



## بررسی تاثیر توام احداث متروی شیراز و پایین انداختن تراز آب زیر زمینی بر نشست سطح زمین

محمد حسین شفیعی<sup>۱</sup>، نادر هاتف<sup>۲</sup>

۲- بخش راه و ساختمان، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز

Ahmadcivil2002@gmail.com

### خلاصه

کنترل نشست سطح زمین در حفر تونلهای کم عمق، همانند بیشتر پروژه های عمرانی، از اهمیت به سزایی برخوردار است. مقدار عمده این نشست در اثر سست شدن توده خاک می باشد و در برخورد با لایه آبدار با پایین انداختن تراز آب زیر زمینی این مقدار افزایش می یابد. در این حالت مقدار این نشستها به لحاظ اهمیت تاثیر آن بر سازه های مجاور می بایست با دقت قابل قبولی تخمین زده شود. در این تحقیق اثر توام دو مورد یاد شده، در محل برخورد متروی شیراز با شبکه زهکش این شهر به روش اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفته و نتایج بدست آمده بیانگر آن است که میزان نشست ناشی از پایین انداختن تراز آب زیرزمینی در مقایسه با نشست ناشی از حفر مترو قابل ملاحظه می باشد.

کلمات کلیدی: مترو، زهکش، نشست.

### مقدمه

کنترل نشست سطح زمین همواره و در بیشتر پروژه های عمرانی مد نظر مهندسان طراح و مشاور بوده و از اهمیت بالایی برخوردار است در مورد حفر تونلهای کم عمق نیز این مسأله به دلیل سست شدن توده خاک، صادق است اما نگرانی زمانی دو چندان می شود که در حفر تونل به لایه آبدار برخورد شود که در این صورت باید تراز آب در آن منطقه یا بصورت موقتی و یا بصورت دائمی و با احداث شبکه زهکش پایین انداخته شود، که اگر تراز آب بصورت دائمی پایین انداخته شود نشست زمین بدلیل کاهش یافتن فشار آب حفره ای و تبدیل شدن تمام تنش به تنش موثر و اگر بصورت موضعی این عمل صورت پذیرد مشکلاتی همچون عمل نمودن خود تونل به عنوان زهکش و یا شکل گیری و آرایش مجدد دانه های رس (در لایه های رسی) بر اثر بالا آمدن دوباره تراز آب زیر زمینی بوجود آید که خود این عوامل باعث نشست زمین می شود و در نهایت قسمتی و یا تمام این نشستها به سطح زمین منتقل شده و مشکلاتی را برای سازه های واقع در سطح زمین بوجود می آورد. [۱]

در این تحقیق سعی خواهد شد که ضمن بیان برخی از تئوریهای رایج در مورد نشست سطح زمین در اثر حفر تونلهای کم عمق و نشست زمین در اثر پایین آمدن تراز آب زیر زمینی و اثر توام دو مورد ذکر شده در نشست سطح زمین بررسی شود.

### تخمین نشست سطح زمین در اثر حفر تونلهای کم عمق

اولین رابطه تجربی برای تخمین نشست سطح زمین در اثر حفر تونل توسط Peck در سال ۱۹۶۹ ارائه گردید رابطه تجربی ارائه شده توسط وی برای برآورد میزان نشست سطح زمین در زمینهای نرم استوار بود در این رابطه پروفیل عرضی نشست سطح به کمک تابع توزیع نرمال نشان داده می شد. از آن زمان تا کنون این شیوه پیشنهادی بارها توسط محققین مختلف بررسی و در بعضی موارد عدم کارایی و در

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد عمران، ژئوتکنیک

<sup>۲</sup> استاد



برخی دیگر صحت آن نشان داده شده است. اما در هر حال مسلم است که شیوه برآورد نشست زمین که توسط Peck ارائه شده است بر اساس شیوه سنتی حفاری بوده و تکنولوژیهای جدید حفاری از قبیل حفاری با سپر EPB یا Slurry را در بر نمی گیرد. [۲]

از جمله روشهای دیگر برآورد نشست سطح زمین ناشی از حفر تونلهای کم عمق روش Oteo در سال ۱۹۷۹، روش Sagaseta در سال ۱۹۸۷، روش Booker & Verruijt در سال ۱۹۹۶، روش Medina-Melis در سال ۱۹۹۷ و ... می باشد که البته روابط ارائه شده توسط این افراد از زمان ارائه شان تا کنون چندین بار اصلاح شده اند اما اشکال اصلی بکارگیری این شیوه ها نیاز آنها به پارامترهایی است که ممکن است محاسبه آنها قبل از عملیات ساخت غیر ممکن باشد از قبیل نیاز به اطلاعات رفتار سنجی شده حین ساخت تونل. [۳]

در این بین به نظر می رسد که روش ارائه شده توسط Loganathan در سال ۱۹۹۸ عملی ترین روش برای محاسبه نشست سطح زمین در اثر حفر تونلهای کم عمق می باشد. رابطه ارائه شده توسط Loganathan و Polous در سال ۱۹۹۸ با در نظر گرفتن پارامترهای الاستیک تنها نیازمند پارامتری تحت عنوان پارامتر گپ زهکشی نشده می باشد از آنجایی که محاسبه این پارامتر وابسته به هندسه تونل، سپر حفاری و ویژگیهای ژئوتکنیکی محیط است از این روش می توان جهت برآورد نشست سطح زمین در اثر حفر تونل کم عمق قبل از عملیات ساخت استفاده کرد. [۴]

### نشست سطح زمین در اثر پایین آمدن سطح آب زیر زمینی

با پایین آمدن تراز آب زیر زمینی نشست در سطح زمین و بسته به نوع خاک بصورت آبی یا تدریجی رخ می دهد، محاسبه نشست زمین در اثر پایین آمدن تراز آب زیر زمینی به این دلیل حائز اهمیت می باشد که علاوه بر خسارات وارده بر سازه های روی زمین، ممکن است باعث ایجاد خسارت برای بخشهای زیر زمینی نیز بشود و در نظر نگرفتن این پدیده در محاسبات و پیش بینی ها می تواند خطاهای بسیار زیاد و غیر قابل قبولی را در بر داشته باشد. جهت محاسبه نشست سطح زمین در اثر افت سطح آب زیر زمینی با استفاده از تئوری تحکیم سه بعدی بایوت، فرمول بندی اجزاء محدود در سیستم مختصات استوانه ای و بر اساس معادلات تعادل المانها و معادله پیوستگی سیال منفذی صورت گرفته و رفتار خاک بصورت الاستوپلاستیک و با استفاده از مدل دو خطی (Bilinear) در نظر گرفته شده و برای بیان رفتار تنش- کرنش خاک در حالت غیر ارتجاعی از مدل خطی با شیب مضاعف استفاده شده است. [۵]

### ویژگیهای محل مورد مطالعه

#### مشخصات مترو

متروی شیراز شامل دو تونل رفت و برگشت می باشد که در محدوده مورد مطالعه حفاری و احداث آن توسط دو دستگاه TBM به قطر حدود ۷ متر که در مجاورت یکدیگر به گونه ای که فاصله مرکز به مرکز آنها حدود ۱۵ متر می باشد صورت پذیرفته است. قطر داخلی هر یک از تونلها ۶ متر، ضخامت پوشش ۳۰ سانتیمتر، و حدود ۱۴ سانتیمتر پشت پوشش عملیات تزریق صورت می پذیرد تونل بطور متوسط در عمق ۱۴ متری سطح زمین قرار می گیرد پارامتر مقاومتی پوشش  $f'_c = 510 \frac{kg}{cm^2}$ ، ضریب پواسن بتن پوشش  $\nu = 0.20$  و پوشش با فاصله ۱،۴ متر می باشد که از سگمنتهایی به ضخامت ۳۰ سانتیمتر و عرض ۱،۴ متر تشکیل شده است و در نهایت بصورت یک رینگ کامل با قطر داخلی ۶ متر اجرا می شود. تزریق توسط مخلوط سیمان، پودر سنگ، ماسه بادی و دوغاب بنتونیت صورت می پذیرد.

### پارامترهای ژئوتکنیکی

پارامترهای ژئوتکنیکی از تلفیق نتایج آزمایشهای صحرایی شامل نفوذ استاندارد (SPT)، آزمایش داچکن (CPT)، آزمایش پرسو متر (PMT) و آزمایشهای آزمایشگاهی شامل: تک محوری، سه محوری، برش مستقیم، تحکیم، دانسیته و رطوبت طبیعی ارائه می شوند. برای تعیین مشخصات مقاومت برشی خاک در دوره کوتاه مدت روی تعدادی از نمونه های معرف آزمایشهای تک محوری، سه محوری UU، برش مستقیم تند و پنترو متر جیبی انجام شده است. همچنین برای برآورد مشخصات مقاومت برشی خاک مسیر مورد مطالعه در دراز مدت، آزمایشهای سه محوری CU و CD صورت گرفته است. در نهایت برای مسیر مورد مطالعه تا عمق ۲۴ متری رس لاغر و از ۲۴ متری تا ۵۰ متر رس چاق (Fat Clay) جهت مدلسازی پیشنهاد می گردد.

با توجه به آزمایشات انجام شده از مقادیر جدول (۱) که توسط مشاور پیشنهاد شده است در مدل سازی استفاده می شود.



جدول ۱- مشخصات ژئوتکنیکی خاک ناحیه مورد مطالعه

	$c'$	$\phi'$	$c_u$	$E$	$\nu$	$\gamma_{unsat}$	$\gamma_{sat}$	$K_{ver.}$	$K_{horiz.}$
رس لاغر	$0.18 \text{ kg/cm}^2$	$34^\circ$	$0.40 \text{ kg/cm}^2$	$300 \text{ kg/cm}^2$	0.25	$1.7 \text{ gr/cm}^3$	$2 \text{ gr/cm}^3$	$10^{-4} \text{ cm/sec}$	$3.5 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$
رس چاق	$0.4 \text{ kg/cm}^2$	$30^\circ$	$0.52 \text{ kg/cm}^2$	$390 \text{ kg/cm}^2$	0.35	$1.87 \text{ gr/cm}^3$	$2.05 \text{ gr/cm}^3$	$10^{-4} \text{ cm/sec}$	$3.5 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$

### مشخصات قنات زهکش شیراز

برای رفع مشکل بالا بودن سطح آب زیرزمینی در دشت شیراز مطالعات پایین انداختن سطح آب سفره در منطقه جنوب و جنوب شرقی دشت شیراز در سال ۱۳۷۲ آغاز شد. پس از انجام بررسی‌های لازم، استفاده از نتایج مطالعات و آزمایشات گذشته و بدست آوردن بعضی ضرایب هیدرودینامیکی خاک از طریق حفر و پمپاژ چاه‌های سطحی و مطالعه نقشه‌های شهرداری، راه‌حل‌های مختلف پایین انداختن سطح سفره بحث و با هم مقایسه و در نهایت اجرای قنات زهکش در سه مسیر اصلی و مسیرهای فرعی منتهی به آن‌ها به عنوان راه‌حل مناسب توسط مشاورین طرح ارائه گردید. مسیر زهکش‌ها طوری انتخاب شده‌اند که از خیابانهای اصلی و بلوارها عبور نمایند به طوریکه با ساختمانهای مسکونی و اداری برخورد نداشته و اجرای عملیات به سرعت انجام شود. مشخصات هر یک از سه زهکش دشت شیراز در جدول (۲) آمده است.

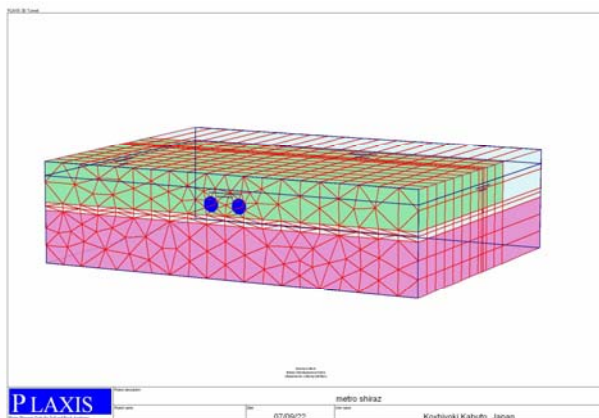
زهکشی که در این تحقیق مورد توجه قرار می‌گیرد زهکش خاتون می‌باشد که در بلوار مدرس و نزدیکی ایستگاه شماره ۶ مترو واقع در کوی زهرا با مترو برخورد می‌نماید.

در ناحیه مورد مطالعه یعنی محل برخورد زهکش با متروی شیراز عمق زهکش در حدود ۲۱،۷۰ متری سطح زمین می‌باشد تراز آب زیر زمینی قبل از احداث زهکش حدوداً در عمق ۷ متری سطح زمین می‌باشد.

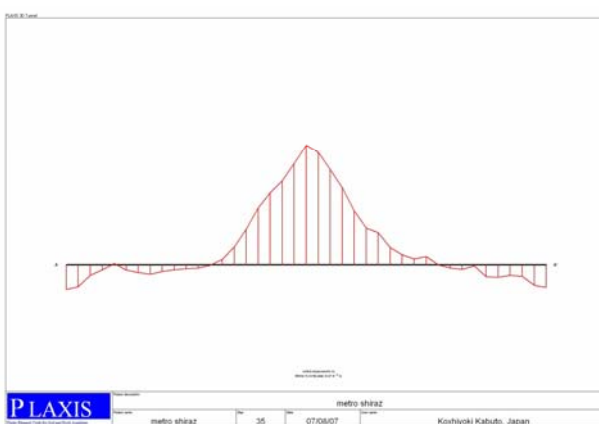
جدول ۲- مشخصات سه زهکش خاتون، زندان و چوگان در دشت شیراز

نام زهکش	محل شروع	محل خاتمه	طول (کیلومتر)	عمق تقریبی محل شروع (متر)	عمق تقریبی خاتمه (متر)
خاتون	فلکه خاتون	ابتدای کانال زه‌آب بر شمالی	۱۲/۰۷	۳۳	۲/۵
زندان	چهار راه زندان	ابتدای کانال زه‌آب بر شمالی	۱۵/۵۱	۴۳	۲/۲
چوگان	چوگان زرهی	ابتدای کانال زه‌آب بر جنوبی	۲۲/۷	۳۲	۲/۱

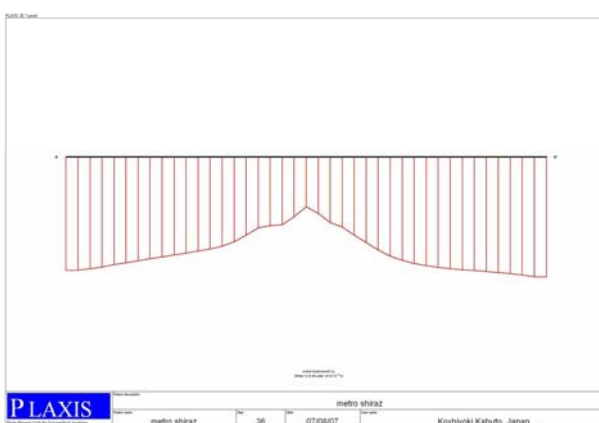
محل برخورد زهکش خاتون با متروی شیراز در فاصله ۵۱۷۰ متری میدان الله و ۲۳۲۳ متری میدان ولیعصر می‌باشد. طول ناحیه مورد مطالعه ۳۰۰ متر طول مترو یعنی از ۵۰۲۰ متری میدان الله (۴۰ متر بعد از ایستگاه شماره ۵) تا ۵۳۲۰ متری میدان الله می‌باشد جهت مدلسازی مترو از نرم افزار PLAXIS 3D TUNNEL استفاده شد و افت هد ناشی از زهکشی نیز از نرم افزار SEEP/W بدست آمد. برای خاک از مدل موهر کولمب و برای پوشش از مدل کشسانی خطی استفاده گردیده است. شکل (۱) شمای سه بعدی مدل و شکل (۲) پروفیل عرضی تغییر شکل قائم سطح زمین پس از احداث مترو در محل برخورد مترو با زهکش بدست آمده از محاسبات را نشان می‌دهد. نشست بوجود آمده در اثر پایین آمدن تراز آب زیر زمینی پس از احداث مترو در شکل (۳) آمده است که هم تغییر شکل ناشی از تونلسازی و هم پایین آمدن تراز آب زیر زمینی را شامل می‌شود.



شکل ۱- شمای سه بعدی مدل ساخته شده در Plaxis 3D Tunnel

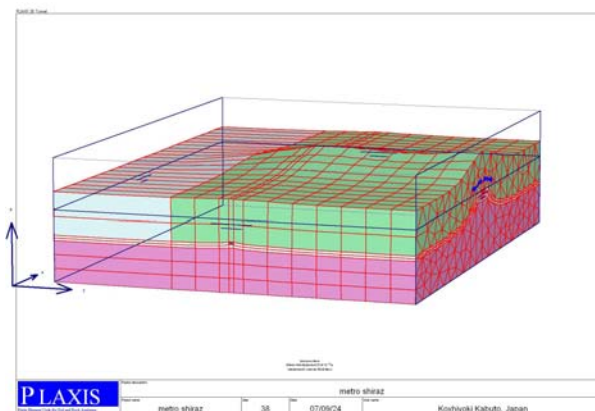


شکل ۲- پروفیل عرضی تغییر شکل قائم سطح زمین در اثر تونلسازی

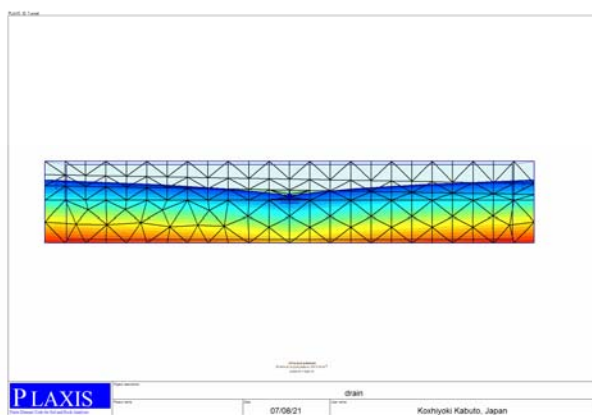


شکل ۳- پروفیل عرضی تغییر شکل قائم سطح زمین در محل برخورد مترو با زهکش شیراز پس از پایین آمدن تراز آب زیرزمینی

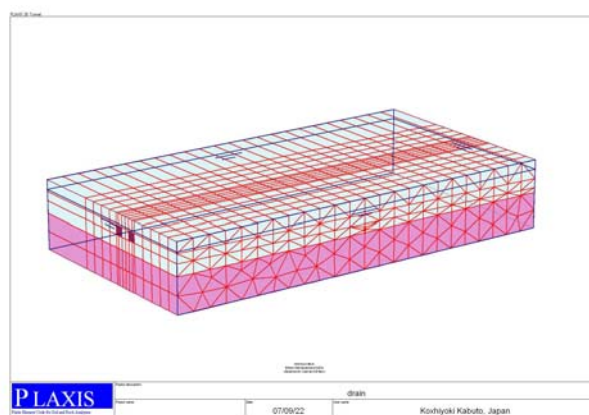
تغییر شکل سه بعدی مدل پس از پایین آمدن تراز آب زیر زمینی و احداث مترو در این مدل مانند شکل (۴) می باشد. جهت در نظر گرفتن تأثیر زهکش و نحوه پایین آمدن تراز آب زیر زمینی بصورت واقعی مدل دیگری ساخته شد شکل(۴) شمای سه بعدی مدل و شکل(۵) نحوه پایین آمدن تراز آب زیر زمینی را نشان می دهد.



شکل ۴- تغییر شکل سه بعدی مدل پس از احداث مترو و پایین آمدن تراز آب زیر زمینی



شکل ۶- نحوه پایین انداختن تراز آب زیر زمینی در مدل زهکش



شکل ۵- شکل سه بعدی مدل زهکش در Plaxis 3D Tunnel

جهت تعیین مقدار عددی تغییر شکلهای بوجود آمده ۱۰ نقطه به فواصل ۷,۵، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ متر در طرفین محل برخورد هم در راستای صولی محور مترو و هم در راستای عمود بر محور طولی مترو تعیین شد. نتایج بدست آمده در جداول ۳ و ۴ آمده است.

جدول ۳- تغییر شکل قائم سطح زمین در راستای عمود بر محور طولی مترو

تغییر شکل قائم سطح زمین در راستای عمود بر محور طولی مترو			
فاصله از نقطه مرجع (متر)	تغییر شکل قائم سطح زمین پس از تونلسازی (متر)	نشست ناشی از پایین آمدن تراز آب زیر زمینی به تنهایی (متر)	تغییر شکل قائم سطح زمین پس از پایین آمدن تراز آب زیر زمینی (متر)
-۱۰۰	-۰,۰۰۵۴	-۰,۰۳۹۰	-۰,۰۴۴۴
-۷۵	-۰,۰۰۱۱۴	-۰,۰۳۳۸	-۰,۰۳۹۹
-۵۰	-۰,۰۰۰۸	-۰,۰۳۸۵	-۰,۰۳۹۳
-۲۵	۰,۰۰۷۹	-۰,۰۳۸۱	-۰,۰۳۰۲
-۷,۵	۰,۰۱۷	-۰,۰۳۷۹	-۰,۰۲۰۹
۰	۰,۰۲۶	-۰,۰۳۷۸	-۰,۰۱۱۸
۷,۵	۰,۰۱۹	-۰,۰۳۸۱	-۰,۰۱۹۱
۲۵	۰,۰۰۸۰۹	-۰,۰۳۹۰	-۰,۰۳۰۹
۵۰	۰,۰۰۱۸	-۰,۰۳۹۷	-۰,۰۳۷۹
۷۵	-۰,۰۰۲۶	-۰,۰۴۰۳	-۰,۰۴۲۹
۱۰۰	-۰,۰۰۰۵	-۰,۰۴۰۷	-۰,۰۴۵۷



جدول ۴- تغییر شکل قائم سطح زمین در راستای محور طولی مترو

تغییر شکل قائم سطح زمین در راستای محور طولی مترو				
فاصله از نقطه مرجع (متر)	تغییر شکل قائم سطح زمین پس از تونلسازی (متر)	تغییر شکل قائم سطح زمین پس از پایین آمدن تراز آب زیر زمینی (متر)	نشست ناشی از پایین آمدن تراز آب زیر زمینی به تنهایی (متر)	نشست اصلاح شده واقعی (متر)
-۱۰۰	۰,۰۲۱۴	۰,۰۰۹۱-	-۰,۰۳۵۱	-۰,۰۲۹۲
-۷۵	۰,۰۲۱۶	-۰,۰۰۱	-۰,۰۳۵۲	-۰,۰۳۰۳
-۵۰	۰,۰۲۱۸	-۰,۰۰۱۱	-۰,۰۳۵۴	-۰,۰۳۱۵
-۲۵	۰,۰۲۲۰	-۰,۰۰۱۲۷	-۰,۰۳۶۳	-۰,۰۳۳۴
-۷,۵	۰,۰۲۲۵	-۰,۰۰۱۴۹	-۰,۰۳۸۰	-۰,۰۳۶۱
۰	۰,۰۲۲۸	-۰,۰۰۱۶۳	-۰,۰۳۹۱	-۰,۰۳۷۸
۷,۵	۰,۰۲۳۱	-۰,۰۰۱۴۵	-۰,۰۳۷۰	-۰,۰۳۶۳
۲۵	۰,۰۲۳۶	-۰,۰۰۱۲	-۰,۰۳۴۰	-۰,۰۳۴۳
۵۰	۰,۰۲۴۰	-۰,۰۰۱۰۳	-۰,۰۳۲۱	-۰,۰۳۳
۷۵	۰,۰۲۴۵	-۰,۰۰۰۸۵	-۰,۰۳۰۶	-۰,۰۳۱۷
۱۰۰	۰,۰۲۴۸	-۰,۰۰۰۷۲	-۰,۰۲۹۴	-۰,۰۳۰۷

نتایج

[ ] ...

Contraction

( )



## Drop manhole

۱- راست بود، ب. و شهریار، ک. و خوشروان آذر، ع. (۱۳۸۳) "برآورد تحلیلی تونلسازی در نواحی شهری (مطالعه موردی فاز اول مترو تبریز)" دومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران.

2- Peck, R. B. (1969) "Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground," State of the Art Volume, Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp. 225-290, Mexico City.

3- Melis, M., Medina, L. and Rodríguez, J. (2002) "Prediction and analysis of subsidence induced by shield tunneling in the Madrid metro extension" *Can. Geotech. J.* Vol. 39, No. 6 PP 1273-1287.

4- Loganathan, N. and Poulos, H.G. (1998) "Analytical prediction for tunneling induced ground movements in clays," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol. 124, No. 9, pp. 846-856.

۵- توفیق، محمد محسن. و اوریا، احد. (۱۳۸۴). مدل سازی عددی نشست منطقه ای در اثر نوسانات سطح آب زیر زمینی با روش اجزاء محدود، پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران دانشگاه شهید باهنر کرمان،

۶- جعفری پشته، ش. و دماوندی، ح. (۱۳۸۵). "بررسی اثرات حفاری تونل خط ۴ مترو تهران بر ساختمانهای اطراف" هفتمین کنفرانس تونل ایران.