تأثیر زبری درزه‌ها در تعیین میزان حائل مورد نیاز برای پایدارسازی تونل‌های تکی و دوقلو راه احداث شده در سنگ‌های درزه‌دار

مسعود پلاسی*[۱] و علی کارگر[۲]

[۱] استادیار دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

[۲] دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۰۵/۰۷، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده: ۱۳۹۰/۱۱/۱۶، تاریخ تصویب: ۱۳۹۰/۱۱/۲۳)

چکیده

برای عبور از کوهستان‌های مرتفع و پرشیب، به جای طولانی نمودن مسیر و ایجاد پیچ‌های زیاد که به منظور کاهش شیب طولی انجام می‌گیرد، می‌توان از تونل استفاده کرد. تونل‌های راه برحسب نوع مسیر به دو گروه تونل‌های یک طرفه و دو طرفه تقسیم می‌شوند. در بزرگراه‌ها با توجه به تعدد خطوط عبور، از دو نوع تونل شامل: تونل‌های دوقلو (دارای دو مقطع کوچک مجزا با جریان یک طرفه) و تونل‌های تکی (دارای یک مقطع بزرگ با جریان دو طرفه) استفاده می‌شود. هزینه ساخت تونل‌ها عمدتاً به طول، مقطع حفاری و سیستم‌های نگهدارنده مناسب جهت پایدارسازی جداره آن‌ها، بستگی دارد. در این میان سیستم نگهدارنده مورد نیاز وابسته به نوع زمین و مشخصات ژئوتکنیکی آن است. در توده سنگ‌های درزه‌دار، زبری درزه‌ها یکی از عوامل مهم در پایدار ماندن مقاطع تونل‌ها به شمار می‌رود. در این مقاله تأثیر زبری درزه‌ها در میزان پایدارکننده‌های مورد نیاز برای تونل‌های تکی و دوقلو راه با استفاده از روش مدل‌سازی عددی DEM، در قالب نرم افزار UDEC، مورد بررسی قرار داده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: زبری درزه، تونل تکی، تونل دوقلو، مقطع حفاری، مدل‌سازی عددی، منحنی مشخصه، سیستم نگهدارنده.

مقدمه

برای عبور از کوهستان‌های مرتفع و پرشیب، به جای طولانی نمودن مسیر و ایجاد پیچ خم‌های زیاد که به منظور کاهش شیب طولی انجام می‌گیرد، می‌توان از تونل استفاده کرد. با احداث تونل، فاصله ارتباطی بین دو نقطه معین از مسیر (در طرفین ارتفاعات) به مراتب کوتاه‌تر شده، قوس‌های اضافی حذف و خطرات ناشی از سقوط بهمن (در مناطق برف گیر) و سقوط قطعات سنگ و خاک (در مناطق ریزشی) برطرف گردیده و همچنین هزینه‌های نگه‌داری و بهره‌برداری، تا حد قابل توجهی کاهش می‌یابد. تونل‌های راه برحسب نوع مسیر به دو گروه تونل‌های یک طرفه و دو طرفه تقسیم می‌شوند. در بزرگراه‌ها با توجه به تعدد خطوط عبور، از دو نوع تونل شامل: تونل‌های دوقلو[۱] (دارای دو مقطع کوچک مجزا با جریان یک طرفه) و تونل‌های تکی[۲] (دارای یک مقطع بزرگ با جریان دو طرفه) استفاده می‌شود. با توجه به اینکه هزینه‌های احداث تونل‌ها در مقایسه با راه‌های معمولی زیاد می‌باشد، لذا انتخاب نوع تونل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هزینه ساخت تونل‌ها عمدتاً به طول، مقطع حفاری و سیستم‌های نگهدارنده مناسب جهت پایدارسازی جداره آن‌ها بستگی دارد. در این میان سیستم نگهدارنده[۳] مورد نیاز وابسته به نوع زمین و مشخصات ژئوتکنیکی آن است. در توده سنگ‌های درزه‌دار، زبری درزه‌ها یکی از عوامل مهم در تعیین میزان حائل‌ها به شمار می‌رود. بر این اساس، هر چه زبری درزه‌ها بیشتر شود احتمال وجود مناطق ریزشی در تونل کاهش می‌یابد و در مقابل، با کاهش زبری درزه‌ها این احتمال نیز کاهش می‌یابد. در این مقاله تأثیر زبری درزه‌ها در میزان حائل مورد نیاز برای تونل‌های تکی و دوقلو راه مورد بررسی قرار داده می‌شود. بدین منظور ابتدا توده سنگی با مشخصات ثابت به عنوان مبنا در نظر گرفته شده‌است. با فرض ثابت بودن خصوصیات درزه‌ها در تمام حالات، تغییرات زبری درزه‌ها در توده سنگ مبنا منظور شده‌است. به منظور مشاهده تأثیر زبری

*نویسنده مسئول: تلفن: فاکس: Email: mpalas@ut.ac.ir

Archive of SID
www.SID.ir

درزه‌ها در پارامترهای توده سنگ مبنا، نرم افزار RocLab مورد استفاده قرار گرفته‌است.

مشخصات تونل‌ها

برای تونل‌های تکی و دوقلو مقاطع طاقی شکل در نظر گرفته شده وفرض شده تونل‌ها در عمق ۲۰۰ متری از سطح زمین احداث می‌شوند. اندازه مقطع عرضی باید به گونه‌ای انتخاب شود که حداقل فضای مورد نیاز برای عبور ترافیک را برآورده نماید. در آیین‌نامه‌های کشورهای مختلف، جهت انتخاب حداقل فضای مورد نیاز برای قسمت‌های مختلف درون تونل توصیه‌های گوناگونی به عمل آمده‌است. مقاطع در نظر گرفته شده در این تحقیق، بر اساس آیین‌نامه راه ایران برای بزرگراه برون شهری طراحی شده‌است. مشخصات مربوط به تونل‌های تکی و دوقلو در جدول ۱ نشان داده شده‌است.

جدول ۱: مشخصات تونل‌های تکی و دوقلو

مشخصه	تونل تکی	تونل دوقلو
تعداد خطوط عبور	۴	۲
عرض سواره‌رو (m)	۳،۶۵	۳،۶۵
عرض شانه راست (m)	۱،۸۵	۱،۸۵
عرض شانه چپ (m)	۱،۸۵	۰،۵
عرض نوار میانی (m)	۰،۷	-
عرض پیاده‌رو راست (m)	۰،۷	۰،۷
عرض پیاده‌رو چپ (m)	۰،۷	-
ارتفاع آزاد (m)	۵،۲	۵،۲

موقعیت قرارگیری تونل‌های دوقلو نسبت به هم تأثیر زیادی در میزان نشست سطحی زمین و همچنین توزیع لنگر خمشی در پوشش[4] تونل‌ها دارد [۱]. با بررسی حالت‌های قرارگیری افقی، عمودی و مورب تونل‌ها نسبت به یکدیگر توسط این محققین ملاحظه شد در صورتی که محور تونل‌ها در راستای افقی نسبت به یکدیگر قرار گیرند و فاصله محور تونل‌ها به اندازه کافی از هم دور باشد، سبب کاهش نشست سطحی زمین و همچنین کاهش توزیع لنگر خمشی در پوشش تونل‌ها می‌شود. بنابراین با توجه به مناسبتر بودن چنین وضعیتی، برای تونل‌های دوقلو در این تحقیق اساس طراحی بر پایه قرارگیری تونل‌های دوقلو در تراز افقی نسبت به هم استوار شده است و فاصله تونل‌ها طوری منظور شده که تونل‌ها تأثیری بر یکدیگر نداشته باشند.

خصوصیت توده سنگ مبنا

در این تحقیق ماسه سنگ[5]، به عنوان توده سنگ مبنا در نظر گرفته شده‌است. فرض شده‌است خصوصیات درزه‌ها به جز در زبری آن‌ها، در وضعیت‌های مختلف ثابت بماند. فاصله درزه‌ها یک متر و زاویه آنها ۷۰ و ۱۳۰ درجه نسبت به محور افقی منظور شده‌است. در جدول ۲ خصوصیات مکانیکی مربوط به توده سنگ و درزه‌ها [۲-۴]، و در جدول ۳ شاخص Q برای توده سنگ مبنا [۴]، نشان داده شده‌است.

جدول۲: خصوصیات مکانیکی مربوط به توده سنگ مبنا و درزه‌ها

خصوصیات	مقدار
مدول الاستیسیته توده سنگ (GPa)	۱۹،۸
نسبت پواسون توده سنگ	۰،۲
جرم حجمی توده سنگ (MPa)	۲۶۰۰
مقاومت فشاری توده سنگ (MPa)	۴۳
مقاومت کششی توده سنگ (MPa)	۲،۱
زاویه اصطکاک توده سنگ (درجه)	۴۶،۴
چسبندگی توده سنگ (MPa)	۹،۴۵
زاویه اصطکاک درزه‌ها (درجه)	۲۰
چسبندگی درزه‌ها (MPa)	۰،۲
زاویه اتساع درزه‌ها (درجه)	۰

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۳: شاخص Q برای توده سنگ مبنا

مقدار	توصیف	پارامتر
۱۰۰	خیلی خوب	شاخص کیفی سنگ (RQD)
۱۲	سه دسته درزه	عدد دسته درزه (Jn)
۱،۵	زبر یا نامنظم	عدد زبری درزه (Jr)
۲	کمی دگرگون شده	عدد دگرسانی درزه (Ja)
۱	حفاری خشک	ضریب کاهش آب درزه (JW)

با وارد کردن زبری‌های مختلف در در توده سنگ مبنا، برخی از مشخصات مکانیکی آن تغییر خواهد کرد. برای مشاهده این این تغییرات از نرم افزار RocLab بر اساس معیار هوک و براون[۶] استفاده شده‌است. در RocLab شاخص GSI یکی از پارامترهای تأثیرگذار به شمار می‌رود. در سیستم Q شاخص GSI از رابطه زیر به دست می‌آید [۴ و ۶]:

$$GSI = 9Ln\left(\frac{RQD}{J_n}\times\frac{J_r}{J_a}\right)+44 \qquad (۱)$$

که در آن، RQD شاخص کیفی سنگ، Jn عدد دسته‌درزه، Jr عدد زبری درزه و Ja عدد دگرسانی درزه می‌باشد. مقدار RQD بر اساس رابطه زیر تغییر خواهد کرد [۴].

$$RQD = 115 - 3.3J_v \qquad (۲)$$

که در آن J_v تعداد درزه در واحد حجم است. بنابراین با تغییر RQD، مقادیر مختلفی برای GSI به دست می‌آید. با توجه به مقادیر به دست آمده و مقادیر پیشنهاد شده در RocLab، در زبری‌های مختلف مقادیری برای GSI تعیین شده‌است. بر همین اساس تحلیل‌ها در توده سنگ مبنا برای چهار مقدار متفاوت Jr صورت گرفته‌است. جدول ۴ خصوصیت مربوط به توده سنگ در وضعیت‌های مختلف را نشان می‌دهد.

مدل‌سازی عددی با استفاده از DEM

روش اجزای مجزا برای نخستین بار توسط کاندال[۷] در سال ۱۹۷۱ ارائه شد. این روش به نام بلوک صلب نیز شناخته می‌شود. از DEM برای آنالیز مسائل مکانیک سنگ در حالت استاتیکی و دینامیکی استفاده می‌شود.

برخلاف روش‌های دیگر، روش اجزای مجزا محیط اطراف را به صورت پیوسته مدل نمی‌کند بلکه محیط را متشکل از چندین بلوک جدا از هم درنظر می‌گیرد. یکی از مسائل کلیدی مکانیک سنگ، آنالیز رفتار توده سنگ‌های ناپیوسته است که در برگیرنده یک و یا تعداد بیشتری دسته درزه و یا دیگر ناپیوستگی‌ها باشد. لذا در این که تحقیق با توجه به وجود دسته درزه‌ها، از روش اجزاء مجزا قابلیت آنالیز رفتار توده سنگ‌های ناپیوسته را دارد، در قالب نرم افزار UDEC، استفاده شده‌است.

مراحل مدل‌سازی تونل‌ها

- ایجاد هندسه مدل

مدل‌سازی در ابتدا با تعیین حدود مدل آغاز می‌شود. مرزهای مدل باید به اندازه کافی دور از محیط تونل انتخاب شود تا شرایط اعمال شده در مرزها بر محاسبه تنش‌ها و تغییر مکان‌ها تأثیر نگذارد. بنا به توصیه راهنمای UDEC مرزهای باید به اندازه پنج برابر قطر تونل از محیط آن فاصله داشته باشد. بر همین اساس در اینجا برای تونل‌های تکی و دوقلو، مرزها چپ و راست در فاصله پنج برابر عرضشان از محیط حفاری انتخاب شده ولی برای مرزهای بالا و پایین، با توجه به تأثیر بیشتر فضای بالای تونل، برای مرز بالایی فاصله از محیط تونل شش برابر دهانه و برای مرز پایین چهار برابر دهانه منظور شده‌است.

پس از تعیین ابعاد کلی مسئله، باید هندسه درزه‌ها و مقطع تونل به برنامه معرفی شود. در نرم افزار UDEC زمان حل مسله به طور تقریبی با $N^{3/2}$ رابطه دارد که N تعداد بلوک‌ها می‌باشد [۷]. بنابراین در یک محیط درزه‌دار، تصمیم‌گیری در مورد مسئله به طوری که برنامه را قادر به رسیدن به جواب‌های قابل قبول در زمان مناسب گرداند، بسیار مهم است. برهمین اساس در اینجا با توجه به بزرگ بودن حدود مدل‌ها و همچنین تأثیر کمتر درزه‌هایی که فاصله بیشتری تا مقطع حفاری دارند، در اطراف تونل، محدوده دایره‌ای با قطری حدود ۲/۵ برابر دهانه تونل‌ها در نظر گرفته شده و در آن فاصله درزه‌ها به اندازه ۱ متر اعمال شده‌است. (شکل ۱) در انتهای این قسمت شبکه‌بندی مدل با دستور gen edge انجام می‌شود.

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ٤: خصوصیت مربوط به توده سنگ در وضعیت‌های مختلف

وضعیت	توصیف زبری درزه‌ها	Jr	GSI	C (MPa)	φ (degrees)	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	Em (GPa)
۱	آیینه‌ای و مسطح	۰،۵	۴۹	۱،۲	۵۰،۸۷	۴،۲۶	۰،۰۹۵	۵،۹۶
۲	آیینه‌ای و موجدار	۱،۵	۵۸،۵	۱،۵۲	۵۲،۲۲	۷،۴	۰،۲	۱۰
۳	نامنظم و موجدار	۳	۶۴،۷	۱،۸۱	۵۴،۵۷	۱۰،۴۸	۰،۳۱	۱۲،۹
۴	درزه‌های غیر ممتد	۴	۶۷،۳	۱،۹۹	۵۵،۷	۱۲،۱۲	۰،۳۷۵	۱۴

- تعیین مدل رفتاری و خصوصیات مصالح

نرم افزار UDEC قادر به مدل کردن هفت نوع مدل رفتاری مربوط به بلوک‌ها و پنج نوع مدل رفتاری برای درزه‌هاست [۷]. از جمله مدل بلوک‌ها می‌توان به، elastic model، Mohr – Coulomb model و null model، و در مورد درزه‌ها به مدل‌های Point contact، Area contact و Barton–Bandis اشاره کرد. در این تحقیق برای بلوک‌ها از مدل موهر- کلمب و برای درزه‌ها، با توجه به کاربردی تر بودن مدل تماس سطحی[۹] در مسائل مکانیک سنگ، از این مدل استفاده شده‌است. در مدل رفتاری موهر-کلمب هر بلوک با شش مشخصه تعریف می‌شود که عبارتند از: وزن مخصوص، مدول حجمی، مدول برش، زاویه اصطکاک، چسبندگی، زاویه اتساع و مقاومت کششی. همچنین برای درزه‌ها نیز شش خصوصیت باید تعریف شود: سختی نرمال، سختی برشی، زاویه اصطکاک، چسبندگی، مقاومت کششی و زاویه اتساع. در صورتی که برای مشخصه‌های فوق عددی وارد نشود نرم افزار UDEC مقدار آن را صفر در نظر می‌گیرد.

- تنش‌های اولیه

اطلاعات مربوط به تنش‌های اولیه از طریق آزمایشات در جا به دست می‌آید. وقتی به دلایلی، انجام چنین آزمایش‌هایی مقدور نباشد، می‌توان پارامترهای لازم را در محدوده مناسب انتخاب نمود و تحلیل‌های اولیه را بر پایه آن انجام داد. هوک و براون نشان دادند تنش‌های قائم با تقریب خوبی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\sigma_v = \gamma h \qquad (۳)$$

که در آن، γ وزن مخصوص متوسط سنگ و h ارتفاع سربار است. در اینجا ضریب فشار جانبی زمین برابر یک در نظر گرفته شده‌است و با توجه به قرار گیری تونل‌ها در عمق ۲۰۰ متری از سطح زمین، می توان مقدار تنش‌ها را تعیین کرد. معرفی تنش‌های اولیه به مدل این حسن را دارد که روند همگرایی اولیه برنامه را تسریع می‌بخشد. در صورت عدم تعریف تنش‌های اولیه برای نرم افزار، مقدار آنها در بلوک‌ها برابر صفر منظور می‌شود.

- شرایط مرزی

پس از ایجاد هندسه مدل و تعیین تنش‌های اولیه، بایستی شرایط مرزی برای مدل‌سازی تعیین گردد. این مسئله معمولاً به دو صورت ممکن است: استفاده از مرزهای تغییر مکانی و استفاده از مرزهای تنشی (شکل ۲).

با توجه به اهمیت تأثیر جابجایی در بحث پایداری تونل‌ها، انتخاب شرایط مرزی مناسب نقش مهمی را ایفا می‌کند. در نرم افزار UDEC شرایط مرزی برای مدل‌ها به دو صورت تعریف می شود:

حالت اول - مرزهای تغییر مکانی

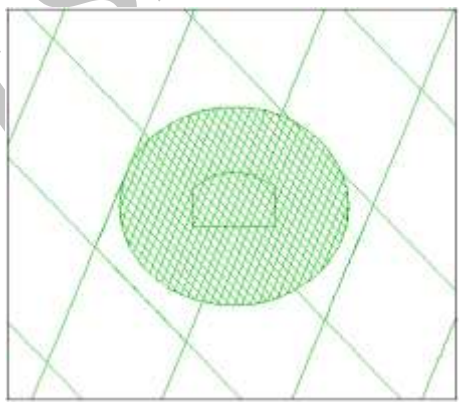
حالت دوم - مرزهای تنشی

در حالت اول به جای اعمال تنش خارجی به مرزها، تغییر مکان را در نقاط مرزی صفر قرار می‌دهیم. این فرض در صورتی صحیح است که مرزهای مدل به قدر کافی از مقطع حفاری دور در نظر گرفته شوند تا تأثیر حفاری بر روی آن کم باشد. چنین مرزی فاصله مرزهای مدل را از مرکز مدل زیاد کرده که سبب بزرگ شدن چارچوب مدل گردیده و در نتیجه آن سرعت اجرای محاسبات بسیار کم می گردد. در حالت دوم با توجه به مقدار سربار(γh) مرزهای کناری را با استفاده از نیروهای خارجی($K\gamma h$)

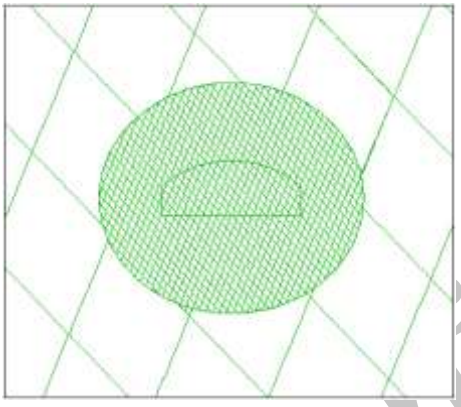
Archive of SID

www.SID.ir

محدود می‌نماییم و از حرکت آن جلوگیری می‌کنیم. چنین مرزی فاصله مرزهای مدل را از مرکز مدل کم کرده که سبب کوچک شدن چارچوب مدل گردیده و در نتیجه آن سرعت اجرای محاسبات افزایش می‌یابد. در این تحقیق با توجه به اینکه برای تونل‌ها فرض شده که در عمق ۲۰۰ متری از سطح زمین احداث می‌شوند لذا میزان سربار در آن‌ها زیاد بوده،که در نتیجه آن سرعت اجرای محاسبات با استفاده از مرزهای تنشی مناسب‌تر است. در خصوص همگرایی مدل‌ها و پایداری آن‌ها، استفاده از مرزهای تغییر مکانی باعث بستن مرزهای مدل گردیده که در نتیجه آن میزان جابجایی و تغییر شکل در مرزها صفر می‌گردد. در نتیجه وارد کردن تنش قائم حاصل از سربار به مدل به دلیل عدم امکان جابجایی به واسطه استفاده از مرزهای تغییر مکانی باعث ایجاد تمرکز تنش زیاد در المان‌های مجاور در جدار مقطع حفاری گردیده و در پی آن ناپایداری در این المان‌ها اتفاق افتاده که در نتیجه آن مقطع تونل به پایداری اولیه جهت ادامه کار نمی رسد. با انجام یک سری تحلیل‌ها بر روی مدل‌های ساده اولیه و مقایسه نتایج با یکدیگر ملاحظه گردید که مرزهای تنشی به دلیل اینکه شرایط مرزی را واقعی‌تر در نظر گرفته و همچنین امکان جابجایی را به تمام المان‌های اطراف مقطع حفاری می‌دهد، به دلیل عدم بوجود آمدن تمرکز تنش در این المان‌ها نتایج قابل قبول‌تری نسبت به مرزهای تغییر مکانی می‌دهد و همچنین سرعت همگرایی در آنها مناسب‌تر است. از این رو در این تحقیق از مرزهای تنشی برای رسیدن به تعادل اولیه استفاده شده‌است.

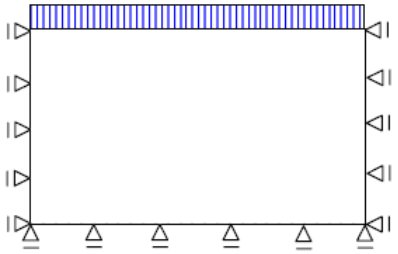


(تونل دو قلو)

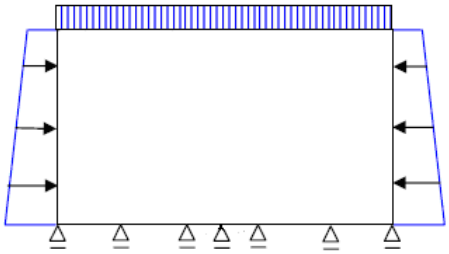


(تونل تکی)

شکل ۱: محدوده در نظر گرفته شده برای اعمال فاصله درزه‌ها



(مرزهای تغییر مکانی)



(مرزهای تنشی)

شکل ۲: شرایط مرزی اعمال شده در مدل‌سازی

Archive of SID
www.SID.ir

- ایجاد تعادل اولیه

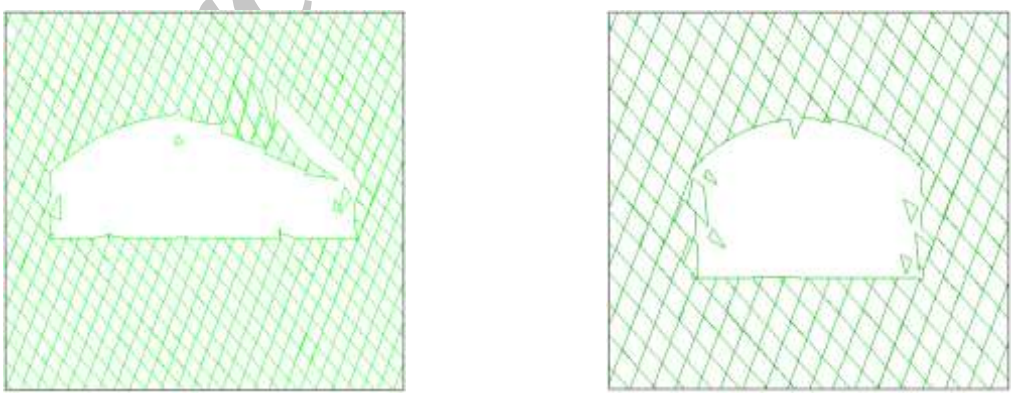
برای ایجاد تعادل در مدل‌ها بعد از منظور کردن شتاب گرانشی زمین از دستور cycle n استفاده می‌شود که n تعداد گام‌هایی است که برای رسیدن مسئله به تعادل اولیه در نظر گرفته می‌شود. با اجرای این دستور نیروهایی که پیش از این به گره‌ها اختصاص داده شده بودند، موجب حرکت گره‌ها در جهت نیرو و ایجاد تنش‌های تعادلی درزونها می‌شوند. پس از اجرای این دستور با کنترل همگرایی، کنترل لغزش و کنترل تنش‌ها اولیه ، صحت به تعادل رسیدن مدل‌ها در حالت اولیه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

- حفاری تونل

پس از به تعادل رسیدن مدل‌ها با تغییر شرایط مرزی به مرزهای تغییر مکانی و صفر کردن تغییر مکان‌های ایجاد شده در مرحله رسیدن به تعادل اولیه، با استفاده از دستور reset disp اقدام به حفاری تمام مقطع تونل‌ها می‌کنیم. حفر تونل با تخصیص مدل رفتاری پوچ به منطقه حفاری، مدل می‌شود [۷]. ملاحظه می‌شود در اثر حفاری تمام مقطع، در درصدهای مختلف ترخیص تنش در تونل‌ها تکی و دوقلو ریزش اتفاق می‌افتد. شکل ۳ مکانیزم ریزش در تونل‌های تکی و دوقلو در اثر حفاری تمام مقطع را نشان می‌دهد. لذا برای درک بهتر از ارتباط میزان جابجایی جداره تونل‌ها نسبت به درصد ترخیصی تنش در آن‌ها، منحنی عکس العمل زمین (GRC) رسم می‌گردد.

- رسم منحنی مشخصه زمین (GRC)

برای رسم منحنی مشخصه زمین در یک حفاری زیرزمینی، همان‌گونه که در روش‌های تحلیلی مرسوم است، بایستی فشار درونی برابر با تنش در جای زمین به کلیه نقاط اطراف مقطع وارد نمود و در طی یک فرآیند تدریجی میزان این فشار را کاهش داد تا به مقدار صفر برسد. در طول فرایند کاهش فشار داخلی، تغییر مکان یک نقطه خاص از مقطع ضبط می‌شود و بدین ترتیب با ارتباط دادن تغییر مکان در آن نقطه و فشار داخلی مقطع، منحنی مشخصه زمین برای آن نقطه رسم می‌گردد. در این جا برای تونل‌های تکی و دوقلو نقطه‌ای در مرکز سقف آن‌ها به عنوان نقطه شاهد در نظر گرفته شده و منحنی مشخصه زمین (GRC) برای چهار وضعیت مختلف توده سنگ رسم شده‌است. (شکل‌های ۴ - ۷) با توجه به منحنی‌های مشخصه زمین، برای تونل‌های تکی و دوقلو در شرایط مختلف زمین ملاحظه می‌شود که به جز در وضعیت ۱ برای تونل دوقلو در بقیه موارد مقطع تونل‌ها ناپایدار می‌شوند. بنابراین جهت پایدار کردن تونل‌ها باید از سیستم‌های نگهدارنده استفاده شود.

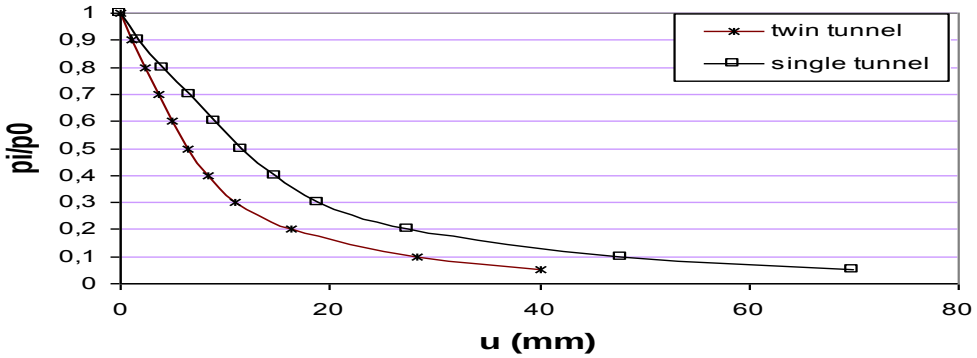


(تونل دوقلو) (تونل تکی)

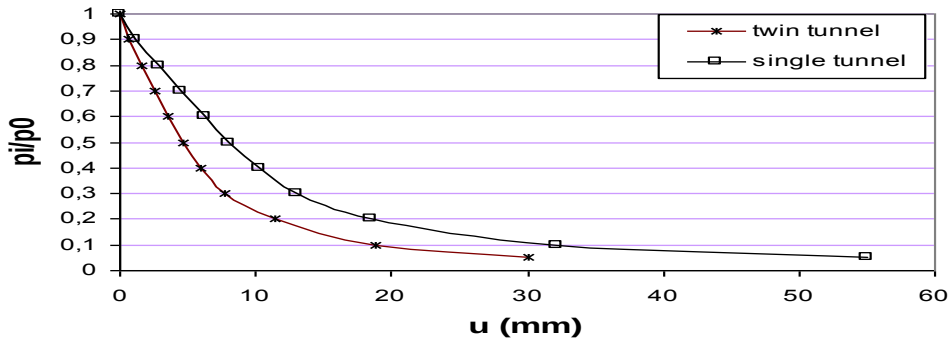
شکل ۳: مکانیزم ریزش جداره تونل‌ها در اثر حفاری تمام مقطع

Archive of SID

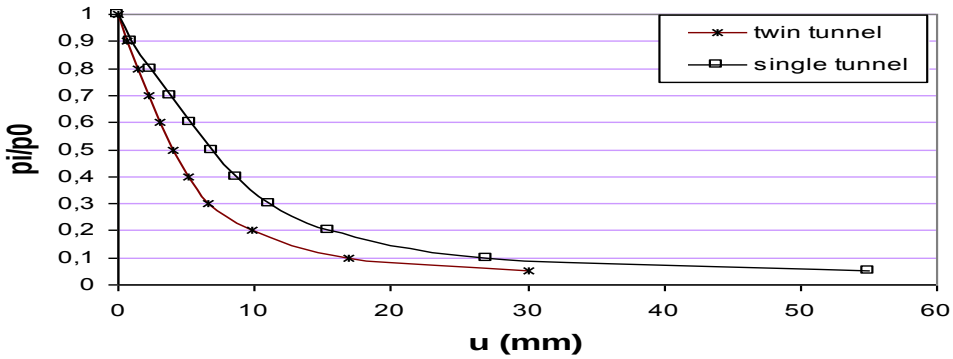
www.SID.ir



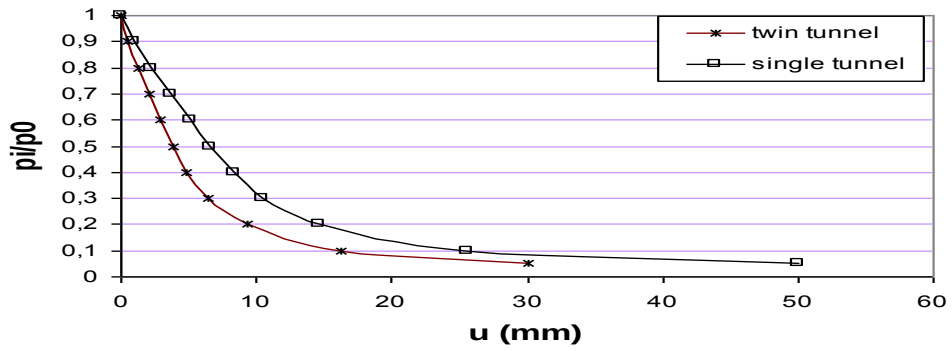
شکل ٤: منحنی مشخصه زمین (GRC) برای توده سنگ در وضعیت (۱)



شکل ٥: منحنی مشخصه زمین (GRC) برای توده سنگ در وضعیت (۲)



شکل ٦: منحنی مشخصه زمین (GRC) برای توده سنگ در وضعیت (۳)



شکل ۷: منحنی مشخصه زمین (GRC) برای توده سنگ در وضعیت (٤)

www.SID.ir

- پایدار کردن تونلها

تعیین ویژگی سیستم نگهدارنده یکی از مسائل اصلی در طراحی تونل‌ها به شمار می‌رود. در اکثر پروژه‌های تونل‌سازی از پیچ سنگ، شاتکریت، قاب‌های فلزی و بتنی استفاده می‌شود. در اینجا برای پایدار کردن تونل‌ها در وضعیت‌های مختلف، از سیستم ترکیبی راکبولت و شاتکریت استفاده شده‌است که مشخصات آن‌ها در جدول ۵ و ۶ نشان داده شده‌است [۴،۷].

در این تحقیق چون مقایسه میزان سیستم نگهدارنده دو تونل تکی و دوقلو در درصد زبری‌های مختلف درزه مد نظر است، فرض شده برای تونل‌ها در شرایط مختلف، نگهدارنده‌ها در ۸۰ درصد ترخیص تنش اولیه نصب شوند.

همچنین جهت منطقی تر کردن مقایسه، نگهدارنده تونل‌ها در وضعیت های مختلف طوری انتخاب شده که ضریب اطمینان تقریبا یکسانی داشته باشند.

برهمین اساس ضریب اطمینان نگهدارنده‌ها با توجه به شکل ۸ از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$F \cdot S = \frac{P_{s\max}}{P_i} \qquad (٤)$$

که در آن، $F \cdot S$ ضریب اطمینان سیستم نگهدارنده، $P_{s\max}$ حداکثر فشار سیستم نگهدارنده و P_i فشار در نقطه تقاطع دو منحنی است.

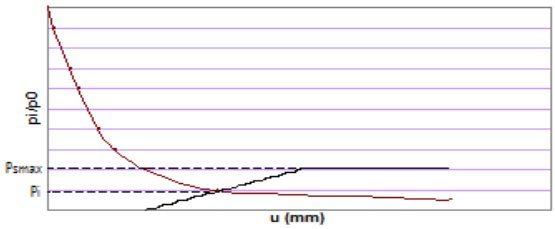
با تعیین مقدار سیستم نگهدارنده مورد نیاز جهت پایدار کردن تونل‌ها، منحنی اندرکنش زمین وسیستم نگهدارنده برای تونل‌های تکی و دوقلو در وضعیت‌های مختلف رسم شده‌است. (شکل‌های ۹ - ۱۲) بر اساس تحلیل‌های صورت گرفته، میزان راکبولت و شاتکریت مورد نیاز جهت پایدارسازی تونل‌ها در شرایط مختلف تعیین شد که در جداول ۷ و ۸ مقادیر آنها نشان داده شده‌است.

جدول ۵: مشخصات راکبولت برای پایدارسازی تونلها

قطر (mm)	۲۵
جرم حجمی (kg/m^3)	۷۵۰۰
مدول الاستیسیته (GPa)	۲۰۰
مقاومت کششی (kN)	۲۴۰
سختی برشی دوغاب (GPa/m/m)	۵
مقاومت چسبندگی دوغاب (kN/m)	۳۰۰

جدول ٦: مشخصات شاتکریت برای پایدارسازی تونلها

جرم حجمی (kg/m3)	0022
مدول الاستیسیته (GPa)	02
ضریب پواسون	2120
مقاومت فشاری (MPa)	02
مقاومت کششی (MPa)	02
مقاومت پسماند (MPa)	22



شکل ۸: منحنی اندرکنش زمین وسیستم نگهدارنده

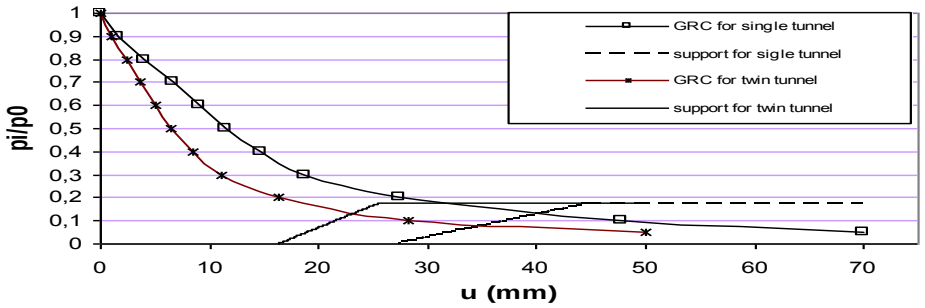
بررسی اقتصادی

با تعیین مقدارسیستم نگهدارنده مورد نیاز، تونل‌ها دربحث هزینه‌ای با هم مقایسه می‌شوند. در تونل‌های دوقلو برای تعیین مقدار نگهدارنده، باید با توجه به وجود دو مقطع یکسان، مقدار نگهدارنده مورد نیاز برای پایداری یک مقطع، در عدد دو ضرب شود.

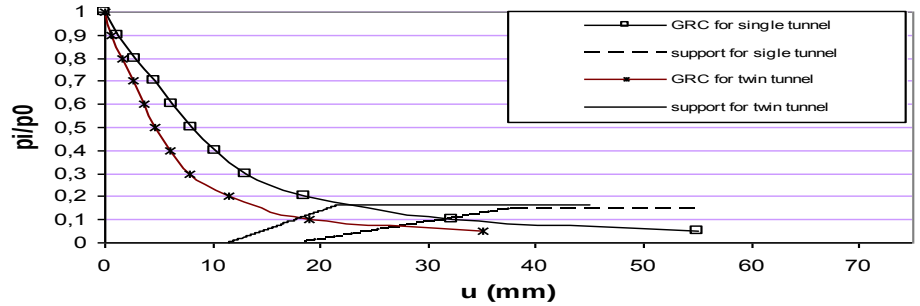
سرانجام برای تعیین بودجه مورد نیاز برای پایدار کردن تونل‌ها، هزینه مصالح و اجرای سیستم نگهدارنده (شاتکریت و راکبولت) بر اساس فهرست بهای راه ایران (۱۳۸۶) مورد بررسی قرار گرفت. شکل۱۳ مقادیر کلی برآورد شده برای پایدارسازی یک متر طول تونل‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده، ملاحظه می‌شود که در شرایط وجود دسته درزه‌های مختلف، هزینه مورد نیاز برای پایدار کردن تونل تکی در واحد طول مقادیر بیشتری نسبت به تونل‌های دوقلو را نشان می‌دهد.

Archive of SID

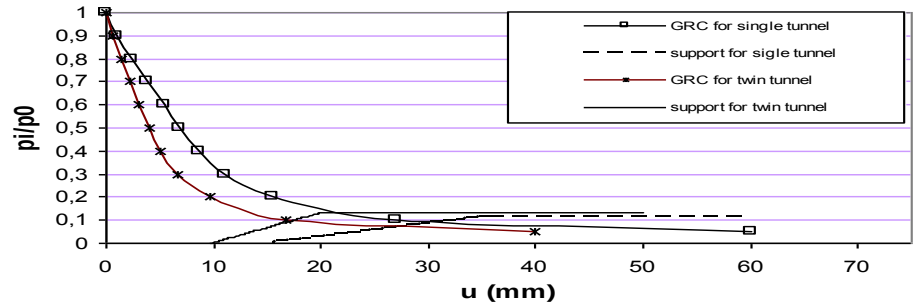
www.SID.ir



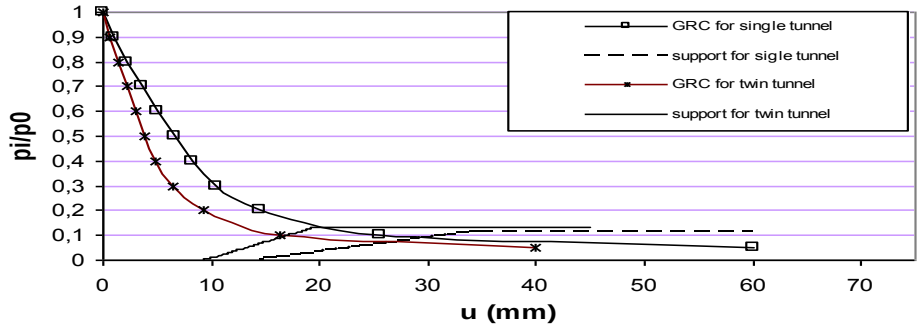
شکل ۹: منحنی اندرکنش زمین و سیستم نگهدارنده دروضعیت (۱)



شکل ۱۰: منحنی اندرکنش زمین و سیستم نگهدارنده دروضعیت (۲)



شکل ۱۱: منحنی اندرکنش زمین و سیستم نگهدارنده دروضعیت (۳)



شکل ۱۲: منحنی اندرکنش زمین و سیستم نگهدارنده دروضعیت (٤)

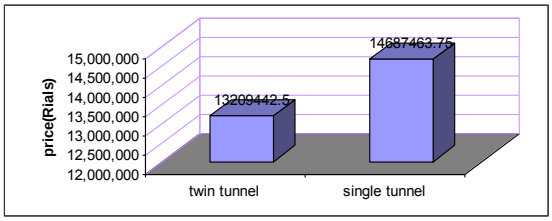
www.SID.ir

جدول ۷: میزان راکبولت و شاتکریت مورد نیاز جهت پایدارسازی تونل دوقلو

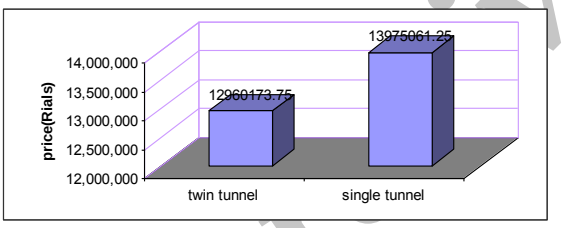
وضعیت	Shotcrete (cm) in roof	Shotcrete (cm) in wall	Bolt spacing=3.6 m in roof	Bolt spacing=3.2 m in wall
۱	۱۵	۱۰	۱،۵	۱،۵
۲	۱۲،۵	۷،۵	۲	۲
۳	۱۰	۷،۵	۱،۵	۱،۵
۴	۱۰	۷،۵	۱،۵	۱،۵

جدول ۸: میزان راکبولت و شاتکریت مورد نیاز جهت پایدارسازی تونل تکی

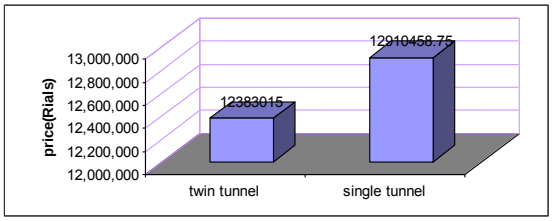
وضعیت	Shotcrete (cm) in roof	Shotcrete (cm) in wall	Spacing bolt=5.2 m in roof	Spacing bolt=3.6 m in wall
۱	۲۷،۵	۱۲،۵	۱،۵	۱،۵
۲	۲۲،۵	۱۲،۵	۱،۵	۱،۵
۳	۱۷،۵	۱۰	۱،۵	۱،۵
۴	۱۷،۵	۱۰	۱،۵	۱،۵



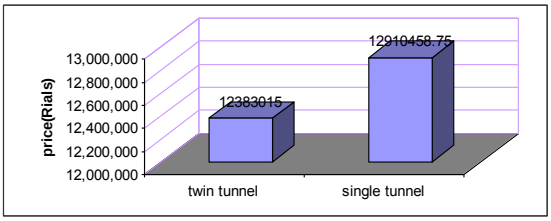
وضعیت (۱)



وضعیت (۲)



وضعیت (۳)



وضعیت (٤)

شکل ۱۳: هزینه پایدارسازی یک متر طول تونل در وضعیتهای مختلف

Archive of SID

www.SID.ir

نتیجه گیری

در این تحقیق، تأثیر زبری درزه در توده سنگ درزه‌دار، در میزان سیستم نگهدارنده مورد نیاز برای پایدارسازی تونل‌های تکی و دوقلو راه، با استفاده از روش المان مجزا مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل‌های انجام شده نشان می‌دهد که با کاهش زبری درزه‌ها، میزان تغییر شکل‌ها در اطراف مقطع تونل‌ها افزایش می‌یابد که این مقدار در تونل تکی بیشتر از تونل‌های دوقلو است. بر این اساس، با توجه میزان زبری درزه‌ها، برای کنترل جابجایی در تونل‌ها از سیستم ترکیبی راکبولت و شاتکریت استفاده شد. ملاحظه گردید که با افزایش زبری از وضعیت (۱) (درزه‌های آیینه‌ای و مسطح) تا وضعیت (۳) (درزه‌های نامنظم و موجدار) میزان سیستم نگهدارنده کاهش می‌یابد. اما با افزایش زبری از وضعیت (۳) به وضعیت (۴) (درزه‌های غیر ممتد) تغییری در میزان سیستم نگهدارنده ایجاد نمی‌شود.

همچنین براساس میزان حائل مورد نیاز در تونل‌ها، بررسی اقتصادی صورت گرفت و هزینه پایدارسازی یک متر طول تونل در وضعیت‌های مختلف از نظر زبری درزه‌ها برای تونل تکی و دوقلو مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد در شرایط مختلف درزه‌ها از نظر زبری، اجرای تونل‌های دوقلو اقتصادی‌تر از تونل تکی می‌باشد.

مراجع

1. Hage, C.F. and Shahrour, I. (2007). "Numerical analysis of the interaction between twin-tunnels: Influence of the relative position and construction procedure". *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 23, Issue 2, PP. 210-214.
2. Hoek, E. and Diederichs, M.S. (2005). "Empirical estimation of rock mass modulus." *Internaional Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 43, Issue 2, PP. 203-215.
3. Rahn, P.H. (1986). *Engineering geology: an environmental approach*. *Prentice Hall, London.*
4. Hoek, E., Kaiser, P.K. and Bawden, W.F. (2000). *Support of Underground Excavation in Hard Rock.* A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield.
5. Barton, N., Lien, R. and Lunde, J. (1974). *Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support*. Springer-Verlag.
6. Hoek, E. and Brown, E.T. (1980). *Underground Excavation in Rock*. Instn. Min. Metall., London.
7. ITASCA CONSULTING GROUP, Inc. (2000). *Universal Distinct Element Code (UDEC) User's Manual*. First Edition, January 2000.
8. Brady, B.H.G. and Brown, E.T. (1985). *Rock Mechanics for Underground Mining*. Gorge Alleh and Unwin (Publisher) Ltd.
9. Bardy, B.H.D. (1992). *Stress analysis for Rock Masses*. Butterworth-Heinemann Ltd.
10. Haruyama, K. & Taira, K. (2007). "Construction of large cross-section double-tier metropolitan inter-city highway (Ken-O-Do) Ome Tunnel by NATM". *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 20, Issue 2, PP. 111-119.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1. Twin tunnel
2. Single tunnel
3. Support
4. Lining
5. Sandstone
6. Hoek-Brown
7. Cundall

Archive of SID
www.SID.ir