

مطالعه عددی تاثیر پیش‌برش مکانیکی و بولت فایبرگلاس در عبور تونل البرز از زون گسل خورده‌ی کندوان

آرش نوذری^۱؛ محمد حسین خسروی^{۲*}؛ مجتبی عسکری^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

۲- استادیار؛ دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

۳- مشاور ارشد مکانیک سنگ، شرکت بزرگراه تهران-شمال

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۴/۱۰/۱۳؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۵/۰۸/۲۶

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2017.855

واژگان کلیدی	چکیده
تونل البرز	یکی از مهم‌ترین مسائلی که در زمان حفر تونل‌ها در زمین‌های ضعیف و دارای شرایط سخت مورد توجه قرار می‌گیرد، ایجاد پایداری مناسب و جلوگیری از وقوع گسیختگی‌ها و ریزش‌ها در سینه‌کار و تاج تونل است. به همین منظور در زمین‌های سست و دارای خصوصیات مکانیکی ضعیف به منظور تنظیم صلبیت و استحکام جبهه‌کار پیشروی و به موجب آن ایجاد شرایط مناسب برای کنترل کامل تغییرشکل زمین و در نتیجه در مرحله آخر برای تحکیم کامل تونل در دوره‌های بلند و کوتاه مدت، استفاده از روش‌های پیش‌تحکیمی اجتناب‌ناپذیر است. از روش‌های موثر در این زمینه می‌توان به استفاده از روش پیش‌برش مکانیکی و بولت‌های فایبرگلاس اشاره نمود. علی‌رغم تحلیل‌ها و بررسی‌های مختلفی که پیرامون این دو روش صورت پذیرفته است، یک بررسی جامع به منظور مقایسه و تحلیل این روش‌ها برای مشخص شدن تاثیر هر یک از روش‌ها در شرایط ژئومکانیکی ثابت انجام نگرفته است. به منظور ارزیابی این روش‌ها در یک شرایط ژئومکانیکی مشخص به بررسی عددی این روش‌ها با استفاده از نرم‌افزار <i>FLAC3D</i> برای عبور تونل البرز از زون گسل‌خورده کندوان، پرداخته شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که پیش‌برش مکانیکی به همراه بولت‌های فایبرگلاس به میزان قابل توجهی موجب کاهش ناحیه پلاستیک اطراف و جبهه‌کار تونل و در نتیجه کاهش جابجایی‌های تاج، دیواره و جبهه‌کار تونل می‌شود.

۱- پیش‌گفتار

با توجه به شرایط بسیار متنوع زمین‌ها، برای انجام عملیات بهسازی روش‌های مختلفی ارائه شده است و این روش‌ها در حالت کلی به دو دسته روش‌های پیش‌تحکیمی حفاظتی و تقویتی تقسیم می‌شوند، که در گروه اول به بهسازی پیرامون جبهه‌کار پیشروی به منظور ایجاد شرایط محافظتی برای حفظ جبهه‌کار و کاهش تنش‌های وارده بر آن و در گروه دوم به طور مستقیم به بهسازی جبهه‌کار پیشروی برای بهبود مشخصات تغییرشکل‌پذیری و مقاومتی آن پرداخته می‌شود.

بر اساس مشخصات پروژه و زمین منطقه هر یک از روش‌های فوق و یا ترکیبی از آن‌ها قابل کاربرد هستند (*Lunardi, 2012*).

در سال ۱۹۵۰ میلادی فضای پیرامونی تعدادی از تونل‌های دایروی در منطقه داکوتای جنوبی آمریکا توسط روشی مشابه پیش‌برش مکانیکی پیش از انجام عملیات آتشفکری تحت عملیات برش‌کاری قرار گرفت. هدف کلی از این روش ایجاد سطح آزاد برای انفجار بهتر و داشتن سطحی با هندسه منظم برای عملیات احداث تونل بوده است. روش پیش‌برش مکانیکی هیچ کاربرد دیگری به عنوان یک شیوه

* تهران، تقاطع خیابان کارگر شمالی و اتوبان شهید گمنام (چهارراه امیرآباد)، روبروی کوچه نهم، ساختمان شماره ۲، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی معدن؛ کدپستی: ۱۴۳۹۵۷۱۳۱؛ شماره تلفن: ۰۲۱-۸۲۰۸۴۳۹۸؛ دورنگار: ۰۲۱-۸۸۰۰۸۸۳۸؛ رایانامه: mh.khosravi@ut.ac.ir

همکاران (Zhang, Li, Liu, Li, & Shi, 2014). لی و همکاران (Li, Qi, Wang, & Yang, 2012) و آکسوی و اونارگان (Aksoy & Onargan, 2010) اشاره نمود. با توجه به مقایسه‌های انجام شده توسط کاماتا و ماشیمو از طریق آزمایش سانتریفیوژ (Kamata & Mashimo, 2003) و مدلسازی المان مجزا انجام شده توسط فاناتسو و همکاران (Funatsu, Hoshino, Sawae, & Shimizu, 2008) روش بولت‌های فایبرگلاس در مقایسه با پری پولینگ برای پایداری جبهه کار تونل به مراتب موثرتر می‌باشد. بولت‌های فایبرگلاس با طول‌ها و جانمایی‌های مختلف بر اساس وضعیت جبهه کار و مساحت مقطع تونل مورد استفاده قرار می‌گیرند. با کاربرد این بولت‌ها علاوه بر کاهش جابجایی جبهه کار، از میزان جابجایی‌های تاج و دیواره‌ها نیز کاسته می‌شود (Aksoy & Onargan, 2010). کالولو و تیور (Calvello & Taylor, 1999) و کاماتا و ماشیمو (Kamata & Mashimo, 2003) با مطالعات آزمایشگاهی ثابت کردند که در صورت جانمایی بولت‌های فایبرگلاس به صورت محیطی میزان جابجایی جبهه کار به حداقل کاهش می‌یابد.

با توجه به موارد مذکور مطالعات مختلفی در زمینه کاربرد بولت‌های فایبرگلاس و روش پیش‌برش مکانیکی صورت پذیرفته است، اما بررسی این دو روش به صورت هم‌زمان و مقایسه آن با حالت‌های استفاده مجزا از هر یک از روش‌ها مورد بررسی قرار نگرفته است. به همین منظور در این مقاله ابتدا روش پیش‌برش مکانیکی و بولت‌های فایبرگلاس به صورت مختصر معرفی می‌شود و در ادامه با معرفی تونل البرز و گسل کندوان به بررسی عددی کاربرد هر یک از دو روش پیش‌برش مکانیکی و بولت‌های فایبرگلاس با جانمایی محیطی به صورت چهار دایره هم‌مرکز به منظور کنترل جابجایی‌ها و پایدار سازی تونل البرز برای عبور از زون گسل خورده کندوان پرداخته می‌شود.

۲- روش‌های پیش‌تحکیمی

۲-۱- پیش‌برش مکانیکی

پیش‌برش مکانیکی عبارتست از یک شکاف با ضخامت و طول از پیش تعیین شده که به صورت برونسو در پیرامون بخش حفاری نشده تونل ایجاد می‌شود (Walsum, 1991). برای

تونل‌زنی نداشته است، تا این که در دهه ۷۰ میلادی توسط تعدادی محقق فرانسوی تحت بازنگری قرار گرفت و به همراه انجام عملیات برش فضای پیرامونی تونل از تزریق دوغاب به عنوان لایه‌ای محافظ برای ناحیه‌ای که تحت عملیات حفاری قرار می‌گیرد، استفاده شد (Walsum, 1991). پس از آن این روش به صورت گسترده‌ای در اروپا مورد استفاده قرار گرفت. بوگارد در سال ۱۹۸۸ به بررسی جامع این روش پرداخت و دریافت که استفاده از این روش موجب بهبود شرایط ایمنی و افزایش نرخ پیشروی و در نتیجه کاهش هزینه‌های عملیاتی می‌شود (Bougard, 1988). استفاده از روش پیش‌برش مکانیکی ناحیه تاثیر حفاری تونل را کوچک می‌نماید و موجب کاهش تاثیر حفاری تونل بر سازه‌های سطحی و زیرسطحی منطقه می‌شود (Altamura & Miliziano, 2006). از مثال‌های حفاری تونل با استفاده از روش پیش‌برش مکانیکی می‌توان به ساخت ایستگاه تونل بالدو دگلی اوبالد (Baldo degli Ubaldi) شهر رم (Focaracci & Lunardi, 1998)، تونل نازانو (Nazzano) در آزاد راه میلان-نیپل (Lunardi & Focaracci, 2003)، تونل آزاد راه فونتینای-بویس Fontenay-Bois در نزدیکی پاریس که در خاک‌های چسبنده و شیل حفر شده است، تونل‌های فونتینای و سیاکس Fontenay and Sceaux برای مسیر راه‌آهن شهر پاریس که در سنگ‌های سست با مقاومت تک محوری بین ۰.۶ تا ۱۵ مگاپاسکال، تونل لیل Lille در شمال فرانسه که در سنگ‌های چاک خرد شده ایجاد شده است، اشاره نمود (Walsum, 1991).

یکی دیگر از مسائل مهم در زمینه تونل‌سازی، جابجایی تاج و فضای حفر شده، در اثر جابجایی جبهه کار تونل است. به منظور جلوگیری از جابجایی جبهه کار به سمت داخل فضای حفر شده، روش‌های مختلفی از قبیل لوله‌های تزریق شده (Prepoling)، بولت‌های فایبرگلاس، روش‌های پیش‌تحکیمی عمودی، تزریق با فشار بالا و انجماد زمین به کار می‌رود (Pietro, 2008). موفقیت استفاده از لوله‌های تزریق شده به منظور تقویت جبهه کار توسط محققان زیادی به اثبات رسیده است که از جمله آن‌ها مطالعه موردی وانگ و همکاران (Wong, Ng, Chen, & Bian, 2012)، آزمایش مدل سانتریفیوژ توسط هیستاک و اوهنو (Hisatake & Ohno, 2008)، و مدلسازی عددی انجام شده توسط ژانگ و

است (Lunardi, 2012). پوششی که با این روش در اطراف تونل ایجاد می‌شود، شکلی شبیه یک مخروط ناقص دارد و با ویژگی‌های مکانیکی مناسبی که دارد می‌تواند پیش‌نگهداری شعاعی مناسبی برای زمین اطراف تونل ایجاد کرده و به مقدار کافی مانع از ریزش توده‌سنگ‌های اطراف آن شود (Altamura & Miliziano, 2006).



ب) عملیات پیش‌برش و تزریق همزمان

شکل ۱- ماشین ایجاد پیش‌برش مکانیکی و نحوه انجام برش و تزریق همزمان (Lunardi, 2012)

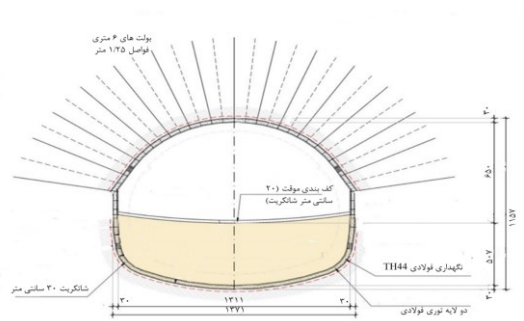


الف) نمایی کلی از ماشین

۳- معرفی پروژه

۳-۱- تونل البرز

مجموعه تونل‌های البرز واقع در منطقه ۲ آزاد راه تهران شمال با طول ۶۴۰۰ متر، طولی‌ترین مجموعه تونلی در این آزادراه هستند که به منظور عبور از ارتفاعات البرز مرکزی طراحی شده‌اند. تونل شرقی البرز با عرض ۱۳٫۷۱ متر و ارتفاع ۱۱٫۵۷ در حال حفاری است که در شکل ۲ مقطع تونل همراه با نگهداری‌های به کار گرفته شده در آن نشان داده شده است (Tehran-Shomal Freeway co, 2008).



شکل ۲- مقطع تونل البرز همراه با نگهداری‌های انجام شده (Tehran-Shomal Freeway co, 2008)

ایجاد شکاف از ماشینی مخصوص استفاده می‌شود که با یک برش دهنده زنجیری کار می‌کند و شکل محیط تونل را باز تولید می‌نماید. بلافاصله پس از ایجاد شکاف، نازل موجود در پشت واحد برش بتن مسلح شده توسط الیاف و مواد مناسب جهت گیرش سریع را به داخل شکاف تزریق می‌کند. در شکل ۱ ماشین ایجاد کننده پیش‌برش مکانیکی و نحوه تزریق توسط نازل تعبیه شده در پشت واحد برش ماشین، آورده شده

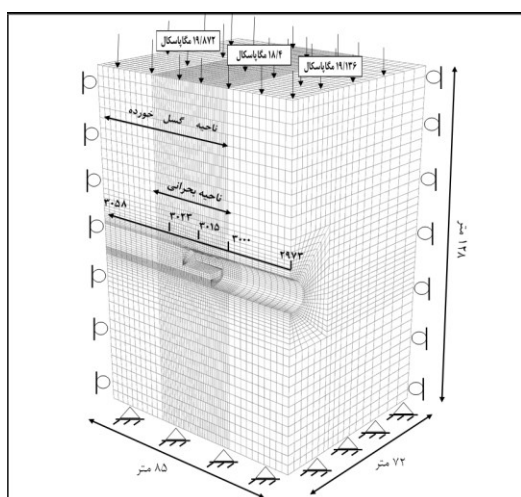
۲-۲- بولت فایبرگلاس

در این روش تعدادی چال به صورت خشک در جبهه کار حفر می‌شود که طول این چال‌ها بیشتر از قطر تونل است و نسبت به محور تونل زاویه‌دار هستند و حتی ممکن است به خارج از محدوده جبهه کار نیز وارد شوند. پس از حفر چال‌ها، بولت‌های فایبرگلاس مخصوص در داخل چال‌ها قرار می‌گیرند و بلافاصله پس از آن دوغاب سیمان به داخل چال تزریق می‌شود. زمانی که طول باقی‌مانده از بولت‌های کار گذاشته شده در جبهه کار پس از پیشروی کمتر از طول مناسب جهت تضمین پیش‌تحکیم تونل باشد، عملیات تکرار می‌شود.

پارامترهای مشخص‌کننده این روش عبارتند از طول، فراوانی، همپوشانی، مقطع طولی و توزیع هندسی بولت‌ها. سطح بیرونی بولت‌های لوله‌ای معمولاً دارای شیارهای مارپیچی می‌باشد تا مقاومت آن‌ها در مقابل لغزش را بالا ببرد، طول این بولت‌ها حداکثر بین ۱۵ تا ۱۸ متر است. در صورت نیاز به اتصال بولت‌ها، لازم است از بست‌های حلقوی و چسب (رزین اپوکسی) استفاده شود تا این اطمینان حاصل شود که مقاومت کششی و برشی محل اتصال همانند سایر بخش‌های بولت است (Lunardi, 2012).

جدول ۱- پارامترهای ژئومکانیکی ناحیه مورد بررسی (Giniowski, 2008)

متر				پارامتر
۳۰۲۳-۳۰۵۸	۳۰۱۵-۳۰۲۳	۳۰۰۷-۳۰۱۵	۲۹۷۳-۳۰۰۷	
۶۰	۲۷	۳۵	۴۵	مقاومت فشاری تک محوری (مگاپاسکال)
۶۳	۲۸	۳۳	۵۱	RMR
۲۷۰۰	۲۵۰۰	۲۵۵۰	۲۶۰۰	وزن مخصوص
۳/۲۰۸	۰/۹۶۳	۱/۴۳۳	۲/۱۸۸	چسبندگی C (مگاپاسکال)
۴۳/۳۳	۲۱/۷۹	۲۸/۳۵	۳۵/۴۵	زاویه اصطکاک داخلی ϕ (درجه)
۱۰۳۲۹	۱۰۹۸	۱۶۶۷	۵۳۲۸	مدول الاستیسیته E (گیگاپاسکال)



شکل ۴- نحوه مش‌بندی و چگونگی مرزهای مدل

۴- مدل‌سازی عددی و تحلیل سه‌بعدی

در شکل ۴ نمایی از نحوه مش‌بندی و چگونگی مرزهای مدل آورده شده است. مدل ساخته شده دارای ۸۶ متر طول، ۱۲۸ متر ارتفاع و ۷۲ متر عرض است. تمامی مرزها با تکیه‌گاه‌های غلظتی بسته شده‌اند، به غیر از مرز پایینی مدل که توسط تکیه‌گاه مفصلی ثابت شده است. تنش قائم ناشی از وزن روباره ۸۰۰ متری به صورت بار قائم بر مرز بالایی مدل وارد شده است. به منظور به حداقل رساندن زمان محاسبات و با توجه به تقارن محوری مدل، تنها نیمی از تونل مدل شده است. شبکه تفاضل محدود ساخته شده، دارای ۸۷۵۳۵ زون است که زمین منطقه، بولت‌های به کار رفته، نگهداری فولادی و پوشش بتنی مورد استفاده به ترتیب با اجزاء هشت، دو، دو و سه‌گانه‌ای مدل شده‌اند. زمین منطقه و بولت‌های فایبرگلاس به صورت الاستوپلاستیک و منطبق بر معیار شکست موهر-کلمب مدل شده‌اند. پوشش ایجاد شده توسط روش پیش‌برش مکانیکی و نگهداری بتنی تونل به صورت الاستیک هستند.

۴-۱- نحوه حفاری و اعمال نگهداری

حفاری تونل به صورت دو مرحله‌ای و با کاربرد روش‌های پیش‌برش مکانیکی در پیرامون جبهه کار و بولت‌های فایبرگلاس در درون جبهه کار به منظور بهسازی ناحیه گسل-خوردنه مدل‌سازی شده است. در مدل‌سازی‌های انجام شده برای نگهداری و عملیات پیش‌تحکیمی المان‌های زیر به کار رفته است، که مشخصات هر یک از آنها در جدول ۲ آورده شده است.

مطالعه عددی تاثیر پیش‌برش مکانیکی و بولت فایبرگلاس در عبور تونل البرز از زون گسل خورده‌ی کندوان: ص ۹۹-۱۱۲

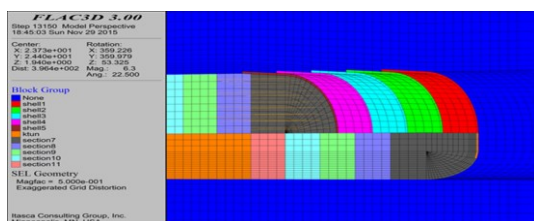
- بخش پیش‌برش مکانیکی به صورت محیط معادل الاستیک با تقویت مصالح و اختصاص مشخصات دوغاب مورد استفاده در این روش به ناحیه مورد نظر مدل شده است. طول هر برش ۴ متر و میزان همپوشانی ۰/۸ متر در نظر گرفته شده است.
- مدل‌سازی بولت‌های فایبرگلاس و بولت‌های سقف با استفاده از المان ساختاری کابل (*Cable structural element*) انجام شده است. بولت‌های فایبرگلاس دارای طول ۱۲ متر و بولت‌های مورد استفاده در سقف ۶ و ۹ متر هستند.
- به منظور مدلسازی نگهداری فولادی که از نوع توپشنت-هینزمن *TH-44* است، از المان ساختاری بیم (*Beam structural element*) استفاده شده است، برای اتصال نگهداری فولادی نیز از لارده‌های فولادی استفاده شده است.
- برای مدلسازی شاتکریت و بتن مورد استفاده در تونل، از المان ساختاری شل (*Shell structural element*) استفاده شده است. ضخامت شاتکریت در جبهه‌کار ۵ سانتی‌متر، در کف تونل در بخش بحرانی گسل ۵۰ سانتی‌متر و در سایر قسمت‌ها ۳۰ سانتی-متر و در دیوار و سقف ۳۰ سانتی‌متر است.

جدول ۲- مشخصات اجزاء سیستم‌های نگهداری و پیش‌تحکیمی (Lunardi, 2012; Tehran-Shomal Freeway co, 2008)

مشخصات	نوع سیستم	پیش‌برش مکانیکی	شاتکریت	بولت سقف	بولت فایبرگلاس	نگهداری فولادی
مدول یانگ $(Gpa) E$	۱۸٫۲	۱۴٫۱	۲۰۰	۴۵	۲۱۰	
ضریب پواسون	۰٫۲۱	۰٫۲	—	—	—	۰٫۲۵
سطح مقطع عرضی (m^2)	—	—	$10^{-4} \times 810384$	$10^{-3} \times 2826$	$10^{-4} \times 56$	
مقاومت کششی تسلیم (kN)	—	—	۵۰۰	۴۵۰	—	
مقاومت فشاری تسلیم (kN)	—	—	۴۰۰	۳۶۰	—	
سختی دوغاب بر واحد طول $(MN/m/m)$	—	—	۷۶۴۸	۷۶۴۸	—	
مقاوت چسبندگی دوغاب بر واحد طول (MN/m)	—	—	۲٫۲	۱٫۲	—	
محیط موثر دوغاب (m)	—	—	۰٫۲۵	۰٫۱۱۳۱	—	
گشتاور دوم نسبت به محور y المان (m^4)	—	—	—	—	—	$10^{-6} \times 1265$
گشتاور دوم نسبت به محور z المان (m^4)	—	—	—	—	—	$10^{-6} \times 1564$
گشتاور قطبی اینرسی (m^4)	—	—	—	—	—	$10^{-6} \times 2829$

فاصله‌ای بیش از ۱٫۵ برابر قطر تونل قرار داشته باشد (Lunardi, 2012). با رسیدن به زون گسل‌خورده ابتدا عملیات ایجاد پوشش پیش‌برش مکانیکی انجام می‌شود و خواص الاستیک مناسب به آن اختصاص داده می‌شود، سپس جبهه‌کار تونل با شاتکریت پوشیده شده و در مرحله بعدی

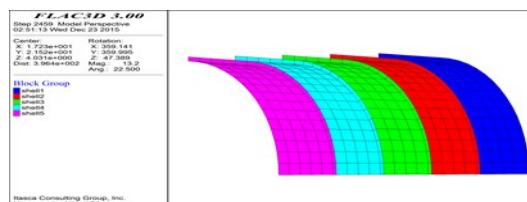
نحوه انجام عملیات به این صورت است که ابتدا تونل به صورت عادی و در گام‌های ۳ متری حفر می‌شود و پس از نزدیک شدن به منطقه گسل‌خورده، عملیات به صورت دو مرحله‌ای (فوقانی و تحتانی) ادامه می‌یابد، در روش پیش برش مکانیکی حفاری بخش کف تونل همواره باید در



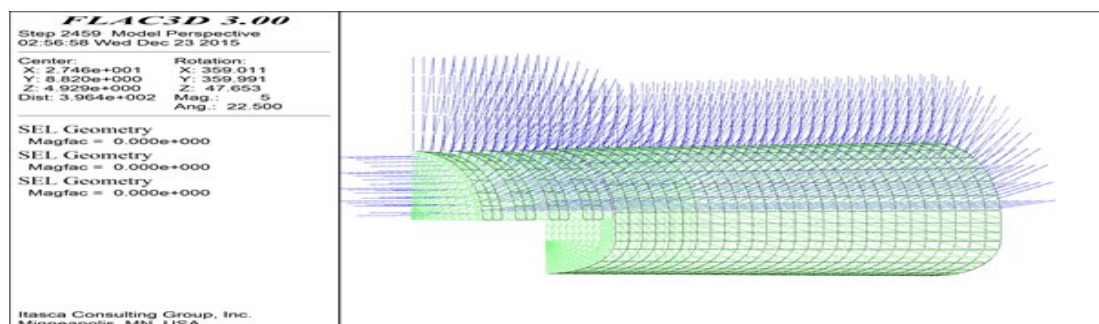
شکل ۶- روش پیش‌برش مکانیکی و بولت‌های فایبرگلاس

پس از این که نصب بولت‌های فایبرگلاس پایان می‌یابد، انجام عملیات حفاری آغاز می‌گردد و در زیر پوشش ایجاد شده توسط روش پیش‌برش مکانیکی، نگهداری فولادی نصب می‌شود. برای هر گام پیشروی سه قاب فولادی در نظر گرفته شده است که به فواصل ۱ متر از یکدیگر نصب می‌شوند. پس از نصب نگهداری فولادی، بولت‌های ۹ متری به فواصل ۱٫۲۵ متر و با زاویه جانبی ۷٫۵ درجه نسبت به یکدیگر نصب می‌شوند. به منظور مشخص شدن تاثیر استفاده از روش‌های پیش‌تحکیمی، سیستم نگهداری در تمامی چهار حالت یکسان در نظر گرفته شده است. در شکل ۷ نگهداری‌های به کار گرفته شده در مدل‌سازی آورده شده است.

بولت‌های فایبرگلاس در سینه کار تونل نصب می‌شوند. به منظور مدل‌سازی بولت‌ها از اجزاء ساختاری خطی با رفتار الاستوپلاستیک استفاده شده است (Dias, 2011) هر بولت ۱۲ متر طول دارد و از ۱۵ جزء ساختاری تشکیل شده است، با توجه به اینکه هر گام پیشروی ۳٫۲ متر می‌باشد، با هر مرحله از پیشروی تونل ۴ جزء ساختاری بولت تخریب می‌شود. پس از سه گام پیشروی طول بولت‌ها به کمتر از ۴ متر می‌رسد و عملیات نصب بولت‌ها مجدداً تکرار می‌شود (Aksoy (Buhan, Bourgeois, & Hassen, & Onargan, 2010) در شکل ۵ چگونگی ایجاد پوشش با روش پیش‌برش مکانیکی و در شکل ۶ جانمایی بولت‌ها که به صورت چهار دایره هم‌مرکز می‌باشد، آورده شده است.



شکل ۵- پوشش ایجاد شده در روش پیش‌برش مکانیکی



شکل ۷- نگهداری به کار رفته در مدل‌سازی

د) استفاده توان از پیش‌برش مکانیکی و بولت فایبرگلاس. در شکل ۸ وضعیت کنترهای جابجایی در چهار حالت مختلف آورده شده است. مطابق شکل ۸-الف در صورت عدم استفاده از روش‌های پیش‌تحکیمی جابجایی‌ها در اطراف تونل به بیشترین مقدار خود رسیده و تونل ناپایدار می‌شود. مطابق شکل ۸-ب استفاده از روش پیش‌برش مکانیکی می‌تواند موجب کاهش جابجایی‌های محیطی تونل به

۴-۲- اجرای مدل‌ها و تفسیر نتایج مدل برای چهار حالت مختلف ساخته شده و در آخرین مرحله از فرآیند مدل‌سازی، حفاری و تحلیل سیستم‌های نگهداری مورد استفاده، نتایج به دست آمده با هم مقایسه و تفسیر شده‌اند.

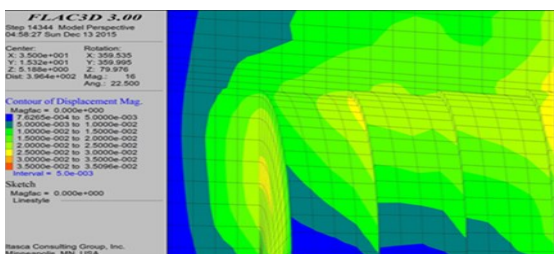
- الف) عدم استفاده از روش‌های پیش‌تحکیمی
- ب) استفاده از پیش‌برش مکانیکی
- ج) استفاده از بولت فایبرگلاس

مطالعه عددی تاثیر پیش‌برش مکانیکی و بولت فایبرگلاس در عبور تونل البرز از زون گسل خورده‌ی کندوان: ص ۹۹-۱۱۲

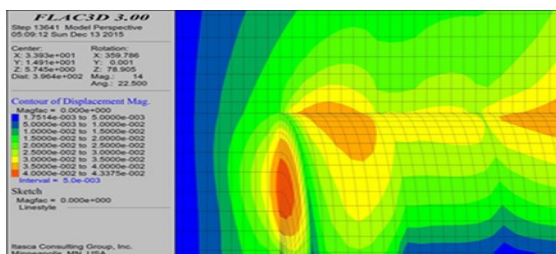
استفاده توامان از این روش‌ها، جابجایی‌ها در اطراف محدوده حفاری در زون گسل خورده به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. در این شکل اثر استفاده از بولت‌های فایبرگلاس بر وضعیت جابجایی جبهه‌کار کاملاً مشهود است و به جای داشتن کنتور جابجایی به صورت یک قوس بزرگ، کنتور جابجایی در جبهه‌کار به چند قوس کوچک تقسیم شده است، که تعداد این قوس‌ها بستگی به تعداد بولت‌های به کار رفته در راستای عمودی جبهه‌کار دارد.

مقدار قابل توجهی شود. اگرچه این روش به تنهایی قادر به کنترل جابجایی جبهه‌کار تونل نخواهد بود. از طرف دیگر استفاده از بولت‌های فایبرگلاس به تنهایی مطابق آنچه در شکل ۸-ج نشان داده شده است باعث کاهش قابل توجه جابجایی‌های جبهه‌کار می‌شود ولی بر جابجایی‌های محیطی تونل تقریباً اثری نخواهد داشت.

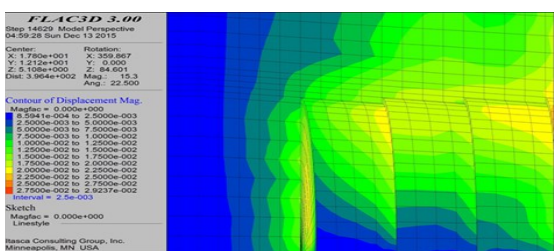
بنابراین به منظور کنترل هم زمان جابجایی‌های محیطی و جبهه‌کار تونل از روش پیش‌برش مکانیکی همراه با بولت‌های فایبرگلاس استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۸-د قابل مشاهده است، به



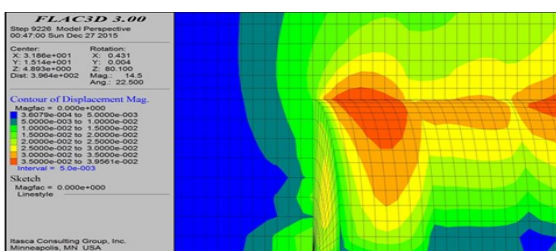
(ب) استفاده از پیش‌برش مکانیکی



(ف) عدم استفاده از روش‌های پیش‌تحکیمی



(د) استفاده توامان از پیش‌برش مکانیکی و بولت فایبرگلاس



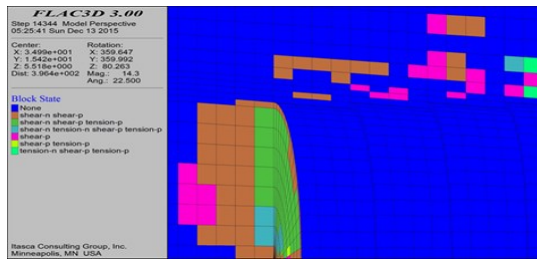
(ج) استفاده از بولت‌های فایبرگلاس

شکل ۸- کنتورهای جابجایی در چهار حالت مختلف

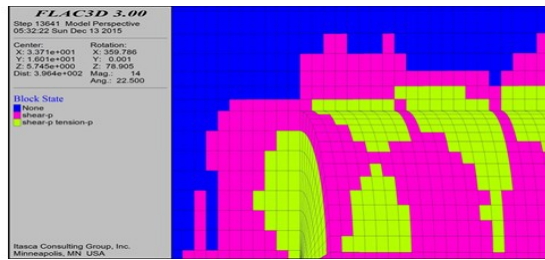
حالت مختلف مدل‌سازی، به صورت شماتیک در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با استفاده همزمان از روش پیش‌برش مکانیکی و بولت‌های فایبرگلاس، میزان همگرایی‌ها در سقف، قوس بالایی و دیواره تونل به ترتیب ۴۹، ۳۴ و ۶۱ درصد و همچنین میزان جابجایی جبهه‌کار ۶۰ درصد کاهش یافته است. بنابراین استفاده همزمان از این دو روش بهترین عملکرد را در کاهش همگرایی‌ها در عبور تونل از ناحیه گسل خورده خواهد داشت.

در شکل ۹ مناطق پلاستیک مدل در چهار حالت مذکور آورده شده است. با توجه به این اشکال، با استفاده از بولت‌های فایبرگلاس، از تعداد زون‌های پلاستیک در جبهه‌کار تونل کاسته می‌شود و نتیجه آن افزایش پایداری جبهه‌کار تونل و کاهش جابجایی‌های آن است. همچنین استفاده از روش پیش‌برش مکانیکی، موجب کاهش تعداد زون‌های پلاستیک در اطراف فضای حفر شده و انجام عملیات حفاری در زیر فضای از پیش نگهداری شده می‌شود. میزان همگرایی و جابجایی جبهه‌کار تونل برای چهار

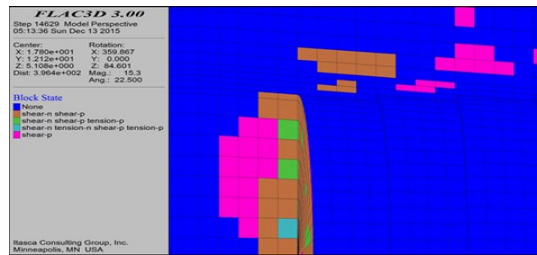
دوفصلنامه‌ی علمی-پژوهشی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی؛ دوره‌ی ۵؛ شماره‌ی ۱؛ تابستان ۱۳۹۵



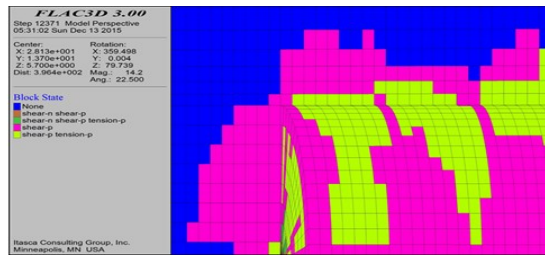
(ب) استفاده از پیش‌برش مکانیکی



(الف) عدم استفاده از روش‌های پیش‌تحکیمی



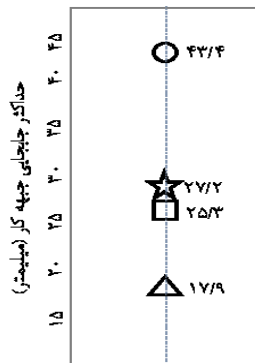
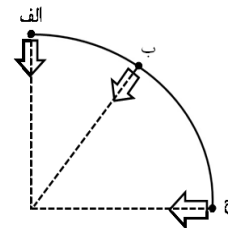
(د) استفاده از پیش‌برش مکانیکی و بولت فایبرگلاس



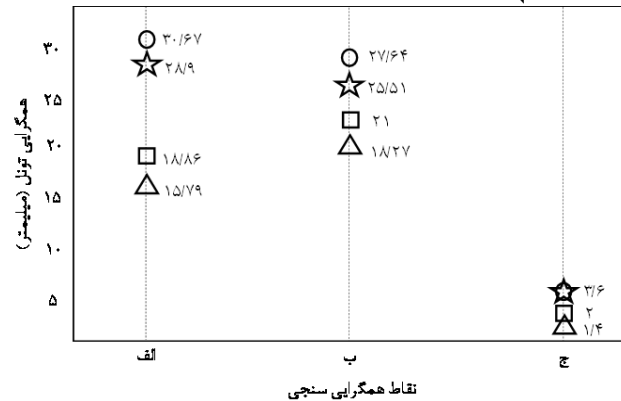
(ج) استفاده از بولت‌های فایبرگلاس

شکل ۹- نواحی پلاستیک در چهار حالت مختلف

- الف، ب، ج: نقاط سنجش همگرایی
 ○ عدم استفاده از روش‌های پیش‌تحکیمی
 ☆ استفاده از بولت فایبرگلاس
 □ استفاده از پیش‌برش مکانیکی
 △ استفاده توامان از پیش‌برش مکانیکی و بولت فایبرگلاس



(ب) جابجایی جنبه کار



(الف) همگرایی سقف و دیوارها

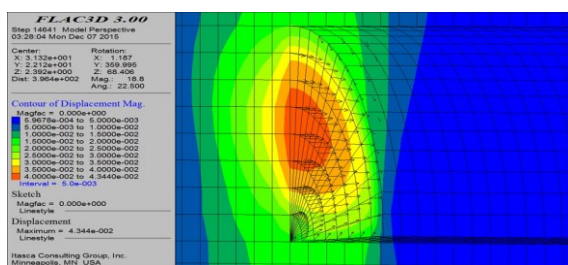
شکل ۱۰- سنجش همگرایی و جابجایی جنبه کار تونل در چهار حالت مختلف

مطالعه عددی تاثیر پیش‌برش مکانیکی و بولت فایبرگلاس در عبور تونل البرز از زون گسل خورده‌ی کندوان: ص ۹۹-۱۱۲

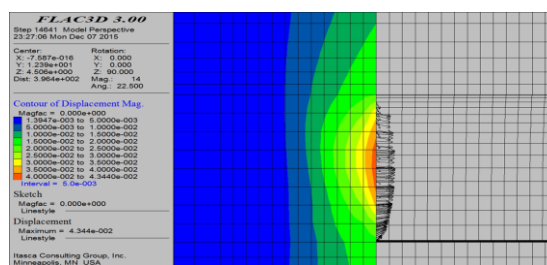
استفاده شده است. با استفاده از این بولت‌ها پارامتر-های مکانیکی جبهه‌کار افزایش می‌یابد و در نتیجه مقاومت بیشتری در برابر تنش‌های محیطی از خود نشان می‌دهد و در نهایت موجب کوچک شدن ناحیه پلاستیک جبهه‌کار و کاهش جابجایی‌ها در این ناحیه می‌شود. میزان حداکثر جابجایی‌های جبهه‌کار در این حالت ۲۷٫۲ میلی‌متر است.

در شکل ۱۴ وضعیت جابجایی‌های جبهه‌کار با استفاده هم‌زمان از بولت‌های فایبرگلاس و پیش‌برش مکانیکی آورده شده است و میزان حداکثر جابجایی جبهه‌کار به ۱۷٫۹ میلی‌متر رسیده است.

کنتورهای جابجایی جبهه‌کار تونل برای چهار حالت مدل‌سازی مورد بررسی در شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ نشان داده شده است. در شکل ۱۱ ملاحظه می‌شود، به دلیل عدم استفاده از روش‌های پیش‌تحکیمی میزان جابجایی‌های جبهه‌کار تونل به ۴۳٫۴ میلی‌متر می‌رسد. در شکل ۱۲ با کاربرد روش پیش‌برش مکانیکی حداکثر جابجایی جبهه‌کار به ۲۵٫۳ میلی‌متر کاهش پیدا کرده است که دلیل آن کاهش تنش‌های وارده بر بخش جلوی جبهه‌کار به دلیل پوشش بتنی ایجاد شده به واسطه پیش‌برش مکانیکی و در نتیجه کوچک‌تر شدن ناحیه پلاستیک جبهه‌کار است. در شکل ۱۳ از بولت‌های فایبرگلاس به منظور پیش‌تحکیم جبهه‌کار

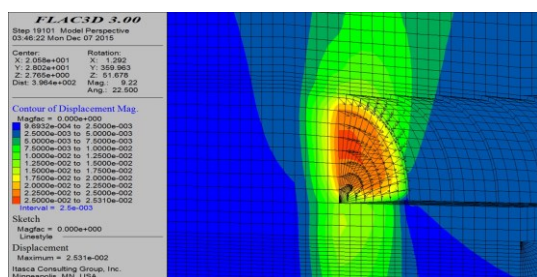


(ب) نمای مایل

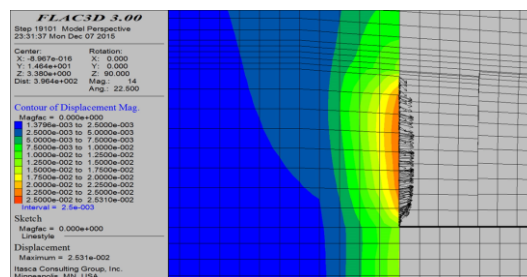


(ف) نمای جانبی

شکل ۱۱- جابجایی جبهه‌کار در حالت عدم استفاده از روش‌های پیش‌تحکیمی



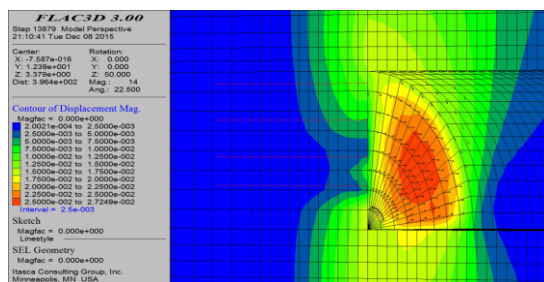
(ب) نمای مایل



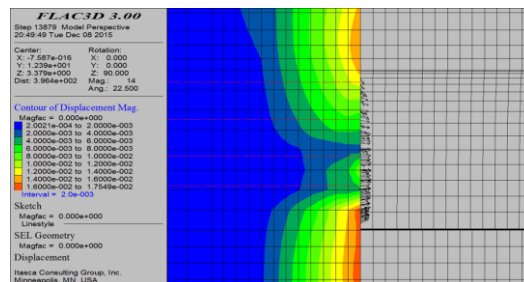
(ف) نمای جانبی

شکل ۱۲- جابجایی جبهه‌کار در حالت استفاده از پیش‌برش مکانیکی

دوفصلنامه علمی-پژوهشی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی؛ دوره ۵؛ شماره ۱؛ تابستان ۱۳۹۵

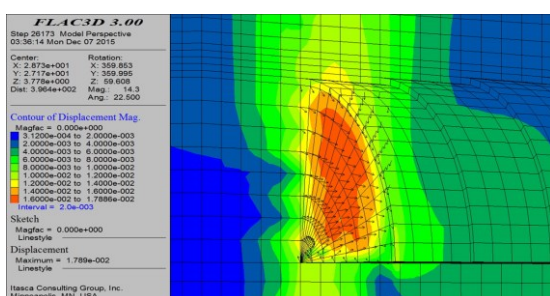


ب) نمای مایل

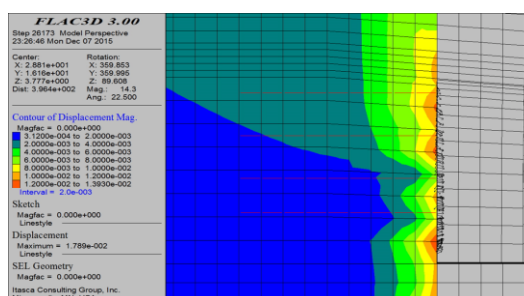


الف) نمای جانبی

شکل ۱۳- جابجایی جبهه کار در حالت استفاده از بولت فایبرگلاس



ب) نمای مایل



الف) نمای جانبی

شکل ۱۴- جابجایی جبهه کار در حالت استفاده توامان از بولت فایبرگلاس و پیش برش مکانیکی

دچار گسیختگی خواهند شد. در شکل ۱۷ از روش پیش برش مکانیکی استفاده شده است و با توجه به اینکه این روش از روش های پیش تحکیمی حفاظتی می باشد، میزان نیروهای وارد شده بر بولت ها در مقطعی که از این روش استفاده می شود، نسبت به حالات قبلی کاهش یافته و مانع گسیختگی بولت ها می شود. شکل ۱۸ نشان دهنده استفاده هم زمان از بولت های فایبرگلاس در جبهه کار و پیش برش مکانیکی در پیرامون جبهه کار می باشد، این حالت از لحاظ نیروهای وارده بر بولت ها شباهت زیادی به حالت قبلی داشته و میزان ماکزیمم نیروی وارده بر بولت ها در هر دو حالت ۴۰۵/۵ کیلونیوتن می باشد.

دلیل این تشابه در وضعیت توزیع نیروهای وارد بر بولت های سقف کاملا مشهود است، زیرا مشخص است که این نیرو مربوط به بخشی از تونل می باشد که از روش های پیش تحکیمی استفاده نشده است و بنابراین به دلیل تشابه سیستم نگهداری به کار گرفته شده، وضعیت توزیع نیروها و ماکزیمم نیروی وارد بر بولت ها نیز مشابه یکدیگر خواهد بود.

۳-۴- بررسی عملکرد سیستم نگهداری همان طور که در بخش ۴-۱ گفته شد، به منظور مدل سازی بولت ها از المان ساختاری کابل استفاده شده است و دلیل آن مقاومت خمشی بسیار پایین بولت ها در مقایسه با مقاومت کششی آن ها می باشد. به همین دلیل به منظور مقایسه تاثیر استفاده از روش های پیش تحکیمی بر بولت های سقف در شکل های ۱۵ تا ۱۸ میزان نیروهای کششی ایجاد شده در بولت ها در حالت های مختلف با یکدیگر مقایسه شده اند.

در شکل ۱۵ از روش های پیش تحکیمی استفاده نشده است و مشاهده می شود که میزان حداکثر نیروی کششی به ۵۰۰ کیلونیوتن می رسد. مطابق جدول ۲ مقاومت کششی بولت های سقف ۵۰۰ کیلونیوتن می باشد، بنابراین در این ناحیه با گسیختگی بولت ها مواجه خواهیم شد. در شکل ۱۶ از بولت های فایبرگلاس به عنوان عامل پیش تحکیمی استفاده شده است. همان طور که مشاهده می شود، بولت های فایبرگلاس تاثیر چندانی بر نیروهای وارد بر بولت های سقف ندارند و در این حالت نیز نیروهای وارد بر بولت ها بیش از مقاومت کششی آن ها می باشد و مانند حالت قبل بولت ها

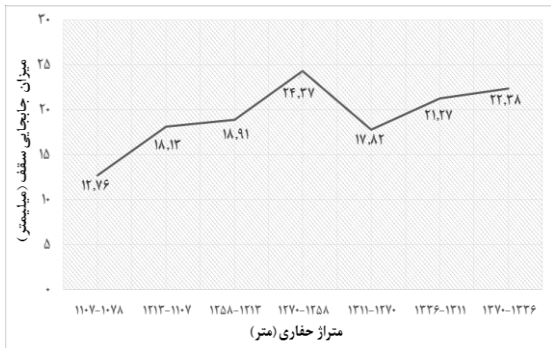
مطالعه عددی تاثیر پیش‌برش مکانیکی و بولت فایبرگلاس در عبور تونل البرز از زون گسل خوردگی کندوان: ص ۹۹-۱۱۲

پذیرفته است و پارامترهای ژئومکانیکی مورد استفاده در مدل-سازی قابل اعتماد هستند.

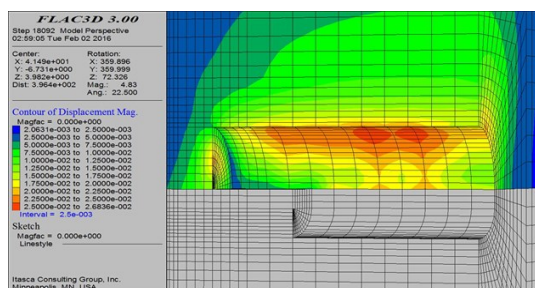
مدل‌سازی برای مترائ ۳۰۵۸-۲۹۷۳ تونل البرز انجام شده است در حالیکه عملیات حفاری در مترائ ۲۳۵۰ در حال انجام است و هنوز به ناحیه گسل خورده نرسیده است. بنابراین داده‌های ابزار دقیق برای این ناحیه موجود نیست.

از طرف دیگر به دلیل شباهت زیاد مشخصات ژئومکانیکی و زمین‌شناسی مترائ ۱۲۵۸-۱۲۷۰ که در ناحیه حفاری و ایزابندی شده قرار دارد با مترائ ۲۹۷۳-۳۰۰۷ که در ناحیه مدلسازی شده قرار دارد، به منظور صحت‌سنجی مدل از داده‌های ابزار دقیق این ناحیه استفاده شده است.

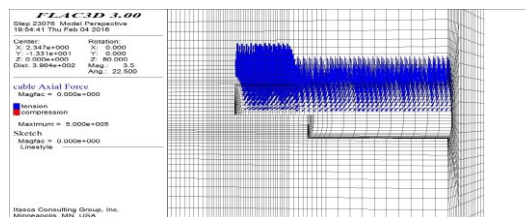
شکل ۱۹ نشان‌دهنده مقادیر حداکثر جابجایی ثبت شده در مترائ ۱۰۷۸-۱۳۷۰ است. مطابق این جدول حداکثر جابجایی در مترائ ۱۲۵۸-۱۲۷۰ برابر ۲۴/۳۷ میلی‌متر است. از طرف دیگر مقادیر حداکثر جابجایی بدست آمده در مدل عددی برای مترائ ۲۹۷۳-۳۰۰۷ برابر ۲۶/۸۳۶ میلی‌متر است که مطابقت خوبی را نشان می‌دهد. کنتورهای جابجایی سقف و دیوارهای تونل برای مترائ ۲۹۷۳-۳۰۰۷ در شکل ۲۰ آورده شده است.



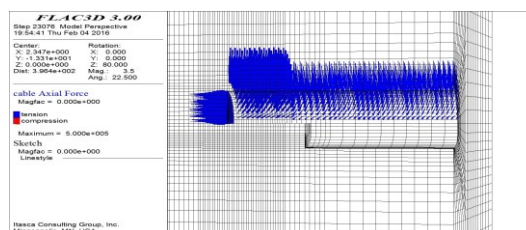
شکل ۱۹- مقادیر جابجایی حداکثر در مترائ ۱۰۷۸-۱۳۷۰



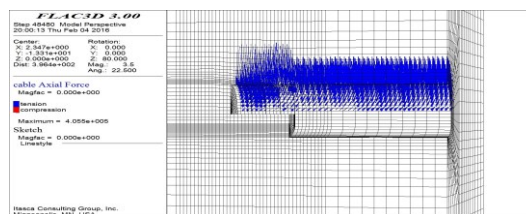
شکل ۲۰- وضعیت جابجایی‌های دیواره و سقف بر اثر حفاری مترائ ۲۹۷۳ تا ۳۰۰۷



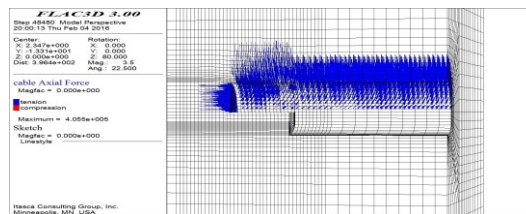
شکل ۱۵- نیروهای وارد بر بولت‌ها در حالت عدم استفاده از روش‌های پیش‌تحکیمی



شکل ۱۶- نیروهای وارد بر بولت‌ها در حالت استفاده از روش بولت‌های فایبرگلاس



شکل ۱۷- نیروهای وارد بر بولت‌ها در حالت استفاده از روش پیش‌برش مکانیکی



شکل ۱۸- نیروهای وارد بر بولت‌ها در حالت استفاده از روش پیش‌برش مکانیکی و بولت‌های فایبرگلاس

۵- مقایسه نتایج مدل‌سازی با اندازه‌گیری‌های برج

با توجه به حفر کامل یک تونل دسترسی در سال ۱۳۸۷ مطالعات آزمایشگاهی کافی بر روی سنگ‌های ناحیه صورت

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله تاثیر استفاده از روش‌های پیش‌برش مکانیکی و بولت فایبرگلاس به‌طور مجزا و به صورت توأمان به منظور انجام عملیات پیش‌تحکیمی در محل عبور تونل البرزاز بخش بحرانی زون گسل خورده‌کنندوان به صورت عددی مورد تحلیل بررسی قرار گرفته است. بر اساس تحلیل‌های انجام شده نتایج زیر حاصل شد:

عدم استفاده از روش‌های پیش‌تحکیمی موجب بزرگتر شدن ناحیه پلاستیک اطراف فضای حفاری و در نتیجه افزایش جابجایی‌های تونل و جبهه‌کار آن می‌شود.

- استفاده از روش بولت‌های فایبرگلاس به دلیل افزایش مشخصات مکانیکی جبهه‌کار، ناحیه پلاستیک آن را کاهش می‌دهد که نتیجه آن کاهش جابجایی‌های جبهه‌کار به میزان ۳۷ درصد می‌باشد.
- روش پیش‌برش مکانیکی فضای پیرامونی جبهه‌کار را تحت پوشش قرار می‌دهد و در نتیجه میزان تنش‌های وارده بر آن کاهش می‌یابد که این امر

موجب کاهش ناحیه پلاستیک شده و نتیجه نهایی آن کاهش جابجایی‌های دیواره، قوس بالایی، سقف و جبهه‌کار تونل به ترتیب به میزان ۴۴/۴، ۲۴، ۳۸/۵ و ۴۱/۷ درصد می‌باشد.

- با استفاده هم‌زمان از روش‌های پیش‌برش مکانیکی و بولت‌های فایبرگلاس و در واقع استفاده توأمان از روش‌های پیش‌تحکیمی حفاظتی و تقویتی، بهترین نتایج به‌دست آمدند و جابجایی‌های دیواره، قوس بالایی، سقف و جبهه‌کار تونل به ترتیب به میزان ۶۱/۱، ۳۳/۹، ۴۸/۵ و ۵۸/۷ کاهش یافتند.
- عدم استفاده از روش‌های پیش‌تحکیمی موجب گسیختگی برخی از بولت‌ها در ناحیه بحرانی گسل شد. استفاده از روش بولت‌های فایبرگلاس نیز به دلیل تاثیر بسیار ناچیز بر تحکیم سقف، توانایی جلوگیری از این اتفاق را نداشتند. اما روش پیش‌برش مکانیکی با توجه به اینکه یک روش حفاظتی محسوب می‌شود، توانایی خوبی در کاهش نیروهای وارد بر بولت‌های سقف داشت.

۷- مراجع

- Aksoy, C., & Onargan, T. (2010). The role of umbrella arch and face bolt as deformation preventing support system in preventing building damages. *Tunneling and Underground Space Technology*, 25, 553-559.
- Altamura, G., & Miliziano, S. (2006). Three-dimensional modeling for the widening of existing tunnels.
- Bougard, J. (1988). Mechanical pre-cutting method. *Tunneling and Underground Space Technology*, 3, 163-167.
- Buhan, P., Bourgeois, E., & Hassen, G. (2008). Numerical simulation of bolt supported tunnels by means of a multiphase model conceived as an improved homogenization procedure. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 32(13), 1597-1615.
- Calvello, M., & Taylor, R. (1999). Centrifuge modelling of a pile-reinforced tunnel heading. *Proceedings of Geotechnical Aspect of Underground Construction in Soft Ground*, (pp. 313-318). Balkema, Rotterdam.
- Dias, D. (2011). Convergence-confinement approach for designing tunnel face reinforcement by horizontal bolting. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26, 517-523.
- Focaracci, A., & Lunardi, P. (1998). Design and construction of a station on Rome Metro. *Tunnels and Tunneling International*, 27-32.
- Funatsu, T., Hoshino, H., Sawae, H., & Shimizu, H. (2008). Numerical analysis to better understand the

مطالعه عددی تاثیر پیش‌برش مکانیکی و بولت فایبرگلاس در عبور تونل البرز از زون گسل خورده‌ی کندوان: ص ۹۹-۱۱۲

mechanism of the effects of ground supports and reinforcements on the stability of tunnels using the distinct element method. *Tunneling and Underground Space Technology*, 23, 561–573.

Giniowski, I. (2008). *Geological report of Alborz tunnel*. Tehran-Shomal Freeway Co.

Hisatake, M., & Ohno, S. (2008). Effects of pipe roof supports and the excavation method on the displacements above a tunnel face. 23, 120-127.

Kamata, H., & Mashimo, H. (2003). Centrifuge model test of tunnel face reinforcement by bolting. *Tunneling and Underground Space Technology*, 18, 205–212.

Li, B., Qi, T., Wang, Z., & Yang, L. (2012). Back analysis of grouted rock bolt pullout strength parameters from field tests. 28, 345–349.

Lunardi, P. (2012). *Design and construction of tunnels*. Italy: Springer.

Lunardi, P., & Focaracci, A. (2003). Widening the load at Nazzano. *Tunnels and Tunneling International*, 16-19.

Tehran-Shomal Freeway co. (2008). *Detailed reports and maps of Alborz tunnel*.

Walsum, E. (1991). Mechanical pre-cutting, a rediscovered tunneling technique. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 24, 65-79.

Wong, K., Ng, C., Chen, Y., & Bian, X. (2012). Centrifuge and numerical investigation of passive failure of tunnel face in sand. *Tunneling and Underground Space Technology*, 28, 297–303.

Zhang, L. (2004). *Engineering properties of rocks* (Vol. 4). (J. A. Hudson, Ed.) Elsevier Geo-Engineering book.

Zhang, Z., Li, H., Liu, H., Li, G., & Shi, X. (2014). Load transferring mechanism of pipe umbrella support in shallow-buried tunnels. *Tunneling and Underground Space Technology*, 43, 213–221.