برآورد نشست سطحی در تونل بزرگراهی نیایش با استفاده از روش‌های تجربی، عددی و نشست‌های واقعی

غلامرضا خانلری*، محمد ملکی، رضا حیدری ترکمانی، سمیه علی‌پور، فاطمه ناصری؛
دانشگاه بوعلی سینا، دانشکدهٔ علوم پایه، گروه زمین‌شناسی

تاریخ: دریافت ۹۲/۸/۱۱ **پذیرش** ۹۳/٤/٤

چکیده

یکی از بهترین روش‌ها برای بهبود مسئلهٔ حمل و نقل، استفاده از تونل‌های زیرزمینی است. در همین راستا، تونل بزرگراه نیایش شامل دو تونل شمالی و جنوبی تقریباً موازی است که به‌روش تونل‌سازی جدید اتریشی NATM[1] در شمال تهران احداث شده است. حفر تونل و دیگر سازه‌های زیرزمینی منجر به بروز تغییرات چشم‌گیر در وضعیت تنش در اطراف سازه می‌گردد که این مسئله سبب نشست در سطح زمین می‌شود. در این پژوهش، میزان نشست سطحی زمین با استفاده از انواع روش‌های تجربی، عددی و هم‌چنین مقادیر نشست واقعی در پنج مقطع (CS-1 تا CS-5)، بررسی شده‌اند. روش تجربی به‌کار رفته، روش اوریلی و نیو (۱۹۸۲) و روش عددی نیز روش المان محدود با استفاده از نرم‌افزار $PLAXIS_{2D}$ است. بر اساس نتایج به‌دست آمده، روش عددی در تمامی مقاطع (به استثناء مقطع ۳) هم‌خوانی بیش‌تری با داده‌های نشست واقعی حاصل از اندازه‌گیری‌های برجا دارد. در حالی‌که روش تجربی در مقاطع ۲، ٤ و ۵ میزان نشست را بیش‌تر از نشست واقعی نشان می‌دهد. هم‌چنین نتایج حاصل از روش‌های یاد شده نشان می‌دهند که حداکثر نشست، بیش‌تر از مقدار نشست مجاز و در محدودهٔ اخطار است.

واژه‌های کلیدی: تونل نیایش، نشست زمین، NATM، روش تجربی، روش عددی، $PLAXIS_{2D}$

* **نویسنده مسئول** Khanlari_reza@yahoo.com

1. New Austrian Tunnelling Method

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2917]

مقدمه

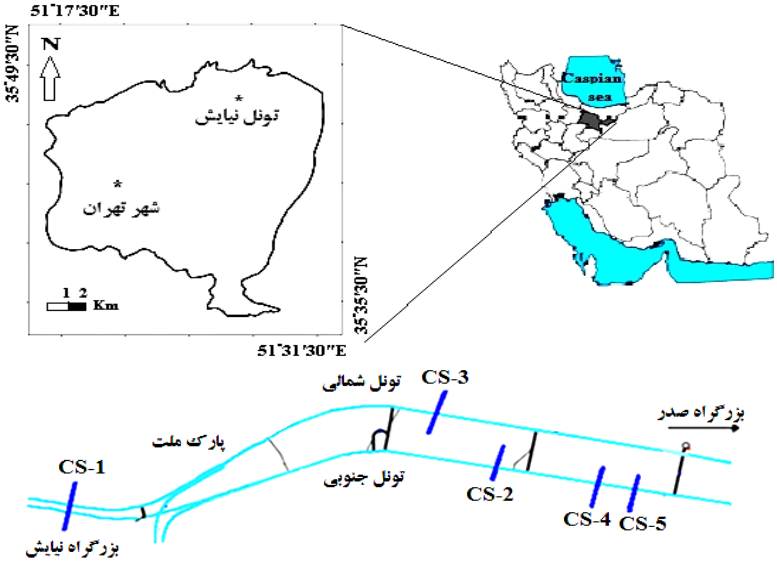
تهران به‌عنوان پایتخت، از شهرهای مهم و پرجمعیت است. با توجه به گسترش ترافیک در شمال تهران، احداث تونل بزرگراهی در این قسمت ضرورت دارد. شکل ۱ نمایی از مسیر پروژه را نشان می‌دهد. از مهم‌ترین مسائل در حفر تونل در نواحی کم‌عمق شهری و در زمین‌های نرم، موضوع نشست سطح زمین و تأثیر آن بر سازه‌ها و تأسیسات شهری مجاور است. یقیناً نشست سطحی زمین خطر تغییر شکل ساختمان‌ها را افزایش می‌دهد [۱]. بنا بر این روش حفاری باید به گونه‌ای باشد که میزان نشست زمین را به حداقل برساند. برای تونل‌های دوقلو و با مقطع غیردایره‌ای در زمین‌های نرم، روش تونل‌سازی جدید اتریشی (NATM) پیشنهاد شده است [۲]. محققان مختلف سه روش عمده برای پیش‌بینی میزان نشست زمین به روش NATM ارائه کرده‌اند که عبارتند از: ۱) روش نیمه‌تئوری (تجربی)، بر اساس روابط به‌دست آمده از مشاهدات پیشین، ۲) آنالیزهای عددی مثل روش المان محدود که این روش مورد علاقهٔ عام است و ۳) روش‌های شبکهٔ عصبی و منطق فازی [۳]، [٤] و [٥].

هدف از این بررسی، پیش‌بینی وضعیت نشست‌های حاصل از حفر تونل نیایش به‌روش تجربی و روش عددی (با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS V.8.2) در پنج مقطع (CS-1 تا CS-5) در مسیر تونل مذکور است (شکل ۱). با توجه به این که از کیلومتر ۱+٥٤٠ تا ۲+٦۰۰ تونل شمالی و از کیلومتر ۱+٥٥۰ تا ۲+٦۸۰ تونل جنوبی، در مسیر ساختمان‌های مسکونی قرار می‌گیرند از این رو، پیش‌بینی نشست در این مقاطع ضروری است.

زمین‌شناسی و خصوصیات ژئوتکنیکی مسیر تونل نیایش

تهران روی نهشته‌های آبرفتی دوران چهارم زمین‌شناسی بنا شده است [٦]. آبرفت‌های مذکور با سیلاب‌هایی که در اواخر دوران سوم و هم‌زمان با برپایی ارتفاعات البرز از این ارتفاعات سرچشمه گرفته‌اند، در نواحی دامنه‌ای و پست برجای گذاشته شده‌اند. بخش اعظم تونل نیایش در سازند هزاردره (A) و در ورودی شرقی و قسمت میانی تونل شمالی در سازند کهریزک (Bn) قرار گرفته است [۷]. مقاطع زمین‌شناسی مسیر بررسی شده برای تونل شمالی و جنوبی به‌ترتیب در شکل‌های ۲ الف و ب نشان داده شده‌اند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2917]



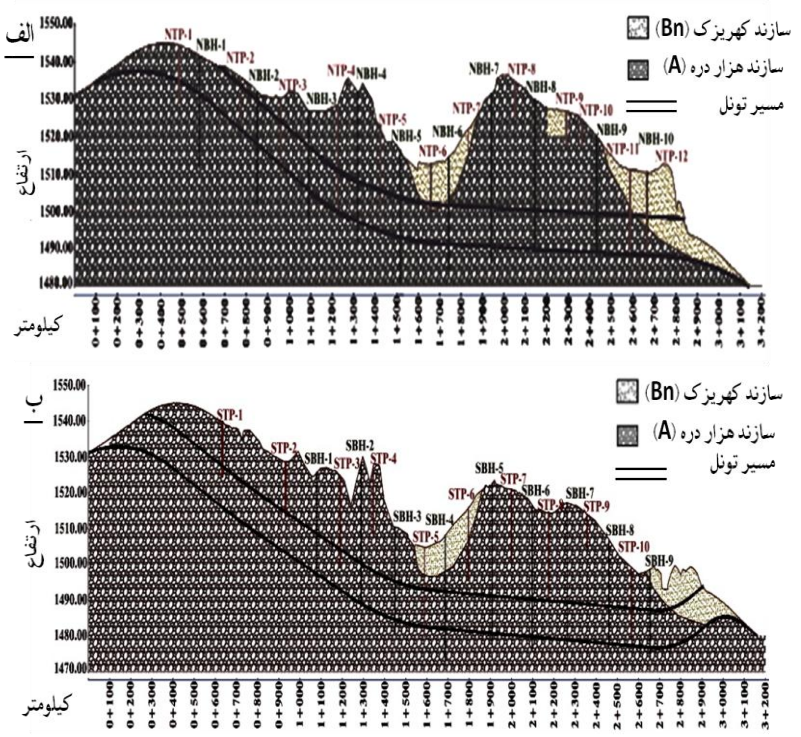
شکل ۱. موقعیت تونل نیایش و مقاطع بررسی شده در مسیر تونل

چنان‌که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، سازند هزاردره (A) با ضخامت حدود ۱۲۰۰ متر شامل کنگلومرای همگن با سیمان قوی است که به‌طور موضعی دارای لایه‌ها و عدسی‌های رس و ماسه است. این سازند به‌صورت دگرشیب به‌وسیلهٔ سازند کهریزک (Bn) پوشیده شده است. سازند کهریزک (Bn)، کنگلومرایی ناهمگن متشکل از شن، ریگ و سنگ‌های آواری به اندازهٔ قلوه سنگ است که زمینه‌ای به‌اندازهٔ لای و ماسه دارد. این سازند معمولاً چینه‌بندی ندارد و سیمان‌شدگی در آن ضعیف توسعه یافته است [۸].

به‌منظور بررسی‌های زیرسطحی و تعیین مشخصات ژئوتکنیکی مسیر پروژه، ۲۰ گمانه با عمق‌های ۲۵ تا ٤٥ متر و تعداد ٢٤ چاهک دستی به عمق‌های ۱۰ تا ۳۰ متر حفاری شده‌اند. در گمانه‌های حفاری شده آزمایش‌های پرسیومتری و لوفران انجام شده و آزمایش دانسیته برجا، بارگذاری صفحه‌ای و برش مستقیم برجا نیز در چاهک‌ها انجام شده است. علاوه بر آزمایش‌های برجا، آزمایش‌های آزمایشگاهی نیز روی نمونه‌های به‌دست آمده از گمانه‌ها انجام شده است. با توجه به این که آبرفت‌های تهران در گذر زمان دچار تغییر ساختار شده‌اند و سیمان ثانویه بین آن‌ها تشکیل شده است از این رو، آزمایش‌های آزمایشگاهی باعث از بین

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2917]

رفتن ساختار آن‌ها شده و نتایج دقیقی به‌دست نمی‌دهند [۷]. در نتیجه از نتایج حاصل از آزمایش‌های برجا، در روش عددی استفاده شده است که شامل نتایج آزمایش بارگذاری صفحه‌ای، برش مستقیم برجا و دانسیته برجا است. جدول ۱ خلاصه‌ای از خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های مسیر را نشان می‌دهد.



شکل ۲. مقاطع عرضی محدودهٔ بررسی شده (الف: تونل شمالی، ب: تونل جنوبی) [۷]

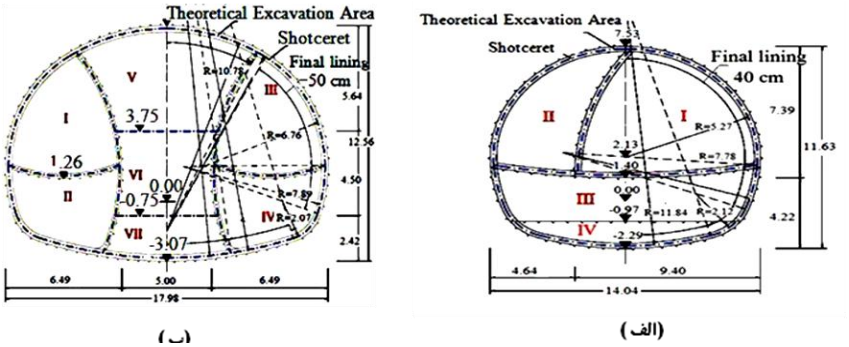
جدول ۱. خصوصیات ژئوتکنیکی سازندهای مختلف زمین‌شناسی مسیر تونل [۷]

سازند زمین‌شناسی	عمق لایه (m)	وزن واحد حجم (kN/m^3)	مدول الاستیسیته (kN/m^2)	چسبندگی (kN/m^2)	نسبت پواسون	زاویهٔ اصطکاک داخلی (°)
سازند A	۱۵-۰	۱۸	۶۰۰۰۰	۳۰	۰/۲	۳٤
سازند A	>۱۵	۱۹	۷۰۰۰۰	٤۰	۰/۲٦	۳٦
سازند Bn	۲۰-۰	۱۸	۵۰۰۰۰	۲۰	۰/۲	۳٤

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2917]

روش ساخت تونل نیایش

حفاری تونل نیایش با استفاده از روش تونل‌سازی جدید اتریشی (NATM) انجام شده است. مزیت اصلی این روش نسبت به بقیهٔ روش‌های مرسوم تونل‌زنی، انعطاف‌پذیری زیاد آن است [۹]. تکنیک‌های بسیاری برای مقابله با شرایط گوناگون زمین در حفر تونل‌های بزرگ و غیردایره‌ای وجود دارند که از بین آن‌ها پتانسیل صرفه‌جویی از نظر هزینه، در این روش زیاد است [۱۰]–[۱٤]. تونل نیایش در مسیرهایی که از زیر ساختمان‌ها می‌گذرد، به‌صورت دوخطه و در بقیه مسیرها به‌صورت سه‌خطه طراحی شده است. مقاطع سه‌خطه عرض ۱۷/۹۸ متر و ارتفاع ۱۲/٥٦ متر دارد و برای تونل دوخطه به‌ترتیب برابر ۱٤/۰٤ و ۱۱/٦۳ متر است. مقاطع سه‌خطه در هفت مرحله و مقاطع دوخطه نیز در چهار مرحلهٔ حفاری شده‌اند. شکل ۳ مراحل حفاری را در تونل سه‌خطه و دوخطه نشان می‌دهد. سیستم نگه‌داری اولیه هم‌زمان با حفاری تونل نصب می‌شود که شامل بتن پاشیده به ضخامت ۳۰ سانتی‌متر برای مقاطع سه‌خطه و ۲۵ سانتی‌متر برای مقاطع دوخطه است. هم‌چنین پوشش نهایی تونل که شامل قطعات بتنی پیش‌ساخته است، به‌ضخامت ٥۰ سانتی‌متر برای تونل سه‌خطه و ٤۰ سانتی‌متر برای تونل دوخطه اجرا می‌شود [۷]. خصوصیات مکانیکی پوشش اولیه و نهایی برای تونل‌های سه‌خطه و دوخطه در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۳. مقطع عرضی از تونل و مراحل حفاری الف) مسیر دوخطه، ب) مسیر سه‌خطه [۷]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2917]

نشست سطح زمین در اثر حفر تونل

به‌طورکلی حفر تونل و دیگر سازه‌های زیرزمینی منجر به حذف توده‌ای از خاک و سنگ محل و بروز تغییرات چشم‌گیر در وضعیت تنش اطراف آن‌ها می‌شود. اولین دلیل نشست زمین

جدول ۲. خصوصیات سیستم نگه‌داری اولیه و نهایی [۷]

سیستم نگه‌داری	D (cm)	E (kN/m^2)	υ	EA (kN/m)	EI (kNm^2/m)	W (kN/m/m)
پوشش اولیه (مسیر ۳ خطه)	۳۰	۳*۱۰^۷	۰/۲	۳/۷۵*۱۰^۶	۱۹/۵۳*۱۰^٤	٦/۲۵
پوشش نهایی (مسیر ۳ خطه)	۵۰	۳*۱۰^۷	۰/۲	۱/۵*۱۰^۷	۳/۱۲۵*۱۰^۵	۱۲/۵
پوشش اولیه (مسیر ۲ خطه)	۲۵	۳*۱۰^۷	۰/۲	۳/۷۵*۱۰^۶	۱۹/۵۳*۱۰^٤	٦/۲۵
پوشش نهایی (مسیر ۲ خطه)	٤۰	۳*۱۰^۷	۰/۲	۱/۲*۱۰^۷	۱/٦*۱۰^۵	۱۰

EA: صلبیت محوری (**E**: مدول الاستیسیته پوشش، **A**: سطح مقطع پوشش)، **EI**: صلبیت خمشی (**I**: ممان اینرسی پوشش)، **W**: وزن پوشش، υ: نسبت پواسون، **D**: ضخامت

بالای تونل، تمایل حرکت زمین به داخل تونل بعد از حفاری است [۱۵]. محققان مختلف همواره این مسئله را بررسی کرده‌اند تا با اتخاذ شیوه‌های مناسب میزان نشست را قبل از شروع عملیات ساخت برآورد کنند. پک (۱۹٦۹)[1] گزارشی مدون و جمع‌آوری کلی از عملیات اجرایی تونل در زمین‌های نرم، تا آن زمان ارائه کرد. او نشان داد که منحنی نشست سطح زمین در اثر حفر تونل دارای توزیع نرمال است [۱٦]. اوتو[2] و سگاستا[3] (۱۹۹٦)، روابط تجربی دیگری ارائه کردند که مبتنی بر محیط غیرالاستیک است و نشان دادند که جابه‌جایی‌های ایجاد شده با افزایش فاصله از محور تونل، به‌طور نمایی کاهش می‌یابد [۱۷]. لاگانتان[4] و پولوس[5] (۱۹۹٦)، نیز با بررسی این موضوع به‌روش تحلیلی، روابطی را برای نشست‌های سطحی و تغییر شکل‌های جانبی خاک در اثر حفر تونل ارائه کردند و با مقایسهٔ روابط به‌دست آمده با پنج مورد واقعی به این نتیجه رسیدند که منحنی نشست مبتنی بر روابط مذکور کمی عریض‌تر از منحنی‌های مشاهده شده است [۱۸]. سلبی[6] (۱۹۹۹)، با استفاده از دو روش عددی اجزای محدود و تفاضل محدود، به بررسی و مدل‌سازی تونل‌هایی در انگلستان پرداخت و با مقایسه

1. Peck 2. Oteo 3. Sagaseta 4. Loganathan 5. Poulos 6. Selby

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2917]

نتایج به‌دست آمده با مقادیر تجربی به این نتیجه رسید که روش‌های عددی مذکور به‌ترتیب منحنی نشست را کم عمق‌تر و عریض‌تر از مقادیر مشاهده شده پیش‌بینی می‌کنند [۱۹]. چو[1] و بوبت[2] (۲۰۰۲)، وضعیت نشست در تونل بلفاست و تونل مکزیکوسیتی را با روش‌های تجربی و تحلیلی (برداشت‌های صحرایی) و عددی (نرم‌افزار PLAXIS) باهم مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که تطابق خوبی بین این روش‌ها وجود دارد [۲۰]. محموتوقلو[3] (۲۰۱۱)، به بررسی نشست ناشی از حفر تونل‌های دوقلو در استانبول، پرداخت. بدین‌منظور مقاطعی با عدد SPT کم که جزء زمین‌های سست به‌حساب می‌آیند، بررسی شدند [۱]. وحدتی و همکاران (۲۰۰۹)، با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS به بررسی نشست حاصل از حفر خط ۲ تونل تبریز پرداخته‌اند و اثر آن را بر روی میزان نشست بازار زیرزمینی واقع بر روی تونل، بررسی کردند [۲۱]. حسن‌پور و همکاران (۲۰۱۲)، با استفاده از سه روش تحلیلی، عددی و برداشت‌های برجا، به بررسی نشست سطح زمین در اثر حفر تونل متروی استانبول پرداختند. برای تحلیل عددی، از نرم‌افزار تفاضل محدود $FLAC_{3D}$ و برای تحلیل تجربی، از روش هرزوگ[4] (۱۹۸۵) (رابطهٔ ٦) استفاده کردند. این تونل‌ها، به‌صورت دوقلو است و از روش NATM برای حفاری آن استفاده شده است. نتایج این تحلیل نشان داد که با افزایش سربار، میزان نشست نیز افزایش می‌یابد [۲۲]. نظر به اهمیت بروز نشست‌های ناشی از حفر تونل در مناطق شهری شرکت عمران راهوار پژوهش به‌عنوان مشاور پروژهٔ مذکور، حد مجاز نشست را ۷ میلی‌متر، از ۷ تا ۱۵ میلی‌متر را حدالارم، از ۱۵ تا ۳۰ میلی‌متر حد اخطار و بیش از ۳۰ میلی‌متر را ممنوع‌الورود اعلام کرده است. با توجه به این امر برای کنترل نشست‌ها با مقادیر مجاز، اندازه‌گیری‌های برجا، به روش‌های تجربی و روش عددی توجه شده است.

تخمین نشست سطحی به‌کمک روش‌های تجربی[5]

پک (۱۹٦۹)، اولین رابطهٔ تجربی را در بارهٔ توزیع نشست سطح زمین در اثر حفر تونل ارائه کرد (رابطه ۱). به عقیدهٔ این محقق، توزیع عرضی نشست سطحی تقریباً شبیه به منحنی چگالی احتمال نرمال است [۱٦]. پک (۱۹٦۹) و اوریلی[6] و نیو[7] (۱۹۸۲)، منحنی گوسی برای

1. Chou 2. Bobet 3. Mahmutoglu 4. Herzog
5. Emprical Methods 6. O'Reilly 7. New

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2917]

ارزیابی میزان نشست کوتاه مدت در اثر حفر تونل را برای تونل‌های منفرد، ارائه کردند [۱۵]، [۱٦]. پارامترهای نشست استفاده شده در روش تجربی در شکل ٤ نشان داده شده است [٤].

$$S = S_{\max} \times e^{(\frac{-X^2}{2i^2})} \quad (۱)$$

در این رابطه، S نشست سطح زمین در فاصلهٔ χ از محور تونل است، (mm)، S_{max} بیش‌ترین نشست در خط بالای تونل (mm)، χ فاصلهٔ افقی از محور تونل (m) و i طول نقطهٔ عطف منحنی نشست عرضی نسبت به محور تونل (m) است. چندین روش برای محاسبهٔ نقطهٔ عطف منحنی (i) پیشنهاد شده است (رابطه‌های ۲ تا ٤). در این پژوهش، محاسبهٔ i بر اساس میانگین روابط تجربی مذکور به‌دست آمده است (رابطهٔ ۵):

$$i_1 = 0.386 \times Z_0 + 2.84 \quad (۲)$$

$$i_2 = 0.5 \times Z_0 \quad (۳)$$

$$i_3 = 1.392.(\frac{D}{2}).(\frac{Z_0}{D})^{0.704} \quad (٤)$$

$$i = \frac{i_1 + i_2 + i_3}{3} \quad (۵)$$

که در آن Z_0 عمق محور تونل (m) و D قطر تونل (m) است. آریوگلو[1] (۱۹۹۲) [۲۳] رابطهٔ (۲) و (٤)، گلوسوپ[2] (۱۹۷۸) [۲٤] رابطهٔ (۳)، و نیز ارسلبی[3] و همکاران (۲۰۰۵) [٤] رابطهٔ (۵) را برای محاسبهٔ میانگین نقطهٔ عطف (i_{ave}) پیشنهاد کرده‌اند. هم‌چنین هرزوگ (۱۹۸۵) مدلی برای ارزیابی حداکثر نشست سطحی برای تونل‌های منفرد ارائه کرده است (رابطهٔ ٦) [۲۵].

$$S_{max} = 0.785 .(\gamma_n Z_0 + \sigma_s).\left(\frac{D^2}{i.E}\right) \quad (٦)$$

در رابطهٔ (٦) E مدول الاستیسیته (kN/m^2)، γ_n وزن واحد حجم طبیعی سازند (kN/m^3)، Z_0 عمق محور تونل (m)، σ_s کل بار اضافی (kN/m^2) است.

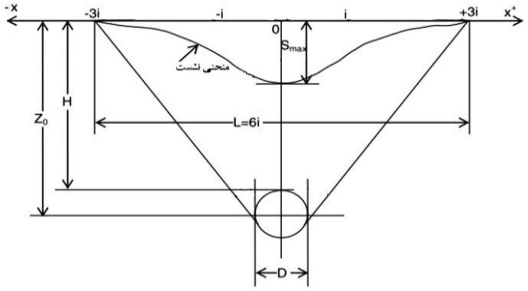
فرضیاتی برای آنالیز تونل مذکور استفاده شده که عبارتند از:

۱. تونل کم‌عمق است و مبحث نشست بیش‌تر در نواحی کم‌عمق مشکل آفرین است که باید در نظر گرفته شود،

1. Arioglu 2. Glossop 3. Ercelebi et al

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2917]

۲. تونل از میان مصالح شنی و ماسه‌ای عبور می‌کند (برای سهولت مدل‌سازی در نـرم‌افـزار لنزهای رسی در نظر گرفته نشده‌اند)،
۳. روش حفاری تونل NATM است،
٤. به‌دلیل فاصلهٔ زیاد دو تونل از یک‌دیگر اندرکنش دو تونل در نظر گرفته نشده است. البته به‌استثناء مقطع ۱، زیرا در این مقطع فاصلهٔ دو تونل کم است،
۵. نشست تحکیمی دراز مدت تونل و حجم از دست رفته در نظر گرفته نشده است، زیرا در بحث تحکیم پارامتر زمان نیز وارد می‌شود و با توجه به این‌که دسترسی به اعداد نشست واقعی در دراز مدت نیست، از این رو، پارامتر زمان در نظر گرفته نشده است.



شکل ٤. پارامترهای نشست [٤]

سایر روابط تجربی که برای ارزیابی میزان نشست استفاده می‌شود، در زیر آورده شده‌اند. این روابط را اوریلی و نیو (۱۹۸۲) ارائه کرده‌اند [۱۵]:

$$\frac{ds}{dx} = 0.606 \left(S_{max} / i \right) \quad (۷)$$

$$H_{max} = i\sqrt{3} \quad (۸)$$

که در این روابط ds/dx حداکثر شیب منحنی نشست نسبت به فاصله از محور تونل بر حسب متر و H_{max} فاصلهٔ عمودی بین سطح زمین (سطحی که گودال نشست در آن قرار دارد) و تاج تونل بر حسب متر را نشان می‌دهد.

با استفاده از روابط (۵، ٦، ۷ و ۸) و جدول ۳ خطر آسیب به ساختمان‌ها در اثر نشست سطحی، قابل پیش‌بینی و طبقه‌بندی است. پارامترهای ورودی و نتایج پیش‌بینی نشست به روش تجربی در جدول ٤ ارائه شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود. بیش‌ترین نشست و شیب

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2917]

به‌ترتیب ۲۹ میلی‌متر و ۰/۰۰۲۳ متر هستند که متعلق به یک مقطع است و با توجه به رده‌بندی خطر تخریب ساختمان‌ها که ارسلبی و همکاران (۲۰۰۵) [٤] ارائه کرده است، ساختمان‌های منطقه در محدودهٔ کم‌خطر قرار می‌گیرند (جدول ۳). اما برای افزایش درجهٔ اطمینان نسبت به این موضوع، لازم است با استفاده از روش‌های دیگر نیز این موضوع بررسی شود. از این رو، با استفاده از روش عددی که دقیق‌تر است میزان نشست به‌دست آمده است و در نهایت این دو روش تجربی و عددی با نشست‌های واقعی، مقایسه شده است تا به نتایج مطلوب و واقعی دست یابیم.

جدول ۳. رده‌بندی خطر تخریب ساختمان‌ها [٤]

ارزیابی خطر	S_{max} (mm)	ds/dx
قابل چشم‌پوشی	۱۰>	۰/۰۰۲>
کم	۱۰–۵۰	۰/۰۰۲–۰/۰۰۵
متوسط	۵۰–۷۵	۰/۰۰۵–۰/۰۲
زیاد	۷۵<	۰/۰۲<

روش عددی برای ارزیابی حداکثر نشست سطحی

با وجود این که روش‌های غیرعددی مثل روش تجربی در برخی از موارد پیش‌بینی‌های نسبتاً خوبی از پاسخ زمین به روند احداث تونل را ارائه می‌دهند، اما یک یا چند عامل محدود در این روش در نظر گرفته می‌شود. درحالی که با روش عددی همهٔ عوامل مؤثر بر میزان نشست، در تحلیل‌ها دیده می‌شوند. در دههٔ اخیر مدل‌سازی عددی یکی از روش‌های غالب برای حل مسائل مهندسی است که آنالیزهای پایداری و پیش‌بینی رفتار سیستم را در بر می‌گیرند [۲٦]. روش‌های عددی مختلفی (مثل المان محدود، تفاضل محدود، المان مرزی، المان گسسته و روش‌های ترکیبی) به‌طور گسترده برای مدل‌سازی حفاری‌های زیرزمینی استفاده می‌شوند [۲۷]. در این پژوهش نیز برای مدل‌سازی حفاری تونل نیایش از نرم‌افزار $PLAXIS_{2D}$ که روشی عددی المان محدود است، استفاده شده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2917]

جدول ٤. پیش‌بینی میزان نشست به‌روش تجربی برای ۵ مقطع در مسیر تونل نیایش

نام مقطع	پارامترهای ورودی					پارامترهای تخمینی			
	D (m)	Z_0 (m)	E (kN/m^2)	γ_n (kN/m^2)	σ_s (kN/m^2)	I (m)	S_{max} (m)	ds/dx (m)	H_{max} (m)
CS.1	١٤	١٢	١٥٠٠٠٠	١٨	٠	٧/٤	−٠/٠٢٩	٠/٠٠٢٣	١٢/٨٢٥
CS.2	١٢	١٦	٢٥٠٠٠٠	١٧/٥	١٠٠	٩/٠٨	−٠/٠١٧	٠/٠٠١١	١٥/٧٢
CS.3	١٢	٢٠	٢٤٠٠٠٠	١٧	١٤٠	١٠/٨٤	−٠/٠٢	٠/٠٠١١	١٨/٧٧
CS.4	١٢	٣٠	٢٤٠٠٠٠	١٨	١٧٠	١٥/١١	−٠/٠٢١	٠/٠٠٠٨	٢٦/١٧
CS.5	١٢	١٤	٢٣٠٠٠٠	١٧	٦٠	٨/١٨	−٠/٠١٦	٠/٠٠١٢	١٤/١٧

انتخاب مدل رفتاری خاک

معمولاً محیط‌های خاکی دارای خواص و رفتارهای بسیار متفاوت هستند. مدل‌های رفتاری بسیاری برای خاک تعریف شده است که از آن جمله می‌توان مدل‌های الاستیک، الاستوپلاستیک و الاستوویسکوپلاستیک را نام برد. مدل‌های الاستیک می‌توانند خطی و غیرخطی باشند. خاک در مدل‌های الاستوپلاستیک در تنش‌های کم به‌صورت الاستیک عمل می‌کند و در تنش‌های بیش‌تر شروع به گسیخته شدن می‌کند و اصطلاحاً پلاستیک می‌شوند [٢٦]، [٢٨]، [٢٩]. در طول مکانیزم گسیختگی، میزان کرنش‌های خمیری متفاوت است و هر مقدار که تغییر شکل‌های برشی افزوده شود، به‌واسطهٔ سخت‌شوندگی برشی مقدار پارامترهای برشی نیز افزوده می‌شود که این به‌معنای ظهور تدریجی ضریب اصطکاک و سایر مشخصات مقاومتی به‌واسطهٔ ایجاد کرنش خمیری است [٣٠]. با توجه به این رفتار، انتخاب مدل رفتاری که بتواند این شرایط را مدل‌سازی کند، ضروری است. نرم‌افزار PLAXIS مدل‌های رفتاری پیشرفته‌ای ارائه می‌کند. انواع مدل‌های موجود در این نرم‌افزار شامل: مدل نرم شونده، مدل سخت شونده و مدل نرم‌شونده به‌همراه خزش است. راهنمای نرم‌افزار استفاده از مدل ترکیبی الاستیک و پلاستیک را، برای تحلیل رفتار خاک در اثر حفر تونل پیشنهاد می‌کند. مدل خاک سخت‌شونده قابلیت ارضا این رفتار خاک را دارد. در این قسمت، مدل رفتاری سخت‌شونده، به‌دلیل دقت زیاد و وجود متغیرهای بیش‌تر استفاده شده و البته حل آن به‌صورت کرنش صفحه‌ای است [٣٠].

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2917]

مایر[1] و همکاران (۱۹۹٦) نیز از این مدل برای تعیین نشست در تونل‌هایی که به‌روش NATM ساخته می‌شوند، بهره برده و بیان کردند که نتایج حاصل از تحلیل با اندازه‌گیری برجا نشست (داده‌های ابزار دقیق)، بسیار نزدیک است [۳۱].

معرفی مدل خاک سخت شونده[2]

مدل سخت‌شونده خاک در واقع، توسعه‌ای از مدل موهر کولمب است که این مدل مربوط به اضافه کردن مکانیزم خمیری هم‌سان با سطح تسلیم کلاهکی است. شکل ۵ سطوح تسلیم مدل سخت‌شونده و متغیرهای مدل سخت‌شونده را نشان می‌دهد. شکل ۵ الف انواع منحنی‌های تنش- کرنش آزمایشی سه‌محوری زه‌کشی شده استاندارد را نشان می‌دهد. در بارگذاری اولیه رفتار به‌صورت غیرخطی است و تنش شکست بر اساس معیار موهر کولمب تعیین می‌شود. مدول سختی در این قسمت، E_{50} است. در برابر E_{50} که کرنش الاستیک و پلاستیک را مشخص می‌کند، E_{ur} فقط مدول الاستیک را مشخص می‌کند. E_{ur} در ارتباط با نسبت پواسون (υ_{ur})، رفتار باربرداری- بارگذاری مجدد زمین را نشان می‌دهد. طبق رابطهٔ (۹) هر دو مدول بارگذاری و مدول باربرداری-بارگذاری مجدد به سطوح تنش وابسته‌اند [۳۰].

$$a = c'.\cot\phi' \qquad (۹)$$

$$E_{50} = E_{50}^{0}(\frac{\sigma_3' + a}{p_0 + a})^m, E_{ur} = E_{ur}^{0}(\frac{\sigma_3' + a}{p_0 + a})^m$$

E_{50}^{0} و E_{ur}^{0} مدول‌های ورودی برای $\sigma_3' = p_0$ هستند و p_0 فشار مرجعی است که معمولاً یک بار در نظر گرفته می‌شود. مقدار m می‌تواند با آزمایش تحکیم و سه‌محوری محاسبه شود و مقدار آن از ۰/۵ تا ۱ به‌ترتیب برای ماسه و رس متغیر است.

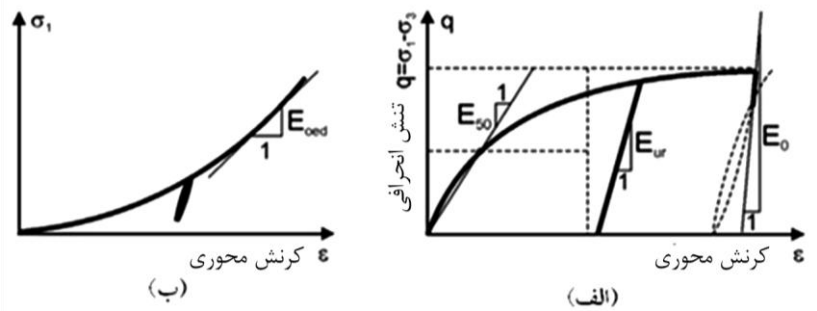
چنان‌چه خصوصیات زمین مشابه با مواد سنگی باشد، مقدار m کم‌تر از ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود. شکل ۵ ب نتایج آزمایش تحکیم را نشان می‌دهد. در مدل سخت‌شوندهٔ خاک، سختی تحکیمی از رابطهٔ (۱۰) به‌دست می‌آید:

1. Mair 2. Hardening Soil Model (HS Model)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2917]

$$E_{oed} = E_{oed}^{0}\left(\frac{\sigma_1' + a}{p_0 + a}\right)^m \qquad (۱۰)$$

که در این رابطه E_{oed}^{0} سختی تانژانتی[1] در آزمایش تحکیم (kN/m^2) است. شکل ٦ الف سطوح سخت‌شوندگی برشی و حجمی را نشان می‌دهد. شکل ٦ ب سطح تسلیم کل در فضای تنش را نشان می‌دهد. در نرم افزار استفاده شده تعداد ۸ پارامتر به‌عنوان ورودی انتخاب شده‌اند که عبارتند از زاویهٔ اصطکاک داخلی (φ)، چسبندگی (C)، عمق (m)، زاویهٔ اتساع (ψ)، نسبت پواسون (υ_{ur})، E_{oed} ، E_{50} و E_{ur}. به‌منظور دست‌یابی به شاخص‌های پیشرفتهٔ مدل سخت‌شونده، با استفاده از آزمایش بارگذاری صفحه‌ای داده‌ها کالیبره شده و شاخص‌های یادشده استخراج شده‌اند [۳۱].

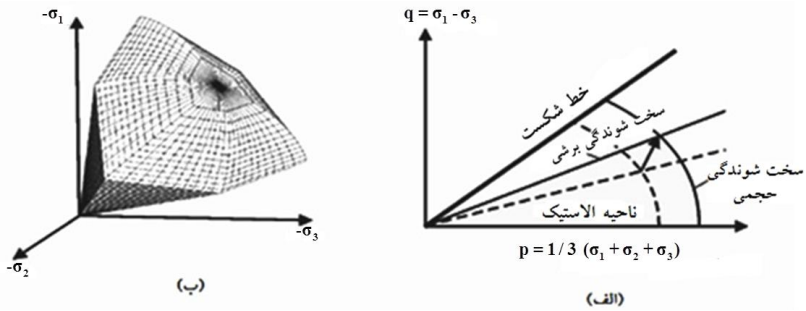


شکل ۵. مدول سختی خاک الف) مدول محاسبه شده با آزمایش سه‌محوره، ب) مدول محاسبه شده با آزمایش تحکیم [۳۱]

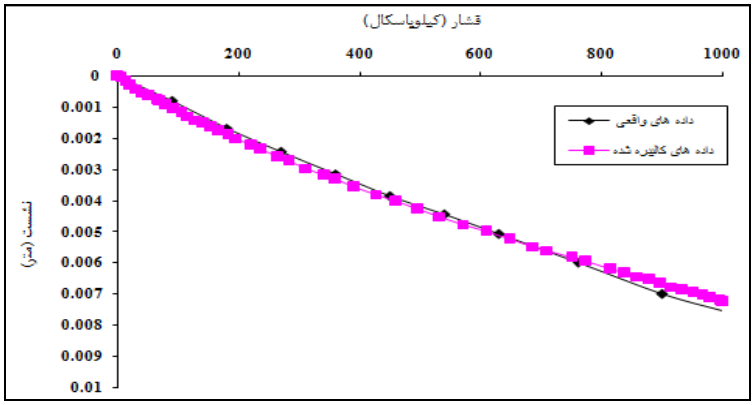
به‌منظور کالیبراسیون داده‌ها آزمایشی مانند آزمایش بارگذاری صفحه‌ای در نرم‌افزار PLAXIS مدل می‌شود و با تغییر مشخصات سختی در مدل، داده‌های هم‌خوان با داده‌های آزمایش استخراج می‌شود. در شکل ۷ نمونهٔ آزمایشگاهی و نمونهٔ مدل‌شده منطبق بر آن آورده شده است. در جدول ۵ با توجه به مشخصات فیزیکی و مکانیکی مصالح و بر اساس داده‌های کالیبره شده، پارامترهای مدل سخت شونده به‌طور متوسط تعیین شده است.

1. Tangent stiffness

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2917]



شکل ٦. سطح تسلیم برای مدل خاک سخت‌شونده در C=0 الف) سخت‌شوندگی برشی و حجمی در فضای p-q، ب) سطح تسلیم کل در فضای تنش‌های اصلی [۳۱]



شکل ۷. نمونهٔ آزمایشگاهی و نمونهٔ مدل شده منطبق بر آن

در این نرم‌افزار برای مدل‌سازی ساخت تونل، المان‌های ۱۵ گرهی و ٦ گرهی وجود دارد. المان ۱۵ گرهی بسیار دقیق‌تر از المان ٦ گرهی است اما سرعت محاسبات را کم می‌کند. البته در این پژوهش از المان ۱۵ گرهی به‌علت افزایش دقت محاسبات استفاده شده است. در شکل ۸ الف مدل شبکه‌بندی المان محدود برای مقطع سه‌خطه نشان داده شده است. عرض این مدل ۱٤۰ متر و ارتفاع آن ۸۰ متر (این مدل به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که توزیع تنش‌ها به آن قسمت‌ها نرسد، البته در این‌جا کمی بیش‌تر در نظر گرفته شده است) مورد نظر است. در شکل ۸ ب مدل شبکه‌بندی المان محدود برای مقطع دو خطه ارائه شده است. به‌علاوه مدل سخت شونده برای خاک و مدل الاستیک نیز برای نگه‌داری تونل استفاده شده و به‌منظور مدل کردن لاینینگ از المان صفحه‌ای استفاده شده است. لازم به توضیح است که در این مدل‌سازی، شبکه‌بندی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2917]

متوسط تا ریز به‌کار رفته و شبکه‌بندی در نواحی نزدیک تونل برای افزایش دقت ریزتر می‌شود. در ادامه مدل مش‌بندی المان محدود و جابه‌جایی‌های قائم خاک برای مقاطع سه‌خطه و دوخطه نشان داده شده و نمودارهای نشست سطح زمین در اثر حفر تونل در مقاطع مختلف، ارزیابی شدند. برای مدل‌سازی بار ساختمان‌ها به‌ازای هر طبقه ساختمان باری معادل ۱۰ کیلو نیوتن بر مترمربع در نظر گرفته شده است [۳۲]. وضعیت تنش برجا، از پارامترهای مهم در مدل‌سازی خصوصاً تونل‌ها است. در این بررسی، مقدار پارامتر K برابر ۰/۸ در نظر گرفته شده است.

جدول ۵. مشخصات مکانیکی خاک (استخراج شده از داده‌های کالیبره شده)

عمق (m)	نوع خاک	C (kN/m^2)	φ^o	ψ^o	υ_{ur}	E_{50}^{ref} (kN/m^2)	E_{ur}^{ref} (kN/m^2)	E_{oed}^{ref} (kN/m^2)
۰-۱۰	GC	۲۷	٤۰	۱۰	۰/۲	٤۰۰۰۰	۱۲۰۰۰۰	٤۰۰۰۰
۱۰-۱۸	GM	۳۰	۳٥	٥	۰/۲	٤۸۰۰۰	۱٤۰۰۰۰	٤۸۰۰۰
۱۸<	SC	۲۷	٤۰	۱۰	۰/۲	٥٦۰۰۰	۱۷۰۰۰۰	٥٦۰۰۰

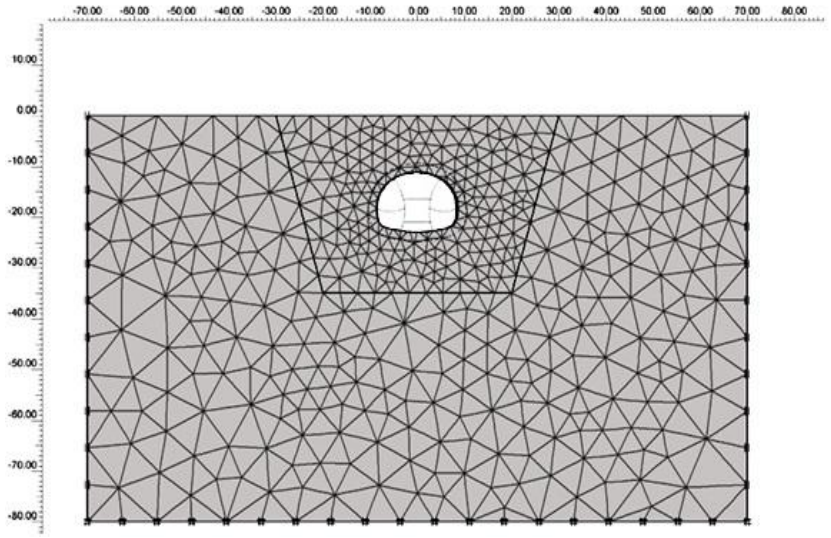
به‌منظور تطابق بیش‌تر مدل در نظر گرفته شده با شرایط واقعی پروژه، مراحل حفاری و خاک‌برداری با همان ترتیبی که در شکل ۳ نشان داده شده است، در مقاطع دوخطه و سه‌خطه مدل‌سازی شده و روباره‌های اضافی نیز در نرم‌افزار اعمال شده است. هم‌چنین جابه‌جایی‌های قائم زمین برای مقاطع سه‌خطه و دوخطه در شکل‌های ۹ الف و ب نشان داده شده است.

مقایسهٔ روش‌های مختلف ارزیابی نشست سطحی با نتایج نشست واقعی

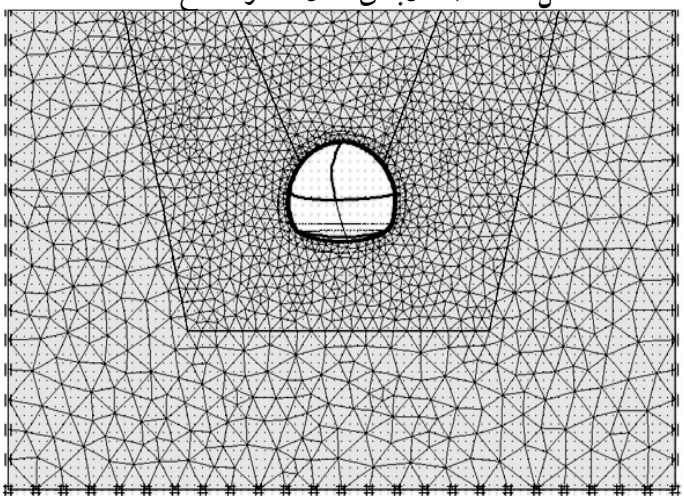
با استفاده از کشش‌سنج گمانه‌ای تغییر مکان زمین در طول محور گمانه اندازه‌گیری شده است. این کشش‌سنج‌ها در گمانه‌های قائم حفاری شده قرار می‌گیرند. هم‌چنین نقاط رفتارسنج سطحی نیز در قسمت فوقانی گمانه‌های کشیدگی سنج نصب شده و نشست سطح زمین با ترازگیری ارتفاع انجام خواهد شد. در مقاطع اشاره شده (شکل ۱) با توجه به سه روش نام‌برده میزان نشست سطحی تونل بررسی شده است. در ادامه با استفاده از روش عددی، تجربی و داده‌های واقعی منحنی‌های نشست–فاصلهٔ ترسیم شده و نتایج با یک‌دیگر مقایسه شده‌اند. همهٔ

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2917]

مشخصات مقاطع اعم از موقعیت، ضخامت خاک، روباره اضافی و دانه‌بندی در جدول ٦ به‌صورت خلاصه آورده شده است.

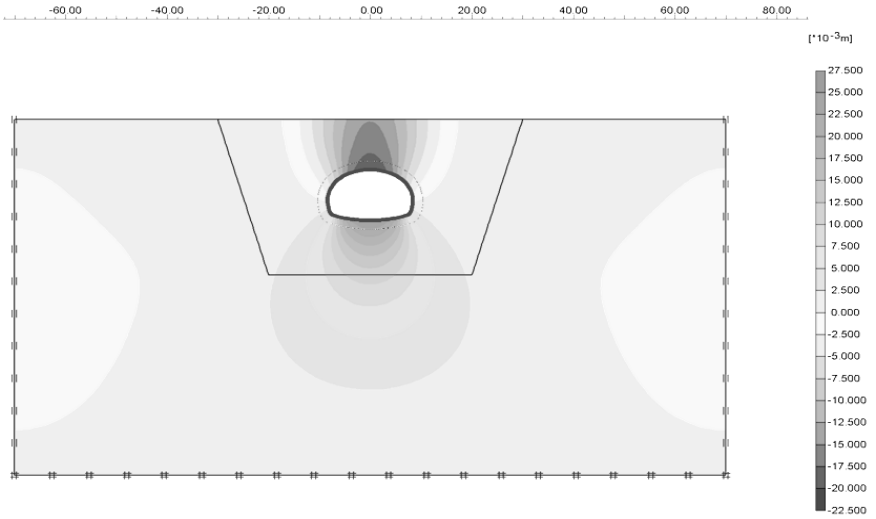


شکل ۸. الف) مدل‌بندی المان محدود مقطع سه‌خطه

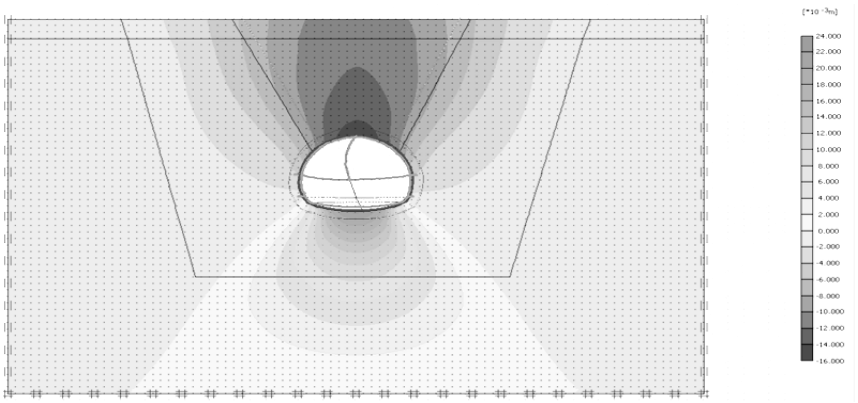


شکل ۸. ب) مدل‌بندی المان محدود مقطع دوخطه

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2917]



شکل ۹. الف) جابه‌جایی‌های قائم برای مقطع سه‌خطه



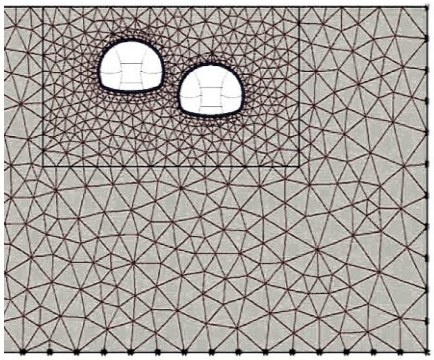
شکل ۹. ب) جابه‌جایی‌های قائم برای مقطع دوخطه

جدول ٦. مشخصات مقاطع بررسی شده در مسیر تونل نیایش

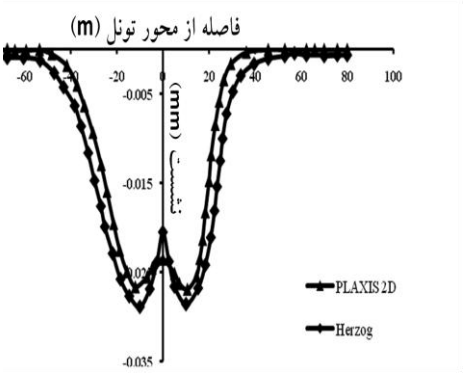
شماره مقطع	موقعیت	ضخامت خاک (متر)		روباره اضافی	دانه‌بندی
		تونل شمالی	تونل جنوبی		
CS-1	ورودی غربی تونل	۷/۵	۱۳	----	GM-GC
CS-2	۱+۷۲۵	----	۱٤	دارد	GC-SC
CS-3	۱+۷۷۰	۲۰	----	دارد	GC-SC
CS-4	۲+٤٥۰	----	۳۰	دارد	GC، SC و GM
CS-5	۲+٥۳۰	----	۱٤	دارد	GC، SC و GM

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2917]

در مقطع ۱، که در ورودی غربی تونل نیایش واقع شده است، فاصلهٔ بین دو تونل کم است و محدودهٔ میانی بین دو قسمت کناری تونل در حدود ٤ متر است، این مسئله باعث تأثیر حفر دو تونل بر میزان نشست خواهد شد. بنا بر این، این حالت وضعیتی بحرانی بر میزان نشست به‌حساب می‌آید. در شکل ۱۰، مدل مش‌بندی المان محدود دو تونل نشان داده شده است. در این مقطع داده‌های واقعی وجود ندارد، از طرفی ساختمانی در مسیر تونل واقع نشده است، اما به‌علت نزدیک بودن دو تونل به یک‌دیگر این مقطع نیز مدل‌سازی شده است. از این رو، فقط از روش تجربی و عددی استفاده شده است (شکل ۱۱). میزان نشست به‌دست آمده با روش تجربی بیش‌تر از مقادیر آن با روش عددی است. با توجه به این‌که روش‌های تجربی در تعداد پارامترهای مؤثر محدودیت دارند، از این رو، این مسئله سبب کاهش دقت این روش نسبت به روش عددی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که در مقطع ۲ اندازه‌گیری‌ها با نتایج حاصل از روش عددی هم‌خوانی بیش‌تری دارند (شکل ۱۲). در مقطع ۳، بیش‌ترین نشست اندازه‌گیری شده در هر سه روش، تقریباً با یک‌دیگر هم‌خوانی دارند (شکل ۱۳). در مقطع‌های ٤ و ۵، نشست‌های واقعی تطابق خوبی با روش عددی دارند (شکل ١٤ و ١٥). چنان‌که در تمامی مقاطع مشاهده می‌شود تعداد اطلاعات حاصل از نشست‌های واقعی، کم است و به‌سبب محدودیت داده‌های اندازه‌گیری شده، در این مقاله به‌ناچار به این تعداد بسنده شده است.

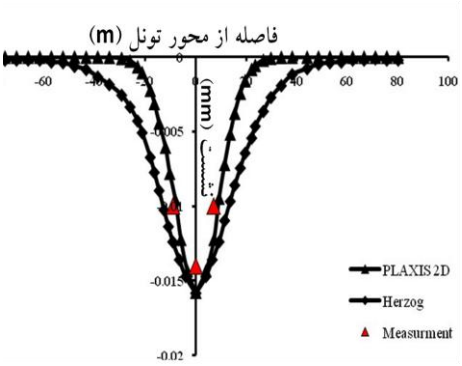


شکل ۱۰. مدل‌بندی المان محدود (کیلومتر۵۰۵+۰)

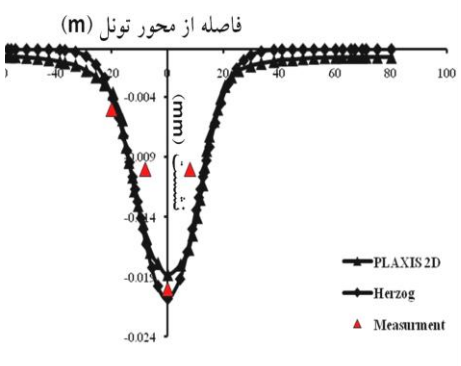


شکل ۱۱ . الگوی نشست برای مقطع CS-1

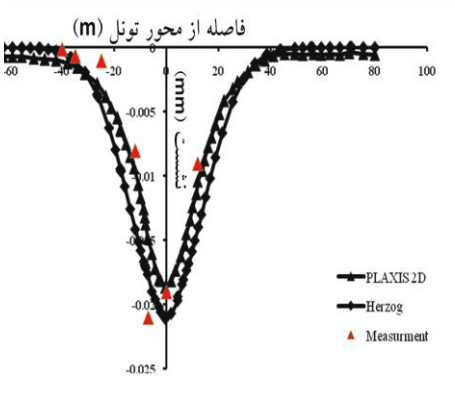
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2917]



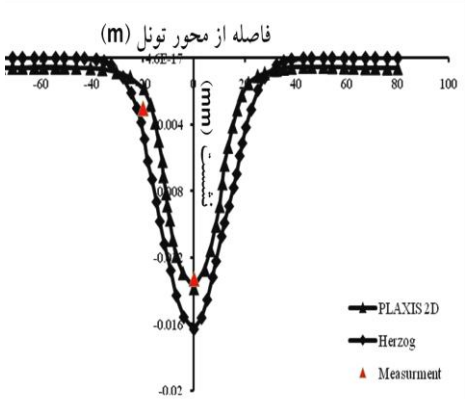
شکل ۱۲. الگوی نشست برای مقطع CS-2



شکل ۱۳. الگوی نشست برای مقطع CS-3



شکل ۱٤. الگوی نشست برای مقطع CS-4



شکل ۱۵. الگوی نشست برای مقطع CS-5

بحث

نتایج نشست به‌دست آمده از روش‌های تجربی، عددی و اندازه‌گیری‌های برجا در پنج مقطع از مسیر تونل بررسی شده‌اند. چنان‌که که نمودارهای نشست نشان می‌دهند، هر سه روش شامل اندازه‌گیری‌های برجا، تجربی و عددی، هم‌خوانی خوبی با هم دارند. اگرچه اندازه‌گیری‌های بر جا به استثناء یکی از مقاطع (مقطع ۳) هم‌خوانی بیش‌تری با نتایج روش عددی نشان می‌دهند. نتایج میانگین حداکثر نشست سطحی (S_{max}) در همهٔ مقاطع به‌روش تجربی، عددی و نشست‌های واقعی در جدول ۷ خلاصه شده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2917]

جدول ۷. مقایسهٔ مقادیر نشست سطحی در روش‌های مختلف

نام مقطع	S_{max} (mm) نشست واقعی (ابزار دقیق)	S_{max} (mm) روش تجربی	S_{max} (mm) روش عددی
CS-1	----	۲۹	۲٦
CS-2	۱٤	۱۷	۱۵/۸
CS-3	۲۰	۲۰	۱۸/۸
CS-4	۱۹	۲۱	۱۹
CS-5	۱۳/۳	۱٦	۱۳/۸

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، میزان نشست سطحی زمین با استفاده از انواع روش‌های تجربی، عددی و مقادیر اندازه‌گیری‌های برجا، بررسی شده است. روش تجربی به‌کار رفته، روش اوریلی و نیو (۱۹۸۲) و روش عددی به‌کار رفته، روش المان محدود با استفاده از نرم‌افزار $PLAXIS_{2D}$ است. بر اساس نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های برجا، روش‌های تجربی و روش عددی، حداکثر نشست ناشی از حفر تونل به‌ترتیب ۲۰، ۲۹ و ۲٦ میلی‌متر است که بیش‌تر از نشست مجاز (در محدودهٔ اخطار) است. در حالی که بر اساس بررسی تجربی و با استفاده از طبقه‌بندی ارسلبی و همکاران (۲۰۰۵)، ساختمان‌های منطقهٔ مورد نظر از نظر نشست، در محدودهٔ کم‌خطر قرار می‌گیرند. هم‌چنین با توجه به اعمال پوشش اولیه و پوشش نهایی در تونل نیایش، ضریب اطمینان افزایش یافته و باعث ایمنی بیش‌تر ساختمان‌های مسیر می‌شوند. از طرف دیگر، سیمانی شدن ثانویهٔ آبرفت‌های مسیر تونل سبب افزایش پایداری تونل می‌شود. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان می‌دهند که روش‌های عددی و تجربی، هم‌خوانی خوبی با یک‌دیگر دارند. البته نشست‌های واقعی با نتایج مدل‌سازی عددی هم‌خوانی بیش‌تری را نشان می‌دهند. هر چند که روش تجربی در مقاطع ۲، ٤ و ۵ میزان نشست را کمی بیش‌تر از اندازه‌گیری‌های برجا نشان می‌دهد. این مسئله می‌تواند به‌علت عدم دقت روابط ریاضی و نادیده گرفتن پارامترهای مقاومت برشی خاک (C و ϕ) در روابط تجربی باشد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2917]

تشکر و قدردانی

از مهندسان مشاور پژوهش عمران راهوار و دکتر محمدعلی ارجمند که نویسندگان را در این تحقیق از راهنمایی‌های خود بهره‌مند کرده‌اند، قدردانی می‌شود.

منابع

1. Mahmutoglu Y., "Surface subsidence induced by twin subway tunnelling in soft ground conditions in Istanbul", Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol. 70, No. 1 (2011) 115-131.
2. Ng C.W.W., Lee K.M., Tang D.K.W., "Three-dimensional numerical investigations of new Austrian tunnelling method (NATM) twin tunnel interactions", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 41, No. 3 (2004) 523-539.
3. Schmidt B., "Prediction of settlements due to tunnelling in soil: three case histories", Rapid Excavation and Tunnelling Conference Proceedings (1974) 1179-1199.
4. Ercelebi S.G., Copur H., Bilgin N., Feridunoglu C., "Surface settlement prediction for Istanbul metro tunnels via 3D FE and empirical methods", Tunnelling and Underground Space Technology, London, England (2005) 163-169.
5. Darabi A., Ahangari K., Noorzad A., Arab A., "Subsidence estimation utilizing various approaches-A case study: Tehran No. 3 subway line", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 31 (2012) 117-127.

۶. آقانباتی ع.، *زمین‌شناسی ایران*، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور(۱۳۸۳).

۷. مهندسان مشاور پژوهش عمران راهوار، *گزارش بررسی‌های ژئوتکنیک و مهندسی پی* (۱۳۸۸).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2917]

۸. بربریان م.، قریشی م.، ارژنگ ا.، مهاجر اشجعی ا.، *پژوهش و بررسی ژرف نو زمین ساخت و خطر زمین‌لرزه*، گسلش در گسترهٔ تهران و پیرامون. گزارش شمارهٔ ۵۶ سازمان زمین‌شناسی کشور، چاپ دوم (۱۳۷۱).

9. Sauer G., Gold H., "NATM ground support concepts and their effects on contracting practices, In: Proceedings of the 9th Rapid Excavation and Tunnelling Conference (RETC)", Los Angeles (1989) 67-86.

10. McWilliam F., "Jet Setting under Bonn", Tunnel and Tunnelling, Vol. 23, No. 4 (1991) 29-31.

11. Murphy P., "Design and Construction of the A20 Round Hill Tunnels", Tunnels and Tunnelling (1993) 23-25.

12. Farias M.M., Junior A.H.M., Assis A.P., "Displacement control in tunnels excavated by the NATM: 3-D numerical simulations", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 19 (2004) 283-293.

13. Yoo C.S., Shin H.K., "Behavior of tunnel face pre-reinforced with sub horizontal pipes", North American Tunnelling (2000) 463-468.

14. Yao D. T.C., Wu C.H., Chang Y. H., "An introduction to design and analysis of pipe roof in soft clay, 4th Cross Strait Seminar on Tunnel and Underground Construction" (2004).

15. O'Reilly M.P., New B.M., "Settlements above tunnels in the United Kingdom their magnitude and prediction", Proceedings of Tunnelling 82 Symposium, Brighton (1982) 173-181.

16. Peck R.B., "Deep excavation and tunnelling in soft ground", State of the Art. 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico (1969) 225-290.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2917]

17. Oteo C. S., Sagaseta C., "Some spanish experiences of measurement and evaluation of ground displacements around urban tunnels", geotechnical aspects of undergoing construction in soft ground, (ed. Mair, R.J. and Taylor, R.N.), London (1996) 731-736.
18. Loganathan N., Poulos H.G., "Analytical prediction for tunnelling-induced ground movements in clays", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,Vol. 124, No. 9 (1998) 846-856.
19. Selby A.R., "Tunnelling in soil-ground movements and damage to buildings in Workington", UK, Geotech. and Geo Eng, Vol. 17 (1999) 351-371.
20. Chou W.I., Bobet A., "Predictions of ground deformations in shallow tunnels in clays", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 17 (2002) 3-19.
21. Vahdatirad M.J., Ghodrat H., Firuzian S., Barari A., Torabi M., "Analysis of underground market settlement in Tabriz urban railway, European Journal of Scientific Research, Vol. 36 (2009) 595-605.
22. Hasanpour R., Chakeri H., Ozelik Y., Denek H., "Evaluation of surface Settlements in the Istanbul Metro in terms of analytical, numerical and direct measurements", Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol. 3 (2012) 499-510.
23. Arioglu E., "Surface movements due to tunnelling activities in urban areas and minimization of building damages", Short Course, Istanbul Technical University, Mining Engineering Department (1992).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2917]

24. Glossop N.H., "Soil deformation caused by soft ground tunnelling", Ph.D. Thesis, University of Durham (1978).

25. Herzog M., "Surface subsidence above shallow tunnels", Bautechnik, Vol. 64, No. 11 (1985) 375-377 (in German).

۲۶. میرمیرانی ش.، *تحلیل نشست زمین در اثر حفر تونل‌های مترو*، پایان‌نامهٔ کارشناسی‌ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان (۱۳۸۰).

27. Chakeri H., Hasanpour R., Hindistan M. A., Unver B., "Analysis of interaction between tunnels in soft ground by 3D numerical modeling", Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol. 70, No. 3 (2010) 439-448.

۲۸. شریعتمداری ن.، فرزانه ا.، *بررسی نشست سطح زمین در اثر حفر تونل مترو در تهران*، مجموعه مقالات پنجمین کنفرانس تونل ایران، تهران، دانشکدهٔ فنی، دانشگاه تهران (۱۳۸۰) ۲۶۷,-۲۶۵

۲۹. وفاییان م.، *ویژگی‌های نشست زمین در اثر حفر تونل‌های کم‌عمق*، مجموعه مقالات پنجمین کنفرانس تونل ایران، تهران (۱۳۸۰) ۳۱۳-۳۲۱.

30. Manual PLAXIS, "Finite element code for soil and rock plasticity", Delft University of Technology, Netherlands.

31. Mair, R.J., Taylor, R.N., Burland, J.B., "Prediction of ground movements and assessment of risk of building due to bored tunnelling", Mair and Taylor, Balkema, Rotterdam (1996) 713-718.

۳۲. حیدری م. ر.، وفاییان م.، شریعتمداری ن.، *تأثیر شیب سطح زمین، بار خارجی و شکل مقطع تونل بر مقدار نشست زمین حاصل از حفر تونل‌های خاکی*، ششمین کنفرانس تونل، دانشکدهٔ عمران دانشگاه علم و صنعت ایران (۱۳۸۲).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.2.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2917]