

مدلسازی آستانه استغراق سرریزهای متخلخل قوسی با استفاده از مدل‌های محاسبات نرم

چکیده: سرریزهای متخلخل به عنوان سازه‌های دوست‌دار محیط زیست، جایگزین مناسبی برای سرریزهای صلب متداول در صنعت آب می‌باشند. یکی از چالش‌های اندازه‌گیری دبی در سرریزها، تشخیص آزاد یا مستغرق بودن جریان است. برای تعیین مرز بین این دو نوع جریان از شاخص آستانه استغراق استفاده می‌شود. در این تحقیق توانایی مدل شبکه عصبی مصنوعی و ترکیب آن با یک مدل بهینه‌ساز در پیش‌بینی شاخص آستانه استغراق ارزیابی شده است. برای این منظور از یک مجموعه داده آزمایشگاهی انجام شده با این هدف استفاده شده است. آزمایش‌های این تحقیق در یک فلوم به طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۲۰، ۰/۶ و ۰/۵ متر انجام شده است. برای این تحقیق ۲۰ مدل سرریز در دبی‌های مختلف مورد آزمایش قرار گرفته و در مجموع ۱۷۵ آزمایش انجام شده است. نتایج مدلسازی نشان داد که مدل MLP با خطای متوسط حدود ۷ درصد و مدل ترکیبی MLP-GNDO با خطای متوسط در حدود ۴ درصد مقدار شاخص آستانه استغراق را پیش‌بینی کرده‌اند.

کلیدواژگان: اندازه‌گیری جریان، جریان آزاد، جریان مستغرق، مدلسازی آزمایشگاهی، محاسبات نرم

۱- مقدمه

مقطع و ضرب آن‌ها مقدار دبی بدست می‌آید. در روش دوم با تشکیل مقطع کنترل با استفاده از کوچک کردن مجرای آبراهه (با استفاده از تنگ‌شدگی کناری یا بالا آمدگی در کف) جریان از عمق بحرانی عبور کرده و یک رابطه مستقیم بین دبی و عمق آب در بالادست سازه برقرار می‌شود [1]. با توجه به اینکه اندازه‌گیری سرعت متوسط در آبراهه با پیچیدگی‌های زیادی همراه است و در بیشتر مواقع نیازمندی ابزار دقیق گران قیمت است، تا حد امکان سعی می‌شود از روش دوم که مبتنی بر دبی-اشل است استفاده شود. در این زمینه سازه‌های مختلفی مثل سرریز، روزنه، و فلوم‌ها در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند [2]. سرریزهای یکی از متداولترین سازه‌ها برای این موضوع می‌باشند.

در صنعت سرریزها معمولاً با استفاده از مواد سخت و غیر قابل نفوذ مانند بتن و فلز ساخته می‌شوند. این ساختارهای نفوذناپذیر مانع حرکت موجودات آبی و همچنین حمل و نقل مواد فیزیکی و شیمیایی در آب می‌شوند. همچنین رسوب در پشت سرریز تجمع یافته

اندازه‌گیری جریان در آبراهه‌های طبیعی و مصنوعی برای مدیریت و توزیع مؤثر آب بر اساس تقاضا ضروری است. اجرای این شیوه‌ها به رفع مشکلات اجتماعی ناشی از مدیریت ضعیف آب کمک می‌کند و تخصیص کارآمد منابع آب را برای اهداف برنامه ریزی تضمین می‌کند. با توجه به شرایط اقلیمی کشور ما، کمبود منابع آب چالش قابل توجهی در حال و آینده است. در نتیجه، اندازه‌گیری دقیق و مدیریت کارآمد منابع آبی موجود و همچنین همسو کردن تلاش‌های ما با ابتکارات جهانی بسیار مهم است. برای دستیابی به این هدف، تاکنون سازه‌های مختلفی برای اندازه‌گیری آب در مجاری باز و بسته ارائه شده است.

اندازه‌گیری جریان در آبراهه‌ها نسبت به خط لوله با جریان تحت فشار دارای درجه آزادی بیشتر و در نتیجه عدم قطعیت بیشتر می‌باشد. برای سنجش سیالات در آبراهه‌های باز به صورت کلی دو روش عمده وجود دارد. در روش اول با اندازه‌گیری سرعت متوسط و سطح

و منجر به عدم قطعیت در برداشت دقیق جریان و مشکلات بهره‌برداری می‌شود [3]. اخیراً، محققان در حال بررسی استفاده از مواد طبیعی مقرون به صرفه و در دسترس برای کاهش این اثرات مضر و حفظ چشم انداز طبیعی بوده‌اند. سرریزهای متخلخل در این بین به عنوان جایگزین مناسبی برای سرریزهای غیرقابل نفوذ پدیدار شده‌اند که ویژگی‌هایی مانند پایداری (جلوگیری از زیر فشار و جوشش پایین دست)، مقرون به صرفه بودن (استفاده از مواد طبیعی و در دسترس)، نفوذپذیری و مقاومت در برابر نیروهای ناشی از آب را ارائه می‌کنند [4,5]. به گفته چنسن این ساختارها برای تحقیقات آتی بسیار توصیه شده و ارزشمند هستند [6]. چنین ساختارهایی با هوادهی بیشتر، فعالیت میکروارگانیسم‌های هوازی را تقویت می‌کنند که ظرفیت خود پالایشی رودخانه را افزایش می‌دهد. این افزایش خودپالایی منجر به تصفیه آب و از بین بردن بوی نامطبوع در مناطقی می‌شود که فاضلاب تخلیه می‌شود [3,4].

تاکنون تحقیقات متعددی روی سرریز متخلخل صورت گرفته است. بیشتر این تحقیقات روی سرریز های لبه پهن متخلخل و در مورد تحلیل جریان در حالت آزاد یا مستغرق بوده است [8-12]. در بعضی از تحقیقات الگوی جریان اطراف این سرریزها به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی شده است [4,7,13,14]. اخیراً حسینیان شیروان و همکاران به بررسی انسداد بالادست این سازه بر عملکرد هیدرولیکی آن پرداخته است [7].

استفاده از مدل‌های محاسبات نرم روز به روز در علم مهندسی آب توسعه می‌یابد. این مدل‌ها برای پدیده های مختلفی استفاده شده اند [15-16]. رحمانشاهی و همکاران به تخمین ضریب دبی و آستانه استغراق در سرریزهای لبه پهن با شیب کناری پرداخته‌اند [16]. جریان عبوری از یک سازه اندازه‌گیری مانند سرریز را می‌توان به دو دسته جریان آزاد یا مدولار و جریان مستغرق یا غیرمدولار تقسیم‌بندی کرد. با توجه به

اینکه روابط اندازه‌گیری دبی در حالت آزاد و مستغرق با هم متفاوت می‌باشند، تشخیص مرز بین جریان آزاد و مستغرق که به عنوان آستانه استغراق معروف است یک پدیده مهم در علم سنجش سیالات در مجاری باز است. از طرفی آستانه استغراق در سرریزهای متخلخل با سرریزهای صلب متفاوت است. در سرریزهای صلب آستانه استغراق در ترازهای بالاتر از ارتفاع سرریز اتفاق می‌افتد. در سرریزهای متخلخل به دلیل وجود جریان درون‌گذر و ارتباط بالادست و پایین دست سرریز از طریق بدنه آن، آستانه استغراق در ترازهای عمیق پایاب پایین تر از ارتفاع سرریز نیز اتفاق می‌افتد. تاکنون مطالعه دقیقی در این زمینه در سرریزهای قوسی متخلخل صورت نگرفته است. در نتیجه، هدف این مطالعه حاضر بر کردن این خلأ پژوهشی و ارائه یک روش محاسبات نرم برای تخمین این شاخص است.

هدف این تحقیق مدلسازی مبتنی بر محاسبات نرم آستانه استغراق در سرریزهای متخلخل قوسی است. برای این منظور از یک مجموعه داده آزمایشگاهی استفاده شده است. با این هدف، پس از تحلیل ابعادی و بی‌بعد سازی پارامترهای مؤثر، مدلسازی بر اساس روش شبکه عصبی و همچنین ترکیب آن با یک روش بهینه‌سازی انجام شد. در ادامه نتایج این دو مدل با استفاده از پارامترهای آماری تجزیه و تحلیل شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مدلسازی آزمایشگاهی

آزمایش‌های این مطالعه در فلوم آزمایشگاهی سازمان آب و برق خوزستان انجام شد. فلوم به شکل مستطیل با عرض ۰/۶ متر و طول و ارتفاع ۰/۵ متر می‌باشد. این فلوم به عنوان یک سیستم جریان آب بسته عمل کرده که در انتها یک دریچه برای کنترل سطح آب پایین دست قرار داشت. برای تنظیم دبی ورودی به فلوم، یک شیر بعد از خروجی پمپ تعبیه شد. دبی ورودی به فلوم با استفاده از یک سرریز مستطیلی لبه تیز مدرج که در انتهای پایین دست سیستم قرار دارد

جریان شامل عمق بالادست h و پایین دست جریان h_t نیز از متغیرهای مؤثر بر آستانه استغراق می‌باشند.

$$f_1 \left(\begin{matrix} h, h_t, B, g, P, L_{Arc}, L_c, n, d_{50}, \\ \rho, \mu \\ = 0 \end{matrix} \right) \quad (1)$$

با استفاده از تئوری پی‌باکینگهام [18] و با انتخاب پارامترهای μ ، g و h به‌عنوان متغیرهای تکرار، می‌توان رابطه (۱) را به‌صورت بدون بعد زیر نوشت

$$f_1 \left(\begin{matrix} \frac{B}{h}, \frac{d_{50}}{h}, \frac{P}{h}, \frac{h_t}{h}, \frac{\rho\sqrt{gh^3}}{\mu}, n, \\ \frac{L_c}{h}, \frac{L_{Arc}}{h} \end{matrix} \right) = 0 \quad (2)$$

با ترکیب این پارامترهای بدون بعد می‌توان به اعداد بدون بعد مناسب‌تری رسید.

$$\pi_1 = \frac{h_t}{h} / \frac{P}{h} = \frac{h_t}{P} \quad (3)$$

$$\pi_2 = \frac{L_c}{h} / \frac{L_{Arc}}{h} = \frac{L_c}{L_{Arc}} \quad (4)$$

$$\pi_3 = \frac{d_{50}}{h} / \frac{P}{h} = \frac{d_{50}}{P} \quad (5)$$

بنابراین پارامترهای بدون بعد رابطه (۲) به صورت زیر تغییر می‌کنند.

$$\frac{h_t}{P} = f_1 \left(\frac{h}{B}, \frac{L_c}{L_{Arc}}, \frac{d_{50}}{P}, n, \frac{\rho\sqrt{gh^3}}{\mu} \right) \quad (6)$$

در رابطه (۶) پارامتر $\frac{\rho\sqrt{gh^3}}{\mu}$ عدد رینولدز می‌باشد. در آزمایش‌های این تحقیق عدد رینولدز بزرگتر از ۵۰۰۰ می‌باشند بنابراین از عدد رینولدز صرف‌نظر می‌شود و رابطه نهایی به شکل زیر ارائه می‌شود.

$$\frac{h_t}{P} = f_1 \left(\frac{h}{B}, \frac{L_c}{L_{Arc}}, \frac{d_{50}}{P}, n \right) \quad (7)$$

اندازه‌گیری شد. سطح آب بالادست و پایین دست سرریز با استفاده از عمق سنج با دقت ± 0.2 میلی‌متر اندازه‌گیری شد. مدل‌های سرریز متخلخل با استفاده از یک میله فلزی به قطر ۴ میلی‌متر برای ایجاد پایداری ساخته شدند و برای ایجاد ساختار متخلخل، توری در اطراف بدنه سرریز تعبیه شد. در شکل ۱ نمونه‌هایی از مدل‌های سرریز قوسی متخلخل مورد استفاده در آزمایش‌ها ارائه شده است. جدول ۱ جزئیات هندسی و اختصارهای مدل‌های ساخته شده را ارائه می‌دهد. همچنین در شکل ۲ پلان سرریزهای قوسی و مصالح سنگی مختلف با قطرهای یکنواخت و گوشه‌های تیز، از $7/13$ تا $31/75$ میلی‌متر نمایش داده شده است.

برای تعیین شاخص آستانه استغراق، در ابتدا جریان داخل فلوم باز شده و درپچه انتهایی کاملاً باز می‌باشد. در این حالت جریان آزاد است. پس از آن با افزایش تدریجی عمق پایاب عمق بالادست رصد می‌شود. با افزایش بیشتر عمق پایاب نهایتاً به شرایطی خواهیم رسید که عمق بالادست ۱ میلی‌متر افزایش یافته است. یک مرحله قبل از این حالت به عنوان آستانه استغراق تلقی می‌شود [17].

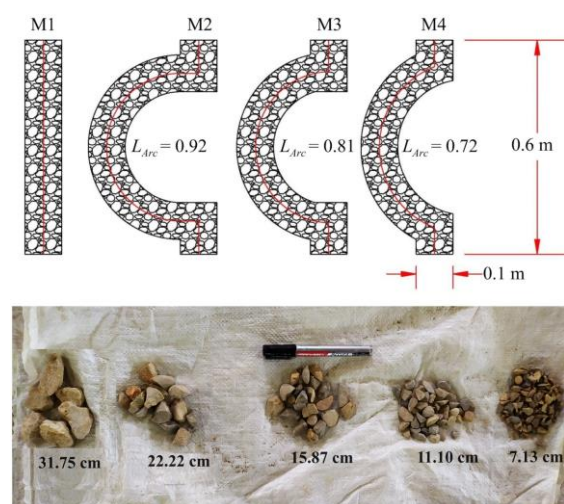
در این تحقیق ۲۰ مدل مختلف سرریز در دبی‌های مختلف مورد آزمایش قرار گرفته و در مجموع ۱۷۵ آزمایش برای حالت آستانه استغراق انجام شد.

۲-۲- تحلیل ابعادی

پارامترهای مؤثر بر آستانه استغراق سرریز متخلخل قوسی شامل پارامترهای هندسی، مشخصات سیال و شتاب ثقل می‌باشند. پارامترهای هندسی شامل ارتفاع سرریز P ، قطر متوسط مصالح سنگی d_{50} و تخلخل آن‌ها n ، ضخامت سرریز L_c ، طول مؤثر سرریز L_{Arc} و عرض فلوم B می‌باشد. پارامترهای مربوط به سیال شامل لزجت دینامیکی μ ، و جرم مخصوص ρ می‌باشند. دیگر پارامتر مؤثر بر جریان در مجاری باز شتاب ثقل g می‌باشد. همچنین پارامترهای مربوط به

شکل ۱- جزییات مدل های آزمایشگاهی

سرریز	L_c (m)	P (m)	W (m)	Q (L/s)	L_{Arc} (cm)	d_{50} (mm)	n (%)
M1				۱۰/۳۶ - ۶۴/۸۸	۶۰	۱۱/۱، ۷/۱۳	۰،۴۶، ۰،۵۴
M2	۰/۱	۰/۱۶	۰/۶	۱۴/۸۰ - ۲۵/۶۴	۹۲/۱۳	۱۵/۸۷	۰،۴۷، ۰،۴۴
M3				۱۴/۸۰ - ۲۵/۶۴	۸۱/۴۵	۳۱/۷۵، ۲۲/۲۲	۰،۴۷، ۰،۴۴
M4				۱۰/۳۶ - ۶۴/۸۸	۷۱/۹۷		۰،۴۷، ۰،۴۴

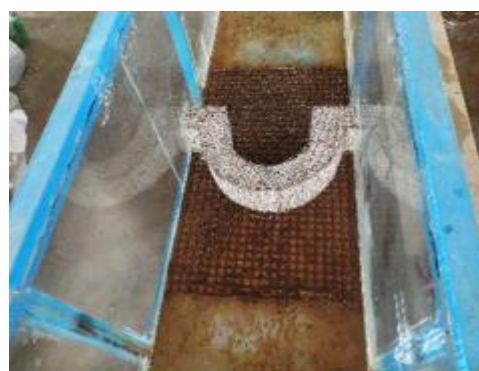


شکل ۲- مدل های مختلف سرریز قوسی متخلخل و مصالح با دانه بندی مختلف

در جدول ۲ محدوده متغیرهای بدون بعد رابطه (۷) ارائه شده است. همچنین در شکل ۳ توزیع فراوانی پارامترهای رابطه (۷) نمایش داده شده است. مطابق این شکل توزیع این پارامترها نشان داده که بیشتر آن ها از توزیع نرمال پیروی نمی کند. در این تحقیق از معیارهای آماری مختلفی مطابق جدول ۳ برای ارزیابی دقت مدل ها استفاده شده است.

جدول ۲- محدوده اعداد بدون بعد رابطه (۷)

محدوده	متغیرهای بی بعد مستقل			
	d_{50}/P	L/L_{Arc}	n	h/B
حداقل	۰/۰۴۵	۰/۱۰۹	۰/۴۴	۰/۳۰۷
حداکثر	۰/۱۹۸	۰/۱۶۷	۰/۵۶	۰/۴۹۲



شکل ۱- چند تصویر آزمایشگاهی از سرریز متخلخل قوسی

در پیشینه تحقیق برای آستانه استغراق شاخص های دیگری مانند h_t/h و h_t/B نیز به عنوان آستانه استغراق معرفی شده اند [19]. با این وجود تحلیل های اولیه نشان داد که شاخص h_t/P برای این نوع سرریز مناسب تر می باشد.

جدول ۳- رابطه‌های آماری محاسبه دقت

نتایج پیش‌بینی شده

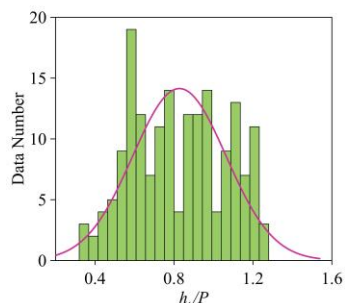
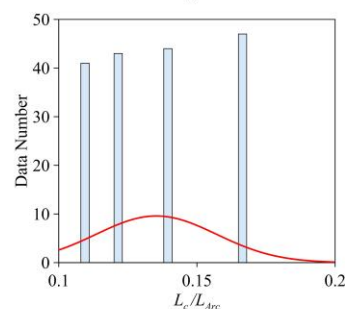
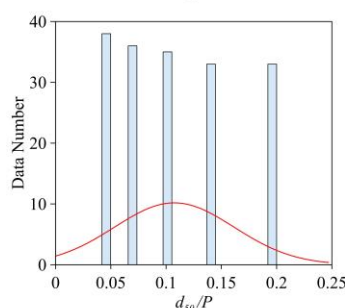
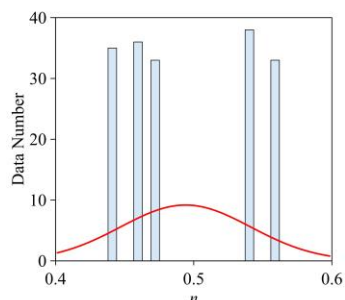
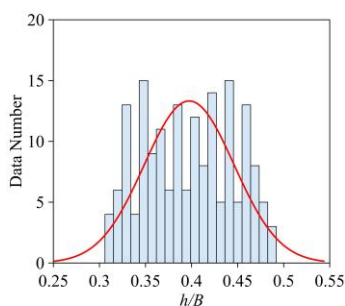
معیار	معادله
RMSE	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_t/P^{Mea} - h_t/P^{Pre})^2}$
MAPE	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{ h_t/P^{Mea} - h_t/P^{Pra} }{h_t/P^{Mea}}$
R ²	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (h_t/P^{Mea} - h_t/P^{Pre})^2}{\sum_{i=1}^n (h_t/P^{Mea} - h_t/P^{Mean})^2}$

۳-۲- مدل شبکه عصبی مصنوعی MLP¹

پرسپترون چند لایه MLP، یک معماری شبکه عصبی مصنوعی پرکاربرد است. این شامل چندین لایه از نورون‌های مصنوعی یا پرسپترون‌های به هم پیوسته است که به صورت پیش‌خور سازماندهی شده‌اند. هر نورون در یک MLP ورودی‌ها را دریافت می‌کند، یک تابع فعال‌سازی را اعمال می‌کند و خروجی را به لایه بعدی ارسال می‌کند [16]. در شکل ۴ شماتیک کلی این روش نمایش داده شده است.

۳-۲-۴- مدل GNDO²

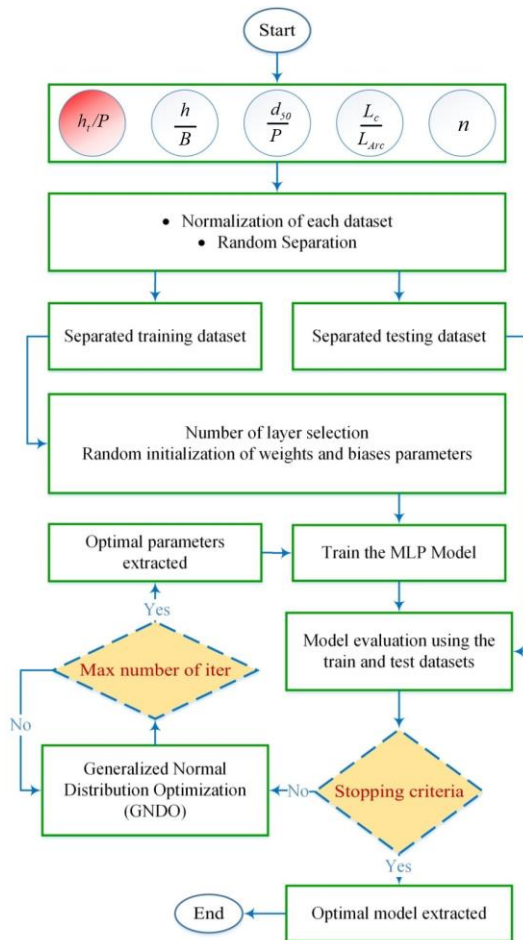
در حالت معمول روش MLP با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مبتنی بر گرادینت آموزش می‌بیند. در این تحقیق در سناریو دوم از الگوریتم بهینه‌سازی GNDO استفاده شده است. بهینه‌سازی توزیع عادی تعمیم‌یافته (GNDO) یک چارچوب ریاضی است که در الگوریتم‌های بهینه‌سازی و مدل‌سازی آماری استفاده می‌شود. این گسترش توزیع نرمال است که امکان ثبت طیف وسیع تری از توزیع‌های داده را فراهم می‌کند. GNDO پارامترهای اضافی را برای کنترل شکل، چولگی و کشیدگی توزیع معرفی می‌کند و نمایش انعطاف‌پذیرتری از داده‌ها را ممکن می‌سازد [16].



شکل ۳- توزیع فراوانی متغیرهای مستقل و وابسته

² Generalized Normal Distribution Optimization

¹ Multilayer Perceptron



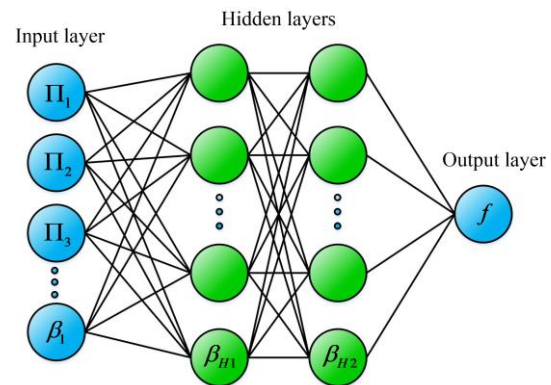
شکل ۵ - روند نمای ترکیب مدل MLP و بهینه‌ساز GNDO

در شکل ۸ نتایج مدل MLP-GNDO برای هر دو دسته داده آموزش و ارزیابی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. مقدار R^2 این مدل برای دو دسته داده به ترتیب 0.98 و 0.97 می‌باشد. همچنین در شکل ۹ مقدار باقیمانده این دو دسته داده نسبت به نتایج آزمایشگاهی نمایش داده شده است. مقدار این پارامتر برای داده‌های آموزش و ارزیابی مشابه مدل MLP در محدوده ± 0.1 می‌باشد. در این مدل نیز مشابه سناریو قبل، دقت پیش‌بینی داده‌های آموزش مطابق انتظار بیشتر از داده‌های ارزیابی است.

GNDO ابزار قدرتمندی برای بهینه‌سازی مدل‌ها و برازش داده‌ها برای بهبود دقت و ثبت تفاوت‌های ظریف پدیده‌های دنیای واقعی فراهم می‌کند. در شکل ۵ روند نمای مدل‌سازی مورد استفاده ارائه شده است. در این مدل‌سازی‌ها 70% درصد داده‌ها برای آموزش^۳ و 30% درصد داده‌ها برای ارزیابی^۴ در نظر گرفته شده است.

۳- نتایج و بحث

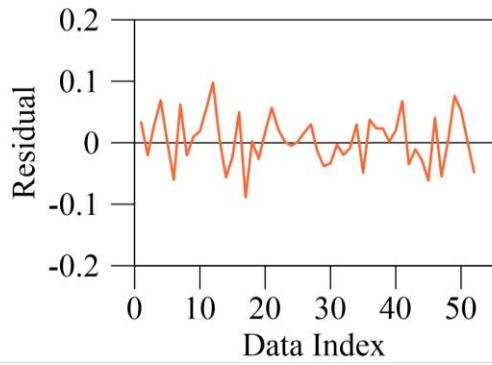
در شکل ۶ نتایج MLP به اختصار *Pre* با داده‌های آزمایشگاهی به اختصار *Meas* مقایسه شده است. مطابق شکل نتایج با دقت مناسبی در هر دو دسته داده آموزش و ارزیابی پیش‌بینی شده‌اند. مقدار R^2 داده‌های آموزش برابر 0.97 و داده‌های ارزیابی 0.94 می‌باشد. مقدار باقیمانده داده‌های آموزش و ارزیابی برای این مدل در شکل ۷ ارائه شده است. محدوده باقیمانده داده‌های آموزش و داده‌های ارزیابی ± 0.1 می‌باشد. مطابق نتایج دقت نتایج آموزش مطابق انتظار بیشتر از داده‌های ارزیابی بدست آمده است.



شکل ۴- طرح کلی مدل شبکه عصبی MLP

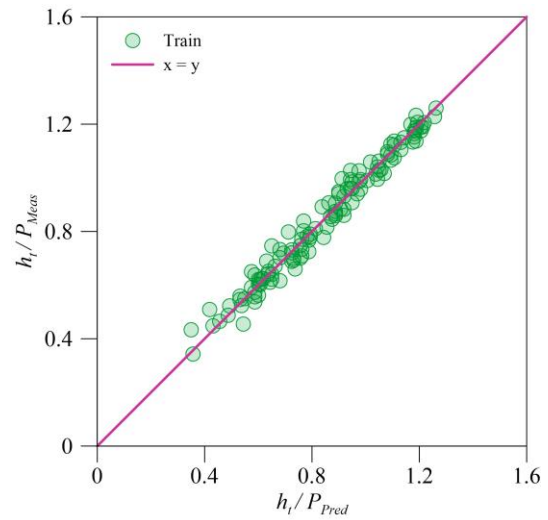
⁴ Test

³ Train

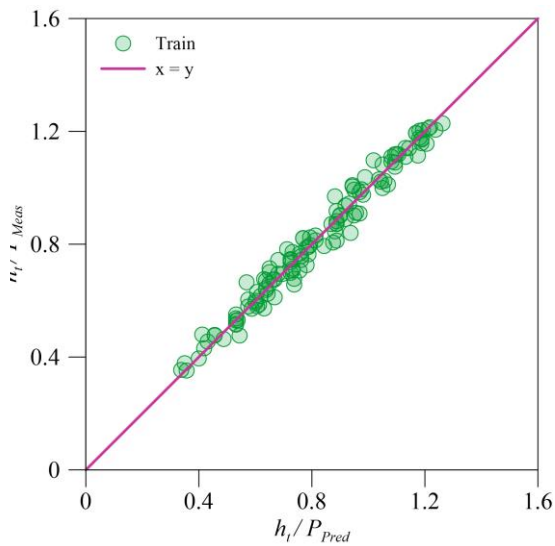


(ب)

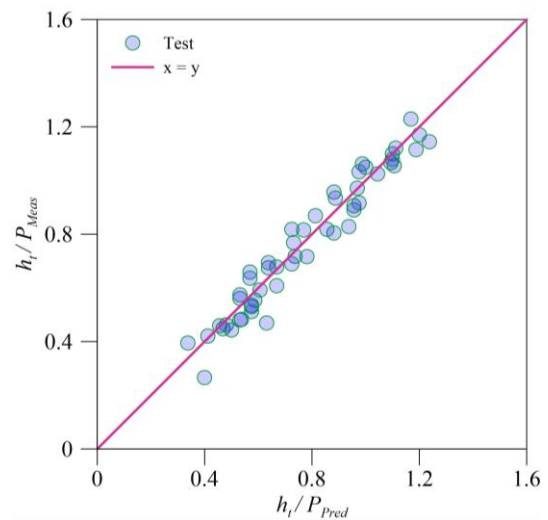
شکل ۷- باقیمانده نتایج پیش بینی شده با استفاده از مدل MLP



(الف)

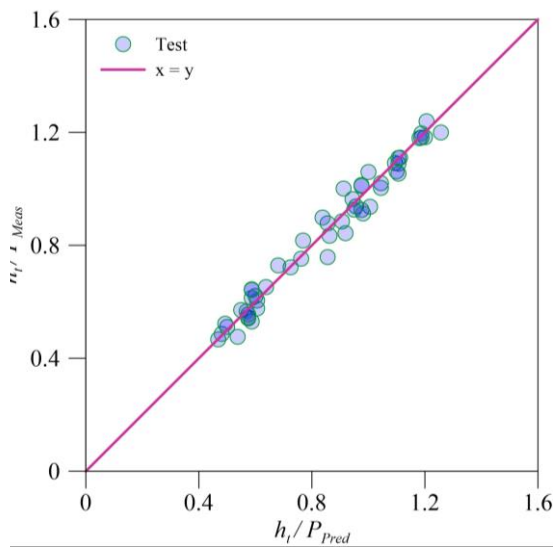


(الف)

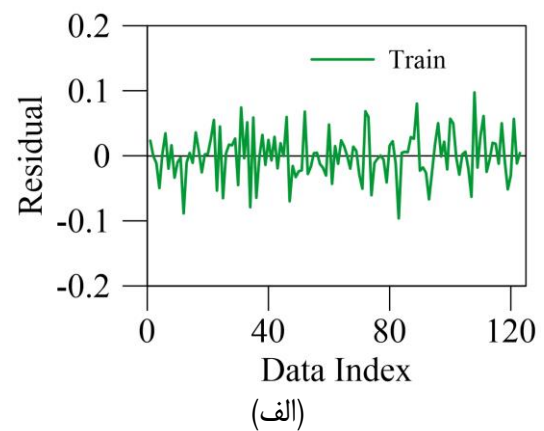


(ب)

شکل ۶- مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و پیش بینی شده با استفاده از مدل MLP

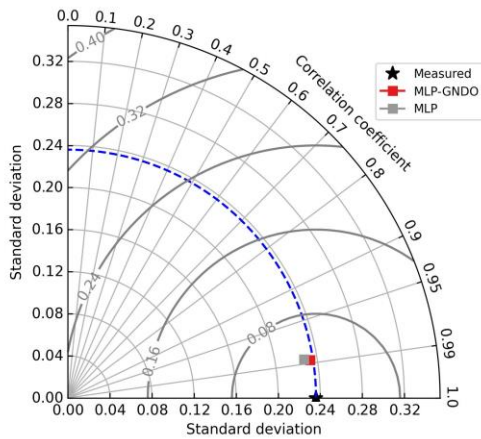


(ب)

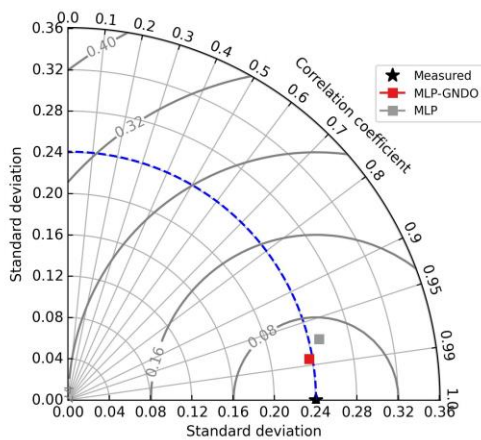


(الف)

شکل ۸- مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و پیش بینی شده با استفاده از مدل MLP



(الف)

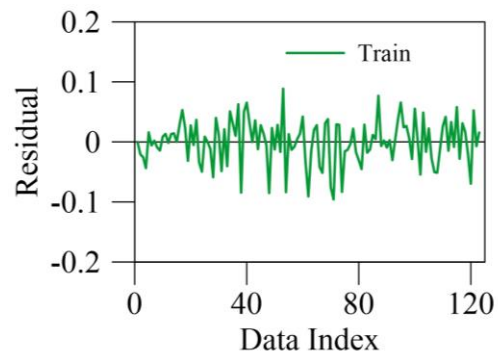


(ب)

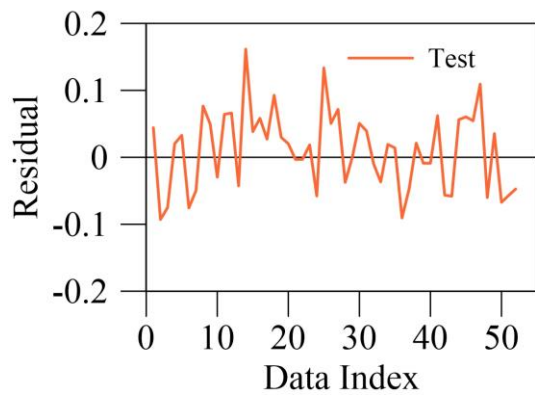
شکل ۱۰- نمودار تیلور (الف) داده‌ها آموزش، و (ب) داده‌های ارزیابی

در جدول ۴ مقادیر همه پارامترهای آماری برای هر دو سناریو و هر دو مجموعه داده ارائه شده است. مطابق نتایج اگرچه دقت هر دو سناریو برای داده‌های آموزش نزدیک است ولی مدل ترکیبی داده‌های ارزیابی را با دقت مناسب‌تری تخمین زده است.

در شکل ۱۱ نمودار خطا هر دو سناریو برای داده‌های آموزش و ارزیابی ارائه شده است. مطابق این شکل مدل ترکیبی در کل دقت بالاتری داشته و بیشتر از ۹۳ درصد داده‌های ارزیابی را با خطای کمتر از ۱۰ درصد پیش بینی می‌کند. این در حالی است که این مقدار برای مدل MLP ۸۰ درصد است. متوسط خطا برآورد داده‌های ارزیابی مدل MLP حدود ۷ درصد و برای مدل ترکیبی حدود ۴ درصد است.



(الف)



(ب)

شکل ۹- باقیمانده نتایج پیش بینی شده با استفاده از مدل MLP

در شکل ۱۰ نمودار تیلور هر دو سناریو برای هر دو دسته داده‌های آموزش و ارزیابی ارائه شده است. در این نمودار همزمان ۳ پارامتر آماری همبستگی، انحراف معیار و RMSE با هم مقایسه می‌شوند. نزدیکی نتایج مدل با داده آزمایشگاهی چه از نظر همبستگی و چه از نظر انحراف معیار نشان از دقت بالای آن مدل است. در شکل ۱۰ (الف) نتایج مدل برای داده‌های آموزش و در شکل ۱۰ (ب) نتایج مدلسازی برای داده‌های ارزیابی ارائه شده است. مطابق شکل برای هر دو مجموعه داده می‌توان گفت مدل ترکیبی MLP-GNDO دقت مناسب‌تری برای پیش بینی آستانه استعراق این نوع سرریز دارد.

جدول ۴- مقادیر پارامترهای آماری دو سناریو

مدل	داده	R ²	RMSE	MAE
MLP-GNDO	Train	۰/۹۷۶	۰/۰۳۷	۰/۰۲۸
	Test	۰/۹۷	۰/۰۴	۰/۰۳
MLP	Train	۰/۹۷	۰/۰۴	۰/۰۳
	Test	۰/۹۴	۰/۰۶	۰/۰۵

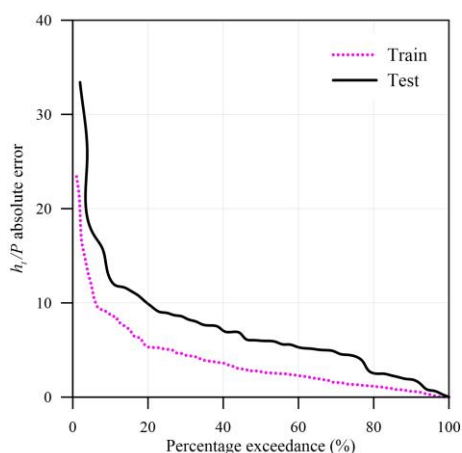
۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق شاخص آستانه استغراق سرریز متخلخل قوسی با استفاده از مدل محاسبات نرم تخمین زده شده است. برای این منظور از دو سناریو بهره برده شده است. در سناریو اول از مدل MLP ساده و در سناریو دوم مدل MLP با استفاده از بهینه‌ساز GNDO ترکیب شده است. برای ارزیابی دقت مدل‌ها از یک مجموعه داده آزمایشگاهی بعد تعداد ۱۷۵ عدد استفاده شده است. در ابتدا بر اساس تحلیل ابعادی، پارامترهای بدون بعد استخراج شده و پارامترهای متقل آن‌ها به عنوان ورودی مدل‌های محاسبات نرم معرفی شده‌اند. بررسی پارامترهای بی‌بعد مختلف نشان داد که نسبت عمق پایاب به ارتفاع فلوم (h_t/P) یک شاخص مناسب برای آستانه استغراق برای این نوع سرریز است.

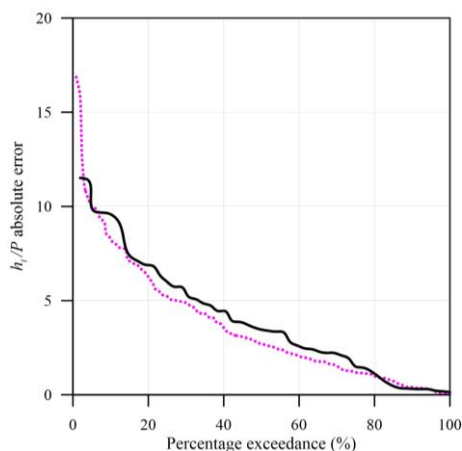
نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مدل MLP داده‌های آموزش و ارزیابی را به ترتیب با خطای متوسط ۳/۹ و ۷/۲ درصد و مدل ترکیبی MLP-GNDO با خطای متوسط ۳/۷ و ۴ درصد پیش‌بینی می‌کند. مقدار مدل MLP برای داده‌های تست ۰/۹۴ و مدل MLP-GNDO ۰/۹۷ می‌باشد. مدل ترکیبی در کل دقت بالاتری داشته و بیشتر از ۹۳ درصد داده‌های ارزیابی را با خطای کمتر از ۱۰ درصد پیش‌بینی می‌کند. این در حالی است که این مقدار برای مدل MLP ۸۰ درصد است.

۵- تقدیر و تشکر

از سازمان آب و برق خوزستان برای فراهم کردن شرایط آزمایشگاهی این تحقیق تقدیر و تشکر می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل ۱۱- نمودار خطا هر دو مدل (الف) MLP و (ب) MLP-GNDO

۶- منابع

- [1] Potter, M. C., Wiggert, D. C., and Ramadan, B. H. 2012. *Mechanics of fluids SI version*. Cengage learning.##
- [2] White, F. M. 1990. *Fluid mechanics*. New York.##

- [3] Mohamed, H. I. 2010. Flow over gabion weirs. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 136(8): 573-577.##
- [4] Fathi-moghaddam, M., Sadrabadi, M. T., and Rahmanshahi, M. 2018. Numerical simulation of the hydraulic performance of triangular and trapezoidal gabion weirs in free flow condition. *Flow Measurement and Instrumentation*, 62, 93-104. 963-971.##
- [5] Rahmanshahi, M., and Shafai Bejestan, M. 2020. Gene-expression programming approach for development of a mathematical model of energy dissipation on block ramps. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 146(2), 04019033.##
- [6] Chanson, H. 2006. Discussion of “discharge through a permeable rubble mound weir” by Kohji Michioku, Shiro Maeno, Takaaki Furusawa, and Masanori Haneda. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(4), 432-433.##
- [7] Hasanian Shirvan, S., Pirzadeh, B., Rajaei, S. H., and Shafai Bejestan, M. 2023. Experimental investigation of gabion broad-crested weirs under upstream partial blockage conditions. *Water Supply*, 23(7), 2638-2648.##
- [8] Safarzadeh, A., and Mohajeri, S. H. 2018. Hydrodynamics of rectangular broad-crested porous weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 144(10), 04018028.##
- [9] Salmasi, F., and Sattari, M. T. 2017. Predicting discharge coefficient of rectangular broad-crested gabion weir using M5 tree model. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 41, 205-212.##
- [10] Shariq, A., Hussain, A., and Ahmad, Z. 2022. Flow over gabion weir under free and submerged flow conditions. *Flow Measurement and Instrumentation*, 86, 102199.##
- [11] Salmasi, F., Sabahi, N., and Abraham, J. 2021. Discharge coefficients for rectangular broad-crested gabion weirs: experimental study. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 147(3), 04021001.##
- [12] Shariq, A., Hussain, A., and Ahmad, Z. 2020. Discharge equation for the gabion weir under through flow condition. *Flow Measurement and Instrumentation*, 74, 101769.##
- [13] Leu, J. M., Chan, H. C., and Chu, M. S. 2008. Comparison of turbulent flow over solid and porous structures mounted on the bottom of a rectangular channel. *Flow Measurement and Instrumentation*, 19(6), 331-337.##
- [14] Mohammadpour, R., Ghani, A. A., and Azamathulla, H. M. 2013. Numerical modeling of 3-D flow on porous broad crested weirs. *Applied Mathematical Modelling*, 37(22), 9324-9337.##
- [15] Rahmanshahi, M., Jafari-Asl, J., Shafai Bejestan, M., and Mirjalili, S. 2023. A Hybrid Model for Predicting the Energy Dissipation on the Block Ramp Hydraulic Structures. *Water Resources Management*, 37(8), 3187-3209.##
- [16] Rahmanshahi, M., Jafari-Asl, J., Fathi-Moghadam, M., Ohadi, S., and Mirjalili, S. 2023. Metaheuristic learning algorithms for accurate prediction of hydraulic performance of porous embankment weirs. *Applied Soft Computing*, 111150.##
- [17] Hager, W. H., and Schwalt, M. 1994. Broad-crested weir. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 120(1), 13-26.##

[18] Barenblatt, G. I. 1987. *Dimensional analysis*. CRC Press.##

[19] Bijankhan, M., Teymourkhani, A., and Ferro, V. 2022. Portable central baffle flume. *Journal of Agricultural Engineering*, 53(2).##

Modeling of modular limit of arc porous weirs using soft computing models

Abstract

Porous weirs, as environmentally friendly structures, are a suitable alternative to solid weirs commonly used in the water industry. One of the challenges in measuring flow in weirs is determining whether the flow is free or submerged. The modular limit index is used to distinguish between these two types of flow. This research evaluates the ability of an artificial neural network and combination with a optimization model to predict the modular limit index. To achieve this, a laboratory dataset was utilized. The experiments were conducted in a flume with dimensions of 20 m in length, 0.6 m in width, and 0.5 m in height. In total, 20 weir models were tested at various flow rates, resulting in 175 tests being performed. The modeling results indicated that the MLP model, with an average error of 7%, and the combined MLP-GNDO model, with an average error of 4%, successfully predicted the modular limit index value.

Keywords: flow measurement, free flow, submerged flow, experimental modeling, soft compute analysis