

# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΙΧΘΥΩΝ ΣΕ  
ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΠΟΤΑΜΩΝ ΜΕ ΔΙΟΔΟΥΣ ΙΧΘΥΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ  
ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΜΗΤΣΟΠΟΥΛΟΣ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Α. Ι. ΣΤΑΜΟΥ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π. (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

Π. ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ, ΟΜΟΤΙΜΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

Κ. ΝΟΥΤΣΟΠΟΥΛΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2023

«Το έργο συγχρηματοδοτείται από την Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση», στο πλαίσιο της Πράξης «Ενίσχυση του ανθρώπινου ερευνητικού δυναμικού μέσω της υλοποίησης διδακτορικής έρευνας - 2<sup>ος</sup> κύκλος» (MIS-5000432), που υλοποιεί το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ)»



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο

Επιχειρησιακό Πρόγραμμα  
Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού,  
Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης







ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ  
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΙΧΘΥΩΝ ΣΕ  
ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΠΟΤΑΜΩΝ ΜΕ ΔΙΟΔΟΥΣ ΙΧΘΥΩΝ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ  
ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΜΗΤΣΟΠΟΥΛΟΣ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Α. Ι. ΣΤΑΜΟΥ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π. (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

Π. ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ, ΟΜΟΤΙΜΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

Κ. ΝΟΥΤΣΟΠΟΥΛΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΕΓΚΡΙΘΗΚΕ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΠΤΑΜΕΛΗ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΤΗΝ  
..... 2023.

.....  
Α. Ι. ΣΤΑΜΟΥ  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

.....  
Π. ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

.....  
Κ. ΝΟΥΤΣΟΠΟΥΛΟΣ  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π..

.....  
Χ. ΜΑΚΡΟΠΟΥΛΟΣ  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

.....  
Β. ΤΣΙΧΡΙΝΤΖΗΣ  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

.....  
Α. ΨΙΛΟΒΙΚΟΣ  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΠΑΝ. ΘΕΣ.

.....  
Η. ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ  
ΕΡΕΥΝΗΤΗΣ ΕΛΚΕΘΕ

.....

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΜΗΤΣΟΠΟΥΛΟΣ

Copyright © Γεώργιος Β. ΜΗΤΣΟΠΟΥΛΟΣ 2023.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

«Το έργο συγχρηματοδοτείται από την Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση», στο πλαίσιο της Πράξης «Ενίσχυση του ανθρώπινου ερευνητικού δυναμικού μέσω της υλοποίησης διδακτορικής έρευνας- 2ος κύκλος» (MIS-5000432), που υλοποιεί το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ)» (MIS-5000432), που υλοποιεί το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ)»



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο

Επιχειρησιακό Πρόγραμμα  
Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού,  
Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



«This research is co-financed by Greece and the European Union (European Social Fund- ESF) through the Operational Programme «Human Resources Development, Education and Lifelong Learning» in the context of the project “Strengthening Human Resources Research Potential via Doctorate Research” (MIS-5000432), implemented by the State Scholarships Foundation (IKY)»



Ευρωπαϊκή Ένωση  
European Social Fund

Operational Programme  
Human Resources Development,  
Education and Lifelong Learning

Co-financed by Greece and the European Union



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο

Επιχειρησιακό Πρόγραμμα  
Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού,  
Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	vi
ABSTRACT	xi
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	xv
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	xvi
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	xx
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	21
1.1 Θεωρητικό πλαίσιο	21
1.1.1 Μαθηματικά μοντέλα διόδων ιχθύων	21
1.1.2 Μαθηματικά μοντέλα ποταμών σε περιοχές διόδων ιχθύος	22
1.2 Ερευνητικά ερωτήματα	22
1.3 Πρωτότυπα σημεία της διατριβής – Δημοσιεύσεις	23
1.3.1 Πρωτότυπα σημεία της διατριβής	23
1.3.2 Δημοσιεύσεις	23
1.4 Μεθοδολογία	24
1.4.1 Φάση 1. Βιβλιογραφική διερεύνηση	24
1.4.2 Φάση 2. Δόμηση ολοκληρωμένου μοντέλου	24
1.4.3 Φάση 3. Βαθμονόμηση και επιβεβαίωση του μοντέλου	25
1.4.4 Φάση 4. Εφαρμογή του ολοκληρωμένου μοντέλου	25
1.4.5 Φάση 5. Τελικές εργασίες	25
1.5 Διάρθρωση της διδακτορικής διατριβής	25
2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ	27
2.1 Εισαγωγή	27
2.2 Είδη διόδων ιχθύων	28
2.2.1 Δίοδος ιχθύων τύπου Denil	28
2.2.2 Δίοδος ιχθύων με υπερχείλιση με ή χωρίς βυθισμένες οπές στα πετάσματα	28
2.2.3 Δίοδος ιχθύων με ρομβοειδή διάταξη πετασμάτων ή με κυρτά πετάσματα	29
2.2.4 Δίοδος ιχθύων τύπου ice-harbor	30
2.2.5 Οχετοί με συνεχή ροή για χρήση ως δίοδοι ιχθύων	31
2.2.6 Ανελκυστήρας ιχθύων	31
2.2.7 Δίοδος ιχθύων κάθετου ανοίγματος	32
2.3 Μαθηματική προσομοίωση ροής σε δίοδους ιχθύων	34
2.4 Μαθηματική προσομοίωση συμπεριφοράς ιχθύων	42

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

3	ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	49
3.1	Εισαγωγή	49
3.2	Εξισώσεις του ολοκληρωμένου μοντέλου σε ποταμούς	49
3.2.1	Εξισώσεις ροής του ολοκληρωμένου μοντέλου σε ποταμούς - Το μοντέλο TELEMAC – 2D	49
3.2.2	Προσδιορισμός των χαρακτηριστικών της τύρβης	49
3.3	Εξισώσεις συμπεριφοράς ιχθύων του ολοκληρωμένου μοντέλου σε ποταμούς	50
3.4	Εξισώσεις ολοκληρωμένου μοντέλου σε διόδους ιχθύων	56
3.4.1	Εξισώσεις ροής του ολοκληρωμένου μοντέλου σε διόδους ιχθύων – Το μοντέλο FLOW-3D	56
3.5	Εξισώσεις συμπεριφοράς ιχθύων του ολοκληρωμένου μοντέλου σε διόδους ιχθύων	57
4	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΠΟΤΑΜΟΥΣ	61
4.1	Εισαγωγή	61
4.2	Περιγραφή της περίπτωσης εφαρμογής	61
4.2.1	Περιοχή εφαρμογής – Jedsted Mill Fish Farm	61
4.2.2	Δεδομένα βαθυμετρίας και ταχύτητας ροής	62
4.2.3	Πειραματικές μετρήσεις κίνησης ιχθύων	63
4.3	Υπολογισμοί υδροδυναμικού μοντέλου	63
4.3.1	Εισαγωγή	64
4.3.2	Υπολογιστικό πλέγμα	64
4.3.3	Οριακές συνθήκες	65
4.3.4	Υπολογισμός του συντελεστή τραχύτητας Manning	66
4.3.5	Βαθμονόμηση του υδροδυναμικού μοντέλου	67
4.3.6	Αποτελέσματα του υδροδυναμικού μοντέλου	69
4.4	Υπολογισμοί του μοντέλου συμπεριφοράς ιχθύων	71
4.4.1	Δεδομένα εισόδου του μοντέλου συμπεριφοράς ιχθύων	71
4.4.2	Ανάλυση ευαισθησίας	72
4.4.3	Αποτελέσματα μοντέλου συμπεριφοράς ιχθύων	73
4.5	Δείκτες καταλληλότητας ενδιαιτήματος ιχθύος	74
4.5.1	Εισαγωγή	74
4.5.2	Χρήση του ολοκληρωμένου μοντέλου για τον υπολογισμό του δείκτη καταλληλότητας ενδιαιτήματος	75
5	ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΔΙΟΔΟΥΣ ΙΧΘΥΩΝ	79
5.1	Εισαγωγή	79

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

5.2	Περιγραφή της περίπτωσης εφαρμογής του υδροδυναμικού μοντέλου στην πρώτη διόδο ιχθύων	79
5.2.1	Εισαγωγή	79
5.2.2	Γεωμετρία της πειραματικής διόδου ιχθύων	79
5.3	Υπολογισμοί υδροδυναμικού μοντέλου της πρώτης διόδου ιχθύος	80
5.3.1	Υπολογιστικό πλέγμα	80
5.3.2	Οριακές συνθήκες	81
5.3.3	Σενάρια υπολογισμών	81
5.3.4	Αποτελέσματα υπολογισμών	82
5.3.5	Υπολογισμός πεδίου ταχυτήτων ροής	83
5.3.6	Υπολογισμός βάθους ροής	89
5.3.7	Υπολογισμός χαρακτηριστικών τύρβη	91
5.3.8	Συμπεράσματα	96
5.4	Περιγραφή της περίπτωσης εφαρμογής του υδροδυναμικού μοντέλου στην δεύτερη διόδο ιχθύων	97
5.4.1	Εισαγωγή	97
5.4.2	Γεωμετρία της πειραματικής διόδου ιχθύων	97
5.4.3	Πειραματικές τροχιές ιχθύων	98
5.4.4	Υπολογισμός του πεδίου ροής και της ταχύτητας των ιχθύων	98
5.4.5	Αποτελέσματα της πειραματικής εργασίας	98
5.5	Υπολογισμοί υδροδυναμικού μοντέλου της δεύτερης διόδου ιχθύος	99
5.5.1	Υπολογιστικό πλέγμα	99
5.5.2	Οριακές συνθήκες	99
5.5.3	Αποτελέσματα υπολογισμών	100
5.6	Υπολογισμοί του μοντέλου συμπεριφοράς ιχθύων	102
5.6.1	Δεδομένα εισόδου του μοντέλου συμπεριφοράς ιχθύων	102
5.6.2	Βαθμονόμηση	103
5.6.3	Αποτελέσματα και σχολιασμός των αποτελεσμάτων του μοντέλου συμπεριφοράς ιχθύων	103
5.6.4	Συμπεράσματα	106
6	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΔΙΟΔΟΥ ΙΧΘΥΩΝ ΜΕ ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ	108
6.1	Εισαγωγή	108
6.2	Μεθοδολογία	109
6.2.1	Επιλογή των χαρακτηριστικών στη διόδο ιχθύων	109
6.2.2	Επιβεβαίωση του υδροδυναμικού μοντέλου	110
6.2.3	Καμπύλες καταλληλότητας ενδιαιτήματος	112



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

6.2.4	Μοντελοποίηση καταλληλότητας ενδαιτήματος	112
6.3	Υπολογισμοί υδροδυναμικού μοντέλου	114
6.4	Υπολογισμοί υδροδυναμικού μοντέλου – ενδαιτήματος	116
6.4.1	Καταλληλότητα της διόδου ιχθύων ανά βιοτική ομάδα	116
6.4.2	Συνολική καταλληλότητα	117
6.5	Σχολιασμός αποτελεσμάτων	119
6.5.1	Παροχές, γεωμετρικά χαρακτηριστικά και δείκτες καταλληλότητας	119
6.5.2	Η οικολογική βελτιστοποίηση και η «ιδανική» δίοδος ιχθύων	120
6.5.3	Υπάρχει κατάλληλη δίοδος ιχθύων για όλα τα είδη;	121
6.5.4	Καταλληλότητα, αποτελεσματικότητα και ελκυστικότητα. «Ποιες είναι οι δυνατότητες της βελτιστοποίησης με τη χρήση μαθηματικών μοντέλων;»	122
6.6	Συμπεράσματα	122
7	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	123
7.1	Εισαγωγή	123
7.2	Περιγραφή της περίπτωσης εφαρμογής	123
7.2.1	Τα χαρακτηρίστηκα του π. Αλμωπαίου και της λεκάνης απορροής του	124
7.2.2	Τα χαρακτηρίστηκα του φράγματος και του ταμιευτήρα	124
7.2.3	Η ιχθυοπανίδα της περιοχής	125
7.3	Υπολογισμοί υδροδυναμικού μοντέλου	125
7.3.1	Γεωμετρία και σενάρια	126
7.4	Γεωμετρία και σενάρια	128
7.5	Υπολογισμοί και σχολιασμός τους	129
7.5.1	Γενικά χαρακτηριστικά του πεδίου ροής	129
7.5.2	Επίδραση της κατάντη οριακής συνθήκης και του αριθμού δεξαμενών του μοντέλου	131
7.5.3	Επίδραση του πλάτους της οπής εισροής	131
7.5.4	Επίδραση του αριθμού των οπών εισροής	131
7.5.5	Επίδραση της στάθμης του ταμιευτήρα του φράγματος	132
7.5.6	Επίδραση του πλάτους του κάθετου ανοίγματος	132
7.5.7	Συμπεράσματα	133
7.6	Εφαρμογή του μοντέλου συμπεριφοράς ιχθύων	133
7.6.1	Επιλογή υδροδυναμικού πεδίου	133
7.6.2	Δεδομένα του ιχθύος σχεδιασμού	135
7.6.3	Αποτελέσματα και σχολιασμός	136
7.7	Συμπεράσματα από την εφαρμογή του ολοκληρωμένου μοντέλου σε διόδους ιχθύων	139

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

8	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	141
8.1	Συμπεράσματα από τη χρήση του ολοκληρωμένου μαθηματικού μοντέλου	141
8.1.1	Συμπεράσματα από τη χρήση του ολοκληρωμένου μοντέλου σε ποταμούς	141
8.1.2	Συμπεράσματα από τη χρήση του ολοκληρωμένου μοντέλου σε διόδους ιχθύων	141
8.1.3	Απάντηση στο ερευνητικό ερώτημα	142
8.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	143
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	145

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα φράγματα - ταμειυτήρες νερού αποτελούν εμπόδια για τη μετανάστευση των ιχθύων δυσχεραίνοντας την πρόσβασή τους στα ενδαιτήματα και στις περιοχές αναπαραγωγής τους. Δημιουργείται έτσι ένα σημαντικό περιβαλλοντικό πρόβλημα, το οποίο αντιμετωπίζεται αποτελεσματικά με τη χρήση Διόδου Ιχθύων (ΔΙ), που επιτρέπουν τη μετακίνηση των ιχθύων προς τα ανάντη. Μια ΔΙ αποτελείται συνήθως από έναν επικλινή ανοικτό αγωγό με κατάλληλες διατάξεις, όπως π.χ. υπερχειλιστές ή τοιχία, με τις οποίες χωρίζεται ο αγωγός σε τμήματα - δεξαμενές. Οι πιο συνηθισμένες διατάξεις ΔΙ και πλέον κατάλληλες για τις ελληνικές συνθήκες είναι οι ΔΙ με κάθετα ανοίγματα (ΔΙΚΑ).

Οι περισσότερες υφιστάμενες πρακτικές μέθοδοι σχεδιασμού για ΔΙ χρησιμοποιούν εμπειρικές εξισώσεις ή/και προτεινόμενες τιμές για τις κύριες διαστάσεις των δεξαμενών με στόχο να αποσβεστεί η ενέργεια της εισερχόμενης φλέβας, να μειωθεί η ταχύτητα της και να οδηγηθεί ομαλά στο επόμενο άνοιγμα. Αυτές οι πληροφορίες βασίζονται συνήθως σε μετρήσεις, κυρίως ταχυτήτων ροής και απόσβεσης κινητικής ενέργειας τύρβης που λαμβάνονται από πειραματικές έρευνες σε φυσικά μοντέλα. Πολλές φορές, ο τρόπος αυτός σχεδιασμού δεν είναι επιτυχής με αποτέλεσμα να είναι επιτακτική η ανάγκη ανάπτυξης ορθολογικών μεθόδων σχεδιασμού. Μια τέτοια μέθοδος είναι με τη χρήση ενός Ολοκληρωμένου Μαθηματικού Μοντέλου (ΟΜΜ).

Ένα ΟΜΜ αποτελείται από ένα υδροδυναμικό μοντέλο και ένα οικολογικό. Το υδροδυναμικό μοντέλο, που υπολογίζει το πεδίο ροής στη ΔΙ, είναι συνήθως μοντέλο CFD (Computational Fluid Dynamics). Το οικολογικό μοντέλο χρησιμοποιεί τα χαρακτηριστικά του πεδίου ροής για να υπολογίσει τη συμπεριφορά-κίνηση των ιχθύων, επιδιώκοντας την ελαχιστοποίηση της καταναλισκόμενης ενέργειας, δηλαδή ακολουθώντας τις περιοχές χαμηλής ταχύτητας και τύρβης.

Τα μοντέλα CFD επιτρέπουν τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού μιας ΔΙ μέσω της εκτέλεσης τροποποιήσεων στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δεξαμενών. Ωστόσο, για να θεωρηθούν αξιόπιστα τα αποτελέσματα ενός μοντέλου CFD, πρέπει να επιβεβαιώνονται με πειραματικά δεδομένα. Στις περισσότερες ερευνητικές εργασίες για ΔΙ, συνήθως θεωρείται ότι η ροή είναι δισδιάστατη, οπότε περιγράφεται ικανοποιητικά στο μεγαλύτερο τμήμα της δεξαμενής, αλλά όχι στην περιοχή της φλέβας εισροής, όπου η ροή είναι τρισδιάστατη. Για την υδροδυναμική προσομοίωση των ποταμών, εξαιτίας κυρίως του πολύ μεγάλου μεγέθους του εξεταζόμενου τμήματος, χρησιμοποιούμε δισδιάστατα μοντέλα που επιλύουν τις εξισώσεις Saint-Venant και δίνουν πολύ καλά αποτελέσματα σε μικρό υπολογιστικό χρόνο.

Τα μοντέλα προσομοίωσης της συμπεριφοράς των ιχθύων (ΜΣΙ) παρέχουν τις απαραίτητες πληροφορίες κίνησης και συμπεριφοράς των ιχθύων σε ποταμούς ή ΔΙ. Στο ΜΣΙ προσομοιώνονται οι βασικές λειτουργίες των ιχθύων, οι οποίοι δεχόμενοι υδροδυναμικά ερεθίσματα από το περιβάλλον, όπως οι ταχύτητες ροής και οι διαφορές επιταχύνσεων, λαμβάνουν την απόφαση να πραγματοποιήσουν συγκεκριμένες κινήσεις. Η περιοχή εντός της οποίας ένας ιχθύς αντιλαμβάνεται το υδροδυναμικό ερέθισμα προσδιορίζεται από 5 θέσεις περιμετρικά του ιχθύ και ονομάζεται περιοχή αντίληψης (Sensory Ovoid). Γενικά, διακρίνονται τρεις τρόποι κολύμβησης ιχθύων (1) η συνεχής, (2) η παρατεταμένη και (3) η εκρηκτική. Οι τρόποι αυτοί συνδέονται με τις αντίστοιχες κινήσεις τους που είναι (α) ενεργή κολύμβηση στην κατεύθυνση της ροής, (β) παθητική κολύμβηση και συμπαράσυρση από τη ροή, (γ) αποφυγή και μεταβολή γωνίας σε σχέση με την ροή και (δ) διαφυγή και κολύμβηση αντίθετα στη ροή.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το σημαντικότερο ΜΣΙ που υπάρχει στη διεθνή βιβλιογραφία είναι το μοντέλο ELAM. Το ELAM είναι ένα μοντέλο της μορφής Individual Based Model (IBM) που προσομοιώνει τους ιχθύες ως ανεξάρτητες μονάδες, λαμβάνοντας υπόψη τις μεταξύ τους διαφορές, όπως π.χ. το μέγεθος. Συνδυάζει τη μέθοδο Particle Tracking με την αρχή κίνησης της ελάχιστης ενέργειας, δηλαδή ο ιχθύς προτιμά τις περιοχές χαμηλής ταχύτητας και τύρβης με μικρές μεταβολές της ροής.

Η παρούσα Διδακτορική διατριβή θέτει το κύριο ερευνητικό ερώτημα που είναι:

«Πώς σχεδιάζουμε ορθολογικά με ένα OMM μια ΔΙ, ώστε αυτή να είναι αποτελεσματική;»

Το ερώτημα αυτό αναλύεται στα ακόλουθα 5 επιμέρους ερευνητικά ερωτήματα:

- (1) Πώς μπορούμε να περιγράψουμε με ένα μαθηματικό μοντέλο την κίνηση των ιχθύων σε μια ΔΙ;
- (2) Πώς μπορούμε να περιγράψουμε με ένα μαθηματικό μοντέλο την κίνηση των ιχθύων σε ένα ποταμό στην περιοχή μιας ΔΙ;
- (3) Πώς σχεδιάζουμε μια ΔΙ, ώστε αυτή να επιτρέπει την ασφαλή κίνηση των ιχθύων;
- (4) Πώς τοποθετούμε μια ΔΙ στην περιοχή ενός φράγματος, ώστε να ελκύει τους ιχθύες;
- (5) Ποιο μοντέλο τύρβης προσομοιώνει καλύτερα το πεδίο ροής σε μια ΔΙ;

Το πρωτότυπο σημείο της παρούσας διδακτορικής διατριβής που δίνει απάντηση και στα ερευνητικά ερωτήματα που τέθηκαν, είναι η ανάπτυξη ενός OMM, με το οποίο σχεδιάζεται ορθολογικά μια ΔΙ, ώστε αυτή να είναι αποτελεσματική. Το OMM αποτελείται από δυο υπομοντέλα (α) ένα OMM για ποταμούς και ένα OMM για ΔΙ. Κάθε OMM αποτελείται από ένα υδροδυναμικό μοντέλο και ένα ΜΣΙ. Το υδροδυναμικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε σε ποταμούς είναι το **TELEMAC-2D** και το μοντέλο σε ΔΙ είναι το **FLOW-3D**. Τα ΜΣΙ για ποταμούς και ΔΙ δομήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας.

Το OMM βαθμονομήθηκε και επιβεβαιώθηκε με πειραματικά δεδομένα από τη διεθνή βιβλιογραφία και ακολούθησαν 2 εφαρμογές. Η πρώτη εφαρμογή είχε στόχο τη γεωμετρική βελτιστοποίηση της ΔΙΚΑ. Έγινε υδροδυναμική προσομοίωση της ροής σε ΔΙΚΑ για διάφορα γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συνδυάστηκαν με δείκτες καταλληλότητας ενδιαίτηματος ιχθύων και μακροασπόνδυλων και τελικά επιλέχθηκε η ΔΙΚΑ με εκείνα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, που δημιουργούν συνθήκες κατάλληλες για την πλειονότητα των εξεταζόμενων ειδών. Η δεύτερη εφαρμογή ήταν ο σχεδιασμός μιας ΔΙ για χωμάτινο αρδευτικό φράγμα μεγάλου ύψους και μεταβαλλόμενης στάθμης ταμιευτήρα. Στην εφαρμογή αυτή προτάθηκε ο πύργος ΔΙ. Ο πύργος ΔΙ αποτελείται από 14 σειρές ΔΙ καθ' ύψος και συνολικά 99 δεξαμενές, που έχουν μια πλευρική οπή, από τη οποία εισέρχεται νερό του ταμιευτήρα στη ΔΙ. Οι οπές ρυθμίζονται με θυροφράγματα και ο ρόλος τους είναι να επιτρέπουν την είσοδο νερού στη ΔΙ ανάλογα με τη στάθμη του ταμιευτήρα.

Από τους υπολογισμούς του OMM σε ποταμούς εξαγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα.

1. Το υδροδυναμικό μοντέλο μπορεί να προσομοιώσει ικανοποιητικά το πεδίο ροής σε ένα ποταμό με τη χρήση του μοντέλου τύρβης Standard  $k - \epsilon$  (SKE), όπως προτείνεται από τη βιβλιογραφία. Ο δείκτης συσχέτισης Root Mean Square Error (RMSE) των ταχυτήτων ροής που υπολογίζονται από το μοντέλο σε σχέση

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

με τις μετρούμενες κυμαίνεται από 0.03 μέχρι 0.054, με βέλτιστη τιμή το μηδέν, ενώ ο δείκτης Index of Agreement (IA) από 0.96 μέχρι 0.99, με βέλτιστη τιμή τη μονάδα.

2. Το μοντέλο συμπεριφοράς ιχθύων μπορεί να υπολογίσει με ικανοποιητική ακρίβεια το ποσοστό των ιχθύων που θα ακολουθήσουν ευθεία ή κυκλική τροχιά. Όμως, το πιο σημαντικό είναι ότι μπορεί να υπολογίσει το ποσοστό των ιχθύων που θα εξέλθουν από το μοντέλο από μια συγκεκριμένη έξοδο. Αυτό μπορεί να γενικευθεί θεωρώντας έξοδο του μοντέλου την είσοδο μιας ΔΙ. Με δεδομένο ότι το υδροδυναμικό μοντέλο μπορεί εύκολα να τροποποιηθεί ώστε να προσομοιωθούν διαφορετικά ρεύματα προσέλευσης ιχθύων από μια ΔΙ (διαφορετικές παροχές εξόδου), τότε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο συμπεριφοράς ιχθύων για να εξακριβώσουμε υπό ποιες συνθήκες το μεγαλύτερο ποσοστό θα κινηθεί προς τη ΔΙ.
3. Η ακριβής προσομοίωση μιας πειραματικής τροχιάς δεν είναι απόλυτα εφικτή, γιατί το μοντέλο εισάγει τυχαιότητα στον υπολογισμό των μεταβλητών του, που είναι ικανές να διαφοροποιούν τις προσομοιωμένες τροχιές. Ωστόσο, αν προσομοιωθεί ικανός αριθμός ιχθύων, από μια πειραματική θέση εκκίνησης, το μεγαλύτερο ποσοστό από τις τροχιές που υπολογίζονται θα ακολουθεί τη διεύθυνση της μετρούμενης τροχιάς.
4. Το OMM μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο για να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για την καταλληλότητα ενδιαιτήματος αξιοποιώντας τα πειραματικά δεδομένα και το υπολογιζόμενο πεδίο ροής.

Από τους υπολογισμούς του OMM σε ΔΙ εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα.

1. Το πεδίο ροής σε μια ΔΙ είναι αρκετά πολύπλοκο. Συχνά, είναι απαραίτητο ένα τρισδιάστατο μοντέλο CFD για τον υπολογισμό του πεδίου ροής, ιδιαίτερα για την ακριβή περιγραφή της ροής στις περιοχές των κάθετων ανοιγμάτων.
2. Το μοντέλο τύρβης RNG KE και η μέθοδος Volume of Fluid (VOF) μπορούν να δώσουν ακριβή αποτελέσματα για τον προσδιορισμό της επιφάνειας της ροής σε μικρό σχετικά υπολογιστικό χρόνο.
3. Οι υπολογισμοί του τρισδιάστατου μοντέλου έδειξαν (1) καλή συμφωνία με τα πειράματα και τους δισδιάστατους υπολογισμούς των υπολογιζόμενων μέσων ταχυτήτων ροής ( $RMSE = 0.01 - 0.03$ ), (2) καλύτερη απόδοση στον προσδιορισμό της επιφάνειας ροής στη ΔΙ, η οποία αποδίδεται στην μέθοδο VOF και (3) καλύτερος υπολογισμός των χαρακτηριστικών της τύρβης από τα δισδιάστατα μοντέλα, η οποία οφείλεται στο μοντέλο τύρβης RNG KE (που ξεπερνά το πρόβλημα της υπερεκτίμησης της τύρβης του μοντέλου SKE) και στο γεγονός ότι το τρισδιάστατο μοντέλο λαμβάνει υπόψη τα τρισδιάστατα χαρακτηριστικά της ροής στη ΔΙ.
4. Οι τρισδιάστατοι υδροδυναμικοί υπολογισμοί έδειξαν ότι οι συνήθεις παραδοχές στις ΔΙ, ότι (α) η ροή είναι δισδιάστατη και (β) η προσομοίωση 3-5 δεξαμενών είναι επαρκής για την επίτευξη ικανοποιητικών αποτελεσμάτων, δεν ισχύουν πάντα, και πρέπει οι παραπάνω παραδοχές να ελέγχονται ανάλογα με την εσωτερική διάταξη και με τον αριθμό των δεξαμενών της ΔΙ.

5. Το μοντέλο συμπεριφοράς ιχθύων μπορεί να υπολογίσει με ικανοποιητική ακρίβεια το ποσοστό των ιχθύων που θα ακολουθήσουν μια συγκεκριμένη πορεία προς τα ανάντη της ΔΙ.
6. Το μοντέλο συμπεριφοράς ιχθύων δεν μπορεί να προσομοιώσει το χρόνο ανάπαυσης των ιχθύων εντός της ΔΙ κάθετου ανοίγματος, όμως δείχνει ότι αν οι ιχθύες δεν περάσουν απευθείας από την κατάντη δεξαμενή στην ανάντη, τότε ο χρόνος «άσκοπης» κίνησης μέσα στη δεξαμενή θα είναι σε κάποια περιοχή, που θεωρείται περιοχή ανάπαυσης.

Το κύριο ερευνητικό ερώτημα που τέθηκε στην παρούσα διατριβή εξειδικεύτηκε στα ακόλουθα πέντε επιμέρους ερευνητικά ερωτήματα, τα οποία απαντώνται συνοπτικά.

1. **Πως μπορούμε να περιγράψουμε με ένα μαθηματικό μοντέλο την κίνηση των ιχθύων σε μια ΔΙ;** Συχνά μπορεί να είναι απαραίτητη η χρήση ενός τρισδιάστατου μαθηματικού μοντέλου και σε συγκεκριμένες περιπτώσεις μπορεί να επαρκεί ένα δισδιάστατο μοντέλο. Με τη χρήση του μαθηματικού μοντέλου είναι εφικτός ο ακριβής προσδιορισμός των βαθών και των ταχυτήτων ροής και με αρκετά καλή ακρίβεια ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών της τύρβης. Τα χαρακτηριστικά αυτά του πεδίου ροής είναι αυτά που επηρεάζουν την κίνηση των ιχθύων εντός της ΔΙ. Άρα, με τον ορθό υπολογισμό τους και λαμβάνοντας υπόψη ότι οι ιχθύες δέχονται τα υδροδυναμικά αυτά ερεθίσματα και προσπαθούν (α) να καταναλώσουν τη μικρότερη δυνατή ενέργεια για να φτάσουν στα ανάντη και (β) να αποφύγουν την υπέρμετρη έκθεση στην τύρβη, που μπορεί να τους αποπροσανατολίσει, μπορούμε να περιγράψουμε την κίνηση των ιχθύων εντός της ΔΙ. Το μαθηματικό μοντέλο πρέπει να λαμβάνει υπόψη του και τους δείκτες καταλληλότητας ενδιαίτηματος, ώστε να μπορεί να γίνει μια αρχική γεωμετρική βελτιστοποίηση ΔΙ, ως προς της χρήσης της από περισσότερα είδη .
2. **Πως μπορούμε να περιγράψουμε με ένα μαθηματικό μοντέλο την κίνηση των ιχθύων σε ένα ποταμό στην περιοχή μιας ΔΙ;** Η περίπτωση των ποταμών είναι πιο σύνθετη σε σχέση με τη ΔΙ, ως προς την περιγραφή του ΜΣΙ, ενώ δεν ισχύει το ίδιο για το υδροδυναμικό μοντέλο. Είναι σημαντικό να τονιστεί η μεγαλύτερη πολυπλοκότητα του ΜΣΙ σε ποταμούς, διότι οι ιχθύες είναι ήδη εγκλιματισμένοι στα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά των ποταμών. Οπότε είναι σημαντικό να υπάρχουν παρατηρήσεις για τους ιχθύες σχεδιασμού, ώστε να μπορεί το μοντέλο να λάβει κατάλληλες τιμές για τις παραμέτρους του.
3. **Πως σχεδιάζουμε μια ΔΙ, ώστε αυτή να επιτρέπει την ασφαλή κίνηση των ιχθύων;** Για το σωστό σχεδιασμό μιας ΔΙ, που να επιτρέπει την ασφαλή κίνηση των ιχθύων, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε ένα μαθηματικό μοντέλο ώστε: (1) Να δημιουργείται πεδίο ροής κατάλληλο για της δυνατότητες των ιχθύων ενδιαφέροντος, (2) να προβλέπονται περιοχές ανάπαυσης, ώστε να μειώνεται η απαιτούμενη ενέργεια ανόδου σε μια ΔΙ, και (3) να αποφεύγεται βάθος ροής μικρότερο από το προβλεπόμενο για τους ιχθύες.
4. **Πως τοποθετούμε μια ΔΙ στην περιοχή ενός φράγματος, ώστε να ελκύει τους ιχθύες;** Η βέλτιστη χωροθέτηση μιας ΔΙ επιτυγχάνεται με τα παρακάτω βήματα: (1) εύρεση του δείκτη καταλληλότητας ενδιαίτηματος του ποταμού για τα είδη που μας ενδιαφέρουν, ώστε να χωροθετηθεί σε κατάλληλο σημείο η ΔΙ, (2) βελτιστοποίηση της ΔΙ με οικολογικά κριτήρια, (3) εφαρμογή του ΟΜΜ στην περιοχή του ποταμού συμπεριλαμβάνοντας τη βελτιστοποιημένη ΔΙ και (4) βελτιστοποίηση των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών της εισόδου και της

εξόδου της ΔΙ, με στόχο τη μεγιστοποίηση του ποσοστού των ιχθύων που κινούνται προς την είσοδο της ΔΙ. Η απάντηση αυτή βρίσκεται σε συμφωνία με τις περισσότερες βιβλιογραφικές πηγές.

- 5. Ποιο μοντέλο τύρβης προσομοιώνει καλύτερα το πεδίο ροής σε μια δίοδο ιχθύος;** Ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών της τύρβης επηρεάζει τους υπολογισμούς του πεδίου ροής και τους ιχθύες. Έτσι ο υπολογισμός αυτός πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο ακριβής, αλλά ταυτόχρονα και οικονομικός από πλευράς υπολογιστικού κόστους, ιδιαίτερα στα τρισδιάστατα μοντέλα. Η χρήση του μοντέλου RNG KE μπορεί να πετύχει ικανοποιητική ακρίβεια με μικρό σχετικά υπολογιστικό χρόνο, για τις περιπτώσεις ροής σε ΔΙ. Πιο απλά μοντέλα (Mixing Length, SKE, Constant viscosity) δεν μπορούν να προβλέψουν ικανοποιητικά το πεδίο ροής, ενώ πιο σύνθετα (Large Eddy Simulation) αυξάνουν πολύ τον υπολογιστικό χρόνο και την πολυπλοκότητα των αποτελεσμάτων.

## ABSTRACT

Water reservoirs are barriers to fish migration, making it difficult for fish to access their habitats and reproduction areas. This creates a major environmental problem, which is effectively addressed by the use of Fish Passes (FP), which allows fish to migrate upstream. An FP usually consists of a sloping channel with baffles, which divide the channel into sections - pools. The most common and most suitable for the species found in Greece are the Vertical-Slot Fish passes (VSF).

Most existing practical design methods for VSFs use empirical equations and/or suggested values for the main dimensions of the tanks in order to dissipate the energy of the incoming jet, reduce its velocity and drive it smoothly to the next slot. These methods are usually based on measurements, mainly of flow velocities and turbulence kinetic energy dissipation obtained from experimental investigations in physical models. Often, this design approach is not successful, thus making it imperative to develop rational design methods. One such method is by using an Integrated Mathematical Model (IMM).

An IMM consists of a hydrodynamic model and an ecological model. The hydrodynamic model, which calculates the flow field in the VSF, is usually a CFD (Computational Fluid Dynamics) model. The ecological model uses the characteristics of the flow field to calculate the behaviour-movement of the fish, seeking to minimise the energy consumed, i.e. following the low velocity and turbulence regions.

CFD models allow optimizing the design of an VSF by performing modifications to the geometric characteristics of the pools. However, for the results of a CFD model to be considered reliable, they must be confirmed by experimental data. In most VSFs research papers, it is usually assumed that the flow is two-dimensional, so it is satisfactorily described in most of the tank, but not in the slot region, where the flow is three-dimensional. For the hydrodynamic simulation of rivers, mainly because of the very large size of the considered section, we use two-dimensional models that solve the Saint-Venant equations and give very good results in a short computational time.

Fish behaviour simulation models (FBM) provide the necessary information on fish movement and behaviour in rivers or VSFs. In the FBM, the basic functions of fish are simulated, which, in response to hydrodynamic stimuli from the environment, such as flow velocities and acceleration differences, make the decision to perform specific movements. The area within which a fish perceives the hydrodynamic stimulus is defined by 5 location points around the perimeter of the fish and is called the sensory ovoid. In general, three modes of fish swimming can be distinguished (1) continuous, (2) prolonged and (3) burst. These modes are associated with their respective movements which are (a) active swimming in the direction of the flow, (b) passive swimming and entrainment by the flow, (c) avoidance and changing angle with respect to the flow, and (d) escape and swimming against the flow.

The most important FBM available in the literature is the ELAM model. ELAM is a model of the Individual Based Model (IBM) format that simulates fish as independent units, considering differences between them, such as size. It combines the Particle Tracking method with the minimum energy movement principle, i.e. the fish prefers low velocity and turbulent regions with small flow changes.

This PhD thesis poses the main research question which is:



## ABSTRACT

"How do we rationally design an VSF with an IMM so that it is effective?"

To answer the aforementioned research question the following 5 sub-research questions must be addressed:

- (1) How can we describe with a mathematical model the movement of fish in a VSF?
- (2) How can we describe with a mathematical model the movement of fish in a river in the area, where a VSF is located?
- (3) How do we design a VSF so that it allows the safe movement of fish?
- (4) How do we place a VSFs entrance near a dam to attract fish?
- (5) Which turbulence model best simulates the flow field in a VSF?

The original point of this dissertation, which answers the research questions posed, is the development of an IMM to rationally design a VSF to be effective. The IMM consists of two sub-models (a) an IMM for rivers and (b) an IMM for VSFs. Each IMM shall consist of a hydrodynamic model and a FBM. The hydrodynamic model used in rivers is TELEMAC-2D and the model used in VSFs is FLOW-3D. The FBM for both rivers and VSFs were structured as part of this thesis.

The IMM was calibrated and validated with experimental data from the international literature and 2 applications followed. The first application was aimed at the geometric optimization of VSF. A hydrodynamic simulation of the flow in VSF for different geometric characteristics was performed. The simulation results were combined with fish and macroinvertebrate habitat suitability indices and finally the VSF with those geometric characteristics that create conditions suitable for most of the species considered was selected. The second application was the design of a VSF for an irrigation dam with a variable reservoir water level. In this application, the Fish-Pass Tower (FPT) was proposed. The FPT tower consists of 14 rows of VSFs and a total of 99 pools, which have a side opening through which reservoir water enters the VSF. The holes are regulated by sluice gates and their role is to allow water to enter the VSF depending on the reservoir level.

The following conclusions can be drawn from the calculations of the OMM in rivers.

1. The hydrodynamic model can satisfactorily simulate the flow field in a river using the Standard k - epsilon (SKE) turbulence model as proposed in the literature. The Root Mean Square Error (RMSE) correlation index of the flow velocities calculated by the model with respect to the measured ones ranges from 0.03 to 0.054, with an optimum value of zero, while the Index of Agreement (IA) ranges from 0.96 to 0.99, with an optimum value of one.
2. The FBM can estimate with reasonable accuracy the percentage of fish that will follow a straight or circular trajectory. More importantly, however, it can estimate the percentage of fish that will exit the model from a given exit. This can be generalized by considering the model output to be the input of a VSF. Given that the hydrodynamic model can be easily modified to simulate different fish attraction currents from a VSF (different outlet flows), then we can use the fish behaviour model to determine under which conditions the largest proportion will move towards the VSF entrance.
3. Accurate simulation of an experimental trajectory is not entirely feasible, because the model introduces randomness in the calculation of its variables, which alter the simulated trajectories. However, if a sufficient number of fish are

## ABSTRACT

simulated, from an experimental starting position, most of the calculated trajectories will follow the direction of the measured trajectory.

4. IMM can be used as a tool to draw useful conclusions about habitat suitability by utilizing the experimental data and the calculated flow field.

The following conclusions can be drawn from the IMM calculations in VSFs.

1. The flow field in a VSF is quite complex. Often, a three-dimensional CFD model is necessary to calculate the flow field, especially to accurately describe the flow in the regions of the slot.
2. The RNG KE turbulence model and the Volume of Fluid (VOF) method can give accurate results for determining the free surface of the flow with relatively low computational cost.
3. The 3D model calculations showed (1) good agreement with experiments and 2D calculations of the calculated mean flow velocities (RMSE = 0.01 -0.03), (2) better performance in determining the flow surface in the VSF, which is attributed to the VOF method, and (3) better calculation of turbulence characteristics than the 2D models, which is due to the RNG KE turbulence model (which overcomes the problem of overestimation of turbulence in the SKE model) and the fact that the 3D model takes into account the 3D characteristics of the flow in the VSF.
4. The 3D hydrodynamic calculations have shown that the usual assumptions in VSFs, that (a) the flow is 2D and (b) the simulation of 3-5 tanks is sufficient to achieve satisfactory results, are not always valid, and the above assumptions need to be checked depending on the internal structure and the number of pools of the VSF.
5. The fish behaviour model can estimate with reasonable accuracy the proportion of fish that will follow a particular path upstream of the VSF.

The FBM cannot simulate the resting time of fish within the VSF, but it does indicate that if fish do not pass directly from the downstream to the upstream pool, then the time of "aimless" movement within the tank will be in some area, which is considered a resting area.

The main research question posed in this thesis was addressed by the following five sub-research questions, which are briefly answered.

- 1. How can we describe with a mathematical model the movement of fish in a VSF?** Often it may be necessary to use a three-dimensional mathematical model and in certain cases a two-dimensional model may be sufficient. By using the mathematical model, it is possible to accurately determine depths and flow velocities and to calculate turbulence characteristics with a reasonably good accuracy. These are the flow characteristics that influence the movement of fish within the VSF. Therefore, by correctly calculating them and considering that fish receive these hydrodynamic stimuli and follow the rules of (a) low energy consumption and (b) turbulence avoidance, we can describe the movement of fish within the VSF. The mathematical model must also consider habitat suitability indices, so that an initial geometric optimization of the FP can be made in terms of its use by more species.

- 2. How can we describe with a mathematical model the movement of fish in a river in the area, where a VSF is located?** Rivers are more complex than VSFs in terms of describing the FBM, whereas the case is different for the hydrodynamic model. It is important to emphasize the greater complexity of the FBM in rivers because fish are already acclimatized to the hydrodynamic characteristics of rivers. Therefore, it is important to have observations for the design fish so that the model can obtain appropriate values for its parameters.
- 3. How do we design a VSF so that it allows the safe movement of fish?** To properly design a VSF that allows for the safe movement of fish, we must use a mathematical model to (1) create a flow field appropriate of the fish of interest, (2) provide low velocity resting areas to reduce the required upstream energy in a VSF, and (3) avoid flow depths less than the minimum acceptable depth for fish.
- 4. How do we place a VSFs entrance near a dam to attract fish?** Optimal placement of a VSF is achieved by the following steps: (1) finding the habitat suitability index of the river for the species of interest to place the VSF in an appropriate location; (2) optimizing the VSF using ecological criteria; (3) applying the IMM to the river area including the optimized VSF and (4) optimizing the hydrodynamic characteristics of the VSF inlet and outlet to maximize the proportion of fish moving toward the VSF. This answer is in good agreement with most of the literature.
- 5. Which turbulence model best simulates the flow field in a VSF?** The calculation of turbulence characteristics affects the flow field and fish-pass calculations. Thus, this calculation needs to be as accurate as possible, but at the same time effective in terms of computational cost, especially in 3D models. The use of the RNG KE model can achieve satisfactory accuracy with a relatively short computational time for the cases of flow in a VSF. Simpler models (Mixing Length, SKE, Constant viscosity) cannot predict the flow field satisfactorily, while more complex models (Large Eddy Simulation) greatly increase the computational time and complexity of the results.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η παρούσα διδακτορική διατριβή είναι το αποτέλεσμα μιας συνεχούς προσπάθειας που ξεκίνησε τον Ιούλιο του 2017, στο εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής, στον Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ με επιβλέποντα τον Καθηγητή κ. Αναστάσιο Στάμου.

Αρχικά θα ήθελα να εκφράσω τις βαθύτερες ευχαριστίες μου στον καθηγητή μου κ. Αναστάσιο Στάμου για την καθοδήγησή του, χωρίς την οποία η περάτωση αυτής της διατριβής δεν θα ήταν εφικτή. Επιπλέον θέλω να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στα μέλη της συμβουλευτικής μου επιτροπής, τον Καθηγητή ΕΜΠ κ. Παναγιώτη Παπανικολάου και τον Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Κωνσταντίνο Νουτσόπουλο.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τα υπόλοιπα μέλη της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής, Καθηγητές ΕΜΠ κ. Βασίλειο Τσιχριντζή και κ. Χρήστο Μακρόπουλο, τον Καθηγητή Πανεπιστημίου Θεσσαλίας κ. Άρη Ψιλοβίκο και τον ερευνητή του ΕΛΚΕΘΕ κ. Ηλία Δημητρίου που με τίμησαν με τη συμμετοχή τους στην επταμελή εξεταστική επιτροπή της διδακτορικής μου διατριβής.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον Δρ. Χρήστο Θεοδωρόπουλο για την βοήθειά του στην ολοκλήρωση της διατριβής, καθώς και στους προπτυχιακούς και μεταπτυχιακούς φοιτητές Σωτήρη Παγονόπουλο, Ευγενία Οικονομοπούλου και Αθανάσιο Μυλούλη για την προεργασία που έγινε στις διπλωματικές τους εργασίες και βασίστηκε η παρούσα διατριβή.

Επίσης ευχαριστώ το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ) για τη χρηματοδότηση της διδακτορικής μου διατριβής.

Τέλος, εκφράζω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου, στη σύζυγό μου, Γεωργία, η οποία μνημονεύεται πλέον σε 5 εργασίες, στα παιδιά μου που ανέχτηκαν τον πατέρα τους να δουλεύει στον υπολογιστή του, στους φίλους και στους συνεργάτες μου, οι οποίοι βρίσκονται πάντοτε δίπλα μου.

**ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ**

<b>Εικόνα 2.1</b> ΔΙ Denil [48]	28
<b>Εικόνα 2.2</b> ΔΙ με υπερχειλίση [49]	29
<b>Εικόνα 2.3</b> ΔΙ με εγκοπές στα πετάσματα (αριστερά) και υπερχειλιστές (δεξιά) [10]	29
<b>Εικόνα 2.4</b> ΔΙ με ρομβοειδή διάταξη πετασμάτων [10]	30
<b>Εικόνα 2.5</b> Ice-Harbor ΔΙ στο φράγμα John Day [50]	31
<b>Εικόνα 2.6</b> Παράδειγμα λειτουργίας οχετών ως δίοδοι ιχθύων [51], [52]	31
<b>Εικόνα 2.7</b> Ανελκυστήρας ιχθύων [53]	32
<b>Εικόνα 2.8</b> ΔΙΚΑ (α) με και (β) χωρίς κατευθυντήριο πτερύγιο [53]	33
<b>Εικόνα 2.9</b> (α) Συμπεριφορές ιχθύων κοντά στις περσίδες, (b) προσομοιωμένες τροχιές ιχθύων και πεδίο ροής κοντά στις περσίδες [65]	43
<b>Εικόνα 2.10</b> Προσομοιωμένη και πειραματική κίνηση ιχθύος μέσα στη δίοδο [43]	44
<b>Εικόνα 2.11</b> Χαρακτηριστικά πεδίου ροής (Α και Β) και τροχιές ιχθύων (C και D) [28]–[30]	46
<b>Εικόνα 2.12</b> Γωνίες που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της συμπεριφοράς ιχθύος [31]	47
<b>Εικόνα 3.1</b> Το GUI του μοντέλου	50
<b>Εικόνα 3.2</b> Περιοχή αντίληψης ιχθύος (Sensory Ovoid) [35]	51
<b>Εικόνα 3.3</b> Διάγραμμα ροής του υπολογιστικού κώδικα του ΜΣΙ σε ποταμούς	55
<b>Εικόνα 3.4</b> Σύντομο διάγραμμα ροής του ΜΣΙ σε ΔΙ	57
<b>Εικόνα 3.5</b> Η περιοχή αντίληψης του ιχθύος στο μοντέλο συμπεριφοράς σε διόδους ιχθύων με τους 6 αισθητήρες	58
<b>Εικόνα 3.6</b> Η τυπική δεξαμενή της ΔΙ (α) χωρισμένη στις 7 περιοχές και (β) με τον ιχθύ και την περιοχή αντίληψής του	58
<b>Εικόνα 3.7</b> Διάγραμμα ροής του υπολογιστικού κώδικα του ΜΣΙ σε ΔΙ	60
<b>Εικόνα 4.1</b> Περιοχή Jedsted Mill Fish Farm στη Δανία	61
<b>Εικόνα 4.2</b> Διάταξη της περιοχής μελέτης [71]	62
<b>Εικόνα 4.3</b> Ισοϋψείς βάθους (χρωματικές) και ταχυτήτων ροής. Σημειώνεται η θέση των υδροφώνων και του υπολογιστικού πεδίου	62
<b>Εικόνα 4.4</b> Τέσσερις πειραματικές τροχιές. (a) Προσπερνά την ζώνη απόσυρσης, (b) εκτελεί κυκλική κίνηση, (c) εγκλωβίζεται στην περιοχή απόσυρσης και (d) εκτελεί κυκλική κίνηση και κατευθύνεται στην υδατοκαλλιέργεια [70]	63
<b>Εικόνα 4.5</b> Το υπολογιστικό πεδίο με πλέγμα (α) coarse, (β) medium, (γ) fine και (δ) superfine	64
<b>Εικόνα 4.6</b> Προφίλ ταχυτήτων που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις με διαφορετικά πλέγματα στη διατομή εξόδου της περιοχής μελέτης.	65
<b>Εικόνα 4.7</b> Βαθυμετρία και μέση ταχύτητα στις διατομές (α) εισόδου, (β) εξόδου ιχθυοτροφείου και (γ) εξόδου μοντέλου	66
<b>Εικόνα 4.8</b> Επικρατούσα βλάστηση στην περιοχή (Sparganium erectum)	67
<b>Εικόνα 4.9</b> Μεταβολή του πεδίου ροής (δεξιά) σε σχέση με τη μεταβολή της κατανομής των τιμών τραχύτητας (αριστερά)	68
<b>Εικόνα 4.10</b> Η τελική κατανομή των τιμών του συντελεστή Manning στο πεδίο ροής	68
<b>Εικόνα 4.11</b> Οι χαρακτηριστικές διατομές που επιλέγονται για τον έλεγχο των προφίλ ταχυτήτων	69
<b>Εικόνα 4.12</b> Προφίλ ταχυτήτων πειραματικών μετρήσεων και προσομοίωσης στη διατομή (α) 2, (β) 3, (γ) εξόδου ιχθυοκαλλιέργειας, (δ) 4, (ε) 5 και (ζ) διατομή εξόδου ανάντη υπερχειλιστή	70

<b>Εικόνα 4.13</b> Ισογραμμές (α) πειραματικών και (β) υπολογισμένων μέσων ταχυτήτων ροής	71
<b>Εικόνα 4.14</b> Δομημένο πλέγμα superfine με απόσταση κόμβων 0.5m	72
<b>Εικόνα 4.15</b> Μεταβολή της υπολογιζόμενης τροχιάς με τη μεταβολή του κατωφλιού της συμπεριφοράς B2 αποτυπωμένες πάνω στο πεδίο ταχυτήτων ροής	73
<b>Εικόνα 4.16</b> Πειραματική τροχιά 1 και τρεις χαρακτηριστικές προσομοιωμένες τροχιές του ΜΣΙ πάνω στο προσομοιωμένο πεδίο ταχυτήτων ροής	74
<b>Εικόνα 4.17</b> Πειραματική τροχιά 2 και τρεις χαρακτηριστικές προσομοιωμένες τροχιές του ΜΣΙ πάνω στο προσομοιωμένο πεδίο ταχυτήτων ροής	74
<b>Εικόνα 4.18</b> Διακύμανση των τιμών του μετρητή $k$ . Υψηλότερες τιμές υποδεικνύουν περισσότερες επισκέψεις στα σημεία αυτά από τους μελετώμενους ιχθύες	76
<b>Εικόνα 4.19</b> Καμπύλες καταλληλότητας βάθους ροής	76
<b>Εικόνα 4.20</b> Καμπύλες καταλληλότητας ταχύτητας ροής	77
<b>Εικόνα 4.21</b> Η κατανομή του δείκτη καταλληλότητας για τον ενήλικο Σολομό	78
<b>Εικόνα 4.22</b> Κατανομή δείκτη καταλληλότητας για τον νεαρό Σολομό (smolt)	78
<b>Εικόνα 4.23</b> Η κατανομή του δείκτη καταλληλότητας για τον μικρό Σολομό	78
<b>Εικόνα 5.1</b> Πειραματική διάταξη των Puertas et al. [18] σε κάτοψη με διαστάσεις	80
<b>Εικόνα 5.2</b> Το υπολογιστικό μοντέλο στο οποίο αναγράφονται οι οριακές συνθήκες	80
<b>Εικόνα 5.3</b> Υπολογιστικό πλέγμα στη δεξαμενή της διάταξης (α) T1 και (β) T2	81
<b>Εικόνα 5.4</b> Τρισδιάστατη απεικόνιση της ΔΙ με ισογραμμές μέσης ταχύτητας ροής	82
<b>Εικόνα 5.5</b> Διατομές ελέγχου στις διατάξεις T1 και T2	83
<b>Εικόνα 5.6</b> Υπολογιζόμενο πεδίο ταχυτήτων ροής (m/s) στο μέσο της δεξαμενής	84
<b>Εικόνα 5.7</b> Υπολογιζόμενο πεδίο ταχυτήτων ροής (m/s) σε κάθετη τομή στο άνοιγμα	85
<b>Εικόνα 5.8</b> Γραμμές ροής (α) σε κάτοψη, (β) σε πλάγια όψη και (γ) σε τρισδιάστατη απεικόνιση στις δεξαμενές 5, 6, 7, 8 και 9 για το σενάριο T13	86
<b>Εικόνα 5.9</b> Σύγκριση των ταχυτήτων στη διεύθυνση $x$ σε διάφορες διατομές για τα σενάρια T12 (α και β) και T13 (γ και δ)	87
<b>Εικόνα 5.10</b> Γραμμές ροής (α) σε κάτοψη, (β) σε πλάγια όψη και (γ) σε τρισδιάστατη απεικόνιση στις δεξαμενές 2, 3, 4 και 5 για το σενάριο T23	88
<b>Εικόνα 5.11</b> Σύγκριση των ταχυτήτων στη διεύθυνση $x$ σε διάφορες διατομές για τα σενάρια T22 (α και β) και T23 (γ και δ)	89
<b>Εικόνα 5.12</b> Σύγκριση βαθών ροής σε διάφορες διατομές για τη διάταξη T12 (κάτω) και T13 (πάνω)	90
<b>Εικόνα 5.13</b> Σύγκριση βαθών ροής σε διάφορες διατομές για τη διάταξη T22 (κάτω) και T23 (πάνω)	90
<b>Εικόνα 5.14</b> Κινητική ενέργεια τύρβης ( $m^2/s^2$ ) σε επίπεδο στη μέση των δεξαμενών για τις διατάξεις T1 και T2	92
<b>Εικόνα 5.15</b> Διάχυση ενέργειας τύρβης ( $W/m^3 \times 10^{-3}$ ) σε επίπεδο στη μέση των δεξαμενών για τις διατάξεις T1 και T2	93
<b>Εικόνα 5.16</b> Κινητική ενέργεια τύρβης ( $m^2/s^2$ ) σε διάφορες διατομές για τις διατάξεις T1 (α και β) και T2 (γ και δ)	94
<b>Εικόνα 5.17</b> Τάσεις Reynolds σε διάφορες διατομές για τη διάταξη T12	95
<b>Εικόνα 5.18</b> Σύγκριση του υπολογιζόμενου (γκρι βέλη με κύκλο) και μετρούμενου (έντονα βέλη) πεδίου ταχυτήτων ροής (m/s) το σενάριο T13. Παρουσιάζονται (α) οι πιο συχνές περιοχές ανάπαυσης Z1, Z2 και Z3 και οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι τρόποι κίνησης των ανάδρομων ιχθύων M1, M2 και M3	96
<b>Εικόνα 5.19</b> Το πειραματικό μοντέλο ΔΙ και οι διαστάσεις της τυπικής δεξαμενής	97

<b>Εικόνα 5.20</b> Υπολογιζόμενο μέσο κατά βάθος πεδίο ταχυτήτων ροής από την εργασία των Rodriguez et al.[69]. Στο πεδίο ροής αποτυπώνονται οι τροχιές του ιχθύ Α (κόκκινες κουκίδες) και του ιχθύ Β (μωβ κουκίδες)	98
<b>Εικόνα 5.21</b> Το υπολογιστικό μοντέλο στο οποίο αναγράφονται οι οριακές συνθήκες και η αρίθμηση των δεξαμενών	99
<b>Εικόνα 5.22</b> Τρισδιάστατη απεικόνιση της ΔΙ με ισογραμμές μέσης κατά βάθος πεδίο ταχυτήτων ροής	101
<b>Εικόνα 5.23</b> Μέσο κατά βάθος πεδίο ταχυτήτων ροής (α) στην πειραματική εργασία [69] και (β) από το υδροδυναμικό μοντέλο FLOW-3D	101
<b>Εικόνα 5.24</b> Υπολογιζόμενο μέσο κατά βάθος (α) πεδίο ταχυτήτων ροής σε m/s, (β) κινητική ενέργεια τύρβης σε $m^2/s^2$ και (γ) τυρβώδης διάχυση σε $m^2/s^3$ για την τυπική δεξαμενή ΔΙ	101
<b>Εικόνα 5.25</b> Γραμμές ροής (α) σε κάτοψη, (β) σε πλάγια όψη και (γ) σε τρισδιάστατη απεικόνιση στις δεξαμενές 3 μέχρι 9 με χρωματική κλίμακα για το μέσο κατά βάθος πεδίο ταχυτήτων ροής	102
<b>Εικόνα 5.26</b> Περιοχών ανάπαυσης με ταχύτητες μικρότερες από 0.30 m/s	102
<b>Εικόνα 5.27</b> (α) Προσομοιωμένες τροχιές σε σύγκριση με το εξωτερικό όριο των πειραματικά μετρούμενων τροχιών του ιχθύος Α και (β) σύγκριση μεταξύ πειραματικής και προσομοιωμένης τροχιάς.	104
<b>Εικόνα 5.28</b> Οι τέσσερις γενικευμένοι τρόποι κίνησης των ιχθύων εντός της ΔΙ σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα και το ΜΣΙ	105
<b>Εικόνα 5.29</b> Απεικόνιση των πειραματικών (κίτρινες και κόκκινες κουκίδες) και της υπολογιζόμενης τροχιάς (μπλε διακεκομμένη γραμμή) πάνω στις γραμμές ροής. Η ροή είναι από τα δεξιά στα αριστερά και η κίνηση των ιχθύων αντίθετη. (α) Ολόκληρη η ΔΙ, (β) μεγέθυνση των τεσσάρων πρώτων δεξαμενών και (γ) μεγέθυνση των τεσσάρων τελευταίων δεξαμενών	106
<b>Εικόνα 6.1</b> Τρισδιάστατη αναπαράσταση της ΔΙ κάθετου ανοίγματος, δισδιάστατες αναπαραστάσεις των εξεταζόμενων τύπων και σκιαγράφιση των τμημάτων εφαρμογής της βελτιστοποίησης	110
<b>Εικόνα 6.2</b> Σύγκριση των προσομοιώσεων για τις ταχύτητες ροής ((α), (β)) και τα βάθη ροής ((γ), (δ)). Συσχέτιση αδιάστατης παροχής-βάθους από πειραματικές εργασίες [8] και των υπολογισμών του TELEMAC-2D (ε), καθώς και συσχέτιση πειραματικών τιμών και υπολογισμών (στ)	111
<b>Εικόνα 6.3</b> Διάγραμμα ροής που εφαρμόστηκε για την αξιολόγηση της καταλληλότητας 12 τύπων ΔΙ σε 7 παροχές για 8 βιοτικές ομάδες	114
<b>Εικόνα 6.4</b> (α) Ταχύτητα και (β) βάθος ροής για τον τύπο 5-30-1 και παροχή $Q=0.6 m^3/s$	115
<b>Εικόνα 6.5</b> Βάθος και ταχύτητας ροή σε σχέση με την παροχή για κάθε τύπο ΔΙ	116
<b>Εικόνα 6.6</b> Μέση καταλληλότητα HSI βιοτικών ομάδων σε σχέση με την παροχή για τη τυπική δεξαμενή, το άνοιγμα και τη δεξαμενή ανάπαυσης για όλες τις ΔΙ	118
<b>Εικόνα 6.7</b> Μέση καταλληλότητα ενδαιτημάτων βιοτικών ομάδων (HSI) για τη ΔΙΚΑ 5-30-1 που έδωσε υψηλότερες καταλληλότητες για όλες σχεδόν τις βιοτικές ομάδες που μελετήθηκαν.	119
<b>Εικόνα 7.1</b> Το προτεινόμενο φράγμα του Αλμωπαίου	124
<b>Εικόνα 7.2</b> (α) Μπριάνα Barbus Barbus , (β) Πέστροφα και (γ) Γιλάρι [134]	125
<b>Εικόνα 7.3</b> Τρισδιάστατη απεικόνιση του προτεινόμενου πύργου διόδου ιχθύων	127
<b>Εικόνα 7.4</b> Γεωμετρία του εξεταζόμενου τμήματος του ΠΙ	127
<b>Εικόνα 7.5</b> Τομή στην πρώτη δεξαμενή εισόδου (Δ0)	128
<b>Εικόνα 7.6</b> Πεδίο ταχυτήτων ροής στις Δ0, Δ1 και Δ2	129

<b>Εικόνα 7.7</b> Πεδίο ταχυτήτων ροής στη Δ4 και την ΔΑ για πλάτος κάθετου ανοίγματος	130
<b>Εικόνα 7.8</b> Κατανομή (α) της κινητικής ενέργειας σε J/Kg και (β) του βαθμού ανάμιξης σε W/m <sup>3</sup> στη Δ4 και ΔΑ	130
<b>Εικόνα 7.9</b> (α) Πεδίο ταχυτήτων ροής, (β) βάθος ροής, (γ) κατανομή της κινητικής ενέργειας σε J/Kg και (δ) κατανομή του βαθμού ανάμιξης σε W/m <sup>3</sup> στη τυπική δεξαμενή	134
<b>Εικόνα 7.10</b> Ισοποσοτικές του πεδίου ταχυτήτων ροής. Διακρίνονται οι περιοχές της δεξαμενής με ταχύτητες μικρότερες των 0.30 m/s (σκούρο γκρι) και μικρότερων από 0.60 m/s (ανοιχτό γκρι)	134
<b>Εικόνα 7.11</b> Μέση καταλληλότητα ενδαιτημάτων (HSI) για τη ΔΙ 10-20-1 που έδωσε υψηλότερες καταλληλότητες για την ομάδα <i>Salmo fario</i> με FL>20cm. Σε μαύρο περίγραμμα σημειώνεται το σενάριο Σ3	135
<b>Εικόνα 7.12</b> Απεικόνιση των σεναρίων ΣΙ2 (κόκκινη γραμμή), ΣΙ4 (κίτρινη γραμμή) και ΣΙ5 (μωβ γραμμή) πάνω στο μέσο πεδίο ταχυτήτων ροής. (α) Ολόκληρη η ΔΙ, (β) μεγέθυνση των τριών πρώτων δεξαμενών και (γ) μεγέθυνση των τριών τελευταίων δεξαμενών. Η διεύθυνση της ροής είναι από δεξιά προς αριστερά	136
<b>Εικόνα 7.13</b> Απεικόνιση των σεναρίων ΣΙ2 (κόκκινη γραμμή), ΣΙ3 (μωβ γραμμή) και ΣΙ5 (κίτρινη γραμμή) πάνω στο μέσο πεδίο ταχυτήτων ροής	137
<b>Εικόνα 7.14</b> Απεικόνιση των σεναρίων ΣΙ2 (κόκκινη γραμμή) και ΣΙ6 (μωβ γραμμή) πάνω στο μέσο πεδίο ταχυτήτων ροής. (α) Ολόκληρη η ΔΙ, (β) μεγέθυνση των τριών πρώτων δεξαμενών και (γ) μεγέθυνση των τριών τελευταίων δεξαμενών. Η διεύθυνση της ροής είναι από δεξιά προς αριστερά	137
<b>Εικόνα 7.15</b> Απεικόνιση των σεναρίων ΣΙ2 (κόκκινη γραμμή), ΣΙ7 (κίτρινη γραμμή) και ΣΙ8 (μωβ γραμμή) πάνω στο μέσο πεδίο ταχυτήτων ροής. (α) Ολόκληρη η ΔΙ, (β) μεγέθυνση των τριών πρώτων δεξαμενών και (γ) μεγέθυνση των τριών τελευταίων δεξαμενών. Η διεύθυνση της ροής είναι από δεξιά προς αριστερά	138



**ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ**

<b>Πίνακας 2.1</b>	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κύριων τύπων ΔΙ	33
<b>Πίνακας 4.1</b>	Χαρακτηριστικά των υπολογιστικών πλεγμάτων	64
<b>Πίνακας 4.2</b>	Σύγκριση των διαφορετικών πλεγμάτων	65
<b>Πίνακας 4.3</b>	Εύρος τιμών συντελεστών τραχύτητας για το τμήμα του ποταμού	67
<b>Πίνακας 4.4</b>	Τιμές του συντελεστή Manning ανά ζώνη	68
<b>Πίνακας 4.5</b>	Σύγκριση των ταχυτήτων ροής που μετρήθηκαν με αυτές που υπολογίστηκαν από το μοντέλο στις διατομές ελέγχου	71
<b>Πίνακας 4.6</b>	Αρχικές και τελικές τιμές παραμέτρων μετά την ανάλυση ευαισθησίας του ΜΣΙ	72
<b>Πίνακας 4.7</b>	Ποσοστό προτίμησης κίνησης και κυκλικής ή μη συμπεριφοράς	73
<b>Πίνακας 5.1</b>	Σενάρια υπολογισμών	81
<b>Πίνακας 5.2</b>	Υπολογιζόμενα και μετρούμενα (παρένθεση) χαρακτηριστικά της ροής	83
<b>Πίνακας 5.3</b>	Σύγκριση με το δείκτη RMSE χαρακτηριστικών ροής που μετρήθηκαν με αυτές που υπολογίστηκαν από τα μοντέλα στις διατομές ελέγχου για το σενάριο T12	91
<b>Πίνακας 5.4</b>	Χαρακτηρίστηκα της ροής στις ζώνες Z1, Z2 και Z3	96
<b>Πίνακας 5.5</b>	Γεωμετρία της διόδου ιχθύων	97
<b>Πίνακας 5.6</b>	Μέση ταχύτητα και χρόνος ανάπαυσης για τον ιχθύ Α [69]	99
<b>Πίνακας 6.1</b>	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δεξαμενών των 12 ΔΙ που μελετήθηκαν	110
<b>Πίνακας 6.2</b>	Κλάσεις μεγέθους για τα είδη που μελετήθηκαν [111]–[113]	112
<b>Πίνακας 7.1</b>	Χαρακτηριστικά ιχθύων της εξεταζόμενης περίπτωσης	128
<b>Πίνακας 7.2</b>	Κριτήρια σχεδιασμού ΔΙ	128
<b>Πίνακας 7.3</b>	Σενάρια υπολογισμών του υδροδυναμικού μοντέλου	129
<b>Πίνακας 7.4</b>	Επίδραση του πλάτους της οπής εισροής στα χαρακτηριστικά της ροής	131
<b>Πίνακας 7.5</b>	Επίδραση των αριθμού των οπών εισροής στην εισερχόμενη παροχή	132
<b>Πίνακας 7.6</b>	Επίδραση της στάθμης ταμειυτήρα στα χαρακτηριστικά ροής των Δ5 και Δ7	132
<b>Πίνακας 7.7</b>	Επίδραση του πλάτους του κάθετου ανοίγματος στα χαρακτηριστικά ροής των Δ5 και Δ7	133
<b>Πίνακας 7.8</b>	Σενάρια υπολογισμών του ΜΣΙ	135

## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα φράγματα - ταμειυτήρες νερού αποτελούν εμπόδια για τη μετανάστευση των ιχθύων δυσχεραίνοντας την πρόσβασή τους στα ενδαιτήματα και στις περιοχές αναπαραγωγής τους. Δημιουργείται έτσι ένα σημαντικό περιβαλλοντικό πρόβλημα, το οποίο αντιμετωπίζεται αποτελεσματικά με τη χρήση Διόδου Ιχθύων (ΔΙ). Μια ΔΙ αποτελείται συνήθως από έναν επικλινή ανοικτό αγωγό με κατάλληλες διατάξεις, όπως π.χ. υπερχειλιστές ή τοιχία, με τις οποίες χωρίζεται ο αγωγός σε τμήματα. Οι πιο συνηθισμένες διατάξεις ΔΙ και πλέον κατάλληλες για τις ελληνικές συνθήκες [1]–[3] είναι οι ΔΙ με κάθετα ανοίγματα (ΔΙΚΑ).

Σήμερα, ο σχεδιασμός των ΔΙ είναι εμπειρικός και βασίζεται κυρίως σε απλοποιημένες θεωρίες για το πεδίο ροής στη ΔΙ και τα χαρακτηριστικά των ιχθύων, τα οποία συνήθως στηρίζονται σε μεγάλο αριθμό πρακτικών πληροφοριών και προσεγγίσεων της διεθνούς και ελληνικής βιβλιογραφίας [1], [4]–[9]. Πολλές φορές, ο τρόπος αυτός σχεδιασμού δεν είναι επιτυχής με αποτέλεσμα να είναι επιτακτική η ανάγκη ανάπτυξης ορθολογιστικών μεθόδων σχεδιασμού. Μια τέτοια μέθοδος είναι με τη χρήση ενός Ολοκληρωμένου Μαθηματικού Μοντέλου (ΟΜΜ).

### 1.1 Θεωρητικό πλαίσιο

#### 1.1.1 Μαθηματικά μοντέλα διόδων ιχθύων

Οι περισσότερες υφιστάμενες πρακτικές μέθοδοι σχεδιασμού για ΔΙ χρησιμοποιούν εξισώσεις ή/και προτεινόμενες τιμές για τις κύριες διαστάσεις των δεξαμενών με στόχο να αποσβεστεί η ενέργεια της εισερχόμενης φλέβας, να μειωθεί η ταχύτητα της και να οδηγηθεί ομαλά στο επόμενο άνοιγμα [10]. Αυτές οι πληροφορίες βασίζονται συνήθως σε μετρήσεις, κυρίως ταχυτήτων ροής και απόσβεσης κινητικής ενέργειας τύρβης που λαμβάνονται από πειραματικές έρευνες σε φυσικά μοντέλα. Τέτοιες έρευνες διεξήχθησαν κυρίως στο Πανεπιστήμιο της Αλμπέρτα [8], [9], [11], [12], αλλά και στο Πανεπιστήμιο της Τουλούζης [7], [13]–[15].

Το υδροδυναμικό μοντέλο που υπολογίζει το πεδίο ροής στη ΔΙ είναι συνήθως ένα μοντέλο CFD (Computational Fluid Dynamics). Το οικολογικό μοντέλο χρησιμοποιεί τα χαρακτηριστικά του πεδίου ροής για να υπολογίσει τη συμπεριφορά-κίνηση των ιχθύων, επιδιώκοντας την ελαχιστοποίηση της καταναλισκόμενης ενέργειας, δηλαδή ακολουθώντας τις περιοχές χαμηλής ταχύτητας και τύρβης [16].

Οι ΔΙ με κάθετα ανοίγματα σχεδιάζονται έτσι ώστε

- (1) να αποσβένεται η ενέργεια της εισερχόμενης φλέβας και να δημιουργούνται συνθήκες ροής στη δεξαμενή που επιτρέπουν στους ιχθύες να διέλθουν από το άνοιγμα προς τα ανάντη της ΔΙ χρησιμοποιώντας την ταχύτητα έκρηξής τους για να αντιμετωπίσουν την προς τα κατάντη ροή της φλέβας, και
- (2) να διαθέτουν περιοχές με χαμηλά επίπεδα τυρβώδους κινητικής ενέργειας, όπου θα ξεκουράζονται οι ιχθύες. Οι περιοχές αυτές είναι συνήθως οι περιοχές ανακυκλοφορίας της ροής.

Τα μοντέλα CFD επιτρέπουν τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού μιας ΔΙ μέσω της εκτέλεσης τροποποιήσεων στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δεξαμενών. Ωστόσο, για να εμπιστευθούμε τα αποτελέσματα ενός μοντέλου CFD, θα πρέπει να επιβεβαιώνονται με πειραματικά δεδομένα ([17],[18]). Στις περισσότερες ερευνητικές εργασίες για ΔΙ, συνήθως θεωρείται ότι η ροή είναι δισδιάστατη, οπότε περιγράφεται

ικανοποιητικά στο μεγαλύτερο τμήμα της δεξαμενής, αλλά όχι η περιοχή της φλέβας εισροής, όπου είναι τρισδιάστατη. Επίσης, έχουν εφαρμοστεί και 3D μοντέλα [12], [19]–[25], τα οποία διαθέτουν δύο πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα.

- (1) Λύνουν τις τρισδιάστατες εξισώσεις συνέχειας και ορμής (Reynolds) για τυρβώδεις ροές και έτσι μπορούν να επιλύσουν αποτελεσματικότερα την 3D ροή στην περιοχή της φλέβας.
- (2) Χρησιμοποιούν μεθόδους που επιτρέπουν τον ακριβέστερο υπολογισμό της μορφής της ελεύθερης επιφάνειας του νερού και των τυρβωδών χαρακτηριστικών της ροής ([19], [26], [24]).

### **1.1.2 Μαθηματικά μοντέλα ποταμών σε περιοχές διόδων ιχθύος**

Οι ΔΙ πρέπει να χωροθετούνται σε κατάλληλες θέσεις που διευκολύνουν την απρόσκοπτη διέλευση των ιχθύων προς τα ανάντη και κατάντη του τεχνικού έργου [27]. Ιδανικά, αυτό μπορεί να επιτευχθεί ορθολογικά, όταν γνωρίζουμε πως συμπεριφέρονται και κινούνται οι ιχθύες. Κατάλληλα μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης της συμπεριφοράς των ιχθύων μας παρέχουν τις απαραίτητες πληροφορίες [28]–[31].

Το υδροδυναμικό μοντέλο που υπολογίζει το πεδίο ροής σε ποταμούς βασίζεται συνήθως στις εξισώσεις Saint-Venant, βλ. π.χ. TELEMAC-2D ([32], [33]). Στο οικολογικό μοντέλο προσομοιώνονται οι βασικές λειτουργίες των ιχθύων, οι οποίοι δεχόμενοι υδροδυναμικά ερεθίσματα από το περιβάλλον, όπως οι ταχύτητες ροής και οι διαφορές επιταχύνσεων, λαμβάνουν την απόφαση να πραγματοποιήσουν συγκεκριμένες κινήσεις. Η περιοχή εντός της οποίας ένας ιχθύς αντιλαμβάνεται το υδροδυναμικό ερέθισμα προσδιορίζεται από 5 θέσεις αντίληψης γύρω από τον ιχθύ.

Γενικά, διακρίνονται οι ακόλουθοι τρεις τρόποι κολύμβησης ιχθύων:

- (1) συνεχής,
- (2) παρατεταμένη, και
- (3) εκρηκτική (burst) κολύμβηση,

Οι τρόποι αυτοί συνδέονται με τις αντίστοιχες κινήσεις τους που είναι

- (1) ενεργή κολύμβηση στην κατεύθυνση της ροής,
- (2) παθητική κολύμβηση και συμπαράσυρση από τη ροή,
- (3) αποφυγή και μεταβολή γωνίας σε σχέση με την ροή, και
- (4) διαφυγή και κολύμβηση αντίθετα στη ροή.

Το σημαντικότερο οικολογικό μοντέλο που υπάρχει στη διεθνή βιβλιογραφία είναι το μοντέλο ELAM [30], το οποίο είναι της μορφής Individual Based Model (IBM) που προσομοιώνει τους ιχθύες ως ανεξάρτητες μονάδες, λαμβάνοντας υπόψη τις μεταξύ τους διαφορές, όπως π.χ. το μέγεθος, συνδυάζοντας τη μέθοδο Particle Tracking με την αρχή κίνησης της ελάχιστης ενέργειας, δηλαδή ακολουθώντας τις περιοχές χαμηλής ταχύτητας και τύρβης με μικρές μεταβολές της ροής.

## **1.2 Ερευνητικά ερωτήματα**

Το κύριο ερευνητικό ερώτημα είναι: Πως σχεδιάζουμε ορθολογικά με ένα OMM μια ΔΙ, ώστε αυτή να είναι αποτελεσματική;

Το ερώτημα αυτό αναλύεται στα ακόλουθα 5 επιμέρους ερευνητικά ερωτήματα:

- (1) Πώς μπορούμε να περιγράψουμε με ένα μαθηματικό μοντέλο την κίνηση των ιχθύων σε μια ΔΙ;
- (2) Πώς μπορούμε να περιγράψουμε με ένα μαθηματικό μοντέλο την κίνηση των ιχθύων σε ένα ποταμό στην περιοχή μιας ΔΙ;
- (3) Πώς σχεδιάζουμε μια ΔΙ, ώστε αυτή να επιτρέπει την ασφαλή κίνηση των ιχθύων;
- (4) Πώς τοποθετούμε μια ΔΙ στην περιοχή ενός φράγματος, ώστε να ελκύει τους ιχθύες;
- (5) Ποιο μοντέλο τύρβης προσομοιώνει καλύτερα το πεδίο ροής σε μια ΔΙ;

### 1.3 Πρωτότυπα σημεία της διατριβής – Δημοσιεύσεις

#### 1.3.1 Πρωτότυπα σημεία της διατριβής

Το πρωτότυπο σημείο της διατριβής είναι η ανάπτυξη ενός ΟΜΜ, που σχεδιάζει ορθολογικά μια ΔΙ, ώστε αυτή να είναι αποτελεσματική.

Το ΟΜΜ αποτελείται από τα ακόλουθα τρία υπο-μοντέλα:

- 1) **MM1:** στο τμήμα του ποταμού ανάντη του φράγματος,
- 2) **MM2:** στη ΔΙ, και
- 3) **MM3:** στο τμήμα του ποταμού κατόντη του φράγματος.

Το κάθε υπο-μοντέλο αποτελείται από ένα υδροδυναμικό μοντέλο και ένα μοντέλο συμπεριφοράς για τους ιχθύες, το οποίο στη συνέχεια καλείται **μοντέλο συμπεριφοράς ιχθύων (ΜΣΙ)**.

Στην παρούσα ΔΔ εξετάστηκαν τα ακόλουθα υδροδυναμικά μοντέλα:

- 1) **TELEMAC-2D** για τα MM1 και MM3, και
- 2) **FLOW-3D** για το MM2.

Τα αντίστοιχα ΜΣΙ δομήθηκαν στο πλαίσιο της ΔΔ και συνδέθηκαν με τα αντίστοιχα υδροδυναμικά μοντέλα.

#### 1.3.2 Δημοσιεύσεις

Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της Διδακτορικής Διατριβής (ΔΔ) πραγματοποιήθηκε η συγγραφή των ακόλουθων 11 δημοσιεύσεων, εκ των οποίων οι 1, 2, 6, 7, 8, 10 και 11 είναι συναφείς με την ερευνητική δραστηριότητα της ΔΔ:

- 1) Mitsopoulos, G. and Stamou, A.I. (2023). Integrated modelling of Vertical-Slot fish-passes. Proceedings of the 10th CEMEPE & SECOTOX international Congress, 5-9 June 2023, Skiathos, Greece.
- 2) Mitsopoulos, G., Svendsen, J.C. and Stamou, A.I. (2022). Integrated modelling of fish behavior in rivers. Proceedings of the 7th IAHR Europe Congress, 7-9 September 2022, Athens, Greece.
- 3) Mitsopoulos, G., Diakakis, M., Panagiotatou, E., Sant, V., Bloutsos, A., Lekkas, E., Baltas, E. and Stamou, A. I. (2022). 'How would an extreme flood have behaved if flood protection works were built?' The case of the disastrous Flash Flood of November 2017 in Mandra, Attica, Greece. Urban Water Journal. 1–11. <https://doi.org/10.1080/1573062x.2022.2103002>.

- 4) Mitsopoulos, G., Panagiotatou, E., Sant. V., Baltas, E., Diakakis, M., Lekkas, E. and Stamou, A. (2022). Optimizing the performance of coupled 1D/2D hydrodynamic models for early warning of flash floods. *Water*. 14(15). 2356. <https://doi.org/10.3390/w14152356>
- 5) Mitsopoulos, G., Diakakis, M., Bloutsos, A., Lekkas, E., Baltas, E. and Stamou, A. (2022). The effect of flood protection works on Flood Risk. *Water*, 14(23), 3936. <https://doi.org/10.3390/w14233936>.
- 6) Mitsopoulos, G. and Stamou, A.I. (2021). Optimizing the Design of a Tower Fish Pass in Irrigation Dams using a CFD model. *Proceedings of the 6th IAHR Europe Congress, February 2021, Warsaw, Poland*.
- 7) Mitsopoulos, G., Theodoropoulos, C., Papadaki, C., Dimitriou, E., Santos, J. M., Zogaris, S. and Stamou, A. (2020). Model-based ecological optimization of vertical slot fishways using macroinvertebrates and multispecies fish indicators. *Ecological Engineering*, 158, 106081. doi:10.1016/j.ecoleng.2020.106081.
- 8) Μητσόπουλος, Γ. και Στάμου, Α.Ι. (2019). Σχεδιασμός Πύργου Διόδου Ιχθύων σε Φράγματα Άρδευσης μεταβλητού βάθους με τη χρήση Μαθηματικών Μοντέλων. Πρακτικά 14ου Συνεδρίου της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, Βόλος, Ελλάδα, 16-17 Μαΐου 2019.
- 9) Οικονόμου, Β., Μητσόπουλος, Γ. και Στάμου, Α.Ι. (2019). Προκαταρκτική εκτίμηση κινδύνου ρύπανσης από Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) εξαιτίας πλημμυρών. Πρακτικά 14ου Συνεδρίου της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, Βόλος, Ελλάδα, 16-17 Μαΐου 2019.
- 10) Stamou, A. I., Mitsopoulos, G., Rutschmann, P. and Bui, M. D. (2018). Verification of a 3D CFD model for vertical slot fish-passes. *Environmental Fluid Mechanics*, 18(6), 1435-1461. doi:10.1007/s10652-018-9602
- 11) Μητσόπουλος, Γ., Στάμου, Α.Ι., Rutschmann, P. and Bui, M. D. (2017). Υδραυλικός σχεδιασμός διόδων ιχθύων με Μοντέλα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD). Πρακτικά 3ου Πανελληνίου Συνεδρίου Φραγμάτων και Ταμιευτήρων «Διαχείριση Έργων και Προοπτικές Ανάπτυξης», Αθήνα, Ελλάδα, 12-15 Οκτωβρίου 2017.

### 1.4 Μεθοδολογία

Για τη δημιουργία του OMM εφαρμόζουμε μια μεθοδολογία 5 φάσεων, όπως περιγράφεται παρακάτω.

#### 1.4.1 Φάση 1. Βιβλιογραφική διερεύνηση

Η βιβλιογραφική διερεύνηση αφορά έρευνες διεθνείς και εντός του Ελλαδικού χώρου. Αποσκοπεί αρχικά στην εύρεση των κατάλληλων γεωμετρικών χαρακτηριστικών καθώς και τις συνθήκες ροής μέσα στις ΔΙ. Για το σκοπό αυτό, μελετήθηκαν και επιλέχθηκαν στον Ελλαδικό χώρο (1) οι κατάλληλες ΔΙ, καθώς και (2) οι ιχθύες βάσει των χαρακτηριστικών τους (μήκος, ταχύτητα πορείας, ταχύτητα έκρηξης). Περαιτέρω, επιλέχθηκαν έρευνες, των οποίων τα πειραματικά δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για την επιβεβαίωση του OMM.

#### 1.4.2 Φάση 2. Δόμηση ολοκληρωμένου μοντέλου

Όπως ήδη αναφέρθηκε, το OMM αποτελείται από (α) ένα υδροδυναμικό μοντέλο και ένα ΜΣΙ για ποταμούς και (β) ένα υδροδυναμικό μοντέλο και ένα ΜΣΙ για ΔΙ.

Για το OMM σε ΔΙ, το υδροδυναμικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε είναι το FLOW-3D [34], το οποίο είναι τρισδιάστατο για την ακριβέστερη επίλυση του πεδίου ροής και των χαρακτηριστικών της τύρβης, που είναι πολύ σημαντική παράμετρος για το ΜΣΙ. Το

ΜΣΙ, δομήθηκε με βάση τις αρχές (α) τις ελάχιστης κατανάλωσης ενέργειας από τους ιχθύες και (β) την αποφυγή των περιοχών με έντονα τυρβώδη χαρακτηριστικά.

Για το ΟΜΜ σε ποταμούς, ως υδροδυναμικό μοντέλο, χρησιμοποιήθηκε το TELEMAC-2D [32], [33]. Για τη δόμηση του ΜΣΙ χρησιμοποιήθηκε ως βάση ένα μοντέλο που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής του ΕΜΠ [35] βασισμένο στο μοντέλο ELAM [28], [30]. Το μοντέλο αυτό προσομοιώνει τρεις βασικές συμπεριφορές: Β1, κολύμβηση προς την κατεύθυνση της ροής, που αποτελείται από την κολύμβηση στην κατεύθυνση της ροής σε συνδυασμό με έναν παράγοντα τυχαιότητας (Biased Correlated Random Walk), Β2, κολύμβηση προς τις υψηλότερες ταχύτητες ροής, διευκολύνοντας την κατάντη μετανάστευση μέσω της αποφυγής εμποδίων, και Β3, κολύμβηση αντίθετα στην κατεύθυνση της ροής, όπου συνιστά μια αντίδραση διαφυγής κατά την οποία ο ιχθύς εγκαταλείπει προσωρινά την κατάντη μετανάστευση και στρέφεται προς τα ανάντη.

### **1.4.3 Φάση 3. Βαθμονόμηση και επιβεβαίωση του μοντέλου**

Με βάση τη βιβλιογραφική διερεύνηση της Φάσης 1, έγινε η βαθμονόμηση και η επιβεβαίωση του ΟΜΜ.

### **1.4.4 Φάση 4. Εφαρμογή του ολοκληρωμένου μοντέλου**

Το ΟΜΜ βελτιστοποιήθηκε για διάφορα είδη ιχθύων και μακροασπόνδυλων και εφαρμόστηκε στο σχεδιασμό ενός πύργου ΔΙ στον ποταμό Αλμωπαίο, στον οποίο μελετάται αρδευτικό φράγμα.

### **1.4.5 Φάση 5. Τελικές εργασίες**

Στην τελευταία φάση πραγματοποιούνται (α) η συγγραφή της Διδακτορικής Διατριβής (ΔΔ) και (β) οι ενέργειες διάχυσης των αποτελεσμάτων της.

## **1.5 Διάρθρωση της διδακτορικής διατριβής**

Η παρούσα διατριβή οργανώνεται ως εξής:

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> – ΕΙΣΑΓΩΓΗ.** Παρουσιάζεται η εισαγωγή στις ΔΙ και στα μοντέλα συμπεριφοράς ιχθύων, ο σκοπός της διατριβής με τα ερευνητικά ερωτήματα, τα πρωτότυπα σημεία της και η εφαρμοζόμενη μεθοδολογία υλοποίησης.

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ.** Πραγματοποιείται η βιβλιογραφική διερεύνηση για (α) τα είδη τεχνικών ΔΙ, καθώς και πίνακας με τα μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα τους, β) τις πειραματικές εργασίες σε ΔΙ κάθετου ανοίγματος, γ) τη μαθηματική προσομοίωση ροής σε ΔΙ, και δ) τη μαθηματική προσομοίωση συμπεριφοράς ιχθύων.

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> - ΔΟΜΗΣΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.** Παρουσιάζεται αναλυτικά η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε στη διατριβή. Παρουσιάζονται (α) το δισδιάστατο υδροδυναμικό μοντέλο TELEMAC-2D σε ποταμούς, (β) το μοντέλο συμπεριφοράς ιχθύων σε ποταμούς, γ) το τρισδιάστατο υδροδυναμικό μοντέλο FLOW-3D σε ΔΙ και δ) το μοντέλο συμπεριφοράς ιχθύων σε ΔΙ.

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> - ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΠΟΤΑΜΟΥΣ.** Πραγματοποιείται η βαθμονόμηση και επιβεβαίωση του μαθηματικού μοντέλου σε ποταμούς. Αρχικά, βαθμονομείται και επιβεβαιώνεται το υδροδυναμικό μοντέλο TELEMAC-2D με πειραματικά δεδομένα διαθέσιμα στη διεθνή

βιβλιογραφία. Στη συνέχεια επιβεβαιώνεται το οικολογικό μοντέλο με δεδομένα για ιχθύες από την ίδια περιοχή εφαρμογής.

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5° - ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΔΙΟΔΟΥΣ ΙΧΘΥΩΝ.** Πραγματοποιείται η βαθμονόμηση και επιβεβαίωση του υδροδυναμικού μοντέλου FLOW-3D με πειραματικά δεδομένα διαθέσιμα στη διεθνή βιβλιογραφία και αναλύεται η ροή μέσα σε μια ΔΙ κάθετου ανοίγματος. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η επιβεβαίωση του ολοκληρωμένου μαθηματικού μοντέλου σε ΔΙ. Αρχικά υπολογίζεται το πεδίο ροής σε ΔΙ κάθετου ανοίγματος με τη χρήση του μοντέλου FLOW-3D. Τέλος, επιβεβαιώνεται το οικολογικό μοντέλο κίνησης ιχθύων με τη χρήση των πειραματικών τροχιών της κίνησης των ιχθύων εντός της ΔΙ.

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6° - ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΔΙΟΔΟΥ ΙΧΘΥΩΝ ΜΕ ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ.** Παρουσιάζεται και εφαρμόζεται μεθοδολογία για τη βελτιστοποίηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών μιας ΔΙ κάθετου ανοίγματος με κριτήριο τους δείκτες καταλληλότητας ενδιαίτηματος. Στόχος της βελτιστοποίησης είναι η εύρεση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών που καθιστούν τη ΔΙ κατάλληλη για τα περισσότερα είδη μικροοργανισμών και ιχθύων σε ποταμούς με ΔΙ.

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7° - ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.** Εφαρμόζεται το OMM σε περιοχή του ποταμού Αλμωπαίου, στην οποία πρόκειται να κατασκευαστεί αρδευτικό φράγμα. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του φράγματος είναι (α) το μεγάλο του ύψος και (β) η συνεχώς μεταβαλλόμενη, μέσα στο έτος, στάθμη επιφάνειας του ταμιευτήρα. Λαμβάνοντας υπόψη τα δυο παραπάνω χαρακτηριστικά προτείνεται η χρήση του Πύργου ΔΙ με πλευρικά ανοίγματα προς τον ταμιευτήρα και βελτιστοποιείται η λειτουργία του.

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8° - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.** Σχολιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών, εξάγονται τα κύρια συμπεράσματα, δίδονται απαντήσεις στα ερευνητικά ερωτήματα και παρέχονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9° – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.** Στο 9° κεφάλαιο παρατίθενται οι βιβλιογραφικές αναφορές.

## 2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

### 2.1 Εισαγωγή

Οι ιχθύες μεταναστεύουν προς τα ανάντη ή τα κατόντη των ποταμών για να βρουν κατάλληλα ενδιαιτήματα για τροφή, αναπαραγωγή ή/και για να αποφύγουν ρύπους ή σκληρές περιβαλλοντικές συνθήκες [36]. Ωστόσο, παγκοσμίως υπάρχουν εκατομμύρια ανθρωπογενείς κατασκευές που εκτρέπουν ή/και αποθηκεύουν γλυκό νερό για οικιακές, γεωργικές και βιομηχανικές χρήσεις [37], εμποδίζοντας τη μετακίνηση των ιχθύων [38]. Ως αποτέλεσμα, οι πληθυσμοί ιχθύων σε ποταμούς με φράγματα έχουν συχνά μειωθεί ή έχουν εξαφανιστεί [39]. Τα διάδρομα είδη χρειάζονται ανεμπόδιστες, πλήρως προσβάσιμες διαδρομές μεταξύ του ποταμού και της θάλασσας [38], [40]. Τα ποτάμια είδη, αν και δεν είναι υποχρεωτικά μεταναστευτικά, είναι επίσης ευάλωτα στη διακοπή της συνέχειας των ποταμών, επειδή πρέπει να μεταναστεύουν εντός των ποτάμιων συστημάτων για να φτάσουν στους τόπους αναπαραγωγής, ενώ συχνά μετακινούνται σε λιγότερα, μικρότερα και ασύνδετα/απομονωμένα ενδιαιτήματα [41]. Σε παγκόσμιο επίπεδο, οι πληθυσμοί των ιχθύων του γλυκού νερού έχουν μειωθεί σοβαρά τα τελευταία 40 χρόνια λόγω της ρύπανσης, της απώλειας ενδιαιτημάτων και του κατακερματισμού [42].

Τα φράγματα αποτελούν τα κύρια εμπόδια στη μετανάστευση των ιχθύων. Για να είναι δυνατή η μετανάστευση των ιχθύων είναι απαραίτητη η κατασκευή διόδων ιχθύων (ΔΙ). Μια ΔΙ αποτελείται συνήθως από έναν επικλινή ανοικτό αγωγό (κανάλι) που περιλαμβάνει κατάλληλες διατάξεις, όπως π.χ. υπερχειλιστές ή τοιχία με ανοίγματα, με τις οποίες χωρίζεται ο αγωγός σε τμήματα-διαμερίσματα (π.χ. μικρές δεξαμενές), στα οποία δημιουργούνται κατάλληλες συνθήκες ροής που διευκολύνουν τη μετακίνηση (προς τα ανάντη) των ιχθύων [6]. Οι περισσότερο συνηθισμένοι τύποι τεχνητών ΔΙ [10] είναι: (i) πολλαπλών δεξαμενών (Multiple-Pool), (ii) τύπου Denil, (iii) με κάθετα ανοίγματα (Vertical-Slot), (iv) με θυροφράγματα (Fish-lock), και (v) ανελκυστήρες ιχθύων (Fish-lifts).

Σήμερα, σχεδιάζουμε τις ΔΙ εμπειρικά [10] βασιζόμενοι κυρίως σε απλοποιήσεις του πεδίου ροής και τα χαρακτηριστικά των ιχθύων, τα οποία συνήθως στηρίζονται σε προσεγγίσεις και πρακτικές πληροφορίες της διεθνούς βιβλιογραφίας. Η μέθοδος αυτή σχεδιασμού δεν είναι πάντα επιτυχής, εξαιτίας κυρίως του εμπειρικού της χαρακτήρα. Για το λόγο αυτό έχουν προταθεί ορθολογικές μέθοδοι σχεδιασμού, όπως με τη χρήση ολοκληρωμένων μοντέλων, τα οποία περιλαμβάνουν ένα μοντέλο Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD) για την περιγραφή του πεδίου ροής στη ΔΙ και ένα οικολογικό μοντέλο που προσομοιώνει την κίνηση των ιχθύων [35]. Τα τελευταία χρόνια εφαρμόζουμε συχνά μοντέλα CFD για να προσδιορίζουμε τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά μιας ΔΙ [24]. Δεν ισχύει το ίδιο για τα οικολογικά μοντέλα, καθόσον ελάχιστα έχουν εφαρμοστεί σε ΔΙ [43]. Μέχρι να αναπτύξουμε αξιόπιστα οικολογικά μοντέλα για ΔΙ (που αποτελούν και αντικείμενο της διδακτορικής διατριβής του πρώτου συγγραφέα), χρησιμοποιούμε εμπειρικά δεδομένα για τους επιλεγέντες τύπους και τις διαστάσεις των ΔΙ που σχεδιάζουμε, τις οποίες ελέγχουμε και βελτιστοποιούμε με τα μοντέλα CFD.

Στη διαδικασία αυτή του βέλτιστου σχεδιασμού σημαντικό βήμα αποτελεί η αρχική επιλογή του τύπου ΔΙ που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του ποταμού, του φράγματος και των ιχθύων. Η επιλογή αυτή γίνεται με βάση τα χαρακτηριστικά των τύπων ΔΙ και τα πλεονεκτήματα-μειονεκτήματά τους, όπως αυτά που παρουσιάζονται στον Πίνακα **2.1**, τα οποία βασίζονται στις εργασίες των Clay [5], FAO/DVWK [10], Larinier [44]–[46], Tarrade and Larinier [14], Schmutz and Mielach [47].



## 2.2 Είδη διόδων ιχθύων

Στη διαδικασία αυτή του βέλτιστου σχεδιασμού σημαντικό βήμα αποτελεί η αρχική επιλογή του τύπου ΔΙ που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του ποταμού, του φράγματος και των ιχθύων. Η επιλογή αυτή γίνεται με βάση τα χαρακτηριστικά των τύπων ΔΙ και τα πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα τους, όπως αυτά που παρουσιάζονται παρακάτω.

### 2.2.1 Δίοδος ιχθύων τύπου Denil

Μια ΔΙ τύπου Denil αποτελείται από επικλινές κανάλι μεγάλης κλίσης, με πετάσματα τοποθετημένα πολύ κοντά μεταξύ τους κατά μήκος του πυθμένα. Πήρε το όνομά της από τον Βέλγο μηχανικό που την κατασκεύασε. Τα πετάσματα τοποθετούνται συνήθως σε γωνία 45° ως προς την κατακόρυφο του πυθμένα και έχουν σχήμα U. Στις ΔΙ Denil η ροή είναι τυρβώδης, με μεγάλη ορμή και υψηλή διάχυση ενέργειας. Το νερό ρέει με σχετικά χαμηλή ταχύτητα κοντά στον πυθμένα και μεγαλύτερες ταχύτητες κοντά στην κορυφή. Τα πλεονεκτήματα του διόδου ιχθύων Denil είναι α) ότι κατασκευάζεται με απότομες κλίσεις πυθμένα, γεγονός που απαιτεί λιγότερο χώρο και έχει χαμηλότερο κόστος, β) ότι δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της στάθμης του νερού στα κατάντη και γ) ότι η ροή του νερού στην είσοδο είναι ιδιαίτερα ελκυστική για τα ψάρια. Τα μειονεκτήματα είναι α) ότι οι μεταβολές της στάθμης του νερού επηρεάζουν έντονα τη λειτουργικότητα της διόδου ιχθύων, β) ότι δεν είναι λειτουργική σε χαμηλές παροχές και γ) ότι χρειάζεται συχνή συντήρηση από σκουπίδια. Η δίοδος ιχθύων Denil είναι ιδανική για τα μεγάλα σαλμονοειδή, αλλά εξαιρετικά ανεπαρκής για τα μικρότερα ψάρια, με αποτέλεσμα να είναι εντελώς αναποτελεσματική για τους μικροοργανισμούς και τα ασπόνδυλα της βενθικής πανίδας.

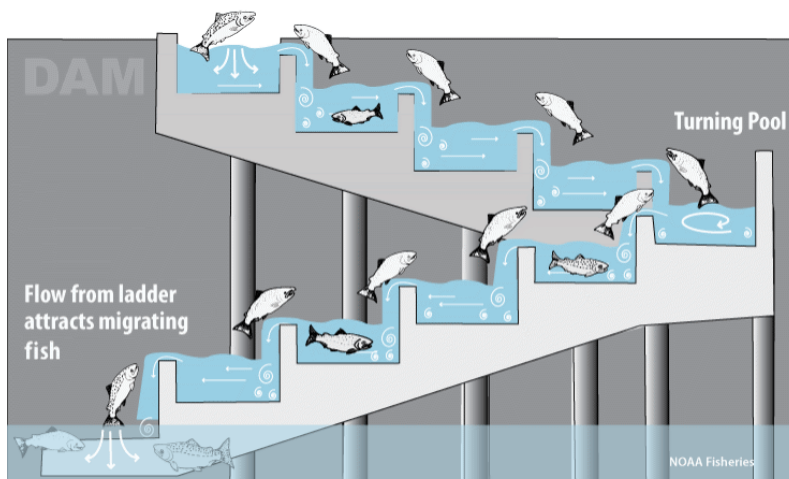


Εικόνα 2.1 ΔΙ Denil [48]

### 2.2.2 Δίοδος ιχθύων με υπερχειλίση με ή χωρίς βυθισμένες οπές στα πετάσματα

Στις διόδους με υπερχειλιστές τα πετάσματα είναι κάθετα στον πυθμένα και στη ροή και έχουν διαφορά ύψους μεταξύ τους. Οι ιχθύες προσελκύνονται από το νερό που ρέει και μετακινούνται από τη μια δεξαμενή στην άλλη είτε πηδώντας είτε κολυμπώντας (ανάλογα με το βάθος ροής). Συνήθως έχουν επίσης ένα ή δύο στόμια στο βυθισμένο μέρος και μια βυθισμένη τομή στο πάνω μέρος, για να βοηθούν οι ιχθύες να μετακινούνται μέσω των οπών σε περίπτωση που δεν είναι σε θέση να πηδήξουν. Η κατασκευή τους είναι απλή, επομένως το κόστος είναι σχετικά χαμηλό, καταφέρνουν να προσαρμοστούν στο δυναμικό κολύμβησης των ιχθύων και γενικά το πεδίο

ταχύτητας διατηρείται χαμηλό, εκτός από τις περιοχές κοντά στον τοίχο. Το κύριο μειονέκτημα είναι η ευαισθησία τους στις διακυμάνσεις της στάθμης του νερού και απαιτούν συχνές προσαρμογές. Η πτώση της ελεύθερης επιφάνειας μεταξύ των λιμνών ορίζεται συνήθως στα 30 cm για τους ενήλικες σολομούς και στα 20 εκατοστά για τα ενήλικα ψάρια του γλυκού νερού. Οι ΔΙ με φράγματα έχουν συνήθως κλίση 10%. Οι διαστάσεις διαφέρουν και επιλέγονται ανάλογα με οι ιχθύες που θα φιλοξενήσει η ΔΙ. Μερικές φορές τα πετάσματα βυθίζονται και η ροή γίνεται ιδιαίτερα τυρβώδης ώστε η δίοδος ιχθύων να είναι επιθυμητή για τους ιχθύες.



**Εικόνα 2.2** ΔΙ με υπερχείλιση [49]



**Εικόνα 2.3** ΔΙ με εγκοπές στα πετάσματα (αριστερά) και υπερχειλιστές (δεξιά) [10]

### **2.2.3 Δίοδος ιχθύων με ρομβοειδή διάταξη πετασμάτων ή με κυρτά πετάσματα**

Η διαφορά από τη δίοδο ιχθύων με υπερχειλιστές είναι το ρομβοειδές σχήμα των πετασμάτων. Κατασκευάζονται υπό γωνία με τα τοιχώματα του καναλιού με το ανάντη ανώτερο τμήμα να είναι βυθισμένο και το κατόντη να έχει την εγκοπή. Σε σύγκριση με την πρώτη κατηγορία, η ΔΙ έχει βελτιωμένα χαρακτηριστικά ροής, με χαμηλότερες μέγιστες ταχύτητες και λιγότερες αναταράξεις- ανακατευθύνει τη ροή για να βοηθήσει τον προσανατολισμό των ιχθύων και έχει ευκολότερη συντήρηση.

Η ΔΙ με κυρτά πετάσματα είναι μια ειδική μορφή της ΔΙ πολλαπλών δεξαμενών. Οι οπές είναι σχεδιασμένες ως διερευνόμενα κανάλια ρεύματος. Τα γενικά κριτήρια και χαρακτηριστικά ισχύουν και εδώ. Το πλεονέκτημα είναι ότι τα στόμια δεν είναι παράλληλα αλλά ευθυγραμμισμένα, γεγονός που μειώνει την τύρβη στις δεξαμενές. Το μειονέκτημά τους είναι ότι χρειάζονται πολύ χώρο και λειτουργούν σε μικρές διαφορές βάθους των δεξαμενών.



**Εικόνα 2.4** ΔΙ με ρομβοειδή διάταξη πετασμάτων [10]

### **2.2.4 Δίοδος ιχθύων τύπου *ice-harbor***

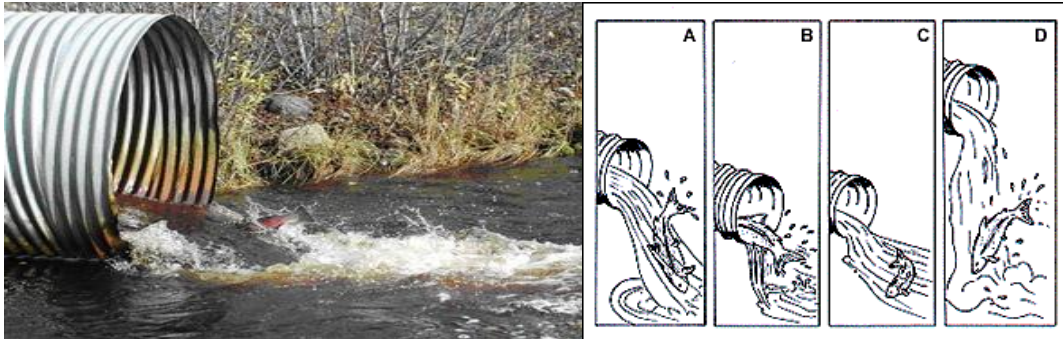
Αυτός ο τύπος είναι ο πιο μελετημένος και χρησιμοποιείται περισσότερο στα μεγάλα υδροηλεκτρικά φράγματα στις ΗΠΑ. Έχει αποτελέσει αντικείμενο πολυάριθμων μελετών, ιδίως στις ΗΠΑ. Τα περάσματα αυτά έχουν βυθισμένα στόμια και εγκοπές, συνήθως δύο σε κάθε πλευρά, όταν η κορυφογραμμή του φράγματος είναι 30 cm. Συνήθως οι διαστάσεις τους είναι μεγάλες, αφού κατασκευάζονται για μεγάλα ψάρια και ιδιαίτερα για μεγάλα σαλμονοειδή. Το μήκος της δεξαμενής φτάνει τα 3 μέτρα και το πλάτος κυμαίνεται από 2 έως 10 m, ανάλογα με την παροχή. Η κλίση του πυθμένα δεν ξεπερνά ποτέ το 10% και για μεγάλες εγκαταστάσεις η παροχή μπορεί να φτάσει τα  $6\text{m}^3/\text{s}$ . Η διάχυση ενέργειας σε κάθε δεξαμενή δεν υπερβαίνει ποτέ τα  $200\text{ W/m}^3$ , όταν έχει σχεδιαστεί με τα παραπάνω κριτήρια. Είναι καλά δοκιμασμένο και λειτουργεί πολύ καλά για μεγάλους ιχθύες, αλλά δεν μπορεί να αντιμετωπίσει μεγάλες διαφορές ύψους εισροής, τα στόμια χρειάζονται τακτικό καθαρισμό και τέλος το κόστος κατασκευής είναι υψηλό.



**Εικόνα 2.5** Ice-Harbor ΔΙ στο φράγμα John Day [50]

### 2.2.5 Οχετοί με συνεχή ροή για χρήση ως δίοδοι ιχθύων

Οι οχετοί είναι κανάλια που χρησιμοποιούνται για να αφήνουν το νερό να περνάει κάτω από κατασκευές όπως δρόμους. Οι οχετοί έχουν κυκλική, ελλειπτική, σωληνοειδή, ορθογώνια ή τετράγωνη διατομή. Ένας αγωγός πρέπει να εξασφαλίζει ότι οι ιχθύες θα περάσουν αβλαβείς και χωρίς καθυστέρηση. Σε πολλές περιπτώσεις οι αγωγοί τοποθετούνται κάτω από την κοίτη του ρεύματος. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε οδοποιία με κλίσεις 0,5 και 5%.



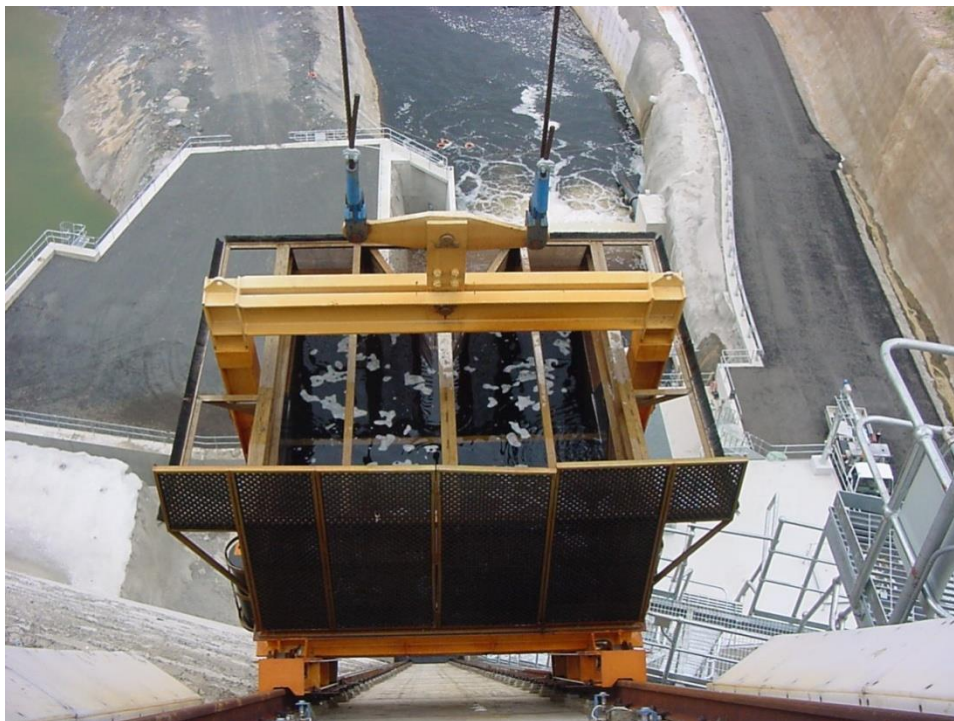
**Εικόνα 2.6** Παράδειγμα λειτουργίας οχετών ως δίοδοι ιχθύων [51], [52]

### 2.2.6 Ανελκυστήρας ιχθύων

Η ΔΙ με ανελκυστήρα χρησιμοποιείται όταν υπάρχει σημαντικά μεγάλη υψομετρική διαφορά (> 6 έως 10 m), όπου οι προαναφερθείσες ΔΙ δεν αποτελούν επιλογή, εξαιτίας του κόστους κατασκευής, της απαίτησης χώρου και της συνολικής επιβάρυνσης των ιχθύων. Μια λύση για να ξεπεραστούν αυτά τα προβλήματα είναι η χρήση συμβατικού αλλά κατάλληλα τροποποιημένου ανελκυστήρα. Όταν φτάσει στην κατώτερη θέση, μια δεξαμενή μεταφοράς βυθίζεται στον πυθμένα. Οι ιχθύες ωθούνται προς τον ανελκυστήρα από ένα ρεύμα έλξης. Μπροστά από τον ανελκυστήρα βρίσκεται μια πύλη πλέγματος, η οποία ωθεί οι ιχθύες στη δεξαμενή. Η κάτω πύλη του ανελκυστήρα κλείνει

και οι ιχθύες που είναι παγιδευμένα μέσα μεταφέρονται στην κορυφή, μαζί με μια ποσότητα νερού. Όταν ο ανελκυστήρας φθάσει στη στάθμη του ταμιευτήρα του φράγματος, δημιουργείται τεχνητό ρεύμα που βοηθά τους ιχθύες να εγκαταλείψουν τη δεξαμενή και να κινηθούν προς το ποτάμι. Η συχνότητα της λειτουργίας του ανελκυστήρα καθορίζεται από τις ανάγκες των ιχθύων.

Πλεονεκτήματα του ανελκυστήρα ιχθύων είναι (α) η ευκολία μετακίνησης των ιχθύων σε περιπτώσεις φραγμάτων μεγάλου ύψους, (β) ο περιορισμένος απαιτούμενος χώρος εγκατάστασης και (γ) η δυνατότητα μετακίνησης όλων των ειδών ιχθύων προς τα ανάντη. Μειονεκτήματα είναι (α) το κόστος εποπτείας και συντήρησης η συντήρηση, (β) το υψηλό κόστος κατασκευής και (γ) οι διακυμάνσεις της στάθμης κατάντη. Τέλος, οι ανελκυστήρες είναι κατάλληλοι για κυρίως για ανάδρομους ιχθύες.

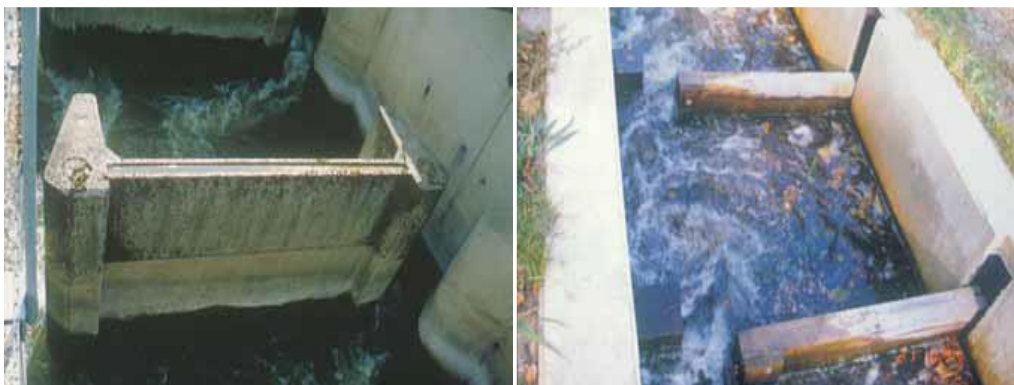


**Εικόνα 2.7** Ανελκυστήρας ιχθύων [53]

### **2.2.7 Δίοδος ιχθύων κάθετου ανοίγματος**

Μια Δίοδος Ιχθύος Κάθετου Ανοίγματος (ΔΙΚΑ) αποτελεί μέρος των διόδων ιχθύος πολλαπλών δεξαμενών. Αποτελείται από ένα κεκλιμένο κανάλι που χωρίζεται από πετάσματα σε δεξαμενές. Η διαφορά είναι ότι τα πετάσματα έχουν ένα κάθετο άνοιγμα, το οποίο εκτείνεται σε όλο το ύψος του διαφράγματος. Μπορεί επίσης να υπάρχει και δεύτερο άνοιγμα στο ίδιο διάφραγμα. Τα ανοίγματα είναι πάντα μετατοπισμένα μεταξύ τους με μετατόπιση ίση με το μήκος των δεξαμενών. Ανάμεσα σε δυο διαδοχικές δεξαμενές, η διαφορά μεταξύ της στάθμης του νερού πρέπει είναι 30 cm για τους σολομούς και 20 cm για τα ενήλικα ψάρια του γλυκού νερού. Η κλίση του πυθμένα κυμαίνεται από 5% έως 10%. Πλεονεκτήματα της ΔΙΚΑ είναι (α) η ευκολία διατήρησης της πορείας των ιχθύων εντός των δεξαμενών, εξαιτίας των χαμηλών ταχυτήτων (β) η ομοιομορφία του πεδίου ροής καθ' ύψος τόσο στο άνοιγμα όσο και στις δεξαμενές, (γ) η εύκολη προσαρμογή στις μεγάλες διακυμάνσεις στη στάθμη του νερού ανάντη και κατάντη, και η δημιουργία περιοχών ανακυκλοφορίας, που χρησιμεύουν σαν περιοχές ανάπαυσης για τους ιχθύες. Γενικά οι ΔΙΚΑ με κάποιες προσθήκες (υποστρώματα

πυθμένα) είναι κατάλληλες για τα περισσότερα είδη και μεγέθη ιχθύων. Επίσης, είναι ο τύπος ΔΙ που χρησιμοποιείται ευρέως στη Ευρώπη.



**Εικόνα 2.8** ΔΙΚΑ (α) με και (β) χωρίς κατευθυντήριο πτερύγιο [53]

**Πίνακας 2.1** Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κύριων τύπων ΔΙ

Είδος ΔΙ	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Πολλαπλών δεξαμενών	<p>Απαιτούν σχετικά μικρή επιφάνεια. Η υφιστάμενη εμπειρία είναι μεγάλη (καθόσον έχουν εφαρμοστεί και δοκιμαστεί εκτεταμένα). Είναι αξιόπιστα (όταν σχεδιάζονται και συντηρούνται κατάλληλα). Λειτουργούν με μικρές παροχές (0.05 – 0.5 m<sup>3</sup>/s). Εφαρμόζονται για πολλά είδη ιχθύων.</p>	<p>Ευαίσθητα σε μεταβολές της ανάντη στάθμης. Εφαρμόζονται περισσότερο αποτελεσματικά σε ιχθείς με μεγάλη ικανότητα κολύμβησης. Μπορεί να φράξουν εξαιτίας φερτών. Έχουν υψηλές απαιτήσεις συντήρησης και καθαρισμού (με συχνότητα εβδομάδας). Απαιτούν την κατασκευή πυθμένα με τραχύτητα.</p>
Denil	<p>Σχεδιάζονται με μεγάλες κλίσεις (10-20%), οπότε απαιτούν μικρή επιφάνεια. Δεν είναι ευαίσθητα σε μεταβολές της κατάντη στάθμης. Δημιουργούν ένα ευνοϊκό ρεύμα κατάντη για να προσελκύουν τους ιχθείς. Είναι κατάλληλα γενικώς για είδη με μεγάλη ικανότητα κολύμβησης.</p>	<p>Η λειτουργία τους απαιτεί σχετικά μεγάλες παροχές (&gt;0.25 m<sup>3</sup>/s). Η έμφραξη τους με φερτά μπορεί εύκολα να διαταράξει τη λειτουργία τους. Απαιτούν υψηλή επίβλεψη και συντήρηση. Είναι εξαιρετικά ευαίσθητα σε μεταβολές της ανάντη στάθμης (πρακτικά, επιτρέπονται μεταβολές μέχρι 20 cm). Δεν είναι κατάλληλα για μικρούς ιχθείς με μικρή ικανότητα κολύμβησης ή και για άλλους (μικρού μεγέθους) οργανισμούς, όπως π.χ. ασπόνδυλα.</p>
Με κάθετα ανοίγματα	<p>Τα κάθετα ανοίγματα καλύπτουν όλο το βάθος ροής. Έτσι: (α) δημιουργούν κατάλληλες συνθήκες για τους ιχθείς που κολυμπούν κοντά στην επιφάνεια, αλλά και κοντά στον πυθμένα, και (β) φράσουν δυσκολότερα σε σχέση με άλλα είδη ΔΙ. Έχουν μικρές απαιτήσεις συντήρησης, όταν τοποθετούνται σε φράγματα. Οι μικρές ταχύτητες ροής κοντά στον πυθμένα επιτρέπουν ακόμα και σε ιχθείς περιορισμένης ικανότητας κολύμβησης να ανέλθουν προς τη επιφάνεια. Αυτό απαιτεί την τοποθέτηση υποστρώματος πυθμένα με πέτρες διαφόρων μεγεθών. Είναι κατάλληλα και για μικρούς ιχθείς ή μικρούς άλλους οργανισμούς.</p>	<p>Μπορεί να φράξουν από φερτά μεγάλου μεγέθους. Οι ιχθύες μπορεί να παγιδευτούν ή να υποστούν «πτώση προς τα πίσω», όταν οι περιοχές ανακυκλοφορίας (στρόβιλοι) είναι εκτεταμένοι.</p>

	<p>Δεν είναι ευαίσθητα σε μεταβολές της κατάντη στάθμης. Είναι κατάλληλα ακόμα και σε σχετικά μεγάλες μεταβολές της ανάντη στάθμης.</p> <p>Λειτουργούν σε μικρές (&gt;0.10 m<sup>3</sup>/s) ή και μεγάλες παροχές (μερικά m<sup>3</sup>/s). Απαιτούν σχετικά περιορισμένο χώρο με δυνατότητα βελτιστοποίησης της εισόδου τους.</p> <p>Τα χαρακτηριστικά ροής τους υπολογίζονται εύκολα.</p>	
Με θυροφράγματα	<p>Είναι κατάλληλα για μεγάλες διαφορές στάθμης νερού, ιδίως όταν δεν υπάρχει μεγάλος διαθέσιμος χώρος. Μπορούν να εφαρμοστούν σε διάφορα είδη φραγμάτων.</p> <p>Είναι κατάλληλα για μεγάλους ιχθύες, αλλά και για ιχθύες με μικρή ικανότητα κολύμβησης.</p>	<p>Έχουν υψηλό αρχικό κόστος και υψηλές απαιτήσεις και μεγάλο κόστος συντήρησης, σε σχέση με τα άλλα περισσότερο συνηθισμένα είδη ΔΙ. Έχουν διαλείπουσα λειτουργία. Σχεδιάζονται δύσκολα (υδραυλικός σχεδιασμός και καθορισμός κύκλων λειτουργίας) και δεν έχουν εξασφαλισμένη απόδοση. Δεν εξασφαλίζεται η εκκένωση όλων των ιχθύων από την ανάντη δεξαμενή. Έχουν παρατηρηθεί τραυματισμοί ιχθύων στον αγωγό μεταξύ της ανάντη και της κατάντη δεξαμενής. Οι ιχθύες δεν παραμένουν για ικανό χρόνο στην κατάντη δεξαμενή.</p> <p>Είναι ευαίσθητα σε μεταβολές της ανάντη στάθμης.</p> <p>Δεν δημιουργούν ευνοϊκό ρεύμα κατάντη για να προσελκύουν τους ιχθύες.</p> <p>Συνιστάται να εφαρμόζονται σε συνδυασμό με τα συνηθισμένα είδη ΔΙ.</p>
Ανελκυστήρες ιχθύων	<p>Είναι κατάλληλοι για μεγάλες διαφορές στάθμης νερού, ιδίως όταν δεν υπάρχει μεγάλος διαθέσιμος χώρος.</p> <p>Οι ιχθύες μεταφέρονται παθητικά. Είναι κατάλληλοι για μεγάλους ιχθύες, αλλά και για ιχθείς με μικρή ικανότητα κολύμβησης.</p>	<p>Απαιτούν τη χρήση αξιόπιστου μηχανικού εξοπλισμού. Έχουν υψηλό αρχικό κόστος και υψηλές απαιτήσεις και μεγάλο κόστος συντήρησης, σε σχέση με τα άλλα περισσότερο συνηθισμένα είδη ΔΙ. Έχουν διαλείπουσα λειτουργία.</p> <p>Δεν εξασφαλίζεται η μεταφορά των μικρών ιχθύων από τα κατάντη, εξαιτίας των διαστάσεων των διακένων.</p> <p>Δεν δημιουργούν ευνοϊκό ρεύμα κατάντη για να προσελκύουν τους ιχθείς.</p> <p>Συνιστάται να εφαρμόζονται σε συνδυασμό με τα συνηθισμένα είδη ΔΙ.</p>

### 2.3 Μαθηματική προσομοίωση ροής σε διόδους ιχθύων

Οι Δίοδοι ιχθύων κάθετου ανοίγματος (ΔΙΚΑ) επιτρέπουν την μετακίνηση τόσο των ιχθύων, όσο και των λοιπών μικροοργανισμών. Οι συνθήκες και τα χαρακτηριστικά ροής εντός της ΔΙ είναι αποδεκτά για μια ποικιλία ειδών, επομένως χρησιμοποιούνται συνήθως και μελετώνται εκτενώς, τόσο με μαθηματική προσομοίωση όσο και με πειραματικές μελέτες.

Αν και η ιδέα των ΔΙ είναι από τις αρχές του 20ου αιώνα, η κύρια εργασία πάνω στις ΔΙΚΑ έγινε από τους Rajaratnam et al. [9]. Μελετήθηκαν 7 διαφορετικοί τύποι ΔΙΚΑ, σε διαφορετικά μοντέλα κλίμακας, αλλά πάντα με διαστάσεις ανάλογες με το πλάτος της ανοίγματος  $b_0$ . Η κύρια αναλογία που προτάθηκε ήταν 10 φορές το  $b_0$  για το μήκος της δεξαμενής και 8 φορές το  $b_0$  για το πλάτος. Η μελέτη τους βασίστηκε στη μέση δομή και τα χαρακτηριστικά της ροής. Οι πειραματικές παρατηρήσεις έδειξαν μια ομοιόμορφη

ροή όπου η μέση ροή είναι η ίδια και επιβεβαίωσαν την προαναφερθείσα υπόθεση. Ο συντελεστής τριβής του ρευστού  $C_f$  ήταν κυρίως σταθερός, κάτι που δείχνει μια γραμμική σχέση μεταξύ της αδιάστατης παροχής  $Q/\sqrt{(gJb^5)}$  και του σχετικού βάθους ροής  $y_0/b_0$ , όπου  $Q$  είναι η παροχή,  $g$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $J$  είναι η κλίση της κοίτης και  $b$  το πλάτος της ανοίγματος .

Με τη χρήση του μοντέλου κλίμακας 1:5.33 και αλλάζοντας τη στάθμη του νερού στα κατάντη της ΔΙ, παρήγαγαν μεγάλο αριθμό 2D και 3D προφίλ ταχύτητας. Τα περισσότερα από αυτά είχαν ομοιόμορφη ταχύτητα φλέβας, με μείωση κοντά στην επιφάνεια, όπου λαμβάνει χώρα υδραυλικό άλμα. Στο τελευταίο κατάντη κάθετο άνοιγμα, παρατηρήθηκε υπερβολική ταχύτητα για χαμηλή στάθμη του νερού. Η μέγιστη ταχύτητα σε κάθε άνοιγμα ήταν κοντά στο  $V_{max}=\sqrt{(2g\Delta h)}$ , όπου  $g$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας και  $\Delta h$  είναι η διαφορά στάθμης μεταξύ του νερού ανάντη και του νερού κατάντη στις δεξαμενές. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ροή είναι τρισδιάστατη και η διαδρομή της φλέβας σχετίζεται με την εισερχόμενη παροχή και τη στάθμη του νερού στα κατάντη. Τέλος, η ενέργεια διαχέεται και δημιουργεί περιοχές ανακυκλοφορίας πάνω και κάτω από τη φλέβα. Το μέγεθος της ανακυκλοφορίας ποικίλλει ανάλογα με την γωνία εισόδου της φλέβας.

Το 1992 πραγματοποιήθηκε νέα εκτεταμένη πειραματική μελέτη από τους Rajaratnam et al. [8]. Μελέτησαν 18 διαφορετικά είδη διατάξεων ΔΙΚΑ σε συνάρτηση με την προηγούμενη σχέση μεταξύ του πλάτους του ανοίγματος και των διαστάσεων της δεξαμενής. Επιβεβαίωσαν τη σχέση που προέκυψε από τη μελέτη τους το 1986, αν και αποδείχθηκε ότι μικρές παραλλαγές είναι επίσης αποδεκτές και δεν αλλάζουν την απόδοση της ΔΙ όσον αφορά τη διέλευση των ιχθύων. Συμπέραναν ότι πρέπει να δίνεται προσοχή κατά το σχεδιασμό, διότι το πολύ μικρό πλάτος μπορεί να μην διαχέει επαρκώς την ενέργεια της φλέβας, κάτι που θα οδηγεί σε έντονη ανακυκλοφορία. Η γραμμική σχέση μεταξύ της αδιάστατης παροχής και του σχετικού βάθους επιβεβαιώθηκε και για τα υπόλοιπα είδη. Το πιο δύσκολο σημείο ήταν ο υπολογισμός της διάχυσης της ενέργειας. Για τη μέτρησή της, υπολογίστηκε ο ρυθμός διάχυσης  $E$ . Δημιουργήθηκε μια σχέση μεταξύ του  $E$  και του σχετικού βάθους που έδειξε μια εξάρτηση του ρυθμού με το σχεδιασμό της ΔΙΚΑ και την κλίση του πυθμένα του. Από την άλλη πλευρά, ο συντελεστής παροχής δεν μεταβάλλεται με τον διαφορετικό σχεδιασμό, επομένως δεν μπορεί να κρίνει την απόδοση της ΔΙ. Το συμπέρασμά τους ήταν ότι από τις 18 διατάξεις, οι συνιστώμενες ήταν οι 6, 16 και 18 για πρακτική χρήση, με βάση όχι μόνο τη συνολική απόδοση, αλλά και την απλότητα του σχεδιασμού και της κατασκευής.

Βασιζόμενοι στα πειράματα των Rajaratnam et al. [8], οι Wu et al. [12] επέλεξαν τη διάταξη 18 και πραγματοποίησαν περαιτέρω πειράματα με μοντέλο κλίμακας 1:2.67, με 3 διαφορετικές κλίσεις πυθμένα 5%, 10% και 20% και διάφορες παροχές εισόδου. Από τα πειράματά τους, παρατηρήθηκαν δύο διαφορετικά μοτίβα της ροής. Το πρώτο, που ονομάστηκε μοτίβο 1, παρατηρήθηκε μόνο στην κλίση πυθμένα 5% για διάφορες παροχές. Αυτό το μοτίβο έδειξε ότι η ροή είχε τη μορφή φλέβας από το ένα κάθετο άνοιγμα στο επόμενο και δημιουργούσε δύο περιοχές ανακυκλοφορίας, μία πάνω και μία κάτω από τη φλέβα. Τα κύρια χαρακτηριστικά του μοτίβου 1 ήταν η δισδιάστατη ροή, η στάθμη του νερού που ήταν σχεδόν οριζόντια και ότι οι ζώνες ανακυκλοφορίας στην δεξαμενή έφταναν το 78% του όγκου. Το δεύτερο μοτίβο, που ονομάστηκε μοτίβο 2, παρατηρήθηκε σε κλίσεις πυθμένα 10 και 20 % και φλέβα χτυπούσε το πλευρικό τοίχωμα μεταξύ των μεγάλων κάθετων τοίχων με αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας περιοχής ανακυκλοφορίας μεταξύ των μικρών κάθετων τοίχων. Η ροή στο μοτίβο 2 ήταν ανομοιόμορφη και τρισδιάστατη. Η επιφάνεια του νερού ανέβαινε κοντά στον κατάντη τοίχο της δεξαμενής και για χαμηλές παροχές παρατηρήθηκε ένα υδραυλικό άλμα, με πολύ μικρό βάθος. Ο όγκος ανακυκλοφορίας στη δεξαμενή ήταν περίπου 38%.



Όσον αφορά τη φλέβα, δεν την μελέτησαν κατά μήκος της τροχιάς της αλλά σε κατακόρυφα επίπεδα. Κατέληξαν ότι η ταχύτητα δεν είναι κάθετη στο άνοιγμα. Η ροή βρέθηκε τρισδιάστατη και επομένως μπορεί να προσεγγιστεί μόνο ως επίπεδος πίδακας. Καθώς η ροή απομακρύνεται από το άνοιγμα, η μέγιστη ταχύτητα μειώνεται και καθιστά τη ροή επιθυμητή για τα ψάρια. Η διαφορά που παρατηρείται στη μέγιστη ταχύτητα μεταξύ των μοτίβων 1 και 2 είναι ότι στο μοτίβο 1 η μέγιστη ταχύτητα παρατηρείται κοντά στην επιφάνεια και στο μοτίβο 2 κοντά στον πυθμένα. Και στις δύο περιπτώσεις δεν βρέθηκε στο άνοιγμα αλλά σε απόσταση από αυτό κατά  $b_0$ .

Μια καινοτόμος πειραματική έρευνα διεξήχθη από τους Puertas et al. [18] σε 2 άλλες προτεινόμενες διατάξεις, τις 6 και 16, από τους Rajaratnam et al. [8] αναφερόμενοι σε αυτά ως διατάξεις T2 και T1 αντίστοιχα. Χρησιμοποίησαν διάφορες εισερχόμενες παροχές και δύο κλίσεις πυθμένα 5 και 10% και έλαβαν μετρήσεις σε διάφορα βάθη. Ακολούθησαν την υπόθεση των Rajaratnam et al. [8] για ομοιόμορφη ροή και επιβεβαίωσαν μια γραμμική σχέση μεταξύ της παροχής και του σχετικού βάθους ροής. Το μέγιστο βάθος ροής εμφανίζεται (α) ανάντη λίγο πριν από το άνοιγμα και (β) κατάντη κοντά στο μεγάλο διαχωριστικό τοίχο. Το ελάχιστο βάθος εμφανίζεται μετά το άνοιγμα, επειδή έχουμε μια ταχεία πτώση νερού στην κατεύθυνση της φλέβας. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η στάθμη του νερού είναι ανεξάρτητη από τη μεταβολή της παροχής.

Το μοτίβο ροής που παρατήρησαν ήταν παρόμοιο με το μοτίβο ροής 1 των Wu et al. [12]. Η κύρια ροή ακολουθούσε μια τροχιά από το ανάντη άνοιγμα προς το κατάντη και δημιουργούσε 2 ζώνες ανακυκλοφορίας μια πάνω από τη φλέβα και μεταξύ των μεγάλων διαχωριστικών τοίχων (μεγάλη περιοχή ανακυκλοφορίας) και μία κάτω από τη φλέβα μεταξύ των μικρών διαχωριστικών τοίχων (μικρή ζώνη ανακυκλοφορίας). Η μεταβολή της παροχής επηρέαζε το μέγεθος των στρόβιλων που δημιουργούνταν. Όταν η κλίση πυθμένα ήταν ίση με 10% παρατηρήθηκε ότι δίπλα στη μεγάλη περιοχή ανακυκλοφορίας εμφανιζόταν δεύτερος μικρότερος στρόβιλος κοντά στον κατάντη μεγάλο διαχωριστικό τοίχο. Το κατακόρυφο διάνυσμα ταχύτητας βρέθηκε κοντά στο μηδέν, κάτι που αποδεικνύει ότι η ροή είναι δισδιάστατη. Τέλος, βρέθηκε ότι η τυρβώδης κινητική ενέργεια έχει γραμμική συσχέτιση με την κλίση του πυθμένα και τις κύριες διαστάσεις της δεξαμενής. Υπάρχει μικρή εξάρτηση μεταξύ της κινητικής ενέργειας τύρβης και της απόστασης από τον πυθμένα με εξαίρεση τις ζώνες υψηλής τύρβης κοντά στην επιφάνεια του νερού.

Όλες οι πιο πάνω πειραματικές εργασίες, μελέτησαν το πεδίο ταχυτήτων, τη σχέση παροχής και βάθους ροής και τις περιοχές ανακυκλοφορίας. Μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους της ροής όμως, τα χαρακτηριστικά της τύρβης, μελετήθηκε προσεγγιστικά. Οι Liu et al. [11] μελέτησαν τα τυρβώδη χαρακτηριστικά της ροής στο εσωτερικό μιας ΔΙΚΑ, χρησιμοποιώντας την ίδια διάταξη με τους Wu et al. [12], τη διάταξη 18 των Rajaratnam et al. [8]. Πραγματοποίησαν πειράματα για να μελετήσουν (α) τα χαρακτηριστικά της τύρβης, (β) τις μέσες δομές/μορφές της ροής και (γ) την σχηματιζόμενη φλέβα και την τροχιά της. Μελετήθηκαν δύο διαφορετικές κλίσεις πυθμένα 5.06% και 10.52% και 2 παροχές 31.2 l/s και 52 l/s,. Επιβεβαίωσαν τα αποτελέσματα των Wu et al. [12] και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ροή από το κάθετο άνοιγμα μπορεί να περιγραφεί από μια δισδιάστατη φλέβα, αν και η διαμήκης ταχύτητα φθίνει γρήγορα. Πρέπει να σημειωθεί όμως ότι τα τυρβώδη χαρακτηριστικά της ροής δεν μπορούν να περιγράψουν από τη θεωρία της τυρβώδους φλέβας, αλλά μπορούν να βρεθούν ομοιότητες, όπως ο ρυθμός διάχυσης. Οι Tarrade et al. [15] επιβεβαίωσαν αυτά τα αποτελέσματα και μελέτησαν περαιτέρω τις δομές τύρβης στο εσωτερικό της ΔΙΚΑ. Χρησιμοποίησαν τη διάταξη 16 των Rajaratnam et al. [8]. Μέσω του πειράματός τους κατάφεραν να συσχετίσουν την κλίση πυθμένα με τα

χαρακτηριστικά της τύρβης και τη μέση ταχύτητα. Επίσης διαπίστωσαν ότι η παροχή δεν επηρεάζει τη ροή, αλλά το βάθος του νερού. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η μέση συμπεριφορά μπορεί να εξηγήσει εν μέρει τη ροή μέσα στη ΔΙΚΑ.

Οι πειραματικές μελέτες έχουν υψηλό κόστος σε ανθρώπινο δυναμικό, χρόνο, χώρο και οικονομικούς πόρους. Ως εκ τούτου, η υπολογιστική ρευστοδυναμική (CFD) μπορεί να αποτελέσει μια εναλλακτική λύση, η οποία μπορεί να βοηθήσει στην κατανόηση, ανάπτυξη και εξέλιξη των χαρακτηριστικών της ροής σε μια ΔΙ. Έτσι, πολλοί ερευνητές μελέτησαν τις ΔΙΚΑ μέσω CFD.

Οι Barton και Keller [20] πραγματοποίησαν υπολογισμούς CFD για να επαληθεύσουν πειραματικά αποτελέσματα. Χρησιμοποίησαν τον εμπορικό μοντέλο ANSYS FLUENT, και επαλήθευσαν τα πειράματα των Wu et al. [12]. Προσομοίωσαν το ακριβές μοντέλο που είχαν δημιουργήσει οι Wu et al. [12] στο εργαστήριο. Χρησιμοποίησαν παροχή 52 l/s και έλυσαν τις εξισώσεις Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS), χρησιμοποιώντας το μοντέλο RNG KE [54] ως μοντέλο τύρβης. Ο υπολογισμός της στάθμης επιφάνειας του νερού έγινε με τη μέθοδο Volume of Fluid (VOF) [26]. Στην είσοδο της ΔΙ χρησιμοποίησαν ως οριακές συνθήκες την εισερχόμενη παροχή και στην έξοδο την στάθμη επιφάνειας του νερού. Οι συντελεστές τραχύτητας ελήφθησαν υπόψη, με μικρή επίδραση στο αποτέλεσμα και το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν μη δομημένο τετράπλευρο ή εξαεδρικό με προσαρμογές για την ακριβή επίλυση των εξισώσεων ροής. Η προσαρμογή του πλέγματος ήταν ζωτικής σημασίας για την αποφυγή υπερεκτίμησης ή υποεκτίμησης κοντά στα όρια. Τα αποτελέσματα του μοντέλου βρίσκονταν σε καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα όσον αφορά το πεδίο ταχυτήτων. Επιπλέον, η υπολογισμένη στάθμη νερού προσαρμόζεται καλά στα πειραματικά δεδομένα, παρά το γεγονός ότι εμφανίστηκε κάποια υπερεκτίμηση κοντά στο άνοιγμα, η οποία μπορεί να οφείλεται σε προβλήματα ακρίβειας. Τέλος, η ανάλυση της τύρβης από το CFD έδωσε μια καλή εκτίμηση της τύρβης και της ανακυκλοφορίας στο εσωτερικό των δεξαμενών, παρόλο που δεν υπήρχαν επαρκή πειραματικά δεδομένα.

Οι Fujihara et al. [55] εφάρμοσαν επίσης ένα μαθηματικό μοντέλο σε ΔΙΚΑ χωρίς όμως να το επιβεβαιώσουν με πειραματικά δεδομένα και μετρήσεις. Η πολυπλοκότητα της ροής στο εσωτερικό ΔΙΚΑ είναι μεγάλη και υπήρχαν μέχρι τότε λίγες προσπάθειες υπολογισμού των χαρακτηριστικών της ροής με μαθηματικά μοντέλα. Χρησιμοποίησαν τη μέθοδο των διαφορικών όγκων για την επίλυση των εξισώσεων Saint Venant με έναν προσεγγιστικό επιλύτη Riemann, μέσω ενός σχήματος Runge-Kutta. Μελέτησαν τρεις διατάξεις μονού ανοίγματος και μια διπλού, παρόμοιες με τη διάταξη 16 των Rajaratnam et al. [8]. Στη διάταξη με τα δυο κάθετα ανοίγματα, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το μοτίβο της ροής είναι σχεδόν το ίδιο ανεξάρτητα από το βάθος ροής στα κατάντη του καναλιού. Η ροή βρέθηκε υποκρίσιμη γενικά, εκτός από την περιοχή των ανοιγμάτων που ήταν υπερκρίσιμη. Η ροή ήταν συμμετρική, με χαμηλές ταχύτητες μεταξύ των άκρων των κεντρικών μεγάλων τοίχων, όπου επίσης συναντώνται οι δύο φλέβες και παρατηρείται το μέγιστο βάθος σε κάθε δεξαμενή. Η μέγιστη ταχύτητα παρατηρήθηκε στο μέσο του κάθετου ανοίγματος.

Η σύγκριση των διατάξεων με ένα άνοιγμα έδωσε παρόμοια αποτελέσματα όσον αφορά τις συνθήκες ροής, αν και οι διαστάσεις των δεξαμενών ήταν πολύ διαφορετικές μεταξύ τους. Η πρώτη διάταξη ονομάστηκε "30" από το πλάτος του κάθετου ανοίγματος, το οποίο ήταν 30 cm. Οι οριακές συνθήκες ανάντη και κατάντη της δεξαμενής ήταν 1 μέτρο και μισό μέτρο αντίστοιχα. Η ροή βρέθηκε να είναι και πάλι υποκρίσιμη στις δεξαμενές με εξαίρεση την τελευταία, στην οποία εφαρμόστηκε η οριακή συνθήκη βάθους μισού μέτρου. Μεταξύ των μεγάλων κάθετων τοίχων παρατηρήθηκε ανακυκλοφορία και στασιμότητα της ροής. Το χαμηλότερο βάθος ροής παρατηρήθηκε

κοντά στο κάθετο άνοιγμα και μεταξύ μικρών κάθετων τοίχων και μεγαλύτερο βάθος ροής κοντά στα κοντά στους κατάντη μεγάλους κάθετους τοίχους των δεξαμενών. Η μέγιστη ταχύτητα ήταν και πάλι στο κέντρο του ανοίγματος. Η δεύτερη διάταξη με ένα κάθετο άνοιγμα είχε πλάτος ανοίγματος 60 cm, αλλά την ίδια αναλογία πλάτους ανοίγματος προς πλάτος δεξαμενής. Τα αποτελέσματα ήταν παρόμοια με αυτά της διάταξης των 30 cm. Τέλος, η τελευταία διάταξη είχε επίσης πλάτος ανοίγματος 60cm, αλλά (α) διαφορετική αναλογία πλάτους ανοίγματος προς πλάτος δεξαμενής και (β) μεγαλύτερη παροχή. Πάλι τα αποτελέσματα ήταν παρόμοια. Η αξιοσημείωτη διαφορά ήταν ότι η μέγιστη ταχύτητα παρατηρήθηκε αμέσως κατάντη του κάθετου ανοίγματος και όχι στο μέσο αυτού. Τα μοτίβα ροής και οι συνθήκες ήταν παρόμοια. Το συμπέρασμα σχετικά με την υπολογισμένη μέγιστη ταχύτητα, για όλα τα σενάρια, ήταν ότι (α) είναι κοντά στη θεωρητική  $V_{max}=\sqrt{(2g\Delta h)}$ , (β) παρατηρείται στο κέντρο του ανοίγματος και (γ) μικραίνει καθώς φτάνει στον κατάντη κάθετο τοίχο της δεξαμενής, εξαιτίας της τριβής. Τέλος, η κατανομή των ταχυτήτων είναι ανεξάρτητη της παροχής και στο μεγαλύτερο μέρος της δεξαμενής επικρατούν πολύ χαμηλές ταχύτητες στις διατάξεις με ένα άνοιγμα σε σχέση με τη διάταξη με δυο, όπως αναμενόταν.

Μια άλλη εφαρμογή ενός μαθηματικού μοντέλου σε ΔΙΚΑ έγινε από τον Khan [25]. Σύμφωνα με τη μελέτη του, οι κατακόρυφες ταχύτητες δεν πρέπει να αγνοούνται, διότι η ροή δεν είναι αμιγώς δισδιάστατη. Θέλησε να αποδείξει ότι το CFD είναι πράγματι ένα χρήσιμο εργαλείο για την κατανόηση της υδραυλικής των ΔΙΚΑ και την ανάλυση των επιπτώσεων της ροής στους ιχθύες. Χρησιμοποίησε ένα μοντέλο CFD με την ονομασία STAR-CD, το οποίο επιλύει τις εξισώσεις RANS. Για την προσομοίωση της τύρβης χρησιμοποίησε το μοντέλο δυο εξισώσεων Standard k-epsilon (SKE). Για την επιβεβαίωση του μοντέλου, χρησιμοποίησε τα αποτελέσματα από τους Wu et al. [12] και σχεδίασε μια ΔΙΚΑ με 7 δεξαμενές παρόμοιες με την διάταξη 16 των Rajaratnam et al. [9]. Η πρώτη και οι δύο τελευταίες δεξαμενές επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τις οριακές συνθήκες. Οι 3 υπόλοιπες παρουσίαζαν παρόμοιες συνθήκες ροής. Για την έρευνά του χρησιμοποίησε μόνο την τέταρτη και κεντρική δεξαμενή. Τα μοτίβα ροής που προέκυψαν ήταν παρόμοια με τα πειραματικά των Wu et al. [12] και Puertas et al. [18]. Οι παρατηρήσεις σχετικά με το βάθος ροής έδειξαν ότι το χαμηλότερο βάθος νερού είναι μετά το κάθετο άνοιγμα και το μεγαλύτερο κοντά στον κατάντη κάθετο τοίχο. Η μέγιστη ταχύτητα βρέθηκε κοντά στο κάθετο άνοιγμα, όπου η φλέβα αρχίζει να αναπτύσσεται. Μετά το άνοιγμα, η τύρβη διαχέεται και η τροχιά της φλέβας διευρύνεται. Το πλάτος της φλέβας παρουσίασε ισχυρή συσχέτιση με το βάθος ροής. Βρέθηκε ότι κοντά στον πυθμένα της δεξαμενής η φλέβα είναι πιο στενή και διευρύνεται όσο πλησιάζουμε στην επιφάνεια. Τέλος παρατήρησε και αυτός τη δημιουργία ανακυκλοφορίας εκατέρωθεν της φλέβας. Ο Khan [25] δεν ανέλυσε τα χαρακτηριστικά της τύρβης μέσα στη δεξαμενή, αλλά την ενέργεια, που απαιτείται από τους ιχθύες για να περάσουν, εξαρτώμενη από (α) τον συντελεστή αντίστασης, (β) το μέγεθος και (γ) την ταχύτητα έκρηξης του ιχθύος. Το συμπέρασμά του ήταν ότι οι συνθήκες στις ΔΙΚΑ δεν είναι κατάλληλες για κάποια ήδη ιχθύων.

Οι Alvarez-Vázquez et al. [56], [57] χρησιμοποίησαν επιπλέον κώδικες βελτιστοποίησης για να διερευνήσουν την ιδανικότερη προσέγγιση στο σχεδιασμό και την υλοποίηση μιας ΔΙΚΑ. Έλυσαν τις εξισώσεις SWE και στη συνέχεια χρησιμοποίησαν τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης Nelder-Mead. Για την εύρεση της βέλτιστης διαστασιολόγησης μιας ΔΙΚΑ όμοιας με τη διάταξη 6 των Rajaratnam et al. [9], χρησιμοποιήθηκε ένα κανάλι 10 δεξαμενών με κλίση πυθμένα 5%. Για την επίτευξη του στόχου τους είχαν ως παράγοντες-στόχους (α) την παρουσία περιοχών ανάπαυσης στο εσωτερικό της δεξαμενής και (β) την μέγιστη δυνατή ταχύτητα ροής, ώστε να μπορούν οι ιχθύες να περάσουν. Ο στόχος του αλγορίθμου βελτιστοποίησης ήταν να βρεθεί η καλύτερη αναλογία διαστάσεων των δεξαμενών. Στη δεύτερη προσπάθειά τους, άλλαξαν τις

μεταβλητές με τις βελτιστοποιημένες και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η μεθοδολογία τους μπορεί να δώσει ακριβή αποτελέσματα που επαληθεύονται από πειραματικά δεδομένα.

Ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών της τύρβης είναι η πιο δύσκολη παράμετρος των μαθηματικών μοντέλων, εξαιτίας της πολυπλοκότητας του φαινομένου και του υψηλού υπολογιστικού κόστους για ακρίβεια υπολογισμών. Οι Cea et al. [58] έκαναν μια έρευνα με χρήση διαφόρων μοντέλων τύρβης για να βρουν ποιο περιγράφει καλύτερα τις συνθήκες ροής σε μια ΔΙΚΑ. Επαλήθευσε τα αποτελέσματά του χρησιμοποιώντας τα πειραματικά δεδομένα των Puertas et al. [18]. Χρησιμοποίησαν τις εξισώσεις SWE βασιζόμενοι στα πειράματα των Puertas et al. [18], τα οποία έδειξαν ότι η ροή είναι κυρίως δισδιάστατη. Τα μοντέλα τύρβης που χρησιμοποίησε ήταν το μοντέλο μήκους ανάμιξης (Mixing Length, ML), το μοντέλο 2 εξισώσεων SKE και το μοντέλο αλγεβρικών τάσεων (Algebraic Stress Model, ASM). Χρησιμοποίησαν 3 διαφορετικές παροχές 35 l/s, 65 l/s και 105 l/s, ένα μη δομημένο πυκνό πλέγμα και προσομοίωσαν ένα κανάλι 7 δεξαμενών. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα μοτίβα ροής είναι παρόμοια με τα πειραματικά σε όλες τις περιπτώσεις, αλλά τα χαρακτηριστικά της τύρβης διαφέρουν ανάλογα με το μοντέλο. Διαπιστώθηκε ότι η τραχύτητα του πυθμένα δεν επηρεάζει σημαντικά τη ροή. Όσον αφορά τα μοντέλα τύρβης, το μοντέλο ASM και το μοντέλο SKE προβλέπουν αρκετά καλά το πεδίο ροής σε όλες τις παροχές, που εξετάστηκαν. Αντίθετα το μοντέλο ML δεν μπόρεσε να το προβλέψει ικανοποιητικά. Το ASM και το SKE δίνουν παρόμοια αποτελέσματα, με εξαίρεση τον υπολογισμό των τάσεων Reynolds, οι οποίες προβλέπονται καλύτερα από το ASM. Κατέληξαν επίσης στο συμπέρασμα, ότι οι εξισώσεις SWE μπορούν να προβλέψουν το πεδίο ροής, μέχρι κλίση πυθμένα ίση με 10%. Πάνω από αυτό η ροή γίνεται τρισδιάστατη.

Οι Heimerl et al. [59] χρησιμοποίησαν για τη μελέτη μιας ΔΙΚΑ δύο μοντέλα CFD με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Το πρώτο μοντέλο, το FENFLOSS, είναι ένας επιλύτης των εξισώσεων RANS και το δεύτερο το εμπορικό μοντέλο ANSYS CFX. Με το FENFLOSS προσομοίωσαν μια ΔΙΚΑ με διάταξη παρόμοια με την 6 από τους Rajaratnam et al. [8], [9], ενώ με το CFX ένα κανάλι 5 δεξαμενών με διάταξη παρόμοια με τη 16. Μελετήθηκαν διαφορετικές μορφές, διαστάσεις και τοποθετήσεις των κατευθυντήριων πτερυγίων και αποδείχθηκε ότι αυτά σχετίζονται με την ομαλότητα της ροής. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η αλλαγή της θέσης δεν δημιουργεί σημαντικές μεταβολές στο πεδίο ροής. Επιπλέον, χρησιμοποίησαν πειραματικά δεδομένα μιας δισδιάστατης ροής, επιβεβαίωσαν το μοντέλο τους και έδειξαν ότι η μέγιστη ταχύτητα είναι ακριβώς πριν το κάθετο άνοιγμα. Παρατήρησαν ότι η κατανομή της ταχύτητας δεν είναι ομοιόμορφη κατά μήκος του βάθους του ανοίγματος και ότι η ταχύτητα κοντά στον πυθμένα είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την ταχύτητα κοντά στην επιφάνεια της ροής επιφάνεια. Τέλος, απέδειξαν ότι τα κατευθυντήρια πτερύγια σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της ροής και της ταχύτητας στη δεξαμενή.

Πολλά από τα προηγούμενα πειράματα απέδειξαν ότι η ροή είναι δισδιάστατη εντός των δεξαμενών, με εξαίρεση τη περιοχή του κάθετου ανοίγματος. Οι Chorda et al. [17] αποφάσισαν να επιλύσουν τις εξισώσεις SWE με τη χρήση του μοντέλου τύρβης SKE και να επιβεβαιώσουν το μοντέλο με πειραματικά δεδομένα από το Πανεπιστήμιο Poitiers της Γαλλίας. Χρησιμοποιήθηκε το Telemac-2D με μη δομημένο τριγωνικό πλέγμα. Προσομοίωσαν το πειραματικό κανάλι (α) με τις πραγματικές του διαστάσεις και (β) υπό κλίμακα. Οι δυο προσομοιώσεις δεν είχαν σημαντικές διαφορές, επειδή η ροή σχετίζεται με την αναλογία των διατάσεων των δεξαμενών και όχι με το μέγεθος των διαστάσεων. Η παρατήρηση έδειξε ότι το μοντέλο SKE περιγράφει ικανοποιητικά τη ροή, αν και υπερεκτιμά το πεδίο τύρβης. Το πεδίο ροής, που υπολογίστηκε, ήταν σε καλή συμφωνία το πειραματικό. Σχηματίστηκε μια φλέβα από το ανάντη κάθετο άνοιγμα

της δεξαμενής προς το κατάντη και δημιουργήθηκαν δύο περιοχές ανακυκλοφορίας πάνω και κάτω από τη φλέβα.

Οι Marriner et al. [23] δημιούργησαν ένα μοντέλο CFD για να μελετήσουν τις συνθήκες ροής στο εσωτερικό των καμπύλων δεξαμενών στροφής, επειδή παρατηρήσεις 'έδειξαν ότι οι ιχθύες δυσκολεύονται να περάσουν. Οι καμπύλες δεξαμενές στροφής συνδέουν παράλληλα κανάλια ΔΙΚΑ, για να περιοριστεί το μήκος των ΔΙΚΑ σε περίπτωση μεγάλης υψομετρικής διαφοράς της εξόδου του καναλιού από την είσοδο. Οι μετρήσεις πεδίου πραγματοποιήθηκαν στη ΔΙΚΑ στη περιοχή Vianney Legendre στον Καναδά. Έλυσαν τις εξισώσεις RANS με μοντέλο τύρβης το SKE. Η επίλυση των εξισώσεων είχε σαν αποτέλεσμα ένα μοτίβο ροής με μεγάλη ανακυκλοφορία στο κέντρο της δεξαμενής. Οι μέγιστες ταχύτητες ήταν μικρότερες από την ταχύτητά έκρηξης των ιχθύων. Τα αποτελέσματα του μοντέλου ήταν σε καλή συμφωνία με τις μετρήσεις και έδειξαν ότι στο εσωτερικό της δεξαμενής δεν σχηματίζονται περιοχές ανάπαυσης για τους ιχθύες. Με βάση τα συμπεράσματα αυτά, τροποποίησαν στο μοντέλο την εσωτερική διάταξη της δεξαμενής στροφής και μελέτησαν τις διαφορές ροής. Δημιουργήθηκαν (α) 3 νέα μοντέλα με την προσθήκη ενός τοιχώματος σε διαφορετικές θέσεις για να διαχέεται η ισχύς της ανακυκλοφορίας, (β) δύο με διαφορετική κλίση του πυθμένα της δεξαμενής και (γ) 1 μοντέλο που μετέτρεπε την καμπύλη της δεξαμενής σε παραλληλόγραμμο. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι μέγιστες ταχύτητες δεν υπερβαίνουν την ταχύτητα των ιχθύων σε όλες τις περιπτώσεις. Αποδείχθηκε όμως ότι το καμπύλο τμήμα επηρέαζε τη κίνηση των ιχθύων, οπότε προτάθηκε η αλλαγή της δεξαμενής σε παραλληλόγραμμη με την προσθήκη ενός κάθετου τοίχου, το οποίο φάνηκε να δίνει πολύ καλύτερα υδραυλικά χαρακτηριστικά.

Οι Bombac et al. [60] μελέτησαν επίσης τα υδραυλικά χαρακτηριστικά των ΔΙΚΑ με τη χρήση διαφορετικών μοντέλων τύρβης, επιλύοντας τις εξισώσεις SWE. Προσομοίωσαν ένα κανάλι 7 δεξαμενών και επιβεβαίωσαν το μοντέλο τους με μετρήσεις από την υφιστάμενη ΔΙ στην οποία βασίστηκαν. Χρησιμοποίησαν τα μοντέλα τύρβης (α) Constant Viscosity (CV), (β) Smagorinsky και (γ) SKE, το οποίο αποδείχθηκε σε προηγούμενες μελέτες ότι δίνει καλά αποτελέσματα. Επιβεβαίωσαν ότι η τραχύτητα του πυθμένα δεν επηρεάζει σημαντικά τα χαρακτηριστικά της ροής. Παρατήρησαν τον σχηματισμό μιας δισδιάστατης φλέβας από το ανάντη κάθετο άνοιγμα προς τον κατάντη μεγάλο κάθετο τοίχο και από εκεί στο κατάντη άνοιγμα. Μεταξύ των δύο μεγάλων κάθετων τοίχων της δεξαμενής δημιουργήθηκε μια ανακυκλοφορία. Η μέγιστη ταχύτητα παρατηρήθηκε στο άνοιγμα, όπως και στις προηγούμενες μελέτες. Επιπλέον, έκαναν κάποιες γεωμετρικές αλλαγές για να δουν τις επιπτώσεις στα αποτελέσματα και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το CFD είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για την παρατήρηση της συμπεριφοράς της ροής με μικρές γεωμετρικές αλλαγές, οι οποίες μπορεί να είναι κρίσιμες για τις προτιμήσεις των ιχθύων. Επιπλέον, το μοντέλο τύρβης SKE αποδείχθηκε ότι έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα, αλλά πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην αριθμητική διάχυση.

Η Ruzdrowska [61] εφάρμοσε το μοντέλο FLOW-3D [34] για να διερευνήσει τις συνθήκες ροής σε μια ΔΙΚΑ στην Πολωνία σε σχέση με τους κατάδρομους ιχθύες. Οι κατάδρομοι ιχθύες, σε αντίθεση με τους ανάδρομους, χρειάζονται χαμηλότερη μέγιστη ταχύτητα και τυρβώδη κινητική ενέργεια. Οι παρατηρήσεις έδειξαν ότι συγκεντρώνονται κοντά στον μεγάλο κάθετο πέτασμα μη μπορώντας να περάσουν στην επόμενη δεξαμενή. Η εξεταζόμενη ΔΙ αποτελείται από δύο μέρη, μια ΔΙΚΑ και μια ΔΙ με προσομοίωση αληθινών βράχων. Έλυσε τις εξισώσεις RANS με το μοντέλο SKE. Οι συνθήκες ροής που υπολογίστηκαν ήταν καλές για τους ανάδρομους ιχθύες (κυρίως τις σαλμονίδες), αλλά υπερέβαιναν υπερβολικά τα όρια των κατάδρομων. Η ΔΙ με βράχους

παρουσίασε καλύτερη απόδοση. Κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η υψηλή τυρβώδης κινητική ενέργεια στη σχισμή, αποτελεί εμπόδιο στη μετανάστευση των ιχθύων.

Οι ερευνητές συνήθως προτιμούν δισδιάστατα μοντέλα , επειδή χρειάζονται λιγότερη υπολογιστική ισχύ. Όμως σε πολλές περιπτώσεις η δισδιάστατη επίλυση απέτυχε να περιγράψει τη ροή. Οι Arrowsmith et al. [62] συνέκριναν ένα δισδιάστατο και ένα τρισδιάστατο μοντέλο. Η ΔΙ αποτελούνταν από 4 ορθογωνικές δεξαμενές και μια δεξαμενή στροφής. Για το δισδιάστατο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε το MIKE 21 της DHI [63] και για το τρισδιάστατο με το ANSYS CFX [64]. Συγκρίθηκαν το βάθος ροής, το πεδίο ταχυτήτων και η διάχυση της τυρβώδους ενέργειας. Οι οριακές συνθήκες ανάντη και κατόντη ήταν η στάθμη της επιφάνειας ροής. Το τρισδιάστατο μοντέλο έδωσε 33% χαμηλότερες παροχές και ταχύτητες ροής και μεγαλύτερα βάρη νερού ανάντη. Αυτό οφείλεται στην ανομοιομορφία και τη μη υδροστατική κατανομή της ταχύτητας, την οποία το δισδιάστατο μοντέλο δεν είναι σε θέση να προβλέψει. Επιπλέον, οι συντελεστές διάχυσης που υπολογίστηκαν ήταν σε συμφωνία και βρέθηκαν και οι δύο κάτω από τα όρια του κανονισμού για ασφαλή διέλευση των ιχθύων. Το τρισδιάστατο υπολόγισε αναλυτικότερα την κατανομή του συντελεστή διάχυσης τυρβώδους ενέργειας, οπότε παρατηρήθηκαν ορισμένες περιοχές στις δεξαμενές, όπου οι τιμές ξεπερνούσαν τις οριακές τιμές.

Οι Klein και Oertel [21] συνέκριναν δύο τύπους ΔΙ με τη χρήση μαθηματικών μοντέλων. Διερεύνησαν μια ΔΙ με δεξαμενές υπερχειλίσσης και μια ΔΙΚΑ με το μοντέλο Flow-3D και χρήση του μοντέλου τύρβης μεγάλων δινών (Large Eddy Simulation, LES). Προσομοίωσαν ολόκληρη τη ΔΙ για δύο παροχές. Τα αποτελέσματά τους έδειξαν ότι η ΔΙ με υπερχειλιστές ήταν καταλληλότερη για την περιοχή έρευνας από τη ΔΙΚΑ, επειδή σε χαμηλότερες παροχές μπορούσε να διατηρήσει το βάθος ροής σε αποδεκτό στάθμη. Επίσης, οι συνθήκες ροής στις δεξαμενές δημιουργούσαν περιοχές ανάπαυσης με καλύτερα χαρακτηριστικά για τους ιχθύες. Από την άλλη πλευρά, η ΔΙΚΑ έδινε πολύ μεγαλύτερες ταχύτητες από τις αποδεκτές και δεν μπορούσε να επιτευχθεί το απαιτούμενο βάθος ροής. Επιπλέον, προσέθεσαν μια δεξαμενή στροφής στο σχεδιασμό του καναλιού. Η δεξαμενή στροφής δεν επηρέασε τα χαρακτηριστικά της ΔΙ με υπερχειλίσση, αλλά μετέβαλε αυτά της ΔΙΚΑ.

Από όλα τα παραπάνω, μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για τις ΔΙΚΑ και τη χρήση μαθηματικών μοντέλων για τον σχεδιασμό τους.

- 1) Σε γενικές γραμμές οι ΔΙΚΑ είναι κατάλληλες για τη συντριπτική πλειονότητα των περιπτώσεων που χρειάζονται τέτοιες κατασκευές. Τα χαρακτηριστικά και τα βάρη ροής δεν επηρεάζονται με την αυξομείωση της εισερχόμενης παροχής, ωστόσο δεν είναι ιδανικές για κάθε περίπτωση.
- 2) Οι διατάξεις που χρησιμοποιούνται τακτικά είναι η 6, 16 και 18 των Rajaratnam et al. [8].
- 3) Η χρήση των μαθηματικών μοντέλων για τον υπολογισμό του πεδίου ροής μιας ΔΙ επιβεβαιώνεται από τα πειραματικά δεδομένα. Το κύριο πρόβλημα εντοπίζεται στον ορθό υπολογισμό του πεδίου τύρβης, το οποίο απαιτεί υψηλό υπολογιστικό κόστος, προκειμένου να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα.
- 4) Συνολικά, το μοντέλο SKE είναι το προτιμότερο, διότι δίνει καλά αποτελέσματα με χαμηλό υπολογιστικό κόστος.
- 5) Η τραχύτητα του πυθμένα δεν έχει αξιοσημείωτη επίδραση στη ροή και στο βάθος ροής.

## 2.4 Μαθηματική προσομοίωση συμπεριφοράς ιχθύων

Στην διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν διάφορα μαθηματικά μοντέλα που περιγράφουν τη συμπεριφορά των ιχθύων. Τα μοντέλα αυτά προσπαθούν να αναπαράγουν τη συμπεριφορά και κίνηση των ιχθύων μέσα σε υδάτινα σώματα, με τη χρήση κυρίως των χαρακτηριστικών της ροής, της γεωμετρίας του ιχθύ και την αντίληψη του ιχθύ απέναντι στις μεταβολές. Συνήθως μελετάται η κίνηση ενός μεμονομένου ιχθύ, διότι είναι ευκολότερη προσέγγιση σε σχέση με τη θεωρία ομάδας που ισχύει όταν έχουμε κοπάδια ιχθύων.

Οι Haefner και Bowen [65] δημιούργησαν ένα μοντέλο που αντιλαμβάνεται τον ιχθύ ως δισδιάστατο. Ο ιχθύς κινείται μέσω του πεδίου ροής σύμφωνα με την Νευτώνεια κινηματική θεώρηση και αποφεύγει τα εμπόδια με χρήση βασικού ενστίκτου επιβίωσης. Η φυσιολογία του ιχθύ καθορίζει τη συμπεριφορά του και την αντίδρασή του στα εμπόδια κατά τη διάρκεια της κίνησής του. Η νέα θέση του ιχθύ υπολογίζεται από τις εξισώσεις κίνησης επιλύοντας πέντε συνήθεις διαφορικές εξισώσεις.

Οι εξισώσεις κίνησης που επιλύονται είναι:

$$\frac{du_{fx}}{dt} = 0.5 * \rho * S_a * U_x^2 * \frac{(C_f+C_p)}{m_v} + \frac{P_x}{m_v} \quad (2.1)$$

$$\frac{du_{fy}}{dt} = 0.5 * \rho * S_a * U_y^2 * \frac{(C_f+C_p)}{m_v} + \frac{P_y}{m_v} \quad (2.2)$$

$$\frac{dx_f}{dt} = u_{fx} \quad (2.3)$$

$$\frac{dy_f}{dt} = u_{fy} \quad (2.4)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = -f(M) \quad (2.5)$$

Όπου ισχύει  $U = u_w - u_f$ , ενώ  $u_f$  είναι η σχετική ταχύτητα του ιχθύος σε σχέση με την ταχύτητα του πεδίου ροής  $u_w$ ,  $M$  είναι η κατηγορία κολύμβησης με βάση τις τέσσερις συμπεριφορές,  $C_f, C_p$  είναι οι συντελεστές οπισθέλκουσας,  $\frac{d\theta}{dt}$  ο ρυθμός εξάντλησης του οξυγόνου ή η ενέργεια που χρειάζεται για κάθε κατηγορία κολύμβησης και  $P$  η ώθηση κολύμβησης ανάλογα με την κατεύθυνση  $\theta$  της κίνησης του ιχθύος:

$$P_x = P * \cos(\theta) \quad (2.6)$$

$$P_y = P * \sin(\theta) \quad (2.7)$$

Η ώθηση κολύμβησης  $P$  υπολογίζεται ως εξής:

$$P = \begin{cases} 0.5C_f S_a \rho u_f^2 \\ S_p 0.5C_f S_a \rho u_f^2 \\ \left(1.0 - \frac{1.0}{1.0+|U_x|}\right) \frac{o}{o_{max}} S_b A_R m_v \\ \frac{o}{o_{max}} S_b A_B m_v \end{cases} \quad (2.8)$$

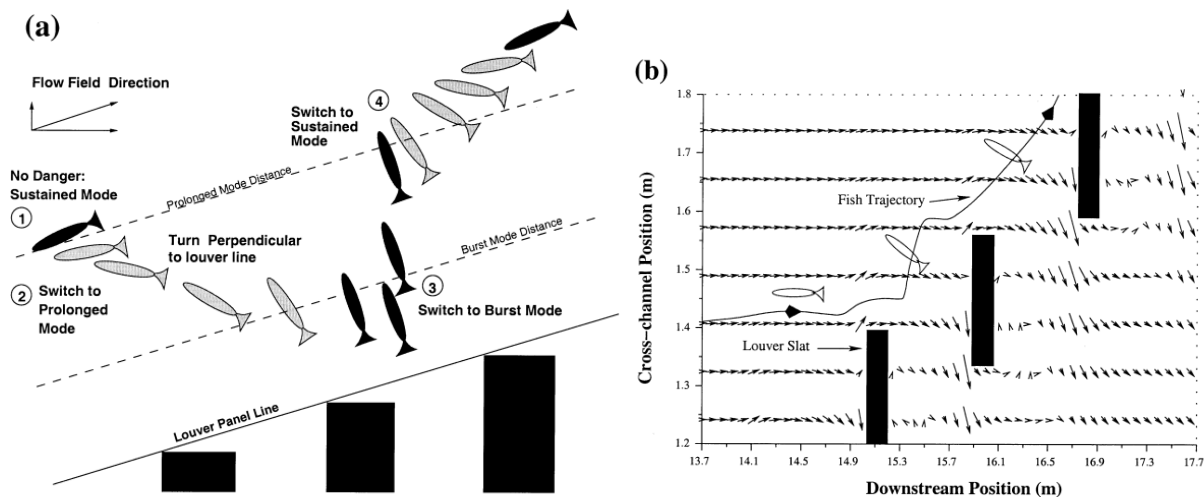
Όπου  $C_f$  ο συντελεστής οπισθέλκουσας για την επιφανειακή τριβή,  $S_a$  η βρεχόμενη επιφάνεια του ιχθύος,  $\rho$  η πυκνότητα του νερού,  $u_f$  η ταχύτητα κολύμβησης του ιχθύος,  $U_x = u_w - u_f$ ,  $A$  επιτάχυνση για κάθε κατηγορία κολύμβησης,  $m_v$  η μάζα του ιχθύος,  $S$  οι παράγοντες που εξαρτώνται από το κάθε είδος ιχθύος και  $\theta$  ο χρόνος που απομένει για τις κατηγορίες κολύμβησης σε σχέση με την κατανάλωση του οξυγόνου.

Ανάλογα με τη συμπεριφορά που επιλέγεται από τον ιχθύ, υπάρχει μια διαφορετική κατανάλωση οξυγόνου που σχετίζεται με τον χρόνο που απομένει για κάθε κατηγορία κολύμβησης, όπου υπολογίζεται ως εξής:

$$\frac{d\theta}{dt} = \begin{cases} 0.0 \\ -0.01f \\ -0.02f \\ -f \end{cases} \quad (2.9)$$

Όπου  $\theta$  έχει μονάδες χρόνου (sec), με  $\theta = 6 \text{ sec}$  για κάθε ιχθύ στην αρχή της προσομοίωσης και  $f$  ισούται με 1.0 ονομαστικά.

Στην **Εικόνα 2.9** φαίνονται οι συμπεριφορές των ιχθύων κοντά στις περσίδες, καθώς και ενδεικτικές τροχιές ιχθύων από την προσομοίωση.



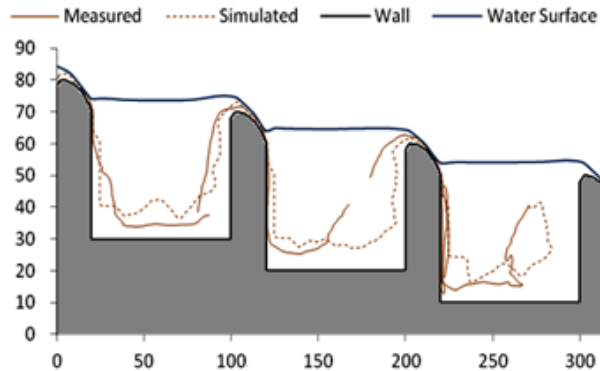
**Εικόνα 2.9** (α) Συμπεριφορές ιχθύων κοντά στις περσίδες, (β) προσομοιωμένες τροχιές ιχθύων και πεδίο ροής κοντά στις περσίδες [65]

Οι Lemasson et al. [66] τροποποίησαν το μοντέλο των Haefner and Bowen [65] προσθέτοντας διαφορετικές συμπεριφορές και χρησιμοποιώντας συμπληρωματικά μια εμπειρική σχέση μεταξύ του ρυθμού κατανάλωσης του οξυγόνου και της ταχύτητας κολύμβησης.

Οι Abdelaziz et al. [16], [43], [67] μελέτησαν την κίνηση των ιχθύων μέσα σε δίοδο και συγκεκριμένα σε δίοδο πολλαπλών δεξαμενών, τη οποία προσομοίωσαν με το μοντέλο FLOW-3D. Ανέπτυξαν ένα μοντέλο κίνησης ιχθύων συνδυάζοντας τη θεωρία της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και των τυχαίων κινήσεων. Κατά τη μετακίνηση του ιχθύ λαμβάνεται υπόψη (α) η ταχύτητα ροής στην επόμενη θέση, (β) τα τυρβώδη χαρακτηριστικά της ροής και (γ) η μνήμη αποφυγής τύρβης. Το μοντέλο επιβεβαιώνεται με τα πειραματικά δεδομένα ροής και κίνησης ιχθύων από προηγούμενη μελέτη. Η



κίνηση προς την επόμενη δεξαμενή γίνεται εντοπίζοντας το άνοιγμα στην ανάντη κατεύθυνση σε απόσταση γύρω από τον ιχθύ.



**Εικόνα 2.10** Προσομοιωμένη και πειραματική κίνηση ιχθύος μέσα στη δίοδο [43]

Οι Goodwin et al. [28], [30] παρουσίασαν δύο εκδόσεις του μοντέλου τους. Στο μοντέλο τους οι ιχθύες αξιολογούν τα υδροδυναμικά ερεθίσματα μέσα στην περιοχή αντίληψης (Sensory Ovoid, SOD) ώστε να καθορίσουν τη συμπεριφορά τους. Όταν αποφασίζεται μία συμπεριφορά, υπολογίζεται το αντίστοιχο διάνυσμα της ταχύτητας κολύμβησης ( $u_f, v_f, w_f$ ) καθώς και την κατεύθυνση για την επιλεγμένη συμπεριφορά, ενώ υπολογίζεται και η καινούρια θέση του ιχθύος λαμβάνοντας υπόψη την προηγούμενη θέση.

Με βάση τη θεωρία της 'μόλις αισθητής διαφοράς' του Weber, κάθε συμπεριφορά ενεργοποιείται αναγνωρίζοντας την υπέρβαση ενός ορίου μεταξύ του σχετικού ερεθίσματος και της ήδη εγκλιματισμένης έντασης και δίνεται ως εξής:

$$E_t = \frac{I^t - I_a^t}{I_a^t} > k_i \quad (2.10)$$

Όπου  $I^t$  είναι η ένταση του αντίστοιχου ερεθίσματος στην θέση που βρίσκεται ο ιχθύς την χρονική στιγμή  $t$ ,  $I_a^t$  η τιμή της έντασης που ο ιχθύς έχει εγκλιματιστεί και  $k_i$  η οριακή τιμή, το κατώφλι κάθε συμπεριφοράς.

Ύστερα από την απόφαση ενεργοποίησης μίας συμπεριφοράς, χρησιμοποιείται μία πιθανοτική προσέγγιση ώστε να προσομοιωθεί πως ο ιχθύς αλλάζει από τη μία συμπεριφορά στην άλλη. Υπολογίζεται η αναμενόμενη χρησιμότητα  $U^t$ , για την συμπεριφορά που επιλέχθηκε, από την πιθανότητα  $P^t$  να αποκτηθεί η χρησιμότητα  $u_i$  αντίστοιχη για κάθε συμπεριφορά. Η υιοθετημένη συμπεριφορά θα είναι τελικά αυτή που παρέχει τη μέγιστη αναμενόμενη χρησιμότητα  $U^t$ :

$$U_i^t = P_i^t * u_i - C_i^t \quad (2.11)$$

Όπου  $u_i$  είναι η εσωτερική χρησιμότητα για κάθε συμπεριφορά,  $P_i^t$  η πιθανότητα για την χρησιμότητα της κάθε συμπεριφοράς και  $C_i^t$  το κόστος ενέργειας που απαιτείται για την εκτέλεση μίας συμπεριφοράς.

Μετά τον προσδιορισμό του διανύσματος της ταχύτητας κολύμβησης ( $u_f, v_f, w_f$ ), η νέα θέση του ιχθύ υπολογίζεται ως εξής για κάθε διεύθυνση  $x, y, z$

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

$$x^{t+dt} = x^t + (u + u_f) * \Delta t \quad (2.12)$$

Όπου ( $x$ ) τα διανύσματα θέσης και ( $u$ ) τα διανύσματα της ταχύτητας ροής.

Οι Goodwin et al. [30] θεώρησαν την υδραυλική τάση ως ερέθισμα για την απόφαση συμπεριφοράς. Έτσι, αφού η  $I^t$  εξαρτάται από τον λογάριθμο της υδραυλικής τάσης σε κλίμακα ως προς μία τιμή αναφοράς θα ισχύει ότι:

$$I^t = \log \frac{S^t}{S_0} \quad (2.13)$$

Όπου  $S^t = \int \left| \frac{\partial u_i}{\partial u_j} \right|$  η υδραυλική τάση και  $S_0$  η τιμή αναφοράς

Οι Goodwin et al. [28] χρησιμοποίησαν το μέγεθος της επιτάχυνσης της ροής  $A_M$  ως ερέθισμα, οπότε η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

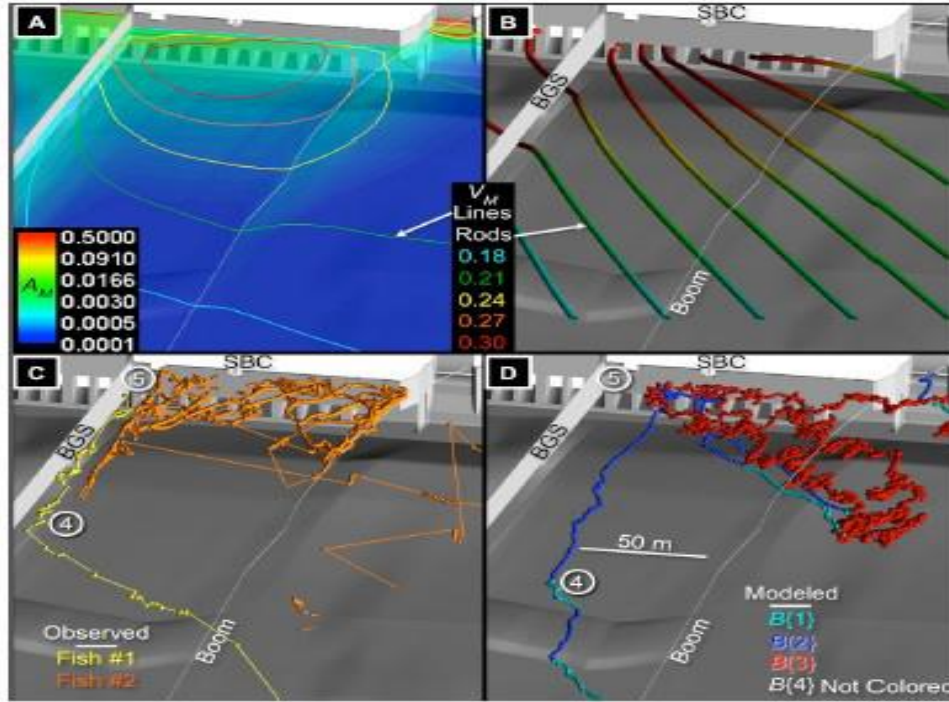
$$I^t = \log \frac{A_M^t}{A_0} \quad (2.14)$$

Και τα δύο μοντέλα λαμβάνουν υπόψη τον κατακόρυφο προσανατολισμό ως ξεχωριστή απόφαση συμπεριφοράς που επηρεάζεται από τη διαφορά της υδροστατικής πίεσης που δέχεται ο ιχθύς στο βάθος που βρίσκεται την χρονική στιγμή  $t$  και της πίεσης του βάθους που ήδη έχει εγκλιματιστεί. Η κολύμβηση προς εγκλιματισμένο βάθος ως απόφαση συμπεριφοράς υιοθετείται όταν η διαφορά μεταξύ της θέσης του ιχθύος και του βάθους στο οποίο ο ιχθύς έχει εγκλιματιστεί, ξεπεράσει την οριακή τιμή ή το κατώφλι  $k_i$

$$E_t = |I^t_i - I^t_a| > k_i \quad (2.15)$$

Όπου  $I^t_i$  η αντιληπτή ένταση της πίεσης στην θέση (βάθος) του ιχθύος την χρονική στιγμή  $t$  και  $I^t_a$  η αντιληπτή ένταση της πίεσης στην οποία ο ιχθύς έχει ήδη εγκλιματιστεί.

$$SQD = \Delta t * S_f * D_a \quad (2.16)$$



**Εικόνα 2.11** Χαρακτηριστικά πεδίου ροής (A και B) και τροχιές ιχθύων (C και D) [28]–[30]

Οι Arenas et al. [31] παρουσίασαν μία μελέτη που επικεντρώθηκε μεταξύ των επιταχύνσεων του πεδίου ροής και της συμπεριφοράς κολύμβησης των νεαρών ιχθύων, παράγοντας κατανομές πιθανοτήτων με την ώθηση των ιχθύων και της κατεύθυνσης των ιχθύων για διαφορετικές τιμές επιταχύνσεων. Οι προσομοιώσεις έγιναν στα φράγματα Rocky Reach και Priests Rapids στις ΗΠΑ. Επιλύθηκε ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα για τον υπολογισμό της ώθησης των ιχθύων σε κάθε περιοχή. Καθορίστηκαν οι συνιστώσες της ώθησης των ιχθύων, ο προσανατολισμός των ιχθύων και ο χρόνος κολύμβησης. Δημιουργήθηκαν οι κατανομές πιθανοτήτων για επιλεγμένες τιμές επιταχύνσεων της ροής. Ο συντελεστής οπισθέλκουσας  $C_{df}$  καθορίστηκε υποθέτοντας ότι ο ιχθύς παρασύρεται από το ρεύμα. Η δύναμη οπισθέλκουσας  $F_D$  και η δύναμη ώθησης του ιχθύος  $F_T$  υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας την ταχύτητα του ιχθύος και την ταχύτητα εδάφους από τα δεδομένα μετρήσεων.

1. Αν  $F_T < 0.6 \cdot 10^{-3} N$  τότε ο ιχθύς συμπαρασύρεται και
2. Αν  $F_T > 0.6 \cdot 10^{-3} N$  τότε ο συντελεστής οπισθέλκουσας και η δύναμη οπισθέλκουσας υπολογίζονται για την κολύμβηση του ιχθύος, καθώς και η δύναμη ώθησης του ιχθύος, παράγοντας γωνίες προσανατολισμού του ιχθύ.

Χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω εξισώσεις:

$$m_f \frac{d\vec{u}_g}{dt} = \vec{F}_D + \vec{F}_T \quad (2.17)$$

$$\vec{F}_D = -0.5\rho|\vec{u}_s|u_s A C_{df} \quad (2.18)$$

Όπου  $u_g$  η ταχύτητα του ιχθύος σε σχέση με το έδαφος και  $m_f$  η μάζα του ιχθύος,  $F_D, F_T$  είναι η δύναμη ώθησης του ιχθύος και η δύναμη οπισθέλκουσας,  $u_s$  η ταχύτητα κολύμβησης του ιχθύος και  $A$  η επιφάνεια αναφοράς που εξαρτάται από τον συντελεστή οπισθέλκουσας  $C_{df}$ :

$$C_{df} = \begin{cases} \text{κολύμβηση} \begin{cases} \frac{493.9}{Re_f^{0.922}}, \text{ αν } Re_f > 2000 \text{ (2.5 - 27)} \\ \frac{24}{Re_s} (1 + b_1 Re_s^{b_2}) + \frac{b_3 Re_s}{b_4 + Re_s}, \text{ αν } Re_f \leq 2000 \text{ (2.5 - 28)} \end{cases} \\ \text{συμπαράσυρση} \left\{ \frac{0.072}{Re_f^{0.2}} \text{ (2.5 - 29)} \right. \end{cases} \quad (2.19)$$

Όπου  $Re_f = \rho * |\vec{u}_s| * \frac{L}{\mu}$  είναι ο αριθμός Reynolds του ιχθύ και  $Re_s$  ο αριθμός Reynolds μίας σφαίρας που έχει τον ίδιο όγκο με τον ιχθύ, καθώς και οι συντελεστές:

$$b_1 = \exp(2.3288 - 6.4581\gamma + 2.4486\gamma^2) \quad (2.20)$$

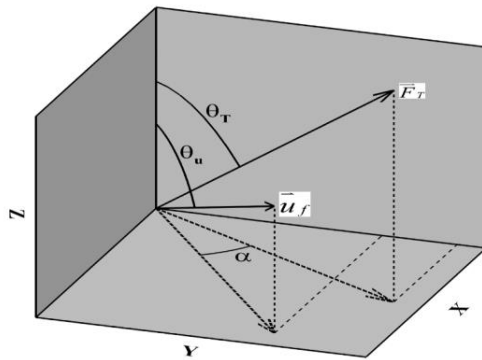
$$b_2 = 0.0964 + 0.5565\gamma \quad (2.21)$$

$$b_3 = \exp(4.905 - 13.8944\gamma + 18.422\gamma^2 - 10.2599\gamma^3) \quad (2.22)$$

$$b_4 = \exp(1.4681 + 12.2584\gamma - 20.7322\gamma^2 - 10.2599\gamma^3) \quad (2.23)$$

Όπου  $\gamma = \frac{s}{s_f}$  με  $s$  την επιφάνεια της σφαίρας που έχει τον ίδιο όγκο με τον ιχθύ και  $s_f$  η πραγματική επιφάνεια του ιχθύ.

Στη μελέτη τους οι Arenas et al. [31] χρησιμοποίησαν μετατροπή συντεταγμένων σχετίζοντας τον προσανατολισμό του ιχθύ με την ταχύτητα ροής παίρνοντας έτσι αποτελέσματα ανεξάρτητα από το Καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Η γωνία μεταξύ του κατακόρυφου άξονα και της δύναμης ώθησης του ιχθύ υποδηλώνεται ως  $\theta_T$  και μεταξύ του κατακόρυφου άξονα και του διανύσματος της ταχύτητας ροής ως  $\theta_u$ . Αλλαγές στο βάθος του νερού προσομοιώνονται από το  $\theta_T$ , με  $\theta_T < 90^\circ$ , που αντιπροσωπεύει την κολύμβηση του ιχθύ προς τα πάνω και όταν  $\theta_T > 90^\circ$  προς τα κάτω. Οι γωνίες μεταξύ της προβολής της δύναμης ώθησης και του διανύσματος της ταχύτητας ροής πάνω στο XY επίπεδο δίνεται ως  $\alpha$  με  $\alpha = 0^\circ$  και  $\alpha = \pm 180^\circ$  υποδηλώνοντας κολύμβηση στην ίδια φορά και στην αντίθετη φορά με τη ροή αντίστοιχα, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 2.12**.



**Εικόνα 2.12** Γωνίες που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της συμπεριφοράς ιχθύος [31]

Οι Gao et al. [68]. ανέπτυξαν ένα μαθηματικό μοντέλο που προσομοιώνει τροχιές εικονικών ιχθύων μέσα σε ΔΙΚΑ. Για την επιβεβαίωση του μοντέλου χρησιμοποίησαν την μελέτη των Rodriguez et al. [69]. Οι παράμετροι του πεδίο ροής που θεωρούν ότι

επηρεάζουν περισσότερο την κίνηση των ιχθύων είναι το διάνυσμα της ταχύτητας ροής και η κινητική ενέργεια τύρβης (ΤΚΕ). Οι ιχθύες κινούνται αντίθετα στην κατεύθυνση της ροής του νερού και υιοθετείται ο ορισμός της περιοχής αντίληψης (Sensory Ovoid) γύρω από τον ιχθύ όπως προτάθηκε από τους Goodwin et al. [28], [30]. Γίνεται η υπόθεση ότι ο ιχθύς αντιλαμβάνεται τις διακυμάνσεις του πεδίου ροής σε μια απόσταση (Sensory Query Distance, SQD) ίση με

$$SQD = L_f * (1 + \alpha * RN) \quad (2.24)$$

Όπου  $L_f$  είναι το μήκος του ιχθύος,  $\alpha$  είναι η αύξηση του εύρους της περιοχής αντίληψης και  $RN$  είναι τυχαίος αριθμός που κυμαίνεται από -1 μέχρι 1.

Εφαρμόζεται η συμπεριφορά που αφορά τον προσανατολισμό του ιχθύος, κατά την οποία τα διανύσματα της ταχύτητας της ροής μαζί με τις επιθυμητές τιμές ΤΚΕ, οι ιχθύες θα ακολουθούν σχεδόν πάντα την κίνηση προς τα ανάντη εκτός αν δεν βρεθούν τα παραπάνω χαρακτηριστικά να ικανοποιούνται ταυτόχρονα οπότε και θα ακολουθήσει τυχαία κίνηση προς τα κατόντη. Η απόσταση που μπορεί να κινηθεί ο ιχθύς σε κάθε χρονικό βήμα δεν μπορεί να ξεπεράσει την περιοχή αντίληψής του SQD.

### 3 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

#### 3.1 Εισαγωγή

Η βιβλιογραφική διερεύνηση καταδεικνύει την ανάγκη χρήσης των μαθηματικών μοντέλων στον σχεδιασμό μιας ΔΙ. Οι λόγοι που συμβαίνει αυτό είναι (α) το υψηλό κόστος και η χρονοβόρος κατασκευή των πειραματικών εργασιών, (β) η ευκολία μεταβολής των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του μοντέλου σε μικρό χρονικό διάστημα, ώστε αυτό να βελτιστοποιηθεί, και (γ) η ταχύτητα λήψης των αποτελεσμάτων για διαφορετικές γεωμετρίες. Σημαντική προϋπόθεση είναι η επιβεβαίωση και βαθμονόμηση των μοντέλων. Όσον αφορά τα μοντέλα ιχθύων, το πρόβλημα είναι εξαιρετικά σύνθετο και απαιτεί γνώσεις περισσότερων επιστημονικών πεδίων. Παρόλα αυτά, δίνουν καλές πληροφορίες για τη γενική κίνηση των ιχθύων σε ποταμούς και ΔΙ. Παρακάτω παρουσιάζονται οι εξισώσεις του ολοκληρωμένου μαθηματικού μοντέλου που σχεδιάστηκε στην παρούσα διατριβή.

#### 3.2 Εξισώσεις του ολοκληρωμένου μοντέλου σε ποταμούς

Το υδροδυναμικό μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της ροής σε ποταμούς είναι το Telemac-2D [32], [33]. Το μοντέλο Telemac-2D είναι ανοιχτού κώδικα και προσομοιώνει τη ροή με ελεύθερη επιφάνεια σε 2 διαστάσεις. Επιλύει τις εξισώσεις συνέχειας και ποσότητας κίνησης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ή διαφορικών όγκων. Χρησιμοποιεί δομημένο, μη δομημένο και μεικτό υπολογιστικό πλέγμα. Σε κάθε κόμβο του πλέγματος υπολογίζει το βάθος του νερού ( $h$ ) και τις 2 συνιστώσες της ταχύτητας ( $u, v$ ).

##### 3.2.1 Εξισώσεις ροής του ολοκληρωμένου μοντέλου σε ποταμούς - Το μοντέλο TELEMAC – 2D

Το Telemac-2D επιλύει ταυτόχρονα τις παρακάτω τέσσερις υδροδυναμικές εξισώσεις ρηχών νερών SWE:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \vec{u}\vec{\nabla}h + h\text{div}\vec{u} = S_h \quad (3.1)$$

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

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{u}\vec{\nabla}v = -g\frac{\partial Z}{\partial y} + S_y + \frac{1}{h}\text{div}(h\nu_t\vec{\nabla}v) \quad (3.3)$$

Όπου,  $h$  (m) είναι το βάθος ροής,  $u, v$  (m/s) είναι οι συνιστώσες της ταχύτητας,  $t$  (s) είναι ο χρόνος,  $x, y$  (m) είναι οι συντεταγμένες κατά την οριζόντια,  $g$  (m/s<sup>2</sup>) είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $\nu_t, \nu_T$  (m<sup>2</sup>/s) είναι η τυρβώδης συνεκτικότητα,  $Z$  (m) είναι το υψόμετρο της ελεύθερης επιφάνειας,  $S_h$  (m/s) είναι ο όρος πηγής της εξίσωσης συνέχειας και  $S_x, S_y$  (m/s<sup>2</sup>) είναι οι όροι πηγής των εξισώσεων ποσότητας κίνησης.

Οι άγνωστες μεταβλητές στις παραπάνω εξισώσεις είναι το βάθος νερού  $h$ , η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας  $u$ , η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας  $v$ . Οι όροι  $S_x, S_y$  (m/s<sup>2</sup>) είναι όροι πηγής που αντιπροσωπεύουν τον αέρα, την τριβή του πυθμένα, την δύναμη Coriolis ή την πηγή της ορμής μέσα στο πεδίο.

##### 3.2.2 Προσδιορισμός των χαρακτηριστικών της τύρβης

Για την περιγραφή της τυρβώδους ροής στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται το συνηθέστερο μοντέλο SKE, όπου  $k$  είναι η τυρβώδης κινητική ενέργεια και  $\epsilon$  η απόσβεση

της τυρβώδους κινητικής ενέργειας. Για τα δύο αυτά μεγέθη το TELEMAC -2D λύνει τις παρακάτω εξισώσεις μεταφοράς:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u \nabla k = \frac{1}{h} \operatorname{div} \left( h \frac{v_t}{1.0} \nabla k \right) + P - \varepsilon + G \quad (3.4)$$

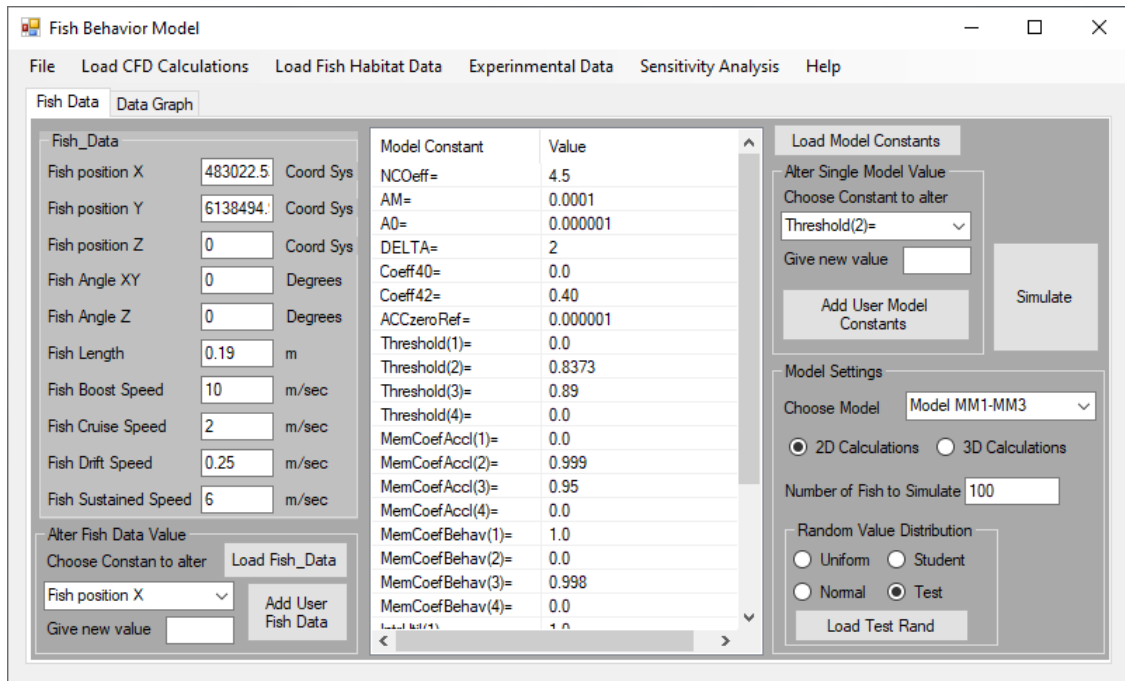
$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u \nabla \varepsilon = \frac{1}{h} \operatorname{div} \left( h \frac{v_t}{1.3} \nabla \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{k} + (1.44P - 1.92\varepsilon) - 1.44 \frac{\varepsilon}{k} G \quad (3.5)$$

Όπου P είναι ο όρος παραγωγής ενέργειας λόγω τύρβης και G είναι ο όρος για τις βαρυτικές δυνάμεις. Τα δύο μεγέθη k και epsilon σχετίζονται με την τυρβώδη συνεκτικότητα με την σχέση:

$$v_t = 0.09 \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.6)$$

### 3.3 Εξισώσεις συμπεριφοράς ιχθύων του ολοκληρωμένου μοντέλου σε ποταμούς

Στο υποκεφάλαιο αυτό ακολουθεί η αναλυτική περιγραφή του μαθηματικού μοντέλου συμπεριφοράς ιχθύος που εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία, το οποίο έχει βασιστεί στο μαθηματικό μοντέλο ELAM των Goodwin et al. [28], [30]. Αρχικά αναπτύχθηκε στο εργαστήριο υδραυλικής του ΕΜΠ μέσα από διπλωματικές εργασίες [35] σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN-95 και επεκτάθηκε στο παρόν. Επίσης ο τελικός κώδικας μεταγράφηκε σε γλώσσα προγραμματισμού C#, ώστε να αποκτήσει Graphic User Interface (GUI).



Εικόνα 3.1 Το GUI του μοντέλου

Το μοντέλο μπορεί να περιγραφεί από τα παρακάτω βήματα:

**Βήμα 1. Εισαγωγή δεδομένων στο πρόγραμμα.** Εισάγουμε στο μοντέλο τα παρακάτω:

1) Τα αποτελέσματα του υδροδυναμικού μοντέλου (βάθη και ταχύτητες ροής) με το πλέγμα υπολογισμών. Το πλέγμα που χρησιμοποιείται είναι δομημένο και δισδιάστατο.

2) Τα χαρακτηριστικά των ιχθύων ενδιαφέροντος, τα οποία ο χρήστης μπορεί να τα εισάγει μέσω (α) αρχείου μορφής κειμένου (.txt), (β) χειροκίνητα στα κατάλληλα κελιά και (γ) της βάσης δεδομένων, που έχει δημιουργηθεί, με στοιχεία για διάφορους ιχθύες.

3) Τις τιμές των σταθερών μεταβλητών, όπως των συντελεστών μνήμης (memory coefficients), των συντελεστών εγκλιματισμού (acclimatization memory coefficients), των οριακών τιμών ενεργοποίησης κάθε συμπεριφοράς (thresholds) και της εσωτερικής χρησιμότητας (intrinsic utility) κάθε συμπεριφοράς. Τα κατώφλια ενεργοποίησης (thresholds) κάθε συμπεριφοράς μπορούν να είναι σταθερά ή να μεταβάλλονται με βάση μια κατανομή που επιλέγει ο χρήστης. Οι παραπάνω συντελεστές θα οριστούν στη συνέχεια.

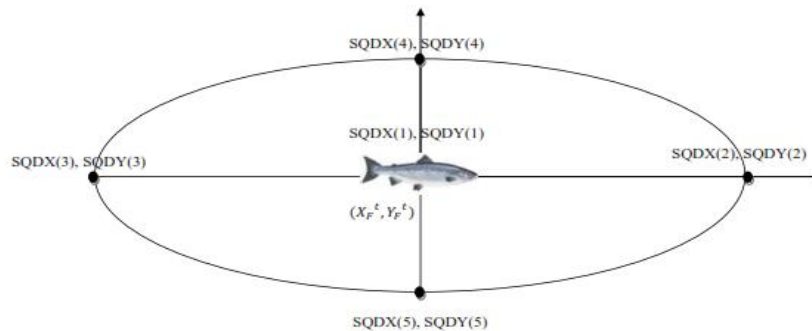
**Βήμα 2. Υπολογισμός των τοπικών επιταχύνσεων.** Χρησιμοποιώντας τους υδροδυναμικούς υπολογισμούς υπολογίζονται οι επιταχύνσεις σε κάθε κόμβο του πλέγματος από τη σχέση:

$$A_M^t = \sqrt{\left(U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial x}\right)^2 + \left(U \frac{\partial V}{\partial y} + V \frac{\partial U}{\partial y}\right)^2} \quad (3.7)$$

Όπου  $U$ ,  $V$  είναι οι ταχύτητες ροής κατά τις διευθύνσεις  $x$  και  $y$ , αντίστοιχα, ενός Καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων.

Για τον υπολογισμό της κλίσης ταχύτητας σε κάθε κόμβο χρησιμοποιείται η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών. Στους εσωτερικούς κόμβους του πλέγματος εφαρμόζονται οι κεντρικές διαφορές, ενώ στα άκρα εφαρμόζονται οι ανάντη και κατάντη διαφορές ανάλογα με το όριο.

**Βήμα 3. Υπολογισμός της περιοχής αντίληψης του ιχθύος.** Το μοντέλο υπολογίζει το εύρος της περιοχής αντίληψης εντός της οποίας ο ιχθύς αντιλαμβάνεται το υδροδυναμικό ερέθισμα. Αποτελείται από 5 θέσεις αισθητήρων (SQD), εκ των οποίων η πρώτη είναι το κέντρο του ιχθύος με συντεταγμένες  $X$  και  $Y$ , δύο στην διεύθυνση του  $X$  και δύο στην διεύθυνση του  $Y$ , όπως φαίνονται στην **Εικόνα 3.2**. Οι αποστάσεις των θέσεων αισθητήρων υπολογίζονται αρχικά στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων με αρχή το κέντρο του ιχθύος και τη άξονα  $X$  την διεύθυνσή του άξονά του και στη συνέχεια ανάγονται στο σύστημα συντεταγμένων του πεδίου ροής.



**Εικόνα 3.2** Περιοχή αντίληψης ιχθύος (Sensory Ovoid) [35]



Ο υπολογισμός των θέσεων γίνεται από τις εξισώσεις (3.8) έως (3.11) και περιλαμβάνει τον υπολογισμό της βασικής απόστασης του σημείου αισθητήρα (SPDIST), η οποία αυξάνεται κατά μια τυχαία απόσταση ( $\alpha$ ) RINC στη διεύθυνση X και ( $\beta$ ) RND στη διεύθυνση Y.

$$SPDIST = \frac{ncoeff}{I_A} = \frac{ncoeff}{\log_{10} \frac{A_M}{A_0}} \quad (3.8)$$

$$RINC = 1 + RRSQD * Delta \quad (3.9)$$

$$RND = (2 * RRSQD - 1) * coeff_{40} \quad (3.10)$$

$$SQD_{X,Y} = \pm SPDIST * RINC \text{ ή } SQD_{X,Y} = \pm SPDIST * RND \quad (3.11)$$

Όπου *RRSQD*, τυχαίος αριθμός που λαμβάνεται από συνεχή κατανομή με τιμές 0-1, *ncoeff*, συντελεστής που αφορά την κλίμακα της ελάχιστης απόστασης των σημείων αισθητήρων, παίρνει τιμές από 0 έως 10 και στο παρόν μοντέλο παίρνει την τιμή 4.5, *coeff<sub>40</sub>* ένας συντελεστής που αφορά την κλίμακα της απόκλισης των σημείων αισθητήρα από τους άξονες του ιχθύος (στο παρόν παίρνει τιμή ίση με το μηδέν), το ποσοστό της τυχαίας αύξησης της απόστασης των θέσεων αισθητήρων *Delta*, που έχει εύρος τιμής από 0.1 έως 3 και μέγεθος της επιτάχυνσης, που υπολογίζεται από τη σχέση (3.12).

$$I_A = \log_{10} \frac{A_M}{A_0} \quad (3.12)$$

Όπου  $A_M = 10^{-4} \text{ m/s}^2$  είναι η ελάχιστη τιμή που επηρεάζει το μέγεθος της περιοχής αντίληψης και  $A_0 = 10^{-6}$  από τη βιβλιογραφία [30].

**Βήμα 4. Καθορισμός συμπεριφοράς.** Για την επιλογή συμπεριφοράς από τον ιχθύ κάθε χρονική στιγμή είναι απαραίτητος ο υπολογισμός του δείκτη ανίχνευσης (*detection metric*), και του συντελεστή απόφασης. Ο δείκτης ανίχνευσης βασίζεται στην «μόλις αισθητή διαφορά» του Weber δίνεται από τον τύπο με χρήση της εξίσωσης (3.12).

$$Detection\ Metric = \frac{I^t - I_a^t}{I_a^t} \quad (3.13)$$

$$I_a^t = (1 - m_{acclimatization}) * I^t + m_{acclimatization} * I_a^t \quad (3.14)$$

Όπου  $I^t$  είναι το μέγεθος της επιτάχυνσης που αντιλαμβάνεται ο ιχθύς την χρονική στιγμή  $t$ ,  $I_a^t$  είναι το μέγεθος της επιτάχυνσης που έχει εγκλιματιστεί ο ιχθύς κατά το προηγούμενο χρονικό βήμα,  $m_{acclimatization}$  είναι ο συντελεστής μνήμης εγκλιματισμού που δείχνει πόσο γρήγορα ο ιχθύς εγκλιματίζεται σε νέες εντάσεις του ερεθίσματος, δηλαδή πόσο γρήγορα προσαρμόζεται σε μια συμπεριφορά και έχει εύρος τιμών 0 μέχρι 1. Αν ο δείκτης ανίχνευσης προκύπτει μεγαλύτερος ή ίσος από την τιμή κατωφλιού  $k_i$  που έχει οριστεί για κάθε συμπεριφορά (B2-B3), τότε σημειώνεται γεγονός:

$$D.Metric = \frac{I^t - I_a^t}{I_a^t} \geq k_i \rightarrow E^t \text{ γεγονός (event)} \quad (3.15)$$

Η συμπεριφορά B1 έχει τιμή κατωφλιού 0 οπότε θεωρείται προκαθορισμένη συμπεριφορά για τους ιχθύες. Προφανώς, όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή του  $k_i$ , τόσο πιο δύσκολο είναι να σημειωθεί γεγονός για την αντίστοιχη συμπεριφορά. Οι τιμές των κατωφλίων ενεργοποίησης (*thresholds*) δεν είναι αναγκαστικά κοινές για κάθε ιχθύ

αλλά μπορούν να μεταβάλλονται (Anderson 2002) καθώς εξαρτώνται από ατομικά χαρακτηριστικά του κάθε ιχθύος, όπως η ηλικία, το μέγεθος, η κατάσταση της υγείας και η πρότερη εμπειρία του [28], [30].

Στο παρόν μοντέλο επιλέχθηκε οι συντελεστές να αποκτούν διαφορετική τιμή για κάθε προσομοιωμένο ιχθύ, οι οποίες ακολουθούν την κανονική κατανομή. Το γεγονός  $E^t$  παίρνει την τιμή 1 αν ο δείκτης ανίχνευσης ξεπεράσει το κατώφλι. Σε αντίθετη περίπτωση παίρνει την τιμή 0.

Στην περίπτωση που έχει σημειωθεί γεγονός, υπολογίζεται ο συντελεστής απόφασης από τον οποίο καθορίζεται ποια συμπεριφορά θα ακολουθήσει ο ιχθύς. Πριν όμως τον συντελεστή απόφασης, υπολογίζονται οι πιθανότητες και οι χρησιμότητες για κάθε συμπεριφορά. Η πιθανότητα προτίμησης της κάθε συμπεριφοράς είναι:

$$P_B^t = (1 - C_{mem}) * E^t + C_{mem} * P_B^t * (t - 1) \quad (3.16)$$

Όπου  $C_{mem}$  είναι ο συντελεστής μνήμης για κάθε συμπεριφορά που ενσωματώνει την ποσότητα πληροφορίας του προηγούμενου χρονικού βήματος.

Ο συντελεστής απόφασης βασίζεται σε μία αντικειμενική λειτουργία, την χρησιμότητα, όπου κάθε συμπεριφορά έχει μία σχετική με αυτήν χρησιμότητα και υπολογίζεται ως εξής:

$$U_B^t = P_B^t * u_B^t \quad (3.17)$$

Όπου  $u_B^t$  είναι η υποκειμενική τιμή της χρησιμότητας ή η εγγενής προτίμηση επιλογής για κάθε συμπεριφορά και έχει εύρος τιμών 0.3-1. Τελικά, σε κάθε χρονική στιγμή  $t$  η συμπεριφορά με τη μέγιστη χρησιμότητα  $U_B^t$  ενεργοποιείται. Επιλέγεται δηλαδή η συμπεριφορά εκείνη για την οποία ισχύει

$$U^t = U_{max}^t \xrightarrow{\text{τότε}} Decision_{B1,B2,B3} = 1. \quad (3.18)$$

**Βήμα 5. Υπολογισμός των  $U_F, V_F$  της ταχύτητας κίνησης του ιχθύος.** Ανάλογα με το ποια συμπεριφορά έχει επιλεχθεί υπολογίζεται η ταχύτητα του ιχθύος όπου λαμβάνεται υπόψη το μήκος του ιχθύος (FL) και οι συντελεστές των ταχυτήτων κολύμβησης κάθε περίπτωσης (ταχύτητα έκρηξης, συνεχή ή συμπαράσυρσης). Υπολογίζεται επίσης η γωνία του ιχθύος στο σύστημα συντεταγμένων του πεδίου ροής που προκύπτει από τις γωνίες του διανύσματος της ροής (FlowangleXY) και της γωνίας μεταβολής της κίνησης του ιχθύος ως προς X,Y (angleXY) σε σχέση με το διάνυσμα της ροής.

Αρχικά, υπολογίζεται η γωνία του διανύσματος της ροής, δηλαδή η κατεύθυνση της ταχύτητας ροής (FlowangleXY), με συνιστώσες ( $U^t, V^t$ ) στην θέση του ιχθύος ( $X_F^t, Y_F^t$ ):

$$FlowangleXY^t = \tan^{-1} \left( \frac{V^t}{U^t} \right) \quad (3.19)$$

Επίσης, για  $t = 0$  ισχύει ότι  $angleXY^t = 0$  και  $FishangleXY^t = 0$ .

Συμπεριφορά B1:

$$Speedfish^t = FL * (S_{cruise} * (S_{cruise} - S_{drift})) \quad (3.20)$$

Συμπεριφορά B2:

$$Speedfish^t = FL * (S_{cruise} + RR * (S_{cruise} - S_{drift})) , \text{αν } A_M^t - A_M^{t-dt} < 0 \quad (3.21)$$

Όπου  $RR$  τυχαίος αριθμός από συνεχή κατανομή με εύρος [0-1].

$$Speedfish^t = \sqrt{U^2 + V^2} * (1 + 1.5) , \text{αν } A_M^t - A_M^{t-dt} \geq 0 \quad (3.22)$$

Συμπεριφορά B3:

$$Speedfish^t = FL * S_{boost} , \text{αν } Decision = 1 \quad (3.23)$$

$$Speedfish^t = Speedfish^{t-dt} * (1 - 0.025) , \text{αν } Decision > 1 \quad (3.24)$$

Τελικά οι συνιστώσες της ταχύτητας  $U_F, V_F$  του ιχθύος κάθε χρονική στιγμή  $t$  θα είναι:

$$U_F^t temp = Speedfish^t * \cos(angleXY^t) \quad (3.25)$$

$$V_F^t temp = Speedfish^t * \sin(angleXY^t) \quad (3.26)$$

$$U_F^t = U_F^t temp * \cos(FishangleXY^t) - V_F^t temp * \sin(FishangleXY^t) \quad (3.27)$$

$$V_F^t = U_F^t temp * \sin(FishangleXY^t) + V_F^t temp * \cos(FishangleXY^t) \quad (3.28)$$

**Βήμα 6. Υπολογισμός της νέας θέσης του ιχθύος  $X_F, Y_F$  και κατεύθυνσης του ιχθύος.** Η νέα θέση υπολογίζεται με βάση την προηγούμενη θέση του ιχθύος από τις Εξισώσεις (3.29) έως (3.31).

$$X_F^{t+dt} = X_F^t + (U_F^t + U^t) * dt \quad (3.29)$$

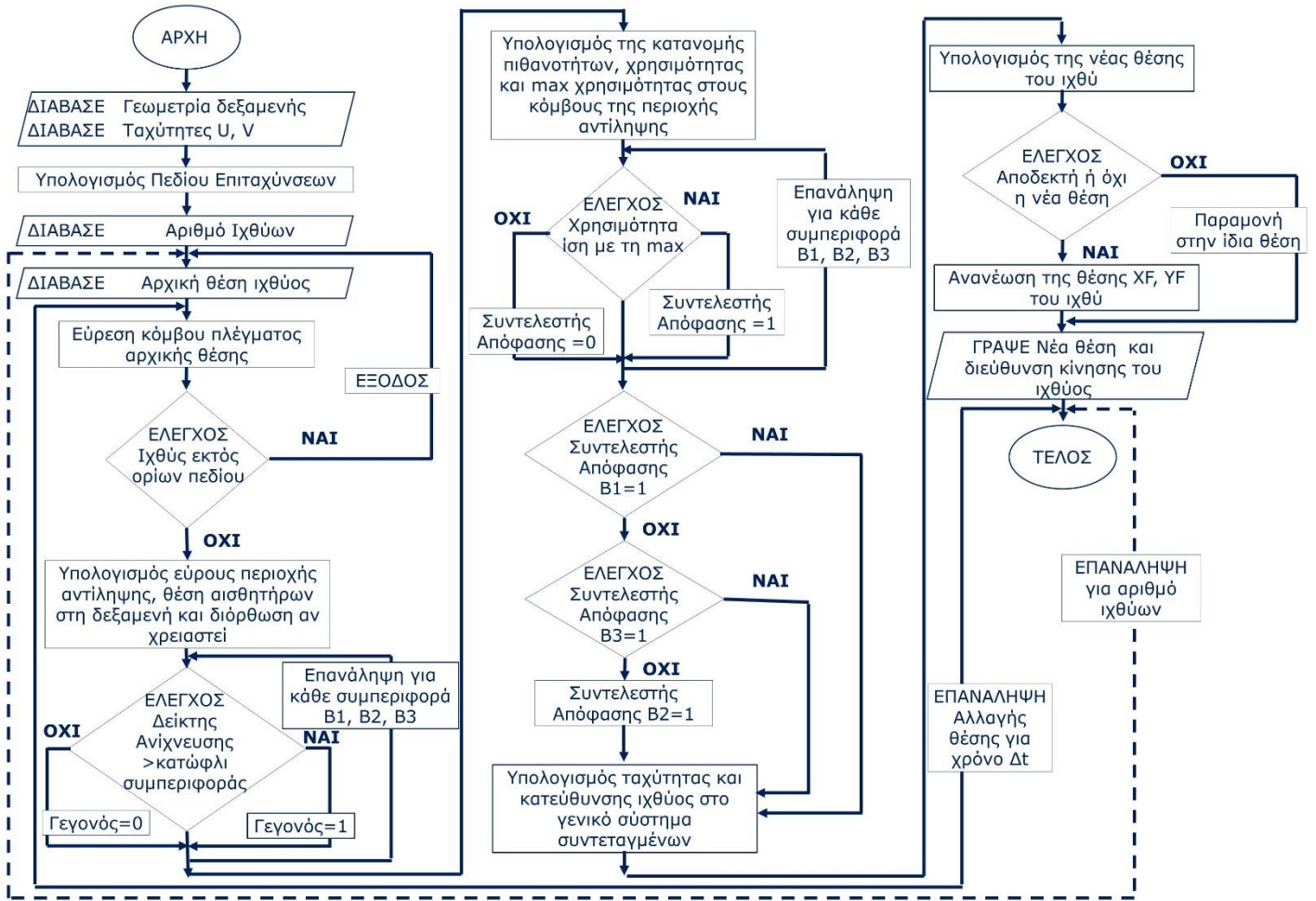
$$Y_F^{t+dt} = Y_F^t + (V_F^t + V^t) * dt \quad (3.30)$$

$$FishangleXY^{t+dt} = FishangleXY^t + angleXY^t \quad (3.31)$$

**Βήμα 7. Έλεγχος νέας θέσης ιχθύος.** Αφού υπολογιστεί η νέα θέση του ιχθύος, το μοντέλο ελέγχει αν η θέση αυτή είναι μέσα στα όρια του υπολογιστικού πλέγματος και εντός των ορίων της περιοχής αντίληψης του ιχθύος. Στην περίπτωση που η νέα θέση βρίσκεται εκτός των ορίων, το πρόγραμμα επιστρέφει στο προηγούμενο βήμα και υπολογίζει εκ νέου μια νέα θέση για τον ιχθύ μεταβάλλοντας την γωνία κίνησης του ιχθύ  $AngleXY^t$  κατά  $20^\circ$ .

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο μπορούν να αποθηκευτούν σε αρχεία κειμένου (txt) ή αρχεία Excel (xlsx). Υπάρχει η δυνατότητα στο GUI ο χρήστης να δει τα αποτελέσματα πριν τα τυπώσει και να τα συγκρίνει με πειραματικά. Επίσης το κώδικας παρέχει τη δυνατότητα στο χρήστη να κάνει υπολογισμούς καταλληλότητας ενδιαίτηματος ή να εξαγάγει καμπύλες ενδιαίτηματος από πειραματικά δεδομένα. Τέλος το πρόγραμμα μπορεί να κάνει ανάλυση ευαισθησίας μιας παραμέτρου του κώδικα.

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ



**Εικόνα 3.3** Διάγραμμα ροής του υπολογιστικού κώδικα του ΜΣΙ σε ποταμούς

### 3.4 Εξισώσεις ολοκληρωμένου μοντέλου σε διόδους ιχθύων

#### 3.4.1 Εξισώσεις ροής του ολοκληρωμένου μοντέλου σε διόδους ιχθύων – Το μοντέλο FLOW-3D

Το μοντέλο FLOW-3D [34] προσδιορίζει το τρισδιάστατο (3D) πεδίο ροής στη ΔΙ επιλύοντας τις εξισώσεις συνέχειας (3.32) και ποσότητας κίνησης (3.33).

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho A^i \bar{u}^i)}{\partial x^i} + \frac{\partial(\rho A^j \bar{u}^j)}{\partial x^j} = 0 \quad (3.32)$$

$$\frac{\partial \bar{u}^i}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[ A^i \bar{u}^i \frac{\partial(\bar{u}^i)}{\partial x^i} + A^j \bar{u}^j \frac{\partial(\bar{u}^i)}{\partial x^j} \right] = \frac{-1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x^i} + G^i + f^i \quad (3.33)$$

όπου  $V_F$  = όγκος ελέγχου,  $t$  = χρόνος,  $P$  = πίεση,  $x_i$  = οι Καρτεσιανές συντεταγμένες στην  $i$ -διεύθυνση,  $u^i$  = ταχύτητα ροής,  $A_i$  = το εμβαδό επιφανείας του όγκου ελέγχου,  $G_i$  = όρος επιτάχυνσης της βαρύτητας και  $f_i$  = οι τυρβώδεις όροι στην  $i$ -διεύθυνση. Οι τυρβώδεις όροι υπολογίζονται από την εξίσωση )

$$\rho V_F f^i = \tau_{bx^i} - \left[ \frac{\partial(A^i \tau_{x^i x^i})}{\partial x^i} + A^j \bar{u}^j \frac{\partial(A^j \tau_{x^j x^j})}{\partial x^j} \right] \quad (3.34)$$

όπου  $\tau_{bx^i}$  = διατμητικές τάσεις στα στερεά όρια και  $\tau_{x^i x^i}$  = ο τανυστής του ρυθμού παραμορφώσεων του υγρού, ο οποίος υπολογίζεται από τις Εξισώσεις 3.35 και 3.36

$$\tau_{x^i x^i} = -2\mu_{tot} \left( \frac{\partial \bar{u}^i}{\partial x^i} - \frac{1}{3} \left( \frac{\partial \bar{u}^i}{\partial x^i} + \frac{\partial \bar{u}^j}{\partial x^j} \right) \right) \quad (3.35)$$

$$\tau_{x^i x^j} = -\mu_{tot} \left( \frac{\partial \bar{u}^i}{\partial x^j} + \frac{\partial \bar{u}^j}{\partial x^i} \right) \quad (3.36)$$

$\mu_{tot} = \mu + \mu_T$  είναι η ολική συνεκτικότητα,  $\mu$  είναι η δυναμική συνεκτικότητα και  $\mu_T$  είναι η τυρβώδης συνεκτικότητα.

Η τυρβώδης συνεκτικότητα προσδιορίζεται με το μοντέλο 2 εξισώσεων RNG KE [54], το οποίο βασίζεται στην υπόθεση Boussinesq για την τυρβώδη συνεκτικότητα και χρησιμοποιεί στατιστικές μεθόδους για τον υπολογισμό των Εξισώσεων 3.37 και 3.38 της κινητικής ενέργειας τύρβης ( $k$ ) και της απόσβεσής της ( $\epsilon$ ).

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[ \rho A^i \bar{u}^i \frac{\partial(k)}{\partial x^i} + \rho A^j \bar{u}^j \frac{\partial(k)}{\partial x^j} \right] = P_s + G + Diff - \rho \epsilon \quad (3.37)$$

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[ \rho A^i \bar{u}^i \frac{\partial(\epsilon)}{\partial x^i} + \rho A^j \bar{u}^j \frac{\partial(\epsilon)}{\partial x^j} \right] = \frac{1.42\epsilon}{k} (P_s + 0.2G) + DDiff - 1.68 \frac{\rho \epsilon^2}{k} \quad (3.38)$$

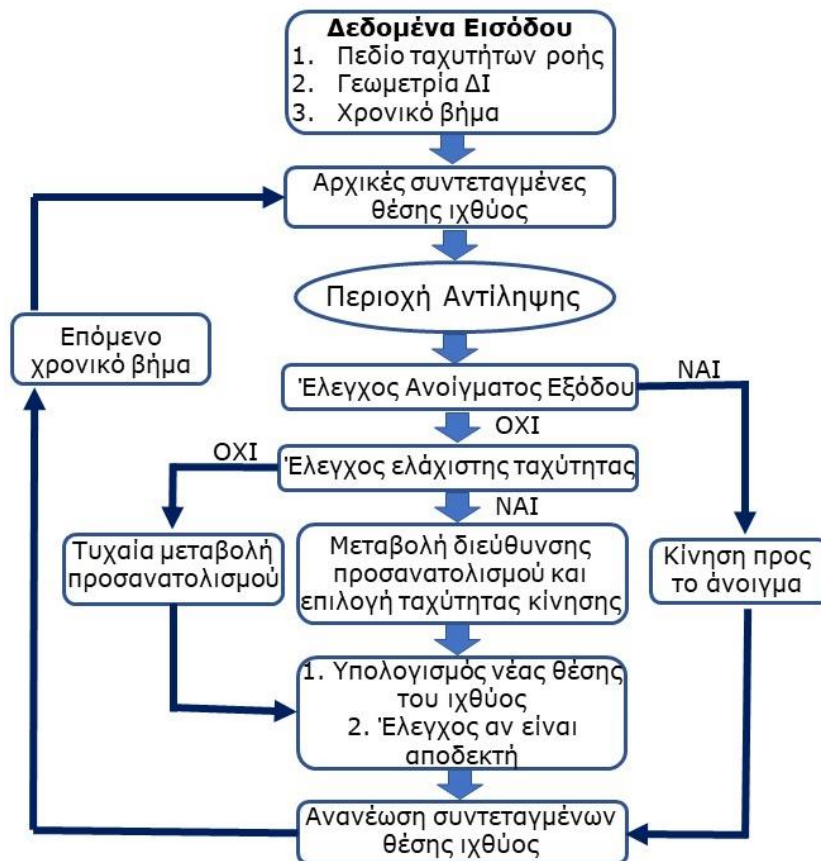
όπου  $P_s$  = διατμητικός όρος και  $Diff$  και  $DDiff$  = όροι διάχυσης.

Η επίλυση των εξισώσεων γίνεται με τη μέθοδο των όγκων ελέγχου και τη χρήση απλού ορθογωνικού πλέγματος που εφαρμόζεται στον υπολογιστικό κώδικα FLOW-3D [34] στον οποίο η ελεύθερη επιφάνεια υπολογίζεται με τη μέθοδο VOF [26]. Στη μέθοδο αυτή οι όγκοι ελέγχου κατηγοριοποιούνται σαν γεμάτοι, μερικώς γεμάτοι ή άδαιοι. Ο αριθμός  $F$  που καθορίζει την ποσότητα του νερού στους όγκους υπολογίζεται από την Εξίσωση 3.39 και παίρνει τιμές από 0 (άδειος) μέχρι 1 (πλήρης).

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[ \frac{\partial(F A^i \bar{u}^i)}{\partial x^i} + \frac{\partial(F A^j \bar{u}^j)}{\partial x^j} \right] = 0 \quad (3.39)$$

### 3.5 Εξισώσεις συμπεριφοράς ιχθύων του ολοκληρωμένου μοντέλου σε διόδους ιχθύων

Στο ΜΣΙ σε ΔΙ, ο ιχθύς αντιμετωπίζεται ως διακριτό μεμονωμένο κινούμενο αντικείμενο. Το μοντέλο υπολογίζει τροχιές ιχθύων χρησιμοποιώντας την αρχή της ελάχιστης κατανάλωσης ενέργειας. Στην **Εικόνα 3.4** παρουσιάζεται συνοπτικό διάγραμμα που συνοψίζει τα βήματα υπολογισμού του ΜΣΙ.



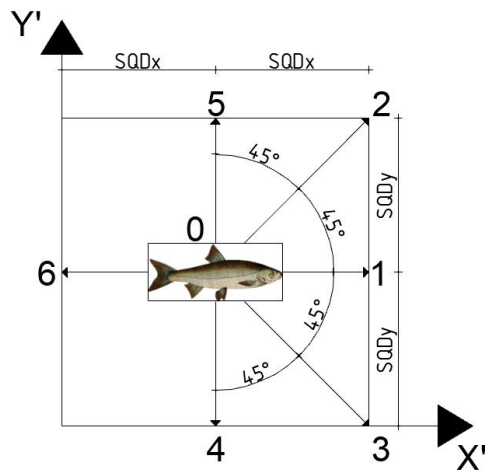
**Εικόνα 3.4** Σύντομο διάγραμμα ροής του ΜΣΙ σε ΔΙ

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα το μοντέλο μπορεί να περιγραφεί από τα παρακάτω βήματα:

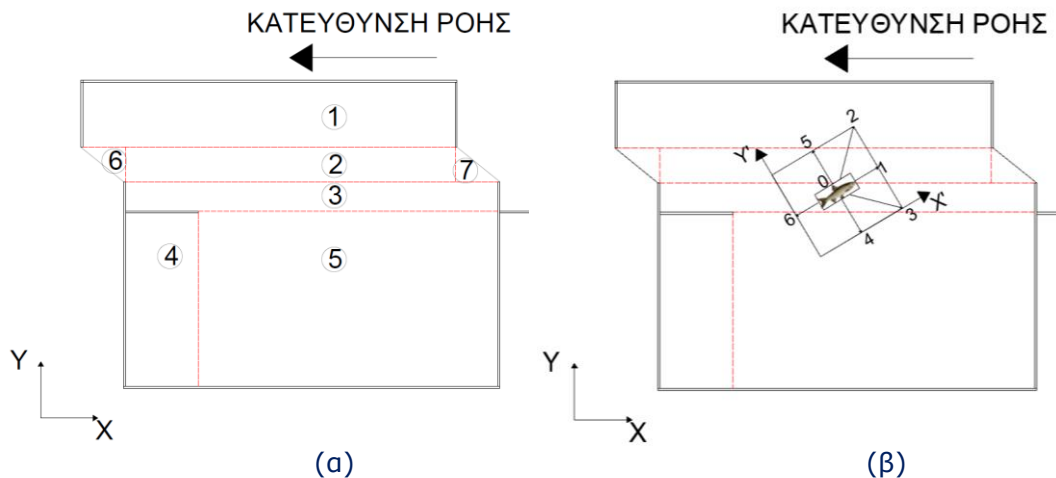
**Βήμα 1.** Εισάγουμε στο μοντέλο τη γεωμετρία της ΔΙ, το υπολογιστικό πλέγμα και το δισδιάστατο πεδίο ταχυτήτων, όπως υπολογίστηκε από το υδροδυναμικό μοντέλο. Επίσης εισάγουμε τα δεδομένα του ιχθύ ενδιαφέροντος, όπως τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά, η ταχύτητά του η αρχική του θέση και διεύθυνση στο υπολογιστικό πλέγμα και το χρονικό βήμα των υπολογισμών. Από το πεδίο ταχυτήτων υπολογίζεται το πεδίο των τοπικών επιταχύνσεων (AM) σε κάθε κόμβο του πλέγματος από την Εξίσωση (3.7).

**Βήμα 2.** Χρησιμοποιώντας το μήκος του ιχθύ, το μοντέλο υπολογίζει τις επτά θέσεις των αισθητήρων της περιοχής αντίληψης του ιχθύος (βλ. **Εικόνα 3.5**). Οι αποστάσεις των θέσεων αισθητήρων υπολογίζονται αρχικά στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων με

αρχή το κέντρο του ιχθύος και τη διεύθυνσή του. Στη συνέχεια ανάγονται στο γενικό σύστημα συντεταγμένων του πεδίου ροής με τη εφαρμογή μητρώου στροφής-μετατόπισης. Στη συνέχεια η δεξαμενή χωρίζεται σε 7 περιοχές, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 3.6<sup>α</sup>**, και υπολογίζεται η θέση αισθητήρων μέσα στη δεξαμενή με την εξίσωση (2.24), ανάλογα με την περιοχή στην οποία βρίσκεται ο αισθητήρας. Η περιοχή του κάθετου ανοίγματος ορίζεται ως θέση εφτά στα ανάντη και θέση 6 στα κατόντη. Αν λάβει την τιμή μηδέν, τότε ο αισθητήρας είναι εκτός δεξαμενής. Στην περίπτωση που η απόσταση του ιχθύ από το όριο του μοντέλου είναι μεγαλύτερη από 5 cm ο αισθητήρας στην περιοχή αυτή έχει λάβει την τιμή μηδέν, τότε γίνεται επαναπροσδιορισμός της θέσης του αισθητήρα. Τέλος αποδίδεται σε κάθε αισθητήρα η τιμή των ταχυτήτων και επιταχύνσεων που αντιστοιχούν στην θέση που βρίσκεται στο υπολογιστικό πλέγμα.



**Εικόνα 3.5** Η περιοχή αντίληψης του ιχθύος στο μοντέλο συμπεριφοράς σε διόδους ιχθύων με τους 6 αισθητήρες



**Εικόνα 3.6** Η τυπική δεξαμενή της ΔΙ (α) χωρισμένη στις 7 περιοχές και (β) με τον ιχθύ και την περιοχή αντίληψής του

**Βήμα 3.** Το μοντέλο ελέγχει αν η θέση του ιχθύ είναι στην περιοχή εφτά, που σηματοδοτεί την έξοδο από τη δεξαμενή (περιοχή του ανοίγματος στα ανάντη της

δεξαμενής), ή αν κάποιος από τους αισθητήρες βρίσκεται στην θέση εφτά. Αν βρεθεί η θέση του στην περιοχή εφτά, κινείται προς το άνοιγμα με διεύθυνση αντίθετη τις ροής και με χρήση της ταχύτητας έκρηξης. Αν βρεθεί κάποιος αισθητήρας, ανάλογα με θέση που βρίσκεται ο ιχθύς υπολογίζεται η γωνία στην οποία θα κατευθυνθεί. (Δεν συνυπολογίζει την επίδραση του πεδίου ροής.)

**Βήμα 4.** Ο ιχθύς ελέγχει τους τρεις αισθητήρες μπροστά (1,2 και 3) του σε γωνία  $\pm 45^\circ$  (βλ. **Εικόνα 3.5**). Εάν η ταχύτητα των αισθητήρων αυτών είναι μικρότερη από μια ελάχιστη ταχύτητα, τότε ενεργοποιείται μια τυχαία κίνηση. Αυτή η ταχύτητα είναι ανάλογη του μήκους του ψαριού και χρησιμοποιείται για τη βαθμονόμηση του μοντέλου. Η τυχαία κίνηση αλλάζει την κατεύθυνση του ψαριού κατά  $20^\circ$  πολλαπλασιασμένη με έναν τυχαίο αριθμό που κυμαίνεται από -1 έως 1.

**Βήμα 5.** Εάν οι ταχύτητες των πιο πάνω κόμβων είναι μεγαλύτερες από την ελάχιστη ταχύτητα, εφαρμόζει την αρχή της ελάχιστης κατανάλωσης ενέργειας. Οι 3 ταχύτητες θα ταξινομηθούν από τη μεγαλύτερη προς τη μικρότερη και θα αποδοθούν πιθανότητες, 0.2, 0.3 και 0.5 αντίστοιχα. Η ίδια διαδικασία ισχύει και για την επιτάχυνση, με πιθανότητες 0.1, 0.3 και 0.6 αντίστοιχα. Στη συνέχεια, οι πιθανότητες σταθμίζονται, προστίθενται και διαιρούνται με το 2. Εάν ένας κόμβος έχει θέση στη δεξαμενή ίση με μηδέν, η πιθανότητα του κόμβου αυτού ορίζεται σε 0.0. Επιπλέον, εάν το μέγεθος των ταχυτήτων ή των επιταχύνσεων των κόμβων είναι ίσα, αποδίδεται στους κόμβους αυτούς η τιμή 0.333. Εάν η τιμή πιθανότητας 0.0 ανατεθεί σε όλους τους μπροστινούς κόμβους, τότε το ψάρι ελέγχει τους τρεις υπόλοιπους αισθητήρες (αισθητήρες 4,5 και 6 στην **Εικόνα 3.5**) της περιοχής αντίληψής και αποφασίζει την κατεύθυνσή του με ίση πιθανότητα ανάμεσα στους αισθητήρες.

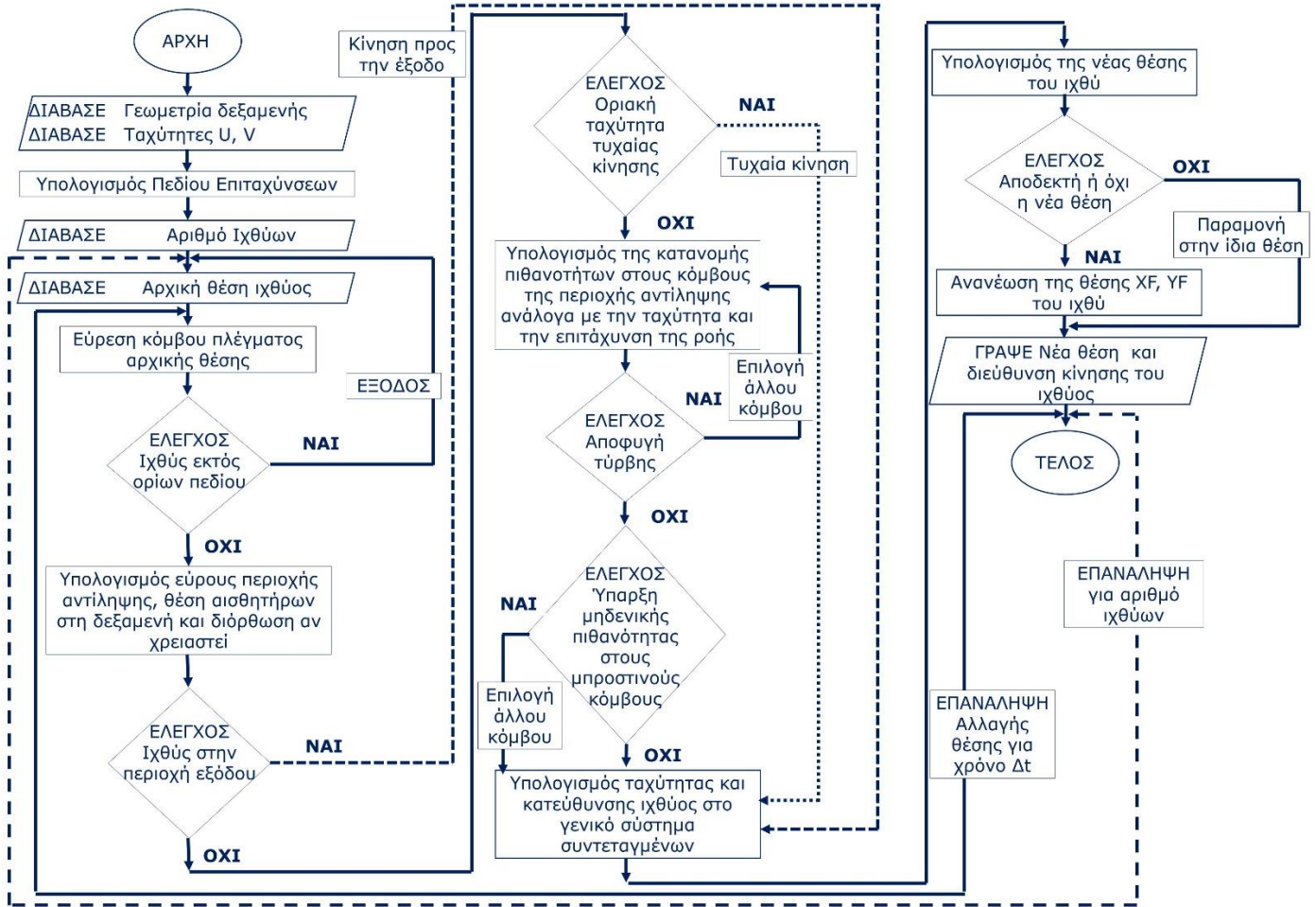
**Βήμα 6.** Ο ιχθύς επιλέγει μια ταχύτητα μεταξύ (α) πλεύσης, (β) παρατεταμένης ή (γ) έκρηξης με βάση την ταχύτητα στην τρέχουσα θέση του. Στη συνέχεια, με βάση (α) την αλλαγή κατεύθυνσης που υπολογίστηκε στο βήμα 5 και (β) τη γωνία του ψαριού στη λίμνη, υπολογίζονται τα νέα διανύσματα ταχύτητας του ψαριού στο γενικό σύστημα συντεταγμένων.

**Βήμα 7.** Η νέα θέση του ψαριού υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη το πεδίο ροής γύρω από το ψάρι. Εάν η νέα θέση βρίσκεται εκτός των ορίων της περιοχής αντίληψης, τότε η θέση περιορίζεται από τις μέγιστες αποστάσεις της περιοχής (SQD).

**Βήμα 8.** Τέλος, το μοντέλο ελέγχει αν η νέα θέση είναι αποδεκτή με βάση τους γεωμετρικούς περιορισμούς και στη συνέχεια προχωρά στο επόμενο χρονικό βήμα. Εάν δεν είναι αποδεκτό, το ψάρι παραμένει στην προηγούμενη θέση και ο υπολογισμός μεταβαίνει στο επόμενο χρονικό βήμα.



### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ



Εικόνα 3.7 Διάγραμμα ροής του υπολογιστικού κώδικα του ΜΣΙ σε ΔΙ

## 4 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΠΟΤΑΜΟΥΣ

### 4.1 Εισαγωγή

Για την βαθμονόμηση και επιβεβαίωση του ολοκληρωμένου μαθηματικού μοντέλου σε ποταμούς ήταν απαραίτητο να επιλεγεί μια περιοχή για την οποία θα υπάρχουν δεδομένα για το υδροδυναμικό πεδίο, όπως η βαθυμετρία, οι παροχές και οι ταχύτητες ροής του πεδίου, αλλά και δεδομένα σχετικά με την κίνηση των ιχθύων κατά την μεταναστευτική περίοδο. Η περιοχή που επιλέχθηκε για την εφαρμογή του μοντέλου είναι ένα τμήμα του ποταμού Konge στη Δυτική Δανία και συγκεκριμένα στην περιοχή του Jedsted Mill, 7 km ανάντη της θάλασσας Wadden, μιας παλιρροιακής ζώνης στο νοτιοανατολικό τμήμα της Βόρειας θάλασσας. Για την περιοχή αυτή διατέθηκαν δεδομένα βαθυμετρίας και ταχύτητας καθώς και δεδομένα μετρήσεων από τροχιές παρατηρούμενων μεταναστευτικών ιχθύων [70].



**Εικόνα 4.1** Περιοχή Jedsted Mill Fish Farm στη Δανία

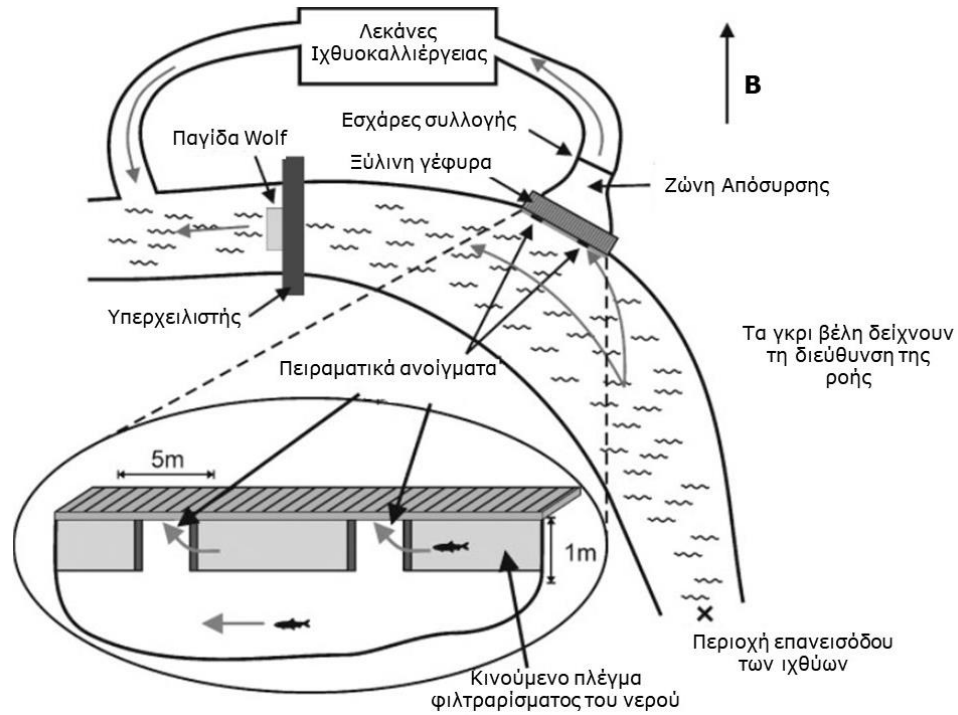
### 4.2 Περιγραφή της περίπτωσης εφαρμογής

#### 4.2.1 Περιοχή εφαρμογής – Jedsted Mill Fish Farm

Η περιοχή εφαρμογής ονομάζεται Jedsted Mill και βρίσκεται στον ποταμό Konge 7 km ανάντη της θάλασσας Wadden. Ο ποταμός έχει μήκος 70 km και μέση κλίση 0,5‰. Εκβάλλει στην θάλασσα Wadden με μέση ετήσια παροχή περίπου 7 m<sup>3</sup>/s. Το πλάτος του ποταμού κυμαίνεται από 8m μέχρι 15m και το βάθος από 0.5m μέχρι 1.4m, ενώ μαζί με άλλους 32 μικρούς παραποτάμους υποστηρίζει πληθυσμούς του Ατλαντικού Σολομού και της Καφέ Πέστροφας.

Στην περιοχή αυτή λειτουργούσε ένα ιχθυοτροφείο πέστροφας. Στην είσοδο του ιχθυοτροφείου δημιουργήθηκαν ζώνες απόσυρσης του νερού (water withdrawal zones). Οι Svendsen et al. [70] διεξήγαγαν στην περιοχή μια σειρά πειραμάτων με νεαρούς σολομούς. Ο στόχος της μελέτης τους ήταν να συνδέσουν τη συμπεριφορά των μεταναστευτικών ιχθύων με τις περιοχές απόσυρσης του νερού, που είναι οικολογικά ακατάλληλες για τους ιχθύες. Ενενήντα μέτρα κατάντη του ιχθυοτροφείου στη ροή του ποταμού είχε τοποθετηθεί ένας υπερχειλιστής για να ελέγχει την ροή του ποταμού. Τμήμα της παροχής του ποταμού εκτρέποταν στην περιοχή του ιχθυοτροφείου μέσω εσχάρων. Το νερό περνούσε μέσα από τις δεξαμενές του ιχθυοτροφείου και επέστρεφε στο ποτάμι κατάντη του υπερχειλιστή [70] (βλ. **Εικόνα 4.2**).

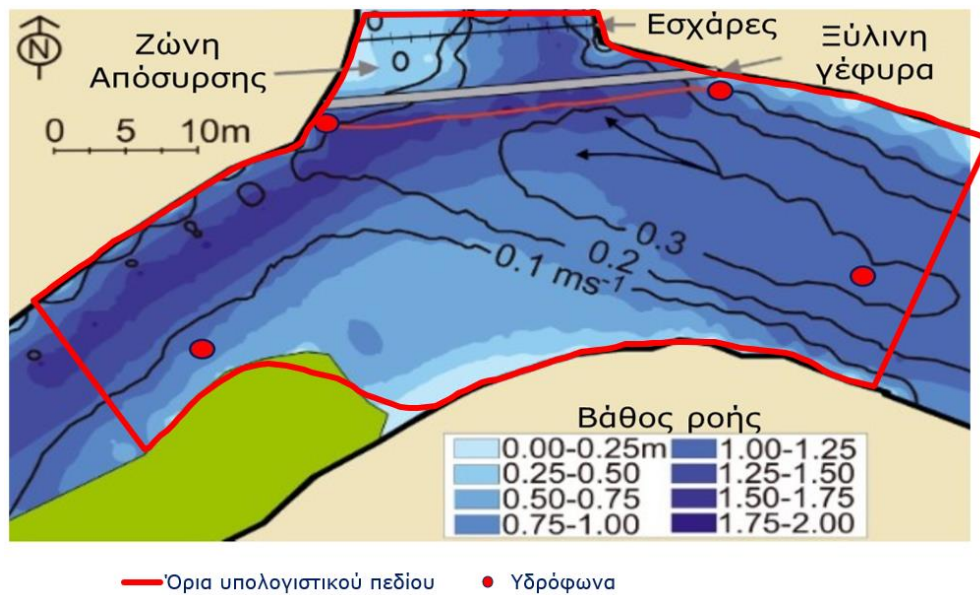
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΠΟΤΑΜΟΥΣ



**Εικόνα 4.2** Διάταξη της περιοχής μελέτης [71]

**4.2.2 Δεδομένα βαθυμετρίας και ταχύτητας ροής**

Για την περιοχή μελέτης δόθηκαν από τους Svendsen et al. [70] δεδομένα βαθών και ταχυτήτων ροής σε αρχείο GIS. Στην **Εικόνα 4.3** φαίνονται οι ισοϋψείς των πειραματικών μετρήσεων.



**Εικόνα 4.3** Ισοϋψείς βάθους (χρωματικές) και ταχυτήτων ροής. Σημειώνεται η θέση των υδροφώνων και του υπολογιστικού πεδίου

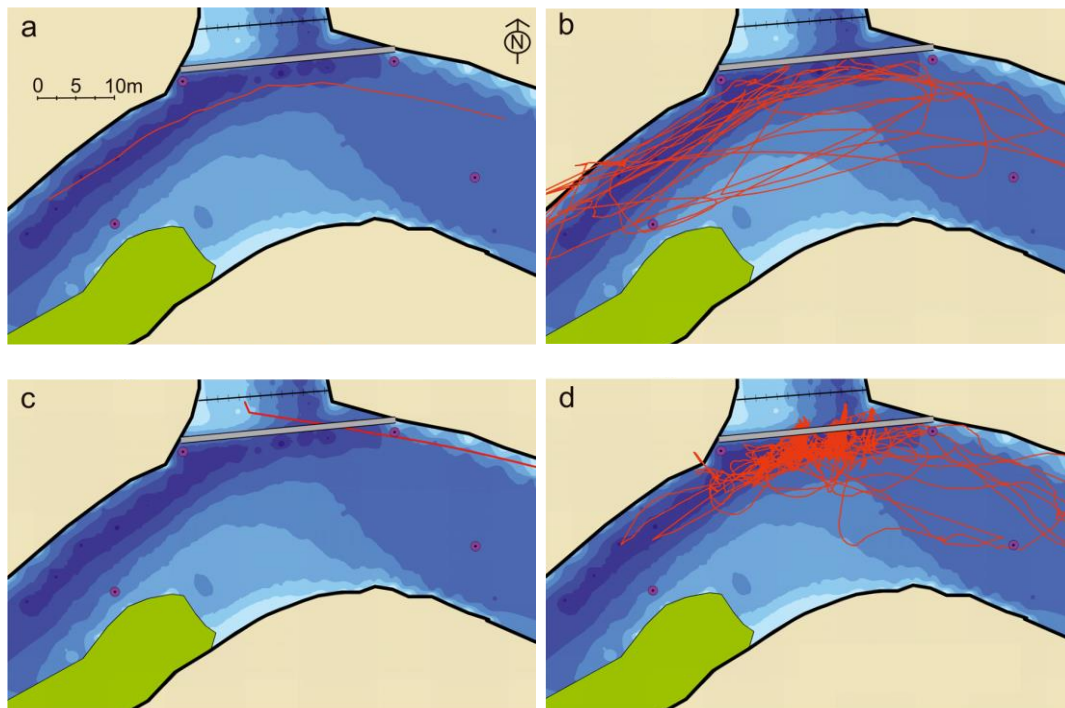
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΠΟΤΑΜΟΥΣ

Οι τιμές του βάθους ροής κυμαίνονται από 0.00m μέχρι 1.80m και οι τιμές της μέσης ταχύτητας ροής κυμαίνονται από 0.05 m/s μέχρι 0.45 m/s. Οι μετρήσεις του βάθους πραγματοποιήθηκαν με την χρήση φορητού GPS και οι μέσες ταχύτητες μετρήθηκαν με την χρήση φορητού μιλίσκου σε βάθος 60% από την ελεύθερη επιφάνεια του νερού.

### 4.2.3 Πειραματικές μετρήσεις κίνησης ιχθύων

Οι Svendsen et al. [70] τοποθέτησαν μία παγίδα τύπου Wolf [72] κατάντη της ιχθυοκαλλιέργειας (βλ. **Εικόνα 4.2**), με σκοπό να συλλέξουν ιχθύες και να μελετήσουν την κίνηση τους. Στους συνολικά 61 ιχθύες, που συλλέχθηκαν, τοποθετήθηκαν ακουστικοί πομποί και αφήθηκαν ξανά ελεύθεροι ανάντη της εισόδου του ιχθυοτροφείου. Οι τροχιές των μελετώμενων ιχθύων καταγράφηκαν με τη χρήση υδροφώνων που ήταν διατεταγμένα σε τέτοιες θέσεις ώστε να σχηματίζουν μορφή τραπεζίου κατά μήκος και κατά πλάτος του ποταμού. Κάθε φορά που περνούσαν από την περιοχή που κάλυπτε η διάταξη των υδροφώνων, ο ακουστικός πομπός έδινε σήμα και οι τροχιές καταγράφονταν με τη μορφή συντεταγμένων X και Y. Τα χαρακτηριστικά των ιχθύων που συμμετείχαν στις πειραματικές μετρήσεις ήταν τα εξής: μήκος  $19.1 \pm 1.1\text{cm}$  και βάρος  $53.1 \pm 9.9\text{g}$ . Οι θέσεις των υδροφώνων φαίνονται στην **Εικόνα 4.3**. Στην **Εικόνα 4.4** παρουσιάζονται ενδεικτικά 4 πειραματικές τροχιές.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματά τους, το 67,2% από τους 61 ιχθύες (41 ιχθύες) πιάστηκαν ξανά στην παγίδα τύπου Wolf, που σημαίνει ότι προσπέρασαν την περιοχή απόσυρσης, ενώ το υπόλοιπο 32,8% (20 ιχθύες) δεν πιάστηκαν στην παγίδα. Από τους 41 ιχθύες, το 65,9% ακολούθησε ευθεία (non-milling) πορεία, ενώ το υπόλοιπο 34,1% παρουσίασε κυκλική συμπεριφορά (milling).



**Εικόνα 4.4** Τέσσερις πειραματικές τροχιές. (a) Προσπερνά την ζώνη απόσυρσης, (b) εκτελεί κυκλική κίνηση, (c) εγκλωβίζεται στην περιοχή απόσυρσης και (d) εκτελεί κυκλική κίνηση και κατευθύνεται στην υδατοκαλλιέργεια [70]

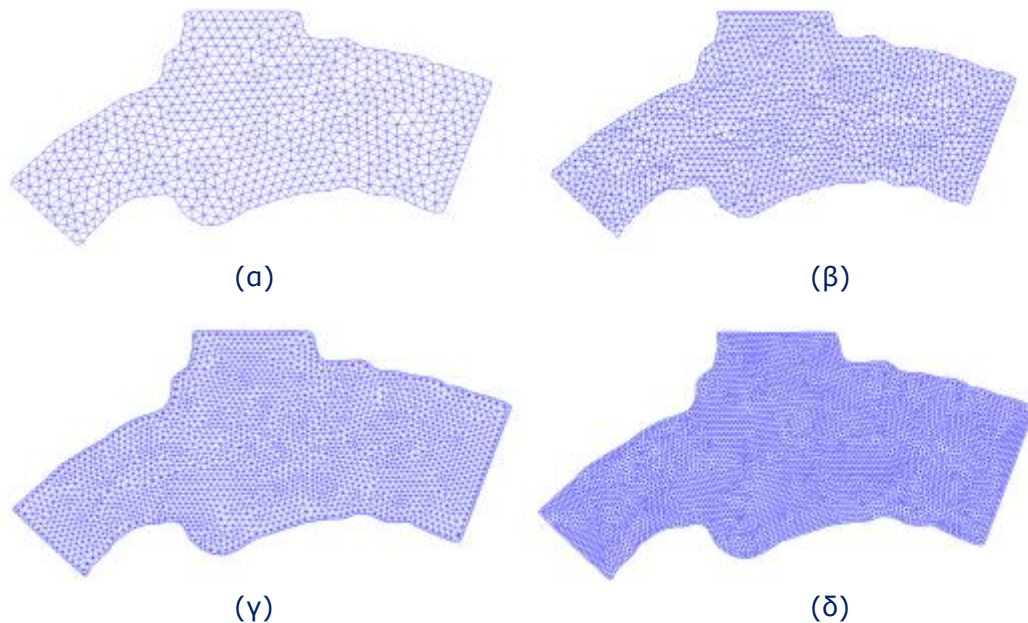
### 4.3 Υπολογισμοί υδροδυναμικού μοντέλου

### 4.3.1 Εισαγωγή

Για την προσομοίωση της ροής στο υπό μελέτη τμήμα του ποταμού χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο TELEMAC- 2D. Τα δεδομένα που εισάγουμε στο υδροδυναμικό μοντέλο είναι (α) οριακές συνθήκες, (β) υπολογιστικό πλέγμα και (γ) τον συντελεστής τραχύτητας. Κάθε ένα από τα παραπάνω πρέπει υπολογιστεί ή να εκτιμηθεί από τα δεδομένα για την περιοχή.

### 4.3.2 Υπολογιστικό πλέγμα

Το υπολογιστικό πεδίο διαμορφώθηκε από τα όρια του ποταμού, στα οποία υπήρχαν μετρήσεις βαθών και ταχυτήτων ροής. Εντός των ορίων δημιουργήθηκε μη δομημένο πλέγμα με τριγωνικά στοιχεία. Κατασκευάστηκαν τέσσερα πλέγματα με διαφορετική απόσταση μεταξύ των κόμβων ώστε να μελετηθεί η επίδρασή του πλέγματος στα αποτελέσματα του πεδίου ροής. Δημιουργήθηκαν 4 πλέγματα με απόσταση κόμβων 1.5m, 1.0m, 0.8m, 0.5m, τα οποία ονομάστηκαν coarse, medium, fine και superfine, αντίστοιχα. Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του κάθε πλέγματος.



**Εικόνα 4.5** Το υπολογιστικό πεδίο με πλέγμα (α) coarse, (β) medium, (γ) fine και (δ) superfine

**Πίνακας 4.1** Χαρακτηριστικά των υπολογιστικών πλεγμάτων

Πλέγμα	Απόσταση κόμβων (m)	Αριθμός κόμβων	Αριθμός στοιχείων
<b>Coarse</b>	1.50	742	1355
<b>Medium</b>	1.00	1648	3103
<b>Fine</b>	0.80	2646	4913
<b>Superfine</b>	0.50	6473	12565

Για τον έλεγχο της ανεξαρτησίας του πλέγματος υπολογίζεται ο δείκτης συμφωνίας Index of Agreement (IA) [73] και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Root Mean Square Error, RMSE) της ταχύτητας στη διατομή εξόδου για κάθε διαφορετικό πλέγμα. Τα IA και RMSE υπολογίζονται από τις εξισώσεις (4.3) και (4.4).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΠΟΤΑΜΟΥΣ

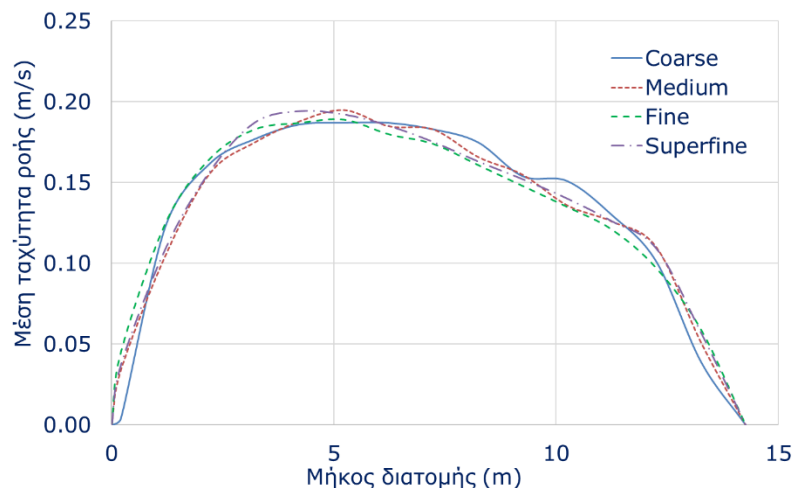
$$IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (4.3)$$

Όπου το IA παίρνει τιμές από 0 μέχρι 1, n είναι το πλήθος των μετρήσεων,  $O_i$  οι τιμές των πειραματικών μετρήσεων και  $P_i$  οι τιμές του μοντέλου. Όσο πιο κοντά στο 1 είναι η τιμή του σφάλματος, τόσο καλύτερη συσχέτιση έχουν οι τιμές μεταξύ τους.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - A_i)^2}{n}} \quad (4.4)$$

Όπου  $P_i$  η τιμή που προβλέπεται και  $A_i$  η πραγματική τιμή. Όσο πιο κοντά στο 0 είναι η τιμή του RMSE, τόσο μικρότερο σφάλμα έχουν οι τιμές μεταξύ τους.

Στην **Εικόνα 4.6** φαίνεται το υπολογιζόμενο προφίλ ταχύτητας για τα 4 πλέγματα. Στον Πίνακα **4.2** φαίνονται οι υπολογισμοί IA και RMSE ανάμεσα στο Fine, που τελικά επιλέχθηκε και στα υπόλοιπα.



**Εικόνα 4.6** Προφίλ ταχυτήτων που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις με διαφορετικά πλέγματα στη διατομή εξόδου της περιοχής μελέτης.

**Πίνακας 4.2** Σύγκριση των διαφορετικών πλεγμάτων

	Coarse - Medium	Medium - Fine	Fine - Superfine
<b>AI</b>	0.987	0.991	0.997
<b>RMSE</b>	0.012	0.009	0.005

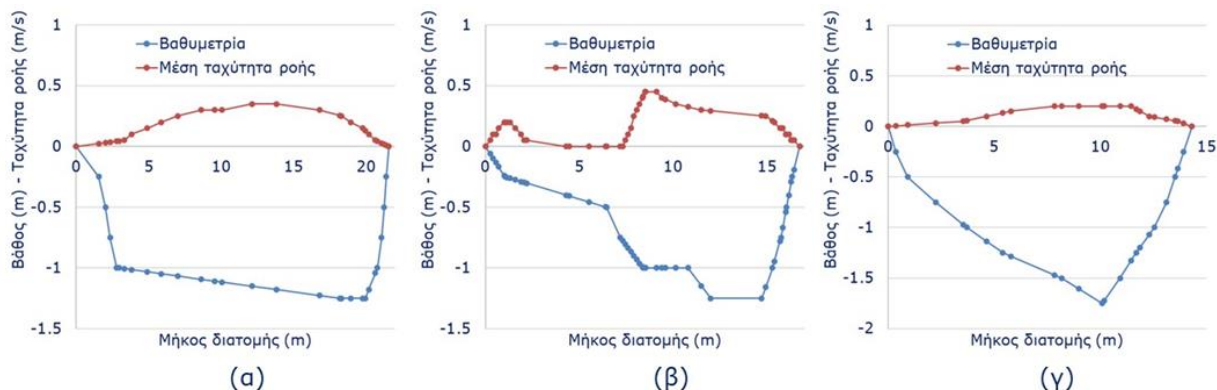
### 4.3.3 Οριακές συνθήκες

Οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο είναι (α) σταθερή παροχή στην είσοδο σε συνδυασμό με το πειραματικό προφίλ ταχύτητας κάθετο στο όριο και (β) στάθμη επιφάνειας ροής στις 2 εξόδους, προς το ιχθυοτροφείο και προς τον υπερχειλιστή. Από τα διαθέσιμα δεδομένα μπορούμε να υπολογίσουμε τις παροχές στις διατομές εισόδου και εξόδου. Για τον υπολογισμό της παροχής οι διατομές χωρίστηκαν σε μικρότερα στοιχεία  $i$  και υπολογίστηκαν το εμβαδό και η μέση τιμή της ταχύτητας για κάθε στοιχείο. Οι επιμέρους παροχές υπολογίστηκαν με βάση την Εξίσωση (4.1). Η τελική παροχή κάθε διατομής είναι το άθροισμα των επιμέρους παροχών.

$$q_i = V_i * A_i \quad (4.1)$$

$$Q = \sum q_i = \sum (V_i * A_i) \quad (4.2)$$

Από τους υπολογισμούς η παροχή προέκυψε στην διατομή εισόδου στα ανάντη στα  $5.24 \text{ m}^3/\text{s}$ , στη διατομή του ιχθυοτροφείου στα  $2.83 \text{ m}^3/\text{s}$  και στη διατομή εξόδου στα κατόντη στα  $2.21 \text{ m}^3/\text{s}$ . Όπως παρατηρούμε υπάρχει μια απόκλιση στο ισιζύγιο παροχών, το οποίο οφείλεται στα σφάλματα μετρήσεων. Στην **Εικόνα 4.7** παρουσιάζονται τα βάθη και οι ταχύτητες ροής στις οριακές διατομές.



**Εικόνα 4.7** Βαθυμετρία και μέση ταχύτητα στις διατομές (α) εισόδου, (β) εξόδου ιχθυοτροφείου και (γ) εξόδου μοντέλου

#### 4.3.4 Υπολογισμός του συντελεστή τραχύτητας Manning

Για τον καθορισμό της τραχύτητας του ποταμού χρησιμοποιείται η σχέση του Manning:

$$V = n^{-1} * R^{2/3} * J^{1/3} \quad (4.5)$$

Όπου  $V$  (m/s) είναι η μέση ταχύτητα ροής,  $n$  (s/m<sup>1/3</sup>) είναι ο συντελεστής τραχύτητας κατά Manning,  $R$  (m) είναι η υδραυλική ακτίνα της διατομής και  $J$  είναι η κατά μήκος κλίση του πυθμένα.

Οι βασικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή του συντελεστή Manning είναι το είδος και το μέγεθος των υλικών που συνθέτουν τον πυθμένα και τις όχθες του καναλιού καθώς και το σχήμα του. Ο Cowan [74] ανέπτυξε μία μέθοδο για την εκτίμηση της επίδρασης των παραπάνω παραγόντων ώστε να προσδιοριστεί η τιμή του συντελεστή τραχύτητας για τον ποταμό. Για τον υπολογισμό του χρησιμοποιείται η σχέση:

$$n = (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m \quad (4.6)$$

Όπου  $n_b$  είναι μία βασική τιμή του συντελεστή  $n$  για ευθύγραμμο, ομοιόμορφο και λείο κανάλι με φυσικά υλικά,  $n_1$  ο συντελεστής διόρθωσης για την επίδραση των ανωμαλιών του εδάφους στην κοίτη του ποταμού,  $n_2$  ο συντελεστής που λαμβάνει υπόψη τη μεταβολή του σχήματος και του μεγέθους της διατομής του ποταμού,  $n_3$  ο συντελεστής που λαμβάνει υπόψη εμπόδια στη ροή,  $n_4$  ο συντελεστής που λαμβάνει υπόψη του τη βλάστηση και  $m$  ο συντελεστής διόρθωσης που λαμβάνει υπόψη τους μαιανδρισμούς του ποταμού.

Η σχέση αυτή διαφοροποιεί το συντελεστή τραχύτητας λαμβάνοντας υπόψη την κατάσταση που επικρατεί κατά μήκος του πυθμένα του ποταμού. Στον Πίνακα **4.3**

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΠΟΤΑΜΟΥΣ

παρουσιάζεται το εύρος τιμών για κάθε συντελεστή  $n$  που τελικά επιλέγεται με βάση τα χαρακτηριστικά του ποταμού.

**Πίνακας 4.3** Εύρος τιμών συντελεστών τραχύτητας για το τμήμα του ποταμού

Υπόστρωμα πυθμένα	Συντελεστές	Περιγραφή συντελεστών	Εύρος τιμών
Αμμώδες με διάσπαρτες περιοχές με χαλίκια	Βασικό χαρακτηριστικό καναλιού, $n_b$	Εδαφικό υλικό γήινο και όχι πετρώδες	0.025-0.032
	Ανομοιομορφία καναλιού, $n_1$	Λεία	0.000
	Αλλαγές στις διατομές, $n_2$	Εναλλασσόμενες	0.010-0.015
	Εμπόδια κατά μήκος του καναλιού, $n_3$	Ελάχιστα	0.005-0.015
	Βλάστηση, $n_4$	Υψηλή	0.025-0.050
	Μαιανδρικό σχήμα, $m$	Ελάχιστο	1.00

Η κοίτη του ποταμού περιλαμβάνει κυρίως άμμο με παρεμβαλλόμενες διάσπαρτες περιοχές με χαλίκι. Κατά την περίοδο των πειραματικών μετρήσεων για τους μελετώμενους ιχθύες στον ποταμό επικρατούσε έντονη βλάστηση από το είδος *Sparganium erectum* με 50% επικάλυψη (βλ. **Εικόνα 4.8**). Καθώς δεν είναι γνωστή η ακριβής κοκκομετρία της άμμου και των χαλικιών, το υλικό του πυθμένα θεωρείται εδαφικό γήινο και όχι πετρώδες (*firm soil*) και ο βασικός συντελεστής  $n_b$  θεωρείται ότι βρίσκεται εντός ενός εύρους ενδιάμεσων τιμών μεταξύ άμμου και χαλικιών. Από τον υπολογισμό προκύπτει ότι το αποδεκτό εύρος του συνολικού συντελεστή Manning κυμαίνεται από 0.065 έως 0.112. Να σημειωθεί όμως ότι η βαθμονόμηση του μοντέλου γίνεται με κατάλληλη επιλογή του συντελεστή Manning, οπότε το εύρος αυτό θα χρησιμοποιηθεί σαν αρχική προσέγγιση.



**Εικόνα 4.8** Επικρατούσα βλάστηση στην περιοχή (*Sparganium erectum*)

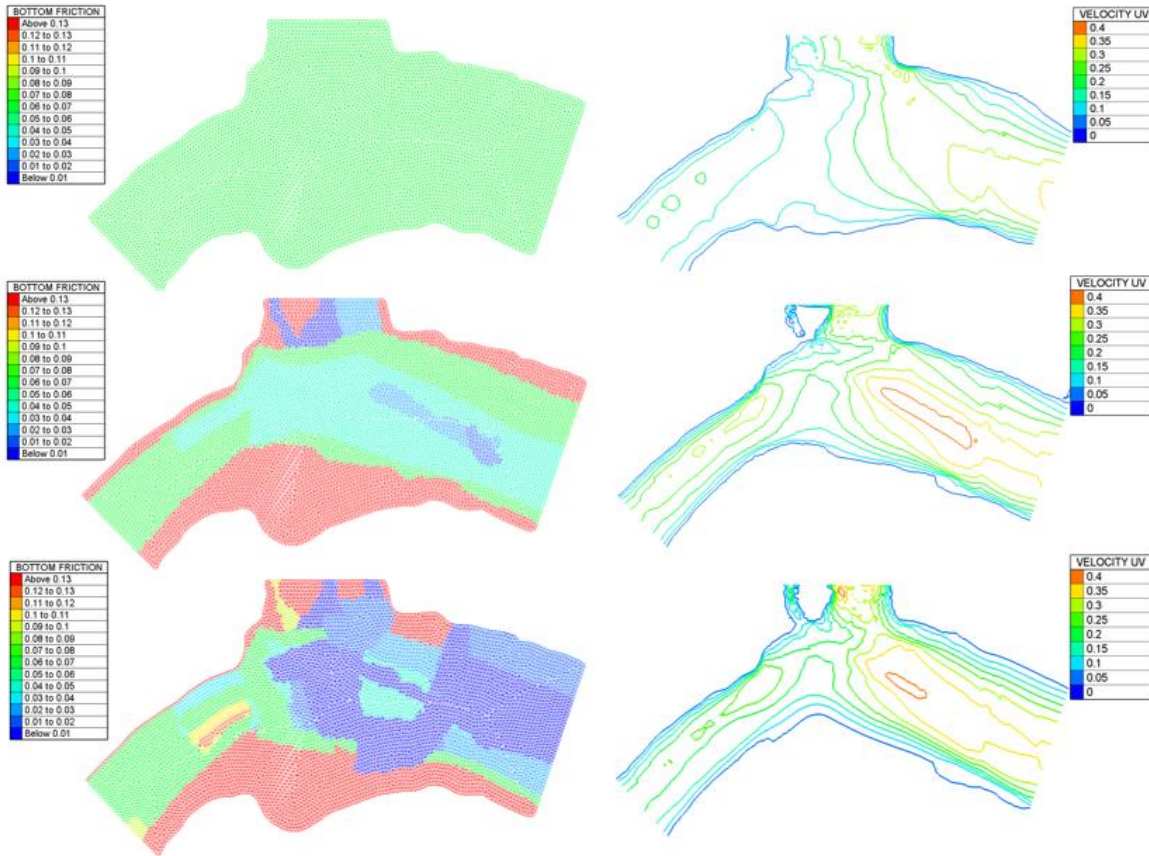
### 4.3.5 Βαθμονόμηση του υδροδυναμικού μοντέλου

Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, για τη βαθμονόμηση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές τιμές του συντελεστή τραχύτητας μέσα στα όρια του υπολογιστικού πεδίου. Η κατανομή των τιμών του συντελεστή Manning στο πεδίο ροής προέκυψε μετά από διαδοχικές δοκιμές, ούτως ώστε τα παραγόμενα αποτελέσματα του υδροδυναμικού μοντέλου ροής να προσεγγίζουν ικανοποιητικά τα πειραματικά δεδομένα. Στην **Εικόνα 4.9** παρουσιάζεται η μεταβολή του πεδίου ροής σε συνάρτηση με την μεταβολή της κατανομής των τιμών τραχύτητας. Στην **Εικόνα 4.10** παρουσιάζεται η τελική κατανομή

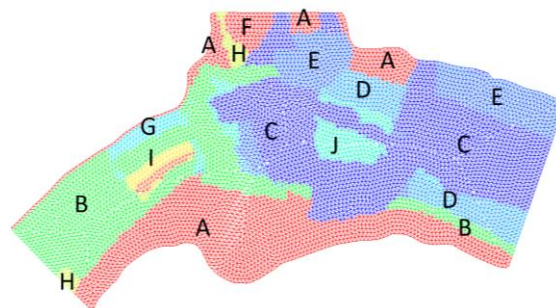


ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΠΟΤΑΜΟΥΣ

των τιμών τραχύτητας Manning σε ζώνες ίδιων τιμών από Α μέχρι J. Ο Πίνακας 4.4 δείχνει τις τελικές τιμές του συντελεστή τραχύτητας εντός του υπολογιστικού πεδίου.



Εικόνα 4.9 Μεταβολή του πεδίου ροής (δεξιά) σε σχέση με τη μεταβολή της κατανομής των τιμών τραχύτητας (αριστερά)



Εικόνα 4.10 Η τελική κατανομή των τιμών του συντελεστή Manning στο πεδίο ροής  
Πίνακας 4.4 Τιμές του συντελεστή Manning ανά ζώνη

Ζώνη διαφορετικής τραχύτητας	Τιμές Συντελεστής Manning
A	0.3
B	0.067
C	0.01
D	0.03

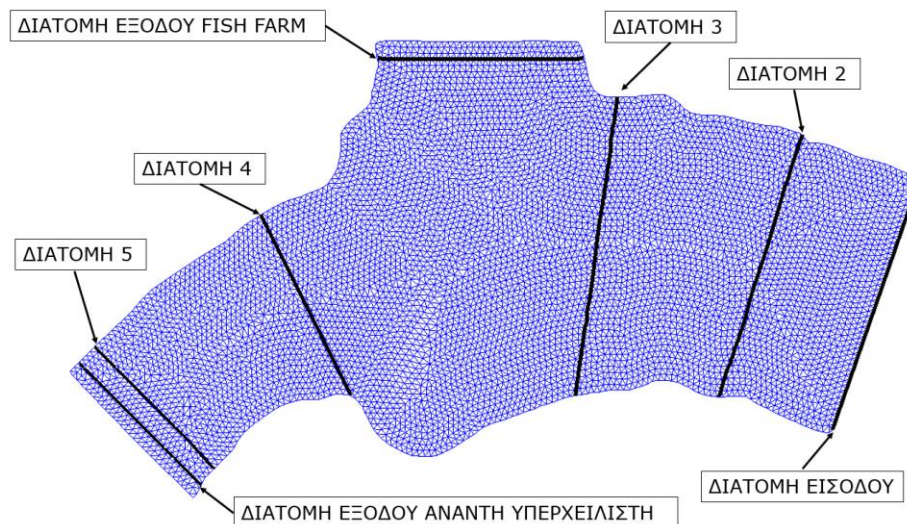
#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΠΟΤΑΜΟΥΣ

E	0.02
F	10
G	0.04
H	0.1
I	0.11
J	0.05

Να σημειωθεί ότι στη ζώνη F σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα, η ταχύτητα πρακτικά μηδενίζεται. Η τιμή τραχύτητας 10, που είναι εκτός πραγματικών ορίων, έχει σκοπό να μειώσει στο ελάχιστο τη ροή από το συγκεκριμένο σημείο.

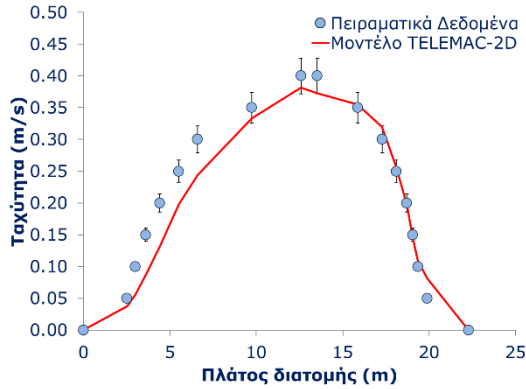
#### 4.3.6 Αποτελέσματα του υδροδυναμικού μοντέλου

Στην **Εικόνα 4.11** φαίνονται οι θέσεις των διατομών ελέγχου. Από την **Εικόνα 4.12** φαίνεται ότι τα προφίλ ταχύτητας ροής παρουσιάζουν ικανοποιητική συμφωνία με τις μετρήσεις των πειραματικών. Να σημειωθεί ότι στις τιμές των πειραματικών μετρήσεων των ταχυτήτων έχει συμπεριληφθεί ποσοστό σφάλματος 7% [75]. Για την σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων και του μοντέλου υπολογίζεται ο δείκτης συμφωνίας IA και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE, που υπολογίζονται από τις εξισώσεις (4.3) και (4.4).

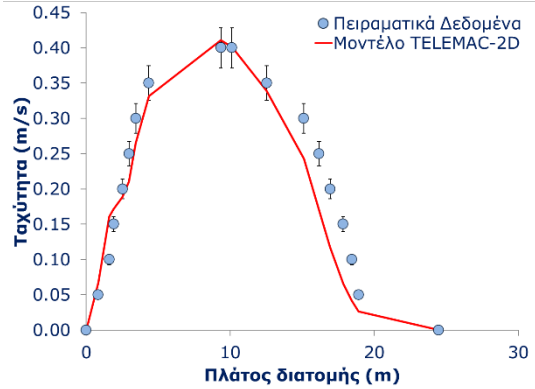


**Εικόνα 4.11** Οι χαρακτηριστικές διατομές που επιλέγονται για τον έλεγχο των προφίλ ταχυτήτων

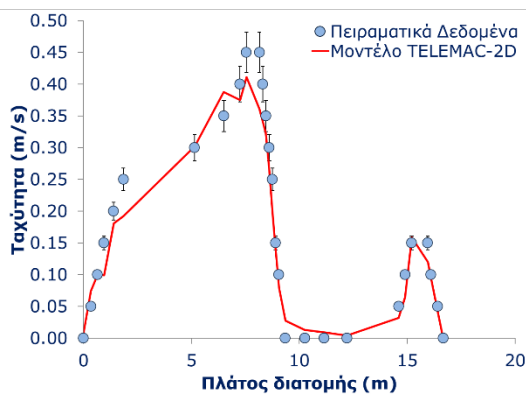
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΠΟΤΑΜΟΥΣ



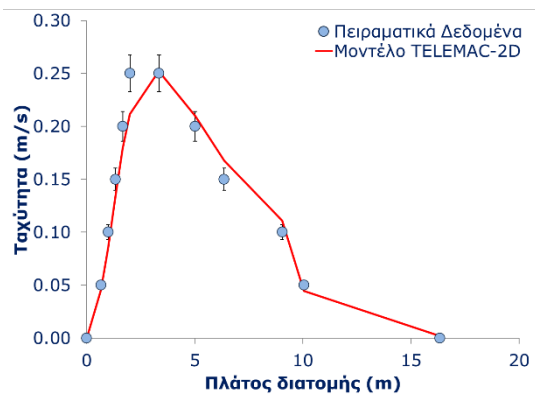
(α)



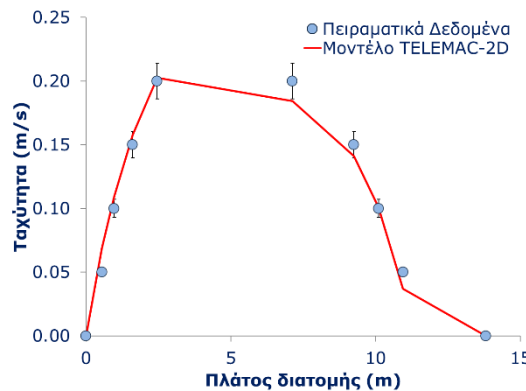
(β)



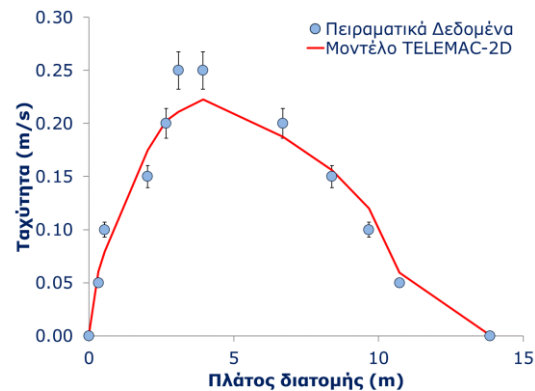
(γ)



(δ)



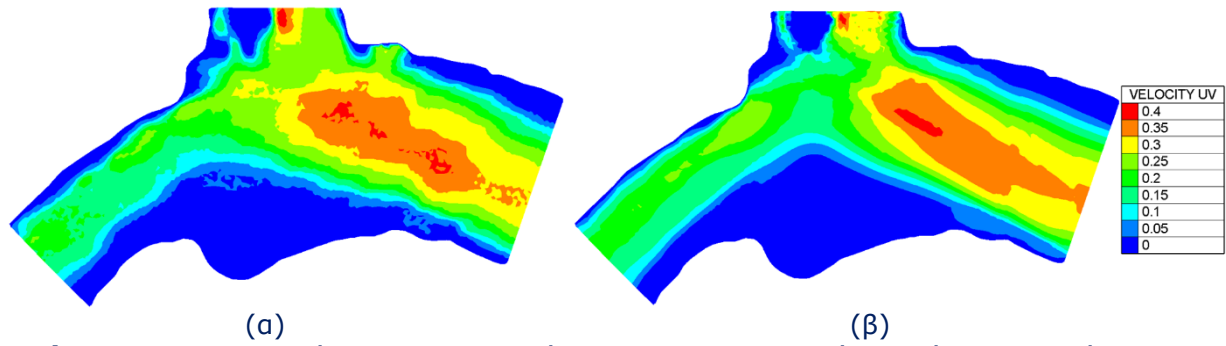
(ε)



(ζ)

**Εικόνα 4.12** Προφίλ ταχυτήτων πειραματικών μετρήσεων και προσομοίωσης στη διατομή (α) 2, (β) 3, (γ) εξόδου ιχθυοκαλλιέργειας, (δ) 4, (ε) 5 και (ζ) διατομή εξόδου ανάντη υπερχειλιστή

Στην **Εικόνα 4.13** παρουσιάζονται οι ισοποσοτικές των μέσων ταχυτήτων ροής από τις πειραματικές μετρήσεις, καθώς και αυτές που υπολογίστηκαν από το μοντέλο.



**Εικόνα 4.13** Ισογραμμές (α) πειραματικών και (β) υπολογισμένων μέσων ταχυτήτων ροής

Ο **Πίνακας 4.5** δείχνει τα αποτελέσματα του IA και RMSE για τις διατομές ελέγχου. Να σημειωθεί ότι στη διατομή εισόδου χρησιμοποιήθηκε το προφίλ ταχύτητας, που εξάγεται από τα δεδομένα μετρήσεων στη διατομή. Άρα αναμένουμε να μην έχει σημαντικές αποκλίσεις.

**Πίνακας 4.5** Σύγκριση των ταχυτήτων ροής που μετρήθηκαν με αυτές που υπολογίστηκαν από το μοντέλο στις διατομές ελέγχου

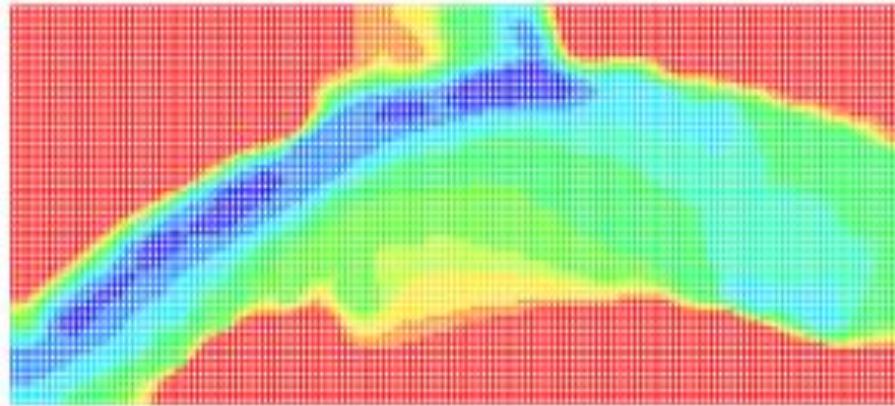
Διατομή ελέγχου	IA	RMSE
Διατομή 2	0.977	0.035
Διατομή 3	0.959	0.047
Διατομή εξόδου ιχθυοκαλλιέργειας	0.985	0.034
Διατομή 4	0.984	0.017
Διατομή 5	0.994	0.011
Διατομή εξόδου προς υπερχειλιστή	0.976	0.020

## 4.4 Υπολογισμοί του μοντέλου συμπεριφοράς ιχθύων

### 4.4.1 Δεδομένα εισόδου του μοντέλου συμπεριφοράς ιχθύων

Με την ολοκλήρωση των υδραυλικών υπολογισμών, εξάγουμε σε μορφή κειμένου τις συντεταγμένες των κόμβων του πλέγματος μαζί με τις τιμές των ταχυτήτων  $U$  και  $V$  του πεδίου ροής. Το ΜΣΙ για ποταμούς μπορεί να υπολογίσει μόνο δισδιάστατες τροχιές και δεν χρειάζεται τη βαθυμετρία. Τα αρχεία πρέπει να είναι σε μορφή κειμένου (text file, txt). Επίσης τα σημεία πρέπει να αντιστοιχούν σε δομημένο πλέγμα. Το υδροδυναμικό μοντέλο TELEMAC-2D χρησιμοποιεί μη δομημένο πλέγμα για την επίλυση, μπορούμε όμως να ζητήσουμε από το μοντέλο, μετά την επίλυση, να εξάγει τα αποτελέσματα σε δομημένο πλέγμα με χρήση γραμμικής παρεμβολής. Τα σημεία εκτός του πεδίου ροής παίρνουν τιμές ταχυτήτων ίσες με μηδέν. Η χρήση της μετατροπής είναι σύμφωνη με τη βιβλιογραφία [30]. Στην **Εικόνα 4.14** παρουσιάζεται το πλέγμα που θα εισαχθεί στο μοντέλο.

Οι ιχθύες που προσομοιώθηκαν είναι νεαροί σολομοί Ατλαντικού (*Salmo Salar Smolt*) με ταχύτητες πορείας, παρατεταμένη και έκρηξης ίσες με 0.40 m/s, 1.20 m/s και 1.90 m/s, αντίστοιχα. Οι τιμές είναι σύμφωνές με τη βιβλιογραφία αλλά και τις πειραματικές μετρήσεις [70].



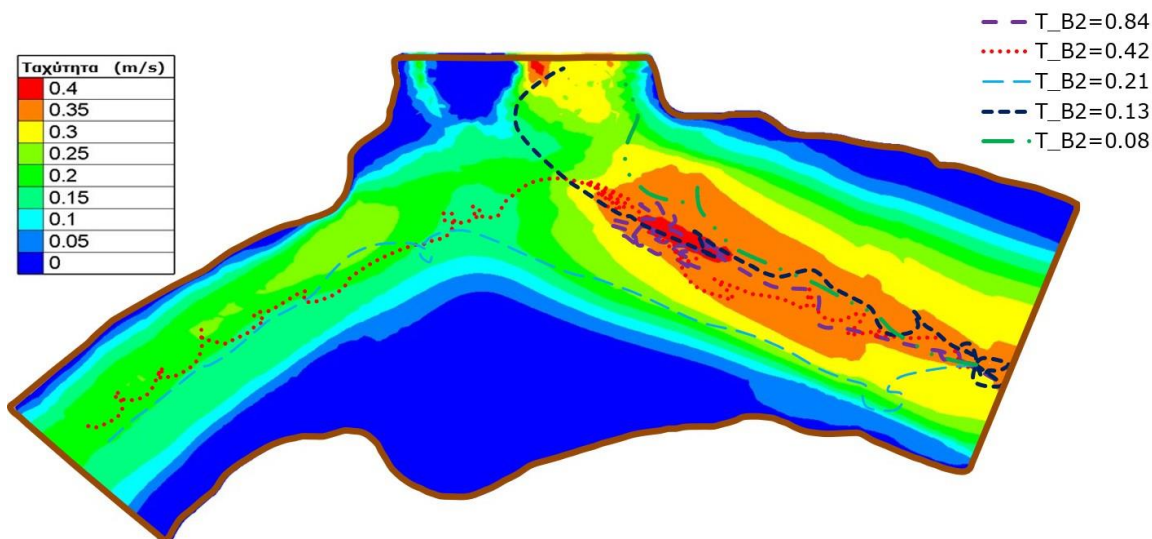
**Εικόνα 4.14** Δομημένο πλέγμα superfine με απόσταση κόμβων 0.5m

#### 4.4.2 Ανάλυση ευαισθησίας

Η μέθοδος που ακολουθήθηκε για την ανάλυση ευαισθησίας είναι η μεταβολή μίας παραμέτρου την φορά (one factor at a time), κατά την οποία αλλάζει η τιμή μίας μόνο παραμέτρου ενώ οι τιμές των υπόλοιπων παραμένουν σταθερές. Μετά την επεξεργασία η παράμετρος επιστρέφει στην αρχική της τιμή και εξετάζεται η επόμενη. Η ίδια διαδικασία γίνεται για κάθε παράμετρο που μελετάται. Επίσης, εξετάζονται διαφορετικές θέσεις εκκίνησης των ιχθύων στις προσομοιώσεις. Σαν αρχικές τιμές χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές του αρχικού κώδικα κίνησης ιχθύων [35], πάνω στο οποίο βασίστηκε το παρόν. Η ανάλυση ευαισθησίας κατέληξε ότι οι πιο σημαντικές παράμετροι είναι το κατώφλι συμπεριφοράς B2 και το κατώφλι συμπεριφοράς B3. Μετά την ανάλυση έγινε βαθμονόμηση του μοντέλου. Στον Πίνακα **4.6** παρουσιάζονται οι τιμές των αρχικών παραμέτρων εισόδου του μοντέλου και αυτών που προέκυψαν μετά την βαθμονόμηση. Στην **Εικόνα 4.15** φαίνεται η μεταβολή της υπολογιζόμενης τροχιάς με τη μεταβολή του κατωφλιού της συμπεριφοράς B2 αποτυπωμένες πάνω στο πεδίο ταχυτήτων ροής

**Πίνακας 4.6** Αρχικές και τελικές τιμές παραμέτρων μετά την ανάλυση ευαισθησίας του ΜΣΙ

Παράμετρος	Αρχικές τιμές	Νέες τιμές
Thres(B2)	0.837	0.40
Thres(B3)	0.89	0.60
CMEM(B2)	0.999	0.70
CMEM(B3)	0.95	0.998
IntrUtil(B2)	0.5	1.00
IntrUTIL(B3)	1.00	1.00
Μήκος Ιχθύος	19.10 cm	19.10 cm
$\Delta t$	2.00 s	2.00 s



**Εικόνα 4.15** Μεταβολή της υπολογιζόμενης τροχιάς με τη μεταβολή του κατωφλιού της συμπεριφοράς B2 αποτυπωμένες πάνω στο πεδίο ταχυτήτων ροής

#### 4.4.3 Αποτελέσματα μοντέλου συμπεριφοράς ιχθύων

Κατά την εφαρμογή του μοντέλου πραγματοποιήθηκαν συνολικά 100 προσομοιώσεις ιχθύων. Ο στόχος του μοντέλου δεν είναι η ακριβής απόδοση των πειραματικών τροχιών, κάτι που δεν είναι απόλυτα εφικτό εξαιτίας των πολλών τυχαίων μεταβλητών του κώδικα, αλλά τροχιές που προσομοιάζουν τις πειραματικές. Το σημαντικότερο όμως είναι το μοντέλο να προβλέπει τα ποσοστά των ιχθύων που κινήθηκαν προς τα κατάντη ή προς τη ιχθυοκαλλιέργεια, και τα ποσοστά των ιχθύων που ακολούθησαν ευθεία τροχιά σε σχέση με αυτά που έκανα κυκλική. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.7.

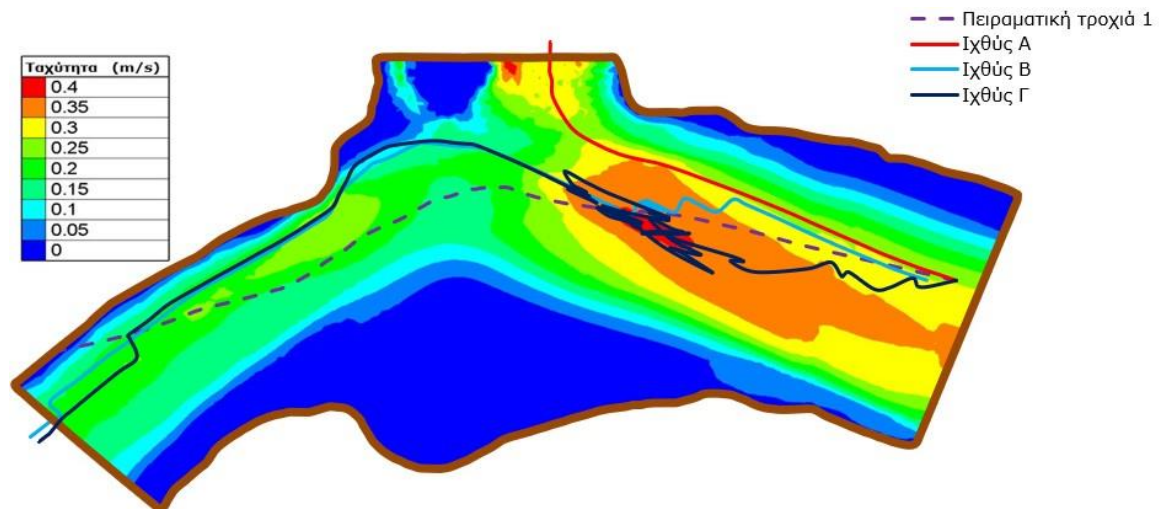
**Πίνακας 4.7** Ποσοστό προτίμησης κίνησης και κυκλικής ή μη συμπεριφοράς

Κίνηση Ιχθύων - Ποσοστό	Έξοδος από κατάντη	Έξοδος προς την ιχθυοκαλλιέργεια	Κυκλική κίνηση στο ποτάμι
Μετρήσεις	67 %	33 %	34 %
Μοντέλο	60 %	40 %	29 %

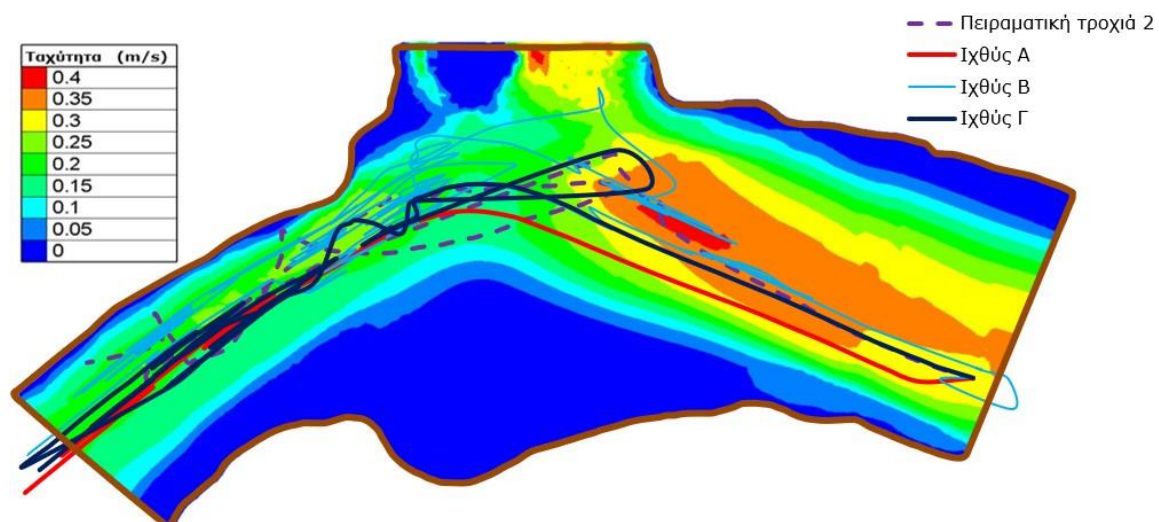
Από τον Πίνακα 4.7 παρατηρούμε ότι στο μοντέλο προσπέρασαν τη ζώνη απόσυρσης του ποταμού το 60% των ιχθύων σε σχέση με το 67% περίπου, που παρατηρήθηκε. Το υπόλοιπο 33% κινήθηκε προς την ιχθυοκαλλιέργεια. Από τους ιχθύες που κινήθηκαν προς τα κατάντη το 29% έκανε κυκλική κίνηση, ενώ το υπόλοιπο προχώρησε ευθεία. Οι παρατηρήσεις έδειξαν ότι το 34% έκανε κυκλική κίνηση, όμως η διαφορά δεν θεωρείται σημαντική.

Στην **Εικόνα 4.16** και στην **Εικόνα 4.17** παρουσιάζονται μια τροχιά που μετρήθηκε (διακεκομμένη γραμμή), με 3 που προσομοιώθηκαν από το ίδιο σημείο εκκίνησης. Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση της πειραματικής τροχιάς 1 (**Εικόνα 4.16**), δυο από τις τρεις προσομοιώσεις πέτυχαν την κατεύθυνση του ιχθύος και με τροχιά παραπλήσια της μετρούμενης. Στην **Εικόνα 4.17** όλες οι τροχιές ακολουθούν παραπλήσιες τροχιές και όλες κάνουν κυκλική κίνηση (milling) στο σημείο διαχωρισμού της ροής προς την έξοδο του ιχθυοτροφείου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΠΟΤΑΜΟΥΣ



**Εικόνα 4.16** Πειραματική τροχιά 1 και τρεις χαρακτηριστικές προσομοιωμένες τροχιές του ΜΣΙ πάνω στο προσομοιωμένο πεδίο ταχυτήτων ροής



**Εικόνα 4.17** Πειραματική τροχιά 2 και τρεις χαρακτηριστικές προσομοιωμένες τροχιές του ΜΣΙ πάνω στο προσομοιωμένο πεδίο ταχυτήτων ροής

### 4.5 Δείκτες καταλληλότητας ενδιαίτηματος ιχθύος

#### 4.5.1 Εισαγωγή

Οι δείκτες καταλληλότητας ενδιαίτηματος (habitat suitability index, HSI) στοχεύουν στο να παρέχουν πληροφορίες για τις ιδανικές συνθήκες περιβάλλοντος που είναι απαραίτητες για το κάθε είδος ιχθύων. Οι δείκτες δίνουν πληροφορίες για το ιδανικό βάθος και ταχύτητα ροής καθώς και για το υπόστρωμα του ποταμού ή της ΔΙ. Ο HSI παίρνει τιμές από 0 έως 1, με την τιμή 1 να είναι η βέλτιστη. Η εφαρμογή των HSI στην περιοχή μελέτης έχει σκοπό την διερεύνηση της καταλληλότητας της περιοχής για το είδος του Ατλαντικού Σολομού και κυρίως για την νεαρή ηλικία που βρίσκονται οι μελετώμενοι ιχθύες. Στη διεθνή βιβλιογραφία δεν παρέχονται αρκετά δεδομένα για το μέγεθος smolt του Ατλαντικού Σολομού, ώστε να δημιουργηθούν οι αντίστοιχες

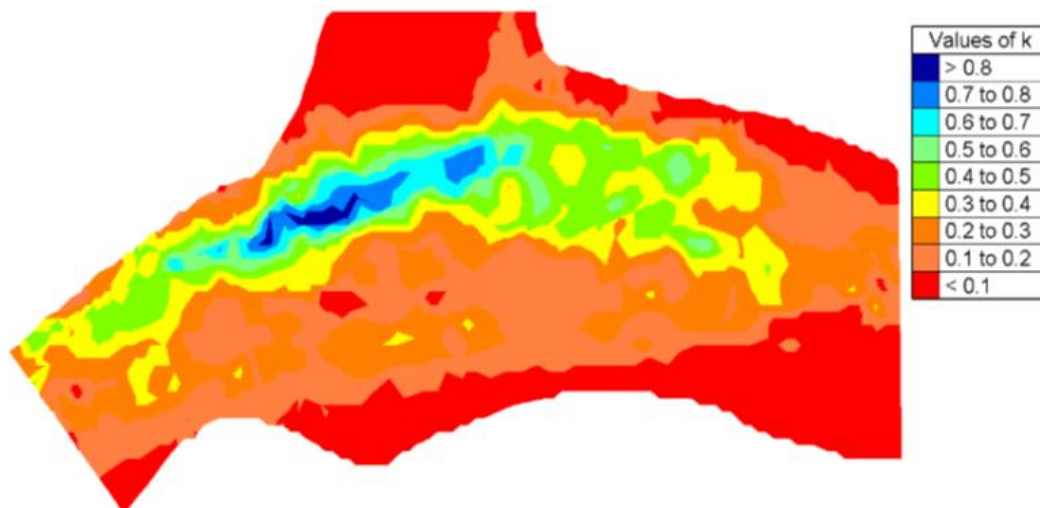
καμπύλες καταλληλότητας. Υπάρχουν όμως οι καμπύλες καταλληλότητας για το στάδιο του μικρού (*Parr*) και του ενήλικου (*Adult*) Σολομού, ώστε να μπορούμε να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα του μοντέλου μας με αυτές.

#### 4.5.2 Χρήση του ολοκληρωμένου μοντέλου για τον υπολογισμό του δείκτη καταλληλότητας ενδιαιτήματος

Το ΟΜΜ μας δίνει τη δυνατότητα να αξιολογήσουμε τις πειραματικές τροχιές σε συνάρτηση με τα αποτελέσματα του υδροδυναμικού μοντέλου και να εξάγουμε για κάθε κόμβο του υπολογιστικού πλέγματος, την επισκεψιμότητα του από τους ιχθύες. Συνδυάζοντας αυτή την πληροφορία με το βάθος και την ταχύτητα ροής και κατηγοριοποιώντας τα αποτελέσματα σε κλάσεις, μπορούμε να πάρουμε μια αρχική εκτίμηση των καμπυλών καταλληλότητας για τους νεαρούς σολομούς. Το υπόστρωμα μπορεί επίσης να συνεκτιμηθεί με χρήση του συντελεστή τραχύτητας, όμως με προσοχή διότι δεν έχουμε αρκετές πληροφορίες για το τον ποταμό, ώστε να εξάγουμε ασφαλή συμπεράσματα.

Ο κώδικας του μοντέλου, που δομήθηκε στα πλαίσια της παρούσας ΔΔ, συγκρίνει τις θέσεις των σημείων που αποτελούν τις πειραματικές τροχιές με τους κόμβους του πλέγματος και υπολογίζει την ευκλείδεια απόστασή τους. Αν η απόσταση αυτή βρεθεί μικρότερη από έναν μέγεθος, που ορίζει ο χρήστης (εδώ 50cm), τότε ο κώδικας αυξάνει μια μεταβλητή  $k$ , που δείχνει την επισκεψιμότητα του κόμβου. Ο μετρητής θα αυξηθεί μόνο μία φορά για κάθε τροχιά. Η διαδικασία αυτή γίνεται για όλες τις πειραματικές τροχιές. Αφού εξεταστούν όλες οι τροχιές γίνεται κανονικοποίηση του  $k$  ως προς τη μέγιστη τιμή του. Τα δεδομένα χωρίζονται σε κλάσεις (η ταχύτητα ανά 0.05m/s μέχρι 0.45m/s και το βάθος νερού ανά 0.2m μέχρι 1.8m) και υπολογίζεται για κάθε κλάση το άθροισμα των μετρητών  $k$ . Ο υπολογισμός του HSI δίνεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 6.

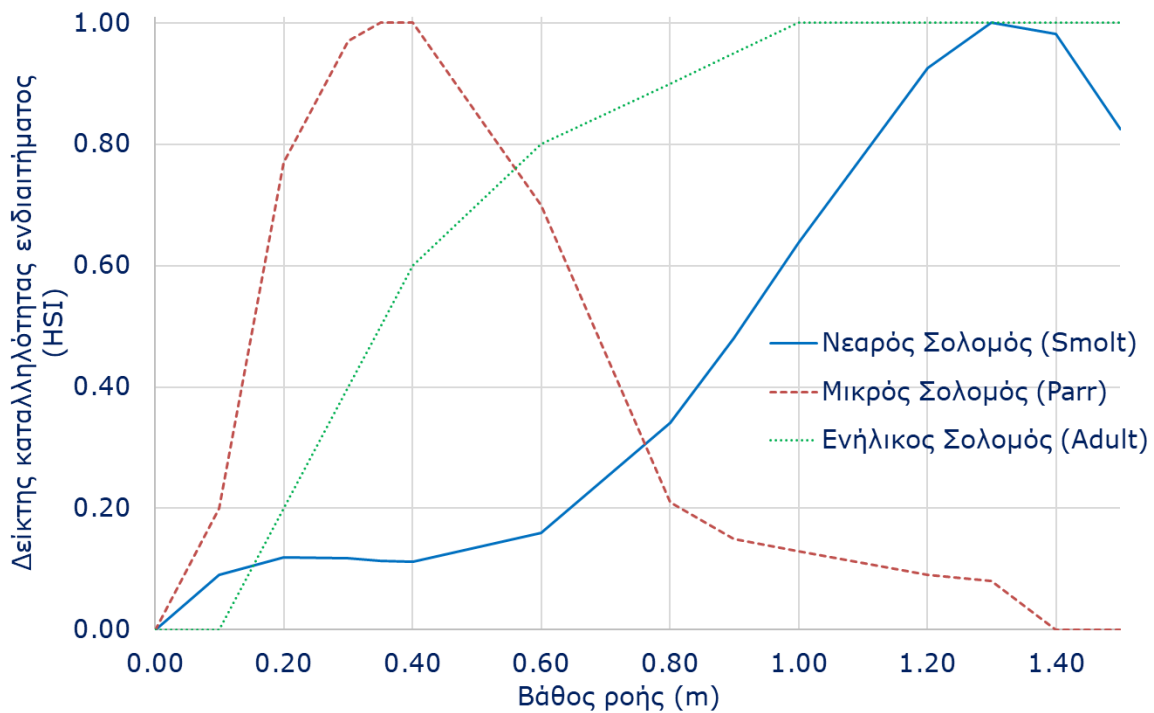
Οι προτιμήσεις ενδιαιτήματος του Σολομού για το στάδιο ηλικίας smolt προσδιορίστηκαν με τη μέθοδο των καμπυλών καταλληλότητας ενδιαιτήματος του Bovee [76] και συγκεκριμένα με τον 3<sup>ο</sup> τύπο κατηγορίας (type III habitat preference curves). Οι καμπύλες καταλληλότητας ενδιαιτήματος σύμφωνα με τον Bovee προέρχονται από δεδομένα παρατηρήσεων της χρήσης του ενδιαιτήματος (τα σημεία όπου παρατηρούνται οι ιχθύες) αλλά διαιρεμένα από την διαθεσιμότητα του ενδιαιτήματος (συνυπολογίζονται τα σημεία όπου δεν παρατηρούνται ιχθύες). Στην **Εικόνα 4.18** παρουσιάζεται η διακύμανση του μετρητή  $k$  στο εξεταζόμενο τμήμα του ποταμού.





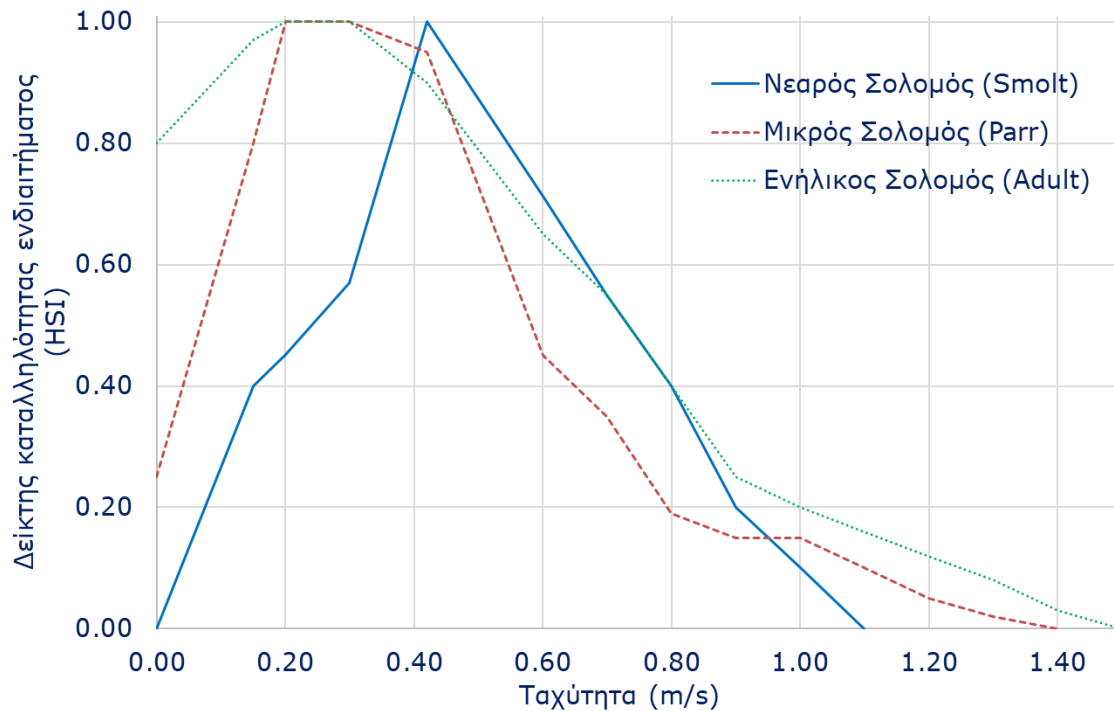
**Εικόνα 4.18** Διακύμανση των τιμών του μετρητή  $k$ . Υψηλότερες τιμές υποδεικνύουν περισσότερες επισκέψεις στα σημεία αυτά από τους μελετώμενους ιχθύες

Στις Εικόνες **4.19** και **4.20** φαίνονται οι καμπύλες καταλληλότητας για τον μικρό και τον ενήλικο Σολομό, όπως προκύπτουν από τη βιβλιογραφία [77], [78], καθώς και οι υπολογιζόμενες καμπύλες από το ΟΜΜ, όπως υπολογίστηκαν σε μεταπτυχιακή εργασία του εργαστηρίου εφαρμοσμένης υδραυλικής [79] με τη χρήση των πειραματικών τροχιών των Svendsen et al. [70].



**Εικόνα 4.19** Καμπύλες καταλληλότητας βάθους ροής

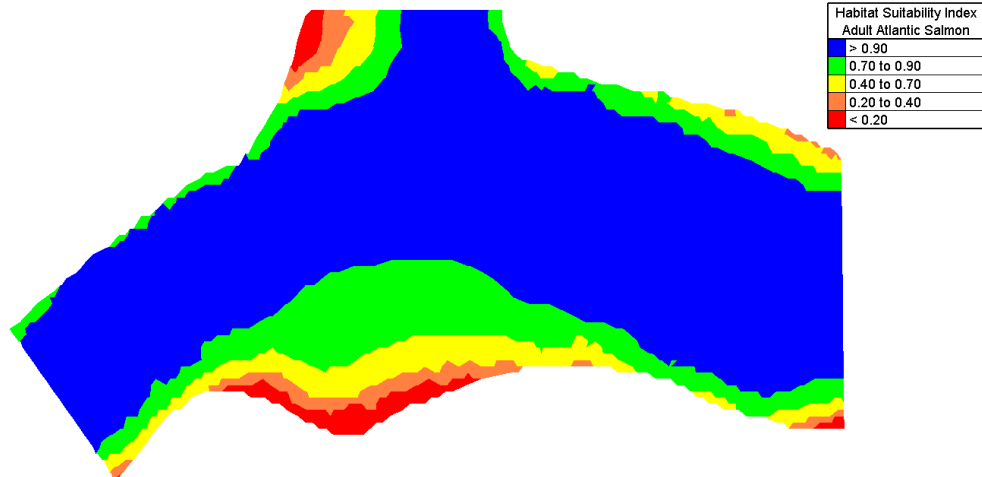
#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΠΟΤΑΜΟΥΣ



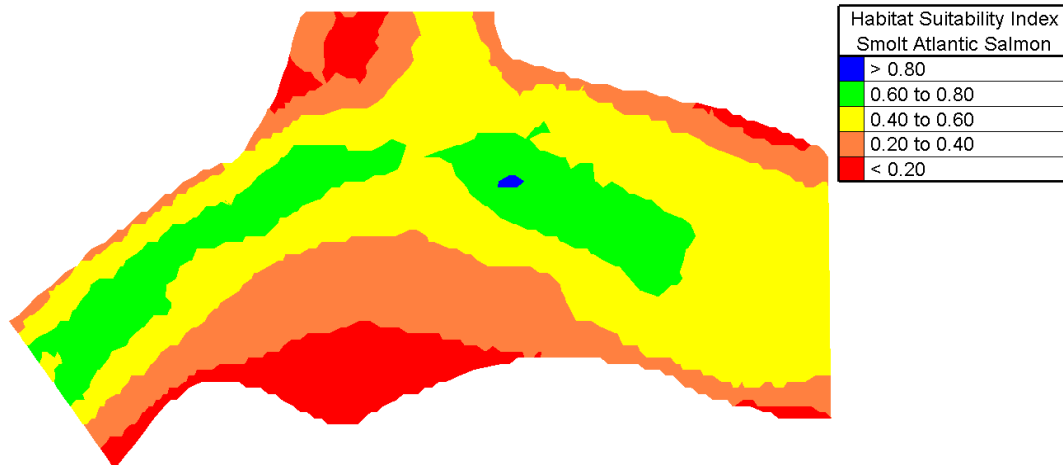
**Εικόνα 4.20** Καμπύλες καταλληλότητας ταχύτητας ροής

Από τα παραπάνω υπολογίζεται ο δείκτης καταλληλότητας ενδιαιτήματος για το τμήμα του ποταμού. Στις Εικόνες **4.21** και **4.23** παρουσιάζονται οι δείκτες καταλληλότητας για τον ενήλικο και μικρό Σολομό αντίστοιχα, ενώ στην **Εικόνα 4.22** για τον νεαρό σολομό, όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο. Το μπλε και το πράσινο χρώμα υποδεικνύει τις καλύτερες συνθήκες τις οποίες προτιμά ο Ατλαντικός Σολομός ανάλογα με το στάδιο της ηλικίας που βρίσκεται. Παρατηρούμε ότι ο HSI που προκύπτει για το εξεταζόμενο τμήμα, είναι ενδιάμεσα από τους δυο δείκτες της βιβλιογραφίας. Να σημειωθεί όμως ότι τα δεδομένα είναι ελλιπή και ενδέχεται να υπάρχουν αποκλίσεις των πραγματικών τιμών από τα παραγόμενα αποτελέσματα. Ο στόχος των υπολογισμών είναι να καταδείξει τη δυνατότητα υπολογισμών του OMM και όχι να παραχθούν αποτελέσματα προς αξιοποίηση.

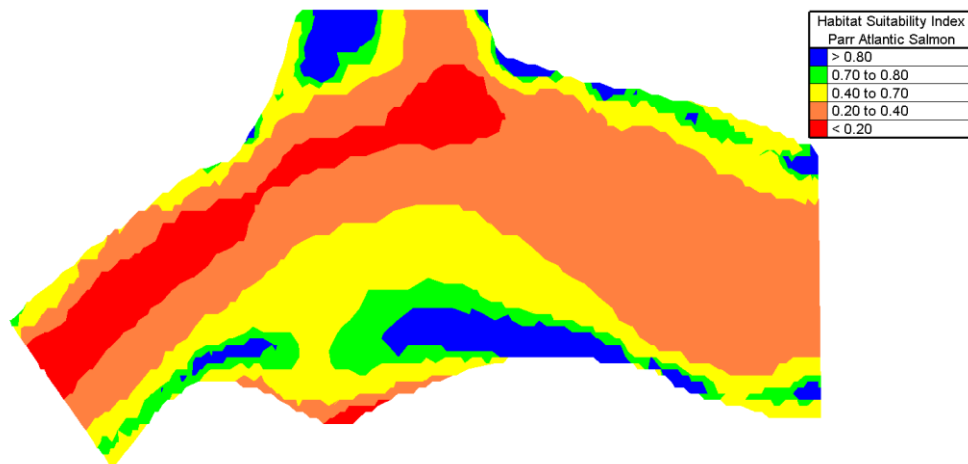
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΠΟΤΑΜΟΥΣ



**Εικόνα 4.21** Η κατανομή του δείκτη καταλληλότητας για τον ενήλικο Σολομό



**Εικόνα 4.22** Κατανομή δείκτη καταλληλότητας για τον νεαρό Σολομό (smolt)



**Εικόνα 4.23** Η κατανομή του δείκτη καταλληλότητας για τον μικρό Σολομό

## 5 ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΔΙΟΔΟΥΣ ΙΧΘΥΩΝ

### 5.1 Εισαγωγή

Για την βαθμονόμηση και επιβεβαίωση του ολοκληρωμένου μαθηματικού μοντέλου σε ΔΙ ήταν απαραίτητο να επιλεγεί μια πειραματική εφαρμογή, για την οποία θα υπάρχουν (α) δεδομένα για το υδροδυναμικό πεδίο, όπως η βαθυμετρία, οι ταχύτητες ροής και τα χαρακτηριστικά της τύρβης, και (β) δεδομένα για την κίνηση των ιχθύων μέσα στη ΔΙ. Στην βιβλιογραφία δεν βρέθηκε μια πειραματική εφαρμογή που να ικανοποιεί και τα δυο κριτήρια. Βρέθηκε όμως μια εφαρμογή σε ΔΙ με δεδομένα για την ανάλυση του υδροδυναμικού πεδίου και μια περίπτωση με προσομοιωμένο υδροδυναμικό πεδίο, αλλά με πειραματικά δεδομένα για την κίνηση των ιχθύων εντός της ΔΙ. Ονομάσαμε τις περιπτώσεις πρώτη ΔΙ και δεύτερη ΔΙ, αντίστοιχα.

### 5.2 Περιγραφή της περίπτωσης εφαρμογής του υδροδυναμικού μοντέλου στην πρώτη δίοδο ιχθύων

#### 5.2.1 Εισαγωγή

Τα μοντέλα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) επιτρέπουν τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού μιας ΔΙ μέσω της εκτέλεσης διαφόρων τροποποιήσεων/αλλαγών στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της τυπικής δεξαμενής τους. Για να θεωρηθούν αξιόπιστα ωστόσο, τα αποτελέσματα ενός μοντέλου CFD αυτό πρέπει να επαληθεύονται. Στις περισσότερες από τις υπάρχουσες εργασίες μαθηματικής προσομοίωσης για ΔΙ, υιοθετείται συνήθως η απλουστευμένη παραδοχή ότι η ροή είναι δισδιάστατη, γεγονός που επιτρέπει τη χρήση ενός δισδιάστατου μοντέλου που συνήθως χρησιμοποιεί τις εξισώσεις ρηχών υδάτων ή Saint-Venant (SWE) σε ένα τμήμα μόνο της ΔΙ, που συνήθως αποτελείται από 3 μέχρι 5 δεξαμενές.

Από τα παραπάνω δημιουργούνται τα παρακάτω ερευνητικά ερωτήματα που προσπαθούμε να απαντήσουμε με τη παρούσα εφαρμογή.

- (1) Απαιτείται ένα τρισδιάστατο μοντέλο CFD, το οποίο χρησιμοποιεί τη μέθοδο Volume of Fluid (VOF) για τον προσδιορισμό της επιφάνειας ροής;
- (2) Είναι το μοντέλο τύρβης RNG KE κατάλληλο για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών της τύρβης και την αποτελεσματική προσομοίωση της ροής σε ΔΙ;
- (3) Είναι ένα τμήμα μιας ΔΙ που αποτελείται από 3-5 δεξαμενές επαρκές για την αποτελεσματική προσομοίωση της ροής σε ΔΙ;

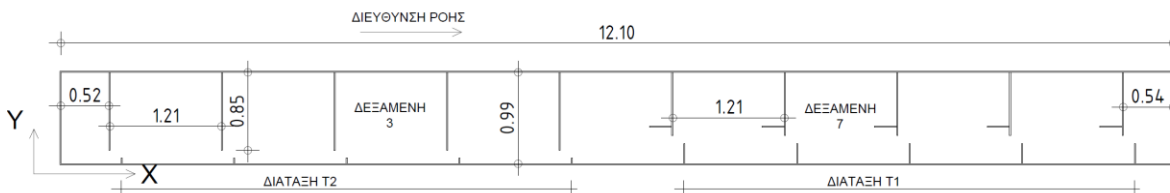
Για να απαντηθούν τα ερωτήματα αυτά, προσομοιώθηκε η ροή πειραματικής ΔΙ σε φυσικό μέγεθος από την εργασία των Puertas et al. [18] και συγκρίθηκαν οι τρισδιάστατοι υπολογισμοί με (1) τις μέσες μετρήσεις της ροής και της τύρβης, (2) τους δισδιάστατους υπολογισμούς με χρήση των μοντέλων τύρβης Standard k-epsilon (SKE), Algebraic Stress Model (ASM), Mixing Length (ML) [58] και τους τρισδιάστατους υπολογισμούς με το μοντέλο Large Eddy Simulation (LES) και (3) δεδομένα και παρατηρήσεις άλλων ερευνητών. Οι υπολογισμοί με το μοντέλο LES έγιναν στα πλαίσια της παρούσας ΔΔ.

#### 5.2.2 Γεωμετρία της πειραματικής δόδου ιχθύων

Οι Puertas et al. [18] χρησιμοποίησαν μια πειραματική ΔΙ Κάθετου Ανοίγματος (ΔΙΚΑ) που παρουσιάζεται στην **Εικόνα 5.1**. Η ΔΙΚΑ αποτελείται από 11 δεξαμενές δύο

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΔΙΟΔΟΥΣ ΙΧΘΥΩΝ

διατάξεων σχεδιασμού T1 και T2, οι οποίες μοιάζουν με τις διατάξεις D16 και D6, αντίστοιχα, που προτείνονται από την πειραματική εργασία των Rajaratnam et al. [8], [9]. Η πρώτη δεξαμενή της ΔΙΚΑ είναι η δεξαμενή εισόδου, στη συνέχεια υπάρχουν 4 δεξαμενές διάταξης T2. Αυτές ακολουθούνται από μια ενδιάμεση δεξαμενή, 4 δεξαμενές διάταξης T1 και τέλος μια δεξαμενή εξόδου. Όλα τα πετάσματα ήταν κατασκευασμένα από πλεξιγκλάς για την παρατήρηση των μετρήσεων της ταχύτητας ροής και του βάθους ροής, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στις δεξαμενές 3 και 7 (βλ. **Εικόνα 5.1**), με ένα ταχύμετρο ADV και έναν αισθητήρα βάθους με βάση την αγωγιμότητα, αντίστοιχα. Οι μετρήσεις ταχύτητας πραγματοποιήθηκαν σε επίπεδα παράλληλα προς τον πυθμένα με απόσταση 10 cm μεταξύ τους, ξεκινώντας από τα 5 cm έως όσο το δυνατόν πλησιέστερα στην επιφάνεια του νερού.

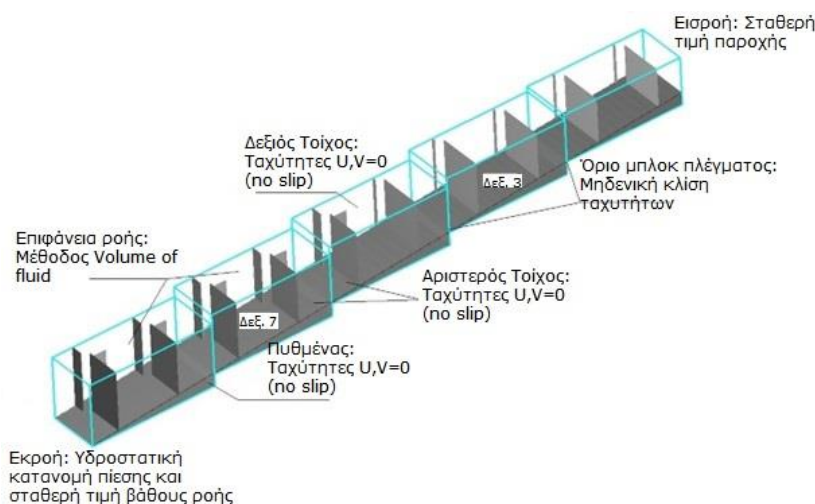


**Εικόνα 5.1** Πειραματική διάταξη των Puertas et al. [18] σε κάτοψη με διαστάσεις

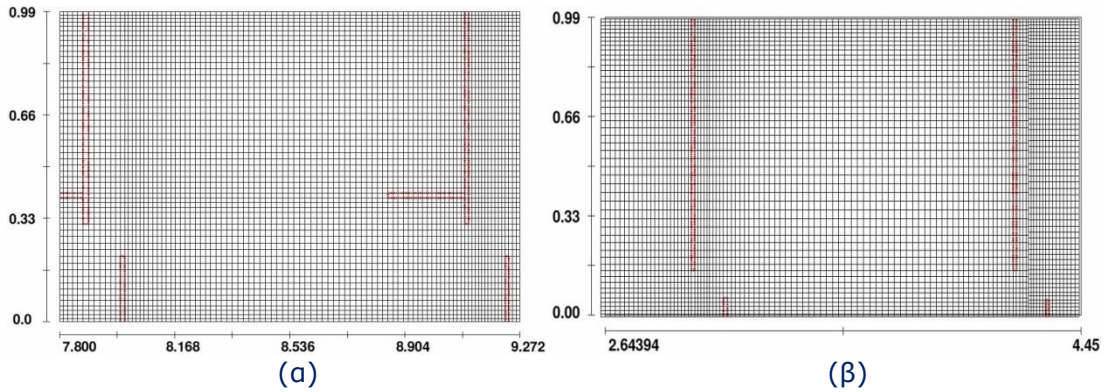
### 5.3 Υπολογισμοί υδροδυναμικού μοντέλου της πρώτης διόδου ιχθύος

#### 5.3.1 Υπολογιστικό πλέγμα

Το περίγραμμα του υπολογιστικού πεδίου, που φαίνεται στην **Εικόνα 5.2**, διαμορφώθηκε σε 5 μπλοκ για να προσεγγίσει αποτελεσματικά την κλίση του πυθμένα και να μειωθούν τα μη ενεργά κελιά (κελιά που δεν συμμετέχουν στον υπολογισμό της ροής). Το υπολογιστικό πλέγμα που αποτελούνταν από περίπου 3000000 κελιά ήταν πιο πυκνό στα σημεία ενδιαφέροντος και κοντά στα πετάσματα και τους τοίχους, με διαστάσεις που κυμαίνονταν από 0.01 έως 0.13m. Αυτό το μέγεθος πλέγματος επιλέχθηκε μετά από μια σειρά προκαταρκτικών υπολογισμών για να διασφαλιστούν αποτελέσματα ανεξάρτητα από το πλέγμα. Στην **Εικόνα 5.3** παρουσιάζεται το υπολογιστικό πλέγμα των δεξαμενών 3 και 7.



**Εικόνα 5.2** Το υπολογιστικό μοντέλο στο οποίο αναγράφονται οι οριακές συνθήκες



**Εικόνα 5.3** Υπολογιστικό πλέγμα στη δεξαμενή της διάταξης (α) T1 και (β) T2

### 5.3.2 Οριακές συνθήκες

Ορίσαμε οριακές συνθήκες στα όρια του πεδίου υπολογισμού, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 5.2**. Στην ανάντη δεξαμενή χρησιμοποιήθηκε σταθερή παροχή με καθορισμένη στάθμη ροής, στην έξοδο της κατόντη δεξαμενής καθορίστηκαν η πίεση και το βάθος νερού, ενώ ο πυθμένας και τα πλευρικά τοιχώματα της δεξαμενής αντιμετωπίστηκαν ως τοιχώματα χωρίς ολίσθηση (no-slip).

### 5.3.3 Σενάρια υπολογισμών

Για να διερευνήσουμε την επίδραση του σχεδιασμού της δεξαμενής (T1 ή T2), της παροχής (Q) και της κλίσης του πυθμένα της ΔΙΚΑ (S), πραγματοποιήσαμε υπολογισμούς για 7 σενάρια με χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στον Πίνακα **5.1**. Τα χαρακτηριστικά αυτά περιλαμβάνουν το μήκος της δεξαμενής (L), το πλάτος της δεξαμενής (W), το πλάτος του ανοίγματος ( $b_0$ ), την αδιάστατη παροχή ( $Q^*$ ), την ταχύτητα αναφοράς ( $V_{ref}$ ), την κινητική ενέργεια αναφοράς ( $k_{ref}$ ). Οι τρεις τελευταίες ορίζονται ως εξής:

$$Q^* = \frac{Q}{\sqrt{gSb_0^5}} \quad (5.1)$$

$$V_{ref} = \sqrt{2gSL} \quad (5.2)$$

$$k_{ref} = 0.5V_{ref}^2 \quad (5.3)$$

**Πίνακας 5.1** Σενάρια υπολογισμών

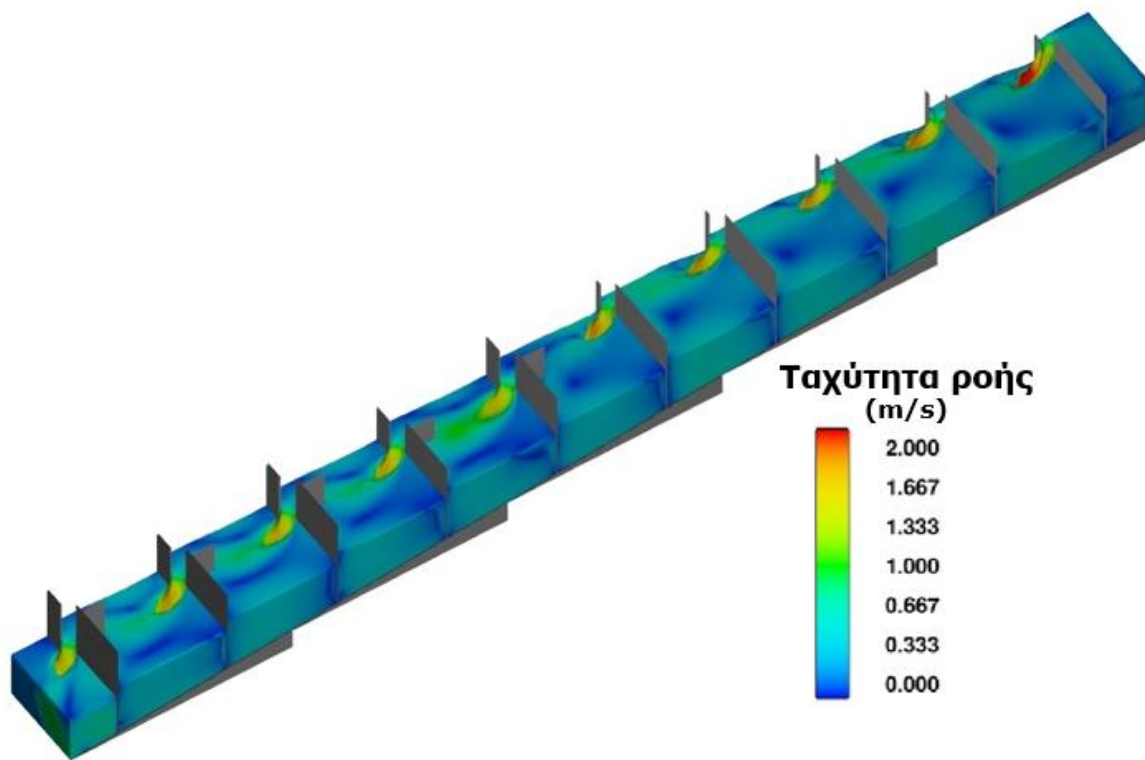
Σενάριο	Διάταξη	S (%)	W (m)	L (m)	$b_0$ (m)	Q (L/s)	$Q^*$ (L/s)	$V_{ref}$ (m/s)	$k_{ref}$ (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )
<b>T11</b>	T1	5.7	0.99	1.21	0.16	65	8.4	1.16	0.68
<b>T12</b>	T1	10.0	0.99	1.21	0.16	65	6.3	1.54	1.19
<b>T13</b>	T1	10.0	0.99	1.21	0.16	105	10.3	1.54	1.19
<b>T21</b>	T2	5.7	0.99	1.21	0.15	65	9.8	1.16	0.68
<b>T22</b>	T2	10.0	0.99	1.21	0.15	65	7.5	1.54	1.19
<b>T23</b>	T2	10.0	0.99	1.21	0.15	105	12.1	1.54	1.19

Σε όλα τα σενάρια υπολογισμών χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο τύρβης RNG KE. Για το σενάριο T12 όμως έγινε επίλυση και με το μοντέλο τύρβης LES, που αναμένεται να υπολογίζει καλύτερα τα τυρβώδη χαρακτηριστικά της ροής. Ο σκοπός της χρήσης του LES είναι να συγκριθεί με το RNG KE και να συνεκτιμηθεί η χρήση του στο σχεδιασμό των ΔΙ.

### 5.3.4 Αποτελέσματα υπολογισμών

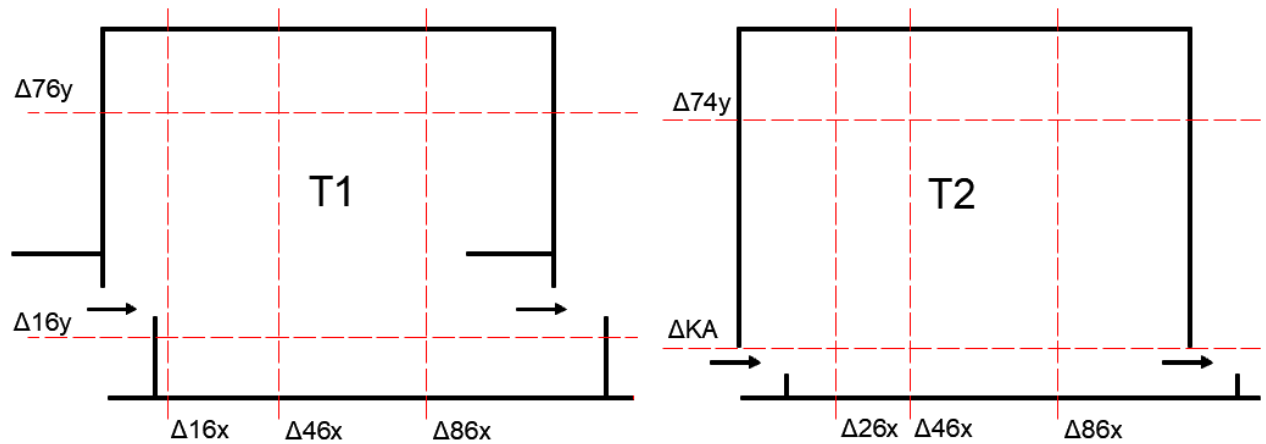
Στην **Εικόνα 5.4** παρουσιάζεται η τρισδιάστατη ΔΙ για το σενάριο T13. Στην **Εικόνα 5.5** φαίνονται οι θέσεις των διατομών ελέγχου σε κάθε διάταξη. Στις διατομές αυτές υπάρχουν πειραματικές μετρήσεις από τους Puertas et al. [18]. Στον πίνακα **5.2**, τα χαρακτηριστικά της ροής στη ΔΙ συγκρίνονται με τις μετρούμενες τιμές, συμπεριλαμβανομένων των ταχυτήτων της φλέβας (μέγιστη  $V_{b,max}$  και μέση  $V_b$ ), των βαθών ροής ( $\alpha$ ) στη σχισμή  $Y_b$ , ( $\beta$ ) στη δεξαμενή (μέση  $Y_m$ , μέγιστη  $Y_{max}$ , ελάχιστη  $Y_{min}$  και στη μέση της δεξαμενής  $Y_0$ ), ( $\gamma$ ) του συντελεστή εκροής ( $C_d$ ) και της διάχυσης ενέργειας στη λίμνη ανά μονάδα όγκου ( $E$ ). Οι δύο τελευταίες υπολογίζονται ως εξής:

$$C_d = \frac{Q}{bY_bV_b} \quad (5.4) \quad \text{και} \quad E = \frac{\rho g Q S_0}{W Y_0} \quad (5.5)$$



**Εικόνα 5.4** Τρισδιάστατη απεικόνιση της ΔΙ με ισογραμμές μέσης ταχύτητας ροής

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΔΙΟΔΟΥΣ ΙΧΘΥΩΝ



**Εικόνα 5.5** Διατομές ελέγχου στις διατάξεις T1 και T2

**Πίνακας 5.2** Υπολογιζόμενα και μετρούμενα (παρένθεση) χαρακτηριστικά της ροής

	<b>T11</b>	<b>T12</b>	<b>T13</b>	<b>T21</b>	<b>T22</b>	<b>T23</b>
$Y_{max}$ (m)	0.55 (0.54)	0.47 (0.47)	0.65 (0.69)	0.57 (0.58)	0.47 (0.46)	0.67 (0.66)
$Y_{min}$ (m)	0.46 (0.45)	0.29 (0.29)	0.49 (0.51)	0.45 (0.48)	0.27 (0.28)	0.48 (0.48)
$Y_o$ (m)	0.50 (0.49)	0.37 (0.37)	0.57 (0.58)	0.51 (0.52)	0.38 (0.37)	0.58 (0.58)
$Y_m$ (m)	0.51 (0.50)	0.38 (0.38)	0.57 (0.60)	0.51 (0.53)	0.38 (0.37)	0.58 (0.58)
$Y_b$ (m)	0.50 (0.53)	0.39 (0.41)	0.59 (0.62)	0.52 (0.54)	0.39 (0.40)	0.59 (0.62)
$V_b$ (m/s)	0.93 (0.89)	1.08 (1.19)	1.13 (1.05)	1.02 (1.09)	1.16 (1.27)	1.30 (1.30)
$V_{b,max}$ (m/s)	1.06 (-)	1.19 (-)	1.27 (-)	1.30 (-)	1.44 (-)	1.56 (-)
$C_d$ (-)	0.86 (0.85)	0.95 (0.83)	0.97 (1.01)	0.81 (0.72)	0.95 (0.85)	0.92 (0.87)
Max $k/k_{ref}$ (%)	11	12	10	11	9	12
$\epsilon_{max}$ (%)	220	340	370	340	540	680
$E$ (W/m <sup>3</sup> )	72 (74)	171 (175)	184 (179)	71 (69)	169 (173)	181 (181)
Όγκος δεξαμενής σε m <sup>3</sup> <0.3 m/s (%)	74	60	64	59	52	48

**5.3.5 Υπολογισμός πεδίου ταχυτήτων ροής**

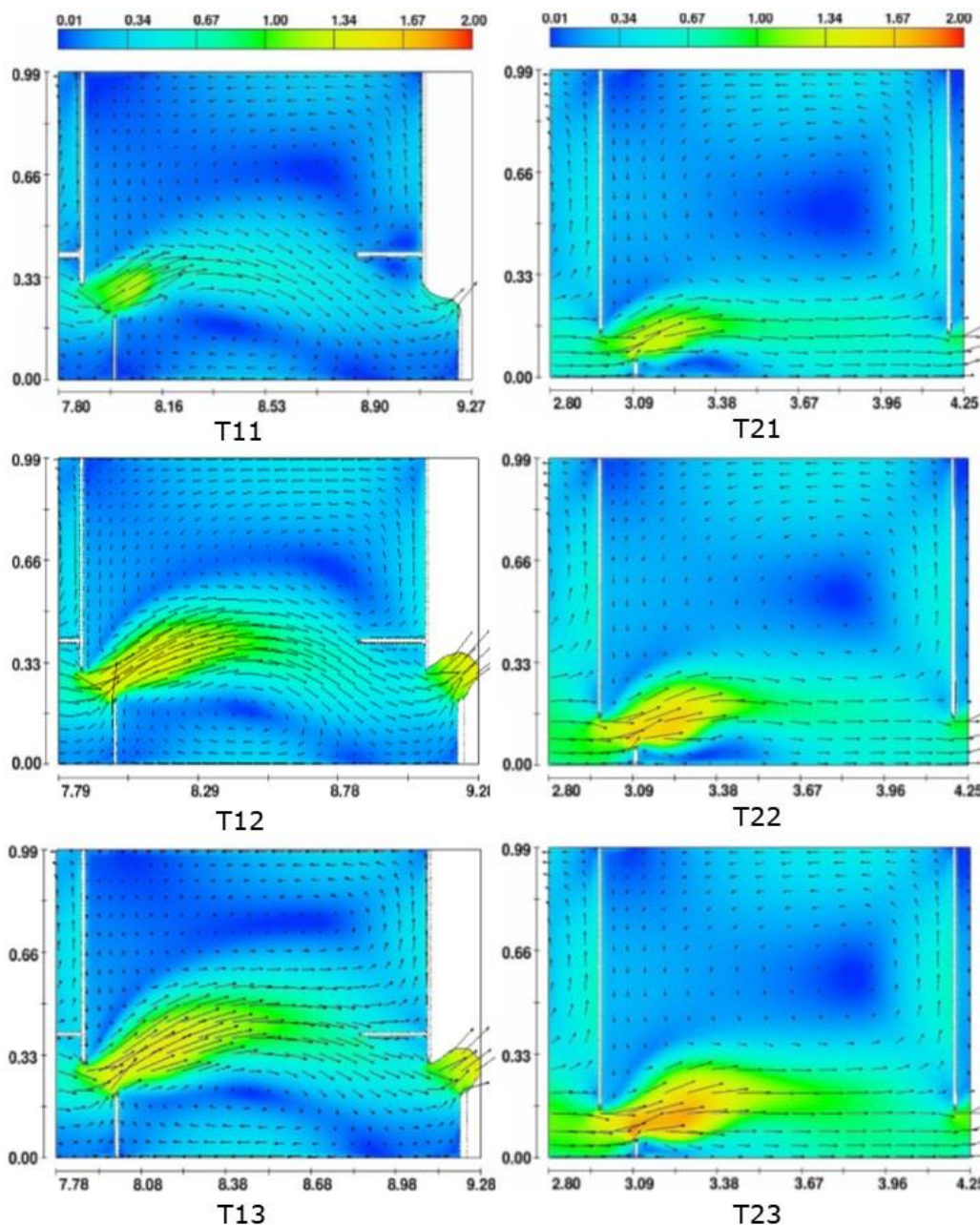
Στην **Εικόνα 5.6** παρουσιάζονται τα υπολογισμένα διανύσματα ταχυτήτων ροής σε οριζόντια επίπεδα (xy), για τις 2 διατάξεις T1 και T2, και στην **Εικόνα 5.7** σε



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΔΙΟΔΟΥΣ ΙΧΘΥΩΝ

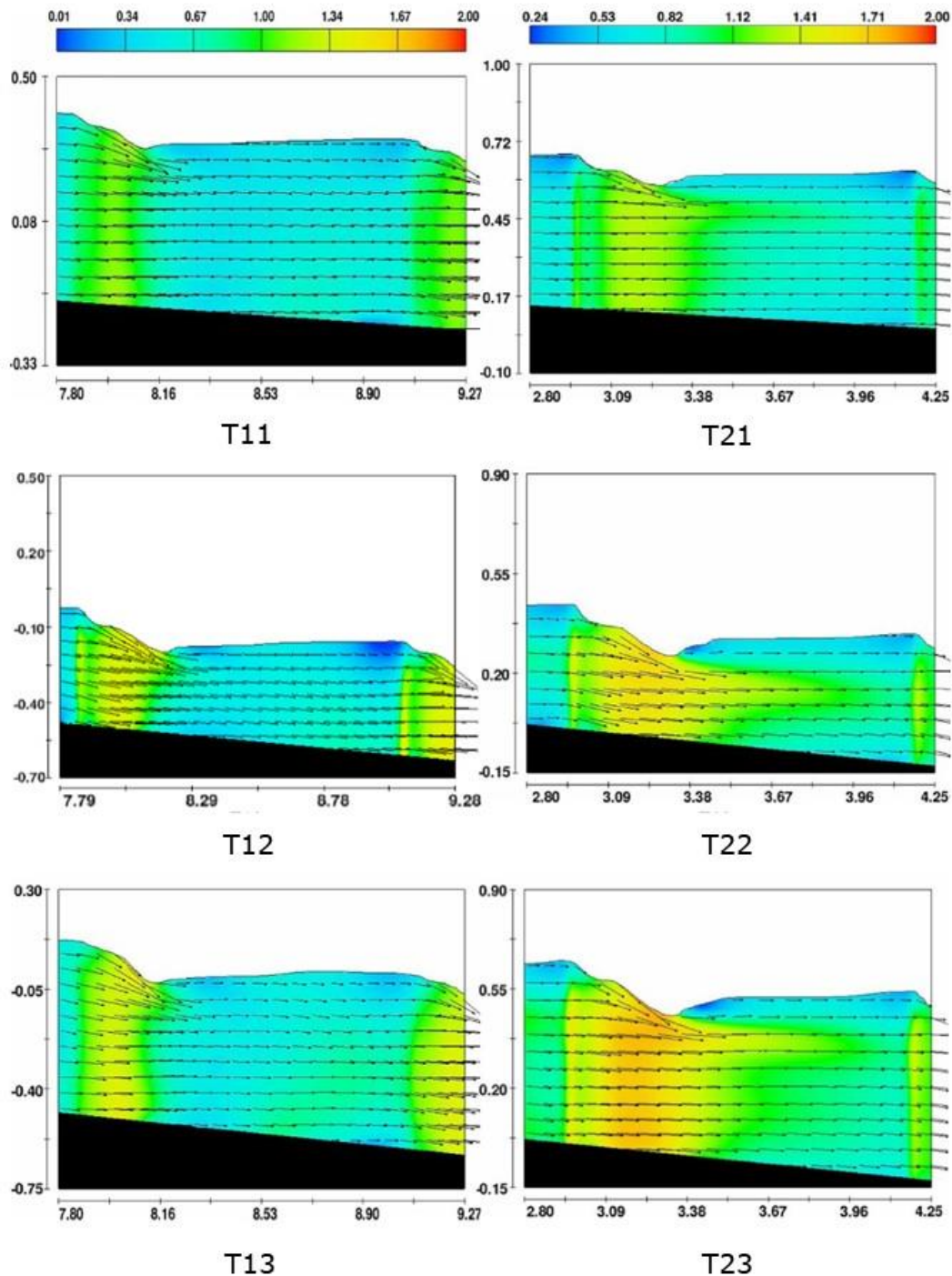
κατακόρυφα επίπεδα (xz) στο κάθετο άνοιγμα. Στην **Εικόνα 5.8** παρουσιάζονται οι γραμμές ροής σε ολόκληρο το κανάλι σε οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο.

Για τη διάταξη T1 (δεξαμενή 7), στην **Εικόνα 5.6** φαίνεται ότι κοντά στην επιφάνεια η φλέβα εισέρχεται από το άνοιγμα κατευθυνόμενη αρχικά προς το κέντρο της δεξαμενής. Στη συνέχεια, ακολουθεί καμπύλη τροχιά που είναι σχεδόν παράλληλη προς το δεξιό τοίχωμα και εξέρχεται από την δεξαμενή. Ο κύριος όγκος της δεξαμενής καταλαμβάνεται από δύο περιοχές ανακυκλοφορίας. Η πρώτη σχηματίζεται στη δεξιά πλευρά της φλέβας, μεταξύ των μικρών πετασμάτων, και είναι σχετικά μικρή, ενώ η δεύτερη που καταλαμβάνει την αριστερή πλευρά της φλέβας, μεταξύ των μεγάλων πετασμάτων, είναι πολύ μεγαλύτερη.



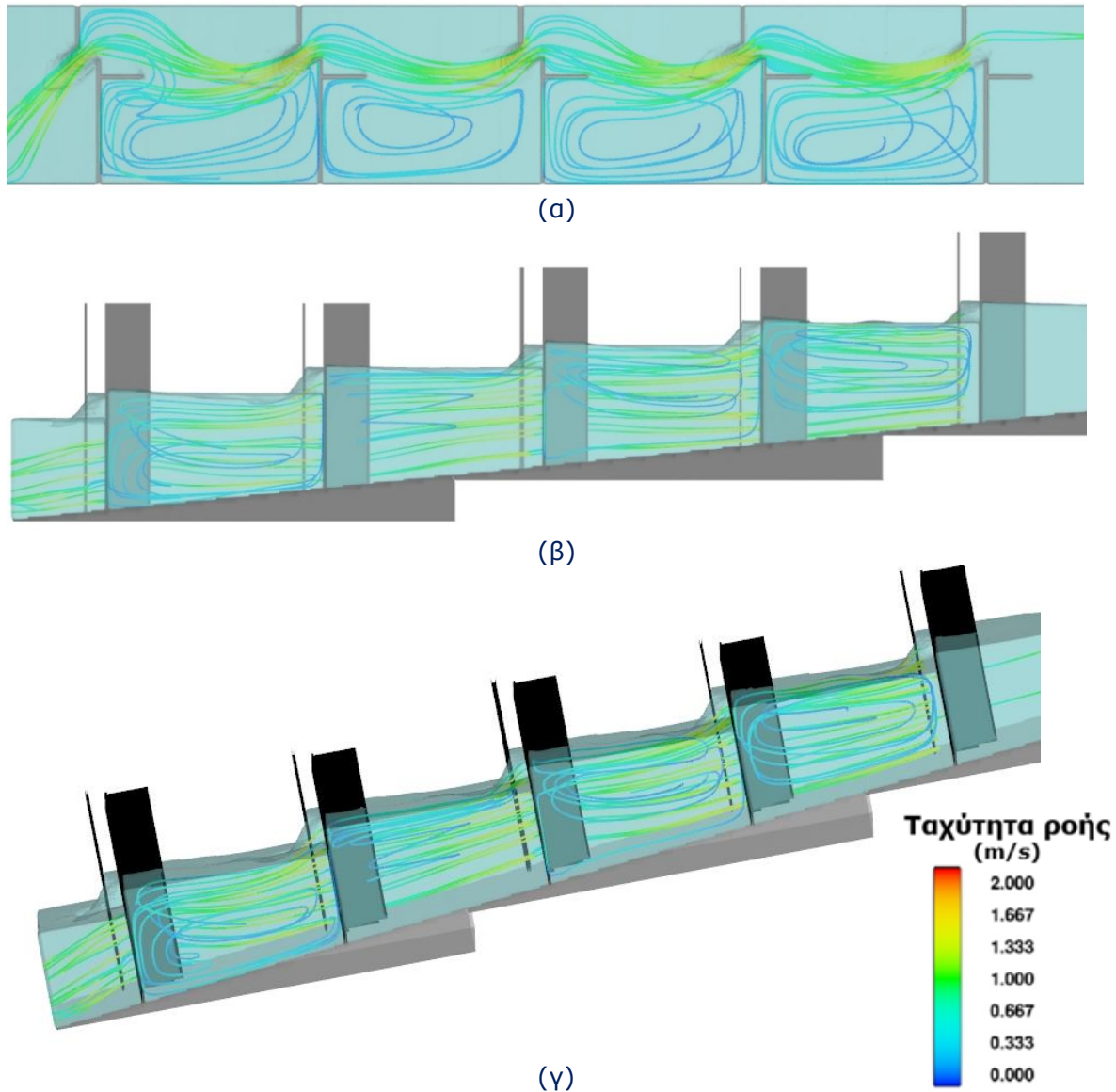
**Εικόνα 5.6** Υπολογιζόμενο πεδίο ταχυτήτων ροής (m/s) στο μέσο της δεξαμενής

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΔΙΟΔΟΥΣ ΙΧΘΥΩΝ



**Εικόνα 5.7** Υπολογιζόμενο πεδίο ταχυτήτων ροής (m/s) σε κάθετη τομή στο άνοιγμα

Κοντά στον πυθμένα, παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά, η οποία σε συνδυασμό με τα σχεδόν παράλληλα διανύσματα ταχύτητας σε κατακόρυφο επίπεδο, τα οποία φαίνονται στην **Εικόνα 5.7**, υποδεικνύουν ότι η ροή στη διάταξη δεξαμενής T1 ακολουθεί ουσιαστικά το "πρώτο μοτίβο ροής" σύμφωνα με την τυπολογία που χρησιμοποιείται από τους Wang et al. [13] και μπορεί πρακτικά να θεωρηθεί ως δισδιάστατη, εκτός από την περιοχή της εισόδου της φλέβας στο άνοιγμα και κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια.



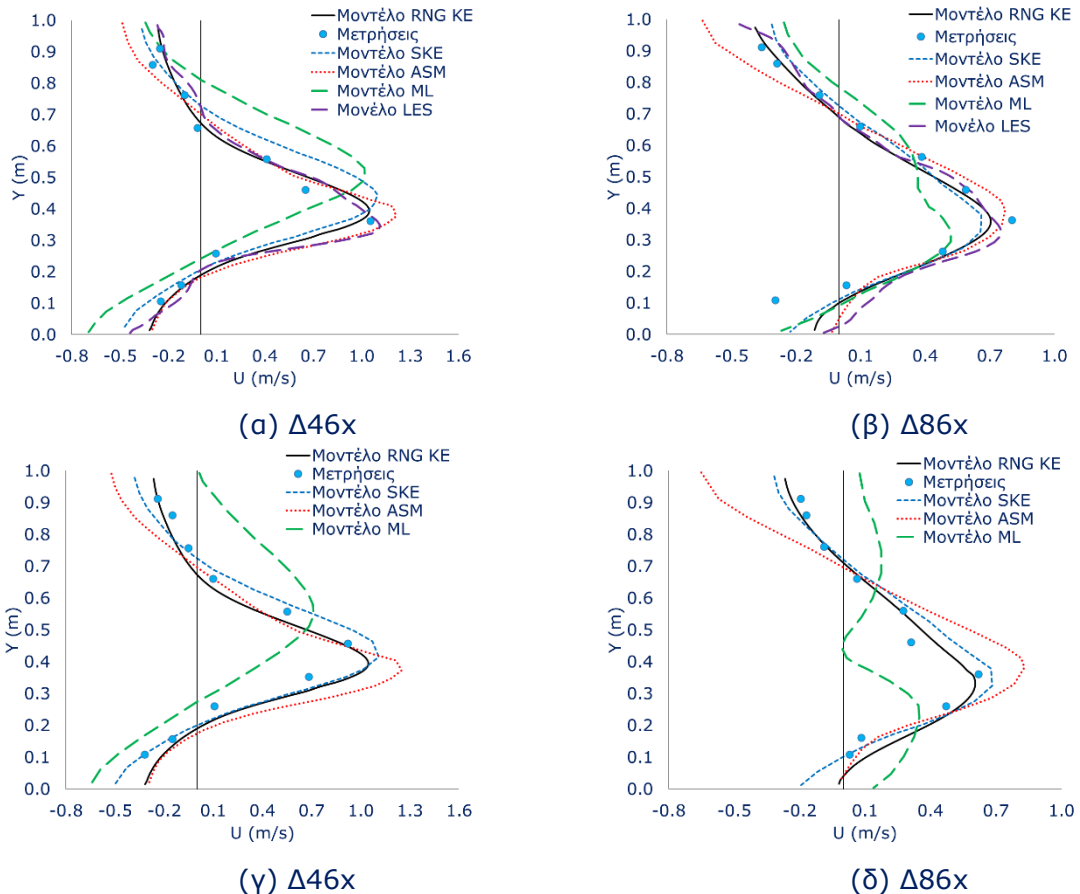
**Εικόνα 5.8** Γραμμές ροής (α) σε κάτωψη, (β) σε πλάγια όψη και (γ) σε τρισδιάστατη απεικόνιση στις δεξαμενές 5, 6, 7, 8 και 9 για το σενάριο T13

Μια προσεκτική παρατήρηση των γραμμών ροής δείχνει ότι η γωνία του εισερχόμενου πίδακα με την οριζόντια διεύθυνση αυξάνεται, όταν κινείται από τον πυθμένα προς την επιφάνεια και λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της κοντά στην επιφάνεια, όπου η εισερχόμενη φλέβα βυθίζεται στην επιφάνεια του νερού. Αυτό το χαρακτηριστικό ροής μπορεί να αποκαλυφθεί μόνο από ένα τρισδιάστατο μοντέλο που περιλαμβάνει μια μέθοδο, η οποία λαμβάνει υπόψη την επίδραση της ελεύθερης επιφάνειας, όπως η παρούσα μέθοδος VOF [26]. Ένα πιο ενδιαφέρον χαρακτηριστικό της ροής που φαίνεται επίσης στην **Εικόνα 5.8γ** είναι η τρισδιάστατη ροή εντός των δεξαμενών 5, 6, 7 και 8. Η ροή μετά την έξοδο από την "μεταβατική" δεξαμενή εισέρχεται στις δυο επόμενες (5 και 6) ακολουθώντας το ίδιο μοτίβο ροής, δηλαδή κατευθυνόμενη από την επιφάνεια ροής προς τον πυθμένα στην περιοχή της μεγάλης ανακυκλοφορίας. Αυτό αλλάζει στην δεξαμενή 7, στην οποία έχουμε παράλληλη κίνηση και αντιστρέφεται στην δεξαμενή 8, που η ροή κινείται από τον πυθμένα στην επιφάνεια. Η εικόνα της ροής είναι αντίστοιχη

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΔΙΟΔΟΥΣ ΙΧΘΥΩΝ

και στα υπόλοιπα σενάρια. Η προαναφερθείσα εναλλασσόμενη συμπεριφορά ροής που μπορεί να αποδοθεί στις διαφορετικές συνθήκες εισόδου σε κάθε λίμνη και στις διαστάσεις των λιμνών (κυρίως στο βάθος του νερού) δείχνει ότι το επιχείρημα των Heimerl et al. [59] ότι ένας αριθμός 3-5 δεξαμενών είναι επαρκής για να επιτευχθεί πλήρως ανεπτυγμένη ψευδο-ομοιόμορφη ροή στις κεντρικές δεξαμενές και να εξαιρεθεί η πιθανή επίδραση των οριακών συνθηκών εισόδου και εξόδου, δεν ισχύει πάντα και τελικά όλες οι δεξαμενές μιας ΔΙ πρέπει να μοντελοποιηθούν για να εξασφαλιστούν ακριβή αποτελέσματα. Επιπλέον, στην **Εικόνα 5.8(α)** φαίνεται ότι το πεδίο ταχυτήτων ροής σε οριζόντιο επίπεδο στο μέσο των τεσσάρων δεξαμενών δεν παρουσιάζει σημαντικές διαφορές. Επομένως, οι διαφορές στις κατακόρυφες διατομές, που φαίνονται στην **Εικόνα 5.8(γ)** δεν αναμένεται να επηρεάσουν σημαντικά το σχεδιασμό των ΔΙ.

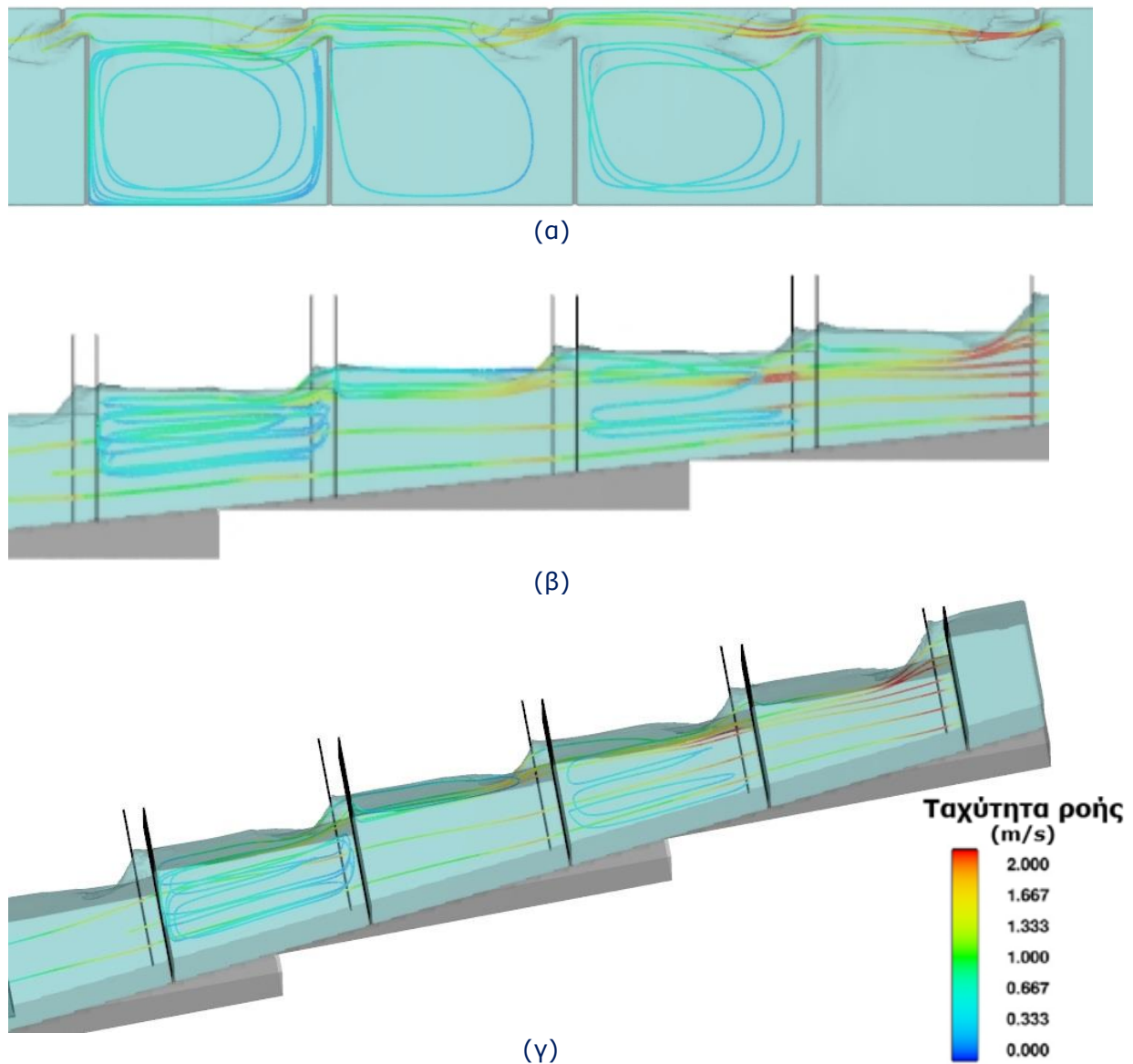
Στην **Εικόνα 5.9** φαίνονται τα προφίλ ταχύτητας ροής στη διεύθυνση  $x$  στις διατομές Δ46x και Δ86x για τα σενάρια T12 και T13 με χρήση διαφορετικών μοντέλων τύρβης. Τα μοντέλα τύρβης που συγκρίνονται είναι το Mixing Length (ML), το SKE, το Algebraic Stress Model (ASM) [58] και τα RNG KE και LES (μόνο για το T12). Παρατηρούμε αφενός ότι υπάρχει μεγάλη επίδραση του μοντέλου τύρβης στον υπολογισμό του πεδίου ροής και αφετέρου ότι απλά μοντέλα όπως το ML δεν δίνουν ακριβή αποτελέσματα. Αντίθετα τα RNG KE, LES, ASM και SKE προσεγγίζουν πολύ καλά τη ροή, και παρουσιάζουν ικανοποιητική συμφωνία με τις μετρήσεις.



**Εικόνα 5.9** Σύγκριση των ταχυτήτων στη διεύθυνση  $x$  σε διάφορες διατομές για τα σενάρια T12 (α και β) και T13 (γ και δ)

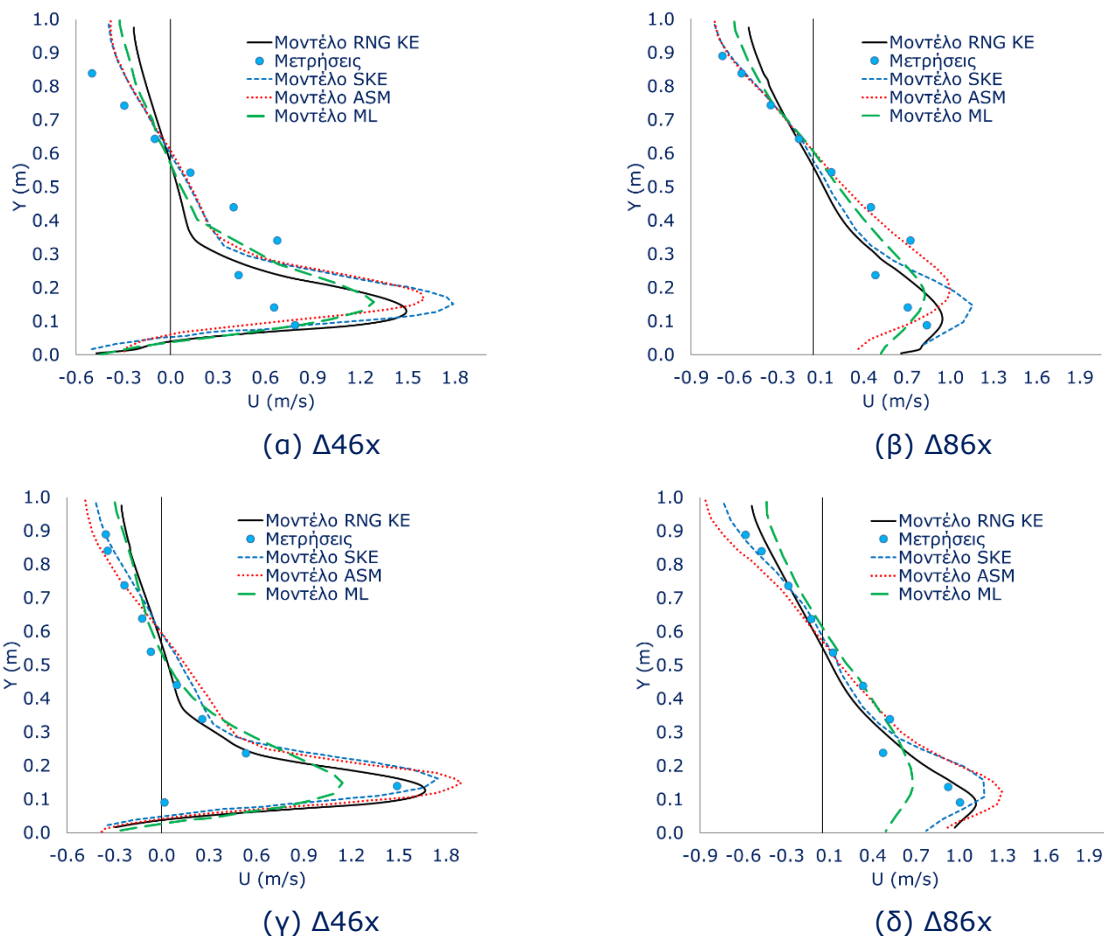
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΔΙΟΔΟΥΣ ΙΧΘΥΩΝ

Για τη διάταξη T2, η εισερχόμενη φλέβα κατευθύνεται προς την έξοδο της πιπίνας ακολουθώντας τροχιά παράλληλη προς το δεξιό τοίχωμα, δημιουργώντας μια μεγάλη περιοχή ανακυκλοφορίας που καταλαμβάνει το μεγαλύτερο όγκο της δεξαμενής και πρακτικά εξαλείφει την αριστερή περιοχή ανακυκλοφορίας (βλ. **Εικόνα 5.6** και **Εικόνα 5.10**). Στην **Εικόνα 5.10** φαίνεται ότι η γωνία της εισερχόμενης φλέβας με την οριζόντια διεύθυνση αυξάνεται με την αύξηση της απόστασης από τον πυθμένα, όπως και στη διάταξη T1. Επιπλέον, τα διανύσματα ταχυτήτων σε ένα κατακόρυφο επίπεδο κατά μήκος της σχισμής είναι σχεδόν παράλληλα (βλ. **Εικόνα 5.7**) και οι γραμμές ροής είναι παράλληλες σε όλες τις δεξαμενές με κατεύθυνση από την επιφάνεια προς τον πυθμένα. Με άλλα λόγια, η ροή στον σχεδιασμό της διάταξης T2 υποστηρίζει την υπόθεση της δισδιάστατης ροής που γίνεται από διάφορους ερευνητές και το επιχείρημα των Heimerl et al. [59].



**Εικόνα 5.10** Γραμμές ροής (α) σε κάτοψη, (β) σε πλάγια όψη και (γ) σε τρισδιάστατη απεικόνιση στις δεξαμενές 2, 3, 4 και 5 για το σενάριο T23

Στην **Εικόνα 5.11** φαίνονται τα προφίλ ταχύτητας ροής στη διεύθυνση x στις διατομές Δ46x και Δ86x για τα σενάρια T22 και T23 με χρήση των διαφορετικών μοντέλων τύρβης, που αναφέρθηκαν πιο πάνω. Παρατηρούμε ότι και εδώ το μοντέλο ML είναι αυτό με τη μικρότερη ακρίβεια, όμως στο θέση της φλέβας παρατηρείται μια απόκλιση από τις πειραματικές τιμές για όλα τα μοντέλα.



**Εικόνα 5.11** Σύγκριση των ταχυτήτων στη διεύθυνση x σε διάφορες διατομές για τα σενάρια T22 (α και β) και T23 (γ και δ)

Τέλος από τον Πίνακα **5.2** φαίνεται ότι οι μέγιστες ταχύτητες στο κάθετο άνοιγμα αυξάνονται με την αύξηση της παροχής και την κλίση πυθμένα και κυμαίνονται από 1.06 έως 1.27 m/s για τη διάταξη T1 και από 1.30 έως 1.56 m/s για τη διάταξη T2. Ωστόσο, οι διαφορές αυτές είναι μικρές, δείχνοντας ότι δεν υπάρχει ισχυρή εξάρτηση της μέγιστης ταχύτητας από την παροχή, παρατήρηση που συμφωνεί με τα ευρήματα των Puertas et al. [18].

### 5.3.6 Υπολογισμός βάθους ροής

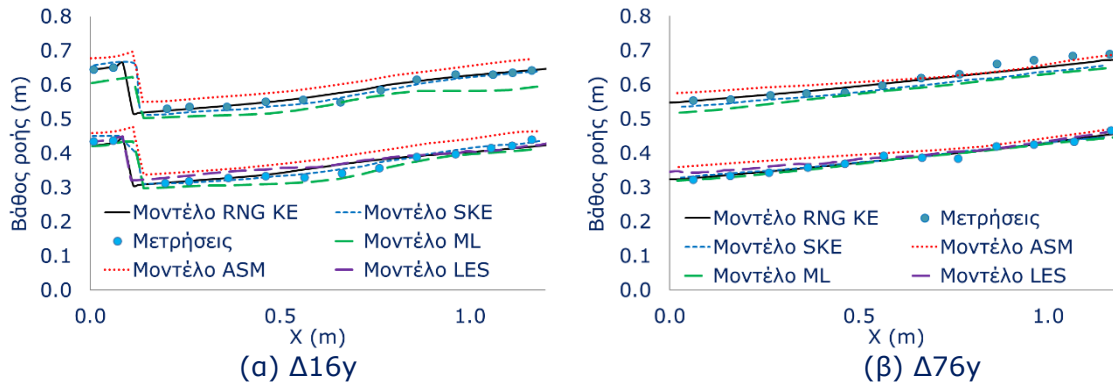
Στις Εικόνες **5.12** και **5.13** συγκρίνονται τα υπολογισμένα βάθη ροής με τις μετρήσεις και με τους υπολογισμούς από τα μοντέλα ML, ASM, SKE, RNG KE και LES για τις διατάξεις T1 και T2, αντίστοιχα. Από τις Εικόνες **5.12** και **5.13** φαίνεται ότι τα τρισδιάστατα μοντέλα (RNG KE και LES) υπολογίζουν με μεγαλύτερη ακρίβεια το βάθος ροής σε σχέση με τα υπόλοιπα μοντέλα σε όλες τις περιπτώσεις. Τα πολύ καλά

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΔΙΟΔΟΥΣ ΙΧΘΥΩΝ

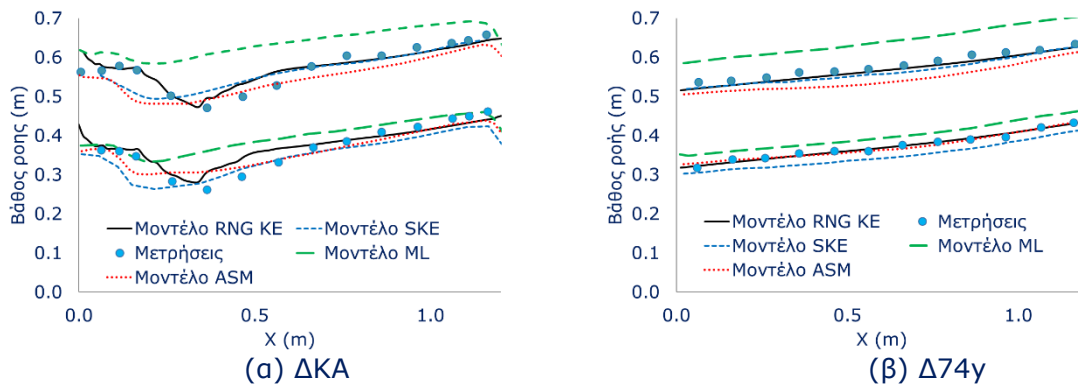
αποτελέσματα μπορούν να αποδοθούν στη χρήση της μεθόδου VOF. Και στις δυο διατάξεις T1 και T2, αμέσως κατάντη της εισόδου της φλέβας, παρατηρούμε την περιοχή πτώσης της επιφάνειας ροής (βλ. επίσης **Εικόνα 5.7**), η οποία παρατηρήθηκε και από προηγούμενους ερευνητές. Η πτώση της επιφάνειας ροής ακολουθείται από μια σταδιακή, σχεδόν γραμμική, άνοδο μέχρι το κατάντη μακρύ πέτασμα. Όπως αναμενόταν, τα βάθη ροής αυξάνονται με την αύξηση της παροχής και τη μείωση της κλίσης πυθμένα, δηλαδή με την αύξηση του  $Q^*$ , ενώ η σχετική πτώση της επιφάνειας ροής είναι μεγαλύτερη για μικρότερες τιμές του  $Q^*$ . Γενικά το βάθος ροής είναι ανεξάρτητο από την ταχύτητα ροής, όπως και σε προηγούμενες μελέτες [26]. Επιπλέον, το βάθος ροής στο κάθετο άνοιγμα και στο κέντρο της δεξαμενής συσχετίζεται πολύ καλά με το  $Q^*$  μέσω των εξισώσεων 5.6 και 5.7, αντίστοιχα.

Για διάταξη T1  $Q^* = 2.79 * \frac{Y_o}{b}$  (5.6) και για διάταξη T2  $Q^* = 3.01 * \frac{Y_o}{b}$  (5.7)

Οι συντελεστές των εξισώσεων 5.6 και 5.7 (2.79 και 3.01) βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία με τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές (2.73 και 3.03).



**Εικόνα 5.12** Σύγκριση βαθών ροής σε διάφορες διατομές για τη διάταξη T12 (κάτω) και T13 (πάνω)



**Εικόνα 5.13** Σύγκριση βαθών ροής σε διάφορες διατομές για τη διάταξη T22 (κάτω) και T23 (πάνω)

### 5.3.7 Υπολογισμός χαρακτηριστικών τύρβη

Στις Εικόνες **5.14** και **5.15** παρουσιάζονται οι κατανομές της τυρβώδους κινητικής ενέργειας ( $k$ ) και της διάχυσης της ( $\epsilon$ ), αντίστοιχα, στο μέσο βάθος της δεξαμενής για το μοντέλο RNG KE, ενώ στις Εικόνες **5.16** και **5.17** συγκρίνονται οι υπολογισμένες κατανομές του  $k$  και των τάσεων Reynolds, αντίστοιχα, με μετρήσεις και με υπολογισμούς με το μοντέλο SKE και το μοντέλο ASM. Για το σενάριο T12 παρουσιάζεται και το μοντέλο LES. Σημειώνεται ότι οι μετρούμενες τιμές του  $k$  είναι στην πραγματικότητα "υπολογισμοί" με χρήση πειραματικών δεδομένων ταχύτητας [18]. Το ίδιο ισχύει και για τα αποτελέσματα του μοντέλου LES.

Οι τρισδιάστατοι υπολογισμοί ταχυτήτων και βαθών ροής ήταν σε καλή συμφωνία με τα αποτελέσματα των δισδιάστατων μοντέλων. Ωστόσο, όπως αναμενόταν, αυτό δεν ισχύει στην πρόβλεψη των μεγεθών που ποσοτικοποιούν την τύρβη στη ροή, τα οποία επηρεάζονται από τον τρισδιάστατο χαρακτήρα της ροής στο κάθετο άνοιγμα και σίγουρα επηρεάζουν τα τυρβώδη χαρακτηριστικά στις δεξαμενές και τη συμπεριφορά των ιχθύων εντός της ΔΙ. Στην **Εικόνα 5.14** φαίνονται οι μέγιστες τιμές της τυρβώδους κινητικής ενέργειας ( $k$ ), οι οποίες παρατηρούνται στις πιο τυρβώδεις ζώνες των δεξαμενών, που είναι ( $\alpha$ ) το κάθετο άνοιγμα και ( $\beta$ ) οι περιοχές διάτμησης του αριστερού και του δεξιού ορίου της εισερχόμενης φλέβας για τη διάταξη T1 και η περιοχή ανακυκλοφορίας αριστερά της φλέβας για τη διάταξη T2. Γενικά, οι ισογραμμές μετατοπίζονται προς τα αριστερά της δεξαμενής, όταν αυξάνεται η παροχή ή η κλίση της δεξαμενής. Στο μεγαλύτερο τμήμα της δεξαμενής, οι τιμές του  $k$  για τη διάταξη T2 είναι χαμηλότερες από ότι στην T1, ενώ οι μέγιστες τιμές του  $k/k_{ref}$  είναι έως και 12% και στα δύο σχέδια. Οι τιμές αυτές συναντώνται στις περιοχές διάτμησης της φλέβας για τη διάταξη T1 και στην μεγάλη ανακυκλοφορία για τη διάταξη T2.

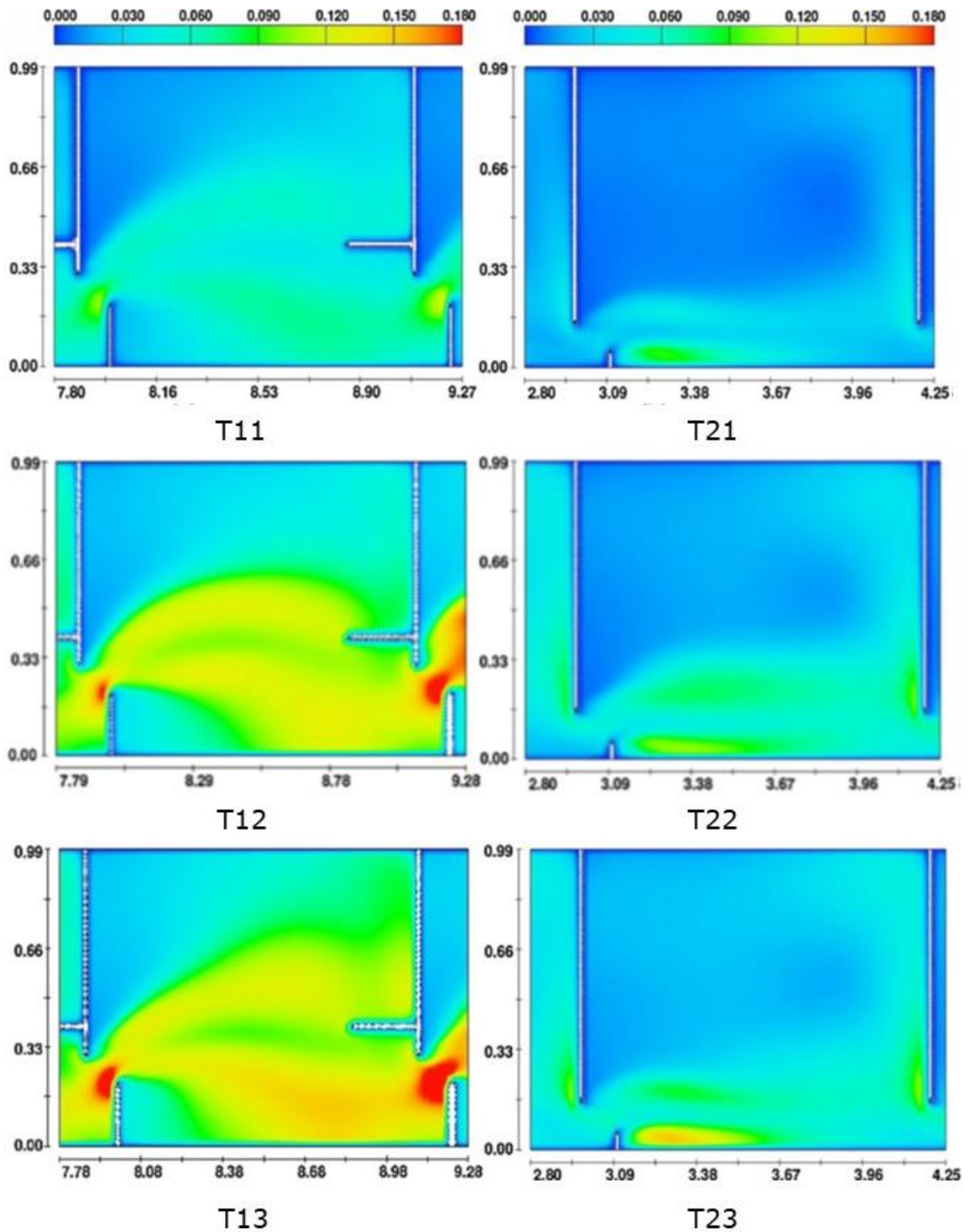
Στις Εικόνες **5.16** και **5.17** συγκρίνονται τα χαρακτηριστικά της τύρβης ( $k$  και τάσεις Reynolds) από όλα τα μοντέλα τύρβης με τις μετρήσεις. Ο **Πίνακας 5.3** δείχνει την απόδοση των μοντέλων σε σχέση με τις πειραματικές τιμές με τη χρήση του δείκτη Root Mean Square Error (RMSE) για το σενάριο T12. Το μοντέλο RNG KE παρουσιάζει ικανοποιητική συμφωνία με τις μετρήσεις. Το μοντέλο SKE γενικά υπερεκτιμά τα επίπεδα τύρβης. Η υπερεκτίμηση αυτή οφείλεται στην τυρβώδη τάση που προκαλείται από τις μεγάλες κλίσεις ταχύτητας που είναι έως και  $20 \text{ s}^{-1}$  [58]. Το μοντέλο ASM παρουσιάζει παρόμοια απόδοση με το RNG KE στον υπολογισμό των χαρακτηριστικών της τύρβης, αλλά υστερεί στον σωστό υπολογισμό των βαθών ροής και στις 2 διατάξεις. Τέλος το τρισδιάστατο μοντέλο LES δίνει καλύτερα αποτελέσματα από όλα τα προηγούμενα. Τα αποτελέσματα του όμως είναι πολύ κοντά σε αυτά του RNG KE, ενώ ο χρόνος που χρειάστηκε το μοντέλο LES είναι σχεδόν διπλάσιος του RNG KE και τα αποτελέσματά του χρειάζονται χρονοβόρα επεξεργασία ώστε να γίνουν συγκρίσιμα με του RNG KE. Η απόδοση των μοντέλων είναι αντίστοιχη και στα υπόλοιπα σενάρια.

**Πίνακας 5.3** Σύγκριση με το δείκτη RMSE χαρακτηριστικών ροής που μετρήθηκαν με αυτές που υπολογίστηκαν από τα μοντέλα στις διατομές ελέγχου για το σενάριο T12

	SKE	ML	RNG KE	LES	ASM	SKE	ML	RNG KE	LES	ASM
Διατομή ελέγχου	Δ 16-46x					Δ 46-86x				
Ταχύτητα ροής	0.199	0.450	0.147	0.118	0.017	0.120	0.20	0.119	0.110	0.140
Βάθος ροής	0.009	0.016	0.009	0.009	0.120	0.008	0.01	0.008	0.008	0.025
Κινητική ενέργεια τύρβης	0.044	-	0.028	0.020	0.036	0.037	-	0.031	0.020	0.018
Τάση Reynolds $u'^2$	0.071	-	0.024	0.020	0.150	0.051	-	0.051	0.030	0.058
Τάση Reynolds $v'^2$	0.065	-	0.015	0.010	0.024	0.041	-	0.017	0.007	0.018

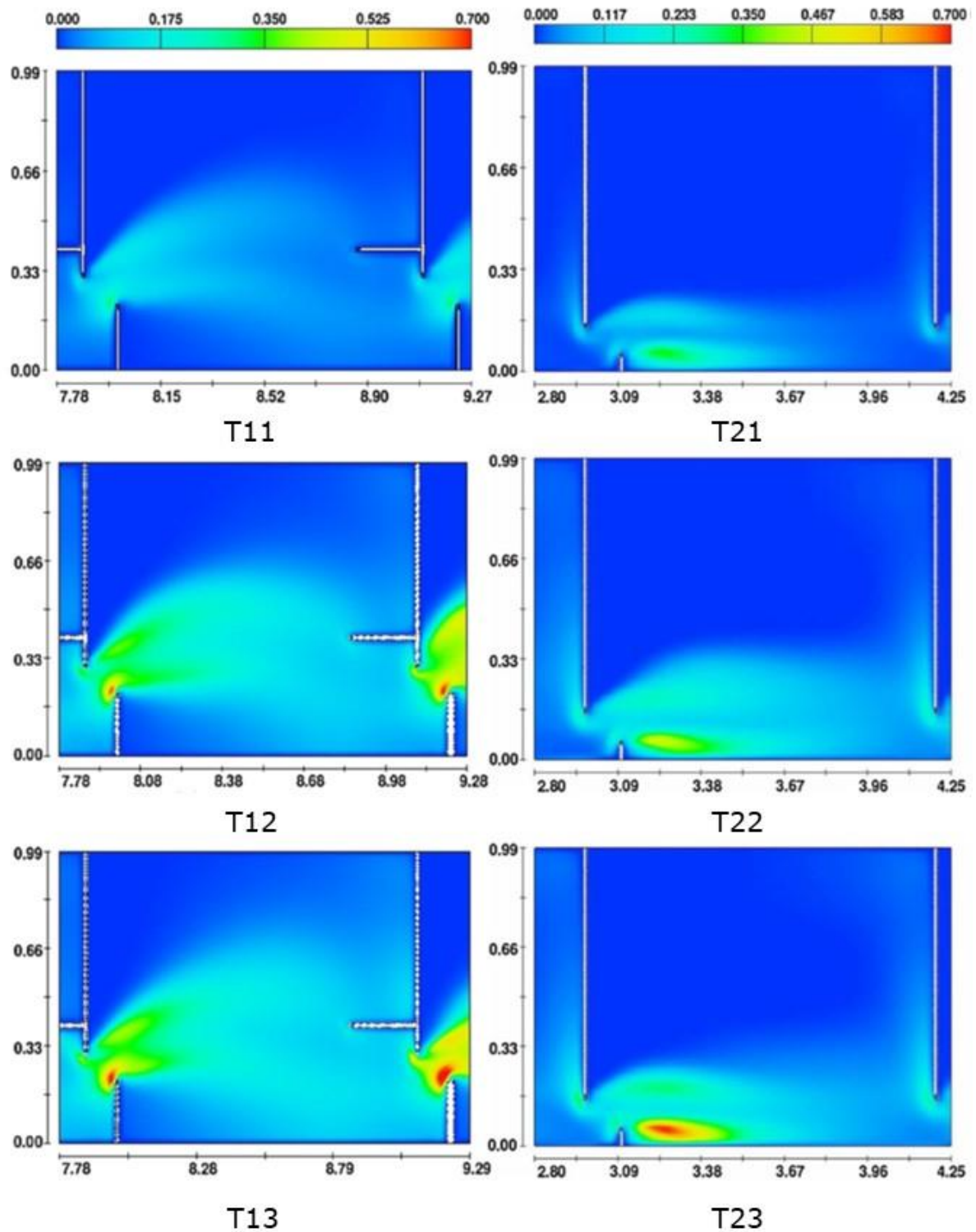


ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΔΙΟΔΟΥΣ ΙΧΘΥΩΝ



**Εικόνα 5.14** Κινητική ενέργεια τύρβης ( $m^2/s^2$ ) σε επίπεδο στη μέση των δεξαμενών για τις διατάξεις T1 και T2

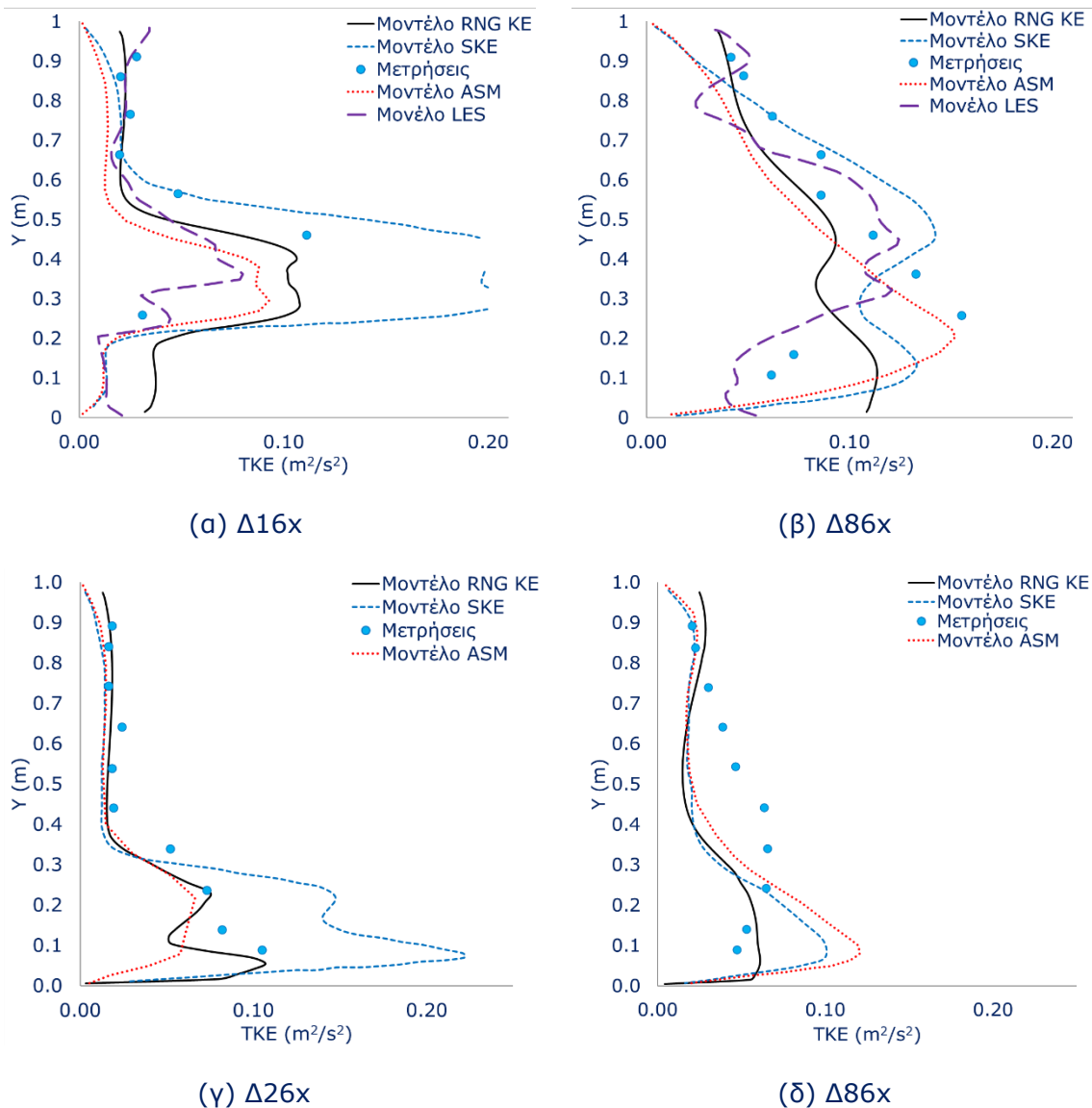
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΔΙΟΔΟΥΣ ΙΧΘΥΩΝ



**Εικόνα 5.15** Διάχυση ενέργειας τύρβης ( $W/m^3 \times 10^{-3}$ ) σε επίπεδο στη μέση των δεξαμενών για τις διατάξεις T1 και T2

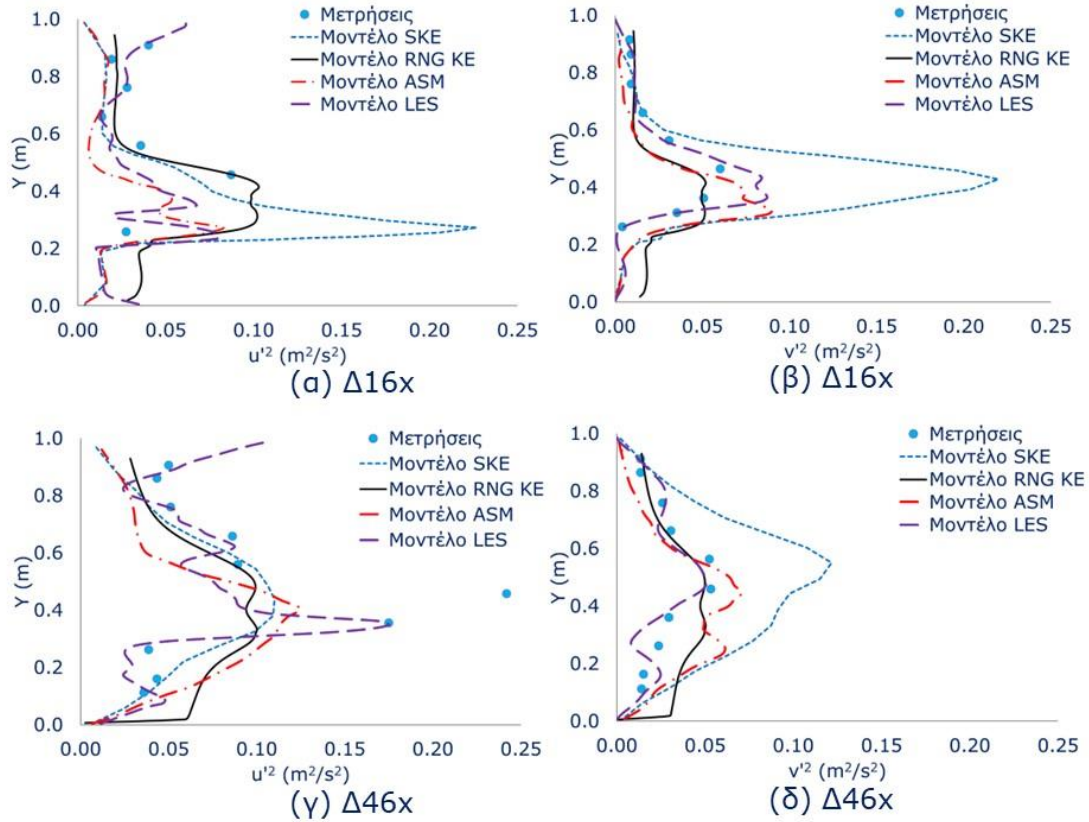
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΔΙΟΔΟΥΣ ΙΧΘΥΩΝ

Σύμφωνα με τις τιμές στον Πίνακα 5.2, η "θεωρητική" διάχυση ενέργειας στην δεξαμενή ανά μονάδα όγκου ( $E$ ) κυμαίνεται από 72 έως 184  $W/m^3$  και για τις δυο διατάξεις T1 και T2. Πρακτικά, οι τιμές αυτές δεν είναι πολύ υψηλότερες από τη συνιστώμενη τιμή των 150  $W/m^3$  [7]. Γενικά, η τιμή του  $E$  από μόνη της δεν επαρκεί για την αξιολόγηση της ικανότητας των ιχθύων να διέλθουν από μια ΔΙ [10], [80] και για μια καλύτερη αξιολόγηση απαιτείται η λεπτομερής χωρική κατανομή του ρυθμού διάχυσης ενέργειας που φαίνεται στην **Εικόνα 5.15**. Οι κατανομές του  $\epsilon$  που παρουσιάζονται στην **Εικόνα 5.15** είναι παρόμοιες με τις κατανομές του  $k$  που παρουσιάζονται στην **Εικόνα 5.14**. Στο μεγαλύτερο τμήμα της δεξαμενής παρατηρούνται χαμηλότερες τιμές του  $\epsilon$  για τη διάταξη T2 σε σχέση με τη διάταξη T1. Ωστόσο, οι μέγιστες τιμές του  $\epsilon$  για την T1 που συναντώνται στη φλέβα (220-370  $W/m^3$ ) είναι χαμηλότερες από αυτές που βρέθηκαν στη φλέβα για την T2 (340-680  $W/m^3$ ).



**Εικόνα 5.16** Κινητική ενέργεια τύρβης ( $m^2/s^2$ ) σε διάφορες διατομές για τις διατάξεις T1 (α και β) και T2 (γ και δ)

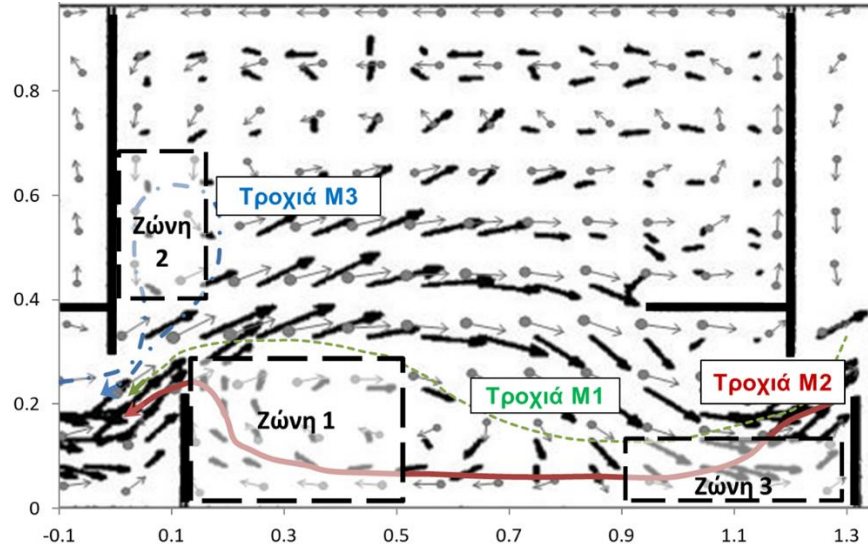
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΔΙΟΔΟΥΣ ΙΧΘΥΩΝ



**Εικόνα 5.17** Τάσεις Reynolds σε διάφορες διατομές για τη διάταξη T12

Τα χαρακτηριστικά της τύρβης θεωρούνται τα πιο σημαντικά για τη μετανάστευση των ιχθύων [80]. Πειράματα έχουν δείξει ότι οι ιχθύες δυσκολεύονται να διατηρήσουν τον προσανατολισμό τους κατά την έκθεση σε συνθήκες υπερβολικής έντασης τύρβης, ενώ σε εξαιρετικά υψηλά επίπεδα, η διατμητική τάση μπορεί να τους προκαλέσει ακόμη και σωματική βλάβη [81]. Επίσης, τα πολύ υψηλά επίπεδα τύρβης μπορεί να οδηγήσουν στην δημιουργία μεγάλων φυσαλίδων αέρα, οι οποίες μπορεί να διαταράξουν την αναπνοή των ιχθύων [31].

Στην **Εικόνα 5.18** παρουσιάζονται (α) οι πιο συχνές περιοχές ανάπαυσης Z1, Z2 και Z3 και οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες τροχιές των ανάδρομων ιχθύων M1, M2 και M3, όπως παρουσιάστηκαν από τους Wang et al. [13]. Η απεικόνιση γίνεται πάνω στο πεδίο ροής του σεναρίου T13. Ο **Πίνακας 5.4** δείχνει ότι τα εύρη των μέσων τιμών  $\epsilon$  στις Z1, Z2 και Z3 είναι ίσα με 45-75, 30-90 και 35-95  $\text{W}/\text{m}^3$  αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές είναι σημαντικά χαμηλότερες από τη συνιστώμενη τιμή ( $150 \text{ W}/\text{m}^3$ ).



**Εικόνα 5.18** Σύγκριση του υπολογιζόμενου (γκρι βέλη με κύκλο) και μετρούμενου (έντονα βέλη) πεδίου ταχυτήτων ροής (m/s) το σενάριο T13. Παρουσιάζονται (α) οι πιο συχνές περιοχές ανάπαυσης Z1, Z2 και Z3 και οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι τρόποι κίνησης των ανάδρομων ιχθύων M1, M2 και M3

**Πίνακας 5.4** Χαρακτηρίστηκα της ροής στις ζώνες Z1, Z2 και Z3

Ζώνη		T11	T12	T13
Z1	Μέγιστη ταχύτητα (m/s)	1.0	1.0	1.1
	% όγκου με $u < 0.3$ m/s	76	78	70
	$P_v$ (W/m <sup>3</sup> )	45	65	75
Z2	Μέγιστη ταχύτητα (m/s)	0.1	0.4	0.5
	% όγκου με $u < 0.3$ m/s	100	93	94
	$P_v$ (W/m <sup>3</sup> )	30	85	90
Z3	Μέγιστη ταχύτητα (m/s)	0.2	0.5	0.4
	% όγκου με $u < 0.3$ m/s	100	40	66
	$P_v$ (W/m <sup>3</sup> )	35	75	95

### 5.3.8 Συμπεράσματα

Επαληθεύτηκε ένα τρισδιάστατο μοντέλο CFD για τον υπολογισμό του πεδίου ροής και των χαρακτηριστικών τύρβης σε ΔΙΚΑ που χρησιμοποιεί το μοντέλο τύρβης RNG KE [54] και τη μέθοδο VOF [26] για τον ακριβή προσδιορισμό της επιφάνειας ροής. Οι υπολογισμοί του μοντέλου συγκρίθηκαν (1) με πειράματα σε δύο διατάξεις δεξαμενών T1 και T2 μιας πειραματικής ΔΙΚΑ [18] που αποτελείται από 11 δεξαμενές και (2) με δισδιάστατους υπολογισμούς [58] χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις SWE και τα μοντέλα ML, ASM και SKE και με τρισδιάστατους χρησιμοποιώντας το μοντέλο τύρβης LES σε συνδυασμό με τη μέθοδο VOF.

Οι υπολογισμοί του τρισδιάστατου μοντέλου έδειξαν (1) καλή συμφωνία με (α) τα πειράματα, (β) τους δισδιάστατους υπολογισμούς στην πρόβλεψη των μέσων ταχυτήτων ροής και (γ) τους τρισδιάστατους υπολογισμούς με το μοντέλο LES, (2) καλύτερη απόδοση στον προσδιορισμό της επιφάνειας ροής στη ΔΙΚΑ, η οποία αποδίδεται στην μέθοδο VOF, (3) καλύτερη πρόβλεψη των χαρακτηριστικών της τύρβης από τα δισδιάστατα μοντέλα, η οποία οφείλεται στο τρισδιάστατο μοντέλο RNG KE και

στο γεγονός ότι το τρισδιάστατο μοντέλο λαμβάνει υπόψη τα 3D χαρακτηριστικά της ροής στη ΔΙΚΑ και παρόμοια αποτελέσματα με το τρισδιάστατο μοντέλο LES, το οποίο υπερτερεί των υπολοίπων.

Επιπλέον, οι τρισδιάστατοι υπολογισμοί έδειξαν ότι οι συνήθεις παραδοχές στις ΔΙΚΑ, ότι η ροή είναι δισδιάστατη και ότι η προσομοίωση 3-5 δεξαμενών είναι επαρκής για την επίτευξη ικανοποιητικών αποτελεσμάτων, δεν ισχύουν πάντα. Η ροή μπορεί να θεωρηθεί ως δισδιάστατη μόνο στη διάταξη T2 και για ορισμένες γεωμετρίες και χαρακτηριστικά ροής στη διάταξη T1. Τελικά, πρέπει να προσομοιωθούν όλες οι δεξαμενές μιας ΔΙΚΑ για να εξασφαλιστούν ακριβή αποτελέσματα. Τέλος, αναδεικνύεται από τα παραπάνω η ανάγκη εκτέλεσης πειραμάτων με πραγματικούς ιχθύες ταυτόχρονα με πειράματα ροής.

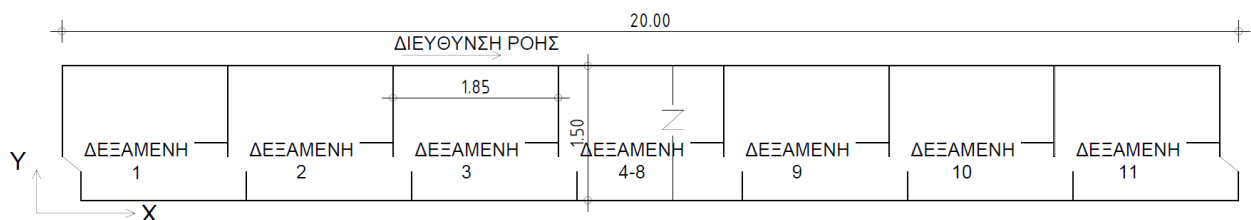
## 5.4 Περιγραφή της περίπτωσης εφαρμογής του υδροδυναμικού μοντέλου στην δεύτερη διόδο ιχθύων

### 5.4.1 Εισαγωγή

Για την επιβεβαίωση του ολοκληρωμένου μαθηματικού μοντέλου χρησιμοποιήθηκε η εργασία των Rodriguez et al. [69]. Στην εργασία τους πραγματοποίησαν πειράματα ιχθύων σε ΔΙΚΑ. Με τη χρήση τεχνικών «μηχανικής όρασης» (computer vision), κατέγραψαν τις τροχιές δύο ιχθύων μέσα σε ένα μοντέλο ΔΙΚΑ πραγματικής κλίμακας. Στόχος τους ήταν να χρησιμοποιήσουν μια μη παρεμβατική μέθοδο μέτρησης εντός της ΔΙΚΑ. Στην εργασία παρουσιάστηκαν οι παρατηρηθείσες τροχιές των ιχθύων σε προβολή επί του υπολογισμένου από δισδιάστατο μοντέλο πεδίου ταχύτητας ροής.

### 5.4.2 Γεωμετρία της πειραματικής διόδου ιχθύων

Η ΔΙ που χρησιμοποιήθηκε είναι κάθετου ανοίγματος και αποτελείται από κανάλι μήκους 20.0m, πλάτους 1.5 m και ύψους 1.0 m. Περιέχει 11 δεξαμενές με τις διαστάσεις που παρουσιάζονται στην **Εικόνα 5.19** και έχει κλίση ίση με 7.5%.



**Εικόνα 5.19** Το πειραματικό μοντέλο ΔΙ και οι διαστάσεις της τυπικής δεξαμενής

**Πίνακας 5.5** Γεωμετρία της διόδου ιχθύων

Μέγεθος	Τιμή
Κλίση (%)	7.50
W (m)	1.50
L (m)	1.85
$b_0$ (m)	0.27
Q (L/s)	250.00

### 5.4.3 Πειραματικές τροχιές ιχθύων

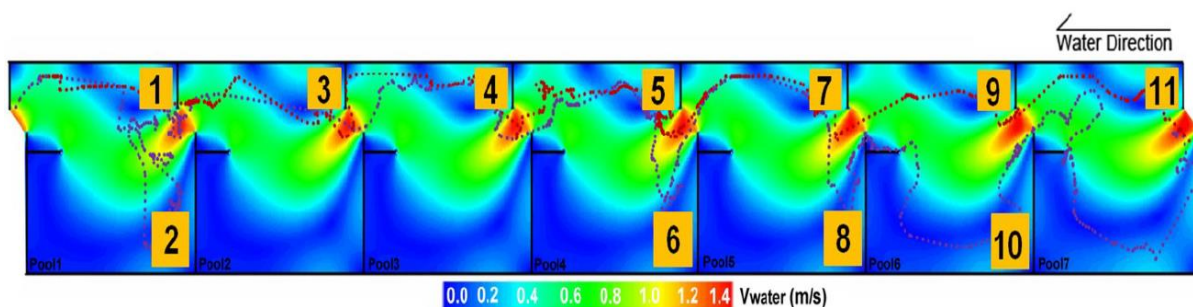
Για την καταγραφή της τροχιάς των ιχθύων μέσα στη ΔΙΚΑ οι Rodriguez et al. [69] χρησιμοποίησαν ένα σύστημα 28 καμερών καταγραφής εικόνας υψηλής ανάλυσης με ευρυγώνιους φακούς 180°. Χρησιμοποίησαν συνολικά επτά δεξαμενές για τους ιχθύες και τοποθέτησαν 4 κάμερες σε κάθε μια. Οι μηχανές ήταν συνδεδεμένες με σύστημα καταγραφής και αποθήκευσης. Η μεθοδολογία τους για (α) την καταγραφή των τροχιών κίνησης και (β) των υπολογισμό της ταχύτητας και της επιτάχυνσης των ιχθύων συνοψίζεται σε τέσσερα βήματα.

- 1) Χρήση των δεδομένων των εικόνων και βαθμονόμηση της θέσης των μηχανών, ώστε να ανασυντεθεί γεωμετρικά σωστά η ΔΙ μέσα από τις εικόνες.
- 2) Χρήση νευρωνικών δικτύων για την τον καθαρισμό των εικόνων από το υπόβαθρο στις περιοχές που εντοπίζονται οι ιχθύες.
- 3) Χρήση των τεχνικών μηχανικής όρασης για την εύρεση της μάζας και του κέντρου βάρους των ιχθύων και καθαρισμό του θορύβου των εικόνων.
- 4) Ανάλυση των δεδομένων, περαιτέρω φιλτράρισμα θορύβου και ανασύσταση της τροχιάς κίνησης.

### 5.4.4 Υπολογισμός του πεδίου ροής και της ταχύτητας των ιχθύων

Για τον υπολογισμό της ταχύτητας και επιτάχυνσης των ιχθύων, οι Rodriguez et al. [69] θεώρησαν ότι η ταχύτητα των ιχθύων, όπως καταγράφηκε, είναι το άθροισμα της πραγματικής ταχύτητας τους και της ταχύτητας του πεδίου ροής. Χρησιμοποίησαν ένα δισδιάστατο μοντέλο ώστε να προσομοιώσουν τη ροή εντός της διόδου ιχθύων. Τελικά αφαίρεσαν την υπολογιζόμενη ταχύτητα ροής από την ταχύτητα των παρατηρήσεων και υπολόγισαν την ταχύτητα κολύμβησης των ιχθύων. Στην **Εικόνα 5.20** φαίνεται το πεδίο ταχυτήτων ροής, όπως υπολογίστηκε από τους Rodriguez et al. [69].

Η ταχύτητα στις δεξαμενές κυμαίνεται από 0.1 έως 1.25 m/s και η τροχιά της φλέβας δημιούργησε τρεις περιοχές ανακυκλοφορίας. Δύο μικρές περιοχές ανακυκλοφορίας στα αριστερά της εισερχόμενης φλέβας και μία μεγάλη στα δεξιά δίπλα στο ανάντη κοντό πέτασμα. Οι περιοχές ανακυκλοφορίας θεωρούνται περιοχές ανάπαυσης για τους ιχθύες [13], [24],[69], [82]. Στους Rodriguez et al. [69] οι ζώνες ανάπαυσης απεικονίζονται με αριθμούς από το 1 έως το 11, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 5.20**.



**Εικόνα 5.20** Υπολογιζόμενο μέσο κατά βάθος πεδίο ταχυτήτων ροής από την εργασία των Rodriguez et al.[69]. Στο πεδίο ροής αποτυπώνονται οι τροχιές του ιχθύ Α (κόκκινες κουκίδες) και του ιχθύ Β (μωβ κουκκίδες)

### 5.4.5 Αποτελέσματα της πειραματικής εργασίας

Στην εργασία τους παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα για 2 ιχθύες, τους Α και Β. Οι ιχθύες Α και Β ανήκουν στην οικογένεια των σαλμονοειδών και το είδος τους είναι πέστροφα. Είχαν παρόμοιο μήκος και βάρος, το οποίο ήταν 19.1 cm και 70 gr, και 20.1

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΔΙΟΔΟΥΣ ΙΧΘΥΩΝ

cm και 79.5 gr, αντίστοιχα. Στην **Εικόνα 5.20** αποτυπώνονται οι τροχιές των ιχθύων, όπως υπολογίστηκαν, πάνω στο υπολογισμένο πεδίο ροής. Στον Πίνακα **5.6** παρουσιάζονται τα υπολογιζόμενα χαρακτηριστικά για τον ιχθύ Α, που είναι (α) ο χρόνος παραμονής στην περιοχή ανάπαυσης, (β) ο χρόνος που ο ιχθύς ήταν σε κίνηση μέχρι να βγει από τη δεξαμενή και (γ) η μέση ταχύτητα ανόδου του ιχθύ.

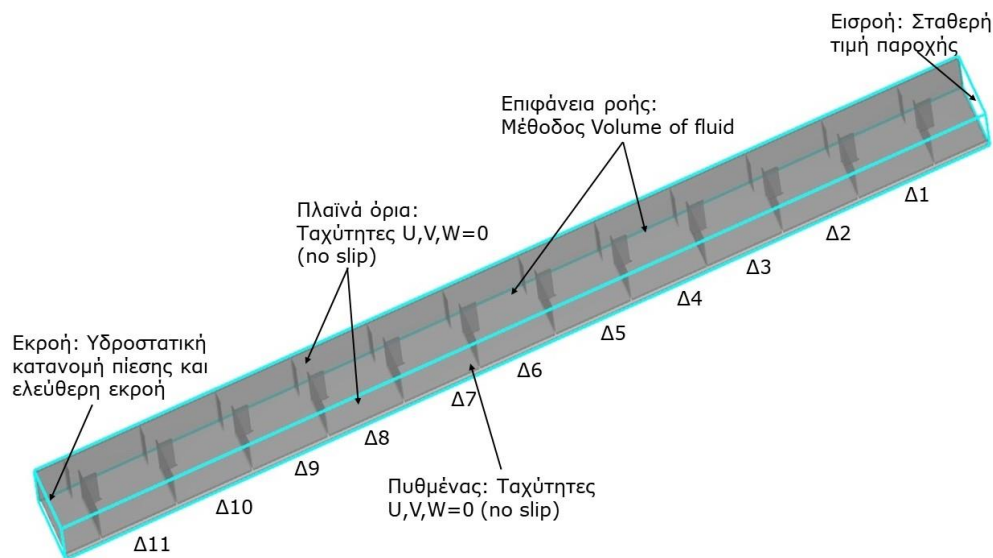
**Πίνακας 5.6** Μέση ταχύτητα και χρόνος ανάπαυσης για τον ιχθύ Α [69]

Ιχθύς Α	Δεξ. 1	Δεξ.2	Δεξ.3	Δεξ.4	Δεξ.5	Δεξ.6	Δεξ.7
Χρόνος Παραμονής (s) στην περιοχή ανάπαυσης	2053	1109	27	880	278	366	316
Χρόνος ανόδου (s)	6	17	3	14	10	3	5
Μέση ταχύτητα (m/s)	1.10	0.80	1.50	0.90	1.00	1.50	1.20

### 5.5 Υπολογισμοί υδροδυναμικού μοντέλου της δεύτερης διόδου ιχθύος

#### 5.5.1 Υπολογιστικό πλέγμα

Το περίγραμμα του υπολογιστικού πεδίου, που φαίνεται στην **Εικόνα 5.21** διαμορφώθηκε με ένα μπλοκ χωρίς κλίση, αξιοποιώντας τη δυνατότητα του μοντέλου να εισάγει ο χρήστης την επιτάχυνση της βαρύτητας με 2 συνιστώσες. Η χρήση ενός μπλοκ μειώνει στο ελάχιστο τα μη ενεργά κελιά, που δεν συμμετέχουν στον υπολογισμό της ροής. Το υπολογιστικό πλέγμα που αποτελούνταν από περίπου 1500000 κελιά ήταν πιο πυκνό στα σημεία ενδιαφέροντος και κοντά στα πετάσματα και τους τοίχους, με διαστάσεις που κυμαίνονταν από 0.01 έως 0.05m.



**Εικόνα 5.21** Το υπολογιστικό μοντέλο στο οποίο αναγράφονται οι οριακές συνθήκες και η αρίθμηση των δεξαμενών

#### 5.5.2 Οριακές συνθήκες

Ορίσαμε οριακές συνθήκες στα όρια του πεδίου υπολογισμού, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 5.21**. Στην ανάντη δεξαμενή χρησιμοποιήθηκε σταθερή παροχή ίση με 250 l/s

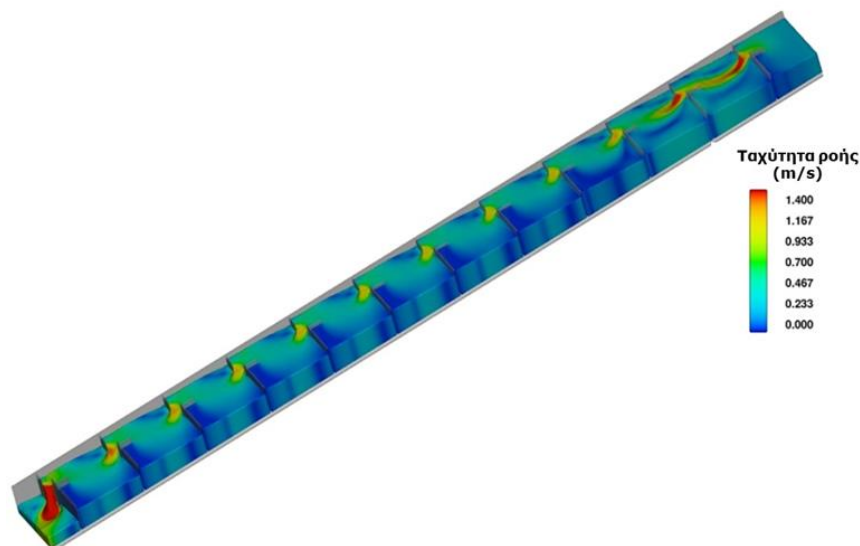


με αυτόματο υπολογισμό της στάθμης ροής, στην έξοδο της κατάντη δεξαμενής καθορίστηκαν η πίεση και ελεύθερη εκροή, ενώ ο πυθμένας και τα πλευρικά τοιχώματα της δεξαμενής αντιμετωπίστηκαν ως τοιχώματα χωρίς ολίσθηση (no-slip). Το υπολογιστικό μοντέλο, εκτός από τις 11 δεξαμενές, που αναφέρονται στην εργασία των Rodriguez et al. [69] έχει και μια δεξαμενή εισόδου και μια δεξαμενή εξόδου για να μειώσει την επίδραση των οριακών συνθηκών στο πεδίο ροής. Να σημειωθεί ότι η σταθερή τιμή παροχής εισόδου αναφέρεται σε επόμενη εργασία των Bermudez et al. [82]. Αυτό ήταν και το μοναδικό σενάριο που προσομοιώθηκε.

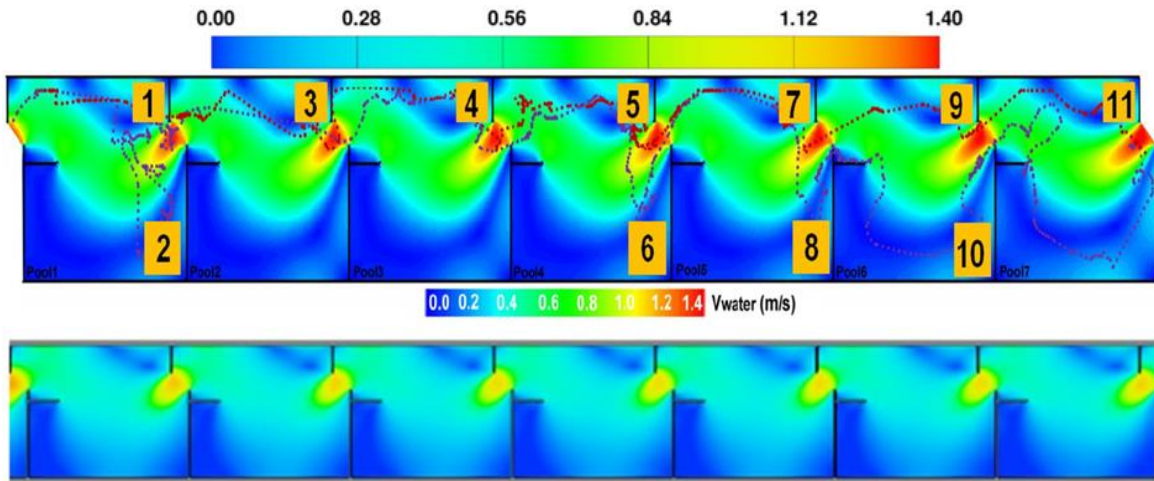
### 5.5.3 Αποτελέσματα υπολογισμών

Στις Εικόνες 5.22 μέχρι 5.24 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών του υδροδυναμικού μοντέλου της παρούσας εργασίας και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις ισογραμμές του προσομοιωμένου πεδίου ταχυτήτων ροής της πειραματικής εργασίας. Το μοντέλο αποτελείται από έντεκα δεξαμενές, ώστε να μειωθεί η επίδραση των οριακών συνθηκών στο πεδίο ροής. Οι ταχύτητες που υπολογίστηκαν στις επτά δεξαμενές, που θα χρησιμοποιηθούν από το ΜΣΙ, κυμαίνονται από 0.01 έως 1.21 m/s, οι οποίες είναι σε καλή συμφωνία με το μοντέλο και τις μετρήσεις των Rodriguez et al. [69]. Επίσης, ο σχηματισμός της φλέβας είναι παρόμοιος με τον πειραματικό, δημιουργώντας τρεις περιοχές χαμηλής ταχύτητας-ανακυκλοφορίας, που φαίνονται στην **Εικόνα 5.24α**, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως περιοχές ανάπαυσης για τους ιχθύες. Επιπλέον, από τις Εικόνες 5.24β και 5.24γ φαίνεται ότι στις περιοχές ανάπαυσης (1 έως 11) επικρατούν συνθήκες χαμηλών ταχυτήτων και τύρβης, όπως παρατηρείται και στην πειραματική εφαρμογή. Ο Bell [5] υποστήριξε ότι οι ιχθύες πρέπει να είναι σε θέση να παραμένουν σε μια δεξαμενή για μικρά χρονικά διαστήματα χωρίς υπερβολική κόπωση. Για να επιτευχθεί αυτό, η ταχύτητα στη δεξαμενή πρέπει να διατηρείται κάτω από 0.30 m/s στο 30% έως 50% του όγκου της.

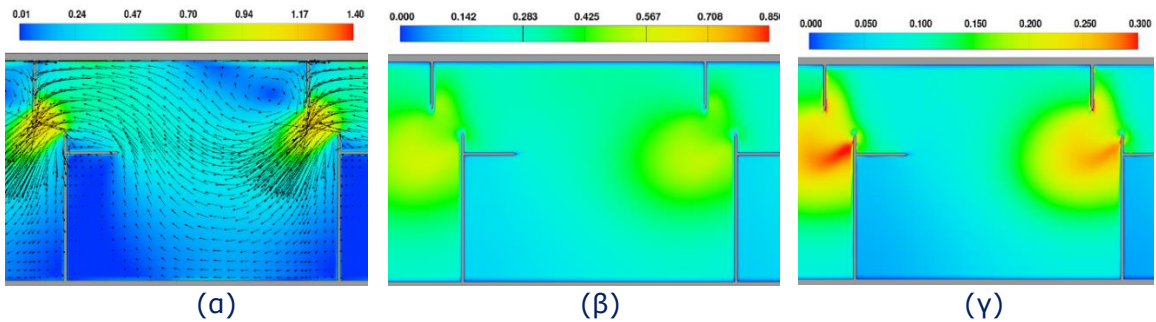
Στην **Εικόνα 5.26** φαίνονται οι περιοχές που η ταχύτητα είναι μικρότερη από 0.30 m/s. Τις περιοχές αυτές τις ονομάζουμε Α, Β και C και καταλαμβάνουν συνολικά το 50% του όγκου της δεξαμενής. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι περιοχές Α και Β ταυτίζονται με τις περιοχές ανάπαυσης που παρατηρήθηκαν πειραματικά.



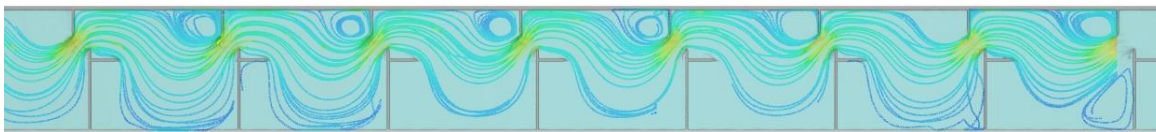
**Εικόνα 5.22** Τρισδιάστατη απεικόνιση της ΔΙ με ισογραμμές μέσης κατά βάθος πεδίο ταχυτήτων ροής



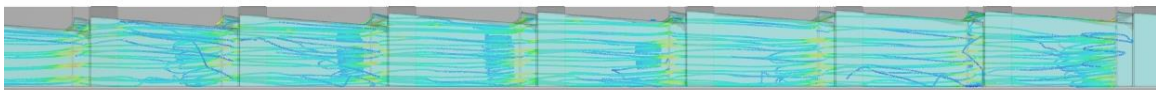
**Εικόνα 5.23** Μέσο κατά βάθος πεδίο ταχυτήτων ροής (α) στην πειραματική εργασία [69] και (β) από το υδροδυναμικό μοντέλο FLOW-3D



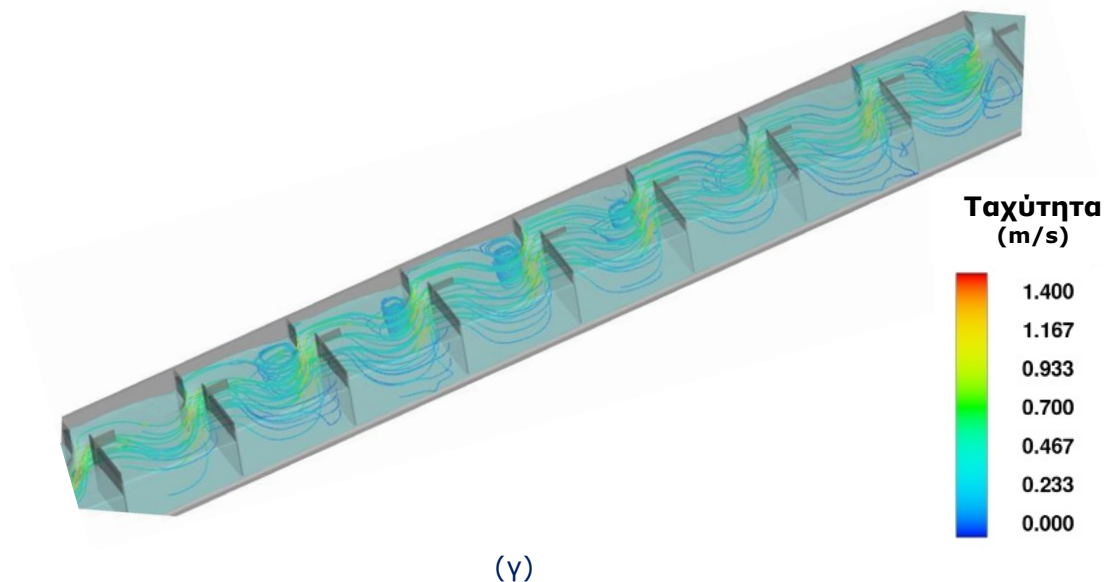
**Εικόνα 5.24** Υπολογιζόμενο μέσο κατά βάθος (α) πεδίο ταχυτήτων ροής σε m/s, (β) κινητική ενέργεια τύρβης σε  $m^2/s^2$  και (γ) τυρβώδης διάχυση σε  $m^2/s^3$  για την τυπική δεξαμενή ΔΙ



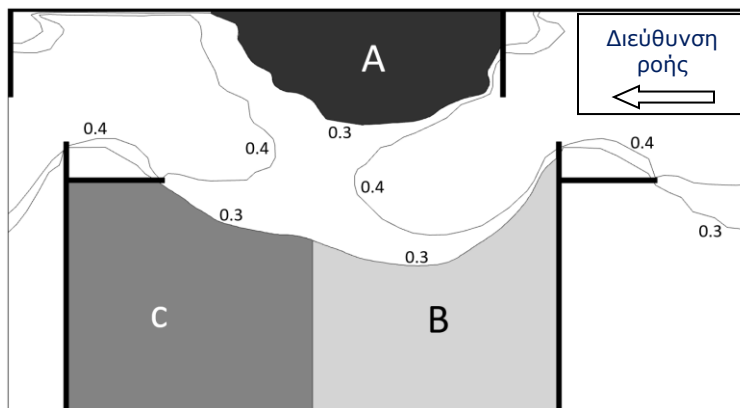
(α)



(β)



**Εικόνα 5.25** Γραμμές ροής (α) σε κάτοψη, (β) σε πλάγια όψη και (γ) σε τρισδιάστατη απεικόνιση στις δεξαμενές 3 μέχρι 9 με χρωματική κλίμακα για το μέσο κατά βάθος πεδίο ταχυτήτων ροής



**Εικόνα 5.26** Περιοχών ανάπαυσης με ταχύτητες μικρότερες από 0.30 m/s

## 5.6 Υπολογισμοί του μοντέλου συμπεριφοράς ιχθύων

### 5.6.1 Δεδομένα εισόδου του μοντέλου συμπεριφοράς ιχθύων

Τα δεδομένα εισόδου του ΜΣΙ σε ΔΙΚΑ είναι (α) το δισδιάστατο πεδίο ροής και (β) τα χαρακτηριστικά των ιχθύων που θα προσομοιωθούν, τα οποία περιλαμβάνουν (α) το μήκος τους και (β) τις δυνατότητες κολύμβησης τους. Οι υπολογισμοί του υδροδυναμικού πεδίου γίνονται απευθείας σε δομημένο πλέγμα, το οποίο εισάγεται χωρίς μετατροπή. Το ΜΣΙ υπολογίζει μόνο δισδιάστατες τροχιές και δεν λαμβάνει υπόψη το βάθος, το οποίο δεν απαιτείται από το μοντέλο.

Στους υπολογισμούς προσομοιώσαμε την κίνηση ιχθύων με τα χαρακτηριστικά των ιχθύων Α και Β, με ταχύτητα πορείας, παρατεταμένη και έκρηξης ίση με 0.46 m/s, 0.97 m/s και 1.5 m/s, αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές είναι σύμφωνες με (α) τη βιβλιογραφία [4],

[5], [47] και  $(\beta)$  τα πειραματικά δεδομένα [69]. Το χρονικό βήμα θεωρήθηκε ίσο με 0.2 s.

### 5.6.2 Βαθμονόμηση

Το μοντέλο βαθμονομήθηκε χρησιμοποιώντας  $(\alpha)$  το SQD και  $(\beta)$  την τυχαία οριακή ταχύτητα κίνησης. Το SQD υπολογίζεται από την εξίσωση (2.24). Στην παρούσα εφαρμογή το  $\alpha$  είναι ίσο με 0.5.

Η οριακή ταχύτητα τυχαίας κίνησης εξαρτάται από το πεδίο ροής γύρω από το ψάρι. Από τη βαθμονόμηση ορίσαμε μια ταχύτητα ίση με 0.5 FishLength/s, ως κατάλληλη για τη ΔΙΚΑ. Αυτό είναι σύμφωνο με τη βιβλιογραφία [68].

### 5.6.3 Αποτελέσματα και σχολιασμός των αποτελεσμάτων του μοντέλου συμπεριφοράς ιχθύων

Με το ΜΣΙ προσομοιώθηκαν 20 μεμονωμένες τροχιές, από τις οποίες 16 έφτασαν στο ανάντη άνοιγμα. Οι 16 τροχιές συγκρίθηκαν με τις τροχιές που παρήγαγαν οι Rodriguez et al. [69]. Στην **Εικόνα 5.27α** παρουσιάζονται οι υπολογισμένες τροχιές. Η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή δείχνει τη εξωτερική περιβάλλουσα των πειραματικά μετρούμενων τροχιών των ιχθύων Α και Β. Στην **Εικόνα 5.27β** φαίνεται μια πειραματική και μια υπολογισμένη τροχιά του ιχθύος Α στην πρώτη δεξαμενή ξεκινώντας από το ίδιο σημείο.

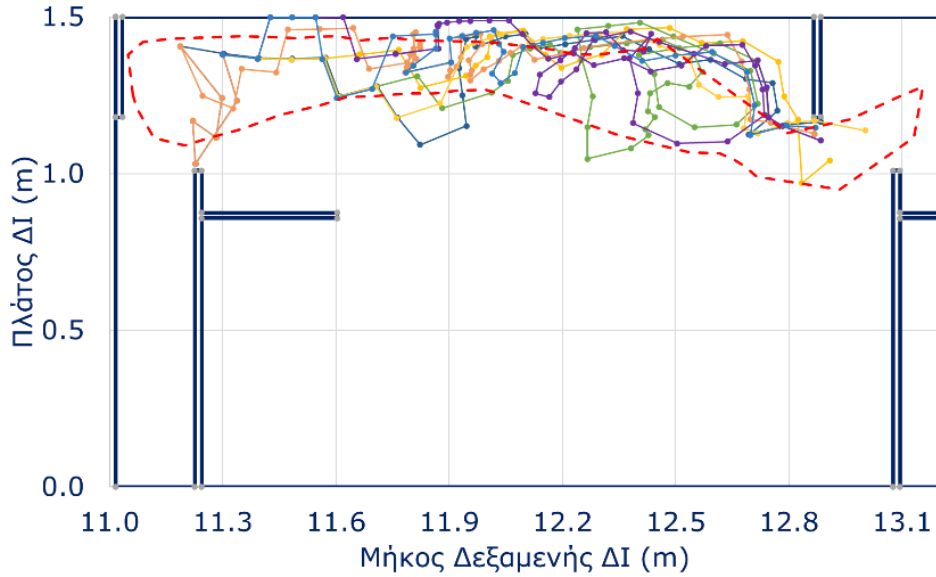
Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα ορίζουμε τρεις κύριους τρόπους κίνησης. Τον τρόπο Α (TA), όπου τα ψάρια χρησιμοποιούν την περιοχή μεταξύ των μικρών πετασμάτων και του άνω τοιχώματος, τον τρόπο Β (TB), όπου τα ψάρια περνούν το κατάντη πέτασμα και κινούνται προς το κάτω τοίχωμα (περιοχές ανάπαυσης Β και C, **Εικόνα 5.26**) μέχρι να φτάσουν στο ανάντη τμήμα της δεξαμενής και στη συνέχεια κινούνται προς το ανάντη άνοιγμα, και τον τρόπο Γ (TC), όπου τα ψάρια κινούνται κατά μήκος της τροχιάς TA αλλά πριν από το ανάντη άνοιγμα (άνοιγμα εξόδου) αλλάζουν κατεύθυνση προς την περιοχή ανάπαυσης Β και στη συνέχεια επιστρέφουν προς το άνοιγμα. Από τα πειραματικά δεδομένα το 64% (9 από τα 14) των ιχθύων χρησιμοποιούν την TA, το 14% (2 από τα 14) την TB και το 22% (3 από τα 14) την TC, ενώ στο μοντέλο τα ποσοστά είναι 68% (11 από τα 16), 12.5% (2 από τα 16) και 6% (1 από τα 16) αντίστοιχα. Το μοντέλο υπολογίζει δύο ακόμη τροχιές όπου ο ιχθύς χρησιμοποιεί μια διαδρομή παρόμοια με την TB μέχρι να φτάσει στην περιοχή ανάπαυσης C και στη συνέχεια επιστρέφει και συνεχίζει με μια τροχιά παρόμοια με την TA. Ονομάσαμε αυτόν τον τρόπο κίνησης D (TD). Όλες οι τρόποι κίνησης φαίνονται στην **Εικόνα 5.28**.

Στην **Εικόνα 5.29** απεικονίζονται, πάνω στις γραμμές ροής του πεδίου της ΔΙ, οι 2 πειραματικές τροχιές των ιχθύων Α (με κίτρινη κουκκίδα) και Β (με κόκκινη κουκκίδα) και μια προσομοιωμένη τροχιά του ιχθύος Α από το ΜΣΙ. Η συνολική κίνηση του προσομοιωμένου ιχθύ δεν ταυτίζεται με αυτή του ιχθύ Α, όμως αυτό είναι λογικό, γιατί η κίνηση του προσομοιωμένου ιχθύ καθορίζεται και από τυχαίες αποφάσεις. Αυτό όμως που πρέπει να σημειωθεί είναι ότι  $(\alpha)$  η συνολική τροχιά του προσομοιωμένου ιχθύ ακολουθεί τους ίδιους γενικευμένους τρόπους κίνησης, που φαίνονται στην **Εικόνα 5.28**, και  $(\beta)$  ότι ο προσομοιωμένος ιχθύς χρησιμοποιεί κυρίως τις περιοχές ανάπαυσης Α, Β και C (**Εικόνα 5.26**).

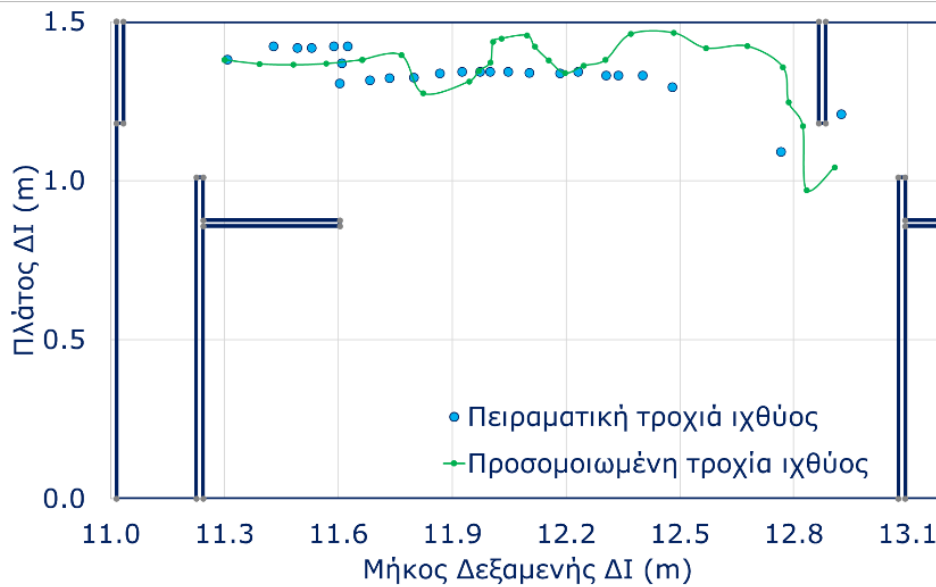
Ο χρόνος που χρειαζόταν ο ιχθύς Α για να φτάσει στο άνω άκρο της δεξαμενής κυμαινόταν από 6s έως 17s (**Πίνακας 5.6**), με μέση τιμή 8.3s για την πειραματική μελέτη, ενώ το FMM υπολόγισε το εύρος από 5.4s έως 24.4s με μέση τιμή 11.4s. Πρέπει

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΔΙΟΔΟΥΣ ΙΧΘΥΩΝ

να σημειωθεί ότι στα 11.4s περιλαμβάνεται ο χρόνος που το ψάρι στέκεται ακίνητο ή κινείται στις ζώνες ανάπαυσης με τη ροή, ο οποίος θα μπορούσε επίσης να είναι χρόνος ανάπαυσης. Τέλος, το ΜΣΙ δεν υπολόγισε τροχιές με παραμονή στις λίμνες άνω των 380s, ενώ ο μέγιστος χρόνος παραμονής στο πείραμα υπερβαίνει τις 2000s.



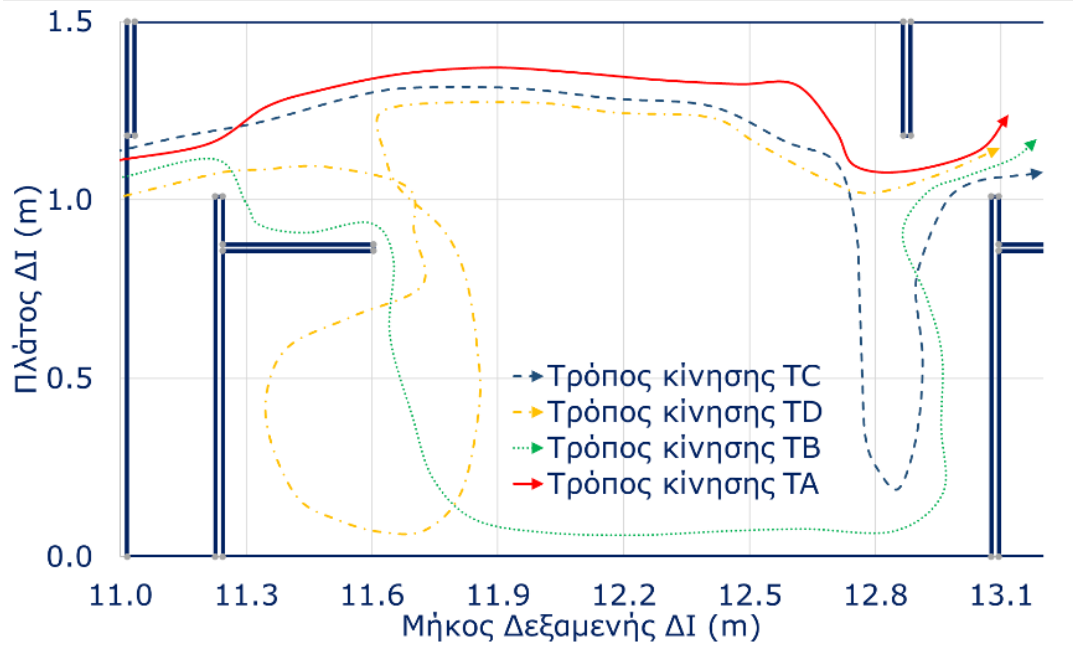
(α)



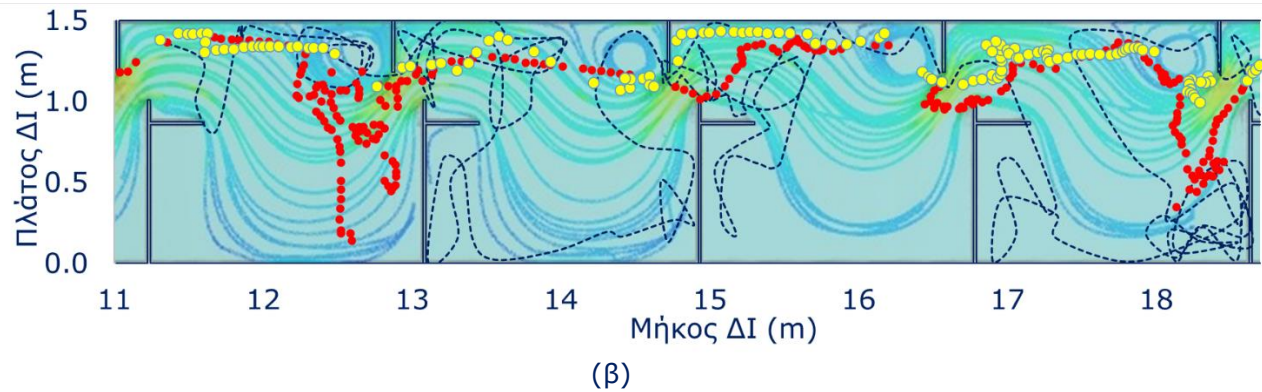
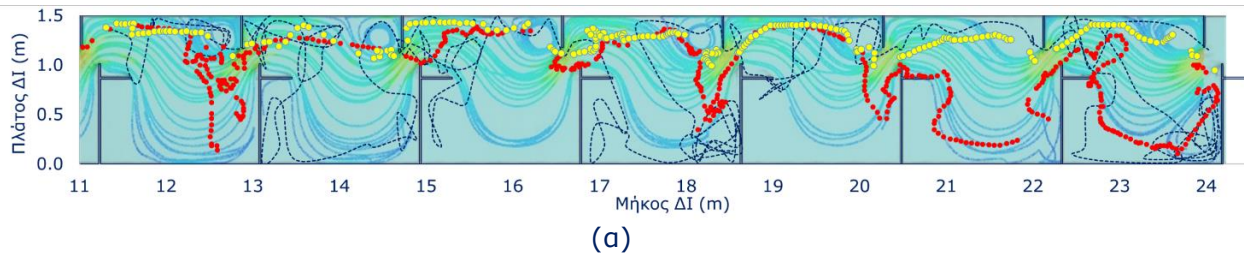
(β)

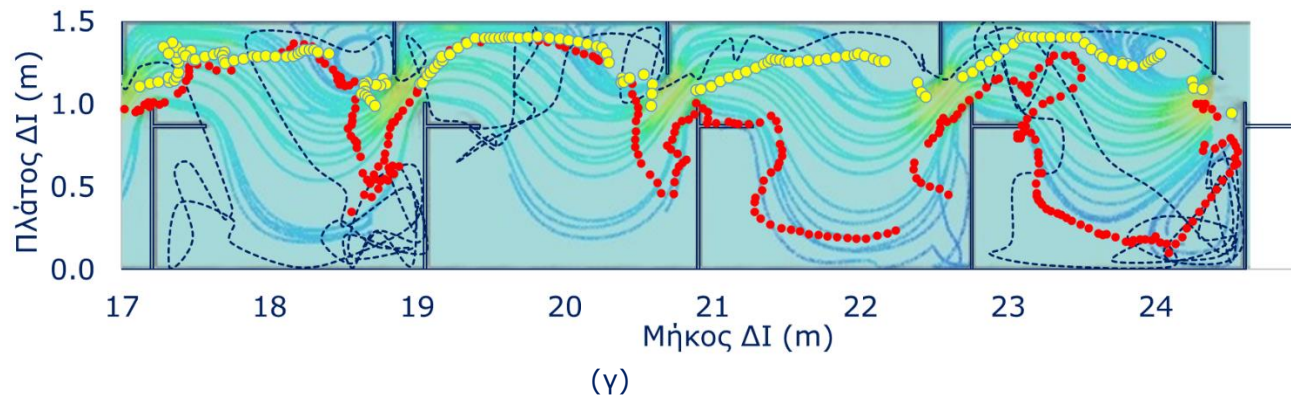
**Εικόνα 5.27** (α) Προσομοιωμένες τροχιές σε σύγκριση με το εξωτερικό όριο των πειραματικά μετρούμενων τροχιών του ιχθύος Α και (β) σύγκριση μεταξύ πειραματικής και προσομοιωμένης τροχιάς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΔΙΟΔΟΥΣ ΙΧΘΥΩΝ



**Εικόνα 5.28** Οι τέσσερις γενικευμένοι τρόποι κίνησης των ιχθύων εντός της ΔΙ σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα και το ΜΣΙ





**Εικόνα 5.29** Απεικόνιση των πειραματικών (κίτρινες και κόκκινες κουκίδες) και της υπολογιζόμενης τροχιάς (μπλε διακεκομμένη γραμμή) πάνω στις γραμμές ροής. Η ροή είναι από τα δεξιά στα αριστερά και η κίνηση των ιχθύων αντίθετη. (α) Ολόκληρη η ΔΙ, (β) μεγέθυνση των τεσσάρων πρώτων δεξαμενών και (γ) μεγέθυνση των τεσσάρων τελευταίων δεξαμενών

Στη εργασία τους, οι Wang et al. [13] συνδύασαν πειράματα ροής και συμπεριφοράς ιχθύων σε μια ΔΙΚΑ με διάταξη παρόμοια με των Rodriguez et al. [69], με το ίδιο είδος ιχθύων, και διαπίστωσαν ότι οι ιχθύες ακολουθούσαν τους 3 τυπικούς τρόπους κίνησης (M1, M2 και M3), που φαίνονται στην **Εικόνα 5.18**, και χρησιμοποιούν τις ζώνες ανάπαυσης Z1, Z2 και Z3 με αντίστοιχες συχνότητες 33, 19 και 48 %. Στον τρόπο M2 που ήταν ο συχνότερα εμφανιζόμενος, οι ιχθύες εισέρχονταν στην δεξαμενή και παρέμεναν ακίνητοι για λίγα δευτερόλεπτα στη ζώνη Z3, στη συνέχεια μετακινούνταν στη ζώνη Z1 και παρέμεναν πίσω από το μικρό διάφραγμα, πολύ κοντά στον πίδακα νερού, για αρκετά δευτερόλεπτα ή λεπτά, και τέλος χρησιμοποιούσαν την ταχύτητα έκρηξης για να περάσουν μέσα από το άνοιγμα. Στον M1, οι ιχθύες εισήλθαν και παρέμειναν για μικρό χρονικό διάστημα πίσω από το μικρό πέτασμα, και σύντομα πέρασαν από το άνοιγμα στην επόμενη δεξαμενή ανάντη. Στον M3, οι ιχθύες εισήλθαν από την ανάντη δεξαμενή στη μεγάλη ζώνη ανακυκλοφορίας και παρέμειναν στη ζώνη Z2 αρκετά λεπτά ή και περισσότερο. Στη συνέχεια, κινήθηκαν κοντά στην εισερχόμενη φλέβα και το εγκάρσιο πέτασμα και χρησιμοποίησαν την ταχύτητα έκρηξης για να περάσουν μέσα από το άνοιγμα.

Τα παραπάνω είναι σε πολύ καλή συμφωνία με τις πειραματικές τροχιές των Rodriguez et al. [69] και τα αποτελέσματα του ΜΣΙ. Οι τρόποι κίνησης M1 και M2 πρακτικά ταυτίζονται με τον τρόπο TA του ΜΣΙ. Επίσης η περιοχές ανάπαυσης Z1 και Z2 είναι παρόμοιες με τις θέσεις ανάπαυσης που αναγνωρίστηκαν από τους Rodriguez et al. [69] και τις περιοχές A και B που εμφανίζονται στην **Εικόνα 5.26**. Τέλος, το ΜΣΙ δείχνει ότι κάποιες φορές οι ιχθύες επιστρέφουν σε προηγούμενη δεξαμενή, με παρόμοια κίνηση με τον τρόπο M2. Αυτό παρουσιάζεται στην **Εικόνα 5.29** στο κάθετο άνοιγμα στη θέση  $x=15m$ .

#### 5.6.4 Συμπεράσματα

Το ολοκληρωμένο μοντέλο σε ΔΙΚΑ επιβεβαιώθηκε με μια πειραματική εργασία που διεξήχθη από τους Rodriguez et al. [69]. Τα αποτελέσματα του υδροδυναμικού μοντέλου ήταν σύμφωνα με αυτά που υπολογίστηκαν από τους Rodriguez et al. [69]. Το OMM παρείχε 16 τροχιές. Οι προσομοιωμένες τροχιές, καθώς και οι περιοχές ανάπαυσης, ήταν σε καλή συμφωνία με τις πειραματικές. Επιπλέον, παρατηρώντας τις τροχιές από την εργασία των Rodriguez et al. [69] σε κάθε δεξαμενή καταλήξαμε σε τρεις κυρίως τρόπους κίνησης, τους TA, TB και TC, που ταυτίζονται και με άλλες

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΔΙΟΔΟΥΣ ΙΧΘΥΩΝ

ερευνητικές εργασίες [13]. Στα πειραματικά δεδομένα το 64% (9 από τα 14) των ιχθύων χρησιμοποιούν τον ΤΑ, το 14% (2 από τα 14) ΤΒ και το 22% (3 από τα 14) ΤC, ενώ στο ΟΜΜ τα ποσοστά είναι 68% (11 από τα 16), 12.5% (2 από τα 16) και 6% (1 από τα 16), αντίστοιχα. Ο χρόνος που χρειάζονται οι ιχθύες για να φτάσουν στο άνω άκρο της δεξαμενής κυμαίνεται από 6s έως 17s, με μέση τιμή 8.3s για την πειραματική μελέτη, ενώ το ΟΜΜ υπολόγισε το εύρος από 5.4s έως 24.4s με μέση τιμή 11.4s.



## 6 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΔΙΟΔΟΥ ΙΧΘΥΩΝ ΜΕ ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ

### 6.1 Εισαγωγή

Για την αποκατάσταση των υδρόβιων βιοτόπων σε ποταμούς με φράγματα, έχουν συνήθως προταθεί δύο λύσεις: (1) η μερική ή ολική αφαίρεση των φραγμάτων, για την οποία έχουν δημοσιευτεί πολυάριθμες μελέτες την τελευταία δεκαετία [83],[84] και (2) η δημιουργία ΔΙ, οι οποίες επιτρέπουν τη διέλευση ενός μέρους του ιχθυοπληθυσμού από ένα φράγμα [85]. Αν και η άρση των εμποδίων φαίνεται αρκετά ελπιδοφόρα, καθώς αποσκοπεί στην πλήρη αποκατάσταση της συνδεσιμότητας του ποταμού, σπάνια είναι εφικτή στην πράξη, λόγω οικονομικών περιορισμών, της παροχής άλλων οικολογικών υπηρεσιών που είναι απαραίτητες για την ανθρώπινη ανάπτυξη (π.χ. άρδευση, παροχή οικιακού νερού) ή των οφελών ασφαλείας, όπως ο έλεγχος των πλημμυρών που παρέχει ένα φράγμα [86]. Ως εκ τούτου, οι ΔΙ, είναι το πιο αποδοτικό μέτρο για τη βελτίωση/αποκατάσταση της συνδεσιμότητας των ποταμών. Η σημασία αυτών των κατασκευών ενισχύθηκε την τελευταία δεκαετία με την έναρξη της εφαρμογής εργαλείων πολιτικής για τα ύδατα, όπως η Ευρωπαϊκή Οδηγία Πλαίσιο για τα Νερά 2000/60/ΕΚ (ΟΠΥ) [87], η οποία θεωρεί την αποτελεσματική διέλευση και την απρόσκοπτη μετανάστευση των ιχθύων ως βασικό στοιχείο για την αποκατάσταση και τη βιώσιμη διαχείριση των λεκανών απορροής.

Έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τύποι ΔΙ, συμπεριλαμβανομένων τεχνικών, φυσικών κατασκευών και ειδικών κατασκευών, με τις πρώτες να είναι οι πιο συνηθισμένες παγκοσμίως [88]. Οι ΔΙ κάθετου ανοίγματος (ΔΙΚΑ) όμως είναι ο τύπος ΔΙ που χρησιμοποιείται συχνότερα, εξαιτίας των πλεονεκτημάτων αναφορικά με τη λειτουργία της και το κόστος κατασκευής και συντήρησης της. Σε αυτόν τον τύπο ΔΙ οι βασικές παράμετροι σχεδιασμού είναι οι διαστάσεις των δεξαμενών [89], τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των κάθετων ανοιγμάτων μεταξύ των δεξαμενών (το πλάτος του ανοίγματος) [90] και η κλίση του πυθμένα [91]. Οι ΔΙΚΑ είναι ο ιδανικότερος τύπος τεχνητής ΔΙ για τη διέλευση πολλαπλών ειδών [10]. Πιο πρόσφατα, σύμφωνα με την ΟΠΥ, η έρευνα σχετικά με τους ΔΙ έχει μετατοπιστεί από ΔΙ που σχεδιάζονται για συγκεκριμένα είδη προς ολιστικές ΔΙ που μπορούν να διευκολύνουν την ασφαλή διέλευση για ένα ευρύ φάσμα ειδών και κατηγοριών μεγέθους, που αντιπροσωπεύουν διαφορετικά οικολογικά χαρακτηριστικά [92].

Η αποτελεσματικότητα των ΔΙ, που ορίζεται ως το ποσοστό των ιχθύων που περνούν επιτυχώς από την είσοδο στην έξοδο [93], έχει συζητηθεί πολύ, μπορεί να κυμαίνεται από 0% έως > 90%, με τις μέσες τιμές να κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 40% και 77% [94], ενώ συχνά είναι υψηλότερη για τα σαλμονοειδή από ό,τι για τα μη-σαλμονοειδή είδη [95], [96]. Έχουν επίσης αναφερθεί χαμηλότερες και υψηλότερες τιμές απόδοσης [96], [97]. Με βάση αυτή τη διαφοροποίηση που εξαρτάται από το είδος και τη δομή, έχει εξαχθεί το συμπέρασμα ότι για τις ΔΙ, ενδέχεται να μην υπάρχει λύση ενός μεγέθους που να ταιριάζει σε όλους, ιδίως όταν τα σχέδια ΔΙ και οι στρατηγικές διατήρησης εφαρμόζονται σε περιοχές και για είδη διαφορετικά από αυτά για τα οποία σχεδιάστηκαν αρχικά [98].

Ωστόσο, η βελτιστοποίηση πριν από την εγκατάσταση αποτελεί ένα κρίσιμο βήμα προς την κατεύθυνση της κατασκευής αποτελεσματικών ΔΙ [56], [57], [99], καθώς επιτρέπει την αξιολόγηση των διατάξεων που είναι πιο κατάλληλες για πολλαπλά είδη-στόχους, με τη χρήση υδροδυναμικής μοντελοποίησης ενδιατημάτων. Ωστόσο, αν και οι πρόσφατες εξελίξεις στην οικοϋδραυλική έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη γρήγορων, μεγάλης ακρίβειας και οικονομικά αποδοτικών εργαλείων μοντελοποίησης, τα εργαλεία

αυτά σπάνια έχουν χρησιμοποιηθεί για τέτοιους σκοπούς βελτιστοποίησης πριν από τη δημιουργία [57], [100] και οι λίγες διαθέσιμες μελέτες μοντελοποίησης ενδιαιτημάτων έχουν επικεντρωθεί κυρίως σε ΔΙ που μοιάζουν με τη φύση [101], [102], [103]. Τα κύρια ερωτήματα βελτιστοποίησης που πρέπει να απαντηθούν είναι:

- 1) Ποια είναι η οικολογικά βέλτιστη παροχή για μια ΔΙ;
- 2) Μπορεί μια ΔΙ να είναι βέλτιστη για όλα τα είδη-στόχους;
- 3) Θα μπορούσε ένα σύστημα μεταβαλλόμενης παροχής να αναπτύξει βέλτιστες συνθήκες για περισσότερα είδη;
- 4) Πώς επηρεάζονται η υδραυλική της ΔΙ και η σχετική καταλληλότητα από αλλαγές στη δομή της ΔΙ;

Τα μοντέλα υδροδυναμικής-ενδιαιτήματος (ΜΥΕ) παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τη μεταβολή των φυσικών ενδιαιτημάτων ως συνάρτηση της παροχής, προβλέποντας τα βάρη νερού και τις ταχύτητες ροής σε διαφορετικές παροχές εντός μιας ΔΙ, συνδυάζοντάς τα με τις προτιμήσεις ενδιαιτημάτων των υδρόβιων βιοτόπων για τον υπολογισμό της καταλληλότητας ενδιαιτήματος σε κάθε προσομοιωμένη παροχή [104]. Αυτές οι εγγενείς ιδιότητες των ΜΥΕ μπορούν να παρέχουν χρήσιμες γνώσεις και απαντήσεις στα παραπάνω ερωτήματα. Ωστόσο, δεν έχουν χρησιμοποιηθεί επαρκώς για τον σκοπό αυτό.

Είναι απαραίτητο να αξιολογηθεί η χρήση των ΜΥΕ για την οικολογική προ-βελτιστοποίηση των ΔΙ. Για την αξιολόγησή τους σχεδιάστηκε ένα μοντέλο ΔΙΚΑ με βάση διάφορους συνδυασμούς τριών βασικών υδραυλικών παραμέτρων (μέγεθος δεξαμενής, πλάτος κάθετου ανοίγματος και κλίση πυθμένα), δίνοντας συνολικά δώδεκα διατάξεις ΔΙΚΑ, οι οποίοι προσομοιώθηκαν για διάφορες παροχές, χρησιμοποιώντας ένα διδιάστατο υδροδυναμικό μοντέλο. Στη συνέχεια, τα υδροδυναμικά αποτελέσματα συνδυάστηκαν με τις προτιμήσεις ενδιαιτημάτων των βενθικών μακροασπόνδυλων και τριών ειδών ιχθύων (επτά ομάδες ιχθύων διαφορετικών κλάσεων μεγέθους) για την αξιολόγηση της καταλληλότητας κάθε τύπου ΔΙ σε κάθε παροχή, για όλους τους μελετώμενους βιοτόπους. Λαμβάνοντας υπόψη ότι μια οικολογικά προ-βελτιστοποιημένη ΔΙΚΑ θα έχει αυξημένες δυνατότητες να χρησιμεύσει ως μια αποτελεσματική διαδρομή για τη μετακίνηση των ιχθύων προς τα ανάντη και προς τα κατάντη ενός φράγματος, αποδεικνύουμε πώς τα ΜΥΕ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον σκοπό αυτό, για την αποκατάσταση της υδρομορφολογικής και τελικά της οικολογικής συνδεσιμότητας των συστημάτων ποταμών με φράγματα.

## 6.2 Μεθοδολογία

### 6.2.1 Επιλογή των χαρακτηριστικών στη διόδου ιχθύων

Πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί σε διατάξεις ΔΙΚΑ που έχουν διερευνηθεί ευρέως πειραματικά ή με μαθηματικά μοντέλα [8], [24], [47] με μήκος δεξαμενής και κλίση πυθμένα, που συνήθως συναντώνται στη βιβλιογραφία σε τέτοιου είδους ΔΙ [105]. Αρχικά αναπτύχθηκε ένα γενικό σχήμα, το οποίο αποτελείται από επαναλαμβανόμενες ακολουθίες έξι διαδοχικών δεξαμενών συν μια μεταβατική δεξαμενή (δεξαμενή ανάπαυσης), που επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ενός κατακόρυφου ανοίγματος. Με βάση αυτή τη γενική διάταξη, σχεδιάστηκαν 12 ΔΙ με βάση το μέγεθος της δεξαμενής, το πλάτος της ανοίγματος και την κλίση του πυθμένα. Στον Πίνακα **6.1** και στην **Εικόνα 6.1** φαίνονται τα χαρακτηριστικά των 12 ΔΙ.

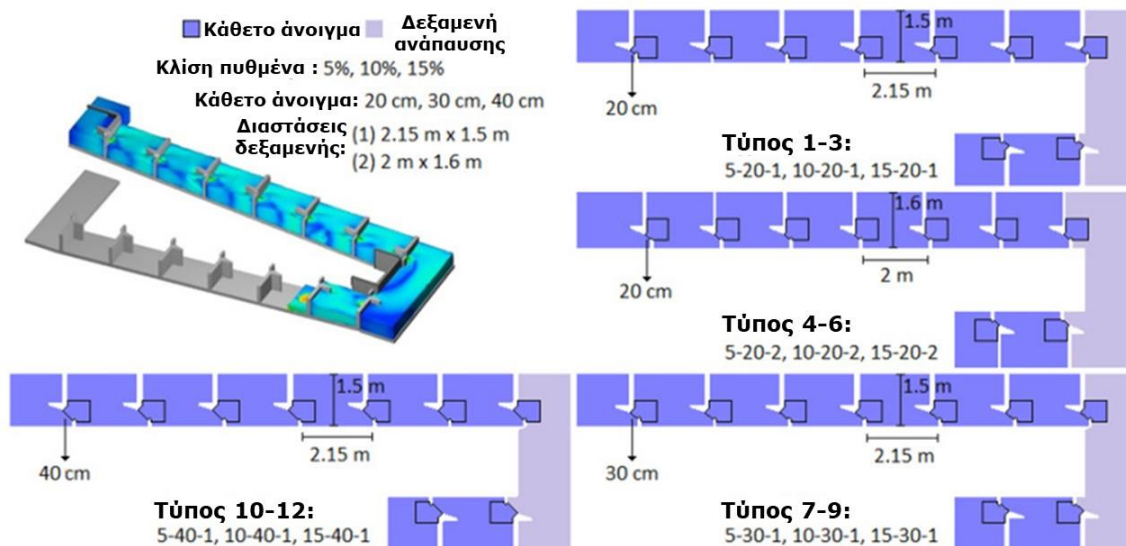
Κατασκευάστηκε μη δομημένο υπολογιστικό πλέγμα με μέγεθος που κυμαινόταν από 20.000 έως 30.000 στοιχεία με ελάχιστη χωρική ανάλυση 0.03 m. Έγινε πύκνωση του πλέγματος στα κάθετα ανοίγματα, εξαιτίας της απότομης αλλαγής της κλίσης της

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΔΙΟΔΟΥ ΙΧΘΥΩΝ ΜΕ ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ

ταχύτητας στο σημείο αυτό [91]. Τέλος πραγματοποιήθηκε ανάλυση ανεξαρτησίας του πλέγματος για να διασφαλιστούν συγκρίσιμα αποτελέσματα.

**Πίνακας 6.1** Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δεξαμενών των 12 ΔΙ που μελετήθηκαν

A/A	Όνομα	Τύπος	Μήκος (m)	Πλάτος (m)	b <sub>0</sub> (m)	J%
1	5-20-1	1-3	2.15	1.50	0.20	5%
2	10-20-1	1-3	2.15	1.50	0.20	10%
3	15-20-1	1-3	2.15	1.50	0.20	15%
4	5-20-2	4-6	2.00	1.60	0.20	5%
5	10-20-2	4-6	2.00	1.60	0.20	10%
6	15-20-2	4-6	2.00	1.60	0.20	15%
7	5-30-1	7-9	2.15	1.50	0.30	5%
8	10-30-1	7-9	2.15	1.50	0.30	10%
9	15-30-1	7-9	2.15	1.50	0.30	15%
10	5-40-1	10-12	2.15	1.50	0.40	5%
11	10-40-1	10-12	2.15	1.50	0.40	10%
12	15-40-1	10-12	2.15	1.50	0.40	15%



**Εικόνα 6.1** Τρισδιάστατη αναπαράσταση της ΔΙ κάθετου ανοίγματος, διδιάστατες αναπαραστάσεις των εξεταζόμενων τύπων και σκιαγράφιση των τμημάτων εφαρμογής της βελτιστοποίησης

### 6.2.2 Επιβεβαίωση του υδροδυναμικού μοντέλου

Για τον υπολογισμό του πεδίου ροή χρησιμοποιήθηκε το υδροδυναμικό μοντέλο TELEMAC-2D [32], [33]. Το TELEMAC-2D επιλύει τις εξισώσεις SWE με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η ΔΙ θεωρήθηκε κατασκευασμένη εξ ολοκλήρου από σκυρόδεμα και ο πυθμένας της επενδυμένος με μικρές πέτρες (πλάτους 6-12 cm), όπως συνιστάται από προηγούμενη βιβλιογραφία για τη διευκόλυνση της διέλευσης τόσο των βενθικών μακροασπόνδυλων όσο και των ιχθύων [10], [106]. Έτσι, ο συντελεστής τραχύτητας Manning ορίστηκε σε 0,025 για τον πυθμένα της ΔΙ, ώστε να ληφθεί υπόψη

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΔΙΟΔΟΥ ΙΧΘΥΩΝ ΜΕ ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ

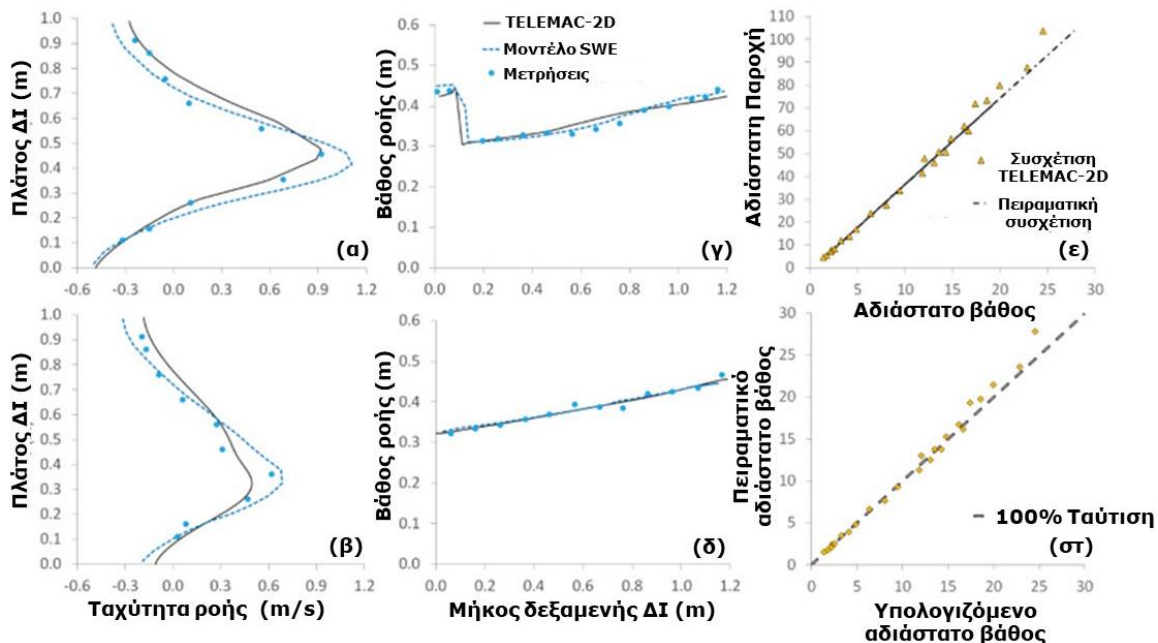
το βραχώδες υπόστρωμα (S) [107] και σε 0,016 για τα τοιχώματα που κατασκευάστηκαν από σκυρόδεμα. Σαν οριακές συνθήκες καθορίστηκε η παροχή (Q) στο ανάντη άκρο του καναλιού (εισροή) και η στάθμη επιφάνειας (h) της ροής στο κατάντη άκρο. Για τον υπολογισμό της στάθμης επιφάνειας, ορίστηκε μια αρχική τιμή h με βάση την ακόλουθη σχέση αδιάστατης παροχής - βάθους ροής  $Q^*-h$  όπως προτάθηκε από τους Rajaratnam et al. [8]:

$$Q^* = 3.77(D_o/b_s) - 1.11 \quad (6.1)$$

όπου,  $Q^*$  είναι η αδιάστατη παροχή,  $D_o$  είναι το μέσο βάθος ροής στη δεξαμενή και  $b_s$  είναι το πλάτος του καθέτου ανοίγματος.

Εφαρμόστηκε μια επαναληπτική διαδικασία ξεκινώντας από την αρχική τιμή h, που προκύπτει από την εξίσωση (6.1) και χρησιμοποιώντας ένα σύνολο εξισώσεων εμπειρικού σχεδιασμού για τις ΔΙΚΑ [1], [10] βρέθηκε το βάθος ροής που αντιστοιχεί για την κάθε διάταξη και παροχή.

Για την επιβεβαίωση του TELEMAC-2D έγιναν υπολογισμοί για την εύρεση του πεδίου ροής με τα δεδομένα (α) από την πειραματική εργασία των Puertas et al. [18] και (β) με τα προσομοιωμένα δεδομένα με τις εξισώσεις SWE των Cea et al. [58] για παρόμοιες διατάξεις ΔΙ. Επίσης έγινε σύγκριση των βαθών ροής, που υπολογίστηκαν από το μοντέλο, με τα αποτελέσματα της Εξίσωσης (6.1) για τον τύπο 5-20-2, για όλες τις παροχές. Και οι δύο μέθοδοι δείχνουν αρκετά καλή συμφωνία των πειραματικών δεδομένων με τους υπολογισμούς του TELEMAC-2D (**Εικόνα 6.2**).



**Εικόνα 6.2** Σύγκριση των προσομοιώσεων για τις ταχύτητες ροής ((α), (β)) και τα βάθη ροής ((γ), (δ)). Συσχέτιση αδιάστατης παροχής-βάθους από πειραματικές εργασίες [8] και των υπολογισμών του TELEMAC-2D (ε), καθώς και συσχέτιση πειραματικών τιμών και υπολογισμών (στ)

Το επιβεβαιωμένο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση των ακόλουθων σεναρίων παροχής: 0.1 m<sup>3</sup>/s, 0.15 m<sup>3</sup>/s, 0.3 m<sup>3</sup>/s, 0.6 m<sup>3</sup>/s, 0.9 m<sup>3</sup>/s, 1.1 m<sup>3</sup>/s και

1.3 m<sup>3</sup>/s. Το εύρος αυτό θα επιτρέψει την ολοκληρωμένη κατανόηση του πεδίου ροής και του τρόπου με τον οποίο επηρεάζεται από την παροχή και τη διάταξη ΔΙ.

### 6.2.3 Καμπύλες καταλληλότητας ενδαιτημάτων

Καθώς η μελέτη καταλληλότητας ενδαιτημάτων όλων των πιθανών ειδών που υπάρχουν σε μια περιοχή θα ήταν πολύ χρονοβόρα, επιλέχθηκαν τρία είδη ως αντιπροσωπευτικά τριών μορφο-οικολογικών ομάδων [108]: (α) Η πέστροφα των Δυτικών Βαλκανίων (*Salmo farioides*), αντιπροσωπευτική των μεγάλου μεγέθους μόνιμων σαλμονοειδών, (β) η μπριάννα των Βαλκανίων (*Barbus balcanicus*), αντιπροσωπευτική των μικρού μεγέθους ποταμόδρομων και βενθικών κυπρινοειδών ιχθύων, και (γ) ο Πελοποννησιακός ποταμοκέφαλος (*Squalius peloronnensis*), ως αντιπροσωπευτικό των μεσαίου μεγέθους ποταμόδρομων κυπρινοειδών. Η χρήση ομαδοποιημένων οργανισμών έχει προταθεί ως εργαλείο για προσεγγίσεις πολλαπλών ειδών [109]. Οι προτιμήσεις των ενδαιτημάτων αυτών των τριών ειδών ιχθύων και των βενθικών μακροασπόνδυλων χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια για την αξιολόγηση της καταλληλότητας καθενός από τις 12 διατάξεις ΔΙΚΑ. Για τους ιχθύς ενδιαφέροντος χρησιμοποιήθηκαν οι κλάσεις μεγέθους του Πίνακα 6.2. Οι προτιμήσεις των ενδαιτημάτων των βενθικών μακροασπονδύλων αξιολογήθηκαν με τη χρήση του συνόλου δεδομένων benthos-GR [110], το οποίο αποτελείται από 380 παρατηρήσεις μικροενδαιτημάτων που συσχετίζουν την ταχύτητα ροής (V), το βάθος νερού (D) και τον τύπο του υποστρώματος (S) με έναν δείκτη καταλληλότητας ενδαιτημάτων με βάση 26.758 δείγματα που ανήκουν σε 70 οικογένειες μακροασπονδύλων.

**Πίνακας 6.2** Κλάσεις μεγέθους για τα είδη που μελετήθηκαν [111]-[113]

	Ταξινόμηση σε Κλάσεις με κριτήριο το μήκος ιχθύος (FL) σε cm			
	Μικρή	Μεσαία	Μεγάλη	Χωρίς ταξινόμηση
Πέστροφα των Δυτικών Βαλκανίων	FL ≤ 10	10 ≤ FL ≤ 20	FL > 20	-
Μπριάννα των Βαλκανίων	FL ≤ 15	-	FL > 15	-
Ποταμοκέφαλος Πελοποννήσου	FL ≤ 10	-	FL > 10	-
Μακροασπόνδυλα	-	-	-	Ναι

### 6.2.4 Μοντελοποίηση καταλληλότητας ενδαιτημάτων

Για κάθε μία από τις 84 υδροδυναμικές προσομοιώσεις (12 τύποι ΔΙ x 7 παροχές) και για κάθε μία από τις επτά ομάδες ιχθύων, η καταλληλότητα ενδαιτημάτων εκτιμήθηκε σε κάθε κόμβο του υπολογιστικού πλέγματος της ΔΙ για τρεις υδραυλικές μεταβλητές: V, D και S. Για τον υπολογισμό της καταλληλότητας ενδαιτημάτων ιχθύων, οι αριθμητικές τιμές των V, D και S μετατράπηκαν σε προτίμηση καταλληλότητας, χρησιμοποιώντας τις σχετικές καμπύλες καταλληλότητας ενδαιτημάτων. Στη συνέχεια, υπολογίστηκε ένας συνδυασμένος δείκτης καταλληλότητας ενδαιτημάτων ως

$$HSI = (HSI_V - HSI_D - HSI_S)^{(1/3)} \quad (6.2)$$

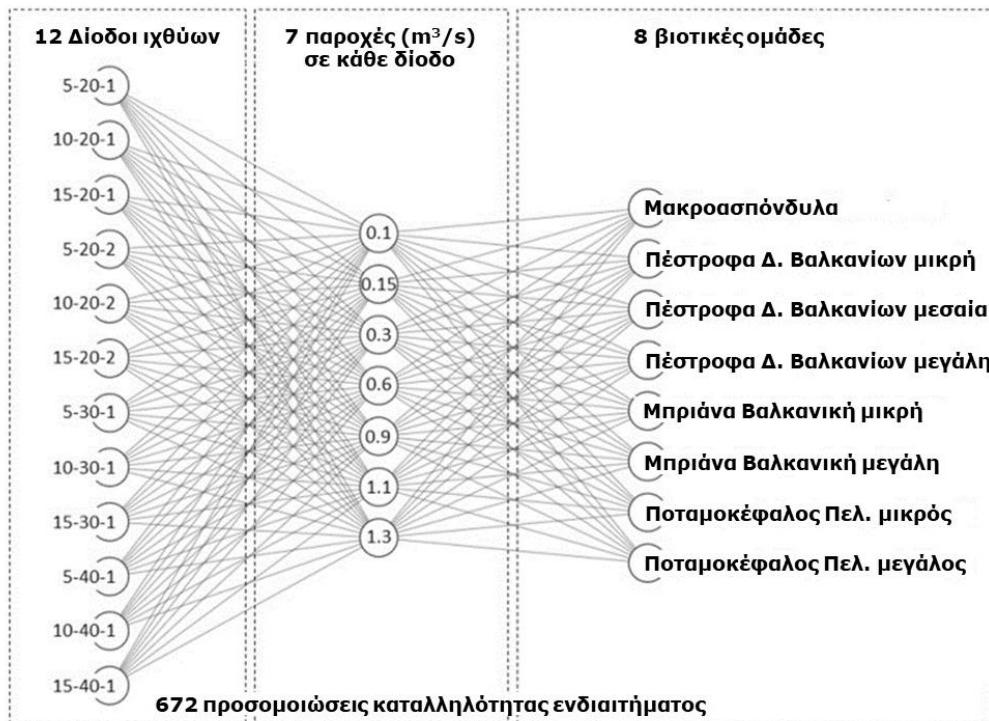
όπου HSI<sub>V</sub> είναι η προτίμηση καταλληλότητας ενδαιτημάτων ταχύτητας, HSI<sub>D</sub> είναι η προτίμηση καταλληλότητας ενδαιτημάτων βάθους και HSI<sub>S</sub> είναι η προτίμηση καταλληλότητας ενδαιτημάτων υποστρώματος [114] [115].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΔΙΟΔΟΥ ΙΧΘΥΩΝ ΜΕ ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ

Η καταλληλότητα ενδαιτήματος μακροασπόνδυλων υπολογίστηκε με τη χρήση του λογισμικού HABFUZZ [116]. Οι αριθμητικές τιμές των V και D μετατράπηκαν σε πέντε αλληλεπικαλυπτόμενες κλάσεις τραπεζοειδούς σχήματος (ασαφή σύνολα, Fuzzy sets, FS) και ταξινομήθηκαν με βάση το ΥΠΟ [87] ( $0 \leq \text{κακή} \leq 0.2$ ,  $0.2 < \text{κακή} \leq 0.4$ ,  $0.4 < \text{μέτρια} \leq 0.6$ ,  $0.6 < \text{καλή} \leq 0.8$ ,  $0.8 < \text{υψηλή} \leq 1$ ). Κάθε αριθμητική τιμή των V και D ανατέθηκε σε μια ή περισσότερες κλάσεις με βαθμό συμμετοχής που κυμαίνεται από 0 έως 1 (το S αντιμετωπίστηκε ως crisp input)

Το σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης, με τις εκ των προτέρων υπολογισμένες τιμές HSI, χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη συνόλου κανόνων IF-THEN με βάση τα δεδομένα, οι οποίοι συσχετίζουν τα FS εισόδου με μια συγκεκριμένη κατηγορία HSI. Ο ασαφής βαθμός συμμετοχής (MD) κάθε μεταβλητής εισόδου (V, D και S) θεωρήθηκε στη συνέχεια ως η πιθανότητα εμφάνισης του συγκεκριμένου FS, όπως "IF το V είναι χαμηλό με MD 1 AND το D είναι μέτριο με MD 1 AND το S είναι χαλίκι με MD 1 THEN η HSI είναι υψηλή με MD 0.3 και καλή με MD 0.7". Οι κανόνες IF-THEN συνδυάστηκαν στη συνέχεια με τη χρήση της κοινής πιθανότητας του Bayes, έτσι ώστε (αναφερόμενοι στο προηγούμενο παράδειγμα) η πιθανότητα ο HSI του συγκεκριμένου κόμβου να είναι υψηλός είναι η κοινή πιθανότητα "το V είναι χαμηλό AND το D είναι μέτριο AND το S είναι χαλίκι AND ο HSI είναι υψηλός ( $1 \times 1 \times 1 \times 0.3 = 0.3$ )", ενώ η πιθανότητα ο HSI να είναι καλός είναι η κοινή πιθανότητα "το V είναι χαμηλό AND το D είναι μέτριο AND το S είναι χαλίκι AND ο HSI είναι καλός ( $1 \times 1 \times 1 \times 0.7 = 0.7$ )". Με βάση μια συνάρτηση χρησιμότητας [117], αποδόθηκε μια βαθμολογία σε κάθε κλάση HSI (κακή: 0.1, κακή: 0.3, μέτρια: 0.5, καλή: 0.7, υψηλή: 0.9) και η καταλληλότητα ενδαιτήματος σε κάθε κόμβο του υπολογιστικού πλέγματος προβλέφθηκε τελικά ως  $HSI = \sum M_{ij} S_{ij}$ , όπου  $M_{ij}$  δηλώνει την κοινή πιθανότητα εμφάνισης κάθε κλάσης HSI και  $S_{ij}$  δηλώνει τη βαθμολογία κάθε κλάσης HSI. Τελικά με βάση το πιο πάνω παράδειγμα, το HSI ισούται με  $0.7 \times 0.9 + 0.3 \times 0.7 = 0.84$  (υψηλό).

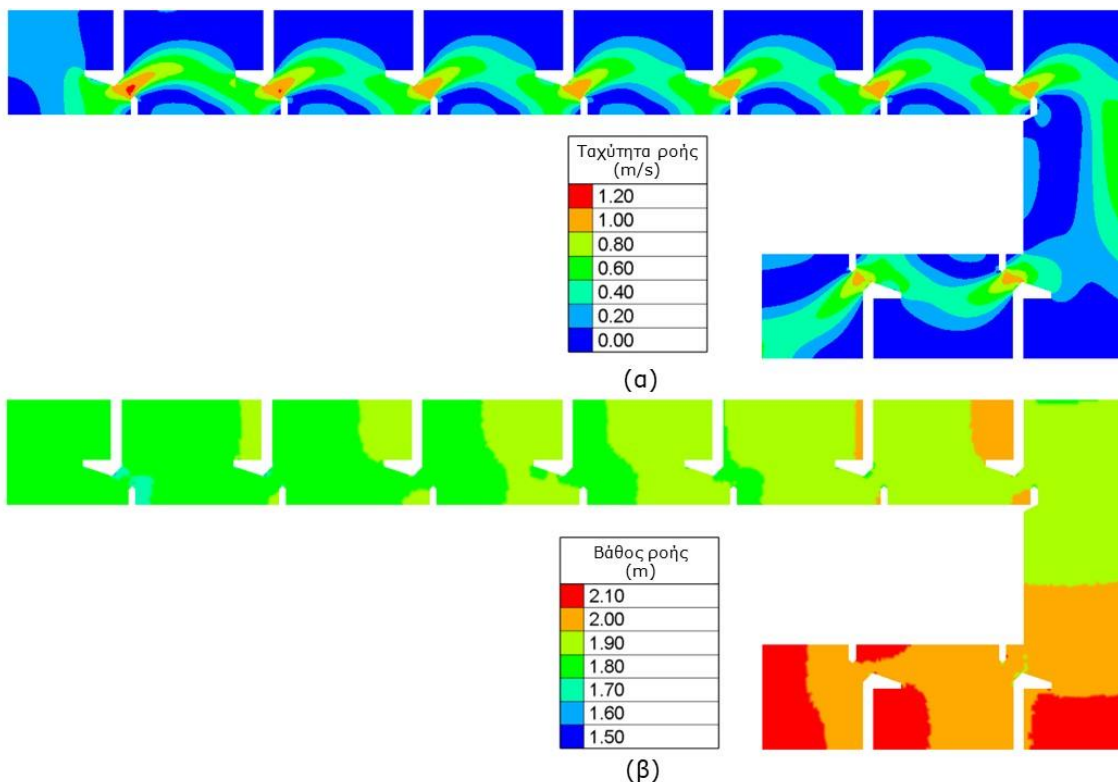
Συνολικά, εφαρμόσαμε 84 υδροδυναμικές προσομοιώσεις (12 τύποι ΔΙ x 7 παροχές) και 672 προσομοιώσεις ενδαιτημάτων (84 υδροδυναμικές προσομοιώσεις x 8 βιοτικές ομάδες (7 ομάδες ιχθύων + τα μακροασπόνδυλα) (βλ. **Εικόνα 6.3**).



**Εικόνα 6.3** Διάγραμμα ροής που εφαρμόστηκε για την αξιολόγηση της καταλληλότητας 12 τύπων ΔΙ σε 7 παροχές για 8 βιοτικές ομάδες

### 6.3 Υπολογισμοί υδροδυναμικού μοντέλου

Στην **Εικόνα 6.4** παρουσιάζεται ενδεικτικά η μέση ταχύτητα και το βάθος ροής για τη ΔΙΚΑ 5-30-1 και παροχή  $Q=0.6 \text{ m}^3/\text{s}$ . Από την **Εικόνα 6.5** φαίνεται ότι το υπολογιζόμενο βάθος ροής έχει ομοιόμορφη χωρική κατανομή μέσα στις δεξαμενές, όπως αναμενόταν, και γραμμική συσχέτιση με την εισερχόμενη παροχή. Η κλίση της γραμμικής συσχέτισης διαφέρει ανάλογα με την κλίση και το πλάτος της ανοίγματος. Η μέση τιμή του βάθους ροής ήταν ίδια σε όλες τις δεξαμενές, τα ανοίγματα και τη δεξαμενή ανάπαυσης για την ίδια παροχή (βλ. **Εικόνα 6.5**). Δεν παρατηρήθηκαν διαφορές στο βάθος ροής για τις ΔΙ με μεγαλύτερο πλάτος δεξαμενής (5-20-2, 10-20-2, 15-20-2) σε σύγκριση με όλους τους άλλους τύπους. Το μέγιστο βάθος ροής (5.1 m) παρατηρήθηκε στην υψηλότερη προσομοιωμένη παροχή ( $Q = 1.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ) και στη χαμηλότερη κλίση (τύπος 5-20-2). Στις δεξαμενές, το μέσο βάθος ροής κυμάνθηκε από 0.17 m στην μεγαλύτερη κλίση και τη χαμηλότερη παροχή (τύπος 15-40-1,  $Q = 0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ ) έως 4.92 m στη μικρότερη κλίση και τη μεγαλύτερη παροχή (τύπος 5-20-2,  $Q = 1.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Ομοίως, στα κάθετα ανοίγματα, το μέσο βάθος ροής κυμάνθηκε από 0.1 m (τύπος 15-40-1-  $Q = 0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ ) έως 4.85 m (τύπος 5-20-2-  $Q = 1.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ), και στη δεξαμενή ανάπαυσης, το μέσο βάθος ροής κυμάνθηκε από 0.23 m (τύπος 15-40-1-  $Q = 0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ ) έως 4.87 m (τύπος 5-20-2-  $Q = 1.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

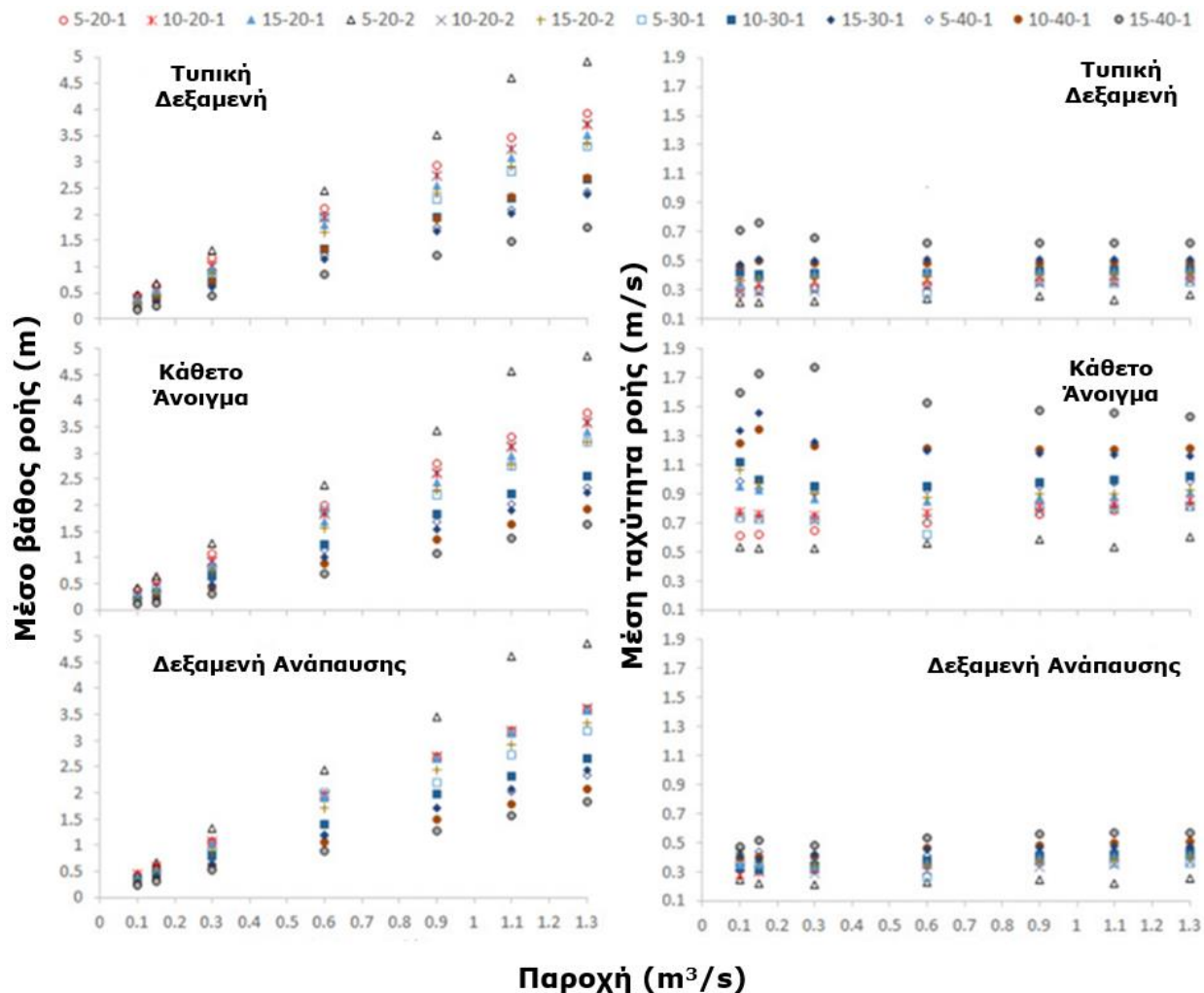


**Εικόνα 6.4** (α) Ταχύτητα και (β) βάθος ροής για τον τύπο 5-30-1 και παροχή  $Q=0.6 \text{ m}^3/\text{s}$

Η ταχύτητα ροής παρέμεινε σταθερή με την αύξηση της παροχής, ήταν υψηλότερη στις ανοίγματα, χαμηλότερη στις δεξαμενές και στη δεξαμενή ανάπαυσης. Αυξανόταν με την αύξηση της κλίσης πυθμένα και του πλάτους του ανοίγματος (βλ. **Εικόνα 6.5**). Η μεγαλύτερες τιμές ταχύτητας παρατηρήθηκαν στις χαμηλότερες παροχές και στην μεγαλύτερη κλίση και στο μεγαλύτερο πλάτος της ανοίγματος. Η μέγιστη ταχύτητα ( $3.04 \text{ m/s}$ ) παρατηρήθηκε στην μεγαλύτερη κλίση και χαμηλότερη παροχή που προσομοιώθηκε (τύπος 15-20-2,  $Q = 0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Στις δεξαμενές, η μέση ταχύτητα κυμάνθηκε από  $0.22 \text{ m/s}$  στη μικρότερη κλίση (τύπος 5-20-2 -  $Q = 0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ ) έως  $0.71 \text{ m/s}$  στην μεγαλύτερη κλίση (τύπος 15-40-1 -  $Q = 0.15 \text{ m}^3/\text{s}$ ), ανεξάρτητα από την παροχή. Ομοίως, στις ανοίγματα, η μέση ταχύτητα κυμαινόταν από  $0.1 \text{ m/s}$  (τύπος 5-20-2;  $Q = 0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ) έως  $4.85 \text{ m/s}$  (τύπος 15-40-1 -  $Q = 0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ), και στη δεξαμενή ανάπαυσης κυμαινόταν από  $0.21 \text{ m/s}$  (τύπος 5-20-2 -  $Q = 0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ) έως  $0.57 \text{ m/s}$  (τύπος 15-40-1 -  $Q = 1.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Τα μοτίβα του πεδίου ροής ήταν διαφορετικά μεταξύ των ΔΙ με πλάτος ανοίγματος  $20 \text{ cm}$  αλλά μικρότερο μέγεθος δεξαμενής (5-20-1, 10-20-1, 15-20-1), με υψηλότερες ταχύτητες ροής μέσα στις δεξαμενές, και εκείνων με πλάτος ανοίγματος  $20 \text{ cm}$  αλλά μεγαλύτερο μέγεθος δεξαμενής (5-20-2, 10-20-2, 15-20-2), στις οποίες οι υψηλότερες ταχύτητες ροής περιορίζονταν κοντά και μεταξύ των περιοχών των κάθετων ανοιγμάτων.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΔΙΟΔΟΥ ΙΧΘΥΩΝ ΜΕ ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ



**Εικόνα 6.5** Βάθος και ταχύτητα ροή σε σχέση με την παροχή για κάθε τύπο ΔΙ

### 6.4 Υπολογισμοί υδροδυναμικού μοντέλου – ενδιαιτήματος

#### 6.4.1 Καταλληλότητα της διόδου ιχθύων ανά βιοτική ομάδα

Η καταλληλότητα των ΔΙ ποικίλλει ανάλογα με τα είδη και τα στάδια ζωής. Για τις ομάδες ιχθύων μικρότερου μεγέθους βρέθηκε γενικά ότι οι τιμές HSI ήταν υψηλότερες σε χαμηλές παροχές ( $Q \leq 0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ) και μειώθηκαν καθώς αυξανόταν η παροχή. Ο ποταμοκέφαλος Πελοποννήσου ακολούθησε αυτό το μοτίβο, το HSI για τη μικρή και μεσαία πέστροφα των Δυτικών Βαλκανίων διέφερε σε μεγάλο βαθμό. Παρατηρήθηκε ότι το HSI μεταβάλλεται ανάλογα με την κλίση του πυθμένα και το πλάτος του ανοίγματος. Τέλος, το HSI για τη μικρή βαλκανική μπριάννα ήταν μέτριο σε όλους σχεδόν τους τύπους ΔΙΚΑ και τις παροχές. Σε αντίθεση με τα είδη μικρού μεγέθους, η HSI των ειδών μεγάλου μεγέθους δεν παρουσίασε συγκεκριμένο μοτίβο. Το μοτίβο HSI των μακροασπόνδυλων έμοιαζε με εκείνο των ιχθύων μικρού μεγέθους, καθώς ήταν υψηλότερο στις χαμηλότερες παροχές ( $Q \leq 0.15 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Όσον αφορά τα βενθικά μακροασπόνδυλα, ο μέσος όρος HSI (HSI<sub>av</sub>) κυμάνθηκε από 0.3 έως 0.66 στις δεξαμενές, από 0.3 έως 0.69 στα ανοίγματα και από 0.3 έως 0.66 στη δεξαμενή ανάπαυσης. Σε όλα τα τμήματα των ΔΙ, οι βέλτιστες τιμές HSI παρατηρήθηκαν

σε χαμηλές παροχές ( $Q = 0.1 \text{ m}^3/\text{s}$  και  $0.15 \text{ m}^3/\text{s}$ ) για όλους τους τύπους ΔΙ, με τις υψηλότερες τιμές να παρατηρούνται στις μικρές παροχές και στα μεγαλύτερα πλάτη ανοίγματος (τύποι ΔΙ 30-1 και 40-1).

Για τη μεγάλη πέστροφα των Δυτικών Βαλκανίων (*Salmo fario*), η HSIαν κυμάνθηκε από 0.19 έως 0.65 στις δεξαμενές, από 0.05 έως 0.46 στα ανοίγματα και από 0.23 έως 0.66 στη δεξαμενή ανάπαυσης. Οι βέλτιστες τιμές HSI παρατηρήθηκαν για παροχή  $Q = 0.6 \text{ m}^3/\text{s}$  για όλους τους τύπους 5-20-1, 5-20-2 και 5-30-1 και σε παροχή  $Q \geq 0.6 \text{ m}^3/\text{s}$  μόνο για τον τύπο 5-20-2. Για τη μεσαίου μεγέθους πέστροφα των Δυτικών Βαλκανίων, η HSIαν κυμάνθηκε από 0.3 έως 0.72 στις δεξαμενές, από 0.06 έως 0.65 στα ανοίγματα και από 0.41 έως 0.75 στη δεξαμενή ανάπαυσης. Η υψηλότερη HSI παρατηρήθηκε για παροχή ίση με  $Q = 0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ , τύπου 5-20-2, αλλά οι βέλτιστες τιμές διέφεραν ανάλογα με την κλίση του πυθμένα και το πλάτος του ανοίγματος (οι χαμηλές παροχές όπου  $Q \leq 0.6 \text{ m}^3/\text{s}$  ήταν βέλτιστες σε χαμηλές κλίσεις και μικρότερα πλάτη ανοιγμάτων, ενώ οι υψηλότερες παροχές, όπου  $Q > 0.6 \text{ m}^3/\text{s}$  ήταν βέλτιστες σε μεγαλύτερες κλίσεις και μεγαλύτερα πλάτη ανοιγμάτων). Για τη μικρή πέστροφα των Δυτικών Βαλκανίων, η HSIαν κυμάνθηκε από 0.01 έως 0.72 στις δεξαμενές, από 0.01 έως 0.63 στα ανοίγματα και από 0.01 έως 0.75 στη δεξαμενή ανάπαυσης. Οι υψηλότερες τιμές HSI παρατηρήθηκαν σε χαμηλές παροχές (από  $Q = 0.15 \text{ m}^3/\text{s}$  έως  $Q = 0.6 \text{ m}^3/\text{s}$ ) για τους τύπους 5-20-1 και 5-30-1, αλλά οι βέλτιστες τιμές διέφεραν και πάλι ανάλογα με την κλίση του πυθμένα και το πλάτος του ανοίγματος. Γενικά, οι χαμηλές παροχές (από  $Q = 0.15 \text{ m}^3/\text{s}$  έως  $Q = 0.6 \text{ m}^3/\text{s}$ ) ήταν βέλτιστες σε όλες τις χαμηλές κλίσεις πυθμένα και τα μικρά πλάτη ανοίγματος, ενώ οι υψηλότερες παροχές ήταν βέλτιστες σε μεγαλύτερες κλίσεις πυθμένα και μεγαλύτερα πλάτη ανοίγματος.

Για τη μεγάλη βαλκανική μπριάννα (*Barbus balcanicus*), η HSIαν κυμάνθηκε από 0.15 έως 0.43 στις δεξαμενές, από 0.15 έως 0.5 στα ανοίγματα και από 0.15 έως 0.43 στη δεξαμενή ανάπαυσης. Η βέλτιστη HSI παρατηρήθηκε σε χαμηλές παροχές ( $\leq 0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ) για όλους τους τύπους ΔΙ. Η υψηλότερη HSI παρατηρήθηκε σε  $Q = 0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ , τύπος 5-20-2. Σε όλα τα τμήματα της ΔΙ, η HSIαν κυμάνθηκε από 0.32 έως 0.51. Οι υψηλότερες τιμές παρατηρήθηκαν σε χαμηλές παροχές ( $Q = 0.1 \text{ m}^3/\text{s}$  και  $Q = 0.15 \text{ m}^3/\text{s}$ ) για τους τύπους 5-20-1 και 5-20-2.

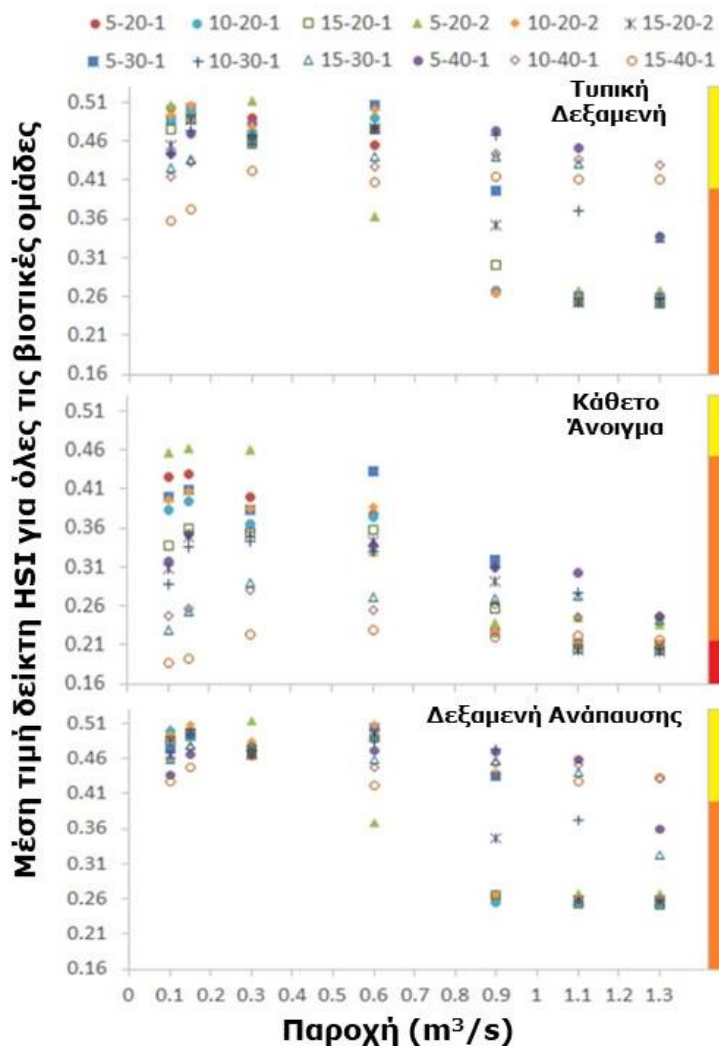
Για τον μεγάλο ποταμοκέφαλο Πελοποννήσου (*Squalius peloponnesis*), το HSIαν κυμάνθηκε από 0.01 έως 0.42 στις δεξαμενές, από 0.01 έως 0.36 στα ανοίγματα και από 0.01 έως 0.43 στη δεξαμενή ανάπαυσης. Το υψηλότερο HSI παρατηρήθηκε για παροχή  $Q = 0.6 \text{ m}^3/\text{s}$ , τύπος 5-30-1. Για τον μικρό ποταμοκέφαλο Πελοποννήσου, το HSIαν κυμάνθηκε από 0.01 έως 0.36 στις δεξαμενές, από 0.01 έως 0.12 στα ανοίγματα και από 0.01 έως 0.35 στη δεξαμενή ανάπαυσης. Οι βέλτιστες τιμές HSI παρατηρήθηκαν για χαμηλές παροχές ( $\leq 0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ) για τους τύπους 5-20-1, 5-20-2, 5-30-1, 10-20-1, 10-20-2, 15-20-1. Η HSI μειώθηκε καθώς αυξανόταν η παροχή  $Q$ .

#### 6.4.2 Συνολική καταλληλότητα

Στην **Εικόνα 6.6** φαίνεται η συνολική καταλληλότητα (ο μέσος όρος HSI των βιοτικών ομάδων). Η συνολική καταλληλότητα ήταν μεγαλύτερη για τον τύπο ΔΙΚΑ 5-20-2 σε όλα τα τμήματα της ΔΙ (ανοίγματα, δεξαμενές, δεξαμενή ανάπαυσης) για  $Q = 0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ . Αύξηση του συνολικού HSI παρατηρήθηκε επίσης για τους τύπους 5-20-1 και 5-30-1 σε όλα τα τμήματα των ΔΙ, αλλά διέφερε ανάλογα με την παροχή. Η HSI για τον τύπο 5-20-1 ήταν υψηλότερη σε χαμηλές παροχές ( $Q \leq 0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ) και μειώθηκε σε υψηλότερες παροχές, ενώ η HSI για τον τύπο 5-30-1 ήταν παρόμοια υψηλή σε  $Q \leq 0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ , υψηλότερη σε  $Q = 0.6 \text{ m}^3/\text{s}$  και μειωμένη σε υψηλότερες παροχές. Ο συνολικός δείκτης HSI των άλλων τύπων ΔΙ ποικίλλει ανάλογα με την παροχή, αλλά ήταν συνήθως

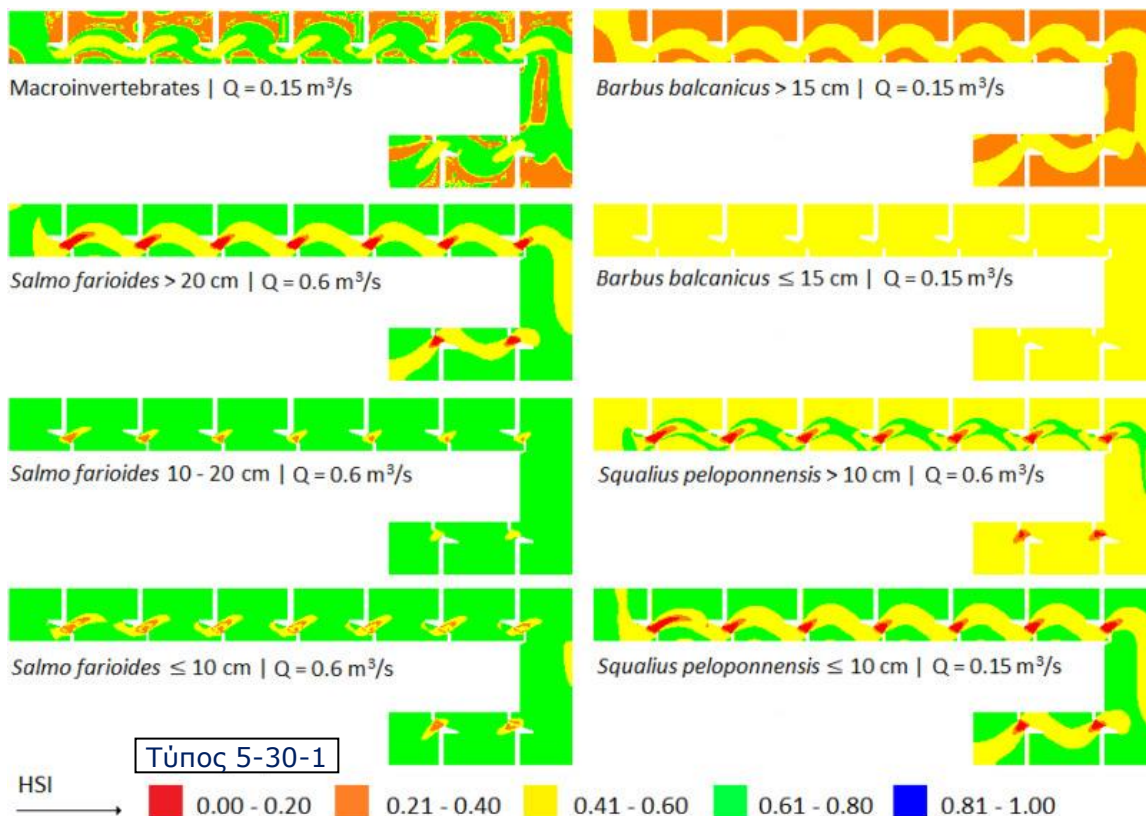
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΔΙΟΔΟΥ ΙΧΘΥΩΝ ΜΕ ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ

χαμηλότερος από εκείνον των τύπων 5-20-1, 5-20-2 και 5-30-1. Πρέπει να σημειωθεί ότι καμία τιμή HSI δεν ήταν υψηλότερη από 0.6 (όριο καλής/μέτριας κατηγορίας). Η μέγιστη τιμή HSI ήταν περίπου 0.5 στις δεξαμενές και τη δεξαμενή ανάπαυσης και περίπου 0.4-0.45 στις ανοίγματα. Τα διαφορετικά μοτίβα ροής που παρατηρήθηκαν μεταξύ των τύπων ΔΙ με το ίδιο πλάτος ανοίγματος αλλά διαφορετικό πλάτος δεξαμενής είχαν ως αποτέλεσμα τοπικά διαφορετικές αποκρίσεις καταλληλότητας ανά βιοτική ομάδα, αλλά όχι αρκετά σημαντικές ώστε να προκαλέσουν υψηλές συνολικές μεταβολές καταλληλότητας μεταξύ αυτών των τύπων. Για τις περισσότερες βιοτικές ομάδες, εκτός από τη μικρή βαλκανική μπριάνα και τα βενθικά μακροασπόνδυλα, ο HSI στις ανοίγματα ήταν κάτω από 0.2 (κακό). Δύο τύποι ΔΙ έδωσαν τις υψηλότερες τιμές καταλληλότητας. Ο τύπος 5-20-2 με  $Q = 0.3 \text{ m}^3/\text{s}$  είχε την υψηλότερη συνολική καταλληλότητα, αλλά δεν ήταν εξίσου υψηλές οι τιμές HSI όλων των βιοτικών ομάδων, και ο τύπος 5-30-1, με  $Q$  που κυμαίνεται μεταξύ  $0.15 \text{ m}^3/\text{s}$  και  $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$ , απέδωσε τις υψηλότερες καταλληλότητες για όλες σχεδόν τις βιοτικές ομάδες που μελετήθηκαν (**Εικόνα 6.7**).



**Εικόνα 6.6** Μέση καταλληλότητα HSI βιοτικών ομάδων σε σχέση με την παροχή για τη τυπική δεξαμενή, το άνοιγμα και τη δεξαμενή ανάπαυσης για όλες τις ΔΙ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΔΙΟΔΟΥ ΙΧΘΥΩΝ ΜΕ ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ



**Εικόνα 6.7** Μέση καταλληλότητα ενδαιτημάτων βιοτικών ομάδων (HSI) για τη ΔΙΚΑ 5-30-1 που έδωσε υψηλότερες καταλληλότητες για όλες σχεδόν τις βιοτικές ομάδες που μελετήθηκαν.

### 6.5 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Προσομοιώσαμε την καταλληλότητα μιας ΔΙΚΑ για μακροσπόνδυλα και για επτά ομάδες ιχθύων, για παροχές που κυμαίνονταν από  $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$  έως  $1.3 \text{ m}^3/\text{s}$ , για να επιλέξουμε τον καταλληλότερο συνδυασμό τύπου ΔΙΚΑ και παροχής που θα ικανοποιούσε τις προτιμήσεις ενδιαίτηματος όλων των βιοτικών ομάδων που μελετήθηκαν. Διαπιστώσαμε ότι η καταλληλότητα σε όλη τη ΔΙΚΑ επηρεάζεται κυρίως από το βάθος του νερού, και όταν το βάθος είναι βέλτιστο, η καταλληλότητα ρυθμίζεται με την ταχύτητα ροής σε διαφορετικά βέλτιστα για κάθε βιοτική ομάδα. Οι τεχνικές ΔΙ δεν μπορούν να είναι ταυτόχρονα ιδανικές για όλα τα είδη και τα στάδια ζωής μιας ποτάμιας διαδρομής/λεκάνης, αλλά μπορούν να βελτιστοποιηθούν ώστε να εξισορροπούν τις καταλληλότητες/προτιμήσεις των βιοτόπων μιας λεκάνης. Η βελτιστοποίηση βάσει μοντέλου μπορεί να χρησιμεύσει ως ένα αποδοτικό από άποψη χρόνου και κόστους εργαλείο για την επιτυχή ανάπτυξη αποτελεσματικών ΔΙ στην πραγματική ζωή.

#### 6.5.1 Παροχές, γεωμετρικά χαρακτηριστικά και δείκτες καταλληλότητας

Συνολικά, η καταλληλότητα σε όλη τη ΔΙΚΑ επηρεάστηκε καθοριστικά από τα υδραυλικά της χαρακτηριστικά, εξαιτίας της αλληλεπίδρασης μεταξύ της παροχής, της κλίσης και του πλάτους του ανοίγματος, που αποτελούν τις πιο κρίσιμες παραμέτρους στις ΔΙΚΑ [13], [118]. Τα βάθη ροής ήταν μεγαλύτερα σε υψηλές παροχές, χαμηλές

κλίσεις και μικρά ανοίγματα, ενώ οι ταχύτητες ροής ήταν υψηλότερες σε υψηλές παροχές, υψηλές κλίσεις και μεγάλα ανοίγματα.

Για τα μακροασπόνδυλα, τα οποία ως επί το πλείστο προτιμούν τα ρηχά και μέτρια ενδαιτήματα [110], [119], όλοι οι τύποι ΔΙ και οι παροχές με  $D > 0.8\text{m}$  ήταν ομοιόμορφα ακατάλληλοι ( $HSI_{av} = 0.3$ ), όπως αναμενόταν. Όταν το  $D$  ήταν αποδεκτό ( $< 0.8\text{ m}$ ) η καταλληλότητα για μακροασπόνδυλα ήταν περαιτέρω εξαρτώμενη από την ταχύτητα ροής. Για τις μικρές και μεσαίες πέστροφες των Δυτικών Βαλκανίων, οι οποίες προτιμούν τα ρηχά και χαμηλών ταχυτήτων ροής ενδαιτήματα [120], όλοι οι τύποι ΔΙ και οι παροχές με  $D > 2\text{ m}$  ήταν ομοιόμορφα ακατάλληλες ( $HSI_{av} \approx 0.2$ ). Όταν το  $D$  ήταν αποδεκτό ( $< 1.5\text{-}2\text{ m}$ ), η καταλληλότητα ήταν και πάλι ρυθμιζόμενη από την ταχύτητα ροής, όντας τελικά βέλτιστη σε  $D < 2\text{ m}$  και  $V < 0.5\text{ m/s}$ . Οι μικροί ποταμοκέφαλοι Πελοποννήσου παρουσίασαν παρόμοιο πρότυπο καταλληλότητας, αλλά με ακατάλληλο  $D > 1.2\text{ m}$ . Οι μεγάλες πέστροφες των Δυτικών Βαλκανίων, οι οποίες προτιμούν κυρίως βαθιά, χαμηλών ταχυτήτων ροής ενδαιτήματα [120], προτιμούσαν  $D > 1.2\text{ m}$  και  $V < 0.7\text{ m}$ . Για τους μεγάλους πελοποννησιακούς ποταμοκέφαλους, η βέλτιστη καταλληλότητα βρέθηκε σε  $D \approx 1.2\text{-}1.7\text{ m}$  και  $V \approx 0.45\text{-}0.7\text{ m/s}$ . Οι μεγάλες βαλκανικές μπριάνες προτίμησαν  $D < 0.8\text{-}1\text{ m}$  και  $V < 0.45\text{ m}$ , ενώ οι μικρές μπριάνες επηρεάστηκαν σε μεγάλο βαθμό από τον τύπο του υποστρώματος ( $HSI\text{-}substrate = 0.21$ ), γεγονός που οδήγησε σε ομοιόμορφα μέτρια καταλληλότητα σε όλους σχεδόν τους τύπους ΔΙ.

### **6.5.2 Η οικολογική βελτιστοποίηση και η «ιδανική» δίοδος ιχθύων**

Η βιβλιογραφία για τις ΔΙ δείχνει ότι οι παραδοσιακές αντιλήψεις σχετικά με το τι είναι βέλτιστο ή αποδεκτό πρέπει να επανεξεταστούν [85]. Η ιδανική ΔΙ, η οποία αναλύθηκε με ακρίβεια από τους Castro-Santos et al. [121], μπορεί να οριστεί εν συντομία ως η ΔΙ που επιτρέπει σε κάθε άτομο οποιουδήποτε ιθαγενούς είδους να κινείται ανάντη ή κατάντη ενός εμποδίου χωρίς να υφίσταται στρες και/ή τραυματισμό. Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης υποδηλώνουν ότι το ιδανικό αυτό δεν μπορεί να επιτευχθεί, καθώς τα διάφορα είδη και κατηγορίες μεγέθους έχουν διαφορετικές απαιτήσεις που εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της ΔΙ και την εισερχόμενη παροχή. Οι τεχνικές ΔΙ δεν μπορούν να είναι ταυτόχρονα ιδανικές για όλα τα είδη και τα στάδια ζωής ενός ποταμού/λεκάνης. Ωστόσο, όπως απαιτείται από τα ευρωπαϊκά νομοθετικά εργαλεία, όπως η ΟΠΥ, οι ΔΙ θα πρέπει να είναι οικολογικά προ-βελτιστοποιημένες ώστε να εξυπηρετούν τη βέλτιστη ανάντη μετακίνηση ενός ευρέος φάσματος ειδών και σταδίων ζωής.

Στην παρούσα μελέτη, επιχειρήθηκε να προ-βελτιστοποιηθεί οικολογικά μια ολιστική ΔΙ και να επιτευχθεί η υψηλότερη δυνατή καταλληλότητα για κάθε βιοτική ομάδα, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα εξίσου υψηλή καταλληλότητα για όλες τις άλλες ομάδες. Στο πλαίσιο αυτό, διαφορετικοί τύποι ΔΙ και παροχές βρέθηκαν βέλτιστοι για τις διάφορες βιοτικές ομάδες. Για τα μακροασπόνδυλα βρέθηκε  $HSI_{av} = 0.662$ . Για τη μεγάλη πέστροφα των δυτικών Βαλκανίων βρέθηκε  $HSI_{av} = 0.6$ , για τη μεσαία πέστροφα των δυτικών Βαλκανίων και τον τύπο 5-30-1|0.6 βρέθηκε  $HSI_{av} = 0.6$ , για τη μεσαία πέστροφα των δυτικών Βαλκανίων και τον τύπο 5-30-1|0.6 βρέθηκε  $HSI_{av} = 0.72$  και για τη μικρή πέστροφα των Δυτικών Βαλκανίων βρέθηκε  $HSI_{av} = 0.715$ . Για τη μεγάλη βαλκανική μπριάννα και τον τύπο 5-40-1|0.3 βρέθηκε  $HSI_{av} = 0.474$ , για τη μικρή βαλκανική μπριάννα και τον τύπο 10-40-1|0.3 βρέθηκε  $HSI_{av} = 0.52$ . Για τον μεγάλο ποταμοκέφαλο Πελοποννήσου και τον τύπο 5-20-2|0.1 βρέθηκε  $HSI_{av} = 0.622$ . Ο τύπος 5-30-1 για παροχές που κυμαίνονται από  $0.15$  μέχρι  $0.6\text{ m}^3/\text{s}$ , ο οποίος επιλέχθηκε τελικά, δεν μπορεί να θεωρηθεί "η ιδανική ΔΙ", αλλά μάλλον η βέλτιστη ισορροπημένη ΔΙ, καθώς είναι αυτή που εξισορροπεί τις

καταλληλότητες του φάσματος των εξεταζόμενων ειδών, το οποίο περιλάμβανε διάφορες μορφο-οικολογικές ομάδες.

### **6.5.3 Υπάρχει κατάλληλη δίοδος ιχθύων για όλα τα είδη;**

Η κατανομή των βιοτόπων στα ρέματα και τα ποτάμια διαμορφώνεται, μεταξύ άλλων, από την ταχύτητα ροής, το βάθος του νερού και τον τύπο του υποστρώματος [119], [122]. Μπορούμε επομένως να υποθέσουμε, και προηγούμενες έρευνες υποδεικνύουν, ότι οι φυσικής μορφής ΔΙ που μιμούνται τις φυσικές/υδραυλικές ιδιότητες των φυσικών υδατορεμάτων, ιδίως όσον αφορά τα  $V$ ,  $D$  και  $S$ , θα ήταν ελκυστικές και αποτελεσματικές για οι ιχθύες και τα μακροασπόνδυλα [123]. Ωστόσο, η μελέτη μας έδειξε ότι είναι εξαιρετικά δύσκολο να μιμηθεί κανείς τέτοιες συνθήκες μέσα σε μια ΔΙΚΑ για πολλαπλά είδη και στάδια ζωής (και αυτό θα μπορούσε πιθανώς να ισχύει και για άλλες ΔΙ), η καταλληλότητα των οποίων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό όχι από την ανεξάρτητη επιρροή κάθε παράγοντα αλλά από πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους [124]. Ως τυπικό μοτίβο στις ΔΙΚΑ, η ταχύτητα ροής φθάνει τις υψηλότερες τιμές στις ανοίγματα και τις χαμηλότερες στις δεξαμενές [9], [125]. Στην βελτιστοποιημένη ΔΙΚΑ (5-30-1|0.15-0.6), η μέση τιμή της  $V$  στις ανοίγματα ήταν 0.72m/s για  $Q = 0.15 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $V_{\max} = 1.42 \text{ m/s}$ ) και 0.62 m/s για  $Q = 0.6 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $V_{\max} = 1.24 \text{ m/s}$ ), αναπτύσσοντας μια αλληλουχία οικολογικά ακατάλληλων συνθηκών, ιδίως για τη πέστροφα δυτικών Βαλκανίων και τον ποταμοκέφαλο Πελοποννήσου ( $HSI \approx 0.2-0.4$ ). Αυτό υποδηλώνει ότι τα είδη αυτά ενδέχεται να μην καταφέρνουν να διασχίσουν αποτελεσματικά την ΔΙ, γεγονός που έρχεται σε συμφωνία με τις χαμηλές κολυμβητικές ικανότητες που έχουν αναφερθεί προηγουμένως για τα μικρά σαλμονοειδή και τους κυπρίνους (εκρηκτική ταχύτητα κολύμβησης  $< 0.6 \text{ m/s}$ ) [126], οι οποίες ενδέχεται να θέτουν σε κίνδυνο τις προσπάθειές τους κατά τη διέλευση των κάθετων ανοιγμάτων της ΔΙΚΑ. Τα μεγαλύτερα άτομα έχουν αυξημένες ταχύτητες έκρηξης και κρίσιμες ταχύτητες κολύμβησης [44]–[46] και μπορεί να διασχίσουν την ΔΙ πιο αποτελεσματικά, αλλά ακόμη και σε αυτή την περίπτωση, υπάρχουν άλλες ιχθυοφυσιολογικές επιπτώσεις που μπορεί επίσης να οδηγήσουν σε περιορισμούς της ταχύτητας στην αποτελεσματική διέλευση [127]. Επιπλέον, παρατηρήσαμε ότι οι τύποι ΔΙΚΑ με αυξημένη καταλληλότητα κάθετων ανοιγμάτων για συγκεκριμένα είδη/στάδια ζωής, ήταν ακατάλληλοι για άλλα είδη. Μόνο η διάταξη 5-30-1|0.15-0.6 ήταν ταυτόχρονα κατάλληλη για πολλά είδη, αλλά και πάλι μέτρια κατάλληλη για όλα τα είδη και τα στάδια ζωής που μελετήθηκαν.

Ανεξάρτητα από τις προαναφερθείσες επιπτώσεις, η ταχύτητα και το βάθος ροής μπορούν να ρυθμιστούν γρήγορα και οικονομικά αποδοτικά με την αλλαγή της σχετικής παροχής ώστε να ικανοποιούνται οι ανάγκες των διαφόρων ειδών και σταδίων ζωής εντός ενός χρονικού (ετήσιου) προγράμματος. Το είδος του υποστρώματος, ωστόσο, δεν είναι ευέλικτο για χρονικές προσαρμογές και θα πρέπει να μοντελοποιηθεί αποτελεσματικά πριν από την εγκατάσταση στην πραγματική ζωή. Το ομοιόμορφο υπόστρωμα της μοντελοποιημένης ΔΙ (μικρές πέτρες) καθορίστηκε και επιλέχθηκε *a priori* ώστε να παρέχει ταυτόχρονα επαρκή καταλληλότητα για όλους τους υπό μελέτη οργανισμούς, που μελετήθηκαν, όπως συνιστάται σε προηγούμενη βιβλιογραφία [10] και αποδεικνύεται από πρόσφατα ελπιδοφόρα αποτελέσματα [106]. Οι συνθήκες υποστρώματος που επιλέχθηκαν, ωστόσο, δεν ήταν ιδανικές, ωστόσο ήταν βέλτιστα ισορροπημένες για όλους τους βιοτόπους που μελετήθηκαν εντός της ΔΙ. Η καταλληλότητα των μικρών λίθων ήταν περίπου 0.65 για τα μακροασπόνδυλα, 0.51, 0.6 και 0.46 για τη μεγάλη, τη μεσαία και τη μικρή πέστροφα των Δυτικών Βαλκανίων, αντίστοιχα, 0.2 και 0.19 για τη μεγάλη και τη μικρή βαλκανική μπριάνα, αντίστοιχα, 0.29 και 0.46 για το μεγάλο και το μικρό ποταμοκέφαλο Πελοποννήσου, αντίστοιχα. Ομοίως με ό,τι παρατηρήσαμε για την ταχύτητα ροής, οποιοσδήποτε άλλος τύπος ομοιόμορφου υποστρώματος θα ευνοούσε ένα ή δύο είδη/στάδια ζωής, αλλά θα μείωνε

κρίσιμα την καταλληλότητα με βάση το υπόστρωμα για άλλα είδη σχεδόν στο μηδέν. Έχει αποδειχθεί ότι μια τεχνική ΔΙ που καλύπτεται από φυσικό υπόστρωμα μπορεί να είναι πιο αποτελεσματική από μια ΔΙ με πυθμένα από τσιμέντο [128]. Η μελέτη μας υποστηρίζει περαιτέρω ότι τα μικτά υποστρώματα (επαναλαμβανόμενα μοτίβα χαλικιών, μικρών/μεγάλων λίθων και ογκόλιθων) θα μπορούσαν πιθανώς να είναι καταλληλότερα από τα ομοιόμορφα υποστρώματα για να παρέχουν ταυτόχρονα αυξημένη καταλληλότητα για πολλούς βιοτόπους, και αυτό θα πρέπει να διερευνηθεί/μοντελοποιηθεί λεπτομερώς σε πραγματικά σχήματα βελτιστοποίησης διόδου ιχθύων.

#### **6.5.4 Καταλληλότητα, αποτελεσματικότητα και ελκυστικότητα. «Ποιες είναι οι δυνατότητες της βελτιστοποίησης με τη χρήση μαθηματικών μοντέλων;»**

Η βασισμένη σε μοντέλα, οικολογική, προ της εγκατάστασης, βελτιστοποίηση των ΔΙ μπορεί να χρησιμεύσει ως ένα αποδοτικό από άποψη χρόνου και κόστους εργαλείο προς την επιτυχή ανάπτυξη αποτελεσματικών ΔΙ. Ωστόσο, οι εκτιμήσεις με βάση μοντέλα που εστιάζουν στην καταλληλότητα δεν μπορούν να αξιολογήσουν ή να βελτιστοποιήσουν την προσέλκυση των ΔΙ, ένα βασικό συστατικό της συνολικής αποτελεσματικότητας των ΔΙ [129], ώστε να μεγιστοποιήσουν τα ποσοστά εισόδου και να μειώσουν τον "χρόνο δοκιμής" των ιχθύων, αν και πιο σύνθετες προσεγγίσεις μοντελοποίησης που εστιάζουν στην προσέλκυση, έχουν πρόσφατα εφαρμοστεί με επιτυχία για τον σκοπό αυτό [130]. Η διέλευση των ιχθύων και η σχετική συμπεριφορά είναι ένα σύνθετο φαινόμενο που εξαρτάται από την αλληλεπίδραση πολλών μεταβλητών, ορισμένες από τις οποίες δεν συμπεριλήφθηκαν στην παρούσα μελέτη, όπως η τύρβη [131] και η θερμοκρασία του νερού [129], και θα πρέπει να ληφθούν υπόψη σε μελλοντικές μελέτες. Επιπλέον, η ικανότητα των ιχθύων να διασχίσουν τα ανοίγματα της ΔΙΚΑ εξαρτάται κυρίως από την κολυμβητική απόδοση των ιχθύων, η οποία βασίζεται σε έναν συνδυασμό ταχύτητας διατήρησης, παρατεταμένης και έκρηξης, καθώς και αντοχής/κόπωσης/ενεργειακής δαπάνης [132]. Αυτοί οι παράγοντες πρέπει να λαμβάνονται επιπλέον υπόψη για την εξαγωγή ασφαλών αποτελεσμάτων σχετικά με τη συνολική καταλληλότητα των κάθετων ανοιγμάτων [132], [22]. Τελικά, μια βέλτιστη ΔΙ θα πρέπει να είναι τόσο ελκυστική (παρέχει βέλτιστα ποσοστά εισόδου) όσο και βατή (παρέχει βέλτιστη καταλληλότητα ΔΙ) για να θεωρηθεί αποτελεσματική (βέλτιστα ποσοστά διέλευσης), και η οικολογική προ-βελτιστοποίηση βάσει μοντέλου θα μπορούσε να συμβάλει χρονικά, οικονομικά και επιτυχώς στη δεύτερη συνιστώσα (βελτιστοποίηση καταλληλότητας) της συνολικής αποτελεσματικότητας.

#### **6.6 Συμπεράσματα**

Η παρούσα μελέτη έδειξε ότι τα ΜΥΕ μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ακρίβεια και επιτυχία ως ένα αποδοτικό από άποψη κόστους και χρόνου εργαλείο για τη βελτιστοποίηση της οικολογικής προ-εγκατάστασης των ΔΙΚΑ. Στο πλαίσιο αυτό, ωστόσο, δείξαμε περαιτέρω ότι είναι εξαιρετικά δύσκολο να βελτιστοποιηθεί, και τελικά να αναπτυχθεί, μια 100% κατάλληλη ΔΙ για πολλαπλά είδη και στάδια ζωής, εξαιτίας των συχνά αντιφατικών προτιμήσεων ενδιατημάτων που πρέπει να προσαρμοστούν σε συγκεκριμένες υδραυλικές συνθήκες, οι οποίες διαμορφώνονται από την αλληλεπίδραση της παροχής, της κλίσης και του πλάτους της ανοίγματος. Όμως, παρά τις πολύπλοκες υδρο-οικολογικές αλληλεπιδράσεις που πρέπει να προσομοιωθούν και να αντιμετωπιστούν, οι εκτιμήσεις καταλληλότητας, βάσει μοντέλου, μπορούν να συμβάλουν με ακρίβεια στην τελική δημιουργία ΔΙ.

## 7 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

### 7.1 Εισαγωγή

Ο σχεδιασμός των ΔΙ σήμερα γίνεται με τη χρήση εμπειρικών σχέσεων [10] βασιζόμενος κυρίως σε απλοποιήσεις του πεδίου ροής και τα χαρακτηριστικά των ιχθύων, τα οποία συνήθως στηρίζονται σε προσεγγίσεις και πρακτικές πληροφορίες της διεθνούς βιβλιογραφίας. Η μέθοδος αυτή σχεδιασμού δεν είναι πάντα επιτυχής, εξαιτίας κυρίως του εμπειρικού της χαρακτήρα [133].

Για την αποφυγή των προβλημάτων αυτών θα εφαρμόσουμε το ολοκληρωμένο μαθηματικό μοντέλο, που επιβεβαιώθηκε παραπάνω, ώστε να αναδείξουμε τη αναγκαιότητα της χρήση του τόσο από την πλευρά της μελέτης του υδροδυναμικού πεδίου ροής, όσο και της συμπεριφοράς των ιχθύων.

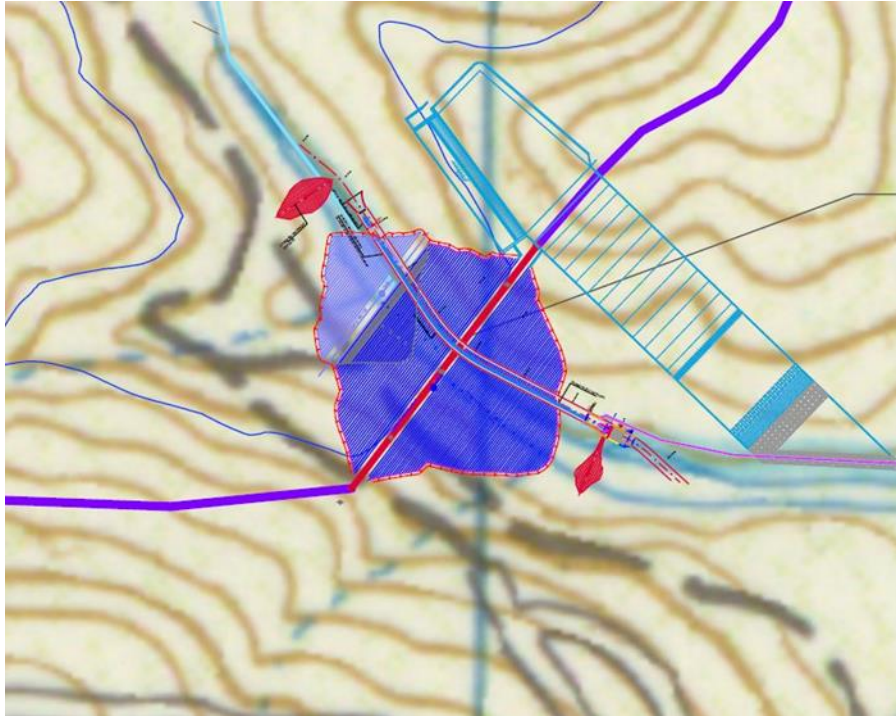
Για την εφαρμογή του μοντέλου θα ακολουθήσουμε την παρακάτω μεθοδολογία 5 βημάτων.

1. Προσδιορισμός των χαρακτηριστικών του ποταμού και της λεκάνης απορροής του.
2. Συλλογή δεδομένων και προσδιορισμός των χαρακτηριστικών του φράγματος και του ταμιευτήρα.
3. Διερεύνηση της ιχθυοπανίδας που θα αποτελέσει τη βάση για την επιλογή των κριτήριων σχεδιασμού.
4. Επιλογή της κατάλληλης ΔΙ με βάση τα παραπάνω και σχεδιασμός της.
5. Εφαρμογή του ΜΣΙ για την ιχθυοπανίδα του βήματος 3.

### 7.2 Περιγραφή της περίπτωσης εφαρμογής

Για την εφαρμογή του ολοκληρωμένου μοντέλου επιλέχθηκε ο ποταμός Αλμωπαίος. Η επιλογή αυτή προκρίθηκε, εξαιτίας (α) του μεγέθους του ποταμού και της συνεχούς ροής του και (β) την ήδη υπάρχουσα προμελέτη φράγματος, που θα διακόψει τη ροή του ποταμού και η οποία απαιτούσε τη δημιουργία ΔΙ. Η εφαρμογή ξεκίνησε με στοιχεία της ιχθυολογικής μελέτης της περιοχής και την προμελέτη του φράγματος, ώστε να εντοπιστεί το κυρίαρχο είδος ιχθύος, τα χαρακτηριστικά του οποίου θα χρησιμοποιηθούν στον σχεδιασμό των δεξαμενών της ΔΙ.





**Εικόνα 7.1** Το προτεινόμενο φράγμα του Αλμωπαίου

### **7.2.1 Τα χαρακτηριστικά του π. Αλμωπαίου και της λεκάνης απορροής του**

Τα χαρακτηριστικά του ποταμού είναι τα εξής:

1. Η λεκάνη απορροής του ποταμού καλύπτει επιφάνεια 975 km<sup>2</sup>.
2. Η μέση ετήσια παροχή του ποταμού είναι 5.8 m<sup>3</sup>/s.
3. Το πλάτος πυθμένα του ποταμού κυμαίνεται από 10 μέχρι 15 m.

### **7.2.2 Τα χαρακτηριστικά του φράγματος και του ταμιευτήρα**

Τα χαρακτηριστικά του φράγματος είναι τα εξής:

1. Το συνολικό ύψος του φράγματος από τη φυσική κοίτη του ποταμού είναι 61 m και το μήκος του φράγματος 245 m.
2. Η επιφανειακή κλίση στην αριστερή πλευρά του φράγματος είναι 20° - 30° και στη δεξιά πλευρά του φράγματος 25° - 38°.
3. Ο ταμιευτήρας έχει έκταση 290 Km<sup>2</sup>.
4. Ο συνολικός όγκος του ταμιευτήρα είναι 45.5x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> και ο νεκρός όγκος είναι 10.7 x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>.
5. Η υψηλότερη στάθμη της επιφάνειας εργασίας του ταμιευτήρα βρίσκεται στα +100 m και η χαμηλότερη στα +79.5 m.
6. Ο αγωγός εκτροπής θα τοποθετηθεί στην αριστερή πλευρά του φράγματος κοντά στον υπερχειλιστή. Η διάμετρός του είναι 8.40 m και το μήκος του 290 m με κλίση κοίτης περίπου 1%.
7. Η ελάχιστη στάθμη αρδευτικού νερού θα είναι στα +79.5 m με παροχή 4.94 m<sup>3</sup>/s και περιβαλλοντική παροχή 1.10 m<sup>3</sup>/s.

### 7.2.3 Η ιχθυοπανίδα της περιοχής

Τα πιο σημαντικά ήδη ιχθύων στην περιοχή είναι:

#### **Μηριάνες (*Barbus macedonicus*).**

Έχουν τυπικό μήκος 40 με 80 cm και με μέσο τα 65 cm. Η αναπαραγωγή γίνεται από τον Μάιο έως τον Ιούλιο, αφού οι ιχθύες έχουν μεταναστεύσει προς τα ανάντη του ποταμού. Σπάνια η αναπαραγωγή επεκτείνεται μέχρι τον Σεπτέμβριο, όταν η θερμοκρασία φτάσει τους 15°C.

#### **Πέστροφα (*Salmo pelagonicus*).**

Μεσαίου μεγέθους ιχθύς με μέσο μήκος of 20-30 cm. Η συμπεριφορά αναπαραγωγής της πέστροφας είναι παρόμοια με εκείνη του συγγενικού σολομού του Ατλαντικού.

#### **Γιλάρι (*Chondrostoma vardarensis*).**

Εμφανίζεται σε πεδινά υδάτινα ρεύματα. Κατοικεί κυρίως σε ποτάμια, με υπόβαθρο από πέτρα ή βράχο και με γρήγορο έως ισχυρό ρεύμα. Μετακινείται σε παραπόταμους για να αναπαραχθεί, σε ορμητικά ρεύματα και ανάμεσα σε πέτρες. Το μέγιστο μήκος του είναι 35cm



(α)



(β)



(γ)

**Εικόνα 7.2** (α) Μηριάνα *Barbus Barbus* , (β) Πέστροφα και (γ) Γιλάρι [134]

Για τον υπολογισμό των ταχυτήτων κίνησης των παραπάνω ιχθύων έγινε η υπόθεση ότι είναι 4 μέχρι 10 φορές ανάλογες με το μήκος του ιχθύος (Fish Length ,FL) [135]–[137].

## 7.3 Υπολογισμοί υδροδυναμικού μοντέλου

### 7.3.1 Γεωμετρία και σενάρια

Η εφαρμογή θα γίνει σε χωμάτινο φράγμα με μεταβολή στάθμης νερού της τάξης των 20.0 m. Προτείνεται η λύση της ΔΙ της Εικόνας **7.3** που ονομάστηκε «Πύργος Διόδου Ιχθύων», ΠΔΙ (Fish Pass Tower). Στις Εικόνες **7.3**, **7.4** και **7.5** παρουσιάζεται ο προτεινόμενος ΠΙ που έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

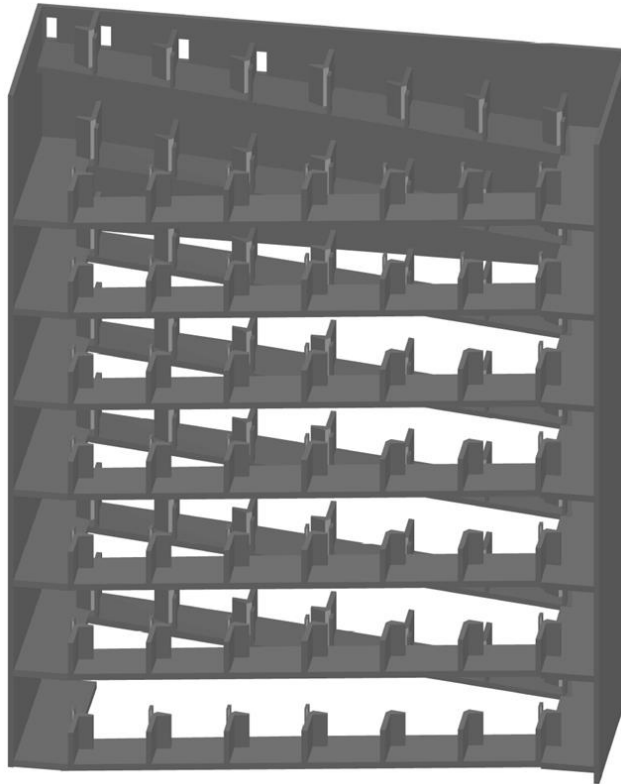
Αποτελείται από 14 σειρές ΔΙ, που κάθε μια έχει 6 δεξαμενές. Για παράδειγμα η πρώτη σειρά αποτελείται από τις δεξαμενές Δ1 μέχρι Δ6. Οι ολικές διαστάσεις του ΠΙ είναι μήκος x πλάτος x συνολικό ύψος = 16.50 m x 5.40 m x 21.00 m.

Η κλίση του πυθμένα των δεξαμενών των ΔΙ (10%) είναι αρκετά μεγάλη και σε συνδυασμό με το συνολικό μεγάλο μήκος των ΔΙ (254.20 m) ενδεχομένως δημιουργεί κόπωση και άλλα προβλήματα στους ιχθύες. Για το λόγο αυτό κάθε μια από τις 14 σειρές καταλήγει σε μια επιμήκη δεξαμενή «ανάπαυσης» (ΔΑ, η Δ7 για την πρώτη σειρά) με διαστάσεις 5.00 m x 1.50 m και κλίση πυθμένα ίση με 5%.

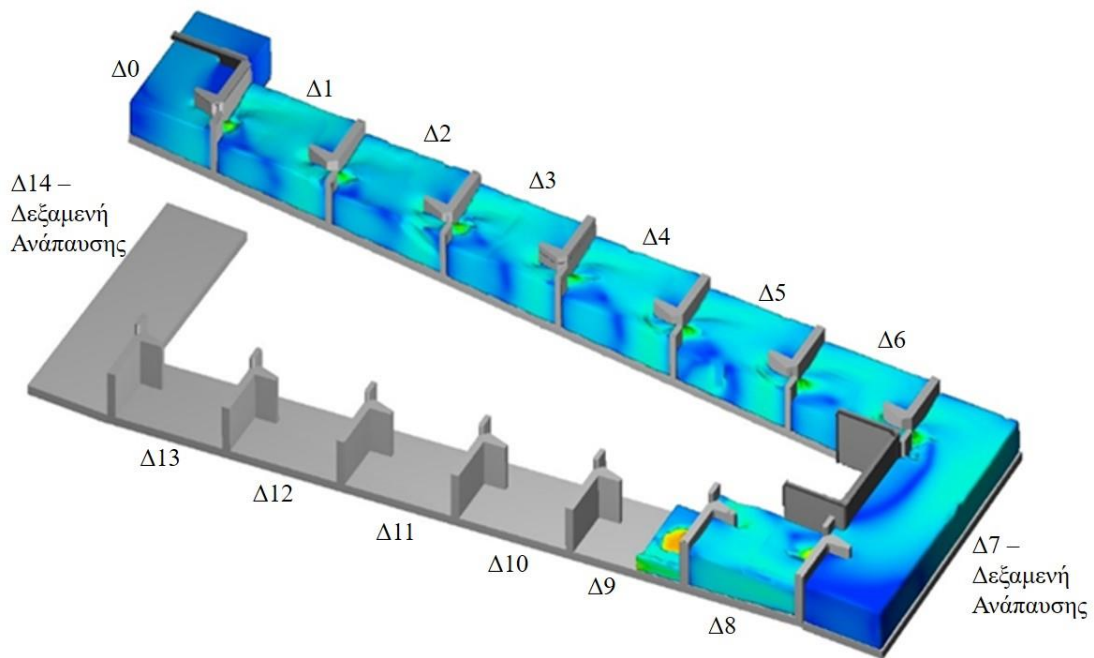
Κάθε μια από τις συνολικά 99 δεξαμενές έχει μια πλευρική οπή εισροής διαστάσεων πλάτος x ύψος = 0.90 m x 0.30 m, από την οποία εισέρχεται στον ΠΙ η ροή από τον ταμιευτήρα του φράγματος. Οι οπές εισόδου τοποθετούνται στα ανάντη κάθε δεξαμενής έχοντας υψομετρική διαφορά ίση με 0.20 m από την προηγούμενη και την επόμενη. Έτσι, μπορεί να ανοίγουν ανά 2 ή 3 χωρίς να λειτουργούν υπό πίεση.

Η παροχή των οπών και κατά συνέπεια η παροχή στις δεξαμενές των ΔΙ ρυθμίζονται στις επιθυμητές τιμές με άνοιγμα των θυροφραγμάτων σε κατάλληλες θέσεις ανάλογα με τη στάθμη του νερού στον ταμιευτήρα. Το άνοιγμα αυτό προσδιορίζεται με τους υπολογισμούς του μοντέλου CFD.

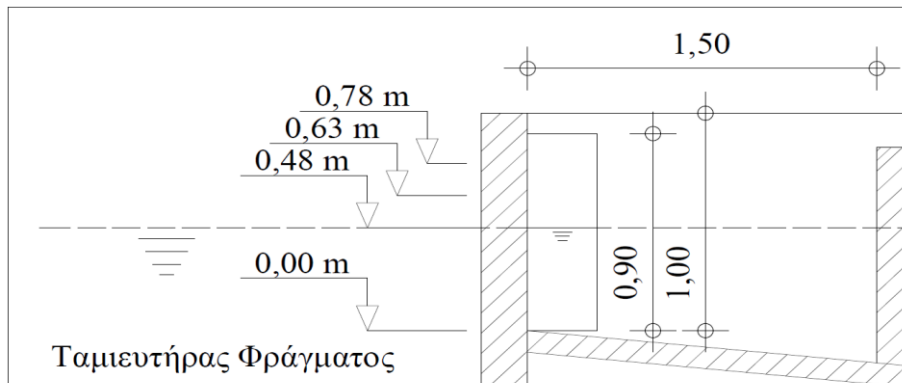
Το ελάχιστο βάθος κολύμβησης είναι ίσο με 0.50 m και το μέγιστο βάθος του νερού στις δεξαμενές δεν υπερβαίνει το 0.85 m. Το ύψος των κάθετων πετασμάτων της δεξαμενής επιλέγεται ίσο με 1.00 m και θα πρέπει να βρίσκεται σε αρμονία με την εσωτερική κλίμακα πρόσβασης.



**Εικόνα 7.3** Τρισδιάστατη απεικόνιση του προτεινόμενου πύργου διόδου ιχθύων



**Εικόνα 7.4** Γεωμετρία του εξεταζόμενου τμήματος του ΠΙ



**Εικόνα 7.5** Τομή στην πρώτη δεξαμενή εισόδου ( $\Delta 0$ )

**Πίνακας 7.1** Χαρακτηριστικά ιχθύων της εξεταζόμενης περίπτωσης

Χαρακτηριστικά ιχθύων	Συμβολισμός	Μονάδες	Τιμές
Μέσο μήκος	$L_F$	m	0.2-0.4
Μέσο πλάτος	$W_F$	m	0.05-0.08
Ταχύτητα κίνησης	$V_F$	m/s	0.4-2.1
Μέγιστη ταχύτητα κολύμβησης	$V_{Burst}$	m/s	1.6-2.5

**Πίνακας 7.2** Κριτήρια σχεδιασμού  $\Delta I$

Μέγεθος	Συμβολισμός	Μονάδες	Τιμές	Έλεγχος
Μέγιστη ταχύτητα	$V_{Omax}$	m/s	1.99	$\leq 2.50$
Διαφορά στάθμης δεξαμενών	$\Delta h_{max}$	m	0.20	$\leq 0.20$
Κλίση πυθμένα	$J_{max}$	-	10.00%	$\leq 12.5\%$
Ελάχιστο βάθος ροής	$h_{min}$	m	0.50	$\geq 0.50$
Βαθμός ανάμιξης	$P_{max}$	$W/m^3$	200	$\leq 200$
Παροχή	$Q$	$m^3/s$	0.27	$\geq 0.16$
Μέγιστη στάθμη επιφανείας ταμιευτήρα ανάντη	$A_{\Phi MAX}$	m	0.78	-
Ελάχιστη στάθμη επιφανείας ταμιευτήρα ανάντη	$A_{\Phi MIN}$	m	-19.22	-
Στάθμη αναφοράς πυθμένα $\Delta I$ στη δεξαμενή $\Delta 0$	-	m	0.00	-

## 7.4 Γεωμετρία και σενάρια

Η γεωμετρία του μοντέλου που διαμορφώθηκε και φαίνεται στην **Εικόνα 7.4** περιλαμβάνει δυο σειρές  $\Delta I$  που η κάθε μια αποτελείται από 6 δεξαμενές ( $\Delta 1, \Delta 2, \Delta 3, \Delta 4, \Delta 5$  και  $\Delta 6$ ) με και μια δεξαμενή ανάπαυσης ( $\Delta A = \Delta 7$ ) στο κατάντη άκρο της κάθε σειράς. Στην πρώτη σειρά υπάρχει η πρώτη δεξαμενή ( $\Delta 0$ ), στην οποία εισέρχεται η ροή από τον ταμιευτήρα. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε μια σειρά προκαταρκτικών υπολογισμών για να εξασφαλίσουμε την ανεξαρτησία των υπολογισμών και καταλήξαμε σε ένα συνολικό αριθμό όγκων ελέγχου ίσο με 1.500.000. Πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί για τα σενάρια με τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στον Πίνακα **7.3** για να εξεταστεί η επίδραση του πλάτους της οπής εισροής, του αριθμού των οπών εισροής, της στάθμης του ταμιευτήρα, του πλάτους του κάθετου ανοίγματος των δεξαμενών, καθώς και της κατάντη οριακής συνθήκης.

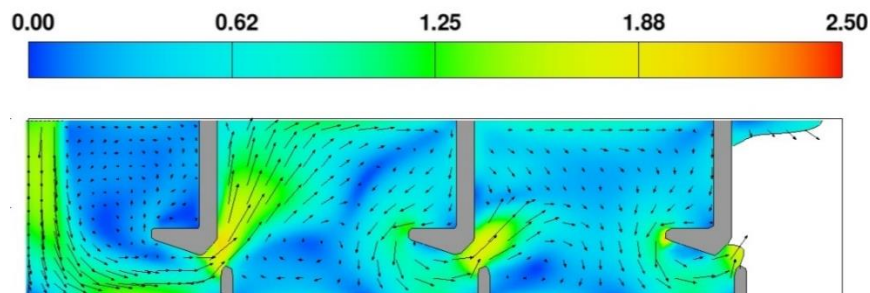
**Πίνακας 7.3** Σενάρια υπολογισμών του υδροδυναμικού μοντέλου

Σενάριο	Πλάτος οπής εισροής (m)	Κάθετο άνοιγμα (m)	Στάθμη νερού στον ταμιευτήρα (m)	Κατάντη οριακή συνθήκη	Τελευταία δεξαμενή
Σ1			0.48		
Σ2			0.63		Δ9
Σ3	0.30			Εκροή	Δ16
Σ4					
Σ5					
Σ6	2x0.30			Βάθος= 0.60 m	
Σ7	3x0.30				
Σ8	0.20	0.20		Εκροή	Δ9
Σ9				Βάθος= 0.20 m	
Σ10	1.00		0.78		
Σ11					Δ1
Σ12					Δ2
Σ13	0.30			Εκροή	Δ3
Σ14					Δ4
Σ15	0.60				
Σ16	0.30				Δ9
Σ17	0.60	0.40			

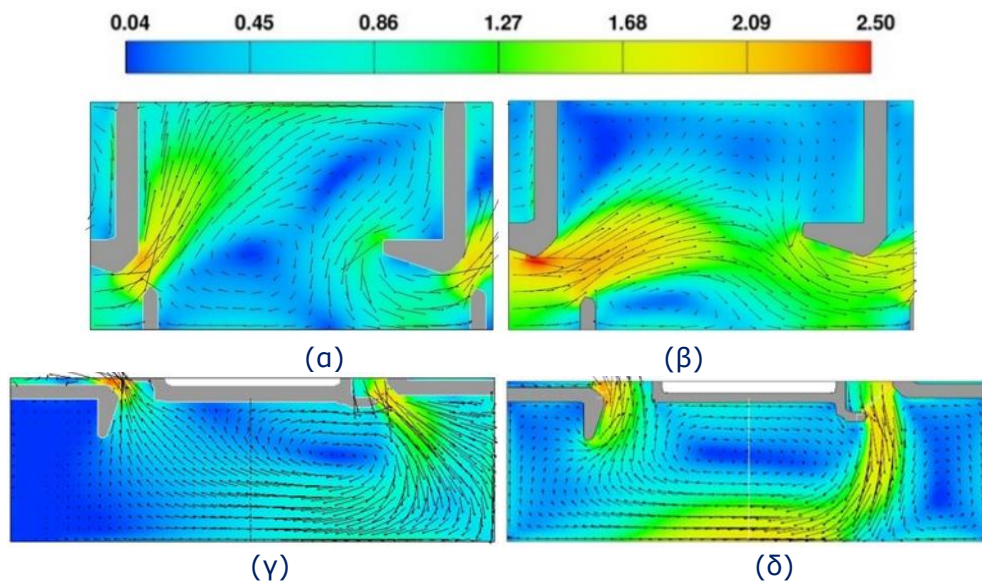
## 7.5 Υπολογισμοί και σχολιασμός τους

### 7.5.1 Γενικά χαρακτηριστικά του πεδίου ροής

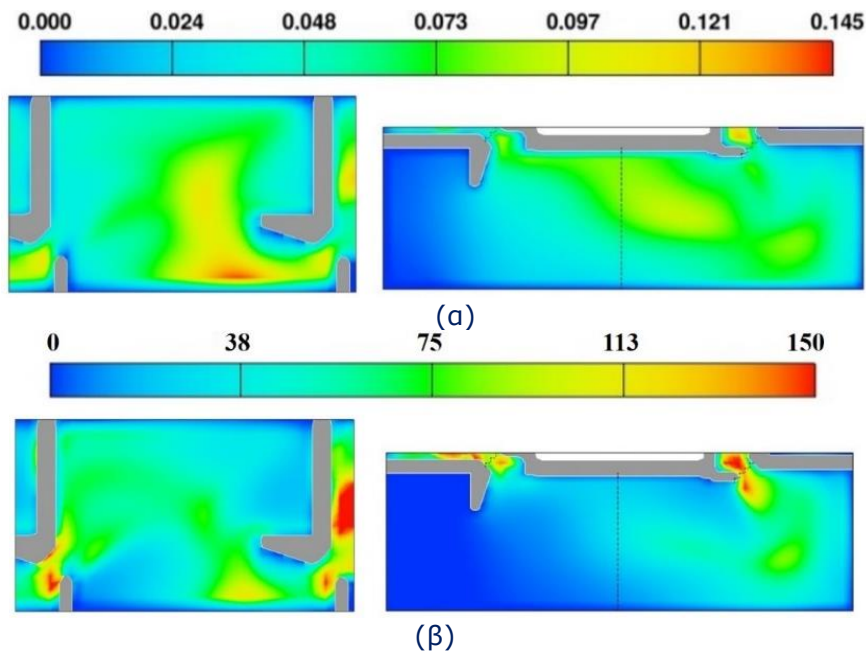
Στην **Εικόνα 7.6** φαίνεται ότι το νερό από τον ταμιευτήρα εισέρχεται στη Δ0 από την πρώτη οπή εισροής, κινείται κατά μήκος του δεξιού (κατά τη διεύθυνση της ροής) τοιχίου, προσκρούει στο απέναντι τοίχιο και ακολουθεί πορεία κατά μήκος αυτού μέχρι να εισέλθει στη Δ1. Αυτή η κίνηση του νερού στη Δ0 δημιουργεί μια μεγάλη αριστερόστροφη περιοχή ανακυκλοφορίας (στρόβιλο) με χαμηλές ταχύτητες ροής (<0.30 m/s), η οποία καταλαμβάνει ένα μεγάλο τμήμα του όγκου της Δ0. Ο στρόβιλος αυτός μπορεί να αποτελέσει περιοχή ανάπαυσης για τους ιχθύες πριν την εισοδό τους στον ταμιευτήρα. Η έκταση του στρόβιλου μειώνεται, όσο αυξάνεται το πλάτος της οπής. Στη μεγαλύτερη οπή, η ροή εισέρχεται στη Δ1 και αφού δημιουργήσει δυο στρόβιλους, ένα μεγάλο δεξιόστροφο στα δεξιά της και ένα πολύ μικρό αριστερόστροφο στα αριστερά της (**Εικόνες 7.6 και 7.7α**), οι οποίοι αποτελούν περιοχές ανάπαυσης ιχθύων εξέρχεται από τη Δ1 και εισέρχεται στη Δ2 δημιουργώντας την ίδια μορφή πεδίου ροής.



**Εικόνα 7.6** Πεδίο ταχυτήτων ροής στις Δ0, Δ1 και Δ2



**Εικόνα 7.7** Πεδίο ταχυτήτων ροής στη Δ4 και την ΔΑ για πλάτος κάθετου ανοίγματος 0.20 m (αριστερά σχήματα) και 0.40 m (δεξιά σχήματα)



**Εικόνα 7.8** Κατανομή (α) της κινητικής ενέργειας σε J/Kg και (β) του βαθμού ανάμιξης σε  $W/m^3$  στη Δ4 και ΔΑ

Σημειώνεται, ότι η έκταση των δυο στροβίλων εξαρτάται από το πλάτος εισροής στη δεξαμενή, η αύξηση του οποίου οδηγεί σε αύξηση της έκτασης του αριστερού στροβίλου και μείωση της έκτασης του δεξιού (βλ. **Εικόνα 7.7β**). Από τις **Εικόνα 7.7 γ** και **δ**, διαπιστώνεται ότι το πεδίο ροής στη ΔΑ είναι όμοιο με αυτό στην Δ1 με τις ταχύτητες ροής να είναι μικρότερες και τους στροβίλους να καταλαμβάνουν μεγάλο τμήμα του όγκου της ΔΑ με πολύ μικρές ταχύτητες επιβεβαιώνοντας την ονομασία της ΔΑ. Οι

ταχύτητες ροής δεν υπερβαίνουν σε καμιά θέση του ΠΙ την τιμή της μέγιστης ταχύτητας κολύμβησης των ιχθύων (2.5 m/s). Όσον αφορά τα τυρβώδη χαρακτηριστικά, στην **Εικόνα 7.8α** φαίνεται η κατανομή της κινητικής ενέργειας τύρβης, της οποίας η μέγιστη τιμή είναι ίση με 0.145 J/kg στη Δ4 και 0.100 J/kg στη ΔΑ, ενώ οι μέσες τιμές της είναι ίσες με 0.083 και 0.049 J/kg, αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές θεωρούνται ικανοποιητικές. Εξαιρετικά ικανοποιητικές είναι και οι τιμές του βαθμού ανάμιξης που φαίνονται στην **Εικόνα 7.8β** με τη μέγιστη τιμή να είναι ίση με 150 W/m<sup>3</sup> στη Δ4 και 130 W/ m<sup>3</sup> στη ΔΑ και τη μέση τιμή ίση με 80 W/m<sup>3</sup> στη Δ4 και 50 W/ m<sup>3</sup> στη ΔΑ.

### 7.5.2 Επίδραση της κατάντη οριακής συνθήκης και του αριθμού δεξαμενών του μοντέλου

Εξετάστηκαν τρεις κατάντη οριακές συνθήκες (α) βάθος ροής ίσο με 0.20 m, (β) βάθος ροής ίσο με 0.60 m και (γ) «εκροή», τις οποίες θέσαμε στην τελευταία δεξαμενή που φαίνεται στον Πίνακα **7.3** και διαπιστώθηκε ότι μια σειρά δεξαμενών ΔΙ (Δ1 μέχρι Δ7) που ακολουθείται από την πρώτη δεξαμενή της επόμενης σειρά (Δ8), στο κατάντη άκρο της οποίας τίθεται η συνθήκη «εκροής» (βλ. **Εικόνα 7.4**), αρκεί για να αποδώσει με πολύ ικανοποιητική ακρίβεια τα χαρακτηριστικά της ροής στις δεξαμενές. Επίσης, τα χαρακτηριστικά της ροής στις δεξαμενές της πρώτης σειράς δεν επηρεάζονται από την εφαρμογή του βάθους ροής του 0.20 m ή του 0.60 m ως κατάντη οριακή συνθήκη στην εκροή της 9ης δεξαμενής (Δ9).

### 7.5.3 Επίδραση του πλάτους της οπής εισροής

Όσο μεγαλύτερο είναι το πλάτος της οπής εισροής, τόσο μικρότερη είναι η ταχύτητα με την οποία εισρέει το νερό στη Δ0 περιορίζοντας τον αριστερόστροφο στρόβιλο (βλ. **Εικόνα 7.6**) και δημιουργώντας μεγαλύτερη ομοιομορφία στην κατανομή ταχυτήτων στην εισροή της Δ1, όπου οι τιμές της ταχύτητας ροής κυμαίνονται από 0.70 m/s μέχρι 1.70 m/s σε όλες τα σενάρια που εξετάστηκαν, που είναι μικρότερες από τη μέγιστη ταχύτητα κίνησης των ιχθύων. Σύμφωνα με τον Πίνακα **7.4**, το ελάχιστο, το μέσο και το μέγιστο βάθος, και η μέγιστη ταχύτητα ροής στη Δ5 και την ΔΑ (Δ7) αυξάνονται με την αύξηση του πλάτους της οπής εισροής.

**Πίνακας 7.4** Επίδραση του πλάτους της οπής εισροής στα χαρακτηριστικά της ροής

Σενάριο	Πλάτος (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	Βάθος ροής (m)						Ταχ. ροής (m/s)	
			Μέσο		Μέγιστο		Ελάχιστο		Μέγιστη	
			Δ5	ΔΑ	Δ5	ΔΑ	Δ5	ΔΑ	Δ5	ΔΑ
Σ8	0.20	0.24	0.69	0.67	0.83	0.83	0.53	0.51	1.93	1.96
Σ3	0.30	0.27	0.77	0.74	0.92	0.92	0.61	0.58	1.97	2.01
Σ15	0.60	0.28	0.80	0.76	0.96	0.93	0.61	0.63	2.08	2.00
Σ10	1.00	0.30	0.85	0.80	0.99	0.97	0.71	0.64	2.10	2.06

### 7.5.4 Επίδραση του αριθμού των οπών εισροής

Εξετάστηκαν οι περιπτώσεις ενός, δυο και τριών οπών πλάτους 0.30 m σε κάθε μια από τις Δ0, Δ1 και Δ2 και διαπιστώθηκε μια μικρή αύξηση στη συνολική παροχή που εισρέει στη ΔΙ από τις οπές με την αύξηση του αριθμού οπών, όπως φαίνεται τον Πίνακα **7.5**. Όπως αναμενόταν, η παροχή που εισρέει σε μια δεξαμενή από κάθε οπή είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο περισσότερο κατάντη βρίσκεται η δεξαμενή. Επιπλέον, το μέσο βάθος στις πρώτες τρεις δεξαμενές μειώνεται με την αύξηση του αριθμού των οπών εισροής, ενώ στις επόμενες δεξαμενές δεν μεταβάλλεται σημαντικά παραμένοντας στην περιοχή των 0.80 m, μιας και η ροή είναι υποκρίσιμη και ελέγχεται από τα κατάντη.



**Πίνακας 7.5** Επίδραση των αριθμού των οπών εισροής στην εισερχόμενη παροχή

Σενάριο	Αριθμός οπών Εισροής (-)	Παροχή Εισόδου (m <sup>3</sup> /s)			
		Δ0	Δ1	Δ2	Συνολική
Σ5	1	0.266	-	-	0.266
Σ6	2	0.082	0.205	-	0.287
Σ7	3	0.039	0.073	0.183	0.295

### 7.5.5 Επίδραση της στάθμης του ταμιευτήρα του φράγματος

Πρακτικά, η στάθμη του νερού στον ταμιευτήρα του φράγματος αποτελεί την ανάντη οριακή συνθήκη των υπολογισμών. Εξετάστηκαν τρεις τιμές στάθμης του νερού του ταμιευτήρα και παρατηρήθηκε, όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.6, ότι με την αύξηση της στάθμης αυξάνεται η παροχή που εισρέει στη ΔΙ (σχεδόν γραμμικά). Παράλληλα, αυξάνονται όλα τα βάθη και οι ταχύτητες ροής, χωρίς όμως να υπερβαίνουν το βάθος του 1.00 m και τη μέγιστη ταχύτητα κολύμβησης των ιχθύων, αντίστοιχα.

**Πίνακας 7.6** Επίδραση της στάθμης ταμιευτήρα στα χαρακτηριστικά ροής των Δ5 και Δ7

Σενάριο	Στάθμη (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	Βάθος ροής (m)						Ταχ. ροής (m/s)	
			Μέσο		Μέγιστο		Ελάχιστο		Μέγιστη	
			Δ5	ΔΑ	Δ5	ΔΑ	Δ5	ΔΑ	Δ5	ΔΑ
Σ1	0.48	0.15	0.47	0.48	0.61	0.65	0.33	0.33	1.86	1.81
Σ2	0.63	0.21	0.62	0.62	0.77	0.78	0.47	0.47	1.92	1.91
Σ3	0.78	0.27	0.77	0.74	0.92	0.92	0.61	0.58	1.97	2.01

### 7.5.6 Επίδραση του πλάτους του κάθετου ανοίγματος

Η τιμή του πλάτους του κάθετου ανοίγματος στις δεξαμενές ΔΙ (b<sub>0</sub>) είναι η σημαντικότερη παράμετρος σχεδιασμού μιας ΔΙ. Πρακτικά, με βάση τη διάσταση αυτή επιλέγουμε κατά τον εμπειρικό σχεδιασμό τις υπόλοιπες διαστάσεις των δεξαμενών μιας ΔΙ. Πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί για δυο τιμές πλάτους του κάθετου ανοίγματος (α) b<sub>0</sub>=0.20 m και (β) b<sub>0</sub>= 0.40 m (για δυο τιμές του πλάτους οπής εισροής). Στην **Εικόνα 7.7β** παρατηρείται ότι αυξάνοντας το πλάτος του ανοίγματος, αυξάνεται η έκταση του αριστερού στροβίλου και μειώνεται η έκταση του δεξιού στροβίλου, Επίσης, σύμφωνα με τον Πίνακα **Πίνακας 7.7** μειώνονται τα βάθη ροής και αυξάνονται οι μέγιστες ταχύτητες ροής.

**Πίνακας 7.7** Επίδραση του πλάτους του κάθετου ανοίγματος στα χαρακτηριστικά ροής των Δ5 και Δ7

Σενάριο	Κάθετο άνοιγμα (m)	Πλάτος οπής εισροής (m)	Βάθος ροής (m)						Ταχ. ροής (m/s)	
			Μέσο		Μέγιστο		Ελάχιστο		Μέγιστη	
			Δ5	ΔΑ	Δ5	ΔΑ	Δ5	ΔΑ	Δ5	ΔΑ
Σ3	0.20	0.30	0.77	0.74	0.92	0.92	0.61	0.58	1.97	2.01
Σ16	0.40	0.30	0.53	0.58	0.72	0.76	0.33	0.25	2.31	2.30
Σ15	0.20	0.60	0.80	0.76	0.96	0.93	0.61	0.63	2.08	2.00
Σ17	0.40	0.60	0.75	0.76	0.93	0.97	0.55	0.43	2.36	2.55

### 7.5.7 Συμπεράσματα

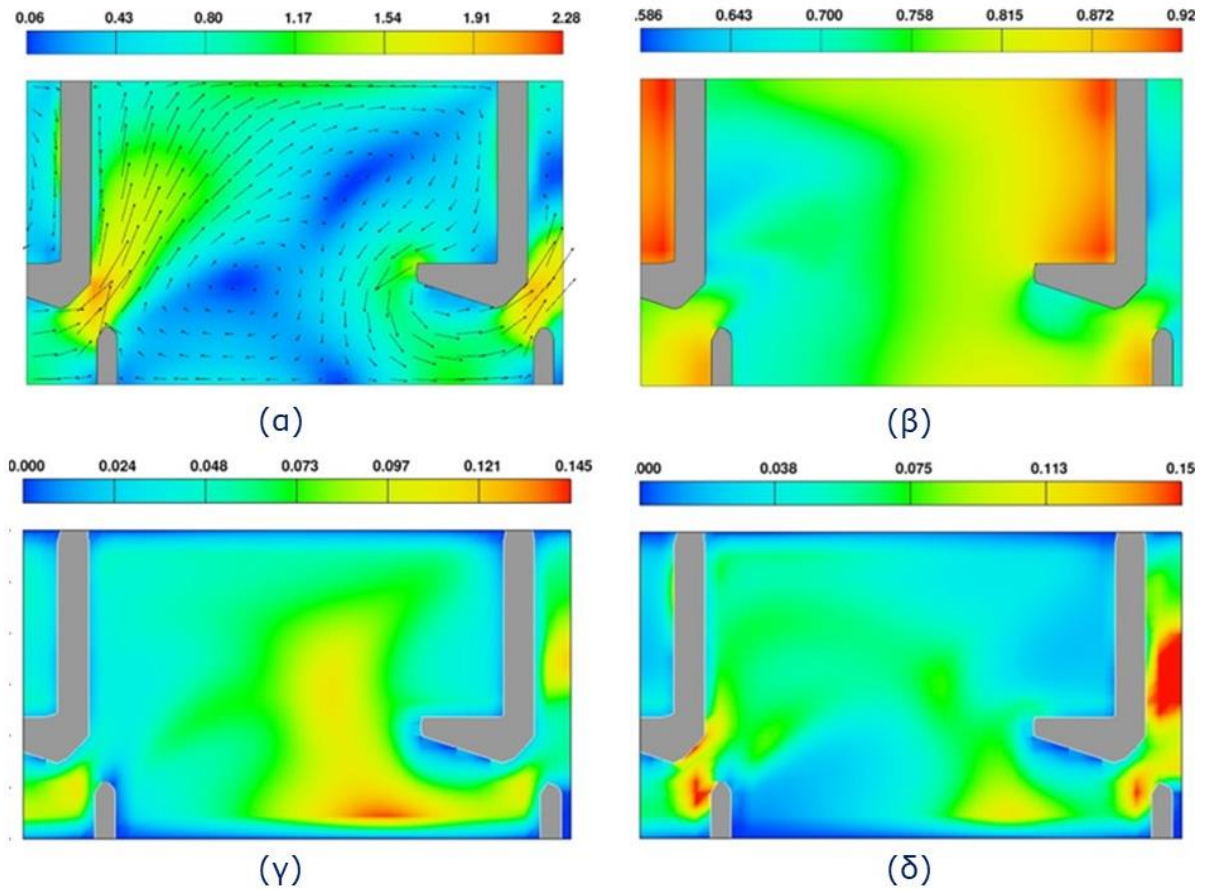
Στην παρούσα περίπτωση φράγματος με μεταβλητή στάθμη ταμειυτήρα προτάθηκε ο «Πύργος Διόδου Ιχθύων» (ΠΔΙ), ο οποίος αποτελείται από σειρές δεξαμενών ΔΙΚΑ εναλλασσόμενης διεύθυνσης ροής. Πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός του ΠΔΙ σε μια περίπτωση φράγματος με το ΟΜΜ με το οποίο προσδιορίζουμε τα χαρακτηριστικά ροής στις δεξαμενές του ΠΔΙ, τα οποία επιβεβαιώνουμε ότι βρίσκονται εντός των ορίων των επιθυμητών τιμών. Εφαρμόζοντας το ΟΜΜ βελτιστοποιούμε το σχεδιασμό και τη λειτουργία του ΠΔΙ επιλέγοντας τις κατάλληλες διαστάσεις των οπών εισροής και του αριθμού τους, καθώς των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των δεξαμενών, κυρίως του πλάτους του κάθετου ανοίγματος. Τελικά επιλέγουμε ως βέλτιστο σχεδιασμό το σενάριο Σ3.

## 7.6 Εφαρμογή του μοντέλου συμπεριφοράς ιχθύων

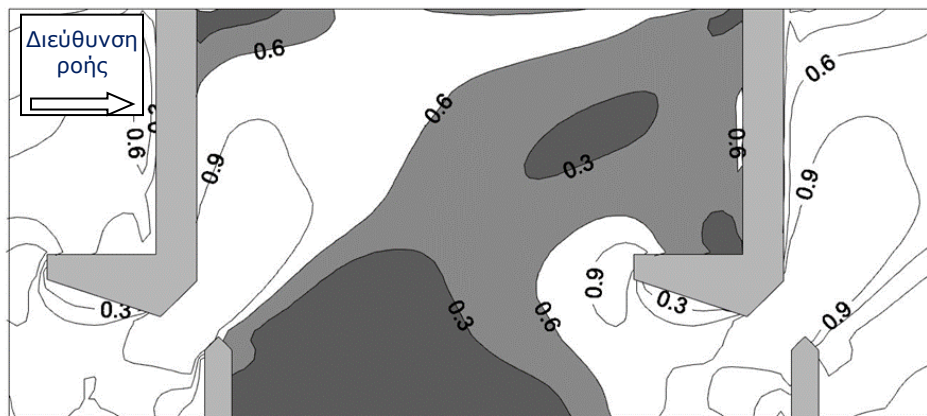
### 7.6.1 Επιλογή υδροδυναμικού πεδίου

Μετά τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας επιλέγουμε το σενάριο Σ3, ως το ιδανικό για την εφαρμογή του ΜΣΙ. Η μέγιστη ταχύτητα στο σενάριο Σ3 είναι 1.97 m/s στην τυπική δεξαμενή και 2.01 m/s στην δεξαμενή ανάπαυσης. Σε όλες τις δεξαμενές η μέγιστη ταχύτητα εμφανίζεται στο κάθετο άνοιγμα. Στην **Εικόνα 7.9α** παρουσιάζεται το πεδίο ταχυτήτων ροής.

Η φλέβα εισέρχεται στην δεξαμενή με κλίση περίπου 70° σε σχέση με την οριζόντιο, προσκρούει στον αριστερό κατά τη ροή τοίχο, μειώνεται η ταχύτητά της και οδηγούμενη από το κατάντη κάθετο πέτασμα και κατευθυντήριο πτερύγιο εξέρχεται από τη δεξαμενή. Δημιουργείται μια μεγάλη περιοχή ανακυκλοφορίας χαμηλών ταχυτήτων <0.30 m/s κάτω από τη φλέβα και προς το δεξί τοίχωμα της δεξαμενής. Οι χαμηλές ταχύτητες εκτείνονται μέχρι το αριστερό τοίχωμα και το κατάντη κάθετο πέτασμα (βλ. **Εικόνα 7.10**). Οι περιοχές αυτές ταυτίζονται με τις περιοχές Α και C (βλ. **Εικόνα 5.26**).



**Εικόνα 7.9** (α) Πεδίο ταχυτήτων ροής, (β) βάθος ροής, (γ) κατανομή της κινητικής ενέργειας σε J/Kg και (δ) κατανομή του βαθμού ανάμιξης σε W/m<sup>3</sup> στη τυπική δεξαμενή



**Εικόνα 7.10** Ισοποσοτικές του πεδίου ταχυτήτων ροής. Διακρίνονται οι περιοχές της δεξαμενής με ταχύτητες μικρότερες των 0.30 m/s (σκούρο γκρι) και μικρότερων από 0.60 m/s (ανοιχτό γκρι)

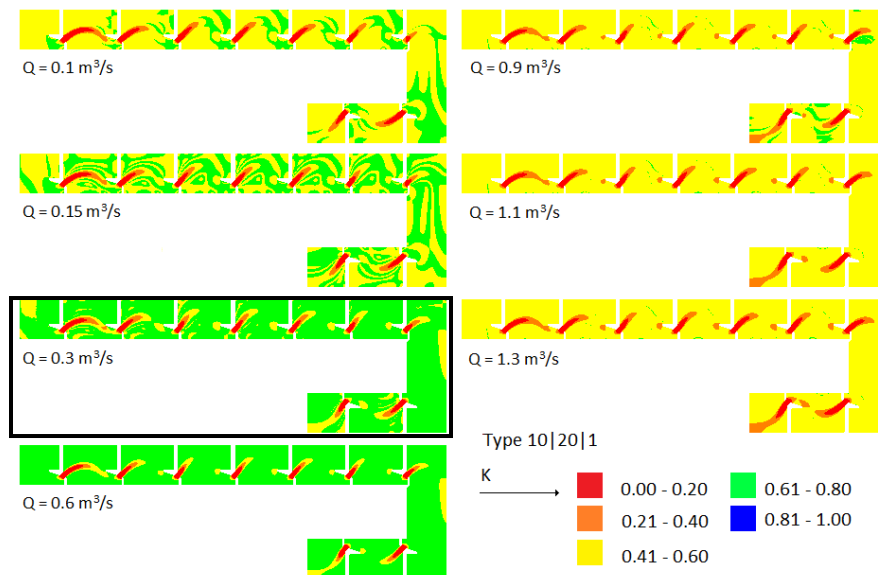
### 7.6.2 Δεδομένα του ιχθύος σχεδιασμού

Στους υπολογισμούς προσομοιώθηκε η κίνηση των ειδών ιχθύων που αναφέρθηκαν πιο πάνω. Εξαιτίας των διαφορετικών χαρακτηριστικών των ιχθύων εξετάστηκαν διάφορα σενάρια υπολογισμών που φαίνονται στον Πίνακα 7.8. Επίσης εξετάστηκε και η επίδραση διαφορετικών συντελεστών τυχαιότητας, ώστε να διαπιστωθεί η επίδρασή τους στις παραγόμενες τροχιές. Ο συντελεστής  $\alpha$  της εξίσωσης (2.24) θεωρήθηκε ίσος με 0.4 και για τον ιχθύ με μήκος 0.40 m μειώθηκε η οριακή ταχύτητα τυχαίας κίνησης στο  $0.3 * FL$  m/s. Να σημειωθεί ότι για να δούμε την επίδραση των τυχαίων μεταβλητών στο μοντέλο επιλέξαμε 3 ομάδες τυχαίων αριθμών ομοιόμορφης κατανομής. Για παράδειγμα, σε κάθε σενάριο της ομάδας A τους ίδιους τυχαίους αριθμούς με την ίδια σειρά. Οι ομάδες B και C είναι εντελώς διαφορετικά σύνολα τυχαίων αριθμών ομοιόμορφης πάλι κατανομής.

**Πίνακας 7.8** Σενάρια υπολογισμών του ΜΣΙ

Σενάριο	Μήκος Ιχθύ (m)	Ταχύτητα έκρηξης (m/s)	Ομάδα τυχαίων αριθμών	Θέση εκκίνησης	Συντελεστής απόστασης περιοχής αντίληψης	Οριακή ταχύτητα τυχαίας κίνησης
ΣΙ 1	0.20	7*FL	A	0.75, 1.30	0.4	0.5 * FL
ΣΙ 2	0.20	10*FL	A	0.75, 1.30	0.4	0.5 * FL
ΣΙ 3	0.20	10*FL	A	0.60, 1.40	0.4	0.5 * FL
ΣΙ 4	0.20	10*FL	C	0.51, 1.16	0.4	0.5 * FL
ΣΙ 5	0.20	10*FL	A	0.54, 1.14	0.4	0.5 * FL
ΣΙ 6	0.20	10*FL	B	0.75, 1.30	0.4	0.5 * FL
ΣΙ 7	0.30	7*FL	A	0.75, 1.30	0.4	0.5 * FL
ΣΙ 8	0.40	7*FL	A	0.75, 1.30	0.3	0.3 * FL

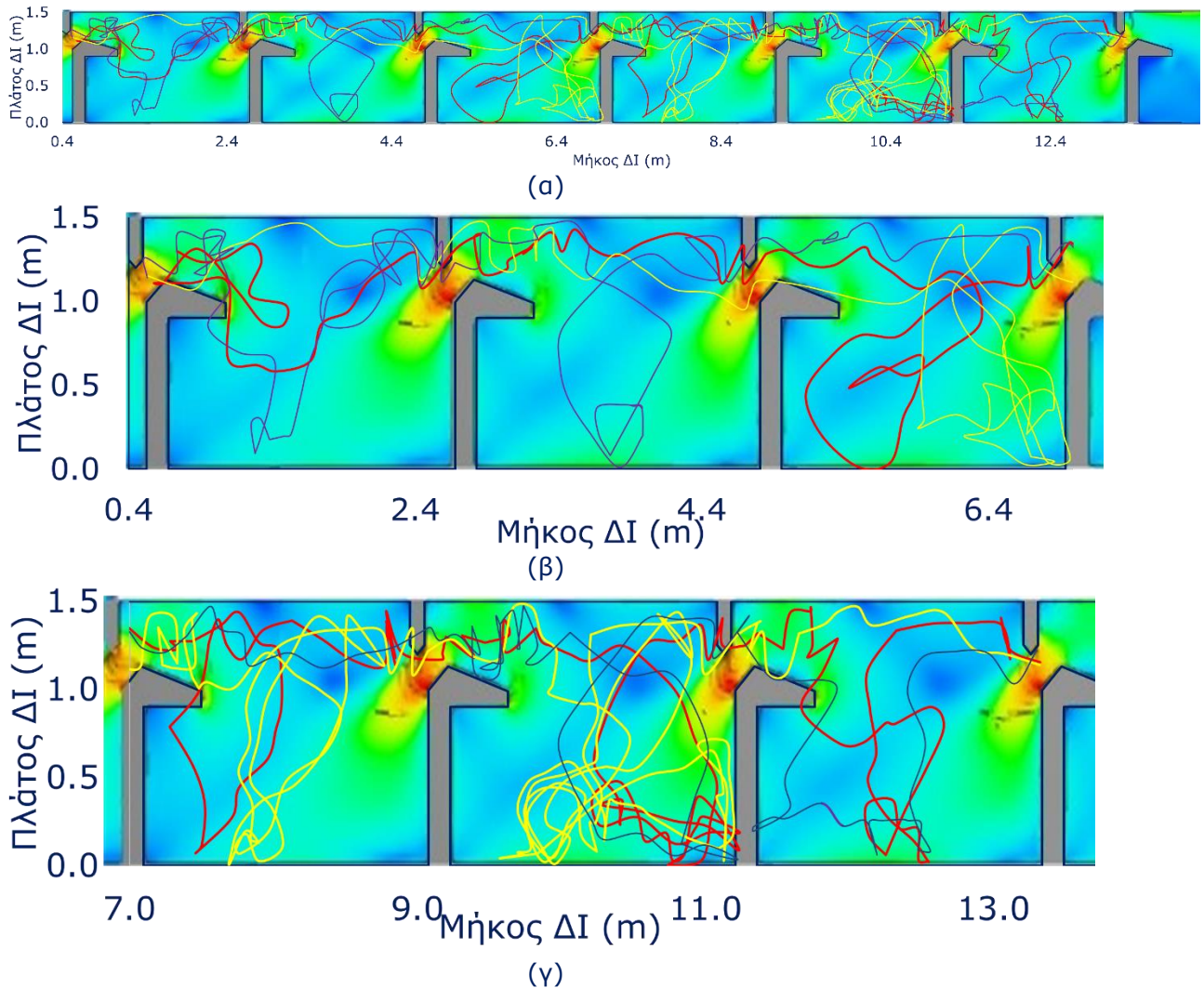
Στην **Εικόνα 7.11** φαίνονται τα αποτελέσματα της οικολογικής βελτιστοποίησης για το υδροδυναμικό σενάριο Σ3.



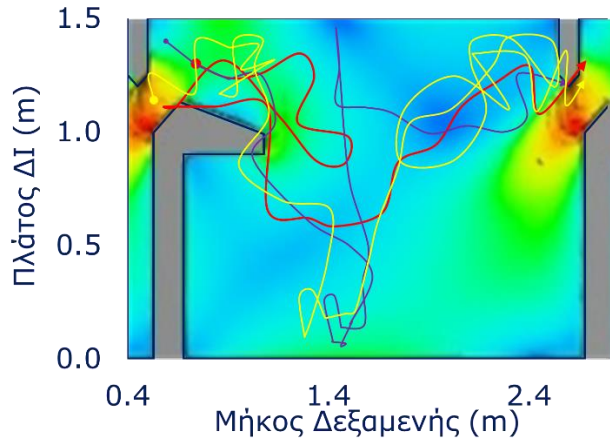
**Εικόνα 7.11** Μέση καταλληλότητα ενδαιτημάτων (HSI) για τη ΔΙ 10-20-1 που έδωσε υψηλότερες καταλληλότητες για την ομάδα *Salmo fario* με FL>20cm. Σε μαύρο περίγραμμα σημειώνεται το σενάριο Σ3

### 7.6.3 Αποτελέσματα και σχολιασμός

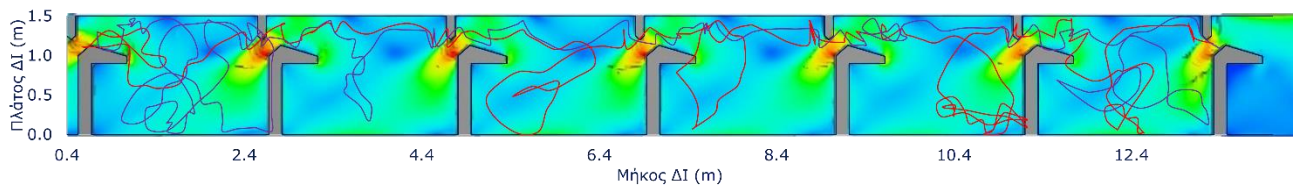
Το μοντέλο χρησιμοποιεί ένα τυπικό τμήμα της ΔΙ με 6 δεξαμενές (Δ1 μέχρι Δ6, βλ. **Εικόνα 7.6**). Στην **Εικόνα 7.12** παρουσιάζονται τα σενάρια ΣΙ2, ΣΙ4 και ΣΙ5 σε όλο το τμήμα της ΔΙ. Στην **Εικόνα 7.13** παρουσιάζονται τα σενάρια ΣΙ2, ΣΙ3 και ΣΙ5 στη δεξαμενή Δ1. Στην **Εικόνα 7.14** παρουσιάζονται τα σενάρια ΣΙ2 και ΣΙ6 σε όλο το τμήμα της ΔΙ. Τέλος στην **Εικόνα 7.15** παρουσιάζονται τα σενάρια ΣΙ2, ΣΙ7 και ΣΙ8 σε όλο το τμήμα της ΔΙ.



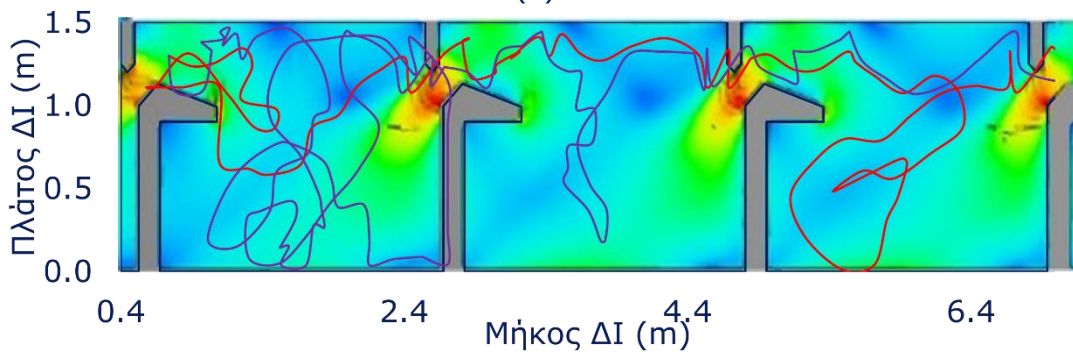
**Εικόνα 7.12** Απεικόνιση των σεναρίων ΣΙ2 (κόκκινη γραμμή), ΣΙ4 (κίτρινη γραμμή) και ΣΙ5 (μωβ γραμμή) πάνω στο μέσο πεδίο ταχυτήτων ροής. (α) Ολόκληρη η ΔΙ, (β) μεγέθυνση των τριών πρώτων δεξαμενών και (γ) μεγέθυνση των τριών τελευταίων δεξαμενών. Η διεύθυνση της ροής είναι από δεξιά προς αριστερά



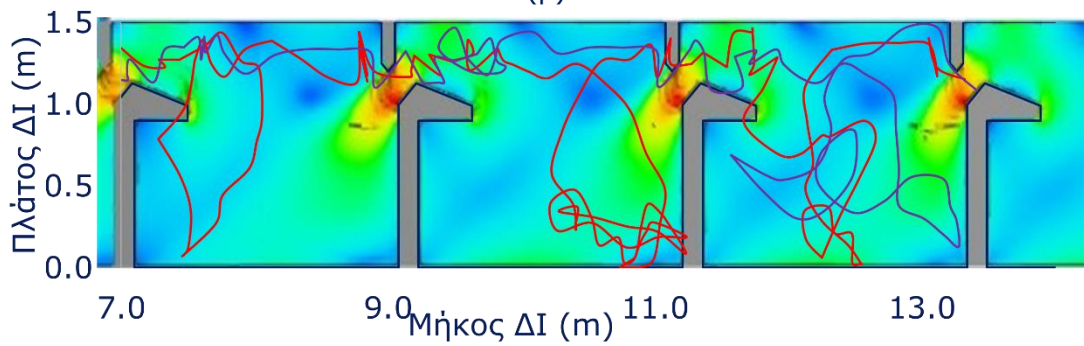
**Εικόνα 7.13** Απεικόνιση των σεναρίων ΣΙ2 (κόκκινη γραμμή), ΣΙ3 (μωβ γραμμή) και ΣΙ5 (κίτρινη γραμμή) πάνω στο μέσο πεδίο ταχυτήτων ροής



(α)

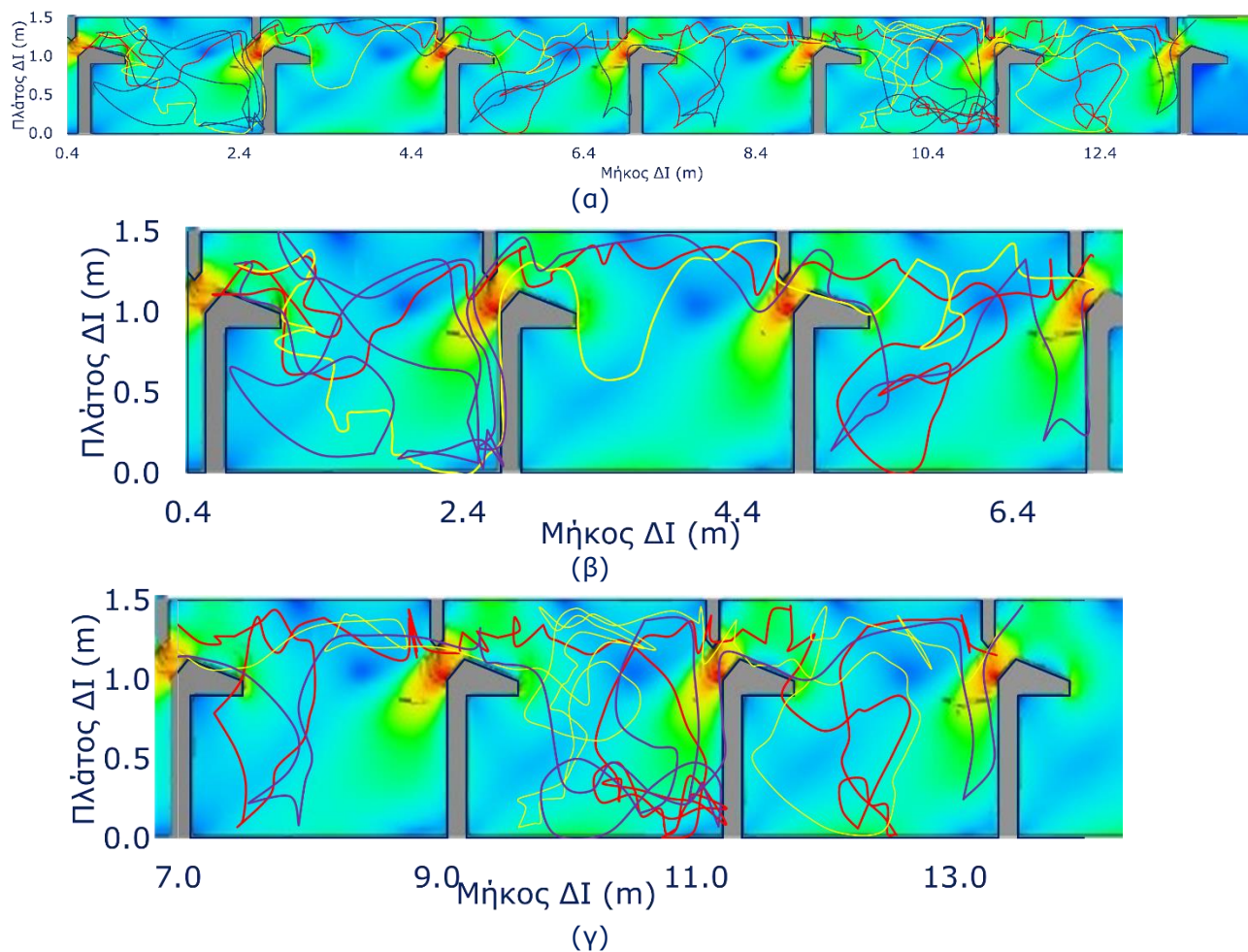


(β)



(γ)

**Εικόνα 7.14** Απεικόνιση των σεναρίων ΣΙ2 (κόκκινη γραμμή) και ΣΙ6 (μωβ γραμμή) πάνω στο μέσο πεδίο ταχυτήτων ροής. (α) Ολόκληρη η ΔΙ, (β) μεγέθυνση των τριών πρώτων δεξαμενών και (γ) μεγέθυνση των τριών τελευταίων δεξαμενών. Η διεύθυνση της ροής είναι από δεξιά προς αριστερά



**Εικόνα 7.15** Απεικόνιση των σεναρίων ΣΙ2 (κόκκινη γραμμή), ΣΙ7 (κίτρινη γραμμή) και ΣΙ8 (μωβ γραμμή) πάνω στο μέσο πεδίο ταχυτήτων ροής. (α) Ολόκληρη η ΔΙ, (β) μεγέθυνση των τριών πρώτων δεξαμενών και (γ) μεγέθυνση των τριών τελευταίων δεξαμενών. Η διεύθυνση της ροής είναι από δεξιά προς αριστερά

Η μέγιστη ταχύτητα στις δεξαμενές της ΔΙ είναι περίπου 2.0 m/s και εμφανίζεται στο κάθετο άνοιγμα. Στο σενάριο ΣΙ1 ο ιχθύς έχει μέγιστη ταχύτητα (ταχύτητα έκρηξης  $7*FL$ , δηλαδή 1.40 m/s). Η προσομοίωση του ΣΙ1 με το ΜΣΙ έδειξε ότι ο ιχθύς δεν μπορεί να περάσει από τα κατάντη στα ανάντη της δεξαμενής, όπως αναμενόταν.

Τα σενάρια ΣΙ2, ΣΙ4 και ΣΙ5 είναι διαφορετικές πιθανές τροχιές του ίδιου ιχθύ μέσα στη ΔΙ. Η διαφορά του ΣΙ2 από το ΣΙ4 είναι (α) η διαφορετική θέση εκκίνησης και (β) η διαφορετική ομάδα τυχαίων αριθμών. Η διαφορά του ΣΙ2 από το ΣΙ5 είναι μόνο η διαφορετική θέση εκκίνησης. Οι παραγόμενες τροχιές διαφέρουν πολύ μεταξύ τους, εξαιτίας των διαφορετικών τυχαίων αριθμών. Είναι όμως εμφανές ότι το ΜΣΙ υπολογίζει τροχιές που είτε διέρχονται από το κατάντη κάθετο άνοιγμα προς το ανάντη (τρόπος κίνησης ΤΑ) είτε παραμένουν για κάποιο διάστημα στις περιοχές χαμηλών ταχυτήτων της ΔΙ, που απεικονίζονται στην **Εικόνα 7.10**. Ο συνολικός χρόνος διέλευσης των ιχθύων για τα σενάρια ΣΙ 2, ΣΙ 4 και ΣΙ 5 είναι 79.2 s, 92.7 s και 98.7 s, αντίστοιχα. Οι χρόνοι αυτοί δίνουν μέσο όρο διέλευσης για κάθε δεξαμενή 13.2 s, 15.4 s και 16.45 s. Οι μέσοι χρόνοι είναι σύμφωνοι με τις παρατηρήσεις για το ίδιο μέγεθος ιχθύος (βλ. **Πίνακας 5.6**).

Οι διαφορές που δημιουργούνται από την διαφορετική θέση εκκίνησης παρατηρούνται και στην **Εικόνα 7.13**, αν και παρατηρείται μια ομοιότητα στην κίνηση, αφού και οι τρεις τροχιές χρησιμοποιούν τις εν δυνάμει περιοχές ανάπαυσης και εξέρχονται από τη δεξαμενή από το ίδιο σημείο. Αντίστοιχα η διαφορά της ομάδας των τυχαίων αριθμών φαίνεται και στην **Εικόνα 7.14**. Εδώ η σειρά τυχαίων αριθμών του σεναρίου ΣΙ6 είναι διαφορετική από το σενάριο ΣΙ4. Και πάλι τα αποτελέσματα είναι διαφορετικά. Οι χρόνοι όμως και οι περιοχές που κινείται ο ιχθύς είναι αντίστοιχοι και για τα τρία σενάρια ΣΙ2, ΣΙ4 και ΣΙ6.

Για τα σενάρια ΣΙ7 και ΣΙ8 έγιναν τροποποιήσεις στις παραμέτρους του μοντέλου. Αυτό κρίθηκε αναγκαίο, διότι μεγαλώνοντας το μήκος του ιχθύ μεγαλώνουν αντίστοιχα και η μέγιστη ταχύτητα κίνησης, το εύρος της περιοχής αντίληψης και η οριακή τιμή της ταχύτητας τυχαίας κίνησης. Ανάλογα με το νέο μήκος εκτιμήθηκαν νέες τιμές με βάση τη βιβλιογραφία. Και εδώ παρατηρούμε ότι οι τροχιές είναι αντίστοιχες. Οι ιχθύες χρησιμοποιούν τις ίδιες περιοχές στη τυπική δεξαμενή. Αυτό όμως που διαφέρει αισθητά είναι ο χρόνος που χρειάστηκε ο κάθε ιχθύς να περάσει το τμήμα της ΔΙ. Ο συνολικός χρόνος διέλευσης για τα σενάρια ΣΙ2, ΣΙ7 και ΣΙ8 είναι 79.2 s, 65.4 s και 50 s, αντίστοιχα. Οι χρόνοι αυτοί δίνουν μέσο όρο διέλευσης για κάθε δεξαμενή 13.2 s, 10.9 s και 5.55 s. Οι χρόνοι αυτοί είναι πάλι αντίστοιχοι με τους πειραματικούς κατά τη βαθμονόμηση.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι ένα μειονέκτημα της ΔΙΚΑ είναι ότι οι ιχθύες αποπροσανατολίζονται κάποιες φορές μέσα στις περιοχές ανακυκλοφορίας. Παρατηρώντας τα αποτελέσματα του ΜΣΙ, όπως αυτά στην **Εικόνα 7.12** στη δεξαμενή Δ5 και λαμβάνοντας υπόψη το μέγεθος του ΠΔΙ και τις συνολικά 99 δεξαμενές, είναι πιθανό οι ιχθύες όντως να αποπροσανατολιστούν ή να καταναλώσουν πολύ μεγάλη ενέργεια πριν καταφέρουν να εξέλθουν από τη ΔΙ και τελικά να εγκλωβιστούν. Αυτή είναι μια παράμετρος αυτό θέλει περαιτέρω έρευνα και μελέτη.

## 7.7 Συμπεράσματα από την εφαρμογή του ολοκληρωμένου μοντέλου σε διόδους ιχθύων

Το ολοκληρωμένο μοντέλο εφαρμόστηκε σε μια ιδιαίτερη περίπτωση αρδευτικού φράγματος στην Ελλάδα. Το φράγμα χαρακτηρίζεται από (α) το μεγάλο ύψος του και (β) τη μεγάλη διακύμανση της στάθμης ταμιευτήρα. Για να αντιμετωπιστούν τα παραπάνω προτάθηκε ο ΠΔΙ, ο οποίος αποτελείται από 14 σειρές ΔΙ, που κάθε μια έχει 6 δεξαμενές. Κάθε δεξαμενή συνδέεται και με τον ταμιευτήρα με μια οπή, η οποία κλείνει με θυρόφραγμα. Ο στόχος της οπής είναι να αντιμετωπίσει τη μεταβολή της στάθμης. Το υδροδυναμικό μοντέλο προσομοίωσε 2 σειρές ΔΙ και συνολικά 17 σενάρια με τα οποία ελέγχθηκαν (α) τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δεξαμενών, των οπών και του κάθετου ανοίγματος, (β) η επίδραση των οριακών συνθηκών του μοντέλου και (γ) η επίδραση των οπών εισροής ανάλογα με τη στάθμη του ταμιευτήρα. Από τα 17 σενάρια επιλέχθηκε το σενάριο Σ3, ως το πιο κατάλληλο. Στο σενάριο Σ3 χρησιμοποιήθηκε σαν υδροδυναμικό μοντέλο για το ΜΣΙ. Δημιουργήθηκαν 8 σενάρια ιχθύων ανάλογα (α) με το μήκος των ιχθύων, (β) την μέγιστη ταχύτητα κίνησης, (γ) την κατανομή των τυχαίων αριθμών και (δ) τη θέση εκκίνησης του μοντέλου. Τα βασικά συμπεράσματα ήταν ότι (α) σε όλα τα σενάρια οι ιχθύες φθάνουν στην τελευταία ανάντη δεξαμενή του μοντέλου, εκτός του ΣΙ 1, που η μέγιστη ταχύτητα του ιχθύ είναι μικρή, (β) οι τροχιές που ακολουθούνται από τους ιχθύες προσομοιάζουν τους τρόπους κίνησης ΤΑ και ΤC, (γ) η τυχαιότητα των μεταβλητών μεταβάλλει τις τροχιές που παράγονται από το ΜΣΙ, όμως οι περιοχές που κινούνται οι ιχθύες παραμένουν ίδιες (αποφεύγονται περιοχές μεγάλων ταχυτήτων), και (δ) οι χρόνοι ανόδου και παραμονής



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

στις δεξαμενές είναι αντίστοιχή με τις πειραματικές μετρήσεις, που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση και επιβεβαίωση του μοντέλου.

## 8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

### 8.1 Συμπεράσματα από τη χρήση του ολοκληρωμένου μαθηματικού μοντέλου

#### 8.1.1 Συμπεράσματα από τη χρήση του ολοκληρωμένου μοντέλου σε ποταμούς

Από τους υπολογισμούς του OMM σε ποταμούς εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα.

- 1) Το υδροδυναμικό μοντέλο μπορεί να προσομοιώσει ικανοποιητικά το πεδίο ροής σε ένα ποταμό με τη χρήση του μοντέλου τύρβης Standard  $k - \epsilon$  (SKE), όπως προτείνεται από τη βιβλιογραφία. Ο δείκτης συσχέτισης Root Mean Square Error (RMSE) των ταχυτήτων ροής που υπολογίζονται από το μοντέλο σε σχέση με τις μετρούμενες κυμαίνεται από 0.03 μέχρι 0.054, με βέλτιστη τιμή το μηδέν, ενώ ο δείκτης Index of Agreement (IA) από 0.96 μέχρι 0.99, με βέλτιστη τιμή τη μονάδα (**Πίνακας 4.5** και **Εικόνα 4.12**).
- 2) Το μοντέλο συμπεριφοράς ιχθύων μπορεί να υπολογίσει με ικανοποιητική ακρίβεια το ποσοστό των ιχθύων που θα ακολουθήσουν ευθεία ή κυκλική τροχιά. Όμως, το πιο σημαντικό είναι ότι μπορεί να υπολογίσει το ποσοστό των ιχθύων που θα εξέλθουν από το μοντέλο από μια συγκεκριμένη έξοδο. Αυτό μπορεί να γενικευθεί θεωρώντας έξοδο του μοντέλου την είσοδο μιας ΔΙ. Με δεδομένο ότι το υδροδυναμικό μοντέλο μπορεί εύκολα να τροποποιηθεί ώστε να προσομοιωθούν διαφορετικά ρεύματα προσέλευσης ιχθύων από μια ΔΙ (διαφορετικές παροχές εξόδου), τότε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο συμπεριφοράς ιχθύων για να εξακριβώσουμε υπό ποιες συνθήκες το μεγαλύτερο ποσοστό θα κινηθεί προς τη ΔΙ (**Πίνακας 4.6**).
- 3) Η ακριβής προσομοίωση μιας πειραματικής τροχιάς δεν είναι απόλυτα εφικτή, γιατί το μοντέλο εισάγει τυχαιότητα στον υπολογισμό των μεταβλητών του, που είναι ικανές να διαφοροποιούν τις προσομοιωμένες τροχιές. Ωστόσο, αν προσομοιωθεί ικανός αριθμός ιχθύων, από μια πειραματική θέση εκκίνησης, το μεγαλύτερο ποσοστό από τις τροχιές που υπολογίζονται θα ακολουθεί τη διεύθυνση της μετρούμενης τροχιάς.
- 4) Το OMM μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν εργαλείο για να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για την καταλληλότητα ενδιαιτήματος αξιοποιώντας τα πειραματικά δεδομένα και το υπολογιζόμενο πεδίο ροής.

#### 8.1.2 Συμπεράσματα από τη χρήση του ολοκληρωμένου μοντέλου σε διόδους ιχθύων

Από τους υπολογισμούς του OMM σε ΔΙ εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα.

- 1) Το πεδίο ροής σε μια ΔΙ είναι αρκετά πολύπλοκο. Συχνά, είναι απαραίτητο ένα τρισδιάστατο μοντέλο CFD για τον υπολογισμό του πεδίου ροής, ιδιαίτερα για την ακριβή περιγραφή της ροής στις περιοχές των κάθετων ανοιγμάτων.
- 2) Το μοντέλο τύρβης RNG KE και η μέθοδος Volume of Fluid (VOF) μπορούν να δώσουν ακριβή αποτελέσματα για τον προσδιορισμό της επιφάνειας της ροής σε μικρό σχετικά υπολογιστικό κόστος.

- 3) Οι υπολογισμοί του τρισδιάστατου μοντέλου έδειξαν (1) καλή συμφωνία με τα πειράματα και τους δισδιάστατους υπολογισμούς των υπολογιζόμενων μέσω ταχυτήτων ροής ( $RMSE = 0.01-0.03$ , **Πίνακας 5.3**), (2) καλύτερη απόδοση στον προσδιορισμό της επιφανειακής ροής στη ΔΙ, η οποία αποδίδεται στην μέθοδο VOF και (3) καλύτερος υπολογισμός των χαρακτηριστικών της τύρβης από τα δισδιάστατα μοντέλα, η οποία οφείλεται στο μοντέλο τύρβης RNG KE (που ξεπερνά το πρόβλημα της υπερεκτίμησης της τύρβης του μοντέλου SKE) και στο γεγονός ότι το τρισδιάστατο μοντέλο λαμβάνει υπόψη τα τρισδιάστατα χαρακτηριστικά της ροής στη ΔΙΚΑ.
- 4) Οι τρισδιάστατοι υδροδυναμικοί υπολογισμοί έδειξαν ότι οι συνήθεις παραδοχές στις ΔΙ, ότι (α) η ροή είναι δισδιάστατη και (β) η προσομοίωση 3-5 δεξαμενών είναι επαρκής για την επίτευξη ικανοποιητικών αποτελεσμάτων, δεν ισχύουν πάντα, και πρέπει οι παραπάνω παραδοχές να ελέγχονται ανάλογα με την εσωτερική διάταξη και με τον αριθμό των δεξαμενών της ΔΙ.
- 5) Το μοντέλο συμπεριφοράς ιχθύων μπορεί να υπολογίσει με ικανοποιητική ακρίβεια το ποσοστό των ιχθύων που θα ακολουθήσουν μια συγκεκριμένη πορεία προς τα ανάντη της ΔΙ.
- 6) Το μοντέλο συμπεριφοράς ιχθύων δεν μπορεί να προσομοιώσει το χρόνο ανάπαυσης των ιχθύων εντός της ΔΙ κάθετου ανοίγματος, όμως δείχνει ότι αν οι ιχθύες δεν περάσουν απευθείας από την κατάντη δεξαμενή στην ανάντη, τότε ο χρόνος «άσκοπης» κίνησης μέσα στη δεξαμενή θα είναι σε κάποια περιοχή, που θεωρείται περιοχή ανάπαυσης.

### **8.1.3 Απάντηση στο ερευνητικό ερώτημα**

Το κύριο ερευνητικό ερώτημα που έθεσε η παρούσα διατριβή είναι:

Πως σχεδιάζουμε ορθολογικά με ένα OMM μια ΔΙ, ώστε αυτή να είναι αποτελεσματική;

Το κύριο ερευνητικό ερώτημα που τέθηκε στην παρούσα διατριβή εξειδικεύτηκε στα ακόλουθα πέντε επιμέρους ερευνητικά ερωτήματα, τα οποία απαντώνται συνοπτικά

#### **1. Πως μπορούμε να περιγράψουμε με ένα μαθηματικό μοντέλο την κίνηση των ιχθύων σε μια ΔΙ;**

Συχνά μπορεί να είναι απαραίτητη η χρήση ενός τρισδιάστατου μαθηματικού μοντέλου και σε συγκεκριμένες περιπτώσεις μπορεί να επαρκεί ένα δισδιάστατο μοντέλο. Με τη χρήση του μαθηματικού μοντέλου είναι εφικτός ο ακριβής προσδιορισμός των βαθών και των ταχυτήτων ροής και με αρκετά καλή ακρίβεια ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών της τύρβης. Τα χαρακτηριστικά αυτά του πεδίου ροής είναι αυτά που επηρεάζουν την κίνηση των ιχθύων εντός της ΔΙ. Άρα, με τον ορθό υπολογισμό τους και λαμβάνοντας υπόψη ότι οι ιχθύες δέχονται τα υδροδυναμικά αυτά ερεθίσματα και προσπαθούν (α) να καταναλώσουν τη μικρότερη δυνατή ενέργεια για να φτάσουν στα ανάντη και (β) να αποφύγουν την υπέρμετρη έκθεση στην τύρβη, που μπορεί να τους αποπροσανατολίσει, μπορούμε να περιγράψουμε την κίνηση των ιχθύων εντός της ΔΙ. Το μαθηματικό μοντέλο πρέπει να λαμβάνει υπόψη του και τους δείκτες καταλληλότητας ενδιαίτηματος, ώστε να μπορεί να γίνει μια αρχική γεωμετρική βελτιστοποίηση ΔΙ, ως προς της χρήσης της από περισσότερα είδη.

#### **2. Πως μπορούμε να περιγράψουμε με ένα μαθηματικό μοντέλο την κίνηση των ιχθύων σε ένα ποταμό στην περιοχή μιας ΔΙ;**

Η περίπτωση των ποταμών είναι πιο σύνθετη σε σχέση με τη ΔΙ, ως προς την περιγραφή του ΜΣΙ, ενώ δεν ισχύει το ίδιο για το υδροδυναμικό μοντέλο. Είναι σημαντικό να τονιστεί η μεγαλύτερη πολυπλοκότητα του ΜΣΙ σε ποταμούς, διότι οι ιχθύες είναι ήδη εγκλιματισμένοι στα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά των ποταμών. Οπότε είναι σημαντικό να υπάρχουν παρατηρήσεις για τους ιχθύες σχεδιασμού, ώστε να μπορεί το μοντέλο να λάβει κατάλληλες τιμές για τις παραμέτρους του.

### **3. Πως σχεδιάζουμε μια ΔΙ, ώστε αυτή να επιτρέπει την ασφαλή κίνηση των ιχθύων;**

Για το σωστό σχεδιασμό μιας ΔΙ, που να επιτρέπει την ασφαλή κίνηση των ιχθύων, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε ένα μαθηματικό μοντέλο ώστε: (1) Να δημιουργείται πεδίο ροής κατάλληλο για της δυνατότητες των ιχθύων ενδιαφέροντος, (2) να προβλέπονται περιοχές ανάπαυσης, ώστε να μειώνεται η απαιτούμενη ενέργεια ανόδου σε μια ΔΙ, και (3) να αποφεύγεται βάθος ροής μικρότερο από το προβλεπόμενο για τους ιχθύες.

### **4. Πως τοποθετούμε μια ΔΙ στην περιοχή ενός φράγματος, ώστε να ελκύει τους ιχθύες;**

Η βέλτιστη χωροθέτηση μιας ΔΙ επιτυγχάνεται με τα παρακάτω βήματα: (1) εύρεση του δείκτη καταλληλότητας ενδιαίτηματος του ποταμού για τα είδη που μας ενδιαφέρουν, ώστε να χωροθετηθεί σε κατάλληλο σημείο η ΔΙ, (2) βελτιστοποίηση της ΔΙ με οικολογικά κριτήρια, (3) εφαρμογή του OMM στην περιοχή του ποταμού συμπεριλαμβάνοντας τη βελτιστοποιημένη ΔΙ και (4) βελτιστοποίηση των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών της εισόδου και της εξόδου της ΔΙ, με στόχο τη μεγιστοποίηση του ποσοστού των ιχθύων που κινούνται προς την είσοδο της ΔΙ. Η απάντηση αυτή βρίσκεται σε συμφωνία με τις περισσότερες βιβλιογραφικές πηγές.

### **5. Ποιο μοντέλο τύρβης προσομοιώνει καλύτερα το πεδίο ροής σε μια ΔΙ;**

Ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών της τύρβης επηρεάζει τους υπολογισμούς του πεδίου ροής και τους ιχθύες. Έτσι ο υπολογισμός αυτός πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο ακριβής, αλλά ταυτόχρονα και οικονομικός από πλευράς υπολογιστικού κόστους, ιδιαίτερα στα τρισδιάστατα μοντέλα. Η χρήση του μοντέλου RNG KE μπορεί να πετύχει ικανοποιητική ακρίβεια με μικρό σχετικά υπολογιστικό χρόνο, για τις περιπτώσεις ροής σε ΔΙ. Πιο απλά μοντέλα (Mixing Length, SKE, Constant viscosity) δεν μπορούν να προβλέψουν ικανοποιητικά το πεδίο ροής, ενώ πιο σύνθετα (Large Eddy Simulation) αυξάνουν πολύ τον υπολογιστικό χρόνο και την πολυπλοκότητα ανάλυσης και επεξεργασίας των αποτελεσμάτων.

## **8.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα**

Τα υδροδυναμικά μοντέλα έχουν μελετηθεί εκτενώς στη βιβλιογραφία αλλά και στα πλαίσια της παρούσας ΔΔ. Οι δυνατότητες για περαιτέρω έρευνα είναι περιορισμένες και αφορούν κυρίως εξειδικευμένες περιπτώσεις ΔΙ. Αντίθετα τα ΜΣΙ έχουν δυνατότητες περαιτέρω ανάπτυξης, ιδιαίτερα σε συνδυασμό με πειραματικές εργασίες με πραγματικούς ιχθύες.

Με βάση λοιπόν τους περιορισμούς και τις δυνατότητες του OMM που αναφέρονταινωρίτερα, διατυπώνονται οι εξής προτάσεις για μελλοντική έρευνα:

- 1) Συνδυασμός των υδροδυναμικών μοντέλων με μοντέλα βελτιστοποίησης και μοντέλα ενδιαίτηματος για την εύρεση της κατάλληλης γεωμετρίας για τα είδη σχεδιασμού.
- 2) Βελτίωση του μοντέλου συμπεριφοράς ιχθύος σε ποταμούς, με τη χρήση της τρίτης διάστασης, που θα εισάγει νέες μεταβλητές όπως το βάθος ροής και η πίεση.

Η τρίτη διάσταση έχει νόημα σε περιπτώσεις ποταμών που τα βάθη είναι μεγαλύτερα και μπορούν να επηρεάσουν την κίνηση.

- 3) Βελτίωση του ΜΣΙ σε εφαρμογές σχεδιασμού ΔΙ υπολογίζοντας την καταναλισκόμενη ενέργεια του ιχθύος κατά τη διάρκεια της κίνησης του και αξιοποιώντας τα αποτελέσματα για την ακριβέστερη προσομοίωση της κίνησης των ιχθύων.
- 4) Συνδυασμός της κίνησης των ιχθύων με τα χαρακτηριστικά της τύρβης που υπολογίζονται από τα υδροδυναμικά μοντέλα, ώστε οι ιχθύες να αξιοποιούν την πληροφορία για την αποφυγή των περιοχών μεγάλης τύρβης.
- 5) Προσθήκη στα ΜΣΙ της επίδρασης της θερμοκρασίας του νερού στα χαρακτηριστικά κίνησης του ιχθύ, η οποία επηρεάζει την ταχύτητα κίνησης.

**BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] A. Stamou, A. Economou, A. Kartsakali, and G. Papadonikolaki, "Fish-passes in small hydroelectric plants: their current empirical design and the future using integrated mathematical models.," in *3rd Joint Conference:13th of Greek Hydrotechnic Union. 9th of Greek Committee for Water Resources Management. 1st of Hellenic Water Association of "Integrated Management of Water Resources in New Era".*, Athens, Dec. 2015.
- [2] G. , S. A. I. Mitsopoulos, "Optimizing the Design of a Tower Fish Pass in Irrigation Dams using a CFD model.," in *6th IAHR Europe Congress, June 30th – July 2nd, 2020, Warsaw, Poland.*, 2020.
- [3] A. Psilovikos, *Ecohydraulics*, Second edition. 2022.
- [4] M. C. Bell, "Fisheries Handbook of Engineering Requirements and Biological Criteria," 1990.
- [5] C. H. (Charles H. ) Clay, *Design of fishways and other fish facilities*. Lewis Publishers, 1995.
- [6] C. Katopodis, "Introduction to Fishway Design," 1991.
- [7] Larinier, Porcher, JP, Travade, and Gosset, "Passes à poissons: expertise, conception des ouvrages de franchissement," 1992.
- [8] N. Rajaratnam, C. Katopodis, and S. Solanki, "New designs for vertical slot fishways," *CANADIAN J. CIVIL ENGINEERING*, vol. 19, no. 3, pp. 402–414, 1992, doi: 10.1139/I92-049.
- [9] N. Rajaratnam, G. Van der Vinne, and C. Katopodis, "Hydraulics of Vertical Slot Fishways," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 112, no. 10, pp. 909–927, Oct. 1986, doi: 10.1061/(asce)0733-9429(1986)112:10(909).
- [10] D. D'Enno, Gerd. Marmulla, R. L. Welcomme, Food and Agriculture Organization of the United Nations., and Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau., *Fish passes: design, dimensions and monitoring*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2002.
- [11] M. Liu, N. Rajaratnam, and D. Z. Zhu, "Mean Flow and Turbulence Structure in Vertical Slot Fishways," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 132, no. 8, 2006, doi: 10.1061/ASCE0733-94292006132:8765.
- [12] S. Wu, N. Rajaratnam, and C. Katopodis, "STRUCTURE OF FLOW IN VERTICAL SLOT FISHWAY," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 125, no. 4, 1999.
- [13] R. W. Wang, L. David, and M. Larinier, "Contribution of experimental fluid mechanics to the design of vertical slot fish passes," *Knowl Manag Aquat Ecosyst*, no. 396, p. 02, 2010, doi: 10.1051/kmae/2010002.
- [14] L. Tarrade, A. Texier, L. David, G. Pineau, and M. Larinier, "An experimental study of turbulent flow in vertical slot fishways Mascaret View project Swimming View project 12TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FLOW VISUALIZATION AN EXPERIMENTAL STUDY OF TURBULENT FLOW IN VERTICAL SLOT FISHWAYS," 2006. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/27335300>
- [15] L. Tarrade, G. Pineau, D. Callaud, A. Texier, L. David, and M. Larinier, "Detailed experimental study of hydrodynamic turbulent flows generated in vertical slot fishways," *Environmental Fluid Mechanics*, vol. 11, no. 1, pp. 1–21, Feb. 2011, doi: 10.1007/s10652-010-9198-4.
- [16] S. Abdelaziz, M. Bui, N. Atsushi, and P. Rutschmann, *Numerical Simulation of Flow and Upstream Fish Movement inside a Pool-and-Weir Fishway*. 2013.
- [17] J. Chorda, M. M. Maubourguet, H. Roux, M. Larinier, L. Tarrade, and L. David, "Two-dimensional free surface flow numerical model for vertical slot fishways," *Journal of Hydraulic Research*, vol. 48, no. 2, pp. 141–151, 2010, doi: 10.1080/00221681003703956.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [18] J. Puertas, L. Pena, and T. Teijeiro, "Experimental Approach to the Hydraulics of Vertical Slot Fishways," *Journal of hydraulic engineering*, 2004, doi: 10.1061/ASCE0733-94292004130:110.
- [19] R. An, J. Li, R. Liang, and Y. Tuo, "Three-dimensional simulation and experimental study for optimising a vertical slot fishway," *Journal of Hydro-environment Research*, vol. 12, pp. 119–129, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jher.2016.05.005>.
- [20] A. F. Barton and R. J. Keller, "3D FREE SURFACE MODEL FOR A VERTICAL SLOT FISHWAY," 2003. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/253645478>
- [21] J. Klein and M. Oertel, "COMPARISON BETWEEN CROSSBAR BLOCK RAMP AND VERTICAL SLOT FISH PASS VIA NUMERICAL 3D CFD SIMULATION," in *E-proceedings of the 36th IAHR World Congress*, The Hague, The Netherlands, 2015.
- [22] B. A. Marriner, A. B. M. Baki, D. Z. Zhu, S. J. Cooke, and C. Katopodis, "The hydraulics of a vertical slot fishway: A case study on the multi-species Vianney-Legendre fishway in Quebec, Canada," *Ecol Eng*, vol. 90, pp. 190–202, May 2016, doi: 10.1016/j.ecoleng.2016.01.032.
- [23] B. A. Marriner, A. B. M. Baki, D. Z. Zhu, J. D. Thiem, S. J. Cooke, and C. Katopodis, "Field and numerical assessment of turning pool hydraulics in a vertical slot fishway," *Ecol Eng*, vol. 63, pp. 88–101, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.ecoleng.2013.12.010.
- [24] A. I. Stamou, G. Mitsopoulos, P. Rutschmann, and M. D. Bui, "Verification of a 3D CFD model for vertical slot fish-passes," *Environmental Fluid Mechanics*, vol. 18, no. 6, 2018, doi: 10.1007/s10652-018-9602-z.
- [25] L. A. Khan, "A Three-Dimensional Computational Fluid Dynamics (CFD) Model Analysis of Free Surface Hydrodynamics and Fish Passage Energetics in a Vertical-Slot Fishway," *N Am J Fish Manag*, vol. 26, no. 2, pp. 255–267, May 2006, doi: 10.1577/m05-014.1.
- [26] C. W. Hirt and B. D. Nichols, "Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries\*," 1981.
- [27] T. Moss, "The governance of land use in river basins: prospects for overcoming problems of institutional interplay with the EU Water Framework Directive," *Land use policy*, vol. 21, no. 1, pp. 85–94, 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2003.10.001>.
- [28] R. A. Goodwin *et al.*, "Fish navigation of large dams emerges from their modulation of flow field experience," *Proc Natl Acad Sci U S A*, vol. 111, no. 14, pp. 5277–5282, 2014, doi: 10.1073/pnas.1311874111.
- [29] L. J. Weber, R. A. Goodwin, S. Li, J. M. Nestler, and J. J. Anderson, "Application of an Eulerian-Lagrangian-Agent method (ELAM) to rank alternative designs of a juvenile fish passage facility," *Journal of Hydroinformatics*, vol. 8, no. 4, pp. 271–295, 2006, doi: 10.2166/hydro.2006.006.
- [30] R. A. Goodwin, J. M. Nestler, J. J. Anderson, L. J. Weber, and D. P. Loucks, "Forecasting 3-D fish movement behavior using a Eulerian-Lagrangian-agent method (ELAM)," *Ecol Modell*, vol. 192, no. 1–2, pp. 197–223, Feb. 2006, doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.08.004.
- [31] A. Arenas, M. Politano, L. Weber, and M. Timko, "Analysis of movements and behavior of smolts swimming in hydropower reservoirs," *Ecol Modell*, vol. 312, pp. 292–307, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.05.015>.
- [32] J.-Michel. Hervouet, *Hydrodynamics of free surface flows: modelling with the finite element method*. Wiley, 2007.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [33] J.-C. Galland, N. Goutal, and J.-M. Hervouet, "TELEMAC: A new numerical model for solving shallow water equations," *Adv. Water Resources*, vol. 14, no. 3, 1991.
- [34] Inc. Flow Science, "FLOW-3D, Version~2023R1." Santa Fe, NM, 2023. [Online]. Available: <https://www.flow3d.com/>
- [35] S. , Pagonopoulos *et al.*, "Rational positioning of fish passes in rivers near Hydroelectric Power Plants using mathematical models for fish behavior," in *Proceedings of the 3rd Panhellenic Dam Congress, 12-15 October 2017 September 2022, Athens, Greece.*, 2017.
- [36] M. C. Lucas, E. Baras, T. J. Thom, A. Duncan, and T. G. Masaryk, "Migration of Freshwater Fishes Ondrej Slavík," 2013.
- [37] B. Lehner *et al.*, "High-resolution mapping of the world's reservoirs and dams for sustainable river-flow management," *Front Ecol Environ*, Nov. 2011, doi: 10.1890/100125.
- [38] M. R. Fuller, M. W. Doyle, and D. L. Strayer, "Causes and consequences of habitat fragmentation in river networks," *Ann N Y Acad Sci*, vol. 1355, no. 1, pp. 31–51, Oct. 2015, doi: 10.1111/nyas.12853.
- [39] J. Freyhof and E. Wright, "European Red List of Freshwater Fishes." Jul. 2011.
- [40] F. Schiemer, G. Guti, H. Keckeis, and M. Staras, "Ecological status and problems of the Danube and its fish fauna. A review," *Proceedings of the second international Symposium on the management of large rivers for fisheries*, Jun. 2004.
- [41] J. A. Cambray, J. M. King, and C. Bruwer, "Spawning behaviour and early development of the Clanwilliam yellowfish (*Barbus capensis*; Cyprinidae), linked to experimental dam releases in the Olifants River, South Africa," *Regulated Rivers: Research & Management*, vol. 13, no. 6, pp. 579–602, Nov. 1997, doi: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1646\(199711/12\)13:6<579::AID-RRR486>3.0.CO;2-F](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1646(199711/12)13:6<579::AID-RRR486>3.0.CO;2-F).
- [42] A. Rouse, *Living Planet Report 2014 Species and spaces, people and places*. 2013. [Online]. Available: [www.livingplanetindex.org](http://www.livingplanetindex.org)
- [43] S. M. A. Abdelaziz, *Numerical simulation of fish behavior and fish movement through passages*.
- [44] M. LARINIER, "FISHWAYS - GENERAL CONSIDERATIONS," *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, no. 364 supplément, pp. 21–27, 2002, doi: 10.1051/kmae/2002104.
- [45] M. LARINIER, "POOL FISHWAYS, PRE-BARRAGES AND NATURAL BYPASS CHANNELS," *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, no. 364 supplément, pp. 54–82, 2002, doi: 10.1051/kmae/2002108.
- [46] M. LARINIER, "LOCATION OF FISHWAYS," *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, no. 364 supplément, pp. 39–53, 2002, doi: 10.1051/kmae/2002106.
- [47] S. Schmutz and C. Mielach, "Mekong River Commission Review of Existing Research on Fish Passage through Large Dams and its Applicability to Mekong Mainstream Dams," 2015.
- [48] "Kleinschmidt | Projects | Kleinschmidt." Accessed: Aug. 27, 2023. [Online]. Available: <https://www.kleinschmidtgroup.com/our-projects/>
- [49] "Fish ladder - Alchetron, The Free Social Encyclopedia." Accessed: Aug. 27, 2023. [Online]. Available: <https://alchetron.com/Fish-ladder>
- [50] "John\_Day\_Dam\_fish\_ladder.jpg (JPEG Image, 720 × 480 pixels)." Accessed: Aug. 27, 2023. [Online]. Available: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0c/John\\_Day\\_Dam\\_fish\\_ladder.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0c/John_Day_Dam_fish_ladder.jpg)



- [51] M. Zwirn, "Culvert Installation in Salmon Streams Forest Road Construction and Culvert Installations in Salmon Streams: Best Management Practices and Lessons for the Samarga Watershed," 2002.
- [52] "Fish Passage Improvement Program - Software, Alaska Department of Fish and Game." Accessed: Aug. 27, 2023. [Online]. Available: <https://www.adfg.alaska.gov/index.cfm?adfg=fishpassage.software>
- [53] "Solved Some large river dams are built with fish locks to | Chegg.com." Accessed: Aug. 27, 2023. [Online]. Available: <https://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/large-river-dams-built-fish-locks-allow-fish-migrate-past-dams-fish-lock-essentially-water-q19522398>
- [54] V. Yakhot and S. A. Orszag, "Renormalization Group Analysis of Turbulence. I. Basic Theory," 1986.
- [55] M. FUJIHARA, T. FUKUSHIMA, and K. TACHIBANA, "NUMERICAL MODELLING OF FLOWS IN VERTICAL SINGLE-SLOT AND DOUBLE-SLOT FISHWAYS," in *Advances in Hydraulics and Water Engineering*, World Scientific Publishing Company, 2002, pp. 1019–1024. doi: doi:10.1142/9789812776969\_0188.
- [56] L. J. Alvarez-Vázquez, A. Martínez, M. E. Vázquez-Méndez, and M. A. Vilar, "Vertical slot fishways: Mathematical modeling and optimal management," *J Comput Appl Math*, vol. 218, no. 2, pp. 395–403, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cam.2007.04.016>.
- [57] L. J. Alvarez-Vázquez, A. Martínez, M. E. Vázquez-Méndez, and M. A. Vilar, "An optimal shape problem related to the realistic design of river fishways," *Ecol Eng*, vol. 32, no. 4, pp. 293–300, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2007.10.008>.
- [58] L. Cea, L. Pena, J. Puertas, M. E. Vázquez-Cendón, and E. Peña, "Application of Several Depth-Averaged Turbulence Models to Simulate Flow in Vertical Slot Fishways," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 133, no. 2, pp. 160–172, 2007, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:2(160).
- [59] S. Heimerl, M. Hagmeyer, and C. Ehteler, "Numerical flow simulation of pool-type fishways: New ways with well-known tools," in *Hydrobiologia*, Sep. 2008, pp. 189–196. doi: 10.1007/s10750-008-9413-1.
- [60] M. Bombač, G. Novak, P. Rodič, and M. Četina, "Numerical and physical model study of a vertical slot fishway," *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, vol. 62, no. 2, pp. 150–159, Jun. 2014, doi: 10.2478/johh-2014-0013.
- [61] M. Puzdrowska, "CZASOPISMO TECHNICZNE ŚRODOWISKO MARTA PUZDROWSKA \* APPLICATION OF NUMERICAL METHODS IN THE DESIGN AND ANALYSIS OF FISH PASS EFFICIENCY ZASTOSOWANIE METOD NUMERYCZNYCH W PROJEKTOWANIU I ANALIZIE SPRAWNOŚCI PRZEPŁAWKI DLA RYB," 2013.
- [62] C. Lauchlan Arrowsmith and Y. Zhu, *Comparison between 2D and 3D hydraulic modelling approaches for simulation of vertical slot fishways*. 2014. doi: 10.14264/uql.2014.49.
- [63] DHI., "MIKE 21 & MIKE 3 FLOW MODEL FM: Hydrodynamic and Transport Module." Hørsholm , 2013.
- [64] ANSYS CFX, "User Manual, Ansys-CFX." ANSYS , 2012.
- [65] J. W. Haefner and M. D. Bowen, "Physical-based model of fish movement in fish extraction facilities," *Ecol Modell*, vol. 152, no. 2, pp. 227–245, 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(02\)00006-6](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(02)00006-6).
- [66] B. H. Lemasson, J. W. Haefner, and M. D. Bowen, "The effect of avoidance behavior on predicting fish passage rates through water diversion structures," *Ecol Modell*, vol. 219, no. 1, pp. 178–188, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.08.013>.

- [67] S. Abdelaziz, M. Bui, K. Hayashida, and P. Rutschmann, *Numerical Simulation of flow pattern inside a pool and weir fishway*. 2012.
- [68] Z. Gao, H. I. Andersson, H. Dai, F. Jiang, and L. Zhao, "A new Eulerian-Lagrangian agent method to model fish paths in a vertical slot fishway," *Ecol Eng*, vol. 88, pp. 217–225, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.ecoleng.2015.12.038.
- [69] Á. Rodríguez *et al.*, "Optical Fish Trajectory Measurement in Fishways through Computer Vision and Artificial Neural Networks," *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 25, no. 4, pp. 291–301, Jul. 2011, doi: 10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000092.
- [70] J. C. Svendsen *et al.*, "Linking individual behaviour and migration success in *Salmo salar* smolts approaching a water withdrawal site: Implications for management," *Aquat Living Resour*, vol. 24, no. 2, pp. 201–209, Apr. 2011, doi: 10.1051/alr/2011121.
- [71] J. C. Svendsen, K. Aarestrup, M. G. Deacon, and R. H. B. Christensen, "Effects of a surface oriented travelling screen and water abstraction practices on downstream migrating salmonidae smolts in a lowland stream," *River Res Appl*, vol. 26, no. 3, pp. 353–361, Mar. 2010, doi: <https://doi.org/10.1002/rra.1261>.
- [72] P. Wolf, "A Trap for the Capture of Fish and Other Organisms Moving Downstream," *Trans Am Fish Soc*, vol. 80, no. 1, pp. 41–45, Jan. 1951, doi: 10.1577/1548-8659(1950)80[41:ATFTCO]2.0.CO;2.
- [73] C. J. Willmott, "ON THE VALIDATION OF MODELS," *Phys Geogr*, vol. 2, no. 2, pp. 184–194, Jul. 1981, doi: 10.1080/02723646.1981.10642213.
- [74] W. L. Cowan, "Estimating Hydraulic Roughness Coefficients," *Agricultural Engineering*, 121,473-475, 1956.
- [75] L. De Doncker, P. Troch, and R. Verhoeven, "Accuracy of discharge measurements in a vegetated river," *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 19, no. 1, pp. 29–40, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2007.08.007>.
- [76] K. D. Bovee, "Development and evaluation of habitat suitability criteria for use in the instream flow incremental methodology," Washington, D.C., 1986. [Online]. Available: <http://pubs.er.usgs.gov/publication/70121265>
- [77] J. Heggenes and S. J. Saltveit, "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*, vol. 36, no. 5, pp. 707–720, 1990, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1990.tb04325.x>.
- [78] D. García de Jalón and J. Gortázar, "Evaluation of instream habitat enhancement options using fish habitat simulations: case-studies in the river Pas (Spain)," *Aquat Ecol*, vol. 41, no. 3, pp. 461–474, 2007, doi: 10.1007/s10452-006-9030-x.
- [79] E. Oikonomopoulou, "Mathematical simulation of the behavior of fish in areas of river barriers with fish passes," National Technical University Athens, NTUA, Athens, 2019. Accessed: Jul. 18, 2023. [Online]. Available: <https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/handle/123456789/399/browse?type=author&value=Oikonomopoulou%2C+Evgenia>
- [80] R. H. Hotchkiss, "Turbulence Investigation and Reproduction for Assisting Downstream Migrating Juvenile Salmonids, Part I of II, 2001-2002 Final Report.," United States, 2002. doi: 10.2172/901269.
- [81] M. Odeh, "Evaluation of the Effects of Turbulence on the Behavior of Migratory Fish, 2002 Final Report.," United States, 2002. doi: 10.2172/799292.
- [82] M. Bermúdez, A. Rodríguez, L. Cea, F. Morcillo, M. Castillo, and E. Aramburu, "IMPLICATIONS OF FISH BEHAVIOR FOR VERTICAL SLOT FISHWAYS DESIGN."
- [83] H. M. Poulos, K. E. Miller, R. Heinemann, M. L. Kraczkowski, A. W. Whelchel, and B. Chernoff, "Dam removal effects on benthic macroinvertebrate dynamics:

- A New England stream case study (Connecticut, USA)," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 11, no. 10, May 2019, doi: 10.3390/su11102875.
- [84] J. R. Bellmore *et al.*, "Conceptualizing Ecological Responses to Dam Removal: If You Remove It, What's to Come?," *Bioscience*, vol. 69, no. 1, pp. 26–39, Jan. 2019, doi: 10.1093/biosci/biy152.
- [85] A. T. Silva *et al.*, "The future of fish passage science, engineering, and practice," *Fish and Fisheries*, vol. 19, no. 2, pp. 340–362, Mar. 2018, doi: 10.1111/faf.12258.
- [86] J. O'connor, M. Mallen-Cooper, and I. Stuart, "Performance, Operation and Maintenance Guidelines for Fishways and Fish Passage Works for the Water and Catchments Group, Department of Environment, Land, Water and Planning," 2015.
- [87] European Commission, "Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy," *OJ*, vol. L 327, pp. 1–73, 2014.
- [88] J. M. Santos, P. Branco, C. Katopodis, T. Ferreira, and A. Pinheiro, "Retrofitting pool-and-weir fishways to improve passage performance of benthic fishes: Effect of boulder density and fishway discharge," *Ecol Eng*, vol. 73, pp. 335–344, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.ecoleng.2014.09.065.
- [89] M. Bermúdez, J. Puertas, L. Cea, L. Pena, and L. Balairón, "Influence of pool geometry on the biological efficiency of vertical slot fishways," *Ecol Eng*, vol. 36, no. 10, pp. 1355–1364, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.06.013>.
- [90] M. Bombač, M. Četina, and G. Novak, "Study on flow characteristics in vertical slot fishways regarding slot layout optimization," *Ecol Eng*, vol. 107, pp. 126–136, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.07.008>.
- [91] F. Romão *et al.*, "Passage performance of two cyprinids with different ecological traits in a fishway with distinct vertical slot configurations," *Ecol Eng*, vol. 105, pp. 180–188, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.ecoleng.2017.04.031.
- [92] J. M. A. N. D. K. C. A. N. D. P. A. A. N. D. F. M. T. Branco Paulo AND Santos, "Pool-Type Fishways: Two Different Morpho-Ecological Cyprinid Species Facing Plunging and Streaming Flows," *PLoS One*, vol. 8, no. 5, pp. 1–9, Jul. 2013, doi: 10.1371/journal.pone.0065089.
- [93] E. Washburn and J. Hateley, "Seite 54 Guidance for assessing the efficiency and related metrics of fish passage solutions using telemetry," 2019.
- [94] C. M. Bunt, T. Castro-Santos, and A. Haro, "Performance of fish passage structures at upstream barriers to migration," *River Res Appl*, vol. 28, no. 4, pp. 457–478, 2012, doi: 10.1002/rra.1565.
- [95] M. J. Noonan, J. W. A. Grant, and C. D. Jackson, "A quantitative assessment of fish passage efficiency," *Fish and Fisheries*, vol. 13, no. 4, pp. 450–464, Dec. 2012, doi: 10.1111/j.1467-2979.2011.00445.x.
- [96] M. Ovidio *et al.*, "The use of behavioural metrics to evaluate fishway efficiency," *River Res Appl*, vol. 33, no. 9, pp. 1484–1493, Nov. 2017, doi: 10.1002/rra.3217.
- [97] F. J. Sanz-Ronda *et al.*, "Passage performance of technical pool-type fishways for potamodromous cyprinids: Novel experiences in semiarid environments," *Water (Switzerland)*, vol. 11, no. 11, Nov. 2019, doi: 10.3390/w11112362.
- [98] P. S. Kemp, "Meta-analyses, Metrics and Motivation: Mixed Messages in the Fish Passage Debate," *River Res Appl*, vol. 32, no. 10, pp. 2116–2124, Dec. 2016, doi: 10.1002/rra.3082.
- [99] L. J. Alvarez-Vázquez, A. Martínez, J. J. Júdece, C. Rodríguez, M. E. Vázquez-Méndez, and M. A. Vilar, "Fishway Optimization Revisited," in *Progress in Industrial Mathematics at ECMI 2010*, M. Günther, A. Bartel, M. Brunk, S.

- Schöps, and M. Striebel, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 545–551.
- [100] D. C. Gisen, R. B. Weichert, and J. M. Nestler, "Optimizing attraction flow for upstream fish passage at a hydropower dam employing 3D Detached-Eddy Simulation," *Ecol Eng*, vol. 100, pp. 344–353, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.10.065>.
- [101] 이성현, 오국열, 정태성, and 정상만, "An Assessment of Fish Habitat of Natural Fishway by Hydraulic Model Experiments and Numerical Analysis," *Journal of Korea Water Resources Association*, vol. 45, pp. 317–329, 2012.
- [102] J. H. Kim, J. D. Yoon, S. H. Baek, and M. H. Jang, "Estimation of optimal ecological flowrates for fish habitats in a nature-like fishway of a large river," *J Ecol Environ*, vol. 39, no. 1, pp. 43–49, Feb. 2016, doi: 10.5141/ecoenv.2016.005.
- [103] A. B. Baki, A. Golpira, G. C. Rampinelli, L. Patrizio, and D. Z. Zhu, "HY032-1 CSCE Annual Conference NUMERICAL MODELLING OF NATURE-LIKE FISH PASSAGE USING A 2D SHALLOW WATER MODEL," 2019.
- [104] C. Papadaki, V. Bellos, L. Ntoanidis, and E. Dimitriou, "Comparison of west Balkan adult trout habitat predictions using a Pseudo-2D and a 2D hydrodynamic model," *Hydrology Research*, vol. 48, no. 6, pp. 1697–1709, Dec. 2017, doi: 10.2166/nh.2016.352.
- [105] M. Larinier, "Fish passage experience at small-scale hydro-electric power plants in France," in *Hydrobiologia*, Springer Netherlands, 2008, pp. 97–108. doi: 10.1007/s10750-008-9398-9.
- [106] S. D. Amaral *et al.*, "Assessment of Retrofitted Ramped Weirs to Improve Passage of Potamodromous Fish," *Water (Basel)*, vol. 11, no. 12, 2019, doi: 10.3390/w11122441.
- [107] V. T. Chow, *Open chanel hydraulics*. 1956.
- [108] M. D. Chan, D. J. Orth, P. L. Angermeier, J. J. Ney, E. P. Smith, and P. Diplas, "Fish ecomorphology: predicting habitat preferences of stream fishes from their body shape," 2001.
- [109] P. M. Leonard and D. J. Orth, "Use of Habitat Guilds of Fishes to Determine Instream Flow Requirements," *N Am J Fish Manag*, vol. 8, no. 4, pp. 399–409, Nov. 1988, doi: 10.1577/1548-8675(1988)008<0399:uohgof>2.3.co;2.
- [110] C. Theodoropoulos, A. Vourka, N. Skoulikidis, P. Rutschmann, and A. Stamou, "Evaluating the performance of habitat models for predicting the environmental flow requirements of benthic macroinvertebrates," *Journal of Ecohydraulics*, vol. 3, no. 1, pp. 30–44, 2018, doi: 10.1080/24705357.2018.1440360.
- [111] G. Papaioannou, C. Papadaki, and E. Dimitriou, "Sensitivity of habitat hydraulic model outputs to DTM and computational mesh resolution," *Ecohydrology*, vol. 13, no. 2, Mar. 2020, doi: 10.1002/eco.2182.
- [112] A. Stamou *et al.*, "Determination of environmental flows in rivers using an integrated hydrological-hydrodynamic-habitat modelling approach," *J Environ Manage*, vol. 209, pp. 273–285, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.jenvman.2017.12.038.
- [113] C. Papadaki, K. Soulis, L. Ntoanidis, S. Zogaris, N. Dercas, and E. Dimitriou, "Comparative Assessment of Environmental Flow Estimation Methods in a Mediterranean Mountain River," *Environ Manage*, vol. 60, no. 2, pp. 280–292, Aug. 2017, doi: 10.1007/s00267-017-0878-4.
- [114] S. Fukuda *et al.*, "Effect of model formulation on the optimization of a genetic Takagi–Sugeno fuzzy system for fish habitat suitability evaluation," *Ecol Modell*, vol. 222, no. 8, pp. 1401–1413, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.01.023>.

- [115] T. Shim, Z. Kim, D. Seo, Y. O. Kim, S. J. Hwang, and J. Jung, "Integrating hydraulic and physiologic factors to develop an ecological habitat suitability model," *Environmental Modelling and Software*, vol. 131, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.envsoft.2020.104760.
- [116] C. Theodoropoulos, N. Skoulikidis, and A. Stamou, "Habfuzz: A tool to calculate the instream hydraulic habitat suitability using fuzzy logic and fuzzy Bayesian inference," *The Journal of Open Source Software*, vol. 1, no. 6, p. 82, Oct. 2016, doi: 10.21105/joss.00082.
- [117] C. J. Brookes, V. Kumar, and S. N. Lane, "A comparison of Fuzzy, Bayesian and Weighted Average A comparison of Fuzzy, Bayesian and Weighted Average formulations of an in-stream habitat suitability model. formulations of an in-stream habitat suitability model," 2010. [Online]. Available: <https://scholarsarchive.byu.edu/iemssconference/2010/all/604>
- [118] S. A. Ead, C. Katopodis, G. J. Sikora, and N. Rajaratnam, "Flow regimes and structure in pool and weir fishways," *Journal of Environmental Engineering and Science*, vol. 3, no. 5, pp. 379–390, 2004, doi: 10.1139/s03-073.
- [119] K. A. Shearer, J. W. Hayes, I. G. Jowett, and D. A. Olsen, "Habitat suitability curves for benthic macroinvertebrates from a small New Zealand river," *N Z J Mar Freshwater Res*, vol. 49, no. 2, pp. 178–191, Apr. 2015, doi: 10.1080/00288330.2014.988632.
- [120] R. Muñoz-Mas, C. Papadaki, F. Martínez-Capel, S. Zogaris, L. Ntoanidis, and E. Dimitriou, "Generalized additive and fuzzy models in environmental flow assessment: A comparison employing the West Balkan trout (*Salmo farioides*; Karaman, 1938)," *Ecol Eng*, vol. 91, pp. 365–377, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.ecoleng.2016.03.009.
- [121] T. Castro-Santos, A. J. Cotel, and P. Webb, "Fishway Evaluations for Better Bioengineering: An Integrative Approach," 2009.
- [122] J. A. Gore, J. B. Layzer, and J. Mead, "Macroinvertebrate instream flow studies after 20 years: A role in stream management and restoration," *Regulated Rivers: Research & Management*, vol. 17, no. 4–5, pp. 527–542, 2001, doi: 10.1002/rrr.650.
- [123] C. Katopodis, J. A. Kells, and M. Acharya, "Nature-like and conventional fishways: Alternative concepts?," *Canadian Water Resources Journal*, vol. 26, no. 2, pp. 211–232, 2001, doi: 10.4296/cwrj2602211.
- [124] B. Ahmadi-Nedushan, A. St-Hilaire, M. Bérubé, É. Robichaud, N. Thiémonge, and B. Bobée, "A review of statistical methods for the evaluation of aquatic habitat suitability for instream flow assessment," *River Res Appl*, vol. 22, no. 5, pp. 503–523, Jun. 2006, doi: <https://doi.org/10.1002/rra.918>.
- [125] F. Romão, J. M. Santos, C. Katopodis, A. N. Pinheiro, and P. Branco, "How does season affect passage performance and fatigue of potamodromous cyprinids? An experimental approach in a vertical slot fishway," *Water (Switzerland)*, vol. 10, no. 4, Mar. 2018, doi: 10.3390/w10040395.
- [126] C. Wolter and R. Arlinghaus, "Burst and critical swimming speed of fish and their ecological relevance in waterways," 2004. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/309106786>
- [127] K. Birnie-Gauvin, P. Franklin, M. Wilkes, and K. Aarestrup, "Moving beyond fitting fish into equations: Progressing the fish passage debate in the Anthropocene," *Aquat Conserv*, vol. 29, no. 7, pp. 1095–1105, 2019, doi: <https://doi.org/10.1002/aqc.2946>.
- [128] A. T. Silva, M. Bermúdez, J. M. Santos, J. R. Rabuñal, and J. Puertas, "Pool-type fishway design for a potamodromous cyprinid in the Iberian Peninsula: The Iberian barbel-synthesis and future directions," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 8, Apr. 2020, doi: 10.3390/SU12083387.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [129] A. D. Ficke, C. A. Myrick, and N. Jud, "The Swimming and Jumping Ability of Three Small Great Plains Fishes: Implications for Fishway Design," *Trans Am Fish Soc*, vol. 140, no. 6, pp. 1521–1531, 2011, doi: 10.1080/00028487.2011.638579.
- [130] D. C. Gisen, "Modeling upstream fish migration in small-scale using the Eulerian-Lagrangian-agent method (ELAM)," 2018. [Online]. Available: <http://dnb.dnb.de>.
- [131] J. C. Liao, "A review of fish swimming mechanics and behaviour in altered flows," *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 362, pp. 1973–1993, 2007.
- [132] J. Puertas *et al.*, "Computer application for the analysis and design of vertical slot fishways in accordance with the requirements of the target species," *Ecol Eng*, vol. 48, pp. 51–60, Nov. 2012, doi: 10.1016/j.ecoleng.2011.05.009.
- [133] G. , Mitsopoulos, A. I. , Stamou, P. , Rutschmann, and M. D. Bui, "Hydraulic design of fish-passes using Computational Fluid Dynamics models," in *Proceedings of the 3rd Panhellenic Dam Congress, 12-15 October 2017 September 2022, Athens, Greece.*, 2017.
- [134] "Search FishBase." Accessed: Aug. 27, 2023. [Online]. Available: <https://fishbase.mnhn.fr/search.php>
- [135] R. García-Díaz, A. Manzano-Rodríguez, and D. García de Jalón, "Transversal barrier heights that brown trout are able to overcome during migrations: Application to three mountain rivers of the Iberian peninsula," *Ecol Eng*, vol. 181, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.ecoleng.2022.106686.
- [136] J. J. Videler, "Fish kinematics: swimming movements stride by stride," in *Fish Swimming*, J. J. Videler, Ed., Dordrecht: Springer Netherlands, 1993, pp. 113–137. doi: 10.1007/978-94-011-1580-3\_6.
- [137] P. WEBB, "Hydrodynamics and energetics of fish propulsion," *Bull Fish Res Bd Can*, vol. 190, pp. 1–159, 1975, Accessed: Jul. 30, 2023. [Online]. Available: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1571698600681953536.bib?lang=en>