

بررسی مقایسه‌ای پارامترهای تاثیرگذار بر میزان استهلاک انرژی در کانال‌های با مقاطع مختلف بر اساس روش آنالیز فاکتوریل و روش هوشمند GPR

کیومرث روشنگر^۱، رقیه قاسم پور^۲، سید مهدی ثاقبیان^{۳*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۵/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۹/۱۰

چکیده

تخمین دقیق مشخصات پرش هیدرولیکی از جمله میزان استهلاک انرژی نقش مهمی در طراحی بهینه سازه‌های هیدرولیکی دارد. در تحقیق حاضر، استهلاک انرژی نسبی ناشی از پرش هیدرولیکی در کانال‌های با مقاطع مختلف (شامل مقطع مستطیلی، واگرای ناگهانی و دوزنقه‌ای) با المان‌های زیر متفاوت و با نحوه چیدمان متفاوت با استفاده از روش هوشمند رگرسیون فرآیند گاوسی (GPR) مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا، ابتدا با استفاده از روش آنالیز فاکتوریل پارامترهای دارای همبستگی بیشتر با میزان استهلاک انرژی تعیین شد. سپس با استفاده از این پارامترهای متفاوتی تعریف گردید و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی نحوه تاثیر نوع کانال و المان‌های زیر بر روی استهلاک انرژی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از تحلیل مدل‌ها کارایی بالای روش به کار رفته را در تخمین میزان استهلاک انرژی نسبی به خوبی نشان داد. ملاحظه گردید که مدل‌های تعریف شده برای کانال واگرا با بلوک مرکزی نسبت به کانال‌های دیگر منجر به نتایج دقیق‌تری می‌گردند. برای این کانال مدل با پارامترهای ورودی F_1 و $(Y_2 - Y_1)/Y_1$ مدل برتر انتخاب شد و بهترین حالت ارزیابی برای داده‌های آزمون برابر با مقادیر $NSE=0/987$ ، $R=0/995$ و $RMSE=0/021$ بدست آمد. همچنین مشاهده گردید که مشخصات المان‌های زیر در بستر کانال در تخمین استهلاک انرژی نسبی تاثیرگذار بوده و بین دو نوع المان‌های زیر با چیدمان شطرنجی و موازی، نتایج بدست آمده از تحلیل مدل‌ها در نوع موازی دقیق‌تر است. مطابق با نتایج آنالیز حساسیت به دو روش فاکتوریل و حذفی، مشخص شد که عدد فرود تاثیرگذارترین پارامتر در تخمین استهلاک انرژی نسبی است.

واژه‌های کلیدی: آنالیز فاکتوریل، استهلاک انرژی، المان زیر، کانال واگرا، GPR

مقدمه

میزان افت انرژی از جمله پارامترهای مهمی هستند که بر اقتصادی کردن سازه حوضچه آرامش تأثیر فراوانی دارند. بر این اساس، حوضچه‌های آرامش با شکل‌ها و مشخصات متفاوت و شرایط حاکم بر جریان آب ساخته شده و در هر مورد سعی شده تا اقتصادی‌ترین حالت انتخاب شود. به منظور عملکرد بهینه حوضچه آرامش لازم است که پرش کاملاً در حوضچه رخ دهد که به عمق آب پایین دست بستگی دارد. اگر به هر دلیلی تأمین عمق مورد نیاز برای وقوع پرش هیدرولیکی کلاسیک میسر نباشد و یا هزینه‌های حفاری به منظور پایین آوردن کف حوضچه مقرون به صرفه نباشد یکی از راه‌های حصول اطمینان از تشکیل پرش در حوضچه استفاده از واگرایی مقطع یا استفاده از المان‌های زیر متفاوت می‌باشد. تاکنون در مورد پرش هیدرولیکی مطالعات متعددی صورت پذیرفته است و روابط متعددی ارائه شده‌اند. کلوسیوس و احمد با فرض تغییرات خطی بین عمق اولیه و ثانویه پرش در مقاطع مستطیلی واگرا، روابطی را برای نسبت عمق ثانویه به عمق اولیه و همچنین افت انرژی نسبی ارائه کردند

یکی از روش‌های متداول استهلاک انرژی جنبشی جریان در پایین دست سازه‌های آبی در حوضچه‌های آرامش، پرش هیدرولیکی می‌باشد. پرش هیدرولیکی، یکی از مهم‌ترین پدیده‌ها در جریان متغیر سریع است که در آن جریان از حالت فوق بحرانی به حالت زیربحرانی تبدیل می‌شود. در اثر پدیده پرش هیدرولیکی عمق جریان در مسیر نسبتاً کوتاهی به میزان زیادی افزایش می‌یابد و در نتیجه، ضمن ایجاد افت انرژی از میزان سرعت جریان به اندازه قابل توجهی کاسته می‌شود. ابعاد حوضچه آرامش به مشخصات پرش هیدرولیکی به خصوص طول و عمق ثانویه پرش هیدرولیکی بستگی دارد. پارامترهایی چون طول پرش، نسبت عمق ثانویه به عمق اولیه و

۱- گروه آب، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- گروه آب، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۳- گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر، اهر - ایران

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

به بررسی عمق آبستگي در اطراف گروه پایه‌های پل پرداختند (Mohammad et al., 2009). باوجود اینکه مدل‌های مختلفی جهت مدل‌سازی مشخصات پرش هیدرولیکی از جمله استهلاک انرژی پیشنهاد شده‌اند، اما با توجه به ماهیت غیرخطی پدیده پرش هیدرولیکی هیچ یک از مدل‌های توسعه یافته نتوانسته‌اند به عنوان یک مدل برتر و توانا شناخته شوند و عدم قطعیت در پیش‌بینی‌ها از اعتبار برآوردها از طریق مدل‌های مختلف می‌کاهد. در مورد بررسی آزمایشگاهی و استخراج روابط نیمه تجربی، با توجه به اینکه کاربرد بسیاری از این فرمول‌ها محدود به مواردی است که منطبق با فرضیات و شرایط توسعه و استخراج فرمول‌ها باشند و در توسعه این روابط یک‌سری ساده‌سازی‌هایی صورت گرفته است، لذا این روابط در شرایط هیدرولیکی متفاوت منجر به نتایج متفاوتی خواهند بود. با این حال، امروزه شبکه‌های غیرخطی به عنوان یکی از سیستم‌های هوشمند در پیش‌بینی پدیده‌های پیچیده بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند. این روش‌ها دارای ماهیت جعبه سیاه بوده و در آن رابطه آموزش داده شده بین پارامترهای ورودی و خروجی مشخص نیست با این وجود می‌توانند برای پیش‌بینی هرگونه متغیری که در آن رابطه بین متغیرهای مربوطه به خوبی درک نمی‌شود، پیدا کردن اندازه و شکل راه‌حل نهایی دشوار است و روش‌های تحلیلی ریاضی رایج قادر به حل آن‌ها نبوده و یا بسیار زمان‌بر هستند، استفاده شوند و معمولاً دارای جواب بهتری نسبت به روش‌های کلاسیک هستند. این مدل‌ها به طور معناداری، خطاهای کوچکتری را در پیش‌بینی نسبت به مدل‌های آماری نشان می‌دهند و دارای سرعت پیش‌بینی بالاتری هستند.

با توجه به پیچیده بودن پدیده پرش هیدرولیکی و عدم قطعیت موجود در تخمین مشخصات آن، روابط نیمه تجربی موجود از دقت کافی برخوردار نبوده و در بیشتر موارد نتایج حاصله با خطاهای بزرگی همراه است. از آنجا که اندازه‌گیری دقیق مشخصات پرش هیدرولیکی از جمله میزان استهلاک انرژی مهم می‌باشد، لذا مقاله حاضر روش جدید مبتنی بر کرنل رگرسیون فرآیند گاوسی (GRP) را به عنوان یکی از روش‌های نوین داده کاوی در تخمین میزان استهلاک انرژی در کانال‌های با مقاطع مختلف به کار برده است. در این راستا، از چندین سری داده آزمایشگاهی مربوط به کانال‌های با مقاطع و المان زبر متفاوت (کانال مستطیلی با المان‌های زبر شطرنجی و موازی، کانال دوزنقه‌ای با المان‌های زبر موازی و کانال واگرای ناگهانی با بلوک مرکزی) استفاده شد. در ابتدا، جهت تعیین پارامترهای تاثیرگذار و دارای همبستگی بیشتر با استهلاک انرژی نسبتی از روش آنالیز حساسیت فاکتوریل استفاده شد. سپس، با استفاده از این پارامترها مدل‌های ورودی متفاوتی تعریف گردید و اثر پارامترهای هیدرولیکی، هندسه کانال و نحو چیدمان المان‌های زبر مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، از آنالیز حساسیت حذفی برای تعیین موثرترین پارامترها در

(Koloseus, & Ahmad., 1969). فینمور و همکاران تاثیر عدد فرود را بر مشخصات پرش هیدرولیکی بررسی کردند (Finnemore et al., 2002). گوپتا و همکاران نسبت طول و نسبت استهلاک انرژی را در پرش هیدرولیکی آزاد در کانال منشوری افقی مدل‌سازی نمودند و به این نتیجه دست یافتند که با افزایش عدد فرود مقادیر طول و میزان استهلاک انرژی بیشتر می‌شوند (Gupta et al., 2013). بدیع زادگان و همکاران (۱۳۹۰) با بررسی پرش هیدرولیکی روی بسترهای موج دار سینوسی افقی نشان دادند که مقادیر مختلف شیب موج زبری، تاثیر متفاوتی در کاهش نسبت عمق مزدوج نداشته و انواع مختلف زبری حدوداً به یک میزان، باعث کاهش عمق ثانویه می‌شوند. اسدی و همکاران (۱۳۹۵) در پژوهشی به بررسی تاثیر قطر متوسط ذرات در شرایط زبری طبیعی بستر بر نسبت عمق ثانویه به اولیه، استهلاک انرژی نسبی پرش هیدرولیکی و ضریب نیروی برشی پرداختند و روابطی را برای هر یک از موارد فوق ارائه نمودند. باباعلی و همکاران به مدل‌سازی محاسباتی پرش هیدرولیکی در حوضچه نشستن با دیوارهای همگر پرداختند و نتایج حاصله را با نتایج سایر محققین مقایسه نمودند (Babaali et al., 2015). ونگ و موزین به ارزیابی تجربی مشخصات آشفستگی در جریان دو مرحله‌ای پرش هیدرولیکی پرداختند (Wang & Murzyn, 2017). پالرمو و پالیارا با استفاده از روش نیمه‌تجربی، استهلاک انرژی ناشی از پرش هیدرولیکی را در کانال‌های زبر شیبدار بررسی کردند و روابطی را در این زمینه ارائه داده و با داده‌های آزمایشگاهی سایر محققین مقایسه نمودند (Palermo & Pagliara., 2018). از آنجا که اندازه‌گیری دقیق مشخصات پرش هیدرولیکی موجب بهینه‌سازی طراحی سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی می‌گردد، لذا استفاده از روش‌های هوشمندی که بتوانند این پارامتر را دقیق‌تر تخمین بزنند، ضروری به نظر می‌رسد. در دهه‌های اخیر روش‌های محاسباتی نرم (مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی، برنامه‌ریزی ژنتیک، ماشین بردار پشتیبان، مدل‌های فازی، رگرسیون فرآیند گاوسی) برای شبیه‌سازی رفتار سیستم‌ها در زمینه مهندسی آب مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به عنوان مثال شیر و کیسی از روش‌های برنامه‌ریزی بیان ژن برای پیش‌بینی عمق آب‌های زیرزمینی استفاده کردند (Shiri, & Kisi., 2011). روش‌نگر و قاسم‌پور با استفاده از روش یادگیری ماشینی Support Vector Machine (SVM) به مدل‌سازی میزان رسوب انتقالی در سیستم‌های فاضلاب پرداختند (Roushangar, & Ghasempour. 2017). سیواپراگاسام و لیونگ از مدل SVM برای پیش‌بینی بارش - رواناب حوضه Tryggevaelde واقع در کشور هلند استفاده کردند (Siviapragasam, & Liong., 2001). خان و کولیبالی روش SVM را جهت پیش‌بینی سطح آب دریاچه بکار بردند (Khan, & Coulibaly. 2006). محمد و همکاران با استفاده از روش تابع شعاع محوری شبکه عصبی مصنوعی و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی

تخمین استهلاك انرژی نسبی استفاده شد.

مواد و روش‌ها

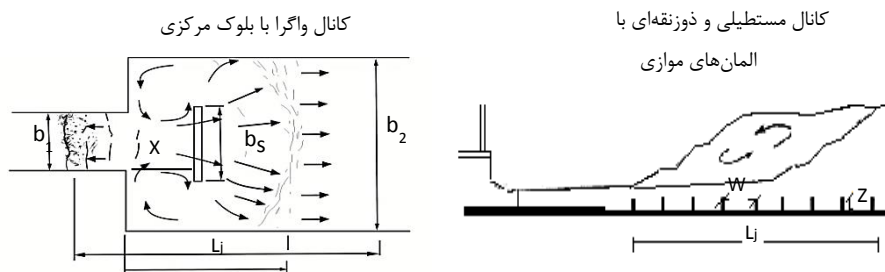
سری داده‌های مورد استفاده در تحقیق

جهت بررسی تاثیر المان‌های زیر بر میزان استهلاك انرژی در کانال‌های مختلف از چند سری داده‌های آزمایشگاهی استفاده شد که شامل آزمایش‌های برمن (Bremen, 1990) در کانال واگرا با بلوک مرکزی، اوچمن (Evcimen., 2005 & 2012) در دو نوع کانال

مستطیلی و دوزنقه‌ای با المان‌های زیر منشوری با چیدمان موازی و داده‌های سیمسیک (Simsik, 2006) در کانال مستطیلی با المان‌های زیر با چیدمان موازی و شطرنجی است. در جدول ۱ محدوده‌ی مشخصات هیدرولیکی و هندسی این آزمایش‌ها و در شکل ۱ جزئیات المان‌های زیر نشان داده شده است. پارامترهای به کار رفته در جدول ۱ و شکل ۱ شامل Fr_1 عدد فرود بالادست، X موقعیت بلوک، Y نسبت اعماق متناوب، Z ارتفاع المان‌های زیر و W فاصله بین المان‌های زیر به کار رفته در کف کانال است.

جدول ۱- محدوده‌ی داده‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها

محقق پارامترها	برمن (۱۹۹۰)	اوچمن (۲۰۰۵)	سیمسیک (۲۰۰۶)	اوچمن (۲۰۱۲)
Z (cm)	۲.۵-۷.۵	۰.۶-۲	۱	۱-۳
X (cm)	۲۰-۸۰	-	-	-
Fr_1	۲.۹۷-۹.۰۲	۷.۲۹-۱۶.۸	۲.۱۳-۱۱.۹۲	۳.۹۲-۱۳.۲۸
W(cm)	۲-۱۸.۱	۴-۹	۳-۹	۲-۱۰
Y	۲.۸-۱۰.۶۴	۸.۷-۱۸.۸	۲.۵-۱۴.۸	۴.۱۵-۱۴.۹
نوع المان زیر	بلوک مرکزی	موازی	موازی و شطرنجی	موازی
نوع کانال	واگرای ناگهانی	مستطیلی	مستطیلی	دوزنقه‌ای
تعداد داده‌ها	۱۵۶	۱۱۳	۹۲	۱۰۷



شکل ۱- جزئیات مربوط به المان‌های زیر استفاده شده در آزمایشات

دست آید، به دو گروه محلی و جامع تقسیم می‌گردد. روش‌های تحلیل حساسیت محلی معمولاً پارامترهای مدل را به‌عنوان متغیر ورودی در نظر گرفته و هدف آن‌ها ارزیابی تأثیر عدم قطعیت پارامتر ورودی مدل بر عملکرد مدل است. روش‌های تحلیل حساسیت جامع، هم پارامترهای مدل و هم سایر عوامل ورودی مدل در یک فرآیند شبیه‌سازی را در نظر می‌گیرد. یکی از روش‌های آنالیز حساسیت روش حذف متغیر ورودی است که در آن تغییرات در خروجی مدل بررسی می‌شود، درحالی‌که یکی از متغیرهای ورودی حذف شده و بقیه در مدل باقی مانده‌اند. روش دیگر آنالیز فاکتوریل است که جهت بررسی تأثیرات اصلی پارامترها از نظر کمی استفاده می‌شود. هر گاه در یک

روش‌های آنالیز حساسیت

تحلیل حساسیت به بررسی چگونگی تغییرات در خروجی مدل نسبت به تغییرات در مؤلفه‌های ورودی می‌پردازد. سؤالاتی که با تحلیل حساسیت پاسخ داده می‌شود شامل این موارد است: چه مؤلفه‌های ورودی بیشترین تغییرات را در خروجی مدل ایجاد می‌کند؟ آیا مؤلفه‌هایی وجود دارد که تغییرات قابل اغماض بر روی خروجی بگذارد؟ آیا اندرکنشی بین مؤلفه‌ها وجود دارد که باعث افزایش یا تضعیف تغییرات ایجاد شده با یک متغیر خاص شود؟ روش‌های کلی تحلیل حساسیت با توجه به اینکه تغییرات خروجی به‌وسیله تغییرات مؤلفه‌های ورودی اطراف یک مقدار مرجع، یا در کل فضای ممکن به

کند. هنگامی که چنین تابعی میانگین پاسخ را در یک مدل رگرسیونی با خطاهای گاوسی تعریف می‌کند، می‌توان از محاسبات ماتریس برای استنتاج بهره‌گیری کرد؛ این مسئله برای مجموعه داده‌هایی با بیش از هزار نمونه امکان‌پذیر است. فرآیندهای گاوسی در مدل‌سازی آماری بسیار پراهمیت‌اند، زیرا خصوصیات نرمالی دارند (Neal, 1997). مجموعه داده S با n مشاهده را در نظر بگیرید $S = \{(x_i, y_i) | i = 1, \dots, n\}$ ، که در آن بردار ورودی با D بعد و y_i خروجی اسکالر یا هدف می‌باشد. این مجموعه متشکل از دو جز ورودی و خروجی به عنوان نقاط نمونه یا تجربی معرفی خواهند شد. به منظور سهولت کار، ورودی‌های مجموعه در ماتریس $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ و خروجی‌ها نیز در ماتریس $Y = [y_1, y_2, \dots, y_n]$ تجمیع می‌گردند. وظیفه رگرسیون، ایجاد یک ورودی جدید x^* به منظور دستیابی به توزیع پیش‌بینی شده برای مقادیر متناظر داده‌های مشاهده‌ای y^* و بر مبنای مجموعه داده S می‌باشد. فرآیند گاوسی مجموعه‌ای از متغیرهای تصادفی است که تعداد محدودی از آنها با توزیع‌های گاوسی ادغام شده‌اند. فرآیند گاوسی تعمیمی از توزیع گاوسی می‌باشد. توزیع گاوسی در واقع توزیع بین متغیرهای تصادفی بوده در حالی که فرآیند گاوسی بیانگر توزیع بین توابع می‌باشد. فرآیند گاوسی $f(x)$ توسط توابع میانگین $m(x)$ و کواریانس به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$m(x) = E(f(x)) \quad (1)$$

$$k(x, x') = E((f(x) - m(x))(f(x') - m(x'))) \quad (2)$$

که در روابط فوق، $k(x, x')$ تابع کواریانس (یا کرنل) بوده که در نقاط x و x' محاسبه می‌شود. فرآیند گاوسی $f(x)$ می‌تواند به صورت زیر بیان گردد:

$$f(x) \sim GP(m(x), k(x, x')) \quad (3)$$

که معمولاً جهت ساده‌سازی، مقدار تابع میانگین برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. در فرآیند گاوسی، رابطه بین بردار ورودی و هدف به فرم زیر می‌باشد:

$$y_i = f(x_i) + \varepsilon \quad (4)$$

که در آن $f(x)$ بیانگر تابع رگرسیون دلخواه و ε نیز مقدار نویز توزیع گاوسی با میانگین صفر و واریانس σ^2 می‌باشد، یعنی $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$. علاوه بر این، چنین فرض می‌گردد که $f = [f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_n)]^T$ داشته به نحوی که $p(f|X) = N(0, K)$ که در آن ماتریس کواریانس با درایه‌های $k_{i,j} = k(x_i, x_j)$ می‌باشد.

$$K(X, X) = \begin{pmatrix} k(x_1, x_1) & k(x_1, x_2) & \dots & k(x_1, x_n) \\ k(x_2, x_1) & k(x_2, x_2) & \dots & k(x_2, x_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k(x_n, x_1) & k(x_n, x_2) & \dots & k(x_n, x_n) \end{pmatrix} \quad (5)$$

$k_{i,j}$ کواریانس بین مقادیر توابع نهان $f(x_i)$ و $f(x_j)$ است. رگرسیون فرآیند گاوسی به منظور محاسبه توزیع پیش‌بینی شده برای

مدل تعداد نسبتاً زیادی متغیر وجود داشته باشد، یافتن رابطه‌ها و یا به عبارت دیگر همبستگی بین این متغیرها به روش‌های معمولی بسیار مشکل و گاه ناممکن است. روش آنالیز فاکتوریل برای رفع این مشکل به وجود آمده است و بر مبنای آن متغیرها به گونه‌ای دسته بندی می‌شوند که در نهایت به دو یا چند عامل که همان مجموعه متغیرها هستند محدود می‌گردند. در حقیقت، روش آنالیز فاکتوریل سعی در شناسایی متغیرهای اساسی یا عواملی دارد که الگوی همبستگی را در مجموعه‌ای از متغیرهای مشاهده‌ای نشان می‌دهند. آنالیز فاکتوریل به عنوان ابزاری برای کشف میزان ممکن کاهش داده‌ها به کار می‌رود و وظیفه اصلی آن ایجاد یک مجموعه از متغیرهای کاملاً جدید که تعداد آنها نسبت به متغیرهای مورد مشاهده خیلی کمتر است و قرار دادن آن به جای مجموعه متغیرهای مورد مشاهده در تحلیل‌های بعدی است. در پژوهش حاضر جهت بررسی میزان تأثیر پارامترهای ورودی بر میزان استهلاک انرژی از روش‌های آنالیز فاکتوریل و حذف متغیر ورودی استفاده شده است.

رگرسیون فرآیند گاوسی (GPR)

در نظریه احتمال و آمار یک فرآیند گاوسی یک مدل آماری است که در آن مشاهدات در دامنه پیوسته رخ می‌دهد. در واقع فرآیند گاوسی، یک فرآیند تصادفی است که به صورت دنباله‌ای از متغیرهای تصادفی شناخته می‌شود و در آن متغیرهای تصادفی معمولاً برحسب مثلاً زمان مرتب شده‌اند و هر زیر مجموعه متناهی از این متغیرها دارای توزیع گاوسی (نرمال) چند متغیره هستند. در یک فرآیند گاوسی هر نقطه از فضای ورودی یک متغیر تصادفی با توزیع نرمال است. علاوه بر این هر مجموعه متناهی از این متغیرهای تصادفی دارای توزیع گاوسی چند متغیره است. توزیع فرآیند گاوسی توزیع مشترک از تمام این متغیرهای تصادفی (شمارا و نامحدود) است. از دید یک الگوریتم یادگیری ماشین، یک فرآیند گاوسی، اندازه‌گیری شباهت بین نقاط (همان تابع کرنل) برای پیش‌بینی نقاط جدید از داده‌های آموزشی است. فرآیند گاوسی مجموعه‌ای از متغیرهای تصادفی است که تعداد دلخواه محدودی از آنها با توزیع‌های گاوسی ادغام شده‌اند. فرآیند گاوسی به طور کامل توسط تابع میانگین $m(x)$ و تابع کواریانس $k(x, x')$ آن تعیین می‌شود. این فرآیند، تعمیمی طبیعی از توزیع گاوسی است که میانگین و کواریانس آن به ترتیب یک بردار و یک ماتریس است. مدل‌های رگرسیون فرآیند گاوسی بر مبنای این فرض هستند که مشاهدات تنظیم باید حامل اطلاعاتی درباره همدیگر باشد. یکی از ویژگی‌های مهم در فرآیند گاوسی وجود توابع کواریانس متنوع در آن است که به محقق این امکان را می‌دهد که از میان آن‌ها گزینش مناسبی انجام دهد. این مدل‌ها می‌توانند توزیع‌هایی را بین توابعی با تعداد یک یا چندین متغیر ورودی مشخص

سعی گردید تا در مدل‌سازی GPR پارامترهای مناسب و مؤثر در تعیین استهلاك انرژی نسبی انتخاب گردد. در تعریف مدل‌ها، ترکیب متفاوتی از مشخصات جریان و هندسه کانال و المان‌های زیر به‌کار رفته در نظر گرفته شد تا تأثیر هر کدام از این پارامترها در مدل‌سازی مشخص گردد. مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در الگوی پرش می‌توانند به‌صورت زیر بیان گردند:

$$f(y_1, y_2, V_1, L_j, \Delta E, \mu, g, \rho, b_1, b_2, Z, W) = 0 \quad (Y) \quad (7)$$

که در آن y_1 و y_2 به ترتیب عمق اولیه و ثانویه پرش، V_1 سرعت جریان قبل از پرش، L_j طول پرش، ΔE استهلاك انرژی، μ ویسکوزیته دینامیکی جریان، g شتاب ثقل، b_1 و b_2 عرض کانال قبل و بعد از مقطع انبساط، W فاصله المان‌های زیر و Z ارتفاع المان زیر است. با استفاده از آنالیز ابعادی و با در نظر گرفتن μ ، ρ و g به‌عنوان پارامترهای تکراری رابطه (Y) می‌تواند به‌صورت زیر بیان گردد:

$$f\left(\frac{y_2}{y_1}, \frac{\Delta E}{E_1}, \frac{L_j}{y_1}, B, F_1, Re, \frac{Z}{y_1}, \frac{W}{y_1}\right) = 0 \quad (8)$$

رابطه بالا نیز می‌تواند به‌صورت رابطه (۹) بیان گردد:

$$f\left(\frac{y_2}{y_1}, \frac{\Delta E}{E_1}, \frac{L_j}{y_1}, B, F_1, Re, \frac{W}{Z}\right) = 0 \quad (9)$$

که در آن F_1 عدد فرود جریان، Re عدد رینولدز و B نسبت انبساط می‌باشد. از طرفی مطالعات صورت گرفته توسط الواتورسکی و رانگوراجو و همکاران (Elevatorski, 2008; Ranga Raju et al, 1980) بیانگر آن است عدد رینولدز تأثیر چندانی در تعیین مشخصات پرش هیدرولیکی ندارد.

در این تحقیق با استفاده از آنالیز حساسیت فاکتوریل میزان همبستگی هر کدام از پارامترها بر روی استهلاك انرژی و همچنین تأثیر این پارامترها بر روی هم تعیین شد. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت در جدول ۲ آورده شده است. مشاهده می‌گردد که در بین پارامترهای به‌کار رفته W/Z همبستگی مطلوبی را با $\Delta E/E_1$ نشان نداده و همبستگی آن با استهلاك انرژی و سایر پارامترها در اکثر موارد به صورت معکوس است. مشاهده می‌گردد که عدد فرود بیشترین همبستگی را با $\Delta E/E_1$ دارد. در بین کانال‌های استفاده شده در تحقیق، همبستگی به‌دست آمده بین استهلاك انرژی و سایر پارامترها در کانال واگرایی ناگهانی بیشتر از سایر کانال‌ها است. در این نوع کانال به نظر می‌رسد که تأثیر فاصله بلوک تا کانال اولیه بر روی استهلاك انرژی نسبت به ارتفاع بلوک بیشتر است. در ادامه با استفاده از پارامترهای $\left(\frac{y_2 - y_1}{y_1}, \frac{y_1}{B}, \frac{X}{y_1}, F_1, \frac{Z}{y_1}\right)$ مدل‌هایی تعریف گردیده و با استفاده از روش GPR مورد ارزیابی قرار گرفته است.

مقادیر تابع f^* در نقاط تست $X^* = [x_1^*, x_2^*, \dots, x_m^*]$ به کار می‌رود. طراحی روش‌های رگرسیون مبتنی بر فرآیند گاوسی شامل استفاده از مفهوم تابع کرنل است. در واقع، با یک تبدیل غیرخطی از فضای ورودی به فضای خصیصه با ابعاد بیشتر (حتی نامتناهی) می‌توان مسائل را به‌صورت خطی تفکیک‌پذیر ساخت. با تبدیل نمونه‌ها از فضای ورودی به فضای ویژگی، تفکیک‌کننده غیرخطی به حالت خطی تبدیل خواهد شد. از مهم‌ترین توابع کرنل می‌توان به کرنل چند جمله‌ای ساده، چند جمله‌ای نرمال شده، تابع شعاع محور و تابع کرنل پیرسون اشاره کرد. لازم به توضیح است که در این تحقیق برای مدل‌سازی با روش GPR از کد نوشته شده در نرم‌افزار متلب استفاده شده است.

معیارهای ارزیابی

به‌منظور ارزیابی دقت مدل‌ها تعریف شده در تخمین استهلاك انرژی نسبی ناشی از پرش هیدرولیکی، از سه پارامتر آماری استفاده گردید که عبارت‌اند از: ضریب همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی (R)، ضریب تبیین (یا ضریب نش-ساتکیف) بین مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی (NSE) که یکی از معیارهای مهم ارزیابی قابلیت یک مدل است و هر چه مقدار آن نزدیک به یک باشد به معنی ارتباط بهتر داده‌ها می‌باشد و ریشه میانگین مربعات خطاها (RMSE) که بیانگر میزان انحراف بین مقادیر پیش‌بینی شده می‌باشد. هر چه مقدار R^2 و R برای یک مدل به یک نزدیک‌تر و مقدار RMSE کوچکتر باشد به معنی مطلوب بودن آن مدل می‌باشد. روابط این پارامترهای آماری به صورت زیر می‌باشد:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (l_{mi} - \bar{l}_{mi}) \times (l_{pi} - \bar{l}_{pi})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (l_{mi} - \bar{l}_{mi})^2 \times (l_{pi} - \bar{l}_{pi})^2}} \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (l_{mi} - l_{pi})^2}{N}}, \quad NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (l_{mi} - l_{pi})^2}{\sum_{i=1}^N (l_{mi} - \bar{l}_{mi})^2}$$

در روابط بالا \bar{l}_m : مقدار اندازه‌گیری شده، \bar{l}_p : متوسط مقدار اندازه‌گیری شده، \bar{l}_p : مقدار پیش‌بینی شده، \bar{l}_m : متوسط مقدار پیش‌بینی شده و N تعداد داده‌هاست.

نتایج و بحث

تعیین پارامترهای تأثیرگذار در مدل‌سازی استهلاك انرژی

با توجه به اینکه انتخاب مدل‌های ورودی در سامانه‌های هوشمند می‌تواند بر روی دقت جواب‌های حاصل از تحلیل تأثیرگذار، لذا

جدول ۲- ماتریس همبستگی حاصل از آنالیز فاکتوریل.

کانال واگرا	$\Delta E/E_1$	F_1	$(y_2-y_1)/y_1$	X/y_1	Z/y_1	y_1/B
$\Delta E/E_1$	۱	۰/۹۱۸	۰/۸۷۴	۰/۷۳۶	۰/۲۵۵	-۰/۳۴۴
F_1		۱	۰/۹۷۸	۰/۸۱۰	۰/۲۶۶	-۰/۳۳۰
$(y_2-y_1)/y_1$			۱	۰/۸۳۶	۰/۲۶۸	-۰/۳۲۰
X/y_1				۱	۰/۶۰۷	-۰/۶۰۸
Z/y_1					۱	۰/۶۰۷
y_1/B						۱

کانال ذوزنقه‌ای	$\Delta E/E_1$	F_1	$(y_2-y_1)/y_1$	W/Z	Z/y_1
$\Delta E/E_1$	۱	۰/۶۰۱	۰/۵۷۶	-۰/۱۷۳	۰/۵۰۱
F_1		۱	۰/۹۶۱	-۰/۲۳۴	۰/۳۵۷
$(y_2-y_1)/y_1$			۱	-۰/۰۷۲	۰/۳۹۵
W/Z				۱	-۰/۴۹۸
Z/y_1					۱

مسططیلی (چیدمان شطرنجی)	$\Delta E/E_1$	F_1	$(y_2-y_1)/y_1$	W/Z	Z/y_1
$\Delta E/E_1$	۱	۰/۷۹۶	۰/۷۹۵	-۰/۱۹۴	۰/۴۰۸
F_1		۱	۰/۹۹۵	-۰/۰۸۹	۰/۴۱۸
$(y_2-y_1)/y_1$			۱	-۰/۰۸۴	۰/۳۸۶
W/Z				۱	-۰/۰۶۵
Z/y_1					۱

مسططیلی (چیدمان موازی)	$\Delta E/E_1$	F_1	$(y_2-y_1)/y_1$	W/Z	Z/y_1
$\Delta E/E_1$	۱	۰/۸۸۵	۰/۷۱۱	-۰/۰۹۳	۰/۵۲۰
F_1		۱	۰/۸۹۳	-۰/۲۵۷	۰/۶۸۷
$(y_2-y_1)/y_1$			۱	-۰/۳۶	۰/۶۹۴
W/Z				۱	-۰/۶۳۶
Z/y_1					۱

مدل‌ها شده‌اند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که میزان واگرایی کانال و فاصله بلوک از کانال اولیه بر روی میزان استهلاک انرژی تاثیرگذار هستند. همچنین، نتایج بیانگر آن است که مدل با تنها پارامتر ورودی عدد فرود نیز منجر به نتایج مطلوبی شده است. بنابراین، می‌توان تنها با استفاده از مشخصات جریان در بالادست پرش هیدرولیکی با روش GPR میزان استهلاک انرژی را به‌دست آورد.

نتایج حاصل از تحلیل مدل‌های مربوط به کانال ذوزنقه‌ای

جهت تخمین استهلاک انرژی نسبی در کانال ذوزنقه‌ای با المان‌های زیر، چند مدل با در نظر گرفتن مشخصات هیدرولیکی و هندسه المان‌های زیر تعریف گردید و با روش GPR مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از تحلیل مدل‌ها در جدول ۴ و شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده از سه معیار ارزیابی مدل برای داده‌های آموزش و آزمون مشاهده می‌شود که مدل با پارامترهای ورودی F_1 ، $(y_2-y_1)/y_1$ ، Z/y_1 بیشترین دقت را دارا است. ملاحظه می‌گردد که استفاده از پارامترهای $(y_2-y_1)/y_1$ و Z/h_1 در کنار عدد

نتایج حاصل از تحلیل مدل‌های مربوط به کانال واگرای ناگهانی

جهت انتخاب تابع کرنل مناسب رگرسیون فرآیند گاوسی، مدل $[F_1, (y_2-y_1)/y_1]$ در حالت کانال واگرای ناگهانی با بلوک مرکزی با کرنل‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. از سه معیار ارزیابی R ، NSE و $RMSE$ جهت تعیین مناسب‌ترین تابع کرنل استفاده شد. مطابق شکل ۲، نتایج نشان داد که تابع کرنل شعاع مداری (RBF) در تخمین میزان استهلاک انرژی نسبی ناشی از پرش هیدرولیکی نسبت به توابع کرنل دیگر بهتر عمل می‌کند. بنابراین، در تجزیه و تحلیل تمامی مدل‌ها از تابع کرنل RBF استفاده شد.

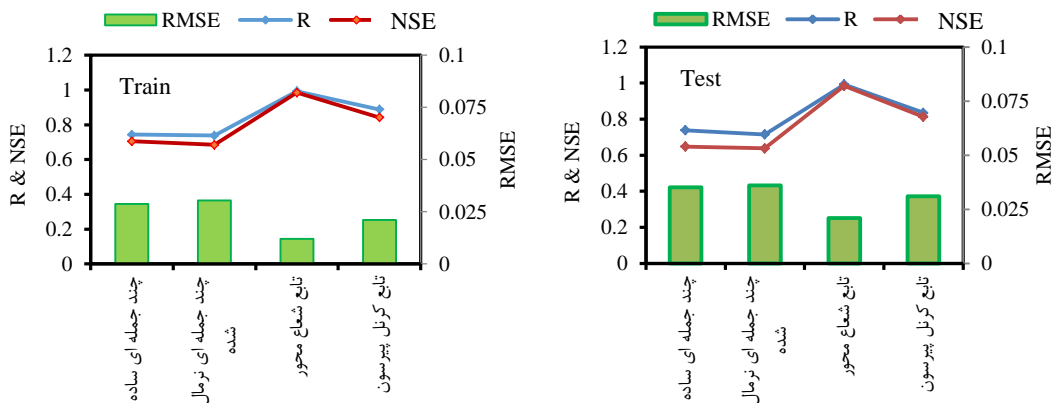
نتایج حاصل از تحلیل مدل‌ها در کانال واگرای ناگهانی با بلوک مرکزی به صورت جدول ۳ و شکل ۳ بیان شده است. با بررسی عملکرد معیارهای ارزیابی برای داده‌های آموزش و آزمون مطابق با جدول ۳، مشاهده می‌شود که مدل با پارامترهای ورودی F_1 و y_1/y_1 جهت تخمین استهلاک انرژی نسبی منجر به نتایج دقیق‌تری شده است. این مدل بیشترین همبستگی و ضریب تبیین و کمترین مقدار خطا را داراست. ملاحظه می‌گردد که استفاده از پارامترهای Z/y_1 و X/y_1 بر روی مدل‌سازی تاثیر داشته و باعث بهبود نتایج

داده‌های آموزش و آزمون برای کانال دوزنقه‌ای در شکل ۳ آورده شده است.

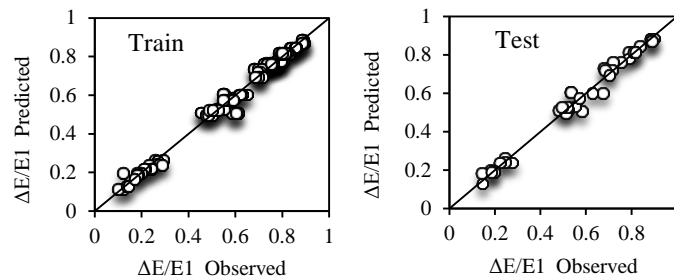
فرود باعث بهبود نتایج مدل‌ها شده است. وجود پارامتر Z/y_1 در مدل برتر بیان‌گر آن است که ارتفاع المان‌های زیر در تخمین میزان استهلاک انرژی نسبی تاثیرگذار است. نمودار مدل برتر برای سری

جدول ۳- نتایج مربوط به مدل‌های پیش‌بینی استهلاک انرژی نسبی در کانای واگرا

مدل	معیارهای ارزیابی					
	Train			Test		
	R	NSE	RMS E	R	NSE	RMSE
F_{r1}	۰/۹۱۵	۰/۹۰۸	۰/۰۳۰	۰/۹۱۰	۰/۹۰۵	۰/۰۳۷
$F_{r1}, (y_2-y_1)/y_1$	۰/۹۹۶	۰/۹۸۸	۰/۰۱۲	۰/۹۹۵	۰/۹۸۷	۰/۰۲۱
$F_{r1}, Z/ y_1$	۰/۹۱۸	۰/۹۳۱	۰/۰۲۷	۰/۹۱۲	۰/۹۲۴	۰/۰۳۳
$F_{r1}, X_s/y_1$	۰/۹۴۵	۰/۹۳۹	۰/۰۱۹	۰/۹۳۳	۰/۹۳۸	۰/۰۳۰
$F_{r1}, y_1/B$	۰/۹۹۹	۰/۹۹۰	۰/۰۱۴	۰/۹۹۶	۰/۹۷۹	۰/۰۲۴



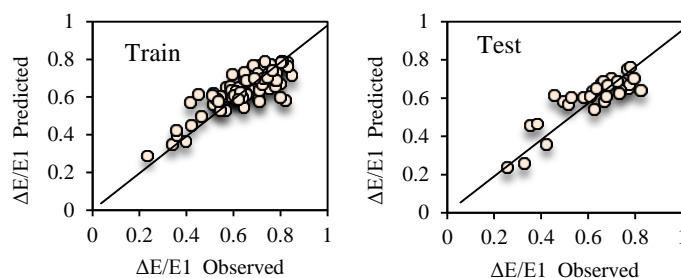
شکل ۲- پارامترهای آماری مدل GPR با توابع کرنل متفاوت- کانال واگرا



شکل ۳- رابطه خطی بین $\Delta E/E_1$ مشاهده شده و پیش‌بینی شده مدل برتر در کانال واگرا

جدول ۴- نتایج مربوط به مدل‌های پیش‌بینی استهلاک انرژی نسبی در کانال دوزنقه‌ای

مدل	معیارهای ارزیابی					
	Train			Test		
	R	NSE	RMS E	R	NSE	RMSE
F_1	۰/۹۱۵	۰/۸۲۸	۰/۰۷۱	۰/۹۱۰	۰/۸۱۰	۰/۰۸۴
$F_1, (y_2-y_1)/y_1$	۰/۹۱۸	۰/۸۳۷	۰/۰۶۶	۰/۹۱۵	۰/۸۱۷	۰/۰۸۰
$F_1, Z/ y_1$	۰/۹۱۶	۰/۸۳۱	۰/۰۶۸	۰/۹۱۲	۰/۸۱۵	۰/۰۸۲
$F_1, (y_2-y_1)/y_1, Z/ y_1$	۰/۹۴۹	۰/۸۹۱	۰/۰۵۶	۰/۹۴۲	۰/۸۶۴	۰/۰۶۸



شکل ۴- رابطه خطی بین $\Delta E/E_1$ مشاهده شده و پیش بینی شده مدل برتر در کانال دوزنقه ای

رگرسیون فرآیند گاوسی در تخمین میزان استهلاک انرژی در کانال مستطیلی موفق تر از کانال دوزنقه ای عمل کرده است.

تعیین میزان تاثیر نسبی پارامترها به روش آنالیز حساسیت حذفی

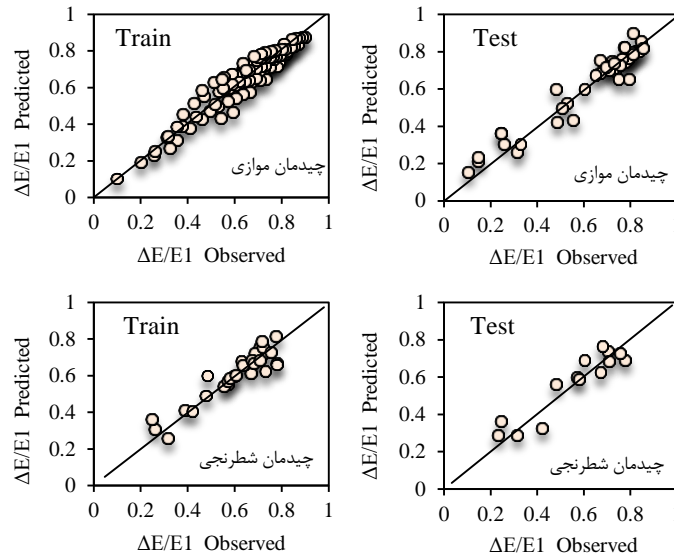
جهت بررسی تاثیر نسبی پارامترهای به کار رفته در مدل برتر هر نوع کانال آنالیز حساسیت به روش حذفی انجام گرفت. برای این منظور با حذف تک تک پارامترهای مدل برتر و اجرای دوباره مدل تعیین معیار ارزیابی RMSE به صورت درصد، میزان تاثیر پارامتر حذف شده در کاهش دقت مدل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از آنالیز حساسیت به صورت شکل ۶ ارائه گردیده است. در این شکل $\Delta RMSE$ میزان درصد خطای اضافه شده به مدل در اثر حذف پارامتر است. همانطور که از شکل مشخص است در تمام حالات در نظر گرفته شده، با حذف عدد فرود میزان درصد خطا تا حدود زیادی افزایش یافته است.

نتایج حاصل از تحلیل مدلها مربوط به کانال مستطیلی

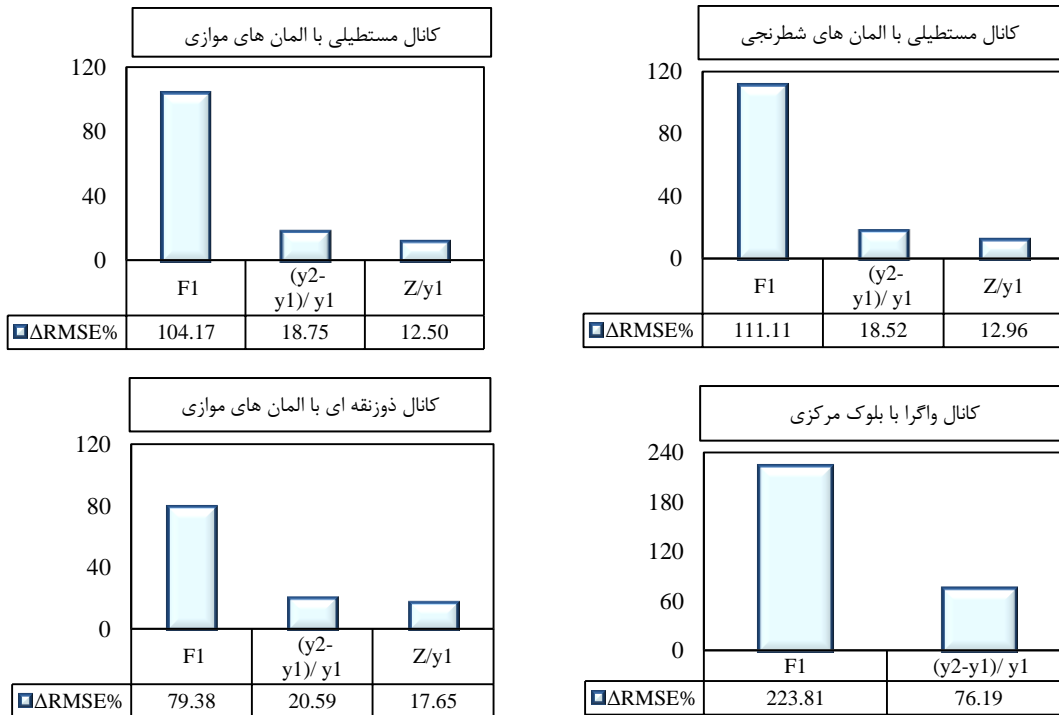
نتایج حاصل از تحلیل مدلها جهت تخمین میزان استهلاک انرژی در کانال مستطیلی دارای المانهای زبر با چیدمان موازی و شطرنجی به صورت جدول ۵ و شکل ۵ بیان شده است. نتایج حاصله نشان دهنده آن است که مدل های تعریف شده در کانال با المانهای زبر دارای چیدمان موازی منجر به نتایج دقیق تری گردیده است که با یافته های تحقیق اسدی و همکاران (۱۳۹۵) در مورد کانال با بستر زبر مطابقت دارد. به نظر می رسد که آرایش موازی المانها نسبت به آرایش شطرنجی المانها در میزان استهلاک انرژی تاثیر گذارتر است. برای هر دو کانال، مدل با پارامترهای $F_1, Z/y_1$ با داشتن کمترین خطا در بین تمامی مدلها بهترین نتایج را ارائه داده است. مطابق با نتایج مشاهده می گردد که در حالت کانال مستطیلی نیز پارامتر Z/y_1 که ارتفاع نسبی المانهای زبر را نشان می دهد کارایی مدل را تا حدودی افزایش داده است. با مقایسه نتایج جدول ۳ تا ۵ می توان بیان نمود که مدل های تعریف شده در کانال واگرای ناگهانی با بلوک مرکزی نسبت به دو کانال دیگر در تخمین استهلاک انرژی منجر به پیش بینی های دقیق تری گردیده اند. همچنین روش

جدول ۵- نتایج مربوط به مدل های پیش بینی استهلاک انرژی نسبی در کانال مستطیلی

مدل	معیارهای ارزیابی					
	Train			Test		
	R	NSE	RMS E	R	NSE	RMSE
المانهای زبر با چیدمان موازی						
F_1	۰/۹۶۶	۰/۹۲۰	۰/۰۲۷	۰/۹۴۱	۰/۸۹۸	۰/۰۶۶
$F_1, (y_2-y_1)/y_1$	۰/۹۹۰	۰/۹۷۵	۰/۰۳۱	۰/۹۸۹	۰/۹۴۹	۰/۰۵۴
$F_1, Z/y_1$	۰/۹۸۸	۰/۹۷۱	۰/۰۳۷	۰/۹۸۲	۰/۹۴۲	۰/۰۵۷
$F_1, (y_2-y_1)/y_1, Z/y_1$	۰/۹۹۸	۰/۹۸۰	۰/۰۲۵	۰/۹۹۳	۰/۹۵۱	۰/۰۴۸
المانهای زبر با چیدمان شطرنجی						
F_1	۰/۸۶۹	۰/۸۶۵	۰/۰۴۲	۰/۸۴۷	۰/۸۲۴	۰/۰۷۴
$F_1, (y_2-y_1)/y_1$	۰/۸۹۱	۰/۸۷۷	۰/۰۳۵	۰/۸۹۰	۰/۸۵۳	۰/۰۶۱
$F_1, Z/y_1$	۰/۸۸۹	۰/۸۷۴	۰/۰۴۲	۰/۸۸۴	۰/۸۴۸	۰/۰۶۴
$F_1, (y_2-y_1)/y_1, Z/y_1$	۰/۹۷۶	۰/۸۹۲	۰/۰۳۰	۰/۹۳۳	۰/۸۷۴	۰/۰۵۴



شکل ۵- رابطه خطی بین $\Delta E/E_1$ مشاهده شده و پیش‌بینی شده مدل برتر در کانال دوزنقه‌ای



شکل ۶- میزان تاثیر نسبی هر یک از پارامترهای ورودی به ازای حذف آن‌ها از مدل برتر

نتیجه‌گیری

در تحقیق کنونی به تخمین استهلاك انرژی ناشی از پرش هیدرولیکی در کانال‌های مرکب (مستطیلی، واگرای ناگهانی و دوزنقه‌ای) دارای المان‌های زیر متفاوت (المان‌های منشوری با چیدمان موازی و شطرنجی و بلوک مرکزی) با استفاده از روش هوشمند GPR پرداخته شد. ابتدا با استفاده از آنالیز حساسیت

بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که عدد فرود بیشترین تاثیر را در تخمین استهلاك انرژی ناشی از پرش هیدرولیکی داراست که با نتایج حاصل از تحقیق گوپتا و همکاران (Gupta et al., 2013) و فینمور و همکاران (Finnemore et al., 2002) مطابقت دارد. پارامترهای Z/y_1 و $(y_2 - y_1) / y_1$ به ترتیب دومین و سومین پارامتر تاثیرگذار بر روی استهلاك انرژی هستند.

Babaali, H., Shamsai, A. and Vosoughifar, H. 2015. Computational modeling of the hydraulic jump in the stilling basin with convergence walls using CFD codes. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40(2): 381-95.

Bremen, R. 1990. Expanding Stilling Basin. *Laboratoire de Constructions Hydrauliques, Lausanne, Switzerland*.

Elevatorski, E. A. 2008. Hydraulic Energy Dissipators. McGraw-Hill, New York.

Evciimen, T. U. 2012. Effect of prismatic roughness on hydraulic jump in trapezoidal channels. (Doctoral dissertation), Middle East Technical University.

Evciimen, T. U. 2005. The effect of prismatic roughness elements on hydraulic jump: The degree master of science. Middle East technical University.

Finnemore, J. E. & Franzini, B. J. 2002. Fluid mechanics with engineering applications. McGraw-Hill, New York, NY, 790.

Gupta, S.K., Mehta R.C., & Dwivedi, V.K. 2013. "Modeling of relative length and relative energy loss of free hydraulic jump in horizontal prismatic channel", *Procedia Engineering*, 51: 529-537.

Hager, W. H. & Bremen, R. 1989. Classical Hydraulic Jump: Sequent Depths. *Journal of Hydraulic Research*, 27(5): 565-85.

Khan, M. S & Coulibaly, P. 2006. Application of Support Vector Machine in Lake Water Level Prediction. *J. Hydrol. Eng*, 11 (3): 199-205.

Koloseus, H.J., Ahmad, D. 1969. Circular hydraulic jump. *Journal of the Hydraulics Division*, 2(10): 775-780.

Mohammad, Z. K., Beheshti, A. A., Behzad, A. A. and Sabbagh-Yazdi, S. R. 2009. Estimation of current-induced scour depth around pile groups using neural network and adaptive neuro-fuzzy inference system. *Applied Soft Computing*, 9(2): 746-755.

Neal, R.M., 1997. Monte Carlo implementation of gaussian process models for bayesian regression and classification, University of Toronto, Toronto: Department of Statistics and Department of Computer Science, Technical report, no. 9702.

Palermo, M. and Pagliara, S. 2018. Semi-theoretical approach for energy dissipation estimation at hydraulic jumps in rough sloped channels. *Journal of Hydraulic Research*, 21: 1-10.

Ranga Raju, K. G., Mittal, M. K., Verma, M. S. & Ganeshan, V. R. 1980. Analysis of Flow over Baffle Blocks and End Sills. *Journal of Hydraulic Research*, 18(3): 227-241.

Roushangar, K. and Ghasempour, R. 2017 Prediction of non-cohesive sediment transport in circular channels in deposition and limit of deposition

فاکتوریل پارامترهای دارای همبستگی بیشتر با استهلاک انرژی تعیین شد. سپس با استفاده از این پارامترها که شامل مشخصات جریان در بالادست و پایین دست پرش هیدرولیکی و هندسه مان‌های زبر بودند، مدل‌های متفاوتی تعریف گردید و نحوه‌ی تاثیر نوع کانال و مان‌های زبر به کار رفته در آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله نشان داد که در حالت کانال دوزنقه‌ای و مستطیلی، مدل با پارامترهای ورودی $F_1, (y_2-y_1)/y_1, Z/y_1$ بیشترین کارایی را دارد. برای کانال مستطیلی، مدل‌های تعریف شده در کانال با مان‌های زبر دارای چیدمان موازی منجر به نتایج دقیق‌تری نسبت به مان‌های دارای چیدمان شطرنجی شد. در کانال واگرای ناگهانی با بلوک مرکزی نیز مدل با پارامترهای ورودی F_1 و $(y_2-y_1)/y_1$ منجر به نتایج دقیق‌تری گردید. ملاحظه شد که استفاده از پارامترهای $X/y_1, Z/y_1$ و y_1/B در کنار عدد فرود باعث بهبود نتایج مدل‌ها می‌شوند و مشخصات مان‌های زبر در بستر کانال در تخمین استهلاک انرژی نسبی تاثیرگذار هستند. نتایج حاصله نشان داد که با استفاده از روش GPR تنها با داشتن مشخصات جریان در بالادست پرش هیدرولیکی می‌توان میزان استهلاک انرژی را با دقت مطلوبی تخمین زد. همچنین مشخص گردید که مدل‌های تعریف شده در کانال واگرای ناگهانی با بلوک مرکزی نسبت به کانال‌های مستطیلی و دوزنقه‌ای در تخمین استهلاک انرژی موفق‌تر هستند. نتایج حاصل از آنالیز حساسیت به روش‌های فاکتوریل و حذفی نشان داد که میزان استهلاک انرژی بیشترین همبستگی را با عدد فرود داشته و در صورت حذف آن خطای مدل تا حدود زیادی افزایش خواهد یافت. در حالت کلی نتایج نشان داد که روش مبتنی بر کرنل دارای کارایی بالایی در محاسبه پارامتر استهلاک انرژی نسبی در انواع کانال‌ها است. با این حال، لازم به ذکر است که روش GPR یک روش داده-گرا بوده و نسبت به داده‌ها حساس است، بنابراین پیشنهاد می‌شود تا مطالعات بیشتری با استفاده از داده‌های میدانی و داده‌هایی با محدوده‌ی متفاوت از داده‌های این آزمایش انجام گیرد تا کارایی آن در تخمین میزان استهلاک انرژی به خوبی مشخص گردد.

منابع

اسدی، ف. فضل اولی، ر. عمادی، ع. ۱۳۹۵. مطالعه آزمایشگاهی استهلاک انرژی و طول پرش هیدرولیکی در شرایط بستر زبر با بلوک‌های مکعبی در پایین دست دریاچه کشویی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۱(۴): ۵۹۷-۶۰۸.

بدیع زادگان، ر. اسماعیلی، ک. فغفورمغربی، م. صانعی، س.م. ۱۳۹۰. مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش کانال‌های آبیاری با بستر موج دار. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۵(۳): ۶۷۶-۶۸۷.

Siviapragasam, C. and Liong S. 2001. Rainfall and runoff forecasting with SSA-SVM approach. *Journal of Hydroinformation*, 3: 141-152.

Wang, H. and Murzyn, F. 2017. Experimental assessment of characteristic turbulent scales in two-phase flow of hydraulic jump: from bottom to free surface. *Environmental Fluid Mechanics*, 17(1): 7-25.

states using SVM. *Journal of Water Science & Technology: Water Supply*, 17(2): 537-551.

Shiri, J., Kisi, O. 2011. Comparison of genetic programming with neuro-fuzzy systems for predicting short-term water table depth fluctuations. *Journal of Comput. Geosci*, 37 (10): 1692–1701.

Simsek, C. 2006. Forced hydraulic jump on artificially roughned beds (M.Sc. thesis). Middle East Technical University, Department of Civil Engineering, Ankara, Turkey.

Comparative Study of Effective Parameters on Relative Energy Dissipation in Channels with Different Shapes based on Factorial Analysis and Intelligent GPR Method

K. Roushangar¹, R. Ghasempour², S.M. Saghebani^{3*}

Received: Aug.21, 2019

Accepted: Des.01, 2019

Abstract:

Accurate estimation of hydraulic jump characteristics such as energy dissipation amount has significant impact on optimum design of hydraulic structures. In this study, hydraulic jump relative energy dissipation was investigated in different sections channels (containing rectangular, sudden expanding, and trapezoidal sections) with different rough elements and with different arrangement using Gaussian Process Regression (GPR). In this regard, the parameters which had most correlation with energy dissipation were determined using factorial analysis. Then, different models were developed and using experimental data the impact of channel type and rough elements on energy dissipation was investigated. The obtained results of models analyzing showed the high efficiency of applied method in estimation of energy dissipation. It was observed that developed model in expanding channel with central block led to more accurate results in comparison with two others channels. For this channel, the model with input parameters of F_1 and $(y_2-y_1)/y_1$ was selected as superior model and the best result for test series was obtained the values of $R=0.995$, $NSE =0.987$ and $RMSE=0.021$. Also, it was observed that the channel rough elements characteristics had impact on predicting the relative energy dissipation and between two rough elements with strain and staggered arrangement, the obtained results for strain state were more accurate. According to the results of both factorial and omitted sensitivity analysis it was indicated that Froude number is the most significant parameter in estimation of relative energy dissipation.

Keywords: Energy dissipation, Expanding channel, Factorial analysis, GPR, Rough element.

1- Water Department, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

2- Water Department, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

3- Department of Civil Engineering, Technical Faculty, Islamic Azad University of Ahar Branch, Ahar - Iran

(*- Corresponding Author Email: smsaghebani@gmail.com)