# بررسی تأثیر عوامل زمین‌شناسی مهندسی بر پارامترهای مرتبط با ارزیابی تجربی نشست زمین در اثر حفر تونل ابوذر، تهران

محمدرضا باغبان گل‌پسند، محمدرضا نیکودل*، علی ارومیه‌ای؛
دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده علوم، گروه زمین شناسی مهندسی

تاریخ: دریافت ۹۳/۷/۱٤ پذیرش ۹۵/۱/۱۸

## چکیده

از جمله موضوع‌های اساسی در ارتباط با تونل‌های کم‌عمق در محیط‌های شهری، نشست زمین در اثر حفر تونل و تأثیر عوامل زمین‌شناسی مهندسی بر آن است. از روش‌های بررسی این مسئله روش تجربی است و پارامترهای تجربی VL و k از جمله مهم‌ترین پارامترهای دخیل در این روش است که مقدار آن‌ها با توجه به خصوصیات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی مصالح تخمین زده می‌شود. در پژوهش حاضر پارامترهایی با توجه به بررسی‌های قبلی محققان مختلف، به‌صورت فرضی در نظر گرفته‌شده و نشست زمین در مسیر تونل ابوذر براساس این مقادیر فرضی پیش‌بینی شده است. نتایج به‌دست آمده با نشست واقعی زمین که هم‌زمان با حفاری تونل مذکور اندازه‌گیری شده است، مقایسه شد. با توجه به این‌که نشست واقعی زمین کم‌تر از مقدار پیش‌بینی‌های اولیه بوده است، نتیجه‌گیری شد که یا VL واقعی کم‌تر از مقدار فرضی است و یا k واقعی بیش‌تر از مقدار فرضی است. با توجه به وابستگی هر دو پارامتر به چسبندگی خاک نتیجه می‌گیریم که باید عاملی باعث افزایش چسبندگی مصالح شده باشد که در این ارتباط سیمانی‌شدگی طبیعی در آبرفت‌های تهران به‌عنوان تأییدی بر فرضیه مذکور تلقی شده، در نتیجه این عامل باعث افزایش چسبندگی و کاهش نشست زمین شده است. برای بررسی سیمانی‌شدگی طبیعی، تفاوت در نتایج آزمایش‌های برجا و آزمایشگاهی برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی، بررسی شده است و چسبندگی زیاد به‌دست آمده از آزمایش‌های برش برجا نسبت به آزمایش‌های آزمایشگاهی به‌عنوان شاهدی برای سیمانی‌شدگی مصالح آبرفتی موجود در مسیر تونل ابوذر مورد استناد قرار گرفت.

**واژه‌های کلیدی** نشست زمین، حفر تونل مکانیزه، پارامترهای تجربی VL و k، تونل ابوذر، سیمانی‌شدگی طبیعی

* **نویسنده مسئول** nikudelm@modares.ac.ir

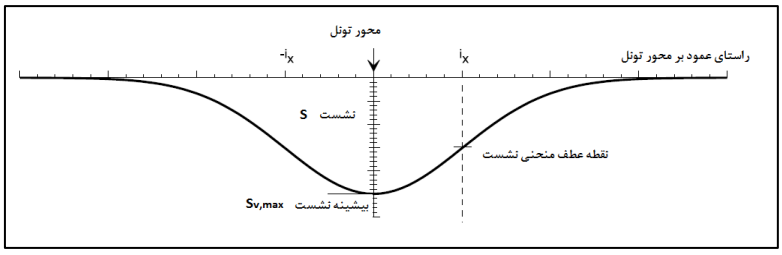
[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.6.0 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3559 ]

## مقدمه

حفر تونل در اعماق کم و در زمین‌های خاکی منجر به تغییر سیستم توزیع تنش‌ها و هم‌گرایی دیواره و دهانهٔ تونل شده و باعث ایجاد جابه‌جایی‌های افقی و عمودی در اطراف تونل می‌شود. این جابه‌جایی‌ها در نهایت تغییر شکل‌هایی در سطح زمین ایجاد می‌کند که تحت عنوان پدیدهٔ "نشست زمین در اثر حفر تونل" شناخته می‌شود. پدیدهٔ مذکور می‌تواند موجب آسیب رساندن به سازه‌های موجود در سطح زمین شود. بنابراین پیش‌بینی و تخمین میزان نشست زمین در اثر حفر تونل به‌خصوص در محیط‌های شهری که مستقیماً با زندگی مردم در ارتباط است، اهمیت ویژه‌ای دارد. عوامل زیادی می‌توانند بر میزان و نوع نشست زمین در اثر حفر تونل تأثیرگذار باشند که خصوصیات زمین‌شناسی و ژئوتکنیک مصالح یکی از مهم‌ترین این عوامل به‌شمار می‌رود. در تحقیق حاضر نشست زمین در اثر حفر تونل ابوذر و عوامل مؤثر بر آن بررسی شده است.

## نشست زمین در اثر حفر تونل

بررسی‌های نسبتاً زیادی در مورد نشست زمین ناشی از حفر تونل انجام شده است. یکی از اولین و اساسی‌ترین بررسی‌ها در ارتباط با این پدیده را، پک[1] (۱۹۶۹) با استفاده از اطلاعات حدود ۲۰ مورد اجرایی که در اختیارش بود انجام داد [۱]. طی این بررسی‌ها، شکل گودی نشست در مقطع عرضی با یک منحنی توزیع نرمال تقریب زده می‌شود و حداکثر نشست زمین دقیقاً در راستای محور تونل در سطح زمین اتفاق می‌افتد. این منحنی در شکل ۱ نشان داده شده است.




**شکل ۱. نمایی کلی ازگودی نشست در نیمرخ عرضی [۲]**

1. Peck

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.6.0 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3559 ]

روش پِک (۱۹۶۹) از متداول‌ترین و کاربردی‌ترین روش‌های موجود در تحلیل و بررسی پدیدهٔ نشست زمین در اثر حفر تونل است. روش‌های متعددی برای بررسی و ارزیابی نشست زمین در اثر حفر تونل پیشنهاد شده است که از جمله متداول‌ترین آن‌ها می‌توان به‌روش‌های تجربی (نیمه‌تجربی)، روش‌های تحلیلی و روش‌های عددی اشاره کرد. برای انجام تحقیق حاضر از روش‌های تجربی و تحلیلی استفاده شده است. در ارتباط با استفاده نکردن از روش‌های عددی باید اشاره کرد که ضمن تأکید بر کارایی این روش‌ها در تحلیل اغلب قریب به اتفاق مسائل ژئوتکنیک از جمله ارزیابی نشست زمین در اثر حفر تونل و انجام تحقیقات وسیع در این خصوص، مدل کردن پارامترهای تجربی VL و k، که موضوع اصلی تحقیق حاضر هستند، با استفاده از روش‌های عددی با عدم‌قطعیت‌هایی همراه است. با در نظر گرفتن این مسئله و با توجه به این‌که تاکنون بررسی‌های نسبتاً اندکی در خصوص روش‌های تجربی و تحلیلی، به‌ویژه با رویکرد تأثیر شرایط زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل و مصالح موجود در آن بر نشست زمین ناشی از حفر تونل انجام شد است، در پژوهش حاضر از روش‌های تجربی و تحلیلی استفاده شده است.

## تحلیل نشست به‌روش تجربی

اساس این روش بر پژوهش‌های پِک استوار است و با توجه به مشاهدات عینی به‌دست آمده است. از جمله این پژوهش‌ها می‌توان به بررسی‌های اُریلی و نیو [۳]، هم‌چنین تحقیقات آتوِل و وودمَن [٤]، آتوِل و همکاران [۵]، که همگی برای تأیید و تکمیل کارهای پِک بوده است، اشاره کرد. طبق نظر پک مقدار نشست در هر نقطه به فاصله x از محور طولی تونل و عمود بر آن را می‌توان از رابطهٔ (۱) محاسبه کرد. پارامترهای موجود در این رابطه در شکل ۱ نشان داده شده است.

$$S = S_{V\max} . \exp\left(\frac{-x^2}{2i_x{}^2}\right) \qquad (۱)$$

S: نشست سطحی در نقطه‌ای به‌فاصلهٔ x از محور تونل، $S_{v,max}$: حداکثر نشست در x=۰ و $i_x$: فاصلهٔ محل نقطه عطف یا بیش‌ترین شیب منحنی نشست از محور تونل است.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.6.0 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3559 ]

### تعیین حداکثر نشست

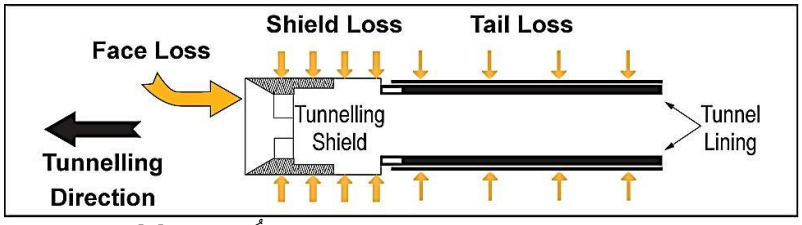
رابطهٔ (۲) را اُریلی و نیو [۳] برای محاسبهٔ حداکثر نشست سطحی ارائه کردند و مِیر [٦] نیز بر آن تأکید کرده است:

$$S_{max} = 0.313V_L(D^2/kz) \qquad (۲)$$

که در این رابطه D و z به‌ترتیب عبارتند از قطر و عمق تونل. هم‌چنین در رابطهٔ مذکور VL افت زمین و k ثابت هندسی و بدون بعد گودی نشست هستند. پارامترهای VL و k با عنوان پارامترهای مرتبط با بررسی تجربی نشست زمین خوانده می‌شوند. در ادامه توضیحات مفصل‌تری در ارتباط با این پارامتر ارائه می‌شود.

### افت زمین (VL)

در احداث تونل، مقدار خاکی که در اثر حفاری از تونل به بیرون منتقل می‌شود از مقداری خاکی که معرف حجم تئوری تونل است، زیادتر است. این مقدار اضافی حفاری تحت عنوان اُفت زمین یا حجم از دست رفته[1] نامیده می‌شود. این پارامتر یکی از عوامل اصلی ایجاد گود نشست در سطح زمین است. براساس پژوهش‌های لُگاناتان در حفاری مکانیزه افت زمین در سه محدوده سینه‌کار، سپر و سگمنت یا بخش انتهایی اتفاق می‌افتد که این بخش‌ها در شکل ۲ نشان داده شده‌اند [۷].




**شکل ۲. بخش‌های مختلف تشکیل‌دهنده اُفت زمین [۷]**

### تعیین مقدار پارامتر های VL و k

لُگاناتان عوامل اساسی تأثیرگذار بر مقدار افت زمین را عمدتاً شامل: روش حفاری، عمق و قطر تونل، شرایط آب زیرزمینی، شرایط تنش‌های اولیه خاک، خصوصیات مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری خاک معرفی می‌کند که در حقیقت می‌توان گفت وضعیت زمین‌شناسی مهندسی

1. Volume Loss یا VL

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.6.0 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3559 ]

حاکم بر مسیر تونل از عوامل اصلی تعیین‌کننده مقدار افت زمین هستند [۷]. پژوهش‌های گسترده‌ای در مورد تعیین مقدار عددی افت زمین انجام شده و محققان مختلف براساس شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی مسیر تونل و مصالح دربرگیرندهٔ آن و هم‌چنین روش حفاری تونل و عوامل دیگر مقادیری را برای این پارامتر پیشنهاد کرده‌اند. به‌عنوان مثال می‌توان به پژوهش‌های گویلیمتی[1] و همکاران (۲۰۰۸) اشاره کرد که براساس این پژوهش‌ها برای شرایطی که مصالح جبههٔ کار و روباره تونل مصالح خاکی باشند، بر حسب شرایط ژئوتکنیکی خاک، برای خاک‌های چسبنده مقدار VL را ۰/۸ و برای خاک‌های دانه‌ای مقدار ۱/۰ را پیشنهاد شده است [۸]. ملاحظه می‌شود که مقدار VL با چسبندگی خاک نسبت معکوس داشته و هر چه چسبندگی خاک بیش‌تر باشد، مقدار VL کم‌تری در حین حفاری تونل اتفاق می‌افتد. در جدول ۱ مقادیر پیشنهادی برای این پارامتر ارائه شده است.

k پارامتری تجربی است که مقدار آن به میزان زیادی وابسته به نوع خاک و خصوصیات ژئوتکنیک آن است. در اراتباط با این پارامتر نیز بررسی‌های نسبتاً زیادی انجام گرفته و محققان مختلف مقادیری را براساس نوع مصالح برای این پارامتر پیشنهاد کرده‌اند. به‌عنوان مثال گویلیلمتی و همکاران مقدار k را برای خاک‌های چسبنده در دامنهٔ ۰/٦ ~ ۰/٤ و برای خاک‌های دانه‌ای و غیرچسبنده در دامنهٔ ۰/۳۵~ ۰/۲۵ پیشنهاد کرده‌اند [۸]. در جدول ۲ مقادیر ارائه شده برای این پارامتر ارائه شده است. با دقت در جدول مشخص می‌شود که رابطهٔ مستقیمی بین این پارامتر و چسبندگی خاک وجود دارد.

**عوامل مؤثر بر نشست (تغییر شکل یا جابه‌جایی) زمین در اثر حفر تونل**

پارامترهای VL و k ، که از عوامل مهم تعیین‌کنندهٔ نشست زمین در اثر حفر تونل هستند، به‌مقدار زیادی به نوع مصالح و خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی شان وابسته است. لِکا و نیو نشان دادند که نشست زمین در اثر حفر تونل به خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی (شرایط زمین‌شناسی، ژئوتکنیکی و آب زمین‌شناسی)، عمق و هندسه تونل، روش احداث تونل و کیفیت محیط کار و مدیریت بستگی دارد [۹]. فرانزوییس و همکاران در تحقیقات خود اثر آنیزوتروپی و هم‌چنین پارامتر $K_0$ را بر میزان نشست زمین در اثر حفر تونل به‌صورت توأم بررسی کرده‌اند [۱۰]. باغبان گل‌پسند و همکاران تـأثیر سیمانی‌شدگی آبرفت‌های تهران و نیز وجود حفره‌های

1. Guglielmetti

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.6.0 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3559 ]

زیرزمینی مانند قنات‌های قدیمی را برنشست زمین در اثر حفر تونل خط هفت مترو تهران (قطعه شرقی–غربی) بررسی کرده و نشان دادند که سیمانی‌شدگی آبرفت‌های تهران باعث کاهش VL و در نتیجه کاهش نشست زمین در اثر حفر تونل شده است [۱۱].

**جدول ۱. مقادیر مختلف VL پیشنهادی به‌وسیلهٔ محققان مختلف [۱۲]**

| مقدار VL (%) | نوع خاک | روش حفاری | مرجع استناد شده |
|---|---|---|---|
| ۰/۲–۱ | ماسهٔ متراکم | TBM دوغابی/EPB | O'Reilly and New (1982) |
| ۱–۲ | رس نرم | | |
| ۰/۵–۱ | رس حاوی ماسه فراوان | | |
| ۰/۲–۰/۹ | ماسهٔ ریزدانه متراکم در عمق ۲۲ تا ۵۲ متر | EPB TBM برای تونل به قطر ۹/۲۵ متر | Leblais and Bochon (1991) |
| ۰/۸–۱/۳ | ماسهٔ ریزدانه متراکم ضخامت روباره بین ٤/۱ تا ۷/۲ | | |
| ۰/۲–۱ | ماسهٔ متراکم تا تراکم متوسط زیر سطح ایستابی | سپر دوغابی | Ata A. A. (1996) |
| ۱–۲ | رس سفت، (رس لندن) | حفر تونل در مد باز | Mair (1996) |
| ۱–۲ | رس نرم | حفر تونل در مُد بسته یا سپر دوغابی) (EPB | |
| ۰/۵ | ماسه | | |
| ۰/۵–۱/۵ | رس سفت (رس لندن) | حفاری سنتی به‌همراه بتن پاشی | |
| ۰/۸۵ | خاک‌های ماسه‌ای با چسبندگی پایین | برای تونل به TBM, دوغابی قطر ۵/۸۵ متر | Sugiyama et al. (1999) |
| ۰/٤۵–۰/۷۸ | خاک‌های عمدتاً چسبنده | | |
| ۱ | مصالح ماسه‌ای (c=0) | TBM دوغابی/EPB | Guglielmetti et al. (2008) |
| ۰/۸ | مصالح رسی (c>0) | | |
| ۱/۱۵ | مصالح رسی | با استفاده از سپر/EPB | Loganathan (2011) |
| < ۰/۵ | ماسه | حفر تونل در مُد بسته EPB ( یا سپر دوغابی) | Toan N. D. (2012) |
| ۱–۲ | رس نرم | | |
| ۰/۲۱–۱/٦٦ | رسوبات یخچالی مانند*DBC | TBM دوغابی/EPB | McCabe et al. (2012) |
| ۰/۷۸–۰/۹٦ | مصالح درشت‌دانه | با استفاده از سپر/EPB | Zhang et al. (2013) |
| ۰/۷۱ | رس سیلتی (ML & CL) | حفاری تونل دوقلو با سپر دوقلوی D-O-T | Gui and Chen (2013) |
| ۱/۰۵–۱/۸۲ | ماسه حاوی رس و سیلت (SM & CL) | | |

*رسوبات یخچالی سفت و خوب دانه‌بندی شده حاوی تقریباً ۳۵ درصد ذرات ریزدانه (مصالح ریزتر از ۰/۰٦ میلی‌متر)، قطعات سنگی درشت به‌همراه عدسی‌های ماسه‌ای و گراولی

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.6.0 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3559 ]

**جدول ۲. مقادیر پیشنهادی محققان مختلف برای تعیین k [۱۲]**

| مقدار k | نوع خاک | روش حفاری | مرجع استناد شده |
|---|---|---|---|
| ۰/۳ | ماسه (c=0) | TBM دوغابی/EPB | Guglielmetti et al. (2008) |
| ۰/۵ | رس (c>0) | | |
| ۰/٤–۰/۵ | رس سفت شکاف‌دار | مکانیزه–سنتی | O'Reilly & New (1982) |
| ۰/۵–۰/٦ | رسوبات یخچالی | سپر–سپر با هوای فشرده | |
| ۰/٦–۰/۷ | رس سیلتی نرم | سپر–سپر با هوای فشرده | |
| ۰/۲–۰/۳ | مصالح دانه‌ای بالای سطح آب | - | |
| ۰/۲–۰/٤۵ | شن و ماسه | بدون توجه به‌روش حفاری و قطر تونل | Fargnoli et al. (2013) |
| ۰/٤–۰/٦ | خاک‌های رسی سفت | | |
| ۰/٦–۰/۷۵ | رس نرم | | |
| ۰/۵ | رس سفت و رس ماسه‌ای | مکانیزه – سنتی | Leca and New (2007) |
| ۰/۲۵ | شن و ماسه با سفتی کم | | |
| ۰/۳۵ | شن و ماسه | برای تونل به TBM, دوغابی قطر ۵/۸۵ متر | Sugiyama et al. (1999) |
| ۰/۵ | خاک‌های چسبنده | | |

هم‌چنین باغبان گل‌پسند و همکاران با بررسی پروفیل زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل خط ۲ مترو تبریز اقدام به معرفی مقاطعی کردند که با توجه به ایجاد پدیدهٔ سینه‌کار مختلط (تناوب لایه‌های رسی و ماسه‌ای)، امکان بروز نشست غیرمجاز وجود دارد [۱۳]. ملاحظه می‌شود که خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل و مصالح موجود در آن یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در میزان و نوع نشست زمین در اثر حفر تونل است. با توجه به گستردگی موضوع و فراوانی پژوهش‌هایی که در این ارتباط انجام شده است، برای رعایت اختصار از ادامه بررسی سوابق موضوع و مرور منابع قبلی صرف‌نظر کرده و به مباحث نشست زمین در اثر حفر تونل ابوذر می‌پردازیم.

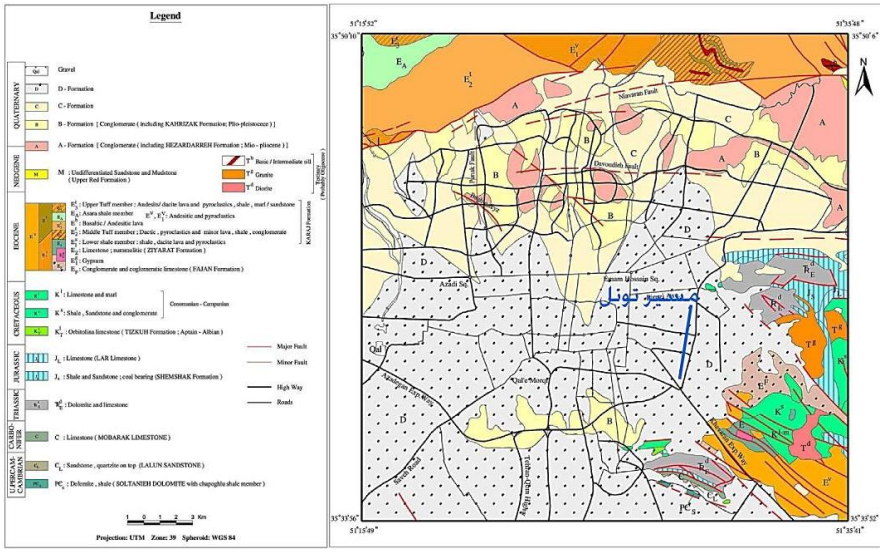
تونل ابوذر در راستای حاشیهٔ شرقی کانال ابوذر واقع در خیابان ابوذر حدفاصل بلوار ائمه اطهار تا شمال بزرگراه خاوران در سه راه افسریه در شرق تهران واقع شده است. طول این تونل حدود۴۰۰۰ متر است و به‌صورت مکانیزه با دستگاه TBM حفاری شده است. قطر حفاری آن حدود ٤/۳۵ و قطر تمام شده آن حدود ۳/۷ متر است. با توجه به اندازه‌گیری و در دسترس بودن اطلاعات نشست واقعی زمین در ۵۰۰ متر ابتدایی تونل، در تحقیق حاضر این محدوده، بررسی شده است.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.6.0 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3559 ]

## زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی

دشت تهران و گسترهٔ پیرامون آن به‌ویژه آبرفت‌های آن را از دیدگاه‌های متنوع، افراد مختلفی تقسیم‌بندی کرده‌اند. ریبن در تحقیقات خود رسوبات جوان اطراف تهران را از نظر سن نسبی به چهار سازند D, C, B, A تقسیم کرده و آن‌ها را به‌ترتیب سازند هزاردره، سازند کهریزک، آبرفت تهران و آبرفت جدید (آبرفت هولوسن) نامیده است که در بین آن‌ها سازند A قدیمی‌ترین و سازند D جدیدترین سری محسوب می‌شوند [١٤]. تقسیم‌بندی ریبن مبنا و اساس بررسی‌های بعدی در مورد آبرفت‌های تهران بوده است و تهیهٔ نقشه‌های زمین‌شناسی گسترهٔ تهران با توجه به این تقسیم‌بندی انجام گرفته است. در شکل ۳ نقشهٔ زمین‌شناسی تهران و مسیر تونل روی آن نشان داده شده است [۱۵]. چنان‌چه ملاحظه می‌شود، مسیر تونل ابوذر در آبرفت‌های D سازند تهران قرار گرفته است. با توجه به نزدیکی مسیر تونل به ارتفاعات جنوب شرقی تهران (آنتی‌البرز) و ضخامت اندک آبرفت‌های D در این محدوده، احتمال برخورد مسیر تونل به واحدهای آبرفتی قدیمی نظیر آبرفت C وجود دارد. در جدول ۳ خصوصیات زمین‌شناسی گروه‌های چهارگانه آبرفت‌های موجود در گسترهٔ تهران نشان داده شده است. براساس این جدول از مهم‌ترین تفاوت‌های سازندهای C و D عبارت است از سیمانی‌شدگی سازند C و سیمانی‌نشدگی در سازند D که این مسئله همان‌گونه که بعداً اشاره می‌شود، تأثیر شگرفی بر مقدار نشست زمین در اثر حفر تونل ابوذر دارد. در محدودهٔ بررسی شده، رسوبات ریزدانه و درشت‌دانه به‌صورت توأم مشاهده می‌شوند اما همان‌گونه که قبلاً نیز ذکر شد، با توجه به قرار گرفتن مسیر تونل در مجاورت ارتفاعات جنوب شرق تهران، و این‌که رسوبات سازند D عموماً ضخامت کمی دارند (جدول ۳)، می‌توان گفت که مسیر تونل در رسوبات سازند C قرار گرفته است. برای ارزیابی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل و مصالح موجود در آن، عملیات ژئوتکنیک در مراحل مختلف انجام شده و براساس نتایج حاصل، نیمرخ زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل ابوذر تهیه و در شکل ٤ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که واحدهای خاکی موجود در مسیر تونل به چهار گروه مجزا تقسیم‌بندی شده‌اند، مبنای این تقسیم‌بندی در ادامه توضیح داده می‌شود.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.6.0 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3559 ]




**شکل ۳. موقعیت مسیر تونل بر روی بخشی از نقشه تهران [۱۵]**

## تفکیک واحدهای خاکی

بر اساس پیشنهاد ITA (انجمن بین‌المللی تونل) و DAUB (کمیته سازه‌های زیرزمینی آلمان) یکی از مهم‌ترین فاکتورها برای تفکیک واحدهای خاکی، درصد ذرات ریزدانه (رد شده از الک۲۰۰) است [۱۸]، [۱۹]. در این بررسی نیز درصد رد شده از الک۲۰۰ به‌عنوان مبنای تفکیک واحدهای خاکی، قرار گرفته است. با در نظر گرفتن این عامل و عوامل دیگر لایه‌های خاکی دربرگیرنده مسیر تونل در محدودهٔ بررسی شده به سه واحد زمین‌شناسی مهندسی[1] با اسامی ET-1، ET-2 و ET-3 تفکیک شده‌اند. این واحدها در جدول ٤ معرفی شده‌اند. هم‌چنین موقعیت و گسترش واحدهای خاکی مذکور در مسیر تونل بر نیمرخ زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل (شکل ٤) نشان داده شده است. در جدول ۵ خصوصیات ژئوتکنیک واحدهای خاکی مذکور ارائه شده است.

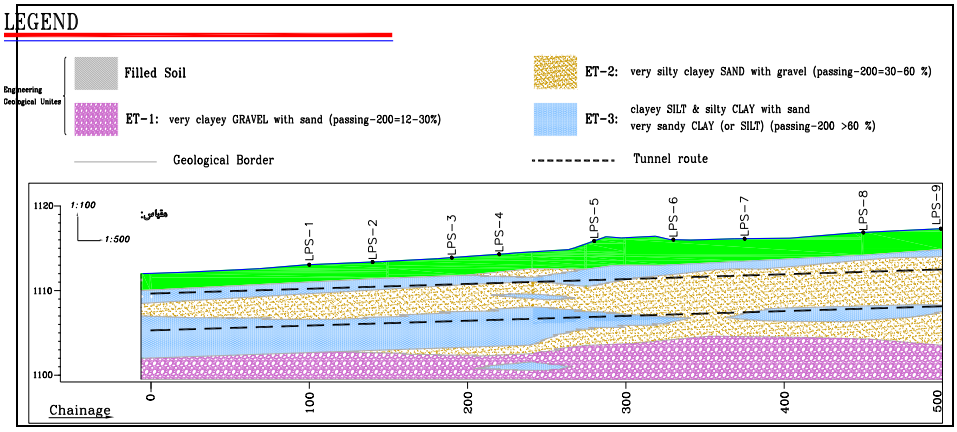
ملاحظه می‌شود که مسیر تونل ابوذر در واحدهای ET-2 و ET-3 جانمایی شده است. در ادامه خصوصیات هر یک از این واحدها را به‌طور خلاصه ذکر می‌کنیم.

1. Engineering geological Type

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.6.0 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3559 ]

**جدول ۳. خصوصیات زمین‌شناسی گروه‌های چهارگانه آبرفت‌های تهران [۱٦]**

| موضوع مقایسه | سازند | | | |
|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | D |
| **سن** | ۵ میلیون سال | ۷۰۰۰۰۰ سال | ۵۰۰۰۰ سال | ۱۰۰۰۰ سال |
| **سیمانی شدن** | سیمانی شده و سخت شده | متغیر ولی عموماً دارای سیمان ضعیف | سیمان ضعیف‌تر از A و سخت نشده | سیمانی نشده |
| **دانه‌بندی** | از حد رس تا دانه‌هایی به قطر ۱۰۰ تا ۲۵۰ میلی متر | بسیار متغیر با قطعات چند متری | از حد رس و سیلت تا حداکثر دانه به قطر ۲۰۰ میلی‌متر | از حد رس تا قطعات سنگی بزرگ‌تر از ۱ متر |
| **شیب لایه‌ها** | دارای شیب حداکثر تا ۹۰ درجه | به‌صورت دگرشیب بر آبرفت A و دارای شیب کم‌تر از ۱۵ درجه | افقی | افقی |
| **ضخامت** | حداکثر ۱۲۰۰ متر | حداکثر ٦۰ متر (به‌سمت جنوب کم می‌شود) | حداکثر ٦۰ متر | کم‌تر از ۱۰ متر |
| **حوضه رسوبی** | سیلابی | یخچالی – سیلابی | سیلابی – رودخانه‌ای | سیلابی – رودخانه‌ای |




**شکل ٤. نیمرخ زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل [۱۷]**

### واحد زمین‌شناسی مهندسی ET-1

این واحد خاکی در ردهٔ خاک‌های درشت‌دانه قرار می‌گیرد و جنس آن عمدتاً از ماسهٔ شنی به‌همراه سیلت و رس و یا شن ماسه‌ای به‌همراه سیلت و رس تشکیل شده است. مقدار درصد رد شده از الک ۲۰۰ (سیلت و رس) در این واحد بین ۱۲ تا ۳۰ ٪ است. بخش‌های مختلف این

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.6.0 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3559 ]

واحد طبق استاندارد USCS از نوع خاک‌های GC، GM هستند.

**واحد زمین‌شناسی مهندسی ET-2**

ذرات تشکیل‌دهندهٔ این واحد خاکی از نظر دانه‌بندی در محدودهٔ وسیعی قرار دارند و از ماسه‌رسی به‌همراه شن و شن‌رسی و سیلتی به‌همراه ماسه، هم‌چنین رس و سیلت‌ماسه‌ای تشکیل شده‌اند. درصد رد شده از الک ۲۰۰ (ذرات ریزدانه) آن بین ۳۰ تا ۶۰ درصد است. بنابراین مطابق با استاندارد USCS بخشی از منحنی‌های دانه‌بندی این واحد در گروه خاک‌های ریزدانه قرار می‌گیرد (CL و ML)، و بخش دیگری از آن در گروه خاک‌های دانه‌ای (GC، SM و SC) تقسیم‌بندی می‌شوند.

**واحد زمین‌شناسی مهندسی ET-3**

ذرات تشکیل‌دهندهٔ واحد خاکی ET-3 عمدتاً از سیلت و رس ماسه‌ای و رس به‌همراه ماسه تشکیل شده است. از نظر دانه‌بندی، مقدار درصد رد شده از الک ۲۰۰ (سیلت و رس) این واحد همواره بیش‌تر از ۶۰ درصد است. این واحد خاکی طبق استاندارد USCS در گروه خاک‌های CL و ML قرار می‌گیرد.

**جدول ٤. مشخصات واحدهای زمین‌شناسی مهندسی تفکیک شده در مسیر تونل**

| واحد زمین شناسی مهندسی | ET-1 | ET-2 | ET-3 |
|---|---|---|---|
| توصیف خاک | شن دارای رس زیاد همراه با کمی سیلت | ماسه دارای رس و سیلت فراوان همراه با کمی شن و یا رس یا سیلت ماسه دار همراه با کمی شن | سیلت رس دار یا رس سیلت دار همراه با ماسه |
| درصد رد شده از الک ۲۰۰ | ۳۰-۱۲ | ۶۰-۳۰ | بیشتر از ۶۰ |
| نوع خاک (USCS) | GC,GM | SC, SM & CL | CL, ML & CL-ML (rarely CH) |

**جدول ۵. مشخصات ژئوتکنیک واحدهای خاکی [۱۷]**

| Unit | C (kPa) | Φ (degree) | E (MPa) | ν | γd (kN/m3) |
|---|---|---|---|---|---|
| Fill | ۸ | ۲۰ | ۱۵ | ۰/۳۵ | ۱۷/۰ |
| ET-1 | ۱۵ | ۳۵ | ٦۵ | ۰/۳ | ۱۹/۰ |
| ET-2 | ۲۰ | ۳۰ | ٤۰ | ۰/۳۲ | ۱۸/٦ |
| ET-3 | ۳۰ | ۲۵ | ۲۵ | ۰/۳۵ | ۱۸/۰ |

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.6.0 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3559 ]

## ارزیابی نشست زمین در اثر حفر تونل ابوذر

در این بخش از تحقیق به بررسی نشست زمین در اثر حفر تونل می‌پردازیم. در این راستا نخست براساس نوع مصالح موجود در مسیر تونل اقدام به پیش‌بینی نشست شده و سپس نتایج حاصل با نشست‌های واقعی مقایسه می‌شود. براساس نیمرخ زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل می‌توان به پیش‌بینی نشست زمین در مقاطع مورد نظر که تحت عنوان مقاطع بحرانی نامیده می‌شوند، اقدام کرد. انتخاب مقاطع بحرانی براساس دستورالعمل و توصیه‌های (IAT۲۰۰۰) انجام شده است [۱۸]. رازی‌فر و همکاران با استفاده از این استاندارد و بر اساس روباره حداکثر و حداقل، خصوصیات ژئوتکنیکی مصالح، شرایط آب زیرزمینی، سازه‌های سطحی و زیرسطحی موجود در محدوده تونل، درجهٔ اهمیت سازه‌های مذکور و . . . نقاطی را برای بررسی نشست زمین در مسیر تونل خط هفت مترو تهران معین کرده و به‌عنوان مقاطع بحرانی در نظر گرفته‌اند [۲۰]. در مسیر تونل ابوذر شرایط نسبتاً یک‌سانی از نظر توپوگرافی، شرایط آب زیرزمینی و به‌ویژه خصوصیات ژئوتکنیکی مصالح حاکم است و با توجه به کم بودن نسبی طول مسیر بررسی‌شده (حدود ٤٠٠ متر) و یک‌نواختی نسبی شرایط از نظر زمین‌شناسی، در تمام نقاطی که نشست واقعی در آن‌ها برداشت شده، پیش‌بینی نشست نیز انجام شده است. نقاط مذکور با علامت LPS-1 تا LPS-9 در نیمرخ زمین‌شناسی مهندسی نشان داده شده است.

### پیش‌بینی نشست به‌روش تجربی

برای پیش‌بینی نشست زمین در این نقاط به‌روش تجربی، مقادیر پارامترهای VL و k براساس خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی هریک از نقاط موردنظر و براساس جدول‌های ۱ و ۲ تخمین زده شده است. باتوجه به همگن بودن نسبی مسیر تونل ابوذر از نظر زمین‌شناسی مهندسی، مقادیر تقریباً مشابهی برای پارامترهای VL و k انتخاب شده و محاسبات مربوط با توجه به این پارامترها انجام شده است. نتایج این محاسبات در جدول ٦ و هم‌چنین به‌صورت نمودار ستونی در شکل ٥ و به‌صورت گودی‌های نشست در مقاطع عرضی در شکل ٦ نشان

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.6.0 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3559 ]

داده شده است. مقادیر نشست‌های پیش‌بینی شده در نقاط بررسی شده، در بازهٔ ۱/٤٦ سانتی‌متر تا ۲/۱۰ سانتی‌متر متغیر است.

**پیش‌بینی نشست به‌روش تحلیلی**

این روش‌ها بر مبنای تحلیل‌های ریاضی است و تغییر شکل ایجاد شده در زمین در اثر حفر تونل براساس تغییرات تنش بررسی می‌شود. این روش‌ها عمدتاً فرضیاتی را در نظر می‌گیرند (مانند همگن بودن و تراکم‌ناپذیر بودن خاک) که در اغلب موارد غیرقابل دسترس هستند. روش‌های متعددی در این ارتباط پیشنهاد شده است که می‌توان به روش‌های وِرویت و بوکر [۲۱]، لُگاناتان و پولوس [۲۲]، بابِت [۲۳]، پارک [۲٤] و . . . اشاره کرد. در این پژوهش از روش لُگاناتان و پولوس برای برآورد نشست استفاده شده است. در این روش که برای حالت زه‌کشی نشده استفاده می‌شود، میزان جابه‌جایی یک نقطه در سطح زمین براساس رابطهٔ (۳) محاسبه می‌شود:

$$S = \frac{(1-\vartheta)H}{H^2+x^2}(4gR + g^2)exp\left[\frac{-1.38x^2}{\left(H\times cotg\left(45+\frac{\varphi}{2}\right)+R\right)^2}\right] \qquad (۳)$$

در این رابطه پارامترها عبارتند از:

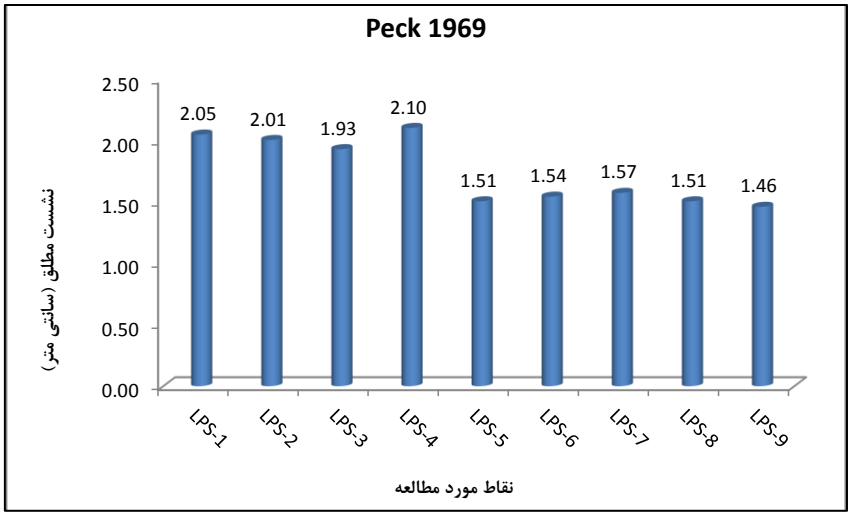
x: فاصلهٔ افقی نقطه مورد نظر از محور تونل، R: شعاع تونل، H: عمق تونل (فاصلهٔ سطح زمین تا محور)، υ: نسبت پواسون خاک، φ: زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک و g: پارامتر گپ (Gap) هستند.

پارامتر گپ[1] چنان‌چه قبلا نیز اشاره شد، براساس خصوصیات هندسی سپر و لاینینگ تونل قابل تعیین است. در این پژوهش این پارامتر براساس ابعاد هندسی TBM و هم‌چنین توصیه‌های لی و همکاران [۲۵] به‌میزان g=۰/۰۱۹m تعیین شده است. نشست زمین در اثر حفر تونل ابوذر به‌روش تحلیلی و با توجه به اطلاعات موجود پیش‌بینی و نتایج آن در جدول ۷ و به‌صورت نمودارهای میله‌ای (نشان‌دهندهٔ نشست حداکثر) در شکل ۷ و به‌صورت گودی‌های نشست در مقاطع عرضی در شکل ۸ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که با فرض g=۰/۰۱۹m مقادیر نشست تقریباً ۲ سانتی‌متر پیش‌بینی شده‌اند.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.6.0 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3559 ]

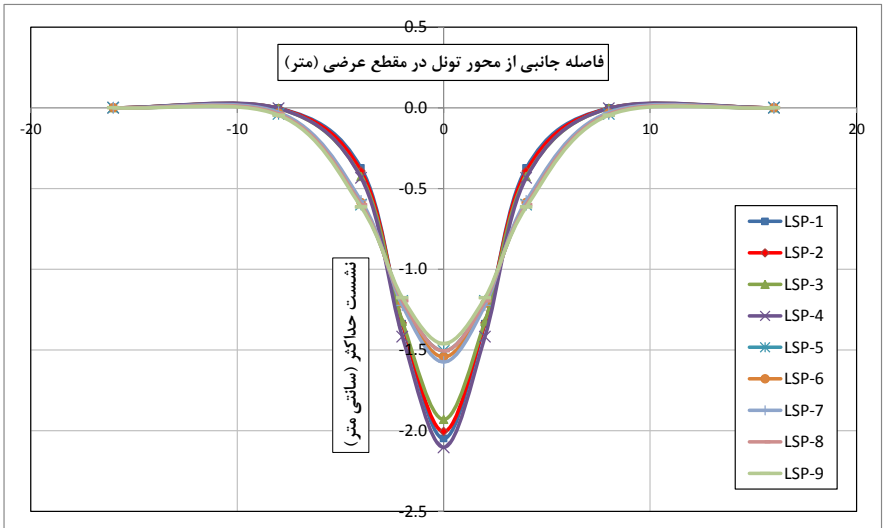
**جدول ٦. ارزیابی نشست به‌روش نیمه تجربی برای تونل ابوذر [۱]**

| شمارهٔ نقطه | کیلومتر | واحد زمین‌شناسی مهندسی | پارامترهای مورد نیاز | | | | حداکثر نشست پیش‌بینی شده (cm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $V_L(\%)$ | $k$ | $Z_0$ (m) | $i$ (m) | |
| LPS-1 | ۰+۱۰۰ | ET-3 و ET-4 | ۰/۷۵ | ۰/٤۳ | ۵/۰٤ | ۲/۱۷ | -۲/۰۵ |
| LPS-2 | ۰+۱٤۰ | ET-3 و ET-4 | ۰/۷۵ | ۰/٤۳ | ۵/۱۵ | ۲/۲۱ | -۲/۰۱ |
| LPS-3 | ۰+۱۹۰ | ET-3 و ET-4 | ۰/۷۵ | ۰/٤۳ | ۵/۳۵ | ۲/۳۰ | -۱/۹۳ |
| LPS-4 | ۰+۲۲۰ | ET-3 و ET-4 | ۰/۸ | ۰/٤ | ۵/٦۳ | ۲/۲۵ | -۲/۱۰ |
| LPS-5 | ۰+۲۸۰ | ET-3 و ET-4 | ۰/۷۵ | ۰/٤۳ | ٦/۸٦ | ۲/۹۵ | -۱/۵۱ |
| LPS-6 | ۰+۳۳۰ | ET-3 و ET-4 | ۰/۷۵ | ۰/٤۳ | ٦/٦۹ | ۲/۸۸ | -۱/۵٤ |
| LPS-7 | ۰+۳۷۵ | ET-3 و ET-4 | ۰/۷۵ | ۰/٤۳ | ٦/۵٦ | ۲/۸۲ | -۱/۵۷ |
| LPS-8 | ۰+٤۵۰ | ET-3 و ET-4 | ۰/۷۵ | ۰/٤۳ | ٦/۸٦ | ۲/۹۵ | -۱/۵۱ |
| LPS-9 | ۰+۵۰۰ | ET-3 و ET-4 | ۰/۷۵ | ۰/٤۳ | ۷/۰۷ | ۳/۰٤ | -۱/٤٦ |




**شکل ۵. نمودار ستونی نشست‌های پیش‌بینی شده در مسیر تونل ابوذر [۱]**

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.6.0 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3559 ]

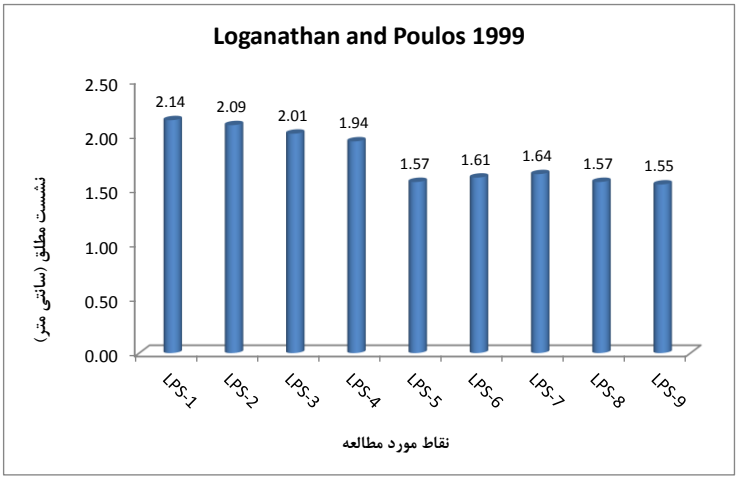



**شکل ٦. منحنی‌های گودی نشست (پیش‌بینی شده) در مقاطع عرضی برای نقاط بررسی شده [۱]**

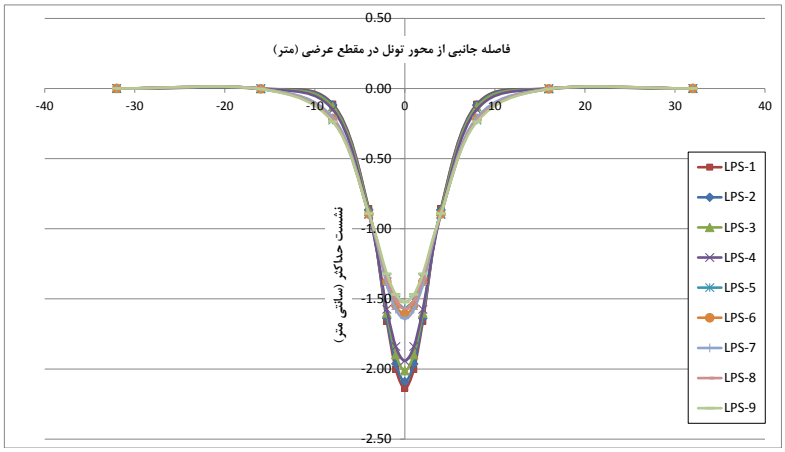
**جدول ۷. ارزیابی نشست به‌روش تحلیلی** لُگاناتان و پولوس [۲۲] **با فرض g=۰/۰۱۹ m و R=۲/۱۷۵ m**

| شمارهٔ نقطه | کیلومتر | واحد زمین‌شناسی مهندسی | پارامترهای مورد نیاز برای پیش‌بینی نشست | | | حداکثر نشست (Cm) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $Z_0$ (m) | $\varphi(^\circ)$ | $\upsilon$ | |
| **LPS-1** | ۰+۱۰۰ | ET-4 و ET-3 | ۵/۰٤ | ۱۹ | ۰/۳۵ | −۲/۱٤ |
| **LPS-2** | ۰+۱٤۰ | ET-4 و ET-3 | ۵/۱۵ | ۱۹ | ۰/۳۵ | −۲/۰۹ |
| **LPS-3** | ۰+۱۹۰ | ET-4 و ET-3 | ۵/۳۵ | ۱۹ | ۰/۳۵ | −۲/۰۱ |
| **LPS-4** | ۰+۲۲۰ | ET-4 و ET-3 | ۵/٦۳ | ۲۲ | ۰/۳٤ | −۱/۹٤ |
| **LPS-5** | ۰+۲۸۰ | ET-4 و ET-3 | ٦/۸٦ | ۱۹ | ۰/۳۵ | −۱/۵۷ |
| **LPS-6** | ۰+۳۳۰ | ET-4 و ET-3 | ٦/٦۹ | ۱۹ | ۰/۳۵ | −۱/٦۱ |
| **LPS-7** | ۰+۳۷۵ | ET-4 و ET-3 | ٦/۵٦ | ۱۹ | ۰/۳۵ | −۱/٦٤ |
| **LPS-8** | ۰+٤۵۰ | ET-4 و ET-3 | ٦/۸٦ | ۱۹ | ۰/۳۵ | −۱/۵۷ |
| **LPS-9** | ۰+۵۰۰ | ET-4 و ET-3 | ۷/۰۷ | ۲۰ | ۰/۳٤ | −۱/۵۵ |

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.6.0 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3559 ]




**شکل ۷. نمودار ستونی نشست های پیش بینی شده در مسیر تونل ابوذر [۲۲]**



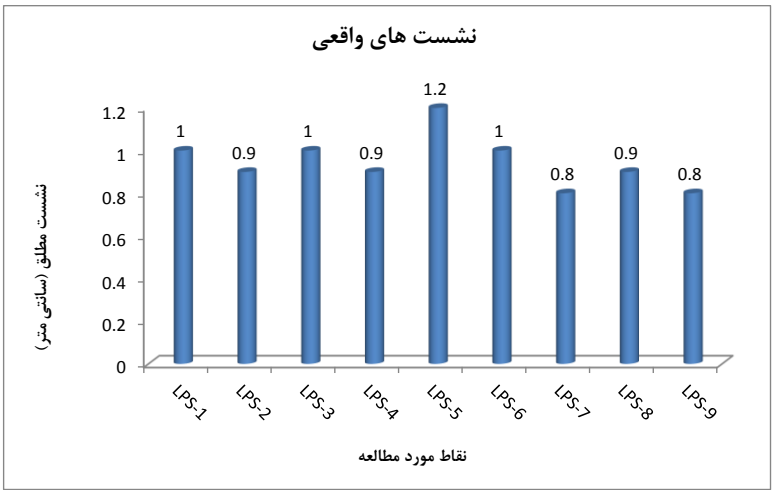

**شکل ۸. منحنی‌های گودی نشست (ارزیابی شده به‌روش تحلیلی** لُگاناتان و پولوس [۲۲]) **در مقاطع عرضی**

### نشست‌های واقعی (اندازه‌گیری شده)

در این پژوهش هم‌زمان با حفاری تونل ابوذر نشست زمین اندازه‌گیری و ثبت شده است. در این راستا بر اساس توصیه‌های دانیکلیف و گرین نقاطی با علامت LPS-1 تا LPS-9 روی زمین مشخص شده و میزان جابه‌جائی قائم آن‌ها با استفاده از ابزارهای دقیق و روش‌های

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.6.0 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3559 ]

نقشه‌برداری اندازه‌گیری شده است [۲۶]. پس از اتمام عملیات حفاری و اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی قائم (Leveling)، مقدار نشست نهایی ($S_{max}$) هر یک از نقاط مذکور ثبت و در شکل ۹ به‌صورت نمودار میله‌ای نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود نشست‌های واقعی اندازه‌گیری شده در طول مسیر اکثراً در حدود ۱ سانتی‌متر هستند که به‌عنوان نشست‌های عادی زمین در نقاط مزبور تلقی می‌شوند. در شکل ۱۰ نشست‌های پیش‌بینی شده به‌روش‌های تجربی و تحلیلی به‌همراه نشست‌های واقعی در نموداری برای مقایسه ارائه شده‌اند. ملاحظه می‌شود که در حالت کلی نشست‌های واقعی کم‌تر از نشست‌های پیش‌بینی شده هستند. این موضوع در بخش بعدی بحث و بررسی می‌شود. شایان ذکر است که در پژوهش‌های حاضر با توجه به محدودیت‌های موجود، تنها پارامتر نشست حداکثر ($S_{max}$) بررسی شده است.

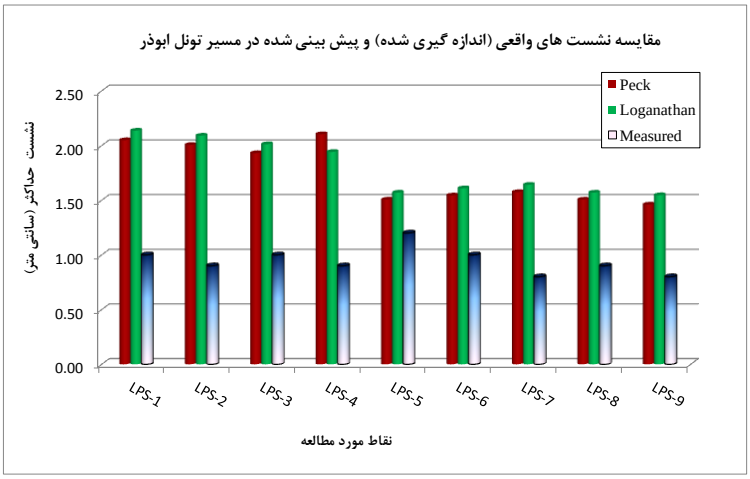



**شکل ۹. نشست‌های واقعی اندازه‌گیری شده در حین حفاری تونل ابوذر [۲۷]**

## تحلیل نتایج

با توجه به شکل ۱۰ مشخص می‌شود که مقادیر نشست‌های اندازه‌گیری شده در شرایط عادی عموماً کم‌تر از نشست‌های پیش‌بینی شده هستند. در ارتباط با این موضوع، با توجه به ثابت بودن نسبی عوامل هندسی در بازهٔ بررسی شده به‌نظر می‌رسد عدم هم‌خوانی موجود، در ارتباط با عوامل زمین‌شناسی است و پارامترهایی مانند VL و k که براساس نوع خاک و شرایط زمین‌شناسی مهندسی حاکم بر محیط تعیین می‌شوند، نیاز به بازنگری دارند.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.6.0 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3559 ]




**شکل ۱۰. مقایسه نشست‌های پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده در مسیر تونل ابوذر [۱۲]**

پارامترهای مذکور در بخش‌های قبلی بر اساس نوع خاک و با توجه به جدول‌های ۱ و ۲ تعیین و مقادیر VL=۰/۸~۰/۷۵% و هم‌چنین k=۰/٤۳~۰/٤ برای پیش‌بینی نشست زمین استفاده شدند. با توجه به‌این‌که تاکنون روش قطعی برای تعیین مقدار دقیق این پارامترها ارائه نشده است، در این مرحله و برای بررسی بیش‌تر مقادیر فرضی مختلفی برای این پارامترها در نظر گرفته شده و نشست زمین بر اساس مقادیر فرضی مذکور ارزیابی شده است. در این ارتباط سعی شده است تا اولاً مقادیر فرضی در بازهٔ پیشنهادی برای پارامترهای مذکور از سوی محققان مختلف انتخاب شود (جدول‌های ۱ و ۲). ثانیاً تغییرات پارامترهای فرضی روند یک‌سانی داشته باشد. بر این اساس مقادیر زیر برای پارامترهای VL و k فرض شده و نشست زمین ارزیابی شد:

VL= ۰/۳%, ۰/٦%, ۰/۹%, ۱/۲%, ۱/۵%, ۱/۸%  k=۰/٦ ،۰/۵ ،۰/٤ ،۰/۳ ،۰/۲

نتایج این ارزیابی‌ها به‌صورت نمودارهای ستونی در نمودارهای موجود در شکل ۱۱ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که با توجه به مقادیر مختلف فرضی برای دو پارامتر VL و k، مقادیر متفاوت و متنوعی از حدود ۰/٤ تا حدود ۱۱ سانتی‌متر برای نشست حداکثر زمین ($S_{max}$) به‌دست آمده است.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.6.0 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3559 ]

در مرحلهٔ بعد لازم است تا تغییرات نشست بر حسب تغییرات هر کدام از دو پارامتر VL و k ارزیابی شود. بدین‌منظور رابطهٔ (۲) بار دیگر استفاده شده و آهنگ تغییرات نشست زمین با تغییر پارامترهای مذکور برای تک تک نقاط بررسی شده در مسیر تونل ابوذر تعیین شده است. به‌دلیل اجتناب از شلوغی بیش از حد اشکال، برای نمونه در دو نقطه (LPS-1) و (LPS-9) که بیش‌ترین و کم‌ترین روباره را دارند، ترسیم شده و در نمودارهای شکل ۱۲ نشان داده شده است. چنان‌که در این نمودارها مشاهده می‌شود، روند تغییرات پارامترهای مذکور یک‌سان نیست. این مسئله با توجه به روابط ریاضی موجود بین پارامترهای مذکور و نشست حداکثر زمین ($S_{max}$)، قابل توجیه است. پارامتر VL رابطهٔ مستقیم با نشست حداکثر دارد. بنابراین روند تغییراتش نیز خطی است (شکل ۱۲ الف و ب) ولی پارامتر k رابطهٔ معکوس با نشست حداکثر زمین ($S_{max}$) دارد و بنابراین روند تغییراتش نیز غیرخطی است (شکل ۱۲ ج و د). بدیهی است که تفاوت در مقادیر نشست حداکثر برای دو نقطهٔ مذکور به‌دلیل تفاوت در ضخامت روباره ($Z_0$) ایجاد شده است اما چنان‌که ذکر شد روند تغیرات میزان نشست حداکثر برای هر دو دو نقطه مذکور مشابه است.

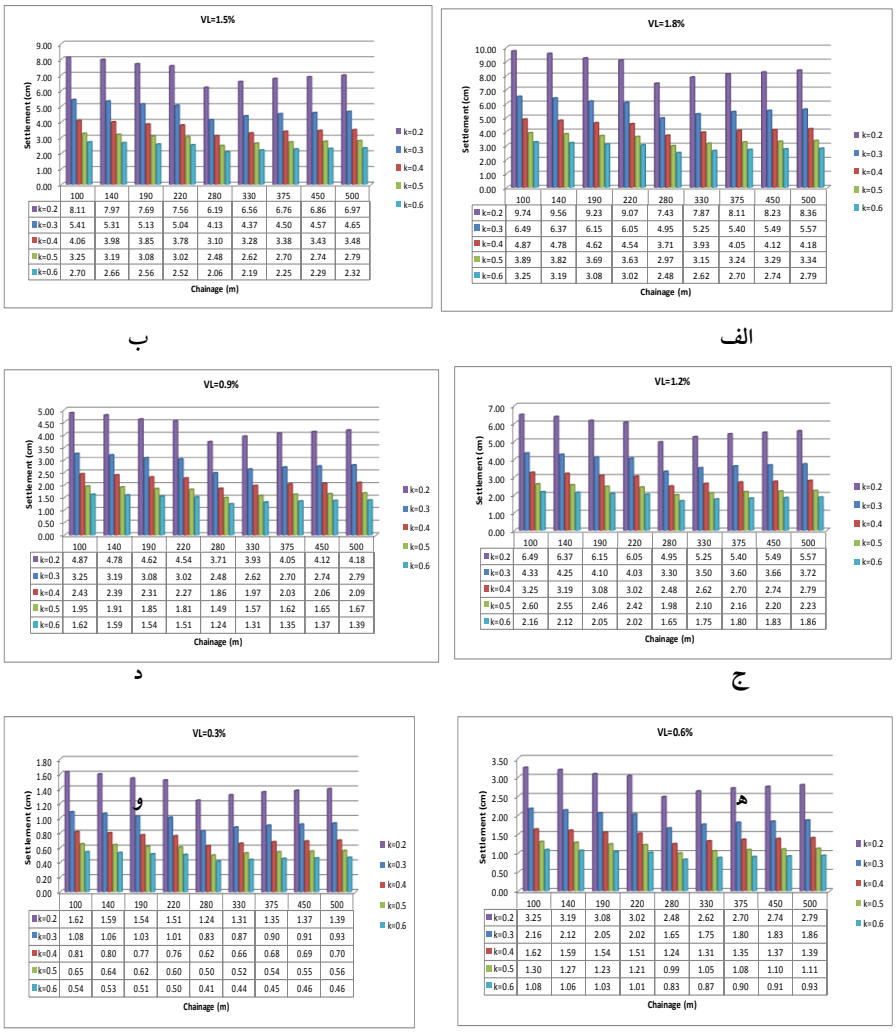
**مقدار واقعی اُفت زمین (VL) و تأثیر عوامل زمین‌شناسی بر آن**

تاکنون روش قطعی برای تعیین مقدار دقیق VL ارائه نشده و تنها براساس نوع مصالح و خصوصیات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی آن‌ها، بازه‌هایی برای این پارامتر پیشنهاد شده است که برای پیش‌بینی نشست مذکور استفاده می‌شود. در این بخش از تحقیق با توجه به در دسترس بودن مقادیر نشست واقعی رخ داده در مسیر تونل ابوذر و بر اساس مباحثی که در بخش‌های قبلی به آن‌ها اشاره شده است، مقدار واقعی این پارامتر تخمین زده می‌شود.

بدین‌منظور لازم است تا به نمودارهای شکل ۱۰ بار دیگر توجه شود. در این نمودار مقادیر نشست واقعی زمین به‌همراه مقادیر پیش‌بینی شده نشان داده شده‌اند. با مقایسهٔ این مقادیر مشخص می‌شود که نشست‌های واقعی (اندازه‌گیری شده) کم‌تر از نشست‌های پیش‌بینی شده‌اند و عمدتاً در حدود $S_{max}$=1cm هستند. بنابراین می‌توان گفت که در مورد خاک‌های موجود در مسیر تونل ابوذر، یکی از دو حالت زیر و یا هر دو آن‌ها تواماً اتفاق افتاده است: الف) مقدار VL واقعی کم‌تر از مقدار پیش‌بینی شده است. ب) مقدار k واقعی بیش‌تر از مقدار پیش‌بینی شده است.

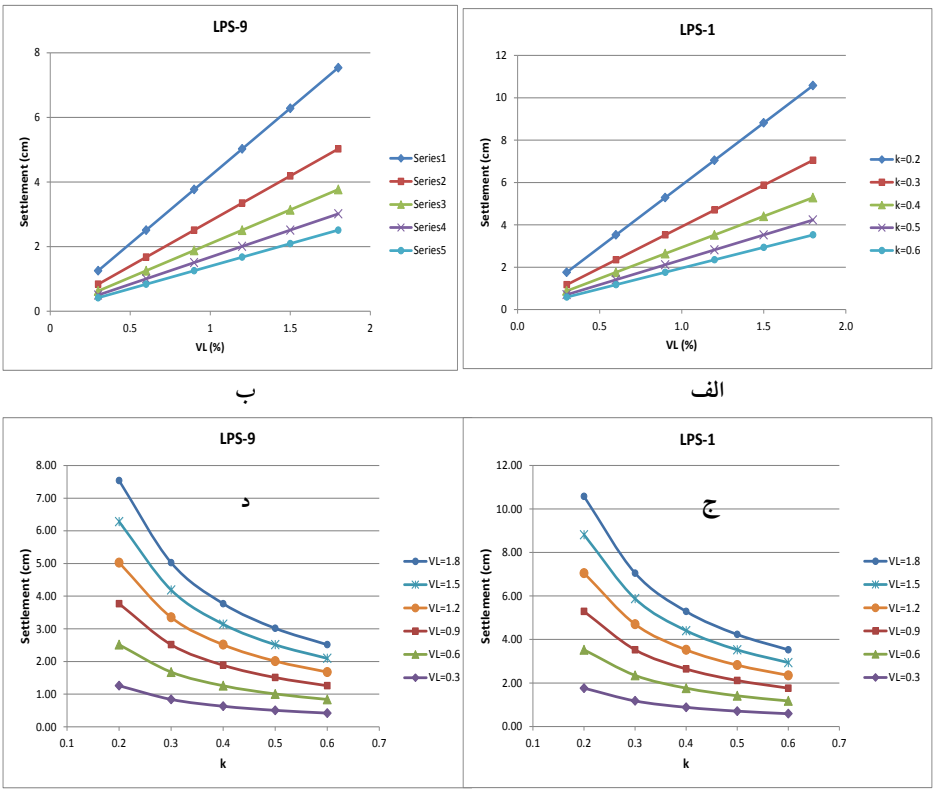
[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.6.0 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3559 ]

برای ارزیابی مقدار واقعی پارامترهای VL و k، مقدار نشست واقعی $S_{max}$=1cm را به‌عنوان مبنا در نظر گرفته و با استفاده از نمودارهای موجود در شکل ۱۱ مقادیری از VL و k که منتج به نشست در حدود $S_{max}$=1cm شده‌اند، انتخاب می‌شوند. چنان‌چه در نمودارهای موجود در این شکل نیز مشخص است مقدار نشست مذکور مربوط به VL=۰/۶ و VL=۰/۳ هستند (شکل ۱۱هـ و و). بنابراین می‌توان گفت ۰/۶≤VLخواهد بود.




**شکل ۱۱. نمودار نشست‌های حداکثر پیش‌بینی شده بر اساس مقادیر VL و k فرضی [۱۲]**

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.6.0 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3559 ]




**شکل ۱۲. روند تغییرات میزان نشست حداکثر با تغییر پارامترهای VL و k [۱۲]**

با توجه به رابطهٔ (۲) لازم است به تأثیر پارامتر k نیز اشاره شود. با توجه به نوع مصالح موجود در مسیر تونل ابوذر، مقدار این پارامتر براساس توصیه‌های محققان مختلف در بازهٔ k=۰/٤۳~۰/٤ تعیین شده است و مقدار نشست زمین بر آن اساس پیش‌بینی شد. قبلاً یادآوری شد که این پارامتر نسبت مستقیم با چسبندگی خاک دارد. با توجه به پایین بودن نشست‌های واقعی نسبت به نشست‌های پیش‌بینی شده به‌نظر می‌رسد k واقعی بیش‌تر از مقدارتعیین شده باشد. از اینجا می‌توان نتیجه گرفت که عاملی در جهت افزایش چسبندگی خاک و به تبع آن افزایش مقدار k دخیل بوده است و بنابراین مقدار k نمی‌تواند کم‌تر از مقدار در نظر گرفته شده (k=۰/٤۳) باشد. نکتهٔ جالب در این ارتباط این است با دقت در نمودارهای شکل ۱۲ج و د مشخص می‌شود که براساس رابطه غیرخطی بین مقدارk و نشست حداکثر ($S_{max}$)، با تغییر

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.6.0 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3559 ]

مقدار k از میزان پیش‌بینی شده (k=۰/٤۳) تا حدود (k=۰/۵) و حتی (k=۰/٦) تغییر قابل توجهی در میزان نشست نخواهد داشت. بنابراین با اطمینان کافی می‌توان مقدار k=۰/٤۳~۰/٤ را پذیرفت. با مشخص شدن مقدار این پارامتر، می‌توان با استفاده از رابطهٔ (۲) مقدار پارامتر افت زمین را در بازهٔ VL=۰/٦۲~۰/۳٦ تأیید کرد. ملاحظه می‌شود که مقدار VL واقعی کم‌تر از مقدار فرض شده برای این پارامتر از روی جدول ۱ است.

**بررسی تأثیر چسبندگی**

قبلاً توضیح داده شد که هر دو پارامتر VL و k با خصوصیات ژئوتکنیکی خاک به‌ویژه چسبندگی در ارتباط است. به‌طوری‌که در جدول‌های ۱ و ۲ ذکر شد، VL نسبت معکوس با چسبندگی و k نسبت مستقیم با آن دارد. کم بودن مقدار VL واقعی اتفاق افتاده برای مصالح موجود در مسیر تونل ابوذر، حاکی از زیاد بودن چسبندگی مصالح است و به‌عبارت دیگر می‌توان گفت که با وجود دانه‌ای بودن، این مصالح چسبندگی نسبتاً زیادی داشته و یا این‌که عاملی باعث افزایش چسبندگی در مصالح مذکور شده است.

در این باره مسئله سیمانی‌شدگی طبیعی در آبرفت‌های تهران می‌تواند تأییدی بر فرضیه مذکور است. باغبان گل‌پسند و همکاران سیمانی‌شدگی طبیعی در مصالح موجود در مسیر تونل خط هفت مترو تهران (قطعهٔ شرقی–غربی) را بررسی و نتیجه‌گیری کرده‌اند که این پدیده باعث کاهش نشست زمین در اثر حفر تونل مذکور شده است [۱۱]. قبلاً ذکر شد که مسیر تونل ابوذر در آبرفت‌های C قرار گرفته و سیمانی‌شدگی طبیعی این سازند یکی از فاکتورهای مهم در کنترل خصوصیات مهندسی این سازند است. به‌عبارت ساده‌تر سیمانی‌شدگی در آبرفت‌های سازند C باعث افزایش چسبندگی در مصالح مذکور شده و در حقیقت به‌عنوان عاملی برای کاهش VL است که در نهایت منجر به این شده است که نشست واقعی کم‌تر از نشست پیش‌بینی شده باشد. برای بررسی این موضوع لازم است تا تفاوت در نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی (سه‌محوری و برش مستقیم) و آزمایش‌های صحرایی (برش برجا) دوباره بررسی شوند. نتایج این آزمایش‌ها برحسب محل نمونه‌برداری و هم‌چنین موقعیت انجام تست برجا در جدول ۸ ارائه شده است. براساس آزمایش‌های برش برجا چسبندگی خاک در حدود

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.6.0 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3559 ]

۱۹kPa~۴۵، اما آزمایش سه‌محوری مقدار این پارامتر را در محدودهٔ kPa ۱۰~۳۰ و آزمایش برش مستقیم در محدودهٔ kPa ۸~۱۶ پیشنهاد کرده است.

با دقت در نتایج حاصل می‌توان تأثیر سیمانی‌شدگی طبیعی در خاک را در اختلاف بین پارامترهای مقاومت برشی حاصل از آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی مشاهده کرد. به‌عبارت ساده‌تر سیمانی‌شدگی طبیعی آبرفت‌های گروه C (که براساس اطلاعات قبلی عمدتاً از جنس رس است) در هنگام آزمایش برش برجا در بین ذرات خاک وجود داشته و به‌همین دلیل چسبندگی نسبتاً زیادی از این آزمایش به‌دست آمده است. ولی به‌علت از بین رفتن سیمان مذکور در طی فرایند نمونه‌برداری، حمل و نقل و عملیات آزمایش‌های آزمایشگاهی (که با عنوان کلی دست‌خوردگی نمونه‌ها از آن یاد می‌شود)، چسبندگی کمی برای مصالح براساس آزمایش‌های آزمایشگاهی حاصل شده است. بنابراین اختلاف بین پارامترهای مقاومتی حاصل از آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی به‌عنوان شاهدی بر سیمانی‌شدگی طبیعی و در نتیجه قرار گرفتن مسیر تونل‌های بررسی شده در آبرفت‌های C قلمداد می‌شود.

**جدول ۸. مقایسهٔ نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی و صحرایی [۱۷]**

| کیلومتر | عمق (متر) | آزمایش‌های برجا | | آزمایش‌های آزمایشگاهی | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | برش برجا | | برش مستقیم | | سه محوری | |
| | | c (kPa) | φ (°) | c (kPa) | φ (°) | c (kPa) | φ (°) |
| ۰+۰۰۰ | ۱~۳ | ۲۰ | ۳۳ | | | | |
| ۰+۲۴۵ | ۶~۸ | ۴۰ | ۲۲ | | | ۳۰ | ۲۵ |
| ۰+۵۰۰ | ۲~۴ | ۱۹ | ۳۵ | | | | |
| ۰+۰۰۰ | ۱~۳ | | | | | ۱۰ | ۲۲ |
| ۰+۲۴۵ | ۱~۳ | | | | | ۱۷ | ۱۵ |
| ۰+۵۰۰ | ۱~۳ | | | | | ۱۶ | ۱۸ |
| ۰+۵۰۰ | ۸~۱۰ | ۴۵ | ۲۸ | | | ۲۰ | ۲۰ |
| ۰+۰۰۰ | ۳~۵ | | | ۸ | ۲۸ | | |
| ۰+۰۰۰ | ۳~۵ | | | ۱۶ | ۱۸ | | |
| ۰+۲۴۵ | ۳~۵ | | | ۱۲ | ۳۰ | | |
| ۰+۵۰۰ | ۳~۵ | | | ۱۵ | ۳۰ | | |

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.6.0 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3559 ]

لازم به ذکر است که در ارتباط با کم بودن VL واقعی اتفاق افتاده در مسیر تونل ابوذر باید به مسائلی مانند قطر نسبتاً کم تونل ابوذر و هم‌چنین عمل‌کرد فرایندهایی مانند فشار جبهه کار و فشار تزریق، که همگی به‌عنوان فاکتوری برای ممانعت از هم‌گرایی کامل دیواره تونل و در نتیجه کاهش VL عمل می‌کند، توجه شود.

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش نشست زمین در اثر حفر تونل ابوذر بررسی شده و تأثیر عوامل زمین‌شناسی مهندسی بر آن بررسی شد. در فرایند پیش‌بینی نشست زمین به‌روش تجربی، یکی از عوامل مؤثر بر مقدار و نوع نشست زمین تعیین پارامترهایی تجربی مانند VL و k ذکر شده است که عمدتاً به خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی مصالح موجود در مسیر تونل بستگی دارند. برای انجام این تحقیق در گام نخست مقدار پارامتر های مزبور براساس مقادیر پیشنهادی محققان مختلف فرض شده و نشست زمین براساس VL و kهای مذکور به‌روش تجربی و هم‌چنین به‌روش تحلیلی پیش‌بینی شد. سپس نشست‌های پیش‌بینی شده با نشست‌های واقعی مقایسه شده و با توجه به کم بودن نشست‌های واقعی نسبت به نشست‌های پیش‌بینی شده، نتیجه گرفته شد که مقدار VL واقعی کم‌تر از مقدار پیش‌بینی شده است. در این ارتباط براساس نشست‌های واقعی اندازه‌گیری شده در مسیر تونل، مقدار VL واقعی اتفاق افتاده در مسیر تونل ابوذر، در بازهٔ ۰/۳۶~۰/۶۲=VL تخمین زده شد. با توجه به ارتباط تنگاتنگ این پارامترها با خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی خاک به‌ویژه چسبندگی، نتیجه گرفته شده عاملی در جهت افزایش مقدار چسبندگی خاک عمل کرده است. براساس خصوصیات زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی آبرفت C تهران، نتیجه گرفته شد که سیمانی‌شدگی مصالح در این سازند، عامل اصلی در افزایش چسبندگی و در نتیجه کاهش VL بوده و بنابراین باعث کاهش نشست زمین در اثر حفر تونل ابوذر شده است. برای بررسی پدیدهٔ سیمانی‌شدگی مصالح موجود در مسیر تونل، به نتایج آزمایش‌های برجا و آزمایشگاهی برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی توجه شده است.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.6.0 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3559 ]

زیاد بودن چسبندگی حاصل از آزمایش‌های برش برجا نسبت به چسبندگی حاصل از آزمایش‌های آزمایشگاهی به‌عنوان شاهدی برای سیمانی‌شدگی مصالح معرفی شد.

## تقدیر و تشکر

از مؤسسهٔ مهندسین مشاور ساحل به دلیل در اختیار گذاشتن اطلاعات مربوط به نشست زمین در اثر حفاری تونل ابوذر تشکر و قدردانی می‌شود.

## منابع

1. Peck R.B., "Deep excavation and tunneling in soft ground", Proc. Of the 7th int. Conference on soil Mechanics and Foundation Engineering" State of the art Volume. Socieded Mexicnan de Mecanica de Suelos, A. C. (1969) 225-290.
2. Franzius J.N., "Behaviour of buildings due to tunnel induced subsidence", Department of Civil and Enviromental Engineering. Imperial College of Science, Technology and Medicine. London, SW7 2BU. (2003).
3. O'Reilly M.P., New B.M., "Settlements above tunnel in the united kingdom- their magnitude and prediction", Tunnelling 82. The Institution of Mining and Metallurgy, London (1982).
4. Attewall P.B., Woodman J. P., "prediction the dynamics of ground settlement and its derivatives caused by tunneling in soil", Ground Engineering, 15 (7) (1982).
5. Attewall P.B., Yeates. J., Selby A.R., "Soil movement induced by tunneling and their effects on pipelines and structures", London., Blackie and Son Ltd (1986).
6. Mair R.J., Taylor R.N., Bracegirdle A., "Subsurface settlement profiles

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.6.0 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3559 ]

above tunnels in clays", Geotechnique 43, No. 2 (1993) 315-320.

7. Loganathan N., "An Innovative Method For Assessing Tunnelling-Induced Risks To Adjacent Structures", PB 2009 William Barclay Parsons Fellowship Monograph 25. Parsons Brinckerhoff Inc (2011).
8. Guglielmetti V., Grasso P., Mahtab A., Xu S., "Mechanized Tunnelling in Urban Areas-Design methodology and construction control", Geodata S.p.A., Turin, Italy:,CRC Press (2008).
9. Leca E., New B.,. "Settlements induced by tunneling in Soft Ground", Tunnelling and Underground Space Technology, vs.22, (2007) 119-149. (ITA/AITES Report 2006).
10. Franzius J.N., Potts D.M., Burland J. B., "The influence of soil anisotropy and K0 on ground surface movement resulting from tunnel excavation", Geotechnique vol:55 no.3 (2005) 189-199.
11. Golpasand M.B., Nikudel M.R., Uromeihy A. "Effect of Engineering Geological Characteristics of Tehran's Recent Alluvia on Ground Settlement Due to Tunneling", Geopersia 4 (2) (2014) 185-199.

۱۲. باغبان گل‌پسند م.، *ارزیابی تأثیر خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی مصالح بر میزان نشست زمین در اثر حفر تونل‌های کم‌عمق در مناطق شهری*، رسالهٔ دکتری زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس. به راهنمایی دکتر محمدرضا نیکودل (۱۳۹٤).

13. Golpasand M.B., Nikudel M.R., Uromeihy A., "Predicting the occurrence of mixed face conditions in tunnel route of Line 2 Tabriz metro, Tabriz, Iran", Global View of Engineering Geology and the Environment (Proceeding of 19th Asian Regional Conference of IAEG) (2013) 487-492.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.6.0 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3559 ]

14. Rieben E.H., "Geological observations on alluvial deposits in norther", Geological Survey of Iran. Rep. No. 9 (1966).

۱۵. جعفری م.، *گزارش ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای شمال تهران از دیدگاه شرایط ساختگاه*، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (۱۳۸۱).

۱۶. چشمی ا.، *مطالعهٔ خواص مکانیکی آبرفت درشت‌دانه تهران براساس ترکیب زمین‌شناسی و آزمایش‌های مکانیکی*، رساله دکتری زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس (۱۳۸۵).

۱۷. مؤسسهٔ مهندسین مشاور ساحل، *مطالعات زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل کمکی کانال ابوذر*، (۱۳۹۰).

18. I.T.A. Working Group No. 2. (ITA), "Guidelines for the design of shield tunnel lining", Tunneling Underground Space Technology.15(3) (2000) 303-331.

19. DAUB (Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen), "Recommendations for selecting and evaluating tunnel boring machines", Tunnel 5 (97), (1997) 20-35.

۲۰. رازی‌فر م.، حسینی م.، هاشمی س.، *تخمین میزان نشست سطح زمین ناشی از حفر تونل قطعه شرقی-غربی خط هفت متروی تهران*، زمین‌شناسی مهندسی (مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران)، جلد سوم، شماره ۳ و ٤ (۱۳۸۹) ۷۱ -۸۷.

21. Verruijt A., Booker J.R., "Surface Settlement due to Deformation of a Tunnel in an Elastic Half Plane", Geotechnique, 46(4) (1996) 753-757.

22. Loganathan N., Poulos H.G., "Tunneling Induced Ground Deformation and their Effect on Adjacent Piles", Proceeding of 10th Australian Tunneling Conf., (1999) 1-34.

23.Bobet A., "Analytical Solutions for Shallow Tunnels in Saturated Ground", J. Eng.Mech. Div. ASCE 127 (12) (2001) 1258-1266.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.6.0 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3559 ]

24. Park H.H., "Analytical Solution for Tunnelling-Induced Ground Movement in Clays", Tunnelling and Underground Space Technology 20, (2005) 249-261.

25. Lee K.M., Rowe R.K., Lo K.Y., "Subsidence owing to tunnelling. I. Estimating the gap parameter", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 29, No. 6 (1992) 929-940.

26. Dunniclif J. and Green G.E., "Geotechnical instrumentation for monitoring field performance", John wiley and Sons Inc., United State (1988).

۲۷. مؤسسهٔ مهندسین مشاور ساحل، *گزارش فعالیت‌های مهندسی کارگاهی* (۱۳۹۱).

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.6.0 ]

[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3559 ]