



پیش‌بینی میدان سرعت در تلاقی کانال‌های روباز با استفاده از مدل‌های داده محور

محمد رضا نیک‌پور^{۱*}، پیام خسروی‌نیا^۲

تاریخ ارسال: ۱۳۹۸/۰۹/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۱۲

مقاله پژوهشی

چکیده

اندازه‌گیری سرعت در محدوده تلاقی کانال‌های روباز از جنبه‌های هیدرولیکی و زیست محیطی حائز اهمیت است. در این پژوهش با به‌کارگیری داده‌های آزمایشگاهی، به تخمین دقیق مؤلفه افقی سرعت در محدوده تلاقی کانال‌های روباز با استفاده از مدل‌های داده محور شامل ANN، ANFIS و GEP پرداخته شد. در مطالعه آزمایشگاهی مذکور، تأثیر شیب جانبی ۴۵ درجه کانال اصلی بر میدان سرعت جریان در مقایسه با دیوار قائم بررسی شد. تعداد نقاط اندازه‌گیری شده به‌ازای شیب‌های جانبی ۴۵ و ۹۰ درجه به ترتیب برابر ۷۲۰ و ۶۶۰ بود. برای تخمین مؤلفه افقی بی‌بعد سرعت جریان در محدوده تلاقی از متغیرهای نسبت دبی و مختصات بی‌بعد نقاط اندازه‌گیری سرعت استفاده شد. برای ارزیابی کارایی مدل‌ها از شاخص‌های آماری، نمودارهای پراکندگی، جعبه‌ای و تیلور استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل GEP به‌ازای شیب‌های جانبی ۴۵ و ۹۰ درجه از بالاترین قدرت تخمین مؤلفه افقی سرعت برخوردار بود. مقادیر ضریب تعیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین قدر مطلق خطا (MAE) توسط مدل GEP در مرحله صحت‌سنجی به‌ازای شیب جانبی ۴۵ درجه به ترتیب برابر با ۰/۹۶۷، ۰/۱۴۲ و ۰/۰۹۴ و به‌ازای شیب جانبی ۹۰ درجه مقادیر مذکور به ترتیب برابر با ۰/۹۵۶، ۰/۱۸۴ و ۰/۱۲۸ به دست آمد. معادلات ریاضی ارائه شده توسط مدل GEP برای پیش‌بینی میدان سرعت طولی در محدوده تلاقی کانال‌ها به‌ازای شیب‌های جانبی ۴۵ و ۹۰ درجه می‌تواند به‌عنوان جایگزین مناسب برای روش‌های مستقیم اندازه‌گیری مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: تلاقی کانال‌ها، شیب جانبی، مدل‌های داده محور، میدان سرعت.

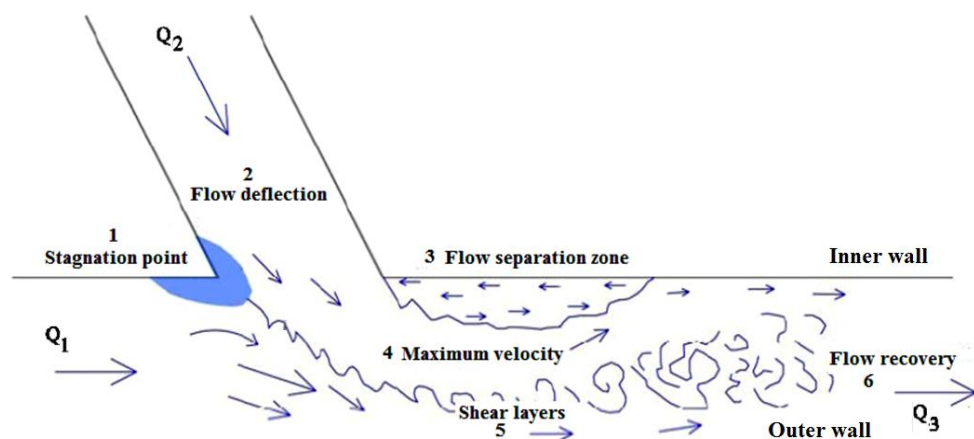
^۱ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. ۰۹۱۳۲۲۲۰۴۸۵، m_nikpour@uma.ac.ir (نویسنده مسئول)

^۲ استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. Email: p.khosravinia2012@gmail.com

مقدمه

هم‌چنین مقادیر بالای انرژی جنبشی اغتشاش در نزدیکی بستر می‌باشد. از آخرین مطالعات میدانی انجام گرفته در خصوص تلاقی کانال‌ها می‌توان به تحقیق Zhang et al. (2019) اشاره کرد. آن‌ها با اندازه‌گیری مولفه‌های سه‌بعدی سرعت در تلاقی رودخانه‌ها، خصوصیات میدان جریان و ریخت‌شناسی بستر در محدوده تلاقی را مورد بررسی قرار دادند. (Debnath et al., 2019). نیز بر اساس مطالعه میدانی، خصوصیات هیدرولوژیکی و ریخت‌شناسی در محل تلاقی رودخانه‌ها را بررسی کردند. نتیجه تحقیقات آن‌ها نشان داد که افزایش شیب رودخانه فرعی با افزایش ورود ذرات رسوبی به رودخانه اصلی همراه بوده و این موضوع منجر به رسوب‌گذاری و کاهش سرعت در پایین‌دست خواهد شد. (Bradbrook et al., 2000); Shabayek et al., (2002); Biron et al., (2004); Ramamurthy et al., (2006); Xhang et al., (2009); Shakibainia et al., (2010) نیز از جمله محققانی بودند که با به کارگیری روش‌های عددی، جریان در محل تلاقی کانال‌ها را در حالت سه‌بعدی شبیه‌سازی کردند. آن‌ها در تحقیقات خود، عوامل تأثیرگذار بر خصوصیات جریان در محل تلاقی شامل نسبت دبی، زاویه تلاقی و اختلاف تراز بستر در محل تلاقی را بررسی کردند. (Ramos et al., 2019) به‌منظور بررسی تأثیر اختلاف تراز بستر در تلاقی کانال‌ها از مدل Open-FOAM استفاده کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که با افزایش نسبت تراز بستر کانال فرعی به کانال اصلی، ابعاد ناحیه جداشدگی کوچک‌تر و زاویه انحراف جریان (نسبت به محور کانال اصلی) بزرگ‌تر می‌شود.

تلاقی کانال‌های روباز یکی از سازه‌های کاربردی در شبکه‌های آبیاری و زهکشی و کانال‌های انتقال آب محسوب می‌شود. در اثر ادغام جریان کانال‌های اصلی و فرعی و به دنبال آن تغییرات ایجاد شده در میدان سرعت جریان، گردابه‌ها و جریان‌های چرخشی ثانویه تشکیل می‌شود که منجر به فرسایش بستر رودخانه و تشکیل چاله فرسایشی عمیق در محدوده تلاقی می‌شود (Ullah et al., 2015). Best (1987) دینامیک جریان در محل تلاقی رودخانه‌ها را به صورت شماتیک بر اساس شکل ۱ نشان داد. مطابق شکل ۱، شش ناحیه در محدوده هیدرودینامیک تلاقی شامل ناحیه رکود جریان، منطقه انحراف جریان، ناحیه جداشدگی جریان، ناحیه تنگ‌شدگی جریان و حداکثر سرعت، لایه برشی و ناحیه بازیافت جریان دیده می‌شود. در مطالعات انجام گرفته در خصوص تعیین موقعیت و ابعاد نواحی مذکور، متغیرهای نسبت دبی، نسبت عرض، عدد فرود جریان و زاویه تلاقی به عنوان عوامل اصلی تأثیرگذار بر ساختار جریان شناسایی شدند (Shakibainia et al., 2010). (Sukhodolov and Rhoads, 2001; Rhoads and Sukhodolov, 2008; Rhoads et al., 2009; Leite Riberio et al., 2012; Liu et al., 2012; Nazari-Giglou et al., 2016; Yuan et al., 2017) از جمله محققانی بودند که میدان جریان را در ناحیه هیدرودینامیک تلاقی به صورت سه‌بعدی اندازه‌گیری کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که وقوع آبشستگی در محدوده تلاقی ناشی از آشفتگی لایه برشی در اثر گردابه‌های سه‌بعدی یا حرکت‌های مارپیچی و



شکل (۱): الگوی جریان در تلاقی کانال روباز، برگرفته از Best (1987) اصلاح شده توسط Leite Ribeiro et al., (2012)

جریان در تلاقی کانال‌های روباز ارائه دادند. نتایج مدل هیبرید مذکور (GA-ANN) در مقایسه با مدل GP از دقت بیشتری در پیش‌بینی میدان سرعت برخوردار بود. Sharifpour et al. (2016) برای پیش‌بینی میدان سرعت در تلاقی کانال‌های روباز از مدل‌های RBF-NN و GEP استفاده کردند. نتایج حاکی از دقت قابل قبول هر دو مدل در شبیه‌سازی میدان جریان در تلاقی بود. با در نظر گرفتن شاخص RMSE مدل GEP عملکرد نسبتاً بهتری را به همراه داشت. در مطالعه آزمایشگاهی خسروی‌نیا (۱۳۹۲) برای اولین بار، تأثیر شیب جانبی دیوار کانال اصلی به همراه تغییرات نسبت دبی و عدد فرود پایاب بر الگوی جریان در محدوده تلاقی کانال‌ها به‌زای زاویه اتصال ۹۰ درجه بررسی شد. هدف اصلی از پژوهش حاضر تخمین مولفه افقی سرعت در محدوده تلاقی به‌زای زوایای شیب جانبی ۴۵ و ۹۰ درجه با استفاده از مدل‌های ANN، ANFIS و GEP می‌باشد.

مواد و روش‌ها

مدل آزمایشگاهی

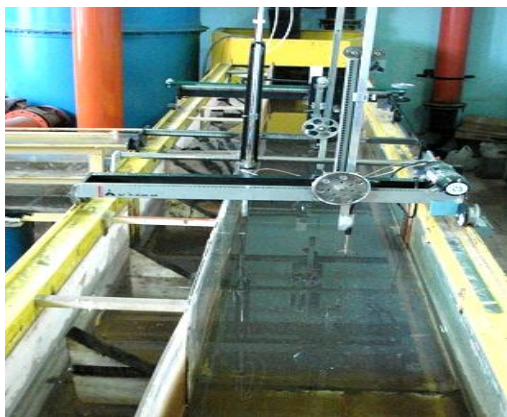
در پژوهش حاضر از داده‌های آزمایشگاهی خسروی‌نیا (۱۳۹۲) استفاده شد. شکل ۲ نمای کلی از فلوم‌ها و تجهیزات مورد استفاده را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۲، کانال اصلی به طول ۶ متر، ارتفاع ۰/۵ متر و عرض ۰/۸ متر و کانال فرعی عمود بر کانال اصلی به طول ۵ متر، ارتفاع ۰/۵ متر و عرض ۰/۲۴ متر بود. برای دیوار کانال اصلی شیب‌های جانبی ۴۵ و ۹۰ درجه در نظر گرفته شد. کانال فرعی نیز دارای شیب جانبی ۹۰ درجه بود. لازم به ذکر است که عرض کف کانال اصلی مقدار ثابت ۰/۵ متر در نظر گرفته شد. به منظور اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای جریان از یک دستگاه سرعت‌سنج سه‌بعدی^۱ ADV استفاده شد. مقادیر سرعت در ۲۰ مقطع عرضی اندازه‌گیری شد. در هر مقطع، اندازه‌گیری سرعت در راستاهای قائم و به فاصله ۵ سانتی‌متر انجام گرفت. در هر راستا نیز سه نقطه به فواصل ۱، ۵ و ۱۰ سانتی‌متر از بستر کانال برای اندازه‌گیری سرعت در نظر گرفته شد. تعداد

امروزه تکنیک‌های محاسبات نرم به خاطر توانایی بالا در تجزیه و تحلیل مسائل پیچیده، به طور گسترده در مسائل متنوع هیدرولیک به کار گرفته می‌شود. از جمله آن‌ها می‌توان به کاربرد مدل‌های هوشمند در پیش‌بینی عمق آب‌سستگي توسط (Muzzammil, 2010; Azamathulla et al., 2008; Azamathulla and Zakaria, 2011; Onen, 2014; Raikar et al., 2016)، تخمین ضریب دبی و ظرفیت تخلیه سرریز جانبی توسط (Neary and Sotiropoulos, 1996; Bilhan et al., 2015; Ebtehaj et al., 2011)، محاسبه خصوصیات جریان در سازه‌های هیدرولیکی و کانال‌های روباز توسط (Raikar et al., 2004; Pal and Goel, 2007; Donmez, 2011; Hong et al., 2011; Sharifi et al., 2011; Juma et al., 2014; Parsaie et al., 2016) اشاره کرد. در خصوص به‌کارگیری مدل‌های داده‌محور در تلاقی کانال‌ها می‌توان به مطالعات ذیل اشاره کرد. Zaji and Bonakdari (2015a) برای پیش‌بینی مولفه طولی سرعت جریان در تلاقی کانال‌ها از مدل‌های MLP-ANN و GP استفاده کردند. برای سنجش دقت مدل‌های مذکور از داده‌های آزمایشگاهی استفاده کردند. نتایج حاکی از آن بود که با در نظر گرفتن شاخص RMSE مدل MLP-ANN عملکرد نسبتاً بهتری را به همراه داشت. Zaji and Bonakdari (2015b) با به‌کارگیری داده‌های آزمایشگاهی، میدان جریان سه‌بعدی در یک تلاقی ۹۰ درجه را با استفاده از نرم افزار ANSYS-CFX شبیه‌سازی کردند. هم‌چنین مقادیر سرعت جریان در تلاقی را با استفاده از مدل ANN پیش‌بینی کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که در مدل‌سازی میدان سرعت در تلاقی، مدل ANN از عملکرد نسبتاً بهتری در مقایسه با نرم‌افزار ANSYS-CFX برخوردار بود. Sharifpour et al. (2015) نیز از مدل‌های رگرسیونی و GEP برای پیش‌بینی مولفه طولی سرعت جریان در تلاقی کانال‌ها استفاده کردند که در نهایت مدل GEP عملکرد بهتری را در این خصوص به همراه داشت. (Bonakdari and Zaji, 2016) با ترکیب الگوریتم ژنتیک (GA) و مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) مدلی برای پیش‌بینی میدان سرعت

^۱ Acoustic Doppler Velocimeter (ADV)

به سمت بالا (مؤلفه قائم) می‌باشد. برای تخمین مؤلفه افقی بی‌بعد سرعت جریان در محدوده تلاقی (U/U_0) از متغیرهای نسبت دبی (Q_f) و مختصات بی‌بعد نقاط اندازه‌گیری سرعت (x/b_1 , y/b_1 , z/b_1) استفاده شد. پارامترهای U و U_0 نمایانگر مقادیر سرعت متوسط جریان در بالادست کانال اصلی و سرعت نقطه‌ای می‌باشد. همچنین b_1 نشان‌دهنده عرض کانال اصلی می‌باشد. در جدول ۱ محدوده متغیرهای مذکور ذکر شده است.

نقاط اندازه‌گیری شده به‌ازای شیب‌های جانبی ۴۵ و ۹۰ درجه به ترتیب برابر ۷۲۰ و ۶۶۰ بود. شکل ۳ مقاطع و نقاط اندازه‌گیری سرعت را به‌عنوان نمونه برای شیب جانبی ۴۵ درجه نشان می‌دهد. همچنین در شکل مذکور، مبدأ و دستگاه مختصات در نظر گرفته شده در اندازه‌گیری‌ها، نمایش داده شده است. ملاحظه می‌شود که سیستم مختصات تعریف شده دارای جهت مثبت x در جهت جریان کانال اصلی (مؤلفه طولی)، جهت مثبت z در خلاف جهت جریان کانال فرعی (مؤلفه عرضی) و جهت y

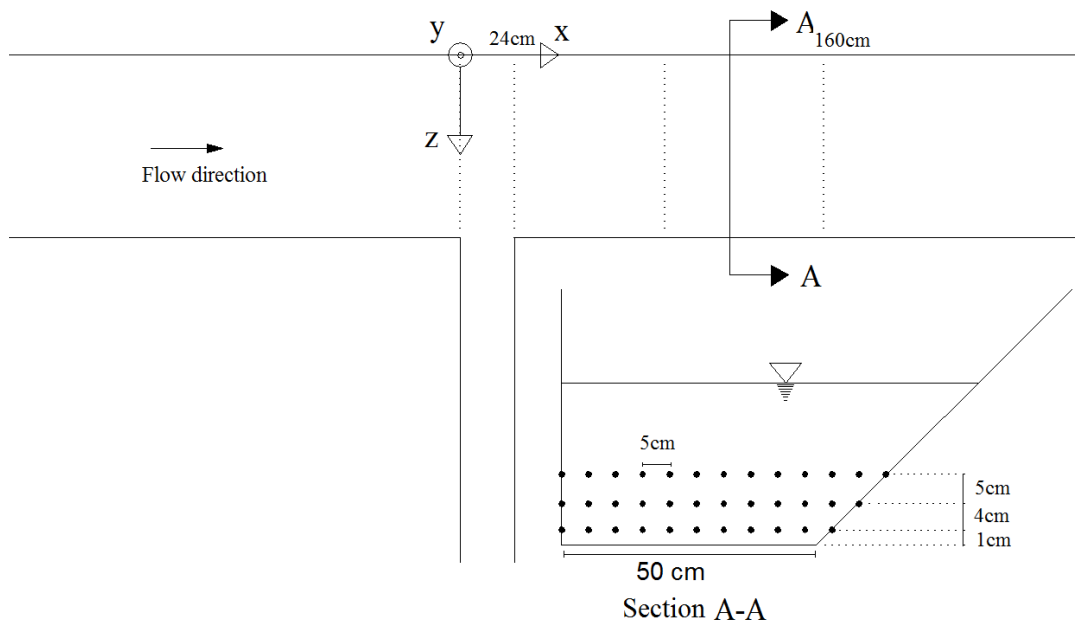


(ب)



(الف)

شکل (۲): مدل آزمایشگاهی پژوهش حاضر (الف): شیب جانبی ۴۵ درجه (ب): شیب جانبی ۹۰ درجه (خسروی‌نیا، ۱۳۹۲)



شکل (۳): مقاطع و نقاط اندازه‌گیری سرعت (خسروی‌نیا، ۱۳۹۲)

جدول (۱): محدوده متغیرهای اندازه‌گیری شده در آزمایش‌ها (خسروی‌نیا، ۱۳۹۲)

محدوده اندازه‌گیری شده	متغیر	زاویه شیب جانبی (درجه)
۰/۱۹۴-۰/۵۵۲	Q_f	۴۵
۰-۳/۲	x/b_1	
۰/۰۲-۰/۲	y/b_1	
۰-۱/۲	z/b_1	
۰-۲/۵۲۲	U/U_0	
۰/۱۹۴-۰/۵۵۲	Q_f	۹۰
۰-۳/۲	x/b_1	
۰/۰۲-۰/۲	y/b_1	
۰-۱	z/b_1	
۰-۲/۶۱۹	U/U_0	

آموزش لونیبرگ- مارکواردت^۲ به کار گرفته شد و برای تشکیل ساختار شبکه از یک لایه پنهان استفاده شد. در پژوهش حاضر، ۷۰ درصد داده‌ها برای دوره آموزش (برای شیب‌های جانبی ۴۵ و ۹۰ درجه به ترتیب برابر ۵۰۴ و ۴۶۲ داده) و ۳۰ درصد داده‌ها برای دوره آزمون (برای شیب‌های جانبی ۴۵ و ۹۰ درجه به ترتیب برابر ۲۱۶ و ۱۹۸ داده) مورد استفاده قرار گرفت. همچنین برای نرمال‌سازی داده‌ها رابطه ۱ مورد استفاده قرار گرفت. در این رابطه، X_n مقدار نرمال شده ورودی X_i و X_{\min} و X_{\max} به ترتیب مقادیر بیشینه و کمینه داده‌ها می‌باشد.

$$X_n = 0.1 + 0.8 \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

سامانه استنتاج فازی- عصبی تطبیقی (ANFIS)

مدل ANFIS بر اساس قوانین سامانه فازی بنا نهاده شده و از قابلیت الگوریتم آموزشی مدل ANNs برای تطبیق و تعیین پارامترهای مبتنی بر قوانین^۳ استفاده می‌کند (Russel and Campbell, 1996). در حالت کلی، یک مدل ANFIS شبکه‌ای چندلایه و متشکل از گره‌ها و کمان‌های اتصال دهنده گره‌ها می‌باشد. گره‌های ابتدایی و انتهایی آن معرف متغیرهای ورودی و خروجی (هدف) بوده

مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)

شبکه عصبی مصنوعی یکی از روش‌های محاسباتی است که به کمک فرآیند یادگیری^۱ و با استفاده از پردازشگرهایی به نام نرون تلاش می‌کند با شناخت روابط ذاتی بین داده‌ها، نگاشت غیرخطی بین ورودی‌ها و خروجی‌ها ارائه دهد (غفاری و وفاخواه، ۱۳۹۲). متغیرهای مؤثر که در مدل‌سازی شبکه‌های عصبی نقش اساسی دارند شامل تعداد تکرار و نوع تابع آموزش، تعداد لایه‌های پنهان و تعداد نرون‌های لایه پنهان می‌باشد. پارامترهای مذکور طی فرآیند سعی و خطا در جهت دستیابی به خطای کمینه توسط طراح تعیین می‌شود. یکی از مهم‌ترین انواع شبکه‌های عصبی، مدل پرسپترون چند لایه (MLP) بوده که بر مبنای یک واحد محاسباتی به نام پرسپترون ساخته می‌شود. مدل MLP از یک لایه ورودی، یک یا چند لایه پنهان و یک لایه خروجی تشکیل شده است. در هر لایه تعدادی نرون در نظر گرفته می‌شود که به وسیله اتصالات به نرون‌های لایه مجاور وصل می‌شوند. در این مدل، ورودی مؤثر هر نرون، حاصل ضرب خروجی نرون‌های لایه قبل در وزن‌های میان آن نرون‌ها است (طلوعی و همکاران، ۱۳۹۰). در پژوهش حاضر، الگوریتم

^۲ Rule-based parameters

^۱ Learning

^۲ Levenberg- Marquardt

لایه چهارم (نرمال‌سازی): این لایه پس از دریافت هر یک از قوانین لایه سوم، مقادیر نرمال شده قوانین را توسط رابطه ۵ محاسبه می‌کند. طبق این رابطه، نسبت قوه اشتعال i امین قانون به مجموع قوه‌های اشتعال همه قوانین محاسبه می‌شود.

$$Output_{IV,i} = \bar{W}_i = \frac{W_i}{W_1 + W_2} \quad i = 1, 2 \quad (5)$$

لایه پنجم (غیر فازی سازی): در این لایه میزان مشارکت (وزن) i امین قانون فازی، با حاصل ضرب قوه اشتعال نرمال شده (خروجی لایه چهارم) و تابع برآیند $(p_i + q_i + r_i)$ محاسبه می‌شود.

$$Output_{V,i} = \bar{W}_i f_i = \bar{W}_i (p_i + q_i + r_i) \quad (6)$$

لایه ششم (جمع‌بندی): در این لایه با جمع مقادیر غیر فازی شده، خروجی مدل ANFIS تولید می‌شود.

$$Output_{VI,i} = \sum \bar{W}_i f_i \quad (7)$$

و گره‌های میانی (پنهان) آن را توابع عضویت و قواعد فازی تشکیل می‌دهند. مطابق شکل ۴، شش لایه مختلف برای مدل ANFIS قابل شناسایی است (Kisi et al., 2015):

لایه اول (ورودی): شامل متغیرهای ورودی X_1 و X_2 می‌باشد.

$$Output_{I,X1} = X_1 \quad Output_{I,X2} = X_2 \quad (2)$$

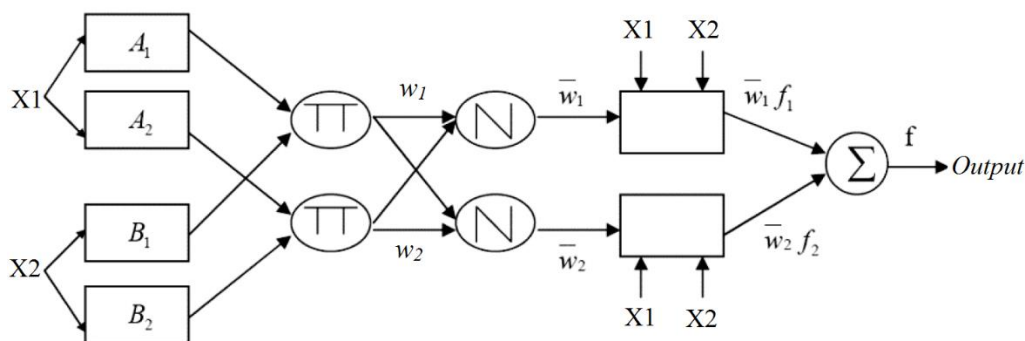
لایه دوم (فازی سازی): در این لایه بر اساس تابع عضویت انتخاب شده، برای هر یک از ورودی‌ها، درجه عضویت (μ) در نظر گرفته می‌شود.

$$Output_{II,i} = \mu_{A_i}(X_1), \quad i = 1, 2; \quad (3)$$

$$Output_{II,i} = \mu_{B_i}(X_2), \quad i = 1, 2$$

لایه سوم (قوانین): در گره‌های این لایه، مطابق با قوانین منطبق فازی سوگنو، سیگنال‌های ورودی در هم ضرب شده و خروجی آن که بیانگر قوه اشتعال^۱ هر قانون فازی می‌باشد، به لایه بعد فرستاده می‌شود. در رابطه ۴، W_n قوه اشتعال قانون n ام می‌باشد.

$$Output_{III,i} = W_n = \mu_{A_i}(X_1) \mu_{B_i}(X_2), \quad i = 1, 2 \quad (4)$$



شکل (۴): ساختار مدل ANFIS (Kisi et al., 2015)

می‌شود تنها ژنوم اصلاح شده به نسل بعد منتقل شده و نیازی به ساختارهای سنگین برای تکثیر و جهش وجود نداشته باشد (Ferreira, 2006). برای شبیه‌سازی با استفاده از مدل GEP مراحل ذیل دنبال می‌شود. گام اول، انتخاب تابع برازش^۴ است. در این پژوهش، ریشه نسبی مربعات خطا^۵ (RRSE) به‌عنوان تابع برازش انتخاب شد. گام دوم، انتخاب متغیرهای ورودی و توابع برای تولید کروموزوم‌ها است. در گام سوم، ساختار و معماری

مدل برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)

مدل GEP یکی از الگوریتم‌های تکاملی بوده که بر اساس فرضیه تکاملی داروین^۳ و توسط فریرا در سال ۱۹۹۹ ارائه شد (Ferreira, 2001). این مدل ترکیبی از مدل برنامه‌ریزی ژنتیک (GP) و الگوریتم ژنتیک (GA) بوده و تفاوت اصلی آن با GP این است که در GEP به‌سازی‌ها در یک ساختار خطی اتفاق افتاده و سپس به‌صورت ساختار درختی بیان می‌شود و این موجب

^۴ Fitness function

^۵ Root relative square error (RRSE)

^۱ Firing strength

^۲ Defuzzification

^۳ Darwinian Evolution Theory

علاوه بر شاخص‌های آماری، برای بررسی دقت و عملکرد مدل‌های هوشمند به صورت عینی، از نمودار مقادیر مشاهداتی در مقابل پیش‌بینی شده، نمودار جعبه‌ای^۱ و نمودار تیلور^۲ استفاده شد. نمودار جعبه‌ای برای مقایسه توزیع آماری مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده استفاده می‌شود و مزیت نمودار تیلور نیز این است که سه شاخص مهم آماری شامل ضریب همبستگی (r)، RMSE و انحراف معیار (SD) را در یک نمودار نمایش می‌دهد.

نتایج و بحث

واسنجی مدل‌های داده محور

در پژوهش حاضر به منظور دستیابی به بهترین معماری مدل شبکه عصبی، توابع انتقال و تعداد نرون‌های لایه پنهان مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج آن در جدول ۲ خلاصه شده است. مطابق جدول مذکور می‌توان دید که به ازای هر دو شیب جانبی ۹۰ و ۴۵ درجه، تابع انتقال TANSIG از خطای کمتری برخوردار است. ضمناً به ازای شیب‌های جانبی ۹۰ و ۴۵ درجه، تعداد نرون‌های مورد نیاز برای لایه پنهان به منظور حصول خطای کمینه به ترتیب برابر با ۹ و ۸ نرون بود.

کروموزوم‌ها و در گام چهارم، توابع ریاضی ارتباط دهنده آن‌ها انتخاب می‌شود. سرانجام در گام پنجم، عملگرهای ژنتیک انتخاب خواهد شد. از جمله قابلیت‌های GEP نسبت به سایر الگوریتم‌های هوشمند، ارائه معادله ریاضی بین متغیرهای ورودی و خروجی می‌باشد که این موضوع جهت انجام پیش‌بینی از اهمیت بالایی برخوردار است.

معیارهای ارزیابی مدل‌های داده محور

برای ارزیابی کارایی مدل‌ها و مقایسه نتایج آن‌ها شاخص‌های آماری ضریب تعیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین قدر مطلق خطا (MAE) مطابق روابط ۸ و ۹ به کار گرفته شد. در این روابط، O_i و P_i به ترتیب مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده و \bar{O}_i و \bar{P}_i میانگین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده می‌باشد.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}_i)(P_i - \bar{P}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}_i)^2 \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P}_i)^2}} \right)^2 \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}} \quad (9)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_i - O_i| \quad (10)$$

جدول (۲): نتایج به کارگیری توابع انتقال و تعداد نرون‌های مختلف بر روی مقدار شاخص RMSE در مدل ANN

$RMSE (U/U_0)_{45^0}$	$RMSE (U/U_0)_{90^0}$	تعداد نرون‌های لایه پنهان	تابع انتقال
۰/۴۹۱	۰/۵۴۴	۸	LOGSIG
۰/۴۸۸	۰/۵۲۹	۹	LOGSIG
۰/۴۹۴	۰/۵۱۳	۱۰	LOGSIG
۰/۴۳۰	۰/۴۹۰	۸	TANSIG
۰/۴۳۹	۰/۴۶۹	۹	TANSIG
۰/۴۸۱	۰/۴۷۶	۱۰	TANSIG

به کارگیری این مدل توصیه شده است که تعداد متغیرهای ورودی در مدل کمتر از ۶ باشد (Kennedy et al., 2003). با توجه به این که در تحقیق حاضر تعداد متغیرهای ورودی، حداکثر برابر ۴ انتخاب شده، لذا استفاده از این روش جهت پیش‌بینی میدان سرعت قابل قبول است. در این پژوهش، انواع توابع عضویت مورد ارزیابی قرار گرفت و مقادیر شاخص RMSE متناظر با هر

در ادامه به واسنجی مدل ANFIS جهت پیش‌بینی مولفه افقی سرعت پرداخته می‌شود. برای تقسیم‌بندی داده‌ها در مدل ANFIS، از روش‌های متفاوتی استفاده می‌شود که از جمله روش‌های مرسوم در این خصوص، روش افراز شبکه^۳ می‌باشد. این روش مبتنی بر انتخاب نوع تابع عضویت (مثلی، دوزنقه‌ای، گوسی، زنگوله‌ای و...) و تعداد تابع عضویت برای هر متغیر ورودی می‌باشد. برای

^۱ Grid partitioning

^۱ Box-plot

^۲ Taylor diagram

برای ساخت درخت تجزیه است. توابع ریاضی به کار گرفته شده در این پژوهش و عملکرد مدل به ازای مجموعه‌ای معین از توابع در جدول ۴ نمایش داده شده است. با توجه به جدول ۴، کمترین مقدار شاخص RMSE به ازای تابع F3 حاصل شده است. همچنین پس از تحلیل حساسیت مدل GEP، پارامترها و عملگرهای ژنتیکی مورد استفاده به همراه مقادیر آنها در جدول ۵ ارائه شده است.

تابع در جدول ۵ گزارش شد. قابل ذکر است که تعداد توابع عضویت با استفاده از آزمون و خطا به‌ازای کمترین مقدار RMSE به‌دست آمده است. با توجه به جدول ۳، می‌توان گفت که بهترین تابع عضویت از نوع مثلثی بوده که تعداد آن برای متغیرهای Q_T ، x/b_1 ، y/b_1 و z/b_1 به ترتیب برابر ۴، ۲، ۳ و ۲ می‌باشد.

همان‌گونه که قبلاً ذکر شد، یکی از گام‌های اساسی برای به‌کارگیری مدل GEP انتخاب عملگرهای ریاضی

جدول (۳): نتایج به‌کارگیری توابع عضویت مختلف بر روی مقدار شاخص RMSE در مدل ANFIS

نوع تابع عضویت	تعداد توابع عضویت	$RMSE (U/U_0)_{90^0}$	$RMSE (U/U_0)_{45^0}$
مثلثی	۲، ۳، ۴	۰/۴۴۳	۰/۴۵۵
گوسی	۲، ۲، ۳	۰/۴۹۲	۰/۴۸۷
دوزنقه‌ای	۲، ۳، ۲، ۳	۰/۴۷۰	۰/۵۱۵
زنگوله‌ای	۲، ۲، ۲، ۲	۰/۵۰۶	۰/۵۴۰

جدول (۴): نتایج به‌کارگیری توابع ریاضی مختلف بر روی مقدار شاخص RMSE در مدل GEP

تابع	عملگرهای ریاضی	$RMSE (U/U_0)_{90^0}$	$RMSE (U/U_0)_{45^0}$
F1	+, -, *, /	۰/۴۹۲	۰/۴۸۹
F2	+, -, *, /, $\sqrt[9]{x}$, $\sqrt[3]{x}$, \sqrt{x} , x^3 , x^2	۰/۲۷۶	۰/۲۶۸
F3	+, -, *, /, $\sqrt[9]{x}$, $\sqrt[3]{x}$, \sqrt{x} , x^3 , x^2 , $\sin(x)$, $\cos(x)$, $\text{Arctan}(x)$	۰/۱۸۴	۰/۱۴۲

جدول (۵): مقادیر پارامترها و عملگرهای مورد استفاده در مدل GEP

تنظیمات کلی	مقادیر پارامترها و عملگرهای ژنتیکی
تعداد کروموزوم‌ها	۳۰
اندازه رأس	۷
تعداد ژن در هر کروموزوم	۳
تعداد جمعیت تولیدی	۱۰۰۰
تابع پیوند	مجموع (+)
	نرخ جهش
	نرخ وارون سازی
	نرخ ترانهش درج متوالی
	نرخ ترانهش ریشه درج متوالی
	نرخ ترکیب تک نقطه‌ای

مطلق خطا ($MAE=0/128$) در مقایسه با سایر مدل‌ها بهتر بوده است. در خصوص شیب جانبی ۴۵ درجه نیز برتری مدل GEP با بیشترین مقدار ضریب تعیین ($R^2=0/967$) و کمترین مقادیر خطا ($RMSE=0/142$) و ($MAE=0/094$) مشهود است. علاوه بر آن، به‌ازای هر دو شیب جانبی مدل‌های ANFIS و ANN در رتبه‌های دوم و سوم قرار می‌گیرند. در شکل ۵ نمودارهای پراکندگی مقادیر U/U_0 مشاهداتی و پیش‌بینی شده توسط مدل‌های ANN، ANFIS و GEP به‌ازای شیب‌های جانبی ۴۵ و

صحت‌سنجی مدل‌های داده محور

در جدول ۶ شاخص‌های آماری عملکرد مدل‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر در تخمین مؤلفه افقی بی‌بعد سرعت جریان در محدوده تلاقی (U/U_0) به‌ازای شیب‌های جانبی ۴۵ و ۹۰ درجه ارائه شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان دید که به‌ازای شیب جانبی ۹۰ درجه، عملکرد مدل GEP با دارا بودن بیشترین مقدار ضریب تعیین ($R^2=0/956$)، کمترین ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE=0/184$) و کمترین میانگین قدر

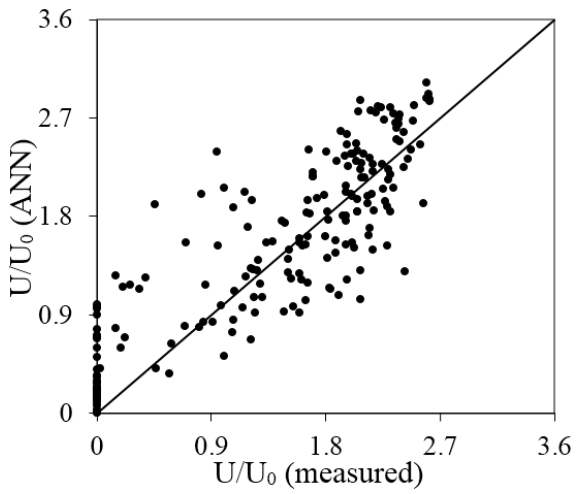


تطابق بهتر مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده دارد. ضمناً مدل ANN در این خصوص عملکرد ضعیفی را به دنبال داشته است.

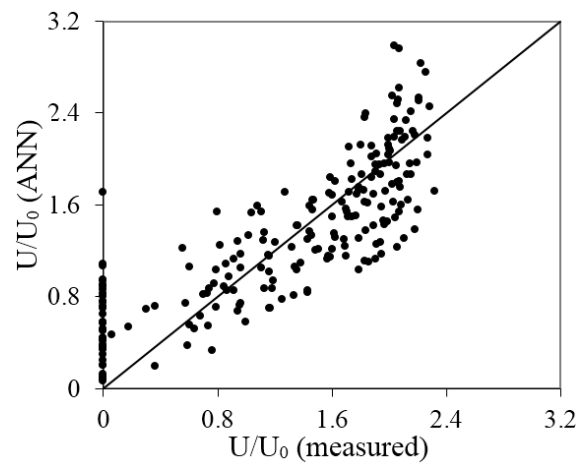
۹۰ درجه نمایش داده شده است. با توجه به نمودارهای مذکور، پراکندگی و تمرکز نقاط حول محور یک به یک در مدل GEP نسبت به دو مدل دیگر بهتر است که نشان از

جدول (۶): عملکرد مدل‌های مورد استفاده در تخمین U/U_0 به‌ازای شیب‌های جانبی ۹۰ و ۴۵ درجه

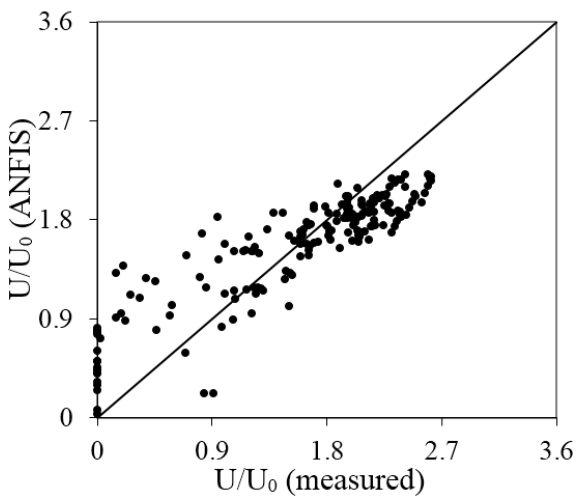
نام مدل	شیب جانبی ۹۰ درجه			شیب جانبی ۴۵ درجه		
	MAE	RMSE	R ²	MAE	RMSE	R ²
ANN	۰/۳۶۶	۰/۴۶۹	۰/۷۳۱	۰/۳۴۰	۰/۴۳۰	۰/۶۸۵
ANFIS	۰/۳۶۱	۰/۴۴۳	۰/۸۱۹	۰/۳۴۵	۰/۴۵۵	۰/۶۹۲
GEP	۰/۱۲۸	۰/۱۸۴	۰/۹۵۶	۰/۰۹۴	۰/۱۴۲	۰/۹۶۷



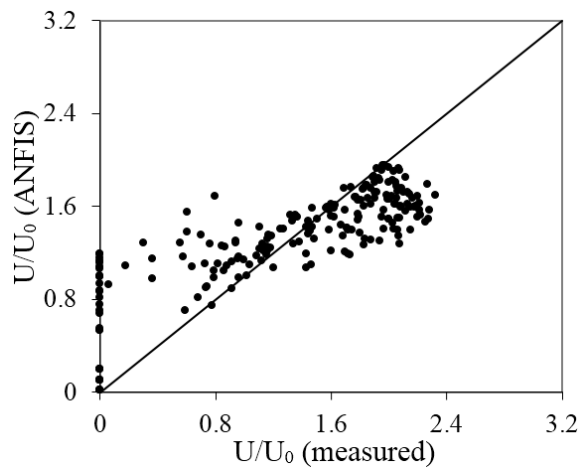
(د)



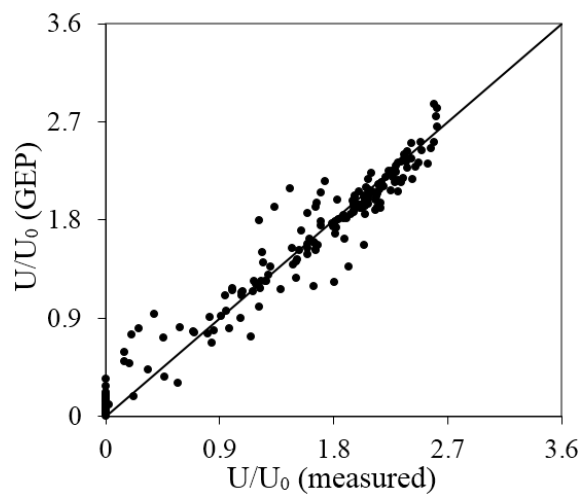
(الف)



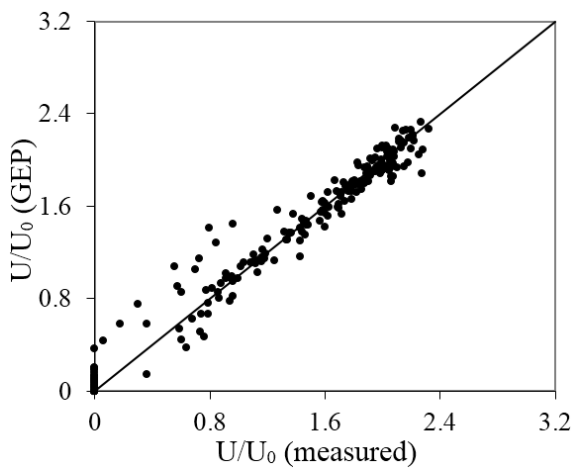
(ه)



(ب)



(و)



(ج)

شکل ۵. نمودار پراکندگی مقادیر U/U_0 مشاهداتی و پیش‌بینی شده
(الف)، (ب) و (ج): شیب جانبی ۴۵ درجه (د)، (ه) و (ز): شیب جانبی ۹۰ درجه

بالاتر است (Sigaroodi et al., 2014). مطابق شکل ۷ به‌ازای شیب جانبی ۴۵ درجه، مدل GEP به نقطه مشاهداتی نزدیک‌تر بوده و برتری آن نسبت به دو مدل دیگر محسوس است به‌طوری‌که دارای کمترین RMSE و بیشترین ضریب همبستگی می‌باشد. در شیب جانبی ۹۰ درجه نیز موقعیت مدل GEP به نقطه مرجع واقع روی محور انحراف معیار نزدیک‌تر بوده که توانایی این مدل را در تخمین سرعت طولی در محدوده تلاقی تأیید می‌کند. یکی از مزایای مدل GEP ارائه رابطه صریح ریاضی می‌باشد. روابط ۱۰ و ۱۱ معادلات به‌دست آمده توسط مدل GEP برای تخمین U/U_0 را به‌ازای شیب‌های جانبی ۴۵ و ۹۰ درجه نشان می‌دهد. نکته قابل توجه در روابط مذکور، تأثیر محسوس پارامتر z/b_1 در محاسبه سرعت نقطه‌ای در محدوده تلاقی می‌باشد. که این موضوع، تغییرات زیاد سرعت در مقاطع عرضی در محدوده تلاقی کانال‌ها را تأیید می‌کند. لازم به ذکر است که در مطالعه آزمایشگاهی خسروی‌نیا (۱۳۹۲) نیز این نتیجه دیده شده بود. معادلات ۱۰ و ۱۱ با دقت بالا قادر به تخمین مولفه افقی سرعت در ناحیه تلاقی کانال‌ها به‌ازای زوایای شیب جانبی ۴۵ و ۹۰ درجه و زوایای اتصال ۹۰ درجه می‌باشند. سایر محدودیت‌های مربوط به معادلات مذکور در جدول ۱ ذکر شده است.

در شکل ۶ نمودار جعبه‌ای توزیع آماری مقادیر U/U_0 مشاهداتی و پیش‌بینی شده به‌ازای شیب‌های جانبی ۴۵ و ۹۰ درجه نمایش داده شده است. مطابق شکل ۶ توزیع آماری مدل‌ها در یک‌چهارم‌های پایین و بالا^۱ و ۵۰ درصد میانی^۲ کاملاً متفاوت است. در شیب جانبی ۴۵ درجه از نظر توزیع داده‌ها و انطباق با مقادیر مشاهداتی، بهترین عملکرد متعلق به مدل GEP است. توزیع آماری مدل ANN نیز به‌ازای یک‌چهارم پایینی و ۵۰ درصد میانی نسبتاً قابل قبول بوده ولی حالت بیش‌برآورد آن برای یک‌چهارم بالایی کاملاً نمایان است. توزیع داده‌های مدل ANFIS نیز در یک‌چهارم پایینی خوب بوده ولی به‌ازای ۵۰ درصد میانی و یک‌چهارم بالایی عملکرد ضعیفی داشته است. در خصوص شیب جانبی ۹۰ درجه نیز مدل GEP به‌ازای یک‌چهارم پایینی و ۵۰ درصد میانی از انطباق خوبی با مقادیر مشاهداتی برخوردار بوده ولی درخصوص یک‌چهارم بالایی تا حدودی حالت بیش‌برآورد در آن دیده می‌شود. مدل‌های ANN و ANFIS به‌ازای یک‌چهارم پایینی عملکرد نسبتاً خوبی داشته‌اند ولی توزیع آماری نامناسب آن‌ها در بازه‌های دیگر مشهود است.

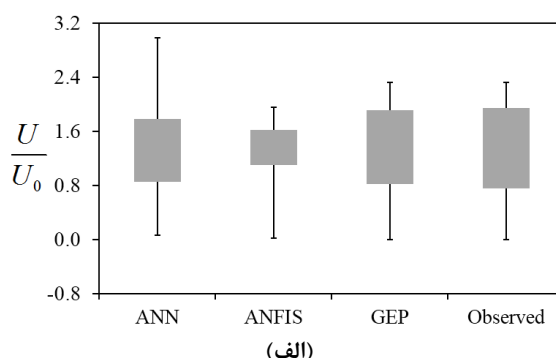
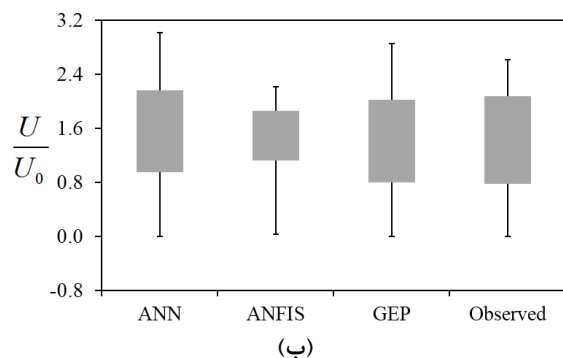
در شکل ۷ نمودار تیلور مقادیر U/U_0 مشاهداتی و پیش‌بینی شده به‌ازای شیب‌های جانبی ۴۵ و ۹۰ درجه نمایش داده شده است. در این نمودار، هر چقدر مدل به مشاهداتی نزدیک‌تر باشد، دقت و قدرت پیش‌بینی مدل

$$\left(\frac{U}{U_0}\right)_{45} = (\sin Q_r)^{5.563} + \text{Arctan} \left[\cos \left(2 \times \frac{z}{b_1} \right) \times \left(\frac{z}{b_1} \right)^{\frac{x}{b_1}} - \frac{y}{b_1} \right] + \sqrt[9]{\frac{z}{b_1}} \quad (10)$$

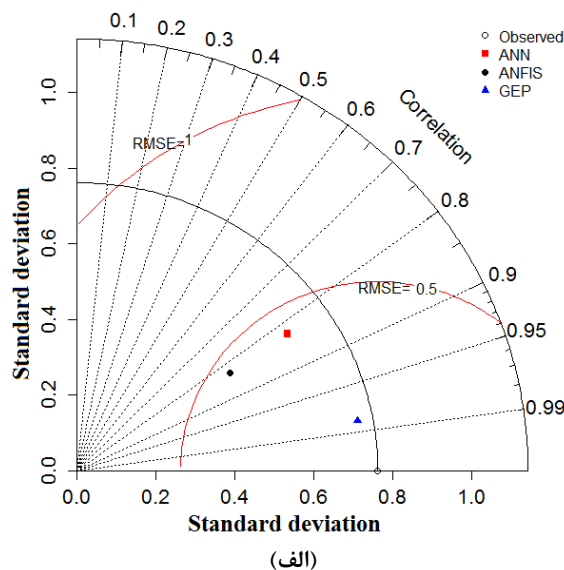
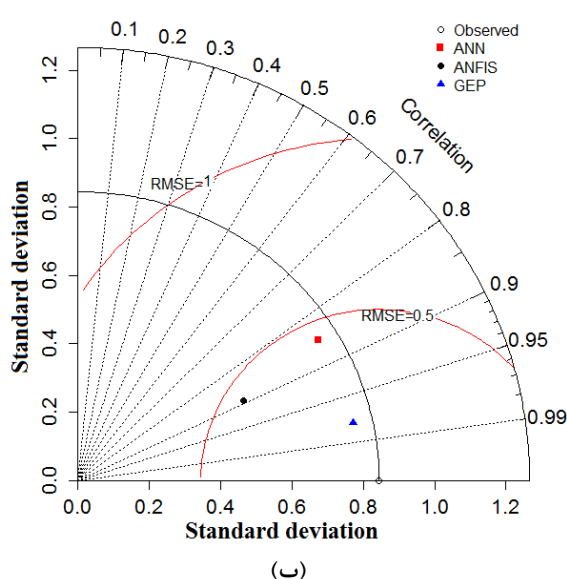
$$\left(\frac{U}{U_0}\right)_{90} = \text{Arctan} \left[\text{Arctan}(Q_r) + \frac{y}{b_1} \right] \times \text{Arctan} \left(\frac{x}{b_1} \times \frac{z}{b_1} \right)^{1/3} + \text{Arctan} \left[\sqrt[3]{\frac{z}{b_1}} + 0.173 \times \frac{z}{b_1} \right] + \sqrt[9]{-5.902 \times \frac{z}{b_1} + \text{Arctan}(Q_r)^2 - 2 \times \left(\frac{z}{b_1} \right)^3} \quad (11)$$

^۲ Median 50 percentile

^۱ Lower and upper quartile



شکل (۶): نمودار جعبه‌ای توزیع آماری مقادیر U/U_0 مشاهداتی و پیش‌بینی شده
(الف): شیب جانبی ۴۵ درجه (ب): شیب جانبی ۹۰ درجه



شکل (۷): نمودار تیلور مقادیر U/U_0 مشاهداتی و پیش‌بینی شده
(الف): شیب جانبی ۴۵ درجه (ب): شیب جانبی ۹۰ درجه

با به‌کارگیری مقادیر اندازه‌گیری شده پرداخته شد. برای تخمین مؤلفه افقی بی‌بعد سرعت جریان در محدوده تلاقی (U/U_0) از متغیرهای نسبت دبی (Q_r) و مختصات بی‌بعد نقاط اندازه‌گیری سرعت ($x/b_1, y/b_1, z/b_1$) استفاده شد. نتایج نشان داد به‌ازای شیب‌های جانبی ۴۵ و ۹۰ درجه، مدل GEP با دارا بودن بیشترین مقدار ضریب تعیین و کمترین ریشه میانگین مربعات خطا در مقایسه با مدل‌های ANFIS و ANN از بهترین عملکرد در تخمین مؤلفه افقی بی‌بعد سرعت جریان در محدوده تلاقی (U/U_0) برخوردار بود. نمودارهای پراکندگی و تیلور نیز دلالت بر برتری و مهارت بالای این مدل در تخمین U/U_0 در مقایسه با دو مدل دیگر داشتند. لازم به ذکر است که در تحقیقات انجام شده توسط Sharifpour et al. (2015)

نتیجه‌گیری

دا شتن آگاهی کافی از الگوهای فرسایش و ته‌نشینی رسوبات و همچنین نحوه انتشار آلودگی در محدوده تلاقی، نیازمند تحلیل دقیق ساختار جریان در ناحیه مذکور می‌باشد. بدین منظور یافتن روشی مؤثر و کارآمد که بتواند میدان سرعت جریان را با دقت مناسب در محدوده تلاقی کانال‌ها پیش‌بینی کند ضروری به نظر می‌رسد. در مطالعه آزمایشگاهی خسروی نیا (۱۳۹۲) میدان سرعت در محدوده تلاقی کانال‌های روباز به‌ازای زوایای شیب جانبی ۴۵ و ۹۰ درجه دیوار کانال اصلی اندازه‌گیری شد. در این مطالعه به بررسی عملکرد مدل‌های ANN، ANFIS و GEP در پیش‌بینی و تخمین هوشمند مؤلفه افقی سرعت

فضای سه بعدی میدان جریان، می توان سرعت طولی جریان را در تلاقی کانال های روباز به ازی شیب های جانبی ۴۵ و ۹۰ درجه با دقت مناسب پیش بینی نمود. برای پژوهش های آتی پیشنهاد می شود که با به کارگیری مدل های داده محور اقدام به مدل سازی و پیش بینی سایر خصوصیات هیدرولیکی و رسوبی در محدوده تلاقی کانال های روباز از جمله ابعاد ناحیه جداشدگی جریان و ابعاد نفوذ حفره آبستگي شود.

(2018 نیز برتری مدل GEP نسبت به مدل های رگرسیونی و ANN در تخمین مؤلفه طولی سرعت جریان در تلاقی کانال های مستطیلی دیده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده می توان گفت، مدل GEP به عنوان مدلی توانمند و با سرعت بالا می تواند جایگزین روش های مستقیم اندازه گیری سرعت جریان در محدوده تلاقی مورد استفاده قرار گیرد. به عبارت دیگر، با به کارگیری روابط رگرسیونی به دست آمده از مدل GEP در پژوهش حاضر و در اختیار داشتن نسبت دبی و مختصات نقاط مورد نظر در

منابع

خسروی نیا پ. ۱۳۹۲. بررسی آزمایشگاهی تأثیر شیب جانبی کانال اصلی دوزنقه ای بر الگوی جریان، فرسایش و رسوب گذاری در تلاقی کانال های باز. رساله دکتری، رشته سازه های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.
طلوعی، س.، حسین زاده دلیر، ع.، قربانی، م.ع.، فاخری فرد، ا.، سلماسی، ف. ۱۳۹۰. تخمین زمانی و مکانی بار معلق رودخانه آجی چای با استفاده از زمین آمار و شبکه عصبی مصنوعی، نشریه دانش آب و خاک. ۲۱(۴): ۹۳-۱۰۴.
غفاری، غ. و وفاخواه. م. ۱۳۹۲. شبیه سازی فرآیند بارش - رواناب با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و سیستم فازی - عصبی تطبیقی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز حاجی قوشان). پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۴(۸): ۱۲۰-۱۳۶.

Azamathulla H. M., Deo M. C. & Deolalikar P. B. 2008 Alternative neural networks to estimate the scour below spillways. *Advances in Engineering Software*, 39(8), 689-698.

Azamathulla H. M. & Zakaria N. A. 2011 Prediction of scour below submerged pipeline crossing a river using ANN. *Water Science and Technology*, 63(10), 2225-2230.

Best J. L. 1987 Flow dynamics at river channel confluences: Implications for sediment transport and bed morphology. In *Recent Developments*. In F.G. Etheridge, R. M. Floers & M. D. Harvey (Eds.), *Fluvial Sedimentology* (39, pp. 27-35), SEPM Special Publication.

Bilhan O., Emiroglu M. E. & Kisi O. 2011 Use of artificial neural networks for prediction of discharge coefficient of triangular labyrinth side weir in curved channels. *Advances in Engineering Software*, 42(4), 208-214.

Biron P. M., Ramamurthy A. S. & Han S. 2004 Three-dimensional numerical modeling of mixing at river confluences. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130, 243- 253.

Bradbrook K. F., Lane S. N., Richards K. S., Biron P. M. & Roy A. G. 2000 Large eddy simulation of periodic flow characteristics at river channel confluences. *Journal of Hydraulic Research*, 38(3), 207-215.

Bonakdari H. & Zaji A. H. 2016. Open channel junction velocity prediction by using a hybrid self-neuron adjustable artificial neural network. *Flow Measurement and Instrumentation*, 49, 46-51.

Debnath J., Das-Pan N., Sharma R. & Ahmed I. 2019 Impact of confluence on hydrological and morphological characters of the trunk stream: a study on the Manu River of North-east India. *Environmental Earth Sciences*, 78(190), 1-19.

Donmez S. 2011 Using artificial neural networks for prediction of alternate depth shaped on rectangular channel in open channel flow. *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research*, 28(1), 339-348.

Ebtehaj I., Bonakdari H., Zaji A. H., Azimi H. & Sharifi A. 2015 Gene expression programming to predict the discharge coefficient in rectangular side weirs. *Applied Soft Computing*, 35, 618-628.

Ferreira C. 2001 Algorithm for solving gene expression programming: A new adaptive problem. *Complex Systems*, 13(2), 87-129.

Ferreira C. 2006 Automatically defined functions in gene expression programming. In *Genetic Systems Programming*. Springer Berlin Heidelberg, 21-56.



- Hong Y. M., Lyu H. T., Lin H. C. & Kan Y. C. 2011 Using artificial neuron network on the impact characteristics analysis of free overfall flow. *Applied Mechanics and Materials*, 71, 4124-4128.
- Juma I. A., Hussein H. H. & Al-Sarraj M. F. 2014 Analysis of hydraulic characteristics for hollow semi-circular weirs using artificial neural networks. *Flow Measurement and Instrumentation*, 38, 49-53. 1409.
- Kennedy P., Condon M. & Dowling J. 2003. Torque-ripple minimization in switched reluctant motors using a neuro-fuzzy control strategy. In: *Proceedings of the IASTED International Conference on Modeling and Simulation*.
- Kisi O., Sanikhani H., Kermani Z. & Niazi F. 2015 Long-term monthly evapotranspiration modeling by several data-driven methods without climatic data. *Computer and Electronics in Agriculture*, 115, 66-77.
- Leite Ribeiro M., Blanckaert K., Roy A. G. & Schleiss J. 2012. Flow and sediment dynamics in channel confluences. *Journal of Geophysical Research*, 117, F01035.
- Liu T. H., Chen L. & Fan B. L. 2012 Experimental study on flow pattern and sediment transportation at a 90° open-channel confluence. *International Journal of Sediment Research*, 27, 178-187.
- Muzzammil M. 2010 ANFIS approach to the scour depth prediction at a bridge abutment. *Journal of Hydroinformatics*, 12(4), 474-485.
- Nazari-Giglou A., Jabbari-Sahebari A., Shakibaenia A. & Borghei S. M. 2016 An Experimental Study of Sediment Transport in Channel Confluences. *International Journal of Sediment Research*, 31(1), 87-96.
- Neary V. S. & Sotiropoulos F. 1996 Numerical investigation of laminar flows through 90-degree diversions of rectangular cross-section. *Computers and Fluids*, 25(2), 95-118.
- Onen F. 2014 Prediction of scour at a side-weir with GEP, ANN and regression models. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(8), 6031-6041.
- Pal M. & Goel A. 2007 Estimation of discharge and end depth in trapezoidal channel by support vector machines. *Water resources management*, 21(10), 1763-1780.
- Parsaie A., Haghiabi A. H., Saneie M., & Torabi H. 2016 Applications of soft computing techniques for prediction of energy dissipation on stepped spillways. *Neural Computing and Applications*, 29, 1393-1409.
- Raikar R. V., Kumar D. N. & Dey S. 2004 End depth computation in inverted semicircular channels using ANNs. *Flow Measurement and Instrumentation*, 15(5-6), 285-293.
- Raikar R. V., Wang C. Y., Shih H. P. & Hong J. H. 2016 Prediction of contraction scour using ANN and GA. *Flow Measurement and Instrumentation*, 50, 26-34.
- Ramos P. X., Schindfessel L., Pego J. P. & Mulder T. P. 2019 Influence of bed elevation discordance on flow patterns and head losses in an open-channel confluence. *Water Science and Engineering*, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wse.2019.09.005>
- Rhoads B. L. & Sukhodolov A. N. 2008 Lateral momentum flux and the spatial evolution of flow within a confluence mixing interface. *Water Resources Research*, 44, 27-143.
- Rhoads B. L., Riley J. D. & Mayer D. R. 2009 Response of bed morphology and bed material texture to hydrological conditions at an asymmetrical stream confluence. *Geomorphology*, 109, 161-173.
- Russel S. O. & Campbell P. F. 1996 Reservoir operating rules with fuzzy programming. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 122(3), 165-170.
- Ramamurthy A. S., Qu J. & Zhai C. 2006 3D simulation of combining flows in 90 rectangular closed conduits. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(2), 214-218
- Shabayek S., Steffler P. & Hicks F. 2002 Dynamic model for subcritical combining flows in channel junctions. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128, 821-828.
- Shakibaenia A., Majdzade-Tabatabai M. R. & Zarrati A. R. 2010 Three-dimensional numerical study of flow structure in channel confluences. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 37, 772- 781.
- Sharifi S., Sterling M. & Knight D. W. 2011 Prediction of end-depth ratio in open channels using genetic programming. *Journal of Hydroinformatics*, 13(1), 36-48.
- Sharifpour M., Bonakdari H. & Zaji A. H. 2015 Open channel junction velocity prediction by gene expression programming and regression methods. *International Conference on Civil Engineering Architecture and urban infrastructure*. Tabriz, Iran.: University of Tabriz.



- Sharifpour M., Bonakdari H. & Zaji A. H. 2018. Comparison of genetic programming and radial basis function neural network for open-channel junction velocity field prediction. *Neural Computation and Application*, 30, 855-864.
- Sigaroodi, S.K., Chen, Q., Ebrahimi, S., Nazari, A., Choobin, B., 2014. Long-term precipitation forecast for drought relief using atmospheric circulation factors: A study on the Maharloo basin in Iran. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(5), 1995-2006.
- Sukhodolov A. & Rhoads B. L. 2001 Field investigation of three-dimensional flow structure at stream confluences 2: Turbulence. *Water Resources Research*. 37(9), 2411–2424.
- Ullah M. S., Bhattacharya J. P. & Dupre W. R. 2015 Confluence scours versus incised valleys: examples from the Cretaceous Ferron Notom Delta, Southeastern Utah, U.S.A. *Journal of Sedimentary Research*, 85(5), 445–458.
- Xhang Ting X. U. & Wei-lin W. U. 2009 Numerical simulation of three-dimensional characteristics of flow at 90o open-channel junction. *Journal of Hydraulic Engineering*, 40(1), 52-59.
- Yuan S., Tang H., Xiao Y., Qiu X. & Xia Y. 2017 Water flow and sediment transport at open-channel confluences: an experimental study. *Journal of Hydraulic Research*, 56(3), 333-350.
- Zaji A. H. & Bonakdari H. 2015a Application of artificial neural network and genetic programming models for estimating the longitudinal velocity field in open channel junctions. *Flow Measurement and Instrumentation*, 41, 81-89.
- Zaji A. H. & Bonakdari H. 2015b Efficient methods for prediction of velocity fields in open channel junctions based on the artificial neural network. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 9(1), 220-232.
- Zhang T., Feng M. & Chen K. 2019 Field investigation of flow and bed erosion/deposition at the confluence of the Yellow River and Fen River. *The 2nd International Symposium on Water Pollution and Treatment*, 427(2020), 012007.



Velocity Field Prediction in Open-Channels Junction using Data Driven Models

Mohammad Reza Nikpour*¹, Payam Khosravinia²

Abstract

The measurement of velocity in rivers confluences and open-channels junction is important in terms of hydraulic and environmental aspects. In this research, the performance of data driven models including ANN, ANFIS and GEP in estimating horizontal component of flow velocity in the open-channels junction was investigated using Khosravinia (2012) laboratory data. In the mentioned study, effects of a 45o side slope in the main channel on hydraulic characteristics of flow were investigated and compared with those at a 90o side slope. In this regard, the velocity field was measured for side slop angles of 45o and 90o using an ADV. For estimating the horizontal component of the flow velocity in the junction region, the discharge ratio and the dimensionless coordinates of measured points in three dimensional space of flow field were used. The performance of the models and comparison of their results were evaluated by coefficient of determination (R²) and root mean square error (RMSE). In addition to statistical indicators, for objective accuracy checking and performance of data driven models, scatterplot, box-plot, and Taylor diagram were used. Comparison of the results of different models using the best pattern indicates that the GEP model with the highest determination coefficient (R² = 0.967), the lowest root mean square error (RMSE = 0.142) and the lowest mean absolute error (MAE = 0.094) in validation step has shown better performance than other models in (U/U₀) estimation for the side slop angle of 45o. Similarly, the mentioned values were achieved 0.956, 0.184 and 0.128 using the GEP model for the side slop angle of 90o. This is while the ANFIS and ANN models ranked second and third. According to the scatterplots of the GEP model, nearly all the points are concentrated around the one-to-one line, which indicates the high level of predictive capability of this model in (U/U₀) estimation for the both side slop angles. Also, according to the box plots, the statistical distribution of the GEP model in the lower and upper quartiles and median 50 percentile had a better performance than the other models, for the both side slop angles. The under and over estimation conditions of the ANFIS and ANN models were evident in these ranges. Moreover, according to the Taylor diagrams, the GEP model was closer to the observations and its superiority to the other models was tangible, with the lowest RMSE and the highest correlation coefficient for the both side slop angles. According to the results, GEP model as a powerful model can be used to replace the direct methods of velocity measurement in the junction region. In other words, using the mathematical equations derived from the GEP model in the present study, the longitudinal velocity field in the open-channels junction for side slopes of 45° and 90° can be predicted accurately.

Key words: Velocity field, Open- channel junction, Side slope, Data driven models.

¹ Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. m_nikpour@uma.ac.ir

² Assistant Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. email: p.khosravinia2012@gmail.com



Velocity Field Prediction in Open-Channels Junction using Data Driven Models

Mohammad Reza Nikpour*¹, Payam Khosravinia²

Introduction

The collision of main and lateral flows, which is followed by a change in the velocity distribution leads to the formation of vortices, secondary circulations, bed erosion, and the scour holes (Khosravinia et al., 2019). The measurement of velocity in rivers confluences and open-channels junction is important in terms of hydraulic and environmental aspects. So far, many experimental and numerical studies on the river confluences have been reported in literature. Some of researchers measured the flow field in the hydrodynamic region of the confluence in three dimensions (Rhoads and Sukhodolov, 2008; Rhoads et al., 2009; Leite Riberio et al., 2012; Liu et al., 2012 Nazari-Giglou et al., 2016; Yuan et al. 2017). Studies have also been done to simulate the flow pattern at the channels junction using numerical methods (Bradbrook et al., 2000; Shabayek et al., 2002; Biron et al., 2004; Ramamurthy et al., 2006; Xhang et al., 2009; Shakibainia et al., 2010).

Methodology

In this research, the performance of data driven models including artificial neural networks (ANN), adaptive neuro-fuzzy interference system (ANFIS), and gene expression programming (GEP) in estimating horizontal component of flow velocity in the open-channels junction was investigated using Khosravinia (2012) laboratory data. In the mentioned study, effects of a 45° side slope in the main channel on hydraulic characteristics of flow were investigated and compared with those at a 90° side slope. In this regard, the velocity field was measured for side slop angles of 45° and 90° using an ADV. For estimating the horizontal component of the flow velocity in the junction region, the discharge ratio and the dimensionless coordinates of measured points in three dimensional space of flow field were used. The performance of the models and comparison of their results were evaluated by coefficient of determination (R^2) and root mean square error (RMSE). In addition to statistical indicators, for objective accuracy checking and performance of data driven models, scatterplot, box-plot, and Taylor diagram were used.

Discussion and Conclusion

Comparison of the results of different models using the best pattern indicates that the GEP model with the highest determination coefficient ($R^2 = 0.967$), the lowest root mean square error (RMSE = 0.142) and the lowest mean absolute error (MAE = 0.094) in validation step has shown better performance than other models in (U/U_0) estimation for the side slop angle of 45°. Similarly, the mentioned values were achieved 0.956, 0.184 and 0.128 using the GEP model for the side slop angle of 90°. This is while the ANFIS and ANN models ranked second and third. According to the scatterplots of the GEP model, nearly all the points are concentrated around the one-to-one line, which indicates the high level of predictive capability of this model in (U/U_0) estimation for the both side slop angles. Also, according to the box plots, the statistical distribution of the GEP model in the lower and upper quartiles and median 50 percentile had a better performance than the other models, for the both side slop angles. The under and over estimation conditions of the ANFIS and ANN models were evident in these ranges. Moreover, according to the Taylor diagrams, the GEP model was closer to the observations and its superiority to the other models was tangible, with the lowest RMSE and the highest correlation coefficient for the both

¹ Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. m_nikpour@uma.ac.ir

² Assistant Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. email: p.khosravinia2012@gmail.com



side slop angles. According to the results, GEP model as a powerful model can be used to replace the direct methods of velocity measurement in the junction region. In other words, using the mathematical equations derived from the GEP model in the present study, the longitudinal velocity field in the open-channels junction for side slopes of 45° and 90° can be predicted accurately.

The most important references

- Khosravinia P., Nikpour M.R., Malekpour A. & Hosseinzadeh Dalir A. 2019. Effect of side slope of main channels on formation and penetration of scour hole in confluences. *River Research and Applications*, **35**(2), 159-168.
- Khosravinia P. 2012. Experimental study on the effect of side slope of trapezoidal main channel on erosion and sedimentation at river-channel confluence. Ph.D. thesis, University of Tabriz, Iran. (In persian)
- Biron P. M., Ramamurthy A. S. & Han S. 2004 Three-dimensional numerical modeling of mixing at river confluences. *Journal of Hydraulic Engineering*, **130**, 243- 253.
- Bradbrook K. F., Lane S. N., Richards K. S., Biron P. M. & Roy A. G. 2000 Large eddy simulation of periodic flow characteristics at river channel confluences. *Journal of Hydraulic Research*, **38**(3), 207-215.
- Leite Ribeiro M., Blanckaert K., Roy A. G. & Schleiss J. 2012. Flow and sediment dynamics in channel confluences. *Journal of Geophysical Research*, **117**, F01035.
- Liu T. H., Chen L. & Fan B. L. 2012 Experimental study on flow pattern and sediment transportation at a 90° open-channel confluence. *International Journal of Sediment Research*, **27**, 178-187.
- Nazari-Giglou A., Jabbari-Sahebari A., Shakibaenia A. & Borghei S. M. 2016 An Experimental Study of Sediment Transport in Channel Confluences. *International Journal of Sediment Research*, **31**(1), 87-96.
- Ramamurthy A. S., Qu J. & Zhai C. 2006 3D simulation of combining flows in 90 rectangular closed conduits. *Journal of Hydraulic Engineering*, **132**(2), 214-218
- Rhoads B. L. & Sukhodolov A. N. 2008 Lateral momentum flux and the spatial evolution of flow within a confluence mixing interface. *Water Resources Research*, **44**, 27-143.
- Rhoads B. L., Riley J. D. & Mayer D. R. 2009 Response of bed morphology and bed material texture to hydrological conditions at an asymmetrical stream confluence. *Geomorphology*, **109**, 161-173.
- Shabayek S., Steffler P. & Hicks F. 2002 Dynamic model for subcritical combining flows in channel junctions. *Journal of Hydraulic Engineering*, **128**, 821-828.
- Shakibainia A., Majdzade-Tabatabai M. R. & Zarrati A. R. 2010 Three-dimensional numerical study of flow structure in channel confluences. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **37**, 772- 781.
- Xhang Ting X. U. & Wei-lin W. U. 2009 Numerical simulation of three-dimensional characteristics of flow at 90° open-channel junction. *Journal of Hydraulic Engineering*, **40**(1), 52-59.
- Yuan S., Tang H., Xiao Y., Qiu X. & Xia Y. 2017 Water flow and sediment transport at open-channel confluences: an experimental study. *Journal of Hydraulic Research*, **56**(3), 333-350.