

Estimation of waterfall height in the downstream of ogee spillways to hydraulic jump control

Ali Taheri Aghdam^{1*}, Bahram Nourani¹, Hadi Arvanaghi², Farzin Salmasi³ 

¹ Ph.D. Candidate, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

² Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

³ Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Abstract

Introduction

The purpose of this study is to generate the relationships to directly calculate waterfall height at the downstream of the spillway to form a jump at the toe of the spillway and to prevent erosion and destruction of the downstream river bed or body of the spillway in a submerged and free hydraulic jump.

Materials and Methods

The purpose of this study is to provide a relationship to directly calculate the waterfall height (h) without the need for a trial and error procedure. For this purpose, the application of the momentum relationship between two sections (1 and 2) yields the waterfall height (h) according to Eq. (1).

$$h = y_1 \left(\frac{y_t}{y_1} - \sqrt{1 - 2Fr_1^2 \left(\frac{y_1}{y_t} - 1 \right)} \right) \quad (1)$$

Since in Eq. (1), Fr_1 and y_1 are themselves a function of the waterfall height (h), so this equation must be solved by trial and error or by using design charts provided by other researchers. To calculate the waterfall height in oscillating jump conditions ($2.5 < Fr_1 < 4.5$) and also for steady and strong jump conditions ($4.5 < Fr_1 < 15.5$), by assuming different values for p , y_0 , y_1 and C (where C is the discharge coefficient), 300 and 1146 series of numbers have been generated by trial and error, respectively. Then, the parameters in Eq. 1 (y_1 , Fr_1) were also calculated. The final waterfall height (h) was obtained for each series of numbers. Using the existing variables, dimensionless parameters (h/y_1), (y_t^2/py_1) and Fr_1 were extracted. Then, multiple linear and nonlinear multiple regression relationships were tested for direct calculation of h/y_1 . Finally, the best relationships with the least error were selected. The results of multiple regression (MR) relationships are also compared with the results of ANN and SVM methods.

Results and Discussion

The proposed non-linear multiple regression relationship (MR-3) shows higher accuracy in estimating the waterfall height, compared to MR-1 and MR-2 regression models based on three statistical indices (RE%, RMSE, R^2) for $2.5 < Fr_1 < 4.5$ and $4.5 < Fr_1 < 15.5$. Therefore with having the Froude number related to the initial hydraulic jump depth (Fr_1), tail water depth (y_t), weir height (P) and initial jump depth (y_1), the calculation of waterfall height (h) will be possible using MR-3 model without any trial and error procedures. Moreover, the results show that among the intelligent models, the ANN model has very close results to the proposed nonlinear regression relation (MR-3) based on the statistical indices.

Conclusion

A new method for calculating the height of a waterfall at the toe of the ogee spillway was presented to control hydraulic jump. To calculate the height of the waterfall directly, multiple nonlinear regression (MR) relationships were presented for two ranges of different Froude numbers. The MR, ANN, and SVM models showed good performance in predicting the height of the waterfall downstream of spillways, but the ability of the two MR and ANN models were better than the SVM.

Keywords: Hydraulic Jump, Intelligence Model, Multiple Regression Model, Ogee Spillway, Waterfall

Article Type: Research Article

*Corresponding Author, E-mail: Alitaheriagdam@gmail.com

Citation: Taheri Aghdam, A., Nourani, B., Arvanaghi, H., & Salmasi, F. (2021). Estimation of waterfall height in the downstream of ogee spillways to hydraulic jump control. *Water and Soil Management and Modeling*, 1(1), 1-12.

DOI: 10.22098/MMWS.2021.1174

DOR: 20.1001.1.27832546.1400.1.1.1.9

Received: 03 March 2021, Accepted: 15 April 2021

Water and Soil Management and Modeling, Year 2021, Vol. 1, No. 1, pp. 1-12

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





محاسبه ارتفاع آبشار در پایین دست سرریزهای اوجی جهت کنترل پرش هیدرولیکی

علی طاهری اقدم^{۱*}، بهرام نورانی^۱، هادی ارونقی^۲، فرزین سلماسی^۳

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۲ دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۳ استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

سرریزهای اوجی بهتر است به گونه‌ای طراحی شوند که پرش هیدرولیکی در پای سرریز تشکیل شود و با این عمل از فرسایش و تخریب پایین دست یا بدنه سرریز در حالت پرش مستغرق و آزاد جلوگیری به عمل آید، برای نیل به این هدف می‌توان از آشناری در پای سرریز استفاده نمود. در همین راستا، در این پژوهش، هدف، ارائه رابطه‌ای مستقیم برای محاسبه ارتفاع آبشار بوده که بر اساس آن در نهایت یک رابطه رگرسیونی چندگانه (MR) غیرخطی پیشنهاد شد. این رابطه می‌تواند بدون نیاز به روش غیرمستقیم و استفاده از منحنی با کمترین محاسبات، ارتفاع آبشار را برآورد نماید. به علاوه عملکرد مدل‌های هوشمند شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) نیز در تخمین ارتفاع آبشار بررسی شد و سپس نتایج آن‌ها با رابطه رگرسیونی چندگانه (MR) توسط معیارهای آماری مورد مقایسه قرار گرفت. طبق نتایج مشاهده شد که روش ANN بهتر از روش SVM می‌تواند ارتفاع آبشار را برآورد نماید. ارزیابی صحت نتایج با استفاده از معیارهای آماری شامل ضریب تبیین (R^2)، درصد خطای نسبی (RE%) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) انجام شد. مقادیر معیارهای آماری R^2 ، RE% و RMSE برای مدل MR و برای شرایطی که عدد فرود قبل از پرش هیدرولیکی (Fr_1) در محدوده ۴/۵ تا ۱۵/۵ باشد، به ترتیب ۰/۹۹۹، ۰/۵۳۹ و ۰/۱۸۶، و برای مدل ANN در محدوده فوق‌الذکر به ترتیب ۰/۹۹۹، ۰/۳۹۴ و ۰/۰۰۳۵ به دست آمد. همچنین در شرایطی که عدد فرود قبل از پرش هیدرولیکی (Fr_1) در محدوده ۲/۵ تا ۴/۵ باشد، مقدار معیارهای آماری اشاره شده در بالا، برای مدل MR به ترتیب ۰/۹۹۹، ۰/۲۴۰ و ۰/۱۲۸ و هم‌چنین برای مدل ANN به ترتیب ۰/۹۹۹، ۰/۰۲۲ و ۰/۰۱۴ به دست آمد. معیارهای آماری نشان از برتری دو مدل MR و ANN نسبت به مدل SVM در برآورد ارتفاع آبشار برای عدد فرود کم‌تر و بیش‌تر از ۴/۵ دارد.

واژه‌های کلیدی: آبشار، پرش هیدرولیکی، سرریز اوجی، مدل هوشمند، مدل رگرسیونی چندگانه

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Alitaheriagdam@gmail.com

استناد: طاهری اقدم، ع، نورانی، ب، ارونقی، ه، و سلماسی، ف. (۱۴۰۰). محاسبه ارتفاع آبشار در پایین دست سرریزهای اوجی جهت کنترل پرش هیدرولیکی. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۱(۱)، ۱-۱۲.

DOI: 10.22098/MMWS.2021.1174

DOR: 20.1001.1.27832546.1400.1.1.1.9

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱۷، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۲۶

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۰، دوره ۱، شماره ۱، صفحه ۱ تا ۱۲

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

برای جلوگیری از خسارات ناشی از انرژی زیاد آب در سرعت‌های فوق بحرانی و همچنین حذف انرژی جنبشی موجود در چنین جریان، عموماً از سازه‌های خاصی به نام مستهلک‌کننده‌های انرژی^۱ در پایین دست جریان استفاده می‌شود. چنین سازه‌هایی علاوه بر از بین بردن انرژی آب وسیله‌ای برای کنترل و مهار پرش هیدرولیکی و به وجود آوردن شرایطی جهت وقوع آن در یک موقعیت مکانی خاص نیز به شمار می‌روند (Salmasi, 2018). از جمله سازه‌هایی که برای کنترل پرش هیدرولیکی به کار می‌روند، می‌توان به حوضچه‌های آرامش، آب‌پایه، سرریزهای لبه تیز و لبه پهن و همچنین برآمدگی و یا پایین-افتادگی‌های موضعی اشاره نمود. در فرآیند طراحی و ساخت حوضچه‌های آرامش، موقعیت پرش هیدرولیکی و طول آن از عوامل بسیار مهم و تعیین‌کننده هستند. همچنین، سعی می‌شود که پرش تا حد امکان نزدیک به پنجه سرریز، بدون تاثیر بر جریان ورودی از روی سرریز تشکیل شود. برای این منظور از روش‌های متعددی جهت به عقب راندن و از طرفی مهار کردن بیش تر پرش و کاهش طول پرش استفاده می‌کنند. بالا آوردن سطح بستر (حوضچه‌های آرامش) در پای سرریزها (یا آبشار) و یا پایین آوردن کف حوضچه‌های آرامش در پای سرریزها (ایجاد گودال) نیز یکی از روش‌هایی هستند که می‌توانند موقعیت پرش را در پای سرریز تثبیت کنند.

بر اساس مطالعات تجربی (Hsu (1950) تحت این شرایط، بسته به این که پرش در قبل و یا داخل ناحیه پایین‌افتادگی تشکیل شود، یک ناحیه تبدیلی وجود خواهد داشت که در آن پرش موقعیت نامتعادلی داشته و نمی‌تواند به وسیله تئوری پیش‌بینی شود، نهایتاً منحنی‌هایی جهت کنترل پرش بسته به مشخصات Fr_1 و y_2/y_1 ارائه شد. (Rajaratnam (1976) مطالعات اولیه آزمایشگاهی را در زمینه پرش هیدرولیکی انجام داد و بیان کرد که کنترل کامل پرش هیدرولیکی روی بستر همراه با شیب معکوس تقریباً غیرممکن است. وجود پایین‌افتادگی در بستر نیز در کنترل پرش نقش مهمی می‌تواند داشته باشد. همچنین، (Abrishami and Saneie (1994) در مطالعات خود بیان کردند که برای یک عمق معین، با افزایش شیب معکوس، نسبت عمق ثانویه به عمق اولیه کاهش می‌یابد. همچنین شیب معکوس نقش مهمی در کاهش طول پرش دارد اما از نظر افت انرژی تغییر محسوسی بین حالت کف افقی با شیب معکوس مشاهده نشده است. در پژوهشی دیگر، (McCorquodale and Mohamad (1994) به این نتیجه رسیدند که کنترل پرش هیدرولیکی روی بستر شیب‌دار در اعداد فرود پایین ($Fr < 4$)

مشکل است. همچنین پرش روی شیب معکوس دارای افت انرژی کم‌تر نسبت به پرش روی بستر صاف می‌باشد. (Esmaily and Abrishami (2002) به بررسی ارتباط بین عمق‌های قبل و پس از پرش هیدرولیکی و همچنین طول پرش با ارتفاع آبشار و گودال پرداختند. نتایج حاصله برای شیب‌های ۰/۵، ۱، ۱/۳ و ۲ درصد ارائه شد. نمودارهای ارائه شده امکان دست‌یابی به الگوهای جهت تعیین ارتفاع مناسب آبشار (شیب‌شکن قائم) در طراحی حوضچه‌های آرامش برای پرش هیدرولیکی و با شیب معکوس را فراهم می‌سازد. (Achour and Debabeche (2003) به بررسی خصوصیات پرش کنترل شده پرداختند و روابطی برای کنترل پرش با استفاده از آستانه لبه تیز و لبه پهن پیشنهاد کردند. اثرات اصطکاک بستر بر تشکیل پرش هیدرولیکی پایدار در کانال شیب‌دار مستطیلی نیز توسط (Defina et al. (2008) به صورت آزمایشگاهی و تئوری بررسی شد و بیان کردند که هر دو مدل در پیش‌بینی تشکیل پرش هیدرولیکی پایدار و ناپایدار در دیواره صاف و زبر کانال به خوبی عمل می‌کنند. علاوه بر این، (Abbaspour et al. (2009) خصوصیات پرش هیدرولیکی بر بستر موج‌دار سینوسی را بررسی کردند. پژوهش ایشان بر پایه دو عامل متغیر ارتفاع موجی نسبی از کف حوضچه آرامش و نیز اعداد فرود مختلف انجام پذیرفت. نتایج آن‌ها نشان داد که عمق پایاب مورد نیاز برای تشکیل پرش روی بستر موج‌دار نسبت به بستر صاف کم‌تر، و ضریب تنش برشی در پرش هیدرولیکی در بستر موج‌دار نسبت به بستر صاف دارای افزایش قابل ملاحظه‌ای است.

(Carvalho et al. (2010) به بررسی عددی و آزمایشگاهی پرش هیدرولیکی پرداختند و به صورت تحلیلی رابطه‌ای در مورد روابط پرش هیدرولیکی استنتاج نمودند. در ادامه، (Asafi and Zeyae (2011) به شبیه‌سازی پرش بر سطح شیب‌دار معکوس با پله با استفاده از مدل $k - \varepsilon$ (Standard) و در دو حالت تابع استاندارد و غیرتعادلی پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که در صحت‌سنجی پروفیل سطح پرش، حالت تابع دیواره استاندارد نتایج بهتری را تولید می‌کند. همچنین، (Habibzadeh et al. (2011) خصوصیات پرش مستغرق را در حضور بلوک در حوضچه آرامش مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که اتلاف انرژی در حضور بلوک در پرش مستغرق بیش‌تر از حالت حضور بلوک در پرش آزاد خواهد بود. در ادامه، (Pourabdollah et al. (2014) در پژوهش خود نیز نشان دادند که مقادیر عمق نسبی پرش در یک حوضچه آرامش با شیب کف معکوس و افزایش زبری، نسبت به حالت افقی کاهش پیدا می‌کند. این زبری‌ها در شرایط متفاوتی با اعداد فرود در محدوده بین ۴/۹ تا ۷/۸ مورد آزمایش قرار گرفتند. به‌طور متوسط کاهش اعماق نسبی در این

نسبی استخر و استهلاک انرژی بیش‌تر هستند. این در حالی است که استفاده از این صفحات، طول نسبی حوضچه آرامش پایین‌دست شیب‌شکن‌های قائم را به‌میزان ۶۹ درصد نسبت به حالت ساده کاهش می‌دهند. امروزه استفاده از مکانیسم تداخل آب با هوا به‌عنوان یکی از روش‌های مؤثر در کنترل سرعت و کاهش انرژی اضافی جریان شناخته شده است. لذا محققین به طراحی سازه‌های هیدرولیکی مختلف برای ایجاد پرش هیدرولیکی به‌عنوان روشی شناخته شده به‌منظور افزایش تلاطم و استهلاک انرژی پرداخته‌اند (Daneshfaraz et al., 2019b).

به‌طور کلی در پژوهش‌های فوق، پژوهش‌گران به بررسی مشخصات پرش هیدرولیکی و ارتباط بین پارامترهای موجود در پرش و تأثیر حالت‌های مختلف پله منفی، پله مثبت، شیب معکوس و زبری‌های مختلف پرداخته‌اند. با توجه به بررسی مطالعات انجام شده در گذشته، هیچ یک از محققین رابطه‌ای مستقیم برای محاسبه ارتفاع آبشار در پای سرریزهای اوجی جهت کنترل پرش هیدرولیکی ارائه نکرده‌اند. لذا هدف از انجام این پژوهش، برآورد رابطه‌ای مستقیم برای محاسبه ارتفاع آبشار در پای سرریز به‌منظور این‌که پرش در پای سرریز تشکیل و از فرسایش و تخریب پایین‌دست یا بدنه سرریز در حالت پرش مستغرق و آزاد جلوگیری شود، می‌باشد. تعیین این‌که آبشار یا گودال در جهت تثبیت موقعیت مکانی پرش هیدرولیکی در پای سرریز طراحی شود به شرایط هیدرولیکی هم‌چون عمق اولیه، عدد فرود اولیه و عمق پایاب بستگی دارد. در پژوهش حاضر یک رابطه‌ای برای تخمین ارتفاع آبشار بر اساس پارامترهای فوق‌الذکر تعیین می‌شود که به‌کارگیری آن، می‌تواند روش‌های سعی و خطا و نموداری را حذف و کار مهندسان را در طراحی آسان‌تر نماید. هم‌چنین، نتایج روابط رگرسیونی چندگانه (MR) پیشنهادی جهت تخمین ارتفاع آبشار با نتایج حاصل از روش‌های هوشمند شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) مورد مقایسه قرار می‌گیرد تا عملکرد این دو مدل هوشمند در تخمین پارامتر مورد نظر نیز مورد ارزیابی قرار گیرد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- شبکه عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) به‌عنوان یکی از قدیمی‌ترین روش‌های داده‌کاوی در علوم مهندسی مطرح می‌باشد. یک شبکه عصبی مصنوعی، تعدادی اجزای پردازش‌گر را تحت عنوان نرون‌ها و اکسون‌ها به یکدیگر متصل می‌کند. اتصال اجزا از طریق وزن‌های شبکه، مطابق با معماری شبکه عصبی مورد نظر انجام می‌شود. تاکنون الگوریتم‌های متعددی از شبکه‌های عصبی در زمینه مختلف علوم مهندسی به‌کار گرفته شده است (Gazanfari

پژوهش ۳۱/۵ درصد به‌دست آمد. Minaei et al. (2016) تأثیر آستانه پلکانی را بر موقعیت پرش هیدرولیکی مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی نشان داده شد که آستانه پلکانی نسبت به آستانه شیب‌دار سهم بیش‌تری در تثبیت پرش هیدرولیکی دارد. علاوه بر آن، روابطی نیز برای محاسبه میزان خروج پرش از حوضچه ارائه شد. Parsamehr et al. (2017) خصوصیات پرش هیدرولیکی در یک کانال مستطیلی در دو حالت با کف افقی و با شیب معکوس به همراه آب پایه را بررسی نمودند. نتایج نشان داد که نصب آب پایه طول پرش هیدرولیکی را در بستر با شیب افقی به‌طور متوسط ۶/۳ درصد و در بستر با شیب معکوس ۱/۵ درصد کاهش می‌دهد. در پژوهشی آزمایشگاهی Ghassemi et al. (2017) نیز به‌منظور توسعه روابطی جدید و با دقت مناسب، به برآورد مشخصات پرش هیدرولیکی مستغرق پرداختند. آن‌ها اعلام نمودند که در یک عدد فرود معین، طول پرش هیدرولیکی مستغرق و افت انرژی نسبی پرش مستغرق به‌ترتیب بیش‌تر و کم‌تر از این مشخصات برای پرش هیدرولیکی آزاد است. Kiani et al. (2017) در پژوهش خود به کنترل پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش با دیواره روزنه‌دار پرداختند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که دیواره روزنه‌دار تأثیر به‌سزایی در استهلاک انرژی، کاهش طول حوضچه آرامش و هم‌چنین کاهش وابستگی موقعیت پرش به عمق پایاب دارد. Pourabdollah et al. (2018) به بررسی خصوصیات پرش هیدرولیکی مستغرق در محدوده اعداد فرود اولیه ۴ تا ۱۰ و نسبت استغراق ۰/۱ تا ۱/۵ روی بستر با شیب معکوس، زبری سنگریزه‌ای و ارتفاع پله انتهایی متفاوت پرداختند. نتایج نشان داد که در یک عدد فرود معین، طول پرش مستغرق و افت انرژی نسبی آن به‌ترتیب بیش‌تر و کم‌تر از این مشخصات برای پرش هیدرولیکی آزاد است. هم‌چنین با افزایش نسبت استغراق، اتلاف انرژی به‌طور متوسط ۱۰ درصد کم‌تر و طول پرش مستغرق در مقایسه با حالت کلاسیک آن ۳۲ درصد افزایش می‌یابد. هم‌چنین ضخامت لایه مرزی بی‌بعد در پرش مستغرق برابر با ۰/۳۷ به‌دست آمد. از سوی دیگر مقادیر ضریب نیروی برشی به‌طور متوسط ۴/۴۴ برابر حالت کلاسیک است. Yousefi et al. (2019) به مقایسه آزمایشگاهی مدل‌های پرش هیدرولیکی در رژیم‌های مختلف جریان پرداختند. نتایج نشان داد که مدل‌های بررسی شده دارای خطا در تخمین طول پرش هیدرولیکی در رژیم‌های مختلف جریان هستند. تأثیر استفاده از صفحات مشبک افقی در لبه شیب‌شکن‌های قائم با جریان فوق بحرانی در بالادست، توسط Daneshfaraz et al. (2019a) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این محققین نشان داد که شیب‌شکن‌های قائم مجهز به صفحات مشبک نسبت به شیب‌شکن‌های قائم ساده دارای عمق نسبی پایین‌دست، عمق

که در آن x_i i امین نمونه از مجموعه داده $\{(x_i, y_i)\}_{i=1}^n$ و y_i کلاس مشخص شده برای نمونه ورودی x_i باشد، آن گاه می توان مفهوم کلیدی مورد نیاز برای تعریف یک طبقه بندی کننده خطی، یعنی ضرب نقطه ای بین دو بردار را که با عنوان ضرب اسکالر نیز شناخته می شود، مطابق رابطه $W^T x = \sum_i x_i w_i$ تعریف نمود. رابطه $f(x) = wx + b$ بیان کلی از طبقه بندی کننده های خطی را نشان می دهد، که در این رابطه W نمایش دهنده وزن b بایاس می باشد. در تعیین تابع $f(x)$ همواره می بایست مقادیر خروجی به گونه ای تعیین شود که به طور هم زمان، میزان کم ترین انحراف از ε تعیین شده و هم چنین تابع، مقدار مناسب w را اختیار نماید. تامین چنین شرایطی با حل رابطه بهینه سازی زیر قابل دست یابی است.

$$\text{Minimise } \frac{1}{2} \|w\|^2 \quad (1)$$

$$\text{Subject to } \{y_i - (w \cdot x_i) - b \leq \varepsilon, (x_i b y) + - \leq \varepsilon\}$$

ε میزان انحراف اعمال شده است. نهایتاً برای تبدیل رابطه بهینه سازی حاوی یک مجموعه قیود نامعادلات و نامساوی ها به یک رابطه صریح، با لحاظ نمودن پارامترهای لاگرانژی γ_i و γ'_i رابطه ۲ به دست خواهد آمد.

$$f(x, b) = \sum_{i=1}^k (y'_i - y_i)(x_i, x) + b \quad (2)$$

حال معادله خطی سازی بالا با به کارگیری توابع کرنل، برای مسائل رگرسیون غیرخطی نیز قابل استفاده است، در نهایت معادله تابع رگرسیون، به صورت رابطه ۳ بیان می شود.

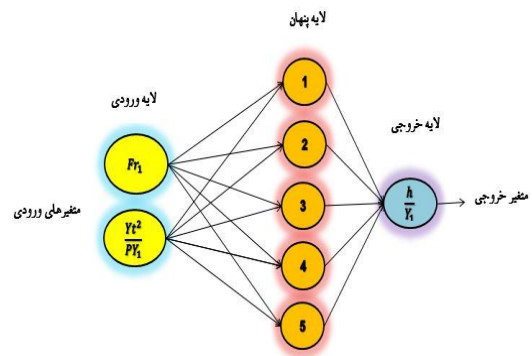
$$f(x, b) = \sum_{i=1}^k (y'_i - y_i)k(x_i, x) + b \quad (3)$$

که در این رابطه $k(x_i, x)$ نمایانگر تابع کرنل است. مطابق پژوهش Gunn (1998) در این مدل سازی به کمک ماشین بردار پشتیبان، انتخاب دو پارامتر ε و c در تخمین تابع رگرسیون $f(x)$ حائز اهمیت است.

۲-۳- سرریز اوجی

در شکل ۲ (الف و ب) مقطع واقعی و شکل شماتیک یک سرریز اوجی که در پای آن آبشار وجود دارد، نشان داده شده است که در آن P ارتفاع سرریز، γ_0 عمق آب در سراب، γ_t عمق آب در پایاب، γ_1 عمق آب قبل از پرش هیدرولیکی و h ارتفاع آبشار است.

(Hashemy and Shahidi, 2012). شبکه های چندلایه پیش خور یکی از مهم ترین ساختارهای شبکه عصبی مصنوعی است که به طور معمول مجموعه ای از واحدهای حسی (نرون های پایه) بوده و تشکیل دهنده یک لایه ورودی، یک یا چند لایه پنهان و یک لایه خروجی است (Salmasi et al., 2021). سیگنال ورودی در مسیری رو به جلو و لایه به لایه منتشر می شود. این شبکه معمولاً با عنوان پرسپترون چندلایه (MLP) نامیده می شود (Norouzi et al., 2019). معماری بهینه شبکه در پژوهش حاضر به صورت ۱-۵-۲ (۲ لایه ورودی، ۵ نرون در لایه پنهان^۲ و ۱ لایه خروجی^۳) انجام شد. لازم به ذکر است که در پژوهش حاضر، معماری های مختلفی برای شبکه مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت بهینه ترین حالت ممکن با کم ترین خطا به صورت ۱-۵-۲ انتخاب شد. شکل ۱ ساختار کلی شبکه عصبی مصنوعی مورد استفاده در پژوهش حاضر را نشان می دهد.

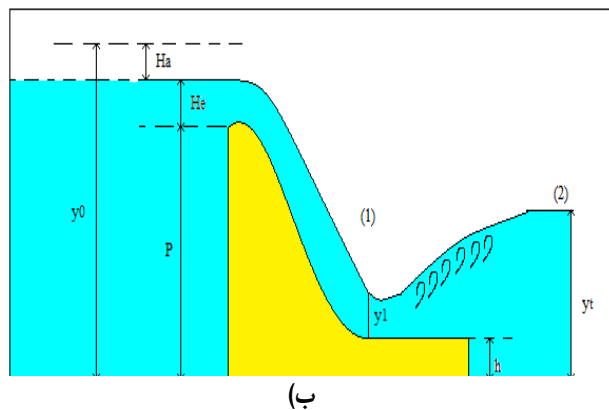


شکل ۱- ساختار کلی شبکه عصبی مصنوعی (ANN)
Figure 1- Structure of artificial neural network (ANN)

۲-۲- ماشین بردار پشتیبان

در شبکه های عصبی پرسپترون چندلایه (MLP) و توابع پایه شعاعی (RBF)، غالباً توجه بر بهبود ساختار شبکه عصبی است، به نحوی که خطای تخمین و میزان اشتباه های شبکه عصبی کمینه شود. اما در نوع خاصی از شبکه عصبی، موسوم به ماشین بردار پشتیبان (SVM)، صرفاً بر کاهش ریسک عملیاتی مربوط به عدم عملکرد صحیح، تمرکز می شود. ساختار یک شبکه SVM، اشتراکات زیادی با شبکه عصبی MLP دارد و عملاً تفاوت اصلی آن، در شیوه یادگیری است که اولین بار توسط Boser et al. (1992) معرفی شده است. ماشین بردار پشتیبان یکی از روش های طبقه بندی نظارت شده خطی داده هاست که در آن ها هر نمونه ورودی به یکی از دو کلاس +۱ یا -۱ طبقه بندی می شود. در صورتی که x برداری با اجزای x_i در نظر گرفته شود

- 1- Input Layer
- 2- Hidden Layer
- 3- Output Layer



شکل ۲- سرریز اوجی سد مارون (الف)، مقطع هندسی سرریز اوجی (ب)
Figure 2- Ogee weir of Marun dam (Arra, 2015) (a), and geometric section of Ogee weir (b)

در راستای دستیابی به هدف پژوهش ابتدا رابطه مومنتم بین مقطع های ۱ و ۲ به شرح زیر نوشته شده و پس از ساده سازی ارتفاع آبشار (h) مطابق رابطه ۷ محاسبه شده است.

ابتدا با فرض مقادیر مختلف برای y_t , y_0 , p و C (که مقدار آن بر اساس نسبت P/He در حالتی که دیواره بالادست قائم باشد در محدوده پژوهش حاضر برای $2/2 < P/He < 15$ به دست آمده است) در پژوهش حاضر C ضریب دبی جریان می باشد، به ترتیب ۳۰۰ و ۱۱۴۶ سری از اعداد به روش سعی و خطا تولید شده است. سپس با توجه به مقادیر پارامترهای فوق الذکر، پارامترهای موجود در رابطه ۷ یعنی (y_1, Fr_1) نیز محاسبه شد. پس از این مرحله با استفاده از رابطه ۷ مقدار ارتفاع آبشار (h) استخراج و سپس با استفاده از روش سعی و خطا ارتفاع نهایی آبشار (h) برای هر سری از اعداد به دست آمد. به عبارت دیگر با استفاده از پارامترهای p , y_0 , y_t و C ، پارامترهای y_1 و Fr_1 در نهایت با استفاده از رابطه ۷ ارتفاع آبشار به روش سعی و خطا محاسبه شد.

در رابطه های ۴ الی ۶ دبی جریان عبوری از روی سرریز، q دبی در واحد عرض جریان، ρ جرم مخصوص سیال، Δv تغییرات سرعت در مقطع های ۱ و ۲، γ وزن مخصوص سیال، g شتاب ثقل، y_1 عمق جریان در مقطع ۱، y_t عمق پایاب، Fr_1 عدد فرود در مقطع ۱، F مجموع نیروهای افقی، F_{p1} نیروی افقی در مقطع ۱، F_{pt} نیروی افقی در پایاب، F_h نیروی افقی وارد بر آبشار و h ارتفاع آبشار است. در صورت ساده سازی رابطه ۶ رابطه ۷ به دست خواهد آمد:

در این محاسبه هدف ارائه رابطه ای مستقیم برای محاسبه ارتفاع آبشار (رابطه ۷) بوده است. لذا با توجه به شکل گیری پرش های نوسانی و موجی مخرب در محدوده عدد فرود $2/5 < Fr_1 < 4/5$ این محدوده به صورت جدا از سایر محدوده ها مورد بررسی قرار گرفت. شایان ذکر است که به دلیل انتشار موج های ناشی از این محدوده به قسمت های پایین دست سازه، تثبیت پرش در این محدوده بایستی بیشتر مورد توجه قرار گیرد. بدین ترتیب که برای محاسبه ارتفاع آبشار در شرایط ایجاد پرش نوسانی ($2/5 < Fr_1 < 4/5$) و همچنین برای شرایط پرش پایدار و قوی

$$\sum F = \rho Q \Delta v \tag{4}$$

$$F_{p1} - F_{pt} - F_h = \frac{\gamma}{g} \cdot b \cdot q \cdot \left(\frac{q}{y_t} - \frac{q}{y_1} \right) \tag{5}$$

$$y_1^2 - y_t^2 + 2h \left(y_t - \frac{h}{2} \right) = \frac{2}{g y_1} \cdot q^2 \left(\frac{y_1}{y_t} - 1 \right) \tag{6}$$

با استفاده از متغیرهای موجود پارامترهای بی بعد h/y_1 و $Fr_1^2 / p y_1$ استخراج شد. سپس با استفاده از نرم افزار SPSS 22 رابطه های رگرسیونی چندگانه خطی و غیرخطی متعددی برای محاسبه مستقیم h/y_1 مورد آزمون قرار گرفت (لازم به ذکر است، h ها مربوط به h های نهایی ولی y_1 ها مربوط به عمق اولیه پرش در ابتدای محاسبات بدون در نظر گرفتن اثر h روی عمق اولیه پرش است) که از میان آن ها نمونه هایی به شکل رابطه های ۸ تا ۱۰ اختیار شد که در این رابطه ها a, b, c, d و e ضرایب ثابت معادلات رگرسیونی چندگانه هستند.

$$h = y_1 \left(\frac{y_t}{y_1} - \sqrt{1 - 2 Fr_1^2 \cdot \left(\frac{y_1}{y_t} - 1 \right)} \right) \tag{7}$$

از آن جایی که در رابطه ۷، Fr_1 و y_1 خود تابعی از ارتفاع آبشار (h) هستند، بنابراین این معادله بایستی به روش سعی و خطا یا با استفاده از گراف های ارائه شده توسط محققین حل شود.

در این پژوهش هدف ارائه رابطه ای مستقیم برای محاسبه ارتفاع آبشار (رابطه ۷) بوده است. لذا با توجه به شکل گیری پرش های نوسانی و موجی مخرب در محدوده عدد فرود $2/5 < Fr_1 < 4/5$ این محدوده به صورت جدا از سایر محدوده ها مورد بررسی قرار گرفت. شایان ذکر است که به دلیل انتشار موج های ناشی از این محدوده به قسمت های پایین دست سازه، تثبیت پرش در این محدوده بایستی بیشتر مورد توجه قرار گیرد. بدین ترتیب که برای محاسبه ارتفاع آبشار در شرایط ایجاد پرش نوسانی ($2/5 < Fr_1 < 4/5$) و همچنین برای شرایط پرش پایدار و قوی

$$\frac{h}{y_1} = a \times Fr_1 + b \times \left(\frac{y_t^2}{p y_1} \right) + c \tag{8}$$

$$\frac{h}{y_1} = a \times Fr_1^b \times \left(\frac{y_t^2}{p y_1} \right)^c \tag{9}$$

$$\frac{h}{y_1} = a \times Fr_1^b \times \left(\frac{y_t^2}{p y_1} \right)^c - d \times Fr_1^e \tag{10}$$

۴-۲- معیارهای ارزیابی دقت

برای ارزیابی، توانایی و دقت رابطه‌های رگرسیونی چندگانه خطی و غیرخطی و همچنین عملکرد مدل‌های هوشمند شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) در تخمین ارتفاع آبشار، از شاخص‌های آماری استفاده شده است. معیارهای ارزیابی جهت تخمین پارامتر ارتفاع آبشار شامل ضریب تبیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و درصد خطای نسبی (RE%) به ترتیب از رابطه‌های ۱۱ تا ۱۳ محاسبه شدند.

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (11)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (12)$$

$$RE\% = \frac{\sum_{i=1}^n (|P_i - O_i|)}{\sum_{i=1}^n P_i} \times 100 \quad (13)$$

در این رابطه‌ها، O_i مقادیر ارتفاع آبشار محاسبه شده از رابطه ۷ به روش سعی و خطا، P_i مقادیر ارتفاع آبشار حاصل از مدل‌های رگرسیونی چندگانه و هوشمند، \bar{O} میانگین حاصل از مقادیر ارتفاع

آبشار محاسبه شده از رابطه ۷ به روش سعی و خطا و n تعداد داده‌هاست.

۳- نتایج و بحث

به منظور برآورد ارتفاع آبشار به صورت مستقیم، معادلات رگرسیونی چندگانه (MR) خطی و غیرخطی با استفاده از نرم‌افزار SPSS 22 استخراج شدند. لازم به ذکر است که در این رابطه‌ها محدوده پارامترهای بی‌بعد برای شرایط اعداد فرود معین به صورت جدول ۱ است. همچنین نتایج معادلات رگرسیونی چندگانه (MR) در جدول ۲ ارائه شده است. معیارهای ارزیابی جهت تخمین مقدار ارتفاع آبشار به وسیله رابطه‌های رگرسیونی در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به جدول ۲ مشاهده می‌شود که رابطه رگرسیونی چندگانه غیرخطی پیشنهادی (رابطه ۳؛ MR-3) با کم‌ترین درصد خطای نسبی (RE%) که مقدار آن برای عدد فرود بالاتر و پایین‌تر از ۴/۵ به ترتیب برابر ۰/۵۳۹ و ۰/۲۴۰۸ و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) با مقادیر ۰/۱۸۶ و ۰/۱۲۸ به ترتیب برای عدد فرود بالاتر و پایین‌تر از ۴/۵، نسبت به مدل‌های رگرسیونی ۱ و ۲ (MR-1, MR-2) که به ترتیب خطی و غیرخطی هستند، در تخمین ارتفاع آبشار از دقت بالایی برخوردار بوده است.

جدول ۱- محدوده پارامترهای بی‌بعد برای عدد فرود معین

Table 1- Range of dimensionless parameters for a given Froude number

محدوده عدد فرود	Max (h/y_1)	Min (h/y_1)	Max (y_t^2/py_1)	Min (y_t^2/py_1)
$2.5 < Fr_1 < 4.5$	6.601	0.536	15.630	7.030
$4.5 < Fr_1 < 15.58$	42.266	0.0379	32.636	4.080

جدول ۲- روابط رگرسیونی خطی و غیرخطی پیشنهادی برای به دست آوردن ارتفاع آبشار

Table 2- Proposed linear and nonlinear regression relationships to obtain waterfall height

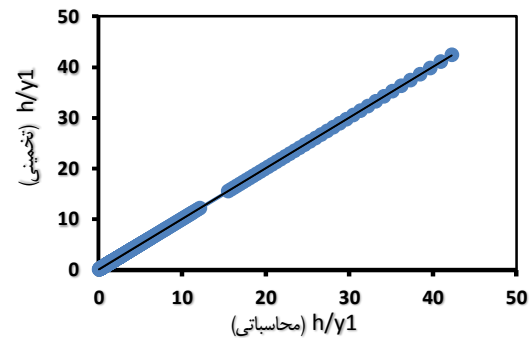
محدوده عدد فرود و شماره رابطه	روابط رگرسیونی	RE%	R^2	RMSE
(MR-1) $4.5 < Fr < 15.5$	$\frac{h}{y_1} = 0.219 \times Fr_1 + 1.35 \times \left(\frac{y_t^2}{py_1} \right) - 7.22$	7.33	0.997	0.282
(MR-1) $2.5 < Fr < 4.5$	$\frac{h}{y_1} = 0.287 \times Fr_1 + 0.635 \times \left(\frac{y_t^2}{py_1} \right) - 4.751$	2.015	0.998	0.0816
(MR-2) $4.5 < Fr < 15.5$	$\frac{h}{y_1} = 0.034 \times Fr_1^{0.959} \times \left(\frac{y_t^2}{py_1} \right)^{1.324}$	25.74	0.967	0.905
(MR-2) $2.5 < Fr < 4.5$	$\frac{h}{y_1} = 0.197 \times Fr_1^{0.3989} \times \left(\frac{y_t^2}{py_1} \right)^{-0.779}$	57.25	0.999	1.334
(MR-3) $4.5 < Fr < 15.5$	$\frac{h}{y_1} = 0.688 \times Fr_1^{0.931} \times \left(\frac{y_t^2}{py_1} \right)^{0.553} - 1.612 \times Fr_1^{0.89}$	0.539	0.999	0.0186
(MR-3) $2.5 < Fr < 4.5$	$\frac{h}{y_1} = 0.554 \times Fr_1^{1.3118} \times \left(\frac{y_t^2}{py_1} \right)^{0.378} - 1.408 \times Fr_1^{0.781}$	0.2408	0.999	0.01286

دست داشتن عدد فرود مربوط به عمق اولیه پرش (Fr_1)، عمق پایاب (y_t)، ارتفاع سرریز (P) و عمق اولیه پرش (y_1) و با استفاده از مدل رگرسیونی چندگانه غیرخطی ۳ (MR-3)، در جدول ۲،

علاوه بر پارامترهای آماری جهت بررسی دقت مدل رگرسیونی چندگانه غیرخطی پیشنهادی (MR-3)، نمودار پراکندگی داده‌ها نیز رسم شده است (شکل ۳). بنابراین با در

در این پژوهش برای بررسی عملکرد دو روش داده‌کاوی شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) در برآورد ارتفاع آبشار، از سه پارامتر بی‌بعد h/y_1 ، y_t^2/py_1 و Fr_1 استفاده شده است. داده‌های موجود برای شرایط معین به روش غیرمستقیم و با روش سعی و خطا استخراج شده‌اند. تعداد کل داده‌های تولید شده برای حالتی که عدد فرود بالاتر و پایین‌تر از $4/5$ باشد، به ترتیب شامل ۱۱۴۶ و ۳۰۰ سری داده هستند. این پارامترها قبل از ورود به نرم‌افزار نرمال شده‌اند. در هر دو مدل ANN و SVM، پارامترهای بی‌بعد y_t^2/py_1 و Fr_1 به‌عنوان ورودی و پارامتر بی‌بعد ارتفاع آبشار نسبت به عمق آب قبل از پرش هیدرولیکی (h/y_1) به‌عنوان خروجی به نرم‌افزار معرفی شد. در هر دو مدل ۷۵ درصد داده‌های موجود (۸۶۰ سری از اعداد برای عدد فرود بین $4/5$ تا $15/5$ و ۲۲۵ سری از اعداد برای عدد فرود بین $2/5$ تا $4/5$) برای آموزش شبکه و ۲۵ درصد آن‌ها (۲۸۶ سری از اعداد برای عدد فرود بین $4/5$ تا $15/5$ و ۷۵ سری از اعداد برای عدد فرود بین $2/5$ تا $4/5$) نیز برای آزمون شبکه مورد استفاده قرار گرفته است، که پارامترهای آماری برای دوره آموزش و آزمون شبکه برای محدوده اعداد فرود مشخص در جدول ۳ نشان داده شده است.

می‌توان بدون نیاز به روش‌های عددی و یا با استفاده از منحنی‌های پیشنهاد شده، ارتفاع آبشار (h) را بدون هیچ گونه سعی و خطایی به‌دست آورد. لازم به ذکر است که مدل رگرسیونی غیرخطی (MR-3) برای حالتی است که تراز کف پایاب و سراب برابر باشد. در صورتی که بین سراب و پایاب سرریز اختلاف ارتفاعی وجود داشته باشد، یعنی تراز کف در سراب بیش‌تر از تراز کف در پایاب باشد، باید اختلاف تراز کف در سراب و پایاب (Δz) به ارتفاع سرریز در رابطه استخراجی اضافه شود.



شکل ۳- نمودار پراکندگی داده‌ها برای مدل رگرسیونی غیر خطی پیشنهادی (MR-3)

Figure 3- Scatter diagram of the proposed nonlinear regression model (MR-3)

جدول ۳ - پارامترهای آماری برای مدل‌های هوشمند مورد استفاده در دوره‌های آموزش و آزمون
Table 3- Statistical parameters of intelligent models used for the training and testing periods

محدوده عدد فرود	پارامترهای آماری	دوره آموزش			دوره آزمون		
		Fr_1	$\frac{y_t^2}{Py_1}$	$\frac{h}{y_1}$	Fr_1	$\frac{y_t^2}{Py_1}$	$\frac{h}{y_1}$
4.5<Fr<15.5	Min	0	0.00068	0.0005	0.00405	0	0
	Max	0.9827	0.9713	0.9685	1	1	1
	Mean	0.2437	0.0759	0.0645	0.25	0.0801	0.0697
	SD	0.1499	0.1162	0.1126	0.164	0.1388	0.1353
	CV	0.615	1.528	1.745	0.656	1.732	1.941
2.5<Fr<4.5	Min	0	0	0	0.0026	0.0106	0.0038
	Max	1	1	1	0.9448	0.924	0.9187
	Mean	0.4874	0.4624	0.433	0.383	0.3603	0.3287
	SD	0.3537	0.3283	0.3354	0.3333	0.3065	0.3117
	CV	0.7257	0.7099	0.7774	0.8702	0.8506	0.971

هوشمند SVM و ANN مشاهده شد که مدل ANN از دقت بالایی در برآورد ارتفاع آبشار برخوردار بوده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل هوشمند ANN نتایج بسیار نزدیکی را نسبت به رابطه رگرسیونی غیرخطی پیشنهاد شده (MR-3) دارد. شکل ۴ (الف و ب) پراکندگی داده‌ها برای دوره آزمون به ترتیب برای شرایطی که عدد فرود بالاتر و پایین‌تر از $4/5$ است را نشان می‌دهد، که برای هر دو شرایط فوق‌الذکر پراکندگی داده‌های حاصل از مدل ANN(MLP) بر خلاف سایر مدل‌ها در تمام مقادیر عدد بی‌بعد (h/y_1) به خط نیم‌ساز نزدیک‌تر بوده و نتایج دقیق‌تری را ارائه می‌دهد.

برای بررسی عملکرد مدل ANN و SVM از شاخص‌های آماری R^2 ، RMSE و RE% استفاده شده است. در جدول ۴ نتایج شاخص‌های آماری برای مدل‌های هوشمند ANN، SVM با توابع کرنل RBF، Polynomial deg.2 و Polynomial deg.3 و رابطه رگرسیونی غیرخطی پیشنهادی (MR-3)، به ترتیب برای عدد فرود بیش‌تر و کم‌تر از $4/5$ نشان داده شده است. شایان ذکر است که در مدل SVM مقادیر ضرایب C ، ϵ و γ به ترتیب ۱۰، ۰/۱ و ۰/۵۵ منظور شده است. معیارهای آماری نشان می‌دهند SVM با تابع کرنل RBF نسبت به سایر توابع کرنل در مدل SVM یعنی Polynomial deg.2 و Polynomial deg.3 از دقت بالایی برخوردار است. با مقایسه معیارهای آماری مدل‌های

شکل ۵ (الف و ب) مقایسه نتایج مشاهداتی و تخمینی در شرایطی که به ترتیب عدد فرود بزرگتر از $4/5$ و عدد فرود بین $2/5$ تا $4/5$ باشد، برای دوره آزمون با استفاده از مدل ANN(MLP) را نشان می‌دهند. با توجه به شکل ۵ (الف و ب) مشاهده می‌شود که مدل ANN(MLP) نتایج بسیار نزدیکی را نسبت به مقادیر مشاهداتی تخمین می‌کند و از دقت بالایی در برآورد ارتفاع آبشار در پای سرریز برخوردار است.

شکل ۶ (الف و ب) مقایسه نتایج مشاهداتی و برآوردی در شرایطی که به ترتیب عدد فرود بزرگتر از $4/5$ و عدد فرود بین $2/5$ تا $4/5$ باشد، برای دوره آزمون با استفاده از مدل SVM توابع کرنل RBF، Polynomial deg.2 و Polynomial deg.3 را نشان می‌دهند. با دقت در شکل ۶ (الف و ب) می‌توان مشاهده نمود که مدل SVM با تابع کرنل RBF نسبت به سایر توابع کرنل در مدل SVM یعنی Polynomial deg.2 و Polynomial

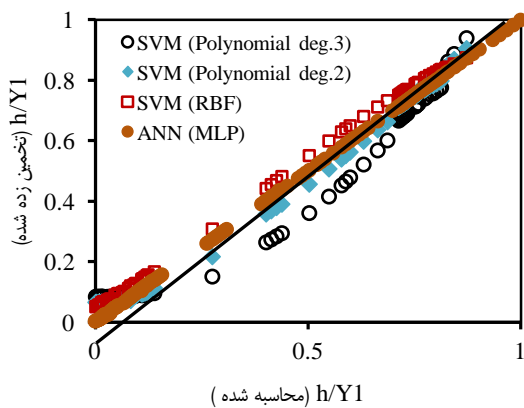
شکل ۵ (الف و ب) مقایسه نتایج مشاهداتی و تخمینی در شرایطی که به ترتیب عدد فرود بزرگتر از $4/5$ و عدد فرود بین $2/5$ تا $4/5$ باشد، برای دوره آزمون با استفاده از مدل ANN(MLP) را نشان می‌دهند. با توجه به شکل ۵ (الف و ب) مشاهده می‌شود که مدل ANN(MLP) نتایج بسیار نزدیکی را نسبت به مقادیر مشاهداتی تخمین می‌کند و از دقت بالایی در برآورد ارتفاع آبشار در پای سرریز برخوردار است.

شکل ۶ (الف و ب) مقایسه نتایج مشاهداتی و برآوردی در شرایطی که به ترتیب عدد فرود بزرگتر از $4/5$ و عدد فرود بین $2/5$ تا $4/5$ باشد، برای دوره آزمون با استفاده از مدل SVM توابع کرنل RBF، Polynomial deg.2 و Polynomial deg.3 را نشان می‌دهند. با دقت در شکل ۶ (الف و ب) می‌توان مشاهده نمود که مدل SVM با تابع کرنل RBF نسبت به سایر توابع کرنل در مدل SVM یعنی Polynomial deg.2 و Polynomial

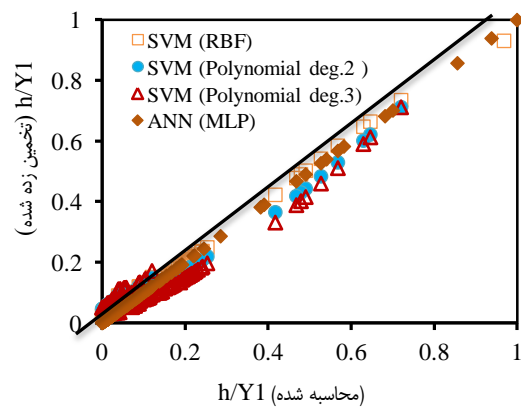
جدول ۴- مقادیر شاخص‌های آماری در دوره آزمون برای مدل‌های هوشمند ANN و SVM و مدل رگرسیونی MR-3

Table 4- Values of statistical indices in the test period for intelligent ANN and SVM models and MR-3 regression model

محدوده عدد فرود		MR-3	ANN (MLP)	SVM (RBF)	SVM (Polynomial deg.2)	SVM (Polynomial deg.3)
		4.5 < Fr < 15.5	RMSE	0.0186	0.00035	0.0179
	RE%	0.539	0.394	20.08	37.96	46.06
	R ²	0.999	0.999	0.995	0.988	0.965
2.5 < Fr < 4.5	RMSE	0.0186	0.00144	0.0374	0.0294	0.0657
	RE%	0.2406	0.02285	8.541	5.593	12.54
	R ²	0.999	0.999	0.998	0.995	0.984



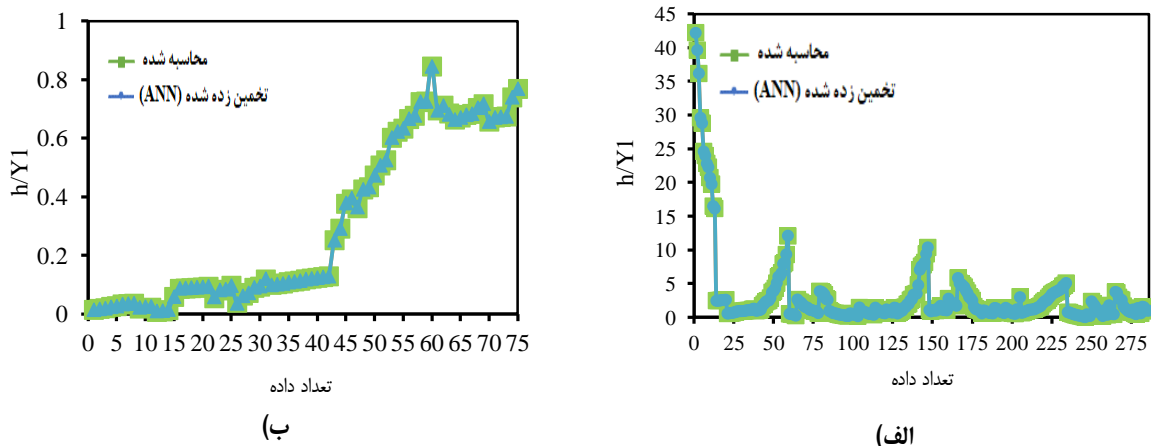
(ب)



(الف)

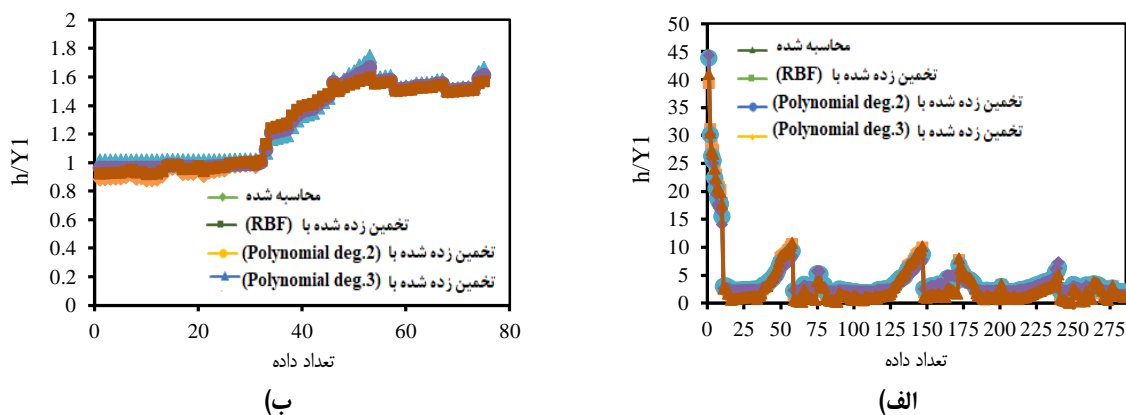
شکل ۴- مقایسه نمودار پراکندگی داده‌ها برای دوره آزمون مدل ANN و SVM (الف): در شرایط $Fr_1 > 4/5$ ، (ب): در شرایط $2/5 < Fr_1 < 4/5$

Figure 4- Comparison of scatter diagrams of ANN and SVM models for the testing period, (a): in conditions $Fr_1 > 4.5$, (b): in conditions $2.5 < Fr_1 < 4.5$



شکل ۵- نمودار مقایسه نتایج محاسباتی و تخمین زده شده برای دوره آزمون با مدل ANN (MLP)، (الف): در شرایط $Fr_1 > 4/5$ ، (ب): در شرایط $2/5 < Fr_1 < 4/5$

Figure 5- Comparison diagram of computational and estimated results of ANN (MLP) model for the testing period, (a): in conditions $Fr_1 > 4.5$, (b): in conditions $2.5 < Fr_1 < 4.5$



شکل ۶- نمودار مقایسه نتایج محاسباتی و تخمین زده شده برای دوره آزمون با مدل SVM، (الف): در شرایط $Fr_1 > 4/5$ ، (ب): در شرایط $2/5 < Fr_1 < 4/5$

Figure 6- Comparison diagram of computational and estimated results of SVM models for the testing period, (a): in conditions $Fr_1 > 4.5$, (b): in conditions $2.5 < Fr_1 < 4.5$

جدول ۵- ارائه مثال عددی برای مقایسه رابطه رگرسیونی پیشنهادی، روش سعی و خطا و روش نموداری

Table 5- Providing a numerical example to compare the proposed regression relationship, trial and error method and graphical method

C	$y_0(m)$	$y_1(m)$	$y_i(m)$	P(m)	Fr_1	P/He	h/y_1 (Trial and error)	h/y_1 (MR-3)	h/y_1 (graph – Beirami (2016))
2.165	9	0.108	4.35	8.25	12.62	11	24.031	24.023	---
1.95	10	0.419	4	8	6.55	4	0.801	0.798	0.78
1.80	10	0.387	4	8	6.81	4	1.243	1.284	1.2
2.1	8	0.518	4	6	5.19	3	0.920	0.909	0.9
2.1	8	0.518	5	6	5.19	3	3.08	3.12	3.04
2	9	0.534	4.6	6.80	5.44	3.09	1.520	1.544	1.5
2	9.98	0.424	3.98	8	6.51	4.04	0.695	0.679	0.65
2	8.5	0.663	4.9	6.04	4.68	2.45	1.366	1.423	1.4
2	9.96	0.418	3.96	8	6.55	4.08	0.725	0.711	0.7
1.85	10	0.397	4	8	6.72	4	1.09	1.12	1.1

۴- نتیجه گیری

۰/۰۱۲۸ و برای مدل ANN به ترتیب ۰/۹۹۹، ۰/۰۲۲ و ۰/۰۱۴ به دست آمد. بنابراین با استفاده از داده‌های اولیه و بدون نیاز به محاسبات سعی و خطا و حتی مراجعه به نمودارهای پیشنهادی، می‌توان به وسیله این رابطه با کمترین نیاز به محاسبات فرعی و با حداکثر خطای ۰/۵ درصدی، ارتفاع آبشار را به صورت مستقیم به دست آورد. علاوه بر مدل ANN، از مدل SVM با توابع کرنل مختلف نیز استفاده شد و مشاهده شد که نتایج رابطه رگرسیونی پیشنهادی (MR-3) همبستگی نزدیکی با مدل ANN (MLP) دارد. بنابراین مدل ANN نسبت به مدل SVM در تخمین مقدار ارتفاع آبشار در جهت تثبیت موقعیت مکانی پرش هیدرولیکی از دقت مناسبی برخوردار است. همچنین نتایج نشان داد که انتخاب تابع کرنل در روش SVM اثر قابل توجهی در عملکرد مدل می‌تواند داشته باشد. در پژوهش حاضر تابع کرنل RBF نسبت به سایر توابع کرنل به کار برده شده عملکرد نسبتاً مطلوب‌تری را نشان داد.

در این پژوهش روشی جدید برای محاسبه ارتفاع آبشار در پای سرریزهای اوجی برای کنترل پرش هیدرولیکی ارائه شد. برای محاسبه ارتفاع آبشار به صورت مستقیم، روابط رگرسیونی غیرخطی چندگانه برای هر یک از محدوده‌های عدد فرود کمتر و بیش‌تر از ۴/۵ ارائه شد که می‌توانند در کارهای مهندسی جهت طراحی سازه مورد نظر مورد استفاده قرار گیرند. علاوه بر آن عملکرد مدل‌های هوشمند ANN و SVM نیز در تخمین ارتفاع آبشار مورد ارزیابی قرار گرفت. مقادیر ضریب همبستگی (R^2)، درصد خطای نسبی (RE%) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) در شرایطی که $Fr_1 < 4/5$ باشد، برای رابطه رگرسیونی غیرخطی پیشنهادی (MR-3) به ترتیب ۰/۹۹۹، ۰/۵۳۹ و ۰/۰۱۸۶ و برای مدل ANN به ترتیب ۰/۹۹۹، ۰/۳۹۴ و ۰/۰۰۳۵ به دست آمد. همچنین در شرایطی که $Fr_1 < 4/5$ باشد، مقدار معیارهای آماری فوق‌الذکر برای رابطه رگرسیونی غیرخطی (MR-3) به ترتیب ۰/۹۹۹، ۰/۲۴۰ و

منابع

غضنفری هاشمی، س.، اعتماد شهیدی، ا. (۱۳۹۱). پیش‌بینی عمق آب شستگی اطراف پایه پل با استفاده از ماشین‌های بردار پشتیبان. *مهندسی عمران مدرس*، ۱۲(۲)، ۲۳-۳۶.

قاسمی، ا.، امید، م.ح.، نصرآبادی، م.، رئیسی استبرق، ع. (۱۳۹۵). بررسی مشخصات پرش هیدرولیکی مستغرق و توسعه‌ی روابطی جدید برای برآورد خصوصیات آن. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۴(۴)، ۷۵۵-۷۶۴.

کیانی، س.، فتحی مقدم، م.، بهروزی راد، ر.، داوودی، ل. (۱۳۹۶). کنترل پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش با دیواره روزه دار. *مهندسی آبیاری و آب ایران*، ۷(۲۸)، ۲۶-۳۶.

مینایی گیگلو، ا.، قدسیان، م.، مهرآیین، م. (۱۳۹۵). بررسی آزمایشگاهی پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با آستانه پلکانی. *مهندسی عمران مدرس*، ۱۶(۱)، ۱۴۶-۱۵۶.

یوسفی، ف.، مظفری، ج.، محسنی موحد، س.ا. (۱۳۹۷). مقایسه آزمایشگاهی مدل‌های پرش هیدرولیکی در رژیم‌های مختلف جریان. *آبیاری و آب ایران*، ۹(۲)، ۱-۱۱.

اسماعیلی، ک.، ابریشمی، ج. (۱۳۹۱). تعیین ارتباط بین عمق‌های قبل و بعد از پرش و ارتفاع پله به منظور کنترل پرش هیدرولیکی روی شیب‌های معکوس. کنفرانس بین‌المللی سازه‌های هیدرولیکی، کرمان، ۶۰۱-۶۱۲.

آصفی، م.، ضیایی، ع.ن. (۱۳۹۰). شبیه‌سازی عددی دو بعدی پرش هیدرولیکی روی سطوح شیب‌دار معکوس همراه با پله در انتها با نرم‌افزار FLUENT. ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

بیرامی، م.ک. (۱۳۹۵). سازه‌های انتقال آب. انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان، چاپ ۱۳، ۴۶۲ ص.

پورعبدالله، ن.، حیدرپور، م.، عابدی کوپایی، ج.، محمدزاده، ج. (۱۳۹۷). مطالعه خصوصیات پرش هیدرولیکی مستغرق روی سطوح زبر و شیب معکوس. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۳(۳)، ۶۸۳-۶۹۳.

دانشفرز، ر.، چابک‌پور، ج.، نظافت، ه. (۱۳۹۸). بررسی آزمایشگاهی آبشستگی ناشی از پرش هیدرولیکی در صفحه مشبک. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵(۵)، ۱۰۳۹-۱۰۵۱.

References

- Abbaspour, A., Hosseinzadeh Dalir, A., Farsadzadeh, D., & Sadraddi, N. (2009). Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics. *Hydro-environmental Research*, 3, 109-117.
- Abrishami, J., & Saneie, M. (1994). Hydraulic jump in adverse basin slope. *International Journal of Water Resources Engineering*, 2(1), 51-63.
- Achour, B., & Debabeche, M. (2003). Control of hydraulic jump by sill in triangular channel. *Journal of Hydraulic Resources*, 41(3), 319-325.
- Arra, N. (2015). Marun Reservoir Dam and power plant. Peyab Sazeh Gostar Co. Archived from <https://archive.is/20150119204215/http://www.peyab.org/maruneng.htm#>, Retrieved 19 January 2015.
- Asafi, M., & Zeyae, A.N. (2011). Two-dimensional numerical simulation of hydraulic jump on inverted sloping surfaces with stairs at bottom with FLUENT software. 6th National Congress of Civil Engineering, Semnan, Iran (in Persian).
- Beirami, M.K. (2016). Water conveyance structure. 13th Edition. Isfahan Technical University Press, 462 Pages (in Persian).
- Boser, B.E., Guyon, I.M., & Vapnik, V.N. (1992). A training algorithm for optimal margin classifiers. Proceedings of the 5th Annual Workshop on

- Computational Learning Theory (COLT'92), Pittsburgh, 144-152.
- Carvalho, R.F., Lemos, C.M., & Ramos, C.M. (2010). Numerical computation of the flow in hydraulic jump stilling basins. *Journal of Hydraulic Research*, 46, 739-752.
- Daneshfaraz, R., Chabokpour, J., & Nezafat, H. (2019a). Experimental investigation of the scouring due to hydraulic jump in screens. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(5), 1039-1051 (in Persian).
- Daneshfaraz, R., Sadeghfam, D., & Hasanniya, V. (2019b). Experimental investigation of energy dissipation the vertical drops equipped with a horizontal screen with the supercritical flow. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(6), 1421-1436 (in Persian).
- Defina, A., Susin, F.M., & Viero, D.P. (2008). Bed friction effects on the stability of a stationary hydraulic jump in a rectangular upward sloping channel. *Physics of Fluids*, 20(3), 036601.
- Esmaily, K., & Abrishami, J. (2002). Determination of relationship between depth before and after jump and step elevation to control hydraulic jump on reverse and steep slopes (positive and negative). Proceedings of the International Conference on Hydraulic Structures, Kerman, Iran Pp. 601-612 (in Persian).
- Gazanfari Hashemy, A., & Shahidi, S. (2012). Prediction of scour depth around bridge pier by support vector machines. *Modares Civil Engineering Journal*, 12(2), 23-36 (in Persian).
- Ghassemi, A., Omid, M., Nasr Abadi, M., & Raeesi Estabragh, A. (2017). Evaluate and develop new relationships to estimate submerged hydraulic jump characteristics. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 47(4), 755-764 (in Persian).
- Gunn, S.R. (1998). Support vector machines for classification and regression. University of Southampton publication, England, 66 pages.
- Habibzadeh, A., Loewen, M., & Rajaratnam, N. (2011). Exploratory study of submerged hydraulic jumps with blocks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(6), 706-710.
- Hsu, E., Kolupaila, S., Jaeger, C., Laushey, L.M., Viparelli, M., Weaver, R.M., Woodward, S.M., & Yates, F.M. (1950). Discussion of control of the hydraulic jump by sills. Ed. by J. W. Forster and R. A. Skrinde. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 115(1), 988-991.
- Kiani, S., Fathi-Moghadam, M., Behroozi-Rad, R., & Davoodi, L. (2017). Control of hydraulic jump in the stilling basins with perforated sill. *Irrigation and Water Engineering*, 7(4), 26-36 (in Persian).
- Norouzi, R., Daneshfaraz, R., & Ghaderi, A. (2019). Investigation of discharge coefficient of trapezoidal labyrinth weirs using artificial neural networks and support vector machines. *Applied Water Science*, 9(7), 148.
- McCorquodale, J.A., & Mohamad, M.S. (1994). Hydraulic jump on adverse slopes. *Journal of Hydraulic Research*, 32(1), 119-130.
- Minaei, A., Ghodsian, M., & Mehraein, M. (2016). Experimental investigation of hydraulic jump in stilling basin with stepped sill. *Modares Civil Engineering Journal*, 16(1) 146-156 (in Persian).
- Parsamehr, P., Farsadizadeh, D., Hosseinzadeh Dalir, A., Abbaspour, A., & Nasr Esfahani, M.J. (2017). Characteristics of hydraulic jump on rough bed with adverse slope. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 23(3), 301-307.
- Pourabdollah, N., Heidarpour, M., Abedi Koupai, J., & Mohamadzadeh, J. (2018). Study of characteristics of submerged hydraulic jump on bed roughness and adverse slopes. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49(3) 683-693 (in Persian).
- Pourabdollah, N., Honar, T., & Fatahi, R.A. (2014). The influence of roughness in adverse bed slopes on conjugate depth and energy losses of hydraulic jump. *Journal of Water and Soil Science*, 18(67), 165-174.
- Rajaratnam, N. (1976). Hydraulic jumps: Advances in Hydrosience. ACADEMIC Press, 4, 84 pages.
- Salmasi, F. (2018). Effect of downstream apron elevation and downstream submergence in discharge coefficient of Ogee weir. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 10.1080/09715010.2018.1556125.
- Salmasi, F., Nouri, M., Sihag, P., & Abraham, J. (2021). Application of SVM, ANN, GRNN, RF, GP and RT models for predicting discharge coefficients of oblique sluice gates using experimental data. *Water Supply*, 21(1), 232-248.
- Yousefi, F., Mozaffari, J., & Mohseni Movahed, S. (2019). Laboratory comparison of hydraulic jump models in different flow regimes. *Irrigation and Water Engineering*, 9(2), 1-11 (in Persian).