

پیش‌بینی نشست سطح زمین در تونل کم عمق خط دو متروی کرج

عیسی محمدی^۱؛ هادی فتحی پور آذر^۲؛ سید رحمان ترابی^۳*

۱- کارشناس ارشد مکانیک سنگ، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، isa1361@gmail.com

۲- دانشجوی دکتری مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، fathipour.hadi@gmail.com

۳- استاد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، rtorabi2@yahoo.com

(دریافت ۲۲ شهریور ۱۳۹۴، پذیرش ۱۰ تیر ۱۳۹۶)

چکیده

یکی از مسائل مهم در تونل‌های مترو شهری، تحلیل پایداری تونل، پیش‌بینی میزان نشست سطح زمین و تعیین یک ضریب اطمینان مناسب است که منجر به تأمین پایداری در حین عملیات حفاری و در زمان بهره‌برداری از سازه مورد نظر می‌شود. در تحقیق حاضر به بررسی میزان نشست سطح زمین ناشی از حفر تونل خط دو متروی کرج، به روش عددی تفاضل محدود با استفاده از نرم‌افزار FLAC 3D پرداخته شده است. ابتدا با استفاده از داده‌های موجود در دو بخش از مسیر تونل که از نظر خصوصیات زمین‌شناسی متفاوت بوده‌اند، مدل‌سازی عددی نشست انجام و نتایج تحلیل با داده‌های ابزاربندی مقایسه شد. چون این نتایج قرابت خوبی با نتایج واقعی داشت، میزان نشست سطح زمین در بخشی از مسیر تونل که از لحاظ زمین‌شناسی و سازه‌های سطحی در حالت بحرانی قرار داشت بررسی شد. این تحلیل نشان داده است که پیش‌بینی نشست در ناحیه با خاک مناسب توسط نرم‌افزار حدوداً ۶/۷ میلی‌متر و در ناحیه با خاک سست ۳۷ میلی‌متر بوده که با نتایج واقعی رفتارنگاری و ابزار دقیق در حین اجرای پروژه همخوانی دارد. همچنین کاهش طول گام حفاری از ۷۵ به ۵۰ سانتی‌متر موجب کاهش ۱۰ میلی‌متری نشست شده است. خسارت ناشی از نشست برای حدود فواصل ایستگاه‌ها تحلیل و بررسی شده است. در پایان، آنالیز حساسیت روی نشست سطح زمین برای پارامترهای ژئومکانیکی خاک از قبیل نسبت تنش‌های افقی به قائم، زاویه اصطکاک داخلی خاک، چسبندگی خاک، مدول الاستیسیته و نسبت بواسون مورد بررسی قرار گرفته شده است که نتایج نشانگر کاهش میزان نشست با افزایش مقدار این پارامترها است.

کلمات کلیدی

نشست سطح زمین، گام حفاری، خط دو متروی کرج، نرم‌افزار FLAC 3D، روش تفاضل محدود

۱- مقدمه

به‌طور کلی حفر تونل و دیگر سازه‌های زیرزمینی منجر به حذف توده‌ای از خاک و سنگ محل و بروز تغییرات قابل توجه در وضعیت تنش اطراف آن‌ها می‌شود. از جمله پدیده‌های مهم ناشی از این دست خوردگی، وقوع نشست در سطح زمین است که در تونل‌های کم عمق شهری که اغلب در زمین‌هایی از جنس آبرفت و رس با استحکام کم حفر می‌شوند حائز اهمیت است و به‌صورت خاص هنگام عبور از زیر مناطق مسکونی اهمیت زیادی دارد. به همین دلیل مساله نشست ناشی از تونل‌سازی و اثرات متعاقب آن به لحاظ اهمیت خاص مخاطرات مربوطه همواره از سوی پژوهشگران مختلف تحت بررسی بوده است تا با اتخاذ شیوه‌های مناسب میزان آن را قبل از شروع به عملیات برآورد کنند [۱-۳]. به علت افزایش شهرنشینی و کمبود فضا بر روی سطح زمین در کلان شهرها و نیاز به توسعه سیستم حمل و نقل عمومی اجرای خطوط زیرزمینی مترو را در این شهرها گریزناپذیر ساخته است. اجرای تونل‌های مترو در کلان شهرها با چالش‌های مختلفی مانند عدم وجود فضای کافی برای تجهیز کارگاه‌ها، ساخت شفت‌ها و هدایت موضعی ترافیک، عبور از تأسیسات شهری و مسائل گوناگون از این نوع روبرو است. مشکل دیگر در حفاری این تونل‌ها نشست‌های ناشی از حفاری و اثرات مخرب احتمالی آن برای سازه‌های سطحی است. هرچند حفاری مکانیزه با اعمال فشار بر سینه کار حین حفاری امکان حذف بخشی از این نشست را فراهم می‌آورد ولیکن اعمال فشارهای قابل توجه نیز تأثیرات سوء دیگری را بر سیستم‌های انتقال فاضلاب و ایجاد تورم ناخواسته در مناطق سست و تغییر رژیم آب زیرزمینی را در پی خواهد داشت. بنابراین تعیین مقدار نشست ناشی از حفاری‌های زیرزمینی و مقایسه با مقدار نشست مجاز سازه‌های سطحی امری بسیار مهم و قابل توجه است [۴].

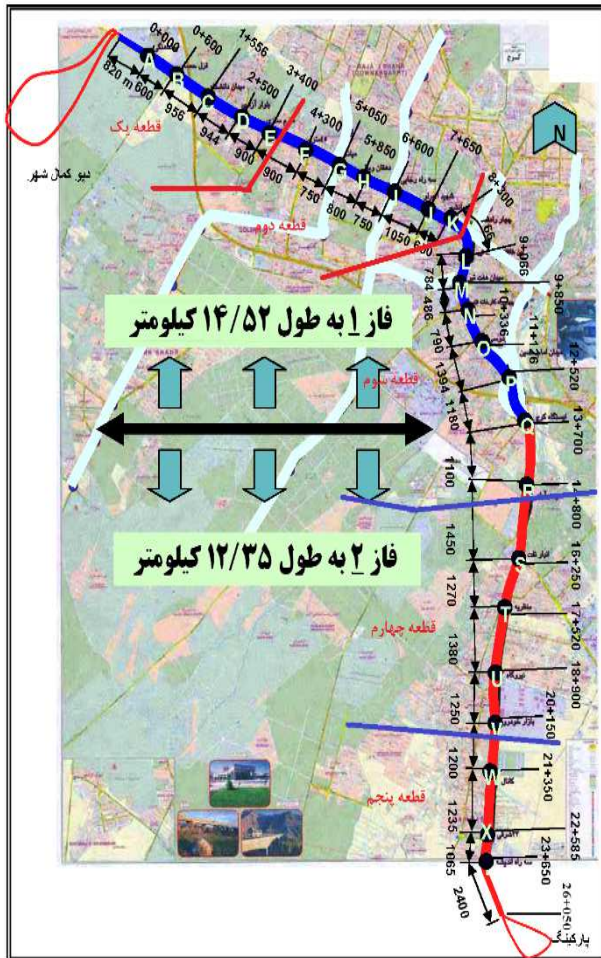
روش‌های پیش‌بینی نشست را می‌توان به‌طور کلی به چهار گروه عمده روش‌های تجربی،^۱ تحلیلی،^۲ مدل‌های فیزیکی،^۳ روش‌های هوش مصنوعی^۴ و روش‌های عددی^۵ تقسیم‌بندی کرد.

چنانچه^۶ و همکاران در بررسی نشست حاصل از تونل‌های چندگانه در تایوان با استفاده از روش‌های تجربی و عددی متوجه کارایی بالاتر روش‌های عددی نسبت به روش‌های تجربی شدند [۶]. در مطالعه‌ای صورت گرفته دیگر توسط مولر و ورمر^۷ در آلمان، کارایی و صحت روش‌های عددی در بررسی نشست سطح زمین

و همچنین تحلیل سیستم نگهداری در صورتی که مدل‌سازی به‌درستی انجام شود مورد تأیید قرار گرفته است [۷]. در تحقیق انجام شده دیگر توسط کاراکوس و فدرول^۸ در ترکیه با استفاده از نرم‌افزارهای FLAC 2D و ABAQUS، نتایج بسیار مطلوبی برای پیش‌بینی نشست سطح زمین ناشی از حفر تونل کم عمق در رس حاصل شده است [۸].

موسوی و همکاران تأثیر فاصله داری قاب‌ها بر روی پایداری تونل و نشست زمین را با استفاده از FLAC 3D در خط ۴ مترو تهران بررسی کرده‌اند [۹]. همچنین رازی فر و همکاران میزان نشست در مترو تهران را با استفاده از FLAC 3D تخمین زده و نتایج را با روش‌های تحلیلی مقایسه کرده‌اند [۱۰]. اینانو و همکاران میزان نشست سطح زمین در مترو تبریز را با استفاده از روش‌های تجربی، عددی (FLAC 2D) و شبکه عصبی برآورد کردند که مقایسه نتایج این روش‌ها با نتایج واقعی صحت شبکه عصبی و روش عددی را نشان می‌دهد [۱۱]. رستمی و همکاران میزان نشست سطح زمین در مترو کرج در محدوده ایستگاه B تا C را با استفاده از روش‌های تحلیلی و عددی بررسی کرده‌اند که در روش عددی با استفاده از PLAXIS نتایج دقیق‌تری به‌دست آورده‌اند [۱۲]. حیدریان و همکاران با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS و یک روش تحلیلی (روش لکا و دورمیو) تأثیر فشار وارد بر جبهه‌کار در روش مکانیزه را بر روی نشست زمین در مترو کرج در محدوده ایستگاه I بررسی کرده‌اند که از هر دو روش نتایج مشابهی به‌دست آوردند [۱۳]. درگاهی و شهریار تأثیر اندازه گام حفاری بر میزان نشست در مترو کرج حدفاصل ایستگاه C تا D را با استفاده از PLAXIS بررسی کرده‌اند [۱۴]. صالح زاده و همکاران مقایسه‌ای بین نتایج ابزار دقیق و نتایج FLAC 2D برای همگرایی تونل مترو کرج حدفاصل ایستگاه F تا G انجام داده‌اند که نتایج مناسبی به‌دست آورده‌اند [۱۵]. کیا اشکوریان و همکاران تأثیر عمق تونل و همچنین سازه‌های سطحی بر نشست سطح زمین در مترو کرج را با استفاده از FLAC 3D بررسی کرده‌اند در این تحقیق نتایج نرم‌افزار در ایستگاه‌های C و E با نتایج ابزار دقیق مقایسه شده و بعد از صحت نتایج پیش‌بینی میزان نشست برای مسیر ایستگاه‌های G تا H برای عمق‌های متفاوت تونل و همچنین وجود سازه‌های سطحی با ارتفاع‌های متفاوت بررسی شده است که در نهایت عمق ۲۰ متر برای تونل حدفاصل G تا H پیشنهاد شده است [۱۶]. در تمامی موارد بالا استفاده از روش‌های عددی نتایج قابل قبولی برای تخمین میزان نشست سطح زمین ارائه کرده‌اند.

زمین پژوه انجام شده است. مشخصات لایه‌های تشکیل دهنده زمین در محدوده‌ای ایستگاه‌های A تا D و تونل مسیر در این محدوده رده خاک در یک تیپ قرار دارد و شامل مخلوط ماسه و شن آمیخته با سیلت و رس بسیار کم با چسبندگی پایین است که عمدتاً با نشان SM و SP-SM نمایش داده می‌شوند [۱۸].



شکل ۱: نقشه خط ۲ متروی کرج [۱۹]

مشخصات لایه‌های تشکیل دهنده زمین در محدوده‌ای ایستگاه‌های D تا E و تونل مسیر در این محدوده رده خاک در یک تیپ قرار دارد و شامل مخلوط شن و ماسه و سیلت با چسبندگی ناچیز که اغلب با نشان GP-GM و در برخی لایه‌ها با نشان SP-SM و GP-GC نمایش داده می‌شوند.

در تحقیق حاضر پیش‌بینی نشست با استفاده از روش عددی انجام شده است. با توجه به جنس خاک‌های آبرفتی ناحیه مورد بررسی، محیط پیوسته در نظر گرفته شده و برای مدلسازی از نرم‌افزار FLAC 3D استفاده شده است. برای انجام این پژوهش ابتدا میزان نشست سطح زمین توسط نرم‌افزار در قسمت‌های که عملیات حفاری به اتمام رسیده و میزان نشست واقعی و نهایی با ابزار دقیق و نقشه‌برداری اندازه‌گیری شده بود تعیین شد و در ادامه با مقایسه داده‌های حاصل از نرم‌افزار با داده‌های اندازه‌گیری شده در این نواحی مدل مناسب برای پیش‌بینی میزان نشست سطح زمین در قسمت‌های که هنوز حفاری انجام نشده بود انجام شد. در پایان با استفاده از دو معیار کرامر^۹ و رانکین^{۱۰}، تأثیر نشست زمین و خسارت‌های وارد بر روی ساختمان‌ها بررسی و تحلیل شده است. در پایان آنالیز حساسیت بر روی نشست سطح زمین برای پارامترهای ژئومکانیکی خاک از قبیل نسبت تنش‌های افقی به قائم، زاویه اصطکاک داخلی خاک، چسبندگی خاک، مدول الاستیسیته و نسبت پواسون بررسی شده است.

۲- مشخصات پروژه

عملیات اجرایی پروژه خط ۲ قطار شهری کرج از سال ۱۳۸۴ آغاز شد. این خط به طول ۲۶/۷۸ کیلومتر در دو فاز طراحی شده است. عملیات ژئوتکنیکی پروژه در پنج قطعه توسط شرکت‌های مشاور اجرا شده است بر اساس سیاست کلی، خط ۲ متروی کرج و حومه برای بهره‌برداری در دو فاز طراحی شده است: فاز یک عبارت است از انجام کامل مطالعات و طراحی پروژه خط ۲ شامل تونل‌های مسیر، ایستگاه‌ها، دپو، پارکینگ، خطوط رابط، اجرای عملیات ساخت تونل و ایستگاه‌های فاز یک از کمالشهر تا سرحد آباد، تهیه و تدارک تجهیزات و ماشین-آلات اصلی و جانبی سیستم‌های مختلف پروژه و تأمین ناوگان. این مسیر شامل ۱۵ ایستگاه (A تا Q) به طول ۱۴/۲۵ کیلومتر است. اجرای کلیه عملیات عمرانی فاز ۲ مسیر شامل ۹ ایستگاه (R تا Z) و تونل به طول ۱۲/۳۵ کیلومتر است. این مسیر در آینده به وسیله TBM حفاری خواهد شد [۱۷]. مسیرها و ایستگاه‌های مذکور در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

۲-۱- قطعه اول

محل مورد مطالعه در منطقه حصارک کرج و در امتداد بلوار شهید بهشتی حد فاصل چهارراه پیشاهنگی (ایستگاه A) تا موسسه سرم‌سازی حصارک (ایستگاه E) به طول حدود ۵ کیلومتر است که مطالعات ژئوتکنیکی آن توسط شرکت مشاور

خاک محدوده شرقی ساختگاه از لایه‌های خاک درشت دانه اغلب گردگوشه شن و ماسه رس و گاهی لای‌دار، با تراکم متوسط تا بسیار متراکم و به رنگ خاکستری و گاهی قهوه‌ای و در عمده قسمت‌ها همراه با قطعات درشت قلوه سنگ همراه است، تشکیل شده است. جنس دانه‌های این لایه عمدتاً آذرآواری، کوارتز و سیلیس‌دار هستند. این لایه که در تمامی گمانه‌های حفر شده تا انتهای عمق حفاری مشاهده شد دارای حداقل ضخامت ۱۰ متر بوده و از نظر اندازه دانه‌ها و خصوصیات مکانیکی به سه زیرلایه قابل تقسیم است.

• زیرلایه L₂₋₁

این زیرلایه که عمدتاً از جنس ماسه رس و به ندرت لای‌دار (SM)، (SC) و گاهی همراه شن است، بیشترین ضخامت که از این زیرلایه گزارش شده در حدود ۱۰ تا ۱۱ متر است.

• زیرلایه L₂₋₂

این زیرلایه از جنس غالب ماسه رس و گاهی لای‌دار به همراه شن (SM)، (SC) بوده که در برخی موارد دارای میان لایه‌هایی از جنس شن رس و یا لای‌دار به همراه ماسه (GC)، (GM) یا شن خوب و بد دانه‌بندی شده (GP)، (GW) و نیز قلوه سنگ‌های درشت است.

• زیرلایه L₂₋₃

جنس غالب این زیرلایه شن خوب یا بد دانه‌بندی شده (GP)، (GW) به همراه قلوه سنگ است که در برخی نقاط موضعی، درشت‌دانه شنی با ریزدانه‌های رسی و یا لای که عمدتاً به همراه ماسه نیز هستند، مخلوط می‌شود (GM, GC). یکی از مشخصه‌های بارز این زیرلایه داشتن قلوه سنگ‌های درشت-دانه با ابعاد بین ۵ تا بزرگتر از ۳۰ سانتیمتر است که در نقاط مختلف گسترش این زیرلایه پراکنده شده‌اند که مقدار آن‌ها با حرکت به سمت نواحی شرقی ساختگاه مورد مطالعه، افزایش می‌یابد. این زیر لایه بافت بسیار متراکمی دارد و غالباً با رنگ خاکستری مشاهده می‌شود.

جدول ۱: مشخصات ژئومکانیکی قطعه اول

مشخصات	محدوده A تا D	محدوده D تا E
زاویه اصطکاک داخلی، ϕ (degree)	۳۰	۳۲
چسبندگی، C (KPa)	۱۰	۰
وزن مخصوص طبیعی خاک، γ (gr/cm ³)	۱/۹۵	
مدول الاستیسیته، E _s (MPa)	۲۵	۳۰
نسبت پواسون ν	۰/۳	

۲-۲ قطعه دوم

قطعه مورد نظر شامل ۶ ایستگاه (F تا K) و تونل بین آن‌ها در مسیر قطعه دوم خط مصوب قطار شهری کرج در امتداد بلوار شهید بهشتی و حد فاصل محدوده سرم‌سازی و جهان‌شهر واقع در ناحیه شمال‌غربی شهر کرج است. مطالعات ژئوتکنیکی این قطعه توسط شرکت مشاور دریا خاک پی انجام شده است. به‌طور کلی خاک زیرسطحی محدوده مورد بررسی را می‌توان در سه گروه لایه‌های خاک دستی، خاک ریزدانه و خاک درشت دانه طبقه‌بندی کرد [۱۹].

۲-۲-۱ لایه خاک دستی

بررسی‌های محلی نشان می‌دهد که لایه‌های خاک دستی تا اعماق مختلف گمانه‌های حفاری شده وجود دارند. به‌طور کلی ضخامت خاک دستی در حدود ۱ الی ۲ متر در ساختگاه مشاهده شده است.

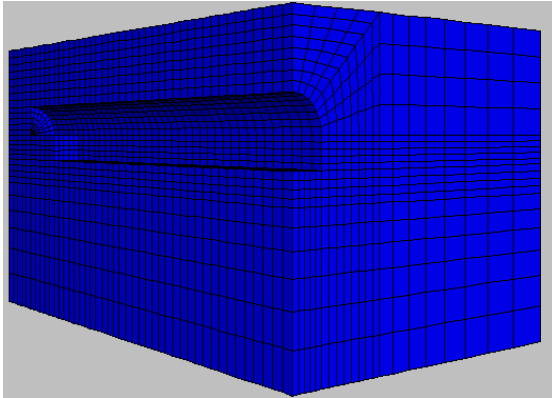
۲-۲-۲ لایه‌های خاک ریزدانه L₁

قسمت فوقانی خاک طبیعی محدوده مورد بررسی در نواحی شرقی تا مرکزی از لایه‌های خاک اغلب مرطوب، (SM) و (SC) گاهی ماسه یا لای‌دار و به ندرت ماسه رس و لای‌دار (CL) ریزدانه رسی بسیار سفت تا سخت و به رنگ قهوه‌ای تشکیل شده است. ضخامت این لایه در نواحی مختلف بین صفر تا ۱۵ متر متغیر است.

۲-۲-۳ لایه‌های خاک درشت دانه L₂

نتایج بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که قسمت تحتانی خاک‌زیر سطحی در محدوده غربی و مرکزی و تقریباً کل بافت

نیز همان عمق واقعی تونل یعنی ۱۰ متر در نظر گرفته شده است.



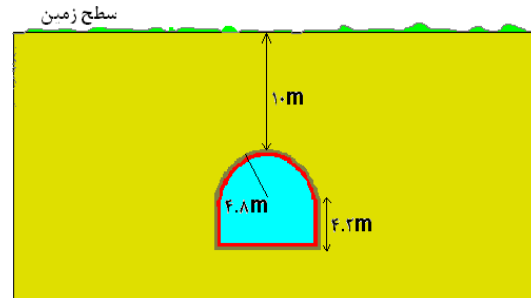
شکل ۳: بلوک ساخته شده برای مدل‌سازی

جدول ۲: مشخصات ژئومکانیکی خاک قطعه دوم [۱۹]

مشخصات	لایه	زیر لایه	زیر لایه	زیر لایه
	L_1	L_{2-1}	L_{2-2}	L_{2-3}
زاویه اصطکاک داخلی، ϕ (degree)	۲۰	۳۲	۳۶	۴۰
چسبندگی، C (KPa)	۵۰	۳۵	۲۵	۶
وزن مخصوص طبیعی خاک، γ (gr/cm^3)	۱/۸۶	۲/۰۱	۲/۰۴	۲
مدول الاستیسیته، E_s (MPa)	۴۰	۵۰	۸۰	۱۰۰
نسبت پواسون ν	۰/۴	۰/۳۵	۰/۳	۰/۴

۳- مشخصات عملیات حفاری

حفاری در این تونل به صورت مکانیکی و با استفاده از ماشین‌های حفار هیدرولیکی (بیل مکانیکی) و به روش جدید تونل‌سازی اتریشی^{۱۱} انجام می‌شود. شکل ۲ مقطع حفاری تونل را نشان می‌دهد. نگهداری موقت تونل شامل شاتکریت به ضخامت ۳۰ سانتی‌متر، لئیس به فاصله ۰/۷ تا ۱/۵ متر و دو لایه مش به ابعاد ۱۵×۱۵ سانتی‌متر استفاده شده است. در نگهداری اصلی از لاینینگ بتنی به ضخامت ۳۰ سانتی‌متر استفاده می‌شود. در بیشتر موارد نگهداری اصلی با فاصله زمانی زیادی بعد از نگهداری موقت نصب می‌شود.



شکل ۲: مقطع حفاری تونل

۵- ارزیابی نتایج مدل‌سازی با نرم‌افزار

در این بخش نتایج مدل‌سازی با نرم‌افزار در دو ناحیه که حفاری آن انجام شده و میزان نشست سطح زمین نیز اندازه‌گیری شده مورد ارزیابی قرار گرفته است. این دو ناحیه از نظر جنس زمین و میزان نشست سطح زمین متفاوت‌اند.

۵-۱ در قطعه دوم حد فاصل ایستگاه‌های A و B

مشخصات خاک این ناحیه طبق جدول ۱ و ورودی‌های نرم‌افزار در این مرحله مطابق جدول ۳ است. بخشی از تونل در این ناحیه در سطح فوقانی، بخشی در هر دو سطح فوقانی و تحتانی حفاری شده و قسمتی از تونل هنوز حفاری نشده است.

در شکل ۴ مدل پیش‌بینی نشست سطح زمین با استفاده از نرم‌افزار مشاهده می‌شود. همچنین شکل ۵ نمودار حداکثر نشست پیش‌بینی شده در سطح زمین توسط نرم‌افزار را نمایش می‌دهد. مقایسه نتایج پیش‌بینی نشست نرم‌افزار با میزان نشست رخ داده که در جدول ۴ مشاهده می‌شود نشان دهنده منطقی بودن پیش‌بینی است. اگر میانگین داده‌های مذکور در حفاری تمام مقطع محاسبه شود عدد ۳۶/۳ میلیمتر به دست می‌آید که به پیش‌بینی نرم‌افزار بسیار نزدیک می‌باشد، با توجه به یکسان بودن داده‌های ژئومکانیکی خاک و ژئومتری تونل اختلاف موجود در نتایج ابزار دقیق می‌تواند ناشی از عوامل انسانی در اجرایی پروژه باشد. به همین دلیل در این تحقیق بالاترین میزان نشست در این ناحیه یعنی ۴۴/۵ میلی‌متر که یک عدد محافظ کارانه می‌باشد به عنوان نشست سطح زمین در

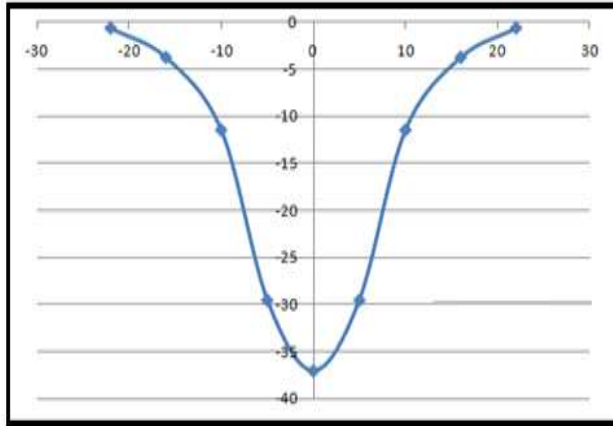
۴- نرم افزار FLAC 3D

این نرم‌افزار بر اساس روش عددی تفاضل محدود بوده و قابلیت‌های آن نرم‌افزار در حالت سه بعدی نسبت به حالت دو بعدی افزایش یافته به گونه‌ای که می‌تواند رفتار سه بعدی سازه خاکی، سنگی یا سایر مواد که دارای جریان پلاستیک هنگام رسیدن به حد تسلیم هستند را شبیه‌سازی کند. برای جلوگیری از تأثیری که ممکن است مرزهای مدل روی نتایج داشته باشند هندسه مدل به صورت شکل ۳ ساخته شد. که طول بلوک حدود ۱۰ برابر قطر معادل تونل یعنی ۹۰ متر، عرض بلوک ده برابر عرض باز شدگی تونل یعنی ۵۰ متر، عمق زیر تونل حدود ۳ برابر قطر معادل حدود ۲۷ متر و ارتفاع روباره

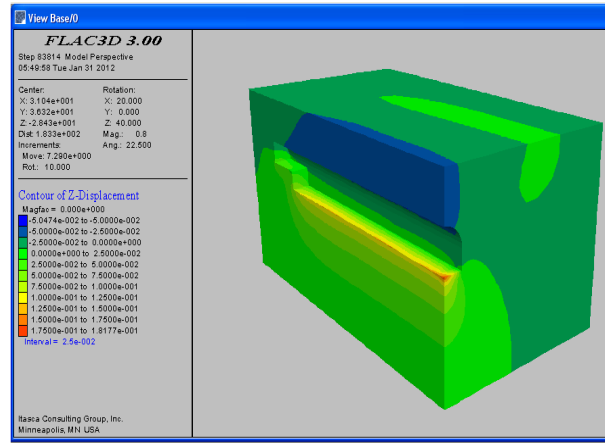
کل مسیر در نظر گرفته شد و ضریب ایمنی ۱/۲ برای نتایج نرم افزار در نظر گرفته شد.

جدول ۳: ورودی‌های نرم افزار

زاویه اصطکاک داخلی degree	دانسیته kg/m ³	مقاومت کششی MPa	چسبندگی KPa	مدول برشی MPa	مدول حجمی MPa
۳۰	۱۹۵۰	۰	۱۰	۹/۶۲	۲۰/۸۳



شکل ۵: منحنی عرضی نشست با روش عددی



شکل ۴: وضعیت حفاری و کنتورهای نشست حدفاصل ایستگاه A و B

جدول ۴: مقایسه نتایج نشست اندازه‌گیری شده با نشست پیش‌بینی شده

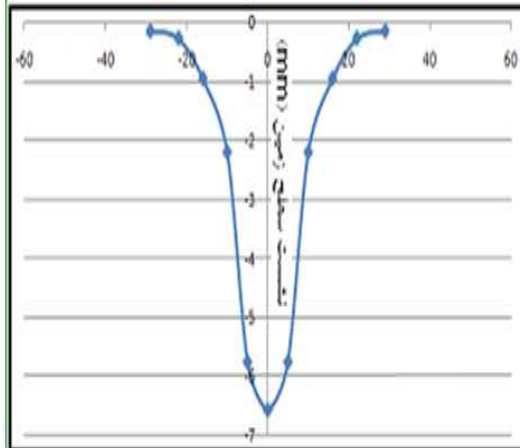
وضعیت حفاری	کیلومترژ	نتایج ابزار دقیق (mm)	نتایج نرم افزار (mm)
مقطع بالا	-۸۲۱	۱۸/۲	۱۷
مقطع بالا	-۷۶۳	۲۴/۷	۱۷
تمام مقطع	-۶۴۵	۳۰	۳۷
تمام مقطع	-۵۴۵	۳۴/۵	۳۷
تمام مقطع	-۴۳۵	۴۴/۵	۳۷

جدول ۵: ورودی‌های نرم افزار

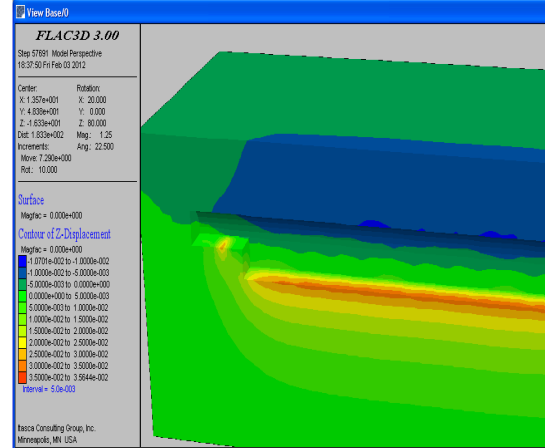
۸۸/۳۳	مدول حجمی، MPa
۳۸/۴۶	مدول برشی، MPa
۶	چسبندگی، kPa
۰	مقاومت کششی، MPa
۲۰۰۰	دانسیته، kg/m ³
۴۰	زاویه اصطکاک داخلی، degree

۲-۵ در قطعه دوم حد فاصل ایستگاه‌های J و K

مشخصات خاک این ناحیه طبق جدول ۲ زیر لایه 2-3 L₂ می‌باشد و ورودی‌های نرم‌افزار در این مرحله مطابق جدول ۵ است. در این قسمت حفاری تونل در بخش فوقانی و تحتانی به پایان رسیده است. در شکل ۶ مدل پیش‌بینی نشست سطح زمین با استفاده از نرم‌افزار مشاهده می‌شود. همچنین شکل ۷ نمودار حداکثر نشست پیش‌بینی شده در سطح زمین توسط نرم‌افزار را نمایش می‌دهد که میزان آن در بالای تاج تونل به میزان ۶/۷ میلی‌متر است.



شکل ۷: منحنی عرضی نشست با روش عددی



شکل ۶: وضعیت حفاری و کنتورهای نشست حدفاصل ایستگاه J و K

جدول ۶: مقایسه میزان نشست در کیلومترهای مختلف تونل بر اساس روش عددی و ابزار دقیق (با توجه به یکسان بودن داده‌های ورودی نرم-

افزار در تمام مسیر که توسط مشاور در اختیار ما قرار داده شده، عدد ۶/۷ برای کل مسیر به دست آمده است)

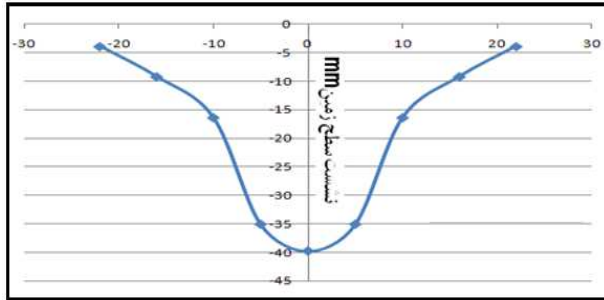
۸۲۱۰	۸۱۳۵	۸۰۸۱	۸۰۷۴	۷۹۹۵	۷۹۳۵	۷۹۳۰	۷۹۲۰	۷۸۹۷	۷۸۹۰	کیلومتر
۴/۲	۶	۹/۹	۶/۹	۵/۹	۸	۶/۹	۶/۳	۵/۲	۸	نتایج ابزار دقیق (mm)
۶/۷										نتایج نرم‌افزار (mm)

محدوده مورد نظر برای پیش‌بینی مطابق شکل ۸ جنب خیابان ۸ متری بوعلی و در کیلومترهای ۱۷۴۵ تا ۱۸۳۵ حد فاصل ایستگاه‌های C و D قرار دارد. حفاری تونل در مسیر این دو ایستگاه صورت نگرفته است در ضلع شمالی محور تونل و به فاصله حدود ۱۱ متر از محور تونل چند باب مغازه تجاری با قدمت متوسط ۴۰ سال وجود دارد که تشکیل یک بلوک ساختمانی به طول ۷۰ متر، عرض ۱۵ و ارتفاع حدود ۴/۵ متر (یک طبقه) را می‌دهند. با توجه به سست بودن خاک و همچنین قرار داشتن سازه‌های غیر مقاوم فاقد فونداسیون در سطح زمین، این محل به‌عنوان یک نقطه بحرانی تلقی می‌شود. در این بخش حفاری و نگهداری این ناحیه در بلوکی با طول ۹۰ متر عرض ۵۰ متر و عمق ۴۴ متر برای گام‌های حفاری به طول ۷۵ سانتی‌متر و ۵۰ سانتی‌متر در نرم‌افزار مدل‌سازی شد که نتایج مربوطه در شکل‌ها و نمودارهای زیر آمده است. همچنین ساختمان با یک بار گسترده ۱۰ کیلو نیوتنی در نرم-افزار مدل شده است.

در جدول ۶ نتایج واقعی میزان حداکثر نشست اندازه‌گیری شده در سطح زمین و همچنین حداکثر نشست پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار دیده می‌شود. با توجه به این نتایج مشاهده می‌شود که میانگین نشست‌های اندازه‌گیری شده

در سطح زمین ۶/۷۳ میلی‌متر بوده که به پیش‌بینی نرم‌افزار بسیار نزدیک است، با توجه به یکسان بودن داده‌های ژئومکانیکی خاک و ژئومتری تونل اختلاف موجود در نتایج ابزار دقیق می‌تواند ناشی از عوامل انسانی در اجرای پروژه باشد. به همین دلیل در این تحقیق حداکثر میزان نشست در این ناحیه یعنی ۹/۹ میلی‌متر که یک عدد محافظ کارانه است به‌عنوان نشست سطح زمین در کل مسیر در نظر گرفته شد و حدوداً ۱/۵ برابر پیش‌بینی نرم‌افزار است. بنابراین در حالت کلی نتایج نرم‌افزار دارای دقت بالایی است اما در صورت برخورد احتیاط-آمیز می‌توان نتایج نرم‌افزار را با ضریب اطمینان ۱/۵ بکار برد.

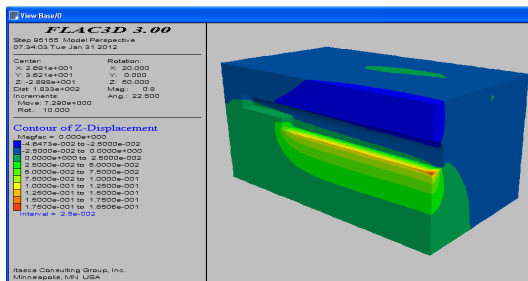
۶- پیش‌بینی میزان نشست حدفاصل ایستگاه C و D



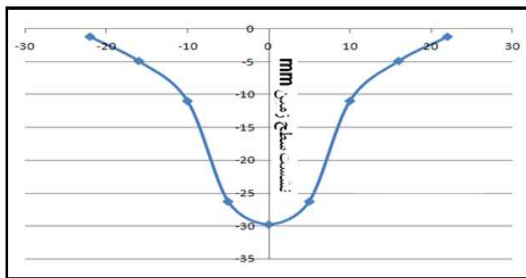
شکل ۱۰: پیش‌بینی منحنی عرضی نشست حدفاصل ایستگاه‌های C و D در گام حفاری ۷۵ cm

۶-۲ حفاری با گام ۵۰ سانتی‌متری

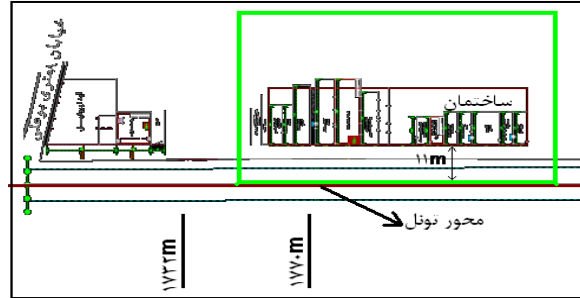
در این مرحله حفر تونل با گام حفاری ۵۰ سانتی‌متری در بلوکی با همان ابعاد قبلی مدل‌سازی شده و نتایج مدل برای پیش‌بینی نشست سطح زمین و شیب به وجود آمده در زیر ساختمان‌ها با توجه به شکل‌های ۱۱ و ۱۲ آمده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در حالتی که طول گام حفاری به ۵۰ سانتی‌متر کاهش می‌یابد حداکثر میزان نشست بر روی محور تونل حدود ۱۰ میلی‌متر کاهش می‌یابد و به حدود ۳۰ میلی‌متر می‌رسد، این مقدار در زیر ساختمان ۷ میلی‌متر کاهش می‌یابد و حداکثر آن در زیر ساختمان به ۱۱ میلی‌متر می‌رسد که مقادیر مطمئن‌تری می‌باشند.



شکل ۱۱: کنتورهای جابجایی قائم پیش‌بینی شده برای حفاری در مجاور ساختمان با گام ۵۰ cm



شکل ۱۲: پیش‌بینی منحنی عرضی نشست حدفاصل ایستگاه‌های C و D در گام حفاری ۵۰ cm

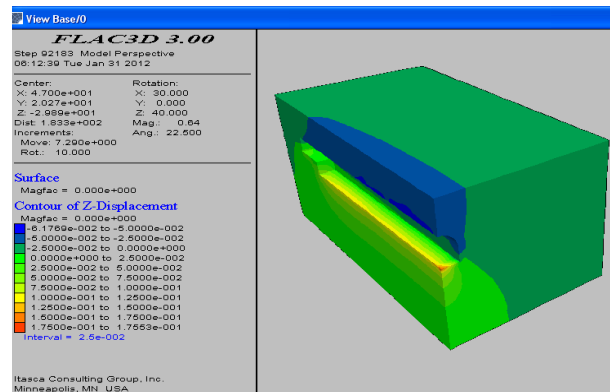


شکل ۸: پلان ناحیه مورد مطالعه برای پیش‌بینی نشست سطح زمین ۶-۱ حفاری با گام ۷۵ سانتی‌متری

در این مرحله نشست سطح زمین ناشی از حفاری تونل با طول گام ۷۵ سانتی‌متر پیش‌بینی شده است، با توجه به وجود ساختمان فاقد فونداسیون در سطح زمین در این مرحله شیب زمین در اثر نشست سطح زمین در زیر ساختمان نیز باید محاسبه شود.

شکل ۹ کنتورهای جابجایی قائم در مدل را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۰ حداکثر نشست پیش‌بینی شده توسط نرم افزار برای سطح زمین بر روی محور تونل در این بلوک حدود ۴۰ میلی‌متر است، این مقدار در زیر ساختمان حدود ۱۸ میلی‌متر است.

نظر به این‌که سازه‌های موجود فاقد استحکام لازم بوده و همچنین با توجه به نتایج ارزیابی نرم‌افزار در حد فاصل ایستگاه‌های J و K که مقدار نشست پیش‌بینی شده را حدود ۲۱ درصد کمتر از واقعیت نشان داد بنابراین با اعمال ضریب ۱/۵ در نتایج بالا می‌توان انتظار نشست ۲۷/۵ میلی‌متر را در زیر ساختمان داشت بنابراین برای بالا بردن ضریب اطمینان در اجرای پروژه در مرحله بعد عملیات حفاری برای گام حفاری به طول ۵۰ سانتی‌متر بررسی خواهد شد.



شکل ۹: کنتورهای جابجایی قائم پیش‌بینی شده برای حفاری در مجاور ساختمان با گام ۷۵cm

۷- تحلیل تأثیر جابجایی زمین (نشست) بر روی ساختمان‌ها

نشست سطح زمین می‌تواند تأثیر زیادی بر روی ساختمان‌ها و پل‌های اطراف تونل داشته باشد. در این قسمت به بررسی آسیب و خسارت‌های احتمالی وارد بر ساختمان‌های مجاور مدلسازی شده با استفاده از دو روش رانکین و کرامر برای حد فاصل ایستگاه‌های (A,B)، (J,K) و (C,D) پرداخته شده است.

۷-۱ ارزیابی خسارت با استفاده از میزان ماکزیمم نشست و شیب منحنی نشست (معیار رانکین)

رانکین در سال ۱۹۹۸ طبق جدول ۷ شدت آسیب‌دیدگی سازه‌ها را بر پایه نشست قائم و شیب منحنی نشست آن‌ها دسته‌بندی کرد. با رسم شیب منحنی نشست عرضی برای مقاطع مدل‌سازی شده می‌توان مقادیر شیب نهائی را برای آن‌ها به دست آورد. همان‌طوری که از اشکال ۵، ۷ و ۱۰ و نتایج نشست (جداول ۴ و ۶) برای حد فاصل ایستگاه‌های (A,B)، (J,K) و (C,D) ماکزیمم نشست و شیب منحنی نشست در هر حد فاصل (A,B)، (C,D) برای هر دو گام ۵۰ و ۷۵ سانتی-متری) در ردیف شماره ۲ قرار می‌گیرد. بنابراین با توجه به معیار رانکین شدت آسیب‌دیدگی بر این سازه‌ها در اثر حفاری کم ارزیابی می‌شود. با توجه به فاصله سازه‌های مجاور و محدوده تأثیر حفر تونل، چنین حالتی را نمی‌توان برای این تونل در حد فاصل A,B زیان‌آور و دارای تهدید بالقوه دانست. ولی برای حد فاصل C,D (هر دو گام پیشروی) باید تمهیدات لازم اتخاذ شود. همچنین برای حدفاصل J,K، شماره ۱ یعنی شدت آسیب دیدگی قابل چشم‌پوشی است.

۷-۲ ارزیابی خسارت با استفاده از شیب منحنی نشست (معیار کرامر)

یکی دیگر از مهم‌ترین پارامترها در بررسی تأثیر نشست بر ساختمان‌ها و پل‌ها، شیب منحنی نشست است. از جمله معیارهای معروف در زمینه بررسی این تأثیرات معیار کرامر است. طبق این معیار بعد از محاسبه شیب منحنی نشست می‌توان خطر آفرینی حفر تونل در منطقه با توجه به این معیار بیشینه شیب منحنی نشست برای سازه‌هایی مانند پل ۱/۸۰۰ و برای سازه‌هایی مانند ساختمان‌های ۱/۹۰۰ است. جدول ۸ دسته‌بندی خسارت وارد بر ساختمان‌ها را بر اساس شیب منحنی نشست نشان می‌دهد.

با توجه به شکل‌های ۵، ۷ و ۱۰ شیب منحنی نشست برای دو حد فاصل (A,B)، (C,D) برای هر دو گام ۵۰ و ۷۵ سانتی-متری) کمتر از ۱/۶۰۰ می‌باشد. بنابراین این نوع تونل‌سازی با توجه به معیار کرامر در ردیف تونل‌سازی با خطر آفرینی کم ارزیابی می‌شود. از سوی دیگر همان‌طوری که ذکر شد با توجه به معیار کرامر شیب منحنی نشست برای سازه‌هایی چون ساختمان بایستی بالاتر از ۱/۹۰۰ باشد بنابراین با در نظر گرفتن چنین حالتی و در صورتی که سازه‌ای در بالای منطقه پر خطر باشد حفر چنین تونلی خطر زیادی برای ساختمان مورد نظر دارد. اما با توجه به فاصله سازه‌های مجاور و محدوده تأثیر حفر تونل، چنین حالتی را نمی‌توان برای این تونل در حد فاصل A,B زیان‌آور و دارای تهدید بالقوه دانست. ولی برای حد فاصل C,D (هر دو گام پیشروی) باید تمهیدات لازم اتخاذ شود. همچنین برای حد فاصل J,K این سازه‌ها در اثر حفاری تونل دچار آسیب و خسارت نمی‌شوند.

۷-۲ ارزیابی خسارت با استفاده از شیب منحنی نشست (معیار کرامر)

یکی دیگر از مهم‌ترین پارامترها در بررسی تأثیر نشست روی ساختمان‌ها و پل‌ها، شیب منحنی نشست است. از جمله معیارهای معروف در زمینه بررسی این تأثیرات معیار کرامر است. طبق این معیار بعد از محاسبه شیب منحنی نشست می‌توان خطر آفرینی حفر تونل در منطقه با توجه به این معیار بیشینه شیب منحنی نشست برای سازه‌هایی مانند پل ۱/۸۰۰ و برای سازه‌هایی مانند ساختمان‌های ۱/۹۰۰ است. جدول ۸ دسته‌بندی خسارت وارد بر ساختمان‌ها را بر اساس شیب منحنی نشست نشان می‌دهد.

با توجه به شکل‌های ۵، ۷ و ۱۰ شیب منحنی نشست برای دو حد فاصل (A,B)، (C,D) برای هر دو گام ۵۰ و ۷۵ سانتی-متری) کمتر از ۱/۶۰۰ است. بنابراین این نوع تونل‌سازی با توجه به معیار کرامر در ردیف تونل‌سازی با خطر آفرینی کم ارزیابی می‌شود. از سوی دیگر همان‌طور که بیان شد با توجه به معیار کرامر شیب منحنی نشست برای سازه‌هایی چون ساختمان بایستی بالاتر از ۱/۹۰۰ باشد بنابراین با در نظر گرفتن چنین حالتی و در صورتی که سازه‌ای در بالای منطقه پر خطر باشد حفر چنین تونلی دارای خطر زیادی برای ساختمان مورد نظر است. اما با توجه به فاصله سازه‌های مجاور و محدوده تأثیر حفر تونل، چنین حالتی را نمی‌توان برای این تونل در حد فاصل A,B زیان‌آور و دارای تهدید بالقوه دانست. ولی برای حد فاصل C,D

(هر دو گام پیشروی) باید تمهیدات لازم اتخاذ شود. همچنین برای حد فاصل K, L, این سازه‌ها در اثر حفاری تونل دچار آسیب و خسارت نمی‌شوند.

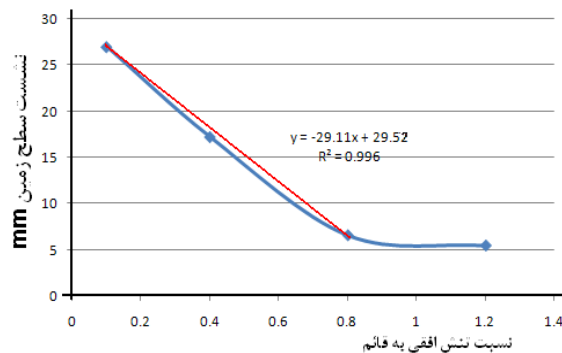
جدول ۷: طبقه‌بندی آسیب‌های وارد بر ساختمان (معیار رانکین) [۲۰]

شماره	دسته‌بندی خطر آسیب‌دیدگی	شدت آسیب- دیدگی	توصیف نوع خسارت	پارامترهای کنترل	
				شیب منحنی	ماکزیمم نشست قائم (mm)
۱	نمای ساختمان	قابل چشم- پوشی	آسیب‌های احتمالی ظاهر ساختمان قابل چشم پوشی است	$\frac{1}{500} <$	< ۱۰
۲	نمای ساختمان	کم	امکان آسیب جزئی به نمای ساختمان، در حالی‌که خسارت‌های ساختاری بعید به نظر می‌رسد.	$\frac{1}{500} - \frac{1}{200}$	۵۰-۱۰
۳	اساسی	متوسط	امکان آسیب به دیواره‌های ساختمان و ترک خوردن آن-ها وجود دارد	$\frac{1}{200} - \frac{1}{50}$	۷۵-۵۰
۴	نیازمند تعمیرات ساختاری	شدید	احتمال آسیب و خسارت اساسی به کل ساختمان زیاد است	$> \frac{1}{50}$	> ۷۵

افقی به قائم، زاویه اصطکاک داخلی خاک، چسبندگی خاک، مدول الاستیسیته و نسبت پواسون بررسی شده است.

۸-۱ نسبت تنش افقی به قائم

با توجه به تغییرات زیاد نسبت تنش افقی به قائم در عمق کم، شاید در ادامه توسعه پروژه قطار شهری کرج به مواردی با نسبت تنش افقی به قائم متفاوت نسبت به حالات بالا برخورد شود در این راستا تأثیر نسبت‌های تنش افقی به قائم ۰/۱، ۰/۴، ۰/۸ و ۱/۲ بررسی و نتایج آن در شکل ۱۳ آمده است



شکل ۱۳: رابطه نشست سطح زمین با نسبت تنش‌های افقی به قائم

جدول ۸: تأثیر شیب منحنی نشست بر روی سازه‌های سطحی

(معیار کرامر) [۲۱]

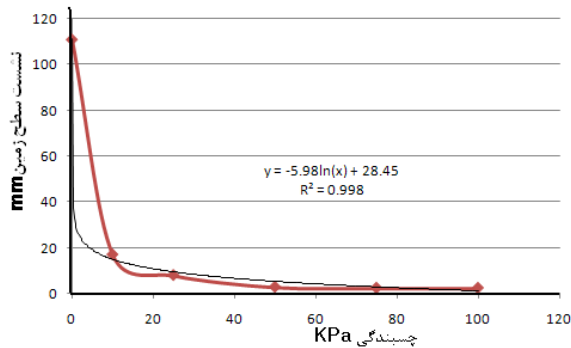
شیب گودی نشست	شدت خسارت
$\frac{1}{1000} >$	خسارتی ندارد
$\frac{1}{1000} - \frac{1}{600}$	خسارت خیلی کم
$\frac{1}{600} - \frac{1}{400}$	خسارت معماری کم
$\frac{1}{400} - \frac{1}{300}$	خسارت معماری متوسط

۸ - آنالیز حساسیت

با توجه به ادامه پروژه خط ۲ قطار شهری کرج و همچنین در شروع عملیات در خطوط دیگر به دلیل تغییرات تدریجی برخی از ویژگی‌های خاک در این خطوط در ادامه آنالیز حساسیت برای پارامترهای ژئومکانیکی خاک از قبیل نسبت تنش‌های

خاک در این بخش تأثیر تغییرات این پارامتر روی میزان نشست بررسی می‌شود. نتایج این بررسی‌ها در شکل ۱۵ ارائه شده است.

با توجه به شکل ۱۵ مشاهده می‌شود که افزایش چسبندگی تا حدود ۲۰ KPa تأثیر سبب کاهش بیش از ۵ برابر در نشست سطح زمین دارد اما در مقادیر بزرگ‌تر میزان تأثیر چسبندگی روی نشست سطح زمین بسیار کاهش می‌یابد.



شکل ۱۵: رابطه نشست سطح زمین با چسبندگی خاک

۸-۴ مدول الاستیسیته

تغییرات مدول الاستیسیته در محدوده خط ۲ از ۲۰ MPa تا ۱۵۰ MPa می‌باشد با توجه به تأثیرگذاری بالای مدول الاستیسیته روی جابجایی‌ها در این مرحله پارامتر مذکور بررسی می‌شود. در نرم‌افزار FLAC 3D به مدول الاستیسیته به صورت مستقیم در خواص خاک وارد نمی‌شود بلکه مدول بالک و مدول برشی جزء داده‌های ورودی می‌باشند بنابراین تغییرات مدول الاستیسیته با استفاده از رابطه زیر در مدل اعمال می‌شود.

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

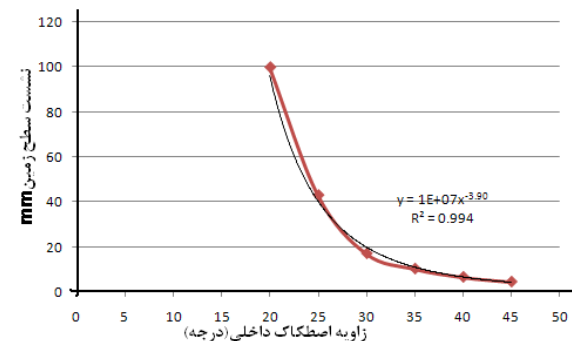
K: مدول بالک، G: مدول برشی، E: مدول الاستیته و ν : نسبت پواسون

با توجه به شکل ۱۶ مشاهده می‌شود که کاهش نشست سطح زمین با افزایش مدول الاستیسیته رابطه مستقیم داشته و بیشترین میزان کاهش نشست به ازای افزایش مدول الاستیسیته به حدود ۱۰۰ MPa می‌باشد به گونه‌ای که باعث کاهش ۹ برابری میزان نشست شده است و افزایش این پارامتر بالاتر از ۱۰۰ MP تأثیر چندانی در نشست سطح زمین ندارد.

مشاهده می‌شود با افزایش تنش‌های افقی میزان نشست سطح زمین کاهش می‌یابد. البته این کاهش تا حدود نسبت ۱ به صورت خطی ادامه دارد و بعد از آن روند آن ثابت می‌شود. افزایش ۴ برابری این پارامتر سبب کاهش ۵ برابری نشست می‌شود.

۸-۲ زاویه اصطکاک داخلی خاک

در نتایج آزمایش‌های خاک مناطق مختلف خط ۲ اختلاف نسبتاً زیادی مشاهده می‌شود به گونه‌ای که از حدود ۲۵ تا ۴۲ درجه مشاهده شده است، این موضوع می‌تواند نشان‌دهنده اختلاف وسیع‌تر این پارامتر در سایر خطوط قطار شهری کرج باشد. آنالیز حساسیت برای زاویه‌های ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰ و در نتایج آزمایش‌های خاک مناطق مختلف خط ۲ اختلاف نسبتاً زیادی مشاهده می‌شود به گونه‌ای که از حدود ۲۵ تا ۴۲ درجه مشاهده شده است، این موضوع می‌تواند نشان‌دهنده اختلاف وسیع‌تر این پارامتر در سایر خطوط قطار شهری کرج باشد. آنالیز حساسیت برای زاویه‌های ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰ و ۴۵ درجه انجام شده و نتایج آن در شکل ۱۴ ارائه شده است.



شکل ۱۴: رابطه نشست سطح زمین با زاویه اصطکاک داخلی خاک

با توجه به شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که اگر زاویه اصطکاک کمتر از ۳۰ درجه باشد تأثیر بسیار زیادی بر روی میزان نشست سطح زمین دارد، اما در زوایای بیشتر از ۳۰ درجه تأثیر این پارامتر کمتر می‌شود. افزایش این زاویه ۲۰ به ۳۰ درجه سبب کاهش ۵ برابری میزان نشست می‌شود.

۸-۳ چسبندگی خاک

نقاط مختلف در طول مسیر خط ۲ با توجه به تفاوت در میزان کانی‌های رسی چسبندگی از ۰ تا حدود ۱۰۰ کیلوپاسکال تغییر می‌کند. با توجه به تأثیر زیاد چسبندگی در ویژگی‌های

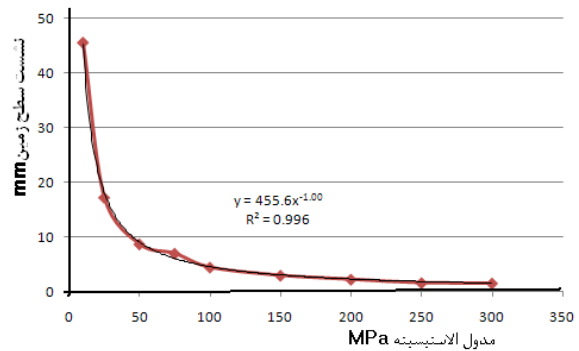
میزان نشست کاهش پیدا کرد. طبق تقسیم‌بندی خسارات و آسیب‌های وارده بر سازه‌های سطحی با روش‌های رانکین و کرامر شدت آسیب برای دو حد فاصل A,B و C,D کم (با توجه به فاصله ساختمان‌های مجاور برای حد فاصل A,B قابل چشم پوشی است ولی برای حد فاصل C,D و برای هر دو گام پیشروی باید تمهیدات لازم اتخاذ شود) و برای حد فاصل J,K شدت آسیب وارده ناچیز و قابل چشم‌پوشی برآورد شد. همچنین، وجود بارهای خارجی همانند سازه‌های سطحی باعث افزایش نشست در سطح زمین می‌شود.

در این تحقیق با توجه به این‌که عمق تونل در تمام مسیر تقریباً ثابت بوده تأثیر تغییرات عمق در افزایش تراکم و مقاومت خاک در مدل‌سازی‌ها لحاظ نشده است.

با توجه به آنالیز حساسیت نشست سطح زمین نسبت به پارامترهای متغیر زمین مشخص شد که بیشترین حساسیت به ترتیب مربوط به چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، مدول الاستیسیته، نسبت تنش‌های افقی به قائم و کمترین حساسیت به تغییرات نسبت پواسون است.

مراجع

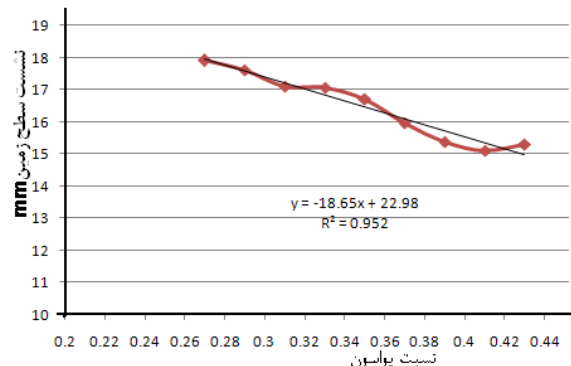
- [۱]. ستاری، ق؛ اسدی، ا؛ شهریار، ک؛ زمانی، ح؛ ۱۳۸۸؛ "برآورد عددی و تحلیلی نشست سطح زمین ناشی از تونلسازی با سپر تعادلی"، هشتمین کنفرانس تونل.
- [۲]. پاکباز، م. س؛ حیدر زاده، ی؛ ۱۳۸۷؛ "بررسی نشست خاک در اثر حفر تونل شهری اهواز"، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران.
- [3]. Vittorio, G., Piergorgio, G., Ashraf, M and Shulin, Xu. (2007) "Mechanized tunneling in urban areas: Design methodology & construction control", Taylor and Francis Group, pp.113-150.
- [۴]. اسماعیلی، م؛ توکلین بنا، ح؛ ۱۳۸۸؛ "بررسی تحلیلی نشست ناشی از حفاری بخش شرقی-غربی خط ۷ متروی تهران و اثر آن بر سازه‌های سطحی"، هشتمین کنفرانس تونل.
- [۵]. افشار، س؛ غفوری، م؛ آرین، م؛ موسوی مداح، س م؛ ۱۳۸۹؛ "بررسی میزان نشست سطح زمین در مسیر خط ۲ قطار شهری مشهد با استفاده از روش محاسبات عددی"، چهارمین همایش زمین شناسی دانشگاه پیام نور.
- [6]. Chen, S. L., Gui, M. W., and Yang, M. C. (2012). "Applicability of the principle of superposition in estimating ground surface settlement of twin-and quadruple-tube tunnels", Tunnelling and Underground Space Technology, 28, pp. 135-149.
- [7]. Möller, S. C., & Vermeer, P. A. (2008). "On numerical simulation of tunnel installation", Tunnelling



شکل ۱۶: رابطه نشست سطح زمین با مدول الاستیسیته

۵-۸ نسبت پواسون

تغییرات نسبت پواسون در نقاط مختلف مترو کرج از ۰/۲۷ تا ۰/۴ است در این بخش تأثیرپذیری نشست سطح زمین از تغییرات این پارامتر بررسی می‌شود. با توجه به شکل ۱۷ مشاهده می‌شود که افزایش نسبت پواسون باعث کاهش کمی در نشست سطح زمین می‌شود و تأثیر چندانی روی نشست ندارد.



شکل ۱۷: رابطه نشست سطح زمین با نسبت پواسون

۹- نتیجه گیری

در این تحقیق، نشست سطح زمین با استفاده از نرم‌افزار 3D FLAC برای پروژه مترو کرج انجام شد که نتایج مناسب و منطقی به همراه داشت. این امر تأیید می‌کند که این نرم‌افزار قابلیت برآورد قابل قبول از وضعیت مناطقی که هنوز حفاری نشده‌اند را دارد. در دو مورد ارزیابی نرم‌افزار، نتیجه تا حدودی کمتر از میزان نشست واقعی زمین بوده‌اند که این می‌تواند ناشی از وجود مشکلات در جمع‌آوری داده‌ها و یا مشکلات اجرایی در پروژه باشد. نتایج 3D FLAC در ادامه پروژه قطار شهری کرج را می‌توان با یک ضریب در حدود ۱/۲ تا ۱/۵ به کار گرفت. با کاهش گام حفاری از ۷۵ سانتی متر تا ۵۰ سانتی متر

[20]. Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A., & Xu, S. (Eds.). (2008). *Mechanized tunnelling in urban areas: design methodology and construction control*. CRC Press.

[21] Pickhaver J. A., (2006) *Numerical modeling of building response to tunneling*, PHD thesis, Oxford University.

and Underground Space Technology, 23(4), pp. 461-475.

[8]. Karakus, M., & Fowell, R. J. (2005). "Back analysis for tunnelling induced ground movements and stress redistribution", Tunnelling and Underground Space Technology, 20(6), pp. 514-524.

[۹]. موسوی، م؛ طالبی نژاد، ع؛ چاکری، ح؛ ۱۳۸۸؛ تحلیل پایداری و مدلسازی سه بعدی تونل و ایستگاه خط ۴ متروی تهران " هشتمین کنفرانس تونل، دانشگاه تربیت مدرس.

[۱۰]. رازی فر، م؛ هاشمی، س؛ حسینی، م؛ یزدی نژاد، ح؛ ۱۳۹۰؛ استفاده از روش‌های تحلیلی و عددی برای تخمین نشست سطح زمین ناشی از حفاری مکانیزه قطعه شرقی- غربی تونل خط هفت متروی تهران " نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی تونل.

[۱۱]. اینانلو عربی شاد، ح؛ آهنگری، کاوه؛ ۱۳۸۹؛ " تحلیل پایداری و پیش‌بینی نشست تونل خط یک مترو تبریز " نشریه زمین شناسی مهندسی دوره ۴، شماره ۱، صفحه ۷۹۳-۸۰۸.

[۱۲]. رستمی، ع؛ رستم آبادی، س؛ حسینی، ن؛ خسرو تاش، م؛ ۱۳۹۰؛ "برآورد تحلیلی و عددی نشست زمین و مقایسه با نتایج ابزار دقیق مطالعه موردی خط ۲ متروی کرج. فصلنامه علمی پژوهشی زمین و منابع واحد لاهیجان، سال چهارم، شماره سوم، صفحه 33 تا صفحه 40.

[۱۳]. حیدریان، پ؛ عقدا، س.م؛ نورزاد، ع؛ ۱۳۹۲؛ " تحلیل پایداری جبهه کار تونل مطالعه موردی خط ۲ متروی کرج " نشریه زمین شناسی مهندسی دوره ۷، شماره ۲، صفحه ۱۷۸۷-۱۸۱۰.

[۱۴]. درگاهی، م؛ شهریاری، ک؛ ۱۳۹۳؛ " بررسی تأثیر طول گام حفاری بر نشست سطح زمین در تونلسازی مرحله‌ای " کنفرانس ملی علوم معدنی؛ مازندران - ساری.

[۱۵]. صالح زاده، ح؛ شاه نظری، ح؛ کاظمینی، م.ج؛ ۱۳۸۸؛ "مقایسه بین همگرایی بخشی از تونل مترو کرج با نتایج حاصل از روش‌های عددی " هشتمین کنفرانس تونل، دانشگاه تربیت مدرس.

[۱۶]. کیااشکوربان، ی؛ کاظمینی، م.ج؛ مهرنهاد، ح؛ ۱۳۹۲؛ " پیش‌بینی تغییر شکل های حاصل از حفاری تونل های کم عمق با کمک روش تفاضل محدود؛ مطالعه موردی خط ۲ متروی کرج " شماره بیست و هفت (شماره ۷ دوره جدید) نشریه فنی، مهندسی مقاوم سازی و بهسازی.

[۱۷]. چکیده گزارش پیشرفت مدیریتی پروژه خط ۱ قطار شهری کرج و حومه، شرکت هگزا، خرداد ماه ۱۳۹۰.

[۱۸]. گزارش عملیات و مطالعات ژئوتکنیک قطعه اول پروژه قطار شهری کرج و حومه، شرکت زمین پژوه، ۱۳۸۴.

[۱۹]. گزارش مطالعات ژئوتکنیک قطعه دوم مسیر مصوب قطار شهری کرج و حومه، شرکت مشاور دریا خاک، ۱۳۸۴.

پی‌نوشت

¹ Empirical methods

² Analytical methods

³ Physical models

⁴ Artificial intelligence methods

⁵ Numerical methods

⁶ Chen

⁷ S.C. Moller & P.A. Vermeer

⁸ M. Karakus , R.J. Fowell

⁹ Cramer

¹⁰ Rankin

¹¹ NATM