

# Flow turbulence changes in the W-weir Fishway using the Flow-3D numerical model

Seyyed Amir Reza Mortazavi<sup>1</sup>, Javad Ahadian<sup>2\*</sup> , Seyed Mohsen Sajjadi<sup>3</sup> ,  
Amir Mohammad Kiyani<sup>4</sup> , Hossein Azizi Nadian<sup>5</sup> 

<sup>1</sup>M.Sc. student, Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

<sup>2</sup>Professor, Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

<sup>3</sup>Associate Professor, Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

<sup>4</sup>PhD student, Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

<sup>5</sup>PhD student, Department of Civil Environmental Architectural Engineering and Mathematics, University of Brescia, Brescia, Italy

Corresponding Author's E-mail: [j.ahadiyan@scu.ac.ir](mailto:j.ahadiyan@scu.ac.ir)

Received: 22 July 2025 Accepted: 31 Oct. 2025

Revised: 12 Oct. 2025 Published: 23 Sep. 2023



Homepage: [ijwer.uoz.ac.ir](http://ijwer.uoz.ac.ir)

**Abstract:** The construction of dams and the installation of diversion weirs hinder the migration of aquatic species upstream of these barriers. To address this issue, hydraulic fishway structures are employed to mitigate energy levels and promote easier passage for fish. The current research conducts a numerical analysis of a W-weir fishway, characterized by an apex angle of 22.5 degrees and a relative distance of 3. To evaluate the hydraulic and hydrodynamic performance of this W-weir fishway, simulations were performed using the Flow 3D model at varying slopes of 4, 7, and 10 percent, alongside 5 distinct inflow rates. The findings indicated that the flow resistance coefficients, specifically Manning roughness and Moody friction, exhibit a decrease of 28% as the flow rate and channel slope increase. The percentage reductions in turbulent kinetic energy at slopes of 4, 7, and 10 percent were 0.036, 0.058, and 0.084 m, respectively. The analysis of the 3D flow velocity distribution along the structure, taking into account the influence of weir kinetic energy on the vertical vortices generated in the downstream slope, revealed that vertical vortices develop downstream of the structures, with the performance of the structure at a 4% slope being more advantageous compared to the other slopes. Furthermore, the maximum variations in the depth ratio associated with Manning roughness were observed at a 10% slope, measuring 0.105, while the minimum was noted at a 4% slope, measuring 0.04.

**Keywords:** Turbulence, Velocity pattern distribution, Froude number, Flow resistance.

**Introduction:** The construction of numerous regulating dams and weirs has resulted in detrimental impacts on the ecosystem and aquatic life. Temporary and diversion dams built in river sections impact aquatic organisms, particularly fish, and are crucial for their reproduction and spawning activities. Varying depths of water flow both upstream and downstream of the dams affect fish migration across different seasons; thus, a fish pass structure is essential to facilitate this movement. The design of such a structure must be informed by a comprehensive understanding of the swimming behaviors of aquatic species (Kim et al., 2015; Shahabi et al., 2022). Turbulent flow conditions diminish the swimming speed of fish and can lead to injuries. Fish exhibit stable, continuous, and explosive swimming speeds, which range from minimum to maximum values, respectively (Beamish, 1978). Consequently, it is vital to possess knowledge of the physics and hydraulics of flow, as well as the geometry of fishway structures. The geometry of these structures can take forms such as rectangular, circular, and elliptical, and they function as weir fishway for water transport (Rajaratnam et al., 1991; Duguay & Lacey, 2015). The design

of fishway structures that incorporate lateral barriers and weirs enhances roughness, reduces flow velocity, and positively influences the movement of aquatic organisms. Studies on weir fishway featuring continuous slotted barriers have indicated that flow depth is contingent upon hydraulic parameters such as discharge, slope.

**Methodology:** To conduct this research and examine the scenarios under consideration, the parameters influencing the flow through the spillway and the barriers utilized in the fishway structure are introduced in accordance with Eq. (1). Subsequently, by Buckingham P-theory, dimensionless parameters are derived as per Eq. (2), which include: Froude number, Reynolds number, relative depth, dimensionless discharge, Darcy-Weisbach coefficient, and bottom slope. Given the constant width of the waterway, apex angle, height of barriers, and their respective distances, the variables were eliminated, leading to the formulation of the following Eq. (2). In this study, the fishway structure is designed in a W-weir, as illustrated in Fig. 1. To enhance the efficiency of the structure and analyze the spillway type fishway, the configuration of fixed barriers is taken into account. The outcomes of this numerical modeling were juxtaposed with the findings from the modeling of the W-weir fishway in the study conducted by Shahabi et al. (2022), and the results were critically evaluated. The laboratory model is depicted in Fig. 2, and the physical experiments referenced in the aforementioned research were executed within this flume. This research investigates the hydrodynamic conditions of the fishway structure, characterized by a fixed opening angle and relative distance of the weir.

**Results and Discussion:** In accordance with the simulation scenarios presented in Table 1, the results of this study have been meticulously analyzed and assessed in alignment with the research objectives. This section evaluates the velocity patterns within the structure, flow resistance, the impact of the Froude number, and turbulent kinetic energy, each of which is elaborated upon in the following sections. The variations in velocity are illustrated in two dimensions: the length and width of the channel. The numerical values and their trends are shown in Fig. 3. As a result, at a slope of 7%, the peak velocities for flow rates of 20 liters per second and 43 liters per second are recorded at 1.67 m/s and 1.93 m/s, respectively, while the minimum velocities, affected by the presence of obstacles, are 0.64 m/s and 0.7 m/s, respectively, observed in the opposing direction of the flow. As depicted in Fig. 6, an increase in the Froude number is associated with a reduction in energy loss coefficients, which is attributed to the increase in depth and the decrease in the effects of spillway barriers and their roughness. The numerical values for friction loss coefficients and Manning roughness at different slopes are illustrated in Figs. 6 and 7, respectively. As the slope rises from 4% to 10%, the root coefficient of friction for the structure at the Froude number is recorded at 0.44, with the highest value reaching 0.95 for the maximum Froude number, while the lowest value, at a slope of 4%, is 0.27, corresponding to 0.9.

**Conclusion:** The flow dynamics observed in the three-dimensional velocity distribution along the fishway structure, which incorporates a W-weir fishway, demonstrated the emergence of vertical vortices downstream of the structures, alongside notable pressure fluctuations. The results indicated that an increase in the Froude number corresponded with a reduction in flow resistance. Furthermore, as the Froude number rose, both the Manning roughness coefficients and the Mody friction coefficients showed a decline. In summary, the findings offer valuable insights into the effects of the structure employed in this study. At the maximum slope of 4%, the structure exhibited enhanced performance, fostering significantly more favorable conditions for fish migration. The analysis of the three-dimensional flow velocity along the structure, taking into account the influence of spillway kinetic energy on the vertical vortices generated in the downstream slope, revealed that vertical vortices are indeed formed downstream of the structures, with the performance of the structure at a 4% slope being more advantageous compared to the other slopes.

© 2023 University of Zabol, Zabol, Iran.



This 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/>)

# تغییرات آشفتگی جریان در سرریز راه ماهی W با استفاده از مدل عددی Flow-3D

سید امیررضا مرتضوی<sup>۱</sup>، جواد احدیان<sup>۲\*</sup>، سید محسن سجادی<sup>۳</sup>، امیرمحمد کیانی<sup>۴</sup>، حسین عزیزی نادیان<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

<sup>۲</sup> استاد گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

<sup>۳</sup> دانشیار گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

<sup>۴</sup> دانشجوی دکتری تخصصی، گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

<sup>۵</sup> دانشجوی دکتری تخصصی، گروه مهندسی معماری عمران-محیط زیست و ریاضیات، دانشگاه برشا، برشا، ایتالیا

پست الکترونیکی نگارنده مسئول: [i.ahadian@scu.ac.ir](mailto:i.ahadian@scu.ac.ir)

وبگاه نشریه: [ijwer.uoz.ac.ir](http://ijwer.uoz.ac.ir)



تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۳۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۹

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۰ تاریخ چاپ: ۱۴۰۲/۰۷/۰۱

**چکیده:** سدسازی و اجرای بندهای انحرافی مانع از مهاجرت آبزیان به بالادست سازه‌ها می‌شود. به همین منظور از سازه هیدرولیکی راه‌ماهی جهت کاهش انرژی و مهاجرت آسان برای ماهیان استفاده می‌شود. پژوهش حاضر به بررسی عددی سازه راه‌ماهی از نوع حوضچه سرریز W شیب‌دار با زاویه راس ۲۲/۵ درجه و با فواصل نسبی ۳ می‌پردازد. برای آگاهی از کارکرد هیدرولیکی و هیدرودینامیکی سازه راه‌ماهی W، سازه در شیب‌های مختلف ۴، ۷ و ۱۰ درصد و جریان ورودی با ۵ دبی متفاوت در مدل Flow 3D شبیه‌سازی شد. نتایج نشان دادند که ضرایب مقاومت جریان که زبری مانینگ و اصطکاک مودی هستند، با افزایش دبی و شیب مجرا تا ۲۸٪ کاهش می‌یابند. درصد کاهش انرژی جنبشی آشفتگی در شیب‌های ۴، ۷ و ۱۰ درصد به ترتیب برابر با ۰/۰۳۶، ۰/۰۵۸ و ۰/۰۸۴ متر ثبت شدند. توزیع سرعت جریان ۳ بعدی در طول سازه با توجه به تاثیر انرژی جنبشی سرریز بر گرداب‌های عمودی تشکیل شده در شیب پایین‌دست نشان داد که گرداب‌های قائم در پایین‌دست سازه‌ها شکل می‌گیرد و عملکرد سازه در شیب ۴ درصد مطلوب‌تر از دیگر شیب‌های آن بود. همچنین بیشینه تغییرات نسبت عمق با زبری مانینگ در شیب ۱۰ درصد برابر با ۰/۱۰۵ و کمترین در شیب ۴ درصد برابر با ۰/۰۴ ثبت شد.

**کلیدواژه‌ها:** تلاطم، توزیع الگوی سرعت، عدد فرود، مقاومت جریان.

## ۱- مقدمه

تولیدمثل و تخم‌ریزی آنان دارد. عمق جریان متفاوت در بالادست و پایین‌دست سدها در مهاجرت ماهی‌ها در فصول مختلف سال اثر می‌گذارد؛ به همین دلیل، نیاز به سازه راه‌ماهی می‌باشد تا بتواند این امر را میسر سازد. طرح این سازه باید متناسب با شناخت کافی از نحوه شنای آبزیان

احداث سدهای تنظیمی و بندهای متعدد، آثار زیان‌باری بر اکوسیستم و زیست‌بوم آبزیان برجای گذاشته است. سدهای موقت و انحرافی احداث شده در مقطع رودخانه بر حیات آبزیانی همچون ماهی‌ها تاثیرگذار می‌باشد و نقشی مهم در

Ahadiyan et al. (2018) به بررسی ضریب زبری مانینگ در کانالی با موانع W شکل نامتقارن در آبراهه روباز با شیب‌های مختلف پرداخت و نشان دادند که عبور آبزیان با بازدهی مناسبی همراه شد. بررسی تأثیر سازه دریچه‌ای در راه‌ماهی نوع جزیره‌ای نشان داد که زاویه قوس دریچه‌ها، تأثیر زیادی بر جریان آب دارد. با کاهش زاویه قوس، جریان اصلی بیشتر و منطقه با سرعت پایین کوچک‌تر می‌شود. بهترین طراحی برای مهاجرت ماهی‌ها، دریچه با زاویه قوس ۱۸۰ درجه است که منطقه‌ای با سرعت پایین بیش از ۶۰ درصد فضای موجود را پوشش داد (Dong et al., 2024).

در تحقیقی دیگر، سرریزهای W شکل نامتقارن با زوایای رأس مختلف با فاصله نسبی متفاوت، طراحی و اجرا شدند. نتایج نشان داد با افزایش شیب، دبی جریان و فاصله نسبی و با کاهش ارتفاع موانع، ضرایب زبری و استهلاک انرژی کاهش می‌یابند (Gallhdar Shoostari et al., 2020). بررسی عملکرد تغییرات خصوصیات مقاومت جریان مانند ضریب افت اصطکاک مودی و ضریب زبری مانینگ نشان داد که با افزایش دبی در یک فاصله نسبی بین سازه‌ها و شیب معین، زبری مانینگ کاهش می‌یابد و با افزایش فاصله نسبی موانع در یک دبی مخصوص نیز، زبری مانینگ کاهش یافت (Shahabi et al., 2021; Shahabi et al., 2022.b).

طراحی بهینه و موثر بر محیط زیست نیازمند مدل‌سازی‌های فیزیکی و میدانی می‌باشد ولی با پیشرفت روزافزون مدل‌های عددی و صرفه اقتصادی، این روش‌ها جایگزین مدل فیزیکی شده‌اند. (Mahmoudian et al., 2019) با استفاده از شبیه‌سازی عددی، سازه راه‌ماهی دنیل و تأثیر آن بر توزیع سرعت و الگوی جریان بررسی کردند و دریافتند که در اعماق نسبی کمتر از ۰.۵ متر، جریان چرخشی ایجاد شده باعث سهولت در حرکت ماهی به بالادست سد می‌شود. (Lashkar ara et al., 2017) با استفاده از مدل عددی به تحلیل شرایط زیست‌محیطی راه‌ماهی دنیل پرداختند. طبق نتایج، سازه‌ای با شیب طولی ۲۰ درصد و زاویه ۴۵ درجه به‌عنوان طرح بهینه انتخاب شد.

در یک بررسی جریان آب در یک مدل عددی سرریز

باشد (Kim et al., 2015; Shahabi et al., 2022.a). جریان در حالت متلاطم، سرعت شنای ماهی را کاهش می‌دهد و موجب آسیب دیدن آن‌ها می‌شود. سرعت شنای ماهی به‌صورت پایدار، پیوسته و انفجاری می‌باشد که به ترتیب در بازه کمینه الی بیشینه سرعت قرار دارد (Beamish, 1978). لذا با توجه به این مورد، آگاهی از فیزیک و هیدرولیک جریان و هندسه سازه راه‌ماهی اهمیت بسزایی دارد. هندسه سازه با شکل‌هایی مثل مستطیلی، دایروی و بیضوی ساخته شده و سازه ترکیبی آنگذر- راه‌ماهی برای انتقال آب استفاده شد (Rajaratnam et al., 1991).

طراحی سازه راه‌ماهی با استفاده از موانع جانبی و سرریز باعث افزایش زبری و کاهش سرعت جریان می‌شود و تأثیری مثبت در روند حرکت آبزیان دارد. پژوهش‌ها بر روی کالورت‌هایی دارای موانع شکاف‌دار پیوسته نشان داد که عمق جریان به پارامترهای هیدرولیکی جریان مثل دبی، شیب و عرض مقطع بستگی دارد (Rajaratnam et al., 1986; Rajaratnam & Katopodis, 1989). بررسی‌هایی بر روی نحوه شنا کردن ماهی قزل‌آلا در راه ماهی‌هایی با نصب موانع و بدون وجود مانع نشان داد که افزایش ضریب زبری بر روند مهاجرت به بالادست تأثیرگذار است (Olsen & Tullis, 2013). بررسی مهاجرت ماهی قزل‌آلا با استفاده از راه‌ماهی کالورتی با موانع سرریزی، نقش موثر ارتفاع و فاصله مانع‌ها را بر بهبود عبور ماهی‌ها نشان داد (Thurman & Horner-Devine, 2007).

در تحقیقی دیگر با اتلاف انرژی و ایجاد سرعت جریان مناسب، امکان عبور ۲۰ درصد بهبود یافت (Tahmasbipour et al., 2024). کاهش ضریب زبری با استفاده از پوشش صیقلی به کاهش راندمان عبور ماهیان منجر گردید (Rajaratnam et al., 1990). بررسی‌ها بر روی نوع مخصوصی از راه‌ماهی‌ها به نام دنیل با تغییر فاصله و ابعاد مجرا انجام شد و اثر عرض آبراهه و تغییرات سرعت و دبی با تغییر فواصل بین هر مانع بررسی شد (Rajaratnam & Katopodis, 1984). مطالعات بر روی شش مدل گوناگون از کالورت با موانعی با تیغه مورب موجب افزایش عمق جریان و تشکیل گردابه در پایاب مانع شد و به عبور ماهیان کمک کرد (Chanson & Uys, 2016).

برای سازه راه‌ماهی مورد ارزیابی قرار گرفت.

در پژوهشی دیگر به تحلیل جریان آشفته در راه‌ماهی ترکیبی با شکاف عمودی و سوراخ کف و تحلیل سرعت‌های سه‌بعدی جریان آب در یک راه‌ماهی مستطیلی با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری ADV<sup>۵</sup> پرداخته شد. هدف، بررسی گردابه‌های تشکیل شده در بالادست هر سرریز بود و برای درک بهتر ساختار جریان آب از روش امگام<sup>۶</sup> خاص برای شناسایی گردابه‌ها استفاده شد. نتایج نشان داد که در قسمت پایین‌دست سازه، جریان آب به صورت مستقیم حرکت می‌کند اما در بالادست، جریان دارای تلاطم است و حتی در برخی نقاط جریان به سمت عقب برمی‌گردد؛ پس، روش شناسایی گردابه نیز به تشخیص دقیق‌تر این ساختارها کمک می‌کند (Shen et al., 2024).

مقایسه نتایج سرریزهای مستقیم و هزارتوی مستطیلی با استفاده از شبیه‌سازی عددی نشان داد که سرریز هزارتوی مستطیلی دبی بیشتری نسبت به سرریز مستقیم دارد. سرریز مستقیم سرعت جریان بیشتری دارد اما هزارتوی مستطیلی انرژی و آشفتگی بیشتری جذب می‌کند. افزایش فاصله سرریزها و شیب بستر باعث افزایش سرعت و آشفتگی و کاهش اتلاف انرژی می‌شود. وجود دهانه در سرریز سرعت جریان را افزایش داده و آشفتگی را کاهش می‌دهد و به ماهی‌ها امکان استراحت در مناطق آرام‌تر را می‌دهد (Mirghorli et al., 2024). در یک مطالعه، بررسی کارایی راه‌ماهی با شکاف عمودی<sup>۷</sup> با روش اولبری لاگرانژی<sup>۸</sup> برای شبیه‌سازی مهاجرت ماهی‌ها انتخاب شد. مدل چهار رفتار حرکت تصادفی، اتلاف انرژی، اجتناب از دیوارها و فرار از سرعت‌های بالا را شبیه‌سازی کرد. نتایج نشان داد که این مدل می‌تواند مسیر حرکت ماهی‌ها را دقیق پیش‌بینی کرده و ابزاری موثر برای ارزیابی کارایی زیستی و هیدرولیکی باشد (Ruiz-Coello et al., 2024). در بررسی دیگری جهت شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار فلوئنت<sup>۹</sup>، مشخصات هیدرولیکی سازه راه‌ماهی با شکاف عمودی در دو حوضچه

راه‌ماهی با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت<sup>۱</sup>، از شبیه‌سازی برای مدل‌سازی سطح آزاد آب برای شبیه‌سازی آشفتگی جریان استفاده شد. نتایج این شبیه‌سازی با نتایج فیزیکی مشابه، تطابق مناسبی داشت و نشان داد که این روش می‌تواند برای بررسی جریان‌های پیچیده موثر باشد (Tarena et al., 2025).

شبیه‌سازی تلاطم جهت بررسی رفتار جریان در یک راه‌ماهی با سطح بازشدگی عمودی با سه مدل متفاوت برای طول اختلاط، مدل تنش جبری به کار گرفته شد. نتایج این تحقیق نشان داد که می‌توان از شبیه‌سازی آشفتگی  $k-\epsilon$  به عنوان مدلی مؤثر در طراحی کارآمدتر و بهینه‌تر راه‌ماهی‌ها استفاده کرد (Cea et al., 2007). در تحقیقی، مدل‌سازی عددی سه‌بعدی جریان غیریکنواخت و آشفته در سازه راه‌ماهی با شکاف عمودی غیریکنواخت با استفاده از نرم‌افزار اپن‌فوم<sup>۲</sup> بررسی شد. روش‌های مدل‌سازی عددی آشفتگی مختلفی استفاده شدند که مدل شبیه‌سازی گردابه بزرگ<sup>۳</sup> در ارائه جزئیات فضایی بهتر عمل کرده است. برای تحلیل دقیق‌تر از مدل آشفتگی مقادیر متوسط عدد رینولدز برای حل بخش آشفتگی جریان در معادله ناویر استوکس<sup>۴</sup> برای مقیاس‌های بزرگ‌تر و از مدل شبیه‌سازی گردابه بزرگ برای نواحی نیازمند تحلیل دقیق‌تر استفاده شد. همچنین، مدل‌سازی سه‌بعدی مزایای زیادی نسبت به مدل‌سازی یک‌بعدی دارد و می‌تواند به تحلیل بهتر دینامیک محلی کمک کند. نتیجه نشان داد که استفاده ترکیبی از مدل‌های یک‌بعدی و سه‌بعدی می‌تواند به مدل‌سازی مؤثر و با صرفه‌جویی در زمان و منابع کمک کند (Fuentes-Pérez et al., 2018).

Shahabi et al. (2023) به بررسی عددی شرایط هیدرودینامیکی راه‌ماهی V شکل با نسبت فواصل مختلف هر سرریز و زوایای بازشدگی متفاوت پرداختند. نتایج نشان داد که در زاویه بازشدگی ۲۲/۵ درجه و فاصله نسبی بین سرریزها به میزان ۱/۳ و ۲/۶ به عنوان بهترین عملکرد

<sup>6</sup> Omega method

<sup>7</sup> Vertical Slot Fishway

<sup>8</sup> Eulerian-Lagrangian-agent Method

<sup>9</sup> Fluent

<sup>1</sup> Fluent

<sup>2</sup> Openfoam

<sup>3</sup> Large Eddy Simulation

<sup>4</sup> Reynolds-Averaged Navier-Stokes

<sup>5</sup> Acoustic Doppler Velocimeter

آن‌ها، متغیرهای آن‌ها حذف شدند و رابطه زیر بدین ترتیب نوشته شد؛

$$F\left(Fr, Re, \frac{\nu}{B}, \frac{Q}{B^{2.5}\sqrt{g}}, f, S\right) = 0 \quad (2)$$

با توجه به اینکه جریان در طبیعت این سازه به صورت آشفتگی است، از عدد رینولدز صرف نظر شده است. ۱۲ پارامتر موجود در رابطه (۱) با توجه به انتخاب پارامترهای تکراری و ثابت به ۶ عدد بدون بعد نسبی در این بررسی رسیده است.

## ۲-۲- مدل عددی Flow 3D

Flow 3D، یکی از مدل‌های ریاضی و دینامیک سیالات محاسباتی رایج می‌باشد که در حل مسائل پیچیده در زمینه مهندسی آب و عمران استفاده می‌شود. توانایی حل سه بعدی پدیده‌های هیدرولیکی توسط این نرم‌افزار در شرایطی که مدل‌سازی فیزیکی زمان‌بر و پرهزینه می‌باشد، سبب افزایش شبیه‌سازی عددی با استفاده از این مدل مطمئن شده است. این نرم‌افزار، یک مدل سازگار با وضعیت پیچیده‌ی جریان در شرایط دو بعدی و سه بعدی می‌باشد که قادر به حل همزمان معادلات پیوستگی و ناویر استوکس می‌باشد. روابط ذیل به ترتیب معادلات حاکم پیوستگی و ناویر استوکس برای سیالات تراکم‌ناپذیر می‌باشند؛

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i + \nu \nabla^2 u_i \quad (4)$$

در روابط بالا،  $u_i$ ، سرعت لحظه‌ای در جهت  $i$  (m/s)،  $g$  شتاب ثقل (m/s<sup>2</sup>)،  $p$  فشار سیال (Pa)،  $\nu$  گرانشی سینماتیکی سیال (m<sup>2</sup>/s) و  $\rho$  جرم مخصوص سیال (Kg/m<sup>3</sup>) هستند.

## ۲-۳- مدل‌سازی عددی

در این پژوهش، سازه راه‌ماهی به شکل W است و به صورت

بررسی شد. نتایج نشان داد که این طراحی، سرعت جریان در شکاف‌ها را کاهش داده و کارایی محفظه‌ها را افزایش داده است و فضای مناسبی برای ماهی‌ها فراهم می‌کند. همچنین، توزیع جریان در لایه‌های مختلف مشابه بوده و جریان دوبعدی است (Qi et al., 2024).

با مرور پژوهش‌های پیشین دریافت شد که کاهش اصطکاک، یک عامل منفی در مهاجرت ماهیان محسوب می‌شود و در این پژوهش از یک سرریز W شکل به عنوان مانع در راه‌ماهی استفاده شد. هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی نقش سازه بر تغییرات ویژگی‌های جریان و آشفتگی، از جمله انرژی جنبشی آشفتگی<sup>۱</sup>، توزیع الگوی سرعت و ضرایب مقاومت جریان با شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۲</sup> است.

## ۲- روش‌شناسی

### ۲-۱- آنالیز ابعادی

جهت انجام این پژوهش و سناریوهای مورد بررسی، پارامترهای موثر در جریان عبوری از سرریز و موانع به کاررفته در سازه راه‌ماهی طبق رابطه (۱) معرفی می‌شوند؛

$$F(B, g, y, L, p, Q, f, V, S, \theta, \rho, \mu) = 0 \quad (1)$$

که در این رابطه،  $Q$  دبی جریان (m<sup>3</sup>/s)،  $D$  فاصله سرریزها (m)،  $B$  عرض آبراهه (m)،  $V$  سرعت جریان (m/s)،  $y$  عمق جریان (m)،  $L$  فاصله بین هر مانع (m)،  $p$  ارتفاع موانع (m)،  $g$  شتاب ثقل (m/s<sup>2</sup>)،  $S$  شیب کف،  $\theta$  زاویه راس سرریز (درجه)،  $f$  ضریب اصطکاک مودی،  $\rho$  جرم مخصوص سیال (Kg/m<sup>3</sup>) و  $\mu$  گرانشی دینامیکی سیال (Kg/m.s) هستند. در ادامه با استفاده از تئوری پی باکینگهام<sup>۳</sup> و پارامترهای تکراری، پارامترهای بدون بعد طبق رابطه (۲) به دست می‌آیند که به ترتیب عبارتند از: عدد فرود، عدد رینولدز، عمق نسبی، دبی بدون بعد و ضریب دارسی و سیبک و شیب کف. با توجه به ثابت بودن زاویه راس، ارتفاع موانع و فواصل

<sup>3</sup> Buckingham

<sup>1</sup> Turbulent Kinetic Energy

<sup>2</sup> Computational Fluid Dynamics

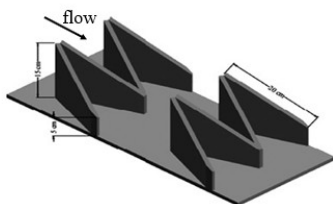


Fig. 1 The W-weir fishway structure

شکل ۱ سازه راه ماهی سرریز W

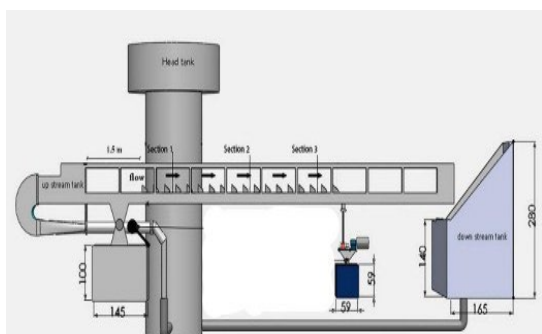


Fig. 2 The laboratory model (Shahabi et al., 2022)

شکل ۲ مدل آزمایشگاهی (Shahabi et al., 2022)

جدول ۱ اطلاعات شبیه‌سازی جریان آزاد

Table 1 Simulation data of free flow

Discharge (m <sup>3</sup> /s)	Slope (%)	Constant parameters	
		D/L	Θ (°)
0.02	4	۳	22.5
	7		
	10		
0.025	4	۳	22.5
	7		
	10		
0.029	4	۳	22.5
	7		
	10		
0.034	4	۳	22.5
	7		
	10		
0.043	4	۳	22.5
	7		
	10		

شکل ۱ طراحی شده‌است. جهت بهبود کارایی سازه و بررسی راه‌ماهی نوع حوضچه سرریز، آرایش موانع ثابت در نظر گرفته شده‌است. نتایج حاصل از این مدل‌سازی عددی با نتایج مدل‌سازی راه‌ماهی نوع حوضچه سرریز W شکل در پژوهش Shahabi et al., (2022).b مقایسه شد و نتایج آن بررسی شده‌است. مدل آزمایشگاهی به صورت شکل ۲ می‌باشد که آزمایش‌های فیزیکی پژوهش مذکور در این فلوم انجام شد. در این تحقیق به بررسی شرایط هیدرودینامیکی سازه راه‌ماهی با زاویه بازشدگی و فاصله نسبی ثابت طبق تحقیقات Shahabi et al., (2022).b پرداخته شده‌است. پارامترها و جزئیات آزمایش در جدول ۱ آمده‌است.

هندسه سازه سرریز راه‌ماهی W وارد نرم‌افزار FLOW-3D شد. محدوده مورد مطالعه در بازه موقعیت مکانی سرریزها می‌باشد که مش‌بندی سازه با اندازه ۰/۰۱ متر شبیه‌سازی شد. در این بررسی ابعاد مش جهت تحقق نتایج مطلوب از اندازه نسبی سلول‌های مجاور به میزان کمتر از واحد در نظر گرفته شد. در نرم‌افزار Flow3D، چند شرط مرزی برای هر یک از وجوه شبکه حل وجود دارد که عبارتند از: Wall، مانند یک دیوار در وجوه صلب شبکه مش بندی حل عمل می‌کند. جریان خروجی که در قسمت خروجی مجرا تعریف شد. جریان در این لایه بی اثر از مرز عبوری، از وجه شبکه حل خارج می‌شود. در ورودی مجرا، حجم جریان برای معرفی وجه شبکه حل به‌عنوان دبی ورودی صورت می‌گیرد. دیواره‌های مجرا و سقف آن در شبکه به صورت Symmetry تعریف شد که شرایط بیرون از مرز شبکه حل را طبق شرایط روی مرز داخلی قرار می‌دهد و می‌تواند در سطح آزاد سیال صورت گیرد. اگر سطح سیال به این مرز برسد، سیال تحت فشار قرار می‌گیرد. مدل تلاطمی استفاده شده در این شبیه‌سازی RNG می‌باشد که با توجه به بررسی‌های عددی در پژوهش (Shahabi et al., 2022.b) انتخاب گردید.

جهت حل روابط حاکم بر جریان دو فازی و به‌دست آوردن مقادیر مجهول از روش‌های حجم محدود و المان محدود استفاده می‌شود. برای شبیه‌سازی سطح میان دو فاز جریان

### ۳- نتایج و بحث

با توجه به سناریوهای شبیه‌سازی که در [جدول ۱](#) گفته شد، نتایج پژوهش متناسب با اهداف این تحقیق، تحلیل و بررسی شده‌است. الگوی سرعت در سازه، مقاومت جریان، اثر عدد فرود و انرژی جنبشی تلاطمی در این قسمت ارزیابی شده‌است و در ادامه به آن‌ها پرداخته شده‌است.

#### ۳-۱- توزیع الگوی سرعت یک بعدی جریان

الگوی سرعت جریان در [شکل‌های ۳ تا ۵](#) به ترتیب در راستای طول، عرض و عمق جریان نمایش داده شده‌است. تغییرات دو بعدی سرعت در راستای طول و عرض کانال در [شکل‌های ۳](#) الی [۵](#) قابل مشاهده است. مقادیر عددی و روند تغییرات آن در [شکل ۳](#) نشان داده شده‌است. مطابق آن در شیب ۷ درصد، بیشترین میزان سرعت برای دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه و دبی ۴۳ لیتر بر ثانیه به ترتیب ۱/۶۷ و ۱/۹۳ متر بر ثانیه می‌باشد و در کمترین میزان که متاثر از وجود موانع است، به ترتیب ۰/۶۴ و ۰/۷ متر بر ثانیه در خلاف جهت جریان ثبت شده‌است. در [شکل ۴](#) که سرعت عرضی جریان را نشان می‌دهد، این میزان به ترتیب برای بیشترین مقدار ۰/۷ و ۱/۱ متر بر ثانیه است و برای کمترین مقدار، ۰/۷ و ۱/۲۵ متر بر ثانیه در خلاف جهت جریان می‌باشد. [شکل ۵](#) نیز سرعت عمقی جریان را نشان می‌دهد.

#### ۳-۲- اثر عدد فرود بر جذر ضرایب زبری مانینگ و

##### اصطکاک مودی سازه

مطابق با [شکل ۶](#)، با افزایش میزان عدد فرود میزان ضرایب افت انرژی کاهش یافته‌است چرا که افزایش عمق را به همراه دارد و تاثیر موانع سرریز و زبری آن‌ها را کمتر می‌کند. در شیب‌های مختلف، مقادیر عددی ضرایب افت اصطکاک و زبری مانینگ به ترتیب در [شکل‌های ۶ و ۷](#) نشان داده شده‌است. با افزایش شیب از ۴ درصد به ۱۰ درصد، مقدار ضریب جذر اصطکاک در سازه برای عدد فرود ۰/۴۴، ۰/۹۵ برای بیشترین مقدار فرود است و در کمترین مقدار که ۰/۲۷ در شیب ۴ درصد برابر با ۰/۹ است که این میزان نسبت به سازه سرریز V شکل ۲۵ درصد کاهش زبری و

در مدل حجم سیال<sup>۱</sup>، رابطه پیوستگی بین هر دو فاز باید برقرار باشد. به منظور تحلیل و محاسبه مقاومت جریان، شیب خط انرژی بین مقاطع مختلف بر اساس روابط [\(۵\)](#) و [\(۶\)](#) نوشته می‌شوند و به کمک روابط [\(۷\)](#) و [\(۸\)](#) ضریب زبری مانینگ و اصطکاک مودی در سازه استخراج شده‌است.

$$\Delta E / \Delta X = S_0 - S_f \quad (5)$$

$$S_0 - S_f = \frac{(h_{v2} + y_2 \times \cos \alpha) - (h_{v1} + y_1 \times \cos \alpha)}{\Delta X} \quad (6)$$

$$h_f = f \frac{LV^2}{D.g} \quad (7)$$

$$Q = \frac{A}{n} R_h^{2/3} \sqrt{S_0} \quad (8)$$

مطابق با روابط بالا، در روابط [\(۵\)](#) و [\(۶\)](#)،  $S_0$  شیب مجرا،  $S_f$  شیب اصطکاک جریان،  $\Delta E$  تغییرات انرژی،  $\Delta X$  فاصله در طول مجرا،  $y$  عمق جریان و  $h_v$  بار آبی جریان هستند. در رابطه [\(۷\)](#)، میزان افت اصطکاک، ضریب افت اصطکاک، طول جریان، سرعت جریان، شتاب گرانش هستند. در رابطه [\(۸\)](#)،  $Q$  دبی جریان،  $n$  ضریب زبری مانینگ،  $R_h$  شعاع هیدرولیکی جریان،  $A$  سطح مقطع جریان می‌باشند.

با توجه به اینکه سرعت جریان و تلاطم، یکی از عوامل تغییر مسیر و سرعت حرکت ماهیان است، بررسی شرایط جریان در این مورد اهمیت دارد (Silva et al., 2012). الگوی جریان در سازه راه‌ماهی بر مسیر حرکت آن‌ها موثر است و میزان تلاطم و تاثیر آن بر شنا کردن ماهی‌ها را در طراحی سازه راه‌ماهی اعمال کرد تا بتوان تمهیدات لازم در نقاط با تلاطم زیاد را اندیشید. انرژی جنبشی آشفته‌گی جریان با استفاده از رابطه پایین محاسبه می‌شود که در [این رابطه](#)،  $V'_x, V'_y, V'_z$  به ترتیب متوسط مربعات ریشه‌های پارامترها در راستای طول، عرض و عمق زمان هستند.

$$TKE = \frac{1}{2} (\overline{V'_x^2} + \overline{V'_y^2} + \overline{V'_z^2}) \quad (9)$$

<sup>1</sup> Volume of flow

عمق نسبی برای این نوع سرریز ۲۰ درصد بهبود عملکرد دارد و عمق کافی برای سازه راهماهی را ایجاد کرده‌است. بیشترین مقادیر به ترتیب برابر با ۱/۱۵ و ۱/۱۲ برای شیب ۴ و ۷ درصد است و کمترین میزان که بعد از سرریزها است برابر با ۰/۷۵ و ۰/۷ در شیب‌های ۷ و ۱۰ درصد می‌باشد.

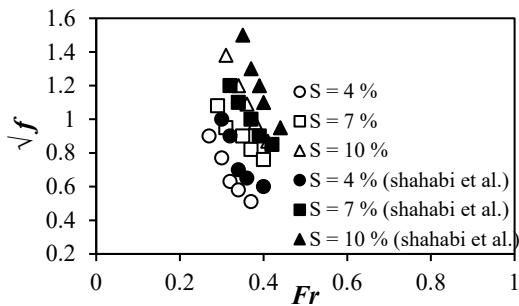


Fig. 6 Froude number vs. the friction coefficient

شکل ۶ عدد فرود در برابر جذر ضریب اصطکاک

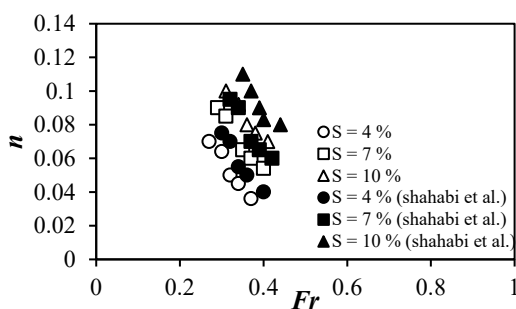


Fig. 7 Froude number vs. Manning roughness coefficient

شکل ۷ عدد فرود در برابر ضریب زبری مانینگ سازه

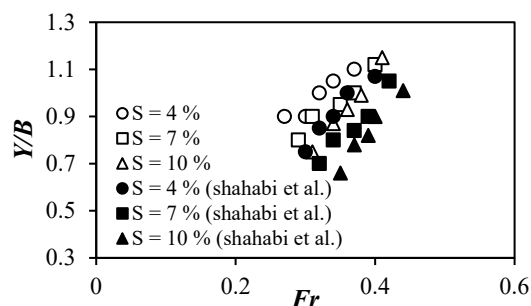


Fig. 8 The effect of Froude number on relative depth of structure

شکل ۸ تاثیر عدد فرود بر عمق نسبی در سازه

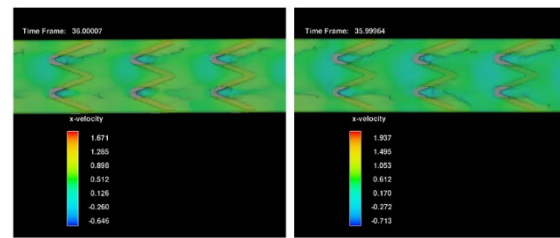


Fig. 3 Longitudinal flow velocity pattern in structure with a 7% slope at flow rates of 20 and 43 (l/s)

شکل ۳ الگوی سرعت طولی جریان در سازه با شیب ۷ درصد در دبی ۲۰ و ۴۳ لیتر بر ثانیه

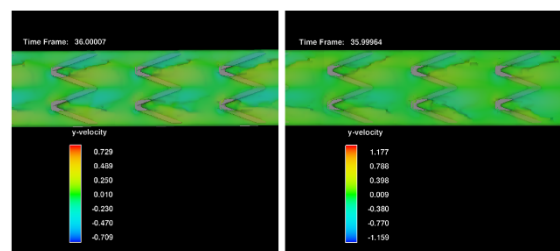


Fig. 4 Transverse flow velocity pattern in structure with 7% slope at flow rates of 20 and 43 (l/s)

شکل ۴ الگوی سرعت عرضی جریان در سازه با شیب ۷ درصد در دبی ۲۰ و ۴۳ لیتر بر ثانیه

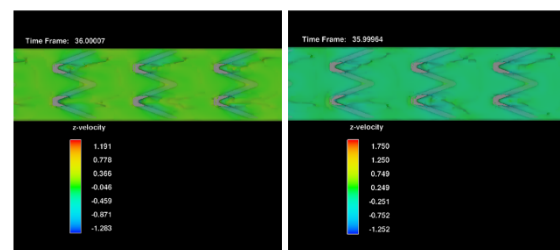


Fig. 5 Flow velocity pattern in structure with a 7% slope at flow rates of 20 and 43 (l/s)

شکل ۵ الگوی سرعت عمقی جریان در سازه با شیب ۷ درصد در دبی ۲۰ و ۴۳ (لیتر بر ثانیه)

در نتیجه افزایش عمق جریان را به همراه داشته‌است.

### ۳-۳- اثر عمق نسبی بر عدد فرود

در شکل ۸، میزان عمق نسبی در برابر عدد فرود نشان داده شده‌است. متناسب با این شکل، عمق نسبی در شیب ۴ درصد بیشترین میزان را دارد و در شیب ۱۰ درصد که سرعت افزایش یافته‌است، کمترین مقدار برای آن ثبت شده‌است. با افزایش عدد فرود، نسبت عمق نیز افزایش یافته‌است. همچنین در قیاس با پژوهش‌های دیگر، میزان

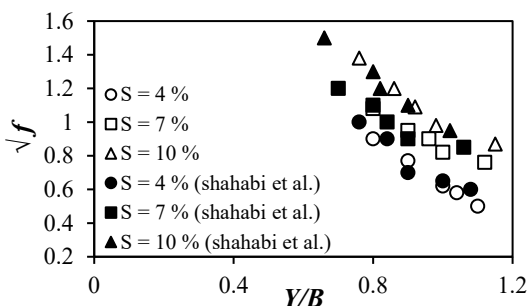


Fig. 9 Effect of relative depth vs. the friction coefficient

شکل ۹ تاثیر عمق نسبی در برابر جذر ضریب اصطکاک

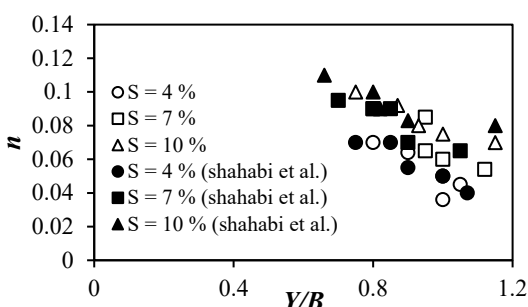


Fig. 10 Effect of relative depth on Manning roughness coefficient of structure

شکل ۱۰ تاثیر عمق نسبی در برابر ضریب زبری مانینگ سازه

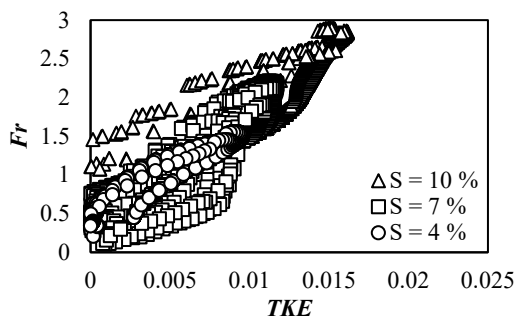


Fig. 11 Effect of turbulence kinetic energy on Froude number

شکل ۱۱ تاثیر انرژی جنبشی آشفتگی در برابر عدد فرود

#### ۴- نتیجه گیری

پژوهش حاضر جهت بررسی شرایط هیدرودینامیکی سازه راه ماهی W شکل و تاثیر آن بر مقاومت و انرژی جنبشی آشفتگی جریان انجام شد. با افزایش شیب، بازه سرعت بیشینه بر روی سرریزها و استخرها افزایش یافته و طول بیشتری نیز خواهد داشت. با افزایش شیب راه ماهی، ارتفاع

#### ۳-۴- اثر عمق نسبی بر ضرایب مقاومت جریان

طبق شکل‌های ۹ و ۱۰، با فاصله نسبی ثابت سرریزها، تغییرات عمق نسبی نسبت به ضریب اصطکاک کاهش می‌دهد. در شیب ۱۰ درصد، مقدار عمق نسبی به‌طور چشم‌گیری تا ۵۵ درصد کمتر می‌شود و این بدلیل افزایش عمق جریان از روی هر سرریز است که بر زبری بستر تاثیر دارد. با افزایش شیب و کاهش میزان عمق در سازه، مقاومت جریان بیشتر می‌شود و بیشترین میزان افت برای ضریب اصطکاک طبق شکل ۹ برابر با ۱/۳ با عمق نسبی ۰/۷۵ و کمترین میزان برابر با ۰/۵ و نسبت عمق ۱/۱۵ است. طبق شکل ۱۰ که تغییرات نسبت عمق را با زبری مانینگ نشان می‌دهد، بیشینه مقدار در شیب ۱۰ درصد برابر با ۰/۱۰۵ و کمترین در شیب ۴ درصد برابر با ۰/۰۴ می‌باشد.

#### ۳-۵- انرژی جنبشی آشفتگی

در این قسمت تغییرات انرژی جنبشی در سازه برای دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه بررسی شده است. شکل ۱۱، روند تغییرات طولی انرژی جنبشی آشفتگی را با مقدار عدد فرود در هر نقطه نشان داده است. بر اساس این نمودار، با حرکت جریان در مسیر که با هر سرریز مواجه می‌شود، عدد فرود متناسب با افزایش عمق آب کاهش می‌یابد و از انرژی جنبشی نیز کاسته می‌شود. پس از عبور جریان از یک سرریز تا سرریز بعدی، افزایش عدد فرود همراه با افزایش سرعت جریان همراه است و انرژی جنبشی نیز افزایش یافته است.

با توجه به مقادیر ثبت شده، در شیب ۱۰ درصد، این روند تغییرات اختلاف بیشتری نسبت به شیب‌های دیگر دارد که به میزان ۱ الی ۲ واحد از عدد فرود می‌باشد. روند انرژی جنبشی آشفتگی نیز در شیب‌های ۴، ۷ و ۱۰ درصد به ترتیب برابر با ۰/۰۳۶، ۰/۰۵۸ و ۰/۰۸۴ می‌باشد. این میزان در مقایسه با پژوهش‌های پیشین با سرریز V شکل (Shahabi et al., 2022)، با توجه به افزایش شیب و همچنین افزایش سرعت انرژی جنبشی بیشتر شده است و ایجاد امواج با نوسانات فشار زیاد سبب تشکیل گردابه قائم در نزدیکی سرریز پایین دست می‌شود.

طول سازه راه‌ماهی با سرریز W نشان داد که گردابه‌های عمودی در پایین‌دست سازه‌ها شکل می‌گیرد و تغییرات فشار بسیار زیاد است. بهترین حالت سازه راه‌ماهی با سرریز W شکل پژوهش حاضر نیز مشخص شد که در فاصله نسبی بین سازه‌ها ۳ و شیب ۴ درصد رخ می‌دهد که منجر به ایجاد شرایط مناسب‌تری جهت مهاجرت ماهیان به بالادست رودخانه می‌گردد. به‌طور کلی با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان به تاثیر سازه بکار رفته در این تحقیق پی برد. در بیشترین شیب که ۴ درصد می‌باشد، سازه بهترین عملکرد را از خود نشان داد و شرایط بسیار مناسب‌تری در راستای مهاجرت ماهیان به‌وجود آمد.

جریان عبوری از روی سرریزها کاهش یافت و همچنین تاثیر پارامترهای مقاومت جریان ناشی از افزایش عدد فرود نیز به‌دست آمد. با انجام شبیه‌سازی عددی و تحلیل آن مشخص گردید که راه ماهی با سرریز W شکل بر ضریب اصطکاک مودی سازه، عدد فرود و دبی بدون بعد تاثیرگذار است.

نتایج حاصل از ارزیابی این شبیه‌سازی برای صحت کارکرد مثبت این سازه ارائه شدند. نتایج نشان داد که با افزایش عدد فرود جریان مقاومت جریان کاهش یافته‌است. با افزایش عدد فرود ضرایب زبری مانینگ و اصطکاک مودی کاهش یافتند. الگوی جریان در توزیع سرعت ۳ بعدی در

The information for this study is provided by the corresponding author.

#### Funding

No financial support was received from any organization for this research.

#### References

- Ahadiayn, J., Galedar Shoshtari, Z., Sajady, S. M., & Mohammadian, T. (2018). The Effect of the Asymmetrical W Shaped Weir as a Barrier on the Hydraulic Properties of Culverts. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 50(3), 543-556. (In Persian) <https://doi.org/10.22060/ceej.2017.12609.5234>
- Beamish, F. W. (1978). Swimming capacity. In *Fish physiology* (Vol. 7, pp. 101-187). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S15465098\(08\)60164-8](https://doi.org/10.1016/S15465098(08)60164-8)
- Cea, L., Pena, L., Puertas, J., Vázquez-Cendón, M. E., & Peña, E. (2007). Application of several depth-averaged turbulence models to simulate flow in vertical slot fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(2), 160-172. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339429\(2007\)133:2\(160\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339429(2007)133:2(160))
- Chanson, H., & Uys, W. (2016). Baffle designs to facilitate fish passage in box culverts: a preliminary study. <https://doi.org/10.15142/T300628160828>
- Dong, M., Zeng, G., Xu, M., Mou, J., & Gu, Y. (2024). Influence of Valvular Structures on the Flow Characteristics in an Island-Type Fishway. *Water*, 16(16), 2336. <https://doi.org/10.3390/w16162336>
- Fuentes-Pérez, J. F., Silva, A. T., Tuhtan, J. A.,

#### 5- List of symbols

P (kgm-1s-2)	Pressure
Fr	Froud number
V (ms-1)	Speed
Re	Reynolds number
G (ms-2)	Gravity acceleration
$\rho$ (kg.m-3)	Density
$\mu$ (kg.m-1s-1)	Dynamic viscosity
$\nu$ (m2s-1)	Kinematic viscosity
f	Mody friction coefficient
n	Manning roughness coefficient
Y (m)	Flow depth
TKE	Kinetic energy of turbulence

#### Acknowledgments

We would like to express our gratitude and appreciation for the cooperation of the Shahid Chamran University of Ahvaz in providing the required for this research .

#### Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

#### Credit Authorship Contribution Statement

Conceptualization, (S.A.R.M.); Methodology (S.A.R.M.); Software (A.M.K. and S.A.R.M.); data analysis, (J.A. and A.M.K.); Writing-Original Draft Preparation, (S.A.R.M.); Writing-Review and Editing, (J.A. and S.M.S.); Supervision, (H.A. and S.M.S.).

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

#### Data Availability Statement

- García-Vega, A., Carbonell-Baeza, R., Musall, M., & Kruusmaa, M. (2018). 3D modelling of non-uniform and turbulent flow in vertical slot fishways. *Environmental modelling & software*, 99, 156-169. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.09.012>
- Gallhdar Shooshtari, Z., Ahadiyan, J., & Sajadi, S. M. (2020). Investigation of the Flow Resistance in Armed Culvert with Asymmetric W Shaped Weirs. *Irrigation Sciences and Engineering*, 43(3), 133-148. (In Persian) <https://doi.org/10.22055/jise.2019.24181.1711>
- Kim, J. H., Yoon, J. D., Baek, S. H., Park, S. H., Lee, J. W., Lee, J. A., & Jang, M. H. (2015). An efficiency analysis of a nature-like fishway for freshwater fish ascending a large Korean river. *Water*, 8(1), 3. <https://doi.org/10.3390/w8010003>
- Lashkar-Ara, B., Ghalavand, F., & Zakermoshfegh, M. (2017). Environmental evaluation of Denil type fishway. *Water Resources Engineering*, 9(30), 13-24. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20086377.1395.9.30.2.7>
- Mahmoudian, Z., Baharvand, S., & Lashkar-Ara, B. (2019). Investigating the Flow Pattern in Baffle Fishway Denil Type. *Irrigation Sciences and Engineering*, 42(3), 179-196. (In Persian) <https://doi.org/10.22055/jise.2019.23693.1689>
- Mirkhorli, P., Ghaderi, A., Alizadeh Sanami, F., Mohammadi, M., Kuriqi, A., & Kisi, O. (2024). An investigation on hydraulic aspects of rectangular labyrinth pool and weir fishway using FLOW-3D. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49(4), 6061-6087. <https://doi.org/10.1007/s13369-024-08591-5>
- Olsen, A. H., & Tullis, B. P. (2013). Laboratory study of fish passage and discharge capacity in slip-lined, baffled culverts. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(4), 424-432. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000717](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000717)
- Qi, S., Fu, C., & Xie, M. (2024). Analysis of Two-Dimensional Hydraulic Characteristics of Vertical-Slot, Double-Pool Fishway Based on Fluent. *Water*, 16(12), 1695. <https://doi.org/10.3390/w16121695>
- Rajaratnam, N., & Katopodis, C. (1984). Hydraulics of Denil fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(9), 1219-1233. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339429\(1984\)110:9\(1219\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339429(1984)110:9(1219))
- Rajaratnam, N., & Katopodis, C. (1989). An Experimental Study of Weir Baffle Culvert Fishways. <https://hdl.handle.net/20.500.14394/29135>
- Rajaratnam, N., Fairbairn, M. A., & Katopodis, C. (1986). Experimental Study of Culvert Fishways. <https://hdl.handle.net/20.500.14394/29407>
- Rajaratnam, N., Katopodis, C., & Fairbairn, M. A. (1990). Hydraulics of culvert fishways V: Alberta fish weirs and baffles. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 17(6), 1015-1021. <https://doi.org/10.1139/190-114>
- Rajaratnam, N., Katopodis, C., & Lodewyk, S. (1991). Hydraulics of culvert fishways IV: spoiler baffle culvert fishways. *Canadian journal of civil engineering*, 18(1), 76-82. <https://doi.org/10.1139/191-010>
- Ruiz-Coello, M. X., Bottacin-Busolin, A., & Marion, A. (2024). A Eulerian-Lagrangian model for simulating fish pathline distributions in vertical slot fishways. *Ecological Engineering*, 203, 107264. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107264>
- Shahabi, M., Ahadiyan, J., Ghomeshi, M., & Azizi Nadian, H. (2022).a. Investigation and evaluation of current resistance and kinetic energy of turbulence in WW fish. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 23(86), 51-68. (In Persian) <https://doi.org/10.22092/idser.2022.356668.1494>
- Shahabi, M., Ahadiyan, J., Ghomeshi, M., Narimousa, M., Katopodis, C., & Azizi Nadian, H. (2023). Numerical study of the effect of a V-shaped weir on turbulence characteristics and velocity in V-weir fishways. *River Research and Applications*, 39(1), 21-34. <https://doi.org/10.1002/rra.4139>
- Shahabi, M., Ahdiyan, J., Narimousa, M., Ghomeshi, M., & Azizi, N. H. (2022).b. Laboratory Study of The Effect of V-shaped Structure on Changes in Fishway Roughness. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 3(11), 1-16. (In Persian) <https://doi.org/10.30495/wsrcj.2022.64329.11268>
- Shahabi, M., Ghomeshi, M., Ahadiyan, J., Mohammadian, T., & Katopodis, C. (2021). Do fishways stress fish? Assessment of physiological and hydraulic parameters of rainbow trout navigating a novel W-weir fishway. *Ecological Engineering*, 169, 106330. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106330>
- Shen, C. Y., Chen, Y. B., Shi, X. T., Wang, M. M., & He, S. H. (2024). Turbulent structural analysis of the combined fishway with vertical seam and bottom hole. *River Research and Applications*, 40(3), 425-435. <https://doi.org/10.1002/rra.4350>
- Silva, A. T., Katopodis, C., Santos, J. M., Ferreira, M. T., & Pinheiro, A. N. (2012). Cyprinid swimming behaviour in response to turbulent flow. *Ecological Engineering*, 44, 314-328. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.03.025>
- Tahmasbipour, M., Azizi Nadian, H., Ahadiyan, J.,

- Oliveto, G., Sajjadi, S. M., & Kiyani, A. M. (2024). Experimental Investigation of T-Jump Stabilization Using Water Jets and Sinusoidal Corrugated Beds. *Water*, 16(23), 3513. <https://doi.org/10.3390/w16233513>
- Tarena, F., Nyqvist, D., Katopodis, C., & Comoglio, C. (2025). Computational fluid dynamics in fishway research-a systematic review on upstream fish passage solutions. *Journal of Ecohydraulics*, 10(1), 107-126. <https://doi.org/10.1080/24705357.2024.2363772>
- Thurman, D. R., & Horner-Devine, A. R. (2007). Juvenile Salmon Passage (No. WA-RD 687.1). Washington (State). Department of Transportation. <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/27401>