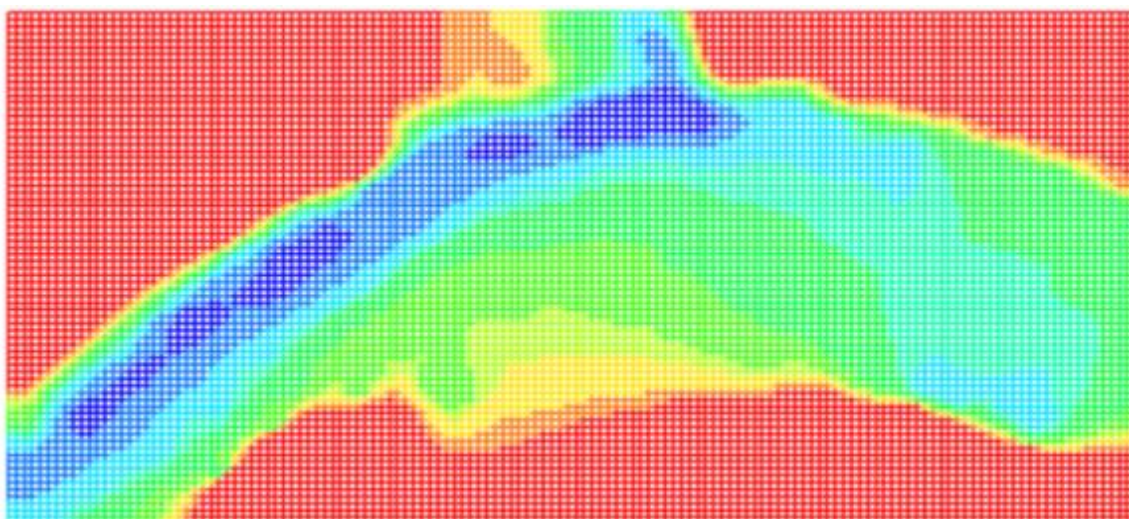




**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΙΧΘΥΩΝ
ΣΕ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΠΟΤΑΜΩΝ ΜΕ ΔΙΟΔΟΥΣ ΙΧΘΥΩΝ»**



Αθανάσιος Μυλούλης

Επιβλέπων: Α. Ι. Στάμου, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2021

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη του καθηγητή Αναστάσιου Ι. Στάμου. Θα ήθελα αρχικά να εκφράσω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα Καθηγητή ΕΜΠ Αναστάσιο Ι. Στάμου, για την διαρκή καθοδήγηση, τις πολύτιμες συμβουλές καθώς και τον χρόνο που αφιέρωσε κατά την διαδικασία εκπόνησης της εργασίας αυτής. Η παρούσα Διπλωματική δεν θα μπορούσε να ολοκληρωθεί χωρίς την αμέριστη βοήθεια και στήριξη του υποψήφιου διδάκτορα του ΕΜΠ Γεώργιου Μητσόπουλου τον οποίο και αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω ιδιαίτερα. Η υπομονή του κατά τη διάρκεια της εξοικείωσής μου με τα υπολογιστικά μοντέλα, το σύνολο των γνώσεων που μου μετέδωσε, η άμεση ανταπόκριση στις απορίες μου και το ειλικρινές ενδιαφέρον του για την πρόοδό μου συντέλεσαν καταλυτικά στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω όλη την ομάδα του εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Υδραυλικής. Το κλίμα συνεργασίας που δημιούργησαν συντέλεσε στην ομαλή ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για τη στήριξή τους τόσο κατά την εκπόνηση της εργασίας όσο και στα υπόλοιπα φοιτητικά χρόνια.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο κύριος σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη ενός μαθηματικού μοντέλου το οποίο θα μπορέσει να προσομοιώσει τη συμπεριφορά και την κίνηση ιχθύων μέσα από διόδους ιχθύων. Το παρόν μαθηματικό μοντέλο βασίστηκε σε προηγούμενη μεταπτυχιακή διατριβή και τροποποιήθηκε σε κάποιες λεπτομέρειες που αφορούν την βαθμονόμηση των μεταβλητών του και την αλληλεπίδραση του ιχθύος με τα όρια του ποταμού και όχι στον βασικό κορμό που περιγράφει τη συμπεριφορά των ιχθύων. Βασική υπόθεση του μοντέλου είναι ότι οι αποφασίζουν την συμπεριφορά τους λαμβάνοντας υπόψη τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά του πεδίου ροής εντός του οποίου βρίσκονται. Αρχικά, αναπτύχθηκε και βαθμονομήθηκε ένα υδροδυναμικό μοντέλο του υπό μελέτη πεδίου ροής με τη βοήθεια του προγράμματος Telemac-2D, λαμβάνοντας υπόψη τις μετρήσεις παροχών που έχουν μετρηθεί πειραματικά στην περιοχή μελέτης. Οι ταχύτητες του πεδίου ροής, που εξάγονται από το υδροδυναμικό μοντέλο, χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια για το υπολογισμό των επιταχύνσεων του πεδίου ροής, οι οποίες και αποτελούν δεδομένα εισόδου στο μοντέλο συμπεριφοράς ιχθύων. Στη συνέχεια, έγιναν τροποποιήσεις στο μοντέλο ώστε να αντιμετωπιστούν προβλήματα που αφορούν την αλληλεπίδραση των ιχθύων με τα στερεά όρια του ποταμού, τα οποία απέτρεπαν την σωστή λειτουργία του μοντέλου. Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις δισδιάστατης κίνησης ιχθύων με διαφορετικές θέσεις εκκίνησης του ιχθύος, και σύγκριση τους με πραγματικές τροχιές ιχθύων που έχουν καταγραφεί πειραματικά στην περιοχή μελέτης. Επίσης, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας στους δείκτες από τους οποίους εξαρτάται η συμπεριφορά ιχθύων, όπως οι τιμές κατωφλιού ενεργοποίησης και οι συντελεστές μνήμης της εκάστοτε συμπεριφοράς. Τέλος, όσον αφορά τα συμπεράσματα, επιβεβαιώθηκε ότι το μοντέλο μπορεί να προβλέψει επαρκώς την γενική συμπεριφορά των ιχθύων αλλά μόνο εν μέρει τις ακριβείς πειραματικές τροχιές, καθώς η κίνηση τους περιλαμβάνει μεγάλο βαθμό τυχαιότητας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

THESIS SUMMARY	4
1. Introduction	4
Theoretical and mathematical background.....	4
2. Presentation of the fish behavior model	5
3. Case study: Jedsted mill fish farm.....	8
4. Implementation of the model.....	10
5. Discussion.....	16
5.1. Conclusions.....	16
5.2. Proposed research.....	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	18
1.1. Γενικά	18
Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΙΧΘΥΩΝ	20
2.1. Γενικά.....	20
2.2. Μεταναστευτικά είδη ιχθύων	20
2.3. Μέθοδοι ανίχνευσης ιχθύων	21
2.3.1. Αισθητήρια όργανα ανίχνευσης	21
2.3.2 Το πλευρικό σύστημα (lateral line system).....	22
2.3.3. Η περιοχή αντίληψης (sensory onoid)	22
2.4. Κίνηση, συμπεριφορά και ταχύτητα ιχθύων	23
2.4.1. Κίνηση ιχθύων	23
2.4.2. Ταχύτητα ιχθύων.....	23
2.4.3. Συμπεριφορά ιχθύων	24
2.5. Παρουσίαση υφιστάμενων μοντέλων συμπεριφοράς ιχθύων	25
2.5.1. Haefner and Bowen, 2002; Lemasson et al., 2008.....	26
2.5.2. Abdelaziz et al. , 2013.....	27
2.5.3. Goodwin et al. , 2006, 2014	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	30
3.1 Περιοχή εφαρμογής – Jedsted Mill Fish Farm.....	30
3.2. Δεδομένα βαθυμετρίας και ταχύτητας.....	31
3.3. Υπολογισμός παροχών	32
3.4. Τραχύτητα πυθμένα ποταμού και συντελεστής Manning.....	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	35

4.1. Γενικά.....	35
4.2. Βασικές εξισώσεις του μοντέλου	35
4.2.1. Τυρβώδης ροή.....	36
4.3. Διαμόρφωση υπολογιστικού πλέγματος και γεωμετρίας	37
4.3.1. Ανεξαρτησία πλέγματος.....	37
4.4.Βαθμονόμηση του μοντέλου	41
4.5. Εφαρμογή του υδροδυναμικού μοντέλου	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΙΧΘΥΩΝ	48
5.1. Παρουσίαση μοντέλου ιχθύος	48
5.2. Διάγραμμα ροής μοντέλου ιχθύος.....	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΙΧΘΥΩΝ	55
6.1. Γενικά.....	55
6.2. Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων μοντέλου ιχθύων	55
6.3. Εφαρμογή του μοντέλου ιχθύος στην περιοχή μελέτης.....	64
6.4. Σύγκριση πραγματικών και προσομοιωμένων τροχιών	68
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	72
7.1. Συμπεράσματα	72
7.2. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	72
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	74

THESIS SUMMARY

1. INTRODUCTION

The growing demand of water usage has been addressed by human activity in the form of hydraulic structures, which fragment river systems forming an artificial barrier in the river flow that affects the surrounding ecosystem and inhibits fish migration in rivers. Hence, attempts have been made to address the problem, by studying fish behavior with the goal of developing structures that facilitate unobstructed fish passage during upstream and downstream migration. The present work is an attempt to verify and calibrate a fish behavior model developed in the Laboratory of Applied Hydraulics of NTUA using field measurements of fish trajectories in the study area. First, the fish behavior model is described, as well as the hydrodynamic characteristics of the case study area. Then, the hydrodynamic model of the flow field is developed using TELEMAC2D, since the intensity of water acceleration is the main input data used by the fish behavior model in order to decide the behavior of the simulated fish. Finally, the results of the model are presented and discussed, as well as a sensitivity analysis for calibrating the model.

Theoretical and mathematical background

Modeling fish behavior in modern literature focuses mainly on sensory signals perceived through the lateral line system which plays a critical part in fish navigation in water bodies. Fish detect signals from their environment through a surrounding volume that can be considered spherical or ellipsoid called the Sensory Ovoid. Its dimensions are called the Sensory Query Distances (SQDs) and are usually assumed as equal to a number of fish body lengths

$$SQD = Dt * S_f * D_a \quad (2.3-1)$$

Where Dt is the time step of the model, S_f is the fish body length and D_a is the number of fish body lengths (Goodwin et al. 2006).

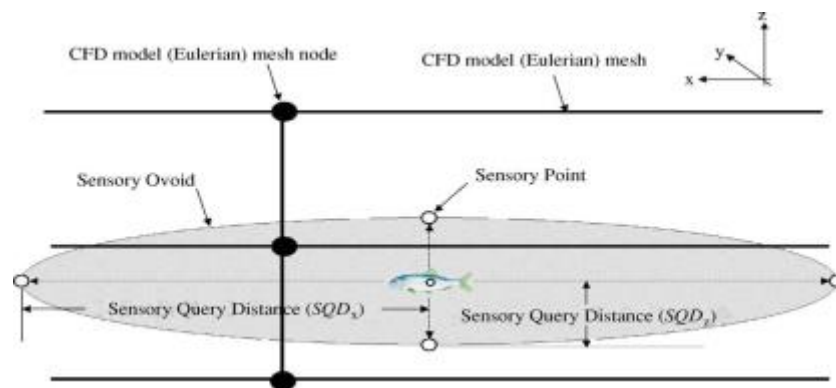


Figure 1-1: 2-Dimensional image of the Sensory Ovoid and the Sensory Query Distances.

Fish, which are considered 2-D in the present work, receive as stimulus from the flow field the water acceleration, see equation (1), which is simulated in its logarithmic dimensionless form, see equation (2), where t is the computational time, and U , V are the flow velocities in the X and Y directions, respectively, of a Cartesian coordinate system.

$$A_M^t = \sqrt{\left(U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial x}\right)^2 + \left(U \frac{\partial V}{\partial y} + V \frac{\partial U}{\partial y}\right)^2} \quad (\text{eq.1})$$

$$I_A^t = \log_{10} \frac{A_M^t}{A_0} \quad (\text{eq.2})$$

When fish perceive the hydrodynamic stimulus, they follow one of the following behaviors:

(B1): swim following direction of flow,

(B2): change direction towards higher flow velocities, and

(B3): swim against the flow.

The choice of behavior is made when the value of the detection index (DMETRIC) surpasses a given threshold for each behavior.

2. PRESENTATION OF THE FISH BEHAVIOR MODEL

The fish behavior model presented here has been developed in the Laboratory of Applied Hydraulics of the National Technical University of Athens and is based on the work of Goodwin et al., 2006. The model receives as input the geometry and hydrodynamic characteristics of the study area in the form of a structured, 2-D computational mesh model, as well as the fish characteristics, their initial positions and the values of behavior-related coefficients in order to produce their modeled trajectories. Calculations are performed as described below.

2. Calculation of acceleration magnitude: The magnitude of water acceleration is calculated at each node of the grid using the relation:

$$A_M^t = \sqrt{\left(U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial x}\right)^2 + \left(U \frac{\partial V}{\partial y} + V \frac{\partial U}{\partial y}\right)^2} \quad (\text{eq.1})$$

The finite differences method is used to calculate the velocity gradient at each node.

The intensity of the magnitude of acceleration perceived by the fish is simulated in its logarithmic dimensionless form, where t is the computational time:

$$I_A^t = \log_{10} \frac{A_M^t}{A_0} \quad (\text{eq.6})$$

A_0 is a fixed reference value.

3. Calculation of the sensory ovoid: The area in which the fish perceives the hydrodynamic stimulus is modeled as 5 sensory positions (SQD), that consist of the

center of the fish, two positions in the X direction and two in the Y direction, as shown in Figure 2.1-1.

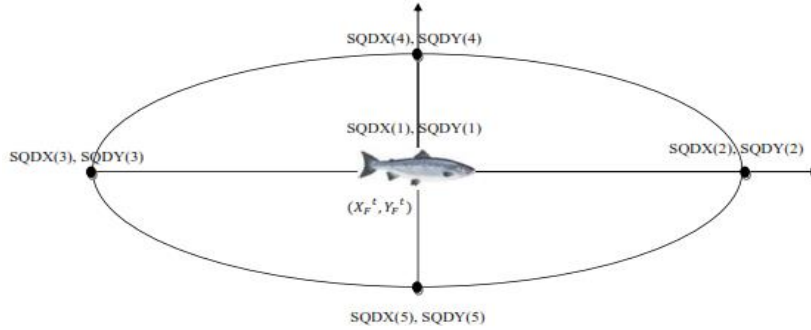


Figure 2.1-1: The fish sensory positions forming the sensory ovoid.

The calculation of SQDs includes the calculation of the basic distance of the sensory point (SPDIST), which is then increased by a random distance (RINC) and white noise is added to the secondary directions of the sensor points (RND) according to the following:

$$SPDIST = \frac{ncoeff}{I_A} = \frac{ncoeff}{\log_{10} \frac{A_M}{A_0}} \quad (\text{eq.7})$$

$$RINC = 1 + RRSQD * Delta \quad (\text{eq.8})$$

$$RND = (2 * RRSQD - 1) * coeff_{40} \quad (\text{eq.9})$$

$$SQD_{X,Y} = \pm SPDIST * RINC \quad \text{and} \quad SQD_{X,Y} = \pm SPDIST * RND \quad (\text{eq.10})$$

Where RRSQD is a random number obtained from a continuous distribution with values in the range [0-1], *ncoeff*, a scale factor of the minimum distance of the sensory points, which in the present model takes the value 4.5, *coeff₄₀*, a scale coefficient regarding the deviation of the sensory points from the X and Y axes of the fish, which in the present model is zeroed for simplicity, $\log_{10} \frac{A_M}{A_0}$ is the magnitude of the acceleration, *Delta*, the percentage of random increase of the distance of the sensory positions with values in the range [0.1-3].

4. Choice of behavior: The modeled fish select their behavior in each time step according to the magnitude of the Detection Metric (DMETRIC).

$$DMETRIC = \frac{I^t - I_a^t}{I_a^t} \quad (\text{eq.11})$$

$$I^t = \log_{10} \frac{A_M^t}{A_0} \quad (\text{eq.2})$$

$$I_a^t = (1 - m_{acc}) * I^t + m_{acc} * I_a^t \quad (\text{eq.12})$$

I^t is the acceleration magnitude perceived by the fish at time t, I_a^t is the acceleration magnitude that the fish has acclimatized to in the previous time step, m_{acc} is the acclimatization memory coefficient. If DMETRIC surpasses the threshold value k_i of each behavior (B2-B3), an event occurs:

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

Behavior B1 has a threshold value of 0 as it is the default behavior of the fish. Threshold values can vary for each individual fish (Anderson 2002) as they depend on the individual characteristics of each fish, such as age, size, health status and previous experience (Goodwin 2004). In the present model, the coefficients receive different values for each simulated fish, which follow the normal distribution.

If an event has occurred, the probability and utility for each behavior are calculated. The probability of preferring each behavior is:

$$P_B^t = (1 - C_{mem}) * E^t + C_{mem} * P_B^t * (t - 1) \text{ (eq.13)}$$

Where C_{mem} is the memory coefficient for each behavior that controls the amount of previous information that is incorporated in the decision following the notion that both the duration and intensity of stimulus in the sensory neurons of the fish need to surpass a minimum value in order to be perceived.

The utility of each behavior is calculated as following:

$$U_B^t = P_B^t * u_B^t \text{ (eq.14)}$$

Where u_B^t is the intrinsic value of utility of each behavior. Finally, at each time step t the behavior with the maximum utility U_B^t is activated.

$$U^t = U_{max}^t \xrightarrow{\tau \circ \tau \varepsilon} Decision_{B1, B2, B3} = 1.$$

5. Calculation of fish velocity: According to the behavior chosen, the speed of the fish is calculated taking into account the length of the fish (L_f) and the coefficients of the swimming speeds of each case (boost, continuous or drifting speed). The angle of the fish with respect to the X, Y axes (FishangleXY) is calculated, resulting from the angles of the flow vector (FlowangleXY) and the angle of fish movement with respect to the flow vector (angleXY).

First, the direction of the flow velocity is calculated (FlowangleXY):

$$FlowangleXY^t = \tan^{-1} \left(\frac{V^t}{U^t} \right) \text{ (eq.15)}$$

The speed of the fish is calculated according to the behavior chosen, as shown below:

Behavior B1:

$$Speedfish^t = L_F * (S_{cruise} * (S_{cruise} - S_{drift})) \text{ (eq.16)}$$

Behavior B2:

$$Speedfish^t = L_F * (S_{cruise} + RR * (S_{cruise} - S_{drift})), \alpha v A_M^t - A_M^{t-dt} < 0 \text{ (eq.17)}$$

$$Speedfish^t = \sqrt{U^2 + V^2} * (1 + 1.5), \alpha v A_M^t - A_M^{t-dt} \geq 0 \text{ (eq.18)}$$

Where RR is a random number taken from a continuous distribution in the range of [0-1].

Behavior B3:

$$Speedfish^t = L_F * S_{boost}, \alpha v Decision = 1 \text{ (eq.19)}$$

$$Speedfish^t = Speedfish^{t-dt} * (1 - 0.025), \alpha v Decision > 1 \text{ (eq.20)}$$

Finally, the components of velocity U_F, V_F will be:

$$U_F^t temp = Speedfish^t * \cos(angleXY^t) \quad (eq.21)$$

$$V_F^t temp = Speedfish^t * \sin(angleXY^t) \quad (eq.202)$$

$$U_F^t = U_F^t temp * \cos(FishangleXY^t) - V_F^t temp * \sin(FishangleXY^t) \quad (eq.23)$$

$$V_F^t = U_F^t temp * \sin(FishangleXY^t) + V_F^t temp * \cos(FishangleXY^t) \quad (eq.24)$$

6. Calculation of the new fish position X_F, Y_F : The new position of the fish is calculated according to the following equations.

$$X_F^{t+dt} = X_F^t + (U_F^t + U^t) * dt \quad (eq.25)$$

$$Y_F^{t+dt} = Y_F^t + (V_F^t + V^t) * dt \quad (eq.26)$$

$$FishangleXY^{t+dt} = FishangleXY^t + angleXY^t \quad (eq.27)$$

7. Checking fish position in relation to the river boundaries: Once the new fish position has been calculated, the model checks whether this position is within the boundaries of the grid. In case the new position is outside the river limits the program returns to the previous step and recalculates a new position for the fish by slightly changing the angle of movement of the fish, $angleXY^t$. If after a certain number of attempts the recalculated position is still out of bounds, the fish turns in the opposite direction and is arbitrarily given a high speed, in order to move away from the problematic point.

3. CASE STUDY: JEDSTED MILL FISH FARM

The area selected for the calibration and confirmation of the model is a section of the Konge River in western Denmark, in the area of the Jedsted Mill Fish Farm, 7 km upstream of the Wadden Sea, a tidal zone in the southeastern part of the North Sea. Depth and velocity data were available for this area as well as measurement data from trajectories of observed migratory fish (Svendsen et al., 2011).

Bathymetry and velocity measurements of the case study area were provided in the form of GIS data. The bathymetry of the area range from 0.30m to 2.05m as shown in Figure 3-1, while the average velocity ranges from 0m / s to 0.45m / s as shown in Figure 3-2.

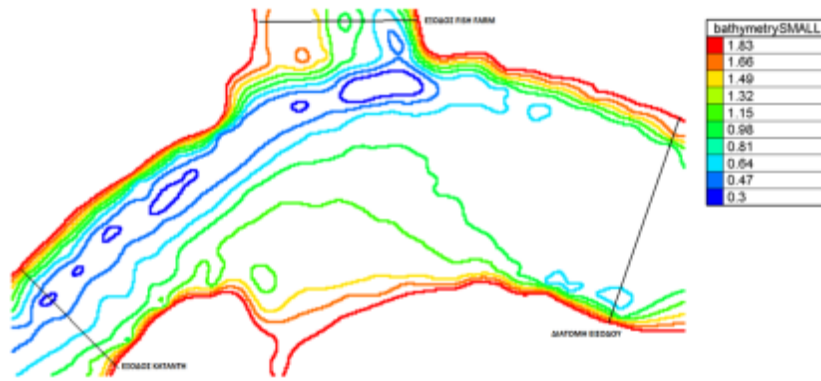


Figure 3-1: Bathymetry data, as measured in the field [source: Svendsen et al., 2010]

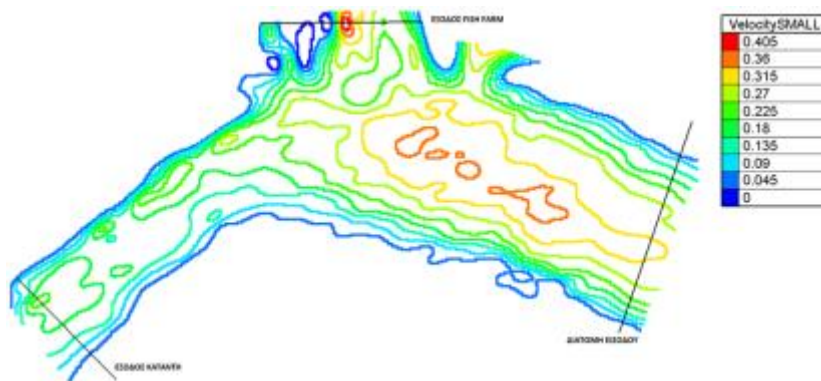


Figure 3-2: Velocity data, as measured in the field [source: Svendsen et al., 2010]

Using the data provided cross sections for the inflow and outflow were constructed in order to calculate the discharge at the boundaries of the study area, as shown in the figures below.

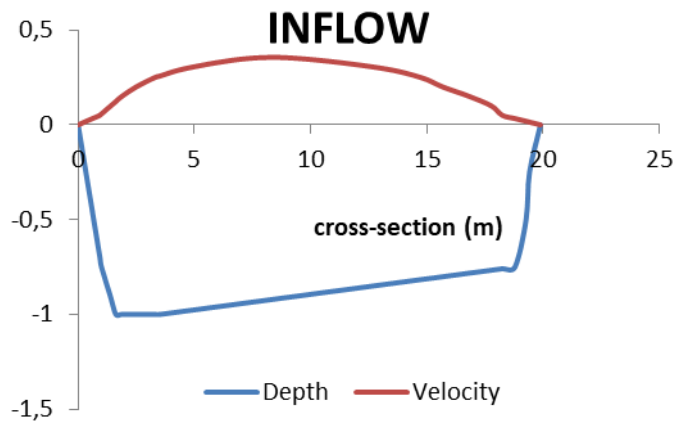


Figure 3-3: Velocity (red) and bathymetry (blue) in the inflow cross-section.

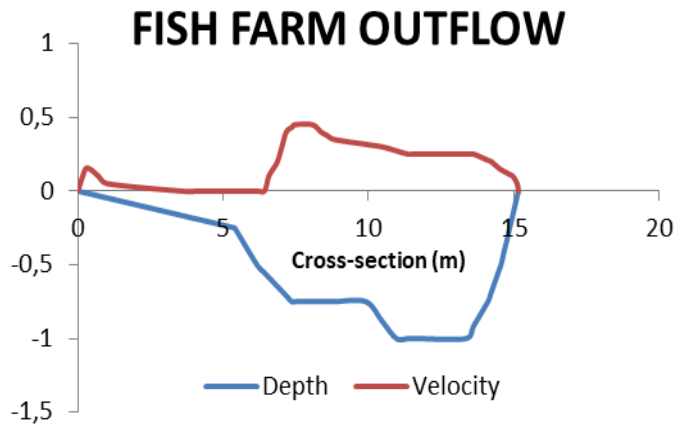


Figure 3-4: Velocity (red) and bathymetry (blue) in the fish farm outflow cross-section.

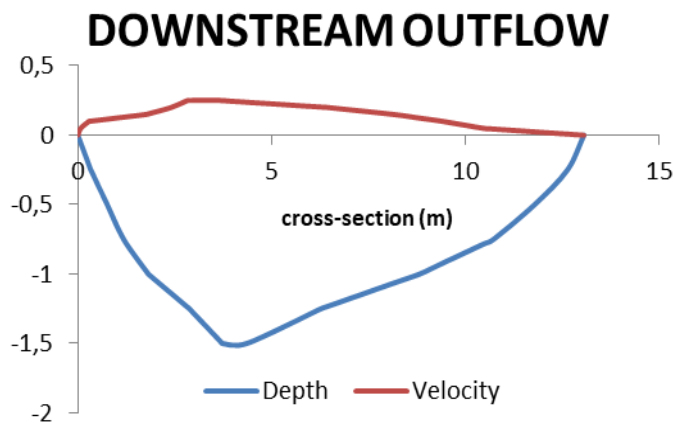


Figure 3-5: Velocity (red) and bathymetry (blue) in the downstream outflow cross-section.

The discharge was calculated as $4.15\text{m}^3/\text{s}$ in the inlet cross-section upstream, $1.99\text{m}^3/\text{s}$ in the fish farm outlet cross-section and $2.12\text{m}^3/\text{s}$ in the downstream outlet cross-section.

4. IMPLEMENTATION OF THE MODEL

Before the implementation of the fish behavior model, the Telemac-2D open source hydrodynamic model was applied for the simulation of flow in the study area. A computational mesh with node distance of 1.0m was structured. The distribution of Manning coefficient values in the flow field was obtained by trial-and-error, so that the results of the hydrodynamic flow model approach the measured data.

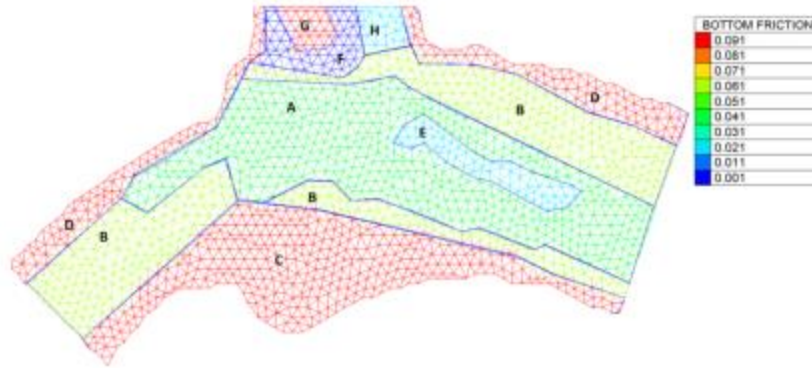


Figure 4-2: The distribution of manning coefficient values in the case study area

In order to verify the results of the hydrodynamic model the velocity profiles in 8 characteristic cross-sections along the river were compared to the measured data. The Index of Agreement (IA) and the Root Mean Square Error (RMSE) between the two sets were calculated, showing that the deviation between the model and the measured data is very small and in acceptable levels.

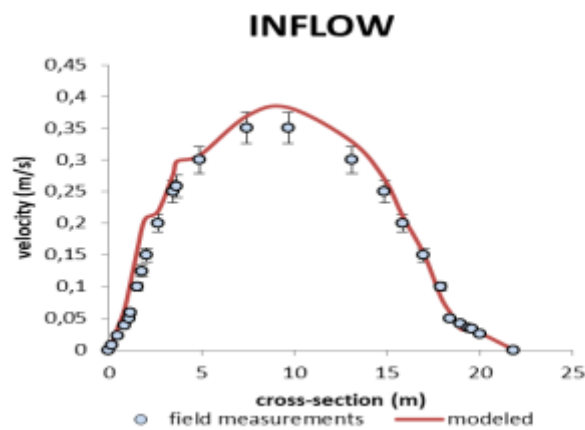


Figure 4-3: The measured and modeled velocity profiles in the inflow of the study area

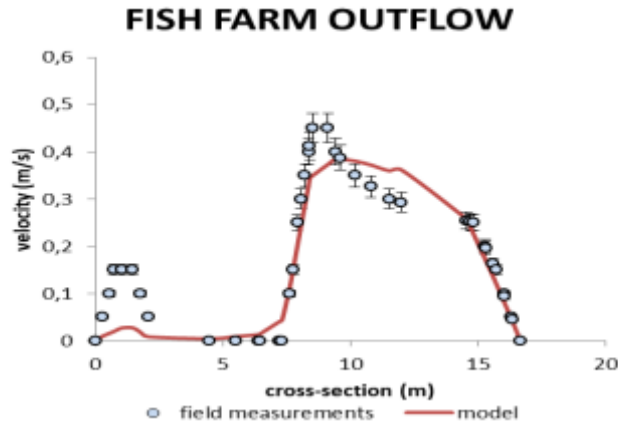


Figure 4-4: The measured and modeled velocity profiles in the fish farm outflow

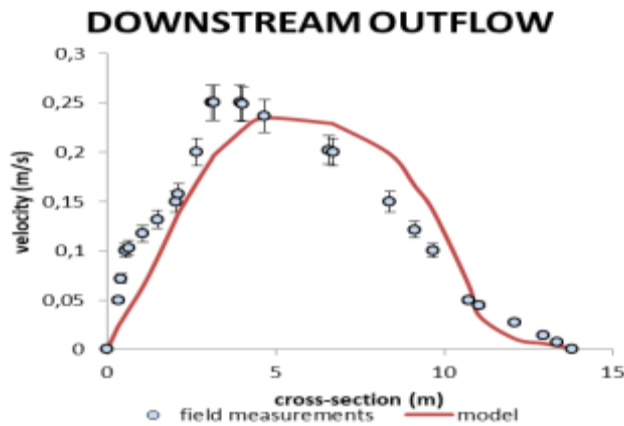


Figure 4-5: The measured and modeled velocity profiles in the downstream outflow

For the calibration of the fish behavior model a sensitivity analysis was performed to account for the memory coefficients and the activation thresholds of behaviors B2 and B3. The sensitivity analysis comprised of three groups of test runs. Group A runs were executed for various threshold and memory coefficient values of behavior B2 ($\text{thres}(B2)$ and $\text{CMEM}(B2)$ respectively). Group B runs were executed for various threshold and memory coefficient values of behavior B3 ($\text{thres}(B3)$ and $\text{CMEM}(B3)$ respectively). Finally, Group C includes two sets of runs executed for different values of the coefficients $\text{thres}(B2)$ and $\text{thres}(B3)$ respectively, while applying maximum value of the intrinsic utility coefficient of behavior B2, ($\text{IntrUtil}(B2) = 1.00$), instead of the default ($\text{IntrUtil}(B2) = 0.50$).

The sensitivity analysis has shown that the coefficients $\text{Thres}(B2)$ and $\text{CMEM}(B2)$ work in combination. Indeed, downscaling the memory coefficient by 50% or more causes even small changes of the activation threshold for behavior B2 to be a lot more impactful on the fish trajectories. On the opposite, when it comes to behavior B3, changes in the activation threshold affect the results significantly, while the memory coefficient is less important. Finally, a higher

value of intrinsic utility for behavior B2 leads to much greater sensitivity of the results to changes in the value of the B2 activation threshold.

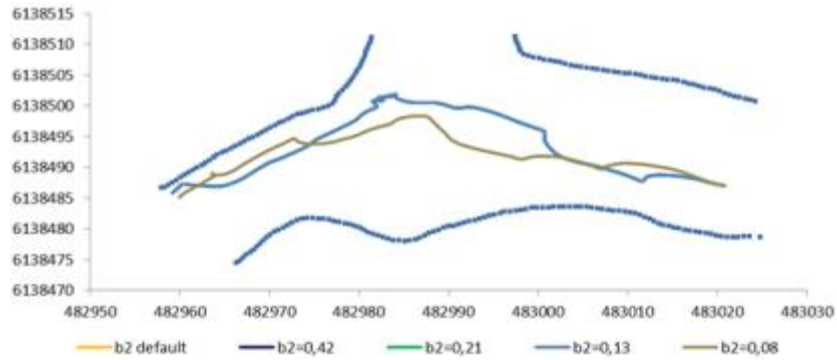


Figure 4-6: Group A1, $CMEM(B2)=0.99$. Fish trajectories remain virtually unaffected by changes in B2 threshold value

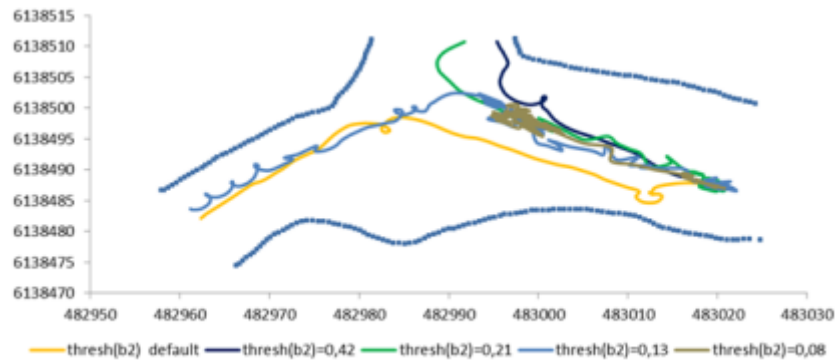


Figure 4-7: Group A3, $CMEM(B2)=0.50$. Changes in B2 threshold value affect fish trajectories significantly

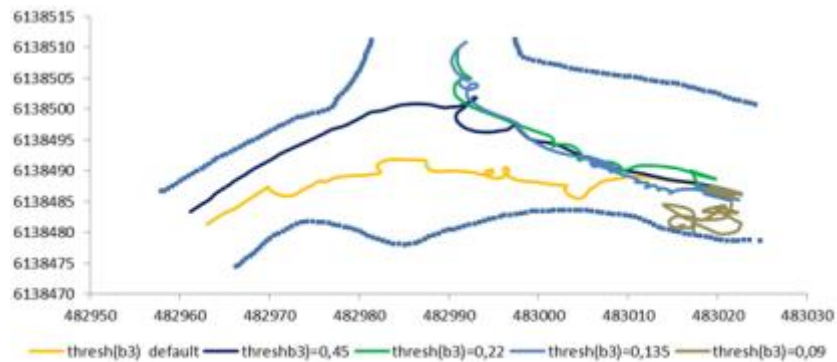


Figure 4-8: Group B1, $CMEM(B3)=0.998$. Lower values of B3 activation threshold means that fish choose this behavior more often leading to big changes in trajectory

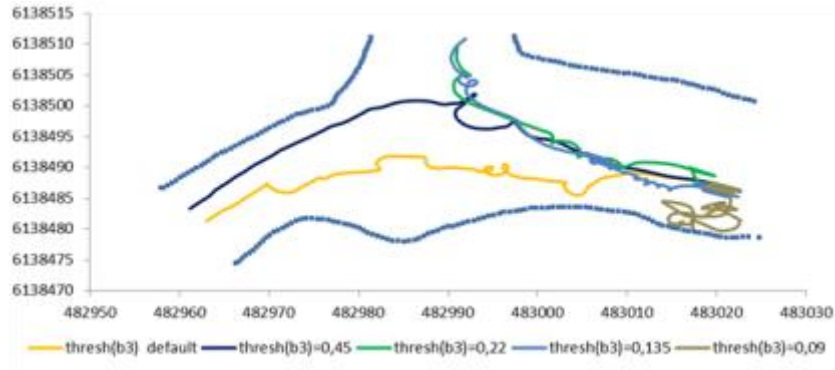


Figure 4-9: Group B4, $CMEM(B3)=0.25$. A reduced value of B3 memory coefficient does not impact fish behavior.

After the sensitivity analysis, an attempt was made to calibrate the model in order to replicate the field data as measured in the study of Svendsen et al. (2011) by simulated the trajectories of 100 virtual fish. In the study, 67% of the measured fish left the area through the downstream exit while the remaining 33% went into the fish farm. Also, milling behavior was observed in 34% of fish, while the remaining 34% were non-milling. The model has managed to approximate the data with a 7% error regarding the fish destination, and 5% error regarding the milling behavior. The chosen values of the model parameters are shown in Table 4-1. The values of the activation thresholds vary for each fish within a range, as they are dependent on a number of factors including the species, health, size, prior history or levels of anxiety and exhaustion.

Table 4-1: Calibrated parameter values used during the application of the fish model

Parameter	Values range
Thres(B2)	0,20±0,10
Thres(B3)	0,50*Thres(B2) + [0,00 , 0,30]
CMEM(B2)	0,75
CMEM(B3)	0,998
IntrUtil(B2)	1,00
IntrUTIL(B3)	1,00
Fish Length	19,10±1,10
DT	2,00±1,00

Table 4-2: Comparison between field measurements and model results.

	Destination		Behavior	
	Down stream	fish farm	non-milling	milling
Model	60%	40%	71%	29%
Measurement data	67%	33%	66%	34%

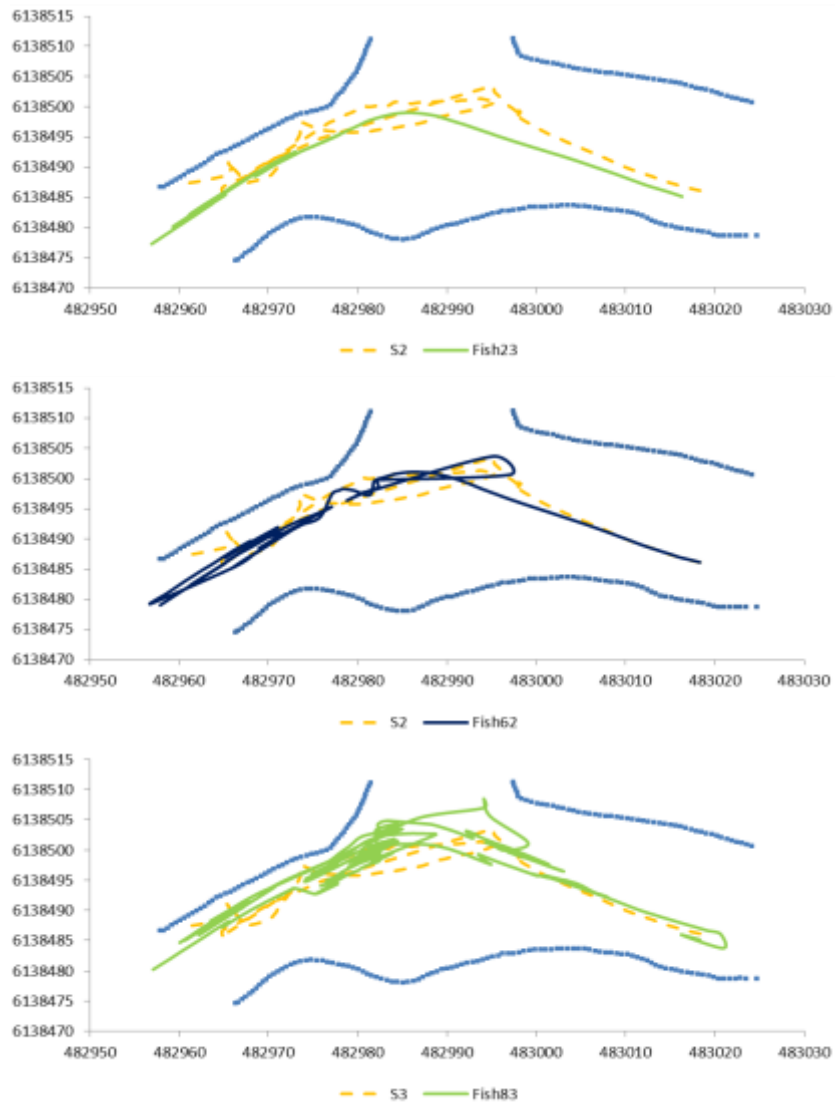


Figure 4-10: Comparison between measured data set S2 and three sample trajectories produced by the model.

In order to further verify the model, an attempt was made to precisely reproduce some of the fish trajectories in the study of Svendsen et al. (2011). Successive applications of the model were made in each of which the starting positions of the 100 fish were in a cluster around the initial

position of the measured fish. There was limited success as the precise trajectories produced by the model are strongly impacted by the starting position virtual fish as well as an important degree of randomness is involved.

5. DISCUSSION

5.1. Conclusions

The following conclusions are drawn from the present study:

- The model is able to simulate the behavior of fish, using hydrodynamic characteristics as stimulus.
Fish can perceive the water acceleration magnitude as a stimulus and choose between three behaviors:
 - o B1, where the fish is oriented in the direction of flow.
 - o B2, where the fish is oriented towards areas of higher flow velocity.
 - o B3, where the fish swims in the opposite direction of the flow.
- Through the appropriate adjustment of the parameters in a range of values, the replication of real fish behavior measured in the field can be achieved.
- The studied fish behavior model manages to simulate to some limited extent the exact fish trajectories, however further research is necessary on the subject.

5.2. Proposed research

- More detailed research of the structure and function of the fish behavior model in order to more accurately simulate the movement of fish during their downstream migration. It is suggested that the movement of the fish be examined in all 3 dimensions and that another pressure-related behavior due to water depth is included.
- The model could possibly be extended in order to simulate upstream migratory fish as well.
- Personalization of the model according to the characteristics of each fish species studied, in order to include the physiological factors that are likely to determine fish behavior.
- Further application of the model in other areas. This is very important for further testing the reliability of the model, especially if it is taken into account that the most critical parameters of the model, (thresholds), are defined as 'site-specific', meaning they do not have a universally applicable value, but they should be appropriately calibrated for each study area. (Goodwin et al., 2014).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Παγκοσμίως, η αυξανόμενη ζήτηση νερού για ύδρευση, αποθήκευση και παραγωγή ενέργειας επιβάλλει επιτακτικά την ανάγκη για καλύτερη διαχείριση των υδατικών πόρων. Στην Ευρώπη, η Οδηγία Πλαίσιο για τα νερά της ΕΕ (WFD, 2000/60/EU) συνδυάζει ποιοτικούς, οικολογικούς και ποσοτικούς στόχους για την προστασία των υδάτινων οικοσυστημάτων, καθώς καθορίζει, μια σειρά από απαραίτητες ενέργειες για την αποτροπή της περαιτέρω υποβάθμισης όλων των υδάτων και την επίτευξη της 'καλής κατάστασης' όλων των υδατικών πόρων.

Ένα από τα προβλήματα τα οποία δημιουργούνται από κατασκευή υδραυλικών έργων σε ποταμούς αφορά τα είδη ιχθύων τα οποία χρησιμοποιούν τους ποταμούς ως μεταναστευτικές οδούς για την αναπαραγωγή τους. Πιο συγκεκριμένα, η κατασκευή μέσα σε έναν ποταμό τεχνικών έργων όπως φράγματα μεγάλης ή μικρής κλίμακας, υπερχειλιστές κλπ δημιουργεί ένα τεχνητό εμπόδιο το οποίο διακόπτει την φυσική ροή του, κάτι το οποίο δημιουργεί δυσκολίες στην μετανάστευση των ιχθύων κατά μήκος του. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος απαιτείται η κατασκευή και σωστή χωροθέτηση ειδικών κατασκευών, των διόδων ιχθύων, οι οποίες επιτρέπουν την απρόσκοπτη διέλευση τους. Τέτοιες κατασκευές συχνά είναι καθοριστικές για την διατήρηση του πληθυσμού των μεταναστευτικών ιχθύων και της γενικότερης λειτουργίας του οικοσυστήματος του ποταμού..

Στην βελτιστοποίηση της λειτουργίας αυτών των διόδων ιχθύων συμβάλει η κατανόηση της κίνησης τους μέσα στα ποτάμια με βάση τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά του πεδίου ροής. Σε αυτή την κατεύθυνση, τίθενται ερωτήματα γύρω από το ποια γνωρίσματα σχετίζονται με τη συμπεριφορά και την κίνηση των ιχθύων και μέσω ποιων τρόπων μπορούν αυτά να αναλυθούν και να καθοριστούν. Τα μαθηματικά μοντέλα και οι υπολογιστικές προσομοιώσεις αποτελούν εργαλεία μέσω των οποίων μπορεί να προσεγγιστεί η συμπεριφορά των ιχθύων, τα οποία αποδεικνύονται απαιτητικά. Για να επιτευχθεί μία σωστή προσέγγιση και μελέτη είναι απαραίτητη η γνώση του μελετώμενου είδους ιχθύος, η συμπεριφορά του κατά τη μεταναστευτική και αναπαραγωγική περίοδο, όπως επίσης και γνώσεις ιχθυολογίας, υδραυλικής μηχανικής και υπολογιστικής ρευστομηχανικής.

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Στην παρούσα εργασία, μέσα από έρευνα του θεωρητικού υποβάθρου που βασίζονται τα μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης της συμπεριφοράς ιχθύων, έγινε προσπάθεια επιβεβαίωσης του μελετώμενου υπολογιστικού μοντέλου ιχθύων με τις πειραματικές μετρήσεις τροχιάς ιχθύων στο πεδίο της περιοχής μελέτης. Εφαρμόστηκε αρχικά το υδροδυναμικό μοντέλο του πεδίου ροής, καθώς τα αποτελέσματα της ταχύτητας και της επιτάχυνσης του νερού που προκύπτουν αποτελούν τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου στο μελετώμενο μοντέλο ιχθύος με βάση τα οποία παίρνονται οι αποφάσεις για την επιλογή της εκάστοτε συμπεριφοράς που θα ακολουθήσουν οι ιχθύες. Επίσης,

περιγράφεται και αναλύεται η δομή και η λειτουργία του μοντέλου ιχθύος. Τέλος, ακολουθεί ανάλυση ευαισθησίας κάποιων παραμέτρων από τις οποίες εξαρτάται η συμπεριφορά των ιχθύων, καθώς και συσχέτιση της καταλληλότητας της περιοχής μελέτης με τις τροχιές των ιχθύων.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η εφαρμογή και βαθμονόμηση ενός υπολογιστικού μοντέλου συμπεριφοράς ιχθύων, ώστε τα παραγόμενα αποτελέσματα να επιβεβαιώνουν τις πειραματικές μετρήσεις τροχιάς ιχθύων στο πεδίο της περιοχής μελέτης. Εφαρμόστηκε αρχικά το υδροδυναμικό μοντέλο του πεδίου ροής, τα αποτελέσματα του οποίου αποτελούν τα δεδομένα εισόδου του μοντέλου συμπεριφοράς ιχθύος. Επίσης, περιγράφεται και αναλύεται η δομή και η λειτουργία του μοντέλου ιχθύος. Τέλος, ακολουθεί ανάλυση ευαισθησίας των βασικών παραμέτρων του μοντέλου από τις οποίες εξαρτάται η συμπεριφορά των ιχθύων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΙΧΘΥΩΝ

2.1. Γενικά

Για την ανάπτυξη ενός μοντέλου προσομοίωσης της συμπεριφοράς και της κίνησης των ιχθύων, απαιτείται ένας συνδυασμός γνωστικών υποβάθρων από τα επιστημονικά πεδία της Ιχθυολογίας, της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής και της επιστήμης των Υπολογιστών. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η φυσιολογία των ιχθύων, οι συμπεριφορές που ακολουθούν, ενώ γίνεται και μια συνοπτική παρουσίαση των υφιστάμενων μαθηματικών μοντέλων συμπεριφοράς ιχθύων.

2.2. Μεταναστευτικά είδη ιχθύων

Η μετανάστευση των ιχθύων αποτελεί περίπλοκη διαδικασία, η μελέτη της οποίας θα πρέπει να λάβει υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των διαφορετικών ειδών ιχθύων. Η κατηγορία που εμπίπτουν οι μελετώμενοι ιχθύες είναι η μετανάστευση για αναπαραγωγικούς σκοπούς. Υπάρχουν τρεις μεγάλες κατηγορίες αναπαραγωγικής μετανάστευσης: οκεανόδρομες, διάδρομες και ποταμόδρομες μεταναστεύσεις (Μεγαλοφώνου, 2015).

Στην κατηγορία της διάδρομης μετανάστευσης, δηλαδή μεταξύ της θάλασσας και του γλυκού νερού, υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες ταξινόμησης της μετανάστευσης των ιχθύων κατά την διάρκεια του κύκλου ζωής τους, τα ανάδρομα και τα κατάδρομα είδη ιχθύος.

Τα ανάδρομα μεταναστευτικά είδη αναπτύσσονται στη θάλασσα μέχρι να φτάσουν στη σεξουαλική ωριμότητα και στη συνέχεια μεταναστεύουν σε γλυκό νερό, όπου ταξιδεύουν ανάντη σε έναν ποταμό για να βρουν κατάλληλη περιοχή ωτοκίας. Αφού εκκολαφθούν, τα νεαρά ανάδρομα ψάρια μένουν στο ρέμα για περίπου ένα χρόνο, Αφού εκκολαφθούν οι νεαροί ιχθύες παραμένουν στο ποτάμι για έναν χρόνο έως ότου γίνουν ενήλικες όπου και ξεκινούν την καθοδική τους πορεία προς τον ωκεανό. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ανάδρομων ειδών είναι ο σολομός του Ατλαντικού και η Καφέ Πέστροφα.



Εικόνα 2.2-1: Ατλαντικός Σολομός (*Salmo salar*) [πηγή: NOAA Fisheries-National Oceanic and Atmospheric Administration, <https://www.fisheries.noaa.gov/species/atlantic-salmon-protected>]

Τα κατάδρομα μεταναστευτικά είδη ακολουθούν το αντίθετο μεταναστευτικό μοτίβο, καθώς οι ενήλικοι ιχθύες μεγαλώνουν και αναπτύσσονται στο γλυκό νερό και ταξιδεύουν προς τον ωκεανό για την αναπαραγωγή τους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα κατάδρομου είδους είναι τα Ευρωπαϊκό Χέλι.

Στην παρούσα εργασία, έγινε προσπάθεια προσομοίωσης της κατάντη μετανάστευσης ανάδρομου ιχθύος και συγκεκριμένα του Ατλαντικού Σολομού (*Salmo salar*).

2.3. Μέθοδοι ανίχνευσης ιχθύων

2.3.1. Αισθητήρια όργανα ανίχνευσης

Τα ψάρια μπορούν να πλοηγούνται στον χώρο με τη βοήθεια διάφορων αισθητήριων οργάνων τα οποία τους παρέχουν πληροφορίες για το περιβάλλον. καθώς και να αλληλοεπιδρούν με βιολογικά, φυσικά και χημικά συστατικά. Τα πιο σημαντικά αισθητήρια στοιχεία που αντιλαμβάνονται τα ψάρια σχετίζονται με:

1. όραση,
2. ακοή,
3. χημειοαισθητική αντίληψη,
4. μηχανική αντίληψη,
5. ηλεκτρική αντίληψη
6. μαγνητικός προσανατολισμός (Tuys, 2012).

Το αισθητηριακό σύστημα στο οποίο επικεντρώνεται κυρίως η βιβλιογραφία των μοντέλων συμπεριφοράς ιχθύων, αφορά τη μηχανική αντίληψη. Σε αυτή περιλαμβάνεται το πλευρικό σύστημα (lateral line system) το οποίο επιτρέπει στους ιχθύες να ανιχνεύουν κίνηση και δονήσεις στο περιβάλλον νερό μέσω επιθηλιακών κυττάρων. Τα επιθηλιακά κύτταρα ανταποκρίνονται στις υδροδυναμικές διαταραχές στο περιβάλλον πεδίο ροής και παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την θέση του ζώου στον τρισδιάστατο χώρο και σε σχέση με άλλα σώματα στο περιβάλλον του.

2.3.2 Το πλευρικό σύστημα (lateral line system)

Η μικρότερη λειτουργική μονάδα του πλευρικού συστήματος είναι ο νευρομαστός, αισθητήρας που βρίσκεται επάνω στην επιφάνεια του δέρματος του ιχθύ ή κάτω από την επιφάνεια του μέσα σε κανάλια με υγρό. Οι νευρομαστοί αποτελούνται από αισθητήρια τριχοειδή κύτταρα τα οποία αντιδρούν στις υδροδυναμικές διαφορές του περιβάλλοντος πεδίου ροής και παρέχουν πληροφορίες για την θέση του ιχθύ στον χώρο και σε σχέση με τις άλλες οντότητες γύρω του (Bleckmann, 2007). Το πλευρικό σύστημα θεωρείται ότι δημιουργεί υδροδυναμικές εικόνες των κινούμενων και στατικών αντικειμένων του περιβάλλοντος, παρόμοιες με τις εικόνες που δημιουργούνται από το σύστημα όρασης (Coombs and Van Netten, 2006).

The external anatomy of a salmon



Εικόνα 2.3-1: Σχεδιάγραμμα ανατομίας σολομού με σημειωμένη την πλευρική γραμμή [Πηγή: Environment and Natural Resources, Government of Northwest Territories, Canada]

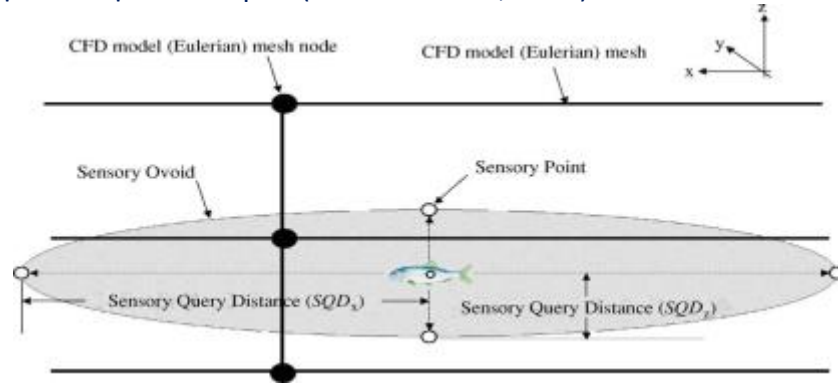
2.3.3. Η περιοχή αντίληψης (sensory ovoid)

Οι ιχθύες δέχονται σήματα και πληροφορίες από το περιβάλλον εντός ενός όγκου που τους περιβάλλει. Η περιοχή αυτή μπορεί να προσομοιωθεί ως συμμετρική σφαίρα ή ως ελλειψοειδές (Goodwin et al., 2006). Η κλίμακα της περιοχής αντίληψης αντιπροσωπεύει το εύρος αντίληψης του πλευρικού συστήματος του ιχθύος. Οι διαστάσεις της εξαρτώνται από το πλευρικό σύστημα ή το μήκος του ιχθύος και συνήθως θεωρούνται ίσες με κάποιο πολλαπλάσιο του μήκους του σώματος του ιχθύος (Coombs, 1999).

Οι παράλληλες, κάθετες και κατακόρυφες (x, y, z) αποστάσεις των αισθητήριων σημείων από το κέντρο του ιχθύος ως προς τον άξονά του (SQD, Sensory Query Distances) περιγράφονται από το ELAM μοντέλο (Goodwin et al., 2006) ως εξής:

$$SQD = \Delta t * S_f * D_a \quad (2.3-1)$$

Όπου Δt το χρονικό βήμα, S_f το μήκος του σώματος του ιχθύος και D_a το πλήθος των μηκών σώματος του ιχθύος (ισούται με δύο μήκη σώματος ιχθύος). Οι τιμές των SQD πρέπει να καθορίζονται στο στάδιο της προεπεξεργασίας του μοντέλου κίνησης ιχθύων αλλά μπορούν επίσης να μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης σε σχέση με τις εξωτερικές συνθήκες που αντιλαμβάνεται ο ιχθύς, για παράδειγμα την ώρα της ημέρας ή την ποιότητα του νερού (Goodwin et al., 2006).



Εικόνα 2.3-2: Δισδιάστατη άποψη επιμηκών και κάθετων αποστάσεων της προσομοιωμένης περιοχής αντίληψης του ιχθύος [πηγή: Goodwin et al., 2006]

2.4. Κίνηση, συμπεριφορά και ταχύτητα ιχθύων

2.4.1. Κίνηση ιχθύων

Η συμπεριφορά των ψαριών και η κίνηση των ψαριών βασίζεται σε αντιδράσεις σε ένα συγκεκριμένο περιβαλλοντικό ερέθισμα. Η απόκριση εξαρτάται από την ένταση του ερεθίσματος και προκαλεί μια κατευθυνόμενη, μη τυχαία κίνηση αντανακλαστική κίνηση η οποία ονομάζεται Τακτισμός (Taxis). Οι πιο συνήθεις Τακτισμοί είναι:

- Φωτοτακτισμός: ο προσανατολισμός σε σχέση με το φως.
- Γεωτακτισμός: η κατευθυνόμενη κίνηση, ανταποκρινόμενη στο ερέθισμα της βαρύτητας.
- Ηλεκτροτακτισμός: εντοπισμός εκπομπής ηλεκτρικών σημάτων, μέσο προσανατολισμού και επικοινωνίας.
- Μαγνητοτακτισμός: προσανατολισμός με βάση μαγνητικά πεδία.
- Θιγμοτακτισμός: προσανατολισμός με βάση την επαφή με κάποιο αντικείμενο.
- Ρεοτακτισμός: προσανατολισμός κίνησης σε σχέση με τη ροή του ύδατος.
- Χημειοτακτισμός: αποφυγή εχθρών, εύρεση τροφής, αναπαραγωγή (Μεγαλοφώνου, 2015).

Το παρόν μοντέλο βασίστηκε στο Θιγμοτακτισμό και το Ρεοτακτισμό ως μη τυχαίες συμπεριφορές κίνησης.

2.4.2. Ταχύτητα ιχθύων

Όσον αφορά τις ταχύτητες κολύμβησης υπάρχουν 3 κατηγορίες που συνδέονται με τη συμπεριφορά των ιχθύων:

- Η συνεχής κολύμβηση ή ταχύτητα πλευσης.
- Η παρατεταμένη ή σταθερή κολύμβηση.
- Η εκρηκτική κολύμβηση που διαρκεί λίγα δευτερόλεπτα (*Webb, 1975*).

Στην συνεχή κολύμβηση οι ιχθύες διατηρούν χαμηλή ταχύτητα για την πλοήγηση μέσα στο ρεύμα του νερού προκειμένου να αποφύγουν την κόπωση. Η συνεχής κολύμβηση στην κατάντη μετανάστευση επιτρέπει στους ιχθύες να κολυμπούν προς την κατάντη κατεύθυνση με κατάντη (αρνητική ρηόταξη) ή ανάντη (θετική ρηόταξη) προσανατολισμό.

Η παρατεταμένη κολύμβηση, κατά την οποία οι ιχθύες βιώνουν κόπωση, χρησιμοποιείται κυρίως ως μηχανισμός αντίδρασης για την αποφυγή εμποδίων (*Katopodis, 2015*).

Η εκρηκτική κολύμβηση χρησιμοποιείται για την αποφυγή άμεσου κινδύνου.

2.4.3. Συμπεριφορά ιχθύων

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην προσπάθεια προσομοίωσης συμπεριφοράς ιχθύων λόγω υδροδυναμικών ερεθισμάτων. Στην πρόσφατη βιβλιογραφία έχουν καθοριστεί μια σειρά συμπεριφορών, από τις οποίες οι πιο σημαντικές παρουσιάζονται παρακάτω.

Οι Haefner and Bowen, (2002) καθόρισαν τέσσερις συμπεριφορές που ενεργοποιούνται ανάλογα με την απόσταση του ερεθίσματος σε σχέση με το ψάρι:

1. Δεν εντοπίζεται ερέθισμα οπότε διατηρείται η συνεχής ταχύτητα.
2. Το ερέθισμα εντοπίζεται σε απόσταση ίση με 1 φορά του μήκους του σώματος του ιχθύος, οπότε και ενεργοποιείται η παρατεταμένη κολύμβηση.
3. Το ερέθισμα εντοπίζεται σε απόσταση ίση με 0.5 φορές του μήκους του σώματος του ιχθύος, οπότε και ενεργοποιείται η εκρηκτική κολύμβηση.
4. Δεν εντοπίζεται ερέθισμα μετά την εκρηκτική κολύμβηση, οπότε ενεργοποιείται η αντίστροφη κολύμβηση.

Οι Goodwin et al. (2006) καθόρισαν τέσσερις συμπεριφορές που ενεργοποιούνται βάση της ταχύτητας του νερού, την κλίση πίεσης και την υδραυλική τάση:

B1: Κολύμβηση προς την κατεύθυνση του διανύσματος της ροής. Η κολύμβηση γίνεται προς την κατεύθυνση της ροής σε συνδυασμό με έναν τυχαίο περίπατο (biased correlated random walk, BCRW).

B2: Κολύμβηση προς τις υψηλότερες ταχύτητες ροής για την μείωση της ασκούμενης υδραυλικής τάσης. Η κολύμβηση προς τις υψηλότερες ταχύτητες ροής εξασφαλίζει την μείωση των εναλλαγών στις ασκούμενες δυνάμεις και τον περιορισμό έκθεσης στην τύρβη.

B3: Κολύμηση προς περιοχές με χαμηλότερες ταχύτητες ροής ή αντίθετα στην κατεύθυνση της ροής, για την μείωση της ασκούμενης υδραυλικής τάσης.

B4: Κολύμηση προς το βάθος που έχει εγκλιματιστεί. Κατευθύνει το ψάρι προς το ύψος πίεσης στο οποίο έχει προγενέστερα εγκλιματιστεί.

Οι συμπεριφορές B2 και B3 σχετίζονται με αλλαγές στις επιταχύνσεις, ενώ η συμπεριφορά B4 με αλλαγές στην πίεση του νερού.

Οι Lemasson et al. (2008) επέκτειναν τη μελέτη των Haefner and Bowen (2002) και πρότειναν πέντε κανόνες συμπεριφοράς ιχθύων:

1. Όταν ο ιχθύς μεταβάλλει την κίνηση του ώστε να αποφύγει τον κίνδυνο, ο επιθυμητός του προσανατολισμός λαμβάνεται από μια συνεχή κατανομή, με ακρότατα τις γωνίες που του επιτρέπουν να απομακρύνεται από τα τοιχώματα ή το εμπόδιο.
2. Οι ιχθύες εντοπίζουν τον 'κίνδυνο' σε απόσταση 1.5 φορά του μήκους του σώματος του ιχθύ και χρησιμοποιούν την παρατεταμένη κολύμηση.
3. Οι ιχθύες δεν αντιλαμβάνονται τα τοιχώματα του καναλιού ως κίνδυνο και ενεργοποιείται η ευθύγραμμη κίνηση. Αντίθετα, το εμπόδιο θεωρείται 'κίνδυνος' και ενεργοποιείται η συμπεριφορά αποφυγής.
4. Κατά την κίνηση τους, οι ιχθύες παρουσιάζουν απρόβλεπτες αλλαγές στην ταχύτητα και στον προσανατολισμό τους, τα οποία λαμβάνονται από στατιστικές κατανομές πειραματικών δεδομένων (κατανομή Γάμμα για την ταχύτητα και κανονική κατανομή για τον προσανατολισμό).
5. Οι ιχθύες έλκονται προς το άνοιγμα που παρακάμπει το εμπόδιο.

Οι Vowles et al. (2014) καθόρισαν πέντε τύπους συμπεριφορών:

1. Ενεργή κολύμηση με τη ροή προς την κατάντη κατεύθυνση.
2. Παθητική συμπαράσυρση με τη ροή προς την κατάντη κατεύθυνση.
3. Αντίδραση, αλλαγή προσανατολισμού προς τα ανάντη και συνέχεια κίνησης προς την κατάντη κατεύθυνση.
4. Διακοπή κίνησης προς τα κατάντη και παραμονή σε περιοχές με υψηλότερες κλίσεις ταχύτητας.
5. Υποχώρηση και αποφυγή προς τα ανάντη με κολύμηση αντίθετα στη ροή με ταχύτητα υψηλότερη από την ταχύτητα του νερού.

2.5. Παρουσίαση υφιστάμενων μοντέλων συμπεριφοράς ιχθύων

Στην διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν διάφορα μαθηματικά μοντέλα που περιγράφουν τη συμπεριφορά των ιχθύων. Μία βιβλιογραφική διερεύνηση των υφιστάμενων μοντέλων έχει υποδείξει τα ακόλουθα μοντέλα ως τα πιο σημαντικά, επισημαίνοντας τα κύρια χαρακτηριστικά τους και τη λειτουργία τους (Γιαννούλης Σ., 2015). Το μοντέλο που μελετάται στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε βασιζόμενο κυρίως στις αρχές του μοντέλου των Goodwin et al. (2014), το οποίο παρουσιάζεται αναλυτικότερα παρακάτω.

2.5.1. Haefner and Bowen, 2002; Lemasson et al., 2008

Οι κύριες πτυχές του μοντέλου Haefner and Bowen είναι οι εξής:

1. Το μοντέλο αντιλαμβάνεται τον ιχθύ ως δισδιάστατο σώμα.
2. Ο ιχθύς κινείται μέσω του πεδίου ροής σύμφωνα με τις Νευτώνειες δυνάμεις
3. Ο ιχθύς προσπαθεί να αποφύγει τα εμπόδια, σύμφωνα με το βασικό ένστικτο επιβίωσης.
4. Η συμπεριφορά και η φυσιολογία του ιχθύ καθορίζει τις αντιδράσεις του στα εμπόδια.
5. Η νέα θέση του ιχθύ υπολογίζεται από τις εξισώσεις κίνησης επιλύοντας πέντε συνήθεις διαφορικές εξισώσεις χρησιμοποιώντας την μέθοδο Runge-Kutta τέταρτης τάξης.

Οι εξισώσεις κίνησης που επιλύονται είναι:

$$\frac{du_{fx}}{dt} = 0.5 * \rho * S_a * U_x^2 * \frac{(C_f + C_p)}{m_v} + \frac{P_x}{m_v} \quad (2.5-1)$$

$$\frac{du_{fy}}{dt} = 0.5 * \rho * S_a * U_y^2 * \frac{(C_f + C_p)}{m_v} + \frac{P_y}{m_v} \quad (2.5-2)$$

$$\frac{dx_f}{dt} = u_{fx} \quad (2.5-3)$$

$$\frac{dy_f}{dt} = u_{fy} \quad (2.5-4)$$

$$\frac{dO}{dt} = -f(M) \quad (2.5-5)$$

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 πιθανές συμπεριφορές, C_f, C_p είναι οι συντελεστές οπισθέλκουσας, $\frac{dO}{dt}$ ο ρυθμός εξάντλησης του οξυγόνου ή η ενέργεια που χρειάζεται για κάθε κατηγορία κολύμβησης και P η ώθηση κολύμβησης ανάλογα με την κατεύθυνση θ της κίνησης του ιχθύος:

$$P_x = P * \cos(\theta) \quad (2.5-6)$$

$$P_y = P * \sin(\theta) \quad (2.5-7)$$

Η ώθηση κολύμβησης P υπολογίζεται ως εξής:

$$P = \begin{cases} 0.5C_f S_a \rho u_f^2 & (2.5-8) \\ S_p 0.5C_f S_a \rho u_f^2 & (2.5-9) \\ \left(1.0 - \frac{1.0}{1.0 + |U_x|}\right) \frac{O}{O_{max}} S_b A_R m_v & (2.5-10) \\ \frac{O}{O_{max}} S_b A_B m_v & (2.5-11) \end{cases}$$

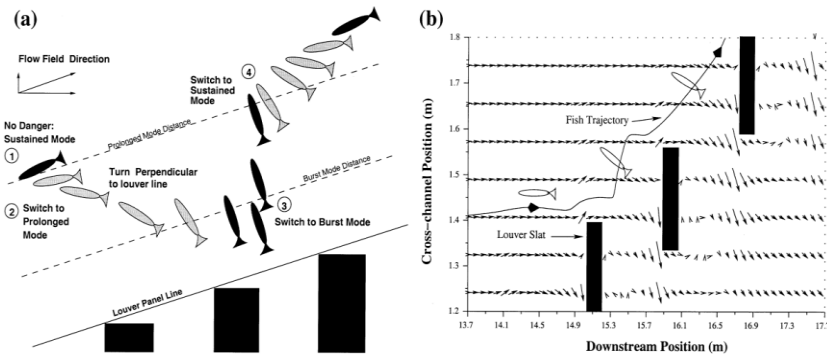
Όπου C_f ο συντελεστής οπισθέλκουσας για την επιφανειακή τριβή, S_a η βρεχόμενη επιφάνεια του ιχθύος, ρ η πυκνότητα του νερού, u_f η ταχύτητα κολύμβησης του ιχθύος, $U_x = u_w - u_f$, A επιτάχυνση για κάθε κατηγορία κολύμβησης, m_v η εικονική μάζα του ιχθύος, S οι παράγοντες που εξαρτώνται από το κάθε είδος ιχθύος και O 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, η οποία υπολογίζεται ως εξής:

$$\frac{dO}{dt} = \begin{cases} 0.0 & (2.5 - 12) \\ -0.01f & (2.5 - 13) \\ -0.02f & (2.5 - 14) \\ -f & (2.5 - 15) \end{cases}$$

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

Στις εικόνες φαίνονται οι συμπεριφορές των ιχθύων κοντά στις περσίδες, καθώς και ενδεικτικές τροχιές ιχθύων από την προσομοίωση.



Εικόνα 2.5-1: (a) Συμπεριφορές ιχθύων κοντά στις περσίδες, (b) προσομοιωμένες τροχιές ιχθύων και πεδίο ροής κοντά στις περσίδες [πηγή: Haefner and Bowen, 2002]

2.5.2. Abdelaziz et al. , 2013

Οι Abdelaziz et al. μελέτησαν την κίνηση των ιχθύων μέσα σε δίοδο και συγκεκριμένα σε δίοδο ιχθύων τύπου rool and weir. Με βάση τα αποτελέσματα του υδροδυναμικού μοντέλου αναπτύχθηκε ένα αριθμητικό μοντέλο συνδυάζοντας τη έννοια της ελάχιστης δαπάνης ενέργειας και της τυχαίας κίνησης κατά την οποία τα αποτελέσματα της τύρβης και της μνήμης των ιχθύων λαμβάνονται υπόψη. Το μοντέλο επιβεβαιώνεται με τα πειραματικά δεδομένα ροής και κίνησης ιχθύων από προηγούμενη μελέτη.

Τα χαρακτηριστικά του μοντέλου είναι:

1. Επιλύονται οι τρισδιάστατες εξισώσεις Navier-Stokes και η εξίσωση συνέχειας για ασυμπιεστα υγρά μέσω του προγράμματος FLOW-3D.
2. Η κίνηση των προσομοιωμένων ιχθύων καταγράφεται χρησιμοποιώντας την ελάχιστη δαπάνη ενέργειας μαζί με μία μέθοδο τυχαίου περιπάτου (random walk).
3. Αν εντοπίζεται άνοιγμα στην ανάντη κατεύθυνση σε μια απόσταση από τον ιχθύ τότε ο ιχθύς θα περάσει από εκεί. Διαφορετικά, το μοντέλο ελέγχει τη μέγιστη ταχύτητα γύρω από τον ιχθύ. Αν αυτή έχει τιμή μεγαλύτερη από ένα όριο τότε ενεργοποιείται η τυχαία κίνηση, αλλιώς αν η τιμή είναι αρκετά υψηλή ώστε να αναγνωρίσει την ανάντη κατεύθυνση τότε ο ιχθύς θα προχωρήσει προς τα εκεί. Τότε εφαρμόζεται το μοντέλο χαμηλής ενέργειας και αποφυγής τύρβης.

4. Ανάλογα με την ύπαρξη τύρβης λόγω κλίσης ταχυτήτων, αν η κλίση ταχυτήτων είναι μικρότερη από την κρίσιμη τιμή, τότε ο ιχθύς περνά χωρίς να λάβει υπόψη του το αποτέλεσμα της αποφυγής της τύρβης. Σε αντίθετη περίπτωση ενεργοποιείται το μοντέλο αποφυγής της τύρβης.

2.5.3. Goodwin et al. , 2006, 2014

Τα κύρια χαρακτηριστικά του μοντέλου που ανέπτυξαν οι Goodwin et al. είναι:

1. Για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών της ροής χρησιμοποιούνται μοντέλα υπολογιστικής υδροδυναμικής που επιλύουν τις κατά Reynolds ολοκληρωμένες εξισώσεις Navier-Stokes.
2. Τα υπολογιστικά πλέγματα της τοπολογίας που χρησιμοποιούνται είναι ορθογωνικά και δομημένα.
3. Οι ιχθύες αξιολογούν τα υδροδυναμικά ερεθίσματα μέσα στην περιοχή αντίληψης και καθορίζουν αντίστοιχα τη συμπεριφορά τους.
4. Όταν λαμβάνεται μια απόφαση συμπεριφοράς, υπολογίζεται το αντίστοιχο διάνυσμα της ταχύτητας κολύμβησης (u_f, v_f, w_f) καθώς και η κατεύθυνση για την επιλεγμένη συμπεριφορά, ενώ υπολογίζεται και η καινούρια θέση του ιχθύος λαμβάνοντας υπόψη την προηγούμενη θέση.

Με βάση την 'μόλις αισθητή διαφορά' του Weber, κάθε συμπεριφορά ενεργοποιείται αναγνωρίζοντας την υπέρβαση μιας τιμής κατωφλιού (threshold) μεταξύ του σχετικού ερεθίσματος και της έντασης στην οποία έχει ήδη εγκλιματιστεί:

$$E_t = \frac{I^t - I_a^t}{I_a^t} > k_i \quad (2.5-16)$$

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 από την πιθανότητα P^t να αποκτηθεί η εσωτερική χρησιμότητα u_i η οποία αντιστοιχεί σε κάθε συμπεριφορά. Η υιοθετημένη συμπεριφορά θα είναι τελικά εκείνη με τη μέγιστη αναμενόμενη χρησιμότητα U^t :

$$U_i^t = P_i^t * u_i - C_i^t \quad (2.5-17)$$

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:

$$x^{t+dt} = x^t + (u + u_f) * \Delta t \quad (2.5-18)$$

$$y^{t+dt} = y^t + (v + v_f) * \Delta t \quad (2.5-19)$$

$$z^{t+dt} = z^t + (w + w_f) * \Delta t \quad (2.5-20)$$

Όπου (x, y, z) τα διανύσματα θέσης και (u, v, w) τα διανύσματα της ταχύτητας ροής. Οι Goodwin et al. (2006) χρησιμοποίησαν 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:

$$I^t = \log \frac{S^t}{S_0} \quad (2.5-21)$$

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. (2014) χρησιμοποίησαν το μέγεθος της επιτάχυνσης της ροής A_M ως ερέθισμα, οπότε η εξίσωση (2.5-21) γίνεται:

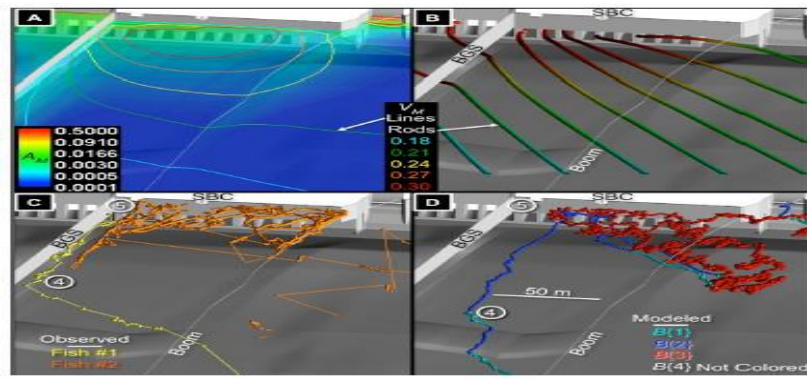
$$I^t = \log \frac{A_M^t}{A_0} \quad (2.5-22)$$

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 στο οποίο 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 ένα κατώφλι k_i :

$$E_t = |I^t_i - I^t_a| > k_i \quad (2.5-23)$$

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

$$SQD = \Delta t * S_f * D_a \quad (2.5-24)$$



Εικόνα 2.5-2: Χαρακτηριστικά πεδίου ροής και τροχιές ιχθύων. (A) Ισομεγέθεις γραμμές του πεδίου επιταχύνσεων στην περιοχή προσομοίωσης, (B) μέγεθος ταχύτητας ροής, (C) τροχιά πραγματικού ιχθύ, (D) τροχιά προσομοιωμένου ιχθύ [πηγή: Goodwin et al., 2014].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

3.1 Περιοχή εφαρμογής – Jedsted Mill Fish Farm

Για την βαθμονόμηση και επιβεβαίωση του μαθηματικού μοντέλου συμπεριφοράς ιχθύων ήταν απαραίτητο να επιλεγεί μια περιοχή για την οποία θα υπάρχουν δεδομένα σχετικά με την κίνηση των ιχθύων κατά την κατάντη μετανάστευση. Επίσης, ήταν απαραίτητο να υπάρχουν δεδομένα για το υδροδυναμικό πεδίο, όπως η βαθυμετρία, οι παροχές και οι ταχύτητες ροής του πεδίου. 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 Fish Farm, 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 (Svendsen et al., 2011).



Εικόνα 3.1-1: Περιοχή Jedsted Mill Fish Farm, Δανία [πηγή: Οικονομοπούλου Ε., 2019]

Ο ποταμός Konge εκβάλλει στην θάλασσα Wadden, έχει μήκος 70 km και μέση κλίση 0,5%. Η μέση ετήσια παροχή στην εκβολή είναι περίπου $7 \text{ m}^3/\text{s}$. Ο ποταμός στο μεγαλύτερο μέρος του έχει πλάτος 8m με 15m και βάθος 0.5m με 1.4m, ενώ μαζί με άλλους 32 μικρούς παραποτάμους υποστηρίζει πληθυσμούς του Ατλαντικού Σολομού και της Καφέ Πέστροφας. Η περιοχή του Jedsted Mill Fish Farm ($55^\circ 23' \text{N}$; $8^\circ 43' \text{E}$) βρίσκεται 90 μέτρα ανάντη από έναν υπερχειλιστή λεπτής στέψευας, ο οποίος επηρεάζει την υδραυλική κατάσταση του ποταμού. Το νερό εκτρέπεται στην περιοχή του ιχθυοτροφείου (Mill Fish Farm) κάτω από μία ξύλινη γέφυρα (27m) και μέσω εσχάρων. Η περιοχή μεταξύ της γέφυρας και των εσχάρων αποτελεί την ζώνη απομείωσης του νερού. Το νερό περνάει μέσα από τις λίμνες του ιχθυοτροφείου και επιστρέφει στο ποτάμι κατάντη του υπερχειλιστή (Svendsen et al., 2011).

Η κοίτη του ποταμού περιλαμβάνει κυρίως άμμο με παρεμβαλλόμενες διάσπαρτες περιοχές με χαλίκι. Κατά την περίοδο των πειραματικών μετρήσεων για τους

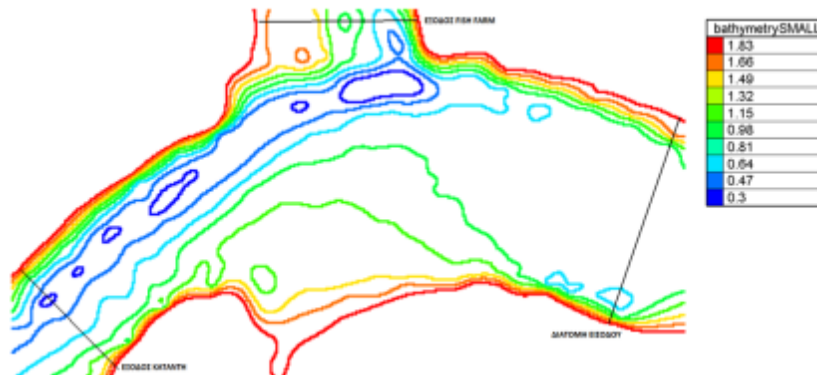
μελετώμενους ιχθύες στον ποταμό επικρατούσε έντονη βλάστηση από το είδος *Sparganium erectum* με 50% επικάλυψη.



Εικόνα 3.1-2: Επικρατούσα βλάστηση στην περιοχή (*Sparganium erectum*) [πηγή: Οικονομοπούλου Ε., 2019]

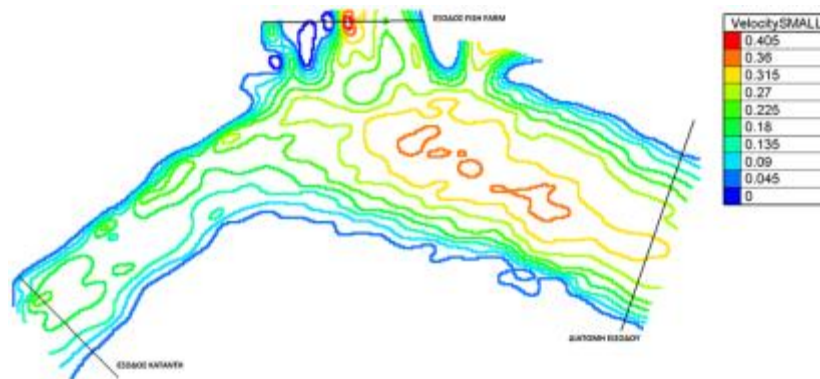
3.2. Δεδομένα βαθυμετρίας και ταχύτητας

Για την περιοχή μελέτης δόθηκαν δεδομένα GIS με τη μορφή ισοϋψών βάθους και μέσης ταχύτητας. Οι τιμές των μετρήσεων της βαθυμετρίας στο πεδίο κυμαίνονται από 0.30m έως 2.05m όπως φαίνονται στην Εικόνα 3.2-1. Οι μετρήσεις του βάθους πραγματοποιήθηκαν με την χρήση φορητού GPS.



Εικόνα 3.2-1: Ισοϋψείς γραμμές βάθους από τις μετρήσεις στο πεδίο [πηγή: Svendsen et al., 2010]. Σημειωμένες η διατομή εισόδου και οι δύο διατομές εξόδου.

Αντίστοιχα, οι τιμές των μετρήσεων της μέσης ταχύτητας στο πεδίο ροής κυμαίνονται από 0m/s έως 0.45m/s όπως φαίνονται στην Εικόνα 3.2-2. Οι μέσες ταχύτητες μετρήθηκαν με την χρήση φορητού μιλίσκου σε βάθος 60% από την ελεύθερη επιφάνεια του νερού



Εικόνα 3.2-2: Ισοϋψείς γραμμές διακύμανσης μέσης ταχύτητας από τις μετρήσεις στο πεδίο γραμμές [πηγή: Svendsen et al., 2011]. Σημειωμένες η διατομή εισόδου και οι δύο διατομές εξόδου.

3.3. Υπολογισμός παροχών

Ο υπολογισμός των παροχών του πεδίου ροής έγινε με βάση τα δεδομένα ταχυτήτων και βαθυμετρίας στην διατομή εισόδου στα ανάντη της περιοχής μελέτης και των διατομών εξόδου προς τα κατόντη και προς το Jedsted Mill Fish Farm, όπως φαίνονται στις εικόνες 3.2-1 και 3.2-2.

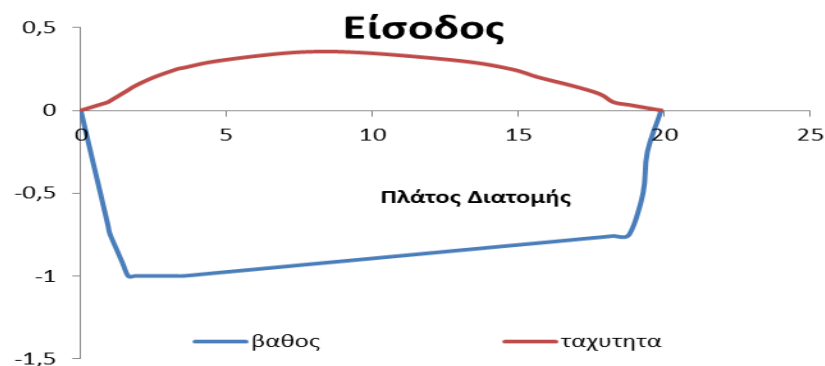
Για τον υπολογισμό της παροχής οι διατομές χωρίστηκαν σε μικρότερα νοητά στοιχεία i και υπολογίστηκαν το εμβαδό και η μέση τιμή της ταχύτητας για κάθε στοιχείο. Οι επιμέρους παροχές υπολογίστηκαν με βάση την Εξίσωση Συνέχειας:

$$q_i = V_i * A_i \quad (3.3-1)$$

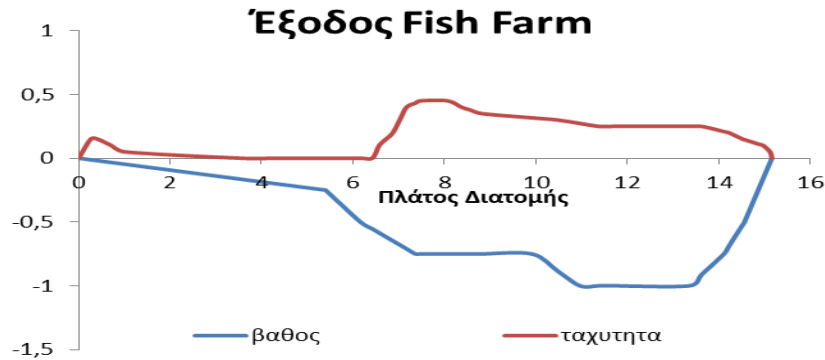
Η τελική παροχή κάθε διατομής είναι το άθροισμα των επιμέρους παροχών:

$$Q = \sum q_i = \sum (V_i * A_i) \quad (3.3-2)$$

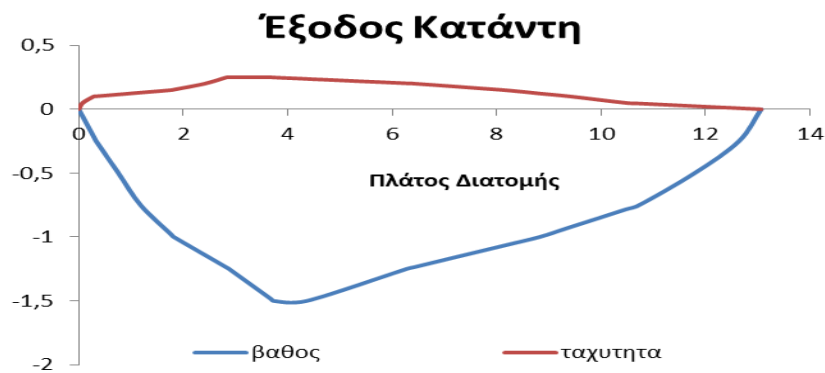
Από τους υπολογισμούς η παροχή προέκυψε στην διατομή εισόδου στα ανάντη στα $4.15 \text{ m}^3/\text{s}$, στη διατομή του fish farm στα $1.99 \text{ m}^3/\text{s}$ και στη διατομή εξόδου στα κατόντη στα $2.12 \text{ m}^3/\text{s}$.



Εικόνα 1.3-1: Βαθυμετρία και μέση ταχύτητα στην διατομή εισόδου στα ανάντη της περιοχής μελέτης



Εικόνα 3.3-2: Βαθυμετρία και μέση ταχύτητα στη διατομή εξόδου προς το fish farm



Εικόνα 3.3-3: Βαθυμετρία και μέση ταχύτητα στη διατομή εξόδου στα κατάντη της περιοχής μελέτης.

3.4. Τραχύτητα πυθμένα ποταμού και συντελεστής Manning

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

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} J^{1/3} \quad (3.3-3) \quad \text{όπου}$$

V (m/s) η μέση ταχύτητα ροής, n (s/[m^{1/3}]) ο συντελεστής τραχύτητας κατά Manning, R (m) η υδραυλική ακτίνα της διατομής και J 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 (1956) ανέπτυξε μία μέθοδο για την εκτίμηση της επίδρασης των παραπάνω παραγόντων ώστε να προσδιοριστεί η τιμή του συντελεστή τραχύτητας για το κανάλι. Για τον υπολογισμό του χρησιμοποιείται η σχέση:

$$n = (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m \quad (3.3 - 4) \quad \text{όπου}$$

n_b : μία βασική τιμή του συντελεστή n για ευθύγραμμο, ομοιόμορφο και λείο κανάλι με φυσικά υλικά,

n_1 : συντελεστής διόρθωσης για την επίδραση των ανωμαλιών του εδάφους στην κοίτη του ποταμού,

n_2 : συντελεστής που λαμβάνει υπόψη τη μεταβολή του σχήματος και του μεγέθους της διατομής του ποταμού,

n_3 : συντελεστής που λαμβάνει υπόψη εμπόδια στη ροή και

n_4 : συντελεστής διόρθωσης που λαμβάνει υπόψη τους μαιανδρισμούς του καναλιού.

Η σχέση αυτή αναφέρεται στη μετατροπή του συντελεστή τραχύτητας λαμβάνοντας υπόψη την κατάσταση που επικρατεί κατά μήκος του πυθμένα του ποταμού.

Το υπόστρωμα του πυθμένα της περιοχής μελέτης αποτελείται κυρίως από άμμο με διάσπαρτες περιοχές με χαλίκια. Επίσης, είναι γνωστό ότι στην περιοχή επικρατεί έντονη βλάστηση. 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.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται το εύρος τιμών για κάθε συντελεστή n που τελικά επιλέγεται με βάση τα χαρακτηριστικά του ποταμού (πηγή: *Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains, USGS*).

Πίνακας 3.3-0-1: Τιμές προσαρμογής συντελεστών τραχύτητας πυθμένα ποταμού σύμφωνα με την USGS.

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

Από τον υπολογισμό προκύπτει ότι το αποδεκτό εύρος του συνολικού συντελεστή Manning κυμαίνεται από 0.065 έως 0.112.

Η επιλογή των κατάλληλων συντελεστών Manning και η κατανομή τους στο πεδίο που μελετάται έγινε με βάση την βαθμονόμηση του υδροδυναμικού μοντέλου και αναλύεται παρακάτω στην εφαρμογή του.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

4.1. Γενικά

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εφαρμόζεται το υδροδυναμικό μοντέλο ανοιχτού κώδικα Telemac-2D για την προσομοίωση ροής με ελεύθερη επιφάνεια σε 2 διαστάσεις. Το μοντέλο επιλύει τις εξισώσεις συνέχειας και διατήρησης της ορμής που περιγράφουν το πεδίο ροής υδάτινων σωμάτων. Χρησιμοποιεί τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων ή διαφορικών όγκων (προκαθορισμένη μέθοδος είναι η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων), καθώς και ένα υπολογιστικό πλέγμα αποτελούμενο από τριγωνικά στοιχεία. Σε κάθε σημείο του πλέγματος, το πρόγραμμα υπολογίζει το βάθος του νερού (h) και τις 2 συνιστώσες της ταχύτητας (u , v). Μπορούν να προσομοιωθούν μη μόνιμες και μόνιμες συνθήκες ροής και να ληφθούν υπόψη τα εξής:

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

Το Telemac-2D αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο προσομοίωσης των υδάτινων συστημάτων και έχει εφαρμογή σε διάφορα πεδία στην επιστήμη του μηχανικού, όπως για παράδειγμα στη σχεδίαση λιμενικών έργων και έργων ανοιχτής θαλάσσης έργων ή τη μελέτη των επιπτώσεων ενός φράγματος ή της μεταφοράς ρύπων σε ποταμούς.

4.2. Βασικές εξισώσεις του μοντέλου

Το Telemac-2D επιλύει ταυτόχρονα τις τέσσερις υδροδυναμικές εξισώσεις Saint-Venant:

1. Εξίσωση συνέχειας:

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

2. Εξίσωση ορμής κατά x :

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

3. Εξίσωση ορμής κατά y :

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

4. Εξίσωση διατήρησης ιχνηθέτη:

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

Όπου:

h (m) το βάθος ροής

u, v (m/s) οι συνιστώσες της ταχύτητας

t (s) ο χρόνος

x, y (m) συντεταγμένες κατά την οριζόντια

g (m/s²) η επιτάχυνση της βαρύτητας

v_t, v_T (m²/s) η τυρβώδης συνεκτικότητα

Z (m) το υψόμετρο της ελεύθερης επιφάνειας

S_h (m/s) ο όρος πηγής της εξίσωσης συνέχειας

S_x, S_y (m/s²) όροι πηγής των εξισώσεων ποσότητας κίνησης

S_T ($\frac{g}{s}$) ο όρος πηγής του ιχνηθέτη

Οι άγνωστες μεταβλητές στις παραπάνω εξισώσεις είναι το βάθος νερού h , η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας u , η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας v . Οι συντεταγμένες x, y μπορούν να δοθούν είτε σε καρτεσιανό σύστημα είτε σε πολικές συντεταγμένες. Οι όροι S_x, S_y (m/s²) είναι όροι πηγής που αντιπροσωπεύουν τον αέρα, την τριβή του πυθμένα, την δύναμη Coriolis ή την πηγή της ορμής μέσα στο πεδίο.

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

$$-\frac{H_0^2}{6}\text{grad}\left[\text{div}\left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)\right] + \frac{H_0}{2}\text{grad}\left[\text{div}\left(H_0\frac{\partial u}{\partial t}\right)\right] \quad (3.2-5)$$

4.2.1. Τυρβώδης ροή

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

Ως μοντέλα τύρβης χαρακτηρίζονται οι εξισώσεις ή τα συστήματα εξισώσεων που επιτρέπουν είτε τον προσδιορισμό της τυρβώδους συνεκτικότητας, είτε γενικότερα τον προσδιορισμό των τυρβωδών τάσεων και, επομένως, καθιστούν δυνατή την επίλυση της τυρβώδους ροής.

Για την περιγραφή της τυρβώδους ροής στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται το συνηθέστερο μοντέλο k-E, όπου k είναι η τυρβώδης κινητική ενέργεια και E η

απόσβεση της τυρβώδους κινητικής ενέργειας. Για τα δύο αυτά μεγέθη το Telemac-2d λύνει τις παρακάτω εξισώσεις μεταφοράς:

Για την τυρβώδη κινητική ενέργεια k :

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

Για την απόσβεση της τυρβώδους κινητικής ενέργειας ε :

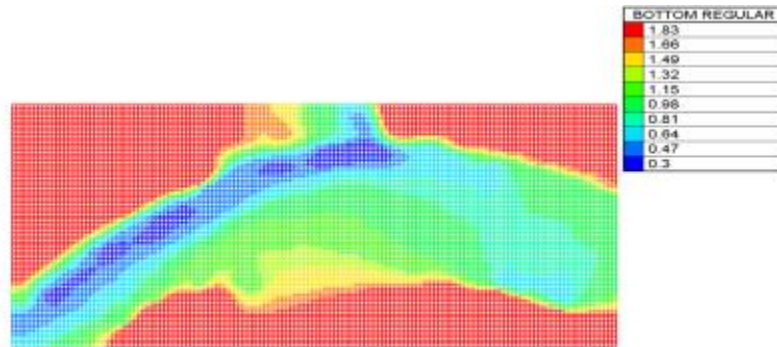
$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u \nabla \varepsilon = \frac{1}{h} \operatorname{div} \left(h \frac{v_t}{1.3} \nabla \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{k} + (1.44P - 1.92\varepsilon) - 1.44 \frac{\varepsilon}{k} G \quad (3.2-7)$$

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

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

4.3. Διαμόρφωση υπολογιστικού πλέγματος και γεωμετρίας

Για την δόμηση του υπολογιστικού πλέγματος του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα *BlueKenue* το οποίο δίνει τη δυνατότητα κατασκευής δομημένου και μη δομημένου πλέγματος. Η ανάπτυξη του μοντέλου της παρούσας μελέτης έγινε σε μη δομημένο πλέγμα με τριγωνικά στοιχεία, για το οποίο πραγματοποιείται ανεξαρτησία πλέγματος με πύκνωση των στοιχείων έως ότου να μην επηρεάζονται τα αποτελέσματα. Στη συνέχεια, κατασκευάστηκε δομημένο πλέγμα το οποίο και χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων του υδροδυναμικού, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.3-1.



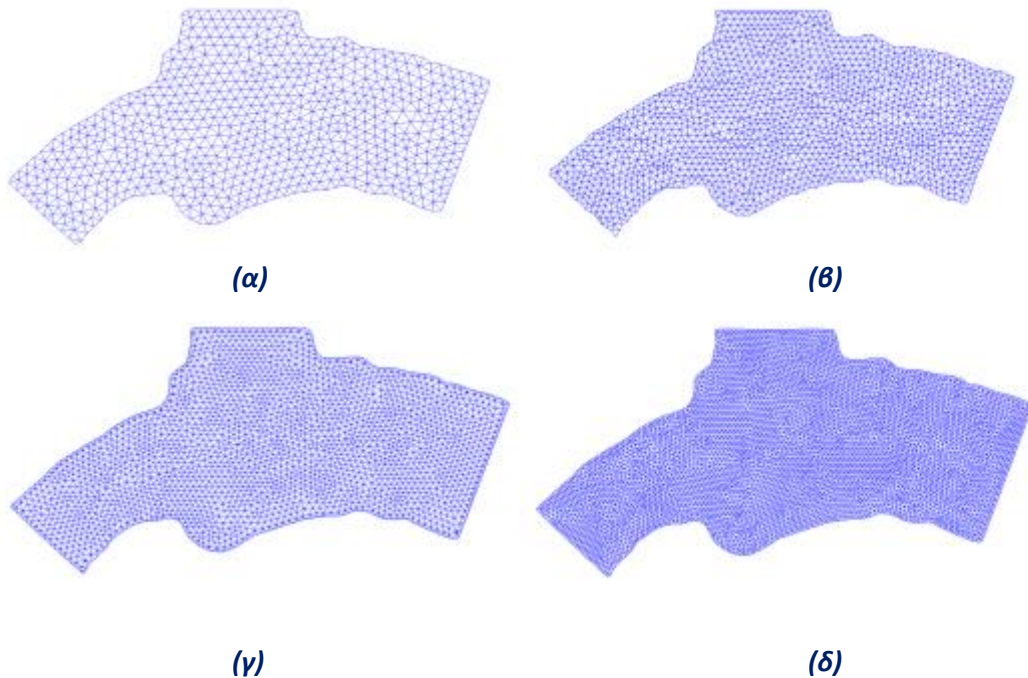
Εικόνα 2.3-1: Δομημένο πλέγμα *superfine* με απόσταση κόμβων 0.5m.

4.3.1. Ανεξαρτησία πλέγματος

Για την διασφάλιση της αντικειμενικότητας των αποτελεσμάτων κρίνεται απαραίτητη η ύπαρξη ανεξαρτησίας πλέγματος, δηλαδή η πυκνότητα των στοιχείων του πλέγματος να είναι επαρκής ώστε να μην επηρεάζει τα αποτελέσματα του μοντέλου. Κατασκευάστηκαν τέσσερα πλέγματα με διαφορετική απόσταση μεταξύ των κόμβων ώστε να μελετηθεί η επίδρασή τους στις προσομοιώσεις. Έγιναν δοκιμές με απόσταση κόμβων 1.5m, 1.0m, 0.8m, 0.5m. Στον Πίνακα 4.3-1 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του κάθε πλέγματος, δηλαδή η απόσταση μεταξύ των κόμβων του, καθώς και ο συνολικός αριθμός στοιχείων και κόμβων του.

Πίνακας 4.3-1: Χαρακτηριστικά διαφορετικών υπολογιστικών πλεγμάτων που χρησιμοποιούνται για την ανεξαρτησία πλέγματος.

Χαρακτηριστικά υπολογιστικών πλεγμάτων			
Πλέγμα	Απόσταση κόμβων	Συνολικός αριθμός στοιχείων	Συνολικός αριθμός κόμβων
Coarse	1.5m	1355	742
Medium	1.0m	3103	1648
Fine	0.8m	4913	2646
Superfine	0.5m	12565	6473

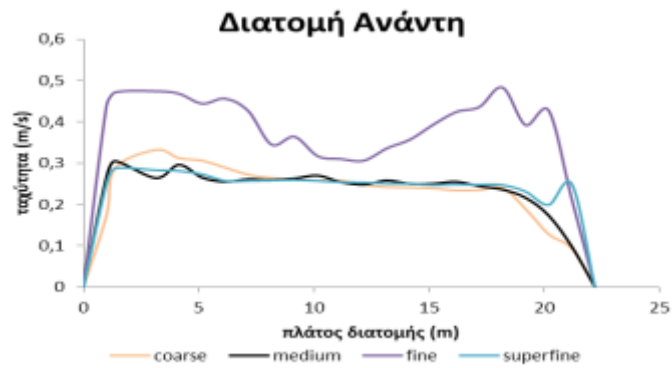


Εικόνα 4.3-1: (α) Μη δομημένο πλέγμα coarse με απόσταση κόμβων 1.5m
 (β) Μη δομημένο πλέγμα medium με απόσταση κόμβων 1.0m
 (γ) Μη δομημένο πλέγμα fine με απόσταση κόμβων 0.8m
 (δ) Μη δομημένο πλέγμα superfine με απόσταση κόμβων 0.5m

Για τον έλεγχο της ανεξαρτησίας των πλεγμάτων υπολογίζεται ο δείκτης συμφωνίας IA (*index of agreement*) και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE (*root mean square error*) μεταξύ τους. Τα προφίλ ταχυτήτων στις χαρακτηριστικές διατομές μεταξύ των διαφορετικών πλεγμάτων απεικονίζονται στα γραφήματα που ακολουθούν.

Πίνακας 4.3-0-1: Συσχέτιση (IA) και απόκλιση (RMSE) τιμών των προφίλ ταχυτήτων μεταξύ των διαφορετικών πλεγμάτων που χρησιμοποιούνται για την ανεξαρτησία πλέγματος στη διατομή εισόδου της περιοχής μελέτης.

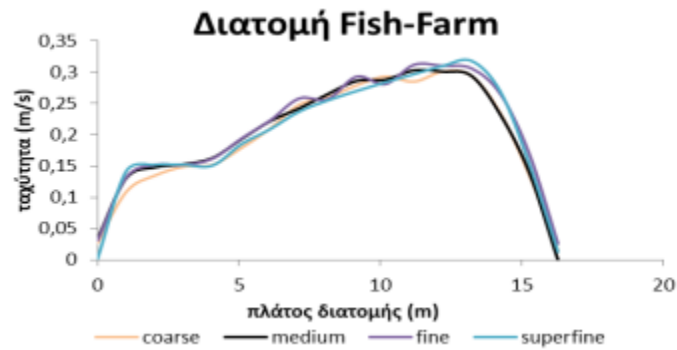
Σύγκριση πλεγμάτων (διατομή εισόδου)			
	Coarse-Medium	Medium-fine	Medium-Superfine
IA	0,893	0,285	0,939
RMSE	0,031	0,155	0,011



Εικόνα 4.3-2: Προφίλ ταχυτήτων που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις με διαφορετικά πλέγματα στη διατομή εισόδου στα ανάντη της περιοχής μελέτης.

Πίνακας 4.3-0-2: Στατιστικά σφάλματα προφίλ ταχυτήτων μεταξύ των διαφορετικών πλεγμάτων που χρησιμοποιούνται για την ανεξαρτησία πλέγματος στη διατομή εισόδου του fish farm της περιοχής μελέτης.

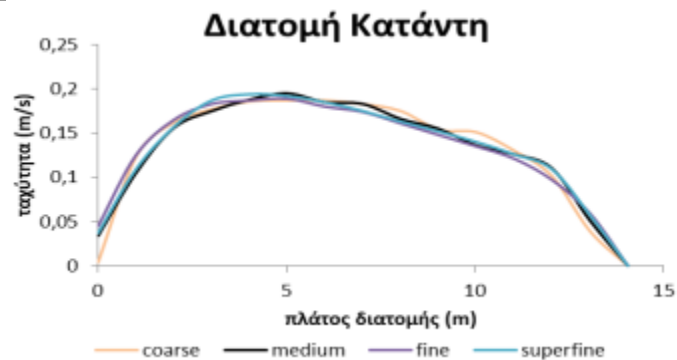
Σύγκριση πλεγμάτων (διατομή Fish Farm)			
	<i>Coarse-Medium</i>	<i>Medium-fine</i>	<i>Medium-Superfine</i>
IA	0,996	0,994	0,992
RMSE	0,011	0,014	0,016



Εικόνα 4.3-3: Προφίλ ταχυτήτων που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις με διαφορετικά πλέγματα στη διατομή εισόδου του fish farm της περιοχής μελέτης.

Πίνακας 4.3-0-3: Στατιστικά σφάλματα προφίλ ταχυτήτων μεταξύ των διαφορετικών πλεγμάτων που χρησιμοποιούνται για την ανεξαρτησία πλέγματος στη διατομή εξόδου στα κατάντη της περιοχής μελέτης.

Σύγκριση πλεγμάτων (διατομή Κατάντη)			
	<i>Coarse-Medium</i>	<i>Medium-fine</i>	<i>Medium-Superfine</i>
IA	0,987	0,991	0,997
RMSE	0,012	0,009	0,005



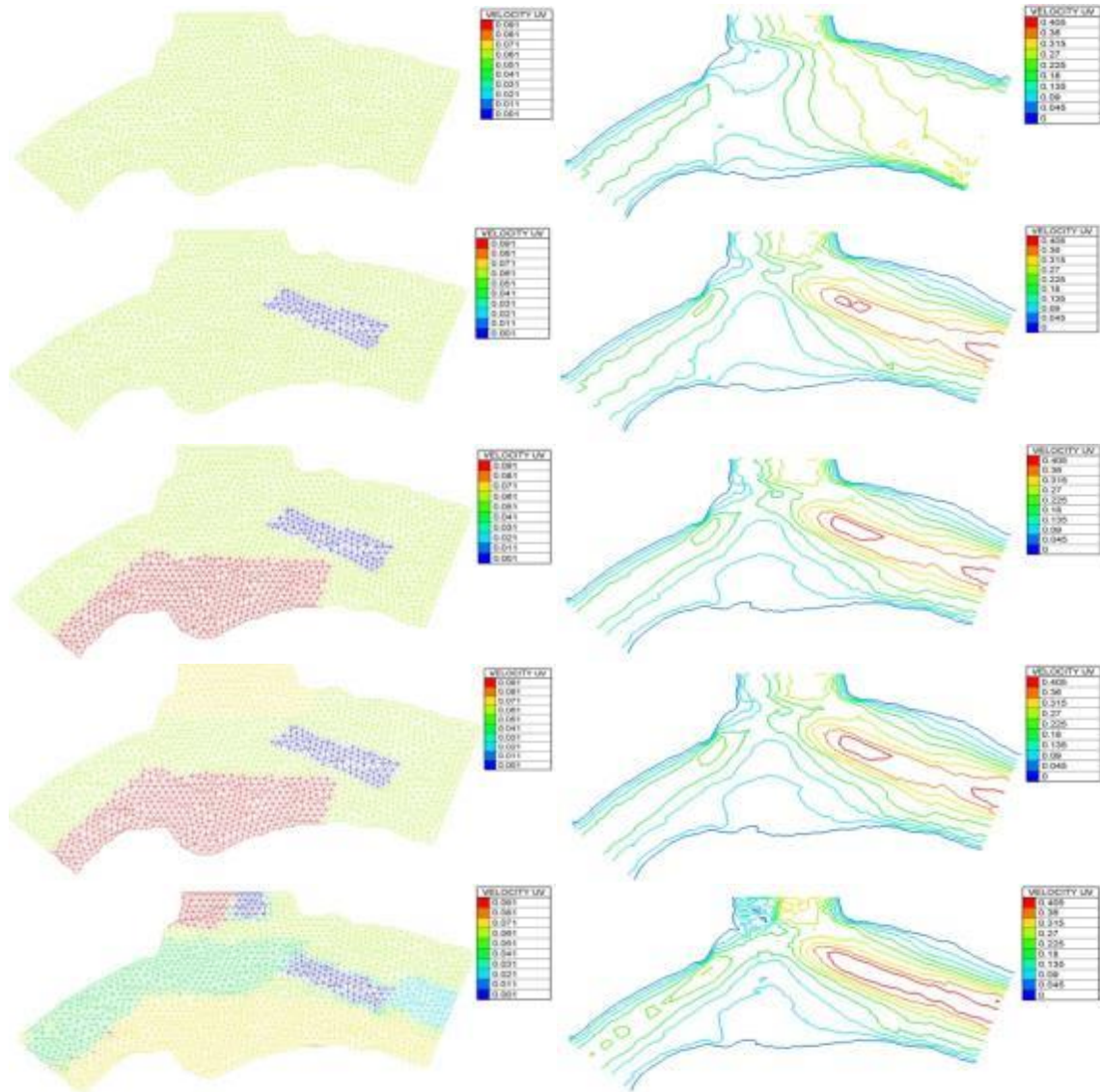
Εικόνα 4.3-4: Προφίλ ταχυτήτων που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις με διαφορετικά πλέγματα στη διατομή εξόδου στα κατάντη της περιοχής μελέτης.

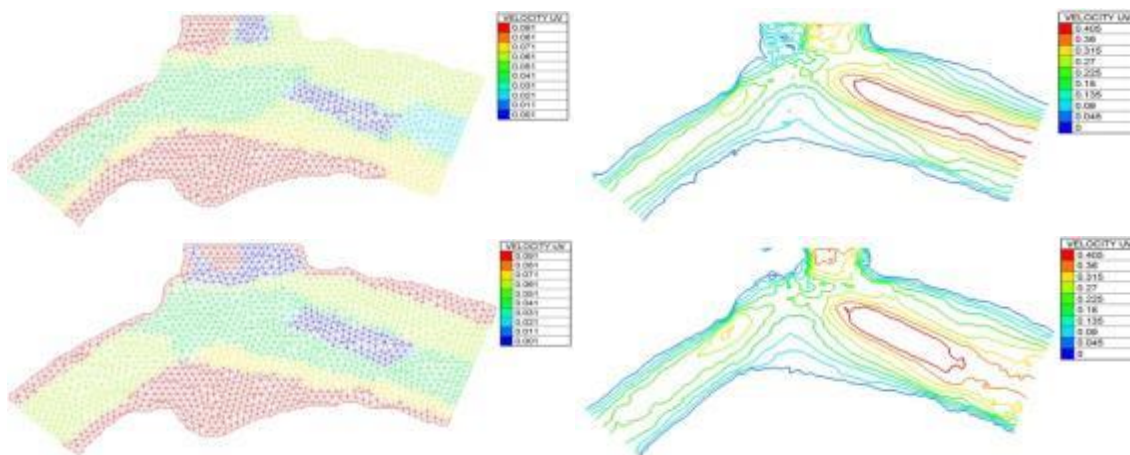
Τελικά, για την εφαρμογή του μοντέλου επιλέγεται το λεπτομερέστερο πλέγμα medium, με απόσταση κόμβων 1.0m.

4.4.Βαθμονόμηση του μοντέλου

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.

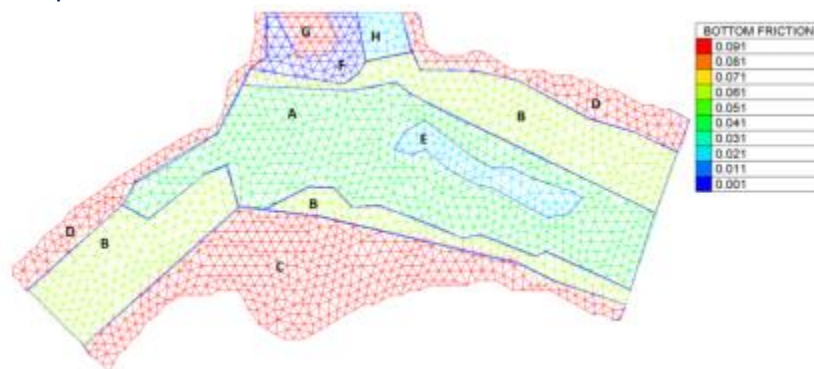
Παρακάτω, στην Εικόνα 4.4-1 φαίνονται η κατανομή των τιμών manning και οι αντίστοιχες κατανομές ταχυτήτων στο πεδίο ροής, σε χαρακτηριστικά στάδια δοκιμών.





Εικόνα 4.4-1: Βήμα-βήμα η διαδικασία επιλογής της τελικής κατανομής του συντελεστή *mapping* του μοντέλου.

Η τελική περίπτωση προσομοίωσης του υδροδυναμικού μοντέλου περιλαμβάνει ένα εύρος διαφορετικών τιμών του συντελεστή Manning, κατανεμημένες στο πεδίο όπως φαίνονται στην Εικόνα 4.4-2.



Εικόνα 4.4-2: Η τελική κατανομή των τιμών του συντελεστή Manning στο πεδίο ροής.

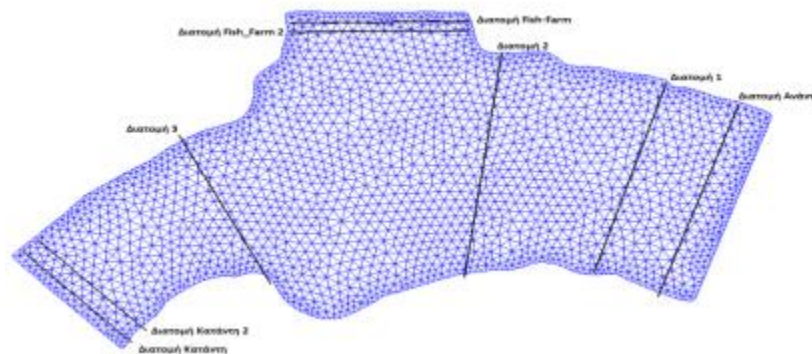
Επιλέγηκαν οι τιμές 0.05 και 0.067 για τον κυρίως άξονα του ποταμού (ζώνες A και B αντίστοιχα) και 0.03 για την περιοχή υψηλών ταχυτήτων (ζώνη E). Οι υψηλές τιμές 0.2 (ζώνες D) και στα όρια και 0.3 στις κάτω όχθες (ζώνη C) αντίστοιχα αντιπροσωπεύουν τις πολύ χαμηλές πειραματικές ταχύτητες νερού λόγω βλάστησης. Τα μικρότερα τμήματα, με τιμές 0.001 (ζώνη F) και 0.03 (ζώνη H) στην είσοδο του fish farm, εφαρμόζονται για καλύτερη προσαρμογή του προσομοιωμένου υδροδυναμικού πεδίου στο πραγματικό. Τέλος, επιλέχθηκε η εξαιρετικά υψηλή τιμή 10.0 σε μέρος της περιοχής εξόδου προς το fish farm (ζώνη G) όπου το βάθος ροής είναι ελάχιστο, ώστε να επιτευχθεί ο μηδενισμός της ταχύτητας ροής σε αυτό το σημείο. Οι υψηλές τιμές Manning έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλές τιμές ταχυτήτων και αντίστοιχα χαμηλές τιμές Manning έχουν ως αποτέλεσμα υψηλές ταχύτητες νερού.

Πίνακας 4.4-1: Συγκεντρωτικά οι τιμές του συντελεστή Manning ανά περιοχή του πεδίου ροής.

Ζώνη	Συντελεστής Manning
A	0.05

B	0.067
C	0.3
D	0.2
E	0.03
F	0.001
G	10
H	0.03

4.5. Εφαρμογή του υδροδυναμικού μοντέλου



Εικόνα 4.5-1: Οι χαρακτηριστικές διατομές που επιλέγονται για τον έλεγχο των προφίλ ταχυτήτων.

Για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων επιλέγονται οι διατομές όπως φαίνονται στην Εικόνα 4.5-1 ώστε να υπάρχει πλήρης εικόνα της διακύμανσης των προφίλ ταχυτήτων. Ακολουθούν τα προφίλ ταχυτήτων που προκύπτουν από το μοντέλο στις διατομές ελέγχου σε σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα. Στις τιμές των πειραματικών μετρήσεων των ταχυτήτων έχει συμπεριληφθεί ποσοστό σφάλματος 7% (De Doncker et al., 2007). Επίσης, υπολογίζεται ο δείκτης συμφωνίας IA (*index of agreement*) και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE (*root mean square error*) μεταξύ των πειραματικών μετρήσεων και των τιμών. Ο δείκτης συμφωνίας ο οποίος κυμαίνεται από 0 έως 1, δείχνει πόσο καλή συσχέτιση έχουν οι τιμές μεταξύ τους. Τιμές κοντά στο 1 αποδεικνύουν πολύ καλή συσχέτιση. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα, το οποίο παίρνει τιμές από 0 έως 1, υποδεικνύει την απόκλιση μεταξύ των τιμών. Τιμές κοντά στο 0 αποδεικνύουν ελάχιστη απόκλιση.

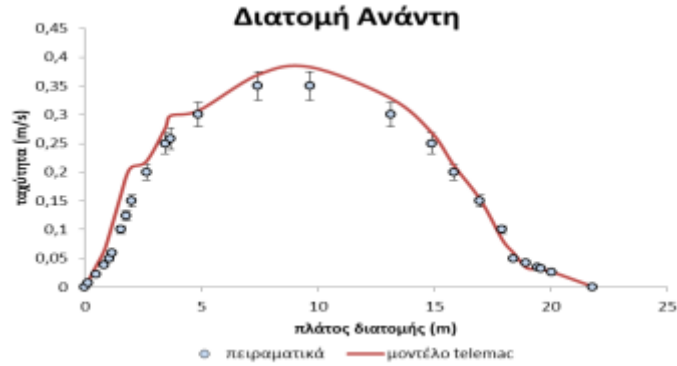
Οι εξισώσεις των IA και RMSE δίνονται ως εξής:

$$IA = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{t=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (4.5-1)$$

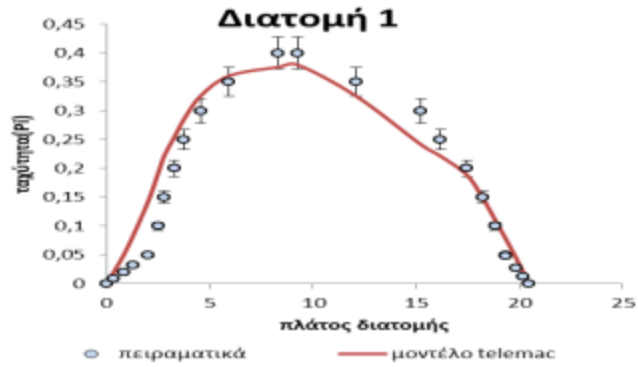
Όπου $0 \leq IA \leq 1$. Επίσης n το πλήθος των μετρήσεων, O_i οι τιμές των πειραματικών μετρήσεων και P_i οι τιμές του μοντέλου. Όσο πιο κοντά στο 1 είναι η τιμή του σφάλματος, τόσο καλύτερη συσχέτιση έχουν οι τιμές μεταξύ τους.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - A_i)^2}{n}} \quad (4.5-2)$$

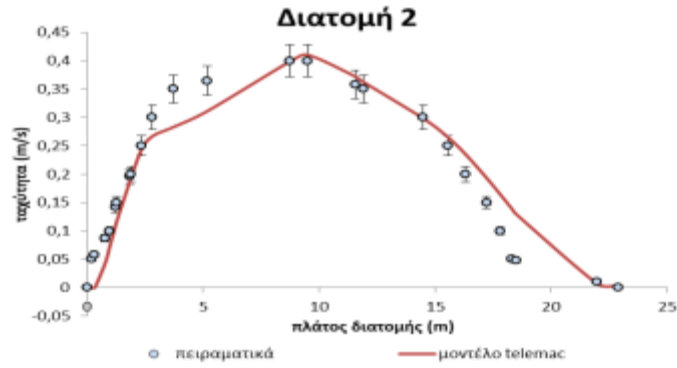
Όπου P_i η τιμή που προβλέπεται και A_i η πραγματική τιμή. Όσο πιο κοντά στο 0 είναι η τιμή του RMSE, τόσο μικρότερο σφάλμα έχουν οι τιμές μεταξύ τους. Στις Εικόνες 4.5-2 έως 4.5-9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του υδροδυναμικού μοντέλου σε σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα στις 8 διατομές.



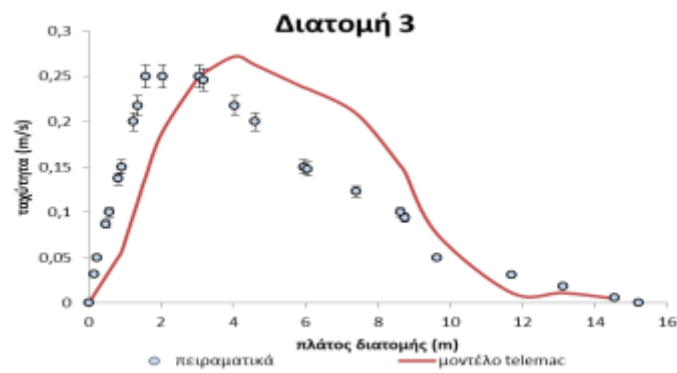
Εικόνα 4.5-2: Προφίλ ταχυτήτων πειραματικών μετρήσεων και προσομοίωσης στη διατομή εισόδου στα ανάντη της περιοχής μελέτης.



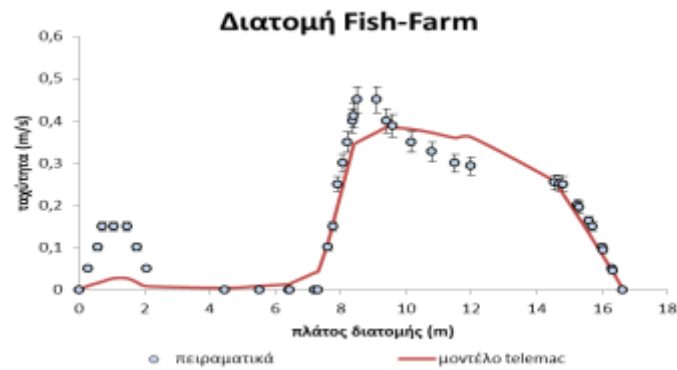
Εικόνα 4.5-3: Προφίλ ταχυτήτων πειραματικών μετρήσεων και προσομοίωσης στη διατομή ελέγχου 1 της περιοχής μελέτης.



Εικόνα 4.5-4: Προφίλ ταχυτήτων πειραματικών μετρήσεων και προσομοίωσης στη διατομή ελέγχου 2.



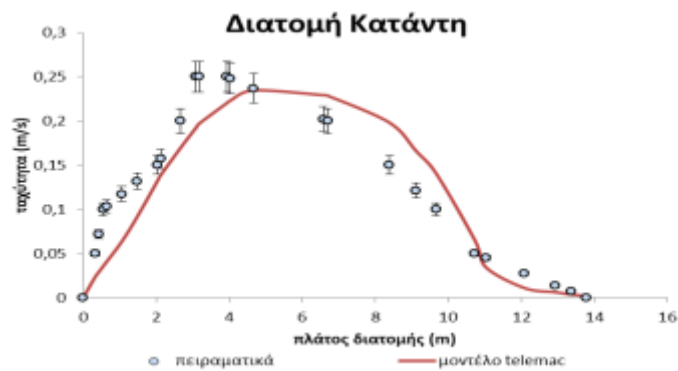
Εικόνα 4.5-5: Προφίλ ταχυτήτων πειραματικών μετρήσεων και προσομοίωσης στη διατομή ελέγχου 3.



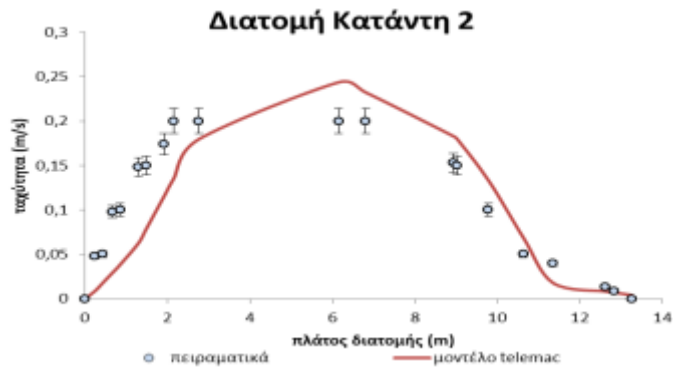
Εικόνα 4.5-6: Προφίλ ταχυτήτων πειραματικών μετρήσεων και προσομοίωσης στην πρώτη διατομή ελέγχου στην εξόδο της το fish farm



Εικόνα 4.5-7: Προφίλ ταχυτήτων πειραματικών μετρήσεων και προσομοίωσης στη δεύτερη διατομή ελέγχου στην έξοδο της το fish farm.



Εικόνα 4.5-8: Προφίλ ταχυτήτων πειραματικών μετρήσεων και προσομοίωσης στην πρώτη διατομή ελέγχου στην έξοδο στα κατάντη της περιοχής μελέτης.



Εικόνα 4.5-9: Προφίλ ταχυτήτων πειραματικών μετρήσεων και προσομοίωσης στην δεύτερη διατομή ελέγχου στην έξοδο στα κατάντη της περιοχής μελέτης.

Στον Πίνακα 4.5-1 φαίνονται συγκεντρωτικά οι δείκτες συμφωνίας και τα σφάλματα μεταξύ των πειραματικών και των προσομοιωμένων τιμών. Σε καμία διατομή δεν παρατηρείται σημαντική απόκλιση μεταξύ του μοντέλου και των πειραματικών δεδομένων.

Πίνακας 4.5-1: Συγκεντρωτικά τα σφάλματα μεταξύ των πειραματικών μετρήσεων και του υπολογιστικού μοντέλου στις διατομές ελέγχου

	IA	RMSE
Διατομή Ανάντη	0,984	0,03
Διατομή 1	0,99	0,041
Διατομή 2	0,992	0,04
Διατομή 3	0,954	0,063
Διατομή Fish-Farm	0,963	0,054
Διατομή Fish-Farm 2	0,922	0,07
Διατομή Κατάντη	0,985	0,035
Διατομή Κατάντη 2	0,967	0,044

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΙΧΘΥΩΝ

5.1. Παρουσίαση μοντέλου ιχθύος

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. (2006) και έχει αναπτυχθεί σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN95.

- 1. Εισαγωγή δεδομένων στο πρόγραμμα:** Αρχικά, εισάγεται στο μοντέλο η γεωμετρία της περιοχής μελέτης, δηλαδή το υπολογιστικό πλέγμα. Το πλέγμα που χρησιμοποιείται είναι δομημένο, δισδιάστατο και αποτελείται από 1648 κόμβους. Επίσης, δίνονται οι σταθερές αρχικές τιμές κάποιων μεταβλητών, συγκεκριμένα 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. Οι συντελεστές αυτοί παίρνουν τιμές ξεχωριστές για κάθε συμπεριφορά. Ακόμη, δίνονται ως δεδομένα το χρονικό βήμα, ο αριθμός των επαναλήψεων και χαρακτηριστικά του ιχθύος, δηλαδή το μήκος του σώματός του, οι συντελεστές των ταχυτήτων συνεχούς κολύμβησης (cruise speed), έκρηξης (boost speed) και συμπαράσυρσης (drift speed) αλλά και η αρχική θέση εκκίνησης του ιχθύος.

Τα κατώφλια ενεργοποίησης (thresholds) κάθε συμπεριφοράς καθώς και τα χαρακτηριστικά των ιχθύων μεταβάλλονται σε κάθε προσομοίωση, παίρνοντας τιμές από κανονική κατανομή. Αντίστοιχα, και το χρονικό βήμα του μοντέλου μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια κάθε προσομοίωσης, προκειμένου να υπάρξει καλύτερη προσέγγιση των πειραματικών συνθηκών.

- 2. Υπολογισμός των τοπικών επιταχύνσεων:** Στη συνέχεια εισάγεται ως δεδομένο η κατανομή ταχυτήτων στο πεδίο ροής, όπως έχει προκύψει από το υδροδυναμικό μοντέλο. Οι τοπικές επιταχύνσεις υπολογίζονται σε κάθε κόμβο του πλέγματος από τη σχέση:

$$A_M^t = \sqrt{\left(U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial x}\right)^2 + \left(U \frac{\partial V}{\partial y} + V \frac{\partial U}{\partial y}\right)^2} \quad (5.1-1)$$

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.

Κεντρικές διαφορές για τους εσωτερικούς κόμβους:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x} = \frac{U_i - U_{i-1}}{2 * DX} \quad (5.1-2)$$

Κατάντη διαφορές για τους κόμβους του αριστερά ορίου:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x} = \frac{-3 * U_i + 4 * U_{i+1} - U_{i+2}}{2 * DX} \quad (5.1-3)$$

Ανάτη διαφορές για τους κόμβους του δεξιά ορίου:

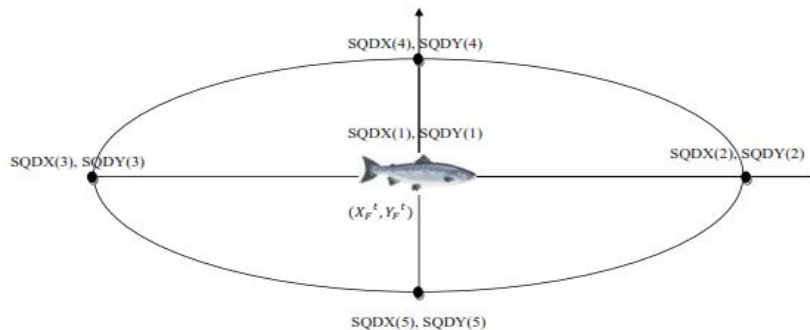
$$\frac{\partial U_i}{\partial x} = \frac{3 * U_i - 4 * U_{i-1} + U_{i-2}}{2 * DX} \quad (5.1-4)$$

Η ένταση του μεγέθους της επιτάχυνσης που αντιλαμβάνονται οι ιχθύες προσομοιώνεται με τη λογαριθμική αδιάστατη μορφή της, όπου t είναι η χρονική στιγμή υπολογισμού:

$$I_A^t = \log_{10} \frac{A_M^t}{A_0} \quad (5.1-5)$$

Όπου A_0 μία σταθερή τιμή αναφοράς.

- 3. Υπολογισμός της περιοχής αντίληψης του ιχθύος:** Στη συνέχεια προσδιορίζεται η περιοχή 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 5.1-1. 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. Στη συνέχεια ανάγονται με την εφαρμογή μητρώου στροφής-μετατόπισης στο Καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων του πεδίου ροής.



Εικόνα 3.1-1: Περιοχή αντίληψης ιχθύος (sensory ovoid).

Ο υπολογισμός των θέσεων περιλαμβάνει τον υπολογισμό της βασικής απόστασης του σημείου αισθητήρα (SPDIST), η οποία αυξάνεται κατά μια τυχαία απόσταση (RINC) και επιπλέον προστίθεται λευκός θόρυβος ως προς τις δευτερεύουσες κατευθύνσεις των σημείων αισθητήρα (RND) και έχει ως εξής:

$$SPDIST = \frac{ncoeff}{I_A} = \frac{ncoeff}{\log_{10} \frac{A_M}{A_0}} \quad (5.1-6)$$

$$RINC = 1 + RRSQD * Delta \quad (5.1-7)$$

$$RND = (2 * RRSQD - 1) * coeff_{40} \quad (5.1-8)$$

$$SQD_{X,Y} = \pm SPDIST * RINC \text{ ή } SQD_{X,Y} = \pm SPDIST * RND \quad (5.1-9)$$

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, $coeff_{40}$ ένας συντελεστής που αφορά την κλίμακα της απόκλισης των σημείων αισθητήρα από τους άξονες του ιχθύος και που στο παρόν μοντέλο παίρνει απλοποιητικά την τιμή 0 ώστε οι θέσεις των αισθητήρων να συμπίπτουν με τους άξονες του ιχθύος, $\log_{10} \frac{A_M}{A_0}$ το μέγεθος της επιτάχυνσης, όπου A_M η ελάχιστη τιμή που επηρεάζει το μέγεθος της περιοχής αντίληψης και ισούται με 0.0001 m/s^2 και A_0 επιτάχυνση με αυθαίρετη τιμή αναφοράς ίση με 10^{-6} , με $Delta$ το ποσοστό της τυχαίας αύξησης της απόστασης των θέσεων αισθητήρων που έχει εύρος τιμής από 0.1 έως 3 και στις προσομοιώσεις ισούται με 2.

- 4. Καθορισμός συμπεριφοράς:** Για την επιλογή συμπεριφοράς από τον ιχθύ κάθε χρονική στιγμή είναι απαραίτητος ο υπολογισμός του δείκτη ανίχνευσης και του συντελεστή απόφασης. Ο δείκτης ανίχνευσης (detection metric), ο οποίος βασίζεται στην 'μόλις αισθητή διαφορά' του Weber δίνεται από τον τύπο:

$$Detection \ Metric = \frac{I^t - I_a^t}{I_a^t} \quad (5.1-10)$$

$$\text{Όπου } I^t = \log_{10} \frac{A_M^t}{A_0} \quad (5.1-5) \text{ και}$$

$$I_a^t = (1 - m_{acclimatization}) * I^t + m_{acclimatization} * I_a^t \quad (5.1-11).$$

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 0-1 και A_M^t όπως αναφέρθηκε, το μέγεθος της επιτάχυνσης της ροής. 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:

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

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 (Goodwin 2004). 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:

$$P_B^t = (1 - C_{mem}) * E^t + C_{mem} * P_B^t * (t - 1) \quad (5.1-12)$$

Όπου C_{mem} είναι ο συντελεστής μνήμης για κάθε συμπεριφορά που ενσωματώνει την ποσότητα πληροφορίας του προηγούμενου χρονικού βήματος που έχει επιρροή στην επόμενη απόφαση ακολουθώντας την αντίληψη ότι τόσο η διάρκεια όσο και η ένταση της δραστηριότητας στους αισθητήριους νευρώνες του ιχθύος χρειάζεται να περάσει μια κατώτατη τιμή προκειμένου να γίνει αντιληπτή.

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

$$U_B^t = P_B^t * u_B^t \quad (5.1-13)$$

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

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

5. Υπολογισμός των συνιστωσών U_F , V_F της ταχύτητας κίνησης του ιχθύος κατά x και y ,

αντίστοιχα: Ανάλογα με το ποια συμπεριφορά έχει επιλεχθεί υπολογίζεται η ταχύτητα του ιχθύος όπου λαμβάνεται υπόψη το μήκος του ιχθύος (L_f) και οι συντελεστές των ταχυτήτων κολύμβησης κάθε περίπτωσης (ταχύτητα έκρηξης, συνεχής S_{cruise} ή συμπαρασύρσης S_{drift}). Υπολογίζεται επίσης η γωνία του ιχθύος ως προς τους άξονες X, Y ($FishangleXY$) 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):

$$FlowangleXY^t = \tan^{-1} \left(\frac{V^t}{U^t} \right) \quad (5.1-14).$$

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

Συμπεριφορά B1:

$$Speedfish^t = L_F * \left(S_{cruise} * (S_{cruise} - S_{drift}) \right) \quad (5.1-15)$$

Συμπεριφορά B2:

$$Speedfish^t = L_F * \left(S_{cruise} + RR * (S_{cruise} - S_{drift}) \right), \text{ αν } A_M^t - A_M^{t-dt} < 0 \quad (5.1-16)$$

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

$$Speedfish^t = \sqrt{U^2 + V^2} * (1 + 1.5), \text{ αν } A_M^t - A_M^{t-dt} \geq 0 \quad (5.1-17)$$

Συμπεριφορά B3:

$$Speedfish^t = L_F * S_{boost}, \text{ αν } Decision = 1 \quad (5.1-18)$$

$$Speedfish^t = Speedfish^{t-dt} * (1 - 0.025), \text{ αν } Decision > 1 \quad (5.1-19)$$

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

$$U_F^t temp = Speedfish^t * \cos(angleXY^t) \quad (5.1-20)$$

$$V_F^t temp = Speedfish^t * \sin(angleXY^t) \quad (5.1-21)$$

$$U_F^t = U_F^t temp * \cos(FishangleXY^t) - V_F^t temp * \sin(FishangleXY^t) \quad (5.1-22)$$

$$V_F^t = U_F^t temp * \sin(FishangleXY^t) + V_F^t temp * \cos(FishangleXY^t) \quad (4.1-23)$$

- 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 την παρακάτω εξίσωση. Ο εκθέτης $t+dt$ δείχνει τον υπολογισμό του σχετικού μεγέθους την τελική χρονική στιγμή του κάθε χρονικού διαστήματος των υπολογισμών.

$$X_F^{t+dt} = X_F^t + (U_F^t + U^t) * dt \quad (5.1-24)$$

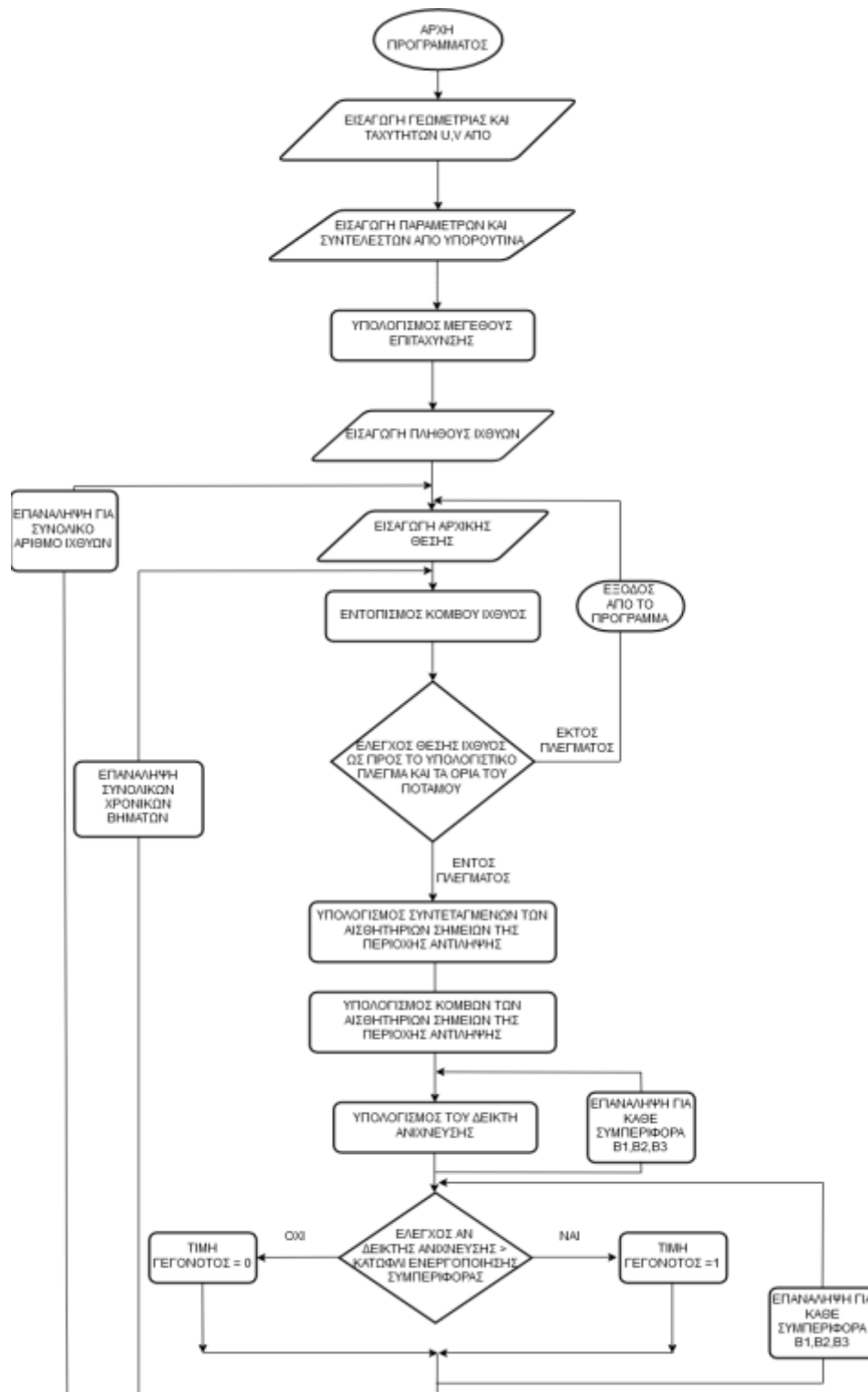
$$Y_F^{t+dt} = Y_F^t + (V_F^t + V^t) * dt \quad (5.1-25)$$

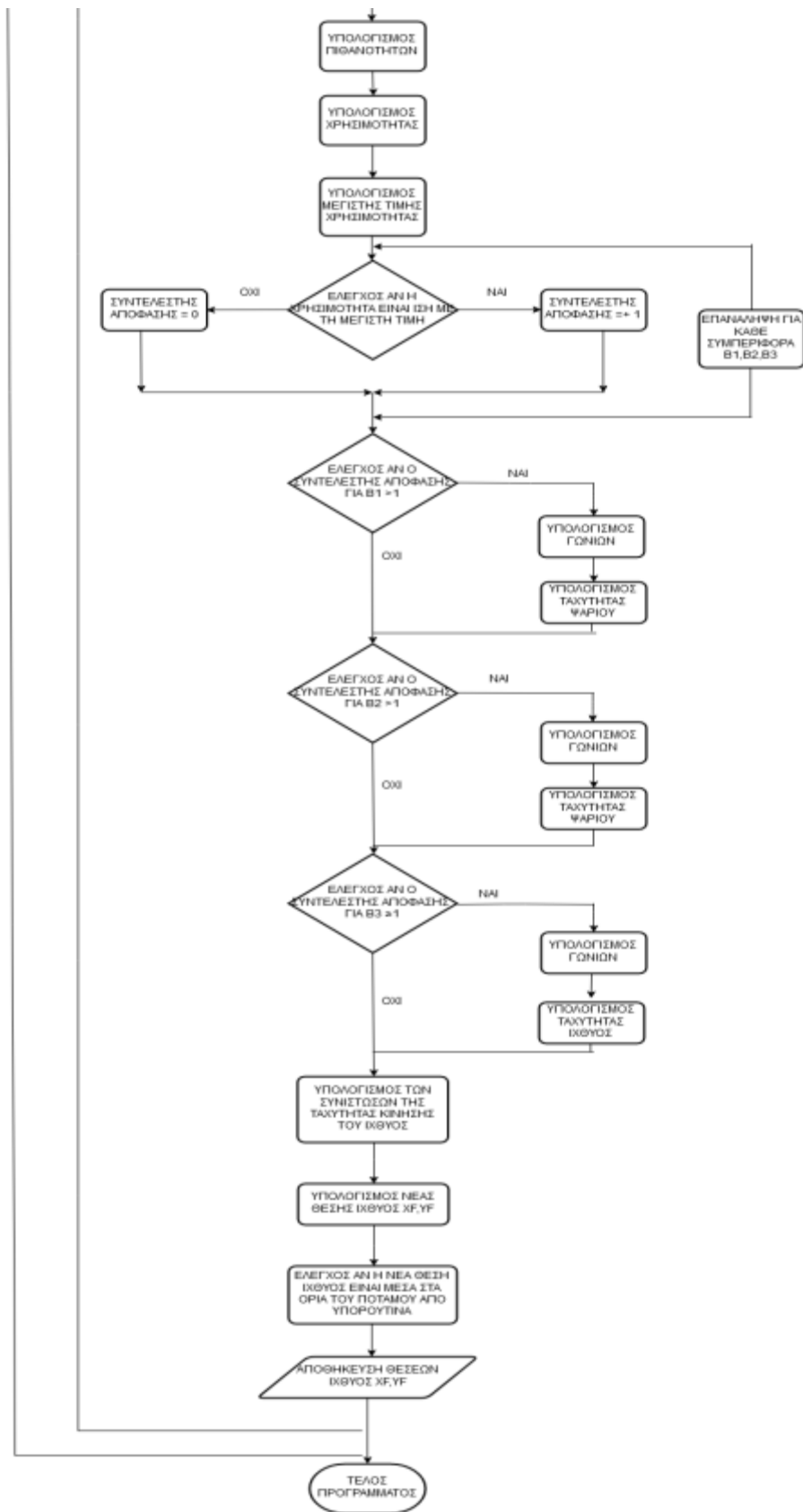
$$FishangleXY^{t+dt} = FishangleXY^t + angleXY^t \quad (5.1-26)$$

- 7. Έλεγχος θέση ιχθύος ως προς τα όρια του ποταμού:** Αφού έχει υπολογιστεί η νέα θέση του ιχθύος, το μοντέλο ελέγχει αν η θέση αυτή είναι μέσα στα όρια του υπολογιστικού πλέγματος. Στην περίπτωση που η νέα θέση βρίσκεται εκτός των ορίων του ποταμού το πρόγραμμα επιστρέφει στο προηγούμενο βήμα και υπολογίζει εκ νέου μια νέα θέση για τον ιχθύ μεταβάλλοντας ελαφρά την γωνία κίνησης του ιχθύ $angleXY^t$. Αν μετά από έναν ορισμένο αριθμό προσπαθειών η νέα θέση συνεχίζει να βρίσκεται εκτός ορίων, τότε ο ιχθύς στρέφεται προς κατεύθυνση αντίθετη από την προηγούμενη που τον οδηγεί εκτός ορίων και ταυτόχρονα του δίνεται μεγάλη ταχύτητα, τριπλάσια της αρχικά υπολογισμένης, προκειμένου να απεμπλακεί από το προβληματικό σημείο.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο είναι ένα αρχείο κειμένου .txt όπου καταγράφεται πόσες επιλογές κάθε συμπεριφοράς έχει κάνει ο κάθε ιχθύς καθώς και ένα αρχείο κειμένου .txt για κάθε ιχθύ όπου καταγράφονται για κάθε χρονικό βήμα οι UTM συντεταγμένες X,Y της θέσης στην οποία έχει βρεθεί. Το αρχείο αυτό στη συνέχεια εισάγεται στο πρόγραμμα υπολογιστικών φύλλων Excel και πολύ εύκολα αναπαρίσταται η τροχιά του ιχθύ σε διάγραμμα X και Y. Ακολουθεί διάγραμμα ροής του μοντέλου.

5.2. Διάγραμμα ροής μοντέλου ιχθύος





ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΙΧΘΥΩΝ

6.1. Γενικά

Το μοντέλο συμπεριφοράς ιχθύων δέχεται ως δεδομένα το δομημένο υπολογιστικό πλέγμα και τις οριζόντιες συνιστώσες της ταχύτητας U , V του πεδίου ροής, οι οποίες υπολογίζονται από το υδροδυναμικό μοντέλο *Telemac 2D*. Τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι ζεύγη σειρών συντεταγμένων X , Y , οι οποίες αντιπροσωπεύουν προσομοιωμένες τροχιές ιχθύων και οι οποίες συγκρίνονται με τις τροχιές των μελετώμενων ιχθύων που έχουν καταγραφεί στο πεδίο (*Svendsen et al., 2011*). Ζητούμενο αποτελεί η βαθμονόμηση του μοντέλου μέσω της προσαρμογής των τιμών των παραμέτρων οι οποίες καθορίζουν την συμπεριφορά των προσομοιωμένων ιχθύων, συγκεκριμένα τα κατώφλια ενεργοποίησης (threshold) των συμπεριφορών $B2$ και $B3$, καθώς και οι αντίστοιχοι συντελεστές μνήμης (memory coefficients) και εσωτερικές χρησιμότητες (intrinsic utilities).

Μετά την ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων του μοντέλου και αφού έχουν καθοριστεί οι παράμετροι που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του ιχθύος καθώς και το εύρος τιμών εντός του οποίου αυτές επηρεάζουν σημαντικά τα αποτελέσματα του μοντέλου, γίνεται μια προσπάθεια προσομοίωσης της συμπεριφοράς που παρουσιάζουν οι εξεταζόμενοι ιχθύες στην μελέτη των *Svendsen et al. (2011)*. Οι ιχθύες ακολουθούν κατά το μεγαλύτερο ποσοστό (66%) την ευθεία πορεία (*non-milling*) συνεχίζοντας την κατάνη μετανάστευση, ενώ ένα μικρότερο ποσοστό (34%) πραγματοποιεί κυκλικές πορείες (*milling*) εντός της περιοχής μελέτης.

6.2. Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων μοντέλου ιχθύων

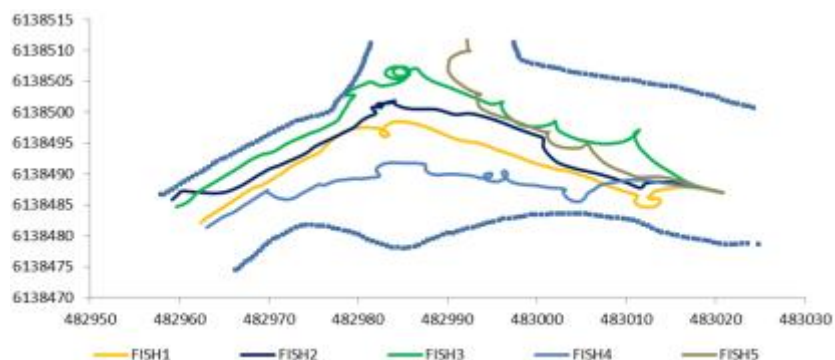
Για τον έλεγχο της επιρροής των παραμέτρων του μοντέλου στις τροχιές των ιχθύων πραγματοποιήθηκαν τρεις ομάδες δοκιμαστικών προσομοιώσεων. Στην πρώτη ομάδα (ομάδα A) έγιναν δοκιμές για διάφορες τιμές των τιμών κατωφλιού και συντελεστή μνήμης της συμπεριφοράς $B2$ ($thres(B2)$ και $CMEM(B2)$ αντίστοιχα). Στη δεύτερη ομάδα (ομάδα B) έγιναν δοκιμές για διάφορες τιμές των τιμών κατωφλιού και συντελεστή μνήμης της συμπεριφοράς $B3$ ($thres(B3)$ και $CMEM(B3)$ αντίστοιχα). Τέλος, στην Τρίτη ομάδα (ομάδα C) έγιναν δύο σετ προσομοιώσεων για διάφορες τιμές των συντελεστών $thres(B2)$ και $thres(B3)$ αντίστοιχα, έχοντας μεταβάλλει την τιμή του συντελεστή εσωτερικής χρησιμότητας της συμπεριφοράς $B2$, $IntrUtil(B2)$, από την προκαθορισμένη τιμή ($IntrUtil(B2)=0.50$) στην μέγιστη ($IntrUtil(B2)=1.00$), ενώ οι συντελεστές μνήμης ($CMEM(B2)$ και $CMEM(B3)$) παρέμειναν στις προκαθορισμένες τιμές τους. Για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων επιλέχθηκαν οι προσομοιωμένοι ιχθείς υπ' αριθμόν 61, 75, 82, 97 και 99, των οποίων οι τροχιές είναι χαρακτηριστικές των αποτελεσμάτων του μοντέλου για τις default τιμές.

Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται οι προκαθορισμένες τιμές των παραμέτρων του μοντέλου. Οι προκαθορισμένες τιμές των παραμέτρων επιλέγονται όπως αναφέρονται στην μεταπτυχιακή εργασία 'Mathematical model on simulating fish-behavior in river flows' (Παγωνόπουλος Σ., 2017) και οι οποίες έχουν βασιστεί στις αρχές του ELAM μοντέλου των Goodwin et al. (2014).

Πίνακας 5.2-1: Προκαθορισμένες (default) τιμές των παραμέτρων του μοντέλου ιχθύος.

Προκαθορισμένες τιμές μοντέλου συμπεριφοράς ιχθύων				
Παράμετρος	Συμπεριφορά	Συμβολισμός	Τιμή	Εύρος τιμών
Τιμή κατωφλιού (threshold)	B1	Thres(B1)	0.0 (σταθερή τιμή)	0-1
Τιμή κατωφλιού (threshold)	B2	Thres(B2)	0.84	0-1
Τιμή κατωφλιού (threshold)	B3	Thres(B3)	0.90	0-1
Συντελεστής μνήμης εγκλιματισμού (memory acclimatization coefficient)	B2	CMEMAC(B2)	0.99	0-1
Συντελεστής μνήμης εγκλιματισμού (memory acclimatization coefficient)	B3	CMEMAC(B3)	0.95	0-1
Συντελεστής μνήμης συμπεριφοράς (memory behavior coefficient)	B1	CMEM(B1)	1.0	0-1
Συντελεστής μνήμης συμπεριφοράς (memory behavior coefficient)	B2	CMEM(B2)	0.99	0-1
Συντελεστής μνήμης συμπεριφοράς (memory behavior coefficient)	B3	CMEM(B3)	0.998	0-1
Εσωτερική χρησιμότητα συμπεριφοράς (intrinsic utility)	B1	CMEM(B1)	1.0	0-1
Εσωτερική χρησιμότητα συμπεριφοράς (intrinsic utility)	B2	IntrUtil(B2)	0.5	0-1
Εσωτερική χρησιμότητα συμπεριφοράς (intrinsic utility)	B3	IntrUtil(B3)	1.0	0-1

Στην Εικόνα 5.2-1 φαίνονται οι τροχιές των 5 ψαριών που επιλέχθηκαν για τις default τιμές του Πίνακα 5.2-1:



Εικόνα 5.2-4: Τροχιές ψαριών για default τιμές $\text{Thres}(B2)=0.84$, $\text{CMEM}(B2)=0.99$, $\text{Thres}(B3)=0.89$, $\text{CMEM}(B3)=0.99$

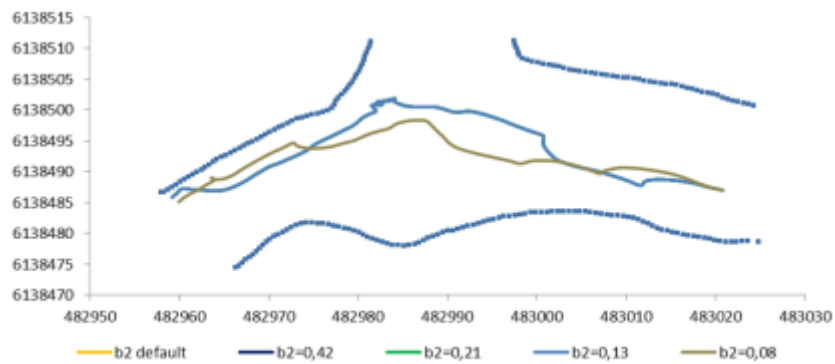
ΟΜΑΔΑ Α

Η πρώτη ομάδα δοκιμών περιλαμβάνει 4 σετ προσομοιώσεων. Κατά το πρώτο σετ (A1), έγιναν προσομοιώσεις με την default τιμή της παραμέτρου $\text{CMEM}(B2)$, και 5 διαφορετικές τιμές της παραμέτρου $\text{thres}(B2)$ [$\text{thres}(B2)=0.84, 0.42, 0.21, 0.13, 0.08$]. Στη συνέχεια οι προσομοιώσεις επαναλήφθηκαν μειώνοντας διαδοχικά την τιμή της παραμέτρου $\text{CMEM}(B2)$ κατά 25% (σετ προσομοιώσεων A2, A3, A4). Οι τιμές των παραμέτρων που αφορούν την συμπεριφορά B3, $\text{thres}(B3)$ και $\text{CMEM}(B3)$, παρέμειναν σταθερές στις default τιμές τους, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2. Ενδεικτικές τροχιές που προέκυψαν για κάθε σετ παρουσιάζονται στις Εικόνες 5.2-2 έως 5.2-5.

Πίνακας 5.2-2: Τιμές των παραμέτρων κατά τις δοκιμές της ομάδας A

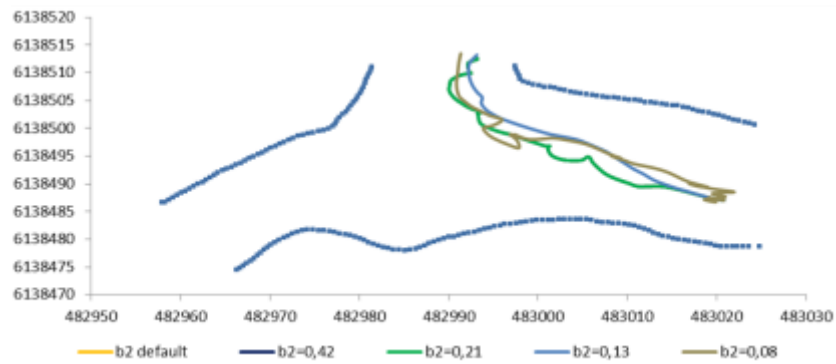
α/α	ομάδα	Σκοπός ομάδας	Σετ	thresB2	thresB3	CMEMB2	CMEMB3	IntrUtilB2
1	A	Έλεγχος των παραμέτρων Thres(B2) και CMEMB(B2)	A1	0,84	0,89	0,99	0,998	0,5
2				0,42				
3				0,21				
4				0,13				
5				0,08				
6			A2	0,84	0,89	0,75	0,998	0,5
7				0,42				
8				0,21				
9				0,13				
10				0,08				
11			A3	0,84	0,89	0,5	0,998	0,5
12				0,42				
13				0,21				
14				0,13				
15				0,08				
16			A4	0,84	0,89	0,25	0,998	0,5
17				0,42				
18				0,21				
19				0,13				
20				0,08				

A1. CMEMB(B2) = 0.99



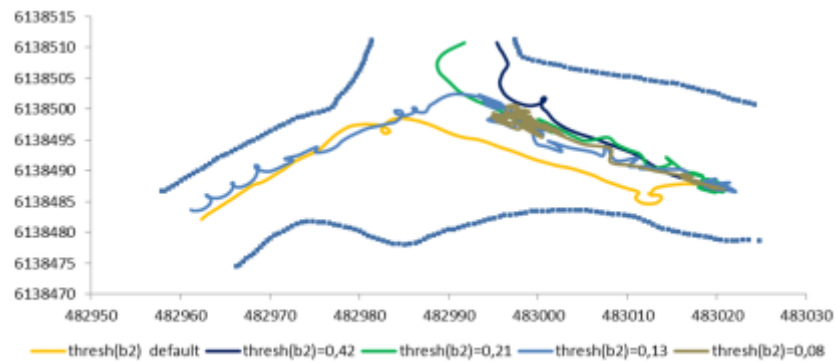
Εικόνα 5.2-5: Fish 2, Ομάδα A, Σετ A1

A2. CMEM(B2) = 0.75



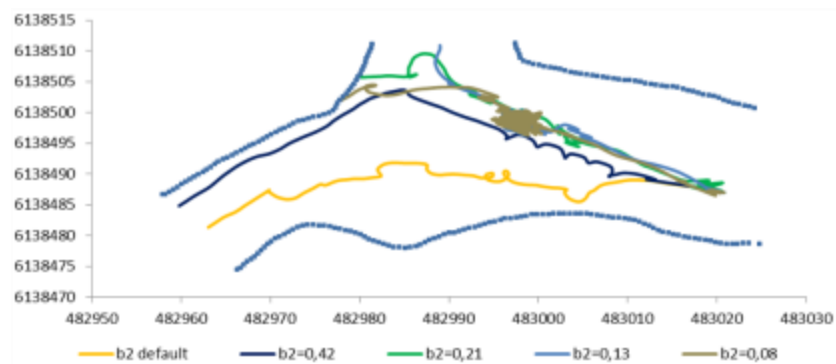
Εικόνα 5.2-6: Fish 5, Ομάδα Α, Σει Α2

A3. CMEM(B2)=0.5



Εικόνα 5.2-7: Fish 1, Ομάδα Α, Σει Α3

A4. CMEM(B2)=0.25



Εικόνα 5.2-8: Fish 4, Ομάδα Α, Σει Α4

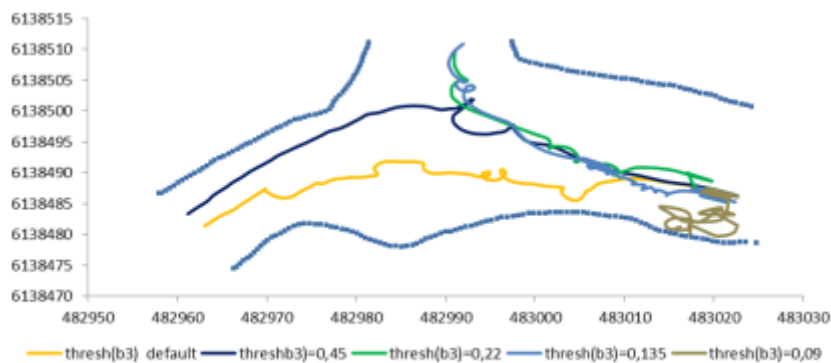
ΟΜΑΔΑ Β

Η δεύτερη ομάδα δοκιμών περιλαμβάνει επίσης 4 σεντ προσομοιώσεων. Κατά το πρώτο σεντ (A1), έγιναν προσομοιώσεις με την default τιμή της παραμέτρου CMEM(B3), και 5 διαφορετικές τιμές της παραμέτρου thres(B3) [thres (B3)= 0.89, 0.45, 0.22, 0.135, 0.09]. Στη συνέχεια οι προσομοιώσεις επαναλήφθηκαν μειώνοντας διαδοχικά την τιμή της παραμέτρου CMEM(B3) κατά 25% (σεντ προσομοιώσεων A2, A3, A4). Οι τιμές των παραμέτρων που αφορούν την συμπεριφορά B2, thres(B2) και CMEM(B2), παρέμειναν σταθερές στις default τιμές τους, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.2-3. Ενδεικτικές τροχιές που προέκυψαν για κάθε σεντ παρουσιάζονται στις Εικόνες 5.2-6 έως 5.2-9.

Πίνακας 5.2-0: Τιμές των παραμέτρων κατά τις δοκιμές της ομάδας Β

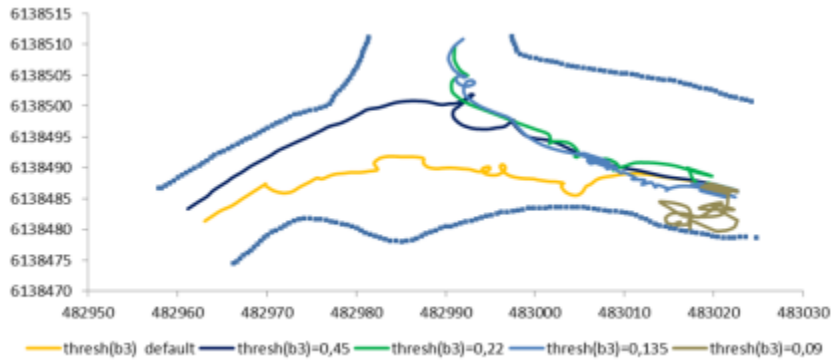
α/α	ομάδα	Σκοπός ομάδας	Σεντ	thresB2	thresB3	CMEMB2	CMEMB3	IntrUtilB2	
21	B	Έλεγχος των παραμέτρων Thres(B3) και CMEM(B3)	B1	0,84	0,89	0,99	0,998	0,5	
22					0,45				
23					0,22				
24					0,135				
25					0,09				
26			B2	0,84	0,89	0,89	0,99	0,75	0,5
27						0,45			
28						0,22			
29						0,135			
30						0,09			
31			B3	0,84	0,89	0,89	0,99	0,5	0,5
32						0,45			
33						0,22			
34						0,135			
35						0,09			
36			B4	0,84	0,89	0,89	0,99	0,25	0,5
37						0,45			
38						0,22			
39						0,135			
40						0,09			

B1. CMEM(B3)=0.998



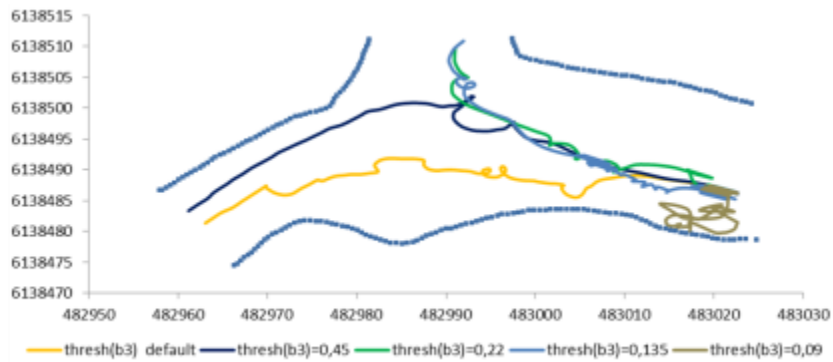
Εικόνα 5.2-9: Fish 4, Ομάδα Β, Σεντ Β1

B2. CMEM(B3)=0.75



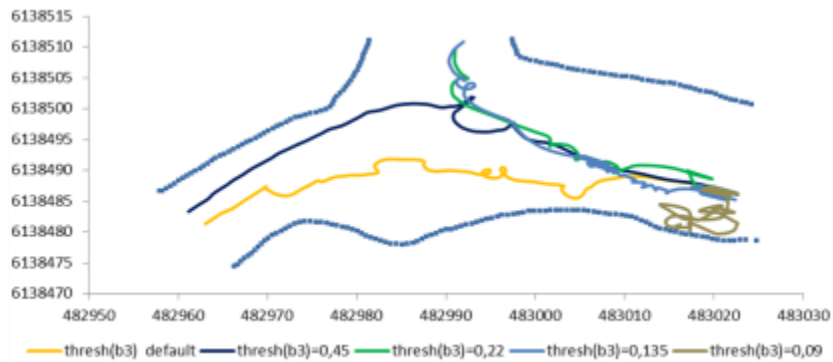
Εικόνα 5.2-10: Fish 4, Ομάδα Β, Σετ Β2

B3. CMEM(B3)=0.50



Εικόνα 5.2-11: Fish 4, Ομάδα Β, Σετ Β3

B4. CMEM(B3)=0.25



Εικόνα 5.2-12: Fish 4, Ομάδα Β, Σετ Β4

ΟΜΑΔΑ C

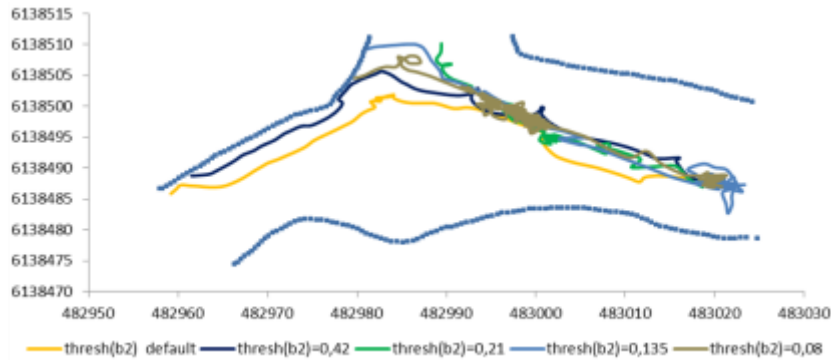
Η δεύτερη ομάδα δοκιμών περιλαμβάνει 2 σετ προσομοιώσεων για διάφορες τιμές των συντελεστών $thres(B2)$ και $thres(B3)$ αντίστοιχα, με την τιμή του συντελεστή εσωτερικής χρησιμότητας της συμπεριφοράς B2, $IntrUtil(B2)$, να είναι ίση με την

μονάδα. Οι συντελεστές μνήμης CMEM(B2) και CMEM(B3) παρέμειναν σταθεροί στις default τιμές τους όπως φαίνεται στον πίνακα 5.2-4. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις Εικόνες 5.2-10 και 5.2-11.

Πίνακας 5.2-4: Τιμές των παραμέτρων κατά τις δοκιμές της ομάδας C

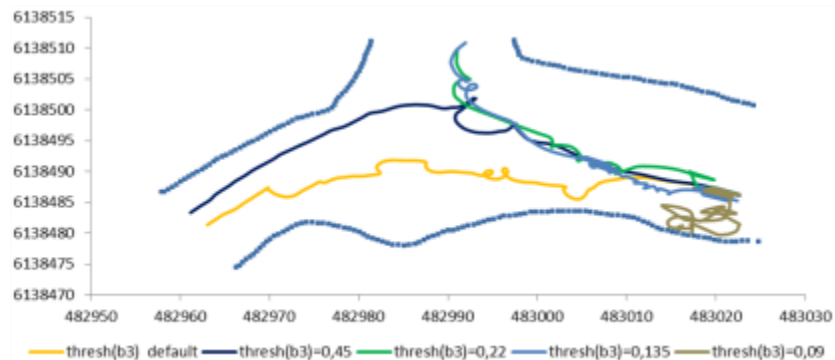
α/α	ομάδα	Σκοπός ομάδας	Σετ	thresB2	thresB3	CMEMB2	CMEMB3	IntrUtilB2
41	C	Έλεγχος των παραμέτρων Thres(B2) και IntrUtil(B2)	C1	0,84	0,89	0,99	0,998	1,0
42				0,42				
43				0,21				
44				0,13				
45				0,08				
46		Έλεγχος των παραμέτρων Thres(B3) και IntrUtil(B2)	C2	0,84	0,89	0,99	0,998	1,0
47					0,45			
48					0,22			
49					0,135			
50					0,09			

C1. IntrUtil(B2)=1.00, CMEM(B2)=0.99



Εικόνα 5.2-13: Fish 2, Ομάδα C, Σετ C1

C2. IntrUtil(B2)=1.00, CMEM(B3)=0.998



Εικόνα 5.2-14: Fish 4, Ομάδα C, Σετ C1

Από την ανάλυση ευαισθησίας που αφορά τις παραμέτρους της συμπεριφοράς B2 (ομάδα A) συμπεραίνεται ότι οι συντελεστές Thres(B2) και CMEM(B2) λειτουργούν σε συνδυασμό. Πράγματι, για πολύ μεγάλες τιμές του συντελεστή μνήμης

[CMEM(B2)=0,99] η μείωση του $\text{thres}(B2)$ δεν προκαλεί αλλαγές στην τροχιά των ιχθύων παρά μόνο για πολύ μικρές τιμές (σετ δοκιμών A1). Αντίθετα, για μειωμένες τιμές του συντελεστή μνήμης [σετ A2, CMEM(B2)=0,75] η μείωση της τιμής του $\text{thres}(B2)$ επιδρά σημαντικότερα στις τροχιές των ιχθύων. Για πολύ μικρές τιμές του CMEM(B2) (σετ A3 και A4), ακόμα και μικρή μείωση του $\text{thres}(b2)$ επηρεάζει σημαντικά το μοντέλο. Από την ανάλυση ευαισθησίας που αφορά τις παραμέτρους της συμπεριφοράς B3 (ομάδα B) συμπεραίνεται ότι Η τιμή του συντελεστή $\text{thres}(B3)$ είναι η κρίσιμη για την εμφάνιση της συμπεριφοράς B3 και συνεπώς οι αλλαγές στην τιμή της προκαλούν σημαντικές αλλαγές στην τροχιά των ιχθύων (σετ B1). Αντίθετα, οι τροχιές παραμένουν ανεπηρέαστες από την μείωση της τιμής του συντελεστή μνήμης για την συμπεριφορά B3 (σετ δοκιμών B2, B3 και B4). Από την ανάλυση ευαισθησίας που αφορά την εσωτερική χρησιμότητα της συμπεριφοράς B2 (ομάδα C) συμπεραίνεται ότι Η αύξηση της τιμής του συντελεστή εσωτερικής χρησιμότητας (IntrUtil) της συμπεριφοράς B2 οδηγεί σε πολύ μεγαλύτερη ευαισθησία των αποτελεσμάτων στην αλλαγή της τιμής του κατωφλίου ενεργοποίησης της συμπεριφοράς B2 ($\text{thres}(B2)$). Αντίθετα, όπως ήταν αναμενόμενο, δεν σχετίζεται με την συμπεριφορά B3 και το κατώφλι ενεργοποίησής της [$\text{thres}(B3)$].

6.3. Εφαρμογή του μοντέλου ιχθύος στην περιοχή μελέτης

Μετά από την ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων του μοντέλου συμπεριφοράς ιχθύων, έγινε εφαρμογή και βαθμονόμηση του μοντέλου προκειμένου να προσομοιωθεί η συμπεριφορά πραγματικών ιχθύων στο υπό εξέταση πεδίο ροής, όπως αυτή περιγράφεται στην μελέτη των Svendsen et al. (2011).

Στη μελέτη των Svendsen et al. (2011) το σύνολο των εξεταζόμενων ιχθύων είναι 61, μήκους $19,1 \pm 1,1$ εκατοστών. Το 67,2% από αυτούς (41 ιχθύες) πιάστηκαν στην παγίδα τύπου Wolf που είχε τοποθετηθεί κατάντη της περιοχής μελέτης, ενώ το υπόλοιπο 32,7% (20 ιχθύες) δεν πιάστηκαν στην παγίδα. Επιπλέον, το 65,9% των μελετώμενων ιχθύων ακολούθησε ευθεία (*non-milling*) πορεία, ενώ το υπόλοιπο 34,1% παρουσίασε κυκλική συμπεριφορά (*milling*).

Σκοπός της βαθμονόμησης του μοντέλου είναι η προσομοίωση της συμπεριφοράς ιχθύων της μελέτης των Svendsen et al. (2011), όπου το 66% του συνόλου θα ακολουθεί ευθεία πορεία και το 34% θα παρουσιάζει κυκλική συμπεριφορά. Επιπλέον, το 67% των προσομοιωμένων ιχθύων πρέπει να εξέρχεται της περιοχής μελέτης συνεχίζοντας την πορεία του κατάντη του ποταμού, ενώ το 33% να εισέρχεται στην περιοχή του Jedsted Mill Fish Farm.

Οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου επιλέχθηκαν όπως φαίνονται στον Πίνακα 5.3-1 μετά από δοκιμές, έχοντας υπ' όψιν τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας. Για ρεαλιστικότερα αποτελέσματα επιλέχθηκε οι μεταβλητές thresholds και το μήκος του κάθε προσομοιωμένου ιχθύ καθώς και το χρονικό βήμα του μοντέλου να έχουν τιμές μεταβαλλόμενες εντός ενός εύρους τιμών, ακολουθώντας την κανονική κατανομή. Οι

θέσεις εκκίνησης των ιχθύων επιλέγονται από ένα νέφος σημείων κατά μήκος της διατομής εισόδου της περιοχής μελέτης.

Πίνακας 5.3-1: Τελικές τιμές παραμέτρων κατά την εφαρμογή του μοντέλου ιχθύος

Παράμετρος	Εύρος τιμών
Thres(B2)	0,20±0,10
Thres(B3)	0,50*Thres(B2) + [0,00 , 0,30]
CMEM(B2)	0,75
CMEM(B3)	0,998
IntrUtil(B2)	1,00
IntrUTIL(B3)	1,00
Μήκος Ιχθύος	19,10±1,10
DT	2,00±1,00

Κατά την εφαρμογή του μοντέλου πραγματοποιήθηκαν συνολικά 100 προσομοιώσεις ιχθύων τα αποτελέσματα των οποίων φαίνονται συνοπτικά στον Πίνακα 5.3-2, σε αντιπαραβολή με τα πειραματικά δεδομένα της μελέτης των Svendsen et al. (2011).

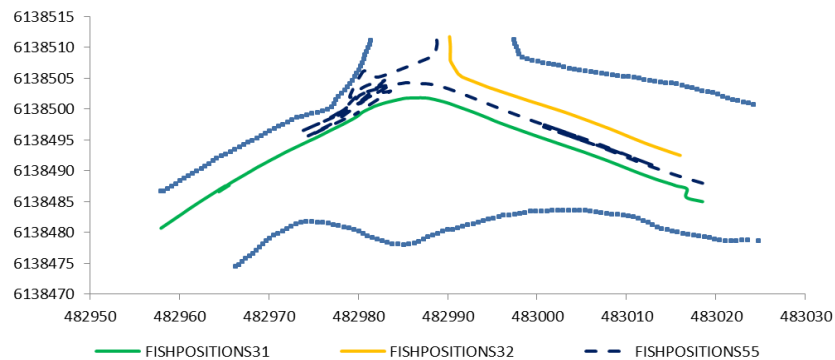
Πίνακας 5.3-2: Σύγκριση πειραματικών δεδομένων και αποτελεσμάτων του μοντέλου

	Σημείο εξόδου		Συμπεριφορά	
	καταντη	fish farm	non-milling	milling
Αποτελέσματα μοντέλου	60%	40%	71%	29%
Πειραματικά δεδομένα	67%	33%	66%	34%

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται κάποιες ενδεικτικές προσομοιωμένες τροχιές καθώς και οι αντίστοιχες συμπεριφορές της οποίες επέλεξαν οι ιχθύες κατά την διάρκεια της διαδρομής τους.

Πίνακας 5.3-3: Οι επιλογές συμπεριφοράς των ιχθύων 31,32 και 35 του μοντέλου συμπεριφοράς σε απόλυτο αριθμό και ποσοστό %

Αριθμός ιχθύος	B1		B2		B3	
	επιλογή συμπεριφοράς	ποσοστό %	επιλογή συμπεριφοράς	ποσοστό %	επιλογή συμπεριφοράς	ποσοστό %
Fish31	47	90,38%	5	9,62%	0	0,00%
Fish32	19	100,00%	0	0,00%	0	0,00%
Fish55	70	83,33%	1	1,19%	13	15,48%

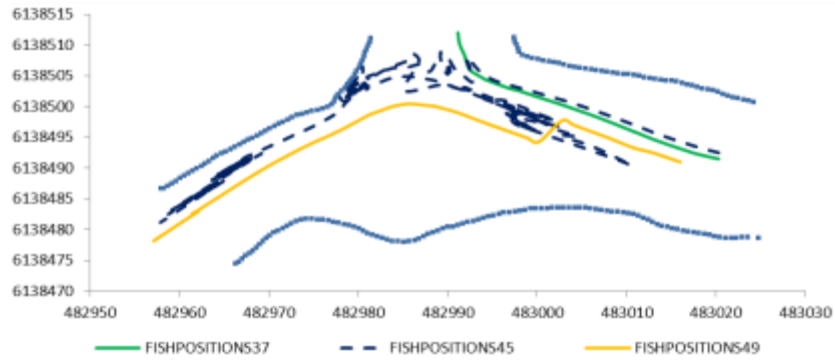


Εικόνα 5.3-1: Προσομοιωμένες τροχιές των ιχθύων 31, 32 και 35 του μοντέλου συμπεριφοράς

Παρατηρούμε ότι ο αριθμός των επιλογών της συμπεριφοράς B2 που κάνει ο προσομοιωμένος ιχθύς Fish31 είναι μικρός (5 επιλογές), συνεπώς δεν επηρεάζεται σημαντικά η τροχιά, ενώ συμπεριφορά B3 δεν επιλέγεται καθόλου. Αντίστοιχα, από τον Fish32 δεν επιλέγονται οι συμπεριφορές B2 και B3, συνεπώς η τροχιά παραμένει ευθύγραμμη και ακολουθεί την ροή του ποταμού προς τα κατάντη. Αντίθετα, η επιλογή της συμπεριφοράς B3 οδηγεί σε απότομες αλλαγές (milling) στην τροχιά του Fish55.

Πίνακας 5.3-4: Οι επιλογές συμπεριφοράς των ιχθύων 37, 45 και 49 του μοντέλου συμπεριφοράς σε απόλυτο αριθμό και ποσοστό %

Αριθμός ιχθύος	B1		B2		B3	
	επιλογή συμπεριφοράς	ποσοστό %	επιλογή συμπεριφοράς	ποσοστό %	επιλογή συμπεριφοράς	ποσοστό %
Fish37	25	100,00%	0	0,00%	0	0,00%
Fish45	165	67,90%	35	14,40%	43	17,70%
Fish49	23	100,00%	0	0,00%	0	0,00%

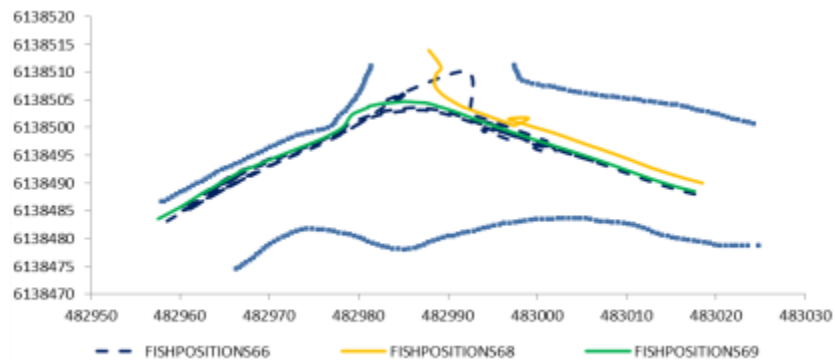


Εικόνα 15-2: Προσομοιωμένες τροχιές των ιχθύων 37, 45 και 49 του μοντέλου συμπεριφοράς

Παρατηρούμε ότι οι προσομοιωμένοι ιχθύες 37 και 49 οι οποίοι δεν επιλέγουν τις συμπεριφορές B2 και B3 ακολουθούν ευθείες τροχιές προς τα κατάντη και την διατομή εξόδου προς το fish farm αντίστοιχα. Αντίθετα, κατά την προσομοίωση του fish45 επιλέγονται σε μεγάλο ποσοστό οι συμπεριφορές B2 και B3, προκαλώντας έντονη κυκλική τροχιά (milling).

Πίνακας 5.3-5: Οι επιλογές συμπεριφοράς των ιχθύων 66, 68 και 69 του μοντέλου συμπεριφοράς σε απόλυτο αριθμό και ποσοστό %

Αριθμός ιχθύος	B1		B2		B3	
	επιλογή συμπεριφοράς	ποσοστό %	επιλογή συμπεριφοράς	ποσοστό %	επιλογή συμπεριφοράς	ποσοστό %
Fish66	97	73,48%	17	12,88%	18	13,64%
Fish68	20	83,33%	4	16,67%	0	0,00%
Fish69	59	100,00%	0	0,00%	0	0,00%



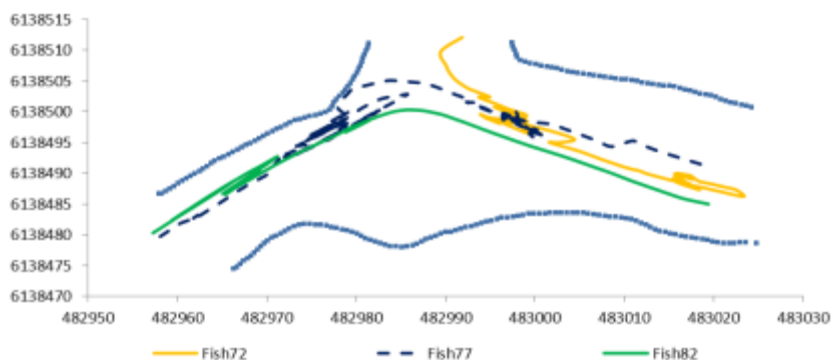
Εικόνα 5.3-3: Προσομοιωμένες τροχιές των ιχθύων 66, 68 και 69 του μοντέλου συμπεριφοράς

Στην περίπτωση του προσομοιωμένου ιχθύος fish66 η επιλογή της συμπεριφοράς B2 προκαλεί κυκλική τροχιά (milling), χωρίς όμως πολλές απότομες αλλαγές προσανατολισμού. Ενώ αντίθετα η τροχιά του fish 68 κατά την οποία συμπεριφορά B2 επιλέγεται λίγες φορές (4 επιλογές), παραμένει κατά βάση ανεπηρέαστη. Ο fish69 δεν

επιλέγει μόνο την συμπεριφορά B1 και συνεπώς ακολουθεί ομαλή πορεία προς τα κατάντη.

Πίνακας 5.3-6: Οι επιλογές συμπεριφοράς των ιχθύων 72, 77 και 82 του μοντέλου συμπεριφοράς σε απόλυτο αριθμό και ποσοστό %

Αριθμός ιχθύος	B1		B2		B3	
	επιλογή συμπεριφοράς	ποσοστό %	επιλογή συμπεριφοράς	ποσοστό %	επιλογή συμπεριφοράς	ποσοστό %
Fish72	31	39,74%	47	60,26%	0	0,00%
Fish77	105	62,50%	41	24,40%	22	13,10%
Fish82	70	90,91%	0	0,00%	7	9,09%



Εικόνα 5.3-4: Προσομοιωμένες τροχιές των ιχθύων 72, 77 και 82 του μοντέλου συμπεριφοράς

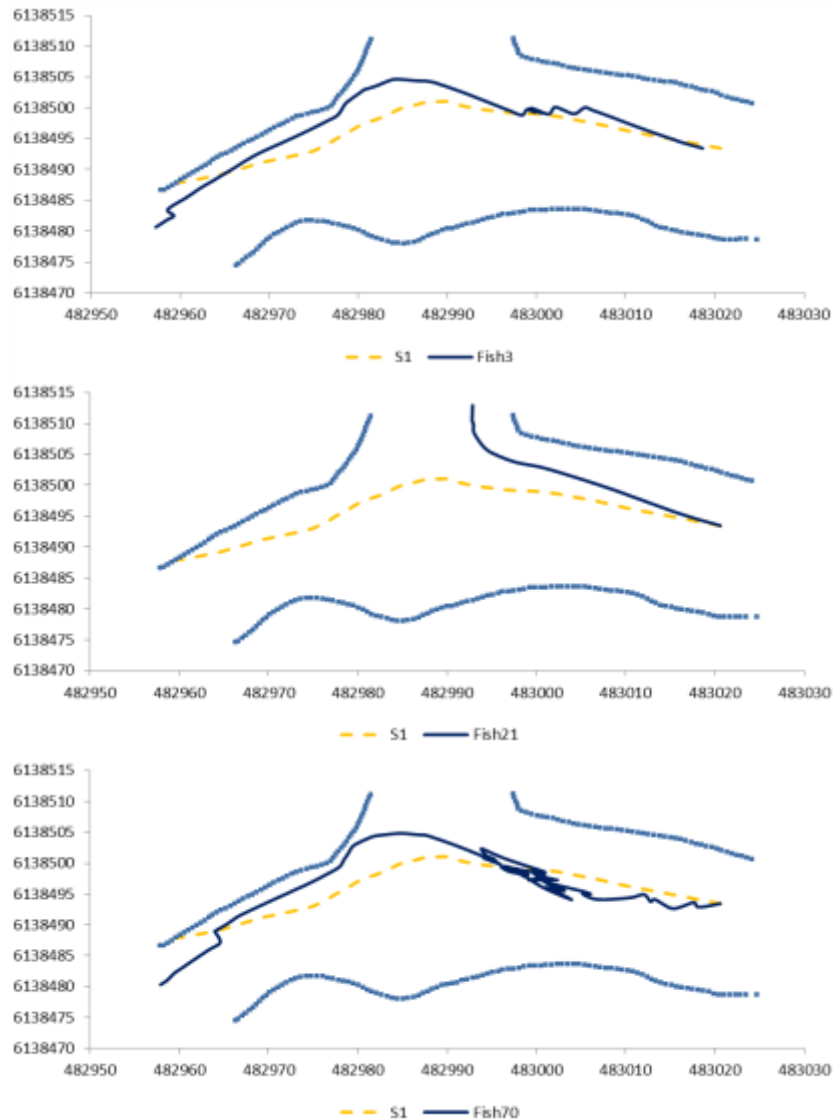
Παρατηρούμε ότι κατά την διάρκεια της προσομοίωσης του ιχθύ fish72 η συμπεριφορά B2 είναι κυρίαρχη (60,3%), οδηγώντας σε ακανόνιστη τροχιά η οποία ωστόσο ακολουθεί την ροή του ποταμού προς την διατομή εξόδου στην πλευρά του fish farm. Αντίθετα, στην περίπτωση του fish77 ο συνδυασμός των συμπεριφορών B2 και B3 οδηγεί σε εμφάνιση κυκλικής τροχιάς με απότομες αλλαγές προσανατολισμού. Τέλος, ο προσομοιωμένος ιχθύς fish82 εμφανίζει περιορισμένη κυκλική τροχιά λίγο πριν την κατάντη έξοδο, αποτέλεσμα της περιορισμένης εμφάνισης της συμπεριφοράς B3 σε εκείνο το σημείο.

6.4. Σύγκριση πραγματικών και προσομοιωμένων τροχιών

Για την περαιτέρω επαλήθευση του μοντέλου έγινε προσπάθεια αναπαραγωγής των τροχιών κάποιων ιχθύων της μελέτης των Svendsen et al. (2011). Έγιναν διαδοχικές εφαρμογές του μοντέλου σε καθεμία από τις οποίες οι θέσεις εκκίνησης των 100 ιχθύων επελέγησαν σε ένα νέφος σημείων γύρω από την αρχική θέση της εκάστοτε πειραματικής τροχιάς.

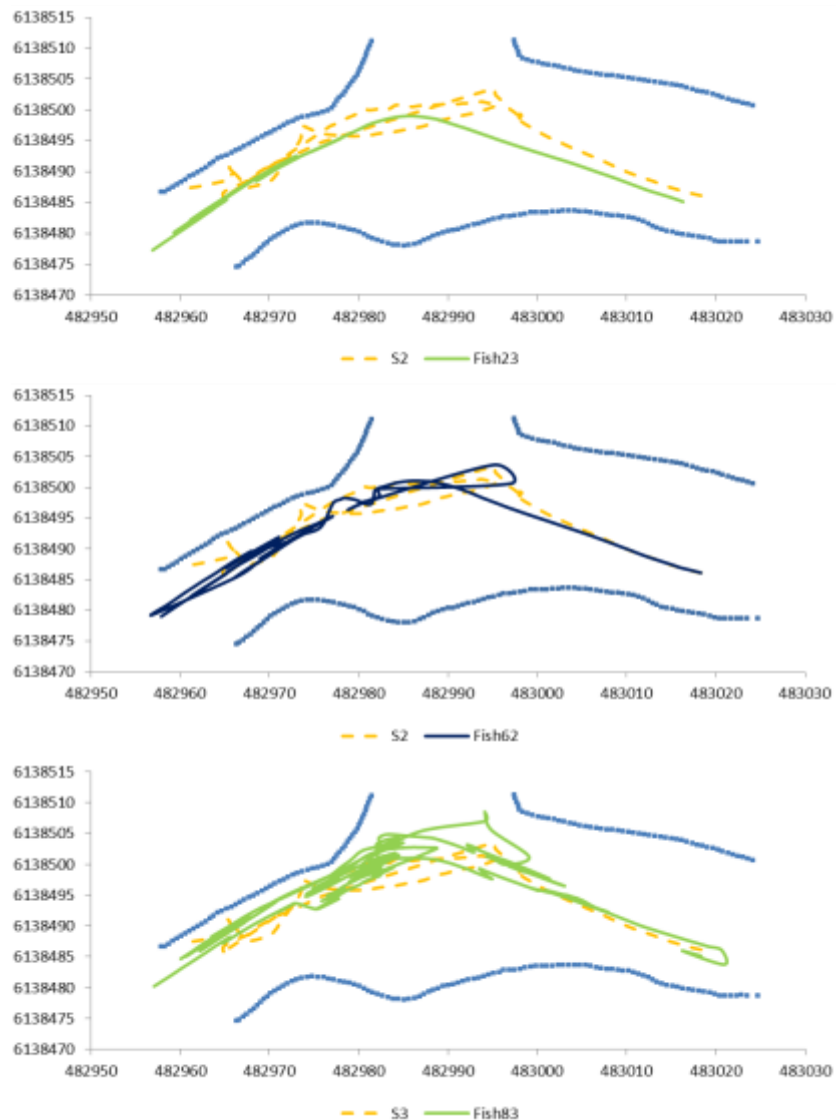
Όπως φαίνεται στις Εικόνες 5.4-1 έως 5.4-3, το μοντέλο μπόρεσε σε κάποιες περιπτώσεις να προσεγγίσει ικανοποιητικά τα πειραματικά δεδομένα. Ωστόσο,

φαίνεται ότι το τελικό αποτέλεσμα εξαρτάται σημαντικά από την αρχική θέση του προσομοιωμένου ιχθύος και περιλαμβάνει ένα μεγάλο βαθμό τυχαιότητας.



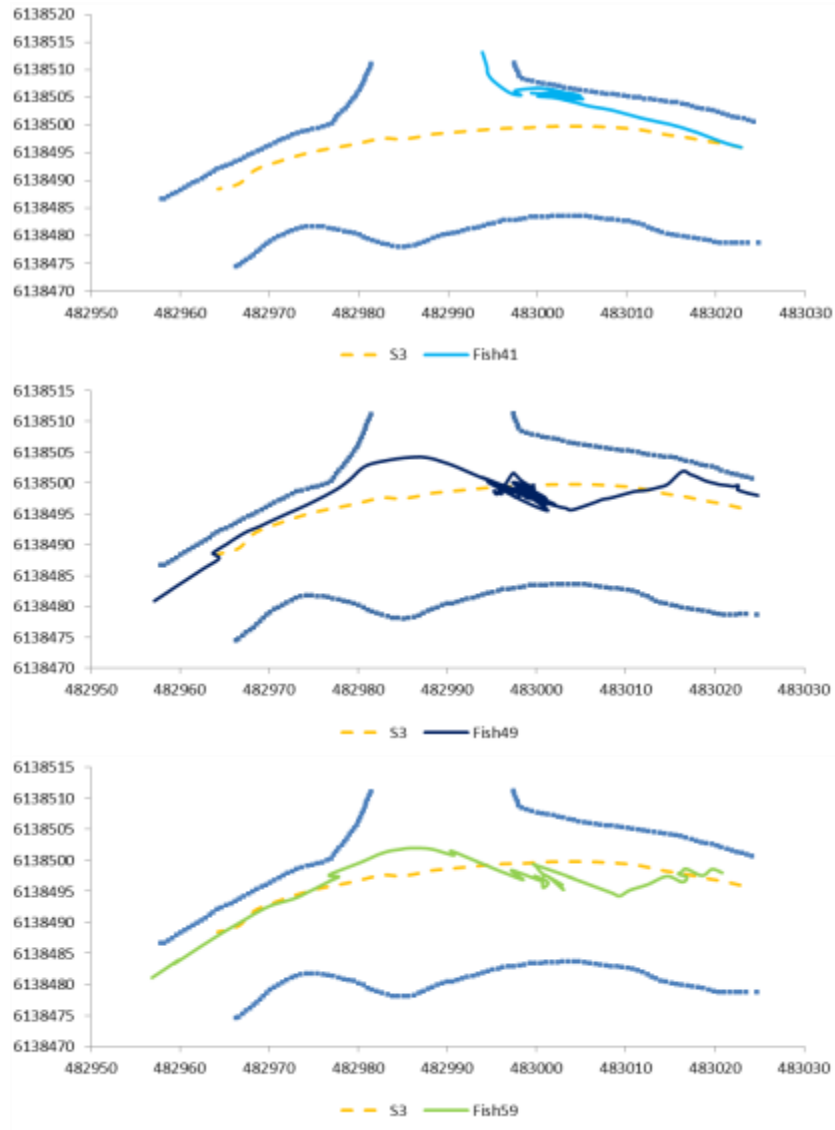
Εικόνα 5.4-1: Πειραματική μέτρηση S1 και τρεις χαρακτηριστικές προσομοιωμένες τροχιές του μοντέλου συμπεριφοράς.

Ο πραγματικός ιχθύς S1 ακολουθεί non-milling πορεία προς την κατάντη έξοδο, όπως μετρήθηκε πειραματικά στην μελέτη των Svendsen et al. (2011). Ο προσομοιωμένος ιχθύς fish3 με θέση εκκίνησης κοντά στην πραγματική προσεγγίζει ικανοποιητικά τις πειραματικές μετρήσεις. Αντίθετα, οι fish21 και fish70 με θέση εκκίνησης την πραγματική δεν καταφέρνουν να προσεγγίσουν τα πειραματικά δεδομένα. Ο πρώτος κινείται προς την έξοδο fish farm ενώ ο δεύτερος ακολουθεί παρόμοια τροχιά με την πειραματική αλλά εμφανίζει συμπεριφορά milling.



Εικόνα 5.4-2: Πειραματική μέτρηση S2 και τρεις χαρακτηριστικές προσομοιωμένες τροχιές του μοντέλου συμπεριφοράς.

Ο πραγματικός ιχθύς S1 ακολουθεί milling πορεία προς την κατάντη έξοδο. Ο προσομοιωμένος ιχθύς fish23 με θέση εκκίνησης κοντά στην πραγματική ακολουθεί παρόμοια τροχιά με την πειραματική αλλά εμφανίζει μόνο περιορισμένη συμπεριφορά milling. Αντίθετα, ο προσομοιωμένος ιχθύς fish62 με αρχική θέση ίδια με την πειραματική προσεγγίζει ικανοποιητικά τις πειραματικές μετρήσεις. Το ίδιο και ο προσομοιωμένος ιχθύς fish83 με θέση εκκίνησης ελάχιστα διαφορετική από την πραγματική.



Εικόνα 5.4-3: Πειραματική μέτρηση S3 και τρεις χαρακτηριστικές προσομοιωμένες τροχιές του μοντέλου συμπεριφοράς.

Ο πραγματικός ιχθύς S3 ακολουθεί non-milling πορεία προς την κατάντη έξοδο. Ο προσομοιωμένος ιχθύς fish41 με αρχική θέση ίδια με την πειραματική δεν καταφέρνει να προσομοιώσει τις πειραματικές μετρήσεις. Αντίθετα, οι προσομοιωμένοι ιχθείς fish49 και fish 59 με θέσεις εκκίνησης κοντά στην πραγματική εμφανίζουν, ο πρώτος παρόμοια, αν και αρκετά πιο ακανόνιστη συμπεριφορά με την πειραματική, ενώ ο δεύτερος ακολουθεί παρόμοια τροχιά αλλά εμφανίζει συμπεριφορά milling.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

7.1. Συμπεράσματα

Από την παρούσα μελέτη προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Το υπό μελέτη μοντέλο είναι σε θέση να προσομοιώσει την συμπεριφορά ιχθύων, έχοντας ως ερέθισμα ενεργοποίησης συμπεριφορών υδροδυναμικά χαρακτηριστικά.
- Ο ιχθύς μπορεί να αντιληφθεί ως ερέθισμα το μέγεθος της επιτάχυνσης και να επιλέξει ανάμεσα σε τρεις συμπεριφορές:
 - B1, όπου ο ιχθύς προσανατολίζεται με την κατεύθυνση της ροής.
 - B2, όπου ο ιχθύς προσανατολίζεται προς περιοχές με υψηλότερες ταχύτητες ροής.
 - B3, όπου ο ιχθύς κολυμπάει αντίθετα προς την κατεύθυνση της ροής.

Η ενεργοποίηση των συμπεριφορών B2 και B3 μπορεί να επιτευχθεί με βαθμονόμηση του μοντέλου. Από την ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων του μοντέλου συμπεριφοράς ιχθύος προκύπτει ότι οι σημαντικότερες παράμετροι είναι τα κατώφλια ενεργοποίησης των συμπεριφορών B2 και B3 καθώς και ο συντελεστής μνήμης της συμπεριφοράς B3, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την βαθμονόμηση.

- Μέσω της κατάλληλης προσαρμογής των παραμέτρων σε ένα εύρος τιμών επιτυγχάνεται η προσομοίωση συνολικά 100 ιχθύων από τους οποίους οι 71 ακολουθούν ευθεία πορεία, δηλαδή κυρίως συμπεριφορά B1 και οι υπόλοιποι 29 παρουσιάζουν κυκλική συμπεριφορά, δηλαδή κυρίως συνδυασμό B2 και B3. Τα ποσοστά αυτά προσεγγίζουν τις πειραματικές τροχιές των μελετώμενων ιχθύων (66% και 34% αντίστοιχα).
- Το μελετώμενο μοντέλο συμπεριφοράς ιχθύων καταφέρνει να προσομοιώσει ως ένα βαθμό τις ακριβείς πειραματικές τροχιές που δίνονται, ωστόσο υπάρχει έντονη εξάρτηση από την αρχική θέση της προσομοίωσης και σημαντικός βαθμός τυχαιότητας. Περαιτέρω έρευνα χρειάζεται επί του θέματος.

7.2. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Όσον αφορά τη μελλοντική έρευνα προτείνονται τα εξής:

- Διεξοδικότερη έρευνα της δομής και της λειτουργίας του μοντέλου συμπεριφοράς ιχθύων ώστε να προσομοιωθεί ακριβέστερα η κίνηση των ιχθύων κατά την κατάντη μετανάστευσή τους. Προτείνεται η κίνηση των ιχθύων να εξεταστεί και στις 3 διαστάσεις και να συμπεριληφθεί και άλλη μία συμπεριφορά που σχετίζεται με την πίεση λόγω βάθους νερού.
- Στο μελετώμενο μοντέλο εξετάζεται μόνο η περίπτωση της κατάντη μετανάστευσης του ιχθύος. Το μοντέλο θα μπορούσε να επεκταθεί και για ιχθύες που πραγματοποιούν ανάντη μετανάστευση.
- Εξατομίκευση του μοντέλου ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε μελετώμενου είδους ιχθύος, ώστε να συμπεριλαμβάνονται οι παράγοντες

φυσιολογίας που πιθανόν να καθορίζουν τη συμπεριφορά που θα ακολουθήσει ο ιχθύς.

- Εφαρμογή του μοντέλου σε άλλες περιοχές μελέτης. Κάτι τέτοιο είναι πολύ σημαντικό για τον περαιτέρω έλεγχο της αξιοπιστίας του μοντέλου, ιδιαίτερα αν συνυπολογιστεί ότι οι κρισιμότεροι παράμετροι του μοντέλου, δηλαδή τα κατώφλια ενεργοποίησης κάθε συμπεριφοράς (thresholds), ορίζονται ως 'site-specific', δηλαδή δεν έχουν μια καθολικά εφαρμόσιμη τιμή, αλλά αυτή θα πρέπει να υπολογίζεται για κάθε περιοχή μελέτης ξεχωριστά. (Goodwin et al., 2014).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Γιαννούλης Σ., 2016. Mathematical modeling of fish-behavior in water bodies, Μεταπτυχιακή Διατριβή, ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, ΕΜΠ, Αθήνα
2. Μεγαλοφώνου Περσεφόνη, Επικ. Καθ., ΕΚΠΑ. 'Ιχθυολογία. Ενότητα 3. Συμπεριφορά Ιχθύων – Τακτισμοί'. Έκδοση 1.0. Αθήνα, 2015.
3. Οικονομοπούλου Ε., 2019. Μαθηματική προσομοίωση της συμπεριφοράς ιχθύων σε περιοχές φραγμάτων πόταμων με διόδους ιχθύων. Μεταπτυχιακή Διατριβή, ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, ΕΜΠ, Αθήνα.
4. Abdelaziz S., Minh D. B., Atsushi N., Rutschmann P., 2013. Numerical Simulation of Flow and Upstream Fish Movement inside a Pool-and-Weir Fishway. Conference: the 35. IAHR World Congress.
5. Anderson J. J., 2002. An agent-based event driven foraging simulation. *Natural Resource Modelling* 15(1).
6. Bleckmann H., 2007. The lateral line system of fish. *Sensory system neuroscience, Fish Physiology* 25, 411-453.
7. Coombs, S., 1999. Signal detection theory, lateral line excitation patterns and prey capture behavior of mottled sculpin. *Anim. Behav.* 58, 421-430.
8. Coombs, S., Van Netten, S., 2006. The hydrodynamics and structural mechanics of the lateral line system. *Fish Biomechanics, Fish Physiology* 23, 103-139
9. Goodwin R. A., Nestler J. M., Anderson J. J., Weber L. J., Loucks D. P., 2006. Forecasting 3-D fish movement behavior using a Eulerian-Lagrangian-agent method (ELAM). *Ecological Modelling* 192, 197-223.
10. Goodwin R. A., Politano M., Garvin J. W., Nestler J. M., Hay D., Anderson J. J., Weber L. J., Dimperio E., Smith D. L., Timko M., 2014. Fish navigation of large dams emerges from their modulation of flow field experience. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 111, 5277-5282.
11. Goodwin R. A., 2004. Hydrodynamics and juvenile salmon movement behavior at lower granite dam: Decoding the relationship using 3-D space-time (CEL agent IBM) simulation. PhD dissertation, Cornell University.
12. Haefner J., Bowen M., 2002. Physical based model of fish movement in fish extraction facilities. *Ecological Modelling* 152, 227-245.
13. Lemasson B., Haefner J. and Bowen M., 2008. The effect of avoidance behavior on predicting fish passage rates through water diversion structures. *Ecological Modelling*, 219, 178-188.
14. Pagonopoulos S., 2017. Mathematical model on simulating fish-behavior in river flows, Μεταπτυχιακή Διατριβή, ΔΠΜΣ Υπολογιστική Μηχανική, ΕΜΠ, Αθήνα.
15. Stamou A. I., Mitsopoulos G., Rutschmann P., Minh D. B., 2018. Verification of a 3D CFD model for vertical slot fish-passes. *Environmental Fluid Mechanics* 18, 1435-1461.
16. Svendsen J. C., Aarestrup K., Malte H., Thygesen H., 2011. Linking individual behaviour and migration success in *Salmo salar* smolts approaching a water withdrawal site: implications for management. *Aquatic Living Resources* 24(02):201 – 209.

17. Tyus Harold M., 2011. Ecology and Conservation of Fishes, CRC Press, London, New York.
18. Vowles A. S., Anderson J. J., Gessel M. H., Williams J. G. and Kemp P. S. (2014). Effects of avoidance behaviour on downstream fish passage through areas of accelerating flow when light and dark, *Animal Behaviour*, 92, 101-109.
19. Webb P. W., 1975. Hydrodynamics and energetics of fish propulsion, p. 49. Bulletin of the Fisheries Research Board of Canada.