

بررسی و ارزیابی مقاومت جریان و انرژی جنبشی آشفته‌گی در راه ماهی W

مریم شهابی^۱، جواد احدیان^{۲*}، مهدی قمشی^۳ و حسین عزیزی نادیان^۴

۱، ۲ و ۳- به ترتیب: دانشجوی دکترا؛ دانشیار و استاد دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۴- کارشناسی ارشد دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۹/۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۴/۱۹

چکیده

در این پژوهش به بررسی و ارزیابی انرژی جنبشی آشفته‌گی (TKE) و مقاومت جریان در سازه نوین راه ماهی W پرداخته شده است. در شرایطی که شیب ۴، ۷ و ۱۰ درصد، فاصله بین سرریزها $D/L=3$ ، $D/L=9$ و $D/L=6$ ، و زاویه ۲۰ درجه است مجموعه‌ای از آزمایش‌ها در ۵ دبی متفاوت در یک سازه نوین راه ماهی W شکل اجرا شد. نتایج مقاومت جریان نشان داد که دبی، شیب، عدد فرود و فاصله نسبی تأثیری معکوس بر عملکرد موانع W به‌عنوان زبری دارند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که مقدار حداکثر TKE می‌تواند برای شیب سرریز ۱۰ درصد تا حدود ۰/۲۲ افزایش یابد ولی برای برخی از حالات قرارگیری سازه‌ها و شیب ۴ درصد مقدار آن در حدود ۰/۰۵ کنترل گردد. همچنین بهترین اثر گذاری شیب در مقدار ۴ درصد در شرایطی که دارای فاصله نسبی بدون بعد ۹ است، مقادیر کمتر از ۰/۰۵ را برای TKE نمایش می‌دهد که منجر به تشکیل بهترین شرایط برای استراحت ماهی در بین دیگر آزمایش‌هاست.

واژه‌های کلیدی

آشفته‌گی جریان، راه ماهی W شکل، زبری سازه راه ماهی، TKE، مقاومت جریان

مقدمه

از ماهی‌ها اشاره کرد. راه ماهی سازه‌ای است که عبور ماهی از موانع رودخانه را ممکن می‌سازد و دسترسی ماهیان به زیستگاه‌های موردنظرشان را آسان می‌کند. طراحی هیدرولیک سازه راه ماهی باید با ویژگی‌های رفتارهای شنای ماهی سازگار باشد تا بتواند راندمان عبور ماهی را بهبود بخشد (Castro et al., 2009, kim et al., 2016). در طراحی انواع سازه راه ماهی، توجه به خصوصیات بیولوژیکی و رفتاری ماهی‌های مهاجر اهمیت ویژه‌ای دارد. نبود شناخت

در عصر حاضر سازه‌های متقاطع در رودخانه می‌تواند اثرهای منفی بر محیط زیست داشته باشند، که این مسئله باعث شده است که راه‌های حفاظت از محیط زیست پیکره‌های آبی و توجه به سلامت اکوسیستم آبریان موجود در منابع آبی بااهمیت تلقی شوند. سازه‌های متقاطع مانع از مهاجرت ماهی‌ها به بالادست می‌شوند. از آثار سوء این مشکل می‌توان به عدم تخم‌ریزی، کاهش تولید مثل و انقراض گونه‌ای

ساخت سازه‌های بهبود یافته راه ماهی گزارش‌هایی ارائه دادند. زینکیان لنگ و همکاران (Xinqian Leng, et al., 2020) کاربرد برای طراحی کالورت‌های صاف عبور ماهی دستورالعمل‌هایی کاربردی ارائه دادند. هتی زوبوت و همکاران (Hattie Zobott et al., 2020) اهمیت بررسی و در نظر گرفتن نیروی دراگ را در طراحی سازه راه ماهی گوشزد کرده و موفق به طراحی سازه بهینه برای عبور ماهی شده‌اند.

مهاجرت شاید چالش برانگیزترین مرحله چرخه حیات ماهی باشد. باین‌همه، درک ما از ماهیان مهاجر و سازوکارهای اساسی زمان مهاجرت و موفقیت ماهی در مهاجرت نامشخص است. طراحی تقریباً اکثر راه ماهی‌ها بر اساس اتلاف انرژی است تا سرعت جریان برای تسهیل در حرکت گونه‌های مختلف ماهی کاهش یابد (Guo, 2019). تاکنون، طراحی هیدرولیکی اکثر راه ماهی‌ها فقط بر میانگین سرعت متمرکز شده و از ویژگی‌های آشفتگی در راه ماهی غفلت گردیده است. ماهی‌ها می‌توانند تلاطم را با گوش داخلی، خط جانبی و تپه عصبی تشخیص دهند (Northcutt, 1997). برخی از مطالعات تأثیر تلاطم را بر رفتار ماهی، انرژی و آشفتگی بررسی کردند و نشان دادند که ماهی می‌تواند از برخی رژیم‌های آشفته بهره‌مند شود (Liao et al., 2003). تنوع در متغیرهای هیدرودینامیکی از جمله سرعت، عمق آب و آشفتگی به مقادیر هندسی حوضچه‌های آرامش، شیب و دبی جریان عبوری وابسته است که این عوامل می‌تواند در کارایی عبور، توانایی شنا و رفتار ماهیان نقش بسزایی داشته باشد (Silva et al., 2010, Silva et al., 2011). آشفتگی حرکتی ناهمگن وابسته به زمان، مکان و نوسان‌های سه‌بعدی سرعت تعریف می‌شود که ناشی از تحرکات تصادفی

کافی در این زمینه، موجب ناکارآمد شدن سازه طراحی و صرف هزینه فراوانمی‌شود بی آنکه نتیجه‌ای مطلوب به دست آید؛ بنابراین، مهم است که ابتدا شرایط اقلیمی، توانایی شنا و الگوهای مهاجرت گونه‌های مختلف ماهی شناسایی شود تا رابطه‌ای بین این عوامل و خصوصیات هیدرولیکی در هنگام طراحی برقرار گردد (Mao, 2018). حداکثر مقدار مجاز سرعت در راه ماهی بر اساس ضعیف‌ترین گونه ماهی تعریف می‌شود. سرعت جریان، مقاومت هیدرودینامیکی در برابر ماهی ایجاد می‌کند و هنگامی که از سرعت انفجاری بیشتر شود می‌تواند مهاجرت ماهی را به خطر اندازد (Katopodis & Gervais, 2016). ماهی‌ها نیاز به مناطق استراحتی دارند که سرعت آب در آنها کم است. از طراحی‌های گذشته راه ماهی، معمولاً تمرکز روی ارتباط بین حداکثر سرعت و سرعت انفجاری، توانایی پایدار شنا، زمان شنای پایدار و توانایی شنا در شرایط بحرانی بوده است (Wang et al., 2017). باین‌حال، هر یک از این شاخص‌ها به تنهایی نمی‌تواند به‌طور کامل رفتار کلی حرکت ماهی را نشان دهد (Scott & Henderson, 2016, Metcalfe et al., 2016). بسیاری از موارد، الگوی جریان در حوضچه راه ماهی باید به گونه‌ای طراحی شود که انرژی موجود در آب را تا آنجا اتلاف کند تا ماهی بتواند بدون هیچ‌گونه استرسی به بالادست صعود کند (Boes et al., 2016). امروزه بر تطبیق طراحی‌ها برای عبور طیف وسیع‌تری از گونه‌های ماهیان تأکید می‌شود (Silva et al., 2018). مایکل اویدیو و همکاران (Michael Ovidio et al., 2020) عملکرد آبراهه‌های جدید نصب شده در رودخانه Vesdre (بلژیک) را تجزیه و تحلیل کردند و از میزان موفقیت در برقراری مجدد تداوم زیست محیطی در این رودخانه در نتیجه

مواد و روش‌ها

به منظور برنامه‌ریزی آزمایش‌ها، ابتدا پارامترهای تأثیرگذار در پدیده حاضر شناسایی شدند که عبارت‌اند از:

$$f(Q, V, S_0, D, L, h_1, h_2, \theta, B, Y, g, \rho, \mu, f) = 0 \quad (1)$$

که در آن،

Q = دبی جریان؛ V = سرعت جریان؛ S_0 = شیب کف کانال؛ D = فاصله بین موانع؛ L = طول دیواره موانع؛ h_1 = ارتفاع پایین دست دیواره موانع؛ h_2 = ارتفاع بالادست دیواره موانع؛ θ = زاویه بین دیواره موانع و دیواره مجاری؛ B = عرض کانال؛ Y = عمق جریان؛ g = شتاب ثقل؛ ρ = جرم واحد حجم سیال؛ μ = لزوجت دینامیکی سیال؛ f = ضریب اصطکاک مودی.

با شناسایی و معرفی پارامترهای تأثیرگذار، اقدام به تحلیل ابعادی آن‌ها به روش پی باکینگهام گردید که نتایج حاصل در رابطه ۲ ارائه شده است.

$$f\left(\frac{V}{\sqrt{gY}}, \frac{\rho Y}{\mu}, \frac{Q}{\sqrt{gB^{2/5}}}, \frac{D}{B}, \frac{L}{B}, S_0, \theta, \frac{B}{Y}, \frac{h_1}{Y}, \frac{h_2}{Y}, f\right) = 0 \quad (2)$$

در پژوهش حاضر پارامترهای h_1 و h_2 و θ ثابت‌اند و از این رو پارامتر بدون بعد مربوط به یکی از آنها از محاسبات حذف می‌شود. پس از این تغییرات، پارامترهای بدون بعد مؤثر در این تحقیق مطابق رابطه ۳ تعیین شد:

$$f\left(\frac{V}{\sqrt{gY}}, \frac{\rho Y}{\mu}, \frac{Q}{\sqrt{gB^{2/5}}}, \frac{D}{B}, S_0, \frac{Y}{B}, f\right) = 0 \quad (3)$$

ذرات جریان در حال حرکت هست. این متغیر هیدرولیکی بر شنای ماهی تأثیر می‌گذارد (Liao et al., 2003). همچنین، بسته به بزرگی آن، تلاطم ممکن است ماهی را جذب یا دفع کند و باعث تحریک یا جلوگیری از حرکات مهاجرتی آن شود. به خوبی ثابت شده است که تلاطم باعث افزایش اینرسی حرکتی برای ماهی می‌شود (Pavlov et al., 1982, Enders et al., 2003). در سطح بسیار بالا، تلاطم باعث آسیب دیدگی بدن ماهی می‌شود یا حتی به مرگ و میر آن می‌انجامد (Cada et al., 1999). بر اساس مطالعات گذشته، مهم‌ترین آشفتگی‌ها برای مهاجرت ماهیان شناسایی شده‌اند که عبارت‌اند از انرژی جنبشی آشفتگی، رینولدز برشی، شدت آشفتگی، کرنش و طول گرداب (Silva et al. 2011, Silva et al. 2015). انرژی جنبشی آشفتگی (TKE) با انرژی جنبشی مرتبط با نوسان سرعت در نقطه‌ای معین مطابقت دارد (Rodi, 1980). انرژی جنبشی آشفتگی (TKE)، توزیع و حجم آن، مهم‌ترین علت راندمان پایین در راه ماهی‌هاست (Puzdrowska & Heese, 2019). از این رو بررسی این متغیر در مسیر جریان برای تعیین رفتاری ماهی‌ها ضروری است. با توجه به اینکه سازه راه ماهی با برخورد به جریان به عنوان زبری عمل می‌کند، و به نظر می‌رسد پارامترهای هیئودینامیک از جمله TKE و همچنین آگاهی عملکرد سازه راه ماهی به عنوان زبری تحت سازه جدید w کمتر بررسی شده است. در مطالعه حاضر به بررسی و ارزیابی مقاومت سازه‌ها و انرژی جنبشی آشفتگی (TKE) در راه ماهی W پرداخته شده است.

۱ نمایی از کانال نشان داده شده است. شیب‌های مورد آزمایش در تحقیق حاضر ۴، ۷ و ۱۰ درصد، دبی‌های مورد آزمایش ۰/۰۲۰، ۰/۰۲۵، ۰/۰۲۹، ۰/۰۳۴، ۰/۰۴۳ متر مکعب بر ثانیه و زاویه سازه ۲۰ درجه در نظر گرفته شد.

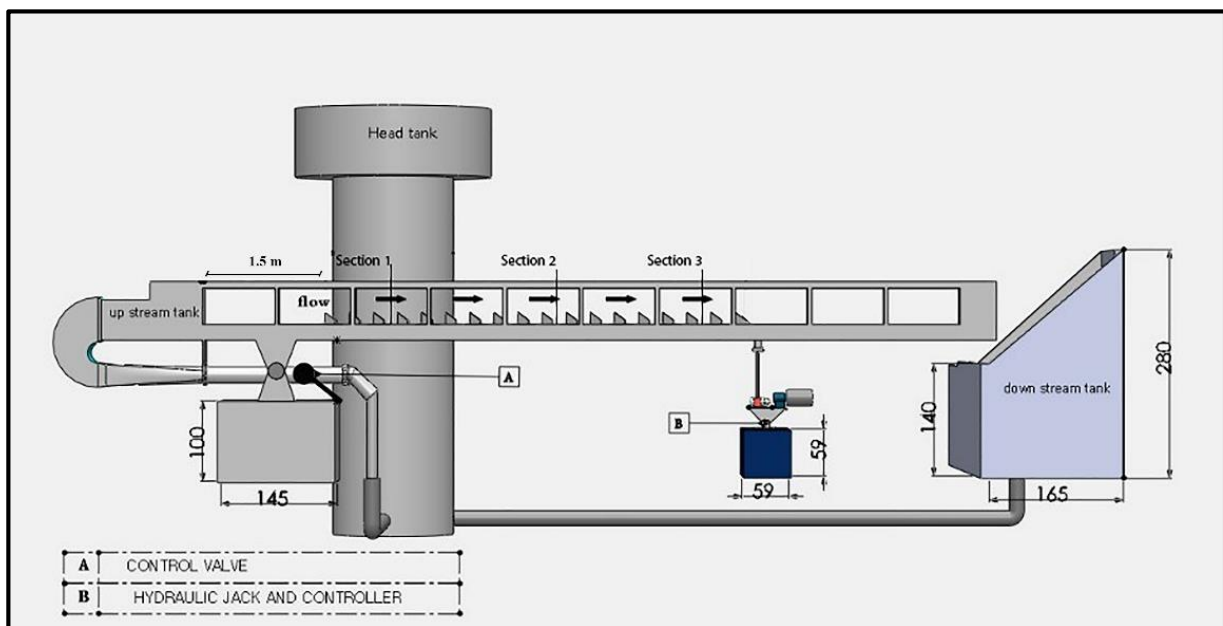
موانع سرریز W شکل در طولی حدود ۵ متر از کانال قرار داده شدند و به منظور کم شدن آثار تلاطم اولیه ناشی از جریان ورودی به آنها، اولین سرریز در فاصله حدود ۳/۵ متری از ابتدای کانال قرار داده شد. سرریز W شکل به عنوان مانع در فاصله‌های $D/L=3$ ، $D/L=6$ و $D/L=9$ قرار داده شدند. در شکل ۲، سرریزهای مورد استفاده و در شکل ۳، شماتیکی از آنها نشان داده شده است.

پارامترهای بدون بعد رابطه ۳ به ترتیب از سمت چپ عبارت‌اند از: عدد فرود، عدد رینولدز، دبی بدون بعد، فاصله نسبی، شیب کف کانال، زاویه بین دیواره موانع و دیواره مجرا، عمق نسبی جریان و ضریب افت داریسی-ویسباخ است.

پس از تعیین پارامترهای بدون تأثیرگذار، اقدام به آماده‌سازی و استفاده از مدل آزمایشگاهی گردید. در ادامه به معرفی مدل آزمایشگاهی و برنامه‌ریزی آزمایش‌ها پرداخته خواهد شد.

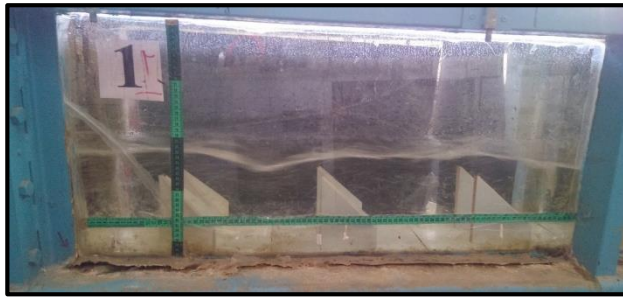
مدل و برنامه‌ریزی آزمایش‌ها

پژوهش حاضر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست دانشگاه شهید چمران اهواز در کانالی به طول ۱۰ متر، ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر و عرض ۲۵ سانتی‌متر اجرا شد، در شکل

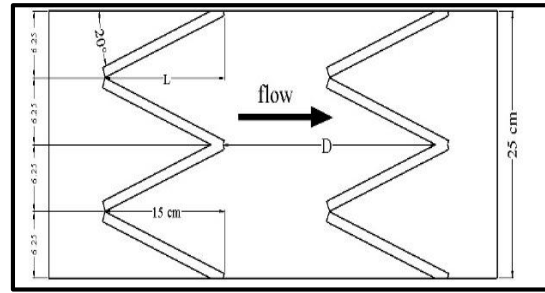


شکل ۱- نمایی از مدل آزمایشگاهی

Fig. 1- View of the laboratory mode



شکل ۲- الف نمایی از سازه سرریز w مورد استفاده
Fig. 2 - View of the w weir structure used



شکل ۳- نمایی از سازه سرریز w مورد استفاده
Fig. 3 - schematic of the w weir structure used

عدم حضور موانع در مسیر جریان، مقادیر ضرایب افت مربوط به خود سازه شامل جذر ضریب اصطکاک مودی سازه و ضریب زبری مانینگ سازه محاسبه شد. لازم است یادآوری شود که به منظور محاسبه عدد فرود کلی، از مقطع شماره ۲ به عنوان نماینده عمق و سرعت جریان در آزمایش‌ها استفاده شد.

$$\frac{\Delta E}{\Delta x} = S_0 - S_f \quad (4)$$

$$S_0 - S_f = \frac{\left(\frac{V_2^2}{2g} + Y_2 \times \cos \alpha\right) - \left(\frac{V_1^2}{2g} + Y_1 \times \cos \alpha\right)}{\Delta x} \quad (5)$$

که در آن،

S_0 = شیب کف کانال؛ S_f = شیب خط انرژی؛ Y_1 و Y_2 = به ترتیب عمق جریان در مقاطع ۱ و ۳؛ V_1 و V_2 = به ترتیب سرعت جریان در مقاطع ۱ و ۳؛ α = زاویه طول کانال نسبت به افق؛ و Δx = فاصله طولی بین مقاطع ۱ و ۳.

ضریب‌های زبری از رابطه داریسی ویسباخ و مانینگ به ترتیب از روابط ۶ و ۷ به دست آمدند.

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (6)$$

روش اجرای آزمایش‌ها

به منظور اجرای آزمایش‌ها، در ابتدا اقدام به ایجاد سازه‌ها در زاویه مورد نظر و چسباندن آنها به کف کانال شد. با گذشت ۱ روز از قرارگیری سازه‌ها، شیب و دبی جریان مورد نظر در کانال تنظیم شد. ابتدا به کمک جک موجود در انتهای کانال شیب مدنظر ایجاد می‌شد و در ادامه با روشن شدن ارتفاع تانک و گذشت ۱۵ دقیقه از برقرار شدن جریان، ارتفاع آب با استفاده از سرریز مثلی انتهایی قرائت می‌گردید و با بهره‌گیری از جدول دبی-اشل مربوط به سرریز مثلی، دبی مورد نظر استخراج می‌گردید. بعد از ثابت شدن شرایط جریان اقدام به برداشت پروفیل سطح آب با استفاده از دستگاه برداشت عمق آب با دقت ۰/۱ سانتی‌متر می‌گردید. به منظور بررسی مجدد عمق‌های برداشت‌شده از عکس و تحلیل آن‌ها به کمک نرم‌افزار digitizer انجام می‌شد.

برای محاسبه مقاومت جریان در آزمایش‌های مختلف، ابتدا شیب خط انرژی بین مقاطع ۱ و ۳ که در شکل ۱ مشخص شده‌اند و به کمک روابط ۴ و ۵ به دست آمده و سپس با استفاده از روابط ۶ و ۷ جذر ضریب اصطکاک مودی سازه و ضریب زبری مانینگ سازه در هر آزمایش محاسبه شد. در نهایت از اختلاف ضرایب افت محاسبه شده در شرایط حضور و

متغیرهای طولی (x)، عرضی (y) و عمودی (z)، زمان به‌طور متوسط در زمان نمونه مربوطه است.

$$Q = \frac{A}{n} \times R^{2/3} \times S_f^{1/2} \quad (7)$$

اد و همکارانش در ادامه تحقیقات خود در زمینه هیدرولیک جریان در راه ماهی‌ها دریافته‌اند که اگر Q دبی عبوری از میان یک استخر-سرریز استاندارد باشد، دبی بدون بعد به‌صورت رابطه ۸ بیان می‌شود (Ead et al., 2002).

$$Q^* = \frac{Q}{\sqrt{g b^{2.5}}} \quad (8)$$

که در آن،

Q = دبی بدون بعد؛ g = شتاب گرانشی زمین؛ b = پهنای داخلی کانال.

طبق مطالب بررسی‌شده، آشفتگی یکی از عوامل اصلی تغییر عملکرد حرکت ماهی است (Silva et al., 2012). از طرفی این تغییرات عملکرد ماهی ناشی از تغییرات زمانی و مکانی نوسانهای سرعت جریان سریع است که از جریان آب آشفته چندگانه حاصل می‌شود (Liao et al., 2003). تعیین میزان TKE جریان با توجه به این موضوع که الگوی جریان در راه ماهی‌ها تأثیر بسیار مهمی در هدایت ماهیان دارد و تنها پارامترهای سرعت و عمق بر شنا کردن ماهی‌ها اثرگذار نیست بلکه میزان آشفتگی نیز مؤثر است و باید نحوه تأثیر نقاط با آشفتگی زیاد بر رفتار ماهی مشخص شود و در طراحی راه ماهی باید مورد توجه قرار گیرد. از این‌رو با داشتن داده‌های نوسان‌های سرعت مربوط به یک نقطه مشخص مقدار این پارامترها استخراج می‌شود. از فرمولی ریاضی ۹ برای محاسبه انرژی جنبشی آشفته استفاده می‌شود (Rodi, 2017) که در این فرمول V_x^2 ، V_y^2 ، V_z^2

$$TKE = 0.5 \left[\overline{V_x'^2} + \overline{V_y'^2} + \overline{V_z'^2} \right] \quad (9)$$

در راه ماهی‌ها لازم است نقاط با آشفتگی بالا (TKE) بررسی شوند و برای عبور ماهیان از این نقاط تمهیدات لازم اندیشیده شود. مقادیر TKE به دو دسته TKE low ($0.05 < \frac{m^2}{s^2}$) و TKE high ($0.05 > \frac{m^2}{s^2}$) تقسیم می‌شوند (Ahmadi et al., 2021).

نتایج و بحث

پس از اجرای آزمایش‌ها، داده‌های موردنیاز برای بررسی هدف‌های پژوهش حاضر استخراج و در غالب نمودارهایی رسم شد. در این بخش ابتدا به تحلیل و بررسی مقاومت جریان تحت و سپس تغییرات انرژی جنبشی آشفتگی ناشی از حضور راه ماهی W پرداخته می‌شود.

اثر دبی بدون بعد و عدد فرود بر جذر ضریب اصطکاک مودی و ضریب زبری مانینگ سازه

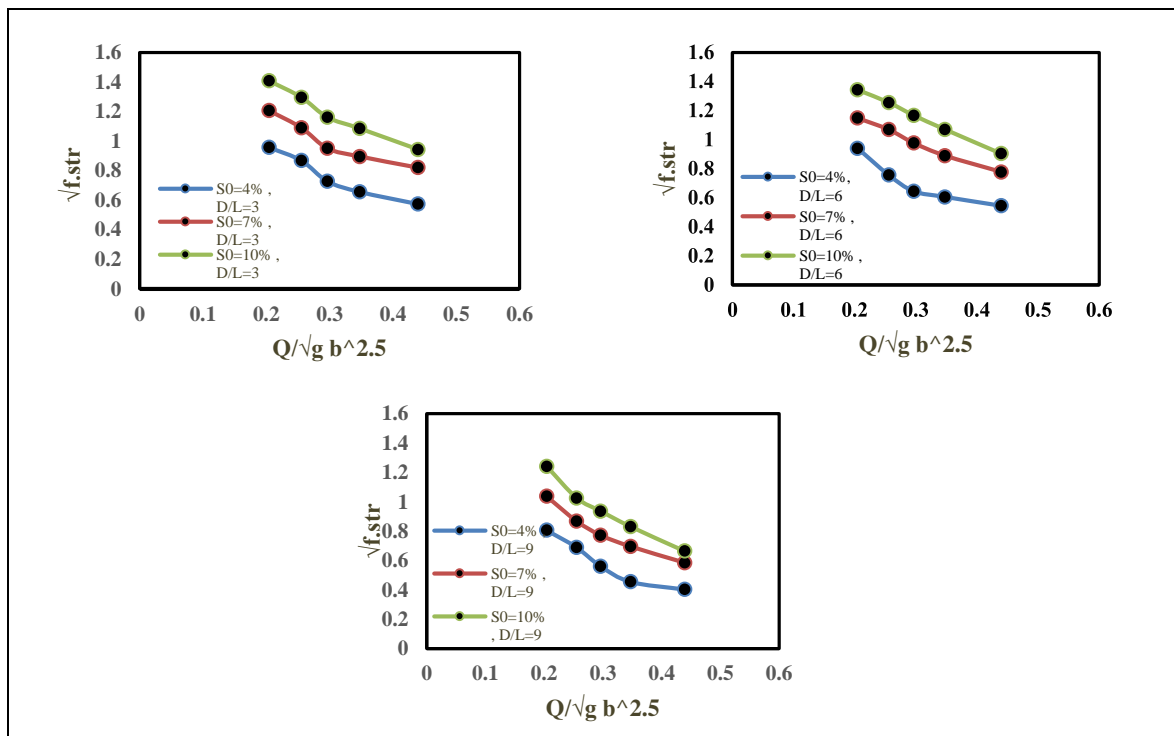
در شکل ۴ و ۵ که نتایج تمامی آزمایش‌های اثر دبی بدون بعد نشان داده شده است، مشاهده می‌شود با افزایش دبی بدون بعد مقدار ضریب‌های افت انرژی، کاهش می‌یابند؛ زیرا افزایش دبی و به‌تبع آن عمق جریان، منجر به کاهش اثر حضور موانع به‌عنوان زبری بستر بر شرایط جریان می‌شود.

با افزایش ضریب، عمق جریان به‌شدت کاهش یافته و این امر باعث افزایش اثر موانع به‌عنوان زبری در مسیر جریان شده است. در فاصله نسبی ۶

بررسی و ارزیابی مقاومت جریان و انرژی جنبشی آشفتگی در...

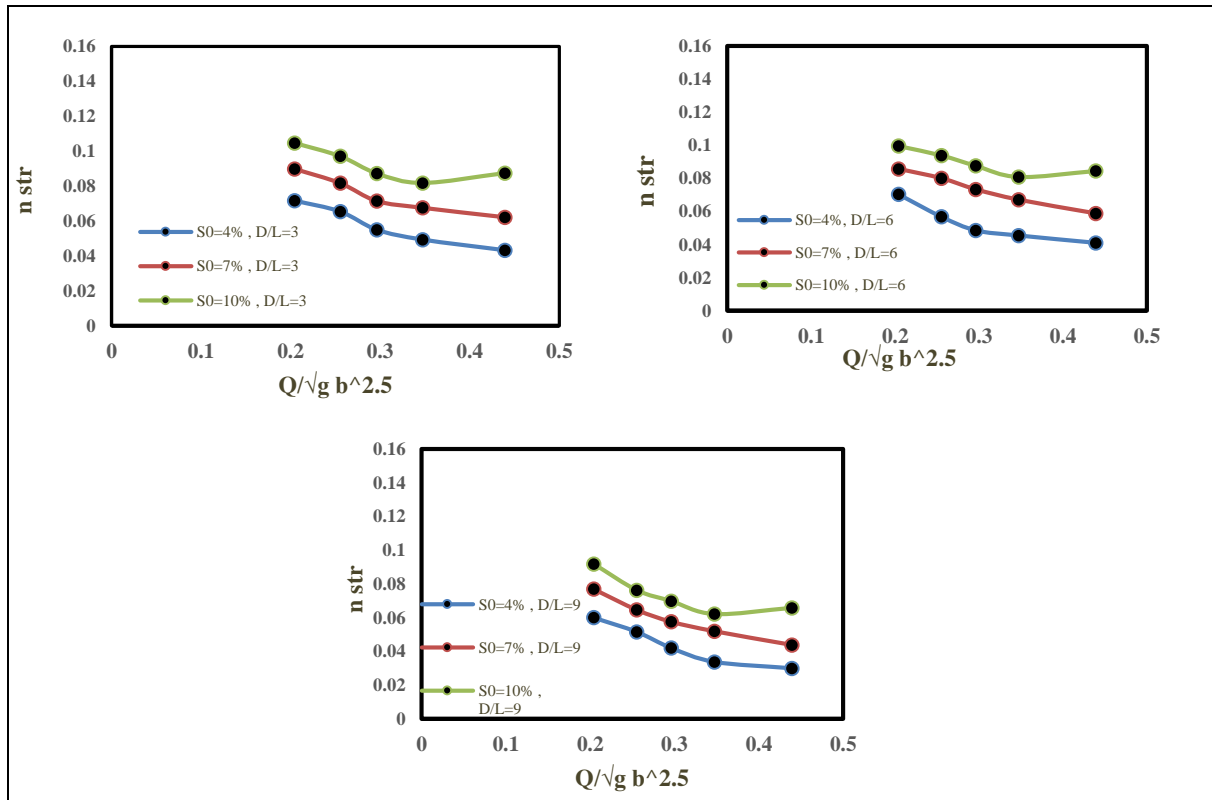
ناکارآمدی موانع در فاصله نسبی ۶ در دبی های بالاتر از این هست. بیشترین افت انرژی با ضریب زبری مانینگ سازه ۰/۰۹۹ در شیب ۱۰ درصد و فاصله نسبی ۶ $D/L=$ و کمترین مقدار آن برابر ۰/۰۲۹ در شیب ۴ درصد و فاصله نسبی ۹ $D/L=$ ایجاد شد.

با افزایش شیب از ۴ به ۱۰ درصد جذر ضریب اصطکاک مودی سازه در دبی بدون بعد ۰/۲۹، حدود ۰/۴۴ درصد کاهش می یابد. در حالی که در همین فاصله نسبی، در دبی بدون بعد ۰/۴۳، این کاهش کمتر از ۴۰ درصد است. این امر نشان دهنده



شکل ۴- اثر دبی بدون بعد بر جذر ضریب اصطکاک مودی سازه

Fig. 4- Effect of dimensionless flow on the square root of the friction coefficient of the structural Modi



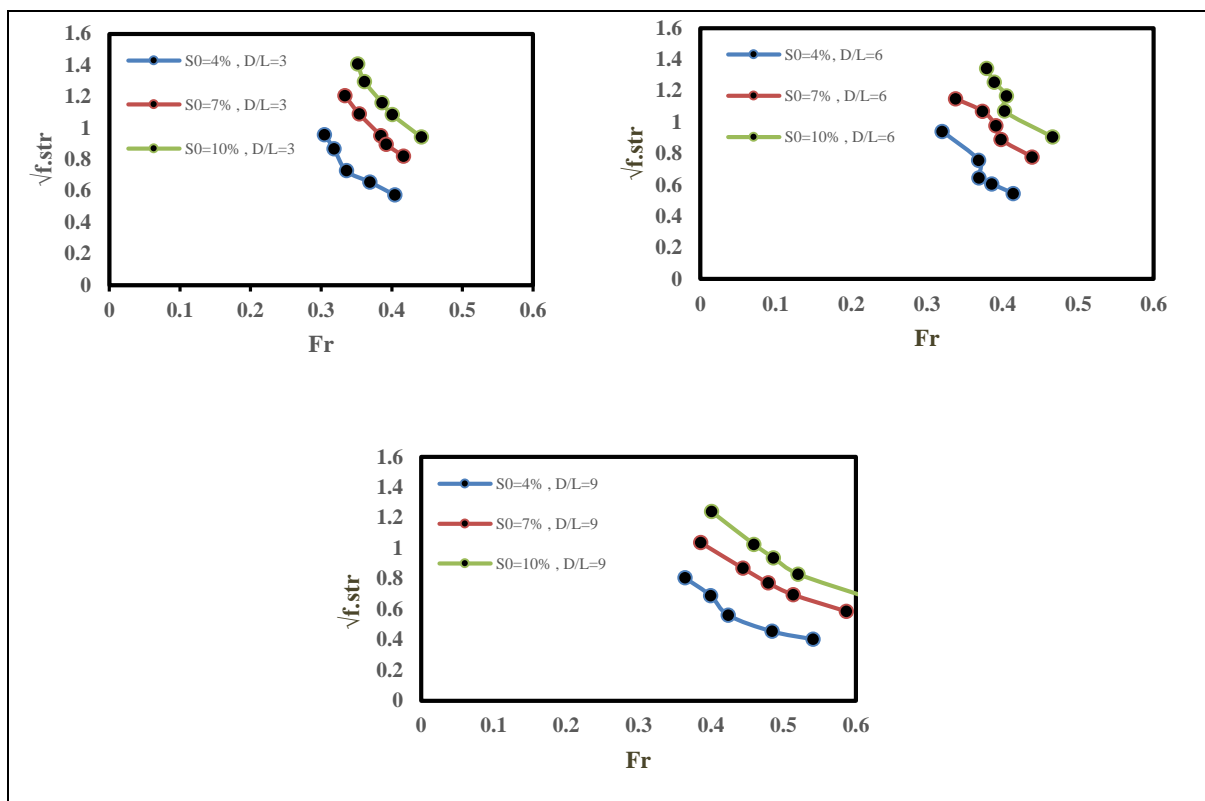
شکل ۵- اثر دبی بدون بعد بر ضریب زبری مانینگ سازه

Fig. 5- Effect of dimensionless flow on the manning roughness coefficient of the structure

حداکثر ضریب زبری مانینگ سازه ۰/۰۹۱ در شیب ۱۰ درصد و فاصله نسبی ۹ با عدد فرود ۰/۴ و حداقل آن با مقدار ۰/۰۲۹۹۰۶ در شیب ۴ درصد و فاصله نسبی ۹ در عدد فرود ۰/۵۴۱ ایجاد شده است.

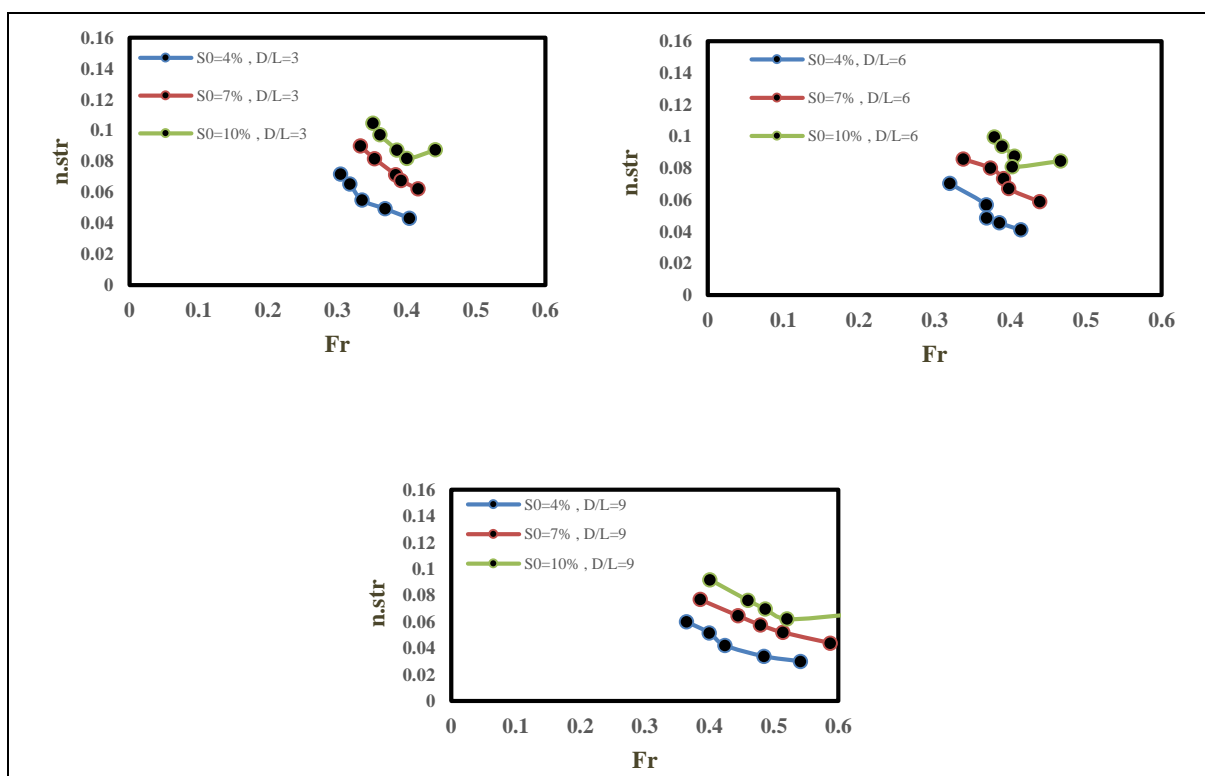
قابل ذکر است که عدد فرود حاضر در نمودارها توسط اندازه‌گیری‌های صورت گرفته در آزمایش‌های شاهد ترسیم شده است. دلیل این امر این است که برای ساخت نمونه واقعی موانع با استفاده از نتایج به دست آمده از مدل آزمایشگاهی راه‌ماهی w شکل، امکان برآورد ابعاد واقعی سازه مورد نیاز، با استفاده از اطلاعات موجود از مقاطع و شرایط هیدرولیکی کالورت یا رودخانه موجود در شرایط طبیعی، قبل از ساخت و نصب موانع وجود داشته باشد.

در شکل‌های ۶ و ۷ اثر تغییرات عدد فرود جریان بر ضریب‌های افت تحت شیب‌های ۷، ۴ و ۱۰ درصد، در سه فاصله نسبی ۳، ۶ و ۹ و زاویه $\theta = 20^\circ$ درجه نشان داده شده است. بررسی شکل ۶ و ۷ نشان از تأثیر معکوس عدد فرود بر ضرایب افت و در نتیجه کاهش مقاومت سازه‌ها که به‌عنوان زبری هستند در برابر جریان دارد. در توجیه این رابطه می‌توان به رابطه مستقیم عدد فرود و سرعت جریان اشاره کرد. به طوری که افزایش عدد فرود و به تبع آن سرعت جریان منجر به تعویق افتادن زمان و افزایش فاصله نقطه جدشدگی جریان از روی دیواره موانع و تشکیل ناحیه جدشدگی پشت هر مانع می‌شود که در نتیجه اثر زبری و مقاومت جریان کاهش می‌یابد.



شکل ۶- اثر عدد فرود بر جذر ضریب اصطکاک مودی سازه

Fig. 6 - The effect of Froude number on the square root of the coefficient of friction of the structural mode



شکل ۷- اثر عدد فرود بر ضریب زبری مانینگ

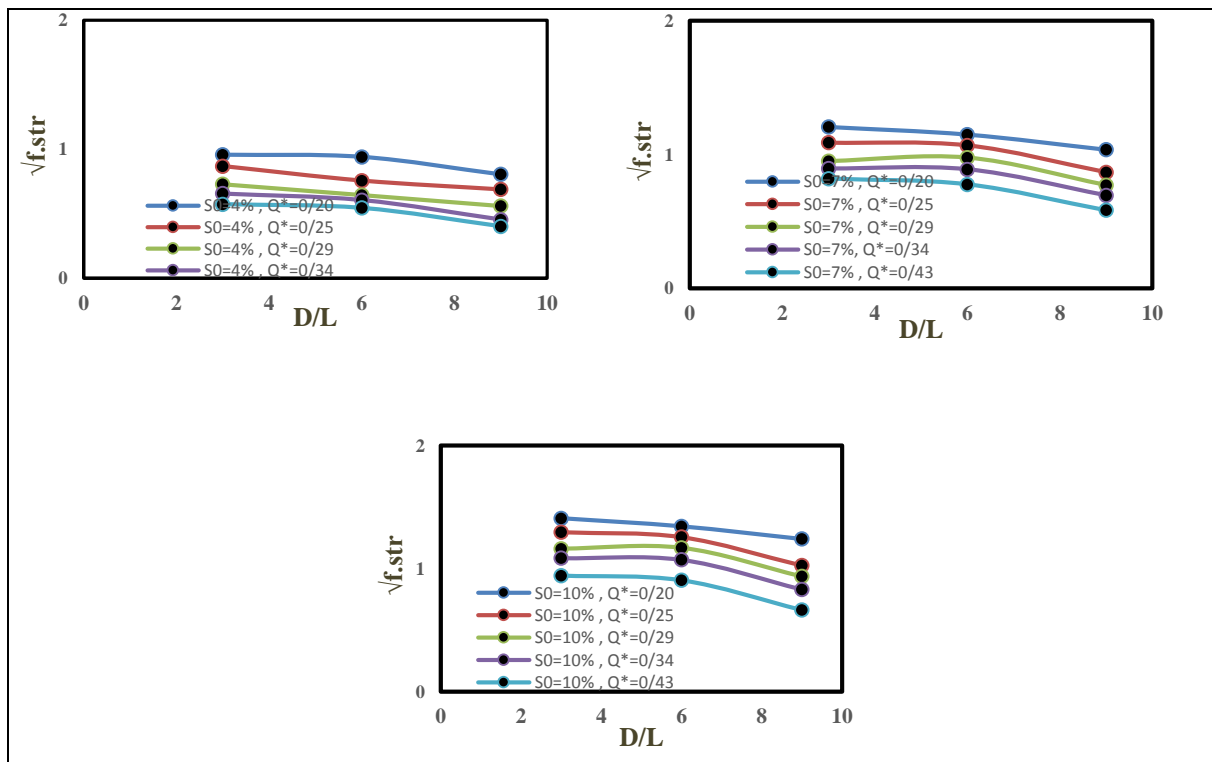
Fig. 7- Effect of Froude number on Manning roughness coefficient

در شیب و فاصله نسبی یکسان، با افزایش دبی، مقاومت در برابر جریان کاهش می‌یابد. در شیب‌های پایین‌تر با تغییر دبی جریان، میزان تغییرات بیشتری در مقاومت جریان رخ می‌دهد. به طوری که در شیب ۴ درصد و فاصله نسبی ۹، با افزایش دبی بدون بعد جریان از ۲۰/۲۰ به ۰/۴۳، حدود ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. این امر در حالی است که در شرایط مشابه، تحت شیب ۱۰ درصد، این کاهش حدود ۴۶ درصد است. بیشترین افت انرژی در شرایط دبی بدون بعد ۰/۲۰، شیب ۱۰ درصد و در فاصله نسبی ۳ و کمترین افت انرژی در شرایط دبی بدون بعد ۰/۴۳، شیب ۴ درصد و در فاصله نسبی ۹ ایجاد شد.

بررسی اثر پارامتر فاصله نسبی و عمق نسبی بر ضریب‌های افت دارسی-ویسباخ

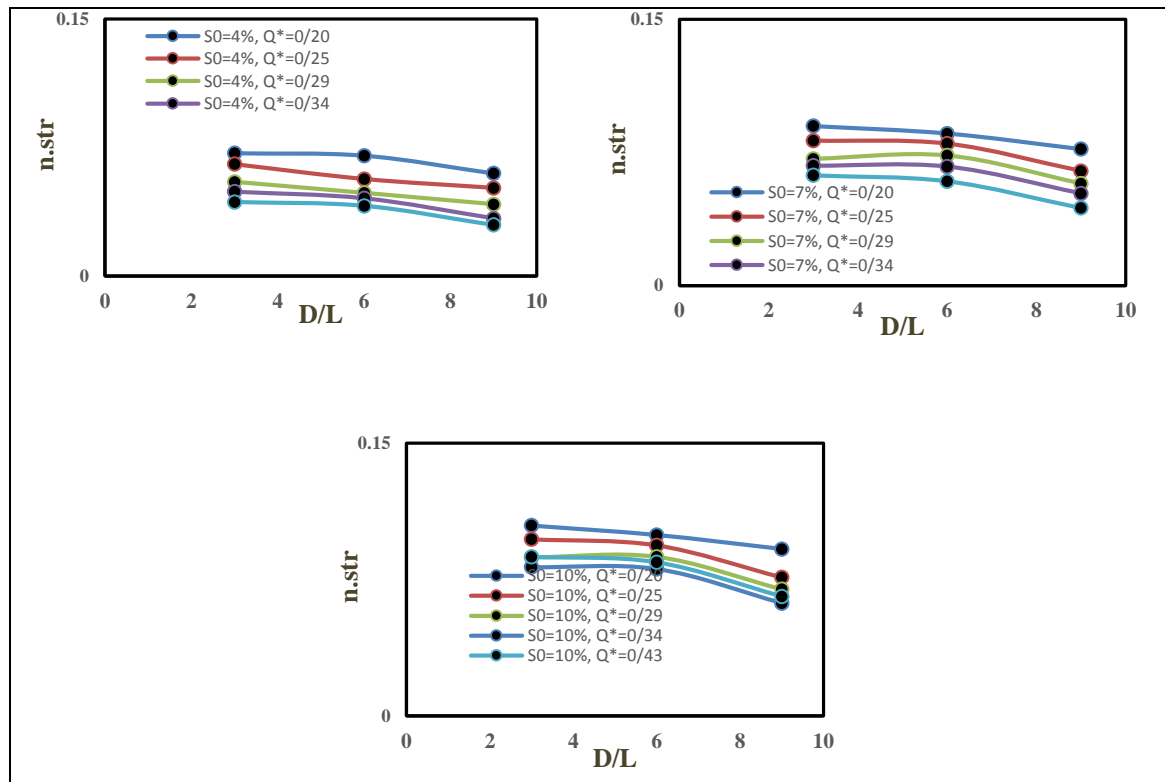
به منظور آگاهی از روند اثر فاصله نسبی بر مقاومت در برابر جریان، ۴۵ آزمایش در سه شیب ۴، ۷ و ۱۰ درصد، تحت دبی‌های بدون بعد ۰/۲۰، ۰/۲۵، ۰/۲۹، ۰/۳۴ و ۰/۴۳ و زاویه $\theta=20$ درجه اجرا شد که در شکل ۸ و ۹ نشان داده شده است.

با بررسی شکل ۸ و ۹ مشاهده شد که با افزایش فاصله نسبی بین موانع، مقاومت در برابر جریان کاهش می‌یابد. دلیل این امر این است که با افزایش فاصله بین موانع، در واقع تراکم موانع در طول مسیر جریان کم شده و اثر زبری کاهش یافته است.



شکل ۸- اثر فاصله نسبی بر جذر ضریب اصطکاک مودی سازه

Fig. 8 - The effect of relative distance on the square root of the coefficient of friction of the structural

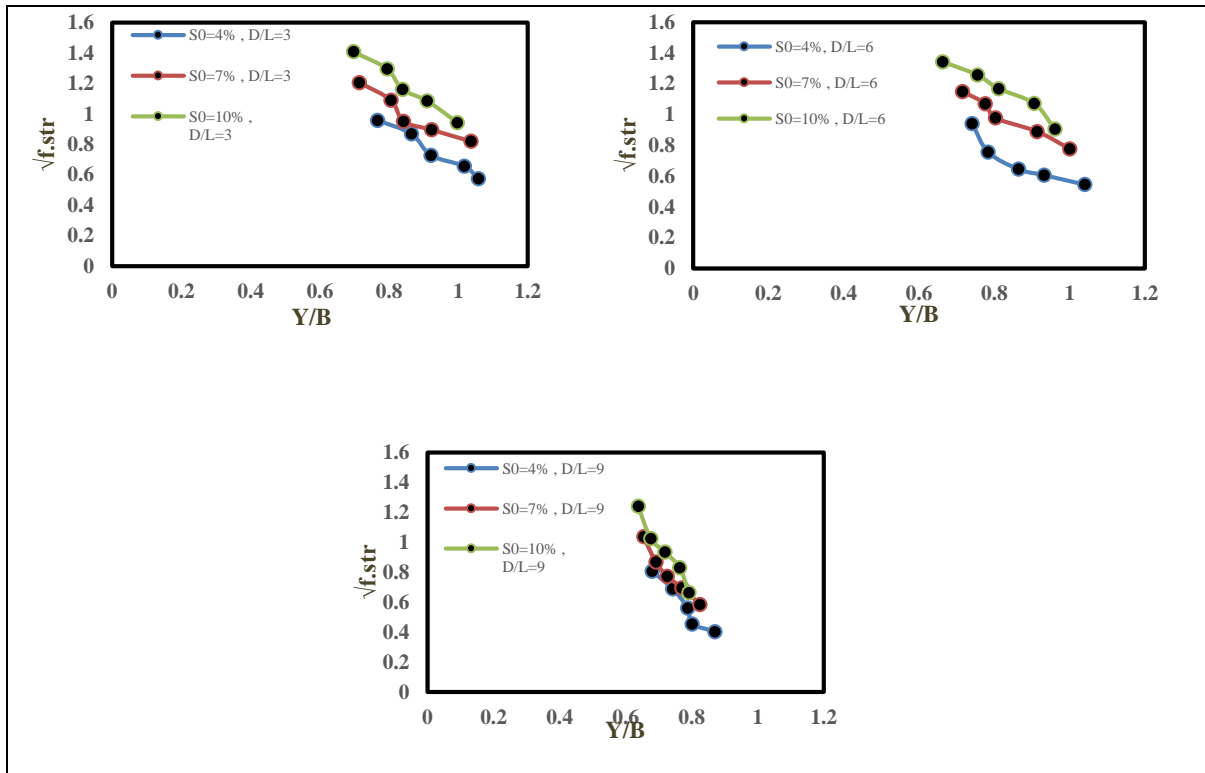


شکل ۹- اثر فاصله نسبی بر تغییرات ضریب زبری مانینگ

Fig. 9- Effect of relative distance on Manning roughness coefficient

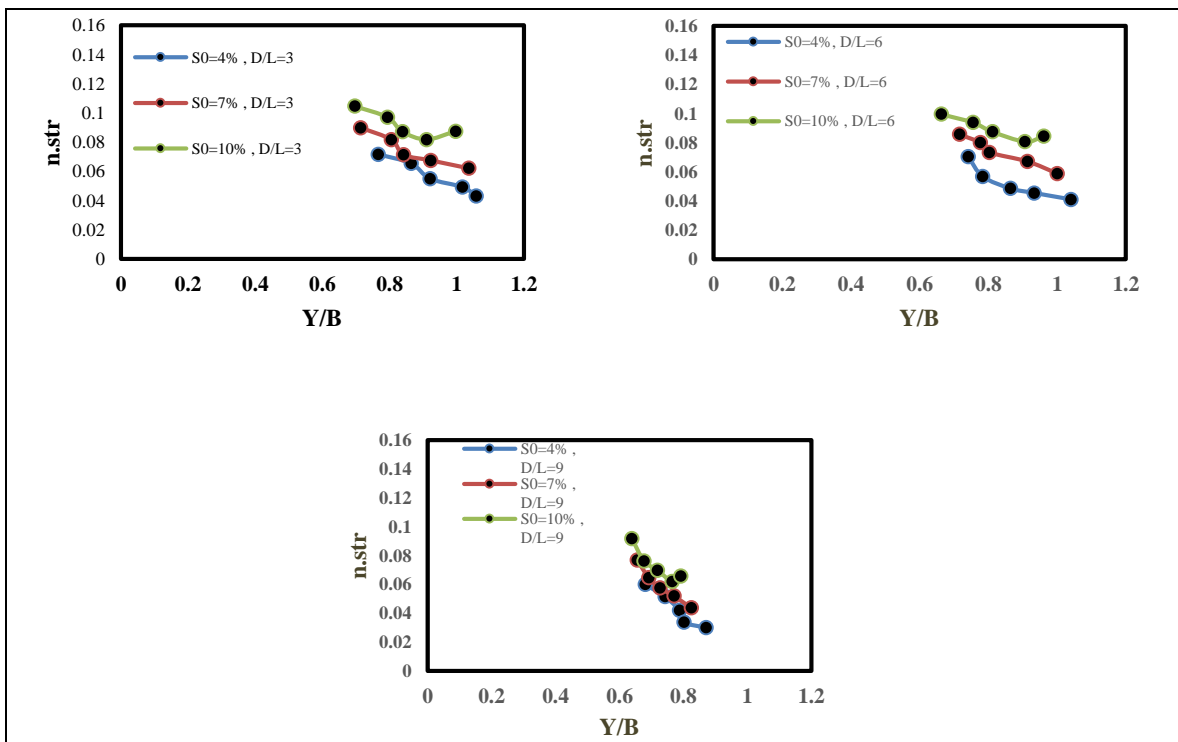
افزایش عمق جریان عبوری از روی سرریز موانع موجب کاهش اثر حضور موانع به عنوان زبری بستر مجرا می شود و مقاومت در برابر جریان حدود ۵۳ درصد کاهش می یابد. در مقابل، افزایش شیب و کاهش عمق جریان موجب افزایش مقاومت در برابر جریان می شود. بیشترین افت اصطکاکی با ضریب زبری مانینگ سازه ۰/۱۰۴ در فاصله نسبی ۳ و عمق نسبی ۰/۶۹ و کمترین مقدار آن برابر ۰/۰۲۹ در فاصله نسبی ۹ و عمق نسبی ۰/۸۷ ایجاد شد.

آخرین پارامتر مورد بررسی تأثیر عمق نسبی بر مقاومت در برابر جریان است که نتایج آزمایش های این بخش در شکل ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۰ و ۱۱ مشاهده می شود در شیب ثابت، با افزایش فاصله نسبی، اثر تغییرات عمق نسبی بر مقاومت در برابر جریان کاهش می یابد. به طوری که در شیب ۱۰ درصد و فاصله نسبی ۹، با تغییر عمق نسبی از ۰/۸۰ به ۰/۸۷، تغییر قابل توجهی در ضرایب مقاومت جریان مشاهده نمی شود.



شکل ۱۰- اثر عمق نسبی بر جذر ضریب اصطکاک مودی سازه

Fig.10- The effect of relative depth on the square root of the modulus of friction of the structure



شکل ۱۱- اثر عمق نسبی بر ضریب زبری مانینگ

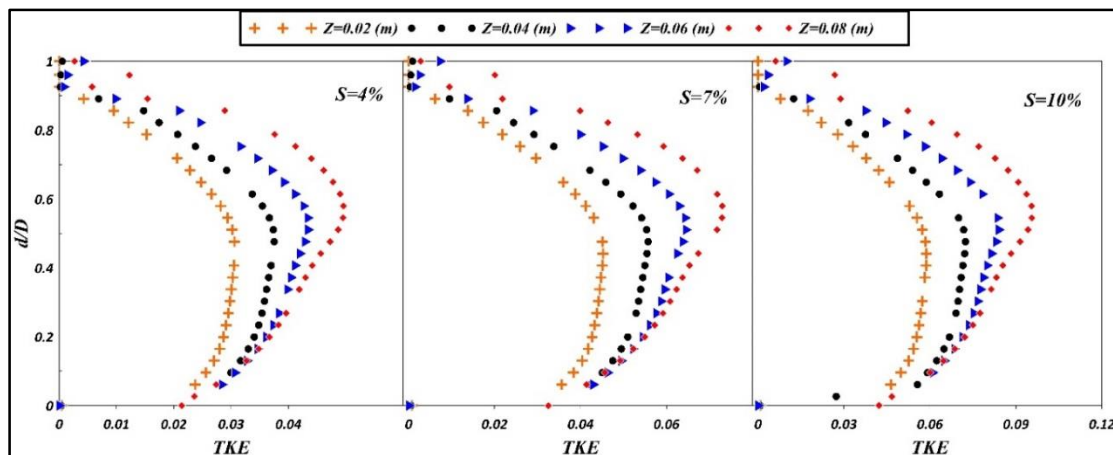
Fig. 11 - Effect of relative depth on Manning roughness coefficient

برگشتی از سازه $i+1$ به سمت سازه i مقدار انرژی جنبشی تلاطمی افزایش می‌یابد. از طرفی، با توجه به شکل و تغییرات مقدار انرژی تلاطمی مشخص است که حداکثر مقدار کمی این پارامتر در نزدیکی سطح آب به وقوع می‌پیوندد، که این امر متأثر از همان برخورد جریان جت رفت و برگشتی بین دو سازه است.

از نظر کمی در این فاصله مقدار TKE حداکثر در شیب‌های ۷،۴ و ۱۰ درصد به ترتیب برابر با ۰/۰۴۹، ۰/۰۷۲ و ۰/۰۹۵ است. در واقع بدیهی است افزایش شیب و تبع آن افزایش سرعت جریان موجب افزایش انرژی تلاطمی می‌گردد. نکته دیگر قابل توجه در فاصله 0.5L وقوع موج پرفشار و کم‌فشار در محدوده $D/L=3$ برابر ۰/۹ تا ۱ است که به صورت گردابه‌ای عمودی در نزدیکی سازه پایین دست شکل می‌گیرد.

بررسی انرژی جنبشی آشفتگی TKE

پس از آگاهی از تغییرات زبری، در این بخش در شرایطی که دبی جریان ۰/۰۲۹ لیتر بر ثانیه است به بررسی تغییرات انرژی جنبشی آشفتگی پرداخته خواهد شد. شکل ۱۲ تغییرات طولی TKE روی خط مرکزی از سازه i تا $i+1$ نسبت به فاصله طولی نسبی $D/L=3$ نشان داده شده است. بر اساس این شکل مشخص است که با افزایش ۵۰ درصدی فاصله طولی نسبی از سازه بالادست و در نزدیکی مرکز بین دو سازه متوالی تقریباً حداکثر TKE رخ می‌دهد. این موضوع به این دلیل است که پس از برخورد جریان به سازه بالادست توسعه یافتگی جریان پیش‌رونده در طولی در حدود نیمی از فاصله‌ای بین دو سازه نیاز رخ خواهد داد. در واقع در فاصله $D/L=3$ به دلیل کوتاهی فاصله و تداخل و برخورد جریان جت پیش‌رونده از سازه i به سمت سازه $i+1$ و جریان



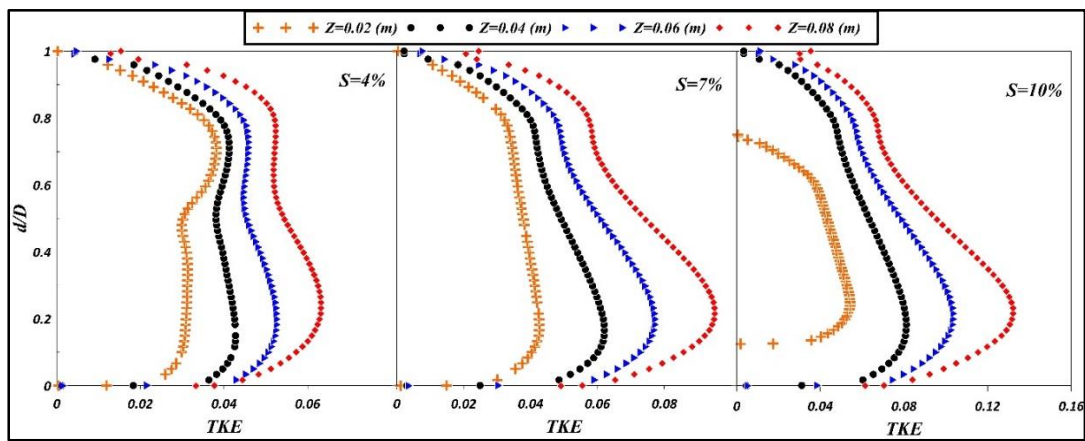
شکل ۱۲- تغییرات طولی TKE روی خط مرکزی از سازه i تا $i+1$ نسبت به فاصله طولی نسبی $D/L=2$

Fig. 12 - Longitudinal changes of TKE on the center line from structure i to $i+1$ with respect to relative longitudinal distance $D/L=2$

در شکل ۱۳ تغییرات طولی TKE روی خط مرکزی از سازه i تا $i+1$ نسبت به فاصله طولی نسبی $D/L=6$ نشان داده شده است. طبق بررسی‌ها، مقدار ماکزیمم TKE در شیب‌های ۴،۷ و ۱۰ درصد به ترتیب برابر با

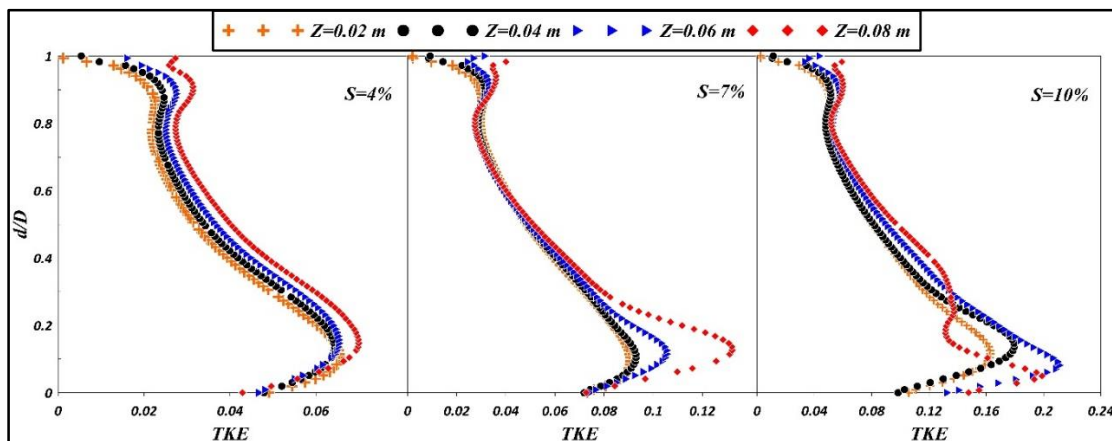
۰/۰۹۵/۰۶۳ و ۰/۱۳۲ است که نسبت به فاصله $D/L=3$ افزایش نشان می‌دهد. این موضوع به این دلیل است که در فاصله بیشتر، سازه‌ها از حالت مانع خارج می‌شوند و به صورت سرریز عمل می‌کنند و باعث ایجاد تلاطم و ورود هوای بیشتر به جریان و

در نهایت افزایش مقدار انرژی تلاطمی می‌گردند. همچنین، در شکل ۱۴ مشاهده می‌گردد که مقدار حداکثر TKE در فاصله $D/L=9$ مجدداً افزایش یافته است. نکته قابل توجه این است که در فاصله $D/L=6$ و $D/L=9$ به دلیل وجود فاصله کافی بین هر دو سازه متوالی، جت جریان قبل از برخورد با سازه پایین دست مستهلک می‌شود و موج پرفشار و کم‌فشار قبل از آن تشکیل نمی‌گردد. تفاوت اساسی و هیدرولیکی جریان در سازه‌های با فاصله $D/L=9$ نسبت به دیگر حالات این است که در فاصله $D/L=9$ یکنواختی انرژی در اعماق مختلف بیشتر است به همین دلیل ماهی شرایط بهتری تجربه می‌کند و دلیل این امر، یکنواختی انرژی در لایه‌های مختلف جریان است. یکی از مهم‌ترین نتایج به دست آمده از تحلیل TKE با توجه به نمودارها و بررسی‌ها این است که موقعیت شکل‌گیری حداکثر TKE مستقل از شیب مسیر است.



شکل ۱۳- تغییرات طولی TKE روی خط مرکزی از سازه i تا $i+1$ نسبت به فاصله طولی نسبی $D/L=4$

Fig. 13- Longitudinal changes of TKE on the center line from structure i to $i+1$ with respect to relative longitudinal distance $D/L=4$



شکل ۱۴- تغییرات طولی TKE روی خط مرکزی از سازه i تا $i+1$ نسبت به فاصله طولی نسبی $D/L=6$

Fig. 14- Longitudinal changes of TKE on the center line from structure i to $i+1$ with respect to relative longitudinal distance $D/L=6$

پس می‌توان نتیجه گرفت در مطالعه حاضر شیب ۴ درصد در فاصله $D/L=9$ بهترین شرایط را برای ماهی ایجاد می‌کند. دلیل این امر را می‌توان این‌گونه بیان کرد طبق شکل ۱۴ حدود ۶۰ درصد از فضای

می‌یابد. همچنین تأثیر معکوس دبی و شیب بر کاهش ضریب‌های افت و بی‌اثر شدن حضور موانع به‌عنوان زبری استخراج شد. به‌طوری‌که با افزایش دبی بدون بعد از ۰/۲۰ به ۰/۴۳ لیتر بر ثانیه در شیب ۴ درصد و فاصله نسبی ۹، اثر گذاری موانع حدود ۵۰ درصد کاهش می‌یابد.

از طرفی، تأثیر معکوس عدد فرود بر ضریب‌های افت و در نتیجه کاهش مقاومت سازه‌ها که به‌عنوان زبری هستند به‌دست آمد و با افزایش فاصله نسبی بین موانع، مقاومت در برابر جریان کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش فاصله نسبی اثر تغییرات عمق نسبی بر مقاومت در برابر جریان کاهش می‌یابد. در بررسی‌های TKE نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان از موقعیت شکل‌گیری حداکثر TKE مستقل از شیب مسیر دارند، همچنین، حداکثر مقدار انرژی تلاطمی نزدیکی سطح آب به وقوع می‌پیوندد و بهترین فاصله برای ماهی ۹ D/L است.

در نهایت شیب ۴ درصد در فاصله ۹ D/L بهترین شرایط را برای ماهی ایجاد می‌کند.

استراحت برای ماهی میزان TKE آن کمتر از ۰/۰۵ است که طبق بررسی‌های کارانتا و همکاران (Quaranta et al . 2019) بهترین منطقه برای استراحت ماهی است. از نظر هیدرولیکی نتایج مطالعات نشان داد که در فاصله ۹ D/L به دلیل وجود فاصله کافی بین هر دو سازه متوالی، انرژی جریان گذرا قبل از برخورد با سازه پایین دست مستهلک می‌شود. در واقع جریان در فاصله ۹ D/L نسبت به دیگر حالات فاصله بین سازه‌ها یکنواختی بیشتری برای انرژی در عمق را به همراه دارد و به همین دلیل فیزیولوژی ماهی شرایط بهتری نسبت به شاهد خواهد داشت.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به‌منظور بررسی اثر سازه راه ماهی بر مقاومت جریان و TKE، ۴۵ آزمایش آزمایشگاهی در دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست دانشگاه شهید چمران اهواز اجرا شد. نتایج حاصل از بررسی‌های مقاومت جریان نشان داد که کارآمدی فاصله نسبی ۶، با افزایش دبی کاهش

مراجع

- Ahmadi, M., Ghaderi, A., MohammadNezhad, H., Kuriqi, A., & Di Francesco, S. (2021). Numerical Investigation of Hydraulics in a Vertical Slot Fishway with Upgraded Configurations. *Water*, 13(19), 2711.
- Boes, R., Albayrak, I. & Kriewitz, C. (2016). Fish protection and downstream fish migration by means of guidance systems with vertical bars: Head loss and bypass efficiency [J]. *Wasserwirtschaft*, 2016, 106: 29-35.
- Cada, G.F., Carlson, T., Ferguson, J., Richmond, M. & Sale, M.(1999). Exploring the role of shear stress and severe turbulence in downstream fish passage. In: Brookshier, P.A. (Ed.), *Proceedings of waterpower'99. Hydro's Future*
- Castro-Santos, T., Cotel, A.J. & Webb, P.W.(2009). Fishway evaluations for better bioengineering: An integrative approach. In *American Fisheries Society Symposium; American Fisheries Society: Bethesda, MD, USA, 2009; Volume 69, pp. 557-575.*
- Enders, E.C., Boisclair, D. & Roy, A.G. (2003). The effect of turbulence on the cost of swimming for juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 60, 1149-1160.
- Ead, S. A., N. Rajaratnam, and C. Katopodis. 11 (2002). Generalized study of hydraulics of culvert fishways. *Journal of hydraulic engineering* 128, no. 1018-1022.

- Katopodis, C., & Gervais, R. (2016). Fish swimming performance database and analyses. Fisheries and Oceans Canada, research document -2016/002.
- Kim, J.H., Yoon, J.D., Baek, S.H., Park, S.H., Lee, J.W., Lee, J.A. & Jang, M.H. (2016). An efficiency analysis of a nature-like fishway for freshwater fish ascending a large Korean river. *Water* 2016, 8, 3.
- Liao, J.C., Beal, D.N., Lauder, G.V. & Triantafyllou, M.S.(2003). Fish exploiting vortices decrease muscle activity. *Science* 2003, 32, 1566–1569.
- Leng, X., Chanson, H., Gordos, M., & Riches, M. (2020). Novel hydraulic guidelines can assist upstream fish passage through smooth box culverts. *Australasian Journal of Water Resources*, 1-10. Liao, J.C., Beal, D.N., Lauder, G. V., Triantafyllou, M.S.. (2003). Fish Exploiting Vortices Decrease Muscle Activity. *Science*. <https://doi.org/10.1126/science.1088295>
- Mao, X. (2018). Review of fishway research in China. *Ecol. Eng.* 2018, 115, 91–95.
- Metcalf, N. B., Van Leeuwen, T. E. & Killen, S. S. (2016). Does individual variation in metabolic phenotype predict fish behaviour and performance *Journal of Fish Biology* (in press, this issue.)
- Northcutt, R.G. (1997) Evolution of gnathostome lateral line ontogenies. *Brain Behav. Evol.* 1997, 50, 25–37.
- Pavlov, D.S., Skorobogatov, M.A. & Shtaf, L.G. (1982). The critical current velocity of fish and the degree of flow turbulence. *Rep. USSR Acad. Sci.* 267, 1019–1021
- Puzdrowska, M. & Heese, T.(2019). Detailed Research on the Turbulent Kinetic Energy's Distribution in Fishways in Reference to the Bolt Fishway. *Fluids* 2019, 4, 64.
- Quaranta, E., Katopodis, C., Comoglio, C., (2019). Effects of bed slope on the flow field of vertical slot fishways. *River Res. Appl.* 13. <https://doi.org/10.1002/rra.3428>.
- Rodi, W.(1980). Turbulence Models and their Application in Hydraulics. IAHR, Delft, the Netherlands (IAHR Monograph)
- Rodi, W.(2017). Turbulence Model sand their Application in Hydraulics: A State-of-the-Art Review. third edition.
- Scott, A. & Henderson P.(2016). Seasonal and age-related migrations in the unexpectedly long-lived benthic fish the lesser weever, *Echiichthys vipera* (Cuvier, 1829) [J]. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 2016, 96(6): 1287-1293
- Silva, A. T., Lucas, M. C., Castro-Santos, T., Katopodis, C., Baumgartner, L. J., Thiem, J. D., Aarestrup, K., Pompeu, P. S., O'Brien, G. C., Braun, D.C., Burnett, N. J., Zhu, D. Z., Fjeldstad, H.-P., Forseth, T. & Rajaratnam, N.(2018). The future of fish passage science, engineering, and practice. *Fish and Fisheries* 19, 340 – 362.
- Silva, A., Hatry, C., Thiem, J., Gutowsky, L., Hatin, D., Zhu, D., & Cooke, S.(2015). Behaviour and locomotor activity of a migratory catostomid during fishway passage. *PloS One*, 10(4). e0123051
- Silva, A.T., Katopodis, C., Santos, J.M., Ferreira, M.T., Pinheiro, A.N. (2012). Cyprinid swimming behaviour in response to turbulent flow. *Ecol. Eng.* 44, 314–328. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng>.
- Silva, A.T., Santos, J.M., Ferreira, M.T., Pinheiro, A.N. & Katopodis, C. (2011). Effects of water velocity and turbulence on the behaviour of Iberian barbell (*Luciobarbus bocagei*, Steindachner 1864) in an experimental pool-type fishway. *River Res. Appl.* 27, 360–373
- Silva, A.T., Santos, J.M., Ferreira, M.T., Pinheiro, A.N. & Katopodis, C.(2010). Passage efficiency of offset and straight orifices for upstream movements of Iberian barbell in a pool-type fishway. *River Res. Appl.*, <http://dx.doi.org/10.1002/rra.1465>.
- Wang, Y., An R. & Li Y..(2017) Swimming performance of rock carp and prenan's Schizothoracin acclimated to total dissolved gas supersaturated water [J]. *North American Journal of Fisheries Management*, 2017, 37: 1183-1190.
- Zhiping, G. (2019). An Experimental Study of Turbulent Structures in a Flat-Crested Weir-Type Fishway

Investigation and Evaluation of Current Resistance and Kinetic Energy of Turbulence in W Fish

M. shahabi, J. Ahadian*, M. Ghomeshi and H. Azizi-Nadian

* Corresponding Author: Associated professor, Hydraulic Structure, Faculty of Water science Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz (SCU), Ahvaz, Iran. Email: ja_ahadiyan@yahoo.com

Received: 30 November 2021, Accepted: 22 June 2022

Introduction

Nowadays, we notice that the river cross structures can negatively affect the environment, which has led to the importance of ways to protect the water bodies and pay attention to the health of the aquatic ecosystem in water resources. For example, cross-structures prevent fish from migrating upstream. Side effects of this problem include lack of spawning, reduced reproduction, and extinction of fish species. The fish passage structures allow fish to cross river barriers and access their habitats. The hydraulic design of the fishway structure must be compatible with the characteristics of the fish's swimming behaviors to improve the fish crossing efficiency (Castro et al., 2009, Kim et al., 2016). In designing various types of fish road structures, attention to migratory fish's biological and behavioral characteristics is of particular importance. Lack of sufficient information in this field will cause inefficiency in the designed system and cost a lot of money without achieving the desired result. Therefore, it is essential first to identify the climatic conditions, swimming ability, and migration patterns of different fish species to examine the relationship between these factors and hydraulic properties during design (Mao, 2018). In the previous research, less assessment of hydrodynamic parameters such as TKE and the knowledge of the performance of the fish passage structure as roughness under the new structure (W-shape structure) has been studied. Therefore, in the present study, the strength of structures and turbulent kinetic energy (TKE) in the path of the W fishway has been done.

Methodology

The present study was performed in the hydraulic laboratory of the water engineering and environmental faculty, Shahid Chamran University, Ahvaz, in a 10 m long, 50 cm high, and 25 cm wide flume. The slopes tested in the present study were 4, 7, and 10%, the tested discharges were considered 25, 29, 34, 43 L/s, and the angle of the structure was 20. W-shaped overflow barriers were placed about 5 m from the flume inlet to reduce the effects of the initial turbulence caused by the inlet flow to them. In addition, the first weir was placed at a distance of about 3.5m from the beginning of the flume. W-shaped weirs were identified as barriers at $D/L=3$, $D/L=6$, and $D/L=9$ distances..

Results and Discussion

The flow resistance studies showed that the efficiency of relative distance 6 decreases with increasing flow rate. Moreover, it is determined that flow and slope have an inverse effect on the friction coefficient reduction, and also the ineffectiveness of the presence of obstacles was extracted as roughness. However, the effect of obstacles is reduced up to 50% with an increasing flow rate from 20 to 43 L/s, a slope of 4%, and a relative distance of 9. On the other hand, the inverse effect of the Froude number on the friction coefficients and reducing the strength of structures those are as roughness was obtained. Hence, increasing the relative distance between obstacles decreases the flow resistance.

In addition, with increasing relative distance, the effect of relative depth changes on flow resistance decreases. In the TKE assessment, the experiment results showed the formation position of the maximum TKE independent of the slope. The maximum amount of turbulent energy occurs near the water surface, and the best distance for fish is $D/L=9$. Finally, a slope of 4% at a distance of $D / L = 9$ creates the best conditions for the fish.

Conclusions

The reduction of friction coefficients has an inverse effect on flow and slope. The inverse effect of the Froude number on the friction coefficients reduces the resistance of structures that are as roughness to flow. By increasing the relative distance between obstacles, the flow resistance decreases. Increasing of relative depth decreases the flow resistance. Likewise, the formation position of the maximum TKE is independent of the slope. The maximum amount of turbulent energy occurs near the water surface. Hence, the best distance for fish passes is $D/L=9$.

Keywords: Turbulence, w-shaped fishway, roughness of fishway structure, TKE, Flow resistance