

تحلیل حساسیت عوامل مؤثر در هوادهی سرریز با استفاده از روش‌های هوشمند مصنوعی و ANFIS

امین مهدوی میمند^۱، جواد احدیان^۲، محمد احترام^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۰/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۷/۲۱

چکیده

هوادهی به جریان عبوری از سرریزها توسط هوادهای یکی از روش‌های مؤثر در کاهش دادن خسارت ناشی از کاویتاسیون در این سازه‌ها می‌باشد. در این تحقیق جهت برآورد هوای مورد نیاز هوادهای از سه روش شبکه عصبی مصنوعی (مبتنی بر الگوریتم لونیبرگ-مارکواد)، ترکیبی عصبی-فازی (ANFIS) و رابطه تجربی فیشر استفاده شد. پارامترهای h_0 (عمق جریان در ابتدای سیستم هواده)، Q_{water} (دبی جریان عبوری از سرریز)، s (ارتفاع پله)، α (زاویه رمپ) و h_s (اختلاف فشار بین اتمسفر و فشار زیر جت جریان عبوری از روی سیستم هواده) به‌عنوان عوامل مؤثر بر میزان جریان هوای مورد نیاز هواده در نظر گرفته شدند و مدل‌سازی بر اساس این پارامترها صورت گرفت. نتایج مدل‌سازی نشان داد که در صورت در نظر گرفتن همه پارامترها روش ANFIS نسبت به دو روش دیگر عملکرد مطلوب‌تری دارد. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که پارامتر اختلاف فشار مهم‌ترین پارامتر در مدل‌سازی با استفاده از هر دو روش عصبی و ANFIS است به گونه‌ای که در اثر حذف شدن این پارامتر در مدل‌سازی، ریشه میانگین مربعات خطا برای روش‌های شبکه عصبی و ANFIS به ترتیب در حدود $۳۷/۵۴$ و $۲۲۴/۷۴$ درصد افزایش می‌یابد. درصد افزایش ریشه میانگین مربعات خطا در اثر حذف شدن پارامتر ارتفاع پله برای روش شبکه عصبی و ANFIS به ترتیب در حدود $۵/۳۹$ و $۱۳/۴$ درصد می‌باشد که کمترین مقدار را در بین سایر پارامترها داشت و به‌عنوان کم‌اهمیت‌ترین پارامتر در مدل‌سازی با استفاده از هر دو روش شناخته شد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم لونیبرگ مارکواد، تحلیل حساسیت، شبکه عصبی، فازی، کاویتاسیون، هواده.

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، ۰۹۱۳۱۹۰۰۱۸۲

Amin_mahdavi68@yahoo.com (نویسنده مسئول)

^۲ استایار گروه سازه‌های، دانشکده علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، Ja_ahadiyan@yahoo.com

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد عمران آب، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، eh.mohammad@yahoo.com

مقدمه

پاکستان، ترکیه و به خصوص ایران خسارت‌های زیادی وارد نموده است. به‌عنوان مثال می‌توان به سد کبان^۱ در ترکیه و سد شهید عباس‌پور در ایران اشاره نمود. یکی از شاخص‌هایی که برای پیش‌بینی خوردگی از آن استفاده می‌شود شاخص کاویتاسیون (σ) می‌باشد که این شاخص از نوشتن رابطه برنولی بین دو مقطع به دست می‌آید. شاخص کاویتاسیون نسبت افت فشار لازم برای تبخیر آب، به پتانسیل کاهش فشار جریان از طریق انرژی جنبشی است و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\sigma = \frac{P - P_v}{\frac{1}{2} \times \rho \times U^2} \quad (1)$$

در این رابطه P_v فشار بخار سیال عبوری از سرریز در دمای محیط، ρ دانسیته سیال، U سرعت متوسط جریان و P فشار محلی است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P = P_0 + P_g \quad (2)$$

در این رابطه P_0 فشار اتمسفر و P_g فشار پیزومتریک می‌باشد.

کاویتاسیون زمانی رخ می‌دهد که شاخص کاویتاسیون، از شاخص کاویتاسیون بحرانی کمتر شود. فالوی (۱۹۸۳) شاخص کاویتاسیون بحرانی را به صورت نشان داده شده در جدول (۱) ارائه داد.

جدول (۱): شاخص کاویتاسیون بحرانی (فالوی، ۱۹۸۳)

عملیات محافظتی	عدد کاویتاسیون (σ)
نیازی به محافظت از سطح نیست	$> 1/8$
بستر جریان با عملیاتی نظیر ساییدن زبری قابل اصلاح می‌باشد.	$1/8 - 0/25$
بستر جریان با اصلاح طراحی مثل پروفیل تنداب محافظت می‌شود.	$0/25 - 0/17$
بستر جریان با هوادهی محافظت می‌شود.	$0/17 - 0/12$
بستر جریان احتمالاً قابل اصلاح نبوده و باید طراحی جدید صورت گیرد.	$< 0/12$

پایین سرریز را نشان دادند. با این وجود شاخص کاویتاسیون پیش‌بینی بهتری از سطح کاویتاسیون ارائه می‌دهد. مطالعات پترکا (۱۹۵۳) نشان داد که با وارد شدن ۲ درصد هوا (نسبت دبی هوا به دبی جریان) به

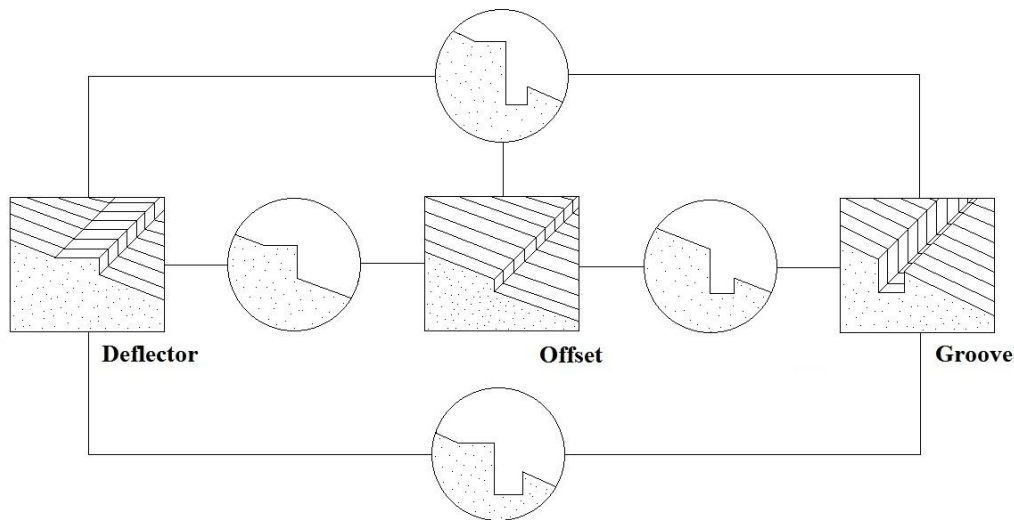
زبری‌های موجود بر سطح سرریز در سرعت‌های بالای جریان باعث جدشدگی جریان از سطح عبوری می‌شود. جدشدگی جریان از سطح عبوری، کاهش فشار وارد بر سرریز را در پی دارد. کاویتاسیون هنگامی رخ می‌دهد که در اثر این کاهش فشار، فشار وارد بر سطح سرریز از فشار بخار سیال کمتر شود که این کاهش فشار باعث به وجود آمدن حباب‌های بخاری در داخل جریان آب می‌شود. این حباب‌ها همراه جریان به پایین دست منتقل می‌شوند. در مناطقی از پایین دست که فشار وارد بر سطح سرریز از فشار بخار سیال بیشتر می‌شود، این حباب‌ها منفجر می‌شوند که در اثر این انفجار امواج ضربه‌ای به وجود می‌آیند که باعث فرسایش و خوردگی بتن سرریز می‌شوند (جانسون، ۱۹۸۸). فشار ناشی از انفجار و تبدیل حباب‌های کاویتی به مایع به ۱۵۰۰ مگا پاسکال هم می‌رسد (فالوی، ۱۹۹۰). امروزه ساخته شدن سدهای با ارتفاع بلند باعث ایجاد سرعت‌های بالای جریان روی سرریزها می‌شود که خطر وقوع کاویتاسیون در این سدها را افزایش می‌دهد. سرریز از سازه‌های مهم حفاظتی یک سد محسوب می‌شود که در هنگام بروز جریان‌های سیلابی شدید آب اضافی را از روی خود عبور می‌دهد در نتیجه باید در برابر عوامل مخرب مقاوم باشد. کاویتاسیون به سرریز سدهای کشورهای مختلفی همچون روسیه، ونزوئلا،

فدایی کرمانی و همکاران (۲۰۱۲) جهت بررسی کاویتاسیون در مطالعه موردی روی سد شهید عباس‌پور، با استفاده از دو پارامتر عدد کاویتاسیون و سرعت جریان، میزان خسارت را در ۵ سطح از بدون خسارت تا خسارت عمده دسته‌بندی نمودند. هر دو روش، خسارت شدید در

¹ keban

هوا به داخل جریان عبوری از سرریز، از هواده‌ها استفاده می‌شود. هواده‌ها با جدا کردن جریان از سطح سرریز، باعث ایجاد جت جریان آزاد و از هم پاشیده‌ای می‌شود که هوا در داخل آن به دام می‌افتد (فیشر، ۲۰۱۱). به طور کلی می‌توان انواع هواده‌ها را شامل گروو، افست، دفلکتور در نظر گرفت. در شکل (۲) می‌توان شماتیکی از انواع هواده و ترکیبات آن‌ها را مشاهده نمود.

جریان، خسارت ناشی از کاویتاسیون به میزان قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند که اگر این نسبت به ۶ تا ۸ درصد افزایش پیدا کند، هیچ‌گونه خرابی ناشی از کاویتاسیون مشاهده نمی‌شود (پترکا، ۱۹۵۳). کاربرد موفقیت آمیز هواده در سد گرند کولی واقع در آمریکا در سال ۱۹۶۰ باعث مورد توجه قرار گرفتن این روش به‌عنوان روشی کم هزینه و کارآمد در کاهش خسارت ناشی از کاویتاسیون در سرریزها شد (جین و همکاران، ۲۰۱۱). جهت وارد نمودن



شکل (۱): شماتیکی از انواع هواده

هوای مورد نیاز هواده‌ها ساختن مدل‌های هیدرولیکی و تکیه بر نتایج آزمایشگاهی است. در شکل (۲) نمونه‌ای از مدل هیدرولیکی سرریز ساخته شده در کنار پروژه‌ی اصلی اجرا شده نشان داده شده است.

یکی از مهم‌ترین مسائل در طراحی هواده‌ها برای هواده‌ی به جریان تعیین میزان دبی هوای مورد نیاز هواده می‌باشد. مقدار هوای مورد نیاز جهت جلوگیری از کاویتاسیون بیش از نیم قرن است که مطرح شده است (کرامر، ۲۰۰۶). دقیق‌ترین روش تعیین میزان جریان



شکل (۲): سرریز سد Kárahnjúkar در کنار مدل هیدرولیکی آن

سال پنجم • شماره هفدهم • پاییز ۱۳۹۳

$$\beta = K_1(F_r - K_2) - K_3 \left(\frac{\Delta P}{\rho \times g \times d} \right)^n \quad (3)$$

در این رابطه β نسبت دبی هوا به دبی جریان (Q_a)، F_r عدد فرود جریان، Δp اختلاف فشار بین اتمسفر و فشار در زیر جت جریان عبوری از هواده (N/m^2)، K_1 ، K_2 و K_3 ضرایب تجربی هستند که به طور عمده به هندسه‌ی مجرای هواده بستگی دارند. ولکارت و راشمن این ضرایب را برای سه سد استخراج کرده‌اند. این ضرایب در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول (۲): ضرایب هندسه هواده برای رابطه ولکارت و راشمن

نام سد	شیب سرریز %	ارتفاع رمپ (m)	زاویه رمپ	K_1	K_2	K_3	N
FozdoAreia	۲۵/۸۴	۰/۲۰/۱۵	۷/۱	۰/۱۷۱۳	۴/۹۴	۱	۱
Guri	۵۸	۰/۱	۲	۰/۰۲۹۸	۳/۱۰۰۷	۰/۰۰۳۵	۱
Amaluza	۲۴۰	۰/۰۶	۵/۷	۰/۲۱۵۱	۵/۹۱۳۱	۰/۵۷۴۴	۱

در این رابطه L_j طول جت بر حسب متر، h عمق جریان بر حسب متر، A_a سطح مقطع مجرای ورودی هوا بر حسب مترمربع، A_w سطح مقطع جریان بالادست هواده بر حسب مترمربع و α زاویه سرریز است. در این رابطه از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{L_j}{h} = 0.28 \times Fr^{1.75} \times (1 + \theta)^{0.22} \times \left(\frac{t_r + t_s}{h} \right)^{0.44} \times \left[(1 + \tan \alpha) \times \frac{A_a}{A_w} \right]^{-0.087} \quad (6)$$

در رابطه‌ی بالا Fr عدد فرود، θ زاویه رمپ، t_r ارتفاع رمپ، بر حسب متر و t_s ارتفاع پله بر حسب متر است. فیشر و همکاران (۲۰۱۰) جهت برآورد دبی جریان هوای مورد نیاز هواده رابطه زیر را پیشنهاد کردند:

$$\beta = 0.0028 F_0^2 (1 + F_0^2 \tan \alpha) - 0.1 \quad (7)$$

$$0 < \alpha < 11.3$$

در این رابطه، α زاویه رمپ هواده است.

امروزه کاربرد محاسبات نرم در مدل‌سازی، کاربرد وسیعی یافته است. کاویانپور و رجبی (۱۳۸۴) جهت تعیین دبی مورد نیاز هواده تونل‌های تخلیه کننده تحتانی از شبکه عصبی با الگوریتم پس انتشار خطا استفاده

از آنجا که ساخت مدل‌های فیزیکی هزینه‌بر است و همچنین در تبدیل مقیاس آزمایشگاهی داده‌ها به مقیاس اصلی مشکلاتی وجود دارد (به نقل از بهرامی و همکاران، ۱۳۸۷) رابطه‌های تجربی برای تعیین میزان جریان هواده سرریز، توسط محققین ارائه شده است. در ادامه مروری بر روابط تجربی که برای برآورد جریان هوای هواده سرریز ارائه شده است خواهد شد. ولکارت و راشمن (۱۹۸۶) جهت تعیین میزان هوای مورد نیاز هواده سرریز رابطه زیر را پیشنهاد کردند (کلز و همکاران، ۱۹۹۱):

هنگامی می‌توان از این رابطه استفاده کرد که سرریز سد مورد مطالعه از نظر هندسی مشابه یکی از این سه سد باشد. فالوی و اروین (۱۹۸۸) بدون در نظر گرفتن فشار زیر جت جریان رابطه زیر را جهت تعیین جریان هوای مورد نیاز پیشنهاد کردند:

$$q_a = \frac{(g \times X^2 \times \tan \alpha) \times \sqrt{\frac{f}{8}}}{V \times \cos^2 \alpha} + V \times X \times \sqrt{\frac{f}{8}} \quad (4)$$

در این رابطه: q_a دبی هوا در واحد عرض، X فاصله افقی از شروع جت جریان تا محل برخورد جت، α زاویه سرریز با افق، V سرعت متوسط جریان و f ضریب اصطکاک سطح رمپ است.

کاکپینر و همکاران (۲۰۰۲) جهت برآورد جریان هوای مورد نیاز هواده رابطه‌ی زیر را ارائه نمودند:

$$\beta = 0.0189 \times \left(\frac{L_j}{h} \right)^{0.83} \times \left[\left(\frac{A_a}{A_w} \right) \times (1 + \tan \alpha) \right]^{-0.24} \quad (5)$$

پیش خور پس انتشار خطا با الگوریتم آموزشی لونبرگ-مارکواد استفاده شد. روش لونبرگ-مارکوارد روشی است که در آن برای اصلاح فراسنج‌ها علاوه بر مشتق اول (ماتریس ژاکوبین) از مشتق‌های دوم نیز (موسوم به ماتریس هسین) استفاده می‌شود. در این الگوریتم روش تغییر پارامترهای پردازشگرهای شبکه عصبی به صورت نشان داده‌شده در زیر می‌باشد:

$$\chi_{k+1} = \chi_k - [H - \eta^l]^{-1} J^T e(t) \quad (۸)$$

در رابطه‌ی بالا k شمارنده تکرار یادگیری، χ معرف بردار وزن‌ها و بایاس‌ها، g_k گرادیان میزان فعلی، η نرخ آموزش، H ماتریس هسین و J ماتریس ژاکوبین است. در این الگوریتم اگر خطا نسبت به تکرار قبلی الگوریتم افزایش یابد، نرخ یادگیری افزایش خواهد یافت تا تأثیر مشتق اول نسبت به مشتق دوم افزایش یابد. در غیر این صورت در صورت کاهش خطا نسبت به تکرار پیشین الگوریتم، مقدار نرخ یادگیری کاهش داده می‌شود تا تأثیر مشتق دوم افزایش یابد. نکته قابل توجه در الگوریتم لونبرگ-مارکوارد استفاده از مشتقات دوم بدون محاسبه مستقیم ماتریس هسین است. ماتریس مشتقات دوم و گرادیان را می‌توان به صورت $H = J^T J$, $g = J^T e$ تخمین زد. در این پژوهش جهت انجام مدل‌سازی از محیط m -file نرم افزار مطلب استفاده شد. با به کار تعداد نرون‌های لایه‌ی میانی مختلف، حالت مطلوب با روش سعی و خطا مشخص شد و مبنای مدل‌سازی قرار گرفت.

روش ترکیبی فازی-عصبی (انفیس)

رویکرد نظریه فازی با در نظر گرفتن ابهام و عدم اطمینان به جای حذف و نادیده گرفتن آن و ترویج منطق چند ارزشی به جای منطق دو ارزشی، امکان بررسی دقیق‌تر مسائل و نگاهی ویژه‌تر به پدیده‌ها را به وجود آورده است. منطق فازی اولین بار توسط لطفی زاده (۱۹۶۵) مطرح شد. ریاضیات فازی از توانایی انسان برای درک مفاهیم مبهمی ناشی شده که قابلیت ارائه و آنالیز با ریاضیات کلاسیک را ندارند (لی و همکاران، ۱۹۹۶). در مجموعه‌های فازی تابع عضویت، درجه عضویت المان‌های مختلف را به یک مجموعه نشان می‌دهد و مقداری بین صفر و یک را می‌گیرد (گوهرریزی و همکاران، ۱۳۹۰).

نمودند. نتایج حاکی از قابلیت بالای شبکه عصبی آموزش دیده نسبت به روش‌های تجربی در برآورد دبی هوای مورد نیاز هواده بعد از دریچه دارد. ذونعمت کرمانی و مهدوی میمند (۱۳۹۱) با مقایسه روش‌های رگرسیون خطی چند متغیره، شبکه عصبی و روابط تجربی در برآورد دبی هوای مورد نیاز تخلیه کننده‌های تحتانی نشان دادند که به لحاظ عملکرد به ترتیب روش شبکه عصبی، رگرسیون خطی چند متغیره و روش‌های مبتنی بر روش‌های تجربی قرار می‌گیرد. نجفی و همکاران (۲۰۱۲) جهت برآورد دبی مورد نیاز هواده بعد از دریچه تونل‌های تخلیه کننده تحتانی، از روش‌های سیستم فازی، ترکیبی فازی-ژنتیک، ترکیبی فازی-عصبی (انفیس) و روابط تجربی استفاده نمودند و نشان دادند که به لحاظ دقت به ترتیب روش‌های انفیس، ترکیبی عصبی-ژنتیک، فازی و روش‌های تجربی قرار دارند. با توجه به مطالب ذکر شده و مروری که بر منابع صورت گرفت در این پژوهش اقدام به مدل‌سازی جریان هوای مورد نیاز هواده سرریز با استفاده از روش‌های شبکه عصبی و روش ترکیبی عصبی-فازی (انفیس) و تحلیل حساسیت عوامل مؤثر در نظر گرفته شده بر میزان جریان هواده، شد.

مواد و روش‌ها

روش‌های مدل‌سازی استفاده شده در این پژوهش شامل شبکه عصبی مصنوعی (مبتنی بر الگوریتم لونبرگ-مارکواد)، انفیس و روش تجربی فیشر می‌باشد که روش تجربی فیشر در بخش قبل توضیح داده شد. در ادامه مختصری در مورد روش‌های شبکه عصبی و انفیس صحبت خواهد شد و در انتها نتایج به دست آمده ارائه خواهد شد.

شبکه عصبی مصنوعی (مبتنی بر الگوریتم لونبرگ-

مارکواد)

نظریه شبکه عصبی مصنوعی برای اولین بار در دهه‌ی ۴۰ میلادی توسط روانشناس معروف مک‌کلاچ و ریاضی‌دان پیتر (۱۹۴۳) مطرح شد (زمانیان و همکاران، ۱۳۹۱). از شبکه‌های عصبی می‌توان جهت پیش‌بینی پدیده‌ها بدون استفاده از روابط ریاضی پیچیده بهره گرفت. در پژوهش اخیر برای آموزش شبکه عصبی از الگوریتم

سال پنجم • شماره هفدهم • پاییز ۱۳۹۳

عمران در دانشگاه کنتربری در نیوزیلند قرار دارد. مدل این سد با مقیاس ۱:۱۵ ساخته شده است. ساختمان این مدل، از یک فلوم تشکیل شده است که ۳/۶ متر طول و ۰/۲۵ متر عرض دارد و شیب سرریز آن ۵۲/۳۳ درجه است. از دو نوع هواده در ساخت این مدل استفاده شده است؛ که در نوع اول آن از افست با ۳۰ میلی متر ارتفاع و رمپ با زاویه ۵/۷ درجه، ارتفاع ۳۰ میلی متر و طول ۳۰۰ میلی متر و در نوع دوم افست با ارتفاع ۳۰ میلی متر و بدون رمپ استفاده شده است. این آزمایش‌ها شامل ۹۱۴ داده می‌باشد (جانسون، ۱۹۸۸). تعداد ۱۲ داده نیز که مربوط به آزمایش‌های صورت گرفته توسط مرکز تحقیقات آب تهران روی مدل هیدرولیکی سد مخزنی آزاد است جمع‌آوری گردید. سد مخزنی آزاد روی رودخانه چم گوره از شاخه‌های اصلی رودخانه سیروان در غرب استان کردستان منطقه مریوان اجرا شده است. مدل هیدرولیکی این سد توسط موسسه تحقیقات آب، با مقیاس ۱:۳۳/۳۳ ساخته شده است. دو سیستم هواده مشابه در فواصل ۱۶۵ متر و ۲۱۰ متر اجرا شده است. ارتفاع رمپ به کاررفته ۰/۵ متر و دارای زاویه ۷ درجه می‌باشد. رمپ دارای طول افقی ۳/۷۵ متر است. در این پژوهش پارامترهای h_0 (عمق جریان در ابتدای سیستم هواده)، Q_{water} (دبی جریان عبوری از سرریز)، s (ارتفاع پله)، α (زاویه رمپ) و h_s (اختلاف فشار بین اتمسفر و فشار زیر جت جریان عبوری از روی سیستم هواده) به عنوان عوامل مؤثر بر میزان جریان هوای مورد نیاز هواده در نظر گرفته شدند و مدل‌های پیشنهادی در این تحقیق بر مبنای این پارامترها ساخته شدند. در جدول (۳) خلاصه‌ای از داده‌های استفاده شده در این تحقیق آورده شده است.

سیستم استنتاج فازی بر اساس قواعد اگر آنگاه بنا نهاده شده است، به طوری که با استفاده از قواعد مزبور می‌توان ارتباط بین تعدادی متغیر ورودی و خروجی را به دست آورد. از این سیستم می‌توان به عنوان یک مدل پیش‌بینی برای شرایطی که داده‌های ورودی و یا خروجی دارای عدم قطعیت بالایی باشند استفاده نمود. مراحل مدل‌سازی فازی عبارت است از: تعیین توابع عضویت، تعیین سیستم استنتاج بر اساس داده‌ها، نوشتن قواعد استنتاج و ترکیب آن‌ها و به دست آوردن نتیجه و در صورت نیاز غیر فازی سازی. منطق فازی این مشکل را دارد که گاهی تشخیص تابع عضویت سیستم مشکل است. جهت رفع این مشکل، ژانگ (۱۹۹۳) یکی از متداول‌ترین مدل‌های ترکیبی فازی-عصبی، انفیس را مطرح کرد. این مدل یک سامانه فازی سوگنو را در یک ساختار عصبی اجرا می‌کند و توابع عضویت از طریق الگوریتم پس انتشار یا ترکیب آن با حداقل مربعات تنظیم می‌شود. در انفیس قوانین ثابت هستند و آنچه بهینه‌سازی می‌شود، عامل‌های توابع عضویت است. در این پژوهش جهت انجام مدل‌سازی، از محیط M-File نرم‌افزار متلب استفاده شد. پس از بررسی توابع عضویت مختلفی همچون مثلثی، دوزنقه‌ای، گوسی ساده، گوسی دوطرفه مرکب، زنگی شکل، سیگموئیدی، سیگموئیدی تفاضلی، S شکل و Z شکل بهترین تابع عضویت شناسایی و با استفاده از روش خوشه بندی فازی کاهشی مدل‌سازی انجام شد.

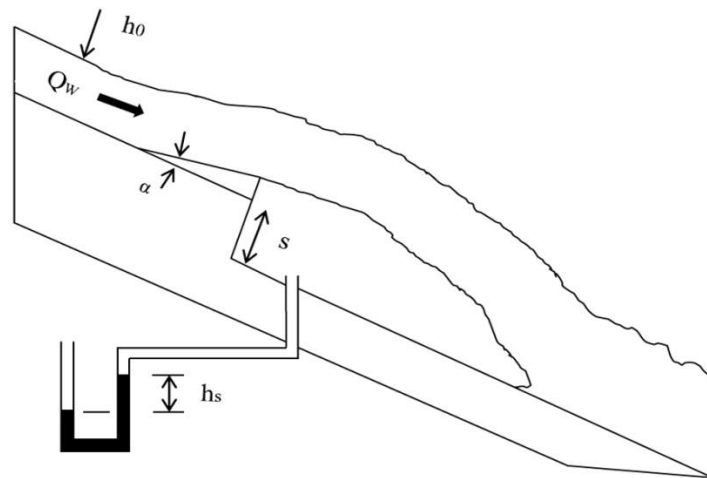
جمع‌آوری داده‌های آزمایشگاهی

داده‌های استفاده شده در این پژوهش مربوط به آزمایش‌های انجام شده روی مدل هیدرولیکی سرریز سد کلاید دم است که در آزمایشگاه مکانیک سیالات مهندسی

جدول (۳): مشخصات آماری مربوط به داده‌های استفاده شده

انحراف معیار	مقدار متوسط	حداقل	حداکثر	پارامترهای اندازه‌گیری شده
۰/۰۴۵	۰/۰۴۳	۰	۰/۱۸۰۶	دبی هوا (مترمکعب بر ثانیه)
۰/۰۲۶	۰/۰۵۴۸	۰/۰۲۲۷	۰/۲۲۲	عمق جریان در ابتدای هواده (متر)
۰/۰۳۹۹	۰/۰۹۱	۰/۰۱۳۱	۰/۳۷۵	دبی جریان (مترمکعب بر ثانیه)
۱۴۶/۳۱	۹۹/۴	-۴۸/۴۵	۱۷۶۱/۷۸	اختلاف فشار زیر جت جریان با اتمسفر (پاسکال)
۰/۰۱۷	۰/۰۳۲	۰/۰۳	۰/۱۸۹۶	ارتفاع پله (متر)
	۰/۰۵۷، ۰			زاویه رمپ (درجه)

در شکل (۳) این پارامترها به صورت شماتیک نشان داده شده‌اند.



شکل (۳): نمایش پارامترهای مؤثر در میزان جریان هوای مورد نیاز هواده سرریز

نتایج و بحث

گرفت. پس از مدل‌سازی، دبی مورد نیاز هواده با استفاده از مدل‌های ارائه شده برآورد شد. جهت مقایسه روش‌های مختلف از آزمون‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا (استاندارد شده توسط میانگین داده‌های آزمایشگاهی)، میانگین خطای مطلق (استاندارد شده توسط میانگین داده‌های آزمایشگاهی) و ضریب همبستگی استفاده شد. در جدول (۴) نتایج حاصل از مدل‌سازی روش‌های مختلف آورده شده است.

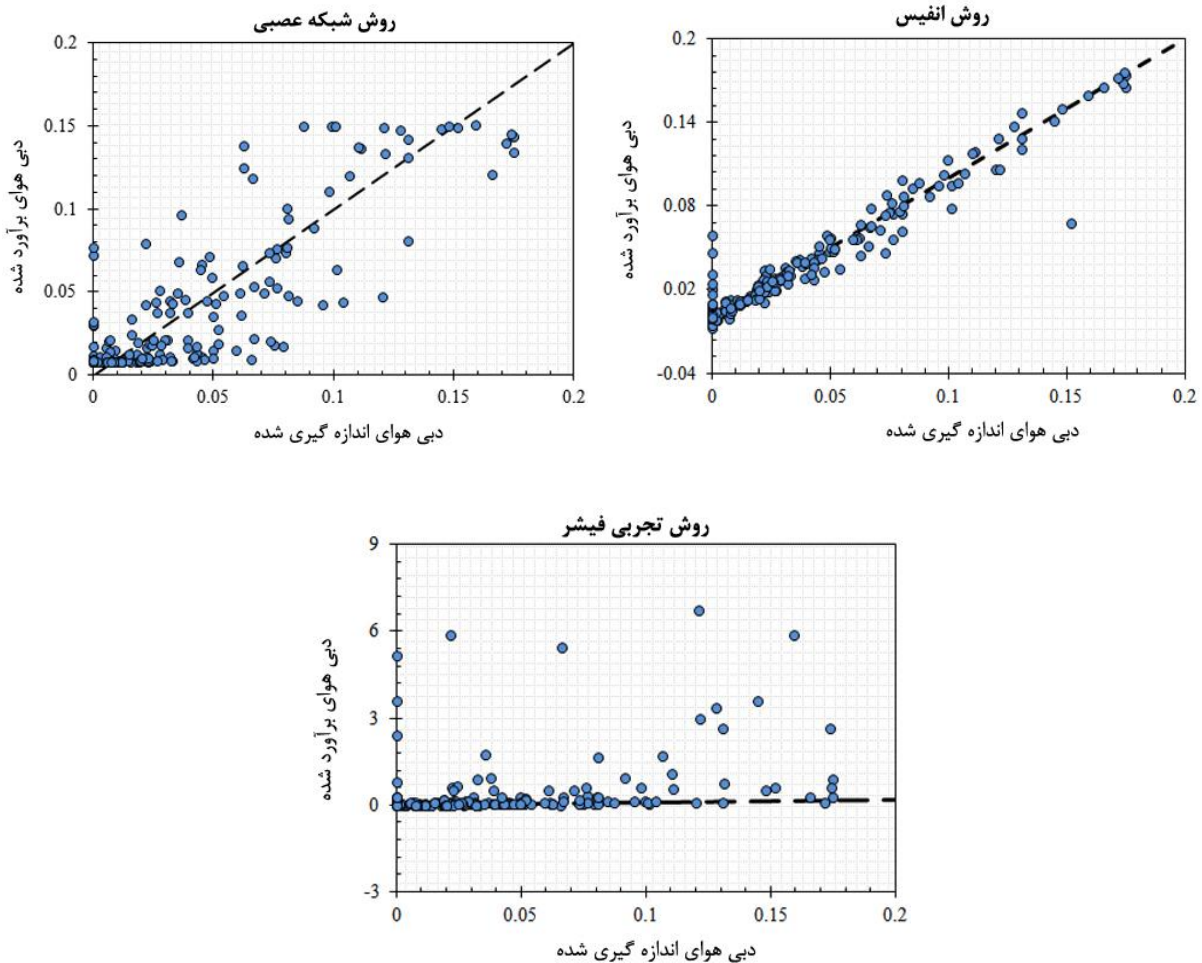
مدل‌سازی روش‌های یاد شده در این پژوهش بر مبنای ۹۱۴ داده مربوط به آزمایش‌های انجام‌شده روی مدل هیدرولیکی سرریز سد کلاید دم و ۱۲ داده مربوط به آزمایش‌های انجام‌شده توسط مرکز تحقیقات آب تهران روی مدل هیدرولیکی سد مخزنی آزاد صورت گرفت. جهت انجام مدل‌سازی، در ابتدا ۲۰ درصد داده‌ها جهت آزمون (تست) مدل به صورت کاملاً تصادفی کنار گذاشته شدند و مدل‌سازی بر اساس باقی‌مانده‌ی داده‌ها صورت

جدول (۴): نتایج حاصل از روش‌های مختلف در برآورد جریان هوای مورد نیاز هواده سرریز (داده‌های آزمون)

روش برآورد	معیارهای خطا			پارامترهای ورودی
	ریشه میانگین مربعات خطا	میانگین خطای مطلق	ضریب همبستگی	
ANFIS	۰/۰۱۹۴	۰/۱۴۴	۰/۹۶۸	$Q_{water}, h_0, h_s, \alpha, s$
ANN	۰/۰۵۳۸	۰/۵۰۴	۰/۷۷۶	$Q_{water}, h_0, h_s, \alpha, s$
Fisher	۱/۹۸	۹/۲۳۲	۰/۳۳	Q_{water}, h_0, α

عملکرد را در بین سایر روش‌ها دارد. روش تجربی فیشر با داشتن بیشترین ریشه میانگین مربعات خطا (۱/۹۸) ضعیف‌ترین عملکرد را در بین روش‌های استفاده شده در این پژوهش دارد. جهت بررسی عملکرد روش‌های مختلف می‌توان از نمودارهای پراکنش نیز بهره گرفت که در شکل (۴) این نمودارها رسم شده‌اند.

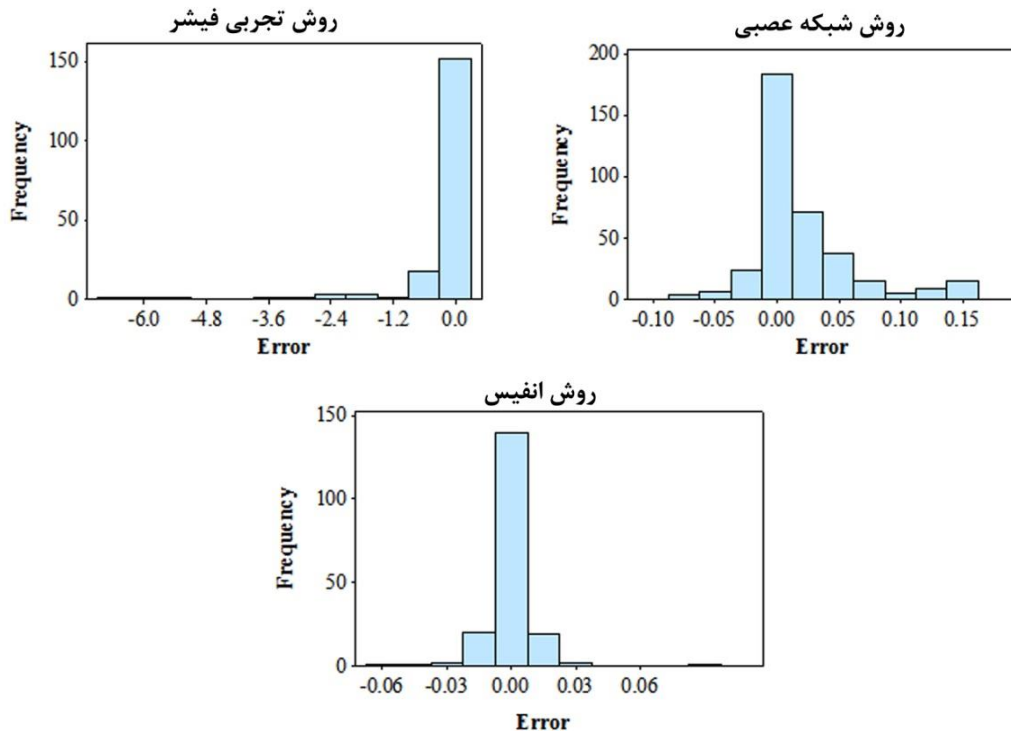
نتایج جدول (۴) مربوط به حالتی است که تمام پارامترهای مؤثر در جریان هوای مورد نیاز، در مدل‌سازی در نظر گرفته شده‌اند. این نتایج نشان می‌دهد که روش ترکیبی عصبی-فازی (ANFIS) با داشتن کمترین ریشه میانگین مربعات خطا (۰/۰۱۹۴)، میانگین خطای مطلق (۰/۱۴۴) و بیشترین ضریب همبستگی (۰/۹۶۸) بهترین



شکل (۴): نمودار پراکنش دبی هوای اندازه‌گیری شده در برابر دبی هوای برآورد شده

بالای خط ۴۵ درجه در روش تجربی فیشر نشان دهنده‌ی بیش شبیه‌ساز بودن این مدل است در حالی که در دو روش شبکه عصبی و انفیس، نقاط تقریباً به طور مساوی بین بالا و پایین خط ۴۵ درجه پخش شده‌اند که نشان از بی‌تفاوتی این مدل‌ها نسبت به کم شبیه‌ساز یا بیش شبیه‌ساز بودن است. جهت بررسی کم شبیه‌ساز یا بیش شبیه‌ساز بودن می‌توان از نمودارهای توزیع فراوانی خطای مطلق نیز بهره گرفت که در شکل (۵) این نمودارها رسم شده‌اند.

در شکل (۴) محور افقی دبی هوای اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و محور عمودی دبی هوای به‌دست آمده توسط مدل‌های پیشنهادی در این تحقیق می‌باشد. خط رسم شده نیم‌ساز دستگاه مختصات است و با افق زاویه ۴۵ درجه می‌سازد. هر چه نقاط به این خط نزدیک‌تر باشند عملکرد مدل مطلوب‌تر است. از بین مدل‌های استفاده شده در این تحقیق، نقاط مربوط به نمودار پراکنش روش ترکیبی عصبی-فازی (ANFIS) به خط ۴۵ درجه نسبت به سایر روش‌ها نزدیک‌تر می‌باشند که بیانگر عملکرد مطلوب این روش است. قرارگیری اکثر نقاط در



شکل (۵): نمودار هیستوگرام فراوانی خطای مطلق به دست آمده از روش‌های مدل‌سازی استفاده شده

استفاده از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و روش ANFIS برای ۵ حالت مختلف، با حذف کردن هر یک از پارامترهای ورودی، میزان هوای مورد نیاز برآورد گردید و معیارهای خطا محاسبه شدند. نتایج تحلیل حساسیت برای روش شبکه عصبی در جدول (۵) آورده شده است.

انحراف به چپ نمودار هیستوگرام روش تجربی فیشر نشان دهنده‌ی بیش شبیه‌ساز بودن این روش است. روش شبکه عصبی و ANFIS تقریباً توزیع نرمالی دارند که نشان دهنده‌ی بی‌تفاوتی این روش‌ها نسبت به کم شبیه‌ساز یا بیش شبیه‌ساز بودن است. جهت تحلیل حساسیت عوامل مؤثر بر جریان هوای مورد نیاز هواده سرریز با

جدول (۵): نتایج تحلیل حساسیت عوامل مؤثر بر جریان هوای مورد نیاز هواده سرریز (روش شبکه عصبی)

روش برآورد	معیارهای خطا			پارامترهای ورودی	پارامتر حذف شده
	ریشه میانگین مربعات خطا	میانگین خطای مطلق	ضریب همبستگی		
ANN	۰/۰۷۴۰	۰/۷۳۵	۰/۳۹۷	Qwater, h ₀ , α, s	h _s
ANN	۰/۰۶۸۷	۰/۶۸۹	۰/۶۶۱	Qwater, h _s , α, s	h ₀
ANN	۰/۰۶۵۵	۰/۶۶۶	۰/۷۳۹	Qwater, h ₀ , h _s , s	α
ANN	۰/۰۵۸۶	۰/۵۷۸	۰/۵۴۱	h ₀ , h _s , α, s	Q _{water}
ANN	۰/۰۵۶۷	۰/۵۲۵	۰/۵۵۲	Qwater, h ₀ , h _s , α	s

مدل در برآورد پدیده بیشترین خطا را داشته باشد و همچنین کم اهمیت‌ترین پارامتر، کمترین خطا را در بین سایر پارامترها دارد. با توجه به جدول (۳) در مدل‌سازی با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی پارامتر اختلاف فشار بین اتمسفر و فشار زیر جت جریان عبوری از هواده (h_s)، با بیشترین ریشه میانگین مربعات خطا (۰/۰۷۴) و

افزایش یافتن خطا در اثر حذف کردن یک پارامتر و مدل‌سازی بر اساس مابقی پارامترها نشان دهنده‌ی اهمیت داشتن آن پارامتر در مدل‌سازی است. از این خاصیت می‌توان در تحلیل حساسیت عوامل تأثیرگذار در مدل‌سازی یک پدیده استفاده نمود. پارامتری بیشترین اهمیت را در مدل‌سازی دارد که در اثر حذف شدن آن

سال پنجم • شماره هفدهم • پاییز ۱۳۹۳
 ANFIS (۰/۰۵۶۷) می‌باشد. جهت بررسی عملکرد روش ANFIS در تحلیل حساسیت عوامل مؤثر بر هوادهی سرریز، نتایج این روش در جدول (۶) آورده شده است.

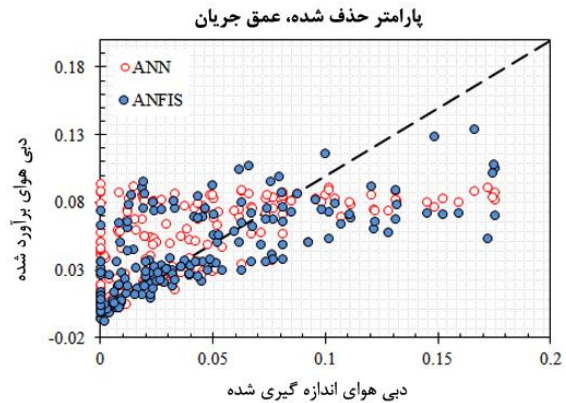
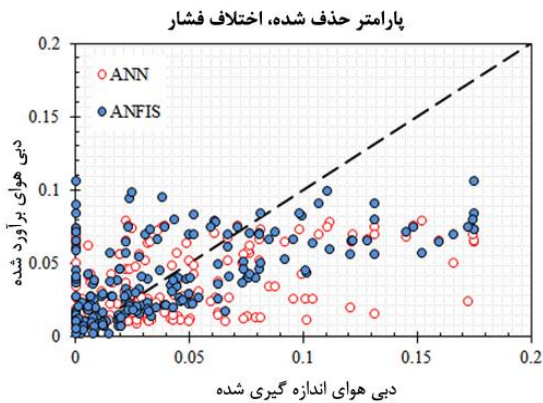
میانگین خطای مطلق (۰/۷۳۵) و کمترین ضریب همبستگی (۰/۳۹۷) بیشترین اهمیت را دارد. کمترین اهمیت در مدل‌سازی با استفاده از این روش مربوط به ارتفاع پله (s) با کمترین ریشه میانگین مربعات خطا

جدول (۶): نتایج تحلیل حساسیت عوامل مؤثر بر جریان هوای مورد نیاز هواده سرریز (روش انفیس)

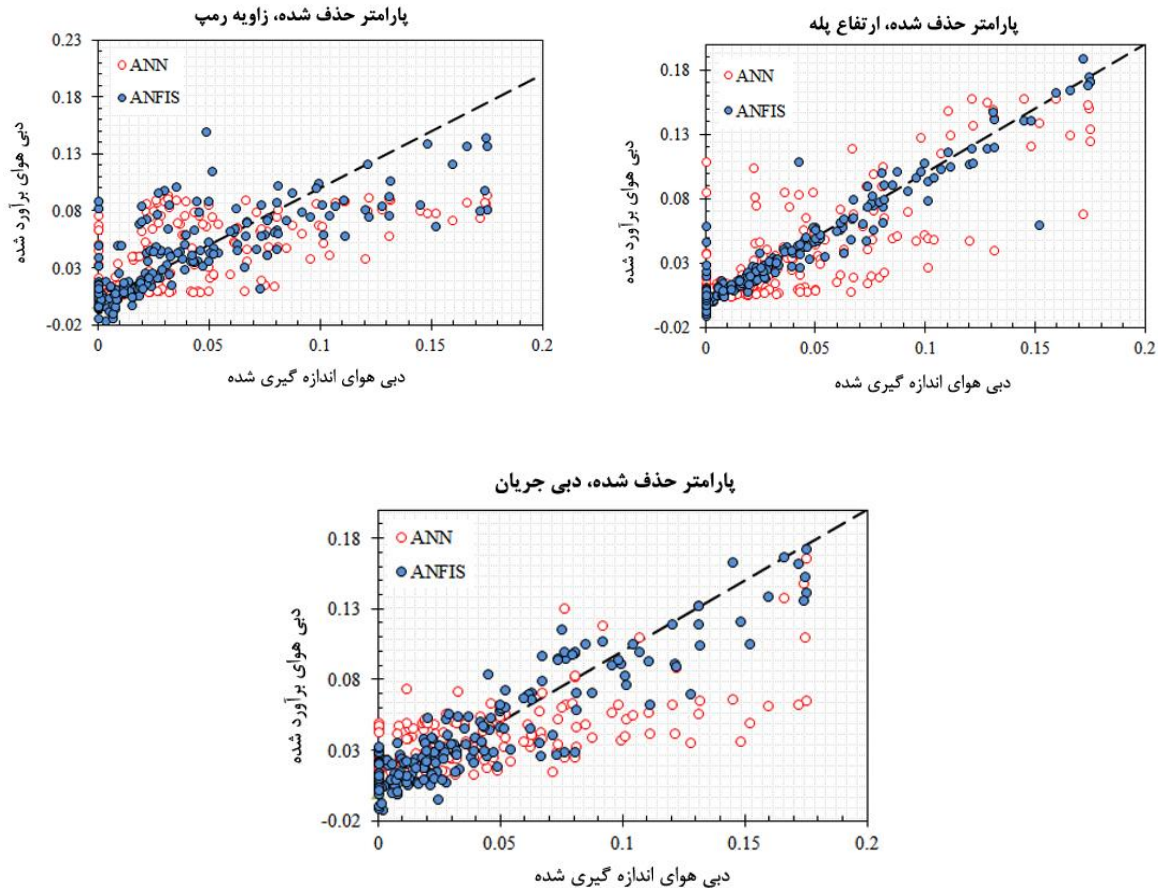
روش برآورد	معیارهای خطا			پارامترهای ورودی	پارامتر حذف شده
	ریشه میانگین مربعات خطا	میانگین خطای مطلق	ضریب همبستگی		
ANFIS	۰/۰۶۳	۰/۶۲۹	۰/۵۷۲	Qwater, h ₀ , α, s	h _s
ANFIS	۰/۰۵۵	۰/۵۰۹	۰/۶۹۵	Qwater, h _s , α, s	h ₀
ANFIS	۰/۰۴۹	۰/۴۴۸	۰/۷۶۸	Qwater, h ₀ , h _s , s	α
ANFIS	۰/۰۳۱	۰/۳۲۹	۰/۹۱۸	h ₀ , h _s , α, s	Qwater
ANFIS	۰/۰۲۲	۰/۱۵۹	۰/۹۵۷	Qwater, h ₀ , h _s , α	s

یعنی تغییرات دبی جریان تأثیر خود را در تغییرات اختلاف فشار و عمق جریان خواهد گذاشت. جهت مقایسه عملکرد پارامترها و روش‌های مختلف در مدل‌سازی جریان هوای مورد نیاز هواده سرریز، نمودار پراکنش مربوط به تحلیل حساسیت مربوط به هر کدام از پارامترها برای دو روش شبکه عصبی و ANFIS در یک دستگاه مختصات رسم شده است. این نمودارها در شکل (۶) نشان داده شده‌اند.

نتایج جدول (۶) نشان می‌دهد که در روش انفیس نیز پارامترهای اختلاف فشار بین اتمسفر و فشار زیر جت جریان عبوری از هواده (h_s) و ارتفاع پله (s) به ترتیب با ریشه میانگین مربعات خطای ۰/۰۶۳ و ۰/۰۲۲ بیشترین و کمترین اهمیت را در مدل‌سازی دارند. نکته جالب توجه در هر دو روش کم بودن اهمیت پارامتر دبی جریان بر خلاف تصور است. این موضوع را این گونه می‌توان توجیه نمود که اثر دبی جریان در سایر پارامترها نهفته است؛



شکل (۶): نمودار پراکنش مربوط به تحلیل حساسیت عوامل مؤثر هوادهی سرریز



ادامه شکل (۶): نمودار پراکنش مربوط به تحلیل حساسیت عوامل مؤثر هوادهی سرریز

نتیجه گیری

کاویتاسیون پدیده‌ای مخرب است که باعث آسیب رساندن به سرریز سدها می‌شود. امروزه کاربرد هوادها جهت کاهش خسارت ناشی از کاویتاسیون در سرریزها کاربرد وسیعی پیدا نموده است. جهت طراحی این هوادها اطلاع از میزان جریان هوای مورد نیاز آن‌ها ضروری است. در این تحقیق با استفاده از روش‌های شبکه عصبی و ANFIS اقدام به مدل‌سازی جریان هوای مورد نیاز هواده سرریز شد و عوامل مؤثر در نظر گرفته شده جهت مدل‌سازی تحلیل حساسیت شدند. نتایج مربوط به ریشه میانگین مربعات خطا در حالتی که تمام پارامترهای در نظر گرفته شده در مدل‌سازی شرکت داشته باشند برای روش‌های انفیس، شبکه عصبی و تجربی فیشر به ترتیب ۰/۰۱۹۴، ۰/۰۵۳۸ و ۱/۹۸ می‌باشد که نشان دهنده عملکرد مطلوب روش انفیس در مدل‌سازی است. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که برای هر دو روش شبکه عصبی و روش انفیس، پارامتر اختلاف فشار بین اتمسفر و

با توجه به نمودارها نیز می‌توان مشاهده نمود که پارامتر اختلاف فشار (h_s) مهم‌ترین تأثیر را در مدل‌سازی جریان هوای سرریز با استفاده از هر دو روش شبکه عصبی و انفیس دارد به گونه‌ای که نقاط پراکنش رسم شده در اثر حذف شدن این پارامتر در مدل‌سازی نسبت به نقاط سایر پارامترها از خط ۴۵ درجه فاصله‌ی بیشتری دارند و می‌توان پراکندگی نقاط را مشاهده نمود. پراکندگی نقاط پراکنش در اثر حذف شدن پارامتر ارتفاع پله (s) برای هر دو روش شبکه عصبی و انفیس کمتر از سایر پارامترها است که نشان دهنده کم اهمیت بودن این پارامتر در مدل‌سازی است. در تمام نمودارها نقاط مربوط به روش شبکه عصبی نسبت به روش ANFIS پراکندگی بیشتری دارند که نشان دهنده عملکرد مطلوب‌تر روش ANFIS نسبت به شبکه عصبی است.

سال پنجم • شماره هفدهم • پاییز ۱۳۹۳

کم بود تأثیر دبی جریان در مدل‌سازی بر خلاف تصور است که علت آن وجود اثر دبی جریان در سایر پارامترها (عمق جریان و اختلاف فشار) است.

فشار زیر جت جریان عبوری از هواده (h_s) بیشترین تأثیر و پارامتر ارتفاع پله (s) کمترین اهمیت را در مدل‌سازی جریان هوای مورد نیاز هواده سرریز دارد. نکته جالب توجه

منابع

- ۱- بهرامی، ا. و غ.ع. بارانی. ۱۳۸۷. بررسی عوامل مؤثر در هواده‌ی ونقش هواده‌ها در جلوگیری از کاویتاسیون در سرریز سدها. سومین کنفرانس مدیریت منابع آب، دانشگاه تبریز.
- ۲- ذونعمت کرمانی، م. و ا. مهدوی میمند. ۱۳۹۱. مقایسه عملکرد روش‌های تجربی، روش‌های مبتنی بر رگرسیون خطی و هوشمند غیرخطی در شبیه‌سازی میزان هواده‌ی جریان تخلیه‌کننده‌های تحتانی. یازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه ارومیه.
- ۳- زمانیان، م.، ار. فتاحی و ف. حسین‌پور. ۱۳۹۱. پیش‌پردازش پارامترهای ورودی به شبکه عصبی مصنوعی و سیستم انتنتاج تطبیقی عصبی- فازی با استفاده از رگرسیون گام به گام و گاما تست به منظور تخمین تبخیر. فصلنامه علمی و پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، سال سوم، شماره نهم، ص ۶۳-۷۶.
- ۴- کاویانپور، م.ر. و ا. رجبی. ۱۳۸۴. کاربرد شبکه عصبی در بهینه‌سازی هواده‌ی تخلیه‌کننده‌های خروجی. تحقیقات منابع آب ایران، جلد ۱، شماره ۳، ص ۱-۸.
- ۵- گوهرریزی، ف. و م. اژدری مقدم. ۱۳۹۰. بررسی آسیب ناشی از خلأزایی با استفاده از منطق فازی. مجله پژوهش آب ایران. دوره ۵، شماره ۸، صفحه ۱۰۷-۱۱۶.
- 6- Chanson, H. 1988. Study of Air Entrainment And Aeration Devices on Spillway Model, Graduate Theses and Dissertations, University of Canterbury New Zealand, 111p.
- 7- Colgate, D. and R. Elder. 1961. Design Considerations Regarding Cavitation in Hydraulic Structures. Tenth Hydraulics Division Conference, American Society of Civil Engineers, Urbana, IL.
- 8- Fadaei Kermani, E., G.A. Barani and M. Ghaeini-Hessaroeeyeh. 2013. Investigation of Cavitation Damage Levels on Spillways. World applied Sciences Journal. 21(1): 73-78.
- 9- Falvey, H.T. 1990. Cavitation in Chutes and Spillways. Engineering Monograph 42. US Bureau of Reclamation, Denver, Colorado. 145P.
- 10- Falvey, T. and A. Ervin. 1988. Aeration in jets and high velocity flows. Proceedings of the International Symposium on Model-Prototype Correlation of Hydraulic Structures, American Society of Civil Engineers/ International Association for Hydraulic Research, Colorado Springs, CO, August 9- 11. 25-55.
- 11- Falvey, H.T. 1983. Prevention of cavitation on chutes and spillways. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge. Frontiers in hydraulic engineering. 432-437
- 12- Jain, W. and L. Chao. 2011. Effects of Entrained Air Manner on Cavitation Damage. journal of Hydrodynamics. 23(3): 333-338.
- 13- Jang J. S. R. 1993. ANFIS: Adaptive-Network Based fuzzy inference system. IEEE Trans system, Man, Cybernetic. 23 (3): 665-685.
- 14- Kells, A.J and C.D. Smith. 1991. Reduction of cavitation on spillways by induced air entrainment. CAN. J. CIV. ENG. 18: 358-377
- 15- Kokpinar, M. A. and M. Gogus. 2002. High-speed jet flows over spillway aerators. Canadian Journal of Civil Engineering, 29(6): 885-898.
- 16- Kramer, K., W. Hager and H.E. Minor. 2006. Development of Air Concentration on Chute Spillways, journal of hydraulic engineering. 132(9): 908-915.
- 17- Lee, W. and J.A. Hoops. 1996. Prediction of Cavitation Damage for Spillways. Journal of Hydraulic Engineering. 122(9): 481-488.
- 18- McCulloch, W.S and W.A. Pitts. 1943. Logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. Bull Math Biophys. 5: 115-133.
- 19- Najafi M.R. Z. Kavianpour, B. Najafi, M.R. Kavianpour and H. Moradkhani. 2012. Air demand in gated tunnels – a Bayesian approach to merge various predictions. Journal of Hydroinformatics. 14(1): 152-166.
- 20- Peterka, A.J. 1953. The effect of entrained air on cavitation pitting. Proceedings of Minnesota International Hydraulic Convention. USA.
- 21- Pfister, M. 2011. Chute Aerators: Steep Deflectors and Cavity Subpressure. journal of hydraulic engineering. 137(10): 1208-1215.
- 22- Pfister, M. and W.H. Hager. 2010. Chute aerators II: Hydraulic design. journal of hydraulic engineering. 136(6): 360-367.

ANFIS and Neural Network Methods to Sensitivity Analysis of the Factors in Aerated Spillway

Amin Mahdavi Meymand¹, Javad Ahadiyan², mohammad ehteram³

Abstract

Aeration is one of the methods to reduce the cavitation damaged in spillways. The Aerators are designed in order adding air to flow. In this study, to estimate the required aerators air demand, three methods: neural network (based on Levenberg- Marquardt algorithm), ANFIS and the Fisher's experimental method was used. The parameters flow depth at the aeration system, flow discharge, Step height, Ramp angle and The pressure difference between atmospheric pressure and pressure under the flow jet in order to modeling was used. The Modeling results show that ANFIS method has better performance than the other two methods. In neural networks and ANFIS methods the pressure difference has the greatest impact on modeling. If this parameter is omitted in the modeling, root mean square error for ANN 37.54 and ANFIS 224.74 percent increases. In ANN and ANFIS methods Step height has the Minimum impact on modeling. If Step height parameter omitted in the modeling, root mean square error for ANN 5.39 and ANFIS 13.4 percent increases.

Keywords: Aerated, ANFIS, Neural Network, Sensitivity

¹ Master of science student, water structures, Faculty of Water Science Engineering, shahid chamran university:
Amin_mahdavi68@yahoo.com

²Assistant Professor, Water engineering department, Faculty of Water Science Engineering, shahid chamran university:
Ja_ahadiyan@yahoo.com

³ Master of science student, civil engineering, shahid chamran university:
Eh.mohammad@yahoo.com