

پیش‌بینی مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش واگرای ناگهانی با استفاده از روش الگوریتم تکاملی

حوضچه‌های آرامش واگرای ناگهانی یکی از سازه‌های مستهلک کننده انرژی می‌باشند که بخش زیادی از انرژی سینماتیکی جریان را از طریق پرش هیدرولیکی، مستهلک می‌کنند. تخمین دقیق مشخصات پرش هیدرولیکی نقش مهمی در طراحی بهینه سازه‌های هیدرولیکی دارند. در این مقاله، کارایی روش برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) در تخمین مشخصات پرش هیدرولیکی در سه نوع کانال واگرا (ساده، دارای پله معکوس، دارای بلوک مرکزی) مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور، مدل‌های مختلف، تعریف و مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله ضمن تأیید قابلیت روش به‌کاررفته در تحقیق، برتری این روش را نسبت به روابط کلاسیک در تخمین مشخصات پرش هیدرولیکی به اثبات رساند. همچنین مشخص گردید که مدل با پارامترهای Fr_1 و $(h_2 - h_1)/h_1$ در تخمین طول پرش و مدل با پارامترهای h_1/B و Fr_1 در تخمین نسبت اعماق متناوب و استهلاک انرژی، بیشترین تأثیر را در پیش‌بینی مشخصات پرش هیدرولیکی دارد.

واژگان کلیدی: برنامه‌ریزی بیان ژن، بلوک مرکزی، پله معکوس، پرش هیدرولیکی، حوضچه آرامش واگرا.

کیومرث روشنگر*

دانشیار، دانشکده فنی مهندسی
عمران، دانشگاه تبریز.
پست الکترونیک:
kroshangar@yahoo.com

ریحانه ولیزاده

دانشجوی کارشناسی ارشد
عمران، دانشکده فنی مهندسی
عمران، دانشگاه تبریز.
پست الکترونیک:
reayhneh_valizdh_rvacivil@yahoo.com

رقیه قاسم‌پور

دانشجوی کارشناسی ارشد
عمران، دانشکده فنی مهندسی
عمران، دانشگاه تبریز.
پست الکترونیک:
r.ghasempour93@ms.tabrizu.ac.ir

۱- مقدمه

یکی از روش‌های متداول استهلاک انرژی جنبشی جریان در پایین‌دست 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 فوق‌بحرانی 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 به‌اندازه قابل توجهی کاسته می‌شود. ابعاد حوضچه آرامش

به مشخصات پرش هیدرولیکی به‌خصوص طول و عمق ثانویه پرش هیدرولیکی بستگی دارد. پارامترهایی چون طول پرش، نسبت عمق ثانویه به عمق اولیه و 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. به‌منظور عملکرد بهینه حوضچه آرامش، لازم است پرش کاملاً در حوضچه رخ دهد که به عمق آب پایین‌دست بستگی دارد. اگر به هر دلیلی تأمین عمق مورد نیاز برای وقوع پرش هیدرولیکی کلاسیک میسر نباشد و یا هزینه‌های حفاری به‌منظور پایین آوردن کف حوضچه مقرون‌به‌صرفه نباشد؛ یکی از راه‌های حصول اطمینان از

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۶/۱۱، بازنگری: ۱۳۹۵/۱۲/۲۶، پذیرش: ۱۳۹۶/۰۱/۱۸
(DOI): 10.22091/cer.2017.1293.1056 شناسه دیجیتال

برنامه‌ریزی ژنتیک، ماشین بردار پشتیبان، مدل‌های فازی) برای شبیه‌سازی رفتار سیستم‌ها در زمینه مهندسی آب مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این روش‌ها الهام گرفته از پدیده‌های موجود در طبیعت بوده و معمولاً دارای جواب بهتری نسبت به روش‌های کلاسیک می‌باشند.

تاکنون روش برنامه‌ریزی بیان ژن (GE^4) جهت تخمین پارامترهای مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است که عبارت‌اند از پیش‌بینی بار کل رسوبی توسط روش‌نگر و همکاران [۵]، پیش‌بینی بارش- رواناب توسط کیسی^۵ و همکاران [۶]، مدل‌سازی افت انرژی در سرریزها توسط روش‌نگر و همکاران [۷]، پیش‌بینی عمق آب‌های زیرزمینی توسط شیری و کیسی [۸] و پیش‌بینی سری‌های زمانی دبی توسط ونگ^۶ و همکاران [۹].

در تحقیق حاضر، سعی گردیده است تا کارایی روش برنامه‌ریزی بیان ژن به‌عنوان روش فرامدل در تخمین مشخصات پرش هیدرولیکی در کانال‌های واگرایی ناگهانی در سه شکل مختلف به‌صورت ساده، دارای پله معکوس و بلوک مرکزی مورد بررسی قرار گیرد. بنابراین، مدل‌های ورودی متفاوتی براساس دو سری داده آزمایشگاهی تعریف گردید تا تأثیر مدل‌سازی متفاوت در تعیین مشخصات هیدرولیکی تعیین گردد. سپس با استفاده از آنالیز حساسیت، پارامترهای مؤثر در تخمین این مشخصات مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- سری داده‌های مورد استفاده در تحقیق

در تحقیق حاضر، از داده‌های آزمایشگاهی برمن^۷ و گاندی^۸ استفاده شده است [۱۰ و ۱۱]. برمن، آزمایش‌هایی را مطابق شکل ۱ در مورد پرش هیدرولیکی

تشکیل پرش در حوضچه، استفاده از واگرایی مقطع می‌باشد. پرش هیدرولیکی در مقاطع واگرا با شرایط جریان ورودی که عبارت‌اند از عمق اولیه پرش، عدد فرود جریان ورودی و پنجه پرش (فاصله عمق اولیه پرش از محل تغییر مقطع) توصیف می‌شود. تاکنون در مورد پرش هیدرولیکی در کانال‌های واگرا مطالعات متعددی صورت پذیرفته و روابط متعددی ارائه شده‌اند. بختیاری، پارامترهای پرش هیدرولیکی در مقاطع واگرا و تأثیر افزایش زاویه واگرایی را بر روی پارامترهای پرش هیدرولیکی مورد بررسی قرار داد [۱]. کلوسیوس و احمد^۱، 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 [۲]. هربراند^۲، با توجه به فشار هیدرولیکی و پراکندگی یکنواخت سرعت، فرمول مومنتم را پیشنهاد داد. در این فرمول، تأثیر اصطکاک، نادیده گرفته شده و انتهای کانال به‌صورت افقی فرض شده بود [۳]. گوپتا^۳ و همکاران، نسبت طول و نسبت استهلاك 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 استهلاك انرژی بیشتر می‌شوند [۴].

کاربرد بسیاری از مدل‌های کلاسیک، محدود به مواردی است که شامل فرضیات و شرایط توسعه و استخراج فرمول‌ها باشند و برای تمامی موارد نمی‌توان از آن‌ها استفاده کرد. از آنجاکه 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 به‌نظر می‌رسد. در دهه‌های اخیر، روش‌های محاسباتی نرم (مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی،

4- Gene Expression Programming

5- Kisi

6- Wang

7- Bremen

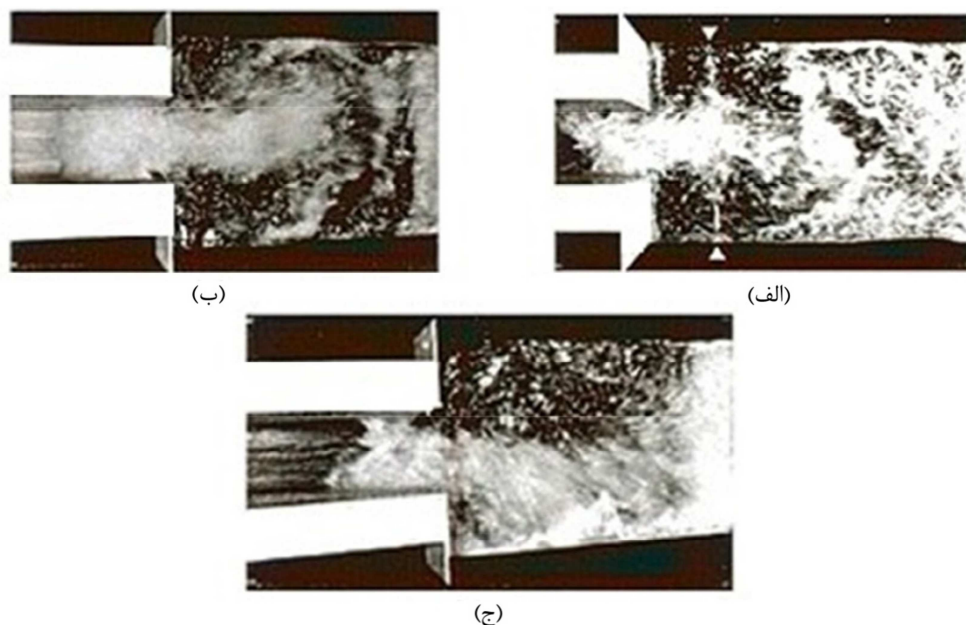
8- Gandhi

1- Koloseus and Ahmad

2- Herbrand

3- Gupta

نیز آزمایش‌هایی را در کانال افقی متقارن به ابعاد $۱/۲ \times ۴۴۵ \times ۲/۱$ متر انجام داده و به بررسی مشخصات پرش هیدرولیکی در کانال واگرای صاف پرداخت. در جدول ۱ محدوده‌ی مشخصات هیدرولیکی و هندسی این آزمایش‌ها نشان داده شده است. شکل ۲ نیز بیانگر شماتیک آزمایشات انجام گرفته می‌باشد.



شکل ۱- پرش هیدرولیکی در حوضچه واگرای ناگهانی. (الف) کانال ساده، (ب) کانال با پله معکوس و (ج) کانال با بلوک مرکزی.

۲-۲- برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)

به‌سبب وجود آن‌ها بهره‌بردار. باوجوداینکه فنوتیپ در GEP، همان نوع از ساختارهای شاخه‌ای مورد استفاده در GP را شامل می‌شود، اما ساختارهای شاخه‌ای که به‌وسیله GEP استنتاج می‌شوند (که بیان درختی نیز نامیده می‌شوند)، مبین تمامی ژنوم‌های مستقل هستند. بنابراین موضوع قابل‌توجه در GEP این است که دومین آستانه تکاملی یعنی آستانه فنوتیپ عبور داده می‌شود و این بدان معنا است که در طول تولیدمثل، تنها ژنوم که اندکی اصلاح شده، برای نسل بعد عبور داده می‌شود و در نتیجه نیازی به ساختارهای نسبتاً سنگین برای تکثیر شدن و جهش نیست، به‌طوری‌که تمامی بهسازی‌ها در یک ساختار خطی ساده که بعداً داخل یک بیان درختی بزرگ می‌شود، اتفاق می‌افتد. راه‌حل اصلی برنامه‌ریزی بیان ژن به‌طور شماتیک در شکل ۳ نشان داده شده است.

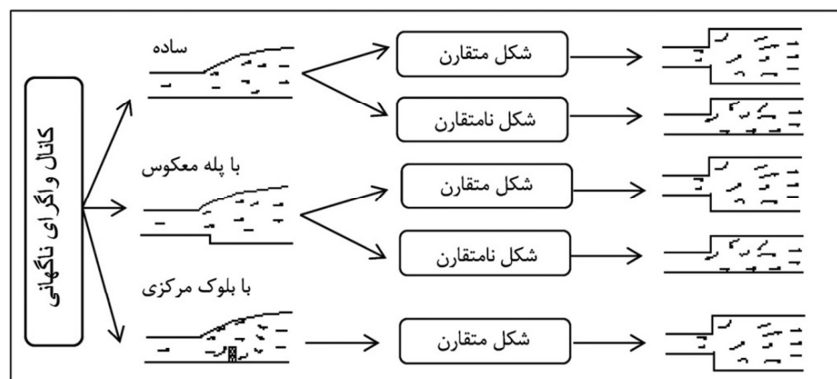
برنامه‌ریزی بیان ژن، توسط فریرا^۹ در سال ۱۹۹۹ ابداع شد [۱۲]. در این برنامه، کروموزوم‌های خطی و ساده با طول ثابت، مشابه با آنچه در الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود و ساختارهای شاخه‌ای با اندازه‌ها و اشکال متفاوت، مشابه با درختان تجزیه در برنامه‌ریزی ژنتیک، ترکیب می‌شوند. از آنجاکه تمامی ساختارهای شاخه‌ای با اندازه‌ها و اشکال متفاوت، در کروموزوم‌های خطی با طول ثابت کدگذاری می‌شوند؛ معادل این است که در GEP، ژنوتیپ و فنوتیپ سرانجام از یکدیگر جدا شده و اکنون سیستم می‌تواند از تمام مزایای تکاملی

^۹ Ferreria

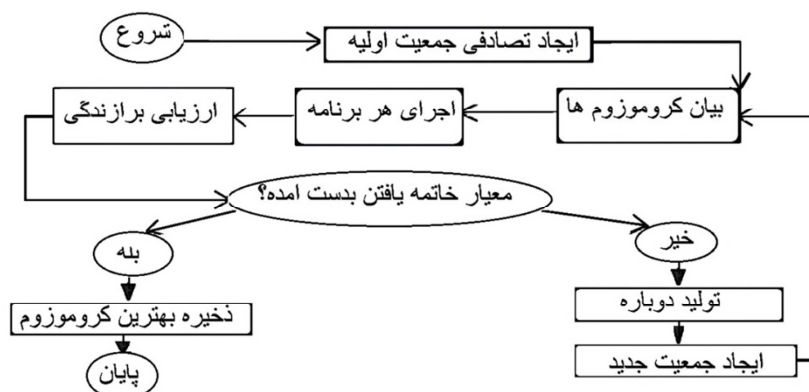
پیش‌بینی مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش واگرای ناگهانی با استفاده از روش الگوریتم تکاملی

جدول ۱- محدوده‌ی داده‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها.

تعداد داده‌ها	شکل کانال	ارتفاع نسبی پله N(s/h ₁)		ارتفاع نسبی بلوک S		موقعیت بلوک Xs (cm)		نسبت اعماق متناوب h ₂ /h ₁	دبی جریان Q (l/s)	نسبت انبساط B (b ₂ /b ₁)	عدد فرود Fr ₁	سری داده‌ها	محقق	شرایط کانال	
		تا	از	تا	از	تا	از								
۱۶۲	نامتقارن	-	-	-	-	-	-	۲/۲-۱۱/۲۶	۲-۱۸/۱	۵	۲/۶۳-۸/۱۲	۱	Bremen (1990)	ساده	
۱۷۸	مقارن	-	-	-	-	-	-	۲/۱۸-۱۰/۲۸	۵/۱-۲۶/۹	۳	۲/۶۳-۸/۰۵	۲			
۹۱	نامتقارن	-	-	-	-	-	-	۳/۴۶-۱۲/۰۵	۱۰-۴۰	۱/۵	۲/۶۵-۸/۱۳	۳			
۸	مقارن	-	-	-	-	-	-	۲-۸	۶/۴۴-۱۵	۰/۴	۲-۹	۱	Gandhi (2014)		ساده
۸	مقارن	-	-	-	-	-	-	۲-۹	۱۲/۳-۱۲/۸	۰/۵	۲-۹	۲			
۸	مقارن	-	-	-	-	-	-	۲-۹/۵	۶/۴۴-۱۰/۶	۰/۶	۲-۹	۳			
۸	مقارن	-	-	-	-	-	-	۲-۱۰	۶/۳-۹/۸	۰/۸	۲-۹	۴			
۱۰۵	نامتقارن	۱/۶۴	۰/۶۱	-	-	-	-	۴/۱۵-۱۲/۵۹	۱۱-۳۹/۵	۱/۵	۳/۲-۸/۴۳	۱	Bremen (1990)	با پله معکوس	
۱۱۲	نامتقارن	۱/۶۱	۰/۵۹	-	-	-	-	۴/۱۵-۱۲/۵۹	۱۱-۳۹/۵	۲	۲/۶۸-۸/۱۲	۲			
۱۲۹	مقارن	۱/۶۶	۰/۴۹	-	-	-	-	۱/۴۵-۱۱/۰۵	۴/۳-۲۴	۳	۲/۰۵-۷/۳۷	۳			
۷۸	مقارن	-	-	۳	۰/۶	۸۰	۲۰	۲/۸۹-۸/۸۱	۳۱-۲۲۵	۳	۳، ۵، ۷، ۹	۱	Bremen (1990)	با بلوک مرکزی	
۷۵	مقارن	-	-	۳	۰/۶	۸۰	۲۰	۳/۰۷-۹/۸۸	۳۱-۲۲۵	۲	۳، ۵، ۷، ۹	۲			
۶۰	مقارن	-	-	۳	۰/۶	۸۰	۲۰	۳/۱۵-۱۰/۶۳	۳۱-۲۲۵	۱/۵	۳، ۵، ۷، ۹	۳			



شکل ۲- شماتیک آزمایشات انجام گرفته.



شکل ۳- شماتیک برنامه‌ریزی بیان ژن.

۳-۲- معادلات نیمه تجربی تخمین پارامتر طول پرش هیدرولیکی و نسبت اعماق متناوب

تاکنون روابط نیمه تجربی محدودی برای برآورد طول پرش هیدرولیکی و نسبت اعماق متناوب ارائه گردیده که هر کدام با توجه به شرایط خاص جریان، به کار می‌روند. روابط استفاده شده در این تحقیق در جدول ۲ آمده است.

۴-۲- معیارهای ارزیابی

به منظور ارزیابی کارایی روش استفاده شده برای تخمین مشخصات هیدرولیکی در کانال واگرا (نسبت اعماق متناوب، طول پرش و میزان استهلاك انرژی)، در این مقاله از سه پارامتر آماری مطابق جدول ۳ استفاده

گردیده است. در این روابط، R ، ضریب همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی، DC^{10} ، همبستگی خطی بین مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی و $RMSE^{11}$ ، ریشه میانگین مربعات خطاها می‌باشد. هر چه مقدار R و DC به یک نزدیک‌تر و مقدار $RMSE$ برای یک مدل، کوچک‌تر باشد به معنی مطلوب بودن آن مدل می‌باشد.

در روابط جدول ۳، L_m ، مشخصه پرش هیدرولیکی اندازه‌گیری شده، $\bar{L}_m$ ، متوسط مشخصه پرش هیدرولیکی اندازه‌گیری شده، L_p ، مشخصه پرش هیدرولیکی پیش‌بینی شده، $\bar{L}_p$ ، متوسط مشخصه پرش هیدرولیکی و N تعداد داده‌ها می‌باشد. یک نکته مهم در آموزش شبکه‌های عصبی، نرمال‌سازی داده‌ها قبل از استفاده در مدل می‌باشد. این عمل، خصوصاً وقتی دامنه تغییرات

¹⁰- Determination Coefficient

¹¹- Root Mean Summation of Square Error

ورودی‌ها زیاد باشد؛ کمک شایانی به آموزش بهتر و سریع‌تر مدل می‌کند.

جدول ۲- معادلات نیمه تجربی برای محاسبه طول پرش هیدرولیکی و نسبت اعماق متناوب.

پارامتر	محقق	معادله	ملاحظات	شماره‌ی معادله
نسبت اعماق متناوب	Kusnetzow	$Y = \frac{0.5}{B} K_K \left[\sqrt{1 + 8BFr_1^2} - 1 \right]$	$K_K = 0.8 - \left(0.9 - \frac{1}{B} \right) \times 0.15$	(۱)
	Herbrand	$Y = Fr_1 \sqrt{\frac{2}{B} - \frac{1}{2B}}$	$Y = h_2 / h_1$	(۲)
طول پرش هیدرولیکی	Smetana	$Lj = 6Hj$	$Hj = h_2 - h_1$	(۳)
	Safranez	$Lj = 6h_1 Fr_1$	-	(۴)
	Bakhmateff and Matezke	$Lj = 5Hj$	-	(۵)
	Hager	$Lj = \left\{ 1 + \left(1 - \frac{1}{\sqrt{B}} \right) \times \left[1 - th(1.9X_1) \right] \right\} Lj^*$	$Lj^* = h_1 \times 220 \times th \left(\frac{Fr_1 - 1}{22} \right)$	(۶)
	Silvester	$Lj = 6.02Hj$	-	(۷)

جدول ۳- معیارهای ارزیابی مدل.

ضریب تعیین	ضریب همبستگی	جذر میانگین مربعات خطاها
$R = \frac{\sum_{i=1}^N (L_m - \bar{L}_m) \times (L_p - \bar{L}_p)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (L_m - \bar{L}_m)^2 \times (L_p - \bar{L}_p)^2}}$	$DC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (L_m - L_p)^2}{\sum_{i=1}^N (L_m - \bar{L}_m)^2}$	$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(L_m - L_p)^2}{N}}$

حاصل از تحلیل تأثیر گذارد، لذا سعی گردید در مدل‌سازی GEP، پارامترهای مناسب و مؤثر در تعیین مشخصات هیدرولیکی انتخاب گردد. شکل ۴ شامل جزئیات کانال‌های واگرایی بدون مانع و با پله‌ی معکوس و بلوک مرکزی می‌باشد.

مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در الگوی پرش در کانال‌های واگرایی می‌توانند به‌صورت رابطه زیر بیان گردند:

$$f(h_1, h_2, V_1, L_j, E_L, \mu, g, \rho, b_1, b_2, s) = 0 \quad (9)$$

که در آن h_1 و h_2 به‌ترتیب، عمق اولیه و ثانویه پرش، V_1 سرعت جریان قبل از پرش، L_j طول پرش، E_L استهلاک انرژی، μ ویسکوزیته دینامیکی جریان، g شتاب ثقل، b_1 و b_2 عرض کانال قبل و بعد از مقطع انبساط و s ارتفاع پله یا بلوک می‌باشد.

اصولاً وارد کردن داده‌ها به‌صورت خام، باعث کاهش سرعت و دقت شبکه می‌شود. بنابراین، برای نرمال‌سازی داده‌های تحقیق از رابطه (۸) استفاده شده است:

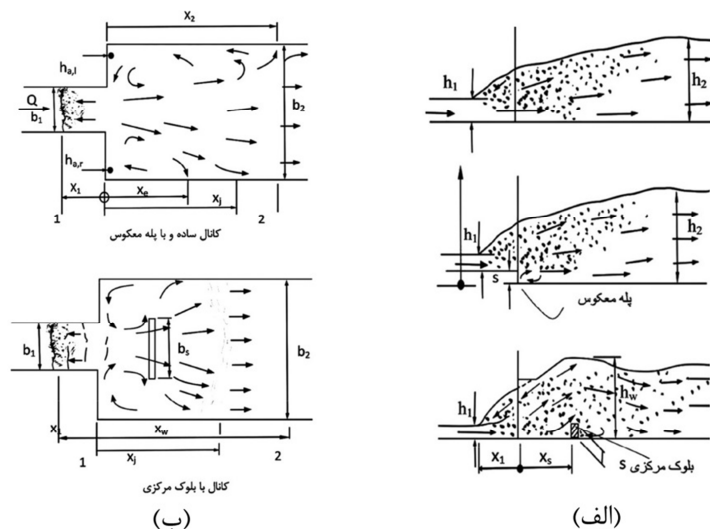
$$x_n = 0.1 + 0.9 \times \left(\frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \right) \quad (8)$$

در رابطه (۸)، x_{min} و x_{max} به‌ترتیب حداقل و حداکثر مقدار داده‌های مشاهده شده و x_n داده نرمال شده می‌باشد.

۳- شبیه‌سازی و نتایج و بحث

۳-۱- تعریف مدل‌های ورودی

با توجه به اینکه انتخاب مدل‌های ورودی در سامانه‌های هوشمند می‌تواند بر روی دقت جواب‌های



شکل ۴- مقطع واگرای ناگهانی. (الف) نمای جانبی و (ب) نمای پلان.

۳-۲- پارامترهای مدل‌های GEP

روند تعیین مدل‌های تخمین مشخصات پرش هیدرولیکی با استفاده از روش برنامه‌ریزی بیان ژن شامل پنج مرحله می‌باشد؛ که به ترتیب، شامل تعیین تابع برازش، انتخاب مجموعه ترمینال‌ها و مجموعه توابع، انتخاب ساختار کروموزوم‌ها که شامل طول سر و تعداد ژن‌ها است، انتخاب تابع پیوند که تعیین‌کننده پیوند بین ریز درخت‌ها می‌باشد و مرحله آخر انتخاب عملگرهای ژنتیکی و نرخ آنها می‌باشد. ترکیبی از عملگرهای ژنتیکی (جهش، وارون‌سازی، ترکیب ترانهش) مطابق جدول ۵ استفاده گردیده است. لازم به ذکر است که در آنالیز مدل‌ها از ۷۵ درصد داده‌ها جهت آموزش و ۲۵ درصد دیگر جهت آزمون مدل‌ها استفاده گردیده است.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- نسبت اعماق متناوب در کانال واگرا

نتایج آنالیز مدل‌ها در تخمین نسبت اعماق متناوب در جدول ۶ و شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از سه معیارهای ارزیابی مدل برای داده‌های آموزش و آزمون، مشاهده می‌شود که بین سه

با استفاده از آنالیز ابعادی و در نظر گرفتن μ ، ρ و g به عنوان پارامترهای تکراری، رابطه (۹) می‌تواند به صورت زیر بیان گردد:

$$f\left(\frac{h_2}{h_1}, \frac{E_2}{E_1}, \frac{L_j}{h_1}, \frac{b_1}{h_1}, \frac{b_2}{h_1}, \frac{v_1^2}{gh_1}, \frac{\rho v_1 h_1}{\mu}, \frac{s}{h_1}\right) = 0 \quad (10)$$

رابطه بالا نیز به صورت رابطه (۱۱) بیان می‌شود:

$$f\left(\frac{h_2}{h_1}, \frac{E_2}{E_1}, \frac{L_j}{h_1}, B, Fr_1, R_n, \frac{s}{h_1}\right) = 0 \quad (11)$$

که در آن Fr_1 عدد فرود جریان، R_n عدد رینولدز و B نسبت انبساط می‌باشد. از طرفی مطالعات صورت گرفته توسط الواتورسکی^{۱۲} و رانگوراجو^{۱۳}، بیانگر آن است که مشخصات پرش هیدرولیکی وابسته به عدد فرود بوده و عدد رینولدز تأثیر چندانی در تعیین این مشخصات ندارد [۱۳ و ۱۴]. همچنین هاگر^{۱۴}، نشان داد که طول پرش وابسته به ارتفاع پرش و عدد فرود می‌باشد [۱۵]. بنابراین در این تحقیق، مدل‌هایی مطابق با جدول ۴ جهت تعیین مشخصات پرش هیدرولیکی در کانال‌های واگرای ناگهانی در نظر گرفته شد.

¹²- Elevatorski

¹³- Ranga Raju

¹⁴- Hager

کانال، مدل‌های تعریف شده برای حوضچه آرامش با بلوک مرکزی نتایج دقیق‌تری را نسبت به دو کانال دیگر ارائه داده است و در بین مدل‌ها، مدل S(II) با پارامترهای ورودی Fr_1 و h_1/B بیشترین کارایی را دارا می‌باشد. این مدل، برای دو حالت دیگر کانال واگرا نیز مدل برتر می‌باشد.

جدول ۴- مدل‌های تعریف‌شده.

پارامترهای ورودی	مدل	پارامتر خروجی
نسبت اعماق متناوب h_2/h_1	S(I)	Fr_1
	S(II)	$Fr_1, h_1/B$
	S(III)	$Fr_1, S/h_1$
	S(IV)	Fr_1, B
طول پرش هیدرولیکی L_j/h_1	L(I)	Fr_1
	L(II)	$Fr_1, (h_2-h_1)/h_1$
	L(III)	$Fr_1, h_2/h_1$
	L(IV)	$Fr_1, S/h_1$
	L(V)	Fr_1, B
استهلاک انرژی نسبی E_L/E_1	E(I)	Fr_1
	E(II)	$Fr_1, h_1/B$
	E(II)	$Fr_1, S/h_1$

جدول ۵- پارامترهای مدل‌های GEP مورد استفاده.

تنظیمات پارامتر	توصیف پارامتر
$X^2, X^3, \tan^{-1}, \sin, \cos, e^x, \sqrt{x}, \otimes, \div, +$	Function set
۳۰	Chromosomes
۷	Head size
۳	Number of genes
Addition	Linking function
Root Mean Square Error (RMSE)	Fitness function error
۰/۰۴۴	Mutation rate
۰/۱	Inversion, IS and RIS transposition rate
۰/۳	One and Two-point recombination rate
۰/۱	Gene recombination and transposition rate

در دو حالت متقارن و نامتقارن نشان‌دهنده آن است که روش برنامه‌ریزی بیان ژن در تخمین نسبت اعماق متناوب در کانال نامتقارن نتایج دقیق‌تری را ارائه می‌دهد؛ درحالی‌که برای کانال بدون مانع، حالت متقارن دقیق‌تر می‌باشد. در شکل ۵، نمودار مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده مدل برتر هر حالت برای سری داده‌های تست، نشان

با توجه به نتایج به‌دست آمده مشاهده می‌گردد که برای حوضچه‌های شامل بلوک مرکزی و پله معکوس اضافه کردن پارامتر S/h_1 به ترکیب مدل‌ها، دقت مدل را تا حدودی افزایش داده است و این امر حاکی از تأثیر ارتفاع بلوک و پله به‌کاررفته، در تخمین نسبت اعماق متناوب می‌باشد. مقایسه‌ی نتایج کانال با پله‌ی معکوس

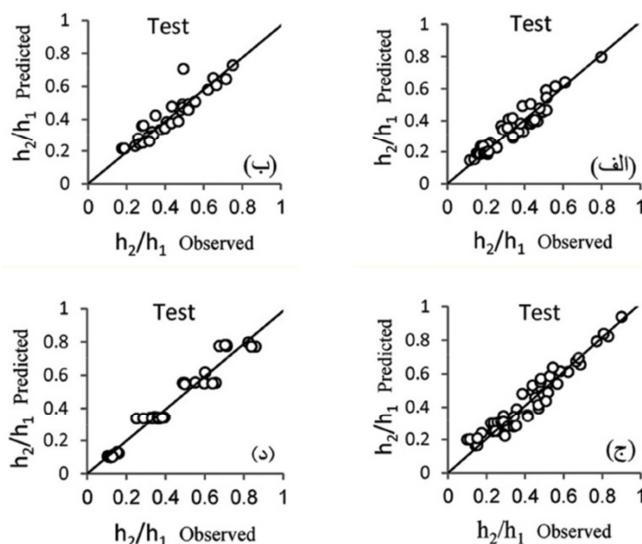
داده شده است. نکته مهم در مورد روش GEP، ارائه فرمول صریح در مورد مسئله مورد بررسی می‌باشد. فرمول به‌دست آمده از این روش برای پیش‌بینی نسبت عمق

ثانویه به عمق اولیه‌ی پرش هیدرولیکی در کانال مستطیلی واگرا با بلوک مرکزی به‌صورت رابطه (۱۲) می‌باشد:

$$Y = \sin Fr_1 + \tan^{-1} \left(\tan^{-1} \left(\tan^{-1} \left(Fr_1 \times \frac{h_1}{B} \right) \right) \right) + \left[(Fr_1^2 - Fr_1) \times \tan^{-1} \left(\frac{h_1}{B} \right) + Fr_1 \right] \quad (12)$$

جدول ۶- نتایج مربوط به مدل‌های برتر پیش‌بینی اعماق متناوب توسط GEP.

معیارهای ارزیابی						مدل	شرایط کانال	
Test			Train					
RMSE	DC	R	RMSE	DC	R			
۰/۰۶۷	۰/۸۴۴	۰/۹۲۶	۰/۰۵۱	۰/۹۰۱	۰/۹۵	S(I)	مقارن	ب.



شکل ۵- رابطه خطی بین h_2/h_1 مشاهده شده و پیش‌بینی شده در مرحله آزمون مدل برتر. (الف) بدون مانع متقارن، (ب) با پلهی معکوس متقارن، (ج) با پلهی معکوس نامتقارن و (د) با بلوک مرکزی.

۴-۲- طول پرش هیدرولیکی در کانال واگرا

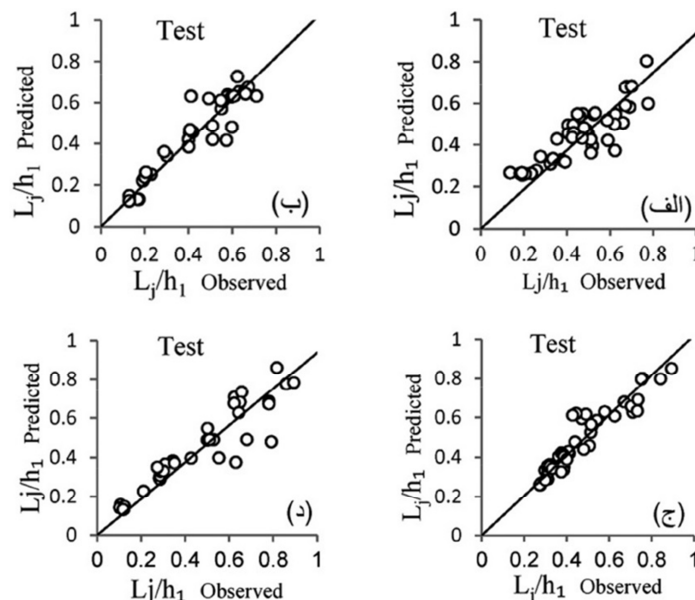
پارامترهای ارزیابی برای مدل‌های تعریف شده جهت تخمین طول پرش هیدرولیکی، در جدول ۷ قابل مشاهده است. بررسی نتایج حاصل در هر سه کانال، نشان دهنده این مطلب است که مدل L(II) در کانال واگرای با بلوک مرکزی، بهترین نتایج را داراست. پارامترهای ورودی این مدل شامل Fr_1 و $(h_2-h_1)/h_1$ می‌باشد. برای حالت کانال متقارن با پله معکوس، مدل L(IV) با پارامترهای ورودی Fr_1 و S/h_1 دقیق‌تر می‌باشد. در حالت کلی با مقایسه نتایج ارائه شده مشاهده می‌شود که با افزودن پارامترهای h_2/h_1 و S/h_1 به ترکیب مدل‌ها کارایی مدل، تا حدودی بهبود یافته است. همچنین مشاهده

می‌شود که روش GEP در تخمین طول پرش در کانال با پله‌ی معکوس نامتقارن نسبت به متقارن، موفق‌تر می‌باشد. با توجه به جدول ۷ می‌توان نتیجه گرفت که افزودن نسبت انبساط کانال، (B)، به‌عنوان پارامتر ورودی جهت تخمین طول پرش در هر دو حالت پله‌ی معکوس و بلوک مرکزی، باعث می‌شود که مدل، طول پرش را با دقت کمتر و خطای بالاتری پیش‌بینی کند. شکل ۶ رابطه خطی بین L_j/h_1 حالت مشاهده و پیش‌بینی شده‌ی مدل برتر نسبت طول پرش به عمق اولیه را نشان می‌دهد. فرمول به‌دست‌آمده از GEP برای پرش هیدرولیکی در کانال مستطیلی واگرا با بلوک مرکزی براساس رابطه (۱۳) می‌باشد:

$$\frac{L_j}{h_1} = \frac{Fr_1 \times \cos(e^{(3.78-Fr_1)})}{7.33} + \frac{h_2-h_1}{h_1} + \frac{\cos(8 \times Fr_1^3)}{14.98} \quad (13)$$

جدول ۷- نتایج مربوط به مدل‌های برتر پیش‌بینی طول پرش توسط GEP.

معیارهای ارزیابی						مدل	شرایط کانال	
Test			Train					
RMSE	DC	R	RMSE	DC	R			
۰/۱۰۸	۰/۶۱۹	۰/۷۸۶	۰/۰۸	۰/۷۵	۰/۸۴۹	L(I)	متقارن	باله
۰/۰۸۸	۰/۷۱۹	۰/۸۵۵	۰/۰۶۹	۰/۸۱۳	۰/۹۰۲	L(II)		
۰/۱۱۲	۰/۶۱۴	۰/۷۹	۰/۰۷۷	۰/۷۶۹	۰/۸۷۵	L(III)		
۰/۱۰۸	۰/۷۴۷	۰/۸۶۵	۰/۱۰۳	۰/۷۶۲	۰/۸۸	L(I)	متقارن	باله معکوس
۰/۰۹۴	۰/۷۶	۰/۸۹	۰/۰۸۹	۰/۸۱۳	۰/۹۱۱	L(II)		
۰/۰۹۵	۰/۷۵۶	۰/۸۸۷	۰/۰۹۲	۰/۸۱۱	۰/۹۰۹	L(III)		
۰/۰۸۷	۰/۷۶۵	۰/۹۱۳	۰/۷۲	۰/۸۴۸	۰/۹۲۱	L(IV)		
۰/۰۹۴	۰/۸۱۳	۰/۸۹۷	۰/۰۸۷	۰/۸۱۵	۰/۹۱۳	L(I)	نامتقارن	
۰/۰۶۹	۰/۸۱۷	۰/۹۰۶	۰/۰۶۷	۰/۸۲۵	۰/۹۲۳	L(II)		
۰/۱۰۵	۰/۷۶۲	۰/۸۶۸	۰/۱۰۱	۰/۷۶۵	۰/۸۹۶	L(III)		
۰/۱۰۱	۰/۷۹۱	۰/۸۷۶	۰/۰۹۵	۰/۸۰۹	۰/۹۰۶	L(IV)		
۰/۱۱۱	۰/۷۲۵	۰/۸۲۲	۰/۱۰۷	۰/۷۲۷	۰/۸۶۵	L(V)		
۰/۱۱۵	۰/۷۶۳	۰/۸۸	۰/۰۹۶	۰/۷۹۱	۰/۸۹	L(I)	متقارن	باله مرکزی
۰/۰۶۱	۰/۸۵۵	۰/۹۱۲	۰/۰۵۴	۰/۸۲۸	۰/۹۴۳	L(II)		
۰/۰۹۷	۰/۷۹۸	۰/۸۸	۰/۰۹۲	۰/۸۱	۰/۸۹۹	L(III)		
۰/۰۹۸	۰/۷۹۴	۰/۸۷۹	۰/۰۹۴	۰/۸۰۸	۰/۸۹۷	L(IV)		
۰/۱۰۹	۰/۷۴۶	۰/۸۷	۰/۱۰۴	۰/۷۵۵	۰/۸۷۸	L(V)		



شکل ۶- رابطه خطی بین L_j/h_1 مشاهده شده و پیش‌بینی شده در مرحله آزمون مدل برتر. (الف) بدون مانع متقارن، (ب) با پلهی معکوس متقارن، (ج) با پلهی معکوس نامتقارن و (د) با بلوک مرکزی.

۳-۴- استهلاك انرژی نسبی در کانال واگرا

با دقت بیشتر و خطای کمتری پیش‌بینی کند. در روش GEP بدون نیاز و دسترسی به داده‌های پایین‌دست که لازمه‌ی محاسبه‌ی استهلاك انرژی است، می‌توان میزان استهلاك را فقط با استفاده از داده‌های بالادست محاسبه کرد و این مزیتی برای روش GEP نسبت به مدل‌های کلاسیک می‌باشد. شکل ۷ رابطه خطی بین $\Delta E/E_1$ حالت مشاهده و پیش‌بینی شده‌ی مدل برتر استهلاك انرژی نسبی را نشان می‌دهد. فرمول به‌دست‌آمده از GEP برای تخمین استهلاك انرژی نسبی پرش هیدرولیکی در کانال مستطیلی واگرا با بلوک مرکزی به‌صورت رابطه (۱۴) می‌باشد:

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \left(-\tan^{-1} \left(\frac{h_1}{B} \right) \right)^9 + Fr_1^2 \times \left[\cos \left(Fr_1^2 - 5.54 \right) \right]^3 + \sqrt{\tan^{-1} \left[\sin \sqrt{2Fr_1} \right] \times Fr_1} \quad (14)$$

گرفت. برای این منظور با حذف تک‌تک پارامترهای مدل برتر و اجرای دوباره مدل و تعیین معیارهای ارزیابی میزان تأثیر پارامتر حذف‌شده در کاهش دقت مدل، مورد بررسی

با بررسی عملکرد معیارهای ارزیابی برای داده‌های آموزش و آزمون، مطابق با جدول ۸ مشاهده می‌شود که مدل E(II) با پارامترهای ورودی Fr_1 و h_1/B جهت تخمین استهلاك انرژی نسبی در تمامی حالات، منجر به نتایج دقیق‌تری گردیده است. همچنین با بررسی دقیق‌تر، مشاهده می‌شود که در کانال با پله معکوس و بلوک مرکزی، استفاده از پارامتر نسبت ارتفاع پله یا بلوک به عمق اولیه جریان، S/h_1 ، به‌عنوان پارامتر ورودی گرچه به مقدار کم ولی باعث بهبود نتایج گردیده است و نیز جایگزین کردن پارامتر h_1/B به‌همراه Fr_1 باعث می‌شود که مدل، مشخصه‌ی هیدرولیکی استهلاك انرژی نسبی را

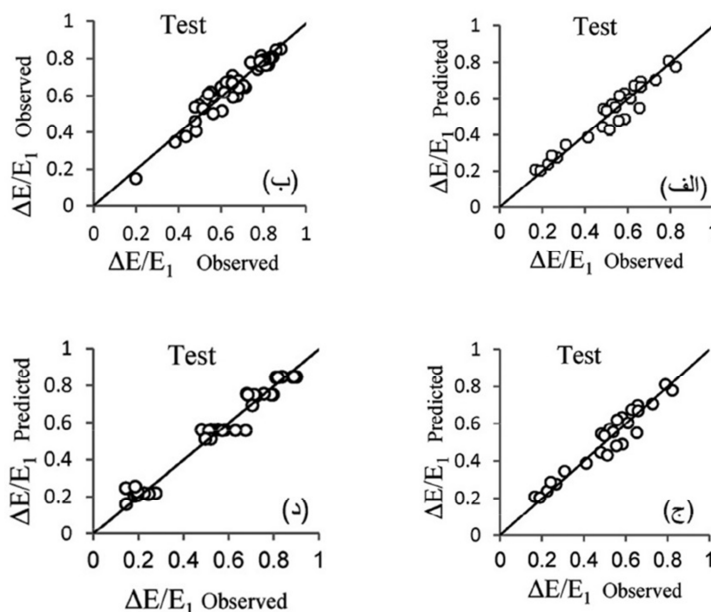
۴-۴- آنالیز حساسیت

جهت بررسی تأثیر پارامترهای به‌کاررفته در مدل برتر هر مشخصه پرش هیدرولیکی، آنالیز حساسیت انجام

قرار گرفت. نتایج حاصل از آنالیز حساسیت به‌صورت جدول ۹ ارائه شده است.

جدول ۸- نتایج مربوط به مدل‌های برتر پیش‌بینی استهلاک انرژی توسط GEP.

معیارهای ارزیابی						مدل	شرایط کانال	
Test			Train					
RMSE	DC	R	RMSE	DC	R			
۰/۰۵۸	۰/۸۶۴	۰/۹۱۳	۰/۰۵۵	۰/۸۷	۰/۹۲۲	E(I)	متقارن	ساده
۰/۰۴۶	۰/۹۰۱	۰/۹۵۳	۰/۰۳۷	۰/۹۴۲	۰/۹۷۱	E(II)		
۰/۱۰۹	۰/۷۱۲	۰/۸۵۴	۰/۰۷۵	۰/۷۲	۰/۸۶	E(I)	نامتقارن	
۰/۰۹۲	۰/۷۸۲	۰/۸۸۶	۰/۰۵۷	۰/۸۳۷	۰/۹۲۱	E(II)		
۰/۱۱	۰/۷۰۱	۰/۷۲۲	۰/۱۰۵	۰/۷۳۳	۰/۸۵	E(I)	متقارن	ب. پله معکوس
۰/۰۶۴	۰/۸۱۶	۰/۹۰۷	۰/۰۴۵	۰/۹۰۹	۰/۹۵۳	E(II)		
۰/۰۹۱	۰/۷۱۴	۰/۷۶۶	۰/۰۸۱	۰/۷۷۵	۰/۸۷۱	E(III)		
۰/۰۹۵	۰/۷۰۹	۰/۷۳۱	۰/۰۹	۰/۷۴۲	۰/۸۶۶	E(I)	نامتقارن	
۰/۰۸۸	۰/۷۲۱	۰/۸۴۴	۰/۰۷۷	۰/۷۷۸	۰/۸۷۵	E(II)		
۰/۰۵۵	۰/۹۰۸	۰/۹۵۶	۰/۰۴	۰/۹۵۲	۰/۹۷۶	E(III)		
۰/۰۵۹	۰/۹۴۶	۰/۹۶۳	۰/۰۵۵	۰/۹۵	۰/۹۶۸	E(I)	متقارن	ب. بلوک مرکزی
۰/۰۴۵	۰/۹۶۵	۰/۹۸۲	۰/۰۴۲	۰/۹۶۵	۰/۹۸۲	E(II)		
۰/۰۶۲	۰/۹۵	۰/۹۶۹	۰/۰۵۱	۰/۹۵۵	۰/۹۷۱	E(III)		



شکل ۷- رابطه خطی بین $\Delta E/E_1$ مشاهده شده و پیش‌بینی شده در مرحله آزمون مدل برتر. (الف) بدون مانع متقارن، (ب) با پله معکوس متقارن، (ج) با پله معکوس نامتقارن و (د) با بلوک مرکزی.

فرود تأثیرگذارترین پارامتر در تخمین هر سه مشخصه پرش هیدرولیکی می‌باشد.

براساس نتایج جدول ۹، مشخص است که با حذف پارامتر Fr_1 خطای حاصل از اجرای مدل به مقدار زیادی افزایش یافته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که عدد

جدول ۹- نتایج حاصل از آنالیز حساسیت.

معیارهای ارزیابی						پارامتر حذف شده	مدل برتر GEP
$Test$			$Train$				
$RMSE$	DC	R	$RMSE$	DC	R		
۰/۲۳۲	۰/۲۱۴	۰/۳۰۹	۰/۲۰۹	۰/۲۳۲	۰/۳۵۱	نسبت اعماق متناوب	
						Fr_1	$S(II)$
۰/۰۷۴	۰/۹۲۱	۰/۹۴۵	۰/۰۵۹	۰/۹۳۷	۰/۹۶۵	h_1/B	
۰/۱۵	۰/۶۳۴	۰/۸۰۴	۰/۱۲۳	۰/۶۷	۰/۸۱۱	طول پرش هیدرولیکی	
						Fr_1	$L(III)$
۰/۱۱۳	۰/۷۶۷	۰/۸۸۵	۰/۰۸۹	۰/۸	۰/۹۰۵	h_2/h_1	
۰/۲۵۳	۰/۲۱۹	۰/۳۶۷	۰/۲۱۴	۰/۲۷۲	۰/۳۷۴	استهلاک انرژی نسبی	
						Fr_1	$E(II)$
۰/۰۷۸	۰/۹۱۳	۰/۹۴۶	۰/۰۶۵	۰/۹۳۲	۰/۹۶۱	h_1/B	

۴-۵- داده‌های ترکیب شده

می‌باشد. نتایج حاصله بیانگر آن است که با اضافه کردن پارامترهای h_2/h_1 و h_1/B به مدل‌ها دقت آن‌ها تا حدودی بهبود یافته است. با این حال، مشاهده می‌گردد که مدل‌های GEP برای داده‌های ترکیب شده نسبت به حالتی که سری داده‌ها به صورت جداگانه مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند، نتایج مطلوبی را ارائه نمی‌دهند.

با ترکیب کل داده‌های موجود، عملکرد روش برنامه‌ریزی بیان ژن برای محدوده‌ی وسیعی از داده‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. جهت بررسی این حالت از دو مدل به صورت مدل برتر هر مشخصه پرش هیدرولیکی و مدل تنها با پارامتر ورودی عدد فرود استفاده گردید. جدول ۱۰ و شکل ۸ شامل نتایج داده‌های ترکیب شده

جدول ۱۰- نتایج مربوط به مدل‌های GEP برای ترکیب داده‌ها.

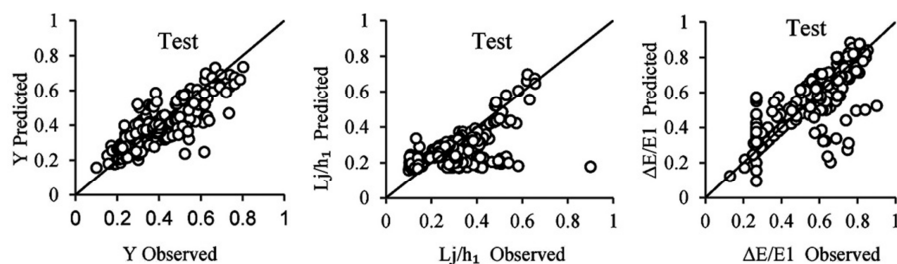
معیارهای ارزیابی						پارامترهای ورودی	پارامتر خروجی
Test			Train				
RMSE	DC	R	RMSE	DC	R		
۰/۰۹۸۷	۰/۵۸	۰/۷۷۴	۰/۰۹۲۴	۰/۶۸	۰/۸۲۸	نسبت اعماق متناوب	
						Fr ₁	h ₂ /h ₁
۰/۰۸۸	۰/۶۶	۰/۸۱۶	۰/۰۷۹	۰/۷۶	۰/۸۷۳	Fr ₁ , h ₁ /B	
۰/۱۷۲	۰/۲۵۱	۰/۴۰۱	۰/۱۵۸	۰/۲۷۲	۰/۴۳۵	طول پرش هیدرولیکی	
						Fr ₁	L _j /h ₁
۰/۱۳۲	۰/۲۷۲	۰/۵۵۴	۰/۱۱۳	۰/۳۰۶	۰/۵۶۴	Fr ₁ , h ₂ /h ₁	
۰/۱۹۶	۰/۴۱۹	۰/۶۶۷	۰/۱۸۸	۰/۵۷۲	۰/۷۴	استهلاک انرژی نسبی	
						Fr ₁	E _L /E ₁
۰/۱۱۸	۰/۶۴۷	۰/۸۸۱۶	۰/۱۰۱	۰/۷۸۱	۰/۸۸۵	Fr ₁ , h ₁ /B	

۴-۶- مقایسه نتایج روش GEP با روابط نیمه تجربی

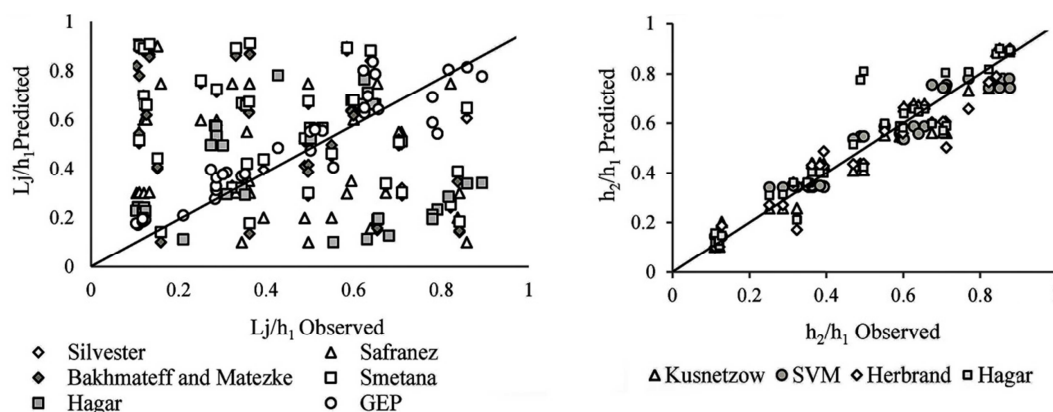
اعماق متناوب و طول پرش هیدرولیکی در کانال واگرا با بلوک مرکزی، از داده‌های آزمون استفاده شده و نتایج حاصل با هم مقایسه گردیده‌اند. نتایج این مقایسه در

برای ارزیابی عملکرد روش برنامه‌ریزی بیان ژن نسبت به برخی روابط نیمه تجربی موجود برای تخمین

شکل ۹ آورده شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، روابط نیمه تجربی در تخمین اعماق متناوب و طول پرش هیدرولیکی در کانال واگرا ارائه داده است.



شکل ۸- رابطه خطی مشخصات پرش هیدرولیکی بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده برای ترکیب داده‌ها.



شکل ۹- مقایسه نتایج روش GEP با روابط نیمه تجربی در تخمین طول پرش و نسبت اعماق متناوب.

پیش‌بینی طول پرش هیدرولیکی نسبت به سایر مدل‌ها دقیق‌تر می‌باشند. مقایسه‌ی نتایج کانال با پله‌ی معکوس در دو حالت متقارن و نامتقارن نشان داد که روش برنامه‌ریزی بیان ژن در تخمین نسبت اعماق متناوب، طول پرش و استهلاك انرژی در کانال نامتقارن نتایج دقیق‌تری را ارائه می‌دهد؛ درحالی‌که برای کانال بدون مانع، حالت متقارن دقیق‌تر می‌باشد. با آنالیز ترکیب کل داده‌ها و مقایسه آن با حالتی که داده‌ها برای هر مشخصه هیدرولیکی به‌طور جداگانه آنالیز گردیدند، مشخص گردید که استفاده از داده‌ها به‌صورت جداگانه منجر به جواب‌های دقیق‌تری خواهد شد. همچنین نشان داده شد که ارتفاع نسبی بلوک و پله معکوس در بهبود کارایی مدل‌ها تأثیرگذار می‌باشند. براساس نتایج آنالیز حساسیت، مشخص گردید که عدد فرود تأثیرگذارترین پارامتر در تخمین هر سه مشخصه پرش هیدرولیکی می‌باشد.

۵- نتیجه گیری کلی

در این تحقیق، برای تخمین مشخصات هیدرولیکی در سه نوع کانال واگرا، از روش برنامه‌ریزی بیان ژن استفاده شد و تأثیر پارامترهای هیدرولیکی و هندسی مورد ارزیابی قرار گرفت. مقایسه روابط نیمه تجربی و کلاسیک با نتایج حاصل از روش به‌کاررفته در تحقیق نشان داد که نتایج روش هوشمند GEP نسبت به روابط کلاسیک دقیق‌تر و قابل اعتمادتر می‌باشد. همچنین ملاحظه گردید که مدل‌های تعریف شده برای کانال واگرا با بلوک مرکزی در تخمین مشخصات پرش هیدرولیکی نسبت به حالات دیگر (کانال بدون مانع و شامل پله‌ی معکوس) نتایج دقیق‌تری را ارائه می‌دهند. با توجه به نتایج حاصله مشاهده گردید که مدل با پارامترهای ورودی h_1/B و Fr_1 در تعیین نسبت اعماق متناوب و استهلاك انرژی نسبی و مدل با پارامترهای ورودی Fr_1 و در

مراجع

- [۱] بختیاری، م. (۱۳۸۷). "بررسی هیدرولیکی پارامترهای جهش هیدرولیکی در مقاطع واگرا (تبدیل‌های خروجی)", پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- [2] Koloseus, H.J., & Ahmad, D. (1969), "Circular hydraulic jump", *Journal of the Hydraulics Division*,
- [3] Herbrand, K. (1970). Der räumliche Wechselsprung, Literaturstudie Bericht Nr. 18 der Versuchsanstalt für Wasserbau der Technischen Universität München, Oskar.
- [4] 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.
- [5] Roushangar, K., Vojoudi, F., & Shiri, J. (2014b), "Modeling river total bed material load discharge using artificial intelligence approaches (based on conceptual inputs)", *Journal of Hydrology*, 514, 114-122.
- [6] Kisi, O., Shiri, J., & Tombul, M. (2013), "Modeling rain fall-runoff process using soft computing techniques", *Journal of Computers & Geosciences*, 51, 108-117.
- [7] Roushangar, K., Akhgar, S., Salmasi, F., & Shiri, J. (2014), "Modeling energy dissipation over stepped spillways using machine learning approaches", *Journal of Hydrology*, 508, 254-265.
- [8] 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.
- [9] Wang, W.C., Chau, K.W., Cheng, C.T., & Qiu, L. (2009), "A comparison of performance of several artificial intelligence methods for forecasting monthly discharge time series", *Journal of Hydrology*, 374(3), 294-306.
- [10] Bremen, R. (1990). Expanding Stilling Basin. Laboratoire de Constructions Hydrauliques, Communication3, Lausanne, Switzerland.
- [11] Gandhi, S. (2014), "Characteristics of Hydraulic Jump", *International Journal of Mathematical, Computational, Physical, Electrical and Computer Engineering*, 8(4), 692-697.
- [12] Ferreria, C. (2001), "Gene expression programming: a new adaptive algorithm for solving problems", *Journal of Complex System*, 13(2), 87-129.
- [13] Elevatorski, E.A. (1980). Hydraulic Energy Dissipators. McGraw-Hill, New York.
- [14] 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.
- [15] Hager, W.H. (1992). Energy Dissipators and Hydraulic Jumps. Kluwer Academic Publication, Dordrecht, The Netherlands, pp. 151-173.

K. Roushangar*

Associate Professor,
Department of Civil
Engineering, University of
Tabriz.

e-mail: kroshangar@yahoo.com

R. Valizadeh

M.Sc. student, Department of
Civil Engineering, University of
Tabriz.

e-mail:
reayhneh_valizdh_rvacivil@yahoo.com

R. Ghasempour

M.Sc. student, Department of
Civil Engineering, University of
Tabriz.

e-mail:
r.ghasempour93@ms.tabrizu.ac.ir

Predicting of Hydraulic Jump Characteristics of Sudden Expanding Stilling Basins Using Evolutionary Algorithm

Sudden expanding stilling basins are one of the energy dissipaters which can dissipate most of the kinetic energy of the flow through hydraulic jump. Accurate estimation of the hydraulic jump characteristics plays an important role in designing of hydraulic structures. Present study applies Gene Expression Programming (GEP) to estimate hydraulic jump characteristics in three different types of sudden expanding channels (i.e. channel without appurtenances, with a central sill and with a negative step). In this regard, different models were developed and tested. The results proved capability of GEP in predicting hydraulic jump characteristics in expanding channels. It was observed that the applied method is more accurate than semi-theoretical relationships. Also it was found that in the jump length prediction the model with input parameters Fr_1 and $(h_2-h_1)/h_1$ and in the sequent depth ratio and relative energy dissipation prediction the model with input parameters Fr_1 and h_1/B led to more accurate outcome. Sensitivity analysis showed that Fr_1 had the key role in modeling. According to the results of the sensitivity analysis parameter Fr_1 had the key role in modeling hydraulic jump characteristics.

Keywords: Central sill, Expanding stilling basin, Gene Expression Programming, Hydraulic Jump, Negative step.

* Corresponding author