

مقایسه برآورد ضریب بده جریان مدل فیزیکی سرریزهای فیوزگیت کنگره‌ای با مدل‌های هوشمند و آماری

مهدی یاسی^{1*}، زکیه غلامی²

تاریخ دریافت: 1395/4/15 تاریخ پذیرش: 1395/8/15

چکیده

سرریزهای فیوزگیت با توجه به نمای از بالا، به دو مدل تاج مستقیم و تاج کنگره‌ای تقسیم می‌شوند. سرریزهای فیوزگیت کنگره‌ای شامل سه نوع: دریاچه باریک با بار کم (NLH)، دریاچه عریض با بار کم (WLH) و دریاچه عریض با بار زیاد (WHH) می‌باشند. در این تحقیق، تاثیر ارتفاع متفاوت چاهک سرریز فیوزگیت مدل WLH و شیب کف بر ضریب بده جریان از روی سرریز بررسی شده، و مقدار ضریب بده از مدل شبکه عصبی مصنوعی و از روش آماری همبستگی چند متغیره با نرم‌افزار SPSS برآورد گردید، و با نتایج نظیر از آزمون مدل فیزیکی مقایسه شده است. همچنین، تحلیل حساسیت عوامل موثر بدون بعد بر ضریب بده جریان مورد آزمون قرار گرفت. برای پیش‌بینی ضریب بده جریان در مدل شبکه عصبی، بهترین برازش از کاربرد الگوریتم لوبنرگ-مارکوارت به‌عنوان تابع آموزش، تابع انتقال تانژانت سیگموئید برای لایه پنهان، و تابع خطی در لایه خروجی، بدست آمد. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که در میان پارامترهای بی‌بعد، تاثیر بار آبی بالادست به ارتفاع جام، از سایر متغیرهای ورودی بیش‌تر است. مقدار خطای نسبی برآورد ضرایب بده جریان از مدل آماری، حدود 30 درصد و شبکه عصبی کم‌تر از 5 درصد می‌باشد. از این‌رو، مدل شبکه‌ی عصبی ابزار مناسبی برای تخمین ضریب بده جریان در سرریزهای فیوزگیت به‌شمار می‌آید.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم لوبنرگ - مارکوارت، سرریز WLH، شبکه عصبی مصنوعی ANN، ظرفیت جریان

مقدمه

و باعث اتلاف قابل ملاحظه‌ی آب از مخزن می‌شوند، به‌کارگیری فیوزگیت‌ها می‌تواند راه‌حلی برای تطبیق ایمنی سد با حداکثر ظرفیت ذخیره باشد (Afshar et al., 2003). فیوزگیت در سال 1989 به‌وسیله فرانسویس لمپریه (Francois Lemperiere)، به‌عنوان یک سیستم ساده و ایمن برای افزایش ذخیره مخزن، افزایش ظرفیت تخلیه سرریز و در نتیجه افزایش ایمنی سد اختراع گردیده است (Falvey and Treille., 1995). هر فیوزگیت مطابق شکل 1، شامل 3 بخش: جام، پایه و چاهک ورودی می‌باشد (Chevalier et al., 1996).

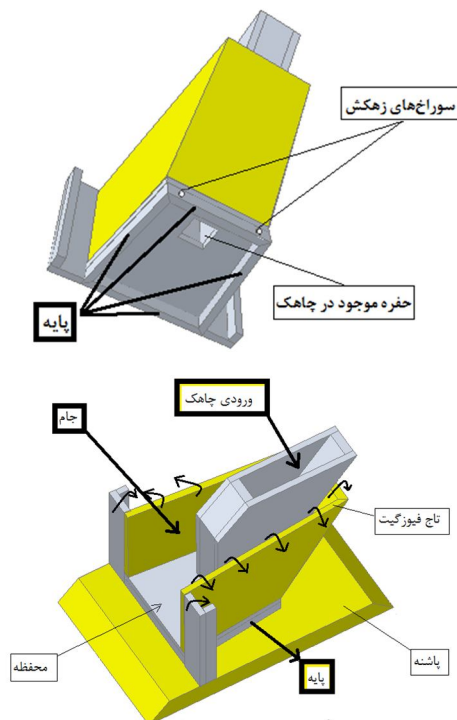
فیوزگیت‌ها مطابق با نمای از بالا، به دو مدل تقسیم می‌شوند: تاج مستقیم و تاج کنگره‌ای. هر کدام با مزیتی همراه است: (1) فیوزگیت‌های تاج مستقیم پایداری سرریزها را فراهم می‌کنند؛ و (2) فیوزگیت‌های تاج کنگره‌ای جریان بیش‌تری را برای یک عمق معین از خود عبور می‌دهند (Barcouda et al., 2006). فیوزگیت‌ها به سه مدل استاندارد: دریاچه باریک با بار کم (NLH: Narrow Low Head)، دریاچه عریض با بار کم (WLH: Wide Low Head) و دریاچه عریض با بار زیاد (WHH: Wide High Head) تولید

برای عبور آب‌های اضافی و سیلاب‌ها از سراب به پایاب سدها، از سازه‌ای به‌نام سرریز استفاده می‌شود که از سازه‌های مهم تشکیل‌دهنده هر سد می‌باشد (بیرامی، 1387). انتخاب نوع سرریز تابع شرایط توپوگرافی، مقدار سیلاب طراحی و نوع سد می‌باشد. سرریزها به‌صورت‌های مختلفی ساخته می‌شوند که متداول‌ترین آن‌ها سرریزهای آزاد (Overfall Spillways) و یا سرریزهای روگذر (Overflow Spillways) هستند (نیک صفت، 1380). سرریزهای ریزشی کنترل نشده یا آزاد، جزو سرریزهای معمول جهت ایمنی سد هستند. از آنجا که این سرریزها دارای هزینه ساخت بالاتری می‌باشند

1- دانشیار مهندسی رودخانه، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران، ایران
2- دانشجوی دکتری رشته سازه‌های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران، ایران
* - ایمیل نویسنده مسئول: (Email: m.yasi@ut.ac.ir)

به همراه پارامترهای مربوطه در شکل 2 نمایش داده شده است.

می شوند که استاندارد طراحی آن ها مطابق جدول 1 می باشد (Falvey and Treille, 1995). شکل نمونه سرریز فیوزگیت مدل WLH

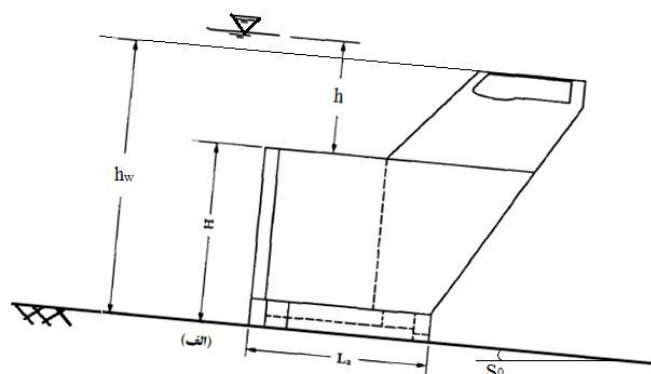
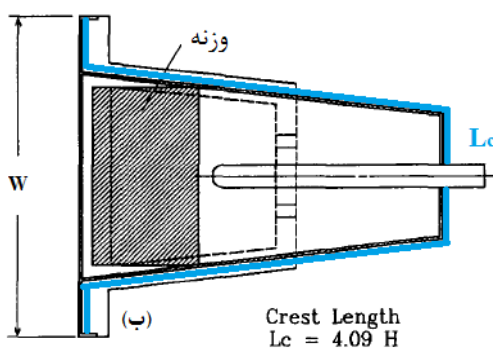


شکل 1- نمای سه بعدی سرریز فیوزگیت کنگره‌ای (غلامی، 1392)

جدول 1- معیارهای طراحی برای سه مدل استاندارد فیوزگیت (Falvey and Treille, 1995)

| | | | |
|-----|----------|-------------|------------|
| NLH | $W=1.0H$ | $L_c=3.76H$ | $L_a=1.0H$ |
| WLH | $W=1.5H$ | $L_c=4.09H$ | $L_a=1.0H$ |
| WHH | $W=1.8H$ | $L_c=5.22H$ | $L_a=1.2H$ |

در جدول فوق، W = عرض سرریز، H = ارتفاع جام، L_c = طول تاج سرریز و L_a = طول کف فیوزگیت می باشد.



شکل 2- شکل نمونه سرریز فیوزگیت مدل WLH. الف) نپرخ؛ ب) نمای از بالا (Falvey and Treille., 1995)

گشتاور نیروهای مقاوم نیز به وسیله جرم سازه، جرم آب در مدل و نیروی هیدرواستاتیک پایین دست به وجود می آید. برای بده‌های بزرگتر از بده طراحی، آب از طریق چاهک به محفظه‌ای که در پایه

واژگونی یک فیوزگیت بستگی به گشتاور نیروهای مقاوم و محرک آن حول لبه پایین دست دارد. نیروهای محرک (لغزشی) شامل نیروی هیدرواستاتیک بالادست مدل و نیروی بالابر در محفظه است.

فیوزگیت حول لبه پایین دست خود چرخش می‌کند. این فرآیند زمانی اتفاق می‌افتد که مجموع گشتاورهای محرک از مجموع گشتاورهای مقاوم بیش تر شود (Falvey and Treille., 1995). شکل 3 مراحل عملکرد فیوزگیت را نشان می‌دهد.



1) عملکرد مشابه یک سرریز کنگره‌ای

2) پر شدن تدریجی چاهک

3) چرخش فیوزگیت حول لبه پایین دست بر اثر فشار بالابر

شکل 3- مراحل عملکرد فیوزگیت (Kocahan., 2003)

برقراری ارتباط بین پارامترهای موثر، منجر به افزایش کاربرد این مدل‌ها در علوم مختلف شده است. شبکه عصبی مصنوعی در حال حاضر کاربرد وسیعی در علوم مختلف از جمله آب و خاک دارد. خورچانی و بلانپاین، با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی یک معادله بده با دقت بالا برای سرریزهای جانبی (همراه با افزایش بده) در شمال فرانسه به دست آوردند که ضریب بده جریان را از روی وزن‌های رشته‌های عصبی به دست می‌آورد. کالیبره مدل به وسیله شبکه چند لایه پیش‌خور (MLP) با الگوریتم آموزشی پس انتشار خطا به دست آمد (Khorchani and Blanpain., 2005). برهمند و جاعل (1386)، جهت تخمین مقدار ضریب بده در سرریزهای جانبی (همراه با کاهش بده) از شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANNs) استفاده کردند. در پژوهش ایشان، مدلی از نوع شبکه چند لایه پیش‌خور (MLP) با الگوریتم آموزشی پس انتشار خطا (BP) و دارای 12 نرون در لایه پنهان، به عنوان مناسب‌ترین مدل انتخاب شد. باطنی و همکاران، روش جدیدی با مدل عصبی-فازی تطبیقی، برای ارزیابی آب‌شستگی پایه‌های پل ارایه دادند و به این نتیجه رسیدند که قطر پایه پل نسبت به بقیه پارامترهای مستقل تاثیر بیش‌تری برای توازن عمق آب‌شستگی دارد (Batani et al., 2006). کبیری سامانی و همکاران (1389)، ضریب بده سرریزهای کناری منقاری را با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و مدل شبکه‌های عصبی تعیین نمودند و برای آموزش مدل از الگوریتم پس انتشار خطا و روش لونیبرگ-مارکوآرت¹ استفاده کردند. نتایج تحقیق نشان داد که از روش شبکه عصبی مصنوعی می‌توان به عنوان ابزاری مناسب برای تخمین ضریب بده جریان در سرریزهای کناری منقاری بهره برد. بیلپهان و همکاران، از دو روش شبکه عصبی چند لایه پیش‌خور (FFNN) و شبکه عصبی با پایه شعاعی (RBNN) برای مطالعه جریان افقی روی

فیوزگیت قرار دارد، می‌ریزد و تراز آب در داخل چاه افزایش پیدا می‌کند که نتیجه آن افزایش فشار در محفظه پایین است که نیروی بالابر (Uplift Force) را به فیوزگیت اعمال می‌کند. نیروی بالابر دریاچه را ناپایدار کرده و در یک تراز از پیش تعیین شده آب در چاه،

فالوی و تریله عوامل موثر بر ضریب بده (C_d) را بررسی و به طراحی هیدرولیکی فیوزگیت‌ها پرداختند. آن‌ها ضریب بده برای فیوزگیت مدل WLH، NLH و WHH تعیین و آن را تابعی از طول تاج فیوزگیت (L_c) و نسبت بار آبی بالای تاج سرریز به عمق کل جریان روی پایه (h/H) دانستند و نشان دادند که با افزایش بار آبی روی فیوزگیت، مقدار ضریب بده کاهش می‌یابد. همچنین، معادله‌ای برای ضریب بده ارایه دادند (Falvey and Treille., 1995). غلامی و همکاران (1392)، به تعیین آزمایشگاهی ضریب بده سرریز فیوزگیت با افزایش جرم وزنه در کانالی کوچک به عرض 7/5 سانتی-متر پرداختند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش جرم وزنه، بار آبی بالادست سازه افزایش می‌یابد و دیرتر واژگون می‌گردد. ولی هرچه سرریز دیرتر واژگون شود، ضریب بده کم‌تری دارد. از آنجا که در مدل‌های کوچک مقیاس (با بار آبی کمتر از 3 سانتی‌متر) و با توصیه نواک و همکاران (Novak et al., 2010)، اثر کشش سطحی غیرقابل اغماض است، ضریب بده تابعی از دو پارامتر بدون بعد عدد وبر و بار آبی بالادست سرریز به ارتفاع جام ارزیابی گردید. غلامی و فضل‌اولی (1393)، به بررسی آزمایشگاهی تاثیر افزایش شیب کانال بر روند ضریب بده در 3 مدل فیوزگیت WLH، خطی و خطی با نیم-رخ مایل پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد که در فیوزگیت کنگره‌ای با افزایش بده، ضریب بده به صورت سهمی کاهش می‌یابد و در فیوزگیت‌های با تاج مستقیم، ضریب بده به صورت خطی در شیب‌های مختلف حالت افزایشی، تقریباً ثابت و کاهش‌ی دارد. در هر 3 مدل با افزایش شیب، عمق آب پایین دست سرریز کم و مقدار ضریب بده افزوده می‌شود.

استفاده از مدل‌های داده محور مانند مدل شبکه‌های عصبی بر اساس نتایج اندازه‌گیری‌های میدانی یا آزمایشگاهی است. قابلیت این مدل‌ها در پیش‌بینی و شبیه‌سازی رفتار توابع غیرخطی پیچیده و

1- Levenberg-Marquardt

مواد و روش‌ها

مدل تجربی: در این بررسی، از نتایج مدل هیدرولیکی سرریز فیوزگیت کنگره‌ای WLH در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، توسط غلامی (1392) استفاده شد. آزمایش در فلومی شیب‌پذیر با طول، عرض و ارتفاع 12، 0/5 و 0/8 متر انجام شد. جنس سرریز پلکسی گلاس، و ارتفاع جام برابر 0/17 متر بود. برای تعادل این مدل، وزنه‌هایی از جنس آهن به کار برده شد که بر روی کف محفظه قرار می‌گیرند. معیار انتخاب این وزنه‌ها، سعی و خطا بوده است. بدین صورت که، جرم وزنه‌ها را تغییر داده تا سازه به درستی عمل کند. طراحی سرریز بر اساس معیارهای جدول 1 انجام گردید. شکل 4 نحوه قرارگیری مدل‌های سرریز به همراه وزنه‌های مورد استفاده در فلوم را نشان می‌دهد. در هر آزمایش، پس از اطمینان از ثابت شدن بده، بار آبی بالادست سرریز قرائت و این روند برای بده‌های مختلف انجام گردید. لازم به ذکر است که برای رسیدن به نقطه واژگونی، بده از کم به زیاد تنظیم شد و بار آبی بالادست سازه در 70 سانتی‌متری بالادست سرریز قرائت شد. سپس، شیب کانال توسط جک هیدرولیکی افزایش داده و همین روند با شیب‌های متفاوت انجام گردید. بعد از اتمام برداشت‌ها، چاهک را تمویض نموده و تمام مراحل قبلی برای 2 چاهک دیگر صورت پذیرفت. جدول 2 تمام مراحل اجرای مدل و تعداد داده‌های قرائت شده در هر حالت را نشان می‌دهد در مجموع 196 آزمایش انجام شد. در جدول 3 نیز، پارامترهای ثابت و متغیر به همراه محدوده اندازه‌گیری آن‌ها مشخص شده است.

معادله جریان: معادله نظری جریان بر روی سرریزها، بر اساس هندسه هیدرولیکی سرریزهای لبه تیز خطی و نرمال، با جریان آزاد بدست می‌آید. برای انواع سرریزهای دیگر (نظیر سرریزهای خطی و یا غیرخطی لبه کوتاه، لبه پهن و لبه گرد)، عوامل هندسی معین به‌طور مستقیم وارد معادله شده؛ ولی عوامل هندسه هیدرولیکی نامعین جریان به‌صورت پارامترهای مستقل موثر و با تحلیل نیمه تجربی، با شاخص ضریب بده جریان (C_d)، در معادله ظاهر می‌شوند. در این پژوهش نیز، برای سرریزهای فیوزگیت کنگره‌ای نوع لبه تیز (شکل های 1 و 2)، معادله جریان آزاد بر روی سرریز از رابطه 1؛ و ضریب بده جریان (C_d)، وابسته به متغیرهای بدون بعد هندسی، جنبشی و دینامیکی، به‌صورت رابطه 2 بدست آمد (غلامی، 1392).

$$Q = C_d * \sqrt{g} * L_c * h^{3/2} \quad (1)$$

$$C_d = f_1(H, \rho, v, \sigma, \mu, w, h, h_w, S_0) \quad (2)$$

H ارتفاع جام، ρ جرم مخصوص آب، v سرعت آب در کانال، σ کشش سطحی، μ لزجت دینامیکی، w وزن وزنه، h بار آبی بالادست سازه، h_w ارتفاع چاهک و S_0 شیب کف کانال است.

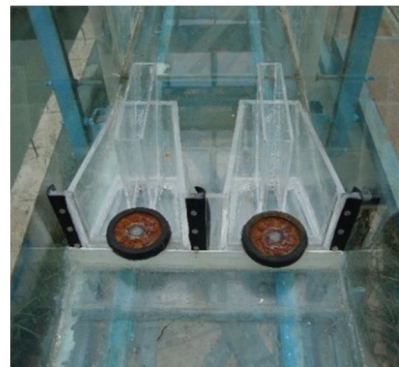
سرریزهای جانبی مستطیلی در یک کانال مستقیم استفاده کردند. مقایسه نتایج نشان داد که برای پیش‌بینی ضریب بده، روش‌های شبکه عصبی مصنوعی نسبت به همبستگی خطی و غیرخطی چند متغیره، مناسب‌تر می‌باشند (Bilhan et al., 2010). خلیلیان‌پور و همکاران (1393)، به مدل‌سازی سرعت در پرش هیدرولیکی بعد از سرریزهای اوجی شکل با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی پرداختند. شبکه مورد استفاده در پژوهش ایشان، یک شبکه Feed Forward بوده و از روش لونیگ-مارکوارت برای آموزش آن استفاده شد. در این تحقیق، نمودارهای تغییرات سرعت برحسب متغیرها را به‌دست آوردند که از این توزیع سرعت می‌توان در طراحی حوضچه‌های آرامش بهینه استفاده نمود. کبیری سامانی و همکاران (1393)، کاربرد مدل عصبی - فازی تطبیقی در تخمین ظرفیت آبگذری سرریزهای جانبی مقاری را بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد که مدل عصبی - فازی تطبیقی برای پیش‌بینی ضریب بده جریان این سرریزها در ارتباط با داده‌های آموزش نیافته تا حدودی ضعیف است. مقایسه نتایج مدل‌سازی انجام شده در این پژوهش و نتایج پژوهشگران قبلی نشان می‌دهد که مدل عصبی - فازی ارائه شده دارای دقت بالاتری است. پارسایی، به مدل‌سازی پیش‌بینی ضریب بده سرریز جانبی با استفاده از فرمول تجربی، پرسپترون چند لایه (MLP) و تابع پایه شعاعی (RBF) به‌عنوان نماینده مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی پرداختند. نتایج نشان داد که عملکرد مدل MLP با دو لایه پنهان (لایه اول شامل 10 نرون با تابع انتقال تانژانت سیگموئید و لایه دوم با 5 نرون با تابع انتقال لوگ سیگموئید و آموزش مدل با استفاده از روش لونیگ-مارکوارت) در مقایسه با مدل RBF و فرمول تجربی بهتر است (Parsaie., 2016). باقری و لوابی، به بررسی کاربرد مدل‌سازی شبکه عصبی مصنوعی در تخمین ضریب بده سرریزهای خطی پرداختند که برای آموزش از الگوی پس انتشار خطا و الگوریتم یادگیری لونیگ-مارکوارت که دارای یک لایه پنهان با 29 نرون و تابع محرک سیگموئید می‌باشد، استفاده کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که مدل شبکه عصبی مصنوعی قادر به برآورد ضریب بده با توجه به پارامترهای هیدرولیکی و هندسی می‌باشد (Bagheri and Lavaei., 2016). تاکنون، آزمون روش شبکه عصبی و کاربرد رابطه همبستگی چند متغیره برای ضریب بده جریان در شرایط هندسی - هیدرولیکی سرریزهای فیوزگیت، گزارش نشده است. در این پژوهش سعی شده است، با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی برگرفته از سرریز فیوزگیت مدل WLH و بهره‌گیری از نرم‌افزار SPSS، رابطه‌ای برای تخمین ضریب بده جریان در این نوع سرریزها ارائه شد. سپس، براساس نتایج مدل آزمایشگاهی و با استفاده از روش شبکه‌های عصبی، نتایج بهینه شده و توانایی هوش مصنوعی در تعیین پارامتر هیدرولیکی مهم در این سرریزها مورد بررسی قرار گرفت و با نتایج حاصل از نرم‌افزار SPSS مقایسه گردید.

جدول 2- آزمون‌های مختلف تجربی (غلامی، 1392)

| مدل | چاهک | شیب | تعداد داده‌ها | شماره آزمایش |
|-----|--------|-------|---------------|--------------|
| | | 0/000 | 23 | 1 |
| | چاهک 1 | 0/010 | 20 | 2 |
| | | 0/020 | 17 | 3 |
| | | 0/000 | 25 | 4 |
| WLH | چاهک 2 | 0/010 | 21 | 5 |
| | | 0/020 | 20 | 6 |
| | | 0/000 | 25 | 7 |
| | چاهک 3 | 0/010 | 25 | 8 |
| | | 0/020 | 20 | 9 |
| | مجموع | | 196 | |



ب) نیم‌رخ جریان عبوری از سرریز WLH



الف) نحوه قرارگیری سرریز WLH و موقعیت وزنه‌ها

شکل 4- سرریز فیوزگیت مدل WLH (غلامی، 1392)

جدول 3- محدوده پارامترهای ثابت و متغیر سرریزهای فیوزگیت مدل WLH (غلامی، 1392)

| پارامترهای متغیر | | | | پارامترهای ثابت | | | | پارامترها مدل |
|----------------------------------|--|---------------------------------|-----------------------|---------------------------|---|-------------------------------|-----|------------------|
| ارتفاع چاهک‌ها (سانتی‌متر) | بار آبی بالادست سرریز (میلی‌متر) | بده جریان (لیتر بر ثانیه) | شیب کف کانال So | جرم وزنه (کیلو) | طول تاج (سانتی - ارتفاع جام (سانتی - متر) | عرض هر فیوزگیت (سانتی‌متر) | مدل | |
| h_w | h | Q (l/s) | S_o | M | H | L_c | W | |
| 18/5 | | | 0/00 | | | | | |
| 21/0 | 30-140 | 10-63 | 0/01 | دو عدد وزنه نیم کیلویی | 16/7 | 130/6 | 25 | WLH |
| 23/5 | | | 0/02 | | | | | |

گردید. همچنین، پارامتر بدون بعد رینولدز حذف گردید. به علت این که این پارامتر در محدوده 8000 تا 50000 قرار دارد و جریان متلاطم است. در نهایت، تاثیر پارامترهای بدون بعد h_w/H و h/H بر روی ضریب بده (رابطه 4) مورد بررسی قرار گرفت. در جدول 4، اطلاعات مربوط به ورودی‌ها و خروجی‌های بدون بعد مورد استفاده در مدل آورده شده است.

$$C_d = f_3 \left(\frac{h}{H}, \frac{h_w}{H}, S_0 \right) \quad (4)$$

رابطه عمومی برآورد ضریب بده سرریز فیوزگیت مطابق رابطه 3 می‌باشد و همان‌طور که نشان داده شده ضریب دبی تابعی از 5 پارامتر بدون بعد Re ، We ، h_w/H ، h/H و S_0 می‌باشد.

$$C_d = \frac{Q}{\sqrt{g} * L_c * h^{3/2}} = f_2 \left(\frac{1}{We}, \frac{1}{Re}, \frac{h}{H}, \frac{h_w}{H}, S_0 \right) \quad (3)$$

در معادله ابعادی 3، بر اساس نظریه کوباس (Kobus., 1980) و تایید نواک و همکاران (Novak et al., 2010)، از عدد وبر به دلیل قرائت بار آبی بیش‌تر از 3 سانتی‌متر در بالادست سازه، صرف‌نظر

روابط رگرسیونی می‌باشد، با این تفاوت که قابلیت انعطاف ANN در تنظیم وزن‌ها بیش‌تر بوده بنابراین جایگزینی مناسب برای رگرسیون‌های چند متغیره به حساب می‌آیند.

برای ایجاد مدل عصبی، از نرم‌افزار MATLAB استفاده شد. در این پژوهش، پارامترهای بی‌بعد موجود در معادله 4 به‌عنوان ورودی در مدل شبکه عصبی مصنوعی و ضریب بده جریان به‌عنوان خروجی در نظر گرفته شد. بخش زیادی از داده‌ها، وارد مدل شد و عملیات آموزش روی آن‌ها انجام شد. بردارهای ورودی به‌صورت تصادفی به سه مجموعه آموزشی (Training)، ارزیابی (Validation) در راستای جلوگیری از بیش‌برازش شبکه (Over fitting) و آزمون (Test) برای بررسی کارایی شبکه نهایی تقسیم شد (کیا، 1394). در مرحله آموزش، وزن‌های اتصالات شبکه تغییر یافته و اصلاح می‌شوند. سپس تعداد لایه‌ها، تعداد نرون‌ها در هر لایه و نوع توابع انتقال مورد استفاده برای نرون‌ها تعیین می‌گردند. تعداد نرون‌ها در لایه پنهان، تابع ضابطه خاصی نبوده و تعیین تعداد مناسب نرون‌های لایه پنهان فقط از طریق سعی و خطا امکان‌پذیر است. در نهایت، مناسب‌ترین مدل با سعی و خطا به‌صورت تغییر توابع انتقال، تغییر تعداد لایه‌ها، تغییر تعداد نرون‌ها در لایه‌های پنهان به‌دست می‌آید. بعد از آموزش شبکه، با استفاده از مجموعه آزمایشی صحت عملکرد شبکه امتحان می‌شود، که مرحله آزمون یا تست شبکه عصبی نامیده می‌شود. بعد از آزمایش شبکه عصبی و رسیدن به خطای قابل‌قبول، مدل شبکه عصبی قابل استفاده خواهد بود.

نتایج و بحث

مدل تجربی: مطابق رابطه 1، یکی از راه‌های افزایش بده عبوری از سرریز، افزایش پارامتر بدون بعد ضریب بده (C_d) می‌باشد. در این تحقیق، پارامتر شیب، ارتفاع چاهک و بار آبی بالادست سرریز تغییر داده شد تا اثر آن بر ضریب بده جریان بر روی سرریز فیوزگیت مدل WLH مشاهده گردد. شکل‌های 5، 6 و 7 تغییرات ضریب بده را با پارامترهای بی‌بعد موثر که به‌ترتیب شامل S₀، h_w/H و h/H می‌باشند، نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است ضریب بده با کاهش بار آبی بالادست، افزایش شیب و کاهش ارتفاع چاهک، افزایش می‌یابد.

براساس نتایج تجربی غلامی (1392)، ضریب بده جریان آزاد بر روی سرریزهای فیوزگیت کنگره‌ای مدل WLH در دامنه (0/3-0/8)، و با متوسط 0/55 قرار دارد. با توجه به شکل‌های 8 و 9، ضریب بده با افزایش h/H، به‌صورت سهمی کاهش می‌یابد (علت سهمی بودن روند داده‌ها را می‌توان چند ضلعی بودن شکل تاج دانست). چون جریان آب از جهت‌های مختلف از روی سرریز عبور می‌کند باعث شده در بده‌های پایین، با توجه به این‌که تداخل بین لایه‌های ریزشی

جدول 4- اطلاعات ورودی و خروجی در مدل فیزیکی سرریزهای فیوزگیت

| نام متغیر | بازه تغییرات | میانگین انحراف معیار |
|-------------------|------------------|----------------------|
| h/H | [0/1745, 0/7136] | 0/4764 |
| h _w /H | [1/0756, 1/3674] | 1/2292 |
| S ₀ | [0, 0/02] | 0/0092 |
| C _d | [0/3383, 0/5067] | 0/4109 |

الف) ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE): هر چه مقدار آن به صفر نزدیک‌تر باشد، بیان‌گر این است که ضریب بده محاسبه‌ای (رابطه 10) و مشاهده‌ای، به‌هم نزدیک‌تر بوده و رابطه از دقت بالاتری برخوردار است.

ب) ضریب تبیین (R²): هر چه مقدار R² به یک نزدیک‌تر شود، پیش‌بینی مدل بهتر خواهد بود.

ج) درصد میانگین مطلق خطا (MAPE): هر چقدر این معیار ارزیابی کم‌تر باشد، میزان دقت روش بیش‌تر خواهد بود. به‌عبارت دیگر مقادیر نزدیک به صفر حاکی از خطای کم مدل پیشنهادی است. استقلال داده‌ها: برای نشان دادن استقلال بین متغیرهای ورودی، می‌توان از آزمون همبستگی (معادله 5) استفاده کرد. اگر جواب آزمون مثبت باشد، یعنی تعداد زیادی از داده‌های یک ورودی با تعداد زیادی از داده‌های ورودی دیگر با هم در ارتباط است. اگر منفی باشد، یعنی تعداد کمی از داده‌های یک ورودی با تعداد زیادی از داده‌های ورودی دیگر با هم در ارتباط است و اگر جواب آزمون صفر شود، بین دو ورودی (x,y) استقلال وجود دارد.

$$\text{Cor}(x, y) = \frac{\text{Cov}(x, y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (5)$$

که در این معادله Cov(x,y) کواریانس و σ انحراف معیار استاندارد است. نتایج این آزمون در جدول 5 آمده است. همان‌طور که دیده می‌شود، بیش‌ترین وابستگی بین دو پارامتر بی‌بعد h_w/H و h/H است، که به‌دلیل وجود پارامتر ارتفاع جام سرریز در هر دو است. در مجموع اعداد موجود در جدول، نزدیک به صفر و یا منفی هستند، بنابراین استقلال سری داده‌های ورودی، مناسب می‌باشد.

جدول 5- نتایج آزمون همبستگی آماری در سرریز فیوزگیت مدل WLH

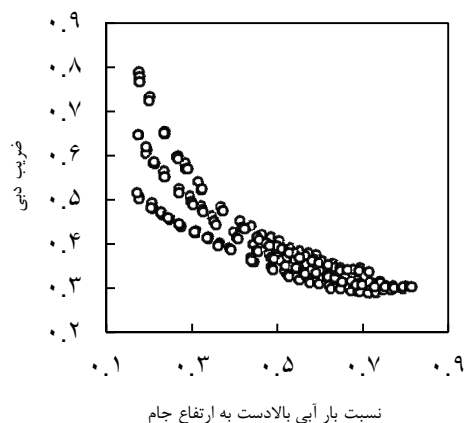
| نام متغیر ورودی | (h/H) | (h _w /H) | (S ₀) |
|---------------------|---------|---------------------|-------------------|
| (h/H) | - | 0/1182 | -0/1165 |
| (h _w /H) | 0/1182 | - | 0/0140 |
| (S ₀) | -0/1165 | 0/0140 | - |

شبکه عصبی مصنوعی Artificial Neural Network:

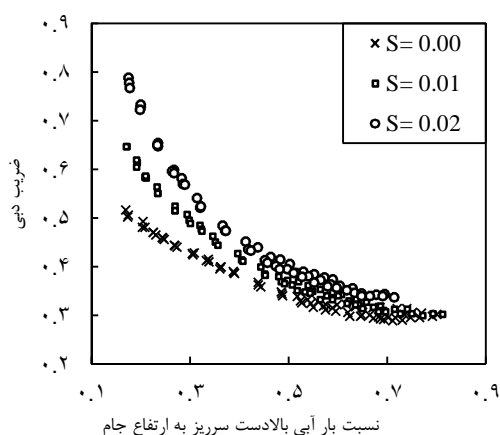
شبکه عصبی یک مدل ریاضی قدرتمند که دارای شباهت‌هایی با

این نتیجه با نتایج به دست آمده از تحقیق (Falvey and Treille., 1995) هم خوانی دارد. با کمی دقت در شکل 8 می توان دریافت که در یک h/H ثابت، با افزایش شیب، به علت کاهش بار آبی بالادست سازه و عمق آب در پایین دست سرریز، تداخل خطوط جریان کم شده، میزان هوادهی به مدل افزایش یافته و در نتیجه ضریب بده زیاد می گردد. شکل 9 ضریب بده جریان (C_d) را در برابر پارامتر h/H در شیب صفر با سه چاهک نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود در h/H های کوچک، یعنی قبل از ورود آب به داخل چاهک، این خطوط به هم نزدیک بوده و در h/H های بزرگ در یک h/H ثابت، بیشترین ضریب بده متعلق به کوتاهترین چاهک است. علت آن را این گونه می توان استنباط کرد که بعد از وارد شدن آب به داخل چاهک، بار آبی بالادست کاهش، هوادهی افزایش و ضریب بده زیاد می شود. همان طور که مشخص می باشد، هرچه ارتفاع چاهک بلندتر شود، دیرتر واژگون می شود. در واقع، تاثیر پارامتر h/H بر ضریب بده جریان (C_d) جزئی است.

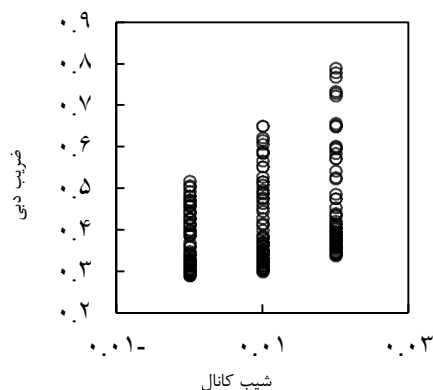
جریان کم است، تمام طول سرریز وظیفه انتقال جریان را انجام دهد و در بده های زیاد، اثر طول تاج در این سازه به دلیل تداخل جت های جریان و فشردگی بین لایه های ریزشی، کم شده، بنابراین C_d کاهش می یابد.



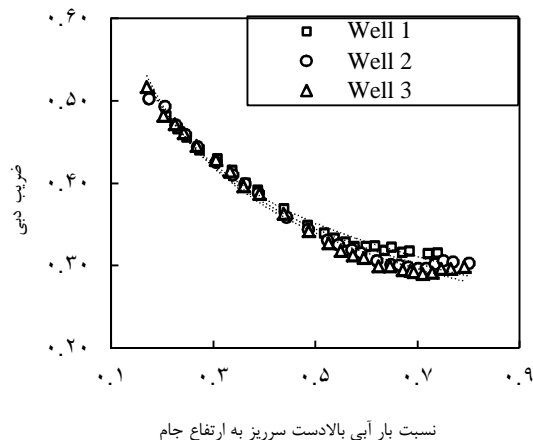
شکل 5- رابطه ضریب بده با نسبت بار آبی بالادست سرریز به ارتفاع جام



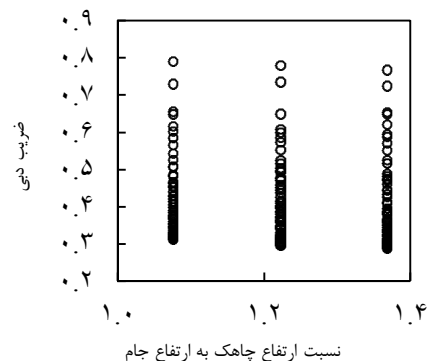
شکل 8- رابطه ضریب بده با نسبت بار آبی بالادست سرریز به ارتفاع جام در سه شیب مختلف



شکل 6- رابطه ضریب بده در 3 شیب مختلف (صفر، 0/01 و 0/02)



شکل 9 - رابطه ضریب بده با نسبت بار آبی بالادست سرریز به ارتفاع جام در سه چاهک با ارتفاع مختلف در شیب صفر



شکل 7- رابطه ضریب بده با نسبت ارتفاع چاهک به ارتفاع جام

مراحل آموزش، ارزیابی، آزمون و تمام داده‌ها نشان داده شده است. در شکل مذکور، محور افقی هدف و محور عمودی خروجی نرم‌افزار می‌باشد. ضریب همبستگی در هر یک از این حالات به ترتیب 0/9991، 0/9993، 0/9990 و 0/9991 است. همان‌طور که مشخص است در مرحله آزمون یا تست، مقدار ضریب همبستگی بالا می‌باشد که نشان می‌دهد مدل شبکه عصبی قادر به برآورد ضریب بده در سرریز فیوزگیت مدل WLH است.

مقایسه نتایج مدل‌ها: در شکل 11، نسبت ضریب بده مشاهده‌ای به ضریب بده محاسبه‌ای با نرم‌افزار SPSS و شبکه عصبی را برای تمام داده‌ها نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است مقدار خطای مدل آماری SPSS حدود 30 درصد و شبکه عصبی کم‌تر از 5 درصد می‌باشد که بیانگر دقت مناسب مدل شبکه عصبی در برآورد ضریب بده است.

مقدار ضریب تبیین، ریشه میانگین مربعات خطا و درصد میانگین مطلق خطا در نرم‌افزار SPSS و مدل شبکه عصبی در جدول 6 ارایه شده است. ضریب تبیین در مدل شبکه عصبی با تقریب خوبی نزدیک به عدد یک است. مقدار پارامتر ریشه میانگین مربعات خطا و درصد میانگین مطلق خطا، در مدل شبکه عصبی نسبت به معادله ارایه شده توسط SPSS، کم‌تر می‌باشد. بنابراین استفاده از شبکه عصبی به علت بالا بودن دقت توصیه می‌گردد.

تحلیل حساسیت: جهت تحلیل حساسیت عوامل موثر بر ضریب بده جریان با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی برای 3 حالت مختلف، با حذف کردن هر یک از پارامترهای ورودی، میزان ضریب بده مورد نیاز برآورد گردید و معیارهای خطا محاسبه شدند. نتایج تحلیل حساسیت برای روش شبکه عصبی در جدول 7 آورده شده است. همان‌طور که مشخص می‌باشد در مدل شماره 3، پارامتر h_w/H بر ضریب بده موثر نبوده، چون داده‌ها در محدوده خاصی متمرکز شده‌اند. بنابراین، به علت عدم پراکندگی مناسب داده‌ها، از این پارامتر در محاسبه ضریب بده جریان در شبکه عصبی صرف‌نظر می‌شود. مطابق جدول، پارامتر h/H بیش‌ترین تاثیر را داشته و با حذف آن، ضریب تبیین به 0/160 کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

سرریزهای فیوزگیت با تاج کنگره‌ای گزینه مناسبی برای گذر جریان‌های سیلابی زیادتر از عرض کم‌تر هستند. ارزیابی ضریب بده جریان در کارایی ظرفیت انتقال این سرریزها اهمیت دارد. براساس نتایج تجربی موجود، ضریب بده جریان آزاد بر روی سرریزهای مدل WLH در دامنه (0/3-0/8)، و با متوسط 0/55 قرار دارد.

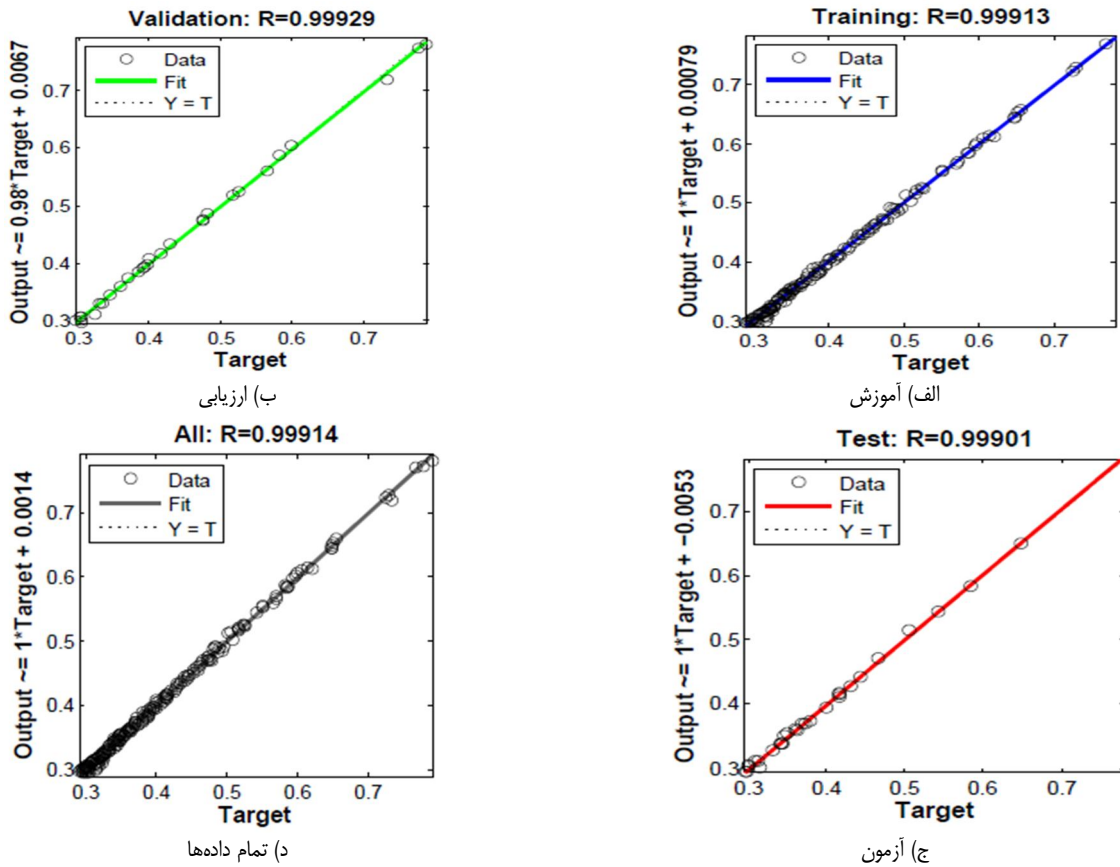
مدل آماری SPSS: برای استخراج معادله ضریب بده، از نرم‌افزار SPSS استفاده شد و رابطه خطی چند متغیره مطابق رابطه 6، بین ضریب بده و پارامترهای بدون بعد بار آبی بالادست سرریز به ارتفاع جام، شیب کانال و نسبت ارتفاع چاهک به ارتفاع جام ایجاد شد.

$$C_d = 0.6284 - 0.5110 \frac{h}{H} + 3.958 S_0 - 0.0085 \frac{h_w}{H} \quad (6)$$

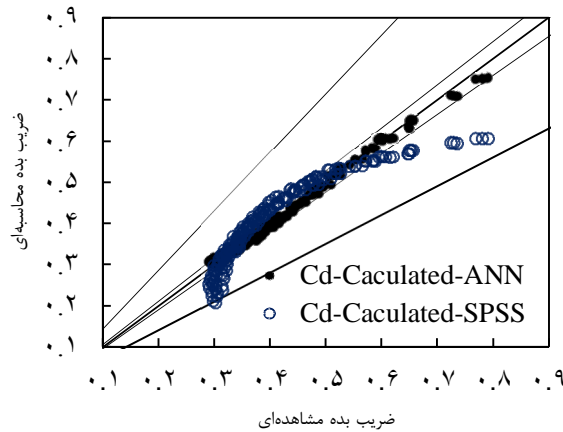
مدل شبکه عصبی: در ساخت یک مدل عصبی، اولین کار انتخاب نوع شبکه است، که در این تحقیق از شبکه عصبی چند لایه پیش‌خور Feed-forward استفاده شد. این نوع از شبکه‌های عصبی در ارتباط با کاربردهای تخمین توابع (همبستگی) از کارایی مناسبی برخوردار هستند (منه‌اج، 1386). در این شبکه‌ها، گره‌ها در لایه‌های متوالی قرار گرفته و ارتباط آن‌ها یک طرفه است. زمانی که یک الگوی ورودی به شبکه اعمال می‌شود، اولین لایه مقادیر خروجی‌اش را محاسبه کرده و در اختیار لایه بعدی قرار می‌دهد. لایه بعدی این مقادیر را به‌عنوان ورودی دریافت کرده و مقادیر خروجی‌اش را به لایه بعدی انتقال می‌دهد، و هر گروه فقط به گره‌های لایه بعد سیگنال منتقل می‌کند. شبکه‌های عصبی چند لایه پیش‌خور دارای توانایی بیش‌تری نسبت به شبکه‌های تک لایه‌اند. شبکه‌های دو لایه با توابع سیگموئیدی در لایه اول، قادرند هر تابعی را با دقت دلخواه تقریب بزنند، در حالی که شبکه‌های تک لایه فاقد چنین توانایی هستند (Hornik, et al., 1989).

پس از انتخاب نوع شبکه، پارامترهای ورودی که در خروجی تاثیرگذار هستند انتخاب می‌گردند. برای آموزش شبکه، الگوریتم Levenberg-Marquardt به‌عنوان تابع آموزش استفاده شد. تحقیقات نشان داده که این نوع الگوریتم جهت آموزش شبکه چند لایه پیش‌خور بسیار مناسب است (منه‌اج، 1386). در این تحقیق، از تعداد 2 لایه با تابع انتقال TANSIG در لایه پنهان و تابع انتقال خطی در لایه خروجی انتخاب گردید. در این پژوهش، با به‌کار بردن تعداد مختلفی از نرون‌های لایه میانی، حالت مطلوب با روش سعی و خطا، تعداد 4 نرون انتخاب شد و مبنای مدل‌سازی قرار گرفت. در واقع، طبق قضیه کولموگوروف¹، شبکه MPL با یک لایه مخفی و تابع محرکه سیگموئیدی در لایه میانی و تابع محرکه خطی در لایه خروجی قادر به تقریب تمامی توابع خواهد بود، مشروط بر این‌که در لایه میانی به‌اندازه کافی نرون وجود داشته باشد. در نتایج سایر محققین هم‌چون برهمند و جاعل (1386)، در سرریزهای جانبی (همراه با کاهش بده) و کبیری سامانی و همکاران (1389)، در سرریزهای جانبی نوک منقاری، از این ساختار برای برآورد توابع استفاده شده است. در شکل 10 نتایج خروجی مدل شبکه عصبی در

1- Kolmogorov Theorem



شکل 10- نتایج خروجی مدل شبکه عصبی نرم‌افزار متلب به ترتیب در مراحل آموزش، ارزیابی، آزمون و تمام داده‌ها



شکل 11- نسبت ضریب بده مشاهده‌ای به ضریب بده محاسبه‌ای با نرم‌افزار SPSS و مدل شبکه عصبی مصنوعی

جدول 6- معیارهای ارزیابی در مدل SPSS و مدل شبکه عصبی مصنوعی

| معیارهای خطا | | ضریب تبیین (R^2) | پارامترهای ورودی | مدل |
|------------------------------|--------------------------------|----------------------|---|------|
| درصد میانگین مطلق خطا (MAPE) | ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) | | | |
| 0/9 | 0/004 | 0/998 | $C_d = f\left(\frac{h}{H}, \frac{h_w}{H}, S_0\right)$ | ANN |
| 8/1 | 0/044 | 0/843 | $C_d = f\left(\frac{h}{H}, \frac{h_w}{H}, S_0\right)$ | SPSS |

جدول 7- نتایج تحلیل حساسیت در برآورد ضریب بده جریان (مدل شبکه عصبی مصنوعی)

| شماره مدل | پارامترهای ورودی | پارامتر حذف شده | معیارهای خطا | |
|-----------|---|-------------------|------------------------------|--------------------------------|
| | | | ضریب تبیین (R ²) | ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) |
| 1 | $C_d = f\left(\frac{h}{H}, \frac{h_w}{H}, S_0\right)$ | - | 0/998 | 0/004 |
| 2 | $C_d = f\left(\frac{h}{H}, \frac{h_w}{H}\right)$ | S ₀ | 0/828 | 0/046 |
| 3 | $C_d = f\left(\frac{h}{H}, S_0\right)$ | h _w /H | 0/994 | 0/009 |
| 4 | $C_d = f\left(\frac{h_w}{H}, S_0\right)$ | h/H | 0/160 | 0/102 |

بیرامی، م. ک. 1387. سازه‌های انتقال آب. انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان. چاپ هفتم.

خلیلیان پور، ا. ح.، صادقیان، ب.، و امانیان، ن. 1393. مدل سازی سرعت در پرش هیدرولیکی بعد از سرریزهای اوجی شکل با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی. هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، بابل.

غلامی، ز.، فضل‌اولی، ر.، عمادی، ع. ر. 1392. تعیین آزمایشگاهی ضریب دبی سرریز فیوزگیت قبل از واژگونی با افزایش جرم وزنه، کنفرانس بین المللی عمران، معماری و توسعه پایدار شهری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز.

غلامی، ز. 1392. بررسی آزمایشگاهی هیدرولیک جریان در سرریز فیوزگیت. پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی. دانشکده مهندسی زراعی. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.

غلامی، ز. و فضل‌اولی، ر. 1393. بررسی آزمایشگاهی هیدرولیک جریان در 3 مدل سرریز فیوزگیت (W.L.H، خطی و خطی با نیم‌رخ مایل) با افزایش شیب کانال، مجله هیدرولیک، دانشگاه تهران، دوره 9. شماره 2. 36-23.

کبیری سامانی، ع. ر.، آقاچان عبدالله، م.، حجاری طاقانکی، س. ر. 1389. تعیین ضریب دبی سرریزهای کناری منقاری با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و مدل شبکه‌های عصبی. مهندسی عمران شریف. 2-27. 4: 85-92.

کبیری سامانی، ع. ر.، آقاچان عبدالله، م.، حجاری طاقانکی، س. ر. 1393. کاربرد مدل عصبی - فازی تطبیقی در تخمین ظرفیت آبگذری سرریزهای جانبی منقاری. مجله پژوهش آب ایران. 8. 4: 47-54.

کیا، م. 1394. شبکه‌های عصبی در Matlab. انتشارات دانشگاهی کیان، چاپ چهارم.

منه‌اج، م. ب. 1386. مبانی شبکه‌های عصبی. جلد اول. انتشارات

در این تحقیق براساس نتایج آزمایشگاهی، ارتباط پارامترهای بی- بعد موثر بر ضریب بده جریان ارایه شده است. رابطه همبستگی خطی چند متغیره 6 با دقت مناسب برای تخمین ضریب بده جریان آزاد با استفاده از مدل آماری SPSS پیشنهاد گردید. هم‌چنین، یک مدل شبکه عصبی به‌منظور تخمین ضریب بده جریان ایجاد شد. در مدل شبکه عصبی مصنوعی مورد استفاده، الگوریتم Levenberg-Marquardt به‌عنوان تابع آموزش، تابع انتقال تانژانت سیگموئید برای لایه پنهان (با تعداد 4 نرون) و تابع خطی در لایه خروجی انتخاب شد. نتایج مرحله آزمون با ضریب همبستگی بالا بیان‌گر قابلیت کاربرد مدل شبکه عصبی جهت تعیین ضریب بده می‌باشد. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که در میان پارامترهای بی‌بعد موثر بر ضریب بده جریان، تاثیر پارامتر h/H از سایر متغیرهای ورودی بیش‌تر است. مقدار خطای نسبی برآورد ضرایب بده جریان از مدل آماری حدود 30 درصد و شبکه عصبی کم‌تر از 5 درصد می‌باشد. نتایج بیان‌گر برتری مدل شبکه‌ی عصبی حاضر نسبت به معادله همبستگی 6 حاصل SPSS است. از این‌رو، مدل شبکه‌ی عصبی ابزار مناسبی برای تخمین ضریب بده جریان در سرریزهای فیوزگیت مدل WLH به‌شمار می‌آید.

تشکر و قدردانی

از جناب آقای دکتر رامین فضل‌اولی، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری به جهت راهنمایی موضوع اصلی این تحقیق تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع

برهمندن، و جاعل، آ. 1386. استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANNs) جهت تخمین مقدار ضریب دبی در سرریزهای جانبی (همراه با کاهش دبی). ششمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه شهرکرد.

- Chevalier, S., Culshaw, S.T and Fauquez, S.T. 1996. The Hydroplus Fusegate System – four years on. The Reservoir as an Asset. Thomas Telford. London.
- Falvey, H.T., Treille, P. 1995. Hydraulics and Design of Fusegates. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. 121.7:512-518.
- Hornik, K., Stinchcombe, M and White, H. 1989. Multilayer Feedforward Networks are Universal Approximators. Neural Networks. 2:359-366.
- Khorchani, M and Blanpain, O. 2005. Development of a Discharge Equation for Side Weirs using Artificial Neural Networks. Journal of Hydroinformatics. 07.1:31-39.
- Kobus, H. 1980. Hydraulic Modelling. German Association for Water Resources and Land Improvement. DA Information Services Publisher. Bulletin.
- Kocahan, H.T. 2003. Hydraulics and Design of Fusegates. USCOE.
- Novak, P., Guinot, V., Jeffrey, A and Reeve, D.E. 2010. Hydraulic Modelling an Introduction. Spon Press. London and New York.
- Parsaie, A. 2016. Predictive Modeling the Side Weir Discharge Coefficient using Neural Network. Journal Model. Earth Systems and Environment. Springer International Publishing Switzerland. 2.63:1-11.
- دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- نیک‌صفت، غ.ر. 1380. تئوری و کاربرد مدل‌های هیدرولیک در طراحی سازه‌های آبی. انتشارات وزارت نیرو - کمیته ملی سدهای بزرگ ایران، نشریه شماره 41.
- Afshar, A., Marino, M.A and Jalali, M.R. 2003. Optimum Design of Fusegates; Reconciling Dam Safety and Increasing Storage Capacity, Journal of Civil Engineering. 1.1:28-32.
- Bagheri, S., Lavaei, N. 2016. Application of Artificial Neural Network Modeling for Estimating the Discharge Coefficient of Linear Weirs. Journal of Applied Research of Water Sciences. 1.2:51-58.
- Barcouda, M., Cazaillet, O., Cochet, P., Jones, B.A., Lacroix, S., Laugier, F., Odeyer, C and Vigny, J.P. 2006. Cost Effective Increasing in Storage and Safety of Most Dams using Fusegates or P.K. Weirs. Commission International Des Grands Barrages. Barcelona.
- Batani, S.M., Borghei, S.M and Jeng, D.S. 2006. Neural Network and Neuro-Fuzzy Assessments for Scour Depth around Bridge Piers. Journal of Engineering Applications of Artificial Intelligence. 20.:401-414.
- Bilhan, O., Emin Emiroglu, M and Kisi, O. 2010. Application of Two Different Neural Network Techniques to Lateral Outflow over Rectangular Side Weirs Located on a Straight Channel. Journal of Advances in Engineering Software. 41.6:831-837.

Performance Evaluation of Discharge Coefficient in Physical Models of Labyrinth Fusegate Spillways with Intellectual and Statistical Models

M. Yasi^{1*}, Z. Gholami²

Received: Apr.23, 2017

Accepted: Jun.24, 2017

Abstract

Fusegate spillways dispart into two models of straight and labyrinth crest according to their plan view. Labyrinth Fusegates are consists of three types: Narrow Low Head (NLH), Wide Low Head (WLH), and Wide High Head (WHH). In this study, the effect of well with different heights and floor slope in WLH model of Fusegate spillways investigated on discharge coefficient over the spillway, and the amount of discharge coefficient calculated by artificial neural network and statistical method of multivariate regression by SPSS software, and compared with the result of physical modeling tests. Also, the sensitivity analysis of effective factors on the flow discharge coefficient has been done. To predict the flow discharge coefficient in artificial neural network, the best fit was obtained from Levenberg-Marquardt algorithm application as training function, TANSIG as transfer function for hidden layer and linear function as output layer. The results of sensitivity analysis showed that among the dimensionless parameters, the ratio of upstream water head to height of bucket is more effective than the other input variables. To estimate the discharge coefficients, the amount of relative error in statistical model is approximately 30% and in neural network is less than 5%. Therefore, the neural network model is considered as a suitable tool for estimating the discharge coefficient in Fusegate Spillways.

Keywords: Artificial Neural Network (ANN), Discharge Capacity, Levenberg-Marquardt Algorithm, WLH Spillway.

1- Associate Professor of River Engineering, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, Karaj Campus, University of Tehran, Iran

2- Ph.D. Candidate of Hydro Structures Engineering, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, Karaj Campus, University of Tehran, Iran

(*-Corresponding Authors Email: m.yasi@ut.ac.ir)