

تعیین ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای و قوسی کنگره‌ای با روش رگرسیون بردار پشتیبان

کیومرث روشنگر^{۱*}، محمد تقی اعلمی^۲، مهدی ماجدی اصل^۳

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۰/۲۸ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۹/۰۲

۱-دانشیار گروه آب، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز

۲-استاد گروه آب، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز

۳-دانشجوی دکتری گروه آب، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: kroshangar@yahoo.com

چکیده

سرریزهای کنگره‌ای یکی از سازه‌های تنظیم سطح آب و کنترل جریان در رودخانه‌ها و کانال‌ها و انتقال آب از سراب به پایاب سدها بوده و امروزه به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این تحقیق، ضریب دبی انواع سرریزهای کنگره‌ای با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی با روش رگرسیون بردار پشتیبان تعیین گردید. بدین‌منظور، داده‌های آزمایشگاهی مورد مطالعه (۵۲۷ داده) برای چهار نوع سرریز مختلف شامل سرریزهای کنگره‌ای نرمال و معکوس در کانال و سرریزهای قوسی کنگره‌ای بدون تیغه‌شکن و با تیغه‌شکن در مخزن برای تعیین ضریب دبی، مورد بررسی قرار گرفت. برای ارزیابی کارایی مدل‌ها از معیارهای جذر مربع میانگین خطاها (RMSE)، ضریب تبیین یا کارایی (E یا DC) و مربع ضریب همبستگی (R^2) استفاده شد. نتایج حاصل نشان داد که روش رگرسیون بردار پشتیبان کارایی بالایی در تعیین ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای دارد. معیارهای ارزیابی مدل در مرحله آزمون برای سرریز کنگره‌ای نرمال ($R^2=0/990$ ، $DC=0/988$ ، $RMSE=0/0077$) بوده و بررسی تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که پارامترهای $(H_T/P, Fr)$ و $(H_T/p, \alpha/\theta)$ به‌ترتیب بیشترین تاثیر را بر روی سرریزهای کنگره‌ای و قوسی کنگره‌ای دارند.

واژه‌های کلیدی: تیغه شکن، رگرسیون بردار پشتیبان، سرریزهای کنگره‌ای، سرریزهای قوسی کنگره‌ای، ضریب دبی

Determination of Labyrinth and Arced Labyrinth Weirs Discharge Coefficients Using Support Vector Regression

K Roushangar^{1*}, MT Alami², M Majedi Asl³

Received: 18 January 2015

Accepted: 22 November 2016

¹-Assoc. Prof., Water. Dept., Faculty of Civil Engineering., Univ. of Tabriz, Iran

²-Prof., Water. Dept., Faculty of Civil Engineering., Univ. of Tabriz, Iran

³-Ph.D. Student., Water. Dept., Faculty of Civil Engineering., Univ. of Tabriz, Iran

* Corresponding Author, Email: kroshangar@yahoo.com

Abstract

Labyrinth weirs are widely used for controlling and regulating flow rate in rivers and canals as well as for conveying flow from upstream to downstream of dams. In this study, the discharge coefficient of the different kinds of labyrinth weirs was predicted by using support vector regression (SVR) technique. Totally 527 laboratory test data were used for predicting discharge coefficient of four different types of weirs including: normal and inverted labyrinth weirs in flume and arced labyrinth weirs with and without the nappe breakers in reservoir. The root mean squared error (RMSE), coefficient of determination (E or DC), and squared correlation coefficient (R^2) statistics were used to evaluate the models' performance. The obtained results showed that the support vector regression technique had a high capability of predicting discharge coefficient of labyrinth weirs. Statistical evaluation criteria of the best model for normal labyrinth weirs were $R^2=0.990$, $DC=0.988$, $RMSE=0.0077$ in validation stage. The results of sensitivity analysis showed that (Fr , H_T/p) and (H_T/p , α/θ) were the most influential parameters for the labyrinth and arced labyrinth weirs, respectively.

Keywords: Arced labyrinth weirs, Discharge coefficient, Labyrinth weirs, Nappe breaker, Support vector regression

مقدمه

طول تاج سرریز با زیگزاگ کردن سرریز در پلان می‌باشد. یعنی ایجاد یک سرریز سه‌بعدی که در واقع همان سرریز کنگره‌ای می‌باشد. محورتاج این نوع سرریزها به صورت مستقیم بوده و در نمایش سطح افقی، سرریز از دیواره‌های متصل به هم تشکیل شده و با هندسه مثلثی، دوزنقه‌ای، مستطیلی و قوسی با تناوب در عرض جریان تکرار می‌گردد. معیار اصلی در طرح کنگره‌ای سرریزها، افزایش ظرفیت انتقال جریان روی سرریز با تاج ثابت و به ازای ارتفاع معین سطح آب دربالادست سرریز بوده است. معمولاً سرریزهای کنگره‌ای به عنوان گزینه‌ای مناسب برای اصلاح

سرریزها از جمله سازه‌های هیدرولیکی برای تنظیم سطح آب، کنترل جریان در کانال‌ها، رودخانه‌ها و مخازن سدها به شمار می‌آیند. سرریز یکی از کلیدی‌ترین ضوابط سد به شمار می‌رود به طوری که شکست بسیاری از سدها به عدم کفایت سرریزشان نسبت داده شده است و ایمنی سدها ارتباط مستقیم و تنگاتنگی با کفایت ظرفیت سرریز دارد. دبی جریان در سرریزها به طور مستقیم متناسب با طول تاج سرریز است. در صورتی که عرض کانال یا مخزنی که سرریز بر روی آن اجرا می‌شود محدود باشد، یکی از راهکارهای افزایش ظرفیت، افزایش

این مطالعه نشان داد که نتایج ANN (MLP) در مقایسه با نتایج و معادلات ارائه شده توسط کومار و همکاران (۲۰۱۱) عملکرد بهتری دارد. جیما و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از شبکه‌های عصبی (ANN) خصوصیات هیدرولیکی سرریزهای نیم‌دایره‌ای را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. آنها نشان دادند که نتایج شبکه‌های عصبی مصنوعی با نتایج آزمایشگاهی همخوانی خوبی دارد. روشنگر و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از روش‌های یادگیری ماشینی، استهلاك انرژی بر روی سرریزهای پلکانی را مدل‌سازی نمودند. روشنگر و گوشه (۲۰۱۵) با استفاده از SVM انتقال بار رسوبی بستر را پیش‌بینی کردند. عظمت‌اله و همکاران (۲۰۱۶) روش SVM را برای پیش‌بینی ضریب دبی سرریز جانبی به‌کار بردند. هدف تحقیق حاضر، پیش‌بینی کارایی و ضریب دبی انواع سرریزهای کنگره‌ای با استفاده از روش رگرسیون بردار پشتیبان (با ترکیب مختلف پارامترهای هندسی و هیدرولیکی) می‌باشد. همچنین نتایج این مدل با نتایج آزمایشگاهی موجود، مورد مقایسه قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

معادله دبی و پارامترهای سرریزهای کنگره‌ای

معادله یک‌بعدی جریان بر روی سرریزهای کنگره‌ای تابعی از بار آبی کل (H_T) بر حسب متر، طول تاج سرریز (L) بر حسب متر و ضریب جریان سرریز (C_d) بدون بعد بوده و از رابطه ۱ به‌دست می‌آید (هندرسون ۱۹۶۶).

$$Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} L_c H_T^{\frac{3}{2}} \quad [1]$$

با استفاده از روش تحلیل ابعادی و با در نظر گرفتن پارامترهای هندسی، سینماتیکی و دینامیکی، پارامترهای مؤثر بر ضریب دبی جریان در سرریزهای کنگره‌ای شامل بار آبی در بالادست سرریز (H_T)، طول دماغه سرریز (A)، طول تاج مؤثر (L_c)، عرض کل سرریز (W)،

سرریزهایی که برای عبور دبی ماکزیمم محتمل با مشکل روبرو هستند، مطرح می‌شوند (کوهان و تیلور ۲۰۰۲) و لذا در این راستا گرایش محققان به برآورد ضریب دبی و کارایی سرریزها رو به افزایش بوده و در سال‌های اخیر و به‌دنبال مطالعات تجربی و آزمایشگاهی، تحقیقات زیادی برای بهبود و پیش‌برد روش‌های تجربی جهت محاسبه ضریب دبی، انتخاب هندسه بهینه و افزایش کارایی سرریزهای کنگره‌ای انجام شده است. هیدرولیک سرریزهای کنگره‌ای^۱ برای اولین بار توسط جنتلینی (۱۹۴۰) مورد بررسی قرار گرفت. توسعه طراحی سرریزهای کنگره‌ای توسط تیلور (۱۹۶۸) و سپس توسط هی و تیلور (۱۹۷۰) شروع شد. کروکستون و تولیس (۲۰۱۰) کارایی هیدرولیکی سرریز کنگره‌ای با جهت‌گیری نرمال و معکوس را مورد ارزیابی قرار دادند. کریستنس (۲۰۱۲) خصوصیات جریان در سرریزهای قوسی کنگره‌ای را توسعه داد. سیمونز (۲۰۱۴) تأثیر تغییرات هندسی سرریزهای کنگره‌ای بر روی کارایی آن‌ها را مورد ارزیابی قرار داد.

در این میان، استفاده از روش‌های محاسبات نرم (نظیر ماشین بردار پشتیبان، SVM) نیز می‌تواند به‌عنوان ابزاری جایگزین برای معادله‌ها و مدل‌های تجربی به‌شمار آید. روش رگرسیون بردار پشتیبان (SVR)^۲ شاخه‌ای از ماشین بردار پشتیبان^۳ است که با اتکا به مبنای ماشین بردار پشتیبان می‌تواند به‌عنوان رگرسیونر در مسائل مهندسی عمل کند. در سال‌های اخیر مطالعات محدودی در زمینه مطالعات مربوط به سرریزها با استفاده از روش‌های داده محور انجام شده است که از آن جمله می‌توان به مطالعات عباسپور و همکاران (۱۳۹۰)، محمد و الیور (۲۰۰۵)، هنبای و همکاران (۲۰۰۹)، گول (۲۰۱۳) و پارسایی و حقابی (۲۰۱۴ و ۲۰۱۵) اشاره نمود. گول (۲۰۱۴) از تکنیک شبکه‌های عصبی برای پیش‌بینی دبی و ضریب دبی سرریزهای مثلثی استفاده نمود.

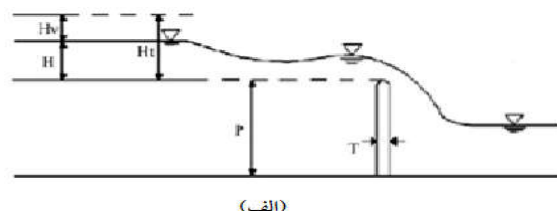
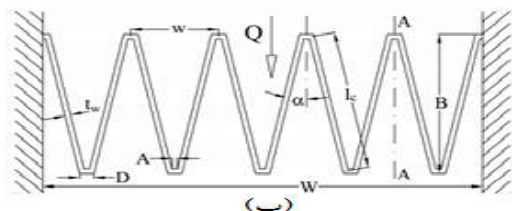
²Support vector machine

¹ Labyrinth weir

² Support vector regression

شماتیک از پروفیل جریان عبوری از روی سرریز کنگره-ای در مقطع و پلان را نمایش می‌دهد.

$$C_d = F(H_T/P, \alpha/\theta, L_c/W, A/w, w/p, Fr) \quad [۲]$$



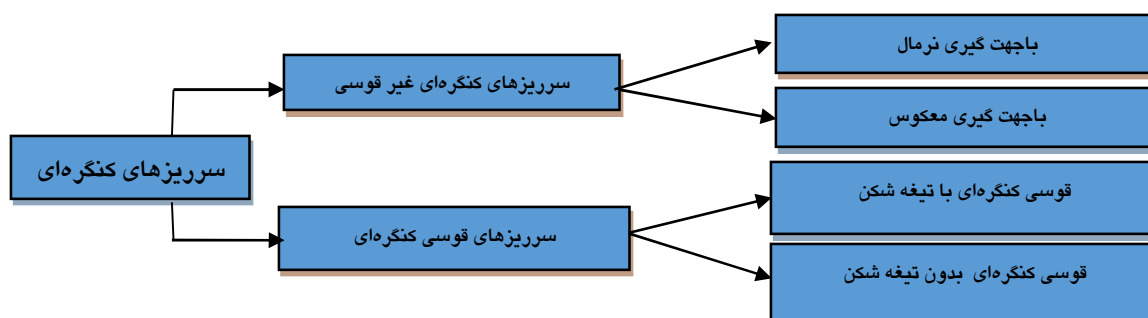
شکل ۱- پروفیل طولی سرریز کنگره‌ای، (ب) پلان سرریز کنگره‌ای.

شکل ۱- پروفیل جریان عبوری از روی سرریز کنگره‌ای.

سیکل (w/p)، زاویه دیواره‌ها (α)، ارتفاع سرریز (p)، نسبت ضخامت نسبی (p/t_w) و موقعیت سرریز (Orientation). مدل‌های فیزیکی مورد آزمایش توسط سیمونز ۱۳ مدل بوده و به‌ازای دبی‌های ۰/۷ تا ۲۰ فوت مکعب بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفته است و در مجموع شامل ۳۰۰ داده برای سرریز کنگره‌ای می‌باشد که در تحقیق حاضر داده‌ها به دو حالت ۱-جهت‌گیری نرمال ۲- جهت‌گیری معکوس تقسیم شده است (شکل ۲) که حالت اول و دوم به‌ترتیب شامل ۱۶۰ و ۱۴۰ داده می‌باشد.

داده‌های مورد استفاده

سیمونز (۲۰۱۴) آزمایشاتی در مورد تغییرات هندسی و اثرات آن بر روی کارایی و روش طراحی سرریزهای کنگره‌ای در فلومی به‌طول ۱۴/۶ متر، عرض ۱/۲ متر، عمق ۰/۹ متر و با شیب ثابت صفر در دانشگاه یوتای آمریکا انجام داده است. پارامترهایی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است به‌شرح زیر می‌باشد: بار آبی در بالادست سرریز (H_T)، طول دماغه سرریز (A)، طول تاج مؤثر (L_c)، عرض کل سرریز (W)، نسبت وضع عمودی یا نسبت عرض



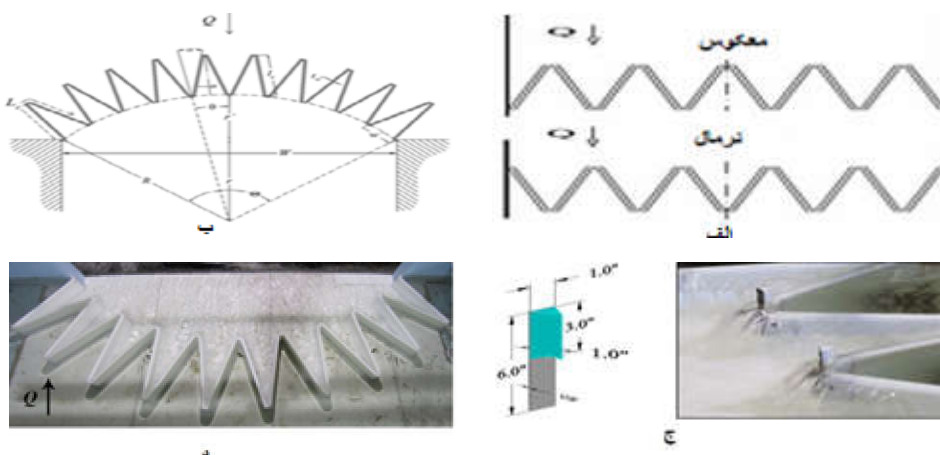
شکل ۲- انواع سرریزهای بررسی شده در این تحقیق.

باشد، سرریز کنگره‌ای نرمال و اگر محل اتصال در پایین‌دست باشد، سرریز کنگره‌ای معکوس نامیده می‌شوند. کریستنسن (۲۰۱۲) آزمایشاتی در مورد

موقعیت قرارگیری سرریزهای کنگره‌ای در شکل (۳-الف) نشان داده شده است. سرریزهای کنگره‌ای که محل اتصال دیواره سرریز با دیواره کانال در بالادست

کریستنس (۲۰۱۲)، ۱۱ مدل بوده و به‌ازای دبیهای ۰/۹ تا ۲۲ فوت مکعب بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفته است و در مجموع شامل ۲۲۷ داده برای سرریز قوسی کنگره‌ای می‌باشد که در تحقیق حاضر داده‌ها به دو حالت ۱- قوسی کنگره‌ای بدون تیغه شکن ۲- قوسی کنگره‌ای با تیغه شکن تقسیم شده است (شکل ۲) که حالت اول و دوم به ترتیب شامل ۱۴۵ و ۸۲ داده می‌باشد. سرریزهای قوسی کنگره‌ای و موقعیت نصب تیغه شکن‌ها در شکل (۳-ب) تا (۳-د) نشان داده شده است.

خصوصیات جریان سرریزهای قوسی کنگره‌ای نصب شده در مخزنی به طول ۷/۳ متر، عرض ۶/۷ متر و به عمق ۱/۵ متر در دانشگاه یوتای آمریکا انجام داده است. پارامترهایی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است همان پارامترهای تحقیق سیمونز (۲۰۱۴) بوده با این تفاوت که در این تحقیق به دلیل قوسی بودن سرریز، پارامترهای زاویه سیکل قوسی (θ)، تعداد سیکلها (N) و شعاع قوسی (R)، به پارامترهای مذکور اضافه شده است (شکل ۳-ب). مدل‌های مورد آزمایش توسط



شکل ۳- تصاویر انواع سرریزها، الف- جهت‌گیری سرریزها در کانال، ب- پلان سرریز قوسی کنگره‌ای، ج- سرریز کنگره‌ای با تیغه شکن، د- تصویر سرریز قوسی کنگره‌ای در مخزن.

روش توسط واپنیک (۱۹۹۵) بر مبنای نظریه یادگیری محاسباتی توسعه یافته است. ماشین‌های بردار پشتیبان برخلاف سایر 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. مدل SVM رگرسیونی قادر است مسئله را توسط روش کرنل به فضای با ابعاد بیشتر ببرد. در فضای دوبعدی برای جداسازی داده‌های دو کلاس، بی‌نهایت خط وجود دارد. نزدیک‌ترین داده آموزشی به

ماشین بردار پشتیبان (SVM)

ماشین‌های بردار پشتیبان همانند شبکه‌های عصبی مصنوعی، یک نوع الگوریتم داده‌محور می‌باشد. این روش دسته‌ای از روش‌های یادگیری با ناظر هستند که برای مسائل طبقه‌بندی، رگرسیون، پیش‌بینی و سایر مسائلی که در این حوزه قرار می‌گیرند، به کار می‌رود. مراحل حل مسائل در ماشین‌های بردار پشتیبان مانند الگوریتم شبکه‌های عصبی مصنوعی به دو مرحله آموزش و آزمون (صحت‌سنجی) تقسیم می‌شود. این

⁴Supervised learning models

⁵Computational learning theory

$$w^T z + b = 0 \rightarrow w^T \varphi(x) + b = 0 \quad [۷]$$

که در عبارت فوق تابع φ وظیفه نگاشت داده‌ها از فضای غیرخطی به یک فضای خطی را به عهده دارد. می‌توان برای این تابع یک حالت کلی‌تر به صورت $K(x_i, x_j)$ تعریف کرد که به وسیله آن بتوان به فضاهای پیچیده تر راه یافت. به فرآیند مذکور ترفند کرنل می‌گویند. توابع کرنل شکل‌های مختلفی دارند و هر کدام می‌توانند با توجه به طبیعت مسئله کاربرد خاص خودشان را داشته باشند. انواع مختلف تابع کرنل در جدول ۱ نشان داده شده است. تابع کرنل خطی^۶ حالت خاصی از تابع کرنل چند جمله‌ای^۷ می‌باشد که از توابع رایج و پر کاربرد در مسائل هستند. تابع کرنل چند جمله‌ای در مسائل پیچیده می‌تواند بسیار مفیدتر باشد. توابع گوسی^۸ (RBF) و کرنل حلقوی^۹ (ERBF) معروفترین و پر کاربردترین توابع کرنل در مسائل ماشین بردار پشتیبان هستند (روشنگر و کوشه، ۲۰۱۵) و در مسائلی مورد استفاده قرار می‌گیرند که هیچگونه اطلاعی از نوع داده‌ها و طبیعت آنها در دست نباشد. مشخصه‌های مدل SVM، یعنی مقادیر ϵ و C بهینه‌سازی می‌شوند و برای تابع کرنل RBF نیز باید مشخصه γ بهینه شود.

جدول ۱- انواع تابع کرنل.

نام کرنل	رابطه کرنل
خطی	$K(x_i, x_j) = (x_i, x_j)$
چند جمله‌ای	$K(x_i, x_j) = ((x_i, x_j) + 1)^d$
گوسی	$K(x_i, x_j) = \exp(-\frac{\ x_i - x_j\ ^2}{2\sigma^2})$
سیگموئید	$K(x_i, x_j) = \tanh(-\alpha(x_i, x_j) + c)$

روند ارزیابی کارایی مدل‌ها

جهت دستیابی به نتایج پیش‌بینی بهتر و دقیق‌تر مدل‌ها، روند آموزشی چندین بار مورد آزمون و خطا قرار گرفت که در پایان برای هر کدام از مدل‌ها و

صفحه تفکیک کننده بردار پشتیبان نامیده می‌شود. بهینه‌ترین صفحه تفکیک کننده، صفحه‌ای می‌باشد که دارای بیشینه فاصله بین دو کلاس باشد. به عبارت دیگر عبارت $2C$ بیشترین مقدار خود را داشته باشد (واپنیک ۱۹۹۸). طبق مبانی هندسه تحلیلی خواهیم داشت:

$$C = \frac{2}{\|W\|} \quad [۳]$$

پس مقدار بیشینه C زمانی حاصل خواهد شد که $\|W\|$ کمترین مقدار را داشته باشد.

$$\text{Min } \frac{1}{2} \|W\| \quad [۴]$$

و معادله کلی صفحه بهینه به صورت زیر خواهد بود:

$$w^T x + b = 0 \quad [۵]$$

ممکن است بعضی از داده‌ها در محدوده تفکیک شده کلاس خود قرار نداشته باشند. به عبارت دیگر داده‌هایی از مرز تعیین شده برای کلاس خود تجاوز کنند و در محدوده کلاس دیگر قرار گیرند. اگر فرض کنیم این میزان تخطی برابر ξ_i باشد. در این صورت مسئله بهینه‌سازی تبدیل می‌شود به یافتن w به نحوی که معادله زیر کمینه شود:

$$\text{Min } \frac{1}{2} \|W\| + C \sum_i \xi_i \quad [۶]$$

پارامتر C تابع جریمه بوده و مقدار بهینه آن ممکن است با سعی و خطا و یا از طریق الگوریتم‌های بهینه‌سازی به دست بیاید. در مسائلی که داده‌ها به صورت خطی تفکیک پذیر نباشند، معادله صفحه تفکیک کننده برای حالت غیرخطی با دخالت "تابع کرنل" که وظیفه نگاشت داده‌ها از فضای غیرخطی به خطی را بر عهده دارد، حاصل می‌شود. در نتیجه معادله تفکیک کننده به صورت زیر تبدیل می‌شود (واپنیک ۱۹۹۸).

^۸Gaussian radial basis function

^۹ Exponential radial basis function

^۶ Linear

^۷ polynomial

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Cd_i^o - Cd_i^p)^2}{N}} \quad [8]$$

$$DC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Cd_i^o - Cd_i^p)^2}{\sum_{i=1}^N (Cd_i^o - \bar{Cd}^p)^2} \quad [9]$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (Cd_i^o - \bar{Cd}^o)(Cd_i^p - \bar{Cd}^p)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Cd_i^o - \bar{Cd}^o)^2 \sum_{i=1}^N (Cd_i^p - \bar{Cd}^p)^2}} \right)^2 \quad [10]$$

در روابط بالا پارامترهای Cd^o ، Cd^p و N به ترتیب ضریب دبی مشاهداتی و پیش‌بینی شده سرریزها و تعداد داده‌ها می‌باشند. معیارهای آماری فوق برای داده‌های آموزش و آزمون محاسبه می‌شوند که در جدول ۲ تعداد داده‌های استفاده شده برای مراحل آموزش و آزمون، برای تمامی حالات، ارائه شده است.

سرریزها الگوی برتر داده‌ها جهت آموزش و آزمون انتخاب گردید. در جدول ۲ الگوی تمامی حالات ارائه شده است. در این تحقیق جهت ارزیابی کارایی مدل‌ها از معیارهای زیر استفاده شده است. ۱- جذر مربع میانگین خطاها^{۱۰} (RMSE) که میزان خطای با بعد موجود در نتایج به دست آمده بوده و مقدار آن از رابطه ۸ محاسبه می‌شود. ۲- ضریب تبیین یا کارآیی^{۱۱} (ضریب نش و شاتکلیف) (DC or E) که همبستگی خطی بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد و هر چه مقدار آن نزدیک به یک باشد به معنی ارتباط بهتر داده‌ها می‌باشد. ۳- مربع ضریب همبستگی^{۱۲} (R^2). مقادیر ضریب تبیین و مربع ضریب همبستگی از روابط ۹ و ۱۰ محاسبه می‌شوند.

جدول ۲- الگوی انتخابی برای مدل‌های برتر و معیارهای ارزیابی در مرحله آزمون.

داده‌های آموزش	داده‌های آزمون	RMSE	DC	R^2	پارامترهای مدل برتر	نوع سرریز
۳۵	۱۰۵	۰/۰۰۷	۰/۹۸۸	۰/۹۹۰	($H_T/P, L_c/W, A/w, Fr$)	سرریز کنگره‌ای (حالت نرمال)
۴۰	۱۲۰	۰/۰۲۵	۰/۹۵۴	۰/۹۸۱	($H_T/P, \alpha, L_c/W, A/w, w/p, Fr$)	سرریز کنگره‌ای (حالت معکوس)
۳۶	۱۰۹	۰/۰۱۳	۰/۹۶۷	۰/۹۷۰	($H_T/P, L_c/W, \alpha/\theta$)	سرریز قوسی کنگره‌ای
۲۱	۶۱	۰/۰۱۰	۰/۹۶۰	۰/۹۶۰	($H_T/P, \alpha/\theta$)	سرریز قوسی کنگره‌ای (با تیغه-شکن)
۵۲۷	-	-	-	-	-	مجموع داده‌ها

نتایج و بحث

مختلف (جدول‌های ۴-۷) که شامل پارامترهایی مانند عدد فرود (Fr)، نسبت وضع عمودی (w/P)، ارتفاع سرریز (P)، تعداد سیکل‌ها (N) و... که در بخش مواد و روش‌ها به طور کامل شرح داده شده است. در جدول ۲ الگوی انتخابی برای مدل‌های برتر با معرفی بهترین مدل‌ها و معیارهای ارزیابی آنها در مرحله آزمون ارائه شده است و در جدول ۳ نوع کرنل و پارامترهای مدل SVM به کار رفته در این تحقیق با روش آزمون و خطا برای سرریز قوسی کنگره‌ای با تیغه‌شکن برای مدل برتر ارائه شده است.

در این تحقیق دو نوع سرریز کنگره‌ای و در کل چهار حالت سرریز کنگره‌ای مورد بررسی قرار گرفته است که شامل ۱- سرریز کنگره‌ای نرمال ۲- سرریز کنگره‌ای معکوس ۳- سرریز قوسی کنگره‌ای با تیغه‌شکن ۴- سرریز قوسی کنگره‌ای بدون تیغه‌شکن می‌باشد (شکل ۲). برای سرریزهای کنگره‌ای نرمال و معکوس ۱۰ مدل مختلف و برای سرریزهای قوسی کنگره‌ای ۸ مدل

¹² Nash and Sutcliffe

¹³ Squared correlation coefficient

¹⁰ Root mean square error

¹¹ Determination coefficient or efficiency

جدول ۳- تعیین پارامترهای مدل SVM با آزمون و خطا برای سرریز قوسی کنگره‌ای با تیغه‌شکن برای مدل برتر.

نام کرنل	R _{Test}	R _{Train}	γ	R _{Test}	R _{Train}	ϵ	R _{Test}	R _{Train}	C	R _{Test}	R _{Train}
گوسین	۰/۹۸۰	۰/۹۹۱	۰/۱	۰/۹۴۳	۰/۹۴۴	۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۱	۰/۸۳۶	۰/۹۰۲
چند جمله‌ای	۰/۹۳۰	۰/۹۳۶	۱	۰/۹۴۹	۰/۹۶۰	۰/۱	۰/۹۷۷	۰/۹۸۱	۱۰	۰/۹۷۷	۰/۹۸۱
خطی	۰/۹۰۷	۰/۹۳۴	۵	۰/۹۷۷	۰/۹۸۱	۰/۰۱	۰/۹۸۰	۰/۹۹۱	۵۰	۰/۹۷۷	۰/۹۸۱
سیگموید	۰/۸۳۱	۰/۸۵۴	۱۰	۰/۹۷۵	۰/۹۸۶	۰/۰۰۱	۰/۹۷۷	۰/۹۹۱	۱۰۰	۰/۹۷۷	۰/۹۸۱
-	-	-	۲۰	۰/۸۵۱	۰/۹۸۲	-	-	-	۱۰۰۰	۰/۹۷۷	۰/۹۸۱

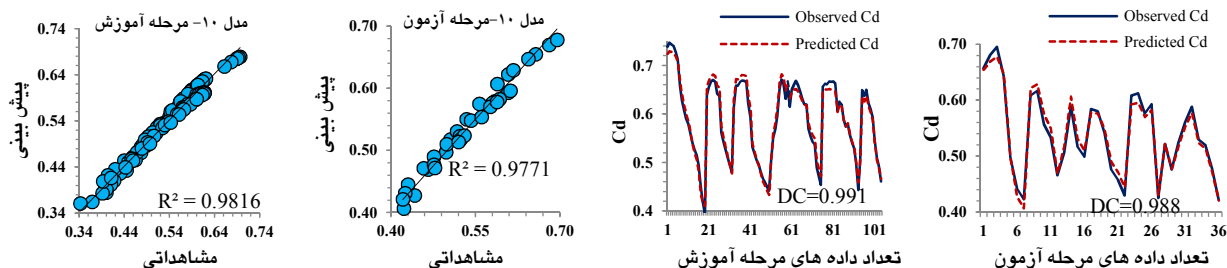
سرریزهای کنگره‌ای با جهت‌گیری نرمال

در جدول ۴، ده مدل انتخابی به همراه پارامترها و معیارهای ارزیابی مدل‌ها و پارامترهای بهینه‌شده ماشین بردار پشتیبان ارائه شده است. در ماشین‌های بردار پشتیبان، چهار مدل (شماره‌های ۵، ۷، ۹، ۱۰) بهترین نتایج و نتایج بسیار نزدیک به هم با $R^2=0/986$ ، $RMSE=0/01$ ، $DC=$ (جدول ۴). نمودار پراکنش بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای نرمال برای مدل برتر (شماره ۱۰) در شکل ۵ ترسیم شده است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای در مرحله آموزش و آزمون با دقت بالایی پیش‌بینی شده و مدل SVM عملکرد خوبی دارد. همچنین در شکل ۵ تغییرات ضریب دبی برای مراحل آموزش و آزمون ترسیم شده است، به طوری که مشاهده می‌شود منحنی‌های مربوط به ضرایب دبی مشاهداتی و پیش‌بینی شده انطباق خوبی با هم دارند و نشان‌دهنده انحراف کمتر مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر آزمایشگاهی می‌باشد. در شکل ۶ تغییرات ضریب دبی مشاهداتی و پیش‌بینی در مقابل نسبت بارآبی (H_T/P) ترسیم شده است. با توجه به نمودار مربوطه، مدل SVM در مرحله آموزش برای تمامی مقادیر (H_T/P) ضریب دبی

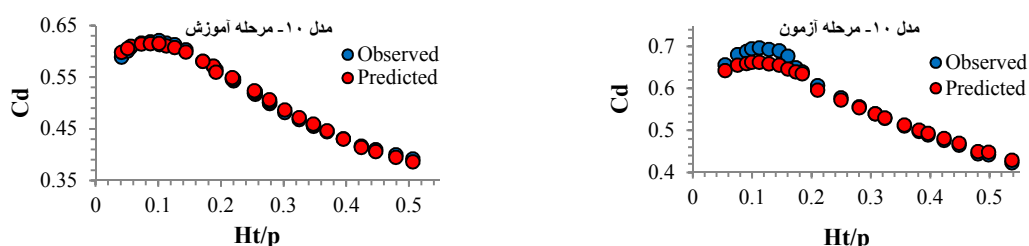
را با دقت بالایی برآورد نموده و در مرحله آزمون به‌ازاء مقادیر $H_T/P > 0/2$ دارای دقت بالایی بوده و به‌ازاء مقادیر $H_T/P < 0/2$ مقادیر مدل SVM نسبت به مقادیر آزمایشگاهی دارای اختلاف کمتر از ۵ درصد مشاهده می‌شود. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که مدل SVM برای تعیین ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای نرمال عملکرد خوبی دارد ($R^2=0/990$) (جدول ۴ و ۸) و در نسبت‌های بارآبی بیشتر (H_T/P بیشتر) دقت مدل بیشتر از نسبت‌های بارآبی کم است. بررسی نتایج معیارهای ارزیابی (جدول ۴ و ۸) نشان می‌دهد که پارامترهای نسبت بار (H_T/P) و عدد فرود (Fr) پارامترهای مؤثر برای تعیین ضریب دبی در سرریزهای کنگره‌ای نرمال می‌باشند و علت آن بستگی به داده‌های آزمایشگاهی سرریز کنگره‌ای می‌باشد که عمده تغییرات پارامترهای بررسی شده بر روی دو پارامتر نسبت بار (H_T/P) و سرعت جریان یا عدد فرود (Fr) می‌باشد ولی تغییرات سایر پارامترها کمتر بوده است به‌عنوان مثال زاویه دیواره (α) در این سرریزها فقط برای زوایای ۱۲ و ۱۵ درجه مورد بررسی قرار گرفته است در نتیجه بدیهی است که تأثیرات زاویه دیواره (α) در تعیین ضریب دبی سرریز کنگره‌ای با مدل SVM کمتر باشد.

جدول ۴- معیارهای ارزیابی مدل‌های مختلف برای تعیین ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای نرمال.

ترکیبات ورودی	آموزش			آزمون			c	ε	γ
	R ²	DC	RMSE	R ²	DC	RMSE			
۱) H _T /P	۰/۸۶۳	۰/۸۶۰	۰/۰۳۰	۰/۸۴۶	۰/۸۱۶	۰/۰۳۱	۱۰	۰/۰۱	۲
۲) H _T /P, α	۰/۹۰۲	۰/۸۹۸	۰/۰۲۶	۰/۸۸۳	۰/۸۶۹	۰/۰۲۶	۱۰	۰/۰۱	۴
۳) H _T /P, α, A/w	۰/۹۰۸	۰/۹۰۴	۰/۰۲۵	۰/۸۸۹	۰/۸۷۲	۰/۰۲۶	۱۰	۰/۰۱	۲۰
۴) H _T /P, α, L _c /W, A/w	۰/۹۱۲	۰/۹۱۲	۰/۰۲۳	۰/۹۰۶	۰/۹۰۴	۰/۰۲۵	۱۰	۰/۰۱	۵
۵) H _T /P, α, L _c /W, A/w, w/p	۰/۹۹۰	۰/۹۷۹	۰/۰۱۰	۰/۹۸۶	۰/۹۷۹	۰/۰۱۰	۱۰	۰/۰۱	۱۲
۶) H _T /P, L _c /W, A/w	۰/۹۰۶	۰/۹۰۴	۰/۰۲۳	۰/۹۰۳	۰/۹۰۰	۰/۰۲۶	۱۰	۰/۰۱	۱۶
۷) H _T /P, α, w/p	۰/۹۹۲	۰/۹۷۶	۰/۰۱۱	۰/۹۸۶	۰/۹۷۶	۰/۰۱۱	۱۰	۰/۰۱	۲۰
۸) H _T /P, L _c /W	۰/۸۷۸	۰/۸۷۵	۰/۰۲۶	۰/۸۷۰	۰/۸۶۹	۰/۰۲۸	۱۰	۰/۰۱	۲۰
۹) H _T /P, α, L _c /W, A/w, w/p, Fr	۰/۹۹۲	۰/۹۷۷	۰/۰۱۱	۰/۹۸۶	۰/۹۷۷	۰/۰۱۱	۱۰	۰/۰۱	۹
۱۰) H _T /P, L _c /W, A/w, Fr	۰/۹۹۲	۰/۹۹۱	۰/۰۰۷	۰/۹۹۰	۰/۹۸۸	۰/۰۰۷	۱۰	۰/۰۱	۱



شکل ۵- ضریب دبی مشاهداتی در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده سرریزهای کنگره‌ای نرمال برای مدل برتر.



شکل ۶- تغییرات ضریب دبی جریان مشاهداتی و پیش‌بینی شده در سرریز کنگره‌ای نرمال (مرحله آموزش و آزمون).

پارامترهای بهینه شده ماشین بردار پشتیبان (c, ε, γ) ارائه شده است. در ماشین بردار پشتیبان مدل شماره ۹ که شامل پارامترهای ($H_T/P, \alpha, L_c/W, A/w, w/p, Fr$) می‌باشد، دارای بهترین نتایج با $R^2=0/981$, $DC=0/954$, $RMSE=0/025$ در مرحله آزمون می‌باشد. نمودار مدل شماره ۹ به دو حالت در شکل ۷ ترسیم شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که این مدل در مرحله آزمون

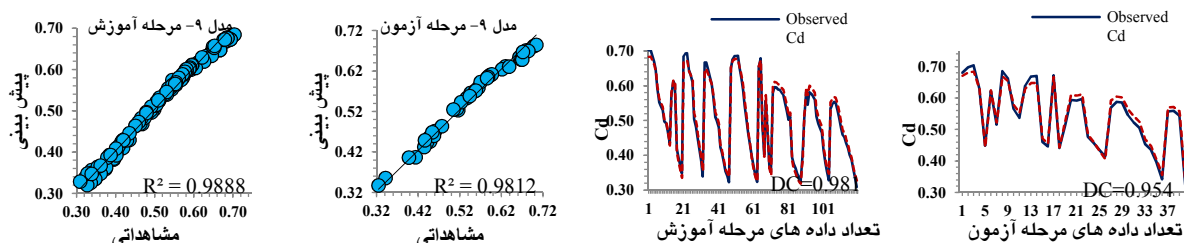
سرریزهای کنگره‌ای با جهت گیری معکوس سرریزهای کنگره‌ای معکوس نیز با همان شرایط هندسی و هیدرولیکی و معیارهای خطا بکار برده شده در سرریزهای کنگره‌ای نرمال، توسط ماشین بردار پشتیبان مورد بررسی قرار گرفت. در جدول ۵، ده مدل انتخابی به همراه پارامترها و معیارهای ارزیابی مدل‌ها و

پارامترها برای تعیین ضریب دبی در سرریزهای کنگره-ای معکوس می باشند که علت آن در بخش قبلی توضیح داده شده است.

به ازاء مقادیر $H_T/P > 0.18$ دارای دقت بالایی بوده و به ازاء مقادیر $H_T/P < 0.18$ مقادیر مدل SVM نسبت به مقادیر آزمایشگاهی، اختلاف کمتر از ۵ درصد دارد. بررسی نتایج معیارهای ارزیابی (جدول ۵ و ۸) نشان می-دهد که پارامترهای H_T/P و عدد فرود (Fr) مؤثرترین

جدول ۵- معیارهای ارزیابی مدل های مختلف برای تعیین ضریب دبی سرریزهای قوسی کنگره ای معکوس.

ترکیبات ورودی	آموزش			آزمون			c	ε	γ
	R ²	DC	RMSE	R ²	DC	RMSC			
۱) H_T/P	۰/۹۰۰	۰/۸۹۷	۰/۰۳۴	۰/۸۶۸	۰/۸۶۰	۰/۰۳۵	۱۰	۰/۱	۲
۲) $H_T/P, \alpha$	۰/۹۰۰	۰/۸۹۸	۰/۰۳۵	۰/۸۶۸	۰/۸۶۰	۰/۰۳۶	۱۰	۰/۱	۲
۳) $H_T/P, \alpha, A/w$	۰/۹۲۵	۰/۹۲۴	۰/۰۳۱	۰/۸۷۸	۰/۸۷۸	۰/۰۳۵	۱۰	۰/۱	۲
۴) $H_T/P, \alpha, L_c/W, A/w$	۰/۹۱۹	۰/۹۱۹	۰/۰۳۲	۰/۸۷۸	۰/۸۷۴	۰/۰۳۵	۱۰	۰/۱	۰/۱
۵) $H_T/P, \alpha, L_c/W, A/w, w/p$	۰/۹۴۶	۰/۹۴۳	۰/۰۲۶	۰/۹۱۵	۰/۹۱۳	۰/۰۲۹	۱۰	۰/۱	۲
۶) $H_T/P, L_c/W, A/w$	۰/۹۲۱	۰/۹۱۶	۰/۰۳۱	۰/۹۳۰	۰/۸۴۰	۰/۰۳۲	۱۰	۰/۱	۰/۵
۷) $H_T/P, \alpha, w/p$	۰/۹۴۸	۰/۹۴۷	۰/۰۲۰	۰/۹۱۲	۰/۹۱۰	۰/۰۲۶	۱۰	۰/۱	۳
۸) $H_T/P, L_c/W$	۰/۹۲۱	۰/۹۲۱	۰/۰۳۱	۰/۸۷۰	۰/۸۶۹	۰/۰۳۶	۱۰	۰/۱	۳
۹) $H_T/P, \alpha, L_c/W, A/w, w/p, Fr$	۰/۹۸۲	۰/۹۸۱	۰/۰۱۵	۰/۹۸۱	۰/۹۵۴	۰/۰۲۵	۱۰	۰/۱	۰/۵
۱۰) $H_T/P, L_c/W, A/w, Fr$	۰/۹۲۰	۰/۹۱۶	۰/۰۳۴	۰/۸۷۲	۰/۸۷۱	۰/۰۳۶	۱۰	۰/۱	۰/۵



شکل ۷- ضریب دبی مشاهداتی در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده سرریزهای قوسی معکوس برای مدل برتر.

به $RMSE=0.013$ در مرحله آزمون می‌باشد. با توجه به جدول‌های ۶ و ۸ و با توجه به اینکه بیشترین تغییرات آزمایشگاهی در هندسه سرریزهای قوسی کنگره‌ای، پارامترهای (α/θ) و H_T/P می‌باشد لذا پارامترهای نسبت H_T/P و نسبت زاویه دیواره‌ها به زاویه سیکل قوسی (α/θ) به‌ترتیب مؤثرترین پارامترها برای تعیین ضریب دبی در سرریزهای قوسی کنگره‌ای بدون تیغه‌شکن می‌باشند.

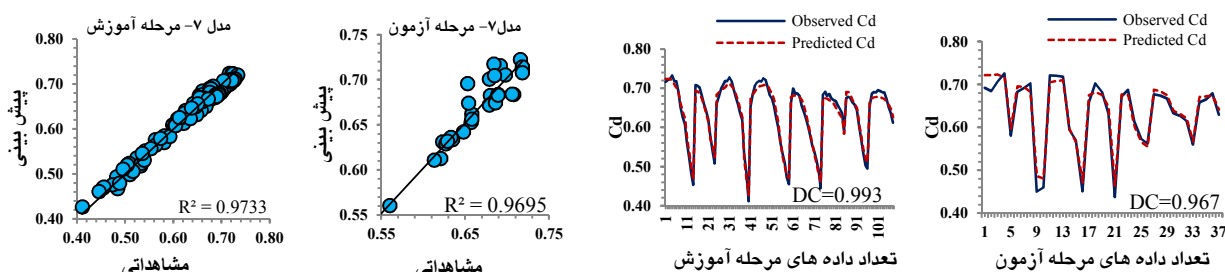
سرریزهای قوسی کنگره‌ای بدون تیغه‌شکن^{۱۴}

در جدول ۶، هشت مدل انتخابی به‌همراه پارامترها و معیارهای ارزیابی مدل‌ها و پارامترهای بهینه شده ماشین بردار پشتیبان (c, ϵ, γ) ارائه شده است. در ماشین بردار پشتیبان (SVM)، مدل ۷ به‌عنوان مدل برتر نسبت به سایر مدل‌ها انتخاب شده است. نتایج مدل شماره ۷ در شکل ۸ در دو حالت به‌عنوان مدل داده کاوی ترسیم شده است که دارای $R^2=0.970$ ، $DC=0.967$.

¹⁴Arced labyrinth weir without the nappe breaker

جدول ۶- معیارهای ارزیابی مدل‌های مختلف برای تعیین ضریب دبی سرریزهای قوسی کنگره‌ای بدون تیغه‌شکن.

ترکیبات ورودی	آموزش			آزمون			c	ε	γ
	R ²	DC	RMSE	R ²	DC	RMSE			
۱) H _T /P	۰/۸۵۵	۰/۸۵۲	۰/۰۲۲	۰/۸۲۲	۰/۸۰۳	۰/۰۲۳	۱۰۰	۰/۰۱	۴/۱
۲) H _T /P, α/θ	۰/۸۶۰	۰/۸۶۰	۰/۰۲۰	۰/۸۵۲	۰/۸۴۳	۰/۰۲۸	۱۰۰	۰/۰۱	۴/۱
۳) H _T /P, α/θ, N	۰/۸۶۴	۰/۸۶۰	۰/۰۳۲	۰/۸۴۴	۰/۸۳۵	۰/۰۳۵	۱۰۰	۰/۰۱	۳/۵
۴) H _T /P, α/θ, N, L _c /W	۰/۸۹۰	۰/۸۸۸	۰/۰۲۵	۰/۸۵۲	۰/۸۴۲	۰/۰۳۰	۱۰۰	۰/۰۱	۲/۵
۵) H _T /P, α/θ, N, L _c /W, P/t _w	۰/۹۳۱	۰/۹۱۵	۰/۰۲۱	۰/۹۲۰	۰/۹۰۸	۰/۰۲۴	۱۰۰	۰/۰۱	۲/۵
۶) H _T /P, N, α/θ, P/t _w	۰/۹۲۰	۰/۸۹۳	۰/۰۲۵	۰/۹۰۴	۰/۸۹۰	۰/۰۲۸	۱۰۰	۰/۰۱	۲/۷
۷) H _T /P, L _c /W, α/θ	۰/۹۹۴	۰/۹۹۳	۰/۰۰۶	۰/۹۷۰	۰/۹۶۷	۰/۰۱۳	۱۰۰	۰/۰۱	۴/۱
۸) H _T /P, L _c /W	۰/۸۷۴	۰/۸۷۲	۰/۰۲۹	۰/۸۷۱	۰/۸۶۹	۰/۰۳۱	۱۰۰	۰/۰۱	۴/۱



شکل ۸- ضریب دبی مشاهداتی در مقابل مقادیر پیش‌بینی‌شده سرریزهای قوسی کنگره‌ای بدون تیغه‌شکن برای مدل برتر

در جدول ۷، هشت مدل انتخابی به همراه پارامترها و معیارهای ارزیابی مدل‌ها (R², DC, RMSE) و پارامترهای بهینه‌شده ماشین بردار پشتیبان ارائه شده است. در ماشین‌های بردار پشتیبان (SVM)، مدل شماره ۷ بهترین نتایج با R²=۰/۹۶۰، DC=۰/۹۵۸، RMSE=۰/۰۱۰ در مرحله آزمون از خود نشان می‌دهد. نتایج مدل شماره ۷ که شامل پارامترهای (H_T/P, L_c/W, α/θ) است به دو حالت در شکل ۹ ترسیم شده است. بررسی نتایج معیارهای ارزیابی نشان می‌دهد که به-ترتیب پارامترهای نسبت بار (H_T/P)، نسبت زاویه دیواره-ها به زاویه سیکل قوسی (α/θ) و نسبت طول تاج مؤثر به عرض سیکل (L_c/W) پارامترهای مؤثر برای پیش‌بینی ضریب دبی در سرریزهای قوسی کنگره‌ای با تیغه‌شکن می‌باشند.

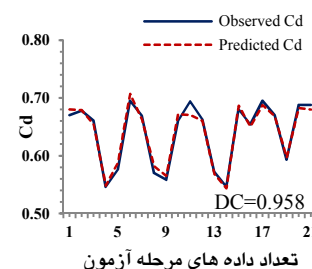
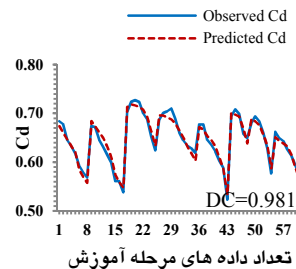
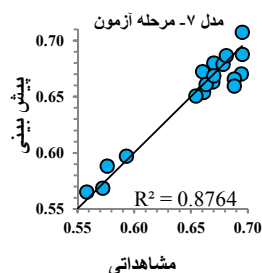
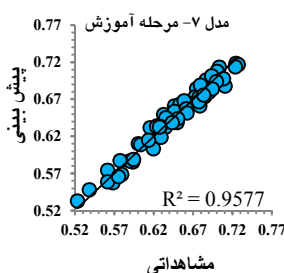
سرریزهای قوسی کنگره‌ای با تیغه‌شکن^{۱۵}

سرریزهای قوسی کنگره‌ای با تیغه‌شکن نیز با همان شرایط هندسی و هیدرولیکی سرریزهای قوسی کنگره‌ای مورد آزمایش قرار گرفته است با این تفاوت که در این نوع سرریزها از یک نوع تیغه شکن (Nappe Breakers) در دماغه‌های پایین‌دست سرریزهای قوسی کنگره‌ای برای بررسی شرایط هوادهی و پایداری تیغه‌های ریزشی به‌ازاء دبی‌های مختلف استفاده شده است (شکل ۳-ج). نتایج نشان داده است که در صورت استفاده از تیغه‌شکن‌ها، تلاطم و نوسانات تیغه‌های ریزشی کمتر شده و تیغه‌های ریزشی به حالت پایدارتری می‌رسند ولی با نصب تیغه‌شکن‌ها ضریب دبی سرریزها کاهش می‌یابد (کروکستون و تولیس، ۲۰۱۰).

¹⁵ Arced labyrinth weir with the nappe breaker

جدول ۷- معیارهای ارزیابی مدل‌های مختلف برای تعیین ضریب دبی سرریزهای قوسی کنگره‌ای با تیغه‌شکن.

ترکیبات ورودی	آموزش			آزمون			c	ε	γ
	R ²	DC	RMSE	R ²	DC	RMSE			
۱) H _T /P	۰/۷۴۹	۰/۷۴۸	۰/۰۳۴	۰/۷۴۶	۰/۷۱۳	۰/۰۳۶	۱۰	۰/۰۱	۱
۲) H _T /P, α/θ	۰/۹۲۹	۰/۹۲۸	۰/۰۳۲	۰/۹۱۵	۰/۹۱۳	۰/۰۳۳	۱۰	۰/۰۱	۵
۳) H _T /P, α/θ, N	۰/۹۵۲	۰/۹۵۱	۰/۰۳۵	۰/۸۳۳	۰/۸۱۴	۰/۰۳۷	۱۰	۰/۰۱	۱/۲
۴) H _T /P, α/θ, N, L _c /W	۰/۹۶۸	۰/۹۶۱	۰/۰۳۰	۰/۸۶۶	۰/۸۵۲	۰/۰۳۲	۱۰	۰/۰۱	۳
۵) H _T /P, α/θ, N, L _c /W, P/t _w	۰/۹۷۲	۰/۹۷۰	۰/۰۰۸	۰/۹۲۵	۰/۸۸۶	۰/۰۱۴	۱۰	۰/۰۱	۲/۵
۶) H _T /P, N, α/θ, P/t _w	۰/۹۷۴	۰/۹۷۱	۰/۰۳۰	۰/۸۶۸	۰/۸۵۹	۰/۰۳۱	۱۰	۰/۰۱	۴
۷) H _T /P, L _c /W, α/θ	۰/۹۸۲	۰/۹۸۱	۰/۰۰۶	۰/۹۶۰	۰/۹۵۸	۰/۰۱۰	۱۰	۰/۰۱	۵
۸) H _T /P, L _c /W	۰/۸۳۵	۰/۵۵۰	۰/۰۳۴	۰/۸۳۱	۰/۵۱۱	۰/۰۴۰	۱۰	۰/۰۱	۱۰



پیش‌بینی شده سرریزهای قوسی کنگره‌ای با تیغه شکن برای مدل برتر.

پارامترها مشخص گردد که نتایج به دست آمده از تحلیل حساسیت پارامترهای موجود در مدل ۷ نشان‌دهنده حساسیت مدل SVM نسبت به پارامتر H_T/P می‌باشد. نتایج به دست آمده از تحلیل حساسیت مدل‌های برتر انواع سرریزها در جدول ۸ ارائه شده است که سرریزهای کنگره‌ای بررسی شده بر روی کانال (حالت نرمال و معکوس) در درجه اول به عدد بدون بعد فرود (F_r) و در درجه دوم به پارامتر بدون بعد H_T/P بسیار حساس بوده و سرریزهای قوسی کنگره‌ای (با تیغه‌شکن و بدون تیغه-شکن) که بر روی مخزن نصب و بررسی شده‌اند به پارامتر بدون بعد (H_T/P) و در درجه دوم به عدد بدون بعد (α/θ) حساس می‌باشد.

تحلیل حساسیت مدل‌ها

در مدل‌های معرفی شده SVM تأثیر تمامی پارامترها (L_c/W, A/w, w/p, Fr, α/θ, H_T/P) در برآورد ضریب دبی سرریزها به‌طور همزمان در نظر گرفته شده است، لذا جهت بررسی تأثیر یک به یک پارامترها در تعیین ضریب دبی سرریزها، با حذف آنها در ورودی مدل‌ها و با همان سری داده‌ها، مدل‌ها مجدداً اجرا شدند. به‌عنوان مثال در سرریز قوسی کنگره‌ای با تیغه‌شکن مدل شماره ۷ در SVM با پارامترهای (α/θ, L_c/W, H_T/P) مدل برتر انتخاب شده است که جهت بررسی حساسیت، مدل‌ها سه بار دیگر با همان شرایط قبلی و با حذف یکی از پارامترها اجرا گردید تا تأثیر حذف هر کدام از

جدول ۸- نتایج تحلیل حساسیت مدل‌ها به انواع سرریزها.

درصد تغییرات حساسیت پارامترهای مؤثر				انواع سرریزها
RMSE	DC	R ²	پارامترهای مؤثر	
۲۵	۱۲	۱۳	F _r	سرریز کنگره‌ای (حالت نرمال)
۲۳	۱۰	۱۱	F _r	سرریز کنگره‌ای (حالت معکوس)
۳۳	۱۵	۱۷	H _T /p	سرریز قوسی کنگره‌ای (بدون تیغه‌شکن)
۳۱	۱۴	۱۶	H _T /p	سرریز قوسی کنگره‌ای (با تیغه‌شکن)

نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق قابلیت عملکرد روش ماشین بردار پشتیبان (SVM) برای پیش‌بینی ضریب دبی انواع سرریزهای کنگره‌ای و قوسی کنگره‌ای مورد بررسی قرار گرفت و مجموعاً از ۵۲۷ داده آزمایشگاهی برای بررسی نتایج استفاده شد. جهت ارزیابی کارایی مدل‌ها و مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده با داده‌های آزمایشگاهی از توابع آماری (R², DC, RMSE) استفاده و نتایج زیر به دست آمده است. در سرریزهای کنگره‌ای نرمال و معکوس نصب‌شده بر روی کانال‌ها، نتایج پیش‌بینی ضریب دبی توسط ماشین بردار پشتیبان با داده‌های آزمایشگاهی همخوانی بسیار خوبی داشته و مقادیر شاخص‌های آماری در مرحله آزمون به ترتیب برابر (R²=۰/۹۷۰ و RMSE=۰/۰۱۳ و DC=۰/۹۶۷) و (R²=۰/۹۶۰ و RMSE=۰/۰۱۰ و DC=۰/۹۵۸) می‌باشند. بررسی تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که برای تمامی حالات سرریزهای قوسی کنگره‌ای نصب‌شده بر روی مخزن به ترتیب پارامترهای H_T/P و نسبت زاویه دیواره‌ها به زاویه سیکل قوسی (α/θ) مؤثرترین پارامترها برای پیش‌بینی ضریب دبی در سرریزهای قوسی کنگره‌ای می‌باشند. در تمامی حالات سرریزهای کنگره‌ای، تابع کرنل گوسی (RBF) نسبت به سایر توابع کرنل، عملکرد بهتری نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده و مقایسه شده با داده‌های آزمایشگاهی، می‌توان مدل SVM را به عنوان یک مدل مناسب و با نتایج قابل قبول برای تعیین ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای توصیه نمود.

در این تحقیق قابلیت عملکرد روش ماشین بردار پشتیبان (SVM) برای پیش‌بینی ضریب دبی انواع سرریزهای کنگره‌ای و قوسی کنگره‌ای مورد بررسی قرار گرفت و مجموعاً از ۵۲۷ داده آزمایشگاهی برای بررسی نتایج استفاده شد. جهت ارزیابی کارایی مدل‌ها و مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده با داده‌های آزمایشگاهی از توابع آماری (R², DC, RMSE) استفاده و نتایج زیر به دست آمده است. در سرریزهای کنگره‌ای نرمال و معکوس نصب‌شده بر روی کانال‌ها، نتایج پیش‌بینی ضریب دبی توسط ماشین بردار پشتیبان با داده‌های همخوانی بسیار خوبی داشته و مقادیر شاخص‌های آماری در مرحله آزمون به ترتیب برابر (R²=۰/۹۷۰ و RMSE=۰/۰۱۳ و DC=۰/۹۶۷) و (R²=۰/۹۶۰ و RMSE=۰/۰۱۰ و DC=۰/۹۵۸) می‌باشند. بررسی تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که برای تمامی حالات سرریزهای قوسی کنگره‌ای نصب‌شده بر روی مخزن به ترتیب پارامترهای H_T/P و نسبت زاویه دیواره‌ها به زاویه سیکل قوسی (α/θ) مؤثرترین پارامترها برای پیش‌بینی ضریب دبی در سرریزهای قوسی کنگره‌ای می‌باشند. در تمامی حالات سرریزهای کنگره‌ای، تابع کرنل گوسی (RBF) نسبت به سایر توابع کرنل، عملکرد بهتری نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده و مقایسه شده با داده‌های آزمایشگاهی، می‌توان مدل SVM را به عنوان یک مدل مناسب و با نتایج قابل قبول برای تعیین ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای توصیه نمود.

منابع مورد استفاده

عباسپور ا و ارونقی ه، ۱۳۹۰. پیش‌بینی جریان بر روی سرریز مرکب مثلثی- مستطیلی با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک. دهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، ۱۷-۱۹ آبان ماه، دانشگاه گیلان، رشت.

- Azamathulla H Md, Haghiabi AH and Parsaie A, 2016. Prediction of side weir discharge coefficient by support vector machine technique. *Water Science & Technology: Water Supply* doi: 10.2166/ws.2016.014.
- Christensen NA, 2012. Flow characteristics of arced labyrinth weirs. M Sc thesis, Utah State University, Logan, UT.
- Crookston BM and Tullis B, 2010. Hydraulic performance weirs. Proc Int Junior Researcher and Engineer Workshop on Hydraulic structures (IJREWHS '10). Edinburgh, U.K.
- Gentilini B, 1940. Weirs within Plan Oblique Crest and Zig-zag. *Memories and Studies of the Institute of Hydraulics and Hydraulic Regil the Polytechnic of Milan*.
- Goel A, 2013. Modeling aeration of sharp crested weirs by using support vector machines. *World Academy of Science, Engineering and Technology* Vol: 7 (12): Schola r.waset.org /1999.8/ 10002382.
- Goel A, 2014. Neural network technique for prediction of discharge coefficient and discharge for a weir, *Journal of Indian Water Resources Society* 34(2): 2014.
- Henderson, FM, 1966. *Open Channel Flow*. Macmillan, New York, USA.
- Hanbay D, Baylar A and Batan M, 2009. Prediction of aeration efficiency on stepped cascades by using least square support vector machines. *Expert Systems with Applications* 36 (3): 4248–4252.
- Hay N and Taylor G, 1970. Performance and design of labyrinth weirs. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 96(11): 2337-2357.
- Juma IA, Hussein H and AL-Sarraj M, 2014. Analysis of hydraulic characteristics for hollow semi-circular weirs using artificial neural networks. *Flow Measurement and Instrumentation* 38: 49–53.
- Kocahan H, and Taylor G, 2002. Rehabilitation of Black Rock Dam Seepage & Inadequate Spillway. Hydroplus, Inc., Arlington, Va.
- Kumar S, Ahmad Z and Mansoor T, 2011. A new approach to improve the discharging capacity of sharp crested triangular plan form weirs. *Flow Measurement and Instrumentation* 22:175–180.
- Mohamed K and Oliver B, 2005. Development of a discharge equation for side weirs using artificial neural networks. *Journal of Hydroinformatics* 7(1): 31–39.
- Parsaie A and Haghiabi AH, 2014. Assessment of some famous empirical equation and artificial intelligent model (MLP, ANFIS) to predicting the side weir discharge coefficient. *Applied Research in Water and Wastewater* 2: 75-79.
- Parsaie A, Yonesi HA and Najafian SH, 2015. Predictive modeling of discharge in compound open channel by support vector machine technique. *Modelling Earth Systems and Environment*. 1:1. doi: 10.1007/s40808-015-0002-9.
- 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, Akhgar S, Salmasi F and Shiri J, 2014. Modeling energy dissipation over stepped spillways using machine learning approaches. *Journal of Hydrology* 508: 254–265.
- Seamons TR, 2014. Labyrinth Weir: A look into geometric variation and its effect on efficiency and design method predictions. M.Sc. thesis, Utah State University, Logan, UT.
- Taylor G, 1968. The performance of labyrinth weirs. Ph.D. thesis, University of Nottingham, Nottingham, England.
- Vapnik VN, 1995. *The Nature of Statistical Learning Theory*. Springer, New York.
- Vapnik, V N, 1998. *Statistical Learning Theory*. Wiley, New York, pages 768.