



Mathematical Expression of Energy Dissipation of Flow over Stepped Spillways Using Genetic Programming

Abbas Parsaie*, Shadi Najafian

1. Department of Hydraulic Structures Engineering, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran
2. Department of Civil Engineering, Applied Science and Technology University, Sain Qaleh branch, Zanjan, Iran

Received: 29 August 2024/ Revised: 13 October 2024/ Accepted: 15 October 2024

<https://doi.org/10.22034/arwe.2024.2039932.1023>

Abstract

Stepped spillways are affective structures for energy dissipation. In this study, to mathematical expression of effect of involved parameters on energy dissipation, a genetic programming (GP) technique was used. The GP categorized in smart function fitting methods that automatically define the most effective parameters and assigned them more weight in final model derived. Involved parameters on energy dissipation of flow are drop number, number of steps, ration of critical depth to height of steps, longitudinal slop of weir, and Froude number of flow at toe of spillways. To compare the performance of GP with other type of soft computing techniques, the multilayer perceptron neural network was developed as well. Results indicated that derived model from GP model has suitable to performance to mathematical expression of involved parameters on energy dissipation. Reviewing the structure of derived model from GP indicated that drop number and ratio of critical depth to the height of steps are the most effective parameters on energy dissipation. Comparison the performance of MLP model with GP showed that the accuracy of MLP is a bit more than the GP. Sensitivity analysis of MLP upheld the results of GP in term of effective parameters.

Keywords: Critical depth, Drop Number, Energy dissipation, Function fitting.



مدل‌سازی ریاضی اتلاف جریان عبوری از روی سرریزهای پلکانی با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک

عباس پارسایی^{۱*}، شادی نجفیان^۲

۱. گروه مهندسی سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۲. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه علمی و کاربردی واحد شهرداری صائین قلعه، زنجان، ایران.

دریافت: ۰۸ شهریور ماه ۱۴۰۳ / اصلاحات: ۲۲ مهر ماه ۱۴۰۳ / پذیرش: ۲۴ مهر ماه ۱۴۰۳

<https://doi.org/10.22034/arwe.2024.2039932.1023>

چکیده

سرریزهای پلکانی یکی از کارآمدترین سازه‌ها در استهلاک انرژی هستند. در این مقاله برای مدل‌سازی ریاضی اتلاف انرژی جریان عبوری از روی سرریز پلکانی از مدل برنامه‌ریزی ژنتیک استفاده شد. به منظور مقایسه عملکرد مدل برنامه‌ریزی ژنتیک با سایر روش‌های رایانش نرم، مدل شبکه عصبی چندلایه به عنوان معمول‌ترین مدل هوش مصنوعی نیز تهیه گردید. پارامترهای دخیل در برآورد بازده سرریز پلکانی در اتلاف انرژی جریان عبوری عبارت‌اند از: عدد دراپ، نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پله‌ها، شیب سرریز، تعداد پله‌ها، نسبت ارتفاع به طول پله‌ها است. نتایج نشان داد که روش برنامه‌ریزی ژنتیک توانایی مناسبی جهت برآورد عملکرد سرریزهای پلکانی در اتلاف انرژی دارد. شاخص‌های آماری خطای این مدل در مرحله صحت‌سنجی عبارت از $R^2=0.95$ است. بررسی ساختار مدل ریاضی استخراج‌شده از روش برنامه‌ریزی ژنتیک نشان می‌دهد که پارامترهای عدد دراپ و نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پله‌ها دارای وزن بیشتری نسبت به سایر پارامترها هستند، لذا نتیجه می‌شود که این پارامترها تأثیر بیشتری در عملکرد سازه در اتلاف انرژی دارند. مقایسه عملکرد مدل برنامه‌ریزی ژنتیک با مدل شبکه عصبی چندلایه نشان می‌دهد که عملکرد شبکه عصبی نسبت به برنامه‌ریزی ژنتیک، کمی بهتر است ($R^2 \geq 0.95$). نتایج آنالیز حساسیت شبکه عصبی چندلایه هم ساختار مدل ریاضی مستخرج شده از برنامه‌ریزی ژنتیک را تأیید می‌نماید.

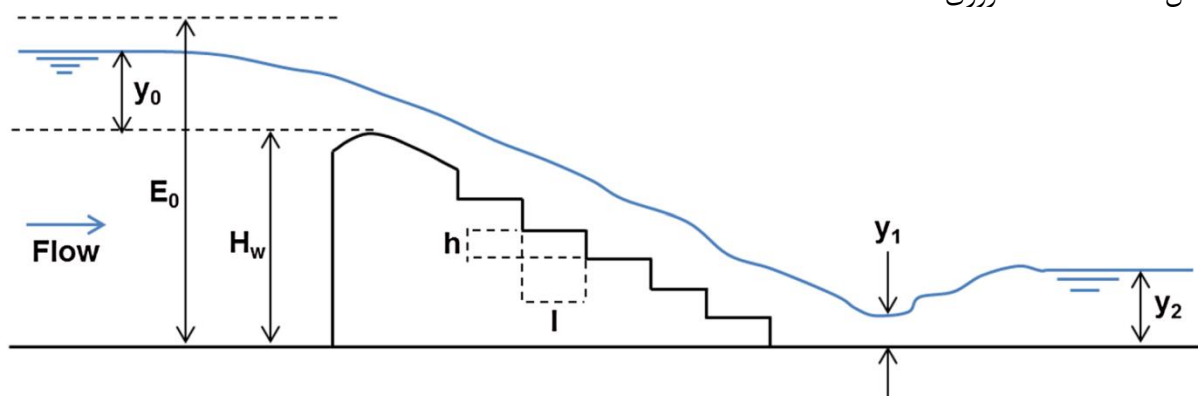
کلمات کلیدی: استهلاک انرژی، برازش منحنی، سرریزهای پلکانی، عدد دراپ، عمق بحرانی.

مقدمه

سرریزهای پلکانی یکی از انواع ساختمان‌های هیدرولیکی هستند که اغلب به‌منظور استهلاک انرژی مازاد جریان آب مورد استفاده قرار می‌گیرند. وجود پله‌های متوالی که از نزدیکی تاج سرریز شروع شده و تا پایین دست آن ادامه دارد، موجب اتلاف بخش عظیمی از انرژی جنبشی جریان عبوری و نیز کاهش ابعاد حوضچه آرامش واقع در پایین دست می‌گردد (Dah-Mardeh et al., 2023; Afaridegan et al., 2024)، که این خود موجب کاهش هزینه‌های مربوط و اقتصادی شدن طرح می‌گردد (Chanson, 2002; Chen, 2015). در دو دهه اخیر استفاده از تکنولوژی ساخت سدها با کاربرد مصالح بتن غلتکی در سدسازی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. باتوجه به سازگاری مناسب ساخت سرریزهای پلکانی با این تکنولوژی (مصالح بتن غلتکی) توجه به این نوع سرریز را بیشتر کرده است (Abu-Khashaba et al., 2014). هیدرولیک سرریزهای پلکانی از پیچیدگی خاصی برخوردار است. طبق مطالعات سورنسون (Sorenson, 1985)، راجاراتنام (Rajaratnam, 1990) و چانسون (Chanson, 1994)، در شرایط عبور جریان بر روی سرریزهای پلکانی سه نوع رژیم جریان متمایز مشاهده می‌شود: الف) رژیم ریزشی، ب) رژیم غلتشی و ج) رژیم جریان بینابینی که در ادامه به‌طور مختصر به آن‌ها پرداخته می‌شود (Dah-Mardeh et al., 2023; 2024). الف) رژیم جریان ریزشی: این نوع جریان در دبی‌های کم و ارتفاع پله‌های بزرگ ایجاد می‌شود. استهلاک انرژی بر اثر تماس جت جریان آب‌وهوا و اختلاط جت روی هر پله و تشکیل پرش هیدرولیکی کامل یا ناقص روی هر پله حاصل می‌گردد. ب) رژیم جریان غلتشی: در این نوع جریان، پلکان‌ها با اثری مشابه زبری بستر عمل می‌کنند. در زیر بستر کاذب که آستانه انتهایی پلکان‌های متوالی را به یکدیگر متصل می‌کند، جریان‌های گردابی تشکیل می‌شود که موجب استهلاک بخش عظیمی از انرژی می‌گردد. ج) رژیم جریان بینابینی: این نوع از رژیم جریان حد واسط دو نوع رژیم ریزشی و غلتشی بوده و در این وضعیت، جریان دارای شکل و حالت مشخصی بر روی سرریز نیست (Boes et al., 2000). چافی و همکاران (Chafi et al., 2010) با انجام آزمایش‌هایی به بررسی کمی و کیفی جریان در سرریزهای پلکانی پرداختند. ایشان با برقرار کردن دو رژیم جریان ریزشی و غلتشی در آزمایش‌ها نشان دادند که شکل و کیفیت سطح پله‌ها بر تغییر رژیم جریان تأثیر می‌گذارد. فلدر و همکاران (Felder and Chanson, 2011) با انجام آزمایش‌هایی بر روی یک سرریز پلکانی با پله‌های یکنواخت و غیریکنواخت و شیب متوسط (۱:۲)، مقدار افت انرژی را بررسی نمودند. نتایج این بررسی نشان داد که نرخ اتلاف انرژی در حالت یکنواخت و غیریکنواخت تقریباً یکسان است. گندر و همکاران (Guenther et al., 2013) به‌منظور بررسی افت انرژی در سرریزهای پلکانی آزمایش‌هایی را بر روی یک مدل فیزیکی با در نظر گرفتن چهار حالت مختلف برای پله‌های مسطح و لبه‌دار و شیب ۲۶/۶ درجه انجام دادند. کرمی و همکاران (Karami et al., 2014) با استفاده از مدل عددی Flow 3D به شبیه‌سازی هیدرولیک جریان و بررسی پدیده کایتاسیون در سرریز پلکانی یک سد پرداختند. روشنگر و همکاران (Roushangar et al., 2014) کارایی الگوریتم‌های شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و برنامه‌ریزی بیان ژن خطی (GEP) را در مدل‌سازی اتلاف انرژی سرریزهای پلکانی مورد بررسی قرار دادند. مقایسه نتایج حاصل از مدل‌ها با نتایج آزمایشگاهی حاکی از این است که می‌توان از دو مدل ANN و GEP در پیش‌بینی افت انرژی در سرریزهای پلکانی استفاده نمود. سلماسی و ازگر (Salmasi and Özger, 2014) با استفاده از سیستم استنتاج فازی به پیش‌بینی اتلاف انرژی در سرریزهای پلکانی با رژیم جریان غلتشی پرداختند. مقایسه نتایج حاصل از مدل با نتایج آزمایشگاهی نشان داد که مدل از قابلیت بالایی در پیش‌بینی اتلاف انرژی برخوردار است. پارسائی و همکاران (Parsaie et al., 2016) با استفاده از مدل رگرسیون تطبیقی چندگانه (MARS) و نیز مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) به پیش‌بینی اتلاف انرژی جریان عبوری از روی سرریزهای پلکانی پرداختند. آنالیز حساسیت انجام گرفته توسط دو مدل نشان داد که نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پله مؤثرترین پارامترها در اتلاف انرژی هستند. همچنین مقایسه نتایج حاصل از مدل‌های MARS و ANN حاکی از این است که هر دو مدل دقت بالایی در پیش‌بینی اتلاف انرژی در این نوع سرریزها دارند اما مدل MARS کمی بهتر از ANN عمل نموده است. بررسی تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های محاسبات نرم توجه محققین علم هیدرولیک را به خود معطوف کرده است. در این تحقیق به‌منظور برآورد عملکرد سرریزهای پلکانی و همچنین بیان ریاضی تأثیر پارامترهای دخیل در میزان اتلاف انرژی از روش برنامه‌ریزی ژنتیک استفاده می‌شود. روش برنامه‌ریزی ژنتیک جزء روش‌های برازش منحنی هوشمند دسته‌بندی می‌گردد. در این روش‌ها در طول فرآیند مدل‌سازی به‌طور خودکار پارامترهایی که بیشترین تأثیر را دارند شناسایی شده و وزن بیشتری به آن‌ها نسبت به سایر پارامترها اختصاص داده می‌شود.

مواد و روش‌ها

هیدرولیک جریان در سرریزهای پلکانی بسیار پیچیده است. همان‌طور که اشاره شد رژیم‌های جریان بر روی سرریزهای پلکانی به سه دسته ریزشی، غلتشی و بینابین تقسیم‌بندی می‌شود. مطالعات در مورد استهلاک انرژی در دو رژیم جریان ریزشی و بینابین محدود است و بیشتر مطالعات انجام‌شده بر روی هیدرولیک سرریزهای پلکانی بیشتر بر روی رژیم غلتشی متمرکز شده است. البته این نکته حائز اهمیت است که طراحی سرریزهای پلکانی برای حالت دبی طراحی در حالت رژیم جریان غلتشی صورت می‌گیرد. برای محاسبه مقدار اتلاف انرژی جریان عبوری بر روی سرریز پلکانی، به‌کارگیری معادله برنولی برای بالادست و پایین‌دست سرریز همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است ضروری است.



شکل ۱. پارامترهای هندسی و هیدرولیکی مؤثر بر اتلاف انرژی جریان
Fig 1. Geometrical and hydraulic parameters affecting flow energy loss

در این شکل E_0 کل انرژی جریان در بالادست سرریز، y_0 عمق جریان بر روی سرریز، H_w ارتفاع سرریز، h و l به ترتیب ارتفاع و طول پله‌ها، y_1 عمق جریان در پایین‌دست سرریز و y_2 عمق جریان بعد از پرش هیدرولیکی است. معادله انرژی جریان در بالادست و پایین‌دست سرریز در معادله‌های ۱ و ۲ ارائه شده است.

$$E_0 = H_w + y_0 + \frac{V_0^2}{2g} = H_w + y_0 + \frac{q^2}{2g(H_w + y_0)} \quad (1)$$

$$E_1 = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = y_1 + \frac{q^2}{2gy_1^2} \quad (2)$$

در این معادله‌ها V_0 و V_1 به ترتیب سرعت جریان در بالادست و پایین‌دست سرریز، q دبی در واحد سرریز، g شتاب ثقل زمین است. میزان اتلاف انرژی جریان بر روی سرریز با استفاده از معادله (۳) به دست می‌آید

$$\frac{\Delta E}{E_0} = \frac{E_0 - E_1}{E_0} = 1 - \frac{E_1}{E_0} \quad (3)$$

برای مشخصات تأثیر پارامترهای هیدرولیکی جریان و هندسی سرریز پلکانی بر مقدار اتلاف انرژی می‌توان اتلاف انرژی را به صورت تابعی از پارامترهای هیدرولیکی و هندسی دانست. پارامترهای هندسی و هیدرولیکی مؤثر در استهلاک انرژی در معادله (۴) آورده شده است.

$$\frac{\Delta E}{E_0} = f(q, l, h, H_w, g, N) \quad (4)$$

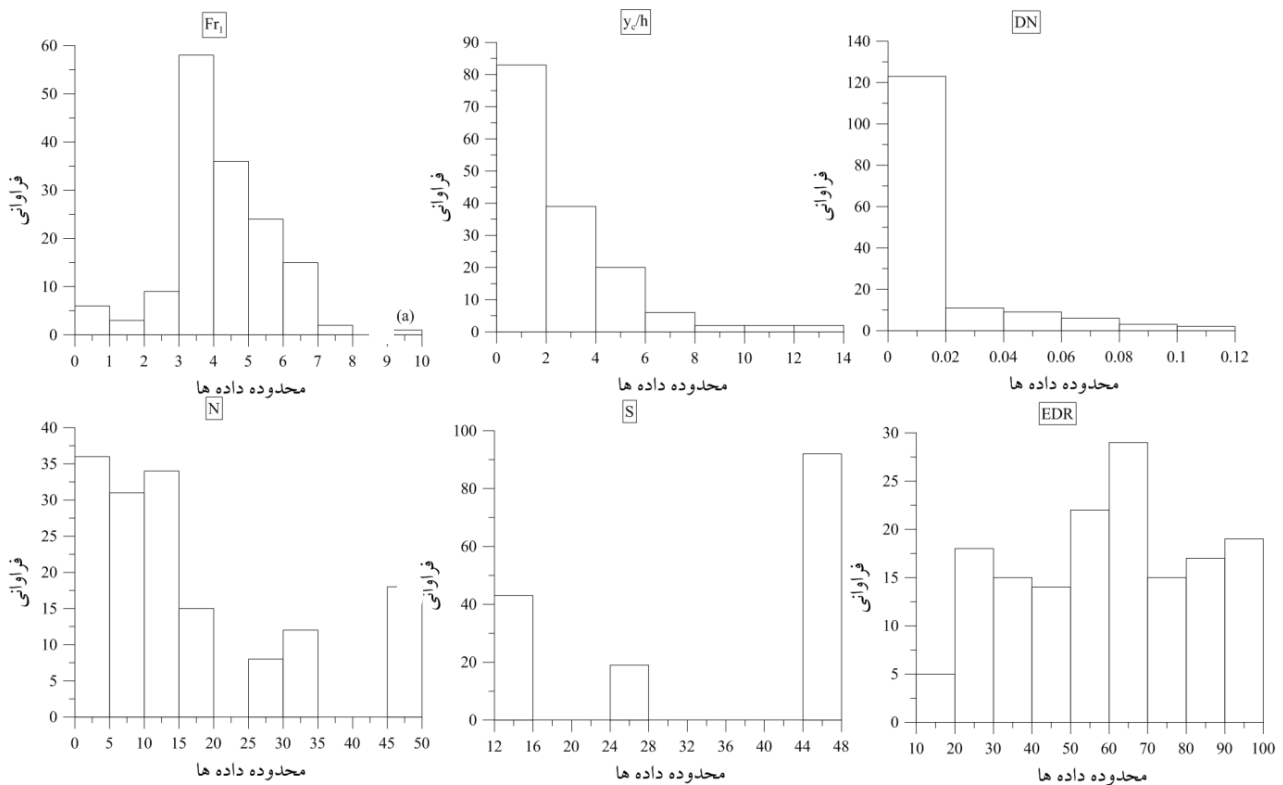
در این N تعداد پله‌های سرریز است. با به‌کارگیری آنالیز ابعادی پارامترهای بی‌بعد استخراج می‌شود. پارامترهای بی‌بعد در معادله (۵) آورده شده است.

$$\frac{\Delta E}{E_0} = f \left(\frac{q^2}{gH_w^3}, \frac{h}{l}, N, \frac{y_c}{h}, Fr_1 \right) \quad (5)$$

در این معادله Fr_1 عدد فرود جریان در پایین‌دست سرریز و y_c عمق بحرانی جریان بر روی سرریز است. اگر در این معادله نسبت $q^2/(gH_w^3)$ عدد دراپ نامیده شود و با نماد DN نشان داده شود و همچنین نسبت h/l را با S نشان دهیم معادله (5) را می‌توان به صورت معادله (6) بازنویسی نمود.

$$\frac{\Delta E}{E_0} = f \left(DN, S, N, \frac{y_c}{h}, Fr_1 \right) \quad (6)$$

برای استفاده از مدل‌های رایانش نرم به جهت برآورد عملکرد سرریزهای پلکانی در استهلاك انرژی، پارامترهای سمت راست معادله (6) به‌عنوان ورودی در نظر گرفته می‌شود و نرخ استهلاك انرژی ($EDR = 100 \times (\Delta E/E_0)$) به‌عنوان خروجی مدل مدنظر گیرد. توسعه مدل‌های رایانش نرم مخصوصاً مدل‌هایی که در دسته روش‌های هوشمند برازش منحنی قرار می‌گیرند اصطلاحاً داده محور هستند. در این مقاله برای بیان ریاضی ارتباط پارامترهای بی‌بعد مؤثر در استهلاك انرژی روش برنامه‌ریزی ژنتیک بکار گرفته خواهد شد. بدین منظور ۱۵۴ داده مرتبط با پارامترهای بی‌بعد (6) از منابع معتبر (Salmasi and Özger, 2014) جمع‌آوری گردید. شکل (۲) هیستوگرام داده‌های جمع‌آوری‌شده را نشان می‌دهد.



شکل ۲. هیستوگرام پارامترهای مؤثر در استهلاك انرژی جریان بر روی سرریز پلکانی
Fig 2. Histogram of effective parameters in flow energy consumption on stepped spillway

روش برنامه‌ریزی ژنتیک

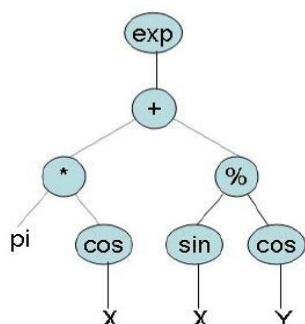
روش برنامه‌ریزی ژنتیک شاخه‌ای از الگوریتم‌های هوشمند جستجو است که توسط کوزا (Koza, 1992) ارائه شد. در روش برنامه‌ریزی ژنتیک از سیستم درختی یا شاخه‌ای استفاده می‌شود. هر شاخه نیز از یک مجموعه پایانه (متغیرهای ورودی) و مجموعه عملگرهای اصلی جبری تشکیل می‌شود. بدین منظور ابتدا بلوک‌هایی که شامل متغیرهای ورودی، تابع هدف و تابع ارتباط‌دهنده آن‌ها است، تعریف

و سپس ساختار مناسب و ضرایب آن تعیین می‌گردد. در شکل ۳ مثال ساده‌ای از ساختار درختی و فضای محاسباتی در روش برنامه‌ریزی ژنتیک ارائه شده است. در این مثال، عملگرهای +، -، *، /، cos، sin، exp، sqrt مجموعه توابع و عملگرهای اصلی، متغیرهای X و Y ورودی‌ها و خروجی و نیز کمیت‌های ثابت pi، ۴، ۳، ۲، ۱ و ۵ را در یک پایانه را نشان می‌دهد. در تابع یا مدل نهایی، ارتباط عملگرها با متغیرها به صورت یک ساختار درختی ارائه شده است که فرم ریاضی آن نیز قابل استخراج است. اگرچه ارائه خروجی مدل بدین صورت ممکن است پیچیده به نظر برسد؛ اما دارای مزیت بسیار مهمی است به طوری که این خروجی برای بخش وسیعی از پدیده مورد مطالعه قابل تعمیم خواهد بود. فرایند گام‌به‌گام مدل‌سازی در برنامه‌ریزی ژنتیک با ایجاد یک جمعیت اولیه از توابع مدل‌های پیش‌بینی شده شروع می‌شود سپس هریک از افراد جمعیت مذکور با استفاده از توابع برازش مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. با هر تولیدمثل، یک جمعیت جدید انتخاب می‌شود. این انتخاب با انجام مراحل زیادی از قبیل انتخاب یکی از عملگرهای عبور، جهش و کپی، انتخاب تعداد مناسبی از افراد حاضر، استفاده از عملگرهای انتخابی برای تولید فرزند، معرفی فرزند در یک جمعیت جدید و ارزیابی مدل مورد نظر با استفاده از برازش‌های مختلف صورت می‌گیرد. در نهایت مراحل فوق منجر به حصول حداکثر تعداد تولید تکرار می‌شوند. برازش هریک از افراد جمعیت تولید شده از رابطه زیر قابل ارزیابی است (Azamathulla and Ghani, 2011; Azamathulla, 2012).

$$f_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |X_j - Y_j|^2 \quad (7)$$

که f تابع هدف، X_j مقدار محاسبه شده برای کروموزوم به ازای تابع برازش j، Y_j مقدار اندازه‌گیری شده یا مقدار مورد انتظار کروموزوم به ازای برازش j.

Function_Set = [+ , - , * , % , sin , cos , exp , sqrt]
 Arity_Set = [2 , 2 , 2 , 2 , 1 , 1 , 1 , 1]
 Terminal_Set = [X , Y , pi , 1 , 2 , 3 , 4 , 5]



$$f = \exp\left(\pi \cos(X) + \frac{\sin(X)}{\cos(Y)}\right)$$

function z = example(X,Y)
 z = exp(pi*cos(X)+(sin(x)/cos(y)));

$$(\exp (+ (* pi (\cos X)) (\% (\sin X) (\cos Y))))$$

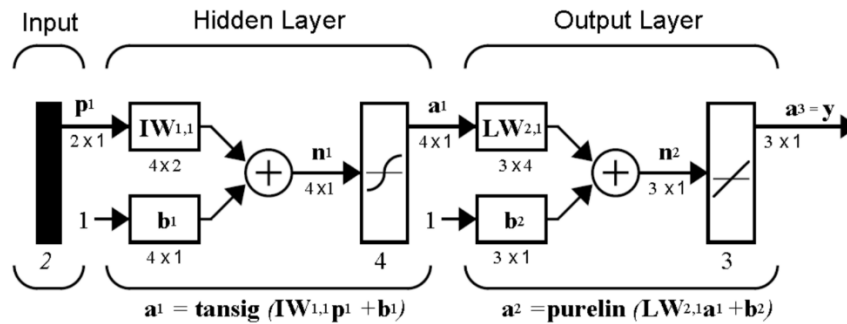
شکل ۳. ساختار درختی ارتباط عملگرها و متغیرها در روش برنامه‌ریزی ژنتیک و نیز رابطه ریاضی نهایی

Fig 3. The tree structure of the relationship between operators and variables in the genetic programming method and also the final mathematical relationship

شبکه عصبی چندلایه

شبکه عصبی یک مدل غیرخطی پیشرفته ریاضی است که می‌تواند رابطه بین ورودی‌ها و خروجی‌های یک سیستم پیچیده غیرخطی را شبیه‌سازی کند. در بسیار از شبیه‌سازی‌ها که به حل معادلات پیچیده جهت یافتن ارتباط بین عوامل مؤثر بر سیستم منجر می‌شود، شبکه عصبی می‌تواند به عنوان یک گزینه جایگزین مطرح شود. شبکه‌های عصبی انواع مختلفی دارند که پرکاربردترین آن‌ها شبکه عصبی چندلایه است (Seyedian et al. 2024). شکل (۴) نمایی شماتیک از یک مدل شبکه عصبی چندلایه را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل مشخص است ورودی‌های مدل شبکه عصبی در ضرایبی (وزن) ضرب شده و سپس با یک مقدار ثابت جمع می‌شوند. سپس تابع انتقال بر روی حاصل آن جمع می‌شود. طراحی مدل شبکه عصبی چندلایه شامل چند مرحله است که عبارت‌اند از: تعریف تعداد لایه‌های مدل شامل لایه ورودی، لایه(های) پنهان، لایه خروجی، تعداد نرون در هر لایه، تعریف تابع فعال انتقال و همچنین در نهایت

انتخاب روش آموزش شبکه عصبی. منظور از آموزش شبکه عصبی تعیین مقادیر وزن‌ها و ثابت‌هایی است که در هر ورودی ضریب و جمع شده می‌شود. روش‌های مختلفی برای آموزش شبکه عصبی پیشنهاد شده است؛ مانند روش‌های گرادیان کاهشی، روش مارکوات لونبرگ و یا روش‌های متاهیوریستیک که در این روش‌ها آموزش شبکه عصبی به‌عنوان یک مسئله بهینه‌سازی فرض شده و سپس برای حل این مسئله الگوریتم‌های بهینه‌سازی مدرن مانند الگوریتم ژنتیک، ازدحام پرندگان و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد (Parsaie and Haghiabi 2015; Parsaie et al. 2016).



شکل ۴. نمایی شماتیک از ساختار یک شبکه عصبی چندلایه

Fig 4. Schematic view of the structure of a multilayer neural network

آماده‌سازی داده‌ها

همان‌طور که اشاره شد توسعه مدل‌های رایانش نرم به‌منظور مدل‌سازی و پیش‌بینی پدیده‌های هیدرولیکی بر مبنای داده‌های اندازه‌گیری شده است. این بدان معنا است که داده‌های جمع‌آوری شده باید به دو گروه داده‌های آموزش که برای توسعه مدل و داده‌های آزمایش که برای صحت‌سنجی عملکرد مدل توسعه داده شده بکار می‌روند. تقسیم می‌شود. انتخاب و اختصاص داده به هر گروه از داده‌های آموزش و آزمایش به‌صورت تصادفی صورت می‌گیرد. ۸۰ درصد داده‌ها برای آموزش و بقیه (۲۰ درصد باقی‌مانده) به گروه آزمایش اختصاص داده شده است. محدوده داده‌های اختصاص داده به گروه‌های آموزش و آزمایش در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱. محدوده داده‌های اختصاص داده شده به گروه‌های آموزش و آزمایش

Table 1. Range of data assigned to training and testing groups

EDR	S	N	DN	γ_c/h	Fr ₁	محدوده	مرحله
15.136	15	3	0.000	0.094	0.234	کمترین	آموزش و توسعه
96.580	45	50	0.104	13.781	9.339	بیشترین	
529.292	33.943	18.309	0.012	2.556	4.128	میانگین	
23.133	13.456	13.456	0.022	2.566	1.401	انحراف معیار	
13.145	15	3	0.000	0.223	0.307	کمترین	آزمایش و صحت‌سنجی
96.441	45	50	0.109	6.327	6.883	بیشترین	
56.412	34.032	17.839	0.014	2.334	4.438	میانگین	
23.534	14.226	15.232	0.028	1.799	1.500	انحراف معیار	

نتایج و بحث

نتایج مربوط به برنامه‌ریزی ژنتیک

همان‌طور که اشاره شد، روش برنامه‌ریزی ژنتیک جزء روش‌های هوشمند برازش منحنی دسته‌بندی می‌گردد. روش‌های برازش منحنی هوشمند به‌طور خودکار پارامترهای مهم را شناسایی و وزن بیشتری را در مدل‌سازی به آن‌ها اختصاص می‌دهد. برای مدل‌سازی ریاضی تأثیر پارامترهای مؤثر در عملکرد سرریزهای پلکانی در اتلاف انرژی جریان عبوری بر روی این سرریزها با توجه به رهیافت ارائه شده در

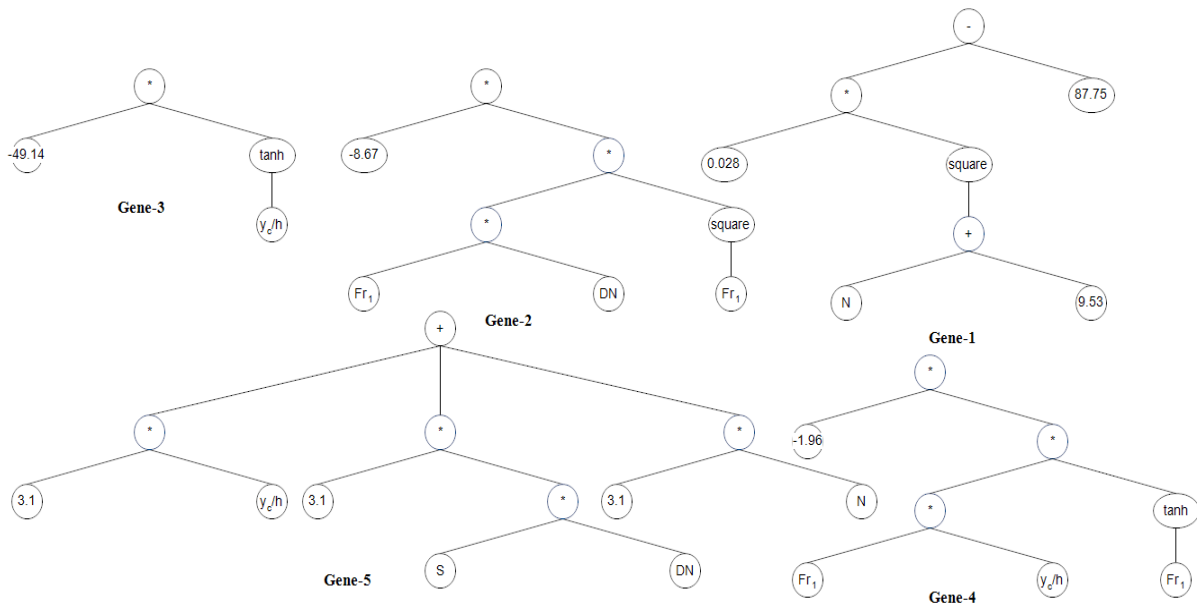
بخش آماده‌سازی داده‌ها مدنظر قرار گرفت بدین‌صورت که داده‌هایی که بر اساس جدول (۱) برای آموزش مدل در نظر گرفته شد در مرحله توسعه مدل استفاده گردید و همچنین داده‌هایی که برای آزمایش مدل در نظر گرفته شده بودند، به صحت‌سنجی اختصاص داده شدند. ورودی‌های مدل برنامه‌ریزی ژنتیک باتوجه‌به معادله (۶) در نظر گرفته شد؛ یعنی پارامترهای $Fr_1, S, N, y_c/h, D_N$ به‌عنوان ورودی و EDR به‌عنوان خروجی در نظر گرفته شد. برای بیان ریاضی ارتباط پارامترهای مؤثر در تنظیماتی در مدل برنامه‌ریزی ژنتیک مانند توابع مورد‌استفاده، عملگرهای ریاضی و تنظیمات مربوط به خود مدل مانند تعداد جمعیت اولیه، نرخ جهش و ... لازم است. این تنظیمات در جدول (۲) گزارش شده است.

جدول ۲. پارامترهای نهایی مدل برنامه‌ریزی ژنتیک.

Table 2. The final parameters of the genetic programming model

پارامتر	مقادیر/ نوع
توابع	times, minus, plus, square, tanh, exp
عملگرهای ریاضی به‌کاربرده شده	+, -, ×, / توان
جمعیت اولیه	200
نرخ جهش	0.044
نرخ وارونگی	0.1
نرخ تلاقی یک نقطه‌ای	0.3
نرخ تلاقی دونقطه‌ای	0.3
نرخ تلاقی ژن‌ها	0.1
نرخ جابه‌جایی ژن‌ها	0.1

مدل ریاضی استخراج‌شده از برنامه‌ریزی ژنتیک در شکل (۵) نشان داده شده است. همان‌طور که در این مشاهده می‌شود این مدل دارای ۵ ژن است که ماکزیمم طول شاخه‌ها سه است. رابطه ریاضی متناسب با مدل ریاضی استخراج‌شده از برنامه‌ریزی ژنتیک در معادله (۸) ارائه شده است. نتایج مدل‌سازی عملکرد سرریزهای پلکانی در اتلاف انرژی جریان عبوری از روی آن در مراحل توسعه و صحت‌سنجی در شکل‌های (۶) و (۷) نشان داده شده است. برای ارزیابی دقت مدل از شاخص‌های محاسبه خطا مانند ضریب تبیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) محاسبه شده است. ارزیابی ساختار مدل استخراج‌شده از برنامه‌ریزی ژنتیک نشان می‌دهد که عدد دراپ، نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پله‌ها تأثیر بیشتری نسبت به سایر پارامترها در استهلاك انرژی جریان دارند. ارزیابی نتایج مدل استخراج‌شده از برنامه‌ریزی ژنتیک نشان می‌دهد که این مدل توانایی مناسبی در مدل‌سازی عملکرد سرریزهای پلکانی در اتلاف انرژی جریان دارد.



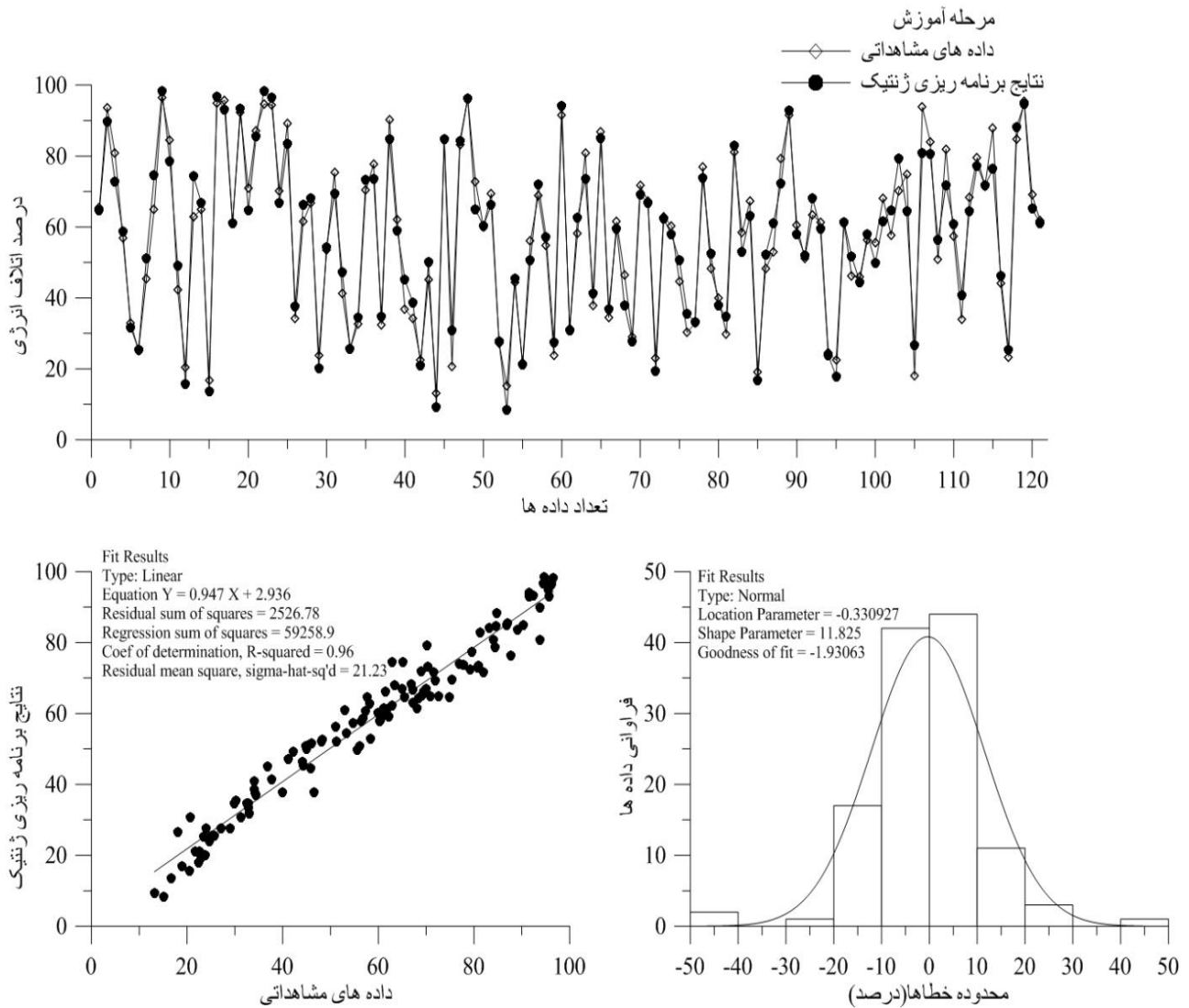
شکل ۵. مدل ریاضی استخراج‌شده از برنامه‌ریزی ژنتیک

Fig 5. Mathematical model extracted from genetic programming

$$\frac{\Delta E}{E_0} = 87.75 + 3.095 \frac{y_c}{h} + 3.095N - 0.02761 \text{square} (N + 9.532) \dots$$

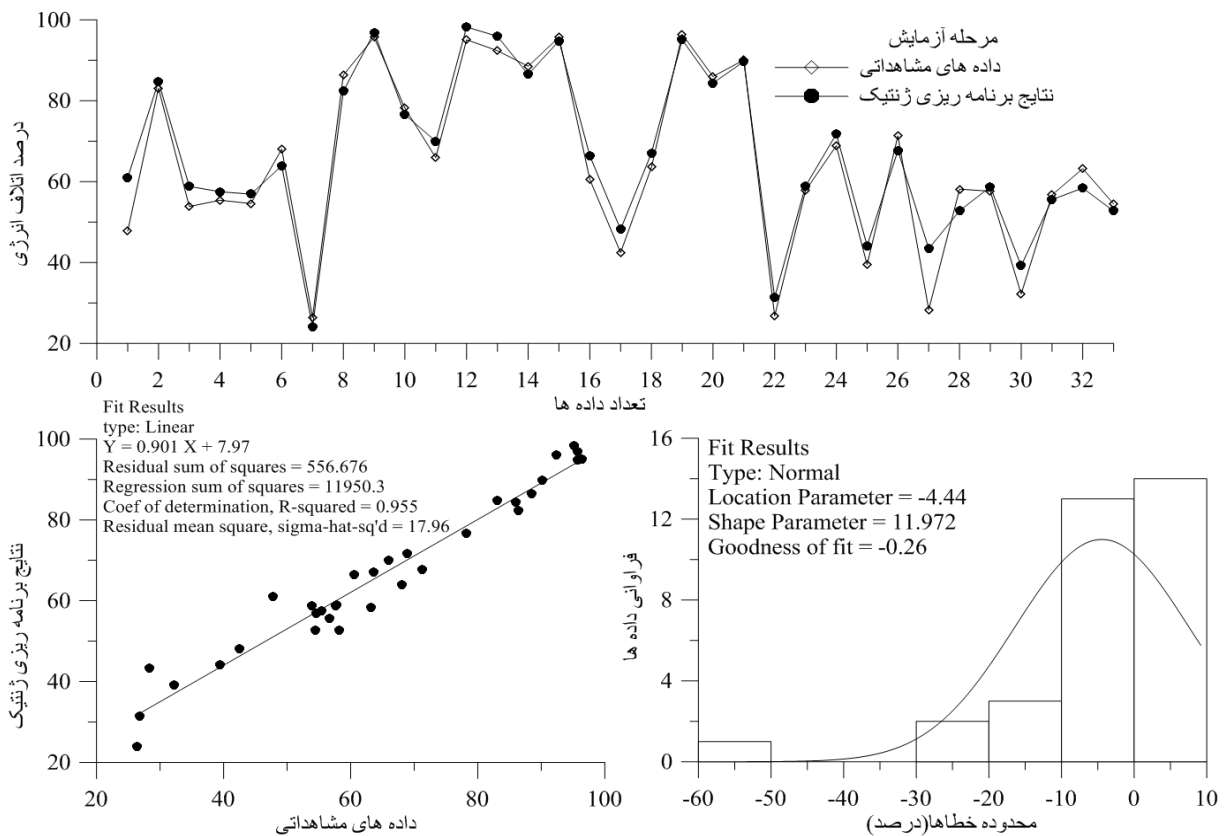
$$-49.14 \tanh \left(\frac{y_c}{h} \right) + 3.095DN \times S - 8.666 Fr_1 DN \times \text{square} (Fr_1) \dots$$

$$-1.963 Fr_1 \frac{y_c}{h} \tanh (Fr_1)$$
(۸)



شکل ۶. عملکرد مدل ریاضی استخراج از برنامه‌ریزی ژنتیک در مرحله توسعه

Fig 6. The performance of the mathematical model of extraction from genetic programming in the development phase

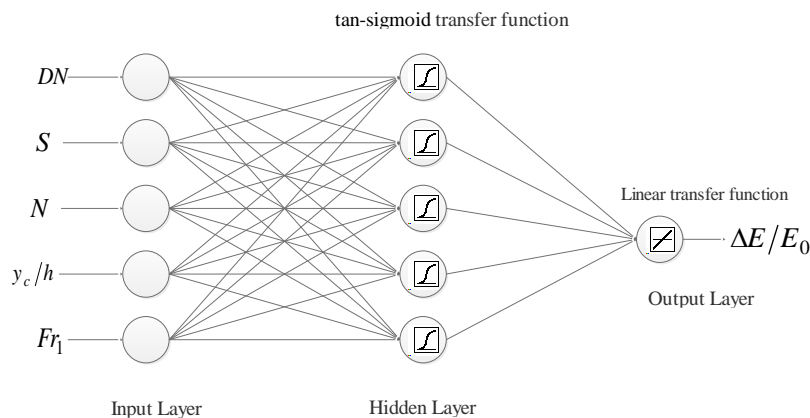


شکل ۷. عملکرد مدل ریاضی استخراج از برنامه‌ریزی ژنتیک در مرحله صحت‌سنجی

Fig 7. The performance of the mathematical model of extraction from genetic programming in the validation phase

نتایج مربوط به شبکه عصبی چندلایه

همان‌طور که اشاره شد شبکه عصبی چندلایه یکی از پرکاربردترین مدل‌های هوش مصنوعی در مدل‌سازی پدیده‌های مهندسی است. همان داده‌هایی که برای توسعه و صحت‌سنجی مدل برنامه‌ریزی ژنتیک مورد استفاده قرار گرفتند برای توسعه مدل شبکه عصبی چندلایه مورد استفاده قرار گرفتند. همان‌طور که در بخش مروری بر شبکه عصبی گفته شد طراحی مدل شبکه عصبی شامل چند مرحله است. این مراحل شامل تعیین آماده‌سازی داده‌ها، تعداد لایه‌های ورودی، پنهان و خروجی، تعیین تابع انتقال و آموزش مدل است. برای جلوگیری از حجیم‌شدن مدل شبکه عصبی بهتر است طراحی گام‌به‌گام آن مدنظر قرار بگیرد. طراحی گام‌به‌گام ساختار شبکه عصبی به این صورت است ابتدا یک لایه پنهان که تعداد نرون‌های آن برابر با تعداد ورودی‌هاست در نظر گرفته می‌شود در این حالت عملکرد توابع انتقال مختلف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بعد از مشخص‌شدن تابع انتقال با بهترین عملکرد در گام بعدی به جهت بهبود عملکرد مدل شبکه عصبی تعداد نرون‌ها و یا تعداد لایه‌های پنهان ممکن است افزایش یابد. خلاصه‌ای از مراحل طراحی مدل شبکه عصبی چندلایه به جهت پیش‌بینی عملکرد سرریزهای پلکانی در اتلاف انرژی جریان عبوری در جدول (۳) ارائه شده است. همان‌طور که از این شکل مشخص است تابع tansing بهترین عملکرد را در میان توابع انتقال ارزیابی شده دارد. همچنین این جدول نشان می‌دهد که افزایش تعداد نرون‌های تابع فعال سازی tansing تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای در افزایش دقت مدل ندارد. ساختار منتخب مدل شبکه عصبی چندلایه در شکل (۸) نشان داده شده است. عملکرد شبکه عصبی توسعه داده‌شده در مراحل توسعه و صحت‌سنجی در شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان داده شده است. همان‌طور که از ارزیابی این شکل‌ها پیدا است دقت مدل شبکه عصبی توسعه داده‌شده جهت پیش‌بینی راندمان سرریزهای پلکانی مناسب است. مقایسه عملکرد شبکه عصبی توسعه داده‌شده با مدل استخراج‌شده از روش برنامه‌ریزی ژنتیک نشان می‌دهد که دقت مدل شبکه عصبی در هر دو مرحله توسعه و صحت‌سنجی مدل یک مقدار جزئی بهتر است. نکته مهم در رابطه با توسعه مدل شبکه عصبی این است که در فرآیند مدل‌سازی پارامترهایی که بیشترین تأثیر را دارند مشخص نمی‌شوند و نیاز است که مدل توسعه داده‌شده آنالیز حساسیت شود.



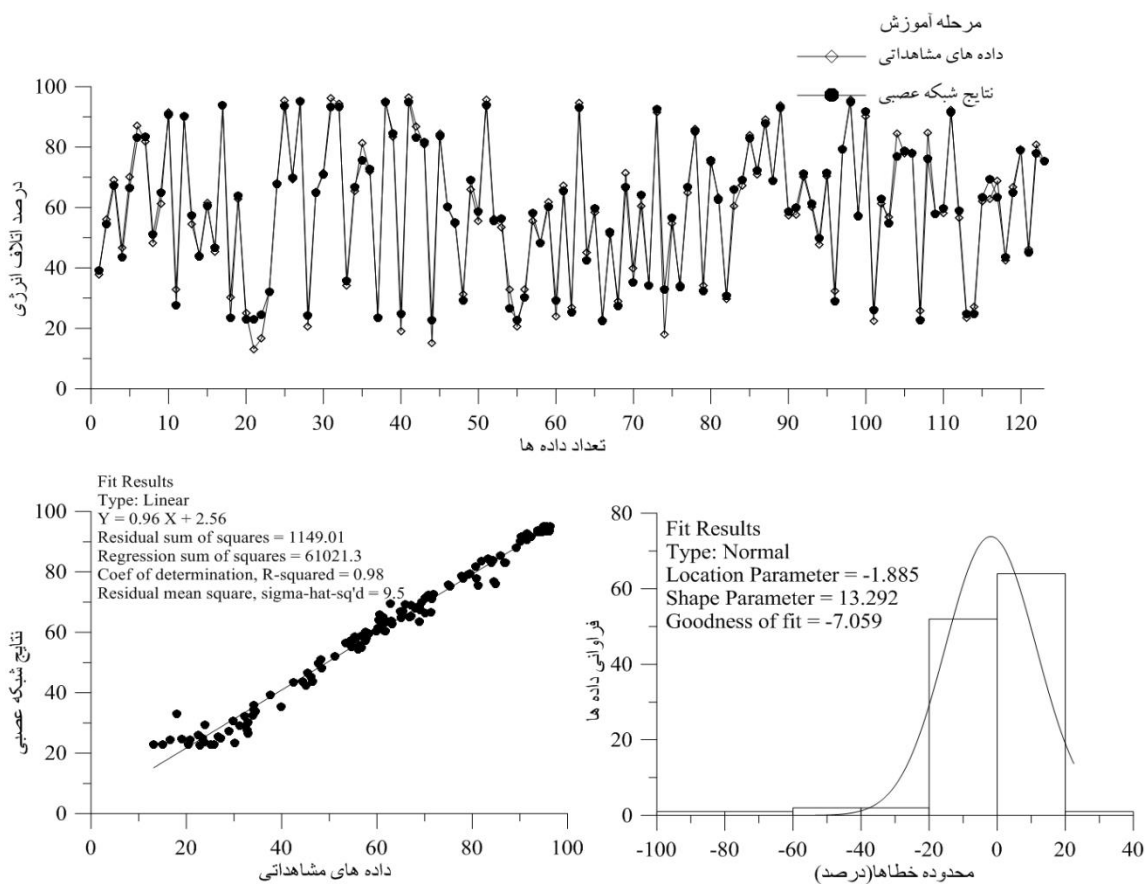
شکل ۸. ساختار منتخب برای شبکه عصبی چندلایه توسعه داده شده.

Fig 8. Selected structure for the developed multilayer neural network.

جدول ۳. خلاصه ای از طراحی مدل شبکه عصبی چندلایه

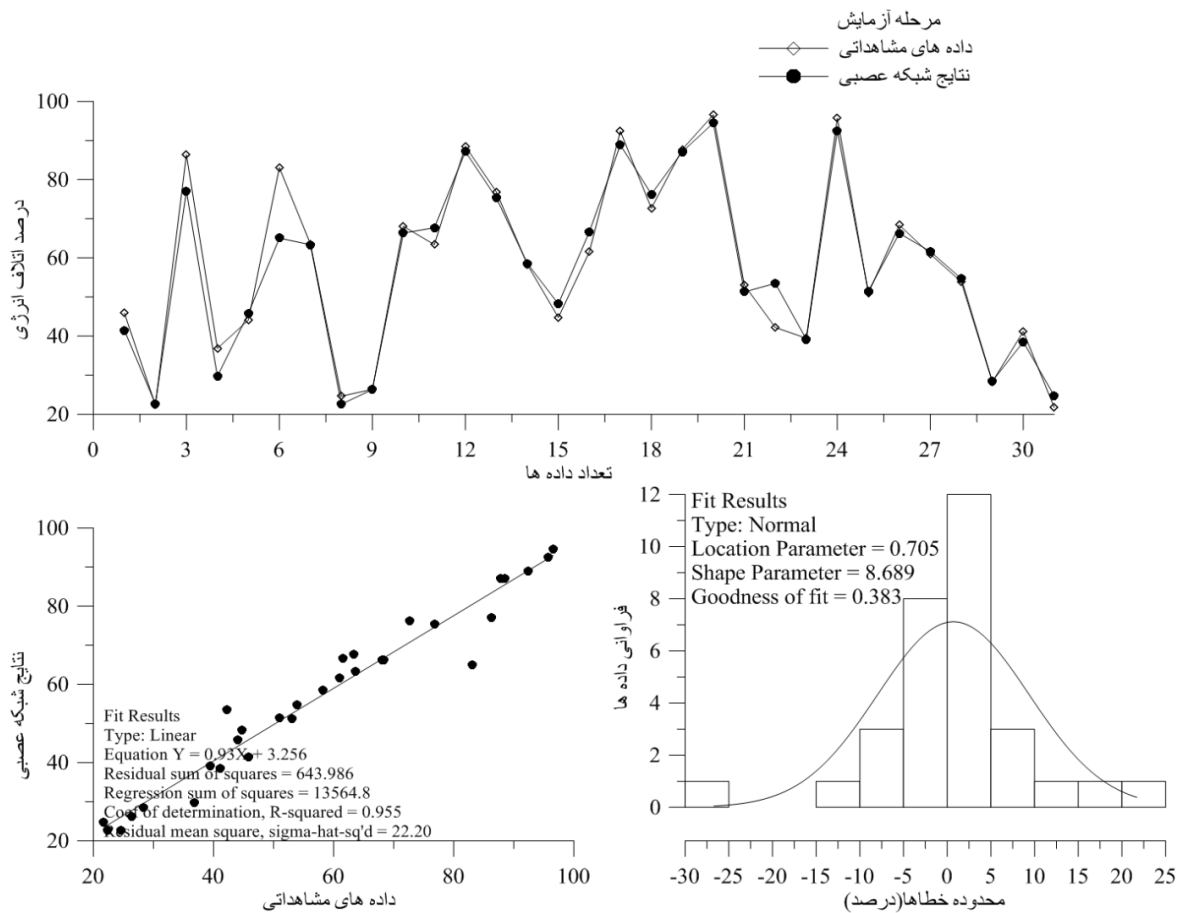
Table 3. Summary of multilayer neural network model design

ردیف	N-H-L	NN&TF	R ^{2*}	RMSE *	R ^{2**}	RMSE **
1	1	5-Purelin	0.63	8.47	0.57	10.85
2	1	5-radbas	0.84	6.58	0.81	7.36
3	1	5-logsig	0.93	4.83	0.92	5.25
4	1	5-tansig	0.987	2.65	0.95	3.98
5	1	9-tansig	0.99	2.52	0.96	3.68



شکل ۹. عملکرد شبکه عصبی توسعه داده شده در مرحله توسعه (آموزش)

Fig 9. Performance of the developed neural network in the development (training) phase.



شکل ۱۰. عملکرد شبکه عصبی توسعه داده شده در مرحله صحت سنجی
 Fig 10. The performance of the developed neural network in the validation phase

آنالیز حساسیت شبکه عصبی

همان‌طور که اشاره شد یکی از نقاط ضعف مدل شبکه نسبت به روش‌های هوشمند برازش منحنی است که در طول مدل‌سازی پارامترهایی که بیشترین تأثیر را دارا است مشخص نمی‌شوند و نیاز است که آنالیز حساسیت انجام گیرد. در این تحقیق برای آنالیز حساسیت مدل شبکه عصبی رهیافتی که توسط (Azamathulla et al., 2016) پیشنهاد شده، مورد استفاده قرار گرفت. این روش بدین صورت است که باتوجه به ساختار منتخب شبکه عصبی عملکرد مدل در مراحل توسعه و آزمایش مورد تحلیل قرار می‌گیرد. سپس یکی از متغیرهای ورودی حذف شده و دوباره مدل مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و عملکرد آن دوباره مورد بررسی قرار می‌گیرد. هر پارامتری که بیشترین تأثیر را در کاهش دقت مدل‌سازی دارد تأثیر بیشتری در پدیده مورد نظر دارد. نتایج حاصل از آنالیز حساسیت مدل شبکه عصبی در جدول (۴) نشان داده شده است. بررسی نتایج آنالیز تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که پارامترهای عدد دراپ و نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پله و تعداد پله‌ها بیشترین تأثیر را در عملکرد سرریزهای پلکانی در استهلاك انرژی جریان دارند.

جدول ۴. نتایج آنالیز حساسیت مدل شبکه عصبی توسعه داده شده

Table 4. The results of the sensitivity analysis of the developed neural network model

ردیف	پارامتر غایب	ورودی‌ها	خروجی	R^2	RMSE
1	-	$DN, S, N, y_c/h, Fr_1$	$\Delta E/E_0$	0.96	3.98
2	DN	$S, N, y_c/h, Fr_1$	$\Delta E/E_0$	0.768	9.45
3	S	$DN, N, y_c/h, Fr_1$	$\Delta E/E_0$	0.952	5.86
4	N	$DN, S, y_c/h, Fr_1$	$\Delta E/E_0$	0.846	7.76
5	y_c/h	DN, S, N, Fr_1	$\Delta E/E_0$	0.813	8.21
6	Fr_1	$DN, S, N, y_c/h$	$\Delta E/E_0$	0.948	6.34

نتیجه‌گیری کلی

مدل‌سازی ریاضی عوامل مؤثر در پدیده‌های هیدرولیکی بخش اصلی مطالعات مهندسی هیدرولیک است. در این تحقیق با استفاده از روش برنامه‌ریزی ژنتیک مدل ریاضی عوامل مؤثر در عملکرد سرریزهای پلکانی در اتلاف انرژی استخراج گردید. روش برنامه‌ریزی ژنتیک جزء روش‌های برازش منحنی هوشمند قرار می‌گیرد که در این روش‌ها پارامترهایی که تأثیر بیشتری در پدیده موردنظر دارند به‌طور خودکار شناسایی شده و در مدل نهایی وزن بیشتری به آن‌ها اختصاص داده می‌شود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد مدل ریاضی استخراج‌شده از برنامه‌ریزی ژنتیک توانایی مناسبی در جهت بیان ریاضی ارتباط پارامترهای مؤثر در عملکرد سرریز پلکانی در استهلاک انرژی دارد. بررسی ساختار مدل ریاضی استخراج‌شده از برنامه‌ریزی ژنتیک نشان می‌دهد که پارامترهای عدد دراپ و نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پله‌ها بیشترین تأثیر را در عملکرد سازه به جهت اتلاف انرژی دارد. همچنین در این پژوهش شبکه عصبی چندلایه به‌عنوان پرکاربردترین مدل هوش مصنوعی در مدل‌سازی‌های مهندسی به جهت تخمین عملکرد سرریز در اتلاف انرژی تهیه شد. نتایج ارزیابی این مدل نشان می‌دهد که دقت مدل شبکه عصبی در مقایسه با مدل برنامه‌ریزی ژنتیک یک مقدار جزئی بهتر است. نتایج تحلیل حساسیت شبکه عصبی نیز نتایج مدل مستخرج شده از برنامه‌ریزی ژنتیک را تأیید می‌نماید.

منابع

- Abu-Khashaba, M. I., Adam, I., & El-Ashaal, A. (2014). Investigating the possibility of constructing lowcost roller compacted concrete dam. *Alexandria Engineering Journal*, 53(1), 131-142.
- Afaridegan, E., Amanian, N., Shانهsazzadeh, A., & Parsaie, A. (2024). Characteristics of flow passing over Hydrofoil Crested Stepped Spillway. *Alexandria Engineering Journal*, 108, 897-910.
- Azamathulla, H. M. (2012). Gene expression programming for prediction of scour depth downstream of sills. *Journal of Hydrology*, 460, 156-159.
- Azamathulla, H. M., Haghiabi, A. H., & Parsaie, A. (2016). Prediction of side weir discharge coefficient by support vector machine technique. *Water Science and Technology: Water Supply*, 16(4), 1002-1016.
- Azamathulla, H. M., & Ghani, A. A. (2011). Genetic programming for predicting longitudinal dispersion coefficients in streams. *Water resources management*, 25, 1537-1544.
- Boes, R. M., Chanson, H., Matos, J., Ohtsu, I., Yasuda, Y., Takahasi, M., Tatewar, S. P., Ingle, R. N., Porey, P. D., Chamani, M. R., & Rajaratnam, N. (2000). Characteristics of Skimming Flow over Stepped Spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(11), 860-873.
- Chafi, C., Hazzab, A., & Seddini, A. (2010). Study of flow and energy dissipation in stepped spillways. *Jordan Journal of civil engineering*, 4(1), 1-11.
- Chanson, H. (1994). Hydraulics of skimming flows over stepped channels and spillways. *Journal of Hydraulic Research*, 32(3), 445-460.
- Chanson, H. (2002). *Hydraulics of Stepped Chutes and Spillways*, Taylor & Francis.
- Chen, S. H. (2015). *Hydraulic Structures*, Springer Berlin Heidelberg.
- Dah-Mardeh, A., Azizyan, G., Bejestan, M. S., Parsaie, A., & Rajaei, S. H. (2023). Experimental study of variation sediments and effective hydraulic parameters on scour downstream of stepped spillway. *Water Resources Management*, 37(13), 4969-4984.
- Dah-Mardeh, A., Azizyan, G., Bejestan, M. S., Parsaie, A., & Rajaei, S. H. (2024). Laboratory investigation to control of downstream scour in a specific model of stepped spillway by six-legged concrete elements (A-Jack). *Ocean Engineering*, 304, 117815.
- Felder, S., & Chanson, H. (2011). Energy dissipation down a stepped spillway with nonuniform step heights. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(11), 1543-1548.
- Guenther, P., Felder, S., & Chanson, H. (2013). Flow aeration, cavity processes and energy dissipation on flat and pooled stepped spillways for embankments. *Environmental fluid mechanics*, 13(5), 503-525.
- Karami, S., Khosrojerdi, A., & Shafai Bajestan, M. (2014). Numerical Modelling of Hydraulic Flow in Dam Stepped Spillway and Study of Cavitation Phenomenon. *European Online Journal of Natural and Social Sciences: Proceedings*, 3(3 (s)), pp-283.
- Koza, J. R. (1992). *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*, Bradford.
- Parsaie, A., Haghiabi, A. H., Saneie, M., & Torabi, H. (2016). Prediction of energy dissipation on the stepped spillway using the multivariate adaptive regression splines. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 22(3), 281-292.
- Rajaratnam, N. (1990). Skimming Flow in Stepped Spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(4), 587-591.
- 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.

- Salmasi, F., & Özger, M. (2014). Neuro-fuzzy approach for estimating energy dissipation in skimming flow over stepped spillways. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39, 6099-6108.
- Seyedian, S. M., Kisi, O., Parsaie, A., & Kashani, M. (2024). Improving the Reliability of Compound Channel Discharge Prediction Using Machine Learning Techniques and Resampling Methods. *Water Resources Management*, 38, 1-25.
- Sorensen, R. M. (1985). Stepped spillway hydraulic model investigation. *Journal of hydraulic Engineering*, 111(12), 1461-1472.