλαιο** γίνεται σχολιασμός των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης σε σύγκριση με τα πραγματικά γεγονότα. Ενώ, παράλληλα, με βάση τα αποτελέσματα πραγματοποιείται αξιολόγηση της οικολογικής κατάστασης των υδάτινων σωμάτων του συστήματος.

Στο **8^ο Κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και προτείνονται κατευθύνσεις για περαιτέρω έρευνα.

Στο **9^ο Κεφάλαιο** παρατίθεται η χρησιμοποιηθείσα βιβλιογραφία.

Στο **Παράρτημα** παρουσιάζονται τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για τη δόμηση της εργασίας, καθώς και κάποια πρόσθετα διαγράμματα αποτελεσμάτων. Τέλος, παρατίθεται η φωτογραφική τεκμηρίωση για τον προσδιορισμό των πλατών.

2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

2.1 Γενικά

Η περιοχή μελέτης είναι η υδρολογική λεκάνη του Καλαμά (GR12), η οποία υπάγεται στο υδατικό διαμέρισμα της Ηπείρου (GR05).

Το υδατικό διαμέρισμα της Ηπείρου αποτελεί ένα από τα 14 υδατικά διαμερίσματα της χώρας, περιλαμβάνει την Περιφέρεια Ηπείρου και μικρά τμήματα των Περιφερειών Δυτικής Μακεδονίας και Δυτικής Ελλάδας, καθώς και τα νησιά Κέρκυρα, Οθωνοί, Ερείκουσα, Παξοί και Αντίπαξοι. Τα γεωγραφικά όρια του υδατικού διαμερίσματος Ηπείρου ορίζονται νότια από τον Αμβρακικό κόλπο, ανατολικά από τους ορεινούς όγκους Βάλτου, Αθαμανικών, οροσειράς βόρειας Πίνδου, Βόιου και Γράμμου, βόρεια από τα ελληνοαλβανικά σύνορα και δυτικά από το Ιόνιο πέλαγος και έχει έκταση ίση με 9.980 km².

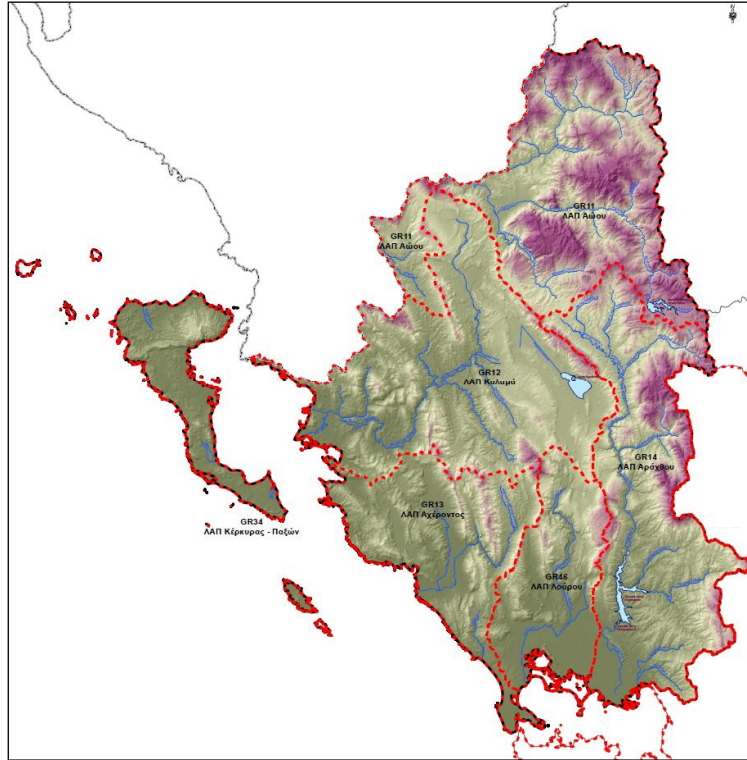
Η λεκάνη απορροής του Καλαμά βρίσκεται σε ποσοστό μεγαλύτερο από 99% σε ελληνικό έδαφος και καταλαμβάνει έκταση ίση με 1900 km².

Ο ποταμός Καλαμάς πηγάζει από το όρος Δούσκο και εκβάλλει στο Ιόνιο πέλαγος. Στις εκβολές του ποταμού έχει διαμορφωθεί τεχνητό τμήμα εκβολής όπου απορρέει ο κύριος όγκος της παροχής του ποταμού, ενώ το φυσικό τμήμα της εκβολής παροχετεύεται από μία οικολογική παροχή.

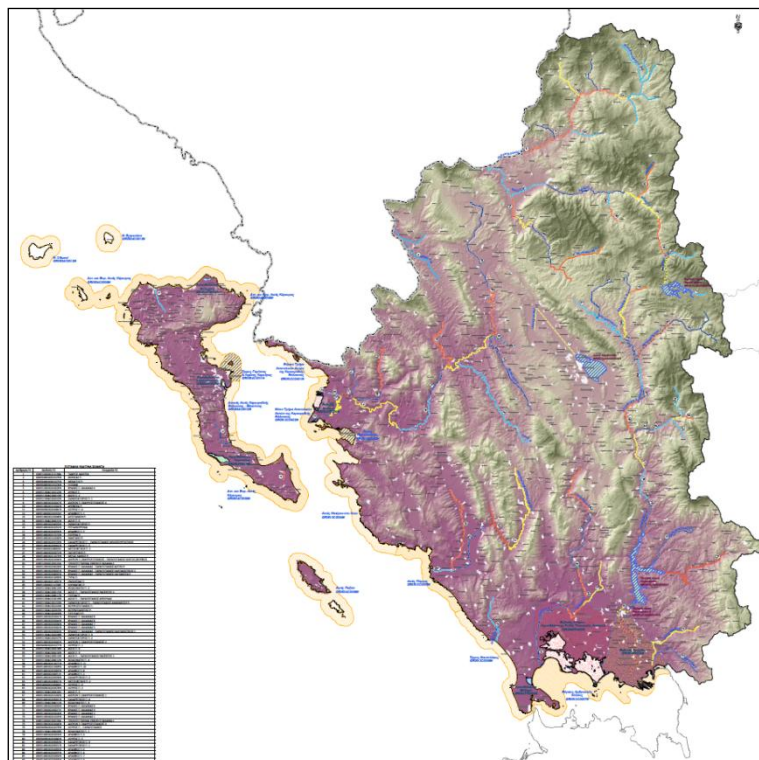
Μέσω σήραγγας η τάφρος Λαψίστας εκβάλλει στο ρέμα της Κληματιάς, που συμβάλλει με τον Καλαμά στην περιοχή του Σουλόπουλου. Στην τάφρο της Λαψίστας απορρέει η κλειστή λεκάνη των Ιωαννίνων, η οποία, έτσι, συμπεριλαμβάνεται στη λεκάνη απορροής του Καλαμά.

Η περιοχή ενδιαφέροντος εστιάζεται στις υπολεκάνες που συνιστούν η κύρια κοίτη, οι κυριότεροι παραπόταμοι του ποταμού και η κλειστή λεκάνη των Ιωαννίνων.

Το υδατικό διαμέρισμα Ηπείρου με τα όρια των λεκανών απορροής φαίνεται στο Σχήμα 2.1-1, ενώ στο Σχήμα 2.1-2 παρουσιάζονται τα επιφανειακά υδάτινα σώματα.

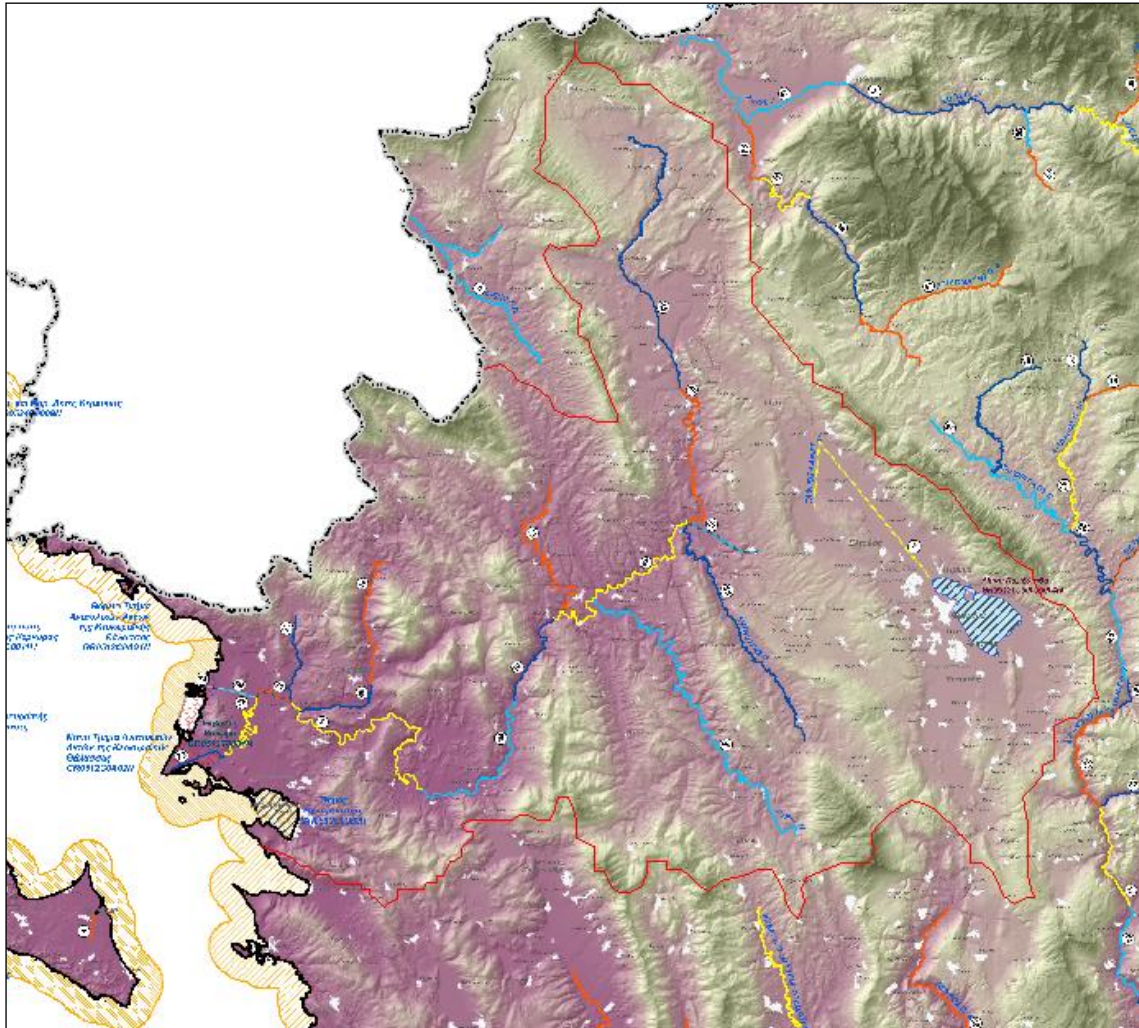


Σχήμα 2.1-1. Λεκάνες απορροής (ΥΠΕΚΑ)



Σχήμα 2.1-2. Υδρογραφικό δίκτυο (ΥΠΕΚΑ)

Το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής μελέτης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1-3.



Σχήμα 2.1-3. Υδρογραφικό δίκτυο περιοχής μελέτης (ΥΠΕΚΑ)

2.2 Κύρια τμήματα του ποταμού

Η κύρια κοίτη του ποταμού Καλαμά διακρίνεται σε 9 κύρια τμήματα [1], χαρακτηριστικά των οποίων παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες. Συγκεκριμένα, οι ονομασίες και οι κωδικοί των υδάτινων σωμάτων της κύριας κοίτης παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2-1, τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά (επιφάνεια, κλάση κλίσης) των υπολεκάνων αυτών παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2-2 και οι θέσεις που τα οριοθετούν στον Πίνακα 2.2-3.

Πίνακας 2.2-1. Ονομασία τμημάτων του ποταμού

Τμήμα ποταμού	Ονομασία ΥΣ	Κωδικός ΥΣ
1	Θυαμής Π. Καλαμάς 9	GR0512R000200041N
2	Θυαμής Π. Καλαμάς 8	GR0512R000200040N
3	Θυαμής Π. Καλαμάς 7	GR0512R000200034N
4	Θυαμής Π. Καλαμάς 6	GR0512R000200033N
5	Θυαμής Π. Καλαμάς 5	GR0512R000200032N
6	Θυαμής Π. Καλαμάς 4	GR0512R000200029N
7	Θυαμής Π. Καλαμάς 3	GR0512R000200027H
8	Τεχνητό Τμήμα Εκβολής Καλαμά 2	GR0512R000202025A
9	Τεχνητό Τμήμα Εκβολής Καλαμά 1	GR0512R000202026A

Πίνακας 2.2-2. Υπολεκάνες απορροής

α/α	Υπολεκάνη απορροής	Επιφάνεια (km ²)	Κλάση κλίση (‰)
1	Θυαμής Π. Καλαμάς 9	369.47	>=1.2
2	Θυαμής Π. Καλαμάς 8	86.51	>=1.2
3	Θυαμής Π. Καλαμάς 7	192.61	<1.2
4	Θυαμής Π. Καλαμάς 6	32.76	<1.2
5	Θυαμής Π. Καλαμάς 5	99.27	>=1.2
6	Θυαμής Π. Καλαμάς 4	116.84	<1.2
7	Θυαμής Π. Καλαμάς 3	3.45	<1.2
8	Τεχνητό Τμήμα Εκβολής Καλαμά 2	25.64	<1.2
	Τεχνητό Τμήμα Εκβολής Καλαμά 1	0.25	<1.2

Πίνακας 2.2-3. Κύρια τμήματα του ποταμού

Τμήμα ποταμού	x (km)
1	0-29
2	29-46
3	46-68
4	68-77
5	77-93
6	93-118
7	118-122
8	122-125
9	125-128

Το κάθε κύριο τμήμα θεωρείται ότι έχει σταθερά υδραυλικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά (εκτός του πλάτους που είναι μεταβλητό), όπως παροχή, γεωμετρία, κλίση πυθμένα και συντελεστή τριβών κατά Manning.

2.3 Παραπόταμοι Καλαμά

Τα χαρακτηριστικά των παραποτάμων του ποταμού Καλαμά [1] παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες. Συγκεκριμένα, οι ονομασίες και οι κωδικοί των υδάτινων σωμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.3-1 και τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά (επιφάνεια, κλάση κλίσης) των υπολεκανών αυτών παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.3-2.

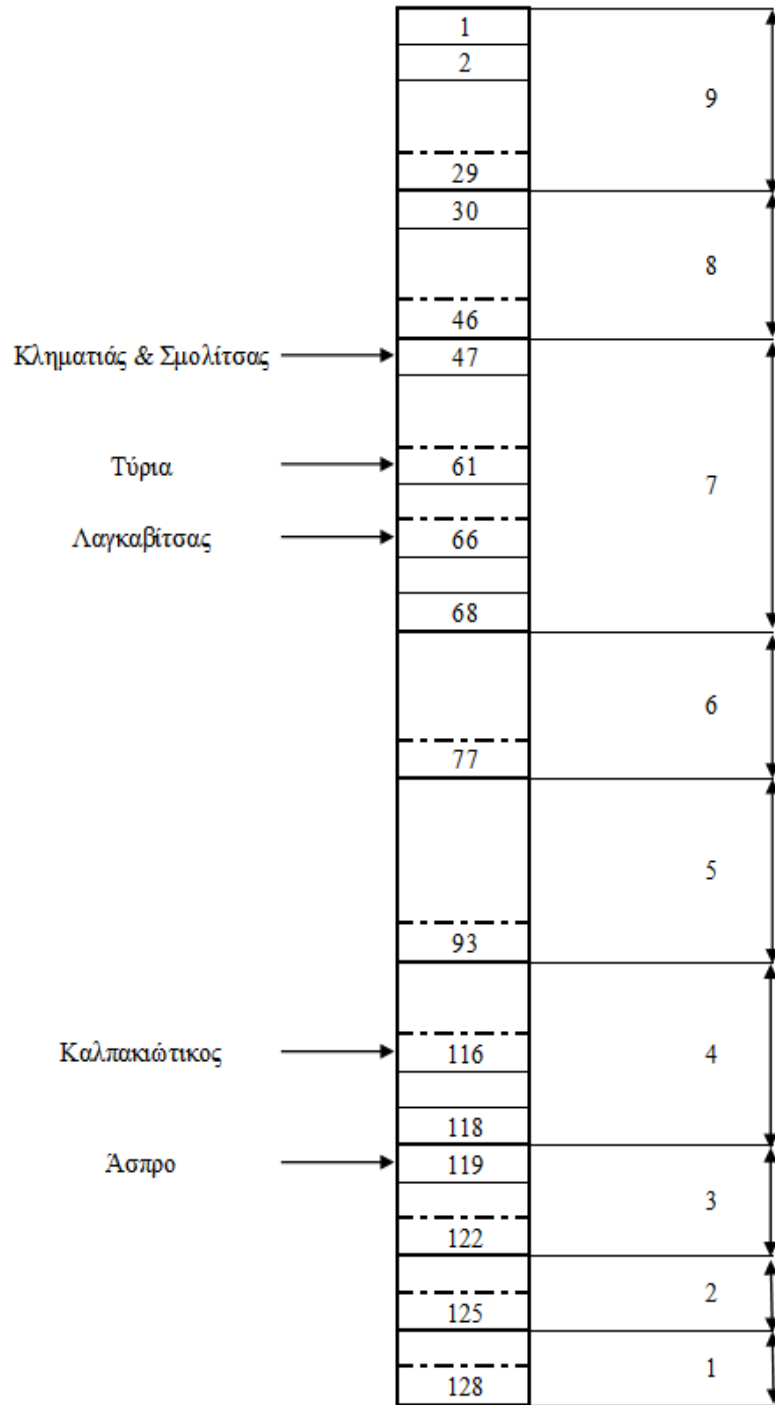
Πίνακας 2.3-1. Ονομασία τμημάτων του ποταμού

Ονομασία ΥΣ	Κωδικός ΥΣ
Τάφος Λαψίστας	GR0512R000212139A
Κληματιάς (Ρέμα)	GR0512R000212138H
Σμολίτσας	GR0512R000212037N
Τύρια	GR0512R000210036N
Λαγκαβίτσας (Ρέμα)	GR0512R000208035N
Καλπακιώτικος 2	GR0512R000206031N
Καλπακιώτικος 1	GR0512R000206030N
Άσπρο	GR0512R000204028N

Πίνακας 2.3-2. Υπολεκάνες απορροής

α/α	Υπολεκάνη απορροής	Επιφάνεια (km ²)	Κλάση κλίση (‰)
1	Τάφος Λαψίστας	202,82	<1,2
2	Κληματιάς (Ρέμα)	34,41	>=1,2
3	Σμολίτσας	171,37	>=1,2
4	Τύρια	263,55	>=1,2
5	Λαγκαβίτσας (Ρέμα)	155,02	>=1,2
6	Καλπακιώτικος 2	141,81	>=1,2
7	Καλπακιώτικος 1	21,97	>=1,2
8	Άσπρο	47,08	>=1,2

Στο Σχήμα 2.3-1 παρουσιάζεται διάγραμμα του συστήματος ποταμού-παραποτάμων για την περιοχή μελέτης.



Σχήμα 2.2-1. Σχηματικό διάγραμμα των 9 τμημάτων του ποταμού και παραποτάμων

3 ΔΙΑΘΕΣΙΜΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

3.1 Γενικά

Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν προέκυψαν από τα τεύχη τεκμηρίωσης του διαχειριστικού σχεδίου του υδατικού διαμερίσματος που εκπονείται από το ΥΠΕΚΑ, καθώς και από αυτοψία για στοιχεία για τα οποία δεν υπήρχαν δεδομένα.

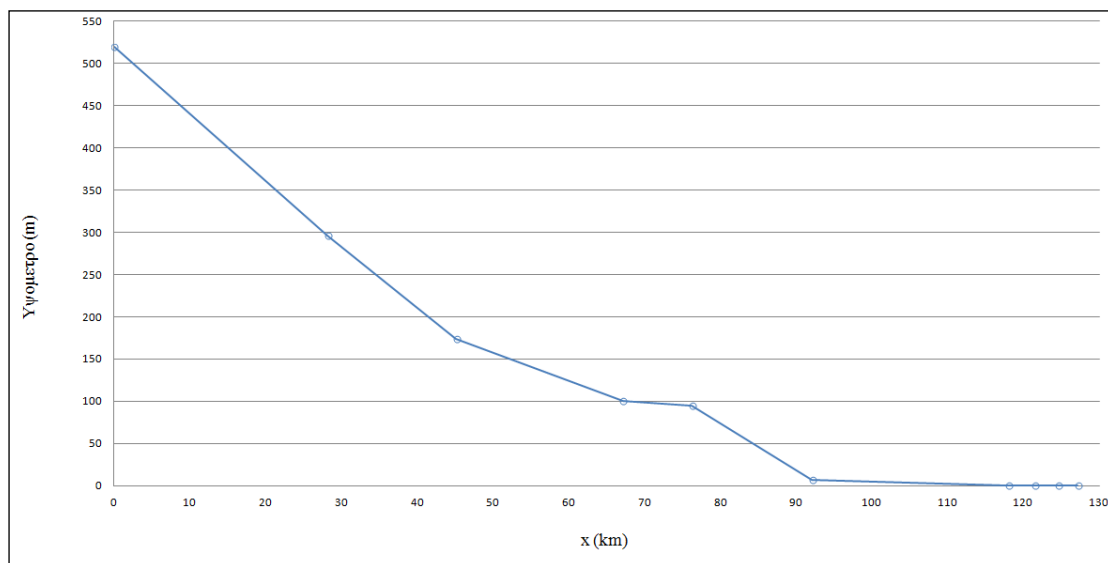
Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα στοιχεία:

- 1) Γεωμετρικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά των 9 κύριων τμημάτων του ποταμού, όπως υψομετρία, πλάτος του ποταμού και συντελεστής τριβών κατά Manning. Τα στοιχεία αυτά περιγράφονται στην παράγραφο 3.2.
- 2) Μέσες τιμές παροχών και για τα 9 κύρια τμήματα του ποταμού. Οι τιμές αυτές υπολογίστηκαν από τις ετήσιες απορροές. Τα στοιχεία αυτά περιγράφονται στην παράγραφο 3.3.
- 3) Χαρακτηριστικά (θέσεις και τιμές φορτίων BOD, N, P σε kg/day) των πηγών ρύπανσης, τα οποία υπολογίστηκαν με βάση ετήσια φορτία. Τα στοιχεία αυτά περιγράφονται στην παράγραφο 3.4.
- 4) Διαθέσιμες μετρήσεις πεδίου συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου, BOD, N, P καθώς και θερμοκρασίας νερού. Τα στοιχεία αυτά λήφθηκαν από τους σταθμούς ελέγχου ποιότητας υδάτων του ΥΠΕΚΑ, που βρίσκονται στον π. Καλαμά. Τα στοιχεία αυτά περιγράφονται στα 3.5 και 3.6.

3.2 Γεωμετρικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά

Η λεκάνη απορροής του Καλαμά χαρακτηρίζεται από έντονο ανάγλυφο, μεγάλες κλίσεις καθώς περιλαμβάνει υψηλά βουνά (μέγιστο υψόμετρο λεκάνης 2198 m) και καταλήγει σε σύντομο σχετικά μήκος σε πεδινές περιοχές για να εκβάλλει τελικά στο Ιόνιο πέλαγος.

Στο Σχήμα 3.2-1 παρουσιάζεται η μηκοτομή του ποταμού Καλαμά με τα 9 κύρια τμήματα αυτού. Η αρίθμηση των τμημάτων γίνεται από το πρώτο ανάντη (9) μέχρι το τελευταίο κατόντη (1) τμήμα.



Σχήμα 3.2-1. Μηκοτομή του ποταμού και κύρια τμήματα αυτού

Τα υψόμετρα των 10 σημείων που ορίζουν τα 9 κύρια τμήματα του ποταμού παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2-1.

Πίνακας 3.2-1. Υψόμετρα σημείων

Σημείο ποταμού	x (km)	Υψόμετρο (m)
1 (αρχή)	0	520.00
2	29	297.00
3	46	175.00
4	68	100.00
5	77	95.00
6	93	7.00
7	118	0.78
8	122	0.32
9	125	0.15
10 (εκβολή)	128	0

Τα πλάτη των διατομών δεν ήταν διαθέσιμα από τα στοιχεία. Γι' αυτό πραγματοποιήθηκαν επί τόπου μετρήσεις κατά μήκος του ποταμού για την καταγραφή τους. Στον Πίνακα 3.2-2 παρουσιάζονται τα πλάτη για κάθε ένα από τα 9 κύρια τμήματα του ποταμού, όπως μετρήθηκαν.

Πίνακας 3.2-2. Πλάτη διατομών του ποταμού

Τμήμα ποταμού	Πλάτος διατομής (m)
1	10.0
2	12.0
3	20.0
4	28.0
5	35.0
6	42.0
7	55.0
8	35.0
9	35.0

Σημειώνεται πως στο Παράρτημα παρατίθεται και φωτογραφική τεκμηρίωση για τον προσδιορισμό του πλάτους των διατομών, από την αυτοψία που έγινε.

Τέλος, η τιμή του συντελεστή τριβών κατά Manning n θεωρείται ίση με $n=0.05$ σε όλο το μήκος του ποταμού.

3.3 Παροχές

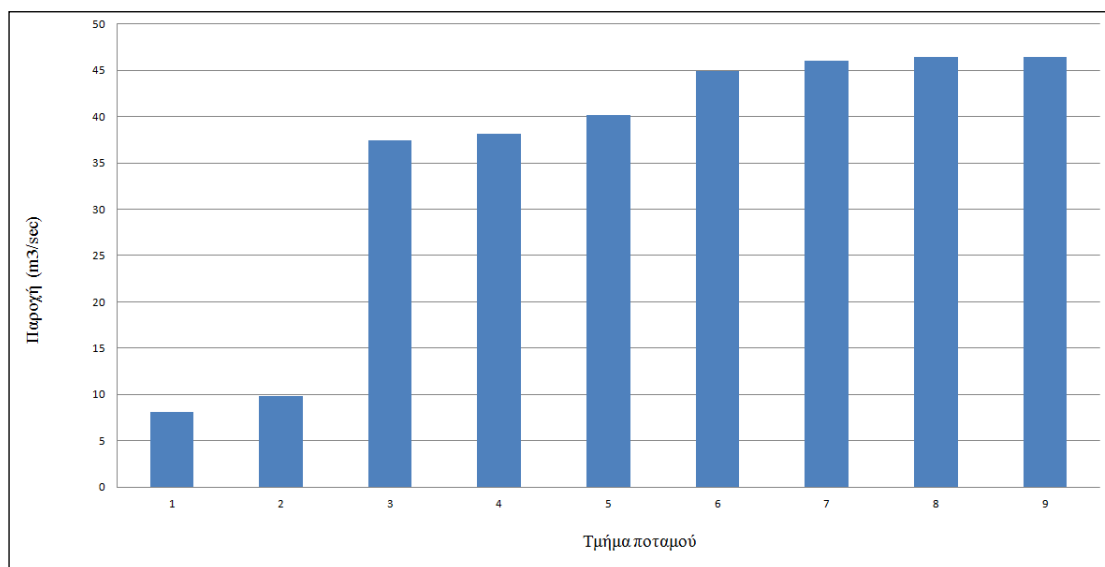
Χρησιμοποιούνται οι μέσες ημερήσιες τιμές παροχών όπως αυτές προέκυψαν από τις ετήσιες παροχές στα 9 κύρια τμήματα του ποταμού Καλαμά, οι οποίες λήφθηκαν από τα κείμενα τεκμηρίωσης διαχειριστικού σχεδίου του υδατικού διαμερίσματος που εκπονείται από το ΥΠΕΚΑ [1]. Στους Πίνακες 3.3-1, 3.3-2 και στα Σχήματα 3.3-1, 3.3-2 παρατίθενται οι παροχές των κύριων τμημάτων του Καλαμά και των παραποτάμων αντίστοιχα.

Πίνακας 3.3-1. Παροχές στα 9 τμήματα του π. Καλαμά

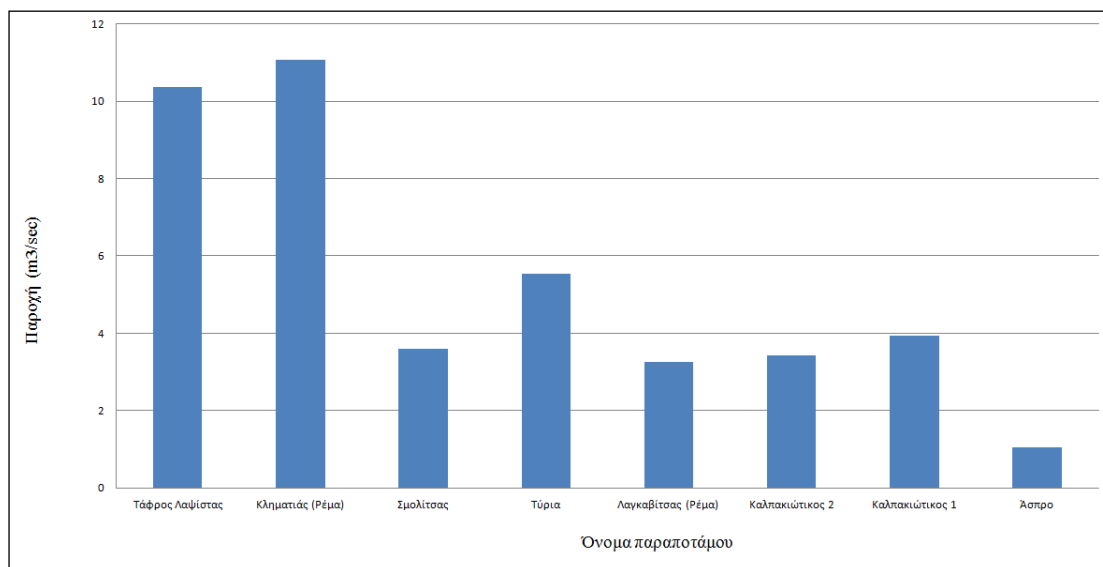
Τμήμα ποταμού	Ετήσια παροχή (hm ³)	Παροχή (m ³ /sec)
1	251.49	8.09
2	307.00	9.87
3	1163.64	37.41
4	1185.07	38.1
5	1250.01	40.19
6	1397.28	44.96
7	1432.15	40.04
8	1445.36	46.46
9	1445.50	46.47

Πίνακας 3.3-2. Παροχές παραποτάμων του π. Καλαμά

Όνομα παραπόταμου	Ετήσια παροχή (hm ³)	Παροχή (m ³ /sec)
Τάφος Λαψίστας	322.21	10.36
Κληματιάς (Ρέμα)	344.73	11.08
Σμολίτσας	112.10	3.6
Τύρια	172.40	5.54
Λαγκαβίτσας (Ρέμα)	101.41	3.26
Καλπακιώτικος 2	106.33	3.42
Καλπακιώτικος 1	122.81	3.94
Άσπρο	33.09	1.06



Σχήμα 3.3-1. Μέσες παροχές στα τμήματα του π. Καλαμά



Σχήμα 3.3-2. Μέσες παροχές στους παραποτάμους του π. Καλαμά

Αντίστοιχα, έχουν ληφθεί οι μέσες ημερήσιες τιμές παροχών για τη θερινή περίοδο, όπως αυτές προέκυψαν από τις μηνιαίες θερινές απορροές στα 9 κύρια τμήματα του ποταμού Καλαμά και στους παραποτάμους.

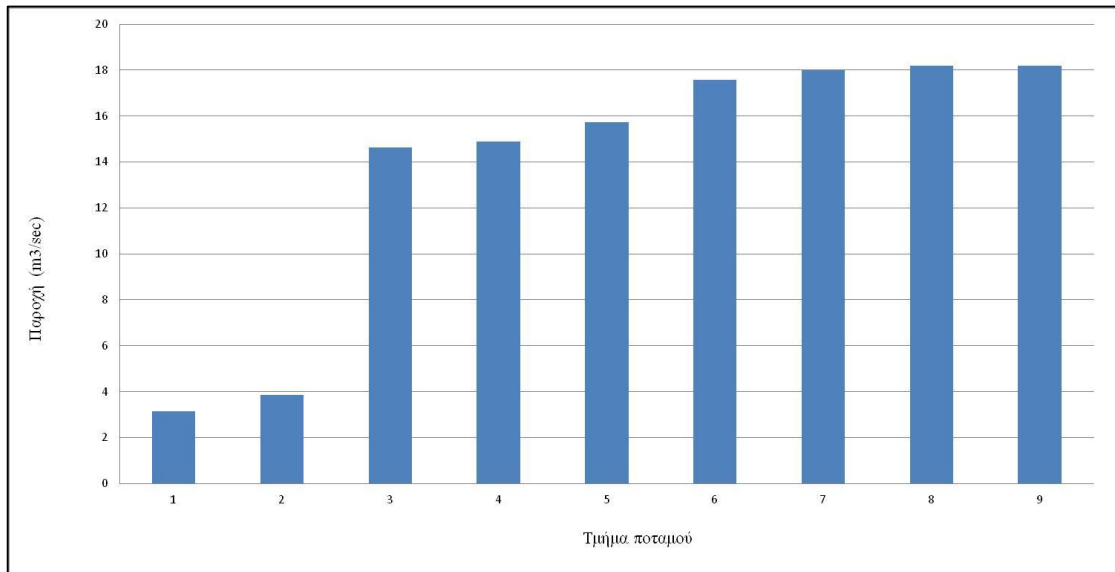
Στους Πίνακες 3.3-3, Πίνακας 3.3-4 και στα Σχήματα 3.3-3, Σχήμα 3.3-4 παρατίθενται οι θερινές παροχές των κύριων τμημάτων του Καλαμά και των παραποτάμων αντίστοιχα.

Πίνακας 3.3-3. Θερινές παροχές στα 9 τμήματα του π. Καλαμά

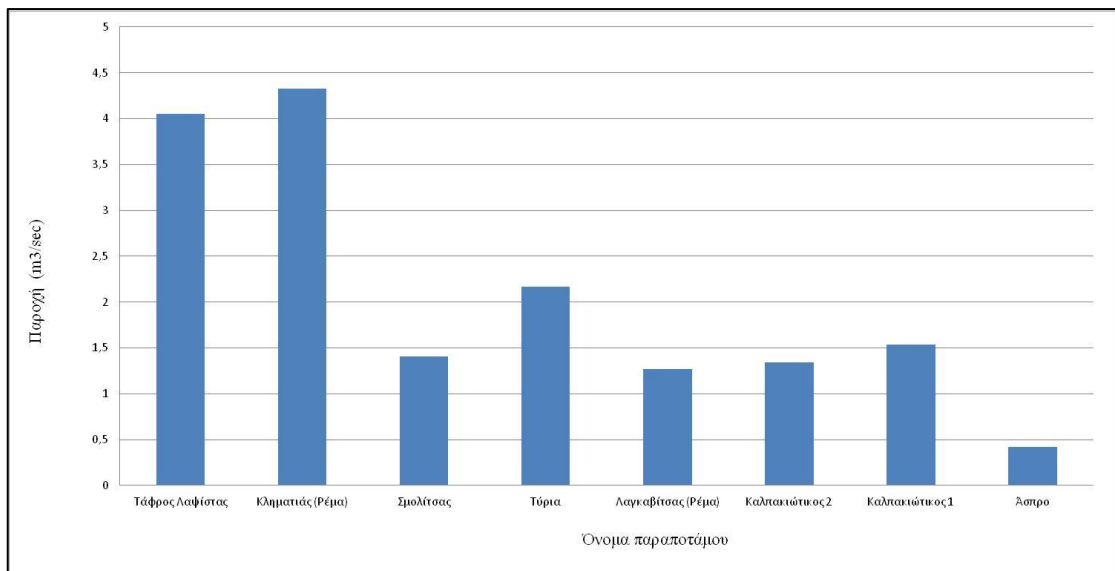
Τμήμα ποταμού	Μηνιαία παροχή (hm ³)	Παροχή (m ³ /sec)
1	8.20	3.16
2	10.01	3.86
3	37.92	14.63
4	38.62	14.90
5	40.74	15.72
6	45.54	17.57
7	46.68	18.01
8	47.11	18.18
9	47.11	18.18

Πίνακας 3.3-4. Θερινές παροχές παραποτάμων του π. Καλαμά

Όνομα παραποτάμου	Ετήσια παροχή (hm ³)	Παροχή (m ³ /sec)
Τάφος Λαψίστας	10.50	4.05
Κληματιάς (Ρέμα)	11.23	4.33
Σμολίτσας	3.65	1.41
Τύρια	5.62	2.17
Λαγκαβίτσας (Ρέμα)	3.30	1.27
Καλπακιώτικος 2	3.47	1.34
Καλπακιώτικος 1	4.00	1.54
Άσπρο	1.08	0.42



Σχήμα 3.3-3. Μέσες θερινές παροχές στα τμήματα του π. Καλαμά



Σχήμα 3.3-4. Μέσες θερινές παροχές στους παραποτάμους του π. Καλαμά

3.4 Πηγές ρύπανσης

3.4.1 Γενικά

Οι πηγές ρύπανσης του ποταμού Καλαμά είναι (α) σημειακές και (β) γραμμικές-καταναμημένες, όπως π.χ. από απορροές.

Στην παρούσα εργασία θεωρούνται τα ακόλουθα σημειακά ρυπαντικά φορτία:

- 1) Εκροές Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ)
- 2) Εσταυλισμένη κτηνοτροφία
- 3) Βιομηχανικές δραστηριότητες
- 4) Χώροι Ανεξέλεγκτης Διάθεσης Απορριμμάτων (ΧΑΔΑ)
- 5) Αστικά απόβλητα από οικισμούς χωρίς ΕΕΛ

Ως γραμμικό ρυπαντικό φορτίο λήφθηκε η πίεση που προέρχεται από τη γεωργία σε περιοχές όπου η δραστηριότητα είναι έντονη.

Δε λαμβάνονται υπόψη γραμμικά-καταναμημένα φορτία, για τα οποία δεν υπήρχε καμιά πληροφορία. Τα φορτία αυτά θεωρείται ότι περιλαμβάνονται στα σημειακά φορτία.

Σημειώνεται πως στη λεκάνη απορροής του ποταμού Καλαμά υπάρχουν δύο Χώροι Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ), αυτοί της Ηγουμενίτσας και των Ιωαννίνων. Ο ΧΥΤΑ Ιωαννίνων δεν ήταν σε λειτουργία κατά την περίοδο μελέτης, καθώς έχει ολοκληρωθεί η κατασκευή του αλλά αναμένεται η λειτουργία του. Ο ΧΥΤΑ Ηγουμενίτσας παροχετεύει τα επεξεργασμένα στραγγίσματά του σε παρακείμενο ρέμα. Οι ρυπαντικές συγκεντρώσεις, όμως, κρίθηκαν αμελητέες ($BOD < 1.2 \text{ kg/έτος}$, $N < 0.5 \text{ kg/έτος}$, $P < 0.1 \text{ kg/έτος}$) και δεν συμπεριλήφθηκαν.

Για τον υπολογισμό των μέσων ημερήσιων φορτίων BOD, N, P θεωρείται πως τα φορτία κατανέμονται ομοιόμορφα στο έτος.

Για τον προσδιορισμό των πιέσεων ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία. Αρχικά, λήφθηκαν από τα τεύχη τεκμηρίωσης του διαχειριστικού σχεδίου του υδατικού διαμερίσματος που εκπονείται από το ΥΠΕΚΑ [2] οι πίνακες δεδομένων (Παράρτημα) και ένας χάρτης που απεικονίζει τις σημειακές πιέσεις. Έπειτα, έγινε διαχωρισμός των στοιχείων με βάση τον αποδέκτη τους και ταυτοποιήθηκαν οι θέσεις του χάρτη με τους πίνακες δεδομένων.

Τέλος, με τη χρήση του σχεδιαστικού περιβάλλοντος AutoCAD, προσδιορίστηκαν οι θέσεις απόρριψης και οι επιμέρους αποστάσεις των πιέσεων με τον ποταμό Καλαμά.

3.4.2 Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ)

Στη λεκάνη απορροής του ποταμού υπάρχουν δύο ΕΕΛ σε λειτουργία, αυτές των Ιωαννίνων και Ηγουμενίτσας. Όμως, μόνο των Ιωαννίνων αποτελεί πίεση για τον Καλαμά αφού απορρέει μέσω της τάφρου της Λαψίστας στον ποταμό. Αντίθετα, η ΕΕΛ Ηγουμενίτσας απορρέει απευθείας στο Ιόνιο πέλαγος.

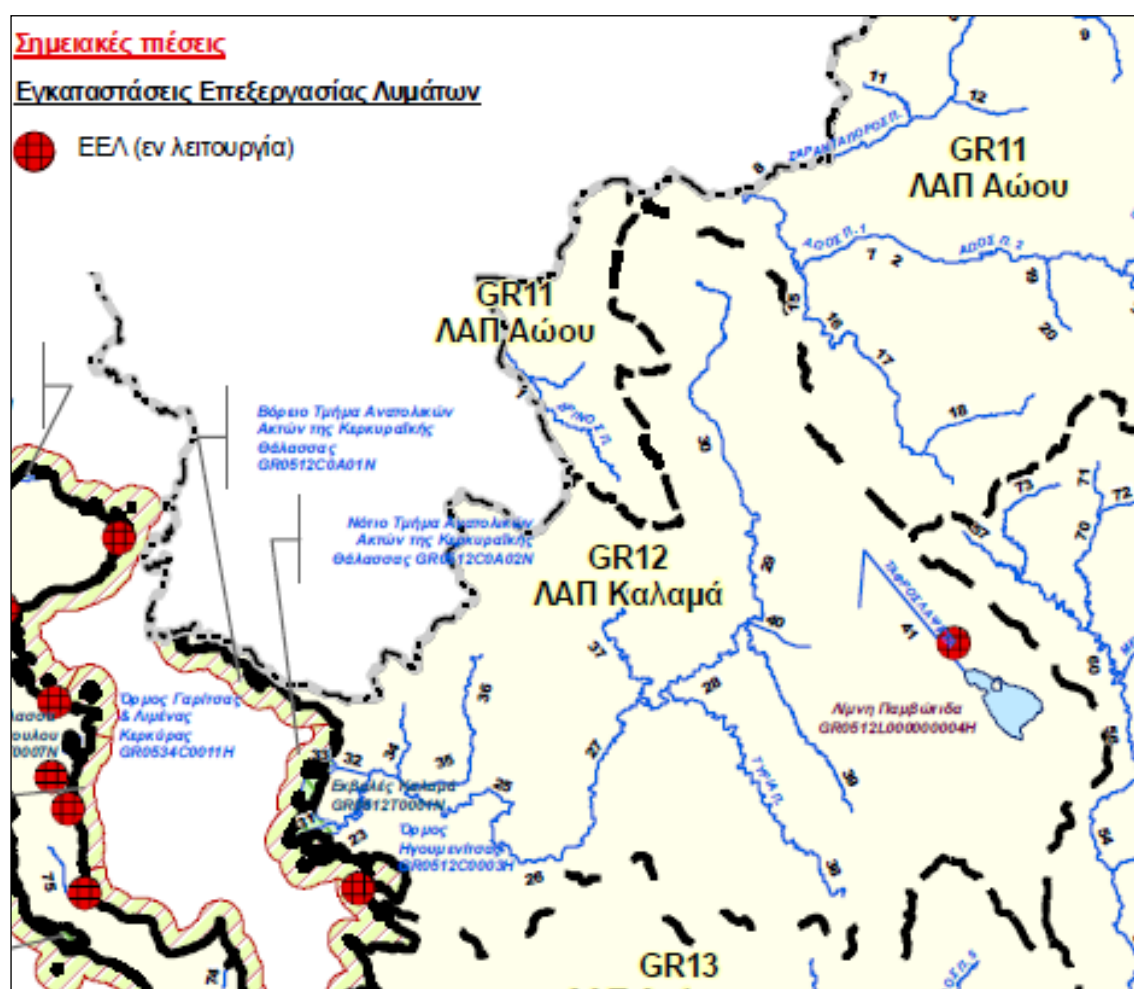
Ο βαθμός επεξεργασίας της ΕΕΛ Ιωαννίνων είναι δευτεροβάθμια επεξεργασία με απομάκρυνση αζώτου, φωσφόρου και αιωρούμενων στερεών (διύλιση). Έτσι, μετά την επεξεργασία απομακρύνονται 90% του BOD, 90% των TSS, 20% του N και 20% του P.

Για τον προσδιορισμό των ρυπαντικών φορτίων της ΕΕΛ έγινε η θεώρηση ισοδύναμου κατοίκου, τα ανεπεξέργαστα λύματα του οποίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.4.2-1.

Πίνακας 3.4.2-1. Ανεπεξέργαστα αστικά λύματα

Παράμετρος	Μονάδα μέτρησης	Φορτίο
Οργανικό φορτίο	g BOD/ κάτοικο/ ημέρα	60
Ολικά αιωρούμενα στερεά	g TSS/ κάτοικο/ ημέρα	75
Ολικό άζωτο	g TN/ κάτοικο/ ημέρα	12
Ολικός φώσφορος	g TP/ κάτοικο/ ημέρα	2.5

Στο Σχήμα 3.4.2-1 παρουσιάζεται η θέση της ΕΕΛ Ιωαννίνων.



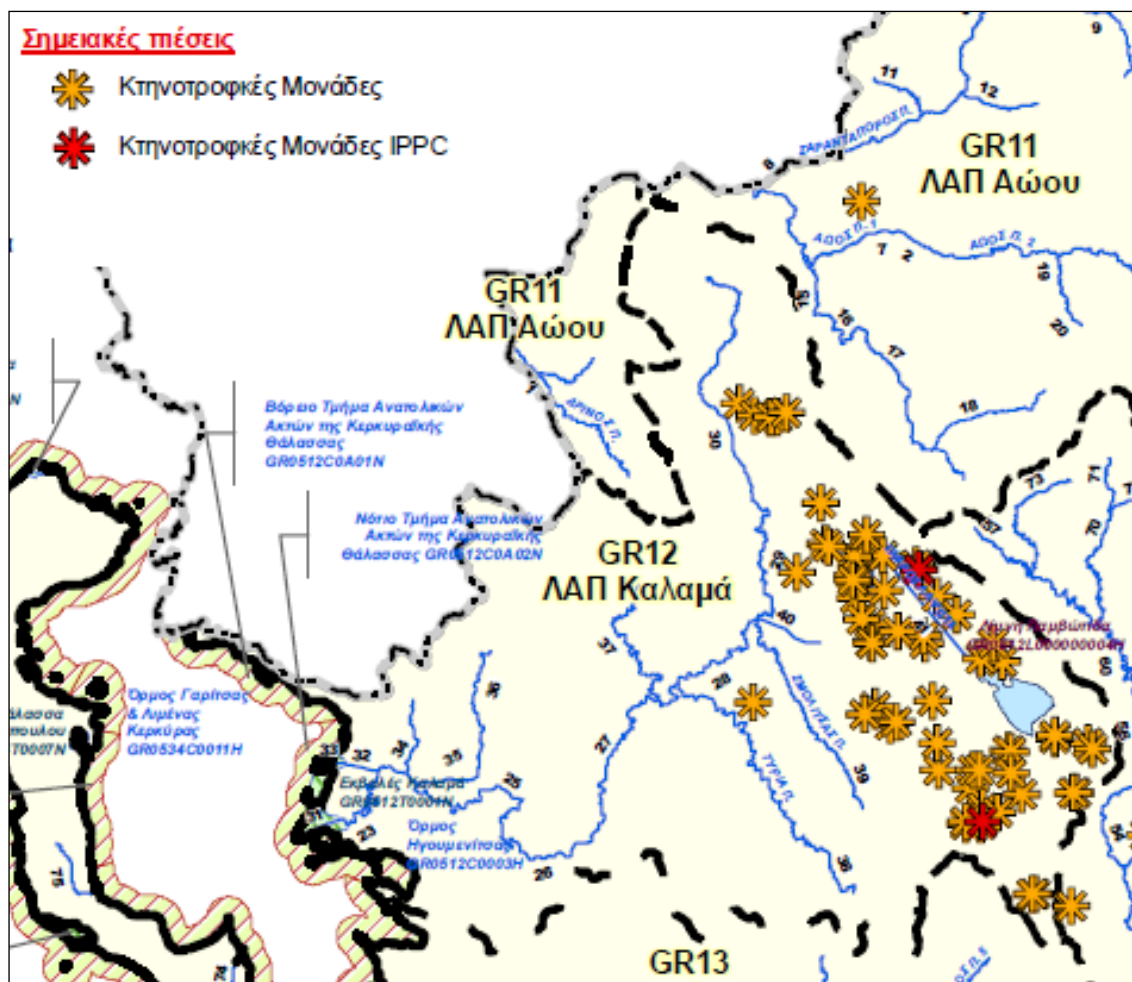
Σχήμα 3.4.2-1. Θέση ΕΕΛ Ιωαννίνων (ΥΠΕΚΑ)

3.4.3 Κτηνοτροφικές μονάδες

Η κτηνοτροφική δραστηριότητα είναι έντονη στην περιοχή μελέτης, ιδιαίτερα στην κλειστή λεκάνη των Ιωαννίνων, και αφορά τις εσταυλισμένες μονάδες που είναι πτηνοτροφεία, χοιροτροφεία και βουστάσια. Τα ρυπαντικά φορτία ποικίλουν λόγω διαφορών που υπάρχουν μεταξύ των μονάδων (διαφορετικό είδος ζώων, διατροφικές

διαφορές, συνθήκες εσταυλισμού κ.α.). Οι βασικές ρυπαντικές ουσίες από την κτηνοτροφία είναι το οργανικό φορτίο, το άζωτο και ο φώσφορος.

Στο Σχήμα 3.4.3-1 παρουσιάζονται οι κτηνοτροφικές μονάδες στη λεκάνη απορροής του Καλαμά.



Σχήμα 3.4.3-1 Θέσεις κτηνοτροφικών μονάδων (ΥΠΕΚΑ)

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό των δεδομένων ρύπανσης από τις κτηνοτροφικές μονάδες είναι η παρακάτω. Αρχικά, έγινε καταγραφή των κτηνοτροφικών μονάδων και στοιχεία για τη δραστηριότητά τους. Έπειτα, με βάση βιβλιογραφικούς συντελεστές που παρατίθενται στον Πίνακα 3.4.3-1 και στοιχεία βάρους των ζώων που παρατίθενται στον Πίνακα 3.4.3-2, δομήθηκε ο πίνακας δεδομένων (Παράρτημα).

Πίνακας 3.4.3-1. Χαρακτηριστικά ζωικών αποβλήτων

Παράμετρος	Μονάδα μέτρησης	Αγελάδες	Μοσχάρια	Χοίροι	Πουλερικά
Υγρά απόβλητα	m ³ /tn ZB/ ημέρα	0.094	0.046	0.051	0.066
BOD5	kg/tn ZB/ ημέρα	1.8	1.3	2.2	3.6
Ολικά Στερεά	kg/tn ZB/ ημέρα	8.8	7.9	6.9	16.8
Πτηνικά Στερεά	kg/tn ZB/ ημέρα	7.2	6.5	5.7	12.2
Φώσφορος	kg/tn ZB/ ημέρα	0.1	0.08	0.17	0.77

Κάλιο	kg/tn ΖΒ/ ημέρα	0.15	0.13	0.1	0.35
-------	-----------------	------	------	-----	------

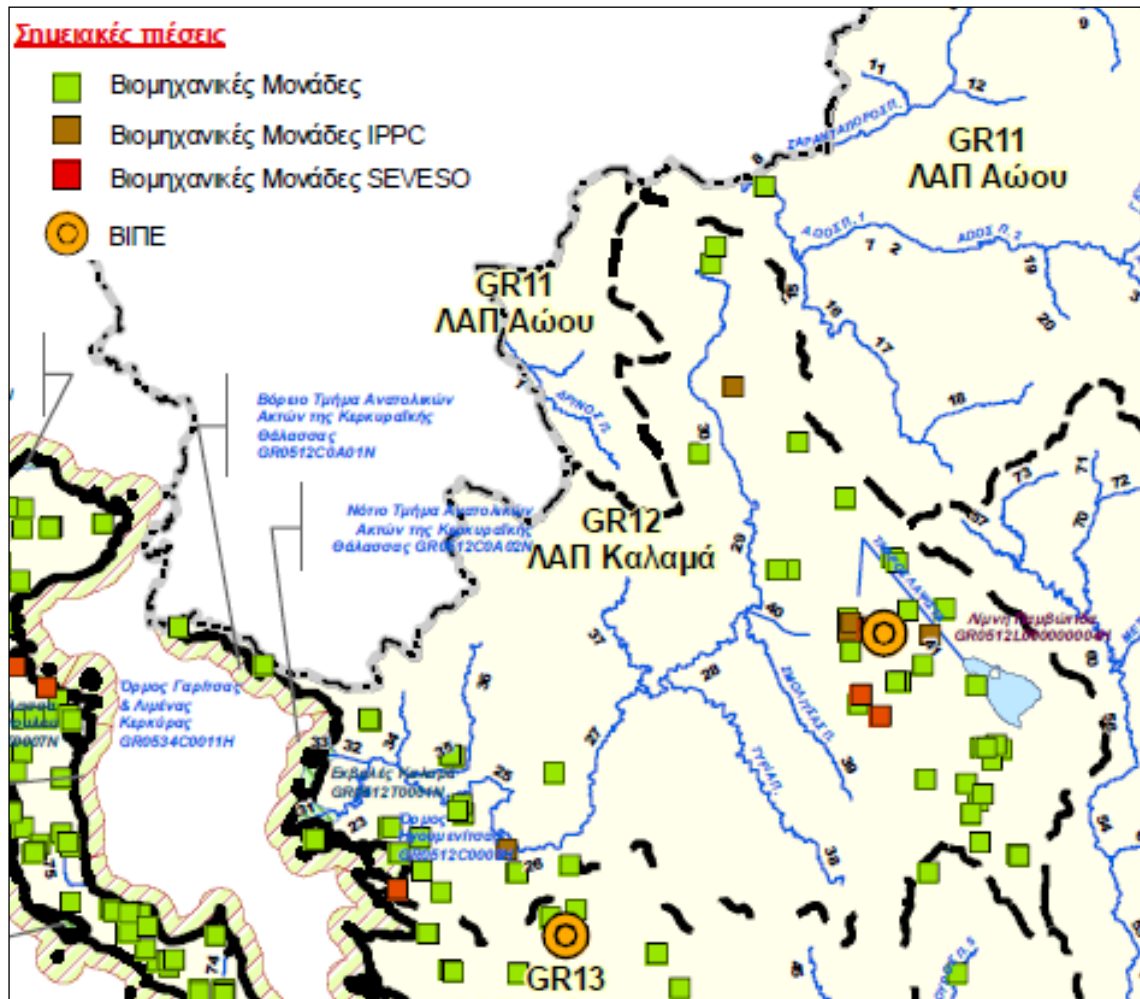
Πίνακας 3.4.3-2. Μέσου βάρους ζώου

Είδος	Βάρος (kg)
Χοιρομητέρες	200
Χοιρίδια	60
Αγελάδες	600
Βοοειδή-Μοσχάρια	450
Όρνιθες αυγοπαραγωγής	2,2
Όρνιθες κρεατοπαραγωγής	1,8

3.4.4 Βιομηχανικές μονάδες

Οι βιομηχανικές μονάδες της περιοχής μελέτης στην πλειοψηφία τους ανήκουν στον δευτερογενή τομέα και είναι μικρές για την εξυπηρέτηση των τοπικών αγορών. Το μεγαλύτερο μέρος της δραστηριότητας απασχολείται με τη συσκευασία και την μεταποίηση αγροτικών προϊόντων (σφαγεία, βιομηχανία γάλατος, ελαιολιβερία). Επίσης, στην περιοχή υφίσταται και η Βιομηχανική Περιοχή (ΒΙΠΕ) Ιωαννίνων η οποία, όμως, απορρέει στην ΕΕΛ Ιωαννίνων και δεν περιλαμβάνεται.

Στο Σχήμα 3.4.4-1 παρουσιάζονται οι βιομηχανικές μονάδες στη λεκάνη απορροής του Καλαμά.



Σχήμα 3.4.4-1 Θέσεις βιομηχανικών μονάδων (ΥΠΕΚΑ)

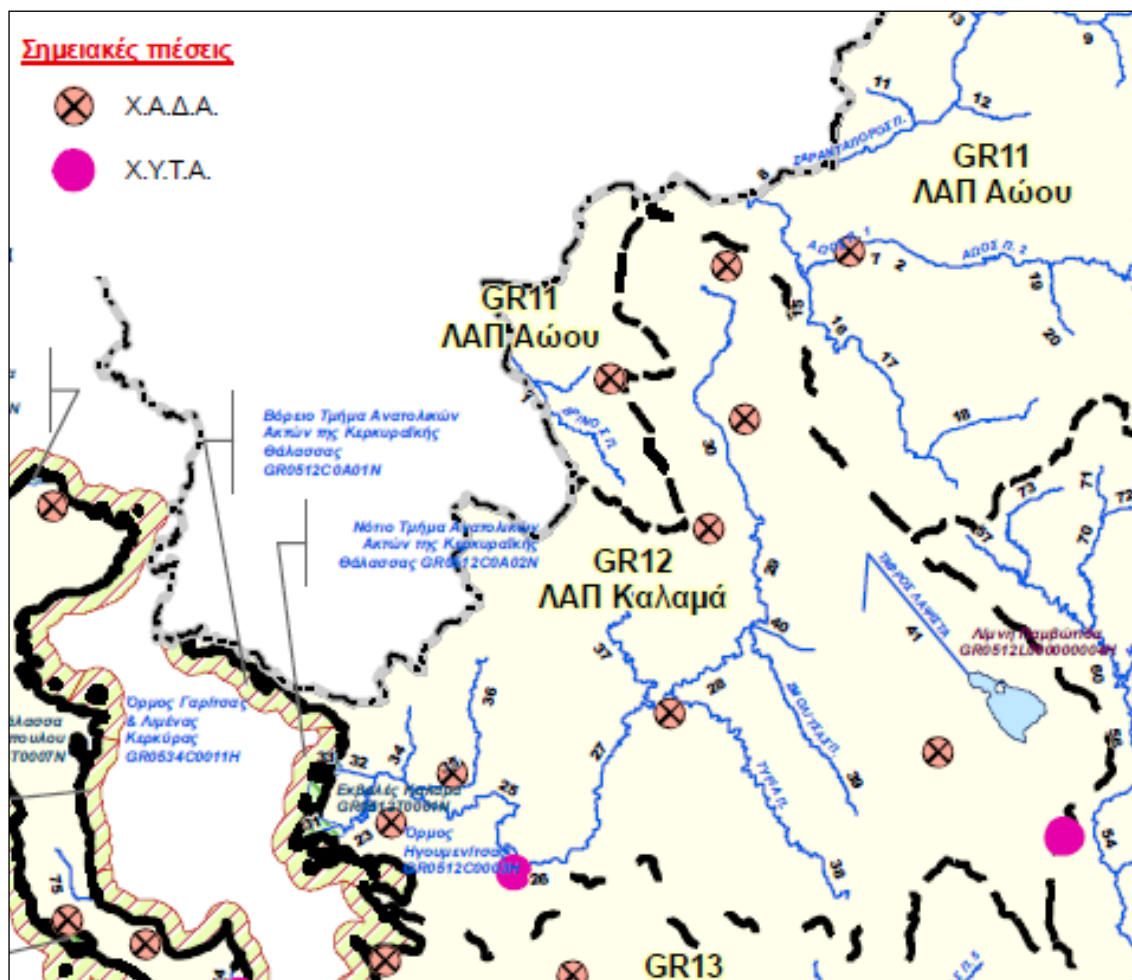
Τα στοιχεία που έχουν ληφθεί έχουν συλλεγεί με την παρακάτω μεθοδολογία. Αρχικά, έγινε καταγραφή των στοιχείων βιομηχανικών μονάδων της περιοχής και κατηγοριοποίησή τους ανάλογα με τον τομέα δραστηριότητας. Στη συνέχεια, με χρήση ανάλογων συντελεστών από διεθνή βιβλιογραφία και σε συνάρτηση με τη δυναμικότητα της εκάστοτε μονάδας καθορίστηκαν τα δεδομένα ρύπανσης. Τέλος, καταρτήθηκε ένας πίνακας (Παράρτημα) με την ονομασία, τη γεωγραφική θέση και τα δεδομένα ρύπανσης.

3.4.5 Χώροι Ανεξέλεγκτης Διάθεσης Απορριμμάτων (ΧΑΔΑ)

Στη λεκάνη απορροής του Καλαμά βρίσκονται 7 ΧΑΔΑ οι οποίοι δεν είναι ενεργοί αλλά ούτε και αποκατεστημένοι. Λόγω έλλειψης στοιχείων για τους επιμέρους ΧΑΔΑ χρησιμοποιήθηκαν τα συγκεντρωτικά στοιχεία πιέσεων που υπάρχουν για τη λεκάνη απορροής του Καλαμά και θεωρήθηκε πως ισοκατανέμονται. Στον Πίνακα 3.4.5-1 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά φορτία των ΧΑΔΑ και στο Σχήμα 3.4.5-1 οι θέσεις των ΧΑΔΑ στη λεκάνη. Επίσης, δίνονται και οι θέσεις των ΧΥΤΑ στη λεκάνη που δε συμπεριλαμβάνονται στον σχεδιασμό, όπως εξηγήθηκε στην παράγραφο 3.4.1.

Πίνακας 3.4.5-1. Εκτιμώμενα ρυπαντικά φορτία των ΧΑΔΑ

ΛΑΠ	Αριθμός ΧΑΔΑ	BOD (tn/έτος)	N (tn/έτος)	P (tn/έτος)
Καλαμά (GR12)	7	48	29	24



Σχήμα 3.4.5-1. Θέσεις ΧΑΔΑ (ΥΠΕΚΑ)

3.4.6 Αστικά απόβλητα

Υπάρχουν οικισμοί όπου είτε δεν υπάρχει κατασκευασμένο δίκτυο, είτε το δίκτυό τους δεν καταλήγει σε ΕΕΛ, αλλά απορρέει κατευθείαν στον αποδέκτη. Στη λεκάνη απορροής του ποταμού Καλαμά υπάρχουν 309 οικισμοί κάτω των 2000 ισοδύναμων κατοίκων και 4 οικισμοί μεταξύ 2000~10000 ισοδύναμων κατοίκων, οι οποίοι δεν έχουν ΕΕΛ. Ο υπολογισμός των φορτίων τους γίνεται σύμφωνα με τον Πίνακα 3.4.6-1, ενώ στον Πίνακα 3.4.6-2 παρουσιάζονται τα φορτία ανά υπολεκάνη.

Πίνακας 3.4.6-1. Ανεπεξέργαστα αστικά λύματα

Παράμετρος	Μονάδα μέτρησης	Φορτίο
Οργανικό φορτίο	g BOD/ κάτοικο/ ημέρα	60
Ολικά αιωρούμενα στερεά	g TSS/ κάτοικο/ ημέρα	75
Ολικό άζωτο	g TN/ κάτοικο/ ημέρα	12
Ολικός φώσφορος	g TP/ κάτοικο/ ημέρα	2.5

Πίνακας 3.4.6-2. Ανεπεξέργαστα αστικά λύματα

Όνομα	BOD (kg/yr)	N (kg/yr)	P (kg/yr)
Θυαμίσ Π. Καλαμάς 9	18016	19003	790
Θυαμίσ Π. Καλαμάς 8	6084	1738	76
Θυαμίσ Π. Καλαμάς 7	9692	2769	249
Θυαμίσ Π. Καλαμάς 6	282	81	4

Θυαμής Π. Καλαμάς 5	5933	1695	63
Θυαμής Π. Καλαμάς 4	10899	3114	249
Θυαμής Π. Καλαμάς 3	2820	810	40
Τεχνητό Τμήμα Εκβολής Καλαμά 2	3363	961	39
Τεχνητό Τμήμα Εκβολής Καλαμά 1	0	0	0
Τάφρος Λαψίστας	28138	8039	355
Κληματιάς (Ρέμα)	2538	725	38
Σμολίτσας	8370	2769	103
Τύρια	8055	2301	79
Λαγκαβίτσας (Ρέμα)	4448	1271	45
Καλπακιώτικος 2	5940	1697	61
Καλπακιώτικος 1	7038	2024	82
Άσπρο	10201020	292292	1414

Στον Πίνακα 3.4.6-2 είναι προφανές πως τα φορτία είναι πολύ μικρά και δεν έχουν τόσο μεγάλη συνεισφορά. Εξαιρέση αποτελεί η υπολεκάνη του παραποτάμου Άσπρου, η οποία δέχεται μία σημαντική πίεση από τους γύρω οικισμούς που αποχετεύουν χωρίς ΕΕΛ. Προφανώς, στη λεκάνη αυτή συμβάλλουν πολλοί οικισμοί χωρίς εγκαταστάσεις επεξεργασίας.

3.4.7 Γεωργία

Η σημαντικότερη γραμμική ρύπανση στην περιοχή μελέτης προέρχεται από την γεωργία. Αυτό συμβαίνει λόγω της λίπανσης και των φυτοφαρμάκων που εφαρμόζονται στις καλλιέργειες με αποτέλεσμα την παραγωγή ρύπων μορφής, κατά κύριο λόγο φωσφόρου και αζώτου.

Ωστόσο, οι χρήσεις γης δεν είναι ίδιες ανά υπολεκάνη. Σημαντικές πιέσεις εμφανίζονται κυρίως στην περιοχή της Ηγουμενίτσας και εκεί έγινε η εφαρμογή των φορτίων.

Τα ρυπαντικά φορτία δίνονται ως εκτιμώμενες συγκεντρώσεις στις απορροές ανά υπολεκάνη. Έτσι, για τον υπολογισμό των πιέσεων προσδιορίστηκε η επιφανειακή απορροή κάθε λεκάνης και εκτιμήθηκε το φορτίο που καταλήγει στα αντίστοιχα υδάτινα σώματα. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.4.7-1.

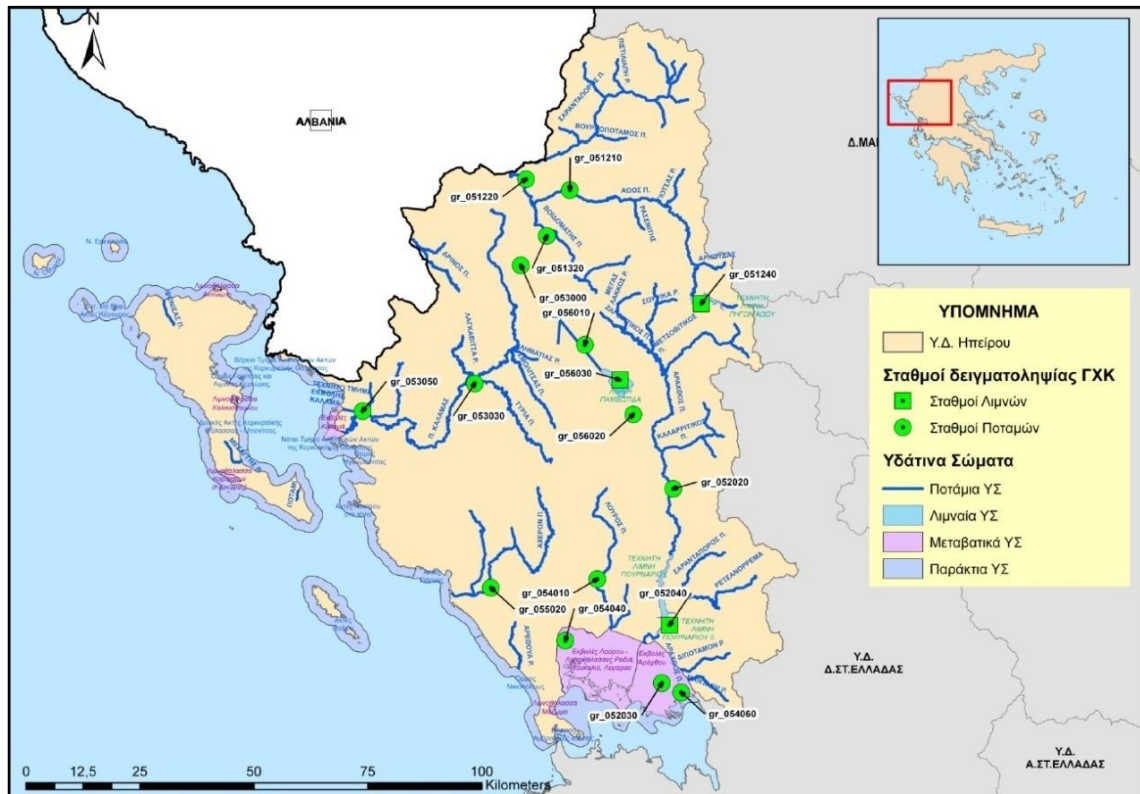
Πίνακας 3.4.7-1. Εκτιμώμενες συγκεντρώσεις

Όνομα λεκάνης	N (mg/l)	P (mg/l)
Θυαμής Π. Καλαμάς 3	1.0	0.2
Τεχνητό Τμήμα Εκβολής Καλαμά 2	0.7	0.2

3.5 Μετρήσεις συγκέντρωσης και θερμοκρασίες

3.5.1 Γενικά

Οι διαθέσιμες μετρήσεις για την περιοχή ήταν ελάχιστες και σε διάσπαρτα χρονικά διαστήματα. Οι σταθμοί μετρήσεων είναι μόνο τρεις κατά μήκος του ποταμού και συγκεκριμένα είναι οι: Καλπάκι (gr_053000), Γέφυρα Βροσίνας (gr_053030) και Εκβολές (gr_053050). Οι θέσεις των σταθμών φαίνονται στο Σχήμα 3.5.1-1. Επίσης, κάποιες φορές οι μετρήσεις δε γίνονται τον ίδιο μήνα σε όλα τα σημεία. Έτσι, για τη μέγιστη αξιοποίηση των διατιθέμενων στοιχείων, δημιουργήθηκαν και περίοδοι μετρήσεων.



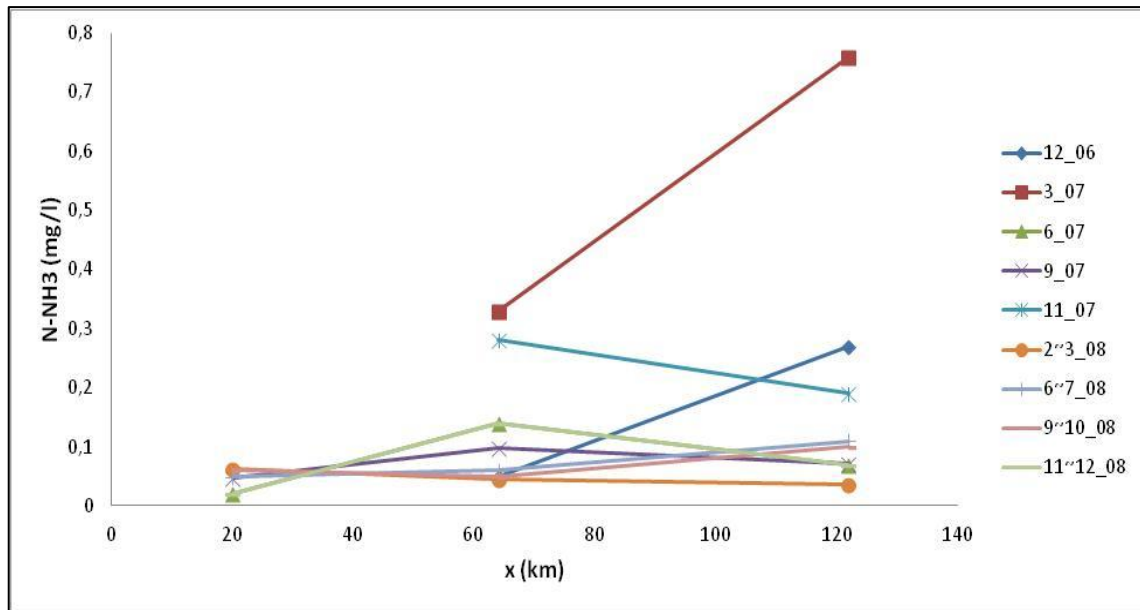
Σχήμα 3.5.1-1. Θέσεις σταθμών μετρήσεων (ΥΠΕΚΑ)

3.5.2 Συγκεντρώσεις ποιοτικών παραμέτρων

Χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές των συγκεντρώσεων όπως αυτές ελήφθησαν από τους σταθμούς δειγματοληψίας του ΓΧΚ. Στους Πίνακες 3.5.2-1, 3.5.2-2, 3.5.2-3 και στα Σχήματα 3.5.2-1, 3.5.2-2, 3.5.2-3 παρουσιάζονται οι μετρήσεις της αμμωνίας, του φωσφόρου και του διαλυμένου οξυγόνου αντίστοιχα. Το οργανικό φορτίο είναι σε όλες τις μετρήσεις κάτω από το ανιχνεύσιμο όριο, που κυμαίνεται μεταξύ 2~3 mg/l, με μοναδική εξαίρεση την περίοδο 9_2008.

Πίνακας 3.5.2-1. Συγκεντρώσεις N-NH₃

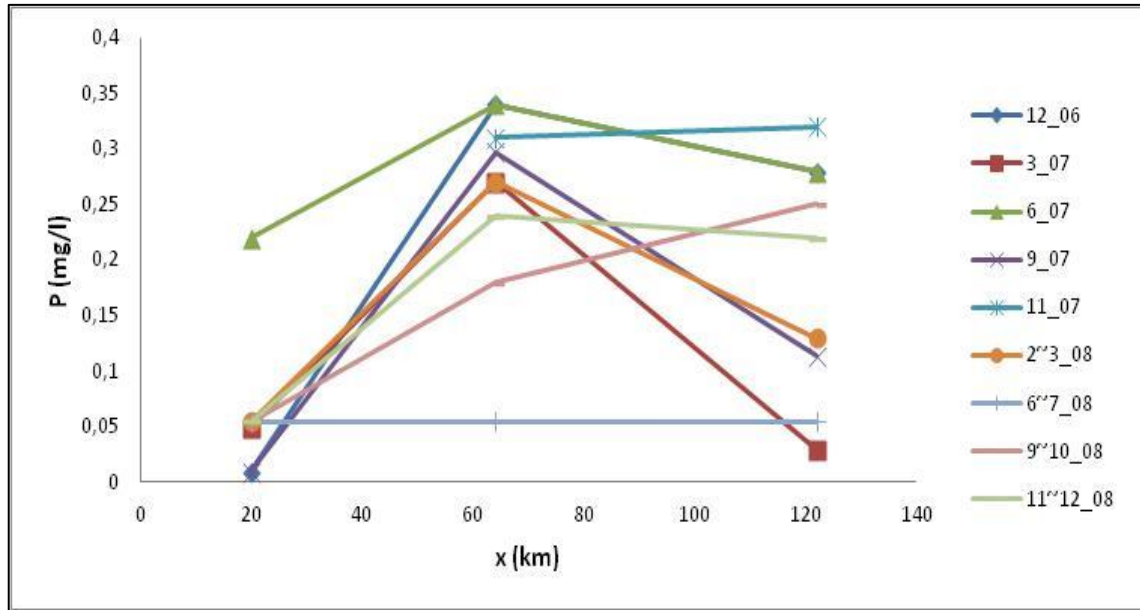
N-NH ₃ (mg/l)	Σταθμός	gr_053000	gr_053030	gr_053050
	x (km) Μήνας	21.0	64.0	122.0
2006	12	-	0.05	0.27
	3	-	0.33	0.76
2007	6	0.02	0.14	0.07
	9	0.047	0.098	0.072
	11	-	0.28	0.19
2008	2~3	0.062	0.044	0.036
	6~7	0.05	0.06	0.11
	9~10	0.06	0.05	0.1
	11~12	0.02	0.14	0.07



Σχήμα 3.5.2-1. Συγκεντρώσεις N-NH₃

Πίνακας 3.5.2-2. Συγκεντρώσεις P

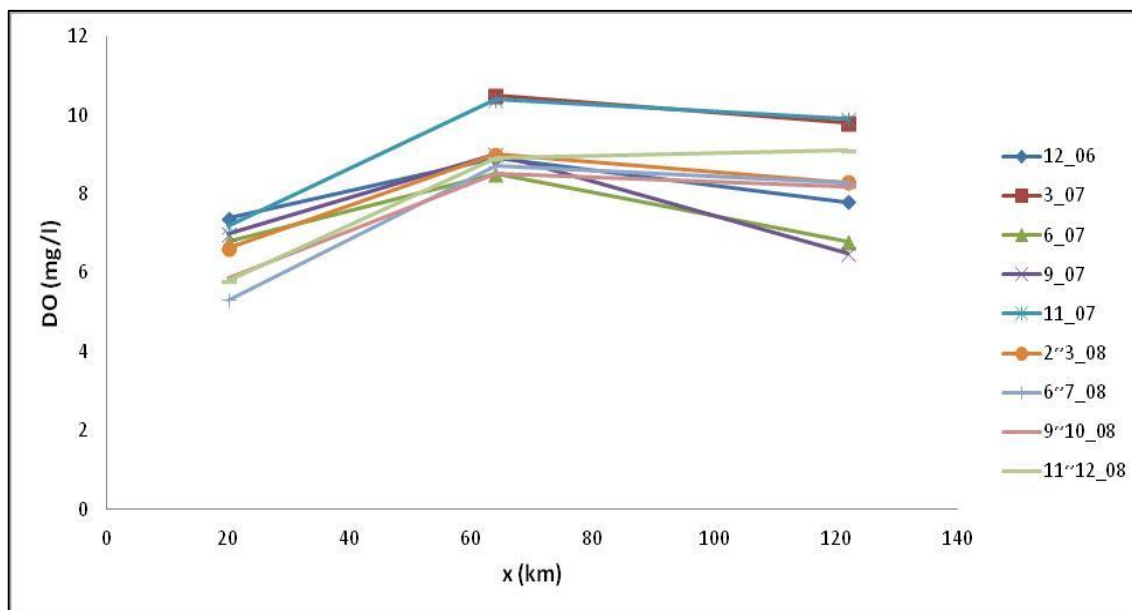
P (mg/l)	Σταθμός	gr_053000	gr_053030	gr_053050
	x (km) Μήνας	21.0	64.0	122.0
2006	12	0.01	0.34	0.28
	3	0.05	0.27	0.03
2007	6	0.22	0.34	0.28
	9	0.01	0.297	0.114
	11	-	0.31	0.32
	2~3	0.055	0.27	0.13
2008	6~7	0.055	0.055	0.055
	9~10	0.055	0.18	0.25
	11~12	0.055	0.24	0.22
	6~7	0.055	0.055	0.055



Σχήμα 3.5.2-2. Συγκεντρώσεις P

Πίνακας 3.5.2-3. Συγκεντρώσεις DO

DO (mg/l)	Σταθμός	gr_053000	gr_053030	gr_053050
	x (km) Μήνας	21.0	64.0	122.0
2006	12	7.4	8.9	7.8
	3	-	10.5	9.8
2007	6	6.8	8.5	6.8
	9	7	9	6.5
	11	7.2	10.4	9.9
	2~3	6.63	9	8.3
2008	6~7	5.32	8.7	8.27
	9~10	5.87	8.53	8.2
	11~12	5.81	8.9	9.1



Σχήμα 3.5.2-3. Συγκεντρώσεις DO

3.5.3 Θερμοκρασίες

Όπως αναφέρθηκε, οι μετρήσεις είναι πολύ περιορισμένες και όχι σε τακτά χρονικά διαστήματα. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.5.3-1.

Πίνακας 3.5.3-1. Θερμοκρασίες νερού °C

	Σταθμός	gr_053000	gr_053030	gr_053050
	x (km)	21.0	64.0	122.0
	Μήνας			
2006	12	12.5	9.9	11.6
	3	13.0	11.0	12.7
2007	6	13.0	17.0	18.4
	9	12.3	16.5	18.0
	11	12.3	12.5	12.7
	2~3	15.2	13.0	22.9
2008	6~7	13.8	20.1	22.9
	9~10	12.3	18.0	18.0
	11~12	13.7	13.8	12.7

4 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

4.1 Μοντέλο υδραυλικής συμπεριφοράς

4.1.1 Γενικά

Ο προσδιορισμός των υδροδυναμικών και γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών έγινε με βάση τα τεύχη τεκμηρίωσης του διαχειριστικού σχεδίου του υδατικού διαμερίσματος, που εκπονείται από το ΥΠΕΚΑ, καθώς και από αυτοψία για στοιχεία για τα οποία δεν υπήρχαν δεδομένα. Συγκεκριμένα, από τα τεύχη λήφθηκαν οι μέσες παροχές Q και οι κλίσεις J, ενώ για τον προσδιορισμό του εκάστοτε πλάτους πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε όλο το μήκος του ποταμού. Τέλος, σημειώνεται πως κατά τη διαδικασία των υπολογισμών θεωρείται σταθερό πεδίο ροής.

4.1.2 Υδροδυναμικά χαρακτηριστικά

Για τους υδραυλικούς υπολογισμούς θεωρείται πως κάθε τμήμα του ποταμού έχει ορθογωνική διατομή, σταθερή κλίση κατά μήκος J και σταθερή παροχή Q. Το βάθος ροής y υπολογίστηκε με την εμπειρική εξίσωση Manning:

$$Q = \frac{1}{n} ER^{2/3} \sqrt{J} = \frac{1}{n} E \left(\frac{E}{\Pi}\right)^{2/3} \sqrt{J} = \frac{1}{n} (w * y) \left(\frac{w*y}{w+2*y}\right)^{2/3} \sqrt{J} \quad (4.1-1)$$

όπου E (E=w*y) είναι το εμβαδό της διατομής, Π (Π=w+2*y) η περίμετρος της διατομής και n ο συντελεστής τριβής κατά Manning.

Αντίστοιχα υπολογίζεται η ταχύτητα ροής:

$$U = \frac{Q}{E} = \frac{Q}{w*y} \quad (4.1-2)$$

Τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά, όπως υπολογίστηκαν παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1.2-1.

Πίνακας 4.1.2-1. Βάθη και ταχύτητες ροής ανά τμήμα

Τμήμα ποταμού	Βάθος ροής (m)	Ταχύτητα ροής (m/d)
9	0.66	106653.9
8	0.68	105125.5
7	1.4	115440.5
6	2	58783.2
5	0.92	107833.9
4	2.2	42035.8
3	2.27	31906.0
2	4.01	28606.3
1	4.02	28537.9

Όπως αναφέρεται παραπάνω για την υλοποίηση των υδραυλικών υπολογισμών έγινε η παραδοχή πως το πλάτος παραμένει σταθερό κατά μήκος του τμήματος. Η παραδοχή αυτή δεν ακολουθείται για τον υπολογισμό των ποιοτικών χαρακτηριστικών του νερού, όπως εξηγείται στην παράγραφο 4.2.

4.1.3 Συντελεστής διασποράς D

Ο υπολογισμός του συντελεστή διασποράς D μπορεί να γίνει είτε με μετρήσεις πεδίου είτε με χρήση αναλυτικών εξισώσεων που έχουν δημιουργηθεί για τον σκοπό αυτό (Kashefirour, Falconer, 2002). Στην παρούσα εργασία ο υπολογισμός του συντελεστή έγινε με αξιοποίηση της εξίσωσης (4.1-3), η οποία προσεγγίζει ικανοποιητικά τα πραγματικά δεδομένα.

$$D = \left[7.428 + 1.775 \left(\frac{W}{H}\right)^{0.62} \left(\frac{U_*}{U}\right)^{0.572} \right] HU \left(\frac{U}{U_*}\right) \quad (4.1-3)$$

Όπου:

- w : Πλάτος διατομής [M]
- H : Βάθος ροής [M]
- U* : Ταχύτητα τριβής [M T⁻¹]
- U : Ταχύτητα ροής [M T⁻¹]

Για τον προσδιορισμό ταχύτητας τριβής χρησιμοποιήθηκε η εξής ανάλυση:

$$U_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (4.1-4)$$

Όπου τ_w είναι η διατμητική τάση του ορίου (4.1-4α) και ρ η πυκνότητα του νερού που λήφθηκε ίση με 998 kg/m^3 .

$$\frac{8\tau_w}{\rho U} = \frac{f}{8} \quad (4.1-4\alpha)$$

Όπου f ο συντελεστής τριβών που υπολογίστηκε από την εξίσωση Colebrook (4.1-4β).

$$f = 1.8 \log(0.145Re) \quad (4.1-4\beta)$$

Όπου Re είναι ο αριθμός Reynolds (4.1-4γ).

$$Re = \frac{UR}{\nu} = \frac{UE}{\nu\pi} \quad (4.1-4\gamma)$$

Όπου R είναι η υδραυλική ακτίνα και ν η κινηματική συνεκτικότητα του νερού που λήφθηκε ίση με $1.01 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Στον πίνακα 4.1.3-1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα κατά τον προσδιορισμό του συντελεστή διασποράς D .

Πίνακας 4.1.3-1. Αποτελέσματα κατά τον υπολογισμό του D

Τμήμα ποταμού	Αριθμός Reynolds	Συντελεστής τριβών f	Διατμητική τάση ορίου τ_w	Ταχύτητα τριβής U_*	Συντελεστής διασποράς D
9	6,1E+10	17.906	3.2E+12	56414.0	1863551.6
8	6,3E+10	17.932	3.1E+12	55646.1	1982664.3
7	1,4E+11	18.556	3.9E+12	62159.1	4173952.6
6	1,0E+11	18.305	9.9E+11	31437.4	3033836.6
5	9,3E+10	18.236	3.3E+12	57561.9	3579350.8
4	8,3E+10	18.144	5.0E+11	22381.7	2628315.5
3	6,6E+10	17.968	2.9E+11	16905.4	2230833.0
2	9,2E+10	18.229	2.3E+11	15266.8	2617274.4
1	9,2E+10	18.228	2.3E+11	15230.2	2615968.9

4.1.4 Μετάβαση μεταξύ τμημάτων

Κατά τη μετάβαση από ένα τμήμα του κύριου ποταμού στο επόμενο θεωρείται πως τη στιγμή της μετάβασης μεταξύ των διατομών διατηρείται σταθερή η ταχύτητα ροής. Ο υπολογισμός του μήκους που απαιτείται έγινε με τη μέθοδο της βήμα προς βήμα ολοκλήρωσης (4.1-5) (Νουτσόπουλος, Χριστοδούλου και Παπαθανασιάδης, 2007). Υπολογίστηκε πως το απαιτούμενο μήκος για να επιτευχθεί το απαιτούμενο βάθος ροής είναι μικρότερο από το εκάστοτε dx μήκος, που έχει διαιρεθεί το τμήμα του ποταμού, οπότε δε χρειάζονται περαιτέρω τροποποιήσεις.

$$\Delta x = x_2 - x_1 = \frac{\left(y_2 + \frac{U_2^2}{2g}\right) - \left(y_1 + \frac{U_1^2}{2g}\right)}{J_0 - \frac{n^2}{2} \left(\frac{U_1^2}{R_1^{4/3}} + \frac{U_2^2}{R_2^{4/3}}\right)} \quad (4.1-5)$$

Όπου Δx είναι το μήκος που απαιτείται για τη μετάβαση, J_0 η κλίση πυθμένα και R η υδραυλική ακτίνα.

4.2 Μοντέλο προσομοίωσης ποιοτικών χαρακτηριστικών

4.2.1 Γενικά

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας δομήθηκε ένα μονοδιάστατο μαθηματικό μοντέλο με στόχο την προσομοίωση της επίπτωσης των ρυπαντικών πιέσεων στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του ποταμού Καλαμά.

Το μοντέλο είναι ένας κώδικας γραμμένος σε περιβάλλον EXCEL και στηρίζεται στην επίλυση διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν τη μεταφορά και τη διάχυση. Επιλύεται, με χρήση πεπερασμένων διαφορών και του σχήματος ανάντη διαφορών (UDS). Προσομοιώνει τις συγκεντρώσεις ποιοτικών χαρακτηριστικών του νερού λαμβάνοντας υπόψη τα υδροδυναμικά και γεωμορφολογικά στοιχεία του ποταμού. Στη συγκεκριμένη εργασία μελετήθηκαν τέσσερα ποιοτικά χαρακτηριστικά (φώσφορος (P), αμμωνία (N-NH₃), BOD₅ (B), διαλυμένο οξυγόνο (DO)), αφού κρίθηκαν ως τα πιο σημαντικά.

4.2.2 Διαφορικές εξισώσεις

Οι θεμελιώδεις εξισώσεις στις οποίες βασίζεται η δόμηση του μοντέλου είναι οι: εξίσωση συνέχειας κατά την οριζόντια διεύθυνση και εξίσωση ισορροπίας. Συγκεκριμένα, επιλύεται η εξίσωση διατήρησης μάζας για τη συγκέντρωση φ μίας ποιοτικής παραμέτρου του νερού σε έναν ορισμένο όγκο του υδάτινου σώματος. Έπειτα, η τελευταία διακριτοποιείται, με τη θεώρηση των ανάντη διαφορών (UDS).

Οι διαφορικές εξισώσεις διατήρησης μάζας πεπερασμένων διαφορών μπορούν να γραφούν ως εξής:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = Q_{in} - Q_{out} \quad (4.2-1)$$

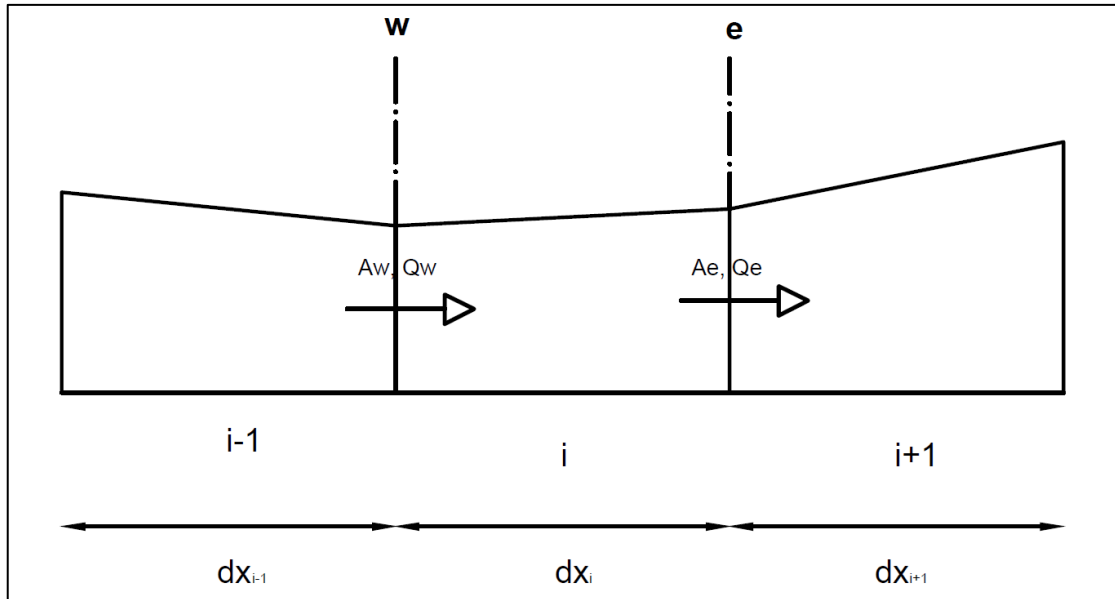
$$\frac{\partial(V\varphi)}{\partial t} = -\frac{\partial(Q\varphi)}{\partial x} dx + \frac{\partial}{\partial x} \left(AD \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) dx + Q_L \varphi_L + k\varphi A dx \quad (4.2-2)$$

Όπου:

- φ : Συγκέντρωση στον ποταμό [M L⁻³]
- φ_L : Συγκέντρωση σε πλευρική εισροή [M L⁻³]
- A : Εμβαδό διατομής ποταμού [M²]
- D : Συντελεστής διασποράς [L² T⁻¹]
- V : Όγκος αναφοράς [L³]
- Q : Παροχή [L³ T⁻¹]
- Q_{in} : Παροχή εισροής στον όγκο αναφοράς i [L³ T⁻¹]
- Q_{out} : Παροχή εκροής στον όγκο αναφοράς i [L³ T⁻¹]
- k : Συντελεστής φθοράς [T⁻¹]

Η εξίσωση (4.2-1) λύνεται για μόνιμο πεδίο ροής, συνεπώς θεωρείται $\frac{\partial V}{\partial t} = 0$ για όλο το μήκος του ποταμού και κάθε χρονική στιγμή.

Η εξίσωση (4.2-2) διακριτοποιείται χρησιμοποιώντας το αριθμητικό πλέγμα που φαίνεται στο Σχήμα 4.2.2-1.



Σχήμα 4.2.2-1. Πλέγμα που χρησιμοποιείται για τη διακριτοποίηση

Μετά τη διακριτοποίηση η εξίσωση (4.2-2) μετατρέπεται ως εξής:

$$V \frac{\varphi_i^1 - \varphi_i^0}{\Delta t} = - \frac{(Q_e^0 \varphi_e^0 - Q_w^0 \varphi_w^0)}{dx} dx + \left[\frac{A_e^0 D_e^0 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)_e^0 - A_w^0 D_w^0 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)_w^0}{dx} \right] dx + Q_L \varphi_L + k \varphi A dx \quad (4.2-3)$$

Με δείκτη i σημαίνεται το εξεταζόμενο τμήμα και αντίστοιχα $i-1$, $i+1$ το προηγούμενο και επόμενο. Επίσης, ο εκθέτης 0 υποδηλώνει τη γνωστή τιμή του στοιχείου (την προηγούμενη χρονική στιγμή), ενώ ο εκθέτης 1 την προς εύρεση τιμή (την εξεταζόμενη χρονική στιγμή). Τέλος, οι δείκτες w και e συμβολίζουν τις τιμές στα “δυτικά” και “ανατολικά” του όγκου αναφοράς.

Αλλά:

$$Q = uA \quad (4.2-4)$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (4.2-3) την (4.2-4) και απαλοφώνοντας η πρώτη μετατρέπεται:

$$V \frac{\varphi_i^1 - \varphi_i^0}{\Delta t} = -(u_e^0 A_e^0 \varphi_e^0 - u_w^0 A_w^0 \varphi_w^0) + \left[A_e^0 D_e^0 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)_e^0 - A_w^0 D_w^0 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)_w^0 \right] + Q_L \varphi_L + k \varphi A dx \quad (4.2-5)$$

Η (4.2-5) αποτελεί την κύρια διαφορική διακριτοποιημένη εξίσωση που με βάση αυτή και το σχήμα των ανάντη διαφορών προκύπτουν οι εξισώσεις του μοντέλου για τρεις περιπτώσεις:

1. Για $i=1$
2. Για $i=2 \sim (n-1)$
3. Για $i=n$

Ειδικότερα για την πρώτη περίπτωση για $i=1$ ισχύουν:

$$\varphi_e^0 = \varphi_i^0 \quad (4.2-6\alpha)$$

$$\varphi_w^0 = \varphi_{up}^0 \quad (4.2-6\beta)$$

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)_e^0 = \frac{\varphi_{i+1}^0 - \varphi_i^0}{dx} \quad (4.2-6\gamma)$$

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)_w^0 = \frac{\varphi_i^0 - \varphi_{up}^0}{0.5dx} \quad (4.2-6\delta)$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (4.2-6α), (4.2-6β), (4.2-6γ) και (4.2-6δ) στην (4.2-5), η τελευταία μπορεί να γραφεί:

$$V \frac{\varphi_i^1 - \varphi_i^0}{dt} = -(u_e^0 A_e^0 \varphi_i^0 - u_w^0 A_w^0 \varphi_{up}^0) + A_e^0 D_e^0 \frac{\varphi_{i+1}^0 - \varphi_i^0}{dx} - A_w^0 D_w^0 \frac{\varphi_i^0 - \varphi_{up}^0}{0.5dx} + Q_L \varphi_L + k\varphi A dx \quad (4.2-7)$$

Απαλοίφοντας από το αριστερό μέλος της (4.2-7) τους όρους και κάνοντας πράξεις λαμβάνεται:

$$\varphi_i^1 - \varphi_i^0 = -u_e^0 A_e^0 \varphi_i^0 \frac{dt}{V} + u_w^0 A_w^0 \varphi_{up}^0 \frac{dt}{V} + A_e^0 D_e^0 \frac{\varphi_{i+1}^0}{dx} \frac{dt}{V} - A_e^0 D_e^0 \frac{\varphi_i^0}{dx} \frac{dt}{V} - A_w^0 D_w^0 \frac{\varphi_i^0}{0.5dx} \frac{dt}{V} + A_w^0 D_w^0 \frac{\varphi_{up}^0}{0.5dx} \frac{dt}{V} + Q_L \varphi_L \frac{dt}{V} + k\varphi dt \quad (4.2-8)$$

Με ομαδοποίηση κοινών όρων η (4.2-8) γράφεται:

$$\varphi_i^1 = \varphi_{up}^0 \left(u_w^0 A_w^0 \frac{dt}{V} + 2A_w^0 D_w^0 \frac{dt}{dxV} \right) + \varphi_i^0 \left(1 - u_e^0 A_e^0 \frac{dt}{V} - A_e^0 D_e^0 \frac{dt}{dxV} - 2A_w^0 D_w^0 \frac{dt}{dxV} \right) + \varphi_{i+1}^0 \left(A_e^0 D_e^0 \frac{dt}{dxV} \right) + Q_L \varphi_L \frac{dt}{V} + k\varphi dt \quad (4.2-9)$$

Για να καταλήξει στην τελική της μορφή:

$$\varphi_i^1 = \varphi_{up}^0 \left(u_w^0 A_w^0 + 2 \frac{A_w^0 D_w^0}{dx} \right) \frac{dt}{V} + \varphi_i^0 \left(\frac{V}{dt} - u_e^0 A_e^0 - \frac{A_e^0 D_e^0}{dx} - 2 \frac{A_w^0 D_w^0}{dx} \right) \frac{dt}{V} + \varphi_{i+1}^0 \left(\frac{A_e^0 D_e^0}{dx} \right) \frac{dt}{V} + Q_L \varphi_L \frac{dt}{V} + k\varphi dt \quad (4.2-10)$$

Αντίστοιχα για $i=2\sim(n-1)$ ισχύουν:

$$\varphi_e^0 = \varphi_i^0 \quad (4.2-11\alpha)$$

$$\varphi_w^0 = \varphi_{i-1}^0 \quad (4.2-11\beta)$$

$$\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right)_e^0 = \frac{\varphi_{i+1}^0 - \varphi_i^0}{dx} \quad (4.2-11\gamma)$$

$$\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right)_w^0 = \frac{\varphi_i^0 - \varphi_{i-1}^0}{dx} \quad (4.2-11\delta)$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (4.2-11α), (4.2-11β), (4.2-11γ) και (4.2-11δ) στην (4.2-5), η τελευταία μπορεί να γραφεί:

$$V \frac{\varphi_i^1 - \varphi_i^0}{dt} = - (u_e^0 A_e^0 \varphi_i^0 - u_w^0 A_w^0 \varphi_{i-1}^0) + A_e^0 D_e^0 \frac{\varphi_{i+1}^0 - \varphi_i^0}{dx} - A_w^0 D_w^0 \frac{\varphi_i^0 - \varphi_{i-1}^0}{dx} + Q_L \varphi_L + k\varphi A dx \quad (4.2-12)$$

Απαλοίφοντας από το αριστερό μέλος της (4.2-12) τους όρους και κάνοντας πράξεις λαμβάνεται:

$$\varphi_i^1 - \varphi_i^0 = -u_e^0 A_e^0 \varphi_i^0 \frac{dt}{V} + u_w^0 A_w^0 \varphi_{i-1}^0 \frac{dt}{V} + A_e^0 D_e^0 \frac{\varphi_{i+1}^0}{dx} \frac{dt}{V} - A_e^0 D_e^0 \frac{\varphi_i^0}{dx} \frac{dt}{V} - A_w^0 D_w^0 \frac{\varphi_i^0}{dx} \frac{dt}{V} + A_w^0 D_w^0 \frac{\varphi_{i-1}^0}{dx} \frac{dt}{V} + Q_L \varphi_L \frac{dt}{V} + k\varphi dt \quad (4.2-13)$$

Με ομαδοποίηση κοινών όρων η (4.2-13) γράφεται:

$$\varphi_i^1 = \varphi_{i-1}^0 \left(u_w^0 A_w^0 \frac{dt}{V} + A_w^0 D_w^0 \frac{dt}{dxV} \right) + \varphi_i^0 \left(1 - u_e^0 A_e^0 \frac{dt}{V} - A_e^0 D_e^0 \frac{dt}{dxV} - A_w^0 D_w^0 \frac{dt}{dxV} \right) + \varphi_{i+1}^0 \left(A_e^0 D_e^0 \frac{dt}{dxV} \right) + Q_L \varphi_L \frac{dt}{V} + k\varphi dt \quad (4.2-14)$$

Για να καταλήξει στην τελική της μορφή:

$$\varphi_i^1 = \varphi_{i-1}^0 \left(u_w^0 A_w^0 + \frac{A_w^0 D_w^0}{dx} \right) \frac{dt}{V} + \varphi_i^0 \left(\frac{V}{dt} - u_e^0 A_e^0 - \frac{A_e^0 D_e^0}{dx} - \frac{A_w^0 D_w^0}{dx} \right) \frac{dt}{V} + \varphi_{i+1}^0 \left(\frac{A_e^0 D_e^0}{dx} \right) \frac{dt}{V} + Q_L \varphi_L \frac{dt}{V} + k\varphi dt \quad (4.2-15)$$

Τέλος, για $i=n$ ισχύουν:

$$\varphi_e^0 = \varphi_{down}^0 = \varphi_i^0 \quad (4.2-16\alpha)$$

$$\varphi_w^0 = \varphi_{i-1}^0 \quad (4.2-16\beta)$$

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)_e^0 = \frac{\varphi_{down}^0 - \varphi_i^0}{0.5dx} = 0 \quad (4.2-16\gamma)$$

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)_w^0 = \frac{\varphi_i^0 - \varphi_{i-1}^0}{dx} \quad (4.2-16\delta)$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (4.2-16α), (4.2-16β), (4.2-16γ) και (4.2-16δ) στην (4.2-5), η τελευταία μπορεί να γραφεί:

$$V \frac{\varphi_i^1 - \varphi_i^0}{dt} = - (u_e^0 A_e^0 \varphi_i^0 - u_w^0 A_w^0 \varphi_{i-1}^0) - A_w^0 D_w^0 \frac{\varphi_i^0 - \varphi_{i-1}^0}{dx} + Q_L \varphi_L + k\varphi A dx \quad (4.2-17)$$

Απαλοίφοντας από το αριστερό μέλος της (4.2-17) τους όρους και κάνοντας πράξεις λαμβάνεται:

$$\begin{aligned} \varphi_i^1 - \varphi_i^0 &= -u_e^0 A_e^0 \varphi_i^0 \frac{dt}{V} + u_w^0 A_w^0 \varphi_{i-1}^0 \frac{dt}{V} - A_w^0 D_w^0 \frac{\varphi_i^0 - \varphi_{i-1}^0}{dx} \frac{dt}{V} + A_w^0 D_w^0 \frac{\varphi_{i-1}^0}{dx} \frac{dt}{V} \\ &+ Q_L \varphi_L \frac{dt}{V} + k\varphi dt \end{aligned} \quad (4.2-18)$$

Με ομαδοποίηση κοινών όρων η (4.2-18) γράφεται:

$$\begin{aligned} \varphi_i^1 &= \varphi_{i-1}^0 \left(u_w^0 A_w^0 \frac{dt}{V} + A_w^0 D_w^0 \frac{dt}{dx V} \right) + \varphi_i^0 \left(1 - u_e^0 A_e^0 \frac{dt}{V} - A_w^0 D_w^0 \frac{dt}{dx V} \right) \\ &+ Q_L \varphi_L \frac{dt}{V} + k\varphi dt \end{aligned} \quad (4.2-19)$$

Για να καταλήξει στην τελική της μορφή:

$$\begin{aligned} \varphi_i^1 &= \varphi_{i-1}^0 \left(u_w^0 A_w^0 + \frac{A_w^0 D_w^0}{dx} \right) \frac{dt}{V} + \varphi_i^0 \left(\frac{V}{dt} - u_e^0 A_e^0 - \frac{A_w^0 D_w^0}{dx} \right) \frac{dt}{V} \\ &+ Q_L \varphi_L \frac{dt}{V} + k\varphi dt \end{aligned} \quad (4.2-20)$$

Πρέπει να σημειωθεί πως όπου υπάρχει συμβολή παραποτάμων αυξάνεται η παροχή εντός του όγκου αναφοράς και έτσι για να ισχύει η εξίσωση ισορροπίας θα πρέπει $Q_e + Q_{in} = Q_w$. Έτσι, για τους όγκους συμβολής ισχύουν οι παρακάτω τροποποιήσεις στις υπάρχουσες εξισώσεις.

$$V \frac{\varphi_i^1 - \varphi_i^0}{\partial t} = - \frac{((Q_e^0 + Q_{in})\varphi_e^0 - Q_w^0\varphi_w^0)}{dx} dx + \frac{[A_e^0 D_e^0 (\frac{\partial \varphi}{\partial x})_e - A_w^0 D_w^0 (\frac{\partial \varphi}{\partial x})_w]}{dx} dx + Q_L \varphi_L + k\varphi A dx \quad (4.2-3\beta)$$

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία επίλυσης όπως και προηγούμενα από την (4.2-3β) καταλήγουμε στην τελική μορφή της (4.2-15β) για τους όγκους συμβολής.

$$\begin{aligned} \varphi_i^1 &= \varphi_{i-1}^0 \left(u_w^0 A_w^0 + Q_{in} + \frac{A_w^0 D_w^0}{dx} \right) \frac{dt}{V} + \varphi_i^0 \left(\frac{V}{dt} - u_e^0 A_e^0 - \frac{A_e^0 D_e^0}{dx} - \frac{A_w^0 D_w^0}{dx} \right) \frac{dt}{V} \\ &+ \varphi_{i+1}^0 \left(\frac{A_e^0 D_e^0}{dx} \right) \frac{dt}{V} + Q_L \varphi_L \frac{dt}{V} + k\varphi dt \end{aligned} \quad (4.2-15\beta)$$

Όπου αν χρειαστεί μπορεί να εκφραστεί και η παροχή εισόδου μέσω της εξίσωσης (4.2-4).

4.2.3 Συντελεστής k

Ο συντελεστής k αναπαριστά την αντίδραση που προκαλείται λόγω φυσικών, χημικών και βιολογικών εργασιών. Οι εξισώσεις των συντελεστών απομείωσης είναι διαφορετικές για κάθε παράμετρο και λήφθηκαν ως εξής (Stamou et al., 2005):

$$k_B = -ck_1 B \quad (4.2-21)$$

$$k_A = -ca_{23}A - pra \frac{A}{A+ca_2} up \quad (4.2-22)$$

$$k_O = ck_2(O_{SAT} - O) - ck_1 B - \frac{4.57-y_a}{y_a} ca_{23}A \quad (4.2-23)$$

$$k_P = -c_P P \quad (4.2-24)$$

Όπου ck_1 είναι ο συντελεστής αντίδρασης του BOD, ck_2 είναι ο συντελεστής αερισμού, ca_{23} είναι ο ρυθμός νιτροποίησης, c_P ο ρυθμός απομείωσης του φωσφόρου, y_a είναι ο συντελεστής απόδοσης των αυτοτροφικών οργανισμών, up είναι ο ρυθμός πρόσληψης αζώτου, pra ο συντελεστής απορρόφησης της αμμωνίας από τα φύκια, ca_2 είναι ίσο με 0.026 και O_{SAT} είναι η συγκέντρωση του κορεσμένου οξυγόνου.

Η θερμοκρασία T επιδρά σημαντικά στους συντελεστές απομείωσης ck_1 , ck_2 , ca_{23} και up . Οι εξισώσεις παρακάτω περιγράφουν την επίδραση αυτή (Thomann and Mueller, 1987).

$$ck_1 = ck_{1,20} \theta_1^{T-20} \quad (4.2-25)$$

$$ck_2 = ck_{2,20} \theta_2^{T-20} \quad (4.2-26)$$

$$ca_{23} = ca_{23,20} \theta_3^{T-20} \quad (4.2-27)$$

$$up = up_{20} \theta_4^{T-20} \quad (4.2-28)$$

Όπου $ck_{1,20}$, $ck_{2,20}$, $ca_{23,20}$ και u_{20} είναι οι τιμές των συντελεστών ck_1 , ck_2 , ca_{23} και u_p αντίστοιχα σε θερμοκρασία $T = 20$ °C. Οι συντελεστές Θ_1 , Θ_2 , Θ_3 , Θ_4 κυμαίνονται μεταξύ 1.020~1.090, 1.005~1.030, 1.0548~1.0997 αντίστοιχα. Για τη μελέτη λήφθηκαν αντίστοιχα ίσοι με 1.047, 1.024, 1.08, 1.047. Το εύρος των τιμών των συντελεστών $ck_{1,20}$, $ca_{23,20}$ και u_{20} είναι αντίστοιχα $0.1\sim 0.5 \text{ day}^{-1}$, $0.1\sim 1.0 \text{ day}^{-1}$ και $0.1\sim 0.5 \text{ day}^{-1}$.

Ο συντελεστής y_a από βιβλιογραφία λαμβάνεται ίσος με 0.24 και ο p_{ra} κυμαίνεται μεταξύ $0.0\sim 1.0$ χωρίς να εξαρτάται από τη θερμοκρασία.

Οι τιμές του συντελεστή $ck_{2,20}$ δίνονται από τύπους ανάλογα με την ταχύτητα και το βάθος ροής (οι εξισώσεις έχουν γραφεί για ταχύτητα U : fps και βάθος H : ft, έτσι γίνονται οι απαραίτητες μετατροπές). Συγκεκριμένα, για βάθη ροής από 1 έως 30 ft και ταχύτητες από 0.5 έως 1.6 fps χρησιμοποιείται η εξίσωση (4.2-29). Ενώ, για βάθη ροής από 2 έως 11 ft και ταχύτητες από 1.8 έως 5.0 fps χρησιμοποιείται η εξίσωση (4.2-30). Και στις δύο περιπτώσεις ο συντελεστής επαναερισμού κυμαίνεται μεταξύ $0.05\sim 12.20 \text{ day}^{-1}$.

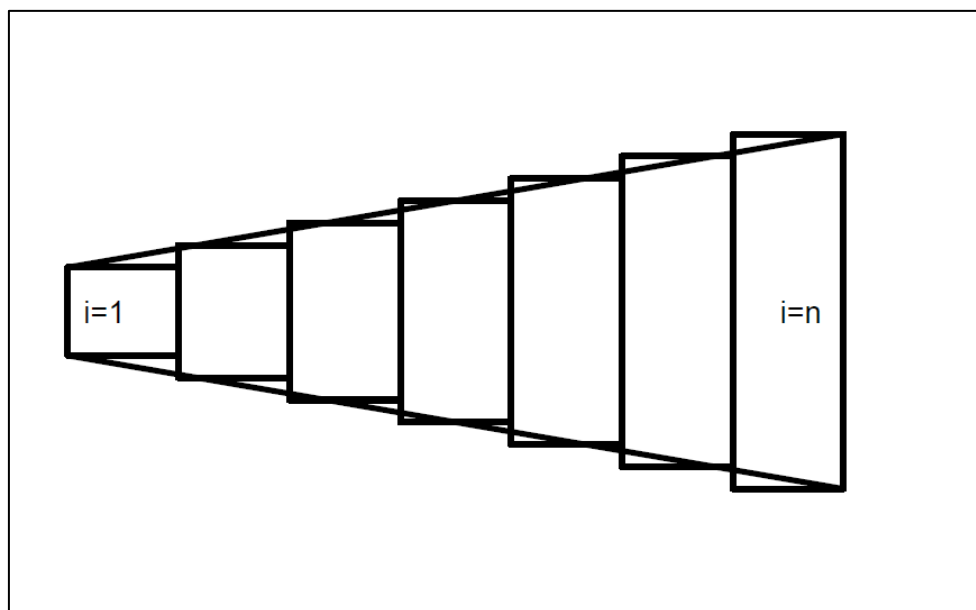
$$ck_{2,20} = \frac{12.9U^{1/2}}{H^{3/2}} \quad (4.2-29)$$

$$ck_{2,20} = \frac{11.6U}{H^{1.67}} \quad (4.2-30)$$

4.2.4 Λειτουργία μοντέλου

Για τη λειτουργία του μοντέλου έγιναν τα εξής βήματα:

1. Το κάθε τμήμα του ποταμού έχει διαιρεθεί σε μικρότερα τμήματα αριθμού n με μήκος dx . Τα μήκη αυτά ποικίλουν ώστε να επιτευχθεί η σταθεροποίηση του μοντέλου.
2. Επιλέχθηκε χρονικό βήμα $dt=0.005 \text{ day}$ σε όλο το μήκος του ποταμού. Το χρονικό βήμα είναι πολύ μικρό ούτως ώστε να επιτευχθούν σταθερά αποτελέσματα.
3. Το πλάτος θεωρείται πως μεταβάλλεται γραμμικά κατά μήκος κάθε τμήματος (από τον πρώτο όγκο $i=1$ έως $i=n$ του κάθε τμήματος, Σχήμα 4.2.4-1), ώστε να μεταβάλλεται ομαλά μεταξύ των διαφορετικών διατομών και να προσομοιώνεται καλύτερα η πραγματική κατάσταση. Συνήθως, στα μοντέλα προσομοίωσης τα πλάτη διατηρούνται σταθερά κατά μήκος κάθε τμήματος.
4. Για κάθε όγκο αναφοράς i υπολογίζονται εμβαδό διατομής, ταχύτητα ροής και όγκος τα οποία εισέρχονται στις διαφορικές εξισώσεις του μοντέλου.
5. Γίνονται επαναλήψεις με χρονικό βήμα dt μέχρι τη στιγμή που επιτυγχάνονται σταθερές συνθήκες.



Σχήμα 4.2.4-1 Γραμμική μεταβολή πλάτους

4.3 Επιβεβαίωση ορθότητας του μοντέλου

4.3.1 Γενικά

Το μοντέλο προσομοίωσης ποιοτικών χαρακτηριστικών δομήθηκε βασισμένο σε παλαιότερες αντίστοιχες μελέτες, όμως δημιουργήθηκε εξ'αρχής στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Έτσι, ήταν απαραίτητο να επιβεβαιωθεί η ορθότητά του, αντιπαραβάλλοντας αποτελέσματα με μία επιβεβαιωμένη θεωρητική, αναλυτική λύση (π.χ. από βιβλιογραφία).

Στα πλαίσια της σύγκρισης των αποτελεσμάτων του μοντέλου με την αναλυτική λύση, οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν με κοινά δεδομένα και για τις δύο περιπτώσεις. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν τα γεωμορφολογικά και υδρολογικά στοιχεία του ποταμού Καλαμά, όπως παραπάνω, και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματά τους. Αφού, η ίδια διαφορική εξίσωση χρησιμοποιείται σε όλες τις παραμέτρους, και το μόνο που αλλάζει είναι ο εκάστοτε συντελεστής απομείωσης, θα αρκούσε η επιβεβαίωση ενός. Στην συγκεκριμένη περίπτωση και για μεγαλύτερη πληρότητα εξετάστηκε ένα σύστημα οργανικού φορτίου BOD – οξυγόνου DO.

Η διαδικασία αυτή αποτελείται από δύο σκέλη: πρώτα θεωρήθηκε μια σημειακή φόρτιση στην αρχή του ποταμού, και έπειτα σημειακό φορτίο σε τυχαία θέση κατά μήκος του ποταμού. Τέλος, κατά τη διαδικασία των υπολογισμών θεωρήθηκαν σταθεροί συντελεστές απομείωσης και σταθερές θερμοκρασίες σε όλο το μήκος του ποταμού.

4.3.2 Αναλυτική λύση

Η αναλυτική λύση βάσει της οποίας έγινε η αντιπαραβολή των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται στις εξισώσεις (4.3-1) και (4.3-2) (Thomann and Mueller, 1987), οι οποίες αναπαριστούν την εξέλιξη της εκάστοτε παραμέτρου κατά μήκος του ποταμού. Υπολογίζεται η συγκέντρωση της παραμέτρου σε μία θέση κατάντη ανάλογα με τις αρχικές συνθήκες και την απόσταση στην οποία βρίσκεται. Επίσης, κατά τη χρήση της αναλυτικής λύσης θεωρείται πως κατά μήκος κάθε εξεταζόμενου τμήματος όλα τα υδροδυναμικά και γεωμορφολογικά στοιχεία παραμένουν σταθερά.

$$L = L_0 \exp\left(-K_d \frac{x}{U}\right) \quad (4.3-1)$$

$$D = D_s - \left\{ \frac{K_d}{K_a - K_d} \left[\exp\left(-K_d \frac{x}{U}\right) - \exp\left(-K_a \frac{x}{U}\right) \right] \right\} L_0 - (D_s - D_0) \exp\left(-K_a \frac{x}{U}\right) \quad (4.3-2)$$

Όπου:

- L : Η συγκέντρωση BOD στην εξεταζόμενη θέση
 L₀ : Η αρχική συγκέντρωση BOD
 D : Η συγκέντρωση DO στην εξεταζόμενη θέση
 D₀ : Η αρχική συγκέντρωση
 D_s : Η συγκέντρωση κορεσμού
 x : Η απόσταση του εξεταζόμενου σημείου από το αρχικό
 U : Η ταχύτητα ροής
 k_d : Ο συντελεστής απομείωσης του BOD
 k_a : Ο συντελεστής επαναερισμού

4.3.3 Εφαρμογή αναλυτικής λύσης

Η ταχύτητα κατά μήκος ενός τμήματος από τα 9 που έχει διαιρεθεί ο Καλαμάς δεν είναι σταθερή. Όπως έχει αναφερθεί, ο ποταμός έχει χωριστεί σε 9 τμήματα τα οποία με τη σειρά τους έχουν διαιρεθεί σε επιμέρους μικρότερα με μήκος dx, ώστε να γίνει η ανάλυση. Για να καλυφθεί η απαίτηση της θεωρητικής λύσης για σταθερή ταχύτητα η εφαρμογή έγινε σε αυτά τα τμήματα κατά μήκος των οποίων η ταχύτητα θεωρείται σταθερή. Έτσι, για κάθε όγκο αναφοράς i θεωρείται στην αρχή του x=0 και οι συγκεντρώσεις υπολογίζονται στη θέση x=dx_i όπου θεωρείται το τέλος του. Οι αρχικές συνθήκες εισόδου δηλαδή, είναι οι συνθήκες εξόδου από τον προηγούμενο όγκο.

Σημειώνεται πως για τη δοκιμή επιλέχθηκαν φορτία ίδιας κλίμακας με προηγουμένως αλλά, και άλλα μεγαλύτερης ώστε να φανεί η ταύτιση των αποτελεσμάτων ακόμα και σε πολύ μεγάλες τιμές. Παρακάτω θα παρατεθούν τα στοιχεία για τις δοκιμές που έγιναν με τα φορτία μεγαλύτερης κλίμακας, αφού είναι και τα δυσμενέστερα.

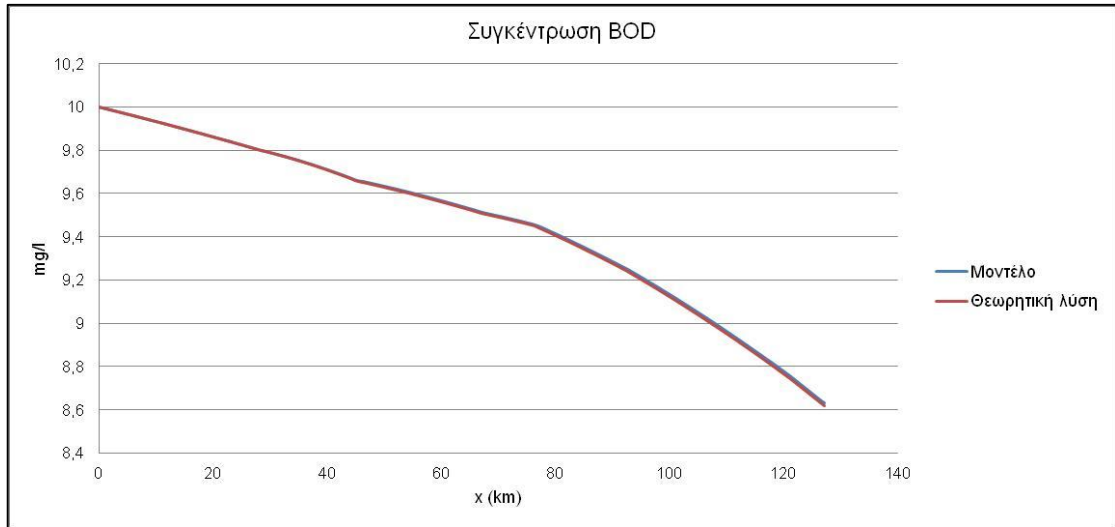
Η σύγκριση έγινε στις εξής δύο φάσεις:

1. Θεωρήθηκε οριακή αρχική συγκέντρωση οργανικού φορτίου εισόδου, στην αρχή του ποταμού, ίση με 10 mg/l.
2. Θεωρήθηκε σε τυχαία θέση (x=53720 m) είσοδος οργανικού φορτίου ίσου με 100000 kg/day.

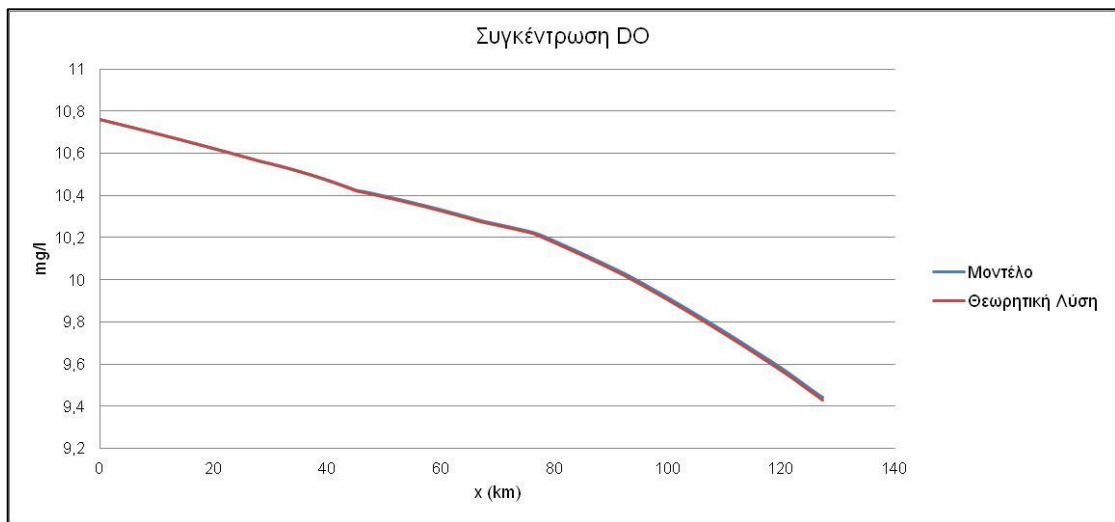
Κατά τη σύγκριση και για τις δύο φάσεις έγιναν από δύο δοκιμές για τις ακραίες τιμές των συντελεστών επαναερισμού k_a και απομείωσης k_d 0.05~12.2 day⁻¹ και 0.1~3.0 day⁻¹ αντίστοιχα, ώστε να γίνει έλεγχος στις πιο δυσμενείς συνθήκες. Επίσης, αναφέρεται πως οι τιμές των παραπάνω συντελεστών θεωρήθηκαν ίσες σε όλο το μήκος.

4.3.4 Αποτελέσματα επιβεβαίωσης

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διαδικασίας της σύγκρισης με τη θεωρητική λύση για τις διάφορες φάσεις. Συγκεκριμένα από την πρώτη φάση, δηλαδή για αρχική οριακή συγκέντρωση οργανικού φορτίου ίση με 10 mg/l, λήφθηκαν τα Σχήματα 5.3.-1 έως 5.3-4. Αντίστοιχα από τη δεύτερη φάση, δηλαδή για οργανικό φορτίο ίσο με 100000 kg/day στη θέση x=53720, λήφθηκαν τα Σχήματα 5.3-5 έως 5.3-8.

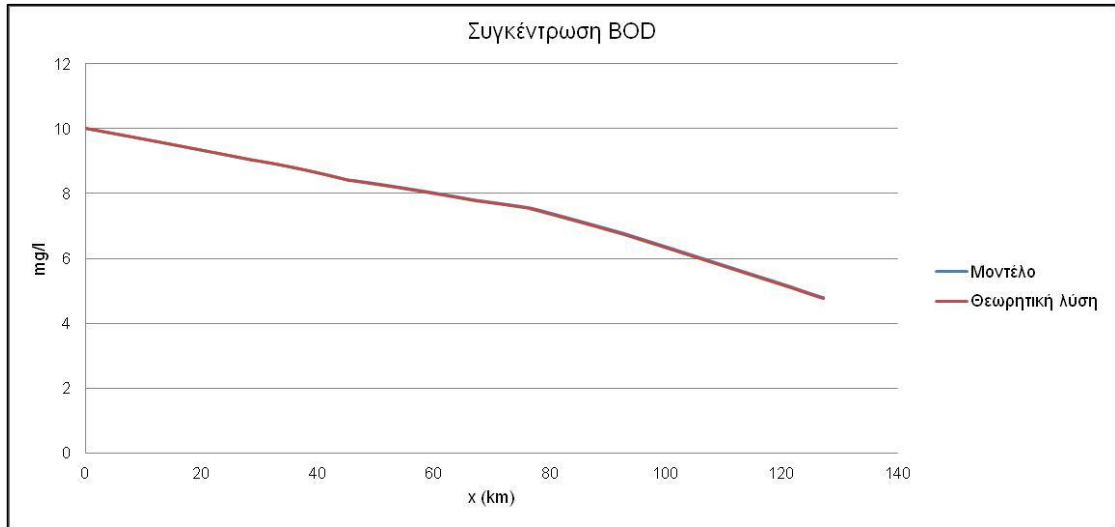


Σχήμα 5.3-1. Συγκεντρώσεις BOD

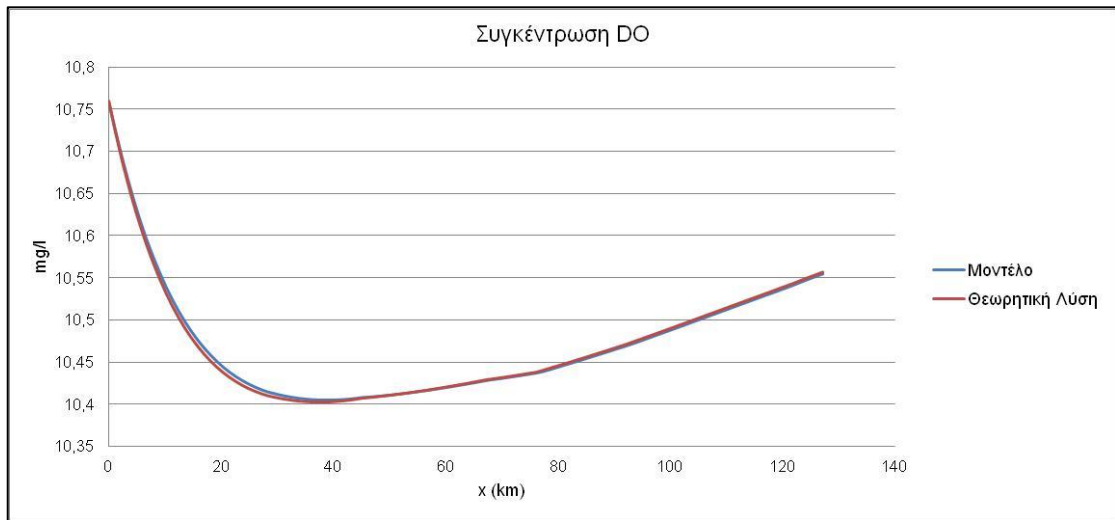


Σχήμα 5.3-2. Συγκεντρώσεις DO

Τα Σχήματα 5.3-1 και 5.3-2 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της πρώτης φάσης για συντελεστές επαναερισμού k_a και απομείωσης k_d ίσους με 0.05 day^{-1} και 0.1 day^{-1} αντίστοιχα.

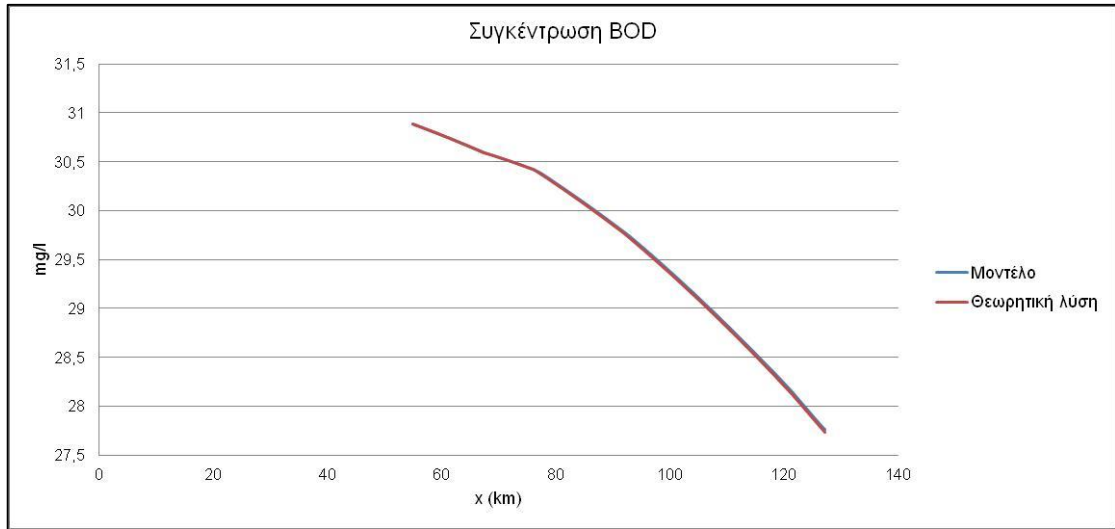


Σχήμα 5.3-3. Συγκεντρώσεις BOD

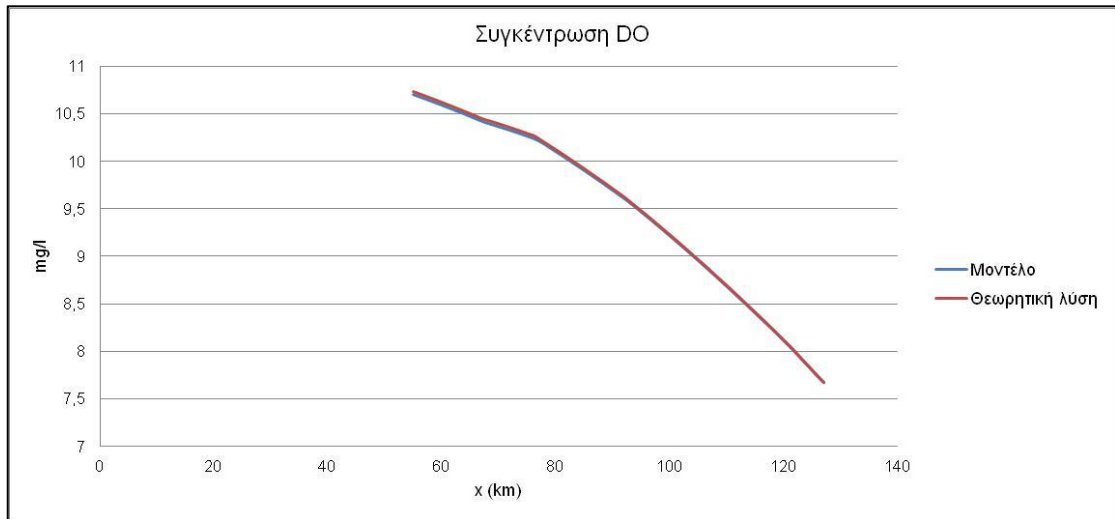


Σχήμα 5.3-4. Συγκεντρώσεις DO

Τα σχήματα 5.3-3 και 5.3-4 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της πρώτης φάσης για συντελεστές επαναερισμού k_a και απομείωσης k_d ίσους με 12.20 day^{-1} και 0.5 day^{-1} αντίστοιχα.

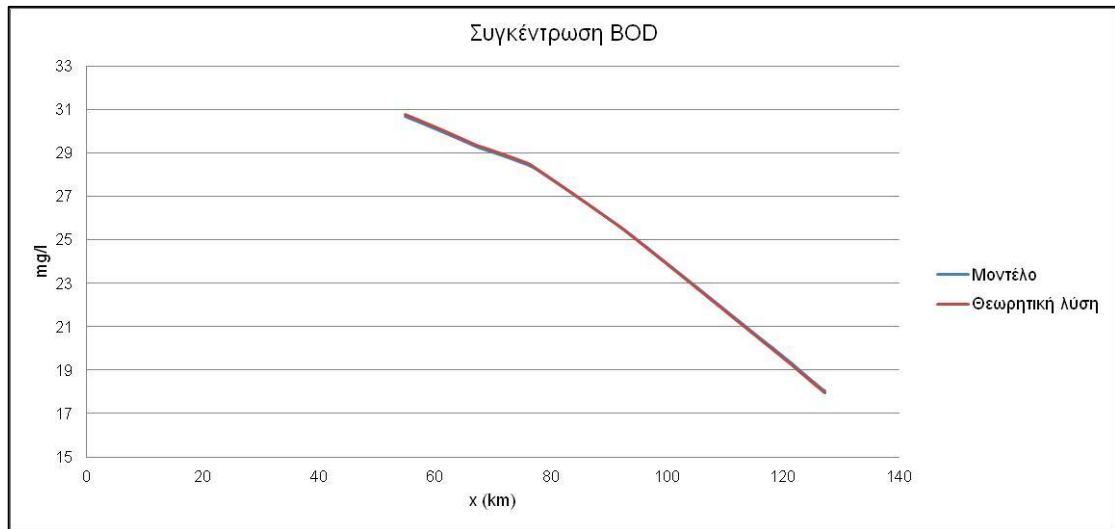


Σχήμα 5.3-5. Συγκεντρώσεις BOD

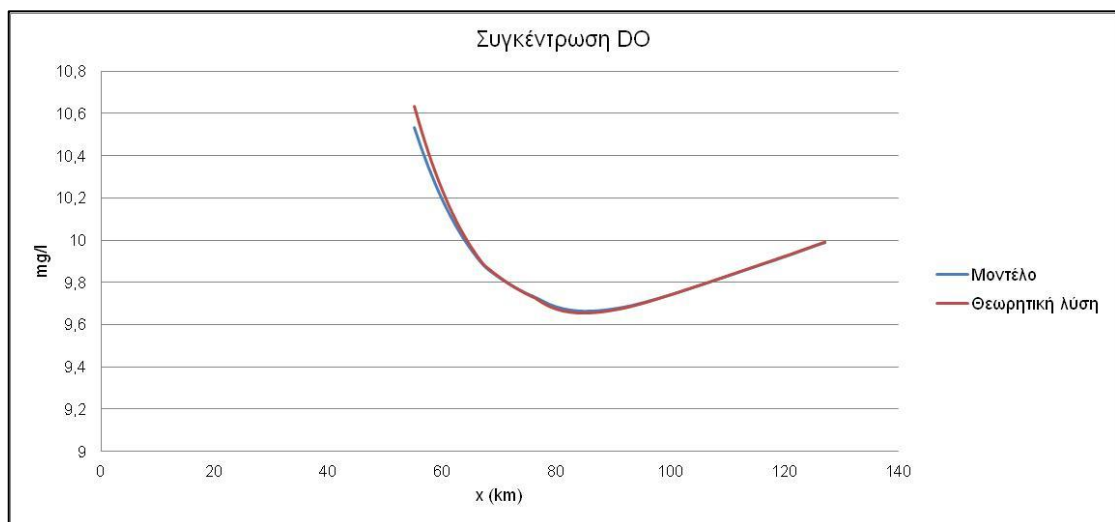


Σχήμα 5.3-6. Συγκεντρώσεις DO

Τα σχήματα 5.3-5 και 5.3-6 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της δεύτερης φάσης για συντελεστές επαναερισμού k_a και απομείωσης k_d ίσους με 0.05 day^{-1} και 0.1 day^{-1} αντίστοιχα.



Σχήμα 5.3-7. Συγκεντρώσεις BOD



Σχήμα 5.3-8. Συγκεντρώσεις DO

Τα σχήματα 5.3-7 και 5.3-8 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της δεύτερης φάσης για συντελεστές επαναερισμού k_a και απομείωσης k_d ίσους με 12.20 day^{-1} και 0.5 day^{-1} αντίστοιχα.

Σε όλα τα στάδια θεωρήθηκε θερμοκρασία νερού $T = 12^\circ\text{C}$ και αντίστοιχα συγκέντρωση οξυγόνου κορεσμού $D_s = 10.76 \text{ mg/l}$.

4.4 Μοντέλο για μεταβλητό dx

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής έγιναν διάφορες προσπάθειες προσομοίωσης, που δεν μπορούν να αναφερθούν, βέβαια, όλες. Όμως, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας έγινε επίλυση των διαφορικών εξισώσεων και άλλη μία φορά από αυτή που αναφέρεται στην παράγραφο 4.2.2. Στην περίπτωση αυτή λαμβάνεται υπόψη συνεχώς μεταβλητό βήμα dx. Αυτό το μοντέλο δε χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία καθώς το βήμα dx σε κάθε τμήμα παραμένει σταθερό. Παρατίθεται όμως, για χρήση σε περίπτωση μεταβλητού βήματος dx για επίτευξη καλύτερης προσομοίωσης.

Ομοίως με πριν οι διαφορικές εξισώσεις διατήρησης μάζας πεπερασμένων διαφορών μπορούν να γραφούν ως εξής:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = Q_{in} - Q_{out} \quad (4.4-1)$$

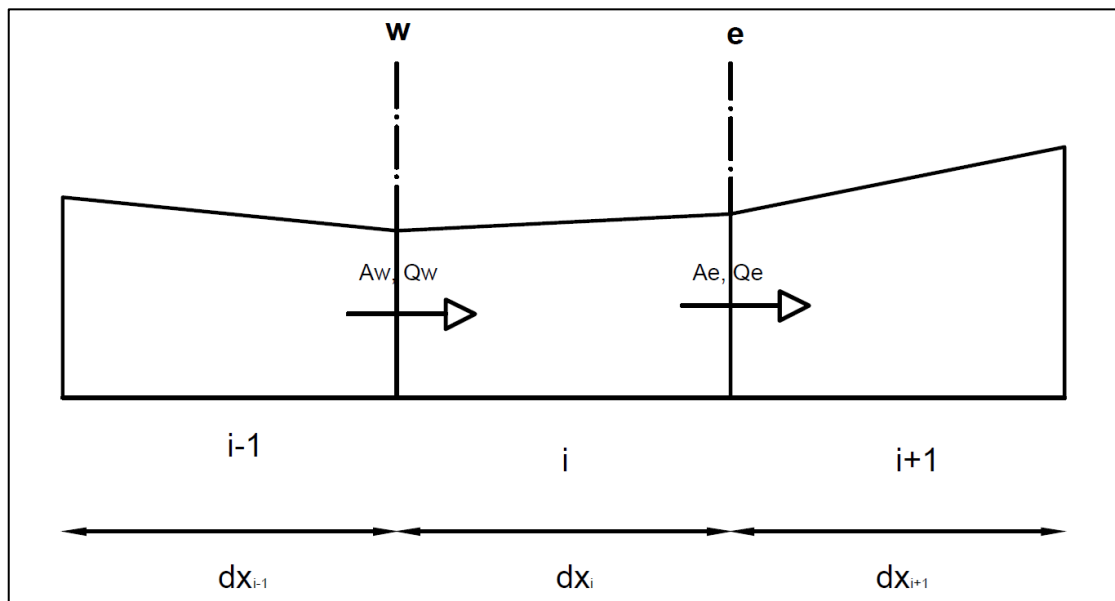
$$\frac{\partial(V\varphi)}{\partial t} = -\frac{\partial(Q\varphi)}{\partial x} dx + \frac{\partial}{\partial x} \left(AE \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) dx + Q_L \varphi_L + k\varphi A dx \quad (4.4-2)$$

Όπου:

- φ : Συγκέντρωση στον ποταμό [$M L^{-3}$]
- φ_L : Συγκέντρωση σε πλευρική εισροή [$M L^{-3}$]
- A : Εμβαδό διατομής ποταμού [M^2]
- E : Συντελεστής διασποράς [$L^2 T^{-1}$]
- V : Όγκος αναφοράς [L^3]
- Q : Παροχή [$L^3 T^{-1}$]
- Q_{in} : Παροχή εισροής στον όγκο αναφοράς i [$L^3 T^{-1}$]
- Q_{out} : Παροχή εκροής στον όγκο αναφοράς i [$L^3 T^{-1}$]
- k : Συντελεστής φθοράς [T^{-1}]

Η εξίσωση (4.4-1) λύνεται για μόνιμο πεδίο ροής, συνεπώς θεωρείται $\frac{\partial V}{\partial t} = 0$ για όλο το μήκος του ποταμού και κάθε χρονική στιγμή.

Η εξίσωση (4.4-2) διακριτοποιείται χρησιμοποιώντας το αριθμητικό πλέγμα που φαίνεται στο Σχήμα 4.4-1.



Σχήμα 4.4-1. Πλέγμα που χρησιμοποιείται για τη διακριτοποίηση

Σημειώνεται πως στη συγκεκριμένη περίπτωση $dx_{i-1} \neq dx_i \neq dx_{i+1}$.

Μετά τη διακριτοποίηση η εξίσωση (4.4-2) μετατρέπεται ως εξής:

$$V \frac{\varphi_i^1 - \varphi_i^0}{\Delta t} = - \frac{(Q_e^0 \varphi_e^0 - Q_w^0 \varphi_w^0)}{\Delta x} \Delta x + \frac{[A_e^0 D_e^0 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)_e^0 - A_w^0 D_w^0 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)_w^0]}{\Delta x} \Delta x + Q_L \varphi_L + k \varphi A \Delta x \quad (4.4-3)$$

Με δείκτη i σημαίνεται το εξεταζόμενο τμήμα και αντίστοιχα $i-1$, $i+1$ το προηγούμενο και επόμενο. Επίσης, ο εκθέτης 0 υποδηλώνει τη γνωστή τιμή του στοιχείου (την προηγούμενη χρονική στιγμή), ενώ ο εκθέτης 1 την προς εύρεση τιμή (την εξεταζόμενη χρονική στιγμή). Τέλος, οι δείκτες w και e συμβολίζουν τις τιμές στα “δυτικά” και “ανατολικά” του όγκου αναφοράς.

Αλλά:

$$Q = uA \quad (4.4-4)$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (4.4-3) την (4.4-4) και απαλοφώντας η πρώτη μετατρέπεται:

$$V \frac{\varphi_i^1 - \varphi_i^0}{\Delta t} = -(u_e^0 A_e^0 \varphi_e^0 - u_w^0 A_w^0 \varphi_w^0) + \left[A_e^0 D_e^0 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)_e^0 - A_w^0 D_w^0 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)_w^0 \right] + Q_L \varphi_L + k \varphi A \Delta x \quad (4.4-5)$$

Η (4.4-5) αποτελεί την κύρια διαφορική διακριτοποιημένη εξίσωση που με βάση αυτή και το σχήμα των ανάντη διαφορών προκύπτουν οι εξισώσεις του μοντέλου για τρεις περιπτώσεις:

1. Για $i=1$
2. Για $i=2 \sim (n-1)$
3. Για $i=n$

Για $i=2 \sim (n-1)$ ισχύουν:

$$\varphi_e^0 = \frac{\Delta x_i}{\Delta x_i + \Delta x_{i+1}} \varphi_{i+1}^0 + \left(1 - \frac{\Delta x_i}{\Delta x_i + \Delta x_{i+1}}\right) \varphi_i^0 = \frac{\varphi_{i+1}^0 \Delta x_i + \varphi_i^0 \Delta x_{i+1}}{\Delta x_i + \Delta x_{i+1}} \quad (4.4-6\alpha)$$

$$\varphi_w^0 = \frac{\Delta x_i}{\Delta x_i + \Delta x_{i+1}} \varphi_{i-1}^0 + \left(1 - \frac{\Delta x_i}{\Delta x_i + \Delta x_{i+1}}\right) \varphi_i^0 = \frac{\varphi_{i-1}^0 \Delta x_i + \varphi_i^0 \Delta x_{i-1}}{\Delta x_i + \Delta x_{i-1}} \quad (4.4-6\beta)$$

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)_e^0 = \frac{\varphi_{i+1}^0 - \varphi_i^0}{\frac{\Delta x_i + \Delta x_{i+1}}{2}} \quad (4.4-6\gamma)$$

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)_w^0 = \frac{\varphi_i^0 - \varphi_{i-1}^0}{\frac{\Delta x_i + \Delta x_{i-1}}{2}} \quad (4.4-6\delta)$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (4.4-6α), (4.4-6β), (4.4-6γ) και (4.4-6δ) στην (4.4-5), η τελευταία μπορεί να γραφεί:

$$V \frac{\varphi_i^1 - \varphi_i^0}{\Delta t} = - \left(u_e^0 A_e^0 \frac{\varphi_{i+1}^0 \Delta x_i + \varphi_i^0 \Delta x_{i+1}}{\Delta x_i + \Delta x_{i+1}} - u_w^0 A_w^0 \frac{\varphi_{i-1}^0 \Delta x_i + \varphi_i^0 \Delta x_{i-1}}{\Delta x_i + \Delta x_{i-1}} \right) + A_e^0 D_e^0 \frac{\varphi_{i+1}^0 - \varphi_i^0}{\frac{\Delta x_i + \Delta x_{i+1}}{2}} - A_w^0 D_w^0 \frac{\varphi_i^0 - \varphi_{i-1}^0}{\frac{\Delta x_i + \Delta x_{i-1}}{2}} + Q_L \varphi_L - k \varphi A \Delta x \quad (4.4-7)$$

Απαλοίφοντας από το αριστερό μέλος της (4.4-7) τους όρους και κάνοντας πράξεις λαμβάνεται:

$$\begin{aligned} \varphi_i^1 - \varphi_i^0 &= \varphi_{i-1}^0 \left(u_w^0 A_w^0 \frac{dx_i}{dx_i + dx_{i-1}} + \frac{2A_w^0 D_w^0}{dx_i + dx_{i-1}} \right) \frac{dt}{V} \\ &+ \varphi_i^0 \left(-u_e^0 A_e^0 \frac{dx_{i+1}}{dx_i + dx_{i+1}} + u_w^0 A_w^0 \frac{dx_{i-1}}{dx_i + dx_{i-1}} - \frac{2A_e^0 D_e^0}{dx_i + dx_{i+1}} - \frac{2A_w^0 D_w^0}{dx_i + dx_{i-1}} \right) \frac{dt}{V} \\ &+ \varphi_{i+1}^0 \left(-u_e^0 A_e^0 \frac{dx_i}{dx_i + dx_{i+1}} + \frac{2A_e^0 D_e^0}{dx_i + dx_{i+1}} \right) \frac{dt}{V} + Q_L \varphi_L \frac{dt}{V} - k\varphi dt \end{aligned} \quad (4.4-8)$$

Με ομαδοποίηση κοινών όρων η (4.4-8) γράφεται:

$$\begin{aligned} \varphi_i^1 &= \varphi_{i-1}^0 \left(u_w^0 A_w^0 \frac{dx_i}{dx_i + dx_{i-1}} + \frac{2A_w^0 D_w^0}{dx_i + dx_{i-1}} \right) \frac{dt}{V} \\ &+ \varphi_i^0 \left(1 - u_e^0 A_e^0 \frac{dx_{i+1}}{dx_i + dx_{i+1}} + u_w^0 A_w^0 \frac{dx_{i-1}}{dx_i + dx_{i-1}} - \frac{2A_e^0 D_e^0}{dx_i + dx_{i+1}} - \frac{2A_w^0 D_w^0}{dx_i + dx_{i-1}} \right) \frac{dt}{V} \\ &+ \varphi_{i+1}^0 \left(-u_e^0 A_e^0 \frac{dx_i}{dx_i + dx_{i+1}} + \frac{2A_e^0 D_e^0}{dx_i + dx_{i+1}} \right) \frac{dt}{V} + Q_L \varphi_L \frac{dt}{V} - k\varphi dt \end{aligned} \quad (4.4-9)$$

Για να καταλήξει στην τελική της μορφή:

$$\begin{aligned} \varphi_i^1 &= \varphi_{i-1}^0 \left(u_w^0 A_w^0 \frac{dx_i}{dx_i + dx_{i-1}} + \frac{2A_w^0 D_w^0}{dx_i + dx_{i-1}} \right) \frac{dt}{V} \\ &+ \varphi_i^0 \left(\frac{V}{dt} - u_e^0 A_e^0 \frac{dx_{i+1}}{dx_i + dx_{i+1}} + u_w^0 A_w^0 \frac{dx_{i-1}}{dx_i + dx_{i-1}} - \frac{2A_e^0 D_e^0}{dx_i + dx_{i+1}} - \frac{2A_w^0 D_w^0}{dx_i + dx_{i-1}} \right) \frac{dt}{V} \\ &+ \varphi_{i+1}^0 \left(-u_e^0 A_e^0 \frac{dx_i}{dx_i + dx_{i+1}} + \frac{2A_e^0 D_e^0}{dx_i + dx_{i+1}} \right) \frac{dt}{V} + Q_L \varphi_L \frac{dt}{V} - k\varphi dt \end{aligned} \quad (4.4-10)$$

Για $i=1$ ισχύουν:

$$\varphi_e^0 = \frac{dx_i}{dx_i + dx_{i+1}} \varphi_2^0 + \left(1 - \frac{dx_i}{dx_i + dx_{i+1}} \right) \varphi_1^0 = \frac{\varphi_2^0 dx_i + \varphi_1^0 dx_{i+1}}{dx_i + dx_{i+1}} \quad (4.4-11\alpha)$$

$$\varphi_w^0 = \varphi_{up}^0 \quad (4.4-11\beta)$$

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)_e^0 = \frac{\varphi_2^0 - \varphi_1^0}{\frac{dx_i + dx_{i+1}}{2}} \quad (4.4-11\gamma)$$

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)_w^0 = \frac{\varphi_1^0 - \varphi_{up}^0}{\frac{dx_i + dx_{i-1}}{2}} \quad (4.4-11\delta)$$

Τέλος, για $i=n$ ισχύουν:

$$\varphi_e^0 = \varphi_{down}^0 = \varphi_i^0 \quad (4.4-12\alpha)$$

$$\varphi_w^0 = \frac{dx_i}{dx_i+dx_{i+1}} \varphi_{n-1}^0 + \left(1 - \frac{dx_i}{dx_i+dx_{i-1}}\right) \varphi_n^0 = \frac{\varphi_{n-1}^0 dx_i + \varphi_n^0 dx_{i-1}}{dx_i+dx_{i-1}} \quad (4.4-12\beta)$$

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)_e^0 = \frac{\varphi_{down}^0 - \varphi_n^0}{\frac{dx_i+dx_{i+1}}{2}} \quad (4.4-12\gamma)$$

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)_w^0 = \frac{\varphi_n^0 - \varphi_{n-1}^0}{\frac{dx_i+dx_{i-1}}{2}} \quad (4.4-12\delta)$$

5 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

5.1 Γενικά

Πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση και επιβεβαίωση του μοντέλου για κάποιες από τις χρονικές περιόδους που διατίθενται. Η βαθμονόμηση έγινε με τις μετρήσεις της αντιπροσωπευτικής περιόδου Σεπτέμβριος 2007 και η επιβεβαίωση με δύο περιόδους: (α) Δεκέμβριος 2008, χειμερινή περίοδος, υψηλών παροχών και (β) Ιούλιος 2008 θερινή περίοδος, χαμηλών παροχών.

Το αποτέλεσμα της βαθμονόμησης είναι να ληφθούν οι τιμές των συντελεστών που συμμετέχουν στη διαδικασία της προσομοίωσης. Επίσης, λήφθηκαν και οι συντελεστές απομείωσης του ρυπαντικού φορτίου ανάλογα με την απόσταση από τον ποταμό.

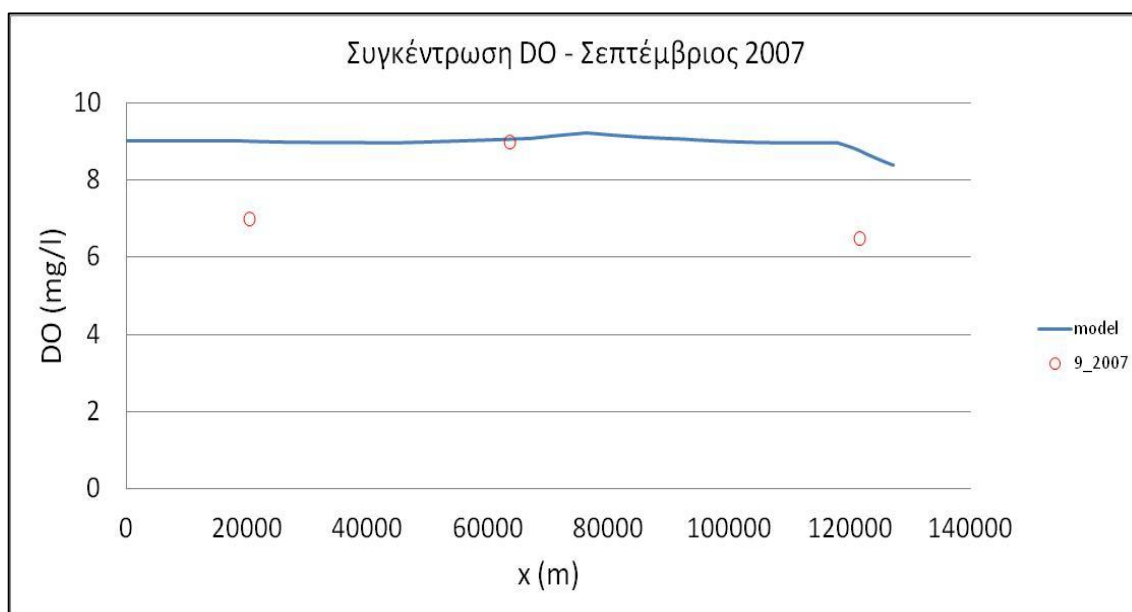
Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η εξής:

1. Αρχικά έγινε η βαθμονόμηση και ο προσδιορισμός όλων των συντελεστών.
2. Έπειτα με σταθερούς συντελεστές έγινε η επιβεβαίωση για τις άλλες περιόδους.

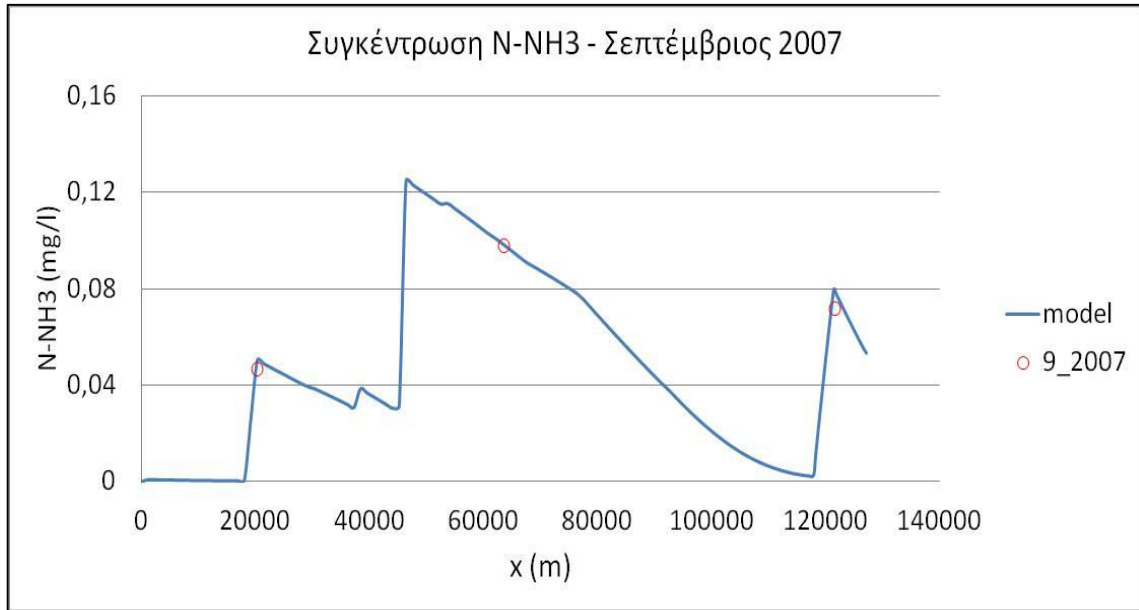
5.2 Βαθμονόμηση του μοντέλου

Είναι προφανές πως η διαδικασία αυτή δεν μπορεί να επιτευχθεί με την πρώτη προσπάθεια. Απαιτήθηκαν πολλές δοκιμές μέχρις ότου το αποτέλεσμα να είναι ικανοποιητικό. Για να γίνει αξιολόγηση του βαθμού προσέγγισης χρειάζεται να προσδιοριστεί με κάποιον τρόπο το σφάλμα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση για την εκτίμηση του σφάλματος αξιοποιήθηκε η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων.

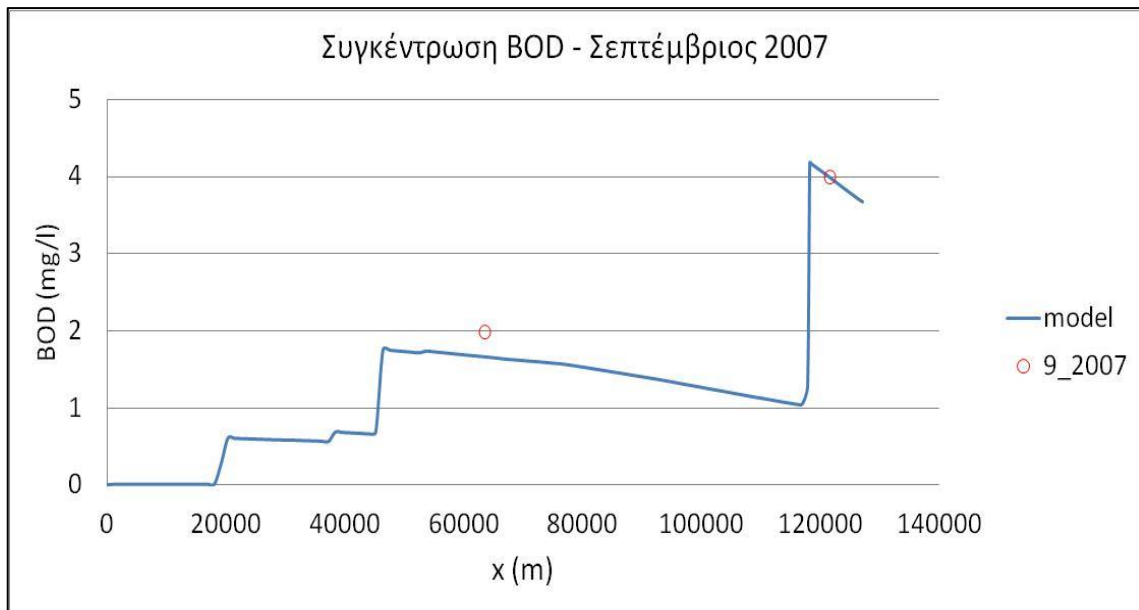
Τα αποτελέσματα της διαδικασίας της βαθμονόμησης σε αντιπαραβολή με τις πραγματικές μετρήσεις παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα. Συγκεκριμένα, στα Σχήματα 5.2-1, 5.2-2, 5.2-3 και 5.2-4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το διαλυμένο οξυγόνο, την αμμωνία, το οργανικό φορτίο και τον φώσφορο αντίστοιχα. Η περίοδος που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διαδικασία είναι ο Σεπτέμβριος του 2007.



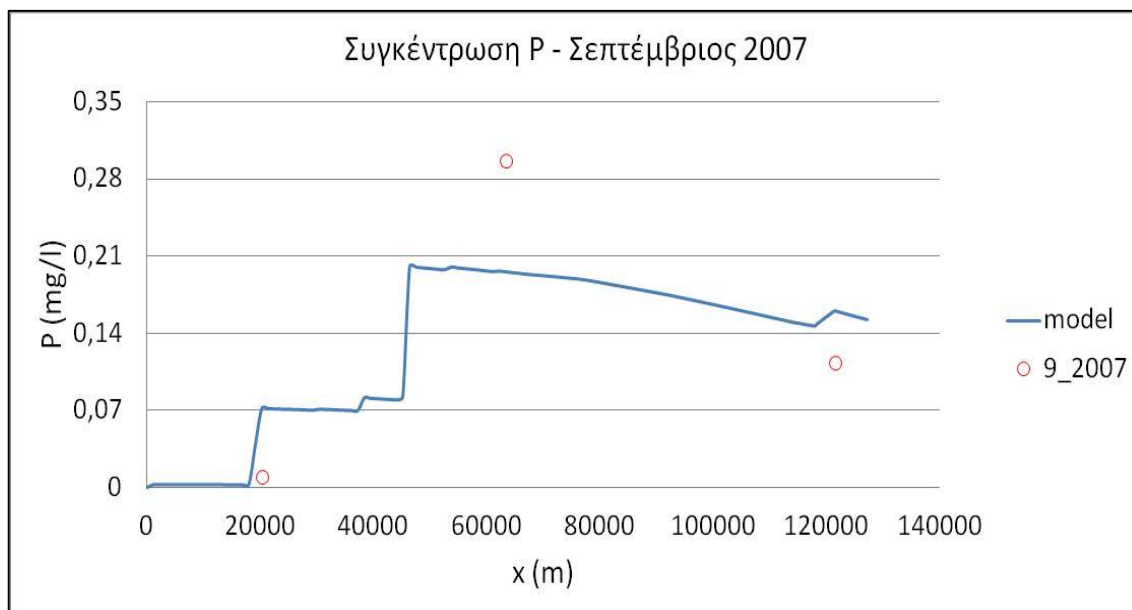
Σχήμα 5.2-1. Συγκέντρωση DO



Σχήμα 5.2-2. Συγκέντρωση N-NH₃



Σχήμα 5.2-3. Συγκέντρωση BOD



Σχήμα 5.2-4. Συγκέντρωση P

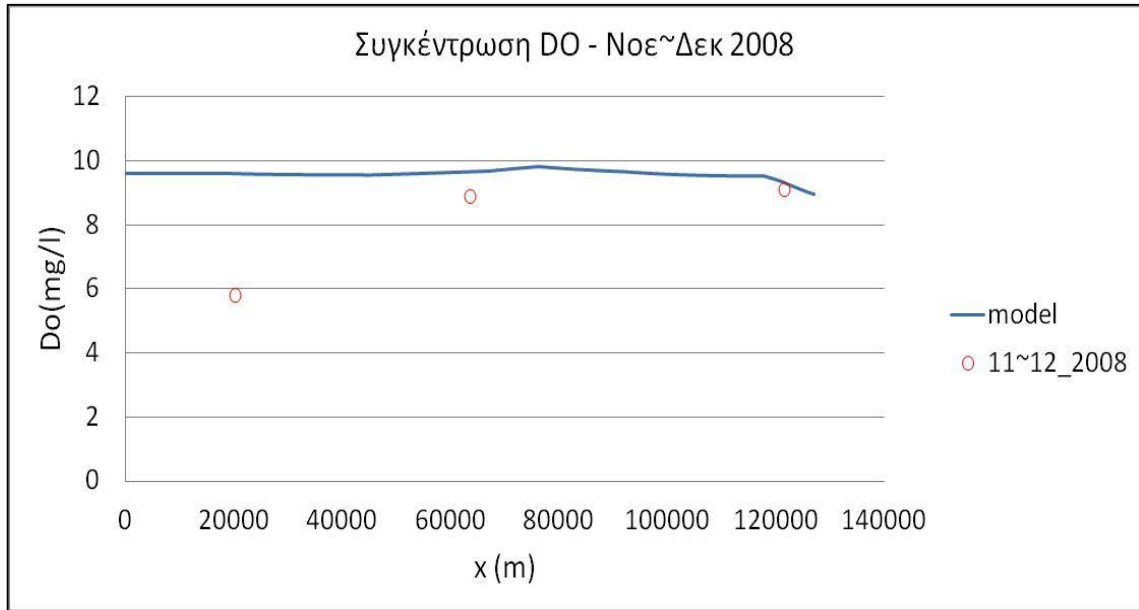
Κατά τη βαθμονόμηση, όπως αναφέρθηκε, έγιναν πολλαπλές επαναλήψεις μέχρι να επιτευχθεί ικανοποιητικό αποτέλεσμα. Οι τελικές τιμές των συντελεστών, όπως προέκυψαν, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2-1.

Πίνακας 5.2-1. Τιμές συντελεστών από βαθμονόμηση

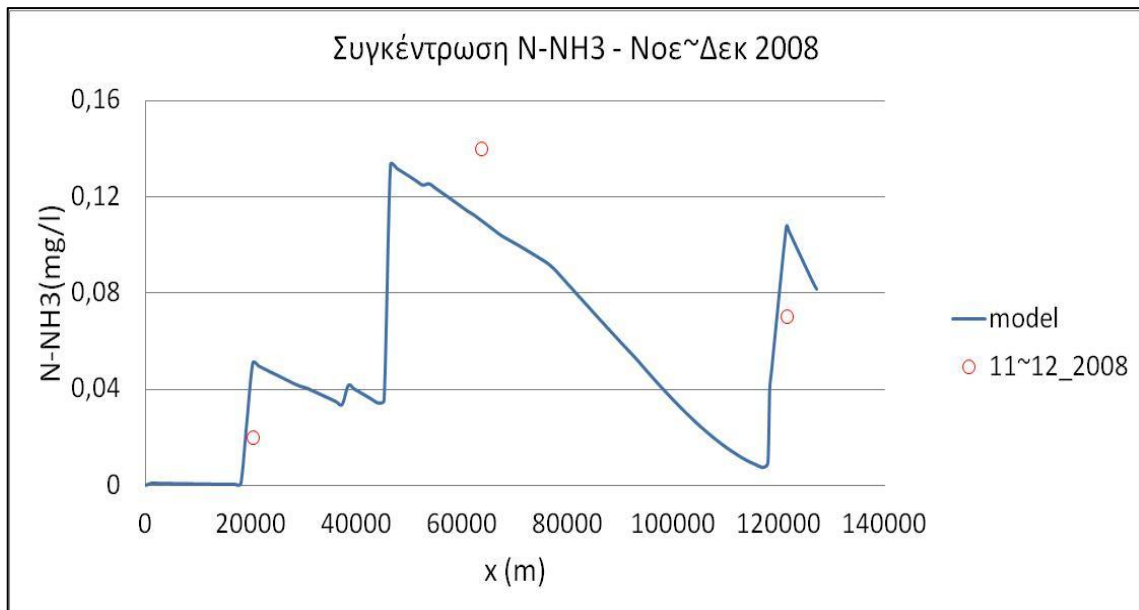
Όνομα	Τιμή από βαθμονόμηση	Εύρος τιμών	Μονάδες
ck_1	0.50	0.10~0.50	day ⁻¹
ca_{23}	0.50	0.10~1.00	day ⁻¹
pra	0.30	0.10~1.00	-
up	0.50	0.10~0.50	day ⁻¹
c_p	0.30	0.10~0.50	day ⁻¹

5.3 Επιβεβαίωση

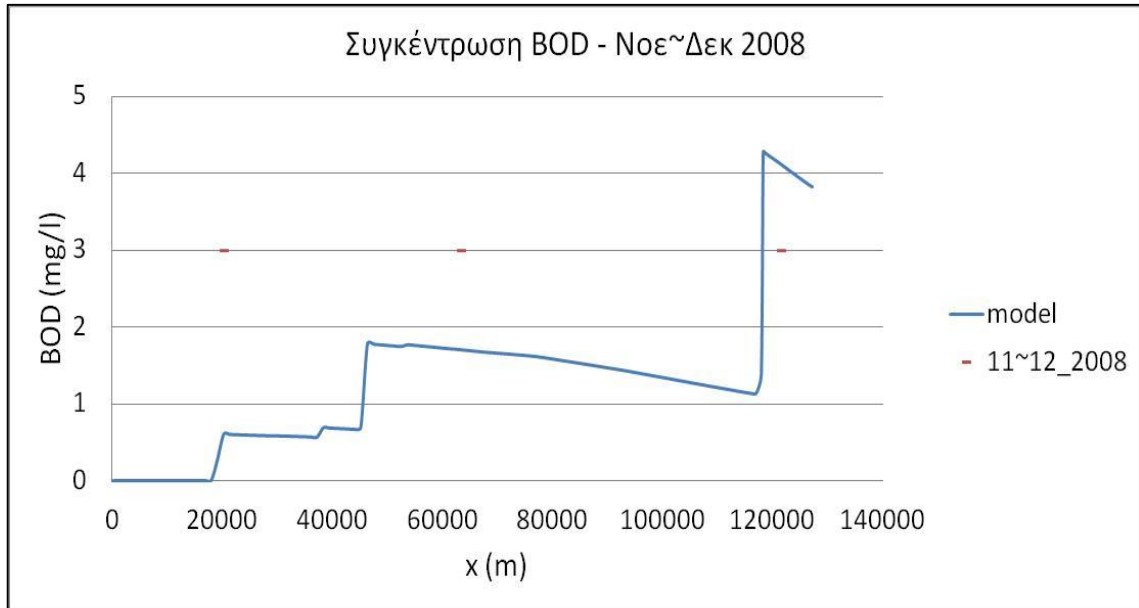
Για να ολοκληρωθεί η διαδικασία γίνεται επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη βαθμονόμηση με άλλες περιόδους. Έτσι, με τις τιμές των συντελεστών του Πίνακα 5.2-1 έγινε η επιβεβαίωση με τις περιόδους: (α) Δεκέμβριος 2008, χειμερινή περίοδος, υψηλών παροχών και (β) Ιούλιος 2008 θερινή περίοδος, χαμηλών παροχών. Τα αποτελέσματα της επιβεβαίωσης παραθέτονται στα παρακάτω σχήματα. Συγκεκριμένα, στα Σχήματα 5.3-1, 5.3-2, 5.3-3 και 5.3-4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το διαλυμένο οξυγόνο, την αμμωνία, το οργανικό φορτίο και τον φώσφορο αντίστοιχα, για τη χειμερινή περίοδο. Αντίστοιχα για τη θερινή περίοδο στα Σχήματα 5.3-5, 5.3-6, 5.3-7 και 5.3-8.



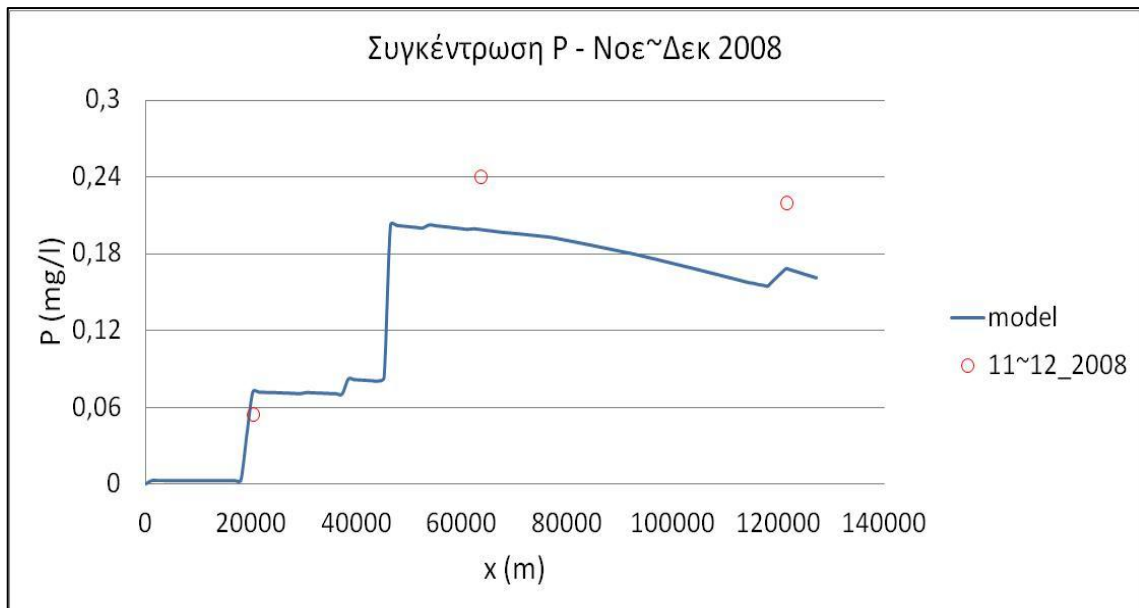
Σχήμα 5.3-1. Συγκέντρωση DO



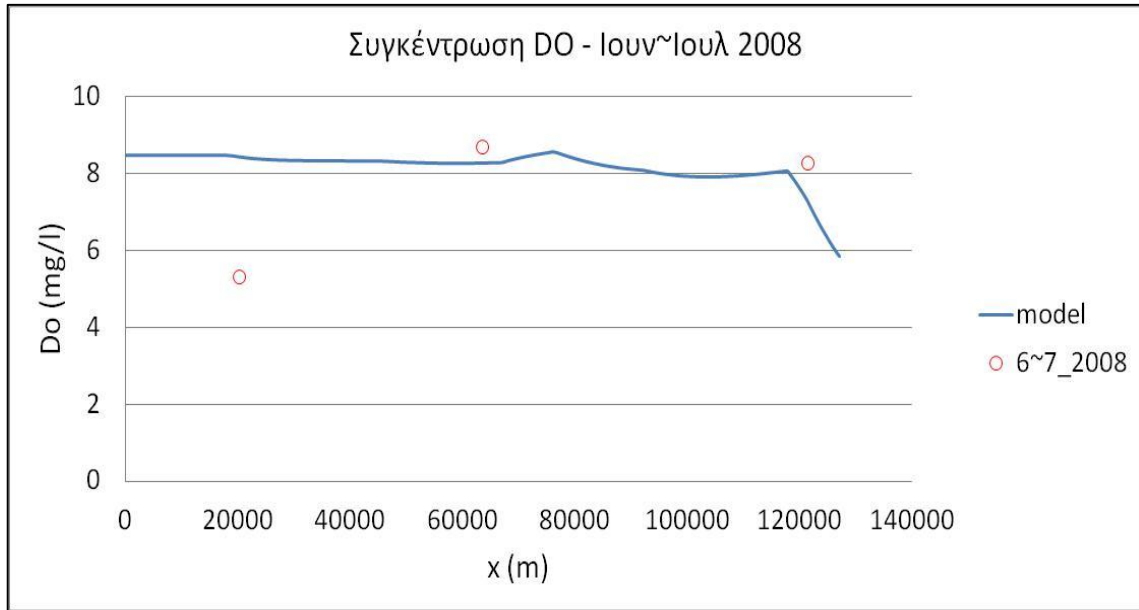
Σχήμα 5.3-2. Συγκέντρωση N-NH3



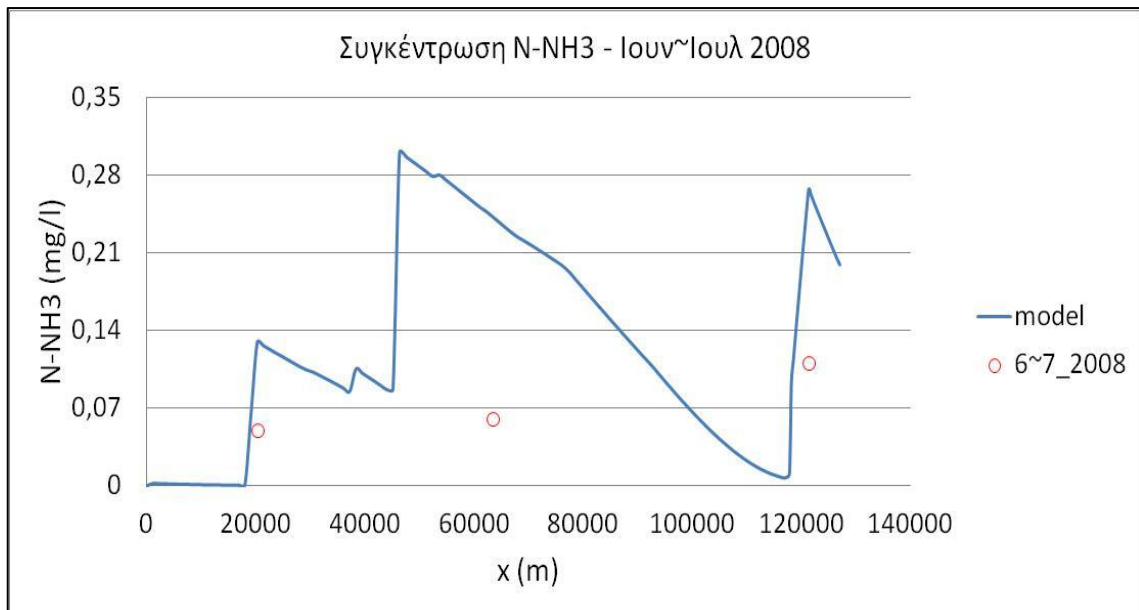
Σχήμα 5.3-3. Συγκέντρωση BOD



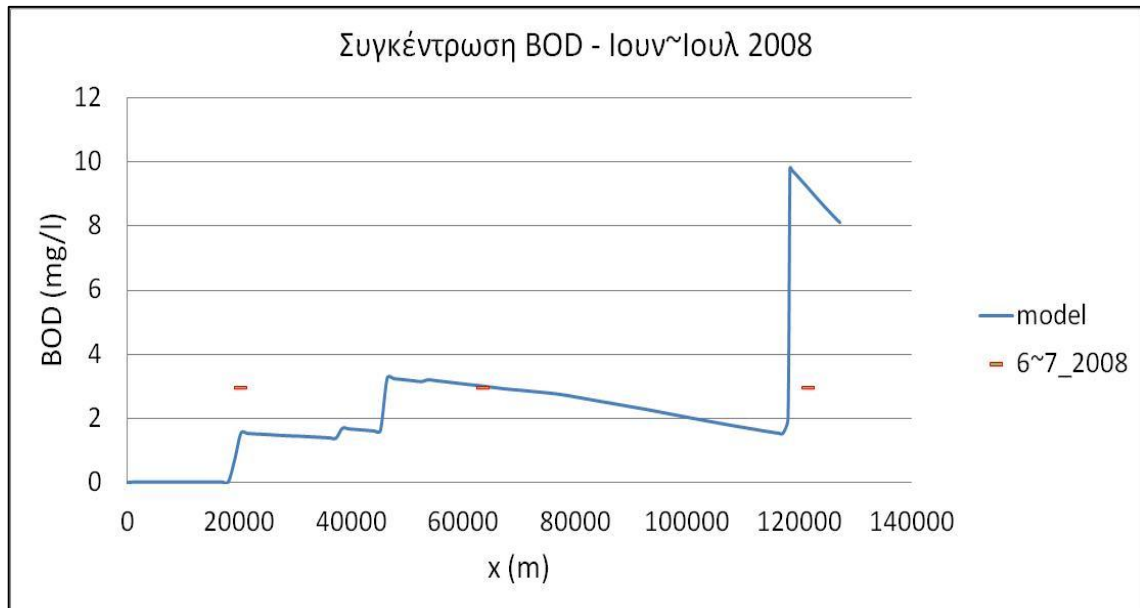
Σχήμα 5.2-4. Συγκέντρωση P



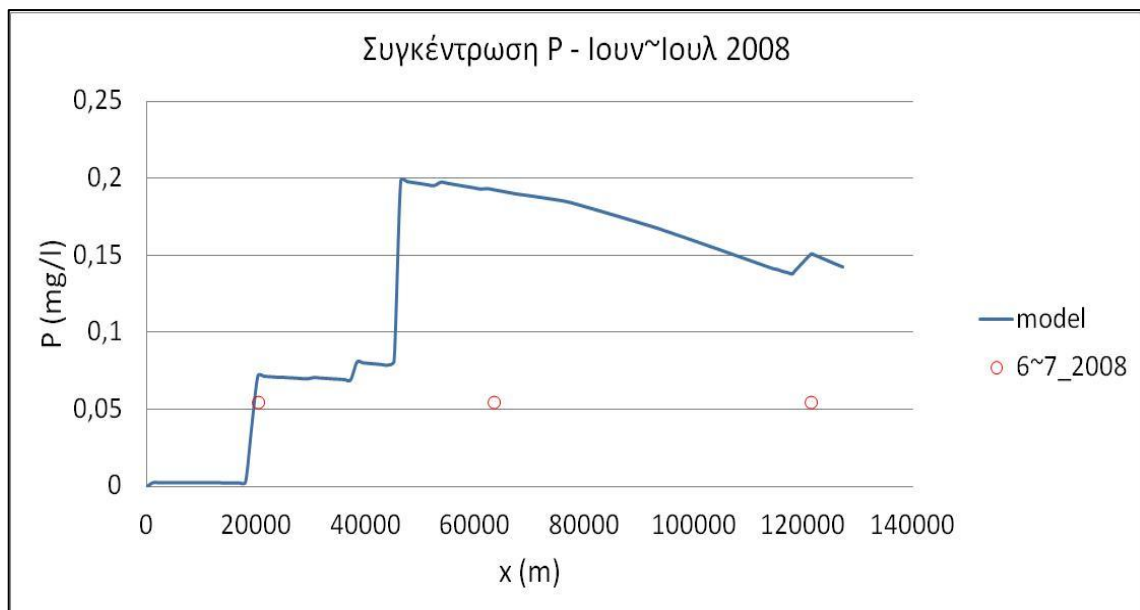
Σχήμα 5.3-5. Συγκέντρωση DO



Σχήμα 5.3-6. Συγκέντρωση N-NH3



Σχήμα 5.3-7. Συγκέντρωση BOD



Σχήμα 5.2-8. Συγκέντρωση P

Όπως αναφέρεται παραπάνω, οι τιμές των μετρήσεων του BOD είναι σε όλες τις περιόδους, πλην μίας, κάτω από το όριο ανίχνευσης. Έτσι, τα διαγράμματα του οργανικού φορτίου παρουσιάζονται σε αντιπαραβολή με τα όρια αντί μετρήσεων.

5.4 Σχολιασμός

Η διαδικασία προσομοίωσης των ποιοτικών χαρακτηριστικών του ποταμού είναι πολύπλοκη και απαιτεί πλήθος δεδομένων. Για την περιοχή μελέτης τα δεδομένα είναι πολύ περιορισμένα και για τις μετρήσεις των ποιοτικών παραμέτρων και για τα υδροδυναμικά στοιχεία. Παρόλα αυτά, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κρίνονται ιδιαίτερα ικανοποιητικά συνυπολογίζοντας και τις δυσκολίες κατά τον υπολογισμό.

6 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

6.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι επιπτώσεις διάφορων υποθετικών εφαρμογών στον ποταμό Καλαμά με χρήση του μοντέλου που δομήθηκε. Άλλωστε, αυτή είναι και η μεγαλύτερη σημασία τέτοιου είδους μοντέλων, να δίνουν τη δυνατότητα αξιολόγησης των επιπτώσεων σε πιθανά μελλοντικές εφαρμογές.

Η πρώτη εφαρμογή που πραγματοποιήθηκε βασίζεται στην υπόθεση πως σταματά να απορρέει η κλειστή λεκάνη των Ιωαννίνων στον Καλαμά. Έχει αναφερθεί πως η λεκάνη των Ιωαννίνων απορρέει στον Καλαμά μέσω του συστήματος Τάφρος Λαφίστας – ρέμα Κληματιάς, και αποτελεί, ίσως, τον σημαντικότερο ρυπογόνο αίτιο για τον ποταμό.

Στη δεύτερη εφαρμογή θεωρείται πως στην περιοχή του παραποτάμου Άσπρου κατασκευάζεται εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων. Στη συγκεκριμένη υπολεκάνη απορρέει μεγάλος αριθμός οικισμών χωρίς ΕΕΛ. Έτσι, στην εφαρμογή αυτή, εξετάζονται οι επιπτώσεις της εγκατάστασης δευτεροβάθμιας επεξεργασίας πριν την εκβολή στον παραπόταμο.

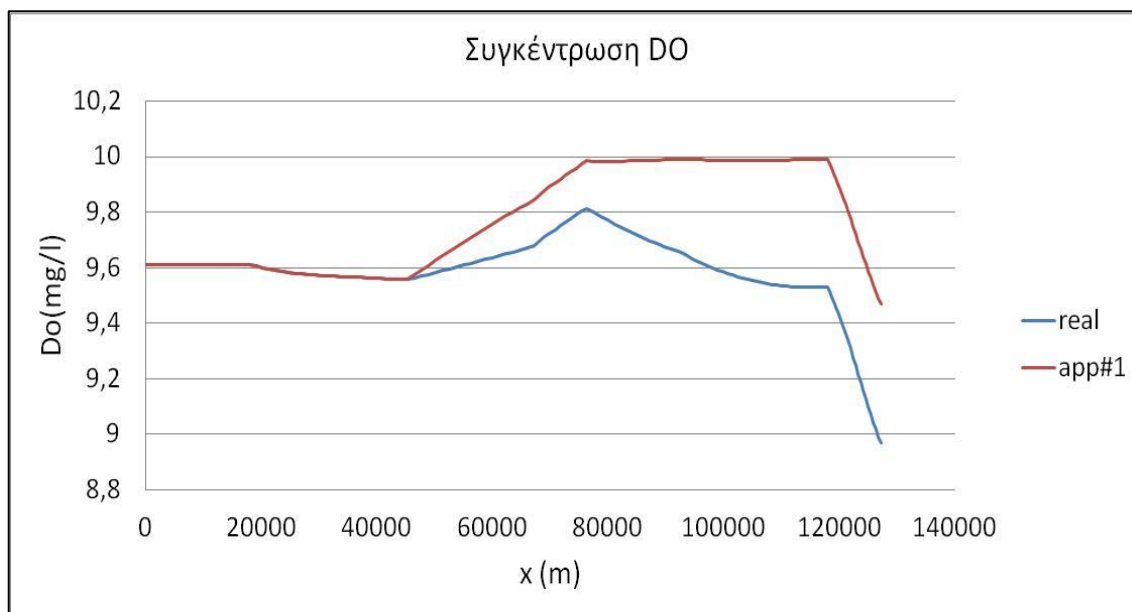
Η τρίτη εφαρμογή εξετάζει τις συνέπειες της εγκατάστασης και λειτουργίας μίας μεγάλης βιομηχανικής μονάδας στην περιοχή του Παραποτάμου. Για τις ανάγκες της εφαρμογής τα ρυπαντικά φορτία θεωρηθήκαν πολύ μεγαλύτερα σε σχέση με τα αντίστοιχα της περιοχής.

Στην τέταρτη εφαρμογή εξετάζονται οι επιπτώσεις στα ποιοτικά χαρακτηριστικά μιας περιόδου με πολύ χαμηλές παροχές. Ειδικότερα, η παροχή κάθε τμήματος θεωρήθηκε ίση με το μισό της θερινής παροχής ενώ τα φορτία παρέμειναν κατά μήκος ίδια.

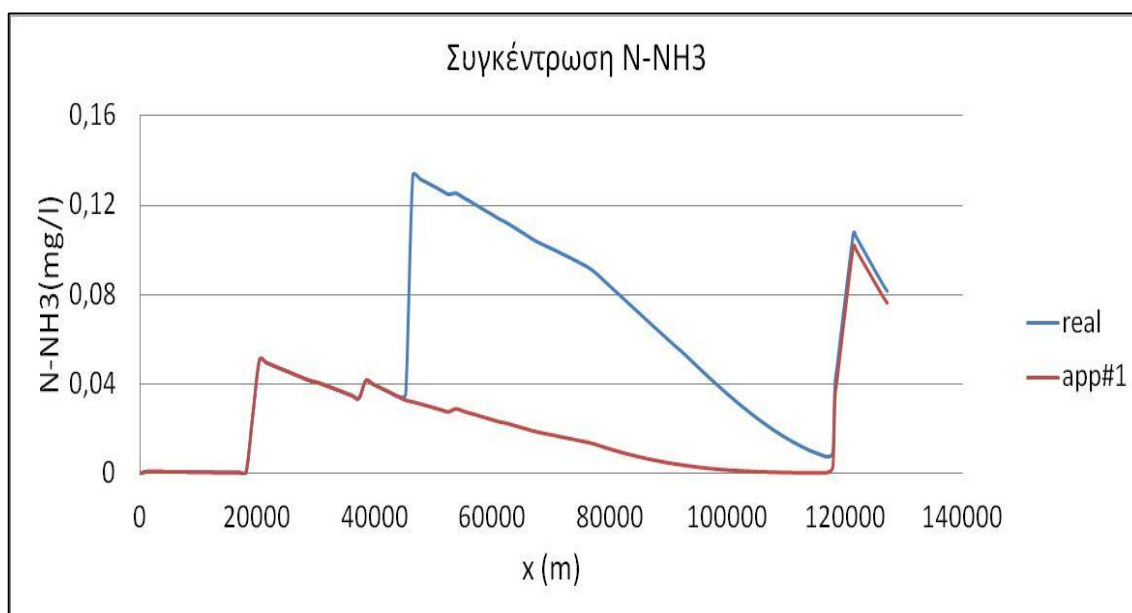
6.2 Διακοπή απορροής κλειστής λεκάνης Ιωαννίνων

6.2.1 Περιγραφή και αποτελέσματα

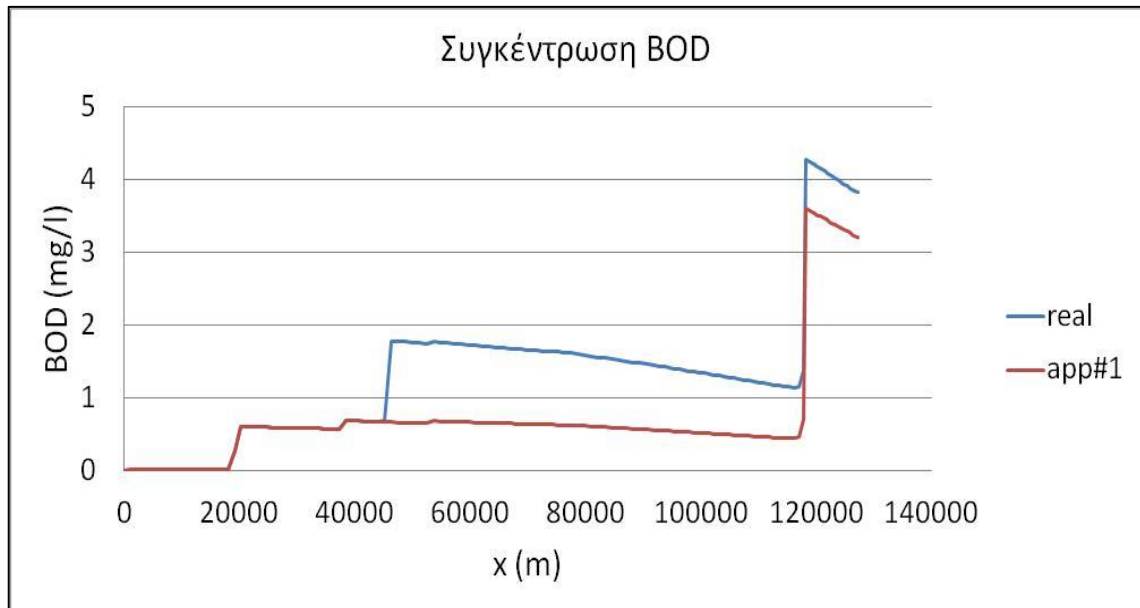
Η λεκάνη των Ιωαννίνων απορρέει μεγάλα ρυπαντικά φορτία ανά έτος στον ποταμό. Η πρώτη εφαρμογή, λοιπόν, εξετάζει τις επιπτώσεις της εκτροπής της παροχής αυτής σε άλλο ποταμό. Στα Σχήματα 6.2.1-1, 6.2.1-2, 6.2.1-3 και 6.2.1-4 παρουσιάζονται σε αντιπαραβολή η πραγματική (αρχική) κατάσταση και η νέα κατάσταση που προέκυψε με τα στοιχεία της εφαρμογής.



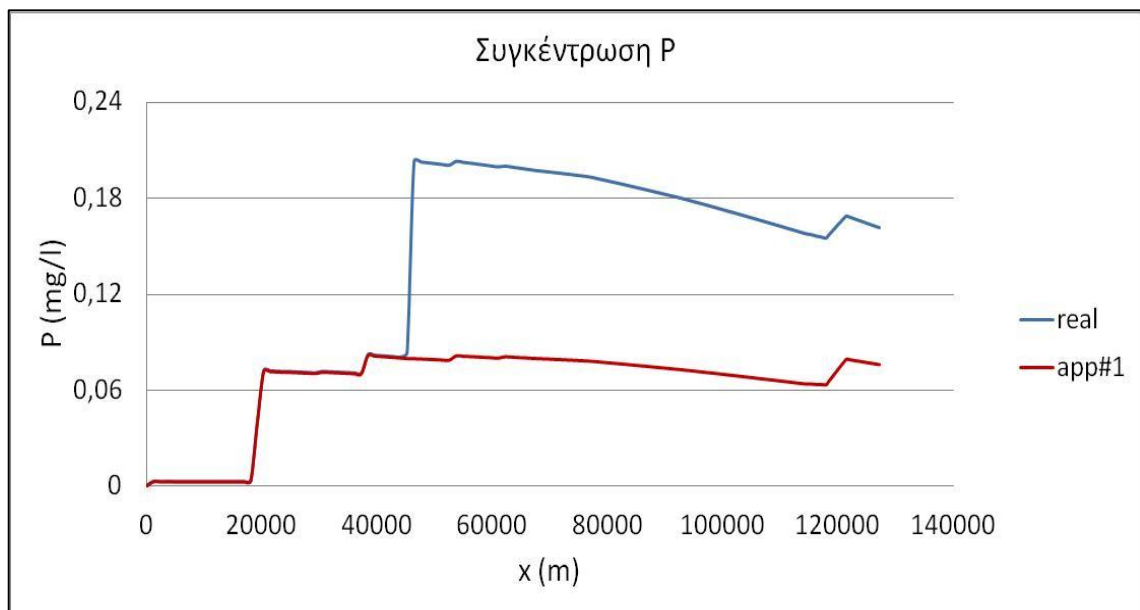
Σχήμα 6.2.1-1. Συγκέντρωση DO



Σχήμα 6.2.1-2. Συγκέντρωση N-NH3



Σχήμα 6.2.1-3. Συγκέντρωση BOD



Σχήμα 6.2.1-4. Συγκέντρωση P

Όλοι οι υπολογισμοί έγιναν με τα υδροδυναμικά στοιχεία της χειμερινής περιόδου και τις τιμές των παραμέτρων όπως προέκυψαν από τη βαθμονόμηση.

6.2.2 Επιπτώσεις

Η κλειστή λεκάνη των Ιωαννίνων αποτελεί τη βασικότερη πηγή ρύπανσης για τον ποταμό Καλαμά. Έτσι, είναι αναμενόμενο οι μεταβολές που παρατηρήθηκαν να είναι σημαντικές.

Συγκριμένα, για σημείο κατάντη της συμβολής παρατηρήθηκε μείωση του οργανικού φορτίου, αμμωνίας και φωσφόρου περίπου κατά 60%, 75% και 55% αντίστοιχα, ενώ

το οξυγόνο αυξήθηκε ελάχιστα, γιατί ήδη βρισκόταν σε υψηλά επίπεδα. Επίσης, δεν παρατηρήθηκαν φαινόμενα υπερκορεσμού του οξυγόνου.

Η οικολογική κατάσταση των υδάτινων σωμάτων είτε δεν άλλαξε είτε άλλαξε λίγο καθώς τα περισσότερα βρίσκονται σε πολύ καλή κατάσταση.

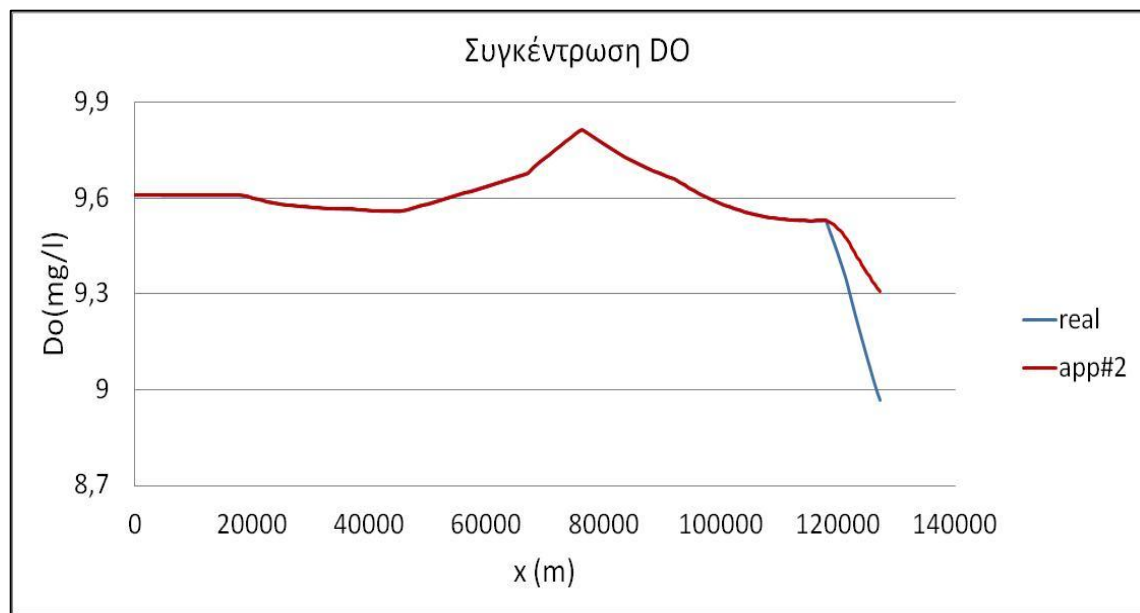
6.3 Εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων στην υπολεκάνη Άσπρο

6.3.1 Περιγραφή και αποτελέσματα

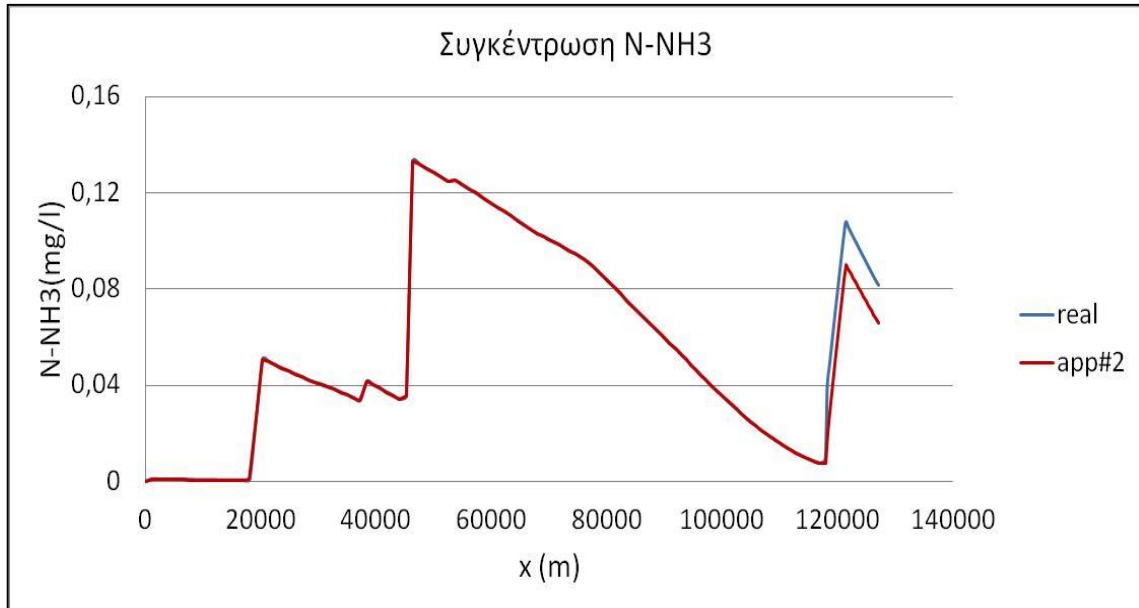
Στη λεκάνη του παραποτάμου Άσπρο απορρέουν οικισμοί χωρίς ΕΕΛ με αποτέλεσμα να συγκεντρώνονται πολύ μεγάλα φορτία. Τα φορτία της λεκάνης που προέρχονται από οικισμούς χωρίς ΕΕΛ είναι υπερπολλαπλάσια σε σχέση με όλες τις άλλες. Έτσι, η δεύτερη εφαρμογή έχει να κάνει με την υπόθεση εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων στην περιοχή για τη μείωση της πίεσης.

Για τις ανάγκες της εφαρμογής θεωρείται πως θα εγκατασταθεί μονάδα δευτεροβάθμιας επεξεργασίας με απομάκρυνση αζώτου και φωσφόρου. Άρα, τα ποσοστά απομάκρυνσης BOD, N, P θα είναι 90%, 80%, 80% αντίστοιχα.

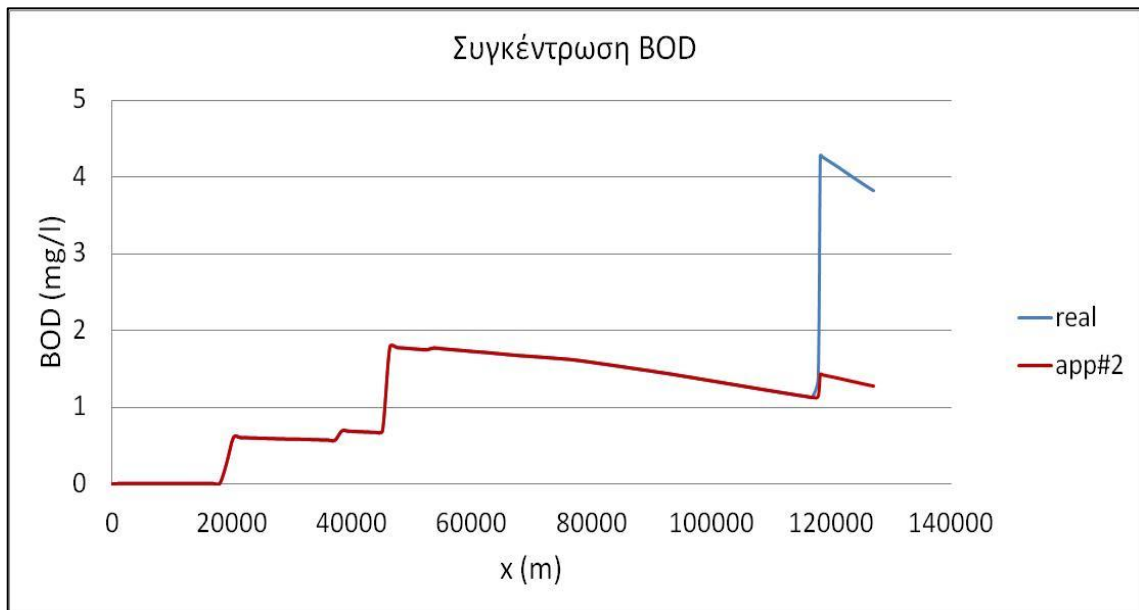
Στα Σχήματα 6.3.1-1, 6.3.1-2, 6.3.1-3 και 6.3.1-4 παρουσιάζονται σε αντιπαραβολή η πραγματική (αρχική) κατάσταση και η νέα κατάσταση που προέκυψε με τα στοιχεία της εφαρμογής.



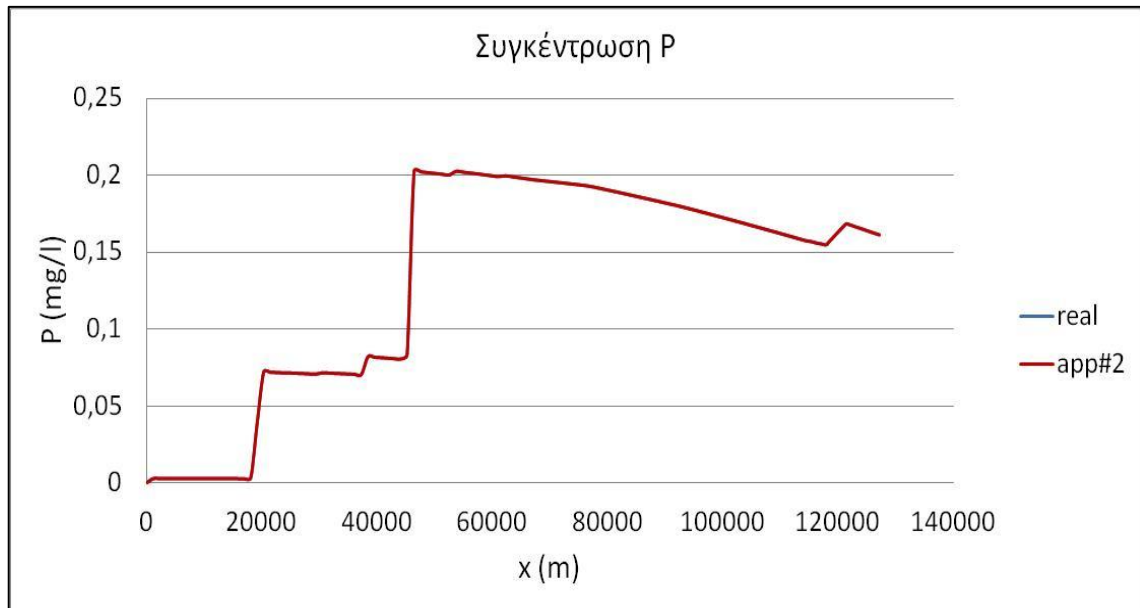
Σχήμα 6.3.1-1. Συγκέντρωση DO



Σχήμα 6.3.1-2. Συγκέντρωση N-NH3



Σχήμα 6.3.1-3. Συγκέντρωση BOD



Σχήμα 6.3.1-4. Συγκέντρωση P

Όλοι οι υπολογισμοί έγιναν με τα υδροδυναμικά στοιχεία της χειμερινής περιόδου και τις τιμές των παραμέτρων όπως προέκυψαν από τη βαθμονόμηση.

6.3.2 Επιπτώσεις

Στην περιοχή του Άσπρου συγκεντρώνονται μεγάλα αστικά ανεπεξέργαστα λύματα. Η επιβάρυνση είναι ιδιαίτερα μεγάλη, όμως, όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα οι επιπτώσεις αφορούν κυρίως το οργανικό φορτίο. Κάτι που ήταν αναμενόμενο αφού αποτελούσε και τη μεγαλύτερη ποσότητα του ρυπαντικού φορτίου.

Συγκεκριμένα, για σημείο κατάντη της συμβολής παρατηρήθηκε μείωση του οργανικού φορτίου και αμμωνίας περίπου κατά 65% και 25% αντίστοιχα, ενώ ο φώσφορος και το διαλυμένο οξυγόνο μεταβλήθηκαν ελάχιστα.

Η οικολογική κατάσταση των υδάτινων σωμάτων είτε δεν άλλαξε είτε άλλαξε λίγο καθώς τα περισσότερα βρίσκονται σε πολύ καλή κατάσταση.

6.4 Εγκατάσταση μεγάλης βιομηχανικής μονάδας στον Παραπόταμο

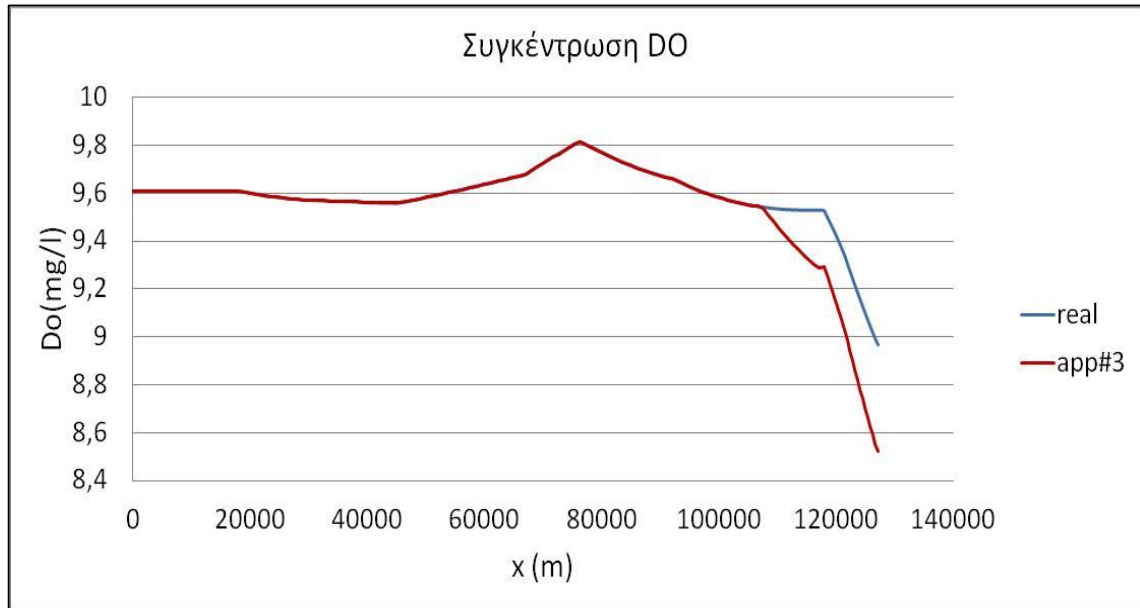
6.4.1 Περιγραφή και αποτελέσματα

Στην εφαρμογή αυτή θεωρείται πως μεγάλη βιομηχανική μονάδα (γαλακτοβιομηχανία) εγκαθίσταται στην περιοχή του Παραποτάμου Ηγουμενίτσας. Τα εκτιμώμενα ρυπαντικά φορτία που θα απορρέει στον ποταμό δίνονται στον Πίνακα 6.4.1-1 και έχουν εκτιμηθεί με βάση παρόμοιες βιομηχανίες.

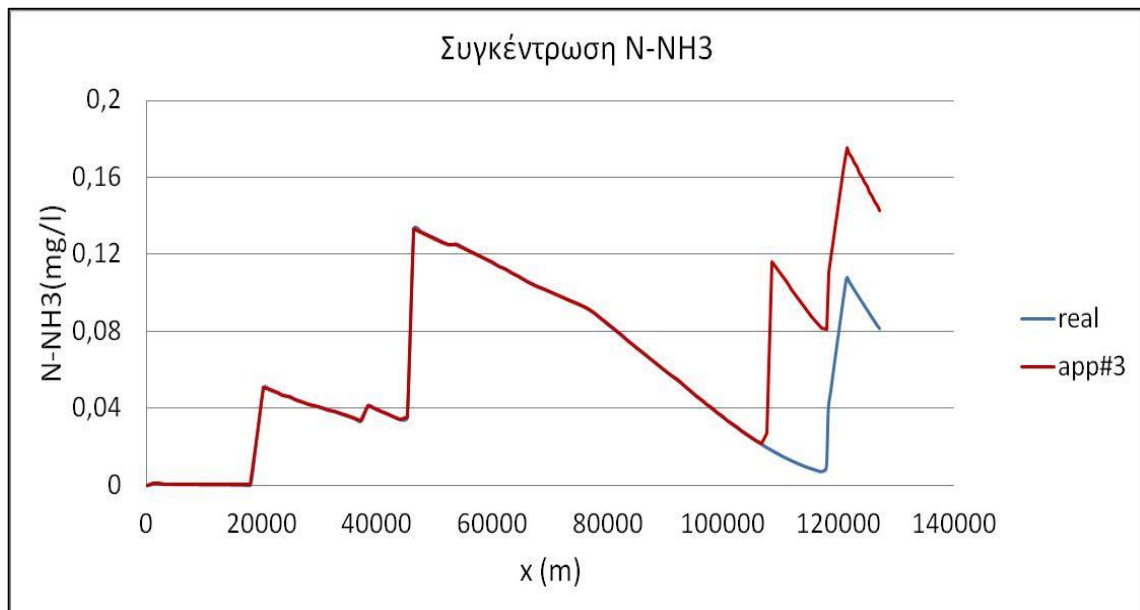
Πίνακας 6.4.1-1. Φορτία που απορρέουν από τη βιομηχανία

BOD (kg/d)	N (kg/d)	P (kg/d)
4000	1100	2400

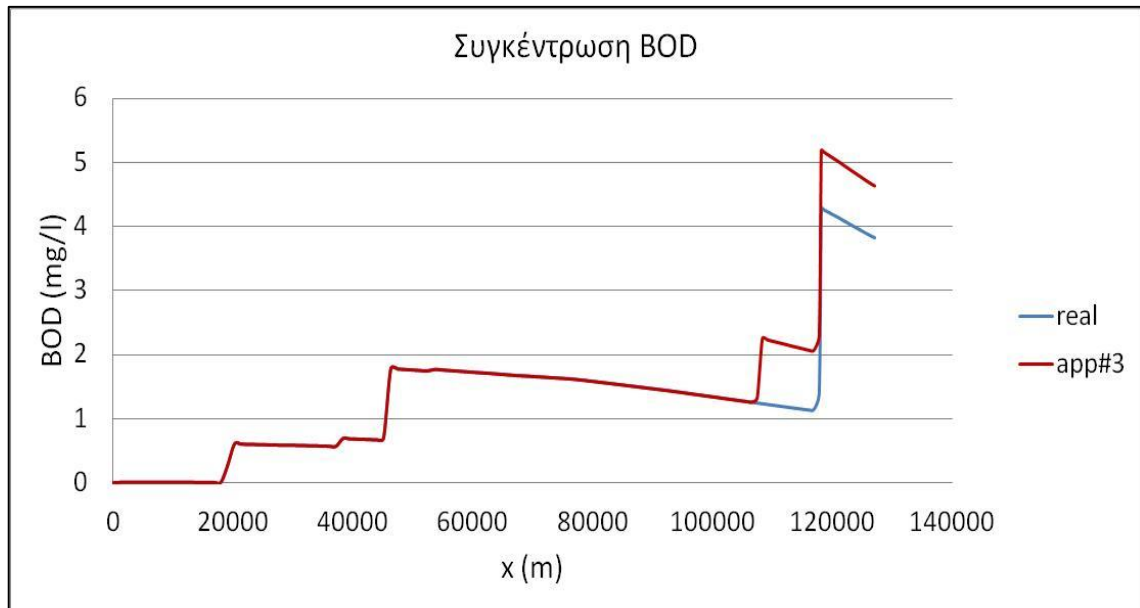
Στα Σχήματα 6.4.1-1, 6.4.1-2, 6.4.1-3 και 6.4.1-4 παρουσιάζονται σε αντιπαραβολή η πραγματική (αρχική) κατάσταση και η νέα κατάσταση που προέκυψε με τα στοιχεία της εφαρμογής.



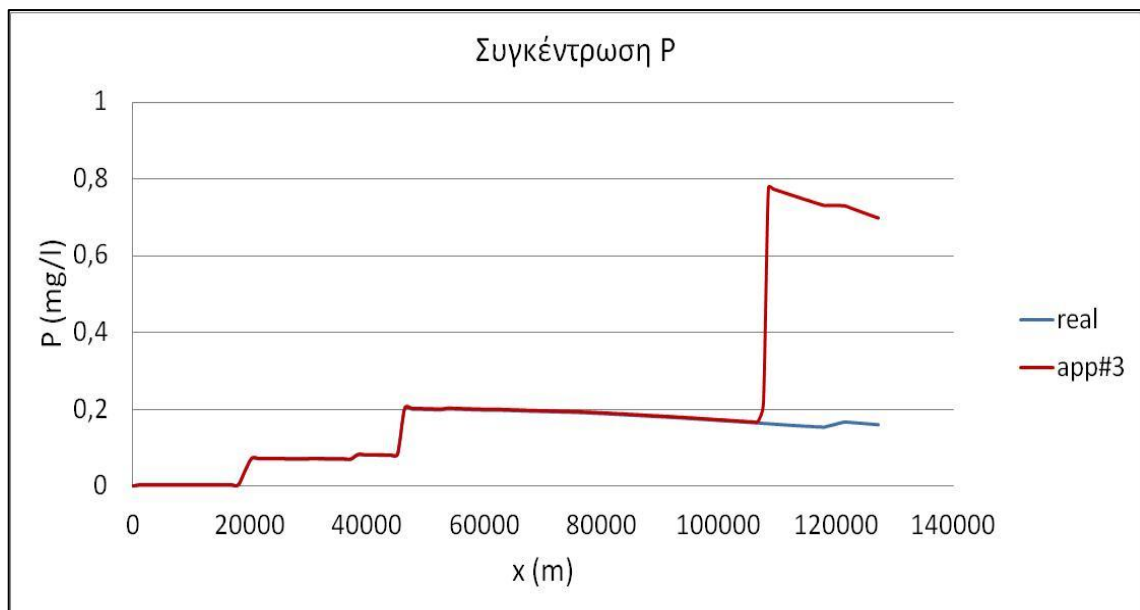
Σχήμα 6.4.1-1. Συγκέντρωση DO



Σχήμα 6.4.1-2. Συγκέντρωση N-NH3



Σχήμα 6.4.1-3. Συγκέντρωση BOD



Σχήμα 6.4.1-4. Συγκέντρωση P

Όλοι οι υπολογισμοί έγιναν με τα υδροδυναμικά στοιχεία της χειμερινής περιόδου και τις τιμές των παραμέτρων όπως προέκυψαν από τη βαθμονόμηση

6.4.2 Επιπτώσεις

Στην περιοχή μελέτης δραστηριοποιούνται πολλές βιομηχανικές μονάδες μικρής ή μεγαλύτερης κλίμακας. Για την εφαρμογή αυτή επιλέχθηκε μια γαλακτοβιομηχανία με πολύ μεγαλύτερα, όμως, φορτία από ότι αυτές της περιοχής.

Για σημείο κατάντη της συμβολής παρατηρείται χονδρικά διπλάσια συγκέντρωση οργανικού φορτίου, τριπλάσια συγκέντρωση αμμωνίας και τετραπλάσια συγκέντρωση φωσφόρου. Το διαλυμένο οξυγόνο μειώνεται κατά 8~10%.

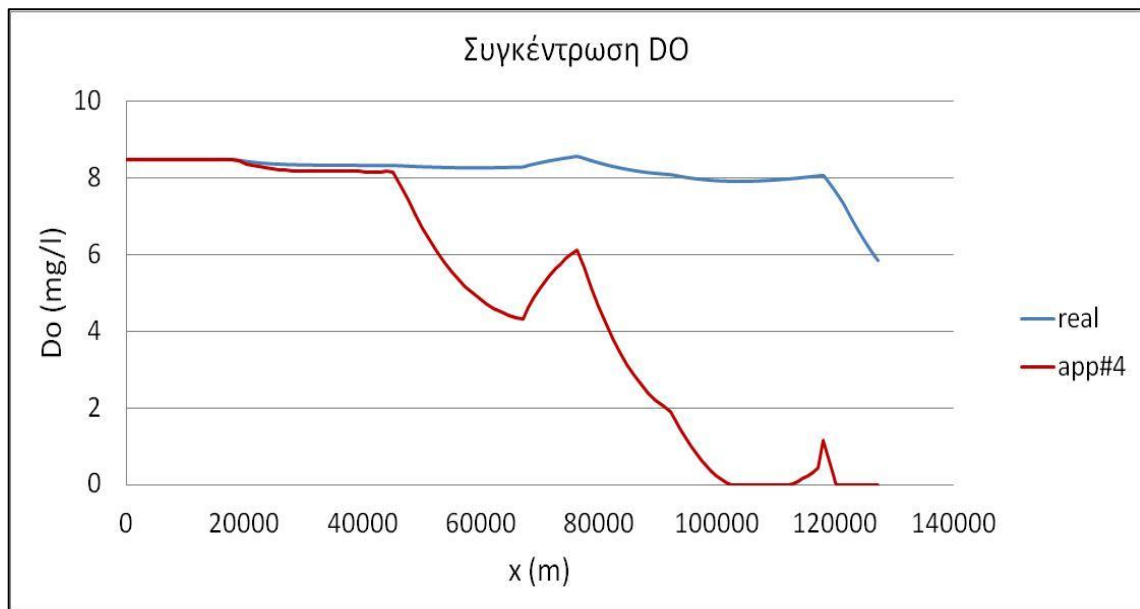
Η οικολογική κατάσταση των υδάτινων σωμάτων είτε δεν άλλαξε είτε άλλαξε λίγο καθώς τα περισσότερα βρίσκονται σε πολύ καλή κατάσταση.

6.5 Περίοδος χαμηλών παροχών

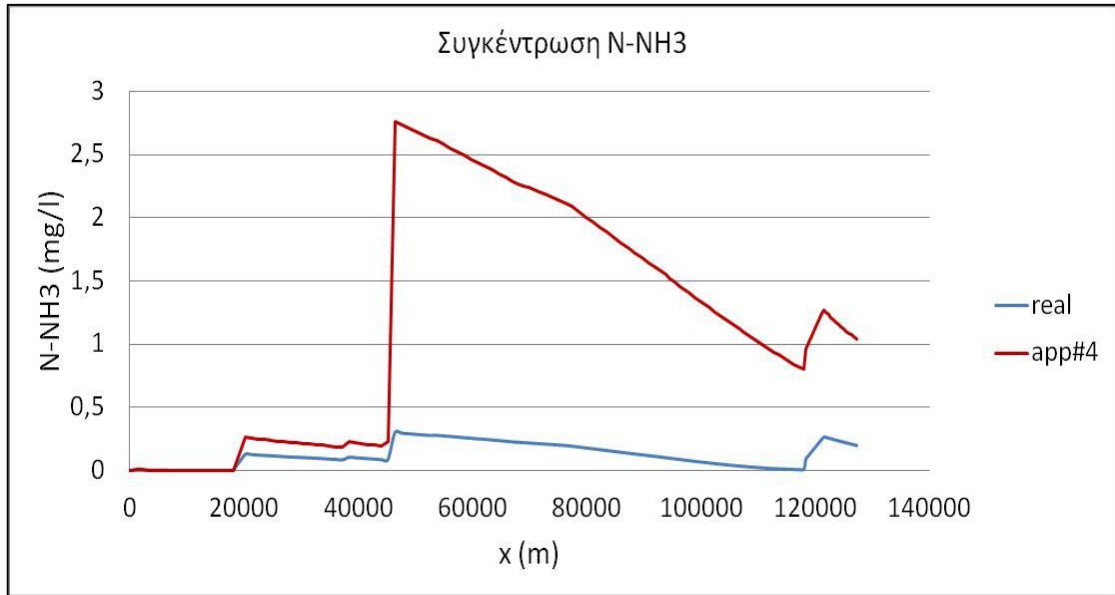
6.5.1 Περιγραφή και αποτελέσματα

Η μείωση της παροχής που διαρρέει τον ποταμό μπορεί να έχει μεγάλη επίπτωση στις συγκεντρώσεις των ποιοτικών χαρακτηριστικών. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή θεωρείται πως οι παροχές σε όλα τα τμήματα του ποταμού είναι μειωμένες στο μισό από τη μέση θερινή παροχή. Τα φορτία παραμένουν σταθερά με πριν, όπως και σε όλες τις εφαρμογές για να γίνεται η σύγκριση με τα νέα αποτελέσματα.

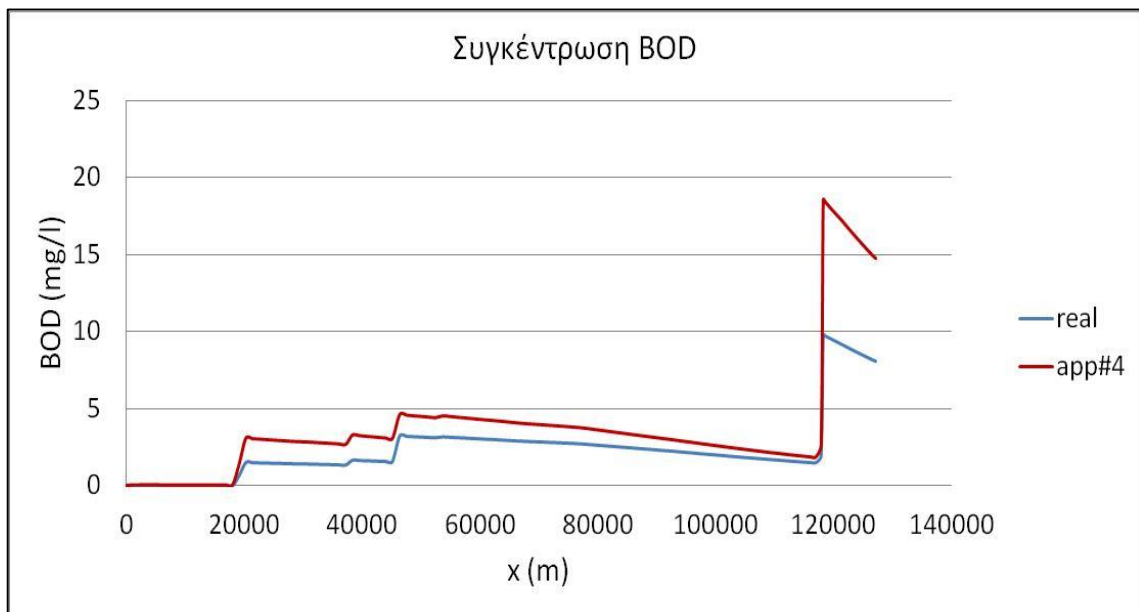
Στα Σχήματα 6.5.1-1, 6.5.1-2, 6.5.1-3 και 6.5.1-4 παρουσιάζονται σε αντιπαραβολή η πραγματική (αρχική) κατάσταση και η νέα κατάσταση που προέκυψε με τα στοιχεία της εφαρμογής



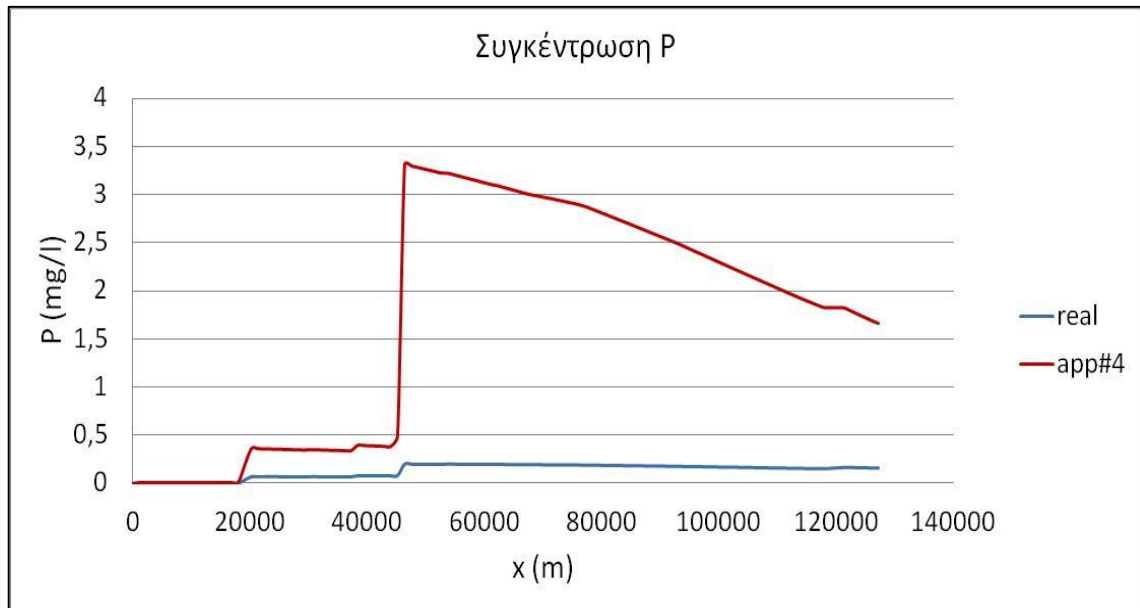
Σχήμα 6.5.1-1. Συγκέντρωση DO



Σχήμα 6.5.1-2. Συγκέντρωση N-NH3



Σχήμα 6.5.1-3. Συγκέντρωση BOD



Σχήμα 6.5.1-4. Συγκέντρωση P

Όλοι οι υπολογισμοί έγιναν με τα υδροδυναμικά στοιχεία της θερινής περιόδου (με τις τροποποιήσεις που αναφέρθηκαν) και τις τιμές των παραμέτρων όπως προέκυψαν από τη βαθμονόμηση.

6.5.2 Επιπτώσεις

Σε αυτή την εφαρμογή οι επιπτώσεις ήταν εξαιρετικά σημαντικές. Σε αντίθεση με τις προηγούμενες εφαρμογές η κλίμακα των μεταβολών εδώ ήταν πολύ μεγαλύτερη. Τα αποτελέσματα είναι πολύ δυσμενή για τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του ποταμού.

Σημειώνεται, πως εν γένει μέχρι τη συμβολή του Καλαμά με τη λεκάνη των Ιωαννίνων οι μεταβολές δεν είναι της ίδιας κλίμακας. Θα αναφερθούν οι μεγαλύτερες τιμές μεταβολών που παρατηρήθηκαν κατά μήκος. Πιο συγκεκριμένα, το οργανικό φορτίο περίπου διπλασιάζεται, ενώ οι συγκεντρώσεις της αμμωνίας και του φώσφορου υπερπολλαπλασιάζονται. Το διαλυμένο οξυγόνο σχεδόν μηδενίζεται.

Οι επιπτώσεις στην οικολογική κατάσταση των υδάτινων σωμάτων στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι πολύ σημαντικές και υποβαθμίζουν κατά πολύ την πρότερη κατάσταση. Ο υποβιβασμός είναι τέτοιος ώστε να χαρακτηρίζονται ΥΣ ως κακά σε κλάση ποιότητας.

7 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

7.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, λαμβάνοντας υπόψη τη σημαντική αβεβαιότητα των διαθέσιμων μετρήσεων πεδίου και των εκτιμήσεων των ρυπαντικών φορτίων κρίνονται ως πολύ ικανοποιητικά. Προφανώς, αν υπήρχαν περισσότερα διαθέσιμα στοιχεία το επίπεδο βεβαιότητας θα ήταν υψηλότερο.

Πρέπει να σημειωθεί, όμως, πως η διερεύνηση βρίσκεται σε προκαταρκτικό στάδιο και ως τέτοια πρέπει να αντιμετωπίζεται. Θα μπορούσε να αποτελέσει ένα πρώτο βήμα για περαιτέρω διερεύνηση.

Σε όλες τις περιόδους που εξετάστηκαν οι μεγαλύτερες τιμές αποκλίσεων εντοπίζονται στο ίδιο σημείο, στον πρώτο σταθμό μέτρησης για τη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου. Η κλίμακα, μάλιστα, του σφάλματος στο σημείο αυτό είναι πολλαπλάσια των άλλων, που ήταν συνήθως πολύ μικρά.

Ο πρώτος σταθμός μέτρησης βρίσκεται στο πρώτο τμήμα του ποταμού, όπου οι κλίσεις είναι σημαντικές (>7‰), άρα προέχει η μεταφορά της διάχυσης. Αναλυτικότερα, όταν η ταχύτητα είναι μεγάλη (άρα μεγάλες κλίσεις, μικρά βάθη κτλ) για ένα ρύπο που πέφτει στο ποτάμι υπερτερεί η μεταφορά, και άρα δεν διαχέεται στο σημείο που πέφτει αλλά σε σημείο κατάντη. Αυτή η συμπεριφορά προσομοιώνεται και από το μοντέλο που δομήθηκε. Επομένως, μπορεί να υποθεθεί πως ο λόγος των αποκλίσεων που παρατηρούνται στα σημεία αυτά οφείλονται σε κάποια υπερεκτίμηση αυτής της διαδικασίας από το μοντέλο.

Για να εξασφαλισθεί καλύτερη προσέγγιση στα αποτελέσματα λήφθηκε υπόψη η μεταβολή του οξυγόνου κορεσμού O_{sat} ανάλογα με το υψόμετρο. Ο Καλαμάς πηγάζει από υψόμετρο πάνω από 500 m, το τέλος του δεύτερου τμήματος, όμως, βρίσκεται ήδη περίπου στα 150 m. Η επίδραση της διαφοράς, λοιπόν, από εκεί και μετά ήταν μικρή. Έτσι, λήφθηκε υπόψη μόνο στα πρώτα δύο τμήματα, όπου βελτιώνει τη συμπεριφορά του μοντέλου.

Στην προσπάθεια να μειωθεί το σφάλμα της προσομοίωσης έγιναν διάφορες επαναλήψεις. Οι τιμές των συντελεστών, όμως, για μείωση του σφάλματος ήταν μη παραδεκτές. Για παράδειγμα, έπρεπε να χρησιμοποιηθούν τιμές οξυγόνου κορεσμού O_{sat} που αντιστοιχούσαν σε θερμοκρασίες μέχρι και 40 °C.

7.2 Αξιολόγηση ποιοτικής κατάστασης υδάτινων σωμάτων

Η μελέτη των αποτελεσμάτων οδηγεί και στην ανάγκη για αξιολόγηση της κατάστασης των υδάτων στις διάφορες περιόδους, ώστε να γίνουν πιο σαφείς οι συνέπειες, θετικές ή αρνητικές, από τις διάφορες μεταβολές.

Η αξιολόγηση αυτή γίνεται με βάση τα όρια κλάσης ποιότητας για τα ποτάμια υδάτινα σώματα της Μεσογείου, όπως αυτά εξηγούνται στα σχέδια διαχείρισης του ΥΠΕΚΑ. Ο Πίνακας 7.2-1 παρουσιάζει αναλυτικά τις τιμές αυτές για τις παραμέτρους ενδιαφέροντος.

Πίνακας 7.2-1. Όρια μεταξύ κλάσεων ποιότητας

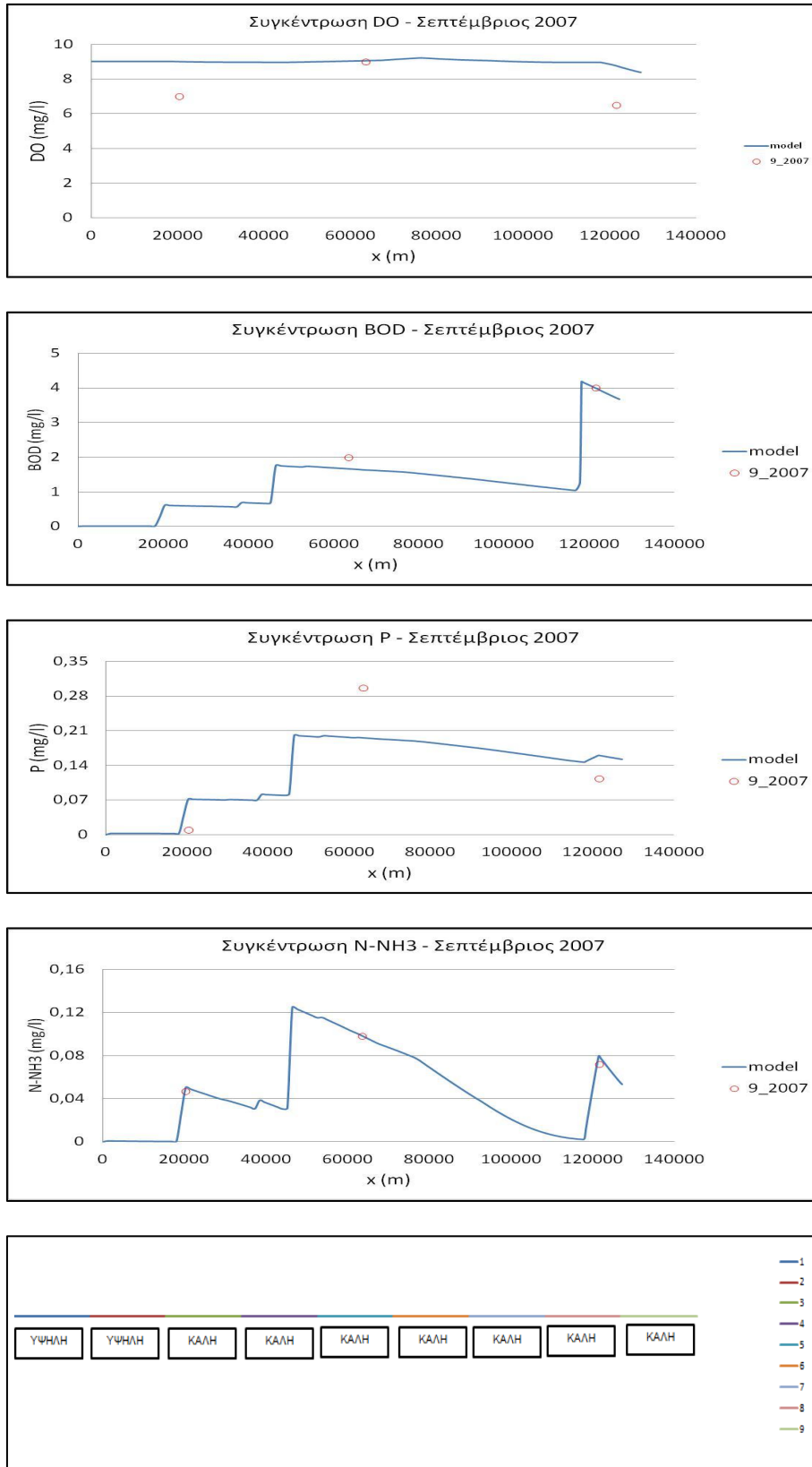
	Υψηλή	Καλή	Μέτρια	Ελλιπής	Κακή
DO (mg/l)	8	6	4	3	
BOD5 (mg/l)	3	6	10	25	
P (mg/l)	0.05	0.20	0.50	1	
NH3 (mg/l)	0.10	0.50	2	5	

Προκύπτει, έτσι, πως τα περισσότερα τμήματα του ποταμού βάσει των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης βρίσκονται στη δεύτερη ανώτερη κλάση και κάποια στην ανώτατη, όπως φαίνεται και στα παρακάτω διαγράμματα (Σχήμα 7.2-1).

Αυτό επιβεβαιώνεται και από τις εφαρμογές στο Κεφάλαιο 6, όπου παρά τις μεταβολές που έγιναν στα πλαίσια των υποθέσεων αυτών, η οικολογική κατάσταση παρέμενε σχετικά υψηλή.

Εξαιρέση, όπως φάνηκε, αποτέλεσε η τέταρτη κατά σειρά εφαρμογή, στην οποία μειώθηκαν οι παροχές στα τμήματα του ποταμού. Στην περίπτωση αυτή, παρατηρήθηκε σημαντικότερη υποβάθμιση της οικολογικής κατάστασης των υδάτινων σωμάτων με κάποια να υποβιβάζονται σε μέτρια, ελλιπή ακόμα και κακή.

Αντιθέτως τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των τμημάτων Τάφρος Λαψίστας και ρέμα Κληματιάς έδειξαν πως δεν ανήκουν στην ίδια οικολογική κλάση. Ειδικότερα, κατά τη χειμερινή περίοδο η κατάσταση τους μπορεί να χαρακτηριστεί καλή, όμως κατά τη θερινή περίοδο υποβαθμίζεται σημαντικά σε μέτρια έως και ελλιπή (Παράρτημα).



Σχήμα 7.2-1. Οικολογική κατάσταση υδάτινων σωμάτων

8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

8.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία δομείται, βαθμονομείται και επιβεβαιώνεται ένα μονοδιάστατο μοντέλο για την προσομοίωση της ποιότητας των νερών του ποταμού Καλαμά. Πρέπει να σημειωθεί πως το μοντέλο αυτό, αποτελεί μια πρώτη προσέγγιση και άρα τα αποτελέσματα μπορούν να θεωρηθούν ως μια αρχική εκτίμηση και μόνο.

Η βαθμονόμηση και επιβεβαίωση πραγματοποιούνται με πολύ περιορισμένα δεδομένα και διαθέσιμες μετρήσεις πεδίου των ετών 2007 – 2008. Τα υδραυλικά στοιχεία προσδιορίστηκαν με βάση δεδομένα (α) από τα σχέδια διαχείρισης του υδατικού διαμερίσματος και (β) από επιτόπου μετρήσεις.

Λαμβάνοντας υπόψη τη σημαντική αβεβαιότητα των διαθέσιμων μετρήσεων πεδίου και των εκτιμήσεων των ρυπαντικών φορτίων η συμφωνία των υπολογισμών με τις μετρήσεις πεδίου κατά τη βαθμονόμηση και επιβεβαίωση κρίνεται ως ικανοποιητική. Εξαιρέση αποτελεί η τιμή συγκέντρωσης DO στον σταθμό του Καλπακίου, όπου παρατηρείται η μεγαλύτερη απόκλιση.

Με βάση τα αποτελέσματα η οικολογική κατάσταση των υδάτινων σωμάτων της κύριας κοίτης του Καλαμά κρίνεται ικανοποιητική παρά τη σημαντική ρυπαντική δραστηριότητα που τον επιβαρύνει. Μάλιστα, ακόμα και σε υποθετικές εφαρμογές με πολύ μεγαλύτερα φορτία, από τα συνήθη της περιοχής μελέτης, η οικολογική κατάσταση παρέμεινε υψηλή. Άρα, η απορροή της κλειστής λεκάνης των Ιωαννίνων είναι μεν δυσχερής για τον ποταμό, όμως, όπως φάνηκε και στην παράγραφο 6.2 οι επιπτώσεις δεν υποβαθμίζουν πολύ την κατάσταση των υδάτινων σωμάτων. Τα παραπάνω βρίσκονται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της αξιολόγησης των υδάτινων σωμάτων από το ΥΠΕΚΑ.

Από τις εφαρμογές που έγιναν, με τέσσερα διαφορετικά σενάρια, τα αποτελέσματα δεν έδειξαν μεγάλες μεταβολές. Εξαιρέση αποτελεί η εφαρμογή όπου οι παροχές ήταν πολύ χαμηλές, όπως κάποιας περιόδου ξηρασίας είτε γενικά χαμηλών απορροών. Σε αυτή την εφαρμογή οι επιπτώσεις ήταν πολύ σημαντικές, κάτι που σημαίνει πως ενδέχεται να δημιουργηθούν σοβαρά προβλήματα στην οικολογική κατάσταση του ποταμού σε μία τέτοια περίπτωση.

8.2 Προτάσεις

Για τη βελτίωση του προτεινόμενου μοντέλου και την αύξηση του βαθμού της αξιοπιστίας ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέσο για τη διαχείριση της ποιότητας των νερών του Καλαμά προτείνονται τα ακόλουθα:

1. Πλήρης και αναλυτική καταγραφή όλων των ρυπαντικών φορτίων (πιέσεων) και των χρονικών διακυμάνσεων τους στον ποταμό Καλαμά, στους παραποτάμους του συστήματος και στο λεκανοπέδιο των Ιωαννίνων.
2. Συστηματική παρακολούθηση των συγκεντρώσεων των ποιοτικών παραμέτρων σε τακτικές περιόδους και ειδικότερα σε περιόδους που αναμένονται μεγάλες συγκεντρώσεις BOD₅, NH₃, P και αντίστοιχα μικρές συγκεντρώσεις DO.
3. Μεγαλύτερο δειγματοληπτικό δίκτυο. Δημιουργία ενός συστήματος καταγραφών υδροδυναμικών χαρακτηριστικών αλλά και συγκεντρώσεων ποιοτικών χαρακτηριστικών σε όλο το μήκος του ποταμού Καλαμά και στους παραποτάμους του.
4. Ταυτόχρονη μέτρηση ποιοτικών και υδροδυναμικών χαρακτηριστικών, ώστε να μπορούν να αξιοποιηθούν τα στοιχεία για συσχέτιση μεταξύ των δύο, καθώς και επέκταση των στοιχείων που καταγράφονται.

Όλα τα παραπάνω υπαγορεύονται και από την Οδηγία Πλαίσιο για τα Νερά (Οδηγία 2000/60/ΕΚ).

9 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) ΥΠΕΚΑ, (2012). Αξιολόγηση και Ταξινόμηση της Ποιοτικής Κατάστασης των Επιφανειακών Υδατικών Συστημάτων.
http://dl.dropboxusercontent.com/u/50953375/KeimenaTekmiriosis/9o_Paradoteo.pdf
- 2) ΥΠΕΚΑ, (2012). Ανάλυση ανθρωπογενών πιέσεων και των επιπτώσεων τους στα επιφανειακά και στα υπόγεια υδατικά συστήματα.
http://dl.dropboxusercontent.com/u/50953375/KeimenaTekmiriosis/8o_Paradoteo.pdf
- 3) ΥΠΕΚΑ, (2012). Τυπο-χαρακτηριστικές συνθήκες αναφοράς για τους τύπους επιφανειακών υδατικών συστημάτων.
http://dl.dropboxusercontent.com/u/50953375/KeimenaTekmiriosis/6o_Paradoteo.pdf
- 4) Kashefipour, S.M., Falconer, R.A., (2002). Longitudinal dispersion coefficients in natural channels, *Water Research*, 36 (6):1596-608.
- 5) Νουτσόπουλος, Γ., Χριστοδούλου, Γ., Παπαθανασιάδης, Τ., (2007). Υδραυλική Ανοιχτών Αγωγών, *Φούντας*, Αθήνα.
- 6) Στάμου, Ι.Α., (2008). Εφαρμοσμένη υδραυλική, *Παπασωτηρίου*, Αθήνα.
- 7) Stamou, I.A., Rutschmann, P., (2011). Teaching simple water quality models, *Education for Chemical Engineers*, 6 (4), e132-e141.
- 8) Stamou, I.A., Douka, E., Kapor, R., Ivetic, M., Branisavljevic, N., (2005). Presentation and calibration of an intergrated model for urban stream water quality management, *Proc. of the Intern. Conference for the Restoration and Protection of the Environment IX*, Kefalonia, Greece.
<http://www.srcosmos.gr/srcosmos/showpub.aspx?aa=11128>
- 9) Thomann, R.V., Mueller, J.A., (1987). Principles of surface water quality modeling and control, *Harper and Row*, New York.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Εισαγωγή

Στο Παράρτημα θα παρατεθούν πίνακες και χάρτες που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη μελέτη, καθώς και η φωτογραφική τεκμηρίωση για τα πλάτη των διατομών του εκάστοτε τμήματος του ποταμού.

Στο Κεφάλαιο 3 αναφέρονται γενικά τα φορτία που λειτουργούν ως πιέσεις στον ποταμό Καλαμά. Παρακάτω παρουσιάζονται όλα τα στοιχεία που ήταν διαθέσιμα για αυτά. Επίσης, παρατίθεται ένας χάρτης με τις θέσεις των πιέσεων όπως αυτές προσδιορίστηκαν.

Επίσης, στο κύριο τεύχος παρουσιάζονται τα διαγράμματα των αποτελεσμάτων αφού έχει επέλθει η σταθεροποίηση. Παρουσιάζονται, λοιπόν, πρόσθετα διαγράμματα που αφορούν την εξέλιξη των ποιοτικών χαρακτηριστικών στον χρόνο.

Ακόμα, στην αξιολόγηση των υδάτινων σωμάτων γίνεται αναφορά και στα τμήματα Τάφρος Λαψίστας και ρέμα Κληματιάς. Παρακάτω παραθέτονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης βάσει των οποίων έγινε η αξιολόγηση. Η Τάφρος της Λαψίστας κρίνεται ως κρίσιμη αφού εκεί απορρέουν τα φορτία, ενώ το ρέμα της Κληματιάς απλώς 'μεταφέρει' την παροχή αυτή.

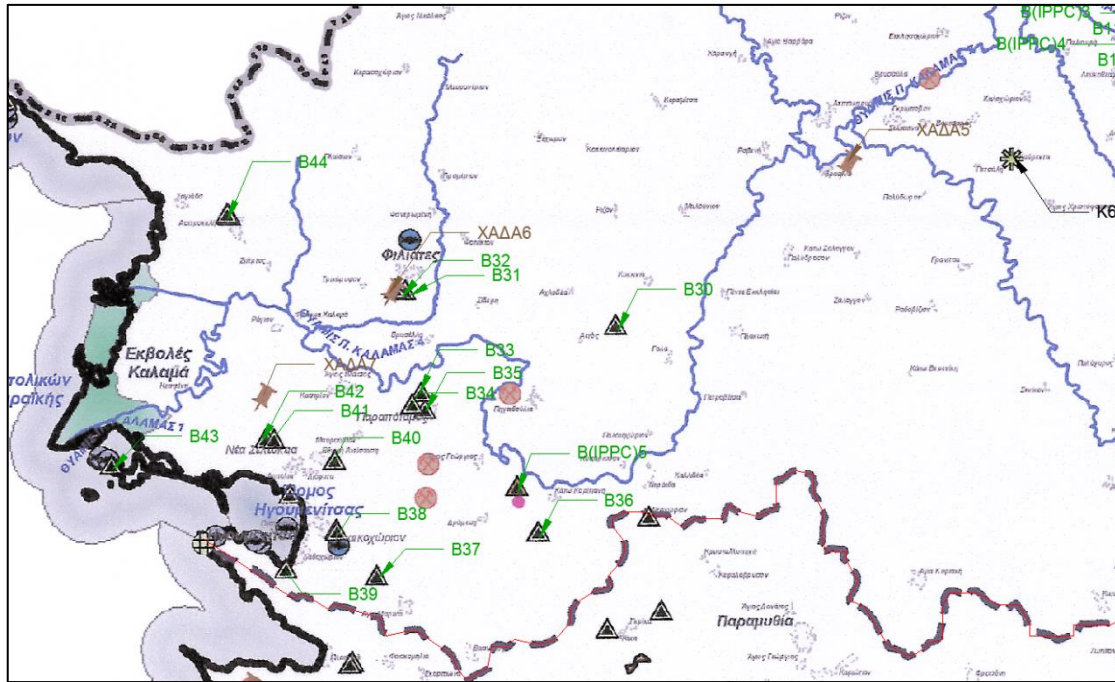
Στα διαθέσιμα στοιχεία επίσης αναφέρεται πως έγινε αυτοψία για τον προσδιορισμό του πλάτους της εκάστοτε διατομής ανά τμήμα του ποταμού. Παρακάτω παρατίθεται η φωτογραφική επισκόπηση της διαδικασίας αυτής

Σημειακές πιέσεις

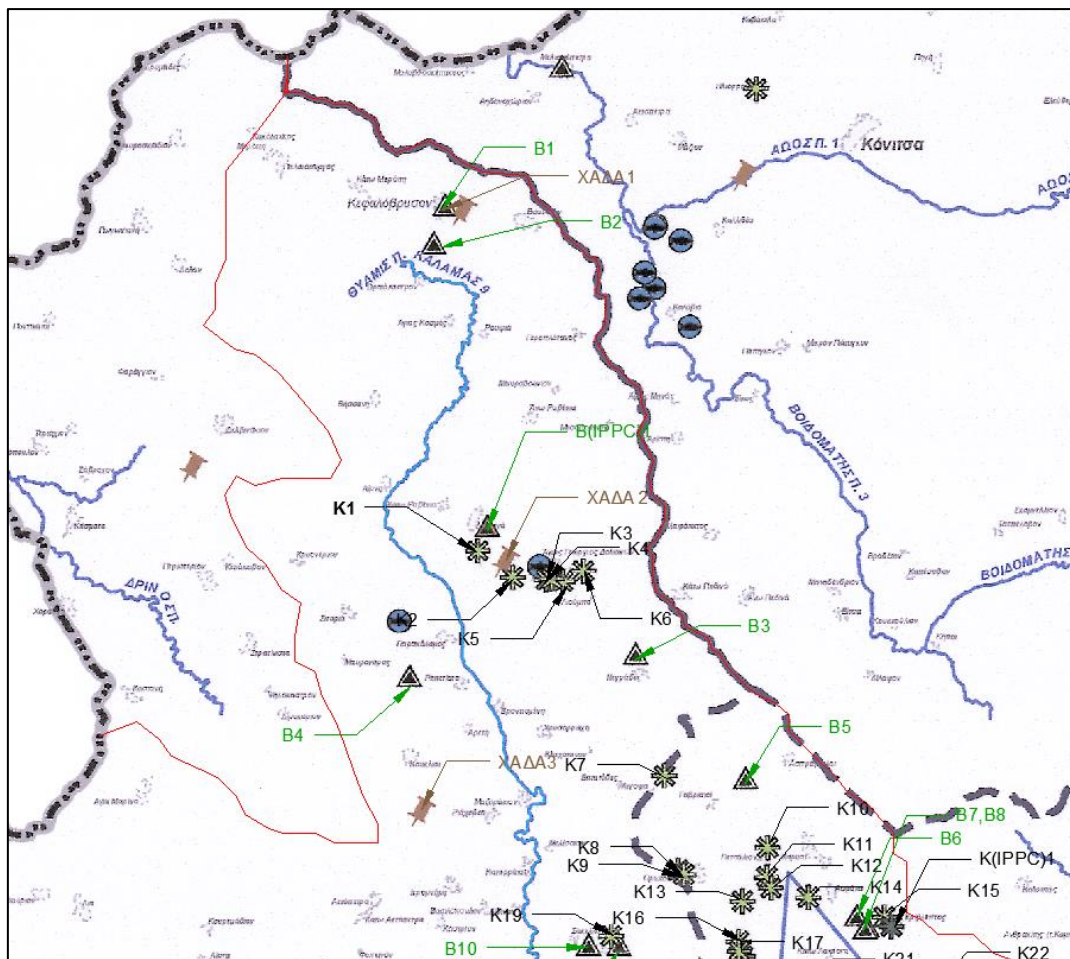
Τα στοιχεία που διατίθενται για τον προσδιορισμό των σημειακών πιέσεων είναι κατάλογοι με τις μονάδες, όπου καταγράφονται τα στοιχεία τους, καθώς και ένας χάρτης που τις απεικονίζει. Ο χάρτης δεν έχει κάποια διακριτή σύνδεση με τους καταλόγους. Έτσι, για τον σαφή προσδιορισμό της θέσης της εκάστοτε μονάδας, έγινε επεξεργασία του χάρτη σε περιβάλλον AutoCAD. Το αποτέλεσμα είναι, όπως φαίνεται στα Σχήματα 1, 2, 3 και 4, η δημιουργία ενός χάρτη με σήμανση της εκάστοτε πίεσης και σύνδεση με τους καταλόγους των στοιχείων. Λόγω μεγάλης κλίμακας παρουσιάζονται τμηματικά στα Σχήματα 1, 2, και 3, ενώ το Σχήμα 4 εμφανίζει όλη τη λεκάνη. Με πράσινο χρώμα σημαίνονται οι βιομηχανικές μονάδες, με μαύρο οι κτηνοτροφικές μονάδες, με καφέ οι ΧΑΔΑ και με γκρι οι ΕΕΛ.

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται η περιοχή του νομού Ηγουμενίτσας.

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζονται οι πιέσεις στην περιοχή βόρεια των Ιωαννίνων κοντά στο Καλπάκι, ουσιαστικά από τις πηγές μέχρι το ύψος της λεκάνης των Ιωαννίνων.

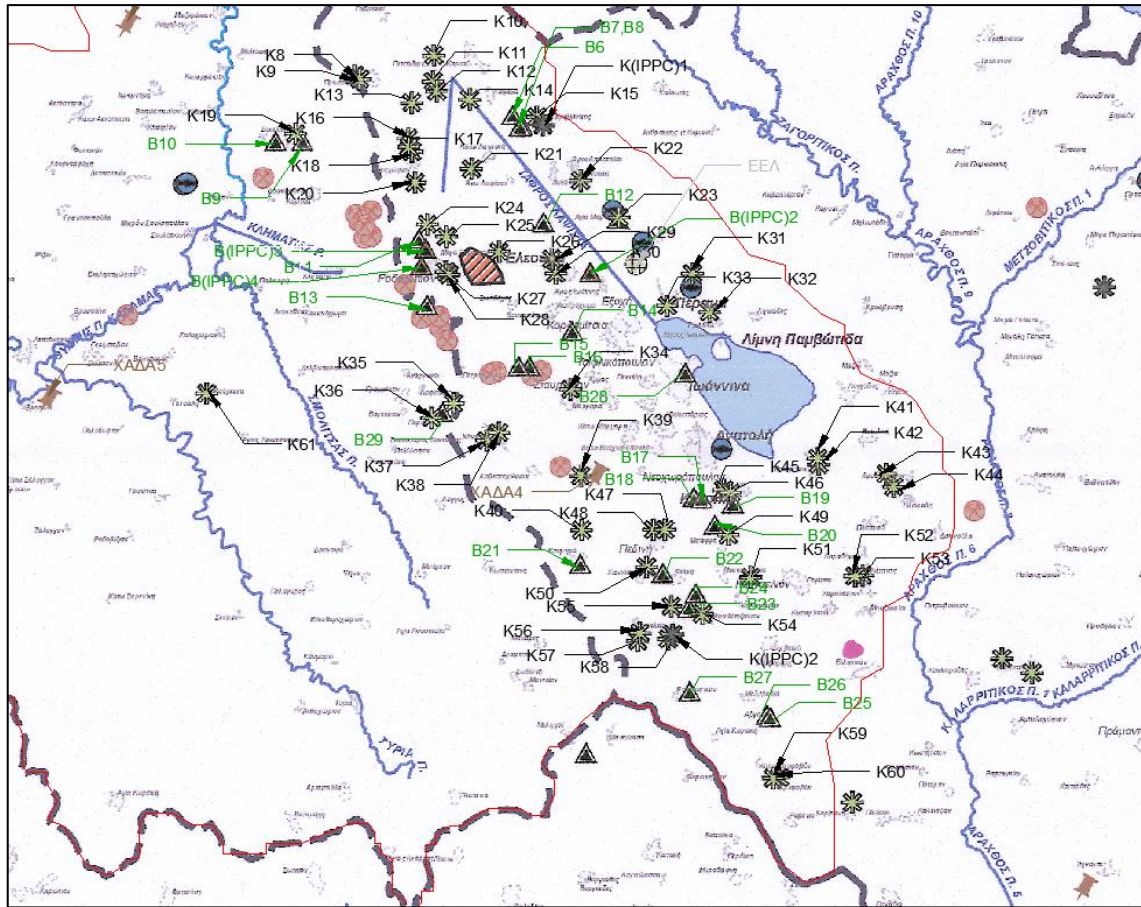


Σχήμα 1. Σημειακές πιέσεις, περιοχή Ηγουμενίστας (ΥΠΕΚΑ)



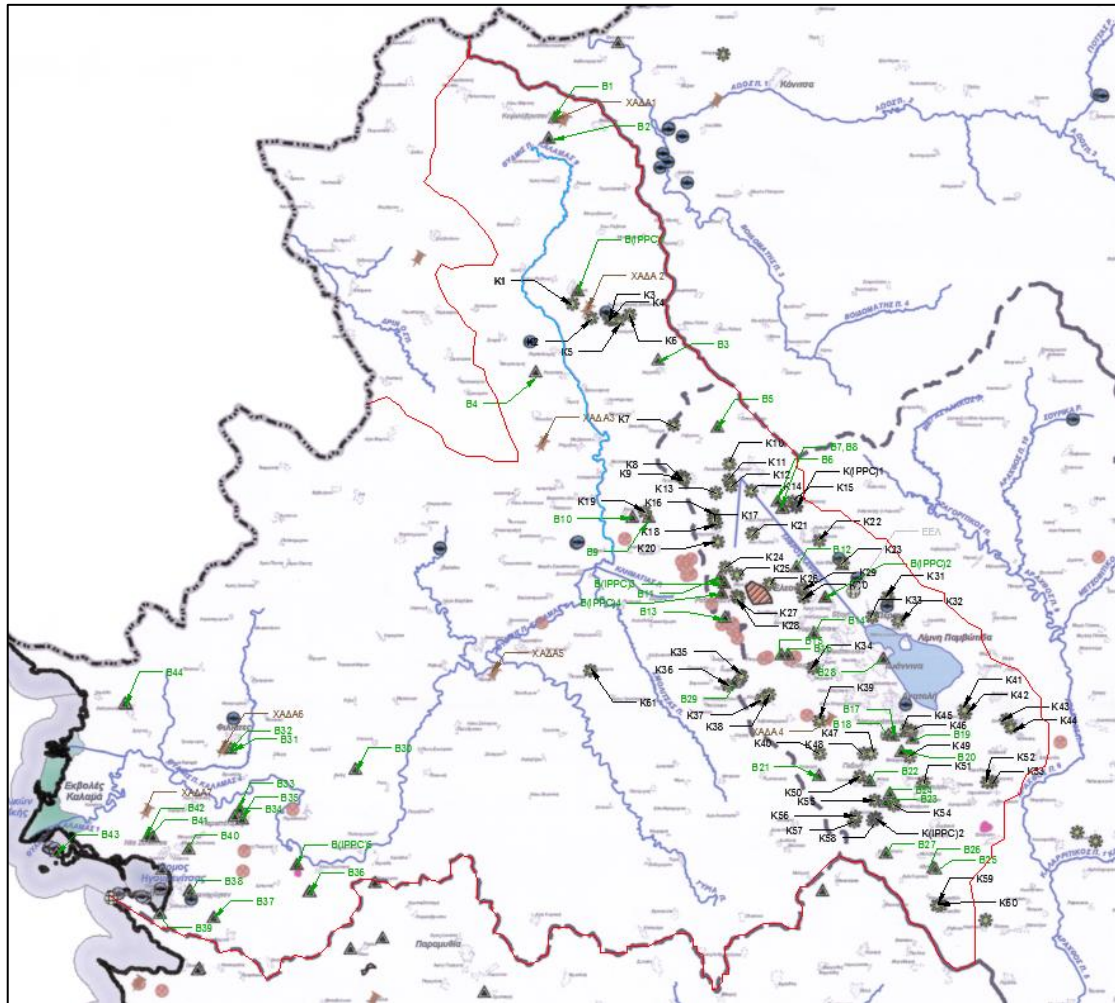
Σχήμα 2. Σημειακές πιέσεις, περιοχή Καλπακίου (ΥΠΕΚΑ)

Στο τρίτο σχήμα παρουσιάζονται οι πιέσεις στη λεκάνη των Ιωαννίνων και προς τα δυτικά.



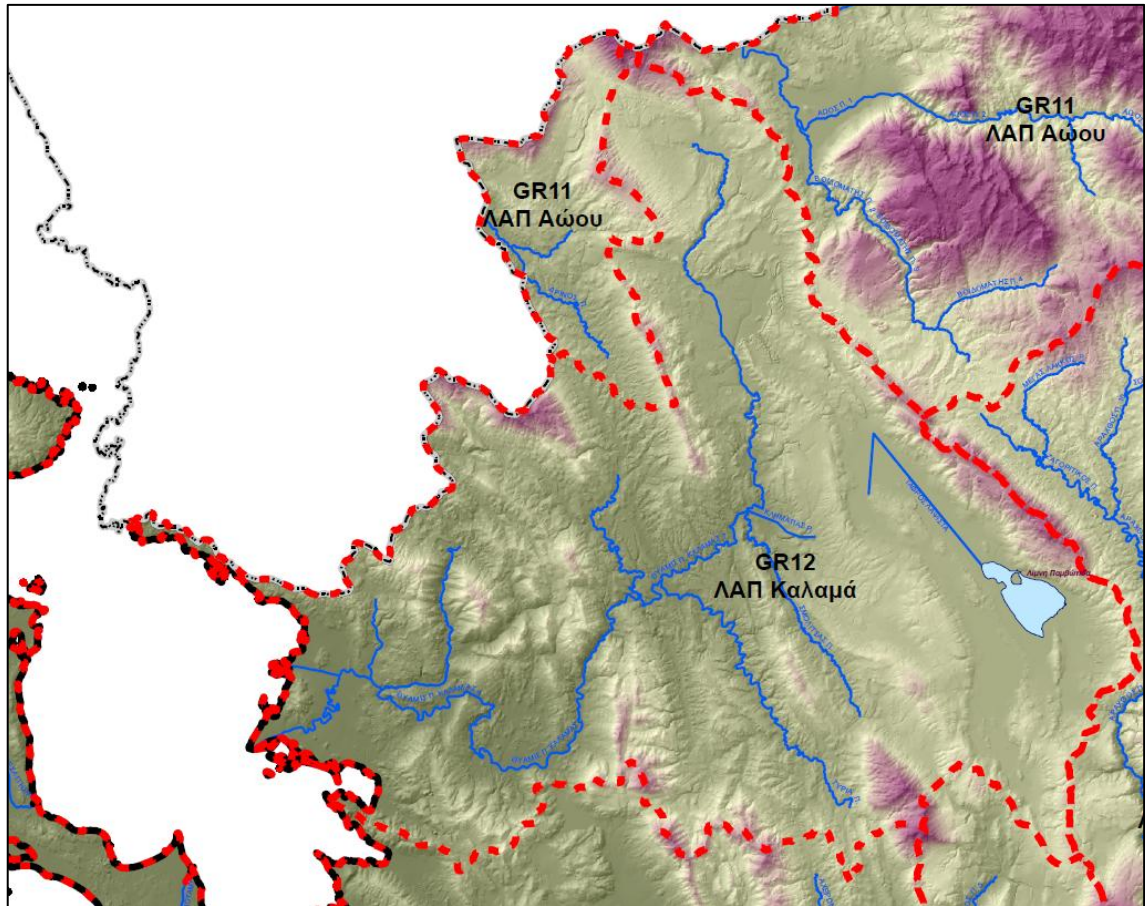
Σχήμα 3. Σημειακές πιέσεις, περιοχή Ιωαννίνων (ΥΠΕΚΑ)

Στο τέταρτο σχήμα παρουσιάζεται η επισκόπηση όλης της περιοχής μελέτης.



Σχήμα 4. Σημειακές πιέσεις, ΛΑΠ Καλαμά (ΥΠΕΚΑ)

Τέλος, σημειώνεται πως στον χάρτη αυτό δεν ήταν σωστά τοποθετημένη η γραμμή του ορίου της λεκάνης απορροής. Έτσι, με χρήση του χάρτη του Σχήματος 5 που απεικονίζει τη σωστή οριογραμμή, χαράχθηκαν τα όρια στους παραπάνω χάρτες. Τα όρια της λεκάνης απορροής του Καλαμά συμβολίζονται με κόκκινη γραμμή.

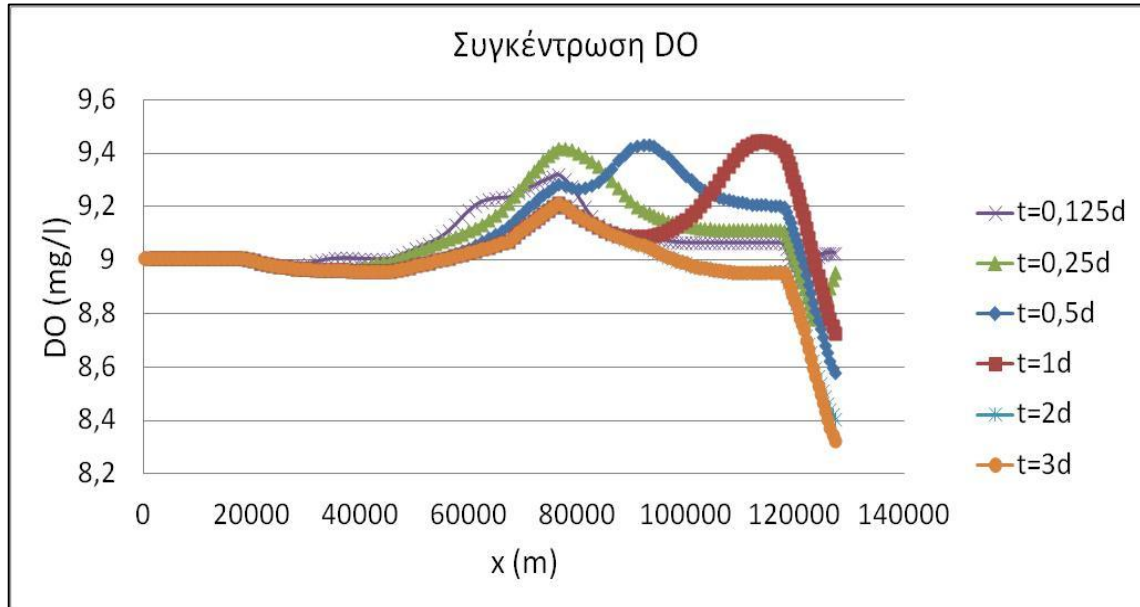


Σχήμα 5. ΛΑΠ Καλαμά (ΥΠΕΚΑ)

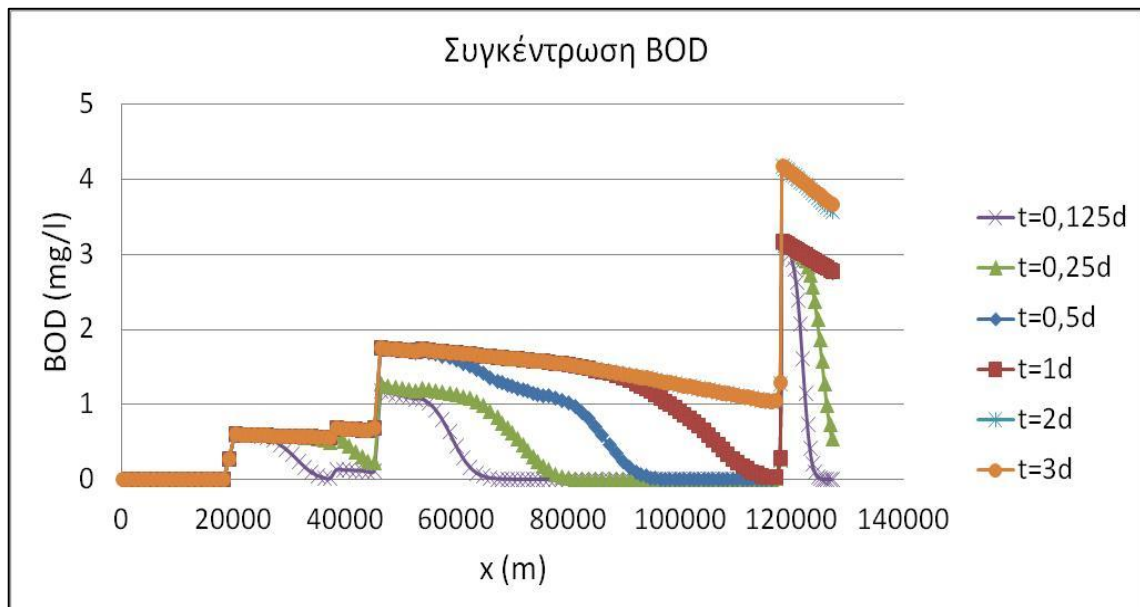
Πρόσθετα σχήματα από τη διαδικασία προσομοίωσης

Κατά την επεξεργασία έγιναν επαναληπτικές διαδικασίες μέχρις ότου να σταθεροποιηθούν οι συνθήκες. Στα διαγράμματα των παραπάνω κεφαλαίων δίνεται μόνο η απεικόνιση αφού έχει επέλθει σταθεροποίηση. Στα παρακάτω σχήματα, παρουσιάζεται η πορεία κάθε παραμέτρου από την έναρξη μέχρι τη σταθεροποίηση.

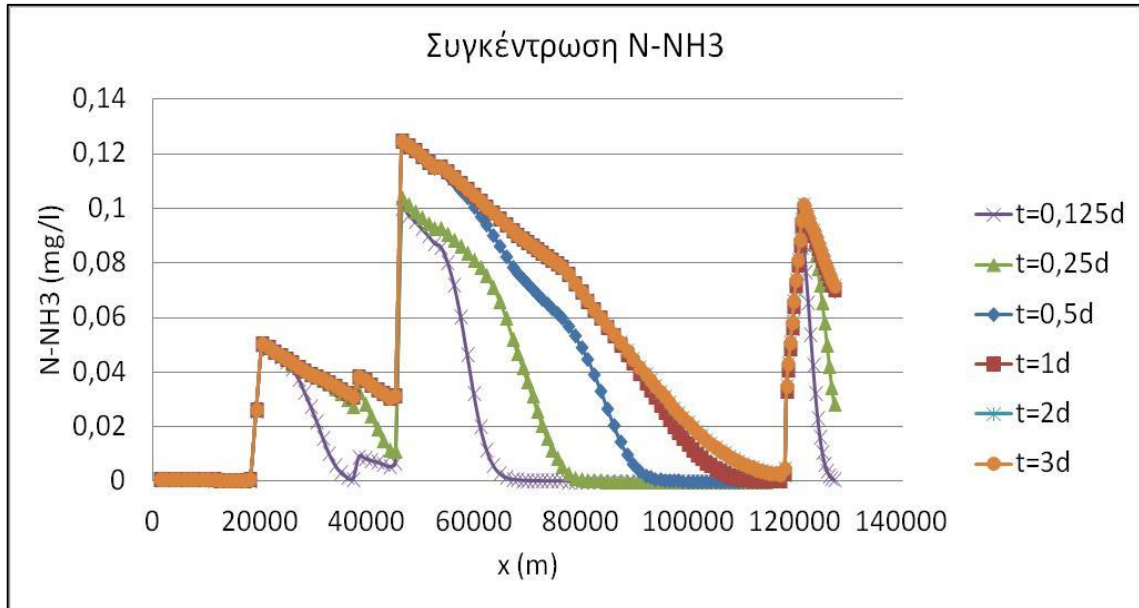
Για την περίοδο Σεπτέμβριος 2008:



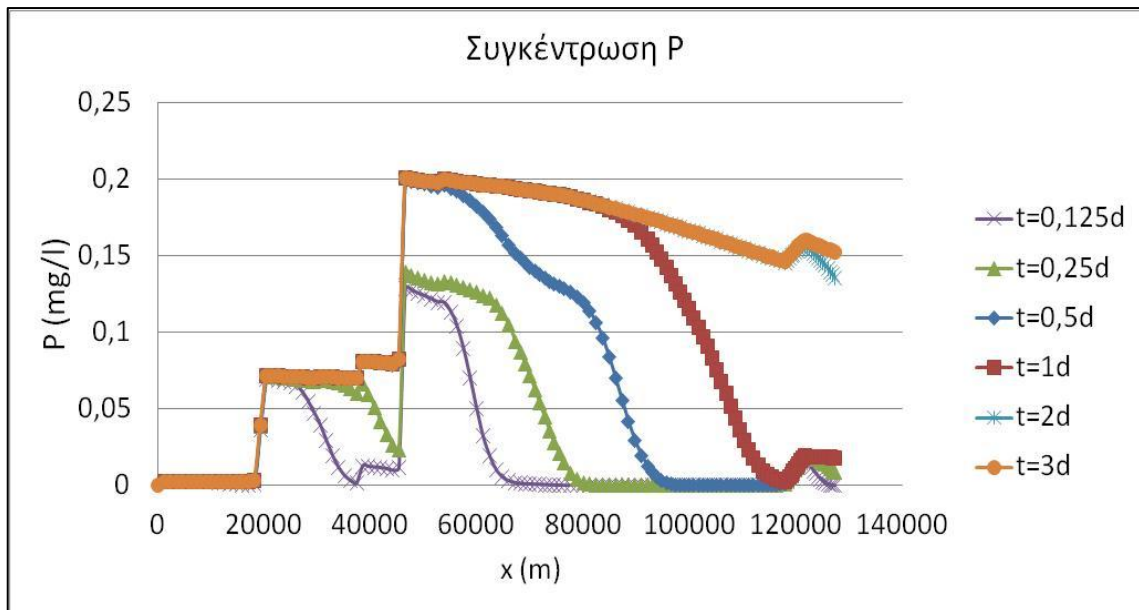
Σχήμα 6. Συγκέντρωση DO



Σχήμα 7. Συγκέντρωση BOD

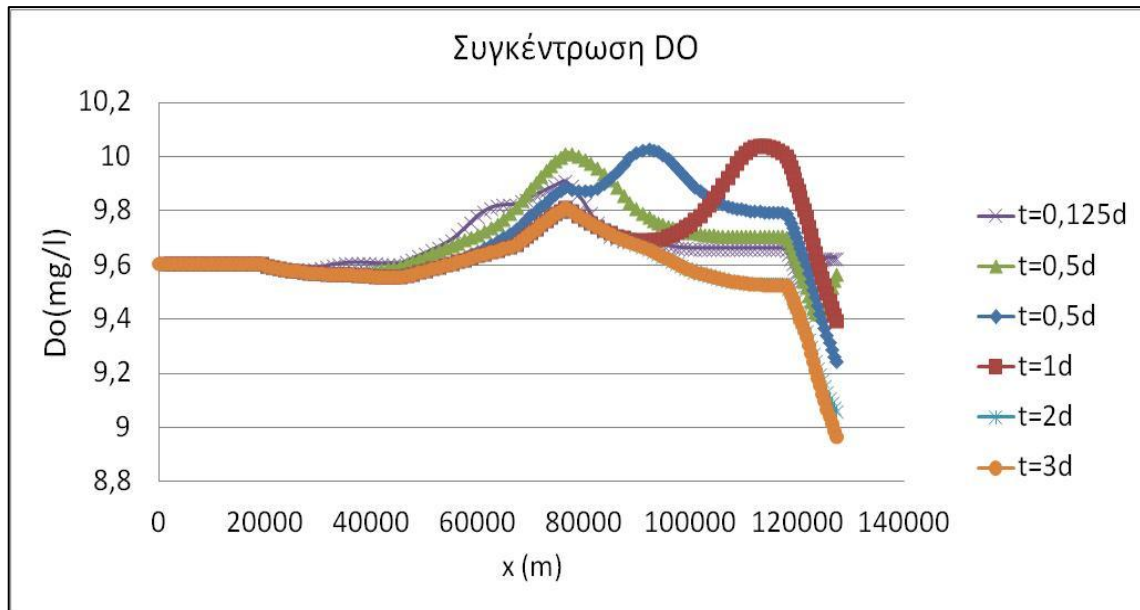


Σχήμα 8. Συγκέντρωση $N-NH_3$

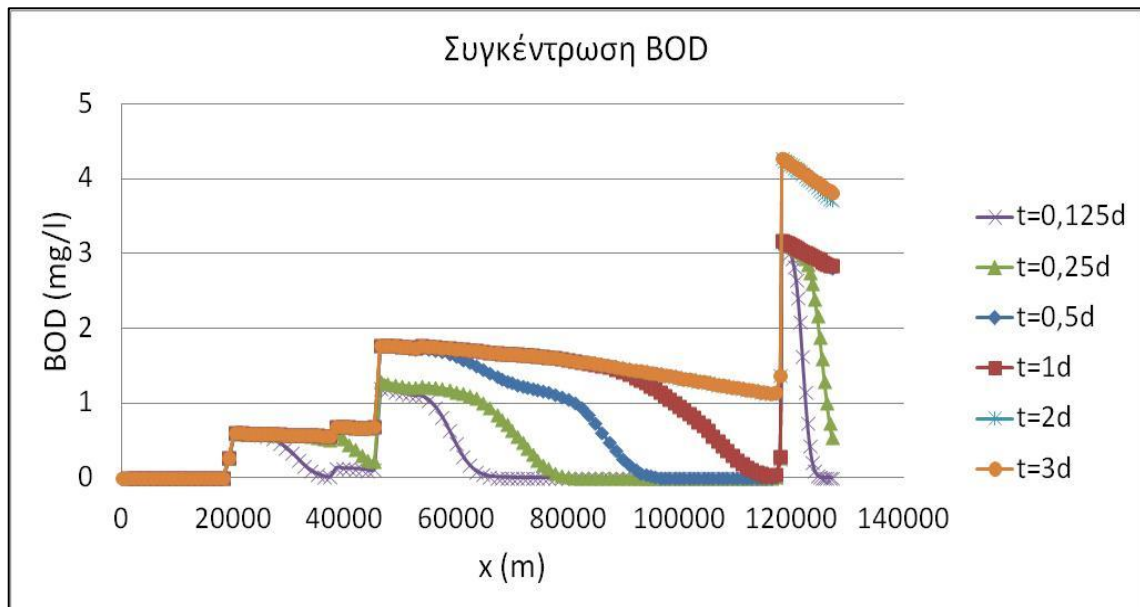


Σχήμα 9. Συγκέντρωση P

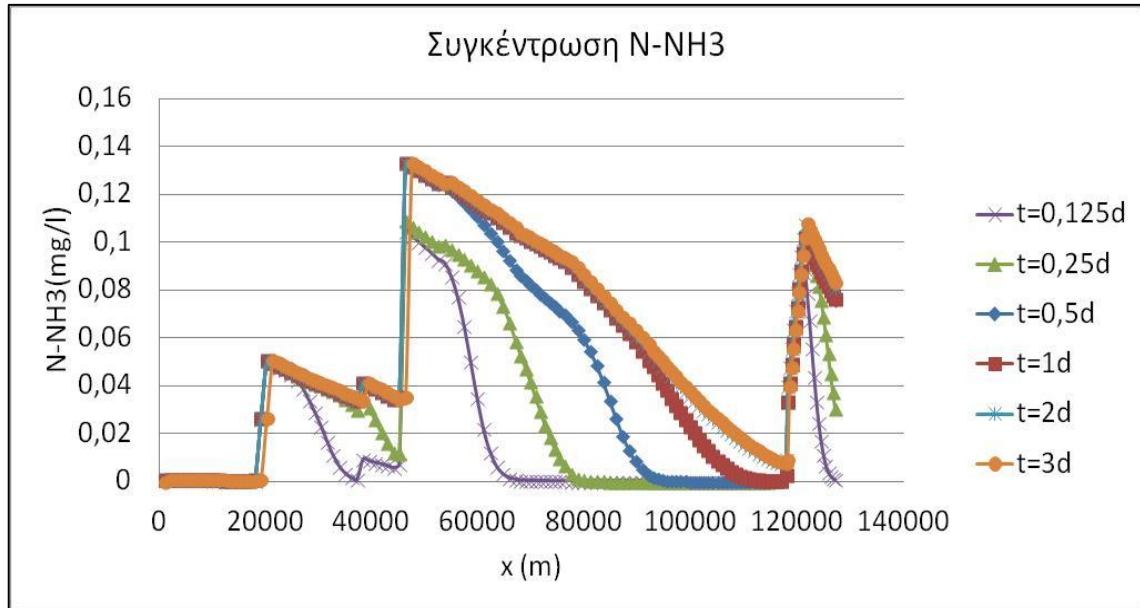
Για την περίοδο Νοέμβριος~Δεκέμβριος 2008



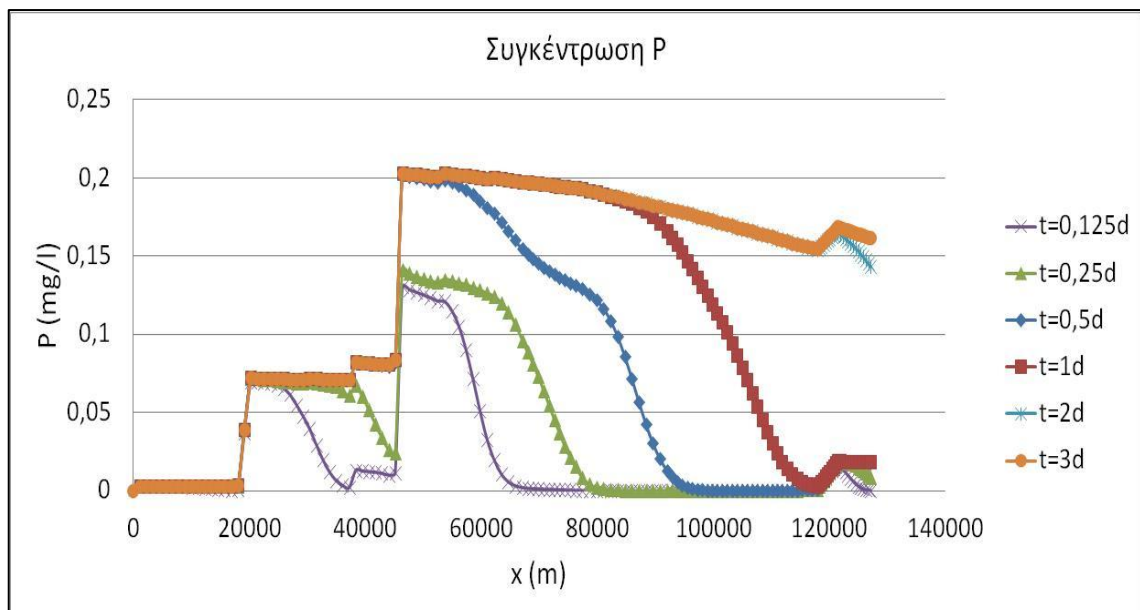
Σχήμα 10. Συγκέντρωση DO



Σχήμα 11. Συγκέντρωση BOD

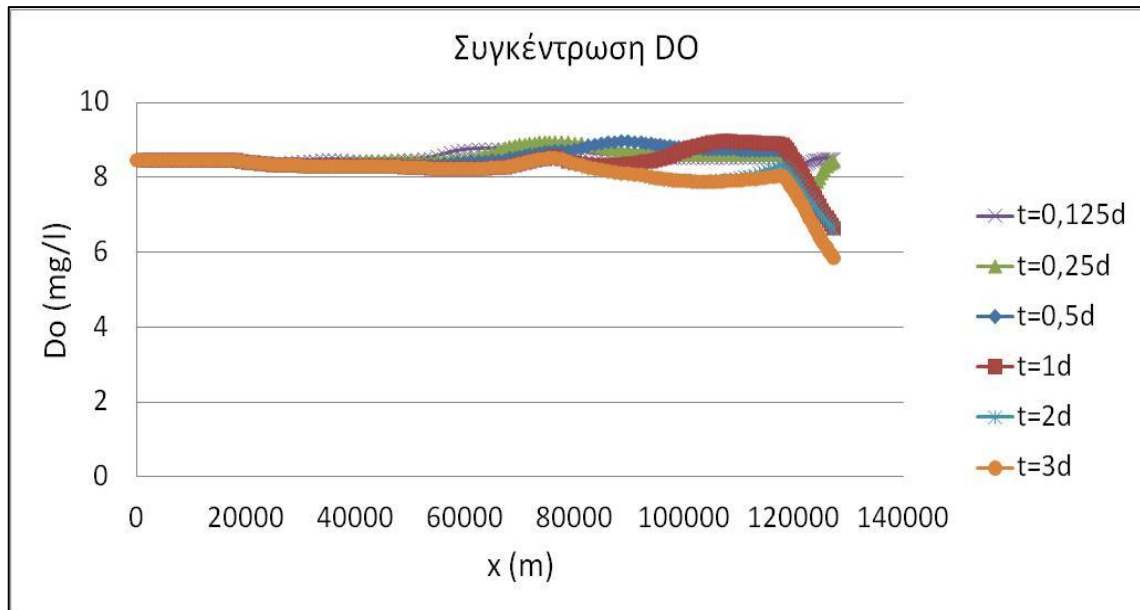


Σχήμα 12. Συγκέντρωση $N-NH_3$

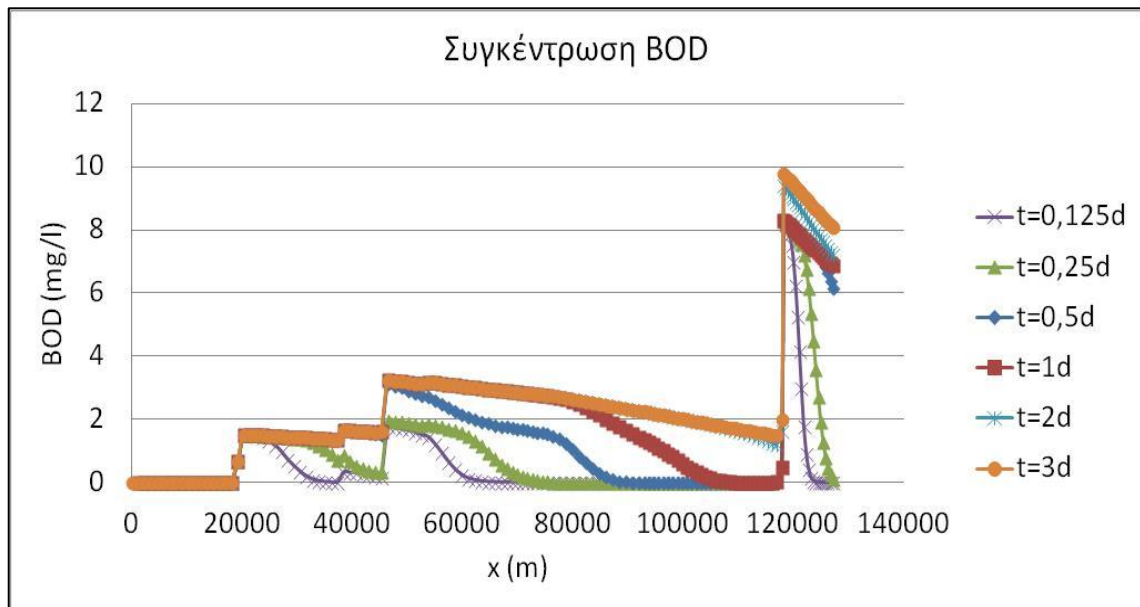


Σχήμα 13. Συγκέντρωση P

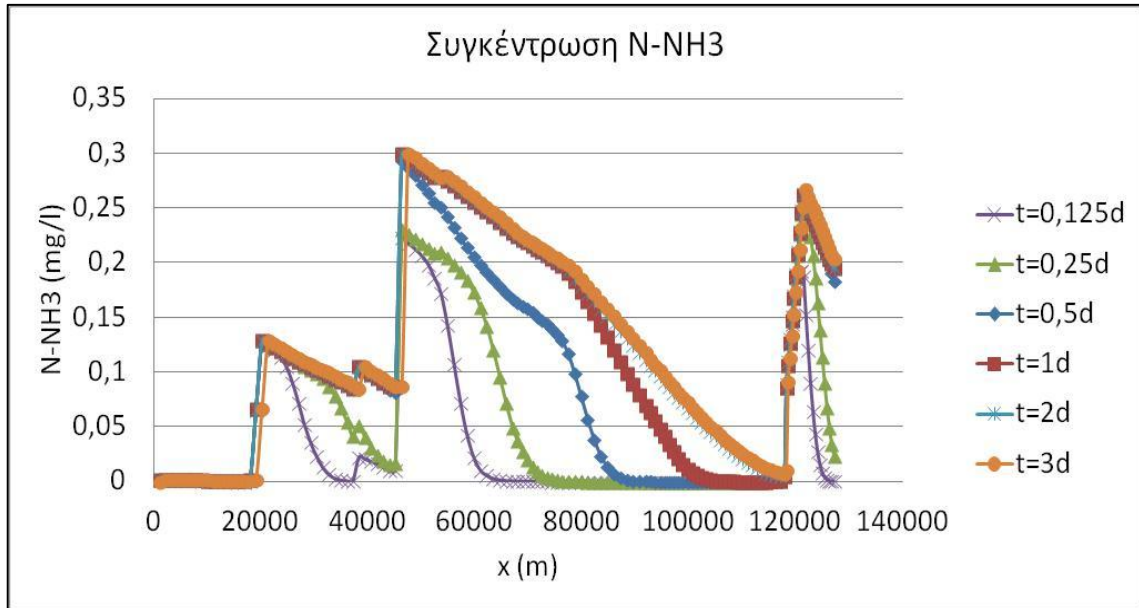
Για την περίοδο Ιούνιος~Ιούλιος 2008



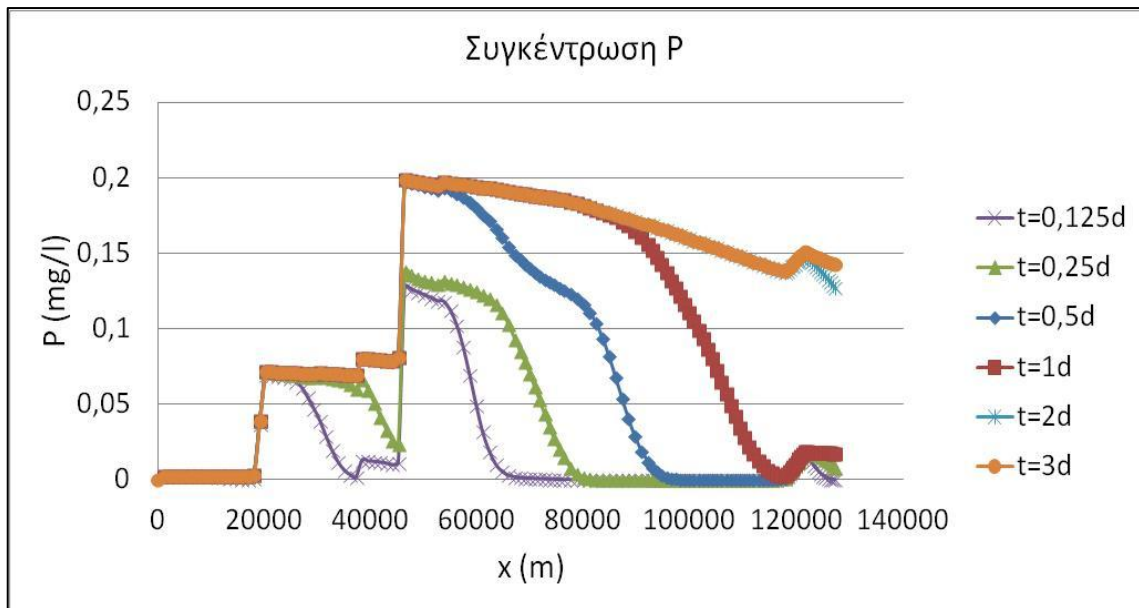
Σχήμα 14. Συγκέντρωση DO



Σχήμα 15. Συγκέντρωση BOD



Σχήμα 16. Συγκέντρωση N-NH3

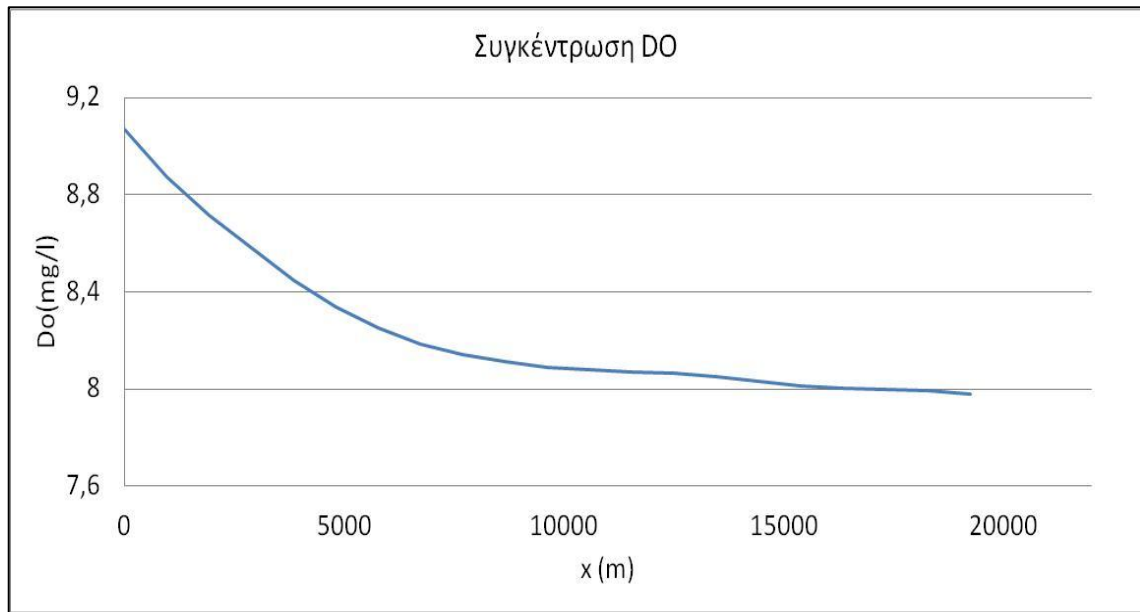


Σχήμα 17. Συγκέντρωση P

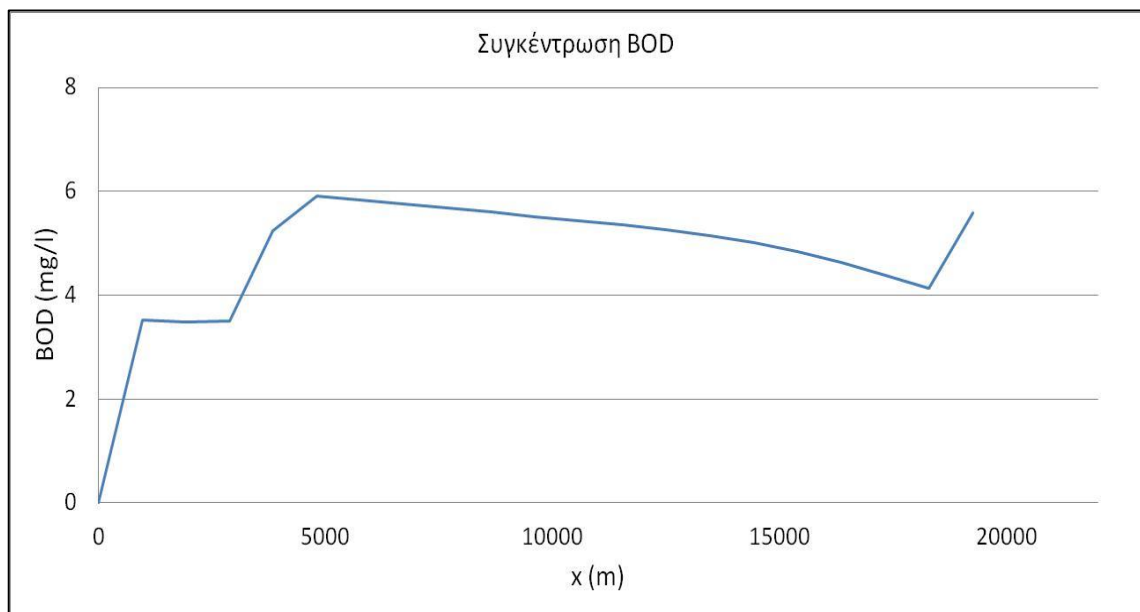
Αποτελέσματα προσομοίωσης για την Τάφρο Λαψίστας

Κατά τη διερεύνηση απαιτήθηκε η προσομοίωση της Τάφρου της Λαψίστας η οποία αποτελεί τη σύνδεση του ποταμού Καλαμά με την κλειστή λεκάνη των Ιωαννίνων. Στην τάφρο απορρέουν όλα τα ρυπαντικά φοερτία της λεκάνης, επομένως είναι ένα υδάτινο σώμα που χρήζει προσοχής. Στα παρακάτω σχήματα παραθέτονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των ποιοτικών χαρακτηριστικών για δύο περιόδους: (α) για τη θερινή περίοδο 6~7_08 και (β) για τη χειμερινή 11~12_08.

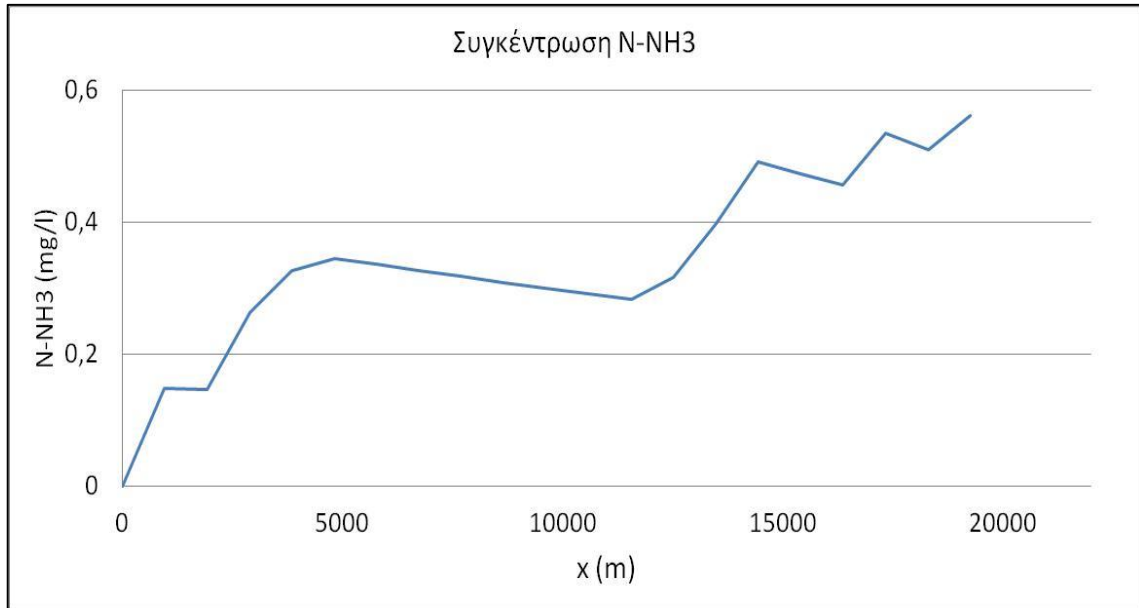
Για την περίοδο Ιούνιος~Ιούλιος 2008



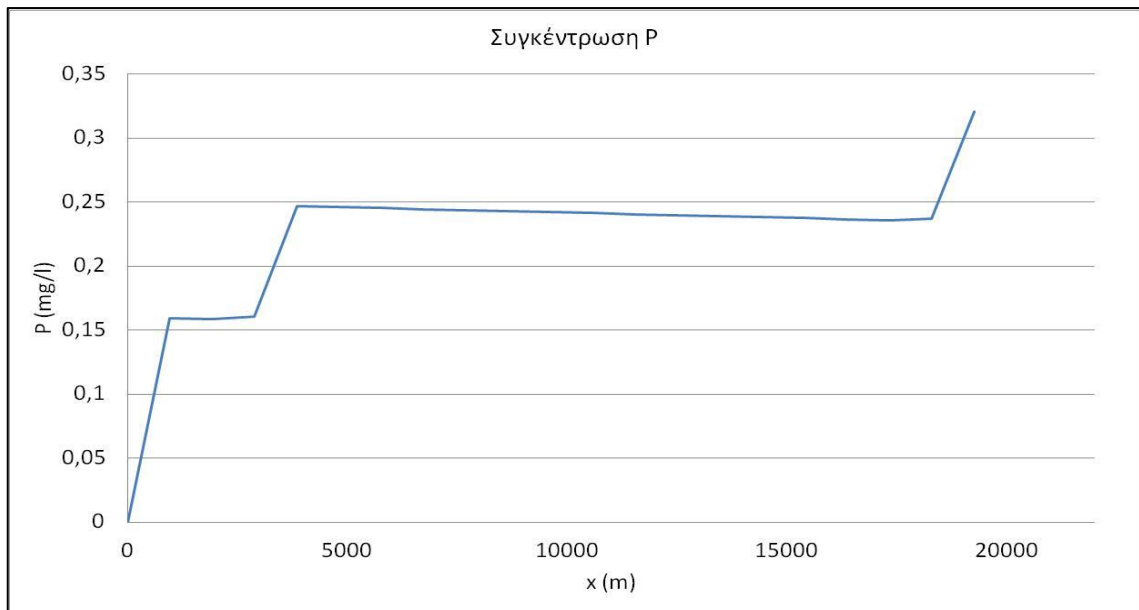
Σχήμα 18. Συγκέντρωση DO



Σχήμα 19. Συγκέντρωση BOD

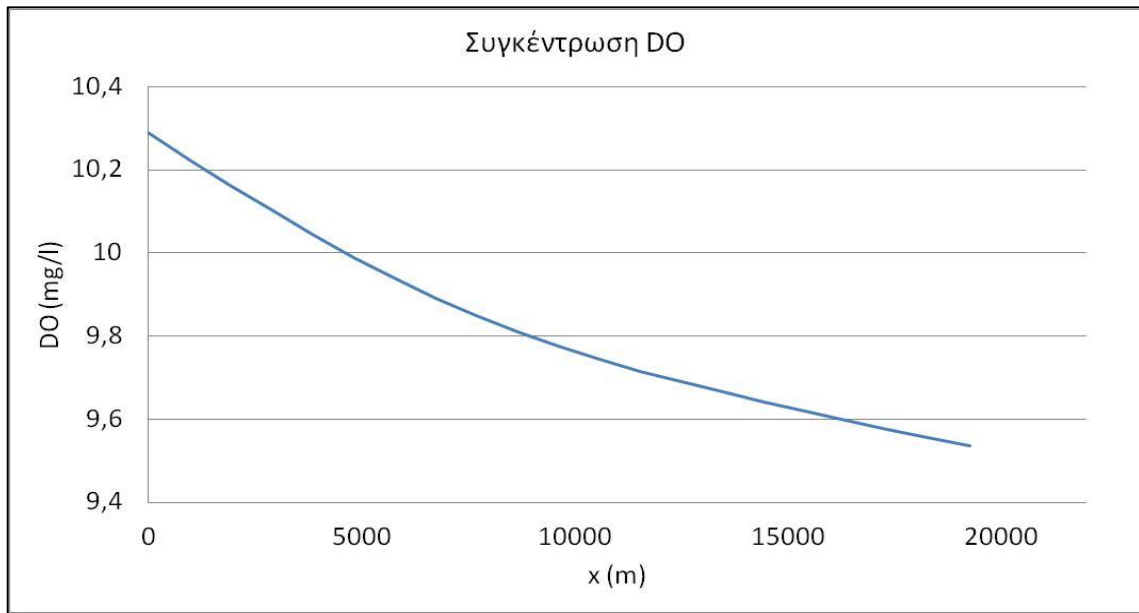


Σχήμα 20. Συγκέντρωση N-NH₃

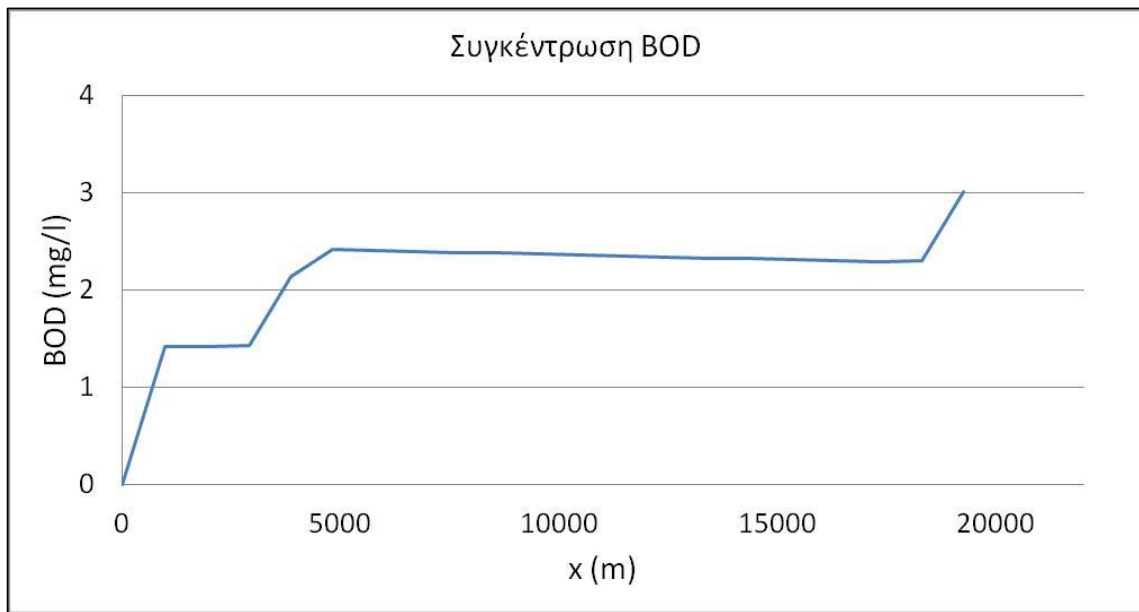


Σχήμα 21. Συγκέντρωση P

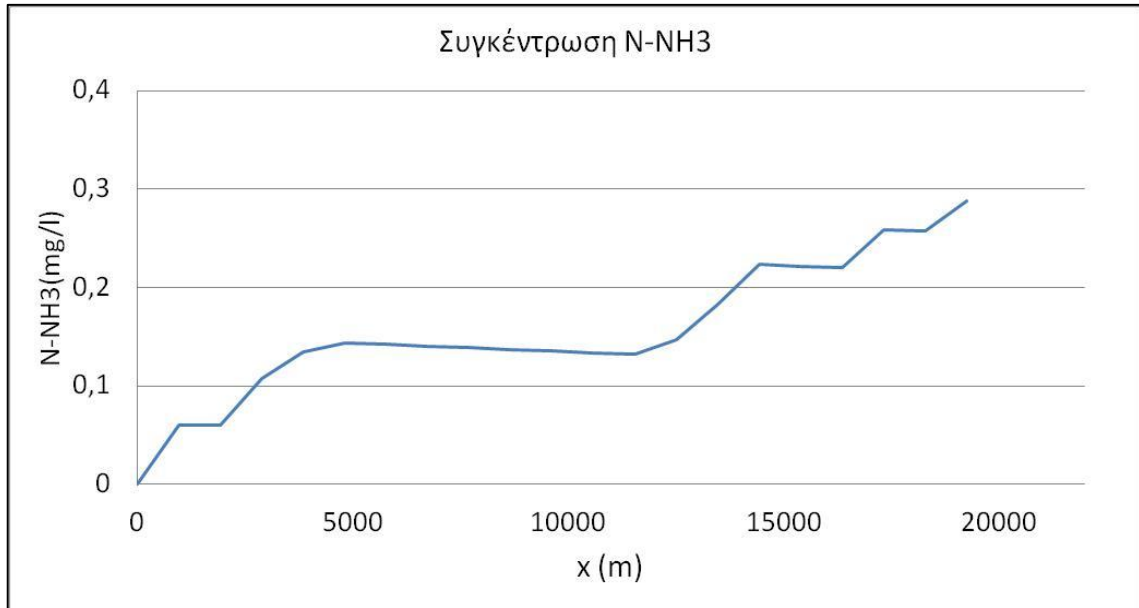
Για την περίοδο Νοέμβριος~Δεκέμβριος 2008



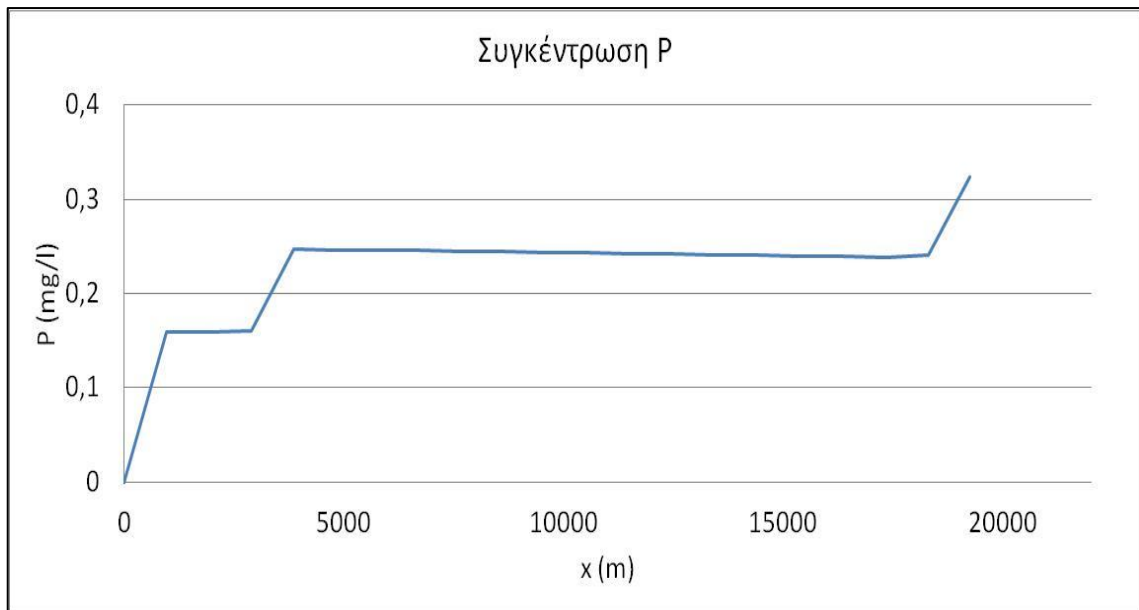
Σχήμα 22. Συγκέντρωση DO



Σχήμα 23. Συγκέντρωση BOD



Σχήμα 24. Συγκέντρωση N-NH3



Σχήμα 25. Συγκέντρωση P

Προσδιορισμός πλάτους – Φωτογραφική τεκμηρίωση

Όλα σχεδόν τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για τη διερεύνηση προέρχονται από τα κείμενα τεκμηρίωσης του διαχειριστικού σχεδίου του διαμερίσματος της Ηπείρου που εκπονήθηκε από το ΥΠΕΚΑ. Όμως, δεν υπήρχε πουθενά κάποια καταγραφή για πλάτη διατομών, ούτε άλλος τρόπος εκτίμησης τους. Έτσι, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε κάθε τμήμα του Καλαμά ώστε να προσδιορισθεί το πλάτος της εκάστοτε διατομής. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν το Μάρτιο του 2013, σε όσα σημεία ήταν προσβάσιμα, λόγω της ιδιαιτερότητας της περιοχής. Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται οι διατομές ανά τμήμα.

Η πρώτη μέτρηση έγινε στο Ωραιόκαστρο Ιωαννίνων, που είναι ο πιο κοντινός οικισμός στις πηγές του ποταμού. Η διατομή αυτή ανήκει στο τμήμα Θυαμίσ Π. Καλαμάς 9 (Σχήμα 26).

Το δεύτερο σημείο μέτρησης ήταν στην περιοχή του Παρακάλαμου Ιωαννίνων. Και αυτή διατομή αυτή ανήκει στο τμήμα Θυαμίσ Π. Καλαμάς 9 (Σχήμα 27). Η μέτρηση έγινε στο σημείο αυτό για να ελεγχθεί αν υπήρχε μεγάλη διαφορά από την περιοχή των πηγών.

Το τρίτο σημείο μέτρησης ήταν στην περιοχή του Σουλόπουλου Ιωαννίνων, ακριβώς πριν τη συμβολή με τους παραποτάμους Σμολίτσα και Κληματιά. Η διατομή αυτή ανήκει στο τμήμα Θυαμίσ Π. Καλαμάς 8 (Σχήμα 28).

Το τέταρτο σημείο μέτρησης ήταν στο Εκκλησοχώρι Ιωαννίνων. Είναι σημείο μετά τη συμβολή με τους παραποτάμους Σμολίτσα και Κληματιά. Η διατομή αυτή ανήκει στο τμήμα Θυαμίσ Π. Καλαμάς 7 (Σχήμα 29,30).

Το πέμπτο σημείο μέτρησης ήταν στη γέφυρα της Βροσίνας Ιωαννίνων. Είναι σημείο μετά τη συμβολή με τον παραπόταμο Τύρια. Η διατομή αυτή ανήκει στο τμήμα Θυαμίσ Π. Καλαμάς 7 (Σχήμα 31).

Το έκτο σημείο μέτρησης ήταν στην περιοχή των Μπολιανών Θεσπρωτίας. Είναι σημείο μετά τη συμβολή με τον παραπόταμο Λαγκαβίτσα. Η διατομή αυτή ανήκει στο τμήμα Θυαμίσ Π. Καλαμάς 6 (Σχήμα 32).

Το έβδομο σημείο μέτρησης ήταν στο Παλαιοχώρι Θεσπρωτίας. Η διατομή αυτή ανήκει στο τμήμα Θυαμίσ Π. Καλαμάς 5 (Σχήμα 33).

Οι επόμενες δυο μετρήσεις αφορούν τον προσδιορισμό του πλάτους για τη διατομή στο τμήμα Θυαμίσ Π. Καλαμάς 4. Οι μετρήσεις έγιναν στην Κορίπιανη και στον Αγ. Γεώργιο Θεσπρωτίας (Σχήμα 34, 35).

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται το φράγμα του Καλαμά. Από το σημείο αυτό και μετά ξενικά το τμήμα Θυαμίσ Π. Καλαμάς 3 (Σχήμα 36).

Το επόμενο σημείο μέτρησης έγινε στην περιοχή Ράγιο Θεσπρωτίας. Η διατομή αυτή ανήκει στο τμήμα Τεχνητό Τμήμα Εκβολής Καλαμά 2 (Σχήμα 37).



Σχήμα 26. Ωραιόκαστρο



Σχήμα 27. Παρακάλαμος



Σχήμα 28. Σουλόπουλο



Σχήμα 29. Εκκλησοχώρι 1



Σχήμα 30. Εκκλησοχώρι 2



Σχήμα 31. Βροσίνα



Σχήμα 32. Μπολιανά



Σχήμα 33. Παλαιοχώρι



Σχήμα 34. Κορίτιανη



Σχήμα 35. Αγ. Γεώργιος



Σχήμα 36. Φράγμα Καλαμά



Σχήμα 37. Τεχνητό τμήμα εκβολής Καλαμά

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται κάποιες φωτογραφίες από σημεία που δεν ανήκουν στην κύρια κοίτη του ποταμού. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 38 παρουσιάζεται το τμήμα Θυαμίσ Π. Καλαμάς 2, που διαρρέεται όπως φαίνεται πολύ μικρή παροχή. Στα Σχήματα 39, 40 παρουσιάζονται οι παραπόταμοι Σμολίτσας και Κληματιάς λίγα μέτρα πριν την κοινή συμβολή τους με τον Καλαμά.



Σχήμα 38. Καλαμάς 2



Σχήμα 39, 40. Σμολίτσας – Κληματιάς



