

M. Shokrollahi

M.Sc. Student, Department of
Civil Engineering, University of
Semnan.

e-mail: mohammadshk@semnan.ac.ir

Kh. Hoseini*

Associate Professor, Department
of Civil Engineering, University
of Semnan.

e-mail: khhoseini@semnan.ac.ir

S.F. Mousavi

Professor, Department of Civil
Engineering, University of
Tabriz.

e-mail: Mousavi_sf@yahoo.com

**Numerical Modeling of the Effect of Changing
the Geometry of Fishway Structure on the Flow
Through Its Vertical Slot**

In the present study, hydraulics of vertical slot is simulated, using Flow-3D. $k-\varepsilon$ turbulence model had the most performance among different turbulence models. Next, the velocity pattern, volume of fish rest-area, and flow turbulence in the channel were analyzed in order to evaluate the performance of fishway with different geometries. In this regard, the influence of geometry on the performance of fishway is investigated. Results showed that by decreasing the ratio of the length of the large wall to the small wall, the longitudinal component of velocity was decreased by an average of 25.11%. By increasing the end of the large-wall angle with respect to the pool wall, the volume of the rest area was increased by 3%. By the increasing the end of the large-wall angle with respect to the pool wall parameter, the turbulence energy was increased by an average of 30.66%. In general, the ratio of the length of the large wall to the small wall has a greater effect on reducing the flow velocity for the fish to cross the fishway and also by increasing the end of the large-wall angle with respect to the pool wall, the rest area of the fish and turbulence energy has increased.

Keywords: Fishway, Velocity profile, Turbulence, Rest area, Flow-3D.

* Corresponding author

Received 04 August 2019, Revised 18 September 2019, Accepted 28 September 2019.

DOI: 10.22091/cer.2019.4691.1162

محمد شکراللهی

دانشجوی کارشناسی ارشد
سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده
مهندسی عمران، دانشگاه
سمنان.

پست الکترونیک:

Behnam1995@gmail.com

خسرو حسینی*

دانشیار، دانشکده مهندسی
عمران، دانشگاه سمنان.

پست الکترونیک:

khoseini@semnan.ac.ir

سید فرهاد موسوی

استاد، دانشکده مهندسی عمران،
دانشگاه سمنان.

پست الکترونیک:

Mousavi_sf@yahoo.com

مدل‌سازی عددی اثر تغییر هندسه سازه راه‌ماهی

بر جریان عبوری از بازشدگی قائم آن

در پژوهش حاضر، ویژگی‌های جریان عبوری از بازشدگی قائم راه‌ماهی با استفاده از مدل عددی Flow-3D شبیه‌سازی شده و نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی صحت‌سنجی گردیده است. نتایج بررسی نشان داد که مدل آشفتگی $k-\epsilon$ دقت خوبی در مدل‌سازی عددی ماهی‌رو نسبت به دیگر مدل‌های آشفتگی دارد. در ادامه، الگوی سرعت، حجم محدوده استراحت ماهیان و تلاطم جریان در راه‌ماهی تحلیل گردیده است تا بتوان عملکرد راه‌ماهی را با هندسه‌های مختلف مورد ارزیابی قرار داد. در این رابطه، نسبت طول دیواره بزرگ به دیواره کوچک هر سلول، زاویه انتهایی دیواره و نسبت عرض خالص ورودی به عرض حوضچه، به‌عنوان پارامترهای بی‌بعد تأثیرگذار در عملکرد حوضچه بررسی شدند. نتایج نشان داد که با کاهش نسبت طول دیواره بزرگ به دیواره کوچک، مؤلفه طولی سرعت جریان به‌طور متوسط ۲۵/۱۱ درصد کاهش یافته است. با افزایش زاویه انتهایی دیواره بزرگ نسبت به دیواره حوضچه، حجم استراحت حدود ۳٪ افزایش داشته است. همچنین، با افزایش پارامتر زاویه انتهایی دیواره بزرگ، انرژی آشفتگی به‌طور متوسط ۳۰/۶۶ درصد افزایش یافته است. به‌طور کلی، نسبت طول دیواره بزرگ به دیواره کوچک تأثیر بیشتری بر روند کاهش سرعت جریان برای عبور ماهیان از ماهی‌رو داشته و همچنین با افزایش زاویه انتهایی دیواره بزرگ نسبت به دیواره حوضچه، محیط استراحت ماهیان و انرژی آشفتگی افزایش یافته است.

واژگان کلیدی: راه‌ماهی، پروفیل سرعت، آشفتگی، ناحیه استراحت، Flow-3D.

۱- مقدمه

سدهای مخزنی و بندهای انحرافی تعبیه می‌شود [۱]. وظیفه مهم سازه راه‌ماهی، ایجاد مسیر مطمئن جهت عبور ماهی‌های مهاجر می‌باشد. سازه‌های راه‌ماهی انواع مختلفی دارند که در این پژوهش به بررسی خصوصیات جریان راه‌ماهی با بازشدگی قائم^۲ پرداخته شده است. اولین راه‌ماهی ساخته شده از نوع بازشدگی قائم در سال ۱۹۶۱ در کشور کانادا بوده است [۲]. همچنین، اولین مطالعات مربوط به این نوع راه‌ماهی توسط راجاراتنام^۳ و همکاران انجام شده است. ایشان با بررسی ۱۸ استخر در راه‌ماهی با بازشدگی قائم، رابطه خطی بین ارتفاع آب و دبی را

احداث سدها و بندهای انحرافی و استفاده از منابع آب سطحی با وجود فواید زیادی که داشته‌اند، باعث تغییر و تحول در محیط‌زیست و حیات آبیان نیز گردیده‌اند. از مهم‌ترین اثرات محیط‌زیستی ساخت سد و بند انحرافی، جلوگیری از عبور ماهیان می‌باشد. به‌منظور رفع این مشکل، سازه‌های هیدرولیکی تحت عنوان راه‌ماهی^۱ در بدنه

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳/۰۵/۱۳۹۸، بازنگری ۲۷/۰۶/۱۳۹۸، پذیرش ۰۶/۰۷/۱۳۹۸.

(DOI): 10.22091/cer.2019.4691.1162 شناسه دیجیتال

^۱- Fishway

^۲- Vertical slot

^۳- Rajaratnam

آزمایشگاهی و سپس مدل‌سازی عددی، به بررسی سرعت و آشفتگی در راه‌ماهی‌ها با بازشدگی قائم پرداختند و دریافتند که با تغییر شکل دیواره جداکننده بزرگ به حالت L شکل، سرعت ۴۳٪ کاهش پیدا می‌کند [۱۱]. در سال ۲۰۱۷ در بررسی عددی راه‌ماهی با بازشدگی قائم، اثر تغییر زاویه دیواره بر سرعت و آشفتگی انرژی نیز مورد پژوهش قرار گرفت [۱۴]. براوو کوردوبا^۶ و همکاران، به بررسی اثر روزه در شرایط مستغرق در راه‌ماهی از نوع بازشدگی قائم پرداختند. در پژوهش ایشان، روزه‌هایی به طول و عرض ۰/۲ متر در نظر گرفته شده و رفتار راه‌ماهی با حضور این روزه‌ها سنجیده شده است. نتایج این پژوهش، حاکی از عملکرد خوب این نوع راه‌ماهی نسبت به راه‌ماهی بدون روزه بوده است [۱۵]. پژوهشگران با استفاده از نرم‌افزار OpenFOAM به تحلیل راه‌ماهی از نوع بازشدگی قائم با مدل‌های مختلف آشفتگی مانند LES و k-ε پرداختند. آنها دریافتند که با استفاده از این نرم‌افزار، مشخصه‌های جریان مانند سرعت و آشفتگی جریان به خوبی پیش‌بینی می‌شود [۱۶]. در سال ۲۰۱۹ مطالعه عددی راه‌ماهی از نوع بازشدگی قائم انجام شد. محققان در این پژوهش اثر شیب بستر را بر عملکرد این نوع راه‌ماهی با نرم‌افزار ANSYS ارزیابی کردند و دریافتند که سرعت جریان با شیب بستر رابطه دارد [۱۷]. احسانی و همکاران، به بررسی آزمایشگاهی شرایط جریان در راه‌ماهی از نوع کانال ماهی- قایق پرداختند. آنها آزمایش‌ها را در ۶ دبی و با شیب ۴٪ انجام دادند. در پژوهش ایشان، برای شبیه‌سازی پوشش گیاهی از لوله‌های پلی‌اتیلنی تحت عنوان برس استفاده شد. محققان دریافتند که پس از هر برس، یک ناحیه با سرعت کم تشکیل شده که بهترین مکان برای استراحت ماهی است. همچنین، سرعت‌های به‌دست آمده در بازشدگی‌های مختلف از حداکثر سرعت ماهی طرح کمتر بوده و این امر باعث سهولت در مهاجرت ماهی می‌شود

به‌دست آوردند. همچنین، رابطه‌ای برای سرعت بیشینه نیز ارائه کردند [۳ و ۴]. در سال‌های اخیر، محققین متعددی به بررسی راه‌ماهی با بازشدگی قائم پرداخته‌اند [۵-۹]. از مزایای راه‌ماهی با بازشدگی قائم این است که ویژگی‌های هیدرولیکی در چنین جریانی به‌صورت نیمه مستقل از دبی و یا تغییرات عمق جریان است [۱۰]. همچنین، ماهی در این سازه از هر ارتفاعی که تمایل داشته باشد می‌تواند عبور کند [۱۱]. در ادامه، به بررسی مطالعات مهم دو دهه اخیر در این مورد پرداخته می‌شود. کیم^۴ و همکاران در سال ۲۰۰۰، با انجام آزمایش‌هایی برای تخمین شرایط هیدرولیکی برای انواع راه‌ماهی حوضچه سرریز، به طراحی بهینه‌ای برای این راه‌ماهی دست یافتند. آنها به این نتیجه رسیدند که سرریز مستطیلی با یک شکاف با چیدمان مستقیم نسبت به حالت زیگزاگی برتری دارد و شرایط هیدرولیکی مناسب‌تری را برای مهاجرت ماهی فراهم می‌کند. همچنین، سرریز دوزنقه‌ای تا زمانی که جریان پایدار است و موجب ایجاد محل استراحت گردد، مناسب می‌باشد [۱۲]. محققان در سال ۲۰۰۴ نیز به بررسی آزمایشگاهی راه‌ماهی روزه‌ای پرداختند و رابطه‌ای بی‌بعد همانند محققین پیشین برای دبی و ارتفاع آب به‌دست آوردند. همچنین، با بررسی الگوی جریان، مناطق داخل استخر در راه‌ماهی روزه‌ای را به دو دسته مناطق چرخشی و یا جریان برگشتی و مناطق با جریان مستقیم تقسیم‌بندی کردند [۱۳]. تاراده^۵ و همکاران، مطالعه‌ای آزمایشگاهی برای تعیین مشخصات جریان آشفته در انواع مختلف راه‌ماهی با بازشدگی قائم انجام دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که الگوی جریان به نسبت طول و عرض حوضچه وابسته است و همچنین رابطه‌ای قوی بین نیروی استهلاکی محاسبه شده و انرژی متوسط جنبشی سرعت وجود دارد [۷]. در سال ۲۰۱۶ پژوهشگران با مطالعه

4- Kim

5- Tarrade

6- Bravo-Córdoba

FLOW-3D استفاده نشده و عملکرد شبیه‌سازی این نرم‌افزار ارزیابی نشده است. علاوه بر این، به تأثیر زاویه دیواره جداکننده بزرگ و همچنین نسبت طول دیواره بزرگ به دیواره کوچک در مطالعات گذشته کمتر توجه شده است. در این مطالعه، به بررسی عددی راه‌ماهی با بازشدگی قائم با توجه به تغییر زاویه دیواره بزرگ و طول دیواره‌ها پرداخته شده است. در نهایت، با نگاهی تازه به خصوصیات جریان مانند مؤلفه طولی سرعت در عمق، آشفتگی جریان و حجم استراحتگاه ماهیان در حوضچه‌ها، سعی در ارائه راهکارهایی برای بهبود عملکرد این نوع راه‌ماهی گردیده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مشخصات سازه راه‌ماهی

در پژوهش انجام شده توسط بومباک^۷ در سال ۲۰۱۷، به بررسی آزمایشگاهی و عددی اثر بازشدگی ورودی و خروجی حوضچه پرداخته شده است. این پژوهش، در کانالی با طول ۳۸، عرض ۲/۲ و طول هر حوضچه ۳ متر انجام شد (شکل ۱). حوضچه شماره ۵ محل قرائت سرعت می‌باشد. در این پژوهش دریافتند که مدل PCFLOW2D به‌خوبی سازه راه‌ماهی را شبیه‌سازی کرده و پارامتر استهلاک انرژی محاسبه شده در این نرم‌افزار در محدوده قابل قبولی بوده است [۱۴]. همچنین، نتایج به‌دست آمده از این پژوهش با مطالعات کوردا^۸ تطابق خوبی داشت [۲۳].

در تحقیق حاضر، شبیه‌سازی عددی جریان در سازه راه‌ماهی با بازشدگی قائم با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D با تمام جزئیات مشابه پژوهش آزمایشگاهی بومباک و همکاران [۱۴] انجام شده است. به منظور صحت‌سنجی مدل عددی نیز، از داده‌های این مرجع آزمایشگاهی استفاده شده است.

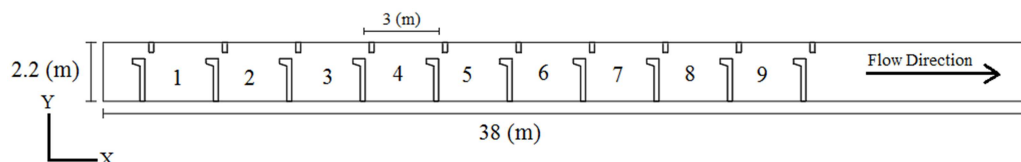
[۱۸]. در سال ۱۳۹۷ بهاروند و همکاران، به بررسی عددی راه‌ماهی با بازشدگی قائم پرداختند. آنها در این بررسی، مطالعه خود را به قسمت محیط استراحت در سازه راه‌ماهی معطوف کردند. در این شبیه‌سازی، از ۴ دبی مختلف استفاده شد و در ۳ عمق نسبی ۰/۲، ۰/۵ و ۰/۷۵، محیط استراحت را برای ماهی آزاد چینوک بررسی کردند. ایشان دریافتند که با افزایش دبی، کاهش ۱۱ تا ۲۰ درصدی محیط استراحت در رده سنی نوجوان تا بالغ پدید خواهد آمد. همچنین، پس از شبیه‌سازی‌های انجام شده مشخص گردید که عمق نسبی ۰/۲ به‌عنوان مساعدترین صفحه استراحتی برای عبور ماهیان به بالادست جریان در میان ترازهای ۰/۵ و ۰/۷۵ است [۱۹]. بدری و همکاران نیز سعی در ارائه مبانی بومی‌سازی طراحی راه‌ماهی شبه‌طبیعی و طراحی آن برای رودخانه‌های ایران داشتند. آنها با استفاده از مدل ریاضی PHABSIM زیستگاه راه‌ماهی طراحی شده را ارزیابی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که ماهیان در زیستگاه خیزآب، برخلاف زیستگاه استخرها، کناره‌های راه‌ماهی را به‌دلیل سرعت‌های مطلوب‌تر به‌عنوان زیستگاه انتخاب می‌کنند [۲۰].

معمولاً ارزیابی عملکرد این سازه به کمک روش‌های آزمایشگاهی صورت می‌گیرد که غالباً هزینه‌بر می‌باشند. به‌منظور سرعت بخشیدن به بهینه‌سازی عملکرد این سازه، از روش‌های با هزینه کمتر استفاده می‌شود. این تحقیق، در راستای بهینه نمودن عملکرد سازه راه‌ماهی صورت گرفته است.

با مطالعه پژوهش‌های اخیر انجام شده در زمینه راه‌ماهی، می‌توان دریافت که در زمینه آزمایشگاهی مطالعات نسبتاً خوبی انجام شده است؛ ولی در زمینه عددی و نرم‌افزاری مطالعات محدود می‌باشد. در صورتی که اگر مطالعات نرم‌افزاری جواب قابل قبولی ارائه دهند چون هم از نظر اقتصادی و هم از نظر زمانی مقرون به‌صرفه‌تر هستند، می‌توان به آنها اعتماد کرد. در پژوهش‌های اخیر صورت گرفته به‌صورت عددی از نرم‌افزار

7- Bombac

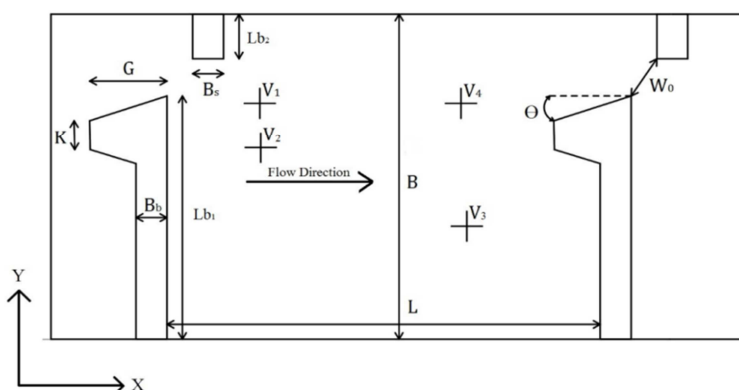
8- Chorda



شکل ۱- مشخصات کانال آزمایشگاهی و محل قرائت سرعت [۱۴]

داده شده است که سه مؤلفه طولی، عرضی و عمقی سرعت را برداشته‌اند. شکل ۲ اطلاعات هندسی و محل اندازه‌گیری پارامتر سرعت در راهمایی را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که اطلاعات آزمایشگاهی مربوط به V_2 و V_3 کافی نبود و برای صحت‌سنجی از داده‌های مربوط به V_1 و V_4 استفاده شده است.

نرم‌افزار Flow-3D یک مدل مناسب برای حل مسائل پیچیده دینامیک سیالات می‌باشد و قادر است دامنه وسیعی از جریان سیالات را مدل کند. این نرم‌افزار برای مدل کردن جریان‌های سطح آزاد سه‌بعدی غیرماندگار با هندسه پیچیده، کاربرد فراوانی دارد. در فاصله عرضی $1/6$ متر از دیواره کانال و فاصله طولی $1/6$ و $1/6$ متر از دیواره بزرگ، دو عدد ADV قرار



شکل ۲- مشخصات هندسی یک واحد از سازه آزمایشگاهی و محل‌های اندازه‌گیری سرعت (V_1 تا V_4)

ناحیه مورد نظر، با اعمال شرایط مرزی مشخص، به پیش‌بینی رفتار سیال می‌پردازد. مدل مذکور، به‌طور همزمان، معادلات سه‌بعدی ناویر-استوکس و معادله پیوستگی را حل می‌کند. معادله پیوستگی (رابطه ۱) و معادله ناویر-استوکس (رابطه ۲)، برای سیال تراکم‌ناپذیر به‌صورت زیر می‌باشند:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

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

که u_i مؤلفه سرعت لحظه‌ای در جهت i (m/s)، ν لزجت دینامیک سیال ($N \cdot s/m^2$)، ρ چگالی سیال (kg/m^3)، g_i

جدول ۱، مشخصات هندسی سازه راهمایی پیشنهادی در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد. در پژوهش بومباک [۱۴] یک θ ، دو نسبت W_0/B ، شش Lb_2 و دو Lb_1 در نظر گرفته شده است. در جدول ۱، θ زاویه انتهایی دیواره بزرگ نسبت به دیوار حوضچه، W_0 بازشدگی ورودی و خروجی حوضچه و Lb_1/Lb_2 نسبت طول دیواره بزرگ به دیواره کوچک می‌باشد. مقدار پارامتر W_0 بین 0.3 تا 0.6 متر، پارامتر Lb_1 بین $1/45$ تا $1/65$ متر و پارامتر Lb_2 بین 0.3 تا 0.5 متر در نظر گرفته شده است.

۲-۲- معادلات حاکم

Flow-3D یکی از کاربردی‌ترین نرم‌افزارهایی است که با حل عددی معادله جریان سیال به روش CFD روی

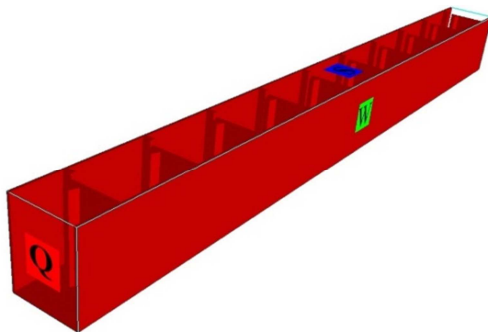
به منظور بررسی اثر پارامترهای تأثیرگذار بر جریان در راه‌ماهی، از آنالیز ابعادی استفاده گردیده است.

مؤلفه شتاب ثقل در جهت i (m/s^2) و p فشار در هر نقطه از سیال (Pa) می‌باشد [۲۱].

جدول ۱- محدوده پارامترهای هندسی در سازه راه‌ماهی پیشنهادی

Lb_1/Lb_2	W_0/B	θ (درجه)
۵/۵	۰/۱۳۶	صفر
۳/۸۷۵	۰/۲۰۴	۹
۲/۹	۰/۲۷۲	۱۸

برای ارزیابی عملکرد بهترین مدل آشفتگی و اندازه سلول‌های محاسباتی از سه معیار ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE^9$)، ضریب تعیین (R^2) و میانگین قدرمطلق خطا (MAE^{10}) استفاده گردیده است. این مقادیر با روابط (۴) تا (۶) بیان شده‌اند.



شکل ۳- شرایط مرزی در شبیه‌سازی راه‌ماهی در نرم‌افزار Flow-3D

هرچه مقدار $RMSE$ و MAE به عدد صفر و مقدار R^2 به عدد یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده تطابق بیشتر بین نتایج عددی و نتایج آزمایشگاهی می‌باشد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E - N)^2}{n}} \quad (4)$$

$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (E - N)^2}{\sum_{i=1}^n E^2 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n N^2}{n}\right)} \right] \quad (5)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |E - N| \quad (6)$$

با ملاحظه پارامترهای هیدرولیکی و زیست‌محیطی راه‌ماهی و استفاده از آنالیز ابعادی، با حذف پارامترهای کم‌اثر، مشاهده شد که پارامترهای مؤثر بر این تحقیق از رابطه (۳) پیروی می‌کنند:

$$\frac{TKE}{V^2} = f\left(\frac{V^2}{g \times y}, \theta, \frac{Lb_1}{W_0}, \frac{Lb_2}{Lb_1}, \frac{B}{W_0}\right) \quad (3)$$

که در آن، TKE انرژی آشفتگی، V سرعت جریان، g شتاب ثقل، y عمق آب، θ زاویه انتهایی دیواره بزرگ نسبت به دیوار حوضچه، Lb_1 طول دیواره بزرگ، Lb_2 طول دیواره کوچک، B عرض حوضچه و W_0 بازشدگی ورودی و خروجی استخر می‌باشند.

۲-۳- مدل‌سازی عددی جریان در راه‌ماهی

در شکل ۳، هندسه راه‌ماهی مدل‌سازی شده به صورت کامل و شرایط مرزی مربوطه نشان داده شده است. برای شبیه‌سازی جریان در مدل راه‌ماهی، از شرط مرزی ورودی دبی (Q) برای سطح ورودی، از شرط مرزی دیوار (W) برای سطح دیوارها و کف مدل، و شرط مرزی سطح (S) برای Z_{max} استفاده شده است؛ چراکه تا وقتی که جریان سیال به این مرز نرسد، شرایط بالای سطح سیال تا بی‌نهایت مشابه شرایط اتمسفر در نظر گرفته می‌شود.

۲-۴- معیار ارزیابی دقت مدل‌سازی عددی

⁹- Root-Mean-Square Error

¹⁰- Mean Absolute Error

در روابط فوق، N_i و E_i به ترتیب داده‌های عددی و آزمایشگاهی و n تعداد کل داده‌ها است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- صحت‌سنجی

در مدل Flow-3D از مدل‌های آشفتگی مختلفی برای شبیه‌سازی استفاده می‌شود. هدف اصلی هر مدل آشفتگی، ایجاد سازوکاری برای تخمین اثر نوسانات آشفتگی بر کمیت‌های متوسط جریان است. در مدل LES، تمام ساختارهای تلاطم که قابل محاسبه با استفاده از شبکه محاسباتی هستند، به‌طور مستقیم محاسبه شده و ساختارهای ریز تقریب زده می‌شوند. در مدل $k-\epsilon$ ، مقیاس طول برخلاف مدل‌های یک معادله‌ای، بدون نیاز به روابط تجربی برآورد می‌شود، اما در مدل آشفتگی RNG برخلاف مدل $k-\epsilon$ ضرایب موجود به روش تجربی محاسبه می‌گردند [۲۴].

در جدول ۲، شاخص‌های آماری R^2 ، RMSE و MAE به منظور بررسی عملکرد مدل عددی، صحت‌سنجی آن برای مدل‌های آشفتگی، همچنین تعداد سلول‌های بهینه برای مدل‌سازی عددی و نتایج پروفیل‌های سرعت در سه راستای مختلف در نقاط مشخص شده در مدل آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه گردیده‌اند. پس از حل میدان جریان سه‌بعدی به وسیله

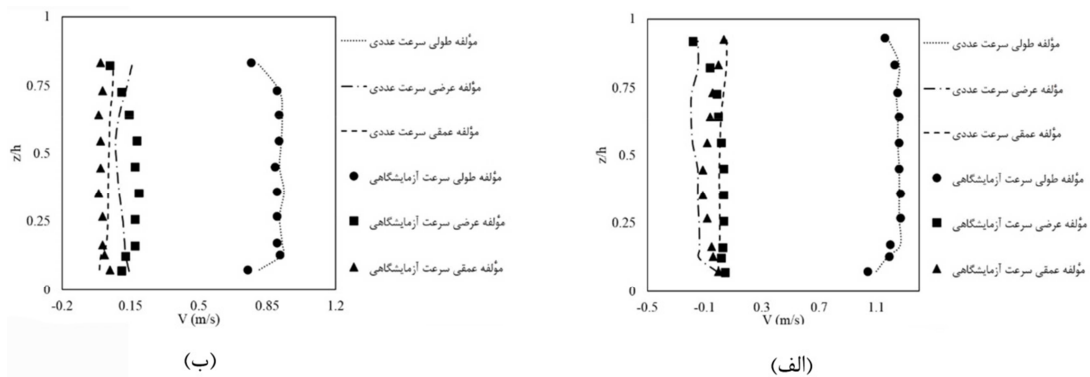
مدل‌های آشفتگی RNG، LES و $k-\epsilon$ و با استفاده از شاخص‌های آماری ذکر شده، بین داده‌های سرعت اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و مقدار متناظر آن در شبیه‌سازی عددی، مشخص گردید که مدل $k-\epsilon$ نتایج مطلوب‌تری را نسبت به سایر مدل‌های آشفتگی نشان می‌دهد. مقدار R^2 در مدل آشفتگی $k-\epsilon$ نسبت به مدل‌های آشفتگی RNG و LES همبستگی بیشتری را نشان می‌دهد. ضریب همبستگی R^2 مدل آشفتگی RNG نزدیک به مدل آشفتگی $k-\epsilon$ است، ولی چون مقدار RMSE و MAE مدل آشفتگی $k-\epsilon$ کمتر است، حاکی از دقت بیشتر آن نسبت به مدل RNG می‌باشد. سپس، با تغییر اندازه سلول شبکه حل، شبکه حل بهینه ارزیابی گردید که نتایج آن در جدول ۳ نشان داده شده است. به دلیل چشم‌گیر نبودن اختلاف دقت سلول ریز با متوسط و مقرون به صرفه بودن شبکه حل متوسط در زمان و هزینه، شبکه حل با اندازه سلول متوسط انتخاب شد. ضمناً، به‌منظور مقایسه نتایج مدل عددی و مدل آزمایشگاهی، پروفیل قائم سرعت طولی جریان در دو نقطه‌ی V_1 و V_4 در سه راستای مختلف برای مدل آشفتگی و تعداد سلول‌های بهینه در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، تطابق خوبی بین مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی برقرار شده است.

جدول ۲- مقایسه دقت مدل‌های آشفتگی

مدل آشفتگی	R^2	RMSE	MAE
RNG	۰/۹۷۲	۰/۰۹۸	۰/۰۷۲
LES	۰/۹۳	۰/۱۱	۰/۰۹۵
$k-\epsilon$	۰/۹۸	۰/۰۸	۰/۰۵

جدول ۳- مقایسه دقت شبکه‌بندی‌های مورد استفاده

اندازه شبکه	تعداد سلول‌ها	R^2	RMSE	MAE
ریز	۱۱۶۰۰۰۰	۰/۹۸۸	۰/۰۹۸	۰/۰۶۸
متوسط	۸۵۰۰۰۰	۰/۹۷۸	۰/۰۸۳	۰/۰۷۳
درشت	۶۰۰۰۰۰	۰/۹۴	۰/۰۸۵	۰/۰۵۴



شکل ۴- مقایسه پروفیل قائم سرعت استخراج شده از نرم‌افزار و مدل آزمایشگاهی، (الف) V_1 و (ب) V_4

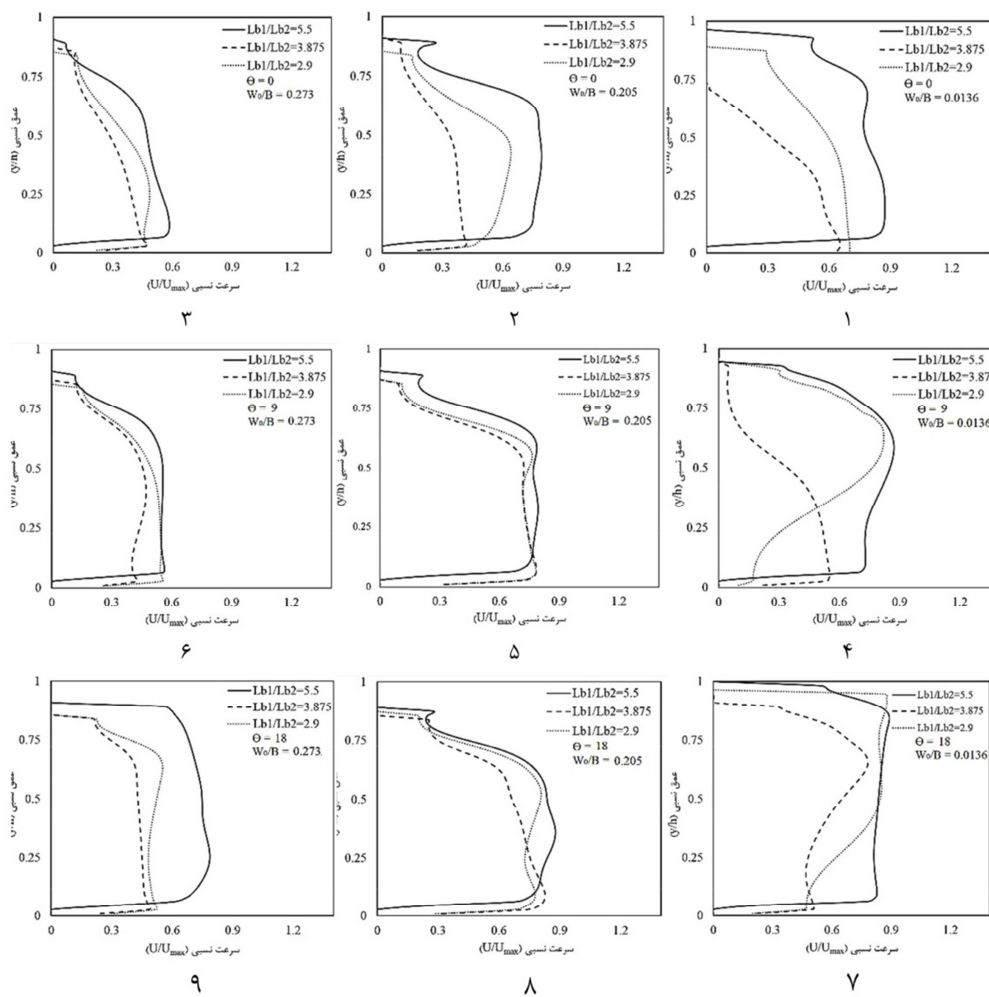
۲-۳- تحلیل سرعت

تغییرات پروفیل سرعت در عمق، روی عبور ماهیان از داخل راه‌ماهی تأثیرگذار است و از معیارهای مهم در طراحی ماهی‌رو می‌باشد. شکل ۵، مقادیر محاسبه شده سرعت عمقی در حوضچه میانی سازه راه‌ماهی را نشان می‌دهد. همچنین، این مؤلفه در خط میانی حوضچه‌ها نشان داده شده است. در این ناحیه، مقادیر سرعت از بخش‌های دیگر استخر بیشتر بوده و ناحیه بحرانی برای عبور ماهی می‌باشد. هرچه سرعت در این محور کمتر باشد، عبور ماهی آسان‌تر است. در این شکل، پروفیل سرعت در استخر با توجه به پارامترهای Lb_1/Lb_2 و θ قابل مشاهده می‌باشد. به منظور بی‌بعد نمودن سرعت، سرعت در هر نقطه از استخر به سرعت بیشینه استخر تقسیم شده است. سرعت در پایین‌ترین تراز استخر صفر است. با فاصله گرفتن جریان از کف، سرعت به مقدار بیشینه خود رسیده و در ادامه، با افزایش ارتفاع، از مقدار سرعت کاسته شده است. با توجه به شکل ۵، در مدل‌های مختلف، به دلیل تغییر هندسه حوضچه‌ها، پروفیل‌های سرعت متفاوتی به دست آمده است. با توجه به درصد تغییرات مؤلفه طولی سرعت مشاهده می‌شود که پارامتر $Lb_1/Lb_2 = 5/5$ تمام نمودارها بیشترین سرعت و پارامتر $Lb_1/Lb_2 = 3/875$ کمترین سرعت را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، با افزایش مقدار پارامتر W_0 ، سرعت کاهش یافته است. در تمامی مدل‌ها، میانگین درصد کاهش سرعت از مدل $Lb_1/Lb_2 = 5/5$ به مدل‌های

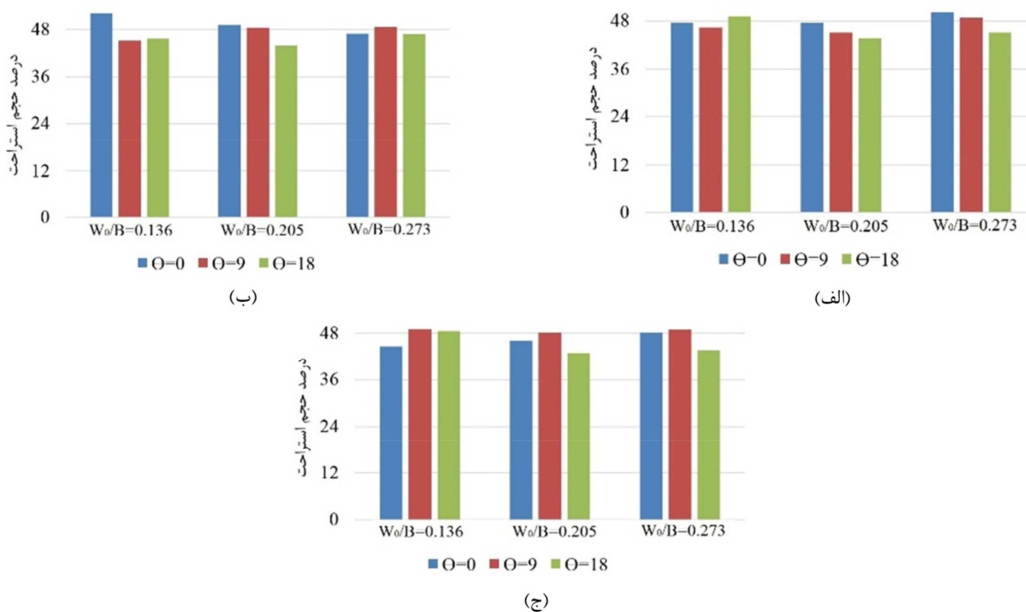
در سازه راه‌ماهی، نواحی با سرعت کم جریان برای استراحت ماهیان اختصاص می‌یابد. طبق نظر محققان در ناحیه استراحت، سرعت جریان باید از 0.3 متر بر ثانیه کمتر باشد [۲۲]. یکی از معیارهای مقایسه سازه‌های راه‌ماهی، تعیین حجم ناحیه استراحت ماهیان می‌باشد. برای دست یافتن به این پارامتر، تعداد سلول‌هایی که سرعت در آن کمتر از 0.3 متر بر ثانیه می‌باشد؛ تعیین گردیده است، سپس این تعداد سلول تقسیم بر کل سلول‌های داخل حوضچه شده است. سلول‌هایی با سرعت صفر که در مجاورت دیوارها می‌باشند در محاسبه ناحیه استراحت منظور نگردیده‌اند.

در نمودارهای میله‌ای ارائه شده در شکل ۶، برای دو پارامتر Lb_1/Lb_2 و θ ، درصد حجم استراحت مقایسه گردیده‌اند. همانطور که در این شکل مشخص است، با افزایش θ از صفر به ۹ و از ۹ به ۱۸ درجه، میانگین درصد حجم استراحت به صورت میانگین $3/3$ افزایش می‌یابد. این مقادیر حجم به صورت متوسط از ۴۳ تا ۵۳ درصد در مدل‌های مختلف تغییر کرده است. با مقایسه نمودارها در این شکل، مشخص گردید که تأثیر θ

نسبت به Lb_1/Lb_2 بر حجم ناحیه استراحت ماهیان بیشتر می‌باشد.



شکل ۵- مؤلفه طولی سرعت در عمق راهمایی با هندسه‌های مختلف

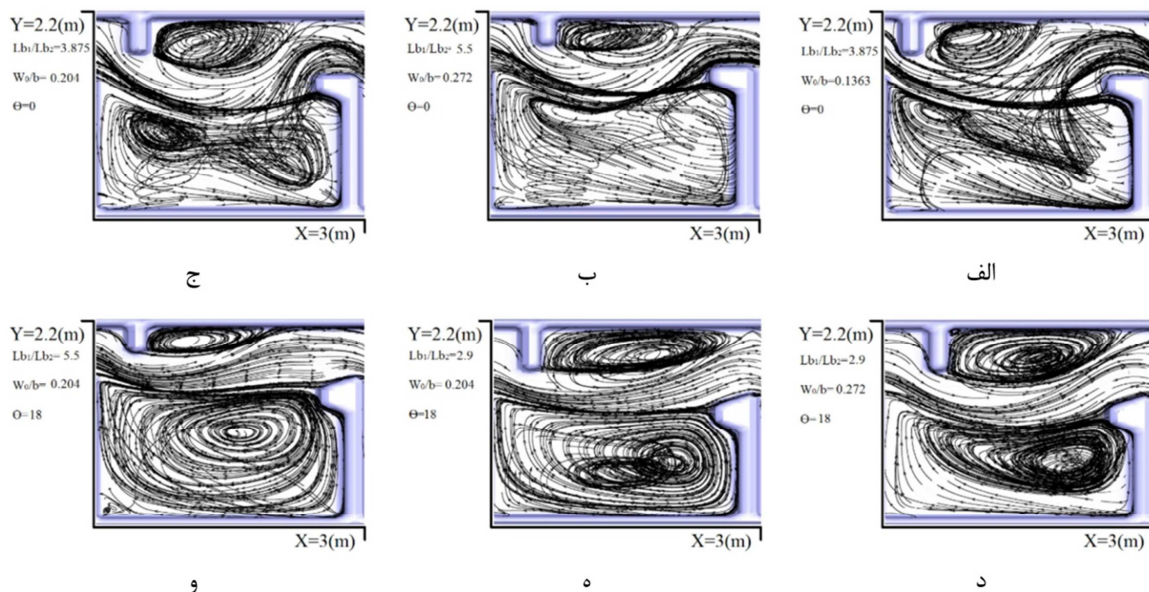


شکل ۶- بررسی اثر نسبت طول دیواره بزرگ به دیواره کوچک بر حجم استراحت ماهیان، (الف) $Lb_1/Lb_2 = 5/5$ ،

(ب) $Lb_1/Lb_2 = 3/875$ و (ج) $Lb_1/Lb_2 = 2/9$

هرچه خطوط جریان در حوضچه‌ها نامنظم‌تر باشد، نواحی استراحت بیشتری تشکیل می‌شود و این امر برای سهولت در مهاجرت ماهی‌ها امری مفید است. طبق تحقیقات انجام گرفته توسط پژوهشگران، محدوده‌های با جریان دورانی توسط جریان‌های اصلی و مستقیم عبوری از یکدیگر جدا می‌گردند [۲۵]. محدوده با جریان دورانی، فضای مناسبی برای استراحت ماهی‌ها می‌باشد. این فضا هرچقدر بیشتر باشد، امکان استراحت برای ماهی‌ها فراهم‌تر است. بنابراین، در شکل‌های ۷-الف تا ۷-ج توسعه این فضا و کاهش مسیر اصلی موجب فراهم شدن فضای بیشتر برای ماهی‌ها می‌گردد. در حالی که در شکل‌های ۷-د تا ۷-و محدوده‌های جریان دورانی فضای کمتری در مسیرهای عبور جریان در سلول‌ها دارند.

در شکل ۷، به منظور بررسی خطوط جریان در حوضچه، نسبت به ترسیم الگوی جریان در میانه عمق $z/h = 0.5$ سه نمونه با بیشترین حجم استراحت و سه نمونه با کمترین حجم استراحت اقدام گردید. در شکل‌های ۷-الف تا ۷-ج خطوط جریان برای بیشترین نسبت حجم ارائه شده است. نواحی با سرعت کمتر از 0.3 متر بر ثانیه، مساحت بیشتری را نسبت به شکل‌های ۷-د تا ۷-و دارند. به عبارتی، محدوده الگوی پر سرعت در شکل‌های ۷-د تا ۷-و و که خطوط جریان داخل حوضچه بسته شده‌اند، مساحت بیشتری نسبت به شکل‌های ۷-الف تا ۷-ج دارند. به عبارت دیگر، با افزایش محیط‌هایی با سرعتی کمتر از 0.3 متر، نواحی برای استراحت ماهیان ایجاد می‌شود. با بررسی انجام شده مشخص گردید که



شکل ۷- بررسی نواحی دورانی جریان در حوضچه استراحت ماهیان

۳-۴- تحلیل انرژی آشفتگی

انرژی آشفتگی وابسته به مؤلفه‌های سرعت نوسانی است [۹]:

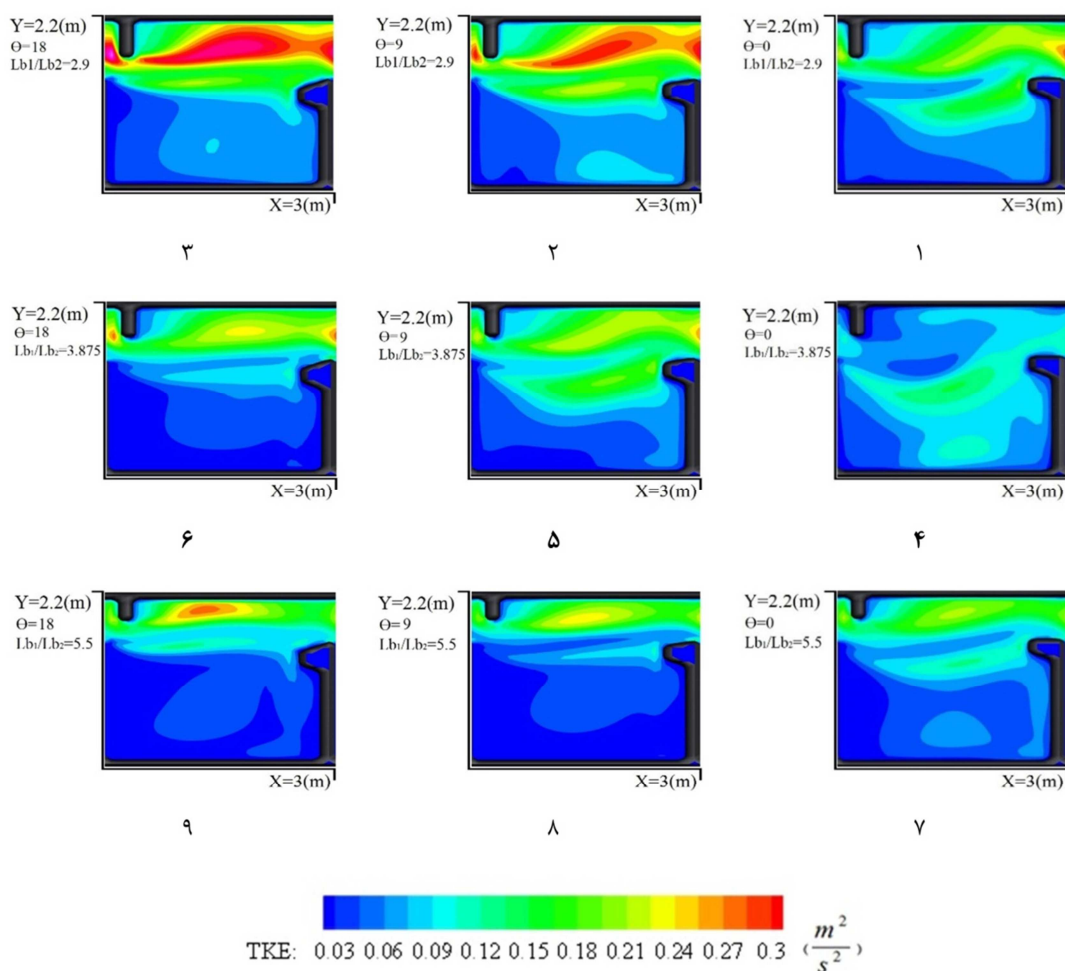
$$TKE = \frac{1}{2} (V_x'^2 + V_y'^2 + V_z'^2) \quad (7)$$

تأثیر پارامتر θ بر انرژی آشفتگی چشم‌گیر بوده است. به طوری که با افزایش زاویه انتهایی دیواره بزرگ نسبت به دیوار حوضچه، انرژی آشفتگی به‌طور متوسط ۳۰/۶۶ درصد افزایش یافته است. همچنین، با افزایش

انرژی آشفتگی از دیگر پارامترهای مهم در طراحی سازه راه‌ماهی می‌باشد. آشفتگی در جریان می‌تواند به ماهی‌ها کمک نماید که با جذب شدن به سمت آشفتگی در مسیر جریان برای حرکت به سمت حوضچه بعدی قرار گیرند. مطالعات انجام شده نشان داده‌اند که انرژی آشفتگی می‌تواند در عبور موفقیت‌آمیز ماهی از طریق سازه راه‌ماهی نقش مهمی را داشته باشد. طبق رابطه (۷)،

بیشتری را نشان می‌دهد. با افزایش زاویه θ ، محدوده‌های دارای آشفتگی حداکثر در مسیر عبوری جریان در مجاورت دیواره‌های کوچک و بزرگ افزایش می‌یابد. همچنین، برای یک θ مشخص و تغییرات Lb_1/Lb_2 می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش این مقدار، محدوده‌های جریان با آشفتگی‌های بیشینه کاهش می‌یابند.

نسبت Lb_1/Lb_2 ، انرژی آشفتگی به طور متوسط $9/82$ درصد افزایش نسبی داشته است. شکل ۸، انرژی آشفتگی ۹ مدل تحلیلی راهمایی در یک W_0 ثابت را نشان می‌دهد. همانگونه که در تمام بخش‌های این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش θ ، انرژی آشفتگی افزایش می‌یابد، چون جریان آب عبوری از ورودی حوضچه به سمت دیواره حوضچه هدایت می‌شود، آشفتگی در آن قسمت متراکم‌تر شده و مقدار عددی



شکل ۸- آشفتگی جریان در حوضچه راهمایی

۴- نتیجه‌گیری

دیواره بزرگ نسبت به دیواره حوضچه (θ)، بازشدگی ورودی و خروجی حوضچه (W_0) و نسبت طول دیواره بزرگ به دیواره کوچک (Lb_1/Lb_2) در سه حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. نتیجه‌گیری حاصل از این پژوهش به شرح زیر است:

در تحقیق حاضر، راهمایی با بازشدگی قائم با استفاده از مدل عددی Flow-3D مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. نتایج مدل آزمایشگاهی مرجع [۱۴] نیز برای صحت‌سنجی و مقایسه تغییرات مشخصه‌های جریان در مدل عددی تحقیق حاضر استفاده شد. زاویه انتهایی

دیواره بزرگ نسبت به دیواره حوضچه، این انرژی به طور متوسط ۳۰/۶۶ درصد افزایش یافته است. ۵- به طور کلی، تغییرات نسبت طول دیواره بزرگ به دیواره کوچک، سرعت آب در راه‌ماهی را کاهش داده و می‌تواند روند حرکت ماهی‌ها را به بالادست آسان‌تر کند. همچنین، حجم محیط استراحت و انرژی آشفتگی با افزایش زاویه انتهایی دیواره نسبت به دیواره حوضچه افزایش می‌یابند.

این تحقیق برای راه‌ماهی نوع بازشدگی قائم صورت گرفته و نرم‌افزار Flow-3D به‌خوبی توانسته جریان را در این سازه مدل‌سازی نماید. لذا پیشنهاد می‌گردد عملکرد این نرم‌افزار برای مدل‌سازی انواع دیگر راه‌ماهی‌ها از جمله راه‌ماهی استخر- سرریزی و یا دنیل استفاده گردد. در این تحقیق، تغییرات هندسی در حوضچه بررسی گردیده است. پیشنهاد می‌گردد عملکرد حوضچه تحت شرایط مختلف هیدرولیکی تغییرات دبی، عدد فرود و شیب بستر مورد بررسی قرار گیرد.

۱- بهترین مدل آشفتگی در این پژوهش، با توجه به مش بهینه، مدل $k-\epsilon$ بوده است. مقادیر شاخص‌های آماری برای این مدل $R^2 = 0/98$ ، $RMSE = 0/08$ و $MAE = 0/05$ به‌دست آمده است.

۲- مؤلفه طولی سرعت در عمق راه‌ماهی با کاهش نسبت Lb_1/Lb_2 به طور متوسط ۲۵/۱۱ درصد کاهش داشته است.

۳- بررسی‌های انجام شده در حجم استراحت حوضچه نشان داد که با افزایش پارامتر θ ، حجم ناحیه استراحت ۳/۶ درصد افزایش داشته است و تغییرات این پارامتر با تغییر Lb_1/Lb_2 بین ۵ تا ۸ درصد بوده است. لازم به ذکر است که در حوضچه‌ها، با تشکیل جریان دورانی، محیطی ایمن برای استراحت ماهیان فراهم می‌شود.

۴- انرژی آشفتگی یکی دیگر از پارامترهای مهم در طراحی راه‌ماهی است که با افزایش نسبت Lb_1/Lb_2 ، به طور متوسط ۹/۸۲ درصد افزایش داشته است. همچنین، با افزایش زاویه انتهایی

مراجع

- [1] Rajaratnam, N., & Katopodis, C. (1984). "Hydraulics of Denil fishways", *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(9), 1219-1233
- [2] Wu, S., Rajaratnam, N., & Katopodis, C. (1999). "Structure of flow in vertical slot fishway", *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(4), 351-360.
- [3] 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.
- [4] Rajaratnam, N., Katopodis, C., & Flint-Petersen, L. (1987). "Hydraulics of two-level Denil fishway", *Journal of Hydraulic Engineering*, 113(5), 670-674.
- [5] Liu, M., Rajaratnam, N., & Zhu, D. Z. (2006). "Mean flow and turbulence structure in vertical slot fishways", *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(8), 765-777.
- [6] Bermúdez, M., Puertas, J., Cea, L., Pena, L., & Balairón, L. (2010). "Influence of pool geometry on the biological efficiency of vertical slot fishways", *Ecological Engineering*, 36(10), 1355-1364.
- [7] Tarrade, L., Texier, A., David, L., & Larinier, M. (2008). "Topologies and measurements of turbulent flow in vertical slot fishways", *Hydrobiologia*, 609(1), 177.
- [8] Tarrade, L., Pineau, G., Calluau, D., Texier, A., David, L., & Larinier, M. (2011). "Detailed experimental study of hydrodynamic turbulent flows generated in vertical slot fishways", *Environmental Fluid Mechanics*, 11(1), 1-21.
- [9] Marriner, B. A., Baki, A. B. M., Zhu, D. Z., Thiem, J. D., Cooke, S. J., & Katopodis, C. (2014). "Field and numerical assessment of turning pool hydraulics in a vertical slot fishway", *Ecological Engineering*, 63, 88-101.
- [10] Bombáč, M., Novak, G., Mlačnik, J., & Četina, M. (2015). "Extensive field measurements of flow in vertical slot fishway as data for validation of numerical simulations", *Ecological Engineering*, 84, 476-484.

- [11] An, R., Li, J., Liang, R., & Tuo, Y. (2016). "Three-dimensional simulation and experimental study for optimising a vertical slot fishway", *Journal of Hydro-environment Research*, 12, 119-129.
- [12] Kim, S., Yu, K., Yoon, B., & Lim, Y. (2012). "A numerical study on hydraulic characteristics in the ice Harbor-type fishway", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 16(2), 265-272.
- [13] Puertas, J., Pena, L., & Teijeiro, T. (2004). "Experimental approach to the hydraulics of vertical slot fishways", *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(1), 10-23.
- [14] Bombač, M., Četina, M., & Novak, G. (2017). "Study on flow characteristics in vertical slot fishways regarding slot layout optimization", *Ecological Engineering*, 107, 126-136.
- [15] Bravo-Córdoba, F. J., Sanz-Ronda, F. J., Ruiz-Legazpi, J., Valbuena-Castro, J., & Makrakis, S. (2018). "Vertical slot versus submerged notch with bottom orifice: Looking for the best technical fishway type for Mediterranean barbels", *Ecological Engineering*, 122, 120-125.
- [16] Fuentes-Pérez, J. F., Silva, A. T., Tuhtan, J. A., 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.
- [17] Quaranta, E., Katopodis, C., & Comoglio, C. (2019). "Effects of bed slope on the flow field of vertical slot fishways", *River Research and Applications*.
- [18] Ehsani, R., Hassanzadeh, Y., Mojtahedi, A., Sanei, M., & Hedayati, H. (2018). "Experimental study of canoe-fishway hydraulic conditions", *Irrigation Sciences and Engineering*, 40(4), 61-75.
- [19] Baharvand, S., & Lashkar-Ara, B. (2019). "Determining the effectiveness of resting pool area in vertical slot fishways type 1 to pass chinook salmon", *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 48(4), 1-12.
- [20] Badri, S. S., Ayyoubzadeh, S. A., & Yasi, M. (2019). "Nature-like fishway design and evaluation of its performance with habitat simulation model of PHABSIM", *Iranian Journal of Ecohydrology*, 6(1), 1-13.
- [21] Smith, H. D. (2004). Modeling the flow and scour around an immovable cylinder, Doctoral dissertation, Ohio State University, USA.
- [22] Quaranta, E., Katopodis, C., Revelli, R., & Comoglio, C. (2017). "Turbulent flow field comparison and related suitability for fish passage of a standard and a simplified low gradient vertical slot fishway", *River Research and Applications*, 33(8), 1295-1305.
- [23] Chorda, J., Maubourguet, M. M., Roux, H., Larinier, M., Tarrade, L., & David, L. (2010). "Two-dimensional free surface flow numerical model for vertical slot fishways", *Journal of Hydraulic Research*, 48(2), 141-151.
- [24] Ghasemzadeh, F. (2013). Simulation of hydraulic problems in flow-3D. 2nd ed., Noavar Publ., Tehran, Iran.
- [25] Yagci, O. (2017). "Hydraulic aspects of pool-weir fishways as ecologically friendly water structure", *Ecological Engineering*, 36, 36-46.