

Research Paper

Investigating the Effect of Geometric Shape of T-Shaped Fishway Barriers on Improving Its Performance

Dana Ghaderi¹, Mahdi Mollazadeh^{2*}, Hossein Mahdizadeh³

¹.MSc Student of Water and Hydraulic Structures Engineering, Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran. Danaghaderidana1376@birjand.ac.ir

² Assist. Prof., Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran. mollazadeh.mahdi@birjand.ac.ir (Corresponding Author)

³ Assoc. Prof., Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Iran. hossein.mahdizadeh@birjand.ac.ir



10.22125/IWE.2022.332599.1609

Received:

March 5, 2022

Accepted:

September 4, 2022

Available online:

Agusut 23,2023

Keywords: Turbulence Kinetic Energy, Energy Dissipation Percentage, Fishway, T-Shaped Barriers, OpenFOAM Software

Abstract

Construction of hydraulic structures along rivers leads to disruption of the aquatic life cycle and ecosystem of the region. Fishway structures are widely used to facilitate access between downstream and upstream hydraulic structures crossing the river, such as dams, to eliminate the inability of fish to swim upstream, and to facilitate their downstream movement. Therefore, in the present study, in order to determine the optimal shape of the barriers used in the T-shaped fishway, the structure was simulated numerically with four types of barriers using OpenFOAM software and the K-ε turbulence model. The numerical model was validated by comparing its results with the results of the related laboratory model. The findings indicate a good agreement between the results of the numerical model and the laboratory results. Among the four specific configurations taking into account different factors, the D3 configuration of T-shaped barriers achieved 38.6% and 41.5% of reverse flow, 85.9% and 92.3% of flows with velocities less than 0.5 m/s, 51.6% and 17.8% of kinetic energy values of turbulence less than 0.02 m²/s² and 72.1% and 19.3% of energy dissipation greater than 8, in longitudinal and transverse flow profiles respectively. had the best performance.

1. Introduction

There are several species of fish that swim in the opposite direction of the flow to reach their homeland. Continuation of this instinctive behavior has become a factor in the survival and reproduction of these fish. Therefore, it is necessary to pay attention to the design and construction of hydraulic structures called fishways in the vicinity of intersecting structures with watercourses. Although the construction of fishways and other similar structures alone cannot solve all the environmental problems related to aquatic animals, but it can be a useful and practical solution for the movement and migration of fish upstream of obstacles. Today, environmental issues are one of the

* **Corresponding Author:** Mahdi Mollazadeh

Address: Department of Civil Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

Email: mollazadeh.mahdi@birjand.ac.ir

Tel: +989153126223

major concerns in the planning and implementation of projects related to water resources (Food Agriculture Organization, 2002).

2. Materials and Methods

In order to investigate the flow behavior in fishway with T-shaped barriers and with different configurations, the dimensions in the present numerical model are similar to the dimensions of the problem solved by Mao et al. (2019b). Laboratory flume has length 24.5 m, width 2 m, height 1.2 m, slope 2.6% as well as T-shaped and rectangular barriers were located in different positions along the flume. The flow rate used in the laboratory model is 0.4 m³/s. The canal consists of a total of eight pools. Except for the first and last pools, all pools have T-shaped baffles. Numerical simulation in the present study was performed with a scale equal to the laboratory model in order to validate the model and after ensuring the accuracy of the model, the changes considered in the research are applied. To ensure uniform flow in the first pool and also not to affect the flow results in the final pool, the channel length in the numerical model was considered 26 meters. Excess length of 24.5 m was applied in two first and final pools.

3. Results

In the present study, the basic design, D1, D2 and D3 configurations, were taken from T-shaped barriers and the best configuration was selected by comparing different hydraulic parameters. Figure (1) shows that the OpenFOAM model has the ability to simulate flow in a fishway structure with high accuracy. The error MSE = 0.098 and RMSE = 0.31 obtained for the numerical and laboratory results show a satisfactory correlation of the results.

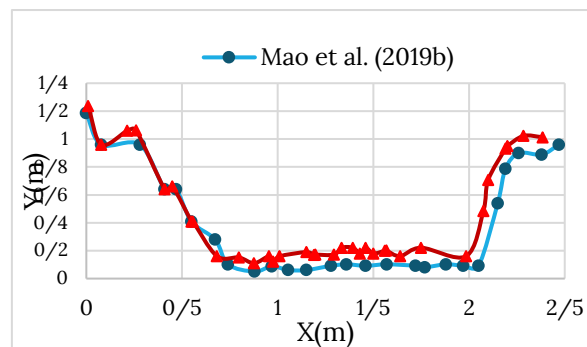


Figure (1): Comparison of velocity values in laboratory and numerical model

Also, among the four configurations, taking into account different factors, the D3 configuration of T-shaped barriers achieving 38.6% and 41.5% of reverse flows, 85.9% and 92.3% of flows with velocity less than 0.5 m/s, 51.6% and 17.8% of the turbulence kinetic energy less than 0.02 m²/s² and 72.1% and 19.3% of energy dissipation percentage greater than 8, in the longitudinal and transverse directions of the flow, respectively, had the best performance.

4. Discussion and Conclusion

Results show that each of the configurations exhibits specific behaviors. In terms of criteria such as limit values along the structure and the percentage of reverse flows in the pools, the best configuration form was selected. Comparison of the results shows that the D3 configuration has the best performance in flow velocity (in both limit velocity and reverse flow percentage), turbulence kinetic energy and energy dissipation, both longitudinally and transversely.

5. Six important references

- 1) Food Agriculture Organization, 2002. Fish passes: design, dimensions and monitoring (Rome, FAO, in arrangement with DVWK) 119 pp.
- 2) . Mao, X. Li, J. An, R. Zhao, W. Li, K. 2019a. Study of key technologies for fishways in the plateaus of western China. *Global Ecology and Conservation*. 20: 1-12.
- 3) Mao, X. Li, J. An, R. Zhao, W. Li, K. 2019a. Study of key technologies for fishways in the plateaus of western China. *Global Ecology and Conservation*. 20: 1-12.
- 4) Mao, X. Zhang, J. Tang, K, Zhao, W. 2019b. DESIGNS FOR T SHAPE FISHWAYS. *THE CIVIL ENGINEERING JOURNAL*. 22:270-20.
- 5) . L. Cea, L. Pena and J. Puertas, "Application of Several Depth Averaged turbulence models to simulate flow in vertical slot fishways," *J. Hydraulic. Eng.*, vol. 75, pp. 160-169, 2007.
- 6)Quaresma, A.L., et al. "Can vertical slot fishways (VSF) operate with less water without compromising effectiveness", 2017.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.



بررسی تأثیر شکل هندسی موانع راه ماهی T شکل بر بهبود عملکرد آن

دانا قادری^۱، مهدی ملازاده^{۲*}، حسین مهدیزاده^۳

تاریخ ارسال: ۱۴۰۰/۱۲/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۳

مقاله پژوهشی

چکیده

احداث سازه‌های هیدرولیکی در مسیر رودخانه‌ها، بروز اختلال در روند طبیعی زندگی آبزیان و اکوسیستم منطقه را در پی دارد. به‌منظور تسهیل راه ارتباطی بین پایین‌دست و بالادست سازه‌های هیدرولیکی متقاطع با رودخانه، مانند بندها و سدها، برطرف‌سازی عدم توانایی شنای ماهیان به بالادست و نیز تسهیل در حرکت آن‌ها به پائین‌دست ساخت سازه راه‌ماهی کاربرد فراوان دارد. از این‌رو در تحقیق حاضر به‌منظور تعیین شکل بهینه موانع مورد استفاده در مسیر راه‌ماهی T شکل، سازه مزبور با چهار نوع شکل از موانع به صورت عددی و با بهره‌گیری از نرم‌افزار OpenFOAM و مدل آشفتگی K-ε شبیه‌سازی شد. صحت‌سنجی مدل عددی از طریق مقایسه با نتایج مدل آزمایشگاهی مرتبط صورت گرفت. یافته‌های مدل عددی حاکی از تطابق مناسب مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی دارد. از میان چهار پیکربندی مدنظر با لحاظ کردن فاکتورهای مختلف، پیکربندی D3 موانع T شکل، در جهات طولی و عرضی جریان، به‌ترتیب با دستیابی به ۳۸/۶٪ و ۴۱/۵٪ جریان‌های برگشتی، ۸۵/۹٪ و ۹۲/۳٪ جریان‌های با سرعت کمتر از ۰/۵ متر بر ثانیه، ۵۱/۶٪ و ۱۷/۸٪ مقادیر انرژی جنبشی آشفتگی کمتر از ۰/۲ متر مربع بر مجذور ثانیه و ۷۲/۱٪ و ۱۹/۳٪ درصد استهلاک انرژی بزرگتر از آستانه حدی، بهترین عملکرد را به خود اختصاص داد.

واژه‌های کلیدی: انرژی جنبشی آشفتگی، درصد استهلاک انرژی، سازه راه‌ماهی، موانع T شکل، نرم‌افزار OpenFOAM

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

danaghaderidana1376@birjand.ac.ir

^۲ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران. mollazadeh.mahdi@birjand.ac.ir (نویسنده مسئول)

^۳ دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران. hossein.mahdizadeh@birjand.ac.ir



مقدمه

گونه‌های مختلفی از ماهیان وجود دارند که بر خلاف جهت جریان آب شنا می‌کنند تا خود را به زادگاهشان برسانند که تداوم این روند به عنوان رفتاری غریزی، عامل بقا و تولیدمثل این ماهی‌ها گردیده است. ماهیان در حرکت خود به بالادست اگر با مانعی روبرو شوند، سعی می‌کنند به هر نحو ممکن از آن مانع عبور کنند. آن‌ها آن قدر به این تلاش غریزی خود ادامه می‌دهند که در صورت عدم موفقیت، حیات آنان به خطر خواهد افتاد. از اثرات سوء نرسیدن ماهی‌ها به بالادست می‌توان به عدم تخم‌ریزی، کاهش تولید مثل و انقراض گونه‌های فراوانی از ماهی‌ها اشاره کرد. برای این منظور، توجه همزمان به طراحی و احداث سازه‌ای هیدرولیکی بنام راه‌ماهی در مجاورت سازه‌های متقاطع با آبرها ضروری است. هر چند ساخت راه‌ماهی‌ها و سایر سازه‌های مشابه نمی‌تواند به تنهایی تمام مشکلات زیست محیطی مربوط به آبریان را مرتفع نماید، اما می‌تواند راهکاری مفید و عملی برای جابجایی و مهاجرت ماهی‌ها به بالادست موانع محسوب شود. امروزه، مسائل زیست‌محیطی یکی از نگرانی‌های مهم در برنامه‌ریزی و اجرای طرح‌های مرتبط با منابع آب است (DVWK, 2002).

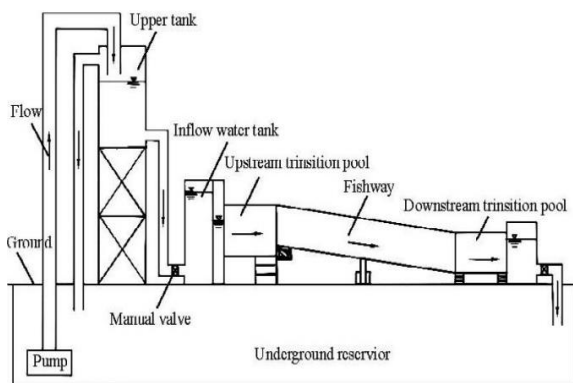
راه‌ماهی‌ها انواع مختلفی دارد که به طور کلی این نوع سازه‌ی زیست محیطی به چهار دسته: دنیل، استخر و سرریز، بازشدگی قائم و کالورتی تقسیم می‌شوند (Fuentes-Perez et al. 2016; Quaranta et al. 2019). از نظر هیدرولیکی راه‌ماهی‌ها تحت عنوان سازه‌های مستهلک کننده انرژی به شمار می‌روند که توانایی انتقال ماهی‌ها به سمت بالادست را نیز دارند (Stamou et al. 2018). برای طراحی بهینه راه‌ماهی باید نسبت به شرایط هیدرولیکی جریان و شروط بهینه بیولوژیکی ماهی‌ها شناخت کافی داشت (Katopodis and Rajaratnam, 1984).

Mao et al. (2012) با استفاده از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار فلوئنت و همچنین مطالعات آزمایشگاهی به دنبال طراحی یک راه‌ماهی برای ماهیان مهاجرتی بودند که در مقایسه با ماهیان قزل‌آلا از قدرت پرش کمتری برخوردار بودند. آن‌ها جهت شبیه‌سازی پروفیل سطح آزاد جریان از

روش حجم سیال و برای بررسی آشفتگی جریان از مدل آشفتگی K-ε استفاده نمودند. در این بررسی دامنه سرعت در هر استخر راه‌ماهی T شکل از ۰/۴۲ متر بر ثانیه تا ۱/۲۲ متر بر ثانیه متغیر بود و به ازای این پروفیل سرعت هیچ منطقه گردابه‌ای بزرگی در راه‌ماهی تشکیل نمی‌گردید. این مطالعه نشان داد که راه‌ماهی T شکل می‌تواند الزامات مختص به این ماهیان مهاجر را از نظر سرعت و الگوهای جریان کاملاً برآورده کند. در روش حجم سیال تنها یک معادله جرم و اندازه حرکت برای دو فاز جریان با مشخصه‌های متفاوت لزجت و چگالی حل می‌شود. همچنین در این روش فرض اولیه بر این اصل استوار است که هیچ یک از فازها اندرکنشی با هم ندارند و به ازای هر حجم کنترل، مقدار کسر حجمی برای فازها برابر واحد می‌باشد (Leon et al. 2010). علاوه بر این Mao (2018) در پژوهشی مشخصات و شاخص‌های هیدرولیکی مناطقی که رفتارهای تغذیه و تخم‌ریزی رخ می‌دهد (به‌ویژه زمین تخم‌ریزی) را بررسی نموده و مشکلات هیدرولیکی مرتبط با راه‌ماهی را مورد تحقیق قرار داد. نتایج نشان داد که اگر شرایط هیدرولیکی راه‌ماهی با شرایط هیدرولیکی محل تخم‌ریزی مطابقت داشته باشد، راه‌ماهی بیشتر با نیازهای غریزی ماهی مطابقت خواهد داشت و در نتیجه میزان موفقیت مهاجرت ماهی در مسیرهای ماهی بسیار افزایش خواهد یافت.

Mao et al. (2019a) در تحقیقی دیگر با انجام توصیف کمی از سرعت، آشفتگی و سایر شاخص‌های هیدرولیکی جریان، رفتار ماهیان در مسیر راه‌ماهی را بررسی کردند. نهایتاً آن‌ها مکانیسم‌های پاسخ بین خصوصیات رفتاری مهاجرت ماهی هدف و هیدرودینامیک راه‌ماهی را شناسایی کردند. سپس با ارائه معیارهایی از مشخصه‌های جریان بر اساس سرعت و انرژی جنبشی آشفتگی، گونه‌های مناسب از ماهی هدف برای فلات غربی چین را معرفی نمودند. راه‌ماهی‌هایی خوب تلقی می‌شوند که بیشینه سرعت جریان که توسط ماهی‌های هدف قابل تحمل است را در نظر می‌گیرند و ضوابط زیست محیطی را در طراحی این گونه سازه‌ها در اولویت قرار می‌دهند (Peake 2004).

دارای طول ۲۴/۵ متر، عرض ۲ متر، ارتفاع ۱/۲ متر، شیب ۲/۶ درصد و همچنین موانع T شکل و مستطیلی در موقعیت‌های مختلف در طول کانال قرار داشتند. دبی مورد استفاده در مدل آزمایشگاهی در ورودی کانال ۰/۴ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. کانال در مجموع شامل هشت حوضچه می‌باشد که حوضچه‌های ابتدایی و انتهایی بدون مانع و در مابقی حوضچه‌ها موانع T شکل با پیکربندی مختلف تعبیه شده است. شبیه‌سازی عددی در تحقیق حاضر با مقیاس برابر با مدل آزمایشگاهی صورت گرفت تا از این طریق صحت‌سنجی مدل صورت گیرد و بعد از اطمینان از صحت عملکرد مدل، تغییرات مدنظر در تحقیق اعمال گردد. طول کانال در مدل عددی برای اطمینان از برقراری جریان یکنواخت در حوضچه ابتدایی و همچنین عدم تأثیرپذیری بر نتایج جریان در حوضچه انتهایی، ۲۶ متر در نظر گرفته شد که مقدار مازاد بر طول کانال آزمایشگاهی (۲۴/۵ متر) در دو حوضچه ابتدایی و انتهایی اعمال گردید. مدل آزمایشگاهی مورد مطالعه در شکل (۱)، نمای سه بعدی حوضچه‌ها و همچنین پلان موقعیت قرارگیری موانع مستطیلی و T شکل در طول مسیر، بترتیب در شکل‌های (۲) و (۳) ارائه شده است.



شکل (۱): مدل آزمایشگاهی مورد مطالعه (Mao et al. (2019b)

همچنین (Mao et al. (2019b) در تحقیقی دیگر با استفاده از شبیه‌سازی عددی در نرم افزار فلوئنت به حل مسئله کنترل بهینه در ارتباط با مدیریت بهینه راه‌ماهی T شکل پرداختند. در مدل ریاضی برای حل معادله سه‌بعدی ناویر-استوکس از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ و روش حجم سیال استفاده کردند. نتایج مدل عددی با مطالعات آزمایشگاهی بررسی گردید و خطای ۸٪ به دست آمد که این مطابقت میان روش انتخابی و مقادیر فیزیکی را می‌رساند.

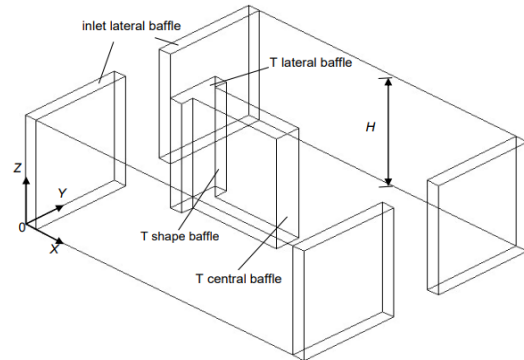
قادری و همکاران (۱۳۹۹) با استفاده از مدل‌سازی در نرم‌افزار Flow-3d به شبیه‌سازی توزیع سرعت جریان در راه‌ماهی استخر و سرریز پرداختند. آن‌ها برای شبیه‌سازی پروفیل سطح جریان از روش حجم سیال استفاده نمودند. آن‌ها نشان دادند که هنگام مهاجرت ماهی‌ها به سمت بالادست، جریان در نواحی میانی و کناره‌های دیوارها در داخل حوضچه‌ها نسبت به سایر نقاط دیگر، سرعت کمتری دارد؛ در نتیجه می‌تواند بهترین محل استراحتگاهی و به دور از تلاطم برای ماهی‌ها به منظور طراحی بهینه‌تر راه‌ماهی به حساب بیاید.

بررسی تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که تنها پارامترهای محدودی در مسیر سازه راه‌ماهی همچون سرعت و انرژی جنبشی آشفتگی و همچنین فرم پیکربندی‌های محدودی از موانع T شکل در مسیر راه‌ماهی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. از این‌رو در تحقیق حاضر برای اولین بار فرم‌های D1، D2 و D3 از پیکربندی موانع T شکل معرفی و با بهره‌گیری از نرم‌افزار متن‌باز OpenFOAM به بررسی مشخصه‌های هیدرولیکی مختلف جریان همچون سرعت، انرژی جنبشی آشفتگی و استهلاك انرژی در راه‌ماهی به منظور انتخاب بهترین پیکربندی پرداخته شده است.

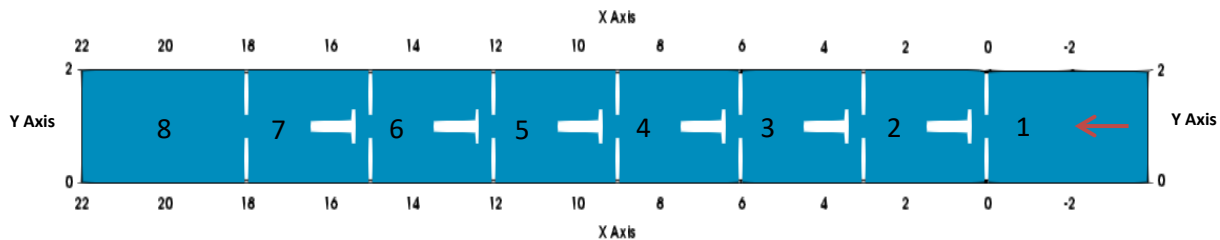
مواد و روش‌ها

مشخصات مدل مورد استفاده

در مدل عددی موجود در تحقیق حاضر، جهت بررسی رفتار جریان در سازه راه‌ماهی با موانع T شکل با پیکربندی‌های مختلف از ابعاد مساله بررسی شده توسط Mao et al. (2019b) بهره گرفته شد. کانال آزمایشگاهی



شکل (۲): نمای سه بعدی از حوضچه‌ها (Mao et al. (2019b)



شکل (۳): پلان موقعیت قرارگیری موانع مستطیلی و T شکل

که در آن U سرعت نسبی، u_r سرعت فازی و α کسر حجمی فازی می باشد. ترم غیرخطی در رابطه فوق با یک روش کاملاً ضمنی و به‌طور تکراری حل شده و یک حل محدود را برای توزیع کسری فاز ارائه می‌دهد. معادله مومنتوم در شکل ناپایدار بازنویسی می‌شود تا کسر حجمی از ترم انتقال استخراج گردد:

$$\frac{\partial(U_a)}{\partial t} + \nabla \cdot (U_a U_a) + \nabla \cdot \left(\frac{\tau_a}{\rho_a} \right) + \frac{\nabla \alpha}{\alpha} \nabla p_a \left(\frac{\tau_a}{\rho_a} \right) = \frac{\nabla p}{\rho_a} + g + \frac{M_a}{\alpha \rho_a} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(U_b)}{\partial t} + \nabla \cdot (U_b U_b) + \nabla \cdot \left(\frac{\tau_b}{\rho_b} \right) + \frac{\nabla \beta}{\beta} \nabla p_b \left(\frac{\tau_b}{\rho_b} \right) = \frac{\nabla p}{\rho_b} + g + \frac{M_b}{\beta \rho_b} \quad (3)$$

که در آن $U_{a,b}$ سرعت فازی، τ_a و τ_b به ترتیب تانسور تنش فازه‌های a و b ، فشار، p ، چگالی مایع، ρ ، چگالی مایع، $M_{a,b}$ نیروی بین سطحی در واحد حجم هستند.

حساسیت‌سنجی شبکه

برای ساخت مدل عددی نیاز به پیش‌پردازش‌هایی شامل ساخت هندسه مدل، شبکه‌بندی و اعمال شرایط مرزی می‌باشد. به‌منظور حساسیت‌سنجی ابعاد شبکه و حذف اثرات نامطلوب اندازه سلول‌های شبکه بر نتایج

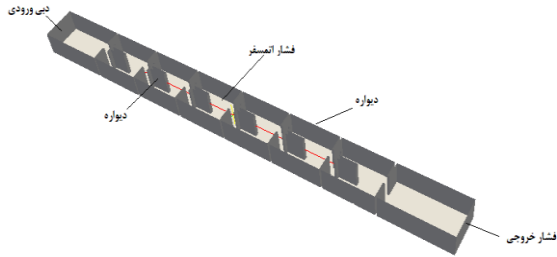
معادلات حاکم

برای حل معادلات حاکم بر جریان دوفازی و یافتن مقادیر مجهول می‌توان از روش‌های متعددی مانند حجم محدود، المان محدود، المان مرزی و اختلاف محدود استفاده نمود. در این تحقیق بنا به نظر پژوهشگران قبلی (Aghebatie and Hosseini 2019) از روش دوفازی به نام اینترفوم^۱ برای مدل‌سازی جریان در راه‌ماهی و برای شبیه‌سازی سطح مشترک میان آب و هوا از روش حجم سیال استفاده شده است. در مدل حجم سیال (VOF) برای شبیه‌سازی سطح مشترک میان دو فاز جریان باید معادله پیوستگی میان دو فاز ارضا شود. معادله پیوستگی برای هر یک از فازها با فرض تراکم‌ناپذیر بودن آن‌ها صورت می‌گیرد. معادله پیوستگی برای بقای مدل در حالت تک فازی و حفظ توزیع کسر حجمی هر فاز بین صفر و یک بازنویسی می‌شود (Cea et al. 2007). لذا سرعت فازی در ترم‌های سرعت نسبی و میانگین بازنویسی می‌شود و معادله پیوستگی فازی به‌صورت زیر در می‌آید:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha U) + \nabla \cdot (u_r \alpha (1 - \alpha)) = 0 \quad (1)$$

¹ InterFoam

نیست. سلول های با مقادیر F بین صفر و یک سطح آزاد یا سطح مشترک را شامل می شوند.



شکل (۴): شرایط مرزی اعمال شده در شبیه سازی

به منظور تعیین بهترین مدل آشفتگی مورد استفاده در مدل عددی علیرغم اشاره به مدل $k-\epsilon$ در تحقیقات پیشین (Mao et al. 2019b)، مدل سازی برای سه مدل آشفتگی $k-\epsilon$ ، $k-\omega$ و $RNG k-\epsilon$ صورت پذیرفت و با محاسبه پارامتر خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی، مدل $k-\epsilon$ انتخاب گردید (جدول ۲).

جدول (۲): نتایج عددی و آزمایشگاهی برای مدل های آشفتگی

شماره طرح	مدل آشفتگی	RMSE
۱	$k-\epsilon$	۰/۷۶
۲	$RNG k-\epsilon$	۰/۸۲
۳	$K-\omega$	۱/۷

صحت سنجی نتایج عددی

به منظور ارزیابی دقت مدل عددی نتایج مربوط به سرعت جریان در نقاط نظیر در مدل عددی و آزمایشگاهی با یکدیگر در عرض بلوک جریان یعنی در طول ۲/۵ متری بلوک و در ارتفاع بلوک مقایسه و مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج پارامتر خطا مدل عددی و آزمایشگاهی، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) و میانگین مربعات (MSE) را به ترتیب برابر با ۰/۳۱ و ۰/۰۹۸ به دست داده است که حکایت از تطابق رضایت بخش مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی دارد (شکل ۵). منظور از محور قائم سرعت جریان و صفحه برش در فاصله ۱۰ سانتی متری دیواره در طول بلوک قرار گرفته است.

هیدرولیکی جریان تعداد مختلف سلول در قالب سه طرح مورد استفاده قرار گرفت که در نهایت با توجه به نتایج و بررسی پارامترهای خطای جذرمیانگین مربعات (RMSE) و ضریب همبستگی (R^2)، طرح شماره ۱ با تعداد سلول ۷۲۰۰۰۰ به منظور دستیابی به بهینه ترین نتایج عددی انتخاب گردید. در جدول (۱) پارامترهای خطا برای تعداد سلول های مورد استفاده بر روی نتایج عددی ارائه شده است.

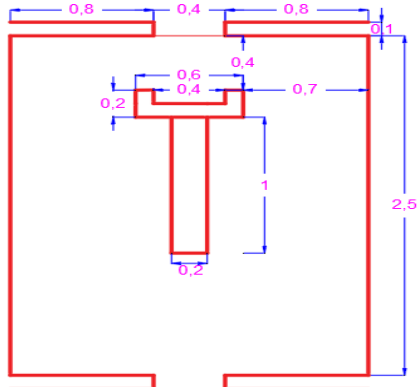
جدول (۱): پارامترهای خطا برای تعداد سلول در شبکه های مورد استفاده

شماره طرح	تعداد سلول	RMSE	R^2
۱	۷۲۰۰۰۰	۰/۰۸۹	۰/۹۶
۲	۵۲۵۰۰۰	۰/۷۱	۰/۸۸
۳	۲۵۱۰۰۰	۱/۴	۰/۶۵

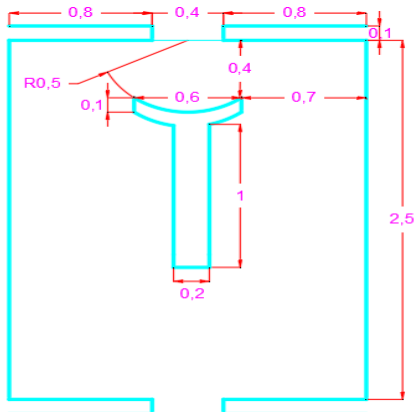
شرایط مرزی و مدل های آشفتگی

اعمال شرایط مرزی از دیگر مراحل پیش پردازش در مدل عددی است. شرایط مرزی اعمال شده به مدل شامل دبی جریان در ورودی (Mass flow rate)، فشار در خروجی (Pressure Outlet)، برای دیواره های کف، کناری و موانع T شکل و مستطیلی (wall) بوده و برای سطح آزاد نیز از شرط مرزی (Pressure Outlet) بهره گرفته شد (شکل ۴). ارتفاع جریان در ورودی ۰/۸ متر می باشد. شتاب جاذبه ثقل برابر با ۹/۸۱ و در راستای ارتفاعی مدل Z اعمال شده است. متد حجم سیال که توسط Hirt و Nicolas ارائه شده است، مسیر جدیدی را در شبیه سازی جریان های به وجود آورده است. این متد بر تعریف یک تابع مقیاس دلالت می کند. این تابع به ما اجازه می دهد که بدانیم سلول محاسباتی توسط یک سیال اشغال شده است یا توسط سیال دیگر یا به صورت ترکیبی از هر دو است. نحوه عمل این متد به این فرم است که یک تابع F تعریف می گردد که مقدار آن در هر نقطه که توسط سیال اشغال شده است، برابر مقدار ۱ است و در غیر این صورت مقدار آن صفر است. سپس مقدار متوسط F در یک سلول کسر حجمی سلول اشغال شده به وسیله ی سیال را نشان می دهد. به عبارتی، مقدار واحد F در یک سلول متناظر با سلول پر از سیال خواهد بود، در حالی که، مقدار صفر نشان می دهد که سلول شامل سیال

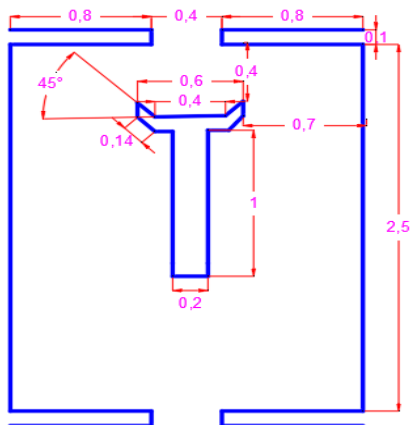
شکل (۶): پیکربندی با طرح پایه



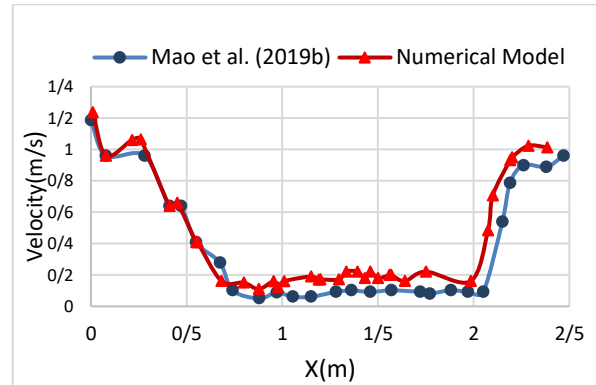
شکل (۷): پیکربندی با طرح D1



شکل (۸): پیکربندی با طرح D2



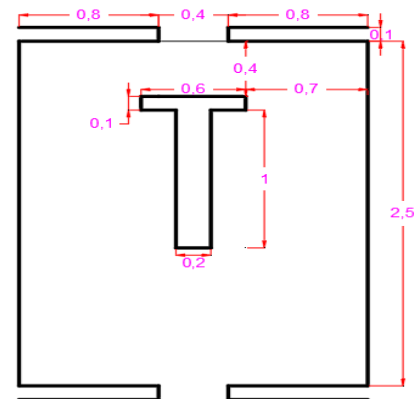
شکل (۹): پیکربندی با طرح D3



شکل (۵): مقایسه مقادیر سرعت در مدل آزمایشگاهی و عددی

نتایج و بحث

به منظور ارزیابی بهینه ترین موانع موجود در مسیر راهماهی چهار نوع پیکربندی شامل پیکربندی طرح پایه، D1، D2 و D3 که به ترتیب در اشکال (۶) و (۷) و (۸) و (۹) نشان داده شده است مورد بررسی قرار گرفتند. ابعاد نشان داده شده در این شکل‌ها بر حسب متر می‌باشد. با بررسی مشخصه‌های جریان شامل سرعت، انرژی جنبشی و نیز نرخ استهلاک انرژی در مسیر راهماهی، به انتخاب بهینه‌ترین پیکربندی اقدام گردید.

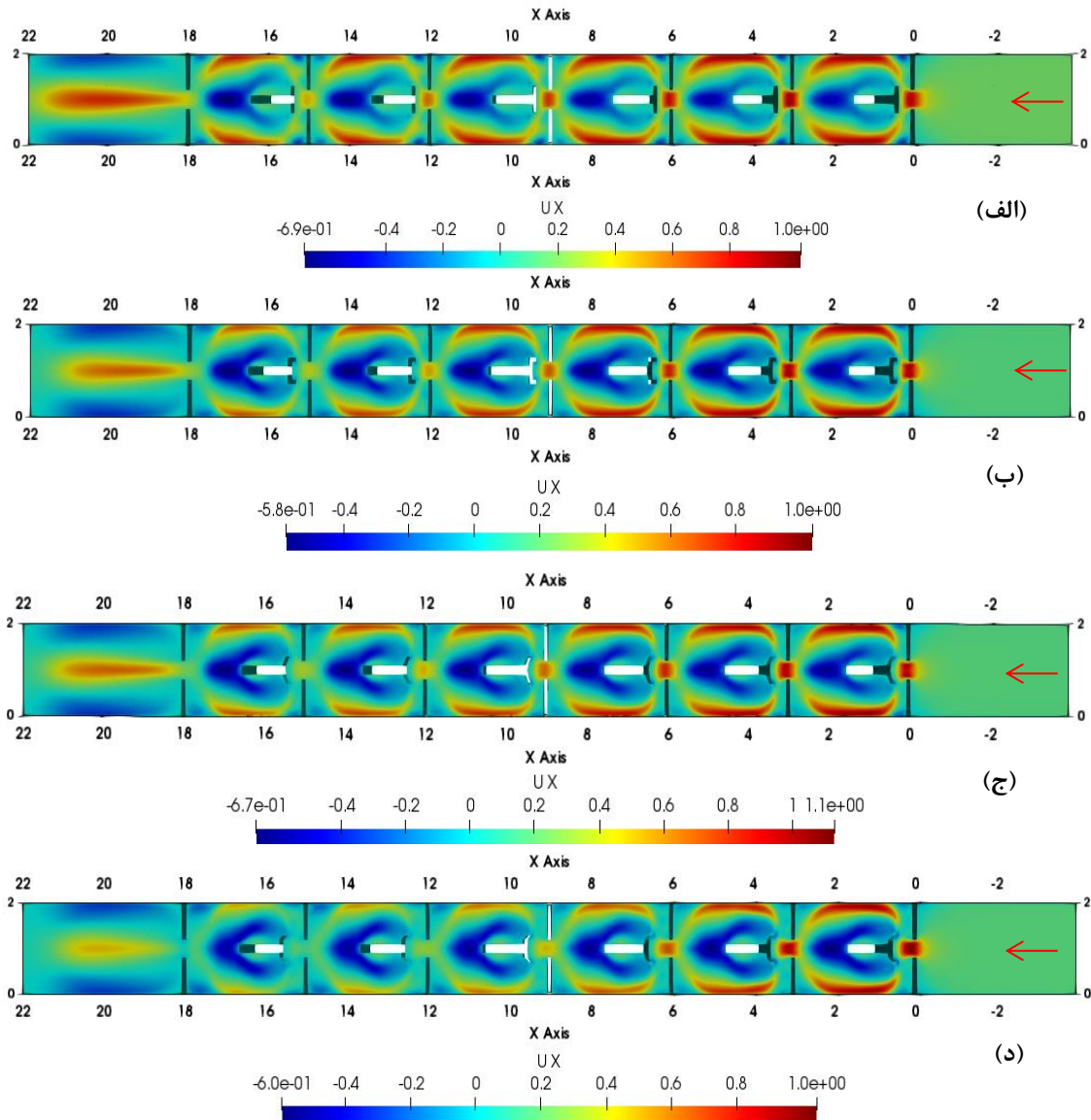


مقایسه مشخصه سرعت جریان

سرعت جریان در عبور ماهی‌ها، نقش به‌سزایی دارد. کنترل این پارامتر به ماهی‌ها اجازه می‌دهد تا به راحتی در خلاف جریان شنا کنند (Quaranta et al. 2019). شکل

و عرضی سرعت جریان به ترتیب در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) ارائه شده است. Mao et al. (2019b) نشان دادند که در راه‌ماهی T شکل حداکثر سرعت جریان در محل ورودی (تنگ‌شدگی‌ها) و جناحین کانال رخ می‌دهد و کنترل جریان در این نقاط امری ضروری است. نتایج ارائه شده برای تمامی پروفیل‌های طولی از ابتدای حوضچه شماره یک در جهت جریان ($X=0m$) تا انتهای کانال ($X=22m$) و همچنین برای تمامی پروفیل‌های عرضی، از پشت مانع T شکل حوضچه شماره سوم ($0/5$ متری ورودی بلوک چهارم) در جهت جریان ($Y=0m$) تا انتهای حوضچه ($Y=2m$) می‌باشد.

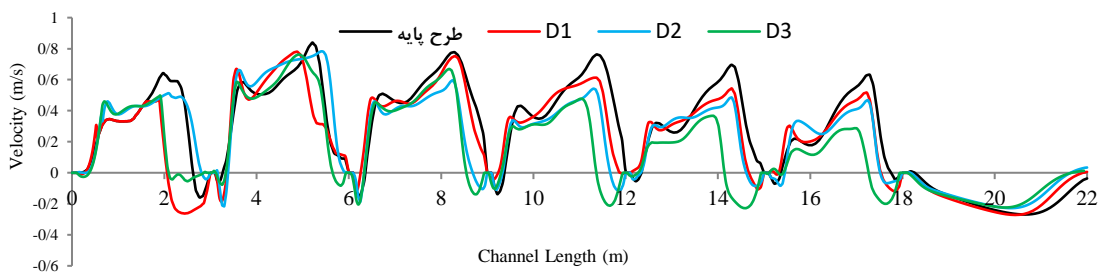
(۱۰) بیانگر تغییرات پارامتر سرعت در جهت جریان (U_x) بر حسب متر بر ثانیه در پیکربندی‌های مختلف مانع T شکل است. نتایج گرافیکی خروجی حاکی از شکل‌گیری سرعت‌های حداقل و حداکثر در بخش‌های مختلف کانال است که حداقل سرعت‌ها که ناشی از جریان‌های برگشتی می‌باشد دقیقاً در محور کانال، و حداکثر سرعت‌ها نیز در فاصله $0/1$ متری از جناحین کانال رخ داده است. بعلاوه شکل‌گیری جریان‌های برگشتی در مسیر، بهبود حرکت راحت تر ماهی‌ها را در مسیر فراهم آورده است. به منظور مقایسه مشخصه‌های جریان در مسیر راه‌ماهی به ازای چهار پیکربندی مختلف طرح پایه، D1، D2 و D3 پروفیل طولی



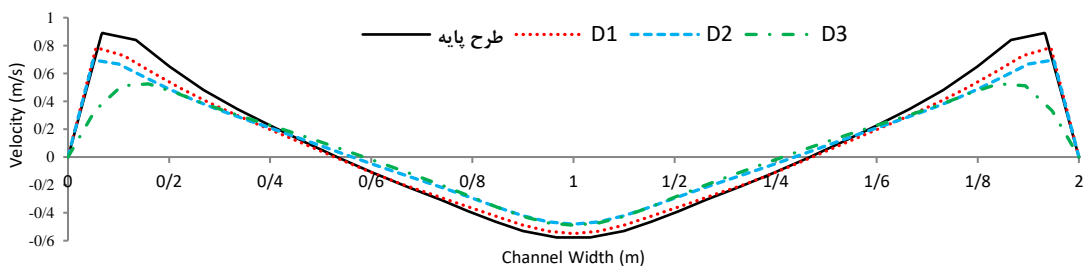
شکل (۱۰): سرعت جریان در پیکربندی‌های با مانع T شکل الف- طرح پایه ب- طرح D1 ج- طرح D2 و د- طرح D3

جهت مقایسه عملکرد پیکربندی‌های مختلف لحاظ گردید. براساس بررسی‌های بعمل آمده مشخص گردید در پیکربندی‌های با طرح پایه، D1، D2 و D3 در جهت طولی به ترتیب $0.65/4$ ، $0.77/3$ ، $0.85/9$ و در جهت عرضی به ترتیب $0.77/7$ ، $0.81/7$ ، $0.84/3$ و $0.92/3$ داده‌های سرعت دارای مقادیر کمتر از آستانه حدی 0.5 متر بر ثانیه می‌باشند (شکل‌های ۱۱ و ۱۲). به‌علاوه با بررسی جریان‌های برگشتی، در پیکربندی‌های با طرح پایه، D1، D2 و D3 در جهت طولی به ترتیب $0.23/7$ ، $0.29/5$ ، $0.29/6$ و $0.38/6$ و در جهت عرضی به ترتیب $0.46/7$ ، $0.45/3$ ، $0.41/5$ و $0.43/7$ (کمتر از صفر) می‌باشند. مقایسه نتایج برای چهار پیکربندی حاکی از آن است که پیکربندی D3 اگرچه در بررسی جریان‌های برگشتی در پروفیل عرضی نسبت به سایر پیکربندی‌ها کم‌ترین تاثیر را داشته؛ ولی در مجموع پروفیل‌های طولی و عرضی در هر دو معیار سرعت آستانه و جریان‌های برگشتی، بیشترین مقدار و بهترین عملکرد را به خود اختصاص داد که می‌تواند این پیکربندی را اولویت‌دارتر از بقیه پیکربندی‌ها کند.

شایان ذکر است که پروفیل‌های طولی به دلیل تقارن هندسه و قرارگیری موانع T شکل در محدوده میانی عرض کانال، در موقعیت $Y=0.2m$ و پروفیل‌های عرضی نیز به دلیل اطمینان از برقراری جریان یکنواخت و از همه مهم‌تر جهت کنترل جذب و موفقیت عبور ماهی‌ها در محل ورودی‌ها (تنگ‌شدگی‌ها) در موقعیت $X=8.5m$ استخراج شدند. در بررسی پروفیل‌های طولی و عرضی جریان برای چهار پیکربندی مختلف حاکی از تغییرات سرعتی در دامنه 0.06 - تا 0.85 متر بر ثانیه دارد. سرعت‌های منفی حکایت از جریان‌های برگشتی در طول مسیر راه‌ماهی دارد که می‌تواند تا حد زیادی به تسهیل حرکت ماهیان در مسیر کمک کند. از این رو جریان برگشتی در هر بلوک به عنوان یک مؤلفه موثر برای حرکت ماهیان تلقی می‌گردد. جهت مقایسه پیکربندی‌های مختلف موانع دو معیار سرعت آستانه حدی 0.5 متر بر ثانیه و درصد جریان‌های برگشتی در طول و عرض مسیر مورد ارزیابی قرار گرفت. این آستانه طبق نظرات (Hunter and Mayor (1986) به منظور عبور بیش‌ترین درصد از ماهی‌ها در رده سنی نوجوان، تحت عنوان شناگران ضعیف (سرعت مداوم 0.5 متر بر ثانیه)



شکل (۱۱): مقایسه پروفیل طولی سرعت جریان برای چهار پیکربندی در موقعیت $Y=0.2m$ در $Z=0.8m$



شکل (۱۲): مقایسه پروفیل عرضی سرعت جریان برای چهار پیکربندی در موقعیت $X=8.5m$ در $Z=0.8m$

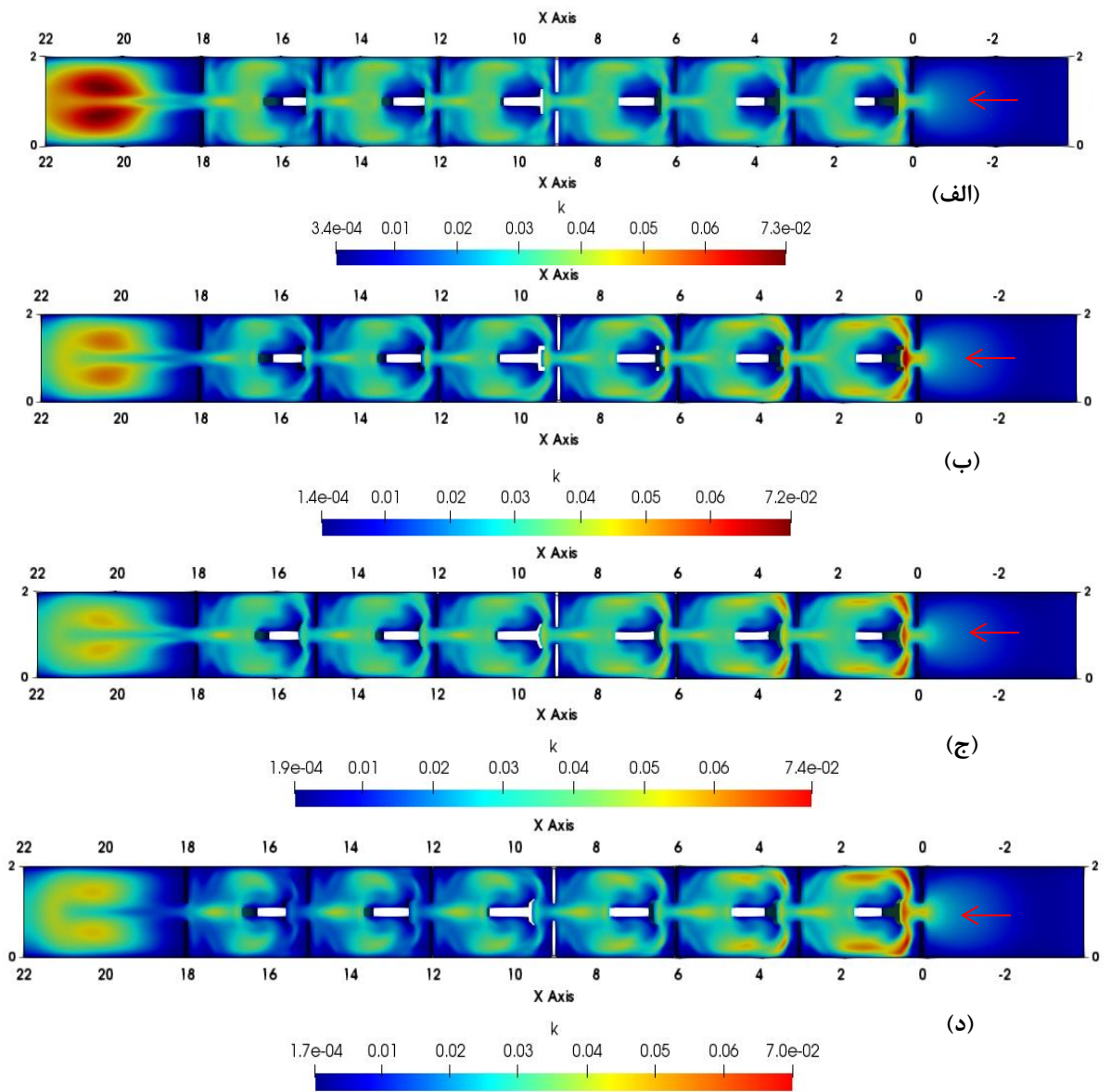
مخاطراتی روبرو می‌کند (لشکرآرا و همکاران). از این رو در انتخاب بهینه‌ترین پیکربندی این پارامتر از درجه اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. انرژی جنبشی آشفتگی بصورت رابطه (۴) بیان می‌شود:

$$K = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (4)$$

که در آن K بیانگر انرژی جنبشی جریان آشفته به ازای واحد جرم، $\overline{u'} = u + \bar{u}$ ، $\overline{v'} = v + \bar{v}$ ، $\overline{w'} = w + \bar{w}$ مؤلفه‌های نوسانگر سرعت بر اساس تجزیه ریولندز و علامت $\bar{\cdot}$ (بار) نشان‌گر متوسط زمانی یک کمیت است.

مقایسه مشخصه انرژی جنبشی آشفتگی جریان

شکل (۱۳) بیانگر تغییرات پارامتر انرژی جنبشی آشفتگی در جهت جریان (k) بر حسب m^2/s^2 در پیکربندی‌های مختلف موانع T شکل است. انرژی جنبشی آشفتگی از جمله پارامترهای بسیار حائز اهمیت در طراحی راهمایی می‌باشد زیرا در صورتی که میزان این انرژی از آستانه مشخصی فراتر رود تلاطم و آشفتگی ایجاد شده در طول مسیر افزایش پیدا می‌کند و حرکت ماهی‌ها را با

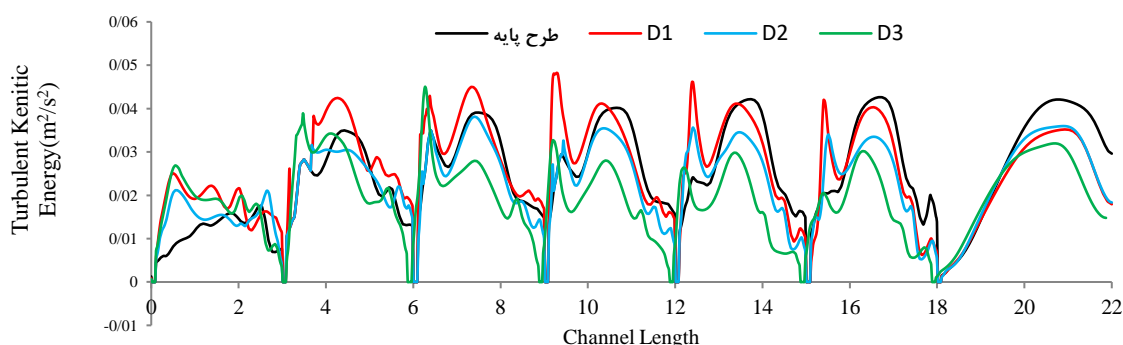


شکل (۱۳): تغییرات انرژی جنبشی آشفتگی جریان در پیکربندی‌های با موانع T شکل الف- طرح پایه ب- طرح D1 ج- طرح D2 و د- طرح D3

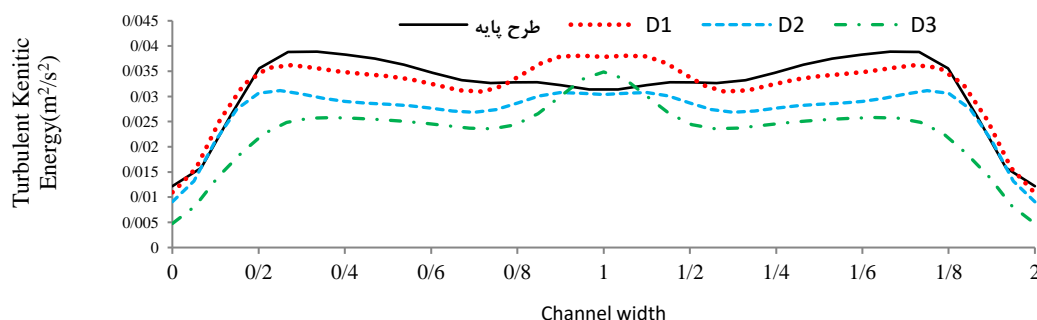


پیکربندی‌های مختلف صورت گرفت. براساس بررسی‌های بعمل آمده مشخص گردید که در پیکربندی‌های با طرح پایه، D1، D2 و D3 در جهت طولی به ترتیب ۲۵/۷٪، ۲۰/۱۵٪، ۳۷/۱۹٪ و ۵۱/۶٪ و در جهت عرضی به ترتیب ۹/۶٪، ۸/۱٪، ۹/۴٪ و ۱۷/۸٪ داده‌های انرژی جنبشی آشفتگی دارای مقادیر کمتر از آستانه حدی ۰/۰۲ هستند. نتایج نشان می‌دهد که پیکربندی طرح D3 به خوبی توانسته است انرژی جنبشی آشفتگی جریان را در مقایسه با سایر پیکربندی‌ها کنترل کند. این امر به حرکت راحت‌تر ماهیان کمک می‌کند و می‌تواند این پیکربندی را اولویت‌دارتر از بقیه کند.

به منظور مقایسه مشخصه انرژی جنبشی آشفتگی جریان که می‌تواند منجر به تلاطم جریان در مسیر راه‌ماهی گردد، پروفیل طولی و عرضی این مشخصه‌ها همان طور که در بخش مقایسه مشخصه سرعت جریان نیز به آن اشاره گردید بترتیب در موقعیت $Y=0.2m$ و $X=8.5m$ کانال مورد مقایسه قرار گرفتند (اشکال ۱۴ و ۱۵). دامنه تغییرات این مشخصه در محدوده ۰ تا ۰/۰۴۵ متر مربع بر مجذور ثانیه (m^2/s^2) می‌باشد. به منظور مقایسه نتایج انرژی جنبشی آشفتگی در طول مسیر، معیار مقدار حدی میانه محدوده نتایج ۰/۰۲ انتخاب و نتایج داده‌های این مشخصه در طول مسیر نسبت به آن مورد مقایسه قرار گرفت. انتخاب این آستانه به منظور تشخیص درصد انرژی آشفتگی‌های پایین‌تر از حد میانه در بین مقادیر بدست آمده برای



شکل (۱۴): مقایسه پروفیل طولی انرژی جنبشی آشفتگی جریان برای چهار پیکربندی در موقعیت $Y=0.2m$ در $Z=0.8m$



شکل (۱۵): مقایسه پروفیل عرضی انرژی جنبشی آشفتگی جریان برای چهار پیکربندی در موقعیت $X=8.5m$ در $Z=0.8m$

جریان (ε) در پیکربندی‌های مختلف موانع T شکل است. بررسی این پارامتر در مسیر راه‌ماهی، از جمله مؤلفه‌های تأثیرگذار در طراحی سازه راه‌ماهی می‌باشد (بهاروند

مقایسه مشخصه نرخ استهلاك

شکل (۱۶) بیانگر تغییرات نرخ استهلاك در جهت

نرخ متوسط استهلاک انرژی در واحد حجم، ε ، به صورت رابطه (۶) بیان می شود:

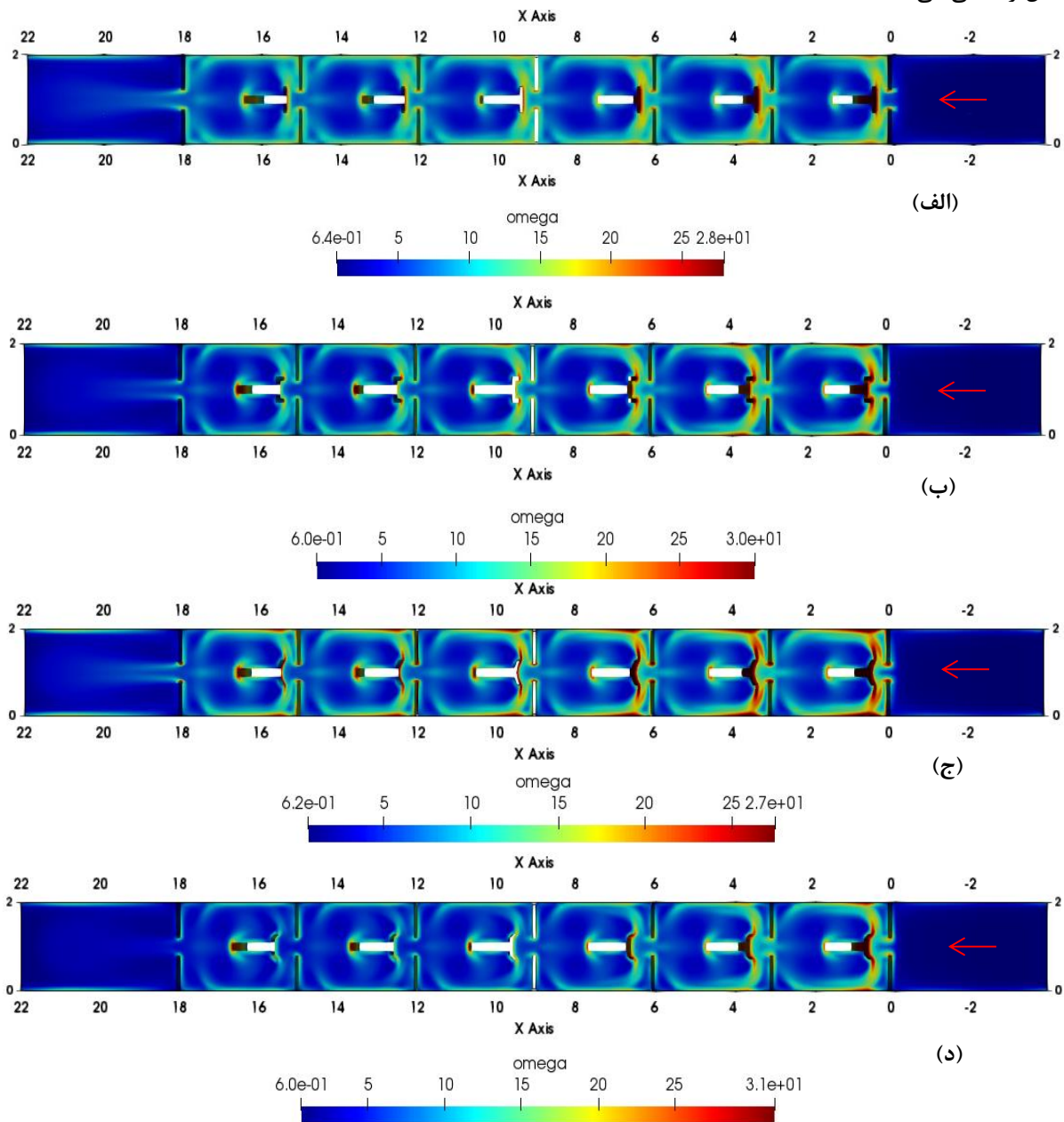
$$\varepsilon = \frac{\rho g Q_t \Delta h}{L B Y_0} = \frac{\rho g Q_t S_0}{B Y_0} \quad (6)$$

P چگالی، ΔH اختلاف هد بین دو حوضچه متوالی، L و B به ترتیب طول و عرض هر حوضچه هستند.

ولشکرآرا (۱۳۹۷). بگونه‌ای که هر پیکربندی که منجر به بالاترین نرخ استهلاک انرژی گردد، قدرت حمل و انتقال ماهیان در طول مسیر راه‌ماهی را تا حد زیادی افزایش می‌بخشد. انرژی جریان در کانال‌ها با رابطه (۵) بیان می‌شود:

$$H = z + \frac{\rho}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} \quad (5)$$

که درصد تغییرات انرژی در طول مسیر و افت آن به دلیل وجود موانع T شکل، معرف درصد استهلاک انرژی در مسیر کانال راه‌ماهی می‌باشد.

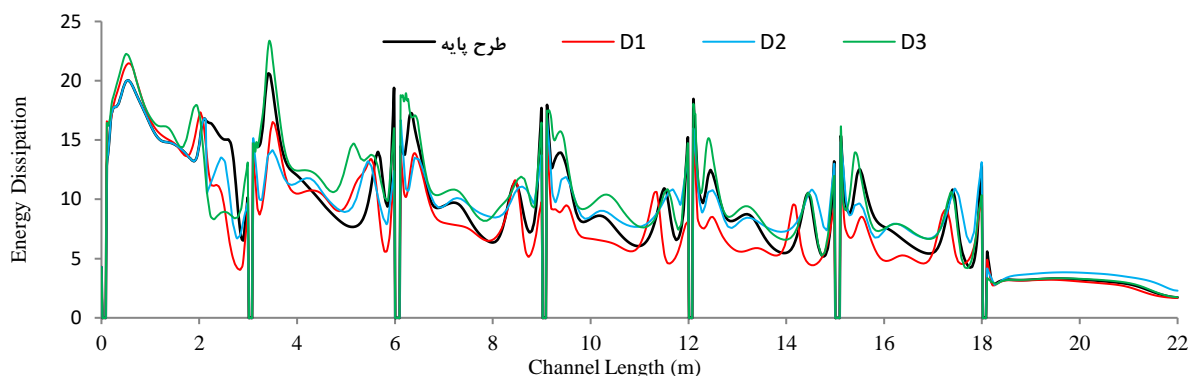


شکل (۱۶): الگوی استهلاک انرژی جریان در پیکربندی‌های با موانع T شکل الف- طرح پایه ب- طرح D1 ج- طرح D2 و د- طرح D3

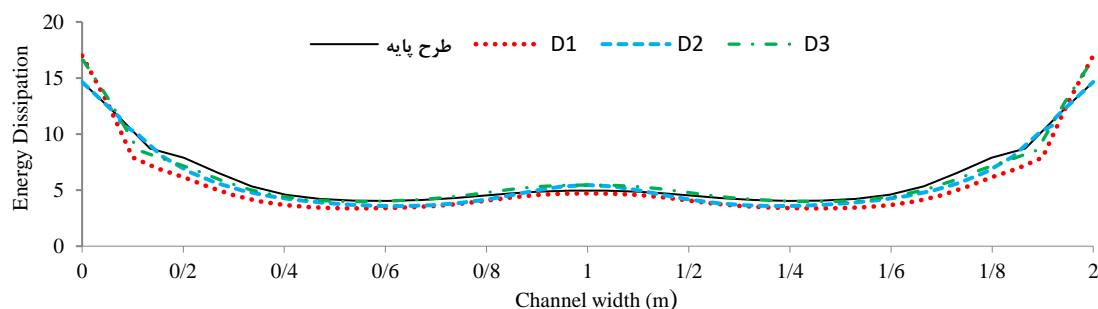


پایه، D1، D2 و D3 در جهت طولی به ترتیب ۰/۶۱، ۵۷/۱۵، ۶۶/۷٪ و ۷۲/۱٪ و در جهت عرضی به ترتیب ۱۴/۱۸، ۱۲/۶٪، ۱۶/۲٪ و ۱۹/۳٪ داده‌های استهلاک انرژی جریان در مسیر راه‌ماهی دارای مقادیر بیشتر از آستانه حدی مقدار ۸ درصد هستند. از این رو پیکربندی با طرح D3 در جهت‌های طولی و عرضی، بیش‌ترین میزان استهلاک را به خود اختصاص داد که می‌تواند این پیکربندی را اولویت‌دارتر از بقیه پیکربندی‌ها کند (شکل‌های ۱۷ و ۱۸).

به منظور مقایسه مشخصه استهلاک انرژی جریان که می‌تواند به انتخاب مسیرهای مناسب برای حرکت و استراحت ماهی کمک کند، پروفیل طولی و عرضی این مشخصه‌ها نیز در موقعیت‌های $X=8.5m$ و $Y=0.2m$ مورد مقایسه قرار گرفت. دامنه تغییرات این مقایسه نتایج استهلاک مشخصه در محدوده ۰ تا ۲۳ درصد می‌باشد. به منظور انرژی جریان در طول مسیر، معیار مقدار حدی ۸ درصد انتخاب و نتایج داده‌های این مشخصه در طول مسیر نسبت به آن مورد مقایسه قرار گرفت. براساس بررسی‌های بعمل آمده مشخص گردید که در پیکربندی‌های با طرح



شکل (۱۷): مقایسه پروفیل طولی استهلاک انرژی جریان برای چهار پیکربندی در موقعیت $Y=0.2m$ در $Z=0.8m$



شکل (۱۸): مقایسه پروفیل عرضی استهلاک انرژی جریان برای چهار پیکربندی در موقعیت $X=8.5m$ در $Z=0.8m$

با لحاظ معیارهایی همچون مقادیر حدی در طول مسیر و همچنین درصد جریان‌های برگشتی در بلوک‌های مسیر راه‌ماهی، به انتخاب بهترین فرم پیکربندی اقدام گردید. خلاصه نتایج مقایسه مشخصه‌های جریان در راه‌ماهی در جهت طولی و عرضی به ترتیب در جداول (۳) و (۴) موجود می‌باشند

با بررسی پارامترهای مختلف هیدرولیکی دخیل در جریان در مسیر سازه راه‌ماهی نتایج قابل ملاحظه‌ای حاصل شد که می‌تواند در انتخاب بهترین پیکربندی موانع موجود در مسیر راه‌ماهی، طراحان را کمک کند. نتایج نشان می‌دهد که هر یک از پیکربندی‌ها در اثر تغییر فرم هندسی رفتارهای مختص به خود ارائه داده‌اند که در تحقیق حاضر



جدول (۳): مقایسه مشخصه‌های جریان در جهت طولی راه‌ماهی به ازای پیکربندی‌های مختلف

مشخصه‌های هیدرولیکی جریان در طول سازه راه‌ماهی T شکل				نوع پیکربندی
				موانع T شکل
سرعت جریان	انرژی جنبشی آشفتگی	استهلاک انرژی		
معیار: آستانه حدی	معیار: آستانه حدی	معیار: آستانه حدی		
درصد سرعت‌های کمتر از	درصد انرژی آشفتگی کمتر	درصد استهلاک بزرگتر		
0/5 m/s	از $0/02 \text{ m}^2/\text{s}^2$			
برگشتی (کمتر از صفر)				
٪ ۲۳/۷	٪ ۲۵/۷	٪ ۶۲	طرح پایه	
٪ ۲۹/۵	٪ ۲۰/۵	٪ ۵۷/۵	طرح D1	
٪ ۲۹/۶	٪ ۳۷/۹	٪ ۶۶/۷	طرح D2	
٪ ۳۸/۶	٪ ۵۱/۶	٪ ۷۲/۱	طرح D3	

جدول (۴): مقایسه مشخصه‌های جریان در جهت عرضی راه‌ماهی به ازای پیکربندی‌های مختلف

مشخصه‌های هیدرولیکی جریان در عرض سازه راه‌ماهی T شکل				نوع پیکربندی
				موانع T شکل
سرعت جریان	انرژی جنبشی آشفتگی	استهلاک انرژی		
معیار: آستانه حدی	معیار: آستانه حدی	معیار: آستانه حدی		
درصد سرعت‌های کمتر از	درصد انرژی آشفتگی	درصد استهلاک بزرگتر		
0/5 m/s	کمتر از $0/02 \text{ m}^2/\text{s}^2$			
برگشتی (کمتر از صفر)				
٪ ۴۶/۷	٪ ۹/۶	٪ ۱۴/۸	طرح پایه	
٪ ۴۵/۳	٪ ۸/۱	٪ ۱۲/۶	طرح D1	
٪ ۴۳/۷	٪ ۹/۴	٪ ۱۶/۲	طرح D2	
٪ ۴۱/۵	٪ ۱۷/۸	٪ ۱۹/۳	طرح D3	

نتیجه‌گیری

افزودن تیغه‌های کمکی در استخرهای سازه راه‌ماهی می‌تواند به نفع ماهی‌ها عمل کند. طراحی ساده تیغه‌های کمکی و مصالح نسبتاً کم مورد نیاز برای پیاده‌سازی آن‌ها باعث می‌شود که گزینه‌ی مناسبی برای بهینه‌سازی سازه‌های پیشتر ساخته شده باشند. در تحقیق حاضر نیز با بهره‌گیری از تیغه و موانع T شکل در پیکربندی‌های مختلف طرح پایه، D1، D2 و D3 و مقایسه پارامترهای مختلف هیدرولیکی، بهترین پیکربندی برگزیده شد. براساس موارد بحث شده نتایج ذیل بطور خلاصه قابل بیان

مقایسه نتایج حاکی از آن است که پیکربندی با طرح D3 در هر سه مشخصه جریان، هم در جهت طولی و هم در جهت عرضی شامل سرعت جریان (در هر دو معیار سرعت حدی و درصد جریان برگشتی)، انرژی جنبشی آشفتگی و استهلاک انرژی بهترین کارایی را نسبت به سایر پیکربندی‌ها دارد که با بهبود این موارد، درصد موفقیت عبور ماهی‌ها از سازه بالا رفته و ماهی‌های بیشتری توان عبور از آن را پیدا خواهند کرد



است:

کمترین مقدار این انرژی مخرب و متلاطم را به خود اختصاص داد که می‌تواند به حرکت آرام و به دور از تلاطم ماهیان کمک شایانی کند.

۴- پیکربندی با طرح D3 در بین سایر پیکربندی‌ها، بالاترین درصد استهلاک انرژی، در جهات طولی و عرضی به ترتیب برابر با ۷۲/۱ و ۱۹/۳ درصدی را داشته است که این مورد نیز از فاکتورهای بسیار حساس به منظور حرکت آرام و بی‌دردسر ماهیان می‌باشد.

۵- فرم پیکربندی D3 در مسیر راه‌ماهی برای اولین بار در این پژوهش ارائه و در مقایسه ارزیابی عملکرد آن از نقطه نظر مشخصه‌های هیدرولیکی، نسبت به سایر پیکربندی‌های موانع T شکل، از بهینه‌ترین فرم برخوردار است.

۱- مدل متن باز OpenFOAM با دقت بالایی قابلیت شبیه‌سازی جریان در مسیر سازه راه‌ماهی دارد بگونه‌ای که خطای $MSE=0.098$ و $RMSE=0.31$ را برای نتایج عددی و آزمایشگاهی دست داده است.

۲- پیکربندی با طرح D3 با مجموع بیشترین درصد رخداد از جریان‌های برگشتی، در جهات طولی و عرضی به ترتیب برابر با ۳۸/۶ و ۴۱/۵ درصدی و همچنین سرعت‌های کمتر از ۰/۵ متر بر ثانیه به ترتیب برابر با ۸۵/۹ و ۹۲/۳ درصدی در مسیر راه‌ماهی، بهترین عملکرد را نسبت به سایر پیکربندی‌ها به خود اختصاص داد.

۳- پیکربندی با طرح D3 با درصد رخداد انرژی جنبشی آشفته‌گی کمتر از ۰/۰۲ متر مربع بر مجذور ثانیه، در جهات طولی و عرضی به ترتیب برابر با ۵۱/۶ و ۱۷/۸ درصدی

منابع

قادری، د.، م. ملازاده و م. اکبری. ۱۳۹۹. شبیه‌سازی عددی توزیع سرعت جریان در سازه راه‌ماهی استخر با استفاده از نرم‌افزار Flow-3d، نوزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه فردوسی مشهد.

لشکرآرا، ب.، ف. قلاوند و م. ذاکر مشفق. ۱۳۹۵. ارزیابی عملکرد زیست محیطی راه ماهی دنیل. نشریه مهندسی منابع آب، سال نهم، شماره ۳۰، ص ۲۴-۱۳.

بهاروند، س. و ب. لشکرآرا. ۱۳۹۷. تعیین سطح مؤثر حوضچه استراحتگاهی در راه ماهی با بازشدگی قائم نوع ۱ به هنگام عبور ماهی آزاد چینوک. نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، شماره ۴، ص ۱۲-۱.

DVWK, Fish passes: Design, dimensions and monitoring, Food and Agriculture Organization of the United Nations in arrangement with Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V. (DVWK), Rome, 2002.

Fuentes-Perez, J., F. Sanz-Ronda, A. Azagra and A. García-Vega. 2016. non-uniform hydraulic behavior of pool-weir fishways: a tool to optimize its design and performance. *Ecological Engineering*, 86: 5-12.

Quaranta, E., C. Katopodis and C. Comoglio. 2019. Effects of bed slope on the flow field of vertical slot fishways. *River Research and Applications*, 35(6): 1-13.

Stamou, A.I., G. Mitsopoulos, P. Rutschmann and M. Bui. 2018. Verification of a 3D CFD model for vertical slot fish-passes. *Environmental Fluid Mechanics*, 18: 1435 -1461.

Rajaratnam, N. and C. Katopodis. 1984. Hydraulics of Denil fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(9): 1219-1233.

Mao, X., F. Jing-jing, T. You-cai and A. Rui-dong. 2012. Influence of structure on hydraulic characteristics of T shape fishway. *Journal Hydrodynamics*, 24(5): 684-691.

Leon, A.S., A. Ghidaoui, A.R. Schmidt and M.H. Garcia. 2010. A robust two-equation model for transient-mixed flows. *Journal of Hydraulic Research*, 48(1): 44-56.

Mao, X. 2018. Review of fishway research in China. *Ecological Engineering*, 115: 91-95.

Mao, X., J. Li, R. An, W. Zhao and K. Li. 2019a. Study of key technologies for fishways in the plateaus of western China. *Global Ecology and Conservation*, 20: 1-12.

Peake, S. 2004. An Evaluation of the Use of Critical Swimming Speed for Determination of Culvert Water Velocity Criteria for Smallmouth Bass. *Transactions of the American Fisheries Society*, 133(6): 1472-1479.



Mao, X., J. Zhang, K. Tang and W. Zhao. 2019b. Designs for T shape fishways. *The Civil Engineering Journal*, 28(2): 270-280.

Aghebatie, B. and Kh. Hosseini. 2019. Computational investigation on the effects of rib on the slug flow phenomenon; using OpenFOAM. *Int J Modern Phys C*, 30(6): 1-12. doi.org/10.1142/S0129183119500517.

Cea, L., L. Pena and J. Puertas. 2007. Application of Several Depth Averaged turbulence models to simulate flow in vertical slot fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133: 160-172.

Hunter, L.A. and L. Mayor. 1986. Analysis of fish swimming performance data. North/South Consultants Inc. Winnipeg, Manitoba, Canada.