

تحلیل کلیدی تأثیر فشار متعادل کننده زمین سپر EPB در جابه‌جایی‌های سینه‌کار تونل به روش عددی در شرایط ژئومکانیکی تونل انتقال آب ابوذر تهران

مهدی اسدالهی^۱ و حسن مومینوند^{۲*}

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه

^۲ دانشیار گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه

(دریافت: ۹۶/۴/۳۰، پذیرش: ۹۸/۲/۴، نشر آنلاین: ۹۸/۲/۴)

چکیده

طرح تونل انتقال آب ابوذر به‌منظور کنترل، هدایت جمع‌آوری آب‌های سطحی و سیلاب‌ها، کاهش آلاینده‌ها در سطح شهر تهران و خارج‌سازی آن توسط سامانه انتقال مناسب و ایمن به اجرا در آمده است. حفر این تونل به روش مکانیزه و به کمک یک دستگاه TBM از نوع سپر ترکیبی در دو حالت باز و بسته به صورت سپر تعادلی فشار زمین (EPB) انجام گرفته است. پایداری سینه‌کار در حال حفاری توسط سپر تعادلی فشار زمین در ابتدای تونل به فاصله ۱۵۰۰ متر دارای اهمیت فوق‌العاده‌ای است. تونل ابوذر در طول مسیر دارای روباره‌های با ضخامت‌های مختلفی است. به این منظور در چهار مقطع در طول مسیر در فواصل ۵۰۰، ۷۵۰، ۹۵۰ و ۱۲۰۰ متر از دهانه تونل که نسبت ضخامت روباره به قطر تونل به‌ترتیب ۱/۱۰، ۱/۳۳، ۱/۵۶ و ۱/۷۰ است، فشار نگهداری سینه‌کار تونل با استفاده از روش‌های مختلف تجربی و تحلیلی برآورد شده است. به علت پدیده قوس فشار در بالای سینه‌کار تونل مقدار فشار نگهداری سینه‌کار برآورد شده از هر یک از روش‌های تجربی و تحلیلی با افزایش ضخامت روباره تغییر چندانی ندارد. تأثیر فشار نگهداری اعمال‌شده بر سینه‌کار تونل حاصل از روش‌های مختلف تجربی، تحلیلی و عملیاتی در میزان جابه‌جایی‌ها به روش عددی با استفاده از نرم‌افزار سه‌بعدی FLAC^{3D} در مقاطع مختلف تونل مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش ضخامت روباره یا نسبت ضخامت روباره به قطر تونل، با اعمال فشار نگهداری سینه‌کار به روش‌های تجربی و تحلیلی، میزان جابه‌جایی‌های حاصل از مدل‌سازی سینه‌کار تونل با نرم‌افزار سه‌بعدی FLAC^{3D} برای نسبت ضخامت روباره به قطر تونل بیشتر از ۱/۵۶، خیلی بیشتر از نسبت ضخامت روباره به قطر برابر ۱/۳۳ است. این نشان می‌دهد به علت بسته بودن سیستم حفر تونل به روش سپر متعادل کننده فشار زمین، میزان آزادسازی تنش که منجر به ایجاد پدیده قوس فشار می‌گردد، کم‌تر از روش‌های دیگر حفر تونل است. نتایج نشان می‌دهد که روش‌های تجربی و تحلیلی براساس پدیده قوس فشار، برآورد مناسبی از فشار نگهداری سینه‌کار با افزایش ضخامت روباره برای حفر تونل به روش سپر متعادل کننده فشار زمین حاصل نمی‌نمایند. همچنین نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که فشار برابر حدود ۹۰ درصد تنش افقی بجا، فشار مناسبی برای نگهداری سینه‌کار تونل ابوذر است.

کلیدواژه‌ها: سپر تعادلی فشار زمین، فشار نگهداری، سینه‌کار، تونل، روش عددی.

۱- مقدمه

شهری با توجه به میزان بارندگی، وضعیت توپوگرافی، شرایط ژئوتکنیکی و حتی سطح رفاه مورد انتظار برای آن شهر، از مجموعه‌ای از راهکارها برای جمع‌آوری و مدیریت آب‌های سطحی بهره گرفته می‌شود. در طرح جامع آب‌های سطحی تهران نیز یک سری از راهکارها برای این منظور ارائه گردیده است که از جمله آن‌ها می‌توان به طرح تونل انتقال آب ابوذر به‌منظور جمع‌آوری آب‌های سطحی و کاهش آلاینده‌ها در سطح شهر تهران اشاره کرد. تونل انتقال آب ابوذر با طولی در حدود ۴۰۰۰ متر در مجاورت کانال سرخه‌حصار حدفاصل پل دوم تا بزرگراه افسریه احداث می‌شود. حفر این تونل به صورت مکانیزه و به کمک یک دستگاه

امروزه به‌دلیل گسترش ساخت‌وساز و توسعه شهرها از جمله کلان‌شهر تهران و تجاوز به حریم مسیل‌ها و آبراهه‌های طبیعی و حذف بخش‌های فزاینده‌ای از شبکه طبیعی مسیل‌ها بیم آن می‌رود، در صورت وقوع بارندگی‌های شدید، معابر شهر دچار آب‌گرفتگی شده و به‌تبع آن خسارات زیادی به زیرساخت‌های شهری وارد آید. از این‌رو، به‌منظور کاهش چنین مشکلاتی که می‌توانند سبب ایجاد اختلال در رفت‌وآمد شهروندان گردند، نیاز به جمع‌آوری، نفوذ و استفاده مجدد از رواناب‌های سطحی در شهرهای بزرگ، روزبه‌روز نمود بیشتری پیدا کرده است، به‌طوری‌که در هر

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۴۴-۳۳۲۹۷۲۸۸۷

TBM^۱ از نوع سپر ترکیبی که قابلیت حفاری در دو حالت باز و بسته به صورت سپر تعادلی فشار زمین را دارد، انجام می‌گیرد. در شرایطی که جبهه کار تونل ناپایدار باشد، دستگاه بایستی در مد بسته (EPB) به کار گرفته شود. به هنگام استفاده از ماشین-های حفاری از نوع سپر تعادلی فشار زمین مسئله تعیین فشار سینه کار از اهمیت فوق العاده‌ای برخوردار است. به طوری که تعیین مقدار این فشار جهت جلوگیری از تخریب سینه کار و نشست زمین از یک سو و ممانعت از بالازدگی زمین از سوی دیگر، همواره بایستی مدنظر قرار بگیرد. با توجه به این که روباره تونل انتقال آب ابوذر تهران متغیر است و خود موجب نیاز به دقت بیشتر در محاسبه مقادیر فشار سینه کار لازم برای عملیات حفاری در طول مسیر می‌گردد. تعیین مقدار صحیح فشار سینه کار تأثیر قابل توجهی بر تنش و رفتار مکانیکی خاک همچون جابه‌جایی، نشست و در نتیجه ایمنی و سرعت پیشروی عملیات حفاری خواهد داشت.

پایداری سینه کار تونل به روش تئوری (Mollon و همکاران، ۲۰۱۱؛ Perazzelli و همکاران، ۲۰۱۴)، آزمون‌های تجربی (Takano و همکاران، ۲۰۰۶؛ Ahmed و Iskandar، ۲۰۱۲؛ Chen و همکاران، ۲۰۱۳؛ Indinger و همکاران، ۲۰۱۱) و روش عددی (Mollon و همکاران، ۲۰۰۹؛ Khezri و همکاران، ۲۰۱۶) مورد بررسی قرار گرفته است. فشار سینه کار عامل مهمی در پایداری سینه کار تونل است. فشار نگهداری سینه کار در روش‌های مختلف حفر تونل به شیوه تجربی، تحلیلی و عددی توسط محققان متعددی مورد بررسی قرار گرفته است (Liu و همکاران، ۲۰۱۶a، ۲۰۱۶b؛ Li و همکاران، ۲۰۰۹؛ Sun و همکاران، ۲۰۰۶؛ Toan، ۲۰۰۶؛ Kasper و Meschke، ۲۰۰۶). Kim و Tonon (۲۰۱۰) در بررسی فشار سینه کار تونل به روش عددی به این نتیجه رسیدند که حداقل فشار سینه کار به دست آمده توسط روش عددی اجزای محدود همیشه مساوی و یا بیشتر از حداقل فشار سینه کار به دست آمده توسط راه‌حل‌های تحلیلی است. در بررسی تأثیر فشار جبهه کار بر نشست سطح زمین در تونل‌سازی مکانیزه با سپر متعادل کننده زمین، نتایج نشان می‌دهد، برای فشار نگهداری سینه کار دارای مقدار ثابت، با افزایش نسبت ضخامت روباره (H) به قطر تونل (D)، میزان نشست کاهش می‌یابد. این در صورتی است که نشست در تاج تونل چندین برابر نشست در سطح زمین است. بدیهی است که برای تونل دارای قطر ثابت، هرچه ضخامت روباره افزایش یابد نشست سطح زمین کاهش می‌یابد. برای تونل که یک سازه خطی است در عمق خیلی زیاد با نصب سیستم نگهداری سگمنت مناسب به صورت پیوسته، انتظار می‌رود که نشست در سطح زمین صفر شود. اما در زمین‌های سست که با سپر متعادل کننده فشار زمین حفر می‌شوند، طبیعی

است که با کاهش فشار سینه کار تونل (کم‌تر از حد تعادل) جابه‌جایی در سینه کار رخ می‌دهد. با این وجود با اندازه‌گیری نشست در سطح زمین نمی‌توان به درستی در رابطه با جابه‌جایی سینه کار تونل قضاوت نمود. پدیده نشست سطح زمین بخشی از عواقب ناشی از تأثیر فشار سینه کار تونل است. برای بررسی این که چه فشاری برای اعمال به سینه کار در روش حفر با سپر متعادل کننده زمین مناسب است، بایستی جابه‌جایی‌های سینه کار تونل که در معرض هجوم پیوسته فشار سر ماشین حفر است را مورد ارزیابی قرار داد. روش‌های برآورد فشار سینه کار تونل عموماً برای انواع روش‌های حفر تونل بوده و اکثر این روش‌ها پدیده قوس فشار را نیز در محاسبات دخالت می‌دهند یا فرمولاسیون آن‌ها طوری است که فشار کم‌تری نسبت به تنش افقی برآورد می‌نمایند. پدیده قوس فشار براساس تنش‌زدایی حاصل شده و در حدود نسبت ضخامت روباره به قطر تونل بیشتر از ۱/۵ تأثیر آن ملاحظه می‌شود (Broere، ۲۰۰۱). این باعث می‌شود فشار کم‌تری برای نگهداری سینه کار برآورد شود. تاکنون مشخص نشده است که آیا پدیده قوس فشار در سینه کار تونل به روش حفر با سپر متعادل کننده فشار زمین نیز همچون روش‌های دیگر حفر تونل است؟ همچنین چگونه می‌توان توسط روش‌های تجربی و تحلیلی فشار نگهداری سینه کار در سپر تعادلی فشار زمین را برآورد نمود؟ چنانچه مقدار فشار نگهداری سینه کار به درستی برآورد شود، جابه‌جایی سینه کار ناچیز بوده و تأثیر آن بر نشست زمین نیز می‌تواند قابل صرف‌نظر شدن باشد. در چنین شرایطی نشست زمین مربوط به کیفیت پرمودن فضای خالی بین دیواره خارجی سگمنت‌ها و دیواره‌های تونل بستگی خواهد داشت.

در این تحقیق تأثیر فشار اعمال شده بر سینه کار تونل حاصل از روش‌های مختلف تجربی و تحلیلی در جابه‌جایی‌های سینه کار به روش عددی با نرم‌افزار سه بعدی FLAC^{3D} در چهار مقطع مختلف دارای ضخامت روباره مختلف طی انجام چندین مرحله عملیات کدنویسی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- ویژگی‌های مکانیکی محدوده مورد تحقیق

در تونل انتقال آب ابوذر از دهانه ورودی تونل، تا فاصله ۱۵۰۰ متری به روش بسته توسط سپر تعادلی فشار زمین (EPB) حفر می‌شود و بقیه طول ۲۵۰۰ متر تونل به روش باز حفر می‌شود. فاصله مقطع طولی از دهانه تونل تا مقطع ۱۵۰۰ متری که در بازه روش حفر توسط سپر تعادلی فشار زمین قرار می‌گیرد در شکل (۱) نشان داده شده است. براساس مطالعات زمین‌شناسی مهندسی انجام شده در مسیر تونل، عمده لایه‌های خاکی مسیر تونل به چهار واحد عمومی شامل ET-2، ET-3، ET-4 و ET-5 تقسیم شده

بار روی گوه عمل نمی‌کند و به وسیله خاک‌های اطراف حمل می‌شود.

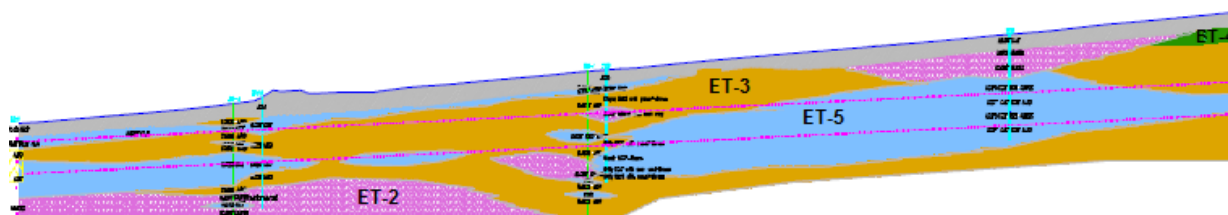
میزان فشارهای سینه‌کار برآورد شده در چهار مقطع تونل دارای ضخامت روباره مختلف به روش‌های تجربی ترزاقی، انجمن زیرزمینی هلند، روش تحلیلی بروئر و عملیاتی در شکل (۲) نشان داده شده است. قطر تونل ابودر دارای ۴/۳۶ بوده و با افزایش فاصله از دهانه تونل ضخامت روباره یا نسبت ضخامت روباره به قطر تونل افزایش می‌یابد. اما مقدار فشارهای نگهداری سینه‌کار تونل به-ترتیب در روش تجربی ترزاقی، فشار اندازه‌گیری شده عملیاتی در جبهه‌کار، روش تجربی انجمن زیرزمینی هلند و روش تحلیلی بروئر در مقاطع مختلف با افزایش نسبت ضخامت روباره به قطر تونل تغییرات چندانی نشان نمی‌دهد (شکل (۲)). فشار عملیاتی نیز در هنگام حفر با استفاده از روش انجمن زیرزمینی هلند و روش تحلیلی بروئر با در نظر گرفتن پدیده قوس فشار در عمقی که نسبت ضخامت روباره به قطر تونل بزرگ‌تر یا مساوی ۱/۵ ضمن تغییراتی توسط مشاور و مجری طرح برآورد شده است (مؤسسه مهندسين مشاور ساحل، ۱۳۹۰).

با افزایش ضخامت روباره تونل تنش برجای قائم و به تبع آن تنش‌های برجای افقی افزایش می‌یابند. اما در روش‌های برآورد فشار نگهداری سینه‌کار، با افزایش ضخامت روباره پدیده قوس فشار در سینه‌کار تونل به وجود می‌آید که این خود سبب کاهش فشار نگهداری سینه‌کار تونل می‌گردد. در ادامه تحقیق بعد از مدل‌سازی به روش عددی با استفاده از نرم‌افزار سه‌بعدی FLAC^{3D} تأثیر فشار نگهداری سینه‌کار حاصل از جدول (۴) در جابه‌جایی سینه‌کار تونل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

است (شکل (۱)) که مشخصات کامل این واحدها در جدول (۱) نشان داده شده است. همچنین ویژگی‌های ژئوتکنیکی واحدهای خاکی مسیر تونل در جدول (۲) نشان داده شده است. برطبق مطالعات زمین‌شناسی انجام شده در این محدوده، خاک‌های این قسمت از تونل دارای مقاومت برشی بسیار پایینی هستند و همچنین تراز تونل بالاتر از تراز آب‌های زیرزمینی بوده و بنابراین حفر تونل در محیطی عاری از آب و به صورت خشک صورت گرفته است.

۳- برآورد فشار در مقاطع مختلف مسیر تونل

با افزایش طول تونل از دهانه آن ضخامت روباره افزایش می‌یابد. روش‌های متعددی برای برآورد فشار نگهداری سینه‌کار تونل ارائه شده است که شرح مفصل آن‌ها توسط اسدالهی (۱۳۹۲) گزارش شده است. در این میان، پرکاربردترین آن‌ها که عوامل مهمی در برآورد فشار سینه‌کار دخالت می‌دهند، روش‌های تجربی Terzaghi (۱۹۴۳)، انجمن زیرزمینی هلند^۲ (Grasso و همکاران، ۲۰۰۸) و روش تحلیلی Broere (۲۰۰۱) هستند. روابط مربوط به این روش‌ها در جدول (۳) نشان داده شده است. روش ترزاقی حالت تعادل حدی^۳ خاک را در سینه‌کار تونل در نظر می‌گیرد طوری که اثرات ستون مؤثر خاک را به عنوان یک بار بر TBM در نتیجه اثر قوسی خاک محاسبه می‌کند. در روش انجمن زیرزمینی هلند مطابق جدول (۳) فشار نگهداری تابعی از فشار مؤثر زمین، ضریب فشار محرک زمین و فشار آب است. مدل گوه چند لایه بروئر نیز از روش سیلو و گوه گرفته شده است. در این روش با در نظر گرفتن قوس خاک^۴ بخشی از ستون خاک بالای گوه به عنوان



شکل ۱- موقعیت مسیر تونل و پروفیل زمین‌شناسی در محدوده مورد تحقیق از دهانه تونل تا فاصله ۱۵۰۰ متری که با سپر تعادلی فشار زمین (EPB) حفر شده است (مؤسسه مهندسين مشاور ساحل، ۱۳۹۰)

جدول ۱- مشخصات واحدهای خاکی تفکیک‌شده در لایه‌های دربرگیرنده مسیر تونل ابودر (مؤسسه مهندسين مشاور ساحل، ۱۳۹۰)

پارامتر	ET-2	ET-3	ET-4	ET-5
این واحد خاکی در رده خاک‌های درشت‌دانه قرار می‌گیرد و جنس آن عمدتاً از ماسه شنی به همراه سیلت و شن ماسه‌ای به همراه سیلت و رس تشکیل شده است.	ذرات تشکیل دهنده این واحد خاکی از ماسه رسی به همراه شن و شن رسی و سیلتي به همراه ماسه، همچنین رس و سیلت ماسه‌ای تشکیل شده است.	این واحد خاکی در رده خاک‌های درشت‌دانه محسوب می‌شود و جنس آن عمدتاً از ماسه رسی به همراه شن تشکیل شده است.	ذرات تشکیل دهنده این واحد خاک عمدتاً سیلت و رس ماسه‌ای هستند.	

4. Soil Arching

2. Dutch Center Underground Bowe (COB)
3. Limiting Equilibrium

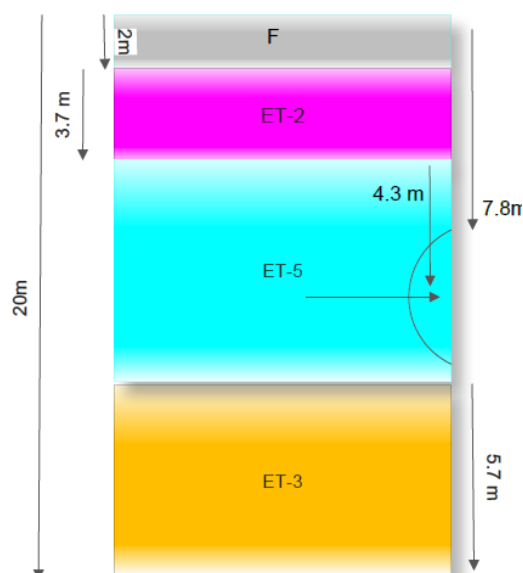
جدول ۲- ویژگی‌های مدول تغییر شکل (E)، ضریب پواسون (ν)، زاویه اصطکاک داخلی (φ') مقاومت چسبندگی (C') و وزن واحد حجم در حالت خشک (γ) واحدهای خاکی مسیر تونل (اسدالهی، ۱۳۹۲).

واحد زمین‌شناسی	E kg/cm ²	ν	φ' درجه	C' kg/cm ²	γ gr/cm ³
ET-2	۷۰۰	۰/۳	۳۸	۰/۱۵	۱/۸
ET-3	۴۵۰	۰/۳۲	۳۲	۰/۲۰	۱/۷۵
ET-4	۵۰۰	۰/۳۳	۳۵	۰/۱۸	۱/۷۵
ET-5	۲۰۰	۰/۳	۲۵	۰/۴۰	۱/۸

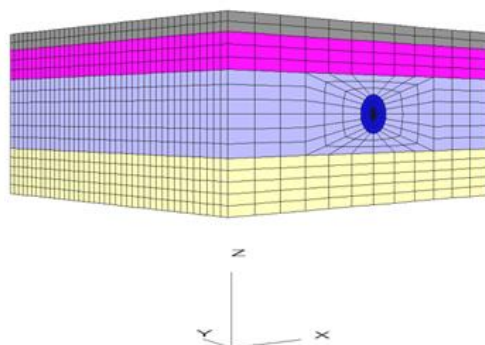
جدول ۳- روش‌های مهم تجربی و تحلیلی برای برآورد فشار نگهداری سینه‌کار تونل

ردیف	نام محقق	نوع روش	رابطه
۱	(انجمن زیرزمینی هلند) (COB)	تجربی	$\sigma_t = k_a \sigma_v + \sigma_w + 20kpa$ $k_a = 1 - \sin \Phi / 1 + \sin \Phi$ فشار نگهداری = σ_t فشار مؤثر زمین، فشار آب، ضریب فشار محرک زمین = K_a
۲	Terzaghi (۱۹۴۲)	تجربی	$B = R \left\{ \tan \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) + \frac{1}{\cos(45 - \frac{\phi}{2})} \right\}$ $\sigma_v = \frac{\gamma B - C}{K_0 \tan \phi} (1 - e^{-K_0 \tan \phi \frac{H_c}{B}}) + P_0 e^{-K_0 \tan \phi \frac{H_c}{B}}$ B = عرض بارگذاری σ_v = فشار خاک Ha = ارتفاع قوسی شدن خاک C = چسبندگی P_0 = سرباره K_0 = ضریب فشار زمین γ = وزن مخصوص D = قطر تونل K_1 = ضریب فشار محرک زمین P_f = فشار نگهداری
۳	Broere (۲۰۰۱)	تحلیلی	$E = - \frac{\zeta - (G_s + G_w) + (2T + K)}{\zeta_+}$ $G_s = BD \cot \theta \sigma'_v(Z_t), \quad G_w = \frac{B D \cot \theta}{2} \gamma'$ $K = \frac{BD}{\sin \theta} c'$ $T = \frac{D \cot \theta}{2} (c' + K_{a3} \bar{\sigma}'_v \tan \phi')$ $\bar{\sigma}'_v \phi = \sigma'_v(Z_t) + \frac{1}{3} D \gamma'$ $k_{a3} = \frac{\sin \theta \cos \theta - \cos^2 \theta \tan \phi - \frac{k_a}{1.5} \cos \theta \tan \phi}{\cos \theta \sin \theta + \tan \phi \sin^2 \theta}$ $a = \frac{(1 + 3C/D)}{(1 + 2C/D)}$ $S = E + W$ $\sigma_t = \frac{4s}{\pi D}$ B = عرض گوه D = قطر تونل γ' = وزن مخصوص غوطه‌ور K = ضریب فشار جانبی ϕ' = زاویه اصطکاک داخلی C' = چسبندگی $\bar{\sigma}'_v$ = تنش قائم در قسمت بالای گوه Z_t = تنش قائم در ضخامت G_s = وزن سیلو G_w = وزن گوه K_{a3} = ضریب فشار جانبی سه‌بعدی E = نیروی مؤثر جانبی T = نیروی برشی خاک W = نیروی آب S = نیروی کل وارد بر سینه‌کار تنش کل = σ_t

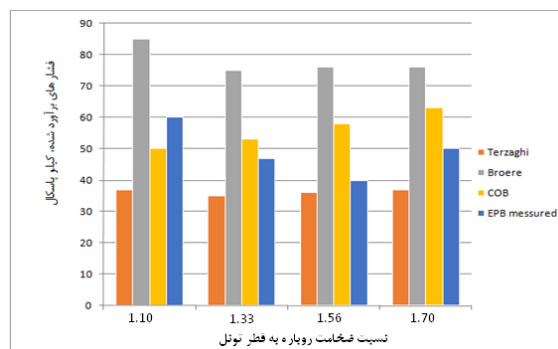
این که شعاع تونل ۲/۱۸ متر است، بنابراین در این تحقیق برای مدل ساخته شده طول و عرض مدل به ترتیب ۴۴ و ۴۰ متر و ارتفاع مدل نیز با توجه به توپوگرافی برای ضخامت روباره بین ۴/۸ متر تا ۷/۸، بین ۱۵ تا ۲۰ متر برای چهار مقطع مختلف در نظر گرفته شد. برای مثال مدل هندسه تونل به همراه موقعیت محورهای مختصات برای مقطع دارای روباره ۷/۸ متر با ارتفاع برابر با ۲۰ متر، طول و عرض به ترتیب ۴۴ و ۴۰ متر در شکل (۴) نشان داده شده است. اندازه مش‌ها و فواصل بین گره‌ها در دقت نتایج به‌ویژه ناحیه نزدیک به جداره تونل و زمان اجرای برنامه دارای اهمیت است. فاصله بین گره‌ها در جداره تونل دارای مقدار حداقل و برابر ۴۴ سانتی‌متر بوده طوری که تعداد ۲۴ گره در محیط دایره تونل وجود دارد. فاصله گره‌ها در مقطع عرضی از جداره تونل تا محدوده به عرض ۲۰ متر در جهت محور x افزایش یافته و پس از آن دارای مقدار ثابتی است (شکل (۴)).



شکل ۳- لایه‌های خاک در محل چاهک TP8 در ۱۲۰۰ متری از دهانه تونل



شکل ۴- مدل هندسه تونل و موقعیت محورهای مختصات در مقطع دارای فاصله ۱۱۵۰-۱۲۰۰ متری از دهانه تونل



شکل ۲- فشارهای به‌دست آمده از روش‌های تجربی، تحلیلی و عملیاتی در روباره‌های مختلف تونل ابوذر در فواصل ۵۰۰، ۷۵۰، ۹۵۰ و ۱۲۰۰ متر از دهانه تونل به ترتیب دارای نسبت‌های روباره به قطر ۱/۱۰، ۱/۳۳، ۱/۵۶ و ۱/۷۰

۴- مدل‌سازی سینه‌کار تونل به روش عددی با استفاده از

نرم‌افزار سه‌بعدی FLAC^{3D}

۱-۴- فرضیات مدل‌سازی

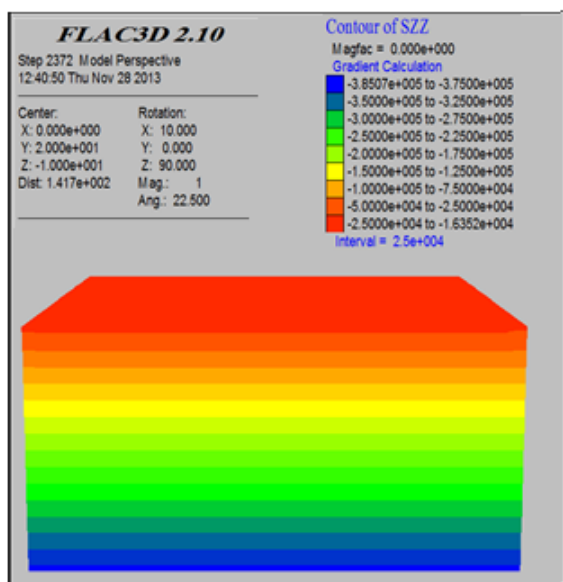
مدل‌سازی عددی همواره با فرضیات و اصولی همراه می‌باشد که نتایج با توجه به آن‌ها حاصل می‌شود و لذا در این قسمت اصولی که در مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است، ارائه می‌شود:

- لایه‌های خاک به صورت افقی و نامحدود در محدوده مدل‌سازی در نظر گرفته شده است.
- حفاری دستگاه به صورت تک‌مرحله‌ای در نظر گرفته شده است.
- ابعاد مدل تا حذف اثر حفاری در مرزها توسعه داده شده است.
- مدل رفتاری خاک‌ها الاستیک-پلاستیک کامل با معیار شکست مور-کومب در نظر گرفته شده است.
- تنش‌های افقی با هم برابر در نظر گرفته شده‌اند و نسبت تنش‌های افقی به تنش‌های عمودی در هر لایه برابر $k = 1 - \sin \varphi$ در نظر گرفته شده است.
- میزان نیروی گرانشی زمین برابر با $g = 10 \text{ m/s}^2$ در نظر گرفته شده است.
- بار سطحی شامل بار ترافیک ۲۰ کیلوپاسکال و به صورت یکنواخت اعمال شده است.

۲-۴- هندسه مدل

لایه‌های خاک در چاهک شماره ۸ واقع در ۱۲۰۰ متری از دهانه تونل در شکل (۳) نشان داده شده است. به منظور کاهش تأثیر مرزهای کناری بر روی نتایج، معمولاً مرزهای طرفین تونل حدود ۵ تا ۱۰ برابر شعاع تونل در نظر گرفته می‌شود. با توجه به

جابه‌جایی است و برای رسیدن به وضعیت تعادل در مدل بایستی جابه‌جایی‌ها را صفر نمود تا شرایط موجود در طبیعت در مدل ایجاد گردد. برای این کار از تاریخچه سرعت و تاریخچه جابه‌جایی می‌توان بهره برد. برای به تعادل رسیدن مدل بایستی نسبت نیرو-های نامتعادل به صفر نزدیک شوند. کنتورهای تنش قائم قبل از حفر برای همین مقطع در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۶- کنتور تنش‌های قائم قبل از حفاری در مقطع دارای فاصله ۱۱۵۰-۱۲۰۰ متری از دهانه تونل

۴-۵- حفر تونل و نصب سیستم نگهداری

در مدل‌سازی هر مقطع پس از به تعادل رسیدن اولیه اقدام به حفر تونل شد. برای حفر تونل از دستور مدل تهی^۵ در زون‌های قرار گرفته در داخل تونل استفاده شد. قطر تونل ابودر ۴/۳۶ متر است. نمونه‌ای از تونل حفر شده در مقطع با ضخامت روباره ۷/۸ متر در شکل (۷) نشان داده شده است. برای نگهداری تونل توسط سپر استوانه‌ای فولادی از المان‌های سازه‌ای پوسته^۶ استفاده شده است. ویژگی‌های مکانیکی سیستم نگهداری به کار گرفته شده در جدول (۵) نشان داده شده است.

جدول ۵- ویژگی‌های مکانیکی سیستم نگهداری همگن المان

سازه‌ای مدل	
مدول الاستیسیته به کیلوپاسکال	ضریب پواسون
1.812×10^8	0.2

۴-۳- اعمال شرایط مرزی و تنش‌های برجا

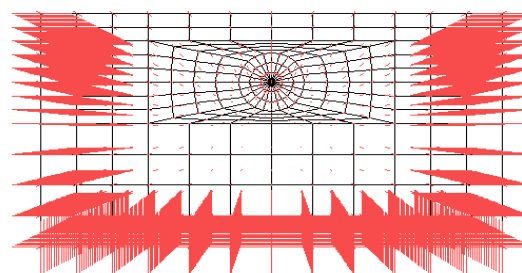
در مدل‌سازی عددی، مرزها به دو صورت طبیعی و مصنوعی می‌باشند. از دیواره یک شیروانی خاکی، سطح زمین و یا محیط یک تونل می‌توان به عنوان مرزهای طبیعی نام برد. مرزهای طبیعی در طبیعت وجود داشته درحالی‌که مرزهای مصنوعی وجود خارجی ندارند و تنها برای کاهش تعداد المان‌ها در مدل‌سازی عددی و محصور کردن زون‌های یک مدل تعریف می‌شوند. در این تحقیق جهت جلوگیری از حرکت مدل و ایجاد تعادل نهایی، مدل در صفحات $x=22$ و $x=-22$ در راستای x ، در صفحات $y=40$ و $y=0$ در راستای y و در صفحه $z=-20$ در راستای z (راستای قائم) دارای تکیه‌گاه ثابت است. مدل در چهار صفحه جانبی قائم در جهت قائم دارای تکیه‌گاه آزاد است. در قسمت بالای مدل در صفحه $z=0$ بار ناشی از ترافیک به صورت گسترده و یکنواخت در راستای عمود بر صفحه برابر ۲۰ کیلو پاسکال اعمال شده است.

بار عمودی ناشی از وزن لایه‌ها به علاوه بار ترافیک می‌باشد. تنش قائم زمین (σ_v) و تنش جانبی زمین (σ_h) به صورت زیر تعیین شد.

$$\sigma_v = \sum \gamma h + 20 \text{ kPa} \quad (1)$$

$$\sigma_h = (1 - \sin \phi) \sigma_v \quad (2)$$

با توجه به ضخامت روباره ۷/۸ متری برای لایه‌های مختلف خاک و بار ترافیک معادل ۲۰ کیلوپاسکال، فشار جانبی خاک در حالت سکون در تراز نیمه ارتفاع تونل حدود ۱۰۰ کیلوپاسکال در مقطع ۱۱۵۰-۱۲۰۰ متری از دهانه تونل محاسبه شد. تصویری از شرایط مرزی در مدل سه‌بعدی در شکل (۵) نشان داده شده است. لازم به ذکر است شرایط مرزی در راستای قائم به صورت غلطکی می‌باشد.



شکل ۵- نمایی از شرایط مرزی در مدل سه‌بعدی

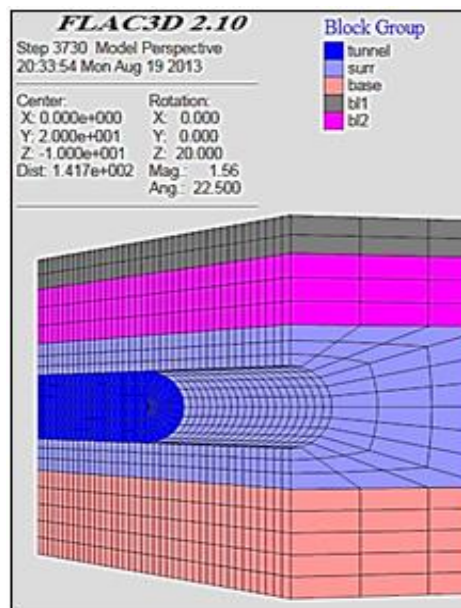
۴-۴- حل مدل تا رسیدن به تعادل قبل از حفاری

قبل از انجام عملیات حفاری چون محدوده تحت تنش فاقد

۴-۷- تعیین جابه‌جایی نقاط شاهد سینه‌کار در اثر اعمال فشار نگهداری به روش‌های مختلف و در چهار مقطع مختلف در طول مسیر تونل

تأثیر فشارهای نگهداری سینه‌کار حاصل از روش‌های مختلف و فشارهای انتخابی در جابه‌جایی‌های نقاط شاهد به‌ترتیب در چهار مقطع در طول مسیر تونل مورد بررسی قرار می‌گیرد که ابتدا از مقطع ۱۱۵۰-۱۲۰۰ متر از دهانه ورودی تونل که دارای روباره ۷/۸ متر است مدل‌سازی شروع می‌شود. در این مقطع از تونل، تأثیر تعداد هفت حالت فشارهای نگهداری سینه‌کار به‌ترتیب برابر صفر کیلوپاسکال (بدون فشار سینه‌کار)، فشار سینه‌کار روش تجربی ترزاقی (۳۷ کیلوپاسکال)، فشار اندازه‌گیری شده عملیاتی در جبهه‌کار (۵۰ کیلوپاسکال)، روش تجربی انجمن زیرزمینی هلند COB (۶۳ کیلوپاسکال)، روش تحلیلی گوه چند لایه‌ای بروئر (۷۶ کیلوپاسکال)، فشار نزدیک به تنش‌های افقی برجا (۹۰ کیلوپاسکال) و فشار بالازدگی (۱۲۰ کیلوپاسکال) بر میزان جابه‌جایی‌های نقاط شاهد واقع بر سینه‌کار تونل مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طوری که قبلاً شرح داده شد، فشار عملیاتی اندازه‌گیری شده براساس روش‌های تجربی، تحلیلی و ضمن تغییراتی، در مقاطع مختلف تونل اعمال شده است. چون هنوز روش مشخصی در منابع علمی مهم تونل‌سازی برای تعیین فشار پایدارکننده سینه‌کار ارائه نشده است (اسدالهی، ۱۳۹۲). همچنین فشار ۱۲۰ کیلوپاسکال به این علت به کار گرفته شد که حداکثر فشاری است که در آن جهت جابه‌جایی‌های به سمت داخل دیواره سینه‌کار اتفاق می‌افتد.

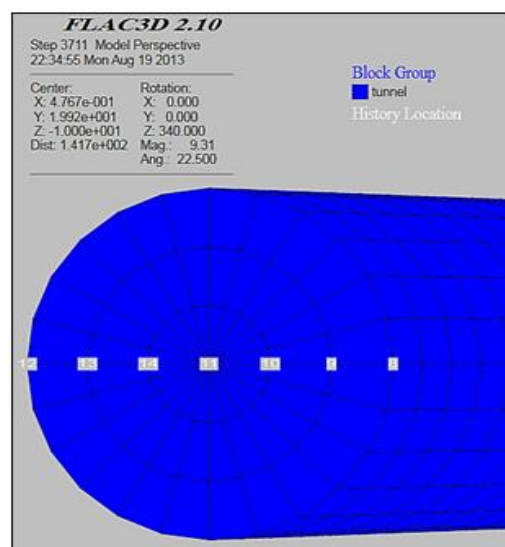
جابه‌جایی سینه‌کار در جهت افقی (محور x) و عمود بر محور تونل بسیار ناچیز و نزدیک به صفر است. همچنین جابه‌جایی سینه‌کار در جهت قائم نیز خیلی کم‌تر از جابه‌جایی در جهت محور تونل است. جابه‌جایی سینه‌کار در جهت محور تونل (در جهت افقی، محور y) در راستای اعمال فشار سینه‌کار، معیار خوبی برای بررسی موضوع است. در هر یک از هفت حالت مدل‌سازی، میزان جابه‌جایی در ۷ نقطه روی قطر افقی واقع در نیمه ارتفاع دایره تونل تحت فشار سینه‌کار یادداشت شد. در هر مرحله جابه‌جایی‌ها به شکل یک نمودار پیوسته استخراج شد. کلیه جابه‌جایی‌های حاصل از هفت مرحله مدل‌سازی برای مقطع ۱۱۵۰-۱۲۰۰ متر از دهانه ورودی تونل که دارای روباره ۷/۸ متر است، در شکل (۹) نشان داده شده است. علامت منفی در شکل (۹) جابه‌جایی سینه‌کار به سمت بخش حفر شده تونل را نشان می‌دهد. در روی قطر افقی تونل بیشترین جابه‌جایی در مرکز سینه‌کار تونل اتفاق افتاده است. همچنین جابه‌جایی در مرکز سینه‌کار تونل نسبت به قطر تونل در جهت ارتفاع دارای مقدار متوسط است و معیاری برای نشان دادن مقدار جابه‌جایی می‌باشد. برای حالتی که هیچ فشاری به سینه‌کار تونل وارد



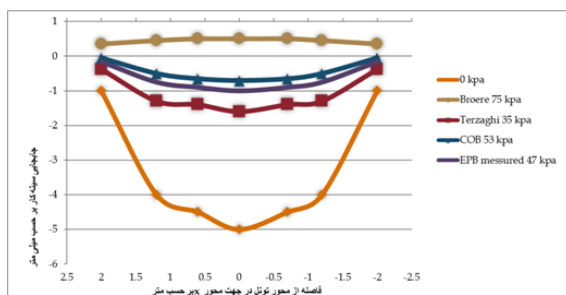
شکل ۷- حفر تونل در مدل ساخته‌شده در مقطع دارای فاصله ۱۱۵۰-۱۲۰۰ متری از دهانه تونل

۴-۶- ایجاد نقاط شاهد بر روی سینه‌کار تونل

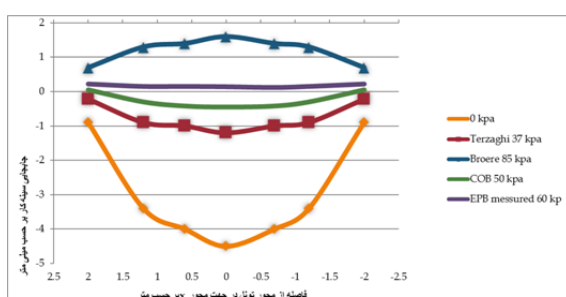
برای نشان دادن میزان جابه‌جایی‌ها در سینه‌کار تونل می‌توان از نقاط شاهده‌ای که در سینه‌کار تونل فرض شده‌اند، استفاده کرد. در واقع پس از حل مدل با مشاهده تاریخچه جابه‌جایی هر یک از نقاط شاهد واقع بر سینه‌کار تونل، میزان جابه‌جایی سینه‌کار مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتیجه مدل‌سازی نشان داد که بیشترین جابه‌جایی در نیمه ارتفاع سینه‌کار اتفاق می‌افتد. نقاط شاهد انتخابی بر روی قطر افقی سینه‌کار تونل در هندسه مدل ساخته شده در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل ۸- موقعیت نقاط شاهد در سینه‌کار تونل در مقطع دارای فاصله ۱۱۵۰-۱۲۰۰ متری از دهانه تونل



شکل ۱۱- میزان جابه‌جایی سینه‌کار حاصل از فشارهای نگهداری مختلف در مقطع ۷۵۰-۷۰۰ متر، دارای روباره ۵/۸ متری و نسبت روباره به قطر ۱/۳۳

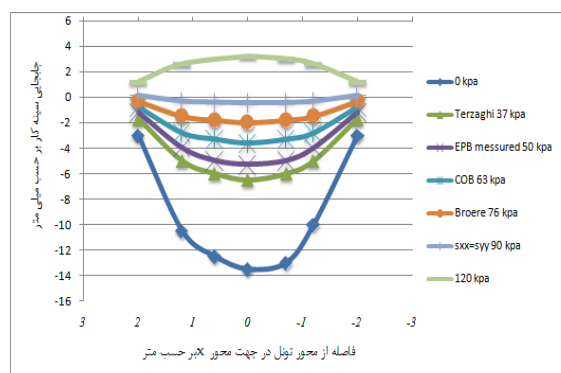


شکل ۱۲- میزان جابه‌جایی سینه‌کار حاصل از فشارهای نگهداری مختلف در مقطع ۴۵۰-۵۰۰ متر و نسبت روباره به قطر ۱/۱۰

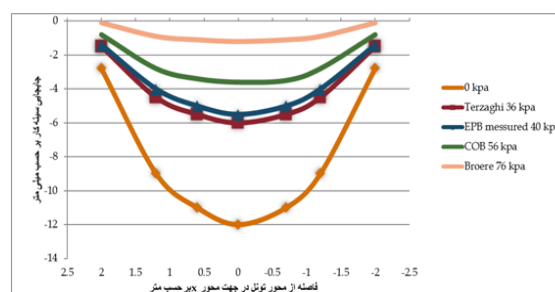
لایه‌های دربرپرنده این سه مقطع تونل در محیط ET-3 دارای ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مطابق جدول (۲) هستند. نتایج به‌دست آمده حاصل از اعمال فشار نگهداری سینه‌کار در هر یک از مقاطع در طول مسیر تونل به‌ترتیب در شکل‌های (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده است.

۵- مقایسه بین نتایج حاصل از روش‌های تجربی و تحلیلی
نتایج حداکثر جابه‌جایی در مرکز سینه‌کار تونل حاصل از اعمال فشار نگهداری تخمینی روش‌های مختلف در شکل (۱۳) با هم مقایسه شده‌اند. در شکل (۱۳) علامت منفی نشان‌دهنده جابه‌جایی افقی در جهت قسمت تونل حفر شده است. به‌علت پدیده قوس فشار، برآورد فشار نگهداری سینه‌کار تونل توسط هر یک از روش‌های مربوطه، با افزایش ضخامت دارای تغییرات ناچیزی است (شکل (۲)). عموماً در حفر تونل به روش‌های مختلف دیگر، قوس فشار را در حدود نسبت ضخامت روباره به قطر تونل بیشتر از ۱/۵ در نظر گرفته می‌شود (Broere, ۲۰۰۱). با اعمال چنین فشارهایی برای نسبت ضخامت روباره به قطر تونل برابر و بیشتر ۱/۵۶ (ضخامت روباره برابر و بیشتر از ۶/۸ متر) و میزان جابه‌جایی‌های حاصل از مدل‌سازی سینه‌کار تونل با نرم‌افزار سه‌بعدی FLAC^{3D}

نمی‌شود، حداکثر جابه‌جایی افقی سینه‌کار تونل در جهت محور y، ۱۳/۵ میلی‌متر بوده و دقیقاً در مرکز سینه‌کار رخ داده است (شکل (۹)). با توجه به این که شعاع تونل انتقال آب ابودر ۲/۱۸ متر می‌باشد، این جابه‌جایی ۰/۶۲ درصد شعاع تونل می‌باشد. روش بروئر از بین روش‌های فشار نگهداری سینه‌کار بیشترین مقدار را داشته و حداکثر جابه‌جایی مربوط به آن ۸/۳ میلی‌متر است. کم‌ترین مقدار قدر مطلق جابه‌جایی که به صفر نزدیک شده مربوط به فشار اعمال شده ۹۰ کیلوپاسکال است که برابر حدود ۹۰ درصد تنش افقی برجا است. با افزایش فشار نگهداری سینه‌کار تا ۱۲۰ کیلوپاسکال برعکس جابه‌جایی‌ها به سمت خارج سینه‌کار اتفاق افتاده است. فشار عملیاتی اندازه‌گیری شده در جبهه‌کار (۵۰ کیلوپاسکال) نیز فشار مناسبی نیست. به‌صورت مشابه مقطع ۱۲۰۰-۱۱۵۰ متر، در سه مقطع دیگر مسیر تونل شامل: مقطع ۹۵۰-۹۰۰، ۷۵۰-۷۰۰ و ۴۵۰-۵۰۰ متر از دهانه تونل، فشار نگهداری سینه‌کار حاصل از روش‌های مختلف تجربی و تحلیلی مطابق جدول (۴)، فشار نگهداری سینه‌کار عملیاتی و صفر مدل‌سازی انجام شد و مقادیر جابه‌جایی‌ها در نقاط کنترل به‌دست آمد (اسدالهی، ۱۳۹۲).

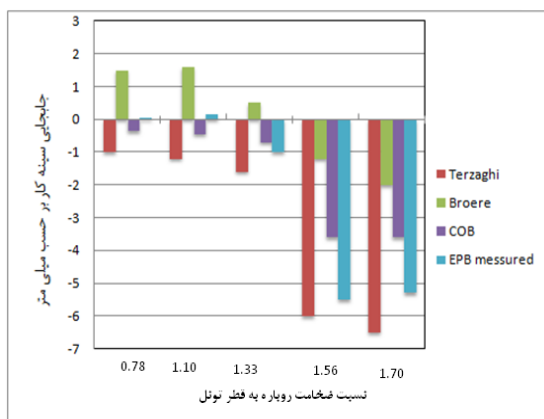


شکل ۹- مقایسه میزان جابه‌جایی‌ها در نقاط شاهد برای فشارهای مختلف نگهداری سینه‌کار در مقطع ۱۲۰۰-۱۱۵۰ متر، دارای روباره ۷/۸ متر و نسبت روباره به قطر ۱/۷۰



شکل ۱۰- میزان جابه‌جایی سینه‌کار حاصل از فشارهای نگهداری مختلف در مقطع ۹۵۰-۹۰۰ متر، دارای روباره ۶/۸ متری و نسبت روباره به قطر ۱/۵۶

و فشار صفر (سینه کار بدون فشار) نیز در مراحل مختلف مدل-سازی بر سینه کار اعمال شد. میزان جابه جایی افقی در جهت محور y حاصل از تعداد ۶ مرحله مدل سازی در شکل (۱۴) نشان داده شده است. در فشار سینه کار ۱۹۵ کیلوپاسکال (معادل ۹۰ درصد تنش افقی برجا)، حداکثر میزان جابه جایی که در مرکز سینه کار در جهت محور y اتفاق می افتد، ناچیز است. این فشار نگهداری سینه کار برابر ۱۹۵ کیلوپاسکال خیلی بیشتر از فشار نگهداری سینه کار برآورد شده توسط روش های تجربی و تحلیلی است. نتایج نشان می دهد برای تونل با قطر و عمق بیشتر نیز فشارهای برآورد شده از روش های تجربی و تحلیلی کافی نیست. جابه جایی در مرکز سینه کار در جهت محور y با افزایش نسبت ضخامت روباره به قطر تونل و همچنین با افزایش قطر تونل با اعمال فشار به روش های تجربی و تحلیلی افزایش می یابد (شکل (۱۵)). نتایج این تحقیق نشان می دهد که روش های تجربی و تحلیلی برآورد مناسبی از فشار نگهداری سینه کار با افزایش ضخامت برای حفر تونل به روش سپر متعادل کننده فشار زمین (EPB) نشان نمی دهند. نتایج مدل-سازی به روش عددی توسط Liu و همکاران (۲۰۱۶a؛ ۲۰۱۶b) با استفاده از نرم افزار $FLAC^{3D}$ در شرایط ژئومکانیکی دیگری برای تونل به قطر ۶ متر و ضخامت روباره به ترتیب دارای ۱۲، ۱۵ و ۱۸ متر (نسبت روباره به قطر ۱/۵، ۲ و ۲/۵)، نسبت فشار سینه کار به تنش افقی برجا به ترتیب ۹۰٪، ۸۸٪ و ۸۲٪ حاصل شده که بیشتر از درصدهای فشار سینه کار نسبت به تنش افقی برجا با استفاده از روش های تجربی و تحلیلی هستند. مقدار ضریب ارتجاعی و زاویه اصطکاک داخلی محیط ET-3 بیشتر از محیط ET-5 است.



شکل ۱۳- مقایسه نتایج جابه جایی در مرکز سینه کار تونل حاصل از روش های مختلف اعمال فشار نگهداری سینه کار در پنج مقطع مسیر تونل شامل: ۷۵۰-۹۰۰، ۹۵۰-۱۱۵۰، ۱۲۰۰-۱۴۵۰، ۱۵۰۰-۱۷۵۰ و ۱۸۰۰-۲۰۰۰ متر از دهانه تونل به ترتیب دارای نسبت روباره به قطر ۱/۷۰، ۱/۵۶، ۱/۳۳، ۱/۱۰ و ۰/۷۸ (قطر تونل ۴/۳۶ متر)

افزایش می یابد. برای ضخامت روباره برابر و بیشتر از ۶/۸ متر، فشار نگهداری سینه کار حاصل از روش های تجربی و تحلیلی کافی نبوده و بایستی بیشتر می شد تا جابه جایی کاهش می یافت. نتایج مدل-سازی نشان می دهد در سه مقطع تونل که نسبت ضخامت روباره به قطر تونل کم تر از ۱/۵۶ بوده فشار عملیاتی نسبتاً مناسب بوده است. در صورتی که فشار عملیاتی نیز برای نسبت ضخامت روباره به قطر تونل بیشتر از ۱/۵۶ نیز کافی نبوده است. به علت قطر کم تونل (۴/۳۶ متر) جابه جایی کم تر به وجود آمده است. عموماً قطر تونل های دوخطه مترو بیشتر از این اندازه و حدود ۸ متر است. چنانچه قطر تونل بیشتر و محیط حفر نیز سست تر می بود، جابه جایی بیشتری حاصل می گردید.

برای روباره ۷/۸ متر وقتی که فشار نگهداری سینه کار تونل برابر ۹۰ کیلوپاسکال وارد شده، جابه جایی ها حدوداً به صفر نزدیک شده اند (شکل (۹)). این فشار نگهداری سینه کار خیلی بیشتر از فشار نگهداری سینه کار برآورد شده توسط روش های ترزاقی (۳۷ کیلوپاسکال)، روش انجمن زیرزمینی هلند (۶۳ کیلوپاسکال) و روش بروئر (۷۶ کیلوپاسکال) است. در روش بروئر و در ضخامت روباره کم؛ فشار بیش از حد برآورد شده، جابه جایی به سمت خارج سینه کار و در ضخامت بیشتر؛ با کم تر برآورد نمودن فشار، جابه جایی به سمت داخل سینه کار تونل حفر شده است. چنین بازه تغییرات جابه جایی با افزایش ضخامت روباره نشان می دهد که به کارگیری روش بروئر نیز برای برآورد فشار نگهداری سینه کار تونل، کارآمد نیست. این نشان می دهد به علت بسته بودن سیستم حفر تونل به روش سپر متعادل کننده فشار زمین (EPB)؛ میزان آزادسازی تنش که منجر به ایجاد پدیده قوس فشار می گردد، همچون روش های دیگر حفر تونل نیست.

در این تحقیق قطر تونل برابر با ۴/۳۶ متر است و برای تونل با قطر بیشتر میزان جابه جایی ها می تواند بیشتر باشد و استفاده از روش های تجربی و تحلیلی برآورد فشار نگهداری سینه کار، می تواند باعث خسارت شود. به این منظور در کیلومتر ۱۲۰۰ متری از دهانه ورودی تونل، میزان جابه جایی تونل فرضی به قطر ۸ متر و دارای روباره ۱۷ متر (نسبت روباره به قطر برابر ۲/۲۰) با اعمال فشار سینه کار حاصل از روش های مختلف نیز مدل سازی و مورد بررسی قرار گرفت. در این شرایط فشار سینه کار به روش های انجمن زیرزمینی هلند، (Grasso و همکاران، ۲۰۰۸)، Terzaghi (۱۹۴۲) و Broere (۲۰۰۱) به ترتیب برابر ۵۶ کیلوپاسکال (۲۵ درصد تنش افقی)، ۱۱۷ کیلوپاسکال (۵۰ درصد تنش افقی برجا) و ۱۴۷ کیلوپاسکال (۶۸ درصد تنش افقی) برآورد شد. به علاوه فشارهای برآورد شده، فشار ۱۹۵ کیلوپاسکال (معادل ۹۰ درصد تنش افقی) و فشار ۲۳۰ کیلوپاسکال (۱۰۶ درصد از تنش افقی)

قطر تونل از ۱/۵۶ به ۱/۷ تغییر نموده، مقداری ضریب ارتجاعی کاهش یافته است. چون عمق تونل و میزان فشارهای سینه کار نیز تغییر نموده اند، ارزیابی تأثیر پارامتری نظیر ضریب ارتجاعی در میزان جابه جایی در چنین شرایطی امکان پذیر نیست.

۶- نتیجه گیری

(۱) فشار نگهداری سینه کار تونل به روش های تجربی و تحلیلی با افزایش ضخامت روباره در مقاطع مختلف دارای تغییرات ناچیزی است.

(۲) نتایج نشان داد با اعمال فشار سینه کار حاصل از روش های مختلف تجربی و تحلیلی در مقاطع مختلف تونل دارای نسبت های مختلف ضخامت روباره به قطر ۱/۱۰، ۱/۳۳، ۱/۵۶، و ۱/۷۰ میزان جابه جایی های حاصل از مدل سازی سینه کار تونل ابودر با نرم افزار سه بعدی FLAC^{3D} برای نسبت ضخامت روباره به قطر تونل بیشتر از ۱/۵۶ افزایش می یابد. همچنین فشار عملیاتی اندازه گیری شده نیز فشار مناسبی برای نسبت ضخامت روباره به قطر تونل ابودر بیشتر از ۱/۵۶ نیست.

(۳) روش های مختلف تجربی و تحلیلی برآورد مناسبی از فشار نگهداری سینه کار سپر متعادل کننده فشار زمین با افزایش ضخامت روباره به ویژه برای شرایطی که نسبت ضخامت به قطر تونل بزرگتر از حدود ۱/۵۶ است، نشان نمی دهند.

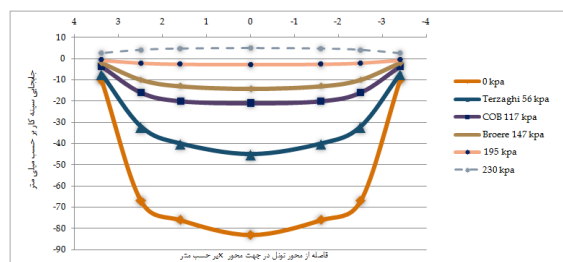
(۴) این نشان می دهد به علت بسته بودن سیستم حفر تونل به روش سپر متعادل کننده فشار زمین (EPB)، میزان آزادسازی تنش که منجر به ایجاد پدیده قوس فشار می گردد، کم تر از روش های دیگر حفر تونل است.

(۵) همچنین نتایج این تحقیق نشان می دهد که فشار سینه کار موردیاز حدود ۹۰ در صد تنش افقی برجا برای نگهداری سینه کار سپر متعادل کننده فشار زمین برای نسبت ضخامت به قطر تونل بزرگتر از ۱/۵۶ در تونل ابودر مناسب به نظر می رسد و استفاده از روش های تجربی و تحلیلی به این منظور قابل اطمینان نمی باشند.

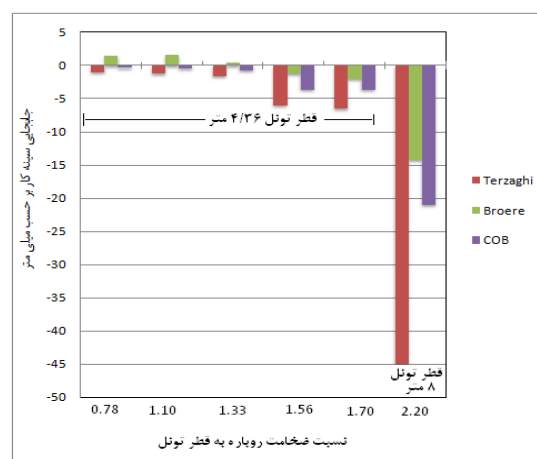
۷- مراجع

اسدالهی م، "بررسی تأثیر فشار متعادل کننده زمین سپر EPB در رفتار مکانیکی سینه کار تونل با استفاده از نرم افزار FLAC^{3D} (مطالعه موردی تونل انتقال آب ابودر تهران)"، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه ارومیه، دانشکده فنی گروه معدن، ۱۳۹۲.

حسن پور م، "برآورد فشار بهینه سینه کار در تونل سازی مکانیزه و بررسی تأثیر پارامترهای زمین بر جبهه کار با استفاده از نرم افزار FLAC^{3D}"، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه



شکل ۱۴- مقایسه میزان جابه جایی ها در نقاط روی قطر افقی در نیمه ارتفاع و در جهت محور Y برای فشارهای مختلف نگهداری سینه کار در کیلومتر ۱۲۰۰ متری از دهانه ورودی برای تونل فرضی به قطر ۸ متر و نسبت روباره به قطر ۲/۲۰ و ضخامت روباره ۱۷ متر



شکل ۱۵- نتایج جابه جایی در مرکز سینه کار تونل حاصل از روش های مختلف اعمال فشار نگهداری سینه کار برای تونل به قطر ۴/۳۶ متر و به ترتیب دارای نسبت روباره به قطر ۱/۷۰، ۱/۵۶، ۱/۳۳، ۱/۱۰ و ۷/۸ در مقایسه با تونل دارای قطر ۸ متر و نسبت روباره به قطر ۲/۲۰ و ضخامت روباره ۱۷ متر

نتایج بررسی های حاصل از مدل سازی عددی تأثیر پارامترهای ژئومکانیکی در میزان جابه جایی سینه کار تونل با استفاده از نرم افزار المان محدود ABAQUS توسط رضایی فرعی و بابائی (۱۳۹۶) و با استفاده از نرم افزار FLAC^{3D} توسط حسن پور، (۱۳۹۷) نشان می دهند، در شرایط یکسان با افزایش ضریب ارتجاعی میزان جابه جایی کاهش می یابد. برای حالتی که نسبت ضخامت روباره به قطر تونل ۱/۳۳ و ۱/۵۶ است، توده خاک دربرگیرنده تونل ابودر محیط ET-3 بوده و دارای ویژگی های ژئومکانیکی نظیر ضریب ارتجاعی یکسان است. اما جابه جایی ها با اعمال فشار سینه کار به روش های تجربی و تحلیلی دارای تغییرات قابل توجهی برای دو نسبت ضخامت روباره به قطر تونل ۱/۳۳ و ۱/۵۶ هستند. برای حالتی که نسبت ضخامت روباره به

- 2014, 43, 459-469.
- Sun S, Pei H, Zhang S, "Analysis of face stability and ground settlement in EPB shield tunnelling for the nanjing metro", The Geological Society of London, IAEG, Paper Number 274, 2006.
- Tanaku D, Otani J, Mukunoki T, "Application of X-ray CT boundary value problems in geotechnical engineering: research on tunnel face failure", Geocongress, 2006, 1-6.
- Terzaghi K, "Theoretical soil mechanics", New York: Wiley, 1943.
- Toan ND, "TBM and lining-Essensial Interface", M.Sc Thesis, Politecnico di Torino, Italy, 2006.
- ارومیه، دانشکده فنی گروه معدن، ۱۳۹۷.
- رضایی فرعی ا ح، بابائی س، "بررسی اثرات پارامترهای مختلف در تعیین میزان بهینه فشار جبهه کار تونل های مکانیزه در خاک های رسی - سیلتی"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، ۱۳۹۶، ۴۷، (۳)، ۳۳-۴۵.
- مؤسسه مهندسين مشاور ساحل، "گزارش روش اجرای تونل انتقال آب ابودر"، ۱۳۹۰.
- Ahmed M, Iskander M, "Evaluation of tunnel face stability by transparent soil models", Tunnelling and Underground Space Technology, 27, 101-110, 2012.
- Broere, W, Tunnel "Face Stability and New CPT Applications", Delft University press, 2001.
- Chen RP, Li J, Kong LG, Tang LJ, "Experimental study on face instability of shield tunnel in sand", Tunnelling and Underground Space Technology, 2011, 33, 12-21.
- Grasso P, Mahtab A, Xu S, "Mechanized Tunneling in Urban Areas: Design Methodology and Construction Control", Taylor & Francis Group, 2008.
- Idinger G, Aklik P, Wu W, Borja RI, "Cetrifuge model test on the face stability of shallow tunnel", Acta Geotechnica, 2011, 6, 105-117.
- Kasper T, Meschke G, "Influence of face pressure on the grouting pressure and TBM design in soft ground tunnel", Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21, 160-171.
- Kim SH, Tonon F, "Face stability and required support pressure for tbn driven tunnels with ideal face membrane-drained case", Tunneling and Underground Space Technology, Elsevier, 2010.
- Li, W, Emerialut, F, Kastner R, and Zhang, ZX, "Stability analysis of large slurry shield-Driven Tunnel in soft clay", Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24, 472-481.
- Liu W, Luo X, Hu L, Yang Y, "3D Tunnel face stability of cross-river shield tunnel considering water pressure", EJGE, 2016a, 21, Bund, 15, 4807-4819.
- Liu W, Wu W, Lina Hu L, Yongxuan Yang Y, "Analysis of limit support pressure on tunnel face below the river bed", International Journal of Simulation Systems, Science and Technology, 2016b, 17, (39), 1-6.
- Mollon G, Dias D, Soubra AH, "Rotaional failure mechanisms for the face stability analysis of tunnels driven by a pressurized shield", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2014, 35, 1363-1388.
- Mollon G, Dias D, Soubra AH, "Probabilistic analysis of circular tunnel in homogenous soils using response surface methodology", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 135, 1314-1325.
- Khezri N, Mohamad H, Fatahi B, "Stability assessment of tunnel face in a layered soil using upper bound theorem of limit analysis", Geomechanics and Engineering, 2016, 11 (4), 471-492.
- Perazzelli P, Leone T, Anagnostou G, "Tunnel face stability under seepage follow condtions", Tunnelling and Underground Space Technology,

EXTENDED ABSTRACT

A Critical Analysis of the Effect of Earth Pressure Balance (EPB) on Displacements of Tunnel Face by Numerical Modeling for the Geomechanical Conditions of Abuzar Water Transitional Tunnel

Mehdi Assadoulahi, Hassan Moomivand*

Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia 1531157561, Iran

Received: 22 July 2017; Accepted: 25 April 2019

Keywords:

EPB, Face support pressure, Numerical modeling.

1. Introduction

Abuzar water transitional tunnel project has been performed to collect surface waters and floods, and to reduce the pollutions in Tehran city environment. The mechanized excavation of this tunnel was carried out by a double shield TBM machine in two cases of open and closed excavation mode. Closed excavation of the tunnel has been performed by earth pressure balance (EPB) machine. The face stability of the tunnel was very important for the distance of 1500 m from the tunnel entrance that excavated by closed mode. Overburden has different thickness along the Abuzar water transitional tunnel. For this reason, tunnel face support pressure has been estimated for four different sections having overburden thickness to diameter ratio of 1.10, 1.33, 1.56 and 1.7 respectively by different empirical and analytical methods. Various methods of estimating face support pressure have been presented. The more applicable methods that incorporate important parameters are empirical methods of Terzaghi (1943) and Dutch Center Onderground Bowe (Grasso, 2008), and analytical method of Broere (2001). The effect of assessed face support pressure using different empirical and analytical methods, and the practical measured support pressure on the values of face displacements of the tunnel have been investigated by numerical modeling using FLAC^{3d} software in four different sections of the tunnel.

2. Methodology

First, tunnel face support pressure have been assessed using different empirical and analytical methods in different sections of tunnel having different overburden thickness to show the effect of overburden thickness on the face support pressure. Then, face displacements of the tunnel have been assessed by numerical modeling in different sections having different overburden thickness by applying different methods of face support pressure estimations.

3. Results and discussion

Estimated tunnel face support pressure using each of empirical and analytical methods have no significant variations with an increase of the overburden thickness (Fig. 1). As the results showed that the estimated face support pressure has not been increased with increasing the depth that is because of presence of arc pressure in the proposed methods. Applying analytical wage multilayer's method of Broere causes lower value of displacement in the tunnel face in comparison with the other methods. The results show that values of displacements from the tunnel face modeling using FLAC^{3d} software have considerably greater value for ratio of overburden to diameter of tunnel of greater than 1.56 in comparison with ratio of overburden to diameter

* Corresponding Author

E-mail addresses: mahdi7690@gmail.com (Mehdi, Assadoulahi), h.moomivand@urmia.ac.ir (Hassan, Moomivand).

of smaller than 1.33 (Fig. 2). The empirical and analytical methods cannot estimate acceptable value of face support pressure of tunnel with an increase of the overburden thickness for a tunnel excavated by earth pressure balance (EPB). The results of this research shows that the face support pressure of about 90% of in-situ horizontal stress is an acceptable pressure for the tunnel face support excavated by EPB.

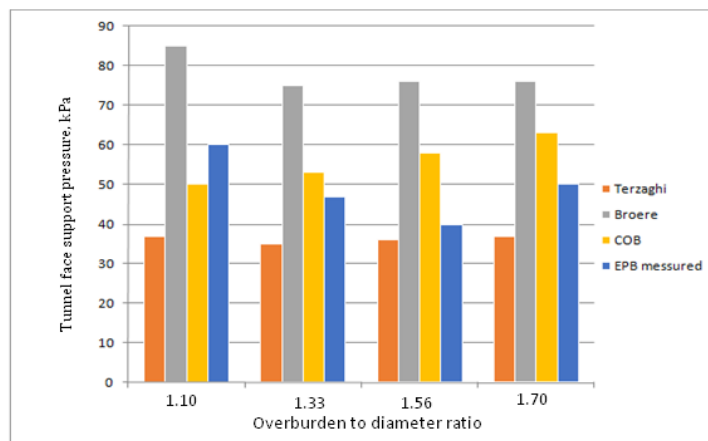


Fig. 1. Face support pressure using each of empirical, analytical and operational methods for ratio of overburden thickness to tunnel diameter of 1.10, 1.33, 1.56 and 1.70 in different sections of 500, 750, 950, and 1200 m from entrance of Abuzar water transitional tunnel respectively

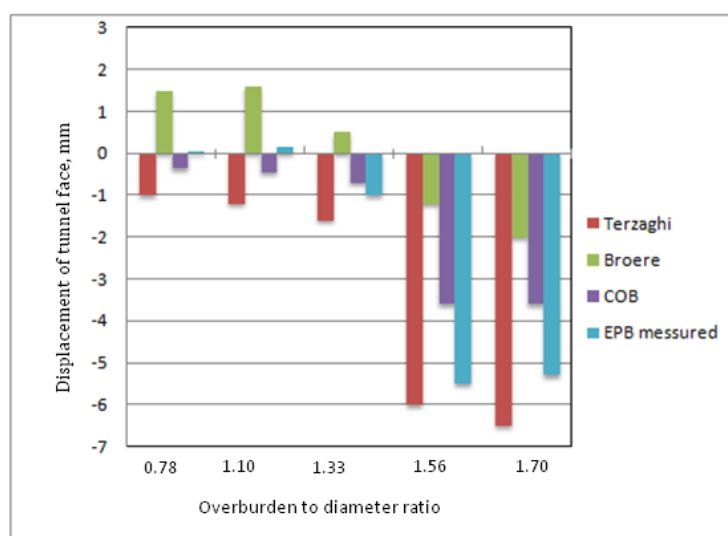


Fig. 2. The obtained displacement at the center of tunnel using five different methods of applying face support pressure for ratio of overburden thickness to tunnel diameter of 0.78, 1.10, 1.33, 1.56 and 1.70 in different sections of 300, 500, 750, 950, and 1200 m from entrance of Abuzar water transitional tunnel respectively.

4. Conclusions

Estimated tunnel face support pressure using each of empirical and analytical methods does not have significant variations with an increase of the overburden thickness. The empirical and analytical methods cannot estimate acceptable value of face support pressure of tunnel with an increase of overburden to diameter ratio of greater than 1.33 for a tunnel excavated by earth pressure balance (EPB).

5. References

- Broere W, "Tunnel Face Stability and New CPT Applications", Delft University press, 2001.
- Grasso P, Mahtab A, Xu S, "Mechanized Tunneling in Urban Areas: Design Methodology and Construction Control", Taylor & Francis Group, 2008.
- Terzaghi K, "Theoretical soil mechanics", New York: Wiley, 1943.