کاربرد مدل‌های عددی سه بعدی در تحلیل رفتار سینه کارهای نگهداری شده توسط بولت‌های تزریقی

محمدتقی همزبان قراملکی[i]، مهدی موسوی [ii]

چکیده

گسترش شبکه‌های زیرزمینی شهری و بین شهری نیاز به حفر تونل در شرایط کاری سخت را افزایش داده است. حفظ پایداری سینه کار تونل یکی از مهمترین موارد ایمنی در مورد چنین تونل‌هایی است. در این مطالعه پایداری سینه کار تونل پردیس در شمال شرق تهران، که در یک زمین سست حفاری می‌شود، با استفاده ازمدل‌های عددی سه بعدی تحلیل گشته است. براساس این تحلیل‌ها معلوم شد که نوع نگهداری دیواره‌ها بر رفتار سینه کار تونل کاملاً بی تاثیر است. همچنین چگونگی افزایش جابجایی‌های سینه کار با افزایش عمق روباره و ابعاد مقطع حفاری به نمایش درآمده است. در گام بعدی تاثیر بولت‌های نصب شده در سینه کار در پایدارسازی آن مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که این بولت‌ها کاهش قابل ملاحظه‌ای را در جابجایی‌های بوقوع پیوسته در سینه کار و زون‌های پلاستیک تشکیل شده در اطراف آن موجب می‌گردند. نهایتاً تاثیر این بولت‌ها بر رفتار دیواره تونل بررسی و معلوم شد که بولت‌های یاد شده با اینکه فشار وارد بر دیواره‌های تونل را افزایش می‌دهند، تاثیر چندانی در جابجایی‌های به وقوع پیوسته در اطراف آن ندارند.

کلمات کلیدی

تونل، زمین‌های نرم، سینه کار، تحلیل پایداری، FLAC3D، بولت زنی

Application of Three Dimensional Numerical Models in Analysis of Supported Tunnel Faces by Grouted Bolts

M. T. Hamzaban; M. Moosavi

ABSTRACT

Development of underground tunnel networks sometimes necessitates tunneling in difficult ground conditions. Maintenance of tunnel face stability is one of the most important safety challenges in such tunnels. In this study, face stability of Pardis tunnels, which are excavated in an un-compacted conglomerate east of Tehran, is assessed. For this goal, three dimensional numerical models are used using FLAC3D software, showing that the type of tunnel wall support has no major effect on tunnel face stability. Moreover increase of tunnel face displacement with increase of overburden and progress of excavation of stages is quantified. The effect of installed bolts on the tunnel face to improve stability is investigated. The results show that installation of bolts in the tunnel face increases pressure on tunnel walls but have no effect on displacements around it.

KEYWORDS

Tunnel, Soft Grounds, Face, Stability Analysis, FLAC3D, Bolting

[i] دانشجوی کارشناسی ارشدمکانیک سنگ؛ دانشکده مهندسی معدن؛ پردیس دانشکده‌های فنی؛ دانشگاه تهران hamzaban79@yahoo.com

[ii] استادیار دانشکده مهندسی معدن؛ پردیس دانشکده‌های فنی؛ دانشگاه تهران mmoosavi@ut.ac.ir

۱- مقدمه

یکی از نکات مهم در تونل زنی در زمین های نرم مسأله پایدار سازی جبهه کار است؛ زیرا می‌توان با کار برد روش‌های مختلف از نگهداری سقف و دیواره‌های تونل اطمینان حاصل کرد[۱]. حتی با کاربرد سیستم‌های نگهداری صلب تر و بستن کف تونل و نصب نگهداری در آن و حفر چند مرحله‌ای فضاهای زیرزمینی، میزان نشست‌های حاصل از تونل زنی ممکن است بیش از حد باشند. در این حالت نشست‌های یاد شده را می‌توان ناشی از تغییر شکل‌های سینه کار تونل دانست. بنابراین اگر بتوان این تغییر شکل‌ها را کنترل کرد، نشست سطحی کاهش خواهد یافت [۲].

با اینکه اهمیت پایداری سینه کار و تاثیر آن بر رفتار زمین اطراف و عملیات اجرایی تونل امری مسلم است، تا به حال پیشرفت چندانی در تحلیل و طراحی پایداری سینه کار و تعیین پارامترهای مربوط و نهایتاً درک رفتار کلی زمین مقابل تونل صورت نگرفته است. که ناشی از ماهیت سه بعدی مسئله است. در این حالت میدان تنش- کرنش[۱] کاملاً سه بعدی است و نمی-توان از فرضیات ساده کننده ای همچون کرنش صفحه ای[۲] یا تنش صفحه ای[۳] بهره برد [۳].

از جمله مهمترین روش‌های تحلیلی در ارزیابی پایداری سینه کار می‌توان به مفهوم عدد پایداری ارائه شده توسط برامز[۴] و بنرمارک[۵] اشاره نمود [٤]. همچنین دیویس[۶] و همکاران [٥] و نیز لکا[۷] و دورمیه[۸] با استفاده از روش پلاستیسیته کران بالا[۹] و کران پایین[۱۰]، محدوده پایداری سینه کار را مورد بررسی قرار داده‌اند. پیچیدگی بالا و عدم صراحت کافی از یک سو و باز ماندن از ارائه اطلاعاتی در مورد شرایط تنش – کرنش از سوی دیگر، کاربرد این روش‌های تحلیلی را محدود ساخته است. علاوه بر این هنگام اضافه شدن سیستم نگهدارنده بر سینه کار، رئولوژی[۱۱] خاک و سنگ و برهم کنش آنها با ابزار نگهدارنده، خود بر پیچیدگی قضیه می‌افزاید [٦].

در این مطالعه وضعیت پایداری سینه کار تونل‌های پردیس با استفاده از مدل‌های سه بعدی تولید شده توسط نرم افزار $FLAC^{3D}$ مورد ارزیابی قرار گرفته و اقدام به طراحی سیستم نگهداری برای پایدارسازی آن خواهد شد. مدل‌های سه بعدی به کار رفته توانایی شبیه سازی رفتار محیط را بدون نیاز به درنظر گرفتن فرضیات ساده کننده دارند. بنابراین می توان انتظار داشت که نتایج حاصل از آن انطباق بیشتری با واقعیت داشته باشد. بویژه هنگامی که شبیه سازی یک پدیده کاملاً سه بعدی همچون رفتار سینه کار تونل مورد نظر باشد. سیستم نگهداری پیشنهادی برای سینه کار تونل‌های یاد شده بولت‌های تزریقی طولی نصب شده در زمین مقابل سینه کار را شامل می‌شوند که در ادامه به اختصار معرفی می‌گردند.

۱-۱- استفاده از بولت ها در پایدارسازی سینه کار

نخستین مورد از بولت زنی در سینه کار توسط ماستروپیترو[۱۲] در سال ۱۹۷۹ در ایتالیا و در مارن بسیار خرد شده با استفاده از بولت های تزریقی ۵ متری گزارش شده است. باربا‌چی[۱۳] و همکاران (۱۹۹۰) کاربرد بولتهای سولکس[۱٤] به طول ۳ متر را در رس توصیف نموده‌اند. گراس[۱۵] و همکاران (۱۹۹۲) مثال هایی از نگهداری سینه کار را ارائه کرده اند که در آنها از لوله های فایبرگلاس[۱۶] در یخرفت استفاده شده است. آرسنا[۱۷] و همکاران (۱۹۹۱)، لوناردی[۱۸] و همکاران (۱۹۸۹) نیز تکنیک کاربرد لوله‌های فایبرگلاس را در ایتالیا و فرانسه توصیف نموده‌اند [۷].

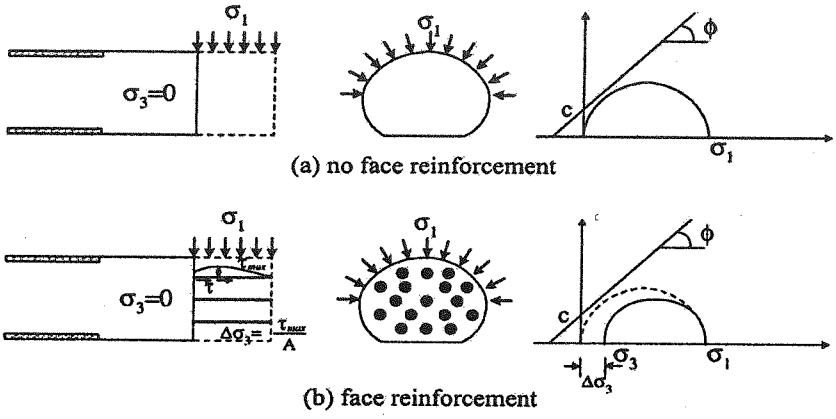
همانگونه که در شکل (۱) به نمایش در آمده است، هدف از تقویت سینه کار، افزایش ظرفیت باربری زمین مقابل سینه کار توسط فراهم آوردن تاثیر محصور کننده اضافی با استفاده از بولت‌های طولی است. اساس چنین مکانیزمی بسیار مشابه تقویت زمین است که در آن مقاومت برشی به توزیع نیروی کششی در امتداد المان های تقویت منجر می‌گردد [۱].

با رواج بولت‌های فایبر گلاس[۱۹]، تکنیک بولت زنی در سینه کار گسترش بیشتری یافته است. زیرا این بولت کم هزینه‌اند و از مزایای تکنیکی چون مقاومت محوری بالا همراه با شکنندگی نسبی عرض برخوردار می‌باشند که موجب می‌شود در حین حفاری به سهولت دچار خردایش گردند. چنین بولت‌هایی عملاً دو الزام را برآورده می‌سازند [۳].

– تاثیر تقویت کنندگی در کل طول آنها در داخل توده سنگ گسترش می‌یابد. بنابراین می توان به تدریج و با پیشروی حفاری از طول آنها کاست، بدون آنکه تاثیر چندانی بر عملکرد بخش باقیمانده داشته باشد. بولت ها عموماً توسط دوغاب یا رزین در چال ها نصب می‌گردند که با در نظر گرفتن تردی و وزن کم مواد کامپوزیتی[۲۰] می توان از بولت‌هایی با قطر بزرگ و تا چندین دسی متر، نیز بهره برد.

– خصوصیات مقاومتی در امتداد فیبرها قابل مقایسه با مواد فولادی است، ولی تغییر شکل پذیری مواد کامپوزیتی به میزان قابل توجهی بالاتر است و به راحتی خرد می‌شوند.

روش حفاری با سینه کار باز[۲۱]، که این تکنیک را نیز شامل می‌شود، به دلیل هزینه کم و انعطاف پذیری بالا یکی از پر طرفدارترین روش‌های تونل زنی است، ولی کاربرد آن منحصر به زمین هایی با شرایط نسبتاً پایدار است. بکار گیری بولت‌های تقویتی در سینه کار جهت تامین نگهداری اولیه، دامنه



شکل (۱): تکنیک تقویت سینه کار بطور نظری [۱]

کاربردی روش یاد شده را تا حد زیادی گسترش می‌دهد. چنین تونلی را می‌توان با شکل مقطعی حفر کرد و در صورت بروز تغییر شرایط زمین، که برای مثال منجر به بروز مشکلات فراوانی برای سپرهای در حال پیشروی می‌گردد، می‌توان سکانس ساخت را به سادگی تغییر داد و اقدامات لازم را برای انطباق با شرایط جدید بکار بست [۸].

با اینکه نصب بولت‌ها عملاً باعث افزایش هزینه عملیات تونل زنی می‌شود، اما افزایش پایداری حاصل اجازه حفر تونل را با سرعت‌های پیشروی بالاتر وحتی با ابعاد مقطع بزرگ تر فراهم می‌کند. بنابراین در مجموع می توان انتظار کاهش هزینه ها را داشت. علاوه بر این در مواردی که شرایط زمین شناسی متغیر باشد، در صورت نیاز می توان فرایند بولت گذاری را به توالی عملیات تونل زنی اضافه نمود و با بهبود شرایط زمین حذف کرد. نصب بولت‌ها نیز توسط تجهیزات متداول صورت می‌گیرد ونیازی به تهیه ابزارهای ویژه ای برای این منظور نیست.

۱-۲- ارزیابی رفتار سینه کارهای نگهداری شده

با اینکه تا به حال پیشرفت چندانی در تحلیل و طراحی پایداری سینه کار و درک رفتار کلی زمین مقابل تونل حاصل نشده است، تحلیل رفتار زمین‌های تقویت شده مقابل تونل کاری به مراتب مشکل تر و پیچیده تر است. در این حالت علاوه بر موارد یاد شده در تحلیل پایداری سینه کار، بایستی تاثیر حضور بولت‌ها و بر هم کنش آنها با خاک و سنگ را نیز که موجب تشکیل محیطی نا همگن در مقابل سینه کار می‌گردد، در نظر داشت. به این ترتیب، تا به حال روش کاملاً تحلیلی برای طراحی سیستم‌های بولت زنی در سینه کار، با وجود گسترش روز افزون آن ارائه نشده است [۳]. بررسی‌هایی که تا به حال انجام یافته اند بیشتر مبتنی بر مدل های فیزیکی و عددی هستند که در زیر به اجمال مورد بررسی قرار می‌گیرند.

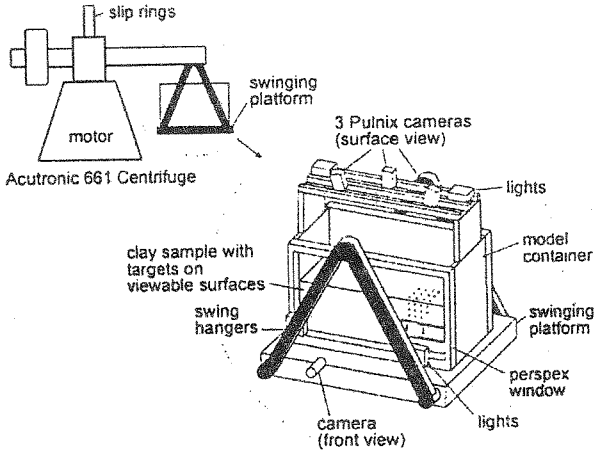
۱-۲-۱ مدل های فیزیکی

در این مدل‌ها تونل و سینه کار نگهداری شده، با استفاده از مواد مناسب و با مقیاسی معین ساخته شده و تحت شرایط خاصی بارگذاری می‌شوند و در نهایت پاسخ‌های مدل‌های مختلف در برابر بارگذاری تعیین شده و برای تعیین نحوه عملکرد سیستم‌های نگهدارنده مختلف، با هم مقایسه می‌گردند. بخش عمده‌ای از این مدل‌ها را مدل‌های سانتریفیوژ[۲۲] تشکیل می‌دهند که در آنها برای شبیه سازی حالت تنش‌ها در مدلی با مقیاس 1:N میدان شتاب در دستگاهی همانند آنچه که در شکل (۲) به نمایش در آمده است، تا مقدار Ng افزایش می یابد [۵].

مدل های سانتریفیوژ مختلفی از سینه کارهای نگهداری شده توسط بولت‌های طولی بوسیله کاماتا[۲۳] [۹]، تیلور[۲۴] [۱۰] و مؤلفین دیگر [۱۱] ساخته شده‌اند که در آنها چگونگی تأثیر طول، تعداد و آرایش بولت‌های نصب شده در رفتار سینه کار تونل‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۱-۲-۲-مدل های عددی

دشواری ساخت و آزمایش مدل‌های فیزیکی و فقدان یک سیستم دقیق برای انجام مشاهدات کمّی در آنها از یک سو و تکامل برنامه های عددی و پیشرفت های سخت افزاری صورت گرفته از سوی دیگر، موجب کاربرد مدل‌های عددی در دامنه ای گسترده تر شده است؛ که امکان بررسی دقیق تر و جزئی تر مسائل ژئوتکنیکی را حتی به شکل سه بعدی فراهم کرده‌اند.



شکل (۲): مدل و آونگ سانتریفیوژ [۵]

پیلا[۲۰] و همکاران در سال ۱۹۹۶ با استفاده از نرم افزار $FLAC^{3D}$ روش های مختلف مدل سازی بولت‌های موجود در زمین مقابل سینه کار را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها تاثیر بولت ها را بر تنش های شعاعی پیرامون تونل بررسی کردند و نشان دادند که مقداری بحرانی برای تعداد بولت‌های نصب شده در سینه کار وجود دارد [۷].

پیلا همچنین در سال ۱۹۹۴ با استفاده از یک مدل المان محدود سه بعدی تأثیر نگهداری سینه کار و دیواره تونل را بر جابجایی بوقوع پیوسته در سینه کار مورد ارزیابی قرار داد و نشان داد که نگهداری دیواره‌های تونل تأثیری بر جابجایی های بوقوع پیوسته در سینه کار و همچنین نگهداری سینه کار تأثیری چندان در همگرایی دیواره های تونل ندارد [۱۲].

شین[۲۶] در سال ۲۰۰۲ با استفاده از نرم افزار المان محدود سه بعدی *ABAQUS* تأثیر صلبیت محوری بولت‌های نصب شده در سینه کار را بر رفتار آن مورد ارزیابی قرار داد. صلبیت محوری[۲۷] به صورت حاصل ضرب سطح مقطع بولت در مدول الاستیسیته آن تعریف می‌گردد. او همچنین در این تجزیه و تحلیل ها نشان داد که بولت‌های نصب شده در پیرامون تونل نیروی بیشتری نسبت به بولت‌های مرکزی سینه کار تحمل می‌کنند [۸].

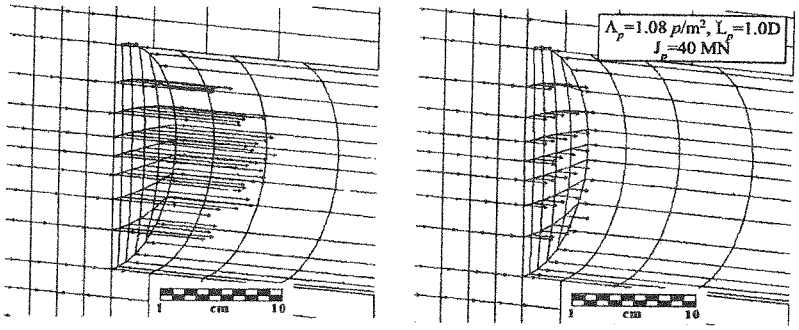
شین و یو[۲۸] در سال ۲۰۰۳ تحلیل نسبتاً جامعی را برای ارزیابی تأثیر پارامترهای مختلف نگهداری بر رفتار سینه کار با استفاده از برنامه سه بعدی *DIANA* ارائه دادند که در آن تعداد بولت ها (N)، طول آنها (L) و صلبیت محوری آنها (J=E.A) مورد توجه قرار گرفت. علاوه بر پارامترهای یاد شده دانسیته نگهداری نیز به صورت $\Lambda = \frac{N}{A_t}$ تعریف شد که در آن A_t سطح مقطع حفاری است [۱].

بر اساس این تحلیل‌ها می‌توان تأثیر بولت‌های طولی را بر جابجایی‌های محوری رخ داده در سینه کار در شکل (۳) به روشنی مشاهده کرد. در حالت بدون نگهداری، خاک به صورت گنبدی به سمت تونل به حرکت در می‌آید و جابجایی حداکثر در محدوده مرکزی سینه کار رخ می‌دهد، در صورتی که در حالت نگهداری شده کاهش قابل توجه در جابجایی سینه کار آشکار بوده و الگوی جابجایی نیز کم و بیش یکنواخت است.

تأثیر بولت‌ها بر نشست سطح زمین نیز در شکل (٤) کاملاً مشهود است. مشاهده می‌شود که حداکثر نشست و شیب زمین برای حالات نگهداری شده به میزان قابل توجهی، تا ۷۵٪ کاهش یافته است. مقدار این کاهش در حالتی که دانسیته نگهداری و به عبارتی تعداد بولت‌های نگهدارنده بیشترند، مشهودتر است.

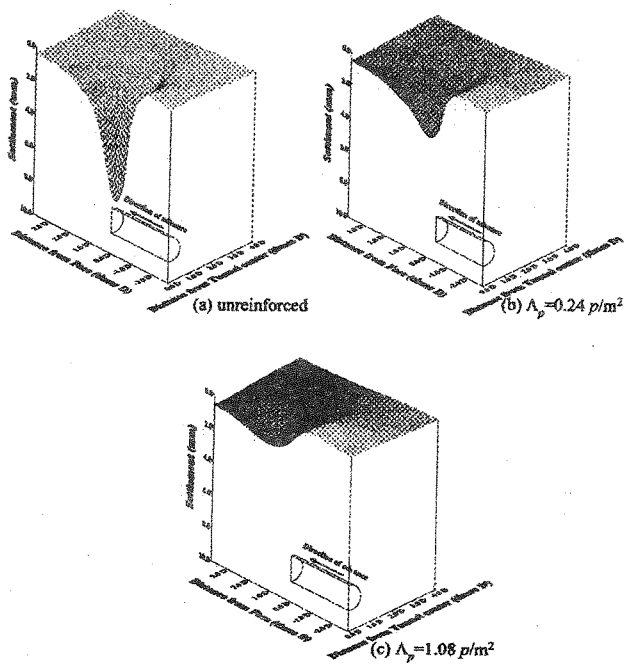
همانگونه که قبلاً نیز بیان شد، پارامترهایی چون طول و تعداد بولت‌های بکار رفته دارای مقادیری بحرانی اند که هر گاه پارامترهای یاد شده فراتر از مقادیر بحرانی باشند، تأثیر چندانی در عملکرد آنها به چشم نمی‌خورد. برای ارزیابی این پامترها؛ یو و شین جابجایی محوری سینه کار را در حالات مختلف بولت زنی و به ازای تعداد و طول‌های مختلف بدست آورده و نتایج را در نمودارهایی چون شکل (٥) خلاصه کردند. بر اساس شکل (٥- الف) هنگامی که طول بولت ها کمتر از نصف قطر تونل است، جابجایی محوری به سرعت کاهش می‌یابد؛ اما بعد از این مقدار، آهنگ سیر کاهشی این جابجایی بسیار کندتر می‌شود. چنین پدیده‌ای دقیقاً برای تعداد بولت‌ها و صلبیت محوری آنها نیز به چشم می‌خورد [۱].

مقادیر بحرانی $(L)_{cr}$، $(\Lambda)_{cr}$ و $(J)_{cr}$ با توجه به اشکال یاد شده به ترتیب برابر $0.5 \sim 1.0\,D$، $1.08\,P/m^2$ و $100\,MN$ بدست می آیند. این مقادیر را می‌توان به عنوان حداقل ترکیب نگهداری مورد نیاز برای جلوگیری از تغییر شکل‌های غیر- مجاز سینه کار، به هنگام کاربرد تکنیک‌های نگهداری سینه کار در نظر گرفت. حفظ مقادیر Λ، L و J در محدوده مقدار بحرانی یا بیش از آن حائز اهمیت بوده و در نتیجه تعیین $(L)_{cr}$، $(\Lambda)_{cr}$ و $(J)_{cr}$ برای شرایط زمین تونل زنی مورد نظر یکی از قسمت- های اساسی طراحی خواهد بود.

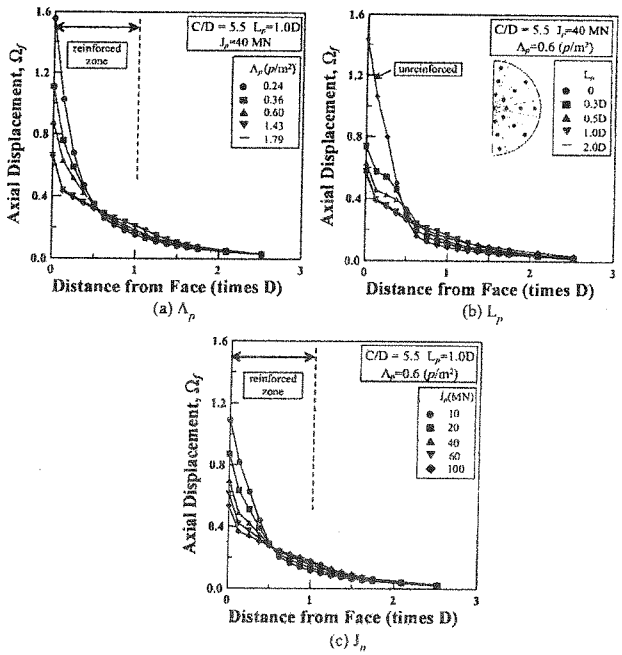


شکل (۳): بردارهای جابجایی برای خاک الف) بدون نگهداری ب) نگهداری شده [۱]

(ب) (الف)



شکل (۴): تأثیر نگهداری سینه کار بر نشست سطحی (a) حالت بدون نگهداری، (b) $\Lambda_p = 0.24\ ^{p}/_{m^2}$، (c) $\Lambda_p = 1.08\ ^{p}/_{m^2}$ [۲]



شکل (۵): تغییرات حداکثر جابجایی محوری سینه کار بر حسب (a) L_p، (b) Λ_p، (c) J_p [۲]

یکی از نکات مبهمی که در این حالت پدید می‌آید، تأثیر عوامل زمین شناسی بر پارامترهای فوق است. یو و شین بر اساس تحلیل های عددی نشان دادند که نسبت C/D، عمق روباره بر قطر تونل، و نوع خاک تا حدود زیادی بر پارامترهای فوق بی تأثیر است؛ اما انجام مطالعات بیشتر و پردامنه تری در این زمینه ضروری به نظر می‌رسد [۱].

۲- ۲- تحلیل پایداری سینه کار تونل پردیس

۲-۱- موقعیت تونل پردیس

تونل پردیس از دو تونل رفت و برگشت مجزا از هم به طول ۱۵۵۰ متر تشکیل شده است که ابتدای آنها در کیلومتر ۲+۴۰۰ آزاد راه در دست ساخت تهران - رودهن قرار دارند. هر یک از این تونل ها در سه باند به عرض کلی ۱۲ متر و ارتفاع ۸ متر ساخته می‌شوند که دیواره های مجاور آنها فاصله ای در حدود ۵۲ متر از هم دیگر دارد. ارتفاع روباره تونل با توجه به توپوگرافی متغیر منطقه، متفاوت بوده و مابین ۲۵ تا ۶۵ متر است. حفاری این تونل‌ها در دو مرحله، توسط دستگاه رودهدر[۲۹]، به صورت حفر طاق بالایی[۳۰] و برداشتن کف[۳۱] انجام می گیرد که در حال حاضر عملیات مربوط به حفر بخش طاق بالایی در جریان است. سیستم نگهداری نصب شده در این تونل‌ها عبارت از یک لایه بتن پاشیده[۳۲] به ضخامت ۳ تا ۱۰ سانتی متر همراه با توری فلزی[۳۳] بعلاوه قاب های فولادی مشبک[۳۴] سه تایی با فواصل ۲ تا ۳ متر است.

طی عملیات حفاری، تونل‌های یاد شده به صورت پیش بینی نشده با لایه‌ای رسی به ضخامت حدود ۴۰ متر در امتداد محور تونل برخورد داشته‌اند. این لایه شیبی مابین ۱۵ تا ۲۰ درجه به موازات محور تونل و ۲۰ تا ۲۵ درجه در جهت عمود بر آن داشته و در کیلومترهای ۳+۴۸۰ تا ۳+۴۳۰ از تونل چپ و ۳+۴۱۰ تا ۳+۳۷۰ از تونل راست، رخنمون‌های آن گزارش شده اند. سیستم نگهداری نصب شده در این لایه شامل لایه شاتکریت به ضخامت ۱۵ تا ۲۵ سانتی متر و قاب های فولادی مشبک چهار تایی به فواصل ۰/۵ تا ۱ متر می‌شوند. علاوه بر این در محل پایه های قاب‌های یاد شده برای جلوگیری از فرو رفتن آنها در زمین اقدام به نصب شناژ[۳۵] بتنی شده است.

پارامترهای ژئومکانیکی مربوط به محیط دربرگیرنده تونل و هم چنین نسبت تنش های موجود در منطقه بر اساس آنالیزهای برگشتی انجام یافته بر روی داده‌های حاصل از ابزاربندی تعیین شده‌اند [۱۳]. این پارامترها در جدول (۱) خلاصه شده‌اند.

جدول (۱): پارامترهای ژئومکانیکی زمین دربرگیرنده تونل [۱۳]

واحدزمین شناسی	E (MPa)	C (KPa)	ϕ (°)	K
کنگلومرا	۱۰۰	۱۳۵	۳۳	۱/۴۴
رس	۸۱	۱۰۰	۲۴	۱/۴۴

۲-۲- تحلیل پایداری

برای ارزیابی پایداری، از مقاطع تغییر شکل سینه کار بهره گرفته شده است. در این مقاطع محور افقی نمایانگر جابجایی-های انجام یافته و محور قائم نشان دهنده ارتفاع تونل است. برای ارزیابی پایداری یا عدم پایداری، بر روی این مقاطع مقدار جابجایی بحرانی حاصل از مفهوم کرنش بحرانی[۳۶] ساکورائی[۳۷] نیز به نمایش درآمده است. بر اساس این مفهوم، هرگاه مقدار کرنش اطراف تونل (که به صورت نسبت همگرایی تونل به قطر آن تعریف می‌شود) بیش از کرنش بحرانی گردد، تونل به حالت ناپایدار درخواهد آمد [۱۴]. کرنش بحرانی توسط فرمول زیر محاسبه می‌گردد:

$$\log \varepsilon_{cr} = -0.251 \log E - 1.22 \qquad (1)$$

که در آن ε_{cr} کرنش بحرانی بر حسب درصد و E مدول الاستسیته[۳۸] بر حسب کیلوگرم نیرو بر سانتی متر مربع است. کرنش و جابجایی‌های بحرانی برای کنگلومرا و رس به شرح جدول (۲) محاسبه می‌شوند. تحلیل‌هایی که بر این اساس انجام گرفته اند به شرح ذیل‌اند:

جدول (۲): مقادیر کرنش‌ها و همگرائی های بحرانی در کنگلومرا و رس

	E (Kg/cm^2)	ε_{cr} (%)	همگرائی مجاز (cm)
کنگلومرا	۱۰۲۰	۱/۰۷	۶/۴۲
رس	۸۲۶/۲	۱/۱۲	۶/۷۴

۲-۱-۱ - ارزیابی اثر نگهداری دیواره‌ها در رفتار سینه کار

نخستین موردی که بررسی می‌شود، تأثیر سیستم نگهداری نصب شده در دیواره‌ها بر رفتار سینه کار است. مقاطع عرضی تغییر شکل سینه کار به ازای عمق روباره ۴۵ متری، در حالت بدون نگهداری و نیز همراه با چهار نوع سیستم نگهداری در شکل (۶) به نمایش درآمده‌اند. جزئیات این حائل‌ها در جدول (۳) توصیف شده‌اند. از این شکل می‌توان به روشنی دریافت که نگهداری دیواره‌های تونل تقریباً هیچ گونه تأثیری بر رفتار سینه کار آن ندارند. بنابراین می‌توان مستقل از نوع نگهداری دیواره‌های تونل به تحلیل پایداری سینه کار اقدام نمود.

جدول (۳): سیستم های نگهداری نصب شده در دیواره تونل [۱۳]

فواصل قابها (m)	ضخامت شاتکریت (cm)	نوع نگهداری
۲	٦	سیستم اعمالی
۲/۲	٥	۱
–	۱۰	۲
۱/۰۸	–	۳

۲-۲-۲- اثر عمق روباره

شکل (۷) پروفیل تغییر شکل سینه کار تونل‌های حفر شده در کنگلومرا را با اعماق روباره مختلف به نمایش گذاشته است. در این شکل میزان همگرائی بحرانی نیز نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش عمق روباره مقدار جابجایی‌های به وقوع پیوسته در سینه کار افزایش می‌یابند. در عمق ۳۰ متری سینه کار کاملاً پایدار است و وقتی عمق روباره به ٤٥ متر می‌رسد بخش میانی سینه کار به ارتفاع حدود ۱/٥ به حالت ناپایدار در می‌آید. در نهایت در عمق ٦۰ متری تنها یک متر از بخش پایینی سینه کار به حالت پایدار خواهد بود.

۲-۲-۳- تأثیر ابعاد مقطع حفاری

برای ارزیابی تاثیر ابعاد مقطع حفاری بر میزان تغییر شکل سینه کار، پروفیل‌های جابجایی در دو حالت حفر تمام مقطع و حفر مقطع بالائی برای روباره ٤٥ متری در شکل (۸) رسم می‌شوند. همانگونه که انتظار می‌رود، میزان جابجایی‌های ثبت شده در حالت تمام مقطع بیشترند.

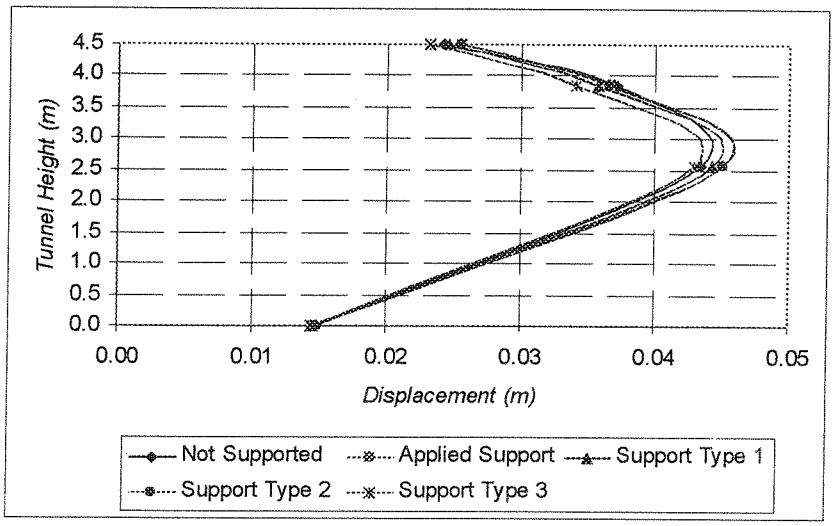
۲-۲-٤- تاثیر نوع زمین

شکل (۹) پروفیل تغییر شکل سینه کار را در لایه رسی، همراه با جابجایی بحرانی مربوطه به نمایش می‌گذارد. در این شکل پروفیل مربوط به سینه کار حفر شده در کنگلومرا در عمق ٤٥ متری نیز به نمایش درآمده است. اختلاف عمق تونل در این حالت تنها ٤ متر است که اگر از آن صرف نظر شود، می‌توان تاثیر نوع زمین را نیز در رفتار سینه کار مشاهده کرد.

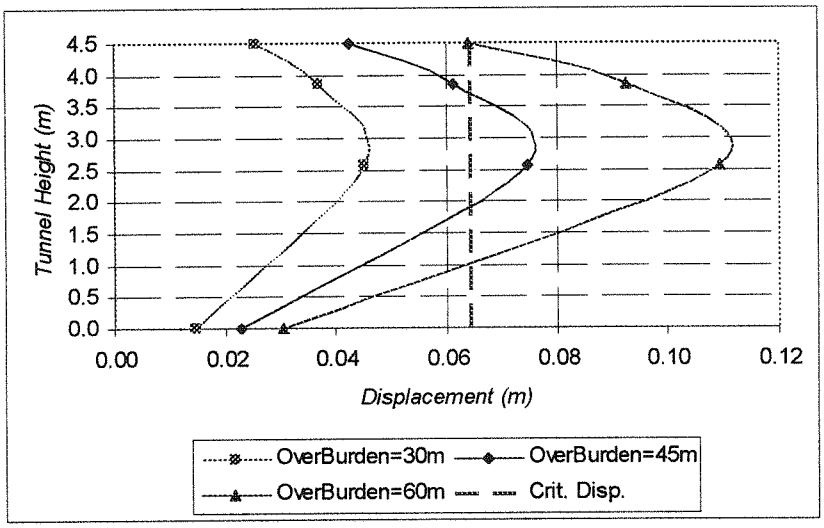
۲-۳- طرح پایدارسازی سینه کار

همانگونه که در اشکال (۷) و (۹) مشخص است، سینه کار تونل در کنگلومرا و در عمق ٦۰ متری و نیز در لایه رسی به حالت ناپایدار خواهد بود. بنابراین در این بخش اقدام به ارزیابی وضعیت پایداری سینه کار در حالات یاد شده فوق خواهیم کرد.

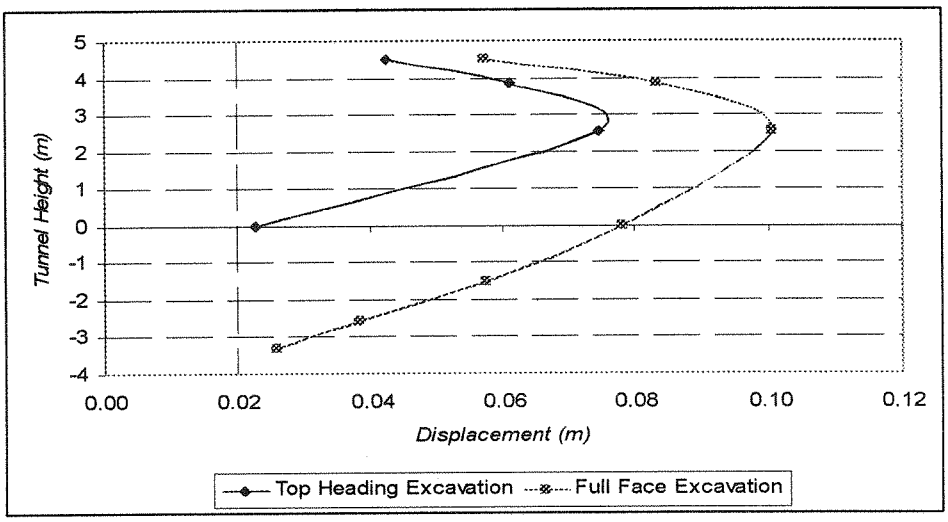
برای افزایش پایداری سینه کار، تاثیر بولت های تزریقی[۳۹] نصب شده در زمین مقابل سینه کار مورد بررسی قرار می‌گیرد.



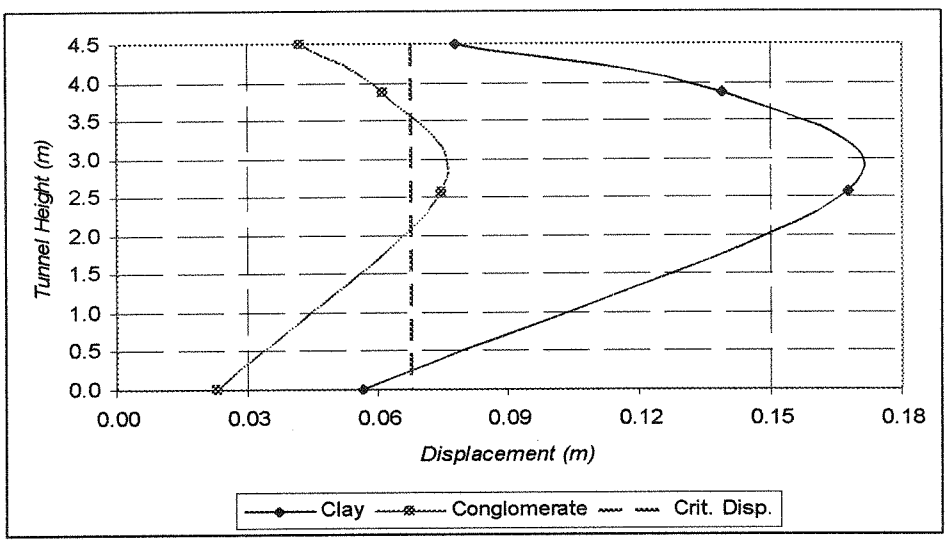
شکل (۶): تاثیر سیستم نگهداری نصب شده در دیواره ها بر تغییر شکل‌های سینه کار



شکل(۷): تاثیر عمق روباره بر تغییر شکل‌های سینه کار



شکل (۸): تاثیر ابعاد مقطع حفاری بر میزان تغییر شکل‌های سینه کار در روباره ۴۵ متری



شکل (۹): پروفیل‌های جابجائی سینه کار در لایه رسی و مقایسه آن با کنگلومرا

مقادیر بحرانی پارامترهای طراحی بولت‌ها بر اساس نتایج حاصل از مطالعات عددی [۱] و مدل‌های فیزیکی سانتریفیوژ [۹]، به صورت ذیل انتخاب شده‌اند:

$$L_{cr} = 0.5 \sim 1.0\,D$$
$$\Lambda_{cr} = 1.08\,{bolt}/{m^2}$$
$$J_{cr} = 100\,MN$$

که در آنها Λ دانسیته بولت‌ها (تعداد بولت‌های نصب شده در واحد سطح) و J صلبیت محوری آنها (حاصلضرب مدول الاستیک بولت‌ها در سطح مقطع آنها) است.

برای مدل سازی بولت‌ها، در این مطالعه از المانهای کابلی نصب شده در سینه کار استفاده می‌شود. در ابتدا این المانها به طول ٤/٥ متر در زمین مقابل نصب می‌شوند. به هنگام حفاری بخشی که در داخل تونل قرار می‌گیرد، حذف و معادل طول بخش حذف شده به انتهای بولت‌ها اضافه می‌گردد. البته در عمل، بولت‌ها تا چندین برابر فاصله مورد نیاز نصب می‌شوند؛ به گونه‌ای که می‌توانند تا چندین گام پیشروی را پوشش دهند، ولی در اینجا برای سادگی فرایند مدل سازی، فرض می‌شود که همواره حداقل طول مورد نیاز بولت‌ها در زمین مقابل تونل موجوداند. شکل (١٠) وضعیت هندسی بولت‌های نصب شده در سینه کار را به نمایش می‌گذارد.

شکل (١١) جابجایی‌های بوقوع پیوسته در سینه کار را در دو حالت بدون نگهداری و نگهداری شده توسط بولت‌های طولی در کنگلومرا به نشان می‌دهد. در این شکل اولاً کارآیی بولت های نصب در سینه کار تونل به خوبی در جلوگیری از بروز شکست در آن به نمایش درآمده است. ثانیاً مشاهده می‌شود که در حالت نگهداری شده جابجایی‌ها حالت یکنواخت تری به خود گرفته اند و از میزان تحدب پروفیل تغییر شکل یافته سینه کار کاسته شده است.

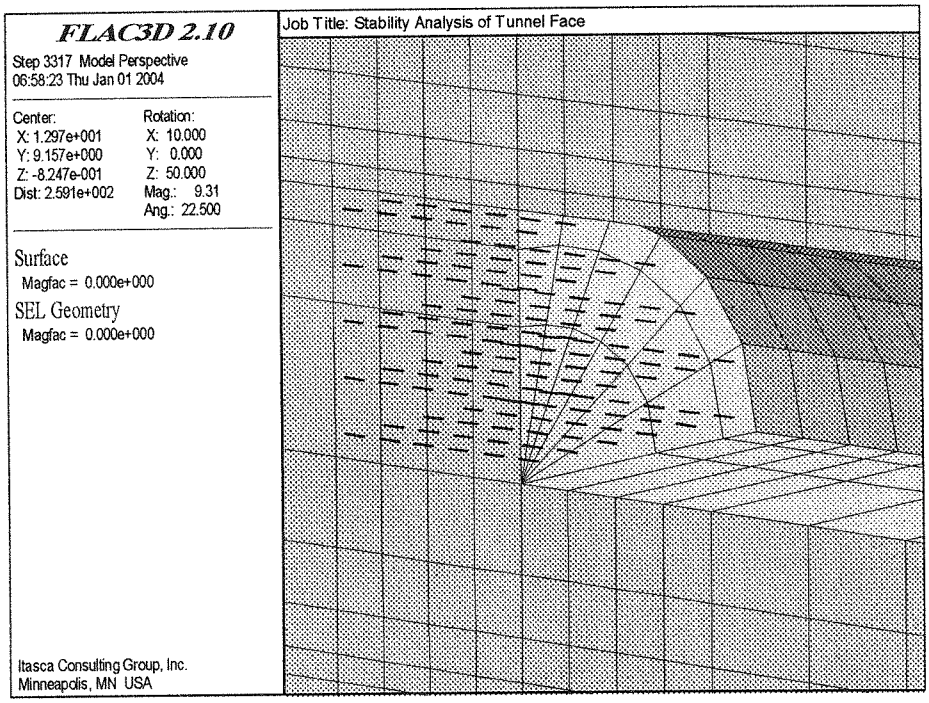
با مقایسه زونهای پلاستیک تشکیل شده در مقابل سینه کار در شکل (١٢) نیز می‌توان شرایط پایدار حاصل از بولت زنی در سینه کار را مشاهده کرد.

در شکل (١٣) پروفیل‌های تغییر شکل طولی تونل در دو حالت ترسیم شده‌اند. در این پروفیل‌ها محور افقی نمایانگر فاصله از سینه کار است. به طوری که سینه کار در موقعیت صفر قرار گرفته است. مقادیر منفی نشان دهنده بخش حفر شده در پشت سینه کار و مقادیر مثبت نمایانگر زمین حفر نشده مقابل سینه کارند. از این شکل به خوبی مشخص است که نگهداری سینه کار تونل اندکی از میزان جابجایی‌ها در زمین مقابل سینه کار می‌کاهد، اما بر جابجایی‌ها به وقوع پیوسته در دیواره تقریباً بی تأثیر است. مورد اخیر قبلاً توسط پیلا نیز نشان داده شده است [١٢].

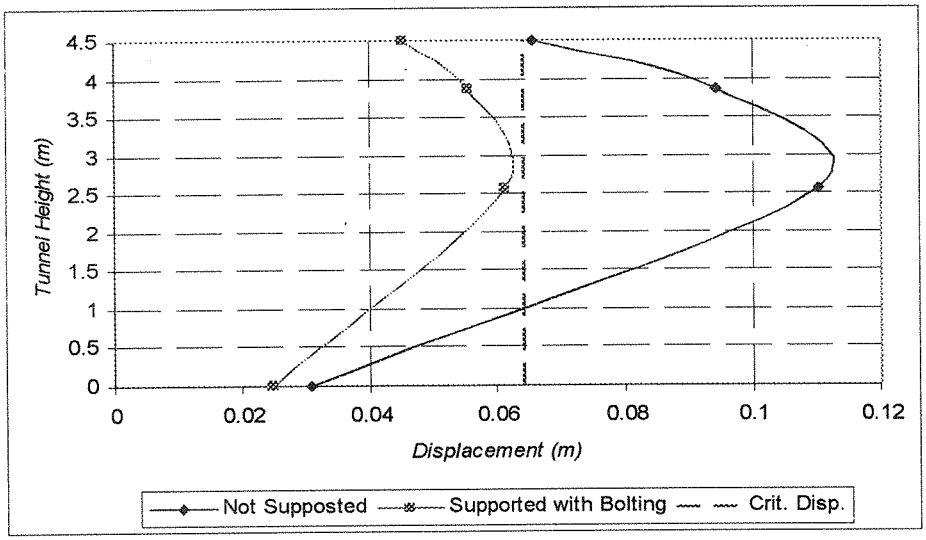
در زمین اطراف تونل وضعیت تنش‌ها کمی متفاوت است. در شکل (١٤) پروفیل فشارهای اطراف سقف تونل در دو حالت با هم مقایسه شده‌اند. در این پروفیل‌ها فشاری که به صورت عمودی بر دیواره تونل اعمال می‌گردد، در زون‌هایی که بلافاصله پشت سیستم حائل قرار گرفته‌اند، بر حسب فاصله از سینه کار رسم شده‌اند. بنابر این می‌توان پروفیل های یاد شده را حتی در بخش‌هایی از تونل که اقدام به حفر و نگهداری آنها نشده نیز گسترش داد. با توجه به این پروفیل‌ها معلوم می‌گردد که با اعمال نگهداری در سینه کار تونل، میزان فشار وارد بر نگهداری دیواره ها اندکی افزایش می یابد. دلیل این امر ممکن است ناشی از محدود شدن حرکات سینه کار باشد. زیرا این امر باعث جلوگیری از رها شدن تنش‌های این ناحیه می‌شود و با دور شدن سینه کار و نصب نگهداری این تنش ها بر سیستم مذکور اعمال می‌گردند

شکل (١٥) مقاطع جانبی جابجایی سینه کار در لایه رسی را در دو حالت بدون نگهداری و نگهداری شده به نمایش می‌گذارد. بولت‌های نصب شده در اینجا نیز پارامترهایی کاملاً مشابه بولت‌های نصب شده در کنگلومرا دارند. این شکل نیز وضعیتی کاملاً مشابه با شکل ١١ را ارائه می‌دهد و نشان می‌دهد که با نصب بولت‌ها در سینه کار وضعیت آن به حالت متعادل درآمده است.

مقایسه مقاطع جانبی تغییر شکل سینه کار در حالت نگهداری شده در رس و کنگلومرا نشان می‌دهد که بولت-ها در دو حالت بیشترین جابجایی سینه کار را در حدود ٦ سانتی متر محدود کرده‌اند و در دو محیط با شرایط ژئومکانیکی متفاوت، تاثیر نسبتاً مشابهی را به نمایش گذاشته-اند. در این حالت می‌توان نتیجه گیری نمود که تغییر جنس زمین تأثیری در پارامترهای طراحی بولت‌ها از جمله طول و تعداد آنها ندارد. البته همانگونه که در جدول (١) مشاهده می‌شود، پارامترهای ژئومکانیکی بکار رفته برای کنگلومرا و رس تفاوت نسبتاً کمی باهم دارند و ممکن است تشابه یاد شده ناشی از این تفاوت اندک باشد. در هر صورت همانگونه که قبلاً نیز بیان شد، به نظر می‌رسد که انجام مطالعات بیشتر در این زمینه ضروری باشد.



شکل (۱۰): وضعیت هندسی بولت‌های نصب شده در سینه کار تونل



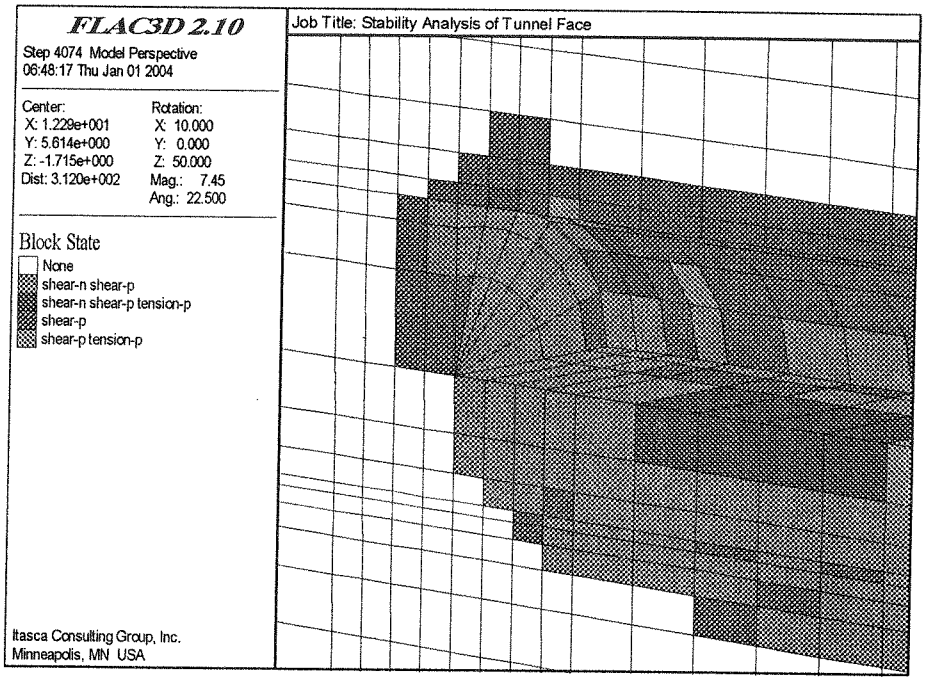
شکل (۱۱): پروفیل‌های جابجایی سینه کار در دو حالت بدون نگهداری و نگهداری شده در کنگلومرا

۳- بحث و نتیجه گیری

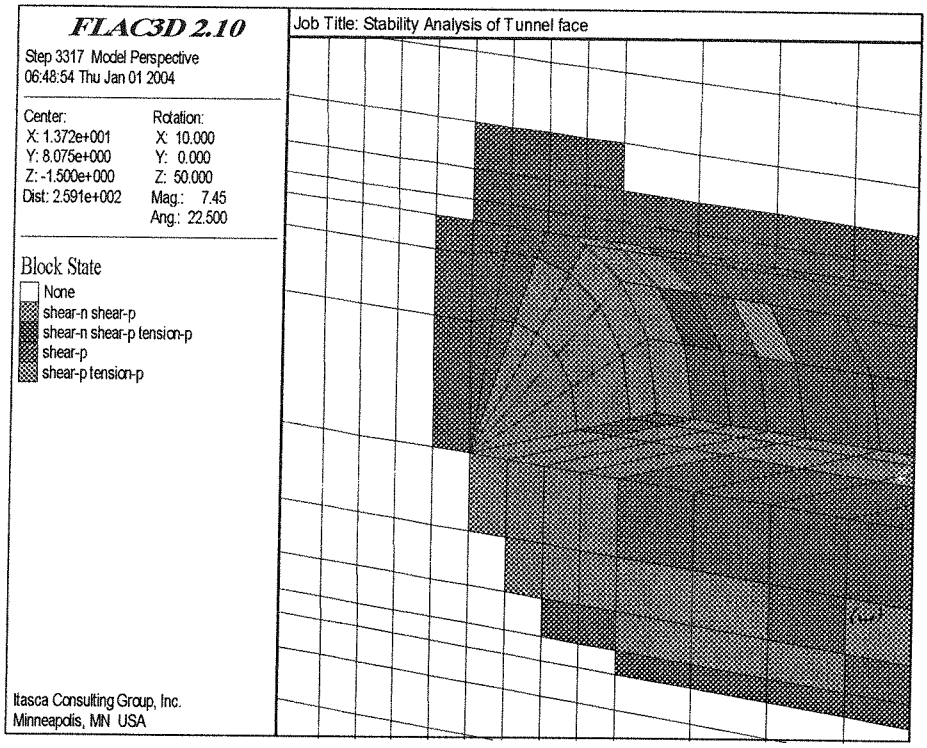
در این بولت‌های تزریقی طولی به عنوان عاملی جهت افزایش پایداری سینه کار بررسی شدند. این روش برخلاف سایر روش های پایدارسازی سینه کار بسیار انعطاف پذیر بوده و به سهولت می‌تواند با اشکال مختلفی از مقطع حفاری و تغییرات شرایط زمین شناسی منطبق گردد.

بر اساس نتایج حاصل از مدل‌های فیزیکی و عددی پارامترهای طراحی بولت‌های مزبور مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که این پارامترها دارای مقداری بحرانی‌اند که هرگاه از آن فراتر روند، تأثیر چندانی در عملکرد بولت‌ها به چشم نخواهد خورد. مقادیر فوق را می‌توان به عنوان حداقل ترکیب مورد نیاز برای اجرای سیستم نگهداری در نظر گرفت. بنابراین تعیین آنها اهمیت زیادی در فرایند طراحی سیستم‌های نگهداری مورد بحث خواهد داشت.

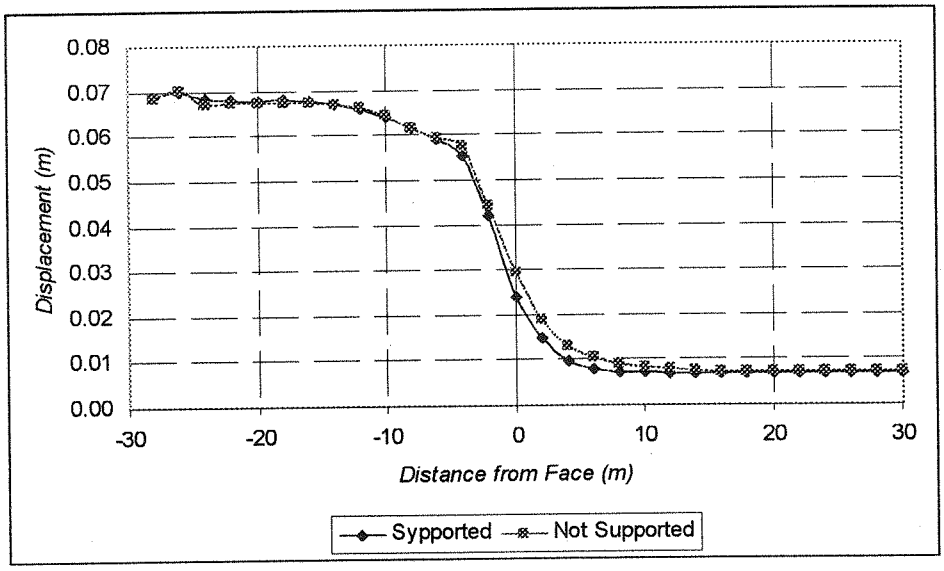
بر اساس مدل‌های ساخته شده نشان داده شد که نوع نگهداری دیواره های تونل بر رفتار سینه کار تقریباً بی- تاثیر است. همچنین چگونگی افزایش جابجایی‌های بوقوع پیوسته در سینه کار با افزایش عمق روباره و ابعاد مقطع حفاری به نمایش درآمد.



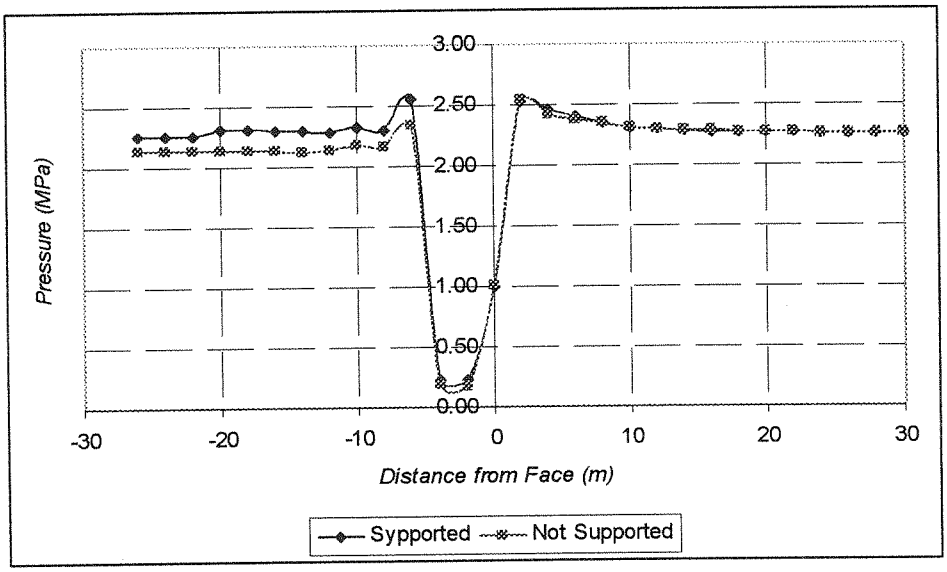
(الف)



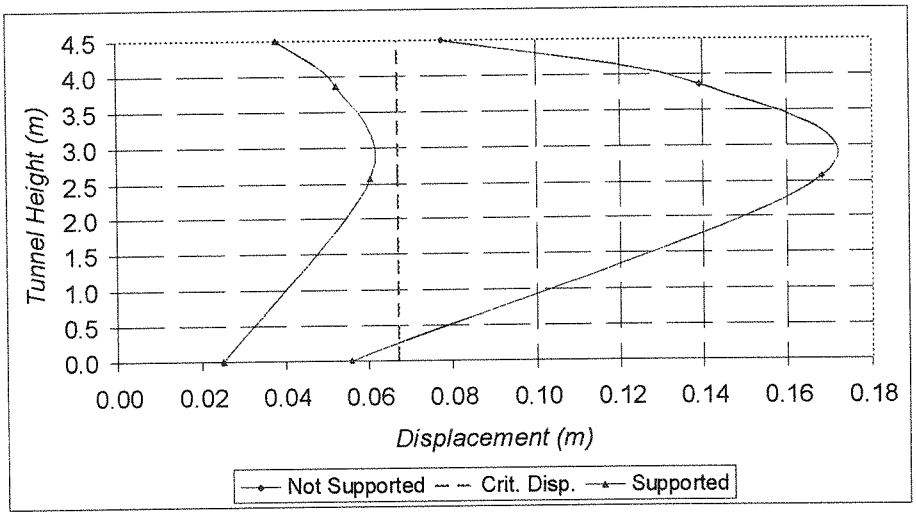
شکل(۱۲): زون‌های پلاستیک مقابل سینه کار تونل (الف) حالت بدون نگهداری،(ب) نگهداری شده



شکل (۱۳): پروفیل‌های تغییر شکل طولی تونل در دو حالت بدون نگهداری و نگهداری شده در کنگلومرا



شکل (۱۴): پروفیل‌های طولی فشار اطراف تونل در دو حالت بدون نگهداری و نگهداری شده در کنگلومرا



شکل(۱۵): پروفیل‌های جابجایی سینه کار در دو حالت بدون نگهداری و نگهداری شده در رس

در مواردی که پیش بینی می‌شد تونل ناپایدار است، سیستم نگهداری طراحی شد که شامل بولت‌های فایبرگلاس تزریقی نصب شده در سینه کار است و با پیشروی سینه کار از طول آنها کاسته می‌شود. این سیستم به این دلیل انتخاب شده است که ناپایداری‌های موصوف تنها در بخش‌های محدودی از تونل پدید می‌آیند. در مقابل سیستم مورد بحث قابلیت انعطاف بسیار بالایی با شرایط زمین داشته و به راحتی می‌توان در صورت لزوم آنرا به عملیات اجرای تونل اضافه کرد، تغییر داد و در صورت عدم نیاز حذف نمود. بر اساس نتایج حاصل از مدل-های عددی نشان داده شد که سیستم یاد شده می‌تواند به خوبی از عهده پایدار سازی سینه کار برآید.

۷- مراجع

[۱] Yoo, Chungsik; Shin, Hyun – Kang; "*Deformation behavior of the tunnel face reinforced with longitudinal pipes – laboratory and numerical investigations*", Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 18, p.p. 303 – 319, 2003.

[۳] Barely, A. D.; Graham, m.; "Trial soil nailsfor tunnel support in London clay and detection of tendon stiffness and bound length in load transfer", Ground Improvement Geosystems, p.p. 433 – 444, 1997.

[٤] Jassiannosse, C.; Duios, P.; Saitta, A.; "*Tunnel face reinforcement by bolting: Soil bolt homogenization, strain approach*", Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, p.p. 373 – 378, 1996.

[٥] Leca, E.; Leblias, Y.; "*Underground works in soils and soft ground tunneling*", Geo Engineering Conference, p.p. 7– 24, 2000.

[٦] Broere, W.; "*Tunnel face stability and new CPT applications*", PhD Thesis, Delft University Press, 2001.

[٧] Leca, E.; Dormieux, L., "*Upper and lower bound solutions for the face stability of shallow circular tunnels in frictional materials*", Geotechnique, vol. 40, p.p. 581 – 606, 1990.

[٨] Peila, D.; Oreste P. P.; Pelizza, S.; "*Study of the influence of sub – horizontal fiberglass pipes on the stability of a tunnel*", North American Tunnelling' 96, p.p. 425 – 432, 1996.

[٩] Ng, C. W. W.; Shin, H. K.; "*A three – dimensional parametric study of the use of soil nails for stabilizing tunnel face*", Computers & Geotechniques, vol. 29, p.p. 673 – 697, 2002.

[۱۰] Kamata, A.; Mashimo, H.; "*Centrifuge model test of tunnel face reinforced by bolting*", Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 18, p.p. 205 – 212, 2003.

[۱۱] Calvello, M.; Taylor, R.; "*Centrifuge modeling of a spile – reinforced tunnel head*", Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, p.p. 73 – 94, 2000.

[۱۲] Al Hallak, R.; Garnier, G.; Leca, E.; "*Experimental study of the stability of the tunnel face reinforced by bolts*", Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, p.p. 345 – 350, 2000.

[۱۳] Peila, D.; "*A theoretical study of reinforcement influence on the stability of a tunnel face*", Geotechnical and Geological Engineering, vol. 12, p.p. 145 – 168, 1994.

[۱٤] همزبان قراملکی، محمدتقی؛ **ارزیابی پروفیل سه بعدی جابجایی اطراف تونل در زمین‌های نرم توسط مدل سازی عددی**؛ پایان نامه کارشناسی ارشد؛ دانشکده فنی، دانشگاه تهران؛ ۱۳۸٤.

[۱۵] Sakurai, S.; "*Evaluation of the mechanical stability of underground excavations*" , www.jnc.go.jp, 1988.

۸- زیر نویس ها

1 Stress-Strain
2 Plain Strain
3 Plain Stress
4 Broms
5 Bennermark
6 Davis
7 Leca
8 Dormieux
9 Upper Bound
10 Lower Bound
11 Rheology
12 Mastropietro
13 Brbacci
14 Swellex
15 Grass
16 Fiberglass
17 Arsena
18 Lunardi
19 Fiberglass
20 Composite
21 Open Face Excavation
22 Centrifuge
23 Kamata
24 Taylor
25 Peila
26 Shin
27 Axial Rigidity
28 Yoo
29 Roadheader
30 Top Heading
31 Benching
32 Shotcrete
33 Wire Mesh
34 Lattice Grider
35 Chainage
36 Critical Strain
37 Sakurai
38 Modulus of Elasticity
39 Grouted