

EXTENDED ABSTRACT

**Investigation of the Flow Resistance in Armed Culvert with
Asymmetric W Shaped Weirs**

Z. Gallehdar Shoushtar¹, J. Ahadiyan² and S. M. Sajadi^{3*}

- 1- M.Sc. Graduate, Department of Hydraulic Structures, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
- 2- Associate Professor of Water Structures, Faculty of Water Sciences and Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
- 3* - Corresponding Author, Assistant Professor of Water Structures, Faculty of Water Sciences and Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. (*m.sadjadi@scu.ac.ir*).

Received: 16 November 2018

Revised: 19 February 2019

Accepted: 24 February 2019

Keywords: Energy Dissipation, Fishway, Improve Fish Crossing, Manning Roughness Coefficient, W shaped Weir.

DOI: 10.22055/jise.2019.24181.1711.

Abstract

Construction of diversion dams in the rivers has caused many changes in these areas; so, hydraulic structures prevented the fish migration to the upstream. Then, the construction of hydraulic structures as fish-path for energy dissipation and improving the fishes passage are necessary. In the present study, asymmetrical W shaped Weir are designed with the tip angle of 40°, and the barriers with 30°, 60°, are designed with the tip angle of 90°. To recognize the hydraulic performance of fish-path, three physical models were designed for any barrier including: 30 barriers of asymmetrical W shaped Weir with 0.6 relative distance, a model with 15 barriers with 1.2 relative distance, and 10 barriers with 1.8 relative distance. Based on the obtained results of increasing slope, flow discharge, relative distance, reducing roughness coefficients of barriers height, and dissipation energy dissipation will reduce. The square root of the ratio of 0.87 to 0.65 Darcy Weisbach on the slope 3 percent in the relative distance reaches 1.8. The results of the experiments show that the overflow with a top angle of 40 degrees and the relative distance of 1.2 would be the best conditions for fish crossings in the upstream flow.

Introduction

Generally, emigrant fishes instinctively swim against flow direction to spawn and to reach to the place that they came out of spawn. The continuance of this action leads to survival and reproduction of the fishes. Dams, diversion and regulating weirs pose a significant threat to fishes migration process toward the upstream. Culverts which passed half of their lifespan need replacement and rehabilitation. Since replacement of a culvert is highly expensive, nowadays, repairing and rehabilitation is a more appropriate solution. For this purpose, polyethylene pipes would be inserted into the culverts called slips lining. This action reduces roughness, increases energy and culvert's depreciation and makes it difficult for fishes to pass. Using VOF of k-ε turbulence model and organized or non-organized combined gridding, Carrica et al (2005) modeled pool weirs using FLUENT model and finally satisfying results were obtained in comparison with the physical model. Cea et al (2007) employed a shallow water numerical model and turbulence modeling by utilizing

three k- ϵ turbulence length model and modeled algebraic stress of vertical slot type fish baffle. In this study, due to the hydraulic performance of AWWs, it has been decided to employ these structures as fish baffle. It is necessary to maintain that the AWWs have never been used as fish baffle before and it could be evaluated as a design case. In order to achieve this goal, an experimental investigation in this field was conducted. Parameters were considered and evaluated as newly produced dimensionless parameters.

$$f = g\left(\frac{V}{\sqrt{gy}}, \frac{y}{B}, \lambda^+, h^+, q^*, S_0\right) \quad (1)$$

Methodology

The main flume is 10 m in length, 25 cm in width, and 50cm in height. The flume's slop is adjustable up to 7.6%. For the present study, the slops were considered to be as 3 to 7.6 percent since fishways would be used in high slops. Fishway structures were constructed within the flume and AWWs were inserted into the flume along a 5-m length section, so that the first baffle was placed 3.5 m further than the entrance to be far enough from the initial turbulences. The flows ranged from 16 to 50 L/S. According to what was stated before about the flume and laboratory equipment, measuring instruments are as follows: a precise point gauge with a precision of 0.1 mm for measuring the flow depth through different sections of culvert, triangular weir to measure the flow rate and a camera for high definition filming. For this purpose, AWWs were placed at various spaces of 0.6, 1.2 and 1.8m. Each model was tested at three slops of 3%, 4.8%, 7.6% and four flow rates of 21.62, 32.68 and 46.64 L/S and a total of 81 trials were conducted. In these trials, slope and flow rate were regulated initially, and subsequently, the present uniform flow was filmed. Afterwards, water surface profile was drawn by the digitizer Engage software and Reynolds number, Froude number, Moody friction coefficient, Manning roughness coefficient and the other dimensionless parameters extracted from dimensional analysis were calculated. To calculate dimensionless parameters, first, energy dissipation for every single trail was computed and then roughness coefficients were calculated using Eq (2) – (3).

$$hf = f \frac{2}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

Energy loss (hf) over a given length, length (L), Average velocity (V) between the first and second section and gravitational acceleration (g) combining Eq (3) with Manning's equation Manning roughness coefficient could be defined as:

$$n = R \sqrt[1]{f/8g} \quad (3)$$

Results and discussion

The Manning roughness coefficient is expressed as a function of hydraulic radius (R), Moody friction coefficient (f) and gravitational acceleration (g).

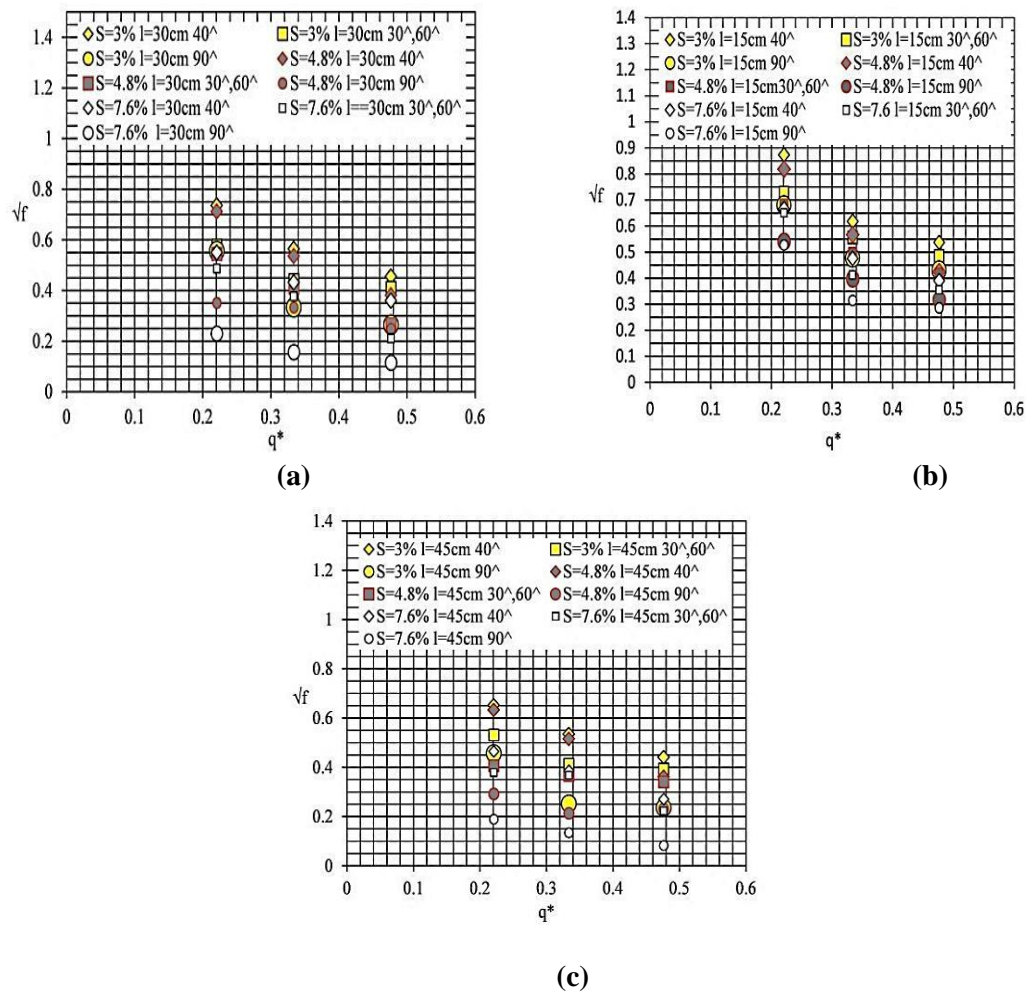


Fig. 1-Moody roughness coefficient root square variations versus dimensionless flow rate tested at relative spacing of a) 0.6; b) 1.2; (c) 1.8

The diagram of Moody friction coefficient versus dimensionless flow rate q^* for different models was plotted in order to evaluate the effect of flow rate on moody's friction factor. With respect to Fig.1, the increase in the flow rate throw constant hydraulic condition led to Moody friction coefficient reduction. So, Moody friction coefficient root square decreases from 0.832 at flow rate of 21.62 L/S to 0.5371 at 46.64 L/S. According to the research objectives, the best fish baffle for minimizing culvert's depreciation was AWW with two vertex angles of 40 degrees and relative spacing of 0.6m, but as fishes need sufficient space for resting through their path toward the upstream, the ideal relative spacing for fish passage improvement is 1.2.

Results Conclusions

By increasing the baffle's height at similar hydraulic conditions due to the rise of the friction loss, roughness coefficient increases.

- The placement of barriers together, with the relative distance of zero ($\lambda^+ = 0.6$), causes that only a limited part of the barrier be effective in creating effective loss. So, to increase the rate of friction loss, the presence of the relative distance between the barriers is essential; otherwise, barriers will greatly miss their performance.

Acknowledgement

The costs of this research are provided by the research site of the second author. The financial management of the Vice Chancellor for Research of Shahid Chamran University of Ahvaz is hereby thanked.

References

- 1- CARRICA, P., TURAN, C. & WEBER, L. 2005. Computation Of The Free Surface Flow In A Fish Passage. *Mecánica Computacional*, 24.
- 2- CEA, L., PENA, L., PUERTAS, J., VÁZQUEZ-CENDÓN, M. & PEÑA, E. 2007. Application of several depth-averaged turbulence models to simulate flow in vertical slot fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133, 160-172.



© 2020 by the authors. Licensee SCU, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

بررسی مقاوت جریان کالورت مسلح شده با سرریزهای W شکل نامتقارن

زینب گله دار شوشتری^۱، جواد احدیان^{۲*} و سید محسن سجادی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲- دانشیار گروه سازه‌های آبی دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۳- نویسنده مسئول، استادیار سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز. m.sadjadi@scu.ac.ir

پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۵

بازنگری: ۱۳۹۷/۱۱/۳۰

دریافت: ۱۳۹۶/۸/۲۵

چکیده

احداث سدهای انحرافی در مسیر رودخانه‌ها مانع از مهاجرت ماهی‌ها به بالادست می‌شوند. به همین دلیل احداث سازه‌های هیدرولیکی تحت عنوان راه‌ماهی به منظور استهلاک انرژی و بهبود عبور ماهی‌ها ضروری می‌باشد. در تحقیق حاضر سرریزهای W شکل نامتقارن با زوایای رأس ۴۰ درجه، سرریز با زوایای رأس ۳۰ و ۶۰ درجه و سرریز با زاویه رأس ۹۰ درجه طراحی شدند همچنین به منظور شناخت عملکرد هیدرولیکی این نوع از راه‌ماهی، سه مدل فیزیکی شامل مانع از نوع سرریز W شکل نامتقارن با فاصله نسبی ۱/۶ + (۳۰ عدد مانع)، مدل با ۱۵ عدد مانع با فاصله نسبی ۱/۲ و مدل با ۱۰ عدد مانع با فاصله نسبی ۱/۸ برای هر سرریز طراحی و اجرا شدند. نتایج نشان داد با افزایش شیب، دبی جریان و فاصله نسبی و با کاهش ارتفاع موانع، ضریب زبری و استهلاک انرژی کاهش می‌یابند. بر اساس نتایج به دست آمده در شیب سه درصد ضریب زبری مائینگ از ۰/۶۵ + در فاصله نسبی ۱/۶ + به ۰/۴۸ + در فاصله نسبی ۱/۸ می‌رسد. جذر ضریب دارسی و سیساک در شیب مشخص سه درصد از ۰/۸۷ + به ۰/۶۵ + در فاصله نسبی ۱/۸ می‌رسد. همچنین نتایج آزمایش‌ها نشان داد که سرریز دارای زوایای رأس ۴۰ درجه و فاصله نسبی ۱/۲ بهترین شرایط برای عبور ماهی‌ها به بالادست جریان می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: راه‌ماهی، استهلاک انرژی، سرریز W شکل نامتقارن، ضریب زبری مائینگ، بهبود عبور ماهی‌ها.

مقدمه

استهلاک کالورت‌ها شده و عبور ماهی‌ها را دچار مشکل می‌کند. بنابراین قرار دادن موانع درون کالورت‌ها به منظور بهبود عبور ماهی‌ها و افزایش استهلاک انرژی ضروری می‌باشد (Webb and Hatchkiss, 2009). شرایط هیدرولیکی این سازه‌ها باید به گونه‌ای باشد که ماهیان قادر به عبور از آن‌ها باشند، در غیر این صورت منجر به تأخیر در مهاجرت ماهی‌ها به بالادست شده و باعث از بین رفتن تعداد زیادی از ماهی‌ها و در نهایت انقراض گونه‌هایی از ماهی می‌شود. بنابراین طراحی و احداث راه‌ماهی از نقطه نظر محیط‌زیستی بسیار با اهمیت است. در احداث راه‌ماهی باید بعضی از مسائل هیدرولیکی را مد نظر قرار داد یکی از این مسائل جذب ماهی‌ها به طرف راه‌ماهی و دیگری حداکثر سرعت جریان در مسیر راه‌ماهی است. ماهی‌ها در حرکت خود به بالادست اگر با مانعی رو به رو شوند، سعی می‌کنند از مانع عبور کرده و از تصمیم خود منصرف نمی‌شوند و اگر نتوانند از موانع عبور کنند حیات آن‌ها با مشکل مواجه شده و ممکن است از بین بروند. طبق شواهد موجود اولین راه‌ماهی در قرن هفدهم طراحی شده است. Rajaratnam et al. (1989) پیوسته‌ی شکاف‌دار (slotted weir baffle) را مورد بررسی قرار دادند هیدرولیک جریان عبوری از کالورت راه‌ماهی را بررسی

عموماً ماهی‌های مهاجر، در رودخانه‌ها به منظور تخم‌ریزی به طور غریزی در خلاف جهت جریان آب شنا می‌کنند، تا خود را به محل‌هایی که از تخم خارج شده‌اند برسانند. تداوم این عمل منجر به بقا و تولیدمثل ماهی‌ها می‌شود. سدها و بندهای انحرافی و تنظیمی بیش‌ترین خطر را در روند مهاجرت ماهی‌ها به بالادست به وجود می‌آورند، با احداث سدها و سازه‌های آبیگر کل عرض رودخانه بسته می‌شود و به عنوان تهدیدی جدی برای عبور ماهی‌ها به بالادست جریان به حساب می‌آیند، برای برطرف کردن این مشکل در طراحی سدها و آبیگرها، سازه‌های هیدرولیکی تحت عنوان راه‌ماهی و کالورت مانع‌دار احداث می‌شوند (Acharya et al., 2000). ماهی‌ها به کمک این سازه‌ها به بالادست جریان مهاجرت می‌کنند. کالورت‌های فرسوده که، تقریباً نیمی از عمر خود را سپری کرده‌اند نیاز به تعمیر و جایگزینی دارند. از آنجا که جایگزینی کالورت‌ها بسیار پرهزینه می‌باشد، امروزه تعمیر و به‌سازی آن‌ها راه‌حل مناسب‌تری محسوب می‌شود. برای این منظور درون کالورت‌ها لوله‌های پلی‌اتیلن قرار داده می‌شود که به این عمل اسلیپ‌لاینینگ (Slip Lining) گفته می‌شود، این عمل منجر به کاهش زبری و افزایش انرژی و

منطقه‌ی چرخش بزرگ بلافاصله در پایین دست هر مانع به وسیله افزایش متوسط عمق جریان برای هر دبی جریان باعث سهولت و افزایش عبور ماهی‌ها شود. Ehsani et al. (2016) شرایط جریان در راه‌ماهی از نوع کانال ماهی - قایق‌رو را بررسی کردند. با مقایسه عمق جریان در دبی‌های مختلف با توجه به ابعاد ماهی‌های مهاجر در رودخانه‌های استان مازندران، دبی‌های سوم و چهارم به ترتیب با مقادیر $4/4$ و $9/1$ لیتر بر ثانیه عمق‌های بهینه را برای عبور ماهی‌ها ایجاد می‌نمایند. با تهیه نقشه رستر سرعت‌های طولی و عرضی جریان در محیط GIS و ترسیم الگوی جریان با استفاده نرم‌افزار متلب مشاهده گردید که یک ناحیه کم سرعت در داخل حوضچه‌ها، بعد از هر مانع تشکیل می‌شود که بهترین مکان برای استراحت ماهی‌ها است. سدهای مارد و بهمن شیر در حال طراحی و احداث در استان خوزستان می‌باشند، این سازه‌ها نیاز به سازه‌های هیدروبیکی راه‌ماهی دارند، به همین دلیل تصمیم به طراحی راه‌ماهی از نوع سرریز w شکل نامتقارن گرفته شد. ماهی *Tenulosa* یک ماهی گرم‌آبی است و تنها گونه آنادارموس (مهاجر) در جنوب ایران می‌باشد. این ماهی دارای قدرت پرش و شنای بالایی می‌باشد. در این مطالعه با توجه به عملکرد هیدرولیکی سرریزهای w شکل نامتقارن تصمیم بر این شد که از این سازه‌ها به‌عنوان راه‌ماهی استفاده شود. لازم به ذکر است که سرریز w شکل نامتقارن به‌عنوان مانع راه‌ماهی تاکنون مورد استفاده قرار نگرفته است و می‌توان به‌عنوان طراحی مورد ارزیابی واقع شود. برای دستیابی به این هدف بررسی آزمایشگاهی در این زمینه صورت گرفت، به طوری که مدل‌های مختلف فیزیکی از سازه‌های مورد نظر تهیه شد و آزمایش‌هایی با متغیرهای مختلف روی آن‌ها انجام گردید. در ادامه به بررسی شرایط و امکانات آزمایشگاهی و تحلیل ابعادی به‌کار گرفته شده در این مطالعه پرداخته می‌شود.

مواد و روش‌ها

برای انجام پژوهش حاضر، می‌توان پارامترهای تأثیرگذار روی جریان عبوری از روی سرریز w شکل نامتقارن را مطابق رابطه (۱) تعریف نمود:

$$F(B, g, y, l, p^*, S_0, \theta_1, \theta_2, \mu, f, V, \rho, Q) = 0 \quad (1)$$

در رابطه (۱)، B عرض فلوم، g شتاب ثقل، l عمق جریان، f فاصله بین موانع، θ_1 و θ_2 : زاوای رأسی مثلث در سرریز w شکل نامتقارن، p ارتفاع موانع، μ : لزجت، Q : دبی جریان، p : جرم مخصوص، S_0 : شیب کف، f : ضریب اصطکاک مودی، V : سرعت متوسط جریان می‌باشد. با توجه به آنالیز ابعادی صورت گرفته به کمک تئوری π با کینگهام می‌توان روابط بدون بعد را استخراج کرد و به صورت رابطه (۲) بیان نمود:

نمودند. در تحقیق آن‌ها معادله‌ای برای پیش‌بینی عمق جریان به ازای دبی، قطر و شیب کالورت در هر مقطع از کالورت ارائه شده است.

هم‌چنین نتایج آن‌ها نشان داد، وجود شکاف در مانع تا حدی اثربخش می‌باشد. Rajaratnam et al (1990) در بررسی خود روی کالورت با موانع دارای راه‌ماهی، مانع پیوسته (weir baffle) را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در بررسی خود روی موانع پیوسته به این نتیجه رسیدند که مانع پیوسته یک جایگزین مقرون به صرفه‌ی مانع شکاف‌دار می‌باشد. مانع پیوسته می‌تواند از یک قطعه فلزی و یا پلاستیکی ساخته شود. در مطالعه‌ی آن‌ها نتایج حاصل از یک بررسی آزمایشگاهی روی کالورت دارای مانع، از نوع سرریز بیان شده است. موانع دارای ارتفاع $0/1$ و $0/15$ برابر قطر کالورت (D) موجود و فاصله نسبی $0/6$ و $1/2$ برابر قطر (D) کالورت مورد بررسی قرار گرفتند. معادله‌ای نیز برای تعیین عمق آب درون کالورت ارائه شد. Rajaratnam et al (1991) در تحقیق روی کالورت‌های دارای مانع راه‌ماهی، پی بردند که مانع اسپویلر (Spoiler baffle) می‌تواند شامل ردیف‌های مکعبی با فاصله از هم و در امتداد داخلی کالورت به‌کار برده شوند این موانع در دو یا سه ردیف یا هر ترکیب مشابه دیگر احداث می‌شوند. در بررسی موجود چهار مانع با ارتفاع $0/09D$ و $0/15D$ و فاصله نسبی $0/35D$ و $1/06D$ به‌کار برده شد، در نهایت مانع اسپویلر کارآمد ارائه شد و بر اساس نتایج تحقیقات آن‌ها معادله‌ای برای تعیین عمق آب به ازای سرعت جریان و قطر و شیب آبگذر بیان شد، هم‌چنین معادله‌هایی برای تعیین سرعت ارائه شد. Carrica et al. (2005) مدل آشفتگی K- ϵ و شبکه‌بندی

ترکیبی با سازمان و بی سازمان راه‌ماهی استخر-سرریز را با مدل FLUENT مدل‌سازی کردند و نتایج رضایت بخشی در مقایسه با مدل فیزیکی به‌دست آوردند. Cea et al (2007) با استفاده از مدل عددی آب‌های کم عمق و مدل‌سازی آشفتگی با به‌کارگیری سه مدل طول اختلاط K- ϵ و تنش جبری را برای راه‌ماهی از نوع بازشدگی قایم مدل نمودند، نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از مدل آشفتگی K- ϵ را می‌توان به‌عنوان ابزاری برای طراحی عملی استفاده کرد. بر اساس بررسی Rayamajhi et al (2012) جریان فوق بحرانی در کالورت‌ها معمول می‌باشد و به تبع آن ارتفاع ناشی از جریان ممکن است برای تنفس و حرکت ماهی‌ها مناسب نباشد. تحقیق Tullis و Olsen (2013) با موضوع ماهی عبوری و دبی در کالورت دارای اسلیپ‌لاینینگ مانع‌دار صورت گرفت و توانستند اثر مانع در تخلیه‌ی جریان پر از یک آبگذر پلی‌اتیلن را بررسی کنند و هم‌چنین تعداد ماهی‌های عبوری به واسطه حضور راه‌ماهی را نیز بررسی کردند. Uys و Chanson (2016) در یک بررسی فیزیکی روی یک آبگذر دارای راه‌ماهی، یک کالورت با شش مدل فیزیکی شامل شش طرح از موانع را مورد بررسی آزمایشگاهی قرار دادند، نتایج آن‌ها نشان داد که مانع دارای تیغه مورب ساده می‌تواند تأثیرگذار بوده و با ایجاد یک

مدل آزمایشگاهی

مدل‌های مورد مطالعه در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران برپا شدند. برای انجام آزمایش‌های تحقیق حاضر از یک فلوم به طول ده متر، عرض ۲۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر استفاده گردید. این فلوم دارای قابلیت تغییر شیب از صفر تا ۷/۶ درصد را داراست، از آنجایی که راه‌ماهی‌ها در شیب‌های زیاد احداث می‌شوند (شیب ۲۰ درصد نیز طراحی شده است (Mahmoodi Kordestani and Shafai-Bajestan, 2002). در تحقیق حاضر با توجه امکانات آزمایشگاهی موجود، شیب‌های سه تا ۷/۶ درصد متغیر در نظر گرفته شد. در این مطالعه درون فلوم سازه‌های راه‌ماهی احداث شدند، به این صورت که سازه‌های w شکل نامتقارن در طولی حدود پنج متر درون فلوم چسبیده شدند، به طوری که اولین مانع در ۳/۵ متری از ابتدای فلوم قرار داده شد تا به اندازه کافی از آشفتگی‌های اولیه به دور باشد. این سازه‌ها با توجه به ابعاد فلوم موجود طراحی گردیدند. دبی‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها از ۱۶ تا ۵۰ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شدند، دبی حداقل (۲۱/۴۶) برای دوری از تشکیل جریان حوضچه‌ای و دبی حداکثر (۴۶/۶۴) برای دوری از جریان سرسره-ای انتخاب می‌شود. در شکل (۱) نمایی از پلان فلوم مورد استفاده، و در شکل (۲) نمایی از سرریزهای w شکل نامتقارن به همراه جزئیات نشان داده شده است. در جدول (۱) نیز متغیرهای موجود در تحقیق ارایه شده است.

$$F\left(\frac{gy}{v^2}, \frac{\mu}{\rho\nu y}, \frac{p}{B}, \frac{l}{B}, \frac{Q}{b^{2.5}\sqrt{g}}, \frac{y}{B}, S_0, \theta_1, \theta_2\right) = 0 \quad (2)$$

در این رابطه، پارامتر اول عکس عدد فرود، پارامتر دوم عکس عدد رینولدز، پارامتر سوم عمق نسبی در طول فلوم، پارامتر چهارم نسبت ارتفاع سرریز، پارامتر پنجم و ششم زاویه رأس مثلث در سرریز w شکل نامتقارن، پارامتر هفتم فاصله نسبی، پارامتر هشتم شیب کف، پارامتر نهم ضریب دارسی ویسباخ، پارامتر دهم طول نسبی و پارامتر یازدهم دبی بدون بعد است. در این تحقیق هدف اصلی محاسبه ضریب اصطکاک مودی (f) و به تبع آن ضریب زبری مانینگ (n) می‌باشد. با توجه به روابط موجود ابتدا ضریب اصطکاک مودی و سپس ضریب زبری مانینگ محاسبه شدند و در نهایت پارامترهای موجود در رابطه (۳) به‌عنوان پارامترهای بدون بعد در نظر گرفته شدند و مورد ارزیابی قرار گرفتند.

$$f \& n = g\left(\frac{V}{\sqrt{gy}}, \frac{y}{B}, \lambda^+, h^+, q^+, S_0, \theta_1, \theta_2\right) \quad (3)$$

به‌دلیل آشفتگی جریان از عدد رینولدز جریان صرف‌نظر شد (حداقل رینولدز ۲۵۰۰۰). در رابطه (۳)، q^+ ، h^+ ، λ^+ به‌ترتیب به‌عنوان فاصله نسبی (فاصله بین موانع تقسیم بر عرض کالورت)، ارتفاع نسبی (ارتفاع بین موانع تقسیم بر عرض کالورت) و دبی بدون بعد جریان در نظر گرفته شدند.

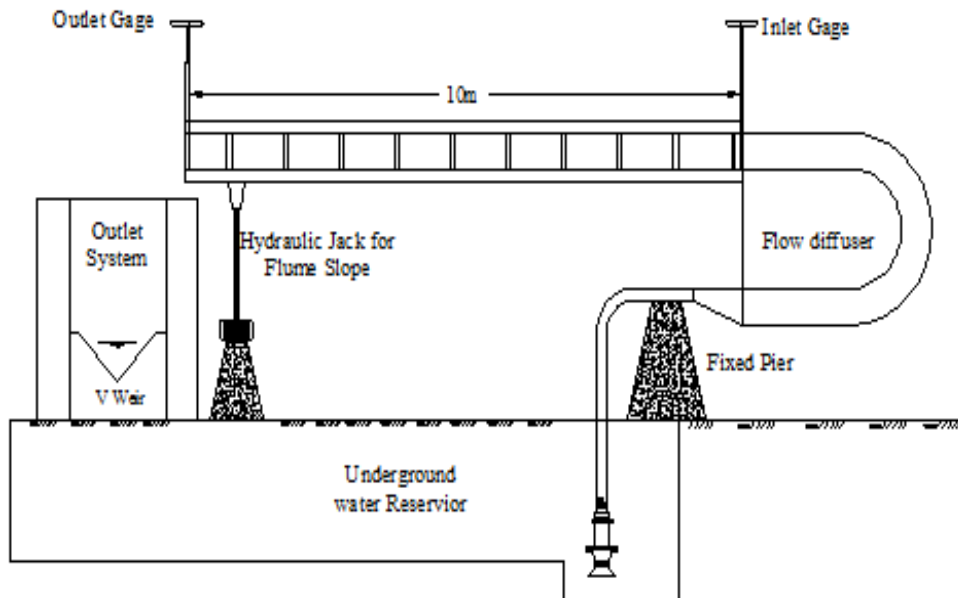


Fig. 1- Plan view of the experimental flume
 شکل ۱- نمایی از پلان فلوم مورد استفاده

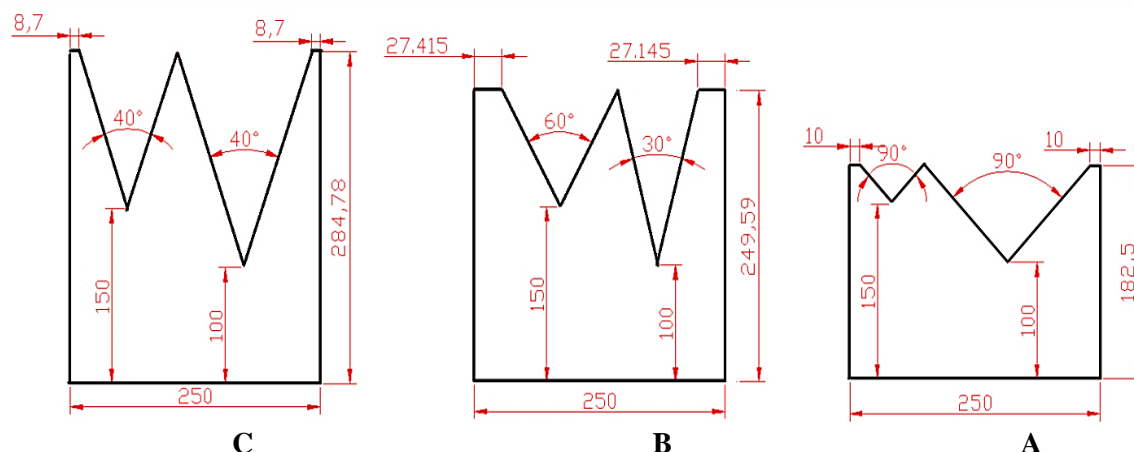


Fig. 2- W-shaped weirs with angles A) 90 B) 30 & 60 C) 40 Degrees (Dimensions in the fig. in mm.)
 شکل ۲- سرریزهای W شکل دارای زوایای الف) ۹۰ درجه، ب) ۳۰ و ۶۰ درجه، ج) ۴۰ درجه (ابعاد در شکل به میلی متر)

جدول ۱- متغیرهای موجود در تحقیق

Table 1- Variables in the research

$Q(\frac{m^3}{s})$	S_0	λ^+
0.02162	3%	0.6
0.03268	4%/8	1/2
0.04664	7%/6	7%/6

می‌باشد، لذا فاصله نسبی $0/6$ کمترین فاصله نسبی (فاصله بین دو مانع تقسیم بر عرض کالورت)، در نظر گرفته شد، در این فاصله نسبی $(\lambda^+ = 0/6)$ سرریزهای W شکل نامتقارن 30 عدد و در فاصله نسبی $1/2$ $(\lambda^+ = 1/2)$ تعداد موانع 15 عدد و در فاصله نسبی $1/8$ $(\lambda^+ = 1/8)$ تعداد موانع 10 عدد می‌باشد. هر مدل در سه شیب سه، $4/8$ و $7/6$ درصد و در سه دبی $21/62$ ، $32/68$ و $46/64$ لیتر بر ثانیه مورد آزمایش قرار گرفته شدند که در مجموع 81 آزمایش انجام شد. در این آزمایش‌ها ابتدا شیب و دبی جریان تنظیم گردید و سپس عمق جریان در بالادست $(0/5)$ متر قبل از اولین مانع) و پایین دست $(0/5)$ متر بعد از آخرین مانع) توسط پوینت گیج اندازه‌گیری شد و عدد رینولدز، عدد فرود جریان، ضریب اصطکاک مودی، ضریب زبری مانینگ و سایر پارامترهای بدون بعد حاصل از تحلیل ابعادی محاسبه شدند. به منظور محاسبه پارامترهای بدون بعد ابتدا افت انرژی در هر آزمایش مورد محاسبه قرار گرفت (بازه مورد بررسی $0/5$ متر قبل از اولین مانع و $0/5$ متر بعد از آخرین مانع می‌باشد)، سپس با استفاده از روابط (۴) و (۵) ضریب زبری محاسبه شدند.

$$hf = f \frac{L V^2}{D \cdot 2g} \quad (4)$$

سیستم تأمین آب فلوم بدین صورت است که جریان آب از طریق پمپ شناور با قدرت 20 اسب بخار به برج اصلی که دارای ارتفاع $4/5$ متری از زمین می‌باشد، هدایت شده و از طریق سیستم لوله‌کشی به یک کانال زانویی شکل منتقل می‌شود و در نهایت وارد فلوم اصلی شده، سپس در قسمت خروجی فلوم به یک حوضچه آرامش ختم می‌شود. در ابتدای حوضچه یک سرریز کالیبره شده مثلی 90 درجه برای اندازه‌گیری دبی جریان موجود بوده در نهایت جریان پس از سرریز مثلی وارد مخزن اصلی تأمین آب می‌گردد. بر اساس مطالب بیان شده در خصوص فلوم و تجهیزات آزمایشگاهی، وسایل اندازه‌گیری مورد استفاده عبارت‌اند از: پوینت گیج دقیق با دقت ± 0.1 میلی‌متر به منظور اندازه‌گیری ارتفاع جریان آب در مقاطع مختلف کالورت و سرریز مثلی شکل به منظور اندازه‌گیری دبی جریان می‌باشد. مدل‌های فیزیکی احداث شده به‌عنوان راه‌ماهی، سرریزها در فواصل مختلف می‌باشند. برای این منظور سرریزهای W شکل نامتقارن در فواصل نسبی (λ^+) $0/6$ ، $1/2$ و $1/8$ قرار داده شدند. معمولاً ماهی‌ها هنگام شنا کردن به فضایی برای استراحت در حوضچه‌ها نیاز دارند (به دلیل طولانی بودن مسیر مهاجرت)، هم‌چنین با کاهش فاصله ممکن است بخشی از موانع در تماس با سطح آب قرار نگیرند و افت اصطکاک و کارایی موانع کاهش پیدا کند. با توجه به اینکه تحقیقات گذشته نشان دادند که $0/6$ کمترین فاصله نسبی مناسب

اطمینان بیش‌تر به‌وسیله میکرومولینه پروفیل سرعت اندازه‌گیری شد و میانگین پروفیل سرعت به‌عنوان سرعت متوسط مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج و بحث

در این بخش به تجزیه و تحلیل نتایج ۸۱ آزمایش انجام‌شده درون کالورت مسلح شده با سرریزهای w شکل نامتقارن دارای جریان آزاد پرداخته شده است. با توجه به اینکه راه‌ماهی نوعی زبری محسوب می‌شود، لذا در این مطالعه به بررسی ضرایب زبری پرداخته شده است.

در رابطه (۴) افت انرژی در بازه مورد نظر، L طول بازه مورد بررسی، V سرعت متوسط بین مقطع اول و دوم و g شتاب ثقل می‌باشد. با ترکیب رابطه (۴) و رابطه مانینگ نیز می‌توان ضریب زبری مانینگ را به‌صورت زیر تعریف نمود:

$$n = R \frac{1}{6} \sqrt{\frac{f}{8g}} \quad (5)$$

در رابطه فوق n ضریب زبری مانینگ، R شعاع هیدرولیکی و f ضریب اصطکاک مودی می‌باشد. همچنین براساس رابطه پیوستگی $Q = \frac{A}{V}$ سرعت متوسط جریان مورد محاسبه قرار گرفت، برای

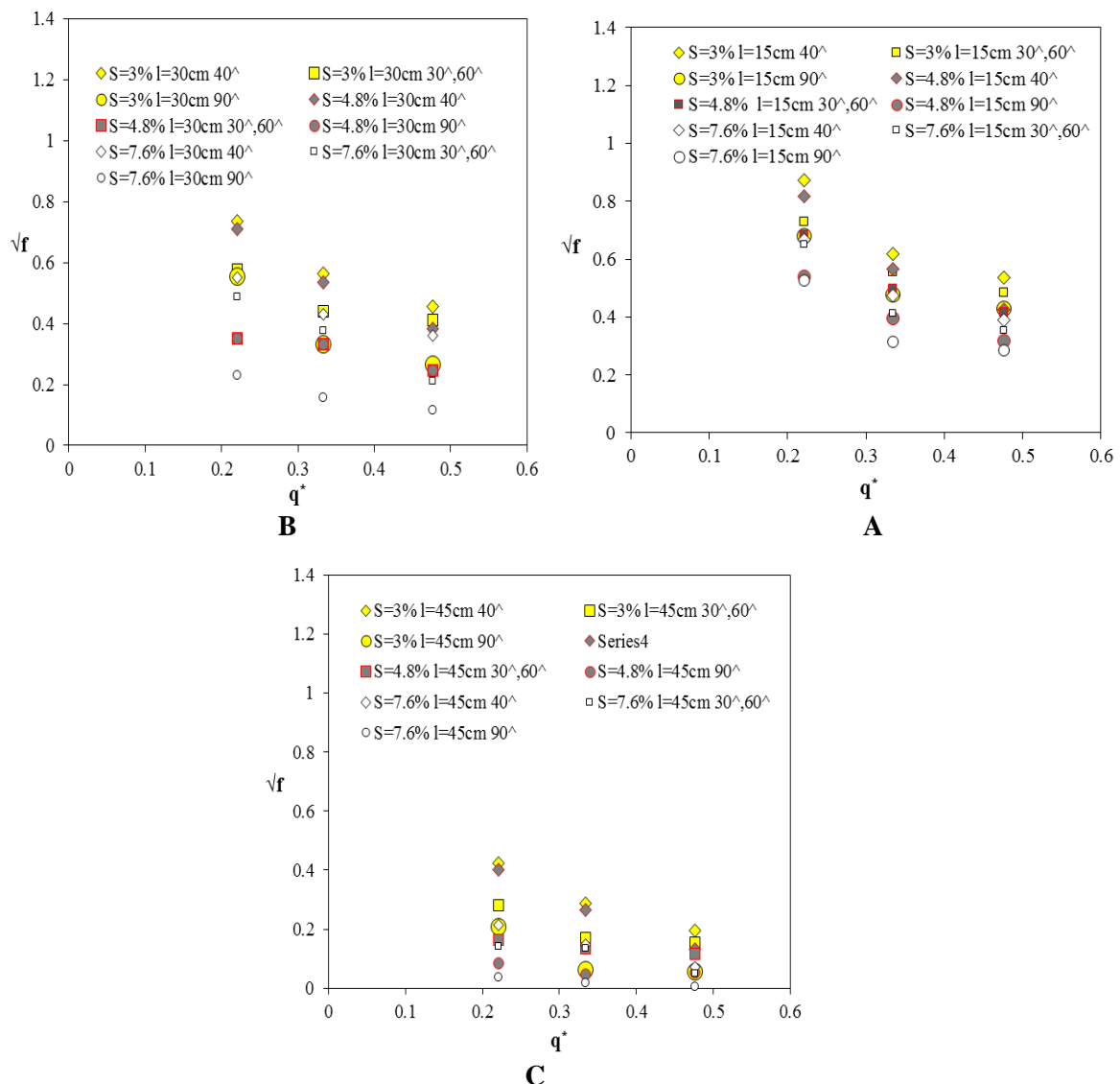


Fig. 3- Moody roughness coefficient root square variations versus dimensionless flow rate tested at relative spacing of A) 0.6; B) 1.2; C) 1.8

شکل ۳- نمودار تغییرات جذر ضریب اصطکاک مودی نسبت به دبی بدون بعد جریان در سه فاصله نسبی مختلف در، الف) فاصله نسبی ۰/۶، ب) فاصله نسبی ۱/۲، ج) فاصله نسبی ۱/۸

دارای دو زاویه رأس ۴۰ درجه و فاصله نسبی ۰/۶ بهترین نوع راهمایی برای کاهش فرسایش کالورت بوده ولی به دلیل اینکه ماهی‌ها در طول مسیر خود به بالادست نیاز به استراحت و فضای کافی دارند، بهترین فاصله نسبی برای بهبود عبور ماهی‌ها ۱/۲ می‌باشد.

$$\sqrt{\frac{8}{g}} = \frac{v}{u_*} = 2.5 \ln \frac{y}{k_s} + A_s \quad (6)$$

برای بررسی اثر دبی جریان روی ضریب زبری مانینگ، نمودار تغییرات ضریب زبری مانینگ نسبت به دبی جریان در شکل (۴) نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، در شرایط هیدرولیکی برابر با افزایش دبی بدون بعد جریان، فاصله نسبی، شیب کف و کاهش ارتفاع موانع، ضریب زبری مانینگ کاهش می‌یابد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود روند تغییرات ضرایب زبری نسبت به دبی جریان یکسان بوده این امر نشان دهنده‌ی رابطه‌ی مستقیم ضریب زبری مانینگ (n) و ضریب اصطکاک مودی (f) می‌باشد. طبق رابطه‌ی (۵) ضریب اصطکاک زبری مانینگ با جذر ضریب اصطکاک مودی رابطه‌ی

مستقیم دارند. به‌منظور بررسی دقیق‌تر موضوع به تجزیه و تحلیل اثر عدد فرود جریان روی زبری موانع نیز پرداخته شد. نمودارهای جذر ضریب اصطکاک مودی نسبت به عدد بدون بعد فرود نشان می‌دهند که، با افزایش عدد فرود جریان جذر ضریب اصطکاک مودی کاهش می‌یابد به طوری که با فوق بحرانی شدن جریان جذر ضریب اصطکاک مودی کاهش می‌یابد. تغییرات جذر ضریب اصطکاک مودی نسبت به عدد فرود در شکل (۵) نشان داده شده است، در شرایط هیدرولیکی یکسان جذر ضریب اصطکاک مودی از ۰/۸۷۳۲ در بلندترین سازه به ۰/۶۸ در کوتاه‌ترین سازه کاهش پیدا می‌کند. با توجه به رابطه (۷) عدد فرود با سرعت جریان (v) رابطه مستقیم و با جذر عمق جریان (\sqrt{y}) رابطه عکس دارد، در شرایط هیدرولیک یکسان با افزایش فاصله نسبی، شیب و کاهش ارتفاع موانع سرعت جریان افزایش و عمق جریان کاهش می‌یابد، با افزایش دبی سرعت نسبت به عمق جریان افزایش بیشتری پیدا می‌کند و در نهایت عدد فرود جریان افزایش می‌یابد و با توجه به رابطه (۱۰)، f و V با یکدیگر رابطه عکس دارند، بنابراین طبق رابطه (۱۱) با افزایش سرعت و عدد فرود، جریان جذر ضریب اصطکاک مودی کاهش می‌یابد. لذا با کاهش فاصله نسبی، شیب، دبی جریان و افزایش ارتفاع مانع، ضریب اصطکاک مودی افزایش می‌یابد.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gy}} \quad (7)$$

به‌منظور بررسی زبری موانع، ضریب اصطکاک مودی به دلیل بیان بهتر زبری مطلق و ضریب زبری مانینگ در مدل‌های مختلف آزمایشگاهی محاسبه گردید. به‌منظور بررسی اثر دبی جریان بر فاکتور اصطکاک مودی نمودار جذر ضریب اصطکاک مودی نسبت به دبی بدون بعد جریان q^* برای مدل‌های مختلف رسم گردید. تجزیه و تحلیل نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دبی جریان در شرایط هیدرولیکی یکسان ضریب اصطکاک مودی کاهش می‌یابد، همان‌گونه که در نمودارهای شکل (۳) مشخص است، جذر ضریب اصطکاک مودی از ۰/۸۳۲ در دبی ۲۱/۶۲ لیتر بر ثانیه به ۰/۵۳۷۱ در دبی ۴۶/۶۴ لیتر بر ثانیه می‌رسد، بنابراین با افزایش دبی از ۲۱/۶۲ لیتر بر ثانیه به ۴۶/۶۴ لیتر بر ثانیه جذر ضریب اصطکاک مودی ۳۳/۶۱ کاهش می‌یابد. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد که با افزایش دبی جریان سرعت (v) و عمق جریان (y) بطور همزمان افزایش می‌یابند، در نتیجه $u_* = \sqrt{gRs}$ افزایش پیدا می‌کند به دلیل اینکه روند تغییرات سرعت جریان بیش‌تر از سرعت برشی u_* می‌باشد بنابراین $\frac{v}{u_*}$ افزایش یافته، همچنین با افزایش شیب و کاهش عمق آب شیب خط انرژی افزایش می‌یابد ولی به دلیل افزایش سرعت و کاهش عمق جریان، $\frac{v}{u_*}$ افزایش پیدا می‌کند. بنابراین با افزایش شیب و سرعت جریان و کاهش عمق جریان $\frac{v}{u_*}$ افزایش و با توجه به رابطه (۶) جذر ضریب اصطکاک مودی کاهش پیدا می‌کند، که این امر بیان‌گر انطباق نتایج آزمایش‌های انجام شده و نتایج تئوری حاصل از رابطه (۶) می‌باشد. با افزایش سرعت طبق رابطه (۴) ضریب اصطکاک مودی کاهش می‌یابد. شکل (۳) جذر ضریب اصطکاک مودی در فواصل نسبی مختلف را نیز نشان می‌دهد، همان‌گونه که ملاحظه می‌شود با افزایش فاصله نسبی، جذر ضریب اصطکاک مودی کاهش می‌یابد به طوری که جذر ضریب اصطکاک مودی در ارتفاع یکسان موانع در فاصله نسبی ۰/۶ بیش‌ترین مقدار و در فاصله نسبی سه برابری یعنی ۱/۸ کم‌ترین مقدار را دارد که این مسئله بیان‌گر رابطه عکس فاصله نسبی و جذر ضریب اصطکاک مودی می‌باشد. به‌طور مثال جذر ضریب اصطکاک مودی از ۰/۸۷۳۲ در فاصله نسبی ۰/۶ و در شرایط هیدرولیکی یکسان به ۰/۶۵۱۲ کاهش پیدا می‌کند بنابراین با سه برابر شدن فاصله نسبی جذر ضریب اصطکاک مودی ۲۵/۴۲ درصد کاهش می‌یابد. با کاهش فاصله نسبی بین موانع و افزایش ارتفاع موانع از نوع سرریز w شکل نامتقارن به دلیل افزایش سطح تماس نیروی درگ فشاری وارده از طرف سیال بر سطوح موانع افزایش می‌یابد، با کاهش فاصله نسبی تعداد موانع بیش‌تر شده و در نتیجه نیروی درگ اصطکاکی نیز افزایش یافته بنابراین با افزایش ارتفاع و کاهش فاصله نسبی افت اصطکاکی کل افزایش پیدا می‌کند و با توجه به رابطه (۴) بین افت اصطکاکی و جذر ضریب اصطکاک مودی رابطه مستقیم وجود دارد لذا با افزایش ارتفاع و تراکم موانع جذر ضریب اصطکاک مودی افزایش می‌یابد. با توجه به اهداف پژوهش سرریز w شکل نامتقارن

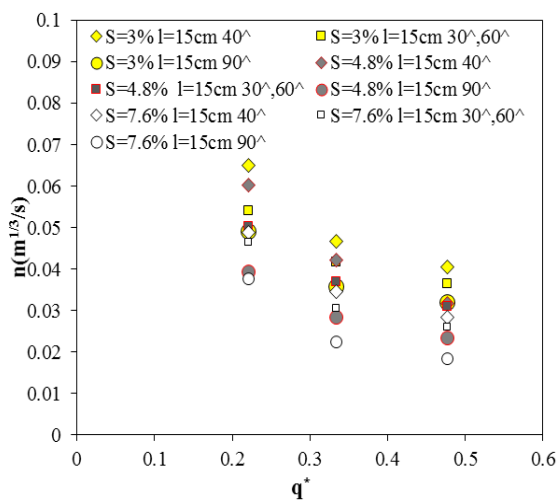
$$V = F \left(\frac{1}{f}, \frac{1}{y} \right) \quad (10)$$

$$V \propto \frac{1}{f} \quad (8)$$

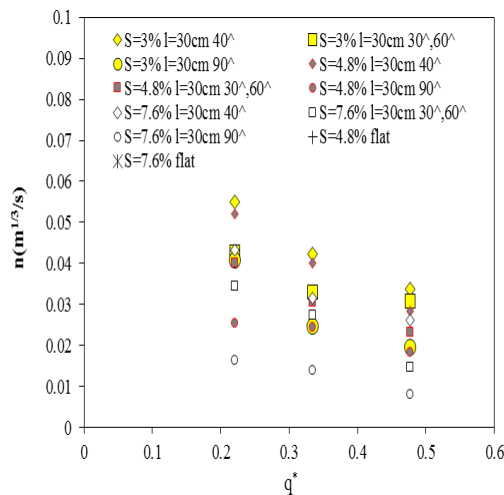
$$Fr = h \left(\frac{1}{f}, \frac{1}{y} \right) \quad (11)$$

$$V \propto \frac{1}{y} \quad (9)$$

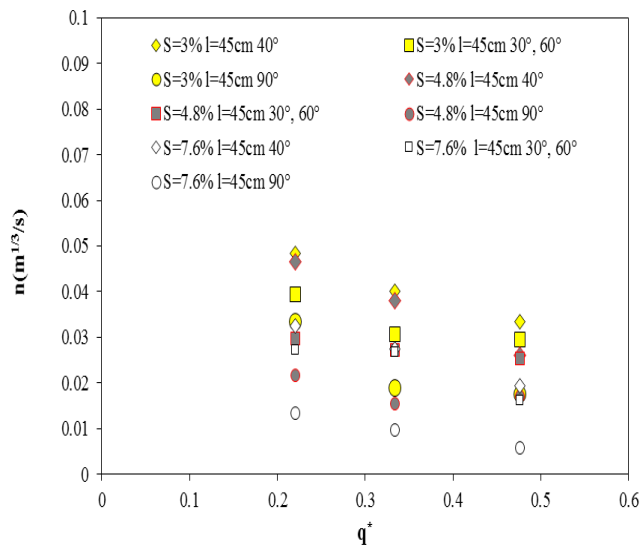
از ترکیب معادله (۷) و (۸) و (۹) خواهیم داشت:



B



A



C

Fig. 4- Manning roughness coefficient variations versus dimensionless flow rate tested at relative spacing of A) 0.6; B) 1.2; C) 1.8

شکل ۴- نمودار تغییرات ضریب زبری مانینگ نسبت به دبی بدون بعد جریان در سه فاصله نسبی مختلف در، الف) فاصله نسبی

۱/۶، ب) فاصله نسبی ۱/۲، ج) فاصله نسبی ۱/۸

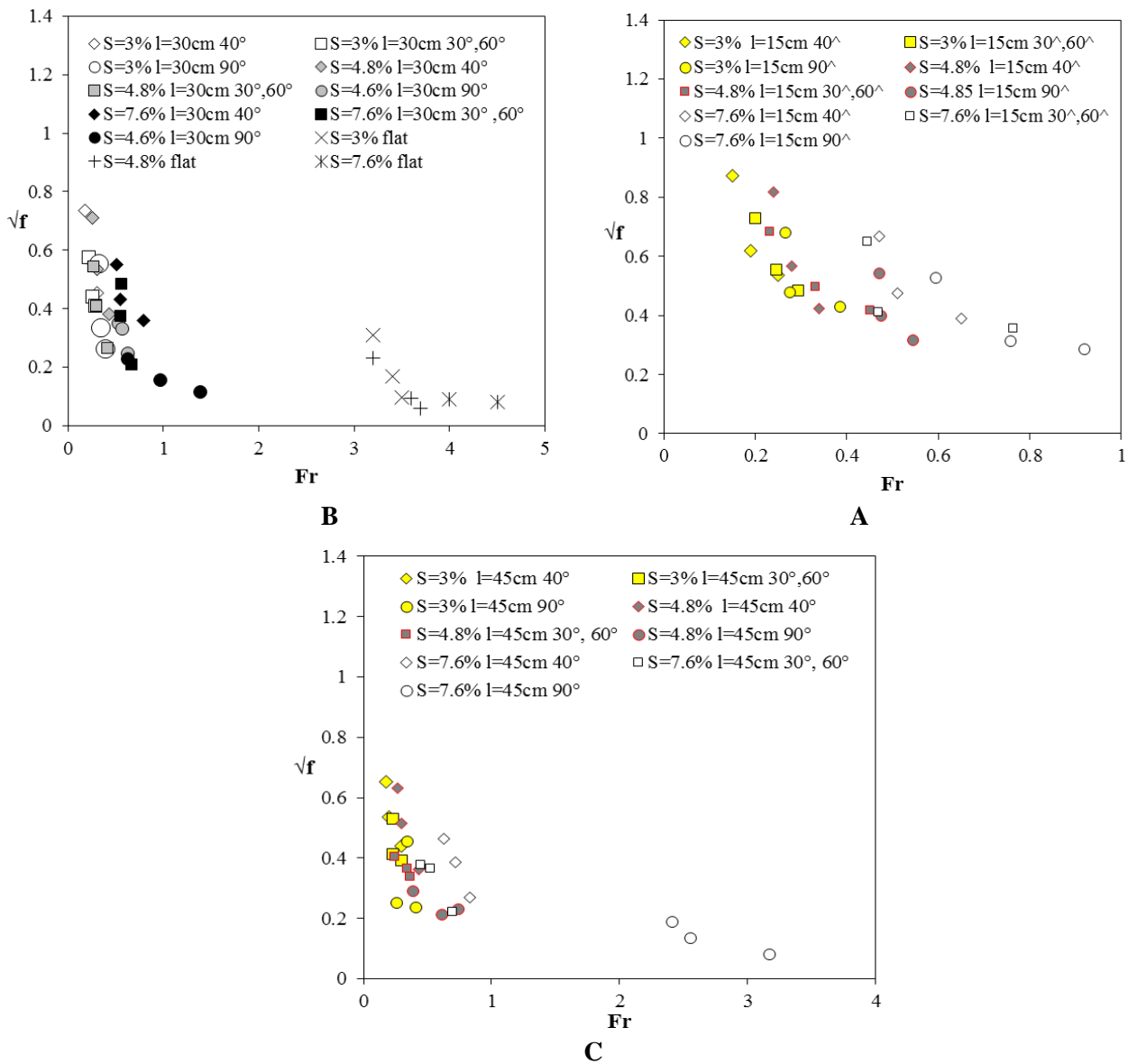


Fig. 5 - Moody roughness coefficient root square variations Froude number tested at relative spacing of A) 0.6; B) 1.2; C) 1.8

شکل ۵- نمودار تغییرات جذر ضریب اصطکاک مودی نسبت به عدد فرود در، الف) فاصله نسبی ۰/۶، ب) فاصله نسبی ۱/۲، ج) فاصله نسبی ۱/۸

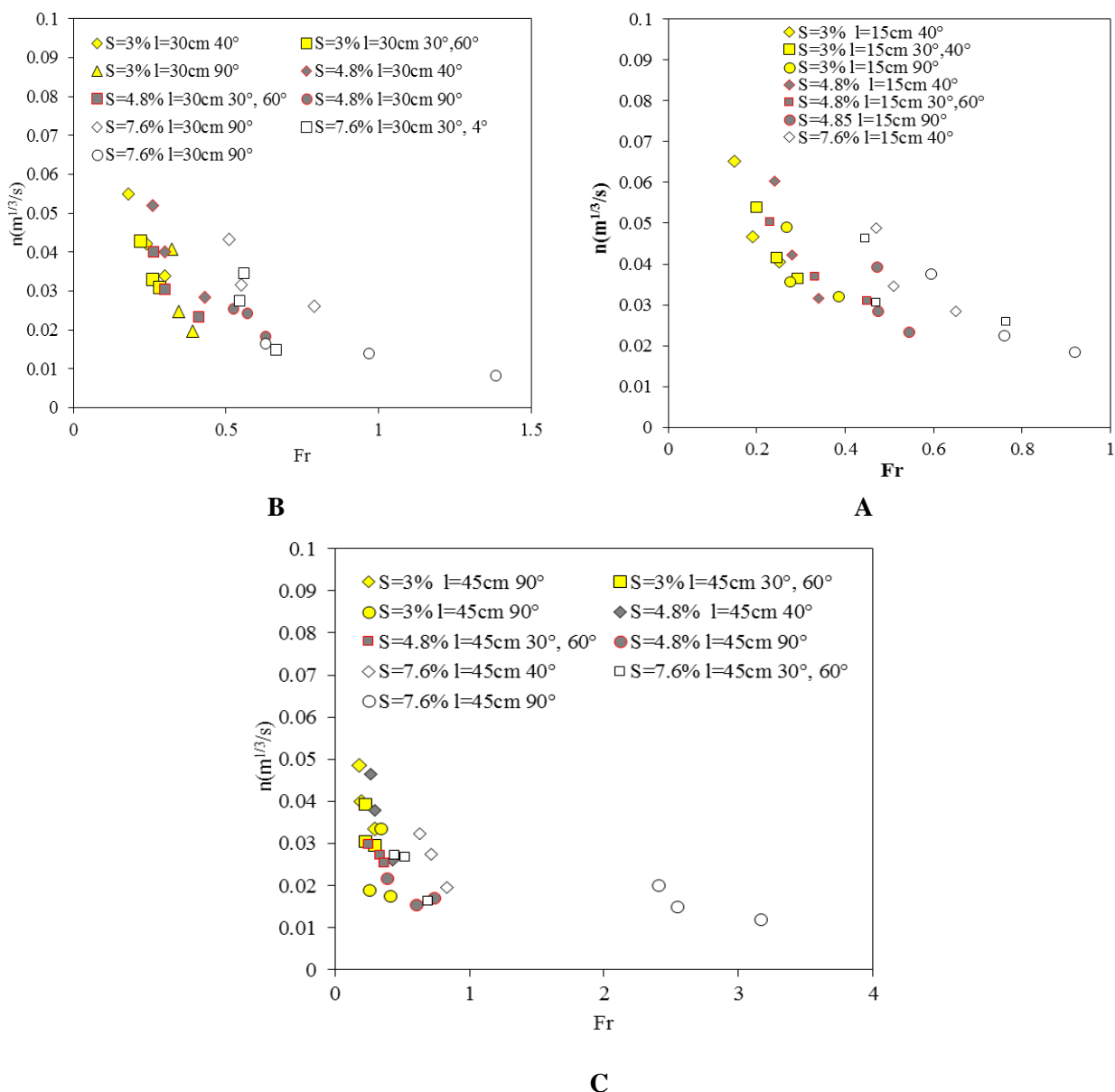


Fig. 6-- Manning roughness coefficient variations versus Froude number tested at relative spacing of A) 0.6; B) 1.2; C) 1.8

شکل ۶- نمودار تغییرات ضریب زبری مانینگ نسبت به عدد فرود در، الف) فاصله نسبی ۰/۶، ب) فاصله نسبی ۱/۲، ج) فاصله نسبی ۱/۸

ب) فاصله نسبی ۱/۲، ج) فاصله نسبی ۱/۸.

فاصله نسبی ۰/۶ به دلیل وجود آشفتگی‌های بین موانع ماهی‌ها از سرعت انتحاری برای شنا کردن استفاده می‌کنند، بنابراین در راه ماهی دارای طول زیاد ماهی‌ها نیاز به استراحت دارند لذا وجود حوضچه‌هایی برای استراحت ضروری به نظر می‌رسد. در فاصله نسبی ۱/۲ به دلیل وجود سرعت مناسب در حوضچه‌ها و تشکیل گردابه‌ها به صورت کامل شرایط بهتری برای مهاجرت ماهی‌ها فراهم می‌شود و در فاصله نسبی ۱/۸ به دلیل وجود سرعت نسبتاً بالا مهاجرت ماهی‌ها به سختی انجام می‌گردد.

بررسی‌ها نشان می‌دهند که، در فاصله نسبی ۰/۶ به دلیل سرعت کم و مناسب بمنظور مهاجرت ماهی‌ها، ماهی‌ها با سرعت بالایی شنا می‌کنند و در مدت کوتاه‌تری به بالادست مهاجرت می‌کنند، اما به دلیل فضای اندکی که بین موانع وجود دارد، گردابه‌ها به صورت کامل تشکیل نشده در نتیجه در این فاصله نسبی آشفتگی‌های جریان بیش‌تری وجود دارد. ماهی‌ها که با کوچکترین عامل غیر عادی نظیر صدا و یا آشفتگی جریان دچار استرس می‌شوند، به شدت استرس پیدا می‌کنند، که این امر برای سلامتی آنها مشکل ایجاد می‌کند (Branson, 2008).

ارایه رابطه

به کمک نرم‌افزار آماری SPSS و تحلیل ابعادی صورت گرفته رابطه‌ای برای ضریب زبری مانینگ با ضریب اطمینان ۰/۸۲ استخراج شد. شکل (۷) مقایسه مقادیر اندازه گیری شده با محاسباتی از رابطه زیر را نشان می‌دهد.

$$n = 0.045 q^+ - 0.008 \lambda^+ + 0.003 h^+ + 0.024 Fr^{-0.328} \quad (12)$$

مقایسه‌ای با سایر تحقیقات

در پژوهش موجود به منظور تجزیه و تحلیل و بررسی دقیق‌تر موضوع نتایج حاصل از آزمایش‌های تحقیق حاضر با نتایج تحقیقات گذشته مقایسه شد. Dugay و Lacey (2014)، روی زبری اسلیپ‌لاینینگ‌ها تحقیق کردند، برای این منظور یک مدل فیزیکی احداث کردند. این مدل توسط متصل‌کننده‌هایی درون فلومی به طول هشت متر و عرض ۰/۵ متر قرار داده شد. در این مطالعه سه مانع از نوع سرریز شکاف‌دار و سرریز پیوسته و مانع از نوع باریک و بلند و در سه ارتفاع نسبی مختلف ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۱۵ و چهار فاصله نسبی ۰/۰۶، ۰/۱۲، ۰/۱۸ و ۰/۲۴ برای هر مانع

و در نه دبی مختلف و در شیب صفر درصد مورد آزمایش قرار گرفته است. پس از آن ضرایب زبری را محاسبه کردند. در این مطالعه کوتاه‌ترین و بلندترین سرریز w شکل متقارن در سه شیب و فاصله نسبی مختلف با موانع از نوع سرریز شکاف‌دار و سرریز پیوسته و مانع از نوع باریک و بلند مقایسه شدند. همان‌گونه که در شکل (۸) ملاحظه می‌شود تفاوت بین بلندترین سرریز w شکل نامتقارن (دارای دو زاویه رأس ۴۰ درجه) با تحقیق پیشین بسیار زیاد بوده ولی تفاوت کوتاه‌ترین سرریز w شکل نامتقارن (دارای دو زاویه رأس ۹۰ درجه) با موانع از نوع سرریز شکاف‌دار و سرریز پیوسته و هم‌چنین مانع از نوع باریک و بلند کمتر بوده است، طوری که در بعضی از آزمایش‌ها نتایج نزدیک به هم می‌باشد. با توجه به اینکه جریان در این تحقیق به صورت آزاد در نظر گرفته شده است و اثرگذاری شتاب ثقل روی آزمایش‌ها، عدد فرود جریان روی زبری تأثیرگذار می‌باشد، در حالی که در اکثر تحقیقات گذشته جریان به صورت تحت فشار بوده و به دلیل عدم تأثیر شتاب ثقل، عدد فرود جریان روی ضرایب زبری اثر گذار نمی‌باشد.

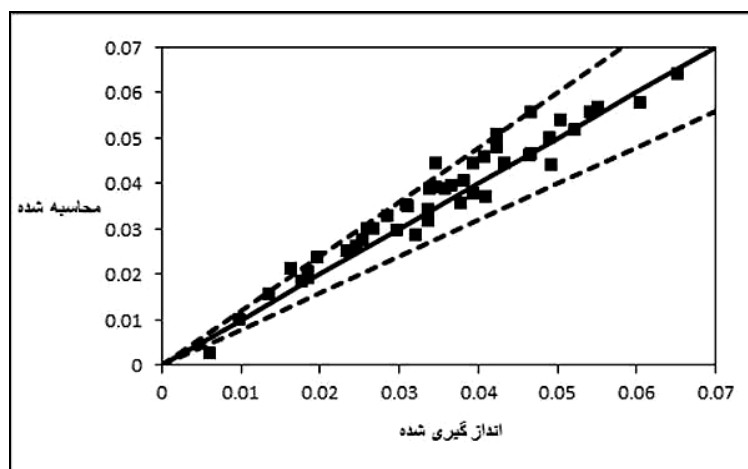


Fig. 7- The measured versus calculated Manning roughness coefficient (n) شکل ۸

شکل ۷- مقایسه مقادیر ضریب مانینگ (n) اندازه گیری شده و محاسبه شده

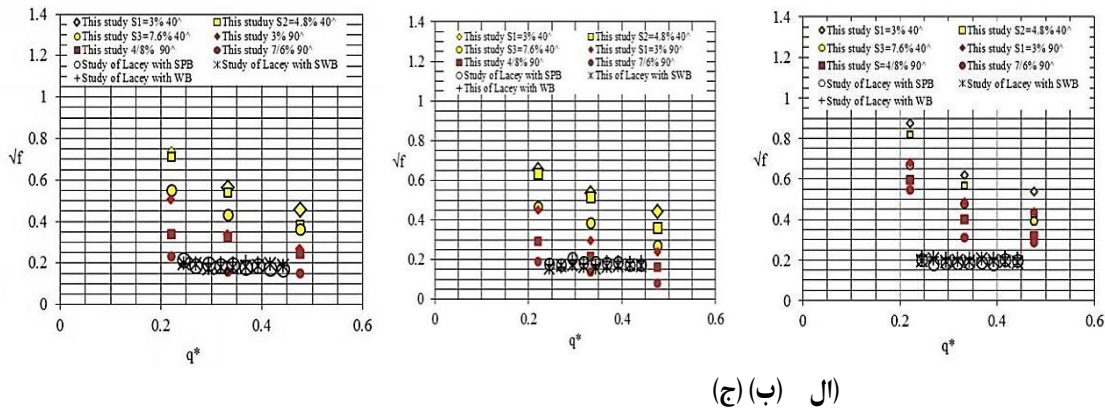


Fig. 8- Moody roughness coefficient root square variations versus dimensionless flow rate in this study and previous studies

شکل ۸- نمودار تغییرات جذر ضریب اصطکاک مودی نسبت به دبی بدون بعد جریان در این مطالعه و تحقیقات پیشین

• با افزایش عدد فرود جریان در حالت زیر بحرانی ضریب زبری مانینگ و ضریب اصطکاک مودی کاهش پیدا می کنند و همچنین در شرایط فوق بحرانی ضرایب زبری به شدت کاهش می یابند.
• با افزایش ارتفاع و کاهش فاصله نسبی و شیب کف فلوم، نیز به دلیل افزایش نیروی درگ فشاری و اصطکاک، ضرایب زبری افزایش می یابند، به طوری که سازه دارای زاویه رأس ۴۰ درجه و فاصله نسبی ۰/۶ بیشترین مقدار ضرایب زبری را به خود اختصاص داده اند. فاصله نسبی ۱/۲ و سرریز W شکل نامتقارن دارای زوایای رأس ۴۰ درجه بهترین مدل برای عبور ماهی ها به بالادست جریان می باشد.

تشکر و قدر دانی

هزینه های این تحقیق از محل پژوهانه نویسنده دوم تأمین شده است. بدین وسیله از مدیریت مالی معاونت پژوهش دانشگاه شهید چمران اهواز تشکر می گردد.

نتیجه گیری

در این تحقیق به منظور کاهش استهلاك کالورتها و بهبود عبور ماهی ها و بررسی ضرایب زبری ۸۱ آزمایش در دبی و شیب های مختلف انجام شد، نتایج آزمایش ها نشان می دهد که:

• قرارگیری سازه ها در کنار یکدیگر بدون فاصله نسبی (λ^+) باعث تماس تنها بخشی از سازه ها با جریان می شود. بنابراین نیروی درگ کاهش پیدا می کند و باعث افت اصطکاک کل می شود و سازه به عنوان راه ماهی بخشی از کارایی خود را از دست خواهد داد، بنابراین وجود حداقل فاصله نسبی ضروری می باشد.

• با افزایش دبی جریان، به طور هم زمان عمق و سرعت جریان افزایش می یابند ولی به دلیل افزایش بیش تر سرعت جریان نسبت به عمق جریان نسبت $\frac{v}{u_*}$ افزایش پیدا می کند که این امر موجب کاهش ضرایب زبری می گردد.

References

- 1- Acharya, M., Kells, J.A. and Katopodis, C., 2000. Some hydraulic design aspects of nature-like fishways. In *Building Partnerships* (pp. 1-10).
- 2- Branson, E. J. 2008. *Fish welfare*, John Wiley & Sons.
- 3- Carrica, P.M., Turan, C. and Weber, L., 2005. Computation Of The Free Surface Flow In A Fish Passage. *Mecánica Computacional*, pp.167-180.
- 4- Cea, L., Pena, L., Puertas, J., Vázquez-Cendón, M. & PEÑA, E. 2007. Application of several depth-averaged turbulence models to simulate flow in vertical slot fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133, 160-172.
- 5- Chanson, H. and Uys, H., 2016. Baffle designs to facilitate fish passage in box culverts: a preliminary study. 6th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, Portland, Oregon, USA, 27-30 June 2016

- 6- Duguay, J. and Lacey, R.J., 2015. Effect of fish baffles on the hydraulic roughness of slip-lined culverts. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(1), p.04014065.
- 7- Ehsani, R., Hassan Zadeh, Y., Mojtahedi, A.R., Saneei, M. and Hedayati, H., 2018. Experimental Study of Canoe-fishway Hydraulic Condition. *Irrigation Sciences and Engineering*, 40(4), pp.61-75.
- 8- Khodier, M.A. and Tullis, B.P., 2014. Fish passage behavior for severe hydraulic conditions in baffled culverts. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(3), pp.322-327.
- 9- Mahmoodi Kordestani, M and M. Shafai-Bajestan. 2002. Experimental investigation of hydraulic criteria in the fishways. International Conference on Environmental Engineering, 2002 joint CSCE/EWRI of ASCE conference/Nigara falls, Ontario, Canada
- 10- Olsen, A.H. and Tullis, B.P., 2013. Laboratory study of fish passage and discharge capacity in slip-lined, baffled culverts. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(4), pp.424-432.
- 10- Rajaratnam, N., Katopodis, C. and Fairbairn, M.A., 1990. Hydraulics of culvert fishways V: Alberta fish weirs and baffles. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 17(6), pp.1015-1021.
- 11- Rajaratnam, N., Katopodis, C. and Lodewyk, S., 1991. Hydraulics of culvert fishways IV: spoiler baffle culvert fishways. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 18(1), pp.76-82.
- 12- Rajaratnam, N., Katopodis, C. and McQuitty, N., 1989. Hydraulics of culvert fishways II: slotted-weir culvert fishways. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 16(3), pp.375-383.
- 13- Rayamajhi, B., Vasconcelos, J.G., Devkota, J.P., Baral, D. and Tritico, H.M., 2012. Should fish passage through culverts be a concern for midwest engineers and planners? Determining the percentage of culverts that act as barriers to fish passage in NE Ohio. In *World Environmental and Water Resources Congress 2012: Crossing Boundaries* (pp. 1624-1634).
- 14- Webb, J.R. and Hotchkiss, R.H., 2009. Culvert retrofit and fish passage: An update. In *World Environmental and Water Resources Congress 2009: Great Rivers* (pp. 1-12).