

## "افق‌های جدید در تونلسازی"

۲۸-۲۹ آبان ماه ۱۳۹۸

### بررسی تاثیر حفر مکانیزه به روش فشار تعادلی زمین تونل‌ها در محیط‌های شهری بر دیوارهای حائل، مطالعه موردی: خط ۷ متروی تهران

داریوش محمدی<sup>۱\*</sup>، احمد فهیمی‌فر<sup>۲</sup>، داوود پارساپور<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکترای تخصصی مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ d.mohammadi@aut.ac.ir

<sup>۲</sup> استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ Fahim@aut.ac.ir

<sup>۳</sup> دکترای تخصصی ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ Parsa@aut.ac.ir

#### چکیده فارسی

گاهی اوقات برای انتخاب مسیر تونل در محیط‌های شهری، چاره‌ای جز عبور از زیر سازه‌های سطحی مختلف نیست؛ به عبارت دیگر، مسیر تونل به طراحان تونل دیکته می‌شود. از جهتی در اثر حفر تونل در مناطق کم عمق با محیط میزبان از جنس رسوبات آبرفتی و سنگ‌های سست، جابجایی‌ها و تغییرشکل‌هایی در زمین رخ می‌دهد؛ لذا تونلسازی در این شرایط بسیار حساس بوده و حرکات مذکور باید در سطح مجاز کنترل شود تا آسیب به سازه‌های سطحی به حداقل برسد. در این تحقیق بخشی از مسیر قطعه‌ی جنوبی - شمالی تونل خط ۷ متروی تهران مورد بررسی قرار گرفته است. در این مسیر، ماشین مکانیزه‌ی حفر تونل، به ناچار از زیر دیوار حائل وزنی موسوم به دیوار حائل شهرک پردیس واقع در محدوده‌ی میدان صنعت عبور نمود. در این مطالعه، برای بررسی ابعاد مختلف طراحی تونل و اندرکنش تونل - خاک - دیوار حائل از روش عددی المان محدود سه‌بعدی با کمک نرم‌افزار Plaxis استفاده شده است. نتایج نشان داد که وجود سازه‌ی دیوار حائل در کاهش نشست قائم و کرنش افقی در محدوده‌ی زیر پی دیوار تأثیری ندارد و در محدوده‌ای به علت دوران پی دیوار، نشست و کرنش بیشتری را نشان می‌دهد. همچنین، خطر آسیب به سازه‌ی دیوار در رده‌ی شدید و بسیار شدید با آسیب سازه‌ای جدی پیش‌بینی شد. علاوه بر این، تحلیل پارامتری بر روی پارامترهای تأثیرگذار بر نشست سطحی و جابجایی افقی در عمق در حفاری با ماشین فشار تعادلی زمین و همچنین هندسه، موقعیت دیوار نسبت به تونل و سایر ویژگی‌های دیوار انجام شد.

**واژه‌های کلیدی:** اندرکنش تونل - سازه، EPBM، نشست سطحی، دیوار حائل، حفاری مکانیزه، خط ۷ متروی تهران

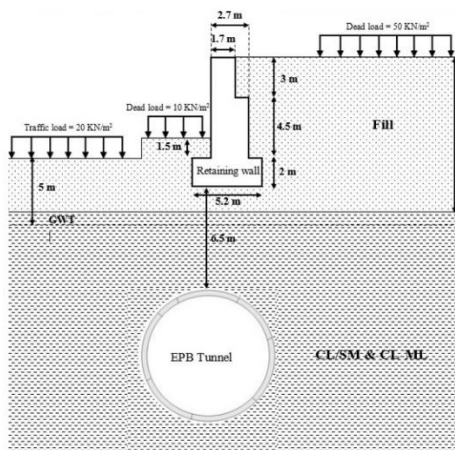
#### ۱- مقدمه

تونل‌ها، برخلاف سازه‌های سطحی نظیر ساختمان‌ها و پل‌ها که بر روی زمین قرار دارند، در درون مصالح زمینی قرار گرفته‌اند، در نتیجه رفتار زمین بر روند حفاری تونل و همچنین تحلیل و طراحی سیستم نگهداری آن موثر است. از جهتی، وجود سازه‌های سطحی و زیرسطحی در اطراف تونل‌های کم عمق در زمین‌های آبرفتی و سست شهری باعث شده است که عملیات احداث کارهای زیرزمینی به علت تغییرشکل ناشی از حفاری از حساسیت خاصی برخوردار باشد [۱]. به همین علت، پیش‌بینی رفتار سازه‌های سطحی در اثر حفاری تونل، به یکی از موضوعات کلیدی در طراحی تونل‌ها تبدیل شده است. با توجه به این که وجود سازه‌های سطحی میزان نشست ناشی از عملیات تونلسازی را تغییر می‌دهند، چندان نمی‌توان به روش‌های تجربی و تحلیلی در پیش‌بینی نشست در حالت سطح آزاد (بدون حضور سازه) اعتماد کرد. لذا روش‌های تئوریک جدیدی وجود دارند که تا حدودی نقایص این روش‌ها را بهبود می‌بخشند. به عنوان مثال می‌توان، به روش‌های تیر عمیق، سختی نسبی و تیر متورق، در ارزیابی صدمات ساختمان در اثر حفاری تونل، اشاره کرد در این روش‌ها در ابتدا نشست سطح زمین در حالت سطح آزاد در اثر عملیات تونلسازی محاسبه و با استفاده از تحلیل اندرکنش خاک - سازه و محاسبه‌ی پاسخ سازه، آسیب وارده ارزیابی می‌شود.

در روش‌های تعیین آسیب وارده به سازه‌های سطحی (عموماً ساختمان و پی)، ارزیابی در سه سطح اولیه، ثانویه و تفصیلی انجام می‌شود، به عنوان مثال در صورتی که سازه در ارزیابی سطح اولیه در محدوده‌ای ایمن قرار گیرد، در مرحله‌ی بعدی تخمین آسیب حذف می‌شود [۲]. ارزیابی اولیه از پتانسیل خرابی سازه‌ها معطوف به نشست مطلق و چرخش یا شیب (حاصل تقسیم نشست تفاضلی بر طول متناظر آن) است و محققینی نظیر مک‌دونالد و اسکمپتون (۱۹۵۶)، مایرهوف (۱۹۵۶)، تیکر و پولشین (۱۹۵۷)، بجرم (۱۹۶۳)، بولند و ورث (۱۹۷۴) و رانکین (۱۹۸۸) جداولی از مقادیر مجاز این فاکتورها ارائه داده‌اند [۲] [۳] [۴]. در ارزیابی ثانویه از روش‌های تیر عمیق، سختی نسبی، تیر متورق و با کمک مدلسازی عددی ارائه شده توسط بولند و ورث (۱۹۷۵)، بوسکاردین و کوردین (۱۹۸۹)، بون (۱۹۹۶)، آدنبروک و پاتس (۱۹۹۷)، ورث و بولند (۱۹۹۷)، ووس (۲۰۰۳)، فرانزیوس (۲۰۰۳)، فینو (۲۰۰۵) و گوگلیمتی (۲۰۰۸) اشاره کرد [۲] [۵] [۶] [۷] [۸]. در صورتی که ارزیابی اولیه و ثانویه آسیب وارده به سازه در محدوده‌ی مجاز نباشد، نیاز به ارزیابی تفصیلی با ساخت مدل عددی المان محدود از پروسه‌ی ساخت تونل است که پژوهشگران بسیاری در پروژه‌های مختلف از این روش استفاده کرده‌اند که می‌توان به مرور و شهرور (۲۰۰۳)، عقیفی‌پور و همکاران (۲۰۱۱)، لیانایاتیرانا و نیشانتان (۲۰۱۶) و نعمت‌الهی و دیاز (۲۰۱۹) اشاره کرد [۹] [۱۰] [۱۱] [۱۲].

## ۲- طرح مسئله و شرایط ژئوتکنیکی

طبق تحقیقات به عمل آمده، سختی پی سازه‌های سطحی موجب کاهش کرنش افقی و نشست می‌شود، به عبارتی دیگر، پی سازه‌های سطحی از منحنی نشست سطح آزاد تونل پیروی نمی‌کند و بسته به سختی پی مقادیر کمتری تغییرشکل از خود نشان می‌دهد. البته این موضوع همواره صدق نمی‌کند و بستگی به موقعیت سازه نسبت به گودی نشست و همچنین سختی سازه نسبت به خاک دارد [۲]. برای حفر تونل و پیشروی در مسیر شمالی-جنوبی خط ۷ متروی تهران در کیلومتر ۲۱+۹۱۰ تا ۲۱+۹۵۰ ماشین مکانیزه‌ی حفر تونل از نوع فشار تعادلی زمین، به ناچار از زیر دیوار حائل وزنی موسوم به دیوار حائل شهرک پردیسان واقع در محدوده‌ی میدان صنعت با روباره‌ی کمتر از قطر تونل برای رسیدن به تراز ایستگاه میدان صنعت (W7) عبور می‌کند. طراحان تونل، با قبول این اصل که سختی سازه‌های سطحی نظیر ساختمان‌ها می‌تواند در کاهش نشست تاثیر گذار باشد، حفاری تونل در این ناحیه را آغاز کردند، اما در حین حفاری مشخص شد که مطابق شکل ۱-الف، در دیوار حائل وزنی مذکور ترک‌هایی عرضی و طولی به وجود آمده است. در شکل ۱-ب، موقعیت تونل نسبت به دیوار حائل، همچنین لایه‌بندی مهندسی خاک (جدول ۱) و سطح آب زیرزمینی نشان داده شده است. پایداری کلی دیوار پس از عبور ماشین حفار حفظ شده ولی ایمن‌سازی دیوار به علت طول کم آن اصلاح و ترمیم شد.



(ب)



(الف)

شکل (۱): (الف) ایجاد ترک‌های طولی و عرضی در دیوار حائل در اثر حفر تونل و (ب) موقعیت تونل و سازه‌ی دیوار حائل

جدول (۱): خواص مکانیکی لایه‌های خاک

| ضخامت لایه m | توصیف لایه     | مدول الاستیسیته $\text{MN/m}^2$ | چسبندگی $\text{KN/m}^2$ | زاویه اصطکاک داخلی درجه | وزن مخصوص $\text{KN/m}^3$ |
|--------------|----------------|---------------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|
| ۰-۱۱/۵       | خاک دستی مترکم | ۳۵                              | ۱۵                      | ۲۲                      | ۱۹                        |
| ۱۱/۵-۴۵      | CL/SM & CL-ML  | ۳۵                              | ۴۵                      | ۲۵                      | ۲۰                        |

دیوار حائل شهرک پردیسان دیوار حائلی وزنی است که از سنگ‌های مالون از جنس توف و ملات سیمان تشکیل شده است که به صورت ترکیب لاشه سنگ و ملات سیمان در پشت این دیوار حائل قرار دارد. در جدول ۲ خواص مکانیکی دیوار حائل ارائه شده است.

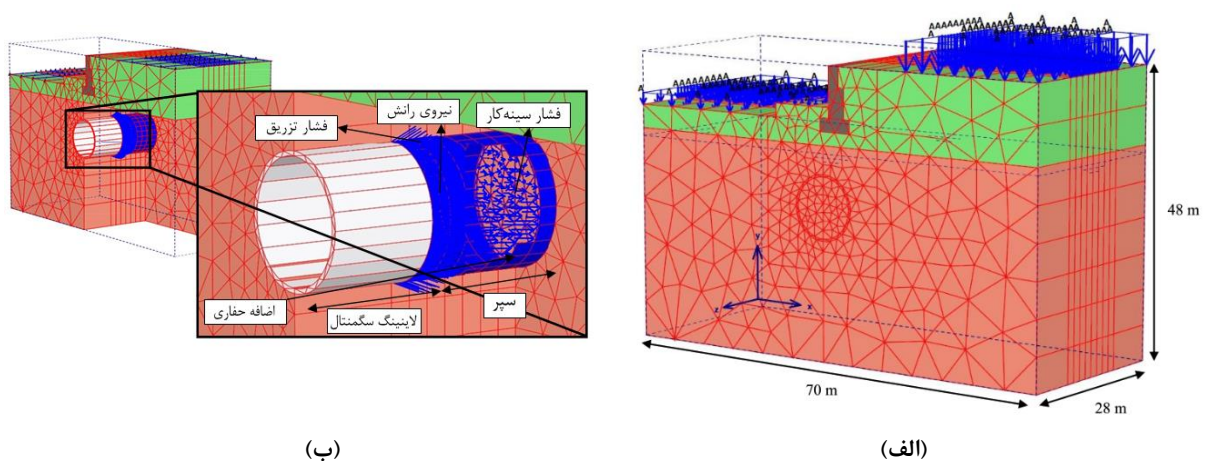
جدول (۲): خواص مکانیکی دیوار حائل

| مدل رفتاری  | وزن مخصوص<br>$\text{KN/m}^3$ | مدول الاستیسیته<br>$\text{GN/m}^2$ | ضریب پواسون |
|-------------|------------------------------|------------------------------------|-------------|
| الاستیک خطی | ۲۴                           | ۵                                  | ۰/۱۵        |

### ۳- مدلسازی اجزای محدود

برای بررسی عددی مسئله، از کد محاسباتی Plaxis که براساس روش اجزا محدود پایه گذاری شده، استفاده شده است که برای تحلیل تغییرات تنش - تغییر شکل در محیط های پیوسته ی خاکی و مسائل اندرکنش بین سازه ها در چنین محیط هایی مورد استفاده قرار می گیرد. دلیل انتخاب این نرم افزار توانایی بالا در شبیه سازی حفاری مکانیزه با اکثر پارامترهای تاثیر گذار و همچنین تحلیل مسائل پیچیده اندرکنش سازه های زیرسطحی خاک - سازه های سطحی بوده است.

اولین گام در اجرای یک مدل، ساخت هندسه آن است. مدل ساخته شده دارای ابعاد  $70 \times 48 \times 28$  متر است که در جهت محور Z به اندازه ی ۲۸ متر ادامه داده شده است، شکل ۲-الف. برای کم کردن تاثیر مرزهای ابتدایی و انتهایی در راستای محور Z، ابتدا و انتهای مدل به اندازه ی ۸ متر در نظر گرفته شده است. با توجه به گام حفاری ماشین و عرض سگمنت ها که برابر با ۱/۵ متر است، فاصله ی بین این دو ناحیه، به ۸ ناحیه ۱/۵ متری تقسیم شده است. این مدل شامل ۵۸۲۰ المان ایزوپارامتریک ۱۵ گره ای است.



شکل (۲): (الف) نمایی از هندسه ی مدل سه بعدی در Plaxis و (ب) اعمال عملیات اجرایی در حفاری با EPBM در مدل المان محدود

المان های دیگر مورد استفاده در مدل، المان صفحه ای است و در مرز سازه و خاک از المان فصل مشترک برای بیان اندرکنش آن ها استفاده شده است. از المان صفحه ای، برای مدل کردن سپر استفاده شده است که خواص مکانیکی آن در جدول ۳ ارائه شده است، همچنین برای مدلسازی سگمنت ها از المان حجمی استفاده شده است و خواص مورد نیاز برای تعریف آن ها در حالت الاستیک در جدول ۴ نگاشته شده است.

جدول (۳): مشخصات مکانیکی و هندسی سپر

| مدل رفتاری  | وزن مخصوص<br>$\text{KN/m}^3$ | مدول الاستیسیته<br>$\text{GN/m}^2$ | ضریب پواسون   | ضخامت<br>$\text{cm}$ | سختی محوری<br>$\text{KN/m}$ | سختی خمشی<br>$\text{KNm}^2/\text{m}$ |
|-------------|------------------------------|------------------------------------|---------------|----------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| الاستیک خطی | ۷۸/۵۰                        | ۲۰۰                                | ۰ (بسیار صلب) | ۵                    | ۱۷۷                         | ۲۰۸۳/۳                               |

جدول (۴): مشخصات مکانیکی و هندسی سگمنت

| مدل رفتاری  | وزن مخصوص<br>$\text{KN/m}^3$ | مدول الاستیسیته<br>$\text{GN/m}^2$ | ضریب پواسون | ضخامت<br>$\text{cm}$ | مقاومت فشاری<br>$\text{MN/m}^2$ | تعداد سگمنت های هر رینگ |
|-------------|------------------------------|------------------------------------|-------------|----------------------|---------------------------------|-------------------------|
| الاستیک خطی | ۲۵                           | ۲۰                                 | ۰/۲         | ۳۵                   | ۴۰                              | ۶+۱+۱                   |

مرزهای اطراف مدل به صورت غلظتی در نظر گرفته شده و مرز فوقانی به صورت آزاد فرض شده است تا مدل بتواند نشست کند، همچنین مرز در کف مدل در دو جهت ثابت و بدون حرکت در نظر گرفته شده است. براساس شکل ۱-ب، بار ۵۰ کیلونیوتن بر مترمربع برای ساختمانی که دارای ۳ طبقه روی زمین و ۲ طبقه زیرزمین است در نظر گرفته شده است. بار ۱۰ کیلونیوتن بر مترمربع برای ساختمان نمازخانه و سرویس های بهداشتی پایین دیوار و همچنین بار ناشی از ترافیک بزرگراه، برابر با ۲۰ کیلونیوتن بر مترمربع در نظر گرفته شده است. برای مدل کردن حفاری تونل با

ماشین فشار تعادلی زمین و پارامترهای موثر، ابتدا بخش اول تونل (۸ متر ابتدایی) حفاری شده و سگمنت گذاری می شود، پس از این مرحله، سپر به اندازه ی گام حفاری یعنی ۱/۵ متر وارد بخش دوم می شود، هنگامی که ۱۰/۵ متر به اندازه ی ۷ گام ۱/۵ متری حفاری شد، عملیات سگمنت گذاری و تزریق اعمال می شود، شایان ذکر است که در مراحل حفاری، نیروی پیشران جک ها به سگمنت ها اعمال می شود و فشار سینه کار نیز در تمام مراحل اعمال شده است. مراحل اعمال تغییر در حفاری با ماشین فشار تعادلی زمین در شکل ۲-ب نشان داده شده است. جدول ۵ مشخصات ماشین حفار خط ۷ متروی تهران در محدوده ی شهرک پردیس را نشان می دهد.

جدول (۵): مشخصات EPBM خط ۷ متروی تهران

| نوع ماشین | قطر حفار | طول سپر | فشار تزریق | فشار سینه کار | اضافه حفاری | گام حفاری | نیروی پیشروی |
|-----------|----------|---------|------------|---------------|-------------|-----------|--------------|
|           | m        | m       | bar        | bar           | cm          | m         | KN           |
| EPBM      | ۹/۱۶     | ۱۰/۵    | ۲          | ۰/۷           | ۲           | ۱/۵       | ۶۵۰۰۰        |

#### ۴- بررسی پتانسیل خرابی سازه ی دیوار حائل

برای این منظور از روش مورد تایید اتحادیه تونلسازی انگلیس، که توسط مایر و همکاران در سال ۱۹۹۶ برای پروژه های تونلسازی در لندن ارائه شده و به طور گسترده کاربرد دارد، استفاده شده است. این روش که مقدماتی از آن در بخش اول مقاله ارائه شد در سه سطح اولیه، ثانویه و تفصیلی به بررسی آسیب وارده بر سازه های سطحی در اثر عملیات تونلسازی می پردازد که در ادامه توضیحات بیشتری در این زمینه ارائه می شود [۱۳].

##### ۴-۱- ارزیابی اولیه

در مورد نشست مطلق در حالت سطح آزاد، مقدار نشست برای پی های نواری نظیر دیوار حائل برابر با ۲۵ میلیمتر در خاک های ماسه ای و ۶۵ میلیمتر در خاک های رسی از سوی بیشتر مراجع پذیرفته شده است. در مورد مقدار چرخش نیز مقدار  $\frac{1}{300}$  حد بحرانی برای آسیب های جزئی به سازه از سوی محققان و مراجع معتبر انتخاب شده است. مقدار نشست مطلق و چرخش براساس نتایج شکل ۳-الف در حالت مرزی قرار دارد و نیازمند ارزیابی ثانویه است.

##### ۴-۲- ارزیابی ثانویه

در این مرحله سازه سطحی به عنوان یک تیر الاستیک در نظر گرفته می شود. این تیر، طوری فرض می شود که پی سازه از پروفیل نشست تبعیت کند و براساس آن تغییر شکل نشان دهد. اگرچه این روش نسبت به مرحله ی اول جزئیات بیشتری را در نظر می گیرد؛ ولی همچنان این روش نیز محافظه کارانه است، زیرا فرض بر این است که ساختمان از منحنی نشست سطح آزاد پیروی می کند. در سال ۱۹۹۷، پاتس و آدنیروک روش جدیدی را برای بررسی میزان آسیب احتمالی وارده بر سازه با معرفی روش سختی نسبی ارائه کردند [۷]. در این روش برخلاف متدهای گذشته، مقدار سختی سازه ها در نظر گرفته شد. در ابتدا مبنای این روش، براساس سختی سازه ها، بدون در نظر گرفتن وزن آن ها بود؛ ولی در سال ۲۰۰۳ این محققین روش خود را بسط داده و تاثیر وزن سازه در کنار سختی آن را نیز مورد ارزیابی قرار دادند. با توجه به اینکه دیوار حائل یک سازه ی سطحی است، از روش مذکور برای ارزیابی ثانویه استفاده شده است. برای استفاده از روش سختی نسبی از گام های زیر تبعیت می شود:

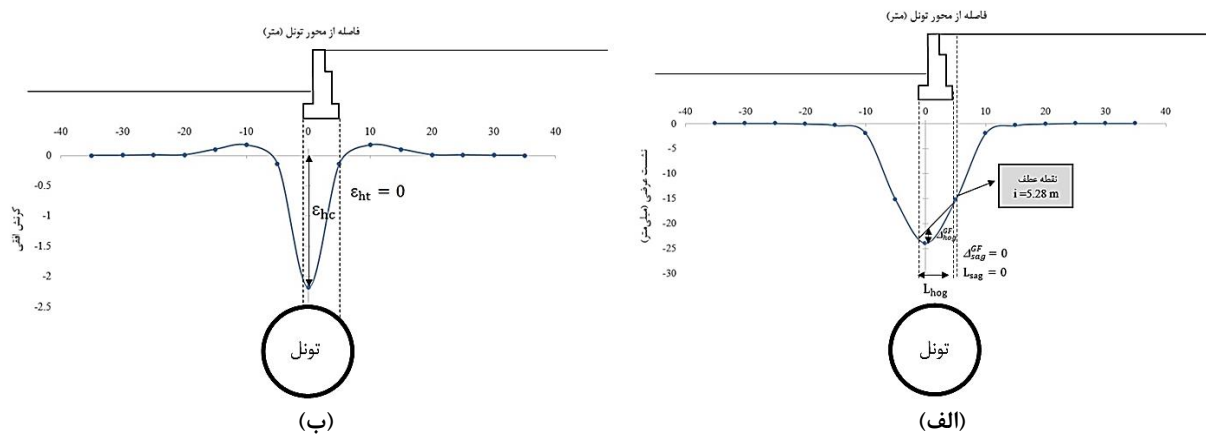
**الف) تغییر شکل زمین:** کرنش افقی و گودی نشست در حالت سطح آزاد (بدون وجود سازه دیوار حائل) برای قسمت زیر دیوار حائل به کمک روابط تجربی ۱، ۲ و ۳ که به ترتیب، کرنش افقی، نشست در مقطع عرضی تونل و نقطه ی عطف کاسه ی نشست را طبق روش پک [۱۴] نشان می دهد، محاسبه می شوند.

$$\varepsilon_{hx(x)} = \frac{S_v(x)}{Z_0} \left( \frac{x^2}{i^2} - 1 \right) \quad (1)$$

$$S_v(x) = S_{v,max} e^{\frac{-x^2}{2i^2}} = \sqrt{\frac{\pi V_L D^2}{2}} e^{\frac{-x^2}{2i^2}} \quad (2)$$

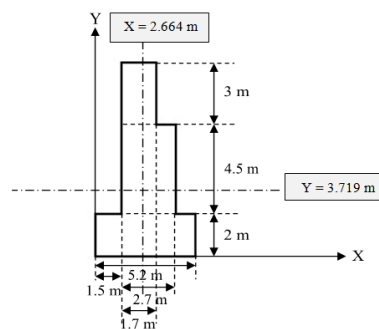
$$i = \frac{D}{2} \left( \frac{Z_0}{D} \right)^{0.8} \quad (3)$$

در این روابط  $D$ ، قطر خارجی تونل،  $Z_0$ ، عمق محور تونل،  $V_L$ ، افت زمین که برای حفاری سپری بین ۰/۵ تا ۱/۵ درصد است،  $i$  نقطه عطف،  $S_{v,max}$ ، نشست ماکزیمم و  $x$  فاصله از محور مرکزی تونل است. با توجه به اینکه بررسی نشست در زیر پی دیوار حائل مورد نظر است، لذا عمق محور تونل برابر با ۱۱ متر در نظر گرفته شده است. شکل های ۳ الف و ب به ترتیب نشست در مقطع عرضی و کرنش افقی را در حالت سطح آزاد (بدون حضور دیوار) نشان می دهد.



شکل (۳): (الف) گودی نشست در حالت سطح آزاد (GF) و پارامترهای نسبت انحناء و (ب) نمودار کرنش افقی در حالت سطح آزاد (GF)

ب) سختی محوری (EA) و خمشی (EI) دیوار حائل: برای تعیین سختی محوری و خمشی سازه‌ی دیوار حائل باید مساحت و ممان اینرسی (ممان دوم سطح) دیوار را بدست آورد. لذا اولین قدم تعیین مرکز سطح مقطع دیوار حائل است. ابعاد دیوار و مرکز سطح در شکل ۴ نشان داده شده است. در جدول ۶ مساحت و ممان دوم سطح ارائه شده است.



شکل (۴): ابعاد مقطع دیوار حائل پردیسان و مرکز سطح (ثقل) آن

ج) محاسبه سختی نسبی دیوار حائل: مطالعه‌ی پارامتریک پاتس و آدنبروک (۱۹۹۷) شامل انجام تحلیل تغییرشکل تونل به ازای تغییرات وسیعی از سختی‌های خمشی و محوری و همچنین هندسه‌ی سازه بوده است. برای ارتباط بین سختی سازه‌ها با سختی محیط، نسبت‌های سختی نسبی به صورت ۴ و ۵ ارائه شده است.

$$\alpha^* = \frac{EA}{E_s \left( \frac{B}{2} \right)} \quad (۴)$$

$$\rho^* = \frac{EI}{E_s \left( \frac{B}{2} \right)^4} \quad (۵)$$

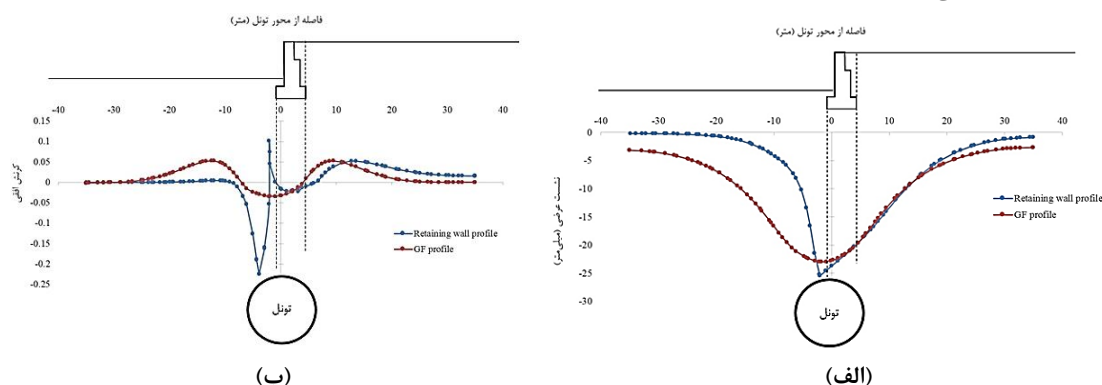
$\rho^*$ ، سختی محوری نسبی، پارامتری بدون بعد است. پارامتر  $\alpha^*$ ، تحت عنوان سختی خمشی نسبی تعریف شده است که بعد آن،  $[1/L]$  است. در این روابط،  $B$ ، عرض سازه سطحی،  $E_s$ ، مدول سکانتی خاک و  $EI$  کنترل کننده رفتار خمشی تیر است؛ در حالیکه  $EA$  توصیف کننده رفتار محوری و برشی آن است. معیارهای تغییرشکل سازه که در تحلیل این پژوهشگران تعیین شده، نسبت انحناء و کرنش افقی بوده است. برای بررسی میزان تأثیر حضور سازه در تغییرشکل گودی نشست، مقادیر این دو معیار به صورت نسبت حالت وجود سازه و حالت بدون حضور سازه در نظر گرفته می‌شود. این نسبت‌ها تحت عنوان ضرایب تصحیح نامگذاری شده است که برای حالت‌های برآمدگی و فرو رفتگی گودی نشست در نظر گرفته شده است. که با توجه به مقادیر جدول ۶، مقدار  $\alpha^*$  و  $\rho^*$  به ترتیب برابر با  $۱۸۹۰/۳۸$  و  $۴۵۵۷/۶۹$   $1/m$  است.

جدول (۶): مقادیر مورد نیاز برای محاسبه‌ی سختی نسبی دیوار حائل

| مدول الاستیک خاک ( $E_s$ ) | مدول الاستیک دیوار (E) | ممان دوم سطح ( $I_x$ ) | مساحت سطح مقطع (A) | پهنای دیوار (B) |
|----------------------------|------------------------|------------------------|--------------------|-----------------|
| MPa                        | GPa                    | $m^4$                  | $m^2$              | m               |
| ۳۵                         | ۵                      | ۲۰۱/۵۶۷                | ۲۷/۶۵              | ۵/۲             |

د) تصحیح به کمک گراف‌های طراحی: براساس شکل ۳، به علت عرض کم دیوار حائل، دیوار در محدوده تحذب منحنی نشست و

بالا آمدگی کرنش افقی قرار نگرفته است. لذا با کمک گراف‌های طراحی پاتس و آدنبروک (۱۹۹۷)، ضریب تصحیح گودی نشست در اثر حضور دیوار حائل برآورد می‌شود، لذا نیاز است که مدلی دو بعدی از مسئله در نرم‌افزار Plaxis ساخته شده و اثر وجود سازه لحاظ گردد. بر این اساس مدل بدون وجود سازه ساخته شده و در کنار آن مدل با دیوار حائل به صورتی ساخته شد که مراحل ساخت دیوار حائل در مدل اعمال گردد تا تنش القایی در زمین ایجاد شود که بعد از این مرحله جابجایی‌ها در زمین صفر و تونل حفاری شد. نتایج منحنی نشست و کرنش افقی در حالت بدون وجود سازه و وجود آن در منحنی‌های شکل ۵ ارائه شده است.



شکل (۵): (الف) گودی نشست برای حالت سطح آزاد و وجود سازه دیوار و (ب) نمودار کرنش افقی برای حالت سطح آزاد و وجود سازه دیوار

برای صحت‌سنجی مدل عددی، با توجه به این نکته که در محدوده‌ی مذکور روش‌های مشاهده‌ای نظیر ابزار دقیق استفاده نشده است از روش‌ها و روابط تحلیلی برای این مهم استفاده شده است. با مقایسه‌ی نشست‌های بدست آمده از رابطه‌ی یک طبق شکل ۳-الف و مدل عددی در شکل ۵-الف می‌توان به این نتیجه رسید که مدل عددی منطبق با روابط تجربی است و بدین ترتیب صحت‌سنجی مدل انجام می‌شود.

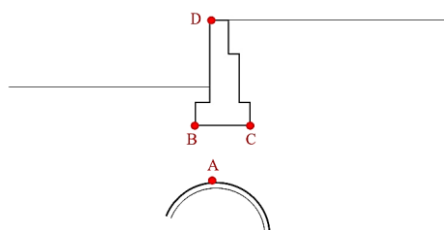
**هـ) بررسی آسیب وارد بر دیوار حائل:** براساس نمودارهای تعیین آسیب خطر پاتس و آدنبروک (۱۹۹۷)، عبور تونل از زیر سازه‌های سطحی، سازه‌ی دیوار حائل در ناحیه سازه‌های دارای خطر شدید تا بسیار شدید است و در رده‌بندی ۴ و ۵ آسیب قرار دارد. پهنا و میزان امتداد ترک‌های طولی و عرضی نشان داده شده در شکل ۱-الف، میزان آسیب تخمین زده شده را تایید می‌کند و نیاز است که ارزیابی تفصیلی انجام شود.

#### ۴-۳- ارزیابی تفصیلی

در این مرحله وضعیت سازه در شرایط اجرای تونل بایستی مورد ارزیابی قرار گیرد. این بررسی شامل تحلیل سه بعدی اجرای تونل است. اندرکنش بین خاک - سازه همانند سختی پی سازه‌ها یک فاکتور کلیدی در این مرحله است. در مراحل ارزیابی اولیه و ثانویه، از پروفیل نشست سطح آزاد برای پیش‌بینی میزان خسارت وارده بر سازه، استفاده شده است. این دیدگاه و نتایجی که از آن بدست می‌آید خیلی محافظه‌کارانه است؛ چون که در آن فرض می‌شود که هر سازه‌ای، از پروفیل گودی نشست برای حرکت تبعیت می‌کند؛ اما در اصل سختی سازه‌ها باعث تغییر حرکت القایی زمین می‌شود و در کل میزان تغییر شکل سازه‌ها را کاهش می‌دهد. بورلند در سال ۱۹۹۵، ضمن تحقیقات خود به این نتیجه رسید که با در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه، در ارزیابی‌ها، معمولاً کاهش در شدت آسیب پیش‌بینی شده به سازه‌ها مشاهده خواهد شد [۱۵]. در ادامه نتایج تحلیل سه‌بعدی انجام شده توسط روش عددی المان محدود ارائه شده است.

#### ۵- تحلیل حساسیت و پارامتری

علاوه بر عوامل زمین‌شناسی، خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ و خاک، آب‌های زیرزمینی و شرایط تنش‌های منطقه، نوع روش حفاری نیز بر نشست سطح زمین تاثیرگذارند. در تونلسازی با ماشین‌های فشار تعادلی زمین، فشار سینه‌کار، فشار تزریق دوغاب پشت سگمنت، اضافه حفاری، نیروی پیشران جک‌ها، نرخ نفوذ، توقف‌های حفاری، وزن ماشین و سیستم پشتیبانی از عوامل تاثیرگذار بر تغییرشکل‌های زمین میزبان است که در ادامه به مهمترین عوامل اشاره خواهد شد. برای بررسی تاثیر این عوامل بر دیوار از ۴ نقطه‌ی مرجع برای پایش مطابق شکل ۶ استفاده شده است.



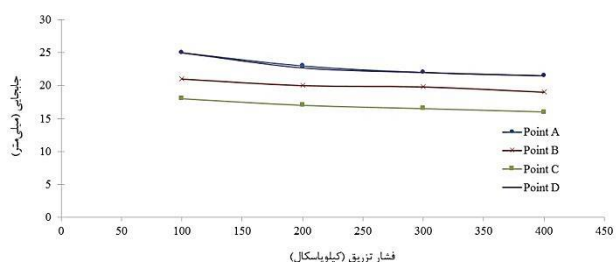
شکل (۶): نقاط پایش مسئله

فشار سینه کار اولین و مهمترین پارامتر کلیدی در حفاری سپری می‌باشد. شکل ۷-الف، جابجایی قائم در نقاط پایش A، B، C و D براساس فشارهای سینه کار ۵۰ تا ۳۰۰ کیلوپاسکال را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است با افزایش فشار سینه کار جابجایی کمتر می‌شود. تاثیر افزایش این فشار تا ۲۰۰ کیلوپاسکال محسوس و پس از آن تغییرات جابجایی محسوس نمی‌باشد. جابجایی تاج تونل و بالاترین نقطه‌ی دیوار حائل دارای مقداری مشابه است و مقدار نشست تفاضلی پی دیوار حائل در تمامی فشارها در حدود ۲/۵ میلی‌متر و جابجایی پاشنه‌ی سمت چپ بیشتر از پاشنه‌ی سمت راست است که این امر به علت ایجاد لنگر واژگونی دیوار و کاهش ظرفیت باربری پی دیوار حائل است.

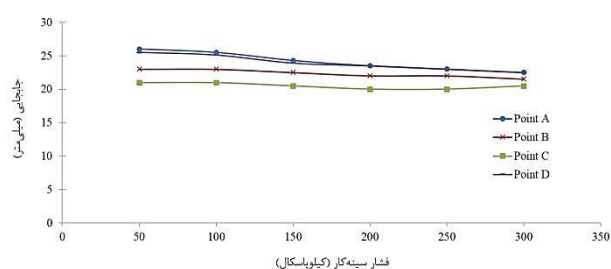
یکی دیگر از پارامترهای مهم در کنترل زمین در حفاری سپری، تزریق فاصله خالی بین لاینینگ و زمین است. فشار خروجی دوغاب از نازل‌های تزریق نباید کمتر از فشار زمین در کف تونل و نه بیشتر از فشار زمین در تاج تونل باشد. براساس شکل ۷-ب، افزایش فشار تزریق باعث کاهش جابجایی قائم می‌شود، اما تغییرات جابجایی در نقاط زیر پی دیوار حائل به تغییرات فشار تزریق دوغاب حساسیت کمتری دارد و همانند فشار سینه کار روند جابجایی نقطه‌ی تاج تونل و بالاترین نقطه‌ی دیوار حائل مشابه یکدیگر است و نشست تفاضلی در دو طرف پی دیوار مشهود است.

اضافه حفاری به فاصله‌ی بین سطح خارجی سپر و زمین گفته می‌شود که به منظور کاهش اصطکاک سپر با زمین و مانور راحت‌تر ماشین در قوس‌ها ایجاد می‌شود که پس از سگمنت‌گذاری، این ناحیه توسط دوغاب پر می‌شود. لذا در مدل عددی المان محدود از اضافه حفاری ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۱ درصد قطر حفاری استفاده شده است. براساس شکل ۷-ج افزایش اضافه حفاری در افزایش نشست تاثیر محسوسی دارد، همچنین افزایش اضافه حفاری، نشست تفاضلی در دو انتهای پی دیوار را افزایش می‌دهد.

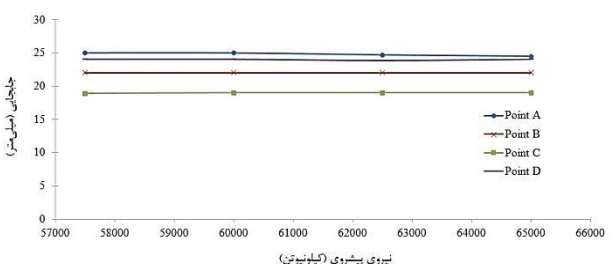
براساس شکل ۷-د، نیروی جک‌ها چندان بر روی جابجایی زمین تاثیرگذار نمی‌باشد ولی با توجه به اینکه این نیرو تامین کننده‌ی نیروی پیشران دستگاه و به تبع آن فشار در ناحیه سینه کار است، در عمل تنظیم آن با آهنگ حرکت دستگاه، حجم خاک حفاری شده و فشار جبهه کار می‌تواند در میزان نشست تاثیرگذار باشد.



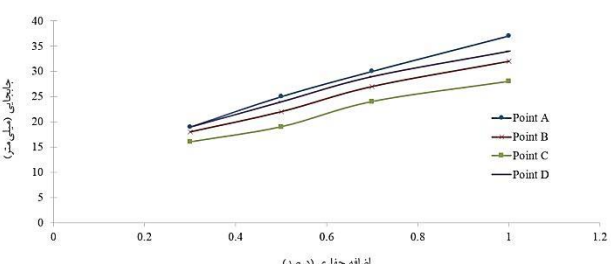
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

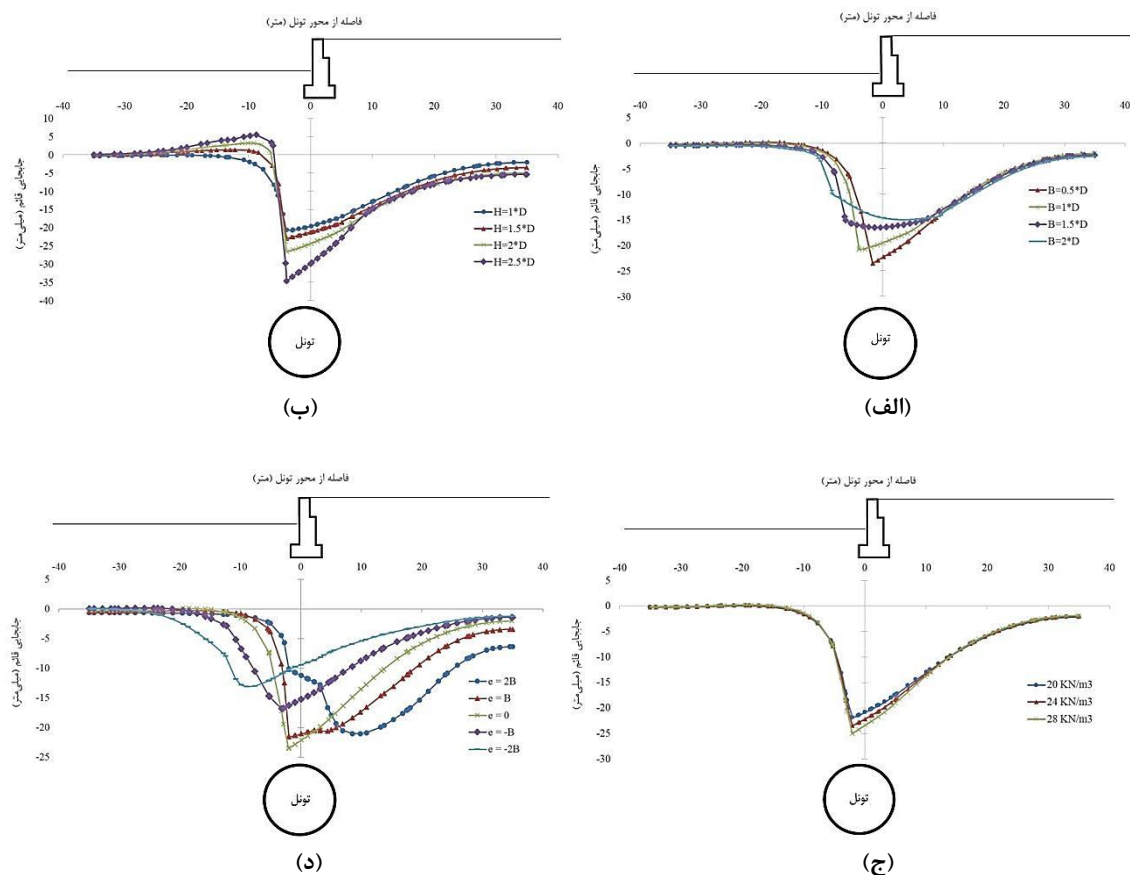
شکل (۷): جابجایی قائم نقاط پایش شده در اثر تغییر در (الف) فشار سینه کار، (ب) فشار تزریق دوغاب، (ج) اضافه حفاری و (د) نیروی پیشران

برای تعمیم مسئله‌ی دیوار حائل پردیسان برای حالت‌های عمومی‌تر، با تغییر در هندسه‌ی دیوار حائل نظیر تغییر در عرض، ارتفاع و همچنین در وزن دیوار با تغییر در وزن مخصوص آن و در نهایت تغییر در موقعیت محور تونل نسبت به مرکز ثقل دیوار حائل، تحلیل پارامتری انجام شده است. شکل ۸-الف منحنی نشست در تراز پی دیوار در اثر تغییر در عرض پی دیوار حائل براساس قطر تونل را نشان می‌دهد. همانطور که در نمودار نشست قائم زمین مشخص است، با افزایش عرض پی و در نتیجه افزایش سختی سازه در محدوده‌ی سازه - خاک، نشست زمین و عمق گودی نشست کمتر شده است.

براساس شکل ۸-ب، با افزایش ارتفاع دیوار حائل و در نتیجه وزن دیوار، مقدار فروروی دیوار در زمین در اثر حفاری تونل بیشتر می‌شود و به علت افزایش ارتفاع دیوار و در نتیجه افزایش بازوی لنگر و طبیعتاً افزایش لنگر واژگونی، فرورفتگی بیشتر می‌شود. بالازدگی در سمت راست نمودار به علت لنگر واژگونی است که با افزایش بازوی لنگر بیشتر شده است. افزایش وزن سازه بدون تغییر در هندسه‌ی سازه در نتیجه‌ی تغییر در وزن مخصوص آن موجب افزایش نشست می‌شود (شکل ۸-ج).

طبق شکل ۸-د، محور تونل به اندازه‌ی عرض پی دیوار و دو برابر آن نسبت به مرکز ثقل دیوار حائل (خروج از مرکزیت) جابجا شده است. این شکل نمودار نشست در اثر تغییر در محور تونل را نشان می‌دهد. زمانی که محور تونل در زیر مرکز ثقل دیوار قرار گیرد، بیشترین نشست و زمانی که به

سمت راست دیوار حرکت می‌کند، گودی نشست و گستردگی آن بیشتر می‌شود و زمانی که به سمت چپ دیوار حرکت می‌کند، دارای گودی کمتر است.



شکل (۸): منحنی نشست در راستای عرضی تونل در تراز پی دیوار با تغییر در (الف) عرض پی دیوار، (ب) ارتفاع دیوار، (ج) وزن دیوار و (د) موقعیت تونل نسبت به دیوار

## ۶- بحث و نتیجه‌گیری

یک اصل کلی در مورد سازه‌های سطحی نظیر ساختمان‌ها وجود دارد که به علت سختی پی این سازه‌ها، در اثر عبور تونل از زیر این سازه‌ها مقدار نشست کمتری نسبت به حالت عدم حضور سازه‌ها مشاهده می‌شود، در مورد سازه‌ی سطحی دیوار حائل وزنی پردیسان، مشاهده شد که به علت عرض کم دیوار حائل نسبت به قطر تونل، مقدار نشست در حالت وجود سازه بیشتر از حالت عدم حضور آن است. سازه‌ی دیوار حائل پردیسان در رده‌بندی آسیب به سازه‌های سطحی، در رده‌بندی آسیب زیاد تا شدید قرار دارد و ترک‌های طولی و عرضی موجود در این دیوار نشان از این موضوع است و می‌توان گفت که گراف‌های طراحی میزان خرابی را درست پیش‌بینی کرده است. در میان تمامی پارامترهای تاثیرگذار بر جابجایی زمین در اثر حفاری با ماشین فشار تعادلی زمین اعم از فشار سینه‌کار، فشار تزریق دوغاب پشت سگمنت، اضافه حفاری و نیروی پیشران جک‌ها، افزایش اضافه حفاری در افزایش نشست تاثیر محسوسی دارد، همچنین مشخص شد که با افزایش اضافه حفاری نشست تفاضلی در دو انتهای پی دیوار افزایش می‌یابد و با افزایش عرض پی و در نتیجه افزایش سختی سازه در محدوده‌ی سازه - خاک، نشست زمین کم می‌شود، همچنین با افزایش ارتفاع دیوار حائل و در نتیجه وزن دیوار، مقدار فروروی دیوار در زمین در اثر حفاری تونل بیشتر می‌شود و به علت افزایش ارتفاع دیوار و در نتیجه افزایش بازوی لنگر و طبیعتاً افزایش لنگر واژگونی، فرورفتگی بیشتر خواهد شد. نهایتاً تغییر در موقعیت تونل نسبت به دیوار باعث کاهش مقدار نشست و گستردگی آن در سطح زمین می‌شود.

## تقدیر و تشکر

نویسندگان این پژوهش از مهندس علی امام، مدیرعامل متروی تهران و حومه، به خاطر مطالعه‌ی این مقاله و بیان اظهارنظرها و رهنمودهایشان، صمیمانه سپاسگذاری می‌کنند.

- [١] Bilgin, N., Copur, H., & Balci, C. "Mechanical Excavation in Mining and Civil Industries." 1st Edition, Kindle Edition, CRC Press, 2014.
- [٢] Franzius, J.N. "Behaviour of buildings due to tunnel induced subsidence." PhD thesis, Imperial College of science, technology and medicine, University of London, 2003.
- [٣] Burland, J. B., & Wroth, C. P. "Settlement of buildings and associated damage." Proc. Conference Settlement of structures, Pentech Press, London, pp. 611-654, 1974.
- [٤] Rankin, W. J. 1988. "Ground movements resulting from urban tunnelling: predictions and effects." Engineering geology of underground movements, The Geological Society, London, pp. 79-92, 1988.
- [٥] Burland, J. B., & Wroth, C. P. "Settlement of buildings and associated damage." Proc. Conference Settlement of structures, Pentech Press, London, pp. 611-654, 1974.
- [٦] Boscardin, M. D., & Cording, E. J. "Building response to excavation-induced settlement." Journal of Geotech. Engineering, ASCE, 115(1), 1989.
- [٧] Potts, D.M., & Addenbrooke, T.I. "A structure's influence on tunneling induced ground movement." Proceeding of the Institution of Civil Engineers and Geotechnical Engineering 125, pp. 109-125, 1997.
- [٨] Guglielmetti, V., & Grasso, P. "Mechanized tunneling in urban areas." Teylor & Francis Publisher, 2008.
- [٩] Mroueh, H., & Shahrour, I. "A full 3-D finite element analysis of tunneling adjacent structures interaction." Journal of Computers and Geotechnics (30), pp. 245-253, 2003.
- [١٠] Afifipour, M., Sharifzadeh, M., Shahriar, K., & Jamshidi, H. "Interaction of twin tunnels and shallow foundation at Zand underpass, Shiraz metro, Iran." Tunnelling and Underground Space Technology 26, pp. 356-363, 2011.
- [١١] Liyanapathirana, D.S., & NishanthanInfluence, R. "Influence of deep excavation induced ground movements on adjacent piles." Tunnelling and Underground Space Technology 52, pp. 168-181, 2016.
- [١٢] Nematollahi, M., & Dias, D. "Three-dimensional numerical simulation of pile-twin tunnels interaction – Case of the Shiraz subway line." Tunnelling and Underground Space Technology 86, pp. 75-88, 2019.
- [١٣] Mair, R. J., Taylor, R. N., & Burland, J. B. "Prediction of ground movements and assessment of risk of building damage due to bored tunnelling." Proceeding of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Balkema, Rotterdam, pp. 713-718, 1996.
- [١٤] Peck, RB. "Deep excavation and tunneling in soft ground, State-of-the-art report." In Proc 7th int conf soil mechanics and found engineering, Mexico, pp 225-90, 1969.
- [١٥] Burland, J. B. "Assessment of risk of damage to buildings due to tunnelling and excavation." Invited Special Lecture. In: 1st Int. Conf. on Earthquake Geotech. Engineering, IS Tokyo '95, 1995.