نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی
Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)
tuse.shahroodut.ac.ir
دوره‌ی ۵- شماره‌ی ۱/تابستان ۱۳۹۵

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 دانشکده های فنی دانشگاه تهران
۲- استادیار؛ دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده های 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
تونل البرز
گسل کندوان
پیش‌برش مکانیکی
بولت فایبرگلاس
مدلسازی عددی

چکیده

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 اجتناب ناپذیر 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 *FLAC3D* 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 پیش تحکیمی حفاظتی و تقویتی تقسیم می‌شوند، که در گروه اول به بهسازی پیرامون جبهه کار پیشروی به منظور ایجاد شرایط محافظتی برای حفظ جبهه‌کار و کاهش تنش‌های وارده بر آن و در گروه دوم به طور مستقیم به بهسازی جبهه کار 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 امریکا توسط روشی مشابه پیش برش مکانیکی پیش از انجام عملیات آتشکاری 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 پیش برش مکانیکی هیچ کاربرد دیگری به عنوان یک شیوه

* تهران، تقاطع خیابان کارگر شمالی و اتوبان شهید گمنام(چهارراه امیر آباد)، روبروی کوچه نهم، ساختمان شماره۲، پردیس دانشکده های فنی دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی معدن ؛ کدپستی: ۱۴۳۹۹۵۷۱۳۱؛ شماره‌ی تلفن: ۸۲۰۸۴۳۹۸-۰۲۱؛ دورنگار: ۸۸۰۰۸۸۳۸-۰۲۱؛ رایانامه: mh.khosravi@ut.ac.ir

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 فونتنای-بویس *Fontenay-Bois* در نزدیکی پاریس که در خاک های چسبنده و شیل حفر شده است، تونل‌های فونتنای 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 جبهه‌کار تونل است. به منظور جلوگیری از جابجایی جبهه‌کار به سمت داخل فضای حفر شده، روش‌های مختلفی از قبیل لوله‌های تزریق شده (*Prepoling*)، بولت های فایبرگلاس، روش های پیش‌تحکیمی عمودی، تزریق با فشارِبالا و انجماد زمین به کار می‌رود (*Pietro, 2008*). موفقیت استفاده از لوله‌های تزریق شده به منظور تقویت جبهه‌کار 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 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 می باشد. بولت های فایبرگلاس با طول ها و جانمایی های مختلف بر اساس وضعیت جبهه‌کار و مساحت مقطع تونل مورد استفاده قرار می‌گیرند. با کاربرد این بولت ها علاوه بر کاهش جابجایی جبهه‌کار، از میزان جابجایی‌های تاج و دیواره‌ها نیز کاسته می‌شود (*Aksoy & Onargan, 2010*). کالولو و تیلور (*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 جبهه‌کار به حداقل کاهش می‌یابد.

با توجه به موارد مذکور مطالعات مختلفی در زمینه کاربرد بولت های 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 هم مرکز به منظور کنترل جابجایی‌ها و پایدار سازی تونل البرز برای عبور از زون گسل‌خورده کندوان پرداخته می‌شود.

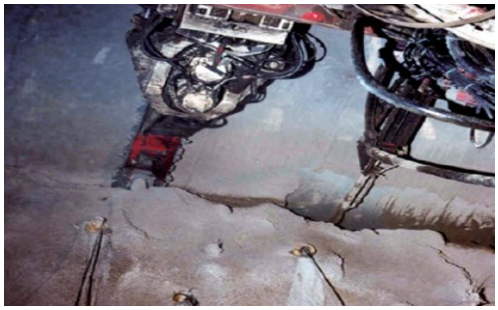
۲- روش‌های پیش‌تحکیمی

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

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 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)*.

الف) نمایی کلی از ماشین



ب) عملیات پیش برش و تزریق همزمان

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

۲-۲- بولت فایبرگلاس

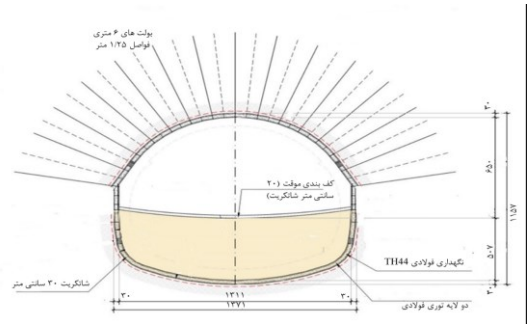
در این روش تعدادی چال به صورت خشک در جبهه‌کار حفر می‌شود که طول این چال‌ها بیشتر از قطر تونل است و نسبت به محور تونل زاویه‌دار هستند و حتی ممکن است به خارج از محدوده جبهه‌کار نیز وارد شوند. پس از حفر چال‌ها، بولت‌های فایبرگلاس مخصوص در داخل چال‌ها قرار می‌گیرند و بلافاصله پس از آن دوغاب سیمان به داخل 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 بولت ها. سطح بیرونی بولت های لوله‌ای معمولا 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)*.

۳- معرفی پروژه

۳-۱- تونل البرز

مجموعه تونل‌های البرز واقع در منطقه ۲ آزاد راه تهران شمال با طول ۶۴۰۰ متر، طویل‌ترین 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)*.



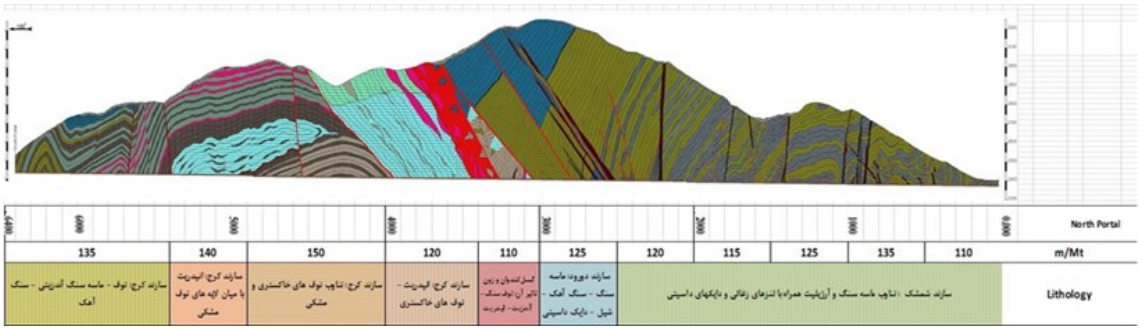
شکل ۲- مقطع تونل البرز همراه با نگهداری‌های انجام شده
(Tehran-Shomal Freeway co, 2008)

۳-۲- زمین‌شناسی منطقه

تونل شرقی البرز در زون مرکزی واقع شده و از تنوع لیتولوژیکی و پیچیدگی ساختاری ویژه‌ای برخوردار است به‌طوری‌که حفاری آن از شمال به جنوب در سه سازند شمشک (۲۵۰۰متر)، درود (۴۶۰ متر) و کرج (۳۳۶۶ متر) صورت خواهد گرفت. هر یک از سازندهای مذکور خود از تنوع سنگ شناسی گسترده‌ای برخوردارند به‌طوری‌که حفاری در مجموعه‌ای از واحدهای سنگ تبخیری، آذرین، آذرآواری و رسوبی قابل پیش‌بینی است. پروفیل زمین‌شناسی تونل در شکل ۳ آورده شده است.

مجموعه گسل کندوان با محدوده‌ای به عرض ۴۰۰ متر، که مرز احتمالی بین سنگ‌های سازند درود و سازند کرج است، از جمله اختصاصات ساختاری تونل مذکور محسوب می‌شود. ساختار زمین‌شناسی در این محدوده بسیار دشوار و پیچیده است و لیتولوژی سنگ‌های توده نیز بسیار متنوع است. در این محدوده ماسه‌سنگ، آرژلیت، مارن، آنیدریت، آندزیت، توف و توف ماسه‌سنگی قرار دارند.

در محدوده ۳۰۲۳ – ۳۰۰۷ تخریب تکتونیکی بزرگی مشاهده می‌شود. پرکننده این گسل در محدوده ۳۰۱۵ – ۳۰۰۷ مواد برشی با سیمانته رسی می‌باشد به‌طوری‌که خرده سنگ‌های نیمه‌کروی با ابعاد ۱۰-۳ سانتی‌متر توسط رس سیمانته شده‌اند. به همین دلیل، توده‌سنگ در این محدوده نسبتاً پایدار بوده و موارد ریزش سنگ در این ناحیه مشاهده نشده است. در ادامه، در محدوده ۳۰۲۳ – ۳۰۱۵ گسل توسط مصالح سست و سیمانته‌نشده (قلوه سنگ، خرده‌سنگ و رس) پر شده است *(Giniowski, 2008)*.



شکل ۳- پروفیل زمین‌شناسی تونل (Giniowski, 2008)

۳-۳- مشخصات ژئومکانیکی ناحیه مورد مطالعه

با توجه به حفر یک تونل اکتشافی با قطر ۵/۲، نمونه‌هایی جهت رده‌بندی و تعیین پارامترهای ژئومکانیکی سنگ‌های دربرگیرنده تونل برداشت شده است. با توجه به نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های ژئوتکنیک بر روی نمونه‌ها، پارامترهای ژئومکانیکی ناحیه موردنظر در جدول ۱ نشان داده شده است.

به منظور تعیین نسبت تنش افقی به عمودی روابط زیادی ارائه شده است که با توجه به وضعیت گسل که از نوع گسل‌های نرمال است، از رابطه ارائه شده توسط رامل استفاده می‌شود *(Zhang L. , 2004)*:

$$k = 0.5 + 150/Z \qquad (۱)$$

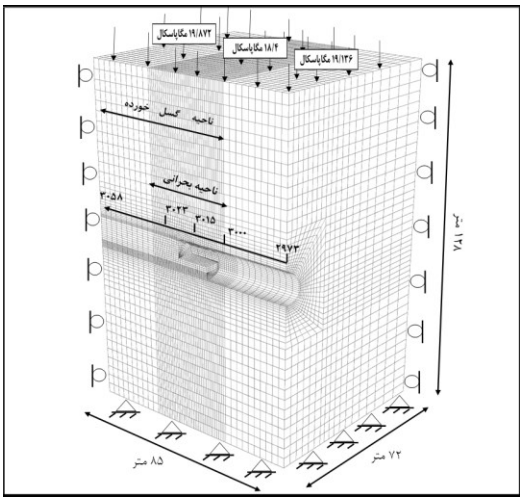
بنابراین با توجه به رو باره ۸۰۰ متری تونل، مقدار k=۰/۶۸۷۵ در نظر گرفته می‌شود.

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

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

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 غلتکی 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 سه گره‌ای 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.



شکل ۴- نحوه مش‌بندی و چگونگی مرزهای مدل

۴-۱- نحوه حفاری و اعمال نگهداری

حفاری تونل به صورت دو مرحله‌ای و با کاربرد روش‌های پیش‌برش مکانیکی در پیرامون جبهه‌کار و بولت‌های فایبرگلاس در درون جبهه‌کار به منظور بهسازی ناحیه گسل-خورده 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.

- 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 تویشنت-هینزمن *TH-44* است، از المان ساختاری بیم (*Beam structural element*) استفاده شده است، برای اتصال نگهداری فولادی نیز از لاره‌های 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.

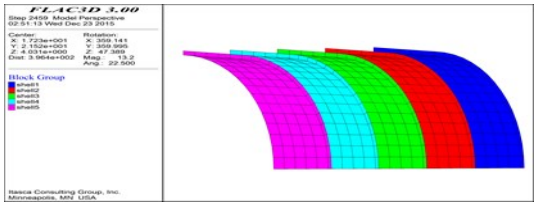
جدول ۲- مشخصات اجزاء سیستم‌های نگهداری و پیش‌تحکیمی (Lunardi, 2012; Tehran-Shomal Freeway co, 2008)

مشخصات / نوع سیستم	پیش‌برش مکانیکی	شاتکریت	بولت سقف	بولت فایبرگلاس	نگهداری فولادی
مدول یانگ E (Gpa)	۱۸٫۲	۱۴٫۱	۲۰۰	۴۵	۲۱۰
ضریب پواسون	۰٫۲۱	۰٫۲	_	_	۰٫۲۵
سطح مقطع عرضی (m^2)	_	_	$۱۰^{-۴}\times$۸٫۰۳۸۴	$۱۰^{-۳}\times$۲٫۸۲۶	$۱۰^{-۴}\times$۵۶
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)	_	_	_	_	$۱۰^{-۶}\times$۱۲٫۶۵
گشتاور دوم نسبت به محور z المان (m^4)	_	_	_	_	$۱۰^{-۶}\times$۱۵٫۶۴
گشتاور قطبی اینرسی (m^4)	_	_	_	_	$۱۰^{-۶}\times$۲۸٫۲۹

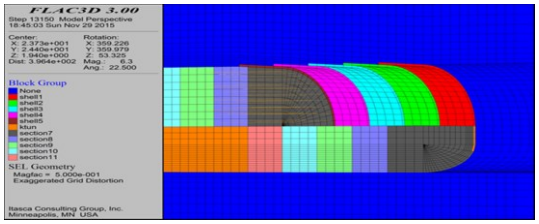
نحوه انجام عملیات به این صورت است که ابتدا تونل به صورت عادی و در گام‌های ۳ متری حفر می‌شود و پس از نزدیک شدن به منطقه گسل‌خورده، عملیات به صورت دو مرحله ای (فوقانی و تحتانی) ادامه می‌یابد، در روش پیش برش مکانیکی حفاری بخش کف تونل همواره با ید در فاصله‌ای بیش از ۱٫۵ برابر قطر تونل قرار داشته باشد *(Lunardi, 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

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 تشکلیل 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 مجددا تکرار می‌شود *(Aksoy 2008)* *(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 هم مرکز می‌باشد، آورده شده است.

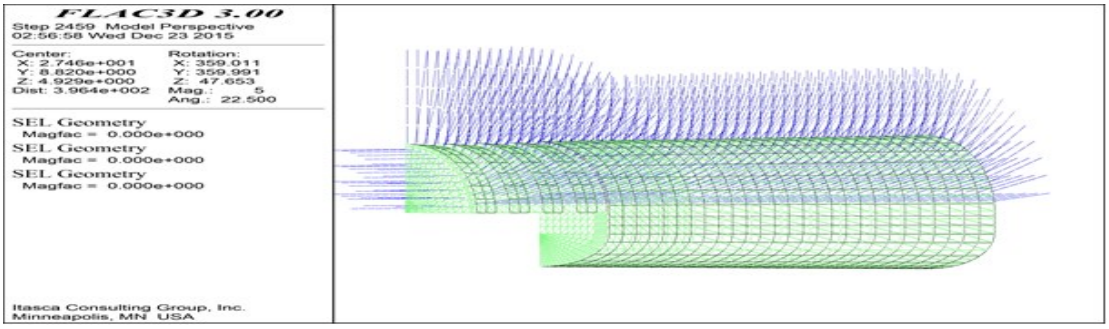


شکل ۵- پوشش ایجاد شده در روش پیش‌برش مکانیکی



شکل ۶- روش پیش‌برش مکانیکی و بولت‌های فایبرگلاس

پس از این که نصب بولت های 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 می شوند. 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 مدل سازی آورده شده است.



شکل ۷- نگهداری به کار رفته در مدلسازی

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

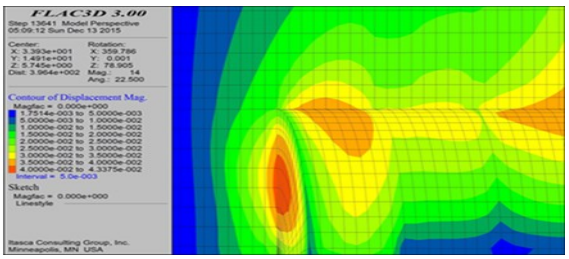
ج) استفاده از بولت فایبرگلاس

د) استفاده توامان از پیش‌برش مکانیکی و بولت فایبرگلاس.

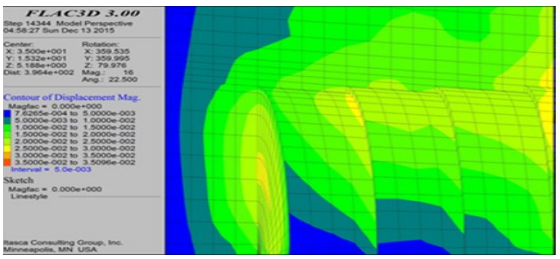
در شکل ۸ وضعیت کنتورهای جابجایی در چهار حالت مختلف آورده شده است. مطابق شکل ۸-الف در صورت عدم استفاده از روش‌های پیش تحکیمی جابجایی ها در اطراف تونل به بیشترین مقدار خود رسیده و تونل ناپایدار می شود. مطابق شکل ۸-ب استفاده از روش پیش‌برش مکانیکی می‌تواند موجب کاهش جابجایی های محیطی تونل به

مقدار قابل توجهی شود. اگرچه این روش به تنهایی قادر به کنترل جابجایی جبهه کار 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 می شود ولی بر جابجایی‌های محیطی تونل تقریبا اثری نخواهد داشت.

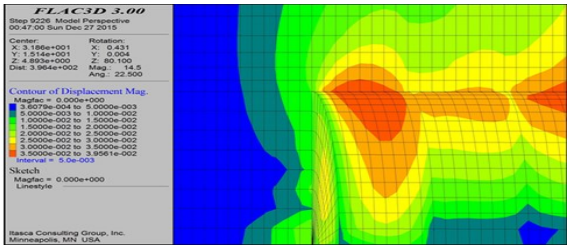
بنابراین به منظور کنترل هم زمان جابجایی‌های محیطی و جبهه کار تونل از روش پیش‌برش مکانیکی همراه با بولت‌های فایبرگلاس استفاده شده است. همان طور که در شکل ۸-د قابل مشاهده است، به استفاده توامان از این روش‌ها، جابجایی‌ها در اطراف محدوده حفاری در زون گسل‌خورده به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. در این شکل اثر استفاده از بولت‌های فایبرگلاس بر وضعیت جابجایی جبهه‌کار کاملا 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.



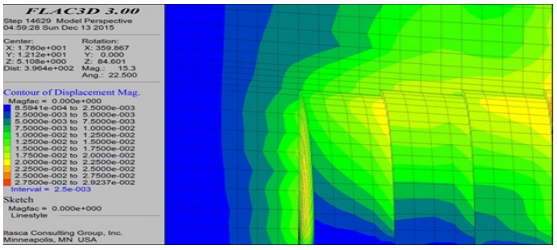
الف) عدم استفاده از روش‌های پیش‌تحکیمی



ب) استفاده از پیش‌برش مکانیکی



ج) استفاده از بولت‌های فایبرگلاس

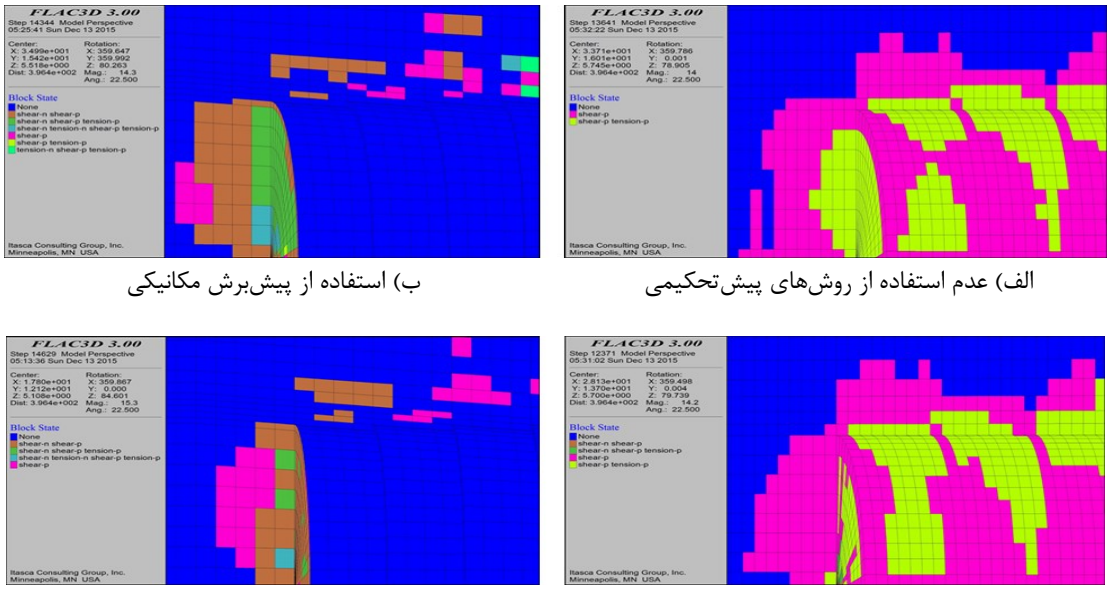


د) استفاده توامان از پیش‌برش مکانیکی و بولت فایبرگلاس

شکل ۸- کنتورهای جابجایی در چهار حالت مختلف

در **شکل ۹** مناطق پلاستیک مدل در چهار حالت مذکور آورده شده است. با توجه به این اشکال، با استفاده از بولت های فایبرگلاس، از تعداد زون های پلاستیک در جبهه‌کار تونل کاسته می‌شود و نتیجه آن افزایش پایداری جبهه کار 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 جبهه کار تونل برای چهار حالت مختلف مدل سازی، به صورت شماتیک در **شکل ۱۰** نشان داده شده است. مشاهده می شود 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 جبهه کار ۶۰ درصد کاهش یافته است. بنابراین استفاده همزمان از این دو روش بهترین عملکرد را در کاهش همگرایی ها در عبور تونل از ناحیه گسل خورده خواهد داشت.



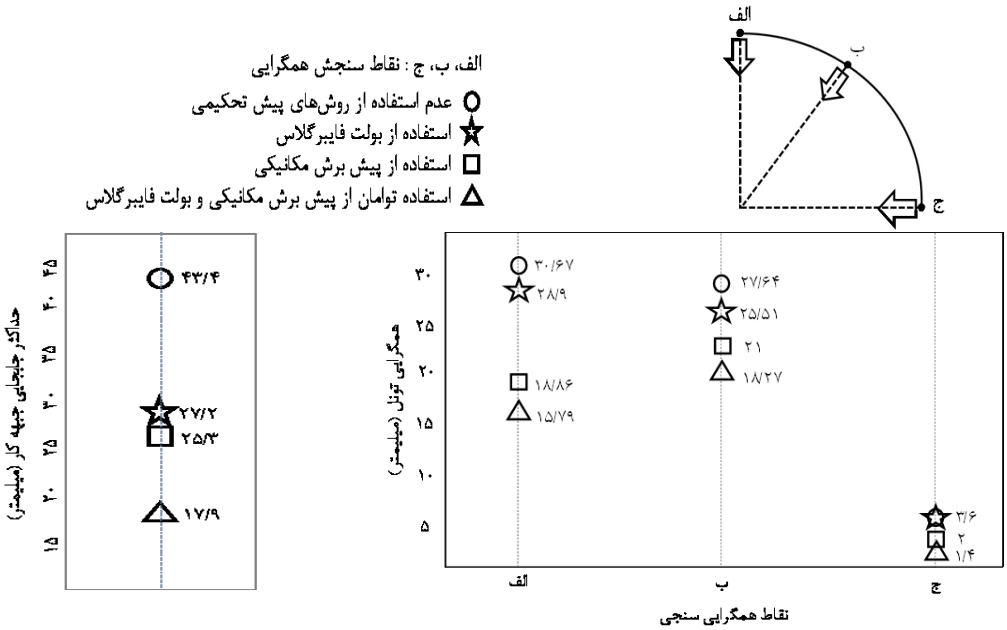
الف) عدم استفاده از روش‌های پیش‌تحکیمی

ب) استفاده از پیش‌برش مکانیکی

ج) استفاده از بولت‌های فایبرگلاس

د) استفاده از پیش‌برش مکانیکی و بولت فایبرگلاس

شکل ۹- نواحی پلاستیک در چهار حالت مختلف



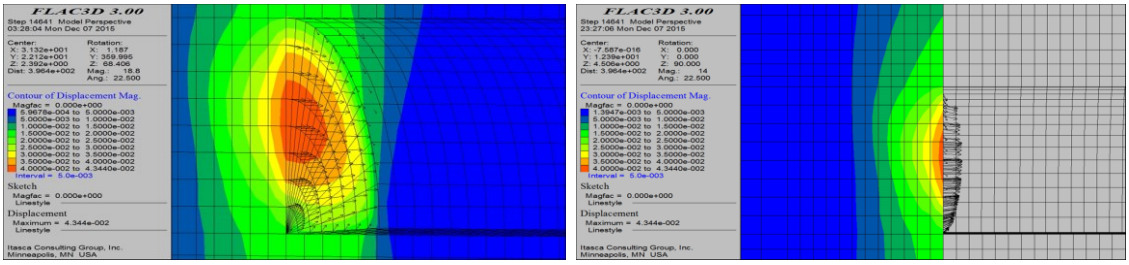
الف) همگرایی سقف و دیوارها

ب) جابجایی جبهه کار

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

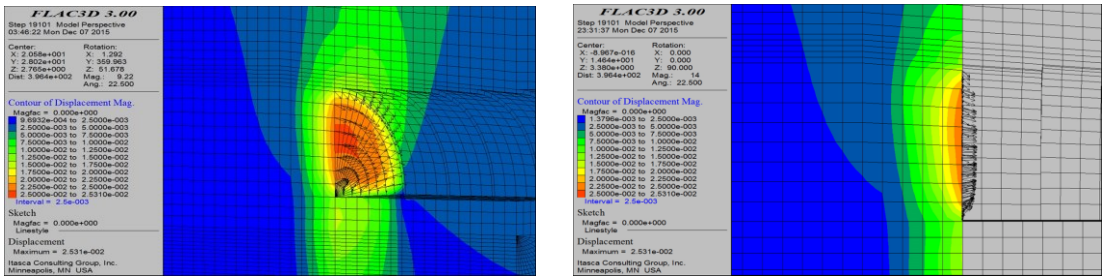
کنتورهای جابجایی جبهه‌کار تونل برای چهار حالت مدل‌سازی مورد بررسی در شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ نشان داده شده است. در شکل ۱۱ ملاحظه می‌شود، به دلیل عدم استفاده از روش‌های پیش‌تحکیمی میزان جابجایی‌های جبهه‌کار تونل به ۴۳/۴ میلی‌متر می‌رسد. در شکل ۱۲ با کاربرد روش پیش‌برش مکانیکی حداکثر جابجایی جبهه‌کار به ۲۵/۳ 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 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.



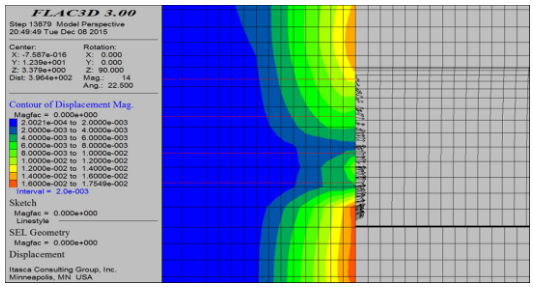
الف) نمای جانبی ب) نمای مایل

شکل ۱۱- جابجایی جبهه‌کار در حالت عدم استفاده از روش‌های پیش تحکیمی

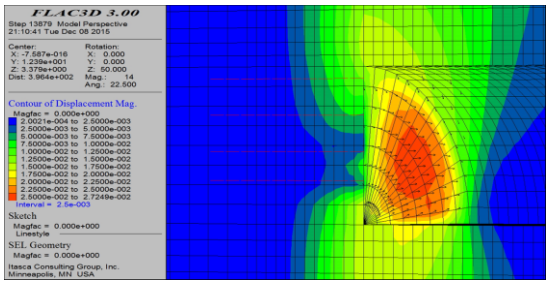


الف) نمای جانبی ب) نمای مایل

شکل ۱۲- جابجایی جبهه‌کار در حالت استفاده از پیش‌برش مکانیکی

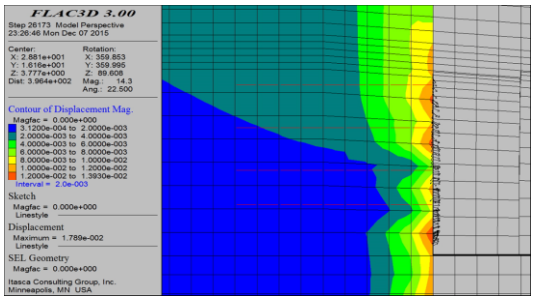


الف) نمای جانبی

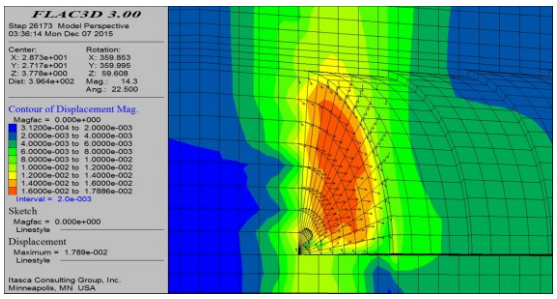


ب) نمای مایل

شکل ۱۳- جابجایی جبهه‌کار در حالت استفاده از بولت فایبرگلاس



الف) نمای جانبی



ب) نمای مایل

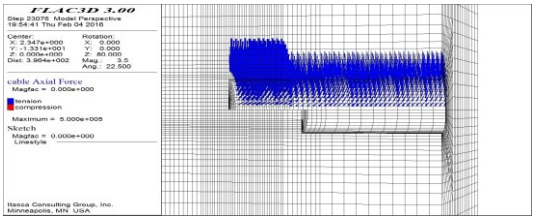
شکل ۱۴- جابجایی جبهه‌کار در حالت استفاده توامان از بولت فایبرگلاس و پیش‌برش مکانیکی

۴-۳- بررسی عملکرد سیستم نگهداری

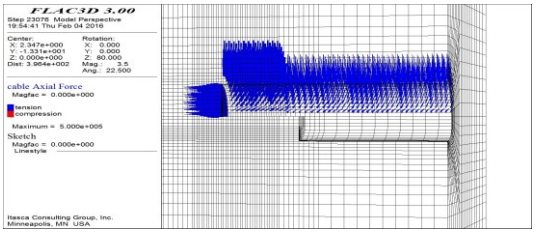
همان‌طور که در بخش ۴-۱ گفته شد، به منظور مدل‌سازی بولت‌ها از المان ساختاری کابل استفاده شده است و دلیل آن مقاومت خمشی بسیار پایین بولت‌ها در مقایسه با مقاومت کششی آن‌ها می‌باشد. به همین دلیل به منظور مقایسه تاثیر استفاده از روش‌های پیش‌تحکیمی بر بولت‌های سقف در شکل‌های ۱۵ تا ۱۸ میزان نیروهای کششی ایجاد شده در بولت‌ها در حالت‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

در شکل ۱۵ از روش‌های پیش‌تحکیمی استفاده نشده است و مشاهده می‌شود که میزان حداکثر نیروی کششی به ۵۰۰ کیلونیوتن می‌رسد. مطابق جدول ۲ مقاومت کششی بولت‌های سقف ۵۰۰ کیلونیوتن می‌باشد، بنابراین در این ناحیه با گسیختگی بولت‌ها مواجه خواهیم شد. در شکل ۱۶ از بولت‌های فایبرگلاس به عنوان عامل پیش‌تحکیمی استفاده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بولت‌های فایبرگلاس تاثیر چندانی بر نیروهای وارد بر بولت‌های سقف ندارند و در این حالت نیز نیروهای وارد بر بولت‌ها بیش از مقاومت کششی آن‌ها می‌باشد و مانند حالت قبل بولت‌ها دچار گسیختگی خواهند شد. در شکل ۱۷ از روش پیش‌برش مکانیکی استفاده شده است و با توجه به اینکه این روش از روش‌های پیش‌تحکیمی حفاظتی می‌باشد، میزان نیروهای وارد شده بر بولت‌ها در مقطعی که از این روش استفاده می‌شود، نسبت به حالات قبلی کاهش یافته و مانع گسیختگی بولت‌ها می شود. شکل ۱۸ نشان‌دهنده استفاده همزمان از بولت های فایبرگلاس در جبهه کار و پیش‌برش مکانیکی در پیرامون جبهه‌کار می‌باشد، این حالت از لحاظ نیروهای وارده بر بولت‌ها شباهت زیادی به حالت قبلی داشته و میزان ماکزیمم نیروی وارده بر بولت ها در هر دو حالت ۴۰۵/۵ کیلونیوتن می‌باشد.

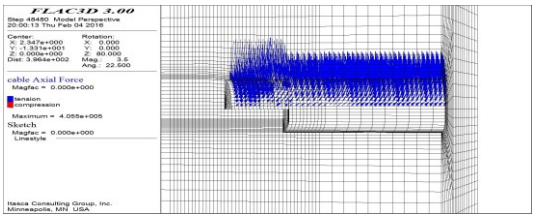
دلیل این تشابه در وضعیت توزیع نیروهای وارد بر بولت‌های سقف کاملا مشهود است، زیرا مشخص است که این نیرو مربوط به بخشی از تونل می‌باشد که از روش‌های پیش‌تحکیمی استفاده نشده است و بنابراین به دلیل تشابه سیستم نگهداری به‌کار گرفته شده، وضعیت توزیع نیروها و ماکزیمم نیروی وارد بر بولت‌ها نیز مشابه یکدیگر خواهد بود.



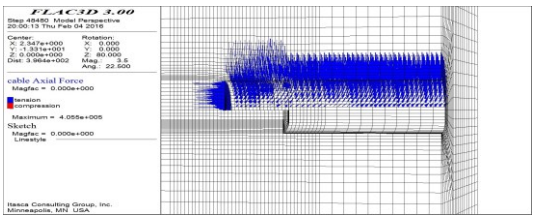
شکل ۱۵- نیروهای وارد بر بولت‌ها در حالت عدم استفاده از روش‌های پیش‌تحکیمی



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

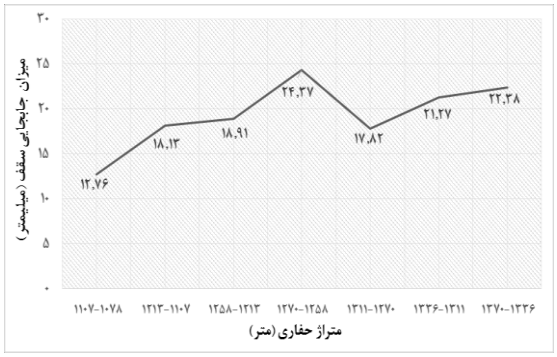
۵- مقایسه نتایج مدل‌سازی با اندازه‌گیری‌های برجا

با توجه به حفر کامل یک تونل دسترسی در سال ۱۳۸۷ مطالعات آزمایشگاهی کافی بر روی سنگ‌های ناحیه صورت پذیرفته است و پارامترهای ژئومکانیکی مورد استفاده در مدل-سازی قابل اعتماد هستند.

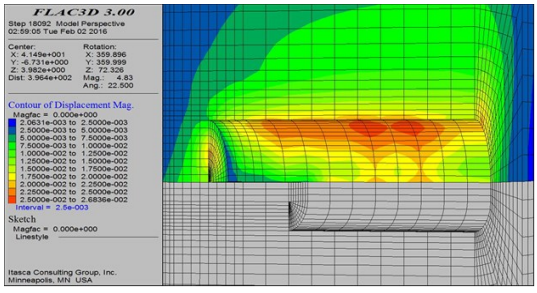
مدل‌ســـازی برای متراژ ۳۰۵۸-۲۹۷۳ تونل البرز انجام شـــده اســـت در حالیکه عملیات حفاری در متراژ ۲۳۵۰ در حال انجام است و هنوز به ناحیه گسل خورده نرسیده است. بنابراین داده های ابزار دقیق برای این ناحیه موجود نیست.

از طرف دیگر به دلیل شـــباهت زیاد مشـــخصـــات ژئومکانیکی و زمین‌شناسی متراژ ۱۲۵۸-۱۲۷۰ که در ناحیه حفاری و ابزاربندی شـده قرار دارد با متراژ ۲۹۷۳-۳۰۰۷ که در ناحیه مدلسازی شده قرار دارد، به منظور صحت سنجی مدل از داده های ابزار دقیق این ناحیه استفاده شده است.

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



شکل ۱۹- مقادیر جابجایی حداکثر در متراژ ۱۰۷۸-۱۳۷۰



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

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله تاثیر استفاده از روش‌های پیش‌برش مکانیکی و بولت فایبرگلاس به‌طور مجزا و به صورت توامان به منظور انجام عملیات پیش‌تحکیمی در محل عبور تونل البرزاز بخش بحرانی زون گسل‌خورده کندوان 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 اطرف 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 توامان 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 پیش-برش 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

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 ethod 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.