

## ارزیابی عملکرد مدل‌های ANFIS و ANFIS-PSO در برآورد خصوصیات پرش هیدرولیکی

ناهید پورعبداله<sup>۱</sup>، جهانگیر عابدی کوپایی<sup>۱</sup>، منوچهر حیدرپور<sup>۱</sup> و محمود اکبری<sup>۲\*</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۲/۲۵)

### چکیده

در این مطالعه دقت مدل‌های ANFIS و ANFIS-PSO در برآورد ویژگی‌های پرش هیدرولیکی شامل نسبت اعماق مزدوج، طول نسبی، طول غلتاب نسبی و افت انرژی نسبی در یک حوضچه آرامش در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی ارزیابی شد. این ویژگی‌ها در حوضچه آزمایشگاهی با مقطع مستطیلی با ۴ شیب معکوس، ۴ قطر زبری بستر، ۴ ارتفاع پله مثبت انتهایی، ۳ عدد فرود و ۴ دبی اندازه‌گیری شدند. میانگین پارامترهای آماری NRMSE، CRM و  $R^2$  برای برآورد ویژگی‌های پرش هیدرولیکی توسط مدل ANFIS، به ترتیب ۰/۰۵۹، ۰/۰۰۱- و ۰/۹۸۹ بود. در حالی که مقادیر میانگین پارامترهای یادشده برای مدل ANFIS-PSO به ترتیب ۰/۱۸۵، ۰/۰۰۲ و ۰/۹۵۷ بود. نتایج حاصل نشان داد که این مدل‌ها قادرند ویژگی‌های پرش هیدرولیکی را با دقت بسیار زیاد برآورد نمایند. البته مدل ANFIS در برآورد نسبت اعماق مزدوج، طول پرش نسبی، طول غلتاب نسبی و افت انرژی نسبی نسبت به مدل ANFIS-PSO اندکی دارای دقت بیشتری بود.

واژه‌های کلیدی: پرش هیدرولیکی، مدل داده‌مبنا، نسبت اعماق مزدوج، افت انرژی نسبی پرش

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و محیط زیست، دانشگاه اراک

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: Email: m-akbarii@araku.ac.ir

## مقدمه

مطالعات بسیاری درباره مشخصه‌های پرش هیدرولیکی تحت شرایط مختلف صورت پذیرفته است. محسنی موحد و همکاران (۱۱) به بررسی برآورد طول پرش هیدرولیکی با استفاده از یک معادله نیمه‌تحلیلی در پرش نوع E و کلاسیک پرداختند. پورعبداله و همکاران (۱۵) تأثیر همزمان شیب معکوس، زبری بستر و پله مثبت انتهایی را بر خصوصیات پرش هیدرولیکی بررسی کردند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که افزایش شیب معکوس و زبری و پله مثبت انتهایی باعث افزایش افت انرژی نسبی و کاهش نسبت اعماق مزدوج، طول غلتاب و طول پرش نسبت به پرش کلاسیک می‌شود. دانشفراز و همکاران (۵) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر واگرایی و بستر زبرشده با شن بر مشخصات پرش هیدرولیکی پرداختند. نتایج نشان داد که حوضچه‌های آرامش و اگرای ناگهانی با بستر زبر در تمامی نسبت‌های بازشدگی، عمق مزدوج پرش را در مقایسه با واگرای با بستر صاف به صورت متوسط ۱۲ تا ۱۶ درصد کاهش می‌دهد. دانشفراز و همکاران (۶) پرش هیدرولیکی را در یک کانال با واگرایی ناگهانی و زبری مصنوعی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که عمق ثانویه و طول پرش S در یک تخت زیر نسبت به بستر صاف به ترتیب ۲۲ و ۹-۱۳ درصد کاهش یافته است.

امروزه با افزایش توان محاسباتی رایانه‌ها، محققان با پیاده‌سازی محاسبات نرم در مدل‌های داده‌مبنا، راهکارهایی برای حل مسائل پیچیده، غیر خطی، غیر قطعی و مبهم ارائه داده و باعث تخمین دقیق و صرفه‌جویی در وقت و هزینه شده‌اند. مدل استنتاج فازی-عصبی (ANFIS) که ترکیبی از سیستم‌های فازی و شبکه عصبی مصنوعی است، ایرادهای کمتری نسبت به دو مدل دیگر دارد (۱۲). با ترکیب این مدل با الگوریتم‌های بهینه‌سازی می‌توان برای بهتر شدن عملکرد مدل ANFIS تلاش کرد (۱۰). علیزاده و همکاران (۲) با استفاده از مدل ANFIS-GA به تخمین طول پرش هیدرولیکی در شرایط زبری و شیب پرداختند. نتایج نشان داد که عدد فرود اولیه

مؤثرترین پارامتر در مدل‌سازی پرش هیدرولیکی است. عظیمی و همکاران (۳) برای تخمین طول غلتاب پرش هیدرولیکی در شرایط زبری بستر با استفاده از مدل‌های ANFIS و ANFIS-FA، پارامتر مذکور را به‌عنوان تابعی از عدد فرود ( $Fr_1$ )، نسبت زبری بستر به عمق جریان در بالادست پرش ( $t/D_1$ ) و نسبت اعماق مزدوج ( $D_2/D_1$ ) در نظر گرفتند. مطابق نتایج مدل ANFIS-FA به‌عنوان مدل برتر برای تخمین طول غلتاب پرش هیدرولیکی بدست آمد. شهبازیگی و همکاران (۱۸) با استفاده از مدل ANFIS-PSO به شبیه‌سازی طول پرش هیدرولیکی در شرایط شیب و زبری پرداختند. نتایج، دقت مناسب این مدل برای شبیه‌سازی را نشان داد. نوروزی و همکاران (۱۲) از دو مدل هوشمند مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و مدل عصبی-فازی تطبیق‌پذیر (ANFIS) در تخمین استهلاك انرژی نسبی با استفاده از ۳ پارامتر استفاده کردند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که هر دو مدل هوشمند از دقت بهتری در تخمین استهلاك انرژی نسبی برخوردار هستند ولی مدل ANFIS نسبت به شبکه عصبی مصنوعی (ANN) از دقت بالایی برخوردار می‌باشد.

نظر به مطالعات گذشته تاکنون از مدل‌های داده‌مبنا در پیش‌بینی ویژگی‌های پرش هیدرولیکی در شرایط کاربرد همزمان زبری، شیب معکوس و پله مثبت انتهایی استفاده نشده است. بنابراین، هدف این مطالعه، ارزیابی مدل‌های ANFIS و ANFIS-PSO برای برآورد ویژگی‌های مهم پرش هیدرولیکی شامل نسبت اعماق مزدوج، طول نسبی پرش، طول نسبی غلتاب و افت انرژی نسبی پرش در حوضچه آرامشی با کاربرد همزمان شیب معکوس، بستر زبر و پله مثبت انتهایی بوده است.

## مواد و روش‌ها

در این تحقیق با استفاده از کدنویسی در محیط برنامه‌نویسی نرم‌افزار MATLAB از دو مدل داده‌کاوی ANFIS و ANFIS-PSO برای برآورد مشخصات پرش هیدرولیکی در

شرایط زبری، شیب معکوس و پله مثبت انتهایی استفاده شد.

### مدل آزمایشگاهی

این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی اصفهان در فلومی با مقطع مستطیلی به عرض ۰/۴، ارتفاع ۰/۶ و با طول ۸ متر با کف و دیوارهای پلکسی گلاس شفاف صورت گرفت. طول حوضچه آرامش شامل ۲ متر سطح شیبدار معکوس و یک پله مثبت انتهایی با طول یک متر بود. به منظور افزایش عدد فرود اولیه در ۲ متر از طول کانال (قبل از دریچه بالادست) ارتفاع کانال از ۰/۶ متر به ۱/۲۵ متر افزایش یافت. همچنین، شیب بستر حوضچه آرامش صفر، ۱/۵-، ۳- و ۵- درصد انتخاب شد. ارتفاع پله مثبت انتهایی نیز ۰، ۳، ۶ و ۱۰ سانتی متر در نظر گرفته شد. آزمایش‌های این پژوهش هم در حالت بستر بدون زبری و هم برای بستر با زبری سنگریزه‌ای با دانه‌بندی  $0/66 \leq t \leq 0/76$ ،  $11/1 \leq t \leq 22/2$  و  $19/1 \leq t \leq 22/2$  میلی‌متر انجام گرفت. در مجموع در این مطالعه ۵۷۶ آزمایش در محدوده اعداد فرود ۴ تا ۱۰ و چهار دبی در بازه ۳۰ تا ۵۰ لیتر بر ثانیه (۳۱، ۳۸/۵، ۴۴ و ۵۰ لیتر بر ثانیه) برنامه‌ریزی و انجام شد (جدول ۱). نمونه‌ای از پرش آزاد در شکل ۱ (الف) و تصویری شماتیک از پرش آزاد تثبیت‌شده بر روی سطح شیب‌دار معکوس همراه با زبری بستر و پله مثبت انتهایی در شکل ۱ (ب) نشان داده شده است. برای اندازه‌گیری عمق جریان از یک عمق سنج دستی با دقت  $\pm 0/1$  میلی‌متر و برای اندازه‌گیری دبی و سرعت به ترتیب از دبی‌سنج الکترومغناطیسی و لوله پیتوت استفاده شد که با استفاده از سرعت سنج ADV کالیبره شده بود.

### مدل‌های داده مبنا

#### مدل ANFIS

یکی از قدرتمندترین ساختارها به منظور تلفیق سیستم فازی و شبکه عصبی، ANFIS است (۸). توابع عضویت در منطق فازی و نرون‌ها در شبکه عصبی مطرح هستند. ابتدا توابع عضویت

برای پارامترهای ورودی تعریف شده و مقدار عضویت هر پارامتر ورودی به بازه‌های مختلف فازی تعیین می‌شود. نقطه ضعف اصلی سیستم استنتاج فازی، تعیین توابع عضویت بهینه است که در ANFIS، با استفاده از توانایی یادگیری شبکه عصبی، این مشکل مرتفع می‌شود. ساختار ANFIS دارای پنج لایه به ترتیب شامل گره‌های ورودی، قاعده، متوسط، نتیجه و خروجی است. هر گره دارای تابعی با پارامترهای قابل تنظیم یا ثابت است. در مرحله آموزش، پارامترهای مرتبط با توابع عضویت تغییر یافته و با استفاده از بردار گرادیان به گونه‌ای محاسبه می‌شوند که یک معیار مناسب برای مطلوبیت مدل‌سازی پارامترها ایجاد شود. پس از ایجاد بردار گرادیان، از مدل‌های بهینه‌سازی برای بهینه‌سازی پارامترها و به حداقل رساندن خطاها استفاده می‌شود.

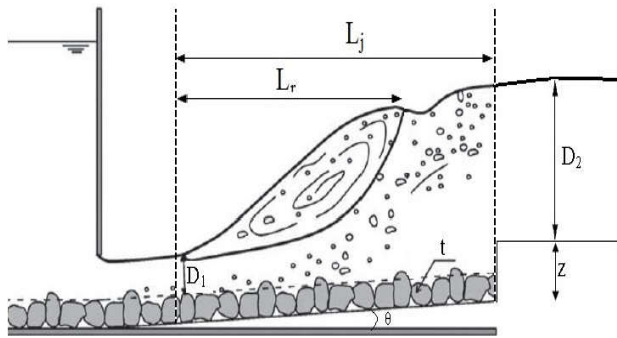
در روش‌های داده‌کاوی نظیر ANFIS، برای فرایند آموزش، یک مسئله بهینه‌سازی حل می‌شود تا به روش مدل‌سازی معکوس پیچ‌های الگوریتم ANFIS تنظیم شود. عمدتاً در نرم‌افزارهای مختلف، الگوریتم لونیبرگ-مارکواریت که یک الگوریتم ابتکاری است و توانایی خروج از دام بهینه موضعی را ندارد به کار می‌رود. حال آنکه روشی نظیر ANFIS-PSO الگوریتم فراابتکاری PSO را جایگزین الگوریتم لونیبرگ-مارکواریت می‌نماید (۱۴).

### مدل تلفیقی ANFIS و PSO

بهینه‌سازی گروهی ذرات با به وجود آوردن مجموعه‌ای از ذرات یا راه‌حل‌ها که به صورت تصادفی به وجود می‌آید، ایجاد می‌شود (۹). سپس با استفاده از به روز رسانی مکرر ذرات به جستجوی بهینه‌ترین حالت می‌پردازد. با فرض وجود فضای D بعدی و ذره i ام در این فضا به صورت  $X_i$  و بردار سرعت با  $V_i$  نشان داده می‌شود. بهترین موقعیت که ذره i ام پیدا کرده است، به صورت  $P_{best_i}$  نشان داده

جدول ۱. نوع و تعداد متغیرهای مورد نظر برای انجام آزمایش‌های این پژوهش

متغیر	دبی (LPS)	عدد فرود	شیب معکوس (%)	زبری بستر (cm)	ارتفاع پله مثبت (cm)
محدوده	۵۰-۳۰	۱۰-۴	۵-۰	۲-۰	۱۰-۰
تعداد و مقدار	۴	۳	۵ و ۳، ۱/۵، ۰	۲ و ۱/۲، ۰/۵۲، ۰	۱۰ و ۶، ۳، ۰



(ب)



(الف)

شکل ۱- الف) نمونه از پرش هیدرولیکی تثبیت شده در فلوم آزمایشگاهی (ب) تصویر شماتیک از پرش آزاد بر روی سطح شیب‌دار معکوس همراه با زبری بستر و پله مثبت انتهایی

### مدل‌سازی و معیارهای ارزیابی

به‌منظور بررسی میزان تأثیر زبری، شیب معکوس و پله مثبت انتهایی بر اعماق مزدوج، طول پرش، طول غلتاب و افت انرژی پرش هیدرولیکی اگر چنانچه  $D_1$  عمق اولیه پرش روی بستر زبر،  $u_1$  سرعت متوسط در مقطع اولیه پرش،  $D_2$  عمق ثانویه،  $L_j$  طول پرش و  $L_r$  طول غلتاب پرش باشد، بنابراین  $D_2$ ،  $L_j$ ،  $L_r$  و  $\Delta E$  تابعی از پارامترهای زیر خواهند بود:

$$D_2, L_j, L_r, \Delta E = f(D_1, u_1, g, \mu, \rho, t, \theta, z) \quad (3)$$

در این رابطه  $g$  شتاب ثقل،  $\rho$  دانسیته،  $\mu$  لزجت دینامیکی آب،  $t$  قطر زبری،  $v$  لزجت سینماتیکی،  $\theta$  شیب بستر و  $z$  ارتفاع پله مثبت انتهایی می‌باشد. بنابراین، با توجه به آنالیز ابعادی نسبت اعماق مزدوج  $(D_2/D_1)$ ، از رابطه زیر به دست می‌آید:

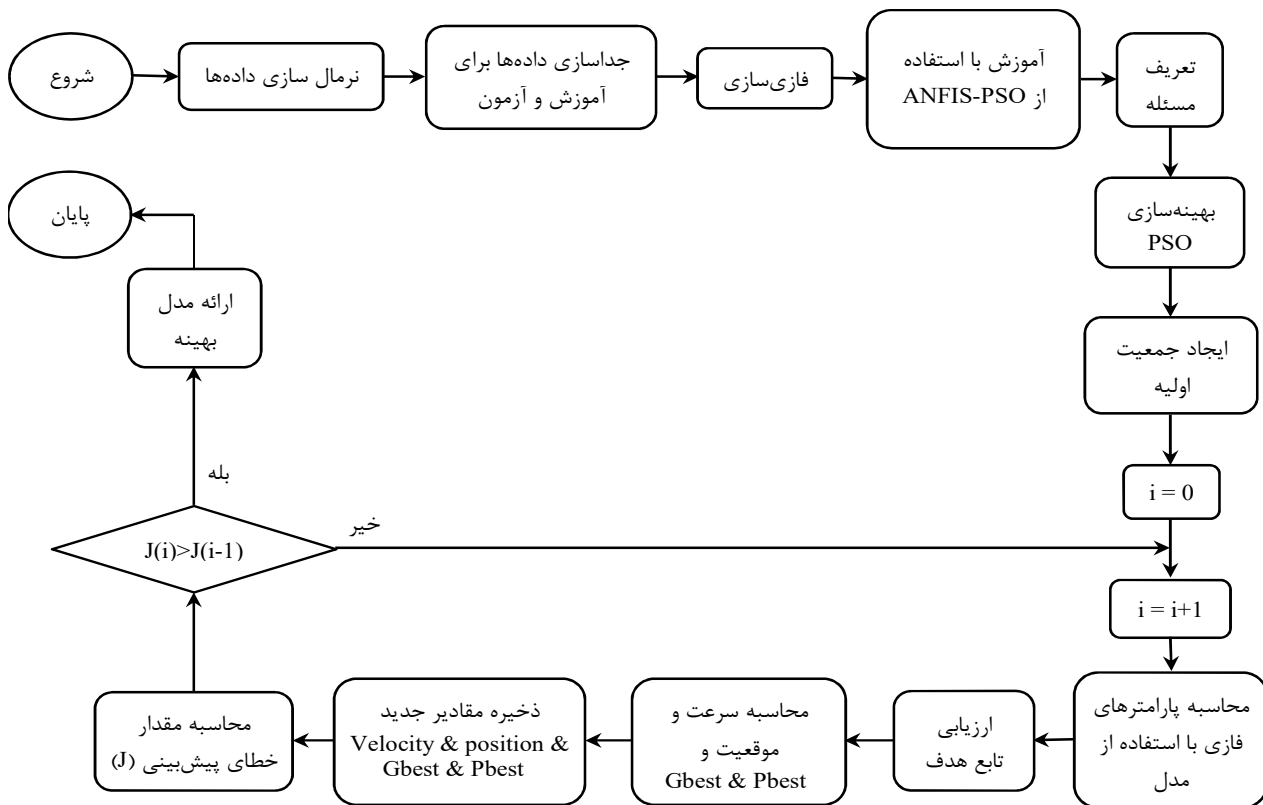
$$\frac{D_2}{D_1} = f_1\left(\text{Re} = \frac{u_1 D_1}{\nu}, \text{Fr}_1 = \frac{u_1}{\sqrt{g D_1}}, \frac{t}{D_1}, \frac{z}{D_1}, \theta\right) \quad (4)$$

می‌شود و بهترین موقعیتی که بهترین ذره در بین کل ذرات پیدا کرده است، با  $G_{\text{best}_i}$  نشان داده می‌شود. سرعت و موقعیت هر ذره در هر تکرار با استفاده از روابط ۱ و ۲ محاسبه و بروزرسانی می‌شود:

$$V_i(t) = W \cdot V_i(t-1) + \rho_1 (X_{\text{Pbest}_i} - X_i(t)) + \rho_2 (X_{\text{Gbest}_i} - X_i(t)) \quad (1)$$

$$X_i(t) = X_i(t-1) + V_i(t) \quad (2)$$

که در آن  $\rho_1 = C_1 R_1$  و  $\rho_2 = C_2 R_2$  است. همچنین در آن  $C_1$  و  $C_2$  ضریب ثابت آموزش،  $R_1$  و  $R_2$  دو عدد تصادفی با توزیع یکنواخت بین صفر و یک و  $W$  وزن می‌باشد. اندیس‌های  $t$  و  $t-1$  نیز به ترتیب مربوط به تکرار جاری و قبلی الگوریتم هستند. روندنمای برنامه نوشته شده مدل ANFIS-PSO در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. روند حل مسئله با مدل ANFIS-PSO

به‌عنوان ورودی مدل‌های ANFIS و ANFIS-PSO در نظر گرفته شد (جدول ۲). به‌منظور تعیین دقت واقعی مدل و جلوگیری از تأثیر ارتباط احتمالی هر بردار با بردارهای قبلی و بعدی در افزایش کاذب دقت مدل‌ها و جلوگیری از سوگیری (Bias)، ۷۰ درصد داده‌ها به صورت تصادفی برای آموزش و ۳۰ درصد آن برای آزمون مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

در این مطالعه، از نرم‌افزار MATLAB برای کدنویسی استفاده شد. همچنین، به‌منظور ارزیابی دقت مدل‌های داده‌مبنا از شاخص‌های آماری خطای جذر میانگین مربعات نرمال شده (NRMSE)، ضریب تبیین ( $R^2$ ) و ضریب باقیمانده (CRM) استفاده شد. گفتنی است هر چه شاخص‌های آماری NRMSE و CRM به صفر و  $R^2$  به یک نزدیکتر باشد، نشان‌دهنده پیش‌بینی بهتر در برآورد داده‌ها

همچنین نسبت طول پرش ( $L_j/D_1$ )، نسبت طول غلتاب پرش ( $L_r/D_1$ ) و نسبت افت انرژی ( $\Delta E/E_1$ ) تابعی از:

$$(5)$$

$$\frac{L_j}{D_1}, \frac{L_r}{D_1}, \frac{\Delta E}{E_1} = f_1\left(\frac{D_2}{D_1}, Re = \frac{u_1 D_1}{\nu}, Fr_1 = \frac{u_1}{\sqrt{g D_1}}, \frac{t}{D_1}, \frac{z}{D_1}, \theta\right)$$

در آزمایش‌های انجام گرفته در این مطالعه مقدار عدد رینولدز در محدوده ۴۵۰۳۰ تا ۲۰۹۰۶۳ متغیر بود که بیانگر جریان آشفته است، لذا می‌توان از اثر لزجت صرفه‌نظر کرد. بنابراین، معادله (۴ و ۵) به صورت زیر اصلاح می‌شود:

$$\frac{D_2}{D_1} = f_2\left(Fr_1, \frac{t}{D_1}, \frac{z}{D_1}, \theta\right) \quad (6)$$

$$\frac{L_j}{D_1}, \frac{L_r}{D_1}, \frac{\Delta E}{E_1} = f_2\left(\frac{D_2}{D_1}, Fr_1, \frac{t}{D_1}, \frac{z}{D_1}, \theta\right) \quad (7)$$

با توجه به آنالیز ابعادی، پارامترهای  $D_2/D_1$ ،  $t/D_1$ ،  $z/D_1$  و  $\theta$  و  $Fr_1$

جدول ۲. پارامترهای ورودی برای برآورد نسبت اعماق مزدوج، طول پرش، طول غلتاب و نسبت افت انرژی

پارامتر	Fr <sub>1</sub>	θ	z/D <sub>1</sub>	t/D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub> /D <sub>1</sub>
D <sub>2</sub> /D <sub>1</sub>	✓	✓	✓	✓	**
L <sub>j</sub> /D <sub>1</sub>	✓	✓	✓	✓	✓
L <sub>r</sub> /D <sub>1</sub>	✓	✓	✓	✓	✓
ΔE/E <sub>1</sub>	✓	✓	✓	✓	✓

جدول ۳ مقادیر آماره‌های  $R^2$ ، CRM و NRMSE در مراحل آموزش، آزمون و کل را برای برآورد نسبت اعماق مزدوج توسط دو مدل ANFIS و ANFIS-PSO در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه نشان می‌دهد. مطابق این جدول و با توجه به شاخص‌های مختلف اگر چه هر دو مدل ANFIS و ANFIS-PSO در برآورد نسبت اعماق مزدوج عملکرد مناسبی داشته‌اند؛ اما دقت مدل ANFIS در این خصوص نسبت به مدل ANFIS-PSO اندکی بیشتر بوده است. ضمن آنکه مدل ANFIS نسبت اعماق مزدوج را اندکی بیشتر و مدل ANFIS-PSO کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده برآورد نموده‌اند.

پورعبداله و همکاران (۱۵) نشان دادند که در هر بستر با شیب معکوس، با افزایش ارتفاع پله مثبت انتهایی کاهش نسبت اعماق مزدوج شدت می‌یابد. همچنین، با افزایش قطر زبری‌های سنگریزه‌ای بستر حوضچه آرامش در هر شیب و ارتفاع پله مثبت انتهایی، کاهش نسبت اعماق مزدوج چشمگیرتر گردید. ایشان نشان دادند حداکثر خطای معادلات حل تحلیلی مختلف برای برآورد نسبت اعماق مزدوج در مقایسه با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی  $\pm 20\%$  درصد بوده است. همچنین، پورعبداله و همکاران (۱۶) میزان خطا در برآورد نسبت اعماق مزدوج با استفاده از نرم افزار Flow-3D را برابر  $\pm 12\%$  درصد بیان کردند. میزان خطا برای برآورد نسبت اعماق مزدوج در تحقیقات کارولو و همکاران (۴)، پاگیرا و همکاران (۱۳) و پاگیرا و پالرمو (۱۴) به ترتیب برابر  $5/4$ ،  $30$  و  $20$  درصد بوده است. این

است (۱۷). همچنین، مقادیر منفی شاخص CRM نشان‌دهنده برآورد بیش از حد مدل و مقادیر مثبت آن نشان‌دهنده برآورد کمتر از حد مدل در مقایسه با اندازه‌گیری‌ها است (۱). در زیر روابط شاخص‌های آماری مورد استفاده ارائه شده است:

$$NRMSE = \frac{\left(\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2\right)^{0.5}}{\bar{O}} \quad (8)$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{k=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sum_{k=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{k=1}^n (P_i - \bar{P})^2}\right)^2 \quad (9)$$

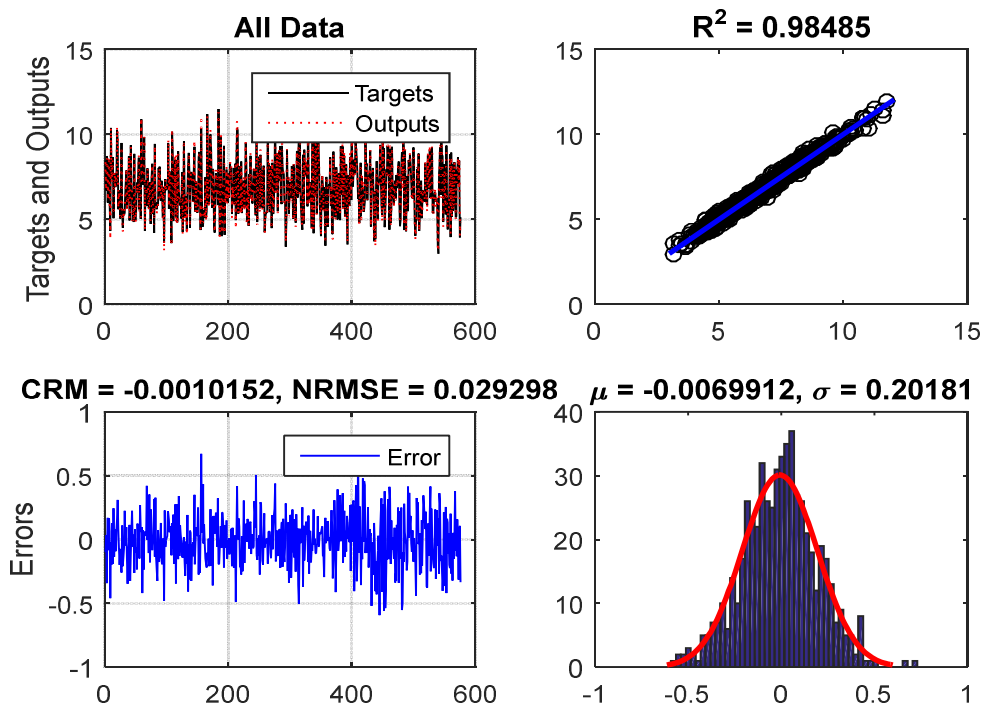
$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (10)$$

در روابط فوق:  $O_i$  مقادیر اندازه‌گیری شده،  $P_i$  مقادیر پیش بینی شده،  $n$  تعداد مشاهدات،  $\bar{O}$  و  $\bar{P}$  به ترتیب میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده است.

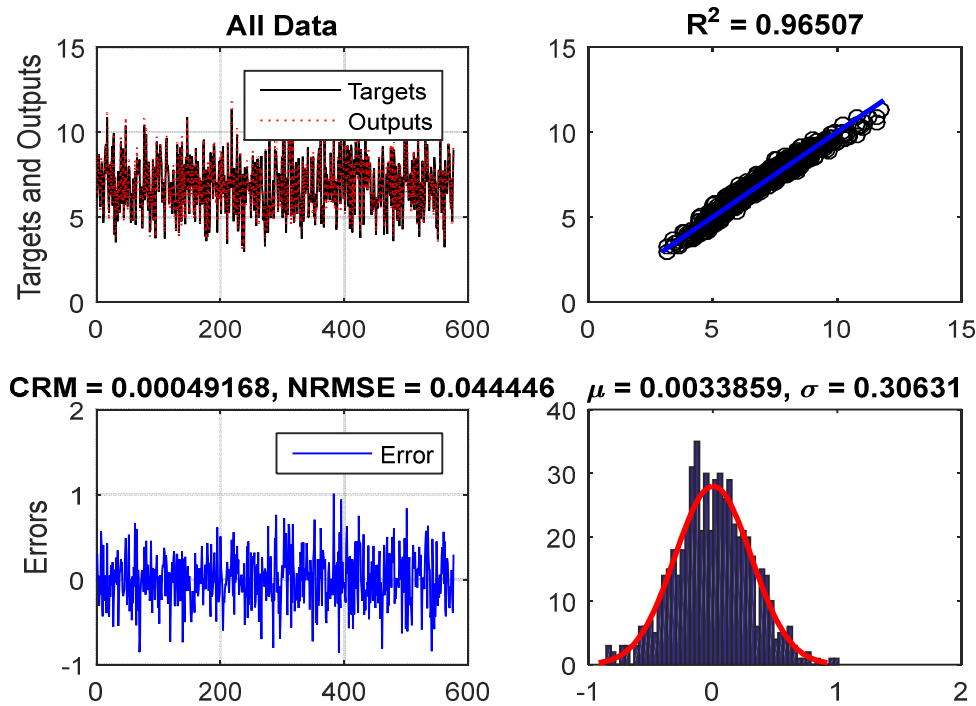
## نتایج و بحث

### نسبت اعماق مزدوج

در شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب مقادیر نسبت اعماق مزدوج اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و برآورد شده توسط مدل ANFIS و ANFIS-PSO برای کل داده‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد براساس مقادیر شاخص‌های آماری ذکرشده در این شکل‌ها، تطابق بسیار خوبی بین مقادیر نسبت اعماق مزدوج اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و محاسبه شده توسط مدل‌ها وجود داشته است.



شکل ۳. ارزیابی عملکرد مدل ANFIS در برآورد  $D_2/D_1$  برای کل داده‌ها (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۴. ارزیابی عملکرد مدل ANFIS-PSO در برآورد  $D_2/D_1$  برای کل داده‌ها (رنگی در نسخه الکترونیکی)

جدول ۳. نتایج حاصل از شاخص‌های آماری برای برآورد نسبت اعماق مزدوج

مدل	R <sup>2</sup>			CRM			NRMSE		
	All	Test	Train	All	Test	Train	All	Test	Train
ANFIS	۰/۹۸۹	۰/۹۷۵	۰/۹۸۵	-۰/۰۰۳	-۰/۰۰۱	۰/۰۲۶	۰/۰۳۶	۰/۰۲۹	۰/۰۲۹
ANFIS-PSO	۰/۹۶۸	۰/۹۵۹	۰/۹۶۵	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰۴۳	۰/۰۴۶	۰/۰۴۴	۰/۰۴۴

گردید. همچنین این مقدار خطا برای مدل داده مبنای ANFIS برابر با  $\pm 9\%$  درصد است. بنابراین، مدل داده مبنای توانایی بالایی در تخمین طول پرش هیدرولیکی داشته است.

#### طول غلتاب نسبی

در شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب مقادیر نسبت طول غلتاب پرش هیدرولیکی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و برآورد شده توسط مدل ANFIS و ANFIS-PSO برای کل داده‌ها نشان داده شده است. مقادیر آماره‌های  $R^2$ ، CRM، و NRMSE برای کل داده‌ها نشان‌دهنده همبستگی مناسب، برآورد مناسب و خطای اندک بود.

جدول ۵ شاخص‌های آماری را برای برآورد نسبت طول غلتاب پرش هیدرولیکی توسط دو مدل ANFIS و ANFIS-PSO در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه نشان می‌دهد. در اینجا نیز اگر چه هر دو مدل ANFIS و ANFIS-PSO در برآورد نسبت طول غلتاب پرش هیدرولیکی عملکرد مناسبی داشته‌اند اما، دقت مدل ANFIS در این خصوص نسبت به مدل ANFIS-PSO بیشتر بوده است. به عبارتی دقت مدل ANFIS نسبت به مدل ANFIS-PSO در خصوص برآورد طول غلتاب نسبی پرش ۱۵ درصد بیشتر بوده است.

پورعبداله و همکاران (۱۶) نشان دادند برآورد نسبت طول غلتاب پرش هیدرولیکی با استفاده از نرم افزار Flow-3D در مقایسه با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، دارای  $\pm 16\%$  درصد خطا بوده است. این مقدار خطا برای مدل داده مبنای ANFIS برابر با  $\pm 11\%$  درصد است. بنابراین، مدل داده مبنای توانایی

مقدار خطا برای مدل داده مبنای ANFIS برابر با  $\pm 9\%$  درصد می‌باشد. بنابراین، می‌توان گفت که مدل‌های داده مبنای نسبت اعماق مزدوج را با دقت قابل قبولی تخمین زده‌اند.

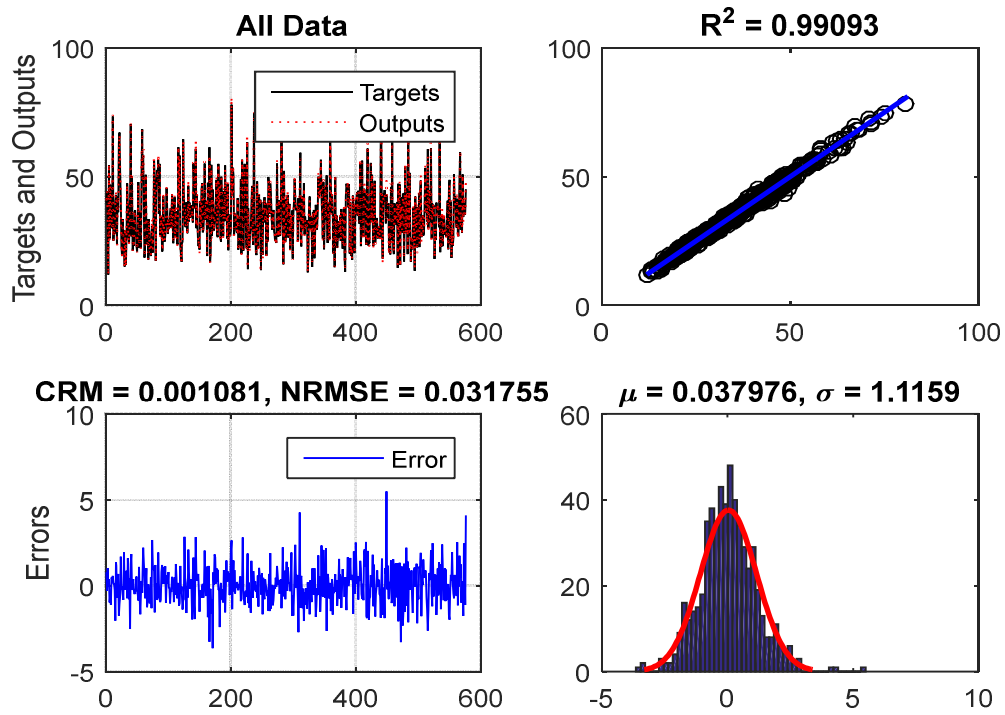
#### طول پرش نسبی

شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب مقادیر طول پرش نسبی اندازه‌گیری و برآورد شده برای کل داده‌ها را نشان می‌دهند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود تطابق داده‌های هدف و خروجی، نزدیکی مقادیر هدف و خروجی به نمودار  $y=x$ ، تخطی کم مقادیر خطا از مقدار صفر و نزدیکی توزیع (هیستوگرام) خطا به توزیع نرمال، در این شکل‌ها قابل مشاهده است.

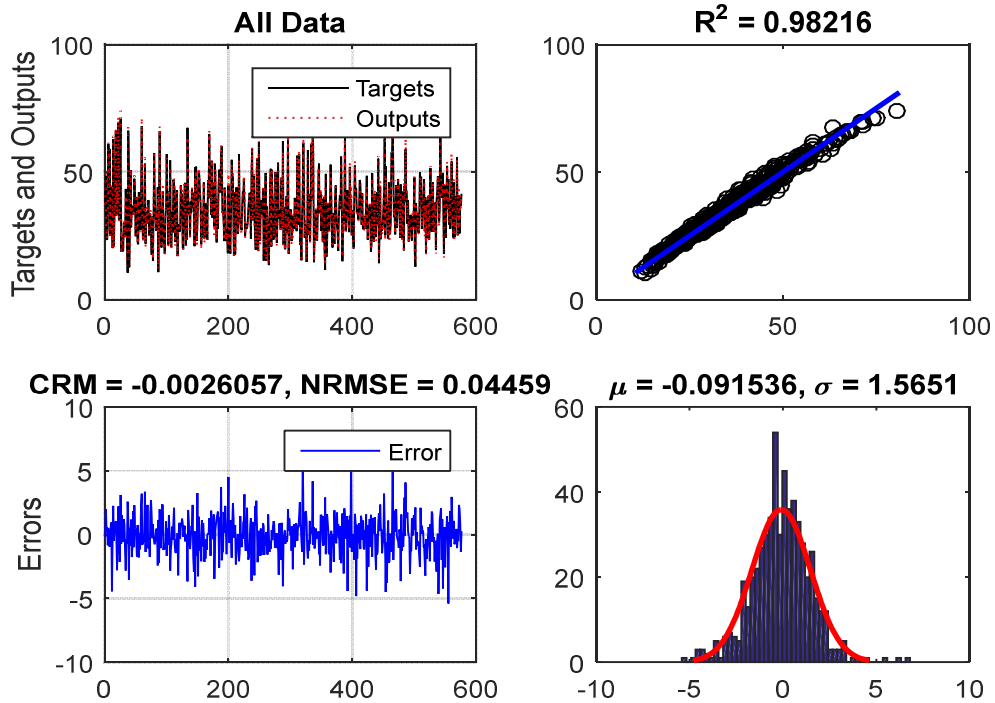
جدول ۴ شاخص‌های آماری را برای برآورد نسبت طول پرش هیدرولیکی نشان می‌دهد. مطابق این جدول و با توجه به شاخص‌های مختلف اگر چه هر دو مدل ANFIS و ANFIS-PSO در برآورد نسبت طول پرش هیدرولیکی عملکرد مناسبی داشته‌اند اما، دقت مدل ANFIS در این خصوص نسبت به مدل ANFIS-PSO بیشتر بوده است. این نتایج با نتایج شهبازیگی و همکاران (۱۸) و علیزاده و همکاران (۲) مطابقت داشت.

همچنین، پورعبداله و همکاران (۱۵) بیان کردند دلیل اصلی کاهش طول پرش هیدرولیکی در پرش بر روی بسترهای زبر، افزایش تنش برشی بستر است. همچنین با افزایش شیب منفی و پله مثبت انتهایی این کاهش بیشتر گردید. پورعبداله و همکاران (۱۶) نشان دادند برآورد نسبت طول پرش هیدرولیکی با استفاده از نرم افزار Flow-3D در مقایسه با اندازه‌گیری‌های دارای  $\pm 12\%$  درصد خطا بوده است. این مقدار خطا برای ابراهیمی و همکاران (۷) برابر  $6/7\%$  درصد بیان





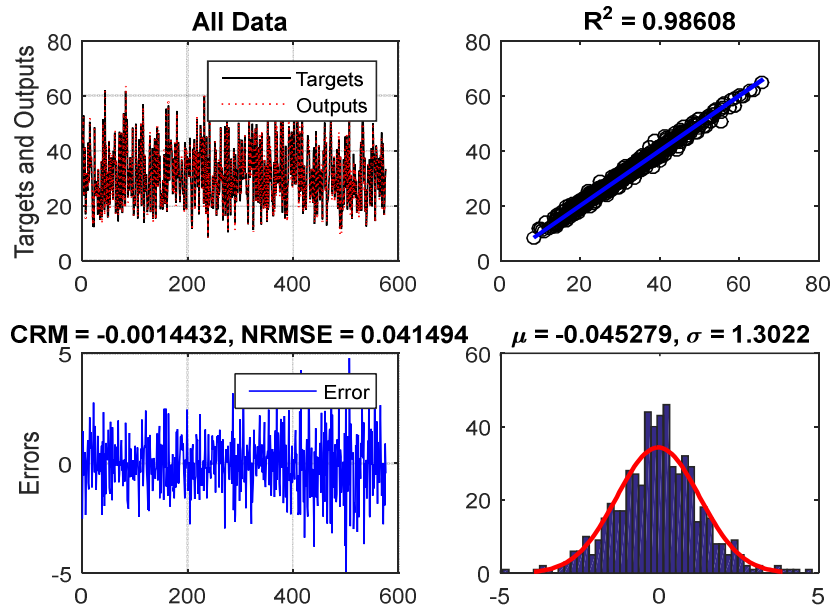
شکل ۵. ارزیابی عملکرد مدل ANFIS در برآورد  $L_j/D_1$  برای کل داده‌ها (رنگی در نسخه الکترونیکی)



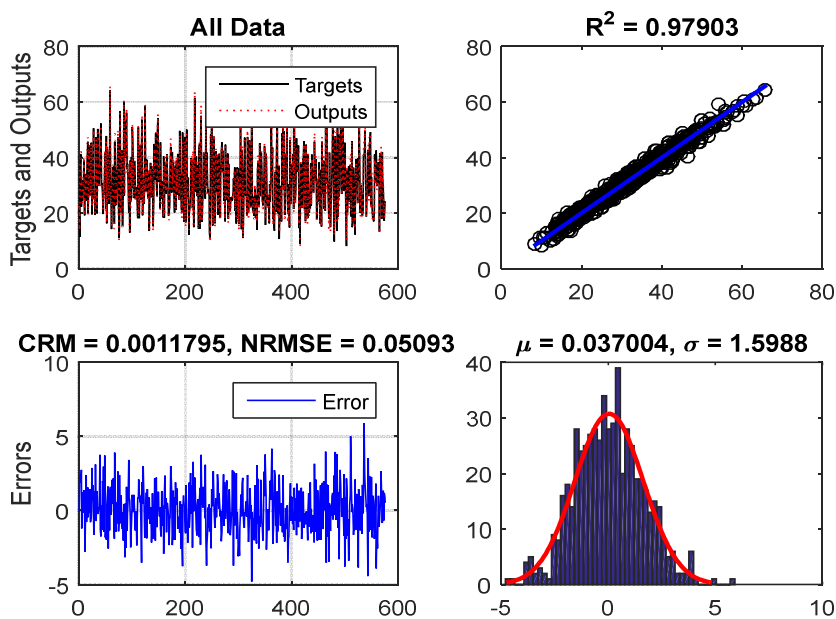
شکل ۶. ارزیابی عملکرد مدل ANFIS-PSO در برآورد  $L_j/D_1$  برای کل داده‌ها (رنگی در نسخه الکترونیکی)

جدول ۴. نتایج حاصل از شاخص‌های آماری برای برآورد نسبت طول پرش هیدرولیکی

مدل	R <sup>2</sup>			CRM			NRMSE		
	All	Test	Train	All	Test	Train	All	Test	Train
ANFIS	۰/۹۹۱	۰/۹۸۷	۰/۹۹۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۴	۰/۰۰۰	۰/۰۳۲	۰/۰۳۷	۰/۰۲۹
ANFIS-PSO	۰/۹۸۲	۰/۹۷۴	۰/۹۸۵	-۰/۰۰۳	-۰/۰۰۶	-۰/۰۰۱	۰/۰۴۵	۰/۰۴۸	۰/۰۴۳



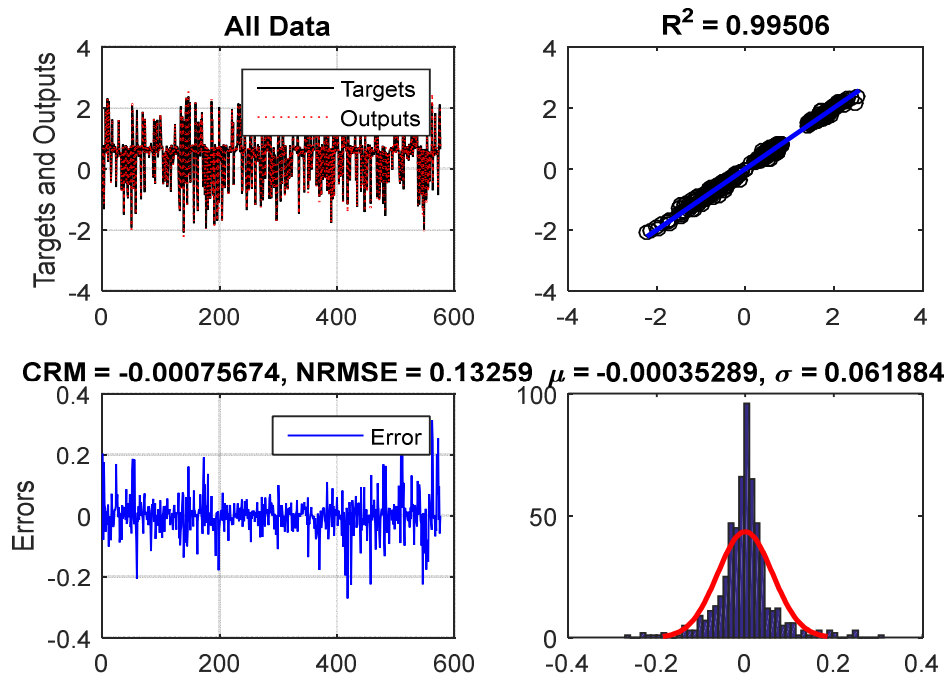
شکل ۷. ارزیابی عملکرد مدل ANFIS در برآورد  $Lr/D_1$  برای کل داده‌ها (رنگی در نسخه الکترونیکی)



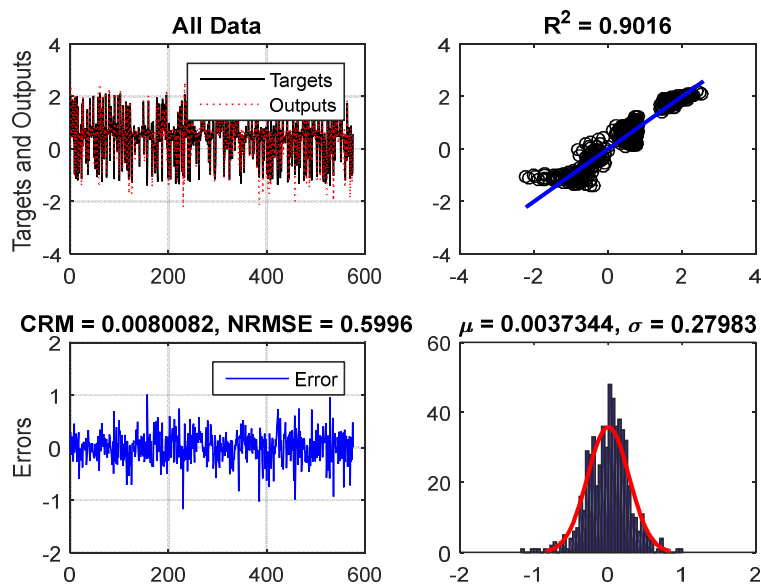
شکل ۸. ارزیابی عملکرد مدل ANFIS-PSO در برآورد  $Lr/D_1$  برای کل داده‌ها (رنگی در نسخه الکترونیکی)

جدول ۵. نتایج حاصل از شاخص‌های آماری برای برآورد طول غلتاب نسبی

مدل	R <sup>2</sup>			CRM			NRMSE		
	All	Test	Train	All	Test	Train	All	Test	Train
ANFIS	۰/۹۸۶	۰/۹۷۷	۰/۹۹۰	-۰/۰۰۱	-۰/۰۰۵	۰/۰۰۰	۰/۰۴۱	۰/۰۵۵	۰/۰۳۵
ANFIS-PSO	۰/۹۷۹	۰/۹۷۶	۰/۹۸۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰۵۱	۰/۰۵۴	۰/۰۴۹



شکل ۹. ارزیابی عملکرد مدل ANFIS در برآورد  $\Delta E/E_1$  برای کل داده‌ها (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۱۰. ارزیابی عملکرد مدل ANFIS-PSO در برآورد  $\Delta E/E_1$  برای کل داده‌ها (رنگی در نسخه الکترونیکی)

جدول ۶. نتایج حاصل از شاخص‌های آماری برای برآورد نسبت افت انرژی نسبی

مدل	R <sup>2</sup>			CRM			NRMSE		
	All	Test	Train	All	Test	Train	All	Test	Train
ANFIS	۰/۹۹۷	۰/۹۹۰	۰/۹۹۵	-۰/۰۰۳	-۰/۰۰۱	۰/۱۰۶	۰/۱۸۲	۰/۱۳۳	۰/۱۳۳
ANFIS-PSO	۰/۹۰۸	۰/۸۸۶	۰/۹۰۱	۰/۰۰۹	۰/۰۰۸	۰/۵۰۸	۰/۹۱۴	۰/۶۰۰	۰/۶۰۰

بالایی در تخمین طول نسبی پرش هیدرولیکی داشته است.

قبولی برآورد می‌کند.

### افت انرژی نسبی

شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب مقادیر نسبت افت انرژی نسبی پرش هیدرولیکی اندازه‌گیری و برآورد شده برای کل داده‌ها را نشان می‌دهند. همان‌گونه که مشخص است میزان دقت هر دو مدل در برآورد  $\Delta E/E1$  مناسب بوده است و در مجموع می‌توان گفت مدل‌ها در شبیه‌سازی افت انرژی نسبی پرش هیدرولیکی بسیار خوب عمل کرده‌اند.

جدول ۶ شاخص‌های آماری را برای برآورد نسبت افت انرژی نسبی پرش هیدرولیکی توسط دو مدل ANFIS و ANFIS-PSO در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه نشان می‌دهد. دقت مدل ANFIS در این خصوص نسبت به مدل ANFIS-PSO اندکی بیشتر بوده است.

پورعبداله و همکاران (۱۵) نشان دادند که در هر بستر با شیب معکوس، با افزایش ارتفاع پله مثبت انتهایی نسبت افت انرژی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش قطر زبری‌های سنگریزه‌ای در هر شیب و ارتفاع پله مثبت انتهایی، افزایش نسبت افت انرژی چشمگیرتر گردید. ایشان نشان دادند حداکثر خطای تخمین افت انرژی با استفاده از معادلات حاصل از حل تحلیلی در مقایسه با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی  $\pm 5\%$  درصد بوده است. این مقدار خطا برای مدل داده مبنای ANFIS و ANFIS-PSO برابر با  $\pm 5\%$  درصد است. بنابراین، می‌توان گفت که مدل‌های داده مبنای نسبت افت انرژی را با دقت قابل قبولی تخمین زده‌اند. همچنین نوروزی و همکاران (۱۲) عنوان کردند مدل ANFIS نسبت افت انرژی نسبی پرش را با دقت قابل

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق دقت مدل‌های داده مبنای ANFIS و ANFIS-PSO به‌منظور برآورد ویژگی‌های مختلف پرش هیدرولیکی تثبیت‌شده در حوضچه آرامش، در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. این ویژگی‌ها شامل نسبت اعماق مزدوج، طول نسبی، طول غلتاب نسبی و افت انرژی نسبی پرش هیدرولیکی بودند. ویژگی‌های اشاره شده در حوضچه آرامش با مقطع مستطیلی و ۴ شیب معکوس مختلف، ۴ قطر زبری بستر و ۴ ارتفاع پله مثبت انتهایی در محدوده عدد فرود ۴ تا ۱۰ اندازه‌گیری شده بودند. بر مبنای نتایج، مدل ANFIS در برآورد ویژگی‌های مختلف پرش از مدل ANFIS-PSO اندکی دقت بیشتری داشت. با توجه به مطالب بیان شده استفاده از مدل‌های داده مبنای یکی از روش‌های برآورد خصوصیات پرش با بیشترین دقت بوده و می‌توان در مدت زمان کم و کاهش هزینه‌ها خصوصیات پرش هیدرولیکی را پیش‌بینی نمود.

## منابع مورد استفاده

1. Akbari, M., M. Gheysari, B. Mostafazadeh-Fard and M. Shayannejad. 2018. Surface irrigation simulation-optimization model based on meta-heuristic algorithms. *Agricultural Water Management* 201: 46-57.
2. Alizadeh, A., F. Yosefvand and A. Rajabi. 2020. Modeling Hydraulic Jump Length on Sloping Rough Beds using Adaptive Neuro Fuzzy Inference Systems-Genetic Algorithm. *Water and Soil Science* 29(4): 175-187 (In Farsi).
3. Azimi, H., H. Bonakdari, I. Ebtehaj and D. G. Michelson. 2018. A combined adaptive neuro-fuzzy inference system-firefly algorithm model for predicting the roller length of a hydraulic jump on a rough channel bed. *Neural Computing and Applications* 29 (6): 249-258.
4. Carollo, FG., V. Ferro and V. Pampalano. 2009. New solution of classical hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Engineering* 1:1-9.
5. Daneshfaraz, R., M. Majedi Asl and R. Mirzaee. 2019. Experimental study of expanding effect and sand-roughened bed on hydraulic jump characteristics. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 50(4): 885-896.
6. Daneshfaraz, R., M. Majedi Asl, R. Mirzaee and T. Gokmen. 2020. Hydraulic jump in a rough sudden symmetric expansion channel. *AUT Journal of Civil Engineering* 5(2): 4-4.
7. Ebrahimi, S., F. Salmasi and A. Abbaspour. 2013. Numerical study of hydraulic jump on rough beds stilling basins. *Journal of Civil Engineering and Urbanism* 3: 19-24.
8. Jang J. S. R. 1993. ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics* 23(3): 665-685.
9. Kennedy, J. and R. Eberhart. 1995. Particle swarm optimization. In: IEEE Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks, 4: 1942-1948.
10. Milan, S. G., A. Roozbahani, N. A. Azar and S. Javadi. 2021. Development of adaptive neuro fuzzy inference system-evolutionary algorithms hybrid models (anfis-ea) for prediction of optimal groundwater exploitation. *Journal of Hydrology* 598: 126258.
11. Mohseni Movahed, S. A., J. Mozaffari, D. Davoodmaghami and M. Akbari. 2018. A semi-analytical equation to estimate hydraulic jump length. *Periodica Polytechnica Civil Engineering* 62(4): 1001-1006.
12. Norouzi Sarkarabad, R., R. Daneshfaraz and A. Bazyar. 2019. The study of energy depreciation due to the use of vertical screen in the downstream of inclined drops by adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). *Amirkabir Journal of Civil Engineering* 53(3): 1-17 (In Farsi).
13. Pagliara, S., L. Lotti and M. Palermo. 2008. Hydraulic jump on rough bed of stream rehabilitation structures. *Journal of Hydro- Environment Research* 2(1): 29-38.
14. Pagliara, S. and M. Palermo. 2015. Hydraulic jumps on rough and smooth beds: aggregate approach for horizontal and adverse-sloped beds. *Journal of Hydraulic Research* 53(2): 243-252.
15. Pourabdollah, N., M. Heidarpour and J. Abedi Koupai. 2019. An experimental and analytical study of a hydraulic jump over a rough bed with an adverse slope and a positive step. *Iranian Journal of Science and Technology. Transactions of Civil Engineering* 43: 551-561.
16. Pourabdollah, N., M. Heidarpour and J. Abedi Koupai. 2019. Experimental, analytical and numerical study of hydraulic jump in stilling basin with adverse slope, rough bed and positive step. Ph.D. Thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan, I.R. Iran.
17. Salari, S., M. Moghaddasi, M. Mohammadi Ghaleni and M. Akbari. 2021. Groundwater level prediction in Golpayegan aquifer using ANFIS and PSO combination. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 52(3): 721-732 (In Farsi).
18. Shahbazbigi, E., A. shabanlou and M. Izadbakhsh. 2019. Modeling the Length of Hydraulic Jump on Sloping Rough Bed Using Hybrid Model based on Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems and Particle Swarm Optimization. *Iranian Water Researches Journal* 12(3): 109-118 (In Farsi).

## Evaluation of ANFIS and ANFIS-PSO Models for Estimating Hydraulic Jump Characteristics

N. Pourabdollah<sup>1</sup>, J. Abedi Koupai<sup>1</sup>, M. Heidarpour<sup>1</sup> and M. Akbari<sup>2\*</sup>

(Received: February 17-2021; Accepted: May 15-2021)

### Abstract

In this study accuracy of the ANFIS and ANFIS-PSO models to estimate hydraulic jump characteristics including sequence depth ratio, the jump length, the roller length ratio, and relative energy loss was evaluated in stilling basin versus laboratory results. The mentioned characteristics were measured in the stilling basin with a rectangular cross-section with four different adverse slopes, four diameters of bed roughness, four heights of positive step, three Froude numbers, and four discharges. The average statistical parameters of NRMSE, CRM, and  $R^2$  for estimating hydraulic jump characteristics with the ANFIS model were 0.059, -0.001, and 0.989, respectively. While, the mean values of these parameters for the ANFIS-PSO model were 0.185, 0.002, and 0.957, respectively. The results indicated that these models were capable of estimating hydraulic jump parameters with high accuracy. However, the ANFIS model was moderately more accurate than the ANFIS-PSO model to estimate the sequence depth ratio, the jump length, the roller length ratio, and relative energy loss.

**Keywords:** Hydraulic jump, Data-Driven model, Sequence depth ratio, Relative energy loss

---

1. Department of Water Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

2. Department of Water Science and Engineering, College of Agriculture and Environment, Arak University, Arak, Iran.

\*: Corresponding author, Email: m-akbarii@araku.ac.ir