Archive of SID



# کاربرد مدل عددی سه بعدی و سیستم‌های هوشمند در واسنجی ضریب دبی در سازه ترکیبی سرریز–روزنه

نیما آئین[۱]، محسن نجارچی[۲*]، سید محمد میرحسینی هزاوه[۳]، سید محمد مهدی نجفی زاده[۴]، احسان اله ضیغمی[۵]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۲/۶ صص: ۲۸-۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۲۲

## چکیده

سازه ترکیبی سرریز لبه تیز مثلثی-روزنه مستطیلی یکی از مهمترین سازه‌هایی هست که علاوه بر تنظیم سطح آب و اندازه گیری دبی، عملیات رسوب شویی و تخلیه جریان را به وسیله روزنه موجود نیز انجام می‌دهد. در این تحقیق سعی شده است تا با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، ابتدا این ۴ مدل با شرایط هندسی مختلف این سازه به صورت سه بعدی توسط نرم افزار Flow-3D شبیه سازی گردد. سپس، با انجام آنالیز ابعادی به بررسی تاثیر پارامترهای بی بعد موثر در این تحقیق بر روی ضریب دبی پرداخته شود. این پارامترهای بی بعد عبارتند از h/b، h/d و h/y، که در آن h عمق آب روی سریز، b عرض دریچه، d ارتفاع دریچه و y فاصله بین بالای دریچه تا راس سرریز می باشد. در نهایت نیز با تهیه چهار مدل مختلف هوش مصنوعی به ارزیابی و مقایسه دقت این مدل‌ها در تخمین دبی پرداخته شود. نتایج این تحقیق نشان دادند که دقت برنامه Flow-3D در شبیه سازی سه بعدی این سازه خوب می‌باشد و شاخص‌های آماری مناسبی در شبیه سازی هد آب و ضریب دبی جریان ارائه گردید (RMSE، MAE، MRAE برای ضریب دبی به ترتیب برابر با ۰/۰۶۷۳، ۰/۲۲۱ و ۰/۲۹۵). همچنین، نتایج در تمام مدل‌ها نشان دادند که ضریب دبی با پارامترهای بی بعد رابطه معکوس دارد. ضریب دبی در این سازه ترکیبی سرریز-روزنه تقریبا بین ۰/۳ تا ۰/۹ می باشد. از طرف دیگر، آنالیز دقت سنجی و نتایج حاصل از چهار مدل هوش مصنوعیMLP، M5P، RBF و GRNN نشان دادند که در این تحقیق، مدل MLP به عنوان برترین مدل می‌باشد و در ادامه آن مدلهای M5P، RBF و GRNN به ترتیب قرار دارند.

**واژه های کلیدی:** سازه ترکیبی سرریز لبه تیز مثلثی-روزنه مستطیلی؛ Flow-3D؛ آنالیز ابعادی؛ هوش مصنوعی؛ MLP، M5P، RBF و GRNN.

[۱] دانشجوی دکترا گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک
[۲] استادیار گروه علوم مهندسی آبیاری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک
[۳] استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک
[۴] دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک
[۵] استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک
* نویسنده مسول مقاله: mohsennajarchi@yahoo.com

www.SID.ir

Archive of SID



## مقدمه

با توجه به اهمیت اندازه گیری دبی جریان، تا کنون روش‌های مختلفی برای تخمین یا اندازه گیری دبی جریان ارائه شده است (بلوچی و همکاران، ۲۰۱۸). از جمله این روش‌ها می‌توان به روش‌های مبتنی بر اندازه گیری مستقیم سرعت به وسیله ادواتی همچون جسم شناور، سرعت سنج یا دبی سنج مغناطیسی و ...، استفاده از سازه‌های اندازه گیری عمق جریان یا ایجاد مقطع کنترل در مسیر جریان همچون سرریزها و ...، استفاده از روش‌های بهینه یابی و حل معادلات جریان، استفاده از علم سنجش از راه دور و تصاویر ماهواره‌ای اشاره نمود. از آنجا که هر کدام از روش‌های فوق دارای محدودیت و شرایط خاص خود می‌باشند؛ از دیرباز استفاده از سازه‌های اندازه گیری عمق جریان یا روش‌های ساده ایجاد کننده مقطع کنترل در مسیر جریان جزو اولویتهای مهندسین می‌باشد.

تا کنون سازه‌های مختلفی جهت تخمین دبی در کانالهای مصنوعی و طبیعی مورد استفاده قرار گرفته‌اند که هر کدام دارای معایب و مزایای خاص خود می‌باشند. از جمله این سازه‌ها می‌توان به انواع سرریزها، روزنه‌ها، پارشال فلوم و ... اشاره نمود، که به طور جداگانه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. یکی از سازه‌هایی که مورد توجه مهندسین قرار گرفت، سازه مرکب سرریز-روزنه بود که در اشکل مختلف و با کارایی‌های متفاوت می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. قبل از سال ۱۹۸۵ اطلاعات محدودی در مورد استفاده از این سازه ترکیبی برای اندازه گیری جریان وجود داشت؛ تا اینکه احمد (۱۹۸۵) مطالعات خود را در زمینه ترکیب سرریز مستطیلی و دریچه مستطیلی بدون فشردگی جانبی به چاپ رساند. او سعی کرد تا یک ضریب دبی برای کل این سیستم ترکیبی بدست آورد ولی به دلیل کمبود داده‌های آزمایشگاهی به این امر دست نیافت (به نقل از نجم، ۱۹۹۵). در ادامه تحقیقات آزمایشگاهی مختلفی در این زمینه انجام گردید که از جمله آنها، نجم (۱۹۹۵) در مورد خصوصیات جریان آزاد ترکیبی بر روی سرریز مستطیلی روی دریچه مستطیلی با انقباض جانبی متفاوت را بررسی و تحقیق کرد. او در این خصوص معادله رگرسیونی برای محدوده خاصی از پارمترهای هیدرولیکی پیشنهاد داد. نجم و همکاران (۱۹۹۴) در مورد اثر پارامترهای هندسی مدل بر روی سرریز مستطیلی با فشردگی جانبی و دریچه معکوس مثلثی را بررسی کردند. ال سعید و همکاران (۱۹۹۵) اندازه گیری جریان ترکیبی با دبی کم یا زیاد را در کانالهای آبیاری مورد بررسی قرار دادند. آنها تحقیقات خود را برای سرریز مستطیلی بالای دریچه مثلثی انجام دادند. آنها یک رابطه برای تخمین دبی در هر دو سیستم مورد مطالعه‌شان ارائه دادند. حمید و همکاران (۱۹۹۶) جریان ترکیبی در حالیکه مدل مستغرق است را مورد بررسی قرار دادند. نجم و همکاران (۱۹۹۷) اثر میزان استغراق پائین دست مدل را بر روی میزان دبی جریان بررسی کردند. مدل استفاده شده به صورت سرریز مستطیلی در بالای دریچه مثلثی بود. آنها نشان دادند که نسبت استغراق دریچه بر روی ارتفاع آب بالادست و میزان دبی عبوری موثر است، به طوریکه هرگاه میزان عمق استغراق پایین دست بیشتر شود، ارتفاع آب بالا دست افزایش و دبی عبوری از مدل کاهش می‌یابد. ال حمید و همکاران (۱۹۹۷) تاثیر پارامترهای هندسی و هیدرولیکی این سازه را بر خودپالایی آن مورد نقد و بررسی قرار دادند. با مشاهده نتیجه آزمایشات این مسئله مشخص می‌شود که با تغییر در ابعاد سازه و شرایط جریان می‌توان با حداکثر دبی، بار معلق و بار بستر بیشتری عبور داد. فرو (۲۰۰۰) معادله‌ایی برای شدت جریان از رو و زیر دریچه مستطیلی لبه پهن بر اساس آنالیز ابعادی استخراج کرد. نجم و همکاران (۲۰۰۲) مطالعات آزمایشگاهی خود را بر روی سرریز و دریچه لبه تیز مستطیلی انجام دادند. آنها این مدل را با بعدهای مختلف هندسی در شرایط مختلف آنالیز کردند. آزمایشات در شیب افقی، کم و تند تکرار شدند و در نهایت به این نتیجه رسیدند که برای هر سه حالت می‌توان یک معادله در نظر گرفت. اسماعیلی و فتحی مقدم (۱۳۸۵) در تحلیل اطلاعات بدست آمده بر روی مدل سرریز-دریچه در کانال دایره‌ای شکل در آزمایشگاه به این نتیجه رسیدند که میانگین ضریب شدت جریان برای سرریز حدود ۰/۷۵ و برای دریچه حدود ۰/۶۵ می باشد. دهقانی و همکاران (۲۰۰۹) تاثیر این سازه را بر آبشستگی پایین دست آن بررسی کردند به طوریکه میزان طول آبشستگی $L_s$ و عمق آبشستگی $h_s$ را اندازه گیری کردند. محمد و همکاران(۲۰۱۱) طرح جدیدی از این سازه را به نحوی که بر روی آن سرریز مستطیلی بدون فشردگی جانبی لبه پهن و به جای دریچه از سه لوله استفاده شده است. ایشان با استفاده از معادله انرژی و آنالیز ابعادی به

www.SID.ir

Archive of SID


این نتیجه رسیدند که این سازه در حالت سرریز با بازشدگی نسبت به زمانی که بازشدگی نداشته باشد، دبی بیشتری را عبور میدهد.

بلوچی و زینی وند (۱۳۹۱) به بررسی آزمایشگاهی ضریب دبی در سازه مرکب سرریز مثلثی، روزنه مستطیلی برای شرایط هیدرولیکی وهندسی مختلف پرداختند. سوری (۱۳۹۲) به بررسی آزمایشگاهی اثر تغییر موقعیت در راستای عمود بر جریان در مدل ترکیبی سریز- دریچه استوانه ای پرداختند. نتایج مطالعه ایشان حاکی از آن است که تغییرات ارتفاع بازشدگی دریچه با ضریب دبی جریان عبوری از سازه رابطه عکس داشته است. همچنین، ارتفاع بازشدگی دریچه با میزان افت انرژی در سرریز استوانه ای رابطه عکس داشته است. گرزین (۱۳۹۲) نیز به بررسی حداکثر عمق آبشستگی در پایین دست سازه ترکیبی سرریز-دریچه مایل در ارتفاع پرداختند. نتایج ایشان نشان می‌دهد که کمترین عمق آبشستگی در زاویه ۳۵ درجه رخ می‌دهد. صالحی و عظیمی (۲۰۱۹)، به بررسی ضریب دبی از تعدادی سازه مرکب سرریز-دریچه با استفاده از روش رگرسیون چند متغییره پرداختند. ایشان ضریب دبی متوسط سازه ها را در محدوده ۰/۸۵ ارائه دادند.

بخش دیگری از تحقیق حاضر مربوط به شبیه سازی عددی می باشد. از جمله مدل‌های عددی هیدرولیکی بسیار کارآمد که برای تمام مهندسین شناخته شده می‌باشند می‌توان به نرم‌افزارهای Flow-3D، Fluent و ... اشاره نمود. یکی از معروف ترین این نرم‌افزارها، مدل عددی Flow-3D می‌باشد که بسیار پرکاربرد بوده و تا کنون تحقیقات مختلفی در شبیه سازی سازه‌های هیدرولیکی با این نرم‌افزار انجام شده است. از جمله تحقیقاتی که با Flow-3D در زمینه سرریزها انجام شده است می‌توان به احمدی و همکاران (۱۳۹۰) اشاره نمود که به واسنجی ضریب دبی در سرریز تاج نیم دایره‌ای پرداختند. ایشان با مقایسه مقادیر ضریب دبی آزمایشگاهی و محاسبه شده توسط نرم افزار، مقدار $R^2$ را برابر با ۰/۹۹۸ ارائه دادند. علاسوند و همکاران (۱۳۹۰) پس از انجام آنالیز ابعادی، به بررسی تاثیر زبری روی استهلاک انرژی و سرریزهای پلکانی گابیونی با استفاده از مدل عددی Flow-3D پرداختند. محمودی و رستمی (۱۳۹۱) به بررسی ابعاد پله‌ها در سرریز پلکانی بر روی استهلاک سرریز پرداختند. ایشان نیز نشان دادند که مدل عددی Flow-3D دقت بالایی در تخمین افت و شبیه سازی سرریزهای پلکانی دارد. اسدی پرتو و همکاران (۱۳۹۱) به بررسی اثر قطر پایه پل برالگوی جریان در کانال مستقیم با استفاده از نرم افزار Flow-3D پرداختند. اژدری مقدم و جعفری (۱۳۹۲) به بررسی هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای ذوزنقه‌ای پرداختند. ایشان پس از انجام انالیز ابعادی و استخراج پارامترهای بی بعد به بررسی نحوه تغییرات ضریب دبی (استخراج شده از نتایج مدل Flow-3D) با پارامترهای بی بعد پرداختند. در تمام این تحقیقات، محققین پس از شبیه سازی و کالیبره کردن مدل‌های خود و مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی عددی با داده‌های آزمایشگاهی، به این نتیجه رسیدند که مدل عددی Flow-3D دقت خوبی برای شبیه سازی سازه مورد بررسی دارد.

همچنین علاوه بر Flow-3D نرم افزارهای دیگری نیز توسط محققین استفاده می‌شود که به طور مثال ورجاوند و همکاران (۱۳۸۹) به بررسی ضریب دبی و پدیده کاویتاسیون در سرریزهای استوانه‌ای با استفاده از مدل عددی Fluent پرداختند. مرتضوی و سجادی (۱۳۹۲) با استفاده از نرم افزار Fluent به بررسی تاثیر پارامترهای هندسی بر هیدرولیک جریان در سرریزهای استوانه‌ای پرداختند.

از طرف دیگر، امروزه به دلیل کارایی بالای سیستمهای هوشمند برای پیش‌بینی مسائل غیر خطی و پیچیده، محققان بسیاری استفاده از این سیستم‌های هوشمند را مد نظر قرار داده‌اند. از جمله تحقیقات مرتبطی که در زمینه سازه‌های هیدرولیکی با استفاده از سیستمهای هوشمند انجام شده است، می‌توان به تحقیق بیلهان و همکاران (۲۰۱۱) اشاره کرد که به بررسی کارایی مدل شبکه عصبی مصنوعی در تخمین ضریب دبی در سرریزهای جانبی پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که مدل شبکه عصبی مصنوعی نتایج بهتری را نسبت به مدل رگرسیون خطی و غیر خطی نشان می‌دهد. در تحقیق دیگری، امیراقلو و همکاران (۲۰۱۱) نیز به صورت جداگانه با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی به تخمین ضریب دبی در سرریزهای جانبی پرداختند. نتایج آنها نیز نشان داد که شبکه عصبی مصنوعی دقت بیشتری را نسبت به مدل رگرسیون غیر خطی دارد. جوما و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از مدل MLP به تخمین ضریب دبی در سرریز تاج دایره‌ای پرداختند. پارسایی و همکاران (۲۰۱۷)، با استفاده

www.SID.ir

Archive of SID

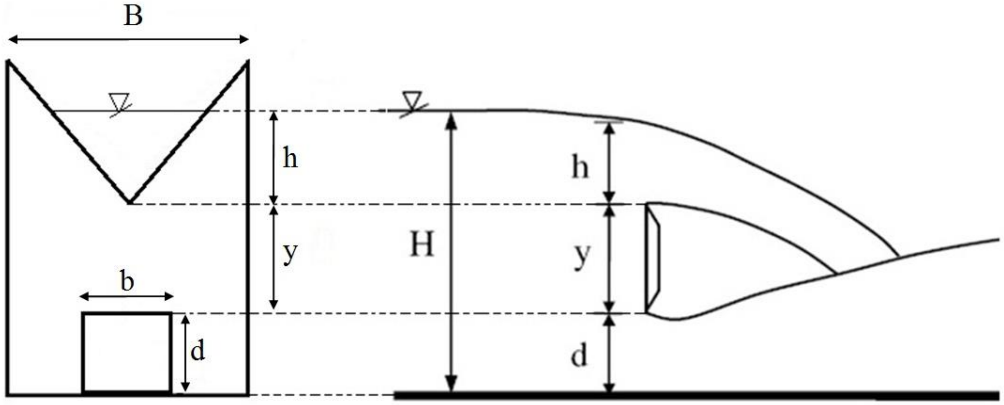

از ANFIS ضریب دبی سازه ترکیبی سرریز-دریچه استوانه ای را مورد ارزیابی و تخمین قرار دادند.

همانطور که از بررسی پیشینه تحقیق فوق مشخص می‌باشد، اهداف این تحقیق شامل سه بخش مدل ترکیبی سرریز-دریچه، شبیه سازی سه بعدی و سیستم‌های هوشمند می‌باشد. در این تحقیق، ابتدا با شبیه سازی سه بعدی جریان روی این سازه مهم، نتایج با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه می‌شوند. سپس، با انجام آنالیز ابعادی به بررسی تاثیر پارامترهای بی بعد موثر در این تحقیق بر روی ضریب دبی پرداخته می‌شود. در نهایت نیز با توجه ماهیت سیستم‌های هوشمند، نتایج پیش بینی ضریب دبی توسط چهار مدل مختلف هوش مصنوعی مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفتند.

## مواد و روش‌ها

### مدل فیزیکی

داده های آزمایشگاهی مربوط به تحقیق حاضر از تحقیقی که در دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شده به دست آمده است. فلوم استفاده شده در این تحقیق دارای کف فلزی و جنس دیواره‌های آن از شیشه و در بخشی دیگر پلکسی گلاس می‌باشد. این فلوم دارای طولی برابر ۱۲ متر و با عرض ۲۵ سانتیمتر دارای عمقی برابر با ۵۰ سانتیمتر از کف فلوم می‌باشد. مدل‌های استفاده شده در بررسی آزمایشگاهی از جنس پلاکسی گلاس بوده که همگی دارای شکل هندسی کلی یکسانی بودند. شکل ۱ نمایی از یکی از مدل‌های ترکیبی ساخته شده را نشان می‌دهد.




**شکل ۱- نمایی از یک مدل سرریز-دریچه ساخته شده (برگرفته از بلوچی و زینی وند، ۱۳۹۱)**

در تحقیق بلوچی و زینی وند (۱۳۹۱) با ساخت چند مدل محدود و در دبی‌های مختلف به بررسی اثرات مختلف هیدرولیکی و هندسی بر روی ضریب دبی در مدل ترکیبی سرریز مثلثی با زاویه راس ۶۰ درجه-دریچه مستطیلی پرداخته شد. حال در تحقیق حاضر و با استفاده از این نتایج و مدل عددی Flow-3D ضریب دبی در این سازه ترکیبی واسنجی می‌گردد.

### آنالیز ابعادی

در این تحقیق، با استفاده از روش آنالیز ابعادی باکینگهام پارامترهای بی بعد موثر در مدل ترکیبی سرریز دریچه مستطیلی به دست آمد (رابطه ۱). در این حالت ۱۲ پارامتر مستقل با ۳ کمیت اصلی (طول، جرم و زمان) وجود دارد و از آن ۹ متغییر بدون بعد زیر حاصل می‌گردد. این ۱۲ پارامتر عبارتند از: $Q_t$ دبی کل سازه ترکیبی، g شتاب ثقل، h هد آب روی سرریز، μ لزجت دینامیلی سیال، θ زاویه راس مثلث، σ کشش سطحی، ρ چگالی سیال، v سرعت، d ارتفاع دریچه، b عرض دریچه، y فاصله بالای دریچه تا راس مثلث، B عرض سرریز.

$$f\left(\mathrm{Re}, We, Fr, \theta, \frac{Q_t}{\sqrt{g}\,h^{2.5}}, \frac{h}{d}, \frac{h}{y}, \frac{h}{b}, \frac{h}{B}\right) \qquad (۱)$$

که در آن Re ، We ، Fr به ترتیب عدد رینولدز، وبر و فرود می‌باشند. به دلیل اینکه تیغه آب بر روی سازه سرریز-روزنه دارای ضخامت کافی بوده از اثر کشش سطحی (عدد وبر) صرفنظر شده است. در رابطه فوق عدد رینولدز چون در محدوده بالایی است بنابراین از تاثیر لزجت چشم پوشی می‌شود. همچنین با توجه به اینکه در تحلیل ابعادی پارامتر دبی نماینده پارامتر سرعت نیز می‌باشد و در سرریزها عدد فرود در ضریب دبی نیز مستتر است، عدد فرود نیز در رابطه نهایی حذف گردیده است. از

www.SID.ir

Archive of SID



طرفی ترم بی بعد $\frac{Q_t}{\sqrt{g}h^{2.5}}$ را نیز می توان به $q_L$ یا دبی بی بعد شده یا همان ضریب دبی (Cd) نشان داد که در آن $Q_t$ دبی کل در حالت ترکیب سرریز- روزنه می‌باشد. در نهایت با فرض B و θ یکسان برای حالت سرریز و روزنه می‌توان نوشت:

$$q_L = Cd = \frac{Q_t}{\sqrt{g}h^{2.5}} = f\left(\frac{h}{d}, \frac{h}{b}, \frac{h}{y}\right) \qquad (۲)$$

## معادلات حاکم بر نرم افزار Flow-3D

به طور کلی، معادلات حاکم بر جریان سه بعدی در این نرم افزار عبارتند از معادله بقای جرم یا معادله پیوستگی و معادلات مومنتم. این معادلات که به معادلات سنت ونانت معروف می باشند، دارای اشکال مختلفی می باشند که در تحقیقات مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است (بلوچی و عابدینی، ۲۰۱۹). معادله بقای جرم یا معادله پیوستگی در این نرم افزار به صورت معادله ۳ ارائه شده است (راهنمای برنامه Flow-3D).

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial_t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + R\frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR} \qquad (۳)$$

که در این معادله ( $V_F$ ) مقدار نسبت حجم باز به جریان، ρ دانسیته سیال، (u, v, w) به ترتیب سرعت در راستای (x, y, z)، ($A_x$, $A_y$, $A_z$) به ترتیب مقادیر نسبت مساحت در راستای (x, y, z) R، و ξ مربوط به سیستم مختصات انتخابی، $R_{DIF}$ تابع دیفیوژن و $R_{SOR}$ تابع چشمه می باشند.

معادلات مومنتوم نیز به صورت شکل عمومی زیر در نرم افزار ارائه شده‌اند:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F}\left\{uA_x\frac{\partial u}{\partial x} + vA_y R\frac{\partial u}{\partial y} + wA_z\frac{\partial u}{\partial z}\right\} - \xi\frac{A_y v^2}{xV_F} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F}(u - u_w - \delta u_s) \qquad (۴)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F}\left\{uA_x\frac{\partial v}{\partial x} + vA_y R\frac{\partial v}{\partial y} + wA_z\frac{\partial v}{\partial z}\right\} + \xi\frac{A_y uv}{xV_F} = -\frac{1}{\rho}\left[R\frac{\partial p}{\partial y}\right] + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F}(v - v_w - \delta v_s) \qquad (۵)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F}\left\{uA_x\frac{\partial w}{\partial x} + vA_y R\frac{\partial w}{\partial y} + wA_z\frac{\partial w}{\partial z}\right\} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F}(w - w_w - \delta w_s) \qquad (۶)$$

که در این روابط ($G_x$, $G_y$, $G_z$) شتاب ثقل در جهات (x, y, z)، ($f_x$, $f_y$, $f_z$) شتاب‌های لزجت می‌باشند. ($b_x$, $b_y$, $b_z$) افت‌های جریان در محیط متخلخل و بخش آخر مقدار تزریق جرم در سرعت صفر می‌باشد. بعلاوه، $W_{sx}$، $W_{sy}$ و $W_{sz}$ تنش‌های برشی دیواره‌ها می‌باشند. برای اطلاعات بیشتر، می‌توان به راهنما و جزئیات نرم افزار رجوع کرد.

## سیستم‌های هوشمند

۱.۴.۲. شبکه عصبی چند لایه پرسپترون (MLP[1])

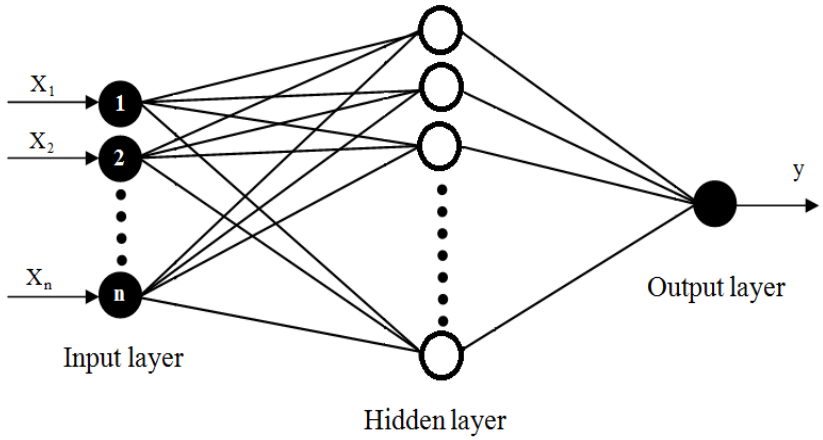
پرسپترون به مجموعه واحدی که برای ما عملیاتی انجام می‌دهند گفته می‌شود. شکل (۲) یک شبکه متعارف و معمولی دو لایه، از نوع چندلایه پیشرو را نشان می‌دهد که بین لایه‌های معرف ورودی وخروجی یک لایه پردازشگر در نظر گرفته شده است. پیشرو یا پیشخور[2] بدین مفهوم است که همه نرون‌ها از سمت چپ خود ورودی می‌گیرند. در لایه اول هیچ گونه پردازشی انجام نخواهد شد و روند اطلاعات و پردازش آنها توسط رابطهائی که دارای وزن می‌باشد و از هر گره به تمام گره‌های لایه بعدی متصل می‌باشند به لایه‌های میانی و لایه انتهایی که معرف مقادیر خروجی می‌باشد منتقل خواهد شد (بلوچی و همکاران، ۲۰۱۵).

[1] Multy Layer Perceptron

[2] Feed Forward

www.SID.ir

Archive of SID


**شکل ۲- یک شبکه ساده سه لایه MLP**

ورودی‌های مدنظر (X) از لایه اول وارد شده و پس از تاثیر وزن‌های مربوط به هر رابط در لایه میانی یا پنهانی، به لایه بعد منتقل می‌شود، نتیجه حاصل از ضرب این اوزان و ورودی‌ها در به صورت متناظر جمع خواهد شد پس از آن در تابع تحریک f که می‌تواند یک تابع خطی، پله‌ای، سیگموئیدی و یا تانژانت هیپرپولیکی، اثر خواهد کرد. همچنین این نتیجه بصورت ورودی برای لایه‌های بعد به صورت مسلسل عمل خواهد کرد تا به لایه آخر رسیده و حاصل به صورت خروجی ارائه خواهد شد. چنانچه نتایج حاصل از میانگین مربعات خطا[1] از خروجی‌های مدل و مقادیر مشاهده شده از حد مدنظر کمتر باشد روند مدل‌سازی خاتمه می‌یابد و در غیر این صورت طی سازو کاری ضرایب وزنی ( $w^1$، $w^2$،... ) تغییر کرده و روند حرکت اطلاعات از لایه ورودی به خروجی تکرار خواهد شد.

## شبکه عصبی توابع اساسی شعاعی (RBF[2])

این نوع از شبکه‌های عصبی مصنوعی، اطراف هر کدام از مشاهدات، شعاعی را در نظر می گیرد که هر کدام از داده های ورودی که در داخل آن شعاع قرار گیرد، آن داده ار درگیر می‌کند. نرون‌های لایه مخفی در شبکه‌های RBF دارای تابع غیرخطی گوسی می‌باشد. شبکه RBF دارای یک لایه ورودی و یک لایه مخفی و یک لایه خروجی است و ارتباط بین نرون‌های لایه ورودی و لایه مخفی بسادگی شبکه MLP نمی‌باشد. نرون‌های لایه مخفی، واحدهای چند بعدی هستند و بعد این نرون‌ها، برابر تعداد ورودی‌های شبکه است. آموزش RBF در دو بخش نظارت شده و بدون نظارت صورت می‌گیرد. روند آموزش به این صورت است که در ابتدا با یکی از روش‌های خوشه‌بندی، پارامترهای تابع گوسی لایه مخفی، تنظیم می‌شوند و سپس وزن‌های ارتباطی بین لایه مخفی و خروجی، به کمک یک الگوریتم یادگیری با نظارت، مانند روش بیشترین شیب در پس انتشار خطای استاندارد و یا روش گردیان مزدوج و یا روش مارکوآرت و ...، تنظیم می‌گردند (چنگ و همکاران، ۲۰۱۴؛ لوپز-مارتین، ۲۰۱۵).

## مدل شبکه عصبی رگرسیون تعمیم یافته (GRNN)

شبکه‌های عصبی رگرسیون تعمیم یافته یا Generalized Regression Neural Networks (GRNN)، یک نوع از شبکه عصبی می‌باشد که به وسیله دونالد اسپچ در سال ۱۹۹۱ مطرح شده است. این نوع از شبکه عصبی از سری شبکه‌های پیشرو با ناظر در آموزش هستند. این شبکه‌ها معمولا برای تقریب توابع به کار می‌روند، و حساسیت کم‌تری نسبت به مسائل با ورودی‌های غیر ایستا دارند که به دلیل رفتار پایه‌ی شعای یکان پنهان آن است. این شبکه‌ها نیازی به آموزش مکرر ندارند. الگوریتم GRNN بر اساس نظریه رگرسیون غیر خطی بنا شده است. به جز روند آموزشی لایه دوم، بقیه نکات آن همچون روش RBF است. ساختار شبکه GRNN در شکل (۳) نشان داده شده است. به صورت خلاصه، این مدل دارای ۴ لایه می‌باشد: لایه ورودی، لایه الگو، لایه مجموع و لایه خروجی. لایه ورودی شامل بردارهای ورودی می‌باشد، که

[1] Mean Square Error

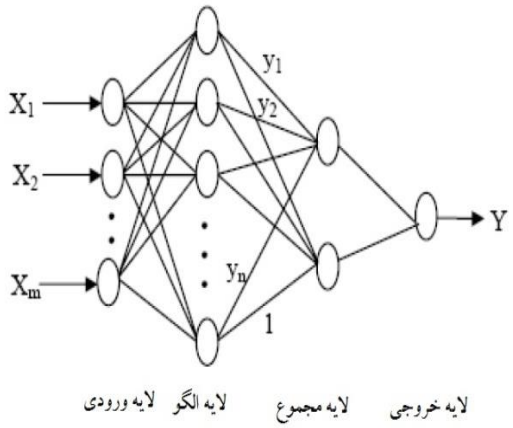
[2] Radial Basis Function

www.SID.ir

Archive of SID



m بعد دارند. لایه الگو دارای n بعد بوده و محاسبات مربوط به تابع انتقال گوسین را انجام می‌دهد. لایه مجموع، مجموع n بعد لایه الگو می‌باشد و در نهایت نیز لایه خروجی، که خروجی مدل را می‌دهد (لی و همکاران، ۲۰۰۶).




**شکل ۳- ساختار مدل GRNN**

## مدل درختی M5

اولین بار مدل درختی M5 را کوییلن در سال ۱۹۹۲ بر اساس روش طبقه بندی درختی برای ایجاد رابطه بین متغیرهای مستقل و وابسته ارائه کرد. این مدل، برخلاف مدل درخت تصمیم[1]، که برای داده های کیفی[2] استفاده می شود، برای هر دو نوع داده‌های کیفی و کمّی[3] قابل استفاده است (کوئینلن، ۱۹۸۶ و ۱۹۹۲). مدل M5 مشابه توابع خطی جدا شده[4] است که ترکیبی از مدل های رگرسیون خطی و رگرسیون درختی است و در علوم مختلف کاربرد فراوان دارد. مدل رگرسیون برای کل فضای داده‌های معادلهٔ رگرسیون ارائه می‌دهد. ولی در مدل رگرسیون درختی محدودهٔ داده‌ها به زیرناحیه‌هایی که برگ[5] نامیده می‌شوند تقسیم و به هر برگ یک برچسب عددی داده می‌شود. جایگزینی معادلهٔ رگرسیون خطی به جای برچسب در گره‌ها شیوه‌ای است که در مدل M5 اجرا می‌شود و می‌تواند متغیرهای عددی پیوسته را پیش بینی یا برآورد کند (پال و دسوال، ۲۰۰۹). ساختار درخت تصمیم گیری شبیه درختی است که از ریشه[6]، شاخه‌ها[7]، گره‌ها[8]، و برگ‌ها تشکیل شده است. درخت تصمیم از بالا به پایین ترسیم می‌شود. ریشه، به منزلهٔ اولین گره، در بالا قرار می‌گیرد و زنجیره‌ای از شاخه‌ها و گره‌ها به برگ‌ها ختم می‌شود. هر گره مربوط به یک متغیر پیش بینی کننده است و به وسیلهٔ شاخه‌ها عمل انشعاب در گره انجام می‌شود. شاخه‌ها شامل بازه‌ای عددی است که از گره والد[9] منشعب می‌شود و به گره فرزند[10] می‌رسد. در مدل M5 از هر گره والد دو شاخه منشعب می‌شود.

ساخت مدل درخت تصمیم گیری در دو مرحله انجام می‌شود. در مرحلهٔ اول درخت تصمیم گیری با انشعاب سازی داده‌ها تشکیل می‌شود. معیار انشعاب در مدل M5 بیشینه سازی کاهش انحراف معیار داده‌ها در گره فرزند است. زمانی که امکان کاهش انحراف معیار داده‌های گره فرزند میسر نباشد گره والد آن منشعب نمی‌شود و به گره پایانی یا برگ نمی‌رسد. کاهش انحراف معیار با رابطهٔ (۷) برآورد می‌شود (پال و دسوال، ۲۰۰۹):

$$SDR = sd(T) - \sum \frac{|T_i|}{|T|} sd(T_i) \qquad (۷)$$

SDR کاهش انحراف معیار در گره فرزند، T مجموعه داده‌های ورودی به گره والد، $T_i$ زیرمجموعهٔ داده‌های ورودی به گره والد، و sd انحراف معیار است.

به علت فرایند انشعاب، انحراف معیار داده‌ها در گره فرزند کمتر از گره والد است. بنابراین همگنی بیشتری دارد. در مدل M5، بعد از آزمودن همهٔ انشعابات ممکن از یگ گره، انشعابی که بیشترین کاهش انحراف معیار را تولید کند انتخاب می‌شود.

## نتیجه گیری و بحث

با توجه به اهمیتی که در بخش مقدمه پیرامون تخمین دبی و بهره جستن از سازه‌هایی همچون سرریز و دریچه و یا ترکیب آنها بیان گردید؛ در این بخش با انجام مدل سازی‌های عددی با نرم افزار Flow-3D بر روی سازه سرریز لبه تیز مثلثی- دریچه مستطیلی، اثر پارامترهای هیدرولیکی و هندسی بر روی ضریب دبی، مورد مطالعه قرار گرفته است. در ادامه این بخش نیز با توجه به نتایج مدلهای هوش مصنوعی مورد استفاده در این تحقیق

[1] Decision tree
[2] Categorical
[3] Quantitative
[4] Piece-wise linear functions
[5] Leaf
[6] Root
[7] Branches
[8] Nodes
[9] Parent node
[10] Child node

www.SID.ir

Archive of SID



(MLP، RBF، GRNN و M5P)، آنالیز دقت سنجی انجام خواهد شد و نتایج به دست آمده به منظور انتخاب بهترین مدل با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

## مقایسه نتایج مدل‌های عددی با فیزیکی

در تحقیق حاضر با استفاده از مدل RNG و با شرط مرزی دبی ورودی به کانال، چند مدل ترکیبی سرریز لبه تیز مثلثی-دریچه مستطیلی شبیه سازی شدند. شکل (۴)، سه مرحله مختلف این مدل سازی در دو بعد طولی (x) و ارتفاعی (z) را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل‌ها به وضوح مشخص است با اجرا شدن مدل عددی آب ابتدا از دریچه عبور کرده و سپس به مرور زمان از سرریز بالا می‌آید تا مدل به پایداری نسبی برسد. در زمان پایداری مدل، ارتفاع آب تقریبا ثابت بوده و به ارتفاع نهایی خود می‌رسد. سپس مقدار هد آب در بالا دست (H) مدل ترکیبی به عنوان خروجی از مدل عددی استخراج گردید که نتایج آن در ادامه آورده خواهند شد. بنابراین، در شکل (۴)، اولین حالت (از بالا) مربوط به نحوه قرارگیری سازه در مدل عددی می‌باشد که هنوز آبی وارد کانال نشده است، دومین حالت مربوط به ابتدای RUN می‌باشد که آب از دریچه عبور کرده اما هنوز ارتفاع آب به راس سرریز نرسیده است، به عبارت دیگر هنوز مدل به حالت ماندگار نرسیده است. سومین شکل مربوط به زمانی است که جریان تقریبا ماندگار شده است و آب هم از دریچه و هم از روی سرریز عبور کرده است. بدیهی است که روند این تصاویر دقیقا مشابه روند انجام آزمایشات فیزیکی می‌باشد (که هدف این تحقیق نیست)؛ بدین معنی که اگر در کانال آزمایشگاهی نیز آب را در کانال رها سازیم، همین مراحل مشاهده می‌گردد.

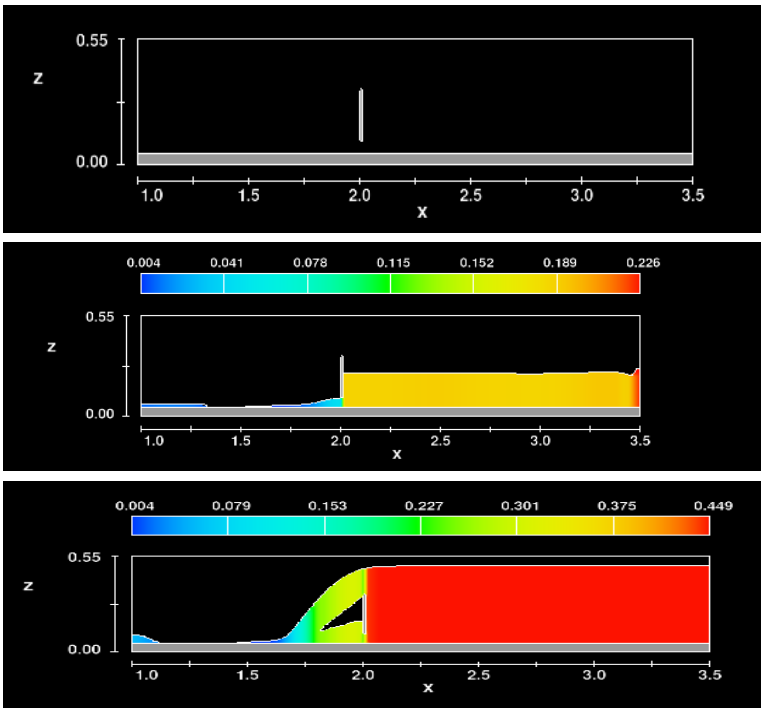
همانطور که پیشتر نیز بیان گردید در تحقیق حاضر، چهار مدل مختلف سرریز- دریچه در چندین دبی مختلف، شبیه سازی شده است. برای راحتی کار، این چهار مدل به صورت زیر نام گذاری شده‌اند:

**مدل اول:** با عرض دریچه ۰/۰۵ متر، ارتفاع دریچه ۰/۰۱۲۵ متر و y برابر با ۰/۲۷ متر.

**مدل دوم:** با عرض دریچه ۰/۰۵ متر، ارتفاع دریچه ۰/۰۲۵ متر و y برابر با ۰/۲۶ متر.

**مدل سوم:** با عرض دریچه ۰/۰۵ متر، ارتفاع دریچه ۰/۰۳۷۵ متر و y برابر با ۰/۲۴ متر.

**مدل چهارم:** با عرض دریچه ۰/۰۵ متر، ارتفاع دریچه ۰/۰۵ متر و y برابر با ۰/۲۳ متر.



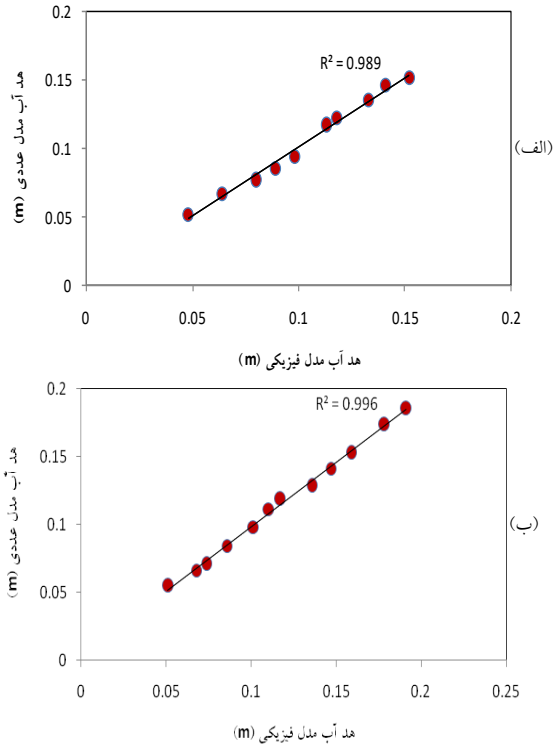

**شکل ۴- مراحل مختلف مدل سازی عددی در دو بعد: الف) سازه قبل از شروع جریان، ب) سازه در نیمه مدل سازی و ج) سازه در شرایط جریان پایدار و ماندگار**

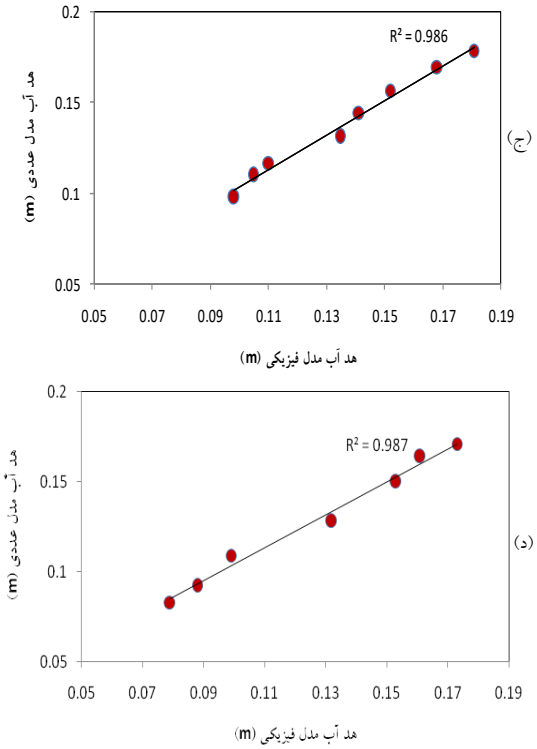
www.SID.ir

Archive of SID



شکل (۵) (الف تا د) مقایسه هد آب (h) در مدل عددی با مدل فیزیکی سرریز لبه تیز مثلی-دریچه مستطیلی برای مدل اول تا چهارم را نشان می‌دهد. نقاط موجود در این شکل نشان دهنده هد آب برای چندین دبی مختلف می‌باشد. با توجه به شکل، نتایج مقایسه هد آب در مدل عددی و فیزیکی دارای $R^2$ برابر با ۰/۹۸۹، ۰/۹۹۶، ۰/۹۸۶ و ۰/۹۸۷ به ترتیب برای مدل اول تا چهارم می‌باشد. بنابراین، مدل عددی به خوبی هد آب را تخمین زده است و نتایج شبیه سازی مدل اول دقت خوبی را نشان می‌دهند. همانطور که در بخش پیشینه تحقیق نیز بیان گردید، مقایسه نتایج مدل عددی و فیزیکی در سایر تحقیقات انجام شده با نرم افزار Flow-3D نیز دارای $R^2$ خوبی می‌باشند (بالای ۰/۹۵). بنابراین می‌توان گفت که این نرم افزار در شبیه سازی مدل ترکیبی سرریز لبه تیز مثلثی-دریچه مستطیلی، همچون شبیه سازی سایر موارد ذکر شده در پیشینه تحقیق کارایی خوبی از خود نشان می‌دهد.



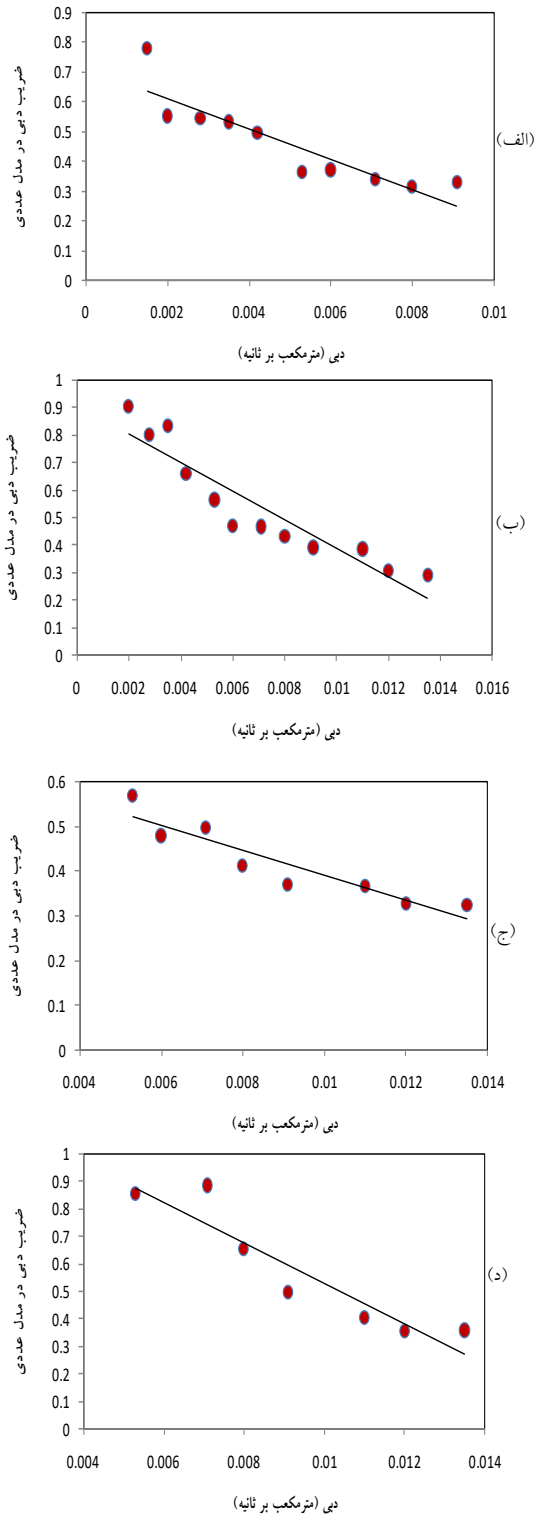

**شکل ۵- مقایسه هد آب (h) در مدل عددی و در مدل فیزیکی برای مدل اول تا چهارم (الف تا د).**

شکل (۶) (الف تا د) به ترتیب تغییرات ضریب دبی در مقابل دبی جریان برای مدل اول، دوم، سوم و چهارم را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل‌ها مشاهده می‌گردد که در تمام مدل‌ها با افزایش دبی، ضریب دبی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر ضریب دبی با دبی رابطه معکوس دارد. همانگونه که مشخص است، ضریب دبی برای مدل اول تقریبا بین ۰/۳۱ تا ۰/۷۸؛ مدل دوم بین ۰/۲۸ تا ۰/۹؛ مدل سوم بین ۰/۳۲ تا ۰/۵۶ و مدل چهارم بین ۰/۳۵ تا ۰/۸۶ می‌باشد. در نتیجه، به طور کلی ضریب دبی در این سازه ترکیبی سریز لبه تیز مثلثی-دریچه مستطیلی تقریبا بین ۰/۳ تا ۰/۹ می باشد. این محدوده، محدوده ای مناسب برای ضریب دبی و مشابه نتایج سایر محققین می باشد (صالحی و عظیمی، ۲۰۱۹).

www.SID.ir

Archive of SID






**شکل ۶- تغییرات ضریب دبی در مقابل دبی برای مدل اول تا چهارم (الف تا د).**

جدول (۱)، مقایسه نتایج سه شاخص RMSE، MAE و MARE برای مدل‌های شبیه سازی شده در این مطالعه را نشان می‌دهد. این ۳ شاخص آماری برای داده‌های ضریب دبی هر چهار مدل و کل داده‌های ضریب دبی استخراج شده‌اند. با توجه به اعداد شاخص RMSE در جدول ۱ مشاهده می‌گردد که تمامی مدل‌ها دقت بالایی دارند و دقت تخمین ضریب دبی کل مدل‌ها (۰/۰۶۷۳) نیز مناسب می‌باشد. اعداد شاخص MAE نیز نشان دهنده دقت بالای هر چهار مدل و کل مدل‌ها (۰/۲۲۱) در تخمین ضریب دبی می‌باشد. اعداد شاخص MRAE نیز که نشان دهنده دقت بالای هر چهار مدل و کل مدل‌ها (۰/۲۹۵) می‌باشد. بنابراین، با استفاده از این شاخص‌های آماری معروف آزمون دقت سنجی نیز برای تمامی مدل‌های شبیه سازی شده انجام گردید و نتایج نشان دهنده دقت و کارایی بالای مدل عددی Flow-3D در تخمین ضریب دبی در سازه ترکیبی سرریز لبه تیز مثلثی- دریچه مستطیلی می‌باشد.

**جدول ۱- نتایج شاخص‌های آماری برای ضریب دبی تخمین زده شده برای هر چهار مدل و کل مدل‌ها**

| | مدل ۱ | مدل ۲ | مدل ۳ | مدل ۴ | کل مدل‌ها |
|---|---|---|---|---|---|
| RMSE | ۰/۰۶۷۴ | ۰/۰۶۷۵ | ۰/۰۳۶۳ | ۰/۰۹ | ۰/۰۶۷۳ |
| MAE | ۰/۲۲۵ | ۰/۲۲۳ | ۰/۱۶۸ | ۰/۲۶۱ | ۰/۲۲۱ |
| MRAE | ۰/۳۱۱ | ۰/۲۹ | ۰/۲۵۶ | ۰/۳۲۱ | ۰/۲۹۵ |

جدول (۲) نیز مشابه جدول (۱) می‌باشد، اما مقایسه نتایج سه شاخص آماری RMSE، MAE و MARE برای هد آب تخمین زده شده برای چهار مدل سریزلبه تیز مثلثی-دریچه مستطیلی می‌باشد. با توجه به اعداد شاخص RMSE در جدول ۲ مشاهده می‌گردد که تمامی مدل‌ها دقت بالایی دارند و دقت تخمین هد (h) کل مدل‌ها (۰/۰۰۴۱) نیز بالا می‌باشد. اعداد شاخص MAE نیز نشان دهنده دقت بالای هر چهار مدل و کل مدل‌ها (۰/۰۶۱) در تخمین هد آب می‌باشد. اعداد شاخص MRAE نیز که نشان دهنده دقت بالای هر چهار مدل و کل مدل‌ها (۰/۱۸۴) می‌باشد. بنابراین، با استفاده از این شاخص‌های آماری پرکاربرد آزمون دقت سنجی نیز برای تمامی مدل‌های شبیه سازی شده انجام گردید و نتایج نشان دهنده دقت و کارایی بالای مدل عددی Flow-3D در

www.SID.ir

Archive of SID



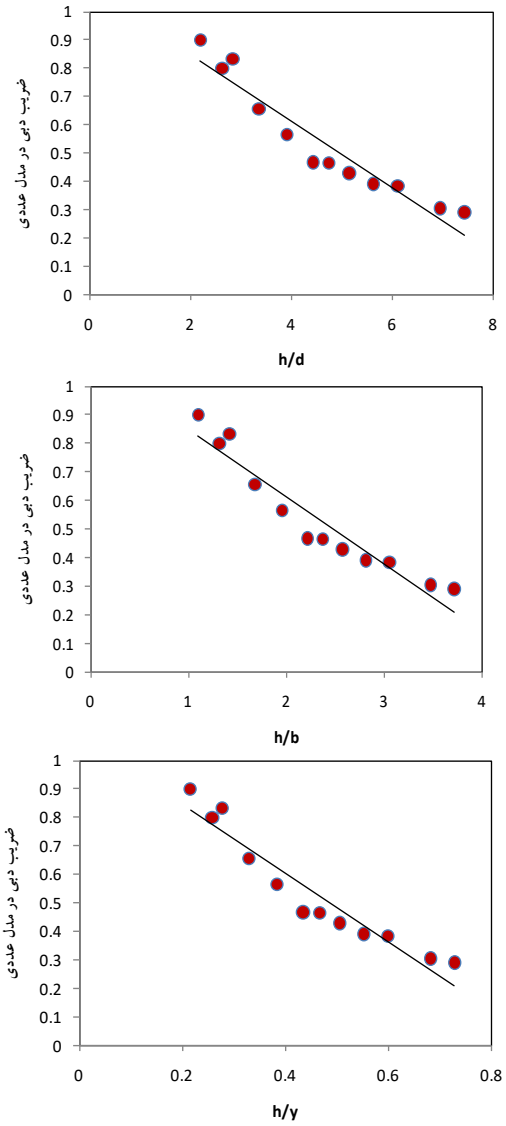
تخمین هد آب در سازه ترکیبی سرریز لبه تیز مثلثی-دریچه مستطیلی می‌باشد.

**جدول ۲- نتایج شاخص‌های آماری برای هد آب تخمین زده شده برای هر چهار مدل و کل مدل‌ها**

| | مدل ۱ | مدل ۲ | مدل ۳ | مدل ۴ | کل مدل‌ها |
|---|---|---|---|---|---|
| RMSE | ۰/۰۰۳۶ | ۰/۰۰۴۲ | ۰/۰۰۳۷ | ۰/۰۰۴۹ | ۰/۰۰۴۱ |
| MAE | ۰/۰۵۸ | ۰/۰۶۱ | ۰/۰۵۷ | ۰/۰۶۵ | ۰/۰۶۱ |
| MRAE | ۰/۱۹۳ | ۰/۱۸۵ | ۰/۱۵۸ | ۰/۱۹۵ | ۰/۱۸۴ |

## تغییرات پارامترهای بی بعد در مقابل ضریب دبی

با توجه به مطالب ذکر شده، ضریب دبی در این تحقیق به سه پارامتر بی بعد h/b، h/d و h/y ربط داده شده است. شکل ۷، ضریب دبی در مدل عددی را در مقابل سه پارامتر بی بعد برای مدل دوم نشان می‌دهد. لازم به ذکر است، که نتایج تمامی چهار مدل یکسان می‌باشند که با توجه به محدودیت مقاله، تنها نتایج مدل دوم در این بخش آورده شده است. با توجه به این شکل مشخص می‌باشد که در تمام مدل‌ها با افزایش نسبت بی بعد h/b، ضریب دبی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر ضریب دبی با نسبت بی بعد h/b رابطه معکوس دارد. از آنجایی که برای هر مدل پارامتر b ثابت می‌باشد، می‌توان اینچنین نتیجه گرفت که با افزایش h ضریب دبی کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، می‌توان مشاهده نمود که در تمام مدل‌ها با افزایش نسبت بی بعد h/d و h/y، ضریب دبی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر ضریب دبی با نسبت بی بعد h/d و h/y رابطه معکوس دارد. با توجه به شکل ۷ مشخص می باشد که محدوده پارامترهای بی بعد h/b، h/d و h/y به ترتیب برابر با ۱ تا ۴، ۲ تا ۸ و ۰/۲ تا ۰/۸ می باشد.




**شکل ۷- تغییرات ضریب دبی در مقابل پارامتر بی بعد h/b، h/d و h/y برای مدل دوم.**

## مدلهای هوش مصنوعی

در این تحقیق با توجه به اهداف این تحقیق و با توجه به پرکاربرد شدن و کارایی بالای مدلهای هوش مصنوعی

www.SID.ir

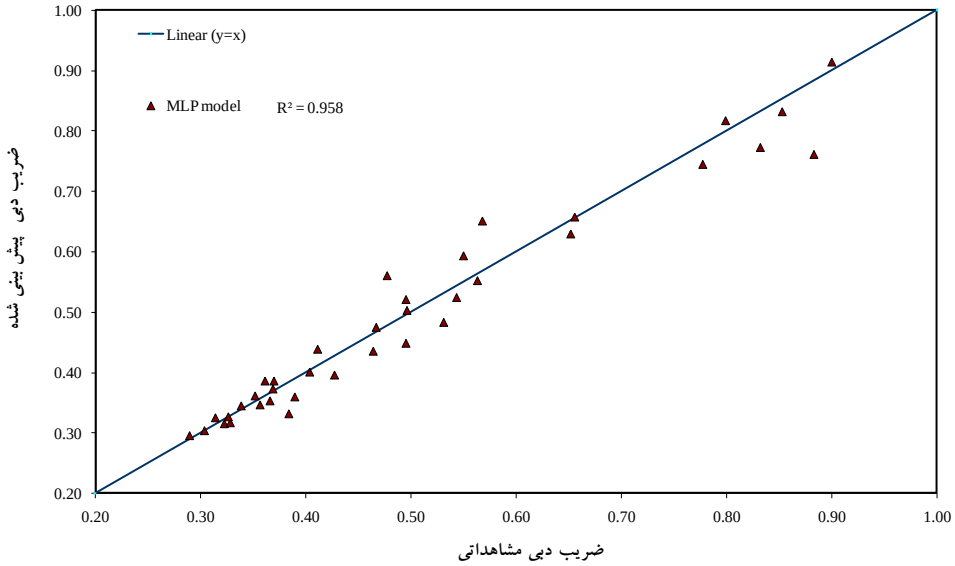
Archive of SID



در تخمین پدیده‌های هیدرولیکی، چهار مدل هوش مصنوعی مختلف (MLP، RBF، GRNN و M5P) تهیه شدند و نتایج آنها با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفتند. در ادامه جزییات مربوط به این مدلها و نتایج آنها به صورت کیفی و کمی با یکدیگر مقایسه خواهند شد و بهترین مدل از میان چهار مدل هوش مصنوعی مورد استفاده جهت پیش بینی ضریب دبی در سازه ترکیبی سرریز لبه تیز مثلثی- دریچه مستطیلی معرفی خواهد شد. لازم به ذکر است که در این تحقیق، پارامترهای ورودی به مدلهای هوش مصنوعی نسبت‌های بی بعد h/b، h/d و h/y؛ و پارامتر خروجی مدل‌ها ضریب دبی می‌باشد. همچنین، روند کار بدین صورت می باشد که ابتدا با استفاده از ۷۰ درصد داده ها مدل آموزش (train) می بیند و سپس با استفاده از ۳۰ درصد باقیمانده داده ها مرحله صحت سنجی (validation) مدل انجام می گردد.

## مدل MLP

توضیحات مختصر مربوط به مدل هوش مصنوعی Multy Layer Perceptron یا MLP در بخش مواد و روش‌ها بیان گردید. در این مدل با انجام سعی و خطای فراوان یک مدل سه لایه با تعداد نورون های لایه میانی برابر با ۱۱ انتخاب شده است. شکل ۸ مقایسه ضریب دبی مشاهداتی در مقابل تخمین زده شده با استفاده از مدل هوش مصنوعی MLP برای سازه ترکیبی سرریز لبه تیز مثلثی-دریچه مستطیلی می باشد. همانطور که در شکل مشخص می‌باشد، مقادیر پیش بینی شده با مقادیر مشاهداتی همخوانی خوبی نشان می‌دهند ($R^2$=0.958).



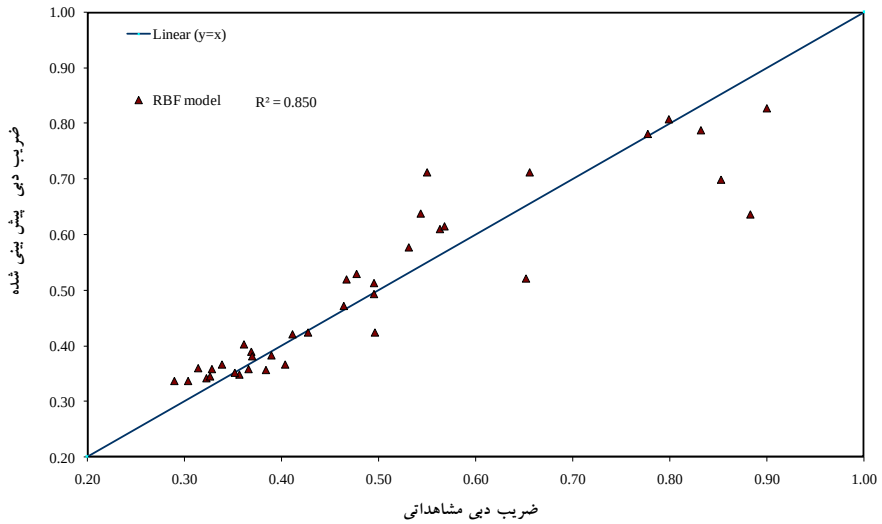

**شکل ۸- مقایسه ضریب دبی مشاهداتی در مقابل تخمین زده شده با استفاده از مدل هوش مصنوعی MLP برای سازه ترکیبی سرریز لبه تیز مثلثی-دریچه مستطیلی**

## مدل RBF

توضیحات مربوط به مدل هوش مصنوعی Radial Basis Function یا RBF در بخش مواد و روش‌ها بیان گردید. در این مدل با انجام سعی و خطای فراوان یک مدل با شعاع ۸ و تعداد نورون های ۹ انتخاب شده است. شکل ۹ مقایسه ضریب دبی مشاهداتی در مقابل تخمین زده شده با استفاده از مدل هوش مصنوعی RBF برای سازه ترکیبی سرریز لبه تیز مثلثی-دریچه مستطیلی می باشد. همانطور که در شکل مشخص می باشد، مقادیر پیش بینی شده با مقادیر مشاهداتی همخوانی تقریبا خوبی نشان می‌دهند ($R^2$=0.85). با توجه به این شکل مشاهده می گردد که مدل RBF در ضرایب دبی بالا در این تحقیق (محدوده ضریب دبی بالا ۰/۶) دقت کمتری از خود نشان می دهد.

www.SID.ir

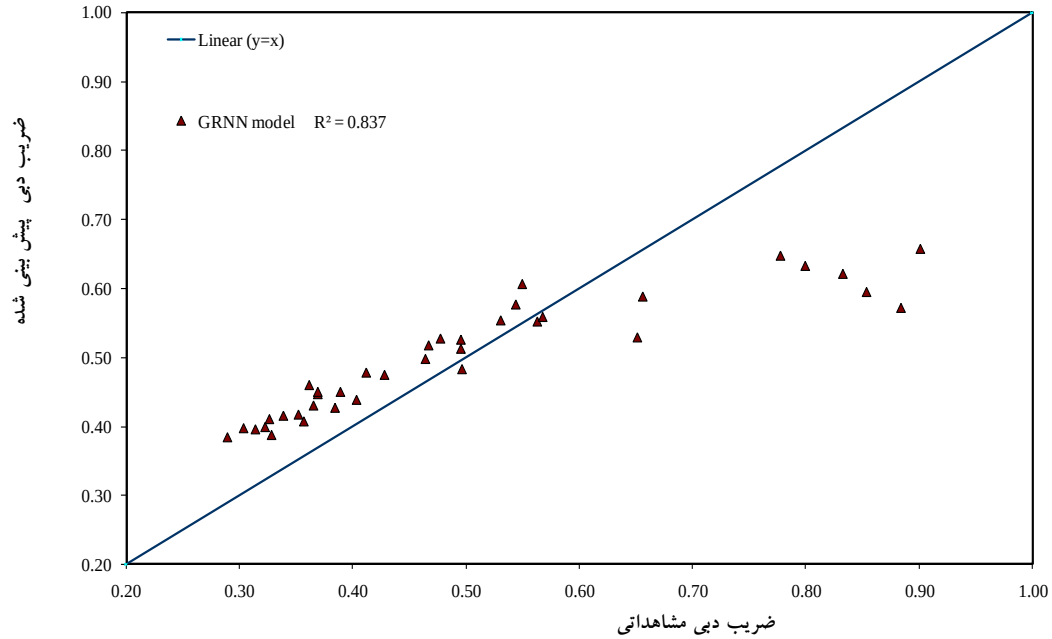
Archive of SID


**شکل ۹- مقایسه ضریب دبی مشاهداتی در مقابل تخمین زده شده با استفاده از مدل هوش مصنوعی RBF برای سازه ترکیبی سرریز لبه تیز مثلثی-دریچه مستطیلی**

## مدل GRNN

توضیحات مربوط به مدل هوش مصنوعی Generalized Regression Neural Networks یا GRNN در بخش مواد و روش‌ها بیان گردید. شکل ۱۰ مقایسه ضریب دبی مشاهداتی در مقابل تخمین زده شده با استفاده از مدل هوش مصنوعی GRNN برای سازه ترکیبی سرریز لبه تیز مثلثی-دریچه مستطیلی می باشد. همانطور که در شکل مشخص می باشد، مقادیر پیش بینی شده با مقادیر مشاهداتی همخوانی ضعیف تری نسبتا به مدل های پیشین دارند ($R^2$=0.837). این عدم همخوانی بالا یا ضعف مدل GRNN، در ضرایب دبی بیشتر مشهودتر می باشد. با توجه به شکل ۱۰، مشاهده می گردد که مدل GRNN نیز در محدوده ضرایب دبی بالا در این تحقیق (بیشتر از ۰/۷۵) دقت کمتری نسبت به ضرایب دبی پایین از خود نشان می دهد.




**شکل ۱۰- مقایسه ضریب دبی مشاهداتی در مقابل تخمین زده شده با استفاده از مدل هوش مصنوعی GRNN برای سازه ترکیبی سرریز لبه تیز مثلثی-دریچه مستطیلی**

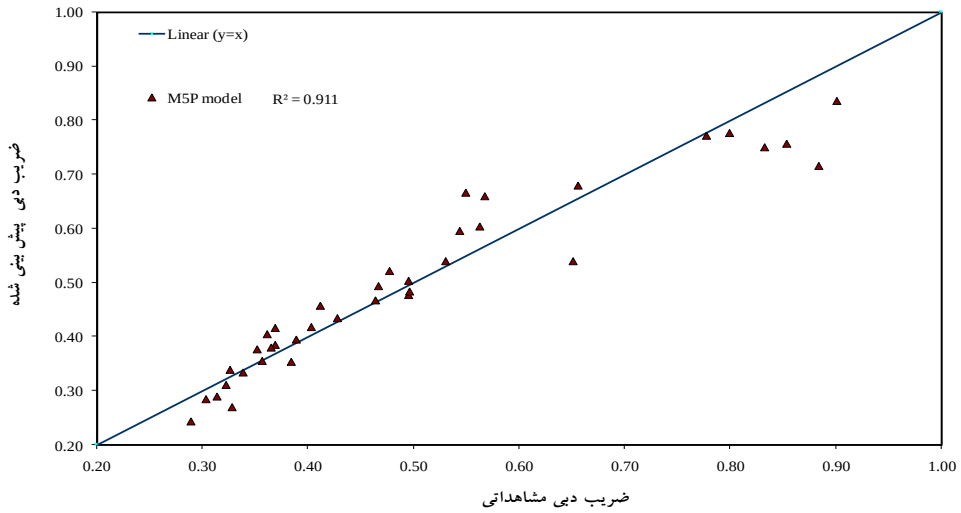
www.SID.ir

Archive of SID



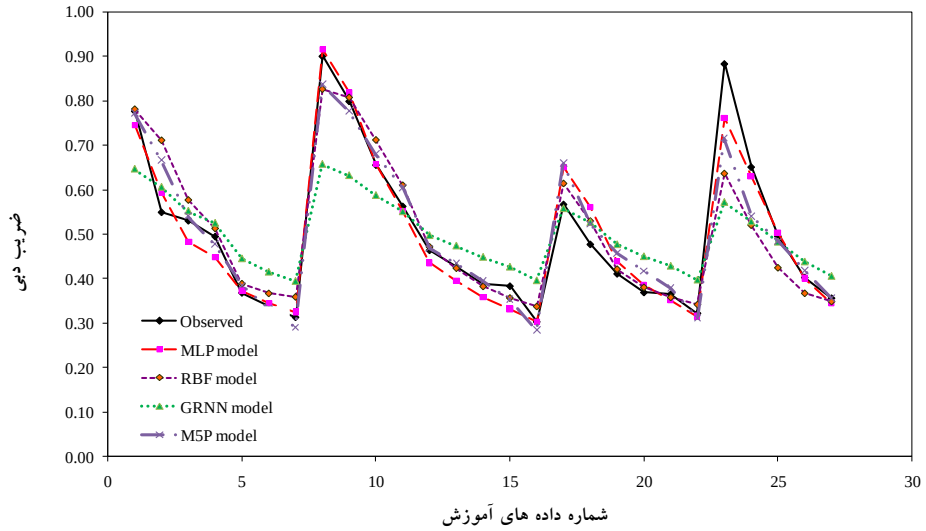
**مدل M5P**

توضیحات مربوط به مدل هوش مصنوعی شبه درختی یا M5P در بخش مواد و روش‌ها بیان گردید. در این مدل، با توجه به داده های موجود تعداد دو شاخه برای مدل شبه درختی ایجاد گردید. شکل ۱۱ مقایسه ضریب دبی مشاهداتی در مقابل تخمین زده شده با استفاده از مدل هوش مصنوعی M5P برای سازه ترکیبی سرریز لبه تیز مثلثی-دریچه مستطیلی می باشد. همانطور که در شکل مشخص می باشد، مقادیر پیش بینی شده با مقادیر مشاهداتی همخوانی خوبی نشان می‌دهند ($R^2$=0.911).




**شکل۱۱- مقایسه ضریب دبی مشاهداتی در مقابل تخمین زده شده با استفاده از مدل هوش مصنوعی M5P برای سازه ترکیبی سرریز لبه تیز مثلثی-دریچه مستطیلی**

همانطور که پیشتر گفته شد، مدلهای هوش مصنوعی مورد استفاده در این تحقیق (MLP، RBF، GRNN و M5P) دارای دو بخش آموزش و صحت سنجی می‌باشند. بنابراین، بررسی دقت هر دو این بخش‌ها و همچنین کل داده‌ها حائز اهمیت می‌باشد. از اینرو، در این بخش به انجام آنالیز دقت سنجی برای بخش آموزش، صحت سنجی و کل داده ها پرداخته می شود. شکل ۱۲ مقایسه ضریب دبی پیش بینی شده در سازه ترکیبی سرریز لبه تیز مثلثی-دریچه مستطیلی با استفاده از مدلهای هوش مصنوعی MLP، RBF، GRNN و M5P، با داده‌های مشاهداتی برای مرحله آموزش می‌باشد. همانطور که در شکل مشخص می‌باشد، نتایج مدل MLP همخوانی بهتری با داده‌های مشاهداتی نشان می‌دهد. از طرف دیگر، مدل GRNN نتایج ضعیف تری را نسبت به سایر مدل‌ها از خود نشان می‌دهد.



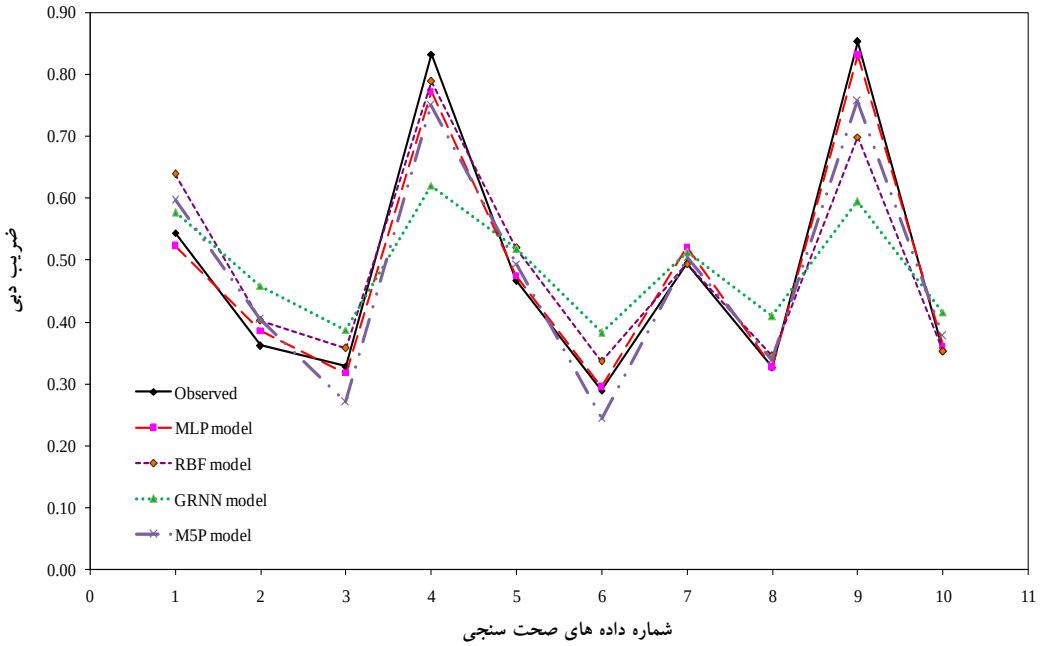

**شکل ۱۲- مقایسه ضریب دبی مشاهداتی در مقابل تخمین زده شده با استفاده از مدل های هوش مصنوعی MLP، RBF، GRNN و M5P برای مرحله آموزش**

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱۳ مقایسه ضریب دبی پیش بینی شده در سازه ترکیبی سرریز لبه تیز مثلثی- دریچه مستطیلی با استفاده از مدلهای هوش مصنوعی MLP، RBF، GRNN و M5P، با داده‌های مشاهداتی برای مرحله صحت سنجی می‌باشد. همانطور که در شکل مشخص می‌باشد، به نظر می‌رسد که نتایج مدل MLP همخوانی بهتری با داده‌های مشاهداتی نشان می‌دهد. از طرف دیگر نیز به نظر می‌رسد که مدل GRNN نتایج ضعیف تری را نسبت به سایر مدل‌ها از خود نشان می‌دهد.




**شکل ۱۳- مقایسه ضریب دبی مشاهداتی در مقابل تخمین زده شده با استفاده از مدل های هوش مصنوعی MLP، RBF، GRNN و M5P برای مرحله صحت سنجی**

در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ به صورت کیفی نتایج مدلها در دو بخش آموزش و صحت سنجی مورد بررسی قرار گرفت. حال به منظور بررسی دقیق‌تر عملکرد و دقت مدل‌ها به صورت کمی، از شاخص‌های خطای آماری معروف از جمله ریشه میانگین مربع خطا یا RMSE (Root Mean Square Error)، میانگین خطای مطلق MAE (Mean Absolute Error)، میانگین خطای نسبی یا MARE (Mean Absolute Relative Error) و شاخص NSE (Nash–Sutcliffe Efficiency) استفاده شده است. جدول ۳، نتایج مربوط به شاخص های آماری RMSE، MAE، MARE، NSE و $R^2$ برای مدل های هوش مصنوعی مورد استفاده در این تحقیق (MLP، RBF، GRNN و M5P) برای مرحله آموزش، صحت سنجی و کل داده‌ها را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که هرچه اعداد مربوط به شاخص‌های RMSE، MAE و MARE به صفر؛ و شاخص NSE و $R^2$ به یک (یا ۱۰۰، چنانچه بر حسب درصد باشند) نزدیک‌تر باشند، دقت نتایج بهتر می‌باشد. لازم به ذکر است که به منظور ارزیابی بهتر مدل‌ها و یافتن برترین مدل هوش مصنوعی در این تحقیق، اعداد شاخص‌های آماری موجود را بر اساس دقت آنها از دقت بیشتر (با رتبه ۱) به کمترین دقت (با رتبه ۴) تقسیم بندی شدند.

www.SID.ir

Archive of SID



**جدول ۳- نتایج مربوط به شاخص های آماری مختلف برای مدل هایMLP ، RBF، GRNN و M5P برای مرحله آموزش، صحت سنجی و کل داده ها**

| نام مدل | | شاخص‌های آماری | | | | | | | | | | مجموع رتبه‌ها |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $R^2$ (%) | رتبه | MAE | رتبه | MARE (%) | رتبه | RMSE | رتبه | NSE | رتبه | |
| MLP | داده‌های آموزش | ۹۵/۵ | ۱ | ۰/۰۲۹ | ۱ | ۵/۶۲ | ۱ | ۰/۰۴ | ۱ | ۰/۹۴۴ | ۱ | ۵ |
| | داده‌های صحت سنجی | ۹۹/۱ | ۱ | ۰/۰۱۹ | ۱ | ۳/۵ | ۱ | ۰/۰۲۵ | ۱ | ۰/۹۹۷ | ۱ | ۵ |
| | کل داده‌ها | ۹۵/۸ | ۱ | ۰/۰۲۶ | ۱ | ۵/۰۴ | ۱ | ۰/۰۳۷ | ۱ | ۰/۹۸۴ | ۱ | ۵ |
| RBF | داده‌های آموزش | ۸۲/۹ | ۴ | ۰/۰۴۵ | ۳ | ۸/۵۶ | ۳ | ۰/۰۷۱ | ۳ | ۰/۸۲۹ | ۳ | ۱۶ |
| | داده‌های صحت سنجی | ۹۱/۴ | ۳ | ۰/۰۴۸ | ۳ | ۹/۰۷ | ۲ | ۰/۰۶۵ | ۳ | ۰/۹۸۲ | ۳ | ۱۴ |
| | کل داده‌ها | ۸۵ | ۳ | ۰/۰۴۶ | ۳ | ۸/۷ | ۳ | ۰/۰۶۹ | ۳ | ۰/۹۴۳ | ۳ | ۱۵ |
| GRNN | داده‌های آموزش | ۸۳/۴ | ۳ | ۰/۰۷۸ | ۴ | ۱۵/۳ | ۴ | ۰/۱۰۳ | ۴ | ۰/۷۳۳ | ۴ | ۱۹ |
| | داده‌های صحت سنجی | ۸۴/۹ | ۴ | ۰/۰۹۷ | ۴ | ۱۹/۳ | ۴ | ۰/۱۲۲ | ۴ | ۰/۹۳۶ | ۴ | ۲۰ |
| | کل داده‌ها | ۸۳/۷ | ۴ | ۰/۰۸۳ | ۴ | ۱۶/۳۸ | ۴ | ۰/۱۰۹ | ۴ | ۰/۸۶ | ۴ | ۲۰ |
| M5P | داده‌های آموزش | ۹۰ | ۲ | ۰/۰۳۶ | ۲ | ۶/۶۱ | ۲ | ۰/۰۵۴ | ۲ | ۰/۹ | ۲ | ۱۰ |
| | داده‌های صحت سنجی | ۹۳/۸ | ۲ | ۰/۰۴۵ | ۲ | ۱۰/۰۳ | ۳ | ۰/۰۵۳ | ۲ | ۰/۹۸۸ | ۲ | ۱۱ |
| | کل داده‌ها | ۹۱/۱ | ۲ | ۰/۰۳۸ | ۲ | ۷/۵۳ | ۲ | ۰/۰۵۴ | ۲ | ۰/۹۶۶ | ۲ | ۱۰ |

با توجه به جدول ۳ و برای مرحله آموزش، مجموع رتبه بندی شاخص‌های آماری استفاده شده نشان می‌دهند که به ترتیب مدل‌های MLP، M5P، RBF و GRNN با مجموع رتبه بندی ۵، ۱۰، ۱۶ و ۱۹ دارای بیشترین دقت می‌باشند. به عنوان مثال، شاخص های آماری RMSE، MAE، MARE، NSE و $R^2$ برای بهترین مدل یعنی MLP به ترتیب برابر با ۰/۰۴، ۰/۰۲۹، ۵/۶۲، ۰/۹۴۴ و ۹۵/۵؛ و برای ضعیف ترین مدل یعنی GRNN به ترتیب برابر با ۰/۱۰۳، ۰/۰۷۸، ۱۵/۳، ۰/۷۳۳ و ۸۳/۴ می باشد. بعلاوه، برای مرحله صحت سنجی، مجموع رتبه بندی شاخص‌های آماری استفاده شده نشان می‌دهند که به ترتیب مدل‌های MLP، M5P، RBF و GRNN با مجموع رنکینگ ۵، ۱۱، ۱۴ و ۲۰ دارای بیشترین دقت می‌باشند. به عنوان مثال، شاخص های آماری RMSE، MAE، MARE، NSE و $R^2$ برای بهترین مدل یعنی MLP به ترتیب برابر با ۰/۰۲۵، ۰/۰۱۹، ۳/۵، ۰/۹۹۷ و ۹۹/۱؛ و برای ضعیف ترین مدل یعنی GRNN به ترتیب برابر با ۰/۱۲۲، ۰/۰۹۷، ۱۹/۳، ۰/۹۳۶ و ۸۴/۹ می باشد. هرچند مرحله صحت سنجی اهمیت ویژه‌ای در تعیین دقت مدل‌ها دارد، اما از آنجا که روند همه مجموع رتبه‌ها در هر دو مرحله آموزش و صحت سنجی یکسان می‌باشد؛ بنابراین واضح است که برترین مدل در این تحقیق مدل MLP می‌باشد. از طرفی، مجموع رتبه بندی شاخص‌های آماری استفاده شده برای کل داده‌ها نشان می‌دهند که به ترتیب مدل‌های MLP، M5P، RBF و GRNN با مجموع رنکینگ ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ دارای بیشترین دقت می‌باشند. به عنوان مثال، شاخص های آماری RMSE، MAE، MARE، NSE و $R^2$ برای بهترین مدل یعنی MLP به ترتیب برابر با ۰/۰۳۷، ۰/۰۲۶، ۵/۰۴، ۰/۹۸۴ و ۹۵/۸؛ و برای ضعیف ترین مدل یعنی GRNN به ترتیب برابر با ۰/۱۰۹، ۰/۰۸۳، ۱۶/۸۳، ۰/۸۳۶ و ۸۳/۷ می باشد. در نتیجه، در این تحقیق، مدل MLP به عنوان برترین مدل پیشنهاد می‌گردد و در ادامه آن مدل‌های

www.SID.ir

Archive of SID


M5P، RBF و GRNN قرار دارند؛ که مدل GRNN دقت مناسبی را نشان نداد.

## نتایج

در این تحقیق با توجه به اهمیت و کاربرد سازه ترکیبی سرریز لبه تیز مثلثی-دریچه مستطیلی که پیشتر بیان گردیده است؛ سعی بر شبیه سازی عددی این سازه ترکیبی با استفاده از مدل عددی سه بعدی Flow-3D شده است. سپس، با انجام آنالیز ابعادی و استخراج یک فرمول جهت محاسبه ضریب دبی (Cd) این سازه ترکیبی، به بررسی و بحث پیرامون تاثیر پارامترهای بی بعد هندسی و هیدرولیکی استخراج شده از آنالیز ابعادی (h/b، h/d و h/y) بر ضریب دبی واسنجی شده از مدل عددی پرداخته شد. در نهایت نیز، با تهیه چهار مدل هوش مصنوعی MLP، RBF، GRNN و M5P و تقسیم داده‌ها به دو بخش آموزش و صحت سنجی، به بررسی و انجام آنالیز دقت سنجی کاملی (با استفاده از ۵ شاخص آماری RMSE، MAE، MARE، NSE و $R^2$) برای تمامی مدل‌ها و داده‌های بخش آموزش، صحت سنجی و کل داده‌ها پرداخته شد. به صورت خلاصه می‌توان نتایج بررسی‌های فوق را به صورت زیر بیان نمود:

- مقایسه نتایج هد آب و ضریب دبی (Cd) در مدل عددی و فیزیکی سازه ترکیبی سرریز لبه تیز مثلثی-دریچه مستطیلی و همچنین انجام آنالیز دقت سنجی، نشان داد که مدل عددی Flow-3D به خوبی هد آب و ضریب دبی را تخمین زده است. همچنین، به طور کلی و برای شرایط موجود در این تحقیق، ضریب دبی در این سازه ترکیبی سریز لبه تیز مثلثی-دریچه مستطیلی تقریبا بین ۰/۳ تا ۰/۹ می باشد.
- در تمام مدل‌ها با افزایش نسبت بی بعد h/b، ضریب دبی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر ضریب دبی با نسبت بی بعد h/b رابطه معکوس دارد. از آنجایی که برای هر مدل پارامتر b ثابت می‌باشد، می‌توان اینچنین نتیجه گرفت که با افزایش h ضریب دبی کاهش می‌یابد. بعلاوه، در تمام مدل‌ها با افزایش دبی یا افزایش نسبت‌های بی بعد h/d و h/y، ضریب دبی کاهش می‌یابد.
- با توجه به آنالیز دقت سنجی برای نتایج مدل عددی سه بعدی Flow-3D، اعداد شاخص‌های RMSE، MAE و MRAE نشان دادند (به ترتیب با مقادیر برابر با ۰/۰۶۷۳، ۰/۲۲۱ و ۰/۲۹۵ برای کل مدل ها) که تمامی مدل‌ها در واسنجی ضریب دبی در سازه ترکیبی سرریز لبه تیز مثلثی-دریچه مستطیلی دقت بالایی دارند.
- نتایج حاصل از بررسی چهار مدل هوش مصنوعی مورد استفاده در این تحقیق نشان داد که به طور کلی دقت هر چهار مدل نسبتا خوب می‌باشند. اما، با دید جزئی‌تر، مجموع رتبه بندی شاخص‌های آماری استفاده شده برای مرحله آموزش نشان می‌دهند که به ترتیب مدل های MLP، M5P، RBF و GRNN با مجموع رنکینگ ۵، ۱۰، ۱۶ و ۱۹ دارای بیشترین دقت می باشند. این روند برای داده‌های صحت سنجی و همچنین کل داده‌ها نیز صادق می‌باشد. در نتیجه، در این تحقیق، مدل MLP به عنوان برترین مدل پیشنهاد می گردد و در ادامه آن مدلهای M5P، RBF و GRNN قرار دارند.

## منابع


۱) احمدی آ، فرمانی فر م، فتاحی چقابگی ع، جوان م، ۱۳۹۰. واسنجی ضریب تخلیه سرریزتاج نیم‌دایره‌ای درمدلFlow 3D با استفاده از داده های آزمایشگاهی. پنجمین کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک.

۲) اژدری مقدم م، جعفری ندوشن ا، ۱۳۹۲. طراحی هیدرولیکی سرریزهای کنگرهای ذوزنقه ای با استفاده از هیدرودینامیک محاسباتی. مجله علمی-پژوهشی عمران مدرس. ۲(۱۳):۱-۱۲.

۳) اسماعیلی ک، فتحی مقدم م، ۱۳۸۵. ضریب دبی در مدل سرریز-دریچه. همایش ملی مدیریت شبکه های آبیاری و زهکشی دانشگاه شهید چمران اهواز.

۴) اسدی پرتو ا، اقبال زاده ا، احمدی آ، ۱۳۹۱. بررسی اثر قطر پایه پل بر الگوی جریان در کانال مستقیم با استفاده از نرم افزارFlow-3D . یازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، ارومیه.

۵) بلوچی ب، زینی وند م، ۱۳۹۱. بررسی آزمایشگاهی ضریب دبی در سازه ترکیبی سرریز – دریچه در شرایط سیلابی. نشریه دانش آب و خاک. ۲(۲۲):۱۵۱-۱۶۴.

۶) سوری ا، ۱۳۹۲. پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی. دانشکده مهندسی زراعی. گروه علوم آب. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.

۷) علاسوند ک، احدیان ج، فتحیان ح، ۱۳۹۰. بررسی تاثیر زبری برروی استهلاک انرژی و سرریزهای پلکانی


www.SID.ir

Archive of SID


گابیونی، با استفاده از مدل ریاضیFLOW- 3D . نشریه علوم و مهندسی آب. ۱: ۸۹-۹۷.

۸) گرزین ع، ۱۳۹۲. مطالعه آزمایشگاهی حداکثر عمق آبشستگی پایین دست سازه ترکیبی سرریز-دریچه مایل در ارتفاع. پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی سازه های آبی. دانشکده مهندسی آب و خاک. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

۹) محمودی م، رستمی راوی ا، ۱۳۹۱. بررسی اثرنصف کردن ابعاد پله ها در سه حالت نسبت۱/۳،بر میزان افت کارمایه در شبیه سرریزهای پلکانی. مجله مهندسی منابع آب. ۵: ۱۰۷-۱۱۸.

۱۰) مرتضوی ا، سجادی م، ۱۳۹۲. بررسی تاثیر پارامترهای هندسی بر هیدرولیک جریان در سرریزهای استوانه‌ای با استفاده از نرم افزار Fluent. چهارمین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی. ۱۸۵۱-۱۸۵۸.

۱۱) ورجاوند پ، فرسادی زاده د، خسروی نیا پ، رفیعی ز، ۱۳۸۹. شبیه سازی جریان در سرریزهای استوانه‌ای با استفاده از مدل Fluent و مقایسه نتایج با مدل فیزیکی. مجله دانش آب و خاک. ۲(۲۰/۱):۵۹-۶۹.

12) Ahmed FH. 1985. Characteristics of discharge of the combined flow through sluice gates and over weirs. J. Engineering and Technology, Iraq. 3(2):49-63 (in Arabic).

13) Alhamid AA, Husain D, Negm AM. 1996. Discharge equation for combined flow over rectangular weirs and below inverted triangular weirs. Arab Gulf Journal for Scientific Research.14(3):595-607.

14) Alhamid AA, Negm AM, Al-Brahim AM. 1997. Discharge equation for proposed self-cleaning device. J. King Saud Univ., Eng. Sci., Riyadh, Saudi Arabia. 91:13–24.

15) Balouchi B, Abedini MJ. 2019. System identification and subsequent discharge hydrograph estimation in waterway corridors based on water level data alone —Unsteady flow condition. J. of Hydrologic Eng., ASCE. 4(10), DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001848.

16) Balouchi B, Abedini MJ, Manhart M. 2018. A simulation-optimization technique to estimate discharge in open channels based on water level data alone—Gradually Varied Flow condition. IJSTC Journal, Springer. 43(8): 1-15, DOI: 10.1007/s40996-018-0149-5.

17) Balouchi B, Nikoo MR, Adamowski J. 2015. Development of expert systems for the prediction of scour depth under live-bed conditions at river confluences: Application of different types of ANNs and the M5P model tree. Applied Soft Computing J. 34: 51–59.

18) Bilhan O, Emiroglu ME, Kisi O. 2011. Use of artificial neural networks for prediction of discharge coefficient of triangular labyrinth side weir in curved channels. Advances in Engineering Software. 42:208–214.

19) Cheng MY, Cao MT, Wu YW. 2014. Predicting equilibrium scour depth at bridge piers using evolutionary radial basis function neural network. J. Comput. Civil Eng. 29(5): 04014070, DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000380.

20) Dehghani AA, Bashiri H, Meshkati E, Ahadpoor A. 2009. Experimental investigation of scouring in downstream of combined flow over weirs and below gates. 33rd IAHR Conference, Canada.

21) El-Saiad AA, Negm AM, Waheed El-Din U. 1995. Simultaneous flow over weirs and below gates. Civil Engineering Research Magazine. 17(7): 62-71.

22) Emiroghlu ME, Bilhan O, Kisi O. 2011. Neural networks for estimation of discharge capacity of triangular labyrinth side-weir located on a straight channel. Expert Systems with Applications. 38:867–874.

23) Ferro V. 2000. Simultaneous flow over and under gate. Journal of irrigation and drainage engineering. 126(3):190-193.

24) Flow-3D, user manual. 2008. Flow Science, Inc.

25) Juma IA, Hussein HH, Al-Sarraj MF. 2014. Analysis of hydraulic characteristics for hollow semi-circular weirs using artificial neural networks. Flow Measurement and Instrumentation. 38: 49–53.

26) Li CF, Zhang JB, Wang ST. 2006. Comparative Study on Input-Expansion-Based Improved General Regression Neural Network and Levenberg-Marquardt BP Network. Lecture Notes in Computer Science. 4113:83-93.

27) López-Martín C. 2015. Predictive accuracy comparison between neural networks and statistical regression for development effort of software projects. Appl. Soft Comput. 27: 434-449, DOI: 10.1016/j.asoc.2014.10.033.

28) Mohamed HI, Abozeid G, Shehata SM. 2011. Hydraulics of clear and submerged overfall weirs with bottom circular openings. Ain Shams Eng. J. doi:10.1016/j.asej.2011.03.004.

29) Negm AM. 1995. Characteristics of combined flow over weirs and under gate with unequal contractions. Proc 2nd Int Conf on Hydro-science and Engineering, Beijing, China. 2(A): 285-292.

30) Negm AM, Al-barahim AM, Al-hamid AA. 2002. Combined free flow over weirs and gate. Journal of Hydraulic Research. 40(3).

31) Negm AM, El-Saiad AA, Alhamid AA, Husain D. 1994. Characteristics of simultaneous flow over weir and below inverted V-Notches. Civil engineering research magazine CERM, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Al-Azhar University, Cairo, Egypt. 16(9):786-799.

32) Negm AM, El-Saiad AA, Saleh OK. 1997a. Characteristics of combined flow over weirs and

www.SID.ir

Archive of SID


below submerged gates. Proc. of Al-Mansoura engineering 2nd Int. Conf. MEIC'97, 1-3 April, Faculty of Engineering, Al-Mansoura University, Al-Mansoura, Egypt. III(B):259-272.

33) Pal M, Deswal S. 2009. M5 model tree based modeling of reference evapotranspiration. Hydrological Processes. 23:1437–1443 .

34) parsaie A, Haghiabi AH, Saneie M, et al. 2017. Prediction of discharge coeffivient of cylindrical weir-gate using adaptive neuro fuzzy interface system (ANFIS). Front Struct. Civ. Eng. 11, 111-122.

35) Quinlan JR. 1986. Introduction of decision trees. Machine learning. Kluwer Academic publisher. 1:81-106.

36) Quinlan JR. 1992. Learning with continuous classes. In Proceedings of the Fifth Australian Joint Conference on Artificial Intelligence. Hobart, Australia, World Scientific, Singapore. 343–348 .

37) Salehi S, Azimi AH. 2019. Discharge characteristics of weir- orifice and weir-gate structures. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 145(11).

38) Specht DF. 1991. A General Regression Neural Network. IEEE Transaction on Neural Networks. 2(6):568–576.

www.SID.ir

Archive of SID


www.SID.ir