

بررسی تأثیر حفاری تمام مقطع تونل مترو بر روی ساختمان‌های مجاور (مطالعه

موردی؛ خط یک متروی تبریز)

رامین عباسی^۱، مهدی حسینی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی^(ه)

۲- استادیار دانشکده مهندسی معدن دانشگاه بین‌المللی امام خمینی^(ه)

(دریافت ۱ شهریور ۹۱، پذیرش اردیبهشت ۹۲)

چکیده

رشد جمعیت در اکثر شهرها باعث افزایش نیاز به اجرای زیرساخت‌ها شده است. هرچه محیط شهری شلوغ‌تر و فضای سطحی محدودتر شده، نیاز به ایجاد سازه‌های زیرسطحی مانند تونل‌ها برای تأمین این زیرساخت‌ها، بیشتر احساس می‌شود. از جمله مشکلات حفاری این تونل‌ها نشست ناشی از حفاری و اثرات مخرب احتمالی آن برای ساختمان‌های واقع در سطح زمین است. از این رو تعیین مقدار نشست ناشی از حفاری‌های زیرزمینی و مقایسه با مقدار نشست مجاز ساختمان‌ها امری بسیار مهم و قابل توجه است. با مرور ادبیات فنی موجود در این زمینه به طور کلی می‌توان روش‌های توسعه داده شده برای پیش‌بینی نشست را در سه بخش روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی تقسیم‌بندی کرد. در این تحقیق پس از بررسی نشست سطح زمین ناشی از تونل‌سازی در حالت بدون حضور ساختمان با استفاده از روش‌های تجربی و تحلیلی، تأثیر وجود ساختمان‌ها بر روی تغییرات ایجاد شده در سطح زمین و همچنین تأثیر تونل‌سازی بر روی جابجایی پی ساختمان‌ها و خسارات و آسیب‌های ناشی از این جابجایی‌ها توسط روش عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. مطالعه موردی در این تحقیق قسمت کم عمق تونل خط یک متروی تبریز است. مدل‌سازی عددی توسط نرم‌افزار PLAXIS3D TUNNEL انجام شده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی نشان می‌دهد که با افزایش صلبیت ساختمان، میزان نشست ناشی از حفاری تونل کاهش می‌یابد و هرچه سطح مقطع ساختمان‌ها در مجاورت تونل بیشتر باشد نشست پی آن‌ها کمتر و یکنواخت‌تر خواهد بود. منحنی‌های نشست سطحی نشان می‌دهد که با افزایش عمق تونل از مقطع اول به مقطع دوم، نشست‌های برآورد شده با روش تحلیلی کاهش پیدا کرده و محدوده تأثیر حفاری بیشتر شده است. این روند برای روش عددی حالت معکوس دارد. همچنین در قسمت مورد مطالعه عبور تونل از زیر ساختمان‌های مجاور تأثیر ناچیزی روی آن‌ها داشته است.

کلمات کلیدی

تونل‌سازی، نشست سطحی، نرم‌افزار Plaxis 3D Tunnel، متروی تبریز

۱- مقدمه

محدود ناپیوستگی قطع شده است در نظر گرفته می‌شود، درحالی‌که در نظریه محیط ناپیوسته، توده سنگ به صورت ترکیبی از بلوک‌ها که در کنار هم قرار داده شده‌اند در نظر گرفته می‌شود از آنجایی که منطقه مورد مطالعه در این تحقیق به صورت خاکی و ریزی است محیط به صورت پیوسته فرض شده است؛ بنابراین روش عددی مورد استفاده روش اجزا محدود (FEM) است. Plaxis 3D Tunnel یک بسته نرم‌افزاری اجزا محدود بوده و منحصر به منظور تجزیه و تحلیل تغییر شکل و پایداری در پروژه‌های مهندسی ژئوتکنیک ابداع شده است.

۳- معرفی پروژه خط یک متروی تبریز

خط یک متروی تبریز به طول ۱۶/۵ کیلومتر بوده و دارای ۱۸ ایستگاه است که از جنوب غربی شهر به سمت مرکز و سپس جنوب شرقی شهر امتداد می‌یابد. این مسیر از لحاظ فیزیکی به صورت هم سطح، نیمه عمیق، عمیق و در ارتفاع طراحی شده است. عملیات حفاری تونل با قطر حفاری ۶/۸۸ متر و به طول ۱۲ کیلومتر است که با استفاده از دستگاه حفاری EPB انجام می‌گیرد. ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل با حفر حدود ۷۰ گمانه ماشینی به صورت مغز زه گیری ممتد به اعماق ۳۰ تا ۶۰ متر مشخص شده است [۱]. در اینجا قسمتی از فاز دوم پروژه خط یک متروی تبریز برای مطالعه و بررسی نشست سطحی زمین، انتخاب شده است که این قسمت شامل حد فاصل بین فلکه دانشگاه تا چهارراه آ برسان است. همچنین در این فاصله دو ساختمان برج بلور و ساختمان بانک صادرات برای تحلیل در مدل‌سازی عددی انتخاب شده است.

۴- معرفی مقطع مدل‌سازی

در این قسمت چگونگی تأثیر حفر تونل خط یک متروی تبریز بر ساختمان‌های اطراف مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۱ موقعیت ساختمان‌ها بین فلکه دانشگاه و چهارراه آ برسان را نشان می‌دهد. در این مقاله ساختمان‌های برج بلور و بانک صادرات در دو مقطع مجزا مدل‌سازی شده است. جدول ۱ موقعیت و مختصات این ساختمان‌ها را نسبت به تونل نشان می‌دهد.

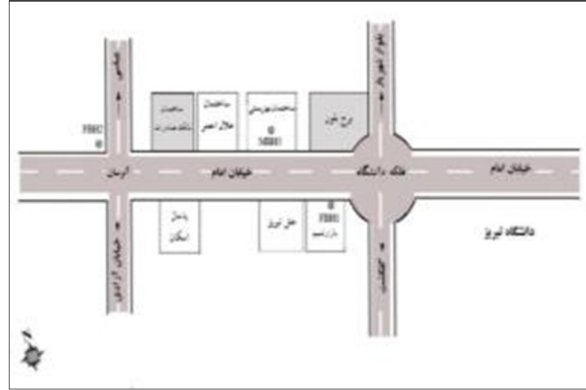
نیاز به تونل‌سازی و احداث فضاهای زیرزمینی در مناطق شهری اکنون به ضرورتی اجتناب‌ناپذیر تبدیل شده است. نظر به اهمیت موضوع و وجود سازه‌های سطحی حساس در بافت شهرها، به ویژه در شهر تبریز لزوم بررسی پدیده نشست سطح زمین در اثر حفاری مترو و تأثیر این پدیده بر روی این سازه‌های سطحی امری ضروری به نظر می‌رسد. به طور کلی روش‌های برآورد نشست زمین در سه گروه تجربی، تحلیلی و عددی طبقه‌بندی شده است. روش‌های تجربی و تحلیلی برای تخمین نشست در حالت زمین سطح آزاد ارائه شده‌اند. روش‌های عددی به خاطر استفاده از رایانه و سهولت کار و همچنین تسریع عملیات، کارایی بیشتری دارند. روش تحلیل اجزا محدود (FEM) به عنوان یکی از روش‌های عددی، این اجازه را به ما می‌دهد که پارامترها و عوامل مختلفی را در احداث تونل که هیچ‌کدام از روش‌های تجربی و تحلیلی آن‌ها را در نظر نمی‌گیرند، بکار ببریم. روش‌های عددی همچنین توانایی تحلیل تأثیر متقابل تونل‌سازی بر روی سازه‌های سطحی و زیرسطحی را دارا می‌باشند. برای تحلیل عددی در این تحقیق از مدل‌سازی المان محدود سه بعدی با نرم‌افزار PLAXIS 3D TUNNEL استفاده شده است که بر اساس روش اجزا محدود کار می‌کند.

۲- نظریه تحقیق

روش‌های تجربی و تحلیلی پیش‌بینی نشست در سطح زمین مربوط به تحلیل نشست در زمین بکر می‌باشند. هرچند که در تحلیل‌های مهندسی، مسائل اغلب شامل اندر کنش بین ساخت تونل و دیگر سازه‌ها است. این قبیل وضعیت‌ها شامل سازه‌های سطحی موجود (مانند ساختمان‌ها)، سازه‌های زیرسطحی موجود (همانند تونل‌ها، لوله کشی‌های شهری) یا ساخت سازه‌های زیرزمینی پیچیده از قبیل تونل‌های دوقلو و ایستگاه‌های زیرزمینی می‌باشند. روشن است که روش‌های تجربی و تحلیلی که ارائه شده در این‌گونه موارد دارای محدودیت‌هایی هستند. مدل‌سازی عددی امکان تطبیق دادن اجزا مختلف مسائل اندر کنش در یک تحلیل را فراهم می‌آورند. روش‌های عددی متفاوتی بر مبنای نظریه‌های محیط پیوسته و ناپیوسته ارائه گردیده‌اند. در نظریه محیط پیوسته توده سنگ به عنوان یک محیط پیوسته که توسط تعدادی

جدول ۱: موقعیت مقاطع مدل‌سازی شده نسبت به تونل

مقطع	ساختمان	مساحت مقطع پی (m ²)	تعداد طبقه	فاصله بین کمینه محور تونل و ساختمان (m)	عمق تاج تونل از سطح زمین (m)
۱	برج بلور	۳۰۰۰	۲۰ طبقه	۱۷/۲۱	۶/۰۰۳
۲	بانک صادرات	۲۰۰	۸ طبقه	۱۶/۴۹	۱۳/۶۰۶



شکل ۱: موقعیت ساختمان‌ها بین فلکه دانشگاه و چهارراه آبرسان

۴-۱- خصوصیات لایه‌های خاک و مصالح مورد استفاده

پارامترهای ژئوتکنیکی لایه‌های خاک منطقه برای مدل رفتاری موهر-کولمب، در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: مشخصات مصالح لایه‌های خاک [۲]

مقادیر		واحد	ماده	پارامتر
لایه ۳۰ >	لایه ۰-۳۰ متر			
Mohr- Coulomb	Mohr- Coulomb	-	مدل	مدل مصالح
Drained	Drained	-	نوع	نوع رفتار مصالح
۱۸	۱۸	kN/m ³	γ_{unsat}	وزن مخصوص غیراشباع
۲۰	۲۰	kN/m ³	γ_{sat}	وزن مخصوص اشباع
$۲,۳ \times ۱۰^۴$	$۲,۳ \times ۱۰^۴$	kN/m ²	E_{ref}	مدول الاستیسیته
۸۸۴۶/۱۵۴	۸۸۴۶/۱۵۴	kN/m ²	G_{ref}	مدول صلبیت
۰/۳	۰/۳	-	ν	نسبت پواسون
۰	۰	deg	ψ	زاویه اتساع
۳۴	۵	kN/m ²	C	چسبندگی
۱۹	۳۵	deg	ϕ	زاویه اصطکاک
۰/۶۷۴	۰/۴۲۶	-	K_0	ضریب فشار جانبی خاک
$K_0 = 1 - \sin \phi'$		ضریب فشار جانبی بر اساس رابطه جکی بدست آمده است.		

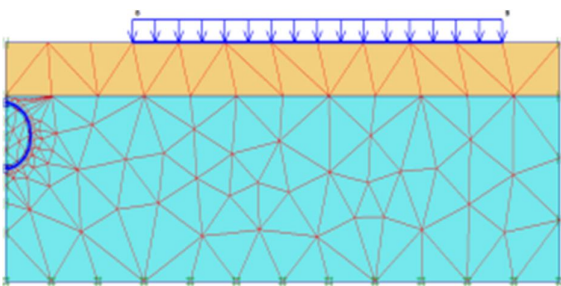
است. مدل‌سازی به صورت دو مقطع جداگانه برای دو ساختمان برج بلور (مقطع شماره ۱) و ساختمان بانک صادرات (مقطع شماره ۲) انجام گرفته است.

المان ۱۵ گرهی ایزو پارامتریک مورد استفاده برای ساخت مدل، شامل ۶ گره مثلثی در صفحه XY و ۹ گره در جهت Z است که قابلیت‌های بالایی در شبیه‌سازی پاسخ محیط‌های خاکی در مقابل تغییرات تنش دارد. المان‌های دیگر مورد استفاده در مدل، المان صفحه‌ای است که برای مدل کردن سپر دستگاه حفاری از آن استفاده شده است.

۴-۳- اعمال شرایط مرزی

برای اجتناب از تأثیر مرزهای مدل بر نتایج تحلیل، از یک شبکه اجزاء محدود با عرض ۷۵ متر و ارتفاع ۲۵ متر برای مقطع شماره ۱ و عرض ۵۰ متر و ارتفاع ۳۵ متر برای مقطع شماره ۲ استفاده شد. شرایط مرزی و اولیه که شامل کلیه بارها، نیروها و جابجایی‌های در محیط مدل است در هنگام مدل‌سازی باید به مدل اعمال گردد. به منظور اعمال شرایط مرزی نیز از مرزهای استاندارد موجود در نرم‌افزار استفاده شده است. در این نوع شرایط مرزی، جابجایی مرزهای کناری در جهت Y آزاد بوده و در جهت X ثابت می‌شوند. مرز پایین نیز در همه جهات ثابت بوده و مرز بالایی آزاد گذاشته می‌شود. در اینجا با توجه به حفاری تونل با استفاده از دستگاه TBM و مدل‌سازی تونل با استفاده از نرم‌افزار سه بعدی، پارامترهای زیر برای مدل‌سازی فازهای مختلف حفاری در نظر گرفته شده است.

- فشار سینه کار (۲۰ کیلو پاسکال در تاج تونل و گرادیان ۲ کیلو پاسکال بر متر)
- فشار تزریق (۲۰۰ کیلو پاسکال در تاج تونل و ۳۰۰ کیلو پاسکال در کف تونل)
- فشار جک‌های پیشران دستگاه (۶۳۵ کیلو پاسکال)



شکل ۲: شرایط مرزی اعمال شده به مدل برج بلور

سگمنت توسط المان‌های حجمی معمولی مدل شده و پی ساختمان‌ها نیز با استفاده از المان صفحه‌ای مدل‌سازی شده است. خواص مورد نیاز برای تعریف سگمنت در حالت الاستیک، توسط پارامتر چگالی، مدول الاستیسیته، ضریب پواسون و ضخامت ارائه شده است (جدول ۳). در این مدل‌سازی پی ساختمان به صورت یک بار گسترده یکنواخت در نظر گرفته شده است. خواص بتن پی ساختمان‌ها در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۳: خواص سگمنت های بتنی

پارامتر	واحد	نماد	مقادیر
شناسه	-	-	بتن
مدل مصالح	-	مدل	Linear-elastic
نوع مصالح	-	نوع	Non-porous
وزن مخصوص	kN/m ³	γ_{unsat}	۲۴
مدول الاستیسیته	kN/m ²	E_{ref}	$۳/۱ \times ۱۰^۷$
ضخامت	m	d	۰/۳
ضریب پواسون	-	ν	۰/۱

جدول ۴: خواص بتن پی ساختمان‌های برج بلور و بانک صادرات

پارامتر	واحد	نماد	مقادیر	
			برج بلور	بانک صادرات
مدل مصالح	-	-	Linear-elastic	Linear-elastic
سختی محوری	kN/m	EA	$۷/۸ \times ۱۰^۷$	$۳/۹۰ \times ۱۰^۷$
سختی خمشی	kNm ² /m	EI	$۵/۸۵ \times ۱۰^۷$	$۷/۳۱۲ \times ۱۰^۶$
ضخامت معادل	m	d	۲/۲۰۱	۱/۵
وزن حجمی	kN/m/m	w	۷۵	۳۷/۵
ضریب پواسون	ν	-	۰/۱۵	۰/۱۵

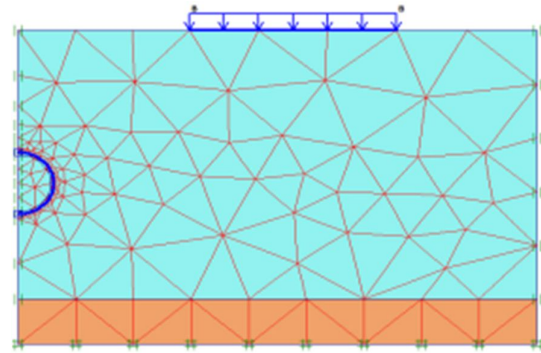
۴-۲- هندسه مدل

به منظور کاهش حجم مدل و کاهش زمان محاسبات از تقارن تونل استفاده شده و مدل به صورت نیمه، ساخته شده

۵-۱- تحلیل نشست عرضی سطح زمین

در شکل‌های ۶ و ۷ پروفیل نشست عرضی سطح زمین برای هر دو مقطع در حضور سربار ناشی از ساختمان ۲۰ طبقه (برج بلور) برای مقطع شماره ۱ و ساختمان ۸ طبقه (بانک صادرات) نشان داده شده است. شکل ۶ نشان می‌دهد که حداکثر نشست عرضی سطحی زمین در مرکز تونل اتفاق افتاده است و مقدار آن برابر $10^{-3} \times 13/30$ متر است. از آنجایی که موقعیت ساختمان در طول محور x از $17/50$ متر تا $67/50$ متر است می‌توان گفت که ساختمان به صورت کامل در قسمت تقعر رو به پایین گودی نشست (برآمدگی خالص، Hogging) قرار گرفته است؛ بنابراین در صورت وارد آمدن خسارت ساختمان دچار کرنش کششی خواهد شد.

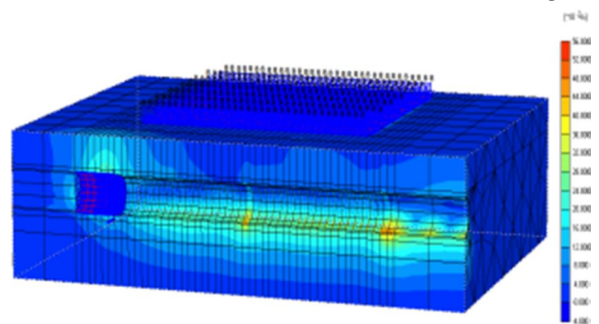
شکل ۷ نیز پروفیل نشست عرضی را برای مقطع دوم در حضور سازه سطحی آن (ساختمان بانک صادرات) نشان می‌دهد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که حداکثر نشست عرضی در این مقطع نیز در مرکز تونل اتفاق افتاده است که مقدار آن $10^{-3} \times 15/63$ متر است. همچنین شکل ۷ نشان می‌دهد که بعد از قسمت انتهایی ساختمان بانک صادرات پدیده برآمدگی رخ داده است. در این مقطع نیز با توجه به موقعیت بانک صادرات می‌توان گفت که این ساختمان نیز در محدوده برآمدگی خالص قرار دارد. این نتایج نشان می‌دهد که نشست عرضی رخ داده در محل مقطع دوم بیش از میزان آن در محل مقطع اول است. در برآورد میزان نشست سطح زمین در حالت سطح آزاد معمولاً با افزایش عمق تونل نشست سطح زمین کاهش می‌یابد؛ اما در مدل‌سازی عددی که حضور سازه‌های سطحی را نیز در نظر گرفته است نتایج متفاوتی را نشان می‌دهد. در اینجا می‌توان گفت که کم بودن سطح مقطع ساختمان در مدل شماره ۲ (۲۰۰ مترمربع) نسبت به مدل شماره ۱ (۳۰۰۰ مترمربع)، و به دنبال آن صلبیت زیاد ساختمان برج بلور از دلایل کاهش نشست در مقطع مدل‌سازی شماره ۱ است.



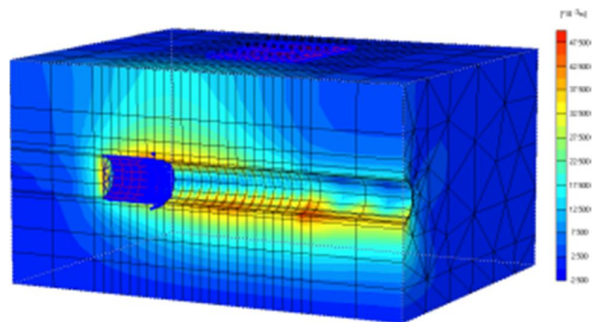
شکل ۳: شرایط مرزی اعمال شده به مدل بانک صادرات

۵- نتایج مدل‌سازی عددی

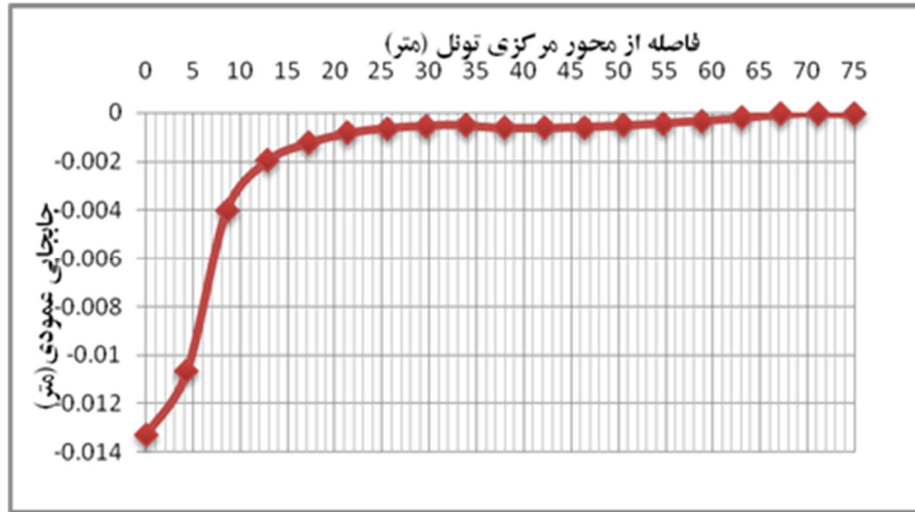
در شکل‌های ۴ و ۵ جهت نشان دادن تغییر میزان جابجایی و همچنین روند توزیع جابجایی در محل دو مقطع کنترلهای جابجایی حاصل از تحلیل توسط نرم‌افزار بعد از حفاری تونل و عبور از زیر ساختمان‌ها به صورت سه بعدی نشان داده شده است.



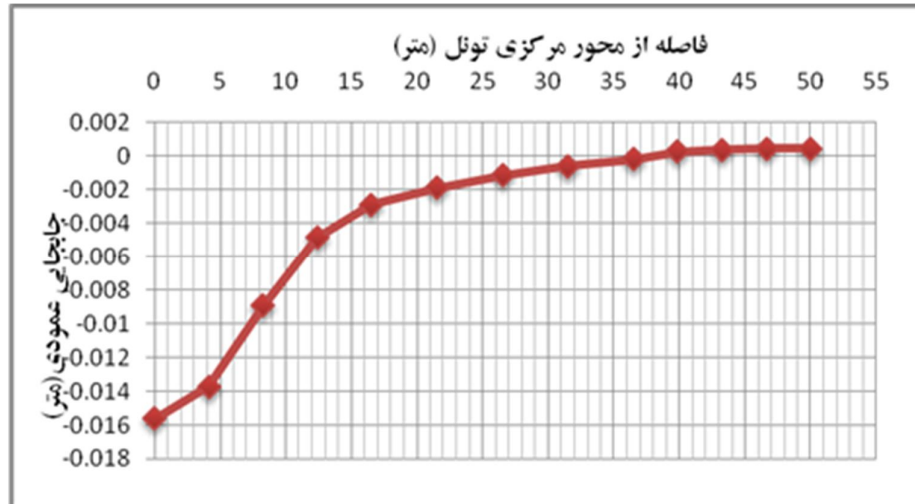
شکل ۴: کانتورهای جابجایی کل مدل در حفاری مقطع ۱ (حداکثر جابجایی برابر $52/39$ میلی‌متر)



شکل ۵: کانتورهای جابجایی کل مدل در حفاری مقطع ۲ (حداکثر جابجایی برابر $48/23$ میلی‌متر)



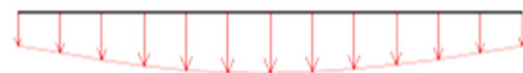
شکل ۶: نشست عرضی سطح زمین برای مقطع شماره ۱ در حضور برج بلور



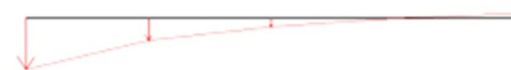
شکل ۷: نشست عرضی سطح زمین برای مقطع شماره ۲ در حضور ساختمان بانک صادرات

با توجه به این شکل، بیش‌ترین جابجایی عمودی برای برج بلور در قسمت میانی ساختمان به دلیل طول زیاد آن در محور X اتفاق افتاده است. همچنین از شکل مربوط به برج بلور می‌توان مقاومت آن در مقابل نشست به دلیل صلبیت بالا را استنباط کرد؛ و اما بیش‌ترین جابجایی عمودی برای ساختمان بانک صادرات در قسمت انتهایی نزدیک به مرکز تونل اتفاق افتاده است. همچنین انتهای دیگر این سازه دچار برآمدگی جزئی شده است. با توجه به این شکل می‌توان نتیجه گرفت که هرچه طول ساختمان و صلبیت آن افزایش یابد نشست کمتر و توزیع جابجایی عمودی در پی ساختمان یکنواخت‌تر خواهد شد.

شکل ۸ نحوه توزیع جابجایی پی ساختمان‌ها در اثر نشست عمودی سطح زمین را نشان می‌دهد.



(آ) برج بلور



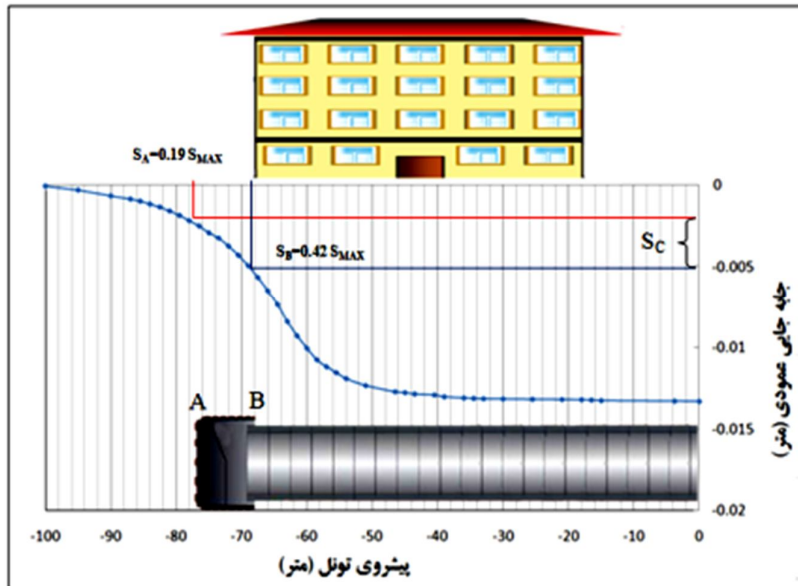
(ب) ساختمان بانک صادرات

شکل ۸: توزیع جابجایی عمودی پی ساختمان‌ها در اثر جابجایی قائم سطح زمین

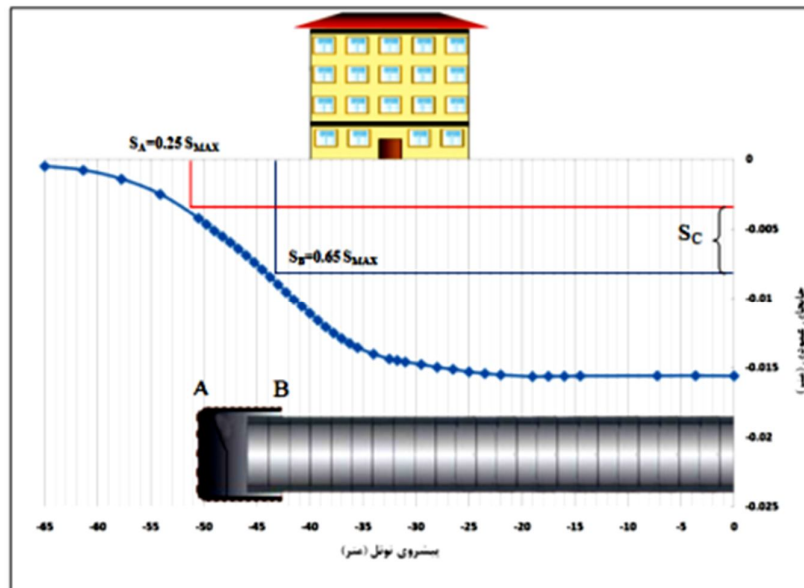
۲-۵- تحلیل نشست طولی سطح زمین

داده است در حالی که حداکثر جابجایی ($S_{y(max)}$) در مقطع شماره ۲ در فاصله ۲۴ متری از جبهه کار و سپر اتفاق افتاده است؛ که این تغییرات ملایم نشست طولی مقطع شماره ۱ با شیب کمتر نسبت به مقطع شماره ۲ را می‌رساند. همچنین با توجه به شکل می‌توان گفت که میزان پیش نشست در جلوی سپر در مقطع شماره ۲، ۲۵ درصد میزان نشست حداکثر و در مقطع شماره ۱، ۱۹ درصد میزان نشست حداکثر است.

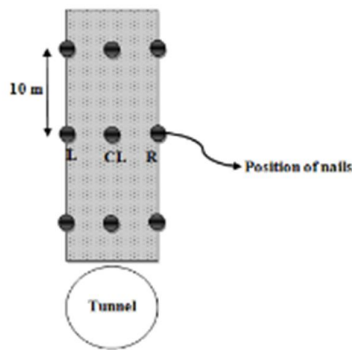
شکل‌های ۹ و ۱۰ منحنی طولی جابجایی سطح زمین را در دو موقعیت مختلف نشان می‌دهند. همچنین موقعیت سپر و سازه‌ها را نیز نسبت به پروفیل طولی نشست می‌توان مشاهده کرد. در این شکل‌ها S_A مقدار پیش نشست طولی در جلوی جبهه کار، S_B مقدار نشست در انتهای سپر و S_C مقدار نشست در طول سپر است. حداکثر جابجایی عمودی برای مقطع شماره ۱ در فاصله ۳۶ متری از جبهه کار و سپر رخ



شکل ۹: منحنی نشست طولی و موقعیت سپر و ساختمان در مقطع شماره ۱



شکل ۱۰: منحنی نشست طولی و موقعیت سپر و ساختمان در مقطع شماره ۲



شکل ۱۱: موقعیت میخکوبی در سطح زمین در بالای تونل جهت نشست سنجی سطح زمین

همان طور که در شکل دیده می‌شود در هر ۱۰ متر ۳ نقطه (L, CL, R) در بالای تونل برداشت شده است. جدول ۶ نتایج نشست سنجی حاصل از عملیات ابزار بندی را ۵۰ متر بعد از عبور کل دستگاه TBM را در محل مقاطع مدل‌سازی عددی نشان می‌دهد.

جدول ۶: داده‌های نشست سنجی حاصل از نتایج ابزار دقیق [۳]

میزان نشست ۵۰ متر بعد از عبور دستگاه TBM (mm)			محل نتایج ابزار دقیق
L	CL	R	
۱۴	۱۹	۸	مقطع شماره ۱
۱۸	۲۵	۱۴	مقطع شماره ۲

همان طور که گفته شد داده‌های ابزار دقیق برای تونل در این بخش از متروی تبریز، فقط در سه نقطه بالای تاج تونل در سطح زمین برداشت شده است. طبق جدول ۶ می‌توان اختلاف نتایج مدل‌سازی عددی هردو مقطع را با نتایج نشست سنجی ابزار دقیق مشاهده کرد؛ که البته طبق گزارش شرکت پیمانکار این اختلاف را می‌توان به دلیل دست خورده بودن ۳ متر از رو باره توجیه کرد.

۷- تحلیل تأثیر جابجایی زمین بر روی برج بلور و ساختمان بانک صادرات

در این قسمت به بررسی آسیب و خسارت‌های احتمالی وارد بر ساختمان‌های ۲۰ طبقه و ۸ طبقه در محل مقاطع مدل‌سازی شده با استفاده از سه روش پرداخته می‌شود. در ادامه به بررسی میزان خسارت با استفاده از سه پارامتر نشست پرداخته شده است.

طبق پروتکل حفاری و داده‌های شرکت پیمانکار، در این قسمت از پروژه برای هردو مقطع از یک مقدار فشار سینه کار استفاده شده است؛ بنابراین در مدل‌سازی مقاطع شماره ۱ و ۲ همان مقدار فشار سینه کار (۰/۲ بار) انتخاب شده است. جدول ۵ مقادیر پارامترهای نشست طولی را برای این مقاطع نشان می‌دهد. طبق این نتایج مشاهده می‌شود که پیش نشست رخ داده و همچنین میزان نشست در انتهای سپر در مقطع شماره ۲ بیشتر از مقطع شماره ۱ است؛ که البته این افزایش جابجایی به خاطر زیاد شدن عمق مقطع شماره ۲ و همچنین افزایش گرادیان فشار در جبهه کار تونل نسبت به مقطع شماره ۱ قابل انتظار است. در واقع این نتایج اهمیت ایجاد فشار سینه کار توسط سپر EPB به جبهه کار حفاری را می‌رساند که اگر این پارامتر به درستی انتخاب شود می‌توان از افزایش نشست در جلوی جبهه کار و سپر پیشگیری کرد که در نتیجه جابجایی زمین در امتداد سپر نیز کاهش خواهد یافت که این منجر به محدود کردن نشست نهایی و در نتیجه پایداری بیشتر تونل خواهد شد؛ بنابراین یکی از دلایل زیاد بودن نشست طولی در مقطع شماره ۲ با توجه به داشتن عمق زیاد نسبت به مقطع شماره ۱ را می‌توان عدم مهار کافی فشار جبهه کار توسط اپراتور با توجه به افزایش گرادیان فشار زمین عنوان کرد.

جدول ۵: مقادیر پارامترهای نشست طولی برای مقاطع مدل‌سازی

مقاطع	$S_A(m)$	$S_B(m)$	$S_C(m)$	$S_y^{(max)}(m)$
۱	$۲/۵۰ \times ۱۰^{-۳}$	$۵/۶۶ \times ۱۰^{-۳}$	$۳/۱۶ \times ۱۰^{-۳}$	$۱۳/۳۰ \times ۱۰^{-۳}$
۲	$۴/۲۲ \times ۱۰^{-۳}$	$۱۰/۰۷ \times ۱۰^{-۳}$	$۵/۸۵ \times ۱۰^{-۳}$	$۱۵/۵۹ \times ۱۰^{-۳}$

۶- بررسی نتایج داده‌های ابزار بندی

بدلیل ارتفاع کم تونل متروی تبریز در قسمت مابین فلکه دانشگاه تا چهارراه آبرسان و همچنین ریزشی بودن منطقه از عملیات ابزار بندی برای نشست سنجی منطقه بالای تونل استفاده شده است. ابزار بندی در این منطقه به صورت برداشت تغییر ارتفاع میخ‌های نصب‌شده در سطح زمین به فاصله ۱۰ متری از یکدیگر (مطابق شکل ۱۱) انجام گرفته است.

۷-۱- ارزیابی خسارت با استفاده از نشست پی سازه

جدول ۷ مقادیر حداکثر جابجایی پی ساختمان‌ها را در سه محور X، Y و Z نشان می‌دهد.

جدول ۷: مقادیر حداکثر جابجایی ساختمان‌های مدل‌سازی شده در مقاطع

ساختمان	$U_x (m)$	$U_z (m)$	$U_y (m)$	$U_{tot} (m)$
برج بلور	$2/72 \times 10^{-3}$	$1/24 \times 10^{-3}$	$5/07 \times 10^{-3}$	$5/16 \times 10^{-3}$
بانک صادرات	$2/43 \times 10^{-3}$	$1/01 \times 10^{-3}$	$3/19 \times 10^{-3}$	$3/51 \times 10^{-3}$

صلبیت ساختمان‌ها بیش‌ترین مقاومت خود را در برابر جابجایی افقی از خود نشان می‌دهند از این رو هردو سازه در جهت افقی جابجایی کمتری را متحمل شده‌اند.

ران کین در سال ۱۹۹۸ طبق جدول ۸ شدت آسیب‌دیدگی سازه‌ها را بر پایه نشست قائم آن‌ها دسته‌بندی کرد. طبق توضیحات این جدول سازه‌هایی که جابجایی قائم پی آن‌ها کمتر از ۱۰ میلی‌متر باشد خسارتی به آن‌ها وارد نمی‌شود و در صورت وارد شدن خسارت، خیلی جزئی و قابل چشم‌پوشی خواهد بود. از آنجایی که نشست قائم پی برج بلور برابر $5/07 \times 10^{-3}$ و نشست قائم پی ساختمان بانک صادرات برابر $3/19 \times 10^{-3}$ بوده و هردو مقدار کمتر از ۱۰ میلی‌متر است بنابراین طبق اظهارات ران کین (Rankin) می‌توان گفت خسارتی بر این دو سازه در اثر حفاری وارد نمی‌شود.

داده‌های جدول نشان می‌دهد که میزان جابجایی پی برج بلور در هر سه محور بیش از ساختمان بانک صادرات است. هردو ساختمان بیش‌ترین جابجایی را در جهت قائم داشته‌اند.

جدول ۸: طبقه‌بندی آسیب‌های وارد بر ساختمان [۴]

شماره	دسته‌بندی خطر آسیب‌دیدگی	شدت آسیب‌دیدگی	توصیف نوع خسارت	$S_{max} [mm]$
۱	نمای ساختمان	قابل چشم‌پوشی	آسیب‌های احتمالی ظاهر ساختمان قابل چشم‌پوشی است	> 10
۲	نمای ساختمان	کم	امکان آسیب جزئی به نمای ساختمان، درحالی‌که خسارت‌های ساختاری بعید به نظر می‌رسد	۱۰-۵۰
۳	اساسی	متوسط	امکان آسیب به دیوارهای ساختمان و ترک خوردن آن‌ها وجود دارد	۵۰-۷۵
۴	نیازمند تعمیرات ساختاری	شدید	احتمال آسیب و خسارت اساسی به کل ساختمان زیاد است	< 75

۷-۲- ارزیابی خسارت با استفاده از شیب منحنی نشست

یکی دیگر از مهم‌ترین پارامترها در بررسی تأثیر نشست بر روی ساختمان‌ها و پل‌ها، شیب منحنی نشست است. از جمله معیارهای معروف در زمینه بررسی این تأثیرات معیار کر امر (Cramer) است. طبق این معیار بعد از محاسبه شیب منحنی

نشست می‌توان میزان مخاطره‌آمیز بودن حفر تونل در منطقه مورد نظر را تعیین کرد. با توجه به این معیار حداکثر شیب منحنی نشست برای سازه‌هایی چون پل $\frac{1}{800}$ و ساختمان $\frac{1}{900}$ است. جدول ۹ دسته‌بندی خسارت وارد بر ساختمان‌ها را بر اساس شیب منحنی نشست نشان می‌دهد.

جدول ۹: تأثیر شیب منحنی نشست بر روی سازه‌های سطحی [۵]

شیب گودی نشست	$\frac{1}{1000} >$	$\frac{1}{1000} - \frac{1}{600}$	$\frac{1}{600} - \frac{1}{400}$	$\frac{1}{400} - \frac{1}{300}$
شدت خسارت	ندارد	خسارت کمی	خسارت معماری کم	خسارت معماری متوسط

جدول ۱۱: مقادیر کرنش‌های کششی پی ساختمان‌ها در مدل‌سازی عددی

ساختمان	ϵ_{xx}	ϵ_{yy}	ϵ_{zz}
برج بلور	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۴
ساختمان بانک صادرات	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲

با توجه به کرنش‌های بدست آمده برای هر دو سازه مقادیر آن‌ها کمتر از محدوده مخاطره‌آمیز دسته‌بندی روش سان و کوردینگ است. و می‌توان گفت که با این روش نیز آسیب احتمالی وارد بر سازه‌های مدل‌سازی شده ناچیز و قابل چشم‌پوشی است.

با رسم شیب منحنی نشست عرضی برای دو مقطع مدل‌سازی شده می‌توان مقادیر شیب نهایی را برای آن‌ها بدست آورد. از آنجایی که این مقدار برای مقطع مربوط به برج بلور $\frac{1}{10000}$ و برای مقطع مربوط به ساختمان بانک صادرات $\frac{3}{10000}$ بدست آمد می‌توان با قاطعیت گفت که این سازه‌ها در اثر حفاری تونل دچار آسیب و خسارت نمی‌شوند.

۸- مقایسه نتایج روش عددی با روش تحلیلی گزنالس و ساگاستا

۳-۷- ارزیابی خسارت با استفاده از کرنش پی‌ها

روش‌های تجربی و تحلیلی برای تخمین نشست در حالت زمین سطح آزاد و بدون حضور سازه ارائه شده‌اند. در واقع هدف اصلی از ارائه روش‌های تحلیلی و تجربی، سادگی نسبی و عدم نیاز آن‌ها به بسیاری از ویژگی‌های مربوط به خاک و محیط حفاری است. که شاید تعیین آن‌ها در زمان شروع پروژه نامعلوم باشد. در واقع این روش‌ها به بررسی تأثیر صرف تونل‌سازی بدون در نظر گرفتن هیچ سازه‌ای در سطح زمین می‌پردازند. از جمله روش‌های تحلیلی برای برآورد نشست سطحی زمین روش گزنالس و ساگاستا (۲۰۰۱) است. روش گزنالس و ساگاستا با ارائه روابط بهتری برای تغییر شکل اطراف تونل و در نظر گرفتن دو الگوی تغییرشکل شعاعی یکنواخت و بیضوی شدن تونل فرمول (۱) را برای تخمین نشست سطحی زمین در حالت بکر ارائه کردند، که با توجه به مطالعات موردی متعدد تخمین قابل قبولی برای نشست در حالت‌های مختلف بدست می‌داد.

سان و کوردینگ (Son and Cording) در سال ۲۰۰۵ جدول ۱۰ را برای پیش‌بینی پتانسیل آسیب ساختمان‌ها بر اساس مقادیر کرنش‌های کششی ارائه کردند. در این جدول شدت خسارت‌های وارد بر سازه‌های سطحی بر اساس کرنش کششی وارد شده بر سازه بیان شده است.

جدول ۱۰: دسته‌بندی آسیب بر اساس کرنش کششی [۶]

شدت آسیب	محدوده کرنش کششی
قابل چشم‌پوشی	۰/۰۰۰ - ۰/۰۵۰
بسیار کم	۰/۰۵۰ - ۰/۰۷۵
کم	۰/۰۷۵ - ۰/۱۶۷
متوسط	۰/۱۶۷ - ۰/۳۳۳
شدید تا خیلی شدید	> ۰/۳۳۳

$$w(y) = 2\epsilon a_0 \left(\frac{a_0}{h}\right)^{2\alpha-1} \frac{1}{(1+y'^2)^\alpha} \left[1 + \rho \frac{1-y'^2}{1+y'^2}\right] \quad (1)$$

در جدول ۱۱ مقادیر کرنش‌های ϵ_{xx} ، ϵ_{yy} و ϵ_{zz} برای ساختمان‌های مدل‌سازی شده به روش عددی بدست آمده است.

که در این رابطه ϵ کرنش انقباضی شعاعی برابر با مقدار u_0 ، $\frac{u_0}{a_0}$ جابجایی شعاعی یکنواخت، a_0 شعاع تونل، y' فاصله از مرکز تونل که بر اساس عمق تونل h نرم‌الیزه شده

بین دو روش فوق، محدوده تأثیر حفاری نیز افزایش یافته است.

اما در مقطع دوم با افزایش عمق تونل به ۱۶/۳ متر میزان حداکثر نشست برآورد شده با روش تحلیلی طبق پیش‌بینی اولیه کاهش یافته و محدوده تأثیر حفاری نیز افزایش پیدا کرده است درحالی‌که این روند برای روش عددی حالت معکوس دارد. یعنی با افزایش عمق از مقطع اول به مقطع دوم میزان حداکثر نشست برآورد شده با روش عددی افزایش و محدوده تأثیر حفاری تونل کاهش یافته است، که دلیل این روند را می‌توان با حضور سازه‌های دو مقطع در سطح زمین توجیه کرد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد ساختمان مقطع اول دارای سطح مقطع و صلبیت زیاد است. درحالی‌که این مقادیر برای ساختمان مقطع دوم نسبت به ساختمان مقطع اول خیلی پایین است. که این موضوع اهمیت تأثیر ساختار سازه‌های سطحی بر روی نشست زمین را می‌رساند.

۹- نتیجه‌گیری

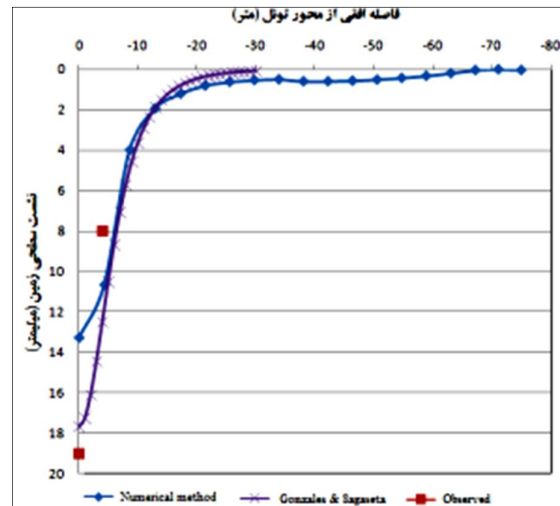
مطالعات انجام شده در این تحقیق نشان داد که:

مقادیر پیش‌نشست در جلوی کات رهد سپر حفاری با مدل‌سازی عددی برای مقطع اول ۰/۱۹ میزان حداکثر نشست و برای مقطع دوم ۰/۲۵ مقدار حداکثر نشست حاصل شده است. همچنین در صورت افزایش پیش‌نشست رخ داده در جلوی سپر EPB، به علت کم بودن فشار سینه کار، نشست در طول سپر افزایش یافته در نتیجه میزان نشست نهایی بعد از سگمنت‌گذاری و تزریق افزایش خواهد یافت.

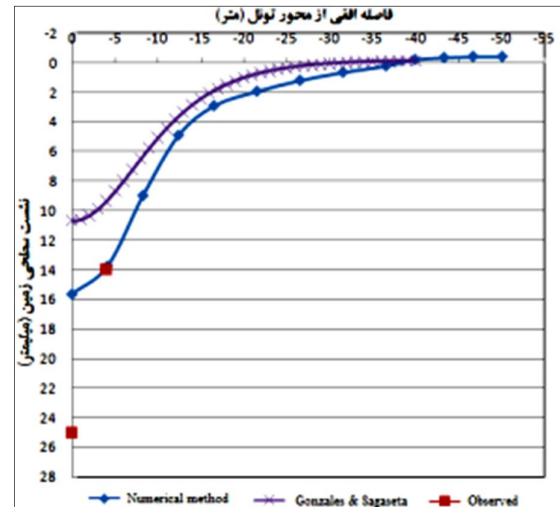
میزان حداکثر نشست رخ داده در مقطع شماره ۱ و زیر برج بلور، ۱۳/۳۰ میلی‌متر و در مقطع شماره ۲ و زیر ساختمان بانک صادرات ۱۵/۶۳ میلی‌متر بوده است. درحالی‌که عمق تونل در مقطع اول، ۹/۳۰۳ متر و در مقطع دوم ۱۶/۳ متر است.

ساختمان برج بلور با وجود سطح مقطع خیلی زیاد و صلبیت بیشتری نسبت به ساختمان بانک صادرات تأثیر بیشتری در کاهش جابجایی‌های رخ داده در سطح زمین داشته است. طوری که حداکثر نشست رخ داده در محل مقطع شماره ۱ (زیر برج بلور) با وجود تونل در عمق کم، نسبت به مقطع شماره ۲ (زیر ساختمان بانک صادرات) کمتر بوده است.

است. a توان تراکم‌پذیری حجمی توده در برگزیده و ρ بیضی‌شدگی نسبی برابر با $\frac{\delta}{\varepsilon}$ است که δ مقدار بیضی‌شدن است [۷]. شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نتایج روش‌های تحلیلی و عددی نشست سطحی زمین در مقاطع ۱ و ۲ را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲: مقایسه منحنی نشست روش‌های تحلیلی و عددی در مقطع اول با عمق ۹/۳۰۳ متر



شکل ۱۳: مقایسه منحنی نشست روش‌های تحلیلی و عددی در مقطع اول با عمق ۱۶/۳۰ متر

در مقطع اول روش تحلیلی گنزالس و ساگاستا تخمین بیشتری از حداکثر نشست سطحی را دارد درحالی‌که پروفیل عرضی نشست در روش عددی تخمین کمتری از حداکثر نشست در محور مرکزی تونل را نشان داده است. همچنین می‌توان مشاهده کرد که با کاهش میزان حداکثر نشست در

هرچه سطح مقطع پی ساختمان‌ها بزرگ‌تر و دارای سختی بیشتری باشد نشست پی سازه یکنواخت‌تر بوده و مقاومت بیشتری در برابر جابجایی‌ها از خود نشان می‌دهد.

میزان نشست و کرنش‌ها در زیر ساختمان‌های برج بلور و ساختمان بانک صادرات مقادیر اندکی بدست آمد و طبق تقسیم‌بندی خسارات و آسیب‌های وارد بر سازه‌های سطحی با چندین روش ذکر شده شدت آسیب وارد شده ناچیز و قابل چشم‌پوشی برآورد شد.

با مقایسه پروفیل‌های نشست سطحی می‌توان مشاهده کرد که با افزایش عمق تونل از مقطع اول به مقطع دوم، نشست برآورد شده با روش تحلیلی کاهش پیدا کرده و محدوده تأثیر حفاری بیشتر شده است. درحالی‌که این روند برای روش عددی حالت معکوس دارد. که دلیل این روند را می‌توان با حضور سازه‌های دو مقطع در سطح زمین توجیه کرد.

۱۰- مراجع

- [۱] مهندسین مشاور جهاد تحقیقات سهند؛ ۱۳۸۲؛ مطالعات ژئوتکنیک مسیر کروی دور شماره یک قطار شهری تبریز، تبریز.
- [۲] مهندسین مشاور موج آب سنگ؛ ۱۳۸۲؛ مطالعات ژئوتکنیک قطار شهری تبریز، تبریز.
- [۳] مهندسین مشاور گنو؛ ۱۳۸۸؛ نتایج نشست سنجی فاز دوم خط یک متروی تبریز، تبریز.

[4] Guglielmetti V., Grasso P., Mahtab A., Xu Sh.; 2008; *Mechanized tunnelling in urban areas: Design methodology and construction control*, Taylor and Francis Group.

[5] Pickhaver J. A.; 2006; *Numerical modelling of building response to tunneling*, PHD Thesis, Oxford University.

[6] Franzius J. N.; 2003; *Behaviour of buildings due to tunnel induced subsidence*, PHD Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine,

[7] Gonzalez C., Sagaseta C.; 2001; *Patterns of soil deformations around tunnels. Application to the extension of Madrid Metro*, Computers and Geotechnics, Vol. 28, pp.445-468.