تحلیل پارامتری رفتار تونل حلزونی دسترسی به تاج سد بختیاری با استفاده از روش عددی (نرم‌افزار $FLAC^{3D}$)

مسعود عبداللهی*، سید محمد اسماعیل جلالی؛
دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک
جواد احمدی؛ شرکت سپاسد، تهران، ایران

تاریخ: دریافت ۹۳/۸/۵ پذیرش ۹٤/۸/٦

چکیده

سد بختیاری در استان لرستان بر رودخانه بختیاری واقع شده است. به‌منظور دسترسی به تاج سد، در مورد حفر تونلی حلزونی شکل، بررسی شده است. از این تونل در ترازهای مختلف، تونل‌های دسترسی دیگری منشعب شده و به گالری‌های تزریق مرتبط می‌شوند. با توجه به این‌که در زمان بهره‌برداری سد، نیز از این تونل استفاده می‌شود و جزء تأسیسات دائمی سد خواهد بود، تعیین صحیح پارامترهای مکانیکی توده‌سنگ برای طراحی و تحلیل پایداری تونل اهمیتزیادی دارد. برای تحلیل پایداری سازه‌های زیرزمینی سنگی، پارامترهای مکانیکی و مهندسی توده‌سنگ باید شناسایی و تعیین شوند. خصوصیات دقیق توده‌سنگ فقط از آزمایش‌های مکانیک سنگی به‌دست می‌آیند. این آزمایش‌ها، به‌دلیل هزینه زیاد و زمان‌بر بودن اغلب کم انجام می‌شوند. تحلیل پارامتری و اولویت‌بندی پارامترها، می‌تواند برای بهینه‌سازی روند آزمایش‌ها به‌کار رود. هم‌چنین، تحلیل پارامتری به جلوگیری از اشتباهات ناشی از حدس و گمان فردی کمک می‌کند. در این مقاله پس از معرفی زمین‌شناسی منطقه و تعیین مقطع بحرانی در مسیر تونل، با استفاده از نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ (روش عددی تفاضل محدود) به مدل‌سازی و تحلیل پارامترهای مکانیکی توده‌سنگ اطراف تونل می‌پردازیم. پارامترهای استفاده شده در تحلیل شامل مدول الاستیسیته (E)، چسبندگی توده‌سنگ (C)، زاویهٔ اصطکاک

* نویسنده مسئول masoud.abdollahi87@yahoo.com

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.3.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3628]

داخلی (ϕ)، ضریب تنش جانبی (K) و مقاومت کششی (σ_t) است. در نهایت با توجه به نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های عددی و تحلیل پارامتری، پارامترهای مؤثر بر پایداری اولویت‌بندی شده‌اند. نتایج حاصل از تحلیل نشان داد که در پروژه حاضر، پارامتر مقاومت کششی توده‌سنگ بر پایداری تونل تأثیر ندارد و هم‌چنین به‌ترتیب اولیت پارامترهای E، ϕ، C و K در طراحی دارای اهمیت هستند. میزان آزمایش‌های برجا برای پارامترهای توده‌سنگ می‌تواند مطابق با میزان حساسیت و ترتیب اهمیت پارامترها توجیه شوند. در اصل، برای پارامترهای با حساسیت بیش‌تر، باید آزمایش‌های بیش‌تری انجام شود. انتخاب روش‌های آزمایش مناسب، باید مطابق با نیازهای پروژه مهندسی و بر اساس اولویت حساسیت پارامترها انجام شود.

واژه‌های کلیدی: سد بختیاری، تونل حلزونی، $FLAC^{3D}$ ، تفاضل محدود، تحلیل پارامتری.

مقدمه

در حال حاضر، روش‌های عددی متعددی برای تحلیل پایداری فضاهای زیرزمینی وجود دارد. در این روش‌ها عوامل زیادی، پایداری این فضاها را تحت تأثیر قرار می‌دهند. روش‌های المان محدود، تفاضل محدود، المان مجزا و روش‌های ترکیبی از روش‌های پرکاربرد در مکانیک سنگ هستند. درستی و قابلیت اعتماد این روش‌ها تا حدود زیادی به انتخاب مناسب مدل محاسباتی و مکانیکی و پارامترهای ورودی بستگی دارد. پس از انتخاب مدل محاسباتی، کلید موفقیت در انتخاب عقلانی پارامترهای محاسباتی است. پارامترهای زیادی وجود دارد که پایداری توده‌سنگ را تحت تأثیر قرار می‌دهند و باید درجه اهمیت این پارامترها مشخص شود. تعیین درجه اهمیت این پارامترها در مورد نحوهٔ تعیین و یا تخمین آن‌ها، در روند طراحی مفید است. حساسیت این پارامترها در هر مورد خاص باید به‌طور جداگانه بررسی شود [۱].

پژوهش‌های بسیاری در مورد تحلیل پارامترهای مؤثر در پایداری فضاهای زیرزمینی با استفاده از روش‌های عددی انجام شده است. ان جی[1] و لی[2] (۲۰۰۲) استفاده از پیچ‌سنگ برای پایداری جبهه‌کار تونل را به‌صورت پارامتری تحلیل کردند [۲]. فلین[3] و همکاران (۲۰۱۰) پارامترهای

1. Ng
2. Lee
3. Fellin

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.3.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3628]

مؤثر بر پایداری جبهه‌کار تونل را به‌صورت مدل آزمایشگاهی تحلیل کردند [۳]. مادکور[۱] (۲۰۱۲) پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار تونل‌ها مانند خصوصیات درزه‌ها و عمق تونل در توده‌سنگ درزه‌دار را بررسی کرد [٤]. میرو[۲] و همکاران (۲۰۱٤) حساسیت پارامترهای خاک در تونل‌سازی مکانیزه را تحلیل کردند [٥]. میکائیل و همکاران (۱۳۸۸) پارامترهای مؤثر بر پیشروی ماشین TBM در تونل انتقال آب قمرود را بررسی کردند [٦].

هدف مقاله حاضر، تحلیل پارامترهای مؤثر بر پایداری تونل دسترسی به تاج سد بختیاری با استفاده از نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ و اولویت‌بندی بر اساس اهمیت و حساسیت در تحلیل است.

معرفی پروژه

ساختگاه سد بختیاری در لرستان و در شمال‌شرق ایستگاه تنگ پنج در مسیر راه آهن تهران- اهواز، روی رودخانه بختیاری واقع شده است. به‌منظور دسترسی به تاج سد، حفر یک تونل اصلی به شکل حلزونی بررسی شد. از این تونل در ترازهای مختلف، تونل‌های دسترسی دیگری منشعب شده و به گالری‌های تزریق مرتبط می‌شوند. شکل ۱ موقعیت مسیر طراحی شده تونل حلزونی، در جناح راست و در پایین‌دست محل سد را نشان می‌دهد. حداقل شعاع مسیر افقی ٦۰ متر و حداکثر شیب طولی ۹/٤درصد است. طول تونل حلزونی تا تاج سد، ۳۷۸۰ متر است. سطح مقطع تونل مورد نظر از نوع D- شکل[۳]، عرض حفاری تونل ۷/۲ متر و ارتفاع آن ٦/۱٥ متر پیش‌بینی شده است. این تونل حلزونی در زمان بهره‌برداری سد نیز استفاده می‌شود [۷].

زمین‌شناسی منطقه

بر اساس اطلاعات موجود از بررسی‌های مرحلهٔ اول و بررسی‌های بازنگری ساختگاه سد و نیروگاه بختیاری اطلاعات کلی زمین‌شناسی مسیر تونل حلزونی بدین‌شرح ارائه می‌شود:

4. Madkour
1. Miro
2."D" Shape

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.3.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3628]

سد بختیاری، از دیدگاه زمین‌شناسی عمومی در زون زاگرس چین‌خورده و در تاقدیس گیریوه واقع است. توالی تاقدیس‌ها و ناودیس‌ها در محدودهٔ بررسی شده از پدیده‌های اصلی ریخت شناسی محسوب می‌شوند.



شکل ۱. پلان جانمایی تونل دسترسی حلزونی، سایر دسترسی‌ها به گالری‌های تزریق و زمین‌شناسی محدودهٔ ساختگاه و مسیر تونل حلزونی سد و نیروگاه بختیاری [۷]

مسیر تونل حلزونی تعدادی از مجموعه لایه‌ها و واحدهای سنگی (واحدهای SV3 تا SV6) در سازند سروک را که در محدودهٔ ساختگاه سد رخنمون دارند را قطع می‌کند. در ادامه به شرح هر یک از واحدهایی که مسیر تونل حلزونی آن را قطع می‌کند،می‌پردازیم. زمین‌شناسی همراه با جانمایی مسیر تونل حلزونی در شکل ۱ نشان داده شده است.

واحد SV3 از تناوب لایه‌های آهکی متوسط تا نازک با باندهای نازک و پیوسته آهک سیلیسی تشکیل شده و ضخامت آن در حدود ۱۱۰ متر است. بخش شمال خاوری تونل حلزونی لایه‌های این واحد را قطع می‌کند.

واحد SV4 نیز شامل لایه‌های آهکی تا آهک مارنی تیره‌رنگ متوسط تا ضخیم‌لایه با گرهک‌های کوچک آهک سیلیسی است. ضخامت این بخش نیز در حدود ۷۰ متر است. ابعاد گرهک‌های چرتی در حدود ۱۵–۱۰ سانتی‌متر است. تقریباً بخش جنوب، جنوب باختری تونل لایه‌های این واحد را قطع می‌کند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.3.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3628]

واحد SV5 به‌طور کلی از لایه‌های آهکی مقاوم، ضخیم تا خیلی ضخیم‌لایه و تیره‌رنگ و ریزدانه تشکیل شده است و در حدود ۱۵۰ متر ضخامت داشته و از لایه‌های آهکی ضخیم تا توده‌ای تشکیل شده است که دارای گرهک‌های فراوان و خیلی بزرگ آهک سیلیسی (چرت) است و به‌همین دلیل دارای ریخت و ظاهر بسیار مشخص است که از فواصل دور نیز به‌راحتی قابل شناسایی است. بخش کمی از مسیر تونل حلزونی که عمدتاً مربوط به ناحیهٔ جنوب باختری مسیر تونل است، توسط این واحد قطع می‌شود.

واحد SV6 آهک سیلیسی به‌صورت کم و فقط در برخی لایه‌ها بوده است و از آهک‌های متوسط تا ضخیم‌لایه خاکستری تا خاکستری‌تیره به‌وجود آمده است. ضخامت بخش بالایی حدود ۱۴۰ متر است. تقریباً بخش ابتدایی مسیر تونل در این واحد قرار دارد.

واحد SV7، در پایین دست تنگه رخنمون دارد و متشکل از لایه‌های آهکی - آهکی مارنی تیره‌رنگ ریزدانه همراه با میان لایه‌های شیل و با لایه‌بندی نازک تا متوسط است. مسیر تونل هیچ‌کدام از لایه‌های این واحد را قطع نمی‌کند، اما مسیر جاده دسترسی به تونل از روی این واحد عبور خواهد کرد [۷].

پژوهش‌های ژئومکانیکی

برخی از مهم‌ترین پژوهش‌ها و آزمون‌های ژئومکانیکی انجام شده در محل ساختگاه سد بختیاری در این بخش ذکر شده است.

آزمایش‌های مکانیک سنگی

تعداد زیادی آزمایش مکانیک سنگی آزمایشگاهی بر نمونه‌های سنگی انتخاب شده از مغزه‌های گمانه‌های اکتشافی در دو آزمایشگاه در ایران و در آلمان انجام شده است. تعداد، نوع و شرایط آزمایش‌های آزمایشگاهی انجام شده در چارچوب تحقیقات ژئوتکنیکی برای پروژه بختیاری عبارتند از:

۱۲۶ آزمایش شاخص[1]، ٤٧٤ اندازه‌گیری سرعت موج اولتراسونیک در شرایط خشک و اشباع، ۱۶۲ آزمایش فشاری نامحصور (تک‌محوری) در شرایط خشک و اشباع، ۱۲۵ آزمایش

1. index

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.3.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3628]

فشاری سه‌محوری در شرایط اشباع، ۹٤ آزمایش برش مستقیم بر ناپیوستگی‌های سنگ، ٤۷ آزمایش کشش غیرمستقیم (برزیلی) و ۲۰ آزمایش نفوذپذیری.

با درنظرگرفتن این حقیقت که اصل سد در واحدهای SV2، SV3 و SV4 سازند سروک در محل پروژه بختیاری ساخته می‌شود و تأسیسات نیروگاه زیرزمینی درون واحدهای SV5 و SV6 حفر می‌شود، بیش‌ترین نمونه‌ها از این واحدها گرفته شده است و اکثر آزمایش‌های آزمایشگاهی روی آن‌ها انجام شده است. هم‌چنین، چندین نمونه از واحد SV7 گرفته شده است که بعضی سازه‌های متعلقات نظیر آب‌گیر نیروگاه، آبراه‌های نیروگاه و مجرای خروج تونل انحراف در آن حفر یا ساخته می‌شوند و تعدادی آزمایش روی این نمونه‌ها انجام شد. به‌علاوه، تعداد کمی نمونه از واحد SV1 گرفته شده است که هیچ برون‌زدی (رخنمون) در محل سد ندارد و هیچ‌یک از اجزا پروژه در آن ساخته یا حفر نمی‌شوند و چند آزمایش محدود با هدف فقط شناسایی سنگ روی آن‌ها انجام شده است. نتایج آزمایش‌های نمونه‌های گرفته شده از SV1 در ارزیابی خصوصیات مکانیکی و شاخص سازند سروک در محل سد بختیاری وارد نشده است.

به‌عنوان نتیجه از ارزیابی و تفسیر همهٔ نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی، ۵ واحد سازند سروک در محل پروژه بختیاری (SV2 تا SV5) به دو گروه تقسیم می‌شوند:

گروه A: شامل واحدهای SV2، SV3 و SV4 که در ناحیهٔ پایه (پی) سد قرار دارند و پارامترهای طراحی و شاخص خیلی مشابه در مقیاس سنگ بکر دارند.

گروه B: شامل واحدهای SV5 و SV6 که در ناحیهٔ تأسیسات نیروگاه زیرزمینی قرار دارند و پارامترهای طراحی و شاخص خیلی مشابه در مقیاس سنگ بکر دارند.

در ادامه، خلاصه نتایج آزمایش‌های شاخص، آزمایش‌های اندازه‌گیری سرعت موج اولتراسونیک، آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری و سه‌محوری ارائه شده است و از تشریح سایر آزمایش‌ها خودداری شده است [۸].

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.3.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3628]

الف) آزمایش شاخص

خلاصه نتایج آزمایش‌های شاخص انجام شده بر ۱۲۶ نمونه سنگ گرفته شده از واحدهای SV2 تا SV7 محل پروژه بختیاری در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است. با بازبینی نتایج آزمایش‌های شاخص، نتیجه می‌گیریم که خصوصیات شاخص مواد سنگی گروه A واحدهای سازند سروک در محل پروژه بختیاری خیلی شبیه به‌هم هستند و بنابراین می‌توان به‌صورت نوعی سنگ ملاحظه شوند. نتیجه مشابه از نتایج آزمایش‌های واحدهای SV5 و SV6 (گروهB) گرفته شد.

جدول ۱. خصوصیات شاخص مواد سنگی گروه A (SV2، SV3 و SV4) در محل پروژهٔ بختیاری [۸]

پارامترهای آماری	تعداد نمونه‌ها	چگالی (kg/m^3)		تخلخل	جذب آب
		خشک	اشباع	n (٪)	w (٪)
میانگین	٦١	٢٦٤٢	٢٦٥٢	۰/۹۳	۰/۳۲
انحراف از معیار		٤٢	٤٠	۰/۸۷	۰/۳۳

جدول ۲. خصوصیات شاخص مواد سنگی گروه B (SV5 و SV6) در محل پروژه بختیاری [۸]

پارامترهای آماری	تعداد نمونه‌ها	چگالی (kg/m^3)		تخلخل	جذب آب
		خشک	اشباع	n (٪)	w (٪)
میانگین	۳۷	٢٦٤٦	٢٦٥٨	۰/۹۱	۰/۳۰
انحراف از معیار		٤٦	٤٤	۰/۹۱	۰/۳۷

ب) آزمایش اندازه‌گیری سرعت موج اولتراسونیک

بیش‌تر از ٤٧٠ آزمایش اندازه‌گیری سرعت موج اولتراسونیک به‌منظور برآورد واقع‌بینانه، ثابت‌های الاستیک و دینامیک مواد سنگی سازند سروک محل پروژهٔ بختیاری، روی نمونه‌های واحدهای SV1 تا SV7 انجام شده است. مطابق با روش استاندارد آزمایش، با اندازه‌گیری چگالی سنگ γ (Kg/m^3)، سرعت موج طولی Vp (m/s) و سرعت موج معکوس Vs (m/s)، نسبت پواسون (ν)، مدول الاستیسیته دینامیکی E_d (GPa)، مدول بالک دینامیکی K_d (GPa) و مدول دینامیکی برشی G_d (GPa) محاسبه می‌شوند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.3.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3628]

مشابه نتایج آزمایش‌های شاخص، سرعت‌های موج اولتراسونیک اندازه گرفته شده روی همهٔ نمونه‌های گرفته شده از واحدهای SV2، SV3 و SV4 (گروه A) خیلی مشابه هم هستند و تأیید می‌کنند که از نقطه نظر مواد سنگی این‌ها به‌صورت نوعی سنگ می‌توانند در نظر گرفته شوند. نتیجه مشابه می‌توان از نتایج آزمایش‌های واحدهای SV5 و SV6 (گروه B) گرفته شود و آن‌ها می‌توانند هم‌چنین به‌صورت نوعی سنگ در نظر گرفته شوند.

نتایج آزمایش‌های اولتراسونیک و خصوصیات دینامیک مواد سنگی گروه A و گروه B در محل پروژه بختیاری، شرایط خشک و اشباع به‌ترتیب در جدول‌های ۳ و ٤ ارائه شده است.

جدول ۳. نتایج آزمایش‌های اولتراسونیک و خصوصیات دینامیک گروه سنگی A در شرایط خشک و اشباع [۸]

پارامتر	وضعیت آب	تعداد نمونه‌ها	γ (g/cm^3)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	ν	E_d (Gpa)	K_d (Gpa)	G_d (Gpa)
میانگین	خشک	۱۲۰	۲٦۷٦	٦۱۱۳	۳۲۷۰	۰/۳۰	۷٤	٦۲	۲۹
انحراف معیار			۳۲	۳۷۱	۱۷۲	۰/۰٤	۸	۱۰	۳
میانگین	اشباع	۱۰۸	۲٦۷۹	٦۱۵۷	۳۳۲۰	۰/۳۰	۷۷	٦۳	۳۰
انحراف معیار			۳۳	٦۲۹	۱۸۲	۰/۰۷	۹	۱۳	۳

جدول ٤. نتایج آزمایش‌های اولتراسونیک و خصوصیات دینامیک گروه سنگی B در شرایط خشک و اشباع [۸]

پارامتر	وضعیت آب	تعداد نمونه‌ها	γ (g/cm^3)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	ν	E_d (Gpa)	K_d (Gpa)	G_d (Gpa)
میانگین	خشک	۱۲۰	۲٦۷۹	٦۱۹۷	۳۲۷۷	۰/۳۰	۷۵	٦۵	۲۹
انحراف معیار			۲۰	۳۱۱	۱۷۱	۰/۰۳	۷	۹	۳
میانگین	اشباع	۹۷	۲٦۸۱	٦۳۲۲	۳۲۸٦	۰/۳۱	۷٦	٦۹	۲۹
انحراف معیار			۱۹	۳۲۷	۱٦۰	۰/۰۲	۷	۸	۳

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.3.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3628]

پ) آزمایش فشاری تک‌محوری

نتایج آزمایش‌های فشاری تک‌محوره بر نمونه‌های گروه A (واحدهای SV2، SV3 و SV4) و گروه B (واحد SV5 و SV6) به‌ترتیب در جدول‌های ۵ و ٦ نشان داده شده است.

جدول ۵. نتایج آزمایش‌های فشاری تک‌محوره بر نمونه‌های سنگ بکر گروه A سازند سروک (واحدهای SV2، SV3 و SV4) در محل پروژه بختیاری [۸]

پارامترهای آماری	وضعیت خشک			وضعیت اشباع		
	تعداد نمونه‌ها	UCS (MPa)	E (GPa)	تعداد نمونه‌ها	UCS (MPa)	E (GPa)
میانگین	۲٦	۱۲۰	٦۸	۲۵	۱۰۵	٦۷
انحراف از معیار		٤٤	۹		۳۰	۱۰

جدول ٦. نتایج آزمایش‌های فشاری تک‌محوره بر نمونه‌های سنگ بکر گروه B سازند سروک (واحدهای SV5 و SV6) در محل پروژه بختیاری [۸]

پارامترهای آماری	وضعیت خشک			وضعیت اشباع		
	تعداد نمونه‌ها	UCS (MPa)	E (GPa)	تعداد نمونه‌ها	UCS (MPa)	E (GPa)
میانگین	۲۰	۱۲۵	٦۷	۱۷	۱۰۹	٦۹
انحراف از معیار		۳۹	۱۱		۲۹	۹

ت) آزمایش فشاری سه‌محوری

تعداد ۱۲۵ آزمایش فشاری سه‌محوری بر نمونه‌های سنگ واحدهای SV2 تا SV7 در آزمایشگاه با استفاده از سلول سه‌محوری هوک انجام شد. فشار محصور بین ۵ تا ٦۰ مگاپاسکال تغییر می‌کند. پارامتر ثابت معیار گسیختگی هوک براون (m_i) و مقادیر محاسبه شده برای UCS (σ_{ci}) برای هر دو گروه سنگی و هم‌چنین برای سنگ بکر واحد SV7 در جدول ۷ نشان داده شده است [۸].

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.3.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3628]

جدول ۷. نتایج آزمایش‌های فشاری سه‌محوره بر سنگ بکر گروه‌های A وB و واحد SV7، پارامتر ثابت معیار شکست هوک براون [۸]

گروه	نوع سنگ	تعداد نمونه‌ها	پارامترهای هوک براون		
			σ_{ci} (MPa)	m_i	r^2
A	SV2، SV3 و SV4	۵۰	۱۲۶	۱۴/۱	۰/۶۵
B	SV5 و SV6	۶۳	۱۱۹	۹/۳	۰/۷۶
-	SV7	۷	۹۳	۱۱/۱	۰/۷۸

طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ

طبقه‌بندی RMR انواع توده‌سنگ در محل سد بختیاری بر اساس نقشه‌برداری گالری‌ها انجام شده است. به‌منظور بازبینی نتایج طبقه‌بندی RMR انجام شده در محل سد بختیاری، سیستم طبقه‌بندی Q روی رده‌های توده‌سنگ مشابه در محل پروژه بختیاری استفاده شده است. در این خصوص، سیستم طبقه‌بندی Q برای طبقه‌بندی مغزه‌های چندین گمانه حفاری شده اطراف محور سد و در منطقه به‌کار برده و مقادیر حداقل، حداکثر، میانگین و بیش‌ترین تکرار Q برای رده‌های توده‌سنگ تعیین شده در محل پروژه بختیاری، برآورد شده است. در جدول ۸ مقادیر Q برآورد شده برای رده‌های توده‌سنگ تعیین شده، نشان داده شده است. در جدول ۹ نتایج طبقه‌بندی RMR و Q با هم مقایسه شده و مقادیر GSI شاخص برای هر رده توده‌سنگ بر اساس مقادیر RMR بازبینی شده، پیشنهاد شده است [۸].

جدول ۸. مقادیر Q برآورد شده برای رده‌های توده‌سنگ متفاوت در محل پروژه بختیاری [۸]

ردیف	سنگ‌شناسی	Q_{Min}	Q_{Max}	Q_{Mean}	Q_{Mf}
۱	SV4+ SV3 +SV2	۰/۰۰۲	۱۰۰	۱/۲۵	۲/۶۹
۲	SV5+SV6	۰/۰۰۲	۱۵۰	۷/۲۶	۵/۲۳
۳	SV7	۰/۰۰۲	۱۰۰	۲/۸	۱/۰۰

جدول ۹. مقایسه مقادیر Q، RMR و GSI برآورد شده برای رده‌های توده‌سنگ تعیین شده [۸]

سنگ‌شناسی	RMR_{89}	Q_{Mean}/Q_{MF}	$RMR=15*Log_{10}(Q)+50^2$	$GSI=RMR'_{89}-5$	GSI پیشنهادی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.3.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3628]

SV4+ SV3 +SV2	٤٨–٦٦	١/٢٥ / ٢/٦٩	٥١–٥٦	٤٨–٦٣	٤٠–٦٠
SV5+SV6	٥٨–٥٩	٧/٢٦ / ٥/٢٣	٥٦–٦١	٥٨–٥٩	٥٥–٦٥
SV7	٤٦–٥٦	٢/٨ / ١/٠٠	٥٠–٥٧	٤٦–٥٦	٤٥–٥٥

در جدول ۹، Q_{MF} مقدار Q بیش‌تر تکرار شده، و RMR_{89}، RMR محاسبه شده بر اساس بیناوسکی و RMR'_{89} مشابه RMR_{89} است اما شرایط آب زیرزمینی به‌صورت خشک در نظر گرفته می‌شود.

ناپیوستگی‌های توده‌سنگ

برای شناسایی توده‌سنگ اطراف تونل حلزونی ابتدا سیستم ناپیوستگی‌های توده‌سنگ بررسی می‌شوند. شیب و امتداد ناپیوستگی‌ها و فاصله‌داری سیستم ناپیوستگی محدوده ساختگاه سد و مسیر تونل حلزونی به‌ترتیب در جدول‌های ۱۰ و ۱۱ آورده شده است. شکل ۲ قرارگیری سه‌بعدی ناپیوستگی‌ها را نشان می‌دهد [۸].

برای به‌دست آوردن متوسط فاصله‌داری هر ناپیوستگی، نمودار فاصله‌داری آن ناپیوستگی در تطابق با تابع توزیع نمایی منفی باید رسم شود و از روی نمودار، متوسط فاصله‌داری به دست می‌آید. برای نمونه، نمودار فاصله‌داری دسته درزه J1 در شکل ۳ آورده شده است. به‌طور خلاصه در جدول ۱۲ مقادیر محاسبه شده برای متوسط فاصله‌داری متوسط ($\overline{X}$) و فراوانی (λ) ناپیوستگی‌ها ارائه شده است.

جدول ۱۰. سیستم ناپیوستگی‌های کلی ساختگاه سد و مسیر تونل حلزونی [۸]

سیستم ناپیوستگی		جهت شیب - نسبت به شمال (درجه)	زاویه شیب (درجه)
لایه‌بندی	بالا دست	۳۰	۵۰
	پایین دست	۲۱۵	۷۵
دسته درزه J1	J1A	۳۱۰	۷۰
	J1B	۳۱۰	٤٠
دسته درزه J2	J2A	۱۲۵	۳۵
	J2B	۱۲۵	۷۵
دسته درزه J3		٤٥	۱۵

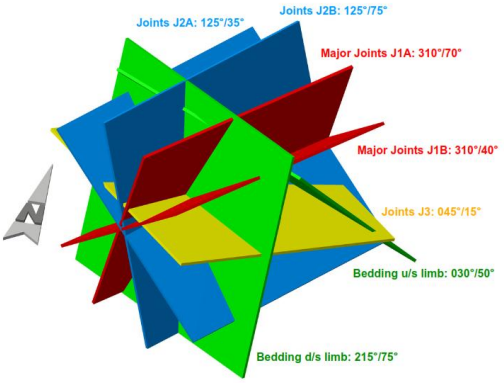
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.3.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3628]

جدول ۱۱. فاصله‌داری سیستم ناپیوستگی‌های کلی ساختگاه سد و مسیر تونل حلزونی [۸]

فاصله‌داری (سانتی‌متر)	دسته درزه J1 (درصدفراوانی)	دسته درزه J2 (درصدفراوانی)	دسته درزه J3 (درصدفراوانی)	لایه بندی (درصدفراوانی)
۲ تا ٦	۲/۵	۳	٦	۱/۵
٦ تا ۲۰	٤۸/۵	۵۲	۲۵	٤۷
۲۰ تا ٦۰	٤۵	٤۳/۵	٦۲/۵	٤٤/۵
٦۰ تا ۲۰۰	٤	۱/۵	٦/۵	۳/۵
۲۰۰ تا ٦۰۰	۰	۰	۰	۳/۵
مجموع	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰

جدول ۱۲. مقادیر متوسط فاصله‌داری و فراوانی ناپیوستگی‌ها

ناپیوستگی	متوسط فاصله‌داری	فراوانی
دسته درزه J1A	۲۹/٦۱	۳/۳۷۸
دسته درزه J1B	۲۹/٦۱	۳/۳۷۸
دسته درزه J2A	۲٦/۲۳	۳/۸۱۲
دسته درزه J2B	۲٦/۲۳	۳/۸۱۲
دسته درزه J3	۳٦/۹٤	۲/۷۰۷
لایه‌بندی بالادست	٤۲/۵۲	۲/۳۵۲
لایه‌بندی پایین دست	٤۲/۵۲	۲/۳۵۲



شکل ۲. نمایش سه‌بعدی ناپیوستگی‌های منطقه پروژه [۸]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.3.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3628]

در حالت کلی اگر تعداد N دسته درزه در توده‌سنگ موجود باشد و تعداد درزه‌ها در واحد طول در امتداد عمود بر هر دسته درزه λ_{io} باشد و α_i و β_i به‌ترتیب امتداد و شیب خط عمود بر دسته درزه i–ام و α_s و β_s امتداد و شیب خط برداشت باشد، تعداد درزه‌ها در واحد طول در امتداد خط برداشت عبارت است از [۹]:

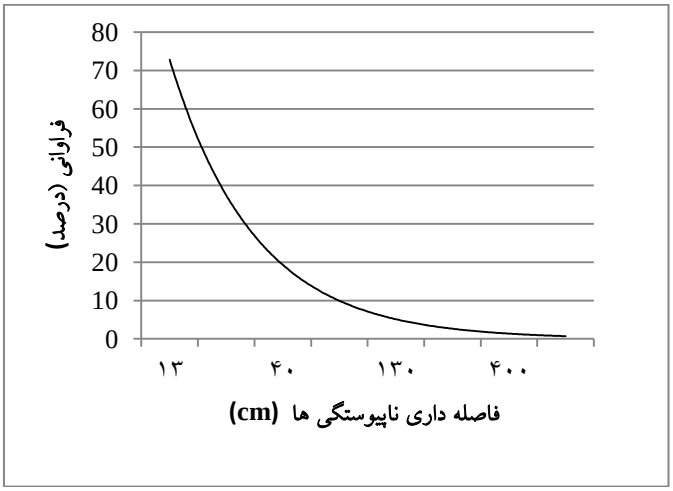
$$\lambda = A\,Sin\alpha_s\,Cos\beta_s + B\,Cos\alpha_s\,Cos\beta_s + C\,Sin\beta_s \qquad (۱)$$

که در آن :

$$A = \sum_{i=1}^{N} \lambda_{io}\,Sin\alpha_i\,Cos\beta_i \qquad (۲)$$

$$B = \sum_{i=1}^{N} \lambda_{io}\,Cos\alpha_i\,Cos\beta_i \qquad (۳)$$

$$C = \sum_{i=1}^{N} \lambda_{io}\,Sin\beta_i \qquad (٤)$$



شکل ۳. نمودار فاصله‌داری دسته درزه J1

با توجه به‌این‌که فاصله‌داری و فراوانی ناپیوستگی‌ها در مسیر تونل مدنظر است، محور تونل به‌عنوان خط برداشت ناپیوستگی‌ها در نظر گرفته می‌شود. بخش بزرگ تونل در امتداد شمال جنوبی قرار دارد و شیب آن تقریباً ۹ درصد است، بنابراین برای محاسبات امتداد تونل صفر و شیب آن ۵ درجه درنظر گرفته می‌شود. با جای‌گذاری شیب، امتداد و فاصله‌داری ناپیوستگی‌های تونل در روابط (۱) تا (٤) مقدار λ، برابر با m^{-1} ۹/۷۸ و مقدار متوسط فاصله‌داری

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.3.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3628]

ناپیوستگی‌ها ($\bar{X}$) در امتداد محور تونل حدود $\bar{x} = ۱۰$ سانتی‌متر به‌دست می‌آید. در این شرایط اندازه فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها نسبت به قطر تونل که برابر با ۷/۲ متر است، بسیار کم است و محیط پردرزه به‌شمار می‌آید و می‌توان محیط توده‌سنگ را شبه پیوسته در نظرگرفت.

لازم به‌ذکر است که λ در این امتداد از تونل کم‌ترین مقدار (و بیش‌ترین مقدار فاصله‌داری) را دارد و در امتدادهای ۳۰، ٦۰ و ۹۰ درجه نسبت به شمال، به‌ترتیب مقادیر ۱۳/۲، ۱۳/۵ و ۱۰/٥٤ m^{-1} را دارد.

با توجه به شبه‌پیوسته در نظر گرفتن توده‌سنگ، با استفاده از نرم‌افزار RocLab، پارامترهای معادل توده‌سنگ از نتایج سنگ بکر و مقادیر GSI توده‌سنگ، به‌دست آمده است. این پارامترها در بخش‌های مدل‌سازی و تحلیل پارامتری ارائه و به‌عنوان پارامترهای ورودی مدل‌سازی استفاده می‌شود.

مدل‌سازی تونل

با توجه به پیوسته بودن محیط سنگی، برای تحلیل از روش تفاضل محدود (FDM) برای استفاده در تحلیل عددی مناسب تشخیص داده شده است. روش تفاضل محدود از قدیمی‌ترین و پرکابردترین روش‌های عددی در حل مسائل مهندسی است. این روش نسبت به‌روش‌های عددی دیگر به‌توان محاسباتی زیادی برای پردازش نیاز ندارد. نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ برنامهٔ تفاضل محدود برای طراحی‌های مهندسی است که برای محیط‌های پیوسته به‌کار می‌رود [۱۰].

با توجه به طویل مسیر تونل، امکان مدل‌سازی کل تونل وجود ندارد. به‌همین منظور بخشی از آن برای مدل‌سازی انتخاب شده است. این بخش از تونل باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که بیان‌گر همه مسیر تونل باشد. با توجه به این‌که مقطع انتخاب شده از تونل، بحرانی‌ترین مقطع تونل است، می‌توان نتایج آن را برای دیگر بخش‌ها تعمیم داد. با توجه به شرایط زمین‌شناسی و تقسیم‌بندی توده‌سنگ مسیر تونل حلزونی که در بخش قبلی تشریح شد و بررسی‌های انجام شده، مقطع بحرانی از گروه سنگی A در کیلومتر ۰+۸۳۰ متر برای تحلیل‌ها شناسایی شده است. روباره تونل در این مقطع ۳٦٥ متر است.

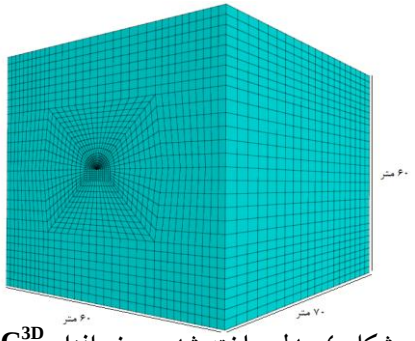
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.3.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3628]

با توجه به هندسهٔ تونل مذکور، برای مدل‌سازی تونلی با سطح مقطع D- شکل، عرض ۷/۲ متر و ارتفاع ٦/۱۵ متر ساخته شده است [۷]. ابعاد مدل‌ها به‌اندازه‌ای در نظر گرفته شده که محدودهٔ تونل تحت اثر ناشی از مرزها قرار نگیرد. فاصلهٔ مرزهای مدل از مرز تونل، حدود چهار برابر قطر تونل در نظرگرفته شده است. مدل رفتاری موهر-کولمب برای مدل انتخاب و سپس خصوصیات مورد نیاز که در جدول ۱۳ ارائه شده‌اند، به مدل تخصیص داده شده است. در مرحلهٔ بعد شرایط مرزی و اولیه در مدل اعمال شده است. برای تأمین شرایط اولیه زمین، تنش‌های اولیه برجای قبل از حفاری به‌کل مدل اعمال می‌شود. جریان سیال صفر درنظر گرفته و محیط سنگی به‌طور خشک و بدون آب فرض می‌شود. مدل ساخته شده، برای رسیدن به حالت تعادل حل شد. برای بررسی تعادل مدل، از یک سری شاخص‌ها از قبیل نیروهای نامتعادل، سرعت در نقاط گرهی و جابه‌جایی مدل می‌توان استفاده کرد. نظر به این‌که قبل از حفاری تونل، زمین در حال تعادل قرار دارد و حفر تونل باعث ایجاد اغتشاش در وضعیت تنش‌ها و جابه‌جایی‌ها می‌شود، لازم است پس از حل و به تعادل رساندن مدل و قبل از حفاری، جابه‌جایی و سرعت گره‌ها صفر شوند، تا شرایط مدل‌سازی به شرایط واقعیت زمین نزدیک‌تر شود [۱۱]، [۱۲]. مدل و مش بندی انجام شده در شکل ٤ نشان داده شده است.

روش کار تحلیل پارامتری

پارامترهای استفاده شده در تحلیل شامل مدول الاستیسیته (E)، چسبندگی توده‌سنگ (C)، زاویهٔ اصطکاک داخلی (ϕ)، ضریب تنش جانبی (K) و مقاومت کششی (σ_t) است که این پارامترها از نتایج آزمایش‌های انجام شده در منطقه [۸] و استفاده از نرم‌افزار RocLab به‌دست آمده‌اند. در جدول ۱۳ مقدار پایه خصوصیات توده‌سنگ اطراف تونل و محدوده تغییرات آن‌ها که ۵۰± ٪ مقدار پایه است، ارائه شده است. بعد از حفر تونل در مدل‌های ساخته شده، پایداری تونل با معیار حداکثر جابه‌جایی عمودی سقف بررسی می‌شود.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.3.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3628]



شکل ٤. مدل ساخته شده در نرم‌افزار $FLAC^{3D}$

جدول ۱۳. پارامترهای استفاده شده در تحلیل

پارامتر	E (GPa)	C (MPa)	ϕ (deg)	K	σ_t (MPa)
مقدار پایه	٤/۷	۱/۱	٤٥	۰/٥	۰/۰٦۷
محدودهٔ تغییرات (±٥۰ ٪ مقدار پایه)	۲/۳٥ – ۷/۰٥	۰/٥٥ – ۱/٦٥	۲۲/٥ – ٦۷/٥	۰/۳ – ۲	۰/۰۳۳ – ۰/۱

برای بررسی تأثیر هر پارامتر، پارامتر موردنظر متغیر و سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته شده است. همه پارامترهای ذکر شده در جدول ۱۳، در مدل‌سازی بررسی و تحلیل شده‌اند و رابطه هر یک از آن‌ها با جابه‌جایی عمودی سقف به‌عنوان معیار پایداری بررسی شده است. نتایج به‌دست آمده از تحلیل پارامترهای موردنظر به‌صورت نمودارها و روابط نشان داده شده در شکل‌های ٥ تا ۹ خلاصه شده‌اند.

با توجه به روابط به‌دست آمده از نمودارها، تابع حساسیت برای هر پارامتر به‌صورت روابط (٥) تا (۹) به‌دست می‌آید:

$$S_E = \left|\frac{du}{dE}\right|\frac{E}{u} = -1 + \frac{46.52}{u}, \qquad u = -5.2\,E + 46.52 \qquad (٥)$$

$$S_c = \left|\frac{du}{dc}\right|\frac{c}{u} = -1 + \frac{20.94}{u}, \qquad u = -1.5636\,c + 20.94 \qquad (٦)$$

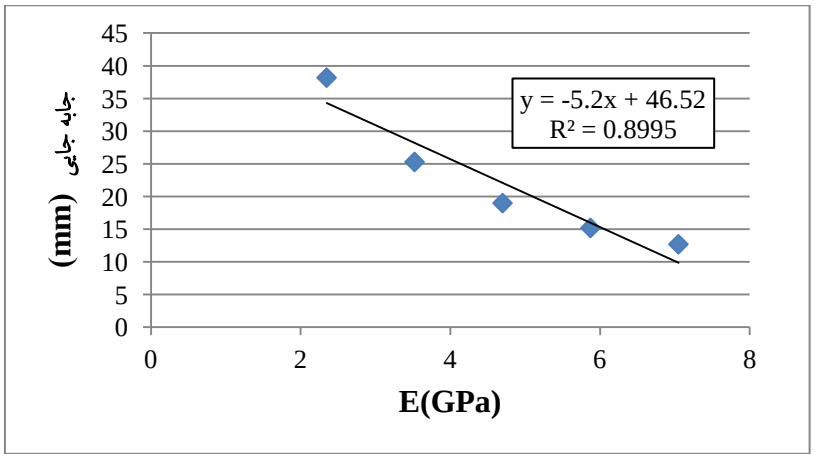
$$S_\phi = \left|\frac{du}{d\phi}\right|\frac{\phi}{u} = -1 + \frac{40.5}{u}, \qquad u = -0.3867\phi + 40.5 \qquad (۷)$$

$$S_k = \left|\frac{du}{dk}\right|\frac{k}{u} = -1 + \frac{20.801}{u}, \qquad u = -3.3269\,K + 20.801 \qquad (۸)$$

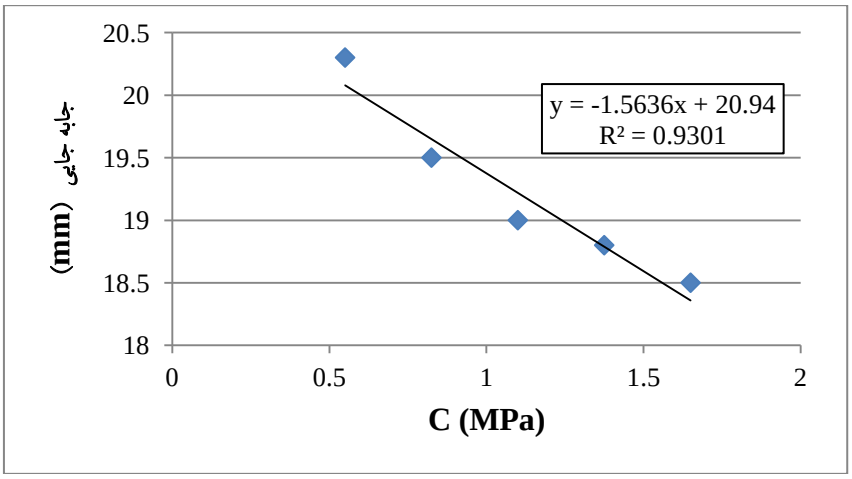
$$S_\sigma = \left|\frac{du}{d\sigma}\right|\frac{\sigma}{u} = 0, \qquad u = 19 \qquad (۹)$$

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.3.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3628]

که در آن u جابه‌جایی عمودی سقف تونل است. فاکتور حساسیت S_E^*، S_K^* و... با قرار دادن مقادیر u در شرایط پایه در تابع حساسیت، به‌دست می‌آید و بیان‌گر حساسیت پارامترهای تعیین شده در هر مورد است. فاکتور حساسیت پارامترهای بررسی‌شده در جدول ١٤ نشان داده شده است.

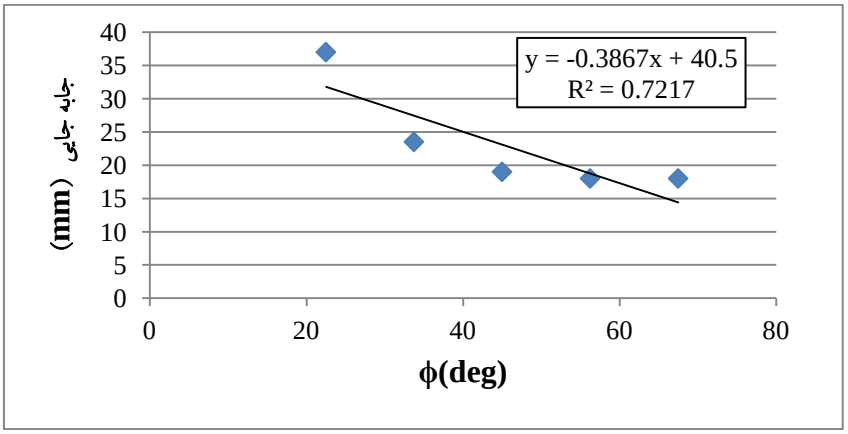


شکل ٥. نمودار تاثیر تغییرات تدریجی E بر جابه‌جایی عمودی سقف



شکل ٦. نمودار تاثیر تغییرات تدریجی C بر جابه‌جایی عمودی سقف

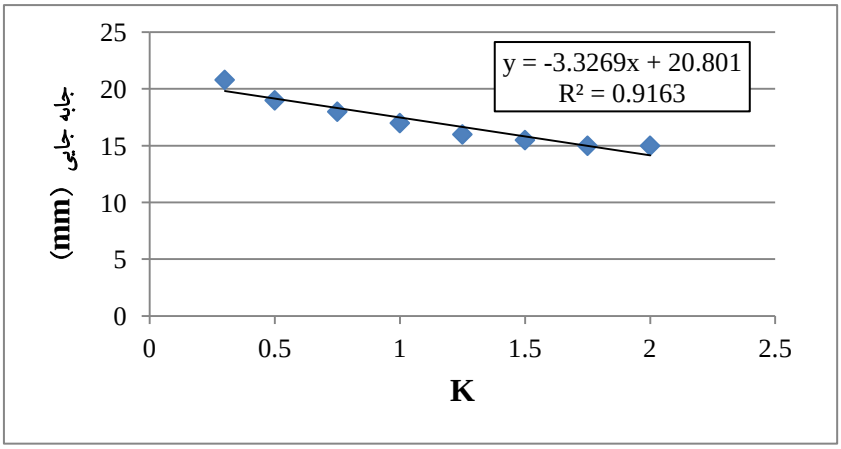
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.3.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3628]



شکل ۷. نمودار تأثیر تغییرات تدریجی ϕ بر جابه‌جایی عمودی سقف

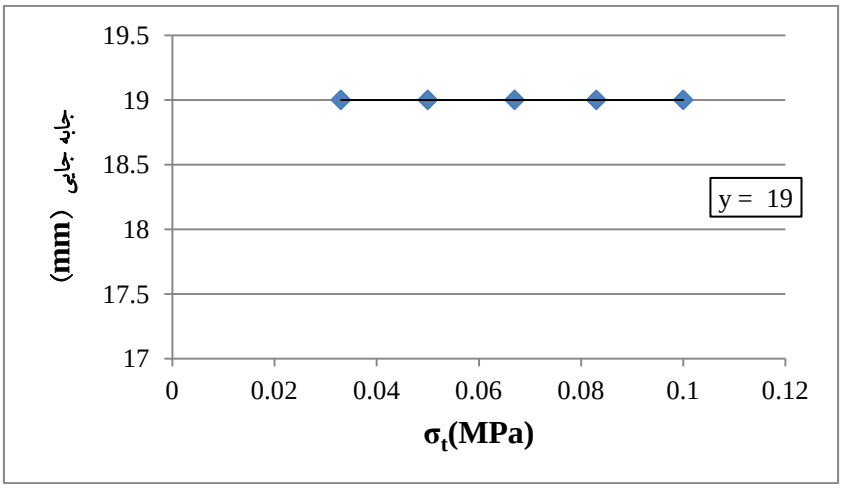
جدول ١٤. فاکتور حساسیت پارامترها

پارامتر	E	C	ϕ	K	σ_t
فاکتور حساسیت	S_E*	S_C*	S_ϕ*	S_k*	S_σ*
مقدار	۱/٤٤۸	۰/۱۰۱	۱/۱۳۲	۰/۰۹۵	۰/۰



شکل ۸. نمودار تأثیر تغییرات تدریجی K بر جابه‌جایی عمودی سقف

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.3.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3628]



شکل ۹. نمودار تأثیر تغییرات تدریجی σ_t بر جابه‌جایی عمودی سقف

چنان‌که از شکل‌های ۵ تا ۹و از جدول ١٤ مشاهده می‌شود، پارامتر σ_t مقاومت کششی در این پروژه تقریباً هیچ تأثیری بر جابه‌جایی‌های عمودی سقف ندارد. تأثیر ضریب تنش جانبی بر جابه‌جایی‌های عمودی نیز چندان محسوس نیست.

بحث و نتیجه‌گیری

مطابق با جدول ١٤، پارامترهای E و φ دو پارامتر اصلی هستند (بیش‌ترین حساسیت را دارند) و باید با دقت فراوان بررسی شوند. نتایج مذکور از یک سری پارامترهای پایه مربوط به پروژه مهندسی موردنظر، به‌دست آمده‌اند. این نتایج برای مسائل و پروژه‌های دیگر متفاوت خواهد بود.

برای تحلیل پایداری سازه‌های زیرزمینی سنگی، پارامترهای مکانیکی و مهندسی توده‌سنگ باید شناخته شوند. خصوصیات دقیق توده‌سنگ فقط از آزمایش‌های وسیع برجا به‌دست می‌آیند. این آزمایش‌ها، به‌دلیل گران بودن و زمان‌بر بودن خیلی‌کم انجام می‌شوند. تحلیل پارامتری، می‌تواند برای بهینه‌سازی روند آزمایش‌ها به‌کار رود.

بهینه‌سازی آزمایش‌ها، کم‌ترین حجم کار برای آزمایش‌های برجای وسیع برای به‌دست آوردن خصوصیات سنگ را موجب می‌شود. بررسی پارامتری، پارامترهای با اهمیت و

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.3.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3628]

حساسیت زیاد که باید در طول آزمایش برجا اندازه‌گیری شوند، را شناسایی می‌کند. به‌طور مثال در پروژه حاضر، مدول الاستیسته و زاویهٔ اصطکاک پارامترهای کلیدی و مهم هستند. آن‌ها باید از آزمایش‌های صحرایی برجا تعیین شوند، در صورتی که دیگر پارامترهای با حساسیت کم‌تر، می‌توانند از آزمایش‌ها ارزان‌تر یا دیگر روش‌ها تعیین شوند.

تحلیل پارامتری به جلوگیری از اشتباهات ناشی از حدس و گمان فردی کمک می‌کند. مجموعه پارامترهای پایه متفاوت، ترتیب حساسیت متفاوتی دارند. به‌این دلیل، تحلیل پارامتری پارامترها، در هر مسئله مهندسی خاص به‌منظور تعیین پارامترهای کلیدی سنگ، باید به‌طور جداگانه انجام شود. پارامترهای کلیدی از پروژه‌ای به پروژهٔ دیگر تغییر می‌کنند.

میزان آزمایش‌های برجا برای پارامترهای توده‌سنگ می‌تواند طبق میزان حساسیت و اهمیت پارامترها توجیه شوند. در اصل، برای پارامترهای با حساسیت بیش‌تر، باید آزمایش‌های بیش‌تری انجام شود. انتخاب روش‌های آزمایش مناسب، باید مطابق با نیازهای پروژه مهندسی و بر اساس اولویت حساسیت پارامترها انجام شود. برای مثال، درصورتی که دو گزینه برای اندازه‌گیری زاویهٔ اصطکاک وجود داشته باشد، که روش اول ارزان و با خطای نسبی ۱۵ درصد و دیگری گران اما با خطای نسبی ۱۰ درصد باشد. چون حساسیت زاویهٔ اصطکاک که ۱/۱۳۲ است، خطای نسبی این دو روش به‌ترتیب ۱٦/۹۸ و ۱۱/۳۲ درصد است. اگر خطای نسبی ۱۵ ٪ > δu در اندازه‌گیری مورد نیاز باشد، اگرچه روش اول ارزان‌تر باشد، اما باید از روش دوم استفاده کرد. اما اگر خطای نسبی ۲۰ ٪ > δu مجاز باشد، می‌توان از روش اول استفاده کرد.

اگرچه تحلیل پارامتری از نظر دقت، پایه علمی برای بهینه‌سازی روند آزمایش‌ها ایجاد می‌کند، اما بهینه‌سازی کلی باید با ملاحظه به دیگر عوامل نظیر هزینه، زمان و دسترس‌پذیری آزمایش‌ها انجام شود [۱۳].

به‌عنوان خلاصه‌ای از نتایج پژوهش، پارامترهای استفاده شده در تحلیل شامل مدول الاستیسیته (E)، چسبندگی توده‌سنگ (C)، زاویهٔ اصطکاک داخلی (ϕ)، ضریب تنش جانبی (K) و مقاومت کششی (σ_t) هستند. به‌منظور بررسی تأثیر این پارامترها بر پایداری تونل، حداکثر جابه‌جایی عمودی سقف بررسی می‌شود. نتایج به‌دست آمده از مدل‌سازی عددی و تحلیل

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.3.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3628]

پارامتری نشان داد که حساسیت مدول الاستیسیته از دیگر پارامترها بیش‌تر است و پارامتر مقاومت کششی توده‌سنگ بر پایداری تونل تأثیر ندارد. به‌ترتیب اولیت پارامترهای E، ϕ، C، K و σ_t در طراحی و تحلیل پایداری دارای اهمیت هستند. پارامتر مدول الاستیسیته و زاویهٔ اصطکاک توده‌سنگ به‌عنوان دو پارامتر اصلی مشخص شده‌اند. برای پارامترهای با حساسیت بیش‌تر، باید آزمایش‌های بیش‌تری انجام شود. انتخاب روش‌های آزمایش مناسب، باید مطابق با نیازهای پروژه مهندسی و بر اساس اولویت حساسیت پارامترها انجام شود.

منابع

۱. عبداللهی‌پور ا.، *پیش‌بینی جابه‌جایی‌های دیواره مغار و بررسی تأثیر ضریب تنش جانبی و شکل مقطع بر پایداری مغار*، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شهیدباهنرکرمان (۱۳۹۰).

2. Ng C.W.W., Lee G.T.K., "A three-dimensional parametric study of the use of soil nails for stabilising tunnel faces", Computers and Geotechnics, Vol. 29 (2002) 673-697.

3. Fellin W., King J., Kirsch A., Oberguggenberger M., "Uncertainty modelling and sensitivity analysis of tunnel face stability", Structural Safety Vol. 32 (2010) 402-410

4. Madkour H., "Parametric analysis of tunnel behavior in jointed rock", Ain Shams Engineering Journal, Vol. 3 (2012) 79-103.

5. Miro S., Hartmann D., Schanz T., "Global sensitivity analysis for subsoil parameter estimation in mechanized tunneling", Computers and Geotechnics Vol. 56 (2014) 80-88.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.3.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3628]

٦. میکائیل ر.، زراعی‌نقدهی م.، جلالی س. م. ا.، سرشکی ف.، *آنالیز حساسیت پارامترهای مؤثر در نرخ پیش‌روی ماشین‌های تونل‌زنی تمام مقطع (TBM)- مطالعه موردی تونل انتقال آب قمرود*، هشتمین کنفرانس تونل ایران (۱۳۸۸).

۷. شرکت مهندسی سپاسد، *گزارش دسترسی به گالری‌های تزریق و زمین‌شناسی پروژه تونل حلزونی دسترسی به تاج سد بختیاری*، مطالعات مرحله دوم (۱۳۹۲).

۸. شرکت توسعهٔ منابع آب و نیروی ایران، *گزارش زمین‌شناسی مهندسی و مکانیک سنگی پروژه سد ونیروگاه بختیاری*، مطالعات اولیه و تکمیلی (۱۳۸۸).

۹. ترابی ر.، مقدمه‌ای بر مکانیک سنگ، چاپ چهارم، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود (۱۳۸۱).

10. Itasca Consulting Group Inc., "FLAC^{3D} Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions", Version 5.0, User's Manual (2012).

۱۱. کرمی م.، ابره ب.، فرامرزی ل.، *آموزش کاربردی نرم‌افزار $FLAC^{3D}$*، چاپ اول، مرکز انتشارت جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان، اصفهان (۱۳۹۱).

۱۲. قاسم پور ن.، پناه‌بر ب.، *تحلیل پایداری فضاهای زیرزمینی با استفاده از نرم‌افزار $FLAC^{3D}$*، چاپ اول، مرکز انتشارت جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر (۱۳۸۸).

13. Zhu W., Zhao J., "Stability Analysis and Modelling of Underground Excavations in Fractured Rocks", Elsevier geoengineering Book Series, Vol.1 (2004).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.3.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3628]