

بررسی مقایسه‌ای عملکرد روش المان محدود و مدل تکاملی در پیش‌بینی برآورد دبی نشت از بدنه یک سد خاکی

یکی از موضوعات بسیار مهم در مورد سدهای خاکی تراوش آب از بدنه و پی سد می‌باشد که در صورت تجاوز از مقدار معینی منجر به خرابی و شکست سد خواهد شد. در تحقیق کنونی، کارایی روش تکاملی برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) و روش المان محدود (SEEP/W) در تعیین دبی نشت از بدنه سد خاکی زنوز واقع در استان آذربایجان شرقی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، ابتدا با استفاده از داده‌های سد خاکی زنوز (تراز آب در مخزن سد، سطح ایستائی پیژومترهای کار گذاشته شده در بدنه و پی سد و دبی نشت) مدل‌هایی در ۳ حالت شامل حالت منفرد دبی نشت وابسته به تراز مخزن، حالت منفرد دبی نشت وابسته به تراز پیژومتر و حالت ترکیبی دبی نشت وابسته به تراز مخزن و پیژومتر تعریف شده و نتایج حاصله مورد ارزیابی قرار گرفته است. سپس با استفاده از آنالیز حساسیت مؤثرترین پارامترها در هر حالت مشخص شده و بهترین حالت به‌دست آمده از روش GEP، با مدل‌سازی نرم‌افزاری با SEEP/W مقایسه گردید. نتایج نشان می‌دهد که تعیین دبی نشت در حالتی که دبی نشت تنها وابسته به تراز مخزن می‌باشد منجر به جواب‌های دقیق‌تری می‌گردد و در این راستا روش برنامه‌ریزی بیان ژن از روش المان محدود به کار رفته موفق‌تر می‌باشد. نتایج آنالیز حساسیت نشان داد که تراز آب مربوط به روز قبل در پیژومتر نصب شده در ارتفاع ۱۸۵۰ متری ((PL105(t-1)) و تراز آب در مخزن مربوط به دو روز قبل ((RL(t-2)) تاثیرگذارترین پارامترها در مدل‌سازی می‌باشند.

واژگان کلیدی: سد خاکی، دبی نشت، تراز آب مخزن، GEP، SEEP/W.

حسن ثانی

کارشناسی ارشد، دانشکده
مهندسی عمران، دانشگاه تبریز.
پست الکترونیک:
h.sani@tabriziau.ac.ir

کیومرث روشنگر*

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

رقیه قاسم پور

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

۱- مقدمه

از اهمیت بالایی برخوردار است. توسعه روش‌های عددی و همزمان با آن توسعه رایانه‌ها، حل معادلات تراوش را میسر کرده و عرصه جدیدی را به روی علاقمندان برای توسعه این مدل‌ها گشوده است. مدل‌هایی که در این زمینه تهیه می‌شوند در مرحله نخست به لحاظ نوع المان‌بندی و تعریف محیط و در مرحله بعد به لحاظ روش حل معادلات قابل تقسیم است. روش‌های متداول شامل تفاضلات محدود، روش اجزای محدود، روش المان‌های مرزی و روش احجام محدود می‌شود. حل معادلات به‌دست آمده نیز می‌تواند با روش‌های متفاوتی اعم از روش حل دقیق و با روش‌های تکراری و امثال آن انجام

بسیاری از سدهای خاکی شناخته شده در جهان، دارای مشکلات ناشی از نشت می‌باشند. این نشت ممکن است از تشکیلات زمین‌شناسی ساختگاه سد یا پی سد و یا از بدنه سد اتفاق افتد. در صورتی که نشت آب از سدهای خاکی کنترل نشود ممکن است در درازمدت منجر به خسارات جبران‌ناپذیری به سد گردد، لذا کنترل نشت و محاسبه مقدار جریان آب از پی و بدنه سد خاکی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۰۵/۱۶، بازنگری ۱۳۹۶/۱۱/۰۲، پذیرش ۱۳۹۶/۱۱/۱۳.
(DOI): 10.22091/cer.2018.2349.1094 شناسه دیجیتال

گردد. در دهه ۸۰، مدل‌های زیاد و مشهوری برای جریان آب زیرزمینی و مدل‌های انتقال ارائه شد. وارد و یه^۱، برنامه المان محدود دوبعدی را برای جریان اشباع-غیراشباع با نام FEM WATER ارائه کردند که توسط چنگ و یه^۲، به صورت مدل سه بعدی با نام 3D FEM WATER به روز شد. واس^۳، یک مدل شبیه‌سازی دوبعدی FEM با نام SUTRA برای جریان آب زیرزمینی اشباع-غیراشباع سیال قابل تراکم ارائه کرد. لاپالا و همکاران^۴، VS2D را برای حل مسائل اشباع متغیر، جریان تک فاز در محیط متخلخل در دو بعد ارائه کردند [۱]. مقدس و همکاران طی مقاله‌ای به ارزیابی روش‌های مختلف محاسبه و کاهش نشت از پی و بدنه سدهای خاکی (مطالعه موردی سد نهرین) با استفاده از مدل SEEP/W پرداخته و چهار حالت مختلف را برای کاهش دبی نشت و گرادیان خروجی مورد مقایسه قرار دادند [۲]. پاکباز و همکاران با مدل SEEP-3D به ارزیابی ساخت دیوار آب‌بند بتن پلاستیک در تکیه‌گاه راست و چپ سد خاکی کرخه در کاهش مقدار تراوش پرداختند. نتایج آنها نشان داد که با ساخت دیوار آب‌بند چپ و راست مقدار تراوش به ترتیب ۶۰ و ۲۰ درصد کاهش می‌یابد [۳]. ارشد و بابر^۵، با استفاده از روش المان محدود میزان تراوش از بدنه سد خاکی را در مقاطع مختلف سد مورد بررسی قرار دادند [۴]. هو و فتاحی^۶، نشت در یک سد خاکی را که دارای لایه‌های غیراشباع بود با روش تحلیلی و با استفاده از روابط حاکم جریان و با در نظر گرفتن اثرات هوا و آب بررسی کردند [۵].

در دهه‌های اخیر روش‌های محاسباتی نرم (شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN^۷))، برنامه‌ریزی ژنتیک

8- Genetic Programming

9- Support Vectore Machine

10- Nero Fuzzy

11- Gene Expressing Programming

12- Khu

13- Liong

14- Whigham and Crapper

15- Rabuna

16- Aytok

17- Tayfure

18- Jeziorsko

19- Ersayin

1- Ward and Yeh

2- Cheng and Yeh

3- Voss

4- Lappala et al

5- Arshad & Baber

6- Ho & Fatahi

7- Artificial Neural Network

۲-۱-۲- ساختار زمین‌شناسی ساختگاه سد

دامنه‌های ساختگاه سد از سنگ‌های داسیتی محکم، سخت و بدون هوازدگی تشکیل شده‌اند و از پایداری کلی برخوردارند. در محل ساختگاه سد، ساختار محلی ویژه‌ای دیده نمی‌شود جز آنکه شیب لایه‌های ماسه‌سنگی اندکی به‌سوی جنوب غربی است. همچنین رخنمون کوچک سنگ‌های پالوزوئیک که در بالادست ساختگاه رخنمون دارد، در واقع، بخشی از یال جنوبی ناودیس کشیده‌ای هستند که به احتمال زیاد تا شمال غرب زنوز در فاصله‌ای نسبتاً طولانی ادامه یافته‌اند. گرچه در این فاصله، سنگ‌های پالوزوئیک برون‌زد ندارند؛ اما در شمال غرب زنوز در کنار آبراهه دره نیز رخنمون این سنگ‌ها همچنان در قالب یک ناودیس دیده می‌شوند. دره زنوز در محل ساختگاه سد، به‌صورت دره‌ای نسبتاً باریک و نزدیک به شکل V است که شیب‌های دامنه چپ و راست آن به ترتیب ۷۵ و ۷۰ درصد می‌باشد. همچنین نسبت طول تاج به ارتفاع سد به بلندای ۶۰ متر حدود ۳ می‌باشد. ساختگاه سد زنوز با متوسط عدد لوژن کمتر از ۶ به لحاظ آبگذری دارای وضعیت بسیار مطلوبی است. چهار مقطع عرضی به‌عنوان مقاطع ابزارگذاری سد پیش‌بینی شده است. این مقاطع با توجه به تنوع و ناهمگنی ساختگاه سد از نظر ویژگی‌های نشست‌پذیری و آبگذری اختیار شده‌اند. با توجه به مقطع زمین‌شناسی و همچنین عدد لوژن پایین قسمت چپ سد و همچنین ارتفاع زیاد مقطع ۱ که در این قسمت قرار دارد، این مقطع، که در شکل ۲ نشان داده شده است، به‌عنوان مقطع بحرانی سد در نظر گرفته و پردازش اطلاعات میدانی جمع‌آوری شده از این مقطع به‌عنوان نمونه برای کل سد در نظر گرفته می‌شود.

کارایی روش هوشمند برنامه‌ریزی بیان ژن در تعیین دبی نشت از بدنه سد خاکی زنوز بررسی شده است. در این راستا، مدل‌های متفاوتی براساس تراز سطح آب مخزن و پیژومترهای موجود در بدنه سد تعریف گردیده و مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین فرمول صریحی جهت پیش‌بینی دبی نشت از بدنه سد خاکی با استفاده از روش GEP ارائه شد. در نهایت، نتایج حاصل از روش GEP با روش المان محدود (نرم‌افزار SEEP/W) مورد مقایسه قرار گرفت.

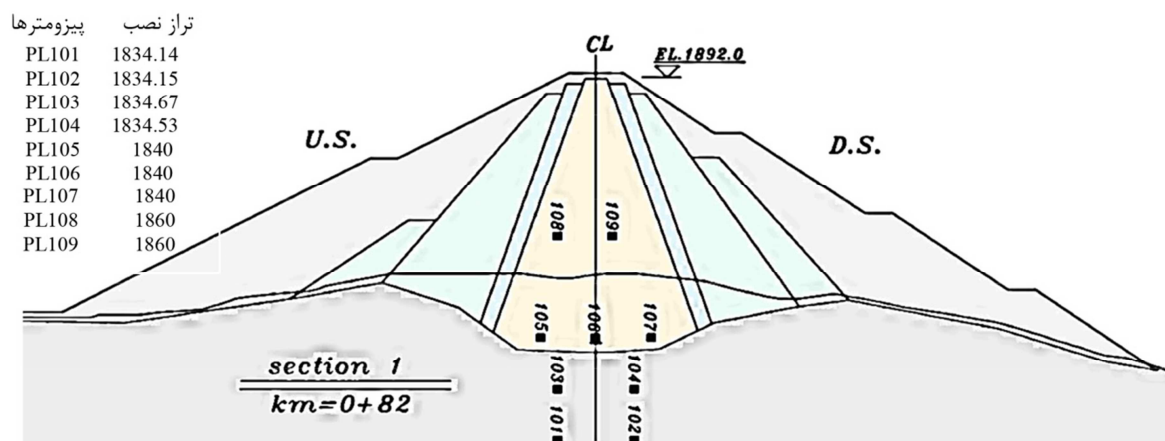
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مشخصات سد زنوز

سد زنوز بر روی رودخانه زنوز چای که از سرشاخه‌های رودخانه ارس در استان آذربایجان شرقی می‌باشد با هدف توسعه آبیاری اراضی زراعی پایین‌دست، تأمین آب شرب مورد نیاز شهر زنوز و نیز تأمین آب مورد نیاز محیط‌زیست احداث گردیده است. این سد مخزنی به ارتفاع ۵۹ متر از بستر رودخانه و ۶۰ متر از پی با حجم عملیات خاکی ۵۶۰۰۰۰ مترمکعب و حجم مفید مخزن معادل ۵/۸ میلیون مترمکعب به اجرا درآمده است. مخزن سد زنوز در تراز نرمال با حجم کل ۵/۹ میلیون مترمکعب در گستره‌ای به طول متوسط ۱۵۰۰ متر و عرض متوسط ۲۱۰ متر، مساحتی بالغ بر ۳۲ هکتار را در بر خواهد گرفت. در شکل ۱، مخزن سد زنوز و مخزن آن نشان داده شده است [۱۵].



شکل ۱- سد خاکی زنوز



شکل ۲- مقطع شماره ۱ سد زنوز

۲-۲- برنامه‌ریزی بیان ژن

فیزیکی نشت آب را به صورت ریاضی شبیه‌سازی کند. اساس مدل‌سازی در این نرم‌افزار بر پایه روش اجزاء محدود بوده و کاربردهای آن در مدل‌سازی جریان آب و همچنین توزیع فشار آب منفذی در محیط‌های متخلخل، از جمله محیط‌های خاکی می‌باشد. از قابلیت‌های این نرم‌افزار، ترسیم تراز آب عبوری از درون خاک و بردارهای سرعت و ترسیم خطوط جریان و هم‌پتانسیل و محاسبه دبی عبوری برای مقطع مشخصی از خاک است. این نرم‌افزار با فرمول‌بندی جامع خود قادر است تا مسائل ساده و پیچیده مربوط به نشت را حل نماید. همچنین این برنامه این قابلیت را دارد که در شرایط جریان ماندگار^{۲۱} آنالیز انجام دهد و شرایط آب و خاک را در حالت‌های مرحله‌ای بررسی کند [۱۷].

۲-۴- معیارهای ارزیابی

در این تحقیق، به منظور ارزیابی کارایی روش‌های استفاده شده جهت تخمین میزان دبی نشت از بدنه سد خاکی زنوز، از دو پارامتر آماری استفاده گردید که عبارت‌اند از: ضریب تعیین (DC^{22}) و میانگین خطای نرمالایز شده (MNE^{23}). شاخص‌های عملکرد مذکور در روابط (۱) و (۲) آورده شده است. در این روابط، O_i و P_i به ترتیب بیانگر دبی نشت مشاهداتی و دبی نشت

برنامه‌ریزی بیان ژن، تعمیم‌یافته الگوریتم ژنتیک (GA^{20}) است که براساس تئوری داروین ارائه شده و توسط فریرا در سال ۱۹۹۹ ابداع شد [۱۶]. برنامه‌ریزی بیان ژن نیز همانند الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی ژنتیک، یک الگوریتم ژنتیکی است که از جمعیتی از افراد استفاده کرده و آنها را مطابق برازندگی انتخاب می‌کند و تغییرات ژنتیکی را با استفاده از یک یا چند عملگر ژنتیکی اعمال می‌نماید. تفاوت اساسی بین این سه الگوریتم، مربوط به ماهیت افراد آنهاست، به طوری که در GA ، افراد رشته‌های خطی با طول ثابت (کروموزوم) و در GP ، نهادهای غیرخطی با اندازه‌ها و اشکال متفاوت (درختان تجزیه) می‌باشند، در حالی که در GEP ، افراد به صورت رشته‌های خطی با طول ثابت (ژنوم یا کروموزوم) کدگذاری شده (مشابه با آنچه که در الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود) و سپس به شکل نهادهای غیرخطی با اندازه‌ها و اشکال متفاوت (یعنی نمایش دیگرام ساده یا بیان درختی مشابه با درختان تجزیه در برنامه‌ریزی ژنتیک) اظهار می‌شوند.

۲-۳- نرم‌افزار SEEP/W

نرم‌افزار SEEP/W یکی از نرم‌افزارهای بسته نرم‌افزاری Geo studio است که می‌تواند فرآیند واقعی

²¹- steady state

²²- Determination Coefficient

²³- Mean Normalized Error

²⁰- Genetic Algorithm

$$X = 0.05 + 0.95 \frac{(X_i - X_{min})}{(X_{max} - X_{min})} \quad (3)$$

۳- مدل سازی

۳-۱- مدل سازی با برنامه ریزی بیان ژن (GEP)

روند تعیین مدل های تخمین مشخصات پرش هیدرولیکی با استفاده از روش برنامه ریزی بیان ژن شامل پنج مرحله می باشد؛ که به ترتیب عبارتند از تعیین تابع برازش، انتخاب مجموعه ترمینال ها و مجموعه توابع انتخاب ساختار کروموزوم ها که شامل طول سر و تعداد ژن ها است، انتخاب تابع پیوند که تعیین کننده پیوند بین ریز درخت ها می باشد و مرحله آخر انتخاب عملگرهای ژنتیکی و نرخ آن ها است. ترکیبی از عملگرهای ژنتیکی (جهش، وارون سازی، ترکیب ترانسپوز) مطابق جدول ۱ استفاده گردیده است. همچنین از هشت اپراتور جهت تجزیه و تحلیل مدل ها استفاده گردید.

پیش بینی شده و \bar{O}_i و N به ترتیب بیانگر میانگین داده های مربوط به دبی نشت مشاهداتی و تعداد داده ها می باشند.

$$DC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad (1)$$

$$MNE = \frac{1}{N} - \sum_{i=1}^N \left| \frac{(O_i - P_i)}{O_i} \right| \quad (2)$$

لازم به ذکر است که در آنالیز مدل ها از ۷۵ درصد داده ها جهت آموزش و ۲۵ درصد دیگر جهت آزمون مدل ها استفاده گردیده است. از آنجایی که آموزش نرم افزار در صورت اعمال یکسری پیش پردازش ها بر روی ورودی ها و هدف و نرمالیزه کردن آنها می تواند به کارایی بالاتر مدل منجر شود، لذا در این تحقیق، داده ها با استفاده از رابطه (۳) به صورت نرمالیزه شده مورد استفاده قرار گرفتند. در این رابطه، X ورودی نرمالایز شده، X_i داده ورودی، X_{min} و X_{max} به ترتیب حداقل و حداکثر داده های ورودی می باشند.

جدول ۱- پارامترهای مدل های GEP مورد استفاده.

توصیف پارامتر	تنظیمات پارامتر
Function set	+ , - , * , / , Cos , sin , tanh , log , x ² , x ³
Chromosomes	30
Head size	7
Number of genes	5
Linking function	Addition
Fitness function error	Root Mean Square Error (RMSE)
Mutation rate	0.044
Inversion, IS and RIS transposition rate	0.1
One and Two-point recombination rate	0.3
Gene recombination and transposition rate	0.1
اپراتورهای مورد استفاده در این تحقیق	
$F_1 = \{ + , - , \times , \div \}$	$F_2 = \{ + , - , \times , \div \}$
$F_3 = \{ + , - , \times , \div , x^2 , x^3 \}$	$F_4 = \{ + , - , \times , \div , x^2 , x^3 , \text{Log} \}$
$F_5 = \{ + , - , \times , \div , \text{Sin} , \text{Cos} \}$	$F_6 = \{ + , - , \times , \div , \text{Sin} , \text{Cos} , \text{tan} \}$
$F_7 = \{ + , - , \times , \div , \text{Sin} , \text{tan} \}$	$F_8 = \{ + , - , \times , \div , \text{Sin} , \text{tan} , \text{h} \}$

۳-۲- مدل‌های تعریف شده

تراز آب در مخزن و پیژومترها (RL, PL). جدول ۲ مدل‌های تعریف‌شده برای حالت‌های مختلف را نشان می‌دهد. در این جدول، پارامتر t تغییرات تراز آب در مخزن یا پیژومترها را که مربوط به امروز می‌باشند نشان می‌دهد. همچنین $(t-1)$ و $(t-2)$ تغییرات مربوط به یک روز و دو روز قبل را بیان می‌کنند.

جهت تعریف مدل‌های پیش‌بینی دبی نشت از سد خاکی سه حالت در نظر گرفته شد که شامل: (۱) حالت منفرد: دبی نشت تابع تغییرات تراز آب پیژومترها (PL)، (۲) حالت منفرد: دبی نشت تابع تغییرات تراز آب در مخزن (RL) و (۳) حالت ترکیبی: دبی نشت تابع تغییرات

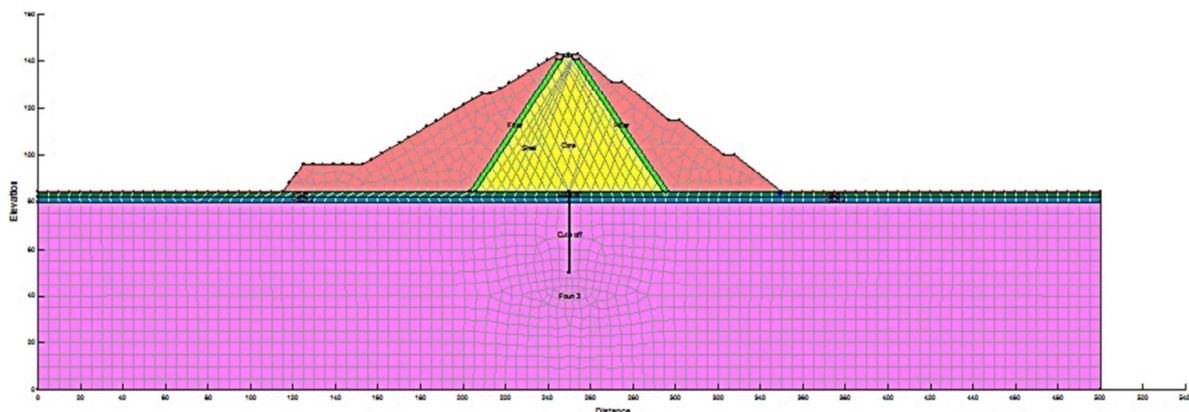
جدول ۲- انواع مدل‌های مفروض برای حالت‌های مختلف

تعداد متغیرها	متغیرها	تابع هدف	مدل	حالات در نظر گرفته شده
-	-	-	-	حالت منفرد
۴	$PLi(t)_{i=101}^{i=104}$	PL(t) - Bed rock	Model.1	PL (دبی نشت وابسته به تغییرات تراز آب در پیژومترها)
۱	PL 106 (t)	P(t)-CL Core	Model.2	
۵	$PLi(t)_{i=105}^{i=109}$	PL(t) -Core	Model.3	
۴	PL 109 (t), PL 107 (t), PL 109 (t), PL 104 (t)	PL(t) -DS	Model.4	
۹	$PLi(t)_{i=101}^{i=109}$	PL(t) -Totall	Model.5	
۴	PL 108 (t), PL 106 (t), PL 103 (t), PL 101 (t)	PL(t) -US	Model.6	
۹	$PLi(t-1)_{i=101}^{i=109}$	PL(t-1) - Totall	Model.7	
۹	$PLi(t-2)_{i=101}^{i=109}$	PL(t-2)- Totall	Model.8	
۱	RL (t)	RL(t)	Model.9	RL (دبی نشت وابسته به تغییرات تراز آب در مخزن)
۲	RL (t), RL (t - 1)	RL(t,t-1)	Model.10	
۳	RL (t), RL (t - 1), RL (t - 2)	RL(t,t-1,t-2)	Model.11	
۱	RL (t - 1)	RL(t-1)	Model.12	
۱	RL (t - 2)	RL(t-2)	Model.13	
				حالت ترکیبی
۵	RL (t), $PLi(t)_{i=101}^{i=104}$	(t)- Bed rock RL(t),PL	Model.14	RL, PL (وابسته به تغییرات تراز آب در مخزن و پیژومترها)
۲	RL (t), PL 106 (t)	RL(t),PL(t)-CL Core	Model.15	
۶	RL (t), $PLi(t)_{i=105}^{i=109}$	RL(t),PL(t)-Core	Model.16	
۵	RL (t), PL 109 (t), PL 107 (t), PL 104 (t), PL 102 (t)	RL(t),PL(t)-DS	Model.17	
۱۰	RL (t), $PLi(t)_{i=101}^{i=109}$	RL(t), PL(t)-Totall	Model.18	
۵	RL (t), PL 108 (t), PL 103 (t), PL 106 (t), PL 101 (t)	RL(t), PL(t)-US	Model.19	
۱۰	RL (t), $PLi(t-1)_{i=101}^{i=109}$	RL(t),PL(t-1)-Totall	Model.20	
۱۰	RL (t - 1), $PLi(t-1)_{i=101}^{i=109}$	RL(t-1),PL(t-1)-Totall	Model.21	
۱۰	RL (t - 2), $PLi(t-2)_{i=101}^{i=109}$	RL(t-2),PL(t-2)-Totall	Model.22	

۳-۳- مدل سازی عددی با نرم افزار SEEP/W

چپ دره همراه با پرده تزریق به عمق ۳۰ متر به دلیل نفوذپذیری زیاد مصالح سنگ پی در عمق‌های تا ۲۰ متر، مورد بررسی قرار گرفت. باید اشاره کرد که نحوه‌ی مش‌بندی و انتخاب ابعاد آنها در دقت جواب حاصله تأثیرگذار می‌باشند. با ریزتر شدن مش‌ها دقت نتایج بالاتر می‌رود، اما مدت زمان تحلیل نیز افزایش می‌یابد. بنابراین، در تحقیق کنونی با در نظر گرفتن این نکات برای آنالیز، سد به ۲۲۸۵ المان مربعی به ابعاد پنج متر تقسیم‌بندی شد. شرایط تخلیه ناگهانی در سد و حالت گذرا در نظر گرفته نشده و در کلیه آنالیزها حالت دائمی در نظر گرفته شده است. مشخصات مربوط به مصالح سد در جدول ۳ آورده شده است.

سد خاکی زنوز با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده مورد نیاز برای مدل‌سازی سد و مقطع ۱ ابزاربندی، به صورت دوبعدی و توسط SEEP/W مدل گردید. به منظور مدل‌سازی مقطع بیشینه سد از نقشه‌های مربوط به مقاطع ابزاربندی سد زنوز استفاده شده و شبکه‌بندی، شرایط مرزی محدوده مصالح مختلف و نفوذپذیری مطابق با شکل ۳ انجام گرفت. جهت تعیین دقیق مقدار دبی نشت یافته از بدنه و پی، به دلیل وجود اختلاف در ویژگی ژئوتکنیکی مصالح سنگی زیر بدنه سد (از لحاظ نفوذپذیری)، مقطع عرضی سد در تکیه‌گاه چپ و نیمه



شکل ۳- شکل مدل شده نرم‌افزار همراه با مش‌بندی

جدول ۳- مشخصات مصالح به کار رفته در سد زنوز

مواد			مشخصات
مصالح سنگریزه‌ای	فیلتر	هسته رسی	
۲۰	۱۷/۲	۱۶	وزن مخصوص خشک (kN/m^3)
۲۲/۴	۲۰/۲	۱۸/۸	وزن مخصوص اشباع (kN/m^3)
۰	۰	۳۰	چسبندگی (kN/m^2)
۴۷	۳۵	۲۱	Φ ($^\circ$)
۱۰-۴	۱۰-۵	۴/۸×۱۰-۸	ضریب نفوذپذیری (m/s)

۴- نتایج و بحث

جدول ۴ نتایج ارزیابی مدل‌ها را از نظر تخمین مقدار دبی نشت سد زنوز در صورتی که فقط تابع تراز آب در پی‌زومترها می‌باشد، نشان می‌دهد. جهت آنالیز بهتر

۴-۱- تخمین دبی نشت فقط تابع تغییرات تراز آب در

پی‌زومترها (حالت منفرد PL)

نتایج و انتخاب مدل برتر، رتبه‌بندی مدل‌ها صورت گرفته است.

جدول ۴- خلاصه نتایج ارزیابی حالت منفرد دبی نشت وابسته به تغییرات تراز آب پیژومترها (PL) با ورودی‌های مختلف

Training		Testing		اپراتور	نوع داده	مدل	حالت
MNE	DC	MNE	DC				
۰/۰۵۰۵	۰/۹۷۷۸	۰/۰۵۷۷	۰/۹۵۵۴	F5	بدون پیش پردازش	Model.1	PL (حالت منفرد- دبی نشت وابسته به تغییرات تراز آب پیژومترها)
۰/۱۹۸۷	۰/۶۱۲۴	۰/۲۳۸۵	۰/۴۵۶۰	F6	بدون پیش پردازش	Model.2	
۰/۱۰۵۸	۰/۹۳۴۹	۰/۱۳۳۰	۰/۸۷۱۳	F7	بدون پیش پردازش	Model.3	
۰/۰۵۳۵	۰/۹۷۶۶	۰/۰۵۶۲	۰/۹۵۳۷	F5	بدون پیش پردازش	Model.4	
۰/۰۵۲۲	۰/۹۷۴۹	۰/۰۵۶۶	۰/۹۶۸۹	F7	بدون پیش پردازش	Model.5	
۰/۰۶۶۸	۰/۹۷۶۳	۰/۰۷۹۵	۰/۹۵۶۲	F6	بدون پیش پردازش	Model.6	
۰/۰۴۹۳	۰/۹۸۵۹	۰/۰۵۳۶	۰/۹۳۰۳	F4	بدون پیش پردازش	Model.7	
۰/۰۸۷۳	۰/۹۷۱۷	۰/۲۲۶۹	۰/۹۶۶۹	F4	بدون پیش پردازش	Model.8	

رتبه‌بندی در جدول ۵ نشان داده شده است. مطابق جدول ۵ و با مقایسه مقدار معیارهای اندازه‌گیری شده برای هر مدل، Model.7 با تابع $Q(t)=PL(t-1)-Total$ و متغیرهای ورودی تحت اپراتور F4 و بدون پیش پردازش داده‌ها، بهترین مدل جهت تخمین دبی نشت سد زنون با در نظر گرفتن حالت منفرد تابع تغییرات تراز پیژومتر انتخاب گردید. این مدل نشان می‌دهد که در نظر گرفتن تراز آب مربوط به یک روز گذشته، تمامی پیژومترها منجر به جواب‌های دقیقی می‌گردد. بعد از این مدل، Model.1 که دارای پارامترهای ورودی تراز آب امروز پیژومترهای ۱۰۱ تا ۱۰۴ که در پی قرار دارند می‌باشد، نتایج مطلوبی را ارائه داده است.

بدین صورت که برای هر معیار ارزیابی از بین مدل‌های مختلف، معیاری که به ترتیب بهترین تا بدترین مقدار می‌باشد امتیاز ۱ تا ۸ را به خود اختصاص داده و با جمع امتیازهای کلیه معیارها در هر مدل، مدلی که کمترین امتیاز را دارد به‌عنوان بهترین مدل انتخاب می‌کنیم. از نظر متوسط خطای نرمالایز شده (MNE)، از بین مدل‌ها، مدلی که دارای کمترین مقدار باشد امتیاز ۱ داشته و به ترتیب با بیشتر شدن مقدار آن امتیاز آن نیز افزایش می‌یابد، در صورتی که برای ضریب همبستگی پیرسون (R^2) و ضریب تعیین (DC) هرچه مقدار این معیار بیشتر و نزدیک‌تر به ۱ باشد، امتیاز بهتر و یا به عبارتی پایین‌تری را به خود اختصاص می‌دهند. نتایج

جدول ۵- نتایج رتبه‌بندی معیارهای ارزیابی حالت منفرد دبی نشت وابسته به تغییرات تراز آب پیژومترها (PL) با ورودی‌های مختلف

Best	Rank	Training		Testing		اپراتور	نوع داده	مدل	حالت
		MNE	DC	MNE	DC				
F4	۱۲	۲	۲	۴	۴	F5	بدون پیش پردازش	Model.1	PL (حالت منفرد- دبی نشت وابسته به تغییرات تراز آب پیژومترها)
	۳۲	۸	۸	۸	۸	F6	بدون پیش پردازش	Model.2	
	۲۷	۷	۷	۶	۷	F7	بدون پیش پردازش	Model.3	
	۱۵	۴	۳	۲	۵	F5	بدون پیش پردازش	Model.4	
	۱۲	۳	۵	۳	۱	F7	بدون پیش پردازش	Model.5	
	۱۷	۵	۴	۵	۳	F6	بدون پیش پردازش	Model.6	
	۹	۱	۱	۱	۶	F4	بدون پیش پردازش	Model.7	
	۲۲	۶	۷	۷	۲	F4	با پیش پردازش	Model.8	

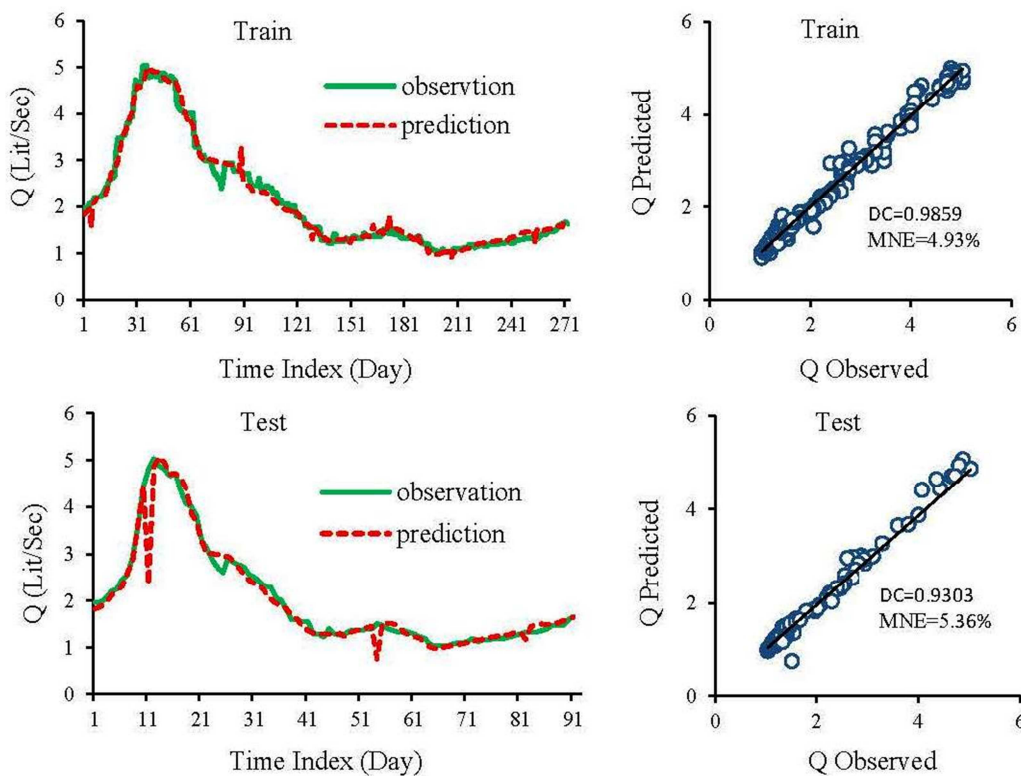
مورد روش GEP ارائه فرمول صریح در مورد مسئله مورد بررسی می‌باشد. فرمول به‌دست آمده از این روش در حالت اول به صورت زیر می‌باشد:

در شکل ۴، نمودار پراکندگی داده‌ها برای مدل برتر ترسیم شده است که تطابق بسیار مناسبی بین داده‌های محاسباتی و مشاهداتی ملاحظه می‌گردد. نکته مهم در

$$Q(t)_{PL} = -[PL109(t-1)] - [PL103(t-1)] - \log([PL102(t-1)]) + \frac{([PL104(t-1)] - [PL103(t-1)] + \log[PL101(t-1)])}{(301.85)}$$

$$+ [PL103(t-1)] - \log \frac{([PL102(t-1)] - 9.99)}{([PL101(t-1)] \times ([PL105(t-1)] - [PL106(t-1)]))} + [PL109(t-1)] + (\log(8.35) \times \log([PL109(t-1)] + 9.99)) \quad (4)$$

$$+ ([PL103(t-1)] - d[PL104(t-1)])^{8.6}$$



شکل ۴- دیاگرام متقابل مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده برای بهترین مدل حالت منفرد PL با روش GEP

جدول ۶ و ۷، نتایج ارزیابی مدل‌ها از نظر تخمین مقدار دبی نشت سد زوز در صورتی که فقط تابع تراز آب مخزن می‌باشد را نشان می‌دهند.

۴-۲- تخمین مقدار دبی نشت فقط تابع تغییرات تراز آب مخزن (حالت منفرد RL)

جدول ۶- نتایج ارزیابی حالت منفرد دبی نشت وابسته به تغییرات تراز آب در مخزن (RL) با ورودی‌های مختلف

Training		Testing		اپراتور	نوع داده	مدل	حالت
MNE	DC	MNE	DC				
۰/۰۷۴۹	۰/۹۷۷۳	۰/۰۷۹۳	۰/۹۷۵۲	F6	بدون پیش پردازش	Model.9	RL (حالت منفرد- دبی نشت وابسته به تغییرات تراز آب در مخزن)
۰/۱۰۰۲	۰/۹۸۹	۰/۲۴۸۷	۰/۹۷۷	F8	با پیش پردازش	Model.10	
۰/۰۶۶۵	۰/۹۸۹۵	۰/۰۷۳۶۷	۰/۹۸۸۲	F3	با پیش پردازش	Model.11	
۰/۰۵۸۴	۰/۹۸۵۹	۰/۰۵۷۵	۰/۹۸۷۲	F7	بدون پیش پردازش	Model.12	
۰/۱۴۲	۰/۹۹۶	۰/۱۵۴۲	۰/۹۸۶۱	F1	با پیش پردازش	Model.13	

جدول ۷- نتایج رتبه‌بندی حالت منفرد دبی نشت وابسته به تغییرات تراز آب در مخزن (RL) با ورودی‌های مختلف

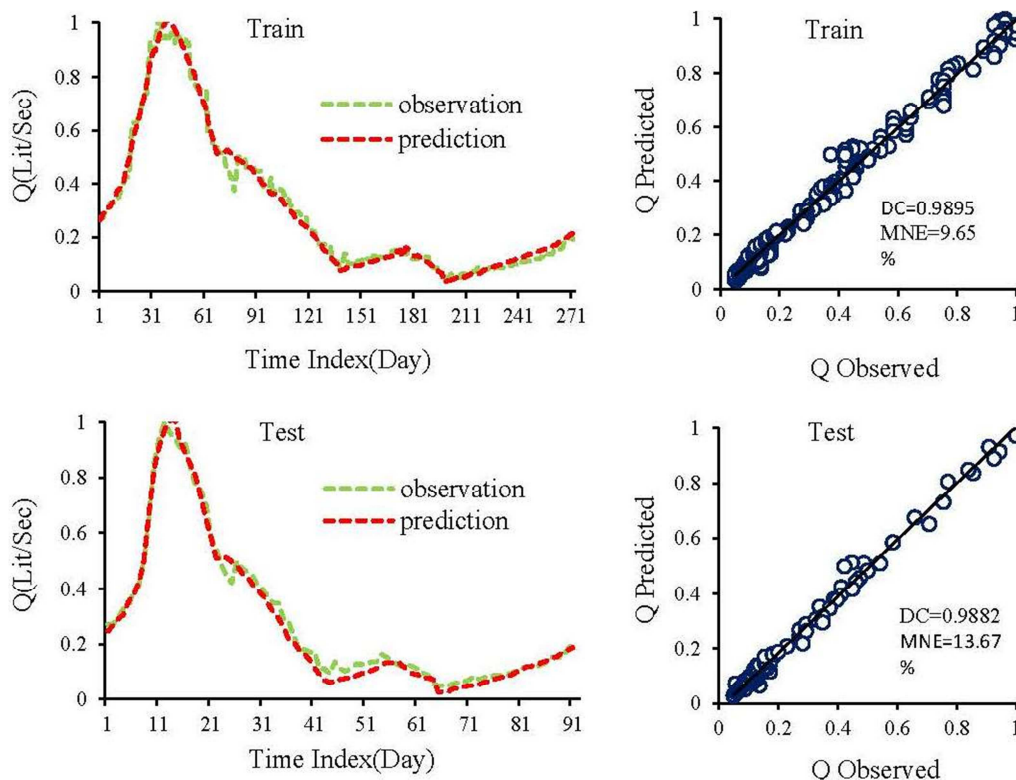
Best	Rank	Training		Testing		اپراتور	نوع داده	مدل	حالت
		MNE	DC	MNE	DC				
F3	۱۶	۳	۵	۳	۵	F6	بدون پیش پردازش	Model.9	RL (حالت منفرد- دبی نشت وابسته به تغییرات تراز آب در مخزن)
	۱۶	۴	۳	۵	۴	F8	با پیش پردازش	Model.10	
	۷	۲	۲	۲	۱	F3	با پیش پردازش	Model.11	
	۸	۱	۴	۱	۲	F7	بدون پیش پردازش	Model.12	
	۱۳	۵	۱	۴	۳	F1	با پیش پردازش	Model.13	

شده است، منجر به نتایج دقیق‌تری گردیده است. در شکل ۵، سری زمانی داده‌های مشاهداتی همراه با خروجی روش برنامه‌ریزی بیان‌زن نشان داده شده است. تطابق بسیار مناسبی را بین داده‌های محاسباتی و مشاهداتی می‌توان ملاحظه کرد. فرمول حاصل از GEP نیز به صورت رابطه (۵) می‌باشد:

$$Q(t)_{RL} = \frac{([RL(t)]^3 - 1.02 \times [RL(t)])}{12.25} + \frac{(310.28 \times ([RL(t)] - [RL(t-2)]))^3}{(-0.16 + ([RL(t-2)]/[RL(t)]))} \quad (5)$$

$$+ \frac{(2.98 - 2 \times [RL(t)])}{(8.43 + [RL(t)]^2)} + [RL(t-2)] + [RL(t-1)]^2 - [RL(t)]$$

مطابق با نتایج به‌دست آمده، Model.11 با تابع $Q(t) = RL(t, t-1, t-2)$ و متغیرهای ورودی $RL(t-1)$ و $RL(t-2)$ تحت اپراتور F3 با پیش‌پردازش داده‌ها، بهترین مدل می‌باشد. مشاهده می‌گردد که مدل‌های تعریف شده در حالت ۲ که در آن دبی نشت، فقط وابسته به تراز آب مخزن در نظر گرفته



شکل ۵- دیاگرام متقابل مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده برای بهترین مدل حالت منفرد RL با روش GEP

۳-۴- تخمین مقدار دبی نشت براساس حالت ترکیبی

جدول ۸، نتایج ارزیابی مدل‌ها جهت تخمین مقدار دبی نشت سد زنوز در صورتی که تابع تراز مخزن و پیژومتر می‌باشد را نشان می‌دهد.

تابع تغییرات تراز آب مخزن و پیژومتر

جدول ۸- نتایج ارزیابی اپراتورهای مفروض شده در حالت ترکیبی (PL, RL)، با ورودی‌های مختلف

Training		Testing		اپراتور	نوع داده	مدل	حالت
MNE	DC	MNE	DC				
۰/۱۱۴۱	۰/۹۸۵۳	۰/۲۳۶۵	۰/۹۷۴۸	F1	با پیش پردازش	Model.14	PL, RL (حالت ترکیبی - دبی نشت وابسته به تغییرات تراز آب در مخزن و پیژومترها)
۰/۰۸۰۶	۰/۹۸۷۳	۰/۱۹۱۵	۰/۹۸۲۲	F1	با پیش پردازش	Model.15	
۰/۰۷۹۱	۰/۹۸۹۴	۰/۱۴۱۶	۰/۹۸۷۲	F4	با پیش پردازش	Model.16	
۰/۱۱۸۴	۰/۹۷۹۴	۰/۲۱۳۵	۰/۶۲۱۰	F2	با پیش پردازش	Model.17	
۰/۰۹۳۴	۰/۹۸۸۰	۰/۳۶۲۱	۰/۹۵۸۶	F8	با پیش پردازش	Model.18	
۰/۱۱۴۷	۰/۹۳۷۴	۰/۱۳۰۵	۰/۹۰۵۹	F1	بدون پیش پردازش	Model.19	
۰/۰۹۸۷	۰/۹۹۹۴	۰/۱۰۰۵	۰/۹۹۹۲	F5	بدون پیش پردازش	Model.20	
۰/۰۷۵۶	۰/۹۸۹۲	۰/۰۹۵۸	۰/۹۸۸۰	F4	با پیش پردازش	Model.21	
۰/۰۷۸۰	۰/۹۹۰۸	۰/۱۶۰۲	۰/۹۸۷۰	F1	با پیش پردازش	Model.22	

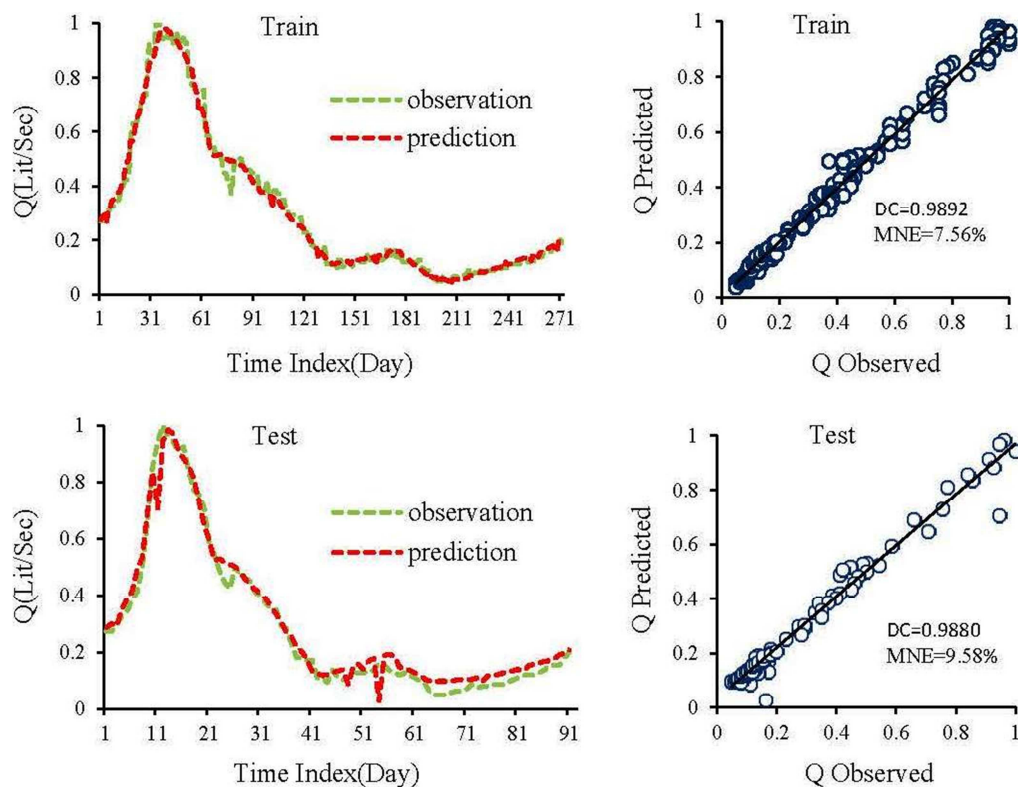
نشت سد زنوز با در نظر گرفتن حالت ترکیبی تابع تراز مخزن و پیژومتر، انتخاب گردید. در شکل ۶، دیاگرام متقابل بهترین مدل نشان داده شده است. فرمول حاصل از GEP نیز به صورت رابطه (۶) می‌باشد.

همچنین نتایج رتبه‌بندی در جدول ۹ نشان داده شده است. مطابق با جدول ۹ و با مقایسه مقدار معیارهای اندازه‌گیری شده برای هر مدل، Model.21 با تابع $Q(t)=RL(t-1)$ تحت اپراتور F4 همراه با پیش‌پردازش داده‌ها بهترین مدل جهت تخمین مقدار دبی

جدول ۹- نتایج ارزیابی اپراتورهای مفروض شده در حالت ترکیبی دبی نشت وابسته به تغییرات تراز آب در مخزن و پیژومترها

Best	Rank	Training		Testing		اپراتور	نوع داده	مدل	حالت
		MNE	DC	MNE	DC				
F4	۲۷	۷	۷	۷	۶	F1	با پیش پردازش	Model.14	PL, RL (حالت ترکیبی - دبی نشت وابسته به تغییرات تراز آب در مخزن و پیژومترها)
	۲۰	۴	۶	۶	۵	F1	با پیش پردازش	Model.15	
	۱۳	۳	۳	۴	۳	F4	با پیش پردازش	Model.16	
	۳۵	۹	۸	۹	۹	F2	با پیش پردازش	Model.17	
	۲۵	۵	۵	۸	۷	F8	با پیش پردازش	Model.18	
	۲۸	۸	۹	۳	۸	F1	با پیش پردازش	Model.19	
	۱۰	۶	۱	۲	۱	F5	بدون پیش پردازش	Model.20	
	۸	۱	۴	۱	۲	F4	با پیش پردازش	Model.21	
۱۳	۲	۲	۵	۴	F1	با پیش پردازش	Model.22		

$$Q(t)_{PL,RL} = [RL(t-1)] + \frac{([PL103(t-1)]^2)}{28.09} + (\log(8 + [PL105(t-1)]))^2 - 1.07 + ([RL(t-1)] - 0.37) \times ([RL(t-1)] - 0.72) \times [PL108(t-1)] \quad (6)$$



شکل ۶- دیاگرام متقابل مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده برای بهترین مدل حالت ترکیبی PL, RL (Model.21) با روش GEP

مدل، مدل دوباره اجرا شد و نتایج جدول ۱۰، حاصل گردید.

۴-۴- آنالیز حساسیت مدل‌های برتر هر حالت

برای بررسی تأثیر پارامترهای مختلف در پیش‌بینی میزان نشت از بدنه سد خاکی، در مدل‌های برتر هر سری، با حذف تک تک پارامترها از سری پارامترهای ورودی

جدول ۱۰- مقادیر معیارهای ارزیابی در بررسی آنالیز حساسیت

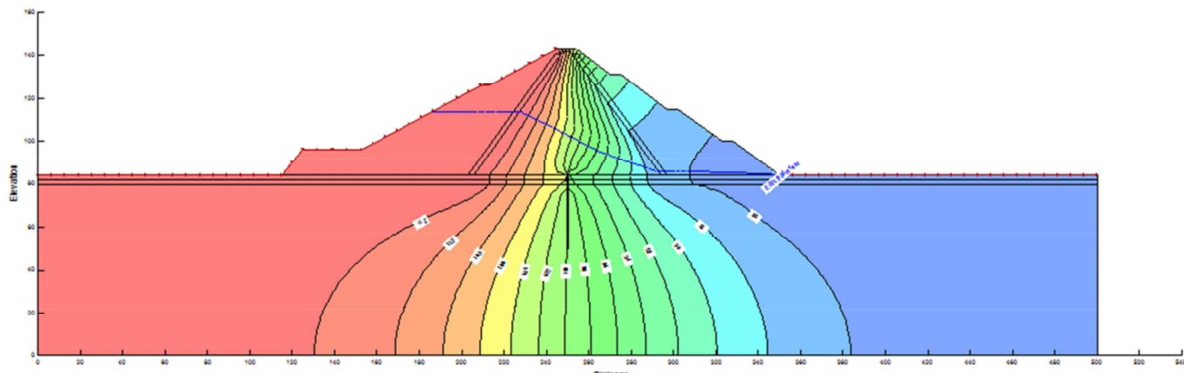
Training		Testing		مدل حالت ۳	Training		Testing		مدل حالت ۱			
MNE	DC	MNE	DC		MNE	DC	MNE	DC				
۰/۰۷۲۱	۰/۹۹۱۳	۰/۰۸۶۲	۰/۹۸۵۹	No PI 101(t-1)	۰/۰۴۷۰	۰/۹۸۶۶	۰/۰۵۲۲	۰/۹۳۲۱	No PI 101(t-1)			
۰/۰۸۷۲	۰/۹۹۰۲	۰/۱۵۱۰	۰/۹۱۶۶	No PI 102(t-1)	۰/۰۴۹۰	۰/۹۸۶۳	۰/۰۵۳۸	۰/۹۳۱۴	No PI 102(t-1)			
۰/۰۷۵۷	۰/۹۹۱۷	۰/۱۰۵۸	۰/۹۳۳۹	No PI 103(t-1)	۰/۱۲۶۶	۰/۸۴۲۳	۰/۱۱۲۵	۰/۸۷۰۰	No PI 103 (t-1)			
۰/۰۷۲۹	۰/۹۹۱۴	۰/۱۰۰۲	۰/۹۸۹۴	No PI 104(t-1)	۰/۰۷۱۲	۰/۹۷۳۴	۰/۰۸۵۵	۰/۹۱۴۵	No PI 104 (t-1)			
۰/۰۷۶۴	۰/۹۹۱۲	۰/۳۰۵۶	۰/۸۶۰۰	No PI 105(t-1)	۰/۰۹۶۶	۰/۹۵۷۱	۰/۱۲۰۲	۰/۸۲۹۹	No PI 105 (t-1)			
۰/۱۱۱۱	۰/۹۸۵۰	۰/۳۴۱۸	۰/۹۵۱۶	No PI 106(t-1)	۰/۰۶۷۲	۰/۹۷۸۵	۰/۰۹۰۲	۰/۹۱۱۱	No PI 106 (t-1)			
۰/۱۰۲۵	۰/۹۸۷۴	۰/۱۷۲۱	۰/۹۷۳۸	No PI 107(t-1)	۰/۰۵۵۲	۰/۹۷۸۶	۰/۰۸۹۶	۰/۸۳۹۳	No PI 107 (t-1)			
۰/۰۷۶۱	۰/۹۹۱۷	۰/۱۴۸۳	۰/۹۷۴۹	No PI 1081(t-1)	۰/۰۵۶۳	۰/۹۸۵۴	۰/۰۷۵۹	۰/۹۰۵۲	No PI 108 (t-1)			
۰/۰۷۶۹	۰/۹۹۱۶	۰/۱۴۳۰	۰/۹۸۲۰	No PI 109(t-1)	۰/۰۴۹۱	۰/۹۸۶۳	۰/۰۵۵۱	۰/۹۵۱۶	No PI 109(t-1)			
۰/۰۷۹۶	۰/۹۸۹۴	۰/۳۱۵۹	۰/۹۲۶۵	No RL (t-1)					حالت ۲			
X				X				۰/۰۹۶۱	۰/۹۹۰۰	۰/۰۹۶۶	۰/۹۹۱۵	No RI (t)
X				X				۰/۰۹۲۰	۰/۹۸۹۹	۰/۱۰۸۰	۰/۹۹۰۳	No RI (t-1)
X				X				۰/۱۰۰۵	۰/۹۸۹۸	۰/۱۶۹۵	۰/۹۸۳۹	No RI (t-2)

نرم‌افزار با دبی نشت مشاهداتی و نتایج حاصل از برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) مقایسه گردید. بدین منظور، اطلاعات مورد نیاز برای مدل‌سازی سد جمع‌آوری شده و مقطع ۱ ابزاربندی، به صورت دوبعدی و توسط SEEP/W مدل شدند. شرایط تخلیه ناگهانی در سد و حالت گذرا در نظر گرفته نشده و در کلیه آنالیزها حالت دائمی (Steady-state) در نظر گرفته شد. پس از مدل نمودن مسئله و اختصاص مشخصات مصالح به آن و اعمال شرایط مرزی، مدل‌ها آنالیز شده و نتایج به صورت خروجی‌های مختلف ارائه می‌شود. در شکل ۷، خطوط هم‌پتانسیل نشان داده شده است.

از نتایج حاصله مشاهده می‌گردد که پارامتر ورودی PL105(t-1) در حالت ۱ (دبی نشت وابسته به تغییرات تراز آب در پیژومترها)، پارامتر RL(t-2) در حالت ۲ (دبی نشت وابسته به تغییرات تراز آب در مخزن) و پارامتر PL105(t-1) در حالت ۳ (دبی نشت وابسته به تغییرات تراز آب در پیژومترها و تراز آب مخزن) بیشترین تأثیر را در تخمین مقدار دبی نشت در سد زنون دارا می‌باشند.

۴-۵- نتایج حاصل از روش المان محدود (SEEP/W)

به منظور مقایسه نتایج، سد زنون توسط نرم‌افزار SEEP/W مدل شده و دبی نشت به دست آمده از این



شکل ۷- نمایش خطوط هم‌پتانسیل در مقطع ۱ سد زنون حاصل از برنامه SEEP/W

با استفاده از سه پارامتر آماری (DC، R² و MNE) به صورت خلاصه در جدول ۱۱ ارائه شده است.

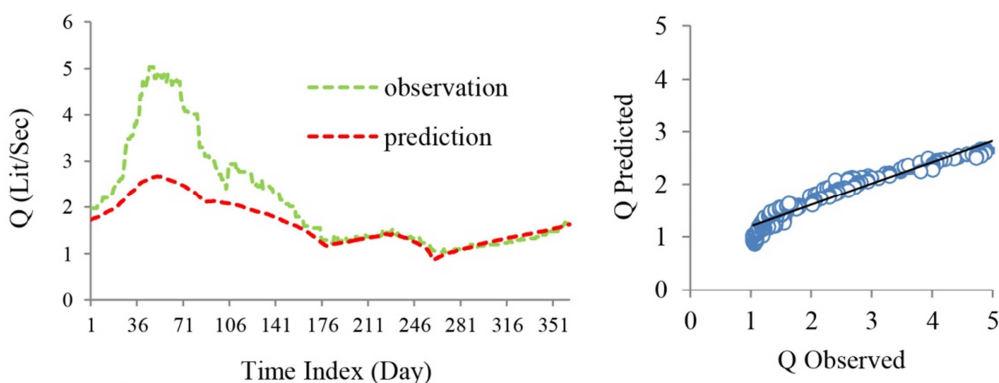
بعد از مدل‌سازی و به دست آوردن خطوط هم‌پتانسیل در داخل بدنه و پی سد، نتایج ارزیابی داده‌ها

جدول ۱۱- نتایج حاصل از SEEP/W

DC	MNE	نوع داده
۰/۴۶۸۸	۰/۱۵۹۳	Total-H1,H2*
۰/۴۹۳۶	۰/۱۵۰۲	Test- H1,H2**
۰/۴۶۰۲	۰/۱۶۲۴	Train- H1,H2***
* کل داده‌های هد بالادست و پایین‌دست		
** داده‌های هد بالادست و پایین‌دست انتخابی تصادفی به صورت ۲۵٪ از کل داده‌ها مطابق الگوی D1 در بیان ژن		
*** داده‌های هد بالادست و پایین‌دست انتخابی تصادفی به صورت ۷۵٪ از کل داده‌ها مطابق الگوی D1 در بیان ژن		

شده است. مطابق با جدول ۱۲ مشاهده می‌گردد که کارایی روش تکاملی GEP نسبت به روش عددی بسیار بالاتر بوده و مدل تعریف شده در این روش، دقت بالاتری را ارائه داده است.

در شکل ۸ نیز نمودارهای داده‌های مشاهداتی پیش‌بینی شده و دیاگرام متقابل دبی نشت نشان داده شده است. همچنین نتایج مقایسه روش GEP و SEEP/W برای بهترین مدل در جدول ۱۲ نشان داده



شکل ۸- دیاگرام متقابل دبی نشت مشاهداتی با دبی نشت پیش‌بینی حاصل از SEEP/W

جدول ۱۲- مقایسه نتایج مدل تکاملی برنامه‌نویسی بیان ژن و مدل ریاضی SEEP/W

معیارهای ارزیابی	مدل ریاضی SEEP/W	مدل تکاملی برنامه‌نویسی بیان ژن	
		برترین مدل (حالت منفرد RL) از حالات مفروضی	
		Test	Train
DC	۰/۴۶۸۸	۰/۹۸۸۲	۰/۹۸۹۵
MNE	۰/۱۵۹۳	۰/۱۳۶۷	۰/۰۹۶۵

شد و مدل‌های متعددی تعریف گردیدند. همچنین اثر پیش‌پردازش داده‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل در ادامه بیان می‌شود.

در بین کل حالات در نظر گرفته شده، Model.11 با پارامترهای ورودی $RL(t, t-1, t-2)$ از حالت منفردی که در آن دبی نشت وابسته به تراز سطح آب مخزن می‌باشد بهترین جواب را در روش برنامه‌ریزی بیان ژن نشان داد. در واقع برتری Model.11 مربوط به حالت منفرد دبی نشت وابسته به تراز آب مخزن حاکی از تبعیت دبی نشت از تراز آب مخزن و وجود رابطه مستقیم و لیکن غیرخطی و همچنین تبعیت تراز پیژومترها از تراز آب مخزن می‌باشد. با توجه به نتایج، پیش‌پردازش داده‌ها برای برترین مدل انتخابی و برترین مدل حالت منفرد دبی نشت تابع تراز مخزن (Model.11) موجب افزایش کارایی مدل مورد استفاده در این تحقیق شده است. نتایج آنالیز حساسیت حاکی از تبعیت بیشتر دبی آب نشتی از پیژومترهای $PL105(t-1)$ و تراز آب مخزن $RL(t-2)$ می‌باشد. انتخاب مناسب پارامترهای ورودی، اثر مستقیمی بر دقت و کارایی مدل پیشنهادی در تخمین دبی نشت سد خاکی خواهد داشت. سیستم هوشمند

در واقع، مدل تکاملی برنامه‌نویسی بیان ژن می‌تواند جایگزین مناسبی برای مدل عددی المان محدود باشد. هرچند به این نکته باید توجه کرد که مدل برنامه‌نویسی بیان ژن یک مدل هوش مصنوعی بوده که در آن ارتباط بین متغیرهای ورودی و خروجی قابل رویت نمی‌باشد؛ لذا دید روشنی از فهم مشکلات فیزیکی مسئله به‌دست نمی‌دهد. در حالت کلی، می‌توان چنین عنوان کرد که مدل‌های توزیعی مبتنی بر فیزیک مساله، مثل مدل SEEP/W، براساس داده‌های فیزیکی و فیلد عمل می‌کنند که گاهی یا چنین داده‌هایی در دسترس نیست یا بنا به علل مختلف شرایط موجود با شرایط طراحی متفاوت بوده در نتیجه نتایج حاصل از مدل با داده‌های مشاهداتی هم‌خوانی نخواهد داشت.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، جهت تخمین میزان دبی نشت از بدنه سد زنوز واقع در استان آذربایجان شرقی از دو روش برنامه‌ریزی بیان ژن و روش عددی SEEP/W استفاده گردید و نتایج این دو روش مورد مقایسه قرار گرفت. جهت بررسی کارایی روش GEP، ۳ حالت در نظر گرفته

گاهی یا چنین داده‌هایی در دسترس نیست یا بنا به علل مختلف، شرایط موجود با شرایط طراحی متفاوت بوده و در نتیجه، نتایج حاصل از مدل با داده‌های مشاهداتی هم‌خوانی نخواهد داشت. به عنوان کار تحقیقی در آینده، پیشنهاد می‌گردد که نتایج حاصل از روش SEEP/W را با استفاده از روش‌های هوشمندی مانند GEP فرموله‌بندی کرد و نتایج حاصل را بررسی نمود. همچنین میزان دبی نشت از سدهای خاکی مختلف توسط دیگر ابزارهای هوش مصنوعی از جمله سیستم استنتاج فازی، درخت تصمیم، رگرسیون خطی و غیرخطی چند متغیره و هیبرید عصبی موجکی مورد بررسی قرار گیرد.

برنامه‌ریزی بیان ژن، GEP، علاوه بر توانایی استخراج رابطه بین متغیرهای ورودی و خروجی به‌طور خودکار و هوشمند، متغیرهایی که در مدل بیشترین تأثیر را دارند انتخاب می‌کند. با توجه به نتایج تخمین دبی نشت سد خاکی زنوز حاصل از برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)، مدل تکاملی برنامه‌نویسی بیان ژن نتایج دقیق‌تری را نسبت به روش عددی ارائه می‌دهد و این امر حاکی از کارایی بالای روش مذکور در تخمین دبی نشت از بدنه سد خاکی می‌باشد و روش GEP می‌تواند جایگزین مناسبی برای مدل عددی المان محدود باشد.

مدل‌های توزیعی مبتنی بر فیزیک مسأله، مثل مدل SEEP/W، براساس داده‌های فیزیکی عمل می‌کنند که

مراجع

- [1] Sharghi, A. (2008). Sewage analysis in Sattarkhan dam using artificial neural network and mathematical models. Thesis of Master, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz.
- [2] Moghadas, M. & Raeisi Estabragh, A. (2012). "Evaluation of Different Methods for Reducing Leakage from Soil Dams (Case Study of Nahrin Dam)", 2nd National Conference on Structure, Geotechnics and Earthquake.
- [3] Pakbaz, M. S., Dardaei, A. & Salahshoor, J. (2009). "Evaluation of performance of plastic concrete cutoff wall in Karkheh dam using 3-D Seepage analysis and measurement". *J. of Applied Sciences*, 9(4), 724-730.
- [4] Arshad, I. & Baber, M. (2014). "Finite Element Analysis of Seepage through an Earthen Dam by using Geo-Slope (SEEP/W) software", *J. Res.*, 1(7), 12-16.
- [5] Ho, L. & Fatahi, B. (2015). "Analytical solution for the two-dimensional plane strain consolidation of an unsaturated soil stratum subjected to time-dependent loading". *Comput Geotech*, 67: 1-16.
- [6] Khu, S.T., Liong, S.Y., Babovic, V., Madsen, H. & Muttill, N. (2001). "Genetic programming and its application in real-time runoff forecasting", *J. Am Water Res Assoc*, 37(2), 439-451.
- [7] Liong, S.Y., Gautam, T.R., Khu, S.T., Babovic, V., Keijzer, M. & Muttill, N. (2002). "Genetic programming: A new paradigm in rainfall runoff modeling", *J. Am Water Res Assoc*, 38(3), 705-718.
- [8] Whigham, P.A. & Crapper, P.F. (2001). "Modeling rainfall-runoff using genetic programming", *Mathematical and Computer Modeling*, 33 (6-7), 707-721.
- [9] Rabunal, J.R., Puertas, J., Suarez, J. & Rivero, D. (2007). "Determination of the unit hydrograph of a typical urban basin using genetic programming and artificial neural networks", *J. Hydrol. Process*, 21, 476-485.
- [10] Aytak, A. & Kisi, O. (2008). "A genetic programming approach to suspended sediment modeling", *J. Hydro.*, 351, 288-298.
- [11] Roushangar, K. (2013). "Intelligent simulation of bridge scouring of bridge bases using evolutionary algorithms", International Conference on Civil Engineering, Architecture & Urban Sustainable Development.
- [12] Roushangar, K., Valizadeh, R., Ghasempour, R. (2017). Predicting of Hydraulic Jump Characteristics of Sudden Expanding Stilling Basins Using Evolutionary Algorithm. 3(1), 1-15, doi: 10.22091/cer.2017.1293.1056.
- [13] Tayfur, G., Swiate, D., Wita, A., Vijay, P. & Singh, F. (2005). "Case Study: Finite Element Method and Artificial Neural Network Models for Flow through Jeziorsko Earth fill Dam in Poland". *J. Hydraulik Engineering*, 131(6): 431-440
- [14] Ersayin, D. (2006). "Studying Seepage in a Body of Earth-Fill Dam by (Artificial Neural Network) ANNs". Department of Civil Engineering Izmir Institute of Technology.
- [15] East Azarbaijan Regional Water Company. All reports and studies of Zenoz Dam Project. 1993 to 2013.
- [16] Ferreira, C. (2005). "Gene Expression Programming: A New Adaptive Algorithm for Solving Problems", *J. Complex Systems*, 13(2), 87-129.
- [17] Amin Javaheri, A. R. & Pakniyat, A. (2009). "Static and Dynamic Analysis of Soil Dams Using Geo Studio", Elme Omran Publishing.

H.Sani

MSc, Department of Civil Engineering, University of Tabriz.

e-mail: h.sani@tabriziau.ac.ir

K.Roushangar*

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

e-mail: kroshangar@yahoo.com

R.Ghasempour

PHD student, Department of Civil Engineering, University of Tabriz.

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

Comparative Study of the Performance of Finite Element Method and Evolutionary Model in Seepage Discharge Predicting From the Body of an Earth Dam

In this study, the capability of gene expression programming (GEP) and a finite element method (SEEP/W) was assessed for predicting water seepage from body and foundation of Zonouz earthen dam located in East Azerbaijan Province. Therefore, different models using observational data of Zonouz dam (water level in the reservoir, pizometer levels implanted in the body and injected tunnel dam and seepage discharge) were developed in three states: single-mode of seepage discharge related to pizometer level, single-mode of seepage discharge related to reservoir level and combined state of seepage discharge related to reservoir and pizometer level and the results were analyzed. From the sensitivity analysis the most effective parameter for any states were determined. Then the best model of GEP was reanalyzed using SEEP/W software. The results showed that the single-mode which the seepage discharge depends to only reservoir level leads to more accurate results and in this regard, the gene expression programming approach is more successful than the applied finite element method. The sensitivity analysis showed that the water level related to one day ago in pizometer which located at level of 1850m (PL105(t-1)) and reservoir level related to two days ago (RL(t-2)) are the most effective parameters in modeling.

Keywords: Earth dam, GEP, Reservoir level, Seepage discharge, SEEP/W.

* Corresponding author