پیش‌بینی خطای سلول فشار به‌کمک روش GEP (مطالعه موردی: سد سنگ‌ریزه‌ای البرز، مازندران، ایران)

مریم نیکوئی*؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران،
علی نورزاد؛ دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست
کاوه آهنگری؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

تاریخ: دریافت ۹۱/۷/۱۶ پذیرش۹۲/٤/۸

چکیده

آگاهی از وضعیت تنش در بدنه سدهای خاکی از مهم‌ترین پارامترهای ارزیابی ایمنی سد است. به‌منظور اندازه‌گیری تنش از سلول فشار کل استفاده می‌شود که این ابزار در بدنه سدهای خاکی نصب می‌گردد. در زمان نصب سلول فشار، سطح حساس آن در تماس مستقیم با تودهٔ خاک قرار گرفته تا تنش کل موجود در خاک را اندازه‌گیری کند و در ترکیب با پیزومترها، فشار آب منفذی موجود در خاک را نیز برآورد می‌کند. به‌منظور دریافت نتایج صحیح و قابل قبول از سلول فشار باید این ابزار با دقت نصب شوند. اما در اکثر موارد، مقادیر اندازه‌گیری شده با این ابزار با مقادیر تئوری و پیش‌بینی شدهٔ تنش، مطابقت ندارد و نتایج سلول فشار همراه با خطا است. عوامل متعددی بر خطاهای سلول‌های فشار تأثیرگذار هستند اما در این تحقیق به نقش ارتفاع و مدت زمان خاک‌ریزی در حین عملیات اجرای سد، به‌عنوان پارامترهای مؤثر بر مقادیر اندازه‌گیری، پرداخته شده است. بدین منظور سد سنگ‌ریزه‌ای البرز واقع در شمال ایران به‌عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شده است. این سد خاکی با هسته رسی، دارای ارتفاع حداکثر ۷۸ متر است. با استفاده از داده‌های رفتارنگاری و در نظر گرفتن تأثیر پارامترهای ارتفاع خاک‌ریزی و مدت زمان خاک‌ریزی، مدلی به‌منظور پیش‌بینی خطای سلول‌های فشار به‌روش GEP[1] با استفاده از نرم‌افزار جنی‌ایکس پروتولز[2] ٤، ارائه شده است.

*نویسنده مسئول nikooee_maryam@yahoo.com

۱. Gene Expression Programming ۲. GeneXProTools

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.8.9]

میزان R^2 برای این مدل، برابر با ۰/۹۸ است که این رقم نشان‌دهندهٔ تطابق خوب مدل با داده‌های رفتارنگاری است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که پارامتر نسبت تفاضل ارتفاع به تفاضل مدت زمان خاک‌ریزی در حین اجرای سد البرز در ایجاد خطا در نتایج سلول‌های فشار سد نقش به‌سزایی داشته است.

واژه‌های کلیدی: تنش، سلول فشار خاک، سد سنگ‌ریزه‌ای، روش GEP، سد البرز

مقدمه

برآورد صحیح تنش در خاک و شناخت روند تغییرات آن برای کنترل فرضیه‌های پایداری و نیز قضاوت مهندسی در خصوص ایمنی سدهای خاکی، اهمیت بسیار دارد. میزان تنش با روش‌های تحلیلی مختلف قابل برآورد است اما اندازه‌گیری مقادیر واقعی برای تأیید صحت برآوردهای انجام شده، با توجه به این‌که خاک‌ها مصالحی نسبتاً پیچیده است و عوامل متعددی در تغییر رفتار آن‌ها مؤثر است، به‌سادگی میسر نیست. بنا بر این برای تعیین توزیع، اندازه و جهت تنش‌های کل در سدهای خاکی از سلول فشار کل استفاده می‌شود. از آن‌جاکه نتایج حاصل از این ابزار در رفتارنگاری سدهای خاکی نقش مؤثری ایفا می‌کند، لذا دقّت در عمل‌کرد این ابزار بسیار حائز اهمّیت است. از این‌رو بررسی‌های بسیاری بر روی عمل‌کرد و نتایج حاصل از سلول فشار انجام گرفته است اما در اغلب موارد بین مقادیر واقعی تنش و مقادیر حاصل از قرائت سلول‌های فشار اختلاف وجود دارد. جستجو در بارهٔ علل ایجاد این خطاها و راه‌های تصحیح آن‌ها همواره از موضوعات مورد توجّه محقّقان بوده است. در این بین می‌توان به پژوهش‌های سلیگ[۱] (۱۹٦٤) و کولهاوی[۲] و وایلر[۳] (۱۹۸۲) که در مورد عوامل مؤثر بر اندازه‌گیری فشار تودهٔ خاک باسلول‌های فشار انجام گرفته است، اشاره کرد [۱]، [۲]. هم‌چنین دانیکلیف[٤] و گرین[٥] (۱۹۹۳) نیز بسیاری از عوامل تأثیرگذار بر نتایج حاصل از سلول فشار را شرح داده‌اند [۳]. بـر اساس نظر اوستوایزن و هوگ[٦] (۲۰۰٦)، باید دلایل بسیار خوبـی

۱. Selig ۲. Kullhawy ۳. Weiler ۴. Dunnicliff
۵. Green ۶. Hoeg

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.8.9]

برای قرار دادن سلول فشار خاک در هر نوع سدی وجود داشته باشد. در ادامه هوگ بیان می‌کند که تعبیر و درک قرائت‌های حاصل از سلول‌های فشار نصب شده در سدهای خاکی به‌ویژه در سدهای سنگ‌ریزه‌ای بسیار مشکل است و زمان و هزینهٔ زیادی صرف نصب چنین سلول‌هایی می‌شود ولی به‌طورکلی اطلاعات کمی از آن‌ها به‌دست می‌آید [٤]. علت ایجاد خطا در نتایج سلول‌های فشار و عدم قطعیت در اندازه‌گیری تنش کل در سدهای خاکی به‌صورت چشم‌گیری تابع پارامترهای فیزیکی و هندسی سلول فشار، شرایط قراردهی و روش نصب، مشخصات ماده پوششی و خاک اطراف و هم‌چنین روند عملیات خاک‌ریزی است [٥].

در این تحقیق سعی بر آن است با در نظرگرفتن تأثیر روند عملیات خاک‌ریزی، نتایج اندازه‌گیری تعدادی از سلول‌های فشار سد البرز بررسی شود. از این‌رو در این پژوهش پارامترهایی که در اجرای عملیات خاک‌ریزی حائز اهمیت است، از قبیل مدت زمان و ارتفاع خاک‌ریزی مورد توجه قرار خواهد گرفت و در نهایت با استفاده از مدل‌سازی می‌توان نتایج سلول‌های فشار را بررسی و تحلیل کرد. بدین‌منظور از نرم‌افزار جنی‌ایکس پروتولز ٤ برای ساختن مدلی برای پیش‌بینی خطای سلول‌های فشار سد البرز و مشاهده تأثیر هر کدام از این عوامل بر نتایج سلول فشار استفاده شده است. عمل‌کرد این نرم‌افزار بر اساس روش GEP است و قادر است با توجه به داده‌های مربوطه، تابع نگاشت بین متغیرهای مستقل و متغیرهای وابسته را پیدا کند و رابطه بین آن‌ها را به‌صورت یک مدل بیان کند.

معرفی سد مخزنی البرز

سد مخزنی البرز بر روی رودخانه بابل‌رود در طول جغرافیایی۵۲/۸ درجهٔ شرقی و عرض جغرافیایی ۳٦/۲۳ درجهٔ شمالی، در ٤٥ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان بابل (۲٦۹ کیلومتری شمال شرقی تهران) در استان مازندران احداث گردیده است (شکل ۱). این سد از نوع سنگ‌ریزه‌ای با هسته رسی است که ارتفاع حداکثر سد از پی ۷۸ متر است و طول تاج آن حدود ۸۳۰ متر است [٦].

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.8.9]



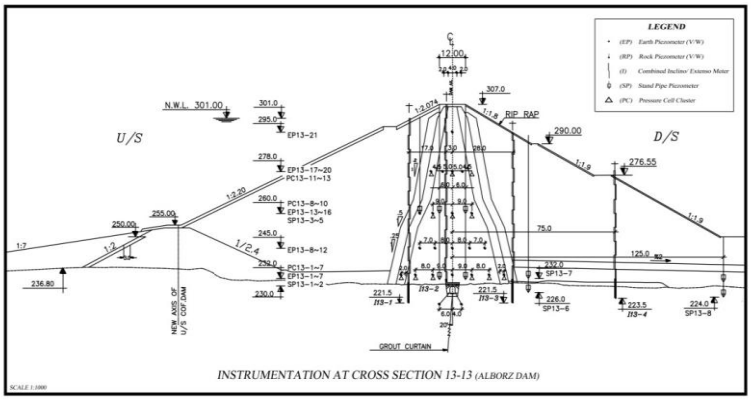
شکل ۱. نقشهٔ موقعیت سد البرز [٦]

ساخت‌گاه سد البرز در شمال رشته کوه‌های البرز، بر روی یال شمالی محور تاقدیسی از جنس مارن‌های کرتاسه با امتداد محوری تقریباً خاوری- باختری واقع شده است. از پدیده‌های مهم ساختمانی در این محل وجود گسل‌های متعددی است که گسل پر شیب و معکوس شمال البرز با روند شرقی– غربی از فاصلهٔ ٤ کیلومتری جنوب ساخت‌گاه سد عبور می‌کند. قابل توجه است که این گسل از نظر لرزه‌خیزی فعال است. هم‌چنین گسل خزر از فاصلهٔ ۲۰ کیلومتری شمال ساخت‌گاه سد عبور می‌کند. نهشته‌های رسوبی تشکیل‌دهندهٔ محدوده سد البرز، مارن‌های کرتاسه و ماسه سنگ میوسن است. مارن‌های کرتاسه شامل مارن‌های توده‌ای کرتاسه بالایی است. در میان این لایه‌های مارنی، اغلب درون لایه‌هایی به ضخامت نیم‌متر که به‌طور تدریجی به ماسه سنگی مارنی تبدیل شده‌اند دیده می‌شود. هم‌چنین، ماسه‌سنگ‌های میوسن اغلب شامل مارن‌های قرمز رنگ و ماسه‌سنگ به‌رنگ سبز و خاکستری و سفید است. این لایه‌های رسوبی با یک ناپیوستگی هم شیب بر روی مارن‌های توده‌ای کرتاسه قرار گرفته‌اند. حدود ۲/۳ سنگ پی دریاچه سد از مارن‌ها و ماسه‌سنگ‌های میوسن و حدود ۱/۳ آن از مارن‌های توده‌ای کرتاسه تشکیل شده که بخش اعظم آن‌ها با خاک‌های فرسایشی برجا، نهشته‌های دامنه‌ای و پادگانه‌های آبرفتی پوشیده شده است. هم‌چنین محدودهٔ تکیه‌گاه چپ ساخت‌گاه سد (در محل تونل‌های انحراف)، از مواد روباره نسبتاً ضخیم و مارن‌های توده‌ای

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.8.9]

کرتاسه تشکیل می‌گردد. تقریباً تمام منطقه با مواد روباره به ضخامت‌های متفاوت پوشیده شده است. بخش پایینی دامنه‌ها در جنوب شرقی آب‌گیر تونل‌ها و شمال خروجی‌ها با نهشته‌های آبرفتی پوشیده شده است. این نهشته‌ها از ماسه، شن و قلوه‌سنگ به‌ضخامت تقریبی ۸ متر تشکیل می‌گردد [۷].

به‌منظور اطمینان از پایداری و ارزیابی عمل‌کرد سد البرز و هم‌چنین مقایسهٔ رفتار سد در طول دوران ساخت و بهره‌برداری، در پنج مقطع از سد البرز سیستم ابزاردقیق نصب شده است. ابزار به‌کار رفته در سد البرز عبارتند از: پیزومترهای الکتریکی (EP, RP)، انحراف‌سنج‌ها (I)، پیزومترهای لوله قائم (SP)، سلول‌های فشارسنج (PC) و غیره (شکل ۲). پس از قرارگیری ابزار، درون ترانشه قرائت آن‌ها بلافاصله بعد از شروع عملیات خاک‌ریزی آغاز می‌شود و از آن‌جاکه نتایج آن در کنترل رفتار سد بسیار مفید است تا پایان عمر سد این قرائت‌ها انجام می‌شود [۸].



شکل ۲. نمونه‌ای از مقطع ابزارگذاری شده سد البرز [۸]

معرفی روش GEP

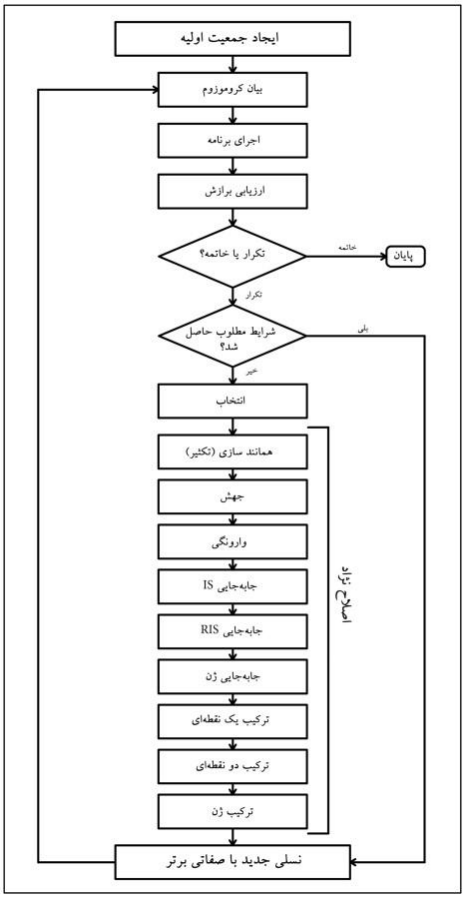
فرریا[۱] در سال ۱۹۹۹ روش GEP را بیان کرد، این روش به‌عنوان روشی نوین و در عین حال کم هزینه بر پایهٔ قاعده الگوریتم ژنتیک و برنامه‌نویسی ژنتیک، با الهام از روند کلی الگوریتم بیان ژن GEA[۲]، مناسب‌ترین و بهینه‌ترین راه حل را برای یک مسئله پیدا می‌کند (شکل ۳) [۹].

۱ Ferreria ۲. Gene Expression Algorithm

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.8.9]

در این تحقیق، برای ساختن مدل به‌روش GEP، از نرم‌افزار جنی‌ایکس پروتولز ٤ استفاده شده است [۱۰]. این ابزار قادر است با توجه به داده‌های مربوطه، تابع نگاشت[۱] بین متغیرهای مستقل[۲] (ورودی) و متغیر وابسته[۳] (خروجی یا هدف)، را پیدا کند و آن را در قالب عبارت درختی ارائه دهد (شکل ٤). هم‌چنین با استفاده از این روش و به‌کمک این نرم‌افزار تأثیر هم‌زمان متغیرهای مستقل بر متغیر هدف بررسی و مؤثرترین متغیر مشخص می‌شود [۱۱].

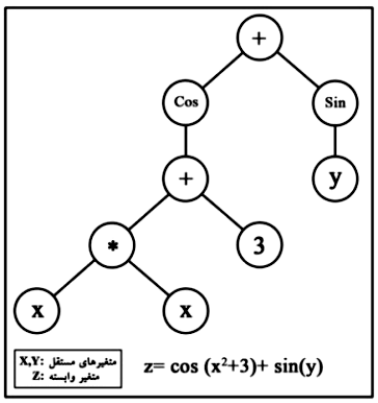


شکل ۳. گام‌های اساسی در روند کلی الگوریتم بیان ژن (GEA) [۹]

۱. Mapping Function ۲. Independent Variables ۳. Dependent Variables

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.8.9]



شکل ٤. عبارت درختی در GEP به‌همراه تابع نگاشت مربوط [۱۱]

داده‌های تحقیق

از آن‌جاکه هدف از این پژوهش، بررسی خطا در سلول‌های فشار سد البرز در حین عملیات خاک‌ریزی است، بنا بر این پارامترهای ارتفاع خاک‌ریزی[۱] (EH)، مدت زمان خاک‌ریزی[۲] (ED) و نسبت تفاضل ارتفاع به تفاضل زمان خاکریزی[۳] (R_{ht}) به‌عنوان عوامل تأثیرگذار در نتایج سلول فشار در نظر گرفته می‌شود.

با محاسبهٔ تئوریک میزان تنش قائم در هر نقطه از سد که سلول فشار به‌صورت افقی نصب شده است و مقایسهٔ آن با تنش قرائت شده با سلول فشار در همان نقطه خاص، صحت نتایج به‌دست آمده از سلول فشار مشخص می‌گردد. بنا بر این اختلاف بین مقادیر واقعی تنش و مقادیر حاصل از قرائت سلول فشار بیان‌گر خطا در نتایج سلول فشار است. درصد خطای سلول فشار در نقاطی که تنش قائم اندازه‌گیری شده با سلول فشار صورت گرفته است، مطابق فرمول (۱) محاسبه می‌شود:

$$PC_{(error)}\% = \frac{(\gamma\Delta h - \Delta\sigma_{pc})}{(\gamma\Delta h)} \times 100 \qquad (۱)$$

که $PC_{(error)}$ % (در صد خطای سلول فشار)، γ (وزن مخصوص خاک (t/m^3))، Δh (اختلاف ارتفاع خاک‌ریزی (m))، $\Delta\sigma_{pc}$ (اختلاف تنش قرائت شده از سلول فشار در دو تراز خاک‌ریزی (kPa)) است.

۱. Embankment Height ۲. Embankment Duration
۳. Height Difference to Time Difference Ratio

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.8.9]

هم‌چنین پارامترهای ارتفاع خاک‌ریزی (EH)، مدت زمان خاک‌ریزی (ED) و نسبت تفاضل ارتفاع به تفاضل زمان خاک‌ریزی (R_{ht}) مطابق این روابط محاسبه می‌شود:

$$EH = E_{elv.} - PC_l \quad (۲)$$

که EH (ارتفاع خاک‌ریزی (m))، $E_{elv.}$[۱] (تراز خاک‌ریزی لایهٔ مورد نظر) و PC_l[۲] (تراز نصب سلول فشار) است.

$$ED = E_t - PC_t \quad (۳)$$

که ED (مدت زمان خاک‌ریزی (Day))، E_t (زمان خاک‌ریزی لایهٔ مورد نظر) و PC_t (زمان نصب سلول فشار) است.

$$R_{(ht)} = {\Delta h}/{\Delta t} \quad (٤)$$

که $R_{(ht)}$ (نسبت تفاضل ارتفاع به تفاضل زمان خاک‌ریزی)، Δh (تفاضل ارتفاع خاک‌ریزی (m)) و Δt (تفاضل زمان خاک‌ریزی (Day)) است.

عمل‌کرد روش GEP در ساخت مدل

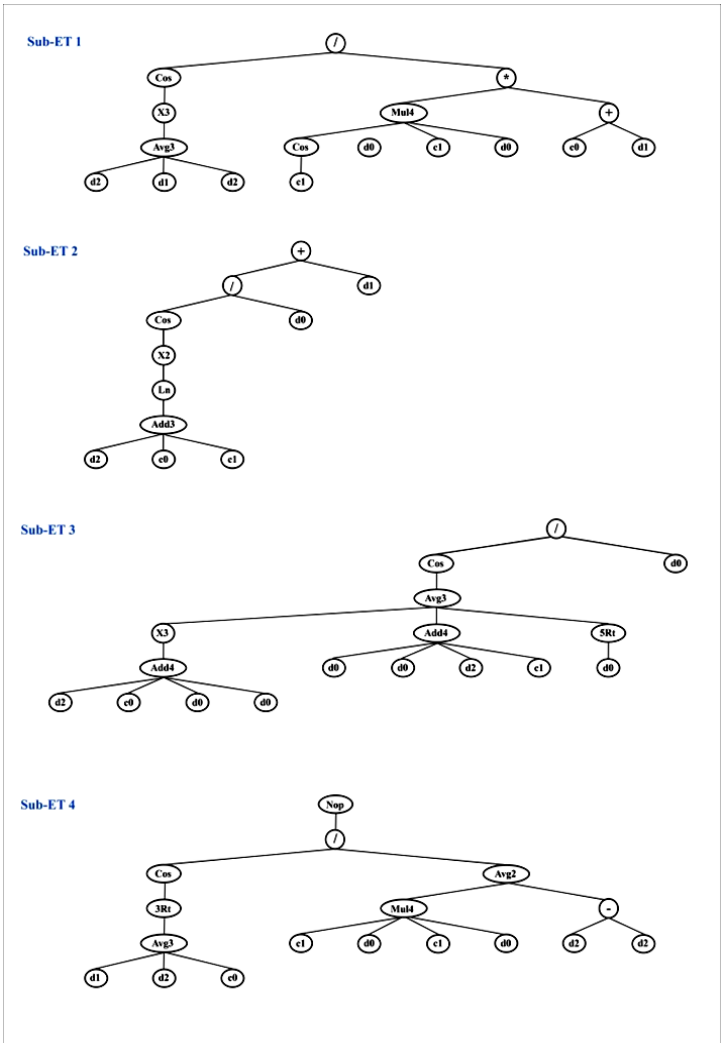
در این پژوهش به‌منظور ساختن مدلی که بتوان به‌خوبی بین خطای سلول فشار و عوامل مؤثر در ایجاد آن ارتباط برقرار کند، روش GEP انتخاب گردید. این مدل شامل پارامترهای EH، ED، $R_{(ht)}$ و درصد خطای سلول فشار $PC_{(error)}$ % است. به‌منظور ارائه مدل، سه پارامتر ارتفاع خاک‌ریزی (EH)، مدت زمان خاک‌ریزی (ED) و نسبت تفاضل ارتفاع به تفاضل زمان خاک‌ریزی (R_{ht}) به‌عنوان متغیرهای مستقل (داده‌های ورودی) و درصد خطای سلول فشار ($PC_{(error)}$%) به‌عنوان متغیر وابسته (داده خروجی) به نرم‌افزار معرفی می‌شود. در نهایت مدل پیش‌بینی درصد خطای سلول فشار در سد البرز به‌صورت عبارت درختی در نرم‌افزار جنی‌ایکس‌پرو تولز ٤ ساخته می‌شود (شکل ۵).

در این مدل، از ۲۱۵ داده به‌دست آمده از پنج سلول فشار که در محور (هسته رسی) پنج مقطع سد البرز نصب شده (نتایج از هم تفکیک نشده است)، استفاده شده است. مقادیر داده‌های استفاده شده در نرم‌افزار نیز مطابق جدول ۱ است.

۱. Embankment Elevation ۲. Pressure Cell Level

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.8.9]



شکل ۵. نمودار درختی مدل پیش‌بینی خطای سلول فشار سد البرز

جدول ۱. مقادیرداده‌های ورودی و خروجی مدل پیش‌بینی خطای سلول فشار

داده های استفاده شده در مدل پیش‌بینی خطای سلول فشار			
		کم‌ترین	بیش‌ترین
متغیر مستقل	ارتفاع خاک‌ریزی (متر) (EH)	۰/۵	۷۵/٤
	مدت زمان خاک‌ریزی (روز) (ED)	۷	۲٦۱۰
	نسبت تفاضل ارتفاع به تفاضل زمان خاک‌ریزی (R_{ht})	۰/۰۰۰۱٦	۰/۲۷۸۵۷
متغیر وابسته	درصد خطای سلول فشار ($PC_{(error)}$%)	-۸۲۹/۳۹	+۷٤٤/٤۳

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.8.9]

از گام‌های اساسی و مهم در توسعه و ساخت مدل، انتخاب تعداد کروموزوم، اندازه هد[۱] و تعداد ژن است. در این تحقیق، با توجه به تعداد داده‌های ورودی و خروجی و این‌که داده‌ها مربوط به ۵ مقطع جداگانه از سد است، تعداد کروموزوم و اندازه هد به‌ترتیب برابر ۹۰ و ۸، انتخاب شد. هم‌چنین تعداد ژن‌ها بر اساس دقت و کاربردی که از مدل ساخته شده انتظار می‌رود تعیین می‌شود. بنا بر این چنان‌که در عبارت درختی مشاهده می‌شود تعداد چهار ژن برای این مدل انتخاب شده است و از عملیات جمع به‌منظور تابع اتصال[۲] یا برقراری ارتباط بین ژن‌ها استفاده می‌شود. در نهایت، ترکیبی از چند پارامتر اصلاح نژاد (جهش[۳]، جابه‌جایی[۴] و تلفیق[۵]) به‌عنوان مجموعه‌ای از عمل‌گرهای ژنتیکی[۶] در این مدل به‌کار برده شده است. پارامترهایی که برای ایجاد مدل پیش‌بینی خطای سلول فشار سد البرز لحاظ شده‌اند، مطابق جدول ۲ است.

جدول ۲. پارامترهای روش GEP برای ساخت مدل

پارامترهای اعمال شده	
مجموعه توابع	+، -، *، /، 3Rt، 5Rt، X^2، X^3، Ln، Sin، Cos
تعداد کروموزوم‌ها	۹۰
تعداد ژن‌ها	٤
اندازه هد	۸
نوع تابع اتصال	عملیات جمع
میزان جهش[۷]	۰/۰۱
میزان وارونگی[۸]	۰/۱
میزان ترکیب یک نقطه‌ای	۰/۳
میزان ترکیب دو نقطه‌ای	۰/۳
میزان ترکیب ژن	۰/۱
میزان جابه‌جایی ژن	۰/۱

۱. Head Size ۲. Linking Function ۳. Mutation ۴. Transposition
۵. Crossover ۶. Genetic Operators ۷. Mutation Rate
۸. Inversion Rate

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.8.9]

نتایج

۱. ارائهٔ رابطهٔ چند متغیره پیش‌بینی درصد خطای سلول‌های فشار سد البرز

بر اساس تابع نگاشتی که از روی عبارت درختی (شکل ۵) نوشته می‌شود، رابطهٔ پیش‌بینی درصد خطای سلول فشار ارائه می‌گردد (رابطهٔ ۵). در این عبارت درختی، متغیرهای d0، d1 و d2 به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ پارامترهای EH، ED و $R_{(ht)}$ است. هم‌چنین مقادیر ضرایب ثابت C0 و C1 برای ژن‌های یک تا چهار که در عبارت درختی مشاهده می‌شود، در رابطهٔ ۵ جای‌گذاری شده است.

(۵)

$$PC_{(error)\%}=\left(\frac{\cos(\frac{(2.ED)+EH}{3})^3}{[\cos(503.43)*(R_{ht})^2*(503.43)]*[-101.57+EH]}\right)+$$
$$\cos(\mathrm{Ln}(ED+24.74+22.92))2R(ht)+EH+\cos((ED+(2.Rht)+(-39.54))3$$
$$+2.R(ht)+ED+394.14+5R(ht)3R(ht)+\cos 3EH+ED+346.623(293.55)2$$
$$*(R(ht))22$$

از این رابطه می‌توان به‌منظور پیش‌بینی درصد خطای سلول‌های فشار سد البرز استفاده کرد. ضریب هم‌بستگی این رابطه برابر با $R^2= 0.98$ است. نزدیک بودن میزان R^2 به عدد یک، نشان‌دهندهٔ تطابق خوب مدل با داده‌های رفتارنگاری است. هم‌چنین میزان بهترین برازش[۱] به‌دست آمده برای این مدل برابر با ۸٦٦/۵ است. این در حالی است که نرخ بیش‌ترین برازش[۲] برابر با ۱۰۰۰ است. نتایج به‌دست آمده نشان‌دهندهٔ کارآیی مناسب و دقت قابل قبول روش GEP در پیش‌بینی در صد خطای سلول فشار سد البرز است.

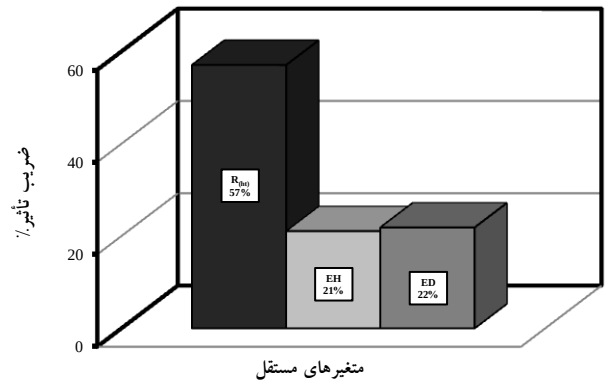
۲. ضریب تأثیر متغیرهای مستقل بر درصد خطای سلول‌های فشار سد البرز

با توجه به میزان ضریب تأثیر که بر اساس تعداد دفعات استفاده از هر متغیر مستقل در ساخت مدل به‌دست آمده است، مؤثرترین پارامتر در ایجاد خطای سلول فشار، پارامتر نسبت تفاضل ارتفاع به تفاضل زمان خاک‌ریزی (R_{ht}) است (شکل ٦).

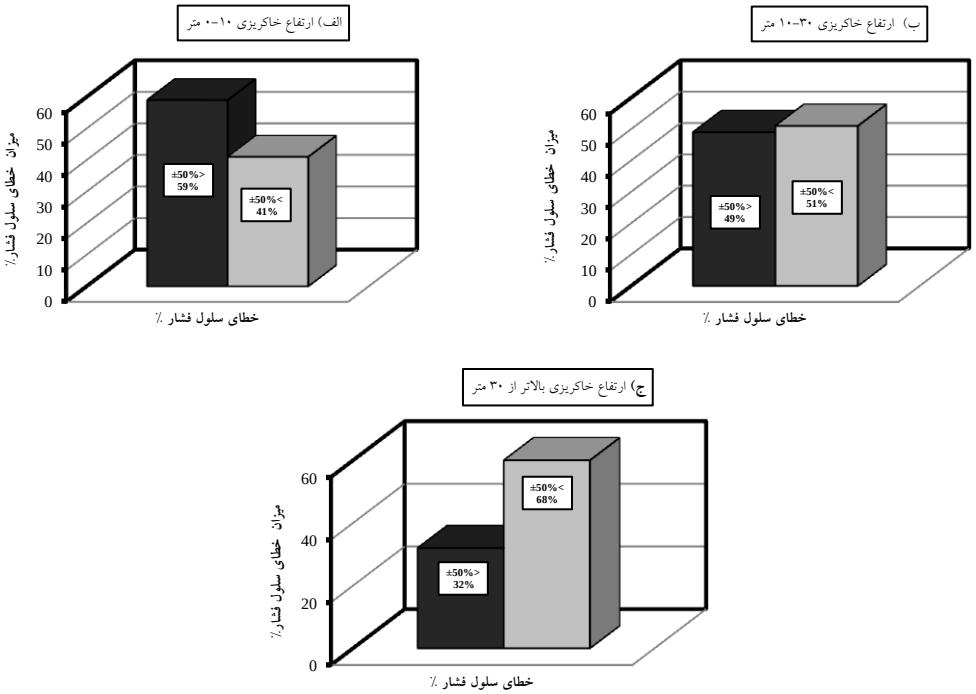
۱. Best Fitness ۲. Max Fitness

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.8.9]



شکل ٦. نمودار درصد ضریب تأثیر متغیرها در ایجاد مدل



شکل ۷. میزان خطای سلول‌های فشار سد البرز در ارتفاع‌های خاک‌ریزی مختلف

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.8.9]

به‌منظور واضح‌تر شدن مسئله، تأثیر این پارامتر در ایجاد خطای سلول فشار در ارتفاع‌های مختلف خاک‌ریزی بررسی می‌شود. چنان‌که در شکل ۷ الف مشاهده می‌شود، میزان در صد خطای سلول فشار نشان می‌دهد که ۵۹ درصد داده‌ها به‌دست آمده از سلول‌های فشار سد البرز در ارتفاع خاک‌ریزی (۱۰–۰) متر دارای خطای کم‌تر از ۵۰± درصد است. بنا بر این با محاسبهٔ میانگین $R_{(ht)}$ در این داده، بهترین و مناسب‌ترین مقدار $R_{(ht)}$ برای عملیات خاک‌ریزی در ارتفاع (۱۰–۰) متر برابر با ۰/۰۳۳ است. اما افزایش میزان $R_{(ht)}$ در ارتفاع خاک‌ریزی (۱۰–۰) متر باعث می‌شود که میزان خطا در ٤١ درصد از نتایج سلول فشار، بیش‌تر از ۵۰± درصد باشد (جدول ۳).

جدول ۳. مقایسهٔ میزان $R_{(ht)}$ در ارتفاع‌های خاک‌ریزی مختلف

ارتفاع خاکریزی(متر)	خطای سلول فشار٪	میانگین $R_{(ht)}$	انحراف معیار$R_{(ht)}$
۰–۱۰	±۵۰٪>	۰/۰۳۳	۰/۰۱٦
	±۵۰٪<	۰/۰۷۹	۰/۰٤٦
۱۰–۳۰	±٪۵۰>	۰/۱	۰/۰۳٦
	±٪۵۰<	۰/۰۱۸	۰/۰۱۷

هم‌چنین در شکل ۷ ب مشاهده می‌شود که ٤۹ درصد نتایج سلول‌های فشار در ارتفاع خاک‌ریزی (۳۰–۱۰) متر دارای خطای کم‌تر از ۵۰± درصد است، میانگین $R_{(ht)}$ در این داده، برابر با ۰/۱ است. اما کاهش میزان $R_{(ht)}$ در ارتفاع خاک‌ریزی (۳۰–۱۰) متر باعث می‌شود که ۵۱ درصد نتایج، خطایی بیش‌تر از ۵۰± درصد را نشان دهد (جدول ۳). بنا بر این در ارتفاع خاک‌ریزی (۱۰–۰) متر به‌منظور کسب نتایج صحیح از سلول فشار باید سرعت عملیات خاک‌ریزی کم باشد و به‌ازای هر ۳۰ روز، یک متر خاک‌ریزی صورت پذیرد ولی در ارتفاع خاک‌ریزی (۳۰–۱۰) متر می‌توان سرعت عملیات خاک‌ریزی را بیش‌تر در نظر گرفت و به‌ازای هر ۱۰ روز یک متر خاک‌ریزی انجام داد. البته اعداد ارائه شده صرفاً مربوط به سد البرز است و تنها تأثیر روند (سرعت) خاک‌ریزی بر روی نتایج سلول‌های فشار مورد توجه قرار گرفته است. بنا بر این هدف از ارائه چنین نتیجه‌ای، نشان‌دادن تأثیر پارامتر مورد نظر $R_{(ht)}$ بر روی نتایج سلول فشار و تغییر میزان تأثیر آن در ترازهای مختلف خاک‌ریزی بر روی نتایج سلول فشار است. بدیهی است که روند خاک‌ریزی تابع عوامل مهم دیگری از جمله پارامترهای

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.8.9]

عملیاتی، جلوگیری از منفی شدن فشار آب حفره‌ای، جلوگیری از پدیده قوس زدگی و آب و هوای منطقه‌ای نیز است که اهمیت آن‌ها بیش‌تر از نتایج سلول فشار است

با توجه به شکل ۷ ج، ٦٨ درصد نتایج سلول‌های فشار سد البرز در ارتفاع خاک‌ریزی (<۳۰) متر، خطای بیش‌تر از ۵۰± درصد را نشان می‌دهد، هم‌چنین با وجود افزایش میزان پراکندگی در مقادیر $R_{(ht)}$ این داده‌ها، می‌توان به این نکته اشاره کرد که مقدار $R_{(ht)}$ در ایجاد خطا در ارتفاع بالاتر از ۳۰ متر بی‌اثر بوده است. در نهایت این نتیجه به‌دست می‌آید که نتایج به‌دست آمده از سلول‌های فشار سد البرز در ارتفاع خاک‌ریزی بالاتر از۳۰ متر تا حدودی غیرقابل اعتماد است.

نتیجه‌گیری

به‌دلیل وجود اختلاف میان میزان تنش واقعی و تنش اندازه‌گیری شده با سلول فشار، همواره سازندگان و استفاده‌کنندگان از این ابزار به‌دنبال راه حل‌هایی برای کاهش این اختلاف هستند. هدف اصلی در این تحقیق، ارائه مدلی به‌منظور پیش‌بینی خطای سلول‌های فشار در سد البرز به‌کمک روش GEP است که در این خصوص این نتایج حاصل گردید:

۱. نسبت تفاضل ارتفاع به تفاضل زمان خاک‌ریزی $R_{(ht)}$ تأثیر مهمی در دقت اندازه‌گیری سلول‌های فشار سد البرز دارد. به‌طوری‌که مشخص شد، با کاهش میزان $R_{(ht)}$ در ارتفاع خاک‌ریزی (صفر تا ۱۰متر) و هم‌چنین با افزایش آن در ارتفاع (۱۰ تا ۳۰ متر)، میزان خطا در نتایج سلول فشار تا حد زیادی کاهش می‌یابد. بنا بر این به‌منظور کسب بهترین نتیجه از سلول‌های فشار باید سرعت عملیات خاک‌ریزی به‌تدریج با افزایش ارتفاع خاک‌ریزی بیش‌تر شود.

۲. پارامتر ارتفاع خاک‌ریزی در صحت برآورد تنش در سلول فشار نقش مهمی ایفا می‌کند. به‌طوری‌که افزایش ارتفاع خاک‌ریزی (بالاتر از ۳۰ متر) باعث افزایش میزان در صد خطا در سلول‌های فشار می‌شود. بنا بر این به نظر می‌رسد نتایج به‌دست آمده از سلول فشار در ارتفاع‌های بالاتر از ۳۰ متر تا حدودی غیرقابل اعتماد است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.8.9]

۳. با توجه به این‌که از ارتفاع خاک‌ریزی بالاتر از ۳۰ متر نتایج سلول فشار همراه با خطای زیاد است و تا حدودی غیرقابل اطمینان است، به‌منظور برآورد تنش در ترازهای بالاتر از ۳۰ متر باید در این تراز، سلول فشار دیگری نصب گردد. بنا بر این نصب سلول فشار در ترازهای کم‌تر از ۳۰ متر الزامی نیست و با این‌کار می‌توان در کاهش هزینه‌های خرید سلول فشار صرفه‌جویی کرد.

٤.بیش‌ترین خطاها در نتایج سلول‌های فشار، مربوط به نحوهٔ نصب آن‌ها و در زمان احداث سدها اتفاق می‌افتد بنا بر این اگر انتخاب سلول فشار و مراحل نصب آن با دقت و صحت لازم انجام شود، با انجام عملیات خاک‌ریزی اصولی و منظم با توجه به نسبت تفاضل ارتفاع به‌مدت زمان خاک‌ریزی و هم‌چنین ارتفاع خاک‌ریزی می‌توان نتایج مناسبی از سلول‌های فشاری که در محور هسته رسی در سایر سدهای خاکی نصب شده‌اند، به‌دست آورد. در ادامه بیان این نکته حائز اهمیت است که آب‌گیری مخزن سد نیز ممکن است به ایجاد خطا در داده‌های سلول فشار منجر گردد. بنا بر این به‌منظور بررسی علت آن، پارامترهای دیگری مد نظر قرار می‌گیرد که بررسی آن مستلزم انجام تحقیق دیگری در این زمینه است.

منابع

1. Selig E. T., "A Review of Stress and Strain Measurement in Soil", Proceedings of the Symposium on Soil Structure Interaction, University of Arizona, Tucson, AZ, University of Arizona, Tucson, AZ (1964) 172-186.
2. Weiler W. A., Kulhawy F. H., "Factors Affecting Stress Cell Measurement in Soil", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.108, No.GT12 (1982) 1529-1547.
3. Dunnicliff J., Green G. E., "Geotecnical Instrumentation for Monitoring Field Performance", John Wiley &Sons, New York (1993).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.8.9]

4. Bock H., "Discussions of Karkheh Dam Instrumentation System-Some Experiences", Geotechnical Instrumentation News (GIN) (2006) 34-41.

5. Ahangari K., Noorzad A., "Use of Casing and Its Effect on Pressure Cells" Mining Science and Technology, Vol. 20, No. 3 (2010) 384-390.

٦. شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس، *گزارش فنی پی و بدنه سد البرز، مطالعات مرحله دوم طرح سد مخزنی البرز*، شرکت سهامی آب منطقه‌ای مازندران، ساری، ایران (۱۳۷۷).

۷. شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس، *گزارش زمین‌شناسی مهندسی سد البرز*، مطالعات مرحله دوم، شرکت سهامی آب منطقه‌ای مازندران، ساری، ایران (۱۳۷۷).

۸. شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس، *گزارش بررسی داده‌های ابزار دقیق بدنه سد البرز*، شرکت سهامی آب منطقه‌ای مازندران، ساری، ایران (آذر ۱۳۸٦).

9. Ferreira C., "Gene Expression Programming, Mathematical Modeling by an Artificial Intelligence", Germany: 2nd Edition, Springer-Verlag (2006).

10. Automatic Problem Solver- APS 3.0, http://www.gepsoft.com.

11. Fernando D. A. K., Shamseldin, A. Y., Abrahart, R. J., "Using Gene Expression Programming to Develop a Combined Runoff Estimate Model from Conventional Rainfall-Runoff Model Outputs", 18th World IMACS / MODSIM Congress, Cairns, Australia (2009) 748-754.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.8.9]