

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΡΟΗΣ ΥΔΑΤΟ-ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗ ΒΙΩΣΙΜΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΙΧΘΟΚΑΤΑΦΥΓΙΟΥ ΠΑΡΑΠΛΕΥΡΑ ΤΗΣ ΡΟΗΣ

Σαββίδης Ιωάννης¹, Κεραμάρης Ευάγγελος^{2*}, Πεχλιβανίδης Γεώργιος¹,
Κουτίτας Χριστόφορος³

¹ Αλεξάνδρειο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε., Σίνδος, 57400, Θεσσαλονίκη,

² Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πεδίο Άρεως, 38334, Βόλος

³ Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 54124, Θεσ/κη

*Στοιχεία επικοινωνίας: ekeramaris@civ.uth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές μετρήσεις και ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων κυκλοφορίας και μεταφοράς συντηρητικού αιωρήματος με σκοπό τον υπολογισμό της βέλτιστης ταχύτητας ροής υδατορεύματος για τη βιώσιμη λειτουργία της φυσικού ή τεχνητού ιχθυοκαταφυγίου παράπλευρα της ποτάμιας ροής. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι όσον αφορά την παγίδευση αιωρούμενων στο ιχθυοκαταφύγιο η καλύτερη περίπτωση (μικρότερη παγίδευση) είναι αυτή στην οποία η ταχύτητα του κυρίου ρεύματος είναι περίπου 0.30 m/s, η οποία βρίσκεται σε συμφωνία με την βέλτιστη ταχύτητα συνθηκών διαβίωσης των ψαριών.

ΛΕΞΕΙΣ-ΚΛΕΙΔΙΑ: ιχθυοκαταφύγιο, ταχύτητα ροής, φυσικό μοντέλο, μαθηματικό μοντέλο

COMPUTATION OF OPTIMUM WATER COURSE FLOW VELOCITY FOR THE SUSTAINABLE OPERATION OF A FISH REFUGE LATERALLY TO THE FLOW

Savvidis Yannis¹, Keramaris Evangelos^{2*}, Pechlivanidis George¹,
Koutitas Christoforos³

¹ Alexander Technological Educational Institute of Thessaloniki, Department of Civil Engineering, Sindos, 57400 Thessaloniki,

² University of Thessaly, Department of Civil Engineering, Pedion Areos, 38334 Volos

³ Aristotle University of Thessaloniki, Department of Civil Engineering, 54124, Thessaloniki

*Corresponding author: ekeramaris@civ.uth.gr

ABSTRACT

In this study the development of mathematical models of hydrodynamic circulation and matter transport and laboratory measurements for the computation of optimum watercourse flow velocity for the sustainable operation of a natural or artificial fish refuge laterally to the main riverine low were held. Concerning the trapping of the suspended particles in the fish reservoir, the results show, that the best case (with the minor trapping) corresponds to flow velocity of the main stream approximately 0.30 m/s, which is in very good agreement with the optimal living conditions of the fishes.

KEY-WORDS: fish reservoir, flow velocity, physical model, mathematical model

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι μελέτες της υδροδυναμικής κυκλοφορίας σε ποτάμια αλλά και στην παράκτια ζώνη έχουν ξεκινήσει εδώ και πολλές δεκαετίες τόσο σε επίπεδο εργαστηριακών πειραμάτων όσο και σε επίπεδο μαθηματικών ομοιωμάτων– αριθμητικών πειραμάτων. Μελέτες για λεκάνη ιχθυοκαταφυγίων δεν έχουν πραγματοποιηθεί σε ανάλογο βαθμό στη βιβλιογραφία. Κομβικό σημείο σε τέτοιου είδους προβλήματα είναι αφενός να εξασφαλίζεται η ανανέωση των νερών της παρακείμενης λεκάνης αλλά ταυτόχρονα και η αποφυγή πιθανών φαινομένων ιζηματογένεσης που θα δυσχέραιναν ή ακόμη και θα ακύρωναν τη λειτουργία της λεκάνης.

Η εκτροφή ψαριών σε γλυκά νερά στην Ελλάδα, ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 60, με την εκτροφή της πέστροφας, ιδρύοντας τον πρώτο κρατικό ιχθυογεννητικό σταθμό, στις πηγές του ποταμού Λούρου, κοντά στα Ιωάννινα. Στη συνέχεια αυτή η δραστηριότητα επεκτάθηκε σε ολόκληρη την περιοχή της Ηπείρου, της Μακεδονίας, καθώς και σε άλλες περιοχές της χώρας, κυρίως στην Στερεά Ελλάδα και την Πελοπόννησο. Σήμερα στην Ελλάδα λειτουργούν περίπου 100 μονάδες εκτροφής πέστροφας, κατανομημένες κυρίως στις περιοχές της Ηπείρου και της Μακεδονίας, χρησιμοποιώντας τα νερά των ποταμών Λούρου και Βοϊδομάτη, καθώς και άλλων μικρότερων ποταμιών, ακόμα και φυσικών πηγών ή γεωτρήσεων, για την λειτουργία αυτών των μονάδων (<http://chrispic-ligarola.blogspot.gr>)

Όσον αφορά την καλλιέργεια και εκτροφή ψαριών σε γλυκά νερά, το πιο συνηθισμένο είδος είναι η πέστροφα η οποία ζει σε ορεινά ποτάμια που διαθέτουν πετρώδη πυθμένα, άφθονη παρόχθια βλάστηση καθώς ομαλή και ταχεία ροή νερού. Η πέστροφα προτιμά περιοχές με κρύα νερά, άφθονο οξυγόνο και είναι ψάρι που υποφέρει από την μόλυνση του νερού. Το συνηθισμένο μέγεθος της πέστροφας είναι περίπου 20-30 cm μήκος, ενώ το βάρος της φτάνει το μισό kg.

Στην εργασία πραγματοποιήθηκε η ανάπτυξη δύο μαθηματικών μοντέλων, ενός μοντέλου υδροδυναμικής κυκλοφορίας και ενός μοντέλου μεταφοράς αιωρούμενων, και εργαστηριακές μετρήσεις για τον υπολογισμό της βέλτιστης ταχύτητας ροής υδατορεύματος για τη βιώσιμη λειτουργία ιχθυοκαταφυγίου παράπλευρα της ροής, όπως εμφανίζεται στο ποτάμιο περιβάλλον με τις φυσικές ή τεχνητές λεκάνες προστασίας ιχθυοπληθυσμών. Επισημαίνεται εδώ ότι η παρούσα εργασία αφορά σε φυσικό ή τεχνητό ιχθυοκαταφύγιο παράπλευρα της κύριας ροής ενός ποταμού – φυσικού υδατορεύματος και όχι σε οργανωμένη ιχθυοδεξαμενή για καλλιέργεια και παραγωγή ιθυοαποθεμάτων. Η παράπλευρη αυτή λεκάνη έχει ως σκοπό την διατήρηση των φυσικών ιθυοαποθεμάτων σε περιόδους πιθανής ξηρασίας όπου ενώ η στάθμη του κυρίου υδατορεύματος μπορεί να μειωθεί σημαντικά, παρόλα αυτά η υδάτινη στήλη της παράπλευρης λεκάνης μπορεί να έχει ένα ικανό βάθος του λόγω του χαμηλότερου επιπέδου του πυθμένα στη λεκάνη και συνεπώς δεν τίθεται η λογική της επανακυκλοφορίας των νερών στην παράπλευρη λεκάνη (η οποία λειτουργεί ως ιχθυοκαταφύγιο και όχι ως δεξαμενή ιχθυοκαλλιέργειας).

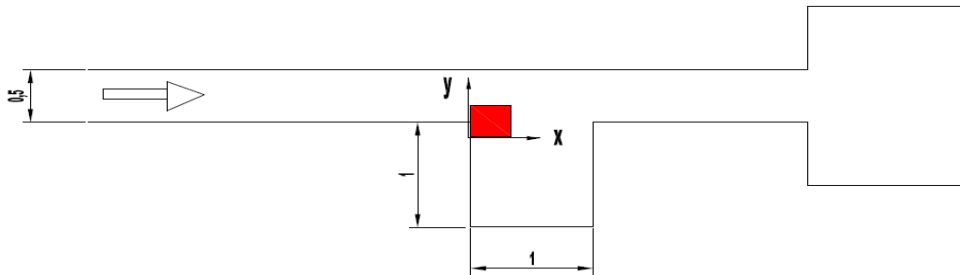
Για τις εργαστηριακές μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος PIV (Particle Image Velocimetry) που είναι μια μέθοδος οπτικοποίησης της ροής και χρησιμοποιείται για τη μέτρηση ταχυτήτων και τυρβωδών χαρακτηριστικών της ροής. Η ακρίβεια των μετρήσεων στην περίπτωση του PIV είναι πολύ μεγάλη. Το ποσοστό λάθους είναι μικρότερο του 2%. (Wereley et al., 2010). Οι συγγραφείς της παρούσας εργασίας στο παρελθόν έχουν εκτελέσει πειράματα με τη συγκεκριμένη μέθοδο. Οι Pechlivanidis et al. (2012) διερεύνησαν πειραματικά τα τυρβώδη χαρακτηριστικά της ροής σε ανοικτό κανάλι με τη χρήση του Particle Image Velocimetry (PIV). Επίσης στην εργασία των Pechlivanidis et al. (2015) μελετήθηκαν πειραματικά τα χαρακτηριστικά της τυρβώδους ροής σε ανοικτό κανάλι με τη χρήση του PIV. Ειδικότερα, μελετήθηκαν υδραυλικά χαρακτηριστικά όπως κατανομή ταχυτήτων, τυρβώδεις εντάσεις και τυρβώδεις τάσεις Reynolds.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ – ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε οριζόντιο κανάλι μήκους 7 m, πλάτους 50 cm και ύψους 50 cm (Εργαστήριο Υδραυλικής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε του Αλεξάνδρειου Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Θεσσαλονίκης). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για βάθος ροής καναλιού $h=10$ cm και βάθος ροής στην παράπλευρη λεκάνη $h_l=15$ cm για διάφορες ταχύτητες ροής εισόδου από 0.05 m/s ως και 0.60 m/s. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε απεικονίζεται στην εικόνα 1. Η έγχρωμη περιοχή (περιοχή της ροής στην οποία πραγματοποιούνται οι μετρήσεις) είναι εκεί όπου γίνεται η φωτογράφιση για τον προσδιορισμό του πεδίου των ταχυτήτων (εικόνα 2). Καλύπτει ένα τμήμα του καναλιού με οριζόντιο μήκος $x=12$ cm και κατακόρυφο μήκος $y=7$ cm.



ΕΙΚΟΝΑ 1. Πειραματική διάταξη



ΕΙΚΟΝΑ 2. Τομή πειραματικής διάταξης

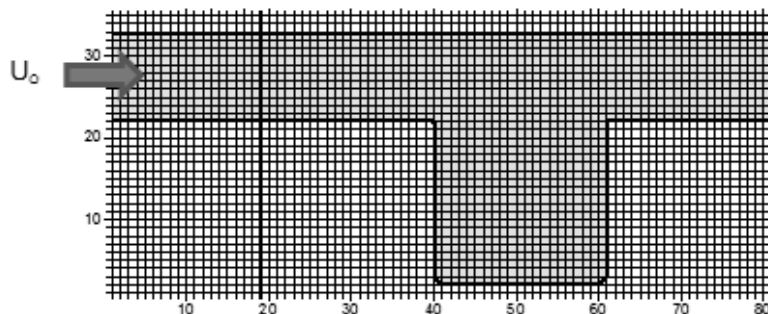
Οι μετρήσεις των ταχυτήτων πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια μιας συσκευής 2D-PIV. Η συσκευή αυτή διαθέτει το laser από το οποίο εκπέμπονται δύο ακτίνες που δημιουργούνται από δύο μονάδες laser που βρίσκονται στην ίδια διάταξη και εξέρχονται από τον ίδιο σφαιρικό φακό. Ο χρόνος μεταξύ των δύο ακτινών μπορεί να ρυθμιστεί από 200 nsec μέχρι περίπου 5 sec. Μετά τον σφαιρικό φακό τοποθετείται και ένας ημικυλινδρικός φακός. Ο τελευταίος μετατρέπει την ακτίνα σε επίπεδη δέσμη (light sheet) πάχους στην περιοχή μέτρησης 1 mm. Τα αιωρούμενα σωματίδια που υπάρχουν και στο πιο καθαρό νερό που είναι διαστάσεων της τάξεως των 10 μm φωτίζονται από την δέσμη του laser. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με αυτά τα σωματίδια σκόνης που μεταφέρει το νερό. Τα σωματίδια φωτογραφίζονται με κάμερα. Με τη βοήθεια CCD κάμερας έγινε λήψη μεγάλου αριθμού φωτογραφιών σε κάθε πείραμα, με την επεξεργασία των οποίων έγινε η ανάλυση των ταχυτήτων. Η κάμερα CCD (charge coupled

device) τύπου TSI Power View Plus 1660 x 1200 px² (2M-pixel) 12-bit ελέγχεται από ένα συγχρονιστή (synchronizer) μέσω υπολογιστή. Από τις δύο δέσμες φωτός λαμβάνεται ένα ζεύγος φωτογραφιών A και B σε χρονικό διάστημα που καθορίζεται ανάλογα με την μέση τιμή της ταχύτητας. Στα εν λόγω πειράματα το χρονικό διάστημα ήταν 1.5 msec. Κάθε φωτογραφία χωριζόταν με το λογισμικό (insight 3G) σε μικρές περιοχές με διαστάσεις 32 pixel x 32 pixel (2¹⁰ pixel) (interrogation spot), που για τα πειράματα σε mm ήταν 2.5 mm x 2.5 mm. Σε κάθε τέτοια περιοχή προσδιορίζονταν οι μετατοπίσεις Δx και Δy λαμβάνοντας την συνέλιξη (convolution) των αντιστοιχών εικόνων των περιοχών. Για τον προσδιορισμό της συνέλιξης γινόταν χρήση της FFT (Fast Fourier Transform). Οι δύο περιοχές ελέγχου από κάθε εικόνα A και B ήταν ένα ζεύγος πινάκων 32x32 με τιμές αντίστοιχες των φωτεινών εντάσεων των pixel. Η θέση της μέγιστης τιμής της συνέλιξης προσδιόριζε στατιστικά τις μετακινήσεις Δx και Δy . Δεδομένου και του χρόνου λήψης των δύο φωτογραφιών προσδιορίζονταν οι ταχύτητες u και v , δηλαδή η οριζόντια και κάθετη συνιστώσα. Λήφθηκαν 200 ζεύγη φωτογραφιών για κάθε πείραμα. Μετά από επεξεργασία των εικόνων υπολογιζόταν οι μέσες ταχύτητες (U_{mean}) για κάθε ζεύγος φωτογραφιών. Τέλος με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab από την επεξεργασία των εικόνων προσδιορίστηκαν χωρικά οι τιμές των ταχυτήτων. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε απόσταση 4 m από την είσοδο του καναλιού. Η ομοιομορφία της ροής ελέγχθηκε μετρώντας το βάθος ροής με τη βοήθεια κανόνων τοποθετημένων ανά 0.5 m. Το επιθυμητό βάθος ροής ελεγχόταν με τη βοήθεια ορθογωνικού εκχειλιστή που βρισκόταν στην έξοδο του καναλιού. Το λάθος στο μετρούμενο βάθος ροής ήταν της τάξης του ± 0.1 mm. Η παροχή μετρήθηκε με την βοήθεια Venturi που ήταν τοποθετημένος στον καταθλιπτικό αγωγό της αντλίας, η οποία παρείχε το ανακυκλούμενο νερό στο κανάλι.

3. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

3.1 ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ

Η διερεύνηση της βέλτιστης ταχύτητας στην περιοχή μελέτης πραγματοποιήθηκε μέσω της ανάπτυξης και εφαρμογής ενός δισδιάστατου μέσου κατά το βάθος, υδροδυναμικού μοντέλου. Το εν λόγω μαθηματικό μοντέλο εφαρμόστηκε στο πεδίο του καναλιού (Εικόνα 3) αφού διακριτοποιήθηκε στο οριζόντιο επίπεδο με διαστάσεις των βρόχων $\Delta x = \Delta y = 0.05$ m (5 cm) και χρονικό βήμα $dt = 0.02$ s, ενώ για την αριθμητική επίλυση εφαρμόστηκε η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών. Διερευνήθηκαν πέντε διαφορετικές ταχύτητες ροής (από 0.05 m/s έως 0.60m/s) για τρεις διαφορετικές ταχύτητες καθίζησης ενώ ελέγχθηκε η πιθανή παγίδευση στην παράπλευρη λεκάνη.



ΕΙΚΟΝΑ 3. Το κανάλι με την παράπλευρη λεκάνη σε κάτοψη με ταχύτητα εισόδου U_0

Οι προσομοιώσεις έγιναν για ταχύτητα ρεύματος εισόδου στο κανάλι από το αριστερό όριο 0.05 m/s ενώ, για το χρονικό διάστημα που αναφέρθηκε, είχε ήδη από επέλθει μονιμοποίηση

της ροής. Οι εξισώσεις που διέπουν τη υδροδυναμική κυκλοφορία είναι οι γνωστές εξισώσεις διατήρησης της ορμής (ισορροπίας δυνάμεων) και μάζας :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} + \nu_h \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \nu_h \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho h} + \nu_h \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \nu_h \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(Uh)}{\partial x} + \frac{\partial(Vh)}{\partial y} = 0 \quad (3.3)$$

όπου h είναι το βάθος της υδάτινης στήλης, U & V οι μέσες κατά το βάθος οριζόντιες ταχύτητες ζ η διακύμανση στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας του νερού, ν_h ο συντελεστής διασποράς σύμφωνα με τη σχέση Smagorinsky (1963) και Mellor (1996), ρ η πυκνότητα του θαλασσινού νερού και g η επιτάχυνση βαρύτητας. Οι διατμητικές τάσεις πυθμένα τ_{bx} και τ_{by} δίνονται από τις εξής σχέσεις:

$$\tau_{bx} = \rho \cdot C_b \cdot U \cdot \sqrt{U^2 + V^2} \quad \text{και} \quad \tau_{by} = \rho \cdot C_b \cdot V \cdot \sqrt{U^2 + V^2}$$

όπου C_b ο συντελεστής τριβής πυθμένα (της τάξης του 0.01).

3.2 ΣΤΕΡΕΟΜΕΤΑΦΟΡΑ

Το μοντέλο μεταφοράς βασίζεται στη μέθοδο του ιχνηλάτη (μέθοδος Lagrange σε συνδυασμό με τη δειγματοληψία -Monte Carlo Method ή Random Walk Simulation). Εφαρμογή της μαθηματικής προσομοίωσης του φαινομένου της μεταφοράς και διάχυσης έγινε από διάφορους ερευνητές τις τελευταίες δεκαετίες μεταξύ των οποίων μπορεί να αναφερθούν οι Jeng (1986), Ganoulis (1994), Al-Raben, Cekirge and Gunay (1989), Γκανούλης (1993), Dimou and Adams (1993), Dong, Wolanski and Li (1997), Savvidis and Koutitas (2000), Savvidis et al. (2001), Krestenitis et al. (2007) και Patoucheas and Savvidis (2015). Σύμφωνα με τη μέθοδο του ιχνηλάτη ή ιχνηθέτη ένας μεγάλος αριθμός σωματιδίων που προσομοιώνει το συνεχές αιωρούμενο υλικό εισάγεται σε μία θέση. Η μετακίνηση των σωματιδίων αυτών παρακολουθείται με το χρόνο. Η μεταφορά καθορίζεται από την τοπική ταχύτητα της ροής ενώ η τυρβώδης διάχυση που οφείλεται στην τυχαία κίνηση Brown των σωματιδίων λόγω του τυρβώδους καθορίζεται από τους συντελεστές τυρβώδους διάχυσης.

Έτσι λοιπόν, μετά την υιοθέτηση κοινού χρονικού και χωρικού βήματος (dt και dx αντίστοιχα) με αυτά του υδροδυναμικού μοντέλου ακολούθησε η δόμηση του μοντέλου μεταφοράς όπως περιγράφεται από Koutitas (1988) όπου η κίνηση του κάθε σωματιδίου αναλύεται σε δύο μέρη, ένα καθοριστικό (της μεταφοράς) και ένα στοχαστικό (της διάχυσης) ως εξής:

Τα καθοριστικά αποκόμματα Δx_i^n και Δy_i^n της εξάπλωσης που συνιστούν τη συνιστώσα της μεταφοράς υπολογίζονται ως εξής:

$$\Delta x_i^n = u_{s_i}^n (x_i^n, t^n) dt \quad \text{και} \quad \Delta y_i^n = v_{s_i}^n (y_i^n, t^n) dt \quad (3.4)$$

όπου $u_{s_i}^n(x_i^n, t^n)$ το καθοριστικό μέρος της ταχύτητας στο χρόνο t^n και τη θέση x_i^n του i σωματιδίου και $v_{s_i}^n(y_i^n, t^n)$ το καθοριστικό μέρος της ταχύτητας στο χρόνο t^n και τη θέση y_i^n του i σωματιδίου. Επίσης εφόσον λαμβάνεται υπόψη και η καθίζηση των σωματιδίων τότε θα πρέπει να υπολογισθεί στην κατακόρυφη κίνηση και ένα καθοριστικό απόκομμα $\Delta z_{s_i}^n$ λόγω της ταχύτητας καθίζησης το οποίο είναι ίσο $\Delta z_{s_i}^n = w_s \cdot dt$ όπου w_s είναι η ταχύτητα καθίζησης των σωματιδίων

Τα στοχαστικά απόκόμματα Δx_i^n & Δy_i^n της εξάπλωσης που συνιστούν τη συνιστώσα της τυρβώδους διάχυσης υπολογίζονται ως εξής:

$$\Delta x_i^n = u_i^n \cdot dt \cdot \text{rnd}[-1,1] \quad \text{και} \quad \Delta y_i^n = v_i^n \cdot dt \cdot \text{rnd}[-1,1] \quad (3.5)$$

όπου u_i^n και v_i^n είναι οι τυχαίες οριζόντιες ταχύτητες στο χρόνο t^n και τις θέσεις x_i και y_i αντίστοιχα, $u_i^n = v_i^n = \sqrt{6Dh/dt}$ όπου D_h συντελεστής διάχυσης & rnd τυχαία μεταβλητή που κατανέμεται ομοιόμορφα στο διάστημα $[-1,+1]$. Στα στοχαστικά απόκόμματα πρέπει επίσης να προστεθεί λόγω της καθίζησης και κατακόρυφης διάχυσης και το απόκομμα Δz_i^n με $\Delta z_i^n = w' \cdot dt \cdot \text{rnd}[-1,1]$ όπου w' είναι η τυχαία –στοχαστική κατακόρυφη ταχύτητα λόγω τυρβώδους (ενώ δεν λαμβάνεται υπόψη καμία κατακόρυφη ταχύτητα του νερού). Το εύρος της τυχαίας ταχύτητας w' υπολογίζεται από την εξίσωση $Wr = \sqrt{6Dv/dt}$ όπου D_v είναι ο κατακόρυφος συντελεστής διάχυσης, σύμφωνα με την κλασσική προσέγγιση $0,01 \cdot h \cdot V$ όπου h είναι το βάθος του νερού και V η ταχύτητα ρεύματος. Η νέα οριζόντια θέση των σωματιδίων υπολογίζεται από την υπέρθεση του καθοριστικού και του στοχαστικού απόκόμματος:

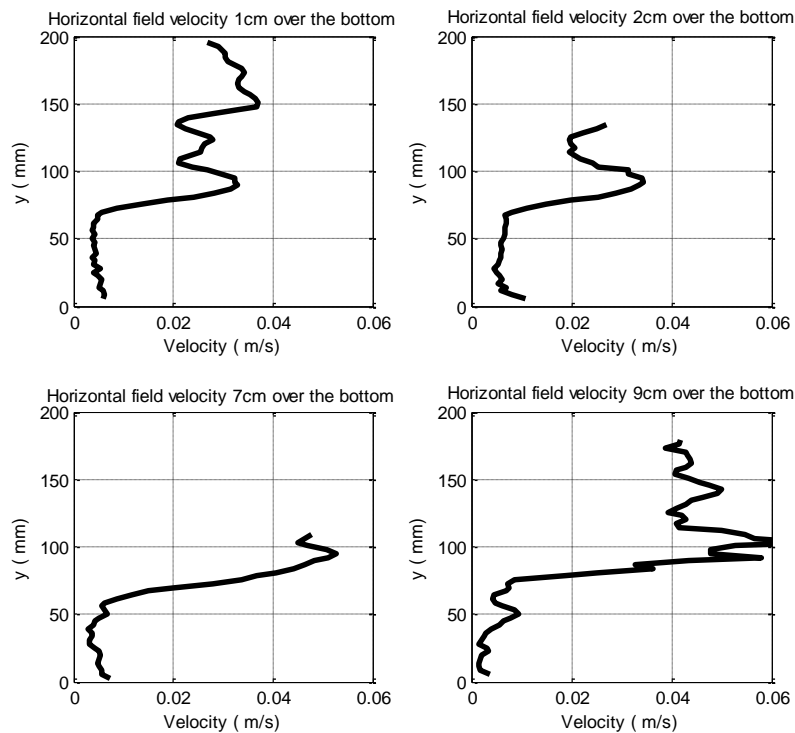
$$x_i^{n+1} = x_i^n + \Delta x_i^n + \Delta x_i^n \quad \text{και} \quad y_i^{n+1} = y_i^n + \Delta y_i^n + \Delta y_i^n \quad \text{και} \quad z_i^{n+1} = z_i^n + \Delta z_{s_i}^n + \Delta z_i^n \quad (3.6)$$

Η χωρική κατανομή των σωματιδίων που προκύπτει από την παραπάνω διαδικασία οδηγεί τελικά στον υπολογισμό των συγκεντρώσεων που σχετίζεται με τον αριθμό των σωματιδίων που βρίσκονται σε έναν βρόχο. Ο υπολογισμός των παγιδευμένων σωματιδίων στην παράπλευρη λεκάνη που προσομοιώνει το ιχθυοκαταφύγιο προκύπτει από το άθροισμα των σωματιδίων τα οποία βρίσκονται σε όλους τους βρόχους μέσα στην περιοχή της λεκάνης.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ

4.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

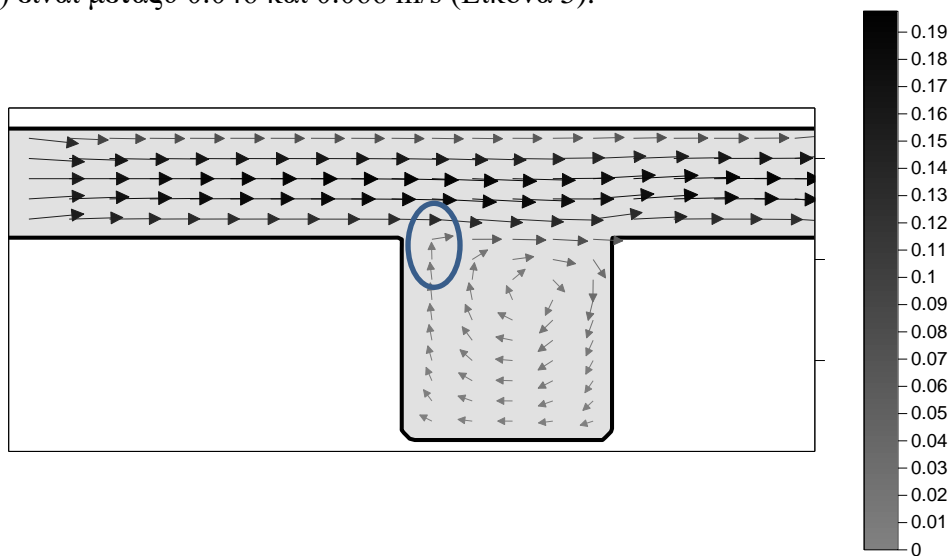
Στο κανάλι του οποίου η περιγραφή δόθηκε παραπάνω, τα εργαστηριακά πειράματα έγιναν για ένα βάθος ροής 10 cm ενώ στην παράπλευρη λεκάνη 15 cm. Μετά την εκτέλεση των πειραμάτων προσδιορίστηκαν τα οριζόντια πεδία των ταχυτήτων σε βάθη 1 cm, 2 cm, 7 cm και 9 cm. Κατόπιν προσδιορίστηκαν τα προφίλ ταχυτήτων κατά τον άξονα y στα διάφορα επίπεδα και σε διάφορες θέσεις. Για τιμές του x κοντά στο μηδέν οι τιμές των ταχυτήτων στο τμήμα μέσα στην δεξαμενή ήταν περίπου 1 με 2 mm/sec και για τιμές του x μεγαλύτερες η τιμή αυξανόταν μέχρι και 0.02 m/s. Η ταχύτητα αυτή ήταν η ταχύτητα με την οποία περιστρεφόταν η μάζα του νερού μέσα στην παράπλευρη δεξαμενή. Η μέση ταχύτητα μέσα στο κανάλι ήταν 0.05 m/s. Παρατηρούμε στα διαγράμματα των ταχυτήτων (προφίλ) την κλίση της ταχύτητας στην διεπιφάνεια μεταξύ του νερού του καναλιού και του νερού στην δεξαμενή (εικόνα 4). Οι διατμητικές τάσεις δημιουργούν και περιστροφή της μάζας του νερού της δεξαμενής με ταχύτητα μικρότερη αυτής του καναλιού.



ΕΙΚΟΝΑ 4. Προφίλ ταχυτήτων σε διάφορες θέσεις πάνω από τον πυθμένα του καναλιού

4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

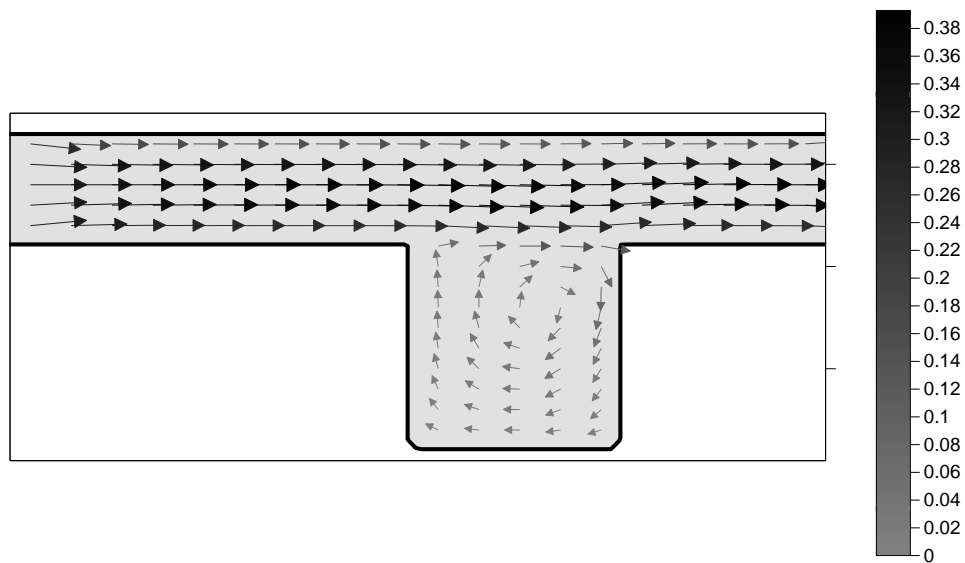
Όσον αφορά την εφαρμογή του υδροδυναμικού μαθηματικού μοντέλου για την περιγραφή της ροής στο κανάλι και τη λεκάνη η οποία είναι πλήρως και ελεύθερα συνδεδεμένη με το κύριο ρεύμα του καναλιού τα αποτελέσματα με ταχύτητα εισόδου 0.05 m/s δίνονται στην παρακάτω εικόνα όπου οι ταχύτητες ροής στο κύριο ρεύμα (εκτός περιοχών δίπλα στα στερεά τοιχώματα) είναι μεταξύ 0.046 και 0.066 m/s (Εικόνα 5).



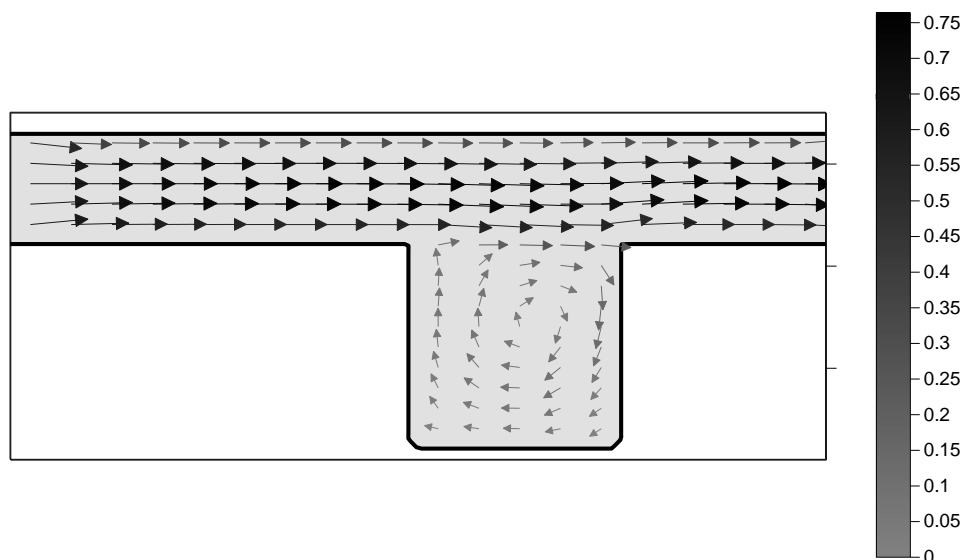
ΕΙΚΟΝΑ 5. Πεδίο μέσων κατά το βάθος ταχυτήτων (m/s) στο σύστημα του καναλιού με την λεκάνη με ταχύτητα εισόδου 0.05 m/s

Από τη περιοχή της έλλειψης φαίνεται ότι οι ταχύτητες του μοντέλου που αντιστοιχούν στις θέσεις ελέγχου του εργαστηριακού πειράματος, έχουν παρόμοιες τιμές με αυτές που αποτυπώθηκαν στο εργαστήριο από το φυσικό μοντέλο με τη μέθοδο PIV (περίπου 0.005 ± 0.05 m/s).

Μετά την ρύθμιση και τεκμηρίωση του μαθηματικού μοντέλου υδροδυναμικής κυκλοφορίας με βάση τις μετρήσεις του φυσικού μοντέλου (δηλ. των εργαστηριακών πειραμάτων) για την παραπάνω ταχύτητα ροής εισόδου στο κανάλι, ακολούθησαν μαθηματικές προσομοιώσεις για αρχική ταχύτητα 0.15, 0.30, 0.45 και 0.60 m/s. Η μορφή της κυκλοφορίας σε όλες τις περιπτώσεις είναι παρόμοια με μεγαλύτερες τιμές των ταχυτήτων. Ενδεικτικά παρατίθεται παρακάτω η περίπτωση ταχύτητας εισόδου 0.30 m/s (Εικόνα 6) η οποία δίνει ταχύτητες ροής στο κύριο ρεύμα μεταξύ 0.28 και 0.38 m/s και τη περίπτωση ταχύτητας εισόδου 0.60 m/s η οποία δίνει ταχύτητες ροής στο κύριο ρεύμα μεταξύ 0.55 και 0.75 m/s (Εικόνα 7).



ΕΙΚΟΝΑ 6. Πεδίο μέσων κατά το βάθος ταχυτήτων (m/s) στο σύστημα του καναλιού με την λεκάνη με ταχύτητα εισόδου 0.30 m/s



ΕΙΚΟΝΑ 7. Πεδίο μέσων κατά το βάθος ταχυτήτων (m/s) στο σύστημα του καναλιού με την λεκάνη με ταχύτητα εισόδου 0.60 m/s

Όσον αφορά την εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου μεταφοράς χρησιμοποιήθηκαν 5000 σωματίδια τα οποία τοποθετήθηκαν στην αρχή του καναλιού ενώ η κίνησή τους καθορίστηκε

από πεδίο ταχυτήτων που προέκυψε από το υδροδυναμικό μοντέλο σε συνδυασμό με την πληροφορία της ταχύτητας καθίζησης. Διερευνήθηκαν πέντε διαφορετικές ταχύτητες ροής (από 0.05 m/s 0.60 m/s) για τρεις διαφορετικές ταχύτητες καθίζησης ενώ ελέγχθηκε η πιθανή παγίδευση στην παράπλευρη λεκάνη. Έγινε η παραδοχή ότι τα σωματίδια τα οποία έφταναν στον πυθμένα επέστρεφαν στη στήλη (σε αιώρηση). Τα παγιδευμένα σωματίδια λόγω του μεγαλύτερου βάρους της παράπλευρης λεκάνης καταμετρήθηκαν και προέκυψε ο παρακάτω πίνακας 1 παγίδευσης ανάλογα με την ταχύτητα καθίζησης (άρα και τη φύση των σωματιδίων π.χ. ιλύς, άμμος κ.α.).

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. Παγίδευση σωματιδίων σε σχέση με την ταχύτητα ροής στο κανάλι και την ταχύτητα καθίζησης των αιωρούμενων φερτών υλών

ταχύτητα εισόδου στο κανάλι m/s	ταχύτητα κύριου ρεύματος στο κανάλι m/s	ταχύτητες ροής στη λεκάνη m/s	$w_s=0.00001$ m/s	$w_s = 0.001$ m/s	$w_s = 0.1$ m/s
			Παγιδευμένη Μάζα Αριθμός παγιδευμένων σωματιδίων (Ποσοστό % της αρχικής μάζας που παγιδεύτηκε)		
$U_o = 0.05$ m/s	0.046-0.066	0.01 - 0.02	146 (2.92)	164 (3.28)	293 (5.86)
$U_o = 0.15$ m/s	0.14-0.19	0.01 - 0.05	103 (2.06)	108 (2.16)	238 (4.76)
$U_o = 0.30$ m/s	0.28 - 0.38	0.01 - 0.10	76 (1.52)	81 (1.62)	130 (2.60)
$U_o = 0.45$ m/s	0.43-0.57	0.01 - 0.15	203 (4.06)	194 (3.88)	452 (9.04)
$U_o = 0.60$ m/s	0.55 - 0.75	0.01 - 0.20	198 (3.96)	221 (4.42)	510 (10.20)

4.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Μετά την υπολογιστική διαδικασία της μαθηματικής και φυσικής μοντελοποίησης που έδωσε τα αποτελέσματα τα οποία παρουσιάστηκαν παραπάνω, η ανάλυση εστιάζεται στην ταχύτητα του νερού η οποία εξασφαλίζει την καλύτερη υγεία των ψαριών κυρίως όσον αφορά το κύριο ρεύμα και δευτερευόντως στο παρακείμενο ιχθυοκαταφύγιο, εφόσον η παραμονή εκεί των ψαριών δεν είναι μεγάλης διάρκειας. Ειδικότερα, η βέλτιστη ταχύτητα κολύμβησης για καλή υγεία, αναπνοή και καλύτερο μυϊκό τόνο των ψαριών (Losordo and Westers, 1994) δίνεται από τη σχέση $U = (0.5-2.0) \times (\text{μήκος ψαριού}) / \text{second}$.

Χαρακτηριστικό όλων σχεδόν των συστημάτων διαχείρισης της πέστροφας, είναι η επιβολή ελάχιστου μεγέθους για τα αποκομιζόμενα ψάρια. Συνήθως το ελάχιστο επιτρεπτό μέγεθος είναι $15 \div 20$ cm ενώ το συνηθισμένο μέγεθος της πέστροφας είναι περίπου $20 \div 30$ cm μήκος, με το βάρος της φτάνει το μισό kg. Όμως το ψάρι φτάνει σε ακόμη μεγαλύτερα μεγέθη. Έτσι λοιπόν, για ένα συνηθισμένο μήκος π.χ. πέστροφας περίπου 20-30 cm (έστω 25 cm) και έναν μέσο συντελεστή (0.5-2.0) π.χ. 1.25, μπορούμε να δούμε ότι $U = 1.25 \times 0.25 = 0.31$ m/s ή 31 cm/s. Το ελάχιστο μήκος θα μπορούσε να είναι σύμφωνα με την παραπάνω πηγή 15 cm οπότε $U = 1.25 \times 15 = 18.7$ cm/s. Από τον πίνακα 1 τα αποτελέσματα δείχνουν ότι όσον αφορά την παγίδευση αιωρούμενων στο ιχθυοκαταφύγιο η καλύτερη περίπτωση (μικρότερη παγίδευση) είναι αυτή στην οποία η ταχύτητα του κύριου ρεύματος είναι 0.30 m/s, συμφωνώντας πλήρως

με την βέλτιστη ταχύτητα κολύμβησης για καλή υγεία, αναπνοή και καλύτερο μυϊκό τόνο των ψαριών που αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία.

Αναφορικά με τις τεχνικές δυνατότητες διαμόρφωσης και επίδρασης ενός υδατορεύματος, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι κάθε παρέμβαση σ' ένα ποτάμι ή χείμαρρο, με τη μορφή κάποιου τεχνικού έργου, μεταβάλλει τη δυναμική του. Η νέα διαμορφούμενη κατάσταση του υδατορεύματος χρειάζεται, όμως, διαρκή προστασία συντήρηση και πιθανά συχνή αναπροσαρμογή. Για τη μελέτη της συμπεριφοράς και της συνεχώς μεταβαλλόμενης, λόγω διαβρώσεων και αποθέσεων, μορφολογίας της κοίτης φυσικών υδατορευμάτων, είναι αναγκαία η μακρόχρονη καταγραφή της διερχόμενης υδατοπαροχής από διαφορετικές διατομές του υδατορεύματος. Είναι γνωστό ότι σε τυχαία διατομή υδατορεύματος, η κατανομή ταχυτήτων στη διατομή εξαρτάται από το υλικό των πρανών και του πυθμένα καθώς και από το σχήμα της διατομής. Από συστηματικές παρατηρήσεις σε φυσικά υδατορεύματα έχει διαπιστωθεί ότι η μέγιστη ταχύτητα εμφανίζεται κοντά στην επιφάνεια, ενώ η μέση ταχύτητα που τελικά ενδιαφέρει τις σημειακές μετρήσεις κατά πλάτος μιας διατομής, εντοπίζεται στο 60% περίπου του βάθους από την επιφάνεια και όταν το βάθος είναι μικρότερο των 70 cm (<https://eclass.duth.gr>). Επομένως με τη βοήθεια τεχνικών παρεμβάσεων σε υδατορεύματα (π.χ. αναβαθμοί, στενώσεις ή διαπλατύνσεις) οι οποίες όμως θα έχουν τη δυνατότητα να μεταβάλλονται ανάλογα πάντα με τη μεταβαλλόμενη κατάσταση της παροχής των ποταμών είναι δυνατό να επιτευχθεί η επιθυμητή ταχύτητα ροής στα υδατορεύματα σε περίπτωση που αυτή κρίνεται σκόπιμη για την καλύτερη διαβίωση και ανάπτυξη των οργανισμών που ζουν μέσα σε αυτό.

Σημαντικές είναι επίσης και κάποιες τεχνικές παρεμβάσεις που αφορούν στο παράπλευρο ιχθυοκαταφύγιο σε περίπτωση που θέλουμε να αυξήσουμε τις ταχύτητες ροής ή να επιδιώξουμε καλύτερη οξυγόνωση των νερών.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εργασία αυτή αναφέρεται στην ανάπτυξη μοντέλου και εργαστηριακών μετρήσεων για τον υπολογισμό της βέλτιστης ταχύτητας ροής υδατορεύματος για τη βιώσιμη λειτουργία ιχθυοκαταφυγίου παράπλευρα της ροής. Τα κύρια συμπεράσματα της εργασίας αυτής είναι τα ακόλουθα :

- Μέσα στη λεκάνη δημιουργούνται δίνες που έχουν χαμηλές τιμές ταχύτητας κίνησης του νερού
- Μικρότερες τιμές ταχύτητας καθίζησης που αντιστοιχούν σε πιο λεπτόκοκκα αιωρούμενα οδηγούν γενικά σε μικρότερες ποσότητες παγιδευμένου υλικού στην παρακείμενη λεκάνη.
- Αύξηση της ταχύτητας εισόδου στο κανάλι από 0.05 σε 0.30 m/s οδηγεί αρχικά σε μικρότερη παγίδευση ενώ από 0.30 μέχρι 0.60 m/s σε μεγαλύτερη παγίδευση.
- Οι ταχύτητες ροής μέσα στη λεκάνη είναι σημαντικά μικρότερες σε σύγκριση με την ταχύτητα του κυρίου ρεύματος στο κανάλι, γεγονός που φανερώνει ότι η οξυγόνωση των νερών στο παράπλευρο ιχθυοκαταφύγιο είναι απαραίτητη, ιδιαίτερα στην περίπτωση που η παραμονή εκεί των ψαριών είναι μεγάλης διάρκειας
- Όσον αφορά την παγίδευση αιωρούμενων στο ιχθυοκαταφύγιο, η καλύτερη περίπτωση (μικρότερη παγίδευση) είναι αυτή στην οποία η ταχύτητα στο κανάλι είναι της τάξης των 0.30 m/s. Επίσης για αυτή την ταχύτητα ροής προκύπτει μικρότερη παγίδευση για τα αιωρούμενα.

ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ : This research has been co-financed by the European Union (European Social Fund – ESF) and Greek national funds through the Operational Program "Education and Lifelong Learning" of the National Strategic Reference Framework (NSRF) - Research Funding

Program: **ARCHIMEDES III**. Investing in knowledge society through the European Social Fund.



Μία αρχική εκδοχή αυτής της εργασίας παρουσιάστηκε στο 3ο Κοινό Συνέδριο (13ο της ΕΥΕ, 9ο της ΕΕΔΥΠ και 1ο του ΕΥΣ) «Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων στη Νέα Εποχή», Αθήνα, 10-12 Δεκεμβρίου 2015.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

http://chrispic-ligapola.blogspot.gr/2011/02/blog-post_07.html

<https://eclass.duth.gr>

- Γκανούλης, Ι. 1993. *Περιβαλλοντική Κατάσταση και Προστασία του Κόλπου της Θεσσαλονίκης*. Τεχνικά Χρονικά, 13(3).
- Al-Raben L.H., Cekirge H.M. and Gunay N. 1989. *A stochastic simulation model of oil spill fate and transport*. *Appl. Math. Modelling*, 13: 322-329.
- Dimou, K. N. and Adams, E.E. 1993. *A Random-walk, Particle Tracking model for Well-mixed Estuaries and Coastal Waters*. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 33: 99-110.
- Dong, L., Wolanski, E. and Li, Y. 1997. *Field and Modeling Studies of Fine Sediment Dynamics in the Extremely Turbid Jiao-jiang River*. *Journal of Coastal Research*, 13(4): 995-1003.
- Ganoulis, J.G. 1994. *Engineering Risk Analysis of Water Pollution*. VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, Federal Republic of Germany, 306.
- Jeng, S.W. 1986. *Two dimensional Random Walk Model For Pollutant Transport in Natural Rivers*. Ph.D. Thesis, University of Texas at Austin.
- Koutitas, C. 1988. *Mathematical models in Coastal Engineering*. Pentech Press Limited, London (UK).
- Krestenitis, Y.N., Kombiadou, K.D. and Savvidis Y.G. 2007. *Modelling the cohesive sediment transport in the marine environment: the case of Thermaikos Gulf*. *Ocean Science*, 3: 91-104.
- Losordo, T.M. and Westers, H. 1994. System carrying capacity and flow estimation. In: Timmons, M.B., Losordo, T.M. (Eds.), *Aquaculture Water Systems: Engineering Design and Management*. Elsevier, New York, 9-60.
- Mellor, G. 1996. *Users Guide for A Three - Dimensional, Primitive Equation, Numerical Ocean Model*.
- Patoucheas, D., and Savvidis, Y. 2015. *Modelling of Hydrobiological PROCESSES IN Coastal Waters*. Chapter in the book: *Hydrodynamics - Concepts and Experiments*, ISBN 978-953-51-2034-6 Book edited by: Prof. Harry Edmar.
- Pechlivanidis, G., Keramaris, E. and Pechlivanidis I. 2012. *Measurements of turbulent characteristics in an open channel using PIV (Particle Image Velocimetry)*. *Global Nest Journal*, 14(3): 378-385.
- Pechlivanidis, G., Keramaris, E. and Pechlivanidis I. 2015. *Experimental Study of the Effects of Permeable Bed (Grass Vegetation and Gravel Bed) on the Turbulent Flow Using Particle Image Velocimetry*. *Journal of Turbulence*, 16(1): 1-16.

-
- Savvidis, Y. and Koutitas C. 2000. *Simulation of transport & fate of suspended matter along the coast of Agathoupolis (N. Greece)*, Proc. of the 5th International Conference Protection and Restoration of the Environment, Thassos, Greece.
- Savvidis, Y., Koutitas C. and Krestenitis Y. 2001. *Development and application of a three dimensional cohesive sediment transport mathematical model*. Journal of Marine Environmental Engineering, 6: 229-255.
- Smagorinsky, J. 1963. *General circulation experiments with the primitive equations. I. The basic experiment*. Monthly weather review, (91): 99–164.
- Wereley, S.T., Meinhart, C.D. 2010. *Recent advantages in micro-particle image velocimetry*, Annual Review of Fluid Mechanics, 42(1): 557-576.