

## توسعه همزمان مدل عددی و هوش مصنوعی جهت شبیه‌سازی جریان بر روی سرریزهای

### جانبی

عباس پارسائی\*<sup>۱</sup>، امیر حمزه حقی آبی<sup>۲</sup> و شادی نجفیان<sup>۳</sup>

(۱) دانشجوی دکتری، گروه مهندسی سازه‌های آبی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران.

(۲) دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران.

(۳) دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی.

\* نویسنده مسئول: [Abbas\\_Parsaie@yahoo.com](mailto:Abbas_Parsaie@yahoo.com)

تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۸/۲۴

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۴/۱۴

### چکیده

مدل‌سازی عددی پدیده‌های هیدرولیکی از مهم‌ترین بخش‌های علم مهندسی هیدرولیک است. مدل‌سازی عددی معمولاً شامل حل معادلات دیفرانسیل حاکم بر جریان و همچنین تخمین ضرایب موجود در این معادلات می‌باشد. در مدل‌سازی عددی هیدرولیک جریان عبوری از بعضی از سازه‌های مورد استفاده در مهندسی آب، مانند سرریزهای جانبی نیاز به حل همزمان معادلات دیفرانسیل و تخمین ضریب شدت جریان می‌باشد. سرریزهای جانبی یکی از انواع سرریزهایی است که به طور وسیعی در انواع پروژه‌های مهندسی آب مورد استفاده قرار می‌گیرد. معادله حاکم بر هیدرولیک سرریزهای جانبی معادله متغیر مکانی می‌باشد که یک معادله دیفرانسیل معمولی است که ضریب شدت جریان نیز در آن حضور دارد. مطالعه بر روی مشخصات هیدرولیکی این نوع سازه به دو قسمت برآورد پروفیل سطح آب و تخمین ضریب دبی تقسیم می‌شود. حل معادله دیفرانسیل هیدرولیک سرریز جانبی منجر به برآورد پروفیل سطح آب عبوری از روی این سازه می‌شود. برای مدل‌سازی ضریب شدت جریان نیز نیاز است که از روش‌های پرقدرتی مانند انواع مدل‌های هوش مصنوعی استفاده شود. در این تحقیق با توجه به اهمیت موضوع، برای مدل‌سازی عددی هیدرولیک سرریز جانبی معادله جریان متغیر مکانی با استفاده از روش رانج کوتای مرتبه چهار حل گردیده و برای تخمین ضریب شدت جریان به توسعه مدل هوش مصنوعی شبکه عصبی تطبیقی (ANFIS) پرداخته شده است. خروجی مدل عصبی تطبیقی به عنوان یکی از ورودی‌های مدل عددی بشمار می‌رود. نتایج کلی نشان می‌دهد که مدل نهایی که از ترکیب دو مدل هوش مصنوعی و مدل عددی تشکیل شده است از توانایی بسیار مناسبی جهت شبیه‌سازی هیدرولیک این سازه برخوردار می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: رانج کوتای مرتبه چهار، سرریزهای جانبی، شبکه عصبی چند لایه، ضریب شدت جریان و معادله جریان متغیر مکانی.

## مقدمه

مطالعه بر روی پدیده‌های هیدرولیکی معمولاً با ساخت مدل‌های فیزیکی در محیط آزمایشگاه همراه بوده است. اساس تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی انجام آنالیز ابعادی می‌باشد، چرا که استفاده از این تکنیک نتایج به دست آمده منحصر به داده‌های اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه نشده و می‌توان نتایج را برای شرایط مشابه نیز تعمیم داد (نیک صفت، ۱۳۸۰؛ شفافی بجستان، ۱۳۹۰). زمان و هزینه بر بودن مدل‌های فیزیکی محققین را به توسعه مدل‌های ریاضی سوق داده است. بکارگیری مدل‌های ریاضی هزینه و زمان را در تحلیل پدیده‌های هیدرولیکی به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش داده است. در مدل‌سازی ریاضی معادلات دیفرانسیل حاکم بر جریان به کمک روش‌های عددی پر قدرت حل می‌گردند (کیامنش، ۱۳۸۸؛ طاهر شمسی، ۱۳۹۰). در تحلیل هیدرولیک سازه‌های آبی علاوه بر حل معادلات، گاه نیاز است که ضرایبی مانند ضریب شدت جریان نیز تخمین زده شوند. تخمین مناسب این ضرایب نیز تأثیر بسیار زیادی در دقت مدل‌سازی عددی پدیده‌های هیدرولیکی دارد (پارسائی و همکاران، ۱۳۹۲). برای مدل‌سازی عددی هیدرولیک جریان عبوری از بعضی از سازه‌های مورد استفاده در مهندسی آب مانند سرریزهای جانبی، نیاز به حل معادلات دیفرانسیل و تخمین ضریب شدت جریان موجود در آن به صورت همزمان می‌باشد (Parsaie and Haghiabi, 2014). سرریز جانبی یک سازه با جریان آزاد است که در دیواره جانبی کانال قرار گرفته می‌گیرد. وقتی سطح آزاد سیال در کانال بالاتر از تاج سرریز قرار می‌گیرد قسمتی از سیال از روی سرریز ریزش و به بیرون از کانال هدایت می‌شود. سرریزهای جانبی در مهندسی هیدرولیک در زمینه‌های سدسازی، شبکه‌های آبیاری و زهکشی اراضی، کنترل سیلاب و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرد (حسینی و ابریشمی، ۱۳۸۴؛ محمودیان شوشتری، ۱۳۸۸). یکی از مهم‌ترین مباحث در مهندسی آب تخمین میزان دبی عبوری از تأسیسات آبی می‌باشد چرا که میزان دبی عبوری با عوامل مختلفی از جمله شیب، زبری، سطح مقطع، بار رسوب معلق و سایر مسائل ارتباط دارد؛ لذا ضروری به نظر می‌رسد که در تأسیسات مختلف انتقال و توزیع آب تخمین دقیقی از دبی عبوری انجام پذیرد (Emiroglu et al., 2011; Borghai and Parvaneh, 2011) تاکنون مطالعات زیادی در خصوص مشخص نمودن رفتار هیدرولیکی این نوع سرریز انجام گرفته است که اغلب ماهیت تجربی دارند. دیمارچی با فرض ثابت بودن انرژی معادله حاکم بر جریان را بدست آورد و برای محاسبه دبی خروجی از سرریز جانبی ضریب شدت جریان را که به نام ضریب دیمارچی نیز شناخته شده است معرفی نمود (Subramanya, 1972). علاوه بر دیمارچی محققین زیادی بر روی ضریب شدت جریان این سازه به مطالعه و تحقیق پرداخته‌اند. برخی از روابط تجربی که بر اساس آنالیز ابعادی استخراج و به کمک مطالعات آزمایشگاهی توسعه داده شده داده‌اند (Ghodsian, 2004؛ هنر و همکاران، ۱۳۸۴؛ Kayaa et al., 2011). مانند همه سرریزهای معمولی، سرریزهای جانبی هم می‌توانند لبه تیز یا لبه پهن باشند همچنین جریان

در کانال اصلی می‌تواند زیر بحرانی و یا فوق بحرانی باشد. اغلب کاربرد سرریزهای جانبی معمولاً به صورت لبه تیز مستطیلی در جریان‌های زیر بحرانی به کار گرفته می‌شوند (کشاوری، ۱۳۸۹؛ حدادی و رحیم پور، ۱۳۹۰). امروزه سرریزهای جانبی به شکل‌های مختلفی ساخته می‌شوند که هر کدام هیدرولیک خاص خود را دارا می‌باشند در این میان سرریزهای جانبی مستطیلی به خاطر سادگی و عملکرد مناسبشان بیش‌تر مورد قرار استفاده می‌گیرند. به منظور افزایش راندمان سرریزهای جانبی می‌توان از صفحات هادی استفاده نمود. نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که با افزودن صفحات هادی یا گروه شمع‌ها تا حدود ۳۰ درصد راندمان کارکرد سرریز افزایش می‌یابد (کبیری سامانی و همکاران، ۱۳۹۰). ضریب شدت جریان در سرریزهای جانبی لبه تیز با مقطع دوزنقه، دایره‌ای، پلان دایره‌ای و پلان مثلثی در محیط آزمایشگاه نیز اندازه‌گیری و محاسبه شده که در نهایت رابطه‌هایی برای محاسبه ضریب شدت جریان این سازه‌ها ارائه شده است (Rahimpour et al., 2001). مطالعه بر روی سرریزهای جانبی با مدل سازی‌های عددی نیز صورت گرفته است بدین صورت که معادله جریان متغیر مکانی با کاهش دبی با استفاده از روش رانج کوتای مرتبه چهار گسسته و برای محاسبه ضریب شدت جریان نیز از روابط تجربی استفاده شده که نتایج نهایی مدل عددی دارای دقت قابل قبولی بوده است (AL-TAEE, 2011؛ Rahimi, 2012؛ محمد ولی سامانی، ۱۳۸۴). با توجه به پیچیده بودن هیدرولیک سرریزهای جانبی روش‌های جدیدی برای طراحی این نوع سازه‌ها ارائه شده است که مبتنی بر استفاده از گراف می‌باشد. مزیت این روش‌ها در سادگی کاربرد آنها است (Rahimi, 2012). برای مدل‌سازی جریان بر روی سرریزهای جانبی علاوه بر حل عددی معادله دیفرانسیل حاکم، لازم است که مقدار ضریب شدت جریان نیز محاسبه شود. جهت تخمین ضریب شدت جریان عبوری از روی سرریز جانبی علاوه بر مطالعات تجربی و آزمایشگاهی، مطالعاتی که مبتنی بر مدل‌سازی ریاضی و هوش مصنوعی می‌باشد نیز صورت گرفته است. در مطالعات هوش مصنوعی به جای ارائه یک رابطه تجربی، یک شبکه توسعه داده می‌شود. از میان روش‌های هوش مصنوعی می‌توان به شبکه عصبی چند لایه (MLP) شبکه عصبی تطبیقی (ANFIS)، سیستم ماشین بردار پشتیبان (SVM) و غیره اشاره کرد. دقت اکثر مدل‌های هوش مصنوعی به مراتب بالاتر از روابط تجربی گزارش شده است. (Parsaie and Haghiabi, 2014؛ هنر و همکاران، ۱۳۸۹؛ Emiroglu et al., 2010). مطالعات صورت گرفته بر روی هیدرولیک سرریزهای جانبی نشان می‌دهد که بررسی خصوصیات هیدرولیک این سازه به صورت جداگانه انجام شده است. بدین صورت که عده‌ای از محققین فقط بر روی روش عددی تمرکز نموده و عده‌ای دیگر فقط به محاسبه و یا تخمین ضریب شدت جریان با استفاده از روش‌های تجربی و هوش مصنوعی پرداخته‌اند. این گسسته کاری مانع از ارائه یک مدل جامع و مناسب متشکل از روش عددی با دقت بالا (جهت حل معادلات دیفرانسیل حاکم) و روش‌های هوش مصنوعی (ابزاری پر قدرت در پیش بینی ضریب شدت جریان) در مدل‌سازی شده است. در مقاله حاضر با

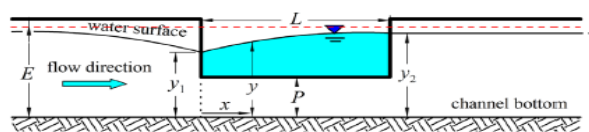
استفاده از روش رانج کوتای مرتبه چهار به گسسته‌سازی و حل عددی معادله جریان متغیر مکانی با کاهش دبی پرداخته شده و برای تخمین ضریب شدت جریان از شبکه عصبی تطبیقی (ANFIS) استفاده شده است.

### مواد و روش‌ها

ابتدا به صورت مختصر معادله حاکم بر جریان متغیر مکانی با کاهش دبی معرفی می‌شود. این معرفی به منظور یافتن دید کلی در مورد هیدرولیک جریان عبوری از روی این سازه و نقش مهم تخمین مناسب ضریب شدت جریان در مدل‌سازی عددی هیدرولیک آن است. بعد از معرفی معادله حاکم، به استخراج پارامترهای بی بعد مؤثر در ضریب شدت جریان با استفاده از تکنیک آنالیز ابعادی پرداخته شده است. این پارامترهای بی بعد اساس روابط تجربی و توسعه مدل‌های هوش مصنوعی ارائه شده جهت تخمین ضریب شدت جریان سرریز جانبی می‌باشند. برای ارائه مدل عددی مناسب، معادله دیفرانسیل حاکم با استفاده از روش رانج کوتای مرتبه چهار گسسته شده و برای تخمین ضریب شدت جریان، مدل شبکه عصبی تطبیقی توسعه داده شده است. مدل شبکه‌های عصبی تطبیقی (ANFIS) به این دلیل انتخاب شده که قبلاً از نظر دقت، قابلیت اطمینان و سهولت توسعه توسط محققین مورد تأیید قرار گرفته است. ورودی این شبکه پارامترهای بی‌بعدی است که در مرحله آنالیز ابعادی استخراج شده‌اند. برای تأیید دقت مدل عددی، مقایسه ای بین نتایج مدل عددی و نتایج مطالعات آزمایشگاهی انجام شده توسط Emiroglu و همکاران (۲۰۱۱)، انجام شده است. برای توسعه مدل کامپیوتری، فلوچارتی تهیه شده است که برنامه‌نویسی برای مدل‌سازی هیدرولیک سرریز جانبی (در محیط نرم افزار Matlab) بر اساس آن انجام شده است.

### معرفی معادله حاکم بر هیدرولیک سرریز جانبی

اگر سرریز جانبی مستطیل شکلی و جریان زیر بحرانی مانند (شکل ۱) در نظر گرفته شود، با استفاده از معادله انرژی (رابطه ۱) و مشتق‌گیری از آن، معادله دیفرانسیل حاکم بر جریان متغیر مکانی کاهش‌ی به صورت رابطه ۲ استخراج می‌شود. این معادله تابعی از دبی و عمق جریان عبوری از روی این سازه می‌باشد. دبی جریان عبوری بر روی این نوع سازه با استفاده از (رابطه ۳) قابل محاسبه می‌باشد. از ترکیب رابطه ۲ و ۳ معادله کلی حاکم بر هیدرولیک این سازه رابطه ۴ بدست می‌آید. برای محاسبه دبی و پروفیل جریان همانطور که از رابطه ۴ برمی‌آید ضریب شدت جریان نیز باید محاسبه شود. برای محاسبه این ضریب عوامل مؤثر بر آن با استفاده از آنالیز ابعادی استخراج و مشخص شده است.



شکل ۱: جریان متغیر مکانی کاهش‌ی در حالت زیر بحرانی بر روی سرریز جانبی

در هر مقطع از کانال، کل انرژی نسبت به یک سطح مبنا برابر است با:

$$H = z + y + \frac{Q^2}{2gA^2} \quad \text{رابطه ۱:}$$

از رابطه بالا نسبت به محور طول (x) مشتق گرفته می‌شود و در نهایت فرم کلی معادله جریان متغیر مکانی با کاهش دبی به صورت زیر حاصل می‌شود.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{s_0 - s_f - \frac{Q}{gA^2} \frac{dQ}{dx}}{1 - \frac{Q^2 B}{gA^3}} = f(y, Q) \quad \text{رابطه ۲:}$$

$$\frac{dQ}{dx} = -\frac{2}{3} c_d \sqrt{2g} (y_m - p_s)^{1.5} = g(y) \quad \text{رابطه ۳:}$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{s_0 - \frac{Q^2 n^2}{b^2 y^{10}} \left(1 + \frac{2y}{b}\right)^{\frac{4}{3}} + \frac{2\sqrt{2}}{3} c_d (y - p)^{3/2} \frac{Q}{b^2 y^2 \sqrt{g}}}{1 - \frac{Q^2}{gb^2 y^3}} \quad \text{رابطه ۴:}$$

در این رابطه y: عمق جریان، P: ارتفاع سرریز از کف کانال، Q: دبی کانال، B: طول سرریز،  $C_d$ : ضریب شدت جریان، g: شتاب ثقل می‌باشد.

### آنالیز ابعادی

عوامل مؤثر در ضریب شدت جریان  $C_d$  عبارتند از:

$$C_d = f(v_1, L, b, h_1, P, \psi, s_0) \quad \text{رابطه ۵:}$$

$v_1$  سرعت جریان در کانال اصلی، L طول سرریز جانبی، b عرض کانال بالا دست،  $h_1$  عمق جریان در بالا دست، P، ارتفاع سرریز جانبی،  $\psi$  زاویه انحراف جریان بر روی سرریز و  $s_0$  شیب طولی کانال می‌باشد. که بعد از بکارگیری تئوری باکینگهام پارامترهای بی بعد به صورت زیر حاصل شده است.

$$C_d = f_1 \left( Fr_1 = \frac{v_1}{\sqrt{gh_1}}, \frac{L}{b}, \frac{L}{h_1}, \frac{P}{h_1}, \psi, s_0 \right) \quad \text{رابطه ۶:}$$

در این رابطه  $Fr_1$  عدد فرود جریان در شروع سرریز جانبی است. مقدار زاویه انحراف جریان ممکن است در طول سرریز افزایش یابد ولی به نظر بعضی از محققین زاویه انحراف جریان، تأثیر معنی‌داری بر روی ضریب شدت جریان نداشته و

پارامتر بی‌بعد طول سرریز  $(\frac{L}{b})$  تأثیر زاویه انحراف را در خود دارا می‌باشد. شیب طولی کانال نیز در جریان‌های زیر بحرانی در طول سرریزهای جانبی را می‌توان نادیده گرفت. در نهایت پارامترهای بی‌بعد مؤثر در ضریب شدت جریان به صورت زیر خواهد بود (Emiroglu et al., 2011).

$$C_d = f_2 \left( Fr_1, \frac{L}{b}, \frac{L}{h_1}, \frac{P}{h_1} \right) \quad \text{رابطه ۷:}$$

جدول ۱: محدوده داده‌های گردآوری شده

محدوده	ضریب شدت جریان	طول نسبی	طول سرریز	عمق نسبی	فرود
کم‌ترین	۰/۲۸	۰/۳۵	۰/۳	۰/۳۴	۰/۰۹
بیش‌ترین	۱/۷۵	۱۰/۷۱	۳	۰/۹۱	۰/۸۳
میانگین	۰/۵۷	۳/۹۹	۱/۶	۰/۷۷	۰/۴۷
انحراف معیار	۰/۲۶	۳/۱۰	۱/۱۱	۰/۱۴	۰/۲

### گسسته سازی

گسسته سازی معادله دیفرانسیل جریان متغیر مکانی همراه با کاهش دبی با استفاده از روش رانج کوتای مرتبه چهارم به صورت زیر می‌باشد. فرم گسسته معادله دیفرانسیل حاکم بر جریان متغیر مکانی در (رابطه ۸) نشان داده شده است.

$$y_{i+1} = y_i + \frac{\Delta x}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

$$k_1 = f(y_i)$$

$$k_2 = f\left(y_i + \frac{k_1}{2}\right)$$

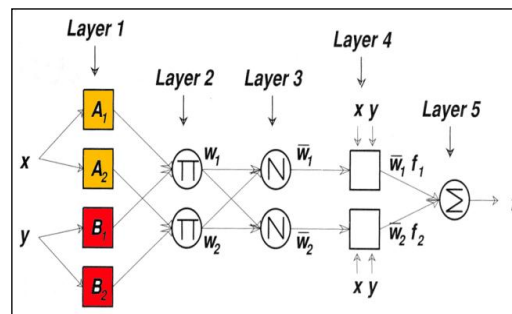
$$k_3 = f\left(y_i + \frac{k_2}{2}\right)$$

$$k_4 = f(y_i + k_3)$$

رابطه ۸:

### ساختار شبکه عصبی تطبیقی

شبکه عصبی تطبیقی (ANFIS) یک شبکه پیشخور چند لایه می‌باشد که از الگوریتم‌های یادگیری شبکه عصبی و منطق فازی به منظور ترسیم یک فضای ورودی به یک فضای خروجی استفاده می‌کند. شبکه تطبیقی سیستم عصبی (ANFIS)، نشان داده است که در مدل کردن کارهای عددی مثل مدیریت مخازن مدل کردن سری‌های زمانی هیدرولوژیکی، برآورد رسوب و پیش بینی سطح آب در مخازن بسیار قدرتمند می‌باشد. شکل ۲ ساختار یک شبکه عصبی تطبیقی را نشان می‌دهد.



شکل ۲: یک نمونه ساختار مدل ANFIS

لایه اول، گره‌های ورودی: هر گره از این لایه، مقادیر عضویتی که به هر یک از مجموعه‌های فازی مناسب تعلق دارند، با استفاده از تابع عضویت تولید می‌کنند. تابع عضویت مجموعه‌های فازی معمولاً توسط توابع فازی سازهای گوسی شکل به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\mu_{A_i} = \frac{1}{1 + \left( \frac{x - c_i}{a_i} \right)^{2b_i}} \quad \text{رابطه ۹:}$$

x: مقدار ورودی به گره i و مجموعه،  $\{b_i, c_i, a_i\} = S_1$  پارامترهای تطبیقی نامیده می‌شوند. لایه دوم، گره‌های قاعده: در لایه دوم، عملگر "و" (AND) به کار برده می‌شود تا خروجی (قوه اشتغال) که نمایانگر بخش مقدم آن قانون است، بدست آید. قوه اشتغال به مقدار درجه ای که بخش مقدم یک قانون فازی برآورده شده، گفته می‌شود و به تابع خروجی آن قانون شکل می‌دهد از این رو، خروجی‌های این لایه، حاصل ضرب درجات مربوط به لایه اول هستند. لایه سوم، گره‌های متوسط: در این لایه i امین گره، نسبت درجه فعالیت قانون i ام را به مجموع درجه فعالیت کلیه قوانین به صورت زیر نرمال سازی می‌کند.

$$o_i^3 = \bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad \text{رابطه ۱۰:}$$

$$i = 1, 2$$

با:  $\bar{w}_i$ : درجه فعالیت نرمال شده قانون i ام می‌باشد. لایه چهارم، گره‌های نتیجه: در این لایه خارجی هر گره برابر است

$$o_i^4 = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x_i + q_i x_2 + r_i) \quad \text{رابطه ۱۱:}$$

$$i = 1, 2$$

<sup>1</sup> Firing Strength

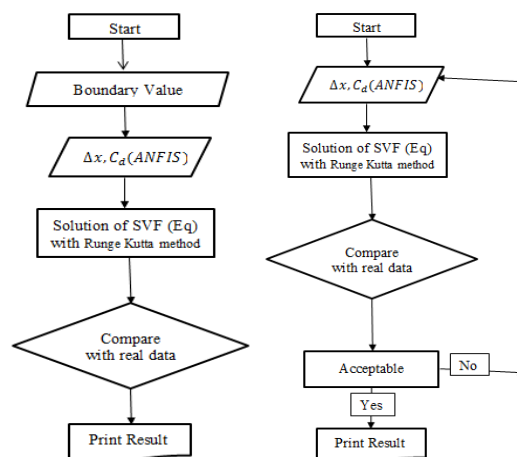
مجموعه،  $S_1 = \{p_i, \{q_i, r_i\}$  پارامترهای متعاقب نامیده می‌شوند. لایه پنجم، گره‌های خروجی: در این لایه هر گره مقدار خروجی نهایی را به صورت زیر محاسبه می‌نماید (تعداد گره‌ها برابر تعداد خروجی‌هاست):

$$O_i^5 = \sum_{i=1}^n w_i f_i = \frac{\sum_{i=1}^4 w_i f_i}{\sum_{i=1}^4 w_i} \quad \text{رابطه ۱۲:}$$

در مدل نرو فازی زمانی عمل شبیه‌سازی به درستی انجام شده است که مجموعه پارامترهای تطبیقی  $S_1$  و مجموعه پارامترهای متعاقب  $S_2$  طوری تخمین زده شوند که مقدار تابع خطای مدل در بخش آموزش و آزمایش به حداقل برسد. تعداد و نوع ورودی‌ها و همچنین شکل تابع عضویت از عوامل تأثیرگذار بر مدل نرو فازی می‌باشد.

### فلوچارت مدل توسعه داده شده

در این مقاله برای مدل‌سازی جریان بر روی سرریزهای جانبی به دو قسمت معادله جریان متغیر مکانی یعنی ضریب شدت جریان و معادله دیفرانسیل به صورت جداگانه پرداخته شده است. برای تخمین ضریب شدت جریان مدل شبکه عصبی توسعه داده شده و برای حل عددی معادله دیفرانسیل جریان متغیر مکانی از روش رانج کوتای مرتبه چهار استفاده شده است. ورودی‌های مدل شبکه عصبی شامل پارامترهایی است که در قسمت آنالیز ابعادی عوامل مؤثر در ضریب دبی رابطه ۷ توضیح داده شده است. برای هر دو قسمت از توسعه مدل برنامه کامپیوتری در محیط نرم افزار Matlab تهیه شده است. با استفاده از داده‌های منتشر شده در مقالات چاپ شده در مجلات معتبر به آموزش، صحت سنجی مدل شبکه عصبی چند لایه پرداخته شده است و در ادامه نتایج ضریب شدت جریان حاصل از مدل هوش مصنوعی، به عنوان ورودی به مدل عددی در نظر گرفته شده است. خروجی نهایی مدل، عمق جریان عبوری از روی سرریز جانبی می‌باشد. (شکل ۳) فلوچارت مدل توسعه داده شده را در مراحل آموزش و ارزیابی نشان می‌دهد.

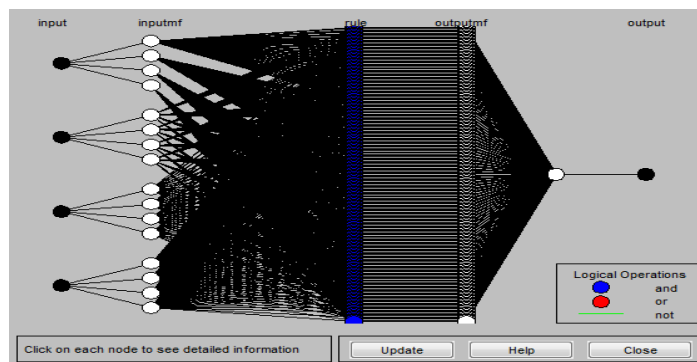


شکل ۳: فلوچارت مدل عددی در مرحله آموزش (سمت راست) و آزمایش مدل (سمت چپ)



## نتایج و بحث

برای تهیه مدل شبکه عصبی تطبیقی، حدود ۱۸۰ داده حاصل از نتایج مطالعات آزمایشگاهی محققین مورد استفاده قرار گرفته است. محدوده این داده ها در جدول ۱ آورده شده است. ۷۰ درصد این داده ها برای آموزش، ۱۵ درصد نیز برای صحت سنجی و بقیه (۱۵ درصد) برای آزمایش مدل شبکه عصبی تطبیقی استفاده شده است. ساختار مدل شبکه عصبی در شکل ۵ نشان داده شده است. هر کدام از ورودی ها دارای چهار تابع عضویت گوسینی (gaussmf) می باشد. نتایج مربوط به توسعه شبکه عصبی تطبیقی در مراحل آموزش، صحت سنجی و آزمایش در (شکل ۶ تا ۸) آورده شده است. شاخص های خطا نیز برای این مدل محاسبه و در جدول ۴ آورده شده است. همان طور که از نتایج مدل شبکه عصبی تطبیقی مشخص است دقت مدل در مراحل توسعه، بسیار مناسب می باشد. برای اعتبار سنجی مدل عددی نهایی ارائه شده بر اساس فلوچارت، مقایسه ای بین نتایج مطالعات Emiroglu و همکاران (۲۰۱۱) انجام گرفت. به این صورت که ابتدا ضرایب بی بعد مورد نیاز در مدل شبکه عصبی تطبیقی (ANFIS) از مطالعات ایشان استخراج و وارد مدل شبکه عصبی تطبیقی شد که خروجی آن تخمین مناسب ضریب شدت جریان است. در مورد بکارگیری مدل عددی باید در نظر داشت که شرایط جریان در مطالعات امیر اقلو و همکاران زیر بحرانی بوده که این خود می رساند که محاسبات باید از پایین دست شروع شده و به طرف بالادست ادامه یابد. خروجی مدل عددی نهایی پروفیل سطح آب برای دو نمونه از آزمایشات است. نتایج حاصل از مدل برای هر دو حالت آزمایشات و تخمین ضریب شدت جریان با استفاده از شبکه عصبی تطبیقی در شکل های (۹ و ۱۰) آورده شده است. همان طور که مشخص است نتایج مدل عددی بسیار مناسب می باشد. برای اجرای مدل نهایی هر دو عمق پایین دست و ضریب شدت جریان و گام های مکانی به برنامه تهیه شده داده شد و خروجی آن نیز ترسیم گردید که شکل های (۹ و ۱۰) حاصل اجرا و مقایسه برنامه تهیه شده با نتایج آزمایشگاهی Emiroglu و همکاران (۲۰۱۱) می باشد. مقادیر به کار رفته در برنامه کامپیوتری در جدول ۵ آورده شده است. همان طور که از جدول ۵ بر می آید دقت مدل نهایی بسیار بالا می باشد.



شکل ۵: ساختار مدل شبکه عصبی تطبیقی تهیه شده

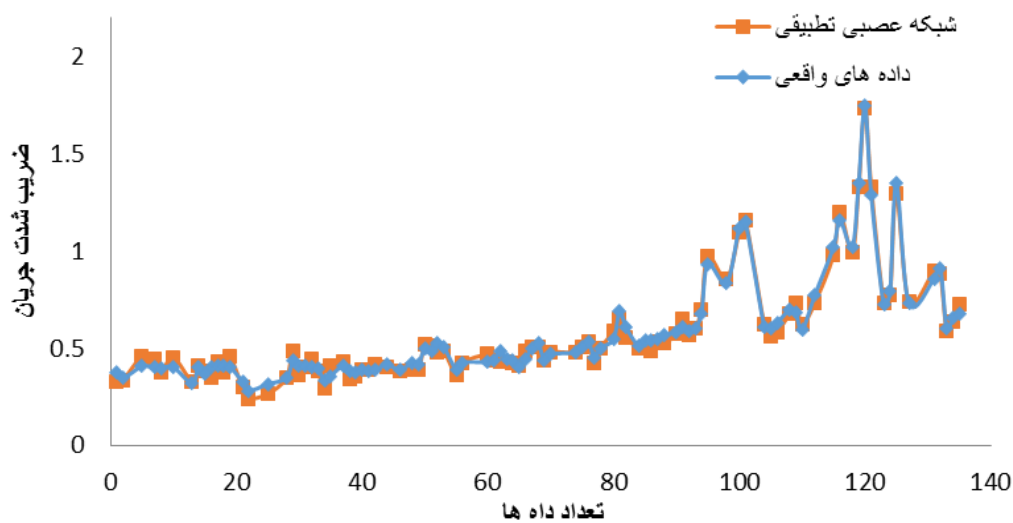
$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (C_{d-o} - \bar{C}_{d-o})(C_{d-e} - \bar{C}_{d-e})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (C_{d-o} - \bar{C}_{d-o})(C_{d-o} - \bar{C}_{d-o}) \sum_{i=1}^N (C_{d-e} - \bar{C}_{d-e})(C_{d-e} - \bar{C}_{d-e})}}$$

$$RSME = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_{d-o} - C_{d-e})^2}$$

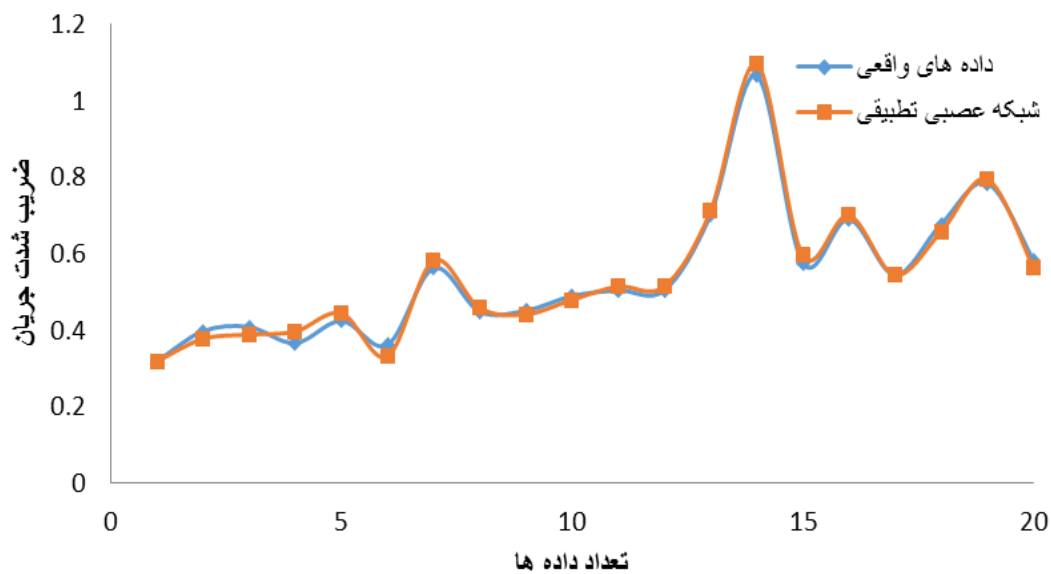
$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{abs}(C_{d-o} - C_{d-e})$$

$$APE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{abs}\left(\frac{C_{d-o} - C_{d-e}}{C_{d-o}}\right)$$

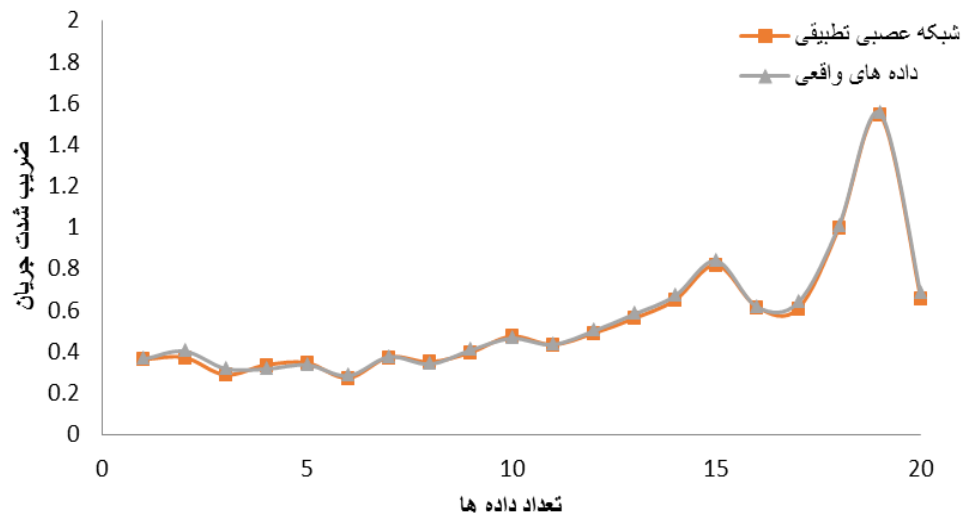
رابطه ۱۳:



شکل ۶: عملکرد شبکه عصبی چند لایه توسعه داده شده در مرحله آموزش



شکل ۷: عملکرد شبکه عصبی چند لایه توسعه داده شده در مرحله صحت سنجی



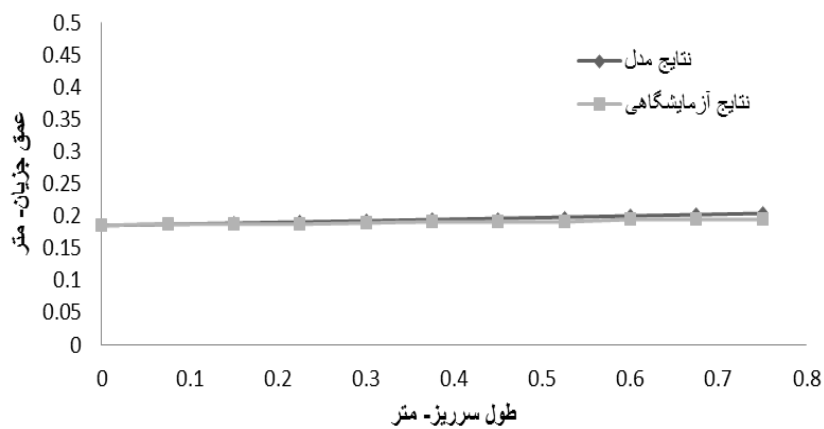
شکل ۸: عملکرد شبکه عصبی چند لایه توسعه داده شده در مرحله آزمایش

جدول ۴: محاسبه شاخص های خطای عملکرد شبکه عصبی چند لایه

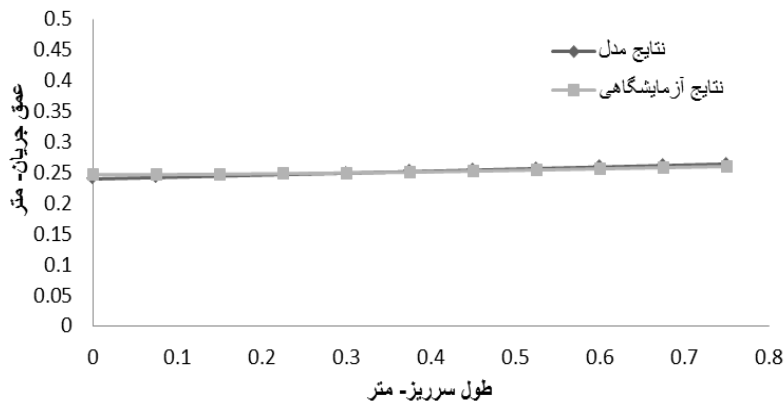
مرحله	میانگین خطای مطلق	درصد خطا مطلق	ریشه میانگین مربعات خطا	ضریب تبیین
آموزش	۰/۰۲۶	۵/۱۷	۰/۰۳	۰/۹۹
صحت سنجی	۰/۰۱۵	۳/۱	۰/۰۱۷	۰/۹۹
آزمایش	۰/۰۱۳	۲/۸۵	۰/۰۱۶	۰/۹۹

جدول ۵: مقادیر بکار رفته برای مدل عددی مطابق فلوچارت

پارامتر اجرا	ضریب شدت جریان	$\Delta x$	ضریب تبیین
اجرای ۱-	۰/۵۲	۰/۰۷۵	۰/۹۸
اجرای ۲-	۰/۴۷	۰/۰۷۵	۰/۹۹



شکل ۹: پروفیل جریان بر روی سرریز جانبی ( $F_r=0.28, P=0.12, L=0.75$ )



شکل ۱۰: پروفیل جریان بر روس سرریز جانبی ( $F_r=0.39$ ,  $P=0.16(m)$ ,  $L=0.75$ )

### نتیجه‌گیری

سرریزهای جانبی یکی از انواع سرریزها می‌باشند که به طور وسیعی در انواع پروژه‌های مهندسی آب مانند مهندسی رودخانه، سدها، شبکه‌های آبیاری و زهکشی، پخش سیلاب و جمع‌آوری فاضلاب و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین مطالعه خصوصیات جریان عبوری بر روی این نوع سرریزها یکی از موضوعات مهم در مهندسی هیدرولیک می‌باشد. برای مدل‌سازی جریان بر روی این سازه استفاده از مدل‌های فیزیکی و عددی لازم به نظر می‌رسد. مدل‌های فیزیکی چون بیشتر در محدود آزمایشگاه و برای مطالعه بر روی موضوع خاصی ساخته می‌شوند از محدودیت‌های آزمایشگاهی برخوردار هستند، به همین دلیل فرمول‌هایی که ارائه داده می‌شوند در عین اعتبار، بیش‌تر در همان محدوده شرایط آزمایشگاهی معتبر و قابل استفاده هستند و با تغییر شرایط آزمایش خطای قابل ملاحظه‌ای در نتایج آن‌ها دیده می‌شود. مدل‌های عددی به دلیل هزینه‌های کم مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این نوع مدل‌ها معادلات دیفرانسیل حاکم بر پدیده به کمک روش‌های عددی معتبر حل شده و نتایج نسبتاً خوبی نیز ارائه شده است، اما باید نتایج آن‌ها با داده‌های آزمایشگاهی و یا صحرایی مورد تأیید قرار بگیرد. اخیراً مهندسان هیدرولیک برای مدل‌سازی پدیده‌ها به توسعه مدل‌های هوش مصنوعی روی آورده‌اند، که تا حدود بسیار خوبی توانسته است جایگزین روش‌های کلاسیک مانند انواع رگرسیون شود. همان‌طور که از نتایج این مقاله بر می‌آید تهیه و توسعه مدل‌های هوش مصنوعی برای تخمین ضرایب موجود در معادلات دیفرانسیل می‌تواند در کنار مدل‌سازی عددی پدیده‌های هیدرولیکی به طور همزمان به کار گرفته شوند. نتایج نشان می‌دهد که تخمین ضرایب با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی در کنار مدل عددی مناسب می‌تواند دقت و کارایی مدل‌سازی‌های کامپیوتری را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش دهد و نرم افزارهای تجاری می‌توانند بر مبنای استفاده همزمان این دو تکنیک توسعه داده شوند.

## منابع

- پارسائی، ع.، احمدی، م. م. و قادری، ک. (۱۳۹۲). شبیه‌سازی عددی انتشار آلودگی در رودخانه‌ها به وسیله توسعه همزمان روش عددی حجم محدود و مدل شبکه عصبی تطبیقی، مجله علوم و مهندسی آب، شماره ۴، ص ۹۷-۱۱۹.
- حدادی، ح.، رحیم‌پور، م.، احمدی، م. م. و غفوری، ع. ر. (۱۳۹۰). ضریب دبی جریان در سرریز جانبی لبه پهن با مقطع دوزنقه ای. یازدهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر. کرمان، دانشگاه شهید باهنر.
- حسینی، ج. ابریشمی، س. م. (۱۳۸۴). اصول جریان در مجاری روباز. انتشارات استان قدس رضوی.
- شفاعی بجستان، م. (۱۳۹۰). مبانی و کاربرد مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ظاهرشمسی، ا. (۱۳۹۰). هیدرولیک محاسباتی. انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر.
- کبیری سامانی، ع.، اسماعیلی، ح. و حیدر پور، م. (۱۳۹۰). افزایش راندمان سرریزهای جانبی ساده با استفاده از صفحات هادی یا گروه شمع. مجله آب و فاضلاب، شماره ۱، ص ۱۰۱-۱۱۳.
- کشاورز، ز. (۱۳۸۹). استخراج معادله پروفیل جریان و ضریب دبی سرریزهای جانبی با مقطع دوزنقه‌ای و دایره‌ای پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ص ۱۲۸.
- کیامنش، ح. (۱۳۸۸). هیدرولیک محاسباتی. انتشارات تراوا.
- محمد ولی سامانی، ح. (۱۳۸۴). مدل ریاضی یک بعدی هیدرولیک سرریزهای جانبی در شرایط وقوع پرش هیدرولیکی. مجله علوم دانشگاه شهید چمران اهواز، شماره ۱۳، ص ۱۴-۱.
- محمودیان شوشتری، م. (۱۳۸۸). اصول جریان در مجاری روباز. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، جلد دو.
- نیک صفت، غ. ر. (۱۳۸۰). تئوری و کاربرد مدل‌های هیدرولیک در طراحی سازه‌های آبی. انتشارات وزارت نیرو، شماره ۴۱، ص ۴۰۳.
- هنر، ت. طرازکار، م. ح. و طرازکار، م. ر. (۱۳۸۹). برآورد ضریب دبی سرریزهای جانبی با استفاده از سیستم استنتاج فازی - عصبی (ANFIS). مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. شماره ۲، ص ۱۷۶-۱۶۹.
- هنر، ت.، جوان، م. و کشاورزی، م. (۱۳۸۴). تحلیل ضریب دبی جزئی سرریزهای جانبی مایل در کانال‌های غیر منشوری مستطیلی. مجله علوم کشاورزی ایران. شماره ۴، ص ۸۲۴-۸۱۹.
- Al-Taee, A. (2011).** Theoretical analysis of flow over the side weir using Runge Kutta method. Annals of the Faculty of Engineering Hnedoara.
- Borghei, S. M. and Parvaneh, A., (2011).** Flow Measurement and Instrumentation, pp: 370-376.

- 
- Emiroglu, M. E., Kisi, O. and Bilhan. O. (2010).** Predicting discharge capacity of triangular labyrinth side weir located on a straight channel by using an adaptive Neuro-Fuzzy technique. *Journal of Advances in Engineering Software*, PP: 154–160.
- Emiroglu, M. E., Agaccioglu, H. and Kaya, N. (2011).** Discharging capacity of rectangular side weirs in straight open channels. *Flow Measurement and Instrumentation*, pp: 319–330.
- Ghodsian, M. (2004).** Flow over triangular side weir. *Journal Scientia Iranica Transaction on Civil Engineering*, pp: 114–20.
- Kayaa, N. Emiroglu, M. E. and Agaccioglu H. (2011).** Discharge coefficient of a semi-elliptical side weir in subcritical flow. *Journal of Flow Measurement and Instrumentation*, pp: 25–32.
- Parsaie, A. and Haghiabi, A.H. (2014).** Predicting the side weir discharge coefficient using the optimized neural network by genetic algorithm. *Scientific Journal of Pure and Applied Sciences*, pp: 103-112.
- Rahimi, A. (2012).** Hydraulic Design of Side Weirs by Alternative Methods. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, pp: 157-167.
- Rahimpour, M., Keshavarz, Z. and Ahmadi, M. M. (2011).** Flow over trapezoidal side weir. *Journal of Flow Measurement and Instrumentation*, pp: 507–510.
- Subramanya, K. and Awasthy, S.C. (1972).** Spatially varied flow over side weirs. *Journal of the Hydraulics Division*, pp: 1-10.