

Estimation of the Scouring Depth of the Plunge Pool of the Symmetrical Crossing Jets by Support Vector Machine

M. Bagherzadeh¹, M.A. Mohammadi^{2*}

1, 2- PhD Student and Associate Professor, Civil Engineering, Water and Hydraulic Structures, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran.

*(Corresponding Author Email: m.mohammadi@urmia.ac.ir)

Received: 16-06-2022

Revised: 13-08-2022

Accepted: 03-09-2022

Available Online: 11-03-2023

تخمین عمق آبشستگی حوضچه استغراق جت‌های متقاطع متقارن به روش ماشین بردار پشتیبان

محمد باقرزاده^۱، میرعلی محمدی^{۲*}

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی دکتری و دانشیار مهندسی عمران-آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه ارومیه، ایران.

*(نویسنده مسئول، E-Mail: m.mohammadi@urmia.ac.ir)

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۵/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۲۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۲/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۲

Abstract

At the downstream end of the large dam spillways, the plunge pool is used for energy dissipation due to the flow. This type of structure has a scouring hole downstream of the dam, which needs to be explored for the issue. The present research work aimed to examine the performance of the support vector machine (SVM) method as one of the familiar soft computing techniques used for estimating the scouring depth of symmetrical crossing jets of a plunge pool. Firstly, an appropriate percentage run and Kernel of the SVM were determined by using laboratory data. Then, the parameters involved the scouring depth including Dencimetric Froude Number, Tailwater Depth, vertical jet angle, angle of the impact point of the jet, and the relative distance between of impact of the jet up to the water surface (Fr_{d90} , T_w , α_v , α_c , δ), were divided into different models and the runs were performed. Numerical values of the evaluation criteria as R, RMSE, and NRMSE related to the test stage results for the best model to estimate the scouring depth were found as 0.9563, 0.688 and 18.47%, respectively. The results of this model confirm the acceptable performance of the SVM for estimating the scouring depth studied in present work. To find a best model, the results of sensitivity analysis reveals that the parameters T_w and α_v have the highest and lowest effects on the accuracy amount of estimation for scouring depth, respectively.

Keywords: Scouring, Dencimetric Froude Number, Tailwater Depth, Soft Computing.

چکیده

در پایین‌دست سرریز سدهای بلند به منظور افزایش میزان استهلاك انرژی جریان از حوضچه‌های استغراق استفاده می‌شود. این نوع سازه‌ها یک گودال آبشستگی در پایین‌دست سد بوده که به بررسی مسئله آبشستگی نیازمند است. تحقیق حاضر با هدف بررسی عملکرد روش ماشین بردار پشتیبان (SVM) به عنوان یکی از تکنیک‌های شناخته شده محاسبات نرم که در برآورد عمق آبشستگی حوضچه استغراق برآمده از جت‌های متقاطع متقارن به کار برده می‌شود. در ابتدا با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی به تعیین درصد اجرا و کرنل مناسب روش SVM پرداخته شد. سپس پارامترهای کارآ در عمق آبشستگی دربرگیرنده عدد فرود دنسیمتریک، عمق نسبی پایاب، زاویه قائم جت، زاویه برخورد جت و فاصله نسبی محل برخورد جت تا سطح آب (Fr_{d90} , T_w , α_v , α_c , δ), به مدل‌های مختلف تقسیم‌بندی و اجرا شدند. مقادیر عددی معیارهای ارزیابی R، RMSE و NRMSE مربوط به نتایج مرحله آزمون برای مدل برتر در برآورد عمق آبشستگی به ترتیب برابر ۰/۹۵۶۳، ۰/۶۸۸ و ۱۸/۴۷٪ به دست آمد. نتایج خروجی از این مدل، عملکرد قابل قبول SVM در برآورد عمق آبشستگی این پژوهش را می‌پذیرد. همچنین نتایج آنالیز حساسیت بر روی مدل برتر در تحقیق حاضر نیز آشکار نمود که پارامترهای T_w و α_v به ترتیب بیشترین و کمترین کارایی در میزان درستی پیش‌بینی عمق آبشستگی را دارند.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی، استهلاك انرژی، عدد فرود دنسیمتریک، عمق پایاب، محاسبات نرم.

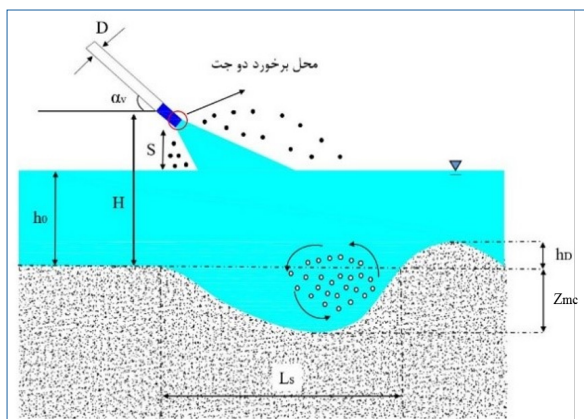
با وجود مطالعات گسترده آزمایشگاهی در زمینه آبشستگی، پژوهشگران در دهه اخیر گرایش بیشتری به استفاده از روش‌های محاسبات نرم در پیش‌بینی و شبیه‌سازی رفتار سازه‌های هیدرولیکی نشان دادند. در سالیان گذشته به‌کارگیری روش‌های محاسبات نرم در زمینه علم هیدرولیک به دلیل دقت بالا و صرف زمان کمتر نسبت به روش‌های کلاسیک گسترده شده است. شبیه‌سازی عددی مراحل آبشستگی در يك حوضچه استخرق با بستر سست و مصالح یکنواخت در اثر يك جریان دو بعدی نشان داد، نتایج به‌دست آمده از مدل عددی هم‌خوانی خوبی با نتایج به‌دست آمده از اندازه‌گیری واقعی دارد (Jia و همکاران، ۲۰۰۱). سنجش دقت شبکه‌های عصبی مصنوعی چند لایه با الگوریتم گرادیان نزولی خطا برای برآورد عمق آبشستگی اطراف پایه های پل نشان داد، نتایج خروجی به مقادیر واقعی نزدیک است و در مقایسه با روابط تجربی دقت بالایی دارد (Lee و همکاران، ۲۰۰۷). استفاده از داده‌های میدانی جهت برآورد آبشستگی موضعی اطراف پایه پل با روش‌های SVR و MLP نشان داد که روش SVR نسبت به روش MLP و روابط تجربی خطای کمی دارد (Pal و همکاران، ۲۰۱۱). همچنین نتایج بررسی عددی حوضچه استخرق با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D نیز آشکار ساخت که در حوضچه‌های استخرق برای رسیدن به شرایط پایدار عمق آبشستگی، زاویه قرارگیری جت کلیدی‌ترین پارامتر به‌شمار می‌رود (Epely-Chauvin و همکاران، ۲۰۱۴). پیش‌بینی میزان بار انتقالی بستر به روش ماشین بردار پشتیبان (SVM) نیز مشخص نمود، این روش در برابر روابط تجربی موجود در این زمینه کارایی خوبی دارد (Koosheh و Roushangar، ۲۰۱۵). استفاده از مدل اویلری اصلاح شده برای بررسی آبشستگی جت قائم روی رسوبات غیرچسبنده نیز نشان داد هم‌خوانی خوبی بین داده‌های عددی و آزمایشگاهی وجود داشته و مدل اویلری اصلاح شده، آبشستگی ایجاد شده توسط جت را به‌صورت دقیق و مؤثر شبیه‌سازی می‌کند (Yan و همکاران، ۲۰۲۰). با شبیه‌سازی عمق آبشستگی پایه‌های پل با هندسه‌های متفاوت بر پایه داده‌های واقعی با سه روش برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)، SVM و مدل رگرسیون غیرخطی معلوم شد SVM با دو روش دیگر، پیش‌بینی بهتر و کارایی مناسبی در برآورد عمق آبشستگی دارد (Majedi Asl و همکاران، ۲۰۲۰). همچنین به‌کارگیری روش SVM برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی شیب‌شکن قائم مجهز به صفحه‌های مشبک افقی دوگانه و صفحه‌های مشبک با قطرهای متفاوت نشان داد، SVM می‌تواند به خوبی پارامترهای جریان را پیش‌بینی نماید (Daneshfaraz و همکاران، ۲۰۲۱a,b). همچنین در پژوهشی دیگر (Daneshfaraz و همکاران، ۲۰۲۱c) کاربرد SVM در پیش‌بینی استهلاک نسبی انرژی در کانال غیرمنشوری با بستر زبر با المان‌های ذورنقه‌ای

موضوع آبشستگی در پایین‌دست سدهای بلند همواره از موضوعات چالش برانگیز در مهندسی سازه‌های هیدرولیکی است. در پایین دست سرریز سدهای بلند یکی از راهکارهای متداول جهت کنترل آبشستگی، مستهلک نمودن انرژی جریان خروجی با استفاده از حوضچه استخرق ناشی از جت‌های متقاطع متقارن می‌باشد. این حوضچه‌ها در مناطقی که مصالح و سنگ بستر در پایین دست سازه مناسب باشد به‌گونه‌ای که آبشستگی ایجاد شده شالوده سد را در معرض خطر قرار ندهد، به‌کار می‌رود (Bollaert، ۲۰۰۲). آشفستگی ایجاد شده در این حوضچه سبب استهلاک انرژی می‌شود و عواملی مانند شرایط محیطی، ارتفاع و ضخامت جت ریزشی بر اندازه انرژی وارد شده از سوی آب خروجی بر حوضچه کارا هستند. پارامترهایی مانند عدد فرود دنسی‌متریک و شکل جت ریزشی به‌ترتیب بیشترین و کمترین کارایی را در آبشستگی حوضچه استخرق برآمده از جت منفرد دارند (Pagliara و همکاران، ۲۰۰۶). از سویی دیگر با افزایش زاویه قرارگیری نازل جت، شکل چاله آبشستگی در این حوضچه حلقوی شده و با کاهش آن شکل چاله بیضوی می‌شود (Pagliara و Palermo، ۲۰۰۸). بررسی‌ها بر روی آبشستگی حوضچه استخرق برآمده از جت‌های متقاطع متقارن با زاویه قائم ثابت ۴۵ درجه نشان داد در عمق پایاب کم، جت‌های متقاطع در برابر جت منفرد عمق آبشستگی بیشتری ایجاد می‌کند (Pagliara و همکاران، ۲۰۱۱a). همچنین در پژوهشی دیگر که بر روی آبشستگی حوضچه استخرق برآمده از برخورد دو جت متقاطع قائم انجام شد، پیدا شد که ابعاد چاله آبشستگی متاثر از پارامترهای عدد فرود دنسی‌متریک، عمق پایاب، زوایای عمودی جت‌ها و فاصله نقطه تقاطع جت‌ها تا سطح آب است (Pagliara و همکاران، ۲۰۱۲). بررسی آبشستگی حوضچه استخرق برآمده از جت آزاد منفرد روی بستر رسوبی غیرچسبنده نشان داد، اگر ضخامت لایه بستر رسوبی کم باشد، عمق نفوذ حباب‌های هوا کم می‌شود، زیرا کف کانال نفوذناپذیر بوده و از نفوذ بیشتر حباب‌های هوا جلوگیری می‌کند. بنابراین با کاهش ضخامت لایه رسوبی، حداکثر عمق آبشستگی کاهش می‌یابد (Taştan و همکاران، ۲۰۱۶). بررسی تغییرات شکل بستر حوضچه استخرق برآمده از برخورد جت قائم با رسوبات غیرچسبنده نشان داد، عمق دینامیک چاله آبشستگی با افزایش ارتفاع جت کاهش می‌یابد و ابعاد حفره آبشستگی با عدد فرود جت رابطه مستقیم دارد (Armaghani و همکاران، ۲۰۱۷). از سویی دیگر افزایش عدد فرود دنسی‌متریک و کاهش عمق پایاب سبب گسترش عمق آبشستگی و چاله ایجاد شده در پایین دست جام پرتابی سرریز اوجی روی بستر رسوبی غیرچسبنده می‌شود (Khalifehei و همکاران، ۲۰۲۰).

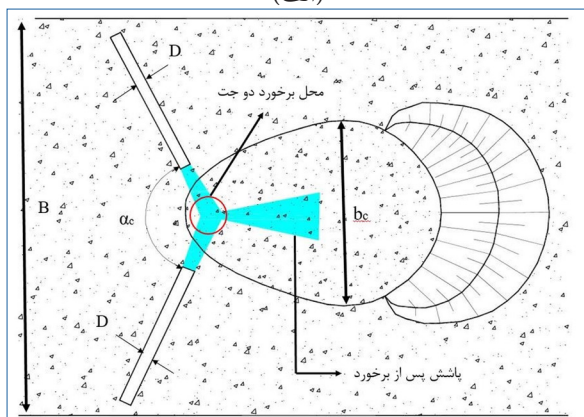
مواد و روش‌ها

• آنالیز ابعادی

از آنالیز ابعادی برای استخراج روابط حاکم بر زمینه پژوهش استفاده شد. به این منظور براساس شکل (۱) متغیرهای موثر بر موضوع آبشستگی حوضچه استخرق برآمده از جت‌های متقاطع متقارن به صورت رابطه (۱) می‌باشد.



(الف)



(ب)

شکل ۱- شمایی از مدل آزمایشگاهی: الف) نمای جانبی، ب) نما از بالا

$$z_{mc} = f_1(D_{eq}, V, \alpha_c, \alpha_v, S, h_0, g^*, d_{90}) \quad (1)$$

با استفاده از قضیه پی-باکینگهام و پس از ساده‌سازی، رابطه (۱) به صورت روابط (۲) و (۳) بیان می‌شود:

$$z_{mc}/D_{eq} = f_2(Fr_{d90} = V/\sqrt{g^*d_{90}}, \alpha_c, \alpha_v, \delta = S/D_{eq}, T_w = h_0/D_{eq}) \quad (2)$$

$$z_{mc} = f_3(Fr_{d90}, \alpha_c, \alpha_v, \delta, T_w) \quad (3)$$

در رابطه (۳)، z_{mc} ، Fr_{d90} ، δ و T_w به ترتیب حداکثر عمق آبشستگی بی‌بعد، عدد فرود دنیسمتريک، فاصله نسبی محل برخورد جت تا سطح آب و عمق نسبی پایاب می‌باشند. محدوده این پارامترهای بی‌بعد مستقل در جدول (۱) نشان داده شده است.

را بررسی کردند. این پژوهشگران استهلاك انرژی در بستر زبر را در دو سناریوی متفاوت که وابسته به ارتفاع زبری بود، برآورد کردند. نتایج به دست آمده نشان داد در هر دو سناریو هنگام استفاده از همه پارامترهای مستقل بهترین پیش‌بینی رخ داد و سناریوی دوم با ارتفاع زبری بیشتر نسبت به سناریوی اول، نتایج نزدیکی به داده‌های آزمایشگاهی داشته است. همچنین براساس آنالیز حساسیت انجام گرفته نشان دادند پارامتر مستقل ارتفاع نسبی زبری H/y_1 کارآترین پارامتر برای پیش‌بینی استهلاك نسبی انرژی در کانال غیرممنشوری با بستر زبر می‌باشد. Dasineh و همکاران (۲۰۲۱) پرش‌های هیدرولیکی روی بستر زبر مثلثی شکل با استفاده از روش‌های مدل سازی عددی و محاسبات نرم را پیش‌بینی کردند. بخش شبیه‌سازی در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D انجام شد و همچنین با استفاده از روش‌های RF، SVM و GEP دقت نتایج مدل‌سازی عددی بررسی و مقایسه شد. نتایج نشان داد میانگین کلی خطای نسبی میان نتایج خروجی از FLOW-3D و نتایج تجربی ۴/۱ درصد است و از میان روش‌های هوش مصنوعی به کارگیری شده در این پژوهش، مدل SVM توانایی بالایی در مقایسه دیگر روش‌ها در هم‌خوانی نتایج با مدل عددی را دارد. شبیه‌سازی عددی و کاربرد محاسبات نرم در تخمین استهلاك انرژی شیب‌شکن قائم با لبه دندانه‌ای افقی به دست Bagherzadeh و همکاران (۲۰۲۲) انجام شد، در این پژوهش ابتدا با نرم‌افزار FLOW-3D و با دندانه‌دار کردن لبه شیب‌شکن، استهلاك انرژی جریان پایین دست آن بررسی شد. سپس با استفاده از روش‌های ANN، SVM و GEP اندازه دقت مدل عددی و مقایسه نتایج بررسی شد. نتایج نشان داد از بین پارامترهای مورد بررسی، افزایش ابعاد لبه‌ها سبب افزایش استهلاك انرژی می‌شود. نتایج پیش‌بینی استهلاك انرژی با استفاده از روش‌های ANN، SVM و GEP نشان داد با اینکه هر سه مدل دقت مناسبی برای تخمین استهلاك انرژی دارند، اما دقت روش ANN با مقادیر $RMSE = 0.0125$ و $R^2 = 0.9805$ برای حالت تست در مقایسه با دو روش دیگر بیشتر است.

براساس پژوهش‌های گذشته مشاهده شد، یکی از مهمترین موضوعات پژوهشی در علم هیدرولیک مربوط به برآورد عمق آبشستگی پایین دست سازه‌های هیدرولیکی همانند حوضچه استخرق سدهای بلند می‌باشد. با وجود مطالعات آزمایشگاهی گسترده در زمینه حوضچه استخرق جت‌های منفرد، مطالعات انجام شده حوضچه استخرق جت‌های متقاطع متقارن بسیار کم بوده و تاکنون استفاده از روش‌های محاسبات نرم نیز مورد توجه قرار نگرفته است. بنابراین این پژوهش برآورد و توانایی روش ماشین بردار پشتیبان در پیش‌بینی عمق آبشستگی حوضچه استخرق برآمده از جت‌های متقاطع متقارن براساس داده‌های آزمایشگاهی پژوهش Pagliara و همکاران (۲۰۱۱b) را بررسی نموده است.

جدول ۱- محدوده پارامترهای مستقل بی بعد

عنوان پارامتر	محدوده تغییر	
	حداقل	حداکثر
زاویه قائم جت ها	۴۵	۸۵
زاویه برخورد جت ها	۳۰	۱۲۰
عمق نسبی پایاب	۰/۷	۷/۱
عدد فرود دنسی متریک	۶/۸۹	۱۴/۸۷
فاصله نسبی محل برخورد جت تا سطح آب	۰	۷

• مشخصات آزمایشگاهی

در این پژوهش داده‌های مورد نیاز از پژوهش آزمایشگاهی Pagliara و همکاران (۲۰۱۱b) تهیه شد. آزمایش‌های این پژوهشگران در یک فلوم آزمایشگاهی به طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۶، ۰/۸ و ۰/۹ متر انجام شد. در پژوهش این پژوهشگران از دو لوله به قطر $D = 0.022$ سانتی‌متر برای ساخت نازل جت استفاده شد و دبی به صورت مساوی در دو نازل جت، جریان پیدا می‌کند. از دبی سنج الکترومغناطیسی ASA-MAG با دقت اندازه‌گیری ۰/۵ درصد برای اندازه‌گیری دبی استفاده شد. ذرات رسوبی به قطر (d_{90}) ۱۰/۲۶ میلی‌متر با ضریب یکنواختی ۱/۱۷ در نظر گرفته شده است. همچنین از یک دریچه در پایین دست فلوم آزمایشگاهی برای ایجاد عمق پایاب استفاده شد. در مجموع از ۱۱۹ سری داده آزمایشگاهی این پژوهش، برای بررسی عملکرد ماشین بردار پشتیبان (SVM) در پیش‌بینی عمق آبستگی استفاده شد.

• ماشین بردار پشتیبان (SVM)

ماشین‌های بردار پشتیبان مثل شبکه‌های عصبی مصنوعی، یک نوع الگوریتم داده محوری می‌باشد. این روش دسته‌ای از روش‌های یادگیری با ناظر هستند که برای مسائل طبقه‌بندی، رگرسیون، پیش‌بینی و سایر مسائلی که در این زمینه قرار می‌گیرند، به کار می‌رود. الگوریتم SVM یک نوع الگوریتم داده‌کاوی است که کاربردهای مختلفی همچون دسته‌بندی و پیش‌بینی داده‌ها دارد. مبنای کار SVM دسته‌بندی خطی داده‌ها می‌باشد و سعی بر این است که در تقسیم خطی داده‌ها، خطی انتخاب شود که حاشیه اطمینان بالایی دارد. در این الگوریتم داده‌های ورودی به دو مرحله آموزش (Train) و آزمون (Test) تقسیم می‌شود. ماشین‌های بردار پشتیبان بر خلاف دیگر روش‌های هوش مصنوعی به جای اینکه خطای محاسباتی را کاهش دهد، ریسک عملیاتی را به عنوان تابع هدف قرار داده و مقدار بهینه آن را به دست می‌آورد، بنابراین مدل SVM رگرسیونی توانایی این را دارد که مسئله را توسط ترنند کرنل به فضای با ابعاد بیشتر برد (Roushangar و

همکاران، ۲۰۱۸). در ماشین بردار پشتیبان انواع مختلف تابع کرنل وجود دارد که باتوجه به طبیعت مسئله هر یک کاربرد خاصی دارند (جدول ۲).

جدول ۲- انواع مختلف توابع کرنل (Roushangar و همکاران، ۲۰۱۸)

Function	Expression
Linear	$K(x_p, x_j) = (x_p, x_j)$
Polynomial	$K(x_p, x_j) = ((x_p, x_j) + 1)^d$
Radial basis function	$K(x_p, x_j) = \exp(-\ x_i - x_j\ ^2 / 2\sigma^2)$
Sigmoid	$K(x_p, x_j) = \tanh(-a(x_p, x_j) + c)$

پارامترهای به دست آمده از آنالیز ابعادی براساس جدول (۳) به صورت مدل‌های مختلف به ماشین بردار پشتیبان معرفی شدند.

جدول ۳- مدل‌های پژوهش

Model	Input parameters
Model 1	Fr_{d90}, T_w
Model 2	Fr_{d90}, T_w, α_v
Model 3	Fr_{d90}, T_w, α_c
Model 4	Fr_{d90}, T_w, δ
Model 5	$Fr_{d90}, T_w, \alpha_v, \alpha_c$
Model 6	$Fr_{d90}, T_w, \alpha_v, \delta$
Model 7	$Fr_{d90}, T_w, \alpha_c, \delta$
Model 8	$Fr_{d90}, T_w, \alpha_v, \alpha_c, \delta$

برای کار با روش SVM ابتدا داده‌های آزمایشگاهی براساس آنالیز ابعادی به صورت پارامتر وابسته و مستقل به محیط نرم‌افزار Statistica-10 معرفی شد. سپس به تعیین درصد مرحله آموزش و آزمون و انتخاب نوع کرنل ماشین بردار پشتیبان پرداخته شد. در این مرحله مدل شماره ۸ برای وجود همه پارامترهای مستقل در برآورد عمق آبستگی انتخاب شد. نتایج تعیین درصدهای مختلف و انواع کرنل در ماشین بردار پشتیبان برای مدل شماره ۸ در جداول (۴) و (۵) نشان داده شده است. براساس جدول (۴) مشخص شد بهترین پیش‌بینی برای مدل شماره ۸ زمانی پیش می‌آید که ۸۰ درصد داده‌ها آموزش داده می‌شود و ۲۰ درصد داده‌ها برای آزمون باقی می‌ماند.

همچنین براساس معیارهای ارزیابی، از میان کرنل‌های متفاوت موجود در نرم‌افزار تابع کرنل RBF به عنوان کرنل مورد استفاده در این پژوهش انتخاب شد.

جدول ۴- نتایج تعیین درصد Run

۸۰-۲۰	۷۵-۲۵	۷۰-۳۰	۶۵-۳۵	۶۰-۴۰	(%) Sampling
Evaluation criteria					
۰/۹۵۳	۰/۹۲۲	۰/۸۸۴	۰/۸۷۰	۰/۸۶۷	R (Test)
۰/۷۳	۰/۹۸	۱/۰۲	۱/۱۳	۱/۱۵	RMSE (Test)

جدول ۵- نتایج برای تعیین نوع کرنل

Sigmoid	RBF	Polynomial	Linear	Kernel Function
Evaluation criteria				
۰/۸۵۰	۰/۹۵۳	۰/۸۴۵	۰/۸۵۹	R (Test)
۱/۱۱	۰/۷۳	۱/۱۶	۱/۰۷	RMSE (Test)

نتایج و بحث

در این پژوهش برای پیش‌بینی عمق آبشستگی حوضچه استخرق برآمده از جت‌های متقاطع متقارن از روش ماشین بردار پشتیبان استفاده شد. ابتدا برای رسیدن به نتایج دقیق و بهتر به پیش‌پردازش داده‌ها (Preprocessing) جهت تعیین درصد مناسب برای مراحل آموزش و آزمون پرداخته شد. نتایج حاصل نشان داد نتایج نزدیک به داده‌های آزمایشگاهی هنگامی به دست می‌آید که ۸۰ درصد داده‌ها آموزش داده شوند و ۲۰ درصد داده‌ها برای آزمون باقی بماند (جدول ۴). پس از آن براساس نتایج کرنل RBF به‌عنوان کرنل مناسب برای روش SVM در نظر گرفته شد (جدول ۵). براساس آنالیز ابعادی انجام شده، عمق آبشستگی به پارامترهای F_{d90} , T_w , α_v , α_c , δ بستگی دارد. این پارامترها براساس جدول (۳) به مدل‌های مختلفی تقسیم شدند. نتایج کلی همه مدل‌های این پژوهش در جدول (۶) نشان داده شده است. برای رسیدن به پیش‌بینی نزدیک به واقعیت، روند آموزشی مدل‌ها چندین بار تکرار شد تا حداقل خطا در حین مراحل برآورد حاصل شود. معیار انتخاب بهترین مدل در این پژوهش مدلی می‌باشد که از دیدگاه آماری ضریب همبستگی میان داده‌های آزمایشگاهی و برآورد شده R بالایی داشته باشد و مقادیر RMSE و NRMSE کمتری در مقایسه با سایر مدل‌ها دارد.

• معیارهای ارزیابی

برای بررسی و ارزیابی دقت مدل‌ها در این پژوهش از معیارهای ارزیابی R ضریب همبستگی بین مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر پیش‌بینی شده، RMSE جذر میانگین مربعات خطاها و NRMSE جذر میانگین مربعات خطاهای نرمال‌سازی شده استفاده شد (روابط ۶، ۷ و ۸). در روابط ذیل، X_{Exp} شناساننده مقادیر داده‌های آزمایشگاهی، \bar{X}_{Exp} میانگین داده‌های آزمایشگاهی، X_{Pre} مقادیر داده‌های پیش‌بینی شده توسط ماشین بردار پشتیبان، \bar{X}_{Pre} میانگین داده‌های پیش‌بینی شده و n تعداد کل داده‌ها می‌باشد (Daneshfaraz و همکاران، ۲۰۲۱d).

$$R = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (X_{Exp} - \bar{X}_{Exp})(X_{Pre} - \bar{X}_{Pre})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{Exp} - \bar{X}_{Exp})^2 \sum_{i=1}^n (X_{Pre} - \bar{X}_{Pre})^2}} \right) \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{Exp} - X_{Pre})^2} \quad (7)$$

$$NRMSE(\%) = \frac{RMSE}{\sum_{i=1}^n X_{Exp}} \times 100 \quad (8)$$

جدول ۶- نتایج پیش‌بینی عمق آبشستگی برای مدل‌های مختلف

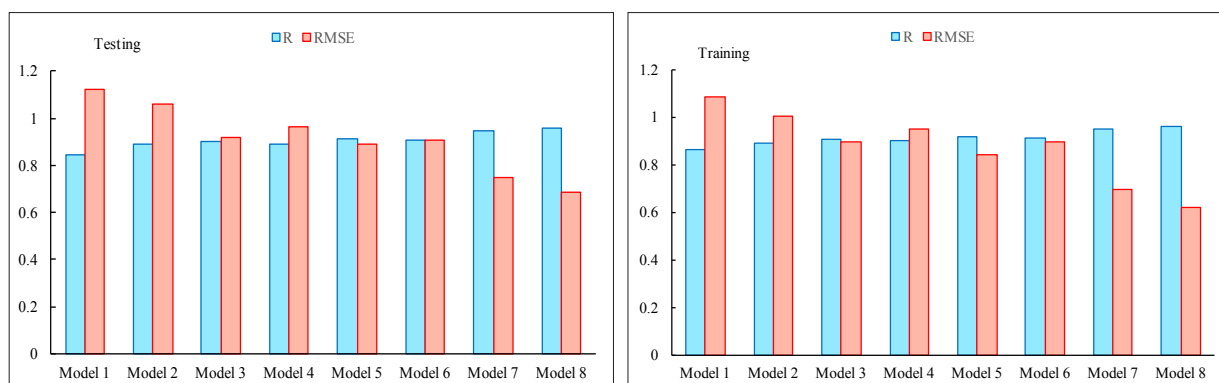
Model	Training			Testing		
	R	RMSE	NRMSE (%)	R	RMSE	NRMSE (%)
Model 1	۰/۸۶۱۵	۱/۰۸۷	۲۷/۸۶	۰/۸۴۵۰	۱/۱۲۲	۳۰/۱۳
Model 2	۰/۸۹۰۷	۱/۰۰۳	۲۵/۷۱	۰/۸۸۷۹	۱/۰۵۹	۲۸/۴۱
Model 3	۰/۹۰۸۰	۰/۸۹۴	۲۲/۹۲	۰/۹۰۰۲	۰/۹۱۷	۲۴/۶۰
Model 4	۰/۹۰۱۶	۰/۹۴۸	۲۴/۳۲	۰/۸۹۰۱	۰/۹۶۵	۲۵/۹۲
Model 5	۰/۹۱۹۹	۰/۸۴۳	۲۱/۶۲	۰/۹۱۱۷	۰/۸۹۲	۲۳/۹۳
Model 6	۰/۹۱۴۶	۰/۸۹۶	۲۲/۹۷	۰/۹۰۷۳	۰/۹۰۵	۲۴/۲۹
Model 7	۰/۹۴۸۹	۰/۶۹۸	۱۷/۹۰	۰/۹۴۴۸	۰/۷۴۶	۲۰/۰۳
Model 8	۰/۹۵۸۷	۰/۶۲۲	۱۵/۹۶	۰/۹۵۶۳	۰/۶۸۸	۱۸/۴۷

جدول (۶) نشان می‌دهد مشخص است که مقادیر ضریب همبستگی مرحله آموزش همواره بیشتر از مرحله آزمون هست و خطای مرحله آموزش به مراتب کمتر از مرحله آزمون است. این نتیجه نشان می‌دهد آموزش شبکه ماشین بردار پشتیبان در زمان پیش‌بینی دچار هیچ خطایی نشده است و مدل‌های شماره ۸ و ۷ به ترتیب کمترین خطا را در پیش‌بینی عمق آبشستگی دارند.

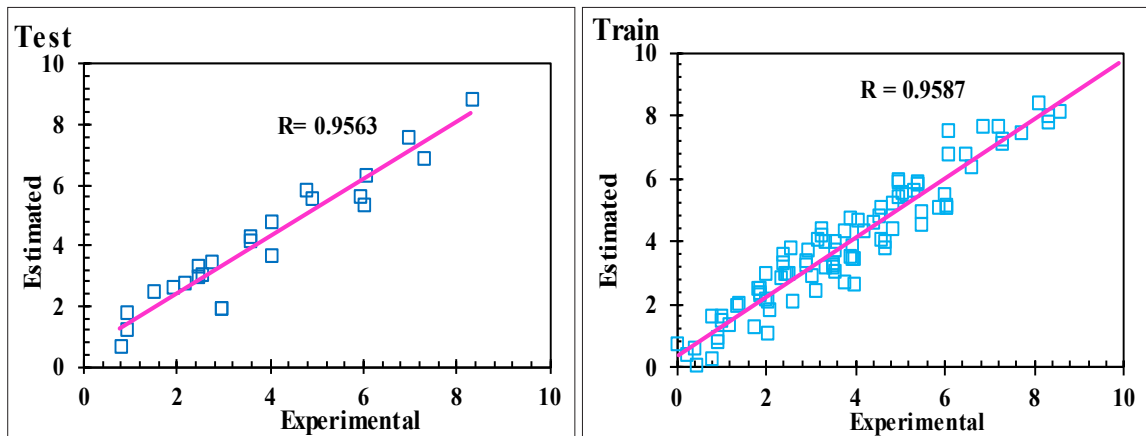
نمودار پراکنش میان مقادیر آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده عمق آبشستگی حوضچه استخرق ناشی از جت‌های متقاطع متقارن با استفاده از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان برای مدل برتر در شکل (۳) نشان داده شده است. براساس نتایج به‌دست آمده مشاهده می‌شود برای هر دو مرحله آموزش و آزمون، داده‌های برآورد شده برای عمق آبشستگی برابری و همپوشانی خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.

با بررسی نتایج جدول (۶) مشخص می‌شود مدل شماره ۸ از دیدگاه معیارهای ارزیابی، نتایج مناسب‌تری نسبت به دیگر مدل‌ها دارد. در مدل شماره ۸ شبیه‌سازی برای همه متغیرهای کارآ در عمق آبشستگی و با ترکیب انجام شد. نتایج این مدل برای مرحله آموزش $R=0/9587$ ، $RMSE=0/622$ و $NRMSE=15/96\%$ و مقادیر ارزیابی برای مرحله آزمون $R=0/9563$ ، $RMSE=0/688$ و $NRMSE=18/47\%$ می‌باشد. بنابراین نتایج به‌دست آمده از SVM نشان می‌دهد از میان مدل‌های این پژوهش، مدل شماره ۸ معرف مدل برتر این پژوهش است.

شکل (۲) به‌صورت گرافیکی نتایج ضریب همبستگی بین مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر پیش‌بینی شده (R) و جذر میانگین مربعات خطاها (RMSE) برای همه مدل‌های این پژوهش در دو مرحله آموزش و آزمون را نشان می‌دهد.



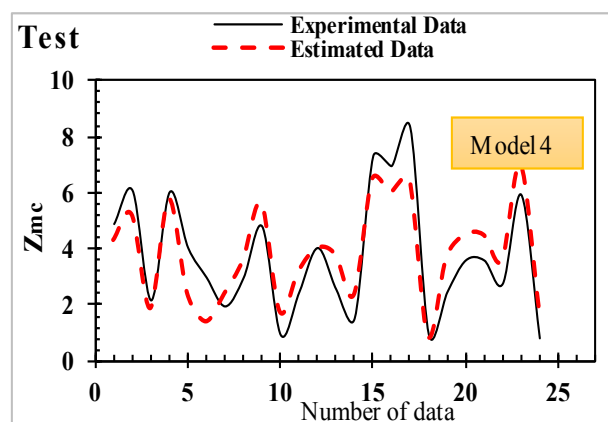
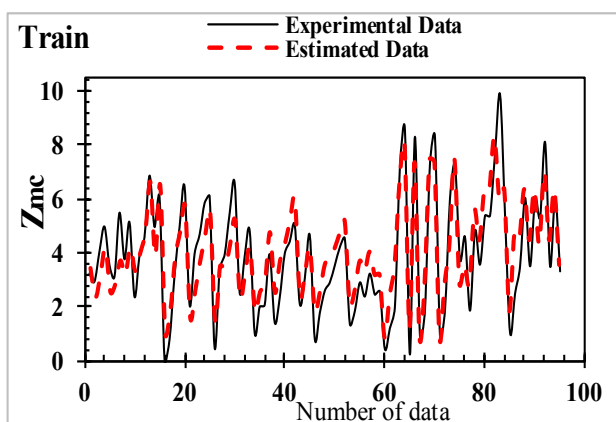
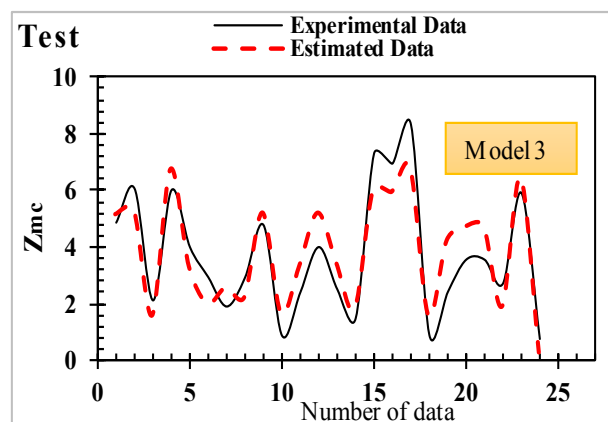
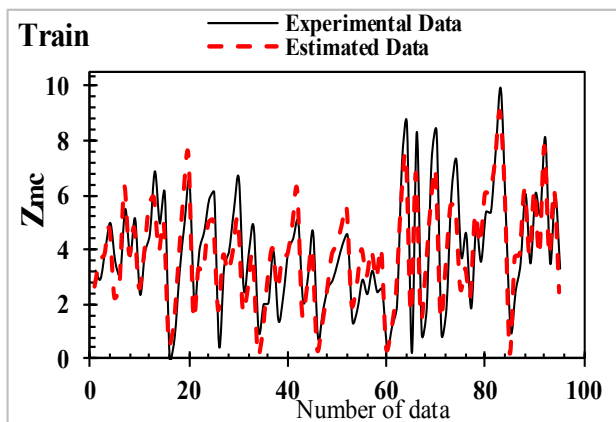
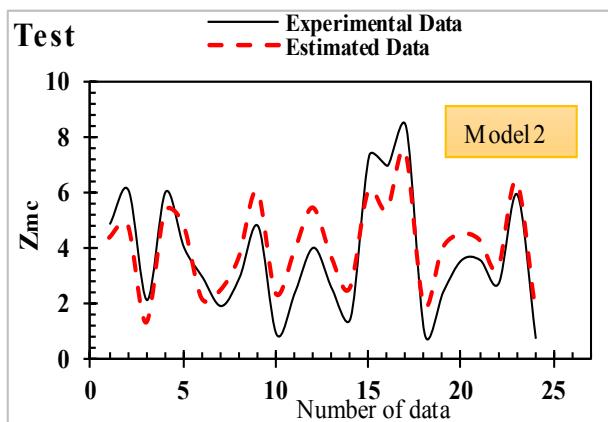
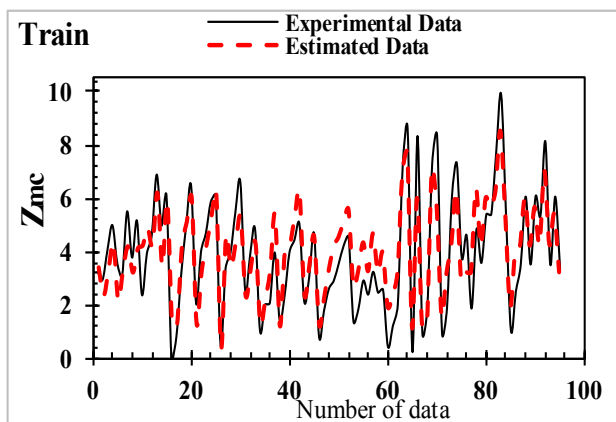
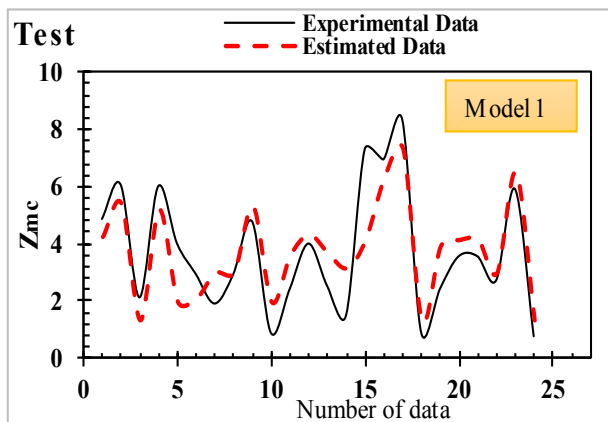
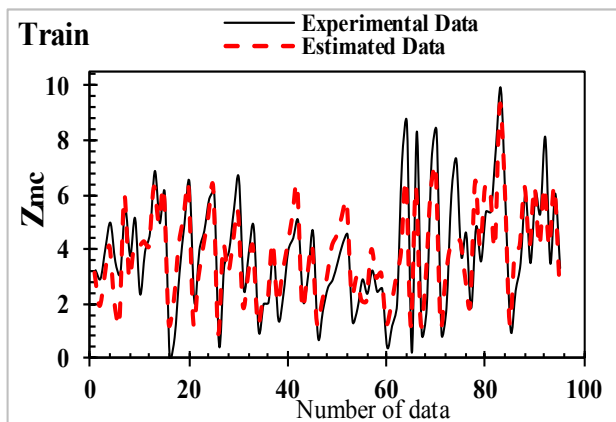
شکل ۲- نتایج نموداری ضریب همبستگی و جذر میانگین مربعات خطاها مقادیر آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده برای همه مدل‌های پژوهش



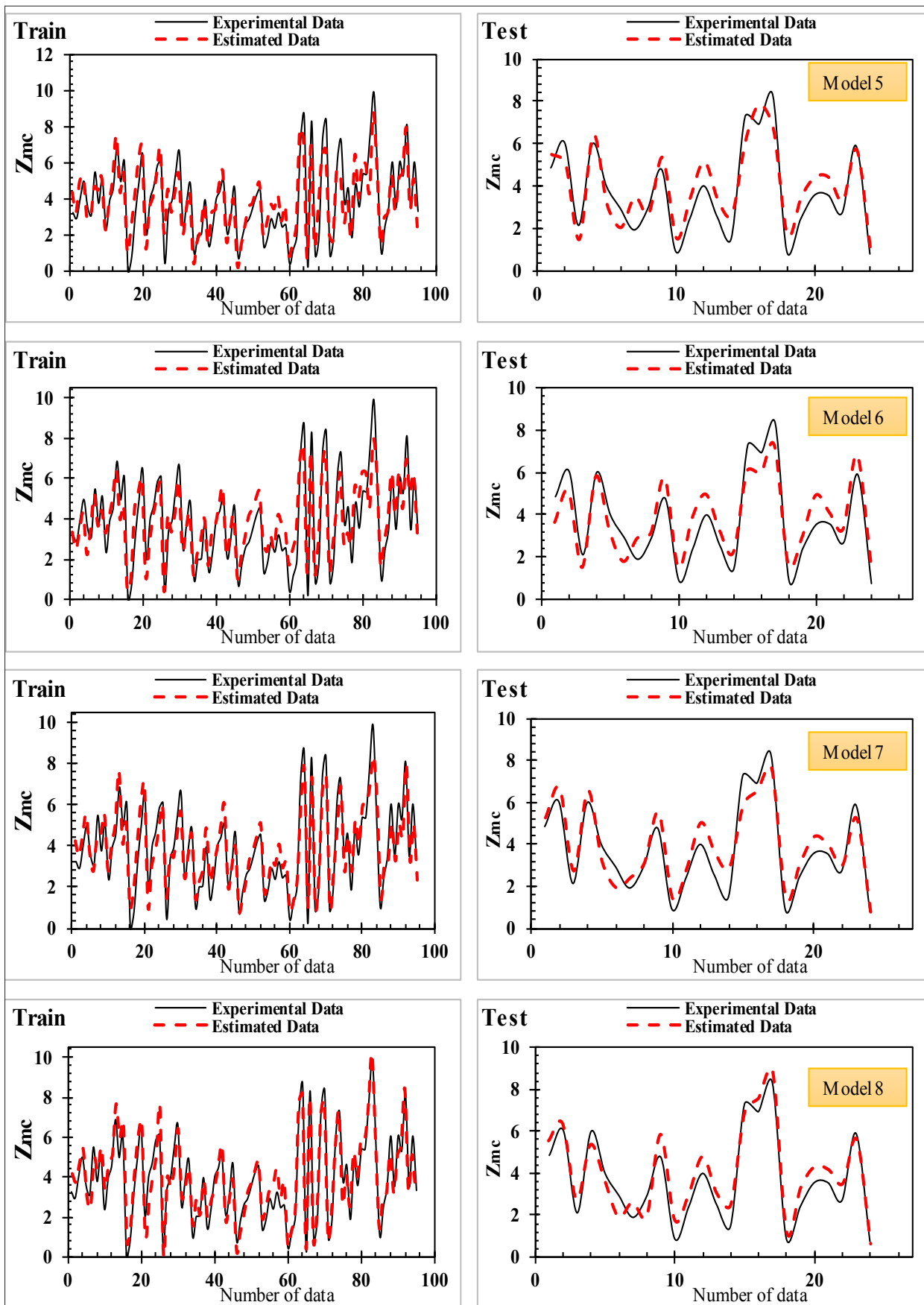
شکل ۳- داده‌های عمق آبشستگی بی‌بعد آزمایشگاهی در مقابل داده‌های تخمینی

می‌شود. در برابر افزایش زاویه برخورد جت‌ها انتشار جانبی برخورد جت افزایش یافته و همین امر سبب مستهلک شدن انرژی جت‌ها شده و به دنبال آن عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. براساس این نتیجه و نتایج مدل‌های این پژوهش می‌توان بیان نمود در مدل‌هایی که در ترکیب ورودی آن‌ها از پارامتر α_c به همراه پارامترهای T_w و Fr_{d90} استفاده شده است، خطای پیش‌بینی کاهش یافته است. اندازه محل برخورد جت تا سطح آب، تابع زاویه برخورد بین دو جت و عمق پایاب بوده و تأثیر فاصله برخورد جت تا سطح آب تحت تأثیر این دو عامل و به خصوص عمق پایاب است، از این رو افزایش اندازه محل برخورد جت تا سطح آب به افزایش عمق آبشستگی می‌انجامد. این یافته آزمایشگاهی نیز در نتایج پیش‌بینی توسط ماشین بردار پشتیبان مشاهده شد. به طوریکه در ترکیب ورودی مدل‌هایی که پارامتر δ در هنگام حضور هم‌زمان پارامترهای α_c و T_w وجود داشت، مدل عملکردی به مراتب بهتر نسبت به دیگر مدل‌ها داشت. به عبارت دیگر در ترکیب ورودی مدل‌های ۴ و ۶ که پارامتر δ بدون وجود هم‌زمان پارامترهای α_c و T_w بود، خطای ماشین بردار در برآورد عمق آبشستگی افزایش داشته است.

همچنین برای بررسی بهتر مدل‌های این پژوهش در شکل (۴) نمودار مقادیر عمق آبشستگی آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده به ازای تعداد داده نمایش داده شده است. در میان مدل‌ها، پس از مدل ۸ که به عنوان مدل برتر شناخته شد، مدل ۷ نتایج نزدیکی به نتایج آزمایشگاهی دارد. مدل ۷ با ترکیب ورودی $(Fr_{d90}, T_w, \alpha_c, \delta)$ و با داده‌های آماری $R = 0.9448$ و $RMSE = 0.746$ در مرحله آزمون نشان داد نبودن پارامتر زاویه قائم قرارگیری جت (α_c) در میان پارامترهای ورودی تأثیر زیادی در دقت پیش‌بینی ندارد. براساس مشاهدات آزمایشگاهی و نتایج پیش‌بینی شده مشخص شد، با افزایش زاویه قائم قرارگیری جت، پس از برخورد به بستر، جت گرایش دارد مصالح شسته شده را از درون چاله به بیرون منتقل کند، از این رو سبب افزایش عمق آبشستگی خواهد شد. البته باتوجه به برخورد جت‌ها و مستهلک شدن انرژی آن‌ها تأثیر زاویه قائم برخورد جت‌ها بسیار ناچیز بوده و این قضیه در زاویه‌های برخورد کم به درستی نمایان است. همچنین براساس یافته‌های آزمایشگاهی Pagliara و همکاران (۲۰۱۱b) برای زاویه‌های برخورد کم (α_c) برخورد دو جت انتشار جانبی بسیار کمی داشته و عملکرد جت متقاطع مانند جت منفرد



شکل ۴- نمودار مقادیر آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده عمق آبستگي بی‌بعد به ازای تعداد داده

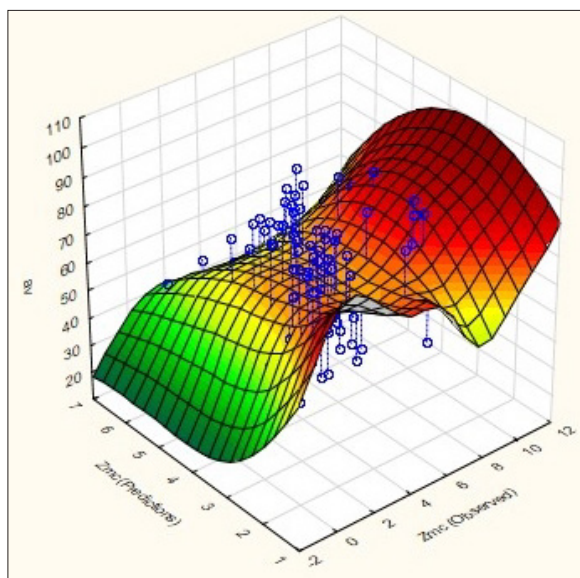
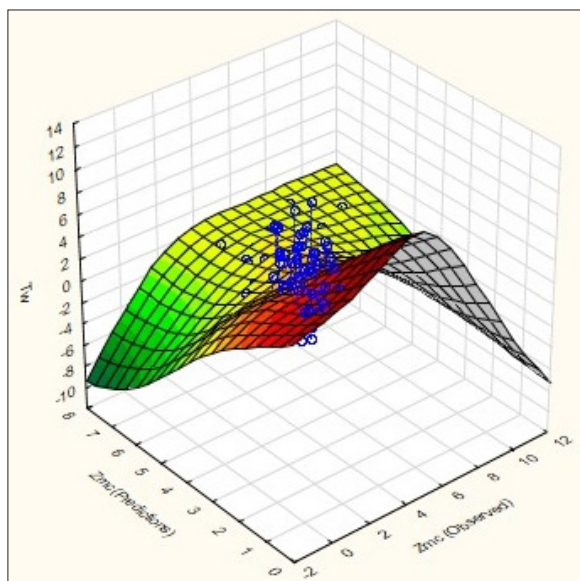


ادامه شکل ۴- نمودار مقادیر آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده عمق آبستگي بی‌بعد به ازای تعداد داده

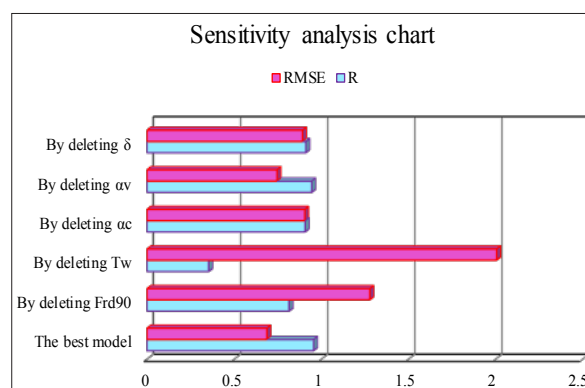
• آنالیز حساسیت

آبشستگی برای داده‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده مدل برتر (مدل شماره ۸) این پژوهش را نشان می‌دهد. براساس شکل (۵) و (۶) مشخص است وجود پارامتر T_w در میان ترکیب ورودی مدل‌ها سبب افزایش همبستگی میان داده‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده است. به عبارت دیگر، پارامتر T_w در پیش‌بینی عمق آبشستگی بیشترین کارایی را در پیش‌بینی عمق آبشستگی حوضچه استخرق داشته است که دلیل بر دقت بالای پیش‌بینی ماشین بردار پشتیبان در حضور این پارامتر می‌باشد. درحالی‌که پارامتر α_v در میان ترکیب ورودی کارایی چندانی بر مقادیر دقت ماشین بردار نداشت.

برای تعیین میزان کارایی هر کدام از پارامترها در برآورد عمق آبشستگی باید آنالیز حساسیت انجام شود. به همین دلیل با حذف یکی از پارامترها از سری پارامترهای ورودی ترکیب برتر، مدل دوباره اجرا شد و تأثیر آن در دقت پیش‌بینی بررسی شد. در شکل (۵) نتایج مقایسه بهترین مدل پیش‌بینی عمق آبشستگی با دیگر مدل‌ها نشان داده شده است. در این بخش با حذف یک پارامتر ورودی از میان پارامترهای ورودی برای مرحله آزمون برای مدل برتر میزان کارایی هر کدام از پارامترها در برآورد عمق آبشستگی بررسی شده است. باتوجه به شکل (۵) مشخص شد پارامترهای $T_w, Fr_{d90}, \alpha_c, \delta, \alpha_v$ به ترتیب (از چپ به راست) بیشترین کارایی را در دقت پیش‌بینی عمق آبشستگی حوضچه استخرق ناشی از جت‌های متقاطع متقارن دارند. به عبارت دیگر با حذف پارامترهای T_w, Fr_{d90} میزان همبستگی میان داده‌های آزمایشگاهی و برآورد شده به شدت کاهش پیدا می‌کند و خطا به صورت چشمگیری افزایش پیدا می‌کند. در مقابل حذف پارامتر از میان ترکیب ورودی به ماشین بردار کارایی فراوانی در دقت مدل نداشته است.



شکل ۶- تأثیر پارامترهای T_w (بی‌بعد) و α_v (بی‌بعد) در عمق آبشستگی (محورها بدون بعد هستند)



شکل ۵- نتایج آنالیز حساسیت برای مدل برتر

براساس مشاهدات آزمایشگاهی و نتایج پیش‌بینی شده مشخص شد، با افزایش عمق پایاب T_w ، از شدت برخورد جت به بستر کاسته شده و به‌گونه‌ای باعث مستهلک شدن انرژی جت می‌شود که در نتیجه با افزایش عمق پایاب، عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. بنابراین این پارامتر تأثیر فراوانی در پیش‌بینی عمق آبشستگی جت‌های متقاطع متقارن دارد. از طرفی با افزایش عدد فرود دنسی‌متریک، نیروی به‌دست آمده از برخورد جت به بستر افزایش یافته و تنش ناشی از آن بیش از تنش برشی بحرانی بستر شده که به افزایش عمق آبشستگی می‌انجامد و این پارامتر پس از پارامتر T_w بیشترین کارایی را دارد. شکل (۶) کارایی موثرترین پارامتر T_w و پارامتر با کمترین تأثیر α_v در عمق

ارزیابی برای مرحله آموزش $R = 0.9587$ ، $RMSE = 0.622$ و برای مرحله NRMSE = 15/96، $RMSE = 0.688$ ، $R = 0.9563$ و برای مرحله آزمون به عنوان بهترین مدل شناخته شد. مقادیر بالای ضریب همبستگی و درصد خطای پایین به دست آمده از روش SVM برای این مدل نشان از همخوانی خوب مقادیر پارامترهای کارآ در آبخستگی مدل برتر این پژوهش مشخص شد پارامترهای α_v و T_w به ترتیب بیشترین و کمترین کارایی را در عمق آبخستگی حوضچه استخرق ناشی از جت‌های متقاطع متقارن دارند.

جدول ۷- لیست علائم و نشانه‌ها

عنوان	علامت	عنوان	علامت
حداکثر عمق آبخستگی با بعد	Z_{mc}	شتاب گرانش	g
قطر معادل جت‌های متقاطع	$D_{eq} = (2D^2)^{0.5}$	چگالی آب	ρ
سرعت جت با قطر معادل	V	چگالی رسوب	ρ_s
زاویه برخورد جت‌ها	α_c	قطری که ۹۰ درصد ذرات از آن کوچکترند	d_{90}
زاویه قائم جت‌ها	α_v	حداکثر عمق آبخستگی بی‌بعد	Z_{mc}
فاصله محل برخورد جت‌ها تا سطح آب	S	عدد فرود دنیسی‌متریک	Fr_{d90}
عمق پایاب	h_0	فاصله نسبی محل برخورد جت تا سطح آب	δ
شتاب گرانشی کاهش یافته	g^*	عمق نسبی پایاب	T_w

mance of support vector machine for predicting vertical drop hydraulic parameters in the presence of dual horizontal screens. *Water supply*, 21(1): 217-231.

Daneshfaraz R., Aminvash E. Ghaderi A. Abraham J. and Bagherzadeh M. 2021b. SVM performance for predicting the effect of horizontal screen diameters on the hydraulic parameters of a vertical drop. *Applied sciences*, 11(9): 4238.

Daneshfaraz R., Aminvash E. Mirzaee R. and Abraham J. 2021c. Predicting the energy dissipation of a rough sudden expansion rectangular stilling basins using the SVM algorithm. *Journal of Applied Research in Water and Wastewater*, 8(2): 98-106.

Daneshfaraz R., Bagherzadeh M. Ghaderi A. Di Francesco S. and Asl M. M. 2021d. Experimental investigation of gabion inclined drops as a sustainable solution for hydraulic energy loss. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(4): 3451-3459.

Armaghani A., Lashkarara B. and Akhond A. A. M. 2017. The Process of Plunge Pool Bed Form Changes by a Vertical Jet Impinging Upon Non-Cohesive Sediment. *Irrigation Sciences and Engineering*, 40(3): 77-85.

Bollaert E. 2002. The influence of plunge pool air entrainment on the presence of free air in rock joints. Rock scour due to falling high-velocity jets Conference. Lisse, The Netherlands <http://infoscience.epfl.ch/record/103498>.

Bagherzadeh M., Mousavi F. Manafpour M. Mirzaee R. and Hoseini K. 2022. Numerical simulation and application of soft computing in estimating vertical drop energy dissipation with horizontal serrated edge. *Water Supply*, 22(4): 4676-4689.

Daneshfaraz R., Bagherzadeh M. Esmaeeli R. Norouzi R. and Abraham J. 2021a. Study of the perfor-

- scour with protection structures. *Journal of Hydro-environment Research*, 2(3): 182-191.
- Pagliara S., Roy D. and Palermo M. 2011a. Scour due to crossing jets at fixed vertical angle. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 137(1): 49-55.
- Pagliara S., Palermo M. and Carnacina I. 2011b. Scour process due to symmetric dam spillways crossing jets. *Intl. J. River Basin Management*, 9(1): 31-42.
- Pal M., Singh N. K. and Tiwari N. K. 2011. Support vector regression-based modeling of pier scour using field data. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 24(5): 911-916.
- Pagliara S., Palermo M. and Roy D. 2012. Stilling basin erosion due to vertical crossing jets. *Journal of Hydraulic Research*, 50(3): 290-297.
- Roushangar K. and Koosheh A. 2015. Evaluation of GA-SVR method for modeling bed load transport in gravel-bed rivers. *Journal of Hydrology*, 527: 1142-1152.
- Roushangar K., Alami M. T. Shiri J. and Asl M. M. 2018. Determining discharge coefficient of labyrinth and arced labyrinth weirs using support vector machine. *Hydrology research*, 49(3): 924-938.
- Taştan K., Koçak P. P. and Yildirim N. 2016. Effect of the bed-sediment layer on the scour caused by a jet. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41(10): 4029-4037.
- Yan X., Mohammadian A. and Rennie C. D. 2020. Numerical modeling of local scour due to submerged wall jets using a strict vertex-based, terrain conformal, moving-mesh technique in Open FOAM. *International Journal of Sediment Research*, 35(3): 237-248.
- Dasineh M., Ghaderi A. Bagherzadeh M. Ahmadi M. and Kuriqi A. 2021. Prediction of Hydraulic Jumps on a Triangular Bed Roughness Using Numerical Modeling and Soft Computing Methods. *Mathematics*, 9(23): 3135.
- Epely-Chauvin G., De Cesare G. and Schwindt S. 2014. Numerical modelling of plunge pool scour evolution in non-cohesive sediments. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 8(4): 477-487.
- Jia Y., Kitamura T. and Wang S. S. 2001. Simulation of scour process in plunging pool of loose bed-material. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(3): 219-229.
- Khalifehei K., Azizyan G. Shafai-Bajestan M. and Chau K. W. 2020. Experimental modeling and evaluation sediment scouring in riverbeds around downstream in flip buckets. *International Journal of Engineering*, 33(10): 1904-1916.
- Lee T. L., Jeng D. S. Zhang G. H. and Hong J. H. 2007. Neural network modeling for estimation of scour depth around bridge piers. *Journal of hydrodynamics*, 19(3): 378-386.
- Majedi-Asl M., Daneshfaraz R. Fuladipanah M. Abraham J. and Bagherzadeh M. 2020. Simulation of bridge pier scour depth base on geometric characteristics and field data using support vector machine algorithm. *Journal of Applied Research in Water and Wastewater*, 7(2): 137-143. doi: 10.22126/arww.2021.5747.1189
- Pagliara S., Hager W. H. and Minor H. E. 2006. Hydraulics of plane plunge pool scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(5): 450-461.
- Pagliara S. and Palermo M. 2008. Plane plunge pool