

تحلیل پارامتری رفتار تونل حلزونه‌ها، دست‌ساز، به تاج سد بختیار، 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

پذیرش ۹۴/۸/۶

تاریخ دریافت ۹۳/۸/۵

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 اهمیت‌زایی 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)، زاویه اصطکاک

*نویسنده مسئول masoud.abdollahi87@yahoo.com

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 به ترتیب اولویت 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 توجه 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 نحوه 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^۱ و لی^۲ (۲۰۰۲) استفاده از پیچ‌سنگ برای پایداری جبهه‌کار تونل را به‌صورت پارامتری تحلیل کردند [۲]. فلین^۳ و همکاران (۲۰۱۰) پارامترهای

-
1. Ng
 2. Lee
 3. Fellin

مؤثر بر پایداری جبهه کار تونل را به صورت مدل آزمایشگاهی تحلیل کردند [۳]. مادکور^۱ (۲۰۱۲) پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار تونل‌ها مانند خصوصیات درزه‌ها و عمق تونل در توده سنگ درزه‌دار را بررسی کرد [۴]. میرو^۲ و همکاران (۲۰۱۴) حساسیت پارامترهای خاک در تونل‌سازی مکانیزه را تحلیل کردند [۵]. میکائیل و همکاران (۱۳۸۸) پارامترهای مؤثر بر پیشروی ماشین TBM در تونل انتقال آب قمرود را بررسی کردند [۶]. 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

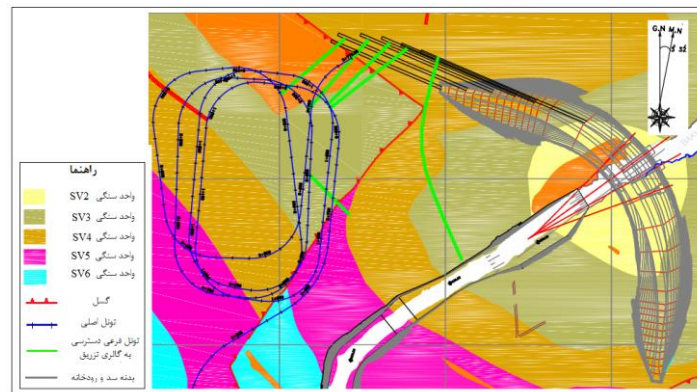
ساختگاه سد بختیاری در لرستان و در شمال‌شرق ایستگاه تنگ پنج در مسیر راه آهن تهران- اهواز، روی رودخانه بختیاری واقع شده است. به منظور دسترسی به تاج سد، حفر یک تونل اصلی به شکل حلزونی بررسی شد. از این تونل در ترازهای مختلف، تونل‌های دسترسی دیگری منشعب شده و به گالری‌های تزریق مرتبط می‌شوند. شکل ۱ موقعیت مسیر طراحی شده تونل حلزونی، در جناح راست و در پایین دست محل سد را نشان می‌دهد. حداقل شعاع مسیر افقی ۶۰ متر و حداکثر شیب طولی ۹/۴ درصد 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 ۶/۱۵ متر پیش‌بینی شده است. این تونل حلزونی در زمان بهره‌برداری سد نیز استفاده می‌شود [۷].

زمین‌شناسی منطقه

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

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

سد بختیاری، از دیدگاه زمین‌شناسی عمومی در زون زاگرس چین‌خورده و در تاقدیس گیربوه واقع است. توالی تاقدیس‌ها و ناودیس‌ها در محدوده بررسی شده از پدیده‌های اصلی ریخت‌شناسی محسوب می‌شوند.



شکل ۱. پلان جانمایی تونل دسترسی حلزونی، سایر دسترسی‌ها به گالری‌های تزریق و زمین‌شناسی محدوده 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 محدوده ساختگاه سد رخنمون دارند را قطع می‌کند. 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.

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 ناحیه 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^۱، ۴۷۴ اندازه‌گیری سرعت موج اولتراسونیک در شرایط خشک و اشباع، ۱۶۲ آزمایش فشاری نامحصور (تک‌محوری) در شرایط خشک و اشباع، ۱۲۵ آزمایش

1. index

فشاری سه‌محوری در شرایط اشباع، ۹۴ آزمایش برش مستقیم بر ناپیوستگی‌های سنگ، ۴۷ آزمایش کشش غیرمستقیم (برزیلی) و ۲۰ آزمایش نفوذپذیری.

با در نظر گرفتن 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 همه 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 ناحیه 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 ناحیه 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].

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 به هم هستند و بنابراین می‌توان به صورت نوعی سنگ ملاحظه شوند. نتیجه مشابه از نتایج آزمایش‌های واحدهای SV5 و SV6 (گروه B) گرفته شد.

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

جذب آب (%) w	تخلخل (%) n	چگالی (kg/m^3)		تعداد نمونه‌ها	پارامترهای آماری
		اشباع	خشک		
۰/۳۲	۰/۹۳	۲۶۵۲	۲۶۴۲	۶۱	میانگین
۰/۳۳	۰/۸۷	۴۰	۴۲		انحراف از معیار

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

جذب آب (%) w	تخلخل (%) n	چگالی (kg/m^3)		تعداد نمونه‌ها	پارامترهای آماری
		اشباع	خشک		
۰/۳۰	۰/۹۱	۲۶۵۸	۲۶۴۶	۳۷	میانگین
۰/۳۷	۰/۹۱	۴۴	۴۶		انحراف از معیار

ب) آزمایش اندازه‌گیری سرعت موج اولتراسونیک

بیش‌تر از ۴۷۰ آزمایش اندازه‌گیری سرعت موج اولتراسونیک به منظور برآورد واقع‌بینانه، ثابت‌های الاستیک و دینامیک مواد سنگی سازند سروک محل پروژه 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 V_p (m/s) و سرعت موج معکوس V_s (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.

مشابه نتایج آزمایش‌های شاخص، سرعت‌های موج اولتراسونیک اندازه گرفته شده روی همه 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 به صورت 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 به صورت 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 به ترتیب در جدول‌های ۳ و ۴ 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	۲۶۷۶	۶۱۱۳	۳۲۷۰	۰/۳۰	۷۴	۶۲	۲۹
انحراف معیار									
میانگین	اشباع	۱۰۸	۲۶۷۹	۶۱۵۷	۳۳۲۰	۰/۳۰	۷۷	۶۳	۳۰
انحراف معیار									

جدول ۴. 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	۲۶۷۹	۶۱۹۷	۳۲۷۷	۰/۳۰	۷۵	۶۵	۲۹
انحراف معیار									
میانگین	اشباع	۹۷	۲۶۸۱	۶۳۲۲	۳۲۸۶	۰/۳۱	۷۶	۶۹	۲۹
انحراف معیار									

پ) آزمایش فشاری تک محوری

نتایج آزمایش‌های فشاری تک محوره بر نمونه‌های گروه A (واحدهای SV2, SV3 و SV4) و گروه B (واحد SV5 و SV6) به ترتیب در جدول‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. جدول ۵. نتایج آزمایش‌های فشاری تک محوره بر نمونه‌های سنگ بکر گروه A سازند سروک

[واحد‌های SV2, SV3 و SV4] در محل پروژه بختیاری [۸]

وضعیت اشباع			وضعیت خشک			پارامترهای آماری
E (GPa)	UCS (MPa)	تعداد نمونه‌ها	E (GPa)	UCS (MPa)	تعداد نمونه‌ها	
۶۷	۱۰۵	۲۵	۶۸	۱۲۰	۲۶	میانگین
۱۰	۳۰		۹	۴۴		انحراف از معیار

جدول ۶. نتایج آزمایش‌های فشاری تک محوره بر نمونه‌های سنگ بکر گروه B سازند سروک

[واحد‌های SV5 و SV6] در محل پروژه بختیاری [۸]

وضعیت اشباع			وضعیت خشک			پارامترهای آماری
E (GPa)	UCS (MPa)	تعداد نمونه‌ها	E (GPa)	UCS (MPa)	تعداد نمونه‌ها	
۶۹	۱۰۹	۱۷	۶۷	۱۲۵	۲۰	میانگین
۹	۲۹		۱۱	۳۹		انحراف از معیار

ت) آزمایش فشاری سه محوری

تعداد ۱۲۵ آزمایش فشاری سه محوری بر نمونه‌های سنگ واحدهای SV2 تا SV7 در آزمایشگاه با استفاده از سلول سه محوری هوک انجام شد. فشار محصور بین ۵ تا ۶۰ 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].

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

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

طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ

طبقه‌بندی RMR انواع توده‌سنگ در محل سد بختیاری بر اساس نقشه‌برداری گالری‌ها انجام شده است. به‌منظور بازیابی 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 بازیابی 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

۴۰-۶۰	۴۸-۶۳	۵۱-۵۶	۱/۲۵ / ۲/۶۹	۴۸-۶۶	SV4+ SV3 +SV2
۵۵-۶۵	۵۸-۵۹	۵۶-۶۱	۷/۲۶ / ۵/۲۳	۵۸-۵۹	SV5+SV6
۴۵-۵۵	۴۶-۵۶	۵۰-۵۷	۲/۸ / ۱/۱۰۰	۴۶-۵۶	SV7

در جدول ۹، مقدار Q_{MF} مقدار Q بیش تر تکرار شده، و RMR_{89} ، RMR محاسبه شده بر اساس بیناوسکی و RMR'_{89} مشابه RMR_{89} است اما شرایط آب زیرزمینی به صورت خشک در نظر گرفته می شود.

نایبوستگی های توده سنگ

برای شناسایی توده سنگ اطراف تونل حلزونی ابتدا سیستم نایبوستگی های توده سنگ بررسی می شوند. شیب و امتداد نایبوستگی ها و فاصله داری سیستم نایبوستگی محدوده ساختگاه سد و مسیر تونل حلزونی به ترتیب در جدول های ۱۰ و ۱۱ آورده شده است. شکل ۲ قرارگیری سه بعدی نایبوستگی ها را نشان می دهد [۸].

برای به دست آوردن متوسط فاصله داری هر نایبوستگی، نمودار فاصله داری آن نایبوستگی در تطابق با تابع توزیع نمایی منفی باید رسم شود و از روی نمودار، متوسط فاصله داری به دست می آید. برای نمونه، نمودار فاصله داری دسته درزه J1 در شکل ۳ آورده شده است. به طور خلاصه در جدول ۱۲ مقادیر محاسبه شده برای متوسط فاصله داری متوسط (\bar{X}) و فراوانی (λ) نایبوستگی ها ارائه شده است.

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

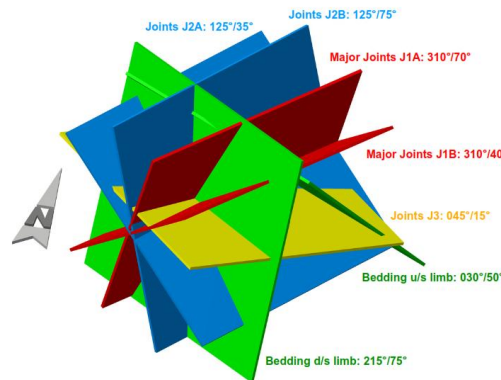
زاویه شیب (درجه)	جهت شیب - نسبت به شمال (درجه)	سیستم نایبوستگی	
۵۰	۳۰	بالا دست	لایه بندی
۷۵	۲۱۵	پایین دست	
۷۰	۳۱۰	J1A	دسته درزه J1
۴۰	۳۱۰	J1B	
۳۵	۱۲۵	J2A	دسته درزه J2
۷۵	۱۲۵	J2B	
۱۵	۴۵	دسته درزه J3	

جدول ۱۱. فاصله‌داری سیستم ناپوستگی‌های 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)
۶ تا ۲	۲/۵	۳	۶	۱/۵
۲۰ تا ۶	۴۸/۵	۵۲	۲۵	۴۷
۶۰ تا ۲۰	۴۵	۴۳/۵	۶۲/۵	۴۴/۵
۲۰۰ تا ۶۰	۴	۱/۵	۶/۵	۳/۵
۶۰۰ تا ۲۰۰	۰	۰	۰	۳/۵
مجموع	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰

جدول ۱۲. مقادیر متوسط فاصله‌داری و فراوانی ناپوستگی‌ها

فراوانی	متوسط فاصله‌داری	ناپوستگی
۳/۳۷۸	۲۹/۶۱	دسته درزه J1A
۳/۳۷۸	۲۹/۶۱	دسته درزه J1B
۳/۸۱۲	۳۶/۲۳	دسته درزه J2A
۳/۸۱۲	۳۶/۲۳	دسته درزه J2B
۲/۷۰۷	۳۶/۹۴	دسته درزه J3
۲/۳۵۲	۴۲/۵۲	لایه‌بندی بالادست
۲/۳۵۲	۴۲/۵۲	لایه‌بندی پایین دست



شکل ۲. نمایش سه‌بعدی ناپوستگی‌های منطقه پروژه [۸]

در حالت کلی اگر تعداد N دسته درزه در توده سنگ موجود باشد و تعداد درزه‌ها در واحد طول در امتداد عمود بر هر دسته درزه λ_{i0} باشد و α_i و β_i به ترتیب 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]:

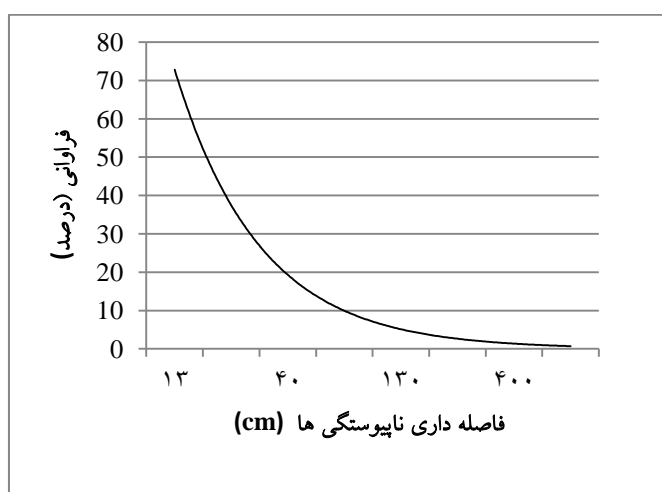
$$\lambda = A \sin \alpha_s \cos \beta_s + B \cos \alpha_s \cos \beta_s + C \sin \beta_s \quad (1)$$

که در آن :

$$A = \sum_{i=1}^N \lambda_{i0} \sin \alpha_i \cos \beta_i \quad (2)$$

$$B = \sum_{i=1}^N \lambda_{i0} \cos \alpha_i \cos \beta_i \quad (3)$$

$$C = \sum_{i=1}^N \lambda_{i0} \sin \beta_i \quad (4)$$



شکل ۳. نمودار فاصله‌داری دسته درزه J1

با توجه به این که فاصله‌داری و فراوانی ناپیوستگی‌ها در مسیر تونل مدنظر است، محور تونل به عنوان 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 در نظر گرفته می‌شود. با جای‌گذاری شیب، امتداد و فاصله‌داری ناپیوستگی‌های تونل در روابط (۱) تا (۴) مقدار λ برابر با $9/78 \text{ m}^{-1}$ و مقدار متوسط فاصله‌داری

نایبوستگی‌ها (\bar{X}) در امتداد محور تونل حدود $\bar{X} = 10$ سانتی‌متر به‌دست می‌آید. در این شرایط اندازه فاصله‌داری نایبوستگی‌ها نسبت به قطر تونل که برابر با $7/2$ متر است، بسیار کم است و محیط پردرزه به‌شمار می‌آید و می‌توان محیط توده‌سنگ را شبه پیوسته در نظر گرفت. لازم به‌ذکر است که λ در این امتداد از تونل کم‌ترین مقدار (و بیش‌ترین مقدار فاصله‌داری) را دارد و در امتدادهای ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه نسبت به شمال، به‌ترتیب مقادیر $13/2$ ، $13/5$ و $10/54 \text{ m}^{-1}$ 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.

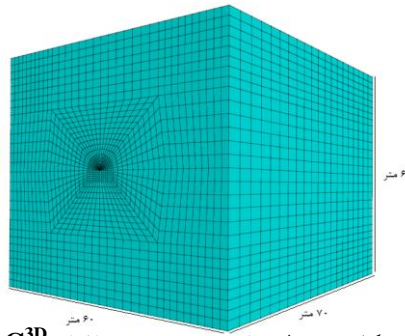
مدل‌سازی تونل

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 پرکاربردترین روش‌های عددی در حل مسائل مهندسی است. این روش نسبت به روش‌های عددی دیگر به‌توان محاسباتی زیادی برای پردازش نیاز ندارد. نرم‌افزار FLAC^{3D} برنامه‌تفاضل 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 $0+830$ متر برای تحلیل‌ها شناسایی شده است. روباره تونل در این مقطع 365 متر است.

با توجه به هندسه تونل مذکور، برای مدل‌سازی تونلی با سطح مقطع D- شکل، عرض ۷/۲ متر و ارتفاع ۶/۱۵ متر ساخته شده است [۷]. ابعاد مدل‌ها به اندازه‌ای در نظر گرفته شده که محدوده تونل تحت اثر ناشی از مرزها قرار نگیرد. فاصله مرزهای مدل از مرز تونل، حدود چهار برابر قطر تونل در نظر گرفته 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 مرحله بعد شرایط مرزی و اولیه در مدل اعمال شده است. برای تأمین شرایط اولیه زمین، تنش‌های اولیه برجای قبل از حفاری به کل مدل اعمال می‌شود. جریان سیال صفر در نظر 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 ۴ نشان داده شده است.

روش کار تحلیل پارامتری

پارامترهای استفاده شده در تحلیل شامل مدول الاستیسیته (E)، چسبندگی توده‌سنگ (C)، زاویه 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 به دست آمده‌اند. در جدول ۱۳ مقدار پایه خصوصیات توده‌سنگ اطراف تونل و محدوده تغییرات آن‌ها که $\pm 50\%$ مقدار پایه است، ارائه شده است. بعد از حفر تونل در مدل‌های ساخته شده، پایداری تونل با معیار حداکثر جابه‌جایی عمودی سقف بررسی می‌شود.



شکل ۴. 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	۴/۷	۱/۱	۴۵	۰/۵	۰/۰۶۷
محدوده تغییرات ($\pm 50\%$ مقدار پایه)	۲/۳۵ - ۷/۰۵	۰/۵۵ - ۱/۶۵	۲۲/۵ - ۶۷/۵	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 ۵ تا ۹ خلاصه شده‌اند.

با توجه به روابط به‌دست آمده از نمودارها، تابع حساسیت برای هر پارامتر به‌صورت روابط (۵) تا (۹) به‌دست می‌آید:

$$S_E = \left| \frac{du}{dE} \right| \frac{E}{u} = -1 + \frac{46.52}{u}, \quad u = -5.2 E + 46.52 \quad (5)$$

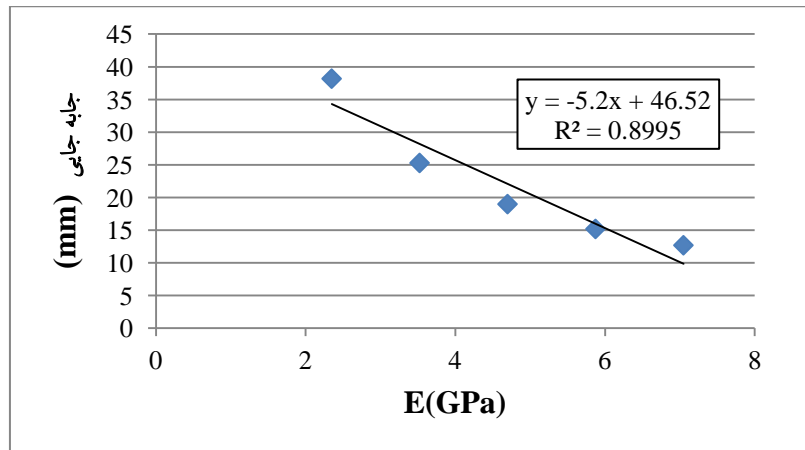
$$S_c = \left| \frac{du}{dc} \right| \frac{c}{u} = -1 + \frac{20.94}{u}, \quad u = -1.5636 c + 20.94 \quad (6)$$

$$S_\phi = \left| \frac{du}{d\phi} \right| \frac{\phi}{u} = -1 + \frac{40.5}{u}, \quad u = -0.3867 \phi + 40.5 \quad (7)$$

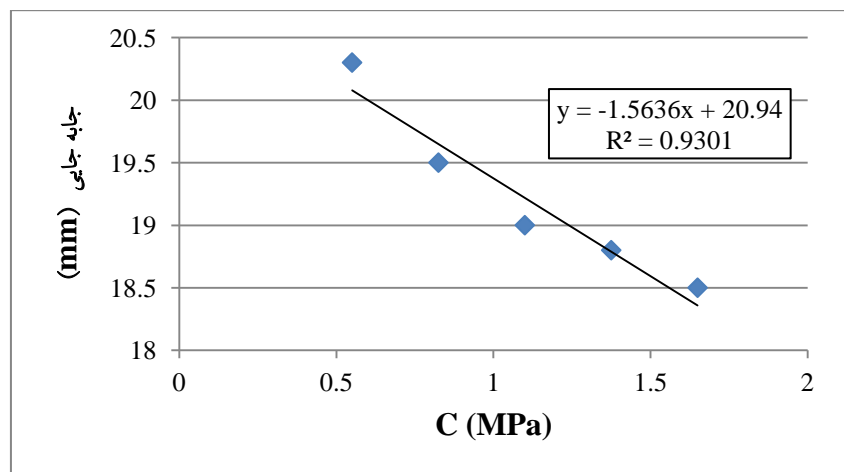
$$S_k = \left| \frac{du}{dk} \right| \frac{k}{u} = -1 + \frac{20.801}{u}, \quad u = -3.3269 K + 20.801 \quad (8)$$

$$S_\sigma = \left| \frac{du}{d\sigma} \right| \frac{\sigma}{u} = 0, \quad u = 19 \quad (9)$$

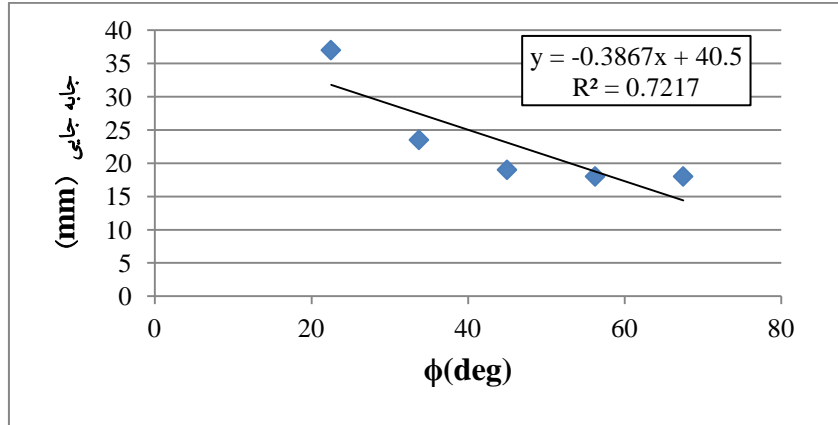
که در آن u جابه‌جایی عمودی سقف تونل است. فاکتور حساسیت S_E^* ، S_K^* و... با قرار دادن مقادیر u در شرایط پایه در تابع حساسیت، به دست می‌آید و بیان‌گر حساسیت پارامترهای تعیین شده در هر مورد است. فاکتور حساسیت پارامترهای بررسی شده در جدول ۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۵. نمودار تاثیر تغییرات تدریجی E بر جابه‌جایی عمودی سقف

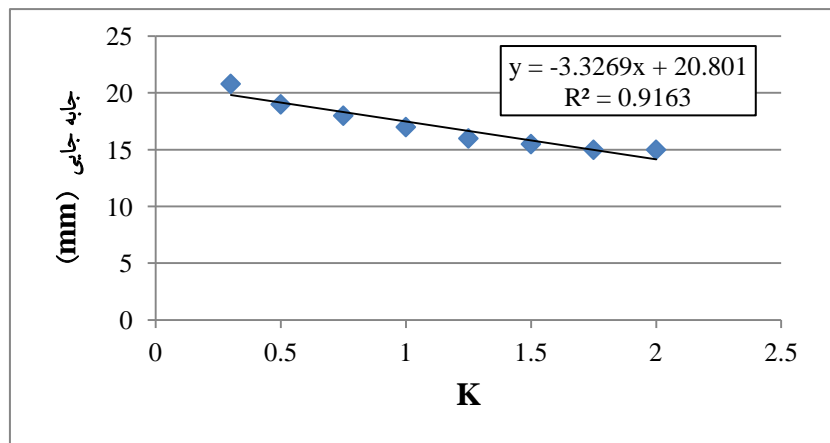


شکل ۶. نمودار تاثیر تغییرات تدریجی C بر جابه‌جایی عمودی سقف

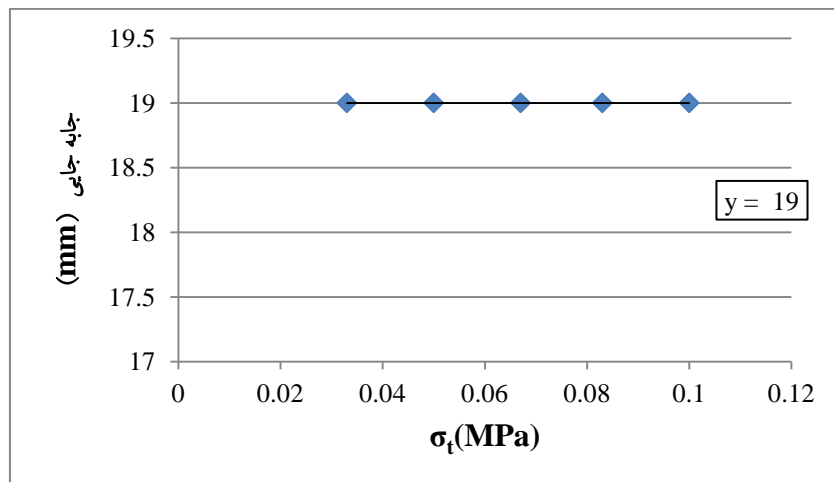


شکل ۷. نمودار تأثیر تغییرات تدریجی ϕ بر جابه‌جایی عمودی سقف
جدول ۱۴. فاکتور حساسیت پارامترها

پارامتر	E	C	ϕ	K	σ_t
فاکتور حساسیت	S_E^*	S_C^*	S_ϕ^*	S_K^*	S_σ^*
مقدار	۱/۴۴۸	۰/۱۰۱	۱/۱۳۲	۰/۰۹۵	۰/۰



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



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

چنان‌که از شکل‌های ۵ تا ۹ و از جدول ۱۴ 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 ۱۴، 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 خیلی کم 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

حساسیت زیاد که باید در طول آزمایش برجا اندازه‌گیری شوند، را شناسایی می‌کند. به‌طور مثال در پروژه حاضر، مدول الاستیسته و زاویه 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. به این دلیل، تحلیل پارامتری پارامترها، در هر مسئله مهندسی خاص به‌منظور تعیین پارامترهای کلیدی سنگ، باید به‌طور جداگانه انجام شود. پارامترهای کلیدی از پروژه‌ای به پروژه 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، در صورتی که دو گزینه برای اندازه‌گیری زاویه 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 زاویه اصطکاک که $1/132$ است، خطای نسبی این دو روش به ترتیب $16/98$ و $11/32$ درصد است. اگر خطای نسبی ۱۵٪ $\delta u <$ در اندازه‌گیری مورد نیاز باشد، اگرچه روش اول ارزان‌تر باشد، اما باید از روش دوم استفاده کرد. اما اگر خطای نسبی $20\% \delta u <$ 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 الاستیسته (E)، چسبندگی توده‌سنگ (C)، زاویه 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

پارامتری نشان داد که حساسیت مدول الاستیسیته از دیگر پارامترها بیش تر است و پارامتر مقاومت کششی توده سنگ بر پایداری تونل تأثیر ندارد. به ترتیب اولیت پارامترهای E ، ϕ ، C ، K و σ_t در طراحی و تحلیل پایداری دارای اهمیت هستند. پارامتر مدول الاستیسیته و زاویه اصطکاک توده سنگ به عنوان دو پارامتر اصلی مشخص شده اند. برای پارامترهای با حساسیت بیش تر، باید آزمایش های بیش تری انجام شود. انتخاب روش های آزمایش مناسب، باید مطابق با نیازهای پروژه مهندسی و بر اساس اولویت حساسیت پارامترها انجام شود.

منابع

۱. عبداللهی پور ا.، پیش بینی جابه جایی های دیواره مغار و بررسی تأثیر ضریب تنش جانبی و شکل مقطع بر پایداری مغار، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان (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.

۶. 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 توسعه 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 انتشارات 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 انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر (۱۳۸۸).
13. Zhu W., Zhao J., "Stability Analysis and Modelling of Underground Excavations in Fractured Rocks", Elsevier geoenvironment Book Series, Vol.1 (2004).