

ارزیابی تأثیر فشار تزریق بر نشست سطح زمین در حفاری با دستگاه EPB (مطالعه موردی: خط ۲ متروی تبریز)

پژوهشی

روح‌الله امجدی^۱؛ فرهاد صمیمی‌نمین^{۲*}؛ حمید چاکری^۳؛ محمدمتین روحانی^۴

۱- دانش‌آموخته‌ی کارشناسی‌ارشد؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، دانشگاه زنجان، r.amjadi71@gmail.com

۲- دانشیار؛ دانشکده مهندسی دانشگاه زنجان، گروه مهندسی معدن، f.samiminamin@znu.ac.ir

۳- دانشیار؛ دانشکده مهندسی دانشگاه صنعتی سهند، گروه مهندسی معدن، chakeri@sut.ac.ir

۴- دانشجوی کارشناسی‌ارشد؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، matinrouhani@yahoo.com

دریافت دست‌نوشته: ۱۴۰۰/۰۶/۳۰؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۰/۱۲/۲۴

شماره صفحات: ۱۶۷ تا ۱۸۲

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/TUSE.2022.11221.1428

واژگان کلیدی	چکیده
نشست سطح زمین مدل‌سازی عددی فضاهای زیرزمینی روش تفاضل محدود FLAC3D	با توجه به حساسیت فضای شهری، حفر تونل با عمق کم، به دقت و توجه بسیاری نیازمند است. از مهم‌ترین نکات قابل توجه در حفر این فضاها می‌توان به نشست سطحی ناشی از حفر تونل اشاره کرد. در این مطالعه، به پیش‌بینی نشست خط ۲ متروی تبریز با روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی پرداخته شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، میزان نشست بیشینه در روش تجربی پک ۲۳/۸، روش تحلیلی لاگاناتان و پولوس ۱۴/۹ و روش عددی تفاضل محدود با نرم‌افزار <i>FLAC3D</i> ، ۱۷/۲ میلی‌متر بدست آمده که با توجه به میزان نشست قرائت شده از ابزاربندی (که برابر ۱۶ میلی‌متر است) دقت نسبی روش‌های عددی و تحلیلی مشخص می‌گردد. سپس به تأثیر تغییرات فشار تزریق بر روی نشست سطحی زمین با روش مدل‌سازی عددی پرداخته شده است. نتایج حاصل نشان داد که میزان تغییر شکل ناشی از فشار تزریق، بسیار ناچیز بوده و هدف اصلی آن، کمک به پرشدن فضاهای ایجادشده است. با بررسی سایر پارامترهای تأثیرگذار بر نشست سطحی می‌توان دریافت که با افزایش فشار روباره و چگالی، میزان جابجایی قائم افزایش و با افزایش فشار جبهه کار، چسبندگی و زاویه اصطکاک، مقدار جابجایی قائم کاهش می‌یابد؛ همچنین در ادامه با بررسی پارامتریک میزان نشست سطحی و فشار روباره، چگالی و چسبندگی، نمودارها و روابطی ارائه شد که بر این اساس، میزان نشست پیش‌بینی‌شده را در مدل مذکور بیان می‌کند.

به طور کلی حفر تونل و دیگر سازه‌های زیرزمینی منجر به حذف توده‌ای از خاک و سنگ منطقه و بروز تغییرات قابل توجه در وضعیت تنش اطراف آن‌ها و حرکت زمین می‌شود. این تغییرات به طور عمومی در شرایط سنگی مناسب، به سطح زمین منتهی نمی‌شود؛ ولی اگر تونل در محیط خاکی و عمق کم حفر شود، می‌تواند این تغییرات را

انجام پروژه‌های تونل‌سازی برای اهداف مختلف در نواحی پرجمعیت شهری در طول دهه گذشته به سرعت افزایش یافته است. تونل‌سازی در مناطق کم‌عمق شهری و در زمین‌های نرم، همواره توأم با مخاطراتی است که نادیده گرفتن آن‌ها می‌تواند عواقب نامطلوبی داشته‌باشد.

همین‌طور، به رابطه‌ای خطی میان فشار روباره و نشست‌سطحی دست‌یافتند.

در این پژوهش، نشست با روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی بررسی و اعتبارسنجی شده و سپس با استفاده از مدل‌سازی عددی سه بعدی تأثیر فشار جبهه‌کار و سایر پارامترهای موثر بر نشست سطح زمین در پروژه‌ی تونل خط دو متروی تبریز بررسی خواهد شد. با توجه به شرایط محیطی تونل، برای مدل‌سازی عددی در این مطالعه از نرم‌افزار *FLAC 3D* استفاده خواهد شد.

۲- مشخصات پروژه

۲-۱- معرفی پروژه خط ۲ متروی تبریز

خطوط متروی تبریز در ۴ خط طراحی شده است. خط ۲ به طول ۲۲/۴ کیلومتر در امتداد شرقی- غربی شهر تبریز قرار داشته و دارای ۲۰ ایستگاه است. بر اساس مطالعات ژئوتکنیکی انجام شده، مسیر این خط به ۶ ناحیه کلی تقسیم به شرح جدول ۱، تقسیم می‌شود.

جدول ۱- وضعیت لایه‌های هر ناحیه

نام ناحیه	از (کیلومتر)	تا (کیلومتر)	وضعیت ناحیه عبوری تونل	توضیحات	عمق آب زبرزمینی (متر)
ناحیه ۱	۰	۵۰۰+۲	عمدتاً در درون رسوبات آبرفتی درشت دانه	-	۱۰-۸
ناحیه ۲	۵۰۰+۲	۰۰۰+۶	عمدتاً از درون رسوبات آبرفتی ریزدانه	-	۱۸-۵
ناحیه ۳	۰۰۰+۶	۳۰۰+۱۱	عمدتاً از درون رسوبات درشت دانه	به دلیل وجود لایه‌های ماسه‌ای اشباع، احتمال وقوع روان‌گرایی در طی زلزله‌های قوی	۳۰-۶
ناحیه ۴	۳۰۰+۱۱	۸۰۰+۱۵	درون لایه‌های سنگی	لایه آبرفتی سطحی: ترکیبی از رسوبات آبرفتی درشت‌دانه و ریزدانه	۲۳-۳
ناحیه ۵	۸۰۰+۱۵	۶۰۰+۱۸	درون رسوبات درشت‌دانه و ریزدانه	-	۲۰-۲
ناحیه ۶	۶۰۰+۱۸	۲۵۰+۲۲	مارن، رس‌سنگ، لای سنگ و ماسه سنگ	-	-

تا سطح زمین انتقال دهد (Leca & New, 2007)، (Sadeghi, et al., 2016) و (Dehghan, et al., 2012).

روش‌های تحلیل نشست به سه گروه اصلی تقسیم می‌شوند که شامل روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی است. در گذشته، بسیاری از تحقیقات بر پایه روابط تجربی استوار بودند (Atkinson, et al., 1975)، ولی امروزه تمرکز اصلی مطالعات بر پایه‌ی روش‌های عددی می‌باشد زیرا در مدل‌سازی عددی، پارامترهای تأثیرگذار بیشتری نسبت به دو روش دیگر دخیل هستند. استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی، بیشتر به دلیل در نظر گرفتن پارامترهایی نظیر رفتار سه‌بعدی سطح حفاری، پدیده قوس‌زدگی، کنترل نشست‌های طولی و رفتار تابع زمان خاک و پدیده خزش و تحکیم است (Meguid, et al., 2008).

چاکری و همکاران (Chakeri & Unver, 2014) مطالعه‌ای بر روی ارتباط پارامترهای موثر ژئوتکنیکی با نشست‌سطحی انجام دادند که بر همین اساس، یک رابطه‌ی لگاریتمی بین چسبندگی و نشست‌سطحی زمین و

۲-۲- وضعیت ژئوتکنیکی خط ۲ متروی تبریز

به منظور مطالعه ژئوتکنیکی پروژه، گمانه‌ها و چاهک‌هایی در طول مسیر و محل ایستگاه‌ها حفاری شده و در طی

مراحل مختلف مطالعات، آزمون‌های برجا (صحرائی) مانند آزمایش بارگذاری صفحه، برش مستقیم برجا، پرسیومتری، نفوذ استاندارد و آزمایش نفوذپذیری لوفران در گمانه‌ها و

چاهک‌های حفاری شده انجام شده‌است. همین‌طور آزمون‌های آزمایشگاهی مانند برش مستقیم، سه محوره، دانه‌بندی و اتربرگ، تحکیم و نفوذپذیری بر روی نمونه‌های اخذ شده از چاهک‌ها و گمانه‌ها در مراحل مختلف مطالعات انجام شده‌است.

۲-۲-۱- مشخصات سیستم نگهداری

برای مدل‌سازی دوغاب تزریقی مابین پوشش بتنی و زمین، از المان حجمی با رفتار الاستیک و برای مدل‌سازی دوغاب تزریقی، از مشخصات دوغاب سیال و دوغاب سخت شده استفاده شد. مشخصات دوغاب پشت‌سگمنت‌ها در جدول ۲، ارائه شده است.

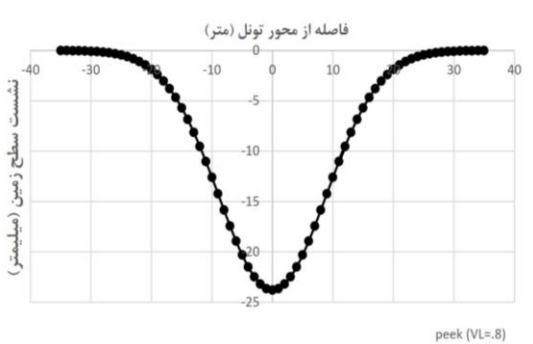
این آزمون‌ها در دو مرحله مطالعات مقدماتی و تکمیلی مسیر تونل و ایستگاه‌ها انجام شده و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی واحدهای مختلف زمین‌شناسی مهندسی با بررسی و تحلیل آماری نتایج حاصل از مطالعات صحرایی

انجام شده‌است.

جدول ۲- مشخصات مصالح بکار برده شده در مدل‌سازی عددی

واحد	دوغاب (سخت شده)	دوغاب (سیال)	پوشش تونل	وزن واحد
KN/m ³	۱۸	۱۸	۲۵	مقاومت فشاری
MPa	۳	۰	۴۰	مدول یانگ
MPa	۲۰	۵	۲۵۲۰۰	ضریب پواسون
-	۰/۳	۰/۴۷	۰/۲	

بیشینه ۲۳/۸ میلی‌متر تعیین شده و پروفیل نشست عرضی حاصل از این روش در شکل ۱، نمایش داده شده است.



شکل ۱- پروفیل عرضی نشست سطح زمین با استفاده از روش پک

با توجه به اینکه تاکنون روش قطعی برای تعیین مقدار دقیق این پارامتر ارائه نشده، در این مرحله و برای بررسی بیشتر، مقادیر فرضی مختلفی که در بازه‌ی پیشنهادی سایر محققان برای پارامتر VL قرار دارند، انتخاب شده تا میزان نشست آن‌ها بررسی شود. در شکل ۲، پروفیل نشست با مقادیر VL مختلف نشان داده شده است.

۳- مدل‌سازی مقطع و بررسی پارامترهای تاثیرگذار

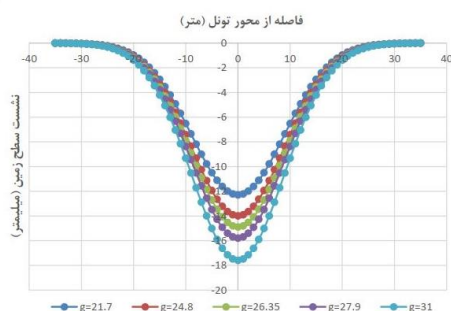
۳-۱- مدل‌سازی نشست با روش تجربی پک

رابطه ارائه شده توسط آقای پک، به پارامترهای پهنای گودی نشست (i)، میزان نشست حداکثری (S_{max}) و افت زمین (VL) وابسته است؛ بنابراین برای بدست آوردن مقدار نشست حداکثری، لازم است پارامتر i محاسبه شود. برای محاسبه این پارامتر از رابطه ۱ استفاده شده است.

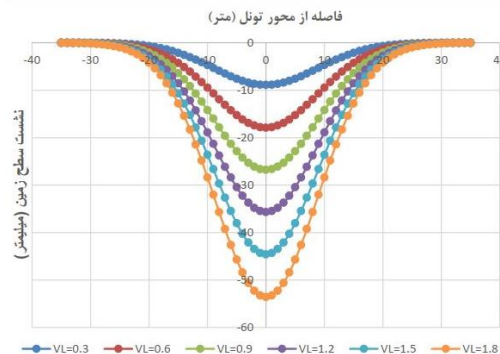
$$\frac{2i}{D} = \left(\frac{Z}{D}\right)^{0.8} \quad (1)$$

$$S_{max} = 0.012 V_L \frac{R^2}{i} \quad (2)$$

مقدار پارامتر i از رابطه‌ی فوق، ۸/۸۷ بدست می‌آید. برای پارامتر افت زمین نیز (از آنجایی که زمین‌شناسی و شرایط ژئوتکنیکی منطقه از نوع رسوبات آبرفتی ریزدانه رسی و سیلتی و میان لایه‌هایی از رسوبات ماسه‌ای بوده و همچنین دلیل اینکه روش اجرا به صورت حفاری سپری است) با توجه به جداول ارائه شده توسط محققین، مقدار ۰/۷۵ و ۰/۸ درصد انتخاب می‌شود (Gugliemetti, et al., 2007) که بر این اساس، مقدار نشست



شکل ۳- پروفیل عرضی نشست زمین با استفاده از روش لاگاناتان و پولوس



شکل ۲- پروفیل نشست سطح زمین با استفاده از روش پک بر اساس V_L های مختلف

جدول ۳- نتایج نشست سطح زمین با روش لاگاناتان و پولوس

S_{max} (mm)	اندازه گپ (میلی‌متر)	فاکتور تصحیح	عمق تونل (متر)
۱۲/۳	۲۱/۷	۰/۰۷	۲۰/۷۴۵
۱۴	۲۴/۸	۰/۰۸	۲۰/۷۴۵
۱۵/۸	۲۷/۹	۰/۰۹	۲۰/۷۴۵
۱۷/۶	۳۱	۰/۱	۲۰/۷۴۵
۱۷۵/۶	۳۱۰	۱	۲۰/۷۴۵

۳-۳- مدل سازی عددی با نرم افزار FLAC3D

با این نرم افزار، تحلیل لاگرانژی محیط سه بعدی پیوسته به کمک روش تفاضل محدود انجام می شود و رفتار سازه های سه بعدی در خاک، سنگ و دیگر موادی مدل می شود که به تسلیم رسیده و رفتار پلاستیک از خود نشان می دهند. هر المان در مقابل نیروها و محدودیت های اعمال شده مطابق با یک قانون تنش- کرنش خطی یا غیرخطی معین رفتار می کند. این نرم افزار توانایی بالایی برای حل مسائل پیچیده در مکانیک و به طور خاص در ژئومکانیک را فراهم می آورد.

برای انجام مدل سازی و محاسبات لازم، مقطعی انتخاب گردید که داده های ابزاربندی آن در اختیار بود. موقعیت این مقطع و ارتفاع روباره در جدول ۴، ارائه شده است.

خط ۲ قطار شهر تبریز به وسیله ماشین حفاری EPB با سپری به طول ۹ متر و قطر ۹/۴۹ متر حفاری می شود. مشخصات تونل و دستگاه حفاری در جدول ۵،

۳-۲- مدل سازی نشست با روش تحلیلی

لاگاناتان پولوس

از آنجایی که قطر حفاری تونل در خط دو متروی تبریز ۹/۴۹ متر و قطر خارجی سگمنت گذاری ۹/۱۸ متر است، بنابراین مقدار گپ بین سگمنت و دیواره حفر شده، ۳۱۰ میلی متر خواهد بود.

طبق اظهارات لی و همکارانش (Lee, et al., 1994) با کاربرد روش های مناسب ساخت (نظیر استفاده از EPB) حرکت سه بعدی جلوی جبهه کار می تواند کنترل شود. به عبارت دیگر، اگر هیچ آزادی فشار در جبهه کار وجود نداشته باشد، میزان این پارامتر صفر خواهد شد ($U_{3D}=0$)؛ همچنین با اجرای اصولی و مهارت کافی در حفر تونل، مشکل نشست زمین دیگر وجود نخواهد داشت و در نتیجه، میزان نشست ناشی از خطای اپراتور نیز قابل صرف نظر خواهد بود ($\omega=0$)، از این رو گپ، معادل گپ فیزیکی (۳۱۰ میلی متر) در نظر گرفته می شود.

طبق تحقیقات اینگلس بر روی نمونه های تزریقی، با انجام عملیات تزریق، فاصله گپ ۰/۱-۰/۰۷ برابر میزان اولیه خود خواهد شد که این مقدار، ضریب تصحیح نامیده می شود. در این تحقیق، مقدار متوسط ضریب تصحیح در نظر گرفته شده است ($S_{max}=14.9$, $g=26.35$). پروفیل های عرضی نشست سطح زمین در شکل ۳، نشان داده شده و همچنین نتایج نشست سطح زمین به ازای مقادیر مختلف ضریب تصحیح تزریق در جدول ۳، ارائه شده است.

خصوصیات اطلاعات وارد شده در نرم‌افزار شامل گروه‌های خاکی و همچنین ماشین حفاری است. به پارامترهای طراحی خاک در مقطع مورد بررسی در جدول ۶، اشاره شده است.

در مدل‌سازی، مرز پایینی در جهت قائم و مرزهای جانبی در جهت‌های افقی ثابت شده و تنش قائم بر اساس وزن روباره در مدل در نظر گرفته شده است. بخشی که زیر سطح ایستایی قرار گرفته، با چگالی اشباع و بخش بالای سطح ایستایی، با چگالی خشک در نظر گرفته می‌شود. همچنین بر روی مرز بالایی هم بار گسترده‌ای برابر با ۲۰ کیلوپاسکال اعمال شده است. برای مدل‌سازی پوشش نگهداری پیش‌ساخته بتنی و سپر دستگاه حفاری از المان پوسته‌ای استفاده و مدل رفتاری قطعات پیش‌ساخته‌ی بتنی و سپر دستگاه حفاری الاستیک فرض شده است.

خصوصیات ماشین حفار و پوشش پیش‌ساخته‌ی بتنی در جدول ۷، ارائه شده و مدل ساخته شده در شکل ۴، نشان داده شده است.

پس از ساخت و اجرای مدل اولیه (قبل از حفاری تونل)، تاریخچه مربوط به نیروهای نامتعادل و کنتورهای تنش قائم استخراج شد، که در شکل ۵، نشان داده شده است. همان طور که در شکل مذکور مشاهده می‌شود، تنش‌ها به طور یکنواخت افزایش می‌یابد و مدل به خوبی شرایط رسیدن به تعادل را طی کرده است.

نمایش داده شده است. اولین گام در اجرای مدل، ساخت هندسه است. مدل اولیه با عرض ۱۰۰ متر، طول ۱۰۰/۵ متر و ارتفاع ۵۰/۴۹ متر طراحی گردید. فاصله مرزهای کناری از مرکز تونل ۵۰ متر بوده و تعداد زون‌ها و گره‌های ایجاد شده در مدل ۲۱۹۷۶۰ و ۲۲۹۰۹۵ است. ابعاد مش‌ها با دور شدن از تونل درشت‌تر شده و در راستای محور تونل نیز مش‌ها با طول ۰/۷۵ متر (نصف طول سگمنت) انتخاب شده‌اند. پوشش بتنی تونل، با ضخامت ۳۵ سانتی‌متر، قطر داخلی ۸/۴۸ متر، قطر خارجی ۹/۱۸ متر و طول ۱/۵ متر در نظر گرفته شده است.

جدول ۴- مقطع انتخابی برای انجام محاسبات

کیلومتر	ضخامت روباره	نسبت C/D
۳۱۵۰	۱۶	۱/۶۹

جدول ۵- مشخصات تونل و دستگاه حفاری

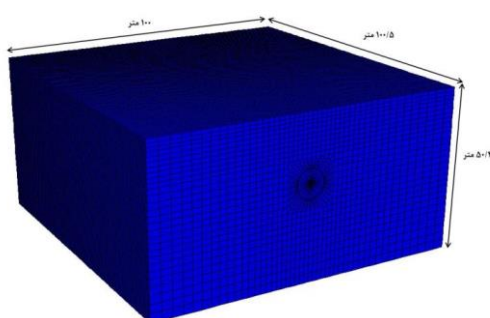
واحد	مقدار	پارامتر	
<i>m</i>	۸۶	طول حفار	دستگاه حفاری
<i>m</i>	۹	طول سپر	
<i>ton</i>	۶۲۵	وزن سپر	
<i>ton</i>	۳۵۰	وزن دنباله	
<i>m</i>	۹/۴۹	قطر حفاری	پوشش پیش‌ساخته بتنی
<i>m</i>	۱/۵	عرض	
<i>m</i>	۰/۳۵	ضخامت	
<i>m</i>	۸/۴۸	قطر داخلی	
<i>m</i>	۹/۱۸	قطر خارجی	

جدول ۶- پارامترهای طراحی خاک در مقطع مورد بررسی

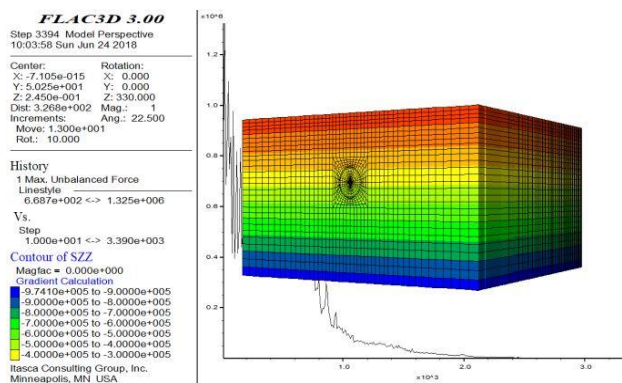
کیلومتر	لایه‌ها	ضخامت (متر)	<i>E</i>	<i>v</i>	ϕ	<i>C</i>	γ_d	γ_m	<i>Hw</i> (متر)
۳۱۵۰	لایه ۱	۲/۳۳	۱۰	۰/۳	۲۲	۱۰	۱/۸	۱/۸	۱۸/۲
	لایه ۲	۱/۰۵	۵۵	۰/۳۳	۲۸/۳	۱۹	۱/۹۴	۱/۵۷	
	لایه ۳	۶/۹۶	۹۰	۰/۴	۲۲	۲۷	۱/۸	۱/۶	
	لایه ۴	۲/۸۶	۹۶۵	۰/۳۳	۱۴	۷	۱/۸۷	۱/۶۵	
	لایه ۵	۲/۶۷	۱۳۵	۰/۳۵	۸/۵	۵۷	۲/۰۱	۱/۷	
	لایه ۶	۴/۱۳	۷۹۵	۰/۳۳	۲۱/۶	۱۴	۲/۰۸	۱/۶۷	
	لایه ۷	۱/۳	۱۲۰	۰/۳۵	۲۷	۱۲	۲/۰۱	۱/۶۵	
	لایه ۸	۴/۸۹	۷۹۰	۰/۳۳	۳۲	۷	۲/۰۴	۱/۶	
	لایه ۹	بستر	۱۲۰	۰/۳۵	۲۸	۱۲	۲/۰۱	۱/۶۵	

جدول ۷- خصوصیات دستگاه حفار و سگمنت

واحد	پوشش پیش ساخته بتنی	دستگاه حفاری	پارامتر
-	الاستیک	الاستیک	رفتار
-	۰/۲	۰/۲۵	ضریب پواسون
Pa	$۲/۵۲ \times 10^{10}$	$۲/۱ \times 10^{11}$	مدول الاستیسیته
Pa	$۱/۹۴۵ \times 10^{10}$	-	مدول بالک
Pa	$۱/۴۵۸ \times 10^{10}$	-	مدول برشی
m	۰/۳۵	۰/۱	ضخامت
Kg/m ³	۲۶۰۰	۷۸۵۰	دانشیته



شکل ۴- مدل سه بعدی تونل



شکل ۵- تاریخچه مربوط به نیروهای نامتعادل در تعادل اولیه و کنترولهای تنش قائم.

فشار مورد نیاز برای تامین پایداری جبهه کار تونل در زمین های خاکی که با دستگاه EPB حفاری می شوند، است. این پارامتر (به خصوص در مواردی که تونل در محیط های شهری حفر می شود) اهمیت بیشتری پیدا می کند. روش های تحلیلی مختلفی برای تخمین فشار مورد نیاز جبهه کار وجود دارد که در این مطالعه از روش های تجربی و تحلیلی متداول برای تخمین فشار جبهه کار که

سپر EPB با استفاده از المان های پوسته ای با رفتار الاستیک خطی مدل شده که برای تامین صلبیت سپر و همچنین در نظر گرفتن وزن ماشین، ضخامت المان های متناظر سپر ۶ سانتی متر انتخاب شده است. در جدول ۵، مقادیر در نظر گرفته شده برای سپر ماشین حفار براساس مشخصات دستگاه حفار خلاصه شده است. یکی از مهم ترین پارامترها در پیشروی دستگاه، تعیین

زاویه‌ی اصطکاک داخلی و نسبت C/D بستگی دارند. در روش جانسکز و استاینر مدل گسیختگی، بصورت یک شکست سه بعدی است که شامل یک گوه گسیختگی در قسمت پایین و سیلوی خاک در قسمت بالا است.

اگر $H > 2D$:

$$\sigma'_v = \frac{a \cdot \gamma' - c'}{k_0 \times \tan \phi} \left(1 - e^{-k_0 \tan \phi \times \frac{H_w}{a}} \right) + \frac{a \cdot \gamma'_a - c'}{k_0 \times \tan \phi} \left(e^{-k_0 \tan \phi \times \frac{H_w}{a}} - e^{-k_0 \tan \phi \times \frac{H}{a}} \right) + q_0 \times e^{-k_0 \tan \phi \times \frac{H_c}{B_1}} \quad (8)$$

اگر $H \leq 2D$:

$$\sigma'_v = \gamma_n \times H \quad (9)$$

که در آن، σ'_v فشار موثر زمین (KPa)، فشار کل زمین (KPa)، k_a ضریب فشار خاک در حال سکون، H ارتفاع روباره (m)، H_w ارتفاع آب (m)، q_0 بار سطحی (KN/m²)، چگالی موثر خاک (KN/m³)، γ'_n چگالی طبیعی خاک (KN/m³)، γ_a چگالی خشک خاک (KN/m³)، D قطر تونل (m)، θ زاویه لغزش گوه (درجه).

مقادیر فشار جبهه کار بدست آمده از روش‌های فوق به همراه مقدار فشار انتخابی برای این مقطع، در جدول ۸، ارائه شده است. میزان فشار تزریق دوغاب پشت سگمنت بطور معمول ۰/۵ بار بیشتر از فشار جبهه کار در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۸- مقادیر فشار جبهه کار بر حسب کیلو پاسکال

برای مقطع انتهایی تثبیت شده

واحد	مقدار بدست آمده	روش
KPa	۱۱۰	COB
KPa	۸۲	Terzaghi
KPa	۱۰۶	Jancsecz and steiner
KPa	۶۳	Leca and Dormieux
KPa	۸۲	مقدار انتخاب شده

برای مدل‌سازی پوشش تونل از المان‌های سازه‌ای با رفتار الاستیک خطی استفاده شده است. بتن مورد استفاده با طبقه‌بندی C45/55 در نظر گرفته شده (خصوصیات

متناسب با مشخصات ژئوتکنیکی خاک منطقه خط ۲ قطار شهری تبریز است استفاده شده است. با استفاده از روش‌های پیشنهادی مرکز ساخت و ساز زیرزمینی آلمان (COB)، روش ترزاقی (Terzaghi, 1943) و روش جانسکز (Jancsecz & Steiner, 1995) و روش پیشنهادی لکا و دورمیو (Leca & Dormieux, 1990) فشار جبهه کار در تاج تونل محاسبه و با یک گرادیان متناسب با مصالح داخل محفظه حفاری دستگاه افزایش داده می‌شود.

در روش پیشنهادی COB مقدار فشار جبهه کار که اندکی بیشتر از فشار جانبی حالت محرک خاک است از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$\sigma_T = k_a \sigma'_v - 2c\sqrt{k_a} + k_a q + u \quad (3)$$

که در رابطه فوق σ'_v تنش قائم موثر، c چسبندگی، q میزان سربار سطحی، u فشار منفذی و k_a ضریب فشار جانبی خاک می‌باشد.

تئوری ترزاقی برای محاسبه بار روی تونل در خاک‌های چسبنده و غیرچسبنده ارائه شده که رابطه آن به شرح زیر است.

$$\sigma_v = \frac{B_1 \cdot \gamma - c}{k_0 \cdot \tan \phi} \left(1 - e^{-k_0 \tan \phi \times \frac{H_c}{B_1}} \right) + q_0 \left(e^{-k_0 \tan \phi \times \frac{H_c}{B_1}} \right) \quad (4)$$

که در این رابطه c چسبندگی خاک، k_0 ضریب فشار جانبی خاک که از رابطه $\phi k_0 = 1 - \sin \phi$ بدست می‌آید، H_c ارتفاع روباره، D ارتفاع تونل، B_0 نصف عرض یا قطر تونل، B_1 نصف طول سست‌شدگی، H_p ارتفاع قوسی، H_w ارتفاع آب، q_0 بار سطحی، γ وزن مخصوص خاک، ϕ زاویه اصطکاک داخلی و σ_v فشار عمودی متوسط روی تاج تونل است.

فشار جانبی خاک جلوی ماشین حفاری در مرکز تونل در حالتی که تونل بالای سطح آب‌زیرزمینی حفاری شده از روابط ۵ و ۶ بدست می‌آید. در این رابطه k_a ضریب فشار جانبی خاک در حالت فعال است.

$$\sigma_T = k_a k_a \times \gamma_d \times (H_p + R) \quad (5)$$

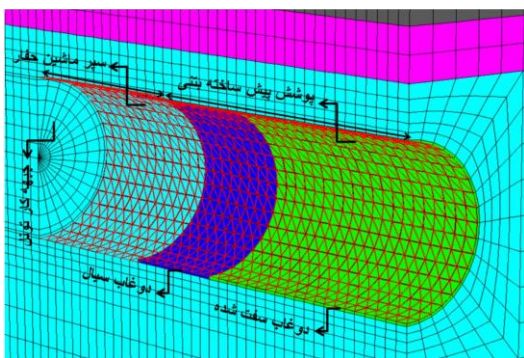
$$k_a = \frac{(1 - \sin \phi)}{(1 + \sin \phi)} \quad (6)$$

رابطه پیشنهاد شده توسط لکا و دورمینو برای بررسی سینه کار تونل دایره‌ای به شرح زیر است:

$$\sigma_T = -CN_c + N_s \sigma_s + N_\gamma \gamma D \quad (7)$$

که در آن N_c ، N_γ ، N_s ضرایب بی‌بعدی هستند که به

بنابراین در مدل‌سازی، مشخصات دوغاب به دوغاب سخت شده تبدیل و همزمان فشار تزریق حذف می‌شود. در پایان گام ۱۲ حفاری، گام‌های ۱ و ۲ شامل نصب پوشش تونل همراه با دوغاب سخت‌شده بدون اعمال فشار تزریق، گام ۳ تا ۶ شامل نصب پوشش تونل همراه با دوغاب تازه (سیال) و اعمال فشار تزریق و گام ۷ تا ۱۲ شامل حفاری تونل همراه با سپر دستگاه است. مراحل مدل‌سازی با حفظ همین فواصل کاری تکرار شده و ادامه می‌یابد. در شکل ۶ و شکل ۷ مراحل حفاری به صورت شماتیک نشان داده شده‌است.



شکل ۶- سپر، سیستم نگهداری بتنی و دوغاب تزریقی (سیال و سخت شده)

۴- اعتبارسنجی نتایج مدل‌سازی عددی

بر اساس نتایج ابزاربندی انجام گرفته، مقدار نشست سطحی در بالای ناحیه مورد مطالعه (در فشار جبهه‌کار ۸۰ کیلوپاسکال) برابر ۱۶ میلی‌متر اندازه‌گیری شده و مقدار نشست سطحی بدست آمده از مدل‌سازی در سطح زمین بالای محور تونل (برای فشار جبهه‌کار ۸۰ کیلوپاسکال) برابر با ۱۷٫۲ میلی‌متر است، با توجه به نزدیکی نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و قرائت‌های محلی می‌توان برای شرایط ژئوتکنیکی مورد نظر با دقت مناسب از مدل رفتاری و الگوی مدل‌سازی انجام گرفته، استفاده کرد.

در شکل ۸، وضعیت نیروهای نامتعادل کننده در هنگام عملیات حفاری و سگمنت‌گذاری و همچنین کنتور جابجایی قائم در فشار جبهه‌کار ۸۰ کیلوپاسکال نشان داده شده‌است.

مقاومتی سگمنت‌ها ارائه شده در جدول ۷ پوشش سگمنتی تونل در مدل‌سازی‌ها بصورت همگن و یکپارچه در نظر گرفته می‌شود؛ اما در واقع این پوشش از تعدادی قطعات بتنی پیش‌ساخته تشکیل شده‌است که با استفاده از مفصل‌هایی به یکدیگر متصل شده‌اند (Blom, 2002) وجود مفصل در پوشش تونل سبب می‌شود از میزان سختی آن در مقایسه با یک پوشش یکپارچه کاسته شود (Teachavorasinskun & Chub-uppakarn, 2010) در نظر گرفتن ضریب اصلاح $\zeta = 0.3$ برای مدول یانگ بتن (Koyama, 2003) مدول یانگ واقعی که باید برای پوشش یکپارچه در تحلیل در نظر گرفته‌شود برابر است با:

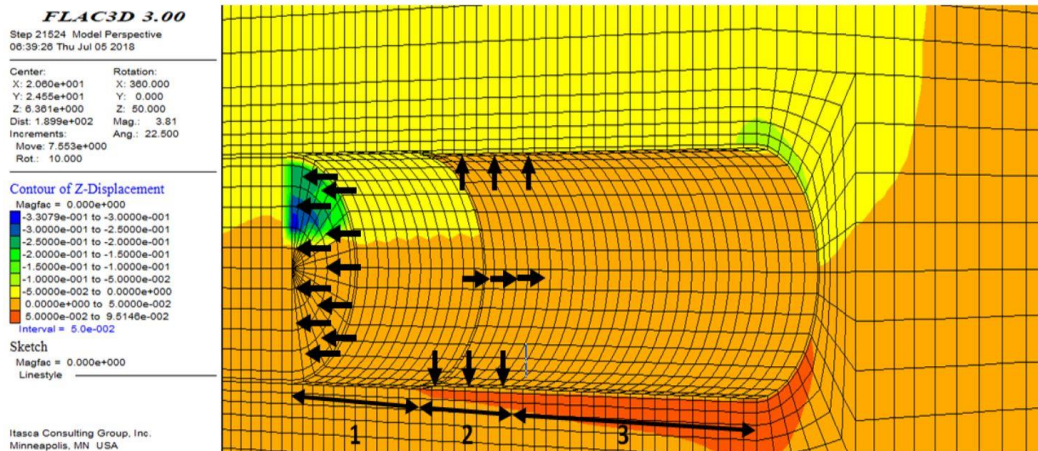
$$E_c = (1 - \zeta) \times E_{CLS} = 25200 \text{ MPa} \quad (10)$$

که در رابطه فوق، E_c مدول یانگ ظاهری رینگ و E_{CLS} مدول الاستیسیته بتن است که برابر ۳۶۰۰۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده‌است.

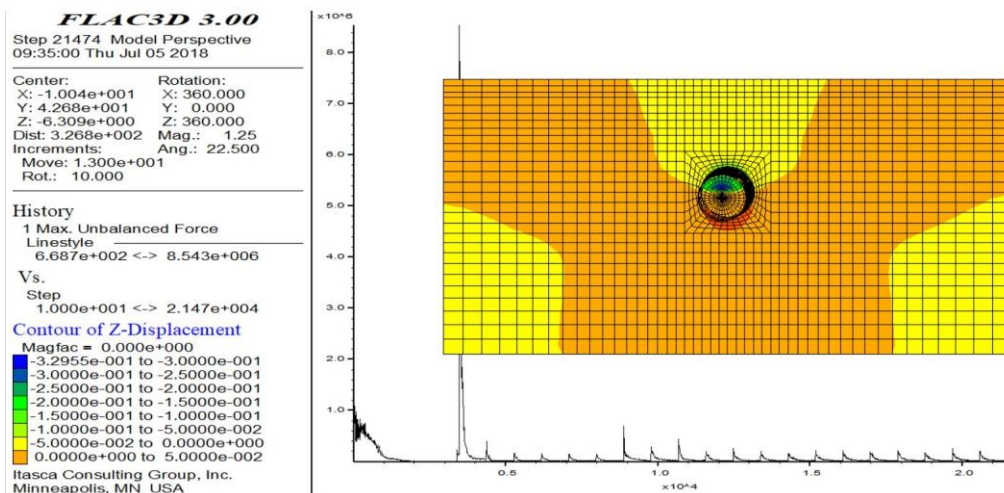
در مدل ساخته شده، رفتار دوغاب پشت سگمنت الاستیک خطی در نظر گرفته شده و در جدول ۷ به مشخصات دوغاب اشاره شده‌است. زمان لازم برای گیرش اولیه دوغاب و در نتیجه، حذف فشار تزریق حدود ۸ ساعت برآورد شده که با توجه به میانگین سرعت پیشروی، طول فشار تزریق اعمالی در مدل‌سازی‌ها برابر ۴ رینگ لحاظ شده‌است.

وزن ماشین حفاری به تمام مقطع تونل وارد نمی‌شود، دوو و همکارانش (Do, et al., 2013) تاثیر وزن ماشین حفاری را با اعمال نیروهای قائم با توزیع قطاع ۹۰ درجه در قسمت کف لاینینگ در طول حفاری شبیه‌سازی در نتیجه وزن سپر تحت زاویه $\alpha = 90$ به ناحیه قوسی کف تونل وارد می‌شود.

در مدل‌سازی مرحله حفار، ابتدا حفاری تونل به طول ۱/۵ متر انجام شد و سپس با اعمال فشار جبهه‌کار و اعمال شرایط سپر در متر ۱/۵ متر، نگهداری فضای حفرشده صورت گرفت. این روند تا متر ۹ متر (به اندازه طول سپر) ادامه می‌یابد. سپس با پیشروی سپر و ورود به متر ۱۰/۵، پوشش‌بتنی و تزریق پشت پوشش‌بتنی در فاصله ۰ تا ۱/۵ متری ابتدای تونل به مدل اعمال شد. پس از گام چهارم نصب پوشش، ملات گیرایی کافی را بدست آورده‌است؛



شکل ۷ - مراحل مدل‌سازی حفاری تونل، ناحیه ۱ حفاری تونل و سپر، ناحیه ۲ نصب پوشش و اعمال فشار تزریق به طول ۴ سگمنت و ناحیه ۳ نصب پوشش و دوغاب سخت شده



شکل ۸ - کنترل جابجایی قائم برای فشار جبهه کار ۸۰ کیلوپاسکال

۵-۱- فشار جبهه کار

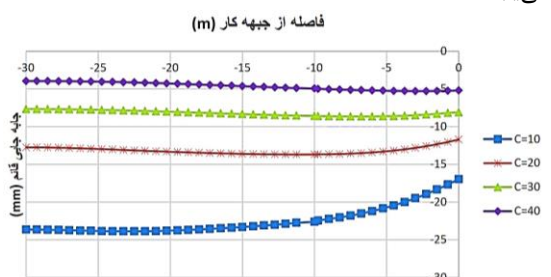
برآورد فشار لازم جهت نگهداری جبهه کار در مرحله طراحی و اجرا یکی از پارامترهای مهم در تونل‌سازی با ماشین‌های حفاری سپری است. برای بررسی تاثیر فشار جبهه کار بر تغییر شکل‌ها در سطح زمین، با ثابت نگه داشتن تمامی پارامترها با فشار جبهه کار ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ ساخته شده است تا تاثیر پارامتر فشار جبهه کار بر نشست سطح زمین تعیین شود.

با توجه به شکل ۹، با افزایش فشار جبهه کار، مقدار نشست کاهش می‌یابد، بنابراین در میان پارامترهای اجرایی

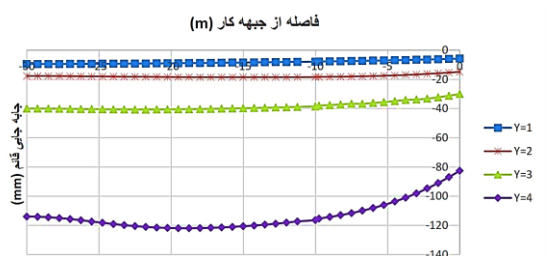
۵- بررسی عوامل موثر در نشست سطح زمین

عوامل موثر در نشست سطح زمین در روش حفاری مکانیزه را می‌توان عمدتاً به سه دسته عوامل هندسی، عوامل ژئومکانیکی و پارامترهای کاری ماشین حفاری تقسیم‌بندی کرد. عوامل هندسی شامل عمق و قطر تونل می‌باشند، پارامترهای کاری ماشین شامل فشار وارد بر جبهه کار، فشار تزریق در پشت سگمنت‌ها و نیز میزان تغییر قطر (کاهش قطر دستگاه در طول) دستگاه می‌باشد و پارامترهای ژئومکانیکی شامل مشخصات مکانیکی لایه‌های خاک ما بین تونل تا سطح زمین است.

افزایش چگالی خاک، مقادیر نشست سطح زمین افزایش می‌یابد.



شکل ۱۱- میزان حداکثر نشست سطحی زمین در چسبندگی مختلف



شکل ۱۲- میزان حداکثر نشست سطحی زمین در چگالی مختلف

۴-۵- زاویه اصطکاک

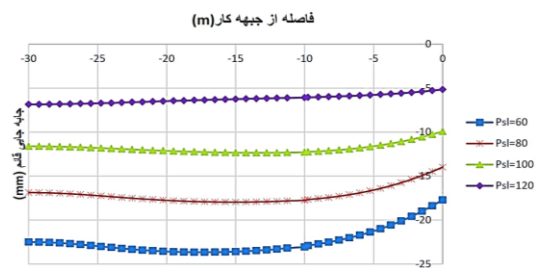
مقدار زاویه اصطکاک داخلی در خاک‌های آلی، حدود ۲۰ درجه و در خاک‌های ماسه‌ای، ۴۰ درجه است (Das & Sobhan, 2002) برای بررسی تأثیر زاویه اصطکاک بر تغییر شکل‌ها در سطح زمین، با ثابت نگه داشتن تمامی پارامترها، مدل‌هایی با زاویه اصطکاک ۲۰، ۳۰ و ۴۰ ساخته شده تا تأثیر پارامتر زاویه اصطکاک بر نشست سطح زمین مشخص شود.

با توجه به شکل ۱۳، زاویه اصطکاک با نشست سطح زمین رابطه عکس دارد؛ یعنی با افزایش زاویه اصطکاک مقدار نشست سطحی کاهش خواهد یافت.

۵-۵- فشار تزریق

در این بخش، با ثابت نگه داشتن فشار جبهه کار، فشار تزریق مدل تغییر داده شده تا تأثیر این پارامتر نیز روی نشست‌های سطح زمین مورد بررسی قرار گیرد. مطابق نتایج بدست آمده می‌توان دریافت که فشار تزریق در نظر گرفته شده، تغییر شکل‌های زمین را فقط در محدوده حفار شده تحت تأثیر قرار

دستگاه حفاری، تأثیر فشار جبهه کار بر مقدار نشست بیشتر است.

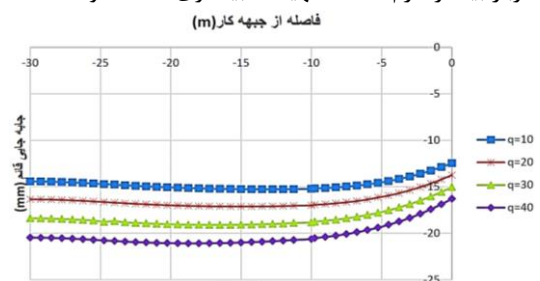


شکل ۹- میزان حداکثر نشست سطحی در فشار سینه کار مختلف

۲-۵- فشار روباره

برای بررسی تأثیر فشار روباره بر تغییر شکل‌ها در سطح زمین، با ثابت نگه داشتن تمامی پارامترها مدلی با فشار روباره ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ ساخته شده تا تأثیر پارامتر فشار روباره بر نشست سطح زمین تعیین شود.

با توجه به شکل ۱۰، فشار روباره با نشست سطح زمین رابطه مستقیم دارد؛ یعنی با افزایش فشار روباره، مقدار نشست سطحی افزایش خواهد یافت پس در محیط‌های با سربار بیشتر لازم است، تمهیدات بیشتری لحاظ شود.



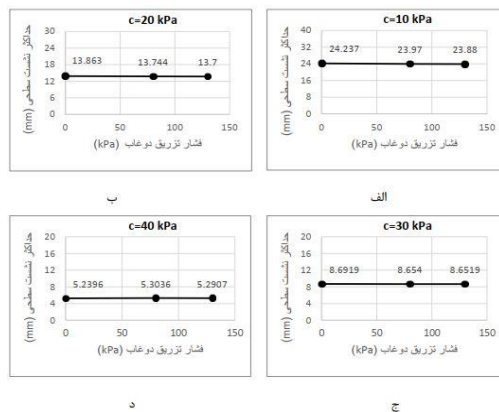
شکل ۱۰- میزان حداکثر نشست سطحی در فشار روباره مختلف

۳-۵- چسبندگی و چگالی محیط

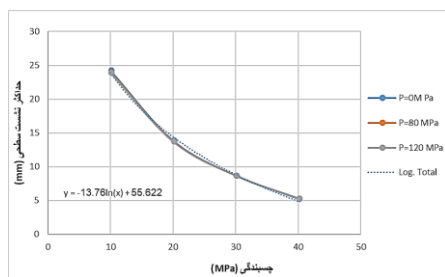
برای بررسی تأثیر چسبندگی محیط بر تغییر شکل‌ها در سطح زمین، با ثابت نگه داشتن تمامی پارامترها، مدلی با چسبندگی ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ کیلوپاسکال ساخته شده (شکل ۱۱) و همچنین برای بررسی تأثیر چگالی محیط بر میزان جابجایی سطح زمین مدلی با چگالی ۱، ۲، ۳ و ۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب ایجاد شده است تا تأثیر عوامل ژئومکانیکی بر نشست سطح زمین تعیین شود (شکل ۱۲).

با توجه به شکل ۱۱، با افزایش مقدار چسبندگی خاک، مقادیر نشست سطح زمین کاهش و با توجه به شکل ۱۲، با

با توجه به شکل ۱۵، با افزایش یا کاهش فشار تزریق، مقدار ماکزیمم نشست قائم در یک محیط با چسبندگی ثابت تغییر چندانی نمی‌کند؛ لذا به نظر می‌رسد که در محیط‌هایی با چسبندگی مختلف، حساسیت تغییر شکل‌های سطحی نسبت به استفاده از مقادیر مختلف فشار تزریق، تقریباً یکسان است. از طرفی، با تغییر چسبندگی محیط، میزان نشست به شدت تغییر می‌کند و همینطور، بر اساس مطالعات پارامتریک مدلسازی عددی (شکل ۱۵)، می‌توان یک نمودار و یک رابطه برای تاثیر چسبندگی و نشست متناظر بیان نمود که در شکل ۱۶، قابل مشاهده است. بر همین اساس، می‌توان دریافت که چسبندگی با نشست سطحی، رابطه‌ی لگاریتمی دارد.



شکل ۱۵- تاثیر بکارگیری فشارهای مختلف تزریق بر نشست حداکثر در محیط‌هایی با چسبندگی متفاوت

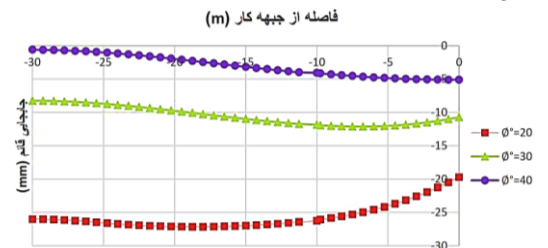


شکل ۱۶- نمودار تغییرات میزان نشست با تغییر چسبندگی

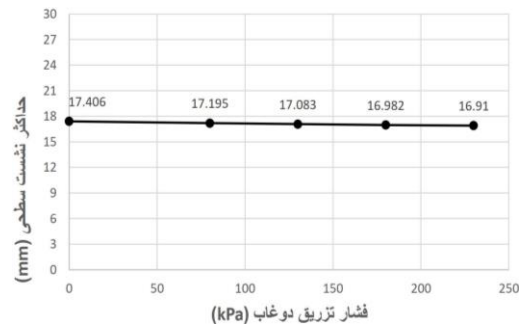
$$S_{max} = -13.76 \ln(C) + 55.622 \quad (11)$$

که در رابطه‌ی فوق، S_{max} حداکثر نشست سطحی (میلی‌متر) و C ، چسبندگی (کیلوپاسکال) است.

داده و موجب کاهش آن می‌شود که این تاثیر ناچیز است. پس می‌توان دریافت که فشار تزریق دوغاب، تاثیر خاصی بر روی بهبود وضعیت تنش‌ها نداشته و هدف اصلی از این فشار در عملیات حفاری و تزریق، کمک به پر شدن کامل فضای ایجاد شده با دوغاب است. در شکل ۱۴، نمودار میزان حداکثری نشست سطحی زمین در فشارهای تزریق مختلف نشان داده شده است.



شکل ۱۳- میزان حداکثر نشست سطحی در زاویه اصطکاک‌های مختلف

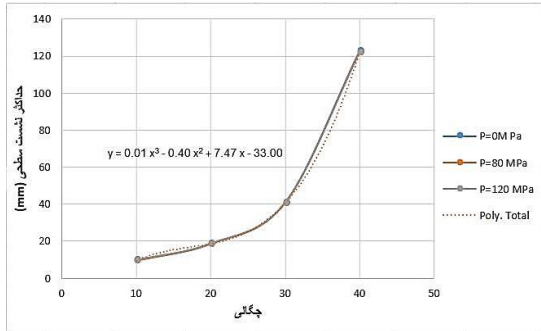


شکل ۱۴- میزان حداکثر نشست سطحی زمین در فشارهای تزریق مختلف در فشار جبهه‌کار ثابت

در ادامه، اثر اعمال فشارهای تزریق در شرایط مختلف هندسی (قطر)، پارامترهای ژئومکانیکی خاک (چسبندگی، چگالی و زاویه اصطکاک) و در فشار روباره مختلف بررسی قرار خواهد گرفت.

۵-۵-۱- تاثیر فشار تزریق با تغییر چسبندگی محیط حفاری

برای بررسی تاثیر فشار تزریق در محیط‌هایی با چسبندگی مختلف، مدل‌هایی با چسبندگی ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ کیلوپاسکال ساخته شده است که برای هر مدل فشارهای تزریق ۰، ۸۰ و ۱۳۰ کیلو پاسکال اعمال شده تا حساسیت فشار تزریق نسبت به پارامتر چسبندگی محیط بررسی شود.

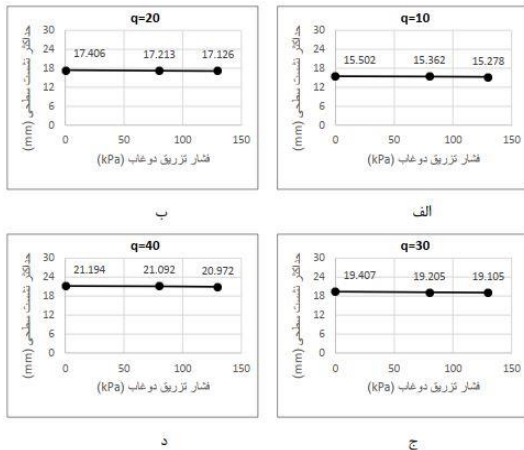


شکل ۱۸- نمودار تغییرات میزان نشست با تغییر چگالی

۵-۵-۳- تأثیر فشار تزریق با تغییر فشار سربار محیط حفاری

با ثابت نگه‌داشتن تمامی پارامترها مدل‌هایی در چهار فشار روباره ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ ساخته و برای هر مدل فشارهای تزریق ۰، ۸۰ و ۱۳۰ اعمال شده تا حساسیت فشار تزریق نسبت به پارامتر روباره بررسی شود.

با توجه به شکل ۱۹، با افزایش یا کاهش فشار تزریق مقدار ماکزیم جابجایی قائم بالای محور تونل با فشار روباره ثابت، تغییر چندانی نمی‌کند؛ ولی با در نظر گرفتن ارتباط فشار روباره و نشست سطحی در مطالعه‌ی پارامتریک، می‌توان به یک رابطه‌ی خطی بین میزان نشست سطحی و فشار روباره‌ی حداکثری رسید (شکل ۲۰). در این شکل، رابطه خطی بین فشار روباره و نشست سطحی قابل مشاهده است.

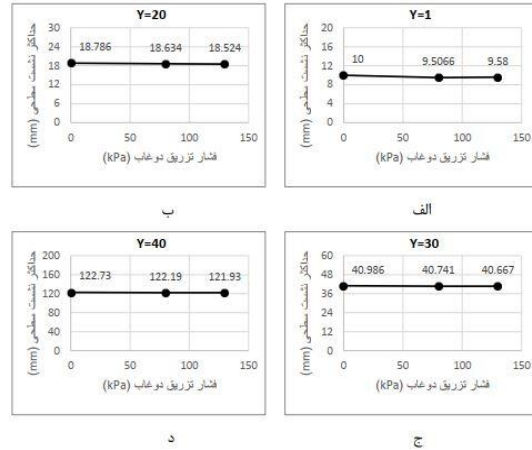


شکل ۱۹- تأثیر بکارگیری فشارهای مختلف تزریق بر جابجایی حداکثر در فشارهای روباره متفاوت

۵-۵-۲- تأثیر فشار تزریق با تغییر چگالی محیط حفاری

با ثابت نگه‌داشتن تمامی پارامترها، برای بررسی تأثیر فشار تزریق در محیط‌هایی با چگالی مختلف، مدل‌هایی با چگالی ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب ساخته شده است که برای هر مدل فشارهای تزریق ۰، ۸۰، ۱۳۰ کیلوپاسکال اعمال شده تا حساسیت فشار تزریق نسبت به پارامتر چگالی محیط بررسی شود.

با توجه به شکل ۱۷، با افزایش یا کاهش فشار تزریق، مقدار نشست حداکثری در بالای محور تونل در یک محیط با چگالی ثابت تغییر چندانی نمی‌کند. یعنی حساسیت تغییر شکل‌های سطحی به محیط‌هایی با چگالی‌های مختلف و با استفاده از مقادیر مختلف فشار تزریق، تقریباً یکسان است. سپس با بررسی رابطه‌ی مستقیم بین میزان نشست و چگالی، تغییرات چشم‌گیری دیده‌شد که در شکل ۱۸ قابل مشاهده است. بر همین اساس می‌توان نتیجه گرفت که چگالی، رابطه‌ای به‌صورت یک معادله‌ی چندجمله‌ای با نشست سطحی دارد.



شکل ۱۷- تأثیر بکارگیری فشارهای مختلف تزریق بر نشست حداکثر در محیط‌هایی با چگالی متفاوت

$$S_{max} = 0.077\rho^3 - 0.3987\rho^2 + 7.4656\rho - 33 \quad (12)$$

که در رابطه‌ی فوق، S_{max} حداکثر نشست سطحی (میلی‌متر) و ρ چگالی (گرم بر سانتی‌متر مکعب) است.

موجب کاهش آن می‌شود و تاثیر آن ناچیز است. پس می‌توان به این نتیجه رسید که فشارهای تزریق دوغاب تاثیر خاصی بر روی بهبود وضعیت تنش‌ها ندارد.

همچنین در فشار تزریق ۰، ۸۰ و ۱۳۰ کیلوپاسکال، حساسیت فشار تزریق نسبت به پارامترهای فشار روباره، چسبندگی، چگالی و قطر بررسی شد. نتایج بدست آمده نشانگر آن است که کاهش یا افزایش فشار تزریق در محیط‌هایی با پارامترهای مختلف، تاثیرچندانی بر جابجایی قائم ندارد.

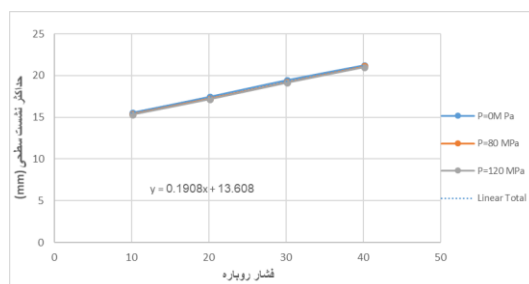
فشار جبهه‌کار با چهار مقدار ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ کیلوپاسکال مدل‌سازی شد. که جابجایی‌های بدست آمده در حالت اعمال فشار به ترتیب ۲۳/۶، ۱۷/۹، ۱۲/۳ و ۸/۸ میلی‌متر بود؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش فشار جبهه‌کار مقدار جابجایی قائم سطح زمین کاهش پیدا می‌کند.

برای بررسی تاثیر عوامل ژئومکانیکی محیط بر تغییر شکل‌ها در سطح زمین، با ثابت نگه داشتن تمامی پارامترها، مدل‌هایی ساخته شد. بر اساس نتایج مدل‌سازی‌ها، با افزایش چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی، مقدار نشست کاهش می‌یابد، در حالی که با افزایش فشار روباره و وزن مخصوص خاک، مقدار جابجایی قائم افزایش می‌یابد؛ همچنین لازم به ذکر است که این پارامترها، حساسیت بسیار کمی نسبت به فشار تزریق داشته و می‌توان نتیجه گرفت که کنترل تغییرات این پارامترها با تغییر فشار تزریق، امکان‌پذیر نیست.

در ادامه نمودارهای نشست سطحی با تغییر چگالی، چسبندگی و فشار روباره ارائه و روابطشان نیز استخراج شد. با استفاده از این روابط، می‌توان در طول اجرای پروژه میزان نشست را به‌طور تقریبی و سریع پیش‌بینی و کنترل کرد که این عمل، تاثیر زیادی بر افزایش راندمان و نرخ پیشروی می‌گذارد.

۷- سیاهه‌ی نمایه‌ها

در جدول ۹، به تمامی نمادهای استفاده شده در مقاله، اشاره شده است.



شکل ۲۰- نمودار تغییرات میزان نشست با تغییر فشار روباره

$$S_{max} = 0.1908q + 13.608 \quad (۱۳)$$

که در رابطه‌ی فوق، S_{max} حداکثر نشست سطحی (میلی‌متر) و q ، فشار روباره است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، با استفاده از روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی به بررسی وضعیت نشست سطح زمین در کیلومتر ۳۱۵۰ در محدوده‌ی ایستگاه قراملک از خط ۲ مترو تبریز پرداخته شد. بر اساس نتایج ابزاربندی انجام گرفته مقدار نشست سطحی در بالای ناحیه مورد مطالعه (در فشار جبهه‌کار ۸۰ کیلوپاسکال) ۱۶ میلی‌متر اندازه‌گیری شده‌است. نشست حداکثری بدست آمده حاصل از روش‌های تحلیلی لاگاناتان و پولوس و تجربی پک و عددی به ترتیب ۱۴/۹، ۲۳/۸، ۱۷/۲ میلی‌متر بود. با توجه به نزدیکی نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و روش لاگاناتان و پولوس با قرائت‌های محلی می‌توان برای شرایط ژئوتکنیکی مورد نظر با دقت مناسب از روش تحلیلی و الگوی مدل‌سازی فوق استفاده نمود.

بر اساس مقایسه این نتایج، هرچه پارامترهای ورودی مربوط به فاکتورهای موثر بر نشست متعددتر باشند، خطای تخمین نشست حداکثری، کمتر خواهد بود. روش‌های عددی به دلیل امکان لحاظ نمودن بیشتر فاکتورهای موثر در نشست و توانایی بررسی سه بعدی مسئله، کم‌ترین مقدار خطا را داشته‌است.

از نتایج عددی بدست آمده می‌توان چنین برداشت کرد که فشار تزریق اعمال شده، تغییر شکل‌های زمین را فقط در محدوده‌ی حفاری تحت تاثیر قرار داده و

جدول ۹- سیاهه‌ی نمایه‌ها

شرح	واحد	نماد
قطر تونل	m	D
روباره تونل	m	C
عمق تونل	m	H
قطر معادل	m	D
مدول الاستیسیته	Kg/cm^2	E
ضریب (نسبت) پواسون	NU	ν
زاویه اصطکاک داخلی	$Deg.$	ϕ
چگالی حالت خشک	KN/m^3	γ_d
چگالی طبیعی	KN/m^3	γ_m
ارتفاع آب زیرزمینی	m	H_w

۸- مراجع

- Atkinson, J.H., Brown, E.T., Potts, M., (1975). Collapse of shallow unlined tunnels in dense sand. *Tunnels and Tunnelling* 3, 81-87.
- Blom, C. (2002). *Design philosophy of concrete linings for tunnels in soft soils. Design philosophy of concrete linings. Netherland: DUP Science.*
- Das, B., & Sobhan, K. (2002). *Principles of geotechnique engineering, Publisher: Global Engineering: Christopher M. Shortt, Eighth Edition.*
- Chakeri, H., & Ünver, B. (2014). A new equation for estimating the maximum surface settlement above tunnels excavated in soft ground. *Environ Earth Sci.* 71, 3195-3210. doi:10.1007/s12665-013-2707-2
- Dehghan, A.N., Shafiee, S.M., & Rezaei, F. (2012). 3-D stability analysis and design of the primary support of Karaj metro tunnel: Based on convergence data and back analysis algorithm. *Engineering geology* 142, 141-149. doi:10.1016/j.enggeo.2012.05.008
- Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A., & Mahtab, S. (2007). *Mechanized Tunnelling in Urban Areas Design Methodology and Construction Control. Publisher: Taylor and Francis group.*
- Jancsecz, S., & Steiner, W., (1995). Face Support for a Large Mix-Shield in Heterogeneous Ground Condition. *Tunneling* 94, 531-550.
- Koyama, Y. (2003). Present status and technology of shield tunneling method in Japan. *Tunnelling and Underground Space Technology* 2-3, 145-159. doi:10.1016/S0886-7798(03)00040-3
- Leca, E., & New, B. (2007). Settlements induced by tunneling in soft ground. *Tunnelling and Underground Space Technology* 22(2), 119-149. doi:10.1016/j.tust.2006.11.001.
- Leca, E. & Dormieux, L., (1990). Upper and Lower Bound Solutions for The Face Stability of Shallow Circular Tunnels in Frictional Material. *Geotechnique* 40, 581-606.
- Lee, R.G., Turner, A.J., & Whitworth, L.J. (1994). Deformations caused by tunnelling beneath a piled

structure. *Proc. XIII Int. Conf. on Soil mechanics and Found, New Delhi, Inde*, (pp. 873-878). London: University Press.

Meguid, M.A., Saada, O., Nunes, M.A., & Mattar, J. (2008). *Physical modeling of tunnels in soft ground: A review. Tunnelling and Underground Space Technology* 23, 185-198.

Do, N.A., Dias, D., Oreste, P., & Djeran-Maigre, I. (2013). *Three-dimensional numerical simulation for mechanized tunnelling in soft ground: The influence of the joint pattern. Acta Geotechnica* 9(4). doi:10.1007/s11440-013-0279-7

Sadeghi, M., Pourhashemi, S.M., Dehghan, A.N., & Ahangari, K. (2016). *The Effect of Excavation Progress on the Behavior of Hakim Highway Tunnel Using Geotechnical Instrumentation. ITAAITES World Tunnel Congress*, 580-590.

Teachavorasinskun, S., Chub-uppakarn, T. (2010). *Influence of segmental joints on tunnel lining. Tunnelling and Underground Space Technology* 25(4), 490-494.

Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics. John Wiley & Sons.*

Evaluation of the effect of injection pressure on surface settlement in excavation with earth pressure balanced shield machine, A case study: Tabriz metro line 2

R. Amjadi¹; F. Samimi Namin^{2*}; H. Chakeri³; M.M. Rouhani⁴

1. MSc Graduated; Faculty of Mining Engineering, University of Zanjan, r.amjadi71@gmail.com

2. Associate Professor; Faculty of Mining Engineering, University of Zanjan, f.samiminamin@znu.ac.ir

3. Associate Professor, Faculty of Mining Engineering, Sahand University of Technology, chakeri@sut.ac.ir

4- MSc Student; Faculty of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, matinrouhani@yahoo.com

Received: 21 Sep 2021; Accepted: 15 Mar 2022

DOI: 10.22044/TUSE.2022.11221.1428

Keywords

Ground surface subsidence
EPB shield machine
numerical modeling
Underground space
Finite difference method (FDM)
FLAC3D

Extended Abstract

Summary

Earth pressure balance (EPB) shield machines have been used to excavate Tabriz metro line 2. A critical section of the tunnel has been modeled in this study. The modeling results have been verified by the monitoring data using the installed instruments on the site. In addition, some crucial operational parameters of the EPB tunnel boring machine (TBM) have also been studied to determine their effects on ground deformation and subsidence during the tunnel excavation.

Introduction

Tunneling in shallow urban areas and on soft ground is always associated with risks that can have unpleasant consequences if ignored. Tunnel excavation removes a mass of soil and rock, leading to significant changes in strength around them, and causing the earth to move. The tunnel has been excavated in a shallow soil environment and the effects of the tunnel excavation will transfer to the ground. The EPB shield is one of the most suitable methods to control the pressure in the tunnel front, decreasing the surface subsidence by controlling this pressure.

Methodology and Approaches

In this research, three-dimensional (3D) numerical modeling is applied to study the effects of TBM-EPB operating parameters on the deformation and subsidence of soft soils using FLAC3D software.

Results and Conclusions

According to the obtained numerical results, it seems that the slurry injection pressures do not have a significant effect on the improvement of stresses. The study also investigates the influence of overburden pressure, cohesion, density, and diameter on the injection pressure. The results indicate that decreasing or increasing the injection pressure in environments with different parameters has little effect on vertical displacement.

To investigate that how geomechanical factors of the environment influence deformation of the earth surface, various models have been constructed by keeping all the parameters constant in which with increasing cohesion and internal friction angle, the rate of subsidence decreases. While increasing the specific gravity of the soil, the amount of vertical displacement increases.
