نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق آبی
سال سوم / شماره دهم / پاییز ۱۳۹۵

Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant
3rd Year / No. 10 / December 2016

بررسی شرایط هیدرولیکی راه‌ماهی از نوع کانال ماهی-قایق‌رو با استفاده از مدل عددی Flow-3D

روح الله احسانی*[۱]
یوسف حسن‌زاده[۲]
علی رضا مجتهدی[۳]
مجتبی صانعی[۴]

چکیده

راه‌ماهی‌ها، به دلیل نقش مهمی که در مهاجرت آبزیان و بقا نسل آن‌ها دارند، از اجزای اصلی سازه‌های تقاطعی از جمله سدها هستند. در این تحقیق مدل عددی کانال ماهی-قایق‌رو با استفاده از نرم افزار Flow-3D تهیه شده است. به منظور صحت‌سنجی از نتایج مدل آزمایشگاهی استفاده شد. با مقایسه نتایج مدل عددی با مدل آزمایشگاهی، مشخص شد که میزان خطا برای عمق و سرعت جریان، به ترتیب ۳ و ۱۱/۵ درصد است. سپس با استفاده از مدل عددی، به ازای دبی‌های بهینه، مقادیر سرعت جریان در راستاهای مختلف حوضچه و بازشدگی‌ها ارائه شد. یک ناحیه کم سرعت در داخل حوضچه‌ها، بعد از هر برس تشکیل می‌شود که بهترین مکان برای استراحت ماهی‌ها است. سرعت‌های طولی بیشینه، در بازشدگی و همچنین در جلوی بازشدگی درحوضچه، اتفاق می‌افتد. با ارایه مقادیر آشفتگی جریان در نقاط مختلف کانال، مشخص گردید که بیشینه آشفتگی در بازشدگی کانال اتفاق می افتد. همچنین مشخص شد که سرعت ها و آشفتگی ها در نقاط مختلف کانال در محدوده مجاز قرار دارند.

واژه‌های کلیدی

کانال ماهی- قایق‌رو، مدل آزمایشگاهی، مدل عددی، سرعت انفجاری، سرعت مداوم.

۱*. دانشجوی دکترای مهندسی عمران، سازه های هیدرولیکی، دانشگاه تبریز، ehsani_2010@yahoo.com.
۲. استاد گروه مهندسی آب، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز.
۳. استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز.
۴. دانشیار گروه مهندسی رودخانه، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۵/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۰/۰۹

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-05-20]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.10.6.8]

مقدمه

در ۶۰ سال گذشته انواع راه‌ماهی در نقاط مختلف جهان طراحی و اجرا شده است که می‌توان آن‌ها را به شکل زیر تقسیم‌بندی نمود:

الف- حوضچه و سرریز[۱]

ب- بازشدگی قائم[۲]

ج- دنیل[۳]

د- کانال ماهی- قایق رو[۴]

راه‌ماهی حوضچه و سرریز شاید قدیمی‌ترین نوع راه‌ماهی مورد استفاده باشد و در سرتاسر دنیا نمونه‌هایی از آن دیده می‌شود. این نوع راه‌ماهی‌ها که شکلی مانند استخرهای پلکانی درست می‌کنند، ترکیبی از یک سری حوضچه‌های متناوب هستند که با سرریزهای لبه تیز از هم جدا شده‌اند. هر کدام از این سرریزها دارای یک شکاف در قسمت بالایی هستند که برای عبور جریان در نظر گرفته شده است. همچنین در قسمت تحتانی سرریزها یک روزنه با ابعاد مناسب برای عبور ماهی در نظر گرفته شده است. با ایجاد جریان آبشاری روی سرریزها و جریان گردابی در حوضچه، انرژی مستهلک شده و سرعت کنترل می‌شود. ماهیان از حوضچه به حوضچه پریده یا از میان روزنه یا شوتها شنا می‌کنند. راه‌ماهی بازشدگی قائم تقریباً مشابه راه‌ماهی حوضچه و سرریز است با این تفاوت که برای عبور ماهی عمق بازشدگی برابر ارتفاع سرریز خواهد بود. بنابراین در این راه‌ماهی، نیازی به پرش از روی سرریز نیست و ماهی در هر عمقی قادر به شنا و عبور از مجرا است (کاتوپودیس[۵]، ۱۹۸۱).

راه‌ماهی دنیل نیز از انواع راه‌ماهی است که به وسیله جی-دنیل در سال ۱۹۰۸ معرفی شد. این نوع راه‌ماهی توسط کاتوپودیس (۱۹۸۱) مورد مطالعه دقیق قرار گرفته است. راه-ماهی دنیل ازیک کانال مستقیم مستطیلی شیب‌دار تشکیل گردیده که درون آن قاب‌هایی متعادل قرارگرفته‌اند. نحوه قرارگیری قاب‌ها باعث اتلاف انرژی زیاد جریان گردیده و جریان نسبتاً مناسبی را برای عبور ماهی در یک مسیر مستقیم و پیوسته فراهم می کند(کاتوپودیس، ۱۹۹۲).

تحقیقات در زمینه هیدرولیک جریان راه‌ماهی دنیل توسط راجاراتنام[۶] و همکاران (۱۹۹۲) انجام شد که نتایج بسیار جالبی در طراحی دنیل‌ها به‌دست آمد.

عوامل مؤثر در شنا کردن ماهی‌ها فقط میدان سرعت و عمق آب نبوده میزان آشفتگی نیز مؤثر است. آشفتگی اضافی می تواند مسیر حرکت ماهی‌ها را مسدود کند. توسط کلی[۷] (۱۹۹۵) پیشنهاد شد که در طراحی راه‌ماهی نقاط با آشفتگی زیاد مشخص شده و نحوه تاثیر آنها بر رفتار ماهی تعیین شود. برای حل چنین مسائلی می توان روش‌های عددی را به کار بست.

با انجام مدل عددی جریان روی یک سرریز اوجی به روش دینامیک سیالات محاسباتی و به‌کار بستن مدل Fluent توسط ساویج[۸] و جانسون[۹] (۲۰۰۱) و مقایسه آن با داده‌های آزمایشگاهی، نشان داده شد که با دینامیک سیالات محاسباتی می‌توان فشارها و دبی را در چنین سازه‌هایی پیش‌بینی کرد. با استفاده از مدل عددی جریان آشفته k-ε و مدل حجم سیال VOF توسط چن[۱۰] وهمکاران (۲۰۰۱)، سرریزهای پلکانی شبیه‌سازی شد. در این شبیه‌سازی از شبکه‌بندی بی‌سازمان برای سوارکردن مرزهای نامنظم استفاده شد. با مقایسه نتایج این مدل با داده‌های آزمایشگاهی با دقت مناسب، نشان داده شد که شبیه‌سازی عددی آشفتگی روشی مؤثری برای شبیه-سازی سرریزهای پلکانی است.

با شبیه‌سازی جریان توسط کاریکا[۱۱] (۲۰۰۵)، با استفاده از روش حجم سیال (VOF) و مدل آشفتگی k-ε و شبکه‌بندی ترکیبی با سازمان و بی سازمان سطح آزاد در راه‌ماهی سرریز اوجی با مدل Fluent نتایج رضایت‌بخشی در مقایسه با مدل فیزیکی به‌دست آمد.

مدل عددی راه‌ماهی نوع بازشدگی قائم توسط سئا[۱۲] و همکاران(۲۰۰۷)، با استفاده از مدل عددی آب‌های کم‌عمق و شبیه‌سازی آشفتگی با بکارگیری سه مدل طول اختلاط، k-ε و تنش جبری انجام شد. نتایج نشان داد که استفاده از مدل آشفتگی را می توان به عنوان ابزاری برای طراحی عملی استفاده کرد.

[1] Weir fishway
[2] Vertical Slot Fishways
[3] Denil Fishways
[4] Canoe-Fishway
[5] Katopodis
[6] Rajaratnam
[7] Clay
[8] Savage
[9] Johnson
[10] Chen
[11] Karrica
[12] Sea

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-05-20]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.10.6.8]

با بررسی وضعیت جریان و پروفیل سرعت در راه‌ماهی دنیل توسط محمودی کردستانی و شفاعی بجستان (۱۳۷۷)، نتایج ایشان نشان داد که راه ماهی دنیل در یک شرایط یکسان از نظر ابعادی، دبی درحدود دو برابر دبی عبوری از راه ماهی ازنوع بازشدگی قائم را از خود عبور می دهد و راه ماهی از نوع دنیل با تشکیل یک ناحیه کم‌سرعت در راه‌ماهی و امکان عبور ضعیف‌ترین شناگران از انواع مختلف ماهی‌ها، به راه ماهی از نوع بازشدگی قائم برتری دارد.

با شبیه‌سازی الگوی جریان در سازه راه‌ماهی با استفاده از مدل کامپیوتری Fluent توسط معیری و حسین‌زاده (۱۳۸۷)، نشان داده شد که پروفیل سطح آب در راه‌ماهی به صورت جریان رویه‌ای است که با نتایج داده‌های فیزیکی تطابق دارد و همچنین یکی از عواملی که باعث استهلاک انرژی در راه ماهی‌های استخر و سرریز می شود، جریان گردشی موجود در هریک ازاستخرها است. عباسی چناری و کمان بدست (۱۳۹۰) در تحقیقی به شبیه سازی عددی آشفتگی جریان و استهلاک انرژی در سازه راه‌ماهی بوسیله مدل Flow-3D پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که در اعماق کمتر سرعت بیشتر است و در نزدیک دیواره ها سرعت کمتر است. همچنین یکی از عواملی که باعث استهلاک انرژی در راه‌ماهی‌های استخر و سرریز می‌شود، جریان گردشی موجود در هریک از استخرها است. در تحقیقات قلاوند و لشکرآرا (۱۳۹۱) هیدرولیک جریان عبوری از راه‌ماهی دنیل با بهره‌گیری از مدل Flow-3D مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج حاصل از تحقیق ایشان نشان داد که مدلFlow-3D به عنوان یک ابزار پر قدرت جهت شبیه‌سازی جریان در سازه‌های با آشفتگی شدید مانند راه‌ماهی دنیل قابل بهره‌برداری است. در تحقیقات زلکی زاده و کیامنش (۱۳۹۲)، با شبیه‌سازی راه‌ماهی حوضچه و سرریز، شیب بهینه‌ای برای این نوع راه‌ماهی بدست آمد.

ایده استفاده از کانال ماهی- قایق رو، نخستین بار در سال ۲۰۰۲ توسط رینهارد هاسینگر[1] مطرح و در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه کاسل[2] بصورت آزمایشی انجام شد. معرفی و ارائه اصول کلی در طراحی و بهره برداری کانال ماهی-قایق‌رو توسط هاسینگر (۲۰۰۴) انجام گرفت. ایده این تحول جدید از این فکر نشأت گرفت که تعداد زیادی از قلم‌های نازک زبر الاستیکی می تواند از یک طرف انرژی را بخوبی مستهلک کند و از طرف دیگر قایق‌ران بدون هیچ گونه مشکلی از داخل آن عبور کند. جنس ساقه‌های علفی باید به اندازه کافی سفت باشد تا افت انرژی لازم را برای کمک به صعود ماهی فراهم کند و نیز به اندازه کافی منعطف باشد تا قایق بدون اینکه آسیبی ببیند از روی آن رد شود و پس از عبور قایق ساقه‌ها به حالت اولیه خود برگردد. حدود نیمی از تجربه‌های اجرا شده این نوع تاسیسات به عنوان راه‌ماهی و نیمی دیگر آنها به عنوان یک سازه ترکیبی برای عبور ماهی‌ها و معبرقایق‌ها هستند. در شکل (۱) یک نمونه از این نوع راه‌ماهی نشان داده شده است. در سال ۲۰۰۷ دانشگاه کاسل با همکاری موسسه تحقیقات و وزارت محیط زیست و آب آلمان تحقیقاتی در زمینه حفاظت از نوعی صدف رودخانه‌ای با استفاده از جانمایی علف‌های مصنوعی انجام داده است. در انگلستان نخستین بار توسط گروه هالکرو[3] در سال ۲۰۰۸، در منطقه پارترز لاک[4] روی رودخانه مدوای، کانال ترکیبی ماهی–قایق‌رو طراحی و ساخته شد. در سال ۲۰۰۹ در ۱/۵ کیلومتری بالادست آن دومین نمونه این نوع راه‌ماهی در منطقه الدریگس لاک[5] و بعد در سال ۲۰۱۰، در منطقه ایست‌لاک[6] توسط همین گروه طراحی و اجرا شد. در این سایت، بر خلاف دو سایت قبلی، عرض کانال به سه قسمت برای عبور ماهی ، مارماهی و قایق تقسیم شده است. در سالیان اخیر، توسعه مطالعات و احداث سدهای لاستیکی در فواصل نزدیک به دریا، بر روی رودخانه‌های شمال کشور، لزوم احداث راه‌ماهی‌های منطبق با محیط زیست را ضروری می‌سازد. احداث سدهای لاستیکی در نزدیکی دریا، موجب قطع تردد ماهیگیران و در نتیجه ایجاد تنش‌های اجتماعی متعددی گردیده است. کانال ماهی-قایق‌رو ایده‌ای نو برای راه‌ماهی است که بیشینه انطباق را با شرایط زیست-محیطی داشته و در آن برای ایجاد تلفات انرژی در مجرای عبور ماهی، از برس‌های مشابه پوشش گیاهی مصنوعی، استفاده شده است که امکان عبور قایق‌های کوچک ماهی‌گیری را فراهم می کند. (هدایتی و همکاران، ۱۳۹۱).

در استان مازندران یک نمونه کانال ماهی-قایق‌رو برای سد لاستیکی تجن توسط هدایتی و همکاران (۱۳۹۱)، طراحی شده و با نمونه کلاسیک آن یعنی راه‌ماهی شیار قائم مقایسه

[1] Reinhard Hassinger
[2] kassel
[3] Halcrow
[4] Porters Lock
[5] Eldridges Lock
[6] East Lock

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-05-20]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.10.6.8]

شده است. با انجام مدل آزمایشگاهی کانال ماهی-قایق‌رو، توسط احسانی و همکاران (۱۳۹۵)، عمق و سرعت جریان در نقاط مختلف کانال به ازای شیب ۴ درصد و در دبی‌های مختلف (در عمق‌های بالا و پایین تراز استغراق) تعیین شد. با انتخاب دبی‌های بهینه، وضعیت سرعت جریان به‌منظور عبور ماهی طرح مورد بررسی قرار گرفت.

سرعت و آشفتگی جریان، پارامترهای مهم به منظور عبور ماهی از راه‌ماهی هستند. درصورت بالابودن سرعت و آشفتگی، امکان عبور ماهی از راه‌ماهی وجود ندارد. در این تحقیق پارامترهای مذکور در راه‌ماهی از نوع ماهی-قایق‌رو با استفاده از مدل عددی مورد ارزیابی قرار گرفته است. توزیع سرعت و آشفتگی جریان در حوضچه و بازشدگی در راستاهای مختلف کانال مشخص شده است و نقاط با سرعت و آشفتگی بیشینه و کمینه تعیین گردیده است. مقادیر بیشینه سرعت و آشفتگی در کانال تعیین شدند و با مقادیر مجاز برای عبور ماهی طرح مقایسه شدند. جهت صحت سنجی مدل، از نتایج مدل آزمایشگاهی احسانی و همکاران(۱۳۹۵)، استفاده شد.

شکل(۱): راه‌ماهی از نوع کانال ماهی – قایق رو

مواد و روش‌ها

مدل آزمایشگاهی

در این تحقیق از نتایج مدل آزمایشگاهی احسانی و همکاران (۱۳۹۵) مورد استفاده قرار گرفت. در این مدل به منظورشبیه-سازی کانال ماهی-قایق‌رو، از یک فلوم مستطیلی به عرض۳۰سانتیمتر، ارتفاع۶۰ سانتیمتر وطول۱۰ متر و شیب ۴درصد، استفاده شد. ارتفاع ساقه‌های برس ۱۰سانتیمتر و قطر آنها ۶ میلیمتر است. دبی جریان توسط شیری در بالادست تنظیم می‌شود. مخزن آرام‌کننده جریان نیز در بالادست جهت آرام‌سازی جریان قبل از ورود به فلوم، تعبیه شد. برای اندازه-گیری دبی جریان در پایین‌دست از یک سرریز مثلثی استفاده شد. قبل از سرریز مثلثی یک مخزن آرام‌کننده جریان تعبیه شد. اندازه‌گیری عمق جریان با عمق سنج انجام شد. سرعت جریان در دو بعد طولی و عرضی با استفاده از سرعت‌سنج الکترومغناطیس انجام شد. جنس کف و دیوار چپ فلوم از پلکسی گلاس و جنس دیوار راست آن شیشه‌ای است. در شکل(۲) تصویر برس های متشکل از لوله های پلی اتیلنی و نحوه چیدمان برس‌ها در کف کانال نشان داده شده است. در مجموع با نصب هشت برس، هفت حوضچه و هشت بازشدگی در فلوم ایجاد شد. ابعاد هر برس ۱۵ (عرض) در ۱۸(طول) سانتیمتر و طول هر حوضچه ۲۵ سانتیمتر است. عرض بازشدگی نیز ۱۲ سانتیمتر است. ابعاد هندسی در این چیدمان بر اساس ابعاد ماهی کپور دریای مازندران به عنوان ماهی طرح با مقیاس ۱:۵، در نظر گرفته شد. اندازه‌گیری‌های عمق جریان برای شش دبی (سه دبی زیر تراز استغراق و سه دبی بالای تراز استغراق) در حوضچه‌های چهارم و پنجم و همچنین بازشدگی‌های چهارم و پنجم و ششم انجام شد. اندازه‌گیری-های سرعت به ازای دبی سوم در نقاط مختلف حوضچه چهارم و بازشدگی‌های چهارم و پنجم انجام شد. در شکل (۳) موقعیت و پراکندگی نقاط برداشت سرعت جریان در حوضچه و بازشدگی و همچنین راستاهای مختلف اندازه گیری سرعت جریان نشان داده شد. اندازه‌گیری‌های سرعت جریان برای ۲۴ نقطه در حوضچه چهارم و همچنین بازشدگی‌های چهارم وپنجم انجام شد. ردیف‌های K، L، M، N و P شامل نقاط اندازه‌گیری در حوضچه و ردیف هایE و F شامل نقاط اندازه-گیری در بازشدگی‌ها هستند. مقادیر دبی آزمایشگاهی در جدول (۲) ارائه شده است. تراز استغراق نسبت به ارتفاع برس

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-05-20]

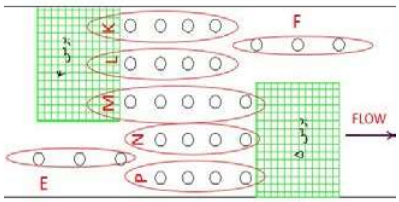
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.10.6.8]

مقایسه می شود. دبی‌هایی با عمق کمتر از ارتفاع برس، دبی-
های زیر تراز استغراق و دبی‌هایی با عمق بیشتر از ارتفاع برس،
دبی‌های بالای تراز استغراق محسوب می‌شوند.

شکل(۲): تصویر برس های متشکل از لوله های پلی اتیلنی و نحوه چیدمان برس‌ها در کف کانال

جدول(۱): مقادیر دبی آزمایشگاهی

وضعیت استغراق	شماره دبی	دبی جریان (لیتر بر ثانیه)	عمق جریان (سانتیمتر)	نسبت استغراق
زیرتراز استغراق	**اول**	۱/۱	۴	۰/۴h
	دوم	۲/۴	۷	۰/۷h
	سوم	۴/۴	۱۰	h
بالای تراز استغراق	**چهارم**	۹/۱	۱۴	۱/۴h
	پنجم	۱۵/۸	۱۷	۱/۷h
	ششم	۲۲	۲۰	۲h



شکل(۳): پلان موقعیت اندازه گیری سرعت جریان (دوایر مشکی) و راستاهای مختلف اندازه‌گیری سرعت جریان

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-05-20]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.10.6.8]

معرفی نرم افزار Flow-3D

Flow-3D یک نرم‌افزار قوی در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی، است که تولید، توسعه و پشتیبانی آن توسط شرکت علوم جریان[1] است. این نرم‌افزار برای کمک به تحقیق در زمینه رفتار دینامیکی مایعات و گازها در موارد کاربردی وسیع طراحی شده است. Flow-3D برای مسائل یک‌بعدی، دوبعدی و سه‌بعدی طراحی شده است. یکی از قابلیت‌های عمده این نرم‌افزار برای تحلیل‌های هیدرولیکی، توانایی مدل کردن جریان‌های با سطح آزاد است. این نرم‌افزار برای جریان-های سه‌بعدی غیرماندگار که دارای سطح آزاد و هندسه پیچیده هستند نیز کاربرد دارد و از روش حجم محدود در شبکه‌بندی با ساختار استفاده می‌کند. به لحاظ استفاده از روش احجام محدود در یک شبکه منظم، شکل معادله‌های گسسته‌شده مورد استفاده نظیر معادله‌های گسسته‌شده در روش تفاضل محدود هستند. بر این اساس نرم‌افزار از روش‌های دقت مرتبه اول و دوم در حل معادلات بهره می برد. در این نرم‌افزار از دو روش عددی برای شبیه سازی هندسی استفاده می شود:

۱-روش حجم سیال[2]: این روش برای نشان دادن رفتار سیال در سطح آزاد مورد استفاده قرار می‌گیرد. که شامل سه قسمت است:

- نمایش موقعیت سطح
- شبکه‌بندی
- شرایط مرزی سطح

۲-روش کسر مساحت-حجم مانع[3]: این روش برای شبیه‌سازی سطوح و احجام صلب مثل مرزهای هندسی کاربرد دارد.

از آنجایی که این نرم‌افزار برای مدل کردن سطح آزاد از روش حجم سیال استفاده می کند، احتیاج به تعریف تابع حجم (F) دارد که از روابط (۱) و (۲) به دست می آید:

$$\frac{\partial F}{\partial t}+\frac{1}{V_S}\left[\frac{\partial(FA_x u)}{\partial x}+\frac{\partial(FA_y v)}{\partial y}+\frac{\partial(FA_z w)}{\partial z}\right]=FDIF \quad (۱)$$

$$FDIF=\frac{1}{V_S}\left[\frac{\partial\left(\vartheta A_x\frac{\partial F}{\partial x}\right)}{\partial x}+\frac{\partial\left(\vartheta A_y\frac{\partial F}{\partial y}\right)}{\partial y}+\frac{\partial\left(\vartheta A_z\frac{\partial F}{\partial z}\right)}{\partial z}\right] \quad (۲)$$

در روابط بالا، ∂F= کسر حجم باز به جریان، ρ : چگالی حجمی سیال، FDIF= پخش آشفتگی، (u,v,w)= مولفه‌های سرعت در جهات (x,y,z). A_x، A_y و A_z به‌ترتیب سطح جریان در جهات x، y و z هستند. ϑ= ویسکوزیته دینامیکی سیال. ضریب نفوذ به صورت $V_S = CF_\mu$ است که CF یک عدد ثابت است. شکل F وابسته به به نوع مسئله‌ای است که مدل می شود. مسائل غیرقابل‌تراکم شامل یک سیال با سطح آزاد یا دو سیال با سطح مشترک هستند. برای سیال یک فازی، F تابع حجم سیال است و بیانگر حجم اشغال شده توسط سیال است. بنابراین F=1 نشانگر وجود سیال و F=0 نشانگر وجود حباب و حفره است.

از کاربردهای Flow-3D در مهندسی آب می توان به پایه‌های پل، سرریز دایره‌ای، شکست سد، پارشال فلوم، آبشستگی، جریان روی یک پلکان، جریان‌های با عمق کم، جریان در کانال‌های کنترل پرش هیدرولیکی، موج‌های کم ارتفاع، دریچه‌های کشویی و جریان سرریز اشاره کرد.

ساخت هندسه مدل و تنظیم شبکه میدان حل در نرم افزار Flow-3D این امکان وجود دارد که با توجه به اهمیت برخی مقاطع، تعداد و و اندازه شبکه‌هایی که برای تولید میدان حل مورد نیاز است ریزتر(پر اهمیت) و یا درشت‌تر(کم اهمیت) در نظر گرفته شود. زمان اجرای محاسبات و میزان مطابقت نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی، دو عامل مهم در انتخاب شبکه‌بندی بهینه خواهد بود. در این تحقیق، ابتدا هندسه کانال به همراه برس‌ها با ساقه‌های استوانه‌ای شکل درنرم افزار Solid Work ترسیم شد و سپس وارد برنامه Flow-3D شد. به دلیل کوچک بودن قطر ساقه‌ها و فاصله بین آنها، به‌ازای تولید تعداد شبکه‌های بسیار بالا (در حدود هشت میلیون شبکه)، برنامه قادر به شناسایی ساقه‌ها و فاصله بین آنها است که اجرای چنین برنامه ای با قدرت کامپیوترهای کنونی، بسیار مشکل و زمان‌بر خواهد بود. لذا برای ساده‌سازی مدل، صرف‌نظر از فاصله بین ساقه‌ها، برس‌های موجود در کانال به صورت یک جعبه یکپارچه (با همان ابعاد برس‌ها) در نظر گرفته شده است.

[1] Flow science, Inc
[2] VOF
[3] FAVOR

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-05-20]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.10.6.8]

در مدل آزمایشگاهی کانال ماهی-قایق‌رو، با اندازه‌گیری‌های انجام شده مشخص شد که سرعت جریان در داخل و پشت برس‌ها خیلی نزدیک به صفر است که ناشی از عبور ناچیز جریان از بین حفره‌های برس است. همچنین آزمایش‌های انجام شده در مدل آزمایشگاهی با براده‌های چوب که برای تعیین خطوط جریان در آزمایشگاه انجام شد نیز موید این مطلب است (احسانی و همکاران، ۱۳۹۵)

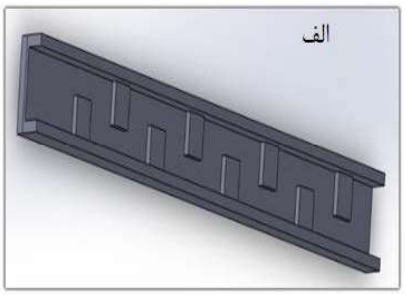
مدل تلاطمی استفاده شده در نرم افزار مدلRNG است. این نرم‌افزار مدل آشفتگی جدیدی بر مبنای گروه‌های نرمال شده رینولدز پیاده سازی کرده است. این دیدگاه شامل روش‌های آماری برای استحصال یک معادله متوسط‌گیری شده برای کمیت‌های آشفتگی است. این مدل کمتر بر ارقام ثابت تجربی تکیه می کند و برای توصیف دقیق‌تر آشفتگی جریان‌های با شدت کمتر و جریان‌هایی با مناطق دارای برش، قوی‌تر شناخته شده است. در شکل (۴)، هندسه مدل و شمایی از شبکه بندی تولید شده در نرم افزار نشان داده شده است.

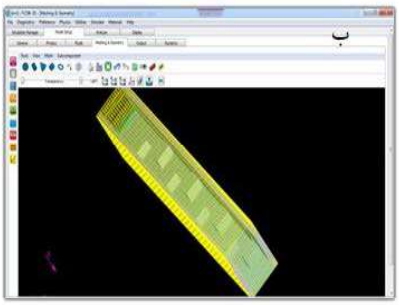
کالیبراسیون مدل عددی

اولین گام در یک مدل عددی، کالیبره کردن مدل است. بدین معنی که تأثیرات عامل های خارجی را به کمینه رسانده و شرایط مدل را به شرایط واقعی نزدیک‌تر کرد. برای استخراج مقادیر درست داده‌های یک مدل عددی یا آزمایشگاهی رسیدن حالت جریان به یک شرایط پایدار ضروری است. در مدل عددی حاضر پس از بررسی چند مدل، زمان مناسب برای اجرا ۴۵ ثانیه در نظر گرفته شد. شرایط مرزی، نیز مطابق جدول (۲) در نظر گرفته شد.

جدول(۲): شرایط مرزی اعمال شده

موقعیت	بدنه کانال	مرزهای کناری	ورودی	خروجی
شرایط مرزی	Solid	Wall	Volume flow rate	Outflow





الف-تهیه هندسه مدل در محیط Solid Work

ب- ایجاد شبکه میدان حل در محیط Flow-3D

شکل(۴): تهیه مدل عددی

نتایج و بحث

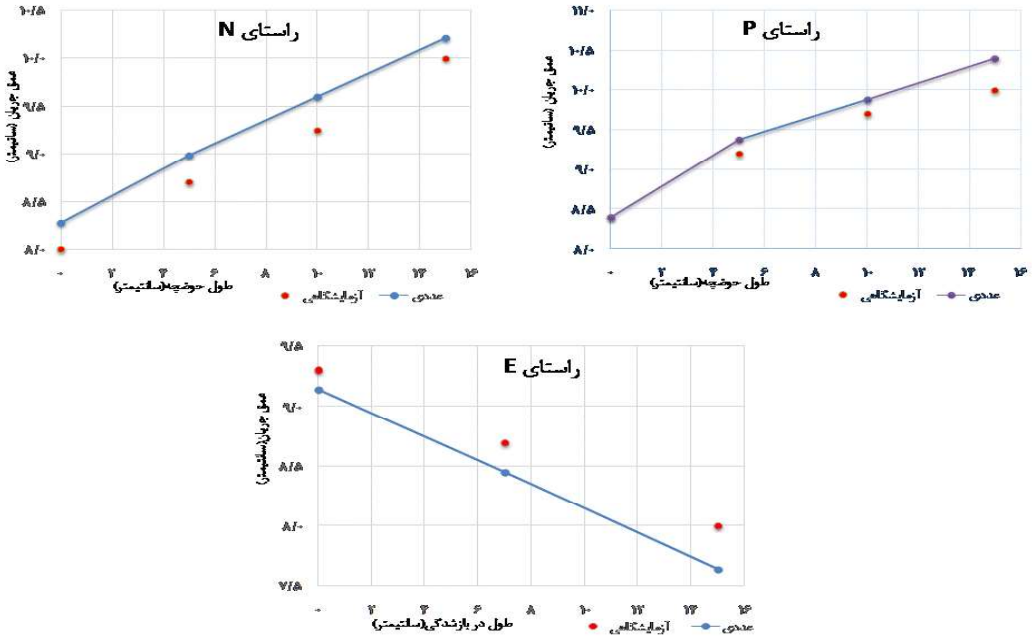
صحت سنجی مدل عددی

دبی‌های سوم و چهارم جدول (۲) از لحاظ مقادیر عمق و سرعت جریان، به منظور عبور ماهی طرح بهینه هستند (احسانی و همکاران، ۱۳۹۵). به‌منظور صحت‌سنجی، عمق و سرعت جریان به ازای دبی سوم، در مدل عددی با مدل آزمایشگاهی مقایسه شد. در مدل آزمایشگاهی مشاهده شد که یک ناحیه کم‌سرعت در پشت برس‌ها ایجاد می‌شود که سرعت جریان نزدیک به صفر است (احسانی و همکاران، ۱۳۹۵).

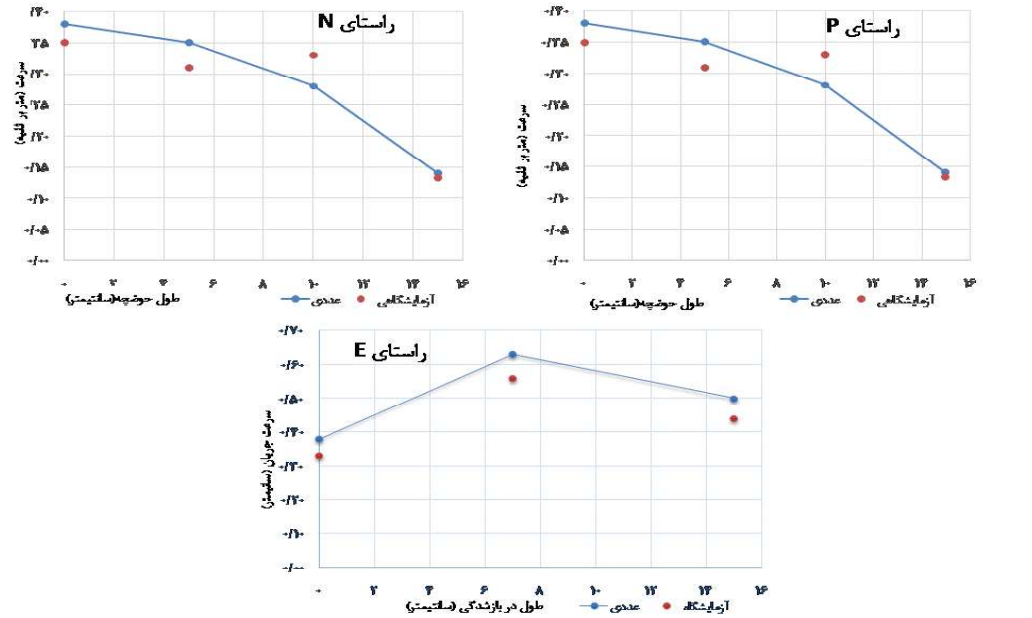
نتایج مدل عددی نیز موید این مطلب است. از آنجایی‌که کنترل سرعت‌های بیشینه در طراحی راه‌ماهی برای عبور ماهی، دارای اهمیت است، بنابراین تنها عمق و سرعت جریان در راستاهای N و P در حوضچه و راستای E در بازشدگی که دارای سرعت‌های بالاتر هستند، در مدل عددی و آزمایشگاهی با هم مقایسه شدند. در شکل (۵) و (۶) مقایسه عمق و سرعت جریان نشان داده شده است. میانگین خطاهای عمق و سرعت جریان به‌ترتیب ۳ و ۱۱/۵ درصد است.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-05-20]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.10.6.8]



شکل(۵): مقایسه عمق جریان در مدل عددی با نتایج مدل آزمایشگاهی



شکل(۶): مقایسه سرعت طولی جریان در مدل عددی با نتایج مدل آزمایشگاهی

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-05-20]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.10.6.8]

بررسی نتایج مدل عددی

برای بررسی سرعت و آشفتگی جریان در حوضچه‌ها و بازشدگی‌ها، برنامه برای دبی های سوم و چهارم (با توجه به ایجاد عمق مناسب و بهینه جریان)، اجرا شد. دبی سوم زیر تراز استغراق و دبی چهارم بالای تراز استغراق است. در شکل-های (۷) و (۸) سرعت جریان در راستای طولی برای دبی‌های سوم و چهارم نشان داده شده است. همچنین در شکل‌های (۹) و (۱۰) آشفتگی جریان در راستای طولی برای دبی‌های سوم و چهارم نشان داده شده است.

۱- به ازای دبی های سوم و چهارم در راستای L, K و M که پشت برس قرار دارند، یک ناحیه کم‌سرعت (نزدیک به صفر) تشکیل می‌شود که بهترین مکان برای استراحت ماهی‌ها است. در این مناطق، ماهی طرح برای عبور از سرعت مداوم خود استفاده می‌کند. بیشینه سرعت در دبی سوم در راستای L، ۰/۱۴متر بر ثانیه است. سرعت مداوم ماهی طرح در مقیاس واقعی ۰/۶۰ متر بر ثانیه است (احسانی و همکاران، ۱۳۹۵). با در نظر گرفتن مقیاس آزمایشگاهی سرعت مداوم، ۰/۲۷ متر بر ثانیه است. بنابراین سرعت‌های ایجاد شده در محدوده مجاز هستند.

۲- سرعت‌های طولی بیشینه در دبی سوم و چهارم در بازشدگی (راستای E) و همچنین در جلوی بازشدگی (ابتدای راستاهای N و P حوضچه) اتفاق می‌افتد. ماهی طرح، برای عبور از این مناطق از سرعت انفجاری خود استفاده می‌کند. سرعت جریان در راه‌ماهی، نباید از سرعت مهاجرت ماهی طرح بزرگ‌تر باشد، در غیراین صورت امکان مهاجرت ماهی‌ها وجود ندارد. سرعت انفجاری ماهی طرح در مقیاس واقعی ۱/۶۰متر بر ثانیه است (احسانی و همکاران، ۱۳۹۵). بیشینه سرعت در بازشدگی در دبی سوم، ۰/۶۹ متر بر ثانیه و در دبی چهارم ۰/۷۰ متر بر ثانیه است. با ملحوظ داشتن بیشینه سرعت انفجاری ماهی طرح با توجه به مقیاس آزمایشگاهی (۰/۷۲ متر بر ثانیه)، مقادیر سرعت‌ها در محدوده مجاز قرار دارند.

۳- شدت آشفتگی در راه‌ماهی نباید از ۲۰۰ وات بر متر مکعب (۰/۲۰۰ ژول بر کیلوگرم بر ثانیه) بیشتر باشد. وگرنه امکان مهاجرت ماهی طرح وجود نخواهد داشت (کاتوپودیس و همکاران، ۱۹۹۷). در دبی سوم (شرایط زیر تراز استغراق برس) با توجه به شکل (۹) آشفتگی در راستاهای L, K و M که پشت برس قرار دارند، ناچیز است. در راستاهایN، P و E (بازشدگی و جلوی بازشدگی) لکه های کوچک آشفتگی بیشتر در اعماق پایین مشهود است. بیشینه مقدار آشفتگی در راستایE (بازشدگی) ۰/۱۸۰ ژول بر کیلوگرم بر ثانیه است و بیشینه آشفتگی در راستای N و P (جلوی بازشدگی در حوضچه) به ترتیب ۰/۰۹۸ و ۰/۱۲۸ ژول بر کیلوگرم بر ثانیه است. بنابراین آشفتگی در همه راستاها در محدوده مجاز قرار دارند. دردبی چهارم (شرایط استغراق برس) با توجه به شکل (۱۰) بیشینه آشفتگی بر روی برس اتفاق می‌افتد. از آنجایی‌که عمق آب روی برس ناچیز است، این منطقه از کانال محل مناسبی برای عبور ماهی طرح نیست و ماهی طرح به‌منظور عبور به بالادست از بازشدگی و حوضچه استفاده می‌نماید. بنابراین باید بازشدگی و حوضچه از لحاظ آشفتگی بررسی گردد. بیشینه آشفتگی در راستاهای L, K و M (در حوضچه) به ترتیب ۰/۱۳۴، ۰/۱۵۰ و ۰/۱۸۵ ژول بر کیلوگرم بر ثانیه است. همچنین بیشینه شدت آشفتگی در راستاهای P, M و E به ترتیب ۰/۰۹۸، ۰/۱۲۸ و ۰/۱۶۰ ژول بر کیلوگرم بر ثانیه است. بنابراین آشفتگی در همه راستاها در محدوده مجاز قرار دارند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق نتایج ذیل به‌طورخلاصه بیان می‌شود:

۱- با مقایسه مدل عددی و آزمایشگاهی مشخص شد که میزان خطا برای عمق و سرعت جریان، به ترتیب ۳ و ۱۱/۵ درصد بوده است.

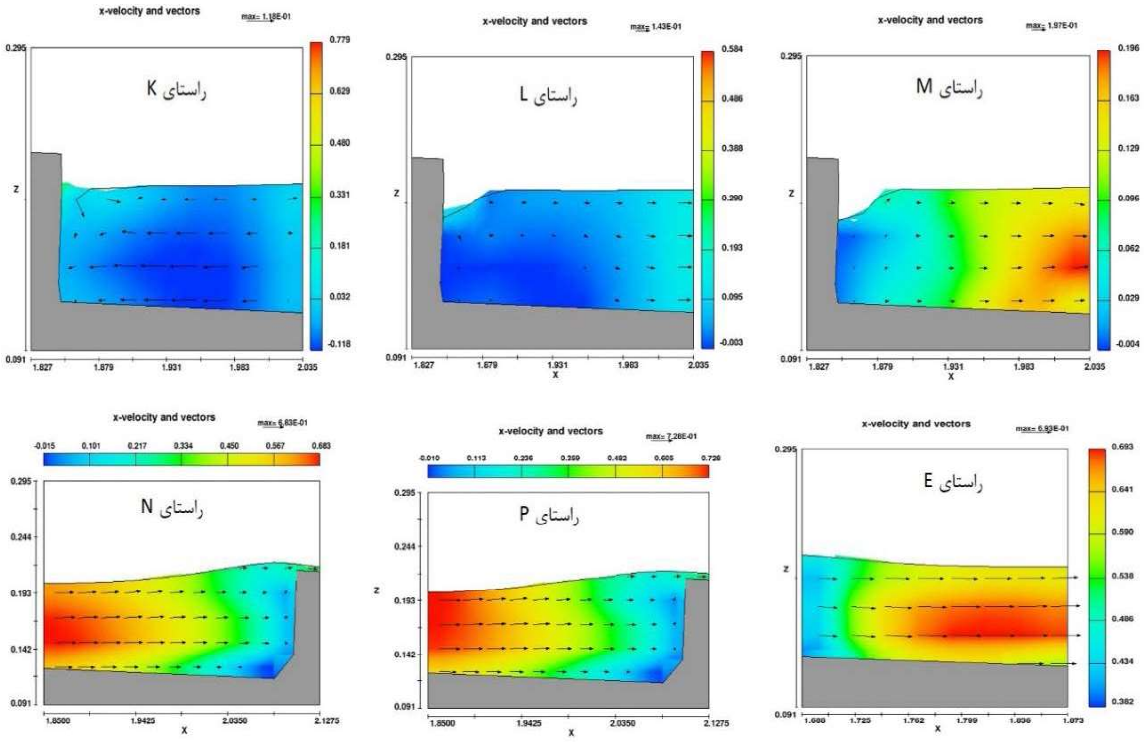
۲- با انجام مدل عددی مشاهده شد که سرعت‌های طولی بیشینه، در بازشدگی‌ها و در جلوی بازشدگی‌ها درحوضچه‌ها، اتفاق می‌افتد. ماهی طرح جهت عبور از بازشدگی‌ها از سرعت انفجاری خود استفاده می‌کند. بیشینه سرعت در بازشدگی در دبی سوم، ۰/۶۹ متر بر ثانیه و در دبی چهارم ۰/۷۰ متر بر ثانیه است. با ملحوظ داشتن بیشینه سرعت انفجاری مجاز برای ماهی طرح مقادیر سرعت‌ها در محدوده مجاز قرار دارند.

۳- سرعت‌های کمینه در داخل حوضچه‌ها، پشت برس‌ها اتفاق می‌افتند. بنابراین در این مناطق، ماهی طرح جهت عبور از سرعت مداوم خود استفاده می‌کند. سرعت بیشینه در دبی سوم ۰/۱۴ متر بر ثانیه است. با توجه به اینکه سرعت مداوم ماهی طرح ۰/۲۷ متر بر ثانیه است، سرعت‌های داخل حوضچه در محدوده مجاز قرار دارند.

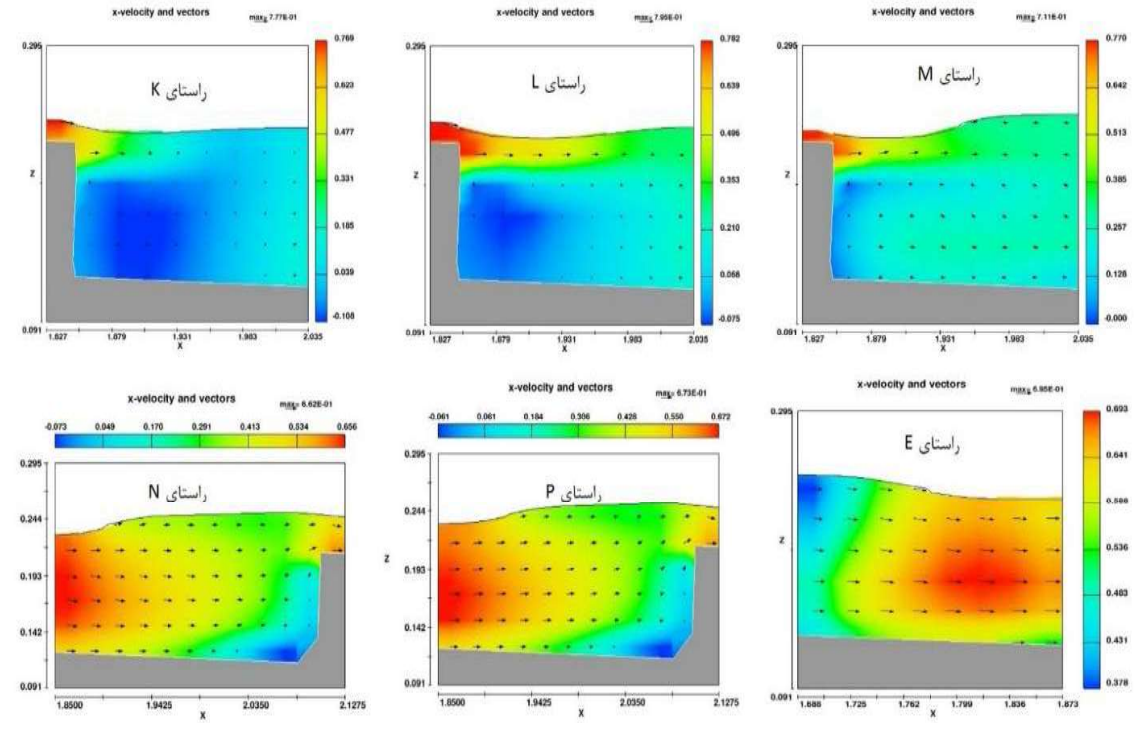
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-05-20]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.10.6.8]

۴- بیشینه آشفتگی در دبی سوم (شرایط زیر تراز استغراق) ۰/۱۸۰ ژول بر کیلوگرم بر ثانیه است که در بازشدگی اتفاق می افتد. بیشینه آشفتگی در دبی چهارم (شرایط استغراق برس) در درون حوضچه اتفاق می‌افتد که مقدار آن ۰/۱۸۵ ژول بر کیلوگرم بر ثانیه است. با توجه به مقادیر بیشینه آشفتگی در راه‌ماهی، این مقادیر در محدوده مجاز قرار دارند.



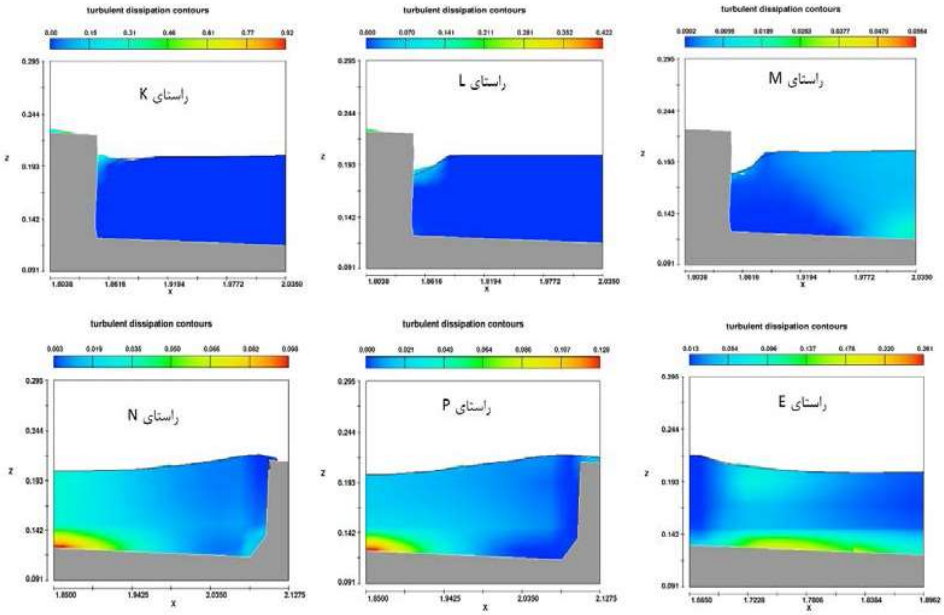
شکل(۷): سرعت طولی جریان در راستاهای مختلف حوضچه به ازای دبی سوم



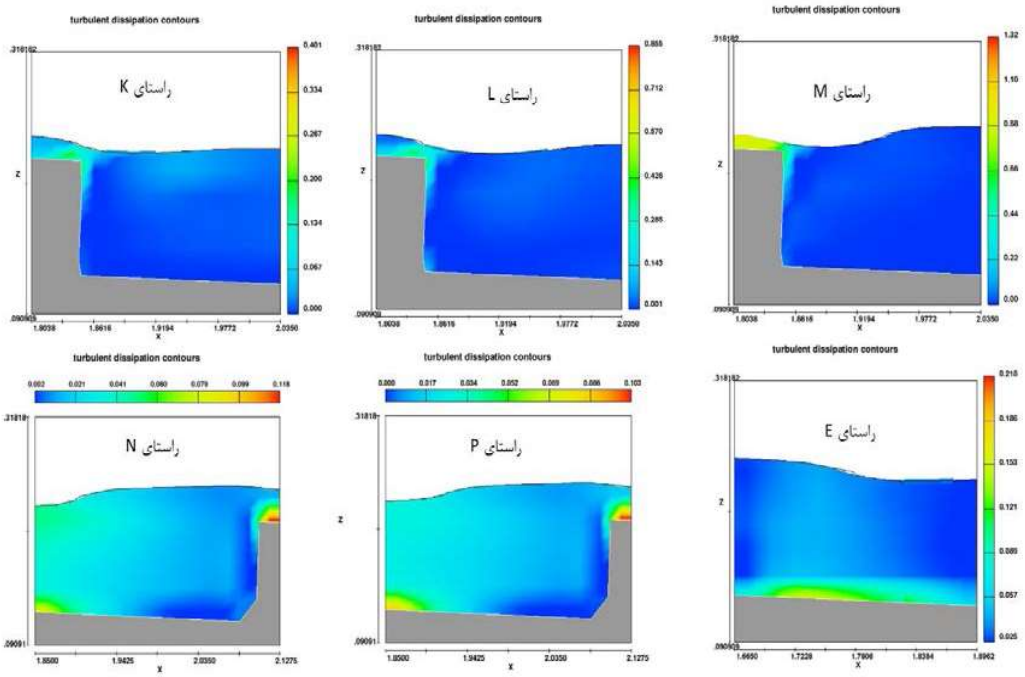
شکل(۸): سرعت طولی جریان در راستاهای مختلف حوضچه به ازای دبی چهارم

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-05-20]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.10.6.8]



شکل(۹): آشفتگی در راستاهای مختلف حوضچه به ازای دبی سوم



شکل(۱۰): آشفتگی در راستاهای مختلف حوضچه به ازای دبی چهارم

مراجع

۱- احسانی، ر. و حسن زاده، ی. (۱۳۹۵). "بررسی آزمایشگاهی شرایط جریان در راه‌ماهی از نوع کانال ماهی- قایق‌رو." مجله علوم و مهندسی آبیاری، دانشگاه شهید چمران اهواز، چاپ نشده.

۲- شفاعی بجستان، م. (۱۳۸۹). "مبانی و کاربرد مدلهای فیزیکی و هیدرولیکی." انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز. صفحات ۱۱۲ تا ۱۱۵.

۳- زلکی زاده، ع. و کیامنش، ح. (۱۳۹۲). " شبیه سازی اثر تغییر شرایط هیدرولیکی و شیب کف بر توزیع سرعت و الگوی جریان در راه‌ماهی استخر و سرریز." هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، زاهدان.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-05-20]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.10.6.8]

۴- عباسی چناری، س. و شیرالی، م. (۱۳۹۰)." بررسی ریاضی الگوی جریان و توزیع سرعت در راه ماهی نوع استخر سرریز با استفاده از مدل Flow3d." نخستین همایش ملی جهاد اقتصادی در عرصه کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی، قم.

۵- قلاوند، ف. و لشکرآرا، ب. (۱۳۹۱). " شبیه سازی جریان در راه ماهی دنیل با استفاده از نرم افزارFlow3d ." نهمین کنگره مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۶- محمودی کردستانی، س. و شفاعی بجستان، م، (۱۳۷۹). "معرفی راه‌ماهی دنیل و مقایسه عملکرد آن با راه‌ماهی از نوع بازشدگی قائم." مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس سد سازی، تهران.

۷- معیری، م. و حسین زاده دلیر، ع. (۱۳۸۷). " شبیه سازی عددی جریان در راه ماهی با استفاده از مدل کامپیوتر Fluent."دومین همایش و نمایشگاه تخصصی مهندسی محیط زیست، دانشگاه تهران.

۸- هدایتی، ه., مسعودیان، م., احسانی، ر. و غلامی، م. (۱۳۹۱). "بررسی امکان استفاده از کانال ماهی رو – قایق‌رو با گیاه مصنوعی و مقایسه آن با راه‌ماهی شیار قائم در سد لاستیکی فرح آباد." نهمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه. دانشگاه شهید چمران اهواز.

9- Carrica, P.M., Turan C. and Weber L. (2005). “Computation of the free surface flow in fish passage”. *Mecánica Computacional*. 24(1), 167-177

10- Chen, Q., Dai, G. and Liu, H. (2002). “Volume of fluid model for turbulence numerical simulation of stepped spillway overflow.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE. 128(7), 683-688.

11- Clay, C.H. (1995). “Design of fishways and other fish facilities.” Deptment. of Fisheries of Canada, Ottawa,301p.

12- Denil, G. (1909). “Les echelles a poissons et leur application aux barrages de Meuse et d`Ourthe (Fish ladders and their use at the Meuse and Ourthe dams).” Bull. Acad. Sci. Belg .pp:1221-1224.

13- Hassinger,R. (2002). “Der Borstenfischpass – Fischaufstieg und Bootsabfahrt in einer Rinne.” *Wasserwirtschaft*. 92(4), 38-42.

14- Hassinger,R., Kraetz,D. (2004). “The Canoe-Fishway-A Combination of Fish Migration Facility and Canoe Passage in the same Channel.” Hydraulics Laboratory and Testing Facilities. Deptment of Civil Engineering. University of Kassel. Germany.

15- Hassinger,R. (2009). “Borsten-Fischpässe und Fisch-Kanu-Pässe Beschreibung des Standes der Technik.”

16- Hiekel,I., Hassinger,R. (2007). “Pilotprojekt Borstenanlagen im Spreewald. Erhaltung, Studien und Tagungsberichte des Landesumweltamtes.” Band 54.

17- Katopodis, C. (1981). “Consideration in the design of fishways for freshwater species.” Proceedings of the 5th Canadian Hydrotechnical Conference., Canadian society of Civil Engineering. pp: 857-878.

18- Katopodis, C. (1992). “Introduction to fishway design.” Working document. *Freshwater Institute, Deptment of Fisheries and Oceans, Canada*. pp: 3-5.

19- Katopodis, C., Rajaratnam, N., Sabur, M.A. and Wu, S. (1997). “Hydraulics of resting pools for Denil fishways.” *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*. 123(7), 632- 638.

20- Rajaratnam, N., Katopodis, C. and Solanki, S. (1992). “New designs for vertical slot fishways.” *Journal of Civil Engineering*, 19 (3), 402-414.

21- Savage, B.M. and Johnson, M.C. (2001). “ Flow over ogee spillway:physical and numerical model case study.” *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 127 (8), 640-648.

22- Cea, L., Pena, L. and Puteras, J. (2007). “Application of several depth averaged turbulence models to simulate flow in vertical slot fishways.” *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 133 (2), 160.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-05-20]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.10.6.8]

Evaluation of Hydraulic Condition in Canoe-fishway Using Flow-3D Modeling

Roohollah Ehsani [*1]
Yousef Hassan zade [2]
Alireza Mojtahedi [3]
Mojtaba Sanei [4]

Abstract

Since the fishway serves important roles in fish migration and survival, they are the main components of river cross structures like dams. In this study, the numerical modeling of Canoe-fishways was conducted using Flow-3D software. For verification, it was used as the results of experimental modeling. By comparing numerical results with experimental model, it was found that the error rates for the depth and velocity of flow were 3 and 11.5%, respectively. Then, using numerical models, the velocity of flow was shown in different directions for optimization discharges, a low-velocity area in pools was found after each brush was formed which was the best place for resting of migratory fishes. Providing the amount of turbulence in different parts of the canal, it was determined that the maximum turbulence occurred in the canal slot. The maximum velocity occurred in slot and in pool front slot. It was also found that velocity and turbulence in different parts of the canal were within the allowable range.

Keywords

Canoe fishway, Experimental model, Numerical modeling, Burst speed, Cruising speed.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-05-20]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.10.6.8]

1* Ph.D. Student in Civil Engineering, Hydraulic Structures, University of Tabriz, Tabriz, Iran, ehsani_2010@yahoo.com.
2 Professor, Department of Hydraulic, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
3 Assistant Professor, Department of Hydraulic, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
4 Associate Professor, Department of River Engineering, Soil Conservation and Management Research Institute.
Received: 2016/08/16 Accepted: 2016/12/29