



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΣΕ ΠΟΤΑΜΟΥΣ
ΜΕ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ - ΕΝΔΙΑΙΤΗΜΑΤΟΣ**



Αγγελική Πολύδερα

Επιβλέπων: Α. Ι. Στάμου, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2016

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	i
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	iii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	iv
ABSTRACT.....	v
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1. Γενικά.....	1
1.2. Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας.....	1
1.3. Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ.....	3
2.1. Οδηγία-Πλαίσιο για τα Νερά.....	3
2.2. Ορισμός της οικολογικής παροχής.....	3
2.3. Μεθοδολογίες εκτίμησης οικολογικής παροχής.....	4
2.4. Η οικολογική παροχή στην Ελλάδα.....	6
2.5. Ο ρόλος των μαθηματικών μοντέλων.....	7
2.5.1. Τα οικολογικά μοντέλα.....	8
2.5.2. Τα ολοκληρωμένα οικολογικά μοντέλα (INECO).....	8
2.5.3. Τα υδροδυναμικά μοντέλα ενδιαιτήματος (ΗΗΜ).....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ.....	11
3.1. Εισαγωγή.....	11
3.2. Υδροδυναμικό μοντέλο.....	13
3.2.1. Γενικά.....	13
3.2.2. Βασικές εξισώσεις του μοντέλου.....	13
3.2.3. Τυρβώδης ροή.....	14
3.2.4. Συντελεστής τριβής.....	15
3.2.5. Οριακές συνθήκες.....	15
3.2.6. Διάρκεια υπολογισμού.....	16
3.2.7. Αρχικές συνθήκες.....	16
3.3. Μοντέλο ενδιαιτήματος.....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	19
4.1. Σπερχειός ποταμός.....	19
4.2. Κλιματολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης.....	21
4.3. Χρήσεις γης στην ευρύτερη περιοχή μελέτης.....	21
4.4. Περιοχές με σημαίνουσα περιβαλλοντική σημασία.....	23
4.5. Ιχθυοπανίδα.....	23
4.6. Περιοχή διερεύνησης.....	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΕΔΙΟΥ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	27
5.1. Μετρήσεις τοπογραφικής αποτύπωσης του ανάγλυφου.....	27
5.2. Μετρήσεις βαθών και ταχυτήτων ροής.....	28
5.3. Υπολογισμός παροχής.....	31
5.4. Καμπύλη στάθμης-παροχής.....	32
5.5. Προσδιορισμός τύπου υποστρώματος.....	34
5.6. Υπολογισμός συντελεστή τριβής.....	36
5.7. Καμπύλες καταλληλότητας εξεταζόμενου ιχθύος.....	40

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	43
6.1. Δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος.....	43
6.2. Δόμηση του υδροδυναμικού μοντέλου.....	44
6.3. Βαθμονόμηση και επιβεβαίωση του υδροδυναμικού μοντέλου.....	45
6.4. Εφαρμογή του υδροδυναμικού μοντέλου.....	47
6.5. Εφαρμογή του μοντέλου ενδιαιτήματος.....	53
6.6. Σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	67
6.6.1.Αποτελέσματα υδροδυναμικού μοντέλου.....	67
6.6.2.Αποτελέσματα μοντέλου ενδιαιτήματος.....	67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	69
7.1. Συμπεράσματα.....	69
7.2. Προτάσεις.....	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	71
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	78

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, ιδιαίτερες ευχαριστίες αποδίδονται στον Καθηγητή ΕΜΠ Αναστάσιο Στάμου, ο οποίος είχε την επίβλεψη της εργασίας, για τον χρόνο που αφιέρωσε, τις πολύτιμες συμβουλές και την διαρκή καθοδήγησή του.

Θερμά ευχαριστώ, επίσης, την Υποψήφια Διδάκτορα Γεωργία Παπαδονικολάκη για την προθυμία της να βοηθήσει σε οποιοδήποτε πρόβλημα προέκυπτε σχετικά με την υλοποίηση της εργασίας.

Έπειτα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Ηλία Δημητρίου, κύριο ερευνητή του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε, για την παροχή δεδομένων, την καθοδήγηση στις μετρήσεις πεδίου και τις εύστοχες επισημάνσεις του σχετικά με την εργασία.

Ευχαριστώ, ακόμα, τον Minh Duc Bui, επιστημονικό συνεργάτη στο Πολυτεχνείο του Μονάχου (TUM), για τη δόμηση του αρχικού μοντέλου ενδιαιτήματος που, ύστερα από τροποποίηση, χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

Το μεγαλύτερο, όμως, ευχαριστώ, το οφείλω στους δικούς μου ανθρώπους, που δε σταμάτησαν ποτέ να πιστεύουν σε μένα και να με στηρίζουν σε κάθε εγχείρημά μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μεταβολή του φυσικού καθεστώτος ροής στους ποταμούς εξαιτίας της ανθρώπινης παρέμβασης έχει αρνητικές συνέπειες στη βιωσιμότητα των ποτάμιων οικοσυστημάτων. Ως αποτέλεσμα, η θέσπιση οικολογικής παροχής κρίνεται αναγκαία για την αποκατάσταση και τη συντήρηση της υγείας των ποταμών. Η επιστημονική κοινότητα στρέφεται ολοένα και περισσότερο στις μεθόδους προσομοίωσης ενδιαιτημάτων για την ορθή εκτίμηση της οικολογικής παροχής, καθώς με τον τρόπο αυτό μπορούν να ληφθούν υπόψη οι ανάγκες των υδρόβιων οργανισμών.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η δόμηση ενός ολοκληρωμένου μοντέλου υδροδυναμικής συμπεριφοράς – ενδιαιτήματος για τον προσδιορισμό της οικολογικής παροχής. Το μοντέλο που δημιουργήθηκε εφαρμόστηκε σε ένα τμήμα του Σπερχειού ποταμού που δέχεται πολλές απολήψεις με αποτέλεσμα να δημιουργούνται σοβαρά προβλήματα σχετικά με τη διατήρηση των ιχθυοπληθυσμών του. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν 2 μεγέθη του ιχθύος Ποταμοκέφαλου που διαβιεί στο Σπερχειό.

Αρχικά, δομήθηκε το υδροδυναμικό μοντέλο, το οποίο βαθμονομήθηκε και επιβεβαιώθηκε με χρήση δεδομένων από μετρήσεις πεδίου κατά την περίοδο 2014-2016 και λαμβάνοντας υπόψη τον τύπο υποστρώματος στο ποτάμι. Παρά το γεγονός ότι τα διαθέσιμα δεδομένα μετρήσεων ήταν περιορισμένα, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κρίθηκαν αρκούντως ικανοποιητικά. Το υδροδυναμικό μοντέλο εφαρμόστηκε για 10 σενάρια παροχών.

Έπειτα, δομήθηκε το μοντέλο ενδιαιτήματος με βάση ένα ήδη υπάρχον μοντέλο που είχε δημιουργηθεί στο Πολυτεχνείο του Μονάχου (TUM). Το τελικό μοντέλο ήταν σε θέση να δέχεται ως δεδομένα εισόδου τα αποτελέσματα του υδροδυναμικού μοντέλου (ταχύτητα και βάθος ροής) και να εξάγει του αντίστοιχους Δείκτες Καταλληλότητας (SI_v , SI_D) λαμβάνοντας υπόψη τις Καμπύλες Καταλληλότητας για το εξεταζόμενο είδος. Τελικά, μπορούσε να υπολογίζει τη Σταθμισμένη Κατάλληλη Έκταση (WUA) για κάθε ένα από τα 10 σενάρια παροχής.

Από την εφαρμογή του ολοκληρωμένου μοντέλου προκύπτει το βέλτιστο σενάριο παροχής, δηλαδή η τιμή της παροχής για την οποία η καταλληλότητα της περιοχής για το εξεταζόμενο είδος μεγιστοποιείται. Με τον τρόπο αυτό, προσδιορίζεται η οικολογική παροχή που μπορεί να συμβάλει στη διατήρηση των ιχθυοκοινοτήτων και του οικοσυστήματος, γενικότερα.

ABSTRACT

The flow-regime alterations in rivers due to human intervention has detrimental effects on the biodiversity of the river ecosystems. As a result, it is recognized that a minimum flow rate (ecological flow) should continue flowing in rivers so that ecosystem integrity can be sustained. Hydrodynamic habitat models (HHMs) have become very popular in the evaluation of ecological flow the last decades, because they evaluate habitat suitability for aquatic organisms, based on physical variables, such as water depth and flow velocity.

The main objective of this study was to develop an integrated model, coupling a 2-D hydrodynamic model with a habitat model, in order to estimate the ecological flow in rivers. The integrated model was applied in Sperchios river, where intense water abstractions cause serious problems regarding fish populations. The target species were two classes of sizes of Chub (*Squalius vardarensis*).

The first step was the setup of the hydrodynamic model, which was then calibrated and verified, taking the substrate type into account and using data from field measurements conducted during the time period 2014-2016. Even though the available data were inadequate, the results of the simulation were quite satisfying. The hydrodynamic model was applied for ten discharge scenarios.

The following step was the setup of the habitat model, based on an existing habitat model used in Technical University of Munich (TUM). The final model could translate the results of the hydrodynamic model into the corresponding values of Suitability Indexes (SI_V , SI_D) via the use of Habitat Suitability Curves (HSC) for the target species. Finally, Weighted Usable Area (WUA) was calculated for every discharge scenario.

Finally, the optimum discharge scenario was the value of the flow rate that could maximize the suitability of the area for the target species; that is the Weighted Usable Area. In this way, the ecological flow can be properly determined and the health of the aquatic ecosystem can be achieved.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Γενικά

Η επίδραση που έχουν οι ανθρωπογενείς παρεμβάσεις στο φυσικό καθεστώς ροής των ποταμών είναι ένα από τα σημαντικότερα θέματα που απασχολούν τη διεθνή επιστημονική κοινότητα σε σχέση με το περιβάλλον (Marsili-Libelli et al., 2013). Η οικολογική παροχή καλείται να θέσει περιορισμούς στην τροποποίηση της φυσικής ροής, εκτιμώντας τις ανάγκες του οικοσυστήματος σε ποιότητα, ποσότητα και χρονική διαθεσιμότητα της ροής. Πρόκειται για ένα πολύ σημαντικό ζήτημα σχετικά με τη διαχείριση υδατικών πόρων, που όμως δεν έχει διερευνηθεί σε βάθος.

Οι οργανισμοί των εσωτερικών υδάτων είναι άρρηκτα συνδεδεμένοι με το φυσικό τους χώρο (Conallin et al., 2010). Αυτό αποδεικνύεται και μέσα από την Ευρωπαϊκή Οδηγία για τα Νερά 2000/60, στα πλαίσια της οποίας τέθηκαν συγκεκριμένοι περιβαλλοντικοί στόχοι, συνεκτιμώντας αυτές τις σχέσεις. Συνεπώς, παρακολουθώντας την ιχθυοπανίδα μέσα στο φυσικό της περιβάλλον ανοίγεται ένας νέος δρόμος για την εκτίμηση των οικολογικών παροχών στους ποταμούς.

Επί σειρά δεκαετιών η ιχθυοπανίδα έχει αποδειχθεί άριστος βιολογικός δείκτης, αντιπροσωπεύοντας τη συνολική κατάσταση της υγείας των ποταμών (Bischoff and Freyhof, 1999, Karr, 1981, Pont et al., 2006). Άρα, η ποσοτικοποίηση των μεταβολών που συμβαίνουν στα φυσικά ενδιαιτήματα των ιχθύων έπειτα από την παρέμβαση του ανθρώπου είναι ιδιαίτερα σημαντική και μπορεί να δώσει απαντήσεις στα ζητήματα διαχείρισης των υδατικών πόρων.

Προς αυτήν την κατεύθυνση, η χρήση μαθηματικών μοντέλων για την κατανόηση των ενδιαιτημάτων της ιχθυοπανίδας διαδραματίζει βασικό ρόλο στον προσδιορισμό των απαιτήσεων της, καθορίζοντας το πλαίσιο με βάση το οποίο οι οποιοσδήποτε μεταβολές μπορούν να προβλεφθούν και να αξιολογηθούν (Olden et al., 2008).

Συνδυάζοντας υδροδυναμικά μοντέλα με μοντέλα ενδιαιτήματος, υπολογίζονται οι μεταβολές στην καταλληλότητα των ενδιαιτημάτων σε συνάρτηση με τις αλλαγές στην παροχή και τις προτιμήσεις των ιχθύων. Βασικός στόχος αυτής της προσπάθειας είναι η εκτίμηση της οικολογικής παροχής να πραγματοποιείται αξιοποιώντας διαθέσιμη πληροφορία μέσα από τους οργανισμούς και όχι μόνο από υδραυλικά και υδρολογικά δεδομένα.

1.2. Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου μαθηματικού μοντέλου που θα συνδυάζει υδραυλικά, υδρολογικά και βιολογικά δεδομένα για τον προσδιορισμό της οικολογικής παροχής σε ποταμούς. Για την εφαρμογή του μοντέλου εξετάστηκε η περίπτωση του ποταμού Σπερχειού, και συγκεκριμένα ένα τμήμα του το οποίο υπόκειται συστηματικά σε απολήψεις νερού. Ως αποτέλεσμα, η ιχθυοπανίδα τίθεται σε κίνδυνο και κρίνεται απαραίτητος ο καθορισμός οικολογικής παροχής στο ποτάμι, προκειμένου να επιτευχθεί η διατήρηση της ισορροπίας στο οικοσύστημα στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό.

1.3. Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από 8 Κεφάλαια και το Παράρτημα.

Στο 1ο Κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή και αναφέρεται ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας.

Στο 2ο Κεφάλαιο γίνεται μια βιβλιογραφική διερεύνηση σχετικά με την εκτίμηση της οικολογικής παροχής. Παρουσιάζονται οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της και, κυρίως, η σημασία της υδραυλικής προσομοίωσης ενδιαιτήματος. Ακόμα, περιγράφονται τα μαθηματικά μοντέλα που δημιουργήθηκαν για την εφαρμογή της Οδηγίας-Πλαίσιου για τα Νερά, ενώ έμφαση δίνεται στα Υδροδυναμικά Μοντέλα Ενδιαιτήματος.

Στο 3ο Κεφάλαιο γίνεται περιγραφή του ολοκληρωμένου μαθηματικού μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία με σκοπό την προσομοίωση του ενδιαιτήματος της περιοχής μελέτης και τον προσδιορισμό της οικολογικής παροχής.

Στο 4ο Κεφάλαιο περιγράφεται η ευρύτερη περιοχή μελέτης, δηλαδή ο Σπερχειός ποταμός. Αναφέρονται τα βασικά χαρακτηριστικά της περιοχής και τα προβλήματα που αντιμετωπίζει σχετικά με τη διαχείριση του νερού.

Στο 5ο Κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των μετρήσεων πεδίου και της επεξεργασίας των δεδομένων που αποκτήθηκαν από αυτές. Παρουσιάζεται η συγκέντρωση όλων των απαιτούμενων δεδομένων για την εφαρμογή του μοντέλου.

Στο 6ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται η δόμηση και η εφαρμογή του ολοκληρωμένου μοντέλου. Γίνεται, επίσης, σχολιασμός των αποτελεσμάτων που παράγονται από την εφαρμογή του.

Στο 7ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα αποτελέσματα του μοντέλου (Κεφάλαιο 6) και προτείνονται κατευθύνσεις για περαιτέρω έρευνα.

Στο 8ο Κεφάλαιο παρατίθεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση της διπλωματικής εργασίας.

Στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ γίνεται αναλυτική περιγραφή με τη μορφή βημάτων της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε για τη δόμηση του υδροδυναμικού μοντέλου, τους υπολογισμούς και τη λήψη αποτελεσμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

2.1. Οδηγία-Πλαίσιο για τα Νερά

Η Οδηγία 2000/60/ΕΚ για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων ή αλλιώς Οδηγία-Πλαίσιο για τα Νερά συνδυάζει ποιοτικούς, οικολογικούς και ποσοτικούς στόχους για την προστασία των υδάτινων οικοσυστημάτων και την καλή κατάσταση όλων των υδατικών πόρων και θέτει ως κεντρική ιδέα την ολοκληρωμένη διαχείριση τους στη γεωγραφική κλίμακα των Λεκανών Απορροής Ποταμών.

Σύμφωνα με την Οδηγία-Πλαίσιο για τα Νερά, αντιμετωπίζονται συνολικά όλες οι χρήσεις και υπηρεσίες νερού, συνυπολογίζοντας την αξία του νερού για το περιβάλλον, την υγεία, την ανθρώπινη κατανάλωση και την κατανάλωση σε παραγωγικούς τομείς. Η προώθηση βιώσιμης χρήσης του νερού μέσω μακροπρόθεσμης προστασίας των διαθέσιμων υδατικών πόρων και η εξασφάλιση επαρκούς παροχής επιφανειακού νερού αποτελούν κάποιους από τους κύριους στόχους της.

Σύμφωνα με την Οδηγία, τα χαρακτηριστικά των υδάτινων σωμάτων που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της οικολογικής κατάστασης ονομάζονται «στοιχεία».

Τα στοιχεία χωρίζονται σε 3 ομάδες:

- Υδρομορφολογικά στοιχεία (hydro-morphological HYD-ELs): αναφέρονται στο υδρολογικό καθεστώς (πχ ποσότητα και δυναμική της ροής), στη συνέχεια του ποταμού και στις μορφολογικές συνθήκες (πχ η διακύμανση του βάθους, οι συνθήκες υποστρώματος και η ταχύτητα του ρεύματος).
- Φυσικοχημικά στοιχεία (physico-chemical PCH-ELs): περιλαμβάνουν γενικά φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά (πχ αλατότητα, θερμοκρασία, διαλυμένο οξυγόνο και pH), καθώς και συγκεκριμένους συνθετικούς ή μη συνθετικούς ρύπους.
- Βιολογικά στοιχεία (biological BIO-ELs): περιλαμβάνουν διάφορους οργανισμούς, όπως το φυτοπλαγκτόν, τα μακρόφυτα και το φυτοβένθος, τα βενθικά ασπόνδυλα και τους ιχθύες.

Στην Οδηγία-Πλαίσιο δίνεται έμφαση κυρίως στα βιολογικά στοιχεία (BIO-ELs), ενώ τα υδρομορφολογικά (HYD-ELs) και τα φυσικοχημικά (PCH-ELs) στοιχεία παίζουν υποστηρικτικό ρόλο. Η άποψη αυτή επιβεβαιώθηκε από τα αποτελέσματα του ευρωπαϊκού προγράμματος REFCOND, το οποίο επικεντρώθηκε στα βιολογικά στοιχεία (BIO-ELs) και κυρίως στην εκτίμηση μιας σειράς παραμέτρων που αντιπροσωπεύουν μετρήσιμα χαρακτηριστικά των υδατικών βιοκοινωνιών. Οι παράμετροι αυτοί λέγονται δείκτες και επιλέγονται με βάση την ικανότητά τους να εκφράζουν δομικές και λειτουργικές πτυχές της βιοκοινωνίας και την ευαισθησία τους σε συγκεκριμένες ανθρωπογενείς πιέσεις. Για παράδειγμα, για το βιολογικό στοιχείο «ιχθύς», δείκτη θα μπορούσε να αποτελεί κάποιο είδος ευαίσθητο στο φυσικοχημικό στοιχείο «διαλυμένο οξυγόνο (DO)» ή στο υδρομορφολογικό στοιχείο «παροχή».

2.2. Ορισμός της οικολογικής παροχής

Κατά καιρούς έχουν δοθεί διάφοροι ορισμοί για την οικολογική παροχή. Έχοντας υπ' όψιν τις διεθνείς δράσεις για την επίτευξη οικολογικής παροχής και τη σημασία τους στα κατάντη οικοσυστήματα, οι Dyson et al. (2003) υιοθέτησαν μια γενική περιγραφή του όρου ως την ποσότητα νερού που παρέχεται σε ένα ποταμό, υγρότοπο ή παράκτια ζώνη με σκοπό τη

διατήρηση των οικοσυστημάτων και των οφελών που απορρέουν από αυτά, σε περιοχές όπου συναντώνται ανταγωνιστικές χρήσεις νερού και ρυθμιζόμενες παροχές.

Στη διακήρυξη του Brisbane το 2007, η οποία υπογράφεται από 750 επιστήμονες από περισσότερες από 50 χώρες, δίνεται μια πιο ολοκληρωμένη ερμηνεία του όρου οικολογική παροχή, εισάγοντας την έννοια του ρυθμού αλλά και της ποιότητας των υδάτων σε ένα οικοσύστημα. Παράλληλα, η διακήρυξη έρχεται να προσδώσει την ιδιαίτερη σημασία που έχει η οικολογική παροχή για τον άνθρωπο. Σύμφωνα με την ερμηνεία αυτή, η οικολογική παροχή είναι η παροχή που περιγράφει την ποσότητα, το ρυθμό και την ποιότητα των ροών των υδάτων που απαιτείται για τη διατήρηση των οικοσυστημάτων γλυκού νερού, καθώς και τη διαβίωση και ευημερία των ανθρώπων που εξαρτώνται από τα οικοσυστήματα αυτά (The Brisbane Declaration, 2007).

Ένας πλήρης ορισμός που συναντάται συχνά σε επιστημονικά άρθρα είναι ο εξής: Η οικολογική παροχή έχει ως σκοπό να συντηρήσει, να προστατέψει και να αποκαταστήσει τις βιολογικές, γεωμορφολογικές, φυσικές και χημικές διεργασίες που συντελούνται σε ένα ποτάμιο σύστημα, οι οποίες διαμορφώνουν και διατηρούν τα υδρόβια οικοσυστήματα (Suen, 2011).

Συνολικά, το ερώτημα που τίθεται είναι κατά πόσο μπορούν να μεταβληθούν οι υδρολογικές συνθήκες που επικρατούν στο ποτάμιο σύστημα για να εξυπηρετηθούν οι ανθρώπινες ανάγκες, ώστε να μην υπάρξουν δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία του οικοσυστήματος. Το ερώτημα αυτό είναι ιδιαίτερα σύνθετο καθώς υπεισέρχονται πολλοί παράγοντες που αφορούν τόσο στον ποταμό, όσο και στα οικοσυστήματα που εξαρτώνται από τη φυσική ροή του. Αρχικά, μελετώνται τα υδρολογικά και ενδεχομένως τα υδραυλικά στοιχεία του ποτάμιου συστήματος. Επιπλέον, απαιτείται ο προσδιορισμός της κατάστασης τόσο των παρόχθιων συστημάτων όσο και των υγροτόπων στις εκβολές του ποταμού, ώστε να διαπιστωθεί η δυνατότητα αφαίρεσης ποσότητας νερού, χωρίς να διαταραχθεί η οικολογική ισορροπία.

2.3. Μεθοδολογίες εκτίμησης οικολογικής παροχής

Τα τελευταία 20 χρόνια έχει αναπτυχθεί πληθώρα μεθόδων και προσεγγίσεων για την εκτίμηση της οικολογικής παροχής. Συνολικά έχουν εντοπιστεί έως 207 διαφορετικές τεχνικές σε 44 χώρες (Tharme, 2003). Οι μεθοδολογίες αυτές έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, με αποτέλεσμα καμία από αυτές να μη θεωρείται απαραίτητα καλύτερη από τις υπόλοιπες. Αντιθέτως, η καταλληλότητά τους εξαρτάται από πολλές παραμέτρους και από τις ιδιαίτερες συνθήκες κάθε μελέτης. Κυριότερες είναι τα χαρακτηριστικά του συστήματος που μελετάται, η πείρα του μελετητή, ο χρόνος, το διαθέσιμο κεφάλαιο, καθώς και το νομοθετικό πλαίσιο που πρέπει να ακολουθεί η μελέτη (Dyson et al, 2003).

Οι μέθοδοι εκτίμησης της οικολογικής παροχής χωρίζονται σε 4 κύριες κατηγορίες, οι οποίες σύμφωνα με τη Tharme (2003) περιγράφονται ως εξής:

1. Υδρολογικές μέθοδοι

Θεωρούνται οι απλούστερες μέθοδοι για τον υπολογισμό της οικολογικής παροχής και βασίζονται κυρίως στη χρήση υδρολογικών δεδομένων. Για την εφαρμογή τους απαιτούνται τα ιστορικά μηνιαία ή ημερήσια δεδομένα της φυσικής παροχής. Οι υδρολογικές μέθοδοι ως επί το πλείστον υπολογίζουν την ελάχιστη απαιτούμενη παροχή με τα διαθέσιμα υδρολογικά δεδομένα και δεν εισάγουν στην επίλυσή τους γεωμορφολογικές και βιολογικές παραμέτρους.

Η πιο γνωστή υδρολογική μέθοδος είναι η μέθοδος Tennant, η οποία αναπτύχθηκε στις ΗΠΑ. Δεν απαιτεί εργασία πεδίου καθώς βασίζεται μόνον σε υδρολογικά στοιχεία. Σύμφωνα με αυτήν τη μέθοδο, η οικολογική παροχή ορίζεται ως:

- το 10% της μέσης ετήσιας παροχής για την επιβίωση των ενδονημάτων,
- το 30% της μέσης ετήσιας παροχής για ικανοποιητική υγεία των ενδονημάτων και
- το 60-100% της μέσης ετήσιας παροχής για τη διατήρηση παρθένων οικοσυστημάτων.

2. Υδραυλικές μέθοδοι

Οι μέθοδοι αυτές αξιοποιούν τις μεταβολές διάφορων απλών γεωμετρικών υδραυλικών χαρακτηριστικών του ποταμού σε επιλεγμένες διατομές, συσχετίζοντας τα με την παροχή, ώστε να εκτιμηθεί η ελάχιστη απαιτούμενη οικολογική παροχή. Τέτοια χαρακτηριστικά είναι η βρεχόμενη περίμετρος ή το μέγιστο βάθος. Η υπόθεση που γίνεται εδώ είναι πως απαιτείται η εύρεση μιας τιμής – κατώφλι των επιλεγμένων υδραυλικών παραμέτρων, που εξασφαλίζει την διατήρηση της σταθερότητας και της ακέραρης λειτουργίας του οικοσυστήματος. Ένα τέτοιο κατώφλι είναι μια τιμή της εξεταζόμενης παραμέτρου, κάτω από την οποία η ποιότητα του βιότοπου υποβαθμίζεται σημαντικά.

Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν καταγραφεί 23 υδραυλικές μέθοδοι με την πιο διαδεδομένη να είναι αυτή της βρεχόμενης περιμέτρου. Στη μέθοδο αυτή μελετάται η στάθμη της υγρής περιμέτρου κυρίως σε αβαθείς περιοχές ή σε υποβαθμισμένες οικολογικά ζώνες του ποτάμιου συστήματος με σκοπό τη διατήρηση της σε αποδεκτά επίπεδα, καθώς αυτή θεωρείται στοιχείο ακεραιότητας του ποταμού. Η προστασία των περιοχών αυτών θα ωφελήσει προοδευτικά το σύνολο του υγροτόπου. Κατασκευάζονται καμπύλες στάθμης-παροχής και εξετάζεται η μεταβολή τους ως προς τις τιμές της παροχής. Η οικολογική παροχή λαμβάνεται πλησίον της τιμής-κατώφλι για την προστασία του συστήματος ή στην τιμή που αντιστοιχεί σε κάποιο ποσοστό της βέλτιστης ποιότητας του ποτάμιου συστήματος (π.χ. 50%). Η μέθοδος αυτή έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές χώρες στην Ευρώπη και στη Βόρεια Αμερική.

3. Μέθοδοι προσομοίωσης ενδονημάτων

Οι μέθοδοι προσομοίωσης ενδονημάτων (habitat simulation methods) είναι οι πιο δημοφιλείς μετά τις υδρολογικές μεθόδους. Ουσιαστικά, πρόκειται για επέκταση των υδραυλικών μεθόδων. Οι μέθοδοι αυτές έχουν μια περισσότερο ολιστική προσέγγιση λαμβάνοντας υπόψη υδρολογικές, υδραυλικές και βιολογικές παραμέτρους, με στόχο την εκτίμηση για διάφορα σενάρια παροχής, της ποσότητας και της καταλληλότητας των ενδονημάτων (Maddock, 1999).

Η σημαντικότερη μέθοδος της προσομοίωσης των ενδονημάτων είναι η Μέθοδος Ενδοποτάμιας Αυξητικής Ροής (Instream Flow Incremental Methodology, IFIM) η οποία περιλαμβάνει το υπολογιστικό μοντέλο PHABSIM (Physical Habitat Simulation) στο οποίο ενσωματώνονται στοιχεία υδρολογικά, μορφολογικά του ποταμού και βιολογικά, ενώ εξάγεται η παροχή που ικανοποιεί τις οικολογικές ανάγκες. Η IFIM θεωρείται ως η πλέον επιστημονικά άρτια για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών ροών (Gore and Nestler, 1988) και διακρίνεται σε 3 επιμέρους στάδια εφαρμογής (Person et al., 2014):

- Υδροδυναμική προσομοίωση. Προσομοίωση χωρικών και χρονικών μεταβολών υδραυλικών παραμέτρων (βάθος, ταχύτητα, υπόστρωμα κτλ)
- Προσομοιώσεις καταλληλότητας ενδονημάτων. Προσομοίωση των απαιτήσεων των ειδών αυτών ως προς τις φυσικές παραμέτρους (βάθος, ταχύτητα, υπόστρωμα κτλ).
- Συνδυασμός των προηγούμενων δύο σταδίων, συσχέτιση των αποτελεσμάτων των μοντέλων προσομοίωσης ενδονημάτων με τα αποτελέσματα του υδροδυναμικού μοντέλου.

4. Μέθοδοι ολιστικής προσέγγισης

Οι μέθοδοι αυτοί (Holistic methods) αποτελούν τις πιο περίπλοκες από τις μεθοδολογίες που αναφέρθηκαν παραπάνω, αφού ουσιαστικά αποτελούν συνδυασμό τους. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται βασίζονται στις μετρήσεις πεδίου και την εφαρμογή πληθώρας

εργαλείων και, κατά συνέπεια, απαιτούν διεπιστημονικότητα και μεγάλη εμπειρία. Επιπλέον, δεν δίνουν ως αποτέλεσμα μια συγκεκριμένη τιμή οικολογικής παροχής, αλλά επικεντρώνονται στον καθορισμό των επιπτώσεων από διαχειριστικά σενάρια.

Η πλέον διαδεδομένη ολιστική μέθοδος είναι η Building Block Methodology η οποία αναπτύχθηκε στη Νότιο Αφρική. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, τα ποτάμια είδη στηρίζονται σε βασικά στοιχεία της δίαιτας του ποταμού, συμπεριλαμβανομένων των χαμηλών παροχών και των πλημμυρών, που διατηρούν τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά του ποταμού. Εξετάζονται όλες οι παράμετροι της δίαιτας του ποταμού και το οικολογικό του προφίλ, ώστε να εκτιμηθούν οι επιπτώσεις των μεταβολών στην παροχή (μέγεθος, συχνότητα). Συνδυάζοντας αυτά τα βασικά στοιχεία εξάγεται μια αποδεκτή παροχή για τη διατήρηση του οικοσυστήματος. Η μεθοδολογία απαιτεί παρουσία ειδικών επιστημόνων με έμφαση στους τομείς της γεωμορφολογίας, της υδρογεωλογίας, της υδρολογίας και της βιολογίας.

2.4. Η οικολογική παροχή στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα, η μελέτη της οικολογικής παροχής σε έργα διαχείρισης υδατικών πόρων ξεκίνησε μόλις την τελευταία δεκαετία. Η έννοια της οικολογικής παροχής εμφανίστηκε ως απόρροια της ΚΥΑ 69269/5387 (ΦΕΚ Β' 678/25-10-1990), με την οποία τέθηκαν σε εφαρμογή οι διατάξεις του νόμου-πλαίσιο για το περιβάλλον 1650/1986 (ΦΕΚ Α' 160/16-10-1986). Με το Άρθρο 2 της υπ' αρ. Δ6/Φ1/οικ. 12160 (ΦΕΚ Β' 1552/3-8-1999) Υπουργικής Απόφασης ορίστηκε ως κριτήριο πρόκρισης των υποβαλλόμενων αιτήσεων για παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας ο βαθμός ενεργειακής αξιοποίησης, με σκοπό τη βέλτιστη αξιοποίηση του υφιστάμενου ανά θέση υδατικού δυναμικού χωρίς επίπτωση στην οικολογική παροχή και τις ποσότητες νερού που απαιτούνται για άλλες χρήσεις (π.χ. ύδρευση). Η οικολογική παροχή σε αυτή την περίπτωση προσδιορίστηκε στο 30% της μέσης παροχής θερινών μηνών.

Αργότερα, με την υπ' αρ. 49828 (ΦΕΚ Β' 2464/3-12-2008) εγκρίθηκε το «Ειδικό Πλαίσιο Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας» και η Στρατηγική Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων αυτού. Το Άρθρο 16 της εν λόγω Απόφασης ορίζει ότι ως ελάχιστη απαιτούμενη οικολογική παροχή νερού που παραμένει στη φυσική κοίτη υδατορεύματος, πρέπει να εκλαμβάνεται το μεγαλύτερο από τα εξής μεγέθη:

- 30% της μέσης παροχής των θερινών μηνών Ιουνίου - Ιουλίου – Αυγούστου ή
- 50% της μέσης παροχής του μηνός Σεπτεμβρίου ή
- 30 lt/sec σε κάθε περίπτωση.

Με την ΥΑ 196978/2011 που αποτελεί τροποποίηση του ΕΠΧΣΑΑ για τις ΑΠΕ, έγινε μια προσπάθεια να ληφθούν υπόψη στην εκτίμηση της οικολογικής παροχής και τα υδραυλικά χαρακτηριστικά της ροής. Έτσι, αναφέρεται πως στην περίπτωση ύπαρξης ιχθυοπανίδας θα πρέπει να εξασφαλίζεται επιφανειακή απορροή στο τμήμα εκτροπής της κοίτης ώστε να υπάρχει βάθος ροής τουλάχιστον 20cm.

Σε όλες τις ανωτέρω νομοθεσίες, η οικολογική παροχή καθορίζεται μονοσήμαντα ως ποσοστό μιας παροχής του ποταμού ή ενός βάθους ροής, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη ο τύπος των ενδοναυτιών και τα είδη της ιχθυοπανίδας. Ως αποτέλεσμα, η οικολογική παροχή που εκτιμάται συχνά αδυνατεί να καλύψει τις ανάγκες του εκάστοτε ενδοναυτιού (ως ενδοναυτιό ορίζεται το φυσικό περιβάλλον στο οποίο ζει και αναπαράγεται ένα είδος, ένας πληθυσμός ή μια βιοκοινότητα). Επίσης, στην Ελλάδα αντιμετωπίζεται μεγάλο πρόβλημα έλλειψης ιστορικών δεδομένων (χρονοσειρές μηνιαίων ή ημερήσιων τιμών παροχής) για την αξιόπιστη εφαρμογή υδρολογικών μεθόδων.

Για αυτούς τους λόγους, κρίνεται αναγκαία η μοντελοποίηση των βιολογικών δεικτών των ενδιαιτημάτων, δηλαδή των διάφορων οργανισμών που διαβιούν σε αυτά, όπως το φυτοπλαγκτόν, τα μακρόφυτα, το φυτοβένθος, τα βενθικά ασπόνδυλα και οι ιχθύες. Στην Οδηγία-Πλαίσιο για τα Νερά, εξάλλου, όπως έχει ήδη αναφερθεί (κεφ 2.1), δίνεται έμφαση στα βιολογικά στοιχεία, ενώ τα υδρομορφολογικά (πχ βάθος και ταχύτητα ροής) και τα φυσικοχημικά (pH, διαλυμένο οξυγόνο και θερμοκρασία) στοιχεία παίζουν υποστηρικτικό ρόλο. Συγκεκριμένα, τα ψάρια επηρεάζονται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τις υδάτινες συνθήκες, την ταχύτητα, το βάθος ροής καθώς και από μορφολογικά χαρακτηριστικά της κοίτης όπως το υπόστρωμα και η ύπαρξη καταφυγίων.

2.5. Ο ρόλος των μαθηματικών μοντέλων

Στο πλαίσιο της εφαρμογής της Οδηγίας-Πλαισίου για τα Νερά, τα μαθηματικά μοντέλα αποτελούν εργαλεία για την καλύτερη κατανόηση των φυσικών, χημικών και βιολογικών συνθηκών στα υδάτινα σώματα.

Τα κύρια είδη μαθηματικών μοντέλων που σχετίζονται άμεσα με την Οδηγία-Πλαίσιο για τα νερά είναι τα εξής:

- **Υδρολογικά μοντέλα (WAB):**
Υπολογίζουν τις διάφορες συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου και τα αντίστοιχα υδρολογικά χαρακτηριστικά των υδάτινων σωμάτων με την εφαρμογή του ισοζυγίου υδατικών πόρων. Παραδείγματα υδρολογικών μοντέλων είναι τα FORTH, TOPCAP1 (Ciarapica & Todini, 2002).
- **Υδροδυναμικά μοντέλα (HYD):**
Υπολογίζουν τα κύρια χαρακτηριστικά της ροής με την εφαρμογή των εξισώσεων συνέχειας και ορμής στα υδάτινα σώματα (Stamou et al. 1995). Κάποια από τα χαρακτηριστικά αυτά είναι το βάθος ροής, η ταχύτητα ροής και ο χρόνος παραμονής.
- **Μοντέλα ποιότητας νερού (WAQ):**
Υπολογίζουν τη χωρική και χρονική κατανομή των συγκεντρώσεων των ποιοτικών χαρακτηριστικών του υδάτινου σώματος. Παραδείγματα μοντέλων ποιότητας νερού για ποτάμια είναι το EPA-QUAL2E (Brown and Barnwell, 1987), το οποίο αποτελεί το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο μοντέλο για θέματα ποιότητας νερού για την προσομοίωση 15 μεταβλητών), το UK SIMCAT (Cox, 2003), το QUASAR (Whitehead et al., 1997) και το RIVE (Wasson et al., 2003). Η πλειονότητα των ήδη υπαρχόντων μοντέλων WAQ για λίμνες αντιμετωπίζουν τα φαινόμενα του ευτροφισμού και της αποξυγόνωσης (Chatzimburos et al., 2002; Chapra, 1997).
- **Οικολογικά μοντέλα (ECO):**
Περιγράφουν την αλληλεπίδραση μεταξύ των χαρακτηριστικών του οικοσυστήματος του υδάτινου σώματος, δηλαδή των βιοτικών και αβιοτικών στοιχείων που αντιδρούν στο σύστημα (Stamou et al., 2002).

Τα παραπάνω μοντέλα μπορούν να υπολογίσουν άμεσα ή έμμεσα την πλειονότητα των HYD-ELs και των PCH-ELs, αλλά λίγα μόνο BIO-ELs. Άμεσος υπολογισμός ενός στοιχείου μπορεί να επιτευχθεί όταν το στοιχείο αυτό συμπίπτει με μία μεταβλητή του μοντέλου και, συνεπώς, το στοιχείο ανήκει στα αποτελέσματα του μοντέλου. Παραδείγματα τέτοιων στοιχείων αποτελούν η παροχή που υπολογίζεται από ένα μοντέλο WAB και η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου που υπολογίζεται από ένα μοντέλο WAQ. Έμμεσος υπολογισμός ενός στοιχείου μπορεί να επιτευχθεί όταν το στοιχείο συνδέεται με μια μεταβλητή του μοντέλου μέσω εξισώσεων (εμπειρικών ή θεωρητικών) ή άλλων σχέσεων. Παραδείγματα τέτοιων στοιχείων αποτελούν η

στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας, το οποίο υπολογίζεται με τη χρήση των αποτελεσμάτων ενός μοντέλου WAB.

2.5.1. Τα οικολογικά μοντέλα

Τα οικολογικά μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό μερικών BIO-ELs από αυτά που αναφέρονται στην Οδηγία-Πλαίσιο για τα Νερά, όπως:

- το φυτοπλαγκτόν,
- τα μακρόφυτα,
- τα βενθικά ασπόνδυλα και
- τα ψάρια.

Τα οικολογικά μοντέλα, όπως όλα τα μαθηματικά μοντέλα, μπορεί να διέπονται από πλήρη αιτιότητα, οπότε ονομάζονται προσδιοριστικά (deterministic), ή να ακολουθούν στατιστικές κατανομές, οπότε καλούνται στατιστικά (Chatzimbiros et al., 2002).

Τα προσδιοριστικά οικολογικά μοντέλα είναι παρόμοια με τα μοντέλα ποιότητας (WAQ) και συχνά χαρακτηρίζονται έτσι. Χρησιμοποιούν, όπως και τα μοντέλα WAQ, εξισώσεις διατήρησης μάζας για να περιγράψουν τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των βιοτικών και αβιοτικών στοιχείων του οικοσυστήματος, καθώς και μεταξύ του οικοσυστήματος με το περιβάλλον. Όλα τα ντετερμινιστικά μοντέλα εμπεριέχουν απλοποιήσεις, μιας και δεν είναι εφικτό να περιλαμβάνουν κάθε οργανισμό ή κάθε είδος οργανισμών. Η πλειονότητα των οικολογικών μοντέλων συγκεντρώνει τις βιολογικές συνιστώσες με κοινή συμπεριφορά σε ομάδες. Για παράδειγμα, όλοι οι τύποι φυτοπλαγκτόν μπορούν να θεωρηθούν μία λειτουργική ομάδα ή μία μεταβλητή που λαμβάνει μέρος σε διάφορες διεργασίες, όπως η παραγωγή, η κατανάλωση και η αποσύνθεση.

Τα στατιστικά οικολογικά μοντέλα είναι εξισώσεις παλινδρόμησης, που περιγράφουν τις σχέσεις μεταξύ των υδρομορφολογικών, χημικών ή φυσικοχημικών χαρακτηριστικών και των βιολογικών χαρακτηριστικών ενός υδάτινου σώματος (Lewin et al., 2004; Allouche, S. and Gaudin, 2001; Weatherhead and James, 2001). Το RIVPACS (Clarke, 2003) είναι ένα τυπικό στατιστικό οικολογικό μοντέλο, το οποίο εμπεριέχει στατιστικές σχέσεις μεταξύ της χλωρίδας και των περιβαλλοντικών χαρακτηριστικών μιας σειράς υδάτινων σωμάτων με υψηλή ποιότητα (θέσεις αναφοράς). Το RIVPACS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της πανίδας των μακροασπόνδυλων σε οποιοδήποτε υδάτινο σώμα όταν δεν υφίσταται ρύπανση ή κάποια άλλη περιβαλλοντική πίεση. Με τον τρόπο αυτό, μπορούν να ορισθούν οι σωστές συνθήκες αναφοράς. Βασικό μειονέκτημα των στατιστικών μοντέλων είναι η αδυναμία πρόβλεψης όταν εφαρμόζονται σε διαφορετική περιοχή (Wasson, 2003).

2.5.2. Τα ολοκληρωμένα οικολογικά μοντέλα (INECO)

Η εκτέλεση της Οδηγίας Πλαίσιο για τα Νερά οδήγησε σταδιακά στην ανάπτυξη και στη χρήση μαθηματικών μοντέλων με το μέγιστο «βαθμό ολοκλήρωσης», έτσι ώστε να συνάδουν με τις επιταγές της Οδηγίας για μία ολιστική προσέγγιση των υδάτινων σωμάτων (πχ όσον αφορά στους ποταμούς, προσέγγιση σε επίπεδο λεκάνης απορροής).

Ο όρος «ολοκλήρωση», λοιπόν, αναφέρεται στη σύνδεση μεταξύ των διαφόρων τύπων επιφανειακών και υπόγειων υδάτινων σωμάτων (ποταμοί, λίμνες, μεταβατικά και παράκτια ύδατα), καθώς και στην ποσότητα, στην ποιότητα και στα οικολογικά χαρακτηριστικά τους. Η ολοκλήρωση των μοντέλων WAB, HYD, WAQ και ECO έχει ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό των ολοκληρωμένων οικολογικών μοντέλων ή αλλιώς μοντέλων INECO (INtegrated ECOlogical Models)

Τα υδροδυναμικά μοντέλα μπορούν εύκολα να συνδυαστούν με τα υδρολογικά μοντέλα ή τα μοντέλα ποιότητας νερού, αλλά δεν συμβαίνει το ίδιο μεταξύ των οικολογικών μοντέλων και των

υδροδυναμικών ή των μοντέλων ποιότητας. Παρά το γεγονός ότι τα υδρομορφολογικά και τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά επηρεάζουν τα οικολογικά χαρακτηριστικά, δεν έχουν αναπτυχθεί ακόμα ντετερμινιστικά μοντέλα INECO.

Ωστόσο, έχουν γίνει διάφορες προσπάθειες να αναπτυχθούν απλά «εμπειρικά» μοντέλα INECO, ακολουθώντας τη γενική ιδέα των στατιστικών οικολογικών μοντέλων. Αυτά τα αρχικά μοντέλα INECO, τα οποία μπορούν να θεωρηθούν ως πρόδρομοι των ντετερμινιστικών μοντέλων INECO, περιλαμβάνουν τα λεγόμενα Υδραυλικά Μοντέλα Ενδαιτημάτων (hydraulic-habitat models, HHM).

2.5.3. Τα υδροδυναμικά μοντέλα ενδαιτηματος (HHM)

Η Tharme (2003) παρουσιάζει τις Μεθόδους Προσομοίωσης Ενδαιτημάτων ως τις δεύτερες πιο δημοφιλείς μεθόδους μετά τις υδρολογικές για την εκτίμηση της οικολογικής παροχής στους ποταμούς. Οι τεχνικές αυτές προσεγγίζουν την οικολογική παροχή διαμέσου της λεπτομερούς ανάλυσης της ποσότητας και της καταλληλότητας του φυσικού βιότοπου για τη διαβίωση των οργανισμών, σε διαφορετικές τιμές παροχής του υδατορεύματος, καθώς με την πάροδο του χρόνου, έγινε κατανοητό ότι η οικολογική παροχή δεν πρέπει να είναι μία και μόνο σταθερή ροή για κάθε περίπτωση. Στη φύση συμβαίνουν αυξομειώσεις της ροής, ανάλογα με την εποχή και το κλίμα, οι οποίες είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με τη φυσιολογική λειτουργία των υδάτινων οικοσυστημάτων. Σταδιακά, προς αυτήν την κατεύθυνση δημιουργήθηκαν τα Υδροδυναμικά Μοντέλα Ενδαιτημάτων, οποία συσχετίζουν τις απαιτήσεις του ενδαιτηματος με τις αλλαγές στη ροή και μπορούν να προτείνουν την καταλληλότερη τιμή της οικολογικής παροχής για κάθε περίπτωση.

Η πλειονότητα των υπαρχόντων Υδροδυναμικών Μοντέλων Ενδαιτηματος (HHM) ασχολείται με τη δυναμική απόκριση των βιολογικών στοιχείων (BIO-ELs), και κυρίως των ιχθύων, σε σχέση με τα υδρομορφολογικά χαρακτηριστικά (HYD-ELs).

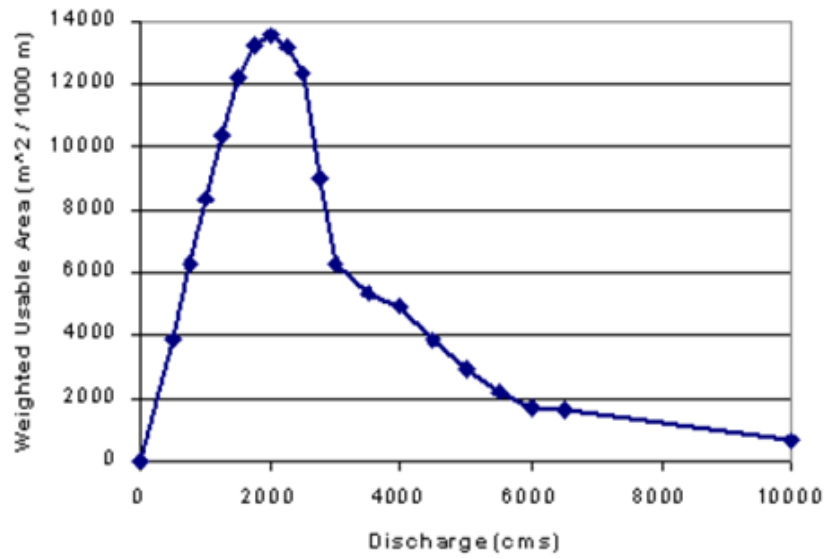
Τα Υδροδυναμικά Μοντέλα Ενδαιτηματος (Hydrodynamic Habitat Models, HHM) για ποταμούς συνδυάζουν:

- υδροδυναμικούς υπολογισμούς για διάφορες τιμές της παροχής με
- κριτήρια καταλληλότητας του ενδαιτηματος για τους υδρόβιους οργανισμούς ενδιαφέροντος,

ώστε να υπολογισθεί η «Σταθμισμένη Κατάλληλη Έκταση» (Weighted Usable Area, WUA) (Κεφάλαιο 3.3).

Τα μοντέλα αυτά, λοιπόν, συσχετίζουν τα φυσικά-υδραυλικά χαρακτηριστικά του ποταμού με την «ποιότητα» του ενδαιτηματος.

Παραδείγματα Υδραυλικών Μοντέλων Ενδαιτηματος (HHM) είναι οι μονοδιάστατοι κώδικες EVHA και PHABSIM (US Geological Survey, 2001; Scruton et al., 1998), οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε κλίμακα πεδίου για την εκτίμηση της καταλληλότητας του ενδαιτηματος για κάθε στάδιο ανάπτυξης διαφόρων ειδών ψαριών, σε συνάρτηση με την παροχή. Τα Υδραυλικά Μοντέλα Ενδαιτηματος (HHM) δύο διαστάσεων (Bockelmann et al., 2002 and 2003) μπορούν να παρέχουν πιο ολοκληρωμένη παρουσίαση της καταλληλότητας των ενδαιτημάτων στα ποτάμια (Ervin and MacLeod, 1999).



Εικόνα 2.4-1: Τυπική μορφή καμπύλης παροχής-WUA (PHABSIM for Windows)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

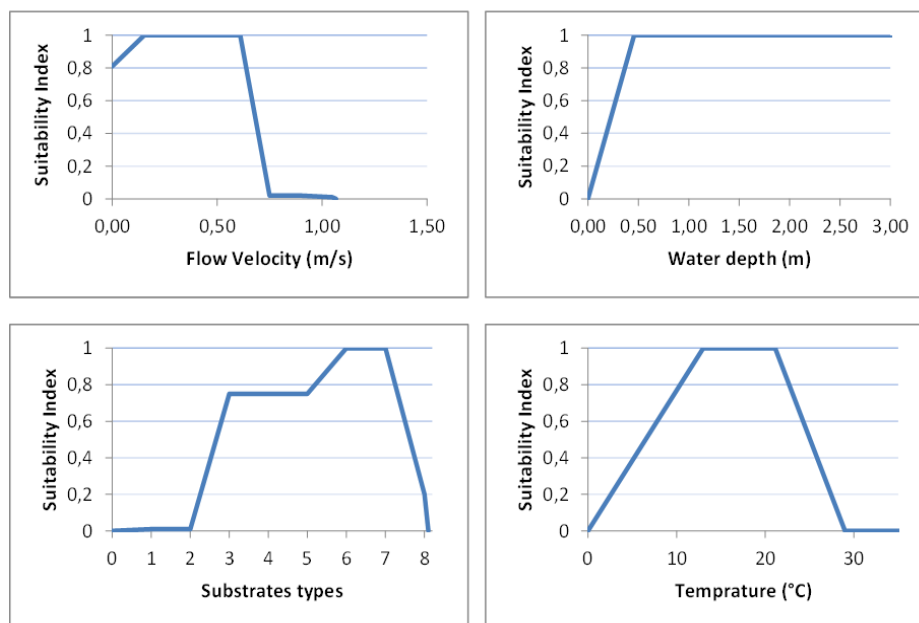
3.1. Εισαγωγή

Το ολοκληρωμένο μαθηματικό μοντέλο (ή αλλιώς το Υδραυλικό Μοντέλο Ενδιαιτήματος) που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από δύο επιμέρους μοντέλα. Συγκεκριμένα, συνδυάζονται τα εξής:

- το υδροδυναμικό μοντέλο (Telemac-2D), για τον υπολογισμό της ταχύτητας και του βάθους ροής σε κάθε σημείο του ποταμού,
- ένα μοντέλο ενδιαιτήματος (habitat model) δομημένο σε κώδικα fortran, το οποίο περιγράφει πώς η «ποιότητα» του ποτάμιου ενδιαιτήματος εξαρτάται από τα φυσικά-υδροδυναμικά χαρακτηριστικά του που υπολογίστηκαν από το υδροδυναμικό μοντέλο.

Με την εφαρμογή του ολοκληρωμένου μαθηματικού μοντέλου επιδιώκεται να εκτιμηθεί η καταλληλότητα του υδατινού σώματος για τους οργανισμούς που διαβιούν σε αυτό μέσα από τον υπολογισμό της Σταθμισμένης Κατάλληλης Έκτασης (Weighted Usable Area, WUA) για διάφορα σενάρια παροχής και, τελικά, να επιλεγθεί το βέλτιστο και να ορισθεί η τιμή της οικολογικής παροχής.

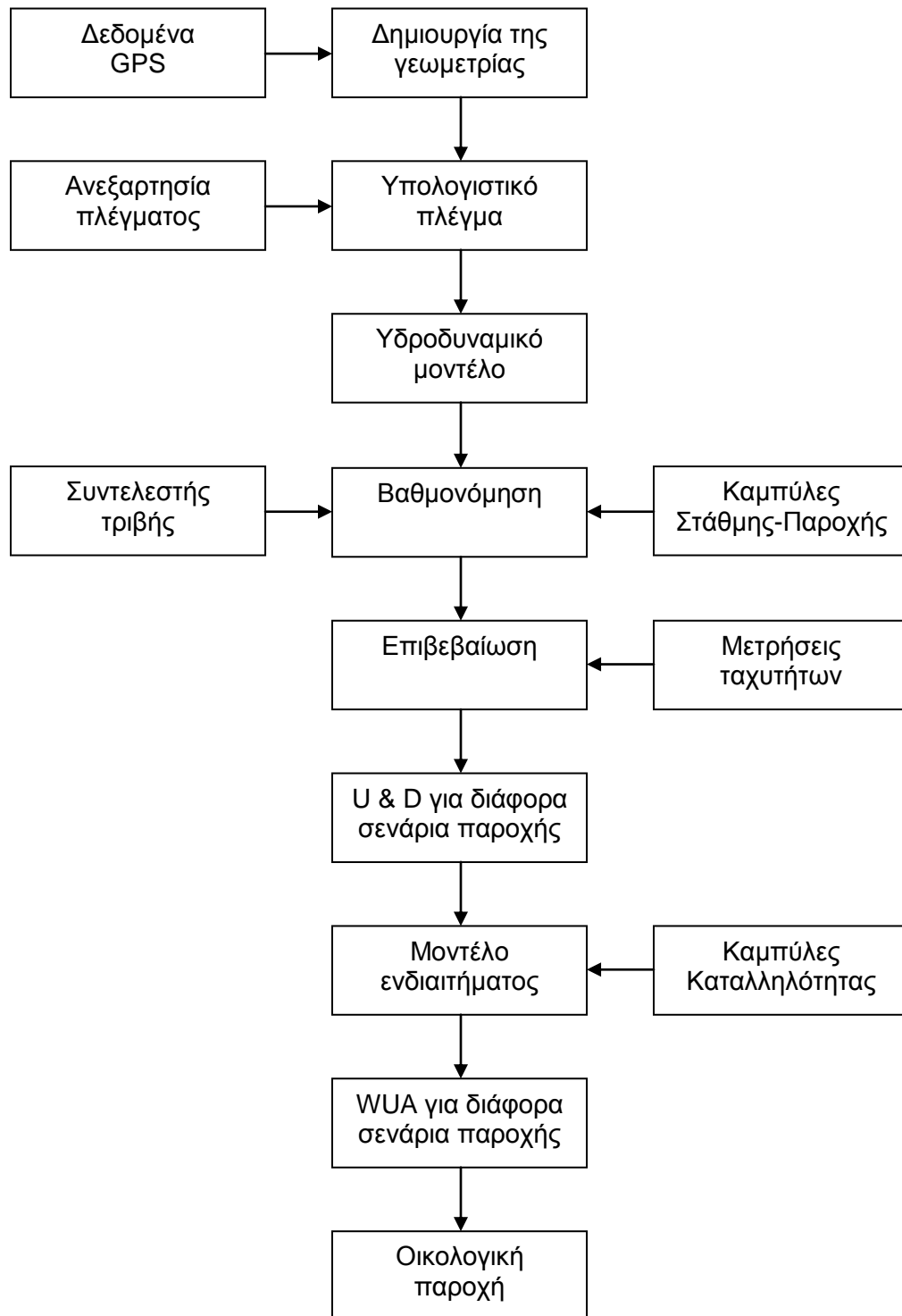
Η Σταθμισμένη Κατάλληλη Έκταση δε μπορεί να μετρηθεί άμεσα στο πεδίο και υπολογίζεται με βάση τις Καμπύλες Καταλληλότητας Ενδιαιτήματος. Οι Καμπύλες Καταλληλότητας Ενδιαιτήματος αποτελούν μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης χαρακτηριστικών των μεσοενδιαιτημάτων της ιχθυοπανίδας. Στην ουσία στοχεύουν στην ποσοτικοποίηση των σχέσεων βιολογικών και αβιοτικών παραμέτρων για τον καθορισμό κριτηρίων καταλληλότητας. Αποδίδουν ένα δείκτη καταλληλότητας με τιμές από μηδέν έως ένα για κάθε παράμετρο που εξετάζεται (ταχύτητα και βάθος ροής). Η τιμή μηδέν εκφράζει το ακατάλληλο ενδιαίτημα, ενώ η τιμή ένα υποδεικνύει βέλτιστη κατάσταση στο διαθέσιμο ενδιαίτημα.



Εικόνα 3.1-1: Καμπύλες Καταλληλότητας για την ιριδίζουσα πέστροφα (Yao et al., 2014)

Ο σχηματισμός μιας Καμπύλης Καταλληλότητας προϋποθέτει πολύ καλή γνώση των υδρόβιων οργανισμών και είναι απαραίτητη η συλλογή δεδομένων σε μεγάλο εύρος συνθηκών ροής

προκειμένου να ορισθούν το βέλτιστο ενδιαίτημα και τα κριτήρια καταλληλότητας για εφαρμογή μεγάλης κλίμακας (πχ Jowett 2002). Για κάθε είδος οργανισμού κατασκευάζονται διαφορετικές καμπύλες ανάλογα με τις προτιμήσεις του και δείχνουν την απόκριση του είδους αυτού στις μεταβολές του περιβάλλοντός του. Συνεπώς, το σχήμα των καμπυλών ποικίλλει ανάλογα με τη φύση της εκάστοτε μεταβολής.



Εικόνα 3.1-2: Το ολοκληρωμένο μαθηματικό μοντέλο

Συνοψίζοντας, η εκτίμηση της καταλληλότερης παροχής γίνεται έμμεσα μέσα από την εκτίμηση των «προτιμήσεων» που έχει το εξεταζόμενο είδος ψαριού όσον αφορά σε 2 βασικές παραμέτρους:

- το βάθος ροής και
- την ταχύτητα ροής.

Στην Εικόνα 3.1-2 παρουσιάζεται με τη μορφή διαγράμματος η κύρια ιδέα και τα βήματα που ακολουθήθηκαν για τη δόμηση του ολοκληρωμένου μαθηματικού μοντέλου.

3.2. Υδροδυναμικό μοντέλο

3.2.1. Γενικά

Το υδροδυναμικό μοντέλο που εφαρμόζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι το Telemac-2D, το οποίο προσομοιάζει τη ροή με ελεύθερη επιφάνεια σε 2 διαστάσεις. Λύνει τις εξισώσεις Saint-Venant χρησιμοποιώντας τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων ή διαφορικών όγκων (προκαθορισμένη μέθοδος είναι η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων), καθώς και ένα υπολογιστικό πλέγμα από τριγωνικά στοιχεία. Σε κάθε σημείο του πλέγματος, το πρόγραμμα υπολογίζει το βάθος του νερού (h) και τις 2 συνιστώσες της ταχύτητας (u , v). Μπορούν να προσομοιωθούν μη μόνιμες και μόνιμες συνθήκες ροής και να ληφθούν υπόψη τα εξής:

- Διάδοση κυμάτων μεγάλου μήκους
- Τριβή στον πυθμένα
- Επίδραση της περιστροφής της Γης (Coriolis effect)
- Επίδραση μετεωρολογικών παραγόντων: ατμοσφαιρική πίεση και αέρας
- Τύρβη
- Ροή σε ποταμό
- Παλιρροϊκές πλημμύρες
- Καρτεσιανές ή πολικές συντεταγμένες
- Ξηρές περιοχές στο υπολογιστικό πεδίο (πχ πλημμυρική κοίτη)
- Διάχυση ρύπου με όρους πηγής κτλ.

Το Telemac-2D μπορεί να εφαρμοσθεί σε διάφορα πεδία στην επιστήμη του μηχανικού, αφού πρόκειται για ένα ισχυρό εργαλείο προσομοίωσης των υδάτινων συστημάτων. Η σχεδίαση λιμενικών και ακτομηχανικών έργων, όσον αφορά στη θάλασσα, καθώς και η μελέτη των επιπτώσεων ενός φράγματος ή της μεταφοράς ρύπων, όσον αφορά στους ποταμούς, αποτελούν μόνο κάποια παραδείγματα εφαρμογής του μοντέλου.

3.2.2. Βασικές εξισώσεις του μοντέλου

Οι βασικές εξισώσεις υπολογισμού που επιλύονται ταυτόχρονα από το μοντέλο Telemac-2D είναι οι παρακάτω:

1. Εξίσωση Συνέχειας:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \vec{\nabla}(h) + h \operatorname{div}(\vec{u}) = S_h \quad (3.2-1)$$

2. Εξίσωση ποσότητας κίνησης κατά τη διεύθυνση x :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \vec{\nabla}(u) = -g \frac{\partial Z}{\partial x} + S_x + \frac{1}{h} \operatorname{div}(h v_r \vec{\nabla} u) \quad (3.2-2)$$

3. Εξίσωση ποσότητας κίνησης κατά τη διεύθυνση y :

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \vec{\nabla}(v) = -g \frac{\partial Z}{\partial y} + S_y + \frac{1}{h} \text{div}(h v_t \vec{\nabla} v) \quad (3.2-3)$$

4. Αρχή διατήρησης της μάζας του ρύπου:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \vec{\nabla}(T) = S_T + \frac{1}{h} \text{div}(h v_t \vec{\nabla} T) \quad (3.2-4)$$

όπου:

h (m)	το βάθος ροής
u, v (m/s)	οι συνιστώσες της ταχύτητας
T (g/l or °C)	ο ρύπος (πχ θερμοκρασία)
t (s)	ο χρόνος
x, y (m)	συντεταγμένες κατά την οριζόντιο
g (m/s ²)	η επιτάχυνση της βαρύτητας
v _t (m ² /s)	η τυρβώδης συνεκτικότητα
v _T (m ² /s)	ο συντελεστής διάχυσης του ρύπου
Z (m)	το υψόμετρο της ελεύθερης επιφάνειας
S _h (m/s)	ο όρος πηγής της εξίσωσης συνέχειας
S _x , S _y (m/s ²)	όροι πηγής των εξισώσεων ποσότητας κίνησης
S _T (g/l/s)	ο όρος πηγής της εξίσωσης διατήρησης της μάζας του ρύπου

Οι άγνωστες μεταβλητές στις παραπάνω εξισώσεις είναι το βάθος νερού h, η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας u, η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας v και ο ρύπος.

Οι εξισώσεις δίνονται εδώ σε καρτεσιανές συντεταγμένες, αλλά μπορούν να δοθούν και σε πολικές συντεταγμένες.

Οι όροι S_x, S_y (m/s²) είναι όροι πηγής που αντιπροσωπεύουν τον αέρα, την τριβή του πυθμένα ή την δύναμη Coriolis μέσα στο πεδίο.

Στην περίπτωση που η ροή δεν μπορεί να θεωρηθεί παράλληλη και οι συνιστώσες της ταχύτητας στην κατακόρυφη διεύθυνση δεν είναι αμελητέες, μπορεί να γίνει προσθήκη κάποιων επιπλέον όρων στις εξισώσεις Saint Venant, όπως αναφέρεται και στη βιβλιογραφία (Serre, Boussinesq, Korteweg, De Vries). Για τη θεώρηση Boussinesq, προστίθενται οι παρακάτω όροι (εξισώσεις Boussinesq):

$$-\frac{H_o^2}{6} \text{grad}[\text{div}(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t})] + \frac{H_o}{2} \text{grad}[\text{div}(H_o \frac{\partial \vec{u}}{\partial t})] \quad (3.2-5)$$

3.2.3. Τυρβώδης ροή

Η γένεση της τύρβης προκαλείται από αστάθεια της ροής οφειλόμενη είτε στις συνθήκες ροής είτε σε τυχαία διατάραξη και εμφανίζεται κατά κανόνα σε περιοχές σημαντικών δυνάμεων συνεκτικότητας, όπως είναι οι περιοχές σημαντικών κλίσεων της ταχύτητας.

Ως μοντέλα τύρβης χαρακτηρίζονται οι εξισώσεις ή τα συστήματα εξισώσεων που επιτρέπουν είτε τον προσδιορισμό της τυρβώδους συνεκτικότητας, είτε γενικότερα τον προσδιορισμό των τυρβωδών τάσεων και, επομένως, καθιστούν δυνατή την επίλυση της τυρβώδους ροής. Το Telemac-2D παρέχει τη δυνατότητα επιλογής μεταξύ των εξής περιπτώσεων:

1. CONSTANT VISCOSITY: Στην περίπτωση αυτή η τυρβώδης συνεκτικότητα (v_t) είναι σταθερή σε όλο το πεδίο. Μπορεί να ορισθεί η τιμή της ολικής συνεκτικότητας (v_{ολ}), η

οποία αποτελεί το άθροισμα της κινηματικής συνεκτικότητας (ν) και της τυρβώδους συνεκτικότητας (ν_t).

2. ELDER MODEL: Το μοντέλο αυτό προσφέρει τη δυνατότητα να ορισθούν διαφορετικές τιμές της συνεκτικότητας κατά μήκος και κατά πλάτος του ρου.
3. K-EPSILON MODEL: Πρόκειται για το συνηθέστερο μοντέλο δύο εξισώσεων, όπου k είναι η κινητική ενέργεια τύρβης (turbulence kinetic energy) και ε η απόσβεση της τυρβώδους κινητικής ενέργειας (turbulence eddy dissipation). Για τα δύο αυτά μεγέθη το Telemac-2D λύνει τις εξισώσεις μεταφοράς, οι οποίες είναι οι εξής:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(k) = \frac{1}{h} \operatorname{div} \left(h \frac{\nu_t}{1.0} \vec{\nabla} k \right) + P - \varepsilon + G \quad (3.2-6)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(\varepsilon) = \frac{1}{h} \operatorname{div} \left(h \frac{\nu_t}{1.3} \vec{\nabla} \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{k} (1.44P - 1.92\varepsilon) - 1.44 \frac{\varepsilon}{k} G \quad (3.2-7)$$

Ενώ τα 2 μεγέθη σχετίζονται με την τυρβώδη συνεκτικότητα με τη σχέση:

$$\nu_t = 0.09 \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.2-8)$$

4. SMAGORINSKI MODEL: Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται κυρίως για θαλάσσια πεδία με φαινόμενα τύρβης μεγάλης κλίμακας.

3.2.4. Συντελεστής τριβής

Ο συντελεστής τριβής στον πυθμένα μπορεί να θεωρηθεί σταθερός κατά μήκος του ποταμού ή να μεταβάλλεται ανά τμήματα. Το Telemac 2D παρέχει τις εξής επιλογές σχετικά με το νόμο τριβής:

1. NO FRICTION
2. HAALAND'S LAW
3. CHEZY'S LAW
4. STRICKLER'S LAW
5. MANNING'S LAW
6. NIKURADSE LAW
7. LOG LAW OF THE WALL
8. COLEBROOK-WHITE LAW

Στις επιλογές 2-6 πρέπει να ορισθεί και η ακριβής τιμή του συντελεστή ανάλογα με τον νόμο που επιλέχθηκε.

3.2.5. Οριακές συνθήκες

Οι οριακές συνθήκες (boundary conditions) προσδιορίζονται στα όρια του υπολογιστικού πεδίου. Αφορούν στις κύριες μεταβλητές του Telemac 2D ή τις τιμές που απορρέουν από αυτές: το βάθος ροής, τις δύο συνιστώσες της ταχύτητας (ή της παροχής) και τον ρύπο. Είναι δυνατόν να περιγραφούν διάφορων ειδών οριακές συνθήκες, όπως για παράδειγμα εισροή ή εκροή σε υπερκρίσιμη ή υποκρίσιμη ροή.

Μία οριακή συνθήκη μπορεί να μεταβάλλεται χωρικά ή/και χρονικά στο όριο. (Ο τρόπος με τον οποίο ορίζεται μία οριακή συνθήκη εξαρτάται από τις χωρικές και χρονικές μεταβολές στη συνθήκη.) Έτσι, μία συνθήκη μπορεί να είναι:

1. Σταθερή στο όριο και στο χρόνο
2. Σταθερή στο όριο και μεταβλητή στο χρόνο
3. Μεταβλητή στο χώρο και σταθερή στο χρόνο
4. Μεταβλητή στο χρόνο και στο χώρο
5. Μεταβλητή στο χρόνο

Στις περισσότερες απλές περιπτώσεις για τα υγρά όρια, ο χρήστης μπορεί να ορίσει απευθείας τις οριακές συνθήκες, έχοντας τις εξής επιλογές:

1. PRESCRIBED ELEVATIONS: ορίζεται η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας στο όριο.
2. PRESCRIBED FLOWRATES: ορίζεται η παροχή στο όριο.
3. PRESCRIBED VELOCITIES: ορίζεται η ταχύτητα στο όριο.

Σε πιο περίπλοκες περιπτώσεις, όταν οι τιμές που πρέπει να καθορισθούν μεταβάλλονται στο χρόνο, ο χρήστης ενδεχομένως να χρειαστεί να προγραμματίσει τις κατάλληλες εντολές.

Είναι, επίσης, πιθανό να υπάρχει κάποιο υγρό όριο στο οποίο η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας να είναι συνάρτηση της παροχής. Κάτι τέτοιο συμβαίνει κυρίως σε ποταμούς για τους οποίους υπάρχει δεδομένη η καμπύλη στάθμης-παροχής (STAGE-DISCHARGE CURVE).

3.2.6. Διάρκεια υπολογισμού

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να καθορίσει τη διάρκεια του υπολογισμού, είτε απευθείας (DURATION), είτε εισάγοντας το χρονικό βήμα και το συνολικό αριθμό των χρονικών βημάτων (DURATION=TIME STEP*NUMBER OF TIME STEPS).

Ανεξάρτητα από το αν έχει οριστεί η διάρκεια του υπολογισμού, το Telemac-2D έχει τη δυνατότητα να λήξει τον υπολογιστική διαδικασία όταν επέλθουν μόνιμες συνθήκες ή όταν το μοντέλο αποκλίνει.

3.2.7. Αρχικές συνθήκες

Σκοπός του ορισμού των αρχικών συνθηκών (initial conditions) είναι η περιγραφή της κατάστασης του μοντέλου στην εκκίνηση της προσομοίωσης ($t=0$). Το Telemac-2D παρέχει στο χρήστη τις παρακάτω επιλογές για τις αρχικές συνθήκες:

1. CONSTANT ELEVATION: Ορίζεται η αρχική στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας στο πεδίο. Τα αρχικά βάθη ροής υπολογίζονται αφαιρώντας το υψόμετρο του πυθμένα από το υψόμετρο της ελεύθερης επιφάνειας. Στα σημεία που ο πυθμένας βρίσκεται ψηλότερα από την ελεύθερη επιφάνεια, το αρχικό βάθος ροής λαμβάνεται μηδενικό.

2. ZERO DEPTH: Όλα τα βάθη ροής έχουν αρχική τιμή το μηδέν, δηλαδή η ελεύθερη επιφάνεια και ο πυθμένας ταυτίζονται. Με άλλα λόγια, ολόκληρος ο τομέας είναι άνυδρος στην αρχή του υπολογισμού.
3. CONSTANT DEPTH: Ορίζεται μια σταθερή αρχική τιμή για το βάθος ροής σε όλο το υπολογιστικό πεδίο.

Υπάρχει, ακόμα, η δυνατότητα ο χρήστης να χρησιμοποιήσει ως αρχικές συνθήκες τα αποτελέσματα ενός προηγούμενου υπολογισμού, όπου έχουν επέλθει μόνιμες συνθήκες ροής.

3.3. Μοντέλο ενδιαιτήματος

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο ενδιαιτήματος που δημιουργήθηκε στο Πολυτεχνείο του Μονάχου (Technical University of Munich, TUM). Το μοντέλο αυτό είναι δομημένο σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran και χρειάστηκε να τροποποιηθεί προκειμένου να εφαρμοσθεί στην περίπτωση του Σπερχειού ποταμού.

Παρακάτω περιγράφονται τα βήματα της υπολογιστικής διαδικασίας του μοντέλου ενδιαιτήματος και παρουσιάζονται οι βασικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται:

1. Δεδομένα εισόδου αποτελούν τα αποτελέσματα του υδροδυναμικού μοντέλου: οι συντεταγμένες, οι συνιστώσες της ταχύτητας, το υψόμετρο του πυθμένα και της ελεύθερης επιφάνειας σε όλους τους κόμβους του πλέγματος. Με αυτά τα δεδομένα υπολογίζονται η μέση ταχύτητα και το βάθος ροής για κάθε κόμβο.
2. Εντοπίζονται οι ιχθύες ενδιαφέροντος και στον κώδικα fortran εισάγονται οι Καμπύλες Καταλληλότητας τους (HSC).
3. Η εξεταζόμενη έκταση του ποταμού χωρίζεται σε σχετικά μικρές περιοχές, N στον αριθμό. Οι περιοχές αυτές μπορούν να ονομαστούν «κελιά». Κάθε κελί είναι τετράπλευρο και δημιουργείται από την ένωση 2 γειτονικών τριγωνικών στοιχείων του πλέγματος του υδροδυναμικού μοντέλου. Σε κάθε κελί αντιστοιχίζεται μια ταχύτητα και ένα βάθος ροής .
4. Το μοντέλο ενδιαιτήματος υπολογίζει το εμβαδόν κάθε κελιού i (Ai).
5. Το μοντέλο ενδιαιτήματος έχει πλέον ως δεδομένα το βάθος και την ταχύτητα για κάθε κελί, καθώς και τις καμπύλες καταλληλότητας για τους ιχθύες ενδιαφέροντος. Συνεπώς, αντιστοιχίζει ένα Δείκτη Καταλληλότητας (Suitability Index, SI) για κάθε μία από τις 2 προαναφερθείσες παραμέτρους (D, V) σε κάθε κελί πραγματοποιώντας γραμμική παρεμβολή όπου χρειάζεται. Κάθε κελί πλέον χαρακτηρίζεται από τους εξής δείκτες:
 - SI_D για το βάθος νερού.
 - SI_V για την ταχύτητα ροής.Ο Δείκτης Καταλληλότητας είτε για το βάθος ροής είτε για την ταχύτητα λαμβάνει τιμές από 0 έως 1. Το μηδέν αντιπροσωπεύει ακατάλληλες συνθήκες για τους εξεταζόμενους οργανισμούς, ενώ η τιμή ένα αντιπροσωπεύει βέλτιστες συνθήκες.
6. Υπολογίζεται ο Συνδυαστικός Δείκτης Καταλληλότητας Ενδιαιτήματος (Habitat Suitability Index, HSI) για κάθε κελί, ως ο γεωμετρικός μέσος των Δεικτών Καταλληλότητας. Με τον τρόπο αυτό, όλες οι παράμετροι αντιμετωπίζονται με την ίδια βαρύτητα (Benaka, 1999). Σε κάθε κελί, λοιπόν, αντιστοιχίζεται ένας δείκτης HSI, με βάση τις τιμές των φυσικών παραμέτρων του κελιού.

$$HSI_i = \sqrt{SI_D \times SI_V} \quad (3.3-1)$$

Ο Συνδυαστικός Δείκτης Καταλληλότητας Ενδιαιτήματος (HSI) λαμβάνει τιμές από 0 έως 1, όπως οι Δείκτες SI_D , SI_V .

7. Πραγματοποιείται βαθμονόμηση της έκτασης που προσομοιώνεται στο υδροδυναμικό μοντέλο, με το Συνδυαστικό Δείκτη Καταλληλότητας και υπολογίζεται η σταθμισμένη κατάλληλη έκταση (Weighted Usable Area, WUA).

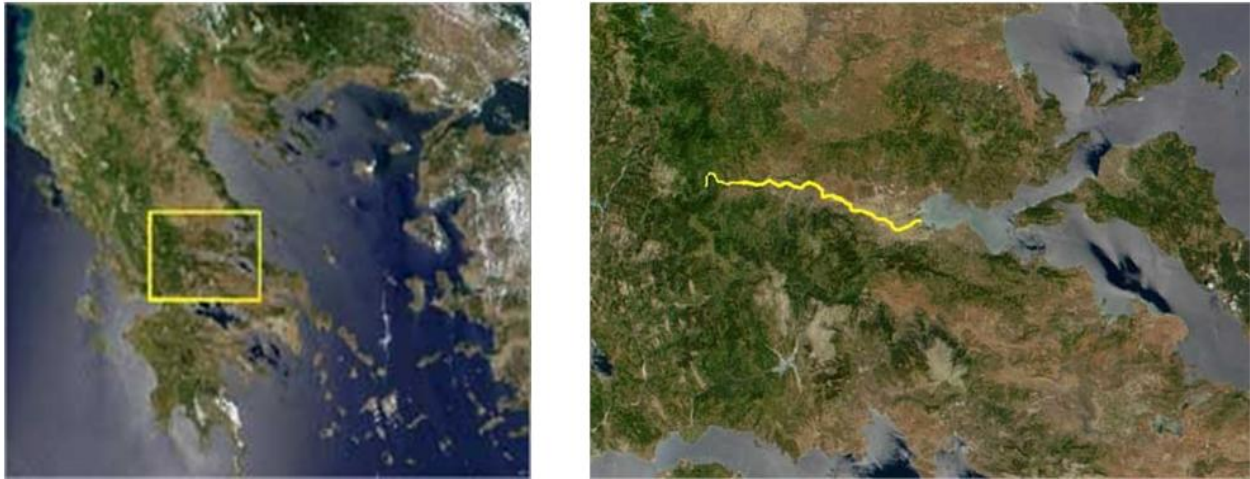
$$WUA = \sum_{i=1}^N (A_i \times HSI_i) \quad (3.3-2)$$

Η σταθμισμένη κατάλληλη έκταση (Weighted Usable Area, WUA) είναι στην ουσία η συνολική έκταση του πεδίου που λαμβάνει τιμές δείκτη καταλληλότητας (δηλαδή $HSI > 0$) και αποτελεί κριτήριο της ποιότητας και της ποσότητας του διαθέσιμου ενδιαιτήματος. Συνεπώς, μία μεγάλη έκταση με χαμηλή καταλληλότητα ενδιαιτημάτων μπορεί να δώσει ίδια αθροιστικά αποτελέσματα με μία άλλη, αρκετά μικρότερη περιοχή, με υψηλή καταλληλότητα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

4.1. Σπερχειός ποταμός

Ο Σπερχειός ποταμός εντοπίζεται στο νομό Φθιώτιδας, στην Περιφέρεια Στερεάς Ελλάδας και έχει μήκος 82km. Πηγάζει από το βουνό Τυμφρηστός Ευρυτανίας και με γενική διεύθυνση δυτική-ανατολική εκβάλλει στο Μαλιακό Κόλπο. Ο Σπερχειός διέρχεται από τα όρια αρκετών κωμοπόλεων και χωριών, τα μεγαλύτερα από τα οποία είναι η Σπερχειάδα, η Μακρακώμη, το Λειανοκλάδι και η Ανθήλη, ενώ περνά τρία χιλιόμετρα νότια από την πόλη της Λαμίας.



Εικόνα 4.1-1: Σπερχειός ποταμός
(google earth)

Η συνολική έκταση της λεκάνης απορροής του Σπερχειού είναι 1660,9 km² και ανήκει στο υδατικό διαμέρισμα Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας (ΥΔ07). Πρόκειται για ένα ταφροειδές νεοτεκτονικό βύθισμα με διαμήκη άξονα που συμπίπτει με τη διαδρομή της κοίτης του ποταμού και το οποίο οριοθετείται περιμετρικά από ορεινούς όγκους. Συγκεκριμένα, τα περιθώρια της λεκάνης οριοθετούνται βορειοανατολικά από την οροσειρά της Όθρυος (υψόμετρο 1144m), δυτικά από τα όρη Τυμφρηστός ή Βελούχι (υψόμετρο 2315m) και Οξυά (υψόμετρο 1922m), νότια από τα Βαρδούσια Όρη (υψόμετρο 2285m) και Οίτη (υψόμετρο 2141m) και νοτιοανατολικά από το όρος Καλλιδρομο (υψόμετρο 1419m). Το υψόμετρο της λεκάνης κυμαίνεται από 0 έως 2285m (στα Βαρδούσια Όρη), με μέση τιμή 641m.

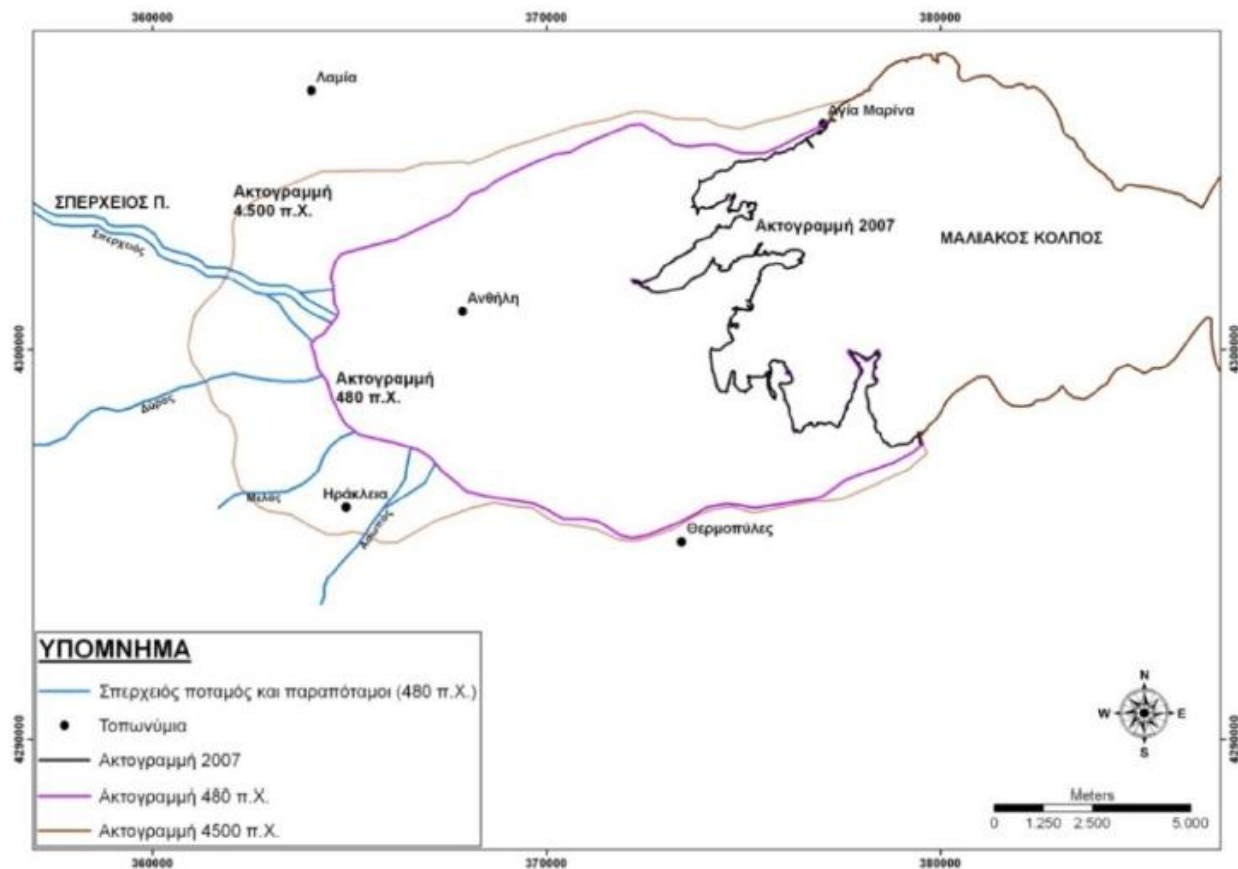
Το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής του Σπερχειού είναι πολύ εκτεταμένο και δενδρικού τύπου. Οι σημαντικότεροι παραπόταμοι του Σπερχειού είναι οι παραπόταμοι του Ινάχου - Βίστριζα (έκταση υπολεκάνης 171,7 km² και μήκος 23.878 m) και Κρασιόρρεμα (έκταση υπολεκάνης 107 km² και μήκος 11.543 m) νότια, ο Ασωπός νοτιοανατολικά (έκταση υπολεκάνης 113,4km² και μήκος 18.817 m), ο Ξεριάς βορειοανατολικά (έκταση υπολεκάνης 90 km² και μήκος 12.545 m) και ο Γοργοπόταμος νοτιοανατολικά (έκταση υπολεκάνης 60,2 km² και μήκος 13.002 m). Σημειώνεται ότι το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής έχει υποστεί σημαντικές επεμβάσεις στα πλαίσια της αντιπλημμυρικής προστασίας της λεκάνης.

Το δέλτα του Σπερχειού αποτελεί ένα σύνθετο σύστημα και σχηματίζεται στις εκβολές του Σπερχειού στον κλειστό και αβαθή Μαλιακό κόλπο. Η ποτάμια δράση, λόγω και της έλλειψης έντονης κυματικής δραστηριότητας, αποτελεί τον πρωταρχικό παράγοντα διαμόρφωσης του δέλτα (Πεχλιβανίδου, 2012).

Πίνακας 4.1-1: Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά υδρολογικής λεκάνης ποταμού Σπερχειού

ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΛΕΚΑΝΗ Π. ΣΠΕΡΧΕΙΟΥ	
Έκταση (km ²)	1.660,9
Περίμετρος (km)	247,6
Μέγιστος άξονας (km)	65,2
Ελάχιστος άξονας (km)	34,4
Μέγιστο υψόμετρο (m)	2.285
Ελάχιστο υψόμετρο (m)	0
Μέσο υψόμετρο (m)	641
Μέγιστη κλίση (°)	66
Ελάχιστη κλίση (°)	0
Μέση κλίση (°)	13,5

Ο ποταμός Σπερχειός είναι ο κύριος τροφοδότης του Μαλιακού κόλπου με φερτές ύλες. Έχει υπολογιστεί ότι ετησίως στο δέλτα φτάνουν 1.140.080m³ φερτών υλών (Κωτούλας, 1987). Η μορφή της παράκτιας ζώνης είναι χαμηλή και χαρακτηρίζεται από την παρουσία πελματοειδών διεισδύσεων της χέρσου στη θάλασσα. Βασικό χαρακτηριστικό της παράκτιας ζώνης είναι η χρονική μεταβολή της, με την αύξηση του δελταϊκού πεδίου με μία ταχύτητα της τάξης του 0,20 km²/χρόνο (Κωτούλας, 1987). Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η «εξαφάνιση» των ιστορικών στενών των Θερμοπυλών με την πάροδο των χρόνων.



Εικόνα 4.1-2: Μεταβολή ακτογραμμής Σπερχειού ποταμού (Ψωμιάδης, 2010)

Οι νότιες ακτές του Μαλιακού κόλπου είναι προσχλωσιγενείς και τροφοδοτούνται από τα φερτά υλικά των ποταμοχειμάρρων Λαζόρεμα, Ποταμιά, Λιαπατόρεμα, Πλατανιάς, οι οποίοι σχηματίζουν αλλουβιακούς κώνους και ριπίδια. Η μορφολογία είναι αντίστοιχη αυτών των βόρειων ακτών του (Αναγνώστου κ.ά., 1994).

4.2. Κλιματολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης

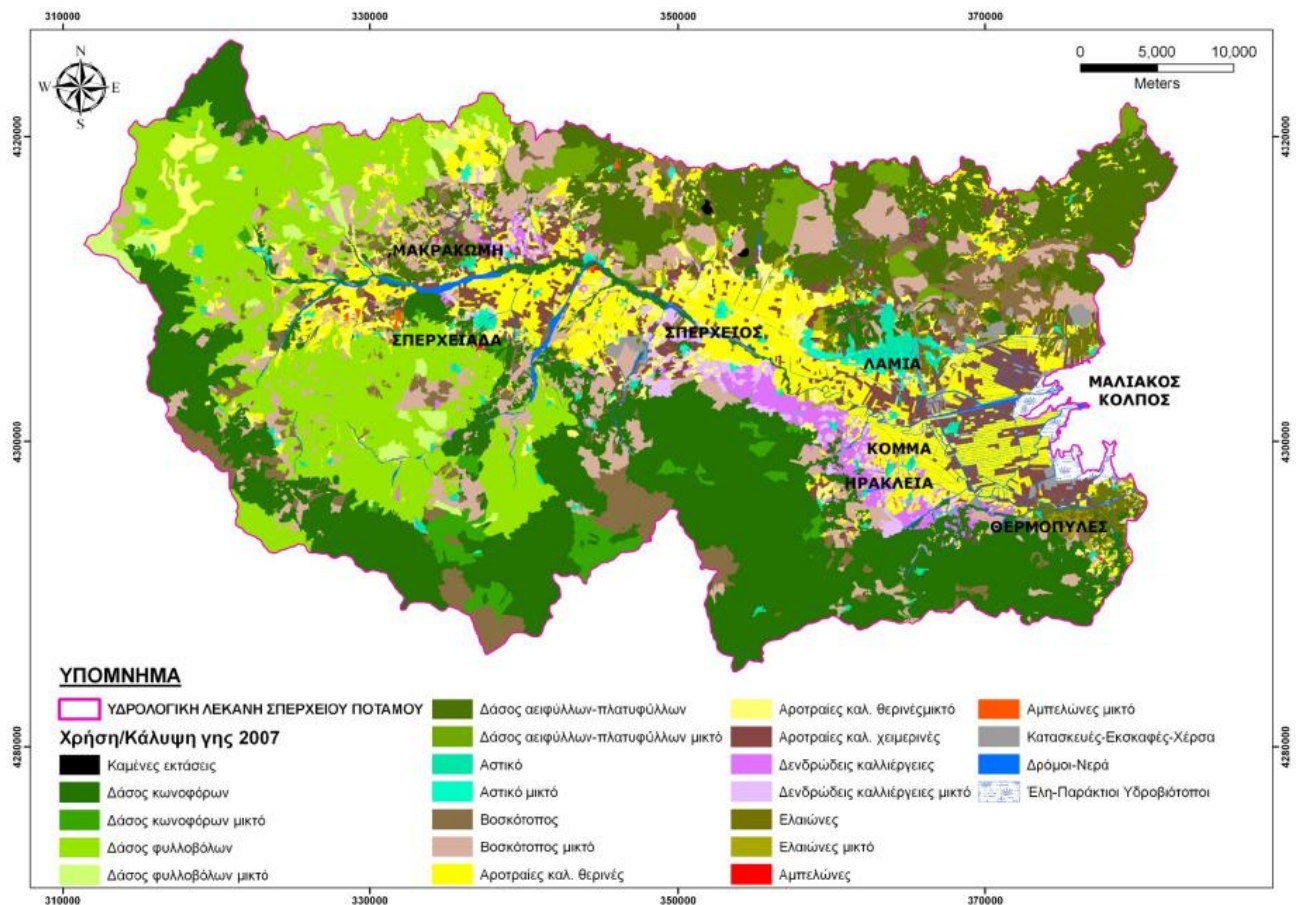
Καθοριστικός παράγοντας της διαμόρφωσης του κλίματος στη λεκάνη απορροής του Σπερχειού ποταμού αποτελεί η θάλασσα ανατολικά (Μαλιακός Κόλπος), καθώς και οι ορεινοί όγκοι που την περιβάλλουν. Ανήκει στην υποτροπική μεσογειακή ζώνη με τις θερμές και ξηρές (άνομβρες) περιόδους να αρχίζουν στα τέλη της άνοιξης και να διαρκούν το καλοκαίρι μέχρι και τις αρχές του φθινοπώρου και τις βροχερές περιόδους να συμβαίνουν από τα μέσα του φθινοπώρου, το χειμώνα και τις αρχές της άνοιξης (Ζαμπάκας 1981, Ρουλος et al. 1997, Ευθυμίου κ. ά. 2005). Παρατηρούνται, βέβαια, διαφοροποιήσεις (μικροκλίμα) ανάλογα με την μορφολογία της περιοχής. Συνεπώς, στον Μαλιακό Κόλπο το κλίμα χαρακτηρίζεται ως Μεσογειακό, ενώ στο εσωτερικό είναι πεδινό ηπειρωτικό στην κοιλάδα του Σπερχειού και ορεινό ηπειρωτικό με ψυχρό και δριμύ χειμώνα σε περιοχές με υψόμετρο άνω των 500m.

Οι μέσες μηνιαίες τιμές με βάση το μετεωρολογικό σταθμό της Λαμίας κυμαίνονται από 7,1°C έως 27°C και η μέση μηνιαία τιμή της βροχόπτωσης, που υπολογίστηκε από όλους τους μετεωρολογικούς σταθμούς της λεκάνης, κυμαίνεται από 575 mm/έτος έως 1426 mm/έτος, εξαρτώμενη από το υψόμετρο, αλλά και από την ποσότητα του χιονιού που πέφτει συνήθως στα μεγαλύτερα υψόμετρα.

4.3. Χρήσεις γης στην ευρύτερη περιοχή μελέτης

Βασικό χαρακτηριστικό της λεκάνης απορροής του ποταμού Σπερχειού είναι ο φυσικός της χαρακτήρας, καθώς 65,3% της έκτασης καταλαμβάνεται κυρίως από δάση (πλατύφυλλων, κωνοφόρων και μικτά δάση), μεταβατική γη μεταξύ δασών και θαμνών και σκληρόφυλλη βλάστηση, ενώ σε σημαντικό τμήμα της λεκάνης λαμβάνουν χώρα αγροτικές δραστηριότητες. Συγκεκριμένα, το 32% της έκτασης καλύπτεται από καλλιεργήσιμη – αρδευόμενη ή μη- γη, από σύνθετα συστήματα καλλιεργειών και ελαιώνες. Οι οικιστικές περιοχές καταλαμβάνουν μόλις το 1,2% της λεκάνης.

Αναφορικά με τη χωρική κατανομή των χρήσεων γης στην λεκάνη απορροής του ποταμού Σπερχειού, παρατηρείται ότι στο πεδινό τμήμα λαμβάνουν χώρα κυρίως οι αγροτικές και οι κτηνοτροφικές δραστηριότητες. Στο βορειοανατολικό τμήμα, στην ευρύτερη περιοχή της Λαμίας εντοπίζονται οι περισσότερες οικιστικές και βιομηχανικές-εμπορικές δραστηριότητες. Τέλος, περιμετρικά της λεκάνης, στους ορεινούς όγκους, συναντώνται δάση, λιβάδια και θαμνότοποι.



Εικόνα 4.3-1: Χρήσεις γης περιοχής μελέτης (Ψωμιάδης, 2010)

Οι κυριότερες καλλιέργειες στην ευρύτερη περιοχή μελέτης, είναι τα δημητριακά, από τα οποία καλλιεργείται κυρίως το σιτάρι, το κριθάρι, ο αραβόσιτος και το ρύζι, που καλλιεργείται στις εκβολές του ποταμού Σπερχειού, και τα βιομηχανικά φυτά, κυρίως βαμβάκι και καπνός. Από τις ετήσιες καλλιέργειες ιδιαίτερη ανάπτυξη παρουσιάζουν τα κτηνοτροφικά φυτά (κυρίως Μηδική). Όσον αφορά τις δενδρώδεις καλλιέργειες καλλιεργούνται ελιές, που εντοπίζονται κυρίως στο βορειοανατολικό και νοτιοανατολικό τμήμα της λεκάνης, κυρίως στους Δήμους Στυλίδας και Μώλου, οπωροφόρα δένδρα όπως κερασιές, βερικοκιές και ροδακινιές οι οποίες εντοπίζονται κυρίως στο νότιο-κεντρικό τμήμα της λεκάνης (κυρίως στους Δήμους Γοργοποτάμου και Υπάτης), ενώ καλλιεργούνται και αρκετά δένδρα καρπών με κέλυφος, κυρίως φιστικιές που εντοπίζονται κυρίως στο νότιο τμήμα της λεκάνης και στον Δήμο Μακρακώμης, καστανιές κυρίως στα ορεινά και αμυγδαλιές. Τέλος, στο νότιο τμήμα της λεκάνης βρίσκεται υπό ανάπτυξη η καλλιέργεια του ακτινιδίου. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι από ολόκληρη την έκταση της Στερεάς Ελλάδας, το ρύζι καλλιεργείται αποκλειστικά στην περιοχή αυτή. Κατά την περίοδο 1991-1999 παρουσιάστηκε μεγάλη μείωση της έκτασης με καπνό, πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη μείωση σε επίπεδο χώρας. Αντιθέτως η έκταση με βαμβάκι αυξήθηκε κατά πολύ μεγάλο ποσοστό.

Η ζωική παραγωγή στην περιοχή μελέτης είναι ιδιαίτερα ανεπτυγμένη με μεγαλύτερο αριθμό ζωικού κεφαλαίου στους Δήμους Λειανοκλαδίου, Τυμφρηστού, Γοργοποτάμου και Λαμίας και λιγότερο στους υπόλοιπους. Η αλιεία στην περιοχή είναι αρκετά αναπτυγμένη στον Μαλιακό κόλπο, με υψηλή συγκέντρωση μονάδων εντατικής ιχθυοκαλλιέργειας.

4.4. Περιοχές με σημαίνουσα περιβαλλοντική σημασία

Οι περιοχές που βρίσκονται εντός της ευρύτερης περιοχής μελέτης και εντάσσονται στο δίκτυο Natura 2000 είναι οι ακόλουθες:

- Η κοιλάδα και οι εκβολές του Σπερχειού – Μαλιακός κόλπος (SCI), με κωδικό GR2440002, με μέσο υψόμετρο 650m και έκταση 34000ha. Η σπουδαιότητα της περιοχής έγκειται στο ότι ο Μαλιακός υποστηρίζει σημαντική παραγωγή σε ψάρια και δίθυρα μαλάκια. Το Λιβάρι στο εσωτερικό τμήμα του κόλπου είναι ένα φυσικό θαλάσσιο πάρκο για την αναπαραγωγή των ψαριών. Οι Εκβολές του Σπερχειού προσφέρουν ιδανικές περιβαλλοντικές συνθήκες στην ορνιθοπανίδα, ενώ ο ποταμός υποστηρίζει και πολλά σημαντικά ενδημικά και προστατευόμενα είδη ψαριών.
- Το φαράγγι του Γοργοποτάμου (SCI), με κωδικό GR2440003, μέσο υψόμετρο 1000m και έκταση 542 ha. Η σπουδαιότητα της περιοχής έγκειται στη γεωμορφολογική δομή της και στο γεγονός ότι, λόγω της δύσκολης πρόσβασης, είναι φυσικά προστατευμένη και προσφέρει καταφύγιο στα αρπακτικά πτηνά.
- Ο Εθνικός Δρυμός Οίτης (SCI), με κωδικό GR2440004, μέσο υψόμετρο 1600 m και έκταση 7210ha. Η σπουδαιότητα του συγκεκριμένου Εθνικού Δρυμού είναι τεράστια. Τουλάχιστον 50 ελληνικά ενδημικά είδη φύονται στην περιοχή, με 8 από αυτά να προστατεύονται από την ελληνική νομοθεσία. Μεγάλης οικολογικής αξίας είναι μιας περιορισμένης έκτασης συστάδα μαύρης πεύκης, ενώ μεγάλο επιστημονικό ενδιαφέρον έχουν και τα σπήλαια του βουνού, με σημαντικότερο αυτό της Ανεμότρυπας.
- Όρος Καλλίδρομο (SCI), με κωδικό GR2440006, με έκταση 6685ha.
- Υγρότοπος εκβολών (δέλτα) Σπερχειού (SPA), με κωδικό GR2440005 και έκταση 3966ha. Σημαντική περιοχή για είδη χαρακτηριστικά των παραποτάμιων δασών, καλαμώνων και ανοικτών υδάτινων εκτάσεων. Περιλαμβάνει είδη παγκόσμιου ενδιαφέροντος, ενώ φιλοξενεί κάθε χειμώνα πάνω από 200000 υδρόβια πουλιά.
- Εθνικός Δρυμός Οίτης – κοιλάδα Ασωπού (SPA), με κωδικό GR2440007 και έκταση 13088ha (Economidis 1991).







Επίσης, στην περιοχή υπάρχουν αρκετά Καταφύγια Άγριας Ζωής, Εκτροφεία Θηραμάτων, Διατηρητέα Μνημεία της φύσης και Υγροβιότοποι, όπως ο υγροβιότοπος των Πηγών Αγίας Παρασκευής (Κωδ.244148000), το έλος της Σκάρφειας (Κωδ.244250000), καθώς και ο ποταμός (Κωδ.244253000) και η περιοχή του Δέλτα (Κωδ.244249000), τα οποία καθιστούν γενικότερα ολόκληρη την περιοχή της λεκάνης του ποταμού Σπερχειού ως μια ιδιαίτερα σημαντική περιοχή όσον αφορά στο περιβάλλον της.

4.5. Ιχθυοπανίδα

Στον Σπερχειό ποταμό εντοπίζονται τουλάχιστον 17 είδη ψαριών, από τα οποία τα 12 είναι επιβεβαιωμένα ιθαγενή είδη και μερικά πολύ σπάνια ενδημικά του ποταμού. Τα πιο γνωστά είδη είναι τα εξής:

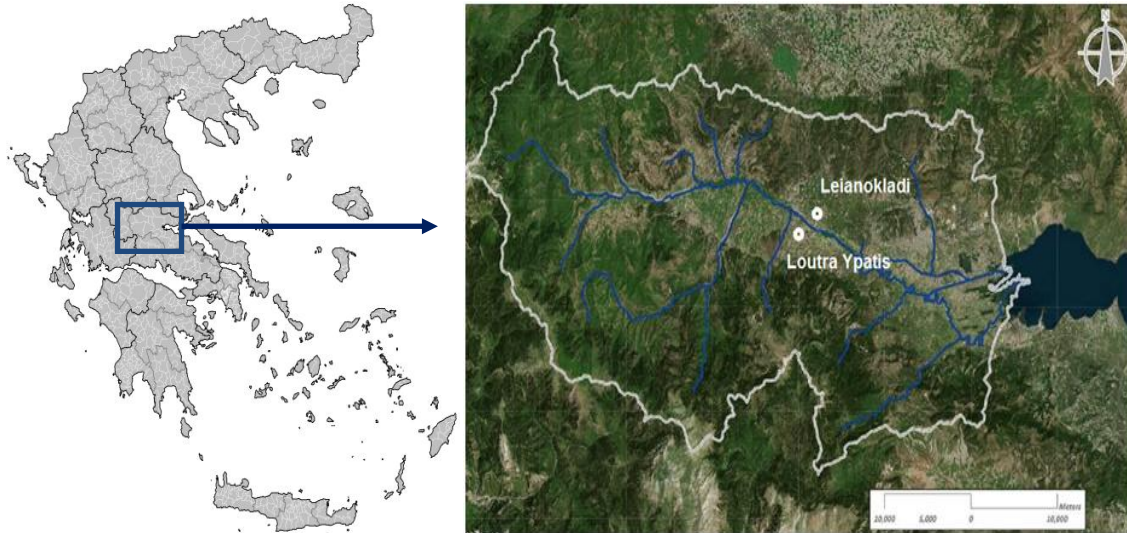
- *Squalius vardarensis* (Μακεδονικός Ποταμοκέφαλος),
- *Barbus sperchiensis* (Μπριάνα),
- *Pelagus marathonicus* (Αττικόψαρο),
- *Pungitius hellenicus* (Ελληνοπυγόστεος),
- *Rutilus* sp. *Sperchios* (Τσιρόνι Σπερχειού),
- *Alburnoides* sp. *Sperchios*.

Πίνακας 4.5-1: Είδη ιχθύων στον ποταμό Σπερχειό
(zogaris.blogspot.be)

Πρόέλευση	Είδος ιχθύος	Εικόνα (από Δ. Κουτσογιαννόπουλο)
Ενδημικά είδη στα νότια Βαλκάνια	<i>Squalius vardarensis</i>	
Ενδημικά είδη στην Ελλάδα	<i>Barbus sperchienses</i>	
	<i>Pelasgus marathonicus</i>	
Ενδημικά είδη στο Σπερχειό ποταμό	<i>Pungitius hellenicus</i>	
	<i>Rutilus sp. Sperchios</i>	
	<i>Alburnoides sp. Sperchios</i>	

4.6. Περιοχή διερεύνησης

Η περιοχή διερεύνησης αποτελεί το τμήμα του Σπερχειού ποταμού που βρίσκεται ανάμεσα στους οικισμούς Λουτρά Υπάτης και Λειανοκλάδι. Ανάντη της περιοχής αυτής υπάρχει Τοπικός Οργανισμός Εγγείων Βελτιώσεων και σημειώνονται σημαντικές απολήψεις νερού, κυρίως κατά τους θερινούς μήνες, με σκοπό την άρδευση των καλλιεργούμενων εκτάσεων. Ως αποτέλεσμα, η ποσότητα νερού που εξακολουθεί να ρέει στην κοίτη του ποταμού είναι ανεπαρκής για τη διατήρηση των ιχθυοπληθυσμών και το οικοσύστημα πλήττεται ανεπανόρθωτα.



Εικόνα 4.6-1: Περιοχή διερεύνησης (1)
(Google earth)



Εικόνα 4.6-2: Περιοχή διερεύνησης (2)
(Google Earth)

Το τμήμα του ποταμού που εξετάστηκε έχει συνολικό μήκος 197 μέτρα και βρίσκεται κατάντη της γέφυρας Λουτρών Υπάτης.



Εικόνα 4.6-3: Περιοχή διερεύνησης και γέφυρα Λουτρών Υπάτης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΕΔΙΟΥ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

5.1. Μετρήσεις τοπογραφικής αποτύπωσης του ανάγλυφου

Στις 28/1/2016 πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στην περιοχή διερεύνησης με όργανο GPS/GNSS Geomax-Zenith 20 και αποτυπώθηκαν 1255 σημεία (συντεταγμένες στο ΕΓΣΑ '87). Με δεδομένα τα σημεία αυτά αποτυπώθηκε το ανάγλυφο του εξεταζόμενου τμήματος του ποταμού.



*Εικόνα 5.1-1: Εξοπλισμός αποτύπωσης τοπογραφίας
(www.ecoflow.gr)*



*Εικόνα 5.1-2: Τοπογραφική αποτύπωση περιοχής
(Google earth)*

Για την υδραυλική προσομοίωση αποτυπώθηκαν 5 διατομές κάθετα στη ροή οι οποίες σημειώνονται με άσπρη γραμμή στην Εικόνα 5.1-2. Η ονομασία των διατομών υποδηλώνει τη χιλιομετρική τους θέση από την αρχή του πεδίου, όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.1-1: Χιλιομετρική θέση διατομών

ΔΙΑΤΟΜΗ	ΧΙΛΙΟΜΕΤΡΙΚΗ ΘΕΣΗ (m)
Δ0	0,0
Δ50	50,0
Δ154	154,0
Δ163	163,0
Δ197	197,0

Η διατομή Δ0 βρίσκεται στο ανάντη όριο του υπολογιστικού πεδίου (εισροή), ενώ η Δ197 βρίσκεται στο κατάντη όριο του υπολογιστικού πεδίου (εκροή).

5.2. Μετρήσεις βαθών και ταχυτήτων ροής

Σε 4 από τις 5 προαναφερθείσες διατομές (Δ0, Δ50, Δ154, Δ163) πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις βαθών και ταχυτήτων ροής. Σε αποστάσεις που ήταν γνωστές από την αρχή κάθε διατομής με τη χρήση μετροταινίας, μετρήθηκαν ταυτόχρονα τα βάθη και οι ταχύτητες της ροής, με σταδία που έφερε προσημειωμένες ενδείξεις βάθους και με μιλίσκο, αντίστοιχα. Σε κάθε περίπτωση καταβάλλεται προσπάθεια οι μετρήσεις ροής να γίνονται σε σημεία στα οποία δεν υπάρχουν εμπόδια, ή άλλοι σχηματισμοί, που προκαλούν τοπικές μεταβολές στην ταχύτητα ροής του ποταμού.

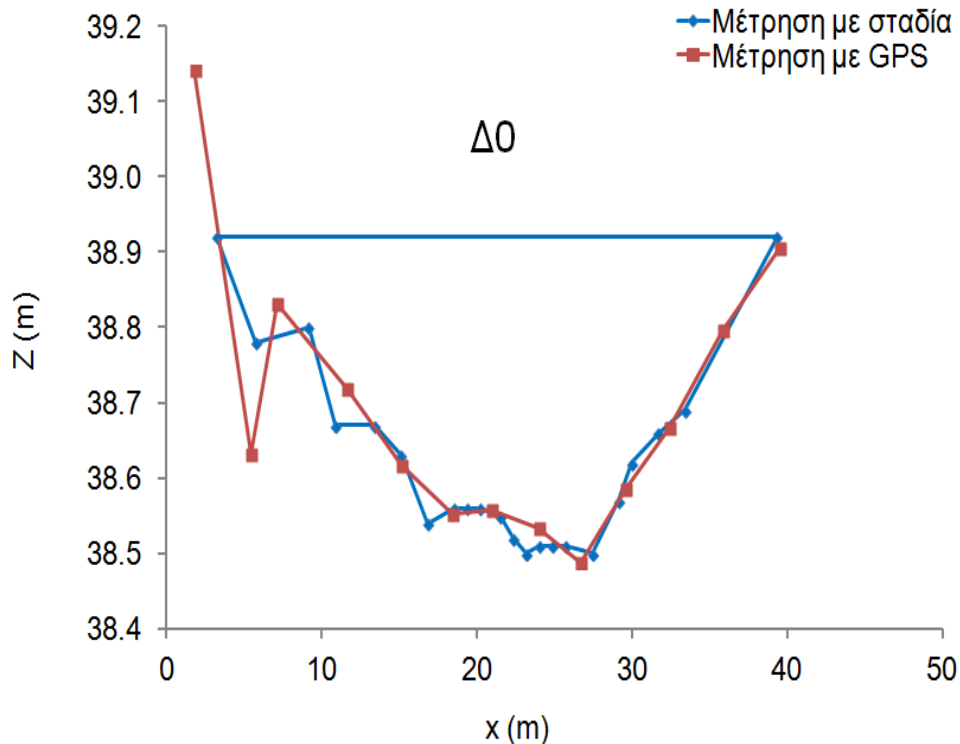
Ο μιλίσκος (ψηφιακό ροόμετρο C2 της ΟΤΤ) είναι μια έλικα που εμβαπτίζεται στη διατομή του υδατορεύματος στο συγκεκριμένο σημείο και περιστρέφεται υπό την επίδραση της ροής, με τυπική διάταξη που παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.2-1. Η προσπέλαση και μέτρηση μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους ανάλογα με τις συνθήκες ροής. Στο Σπερχειό ποταμό τα νερά ήταν σχετικά ρηχά και προσβάσιμα στις 4 μετρηθείσες διατομές, οπότε η όλη διαδικασία έγινε με υδροβασία και η ανόρθωση του μιλίσκου έγινε με το χέρι. Αναγκαία προϋπόθεση για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων είναι ο σωστός προσανατολισμός, οριζόντιος και παράλληλος με τη διεύθυνση της ροής, του άξονα περιστροφής του μιλίσκου.

Η ταχύτητα σε κάθε σημείο της κατακορύφου προκύπτει ως γραμμική συνάρτηση της συχνότητας περιστροφής της έλικας στο σημείο αυτό. Ένα θέμα που χρήζει προσοχής είναι σε ποιο βάθος πρέπει να βυθιστεί ο μιλίσκος, έτσι ώστε η σημειακή ταχύτητα που θα μετρηθεί να είναι αντιπροσωπευτική για τη συγκεκριμένη κατακόρυφο και άρα για το αντίστοιχο τμήμα και διατομή, αφού είναι γνωστό ότι η τιμή της ταχύτητας αυξάνεται με την απόσταση από το οριακό στρώμα. Θεωρείται ότι η μετρούμενη σημειακή ταχύτητα είναι πιο αντιπροσωπευτική της μέσης σε απόσταση από την επιφάνεια ίση με το 60% του βάθους, όταν αυτό δεν υπερβαίνει το βάθος των 0,76m. Για το λόγο αυτό, στις μετρήσεις ταχύτητας στον Σπερχειό ποταμό ο μιλίσκος βυθίστηκε σε βάθος ίσο με το 60% του συνολικού.

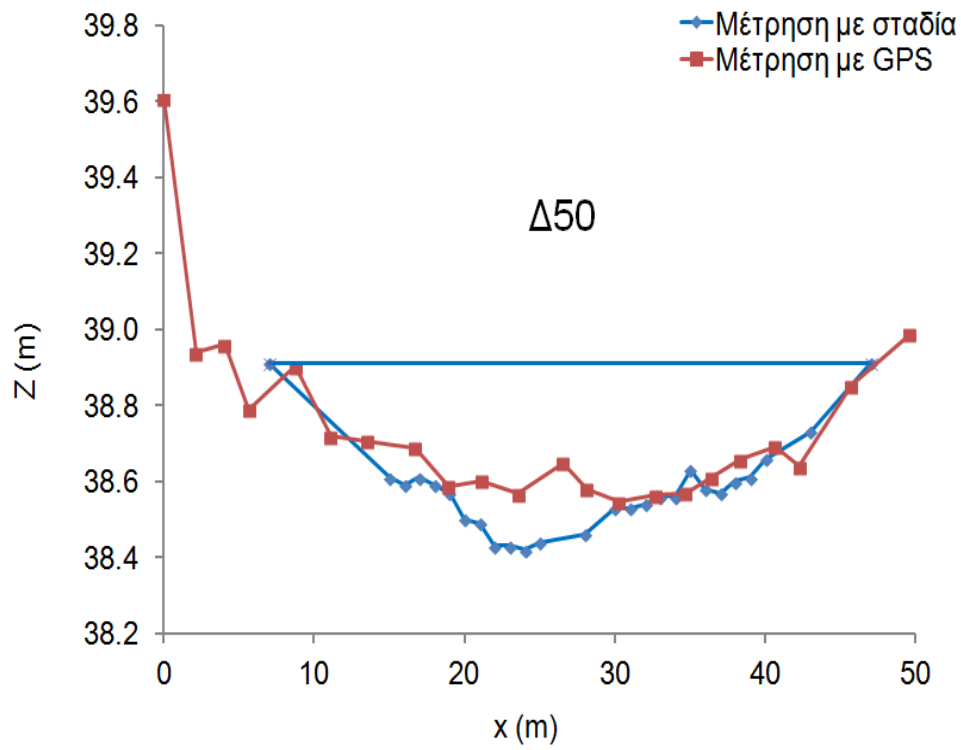


Εικόνα 5.2-1: Μυλίσκος προσαρμοσμένος σε διαβαθμισμένη ράβδο
(www.valeport.co.uk)

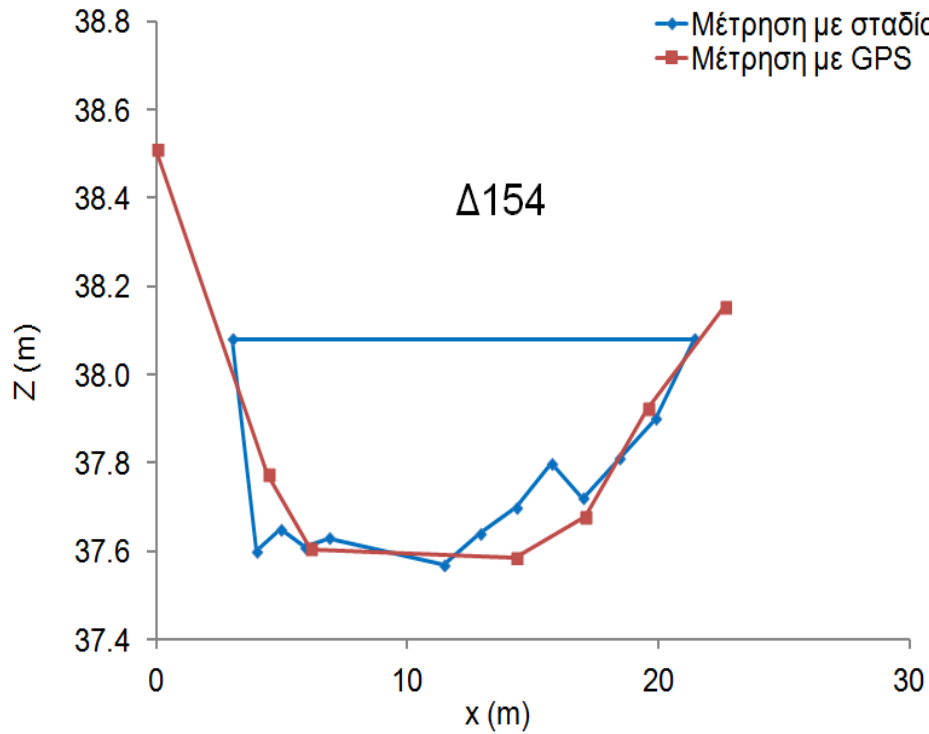
Οι μετρήσεις των βαθών στις 4 διατομές μπορούν να απεικονίσουν τη μορφή του πυθμένα. Συγκρίνοντας, λοιπόν, για κάθε διατομή τη μορφή του πυθμένα από τις μετρήσεις βαθών και από την τοπογραφική αποτύπωση με όργανο GPS/GNSS Geomax-Zenith 20, γίνεται επιβεβαίωση της γεωμετρίας. Με τον τρόπο αυτό, επίσης, μπορούν να εκτιμηθούν τα σφάλματα που έγιναν κατά τις μετρήσεις. Παρακάτω παρουσιάζεται ο πυθμένας σε κάθε διατομή και με τους 2 τρόπους ύστερα από επεξεργασία των δεδομένων.



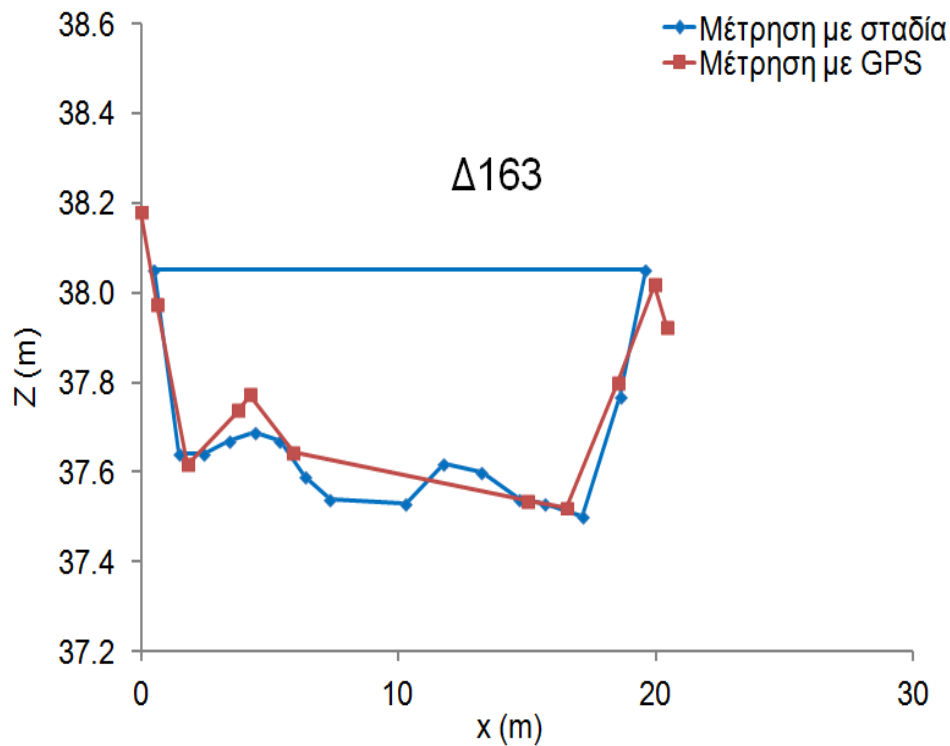
Εικόνα 5.2-2: Επιβεβαίωση γεωμετρίας διατομής Δ0



Εικόνα 5.2-3: Επιβεβαίωση γεωμετρίας διατομής Δ50



Εικόνα 5.2-4: Επιβεβαίωση γεωμετρίας διατομής Δ154



Εικόνα 5.2-5: Επιβεβαίωση γεωμετρίας διατομής Δ163

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι μόνο στη διατομή Δ50 οι μετρήσεις δεν ταιριάζουν ικανοποιητικά, ενώ στις υπόλοιπες διατομές υπάρχει ικανοποιητική αντιστοιχία. Αξίζει να σημειωθεί ότι η επιβεβαίωση της γεωμετρίας ήταν αρκετά δύσκολη στην περίπτωση μας, καθώς οι μετρήσεις βαθών και ταχυτήτων σε κάθε διατομή δεν έγιναν ταυτόχρονα με την αποτύπωσή της.

5.3. Υπολογισμός παροχής

Από την επεξεργασία των μετρήσεων βαθών και ταχυτήτων υπολογίσθηκε σε κάθε διατομή η παροχή του ποταμού με βάση την εφαρμογή της Εξίσωσης της Συνέχειας:

$$Q = V \times A \quad (5.3-1)$$

όπου:

Q (m³/s) η παροχή,
 V (m/s) η μέση ταχύτητα της διατομής και
 A (m²) το εμβαδόν της υγρής διατομής.

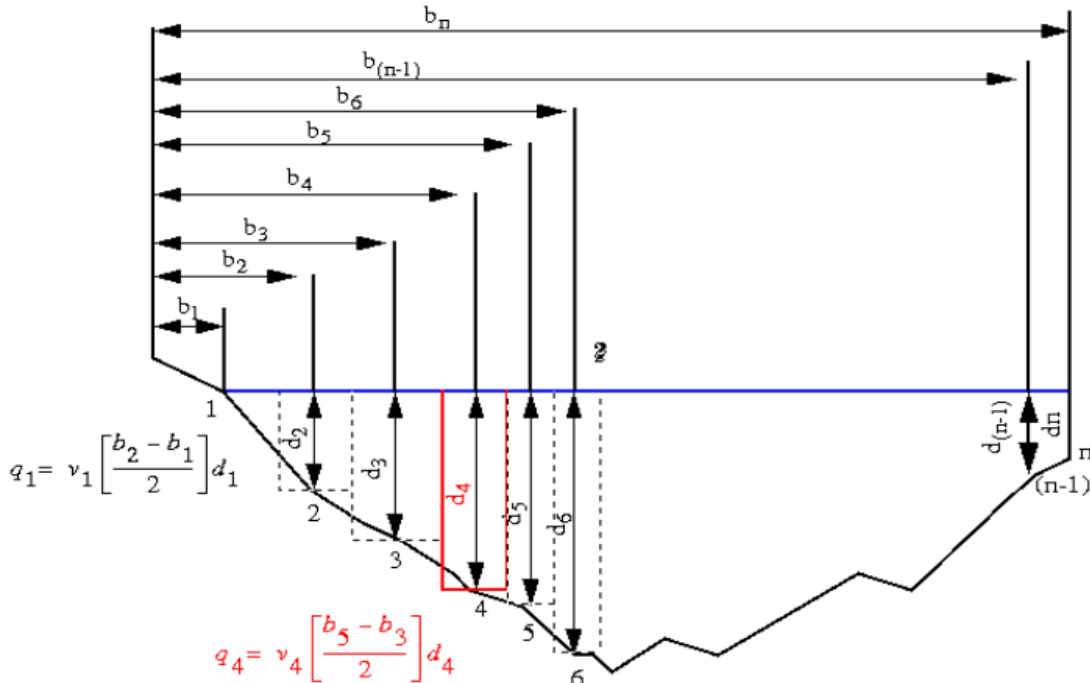
Για την εφαρμογή της Εξίσωσης της Συνέχειας χρησιμοποιούνται δύο μέθοδοι (Shaw 1984, Τσακίρης 1995) : η μέθοδος του μέσου τμήματος (mean-section method) και η μέθοδος διάμεσου τμήματος (mid-section method). Στην περίπτωση μας χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος διάμεσου τμήματος, η οποία συνήθως προτιμάται για τον υπολογισμό της παροχής.

Σύμφωνα με τη μέθοδο διάμεσου τμήματος, η κάθε διατομή χωρίζεται νοητά σε N ορθογωνικά τμήματα. Η μία διάσταση του κάθε τμήματος είναι το μετρημένο βάθος ροής d_i , ενώ η άλλη διάσταση είναι ίση με την ημιδιαφορά των αποστάσεων από την αρχή της διατομής b_{i+1} και b_{i-1} . Στο μέσο κάθε τμήματος η μέση ταχύτητα έχει μετρηθεί και είναι ίση με V_i . Έτσι, σε κάθε διατομή υπολογίζεται η παροχή Q ως εξής:

$$Q = \sum q_i = \sum (V_i \times A_i) = \sum_{i=1}^{N-1} \left[V_i \times d_i \times \frac{(b_{i+1} - b_{i-1})}{2} \right] \quad (5.3-2)$$

όπου:

d_i (m) το βάθος ροής και
 b_i (m) η απόσταση από την αρχή της διατομής.



Εικόνα 5.3-1: Χωρισμός τμημάτων υγρής διατομής υδατορεύματος για την εφαρμογή της μεθόδου διάμεσου τμήματος (kula.geol.wvu.edu)

Οι παροχές που υπολογίστηκαν με την παραπάνω μέθοδο στις 4 διατομές δεν προέκυψαν ίσες λόγω σφαλμάτων κατά τις μετρήσεις. Σφάλματα της τάξης 5%-8% είναι δικαιολογημένα σε μετρήσεις πεδίου και οφείλονται είτε σε αστάθμητους παράγοντες, είτε στην ακρίβεια των οργάνων, είτε στον ανθρώπινο παράγοντα. Για παράδειγμα, η λειτουργία του μιλίσκου μπορεί να επηρεαστεί από διάφορα στερεά αντικείμενα (πχ. κλαδιά, χαλίκια) που συμπαρασύρονται από τη ροή σε συνθήκες τύρβης και προσπίπτουν πάνω στο όργανο.

Τελικά, έπειτα από επεξεργασία των μετρήσεων για κάθε διατομή, η παροχή για τις 28/1/2016 εκτιμήθηκε 8,10 m³/s.

5.4. Καμπύλη στάθμης-παροχής

Στην περιοχή διερεύνησης έχουν πραγματοποιηθεί μετρήσεις πεδίου στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος «ΚΡΗΠΙΣ»: 'Ανάπτυξη συστήματος ολοκληρωμένης διαχείρισης λεκάνης απορροής και της συνδεδεμένης παράκτιας και θαλάσσιας ζώνης', στην περιοχή του Σπερχειού ποταμού και του Μαλιακού Κόλπου. Το ερευνητικό έργο αυτό ξεκίνησε το Ελληνικό Κέντρο Θαλασσιών Ερευνών (ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε.) το 2014 και από τις μέχρι τώρα μετρήσεις το εύρος

των παροχών στην περιοχή διερεύνησης εκτιμάται από 0,03 έως 9,98 m³/s. Οι μετρήσεις παροχής πραγματοποιούνταν στη διατομή Δ154. Με χρήση των δεδομένων αυτών δημιουργήθηκε η καμπύλη στάθμης-παροχής για τη διατομή Δ154.

Η γενική μορφή της καμπύλης στάθμης-παροχής είναι η εξής:

$$Q = a \cdot (H - Z_b)^b \quad (5.4-1)$$

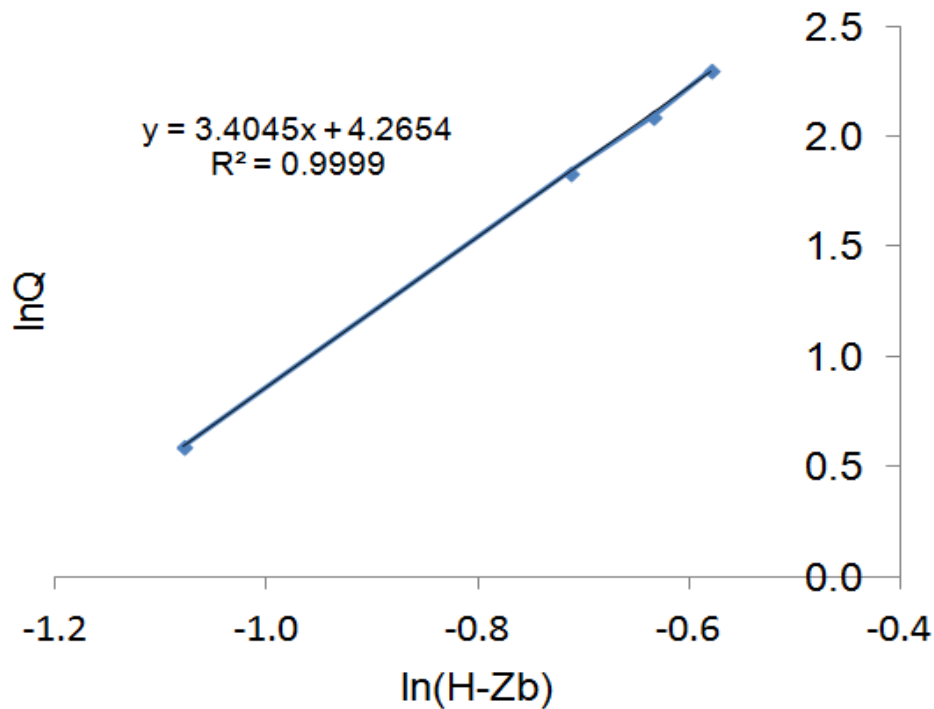
όπου:

H (m) η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας,
 Z_b (m) το υψόμετρο πυθμένα και
 α, b σταθερές της εξίσωσης.

Η λογαριθμική έκφραση της παραπάνω εξίσωσης είναι η εξής:

$$\ln Q = b \cdot \ln(H - Z_b) + \ln a \quad (5.4-2)$$

Για τον υπολογισμό των σταθερών α, b αξιοποιούνται τα διαθέσιμα δεδομένα και δημιουργείται το διάγραμμα που φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 5.4-2: Λογαριθμική έκφραση της καμπύλης στάθμης παροχής

Από το διάγραμμα συμπεραίνουμε ότι α=71,1934 και b=3,4045. Συνεπώς, η εξίσωση της καμπύλης στάθμης-παροχής για την διατομή Δ154 είναι η εξής:

$$Q = 71.19 \cdot (H - Z_b)^{3.40} \quad (5.4-3)$$

Σύμφωνα με την τελική σχέση, μπορεί να υπολογισθεί η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας στη διατομή Δ154 για κάθε τιμή της παροχής.

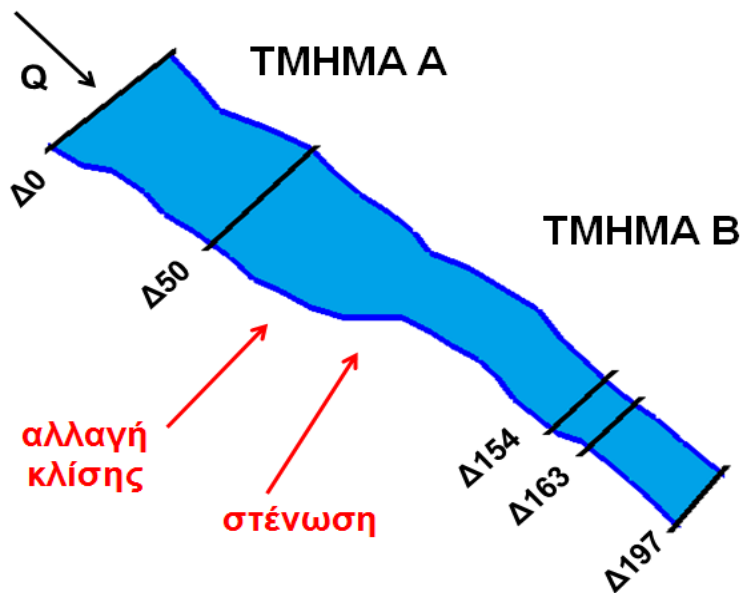
5.5. Προσδιορισμός τύπου υποστρώματος

Ύστερα από επιτόπια επισκόπηση του υποστρώματος κατά μήκος του Σπερχειού ποταμού στην περιοχή διερεύνησης, παρατηρήθηκε ότι το ίζημα του ποταμού αποτελείται ως επί το πλείστον από κροκάλες με διάμετρο που κυμαίνεται από 3 έως 10 εκατοστά.



Εικόνα 5.5-1: Κροκάλες στην περιοχή διερεύνησης

Κρίθηκε, ωστόσο, σκόπιμος ο διαχωρισμός της περιοχής διερεύνησης σε 2 τμήματα ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά υποστρώματος που παρουσιάζει το καθένα.



Εικόνα 5.5-2: Διαχωρισμός περιοχής διερεύνησης ανάλογα με τον τύπο υποστρώματος

ΤΜΗΜΑ Α

Το τμήμα Α αποτελεί το ανάντη τμήμα της περιοχής διερεύνησης και έχει μήκος περίπου 75 μέτρα (από $x=0$ έως $x=75\text{m}$). Το μεγάλο πλάτος (40 μέτρα) και η ήπια κλίση καθιστούν το ποταμό σε αυτό το τμήμα γενικά βατό, καθώς παρουσιάζει μικρότερες ταχύτητες ροής από το κατάντη τμήμα (τμήμα Β). Το τέλος του τμήματος Α προσδιορίζεται από την ύπαρξη μιας στένωσης.



Εικόνα 5.5-3: Στένωση ποταμού

Χαρακτηριστικό του τμήματος Α είναι η παρουσία πρόσφατης συγκολλητικής ιλύος (Εικόνα 5.6-4) η οποία καθιζάνει και συσσωρεύεται κυρίως σε τμήματα πλάτους 7-10 μέτρων στις όχθες του ποταμού, καθώς στα σημεία αυτά οι ταχύτητες είναι μικρές ή ακόμα και μηδενικές (στάσιμα νερά). Η ιλύς αυτή πιθανότατα οφείλεται σε παλαιότερες πλημμύρες που προκλήθηκαν από έντονες βροχοπτώσεις και παρέσυραν λεπτόκοκκο ίζημα προς τα κατάντη.



Εικόνα 5.5-3: Συγκολλητική ιλύς στο τμήμα Α

Παρατηρείται, επίσης, σποραδική εμφάνιση ογκολίθων, καθώς και χαμηλή βλάστηση σε μεμονωμένα σημεία του τμήματος A, τα οποία προβάλλουν αντίσταση στη ροή.



Εικόνα 5.5-4: Ογκόλιθοι και χαμηλή βλάστηση εντός του ποταμού στο τμήμα A

ΤΜΗΜΑ Β

Η έναρξη του τμήματος Β σηματοδοτείται από την εμφάνιση της στένωσης. Πρόκειται για τμήμα μήκους περίπου 122 μέτρων με εντονότερη κλίση και ορμητικά νερά που κατέστησαν τις μετρήσεις πεδίου στις 28/1/2016 αρκετά δύσκολες. Το πλάτος του ποταμού μετά τη στένωση είναι περίπου 20 μέτρα.

Οι μεγάλες ταχύτητες ροής που αναπτύσσονται στο κομμάτι αυτό του ποταμού δεν ευνοούν την καθίζηση λεπτόκοκκου υλικού. Οι όχθες είναι πολύ απότομες και δημιουργούν κατακόρυφα μέτωπα. Στο τμήμα Β δεν παρατηρούνται ογκόλιθοι ή βλάστηση εντός του ποταμού.

5.6. Υπολογισμός συντελεστή τριβής

Για την προσομοίωση της τριβής στον πυθμένα επιλέγεται η εξίσωση του Manning, σύμφωνα με την οποία ισχύει:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} J^{1/2} \quad (5.6-1)$$

όπου:

- n ($s/m^{1/3}$) ο συντελεστής τριβής κατά Manning,
- V (m/s) η μέση ταχύτητα της ροής,
- R (m) η υδραυλική ακτίνα της διατομής και
- J η κατά μήκος κλίση του πυθμένα του αγωγού.

Η επιλογή κατάλληλου συντελεστή Manning διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην ορθή λειτουργία του μοντέλου. Σύμφωνα με τους Chow et al (1988) μπορεί να γίνει μια προσέγγιση

του συντελεστή Manning ενός ποταμού, ή τμήματός του, βάσει της εικόνας που παρουσιάζει (ποιότητα πρανών, ύπαρξη βλάστησης κτλ).

Ο Cowan (1956) ανέπτυξε μια διαδικασία για την εκτίμηση της επίδρασης των παραπάνω παραγόντων στον προσδιορισμό της τιμής του συντελεστή n για ένα κανάλι. Η τιμή του n μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση:

$$n = (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \times m \quad (5.6-2)$$

όπου:

- n_b μια βασική τιμή του συντελεστή Manning για ευθύγραμμο, ομοιόμορφο και λείο αγωγό,
- n_1 ένας συντελεστής που λαμβάνει υπόψη τις ανωμαλίες του εδάφους στην κοίτη του ποταμού,
- n_2 ένας συντελεστής που λαμβάνει υπόψη τη μεταβολή του σχήματος και του μεγέθους της διατομής του ποταμού,
- n_3 ένας συντελεστής που λαμβάνει υπόψη τα εμπόδια στη ροή,
- n_4 ένας συντελεστής που λαμβάνει υπόψη τη βλάστηση στη ροή και
- m ένας συντελεστής διόρθωσης που λαμβάνει υπόψη τους μαιανδρισμούς του ποταμού.

Οι επιτρεπτές τιμές των παραπάνω συντελεστών φαίνονται στους πίνακες που ακολουθούν.

Πίνακας 5.6-1: Βασικές τιμές συντελεστή Manning (n_b) (USGS)

Bed Material	Median Size of bed material (in millimeters)	Base n Value	
		Straight Uniform Channel ¹	Smooth Channel ²
Sand Channels			
Sand ³	0.2	0.012	--
	.3	.017	--
	.4	.020	--
	.5	.022	--
	.6	.023	--
	.8	.025	--
	1.0	.026	--
	Stable Channels and Flood Plains		
Concrete	--	0.012-0.018	0.011
Rock Cut	--	--	.025
Firm Soil	--	0.025-0.032	.020
Coarse Sand	1-2	0.026-0.035	--
Fine Gravel	--	--	.024
Gravel	2-64	0.028-0.035	--
Coarse Gravel	--	--	.026
Cobble	64-256	0.030-0.050	--
Boulder	>256	0.040-0.070	--
[Modified from Aldridge & Garret, 1973, Table 1 --No data			
1Benson & Dalrymple --No data			
2 For indicated material; Chow(1959)			
3 Only For Upper regime flow where grain roughness is predominant			

Πίνακας 5.6-2: Συντελεστής n_1
(USGS)

Channel Conditions	n Value Adjustment ¹	Example
Degree of Irregularity (n_1)		
Smooth	0.000	Compares to the smoothest channel attainable in a given bed material.
Minor	0.001-0.005	Compares to carefully degraded channels in good condition but having slightly eroded or scoured side slopes.
Moderate	0.006-0.010	Compares to dredged channels having moderate to considerable bed roughness and moderately sloughed or eroded side slopes.
Severe	0.011-0.020	Badly sloughed or scalloped banks of natural streams; badly eroded or sloughed sides of canals or drainage channels; unshaped, jagged, and irregular surfaces of channel

Πίνακας 5.6-3: Συντελεστής n_2
(USGS)

Channel Conditions	n Value Adjustment ¹	Example
Gradual	0.000	Size and shape of channel cross sections change gradually.
Alternating occasionally	0.001-0.005	Large and small cross sections alternate occasionally, or the main flow occasionally shifts from side to side owing to changes in cross-sectional shape.
Alternating frequently	0.010-0.015	Large and small cross sections alternate frequently, or the main flow frequently shifts from side to side owing to changes in cross-sectional shape.

Πίνακας 5.6-4: Συντελεστής n_3
(USGS)

Channel Conditions	n Value Adjustment ¹	Example
Negligible	0.000-0.004	A few scattered obstructions, which include debris deposits, stumps, exposed roots, logs, piers, or isolated boulders, that occupy less than 5 percent of the cross-sectional area.
Minor	0.005-0.015	Obstructions occupy less than 15 percent of the cross-sectional area, and the spacing between obstructions is such that the sphere of influence around one obstruction does not extend to the sphere of influence around another obstruction. Smaller adjustments are used for curved smooth-surfaced objects than are used for sharp-edged angular objects.
Appreciable	0.020-0.030	Obstructions occupy from 15 percent to 50 percent of the cross-sectional area, or the space between obstructions is small enough to cause the effects of several obstructions to be additive, thereby blocking an equivalent part of a cross section.
Severe	0.040-0.050	Obstructions occupy more than 50 percent of the cross-sectional area, or the space between obstructions is small enough to cause turbulence across most of the cross section.

**Πίνακας 5.6-5: Συντελεστής n_4
(USGS)**

Channel Conditions	n Value Adjustment ¹	Example
Small	0.002-0.010	Dense growths of flexible turf grass, such as Bermuda, or weeds growing where the average depth of flow is at least two times the height of the vegetation; supple tree seedlings such as willow, cottonwood, arrowhead, or saltcedar growing where the average depth of flow is at least three times the height of the vegetation.
Medium	0.010-0.025	Turf grass growing where the average depth of flow is from one to two times the height of the vegetation; moderately dense stemmy grass, weeds, or tree seedlings growing where the average depth of flow is from two to three times the height of the vegetation; brushy, moderately dense vegetation, similar to 1-to-2-year-old willow trees in the dormant season, growing along the banks, and no significant vegetation is evident along the channel bottoms where the hydraulic radius exceeds 0.61 meters.
Large	0.025-0.050	Turf grass growing where the average depth of flow is about equal to the height of the vegetation; 8-to-10-years-old willow or cottonwood trees intergrown with some weeds and brush (none of the vegetation in foliage) where the hydraulic radius exceeds 0.60 m; bushy willows about 1 year old intergrown with some weeds along side slopes (all vegetation in full foliage), and no significant vegetation exists along channel bottoms where the hydraulic radius is greater than 0.61 meters.
Very Large	0.050-0.100	Turf grass growing where the average depth of flow is less than half the height of the vegetation; bushy willow trees about 1 year old intergrown with weeds along side slopes (all vegetation in full foliage), or dense cattails growing along channel bottom; trees intergrown with weeds and brush (all vegetation in full foliage).

**Πίνακας 5.6-6: Συντελεστής m
(USGS)**

Channel Conditions	n Value Adjustment ¹	Example
Minor	1.00	Ratio of the channel length to valley length is 1.0 to 1.2.
Appreciable	1.15	Ratio of the channel length to valley length is 1.2 to 1.5.
Severe	1.30	Ratio of the channel length to valley length is greater than 1.5.

Λόγω των διαφορετικών χαρακτηριστικών των 2 τμημάτων του ποταμού που παρατέθηκαν στο 5.5, σε κάθε τμήμα χρειάζεται να προσδιορισθεί διαφορετικός συντελεστής τριβής με βάση τη μεθοδολογία που περιγράφηκε.

ΤΜΗΜΑ Α

Θεωρούμε μια αντιπροσωπευτική διατομή του τμήματος Α και με τη βοήθεια των παραπάνω πινάκων υπολογίζουμε το συντελεστή Manning ακολουθώντας την εξής διαδικασία:

- Εύρεση n_b :

Η διατομή χωρίζεται σε 3 τμήματα. Το πρώτο τμήμα, πλάτους 10 μέτρων, βρίσκεται στην αριστερή όχθη του ποταμού και αποτελείται αποκλειστικά από ιλύ. Το δεύτερο τμήμα, που ουσιαστικά αποτελεί την κύρια κοίτη, έχει πλάτος 20 μέτρα και αποτελείται κυρίως από κροκάλες, αλλά και από μικρό ποσοστό ιλύος. Τέλος, το τρίτο τμήμα έχει πλάτος 7 μέτρα και βρίσκεται στην δεξιά όχθη του ποταμού, και αποτελείται αποκλειστικά από ιλύ, ομοίως με το πρώτο τμήμα της διατομής. Σύμφωνα με τον Πίνακα 5.6-1, ο βασικός συντελεστής για ιλύ είναι 0,020-0,032, ενώ για κροκάλες είναι 0,030-0,050. Συνεπώς, θα υπολογίσουμε τον ολικό βασικό συντελεστή n_b χρησιμοποιώντας κάποιους αντιπροσωπευτικούς συντελεστές

$$\text{βαρύτητας για κάθε τμήμα: } n_b = \frac{10}{40} n_{b1} + \frac{23}{40} n_{b2} + \frac{7}{40} n_{b3} \Rightarrow n_b = 0,026 - 0,042 .$$

- Εύρεση n_1 :

Η κοίτη του ποταμού στο τμήμα Α δεν παρουσιάζει κάποια ανωμαλία, άρα $n_1=0$.

- Εύρεση n_2 :

Δεν παρατηρούνται απότομες μεταβολές στο μέγεθος και στο σχήμα των διατομών στο τμήμα Α, οπότε $n_2=0$.

- Εύρεση n_3 :

Στο τμήμα Α παρατηρούνται λίγοι ογκόλιθοι στην κοίτη του ποταμού, οι οποίοι προβάλλουν αντίσταση στη ροή. Συνεπώς, $n_3=0-0,004$.

- Εύρεση n_4 :

Στο τμήμα Α παρατηρείται χαμηλή βλάστηση σε ορισμένα σημεία, άρα $n_4=0.002-0.010$.

- Εύρεση m :

Το τμήμα Α δεν παρουσιάζει μαιανδρισμούς, άρα $m=1$.

Με βάση τα παραπάνω και χρησιμοποιώντας τη σχέση (5.6-2), υπολογίζουμε πως ο συντελεστής Manning για το τμήμα Α κυμαίνεται από 0,028 έως 0,056.

ΤΜΗΜΑ Β

Θεωρούμε μια αντιπροσωπευτική διατομή του τμήματος Β και με τη βοήθεια των παραπάνω πινάκων υπολογίζουμε το συντελεστή Manning ακολουθώντας την εξής διαδικασία:

- Εύρεση n_b :

Το τμήμα Β καλύπτεται από κροκάλες, άρα $n_b=0,030-0,050$.

- Εύρεση n_1 :

Οι όχθες του ποταμού στο τμήμα Β είναι απότομες, άρα $n_1=0,001-0,005$.

- Εύρεση n_2 :

Δεν παρατηρούνται απότομες μεταβολές στο μέγεθος και στο σχήμα των διατομών στο τμήμα Β, οπότε $n_2=0$.

- Εύρεση n_3 :

Στο τμήμα Β δεν παρατηρούνται εμπόδια εντός του ποταμού. Συνεπώς, $n_3=0-0,004$.

- Εύρεση n_4 :

Στο τμήμα Β δεν παρουσιάζεται βλάστηση εντός του ποταμού, άρα $n_4=0$.

- Εύρεση m :

Το τμήμα Β δεν παρουσιάζει μαιανδρισμούς, άρα $m=1$.

Με βάση τα παραπάνω και χρησιμοποιώντας τη σχέση (5.6-2), υπολογίζουμε πως ο συντελεστής Manning για το τμήμα Α κυμαίνεται από 0,031 έως 0,059.

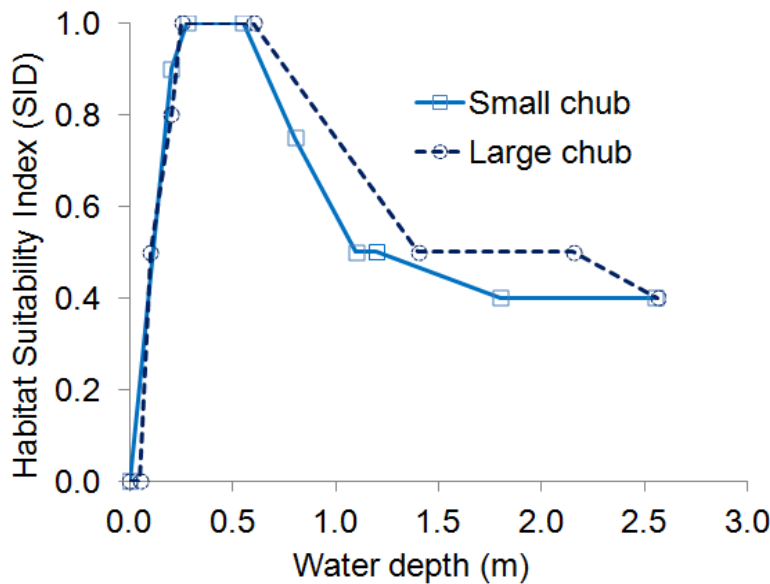
Οι τιμές αυτές των συντελεστών Manning για τα 2 τμήματα θα χρησιμοποιηθούν στην βαθμονόμηση του υδροδυναμικού μοντέλου.

5.7. Καμπύλες καταλληλότητας εξεταζόμενου ιχθύος

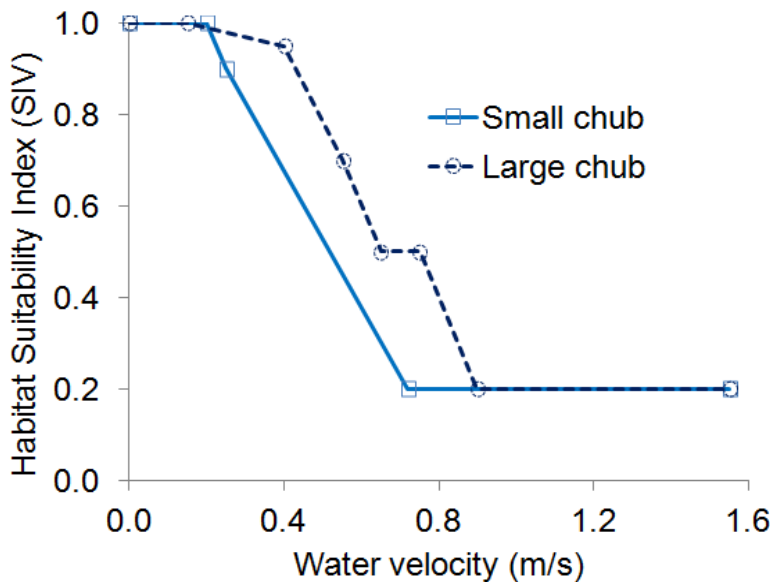
Από τα είδη που υπάρχουν στην περιοχή διερεύνησης (Κεφάλαιο 4.5), για την παρούσα διπλωματική εργασία επιλέχθηκε ο Ποταμοκέφαλος (*Squalius vardarensis*, ή κοινώς Chub), καθώς κρίθηκε με βάση τη βιβλιογραφία και τη γνώμη των ειδικών ως αντιπροσωπευτικός

δείκτης της περιβαλλοντικής ροής. Συγκεκριμένα, εξετάστηκαν 2 μεγέθη του Ποταμοκέφαλου: α) μικρό μέγεθος (έως 10cm), β) μεγάλο μέγεθος (πάνω από 10cm).

Οι καμπύλες καταλληλότητας που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή του μοντέλου καταλληλότητας ενδιαιτήματος αναπτύχθηκαν στα πλαίσια του ερευνητικού έργου ECOFLOW: 'Σύστημα εκτίμησης της αποδεκτής οικολογικής παροχής σε ποτάμια της Ελλάδας', που διεξάγεται από το Ελληνικό Κέντρο Θαλασσίων Ερευνών (ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε.). Η συλλογή δεδομένων για τη δημιουργία των καμπυλών αυτών πραγματοποιήθηκε στον ποταμό Εύηνο, ωστόσο μπορούν να αξιοποιηθούν και για άλλους ποταμούς με παρόμοια υδρομορφολογικά χαρακτηριστικά, εκ των οποίων και ο Σπερχειός.



Εικόνα 5.7-1: Καμπύλες καταλληλότητας βάθους για τα 2 μεγέθη Ποταμοκέφαλου (Martínez-Capel and Muñoz-Mas 2014, Papadaki et al. 2015)



Εικόνα 5.7-2: Καμπύλες καταλληλότητας ταχύτητας για τα 2 μεγέθη Ποταμοκέφαλου (Martínez-Capel and Muñoz-Mas 2014, Papadaki et al. 2015)

Οι καμπύλες καταλληλότητας για τα 2 μεγέθη του Ποταμοκέφαλου εκφράζουν τις προτιμήσεις τους στα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά του πεδίου και μπορούν να προβλέψουν την απόκρισή τους στην εκάστοτε μεταβολή των χαρακτηριστικών αυτών.

Όπως φαίνεται στις Καμπύλες Καταλληλότητας, το καταλληλότερο βάθος και για τα 2 μεγέθη Ποταμοκέφαλου κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0,25m-0,60m, ενώ γενικά επιλέγουν μικρές ταχύτητες (έως 0,20m/s περίπου). Συγκεκριμένα, το μικρό μέγεθος του ιχθύος ενδιαφέροντος θεωρεί ως καταλληλότερες τις περιοχές με τιμές βαθών και ταχυτήτων που κυμαίνονται μεταξύ 0,28-0,55 m και 0-0,20 m/s, αντίστοιχα, ενώ το μεγάλο μέγεθος 0,25-0,60 m και 0-0,15 m/s, αντίστοιχα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

6.1. Δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος

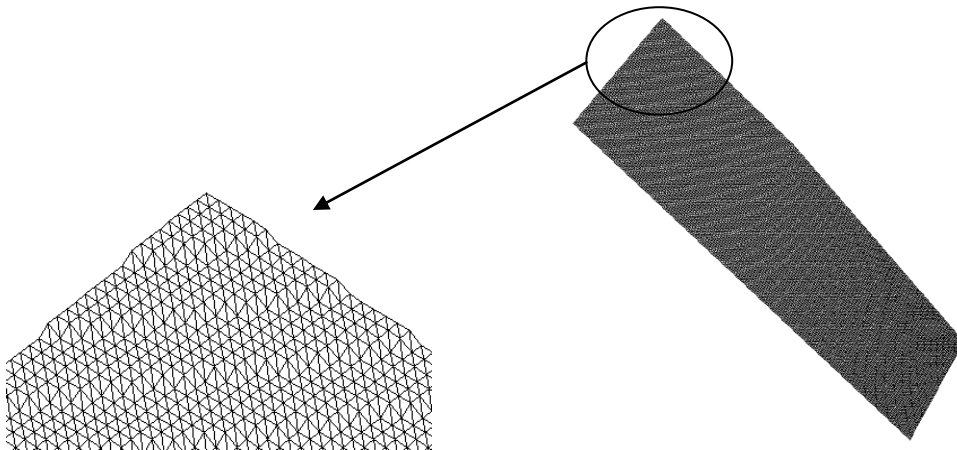
Η κατασκευή του πλέγματος έχει ως στόχο την απεικόνιση της τρισδιάστατης γεωμετρίας του ποταμού στο εξεταζόμενο τμήμα. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται οι συντεταγμένες των σημείων που αποτυπώθηκαν κατά τις μετρήσεις πεδίου (Κεφάλαιο 5.2). Για να λάβει, δηλαδή, κάθε κόμβος του πλέγματος συντεταγμένες (X, Y, Z), γίνεται γραμμική παρεμβολή στο λογισμικό Bluekenue (αναλυτικότερα στο Παράρτημα) μεταξύ των συντεταγμένων των αποτυπωμένων σημείων.

Η δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος αποτελεί μια διαδικασία χρονοβόρα, όμως ιδιαίτερα σημαντική καθώς η ακρίβεια των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τη χρήση CFD (Computational Fluid Dynamics) εξαρτώνται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την ποιότητα του πλέγματος. Ένα αραιό πλέγμα, δηλαδή, μπορεί να οδηγήσει σε ανακριβή αποτελέσματα, ενώ ένα υπερβολικά πυκνό ίσως οδηγήσει σε μεγάλους υπολογιστικούς χρόνους, χωρίς αυτό να είναι απαραίτητο.

Συνεπώς, κατά τη διαδικασία διακριτοποίησης του πεδίου ροής γίνεται προσπάθεια για την ταυτόχρονη επίτευξη δύο κυρίως στόχων:

- το πλέγμα να είναι αρκούντως πυκνό για να αναλύσει τις γεωμετρικές ιδιαιτερότητες του πεδίου ροής και τα ροικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα, και
- να μην σπαταλούνται πόροι όπως υπολογιστική μνήμη και χρόνος προσομοίωσης (να μην είναι υπερβολικά μεγάλος).

Η ακρίβεια κάθε λύσης που προκύπτει από μια προσομοίωση με μεθόδους CFD εξαρτάται κυρίως από την πυκνότητα του πλέγματος, δηλαδή από τον αριθμό των στοιχείων (κελιών) σε αυτό. Για να θεωρηθεί μια λύση αξιόπιστη, θα πρέπει να είναι ανεξάρτητη της ανάλυσης του πλέγματος. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιείται μελέτη ανεξαρτησίας πλέγματος, ώστε να διαπιστωθεί εάν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης οφείλονται στις οριακές συνθήκες και στα φαινόμενα ροής στο συγκεκριμένο πρόβλημα και όχι στην ανάλυση του πλέγματος.



Εικόνα 6.1-1: Υπολογιστικό πλέγμα

Αρχικά, λοιπόν, δημιουργείται ένα πλέγμα και πραγματοποιείται η προσομοίωση. Έπειτα, δημιουργείται ένα πυκνότερο πλέγμα και, με τις ίδιες παραμέτρους του μοντέλου και τις ίδιες ρυθμίσεις του επιλύτη, πραγματοποιείται νέα προσομοίωση. Τα αποτελέσματα της νέας προσομοίωσης συγκρίνονται με αυτά της προηγούμενης και, αν είναι ίδια (εντός κάποιας επιτρεπόμενης ανοχής), τότε το αρχικό πλέγμα είναι ικανοποιητικό. Σε αντίθετη περίπτωση, το

πλέγμα πυκνώνεται περαιτέρω και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Σε κάθε περίπτωση, χρησιμοποιείται το πλέγμα με τα λιγότερα δυνατά στοιχεία που όμως επιτυγχάνει ακριβή λύση, ώστε να εξοικονομούνται υπολογιστικοί πόροι.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία δημιουργήθηκε δομημένο (structured) πλέγμα με τριγωνικά στοιχεία, το οποίο παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.1-1. Τα χαρακτηριστικά του επιλέχθηκαν έπειτα από μελέτη ανεξαρτησίας πλέγματος και παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1-1.

Πίνακας 6.1-1: Χαρακτηριστικά υπολογιστικού πλέγματος

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΛΕΓΜΑ	
Αριθμός κόμβων	13752
Αριθμός στοιχείων	26973
Αριθμός κόμβων κάθετα στη ροή	70
Διάσταση στοιχείου παράλληλα στη ροή	1m
Συνολικό εμβαδόν	10238,63 m ²

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί στο εγχειρίδιο του Telemac 2D συνιστάται τα τριγωνικά στοιχεία του πλέγματος να είναι όσο το δυνατόν ισόπλευρα, αν και στην περίπτωση ροής σε ποταμό η επιμήκυνση των στοιχείων αυτών προς τη φορά της ροής μπορεί να φανεί χρήσιμη για εξοικονόμηση υπολογιστικού χρόνου.

6.2. Δόμηση του υδροδυναμικού μοντέλου

Για το σχηματισμό του υδροδυναμικού μοντέλου αρχικά ορίστηκε το είδος των οριακών συνθηκών. Στην εισροή (διατομή Δ0) επιλέγεται ως οριακή συνθήκη δεδομένη τιμή της παροχής, ενώ στην εκροή (διατομή Δ197) επιλέγεται δεδομένη τιμή της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας. Αυτό το είδος των οριακών συνθηκών είναι σύνηθες για την περίπτωση ποταμών και προτείνεται από το εγχειρίδιο του Telemac 2D.

Σε επόμενη φάση έγινε επιλογή του χρονικού βήματος. Μια αρχική εκτίμηση του χρονικού βήματος γίνεται με βάση τη συνθήκη CFL (Courant-Friedrich-Levy), σύμφωνα με την οποία θα πρέπει να ισχύει:

$$C = \frac{u\Delta t}{\Delta x} + \frac{v\Delta t}{\Delta y} \leq C_{\max} \quad (6.2-1)$$

όπου:

u, v (m/s)	οι συνιστώσες της ταχύτητας,
Δx, Δy (m)	οι διαστάσεις του πλέγματος και
Δt (s)	το χρονικό βήμα,
C (-)	ο αριθμός Courant.

Η τιμή C_{max} λαμβάνεται ίση με 1, όταν πρόκειται για ρητά αριθμητικά σχήματα. Σε αντίθετη περίπτωση (πεπλεγμένο αριθμητικό σχήμα) μπορεί να λάβει μεγαλύτερες τιμές (πχ 7 ή 8).

Τελικά, το χρονικό βήμα επιλέχθηκε ίσο με 0,010 sec και η προσομοίωση καθορίστηκε να διαρκεί έως ότου επέλθουν μόνιμες συνθήκες στη ροή. Αυτό συμβαίνει όταν η διαφορά των τιμών των ταχυτήτων και του βάθους νερού μεταξύ 2 διαδοχικών χρονικών βημάτων είναι μικρότερη από 10^{-6} .

Έπειτα, επιλέχθηκε ως εξίσωση τριβής η εξίσωση του Manning, καθώς αποτελεί την πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη εξίσωση σε ανοικτούς αγωγούς, ενώ ως μοντέλο τύρβης επιλέχθηκε το k-ε.

Τέλος, ορίστηκαν οι αρχικές συνθήκες του προβλήματος. Σε όλο το υπολογιστικό πεδίο θεωρήθηκε ότι υπάρχει ένα βάθος ροής ίσο με 10 cm στην έναρξη της προσομοίωσης ($t=0$). Η επιλογή ενός αρχικού βάθους ροής είναι απαραίτητη στην περίπτωση μας, μιας και έχουμε ορίσει στην είσοδο δεδομένη παροχή (οριακή συνθήκη εισροής). Το Telemac 2D χρειάζεται να έχει ως αρχικά δεδομένα στην είσοδο όχι μόνο την παροχή αλλά και το βάθος ροής, ώστε να δύναται να υπολογίσει την ταχύτητα. Σε περίπτωση που δεν ορίζεται το βάθος ροής, η ροή στην είσοδο είναι υπερκρίσιμη και το Telemac 2D αδυνατεί να πραγματοποιήσει τους υπολογισμούς. Αξίζει να τονισθεί πως τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για μόνιμες συνθήκες δεν επηρεάζονται από τις αρχικές συνθήκες.

Τα βασικά χαρακτηριστικά του υδροδυναμικού μοντέλου που περιγράφηκαν παραπάνω συνοψίζονται στον Πίνακα 6.2-1.

Πίνακας 6.2-1: Βασικές παράμετροι υδροδυναμικού μοντέλου

ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ	
Ανάτη οριακή συνθήκη	δεδομένη παροχή
Κατάτη οριακή συνθήκη	δεδομένη στάθμη ελεύθερης επιφάνειας
Χρονικό βήμα	0.010 sec
Διάρκεια προσομοίωσης	έως μόνιμες συνθήκες ροής
Εξίσωση τριβής	Manning
Μοντέλο τύρβης	k - ε
Αρχική συνθήκη	βάθος ίσο με 0.10m σε όλο το πεδίο

6.3. Βαθμονόμηση και επιβεβαίωση του υδροδυναμικού μοντέλου

Ο όρος βαθμονόμηση (calibration) προέρχεται από τις στατιστικές επιστήμες, και υποδηλώνει μια συστηματική διαδικασία προσαρμογής των τιμών των παραμέτρων ενός μοντέλου, έτσι ώστε οι προσομοιωμένες αποκρίσεις του να προσεγγίζουν όσο το δυνατό περισσότερο τις αντίστοιχες παρατηρημένες τιμές.

Η βασική παράμετρος που χρησιμοποιείται για τη βαθμονόμηση του υδροδυναμικού μοντέλου είναι ο συντελεστής τριβής. Όπως επισημάνθηκε στο κεφάλαιο 5, η περιοχή μελέτης διακρίνεται σε 2 τμήματα όσον αφορά στον τύπο του υποστρώματος. Ο συντελεστής Manning εκτιμήθηκε ότι κυμαίνεται μεταξύ των τιμών:

- 0,028 – 0,056 για το τμήμα A και
- 0,031 – 0,059 για το τμήμα B.

Ζητούμενο είναι να βρεθούν οι τιμές του Manning και για τα 2 τμήματα για τις οποίες οι προσομοιωμένες τιμές της στάθμης σε κάθε διατομή να συμπίπτουν με τις μετρημένες τιμές της στάθμης για την παροχή $Q=8,10 \text{ m}^3/\text{s}$ (μέτρηση 28/1/2016).

Ταυτόχρονα με την επιλογή του συντελεστή Manning, έγινε διερεύνηση για τον καθορισμό κατάλληλης τιμής της οριακής συνθήκης στα κατάντη (Δ197). Στη διατομή Δ197 δεν υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις και δεν ήταν εφικτή η δημιουργία καμπύλης στάθμης-παροχής, ώστε να ορισθεί η τιμή της κατάντη οριακής συνθήκης.

Έπειτα από δοκιμαστικές εφαρμογές του μοντέλου Telemac2D για διάφορες τιμές του συντελεστή Manning, αλλά και της κατάντη οριακής συνθήκης, παρατηρήθηκε ότι οι καταλληλότερες τιμές του Manning για κάθε τμήμα είναι οι εξής:

- 0,028 για το τμήμα Α και
- 0,032 για το τμήμα Β.

Με χρήση των τιμών αυτών, η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας που υπολογίζεται σε κάθε διατομή με το Telemac 2D προσεγγίζει όσο το δυνατόν καλύτερα την μετρημένη τιμή της ελεύθερης επιφάνειας. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τιμές της ελεύθερης επιφάνειας για κάθε διατομή από την προσομοίωση και από την μέτρηση που διεξήχθη στις 28/1/2016 (παροχή ίση με 8,10 m³/s). Καταγράφεται, επίσης, και η αντίστοιχη απόκλιση μεταξύ των 2 τιμών. Όπως αναφέρθηκε, στη Δ197 δεν υπάρχει διαθέσιμη μέτρηση και η τιμή που φαίνεται στον πίνακα αποτελεί την κατάντη οριακή συνθήκη που επιλέχθηκε τελικά.

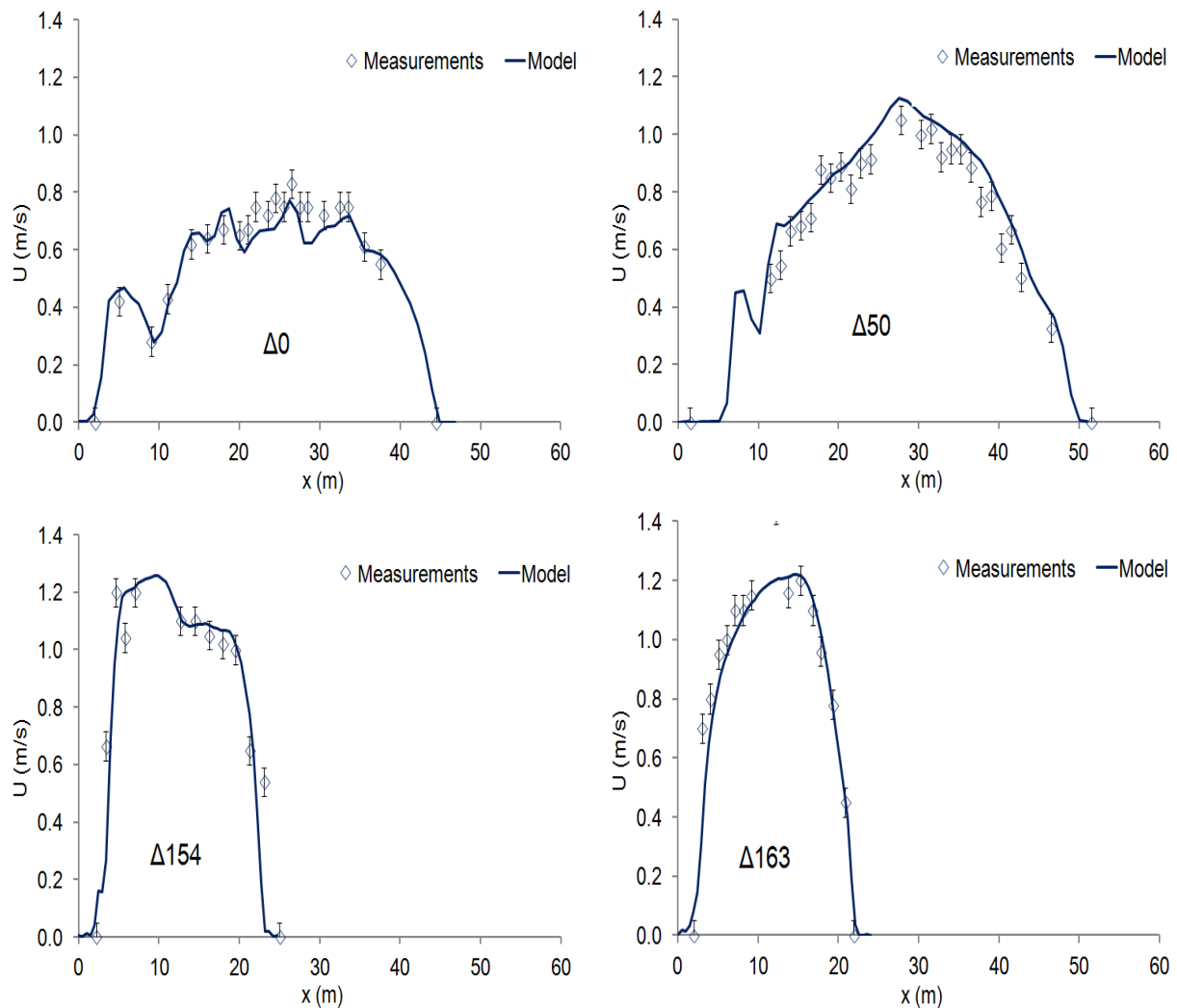
Πίνακας 6.3-1: Τιμές ελεύθερης επιφάνειας διατομών από μέτρηση και από προσομοίωση για $Q=8,10 \text{ m}^3/\text{s}$

ΔΙΑΤΟΜΗ	Συντελεστής Manning	Hmeas (m)	Hsim (m)	Απόκλιση (%)
Δ0	0,028	38,92	39,02	+0,26
Δ50	0,028	38,91	38,90	-0,03
Δ154	0,032	38,10	38,11	+0,03
Δ163	0,032	38,05	38,07	+0,05
Δ197	0,032	-	37,95	-

Σαν πρώτη προσέγγιση, οι τιμές της ελεύθερης επιφάνειας που προέκυψαν από την προσομοίωση θεωρήθηκαν γενικά αποδεκτές, καθώς η απόκλισή τους από τις τιμές της μέτρησης για παροχή $Q=8,10 \text{ m}^3/\text{s}$ (μέτρηση 28/1/2016) είναι αρκετά μικρή, με εξαίρεση, βέβαια, την διατομή Δ0.

Σε επόμενη φάση, για κάθε διατομή συγκρίθηκαν οι ταχύτητες από τη μέτρηση στις 28/1/2016 (παροχή $Q=8,10 \text{ m}^3/\text{s}$) και από την προσομοίωση. Η διαδικασία αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως επιβεβαίωση του μοντέλου.

Από τη σύγκριση, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κρίθηκαν αρκούντως ικανοποιητικά και το υδροδυναμικό μοντέλο θεωρήθηκε αξιόπιστο για την προσομοίωση της ροής στην περιοχή διερεύνησης.



Εικόνα 6.3-1: Ταχύτητες ροής στις 4 διατομές από μέτρηση και από προσομοίωση

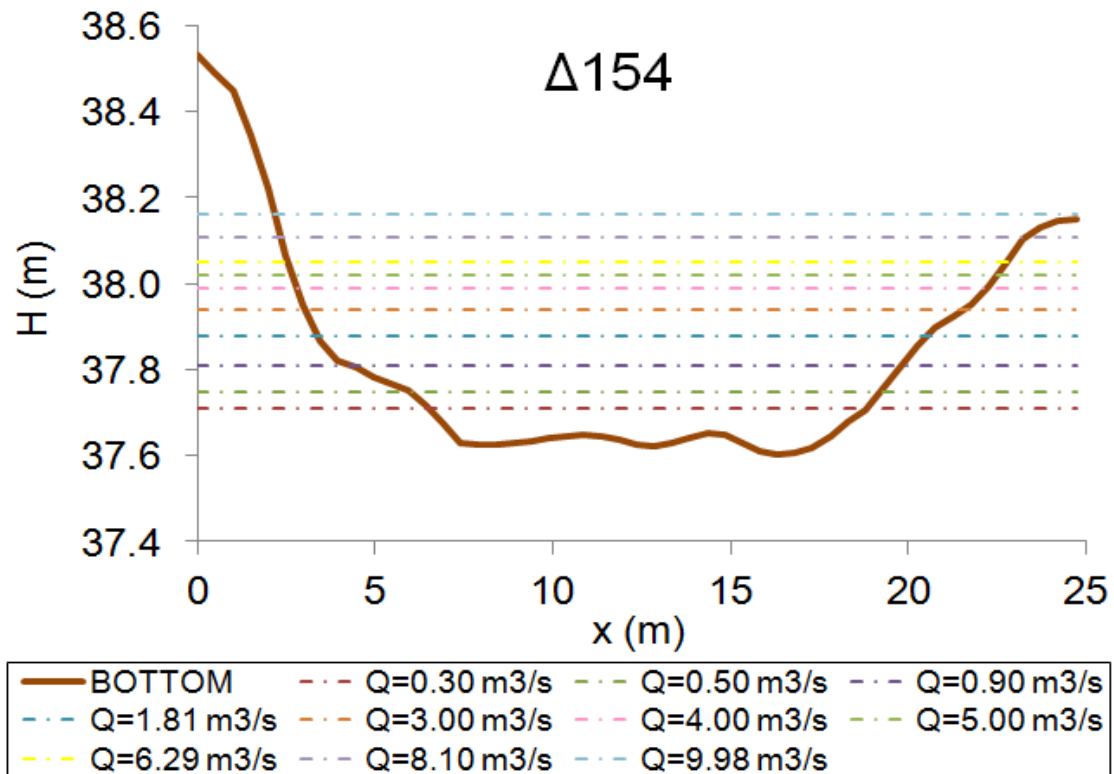
6.4. Εφαρμογή του υδροδυναμικού μοντέλου

Αφού έγινε βαθμονόμηση και επιβεβαίωση του υδροδυναμικού μοντέλου με αξιοποίηση των διαθέσιμων δεδομένων, το μοντέλο εφαρμόστηκε συνολικά για 10 σενάρια παροχών. Οι παροχές αυτές επιλέχθηκαν εντός του εύρους παροχών που συναντάται στην περιοχή διερεύνησης (Κεφάλαιο 5.4).

Πίνακας 6.4-1: Τα διάφορα σενάρια παροχής

Q (m ³ /s)	0,30	0,50	0,90	1,81	3,00	4,00	5,00	6,29	8,10	9,98
-----------------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Στον Πίνακα 6.4-1 συγκεντρώνονται όλα τα σενάρια παροχής που προσομοιώθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία. Για τα σενάρια αυτά, παρουσιάζεται η μεταβολή της στάθμης ενδεικτικά στη Δ154.



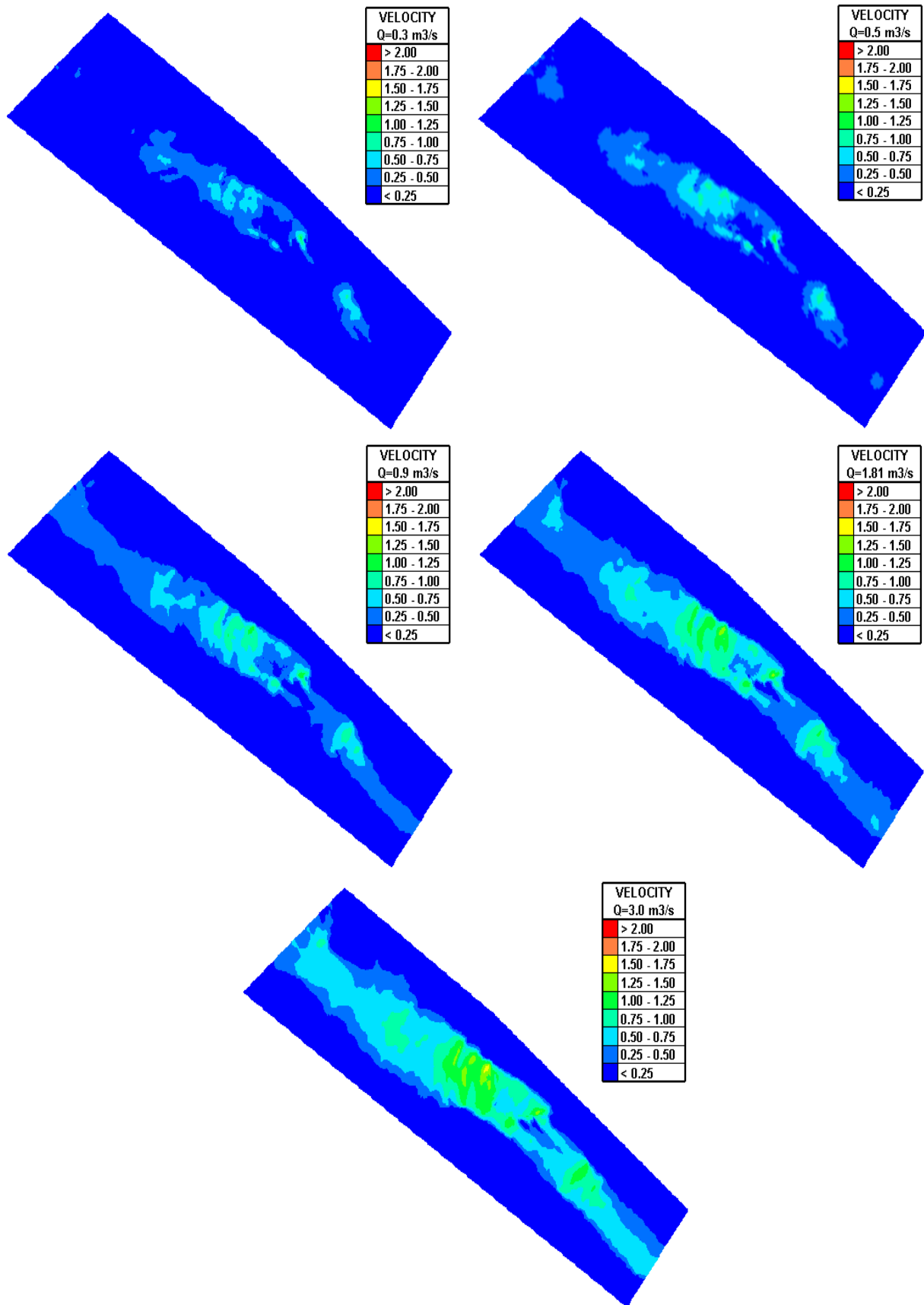
Εικόνα 6.4-1: Μεταβολή στάθμης στη Δ154 για όλα τα σενάρια παροχής

Οι μέγιστες τιμές του βάθους και της ταχύτητας ροής που υπολογίστηκαν από το υδροδυναμικό μοντέλο για κάθε σενάριο παροχής (για μόνιμες συνθήκες ροής) συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα.

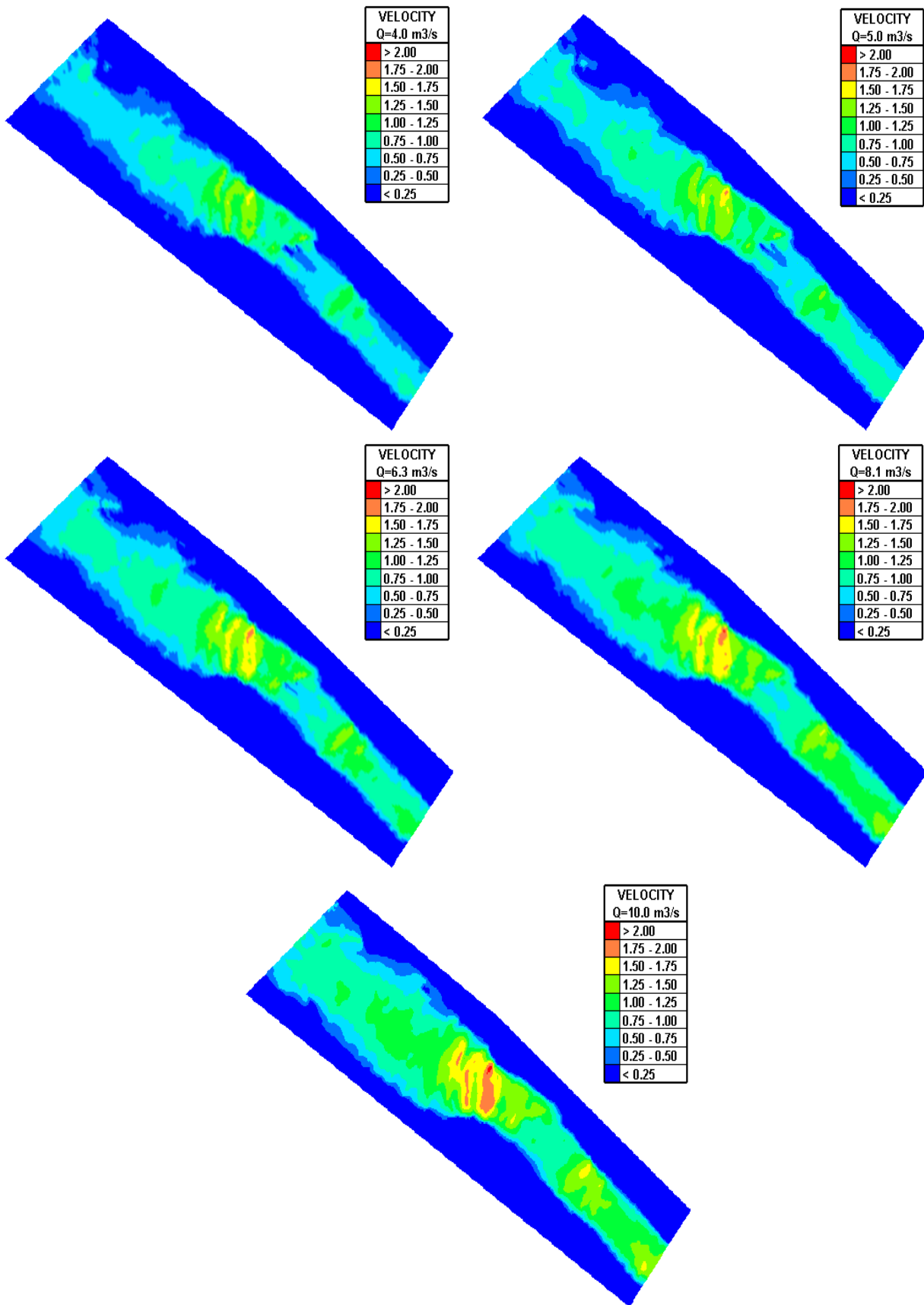
Πίνακας 6.4-2: Μέγιστες τιμές βάθους και ταχύτητας για όλα τα σενάρια παροχής

ΠΑΡΟΧΗ (m ³ /s)	ΜΕΓΙΣΤΟ ΒΑΘΟΣ (m)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ (m/s)
0.30	0.40	1.13
0.50	0.43	1.22
0.90	0.46	1.29
1.81	0.53	1.35
3.00	0.60	1.56
4.00	0.64	1.69
5.00	0.68	1.80
6.29	0.73	1.91
8.10	0.80	2.02
9.98	0.86	2.09

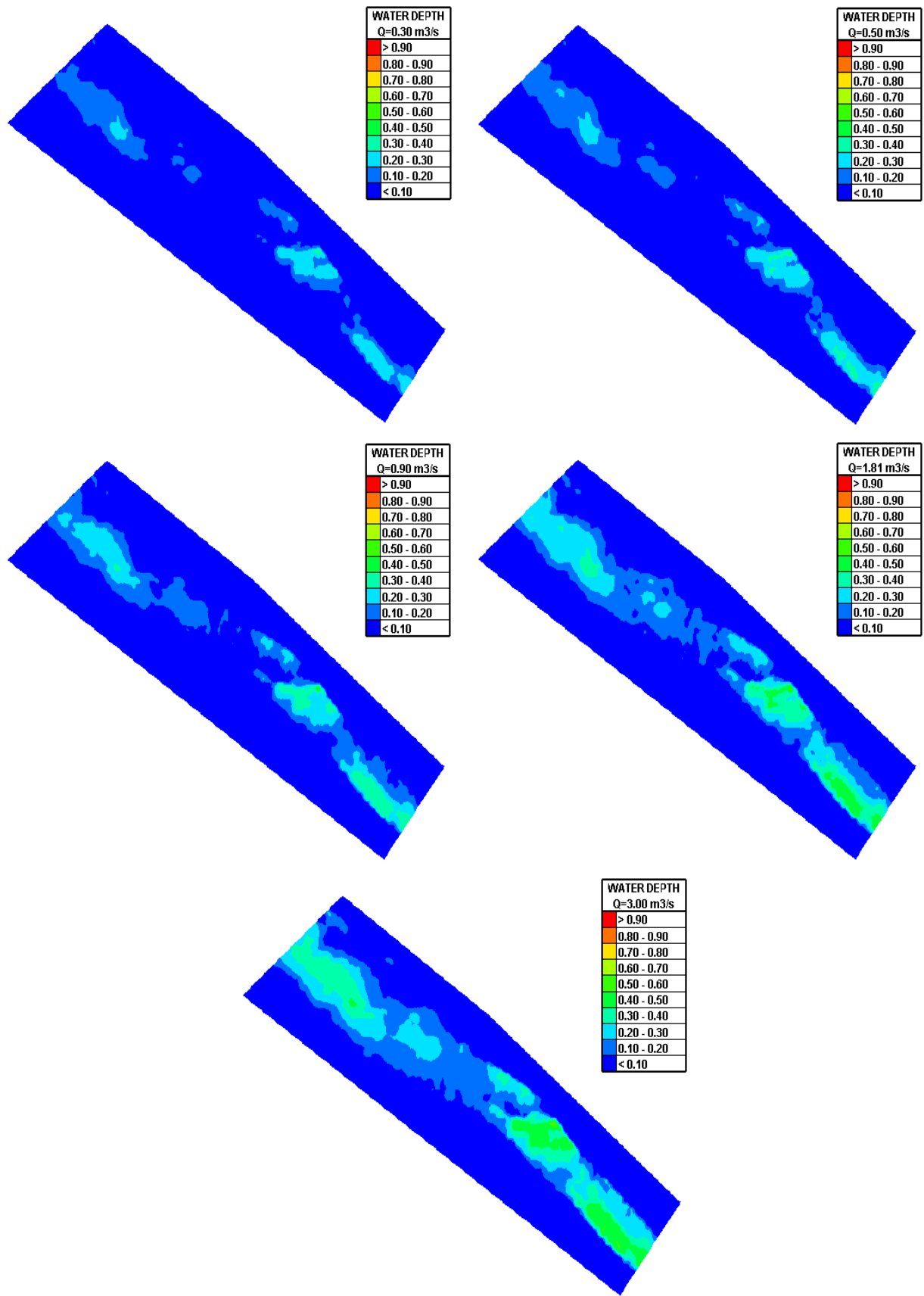
Οι κατανομές της ταχύτητας και του βάθους ροής στο υπολογιστικό πεδίο για κάθε σενάριο παροχής γίνονται καλύτερα αντιληπτές από τα διαγράμματα τύπου «contour». Τα διαγράμματα αυτά απεικονίζουν τα 2 προαναφερθέντα μεγέθη για κάθε σενάριο παροχής στο τέλος της προσομοίωσης, όταν δηλαδή έχουν επέλθει μόνιμες συνθήκες ροής.



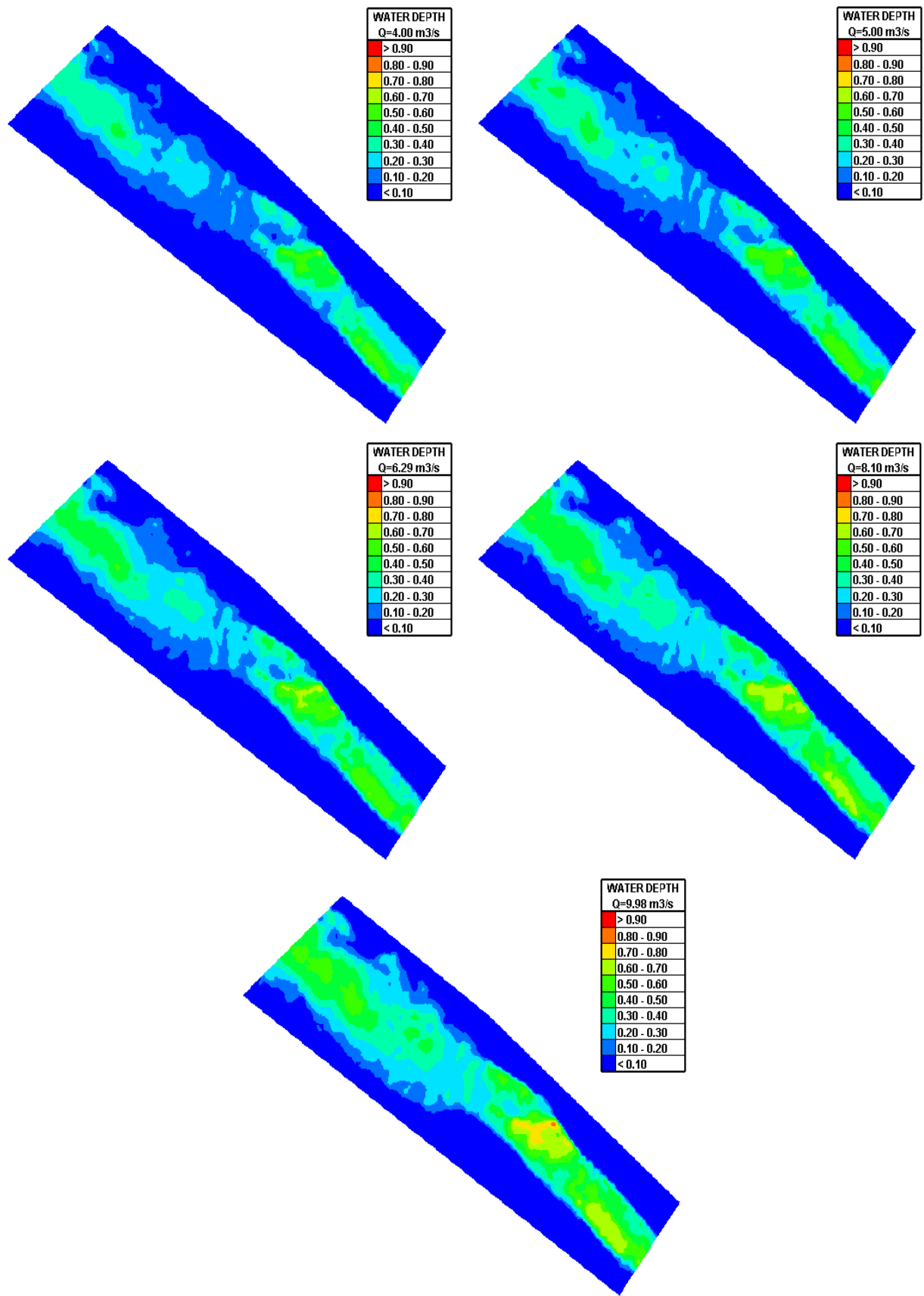
Εικόνα 6.4-2: Κατανομή ταχύτητας ροής για μόνιμες συνθήκες για Q=0.3, 0.5, 0.9, 1.8 και 3.0 m³/s



Εικόνα 6.4-3: Κατανομή ταχύτητας ροής για μόνιμες συνθήκες για Q=4.0, 5.0, 6.3, 8.1 και 10.0 m³/s



Εικόνα 6.4-4: Κατανομή βάθους ροής για μόνιμες συνθήκες για $Q=0.3, 0.5, 0.9, 1.8$ και $3.0 \text{ m}^3/\text{s}$



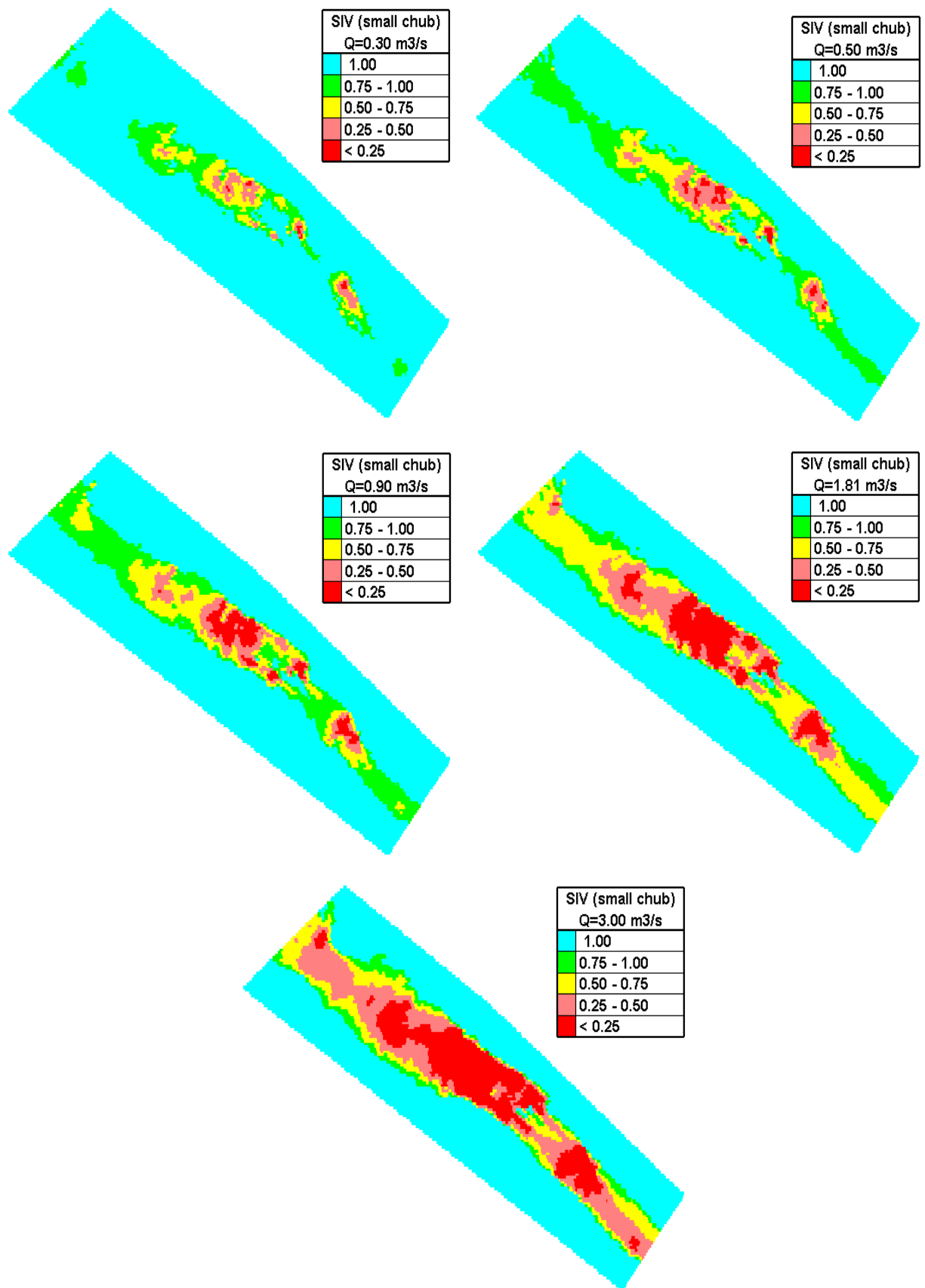
Εικόνα 6.4-5: Κατανομή βάθους ροής για μόνιμες συνθήκες για Q=4.0, 5.0, 6.3, 8.1 και 10.0 m³/s

6.5. Εφαρμογή του μοντέλου ενδιαιτήματος

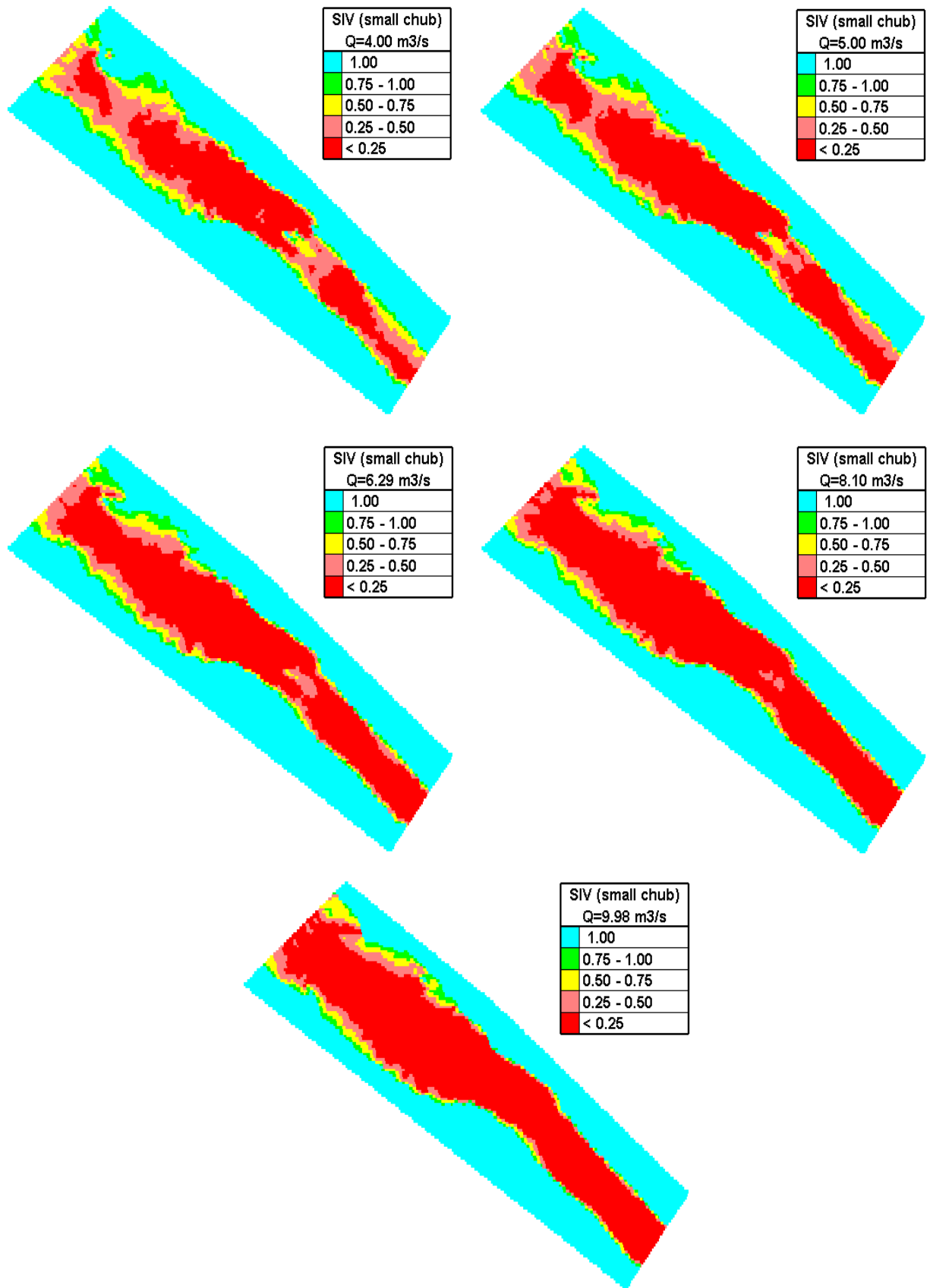
Όπως έχει ήδη αναφερθεί (Κεφάλαιο 3.3.2), η Σταθμισμένη Κατάλληλη Έκταση (Weighted Usable Area, WUA) είναι στην ουσία η συνολική έκταση του πεδίου που λαμβάνει τιμές δείκτη καταλληλότητας (δηλαδή $HSI > 0$) και αποτελεί κριτήριο της ποιότητας αλλά και της ποσότητας του διαθέσιμου ενδιαιτήματος. Συνεπώς, μία μεγάλη έκταση με χαμηλή καταλληλότητα ενδιαιτημάτων μπορεί να δώσει ίδια αθροιστικά αποτελέσματα με μία άλλη, αρκετά μικρότερη περιοχή, με υψηλή καταλληλότητα. Στόχος όμως της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εύρεση της παροχής για την οποία επιτυγχάνεται διατήρηση των ιχθυοπληθυσμών. Προκειμένου, λοιπόν, να μελετηθούν μόνο οι κατάλληλες συνθήκες για τους εξεταζόμενους ιχθύες, το μοντέλο αυτό τροποποιήθηκε ώστε να λαμβάνει υπόψη του μόνο τα κελιά του πλέγματος που έχουν Συνδυαστικό Δείκτη Καταλληλότητας (Habitat Suitability Index, HSI) μεγαλύτερο από 0,5 και να υπολογίζει την αντίστοιχη Σταθμισμένη Κατάλληλη Έκταση (Papadaki et al., 2016).

Το τελικό μοντέλο ενδιαιτήματος τέθηκε σε εφαρμογή για τα 10 σενάρια παροχής, με απώτερο σκοπό την εύρεση της καταλληλότερης παροχής για τη διατήρηση των ιχθυοπληθυσμών στο εξεταζόμενο τμήμα. Δεδομένα εισόδου αποτελούν τα αποτελέσματα των υδροδυναμικών υπολογισμών, ενώ τελικά υπολογίζεται η WUA για κάθε παροχή.

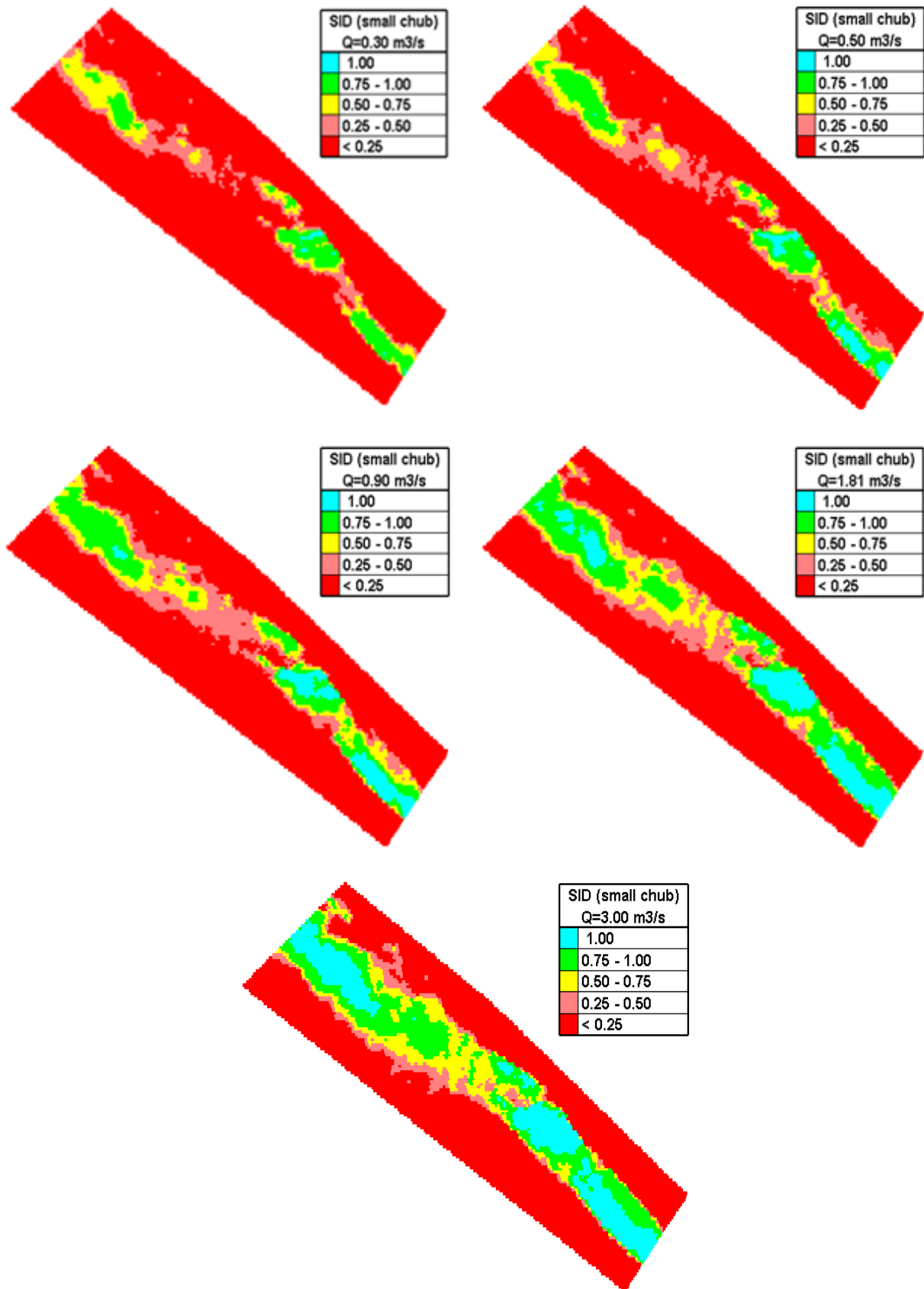
Οι εξεταζόμενοι ιχθύες είναι τα 2 μεγέθη του Ποταμοκέφαλου για τα οποία παράχθηκαν οι καμπύλες καταλληλότητας από το ΕΛ.ΚΕ.ΘΕ. Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνεται με διαγράμματα τύπου «contour» η κατανομή στο υπολογιστικό πεδίο των Δεικτών Καταλληλότητας για την ταχύτητα και το βάθος ροής (SI_V και SI_D , αντίστοιχα), καθώς και του Συνδυαστικού Δείκτη Καταλληλότητας, για όλα τα σενάρια παροχής, όπως υπολογίστηκαν από το μοντέλο ενδιαιτήματος. Αρχικά, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το μικρό μέγεθος του Ποταμοκέφαλου.



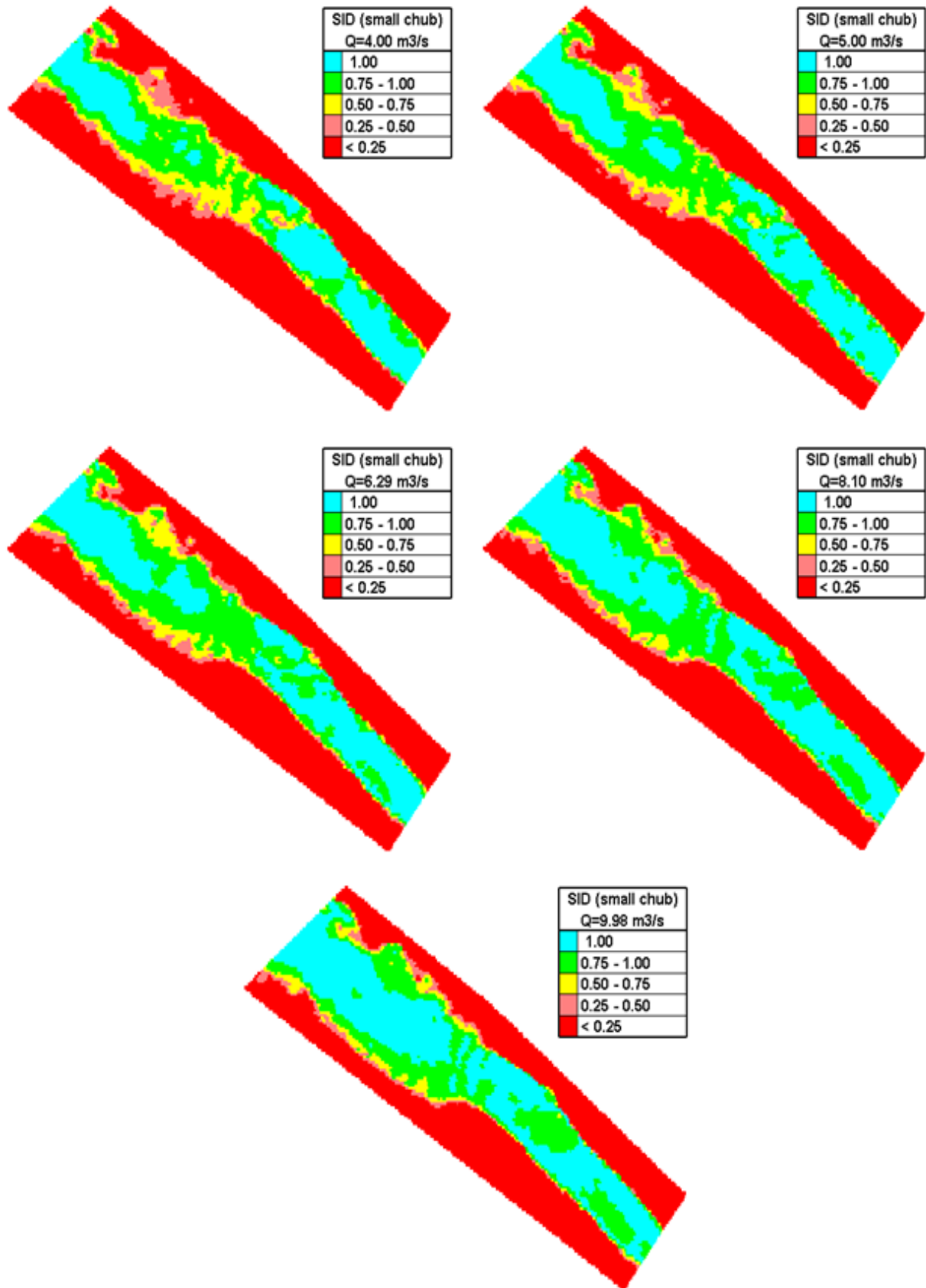
Εικόνα 6.5-1: Κατανομή Δείκτη Καταλληλότητας για την ταχύτητα (SI_v) για το μικρό Ποταμοκέφαλο για $Q=0.3, 0.5, 0.9, 1.81$ και $3.0 \text{ m}^3/\text{s}$



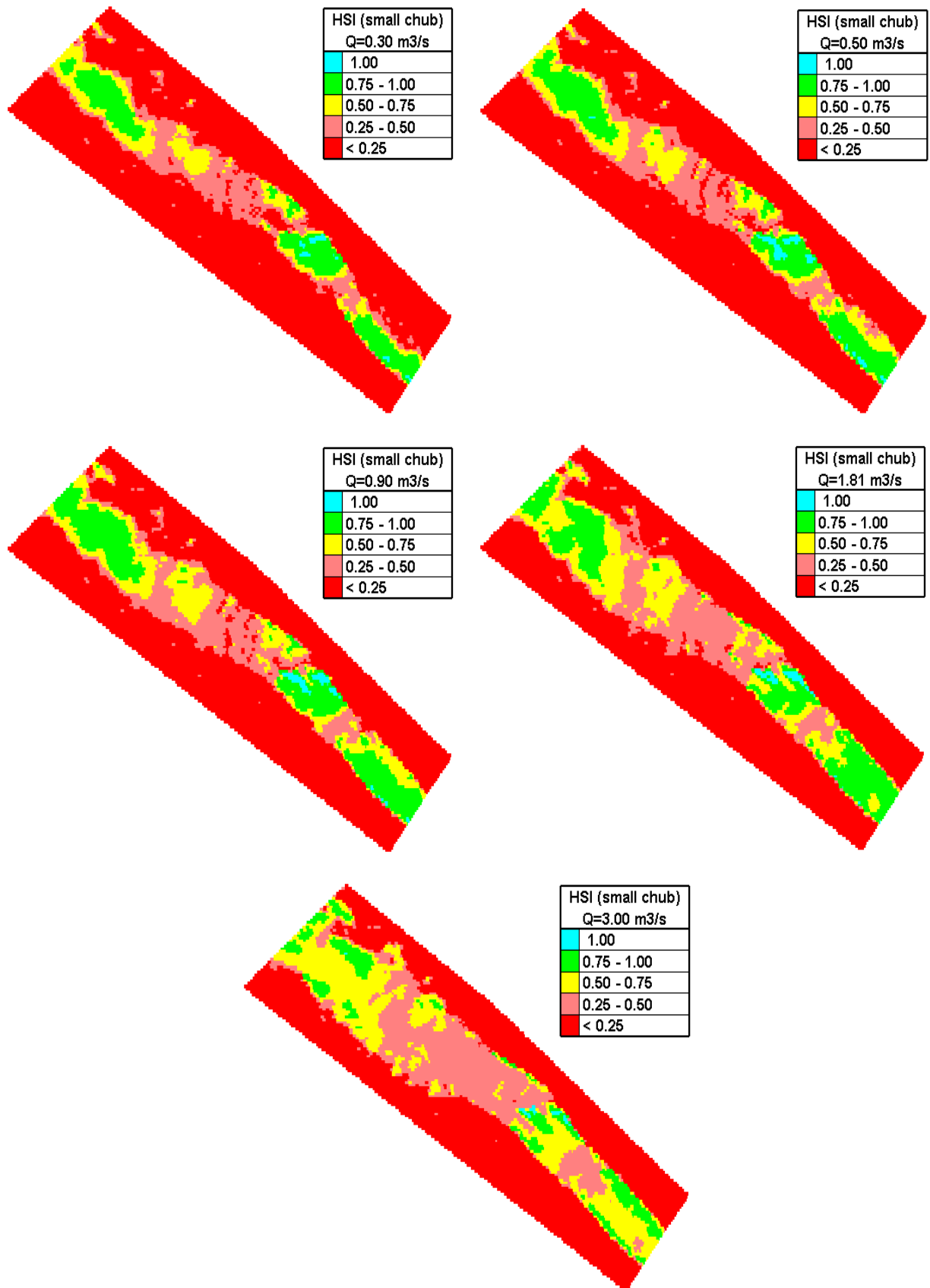
Εικόνα 6.5-2: Κατανομή Δείκτη Καταλληλότητας για την ταχύτητα (SI_v) για το μικρό Ποταμοκέφαλο για $Q=4.0, 5.0, 6.3, 8.1$ και $10.0 \text{ m}^3/\text{s}$



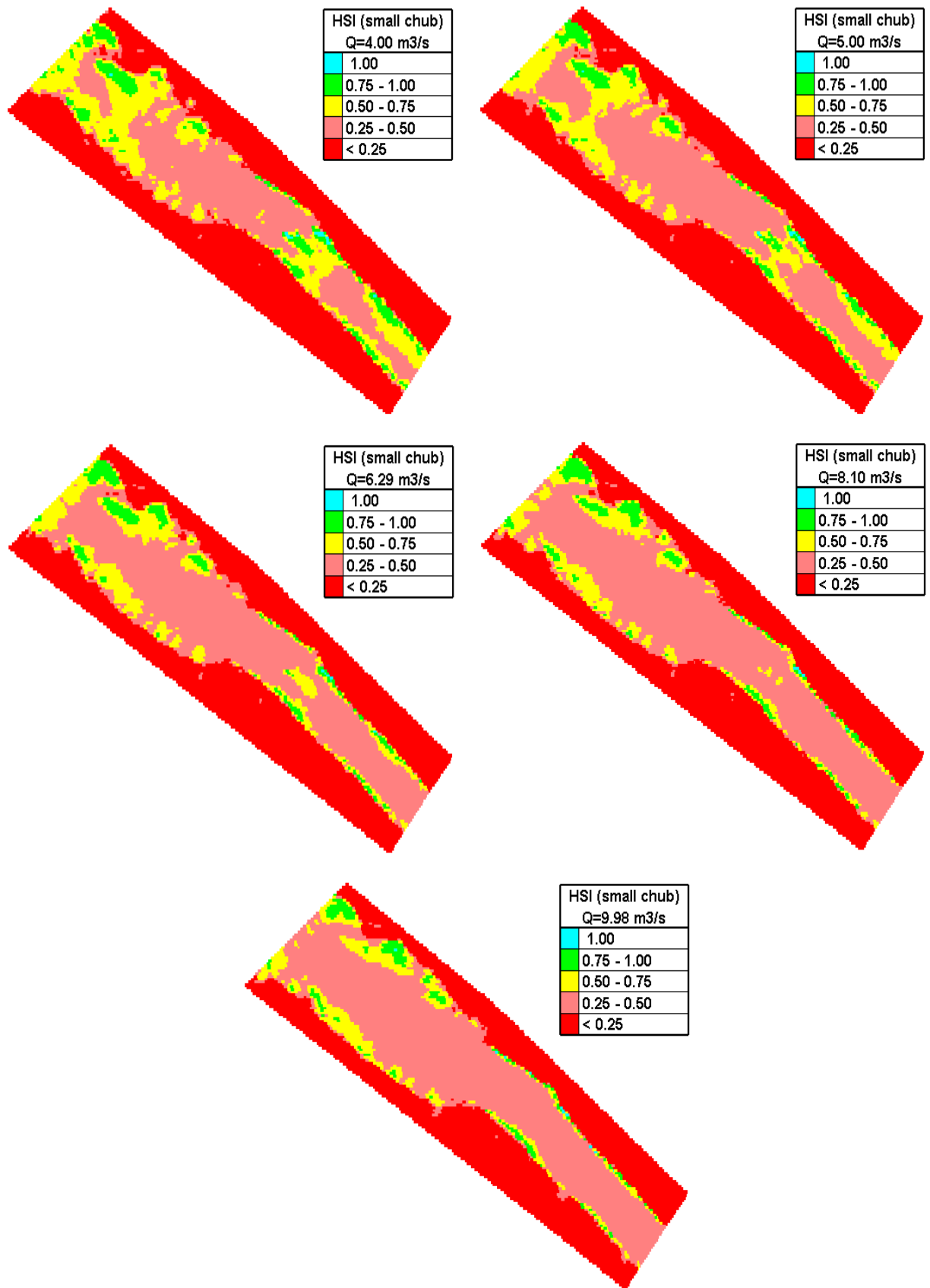
Εικόνα 6.5-3: Κατανομή Δείκτη Καταλληλότητας για το βάθος (SI_D) για το μικρό Ποταμοκέφαλο για $Q=0.3, 0.5, 0.9, 1.81$ και $3.0 \text{ m}^3/\text{s}$



Εικόνα 6.5-4: Κατανομή Δείκτη Καταλληλότητας για το βάθος (SI_D) για το μικρό Ποταμοκέφαλο για $Q=4.0, 5.0, 6.3, 8.1$ και $10.0 \text{ m}^3/\text{s}$

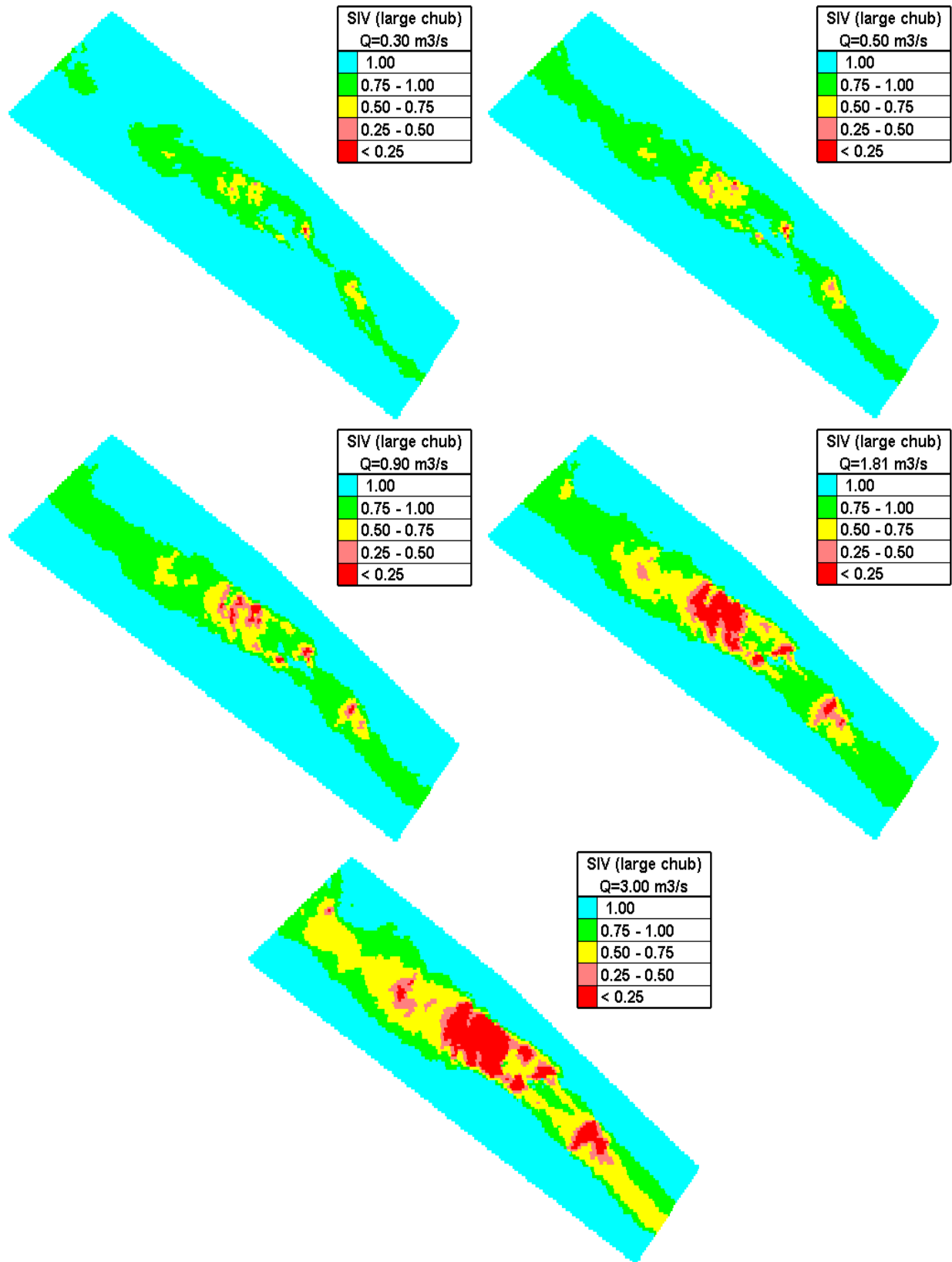


Εικόνα 6.5-5: Κατανομή Συνδυαστικού Δείκτη Καταλληλότητας (HSI) για το μικρό Ποταμοκέφαλο για Q=0.3, 0.5, 0.9, 1.81 και 3.0 m³/s

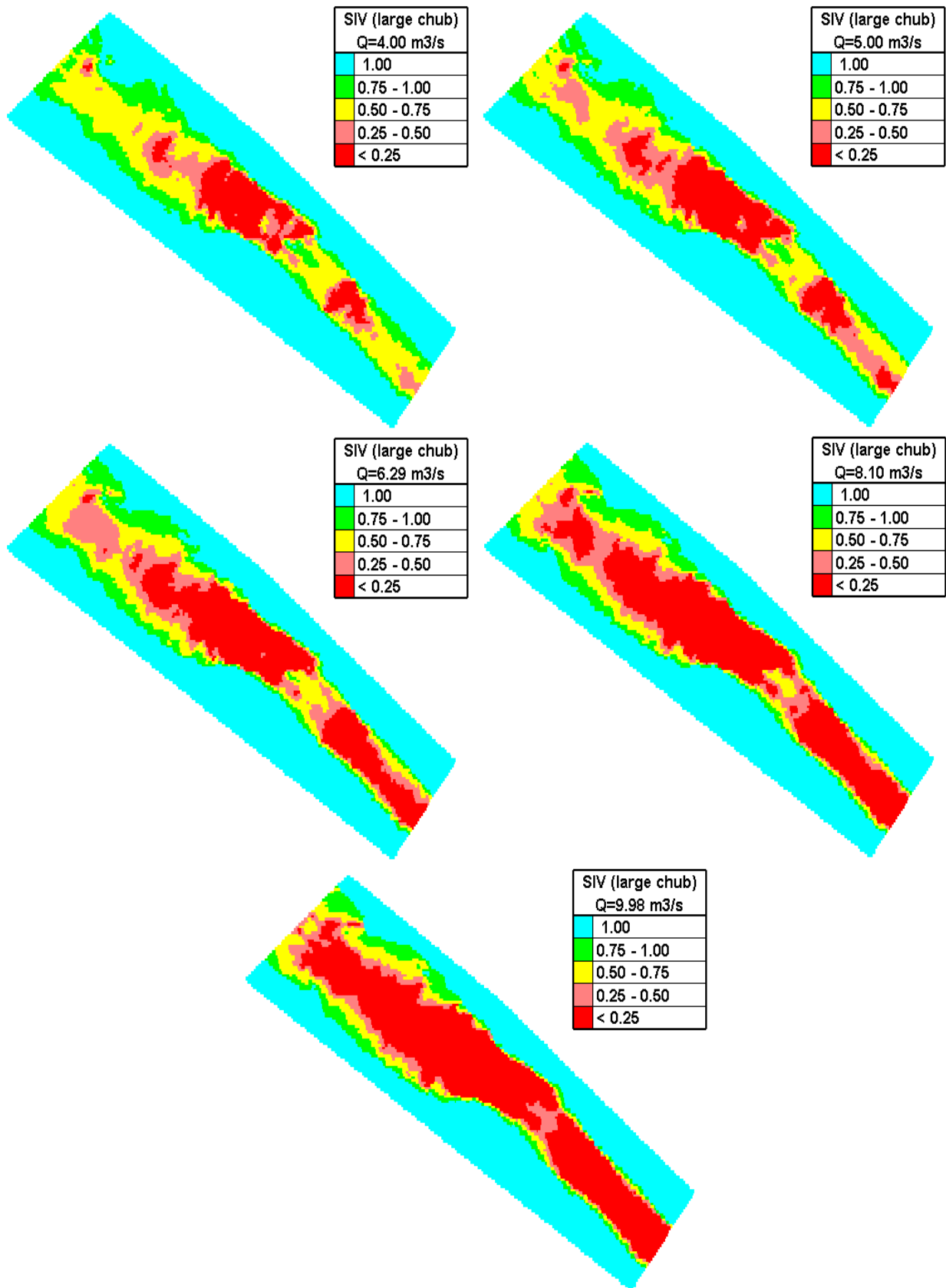


Εικόνα 6.5-6: Κατανομή Συνδυαστικού Δείκτη Καταλληλότητας (HSI) για το μικρό Ποταμοκέφαλο για Q=4.0, 5.0, 6.3, 8.1 και 10.0 m³/s

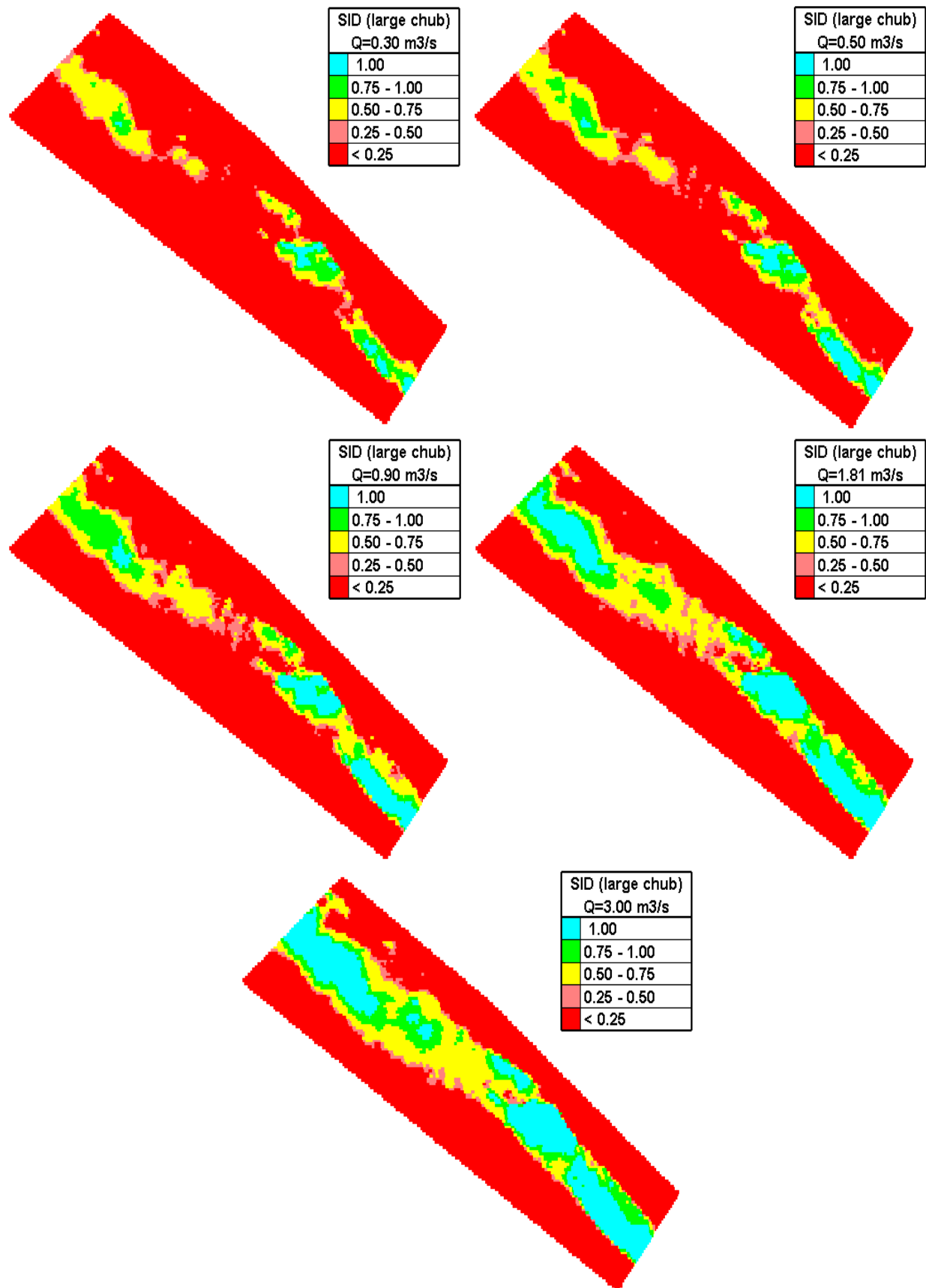
Ομοίως, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου ενδιαιτήματος για το μεγάλο μέγεθος Ποταμοκέφαλου στις παρακάτω εικόνες (με διαγράμματα τύπου contour).



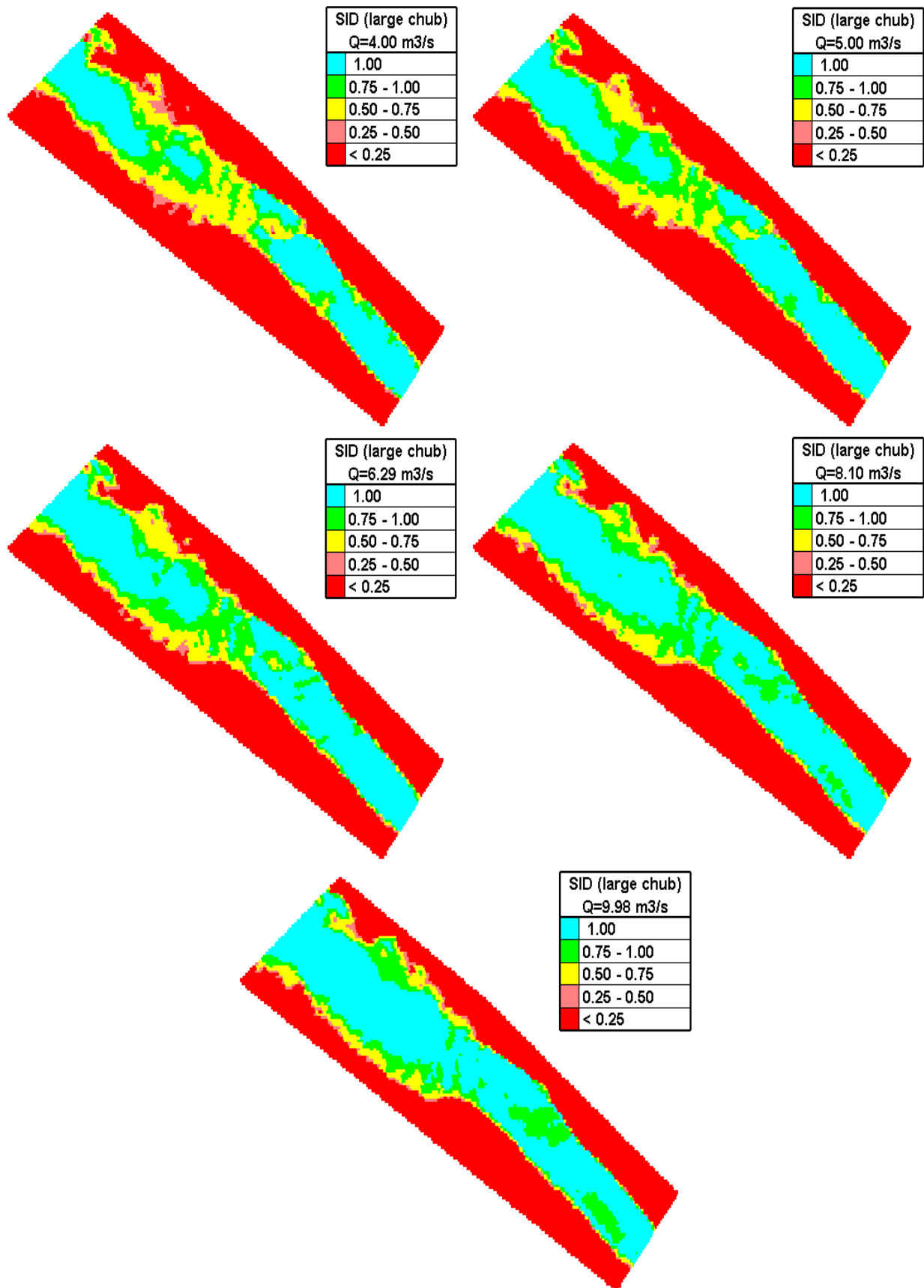
Εικόνα 6.5-7: Κατανομή Δείκτη Καταλληλότητας για την ταχύτητα (SI_v) για το μεγάλο Ποταμοκέφαλο για $Q=0.3, 0.5, 0.9, 1.8$ και $3.0 \text{ m}^3/\text{s}$



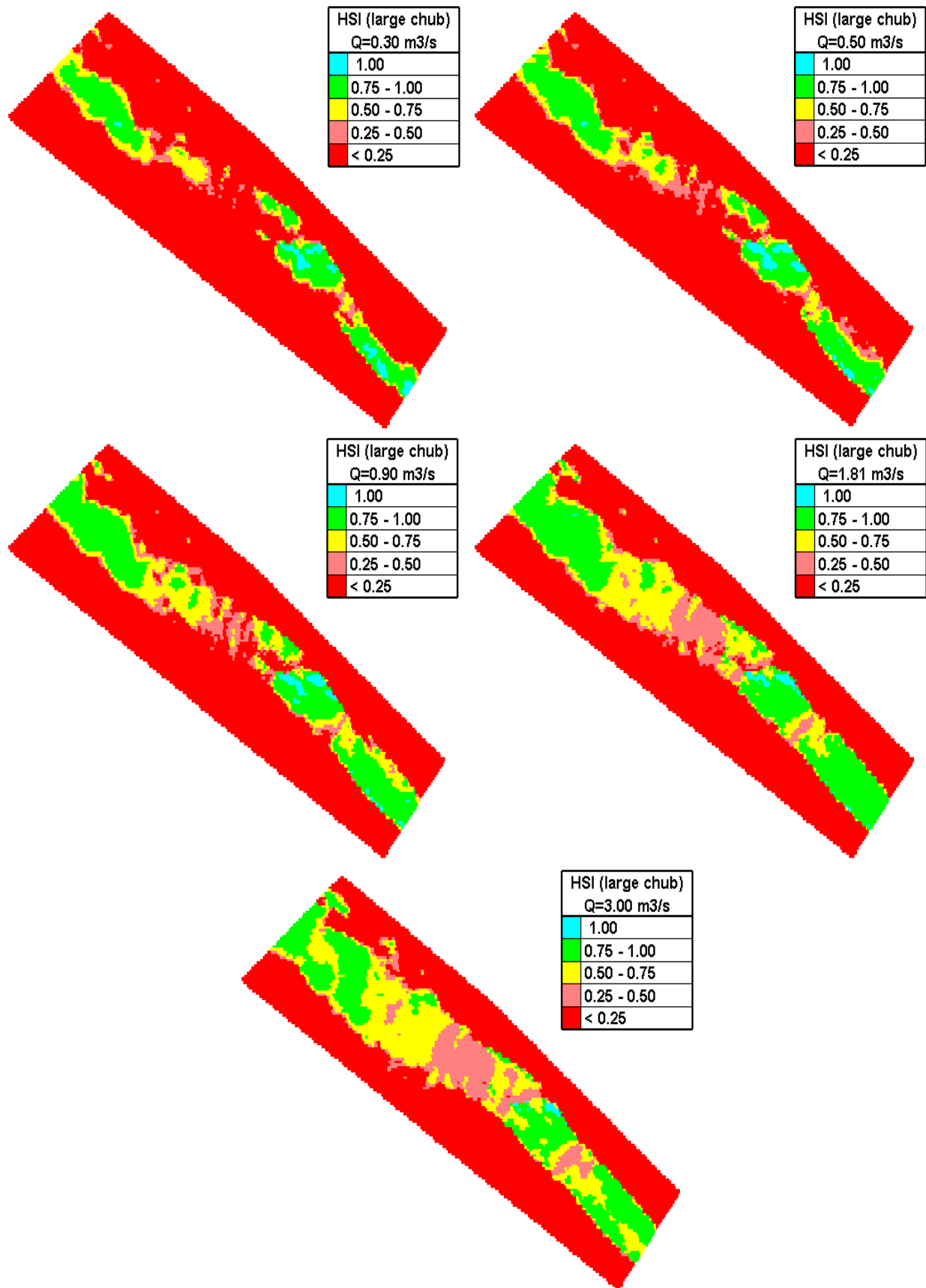
Εικόνα 6.5-8: Κατανομή Δείκτη Καταλληλότητας για την ταχύτητα (SIV_V) για το μεγάλο Ποταμοκέφαλο για $Q=4.0, 5.0, 6.3, 8.1$ και $10.0 \text{ m}^3/\text{s}$



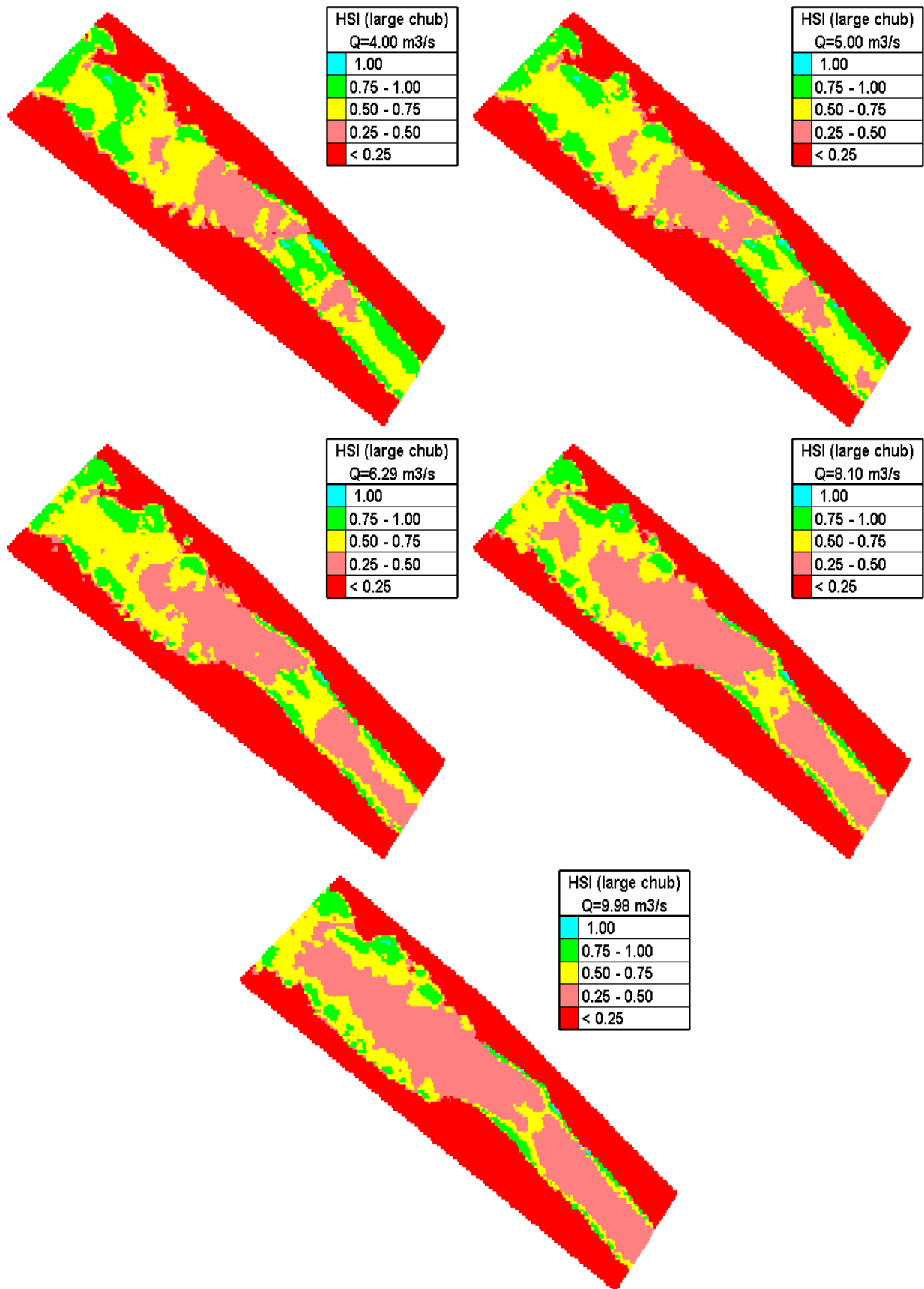
Εικόνα 6.5-9: Κατανομή Δείκτη Καταλληλότητας για το βάθος (SI_D) για το μεγάλο Ποταμοκέφαλο για $Q=0.3, 0.5, 0.9, 1.81$ και $3.0 \text{ m}^3/\text{s}$



Εικόνα 6.5-10: Κατανομή Δείκτη Καταλληλότητας για το βάθος (SI_D) για το μεγάλο Ποταμοκέφαλο για $Q=4.0, 5.0, 6.3, 8.1$ και $10.0 \text{ m}^3/\text{s}$

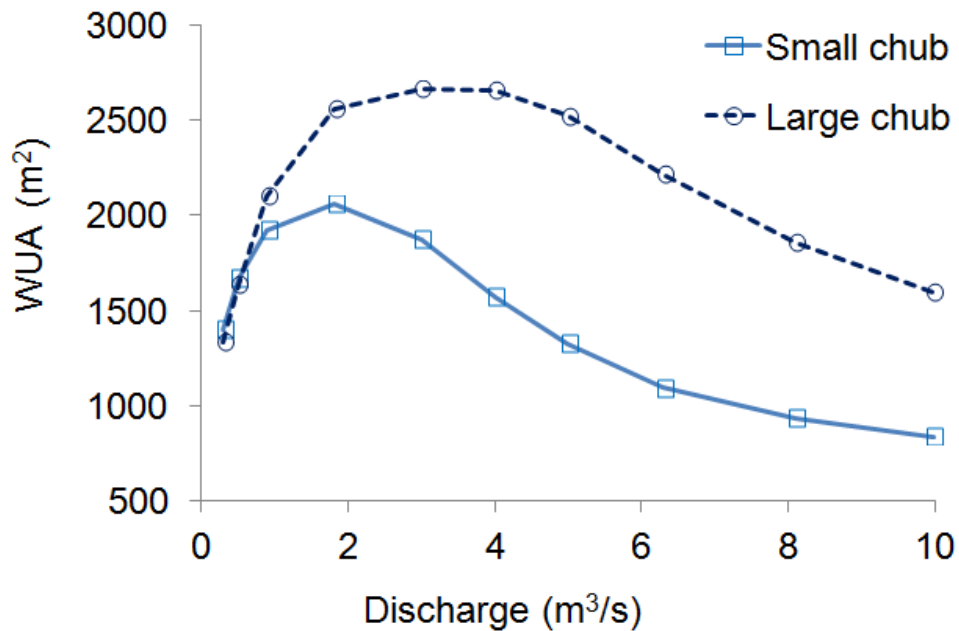


Εικόνα 6.5-11: Κατανομή Συνδυαστικού Δείκτη Καταλληλότητας (HSI) για το μεγάλο Ποταμοκέφαλο για Q=0.3, 0.5, 0.9, 1.81 και 3.0 m³/s



Εικόνα 6.5-12: Κατανομή Συνδυαστικού Δείκτη Καταλληλότητας (HSI) για το μεγάλο Ποταμοκέφαλο για Q=4.0, 5.0, 6.3, 8.1 και 10.0 m³/s

Τέλος, το μοντέλο ενδiciaτήματος υπολογίζει για κάθε παροχή την τιμή της Σταθμισμένης Κατάλληλης Έκτασης (WUA) και για τα 2 μεγέθη του Ποταμοκέφαλου. Με βάση τον δείκτη αυτό, μπορεί να ορισθεί η τιμή της καταλληλότερης παροχής για την διατήρηση των ιχθυοπληθυσμών.



Εικόνα 6.5-13: Σταθμισμένη Κατάλληλη Έκταση (WUA) σε συνάρτηση με την παροχή για τα 2 μεγέθη του Ποταμοκέφαλου

Οι ακριβείς τιμές της WUA για όλα τα σενάρια παροχής συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 6.5-1: Τιμές WUA για όλα τα σενάρια παροχής

DISCHARGE (m³/s)	SMALL CHUB WUA (m²)	LARGE CHUB WUA (m²)
0,30	1402	1334
0,50	1669	1636
0,90	1922	2103
1,81	2058	2558
3,00	1871	2661
4,00	1571	2655
5,00	1327	2522
6,29	1095	2219
8,10	933	1858
9,98	839	1595

6.6. Σχολιασμός αποτελεσμάτων

6.6.1. Αποτελέσματα υδροδυναμικού μοντέλου

Αρχικά, τα αποτελέσματα των υδροδυναμικών υπολογισμών υποδεικνύουν την αύξηση των βαθών και των ταχυτήτων όσο αυξάνεται η παροχή, γεγονός που ήταν αναμενόμενο.

Αναφορικά με την ταχύτητα, παρατηρείται πως το ανάντη τμήμα (τμήμα Α από $X\Theta=0$ έως $X\Theta=75\text{m}$) που έχει πιο ήπια κλίση εμφανίζει εν γένει μικρότερες ταχύτητες από το υπόλοιπο πεδίο, οι οποίες δεν ξεπερνούν το $1,25\text{ m/s}$. Σε κάθε περίπτωση παροχής, οι μεγαλύτερες τιμές της ταχύτητας εμφανίζονται στην περιοχή της στένωσης του ποταμού, όπου και η κλίση γίνεται απότομη. Στην περιοχή αυτή η ροή τείνει να γίνει υπερκρίσιμη και η τιμή της ταχύτητας μπορεί να ξεπεράσει 2 m/s . Μεγάλες σχετικά ταχύτητες εμφανίζονται πάλι λίγο ανάντη της διατομής Δ154 μέχρι και το τέλος του υπολογιστικού πεδίου (αυτό ισχύει κυρίως για τις μεγάλες παροχές).

Όσον αφορά στο βάθος ροής, μεγάλες τιμές του παρουσιάζονται πριν και μετά τη στένωση του ποταμού, γεγονός που είναι απόλυτα φυσιολογικό καθώς στη στένωση η ροή τείνει να γίνει υπερκρίσιμη λόγω της απότομης κλίσης και τα βάθη μειώνονται. Οι μέγιστες τιμές του βάθους σημειώνονται στα τελευταία 80m του υπολογιστικού πεδίου και κυρίως, ανάντη της διατομής Δ154.

6.6.2. Αποτελέσματα μοντέλου ενδαιτήματος

Οι κατανομές της ταχύτητας και του βάθους ροής όπως προέκυψαν από το υδροδυναμικό μοντέλο δικαιολογούν τα αποτελέσματα του μοντέλου ενδαιτήματος, τα οποία συνάδουν με τις προτιμήσεις των εξεταζόμενων ιχθύων όπως εκφράζονται στις Καμπύλες Καταλληλότητας. Όπως έχει ήδη αναφερθεί (Κεφάλαιο 5.7), και τα 2 μεγέθη του Ποταμοκέφαλου προτιμάνε μικρές ταχύτητες και μέτρια βάθη ροής. Συγκεκριμένα, το μικρό μέγεθος του ιχθύος ενδιαφέροντος θεωρεί ως καταλληλότερες τις περιοχές με τιμές βαθών και ταχυτήτων που κυμαίνονται μεταξύ $0,28-0,55\text{ m}$ και $0-0,20\text{ m/s}$, αντίστοιχα, ενώ το μεγάλο μέγεθος $0,25-0,60\text{ m}$ και $0-0,15\text{ m/s}$, αντίστοιχα. Παρακάτω αναλύονται τα αποτελέσματα του μοντέλου ενδαιτήματος για κάθε μέγεθος Ποταμοκέφαλου.

Μικρός Ποταμοκέφαλος

Σχετικά με την ταχύτητα, τα μικρά σενάρια παροχών φαίνονται καταλληλότερα από τα σενάρια μεγάλων παροχών και έτσι, η αντίστοιχη καταλληλότητα του υπολογιστικού πεδίου μειώνεται όσο αυξάνεται η παροχή. Αυτό βέβαια οφείλεται και στο γεγονός ότι ο δείκτης SI_V λαμβάνεται ίσος με 1 από το μοντέλο ενδαιτήματος ακόμα και στις ξηρές περιοχές του πεδίου, εφόσον η ταχύτητα εκεί είναι μηδενική. Όμως, το γεγονός αυτό δεν επηρεάζει τον υπολογισμό της ολικής καταλληλότητας της περιοχής, διότι αυτή εξαρτάται όχι μόνο από την ταχύτητα αλλά και από το βάθος ροής. Έτσι, στις άνωδρες περιοχές του πεδίου ο SI_V είναι ίσος με 1, αλλά ο SI_D είναι μηδενικός, με αποτέλεσμα ο Συνδυαστικός Δείκτης Καταλληλότητας (HSI) να είναι και αυτός μηδενικός. Συνεπώς, οι ξηρές περιοχές δεν λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό της Σταθμισμένης Κατάλληλης Έκτασης (WUA).

Ο Δείκτης Καταλληλότητας για το βάθος (SI_D), αντίθετα με το Δείκτη Καταλληλότητας για την ταχύτητα (SI_V), λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές όσο αυξάνεται η παροχή, καθώς τα βάθη αυξάνονται. Με την αύξηση της παροχής, επίσης, η υγρή επιφάνεια του πεδίου αυξάνεται και άρα, μειώνονται οι ξηρές περιοχές, δηλαδή, οι περιοχές με μηδενικό SI_D .

Συνδυάζοντας αυτές τις πληροφορίες για το μικρό μέγεθος του Ποταμοκέφαλου, εξάγεται ο Συνδυαστικός Δείκτης Καταλληλότητας (HSI) που αντικατοπτρίζει την καταλληλότητα της περιοχής για το συνδυασμό βάθους και ταχύτητας ροής. Παρατηρείται ότι οι περιοχές με μέτρια έως υψηλή καταλληλότητα ($HSI > 0,5$) αυξάνονται μέχρι την παροχή των $1,81\text{ m}^3/\text{s}$, ενώ έπειτα αρχίζουν και μειώνονται. Το γεγονός αυτό αντικατοπτρίζεται στο διάγραμμα της WUA (Εικόνα

6.5-13). Η καμπύλη έχει ανοδική τάση από $Q=0.30 \text{ m}^3/\text{s}$ έως $Q=1,81 \text{ m}^3/\text{s}$, όπου εντοπίζεται η κορυφή της, ενώ μετά υπάρχει έντονη πτώση μέχρι $Q=9,98 \text{ m}^3/\text{s}$. Συνεπώς, για το μικρό μέγεθος Ποταμοκέφαλου, η τιμή της οικολογικής παροχής τίθεται ίση με $Q=1,81 \text{ m}^3/\text{s}$.

Μεγάλος Ποταμοκέφαλος

Αναφορικά με την ταχύτητα, η αντίστοιχη καταλληλότητα μειώνεται όσο αυξάνεται η παροχή, όπως συμβαίνει και με τον μικρό Ποταμοκέφαλο. Στην περίπτωση του μεγάλου Ποταμοκέφαλου, ωστόσο, αυτή η μείωση της καταλληλότητας γίνεται με πιο ήπιο ρυθμό. Για κάθε σενάριο παροχής, δηλαδή, το υπολογιστικό πεδίο κρίνεται πιο κατάλληλο σχετικά με την ταχύτητα για το μεγάλο μέγεθος του ιχθύος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, σύμφωνα με τις Καμπύλες Καταλληλότητας, ο SI_V για το μεγάλο μέγεθος είναι υψηλότερος από ότι για το μικρό μέγεθος όταν η ταχύτητα κυμαίνεται μεταξύ 0,20 και 0,90 m/s.

Όσον αφορά στο βάθος ροής, η καταλληλότητα του πεδίου αυξάνεται όσο αυξάνεται και η παροχή, φαινόμενο που παρατηρείται και για το μικρό μέγεθος Ποταμοκέφαλου. Παρατηρείται πως για τις χαμηλές παροχές (έως $1,81 \text{ m}^3/\text{s}$) που τα βάθη είναι πιο μικρά, το πεδίο κρίνεται καταλληλότερο για το μικρό μέγεθος, ενώ για μεγαλύτερες παροχές ισχύει το αντίθετο.

Συνδυάζοντας τα παραπάνω, υπολογίζεται ο Συνδυαστικός Δείκτης Καταλληλότητας. Οι περιοχές με μέτρια έως υψηλή καταλληλότητα αυξάνονται μέχρι την παροχή $Q=3,00 \text{ m}^3/\text{s}$ και μετά αρχίζουν να μειώνονται. Αυτό το φαινόμενο αντικατοπτρίζεται και στο διάγραμμα της WUA (Εικόνα 6.5-13). Συνεπώς, για το μεγάλο μέγεθος Ποταμοκέφαλου, η τιμή της οικολογικής παροχής τίθεται ίση με $Q=3,00 \text{ m}^3/\text{s}$.

Συνοψίζοντας και για τα 2 μεγέθη του Ποταμοκέφαλου, το εύρος των ελάχιστων παροχών που εξασφαλίζουν τη βέλτιστη ή ικανοποιητική διαθεσιμότητα κατάλληλων ενδονημάτων εκτιμάται ίσο με $1,81-3,00 \text{ m}^3/\text{s}$. Αυτές οι τιμές παροχής θεωρούνται πολύ λογικές για τη διατήρηση των ιχθυοπληθυσμών στο Σπερχειό ποταμό κατά τη διάρκεια της καλοκαιρινής περιόδου. Η καταλληλότερη τιμή για την οικολογική παροχή το καλοκαίρι κρίνεται η $Q=1,81 \text{ m}^3/\text{s}$, η οποία εξασφαλίζει ιδανικές συνθήκες για το μικρό μέγεθος του Ποταμοκέφαλου και ταυτόχρονα την ελάχιστη υδρολογική όχληση για το μεγάλο μέγεθος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

7.1. Συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν ο προσδιορισμός της οικολογικής παροχής σε ποταμούς με ολοκληρωμένα μοντέλα υδροδυναμικής συμπεριφοράς–ενδιαιτήματος. Το ολοκληρωμένο μοντέλο που δημιουργήθηκε για το σκοπό αυτό εφαρμόστηκε σε ένα τμήμα του Σπερχειού ποταμού που δέχεται πολλές απολήψεις με αποτέλεσμα να δημιουργούνται σοβαρά προβλήματα σχετικά με τη διατήρηση των ιχθυοπληθυσμών του. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν 2 μεγέθη του ιχθύος Ποταμοκέφαλου που διαβιεί στο Σπερχειό.

Συνοψίζοντας, τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από τη διερεύνηση αυτή είναι τα εξής:

1. Το υδροδυναμικό μοντέλο, παρά την έλλειψη επαρκών δεδομένων για τη βαθμονόμηση και την επιβεβαίωσή του, επιτυγχάνει να δώσει μια ρεαλιστική εικόνα των υδραυλικών μεγεθών στην περιοχή διερεύνησης. Οι τιμές της ταχύτητας και του βάθους που προέκυψαν από τους υπολογισμούς πλησιάζουν ικανοποιητικά τις αντίστοιχες τιμές από τις μετρήσεις πεδίου.
2. Σε κάθε σενάριο παροχής τα αποτελέσματα του υδροδυναμικού μοντέλου δείχνουν ότι στην περιοχή διερεύνησης, η ταχύτητα ροής αυξάνεται στο τμήμα με την έντονη κλίση (περιοχή στένωσης του ποταμού), ενώ το βάθος ροής αυξάνεται ανάντη και κατάντη της περιοχής αυτής. Οι μέγιστες τιμές βάθους σημειώνονται στα τελευταία 80m του ποταμού.
3. Η καταλληλότητα σχετικά με την ταχύτητα (δείκτης SI_v) μειώνεται όσο αυξάνεται η παροχή, ενώ η καταλληλότητα σχετικά με το βάθος νερού (δείκτης SI_D) αυξάνεται. Αυτό παρατηρείται και για τα 2 είδη Ποταμοκέφαλου και δηλώνει πως οι εξεταζόμενοι ιχθύες προτιμούν μικρές ταχύτητες και μέτρια βάθη. Ο Συνδυαστικός Δείκτης Καταλληλότητας (HSI), που αποτελεί συνδυασμό των προαναφερθέντων δεικτών, αρχικά αυξάνεται, φτάνει μια μέγιστη τιμή για κάποιο σενάριο παροχής και, τελικά, μειώνεται.
4. Η Σταθμισμένη Κατάλληλη Έκταση για κάθε παροχή (εκτός από την $Q=0.3\text{m}^3/\text{s}$ και την $Q=0.5\text{m}^3/\text{s}$) είναι μεγαλύτερη για το μεγάλο μέγεθος Ποταμοκέφαλου, δηλαδή οι συνθήκες που δημιουργούνται στο εξεταζόμενο τμήμα ευνοούν πιο πολύ το μεγάλο μέγεθος. Αυτό συμβαίνει διότι σε γενικές γραμμές ο μεγάλος Ποταμοκέφαλος προτιμάει υψηλότερες τιμές βάθους και ταχύτητας από το μικρό Ποταμοκέφαλο.
5. Η ιδανικότερη τιμή παροχής για το μικρό μέγεθος εκτιμάται στα $1,8\text{ m}^3/\text{s}$, ενώ για το μεγάλο μέγεθος στα $3,0\text{ m}^3/\text{s}$. Το εύρος παροχών $1,8-3,0\text{ m}^3/\text{s}$ θεωρείται πολύ λογικό για τη διατήρηση των ιχθυοπληθυσμών στο Σπερχειό ποταμό κατά τη διάρκεια της καλοκαιρινής περιόδου. Η καταλληλότερη τιμή κρίνεται η $Q=1,8\text{ m}^3/\text{s}$ καθώς εξασφαλίζει ιδανικές συνθήκες για το μικρό μέγεθος του Ποταμοκέφαλου και ταυτόχρονα την ελάχιστη υδρολογική όχληση για το μεγάλο μέγεθος.

7.2. Προτάσεις

Τα αποτελέσματα του μοντέλου που εφαρμόστηκε για τον προσδιορισμό της οικολογικής παροχής κρίνονται αρκετά ικανοποιητικά. Για τη βελτίωση του προτεινόμενου μοντέλου και την αύξηση του βαθμού αξιοπιστίας του προκειμένου να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί για θέματα διαχείρισης του νερού σε ποταμούς παρουσιάζονται οι παρακάτω προτάσεις:

1. Απαραίτητη προϋπόθεση για τη σωστή δόμηση του ολοκληρωμένου μοντέλου είναι η ύπαρξη επαρκών μετρήσεων πεδίου. Χρειάζεται, δηλαδή, η συλλογή περισσότερων υδρολογικών δεδομένων, αλλά και η λεπτομερής τοπογραφική αποτύπωση σε μεγαλύτερο τμήμα του ποταμού, προκειμένου να γίνει σαφέστερη η επίδραση της απόληψης νερού στο οικοσύστημα. Επίσης, προτείνεται η κατασκευή Καμπύλων Καταλληλότητας που να αφορούν τον εξεταζόμενο, και όχι άλλον, ποταμό, προκειμένου τα αποτελέσματα του μοντέλου να αντιστοιχούν όσο το δυνατόν περισσότερο στην πραγματικότητα.
2. Προτείνεται να εξετασθεί η απόκριση των ιχθύων και σε άλλες παραμέτρους, εκτός από το βάθος και την ταχύτητα ροής, όπως η μεταφορά ιζήματος και η θερμοκρασία. Για το σκοπό αυτό, βέβαια, αναγκαία είναι η κατασκευή των αντίστοιχων Καμπύλων Καταλληλότητας.
3. Για πιο ολοκληρωμένη άποψη για τις απαιτήσεις των ιχθυοπληθυσμών χρειάζεται να εξετασθούν και άλλοι ιχθύες που διαβιούν στο εξεταζόμενο ποτάμι. Η εκτίμηση της οικολογικής παροχής, δηλαδή, δεν πρέπει να βασίζεται στην ικανοποίηση ενός μονάχα οργανισμού-στόχου, αλλά στο συγκερασμό των προτιμήσεων περισσότερων χαρακτηριστικών ειδών που συνδέονται με τη γενικότερη οικολογική ποιότητα του ποταμού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνόγλωσση Βιβλιογραφία

1. Αναγνώστου Χ., Παπαθανασίου Ε., Ακεφιμαΐδης Κ., Γεωργακοπούλου-Γρηγοριάδου Ε., Γεωργίου Π., Δελατίλας Ι., Ζενέτου Α., Λαδοπούλου Μ., Πάγκου Κ., Pancucci A., Ρενιέρης Π., Σαμαρά Π., Σιαψάλη Κ., Σύμπουρα Ν., Χρήστου Ε., Χριστιανίδης Σ., Ψυλλίδου-Γκιουράνοβιτς Ρ., Αλμπάνης Τ., Καμπέρη Ε., Πομώνης Θ., Ρίζος Δ. (1994): «Μελέτη εντοπισμού ρύπανσης του Μαλιακού κόλπου σε συνδυασμό με τις ιχθυοπαραγωγικές και αλιευτικές δυνατότητες ανάπτυξής του», ΕΛΚΕΘΕ- Ελληνικό Κέντρο Θαλάσσιων Ερευνών, Αθήνα
2. Γεωργαλάς Σ. (2014): «Εκτίμηση Οικολογικής Παροχής από το Φράγμα του Μαραθώνα και Διαχείριση Διατιθέμενων Υδάτων», Μεταπτυχιακή εργασία, Διεπιστημονικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Περιβάλλον και Ανάπτυξη», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
3. Ευθυμίου Γ., Μερτζάνης Α., Σαπουντζής Μ., Ζακυνθινός Γ. (2005): «Ανθρωπογενείς επιδράσεις στο δέλτα του Π. Σπερχειού – Μέτρα προστασίας, ανάδειξης και διαχείρισης των φυσικών οικοσυστημάτων», Heleco '05, ΤΕΕ, Φεβρουάριος 2005, Αθήνα
4. Ζαμπάκας Ι. (1981): «Γενική κλιματολογία», Αθήνα
5. Καραλής Σ.Η.: «Υδρομετρία: Μέτρηση ταχυτήτων και παροχών σε ανοιχτούς αγωγούς και ποτάμια», ΤΕΙ Αθήνας
6. Κουτσογιάννης Δ., Μαμάσης Ν., Ευστρατιάδης Α. (2003): «Υδρολογική μελέτη λεκάνης Σπερχειού, Υδρολογική-Υδραυλική Μελέτη για την Αντιπλημμυρική Προστασία της Νέας Διπλής Σιδηροδρομικής Γραμμής κατά τη Διέλευσή της από την Περιοχή του Ποταμού Σπερχειού», Εργοδότης: ΕΡΓΑ ΟΣΕ, Ανάδοχος: Δ.Σωτηρόπουλος, Συνεργαζόμενοι: Δ.Κουτσογιάννης, Αθήνα
7. Κωτούλας Δ. (1987): «Έρευνα του χαρακτήρα των χειμαρικών ρευμάτων στην Ελλάδα ως παράγοντα υποβάθμισης ορεινών λεκανών και πλημμυρογένεσης», Μέρος Ι, Λεκάνη απορροής ποταμού Σπερχειού, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη
8. Μιμίκου Μ.Α. (2006): «Τεχνικά Χρονικά», Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
9. Μιμίκου Μ.Α., Μπαλτάς Ε.Α. (2006): «Τεχνική Υδρολογία», εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα
10. Νουτσόπουλος Γ., Χριστοδούλου Γ. (1996): «Μαθήματα Μηχανικής των Ρευστών για Πολιτικούς Μηχανικούς», εκδόσεις Fountas, Αθήνα
11. Νουτσόπουλος Γ., Χριστοδούλου Γ., Παπαθανασιάδης Τ. (2007): «Υδραυλική Ανοιχτών Αγωγών», εκδόσεις Fountas, Αθήνα
12. Οδηγία-Πλαίσιο για τα Ύδατα 2000/60/ΕΚ
13. Παπαδάκη Χ., Δημητρίου Η., Martínez Capel Francisco, Munoz Mas Rafael, Ντοανίδης Λ., Ζόγκαρης Σ., Κοτίνας Β., Ευελπίδου Ν., Σταματάκης Μ., Καρκάνη Ε., Καμπόλης Ι., Ιορδάνης Κ., Γιόξας Γ. (2015): «Δείκτες καταλληλότητας οικοτόπων και οι σχετικοί αλγόριθμοι για την ανάπτυξη του υδροοικολογικού μοντέλου», Τεχνική Έκθεση, Ερευνητικό έργο ECOFLOW, Συνεργασία 2011 - ΓΓΕΤ

14. Πεχλιβανίδου Σ. (2012): «Ιζηματολογικά και φυσικογεωγραφικά μοντέλα ανάπτυξης ολοκαινικών δελταικών ακολουθιών στην κοιλάδα του Σπερχειού ποταμού», Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας, ΑΠΘ
15. Πρόγραμμα «ΚΡΗΠΙΣ: Ανάπτυξη συστήματος ολοκληρωμένης διαχείρισης λεκάνης απορροής και της συνδεδεμένης παράκτιας και θαλάσσιας ζώνης», ΕΛΚΕΘΕ- Ελληνικό Κέντρο Θαλάσσιων Ερευνών, Αθήνα
16. Τέγος Μ. (2014): «Εκτίμηση της οικολογικής ροής στο φράγμα του Μόρνου», Διπλωματική εργασία, Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
17. Τσακίρης Γ. (1995): «Υδατικοί πόροι: Ι. Τεχνική Υδρολογία», Εκδόσεις ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ, Αθήνα
18. Χατζημπίρος Κ. (2007): «Οικολογία: Οικοσυστήματα και Προστασία του Περιβάλλοντος», Έκδοση Γ', Εκδόσεις ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ, Αθήνα
19. Ψωμιάδης Ε. (2010): «Έρευνα Γεωμορφολογικών και Περιβαλλοντικών Μεταβολών στην Υδρολογική Λεκάνη του Σπερχειού Ποταμού με Χρήση Νέων Τεχνολογιών», Διδακτορική Διατριβή, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

1. Acreman, M. C., Dunbar, M. J. (2004): "Defining environmental river flow requirements – a review", Hydrology and Earth System Sciences Discussions, European Geosciences Union, 8 (5), pp.861-876
2. Allouche S. and Gaudin P. (2001): "Effects of avian predation threat, water flow and cover on growth and habitat use by chub in an experimental stream", ΟΙΚΟΣ
3. Arcement G.J. Jr, Schneider V.R.: "Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains", United States Geological Survey (USGS)
4. Barnes H.H. Jr, (1967): "Roughness Characteristics of natural channels", US Geological Survey Water Supply Paper 1849
5. Benaka, L.R. (1999). "Fish habitat: Essential fish habitat and rehabilitation", American Fisheries Society, Hartford CT, (USA), 419 pp.
6. Bischoff, A. and Freyhof, J. (1999): "Seasonal shifts in day-time resource use of 0+ barbel, *Barbus barbus*", Environ. Biol. Fish. 56 (1-2), 199-212.
7. Bockelmann B. N., Fenrich E., Falconer R. A. (2002): "Development of an eco-hydrological model for stream and river restoration", Proceedings of the Environmental flows for river systems / Fourth international ecohydraulics symposium, Cape Town, South Africa.
8. Bockelmann B. N., Lin B., Falconer R. A. (2003): "Ecohydraulics field and modelling study for river restoration", Proceedings of XXX IAHR Congress, Thessaloniki, Greece.
9. Bovee, K.D., 1986. Development and evaluation of habitat suitability criteria for use in the instream flow incremental methodology. Instream flow information paper no. 21, US Fish and Wildlife Service. Biological Report 86 (7), Washington, DC.

10. Brown L. C. and Barnwell T. O. (1987): "The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: documentation and user manual", Env. Res. Laboratory. US EPA, EPA /600/3-87/007, Athens, GA.
11. Buchanan, T.J., Somers, W.P., 1976. Discharge measurements at gaging stations. Tec. water-resources Investig. United States Geol. Surv. - B. 3 - Appl. Hydraulics, 2nd edn. United States Government Printing Office, Washington, pp 1–65.
12. Cengel, Y. A. and Cimbala, J. M. Fluid Mechanics: Fundamentals and applications, 2nd edn. McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 2004.
13. Chapra S. C. (1997): "Surface water quality modelling", McGraw - Hill, New York.
14. Ciarapica L. and Todini E. (2002): "TOPCAPI: a model for the representation of the rainfall - runoff process", Hydrological Processes
15. Clarke R. T., Wright J. F. and Furse M.T. (2003): "RIVPACS models for predicting the expected macroinvertebrate fauna and assessing the ecological quality of rivers", Ecological Modelling
16. Chatzimbiros K., Koutsogiannis D., Katsiri A., Stamou A., Andreadakis A., Sargentis Ph., Christofides C., Efstratiades A. and Valassopoulos A. (2002): "Management of water quality of the Plastiras reservoir", Proceedings of the 4th International Conference on Reservoir Limnology and Water Quality, Czech Republic
17. Chow V. T.(1959): "Open-channel hydraulics", McGraw-Hill Book Co, New York
18. Chow V. T., Maidment D. R. and Mays L. W. (1988): "Applied Hydrology", McGraw-Hill International Editions, Civil Engineering Series
19. Conallin, J., Boegh, E. and Jensen, J.K. (2010): "Instream physical habitat modelling types: An analysis as stream hydromorphological modelling tools for EU water resource managers", Int. J. River Basin Manage. 8 (1), 93-107.
20. Cowan, W.L., 1956. Estimating hydraulic roughness coefficients: Agricultural Engineering, v. 37, no. 7, pp. 473-475.
21. Cox B. A. (2003): "A review of currently available in-stream water-quality models and their applicability for simulating dissolved oxygen in lowland rivers", The Science of the Total Environment
22. Economou A. and Skoulikidis N., (2002): "Reference conditions, ecological quality and classification of the ecological status on inland waters in accordance with the WFD 2000/60", in "Water Framework Directive, Harmonization with Greek reality".
23. Ervine D. A., MacLeod. (1999): "Modelling a river with distant flood banks", Proceedings of the Institution of Civil Engineers, UK
24. Gore, J.A. and Nestler, J.M. (1988): Instream flow studies in perspective. Regul. Rivers: Res. Manage. 2 (2), 93- 101.
25. Heggenes, J., Saltveit, S.J., 1990. Seasonal and spatial microhabitat selection and segregation in young Atlantic salmon, *Salmo salar L.*, and brown trout, *Salmo trutta L.*, in a Norwegian river. J. Fish Biol. 36, 707–720.

26. Hervouet J.-M. (2007): "Hydrodynamics of Free Surface Flows: Modelling with the Finite Element Method", Wiley
27. ISO 1100-2, 2010. Hydrometry – measurement of liquid flow in open channels – Part 2: determination of the stage-discharge relationship
28. Jowett I. G. (1992): "Models of the abundance of large brown trout in New Zealand rivers.", North American Journal Fisheries Management.
29. Karr, J.R. (1981): "Assessment of biotic integrity using fish communities", Fisheries 6 (6), 21-27.
30. Lamouroux, N., Capra, H., 2002. Simple predictions of instream habitat model out-puts for target fish populations. Freshw. Biol. 47 (8), 1543–1556.
31. Lamouroux N., Olivier J.-M., Persat H., Pouilly M., Souchon Y. and Statzner B. (1999): "Predicting community characteristics from habitat conditions: fluvial fish and hydraulics", Freshwater Biology 42
32. Lewin W.- C., Okun N. and Mehner T. (2004): "Determinants of the distribution of juvenile fish in the littoral area of a shallow lake", Freshwater Biology
33. Li, W., Chen, Q., Cai, D., Li, R., 2015. Determination of an appropriate ecological hydrograph for a rare fish species using an improved habitat suitability model introducing landscape ecology index. Ecol. Model. 311, 31-38
34. Maddock, I. (1999): "The importance of physical habitat assessment for evaluating river health", Freshwat. Biol. 41 (2), 373-391.
35. Marsili-Libelli, S., Giusti, E. and Nocita, A. (2013): "A new instream flow assessment method based on fuzzy habitat suitability and large scale river modelling", Environ. Modell. Softw. 41 27-38.
36. Martínez-Capel, F., García De Jalón, D., Werenitzky, D., Baeza, D., Rodilla-Alamá, M., 2009. Microhabitat use by three endemic Iberian cyprinids in Mediterranean rivers (Tagus River Basin, Spain). Fish. Manag. Ecol. 16, 52–60.
37. Martínez-Capel, F., Muñoz-Mas, R., 2014. Development of the HSC for fish species in two river basins in Greece, Technical Report, ECOFLOW project, www.ecoflow.gr
38. Meador, M.R., Brown, L.R., Short, T., 2003. Relations between introduced fish and environmental conditions at large geographic scales. Ecol. Indic. 3 (2), 81–92.
39. Milhous, R.T., Waddle, T.J., (2012): "Physical Habitat Simulation (PHABSIM) Software for Windows (v.1.5.1). Fort Collins, CO: USGS Fort Collins Science Center
40. Mitchell, G.K., 2007. Waimakariri River flow, habitat availability and angling suitability: two-dimensional modelling results. Report prepared for URS New Zealand Ltd.
41. Mosley, M.P., McKerchar A.I., 1993. Streamflow. In: Maidment D (ed) Handb. Hydrol. McGraw-Hill, New York, pp 8.1–8.35
42. Mouton A. M., Schneider M., Depestele J., Goethals P. L. M. and De Pauw N. (2006): "Fish habitat modelling as a tool for river management", Elsevier

43. Olden, J.D., Lawler, J.J. and Poff, N.L. (2008): "Machine learning methods without tears: A primer for ecologists", *Q. Rev. Biol.* 83 (2), 171-193.
44. Papadaki, C., Mentzafou, A., Ntoanidis, L., Zogaris, S., Evelpidou, N., Argyropoulos, D., Dimitriou, E., 2014. Habitat hydraulic modeling for assessing changes of mesohabitat types of a Greek mountainous river, EGU, Austria
45. Papadaki, C., Soulis K., Munoz-Mas, R., Martinez-Capel, F., Zogaris, S., Ntoanidis, L., Dimitriou, E., 2016. Potential impacts of climate change on flow regime and fish habitat in mountain rivers of the south-western Balkans. *Science of the Total Environment* 540, 418-428
46. Papadaki, C., Soulis, K., Munoz-Mas, R., Ntoanidis, L., Zogaris, S., Dercas, N., Dimitriou, E., 2015. A new approach for determining the environmental flow regime in a Greek river, 9th World Congress Of EWRA "Water Resources Management in a Changing World: Challenges and Opportunities", Istanbul, Turkey, ISBN: 978-975-441-442-4, pp. 291
47. Papadaki, C., Vardakas, L., Dimitriou, E., Kommatas, D., Kalogianni, E., 2015. Microhabitat use by two Greek endemic chub species, in two Greek rivers - Preliminary results, 11th Panhellenic Symposium on Oceanography and Fisheries, pp. 629- 632 Mytilene, Lesbos island, Greece
48. Paukert, C.P., Pitts, K.L., Whittier, J.B., Olden, J.D., 2011. Development and assessment of a landscape-scale ecological threat index for the Lower Colorado River basin. *Ecol. Indic.* 11 (2), 304–310.
49. Person, E., Bieri, M., Peter, A. and Schleiss, A.J., 2014. Mitigation measures for fish habitat improvement in Alpine rivers affected by hydropower operations. *Ecohydrology* 7 (2), 580-599.
50. Pont, D., Hugueny, B., Beier, U., Goffaux, D., Melcher, A., Noble, R., et al, (2006): "Assessing river biotic condition at a continental scale: A European approach using functional metrics and fish assemblages", *J. Appl. Ecol.* 43 (1), 70-80.
51. Poulos S., Leontaris S., Collins M. B. (1997): "Sedimentological and clay mineralogical investigations in Maliakos Gulf, eastern Greece", *Bolletino di Geofisica Teorica ed Applicata*, Vol. 39
52. Rodi, W. 1980. Turbulence models and their application in hydraulics - A state of the art review, IAHR, Delft, The Netherlands.
53. Saito, L., Johnson, B.M., Bartholow, J., Hanna, R.B., 2001. Assessing ecosystem effects of reservoir operations using food web-energy transfer and water quality models. *Ecosystems* 4 (2), 105–125.
54. Shokoohi, A., Amini, M., 2014. Introducing a new method to determine rivers' ecological water requirement in comparison with hydrological and hydraulic methods. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 11 (3), 747–756.
55. Scruton D. A., Heggenes J., Valentin S., Harby A. and Bakken T. H. (1998): "Field sampling design and spatial scale in habitat - hydraulic modelling: comparison of three models", *Fisheries Management and Ecology*
56. Sergeant F., Papadonikolaki G., Stamou A. I., Bui M., Rutschmann P., Dimitriou E. and Skoulikidis N. (2015): "Preliminary assessment of the effect of water abstraction in Sperchios

- river (Greece) on its ecological status using the hydraulic habitat model PHABSIM”, Proceedings of the 14th International Conference on Environmental Science and Technology, CEST 2015, Rhodes, Greece
57. Skoulikidis N. Th., Gritzalis K., Kouvarda Th. and Buffagni A. (2004): “The development of an ecological quality assessment and classification system for Greek running waters based on benthic macroinvertebrates”, *Hydrobiologia*
58. Skoulikidis, N., Vardakas, L., Karaouzas, I., Economou, A., Dimitriou, E., Zogaris, S., 2011. Water stress in Mediterranean lotic systems; impacts and management implications in an artificially intermittent river (Evrotas River, Greece). *Aquatic Science Special issue: Drought in Mediterranean Streams* 73, 581-597.
59. Stamou A. I. (2015): “Ecological modeling of surface waters. Notes”, Technical University of Munich
60. Stamou A. I. (2014): “Environmental Hydrodynamic Modeling. Notes”, Technical University of Munich
61. Stamou A. I., Christodoulou G. C., Bensasson L. A., Lazaridis, I. E. (1995): “A comparison of models for coastal circulation”, *Wat. Sci. Tech*
62. Stamou, A.I., Koumanova, B., Stoyanov, S., Atanasov, G., Pipilis, K., 1999b. Water quality of the Beli Lom River. *Water Science and Technology* 39 (8), 55–62.
63. Stamou A. I., Nanou-Giannarou A., Christodoulou G. (2002): “The implementation of Directive 2000/60 in Greece-Use of Mathematical Models”, Proceedings of the 5th International Conference on Water Management in the Era of Transition, Athens
64. Tennant, D.L., 1976. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. *Fisheries* 1, 6–10.
65. Tharme R.E. (2003): “A global perspective on environmental flow assessment: Emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers.”, *River Research and Application*
66. The Brisbane Declaration. (2007): “Environmental Flows are Essential for Freshwater Ecosystem Health and Human Well-Being.”, Brisbane, Australia
67. Theodoropoulos C., Papadonikolaki G., Stamou A .I., Bui M. D., Rutschmann P., Skoulikidis N. (2015): “A methodology for the determination of environmental flow releases from dams based on hydrodynamic habitat modeling and benthic macroinvertebrates”, Proceedings of the 14th International Conference on Environmental Science and Technology, CEST 2015, Rhodes, Greece
68. US Department of the Interior. (2001). “US Geological Survey, PHABSIM for Windows, User's Manual”, Open File Report 01-340
69. Villaret, C., Hervouet, J.-M., Kopmann, R., Merkel, U., Davies, A.G., 2013. Morphodynamic modeling using the Telemac finite-element system. *Computers & Geosciences* 53, 105-113
70. Vörösmarty, C.J., Sharma, K.P., Fekete, B.M., Copeland, A.H., Holden, J., Marble, J., Lough, J.A., 1997. The storage and aging of continental runoff in large reservoir systems of the world. *Ambio* 26 (4), 210–219.

71. Wasson J. G., Tusseau – Vuillemin M. H., Andreassian V., Perrin C. (2003): “What kind of water models are needed for the implementation of the European Water Framework Directive? Examples from France”, *Int. J. River Basin Management*
72. Weatherhead M. A. and James M. R. (2001): "Distribution of macroinvertebrates in relation to physical and biological variables in the littoral zone of nine New Zealand lakes", *Hydrobiologia*
73. Whitehead P. G., Williams R. J., Lewis D. R. (1997): “Quality simulation along river systems (QUASAR): model theory and development”, *The Science of the Total Environment*
74. Yao W., Bui M.D., Rutschmann P. (2014): “Application of habitat and population modeling in river management”, *Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität München*
75. Yao W., Rutschmann P. and Bamal S. (2014): “Modeling of River Velocity, Temperature, Bed Deformation and its Effects on Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*) Habitat in Lees Ferry, Colorado River”, *International Journal of Environmental Research*, 8(4): 887-896
76. Yi Y., Wang Z. and Yang Z. (2010): “Two-dimensional habitat modeling of Chinese sturgeon spawning sites”, *Ecological Modeling* 221, p.864-875
77. Zogaris S. (2014): “Reports on natural history and conservation from a wildlife scientist based in Athens Greece”, *Athens Nature Journal*

Διαδικτυακοί Τόποι

1. www.openmascaret.org
2. www.hcmr.gr
3. www.ecoflow.gr
4. www.itia.ntua.gr
5. www.spercheios.com

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Στο Παράρτημα περιγράφεται με τη μορφή βημάτων η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τη δόμηση του υδροδυναμικού μοντέλου, τους υπολογισμούς και τη λήψη αποτελεσμάτων με τη μορφή διαγραμμάτων και εικόνων.

Εκτός από τον κώδικα Telemac 2D, χρησιμοποιήθηκαν τα προγράμματα Bluekenue και Fudaa Pre-Pro. Τα προγράμματα αυτά αποτελούν σημαντικά εργαλεία για την προετοιμασία του τελικού αρχείου προσομοίωσης, αλλά και για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων των υδροδυναμικών υπολογισμών.

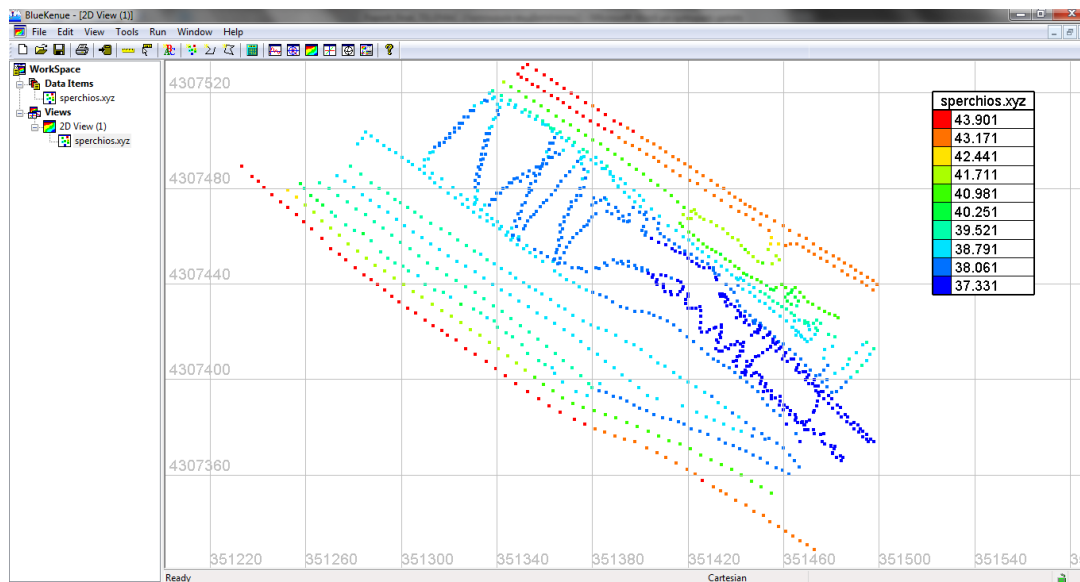
1. ΒΗΜΑ 1^ο: Δημιουργία αρχείου βαθυμετρίας του ποταμού.

Σε ένα αρχείο τύπου «Σημειωματάριο», έστω «sperchios.txt», εισάγουμε σε 3 στήλες δεδομένων τις συντεταγμένες Χ, Υ (ΕΓΣΑ '87) και το υψόμετρο εδάφους Ζ για κάθε σημείο της βαθυμετρίας του ποταμού. Μετονομάζουμε το αρχείο αυτό σε «sperchios.xyz» αλλάζοντας την κατάληξή του.

2. ΒΗΜΑ 2^ο: Δημιουργία του αριθμητικού πλέγματος και των οριακών συνθηκών με το πρόγραμμα Bluekenue

2.1. Εισαγωγή του αρχείου βαθυμετρίας

Στο πρόγραμμα Bluekenue ανοίγουμε το αρχείο της βαθυμετρίας «sperchios.xyz» και, αφού το «σύρουμε» στο 2Dview, «βλέπουμε» τον πυθμένα του ποταμού, όπως φαίνεται στην Εικόνα Π1.



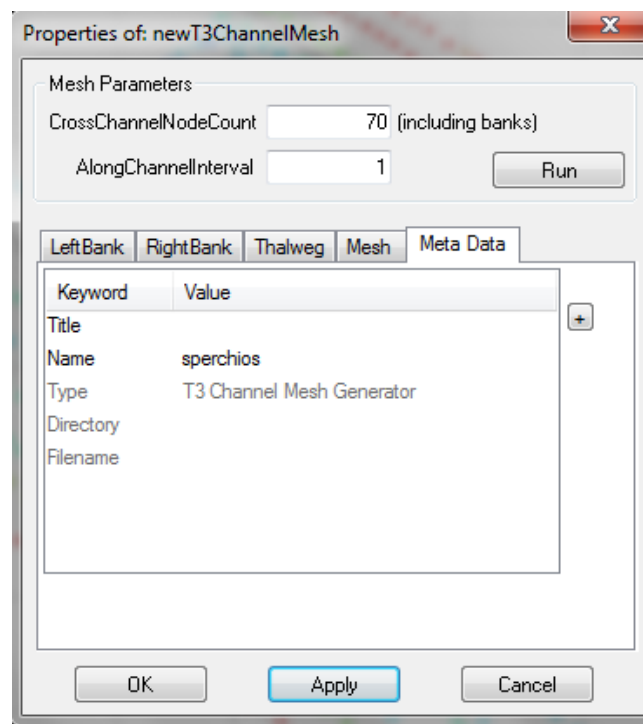
Εικόνα Π1: Η γεωμετρία του ποταμού στο Bluekenue

Το υπόμνημα (Properties-> Colour Scale-> Show Legend) δείχνει το εύρος τιμών των υψομέτρων του εδάφους στην αποτυπωμένη περιοχή.

2.2. Δόμηση του υπολογιστικού πλέγματος

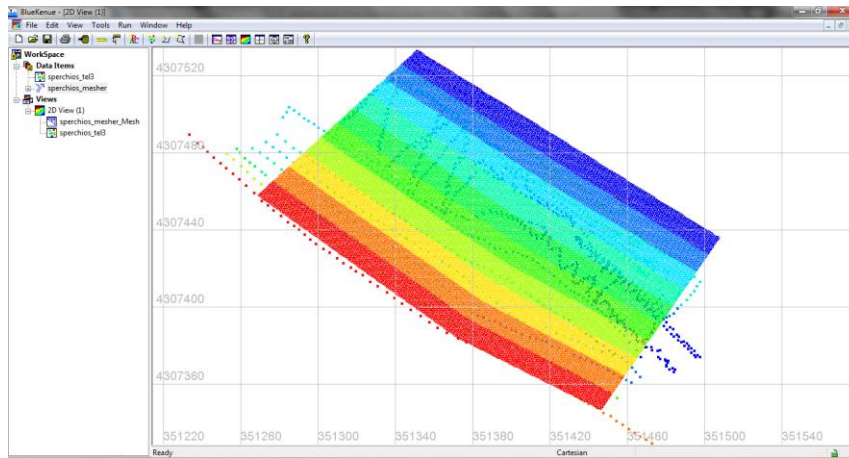
Για τη δημιουργία δομημένου πλέγματος (structured mesh) εφαρμόζουμε την ακόλουθη διαδικασία:

1. Θέτουμε στο Bluekenue τα όρια του υπολογιστικού πεδίου, δηλ. την αριστερή και δεξιά όχθη του ποταμού, σχεδιάζοντας 2 γραμμές (σχεδιάζουμε σημείο-σημείο στην οθόνη με το εργαλείο New Open Line) και τις ονομάζουμε «LEFT_BANK» και «RIGHT_BANK», αντίστοιχα.
2. Ακολουθούμε την εντολή FILE-> NEW και χρησιμοποιούμε το εργαλείο T3 Channel Mesher, ονομάζουμε το αρχείο στο metadata «sperchios» και ορίζουμε τις ακόλουθες παραμέτρους, όπως φαίνεται στην Εικόνα Π2:
 - a. Cross Channel Node Count = 70 που είναι ο αριθμός των κόμβων (70) κάθετα στη διεύθυνση της κύριας ροής του ποταμού, και
 - b. Along Channel Interval = 1.0 (m) που είναι η απόσταση μεταξύ 2 διαδοχικών κόμβων κατά μήκος της κύριας ροής.



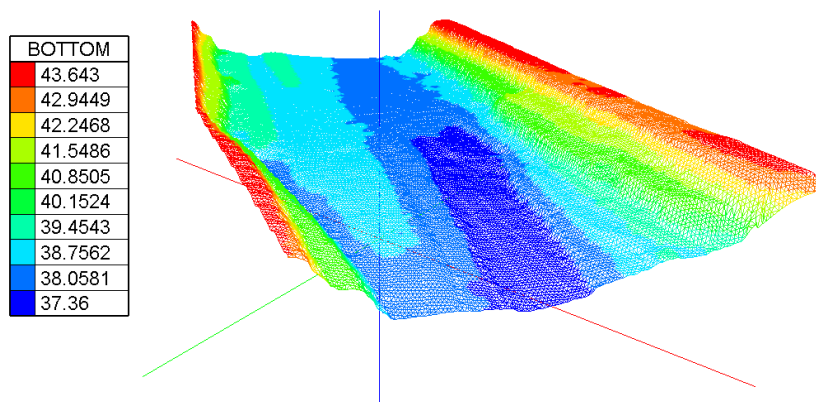
Εικόνα Π2: Εισαγωγή παραμέτρων για τη δημιουργία δομημένου πλέγματος

3. Στο Data items «sperchios» «σύρουμε» τις όχθες του ποταμού «LEFT_BANK» και «RIGHT_BANK» στα LeftBank και RightBank, αντίστοιχα.
4. Επιλέγουμε την εντολή RUN στο «sperchios» για τη δόμηση του πλέγματος που αποθηκεύεται στο «sperchios_mesh», το οποίο βλέπουμε στην δισδιάστατη μορφή του (κάτοψη) σύροντάς το στην επιλογή 2D View, όπως φαίνεται στην Εικόνα Π3.



Εικόνα Π3: Κάτοψη του πλέγματος

5. Ακολουθούμε την εντολή FILE-> NEW και χρησιμοποιούμε το εργαλείο 2D Interpolator με το οποίο πραγματοποιείται γραμμική παρεμβολή μεταξύ των δεδομένων υψομέτρων βαθυμετρίας (στο αρχείο «sperchios.xyz») και προσδιορισμός των υψομέτρων πυθμένα όλων των κόμβων του πλέγματος. Για να γίνει αυτό «σύρουμε» το αρχείο «sperchios.xyz» στο δημιουργούμενο newInterpolator2D. Στη συνέχεια επιλέγουμε το «sperchios_mesh» και στην εντολή TOOLS->Map Object επιλέγουμε newInterpolator2D και πατάμε OK, οπότε το αρχείο «sperchios_mesh» λαμβάνει την τρισδιάστατη μορφή του, την οποία βλέπουμε στην Εικόνα Π4.
6. Τέλος, μετονομάζουμε το αρχείο «sperchios_mesh» σε «BOTTOM» (αριστερό κλικ πάνω του-> Properties-> Meta Data).



Εικόνα Π4: Άποψη του τρισδιάστατου υπολογιστικού πλέγματος

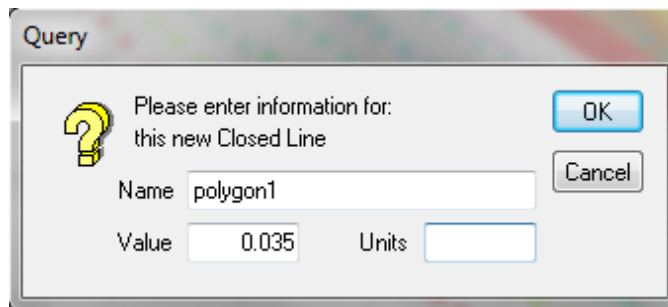
Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι η επιλογή των διαστάσεων του πλέγματος έγινε έπειτα από δοκιμές. Η δημιουργία κατάλληλου πλέγματος παίζει βασικό ρόλο στην επίλυση προβλημάτων, καθώς ένα αραιό πλέγμα μπορεί να οδηγήσει σε ανακριβή αποτελέσματα, ενώ ένα υπερβολικά πυκνό ίσως οδηγήσει σε μεγάλους υπολογιστικούς χρόνους, χωρίς αυτό να είναι απαραίτητο. Στο εγχειρίδιο του Telemac 2D συνιστάται τα τριγωνικά στοιχεία του πλέγματος να είναι όσο το δυνατόν ισόπλευρα, αν και στην περίπτωση ροής σε ποταμό η επιμήκυνση των στοιχείων αυτών προς τη φορά της ροής μπορεί να φανεί χρήσιμη για εξοικονόμηση υπολογιστικού χρόνου.

2.3. Ορισμός του συντελεστή τριβής

Το εξεταζόμενο τμήμα του ποταμού παρουσιάζει διαφοροποιήσεις στην ποιότητα του υποστρώματος, όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 5. Για το λόγο αυτό, χωρίζουμε το υπολογιστικό πεδίο σε τμήματα με διαφορετικούς συντελεστές τριβής με τη βοήθεια του προγράμματος Bluekenue.

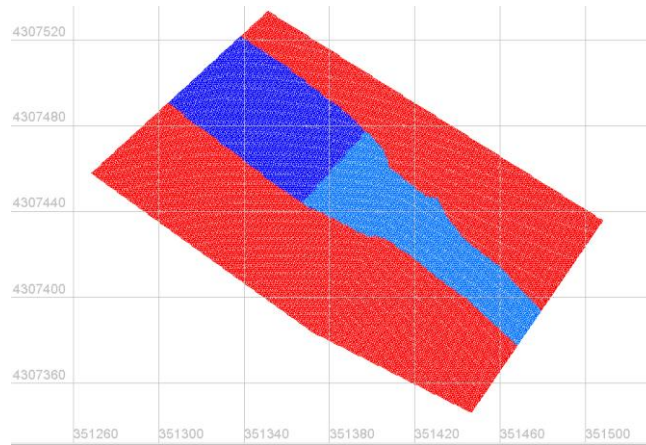
Η διαδικασία που ακολουθούμε για να ορίσουμε συντελεστή τριβής στον ποταμό είναι η εξής:

1. Ακολουθούμε τα βήματα 1 έως 4 του κεφαλαίου 2.2 ώστε να δημιουργήσουμε άλλο ένα πλέγμα «sperchios_mesh».
2. Ορίζουμε κάθε περιοχή του ποταμού που λαμβάνει ένα συγκεκριμένο συντελεστή τριβής, δημιουργώντας πολύγωνα με το εργαλείο New Closed Line. Δημιουργούμε, δηλαδή, τόσα πολύγωνα όσοι είναι και οι διαφορετικοί συντελεστές τριβής στην εξεταζόμενη περιοχή. Αν η περιοχή που εξετάζεται έχει ενιαίο συντελεστή τριβής, χρειάζεται να δημιουργηθεί μόνο ένα πολύγωνο. Σε κάθε πολύγωνο που δημιουργείται εισάγουμε όνομα στο πεδίο Name (πχ polygon1) και τιμή συντελεστή τριβής στο πεδίο Value (πχ 0,035) και πατάμε OK.



Εικόνα Π5: Εισαγωγή στοιχείων για κάθε πολύγωνο

3. Αφού δημιουργήσουμε τα πολύγωνα, επιλέγουμε το νέο «sperchios_mesh» που δημιουργήσαμε και στην εντολή TOOLS->Map Object επιλέγουμε polygon1 και πατάμε OK. Αυτή την ενέργεια την κάνουμε για κάθε πολύγωνο που έχουμε δημιουργήσει.
4. Μετονομάζουμε το «sperchios_mesh» σε «BOTTOM FRICTION» (αριστερό κλικ πάνω του->Properties-> Meta Data)
5. Σύρουμε το «BOTTOM FRICTION» στο παράθυρο 2D View και βλέπουμε πως κάθε τμήμα που έχει διαφορετικό συντελεστή τριβής λαμβάνει διαφορετικό χρώμα. Μπορούμε να ελέγξουμε με τον τρόπο αυτόν ότι οι συντελεστές τριβής έχουν τοποθετηθεί σωστά στο υπολογιστικό πεδίο.



Εικόνα Π6: Τμήματα του υπολογιστικού πεδίου με διαφορετικούς συντελεστές τριβής

2.4. Δόμηση του αρχείου της γεωμετρίας

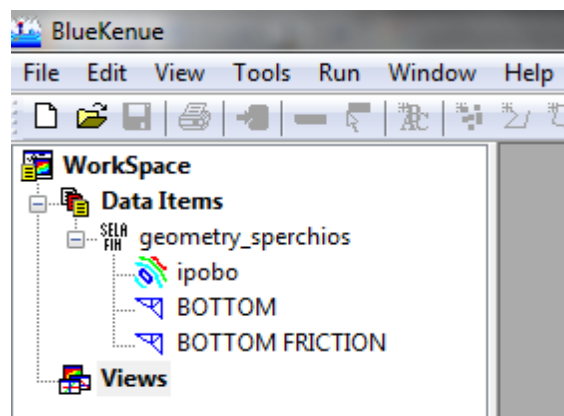
Για τη δόμηση του αρχείου γεωμετρίας στην εντολή FILE-> NEW χρησιμοποιούμε το εργαλείο SELAFIN Object. Δημιουργείται, έτσι, το αρχείο newSelafin, το οποίο μετονομάζουμε σε «geometry_sperchios». Σε αυτό «σύρουμε» τα «BOTTOM» και «BOTTOM FRICTION» που δημιουργήθηκαν όπως υποδείχθηκε στα κεφάλαια 2.2 και 2.3 του Παραρτήματος, αντίστοιχα. Το αρχείο της γεωμετρίας είναι πλέον έτοιμο.

Με την επιλογή στο BOTTOM properties-> Data μπορούμε να δούμε τα στοιχεία του πλέγματος που δημιουργήθηκε, δηλαδή τον αριθμό των κόμβων (nodes) και των τριγωνικών στοιχείων του (elements). Στην περίπτωση μας το πλέγμα αποτελείται από:

- 13.752 κόμβους (nodes) και
- 26.973 στοιχεία (elements).

Ομοίως με πριν, με την επιλογή στο BOTTOM FRICTION properties-> Data μπορούμε να δούμε τη μέγιστη και ελάχιστη τιμή του συντελεστή τριβής που έχουμε εισάγει.

Τέλος, αποθηκεύουμε το αρχείο «geometry_sperchios» ως «geometry_sperchios.slf». Αποτελεί απαραίτητο αρχείο για την προσομοίωση με το πρόγραμμα Telemac 2D και περιγράφει πλήρως τον πυθμένα του ποταμού.

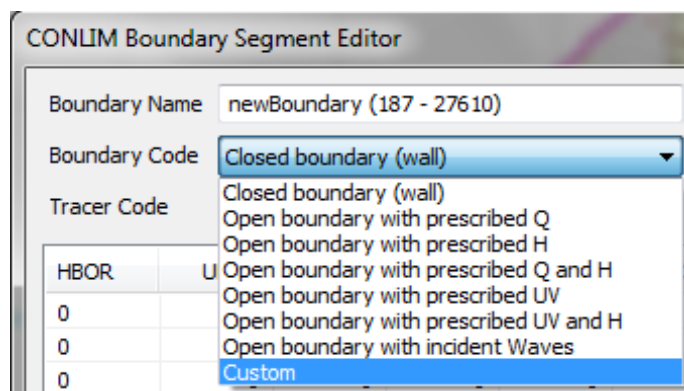


Εικόνα Π7: Τα περιεχόμενα του αρχείου της γεωμετρίας (SELAFIN file)

2.5. Καθορισμός είδους οριακών συνθηκών

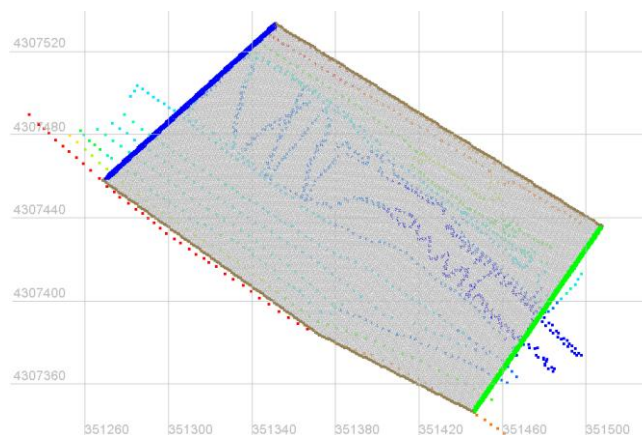
Για τον καθορισμό των οριακών συνθηκών στην εντολή FILE-> NEW χρησιμοποιούμε το εργαλείο Boundary Conditions, επιλέγουμε το αρχείο BOTTOM, το οποίο μετονομάζουμε σε «bc_sperchios» (properties->Meta Data-> bc_sperchios) και το «σύρουμε» στο 2D View για να εισάγουμε γραφικά τις οριακές συνθήκες στην εισροή και εκροή. Για την εισροή επιλέγουμε να έχουμε δεδομένη παροχή (open boundary with prescribed Q), ενώ για την εκροή δεδομένη στάθμη ελεύθερης επιφάνειας (open boundary with prescribed H).

Επιλέγουμε τους κόμβους της εισροής (επιλέγουμε με διπλό κλικ τον πρώτο κόμβο του ορίου και πατώντας το shift επιλέγουμε και τον τελευταίο κόμβο), δεξί κουμπί στο ποντίκι Add Boundary Segment και στο Boundary Code επιλέγουμε Open Boundary with prescribed Q, όπως φαίνεται στην Εικόνα Π6. Αντίστοιχη διαδικασία εφαρμόζουμε στην εκροή. Τελικά, αποθηκεύουμε το αρχείο «bc_sperchios (LIHBOR)» ως «bc_sperchios.cli» και το αρχείο «bc_sperchios» ως «bc_sperchios.bc2».



Εικόνα Π8: Επιλογές οριακών συνθηκών στο *Bluekenue*

Αφού αποθηκευτούν οι αλλαγές μας, το κάθε όριο λαμβάνει ένα συγκεκριμένο χρώμα που αντιπροσωπεύει το είδος της οριακής συνθήκης που το χαρακτηρίζει, όπως φαίνεται και στην Εικόνα Π9. Το υγρό όριο με δεδομένη παροχή χρωματίζεται μπλε, ενώ αυτό με δεδομένη στάθμη ελεύθερης επιφάνειας χρωματίζεται πράσινο. Τα στερεά όρια λαμβάνουν αυτόματα καφέ χρώμα.



Εικόνα Π9: Ορισμός οριακών συνθηκών στο πρόγραμμα *Bluekenue*

Το αρχείο bc_sperchios.cli αποτελεί το δεύτερο –μετά το geometry file- απαραίτητο αρχείο για την προσομοίωση με το πρόγραμμα Telemac 2D.

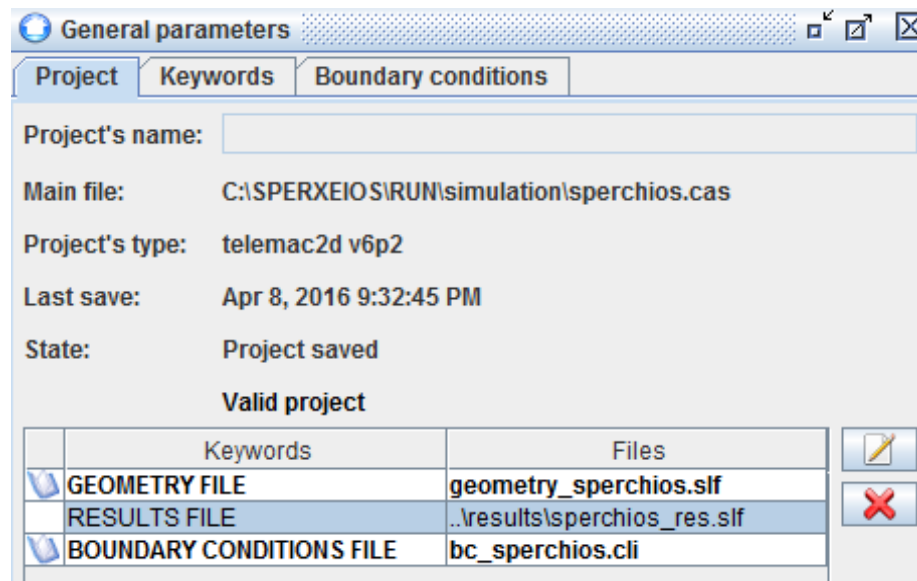
3. ΒΗΜΑ 3^ο: Καθορισμός των παραμέτρων υπολογισμού με το πρόγραμμα Fudaa Pre - Pro

3.1. Δόμηση του steering file

Ανοίγουμε το πρόγραμμα Fudaa Pre-Pro και με το εικονίδιο «launch the hydraulic project editor»->create->create a new Telemac project οδηγούμαστε σε οθόνη, στην οποία εισάγουμε τα ακόλουθα αρχεία:

1. Selafin File: «geometry_sperchios.slf».
2. Boundary Conditions File: «bc_sperchios.cli»
3. Steering File: Sperchios.cas Νέο αρχείο

Επιλέγουμε την εντολή Validate και ονομάζουμε ένα ακόμα νέο αρχείο αποτελεσμάτων ως «sperchios_res.slf», όπως φαίνεται στην Εικόνα Π10.



Εικόνα Π10: Δημιουργία αρχείου προσομοίωσης (steering file)

Το αρχείο προσομοίωσης (ή αλλιώς steering file) αποτελεί κατά κάποιο τρόπο τον «πίνακα ελέγχου» της υπολογιστικής διαδικασίας, καθώς συγκεντρώνει όλα τα απαραίτητα αρχεία και τις απαραίτητες πληροφορίες για τον υπολογισμό. Έχει κατάληξη (*.cas) και μπορεί να ανοίξει και να δεχτεί επεξεργασία με τη χρήση του «Σημειωματάριου» ή του προγράμματος Fudaa Pre-Pro. Αξίζει να σημειωθεί πως το Telemac 2D παρέχει αρχικά προτεινόμενες τιμές για τις διάφορες παραμέτρους προσομοίωσης (keywords), τις οποίες και λαμβάνει υπόψη του για τον υπολογισμό εάν αυτές δεν αλλαχθούν από το χρήστη.

Αρχικά, λοιπόν, δημιουργούμε το αρχείο sperchios.cas, στο οποίο εισάγονται τα αρχεία geometry_sperchios.slf και bc_sperchios.cli. Επίσης, στο αρχείο αυτό καθορίζουμε και το αρχείο στο οποίο το πρόγραμμα Telemac 2D θα αποθηκεύσει τα αποτελέσματα του υπολογισμού (results file), όπως φαίνεται και στην εικόνα Π10. Το αρχείο των αποτελεσμάτων είναι σε μορφή selafin και το ονομάζουμε sperchios_res.slf.

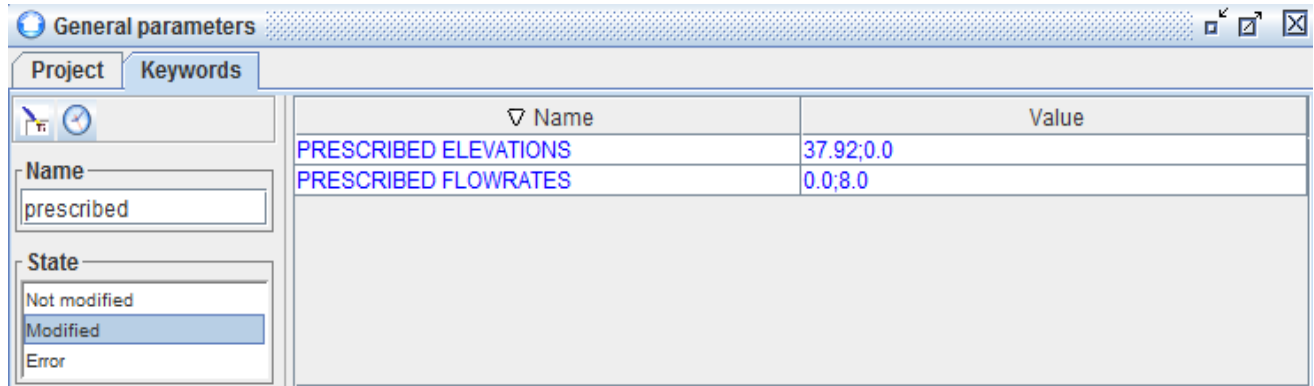
Στο steering file εισάγουμε τις παραμέτρους υπολογισμού ακολουθώντας τη διαδικασία που περιγράφεται στα επόμενα υποκεφάλαια.

3.2. Εισαγωγή των τιμών των οριακών συνθηκών

Σε προηγούμενο βήμα είχαν προσδιορισθεί οι οριακές συνθήκες στα υγρά όρια (εισροή και εκροή ποταμού) στο πρόγραμμα Bluekenue χωρίς όμως να δοθούν τιμές για αυτές. Η διαδικασία αυτή θα γίνει στο πρόγραμμα Fudaa Pre-Pro, ορίζοντας τιμές για το κάθε υγρό όριο στις παραμέτρους PRESCRIBED FLOWRATES και PRESCRIBED ELEVATIONS. Για παράδειγμα, θα μπορούσαμε να εισάγουμε τις εξής τιμές:

- PRESCRIBED FLOWRATES = (0.0; 8.10)
- PRESCRIBED ELEVATIONS = (37.92; 0.0)

Για κάθε παράμετρο εισάγουμε τόσες τιμές όσα είναι και τα υγρά όρια, απλά στα όρια εκείνα όπου δεν ορίζεται η συγκεκριμένη οριακή συνθήκη θέτουμε μηδενική τιμή, η οποία και αγνοείται από το Telemac 2D. Η πρώτη τιμή αντιστοιχεί στην εκροή του ποταμού και η δεύτερη τιμή στην εισροή του.



Εικόνα Π11: Ορισμός των τιμών των οριακών συνθηκών

Αξίζει να σημειωθεί πως οι παραπάνω παράμετροι (keywords) χρησιμοποιούνται για προσομοίωση μόνιμης ροής (σταθερές τιμές με την πάροδο του χρόνου). Σε αντίθετη περίπτωση, αντί να δοθούν τιμές παροχής και στάθμης στα υγρά όρια, μπορούν να δοθούν υδρογραφήματα (LIQUID BOUNDARIES FILE) και καμπύλες στάθμης-παροχής (STAGE-DISCHARGE CURVES FILE), αντίστοιχα.

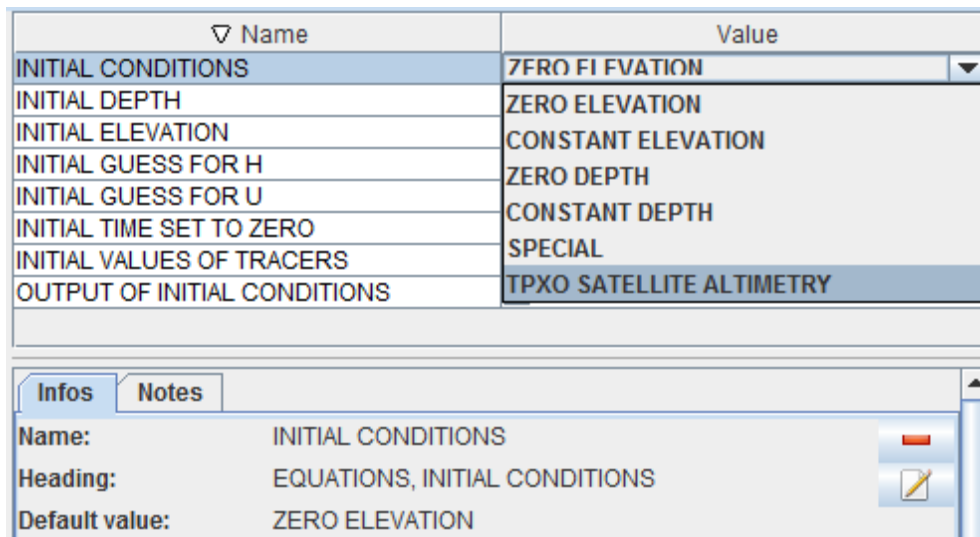
Τέλος, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες της περίπτωσης ενός ποταμού και ακολουθώντας τις συστάσεις του εγχειριδίου του Telemac 2D, επιλέγουμε να τροποποιήσουμε τις παραμέτρους VELOCITY PROFILES και OPTION FOR LIQUID BOUNDARIES, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

▽ Name	Value
OPTION FOR LIQUID BOUNDARIES	1;1
VELOCITY PROFILES	1;5

Εικόνα Π12: Ορισμός των παραμέτρων VELOCITY PROFILES και OPTION FOR LIQUID BOUNDARIES

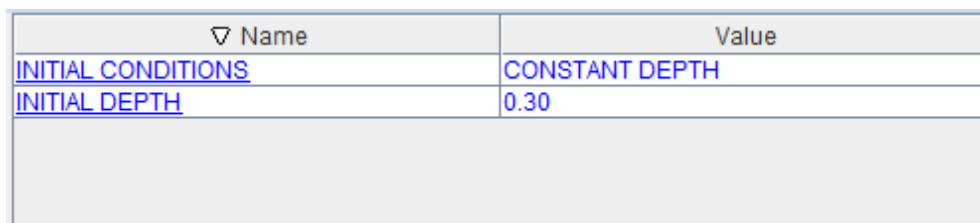
3.3. Καθορισμός των αρχικών συνθηκών

Στο πρόγραμμα Fudaa Pre-Pro υπάρχουν διάφορες επιλογές για τον ορισμό των αρχικών συνθηκών, όπως φαίνεται και στην Εικόνα Π13. Οι αρχικές συνθήκες ουσιαστικά περιγράφουν την κατάσταση του μοντέλου στην αρχή της προσομοίωσης, δηλαδή τη χρονική στιγμή $t=0$.



Εικόνα Π13: Επιλογές για αρχικές συνθήκες στο Fudaa Pre-Pro

Επιλέξαμε ως αρχική συνθήκη να υπάρχει σε όλο το υπολογιστικό πεδίο ένα σταθερό βάθος νερού, ενδεικτικά ίσο με 0.30m. Ορίσαμε δηλαδή την παράμετρο CONSTANT DEPTH, αλλά και την παράμετρο INITIAL DEPTH=0.30, όπως φαίνεται στην εικόνα Π14.



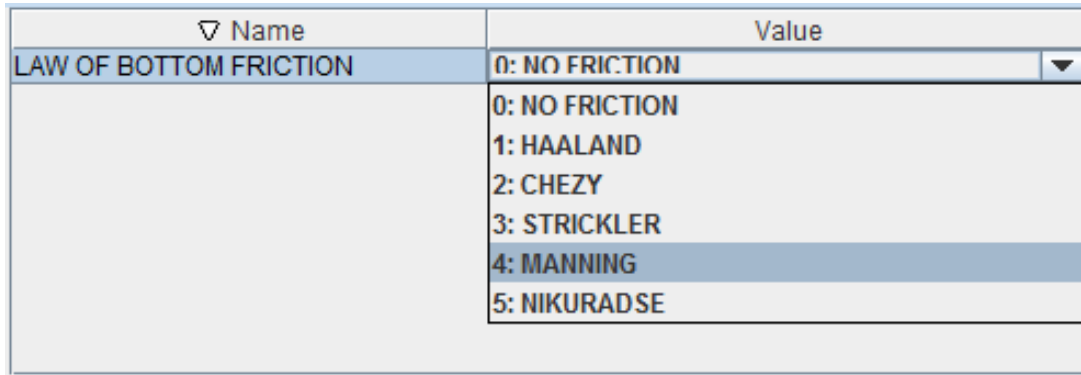
Εικόνα Π14: Επιλογή αρχικών συνθηκών

Η επιλογή ενός αρχικού βάθους ροής είναι απαραίτητη στην περίπτωση μας, μιας και έχουμε ορίσει στην είσοδο δεδομένη παροχή (οριακή συνθήκη εισροής). Το Telemac 2D χρειάζεται να έχει ως αρχικά δεδομένα στην είσοδο όχι μόνο την παροχή αλλά και το βάθος ροής, ώστε να δύναται να υπολογίσει την ταχύτητα. Σε περίπτωση που δεν ορίζεται το βάθος ροής, η ροή στην είσοδο είναι υπερκρίσιμη και το Telemac 2D αδυνατεί να πραγματοποιήσει τους υπολογισμούς.

Το πρόγραμμα Fudaa Pre-Pro παρέχει, επίσης, στο χρήστη την επιλογή να ορίσει ως αρχικές συνθήκες τις τιμές των υδροδυναμικών παραμέτρων όπως έχουν προκύψει από προηγούμενη επίλυση. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να ενεργοποιήσει την παράμετρο "COMPUTATION CONTINUED", καθώς και να εισάγει στο αρχείο προσομοίωσης το αρχείο με την προηγούμενη επίλυση ("PREVIOUS COMPUTATION FILE"). Η γεωμετρία και στις 2 περιπτώσεις θα πρέπει να είναι η ίδια, καθώς σε αντίθετη περίπτωση το Telemac 2D αδυνατεί να κάνει τους νέους υπολογισμούς με βάση τα αποτελέσματα της προηγούμενης επίλυσης.

3.4. Καθορισμός της εξίσωσης υπολογισμού τριβών στον πυθμένα

Σε προηγούμενο βήμα είχαμε ορίσει τις τιμές των συντελεστών τριβής στο πρόγραμμα Bluekenue, όμως τώρα πρέπει να ορισθεί και ο νόμος της τριβής για τον πυθμένα του ποταμού. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια του προγράμματος Fudaa Pre-Pro, αλλάζοντας την παράμετρο LAW OF BOTTOM FRICTION. Επιλέγουμε το νόμο του Manning, καθώς αποτελεί το συνηθέστερο νόμο τριβής για ανοιχτούς αγωγούς.

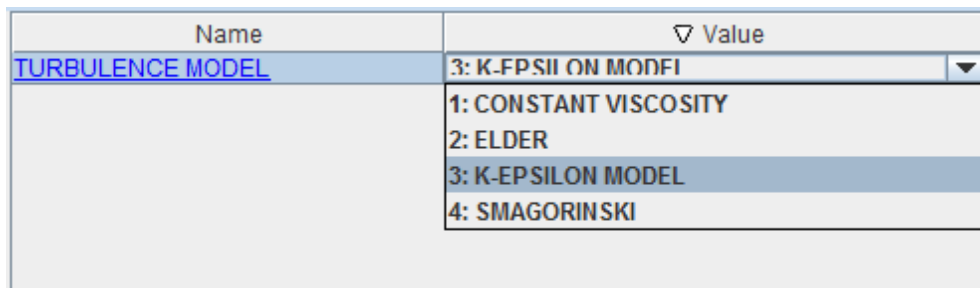


Εικόνα Π15: Επιλογή νόμου τριβής του πυθμένα

Επίσης, με την ενεργοποίηση της παραμέτρου BOTTOM SMOOTHINGS το Telemac 2D λαμβάνει την εντολή να πραγματοποιεί εξομάλυνση της γεωμετρίας του πυθμένα όπου και στο βαθμό που απαιτείται.

3.5. Καθορισμός του μοντέλου τύρβης

Η τύρβη παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην προσομοίωση ροής ανοικτών αγωγών και το Telemac 2D δίνει 4 επιλογές μοντέλων τύρβης μέσω του προγράμματος Fudaa Pre-Pro, όπως φαίνεται και στην κάτωθι εικόνα.



Εικόνα Π16: Επιλογή μοντέλου τύρβης

Επιλέγουμε το μοντέλο k-ε, στο οποίο χρησιμοποιούνται δύο πρόσθετες διαφορικές εξισώσεις μεταφοράς για την κινητική ενέργεια τύρβης (k) και την απόσβεσή της (ε), όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η χρήση του μοντέλου αυτού συνήθως αυξάνει τον υπολογιστικό χρόνο, καθώς απαιτείται ένα πιο λεπτομερές πλέγμα για την εξαγωγή άρτιων αποτελεσμάτων συγκριτικά με την επιλογή σταθερής συνεκτικότητας στο πεδίο.

3.6. Καθορισμός χρονικού βήματος

Πολύ σημαντική παράμετρο για την προσομοίωση αποτελεί το χρονικό βήμα. Μια αρχική εκτίμηση του χρονικού βήματος γίνεται με βάση τη συνθήκη CFL (Courant-Friedrich-Levy), σύμφωνα με την οποία θα πρέπει να ισχύει:

$$C = \frac{u\Delta t}{\Delta x} + \frac{v\Delta t}{\Delta y} \leq C_{\max} \quad (\text{Π-1})$$

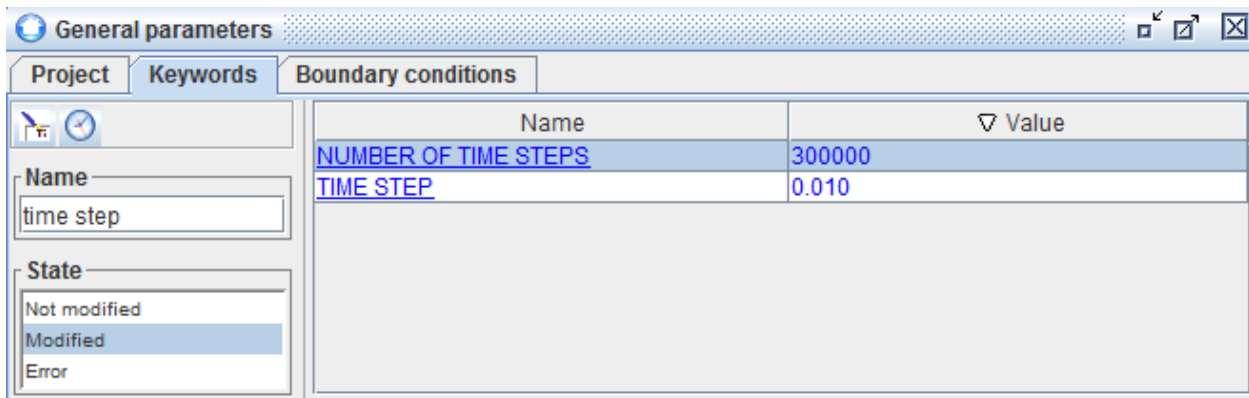
1)

όπου:

u,v (m/s) οι συνιστώσες της ταχύτητας,
 Δx, Δy (m) οι διαστάσεις του πλέγματος και
 Δt (s) το χρονικό βήμα,
 C (-) ο αριθμός Courant.

Η τιμή C_{max} λαμβάνεται ίση με 1 για ρητά αριθμητικά σχήματα, ενώ για πεπλεγμένα σχήματα ο αριθμός Courant μπορεί να λάβει μεγαλύτερες τιμές, όπως 7 ή 8.

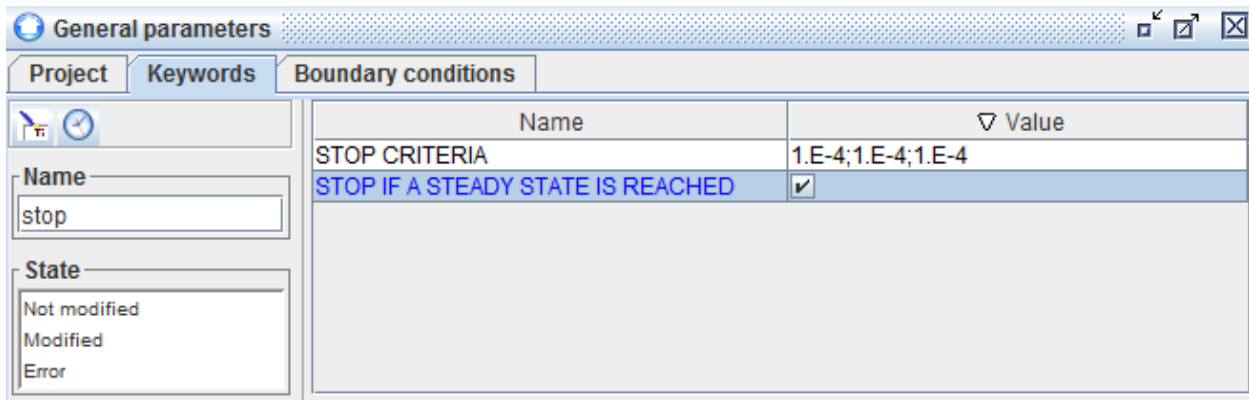
Η συνολική διάρκεια του υπολογισμού αποτελεί το γινόμενο του χρονικού βήματος με τον αριθμό των χρονικών βημάτων.



Εικόνα Π17: Επιλογή του χρονικού βήματος και του αριθμού των χρονικών βημάτων

Επιλέγουμε χρονικό βήμα ίσο με 0,010 seconds και αριθμό χρονικών βημάτων ίσο με 300000, όπως φαίνεται στην Εικόνα Π17. Συνεπώς, η διάρκεια του υπολογισμού μας ισούται με 0,010*300000=3000 seconds.

Ωστόσο, επιλέγουμε την παράμετρο (keyword) STOP IF A STEADY STATE IS REACHED στο Fudaa Pre-Pro, έτσι ώστε ο υπολογισμός να σταματήσει όταν επέλθουν μόνιμες συνθήκες στη ροή. Το κριτήριο για τις μόνιμες συνθήκες καθορίζεται από την παράμετρο (keyword) STOP CRITERIA. Η παράμετρος αυτή ουσιαστικά θέτει τα όρια της μεταβολής των ταχυτήτων, του βάθους και του ρύπου μεταξύ δύο διαδοχικών χρονικών βημάτων. Όταν η μεταβολή των μεγεθών αυτών μεταξύ 2 διαδοχικών χρονικών βημάτων γίνει μικρότερη από τα όρια που έχουμε θέσει σε κάθε κόμβο του πλέγματος, τότε ο υπολογισμός σταματάει. Επιλέγουμε την τιμή 10⁻⁶ για την παράμετρο (keyword) STOP CRITERIA, η οποία είναι μικρότερη από την προτεινόμενη τιμή (10⁻⁴).



Εικόνα Π18: Κριτήρια τερματισμού ενός υπολογισμού

3.7. Καθορισμός αριθμητικών σχημάτων επίλυσης και λοιπών αριθμητικών παραμέτρων

Αρχικά, η επιλογή του αριθμητικού σχήματος για την επίλυση των μερικών διαφορικών εξισώσεων γίνεται με χρήση της παραμέτρου TYPE OF ADVECTION στο πρόγραμμα Fudaa Pre-Pro. Παρέχονται οι εξής επιλογές:

- 1: Method of characteristics
- 2: Centred semi implicit scheme + SUPG
- 3: Upwind explicit finite volume
- 4: N distributive scheme, mass-conservative
- 5: PSI distributive scheme, mass-conservative
- 6: PSI scheme on non-conservative equation
- 7: Implicit N scheme on non-conservative equation
- 13: Edge by edge implementation of scheme 3
- 14: Edge by edge implementation of scheme 4

Πρέπει να επιλεγθεί αριθμητικό σχήμα για τον υπολογισμό της ταχύτητας, του βάθους ροής και της τύρβης. Επιλέγουμε να επιλύσουμε τις εξισώσεις ορμής και τύρβης με τη μέθοδο των χαρακτηριστικών για τον υπολογισμό των συνιστωσών της ταχύτητας, της κινητικής ενέργειας τύρβης και της απόσβεσής της, ενώ για τον υπολογισμό του βάθους ροής χρησιμοποιείται το αριθμητικό σχήμα PSI (επιλογή 5) το οποίο είναι συντηρητικό. Τα σχήματα αυτά τίθενται ως προτεινόμενα από το Telemac 2D.

Επίσης, στην περίπτωση επίλυσης σε ποτάμι, όπου σε κάποια σημεία ο χρήστης εισάγει συγκεκριμένες τιμές βάθους (για παράδειγμα στην εκροή), η εξίσωση της συνέχειας ενδέχεται να μην ικανοποιείται απόλυτα. Με την ενεργοποίηση της παραμέτρου CONTINUITY CORRECTION γίνεται διόρθωση των τιμών των ταχυτήτων, ώστε να εξασφαλίζεται η συνέχεια και το σφάλμα μπορεί να μειωθεί έως και 1000 φορές.

Εφόσον το γραμμικό σύστημα εξισώσεων επιλύεται από επαναληπτική μέθοδο, χρειάζεται να ορισθεί η επιθυμητή ακρίβεια των αποτελεσμάτων καθώς και ο μέγιστος επιτρεπτός αριθμός επαναλήψεων. Για να αυξήσουμε, λοιπόν, την ακρίβεια των αποτελεσμάτων αλλάζουμε τις τιμές των παραμέτρων που φαίνονται παρακάτω:

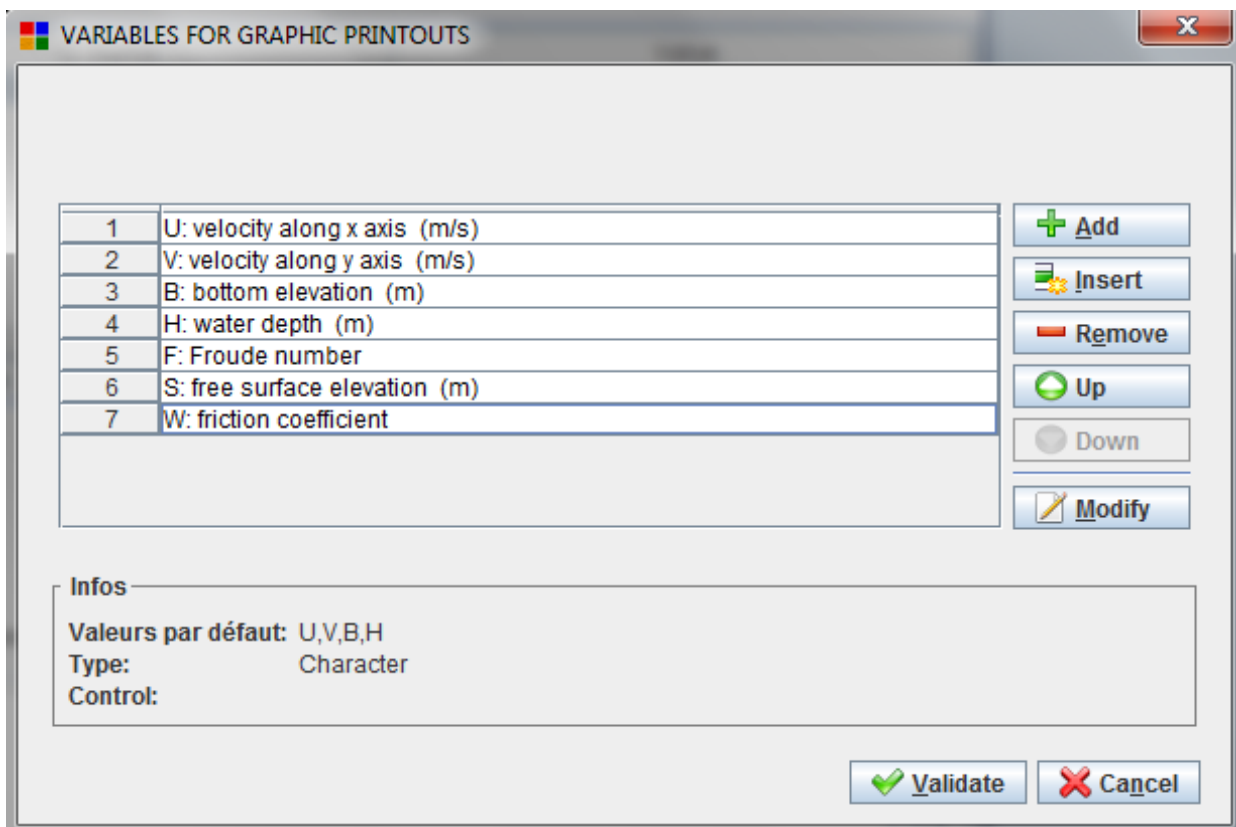
- SOLVER ACCURACY= 10^{-5}
- MAXIMUM NUMBER OF ITERATIONS FOR SOLVER=400

Τέλος, στο εγχειρίδιο του Telemac 2D προτείνεται τροποποίηση κάποιων παραμέτρων, όπως φαίνεται παρακάτω:

- TREATMENT OF THE LINEAR SYSTEM=2
- IMPLICITATION FOR DEPTH=1
- IMPLICITATION FOR VELOCITY=1
- MASS-LUMPING ON H=1
- FREE SURFACE GRADIENT COMPATIBILITY=0.9 (ή γενικά τιμή μικρότερη της μονάδας)

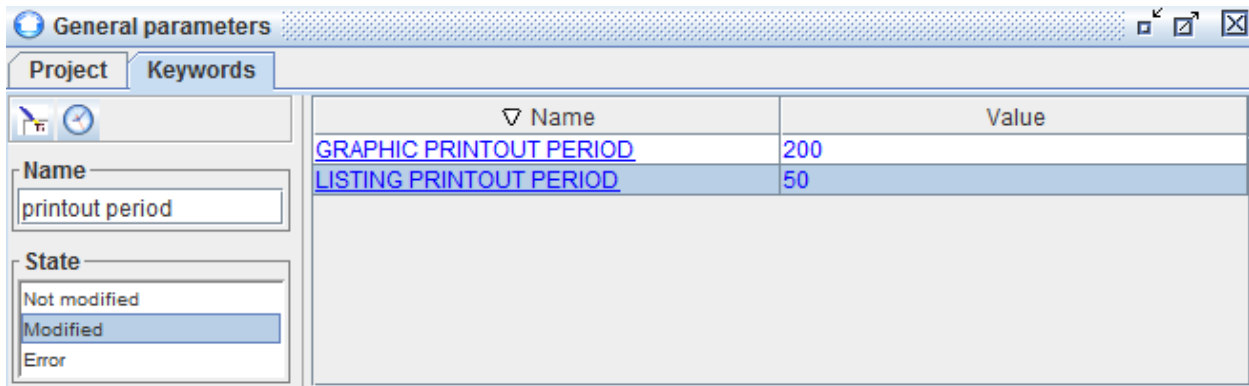
3.8. Καθορισμός τρόπου παρουσίασης αποτελεσμάτων

Αρχικά, επιλέγουμε τις μεταβλητές για τις οποίες επιθυμούμε να εμφανίσει αποτελέσματα το Telemac 2D στο αρχείο των αποτελεσμάτων (results file). Η σχετική παράμετρος (keyword) στο πρόγραμμα Fudaa Pre-Pro είναι η VARIABLES FOR GRAPHIC PRINTOUTS. Οι προτεινόμενες μεταβλητές είναι η ταχύτητα κατά τον άξονα x (U) και κατά τον άξονα y (V), το υψόμετρο του πυθμένα (B) και το βάθος του νερού (H), αλλά προσθέτουμε και τον αριθμό Froude (F), το υψόμετρο της ελεύθερης επιφάνειας (S) και το συντελεστή τριβής. (W), όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα Π19: Επιλογή μεταβλητών για τις οποίες θα παραχθούν αποτελέσματα

Έπειτα, προσδιορίζουμε το χρονικό διάστημα ανά το οποίο τα αποτελέσματα των υπολογισμών θα αποθηκεύονται στο αρχείο των αποτελεσμάτων και θα εμφανίζονται στην οθόνη του Telemac 2D, αλλάζοντας τις παραμέτρους GRAPHIC PRINTOUT PERIOD και LISTING PRINTOUT PERIOD, αντίστοιχα. Η τροποποίηση αυτών των παραμέτρων στοχεύει στη δημιουργία όσο το δυνατόν μικρότερων αρχείων αποτελεσμάτων.



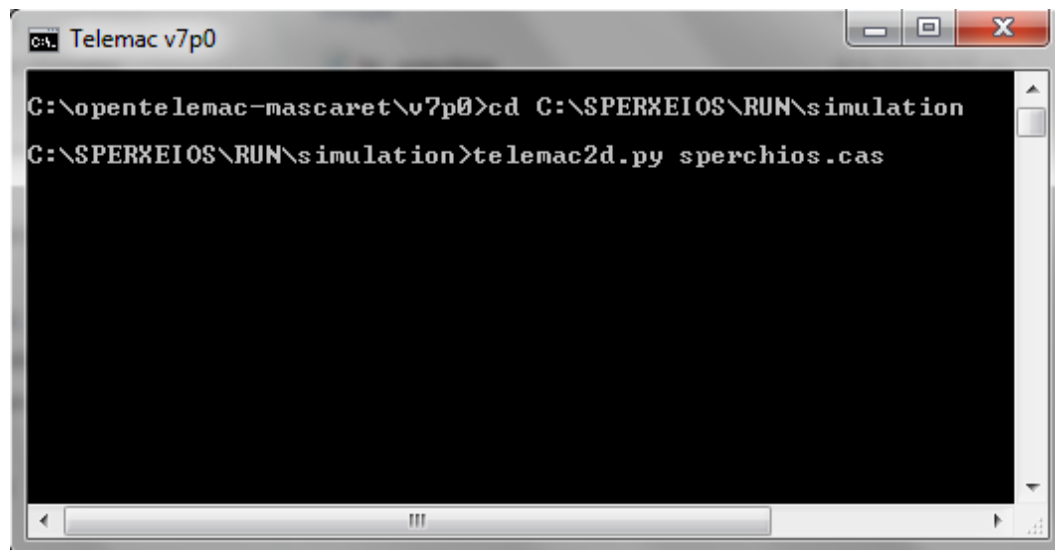
Εικόνα Π20 Παράμετροι σχετικά με την εξαγωγή αποτελεσμάτων

Ενδεικτικές τιμές των παραμέτρων αυτών φαίνονται στην Εικόνα Π20. Οι τιμές αυτές αρκεί να πολλαπλασιαστούν με το χρονικό βήμα για να υπολογισθούν τα χρονικά διαστήματα αποθήκευσης και εμφάνισης των αποτελεσμάτων που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

Τέλος, με την ενεργοποίηση της παραμέτρου MASS BALANCE στο Fudaa Pre-Pro εμφανίζονται στην οθόνη κατά τη διάρκεια του υδροδυναμικού υπολογισμού πληροφορίες σχετικά με την παροχή σε κάθε χρονικό βήμα.

4. Βήμα 4^ο. Εκτέλεση υπολογισμών με το πρόγραμμα Telemac 2D.

Εφόσον έχουμε ετοιμάσει το αρχείο της προσομοίωσης (steering file) με τη βοήθεια του προγράμματος Fudaa Pre-Pro, ανοίγουμε το παράθυρο του Telemac 2D. Στην αρχή ορίζουμε τη θέση του αρχείου προσομοίωσης με την εντολή "cd". Στη συνέχεια, πληκτρολογούμε την εντολή "telemac2d.py (όνομα αρχείου προσομοίωσης)" για να πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός, όπως φαίνεται στην Εικόνα Π21.



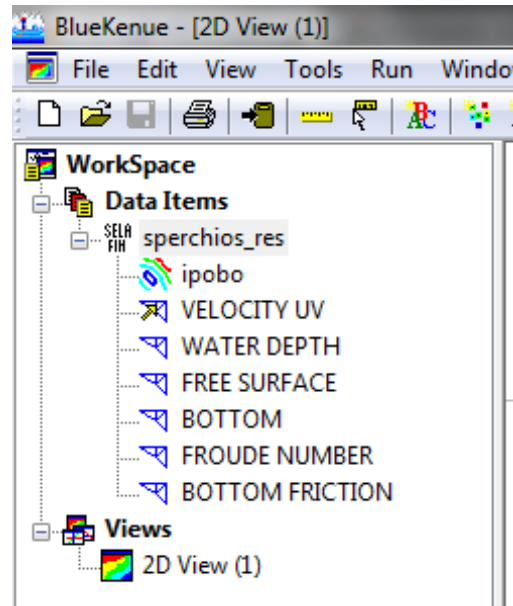
Εικόνα Π21: Παράθυρο Telemac 2D

Εάν δεν υπάρχουν λάθη στα αρχεία, ο υπολογισμός θα ολοκληρωθεί με επιτυχία και στο παράθυρο του Telemac 2D θα εμφανιστεί το μήνυμα "My work is done.". Σε αντίθετη περίπτωση, ο

υπολογισμός θα σταματήσει και θα εμφανιστεί μήνυμα που θα περιγράφει συνοπτικά το λάθος (error) που εντοπίστηκε.

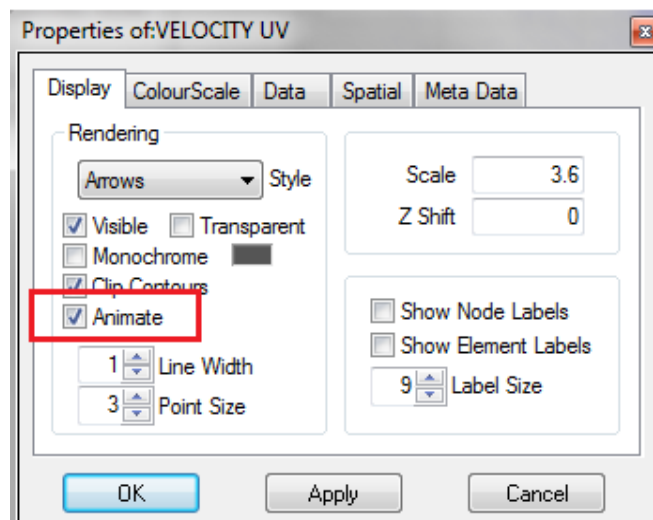
5. Βήμα 5^ο: Παρακολούθηση των αποτελεσμάτων με το πρόγραμμα Bluekenue.

Το αρχείο των αποτελεσμάτων (results file) sperchios_res.sif είναι της μορφής SELAFIN και ανοίγει στο πρόγραμμα Bluekenue. Όπως φαίνεται στην εικόνα παρακάτω, περιέχει αποτελέσματα για τις μεταβλητές που είχαμε ορίσει σε προηγούμενο βήμα στο πρόγραμμα Fudaa Pre-Pro.



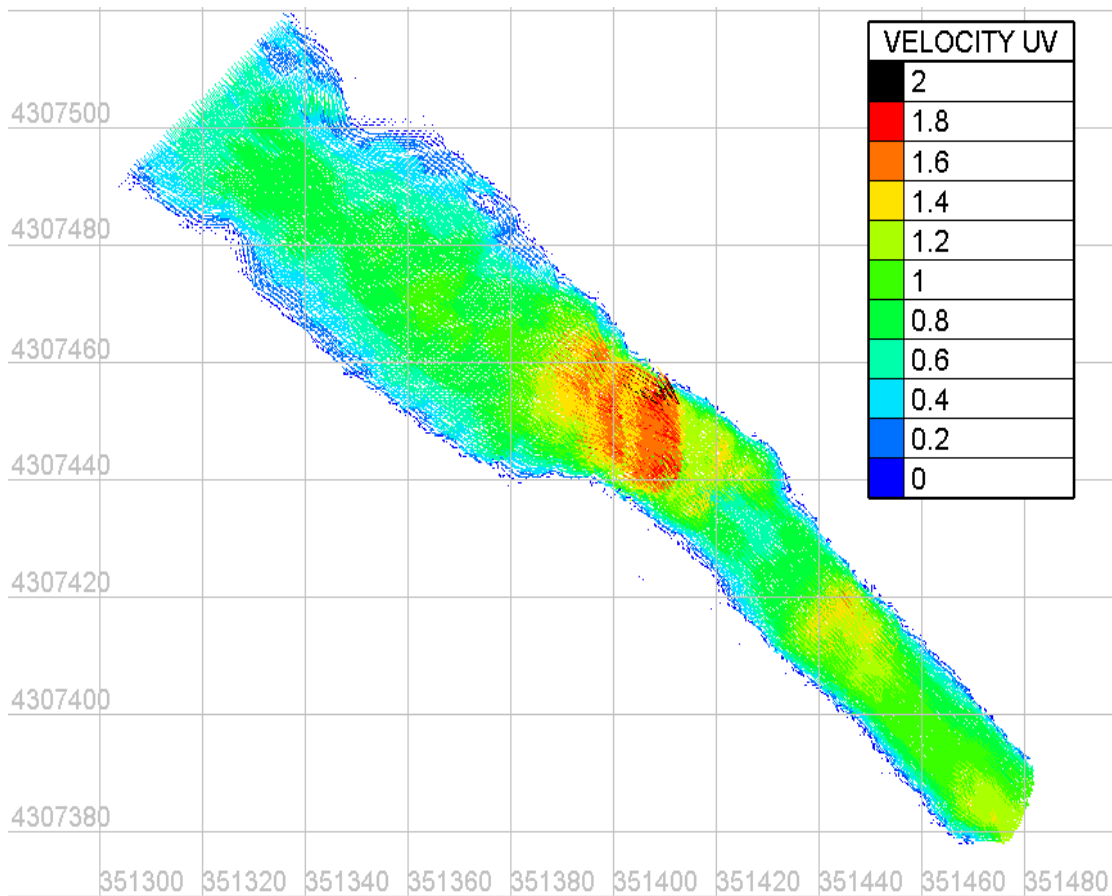
Εικόνα Π22: Περιεχόμενα αρχείου αποτελεσμάτων

Για την αποτίμηση των αποτελεσμάτων, αρκεί να επιλέξουμε τη μεταβλητή που θέλουμε και να την τοποθετήσουμε σε ένα παράθυρο 2D View ή 3D View. Έπειτα, πηγαίνουμε στο πεδίο Properties της μεταβλητής αυτής και επιλέγουμε Animate, ώστε να έχουμε τη δυνατότητα να δούμε την εξέλιξη της καθ' όλη τη διάρκεια του υπολογισμού.



Εικόνα Π23: Επιλογή Animate για αποτίμηση των αποτελεσμάτων

Πατώντας το Play πάνω αριστερά στην οθόνη του Bluekenue, γίνεται αναπαράσταση της εξέλιξης της μεταβλητής που έχουμε επιλέξει κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, μέχρι να επέλθουν μόνιμες συνθήκες.



Εικόνα Π24: Τα διανύσματα των ταχυτήτων στο τέλος της προσομοίωσης

