

## بررسی اندرکنش بین تونل‌های خطوط ۱، ۲ و ۳ مترو تبریز

حسین محمدپور ریحان<sup>۱</sup> و حمید چاکری<sup>۲\*</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۰۴ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۱۸	
<b>واژگان کلیدی:</b> اندر کنش بین تونل‌ها، نشست سطحی، خطوط مترو تبریز، FLAC3D	با توجه به رشد روز افزون خطوط مترو همواره بحث حفظ ساختمان‌ها و معابر از رسیدن آسیب به آن‌ها بسیار مهم بوده و هست، لذا بررسی نشست ناشی از تونل‌سازی امری غیر قابل انکار است. محققان مختلفی تاکنون به بررسی نشست سطحی زمین پرداخته‌اند. با افزایش تعداد خطوط مترو بحث اندرکنش بین آن‌ها نیز پیش می‌آید، لذا در ادامه این تحقیقات، در این مقاله به بحث اندرکنش بین تونل‌ها در نشست سطحی با استفاده از مدل سازی عددی توسط نرم افزار FLAC3D پرداخته شده است. بدین منظور تقاطع بین خطوط مترو تبریز (خطوط یک و دو و سه در محدوده میدان دانشسرای تبریز) مد نظر قرار داده شده که مهمترین بحث اندرکنش بین تونل‌های مترو شهر تبریز می باشد. در این بررسی سیستم حفاری EPB استفاده شده در این خطوط به طور کامل مدل سازی شده است. مدل‌سازی‌های انجام گرفته نشان می‌دهند که عبور تونل‌های خط ۳ مترو تبریز از زیر تونل‌های خط یک باعث افزایش نشست سطحی به میزان ۱۳۹/۴ درصد می‌شود. همچنین بررسی‌ها نشان دادند که عبور تونل‌های خط ۳ از بالای تونل خط ۲ باعث افزایش میزان نشست سطحی به مقدار ۵۶٪ می‌شود.

### ۱- مقدمه

مهمترین و حساس‌ترین نشست‌های ایجاد شده در صنعت تونل‌سازی، نشست‌های ایجاد شده در مناطق شهری است. این امر بدین دلیل است که در مناطق شهری، سازه‌های زیادی در سطح شهر وجود دارند. از جمله می‌توان به انواع ساختمان‌های اداری، تجاری، مسکونی، انواع تاسیسات شهری مانند: خطوط آب، برق، گاز و فاضلاب و... اشاره کرد. بنابراین در محیط‌های شهری، بررسی، تخمین و کنترل نشست‌ها در حین تونل‌سازی امری مهم و غیر قابل انکار می‌باشد. نشست‌های ایجاد شده ناشی از تونل‌سازی علت‌های مختلفی دارد که در این مقاله به بررسی نشست‌های آنی پرداخته شده است. نشست‌های آنی در عرض چند روز (حداکثر چند هفته) بعد از حفاری رخ می‌دهند که در این

زمان، آب زیرزمینی موجود در خاک هنوز از دست نرفته و تغییرات چندانی در فشار آب حفره‌ای ایجاد نشده است [۱]. با توجه به مطالعاتی که توسط محققان مختلف انجام شده است، اندرکنش بین تونل‌ها یکی از مهمترین عواملی است که بر منحنی نشست تاثیر می‌گذارد. تاثیر اندرکنش بین تونل‌ها در منحنی نشست تا به اکنون با استفاده از روش‌های مختلفی مانند: مدل‌سازی فیزیکی، مدل‌سازی عددی و اندازه‌گیری‌های محلی انجام شده است. (هرزوغ ۱۹۸۵، کاراکوس و همکاران ۲۰۰۷، لیو و همکاران ۲۰۰۸، یانگ و همکاران ۲۰۱۷) [۲-۵].

عوامل متعددی در ایجاد نشست در حین تونل‌سازی مکانیزه دخیل هستند که از جمله آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: ۱- تغییر شکل‌های ایجاد شده در سینه‌کار

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: chakeri@sut.ac.ir

۱. کارشناس ارشد مکانیک‌سنگ، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

۲. استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

می‌توان به مقاله‌های ارائه شده توسط حاجی عزیزی و همکاران ۱۳۹۳، موسیوند و همکاران ۱۳۹۶ و احمدی و همکاران ۱۳۹۶ [۱۰-۱۲] اشاره کرد.

به دنبال مطالعات انجام شده در این مقاله به بررسی محل تقاطع‌های غیر همسطح تونل‌های مترو تبریز با استفاده از مدل سازی عددی پرداخته شده است. در این مدل سازی ها سعی شده مکان‌هایی انتخاب شوند که بحرانی‌ترین حالت را دارند و از این رو در تمامی موارد مشابه قابل کاربرد است. شایان ذکر است، برای مدل سازی های سه بعدی، در این مقاله از نرم‌افزار FLAC3D استفاده شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

در این بخش به ارائه جزئیات پارامترهایی مانند مشخصات زمین‌شناسی و پارامترهای هندسی پرداخته شده است.

خط یک مترو شهر تبریز به طول ۱۷/۲ کیلومتر می‌باشد که تعداد ۱۸ ایستگاه برای آن در نظر گرفته شده است. این خط از دو تونل (با نام‌های سهند و سیلان) تشکیل شده که به موازات هم حفاری می‌شوند. فاصله عرضی مرکز به مرکز آن‌ها به طور متوسط ۱۴ متر است.

خط ۲ غرب شهر تبریز را به شرق آن وصل می‌کند طول کل این خط ۲۲/۴ کیلومتر است. همچنین برای این خط تعداد ۲۰ ایستگاه در نظر گرفته شده است. خط ۲ مترو تبریز بر خلاف خط ۱ از یک تونل با مقطع بزرگ تشکیل شده که دارای دو خط رفت و برگشت خواهد بود. خط ۳ مترو تبریز از میدان آذربایجان در شمال غرب تبریز شروع و به ترمینال مرکزی تبریز در جنوب شهر می‌رسد. طول این خط حدود ۱۵ کیلومتر است، که برای این طول تعداد ۱۴ ایستگاه در نظر گرفته شده است. برای حفاری این خط نیز همانند خط ۱ دو تونل در نظر گرفته شده است. که مشخصات تونل‌ها همانند، خط یک می‌باشد. در جدول ۱ اطلاعات کلی درباره ماشین حفاری استفاده شده در خط ۱ و ۲ آورده شده است. همچنین در شکل (۱) موقعیت خطوط چهارگانه مترو تبریز بر روی نقشه این شهر نشان داده شده است.

خطوط ۱، ۲ و ۳ مترو در دو نقطه تلاقی دارند، ابتدا در محدوده میدان دانشسرا که در این محل خط سه از بالای خط ۲ عبور خواهد کرد. سپس در محل تقاطع بین خیابان امام و خیابان خاقانی خط ۳ از زیر خط یک عبور خواهد کرد. مشخصات زمین‌شناسی و لایه بندی این محدوده به

که ناشی از عدم نگهداری مناسب سینه کار است. ۲- تغییر شکل‌های شعاعی اطراف شیلد. ۳- تغییر شکل‌های ایجاد شده در فضای خالی پشت پوشش، که با استفاده از تزریق به موقع دوغاب می‌توان میزان این جابجایی‌ها را به حداقل رساند. این عامل مهمترین عامل ایجاد نشست در تونل-سازی مکانیزه است. ۴- تغییر شکل‌های خود پوشش که کمترین تاثیر را در نشست ناشی از تونل‌سازی مکانیزه دارد [۶]. در مورد اندرکنش بین تونل‌ها تا به حال مطالعات متعددی صورت گرفته است اما بسیاری از آن‌ها در بحث اندرکنش بین تونل‌ها به تونل‌های دوقلو بسنده کرده‌اند برای اولین بار هرزوغ در سال ۱۹۸۵ با استفاده از نتایج اندازه‌گیری شده رابطه ۱ را برای محاسبه حداکثر نشست سطحی در بالای تونل‌های دوقلو ارائه داد:

$$S_{\max} = 4.71(\gamma_n Z_0 + \sigma_s) \left( \frac{D^2}{(3i+a)E} \right) \quad (1)$$

که در روابط فوق  $a$  (m) فاصله بین دو تونل،  $\sigma_s$  کل بار سطحی وارد شده می‌باشد و  $\gamma_n$  نیز وزن مخصوص خاک می‌باشد [۲]. مهمترین نکته‌ای که بایستی در بحث اندرکنش بین تونل‌ها در نظر گرفت، این است که با حفر تونل اولی پارامترهای زمین‌شناسی منطقه تغییر می‌کنند و رهایی تنش اتفاق افتاده در حین حفر تونل اولی باعث کاهش پارامترهای مقاومتی خاک شده و در واقع تونل دومی در زمینی سست‌تر نسبت به تونل اولی حفر خواهد شد. لذا با در نظر گرفتن تغییرات حاصله در زمین، بعد از حفر تونل اولی، وسعت عرضی گودی نشست افزایش یافته و همچنین مقدار نشست حداکثر نیز افزایش می‌یابد [۷]. علاوه بر موارد فوق با توجه به مطالعات انجام شده توسط محققان مختلف مانند حسن‌پور و همکاران (۲۰۱۳) و گرینود (۲۰۰۳) مشخص شده است که پروفیل نهایی نشست حاصل از تونل‌های دوقلو انحراف به سمت تونلی دارد که در ابتدا حفر شده است [۸ و ۹].

عموما برای مطالعه اندرکنش بین تونل‌ها و تعیین دقیق نرخ آزادشدگی تنش و تغییر متناسب در پارامترهای خاک، بهتر است از روش مدل سازی عددی استفاده شود. با حل مسئله به صورت عددی می‌توان تخمین بهتری از پارامترهای تغییر یافته زمین در نتیجه حفر تونل اول بدست آورد.

امروزه مدل سازی عددی یک روش معمول و متداول برای بررسی مطالعات عمرانی و ژئوتکنیکی است که در کشور ما نیز پیشرفت چشمگیری داشته است از جمله این تحقیقات

شرح جدول ۲ است. در شکل (۲) پروفیل طولی خط ۳ و محل عبور خط ۱ و ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات کلی ماشینهای حفاری خط یک و دو مترو تبریز [۱۳]

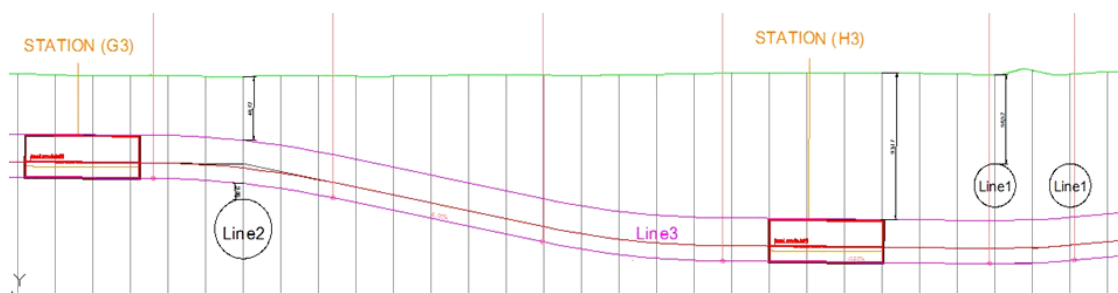
خط ۱	خط ۲	نوع دستگاه حفار
(EPB) Shield	(EPB) Shield	مدل دستگاه
۱۳۳۱/۳۷۲/P۱۴۴	-	قطر حفاری
۶/۸۸ m	۹/۴۹ m	قطر تمام شده
۶ m	۸/۴۸ m	وزن دستگاه
۶۰۰ Tons	۹۷۵ Tons	طول دستگاه
۹۷/۳۵ m	۸۶ m	ضخامت قطعات نگهداری
۰/۳ m	۰/۳۵ m	میانگین طول قطعات نگهداری
۱/۴ m	۱/۵ m	طول سپر
۹/۸ m	۹ m	



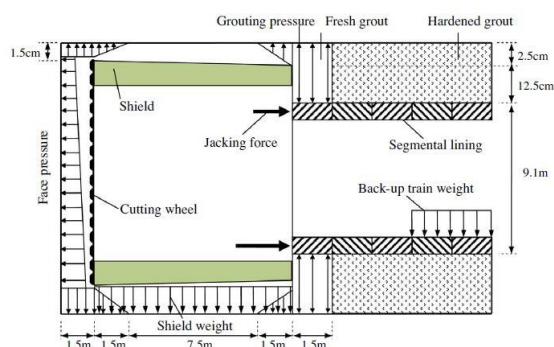
شکل ۱- موقعیت خطوط مترو شهر تبریز بر روی نقشه شهر [۱۳]

جدول ۲- پارامترهای زمین شناسی و ژئو تکنیکی خط یک مترو تبریز در محدوده میدان قونقا و دانشسرا [۱۳]

ضخامت [m]	وزن مخصوص $\gamma_d - \gamma_s$ [KN/m <sup>3</sup> ]	چسبندگی [kpa]	زاویه اصطکاک داخلی [deg]	مدول یانگ [Mpa]	ضریب پواسون	نوع خاک	لایه
۴/۷	۱۶-۱۸	۵۰	۲۰	۲۰	۰/۴۲۵	پر شده	لایه ۱
۲/۴	۱۷/۵-۲۰/۸	۵۰	۳۳	۲۰	۰/۴۲۵	رس	لایه ۲
۳/۱	۱۴/۵-۱۷/۴	۶۵	۵	۵۰	۰/۳۲۵	لای رس دار	لایه ۳
۵/۰۶	۱۹-۲۲/۱	۵۰	۳۵	۳۷/۵	۰/۴۲۵	رس	لایه ۴
۲/۵۹	۱۷-۲۰/۱	۵۰	۳۱	۴۰	۰/۳۲۵	ماسه لای دار	لایه ۵
۱۰	۱۹-۲۲/۱	۵۰	۳۵	۶۰	۰/۳۲۵	ماسه رس دار	لایه ۶
	۱۸-۲۱/۶	۱۵۰	۵	۴۶	۰/۴۲۵	رس	لایه ۷



شکل ۲- موقعیت خطوط ۱، ۲ و ۳ تبریز در پروفیل طولی خط ۳ [۱۳]



شکل ۳- نمونه ای از مدل سازی دستگاه حفاری EPB در

نرم افزار FLAC3D [۱۴]

مدل انتخابی در نرم افزار مدل موهر-کولمب می باشد. برای المان‌های سیستم نگهداری، قطعات نگهداری، دوغاب، و سپر ماشین حفاری رفتاری الاستیک در نظر گرفته شده است. در جدول ۳ پارامترهای مکانیکی استفاده شده برای قطعات نگهداری دوغاب و سپر ماشین حفاری آورده شده است. بار سطحی اعمال شده به مدل‌ها دارای دوبخش است. بخش اول بار ترافیک که به مقدار  $20 \text{ kPa}$  می‌باشد، و بخش دوم بار وارد ناشی از وزن ساختمان‌ها که برای انواع ساختمان‌ها متفاوت بوده و به طور میانگین به ازای هر طبقه مقدار  $10 \text{ kPa}$  در نظر گرفته شده است. (پی ساختمان نیز  $10 \text{ kPa}$  در نظر گرفته شده است).

جدول ۳- پارامترهای مکانیکی سپر، قطعات نگهداری و دوغاب

وزن مخصوص [KN/m <sup>3</sup> ]	ضریب پواسون	مدول یانگ [GPa]	
۷۸/۴	۰/۲۵	۲۰۰	سپر ماشین حفاری
۲۶	۰/۲	۲۸	قطعات نگهداری
۱۵	۰/۲۵	۱	دوغاب

مدل‌سازی‌های عددی انجام شده در این مقاله دارای ویژگی‌هایی به شرح زیر است:

## ۱-۲- مشخصات مدل‌سازی‌های عددی

برای همه مطالعات، فرایند حفاری به روش EPB به صورت کامل و سه‌بعدی و توسط نرم‌افزار FLAC3D مدل‌سازی شده است.

حفاری توسط این نرم‌افزار شامل حفاری تونل، نصب قطعات نگهداری و پر کردن فاصله بین قطعات نگهداری و زمین می‌باشد. به طور کلی روند مدل‌سازی حفاری توسط ماشین حفاری نوع EPB به صورت زیر انجام یافته است:

مرحله ۱: حفاری تونل به اندازه عرض قطعات نگهداری هر مدل.

مرحله ۲: اعمال فشار به سینه‌کار جدید معادل فشار اعمالی توسط ماشین حفاری.

مرحله ۳: نصب المان ساختاری معادل سپر ماشین حفاری در طول جدید حفاری شده.

مرحله ۴: اعمال وزن ماشین حفار به کف مدل.

مرحله ۵: حل مدل در تعداد گام‌های انتخاب شده برای هر یک از آن‌ها.

مرحله ۶: برداشتن فشار اعمالی به سینه‌کار تونل.

مرحله ۷: تکرار مرحله اول تا مرحله پنجم.

(مراحل ۸ الی ۱۱ بعد از پیشروی تونل به اندازه طول سپر انجام می‌شود).

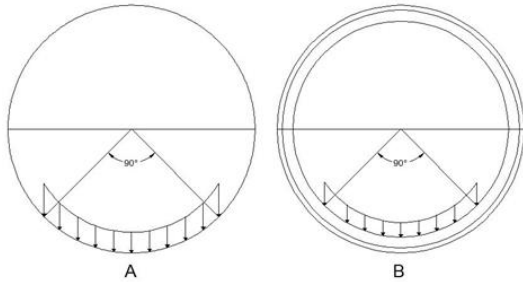
مرحله ۸: برداشتن وزن اعمالی در مرحله چهارم.

مرحله ۹: نصب قطعات نگهداری به منظور اعمال سیستم نگهداری.

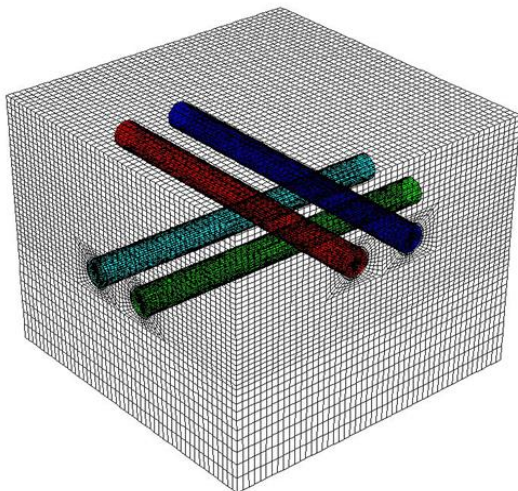
مرحله ۱۰: اعمال فشار تزریق دوغاب و پر کردن فضای خالی بین قطعات نگهداری و زمین.

مرحله ۱۱: اعمال وزن دنباله ماشین حفار به روی قطعات نگهداری‌ها. در شکل (۳) نمونه‌ای از مراحل فوق نشان داده شده که توسط آندو و همکاران (۲۰۱۴) انجام شده است. برای همه مدل‌های ایجاد شده، زمین به صورت همگن و ایزوتروپ در بین لایه‌ها در نظر گرفته شده است. [۱۴].

۳ برابر ۱۰/۸۸ متر و فاصله قائم از کف تونل‌های خط یک تا تاج تونل‌های خط ۳ برابر ۴ متر می‌باشد. مشخصات خط ۱ متروی تبریز با خط ۳ برابر است، به طوری که در این مدل طول گام‌های حفاری برابر عرض قطعات نگهداری‌ها است که آن هم برابر ۱/۴ متر است. ضخامت پوشش ۰/۳ متر و ضخامت گروتینگ برابر ۰/۱۴ متر می‌باشد. طول سپر ایجاد شده نیز برابر ۹/۸ متر می‌باشد که هفت برابر عرض قطعات نگهداری‌ها است.



شکل ۴- نحوه اعمال وزن دستگاه حفاری به مدل عددی



شکل ۵- مدل تقاطع غیر هم سطح خط ۱ و ۳ در ابعاد

۷۰\*۷۰\*۵۷/۵۷

خطوط ۲ و ۳ مترو تبریز نیز در منطقه میدان دانشسرا در یک تقاطع غیر هم سطح قرار می‌گیرند. طبق طرح ارائه شده برای خط ۳ مترو شهر تبریز این خط در این منطقه از بالای خط ۲ عبور خواهد کرد. مدل ایجاد شده توسط نرم-افزار FLAC3D در شکل (۶) نشان داده شده است. این مدل از ۱۷۲۸۰۰ زون تشکیل شده است. ابعاد این مدل در راستای طولی (راستای محور Y) ۷۵ متر، در راستای عرضی (راستای محور X) ۸۴ متر و در راستای قائم (راستای محور Z) ۵۴/۲۴ متر است. میزان روباره خط ۲ در این مدل برابر ۲۴/۲۴m و میزان روباره برای خط ۳ برابر ۱۳/۶m (از مرکز

- مشخصات مکانیکی دوغاب در جدول ۳ نشان داده شده است، البته این مشخصات برای مقاومت ۲۸ روزه دوغاب بدست آمده‌اند. اما در این مقاله از مقاومت روزانه برای این منظور استفاده می‌شود که در واقع در میزان مدول الاستیسیته دوغاب تاثیرگذار است. برای این منظور از رابطه (۲) استفاده شده است، (ریکاردو و همکاران ۲۰۰۵) [۱۵].

$$E_t = E_g \left( 1 - e^{-0.2 \left( \frac{t}{t_0} \right)} \right) \quad (2)$$

در این رابطه  $E_t$  مدول الاستیسیته دوغاب در زمان  $t$  است و  $E_g$  مدول الاستیسیته نهایی دوغاب است که در مقاومت حداکثر بدست می‌آید، و در زمان  $t_0$  حاصل می‌شود. مقدار  $E_g$  استفاده شده در این مقاله طبق جدول ۳ برابر یک گیگاپاسکال می‌باشد که در ۲۸ روز حاصل شده است.

- در این مدل سازی فشار تزریق نیز اعمال شده است. این فشار در اولین رینگ پس از شیلد اعمال می‌شود. برای به-دست آوردن میزان فشار تزریق در عمل، معمولاً نسبتی از فشار سینه کار اعمالی را در نظر می‌گیرند. بدین منظور با استفاده از داده های ۴۰۰ رینگ حفر شده در مترو خط ۱ تبریز، نسبت هر فشار تزریق به فشار سینه کار اعمالی برابر ۱/۹ بار بدست آمده است [۱۳].

- در همه مدل‌های ایجاد شده در این مقاله وزن دستگاه حفاری نیز به مدل وارد شده است، اعمال وزن دستگاه به مدل دارای دو بخش است، بخش اول وزن قسمت سپر است، از آن جایی که وزن خود سپر با اعمال گرادپان در مدل وارد می‌شود لذا در این بخش فقط وزن اقلام داخل سپر مانند اسکرو و ... و همچنین وزن کله حفاری به مدل وارد شده است. در بخش بعدی اعمال وزن دنباله دستگاه حفاری می‌باشد که به پوشش وارد شده است. در شکل (۴) قسمت A نحوه اعمال وزن به بخش اول و در قسمت B نحوه اعمال وزن به بخش دوم آورده شده است [۱۵].

خطوط مترو ۱ و ۳ در انتهای خیابان خاقانی در یک تقاطع غیر هم سطح از روی یکدیگر عبور می‌کنند. در این منطقه خط ۳ از زیر خط یک عبور می‌کند. برای این مدل در راستای طولی، (راستای Y)، ۷۰ متر، در راستای عرضی، (راستای X) برابر ۷۰ متر و در راستای قائم (راستای Z) برابر ۵۷/۵۷ متر می‌باشد.

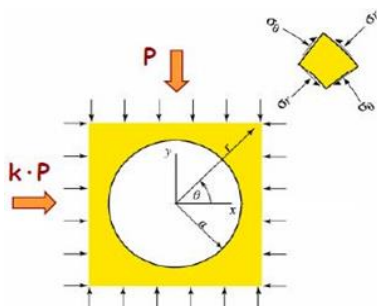
میزان روباره تونل‌های خط ۱ در این مدل برابر، ۱۷/۵۷ متر و میزان روباره تونل‌های خط ۳ برابر ۲۸/۴۵ متر می‌باشد. فاصله قائم مرکز به مرکز تونل‌های خط ۱ و تونل‌های خط

(۷) نشان داده شده است.

جابجایی‌های ایجاد شده در اطراف یک حفریه دایره‌ای شکل می‌توانند توسط روش حل کرش محاسبه شوند. این روش حل که در شرایط کرش صفحه‌ای عمل می‌کند در رابطه (۳) نشان داده شده است.

$$u_r = -\frac{Pa^2}{4Gr} \left[ (1+K) - (1-K) \left\{ 4(1-\theta) - \frac{a^2}{r^2} \cos 2\theta \right\} \right] \quad (3)$$

در رابطه فوق  $K$  نسبت تنش‌های قائم به افقی است، همچنین  $G$  بیانگر مدول برشی و  $\theta$  نیز نشانگر ضریب پواسون می‌باشد، بقیه پارامترها در شکل نشان داده شده است.



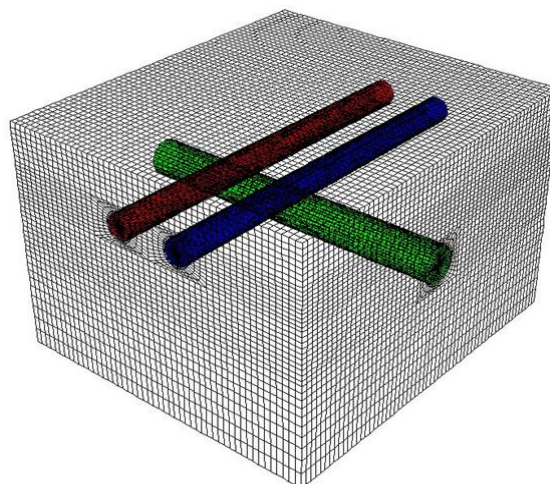
شکل ۷- راه حل کرش

به منظور مقایسه مدل‌سازی عددی با این راه حل، مدل ساده‌ای از یک تونل با استفاده از موادی ایزوتروپ و پیوسته که رفتار الاستیک خطی دارند؛ ایجاد شده است. این مدل دارای ابعادی معادل ۱۰۰ متر در راستای عرضی، ۸۴ متر در راستای طولی و ۴۶/۲۶ متر در راستای قائم است. ابعاد تونل همان ابعاد تونل خط یک مترو تبریز یعنی قطر ۶/۸۸ متر را دارا می‌باشد. خصوصیات مورد استفاده در این مدل عددی همان خصوصیات میانگین خط یک مترو تبریز است که در جدول ۴ ارائه شده است. به منظور مقایسه بین مدل عددی و راه حل کرش، میزان جابجایی‌های قائم اتفاق افتاده در سقف تونل مدنظر قرار گرفته‌اند، در جدول ۵ میزان جابجایی اتفاق افتاده در سقف تونل در مدل عددی و همچنین در راه حل کرش، با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همچنین در شکل (۸) کنترل جابجایی به همراه تاریخچه جابجایی در سقف تونل آورده شده است.

جدول ۴- مشخصات مواد استفاده شده در مدل عددی

وزن مخصوص [KN/m <sup>3</sup> ]	قطر تونل [m]	عمق تونل (از مرکز) [m]	مدول یانگ [Mpa]	ضریب پواسون	ضریب فشار زمین $K$
۲۰/۶۱۷	۶/۸۸	۱۵/۲۶	۴۴/۰۳۸	۰/۳۹۱	۰/۷۱

تونل) می‌باشد. قطر تونل خط ۲ برابر ۹/۵ متر و برای تونل‌های خط ۳ برابر ۶/۸۸ متر می‌باشد. فاصله مرکز به مرکز تونل‌های خط ۳ برابر ۱۴/۵ متر می‌باشد.



شکل ۶: مدل ایجاد شده برای تقاطع غیر همسطح خطوط ۲ و ۳ مترو تبریز

لازم به ذکر است که طول گام‌های حفاری در خط ۲ برابر ۱/۵ متر در نظر گرفته شده است، که برابر عرض قطعات نگهداری‌ها در این خط است. و طول گام‌های حفاری در تونل‌های خط ۳ نیز برابر ۱/۴ متر است، که آن هم برابر با عرض قطعات نگهداری‌ها در نظر گرفته شده است.

## ۲-۲- بررسی دقت و صحت مدل‌سازی عددی

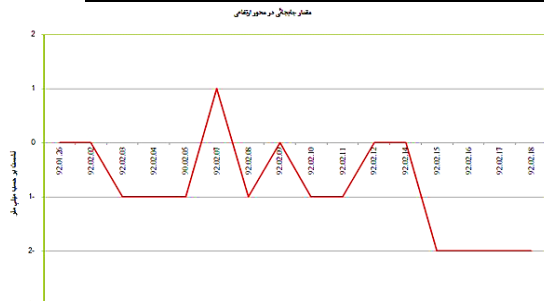
اولین گام در مدل‌سازی عددی مطابقت نتایج عددی با داده‌های حاصل از ابزار بندی و روابط تحلیلی است. با این که مدل‌سازی عددی یک روش مناسب به منظور تعیین میزان نشست و یا سایر مطالعات می‌باشد، اما اگر در تهیه مدل عددی اشتباهی صورت گیرد، این روش مفید و با دقت بالا به مدلی اشتباه تبدیل می‌شود که نتایج حاصل از آن نیز می‌تواند بسیار گمراه کننده و یا حتی خلاف واقع باشد.

## ۲-۲-۱- مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و روش تحلیلی

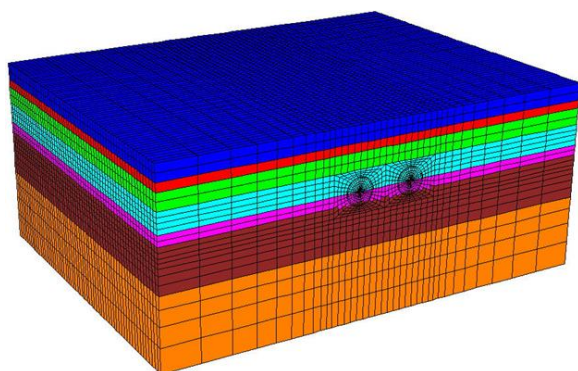
به منظور بررسی و کارایی نرم‌افزار FLAC3D در مدل‌سازی شرایط ژئوتکنیکی، نتایج حاصل از این نرم‌افزار برای جابجایی، با نتایج حاصل از راه حل تحلیلی شناخته شده کرش مقایسه شده است. پارامترهای راه حل کرش در شکل

جدول ۵- مقایسه نتیجه مدل عددی و روش تحلیلی

$U_r$ (در سقف) $\theta = 0$		فشار وارد شده (pa)	مدول برشی (MPa)	شعاع تونل (m)
مدل عددی (cm)	تئوری (cm)			
۲/۹۶۲	۲/۸۱۵	۲۴۳۶۹۲/۹۴۱۳	۱۵/۸۳۰	۳/۴۴



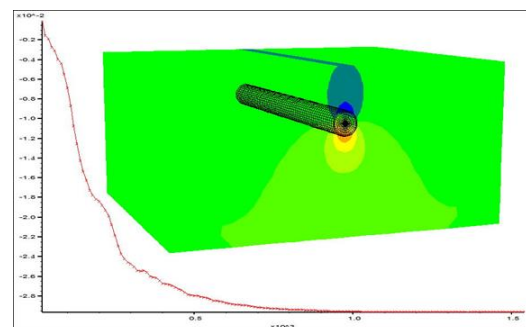
شکل ۹- نشست سطحی اندازه گیری شده در محدوده میدان قونقا [۱۳]



شکل ۱۰- مدل سه بعدی ایجاد شده توسط نرم افزار FLAC3D برای خط یک مترو تبریز

در این مدل طول شیلد ۹/۸ متر می باشد و ضخامت پوشش و گروتینگ به ترتیب برابر ۰/۳ متر و ۰/۱۴ متر می باشد. که در فاصله ۹/۸ متری سینه کار نصب می شوند. همچنین ضخامت قطعات نگهداری ها برابر ۱/۴ متر می باشد. در این مدل بار سطحی به میزان ۳۰ kPa برای یک ساختمان دو طبقه وارد شده است.

شکل (۱۱) کنتور جابجایی و همچنین پروفیل عرضی نشست سطحی ایجاد شده برای مدل ساخته شده در محدوده ایستگاه ۱۳ واقع در میدان قونقا را نمایش می دهد. این جابجایی ها بعد از حفاری ۵۰/۴ متر از تونل ایجاد شده اند که با توجه به مدل های ایجاد شده در این متر از حفاری بیشترین جابجایی ها اتفاق می افتد و بعد از آن جابجایی ها به همان مقدار همگرا می شود. میزان فشار سینه کار اعمالی به این مدل برابر ۱۳۰ kPa می باشد، که برابر فشار عملی وارده توسط ماشین حفار انتخاب شده است.



شکل ۸- کنتور جابجایی بعد از حفر تونل در مدل عددی

با استفاده از روش تحلیلی کرش جابجایی بدست آمده در سقف تونل برابر ۲/۸۱۵ سانتی متر بدست آمده است، مقدار به دست آمده از مدل عددی نیز ۲/۹۶۲ سانتی متر را ارائه می کند. که در مقایسه با نتیجه روش تحلیلی کرش اختلافی حدود ۵ درصد را شامل می شود. این بدین معنی است که FLAC3D می تواند نتایجی مشابه با روش های تحلیلی بدست دهد. لذا استفاده این از نرم افزار در این مقاله که به بررسی جابجایی ها پرداخته است، می تواند کارآمد باشد.

## ۲-۲-۲- مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی عددی و مقادیر اندازه گیری شده واقعی

به منظور بررسی صحت مدل های عددی ایجاد شده، ابتدا به مقایسه بین نتایج نشست ایجاد شده توسط نرم افزار در خط یک مترو تبریز (محدوده میدان قونقا) با نتایج اندازه گیری هایی که در این منطقه انجام گرفته پرداخته می شود. در شکل (۹) میزان نشست سطحی اندازه گیری شده آورده شده است. همانطوری که از شکل مشخص است، حداکثر نشست سطحی برابر با ۲ میلی متر به ثبت رسیده است. نشست سطحی اندازه گیری شده در محدوده میدان قونقا [۱۳] ابعاد مدل ایجاد شده برای این منطقه در راستای طولی (راستای Y) برابر ۸۴ متر، در راستای عرضی (راستای X) برابر ۱۱۰ متر و در راستای قائم (راستای Z) برابر ۴۶/۲۶ متر می باشد. فاصله مرکز به مرکز تونل ها در این مدل برابر ۱۳/۳۰ متر بوده و میزان روباره آن (از مرکز تونل) به مقدار ۱۵/۲۶ متر است. در شکل (۱۰) مدل ساخته شده به همراه لایه بندی نشان داده شده است.

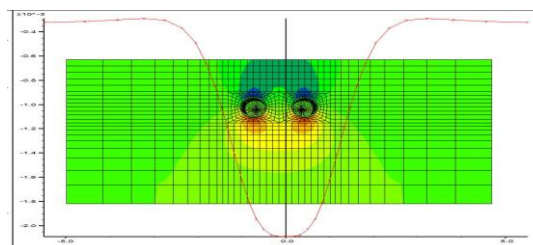
نتایج مدل‌های اجرا شده برای تعیین میزان فشار سینه‌کار خط یک در شکل (۱۲) آورده شده است. از آنجایی که میزان شعاع تونل‌های خط ۱ برابر ۳/۴۴ متر می‌باشد، لذا در فشاری حدود ۹۲kPa میزان جابجایی در مرکز تونل برابر ۳/۴۴ میلی‌متر خواهد شد. در نتیجه برای فشار سینه‌کار اعمالی در حفاری خط ۱ مقدار ۹۲kPa استفاده شده است.

حداکثر نشست که بعد از حفر تونل‌های خط ۱ در سطح زمین ایجاد شده است، در شکل (۱۳) نشان داده شده است که برابر ۳/۷۸ میلی‌متر می‌باشد. میزان جابجایی در تاج تونل‌های خط ۱ در شکل (۱۴) آورده شده است. میزان حداکثر جابجایی در تاج تونل‌های خط ۱ برابر ۶/۷۸ میلی‌متر است.

به منظور حفر تونل‌های خط ۳ اولین گام، تعیین میزان فشار سینه‌کار اعمالی به مدل می‌باشد. در شکل (۱۵) میزان حداکثر جابجایی طولی در سینه‌کار این تونل‌ها با توجه به میزان فشار سینه‌کار اعمالی آورده شده است.

با توجه به شکل (۱۵) میزان فشاری که به ازای آن جابجایی ۳/۴۴ میلی‌متر در سینه‌کار بدست می‌آید فشاری حدود ۲۳۰kPa است. لذا برای حفر این تونل از فشار سینه‌کار ۲۳۰kPa استفاده شده است. مقدار ۵/۰۹ میلی‌متر افزایش می‌یابد علاوه بر آن مشاهده می‌شود که مکان حداکثر نشست سطحی (که در حالت اول در مرکز بین تونل‌های سه‌پند و سبلان بود) نیز تغییر کرده و به بالای تونل سمت چپ و ابتدای تونل خط ۳ منتقل می‌شود. زمانی که خط ۳ به زیر تونل سه‌پند می‌رسد، موجب تغییراتی در میزان نشست در اطراف تونل سه‌پند می‌شود.

در جدول ۶ مقدار جابجایی‌های بدست آمده برای این منطقه از خط یک مترو تبریز با مدل عددی مقایسه شده است. همان‌گونه که در جدول ۶ مشخص است، نتیجه بدست آمده توسط مدل عددی بسیار به نتیجه حاصل از اندازه‌گیری‌ها نزدیک است و میزان اختلاف آن حدود ۰.۵٪ است که نتیجه بسیار قابل قبولی محسوب می‌شود.



شکل ۱۱- کنتور جابجایی در راستای قائم برای خط یک مترو تبریز (محدوده میدان قونقا)

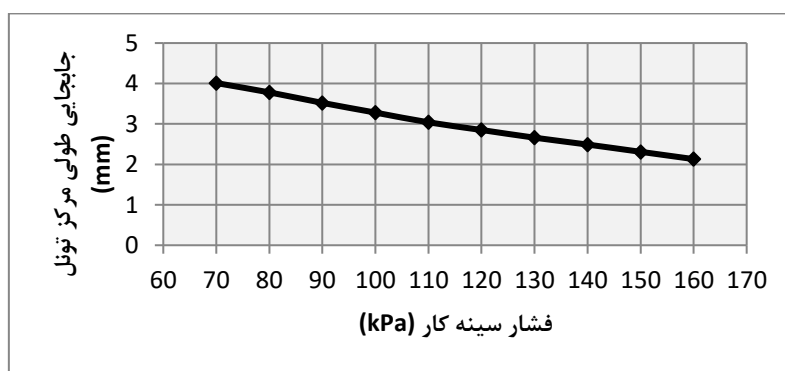
جدول ۶- مقایسه نتایج مدل عددی و مقدار اندازه‌گیری شده برای خط یک مترو تبریز

میزان اختلاف مدل عددی (%)	FLAC 3D (mm)	مقدار جابجایی واقعی (mm)
۵٪	۲/۱	۲

### ۳- نتایج حاصل از مدل سازی‌های عددی

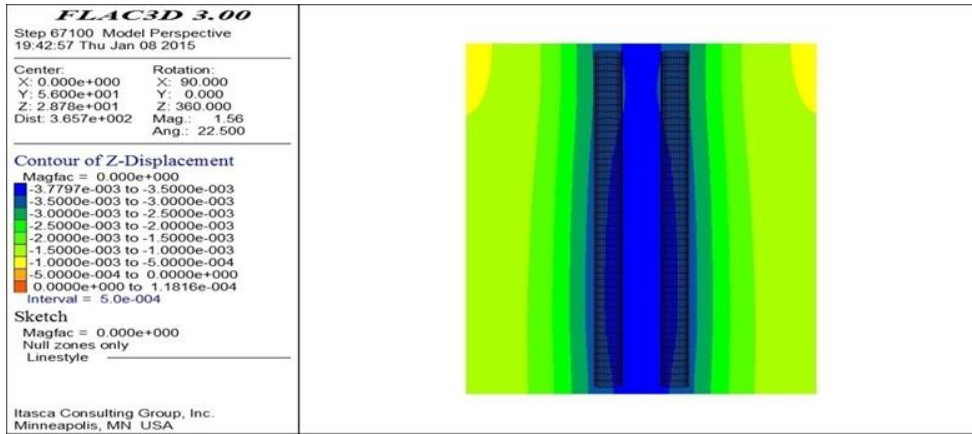
#### ۳-۱- اندرکنش بین خط یک و سه مترو تبریز

از آنجایی که خط یک مترو تبریز هم اکنون از تقاطع خیابان امام خمینی با خیابان خاقانی، عبور کرده است و خط سه نیز در فاز مطالعاتی قرار دارد، لذا در مدل عددی نیز ابتدا تونل‌های خط یک حفر شده‌اند. برای بدست آوردن فشار اعمالی سینه‌کار از فشاری استفاده می‌شود که به ازای آن میزان جابجایی در مرکز تونل برابر ۰/۱ درصد شعاع تونل باشد [۱۶].

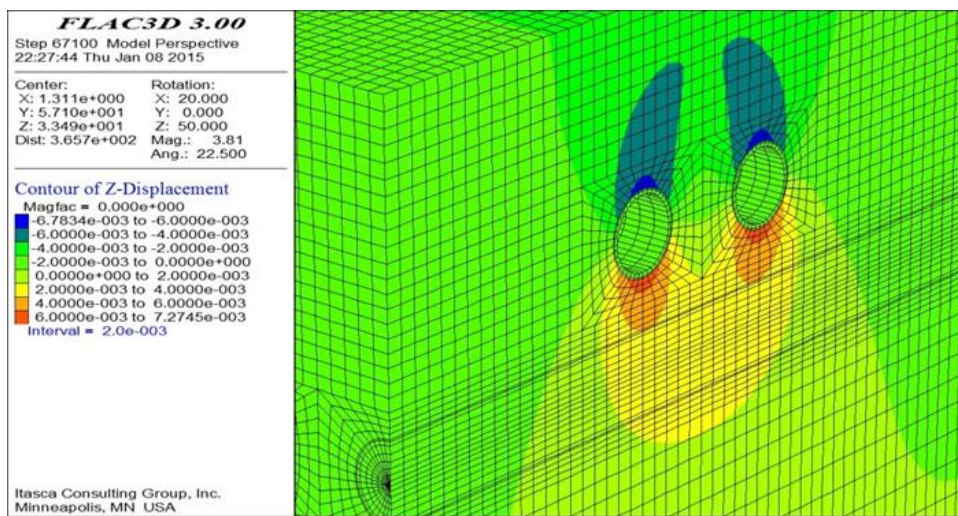


شکل ۱۲- میزان جابجایی طولی در مرکز تونل با توجه به فشار سینه‌کار اعمالی برای خط ۱ مترو تبریز

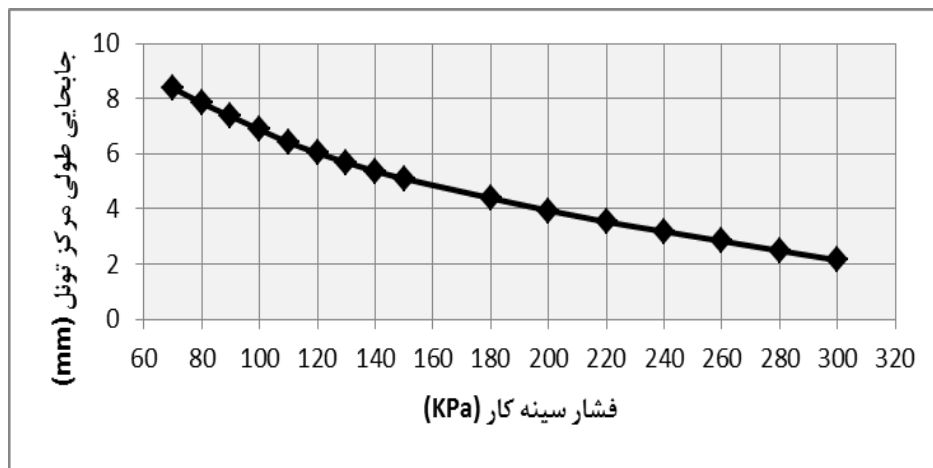




شکل ۱۳- کنتور جابجایی سطحی ایجاد شده بعد از حفر کامل تونل‌های خط ۱



شکل ۱۴- کنتور جابجایی خط یک در راستای خط سه



شکل ۱۵- میزان جابجایی طولی مرکز تونل به ازای میزان فشارسینه کار اعمالی برای خط ۳

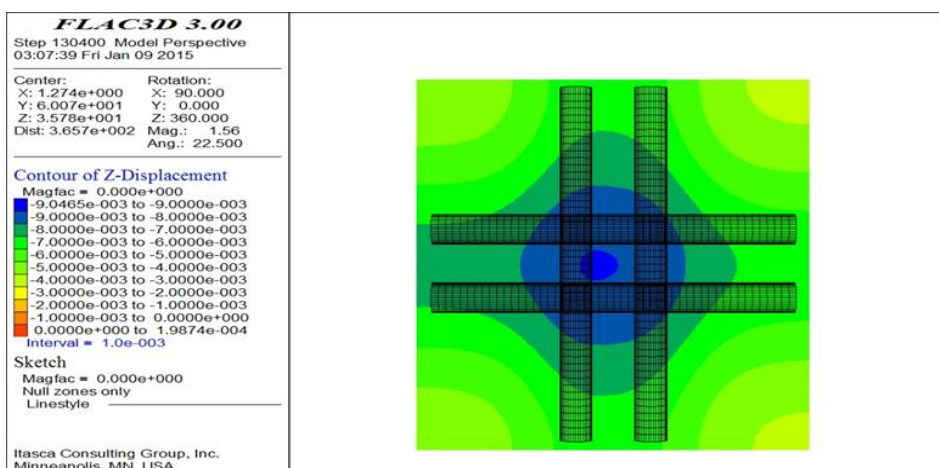
حداکثر نشست سطح زمین از مقدار ۳/۷۷ میلی‌متر به همچنین میزان نشست سطحی در سمت چپ یعنی در جایی که تونل خط ۳ حفر می‌شود، بیشتر افزایش می‌یابد. مشاهده می‌شود که با پیشروی تونل‌های خط ۳ میزان

در این راستا میزان حداکثر جابجایی در تاج تونل سه‌متر از مقدار ۶/۷۸ میلی‌متر به مقدار ۸/۲۰ میلی‌متر افزایش می‌یابد. در واقع حفر تونل‌های خط ۳ باعث افزایش میزان جابجایی‌ها در تونل بالایی (خط ۱) می‌شود. همچنین میزان

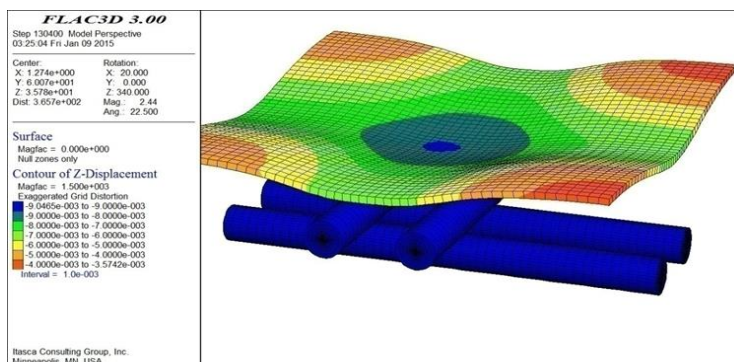
۱۲/۱۱ میلی‌متر برای تونل سبلان می‌رسد، حفر تونل‌های خط ۳ در زیر خط ۱ مترو تبریز باعث افزایش میزان جابجایی در تاج این تونل‌ها نزدیک دو برابر مقدار اولیه می‌رسد.

شکل ۱۶ بیانگر میزان حداکثر نشست سطحی ایجاد شده به مقدار ۹/۰۵ میلی‌متر می‌باشد که در مقایسه با مقدار حداکثر جابجایی قبل از حفر تونل‌های خط ۳ که برابر ۳/۷۸ میلی‌متر می‌باشد، ایجاد خط ۳ در زیر خط ۲ باعث افزایشی معادل ۱۳۹٪ در میزان نشست سطحی شده است. در شکل ۱۷ میزان نشست سطحی ایجاد شده در این منطقه به صورت شماتیک آورده شده است. به طور کلی تاثیر حضور خط ۳ در زیر خط ۱ مترو تبریز در جدول ۷ نشان داده شده است.

جابجایی در تونل سهند افزایش می‌یابد. این روند برای تونل سبلان نیز با شدت کمتر وجود دارد به طور دقیق‌تر در این حالت، میزان جابجایی برای سقف تونل خط ۱ از مقدار ۶/۷۸ میلی‌متر به میزان ۱۰/۱۴ میلی‌متر برای تونل سهند و مقدار ۸/۰۸ میلی‌متر برای تونل سبلان می‌رسد. همچنین در این حالت میزان حداکثر نشست سطحی از مقدار ۳/۷۷ میلی‌متر به مقدار ۶/۲۲ میلی‌متر رسیده است. این حداکثر میزان نشست در بالای تونل سهند، که تونل‌های خط سه ابتدا از زیر آن عبور کرده اند اتفاق می‌افتد. در نهایت زمانی که خط ۳ از زیر هر دو تونل خط ۱ عبور کرده و به طور کامل حفر شده آورده شده است. در این حالت میزان جابجایی در تاج تونل‌های خط ۱ از مقدار ۶/۷۸ میلی‌متر به مقدار ۱۲/۳۳ میلی‌متر برای تونل سهند و مقدار



شکل ۱۶- کنتور نشست سطحی ایجاد شده در تقاطع غیر همسطح خطوط ۱ و ۳



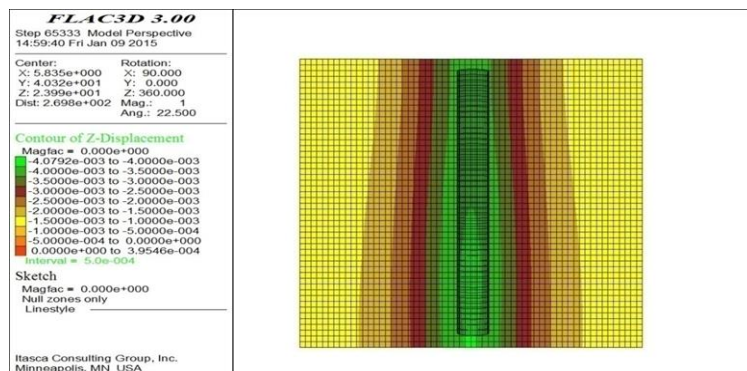
شکل ۱۷- نشست سطحی ایجاد شده در منطقه تقاطع غیر هم سطح خطوط ۱ و ۳

جدول ۷- بررسی تاثیر حفر تونل‌های خط ۳ بر میزان نشست‌های ایجاد شده در منطقه

میزان جابجایی در تاج تونل خط یک (بحرانی‌ترین بین دو تونل) (mm)	میزان حداکثر نشست سطحی (mm)	
۶/۷۸	۳/۷۸	بدون حفر خط ۳
۱۲/۱۳	۹/۰۵	با حفر خط ۳
۷۸/۹	۱۳۹/۴	میزان تاثیر (%)

۲-۳- اندرکنش بین خط دو و خط سه مترو تبریز از آنجایی که خط ۲ مترو تبریز هم‌اکنون در دست حفاری است و خط ۳ نیز در فاز مطالعاتی قرار دارد لذا انتظار می رود تونل مترو خط ۲ ابتدا از این منطقه عبور کند و سپس تونل های خط ۳ از بالای آن عبور کنند. لذا در این بخش نیز مدل عددی صورت گرفته بر این اساس بوده است. ابتدا تونل مترو خط ۲ به طور کامل حفر شده و سپس تونل های خط سه از بالای آن عبور کرده‌اند. همانند مدل پیشین در این مدل نیز برای یافتن میزان فشار سینه کار اعمالی در خط ۲ فشارهای مختلفی بررسی شده

و میزان فشار ۱۹۰ kPa برای این مدل به ازای جابجایی طولی در مرکز تونل برابر ۴/۷۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. بعد از حفر کامل تونل خط ۲، میزان حداکثر نشست ایجاد شده در سطح زمین نیز با توجه به شکل (۱۸)، به مقدار ۴/۰۸ میلی‌متر می باشد. بعد از حفر تونل خط ۲، تونل‌های خط ۳ حفر می‌شوند. میزان فشار سینه کار اعمالی در این خط برابر ۹۰ kPa در نظر گرفته شده است. در شکل (۱۹) کنتور جابجایی قائم بعد از حفر کامل تونل های خط ۳ نشان داده شده است.

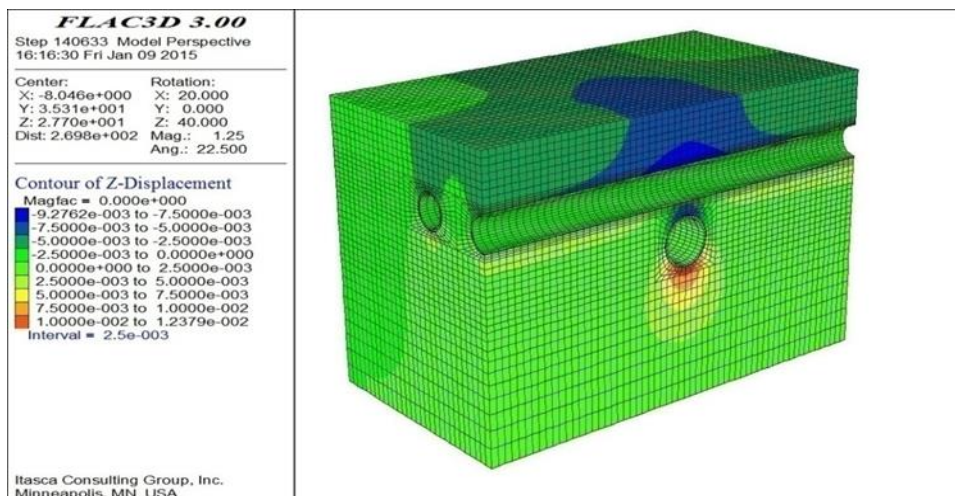


شکل ۱۸- کنتور جابجایی سطحی در راستای قائم بعد از حفر کامل تونل خط ۲

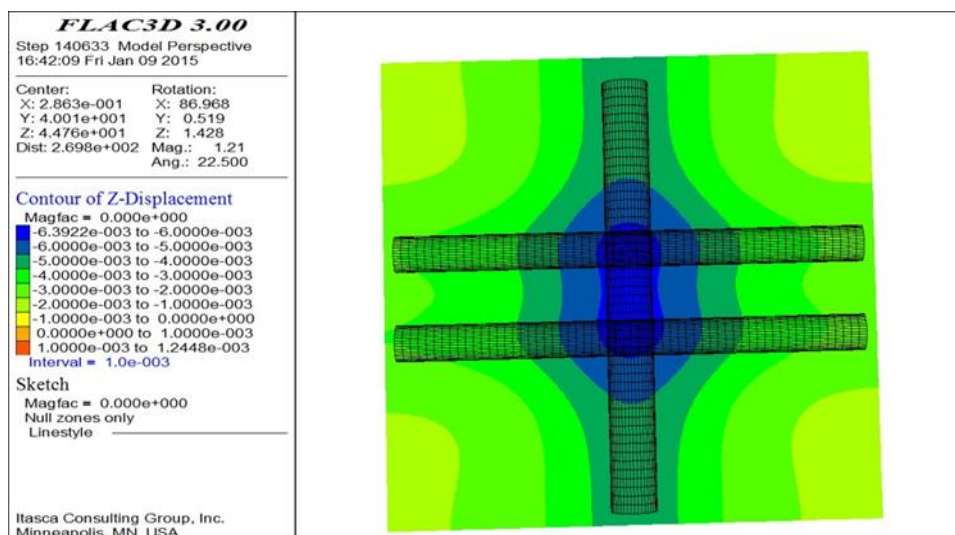
جدول ۸- بررسی تاثیر حفر تونل‌های خط ۳ بر میزان نشست‌های ایجاد شده در منطقه

میزان حداکثر نشست سطحی (mm)	
۴/۰۸	بدون حفر خط ۳
۶/۳۹	با حفر خط ۳
۵۶	میزان تاثیر (%)

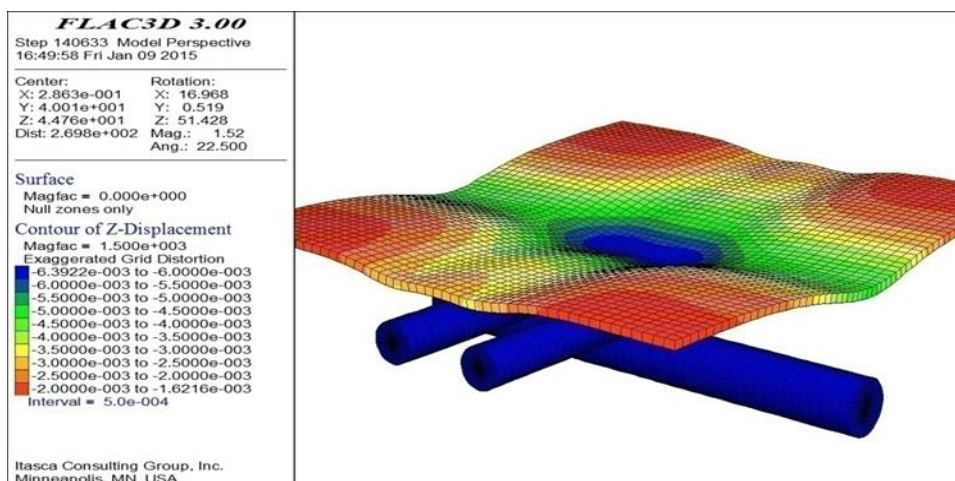
میزان حداکثر نشست سطحی ایجاد شده بعد از حفر کامل تونل‌های خط ۳ از مقدار ۴/۰۸ میلی‌متر به مقدار ۶/۳۹ میلی‌متر افزایش می‌یابد. این امر در جدول ۸ و شکل (۲۰) نشان داده شده است. حداکثر نشست ایجاد شده سطحی در منطقه‌ای بین تونل‌های خط سه و بالای خط ۲ ایجاد می شود. در شکل (۲۱) نشست سطحی نهایی ایجاد شده در این منطقه به صورت شماتیک نشان داده شده است.



شکل ۱۹- کنتور جابجایی قائم بعد از حفر کامل تونل‌های خط ۳



شکل ۲۰- کنتور نشست سطحی بعد از حفر کامل تونل‌های خط



شکل ۲۱- نشست سطحی ایجادشده در محل عبور خط سه از بالای خط دو

#### ۴- بحث و نتیجه گیری

خط ۳ در زیر خط ۱ متروی تبریز باعث افزایش دو

برابری میزان جابجایی در تاج این تونل‌ها می‌گردد. حداکثر نشست ایجادشده سطحی در منطقه‌ای بین تونل‌های خط سه و بالای خط ۲ ایجاد می‌گردد. این میزان بعد از حفر کامل تونل‌های خط ۳ از مقدار ۴/۰۸ میلی‌متر به مقدار ۶/۳۹ میلی‌متر افزایش می‌یابد. به طور کلی مدل‌سازی‌های انجام گرفته نشان می‌دهند که عبور تونل‌های خط ۳ مترو تبریز از زیر تونل‌های خط یک باعث افزایش نشست سطحی به میزان ۱۳۹/۴٪ می‌شود. همچنین بررسی‌ها نشان دادند که عبور تونل‌های خط ۳ از بالای تونل خط ۲ باعث افزایش میزان نشست سطحی به مقدار ۵۶٪ می‌شود. لذا با توجه به فاصله قائم اندک که در بین تونل‌ها وجود دارد در هنگام حفر بایستی بهسازی زمین مورد توجه قرار گیرد.

بررسی‌های انجام گرفته با استفاده از مدل‌سازی سه بعدی نشان‌داد حفر تونل در اطراف تونل موجود، می‌تواند باعث تغییرات عمده‌ای در میزان جابجایی‌های اطراف تونل و نشست سطحی گردد. از جمله مهمترین نتایج حاصل از بررسی‌های انجام یافته می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- نتیجه بدست آمده توسط مدل عددی به نتیجه حاصل از اندازه‌گیری‌های واقعی نزدیک بوده و میزان اختلاف آن حدود ۵٪ می‌باشد.
- زمانی که خط ۳ از زیر هر دو تونل خط ۱ عبور نموده و به طور کامل حفر گردد، میزان جابجایی در تاج تونل‌های خط یک از مقدار ۶/۷۸ میلی‌متر به مقدار ۱۲/۳۳ میلی‌متر برای تونل سه‌پند و مقدار ۱۲/۱۱ میلی‌متر برای تونل سبلان می‌رسد. لذا حفر تونل‌های

## مراجع

- [1] S. G. Ercelebi, H. Copur and I. Oca, "Surface settlement predictions for Istanbul Metro tunnels excavated by EPB-TBM", *Environ Earth Sci*, Vol. 62, No. 2, 2011, pp. 357– 365.
- [2] M. Herzog, "surface subsidence above shallow tunnels", *Bautechnik*, Vol. 62, 1985, pp. 375- .3778.
- [3] M. Karakus, A. Ozsan and H. Basarir, "Finite element analysis for the twin metro tunnel constructed in Ankara Clay-Turkey", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment journal*, Vol. 66, No. 1, 2007, pp. 71-79.
- [4] H. Y. Liu, J. C. Small, J. P. Carter and D. J. Williams, "Effects of tunneling on existing support systems of perpendicularly crossing tunnels", *Computer Geotechnics*, Vol. 36, No. 5, 2009, pp. 880- 894.
- [5] J. Yang, Ch. Liu, Q. Chen and X. Xie, "Performance of overlapped shield tunneling through an integrated physical model tests, numerical simulations and real-time field monitoring", *Underground Space*, Vol. 2, No. 1, 2017, pp. 45-59.
- [6] S. C. Moller and P. A. Vermeer, "On numerical simulation of tunnel installation", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 23, No. 4, 2008, pp. 461–475.
- [7] K. H. Park, "Analytical solution for tunnelling-induced ground movement in clays", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 20, No. 3, 2005, pp. 249-261.
- [8] R. Hasanpour, H. Chakeri, Y. Ozcelik and H. Denek, "Evaluation of surface settlements in the Istanbul metro in terms of analytical, numerical and direct measurements", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment journal*, Vol. 70, No. 3, 2011, pp. 439-449.
- [9] J. D. Greenwood, "Three-Dimensional Analysis of Surface Settlement in Soft Ground Tunneling", *Civil & Inviromental Engineering*, Massachusetts Institute of Technology, 2003.
- [۱۰] محمد حاجی عزیزی، محمود رحمانی و نجف بیگلری، "تحلیل اجزای محدود سدهای زیرزمینی و نکات مهم در طراحی و اجرای آنها- مطالعه موردی سد زیرزمینی آبخوری در استان سمنان"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۲، شماره ۳۸، پاییز ۱۳۹۳، صفحه ۱۰۵-۱۵۳.
- [۱۱] حسین موسیوند و ناصر حاجی، "کاربرد روش المان محدود مقیاس شده در بررسی اثرات توپوگرافی بر امواج لرزه ای"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۵، شماره ۴۹، تابستان ۱۳۹۶، صفحه ۱۶۱-۱۷۴.
- [۱۲] فخرالدین احمدی دانش آشتیانی و علی ناصری فر، "بررسی عددی رفتار اتصالات تیر پیوند خمشی با مقطع کاهش یافته به ستون"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۵، شماره ۴۹، تابستان ۱۳۹۶، صفحه ۱۵۱-۱۶۰.
- [۱۳] مجموعه گزارشات ژئوتکنیک خطوط ۱، ۲ و ۳ مترو تبریز شرکت ایمن سازان.
- [14] N. Anh Do, D. Dias, P. Oreste. And I. D. Maigre, "Three-dimensional numerical simulation of mechanized twin tunnels in soft ground", *Tunneling and underground space technology*, Vol.42, 2014, pp. 40-51.
- [15] C. Ricardo, B. David and L. Angelo, "Three- Dimensional Numerical Models for Mechanised Excavations in Urban Areas" *Jornada Tecnica: Tuneles con EPB. Simulasiony Control de la Tuneladora*. Barcelona, May 2005.
- [16] H. Chakeri, Investigation of face stability and surface settlement at Earth Pressure Balance (EPB) tunneling method, PHD thesis, Hacetepe University, Turkey, 2012.