نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی
Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)
tuse.shahroodut.ac.ir
دوره‌ی ۳- شماره‌ی ۱/تابستان ۱۳۹۳

# بررسی عددی تاثیر اندرکنش تونل- سازه‌ی سطحی بر نشست سطح زمین

**صبا قره‌داش[1*]؛ میلاد برزگر[2]**

۱- دانش‌آموخته‌ی کارشناسی‌ارشد مکانیک سنگ؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن و متالورژی؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- دانش‌آموخته‌ی کارشناسی‌ارشد استخراج معدن؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن و متالورژی؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۱/۱۰/۱۵؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۲۱

**واژگان کلیدی**

نشست سطحی
حفاری مکانیزه
تحلیل پارامتریک
هندسه‌ی ساختمان
خط ۲ متروی مشهد
روش اختلاف محدود

**چکیده**

در احداث زیرساختارهای زیرزمینی شهری، عبور تونل‌ها از زیر سازه‌های سطحی امری اجتناب ناپذیر است؛ بنابراین پیش‌بینی و کنترل تغییر مکان‌های حاصل از حفاری، به ویژه نشست سطحی زمین، همواره باید پیش از حفاری مورد توجه قرار گیرد و در حین حفاری نیز بررسی شود. در این پژوهش یکی از ساختمان‌های مستعد تغییر مکان‌های بحرانی در مسیر عبور تونل خط ۲ متروی مشهد به عنوان مطالعه‌ی موردی انتخاب و با روش عددی مدلسازی و تحلیل شده است. همچنین اثر تغییرات پارامترهای هندسی ساختمان بر نشست سطحی مطالعه شده است. پژوهش انجام گرفته، نشان داده است اثر تغییر عمق بیش‌تر از تغییرات فاصله‌ی جانبی بین تونل و سازه‌های سطحی بر نشست موثر است. همچنین ضمن بررسی نمودارهای تغییرات فاصله‌ی جانبی بین تونل و ساختمان مهم‌ترین نکته این است که افزایش فاصله‌ی جانبی، ابتدا افزایش نشست سطح زمین و سپس تاج تونل را به دنبال داشته و مکانیسم تغییر شکل تونل و تغییرات تنش قائم، با فاصله گرفتن از ساختمان، بر روند تغییرات موثر است. همچنین اثر لحاظ کردن این عوامل بر تغییر شکل نقاط متفاوت ساختمان و مقایسه‌ی آن با نتایج تحلیل‌های زمین بکر نیز ارائه شده است.

## ۱- پیشگفتار

مناسب‌ترین روش توسعه‌ی پایدار در محیط‌های شهری استفاده از فضاهای زیرزمینی مانند تونل‌ها برای کاربری‌های مختلف است. در این صورت عبور مستقیم تونل‌ها از زیر سازه‌های سطحی امری اجتناب‌ناپذیر است؛ بنابراین نشست حاصل از حفاری و اثرات آن بر سازه‌های سطحی همواره نگرانی طراحان فضاهای شهری را به همراه داشته است. حفر تونل در زمین سبب تغییر میدان تنش شده و یک میدان تغییر مکان در زمین اطراف تونل به وجود می‌آورد. در این خصوص نه تنها سازه‌های مجاور تحت تاثیر عواقب ناشی از حفر تونل قرار خواهند گرفت، بلکه میدان تغییر مکان ایجاد شده و همچنین میدان تنش حاصل نیز، متاثر از سازه‌های مجاور خواهد بود **[1]** تا **[3]**.

برای حل این مسئله، روشی بر پایه‌ی سختی ساختمان و خاک پیشنهاد شده است که اثر سختی یک ساختمان را در هنگام محاسبه‌ی تغییر شکل و پتانسیل آسیب‌دیدگی آن به حساب می‌آورد. البته در مقابل ساده شدن مدلسازی رفتار پیچیده‌ی سیستم، مبحث برهمکنش تونل، خاک و سازه قرار دارد؛ زیرا نه تنها ساخت تونل سبب تغییر شکل ساختمان‌ها می‌شود، بلکه وجود ساختمان نیز بر جابجایی خاک اطراف تاثیر می‌گذرد **[4]**.

با وجود اینکه حضور سازه‌های سطحی، بسته به فاصله‌ی سازه و تونل، بر توسعه‌ی حرکات زمین تاثیر گذار است، درک نحوه‌ی گسترش تغییر شکل‌ها و نشست‌های

* تهران؛ خیابان حافظ؛ شماره‌ی ۴۲۴؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن و متالورژی؛ صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵؛ شماره‌ی تلفن: ۶۴۵۴۰-۰۲۱؛ رایانامه: milisaba.46@gmail.com

سطح زمین پیش از اضافه کردن پیچیدگی وجود سازه در حالت زمین بکر نیز اهمیت دارد [5] و [6]. رویکرد موجود در تحلیل برهمکنش تونل-سازه شامل محاسبه‌ی نشست‌های حالت میدان آزاد، ارزیابی پارامترهای تغییر شکل سازه مانند تغییر شکل نسبی، کرنش افقی و نشست‌های تفاضلی بر اساس موقعیت سازه و تونل و در نتیجه تخمین خسارت وارده به سازه است. بر همین اساس نشست‌ها همواره متقارن ارزیابی شده و پتانسیل خسارت به دست آمده با مشاهدات واقعی متفاوت است [7].

رویکرد سختی نسبی و تاثیر سختی سازه‌ی سطحی بر روی تغییر مکان سطح زمین ناشی از حفاری، توسط آتول (*Attewell*) بررسی شده است. در نظر نگرفتن خصوصیات پی سازه و پارامترهای حفاری از کاستی‌های این روش است. اثر برهمکنش تونل، خاک و سازه به روش کنترل تغییر مکان، برای بررسی یک ساختمان ۵ طبقه در مجاورت حفاری تونل‌های دوقلو به صورت سه‌بعدی و پیوسته مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نیز حاکی از کاهش تغییر مکان‌های سطح ناشی از بکارگیری این روش در حضور سازه است و این تغییر مکان‌ها در اثر حفاری تونل‌های دوقلو در مجاورت پی‌ها به شدت افزایش یافته است [8].

پژوهشگرانی مانند کلر (*Klar*) در سال ۲۰۱۰ به بررسی برهمکنش تونل- سازه به روش مستقیم آزادسازی پرداختند. در این روش به مهندس طراح اجازه داده می‌شود با مسئله‌ی ژئوتکنیکی و سازه‌ای به صورت مجزا برخورد نمایند. در نهایت ماتریسی نسبتاً کوچک که می‌توان آن را به صورت مستقیم نیز حل نمود، تشکیل می‌شود [9].

در این تحقیق یکی از بخش‌های مستعد تغییر مکان‌های بحرانی در مسیر تونل خط ۲ متروی مشهد با نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ به روش عددی تفاضل محدود مدلسازی شده است. روش تفاضل محدود برای تحلیل مهندسی انواع سازه‌های ژئوتکنیکی به کار برده می‌شود. با این روش می‌توان رفتار مصالح را در مرحله‌ی پس از تسلیم و با تغییر شکل‌های مومسان تجزیه و تحلیل نمود. عکس‌العمل هر المان متاثر از نیروهای وارده بر آن، شرایط مرزی و رابطه‌ی رفتاری آن (رابطه‌ی تنش-کرنش مصالح) است که برای آن المان تعریف شده است. در این مطالعه اثرات تغییر مکان‌های ایجاد شده در زمین و نیز اثرات محتمل حفاری بر سازه‌های سطحی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین به منظور بررسی راه‌های کنترلی و نقاط حساس‌تر و مستعد سرمایه‌گذار، مطالعه‌ی پارامتری برای پارامترهای هندسی تونل و سازه‌ی سطحی صورت گرفته است.

## ۲- اهداف پژوهش و روش تحلیل

به طور کلی بررسی نشست و تغییر مکان سطح و سازه‌های روزمینی در اثر حفاری و ساخت تونل را می‌توان به دو بخش تحلیل‌های با روابط حل بسته برای حالت زمین بکر و تحلیل‌های عددی دوبعدی و سه‌بعدی با لحاظ کردن شرایط ژئوتکنیکی و سازه‌ای تقسیم نمود. با توجه به اینکه در روش‌های عددی امکان مدلسازی شرایط واقعی امکان‌پذیر است، بنابراین استفاده از این روش‌ها با نیم‌نگاهی به نتایج روش‌های حل بسته می‌تواند نتایج قابل قبول‌تر و واقع‌بینانه‌تری ارائه دهد.

به دلیل ماهیت پیچیده‌ی برهمکش ساختاری تا کنون رابطه‌ای مشخص و گویا برای بیان ارتباط بین سازه‌های سطحی مجاور و نشست زمین، یافت نشده است. فیزیک حاکم بر فرآیند برهمکنش بیانگر آن است که برهم‌نهی سازنده یا مخرب آن می‌تواند سبب افزایش یا کاهش نشست سطح زمین شود. از آن جایی که نشست از لحاظ اقتصادی نقش اساسی در فرآیندهای تونلسازی شهری دارد، بنابراین به نظر می‌رسد اطلاع از مکانیسم نشست و نحوه‌ی تاثیر آن بر سازه‌های مجاور سطحی ضروری است. همان‌گونه که اشاره شد تاکنون مطالعات کمی در ارتباط با تحلیل عددی برهمکنش سازه‌های مجاور و نشست زمین صورت گرفته و هر کدام از آن‌ها دارای نقاط ضعف و قوت خاص خود است. به همین دلیل در این مقاله با بهره‌گیری از تجارب حاصل از این مطالعات و سپس تلفیق و اصلاح آن‌ها، نگرشی ویژه در مورد برهمکنش‌ها ارائه شده است. در این پژوهش اثرات برهمکنش بین تونل و سازه‌های مجاور روزمینی با در نظر گرفتن سختی پی سازه‌ی سطحی و نیز اثرات وزن سازه‌ی احداث شده بر نشست مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۳- مدلسازی عددی

مطالعات انجام شده برای پروژه‌ی خط ۲ متروی مشهد

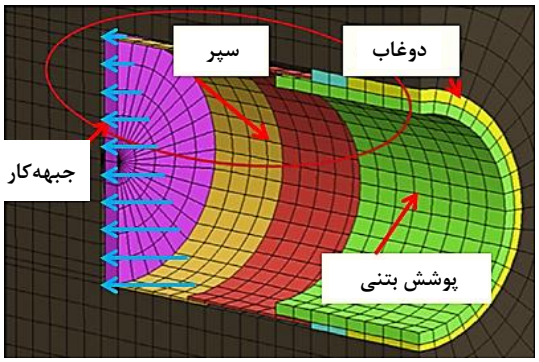
شامل حفر ۴۶ گمانه در مسیر شهری، بررسی‌های صحرائی و مطالعات آزمایشگاهی برای شناخت ویژگی‌های لایه‌های زیرزمینی و تجزیه و تحلیل نتایج است. اطلاعات موجود از داده‌های ژئوتکنیکی بدست آمده از گمانه‌های *DH-9* تا *DH-41* و پروفیل ژئوتکنیکی لایه‌بندی خاک در مسیر عبور از خیابان کوهسنگی گرفته شده است.

به دلیل پیچیدگی فرآیند برهمکنش، نمی‌توان به راحتی و تنها با استفاده از روابط تحلیلی نشست تونل و سازه‌ها را بررسی نمود. از طرفی آزمایش چنین مسائلی دشوار، هزینه‌بر و نیازمند تجهیزات پیشرفته است که به سادگی در مقیاس واقعی قابل کاربرد نیستند؛ بنابراین از تحلیل عددی، که قابلیت مدلسازی شرایط پیچیده برهمکنش از جمله پیچیدگی‌های هندسی، رفتار غیر خطی مواد و شرایط پیچیده‌ی مرزی را دارد، برای تحلیل و بررسی نشست استفاده شده است. تحلیل عددی حاضر را می‌توان به گام‌های زیر تقسیم نمود.

- تعریف هندسه‌ی تونل-سازه و مدلسازی آن‌ها
- انتخاب نحوه‌ی محاسبات، تعریف مدل ساختاری و پارامترهای فیزیکی و مکانیکی مواد
- تعریف شرایط اولیه و مرزی
- ایجاد تعادل اولیه قبل از حفر تونل
- حفاری تونل و دریافت نتایج تحلیل عددی
- اعمال شرایط مرزی شامل مرزهای داخلی تونل (فشار جبهه‌کار، دوغاب و وزن *TBM*)

ابعاد مدل به گونه‌ای در نظر گرفته شده تا ضمن پیشگیری از تاثیر مرزهای مدل بر نتایج بدست آمده و ایجاد خطا، مانع از افزایش حجم و زمان محاسبات شود. ابعاد مدل در راستای محورهای $X$، $Y$ و $Z$ به صورت تابعی از قطر تونل مترو ($D$) و عمق آن ($H$) در نظر گرفته شده است. صفحات جانبی و تحتانی مدل به ترتیب در راستای افقی و عمودی ثابت شده است. بار سطحی ۲۰ کیلوپاسکال به عنوان بار ترافیک به مرز فوقانی مدل اعمال شده است. فرآیند حفاری تونل مترو و نصب پوشش بتنی در گام‌های ۱٫۵ متری مدلسازی شده است. برای مدلسازی فضای خالی میان سپر و جداره‌ی حفاری، این امکان فراهم شده تا نقاط شبکه‌ای واقع بر سطح حفاری حداکثر به اندازه‌ی اضافه‌حفاری ایجاد شده توسط کله‌ی حفار (۱۹ میلی‌متر)، جابجا شوند.

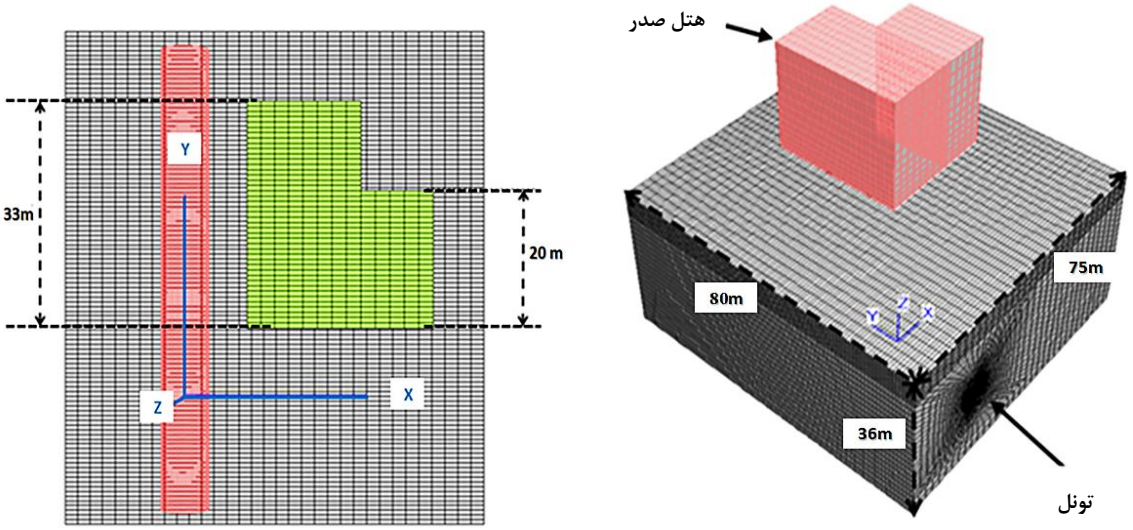
برای مدلسازی فشار محفظه‌ی حفاری، جبهه‌کار حفاری با اعمال بار گسترده‌ی خطی نگهداری شده است. فشار نگهداری جبهه‌کار در تاج تونل برابر با ۳۵ کیلوپاسکال (بر اساس مقادیر طراحی) در نظر گرفته شده است. همچنین فشار تزریق پشت پوشش بتنی در سقف، ۰٫۵ بار (۵۰ کیلوپاسکال) بیش‌تر از فشار نگهداری جبهه‌کار در تاج در نظر گرفته شده که با فرض وزن مخصوص ۱۲ کیلونیوتن بر متر مکعب به صورت بار گسترده خطی، به طول ۱٫۵ متر (طول یک حلقه‌ی پوشش بتنی) از سطح حفاری اعمال شده است. در **شکل ۱** نحوه‌ی اعمال فشار نگهداری جبهه‌کار و فشار تزریق پشت پوشش بتنی در مدل نشان داده شده است.




**شکل ۱- مدلسازی پوشش بتنی، فشار جبهه‌کار و تزریق پشت پوشش بتنی**

مقاطع بحرانی (با مد نظر قرار دادن روباره، قرارگیری زیر ساختمان‌های حساس مسیر و شرایط ژئوتکنیکی خاک) موجود در مسیر متروی مشهد مورد بررسی قرار گرفته و برای تمام آن‌ها مدلسازی سه‌بعدی انجام شده است. **شکل ۲** نمای یکی از مقاطع مورد بررسی را نشان می‌دهد. این مقطع در کیلومتر ۸٫۵۶۰ از مسیر تونل قرار داشته و در آن یک ساختمان ۸ طبقه به ارتفاع ۲۴ متر که ابعاد آن در **شکل ۲** نشان داده شده است، روی مسیر تونل قرار دارد.

با توجه به مطالعات انجام شده، پارامترهای ژئوتکنیکی خاک درونگیر تونل در **جدول ۱** ارائه شده است. برای انجام عملیات حفاری در متروی مشهد دستگاه *TBM* از نوع فشار تعادلی زمین (*EPB*) انتخاب شده است. قطر خارجی تونل ۹٫۱۵ متر و قطر داخلی آن ۸٫۶۸ متر طراحی شده است.




**شکل ۲- نما و پلان تونل و ساختمان مورد بررسی**

**جدول ۱- پارامترهای مکانیکی لایه‌های خاک درونگیر تونل متروی مشهد [۱۰]**

| شماره‌ی لایه | پارامتر / نوع خاک | $\gamma_{bulk}$ $KN/m^3$ | $C$ KPa | $\varphi$ Degree | $\nu$ - | $E$ MPa | $K_0$ - |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| I | CL-ML (رس سیلتی) | ۱۹٫۸ | ۳۰ | ۲۳ | ۰٫۳۴ | ۱۲ | ۰٫۵۶ |
| II | SC-SM (ماسه‌ی رسی) | ۱۹٫۶ | ۰ | ۳۵ | ۰٫۳ | ۷۰ | ۰٫۴۳ |
| III | CL-ML (رس سیلتی) | ۱۹٫۹ | ۳۰ | ۲۵ | ۰٫۳۴ | ۱۲٫۵ | ۰٫۵۳ |
| IV | GC-GM (شن رسی) | ۲۰٫۹ | ۰ | ۳۶ | ۰٫۳ | ۸۰ | ۰٫۳۶ |
| V | CL-ML (رس سیلتی) | ۲۱٫۴ | ۴۰ | ۲۵ | ۰٫۳۲ | ۳۰ | ۰٫۵۳ |

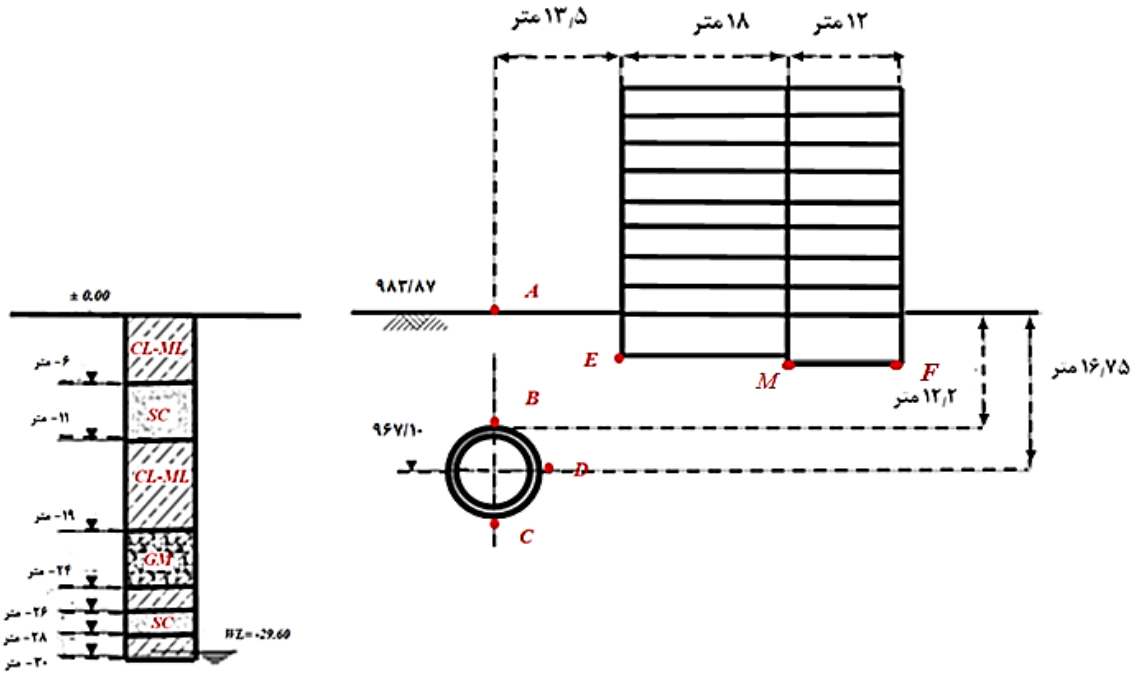
در مدلسازی اضافه حفاری حداکثر ۱۲ سانتی‌متری بین پوشش بتنی و سقف تونل در نظر گرفته شده که با دوغاب و همزمان با حفاری تحت فشار معین پر خواهد شد. در **جدول ۲** خواص فیزیکی و مکانیکی مورد استفاده در اجزا مختلف مدل نشان داده شده است. با توجه به اینکه ساختمان با ابعاد واقعی مدل شده است، جرم سقف و دیواره‌های ساختمان بر اساس آیین‌نامه‌های موجود محاسبه و با توجه به حجم ساختمان، چگالی یکنواخت برای ساختمان محاسبه و هندسه‌ی سه‌بعدی ساختمان با مدل رفتاری مومسان شبیه‌سازی شده است.

در مقطع مورد بررسی سطح آب زیرزمینی بسیار پایین است (در عمق ۳۰ متری از سطح زمین)، به گونه‌ای که بر محیط اطراف دهانه‌ی حفاری بی‌تاثیر است. همان‌طور که در **شکل ۳** مشاهده می‌شود بین سطح آب زیرزمینی و کف تونل بیش از ۱۰ متر فاصله است. همچنین بار ترافیک سطحی با استفاده از آیین‌نامه‌های حمل و نقل ترافیک شهری برآورد و در فاصله‌ای معادل عرض خیابان در مدل اعمال شده است.

تغییرات نشست در نقطه‌ای واقع بر سطح زمین، روی تاج تونل به عنوان نشست حداکثر سطحی (نقطه‌ی $A$)، نشست در تاج تونل (نقطه‌ی $B$)، تورم در کف تونل (نقطه‌ی $C$)، تغییر مکان جانبی نقطه‌ی واقع بر جداره‌ی تونل (نقطه‌ی $D$) و نیز نشست نقطه‌ی واقع بر جداره‌ی پی سازه (نقطه‌ی $E$) و نقاط $M$ و $F$ نقاط میانی و انتهایی واقع بر جداره‌ی پی سازه ضمن تغییرات پارامترهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. **شکل ۳** نقاط بررسی نشست و تورم همراه با هندسه‌ی ساختمان و مشخصات لایه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول ۲- پارامترهای مورد استفاده در مدلسازی المان‌های سپر، دوغاب، پوشش‌بتنی و ساختمان

| پارامتر / نوع المان | $\rho_{bulk}$ | $C$ | $\phi$ | $\nu$ | $E$ | *thickness* |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $Kg/m^3$ | *KPa* | *Degree* | - | *MPa* | *cm* |
| سپر | ۷۸۵۰ | - | - | ۰/۱۷ | ۲۱۰۰۰۰ | ۱۰ |
| دوغاب | ۱۵۰۰ | ۶۰۰ | ۳۵ | ۰/۲۵ | ۴۰ | ۱۲ |
| پوشش بتنی | ۲۶۰۰ | - | - | ۰/۲ | ۳۰۰۰۰ | ۳۵ |
| ساختمان | ۳۶۴ | - | - | ۰/۲ | ۲۵۰۰۰ | - |
| پی | ۲۴۰۰ | - | - | ۰/۲ | ۲۵۰۰۰ | ۴۵۰ - ۴۰۰ |




شکل ۳- نقاط اندازه‌گیری تغییر مکان

## ۴- تحلیل مدل زمین بکر

در حالت مدل پایه یعنی زمین بکر علاوه بر تحلیل‌های عددی، پروفیل نشست سطح زمین در مقطع عرضی با استفاده از روابط نیمه‌تجربی برای مقایسه با نتایج مدل عددی بدست خواهد آمد. در این روش با استفاده از تحقیقات پک (*Peck*) می‌توان منحنی نشست سطح زمین در اثر اجرای تونل را با منحنی توزیع گوسی مطابق گزاره‌ی (۱) زیر نمایش داد **[11]**:

$$S_v = s_{max} exp\left(\frac{-y^2}{2i^2}\right) \qquad (۱)$$

برای تعیین ضریب $i$ در خاک‌های مختلف، مقادیری توسط محققان پیشنهاد شده است. در تحقیق از مقدار $i=(0.4\approx0.45)\times Z_0$ که برای خاک‌های ماسه‌ای است استفاده شده است. $Z_0$ (عمق محور تونل از سطح زمین) نیز ۲/۵ برابر قطر حفاری ($D$) انتخاب شده است. حجم گودال نشست ($V_s$) پدید آمده در سطح زمین در واحد متر تونل، $V_s$ با انتگرال‌گیری از گزاره‌ی (۱) بصورت گزاره‌ی (۲) است. معمولاً این رابطه بر حسب درصدی از حجم خاک حفاری شده در داخل تونل بصورت گزاره‌ی (۳) بیان می‌شود **[11]**:

$$V_s = \sqrt{2\pi}\, iS_{max} \qquad (۲)$$

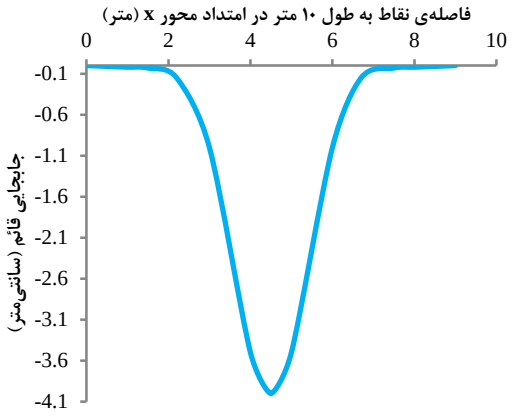
$$V_s = V_l \pi \frac{D^2}{4} \qquad (۳)$$

ضریب کاهش حجم ($V_l$) وابسته به شرایط زمین و روش حفاری است. به عنوان مثال در روش‌های مکانیزه با اعمال فشار به جبهه‌کار با ماشین‌های حفار دوغابی و تعادل فشار زمین، آزادسازی تنش و ضریب $V_l$ (کمتر از یک درصد) کاهش می‌یابد. در این تحقیق تحلیل‌ها در چهار گروه انجام شده است:

- **تحلیل عددی زمین بکر:** در این تحلیل، نشست سطح زمین و تغییر مکان محیط اطراف بدون حضور سازه‌ی سطحی و تنها در اثر حفاری تونل محاسبه شده است.
- **تحلیل اندرکنشی تونل و پی سازه‌ی سطحی:** در این تحلیل علاوه بر تونل، پی سازه‌ی سطحی نیز به مدل اضافه و پروفیل تغییر مکان سطح با در نظر گرفتن سختی پی محاسبه شده است.
- **تحلیل برهمکنشی تونل و پی سازه با در نظر گرفتن اثر وزن سازه:** در این تحلیل علاوه بر لحاظ کردن سختی پی، وزن سازه‌ی سطحی قبل از انجام تحلیل‌های حفاری تونل به پی اعمال شده و سپس پروفیل‌های نشست سطح زمین محاسبه شده است.
- **تحلیل زمین بکر با استفاده از روابط نیمه‌تجربی:** در این قسمت با توجه به روابط نیمه‌تجربی، پروفیل نشست سطح زمین محاسبه شده است.

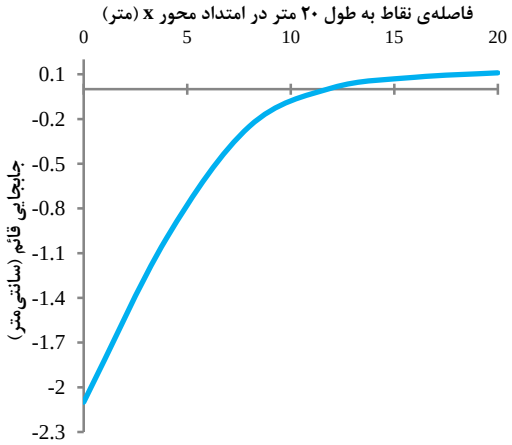
یکی از روش‌های ارزیابی خسارت‌های وارد شده بر سازه‌های سطحی ناشی از عملیات حفاری تونل، برآورد صدمات سازه بر اساس نشست‌های پیش‌بینی شده از تحلیل‌های زمین بکر است. این نوع تحلیل‌ها مستقل از نوع سازه و شرایط سطح زمین است؛ بنابراین برای تخمین اولیه بسیار کارآمد است. در این تحلیل‌ها، نشست‌های بدست آمده از تحلیل زمین بکر را در مدلی مجزا تحت تاثیر بار و ظرفیت سازه، اعمال و نشست‌ها تحت تاثیر عوامل سطحی ارزیابی می‌شود. نتایج عمومی تحلیل مدل برای حالت زمین بکر در ادامه ارائه شده است.

همان‌طور که در **شکل ۴** ملاحظه می‌شود، بیش‌ترین تغییر مکان سطح زمین برابر ۴۰ میلی‌متر در وسط مدل است. یعنی اگر سازه‌ای در بالای تونل قرار داشته باشد برای ارزیابی رفتار آن سازه در اثر حفاری تونل، باید در یک تحلیل مجزا تحت نشستی برابر ۴۰ میلی‌متر قرار داده شود. با یک قضاوت کلی و مقایسه‌ی این مقدار با نشست مجاز پی‌های نواری (۲۵ میلی‌متر) می‌توان بیان نمود با این روش، مقادیر نشست ایجاد شده از مقادیر مجاز بیش‌تر است. بنابراین استفاده از این روش اجرا منجر به ایجاد خسارت در سازه‌های سطحی خواهد شد. در مطالعه‌ی موردی این تحقیق موقعیت پی ساختمان در بالای تونل نبوده بلکه با فاصله از محور تونل قرار گرفته است (**شکل ۳**).




**شکل ۴- پروفیل نشست سطح در تحلیل عددی زمین بکر**

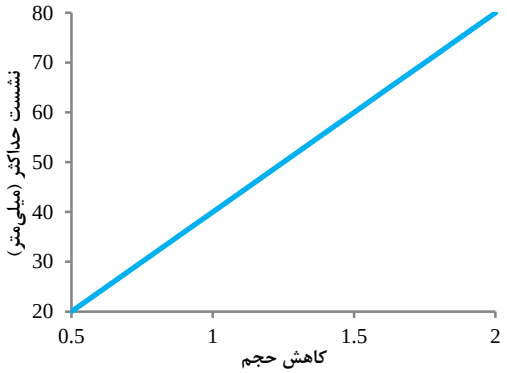
**شکل ۵**، پروفیل نشست سطح زمین در موقعیت پی ساختمان ۸ طبقه را نشان می‌دهد. پروفیل نشست اختلاف تقریبی ۲۱ میلی‌متری را برای موقعیت قرارگیری پی در تحلیل زمین بکر نشان می‌دهد. برای ارزیابی پروفیل نشست کلی مدل که با روش عددی محاسبه شده، این پروفیل و مقادیر نشست حداکثر با روابط نیمه‌تجربی محاسبه می‌شود.




**شکل ۵- پروفیل نشست در موقعیت پی در تحلیل عددی**

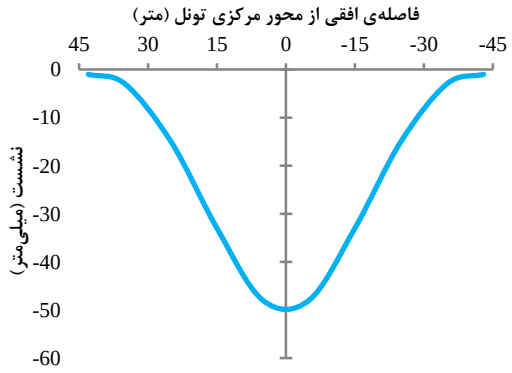
در **شکل ۶** مقدار آزادشدگی نشست بر اساس همگرایی مدل صورت گرفته است. در این خصوص از روابط تجربی برای تعیین نسبت تغییر مکان به تغییر مکان کل با توجه به گام حفاری کمک گرفته شده است.

$$D = 9.15\ M$$
$$Z_0 = 2.5 \times D = 23$$
$$I = 0.45 \times Z_0 = 10.35$$




**شکل ۶- تغییرات ضریب کاهش حجم با نشست حداکثر**

ملاحظه می‌شود نشست حداکثر پیش‌بینی شده با روابط نیمه‌تجربی برابر ۵۰ میلی‌متر و در حدود ۲۰ درصد بیش‌تر از مقادیر محاسبه شده با روش عددی است. علت این اختلاف را می‌توان در فرضیات روش‌های نیمه‌تجربی یافت. در این روش فرض بر آن است که هندسه‌ی تونل کاملا دایروی است و در یک محیط همگن مومسان قرار گرفته است. اما نکته‌ی قابل توجه در مقایسه‌ی این دو روش این است که روش‌های تجربی بدلیل فرضیات به کار رفته، همواره نتایج محافظه‌کارانه‌تری ارائه می‌دهند (**شکل ۷**).

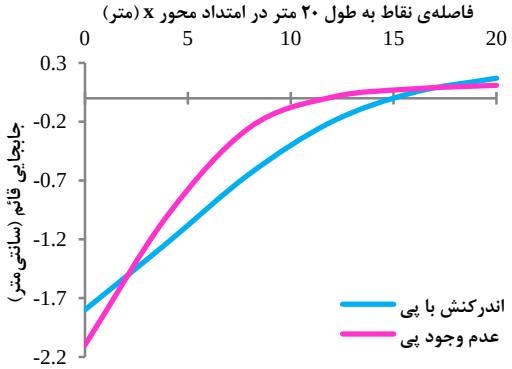



**شکل ۷- پروفیل نشست کلی سطح در تحلیل نیمه‌تجربی**

## ۵- نتایج تحلیل مدل‌های اندرکنشی

در مسائل ژئوتکنیکی لحاظ کردن برهمکنش سبب پیچیدگی بیش‌تر و همچنین واقعی‌تر شدن مدلسازی خواهد شد. با این وجود در مواردی که نیاز به دقت محاسباتی بالا نیست یا تحلیل‌ها برای امکان‌سنجی روش اجرا انجام می‌گیرد، مدل‌های غیر اندرکنشی برتری خواهد داشت. در محاسبات نهایی پروژه لحاظ کردن برهمکنش بین خاک و سازه و همچنین بین تونل و سازه‌ی سطحی از اهمیت خاصی برخوردار است؛ زیرا امکان پیش‌بینی واقعی نشست‌ها را فراهم می‌کند. برای انجام تحلیل‌های برهمکنشی به مدل زمین بکر، پی ساختمان نیز اضافه شده است. در این حالت اثر سختی پی بر پروفیل نشست سطح و نیز تغییر شکل پی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

برای بررسی بهتر اثر سختی پی بر تغییر شکل‌های حالت زمین بکر، پروفیل نشست خاک در زیر پی در دو حالت حضور پی و عدم حضور آن در **شکل ۸** نشان داده شده است. وجود پی، باعث افزایش سختی خاک و کاهش جابجایی در فواصل کمتر از ۲ متر شده است و پس از تقاطع دو منحنی وجود پی سبب افزایش تنش‌های القایی و در نتیجه افزایش نشست شده است. از فواصل تقریبی ۱۶ متر به بعد تقریباً نشست زمین در دو منحنی مشابه است.




**شکل ۸- پروفیل نشست در موقعیت پی**

با لحاظ کردن سختی پی بر پروفیل نشست، دو تغییر در مقدار و نحوه‌ی تغییر شکل سطح به وجود آمده است. تغییر اول، کاهش نشست حداکثر در گوشه‌ی پی به اندازه‌ی ۲٫۱ میلی‌متر است. همچنین نحوه‌ی نشست زیر پی نیز از

حالت منحنی گوسی خارج شده و حالت صاف‌تری به خود گرفته است. این تغییرات و همچنین کاهش نشست به سختی پی بستگی دارد؛ به طوری‌که هر چه پی سخت‌تر باشد، پروفیل نشست دارای انحنای کمتر بوده و از مقدار حداکثر نشست نیز کاسته می‌شود.

از دیگر مواردی که با حضور سازه‌ی سطحی و لحاظ کردن برهمکنش آن با تونل، منجر به بهبود شرایط محیط می‌شود، وزن سازه است. **شکل ۹**، پروفیل نشست سطح زمین را در این حالت در مقایسه با سایر تحلیل‌ها نشان می‌دهد. حداکثر نشست سطح در بالای تونل در حالتی که اثر وزن لحاظ شده است، برابر با ۴۴ میلی‌متر است. این مقدار در مقایسه با مدل قبل ۳ میلی‌متر افزایش را در محل حداکثر نشست نشان می‌دهد. همچنین در پی یعنی محل اعمال بار نیز نشست‌ها به طور محسوسی افزایش یافته است.

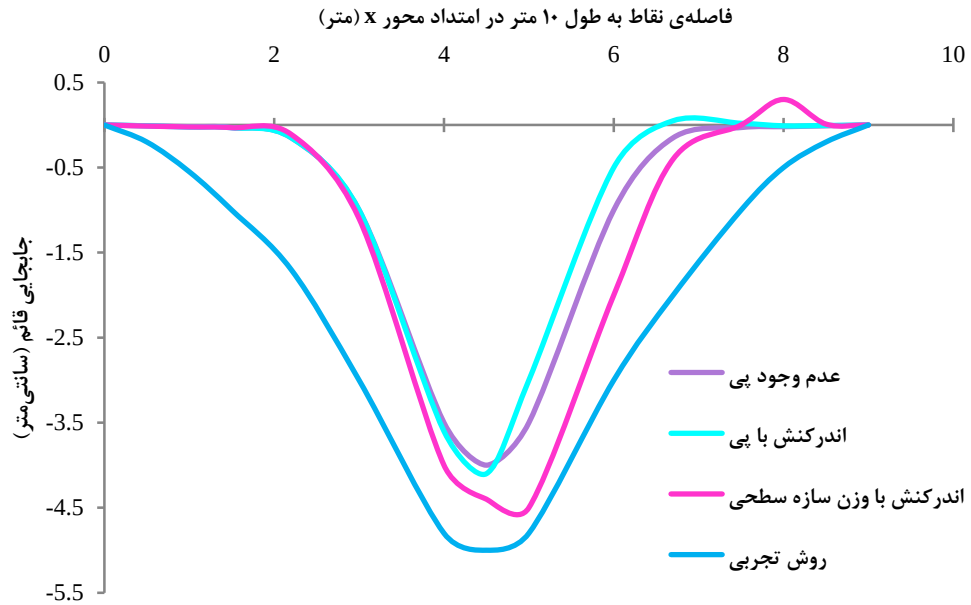
**شکل ۱۰**، نشست سطح در مجاورت پی را نشان می‌دهد. اختلاف ۸ میلی‌متری نشست گوشه‌ی پی در هر دو حالت، نشانگر اهمیت وزن سازه‌ی سطحی به عنوان یکی از عوامل تاثیرگذار برهمکنش تونل و سازه‌ی سطحی است.

## ۶- تحلیل پارامتریک

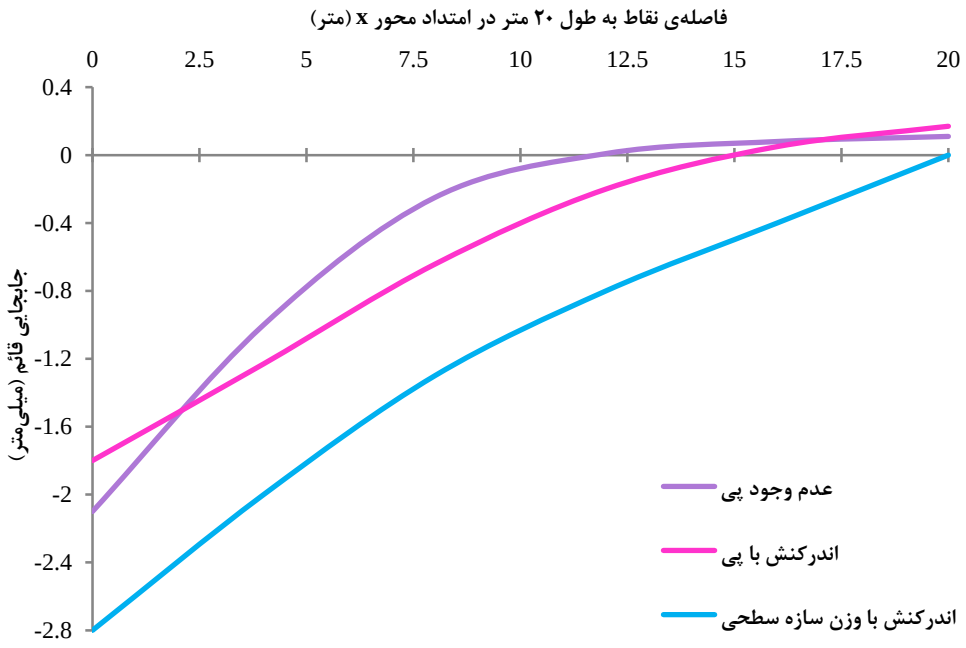
در این پژوهش اثرات پارامترهای هندسی تونل و ساختمان بر تغییر مکان زمین بررسی شده است. اثر تغییرات عمق پی ساختمان، عمق قرارگیری تونل و فاصله‌ی جانبی میان تونل و ساختمان به عنوان مهم‌ترین پارامترهای هندسی موثر مورد تحلیل قرار گرفته است. در این پروژه سطح مقطع و شکل تونل با مطالعات مهندسی انتخاب شده است؛ بنابراین بررسی این پارامترها برای این پروژه ضروری نیست.

در فضاهای شهری، عمق حفاری تونل به عوامل متعددی بستگی دارد. از طرفی، اعماق حفاری کمتر از حدی مشخص، به ویژه در روند حفاری مکانیزه، ناپایداری محیط و خساراتی جبران‌ناپذیر بر سازه‌های سطحی را به دنبال دارد. از طرف دیگر، اعماق حفاری بیش از حدود معمول، عدم امکان اجرا، مشکلات کارگاهی، افزایش هزینه‌ها و مشکلات دوره‌ی بهره‌برداری را به دنبال دارد.

یکی دیگر از مشکلات مربوط به عمق حفاری حضور تاسیسات زیرزمینی است که گاه عدم حفاری در عمقی مشخص را تحمیل می‌نماید. در مسیر عبوری تونل خط ۲ متروی مشهد ساختمان‌های مرتفع با تعداد طبقات زیرزمینی مختلف حضور دارد. همچنین سازه‌های بسیاری نیز در حال ساخت هستند. بنابراین ضمن بررسی اثر تغییرات عمق پی سازه‌ها بر نشست حاصل از حفاری، شاید بتوان نتایج قابل تعمیم به طول مسیر را نیز یافت.




**شکل ۹- پروفیل نشست در سطح زمین در تحلیل‌ها**




**شکل ۱۰- پروفیل نشست در موقعیت پی در تمام تحلیل‌ها**

پارامتری که از یک طرف بر پایداری سازه‌ی مجاور و از طرف دیگر بر نشست حاصل از حفاری موثر است، فاصله‌ی جانبی موجود بین دهانه‌ی حفاری و پی سازه‌ی مجاور است. در سازه‌های دارای پی عمیق (شمع)، گاه فاصله‌ی جانبی کم بین دهانه‌ی حفاری و سازه‌ی مجاور، خطرات زیادی به دنبال دارد. از طرف دیگر در محیط‌های شهری، محدودیت‌های زیادی برای دامنه‌ی فواصل مناسب حفاری وجود دارد و گاه فاصله نمی‌تواند از حدی مشخص بیش‌تر شود.

به دلیل عبور تونل خط ۲ متروی مشهد از مقابل سازه‌های با فواصل متفاوت، برای بررسی فواصل بحرانی، مقادیر تغییر مکان نقاط درونی و سطحی در مقابل تغییرات عمق حفاری تونل مورد بررسی قرار گرفته است. جهت‌های قراردادی تغییر مکان قائم و جانبی نقاط در **شکل ۱۱** نشان داده شده است. نشست (در نقاط $A$، $B$، $C$ و $E$) با علامت مثبت و تورم (نقطه‌ی $D$) با علامت منفی نشان داده شده است.

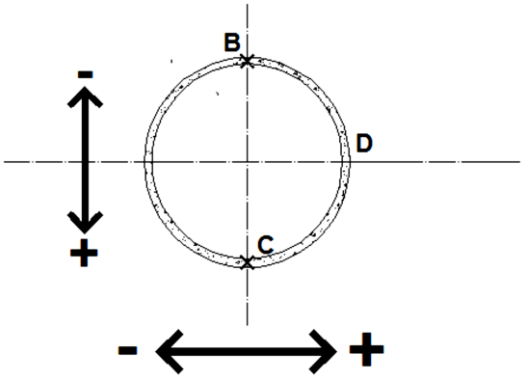
برای تفسیر رفتار نمودارهای تغییر شکل باید مکانیسم تغییر شکل تونل را شناخت. تغییر شکل تونل در حفاری مکانیزه معمولاً به صورت بیضی‌گون است و شناخت جهت تغییر شکل، تفسیر روند تغییرات نمودار را میسر می‌کند. **شکل ۱۲**، تغییر شکل بیضی‌گون شماتیک با گسترش در جهت قطر افقی و **شکل ۱۳** گسترش تغییر شکل بیضی‌گون در جهت قطر قائم را نشان می‌دهد.

برای بررسی رفتار نمودارهای تغییر مکان نقاط درونی زمین در برابر تغییرات عمق حفاری تونل توجه به نکات کلیدی زیر ضروری است:

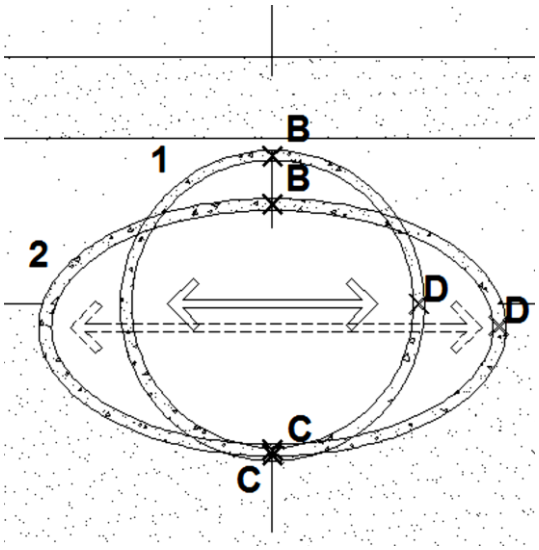
- به طور کلی افزایش عمق حفاری تونل، به دلیل افزایش فشار سربار، تغییر مکان‌های اطراف دهانه‌ی حفاری را افزایش می‌دهد. همچنین از آن‌جا که تغییر مکان‌ها از دهانه‌ی حفاری به سمت سطح زمین مستهلک می‌شود؛ بنابراین با افزایش عمق، نشست تاج تونل روندی افزایشی دارد.
- تغییر مکان‌های نقاط درونی زمین با محیط حفاری تونل متناسب است. یعنی آهنگ تغییر شکل‌های حاصل از حفاری در مصالح دانه‌ای و مصالح چسبنده متفاوت است. به طور کلی نشست در خاک‌های چسبنده به دلیل قوی‌تر بودن خاصیت شکل‌گیری گنبد فشار نسبت به خاک‌های دانه‌ای کمتر است. همچنین اگر دهانه‌ی حفاری شامل چند لایه خاک

باشد، توجه به این نکته که بخش عمده‌ی دهانه دانه‌ای است یا چسبنده، بر بررسی تغییر مکان‌های نقاط اطراف دهانه‌ی حفاری موثر است.

- باید توجه داشت در اغلب موارد حفاری تونل تغییر شکل‌های بیضی‌گون را به دنبال دارد؛ بنابراین لایه‌های اطراف دهانه‌ی حفاری می‌توانند بر روند تغییر شکل بیضی‌گون و گسترش آن در جهت قطر قائم یا افقی موثر باشد.

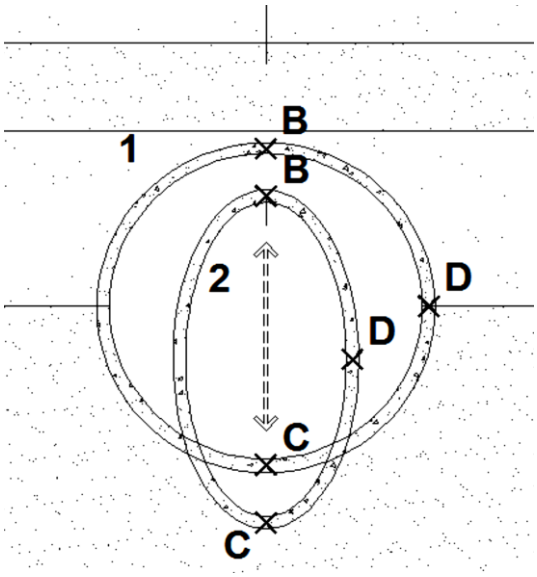



**شکل ۱۱- جهت قراردادی تغییر مکان قائم و جانبی نقاط**




**شکل ۱۲- تغییر شکل بیضی‌گون تونل با گسترش در جهت قطر افقی، حالت اولیه: (۱) و حالت تغییر شکل یافته: (۲)**

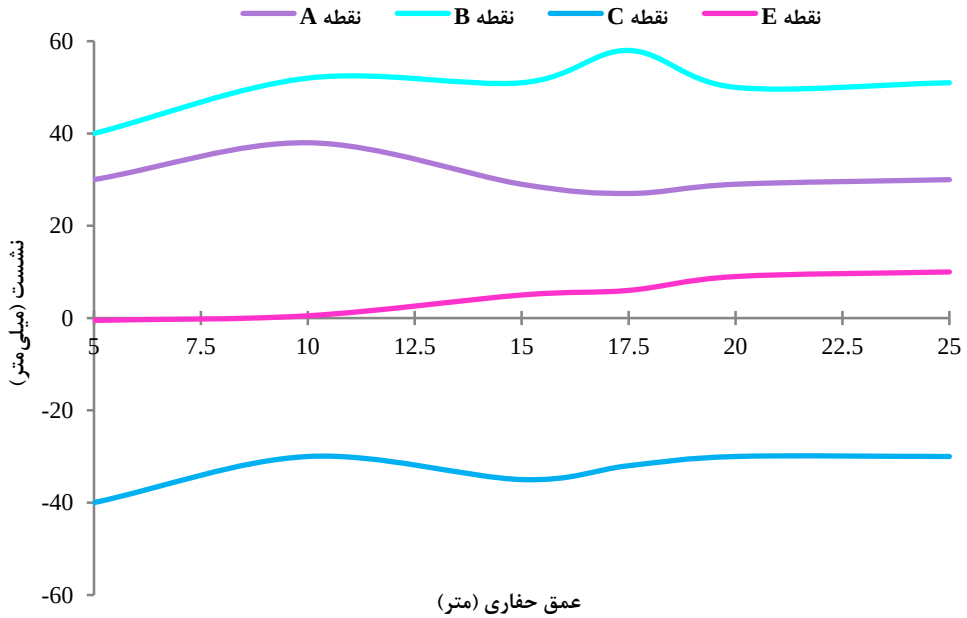
علاوه بر تغییرات فاصله‌ی جانبی بین برج و تونل (به عنوان عامل موثر بر تغییرات مقادیر تغییر مکان نقاط درونی خاک)، اگر بار ساختمان با وزن خاکی هم حجم آن معادل شود، وزن مخصوص خاک معادل، کمتر از وزن مخصوص لایه‌های پنج‌گانه خاک محل خواهد بود؛ بنابراین ضمن فاصله گرفتن از ساختمان، فشار قائم اعمالی بر تونل توسط لایه‌های فوقانی افزایش می‌یابد.




**شکل ۱۳- تغییر شکل بیضی‌گون تونل با گسترش در جهت قطر قائم، حالت اولیه: (۱) و حالت تغییر شکل یافته: (۲)**

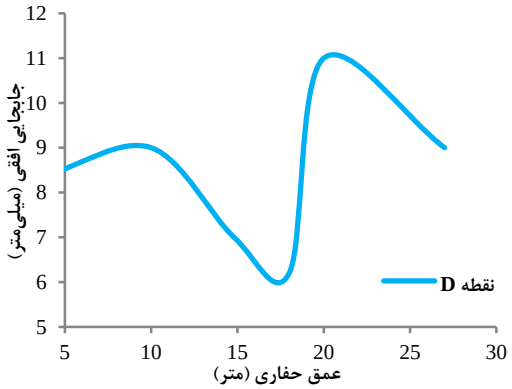
تغییرات پارامتر عمق حفاری تونل در بازه‌ی ۵ تا ۲۵ متر مدلسازی شده و اثر تغییرات آن بر مقادیر تغییر مکان‌های نقاط درونی زمین مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است در هنگام تغییر عمق تونل، فشار تزریق جبهه‌کار متناسب با عمق در مدل عددی افزایش یافته است. اعماق مذکور مربوط به تاج تونل است. عمق تاج تونل در مقطع مورد نظر تونل خط ۲ متروی مشهد ۱۲٫۲ متر است.

**شکل ۱۴**، مقادیر تغییر مکان قائم در برابر تغییرات عمق حفاری را در نقاط $A$، $B$، $C$ و $E$ نشان می‌دهد. با توجه به شکل، ضمن افزایش عمق حفاری به دلیل افزایش فشار سربار، نشست تاج تونل به طور کلی افزایش می‌یابد. در اعماق بیش‌تر از ۱۷ متر ابتدا کاهش نشست و سپس روند تقریباً ثابتی مشاهده می‌شود. دلیل اصلی کاهش نشست تغییر محیط حفاری از خاک دانه‌ای به خاک چسبنده است و به دلیل خاصیت گنبد فشار شدن خاک در تاج تونل، نشست تاج را به صورت موضعی کاهش می‌دهد.




**شکل ۱۴- تغییرات نشست در برابر تغییرات عمق حفاری برای نقاط *A*، *B*، *C* و *E***

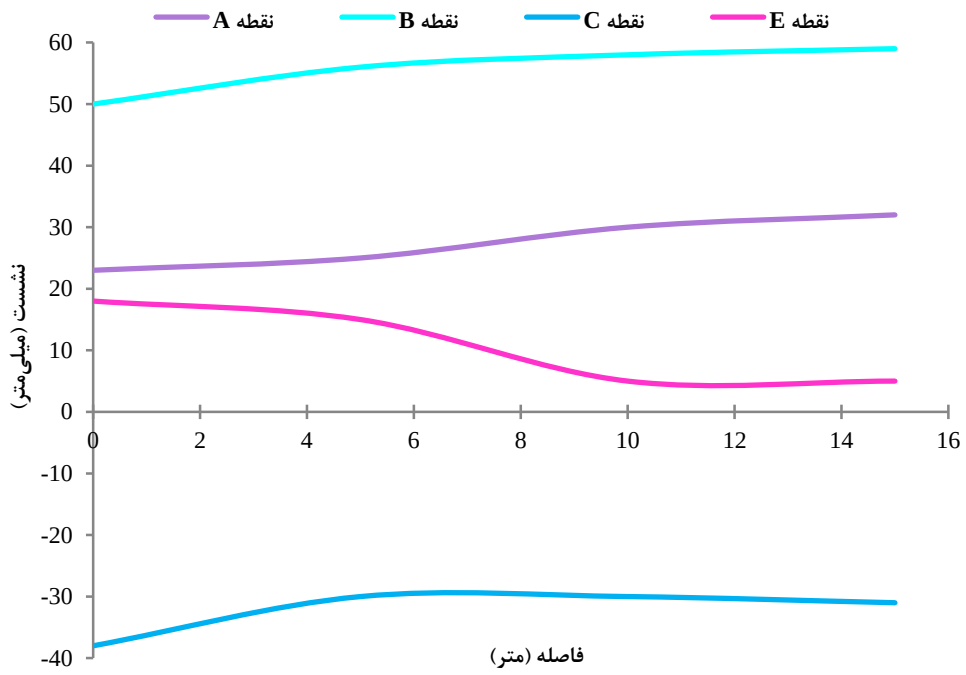
**شکل ۱۵** تغییر مکان جانبی در برابر عمق حفاری را برای نقطه‌ی $D$ نشان می‌دهد. با توجه به شکل، ضمن افزایش عمق حفاری، جابجایی افقی کاهش می‌یابد. در فاصله‌ی جانبی معادل ۲۰ و ۲۵ متر، افزایش نشست سطحی آهنگ بیشتری دارد. به این دلیل که در این فاصله، بخش عمده‌ی محیط حفاری خاک دانه‌ای است و خاک دانه‌ای در اعماق کم و با ضریب تغییر شکل کمتر نسبت به لایه‌های دیگر بوده است.




**شکل ۱۵- تغییر مکان جانبی نقطه‌ی *D* در برابر تغییرات عمق حفاری**

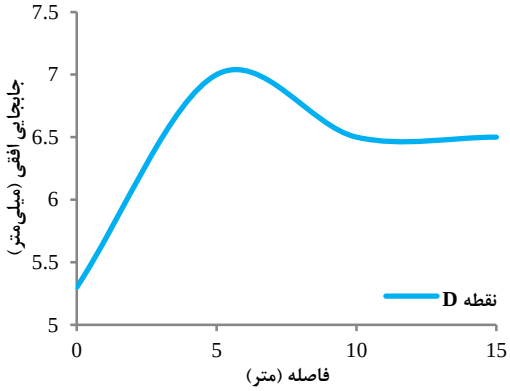
کمترین فاصله‌ی جانبی بین تونل و ساختمان ۱۳٫۵ متر است. از آنجا که تغییرات فاصله‌ی بین تونل و ساختمان تغییرات گسترش تنش زمین را به دنبال خواهد داشت، همواره یکی از عوامل موثر بر تغییرات مقادیر تغییر مکان‌های حاصل از حفاری است. از طرف دیگر در محیط‌های شهری حضور ساختمان‌های متعدد، محدوده‌ی قرارگیری تونل را محدود می‌کند، زیرا گاه نزدیک شدن به پی‌های عمیق ممکن است خسارات جبران‌ناپذیری را به دنبال داشته باشد. فاصله‌ی جانبی بین تونل و ساختمان در بازه‌ی صفر تا ۲۰ متر مدلسازی و اثر آن بر تغییر مکان نقاط مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

**شکل ۱۶**، مقادیر تغییر مکان قائم در نقاط $A$، $B$، $C$ و $E$ در برابر تغییرات فاصله‌ی جانبی بین ساختمان و تونل را نشان می‌دهد. از آنجایی که نقطه‌ی $E$ در ناحیه‌ی اعمال بار ساختمان است، به صورت همزمان با افزایش عمق حفاری، افزایش نشست در آن مشاهده شده است. نکته‌ی قابل توجه این است که آهنگ تغییرات برای اعماق حفاری کمتر از پی ساختمان که موضع اعمال بار ساختمان بر خاک است، کمتر از آهنگ تغییرات در اعماق بیش‌تر از عمق پی است که کاملاً بر تئوری گسترش تنش‌ها در خاک استوار است.




**شکل ۱۶- تغییرات نشست در برابر تغییرات فاصله‌ی جانبی بین ساختمان و تونل برای نقاط *A*، *B*، *C* و *E***

**شکل ۱۷**، نمودار مقادیر تغییر مکان جانبی نقطه‌ی *D* در برابر تغییرات فاصله‌ی بین تونل و ساختمان را نشان می‌دهد. ضمن بررسی نمودارهای تغییرات فاصله‌ی جانبی بین تونل و ساختمان نکته‌ی قابل توجه این است که افزایش فاصله‌ی جانبی بین ساختمان و تونل، ابتدا افزایش نشست سطحی و نشست تاج تونل را به دنبال داشته و تقریباً پس از فاصله‌ای معادل یک قطر تونل به سطح ثابتی می‌رسد.



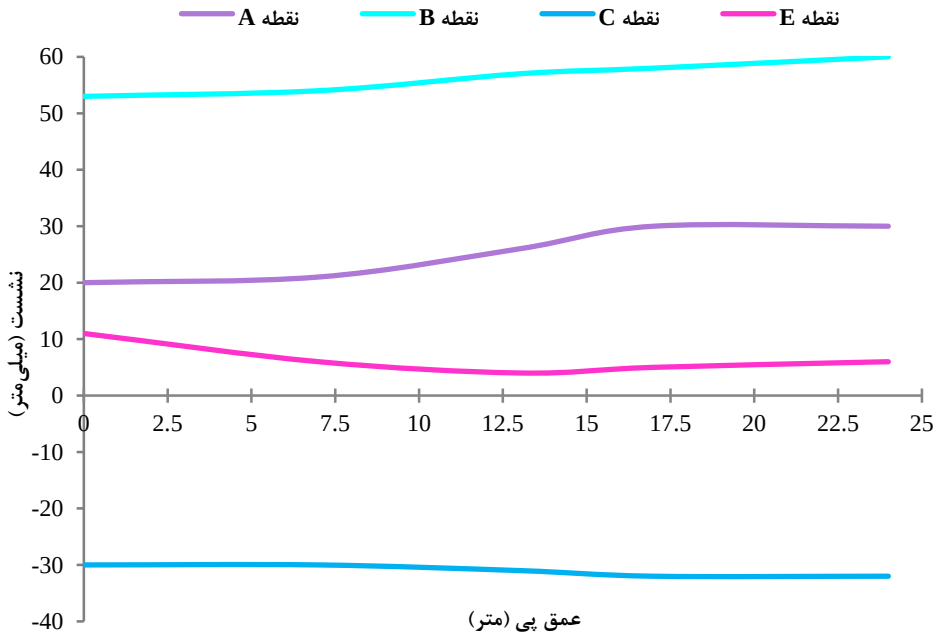

**شکل ۱۷- تغییرمکان جانبی نقطه‌ی *D* در برابر تغییرات فاصله‌ی جانبی بین ساختمان و تونل**

عمق پی ساختمان ۴ تا ۴٫۵ متر است. تغییرات عمق پی ساختمان نیز مشابه تغییرات فاصله‌ی جانبی بین ساختمان و تونل بر گسترش تنش درونی زمین موثر است و همواره یکی از عوامل تاثیرگذار بر میزان نشست حاصل از حفاری است. در این پژوهش، تغییرات عمق پی سازه در بازه‌ی صفر تا ۳۰ متر یعنی از حالت استقرار ساختمان در سطح زمین تا فرض قرارگیری پی سازه در تراز پایین‌تر از کف تونل، مدلسازی و اثرات آن بر تغییرات مقادیر تغییر مکان نقاط درونی زمین مورد بررسی قرار گرفته است.

**شکل ۱۸** تغییرات نشست نقاط *A*، *B*، *C* و *E* در برابر تغییرات عمق ساختمان را نشان می‌دهد. تا زمانی که عمق پی ساختمان که موضع اصلی انتقال بار به خاک است کمتر از عمق تونل است، با افزایش عمق و در نتیجه نزدیک شدن ساختمان به تونل، روند تغییرات نشست در سطح زمین و تاج تونل و تورم کف تونل افزایشی است. دلیل این امر، افزایش سختی جانبی تونل و در نتیجه تقویت تغییر شکل بیضی‌گون با گسترش در جهت قطر قائم است.

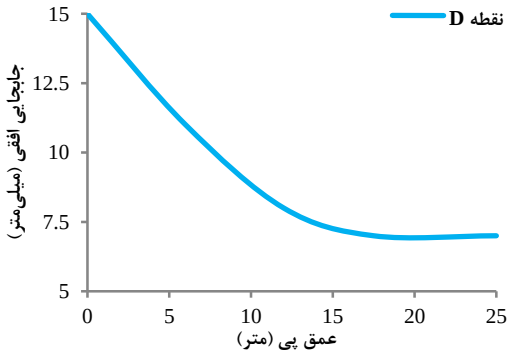
**شکل ۱۹** تغییر مکان جانبی نقطه‌ی *D* در برابر تغییرات عمق ساختمان را نشان می‌دهد. آنگونه که مشاهده

می‌شود، نقطه‌ی $D$ از ساختمان دور می‌شود. البته موضع اصلی افزایش فشار بخش فوقانی تونل است، بنابراین آهنگ تغییرات تورم کف تونل کمتر از نشست در سطح زمین و تاج تونل است. پس از بیش‌تر شدن عمق پی از عمق تونل، با کاهش نسبی فشار جانبی، روند تغییر شکل بیضی‌گون تونل به صورت نسبی در جهت قطر افقی گسترش می‌یابد. بنابراین کاهش نسبی نشست در سطح زمین و تاج تونل و نزدیک شدن نقطه‌ی $D$ به ساختمان مشاهده شده است.




**شکل ۱۸- تغییرات نشست در برابر تغییرات عمق پی ساختمان برای نقاط *A*، *B*، *C* و *E***

با مقایسه‌ی شکل‌های مربوط به تغییرات پارامترهای هندسی واضح است نشست نسبت به تغییرات عمق بیش از فاصله‌ی جانبی حساس است؛ زیرا تغییرات تنش درونی زمین در جهت قائم نسبت به جهت افقی بیش‌تر است.



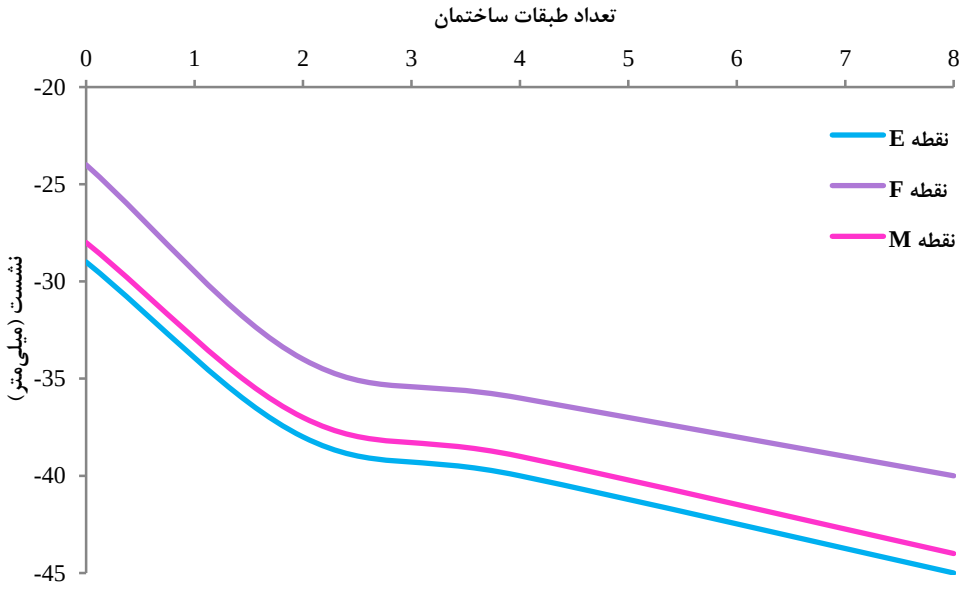

**شکل ۱۹- تغییر مکان جانبی نقطه‌ی *D* در برابر تغییرات عمق پی ساختمان**

منحنی تغییرات نشست به ازای ساختمان‌های با طبقات مختلف در **شکل ۲۰** ارائه شده است. در این شکل، شیب منحنی تغییرات نشست ثابت است و به ازای افزایش مقدار ثابتی به وزن سازه، نشست نیز به صورت متناسب با آن زیاد می‌شود. بدین معنی که برای یک ساختمان ۵ طبقه نیز می‌توان از روی این منحنی میزان نشست را پیش‌بینی نمود. منظور از ساختمان صفر طبقه، حالت سطح آزاد (بدون حضور ساختمان) است. دلیل شکست منحنی افزایش سختی خاک است که با افزایش طبقات بیش‌تر شده و با بیش از ۲ طبقه‌ی ساختمان شیب تغییرات را کمتر کرده است.

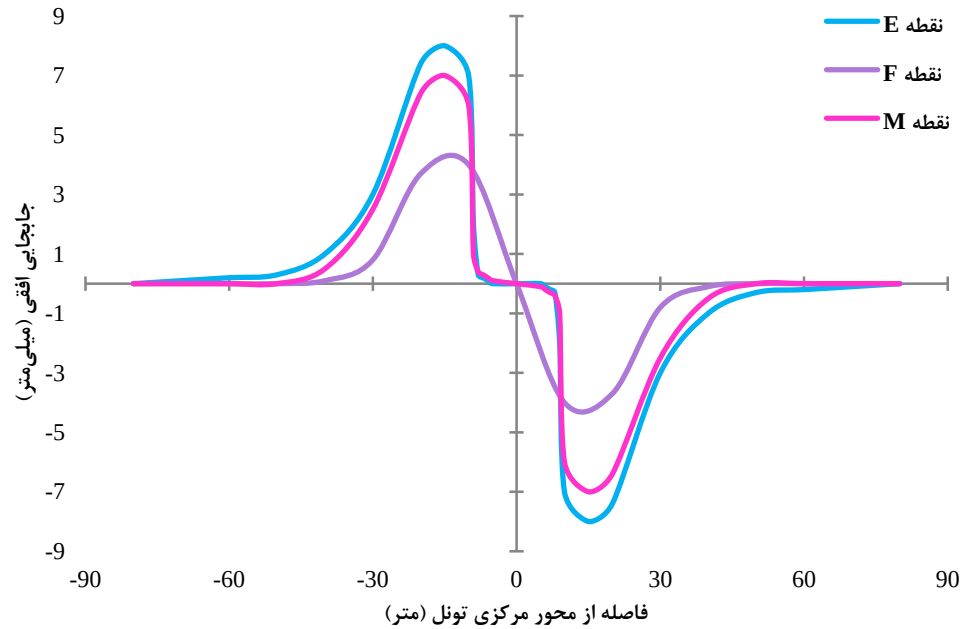
نمودار منحنی‌های جابجایی‌های افقی سطح زمین در **شکل ۲۱**، نشان داده شده است. مشخص است که متناسب با افزایش وزن ساختمان، جابجایی‌های افقی افزایش یافته و شکل منحنی‌های جابجایی افقی سطح زمین در خارج از محدوده‌ی پی ساختمان از منحنی جابجایی افقی در حالت

سطح آزاد پیروی می‌نماید. در محدوده‌ی پی به علت سختی آن، جابجایی‌ها به صفر نزدیک شده‌اند.

در نمودارها با افزایش عمق، تا وقتی پی ساختمان بالاتر از تاج تونل است، به سبب افزایش فشردگی خاک بین ساختمان و دهانه‌ی حفاری، با افزایش عمق، روندی کاهشی در نشست نقطه‌ی $E$ در مقابل افزایش عمق ساختمان مشاهده شده است. با افزایش عمق پی ساختمان در برابر عمق تونل، روند تغییرات به صورت نسبی نزولی شده است.




**شکل ۲۰- منحنی تغییرات نشست به ازای ساختمان‌های با تعداد طبقات مختلف در نقاط *E*، *F* و *M***




**شکل ۲۱- منحنی‌های جابجایی‌های افقی سطح زمین در نقاط *E*، *F* و *M***

## ۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با توجه به تحلیل‌های انجام شده، مهم‌ترین نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

- به دلیل افزایش فشار سربار، با افزایش عمق حفاری نشست تاج تونل افزایش می‌یابد. در اعماق بیش از ۱۲ متر ابتدا کاهش نشست و سپس روند تقریباً ثابتی مشاهده می‌شود. دلیل اصلی کاهش نشست تغییر محیط حفاری از خاک دانه‌ای به خاک چسبنده است که به دلیل خاصیت گنبد فشار شدن خاک در تاج تونل، نشست تاج را به صورت موضعی کاهش می‌دهد.
- آهنگ تغییرات نشست برای اعماق حفاری کمتر از پی ساختمان که موضع اعمال بار ساختمان بر خاک است، کمتر از آهنگ تغییرات در اعماق بیش‌تر از عمق پی ساختمان است.
- افزایش فاصله‌ی جانبی بین سازه و تونل، ابتدا افزایش نشست سطحی و نشست تاج تونل را به دنبال دارد و تقریباً پس از فاصله‌ای معادل یک قطر تونل روند ثابتی داشته است. بیش‌ترین افزایش نشست در بازه‌ی فاصله‌ی بین ۰ تا ۵ متر مشاهده شده است؛ زیرا در این بازه بیش‌ترین تغییرات فشار قائم و جانبی رخ داده است.
- تا زمانی که عمق پی ساختمان کمتر از عمق تونل است، ضمن افزایش عمق و در نتیجه نزدیک شدن ساختمان به تونل، روند تغییرات نشست در سطح زمین و تاج تونل و تورم کف تونل روند افزایشی دارد. دلیل این امر، افزایش سختی جانبی تونل و در نتیجه تقویت تغییر شکل بیضی‌گون با گسترش در جهت قطر قائم است.
- تغییر عمق بیش از تغییرات فاصله‌ی جانبی بین تونل و سازه‌های سطحی بر نشست موثر است. لحاظ کردن اثر سختی پی سبب شده مقادیر نشست حداکثر در سطح زمین به اندازه‌ی ۲٫۴ درصد و نیز مقادیر نشست در زیر پی ساختمان به مقدار ۱۰ درصد کاهش یابد. این نتایج بیانگر آن است که لحاظ کردن سختی پی باعث کاهش نشست‌ها در مقایسه با حالت زمین بکر می‌شود.
- با اعمال وزن ساختمان به مدل، شکل پروفیل نشست تغییر کرده و انحنای کمتری به خود می‌گیرد. این تغییر شکل باعث افزایش چشمگیر مقادیر نشست به خصوص نشست‌های زیر پی تا حدود ۴۰ درصد شده است.
- مقادیر نشست برآورد شده توسط روابط نیمه‌تجربی حدود ۲۰ درصد بیش‌تر از نتایج روش عددی در حالت زمین بکر است که این اختلاف به دلیل فرضیات ساده کننده روش‌های نیمه‌تجربی است.
- در پروژه‌ی متروی مشهد، حداکثر نشست پی ۲۸ میلی‌متر خواهد بود که نیازمند اتخاذ تدابیر خاص از جمله عملیات تحکیم چتری یا تزریق از سطح است.

## ۸- سیاهه‌ی نمادها

| نماد | واحد | شرح | نماد | واحد | شرح |
|---|---|---|---|---|---|
| $V_l$ | % | ضریب کاهش حجم | $y$ | $m$ | فاصله‌ی افقی از محور تونل |
| $V_s$ | $m^3$ | حجم گودال نشست | $D$ | $m$ | قطر تونل |
| $i$ | $m$ | فاصله‌ی افقی از محور تونل تا نقطه‌ی عطف منحنی گودال نشست | | | |
| $S_v$ | $cm$ | نشست قائم در فاصله‌ای مشخص نسبت به محور تونل | | | |
| $Z_0$ | $m$ | فاصله‌ی محور مرکزی تونل از سطح زمین | | | |
| $S_{max}$ | $cm$ | حداکثر نشست قائم روی محور تونل | | | |

## ۹- منبع‌ها

[1] Bernat, S,. & Combou, B. (1998). Soil-Structure Interaction in Shield Tunnelling in Soft Soil. *Computers and Geotechnics*, *22*(3-4), 221-242. http://dx.doi.org/10.1016/S0266-352X(98)00007-X.

[2] Mair, R. J., Taylor, R. N., & Burland, J. B. (1996). Prediction of Ground Movements and Assessment of Risk of Building Damage due to Bored Tunnelling. *International Conference of Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground* (pp. 713-718). London: CRC Press. ISBN: 9054108568.

[3] Mroueh, H., & Shahrour, I. (2002). Three-Dimensional Finite Element Analysis of the Interaction Between Tunneling and Pile Foundations. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 26*(3), 217-230. http://dx.doi.org/10.1002/nag.194.

[4] Potts, D. M., & Zdravkovic, L. (2001). *Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering: Application*. London: Thomas Telford. ISBN: 9780727727831.

[5] Potts, D. M., & Addenbrooke, T. I. (1997). A Structure's Influence on Tunnelling-Induced Ground Movements. *Proceedings of the ICE - Geotechnical Engineering, 125*(2), 109-125. http://dx.doi.org/10.1680/igeng.1997.29233.

[6] Burd, H. J., Houlsby, G. T., Augarde, C. E., & Liu, G. (2000). Modelling Tunnelling-Induced Settlement of Masonry Buildings. *Proceedings of the ICE - Geotechnical Engineering, 143*(1), 17-29. http://dx.doi.org/10.1680/geng.2000.143.1.17.

[7] Boscardin, M. D., & Cording, E. J. (1989). Building Response to Excavation-Induced Settlement. *Journal of Geotechnical Engineering, 115*(1), 1-21. http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1989)115:1(1).

[8] Attewell, P. B., Yeates, J., & Selby, A. R. (1986). Soil Movements Induced by Tunnelling and Their Effects on Pipelines and Structures. London: Blackie. ISBN: 9780412009112.

[9] Klar, A., & Elkayam, I. (2010). Direct and Relaxation Methods for Soil-Structure Interaction due to Tunneling. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A, 11*(1), 9-17. http://dx.doi.org/10.1631/jzus.A0900069.

[۱۰] سازمان قطار شهری مشهد و حومه. (۱۳۸۷). *گزارش نهایی مطالعات ژئوتکنیکی، حد فاصل ایستگاه منطقه‌ی طبرسی و محدوده‌ی پارک کوهسنگی*.

[11] Peck, R. (1969). Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground. *Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (pp. 225-290). Mexico City: Sociedad Mexicana de Mecanica de Suelos.

tuse.shahroodut.ac.ir

Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)

Volume 3-Issue 1\Summer 2014

نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی

# Numerical Analysis of the Effect of Tunnel- Building Interaction on Surface Settlement

**S. Gharehdash[1]; M.Barzegar[2]**

1- M.Sc. in Rock Mechanics; Dept. of Mining and Metallurgical Eng.; Amirkabir University of Technology

2- M.Sc. in Mining Exploitation Engineering; Dept. of Mining and Metallurgical Eng.; Amirkabir University of Technology

**Received: 04 Jan 2013; Accepted: 12 Mar 2014**

**Keywords**

**Surface settlement**
**EPB-TBM**
**Parametric analysis**
**Building geometry**
**Mashhad metro**
**Finite difference method**

**Extended Abstract**

In this research, the influence of tunnel construction of the 2nd line of Mashhad metro in the vicinity of Sadaf hotel has been chosen as a case study. It was aimed to investigate the ground displacements and surface settlement which has been induced by tunneling with Earth Pressure Balance-Shield Tunnel Boring Machine (EPB-TBM). FLAC-3D, as a finite difference software, has been used for numerical modelling.

## Introduction

Construction of underground tunnels plays an important role in development of modern cities. One of the most important problems caused by the construction of tunnels is that underground excavations can cause large settlement of surface ground. Transportation developments in cities often involve tunneling, which inevitably leads to ground movements and Tunnel construction in urban areas may inevitably require crossing close to adjacent surface structures.

## Methodology and Approaches

In this paper, influence of effective parameters are assessed. These factors are geometrical parameters such as tunnel overburden, depth of foundation of building and lateral distance between tunnel and building. Numerical method in this study was performed with FLAC-3D code. Moreover, 4 scenarios are analyzed: green field analysis with close form solution, green field analysis with numerical method, tunnel foundation interaction and tunnel interaction with weight of structure.

## Results and Conclusions

In conclusion, the line graph in various analyses illustrates that the green field analysis even numerical or not are evaluated underestimated results especially on settlement with respect of real condition. Then it is better to consider at least weight of structure for initial settlement analysis. The results indicate that, variation of tunnel overburden is more effective than building depth and lateral distance on surface settlements.