بررسی آزمایشگاهی تأثیر درصد تراکم بر نشست ناشی از تونل سازی تمام مقطع در ماسه

مهرداد امامی تبریزی*، امین عبدلی فاضل، سالار فرجی؛
دانشگاه سهند، دانشکدهٔ مهندسی عمران، تبریز

تاریخ: دریافت ۹٤/۱۱/۲۳ پذیرش ۹۵/۰٦/۰٦

چکیده

حفر تونل در زمین‌های نرم موجب تغییر در توزیع تنش‌های درجا و جابه‌جایی خاک پیرامون آن می‌شود. این جابه‌جایی‌ها ممکن است موجب بروز آسیب در سازه‌های سطحی و زیرسطحی مجاور تونل شود. بنابرین تخمین اندازه و منحنی نشست ناشی از حفر تونل و تعیین پارامترهای مؤثر بر آن اهمیت ویژه‌ای دارد. روش‌های تجربی و تحلیلی متعددی را محققان مختلف برای پیش‌بینی نشست زمین ارائه کرده‌اند. از جمله می‌توان به‌روش تجربی پک (۱۹٦۹)، به‌عنوان رایج‌ترین روش برای تخمین منحنی نشست زمین اشاره کرد. در مقاله حاضر با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی انجام یافته تحت شتاب گرانشی، به بررسی تأثیر درصد تراکم ماسه بر منحنی نشست می‌پردازیم. فرآیند حفر تونل، از طریق اعمال افت حجم در تراز تونل انجام می‌شود. سپس جابه‌جایی خاک با استفاده از روش پردازش تصویر اندازه‌گیری شده و در نهایت منحنی نشست به‌دست آمده با منحنی گوسی پک برازش می‌شود. با انجام آزمایش روی ماسه در دو حالت متراکم و شل و تحلیل نتایج به‌دست آمده مشخص شد با افزایش درصد تراکم، مقدار نشست کاهش یافته و منحنی نشست عریض‌تر می‌شود. هم‌چنین حجم افت زمین در اعماق مختلف با افت زمین موجود در تراز تونل برابر نیست.

واژه‌های کلیدی: نشست، تونل، تراکم ماسه، مدل‌سازی فیزیکی، تصویرپردازی

مقدمه

حرکات زمین یک مسئلهٔ مهم در حفر تونل‌ها است. حفر تونل باعث آزاد شدن تنش‌های درجا می‌شود. که تنها قسمتی از آن به‌وسیلهٔ دیواره تونل محدود می‌شود. در عمل به این علت

*نویسنده مسئول m.emami@sut.ac.ir

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.3.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.27]

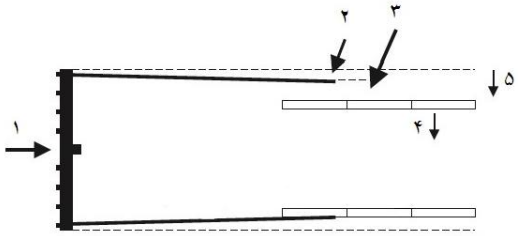
که حفاری و اعمال تکیه‌گاه کاملاً صلب هم‌زمان صورت نمی‌گیرد، شاهد مقداری تغییر شکل در عمق تونل هستیم. که احتمالاً باعث به‌وجود آمدن زنجیره‌ای از حرکات تا سطح زمین می‌شود. این حرکات با کم عمق‌تر شدن تونل محسوس‌تر می‌شود [۱]. هنگام حفر تونل در زمین‌های سخت (سنگی)، غیر از حالت زمین‌های با پتانسیل مچاله شوندگی، حرکت‌های زمین عموما مشکل ساز نیست و انتشار حرکت‌های زمین اطراف تونل جز در حالت‌های کم‌عمق و هنگامی که آب زیرزمینی موجود در لایهٔ نرم بالایی تحت تأثیر قرار گیرد، به سطح زمین نمی‌رسد[۲]. ولی در مورد زمین‌های خاکی، حفر تونل معمولاً موجب نشست لایه‌های خاک بالای تونل می‌شود. نشست‌ها عمدتاً به‌دلیل حرکت زمین به داخل ناحیهٔ حفاری شده، تغییر تنش‌ها و هم‌چنین تحکیم خاک‌های اطراف رخ می‌دهند.

در مناطق پر تراکم شهری، عموماً به‌علت کمبود فضا و یا ایجاد ارتباط بین مناطق مختلف شهری، تونل‌سازی در مجاورت سازه‌های موجود انجام می‌گیرد که ممکن است باعث آسیب به ساختمان‌های مجاور شود. بنابراین پیش‌بینی مقادیر و گستره این نشست‌ها، به‌منظور بهینه‌سازی تکنیک‌های حفاری تونل برای جلوگیری از آسیب رسیدن به سازه‌ها، ارزیابی آسیب‌های احتمالی به سازه‌های مجاور و پیش‌بینی اقداماتی نظیر دوغاب ریزی جبرانی برای کنترل نشست‌ها، اهمیت زیادی دارد. طی فرآیند حفاری تونل‌های مهار نشده یا قسمتی مهار شده، زمین اطراف تونل به‌علت آزاد شدن تنش، به داخل تونل حرکت می‌کند. بنابراین همواره حجم مصالح تولید شده از حفاری بیش از مقدار به‌دست آمده از تئوری است. این حجم اضافه با نام افت زمین[1] شناخته می‌شود و بر حسب میزان حجم تئوری حفاری بیان می‌شود. میزان افت زمین تابعی از نوع خاک، گام پیش‌روی تونل، قطر تونل، روش حفاری، سختی و نوع لاینینگ موقت و دائمی است [۳]. در مورد حفاری مکانیزه عوامل ایجاد افت زمین در شکل ۱ نشان داده شده است که عبارتند از: ۱. حذف فشار در جبهه کار تونل ۲. حفر بزرگ‌تر از شیلد جبههٔ کار به‌منظور تسهیل در حرکت شیلد ۳. فضای خالی بین سیستم حائل و زمین اطراف ٤. اعوجاج و تغییر شکل سیستم حائل تونل ۵. تحکیم خاک [٤]. در صورت اتخاذ فرایند صحیح

1. Ground Loss or volume Loss

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.3.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.27]

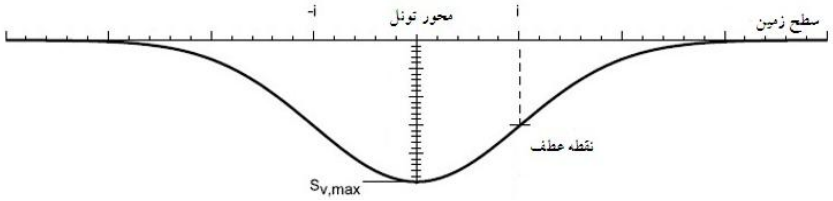
حفاری با ماشین حفاری تونل، می‌توان افت زمین را کنترل کرد. در حقیقت، در حفاری مکانیزه تونل، افت جبهه کار در صورت استفاده از فشار صحیح در جبههٔ کار خیلی محدود است و با تزریق به وقت و با فشار مناسب دوغاب می‌توان افت شعاعی را کنترل کرد. اما با همهٔ ملاحظات، یک مقدار حداقلی از افت زمین وجود دارد که مجموعاً غیرقابل اجتناب است.



شکل ۱ . عوامل ایجاد افت زمین در حفاری مکانیزه تونل

با توجه به اهمیت ذکر شده، محققان مختلفی به بررسی مسئلهٔ نشست سطحی زمین به‌علت تونل‌سازی پرداخته و روش‌هایی را ارائه کرده‌اند. یکی از رایج‌ترین روش‌ها، منحنی تجربی پک است که بر اساس تعدادی از مشاهدات و اندازه گیری‌های صحرایی ارائه شده است. پک و اشمیت (۱۹۶۹) منحنی عرضی نشست (شکل ۲) ایجاد شده در سطح زمین به‌علت تونل‌سازی را با تابع گوسی مدل کردند [۵].

$$s_x = s_{v\max} . e^{-x^2/2i^2} \qquad (۱)$$



شکل ۲. منحنی نشست سطح زمین در اثر حفر تونل

که در آن S_{vmax} میزان نشست سطح زمین بر محور طولی تونل، x فاصله افقی از محور تونل و i فاصله افقی از محور تونل تا نقطه عطف منحنی نشست است. حجم منحنی نشست در طول واحد (V_s) با انتگرال‌گیری از رابطهٔ (۱) بدین‌صورت به دست می‌آید:

$$V_s = \int S_V(x).dx = \sqrt{2\pi}.i.S_{v\max} \qquad (۲)$$

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.3.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.27]

تعداد چشم‌گیری از تحقیقات در این زمینه، شامل مشاهدات صحرایی و مدل‌های آزمایشگاهی به تخمین مقادیر i و S_{vmax} در زمین‌هایی با شرایط مختلف پرداخته شده است. به‌عنوان مثال مایر (۱۹۹۳) مقدار S_{vmax} را بدین‌صورت تخمین زد [٦]:

$$S_{V\max} = 0.313 V_L D^2 / i \qquad (۳)$$

که در آن V_L افت حجم، D قطر تونل و i فاصلهٔ افقی از محور تونل تا نقطه عطف منحنی نشست است.

تخمین‌هایی از مقادیر i به‌وسیلهٔ محققان مختلف در جدول ۱ آورده شده است [۷]. گرچه روش ارائه شدهٔ پک پایه‌ای برای کارهای محققان بعد از وی شد، ولی چنان‌که مشاهده می‌شود، روابط متعددی را محققان مختلف برای تعیین پارامتر i ارائه کرده‌اند. بنابراین در به‌کارگیری از رابطهٔ پک باید دقت کرد [۳].

مارشال و همکاران (۲۰۱۲) با انجام آزمایش‌های سانتریفیوژ به بررسی برخی پارامترهای مؤثر بر نشست در زمین‌های ماسه‌ای پرداختند و نشان دادند که منحنی نشست در ماسه تابعی از اندازهٔ تونل، عمق تونل و هم‌چنین میزان افت حجم است. آن‌ها در پژوهش‌های خود تأثیر

جدول ۱ . برخی از روابط ارائه شده برای محاسبه i در منحنی پک

محققان	موارد کاربرد	پارامتر i منحنی پک
گلاسپ (۱۹۷۸)	حفاری در خاک‌های چسبنده با نسبت عمق به قطر تونل بیش‌تر از ۲	$i = 0.5H$
اشمیت و کلاف (۱۹۸۱)	حفاری با شیلد در رس	$i = a(\frac{H}{2a})^{0.8}$
نیو و اریلی (۱۹۸۲)	حفاری با شیلد در خاک‌های چسبنده	$i = 0.43H + 1.1$
هرزگ (۱۹۸۵)	برای همهٔ انواع خاک	$i = 0.4H + 1.92$
رانکین (۱۹۸۸)	برای همهٔ انواع خاک	$i = KH$
اریگلو (۱۹۹۲)	حفاری با شیلد در رس	$i = 0.4H + 0.6$
اریگلو	برای همهٔ خاک‌ها	$i = 0.386H + 2.84$

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.3.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.27]

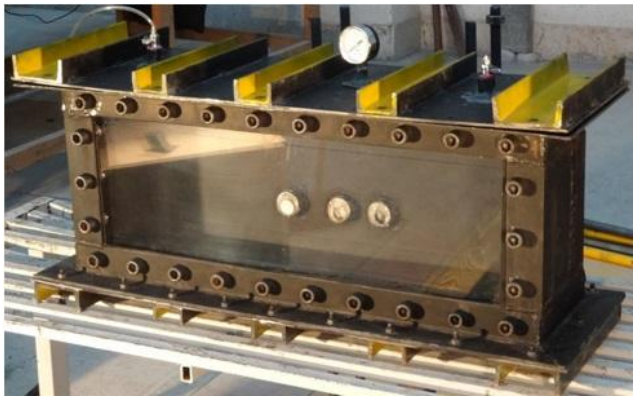
درصد تراکم ماسه را بر منحنی نشست بررسی نکرده و تمامی آزمایش‌هایشان را در ماسه متراکم با درصد تراکم ۹۰ درصد بررسی کردند [۸]. ژو و همکاران (۲۰۱٤) با انجام یک سری آزمایش‌های سانتریفوژ به‌بررسی تأثیر درصد تراکم ماسه بر منحنی نشست پرداختند. آن‌ها آزمایش‌هایشان را در سه حالت شل، متوسط و متراکم به‌ترتیب با درصد تراکم‌های ۵۰ ، ۷۰ و ۹۰ انجام داده و نشان دادند که با کاهش درصد تراکم مقدار نشست افزایش یافته و منحنی نشست باریک‌تر می‌شود [۹]. در مقاله حاضر با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی انجام یافته به بررسی تأثیر درصد تراکم تحت شتاب گرانش پرداخته شده است.

مدل‌سازی فیزیکی انجام یافته

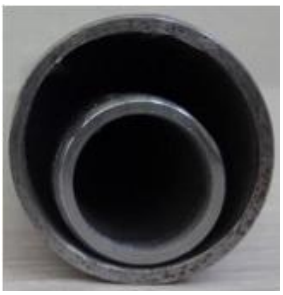
دستگاه ساخته شده برای بررسی نشست‌های ناشی از حفر تونل در تونل‌های تک و دوقلو، شامل یک محفظه فولادی با ابعاد داخلی ۱۵×۳۵×۸۵ سانتی‌متری است که جدار بیرونی آن به‌منظور اندازه‌گیری جابه‌جایی‌ها شفاف و از جنس پلکسی گلاس با ضخامت ٤ سانتی‌متری است (شکل۳). مرکز تونل‌ها تقریباً در فاصلهٔ ۳ برابر قطر از کف دستگاه قرار گرفته‌اند. در داخل دستگاه مکان لازم برای جاسازی سه تونل تعبیه شده که امکان بررسی تونل‌های دوقلو در سه فاصله متفاوت را می‌دهد.

برای مدل کردن افت زمین ناشی از حفر تونل، از لوله‌های تودرتو (شکل ٤) استفاده شده است. بدین‌صورت که پس از آماده‌سازی نمونه در داخل دستگاه آزمایش، لوله خارجی با قطر بیش‌تر، بیرون کشیده شده و باعث حرکت خاک اطراف خود می‌شود. چنان‌که در شکل نیز نشان داده شده است، لوله داخلی تقریباً چسبیده به لوله بزرگ‌تر قرار می‌گیرد تا هندسهٔ افت اعمالی به تونل، مشابه حالت واقعی باشد. بنابراین با تغییر قطر لوله‌ها علاوه بر تغییر در قطر تونل می‌توان افت زمین‌های متفاوتی نیز در خاک اعمال کرد. به‌منظور ثابت کردن لوله‌های با قطر کوچک یک تکیه‌گاه در پشت دستگاه تعبیه شده بود و به‌منظور جلوگیری از ریزش ماسه به داخل گپ بین دو لوله، این فاصله پوشانده می‌شود.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.3.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.27]



شکل ۳. دستگاه ساخته شده



شکل ٤. لوله‌های تودرتو برای مدل کردن افت زمین ناشی از حفر تونل

با توجه به ماهیت مسئله، به‌منظور اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های خاک، از تکنیک پردازش تصویر بهره گرفته شد. بدین منظور در حین انجام آزمایش با استفاده از یک دوربین دیجیتالی، از جابه‌جایی‌های خاک فیلم‌برداری شده و سپس فیلم به‌دست آمده با استفاده از نرم‌افزار متلب به عکس‌های متوالی تبدیل شد. در مرحلهٔ بعد با استفاده از نرم‌افزار GeoPIV نشست‌های سطح خاک تعیین شد [۱۰]. هم‌چنین با استفاده از کدنویسی، ناحیهٔ تحت تأثیر قرار گرفته، پارامترهای نشست و حجم نشست در سطح و اعماق مختلف تعیین شد و منحنی‌های مورد نظر برازش شد.

به‌منظور ارتقای کیفیت بافت تصویر، تصمیم به استفاده از ذرات رنگی شد. برای ایجاد دانه‌های رنگی با توجه به بزرگ بودن دانه‌های رنگی پلاستیکی موجود در بازار (پیگمنت)،

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.3.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.27]

تصمیم به رنگ کردن خود ماسه شد (شکل ۵) و پس از بررسی چند روش، از روش رنگ جوهر استفاده شد.

شکل۵. ماسه رنگ شده با روش جوهر

آزمایش‌های انجام یافته و نتایج به‌دست آمده

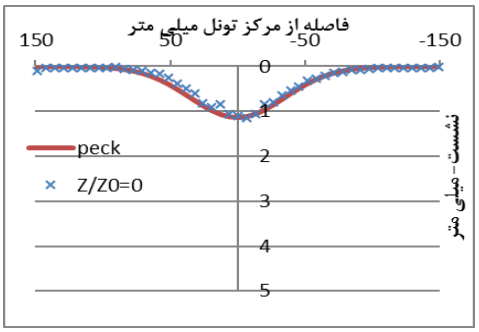
حالت ماسه متراکم

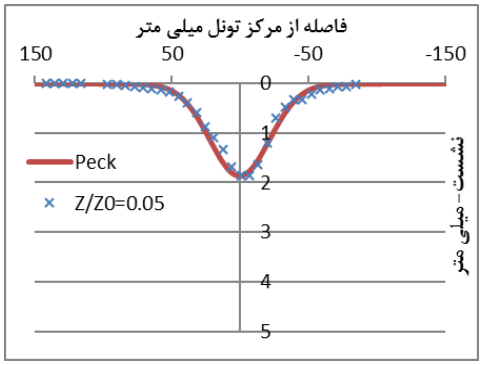
این آزمایش روی ماسه ریزدانه سیلیسی با D_{50} برابر با ۰/۳٤ میلی متر و چگالی ویژه برابر با ۲/٦۲ در حالت خشک و تراکم نزدیک به ۱۰۰٪ انجام شده است. برای ماسه استفاده شده ضریب یک‌نواختی (C_u) تقریباً برابر ۲ و ضریب دانه‌بندی (C_c) در حدود ۱ است که نشان‌گر ماسه بد دانه‌بندی شده است. منحنی دانه‌بندی در شکل ٦ آورده شده است. برای ایجاد تراکم نزدیک ۱۰۰٪، نمونه در لایه‌هایی با وزن برابر به‌داخل محفظه منتقل و با استفاده از ضربات میله متراکم شده است. به‌منظور بررسی نشست حین حفاری از یک لوله با قطر خارجی حدودا برابر با ٤۱ میلی متر استفاده شده است. افت زمین اعمالی تقریباً برابر ٦۰٪ است. نسبت عمق به قطر تونل نیز در حدود ۳ است. در شکل ۷ جابه‌جایی‌های قائم اندازه‌گیری شده و منحنی پک متناظر با بیشینه جابه‌جایی در ٤ عمق مختلف از سطح زمین (Z) نشان داده شده است (Z_0 عمق مرکز تونل از سطح است). چنان‌که ملاحظه می‌شود منحنی پک به‌دست آمده از این طریق، نتایج نزدیکی را پیش‌بینی می‌کند. عدم تقارن مشاهده شده در این نمودار و نمودارهای بعدی، ناشی از عدم قرارگیری دقیق لوله‌ها در حالت متقارن و یا تراز نبودن کامل سطح ماسه است.

شکل ۸ ترازهای جابه‌جایی نرمال را برحسب عمق نرمال شده (برحسب عمق تونل) و فاصله نرمال شده (برحسب قطر تونل) نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که اکثر جابه‌جایی قائم رخ داده در سطح، محدود به فاصله ۱/۲۵ برابر قطر از مرکز تونل است.

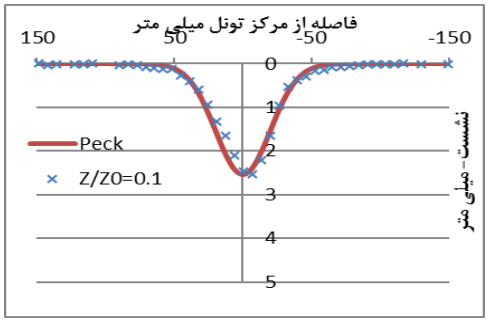
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.3.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.27]

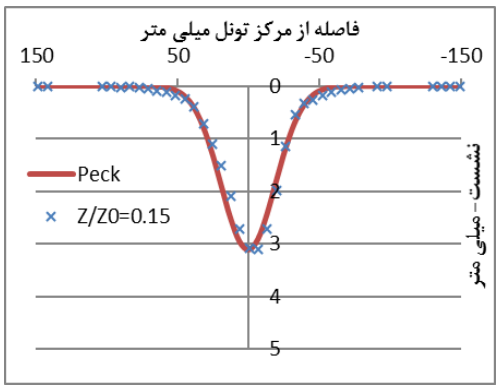
شکل ٦. دانه‌بندی ماسه آزمایش شده



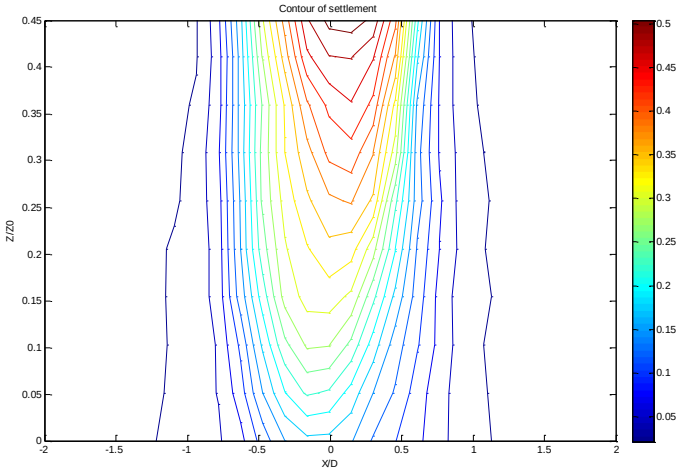


[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.3.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.27]





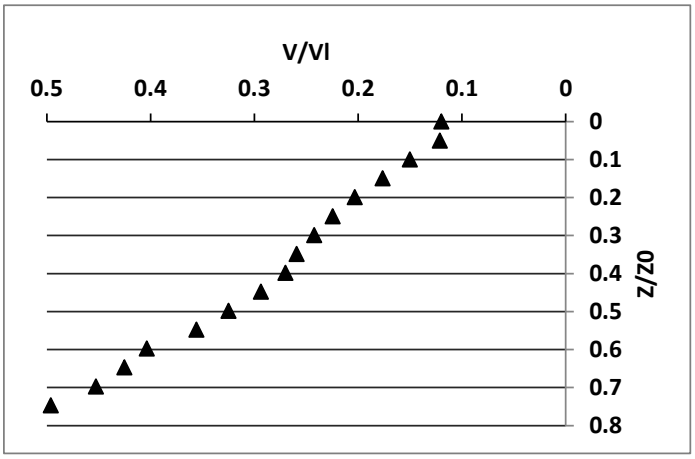
شکل ۷. نشست‌های ثبت شده و منحنی پک برازش شده برای چهار عمق مختلف برای ماسه متراکم



شکل ۸ . منحنی‌های میزان جابه‌جایی قائم در اعماق مختلف برای ماسه متراکم

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.3.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.27]

شکل۹ تغییرات نسبت افت زمین در ترازهای مختلف نرمال شده (بر حسب عمق تونل) را نشان می‌دهد. در این منحنی میزان افت زمین در تراز مورد نظر (*V*) بر حسب افت زمین در تراز تونل (*Vl*) بی‌بعد شده است. نتایج نشان‌دهندهٔ کاهش چشم‌گیر میزان افت زمین با نزدیک شدن به سطح زمین است که این روند تقریباً خطی است. در واقع نمونه خاک از خود یک رفتار اتساعی نشان داده و افت ایجاد شده را تا حدی جبران می‌کند.



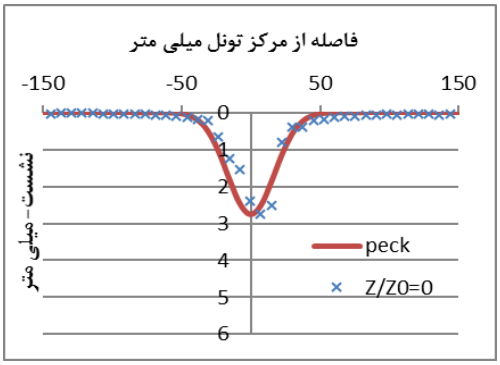
شکل ۹. تغییرات افت زمین نرمال با عمق نرمال برای ماسه متراکم

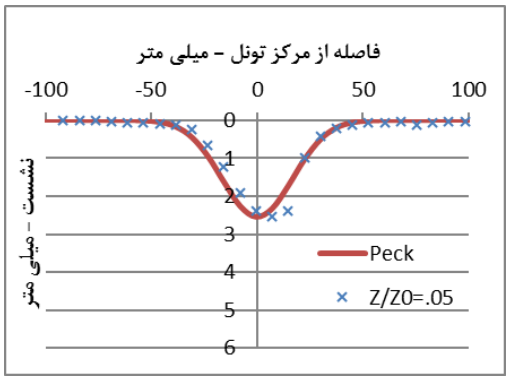
حالت ماسه شل

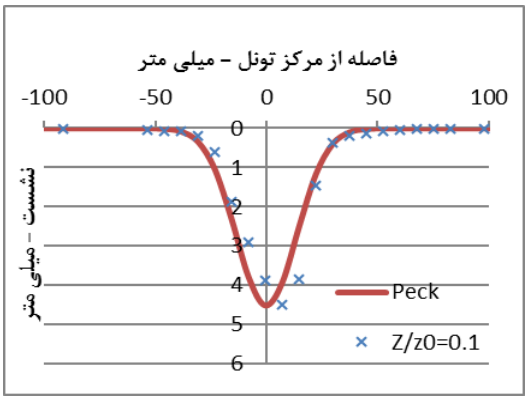
این آزمایش روی ماسه قبل در حالت شل انجام گرفت. برای به‌دست آوردن حالت شل در ماسه، از روش بارش یا ریختن ماسه با استفاده از الک استفاده شد. با توجه به این که ماسه استفاده شده، بد دانه‌بندی شده است، ممکن است تراکم نسبی در این حالت نیز زیاد باشد. به هرحال منظور ما از حالت شل، بیش‌تر متوجه نحوهٔ آماده‌سازی ماسه به‌شرحی که گذشت، است. در شکل ۱۰ مقادیر مشاهده شده نشست و منحنی پک برازش شده برای ٤ عمق مختلف نشان داده شده است. چنان‌که ملاحظه می‌شود نتایج مشاهده شده تقریباً از الگوی منحنی پک تبعیت می‌کنند. چنان‌که ملاحظه می‌شود در این حالت منحنی نشست عرض کم‌تری دارد و مقادیر بزرگ‌تری از جابه‌جایی و افت در مقایسه با حالت متراکم مشاهده

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.3.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.27]

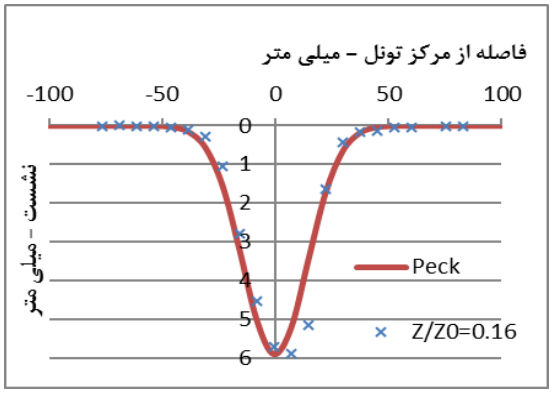
می‌شود که مشابه نتایج به‌دست آمده توسط ژو و همکارانش (۲۰۱٤) با استفاده از سانتریفیوژ است[۹].





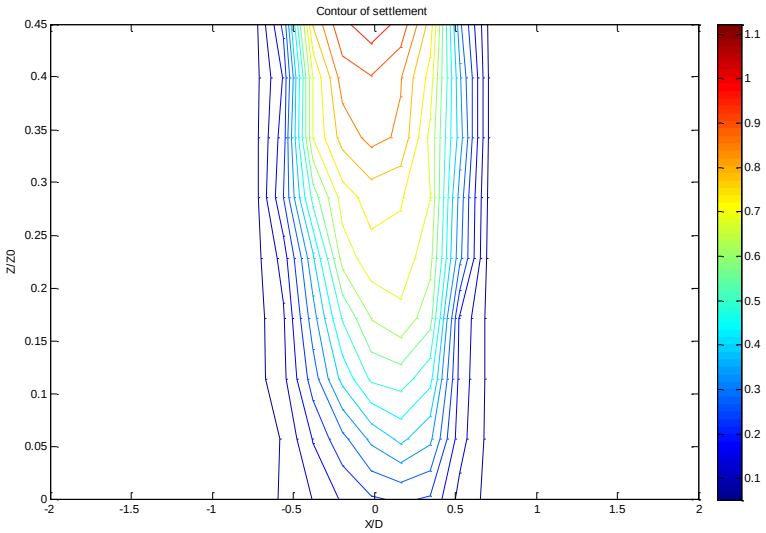


[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.3.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.27]



شکل ۱۰. نشست‌های ثبت شده و منحنی پک برازش شده برای چهار عمق مختلف برای ماسه شل

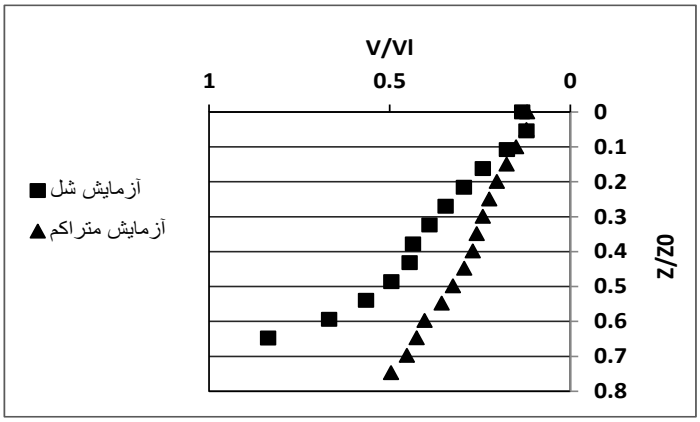
شکل۱۱ ترازهای جابه‌جایی نرمال را برحسب عمق نرمال نشان می‌دهد. چنان‌که ملاحظه می‌شود همه جابه‌جایی قائم رخ داده در سطح تقریباً محدود به فاصلهٔ عرضی ۰/٦ برابر قطر از مرکز تونل است که در مقایسه با عدد ۱/۲۵ برابر قطر مربوط به حالت متراکم، منحنی‌های باریک تری را نشان می‌دهد. میزان افت زمین در اعماق مختلف، برای دو آزمایش حالت شل و متراکم در **شکل** ۱۲ مقایسه شده است. با توجه به این نکته که در هر دو آزمایش، فرض بر اعمال شرایط مرزی جابه‌جایی یک‌سان در دیواره تونل است ولی در عمل مقداری خطا داریم،



شکل ۱۱. منحنی‌های میزان جابه‌جایی قائم در اعماق مختلف برای ماسه شل

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.3.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.27]

میزان افت زمین را در هر آزمایش، بر حسب افت زمین در تراز تونل در همان آزمایش، بی‌بعد کرده‌ایم تا امکان مقایسه نتایج فراهم شود. چنان‌که ملاحظه می‌شود در آزمایش شل حجم بیش‌تری از افت زمین به ترازهای بالاتر از تونل منتقل شده و در واقع اتساع خاک کم‌تر بوده است.



شکل ۱۲. مقایسهٔ افت زمین در اعماق مختلف برای آزمایش شل و متراکم

نتیجه‌گیری

- اگرچه منحنی گوسی ارائه شده توسط پک، نشست قائم سطحی و زیرسطحی در ماسه خشک را به‌طور قابل قبولی پیش‌بینی می‌کند ولی در انتخاب پارامترهای آن باید دقت نمود. در غیر این صورت ممکن است نتایج غیرواقعی به‌دست آید.
- با توجه به تغییر حجم ماسه زهکشی شده هنگام تغییر شکل، حجم افت زمین در اعماق مختلف با حجم افت زمین موجود در تراز تونل برابر نیست. بنابراین استفاده از حجم افت زمین موجود در تراز تونل (Vl) برای برازش منحنی نشست ممکن است منجر به نتایج دور از واقع شود.
- منحنی نشست ناشی از حفر تونل در ماسه شل، در مقایسه با منحنی نشست ماسه متراکم عرض کم‌تری دارد.
- هنگام حفاری در ماسه با تراکم نسبی کم، مقادیر جابه‌جایی و افت در مقایسه با حالت متراکم بزرگ‌تر است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.3.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.27]

منابع

1. Guglielmetti V., Grasso P., Mahtab A., Xu Sh., "Mechanized Tunnelling in Urban Areas", London: Taylor & Francis Group. ISBN-13: 978-0-415-42010-5 (2008).
2. Chapman D., Metje N., Stärk A., "Introduction to Tunnel Construction" Taylor & Francis e-Library, ISBN-13: 978-0-203-89515-3 (2010).
۳. عبدلی فاضل ا.، "بررسی نشست در زمین‌های نرم به علت تونل سازی مکانیزه"، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند تبریز (۱۳۹۳).
4. Pinto F., Zymnis D., Whittle A., "Ground Movements due to Shallow Tunnels in Soft Ground. II: Analytical Interpretation and Prediction", J. Geotech, Geoenviron, Eng 140 (4) (2013).
5. Peck R. B., "Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground", Proc. 7' Conf on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, (1969) 225-290
6. Mair R. J., Taylor R., Burland J., "Prediction of ground movements and assessment of risk of building damage due to bored tunneling" Conference on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, London (1996) 713-718
7. Loganathan N., "An Innovative Method for Assessing Tunnelling-Induced Risks to Adjacement Structures", PB William Barclay Parsons Fellowship Monograph 25 (2011).
8. Marshall A. M., Farrell R. P., Klar A., Mair R. J., "Tunnels in sands the effect of size, depth, and volume loss on greenfield displacements" Geotechnique 62 (5), (2012) 385-399
9. Zhou B., Marshall A., Yu H., "Effect of Relative Density on Settlements above Tunnels in Sands", Tunneling and Underground Construction, (2014) 96-105
10. White D. J., Take W. A., Bolton M. D., "Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry", Geotechnique, 53 (7) (2003) 619-631

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.3.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.27]