

مقاله علمی-پژوهشی

تعیین ضریب دبی سرریزهای لبه تیز کنگره‌ای U شکل تک سیکل با استفاده از روش مبتنی بر کرنل SVM

فیروز محمدی^{۱*}، یوسف حسن‌زاده^۲، کیومرث روشنگر^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۳/۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۴/۳۱

چکیده

سرریزها از جمله سازه‌های هیدرولیکی و بسیار حیاتی از جوانب مختلف همچون اقتصادی، زیست محیطی، ایمنی و امنیتی می‌باشند که علاوه بر عبوردهی و اندازه‌گیری جریان، سازه‌ای کنترل کننده در مواقع سیلابی هستند. هدف اصلی تحقیق، تخمین ضریب دبی به روش هوشمند ماشین بردار پشتیبان با کاربرد داده‌های آزمایشگاهی و همچنین تحلیل عملکرد هیدرولیکی سرریزها می‌باشد. در این مطالعه، متغیرهای هندسی سرریزها به ارتفاع‌های ۱۰، ۱۲/۵ و ۱۵ سانتی‌متر، طول قوس‌های متفاوت به مقادیر ۴۰/۸۲، ۴۵ و ۴۸/۱۰ سانتی‌متر می‌باشد. برای تحلیل عملکرد از آنالیز ابعادی به روش پی باکینگهام استفاده گردید، سپس با روش هوشمند با در نظر گرفتن مدل‌های متفاوت به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف در تعیین ضریب دبی پرداخته شد. با افزایش طول قوس‌ها، راندمان دبی کاهش می‌یابد، با اینکه با افزایش یافتن طول قوس سرریزها طول تاج افزایش می‌یابد، راندمان آبدگری سرریز روند کاهشی می‌گیرد. نتایج حاصل نشان داد که روش هوشمند قادر به تخمین ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای U شکل می‌باشد. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که با حذف پارامتر H/P میزان خطای مدل برای سری داده‌های آموزش تا ۱۴ درصد و برای سری داده‌های آزمون تا ۲۰ درصد افزایش می‌یابد و این پارامتر موثرترین متغیر در تخمین ضریب دبی در سرریزهای کنگره‌ای U شکل است.

واژه‌های کلیدی: تحلیل حساسیت، سرریزهای کنگره‌ای، ضریب دبی، طول قوس، ماشین بردار پشتیبان

مقدمه

(Crookston and Tullis, 2012). در یک عرض ثابت کانال، سرریزهای کنگره‌ای در مقایسه با سرریزهای خطی طول تاج بیشتری دارند. یک سرریز کنگره‌ای می‌تواند در یک هد ثابت با سرریز خطی دبی بیشتری را از روی خود عبور دهد، Crookston and Tullis (2013).

جنیتیلینی اولین مطالعه عملکرد هیدرولیکی برای سرریزهای کنگره‌ای را انجام داد. او راندمان هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای مورب و زیگزاک را با تاج لبه‌تیز استاندارد آزمایش کرد (Gentilini, 1940). جنیتیلینی یک رابطه‌ی هد-دبی مستقل از تعداد سیکل ارائه کرد (Gentilini, 1941). هی و تیلور جامع‌ترین تحقیق را بر روی سرریزهای کنگره‌ای مثلثی و دوزنقه‌ای (با شکل تاج لبه‌تیز) انجام دادند. آنها برای مقایسه عملکرد سرریزهای کنگره‌ای، از نسبت دبی سرریز کنگره‌ای به دبی سرریز خطی استفاده کردند. در منحنی‌های طراحی ارائه شده توسط آنها ارتفاع هیدرواستاتیک جریان به عنوان بار موثر بر روی سرریز لحاظ شده بود (Hay and Taylor, 1970). تویلیس و همکاران ظرفیت سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای را تابعی از بار هیدرولیکی کل، طول تاج موثر و ضریب آبدگری به‌دست آوردند،

سرریزهای کنگره‌ای با توجه به عملکرد مناسب هیدرولیکی و تنوع در هندسه، در کانال‌ها، رودخانه، دریاچه، مخازن برای کنترل هد آب، استهلاک انرژی، هوادهی جریان و اندازه‌گیری جریان ساخته می‌شوند. یک سرریز کنگره‌ای یک سرریز خطی چین‌خورده در پلان می‌باشد (Crookston and Tullis, 2013). با به‌کار بردن سرریزهای کنگره‌ای در سال‌های اخیر عملکرد نامناسب سرریزهای خطی بهبود یافته است، افزایش یافتن طول کل این سرریزها داخل یک کانال با عرض محدود از ویژگی‌های سرریزهای کنگره‌ای است

۱- دانشجوی دکتری عمران- سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده پردیس خودگردان،

دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- استاد گروه مهندسی آب، قطب علمی هیدروانفورماتیک، دانشکده مهندسی

عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۳- استاد گروه مهندسی عمران- آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز،

تبریز، ایران

(*- نویسنده مسئول: (Email: firouzm1979@gmail.com)

آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی (CFD) سرریزهای کنگره‌ای نیم‌دایره‌ای ۳ سیکل در دو حالت با و بدون شکننده تداخل جریان در راس کنگره را بررسی کردند، همچنین این محققین در نتایج‌شان اظهار داشتند استفاده از شکننده‌های تداخل جریان کاهش ضریب دبی را در حدود (۳/۱-۲/۲ درصد) بهبود می‌دهد که قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد (Bilhan et al., 2018).

در این میان، استفاده از روش‌های محاسبات نرم نظیر ماشین بردار پشتیبان نیز می‌تواند به عنوان ابزاری قدرتمند جایگزین برای معادله‌ها و مدل‌های تجربی به شمار آید. روش ماشین بردار پشتیبان می‌تواند به عنوان رگرسیون در مسائل مهندسی عمل کند. در سال‌های اخیر مطالعات محدودی در زمینه سرریزها با استفاده از روش‌های الگوریتم هوشمند انجام شده است که از آن جمله می‌توان به مطالعات زاجی و همکاران (۲۰۱۵) اشاره کرد، این محققان برپایه شبکه عصبی و بهینه‌سازی ازدحام زنبوران برای پیش‌بینی ظرفیت آبگذری سرریزهای کنگره‌ای مثلثی پرداختند. آنها عملکرد شبکه عصبی مبتنی بر شعاعی (RBNN) و در مقایسه با بهینه‌سازی ازدحام زنبوران بصورت چند لایه غیرخطی (MNLPSO) و چند لایه خطی (MLPSO) انجام دادند. این محققان از داده‌های آزمایشگاهی کومار و همکاران برای سرریزهای مثلثی در پلان استفاده کردند. آنها ۶۰ درصد داده‌های آزمایشگاهی را برای فرآیند تربینگ و ۴۰ درصد باقیمانده را برای تست کردن نتایج به کار بردند. براساس نتایج آنها، از میان مدل‌های مطالعه شده مدل (MNLPSO) دارای بیشترین دقت و مدل‌های (MLPSO) و (RBNN) در مرحله بعد از نظر دقت قرار گرفتند (Zaji et al., 2015, Kumar et al., 2011).

روشنگر و همکاران (۱۳۹۶) به روش رگرسیون بردار پشتیبان ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای و قوسی کنگره‌ای را مطالعه کردند. آنها از داده‌های آزمایشگاهی سیمونز، برای سرریزهای کنگره‌ای در ۲ حالت جهت‌گیری نرمال و معکوس و کریستینسن، برای سرریزهای قوسی کنگره‌ای در ۲ حالت با و بدون شکننده تداخل جریان استفاده کردند. با توجه به نتایج بدست آمده و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، می‌توان مدل SVM را به عنوان یک مدل مناسب و با نتایج قابل قبول برای تعیین ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای توصیه نمود

(Seamons, 2014; Christensen, 2012). کرمی و همکاران پیش‌بینی ضریب دبی سرریز کنگره‌ای مثلثی با استفاده از رگرسیون بردار پشتیبان، بردار پشتیبان رگرسیون-کرم شب‌تاب، متدولوژی واکنش سطحی و آنالیزهای مولفه اساسی را مطالعه نمودند. این محققان از داده‌های آزمایشگاهی کومار و همکاران (۲۰۱۱) برای

همچنین ضریب آبگذری تابعی از ارتفاع سرریز، بار هیدرولیکی کل، ضخامت دیواره سرریز، شکل تاج، شکل راس و زاویه دیواره‌های جانبی سرریز می‌باشد (Tullis et al., 1995). حیدرپور و همکاران (۱۳۸۵) سرریزهای چند وجهی با پلان مستطیلی و U شکل را بررسی کردند و برای سرریزهای مستطیلی و U شکل در پلان پارامترهای تاثیر ارتفاع سرریز، تاثیر طول موازی جهت جریان و طول دماغه نسبت به طول گوشواره بر ضریب دبی بررسی نموده و همچنین سرریزهای چند وجهی با پلان مستطیلی و U شکل را با سرریزهای خطی مقایسه کردند. آنها نتیجه‌گیری نمودند در صورتی که گوشه‌های سرریز مستطیلی، انحنا دار شوند و سرریز بصورت U شکل ساخته شود، تداخل سفره‌های ریزشی کاهش یافته و عملکرد سرریز بهبود می‌یابد. قدسیان مطالعات آزمایشگاهی بر روی سرریز کنگره‌ای مثلثی با شکل تاج‌های متفاوت انجام داد و سپس با داده‌های آزمایشگاهی رابطه‌ای منظم برای ضریب دبی و هد-دبی معرفی کرد. در مطالعات ایشان ضریب دبی تابعی از نسبت هد روی سرریز به ارتفاع سرریز، نسبت طول سرریز به پهنای سرریز و شکل تاج بدست آمد (Ghodsian, 2009). خوده و همکاران ارزیابی و آنالیز ضرایب تاج سرریزهای کنگره‌ای دوزنقه‌ای را بررسی کردند، آنالیزهای مقایسه‌ای آنها نشان داد که ماکزیمم تفاوت ضریب دبی بر واحد عرض، در مقادیر ضریب تاج متفاوت حدود ۵ درصد می‌باشد (Khode et al., 2010). خوده و همکاران با هدف فراهم کردن دامنه اختیار بیشتر در طرح سرریزهای کنگره‌ای، دسته‌ای دیگر از منحنی‌های طراحی را در محدوده وسیع‌تری از زاویه دیوار جانبی (۸ تا ۳۰ درجه) سرریز ارائه کردند (Khode et al., 2012). کومار و همکاران ضریب آبگذری سرریز لبه تیز مثلثی در پلان را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که با کاهش زاویه راس، برای مقادیر زیاد نسبت بار آبی روی سرریز به ارتفاع سرریز به دلیل تداخل جت‌های ریزشی ضریب آبگذری کاهش می‌یابد و برای مقادیر کم نسبت بار آبی روی سرریز به ارتفاع سرریز ضریب آبگذری افزایش می‌یابد (Kumar et al., 2011). کراکستون و تولیس یک روش برای طراحی هیدرولیکی و آنالیز سرریزهای کنگره‌ای بر پایه نتایج آزمایشگاهی بصورت مدل‌سازی فیزیکی ارائه کردند (Crookston and Tullis, 2013). کارولو و همکاران یک رابطه دبی-هد بی‌بعد برای سرریزهای کنگره‌ای مثلثی با تغییر در جهت جریان رئوس مثلث‌ها ارائه کردند (Carollo et al., 2017).

بی‌جن‌خان و کوچک‌زاده در یک بررسی آزمایشگاهی، روابط ضریب دبی برای سرریزهای لبه تیز کنگره‌ای مثلثی تک سیکل را در حالت جریان آزاد و مستغرق ارائه کردند (Bijankhan and Kouchakzadeh, 2017). بیلهان و همکاران به صورت

- 1- Computational fluid dynamic
- 2- Radial Basis Neural Network
- 3- Multiple Linear Particle Swarm Optimization

در نهایت ساختار مدل سیستم استنتاج فازی-عصبی بهینه تر می باشد (Haghiabi et al., 2018; Kumar et al., 2011; Ghodsian, 2009).

در مطالعات پیشین مدل های هندسی متعددی در مورد سرریزهای کنگره ای به صورت آزمایشگاهی توسط محققان مختلف مورد بررسی قرار گرفته است، اما سرریز U شکل در پلان (تک سیکل) مورد مطالعه قرار نگرفته است. در این تحقیق تاثیر طول قوس های مختلف، ارتفاع های متفاوت سرریز در شرایط جریان آزاد به صورت آزمایشگاهی و همچنین روش هوشمند مبتنی بر کرنل (SVM) جهت پیش بینی ضریب دبی بررسی شده است.

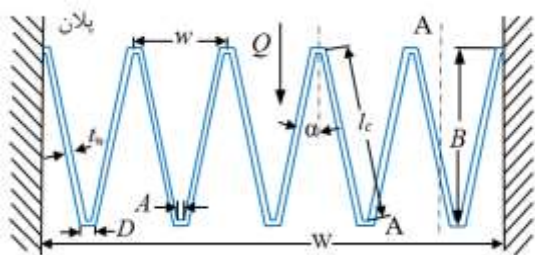
مبانی هیدرولیک سرریزهای کنگره ای در شرایط جریان آزاد

جریان روی سرریزهای کنگره ای سه بعدی بوده و به آسانی به صورت ریاضی تشریح نمی شود و تابع دبی به صورت مطالعه آزمایشگاهی و براساس تحلیل ابعادی به دست می آید. ظرفیت سرریز کنگره ای دوزنقه ای تابعی از هد کل، طول تاج مؤثر و ضریب دبی است. ضریب دبی تابعی از هد کل، ارتفاع سرریز، ضخامت سرریز، شکل تاج، شکل نوک و زاویه لبه های کناری می باشد. برای ساده سازی آنالیز، از تاثیر ویسکوزیته و کشش سطحی، چشم پوشی شده است (Tullis et al., 1995).

تولیس و همکاران برای طراحی سرریز کنگره ای یک معادله ی توسعه یافته برای سرریزهای کنگره ای دوزنقه ای ارائه دادند. بیشترین تاثیر ضریب دبی وابسته به پارامترهای موثر یکسان، نسبت به سرریز خطی می باشد، دماغه سرریز کنگره ای دوزنقه ای در رأس و زاویه کنگره نیز از پارامترهای تاثیرگذار به شمار می رود. رابطه دبی برای سرریزهای کنگره ای را می توان به صورت زیر بیان کرد (Tullis et al., 1995)

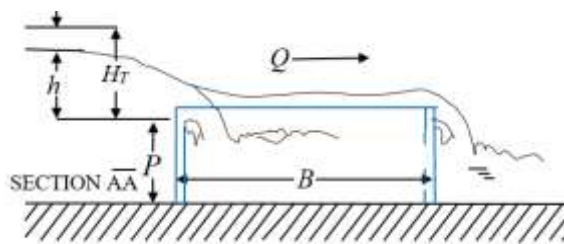
$$Q = \frac{2}{3} C_d (\alpha^\circ) \sqrt{2g} L_c H_T^{3/2} \quad (1)$$

که در آن: Q دبی عبوری از سرریز، g شتاب ثقل، C_d ضریب دبی سرریز، L_c طول موثر سرریز، H_T انرژی کل بالای سرریز می باشد.



سرریزهای مثلثی در پلان استفاده کردند. از میان مدل های مطالعه شده مدل بردار پشتیبان رگرسیون-کرم شتاب دارای بیشترین توانایی برای شبیه سازی می باشد (Karami et al., 2016). کرمی و همکاران پیش بینی ضریب دبی سرریز کنگره ای مثلثی را با استفاده از روش های ماشین یادگیری بیکران، شبکه عصبی مصنوعی و برنامه نویسی ژنتیک مطالعه کردند. این محققان از داده های آزمایشگاهی کومار و همکاران، برای سرریزهای مثلثی در پلان استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که مدل ماشین یادگیری بیکران بهترین کارایی با حداقل خطا را نسبت به مدل شبکه عصبی مصنوعی و برنامه نویسی ژنتیک دارد (Karami et al., 2018; Kumar et al., 2011).

کاردان و همکاران بهینه سازی سرریزهای کنگره ای دوزنقه ای را با استفاده از الگوریتم ژنتیک کار کردند. این محققان از مدل فیزیکی سد UTE ایالات متحده استفاده کرده و با بهینه سازی توسط الگوریتم ژنتیک، میانگین ۲۱ درصد حجم سرریز کنگره ای دوزنقه ای را با تعداد بهینه ۱۴ سیکل کاهش دادند (Kardan et al., 2017). حسینی و همکاران (۱۳۹۴) در مطالعه موردی بر روی سرریز کنگره ای دوزنقه ای سد UTE ایالات متحده از قابلیت سیستم استنتاج فازی و الگوریتم تفاضل تکاملی جهت بهینه کردن هندسه سرریز و تامین شرایط هیدرولیکی مناسب استفاده کردند. آنها از سیستم استنتاج فازی-عصبی برای آموزش و ارزیابی مدل تهیه شده مبتنی بر داده های آزمایشگاهی به منظور تعیین ضریب آبگذری سرریز بهره گرفتند و از الگوریتم تکامل تفاضلی برای بهینه سازی هندسه سرریز با تعریف تابع هدف کمینه سازی حجم بتن ریزی با تامین شرایط هیدرولیکی مناسب، بهره بردند. نتایج بدست آمده از مدل، نشان دهنده کاهش ۱۹/۲ درصدی در هزینه های بتن نسبت به طرح اجرا شده موجود می باشد. حقی آبی و همکاران با استفاده از شبکه عصبی چند لایه پرسپترون و سیستم استنتاج فازی-عصبی براساس مطالعات کومار و همکاران و قدسیان، ضریب دبی سرریز کنگره ای مثلثی یک و دو سیکل را مطالعه نمودند. آنها از تست گاما پارامترهای موثر بر ضریب دبی را انتخاب نمودند و ساختار مدل فازی-عصبی را طراحی کردند. مقایسه نتایج بین شبکه عصبی چند لایه پرسپترون و سیستم استنتاج فازی-عصبی که هر دو مدل از عملکرد قابل قبولی برخوردار بوده و



شکل ۱- طرح کلی سرریز کنگره ای دوزنقه ای شامل پارامترهای هندسی (Crookston and Tullis, 2012)

۴۵ و ۴۸/۱۰ سانتی‌متر، مورد آزمایش قرار گرفت. مدل برتر به دست آمده در روش SVM برای این منظور مورد استفاده قرار گرفت. جهت درک بهتر میزان تأثیر هر یک از متغیرهای مستقل روی ضریب دبی در سرریز کنگره‌ای، تحلیل حساسیت انجام شد. بدین منظور در مدل برتر، با حذف تک‌تک پارامترها از سری پارامترهای ورودی، مدل دوباره اجرا گردید و میزان تأثیر پارامتر حذف شده در کاهش دقت مدل با استفاده از معیارهای ارزیابی، مدل مورد ارزیابی قرار گرفت.

تحلیل ابعادی

با توجه به اینکه پارامترهای مختلف هندسی، هیدرولیکی و مشخصات سیال در مساله مورد نظر تأثیرگذار می‌باشند، پارامترهای موثر بر ضریب دبی بطور کامل انتخاب شده و سپس در ابتدا با استفاده از آنالیز پی باکینگهام پارامترهای تأثیرگذار به صورت بی‌بعد درآمده و با انجام آزمایش و تغییر متغیرهای ورودی، ارتباط بین پارامتر هدف با پارامترهای تأثیرگذار تعیین شده است.

با توجه به شکل (۲) در حالت عمومی، رابطه بین پارامترهای تأثیرگذار بر هیدرولیک سرریزهای غیرخطی انحنادار تک سیکل به صورت رابطه (۴) می‌باشد:

$$\varphi(\rho, g, \mu, \sigma, Q, h, P, t, L_c, R, W) = 0 \quad (4)$$

که در آن، ρ ، g ، μ و σ به ترتیب بیانگر، دانسیته سیال، شتاب ثقل، ویسکوزیته سیال و کشش سطحی سیال، همچنین L_c ، طول مؤثر سرریز می‌باشد.

با توجه به شکل ۱ پارامترهای مؤثر بر ضریب دبی شامل انرژی کل بالای سرریز (H_T)، طول مؤثر سرریز (L_c)، ارتفاع سرریز (P)، عرض سرریز (W)، زاویه بین دیواره سرریز (α)، ضخامت دیواره سرریز (t_w) و عمق جریان (y) می‌باشد. بنابراین براساس تحلیل ابعادی، ضریب دبی تابعی از پارامترهای بدون بعد به دست می‌آید.

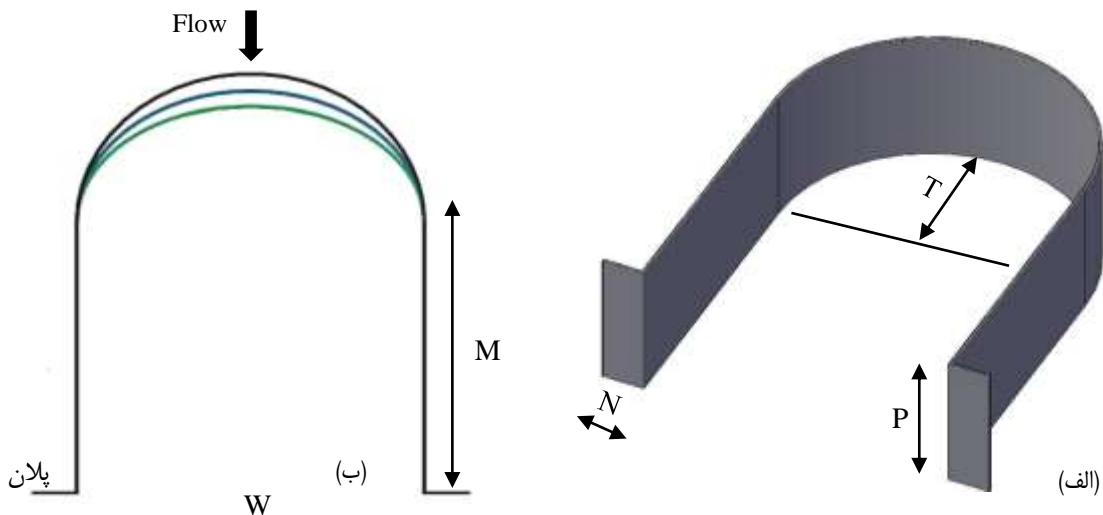
$$C_d = f(H_T, L_c, P, W, \alpha, t_w, y) \quad (2)$$

$$C_d = f\left(\frac{H_T}{P}, \frac{L_c}{P}, \frac{H_d}{W}, \frac{t_w}{W}, \alpha, \frac{y}{P}, \frac{y}{W}, \frac{L_c}{W}\right) \quad (3)$$

تحلیل ابعادی انجام گرفته و تحقیقات مختلف مانند تولیس و همکاران و هی و تیلور نشان می‌دهد که پارامتر بدون بعد نسبت هد کل به ارتفاع سرریز H_T/P به عنوان مهم‌ترین پارامتر در روابط ضریب دبی مطرح شده است (Tullis et al., 1995; Hay and Taylor 1970).

مواد و روش‌ها

در این پژوهش نتایج آزمایشگاهی سرریزهای کنگره‌ای لبه تیز U شکل در پلان (تک سیکل) با طول قوس و ارتفاع‌های مختلف، همچنین شبیه‌سازی هوشمند مدل‌ها با تغییرات هندسی سرریز، در حالت جریان آزاد بررسی شده است. با استفاده از آنالیز ابعادی و تئوری π ، پارامترهای موثر بر هیدرولیک سرریزها انتخاب و با استفاده از آنالیز حساسیت پارامترهای مؤثر در تخمین این پارامتر شناسایی شد، همچنین تأثیر مدل‌سازی متفاوت در تعیین ضریب دبی به روش هوشمند توسعه یافت. دقت نتایج آزمایشگاهی و روش هوشمند مبتنی بر کرنل به صورت آنالیز آماری نیز مقایسه و ارزیابی گردیده است. طول قوس‌ها به عنوان یک متغیر فیزیکی در سه حالت ۴۰/۸۲،



شکل ۲- سرریز کنگره‌ای U شکل مورد تحقیق (الف) پارامترهای هندسی (ب) طول قوس‌های مختلف

در شکل (۳) نشان داده شده، در حالت جریان آزاد انجام گردید. فلوم دارای دیواره‌هایی از جنس پلاکسی گلاس و کف فلزی می‌باشد، که جهت تامین دبی از پمپ حلزونی با دبی تقریباً تا ۸۰ لیتر بر ثانیه استفاده شد. اندازه‌گیری دبی توسط فلومتر التراسونیک در خط لوله تغذیه کانال که مابین مخزن بالادست و پایین دست و در یک مسیر مستقیم با ماکزیمم خطای ۲ درصد قرار داشت، انجام گرفت. فلوم در بالادست به یک منبع آرام‌کننده جریان با طول ۲/۵ متر و عرض ۱/۵ متر مجهز شده بود، همچنین جهت آرام کردن تلاطم جریان از دو صفحه مشبک و در پایین دست آن از سنگریزه و در ادامه از صفحات شناور بر روی سطح آب استفاده گردید. جریان آب پس از عبور از طول فلوم به داخل مخزنی در پایین دست ریخته شده و توسط یک پمپ سیکل چرخشی تکرار می‌گردید.

جهت اندازه‌گیری دقیق عمق جریان از عمق سنج نقطه‌ای با دقت (± 0.1) میلی‌متر استفاده شد که این عمق سنج قادر بود، در طول و عرض کانال حرکت کرده و ارتفاع تاج سرریز و عمق جریان در کل کانال را اندازه‌گیری کند. خط کش مدرج جهت اندازه‌گیری هد روی سرریز در حالت جریان یکنواخت از محل شروع رمپ (سطح شیب‌دار) به اندازه ۶ برابر ارتفاع سرریز به سمت بالادست قرار داشت. شیب فلوم مورد آزمایش با استفاده از جک قابل تغییر بوده که در این تحقیق شیب فلوم برای تمامی آزمایش‌ها در صفر درجه (افقی) ثابت قرار گرفت. تمامی مدل‌ها بر روی یک سکوی افقی مسطح به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر، طول ۱ متر نصب گردیده و یک صفحه شیب‌دار با زاویه ۵ درجه نسبت به افق و طول ۱/۰۶ متر، کف فلوم را به صفحه سکوی مسطح متصل کرده تا خطوط جریان بطور موازی از کف کانال به صفحه افقی جریان یابد. بر مبنای یافته‌های ویلمور (۲۰۰۴)، که اثرات صفحه شیب‌دار بالادست سرریزهای کنگره‌ای را مورد آزمون قرار داده است، نصب و هندسه این صفحه شیب‌دار تأثیری بر روی کارایی هیدرولیکی مدل‌های فیزیکی (نسبت به حالت نزدیک شدن افقی جریان در شرایط کاربرد در مخازن سدها) ندارد (Willmore, 2004).

برای هر دبی مشخص جهت اطمینان از جریان پایدار در فلوم، اندازه‌گیری پارامترهای هیدرولیکی (عمق جریان و دبی جریان) پس از ۱۰ دقیقه انجام می‌گرفت. برای کنترل رقوم سطح آب در فلوم از یک دریچه بادبزی در انتهای پایین دست فلوم استفاده شده که نمای جانبی یک مدل فیزیکی در شکل (۲) و پارامترهای هیدرولیکی در شرایط جریان آزاد برای یک سرریز کنگره‌ای U شکل آورده شده است.

بیلهان و همکاران، سرریزهای کنگره‌ای لبه‌تیز نیم‌دایره‌ای ۳ سیکل با ۳ ارتفاع متفاوت با و بدون شکننده تداخل جریان را بررسی کرده و بصورت عددی نیز راندمان آگذری و عملکرد هیدرولیکی این

با توجه به اینکه سه بعد اصلی در مساله مورد نظر دخالت دارند، لذا طبق قضیه پی باکینگهام، تعداد ۸ پارامتر بی‌بعد می‌توان با استفاده از متغیرهای مساله بصورت رابطه ۵ تعیین نمود:

$$\pi_1 = \varphi(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8) \quad (5)$$

که در آن، π_1 الی π_8 گروه‌های بی‌بعد می‌باشند و از طریق آنالیز ابعدی با انتخاب P ، g و ρ به عنوان متغیرهای تکراری و به شرح ذیل به دست می‌آیند.

با ترکیب گروه‌های بی‌بعد ۱، ۳ و ۶ رابطه ۶ حاصل خواهد شد:

$$\pi_{1,3,6} = \frac{\pi_3}{\pi_1 \pi_6} = \frac{Q}{p^{5/2} g^{1/2}} \frac{P g \rho}{\mu L_c} = \frac{QP}{\mu L_c} = R_e \quad (6)$$

که در آن، R_e بیانگر عدد رینولدز می‌باشد.

با ترکیب گروه‌های بی‌بعد ۴ و ۲ رابطه ۷ حاصل خواهد شد.

$$\pi_{4,2} = \frac{\pi_4^2}{\pi_2} = \frac{h^2 p^2 g p}{p^2 \sigma} = \frac{h^2 g p}{\sigma} = We \quad (7)$$

که در آن، We بیانگر عدد وبر می‌باشد. با ترکیب گروه‌های

بی‌بعد ۵ و ۷ رابطه ۸ حاصل شده است:

$$\pi_{5,7} = \frac{\pi_7}{\pi_5} = \frac{\frac{R}{P}}{\frac{W}{P}} = \frac{R}{W} \quad (8)$$

با جمع‌بندی موارد فوق و با قرار دادن پارامترها در شکل

بی‌بعد به صورت رابطه (۹) می‌باشد:

$$\frac{Q}{p^{5/2} g^{1/2}} = \varphi\left(\frac{h}{p}, R_e, We, \frac{R}{W}\right) \quad (9)$$

به جز برای مقادیر بسیار کوچک هد روی سرریز، می‌توان از تاثیر لزجت و کشش سطحی (اعداد رینولدز و وبر) صرف‌نظر نموده و رابطه فوق را بصورت رابطه شماره ۱۰ ساده نمود و سمت چپ رابطه فوق، از جنس ضریب دبی بوده و لذا می‌توان نوشت:

$$C_d = \varphi\left(\frac{h}{p}, \frac{R}{W}\right) \quad (10)$$

برای تعریف روابط ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای U شکل در

پلان از پارامترهای بی‌بعد واقع در رابطه (۱۲) استفاده شده است.

مشخصات فلوم آزمایشگاهی، روش آزمایش و مدل‌های فیزیکی

آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک در فلومی مستطیلی-افقی به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۳۴ متر و عمق ۰/۸ متر که

جدول (۱) مشخصات مدل‌های فیزیکی، بازه دبی متناظر با هد روی سرریز ارائه شده است.

سرریزها را آزمایش کردند (Bilhan et al., 2018). در تحقیق حاضر، آزمایش‌ها بر روی سرریزهای کنگره‌ای لبه تیز U شکل تک سیکل با ارتفاع متفاوت و ۳ طول قوس مختلف انجام گردیده است. در



شکل ۳- نمایی از تجهیزات و مدل فیزیکی (الف) فلوم آزمایشگاهی تحقیق حاضر (ب) مدل فیزیکی سرریز به ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر

جدول ۱- مشخصات پارامترهای هندسی مدل‌های فیزیکی و بازه آزمایش‌ها

(P) (cm)	T(cm)	N	R (cm)	L_t/W	Q_{free} (lit/s)	H_{free} (mm)
۱۰	۱۳	۴۵	۴۰/۸۲	۲/۸۱	۲/۶۲-۶۷/۵۹	۵/۱۲۰-۵
	۱۵		۴۵	۲/۹۴	۲/۵۹-۳۳/۱۷	۷/۱۱۹-۵
	۱۷		۴۸/۱۰	۳/۰۳	۲/۵۶-۳۳/۹۴	۶/۱۲۰-۳۱
۱۲/۵	۱۳	۴۵	۴۰/۸۲	۲/۸۱	۲/۴۹-۱۲/۳۸	۹/۱۱۹-۵/۵
	۱۵		۴۵	۲/۹۴	۲/۴۷-۰۳/۰۸	۷/۱۱۹-۶/۲
	۱۷		۴۸/۱۰	۳/۰۳	۱/۴۳-۹۶/۸۸	۷/۱۲۰-۶
۱۵	۱۳	۴۵	۴۰/۸۲	۲/۸۱	۱/۳۲-۰۸/۸۱	۱۱/۱۲۰-۴۵
	۱۵		۴۵	۲/۹۴	۱/۳۳-۴۵/۹۶	۱۲۰-۷
	۱۷		۴۸/۱۰	۳/۰۳	۰/۳۸-۹۴/۳۷	۷/۱۲۰-۳۳

ماشین بردار پشتیبان SVM

الگوریتم SVM، جزء الگوریتم‌های تشخیص الگو دسته‌بندی می‌شود و همانند شبکه‌های عصبی مصنوعی یک نوع الگوریتم داده محور می‌باشد. این روش دسته‌ای از روش یادگیری با ناظر هستند، که برای مسائل طبقه‌بندی، رگرسیون، پیش‌بینی و سایر مسائلی که در این حوزه قرار می‌گیرند، به کار می‌رود. ماشین بردار پشتیبان برای اولین بار توسط واپنیک معرفی شد (Vapnik, 1995). نحوه‌ی کارکرد الگوریتم SVM اغلب شبیه روش‌های هوشمند به صورت آموزش (Train) و آزمون (Test) می‌باشد. مزیتی که SVM نسبت به سایر الگوریتم‌ها دارد این است که این الگوریتم مبتنی بر احتمالات نمی‌باشد و همواره جواب یکه‌ای به همراه دارد و زمان کمتری را برای دستیابی به جواب بهینه به خود اختصاص می‌دهد. ماشین‌های بردار پشتیبان بر خلاف سایر روش‌های هوش مصنوعی به جای اینکه

پارامترهای هندسی در شکل (۲) نشان داده شده مدل مورد تحقیق به لحاظ هندسی دارای تقارن می‌باشد، R طول قوس بوده، همچنین پارامترهای N، M و W در همه مدل‌ها دارای مقدار ثابت به ترتیب ۳/۵، ۲۴ و ۳۴ سانتی‌متر هستند. قوس در مدل مورد تحقیق، نیم‌دایره‌ای نبوده و به شکل U می‌باشد، بنابراین استخراج روابط و مقایسه عملکرد هیدرولیکی سرریز U شکل مدنظر خواهد بود. برای هر یک از سرریزهای مورد تحقیق تعداد ۴۵ داده آزمایشگاهی و در مجموع ۴۰۵ داده برای حالت جریان آزاد برداشت گردید. طبق توصیه فالوی، باید نسبت H/W برای صرف نظر کردن از تاثیر دیواره جانبی کمتر از ۰/۳۵ باشد، که در تحقیق حاضر این نسبت رعایت شده است (Falvey, 2003). در مطالعه حاضر برای تمامی حالات، از ۷۵ درصد داده‌ها برای آموزش و ۲۵ درصد باقیمانده برای آزمون مدل‌های ورودی استفاده گردیده است.

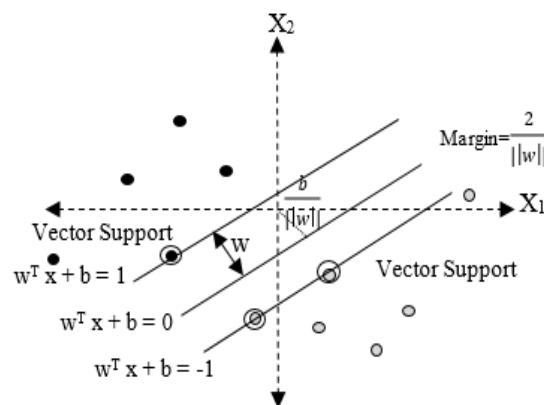
دخالته تابع کرنل $K(x)$ که وظیفه‌ی نگاشت داده‌ها از فضای غیرخطی به فضای خطی را بر عهده دارد، حاصل می‌شود. پس تابع K نگاشتی است که داده‌های فضای X را به فضای Z خواهد برد. معادله کلی صفحه تفکیک‌کننده بهینه به صورت $W^T Z + b = 0$ بیان می‌گردد. که در آن b مقدار بایاس و بردار W فاکتور وزن نامیده می‌شود و W^T بیانگر ترانهاده بردار W است. با دخالت تابع کرنل $K(x)$ معادله‌ی تفکیک‌کننده به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$K: X \rightarrow Z, Z = K(x) \rightarrow W^T K(x) + b = 0 \quad (11)$$

می‌توان برای این تابع یک حالت کلی‌تر به صورت $x_j, K(x_i)$ تعریف کرد که به وسیله‌ی آن بتوان به فضاهای پیچیده‌تر راه یافت. به فرآیند مذکور روش کرنل می‌گویند. در مسائل SVM انتخاب تابع کرنل بسیار مهم می‌باشد و انتخاب آن به نوع و ماهیت مسئله بستگی دارد؛ بنابراین نمی‌توان تابعی را به طور قطعی به عنوان تابع مناسب برای SVM معرفی کرد و نسبت به شرایط این موضوع می‌تواند متغیر باشد. انواع مختلف توابع کرنل در جدول (۲) نمایش داده شده است.

خطای محاسباتی را کاهش دهد، ریسک عملیاتی را به عنوان تابع هدف قرار داده و مقدار بهینه آن را به دست می‌آورد.

از الگوریتم SVM، در هر جایی که نیاز به تشخیص الگو یا دسته‌بندی اشیاء در کلاس‌های خاص باشد می‌توان استفاده کرد. در واقع مبنای کاری SVM دسته‌بندی خطی داده‌ها است و در تقسیم خطی داده‌ها سعی می‌شود خطی انتخاب شود که حاشیه اطمینان بیشتری داشته باشد (شکل ۴). در واقع هدف الگوریتم SVM این است که خطی را بیابد که از داده‌های موجود در دو کلاس دارای بیشترین فاصله باشد و یا به عبارت دیگر دارای کمترین ریسک عملیاتی باشد. در مرحله بعد دو صفحه مرزی موازی با صفحه‌ی تفکیک‌کننده رسم می‌شود و تا زمانی که به داده‌ها برخورد کنند، از هم دور می‌شوند. صفحه تفکیک‌کننده‌ای که بیشترین فاصله را از صفحات دسته‌بندی داشته باشد، بهترین صفحه تفکیک‌کننده است. نزدیک‌ترین داده‌های آموزشی به صفحات تفکیک‌کننده، بردار پشتیبان نامیده می‌شود. در مسائلی که داده‌ها به صورت خطی جدپذیر نباشند، داده‌ها به فضای با ابعاد بیشتر نگاشت پیدا می‌کنند، تا بتوان آن‌ها را در این فضای جدید به صورت خطی جدا نمود. این کار با



شکل ۴- جداسازی داده‌ها در SVM و بردارهای پشتیبان (Vapnik, 1995)

توابع کرنل

یکی از روشهای متداول برای حل مسائل غیرخطی استفاده از توابع کرنل است، این توابع براساس ضرب داخلی داده‌های مفروض تعریف می‌شود. در واقع، با یک تبدیل غیرخطی از فضای ورودی به فضای خصیصه با ابعاد بیشتر (حتی نامتناهی) می‌توان مسائل را به صورت خطی تفکیک‌پذیر ساخت. از مهمترین توابع کرنل می‌توان به کرنل توابع خطی، چند جمله‌ای ساده چند جمله‌ای نرمال شده، تابع شعاع محور و تاب کرنل سیگموئید اشاره کرد. در ادامه روابط مربوط به این کرنل‌ها در جدول (۲) آورده شده است. مطابق با جدول (۲) توابع کرنل دارای پارامترهای مختلفی (مانند γ, d, α, c) هستند که نحوه تنظیم آن‌ها در حصول جواب هرچه بهتر مسئله بسیار مؤثر است.

معیارهای ارزیابی

به منظور ارزیابی و بررسی کارایی روش‌های به کار رفته در این تحقیق از سه معیار ارزیابی مدل (R^2) ضریب همبستگی^۱ بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی، (DC) ضریب تبیین^۲ (ضریب نش یا ضریب شاتکلیف)، (RMSE) جذر میانگین مربعات خطاها^۳ و درصد خطای مطلق^۴ (MAPE) استفاده گردیده است. هر چه مقدار (R) و (DC)

- 1- Squared Correlation Coefficient
- 2- Determination Coefficient or Efficiency
- 3- Root Mean Square Error
- 4- Mean Absolute Percentage Error

سرریزها الگوی برتر داده‌ها جهت آموزش و آزمون انتخاب گردید. روابط معیارهای ارزیابی به صورت پارامتر آماری برای داده‌های آموزش و آزمون محاسبه می‌شوند، در جدول (۳) آورده شده است.

به یک نزدیک تر و مقدار (RMSE) برای یک مدل هر چه به صفر نزدیک تر باشد به معنی مطلوب بودن آن مدل می‌باشد. جهت رسیدن به پیش‌بینی بهتر و دقیق تر مدل‌ها، روند آموزشی چندین بار مورد آزمون و خطا قرار گرفت که در پایان برای هر کدام از مدل‌ها و

جدول ۲- انواع تابع کرنل (Vapnik, 1995)

پارامتر کرنل	تابع کرنل	نوع کرنل
-	$K(x_i, x_j) = (x_i, x_j)$	خطی
d	$K(x_i, x_j) = [(x_i, x_j) + 1]^d$	چندجمله‌ای ساده
γ	$K(x_i, x_j) = \exp\left[-\frac{\ x_i - x_j\ ^2}{2\sigma^2}\right]$	تابع شعاع محور (گوسین)
α, c	$K(x_i, x_j) = \tanh[-\alpha(x_i, x_j)] + c$	سیگموئید

بحث و نتایج

تحلیل نتایج آزمایشگاهی

در شکل (۵) منحنی تغییرات دبی سرریز U شکل نسبت به هد روی سرریز ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت بار آبی، ابتدا مقدار ضریب دبی افزایش یافته و سپس روند نزولی یافته است. بررسی نمودار نشان می‌دهد که بیشترین ضریب دبی سرریز تقریباً در $H_r/P=0.1$ اتفاق افتاده و بعد از آن ضریب دبی سرریز کاهش یافته است. جهت بررسی تاثیر ارتفاع سرریز بر ضریب دبی، سرریز با طول قوس و ارتفاع‌های ثابت انتخاب شد و نمودار تغییرات ضریب دبی در مقابل پارامتر H_r/P رسم گردید. مطابق با شکل (۵) منحنی‌های سمت چپ، مشاهده می‌شود که به ازای طول قوس یکسان، سرریز با ارتفاع کمتر (۱۰ سانتی‌متر) ضریب دبی بیشتری داشته و با افزایش ارتفاع، ظرفیت آبدازی سرریز کاهش یافته است. همچنین در شکل (۵) منحنی‌های سمت راست، با در نظر گرفتن سرریز با ارتفاع ثابت، تاثیر طول قوس‌های مختلف بررسی شد. مشاهده می‌شود که در ارتفاع ثابت سرریزها با افزایش طول قوس سرریز، ظرفیت گذردهی سرریز کاهش یافته است.

بهترین نقطه طراحی سرریزهای کنگره‌ای نقطه پیک نمودار می‌باشد، چرا که در نقطه پیک به دلیل عدم وجود پارامترهای کاهنده راندمان دبی (تداخل جریان، استغراق موضعی) طول موثر تاج حداکثر بوده و دبی در آن نقطه ماکزیمم است. بعد از نقطه پیک نمودار با افزایش بار هیدرولیکی روی سرریز، تیغه‌های عبوری از قوس سرریز بطور مستقیم باهم برخورد کرده و تداخل جریان شکل می‌گیرد، در اثر این برهم کنش، ناحیه‌ای از طول تاج اشغال شده و عملاً میزان گذردهی جریان در این ناحیه حداقل می‌شود. با افزایش هد روی سرریز بعد از تداخل جریان، وجه بالادست سرریز دچار استغراق

جدول ۳- روابط معیارهای ارزیابی مورد استفاده

روابط	پارامترهای آماری
ضریب همبستگی	$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (C_{do} - \overline{C_{do}}) \times (C_{dp} - \overline{C_{dp}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (C_{do} - \overline{C_{do}})^2 \sum_{i=1}^N (C_{dp} - \overline{C_{dp}})^2}}$
ضریب تبیین	$DC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (C_{do} - C_{dp})^2}{\sum_{i=1}^N (C_{do} - \overline{C_{do}})^2}$
جزر میانگین مربعات خطاها	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (C_{do} - C_{dp})^2}{N}}$
درصد میانگین خطای مطلق	$MAPE = \frac{1}{C_{do}} \frac{\sum_{i=1}^n C_{do} - C_{dp} }{N} * 100$

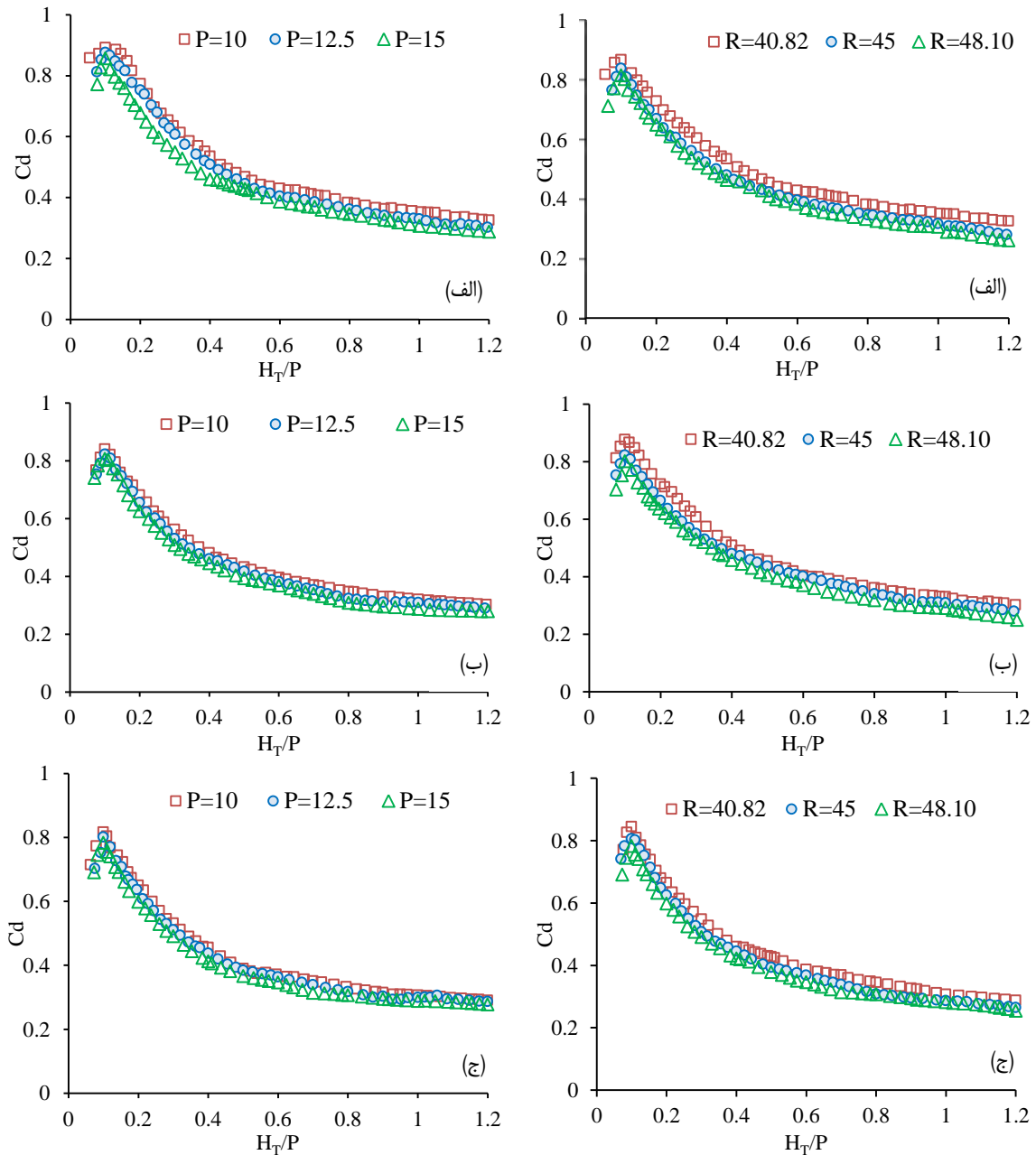
C_{do} : ضریب دبی اندازه‌گیری شده، $\overline{C_{do}}$: متوسط ضریب دبی اندازه‌گیری شده، C_{dp} : ضریب دبی پیش‌بینی شده، $\overline{C_{dp}}$: متوسط ضریب دبی پیش‌بینی شده، N : تعداد داده‌ها، از آنجا که وارد کردن داده‌ها به صورت خام باعث کاهش سرعت و دقت شبکه می‌شود بنابراین نرمال‌سازی کردن داده‌ها کمک شایانی به آموزش بهتر و سریع تر مدل می‌کند. در تحقیق حاضر برای نرمال‌سازی داده‌ها از رابطه (۱۲) استفاده شده است.

$$xn = 0.05 + 0.95 \left(\frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \right) \quad (12)$$

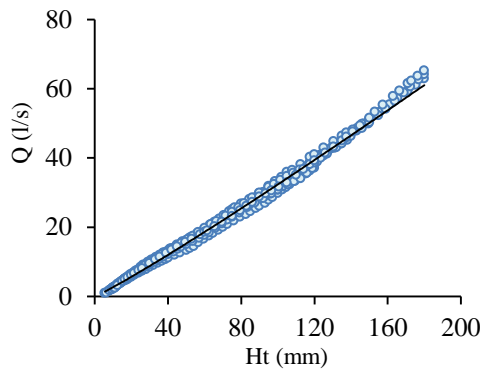
در رابطه بالا X_{min} ، X_{max} به ترتیب حداقل و حداکثر داده‌های مشاهده شده و X_n داده نرمال شده می‌باشد.

قوس سرریزها، تداخل جریان افزایش و راندمان دبی کاهش می‌یابد، با اینکه با افزایش یافتن طول قوس سرریزها طول تاج افزایش می‌یابد ولی افزایش موثر طول تاج محقق نمی‌شود، بنابراین راندمان دبی متاثر از افزایش تداخل جریان بوده و با افزایش طول قوس سرریزها و سپس افزایش ناحیه تداخل جریان، راندمان آگذری سرریز روند کاهشی می‌گیرد.

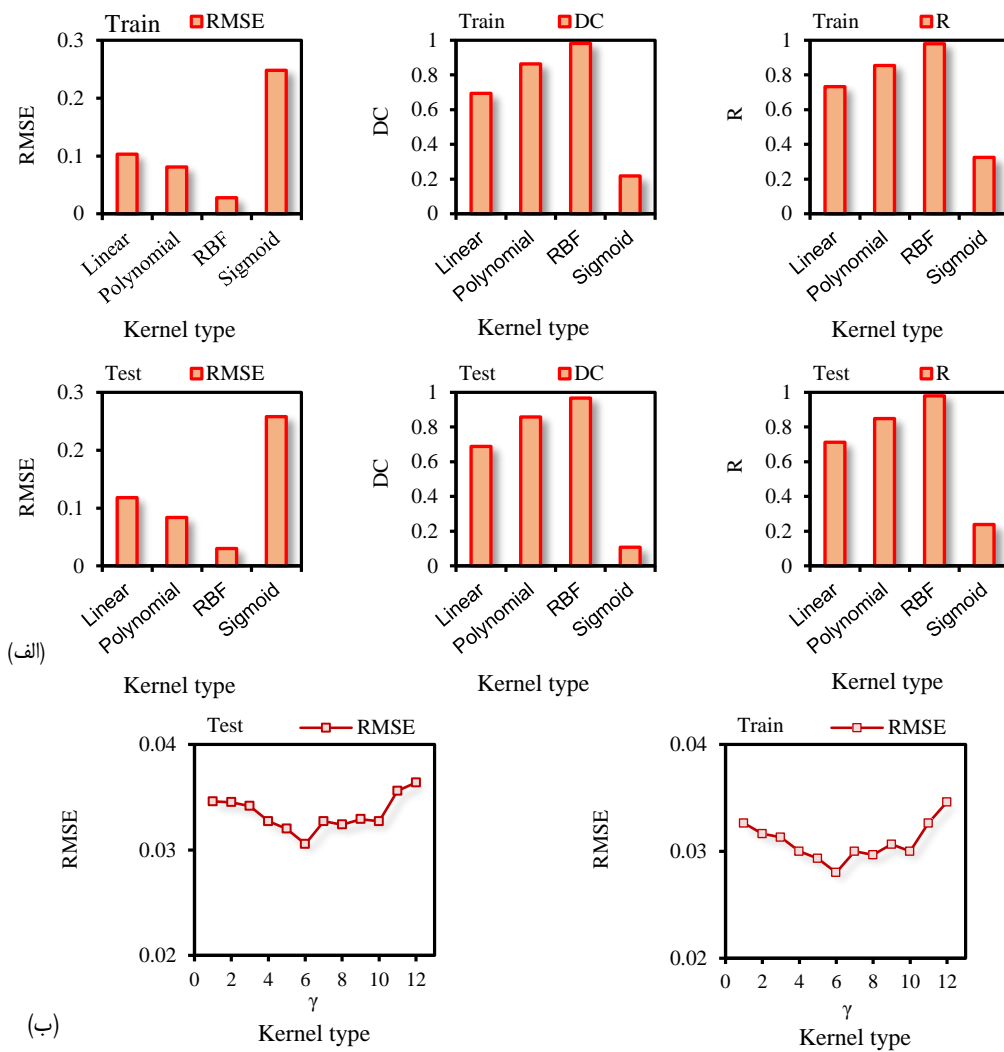
می‌شود. در تداخل جریان و استغراق موضعی کاهش سرعت تخلیه جریان با افزایش هد روگذری از سرریز رخ داده و باعث کاهش راندمان دبی و تغییر مکانیزم عملکرد سرریز از حالت غیرخطی به خطی و از لبه‌تیز به لبه‌پهن می‌شود (Crookston et al, 2012, Carollo et al, 2017, Taylor, 1968). بهترین بازه برای طراحی سرریزها عمق ۴-۵ سانتی‌متر هد روی سرریز می‌باشد (Rehbock, 1929). با توجه به شکل (۵) و (۶) ملاحظه می‌شود، با افزایش طول



شکل ۵- تغییرات ضریب دبی (C_d) با نسبت هد به ارتفاع سرریز (H_T/P) برای طول قوس‌های (منحنی‌های سمت راست)، (الف) $R=48.10$ (ب) $P=12.5$ (ج) $P=15$ و ارتفاع‌های مختلف (منحنی‌های سمت چپ)، (الف) $R=40.82$ (ب) $R=45$ (ج) $R=48.10$



شکل ۶- منحنی تغییرات دبی نسبت به بار هیدرولیکی روی سرریز



شکل ۷- پارامترهای آماری مدل SVM با (الف) توابع کرنل متفاوت (ب) تعیین بهینه پارامتر γ

پارامترهای ورودی H_t/P , L_c/W , R/W , W/P , t/P با کرنل‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. مطابق با شکل ۷ (الف) نتایج نشان داد که تابع کرنل (RBF) در تخمین میزان ضریب دبی در سرریز U

تخمین ضریب دبی با استفاده از روش SVM برای انتخاب تابع کرنل مناسب ماشین بردار پشتیبان، مدل با

ارزیابی مشاهده می‌گردد که برای روش به کار رفته، نتایج قابل قبولی به دست آمده است. برای هر سه حالت مدل با پارامترهای H_t/P , L_c/W , R/W , W/P و R کارایی را با داشتن بیشترین ضریب همبستگی و ضریب تبیین (R) و کمترین خطا (RMSE) در بین سایر مدل‌ها دارا است. برای این مدل، مقادیر معیارهای ارزیابی برای سری داده‌های آزمون مقادیر $R=0.986$, $DC=0.981$ و $RMSE=0.031$ به دست آمده است. با مقایسه مدل‌های تعریف شده، مشاهده می‌گردد، که اضافه کردن متغیرهای t/P , L_c/W , R/W , W/P به پارامترهای ورودی باعث بهبود دقت مدل‌ها گردیده است که این امر بیانگر تاثیر هندسه سرریز در تخمین مقدار ضریب دبی است. همچنین مشاهده می‌گردد در حالت استفاده از متغیر H_t/P به عنوان تنها پارامتر ورودی با استفاده از روش هوشمند به کار رفته در تحقیق نتایج تقریباً قابل قبولی به دست آمده است. در شکل (۸) نمودار پراکنش داده‌های آموزش و آزمون مدل برتر ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، همبستگی مناسبی بین مقادیر مشاهده‌ای و محاسباتی دیده می‌شود، که این امر به دلیل عملکرد مناسب روش SVM در تحقیق حاضر می‌باشد.

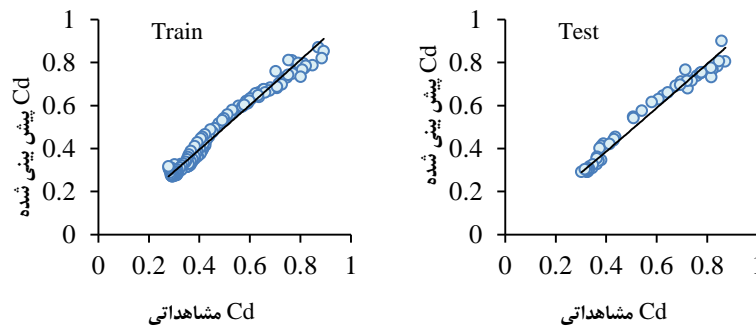
شکل بهتر عمل می‌کند، بنابراین در تجزیه و تحلیل تمامی مدل‌ها از کرنل تابع شعاع محور (گوسین) بهترین و کرنل (Sigmoid) ضعیف‌ترین جواب را ارائه می‌دهد. تابع کرنل RBF دارای بیشترین ضریب همبستگی و تبیین بوده و کمترین خطا را داراست. بنابراین برای مدل‌های دیگر نیز از کرنل (RBF) استفاده گردید. همچنین برای یافتن بهینه‌ترین پارامترهای تابع کرنل از روش سعی و خطا استفاده شد و با آزمون مقادیر مختلف مقدار بهینه این پارامترها انتخاب گردید. نحوه کار به این صورت بود که به ازای مقدار ثابت γ ابتدا مقادیر بهینه ϵ و C به دست آمد، سپس مقدار γ تغییر پیدا کرد و با محاسبه پارامترهای آماری مقدار بهینه آن محاسبه گردید. در شکل ۷ (ب) نمودار پارامتر γ در برابر پارامتر آماری RMSE برای مدل انتخابی نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که مقدار بهینه پارامتر γ عدد شش به دست آمده است.

نتایج تجزیه و تحلیل مدل‌های SVM

با در نظر گرفتن پارامترهای مربوط به هیدرولیک جریان و ابعاد سرریز، مدل‌هایی به صورت جدول (۴) تعریف گردید و با استفاده از روش هوشمند SVM اجرا گردیدند. نتایج حاصل از تحلیل مدل‌ها در جدول (۴) و شکل (۸) نشان داده شده است. با توجه به معیارهای

جدول ۴- پارامترهای ارزیابی مدل‌های تعریف شده

معیارهای ارزیابی				مرحله آموزش				پارامترهای مدل
مرحله آزمون				R	DC	RMSE	MAPE	
0.941	0.826	0.059	20.579	0.949	0.870	0.049	18.368	H_t/P ,
0.949	0.858	0.052	16.612	0.951	0.892	0.043	11.976	$H_t/P, L_c/W$
0.958	0.919	0.045	12.645	0.974	0.947	0.038	8.816	$H_t/P, L_c/W, R/W, t/P$
0.974	0.955	0.035	9.835	0.981	0.964	0.032	7.424	$H_t/P, L_c/W, R/W, W/P$
0.986	0.967	0.030	8.448	0.987	0.981	0.028	6.496	$H_t/P, L_c/W, R/W, W/P, t/P$



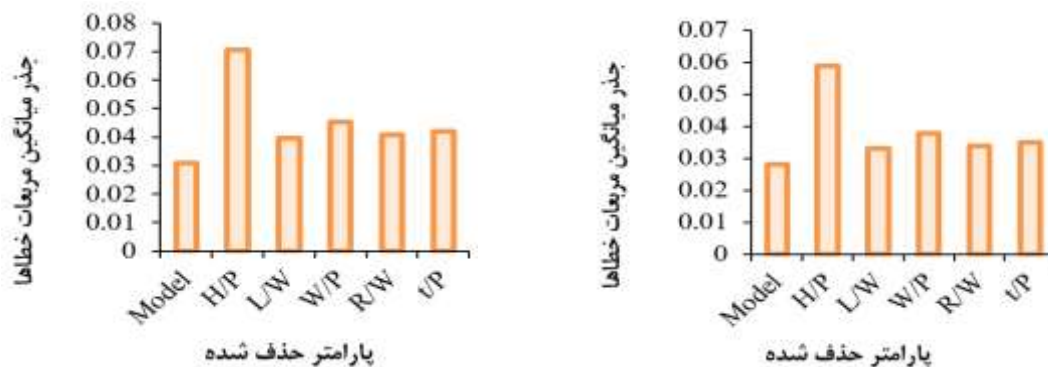
شکل ۸- نمودار پراکنش داده‌های آموزش و آزمون مدل برتر

بررسی قرار گرفته است. با حذف پارامترها از مدل برتر و اجرای دوباره مدل نتایج شکل (۹) بدست آمد. نتایج آنالیز حساسیت مدل مطابق

نتایج مربوط به آنالیز حساسیت مدل برتر در این بخش نتایج مربوط به آنالیز حساسیت مدل برتر مورد

درصد افزایش یافته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که H_t/P موثرترین پارامتر در تخمین ضریب دبی بوده و بعد از این پارامتر W/P تاثیرگذار است.

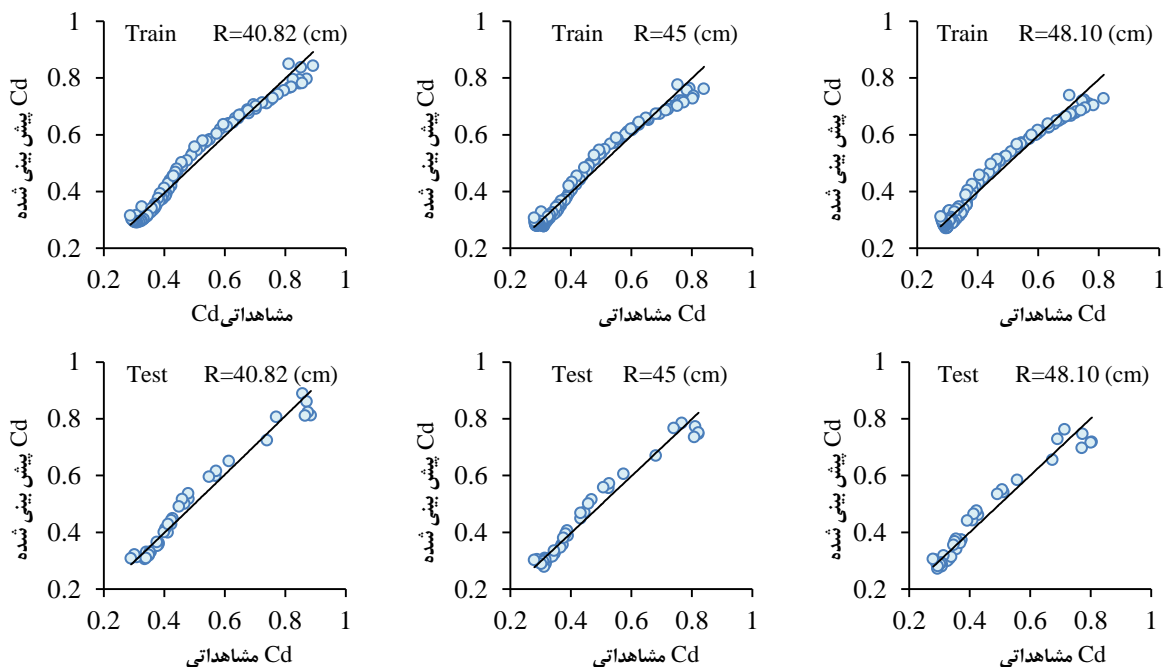
شکل (۹) ارائه شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌گردد، که با حذف پارامتر ورودی H_t/P مقدار خطا (RMSE) به مقدار زیادی افزایش یافته است. با حذف این پارامتر مقدار خطا برای سری داده‌های آموزش ۱۴ درصد و برای سری داده‌های آزمون تقریباً تا ۲۰



شکل ۹- نمودار مقادیر خطاهای آزمون تحلیل حساسیت مدل برتر SVM

جدول ۵- پارامترهای ارزیابی مدل‌های تعریف شده

مدل	طول قوس	معیارهای ارزیابی							
		مرحله آموزش				مرحله آزمون			
		R	DC	RMSE	MAPE	R	DC	RMSE	MAPE
$H_t/P, L_c/W, R/W, W/P, t/P$	40.82	0.986	0.971	0.029	7.94	0.984	0.968	0.032	8.94
$H_t/P, L_c/W, R/W, W/P, t/P$	45	0.987	0.972	0.028	7.84	0.983	0.964	0.033	9.05
$H_t/P, L_c/W, R/W, W/P, t/P$	48.10	0.981	0.969	0.030	8.54	0.976	0.953	0.035	9.14



شکل ۱۰- بررسی تاثیر طول قوس‌ها بر ضریب دبی

دبی تاثیرگذار است. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که با حذف پارامتر ورودی H_t/P میزان خطای مدل تا حدود زیادی افزایش می‌یابد. با حذف این پارامتر مقدار خطای مدل برای سری داده‌های آزمون تا ۲۰ درصد افزایش یافت. لذا، این پارامتر موثرترین متغیر در تخمین ضریب دبی بوده و در حالت استفاده از متغیر H_t/P به عنوان تنها پارامتر ورودی با استفاده از روش هوشمند، نتایج تقریباً قابل قبولی به دست خواهد آمد.

منابع

روشنگر، ک.، اعلمی، م.ت. و ماجدی اصل، م. ۱۳۹۶. تعیین ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای و قوسی کنگره‌ای با روش رگرسیون بردار پشتیبان. نشریه دانش آب و خاک. ۲۷(۱): ۱۷۳-۱۸۶.

حسینی، خ.، تاج نسایی، م. و جعفری ندوشن، ا. ۱۳۹۴. بهینه‌یابی هندسه سرریز کنگره‌ای مثالی با استفاده از مدل فازی-عصبی و الگوریتم تکامل تفاضلی (DE): (مطالعه موردی: سد UTE در ایالات متحده آمریکا). نشریه مهندسی عمران و محیط زیست. ۴۵(۱): ۸۱-۹۱.

حیدرپور، م.، موسوی، س.ف. و روشنی زرمهری، ع.ل. ۱۳۸۵. بررسی سرریزهای چند وجهی با پلان مستطیلی و U شکل. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. ۳(الف): ۱-۱۱.

Bijankhan, M. and Kouchakzadeh, S. 2017. Unified Discharge Coefficient Formula for Free and Submerged Triangular Labyrinth Weirs, *Journal of Flow Measurement and Instrument*, 57(6): 46-56.

Bilhan, O., Cihan Aydin, M., Emin Emiroglu, M., and Carol J. Miller. 2018. Experimental and CFD Analysis of Circular Labyrinth Weirs, *J. Irrigation and Drainage Eng.*, 144(6): 04018007.

Carollo, F.G., Ferro, V., and Pampalona, V. 2017. Testing the Outflow Process over a Triangular Labyrinth Weir, *J. Irrigation and Drainage Eng.*, 143(8): 06017007.

Christensen NA. 2012. Flow Characteristics of Arced Labyrinth Weirs. M. Sc, thesis, Utah State University, Logan, UT.

Crookston, B.M., and Tullis, B.P. 2013. Hydraulic Design and Analysis of Labyrinth Weirs. I: Discharge Relationships, *J. of Irrigation and Drainage Eng.*, 139(5): 363-370.

Crookston, B.M. and Tullis, B.P. 2012. Discharge Efficiency of Reservoir-Application-Specific Labyrinth Weirs. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 138: p. 564-568.

بررسی تأثیر طول قوس‌ها با SVM

جدول (۵) و شکل (۱۱) نتایج حاصل از بررسی تأثیر طول قوس‌ها را نشان می‌دهند. با توجه به نتایج، مشاهده می‌شود که با افزایش طول قوس‌ها دقت مدل، اندکی کاهش یافته است. به طوری که طول قوس $40/82$ سانتی‌متری بیشترین دقت و طول قوس $48/10$ سانتی‌متری کمترین دقت را دارند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش سرریزهای لبه‌تیز U شکل تک سیکل در شرایط جریان آزاد جهت پیش‌بینی ضریب دبی در این نوع سرریزها با ارتفاع و طول قوس‌های متفاوت بررسی شده است. در ادامه پارامترهای موثر در این تحقیق با استفاده از آنالیز پی باکینگهام ارائه شد. نتایج حاصل از روش هوشمند ماشین بردار پشتیبان با نتایج آزمایشگاهی تحقیق حاضر به صورت آنالیز آماری مورد ارزیابی قرار گرفت. خلاصه نتایج تحقیق حاضر به شرح ذیل می‌باشد:

در حالت جریان آزاد در تحقیق حاضر، آنالیز ابعادی انجام شده به روش پی باکینگهام نسبت $R/W, h/p$ مهم‌ترین و موثرترین پارامتر و مطابق مطالعات پیشین، h/p پارامتر موثر در آنالیز طراحی سرریزهای کنگره‌ای می‌باشد، که وابسته به پارامترهای هیدرولیکی و هندسی مدل‌های مورد پژوهش است. با در نظر گرفتن این پارامتر در طراحی و همچنین بررسی عملکرد راندمان هیدرولیکی در سرریزهای کنگره‌ای، نتایج دقیق و قابل اطمینان حاصل می‌شود. بنابراین لحاظ این پارامتر در طراحی و بررسی عملکرد بهینه سرریزهای کنگره‌ای حائز اهمیت بوده و برای کاربرد توصیه می‌گردد. با افزایش طول قوس سرریزها، تداخل جریان افزایش و راندمان دبی کاهش می‌یابد، با اینکه با افزایش یافتن طول قوس سرریزها طول تاج افزایش می‌یابد ولی افزایش موثر طول تاج محقق نمی‌شود.

در سرریزهای با طول قوس ثابت با افزایش ارتفاع سرریزها ظرفیت تخلیه سرریزها کاهش می‌یابد. با مقایسه دو حالت افزایش یافتن طول قوس و ارتفاع سرریزها می‌توان اظهار کرد که حساسیت بیشتر در سرریزها در حالت افزایش طول قوس می‌باشد.

تجزیه و تحلیل مدل‌های تعریف شده با استفاده از روش SVM، قابلیت بالای این روش را در تخمین ضریب دبی به خوبی نشان داد، همچنین مشاهده شد، که مدل با پارامترهای ورودی $H_t/P, L_c/W, R/W, W/P, t/P$ بیشترین دقت و کارایی را با داشتن بیشترین ضریب همبستگی و ضریب تبیین (R و DC) و کمترین خطا (RMSE) در بین سایر مدل‌ها داراست. اضافه کردن متغیرهای $L_c/W, R/W, W/P, t/P$ به پارامترهای ورودی باعث بهبود دقت مدل‌ها گردیده و پارامترهای هندسی سرریز در تخمین مقدار ضریب

- and Analysis of Crest Coefficient for Labyrinth Weir, *World Applied Sciences Journal*. 11(7): 835-839.
- Khode, B.V. 2012. Experimental Studies on Flow over Labyrinth Weir, *J. of Irrigation and Drainage Eng.* 138(6): 548-552.
- 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(3): 175-180.
- Rehbock, T. 1929. Discussion of Precise Measurements, *Trans of ASCE*. 93: 1143-1162.
- Roushangar, K., Ghasempour, R., and Saghebian, S.M. 2019. Comparative Study of Effective Hydraulic Parameters on Bridge Piers Scouring in Cohesive and Grainy Soils Using Gaussian Process Regression Method. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 12(6): 1475-1485.
- Seamons, T.R. 2014. Labyrinth Weirs: A Look into Geometric Variation and Its Effect on Efficiency and Design Method Predictions. M.Sc Thesis, Utah State University.
- Taylor, G. The Performance of Labyrinth Weirs, University of Nottingham, 1968.
- Tullis, J.P., Amanian, N., and Waldron, D. 1995. Design of Labyrinth Spillways, *J. Hydraulic Eng.*, 121(3): p. 247-255.
- Zaji, A.H. Bonakdari., H. Karimi., S. 2015. Radial Basis Neural Network and Particle Swarm Optimization-Based Equations for Predicting the Discharge Capacity of Traingular Labyrinth Weirs. *j. of Flow Measurement and Instrumentation*. 45: p. 341-347.
- Vapnik, V., Guyon, I., and Cortes, C. 1995. Support Vector Networks, *Machine Learning*, 20: 1-25.
- Willmore, C.M. 2004. Hydraulic Characteristics of Labyrinth Weirs, M.S. report, Utah State University, Logan, Utah.
- Crookston, B., Paxson, B.G., and Savage, B. 2012. Hydraulic Performance of Labyrinth Weirs for High Headwater Ratios, the 4th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, Porto, Portugal.
- Falvey, H.T. 2003. Hydraulic design of labyrinth weirs, ASCE Press (American Society of Civil Engineers) Reston, VA.
- Gentilini, B. 1940. Stramazzi con Cresta a Pianta Obliqua ea Zig-Zag: Società Editrice Riviste Industrie Electriche.
- Gentilini, B. 1941. Efflusso Dalle Luci Soggiacenti Alle Paratoie Piane Inclinate ea Settore. Società Editrice Riviste Industrie Elettriche.
- Ghodsian, M. 2009. Stage-Discharge Relationship for a Triangular Labyrinth Spillway, in Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management.
- Haghiabi, A.H., Parsaie, A., and Ememgholizadeh, S. 2018. Prediction of Discharge Coefficient of Traingular Labyrinth Weirs Using Adaptive Neuro Fuzzy Inference System. *Alexandria Engineering Journal*. 57(3): 1773-1782.
- Hay, N. and Taylor, G. 1970. Performance and Design of Labyrinth Weirs, *J. the Hydraulics Division*. 96(11): p. 2337-2357.
- Karami, H., Karimi, S., Rahmanimanesh, M., and Farzin, S. 2016. Prediction Discharg Coefficient of Traingular Labyrinth Weir Using Support Vector Regression, Support Vector Regression-Firefly, Response Surface Methodology and Principal. *j. Flow Measurement and Instrumentation*.
- Karami, H., Karimi, S., Bonakdari, H., and Shamshirband, S. 2018. Predicting Discharge coefficient of Triangular Labyrinth Weir using extreme Learning Machine, Artificial Neural Network and Genetic Programming. *J. Neural Comput and Applic*. 29: 983-989.
- Kardan, N., Hassanzadeh, Y., and Shakoei Bonab, B. 2017. Shape Optimization of Trapezoidal Labyrinth Weirs Using Genetic Algorithm. *Arab J Sci Eng*. 42(3): 1219-1229.
- Khode, B.V., and Tembhurkar, A.R. 2010. Evaluation

Determining the Discharge Coefficient of One-Cycle Sharp-Crested U-Shape Weirs Using Kernel-Based SVM Approach

F. Mohammadi^{1*}, Y. Hassanzadeh², K. Roushangar³

Received: May.23, 2020

Accepted: Jul.21, 2020

Abstract

Weirs are one of the hydraulic and very vital structures from various economic, environmental, safety and security aspects. In addition to passing and flow measurement, they are the controlling structures in the floods. The main purpose of the present research was to predict the discharge coefficient to method of intelligent support vector machine using experimental data as well as analysis of the hydraulic performance of weirs. The geometric variables of the weirs were used 10, 12.5, and 15 cm in height, the length of different archs were 40.82, 45, and 48.10 cm. To analysis the performance, the dimensional analysis was used by the π Bakingham method, then by intelligent method, considering different models, the effect of different parameters in determining the discharge coefficient were investigated. As the length of the weirs arch increases, the discharge efficiency decreases, and as the length of the weirs arch increases, the crest length increases. The results of sensitivity analysis also showed that by removing the H_t/P parameter, the model error rate increases up to 14% for training data series and up to 20% for test data series, and this parameter is the most effective variable in estimating discharge coefficient in in U-shaped labyrinth weirs.

Keywords: Arch length, Discharge coefficient, Labyrinth weirs, Sensitivity analysis, Support vector machine

1- Ph.D. Student of Civil-Hydraulic Structures Engineering, Faculty of Pardis Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

2- Professor, Department of Water Engineering, Center of Excellence in Hydroinformatics, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

3- Professor, Department of Civil-Water Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
(*- Corresponding Author Email: firouzm1979@gmail.com)