

بهینه‌سازی حفاری تونل‌های بزرگ مقطع بر مبنای ارزیابی عددی

فرشاد نژاد شاه محمد^{۱*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۱۰/۳۰	گسترش استفاده از تونل‌ها به عنوان بخشی مهم از راهکار فرایند جابجایی سبب توسعه و افزایش ابعاد چنین سازه‌هایی می‌شود. در زمینه بهینه‌سازی الگوی حفاری تونل‌ها، سوال اساسی نحوه بخش‌بندی سطح مقطع تونل از لحاظ تعداد بخش‌ها و ابعاد آنها در حین حفاری است. در این مقاله با استفاده از شبیه‌سازی پیکره تونل‌های بزرگ مقطع به ارزیابی و بهینه‌سازی بخش‌بندی این تونل‌ها با هدف حداقل‌سازی جابجایی‌های گسترده در سطح زمین و کاهش گسترش کرنش‌های برشی پرداخته می‌شود. بنابراین مطالعاتی بر مبنای تجزیه و تحلیل روش المان مجزا با استفاده از ۸۳ مدل شبیه‌سازی شده انجام شده است. متغیبری که در این تحقیق مورد تحلیل قرار می‌گیرد، نسبت ارتفاع بخش پیشرو به ارتفاع پله در شیوه حفاری دو مرحله‌ای است، از دو تونل دوقلو با شکل‌های D و دایروی با متوسط قطر ۱۳/۷ m که در فاصله ۳۳ متری از همدیگر قرار دارند به عنوان مورد مطالعاتی استفاده شده است. با مدل‌سازی‌های مختلف مقادیر جابجایی در طاق تونل و سطح زمین و گسترش تنش‌ها اندازه‌گیری شده است تا به ارتفاع بهینه حفاری رسید. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در هر دو تونل با افزایش ارتفاع بخش پیشرو میزان جابجایی‌ها افزایش می‌یابد. نکته اساسی این تحقیق آن است که در تونل دایروی ارتفاع بهینه حفاری در بخش پیشرو ۴۵٪ از قطر تونل دایروی بوده و در تونل D این ارتفاع به ۵۵٪ می‌رسد در این ارتفاع روند افزایشی جابجایی‌ها به هم خورده و کاهشی می‌گردد.
پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۴/۱۹	
واژگان کلیدی: ارتفاع بخش پیشرو، المان مجزا، جابجایی سطح زمین و طاق تونل، کرنش برشی.	

۱- مقدمه

سازه‌های زیرزمینی با ابعاد بزرگ یکی از نیازهای اساسی جوامع انسانی است تا بتوان ضمن بهره‌وری بیشتر از یک سازه از گسترش و ساخت سایر فضاهای زیرزمینی اجتناب کرد. بنابراین تونل‌های بزرگ مقطع به عنوان جایگزینی برای حفاری چند تونل با مقطع کوچک هستند. تونل‌هایی با سطح مقطع بزرگتر از 30 m^2 به عنوان تونل‌های بزرگ مقطع خوانده می‌شوند. حفاری و نگهداری این تونل‌ها بسیار حساس و نیازمند به طراحی‌های دقیق می‌باشد. روش‌های مختلفی در حفاری تونل‌های بزرگ مقطع

استفاده می‌شود همانند، بلژیکی، استرالیایی، ایتالیایی، ناتم و روسی که تمام این روش‌ها بر مبنای بخش‌بندی مقطع تونل و شروع حفاری از بخش‌های مختلف ایجاد شده‌اند. به طور کل این نوع از تونل‌سازی شامل یکسری از روش‌های حفاری متوالی می‌باشد [۱]. مشکلات موجود در ایجاد چنین بخش‌ها و همچنین نیاز به زمان سریع در حفاری چنین تونل‌هایی باعث شده است تا فرایند حفر تونل بصورت سیستماتیک و منظم باشد به نحوی که مشکلات پیشرو در روش‌های اشاره شده را نداشته باشد. یکی از روش‌های بسیار مناسب در حفر تونل‌های بزرگ مقطع حتی با وجود

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: farshad.shahmohammad@gmail.com

۱. استادیار، مرکز آموزش عالی شهید باکری میاندوآب، دانشگاه ارومیه

موجب تأثیراتی در سطح زمین خواهد شد که نشست یکی از این پیامدهای حائز اهمیت است. تحقیقات گوناگونی در مورد جابجایی‌های سطح زمین در انواع فعالیت‌های مرتبط با سازه‌های سنگی و خاکی انجام شده است اما در مورد تأثیر حفاری چند بخشی تونل‌ها در میزان چنین جابجایی‌ها، مطالعات اندکی در دسترس می‌باشد. باورس^۲ [۶] نتایج اندازه‌گیری در تونل‌های راه آهن قطارهای سریع السیر که توسط روش‌هایی چون دریافت کناری با پیشروی تأخیری کم بین دو دریافت و حفاری پله‌ای با دریافت واحد کناری، احداث شده بود را مورد بررسی قرار داد. محققان دیگری چون کاراکاس و فاو^۳ [۷ و ۸]، فاریاس^۴ و همکاران [۹] و چانگ سینگ^۵ [۱۰] در این زمینه مطالعاتی انجام داده‌اند. ژائو و شی^۶ [۱۱] به بررسی عوامل مؤثر در پایداری تونل‌ها با استفاده از روش المان حدی در محیط دو بعدی پرداخته‌اند بدین منظور روش حفاری دو مرحله‌ای و دریافت کناری را در یک تونل D شکل در کشور چین با عرض ۹ متر و ارتفاع ۵ متر مورد مطالعه قرار دادند. بر مبنای مطالعات آنها روش دریافت کناری در زمین‌های نرم نتایج بهتری را در پایداری تونل نشان می‌دهد. در مطالعات صورت گرفته توسط ژائو و شی به پارامتر نسبت ارتفاع بخش پیشرو توجه نشده است و فقط در یک نسبت ثابت از ارتفاع بخش پیشرو (معادل ۴۰٪ از ارتفاع تونل) مدل‌سازی صورت گرفته است. وانگ^۷ و همکاران [۱۲] به شبیه‌سازی سه بعدی بر مبنای روش المان حدی یک تونل دایروی با قطر ۱۲ متر پرداختند. در مطالعات آنها این تونل با استفاده از روش دو مرحله‌ای حفاری شده بود و سپس با در نظر گرفتن مشخصات ثابت برای بخش پیشرو، در بخش پله‌ای، سطح مقطع به چندین پله کوچک تقسیم شده و تأثیر ابعاد این پله‌ها در میزان جابجایی‌های رخ داده در سطح زمین مطالعه شده بود نتایج تحقیق آنها نشان داد در زمین‌های بسیار نرم حدکثر طول پله ایجاد شده نباید از نصف قطر تونل بیشتر باشد. ذکر این نکته ضروری است که اگر در این تحقیق ابعاد بخش پیشرو به عنوان متغیر اصلی در نظر گرفته می‌شد و حتی این بخش به چندین زیر بخش دیگر تقسیم شده و مورد مطالعه قرار می‌گرفت امکان کاهش بیشتر جابجایی‌ها دور از انتظار نبود. در زمینه توجه به

شرایط سنگی نامناسب استفاده از روش دو مرحله‌ای می‌باشد [۲].

لوناردی و بارلا^۱ [۳] اهمیت نگهداری جبهه کار تونل با افزایش قطر تونل و همچنین عمق تونل را در فهمیدن و کنترل بخش پیشروی یا پیشانی تونل دانست به نحوی که کنترل رفتار توده سنگ اطراف تونل بر اساس ابعاد بخش پیشانی را به عنوان راز موفقیت در تونل‌سازی حتی در شرایط سخت حفاری بیان کرد. بارلا در تحقیقات خود به این نکته اشاره دارد که در حفاری مکانیزه به دلیل شکل ثابت حفاری میتوان تغییر شکل‌های زمین را نسبت به روش‌های سنتی بهتر کنترل کرد. و اگر ابعاد مناسبی از بخش پیشانی تونل ایجاد شده باشد نرخ حفاری نیز به بیشترین مقدار خود خواهد رسید [۱]. بنابراین اگر امکان حفاری تمام مقطع سطح تونل وجود نداشته باشد می‌توان از روش‌های حفر متوالی از جمله روش پلکانی استفاده کرد. در روش دو مرحله‌ای پلکانی، مقطع تونل به دو بخش بالایی (پیشرو) و پائینی (پله)، به نحوی تقسیم می‌شود که ارتفاع بخش پیشرو در محدوده مناسبی از ارتفاع بخش پله باشد تا تغییر شکل‌های کمی در جبهه کار تونل و توده سنگ دربرگیرنده تونل مشاهده کرد [۴]. روش‌های عددی به نحو گسترده‌ای در شبیه‌سازی مراحل حفاری تونل استفاده می‌شوند. حفاری هر تونلی با توزیع مجدد تنش‌های برجای زمین همراه است که این تغییرات منجر به تغییر شکل در زمین و حتی آسیب به سازه حفاری شده شود. بنابراین لزوم بررسی‌های دقیق در مورد نحوه حفاری وجود دارد [۵]. تعیین ابعاد بخش پیشرو و پله تحت تأثیر نوع تجهیزات، امکانات موجود و شرایط پایداری تونل صورت می‌گیرد. عملیات اجرای تونل با حفاری بخش پیشرو به صورت دریافت آغاز می‌شود. پس از پیشروی دو یا سه سیکل در بخش پیشرو، بخش پله توسط چال‌هایی که بلندتر از بخش پیشرو است، به صورت پلکانی برداشته می‌شود. چالزنی در بخش پله را می‌توان با چال‌های افقی یا قائم انجام داد [۴]. یکی از جنبه‌های مهم در حفر چند بخشی تونل‌ها ایجاد یک محیط ایمن از لحاظ کاری می‌باشد احداث یک فضای زیرزمینی علی‌رغم کنترل همه جانبه آن که توسط روش حفاری و تعبیه سیستم‌های نگهداری مناسب اعمال می‌شود

⁵ Chungsik

⁶ Zhu and shi

⁷ Wang

¹ Lunardi and Barla

² Bawers

³ Karakus, Fowell

⁴ Farias

انحراف آب سد بختیاری که در محدوده کربناته واقع هستند را مورد بررسی قرار داده است. این تونل‌ها با سطح مقطع دایروی و D شکل با متوسط قطر ۱۳/۷ m می‌باشند که با استفاده از روش‌های سنتی حفاری شده‌اند. هدف این مقاله تعیین ارتفاع مناسب حفاری بخش‌های پیشرو و پله‌ای در روش دو مرحله‌ای می‌باشد. بدین منظور با استفاده از روش‌های عددی و انجام تحلیل دو بعدی بر مبنای روش المان مجزا، ابعاد مختلف از این بخش‌ها مدل‌سازی شده و منحنی‌های جابجایی در طاق تونل و سطح زمین در هر مدل به طور کامل رسم شده است. با بررسی‌های انجام شده بر روی این منحنی‌ها و محاسبه میزان نشست در حالتی که تونل‌ها به صورت تمام مقطع حفر می‌شوند تأثیر حفاری چند بخشی تونل‌ها در کاهش جابجایی‌های نهایی به دست می‌آید. در نهایت مناسب‌ترین ارتفاع برای حفاری بخش پیشرو ارائه شده است.

۲- معرفی مورد مطالعاتی

ساختمان سد بختیاری در جنوب غربی ایران، در حدود ۷۰ کیلومتری شمال شرق شهر اندیمشک و حدود ۶۵ کیلومتری جنوب غرب شهر درود قرار دارد. سیستم‌های انحراف آب این سد متشکل از دو تونل می‌باشد که توسط شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران اجرا شده است. تونل‌های انحراف سد بختیاری در کرانه چپ رودخانه بختیاری جانمایی شده‌اند. طول تونل پایینی ۱۱۸۱ متر و طول تونل بالایی ۱۱۵۱ متر می‌باشد. چنانچه در شکل ۱ نمایان است مقطع تونل پایینی دایروی و با قطر ۱۳/۷ متر و مقطع تونل بالایی D شکل به عرض ۱۳/۲۰ و ارتفاع ۱۳/۷۰ متر است. این تونل‌ها در یک الگوی مورب نسبت به هم قرار گرفته‌اند، و فاصله مرکز به مرکز آنها ۳۳ متر است. در محدوده سیستم انحراف ساختمان سد بختیاری، سنگ بستر از نهشته‌های عمدتاً کربناتی سازند سروک تشکیل شده است که حاوی شکستگی‌ها و ۳ سیستم ناپیوستگی عمده می‌باشند [۱۶]. همان‌طور که در شکل (۱) دیده می‌شود چندین گسل تونل‌ها را در بر می‌گیرد که موجب چین خوردگی‌های جناغی و افزایش ناپیوستگی‌ها در مسیر تونل‌ها شده است.

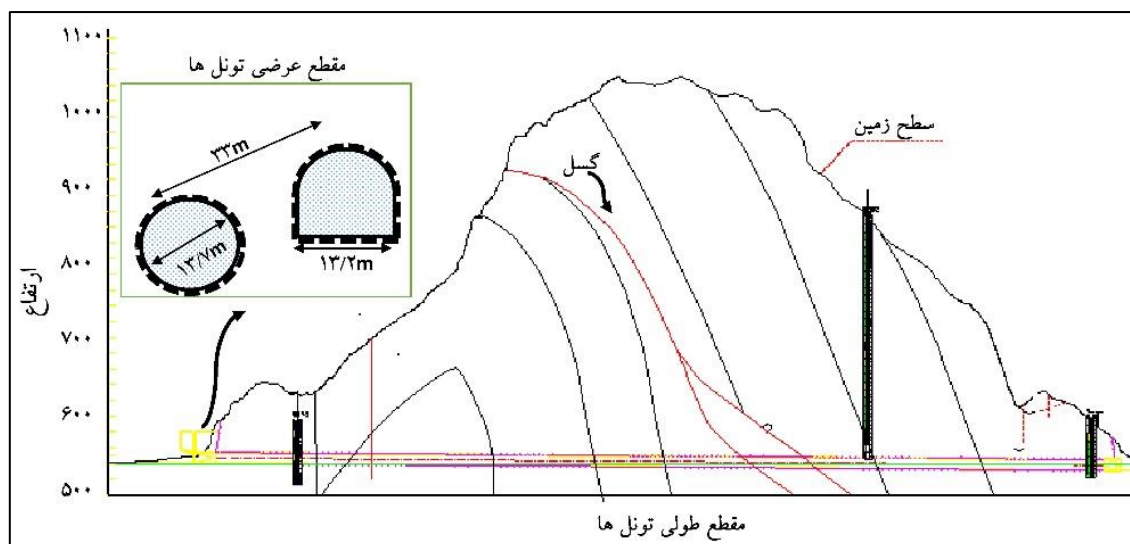
حفاری این تونل‌ها در هر دو بخش پیشرو و پله‌ای توسط روش چالزنی و آتشکاری انجام شده و به اتمام رسیده است.

اهمیت عوامل مؤثر در طراحی ایمن و اقتصادی تونل‌ها، مطالعه‌ای توسط اسکابرت^۱ [۱۳] صورت گرفته است وی عدم قطعیت‌های موجود در این طراحی‌ها را در ۵ مرحله تقسیم بندی می‌کند به نحوی که طبق نظر اسکابرت در گام اول با تعیین نوع زمین، در گام بعدی نوع رفتار زمین باید مشخص شود، در گام سوم نوع روش حفاری و نگهداری باید ارزیابی گردد. بر مبنای این تحقیق در گام چهارم با داشتن گزارش‌های ژئوتکنیک از محدوده مورد بررسی به ارزیابی مجدد الگوی حفاری در گام پنجم پرداخته می‌شود به نحوی که با داشتن مقادیر جابجایی‌ها و تغییرات تنش در روش‌های مختلف می‌توان به بهترین الگوی حفاری رسید. مطالعه اسکابرت به حفاری چند بخشی تونل به عنوان راهکاری در کاهش میزان جابجایی‌های سطح زمین اشاره کرده است. اهمیت توجه به ابعاد بخش‌های مختلف در چنین الگوهای حفاری نکته اساسی مطالعه اسکابرت می‌باشد. که به صورت مفهومی به آنها اشاره کرده است. در حفاری خط ۴ مترو بوداپست در مجارستان که با شکل نعل اسبی دارای قطر تقریبی ۱۲/۶ متر می‌باشد از روش دریافت کناری استفاده شده بود. به دلیل شرایط ضعیف خاکی منطقه، حفاری بخش مرکزی این تونل‌ها توسط ترکیب روش دومرحله‌ای و دریافت کناری انجام شد. در بخش مرکزی این تونل برای بخش پیشرو ارتفاع معادل ۵ متر در نظر گرفته شد طبق نتایج مدل‌سازی که این محققان انجام دادند. با انجام چنین تغییری در بخش مرکزی، کاهش شدید نشست‌های سطح زمین شد [۱۴]. هوک^۲ و همکاران [۱۵] مدل دو بعدی در مورد اهمیت ساختار سیستم نگهداری در تونل‌های بزرگ مقطعی که با روش دو مرحله‌ای حفاری می‌شوند ارائه کرده‌اند. آنها به بررسی سیستم‌های نگهداری مختلف و شرایط آنها در پایداری تونل‌ها پرداختند. توجه اصلی آنها به تغییر در سیستم نگهداری معطوف بوده است و تغییر در ابعاد و ساختار روش دو مرحله‌ای در چنین پایداری مورد توجه قرار نگرفته بود.

تحقیقات انجام گرفته در زمینه شیوه حفاری دو مرحله‌ای نشان می‌دهد که استفاده از این روش حفاری، می‌تواند منجر به پایداری بیشتر سازه مورد حفاری شود. ولی توجه به ابعاد آنها در افزایش کارایی این روش مورد بررسی قرار نگرفته است. این مقاله شرایط واقعی تونل‌های دو گانه

² Hoek

¹ Schubert



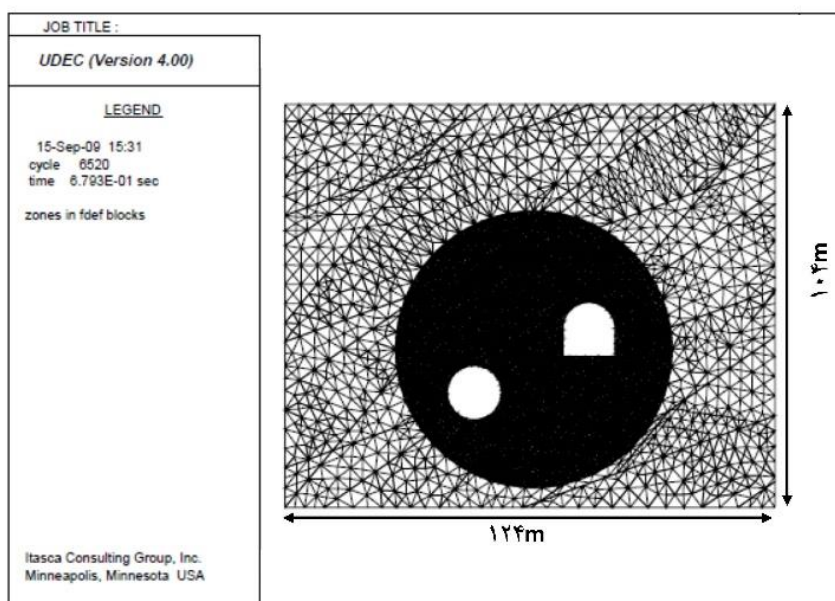
شکل ۱- مقاطع طولی و عرضی تونل‌های مطالعاتی

واقعی از سازه مورد نظر بوده و تغییر در خواص و میزان جابجایی در بخش‌های گوناگون آن به حداقل تأثیر از مرزهای آن برسد.

چنین مدلی را باید بتوان با حداقل زمان و حداکثر سرعت اجرا کرد. همچنین ابعاد عرضی و ارتفاعی این مدل‌ها باید به گونه‌ای باشد که اضافه تنش ناشی از بارگذاری در محیط مدل به حداقل برسد [۱۷]. با ایجاد مدل‌هایی با مرزهای مختلف و مقایسه آنها در نهایت بلوکی همانند شکل (۲) با ابعاد $124\text{ m} \times 104\text{ m}$ ایجاد شد.

۳- آنالیز المان مجزا و مدل‌سازی

در این مقاله از روش المان مجزا^۱ و نرم افزار UDEC جهت انجام مدل‌سازی استفاده شده است. این برنامه، توده سنگ را به صورت یک محیط ناپیوسته در نظر گرفته و قابلیت بررسی تأثیر عوارض ساختاری نظیر درزه‌های سنگی، لایه-بندی، گسل‌ها و انواع ناپیوستگی‌ها را دارد. ناپیوستگی‌ها در این برنامه به عنوان شرایط مرزی بین بلوکی است و جابجایی برشی در امتداد این ناپیوستگی‌ها و نیز چرخش بلوک‌ها می‌تواند انجام گیرد. مدل بایستی معرف حالت



شکل ۲- ابعاد و هندسه مدل ایجاد شده برای تونل‌های مطالعاتی

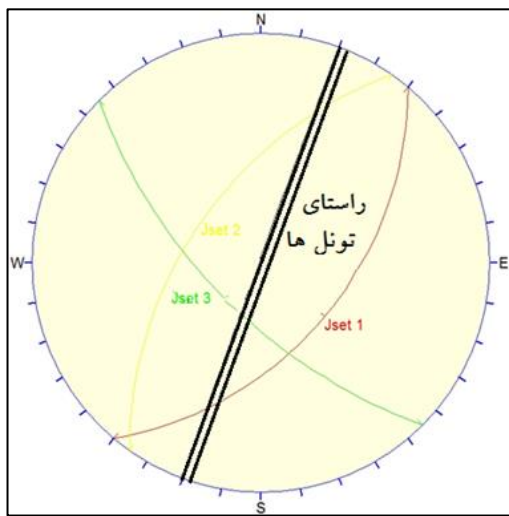
^۱ Universal Distinct Element Code

کربناته از معادله استفانسون [۲۱] که با استفاده از آزمایش-های شکست هیدرولیکی در اعماق کمتر از ۱۰۰۰ متر است، می‌توان استفاده کرد.

$$S_h = 2.2 + 0.89 S_v \quad (۴)$$

در این رابطه S_v ؛ تنش‌های قائم برجا و S_h ؛ تنش‌های افقی برجا می‌باشد.

اهمیت مطالعات درزه‌نگاری در مباحث تونل‌سازی باعث شد تا در اولین گام با اندازه‌گیری مشخصات درزه‌ها و با استفاده از نرم افزار Dips، موقعیت فضایی سیستم ناپیوستگی‌ها نسبت به امتداد تونل‌های مورد نظر بررسی قرار گیرد. شکل (۳) تصویر استریونت آنها را نشان می‌دهد.



شکل ۳- تصویر استریونت ناپیوستگی‌ها به همراه امتداد تونل‌ها

با انجام مطالعات مختلف به منظور مدل‌سازی واقعی تونل‌ها پارامترهای محاسبه شده مورد نیاز در تحلیل به دست آمد که جدول ۱ خلاصه‌ای از آن را نشان می‌دهد. شکل (۴) الگوریتم مراحل مدل‌سازی را نشان می‌دهد به منظور رسیدن به نتایج مورد نظر ۸۳ مدل گوناگون ایجاد شد. ارزیابی تمام این مدل‌ها بر اساس تغییر شکل‌ها و تغییرات تنش رخ داده در طاق تونل‌ها و سطح زمین صورت می‌گیرد.

۴- حفاری تونل‌ها و اندازه‌گیری جابجایی‌ها

برای رسیدن به حفاری بهینه، در ابتدا تونل‌ها به صورت کامل حفاری و نگهداری می‌شوند و سپس بر اساس ارتفاع‌های مختلف بخش پیشرو مدل‌ها ایجاد و نتایج ارزیابی خواهد شد. این مدل‌ها با استفاده از نرم‌افزار

در شکل (۲) برای شبکه‌بندی از المان‌های مثلثی استفاده شد. هر المان شامل تعدادی گره است. هر گره درجه آزادی معینی دارد که به تعداد مجهولات مربوط به آن گره مرتبط است [۱۸]. در تحقیق حاضر تغییر مکان هر گره جز مجهولات مدل می‌باشد. این المان‌ها جهت افزایش دقت محاسبات در اطراف تونل‌ها با تمرکز بیشتری واقع شده‌اند (محدوده تیره اطراف تونل‌ها). مدل رفتاری که برای توده-سنگ در نظر گرفته شده است مدل الاستو-پلاستیک با تئوری شکست موهر - کلمب می‌باشد. این مدل رفتار سنگ در بخش الاستیک را نمی‌کند بلکه در حالتی که رفتار آنها از حالت الاستیک خارج شود و به منطقه پلاستیک برسد، این بخش را شامل می‌شود.

با توجه به حساسیت پارامترهای ورودی در روش‌های عددی، در این مقاله سعی شده است تا با استفاده از اطلاعات اندازه‌گیری شده واقعی و همچنین روابط تجربی سازگار با سنگ‌های کربناته به تمام پارامترهای مورد نیاز رسید. از نکات مهم در مورد خواص درزه‌داری، تعیین مقادیر سختی نرمال (K_n) و سختی برشی درزه‌ها (K_s) می‌باشد. طبق تحقیقات بصیرت و همکاران [۱۹] با افزایش سختی بین درزه‌ها، نیروهای نرمال و برشی بر روی درزه‌ها افزایش و جابجایی‌های نرمال و برشی کاهش می‌یابد بنابراین لزوم تعیین این پارامترها برای رسیدن به نتایج واقعی روشن می‌باشد. در این تحقیق از معادلات ارائه شده توسط گروه تحقیقاتی آیتاسکا^۱ [۲۰] در تعیین سختی نرمال و سختی برشی استفاده شده است.

در این روابط E_m ؛ مدول تغییر شکل توده سنگ (GPa)،

$$k_n = \frac{E_m \cdot E_r}{S(E_r - E_m)} \quad (۱)$$

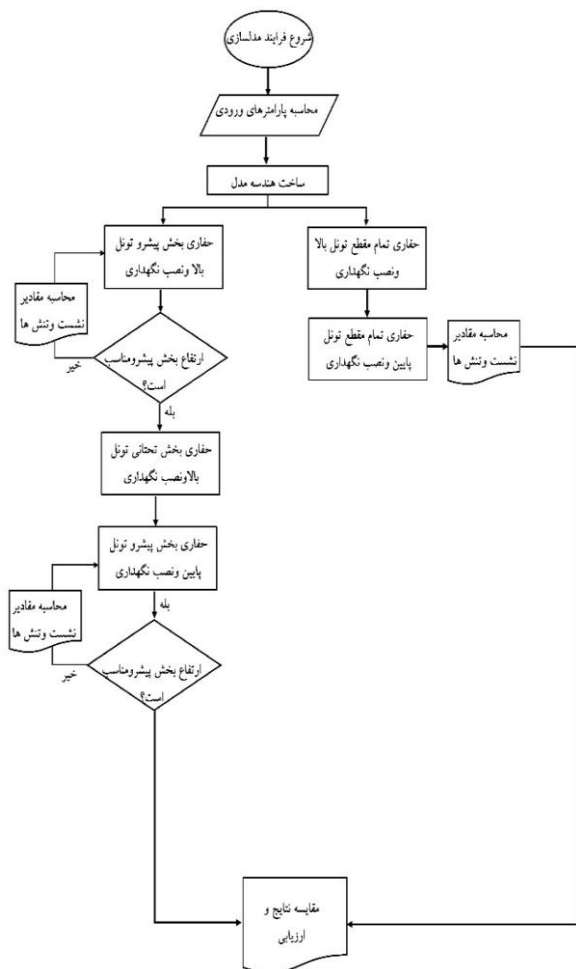
$$k_s = \frac{G_m \cdot G_r}{S(G_r - G_m)} \quad (۲)$$

$$K_n \text{ and } K_s \leq 10.0 \left[\max \left(\frac{K_m + \frac{4}{3} G_m}{S} \right) \right] \quad (۳)$$

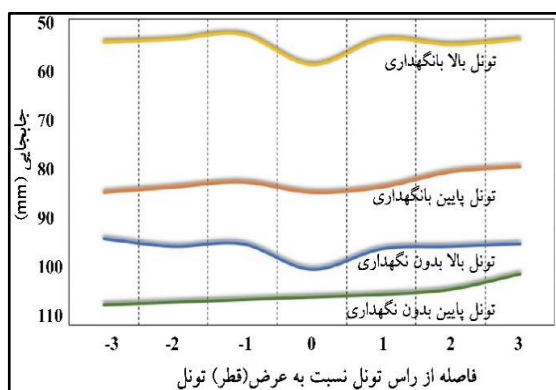
E_r ؛ مدول الاستیسیته سنگ بکر (GPa)، G_m ؛ مدول برشی توده سنگ (GPa)، G_r ؛ مدول برشی سنگ بکر (GPa)، K_m ؛ مدول بالک توده سنگ و S ؛ فاصله داری متوسط درزه-ها است. در تعیین مقدار تنش‌های افقی برجا در زمین‌های

^۱ Itasca

با ۲۷ mm بوده و در حدود ۲۸٪ از میزان جابجایی است که در حالت حفاری تمام مقطع مشاهده شده بود.



شکل ۴- فلوجارت مدل سازی



شکل ۵- جابجایی های ناشی از حفاری تمام مقطع تونل‌های بالا و پایین قبل و بعد از نگهداری در سطح زمین

با افزایش h/H جابجایی‌ها نیز افزایش می‌یابند به نحوی که به ازای نسبت $0/6$ حداکثر جابجایی در سطح زمین به mm $82/4$ می‌رسد که این میزان از جابجایی 84% از جابجایی حفاری تمام مقطع می‌باشد. نکته جالب در این فرایند حالتی است که h/H برابر با $0/55$

UDECE که بر مبنای روش المان مجزا می‌باشد به تجزیه و تحلیل تونل‌ها و منطقه مورد مطالعه می‌پردازد.

جدول ۱- خلاصه ای از پارامترهای مورد نیاز در مدل سازی

وزن مخصوص (Kg/m^3)	۲۶۰۰	
مدول تغییر شکل (Gpa)	۷/۸	
مدول الاستیک سنگ بکر (Gpa)	۶۹	
مدول برشی توده سنگ (GPa)	۳/۲	
مدول برشی سنگ بکر (GPa)	۲۷/۷	
نسبت پواسون	۰/۲۱	
زاویه اصطکاک داخلی (Deg)	۱/۴	
مقاومت چسبندگی (Mpa)	۳۸/۶	
نسبت تنش افقی به قائم	تونل D	۰/۶۰
	تونل دایروی	۰/۵۹
حداکثر ارتفاع روباره (m)	تونل D	۳۷۶
	تونل دایروی	۴۱۴
سختی نرمال (kn) (GPa/m)	دسته درزه ۱	۴۴
	دسته درزه ۲	۱۵
	دسته درزه ۳	۲۲
سختی برشی (ks) (GPa/m)	دسته درزه ۱	۱۸
	دسته درزه ۲	۶
	دسته درزه ۳	۹
مقاومت چسبندگی (Mpa)	۰/۱۸	

۴-۱- حفاری تمام مقطع

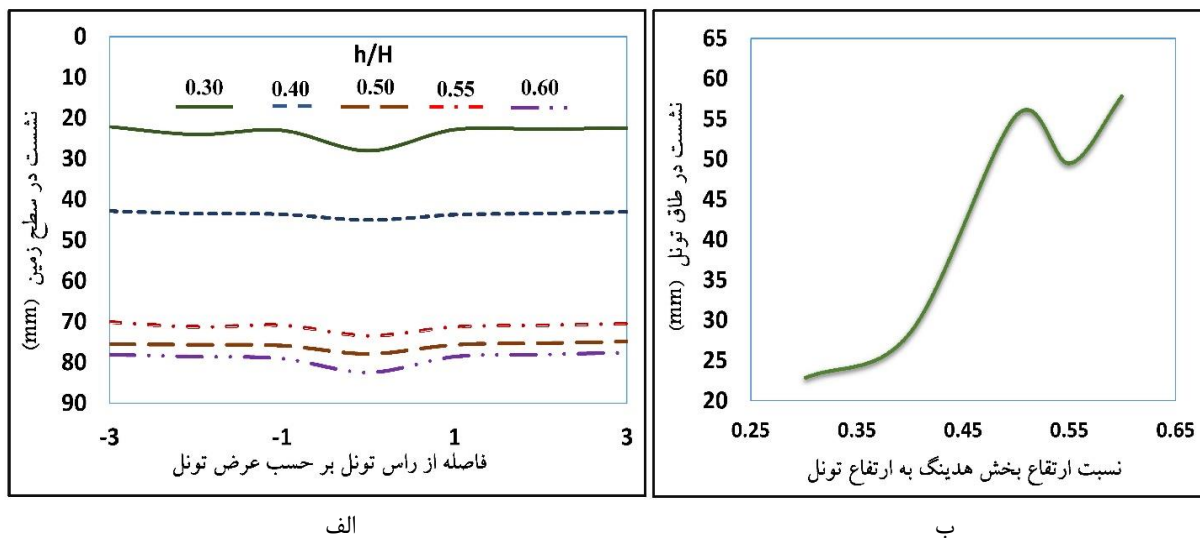
تونل بالایی به صورت D شکل و با سطح مقطع $168/1 m^2$ می‌باشد و تونل پایینی با سطح مقطع $147/3 m^2$ به صورت دایروی حفر می‌شود. بعد از حفاری کامل این تونل سیستم نگهداری شامل شاکرتیک با ضخامت $10 cm$ و پیچ سنگ-هایی با طول $4 m$ و فاصله داری $2/5 m \times 2/5 m$ نصب می‌شود. جابجایی‌های ناشی از حفاری این تونل‌ها در سطح زمین و طاق تونل تا فاصله‌ای معادل 3 برابر عرض تونل از راس تونل، مورد اندازه‌گیری قرار گرفته است. منحنی مربوط به جابجایی ایجاد شده در سطح زمین در دو حالت، حفاری کامل بدون نصب سیستم نگهداری و با نصب سیستم نگهداری در شکل (۵) نشان داده شده است.

۴-۲- حفاری دو مرحله ای

به منظور تعیین ارتفاع مناسب حفاری بخش پیشرو تونل، مدل‌هایی بر اساس نسبت ارتفاع بخش پیشرو (h) و ارتفاع تونل (H)، بدون نصب سیستم نگهداری انجام گرفته است. همان‌طور که در شکل (۶-الف) مشاهده می‌شود این نسبت از $0/3$ تا $0/6$ در تغییر می‌باشد. کمترین میزان جابجایی در سطح زمین به ازاء $h/H = 0/3$ رخ می‌دهد که حداکثر برابر

دیگری اجرا شد به نحوی که بخش پیشرو تا ۰/۶ ارتفاع تونل حفاری و سیستم نگهداری (شاتکریت + پیچ سنگ) مورد نظر در این بخش نصب و سپس حفاری بخش تحتانی انجام می‌شود. بعد از حفاری و شبیه‌سازی کامل محیط، جابجایی نهایی در طاق تونل برابر با ۵/۵ mm می‌باشد که در مقایسه با حفاری تمام مقطع با نصب سیستم نگهداری کاهش ۸۴٪ را نشان می‌دهد. همچنین کرنش برشی برای تونل بالایی در حالتی که از نگهدارنده اولیه استفاده شده است حداکثر ۰/۰۰۳ بوده و حداکثر نیروی محوری وارد بر پیچ سنگ‌ها در تونل بالایی برابر با ۱۱۰ KN کیلو نیوتن به دست آمد. این مقدار از نیروی محوری با توجه به مقاومت نهایی پیچ سنگ‌ها (۲۱۶ KN) منجر به فاکتور ایمنی ۲/۰۵ برای پیچ سنگ‌ها می‌شود که از لحاظ مباحث تحلیل پایداری قابل قبول می‌باشد.

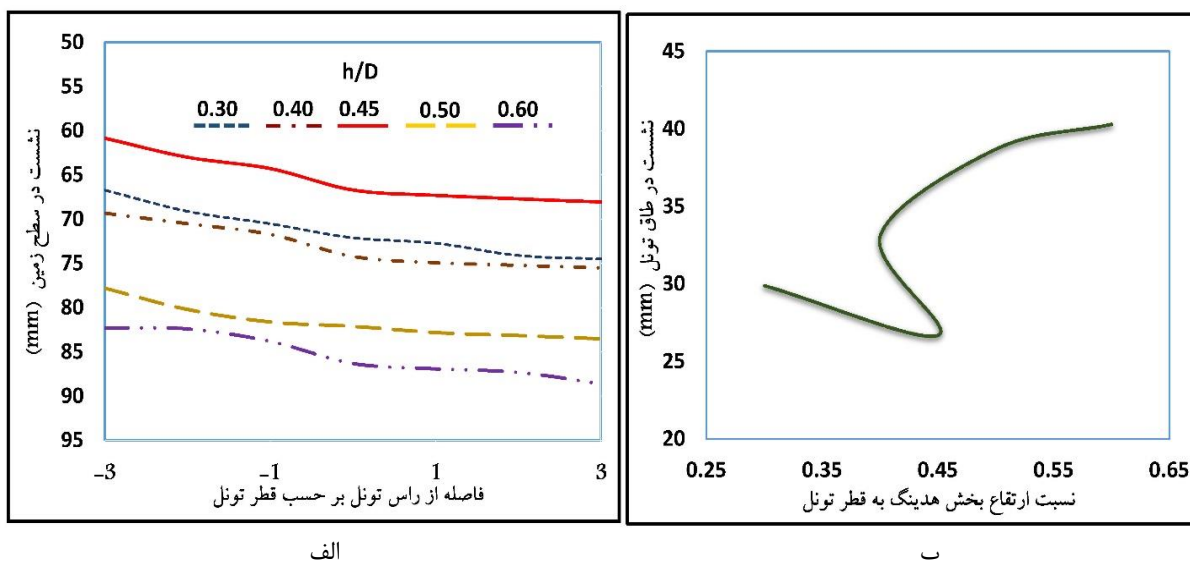
باشد. به ازای این نسبت حالت صعودی افزایش جابجایی معکوس شده و جابجایی در مقایسه با حالتی که این نسبت برابر با ۰/۵۰ باشد کاهش می‌یابد. این کاهش در حدود ۱۰٪ می‌باشد. از عوامل مؤثر در این ناهماهنگی می‌تواند توزیع ناپیوستگی‌ها و قفل شدگی آنها باشد که خود با گستردگی طاق فشار تونل در ارتباط می‌باشد. میزان جابجایی‌ها در طاق تونل نیز بایستی مورد بررسی قرار گیرد. چنانچه در شکل (۶-ب) مشاهده می‌شود جابجایی در طاق نیز با افزایش h/H افزایش می‌یابد ولی در نسبت ۰/۵۵ این افزایش تغییر می‌یابد. جابجایی رخ داده در این حالت برابر با ۴۸ mm خواهد بود که با کاهش ۱۲٪ نسبت به حالتی که $h/H=0/5$ باشد همراه است. در حالتی که این نسبت برابر با ۰/۵۵ باشد ارتفاع بخش پیشرو ۷/۵ mm خواهد بود. برای ارزیابی مدل‌ها در حالت نصب نگهداری، مدل‌های



شکل ۶- جابجایی ناشی از نسبت های مختلف ارتفاع بخش پیشرو (هدینگ) تونل بالایی در طاق تونل و سطح زمین

تمام مقطع مشاهده شده بود. بدون در نظر گرفتن این نسبت و با افزایش h/D جابجایی‌ها نیز افزایش می‌یابد به نحوی که به ازای نسبت ۰/۶ حداکثر جابجایی در سطح زمین به ۸۸/۶ mm می‌رسد. این میزان از جابجایی ۸۴٪ از جابجایی حفاری تمام مقطع می‌باشد. نکته جالب در این فرایند حالتی است که $h/D=0/45$ باشد به ازای این نسبت حالت صعودی در افزایش جابجایی تغییر یافته و جابجایی در مقایسه با حالتی که این نسبت برابر با ۰/۳ و ۰/۴ باشد روند کاهشی دارد این کاهش به ترتیب در حدود ۹٪ و ۱۰٪ می‌باشد.

به منظور تعیین ارتفاع مناسب در حفاری بخش پیشرو تونل پایینی، مدل‌هایی بر اساس نسبت ارتفاع بخش پیشرو (h) و قطر تونل (D) و بدون نصب سیستم نگهداری ایجاد شد (شکل ۷). همان‌طور که در شکل (۷-الف) مشاهده می‌شود این نسبت‌ها از ۰/۳ تا ۰/۶ در تغییر می‌باشد در مورد تونل پایینی نیز همانند تونل بالایی به ازای نسبت‌هایی در خارج این بازه اندازه‌گیری‌ها روند ثابتی داشته و از لحاظ مطالعاتی مورد توجه نمی‌باشند. کمترین میزان از جابجایی‌ها در سطح زمین به ازاء $h/D=0/45$ روی می‌دهد و در این حالت حداکثر جابجایی برابر با ۶۸/۱ mm می‌باشد. این میزان حدود ۶۴٪ از میزان جابجایی است که در حالت حفاری



شکل ۷- جابجایی ناشی از نسبت‌های مختلف ارتفاع بخش پیشرو (هدینگ) تونل پایینی در طاق و سطح زمین

ارتفاع‌های بهینه حفاری ناشی از مدل‌سازی‌ها را برای تونل دایروی و D شکل نشان می‌دهد.

جدول ۲- ارتفاع بهینه حفاری به دست آمده از مدل‌سازی

ارتفاع بخش تحتانی (m)	ارتفاع بخش پیشرو (m)	ارتفاع (قطر) (m)	مساحت (m ²)	نوع تونل
۶/۲	۷/۵	۱۳/۷	۱۶۸/۱	دایروی
۷/۴	۶/۳		۱۴۷/۳	D

۵- نتیجه‌گیری

این تحقیق بر مبنای روش المان مجزا و مدل‌سازی دو بعدی از حفاری پلکانی تونل‌هایی با مقطع دایره و D به منظور تعیین ارتفاع بخش هدینگ می‌باشد، نشان داد در تونل‌های D شکل که با روش پلکانی حفر می‌شوند نسبت ارتفاع بخش پیشرو به ارتفاع کل حفاری برابر با ۰/۵۵، ارتفاع بهینه از لحاظ کاهش جابجایی در سطح زمین و طاق تونل می‌باشد به نحوی که در مقایسه با $h/H=0/5$ این جابجایی به میزان ۱۰٪ در سطح زمین و ۱۲٪ در طاق تونل کاهش داشته است. در صورتی که تونل D شکل با نسبت $h/H=0/55$ حفاری کامل شود، جابجایی در طاق به اندازه ۸۴٪، کمتر از حفاری تمام مقطع خواهد بود. تونل با مقطع دایره نیز به ازای نسبت ارتفاع بخش هدینگ به قطر تونل برابر با ۰/۴۵ مناسب‌ترین حالت از لحاظ پایداری و میزان جابجایی‌های اندازه‌گیری شده در سطح زمین و طاق را نشان می‌دهد. به نحوی که در مقایسه با $h/D=0/30$ جابجایی در طاق و سطح زمین در این حالت به میزان ۱۰٪

میزان جابجایی‌ها در طاق تونل نیز بایستی مورد بررسی قرار گیرد. چنانچه در شکل (۷-ب) مشاهده می‌شود جابجایی در طاق نیز با افزایش h/D افزایش می‌یابد ولی در نسبت ۰/۴۵ این افزایش تغییر می‌یابد. جابجایی در این حالت برابر با ۲۶ mm خواهد بود که با کاهش ۱۰ درصدی نسبت به حالتی که $h/D=0/3$ باشد همراه است. به ازای نسبت $h/D=0/44$ در مورد تونل بالایی میزان حداکثر نشست در طاق تونل برابر با ۴۳ mm خواهد بود که در مقایسه با تونل پایینی در حدود ۳۹٪ بیشتر است. براساس $h/D=0/45$ ارتفاع بخش پیشرو تونل پایینی ۶/۲ m خواهد بود. بنابراین این ارتفاع مناسب‌ترین ارتفاع بخش پیشرو جهت دستیابی به کمترین جابجایی‌ها در سطح زمین و طاق تونل خواهد بود. به منظور تجزیه و تحلیل جابجایی‌های کلی تونل در حالتی که ارتفاع بخش پیشرو ۶/۲ m باشد مدل دیگری اجرا شد به نحوی که بخش پیشرو تا این ارتفاع حفاری و سیستم نگهداری (شاتکریت + پیچ سنگ) مورد نظر در این بخش نصب می‌شود. سپس حفاری بخش تحتانی نیز صورت می‌گیرد. بعد از حفاری و شبیه‌سازی کامل محیط جابجایی نهایی در طاق تونل برابر با ۴ mm می‌باشد. کرنش برشی برای تونل پایینی در حالتی که از نگهدارنده اولیه استفاده شده است حداکثر برابر با ۰/۰۰۳ است. حداکثر نیروی محوری وارد بر پیچ سنگ‌ها در تونل بالایی برابر با ۹۸ کیلو نیوتن می‌باشد که این مقدار از نیروی محوری با توجه به مقاومت نهایی پیچ سنگ‌ها منجر به فاکتور ایمنی ۲/۲ برای پیچ سنگ‌ها می‌شود. جدول ۲

نگهداری شده، خواهد شد. مقادیر فاکتور ایمنی به دست آمده از تونل دایروی و D به ترتیب ۲/۰۵ و ۲/۲ می‌باشد که بیانگر شرایط پایدار تونل‌ها از لحاظ نگهداری می‌باشد.

کاهش می‌یابد. همچنین حفاری کامل این تونل با نسبت بهینه به دست آمده از مدل‌سازی، موجب کاهش حدود ۹۰٪ در جابجایی طاق تونل، نسبت به تونل تمام مقطع

مراجع

- [1] G. Barla, "Full-face excavation of large tunnels in difficult conditions", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol. 8, No.3, June 2016, pp. 294–303.
- [2] F. Zhang, Y.F. Gao, Y.X. Wu, N. Zhang, "Upper-bound solutions for face stability of circular tunnels in undrained clays", *Geotechnique journal*, Vol. 10, No.1, August 2018, pp. 76–85.
- [3] P. Lunardi, G. Barla, "Full face excavation in difficult ground", *Geomechanics and Tunneling*, Vol.7, No. 5, October 2014, pp. 461–468.
- [4] R. Tatiya, *Surface and underground excavations, Methods, Techniques and Equipment*, 2th ed., Taylor and Francis Group, Elsevier, USA, 2005.
- [5] B. Zhang, X. Wang, J.S. Zhang, F. Meng, "Three-dimensional limit analysis of seismic stability of tunnel faces with quasi-static method", *Geomech. Eng*, Vol. 22, No. 9, August 2017, pp. 301–318.
- [6] K.H. Bowers, "An Appraisal of the New Austrian Tunnelling Method in Soil and Weak Rock", PhD Thesis, the University of Leeds, 1997.
- [7] M. Karakus, R.J. Fowell, "Effect of different tunnel face advance excavation on the settlement by FEM", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 18, No.5, November 2003, pp. 513–523.
- [8] M. Karakus, R.J. Fowell, "2-D and 3-D finite element analyses for the settlement due to soft ground tunnelling", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 21, No. 3, January 2006, pp. 381–392.
- [9] M.M. Farias, A.H. Moraes, A.P. Assis, "Displacement control in tunnels excavated by the NATM: 3-D numerical simulations", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 19, No. 3, May 2004, pp. 283–293.
- [10] Y. Chungsik, "Performance of multi-faced Tunneling –A 3D numerical investigation", *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 24, No. 5, September 2009, pp.562–573.
- [11] B. Zhu, X. Shi, "Study on Construction of Long Span and Soft Rock Tunnel with Numerical Simulation", *Applied Mechanics and Materials*, Vol.438–439, November 2013, pp. 964–968.
- [12] X.M. Wang, H.w. Huang, and X.Y.Xie "effects of different bench length on the deformation of surrounding rock by FEM", *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, © 2009 Taylor & Francis Group, 2009, pp. 729–733.
- [13] W. Schubert "The observational Approach in Tunnelling", *Institute for Rock Mechanics and Tunnelling*, Graz University of Technology, Austria, April 2016, pp. 1–8.
- [14] G. Atzl "Challenges and Solutions for large scale Tunnelling in Urban Environment" *Proceedings of the World Tunnel Congress*, Surface challenges, Underground solutions, Bergen, Norway, June 2017, pp. 1–11.
- [15] E. Hoek, C. Carranza-Torres, M. Diederichs, and B. Corkum "Integration of geotechnical and structural design in tunneling", *The 56th Annual Geotechnical Engineering Conference to be held in Minneapolis*, February 2008, pp. 1–54.
- [16] Iran Water and Power Resourced Development Co. Report, "Geological Report of Bakhtiyari Dam", 2006.
- [۱۷] مرتضی اسماعیلی و ولی اله خلیلیان، "بررسی عددی رفتار استاتیکی و دینامیکی خاکریزهای راه آهن ساخته شده با ژئوفوم"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۲، شماره ۳۶، بهار ۱۳۹۳، صفحات ۶۵–۸۳.
- [۱۸] محمد حاجی عزیزی، محمود رحمانی، نجف بیگلری، "تحلیل اجزای محدود سدهای زیرزمینی و نکات مهم در طراحی و اجرای آنها- مطالعه موردی سد زیرزمینی آبخوری در استان سمنان"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۲، شماره ۳۸، پاییز ۱۳۹۳، صفحات ۱۵۳–۱۶۵.
- [۱۹] روح اله بصیرت، حسین سالاری راد، حامد ملاداودی، "تحلیل عددی سیستم نگهداری منفصل (سگمنتال) تحت بار زلزله"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۴، پاییز ۱۳۹۷، صفحه ۱۷۷–۱۸۷.

[20] Itasca Consulting Group, "UDEC version 5, User's manual", 2004.

[21] A. Palmtrom, "The use of RMi in the design of rock support in underground openings", PhD Thesis, University Of Oslo, 1995.