

## پیش‌بینی مشخصات پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و برنامه‌ریزی ژنتیک

اکرم عباسپور<sup>\*1</sup>

تاریخ دریافت: 90/05/08 تاریخ پذیرش: 92/03/07

<sup>1</sup> - استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: akabbaspour@yahoo.com

### چکیده

در تحقیق حاضر مشخصات پرش هیدرولیکی با تحلیل عمق و طول غلتان پرش بر روی بسترهای زبرکه بصورت تابعی از ارتفاع زبری و عدد فرود بالادست می‌باشد با استفاده از مدل شبکه‌عصبی و برنامه‌ریزی ژنتیک شبیه‌سازی گردید. عدد فرود اولیه جریان در محدوده 1/9 تا 10 و زبری نسبی بستر در محدوده 0/085 تا 2/025 قرار داشت. در کل تعداد 454 داده مشاهداتی پرش هیدرولیکی برای آموزش و تست مدل‌های شبکه عصبی و برنامه‌ریزی ژنتیک (GP) استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد در هر دو مدل شبکه عصبی و برنامه‌ریزی ژنتیک تطابق خوبی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده مدل وجود دارند. نتایج این مدل‌ها با روابط موجود برای بستر زبر مقایسه شده است. با توجه به بررسی‌های انجام گرفته خطای محاسباتی مدل‌های عصبی و برنامه‌ریزی ژنتیک در مقایسه با روابط تجربی متداول کمتر شد. همچنین نتایج بدست آمده از مدل GP به صورت معادلات ریاضی و نمودار درختی ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی ژنتیک، بستر زبر، پرش هیدرولیکی، شبکه عصبی مصنوعی

## Prediction of Hydraulic Jump Characteristics on Rough Bed Using Artificial Neural Network and Genetic Programming

A Abbaspour<sup>\*1</sup>

Received: 30 July 2011 Accepted: 28 May 2013

<sup>1</sup>Assoc. Prof., Dept. of Water Engin., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz. Iran

\*Corresponding Author Email: akabbaspour@yahoo.com

### Abstract

In the present research the hydraulic jump characteristics such as depth and length of the jump on rough beds as functions of roughness height and initial Froude number were simulated using artificial neural network (ANN) and genetic programming (GP) models. In the experiments, initial Froude numbers and roughness ratios were in the range of 1.9 to 10 and 0.085 to 2.025, respectively. Totally, 454 sets of the observed data were used in training and testing process of the proposed ANN and GP models. The results of the both artificial neural network and genetic programming models had good agreements with the measured data. Also the results of these models were compared with the known empirical equations for rough beds. It was shown that the ANN and GP models had less computational errors than the empirical equations. Also, the outputs of the GP model were presented in the form of mathematical equations and tree graph.

**Key words:** Artificial Neural Networks, Hydraulic jump, Genetic Programming, Rough bed.

### مقدمه

جریان متلاطم بوجود می‌آید کار مشکلی است (هاگر 1992). فاصله بین عمق اولیه پرش و انتهای غلتان جریان طول غلتان پرش  $L_r$  بوده و با روش جسم شناور تعیین می‌شود (ویشر و هاگر 1995). معمولاً جهت تثبیت پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش از بلوک‌ها، آب پایه‌ها و بستر زبر استفاده می‌شود. استفاده از اجزای زبر در حوضچه آرامش موجب افزایش کارایی حوضچه، کاهش عمق ثانویه و طول پرش می‌گردد (هیزوز و فلک 1984). در مورد پرش هیدرولیکی روی بستر زبر مطالعات مفصلی توسط محققین انجام گرفته است (ویشر و هاگر 1995). اید و راجارتنام (2002) پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج‌دار سینوسی شکل را در بازه عدد فرود

در کانال‌های روباز با تبدیل جریان از شرایط زیر بحرانی به فوق بحرانی پرش هیدرولیکی تشکیل می‌گردد. با توجه به ایجاد این پدیده در طبیعت و استفاده از آن برای اتلاف انرژی در پایین‌دست و سازه‌های هیدرولیکی از جمله سرریزها، دریچه‌ها و آبگیرها تحقیقات وسیعی در این زمینه انجام شده است. مشخصات کامل پرش شامل طول پرش  $L_r$ ، عمق فوق بحرانی اولیه  $y_1$  و عمق ثانویه پرش  $y_2$  می‌باشد. از دیدگاه عملی عمق ثانویه و طول پرش پارامترهای مهمی در پوشش و حفاظت کانال پایین‌دست پرش هستند. تعیین طول پرش که خود تابعی از طول غلتان پرش است و در آن حباب‌های هوا، موج‌های سطحی و

بطوری که می‌توان نتیجه گرفت عمق نسبی  $\frac{y_2}{y_1}$  و طول غلتان نسبی پرش  $\frac{L_r}{y_1}$  تابعی از عدد فرود اولیه جریان

$Fr_1$  و زبری نسبی بستر  $t/y_1$  می‌باشد.

عباسپور و همکاران (2009) تاثیر بستر موج‌دار سینوسی شکل بر روی مشخصات پرش هیدرولیکی در محدوده وسیع‌تری از ارتفاع نسبی موج  $t/y_1$  در بازه 0/32 تا 1/67 مطالعه نمودند. همچنین پیش‌بینی عمق و طول نسبی پرش، استهلاك انرژی و ضریب تنش برشی با مدل‌های رگرسیون خطی انجام گرفت.

در دهه اخیر شبکه عصبی مصنوعی و برنامه‌ریزی ژنتیک برای شبیه‌سازی رفتار سیستم‌ها در زمینه مهندسی آب مورد استفاده قرار گرفته‌اند. دورادو و همکاران (2003) بارش و رواناب جریان در یک حوضه را با مدل شبکه عصبی و برنامه‌ریزی ژنتیک شبیه‌سازی نمودند. گار و دئو (2008) با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک حرکت موج را بررسی نمودند. گوون و همکاران (2009) آبشستگی موضعی در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی را با برنامه‌ریزی ژنتیک پیش‌بینی کردند. عظمت الله و همکاران (2010) برای پیش‌بینی آبشستگی اطراف پایه پل از مدل برنامه‌ریزی ژنتیک و شبکه عصبی استفاده نمودند.

هدف از این تحقیق پیشنهاد رابطه‌ای جدید برای پیش‌بینی پرش بر روی بستر زبر با استفاده از مدل برنامه‌ریزی ژنتیک می‌باشد. این رابطه بر اساس داده‌های مشاهداتی بدست آمده است. همچنین عملکرد مدل پیشنهادی برنامه‌ریزی ژنتیک با مدل شبکه عصبی و روابط تجربی موجود مقایسه شده است.

### مواد و روش‌ها

#### داده‌های آزمایشگاهی

در این تحقیق آزمایش‌ها در یک فلوم مستطیلی به عرض 0/25 متر ارتفاع 0/4 متر و طول 10 متر با شیب کف 0/002 انجام گرفت. کانال مجهز به دریچه تنظیم جریان در ابتدای ورودی کانال و سرریز لبه‌تیز مثلثی با زاویه 53 درجه برای اندازه‌گیری دبی جریان در خروجی فلوم است. اندازه‌گیری عمق و دبی جریان

4-10 و ارتفاع نسبی موج  $t/y_1$  (ارتفاع موج بستر و  $y_1$  عمق اولیه پرش) برابر 0/25، 0/43 و 0/5 بررسی نمودند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که طول پرش تقریباً نصف طول آن روی بستر صاف است. ایزدجو و همکاران (1383) مشخصات پرش هیدرولیکی روی بسترهای موج‌دار دوزنقه‌ای شکل را مطالعه کردند. نتایج نشان داد که موج‌دار بودن بستر در استهلاك انرژی و کاهش هزینه‌های حوضچه آرامش تأثیر قابل توجهی دارد.

نجم (2002) طول بهینه زبری در حوضچه آرامش با بلوک‌های مربعی شکل را به صورت تجربی بررسی نموده است. آزمایشات تجربی جهت بررسی اثرات زبری بر روی طول حوضچه انجام گرفت. در این تحقیق داده‌های تجربی بدست آمده با روش شبکه عصبی مصنوعی و مدل‌های رگرسیون خطی چندگانه بررسی و مقایسه گردید.

توکیای (2005) اثرات بستر موج‌دار را بر روی پرش هیدرولیکی به صورت تجربی بررسی نمود. شیب موج  $t/s$  برابر 0/1، 0/2 و 0/26 بوده و مطالعات در محدوده اعداد فرود 5 تا 12 انجام گرفت. همچنین طول و استهلاك انرژی پرش هیدرولیکی بررسی و داده‌های تجربی موجود بر روی بسترهای موج‌دار و صاف مقایسه گردید.

کارولو و فرو (2007) مشخصات پرش بر روی بسترهای زبر را مطالعه نمود. در این تحقیق اعداد فرود در محدوده 1/9 تا 9/9 بوده و عمق نسبی پرش و طول غلتان پرش به صورت تابعی از عدد فرود اولیه و برای زبری‌های مختلف ( $t$ ) بررسی شده است. نتایج این بررسی و محققین قبلی منجر به ارائه معادله‌های تجربی برای عمق و طول غلتان پرش شده است:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left( -1 + \sqrt{1 + 8 \left( 1 - \frac{2}{\pi} \arctan(0.8 \left( \frac{t}{y_1} \right)^{0.75} \right)) Fr_1^2} \right) \quad [1]$$

$$\frac{L_r}{y_1} = \left( 6.525 \exp(-0.6 \frac{t}{y_1}) \right) (Fr_1 - 1) \quad [2]$$

این معادلات با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی موجود پرش بر روی بسترهای زبر بدست آمده است

## جدول 1- مقادیر پارامترهای مشاهداتی.

متغیرهای عصبی	محدوده داده‌های آزمایشگاهی
$y_1(cm)$	1/1 - 6/75
$y_2(cm)$	8/98 - 31/2
$t (cm)$	0/46 - 3/5
$L_r (cm)$	18 - 76
$Fr_1$	1/9 - 10

## شبکه‌های عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی از تعدادی نرون تشکیل شده‌اند که به صورت لایه‌ای در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. هر شبکه مصنوعی از لایه‌های ورودی، مخفی و خروجی تشکیل شده است (شکل 2) که شبکه ورودی برای تهیه داده‌ها می‌باشد. لایه خروجی شامل مقادیر پیش‌بینی شده بوسیله شبکه عصبی بوده و لایه مخفی یا میانی از نودهای پردازشگر تشکیل شده است (منهاج 1384). تعداد گره‌های لایه ورودی همان تعداد پارامترهای ورودی داده‌های مشاهداتی می‌باشد. در این تحقیق از الگوریتم Marquardt Levenberg با روش پیشرو<sup>1</sup> استفاده شده و برای مدل‌سازی نرم‌افزار متلب 7.5 به کار گرفته شد.

عمق و طول نسبی پرش هیدرولیکی در بسترهای زیر تحت تاثیر متغیر هیدرولیکی جریان و ابعاد هندسی بستر زیر می‌باشد که با استفاده از تحلیل ابعادی به فرم معادله‌های 3 و 4 می‌توان نوشت:

$$\frac{y_2}{y_1} = f_1 \left( Fr_1, \frac{t}{y_1} \right) \quad [3]$$

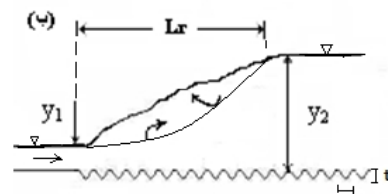
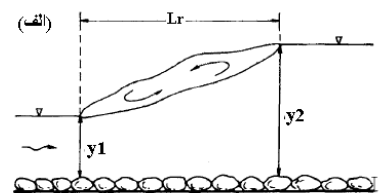
$$\frac{L_r}{y_1} = f_2 \left( Fr_1, \frac{t}{y_1} \right) \quad [4]$$

تعداد نرون‌ها در لایه ورودی برابر 2 فاکتور موثر عدد فرود ( $Fr_1$ ) و زبری نسبی بستر  $\frac{t}{y_1}$  بوده و لایه خروجی شامل یک نرون به صورت عمق نسبی پرش  $\frac{y_2}{y_1}$  است. به طور مشابه با در نظر گرفتن معادله 4 دو

پارامتر عدد فرود ( $Fr_1$ ) و زبری نسبی بستر  $\frac{t}{y_1}$  به

با استفاده از حس‌گرهای التراسونیک در قسمت‌های مختلف کانال انجام گرفت که داده‌ها با استفاده از نرم افزار Visi DAQ قابل نمایش و ذخیره بر روی کامپیوتر است. عمق اولیه پرش در فاصله تقریباً 0/5 متری بالادست بستر موج‌دار (ابتدای پرش هیدرولیکی) اندازه‌گیری شد. ورق‌های موج‌دار سینوسی به ابعاد مختلف مطابق جدول 1 در کف کانال نصب شد. به طوری که کف کانال در محل بستر موج‌دار بصورت افقی بود.

همچنین در این تحقیق از داده‌های مطالعات کارولو و فرو (2007) برای بالابردن دقت ارزیابی مدل‌های شبکه عصبی و برنامه‌ریزی ژنتیک استفاده شده است. آزمایشات آنها در فلوم آزمایشگاهی به طول 14/4 متر، عرض 0/6 متر، و عمق 0/6 متر انجام شده است. زبری نسبی بسترها  $t/y_1$  در بازه 0/085 تا 2/025 بوده که بسترهای زبر در فلوم با استفاده از مصالح شنی با ابعاد نسبتاً یکنواخت ایجاد شده‌بود. توزیع ابعاد بستر به صورت  $d_{50}$  برابر 0/42، 0/82، 1/46، 2/36 و 3/2 سانتی‌متری بوده است. در هر یک از آزمون‌ها عمق اولیه، ثانویه پرش و طول غلتان اندازه‌گیری شده است. طرح شماتیک پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر در شکل 1 نشان داده شده است.



شکل 1- طرح شماتیک پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای زبر (الف) بستر شنی (ب) موج دار.

<sup>1</sup> Feed forward

این حالت متغیرها، ساختارهای برنامه‌ریزی هستند و خروجی نیز میزان توانایی برنامه در رسیدن به اهدافش است. در برنامه‌ریزی ژنتیک یک جمعیت شامل عضو-های تصادفی بوده که کروموزوم نامیده می‌شود و توابع برازش هر یک از کروموزوم‌ها نسبت به مقادیر هدف<sup>2</sup> ارزیابی می‌گردد (کوزا 1992). در مدل برنامه‌ریزی ژنتیک برنامه کامپیوتری متشکل از متغیرهای مختلف و عملگرهای ریاضی (+, -, /, \*) و توابع ریاضی و مثلثاتی (e<sup>x</sup>, sin, cos, tan, log, sqrt, ln و power) تعیین می‌شود. برنامه خروجی ژنتیک به صورت روابط ریاضی و نمودار درختی نمایش داده می‌شود.

در این تحقیق از عملگرهای محاسباتی (+, -, /, \*) و توابع پایه ریاضی (power, tan, e<sup>x</sup>, sqrt) استفاده گردید. تعداد نسل‌ها در این مدل 500 و ماکزیمم اندازه هر برنامه 256 در نظر گرفته شد. پارامترهای بهینه مدل GP در جدول 2 ارائه شده‌است.

با در نظر گرفتن پارامترهای موثر بر مشخصات پرش هیدرولیکی مدل‌سازی برنامه‌ریزی ژنتیک انجام گرفت. در این مدل ورودی مدل دو پارامتر عدد فرود  $Fr_1$  و زبری نسبی بستر  $\frac{t}{y_1}$  و خروجی آن به صورت

پارامتر  $\frac{y_2}{y_1}$  (بی‌بعد) و یا طول نسبی غلتان پرش  $\frac{L_r}{y_1}$

(بی‌بعد) تعریف شده است. داده‌ها در مدل به طور تصادفی به دو قسمت تقسیم شده و برای مراحل آموزش و تست استفاده می‌شوند. عملکرد مدل GP با داده‌های آموزش و تست اعتبار سنجی می‌گردد. برای این منظور 70 درصد داده‌ها برای آموزش و 30 درصد داده‌ها برای تست مدل در نظر گرفته شد. مدل‌سازی GP با ضریب تبیین بالای  $R^2$  و مقادیر قابل قبول خطای ریشه میانگین مربعات  $RMSE$  و میانگین خطای مطلق  $MAE$  نشان دهنده انتخاب مناسب پارامترهای موثر بر خصوصیات پرش هیدرولیکی در بسترهای زبر می‌باشد. همچنین در مدل‌سازی GP رابطه غیر خطی

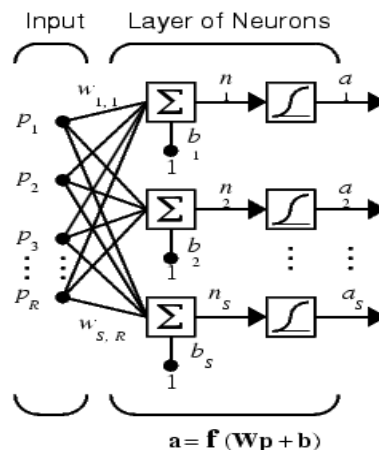
عنوان لایه ورودی طول غلتان نسبی  $\frac{L_r}{y_1}$  در مدل شبکه عصبی معرفی شدند. تعداد نرون‌ها در لایه مخفی 5، 10 و 15 در نظر گرفته شد و تعداد بهینه نرون‌های لایه مخفی ارزیابی گردید. در مرحله آموزش 60 درصد داده‌ها و در هر یک از مراحل صحت سنجی و تست 20 درصد داده‌ها استفاده گردید. خروجی مدل برای هر یک از مراحل آموزش و صحت سنجی و تست با مقادیر مشاهداتی مقایسه شد و دقت مدل تعیین گردید.

به منظور ارزیابی توانایی مدل ANN برای پیش-بینی دقیق معیارهای مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق از دو معیار خطای ریشه میانگین مربعات  $RMSE$ ، میانگین خطای مطلق  $MAE$  و ضریب تبیین  $R^2$  استفاده شده است.

$$R^2 = \left[ \frac{\sum xy}{\sqrt{\sum x^2 \sum y^2}} \right]^2 \quad [5]$$

$$RMSE = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X - Y)^2 \right]^{0.5} \quad [6]$$

$$MAE = \frac{\sum (X - Y)}{n} \quad [7]$$



شکل 2- نمای کلی از شبکه مصنوعی Feed forward.

### برنامه‌ریزی ژنتیک

برنامه‌ریزی ژنتیک<sup>1</sup> (GP) شاخه‌ای از الگوریتم-های ژنتیک است. در این مدل از الگوریتم‌های ژنتیک برای نوشتن برنامه‌های کامپیوتری استفاده می‌شود. در

<sup>2</sup> Target

<sup>1</sup> Genetic Programming

می‌باشد. بررسی‌ها نشان داد که نتایج مدل شبکه عصبی برای پیش‌بینی مشخصات پرش هیدرولیکی  $\frac{y_2}{y_1}$  و  $\frac{L_r}{y_1}$  دارای دقت بالایی است. همچنین با استفاده از این مدل تاثیر پارامترهای مختلف فیزیکی و هیدرولیکی بر روی مشخصات پرش هیدرولیکی قابل ارزیابی است در حالی که در مدل‌های تجربی برای ساده بودن روابط بعضی از پارامترهای موثر تحلیل می‌گردد.

### نتایج مدل برنامه‌ریزی ژنتیک

نتایج مدل برای داده‌های آموزش و تست با استفاده از پارامترهای آماری ضریب تبیین  $R^2$ ، خطای ریشه میانگین مربعات  $RMSE$  و میانگین خطای مطلق  $MAE$  ارزیابی گردید.

در شکل‌های 5 و 6 نتایج شبیه‌سازی مدل GP برای داده‌های آموزش و تست نمایش داده شده است. مطابق این شکل‌ها نتایج مدل GP با مقادیر مشاهداتی عمق و طول غلتان نسبی پرش (پارامتر هدف) تطابق خوبی دارند. نتایج نشان می‌دهند که داده‌های عمق نسبی در نزدیکی خط  $Y=T$  می‌باشند یعنی مقادیر پیش‌بینی و مشاهداتی عمق پرش تقریباً مساوی هستند. با توجه به اینکه اندازه‌گیری طول غلتان پرش همواره در عمل مشکل بوده و همراه با خطا است لذا مطابق شکل 6 کمی پراکندگی برای داده‌های مشاهداتی و مدل پیش‌بینی GP دیده می‌شود. همچنین معادله‌های غیر خطی برای پیش‌بینی عمق و طول غلتان پرش هیدرولیکی به فرم معادله‌های 8 و 9 بدست آمد. در این روابط  $R_1, R_2, R_3, R_4$  و  $R_5$  ضرایب تصادفی ثابت مدل GP و  $X_1$  و  $X_2$  به ترتیب متغیرهای ورودی  $\frac{t}{y_1}$  و  $Fr_1$  هستند. که در معادله‌های 8 و 9 جایگذاری شده‌اند. ضرایب ثابت معادلات در جدول (3) ارائه شده است.

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{Fr_1 R_4^2 R_1^3}{R_6 (R_2 + \frac{t}{y_1})} \quad [8]$$

$$\frac{L_r}{y_1} = (\tan R_4 + R_4 + 3Fr_1) + \frac{(\tan R_4 + R_4 + 2Fr_1 + R_5)Fr_1}{R_2 (\exp \frac{t}{y_1})^2 \exp R_5} \quad [9]$$

بین داده‌های ورودی و مشخصات پرش بدست آمد که به صورت نمودار درختی نمایش داده شده است.

### جدول 2- مشخصات پارامترهای مدل GP بهینه.

Parameters description	Setting of Parameters	پارامترها
Function set	+, -, *, /, Power,	$P_1$
Population size	500	$P_2$
Generation Number	5000	$P_3$
Number of constant	6	$P_4$
Cross over rate	0.9	$P_5$
Mutation	0.05	$P_6$

### نتایج و بحث

در این تحقیق برای تخمین عمق و طول غلتان پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای زیر از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی MLP و برنامه‌ریزی ژنتیک GP استفاده شده و تاثیر پارامترهای زبری بستر و عدد فرود اولیه جریان بر روی مشخصات پرش بررسی شد. همچنین نتایج بدست آمده از مدل‌های ANN و GP با روابط تجربی پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر مقایسه گردید.

### نتایج شبکه عصبی مصنوعی

برای برآورد مقادیر عمق ثانویه و طول غلتان پرش از داده‌های آزمایشگاهی برای آموزش شبکه عصبی استفاده گردید. در این تحقیق شبکه عصبی با الگوریتم چند لایه‌ای MLP برای تخمین مقادیر عمق و طول پرش به کار رفته است. لایه داده‌های ورودی شامل پارامترهای عدد فرود اولیه  $Fr_1$  و ارتفاع زبری نسبی  $\frac{t}{y_1}$  بوده و عمق نسبی پرش  $\frac{y_2}{y_1}$  و یا طول غلتان نسبی  $\frac{L_r}{y_1}$  به عنوان خروجی مدل در نظر گرفته شدند.

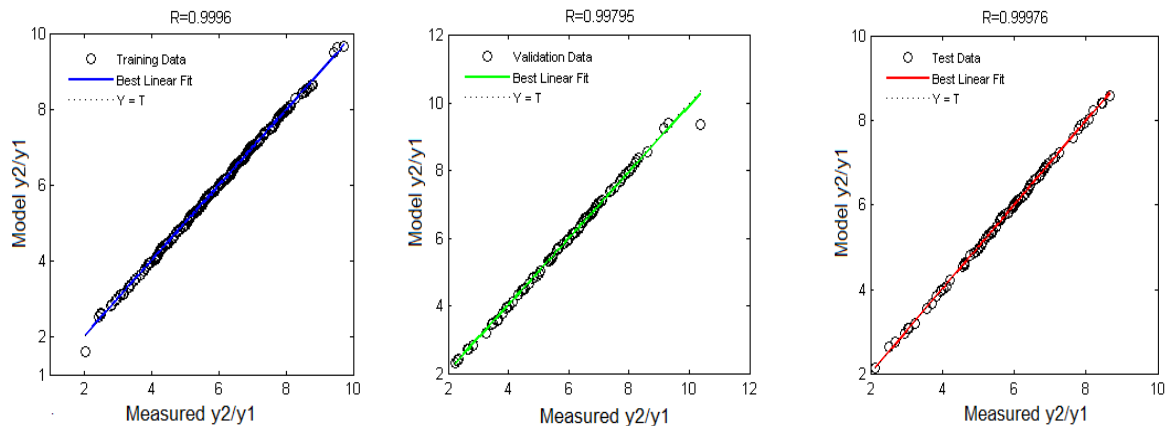
شکل‌های 3 و 4 نتایج مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده شبکه عصبی مربوط به عمق و طول نسبی پرش در مرحله‌های آموزش، صحت‌سنجی و تست را نشان می‌دهند. در این نمودار ضریب تبیین ( $R^2$ ) برای مراحل آموزش، صحت‌سنجی و تست تقریباً 0/99 بوده و همبستگی مطلوبی بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی

مشخصات پرش در بسترهای زبر به عنوان ابزار دقیق در مسائل مهندسی آب مورد استفاده قرار گیرند. همچنین مقایسه این دو مدل با روابط تجربی موجود نشان می‌دهد دقت این مدل‌ها از روابط تجربی نیز بیشتر است. با مقایسه مقادیر خطا و ضریب همبستگی در مدل‌های ANN، GP و معادله تجربی می‌توان نتیجه گرفت که در مدل‌های هوشمند تاثیر تعداد پارامترهای موثر هیدرولیکی و هندسی بیشتری را می‌توان بررسی نمود که در مدل‌های ریاضی و تجربی مشکل ساز است. نمودار درختی عمق و طول نسبی پرش مدل GP به صورت شکل 8 الف و ب ارائه شده است.

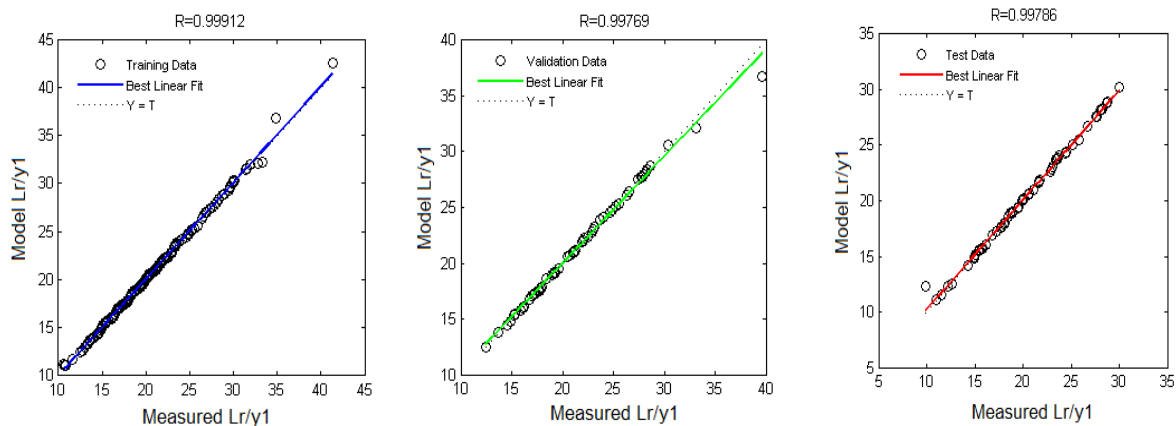
در شکل 7 مقادیر عمق نسبی پرش مشاهداتی نسبت به مقادیر پیش‌بینی مدل GP را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار مقادیر هدف و پیش‌بینی مدل تطابق خوبی با همدیگر دارند.

مقادیر خطای پیش‌بینی عمق و طول غلتان پرش برای معادلات تجربی 1 و 2، ANN و GP تعیین گردید که در جدول (4) این روش‌ها با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

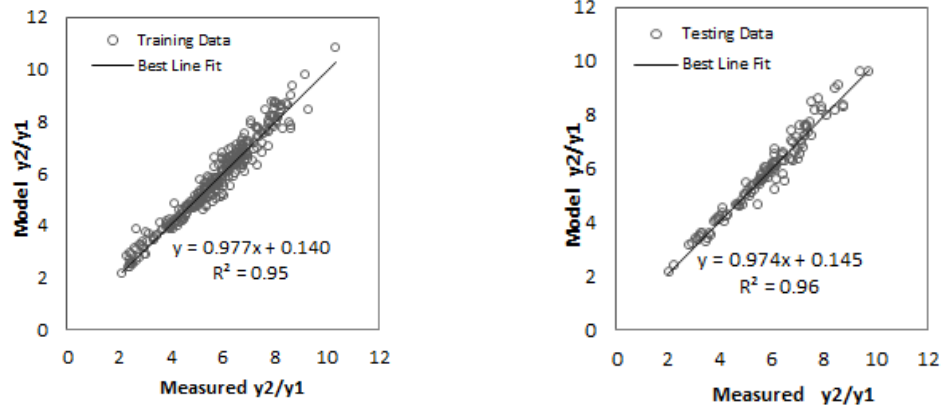
با مقایسه مقادیر عمق و طول غلتان پرش بدست آمده از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و GP می‌توان نتیجه گرفت که هر دو مدل با خطای کمتر معتبر می‌باشند. بنابراین هر دو مدل می‌توانند در پیش‌بینی



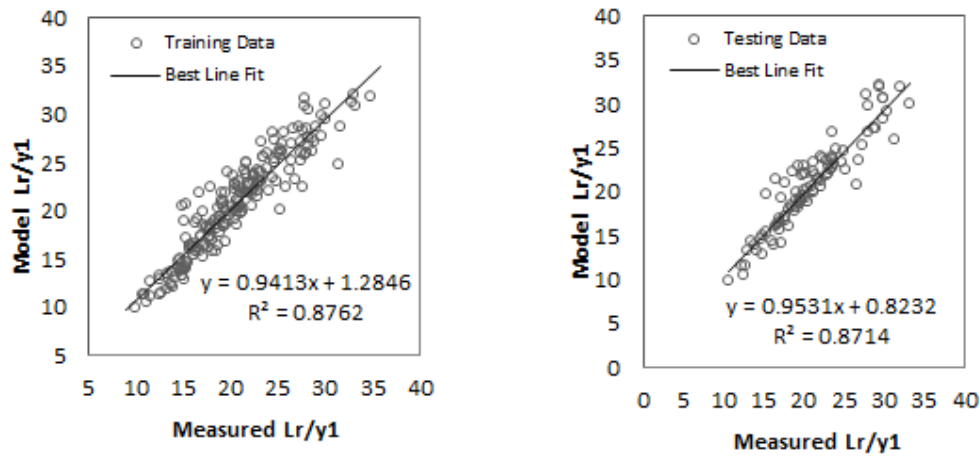
شکل 3- مقایسه مقادیر عمق نسبی پرش مشاهداتی و پیش‌بینی شده با شبکه عصبی در مراحل آموزش، صحت سنجی و تست.



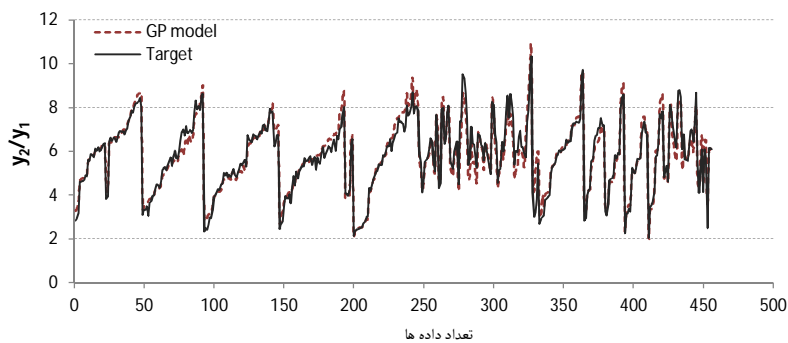
شکل 4- مقایسه مقادیر طول غلتان نسبی مشاهداتی و پیش‌بینی شده با شبکه عصبی در مراحل آموزش، صحت سنجی و تست.



شکل 5- مقایسه مقادیر عمق نسبی پرش مشاهداتی و پیش‌بینی شده با مدل با GP برای مراحل آزمون و تست.



شکل 6- مقایسه مقادیر طول غلطان نسبی پرش مشاهداتی و پیش‌بینی شده با مدل GP برای مراحل آزمون و تست.



شکل 7- مقایسه مقادیر عمق نسبی پرش مشاهداتی و پیش‌بینی شده با مدل GP.

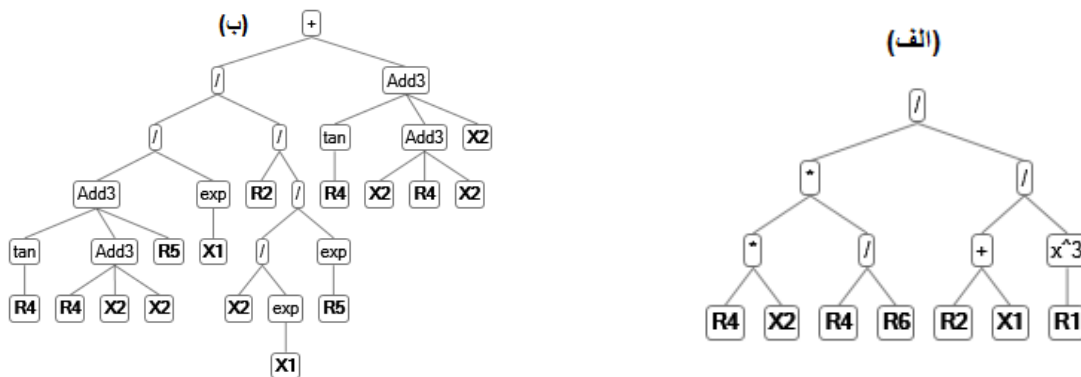


جدول 3- ضرایب ثابت معادلات مدل GP.

R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	R <sub>5</sub>	R <sub>6</sub>	پارامترها
6/82034	5/98264	4/52599	0/27783	9/44693	3/48827	$\frac{y_2}{y_1}$
9/18182	9/04278	7/95319	8/02332	0/28937	-	$\frac{L_r}{y_1}$

جدول 4- مقادیر خطا و ضریب همبستگی مدل تجربی، ANN و GP.

پارامترهای مدل			پارامترهای مدل		
RMSE	MAE	R <sup>2</sup>	RMSE	MAE	R <sup>2</sup>
0/0004	0/047	0/998	0/0004	0/047	0/998
0/0003	0/045	0/996	0/0003	0/045	0/995
1/8	1/36	0/876	0/35	0/28	0/95
1/84	1/39	0/871	0/32	0/29	0/96
4/1	3/16	0/612	0/52	0/36	0/9



شکل 8- نمودارهای درختی (الف) عمق نسبی، (ب) طول نسبی پرش پیش‌بینی شده مدل GP.

## منابع مورد استفاده

- ایزدجو ف، شفاعی بجستان م و بینا م، 1383. مشخصات پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای موج دار دوزنقه‌ای شکل. مجله علمی پژوهشی کشاورزی. جلد 27، شماره 2. صفحه‌های 107-122.
- منهاج م ب، 1384. مبانی شبکه‌های عصبی (هوش محاسباتی)، انتشارات دانشگاه امیر کبیر، چاپ سوم.
- Abbaspour A, Hosseinzadeh Dalir A, Farsadzadeh D, and Sadraddini AA, 2009. Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics. J of Hydro-environment Research 3: 109-117.
- Azamathulla H Md, Ghani AA, Nor Azazi Z and Aytac G, 2010. Genetic programming to predict bridge pier scour. ASCE J of Hydraulic Engineering, Technical Note 10: 165-169.
- Carollo FG, and Ferro V, 2007. Hydraulic jumps on rough beds. J of Hydraulic Eng 133(9): 989-999.
- Dorado J, Rabunal JR, Pazos A, Rivero D, Santos A and Puertas J, 2003. Prediction and modeling of the rainfall-runoff transformation of a typical urban basin using ANN and GP. Applied Artificial Intelligence 17: 329-343.
- Ead SA, Rajaratnam N, 2002. Hydraulic jump on corrugated bed. J of Hydraulic Engineering ASCE 128(7): 656-663.
- Gaur, S, Deo, M.C. 2008. Real time wave forecasting using genetic programming. Ocean Engineering 35:1166-1172.
- Güven A, Azamathulla H Md, and Zakaria NN, 2009. Linear genetic programming for prediction of circular pile scour. Ocean Engineering 36: 985-991.
- Hager WH, 1992. Energy dissipators and hydraulic jump. Kluwer, Dordrecht, Netherlands.

- Hughes WC, Flack JE, 1984. Hydraulic jump properties over rough bed. ASCE J of Hydraulic Engineering 110(12): 1751-1771.
- Koza J R, 1992. Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection. A Bradford Book, MIT Press, Cambridge, Mass. US.
- Negm AM, 2002. Optimal roughened length of prismatic stilling basins. Pp. 88-95, Proceeding of the International Conference on Hydro-Science and Engineering Conference, 18-21 September, Warsaw, Poland.
- Tokyay ND, 2005. Effect of channel bed corrugations on hydraulic jumps. Pp: 408-416, Impacts of Global Climate Change Conference, EWRI, Anchorage, Alaska, USA.
- Vischer DL, Hager WH, 1995. Energy Dissipators. Hydraulic Structures Design Manual, IAHR, Balkema, Rotterdam, Netherlands.