



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دوره چهل و هفت، شماره ۱، تابستان ۱۳۹۴، صفحه ۱۷۵ تا ۱۸۳
Vol. 47, No. 1, Summer 2015, pp. 175-183



نشریه علمی - پژوهشی امیرکبیر (مهندسی عمران و محیط زیست)
Amirkabir Journal of Science & Research (Civil & Environmental Engineering)
(AJSR - CEE)

ارزیابی خطر آسیب به ساختمان‌های اطراف ایستگاه O7 خط هفت متروی تهران با استفاده از روش سختی نسبی

تقی عبدالهی^{*}، احمد جعفری^۲، مهدی سعیدی^۱، فرشاد نژادشاهمحمد^۱، هادی پورسعید^۱

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت ۱۳۹۰/۷/۱۱، پذیرش ۱۳۹۴/۴/۱۰)

چکیده

ساخت تونل در زمین نرم باعث جابجایی زمین اطراف آن می‌شود. پیش‌بینی تغییر شکل ناشی از تونل‌سازی و برآورد آسیب ناشی از آن بر سازه‌های اطراف، بخش حیاتی طراحی و برنامه‌ریزی ساخت تونل در نواحی شهری است. در این مقاله ایستگاه O7 خط هفت متروی تهران که در منطقه‌ای تجاری-مسکونی با تراکم زیاد واقع شده است، با استفاده از نرم افزار فلک سه بعدی^۱ مدل-سازی شد. ایستگاه به روش زیرزمینی حفاری شده، بطوریکه ابتدا یک گالری در وسط ایستگاه به منظور دسترسی و حفاری شمعی‌های کناری و طاق‌های بتنی حفاری شد. شمعی‌ها و طاق‌های بتنی برای کنترل نشست و به عنوان نگهداری موقت به فاصله‌داری ۱/۲ متر ایجاد شدند. در مرحله بعدی داخل ایستگاه حفاری و سیستم نگهداری اصلی آن نصب شد. از ساختمان‌های اطراف ایستگاه ۲ دستگاه ساختمان در حوزه تاثیر ایستگاه واقع بودند که با توجه به نشست بالای ۱۰ میلیمتر این ساختمان‌ها در مرحله اول ارزیابی خطر آسیب در ناحیه ناایمن قرار گرفتند. بنابراین مرحله دوم ارزیابی خطر آسیب با استفاده از روش سختی نسبی انجام شد. در این مرحله ساختمان‌ها در ناحیه ایمن قرار گرفتند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ایجاد ایستگاه، خطری برای ساختمان‌های مجاور ندارد.

کلمات کلیدی

فلک، حوزه تاثیر، ارزیابی خطر آسیب، روش سختی نسبی.

* نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات Email: t_abdolahi@yahoo.com

۱- مقدمه

گیرند و نیز ساختمان‌های با حساسیت بالا مانند آثار تاریخی، بکار می‌رود. در این مرحله ساختمان باید با تمام جزئیات آن مدل‌سازی شود.

در این مقاله ابتدا به بررسی مشخصات محل پژوهش ایستگاه 07 خط هفت متروی تهران پرداخته شده است، سپس روش حفاری و مراحل حفاری ایستگاه 07 آمده است. مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار فلک سه بعدی انجام شده و ارائه مشخصات ساختمان‌های اطراف ایستگاه 07 بخش دیگری از این مقاله را تشکیل می‌دهد. در انتها به تخمین آسیب خطر به ساختمان‌های اطراف ایستگاه پرداخته شده است.

۲- مشخصات محل پژوهش

ایستگاه 07 یکی از ایستگاه‌های میانی خط هفت متروی تهران است. این ایستگاه در زیر اتوبان نواب و در حد فاصل خیابان های کمیل و محبوب مجاز می‌باشد. ایستگاه گفته شده در منطقه ای تجاری-مسکونی با تراکم زیاد واقع شده است. شکل (۱) پروفیل عمومی ژئوتکنیکی مسیر خط هفت و ایستگاه 07 را نشان می‌دهد.

| | |
|----------|-------------------|
| Top soil | 4m |
| Type IV | 4m |
| Type II | 11m |
| Type I | 5m |
| Type II | 07 Station line 7 |
| Type III | 5m |

شکل (۱): پروفیل عمومی ژئوتکنیکی مسیر خط هفت و ایستگاه 07. با توجه به اطلاعات حاصل از حفر گمانه‌ها در مسیر خط هفت، ایستگاه 07 بالای سطح آب‌های زیرزمینی قرار دارد. نتیجه اطلاعات ژئوتکنیکی در جدول (۱) آمده است.

جدول (۱): مشخصات ژئوتکنیکی مسیر خط ۷ و ایستگاه 07 متروی تهران.

| نوع خاک | γ (gr/cm^3) | C (kg/cm^2) | ϕ ($^\circ$) | E (kg/cm^2) | ν |
|---------|---------------------------|--------------------|------------------------|--------------------|-------|
| نوع I | ۱/۹ | ۰/۲ | ۳۸ | ۱۰۰۰ | ۰/۲۷ |
| نوع II | ۱/۹ | ۰/۳ | ۳۵ | ۸۰۰ | ۰/۲۷ |
| نوع III | ۱/۹ | ۰/۳ | ۳۰ | ۵۰۰ | ۰/۳ |
| نوع IV | ۱/۹ | ۰/۴ | ۲۷ | ۳۰۰ | ۰/۳۵ |

۳- روش حفاری و مدل‌سازی ایستگاه 07 خط هفت متروی تهران

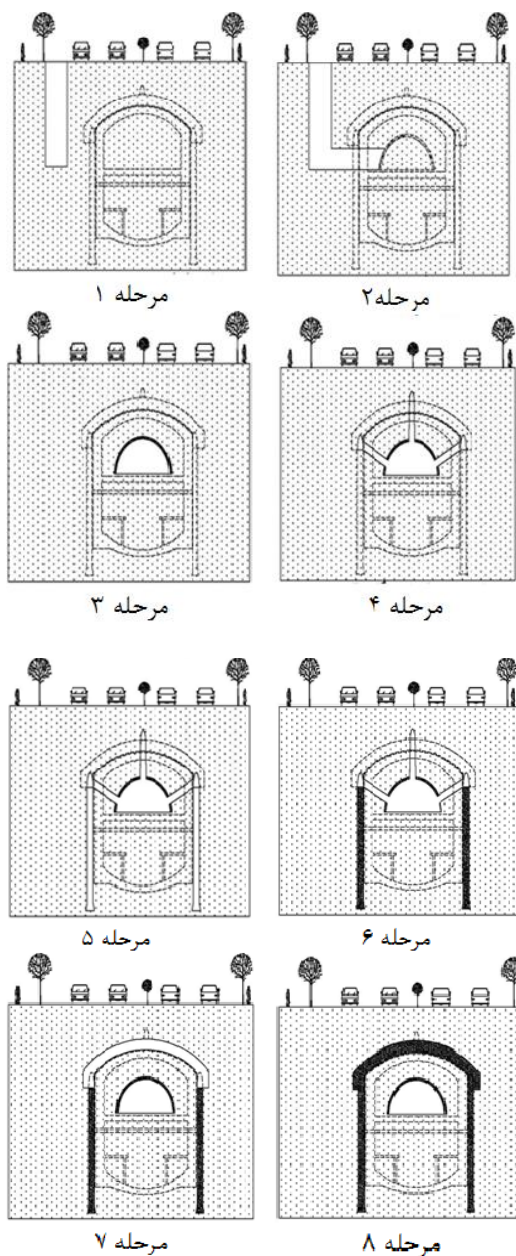
با توجه به طول ۲۷ کیلومتری متروی خط هفت، حفاری مکانیزه به منظور تسریع در عملیات حفاری انتخاب شده است.

ساخت تونل، مخصوصاً در شرایط زمین نرم، باعث جابجایی زمین می‌شود که می‌تواند بر روی ساختمان‌های سطحی و سازه‌های دیگر تأثیر بگذارد. بخش مهمی از هزینه‌های ساخت، تدابیر حفاظتی مورد نیاز برای کاهش آسیب به ساختمان‌ها است. پیش‌بینی صحیح و مؤثر آسیب سازه‌ها بخش قابل توجهی از مرحله برنامه‌ریزی و امکان‌سنجی ساخت تونل در مناطق شهری می‌باشد. اگر روش‌های تخمین آسیب سازه محافظه‌کارانه باشند، می‌توانند منجر به هزینه‌های غیرضروری حفاظتی یا تونل‌سازی پرهزینه شوند. در نتیجه ممکن است هزینه‌های عملیاتی و ساخت تونل افزایش یابد و امکان‌پذیری آن به خطر بیفتد. با روش‌های کارآمد و صحیح برآورد جابجایی زمین ناشی از تونل‌سازی و آسیب ساختمان می‌توان هزینه‌های عملیاتی را کاهش داد.

برای کاهش هزینه‌های غیر ضروری حفاظتی، ساختمان‌هایی که در حوزه تاثیر حفاری قرار دارند ابتدا با استفاده از روش‌های اولیه تخمین آسیب ساختمان، مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. در مرحله اول وجود ساختمان در نظر گرفته نمی‌شود و فرض بر این است که فونداسیون ساختمان از منحنی نشست بدون حضور ساختمان تبعیت می‌کند. با توجه به مقاومت ساختمان در برابر تغییر شکل، واضح است که این مرحله محافظه‌کارانه می‌باشد. بنابراین ساختمان‌هایی که در این مرحله در ناحیه ایمن قرار می‌گیرند آسیبی به آن‌ها وارد نخواهد شد. روش‌های ارائه شده برای این مرحله اغلب بر مبنای شیب منحنی نشست و نیز نشست بیشینه در زیر ساختمان می‌باشند. برخی از این معیارها عبارتند از: معیار مک‌دونالد^۲ و اسکمپتون^۳ (۱۹۵۶)، معیار توکار^۴ و پولشین^۵ (۱۹۵۷)، معیار باپروم^۶ (۱۹۶۳)، معیار رنکین^۷ (۱۹۸۸) و غیره. ساختمان‌هایی که در این مرحله در محدوده ناایمن قرار می‌گیرند باید با روش‌های تخمین آسیب ثانویه مورد ارزیابی قرار گیرند. در این مرحله ساختمان‌ها بصورت تیر در نظر گرفته می‌شوند. همچنین فرض می‌شود ساختمان از منحنی نشست بدون در نظر گرفتن ساختمان تبعیت می‌کند ولی با توجه به مقاومت ساختمان ضرایب تصحیحی به تغییر شکل‌های ساختمان اعمال می‌شود. روش‌های ارائه شده برای این مرحله عبارتند از روش تیر الاستیک ورث^۸ و بورلند^۹ (۱۹۷۵)، تحلیل تفضیلی ساختمان بونه^{۱۰} (۱۹۹۶)، روش سختی نسبی ادنبروک^{۱۱} و پتس^{۱۲} (۱۹۹۷)، روش سختی نسبی اصلاح شده فرانزیوس^{۱۳} (۲۰۰۳)، روش تیر متورق فینو^{۱۴} (۲۰۰۵) و غیره.

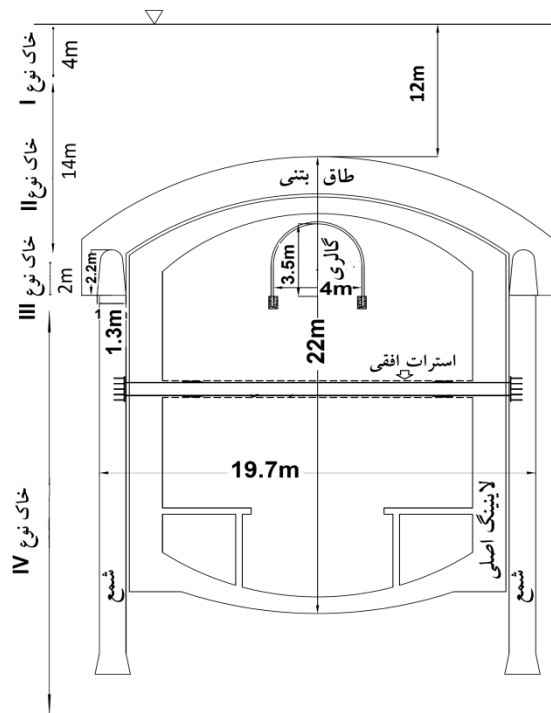
مرحله سوم تخمین آسیب ساختمان برای ساختمان‌هایی که در مرحله ثانویه ارزیابی آسیب در ناحیه ناایمن قرار می‌-

مرحله ۱۰- نصب استرات
 مرحله ۱۱- تکمیل خاکبرداری تا تراز زیر فونداسیون
 مرحله ۱۲- احداث ایستگاه تا تراز سالن فروش بلیط
 مرحله ۱۳- بر چیدن استراتها
 مرحله ۱۴- تکمیل احداث بدنه اصلی ایستگاه
 این مراحل بطور شماتیک در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۳): مراحل ایجاد ایستگاه O7.

عملیات حفاری با دستگاه TBM انجام می‌شود. با در نظر گرفتن شرایط زمین و آب زیرزمینی به ناچار از TBM نوع سپر بسته تعادل فشار زمین استفاده می‌شود. شکل (۲) هندسه و ابعاد ایستگاه O7 را نشان می‌دهد.



شکل (۲): شکل هندسی و ابعاد ایستگاه O7.

با توجه به عمق نسبتاً زیاد ایستگاه O7 و همچنین عدم امکان انجام اصلاحات موقت ترافیکی، روش اجرای این ایستگاه از نوع زیرزمینی در نظر گرفته شده است.

مراحل اجرای ایستگاه O7 به شرح زیر است:

مرحله ۱- حفاری و اجرای شفت دسترسی در مجاورت ایستگاه
 مرحله ۲- حفاری و اجرای گالری ارتباطی از شفت به موقعیت ایستگاه
 مرحله ۳- حفاری گالری در وسط یا طرفین ایستگاه و اجرای سیستم سازه نگهبان موقت در طول ایستگاه
 مرحله ۴- حفاری دسترسی‌های جانبی و گالری‌های بالای تونل

مرحله ۵- حفاری شمع‌های کناری

مرحله ۶- بتن‌ریزی شمع‌ها

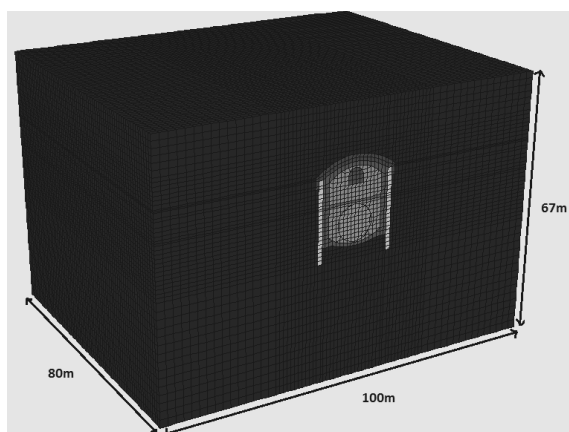
مرحله ۷- حفاری طاق بتنی در امتداد شمع‌ها

مرحله ۸- بتن‌ریزی طاق‌ها

مرحله ۹- خاکبرداری در پناه شمع‌ها و طاق بتنی تا تراز

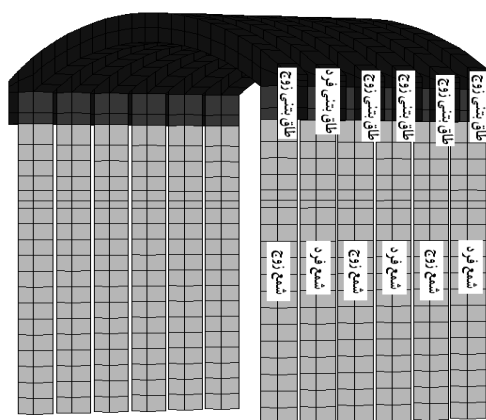
دومین استرات

شمع‌ها و طاق‌های بتنی زوج (یا فرد) شمع‌ها و طاق‌های بتنی فرد (یا زوج) ایجاد می‌شوند. فاصله‌داری و عرض شمع‌ها و طاق‌های بتنی برابر $1/2$ متر می‌باشد.



شکل (۴): شکل هندسی ایستگاه O7.

شکل (۵) شمع‌ها و طاق‌های بتنی ایجاد شده در نرم‌افزار فلک را نشان می‌دهد.



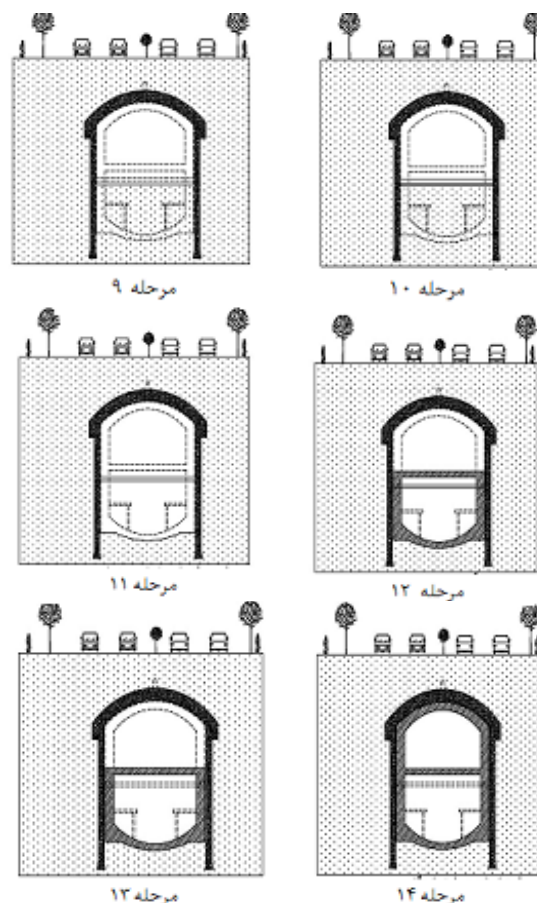
شکل (۵): شمع‌ها و طاق‌های بتنی ایستگاه O7.

۴- تخمین خطر آسیب ساختمان‌ها

برای تخمین خطر آسیب ساختمان‌ها ابتدا، عوامل تغییر شکل ساختمان که در معیارهای مختلف تخمین خطر آسیب بکار گرفته شده‌اند تعریف شده است.

۴-۱- تعریف اصطلاحات و عوامل تغییر شکل ساختمان

در سال ۱۹۷۹ ورث و بورلند تعریف‌های فیزیکی عوامل مربوط به پیش‌بینی آسیب ساختمان را ارائه کردند [۱]. این عوامل در شکل (۶) نشان داده شده است.



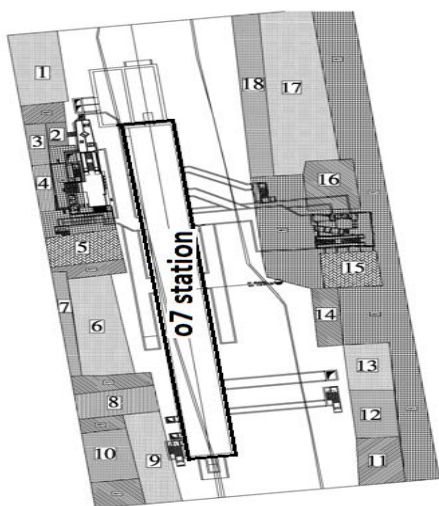
شکل (۳): مراحل ایجاد ایستگاه O7 (ادامه).

مدلسازی ایستگاه O7 با استفاده از نرم‌افزار فلک انجام شد. نرم‌افزار بر مبنای روش تفاضل محدود بنا شده است که برای تحلیل و مدلسازی مسائل ژئوتکنیکی در محیط‌های پیوسته بکار می‌رود. این نرم‌افزار قادر است رفتار سازه‌های تشکیل یافته از خاک، سنگ و سایر مصالحی را که در اثر رسیدن به حد تسلیم خود، دچار تغییر شکل‌های پلاستیک می‌شوند را مدلسازی نماید. مراحل مدلسازی عبارت است از: ساخت هندسه مدل، انتخاب محدوده مناسب توده سنگ یا خاک و مشخص‌بندی مناسب و تعیین خواص آن، اعمال شرایط مرزی و تنش‌های اولیه، حل مدل تا رسیدن به تعادل قبل از حفاری، ایجاد تغییر در مدل (حفاری و نصب سیستم نگهداری و حل مجدد مدل).

شکل (۴) مدل ساخته شده را نشان می‌دهد. مراحل حفاری و ایجاد ایستگاه در مدل، مطابق با مراحل ۱۴ گانه ارائه شده انجام شده است.

این روش برای کنترل نشست در مناطق شهری به منظور جلوگیری از ایجاد آسیب در ساختمان‌ها بکار می‌رود. در این ایستگاه ابتدا شمع و طاق بتنی زوج (یا فرد) حفاری شده و شمع و طاق بتنی ماقبل آن بتن‌ریزی می‌شود. پس از اتمام

موقعیت قرارگیری ساختمان های اطراف ایستگاه در شکل (۸) نشان داده شده است.



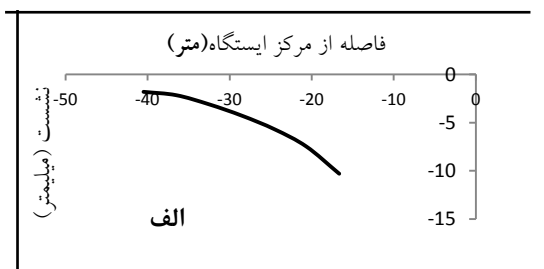
شکل (۸): موقعیت قرارگیری ساختمان های اطراف ایستگاه.

با توجه به توضیحات ارائه شده، اثر عموم ساختمان های واقع در ضلع شرقی و غربی ایستگاه قابل اغماض بوده، زیرا ساختمان های ضلع شرقی در فاصله ای بیش از ۳۰ متر از ایستگاه واقع شده اند و ساختمان های ضلع غربی که در فاصله کمتر از ۳۰ متر از ایستگاه قرار دارند عبارتند از: ساختمان های "۵" و "۸".

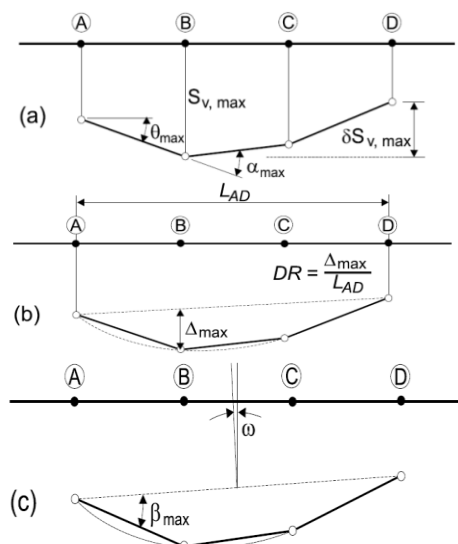
۳-۴- ارزیابی اولیه خطر آسیب به ساختمان ها

در این مرحله مقاومت ساختمان در برابر تغییر شکل ناشی از حفاری فضای زیرزمینی در نظر گرفته نمی شود. همه روش های ارائه شده متناسب با این مرحله بر مبنای شیب و نشست بیشینه ساختمان می باشند.

شکل (۹الف) منحنی نشست در زیر ساختمان "۵" و شکل (۹ب) منحنی نشست در زیر ساختمان "۸" بعد از اتمام حفاری ایستگاه O7، که از نرم افزار فلک بدست آمده است را نشان می دهد.



شکل (۹الف): منحنی نشست زیر ساختمان ۵.

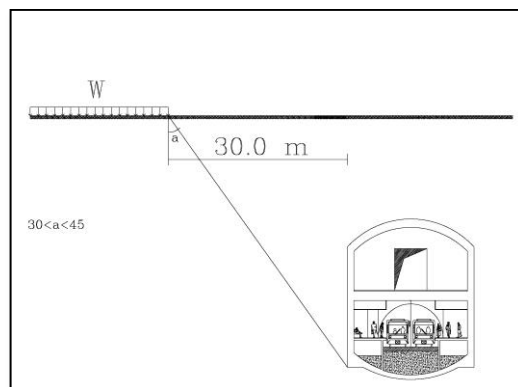


شکل (۶): عوامل تغییر شکل ساختمان [۱].

عوامل تغییر شکل ساختمان عبارتند از: نشست (S_v)، نشست تفاضلی (dS_v)، چرخش یا شیب (θ)، کرنش زاویه-ای (α)، انحنای نسبی (Δ)، نسبت انحنای (Δ/L)، کجی (ω)، انحراف زاویه ای یا چرخش نسبی (β).

۲-۴- موقعیت قرارگیری و مشخصات ساختمان ها

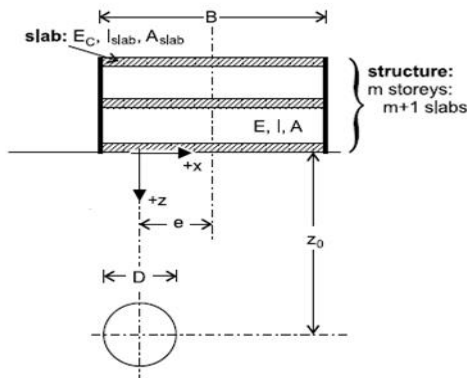
مطابق تئوری توزیع تنش در محیط خاکی (محیط الاستوپلاستیک) جهت یک نوار تنش، به صورت آنچه در شکل (۷) آورده شده است می باشد. زاویه گسترش تنش بصورت $30 < a < 45$ متغیر است. با توجه به ابعاد ایستگاه و تراز قرارگیری آن و فرض محافظه کارانه گسترش تنش با زاویه 45° می توان گفت که کلیه ساختمان هایی که در فاصله بیش از ۳۰ متری دیوار ایستگاه واقع شده اند، حفاری ایستگاه تاثیری بر آن ها نخواهد داشت.



شکل (۷): زاویه گسترش تنش اطراف ایستگاه.

۵- مدل سازی ساختمان

در این روش ساختمان بصورت تیرالاستیک مدل سازی می-شود. در شکل (۱۰) ساختمان m طبقه به منظور محاسبه عوامل مورد نیاز برای جایگزین کردن با تیرالاستیک نشان داده شده است [۶]:



شکل (۱۰): مشخصات ساختمان m طبقه.

ممان دوم برای تیر منفرد معادل با استفاده از تئوری محور موازی (Timoshenko, 1955) با فرض اینکه محور خنثی در زیر ساختمان باشد (بدلیل اینکه پی ساختمانها مقاومت زیادی در برابر تغییر شکل دارند) محاسبه شده است. سختی خمشی سازه برابر است با:

$$(E_C I)_{struct} = E_C \sum_{l=1}^{m+1} (I_{slab} + A_{slab} h_m^2) \quad (1)$$

که E_C مدول الاستیسیته کف طبقات، h_m فاصله بین لایه mام تا محور خنثی، A_{slab} سطح مقطع کف طبقات و I_{slab} ممان دوم کف طبقات می باشد. سختی محوری از رابطه (۲) محاسبه می شود:

$$(E_C A)_{struct} = (m+1)(E_C A)_{slab} \quad (2)$$

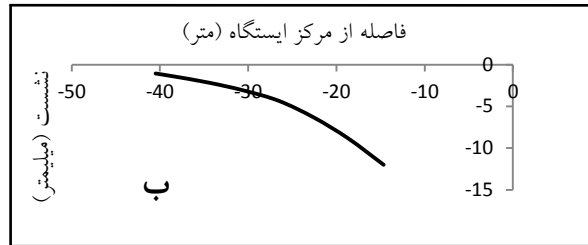
عوامل ورودی برای تحلیل تیر عبارتند از: ضخامت (t)، مدول یانگ (E)، مساحت (A) و ممان دوم سطح (I). بنابراین به منظور بدست آوردن مجموعه عوامل متناسب، روابط سختی های محوری و خمشی سازه بصورت رابطه (۳) در می آیند:

$$(E_C I)_{struct} = \frac{E_{fe} t_{fe}^3 L}{12} \quad \& \quad (E_C A)_{struct} = E_{fe} t_{fe} L \quad (3)$$

که در این روابط t_{fe} ضخامت تیر بکار برده شده در تحلیل المان محدود می باشد و L بعد خارج از صفحه سازه می باشد. از بازنویسی معادلات (۳) می توان ضخامت تیر برای تحلیل المان محدود را بدست آورد:

$$t_{fe} = \sqrt{\frac{12(E_C I)_{struct}}{(E_C A)_{struct}}} \quad (4)$$

برای تحلیل کرنش صفحه ای، بعد خارج از صفحه ساختمان واحد در نظر گرفته می شود و خصوصیات المان های تیر از رابطه



شکل (۹): منحنی نشست زیر ساختمان ۸.

با توجه به شکل (۹الف) بیشینه نشست در زیر ساختمان "۵" برابر با $10/3$ میلیمتر و شیب حداکثر منحنی نشست $\frac{1}{2508}$ می باشد.

بیشینه نشست در زیر ساختمان "۸" برابر ۱۲ میلیمتر و شیب حداکثر منحنی نشست $\frac{1}{1394}$ می باشد.

جدول (۲) ارزیابی اولیه خطر آسیب ساختمان های "۵" و "۸" را نشان می دهد. به جز معیار رنگین، معیارهای دیگر بر مبنای شیب بیشینه منحنی نشست در زیر ساختمان هستند. در معیار رنگین علاوه بر شیب منحنی نشست، نشست بیشینه نیز در ارزیابی خطر آسیب ساختمان در نظر گرفته می شود.

جدول (۲): ارزیابی اولیه خطر آسیب ساختمان های ۵ و ۸.

| معیار | معیار Rankin [۲] | معیار Bjrrum [۳] | معیار Tokar & Polshin [۴] | معیار MacDonald & Skempton [۵] |
|----------------|--|------------------|---------------------------|--------------------------------|
| محدوده متغیرها | $\theta < 1/500$ $S_{max} < 10$ mm | $\theta < 1/750$ | $\theta < 1/200$ | $\theta < 1/500$ |
| ساختمان ۵ | ناپایدار | پایدار | پایدار | پایدار |
| ساختمان ۸ | ناپایدار | پایدار | پایدار | پایدار |

ملاحظه می شود که طبق معیار رنگین هر دو ساختمان در محدوده نایمن قرار می گیرند. بنابراین باید ارزیابی ثانویه خطر آسیب بر روی آن ها انجام شود. با توجه به محدودیت داده های در دسترس از ساختمان ها و وجود کرنش افقی در ساختمان نمی توان از روش تیر متورق فینو استفاده کرد. بنابراین در این مرحله از روش سختی نسبی اصلاح شده استفاده شد.

۴-۴- ارزیابی ثانویه خطر آسیب به ساختمان ها

در این مرحله از روش سختی نسبی استفاده شد. ابتدا این روش بطور خلاصه شرح داده می شود.

جدول (۳): متغیرهای ورودی برای محاسبه سختی محوری و خمشی ساختمان "۵" و "۸".

| | | |
|---------------------------------------|-------------------------------|-------------------|
| $t_{slab}=0.15$ | $A=0.15 \text{ m}^2/\text{m}$ | $L=1\text{m}$ |
| $I_{slab}=0.028 \text{ m}^4/\text{m}$ | $E_c=23*10^6 \text{ kN/m}^2$ | $H=3.4 \text{ m}$ |

جدول (۴) سختی خمشی و محوری ساختمان های "۵" و "۸" را نشان می دهد. ساختمان "۵" دارای ۱۴ طبقه و ساختمان "۸" دارای ۱۳ طبقه می باشد.

جدول (۴): سختی خمشی و محوری ساختمان های "۵" و "۸".

| ساختمان ۸ | ساختمان ۵ | |
|--------------------|---------------------|--|
| ۵۸۵۶۹/۳۷ | ۷۶۳۳۸/۷ | I_{fe} |
| ۸۸/۹۱ | ۹۷/۱۲ | A_{fe} |
| $۵/۲۸ \times 10^5$ | $۵/۳۳ \times 10^5$ | E_{fe} |
| ۹۰/۸۳ | ۹۷/۱۲ | t_{fe} |
| ۴۸×10^6 | $۵۱/۷۵ \times 10^6$ | سختی محوری ($E_c A$) _{struct} [kN/m] |
| ۳۳×10^9 | $۴۰/۶۸ \times 10^9$ | سختی خمشی ($E_c I$) _{struct} [kNm ² /m] |

برای ارزیابی خطر آسیب ساختمان ابتدا باید موقعیت نقطه عطف (نقطه ای که در آن تعقر منحنی عوض می شود) تعیین شود تا مشخص شود که ساختمان در ناحیه محدب یا مقعر قرار گرفته است. در این بخش نقطه عطف با روابط مختلف محاسبه می شود. میل^{۱۵} و همکاران در سال ۱۹۸۳ با انجام آزمایش های سانتریفوژ و مشاهدات محلی، رابطه (۹) را ارائه دادند [۸]:

$$i=0.5Z_0 \quad (9)$$

که i طول نقطه عطف و Z_0 عمق قرارگیری فضای تونل است. با توجه به اینکه عمق ایستگاه ۱۲ متر می باشد بنابراین بر اساس روش میل طول نقطه عطف برابر ۶ متر بدست می آید. محاسبه نقطه عطف با استفاده از روش مایر^{۱۶} و همکارانش (۱۹۹۳) نیز همین نتیجه را تایید می کند [۹].

بنابراین ساختمان ها در ناحیه محدب منحنی نشست قرار گرفته اند و تنش افقی ایجاد شده کششی می باشد. حال باید سختی نسبی محوری و خمشی، ساختمان ها محاسبه شده و بر اساس آن فاکتورهای تصحیح معین شوند. برای محاسبه سختی نسبی محوری و خمشی از رابطه زیر محاسبه شد [۱۰]:

$$E_S = \frac{z\gamma(1+2k_0)}{2} \times 1000 \quad (10)$$

که در آن Z نصف عمق تونل، γ وزن مخصوص خاک بالای تونل بر حسب k_0 ، kN/m^3 نسبت تنش قائم به تنش افقی بوده و E_S بر حسب MPa بدست می آید.

(۵) بدست می آید:

$$I_{fe} = \frac{t_{fe}^3}{12} \quad A_{fe} = t_{fe} \quad E_{fe} = \frac{(E_c A)_{struct}}{t_{fe}} \quad (5)$$

ادنبروک و پتس اصطلاحات سختی نسبی را برای تحلیل های کرنش صفحه ای بکار بردند. EI رفتار خمشی و EA رفتار محوری و برشی ساختمان را کنترل می کند.

در این روش برای در نظر گرفتن مقاومت ساختمان در برابر تغییر شکل، متغیرهای اصلاح تعریف شده اند تا در تغییر شکل ساختمان که از منحنی نشست بدون در نظر گرفتن ساختمان به دست آمده است ضرب شوند که در نتیجه مقاومت ساختمان در پیش بینی تغییر شکل ساختمان لحاظ شود.

$$M^{DR_{hog}} = \frac{DR_{hog}}{DR_{hog}^{GF}} \quad \& \quad M^{DR_{sag}} = \frac{DR_{sag}}{DR_{sag}^{GF}} \quad (6)$$

که در آن $M^{DR_{sag}}$ و $M^{DR_{hog}}$ بترتیب فاکتورهای اصلاح نسبت انحنای ناحیه محدب منحنی نشست^{۱۷} و ناحیه مقعر^{۱۸} می باشند.

فاکتورهای اصلاح مشابهی برای کرنش کششی و فشاری تعریف شدند:

$$M^{\epsilon_{ht}} = \frac{\epsilon_{ht}}{\epsilon_{ht}^{GF}} \quad \& \quad M^{\epsilon_{hc}} = \frac{\epsilon_{hc}}{\epsilon_{hc}^{GF}} \quad (7)$$

که $M^{\epsilon_{hc}}$ و $M^{\epsilon_{ht}}$ بترتیب فاکتورهای اصلاح کرنش کششی و فشاری می باشند.

در نهایت برای محاسبه فاکتورهای اصلاح، سختی نسبی محوری و خمشی از روابط زیر محاسبه می شوند [۷]:

$$\alpha_{mod}^* = \frac{EA}{E_S BL} \quad \& \quad \rho_{mod}^* = \frac{EI}{Z_0 E_S B^2 L} \quad (8)$$

که در این روابط α_{mod}^* سختی نسبی محوری و ρ_{mod}^* سختی نسبی خمشی می باشد.

پس از محاسبه سختی نسبی خمشی و محوری با استفاده از نمودارهای ارائه شده توسط فرانزیوس فاکتورهای اصلاح برای کرنش افقی و نسبت انحنا بدست می آیند

جدول (۳) مشخصات ورودی برای محاسبه سختی خمشی و محوری ساختمان های "۵" و "۸" را نشان می دهد.

جدول (۵): محاسبه نسبت انحنای ساختمان بر اساس روش سختی نسبی.

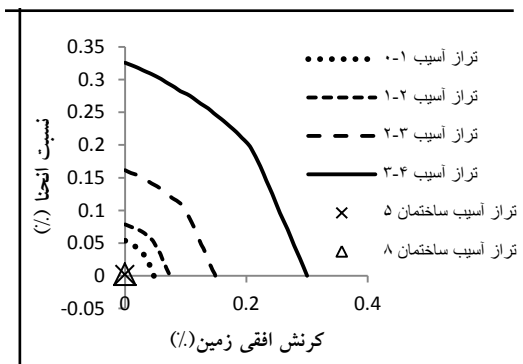
| DR _{hog} (%) | M ^{DR_{hog}} | DR _{hog} ^{GF} (%) | ρ _{mod} * | B (m) | ساختمان |
|-----------------------|-------------------------------|-------------------------------------|--------------------|-------|-----------|
| 0.0015 | 0.2 | 0.0076 | 21.1 | 24 | ساختمان ۵ |
| 0.002 | 0.2 | 0.01 | 14.57 | 26 | ساختمان ۸ |

جدول (۶): محاسبه کرنش ساختمان بر اساس روش سختی نسبی.

| ε _{ht} (%) | M ^{ε_{ht}} | ε _{ht} ^{GF} (%) | α _{mod} * | ساختمان |
|---------------------|-----------------------------|-----------------------------------|--------------------|-----------|
| 0.0003 | 0.0125 | 0.024 | 14.8 | ساختمان ۵ |
| 0.00029 | 0.0125 | 0.023 | 12.67 | ساختمان ۸ |

با وارد کردن نسبت انحنای و کرنش تصحیح شده در نمودار ترازهای آسیب ساختمان، تراز آسیب ساختمان‌های "۵" و "۸" تعیین شدند (شکل ۱۲). ملاحظه می‌شود که با اعمال روش سختی نسبی و در نظر گرفتن سختی ساختمان‌ها، نسبت انحنای هر دو ساختمان ۸۰ درصد (M^{ε_{ht}} = ۰.۲) و کرنش افقی در حدود ۹۹ درصد (M^{DR_{hog}} = ۰.۰۱۲۵) کاهش می‌یابد.

با توجه به شکل (۱۲) تراز آسیب ۱-۰ خطرناک برای ساختمان نخواهد داشت. تراز ۲-۱ متناظر با آسیب معماری بر سازه می‌باشد. ترازهای ۳ و ۴ متناظر با قابلیت تعمیرپذیری سازه می‌باشد. پایداری سازه متأثر از تراز آسیب ۵ می‌باشد.



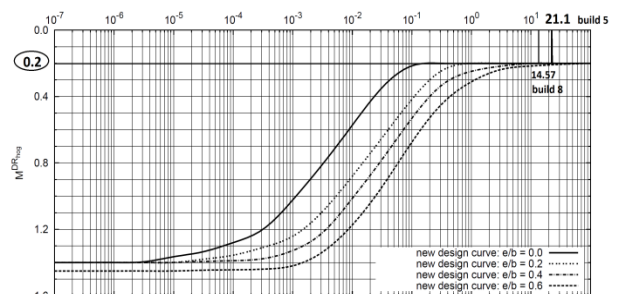
شکل (۱۲): تراز آسیب ساختمان ۵ و ۸.

ملاحظه می‌شود که تراز آسیب ساختمان‌ها در محدوده ۱-۰ بدست آمده است. بنابراین ایجاد ایستگاه آسیبی برای ساختمان‌های "۵" و "۸" نخواهد داشت.

از این روش برای ارزیابی خطر آسیب کلیسای Findlater واقع در Dublin ایرلند که در مجاورت ساخت یکی از ایستگاه‌های این شهر قرار داشت استفاده شد (۲۰۱۰). از آنجایی که این کلیسا در قرن ۱۹ ساخته شده، بنابراین مقادیر سختی نسبی آن پایین بود. با این وجود، با اعمال سختی نسبی ساختمان، نشست تفاضلی ۴۱ درصد کاهش یافت [11].

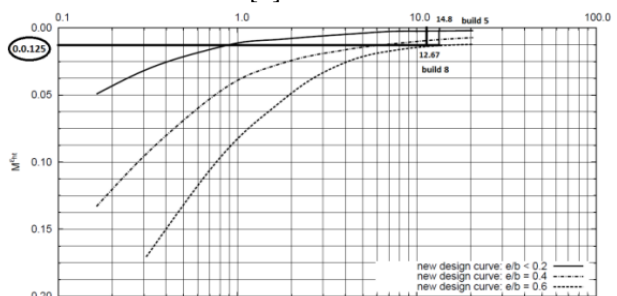
$$E_S = \frac{11.5 \times 19 \times (1 + 2 \times 0.5)}{2} \times 1000 = 145.7 \text{ MPa} \quad (11)$$

برای بدست آوردن فاکتورهای تصحیح بر اساس نمودارهای ارائه شده توسط فرانزیوس، باید نسبت فاصله مرکز ساختمان از مرکز تونل $\frac{e}{B}$ محاسبه شود. با توجه به اینکه این نسبت برای ساختمان "۵" برابر $\frac{e}{B} = \frac{28.7}{24} = 1.19$ و نیز برای ساختمان "۸" نیز برابر $\frac{e}{B} = \frac{27.4}{26} = 1.05$ می‌باشد، بنابراین باید مقدار فاکتور تصحیح را از نسبت $\frac{e}{B} = 0.6$ محاسبه کرد. زیرا این نسبت مرز بالایی برای نسبت‌های بالاتر از $\frac{e}{B} = 0.6$ می‌باشد. یعنی فاکتور تصحیح برای نسبت‌های بالاتر از $\frac{e}{B} = 0.6$ یکسان می‌باشد. شکل (۱۱الف) نحوه بدست آوردن فاکتور تصحیح نسبت انحنای و شکل (۱۱ب) نحوه بدست آوردن فاکتور تصحیح کرنش افقی از روی نمودار فرانزیوس را بطور شماتیک نشان می‌دهد.



شکل (۱۱الف): محاسبه فاکتور تصحیح نسبت انحنای از نمودار

[۷] Franzius.



شکل (۱۱ب): محاسبه فاکتور تصحیح کرنش افقی از نمودار

[۷] Franzius.

پس از بدست آوردن فاکتور تصحیح نسبت انحنای (M^{DR_{hog}}) و ضرب کردن آن در نسبت انحنای بدست آمده از منحنی نشست که در آن وجود ساختمان در نظر گرفت نشده است^{۱۹} (DR_{hog}^{GF}) نسبت انحنای ساختمان‌ها (DR_{hog}) بدست می‌آید. این مراحل برای کرنش افقی نیز تکرار می‌شوند. نتایج در جدول (۵) و (۶) آمده است.

۶- نتیجه‌گیری

روش‌های ارزیابی اولیه خطر آسیب ساختمان‌ها روش‌های محافظه‌کارانه می‌باشند که اغلب آسیب ساختمان‌ها را بیشتر از حد واقعی پیش‌بینی می‌کنند، زیرا در این روش‌ها مقاومت ساختمان‌ها در برابر تغییر شکل ناشی از نشست در نظر گرفته نمی‌شود. بنابراین طراحی فضاهای زیرزمینی با هدف کمینه کردن آسیب به سازه‌های اطراف آن، با تکیه بر روش‌های اولیه ارزیابی خطر آسیب موجب افزایش هزینه ساخت تونل به دلیل بکار گرفتن اقدامات حفاظتی می‌شود. بنابراین به منظور کاهش هزینه‌ها ساختمان‌هایی را که در مرحله اول ارزیابی خطر آسیب در ناحیه نایمن قرار دارند بایستی با روش‌های ثانویه ارزیابی شوند.

در روش‌های ثانویه ارزیابی خطر آسیب، ساختمان بصورت تیر ساده در نظر گرفته می‌شود. اگرچه این کار ساده‌سازی بزرگی می‌باشد ولی پیش‌بینی آسیب با این روش‌ها با موارد واقعی تا حد زیادی مطابقت دارد.

در این مقاله پس از مدل‌سازی ایستگاه، ساختمان‌های اطراف آن مورد بررسی قرار گرفت. ۲ دستگاه ساختمان در حوزه تاثیر ایستگاه قرار گرفتند. در مرحله اول ارزیابی خطر آسیب ۲ دستگاه ساختمان بر اساس روش رنگین با توجه به این که نشست بیشینه در زیر ساختمان‌ها بیش از ۱۰ میلیمتر بدست آمد، در محدوده نایمن قرار گرفتند. بنابراین بایستی بر اساس روش‌های ثانویه ارزیابی خطر آسیب مورد بررسی قرار می‌گرفتند. با توجه با اطلاعات قابل دسترس از خصوصیات ساختمان‌ها از روش سختی نسبی برای ارزیابی ثانویه استفاده شد. بر اساس این روش تراز آسیب ساختمان‌ها ۰-۱ بدست آمد، بنابراین این ساختمان‌ها نیز در محدوده ایمن قرار گرفتند.

۷- مراجع

- [۱] Burland' J. B; Wroth' C. P, "Settlement of buildings and associated damage", Proc. Conference `Settlement of structures. Pentech Press, London, pp. 611- 654, 1974.
- [۲] Rankin' W. J, "Ground movements resulting from urban tunnelling: predictions and effects", pp. 79- 92, Engineering geology of underground movements, The eological Society, London; 1988.
- [۳] Huyen' D.T, "The Effect of Adjacent Buildings on Designing a New Excavation in Clayey Soils", M Sc Thesis, University of Taipei, 2009.
- [۴] Polshin' D.E, Tokar R.A, "Maximum allowable non uniform settlement of

structures", Proceedings of 4th Int. Conf, Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1, pp. 402- 405, 1957.

[۵] Skempton' A.W, MacDonald' D.H, "The Allowable Settlements of Buildings", Proceedings of the Institution of Civil Engineers, London, Part 3, Vol. 6, pp. 727- 768, 1956.

[۶] Addenbrooke' T. I; Potts' D. M, Puzrin' A. M, "The influence of pre-failure soil stiffness on the numerical analysis of tunnel construction", Geotechnique, 47(3), pp.693- 712, 1997.

[۷] Franzius' e. J. N, "Behaviour of building due to Tunneling induced subsidence", Ph.D. Thesis, University of London, October 2003.

[۸] Mail' R.J.; Gunn' M.J. , O'Reilly, M.P., "Ground Movement Around Shallow Tunnels in Soft Clay", 10th International Conference on soil mechanics and Foundation Engineering; Stockholm, pp. 323- 328, 1983.

[۹] Mair' R. J., Taylor' R. N.; Bracegirdle, A., "Subsurface settlement profiles abovetunnels in clays", Geotechnique, 43(2), 315- 320, 1993.

[۱۰] Dimmock' P. S; Mair' R.J, "Effect of building stiffness on tunnelling-induced ground movement", Tunnelling and Underground Space Technology 23 (2008), pp. 438- 450, 2007.

[۱۱] Murphy' J; Gaynor' S, Laefer' D. F, "Predict Tunnel-induced Settlement and Damage to Findlater's Church with Respect to Freefield and Constructed Side Considerations", M.ASCE; GeoFlorida, pp. 1690- 1699, 2010.

۸- زیر نویس‌ها

| | | |
|-------------------------|---------------------------|--------------------------|
| ^۱ FLAC3D | ^۴ Wroth | ^{۱۵} Mail |
| ^۲ Mac Donald | ^۵ Burland | ^{۱۶} Mair |
| ^۳ Skempton | ^۱ Boone | ^{۱۷} Hogging |
| ^۴ Tokar | ^{۱۱} Addenbrooke | ^{۱۸} Sagging |
| ^۵ Polshin | ^{۱۲} Potts | ^{۱۹} Greenfield |
| ^۶ Bjerrum | ^{۱۳} Franzius | |
| ^۷ Rankin | ^{۱۴} Finno | |