«مجله علمی علوم و فنون سازندگی»

سال سوم، شماره۲، تابستان ۱۴۰۳، صفحه ۲۱ الی ۳۲

علمی– تخصصی

برآورد شاخص آسیب‌پذیری ساختمان‌ها در ارتباط با حفاری تونل‌های شهری

عماد خراسانی[1*]، امیرحسین فراهانی[2]، محمد فروغی[3]، محمد علی طهماسبی[4]

۱- دکتری تخصصی دکترای مکانیک سنگ، دانشگاه تهران، ۲- مدیر عامل، مهندسین مشاور طرح آفرینان هزاره امید (طاها)،

۳- کارشناسی ارشد مدیر پروژه، مهندسین مشاور رهساز طرح،

۴- دکترای تخصصی، سرپرست مدیریت دانش، پژوهشکده قرارگاه سازندگی خاتم الانبیاء(ص)

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۷، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۷)

چکیده

تغییرشکل زمین در اثر فرآیند حفاری تونل به ناچار بر ساختمان‌ها و سازه‌های موجود تأثیراتی خواهد داشت و این پدیده در تونل‌سازی شهری غیر قابل اجتناب می‌باشد. در این راستا، خسارات وارد بر ساختمان‌ها و سازه‌های سطحی به نوع و وضعیت ساختمان، مشخصات سازه و همچنین میزان نشست ناشی از حفاری بستگی دارد. بنابراین با توجه به اهمیت موضوع، لازم است ریسک مربوط به حفاری در محدوده ساختمان‌های واقع در حوزه تاثیر تونل برآورد شود. در این مقاله، بر اساس تجارب حاصل از پروژه‌های خط ۷ متروی تهران و خط A متروی قم، دسته‌بندی و امتیازهای مربوط به عوامل موثر در برآورد شاخص آسیب‌پذیری مورد بازنگری و به‌روزرسانی قرار می‌گیرد. به این منظور، ساختمان‌هایی که در این پروژه‌ها در اثر حفاری تونل متحمل آسیب‌های قابل توجه شده‌اند معرفی می‌شود. به عبارت دیگر، آسیب وارده به این ساختمان‌ها بعضاً فراتر از پیش‌بینی‌های مربوطه بوده است. این موضوع در ارتباط با خطا در برآورد شاخص آسیب‌پذیری ساختمان می‌باشد، چراکه پیش‌بینی میزان آسیب‌های وارد بر ساختمان بر اساس شاخص آسیب‌پذیری (به ازای میزان مشخص نشست) صورت می‌پذیرد. بنابراین می‌توان با رفع نواقص موجود در تعیین شاخص آسیب‌پذیری ساختمان، پیش‌بینی مناسب‌تری در خصوص آسیب‌های آتی محتمل در اثر حفاری تونل داشت. پس از معرفی ساختمان‌های شاخص آسیب‌دیده در پروژه‌های مورد مطالعه، عوامل اصلی موثر بر آسیب‌پذیری ساختمان‌ها بررسی گردیده و امتیازهای آن‌ها تعدیل شده است. پس از آن، دسته‌بندی هریک از زیرعوامل موثر با توجه به یافته‌های حاصل از ساختمان‌های آسیب‌دیده و با قضاوت مهندسی به‌روزرسانی شده و امتیازهای مربوط به هر دسته در صورت نیاز اصلاح گردیده است. همچنین به‌منظور اعتبارسنجی روش پیشنهادی در پژوهش حاضر برای برآورد شاخص آسیب‌پذیری ساختمان‌ها در ارتباط با حفاری تونل‌های شهری، رده آسیب ساختمان‌های مورد بررسی در پروژه‌های خط ۷ متروی تهران و خط A متروی قم مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، رده آسیب آن‌ها بر اساس معیار معتبر رانکین که کاربرد گسترده‌ای در تحلیل وضعیت آسیب و پایداری ساختمان‌ها داشته است، با استفاده از روش پیشین و روش پژوهش حاضر تعیین شد. با مقایسه رده‌های آسیب پیش‌بینی‌شده و رده آسیب واقعی ساختمان‌ها، عملکرد روش ارائه‌شده در پژوهش حاضر برای تعیین شاخص آسیب‌پذیری ساختمان مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که استفاده از روش جدید موجب ارتقای قابل توجهی در دقت تخمین رده آسیب ساختمان‌ها می‌شود.

کلید واژه‌ها: تونل، شاخص آسیب‌پذیری ساختمان، خط ۷ متروی تهران، خط A متروی قم

۱- مقدمه

با توجه به رشد روز افزون جمعیت و در نتیجه ترافیک شهری، لزوم استفاده از وسایل حمل و نقل ریلی به سرعت در حال گسترش است. امروزه سازه‌های زیرزمینی به ویژه تونل‌ها نقش مهمی در توسعه‌ی حمل و نقل شهری ایفا می‌کنند. روش‌های مختلفی به منظور حفر و احداث تونل‌ها اعم از تونل‌های شبکه مترو، راه آهن، انتقال آب، صنعتی، معدنی و غیره وجود دارد. تغییرشکل زمین در اثر فرآیند حفاری تونل به ناچار بر ساختمان‌ها و سازه‌های موجود تأثیراتی خواهد داشت و این پدیده در تونل‌سازی شهری غیر قابل اجتناب می‌باشد. در این راستا، خسارات وارد بر ساختمان‌ها و سازه‌های سطحی به نوع و وضعیت ساختمان، مشخصات سازه و همچنین میزان نشست ناشی از حفاری بستگی دارد [۱, ۲]. بنابراین با توجه به اهمیت موضوع، لازم است ریسک مربوط به حفاری در محدوده ساختمان‌های واقع در حوزه تاثیر تونل ارزیابی شود. اولین گام در برآورد ریسک ساختمان‌ها، بررسی شرایط و ثبت مشخصات آن‌ها می باشد. خروجی بررسی شرایط ساختمان‌ها را می‌توان به‌صورت

* رایانامه نویسنده مسئول: emad.khorasani@yahoo.com

کمّی و تحت عنوان "شاخص آسیب‌پذیری ساختمان" ارائه نمود. سپس با بهره‌گیری از این شاخص و تحلیل رده آسیب ساختمان که از بررسی نتایج پیش‌بینی نشست ساختمان حاصل می‌شود، می‌توان سطح ریسک ساختمان را در ارتباط با حفاری تونل برآورد نمود. شاخص آسیب‌پذیری ساختمان‌ها بر اساس بازدیدهای میدانی، نتایج بررسی و ثبت مشخصات ساختمان‌ها و تبدیل پارامترهای کیفی این برداشت‌ها به مقادیر کمّی، توسط معیارهای ارائه شده محاسبه می‌شود [۳].

در این مقاله، تلاش می‌شود تا با بهره‌گیری از معیارهای داخلی و ملاحظات معماری ایرانی، دستورالعملی جامع و بومی به‌منظور برآورد شاخص آسیب‌پذیری ساختمان‌ها برای پروژه‌های تونل‌سازی کشور ارائه شود. در این راستا، داده‌های پروژه‌های خط ۷ متروی تهران و خط A متروی قم به عنوان موردهای مطالعاتی تحلیل می‌گردد. در پروژه خط ۷ متروی تهران، این مطالعات برای اولین بار در کشور توسط مهندسین مشاور ساحل انجام شد و پس از تعمیم این مطالعات در سایر پروژه‌ها از جمله خط A متروی قم، کارفرمایان و مدیران پروژه‌ها، شناخت بیشتری نسبت به این موضوع پیدا کردند و هم اکنون به بخشی قطعی از فهرست مدارک طراحی پروژه‌های شهری (در صورت حفاری تونل در محدوده ساختمان‌ها) تبدیل شده است. در پروژه‌های فوق‌الذکر، برای تعیین شاخص آسیب‌پذیری ساختمان‌ها از روش چیریوتی و همکاران (۲۰۰۱) با اعمال اصلاحاتی استفاده شده است. بررسی‌های اولیه داده‌های پروژه‌های مورد مطالعه به‌ویژه شاخص‌های آسیب‌پذیری برآوردشده برای ساختمان‌ها و میزان آسیب واردشده به آن‌ها پس از ساخت تونل‌های مترو نشان می‌دهد که روش اصلاح‌شده مورد استفاده همچنان کاستی‌هایی دارد که موجب شده است در برخی موارد، پیش‌بینی میزان آسیب‌پذیری ساختمان با رفتار واقعی آن پس از حفاری تونل تفاوت داشته باشد. با انجام این پژوهش تلاش شده است با بررسی عوامل مختلف موثر بر آسیب‌پذیری ساختمان‌ها در ارتباط با حفاری تونل‌های شهری، رویه‌ای جامع برای برآورد شاخص آسیب‌پذیری مربوطه ارائه گردد. به این منظور، با استفاده از تجارب و داده‌های مربوط به پروژه‌های تحت بررسی، دسته‌بندی و امتیازهای عوامل موثر در برآورد شاخص آسیب‌پذیری مورد بازنگری و به‌روزرسانی قرار گرفته است. نتایج حاصل نشان داد که در اکثر ساختمان‌های مورد بررسی، رده آسیب پیش‌بینی‌شده با استفاده از روش پیشنهادی در پژوهش حاضر منطبق بر رده آسیب واقعی ساختمان بوده است؛ در حالیکه اختلاف در رده آسیب واقعی و رده آسیب پیش‌بینی‌شده با استفاده از روش قبلی به مراتب بیشتر می‌باشد. بنابراین استفاده از روش جدید موجب ارتقای قابل توجهی در دقت تخمین رده آسیب ساختمان‌ها می‌شود. شایان ذکر است که با استفاده از نتایج این مقاله، عملیات احداث تونل در کشور با ریسک کمتری در مجاورت ساختمان‌ها قابل انجام خواهد بود.

۲- روش تحقیق

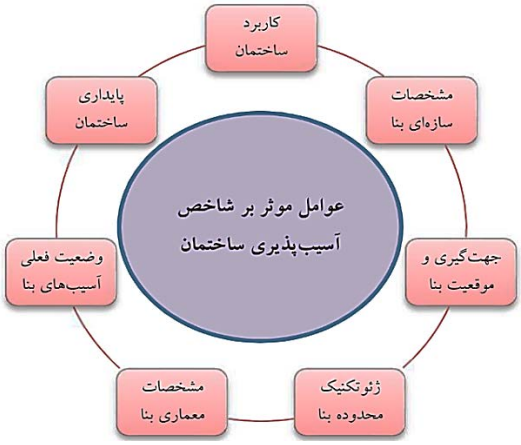
در این بخش از مقاله، به تعریف شاخص آسیب‌پذیری ساختمان‌ها و همچنین روش‌های مورد استفاده در تعیین این شاخص در محدوده حفاری تونل‌های شهری پرداخته می‌شود. به‌علاوه، مشخصات کلی پروژه‌های مورد مطالعه نیز بررسی می‌گردد. سپس رویه بومی‌سازی شاخص آسیب‌پذیری ساختمان‌ها که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است، ارائه می‌شود.

۲- ۱- شاخص آسیب‌پذیری ساختمان

شاخص آسیب‌پذیری ساختمان‌ها بر اساس بازدیدهای میدانی، نتایج بررسی و ثبت مشخصات ساختمان‌ها و تبدیل پارامترهای کیفی حاصل از این برداشت‌ها به مقادیر کمّی، توسط معیارهای ارائه شده محاسبه می‌شود. نتایج بازرسی‌های پیش از حفاری تونل به‌منظور به‌دست آوردن این شاخص مورد استفاده قرار می‌گیرد. پس از مشخص شدن محدوده نشست حفاری تونل، در بازدیدهای میدانی مشخصات ساختمان‌های واقع در محدوده تاثیر حفاری تونل ثبت می‌شود. نشست ایجاد شده سبب تغییر و یا آسیب در ساختمان، عوارض سطحی و زیر سطحی می‌گردد. با توجه به کاربرد سازه‌ها، در زمان ساخت آن، مقادیر مجاز و قابل تحمل نشست محاسبه و تعیین شده که به عنوان نشست مجاز تعریف می‌شود. چنانچه نشست‌ها بیش از مقدار مجاز هر سازه باشد، سبب ایجاد آسیب در آن می‌شود [3]. شاخص آسیب‌پذیری بیانگر فاصله بنا با وضعیت ایده‌آل آن است. در واقع هر چه شاخص آسیب‌پذیری بیشتر باشد، بدین معنی است که وضعیت بنا مناسب نیست و روادارهای آن در برابر تغییرشکل‌های اضافی کوچکتر خواهد بود. به عبارت دیگر، برای مقدار مشخص نشست، یک ساختمان با شاخص آسیب‌پذیری بالاتر متحمل آسیب‌های بیشتری نسبت به یک ساختمان با شاخص آسیب‌پذیری پایین‌تر خواهد شد.

روش‌های متفاوتی برای محاسبه شاخص آسیب‌پذیری در پروژه‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است [4, 5]. در هر پروژه با توجه به شرایط موجود، نوع ساختمان ها، بر اساس قضاوت‌های مهندسی کارشناسان، محققان و مشاوران، طرح‌هایی را ارائه کرده‌اند. در تمامی روش‌های مورد مطالعه، مشخصات ساختمان‌ها به شیوه‌های متفاوت و به طبقات مختلفی تقسیم می‌شود. پارامترهای کلی موثر بر شاخص آسیب‌پذیری ساختمان

در شکل (۱) ارائه شده است.



شکل (۱). پارامترهای کلی مورد استفاده در برآورد شاخص آسیب‌پذیری ساختمان

۲-۲- مروری بر ادبیات موضوع

پیش‌بینی آسیب وارده به ساختمان‌ها در اثر حرکت زمین ناشی از حفاری، یکی از ملاحظات مهم در طراحی تونل‌ها در مناطق متراکم شهری است. این امر منوط به تخمین صحیح نشست زمین و همچنین برآوردی مناسب از میزان آسیب‌پذیری ساختمان در اثر نشست آن می‌باشد. اصولا حفاری‌های زیرزمینی به علت ایجاد ناپیوستگی در محیط اطراف، باعث ایجاد پدیده‌هایی از قبیل نشست، سست‌شدگی و افزایش تنش در یک محدوده معین می‌شوند. در نتیجه این پدیده‌ها، تغییر شکل در خاک به وجود می‌آید. همان‌طور که اشاره شد، یکی از مهم‌ترین اقدامات در ارزیابی ریسک تونل‌سازی در محدوده ساختمان‌ها، تخمین مناسب از میزان آسیب‌پذیری هریک از ساختمان‌ها می‌باشد. به این منظور بایستی شرایط ساختمان‌های واقع در محدوده تاثیر عملیات حفاری مشخص شود.

عملیات بررسی شرایط ساختمان‌ها عمدتاً در سه مرحله پیش از حفاری، در حین حفاری و پس از ساخت تونل صورت می‌پذیرد. بررسی شرایط ساختمان شامل ثبت مشخصات مرتبط با بروز آسیب احتمالی در آن است. در این راستا، مهم‌ترین مشخصات مرتبط می‌تواند مواردی از قبیل سن ساختمان، نوع و عمق پی، تعداد طبقات، نوع سازه‌های باربر، تاریخچه مرمت‌های قبلی، ترک‌ها و معایب موجود، شرایط ژئوتکنیک و تراز آب زیرزمینی باشد که نیاز به بررسی دقیق‌تری دارد. عملیات برداشت ساختمان‌ها پیش از حفاری تونل شامل بازدید میدانی و ثبت مشخصات عمومی ساختمان‌ها، تهیه شناسنامه برای هر ساختمان و نهایتاً برآورد آسیب‌پذیری آن در اثر عملیات حفر تونل است. میزان آسیب‌پذیری یک ساختمان را می‌توان با جمع‌بندی مشخصات ثبت‌شده فوق‌الذکر و به‌صورت کمّی تحت عنوان شاخص آسیب‌پذیری ساختمان ارائه نمود.

از جمله مطالعات کلیدی در زمینه برآورد میزان آسیب‌پذیری ساختمان‌ها می‌توان به دزگنیوک و همکاران (۱۹۹۷)، چیریوتی و همکاران (۲۰۰۱)، سعیدی و همکاران (۲۰۰۹) و همچنین جیاردینا و همکاران (۲۰۱۵) اشاره کرد [۶, ۷, ۸, ۹]. از میان این مطالعات، روش چیریوتی و همکاران (۲۰۰۱) دارای پارامترهای کلیدی بیشتری نسبت به سایر روش‌ها است. این روش با تغییراتی جزئی در پروژه‌های خط ۷ متروی تهران و خط A متروی قم نیز استفاده شده است. در این روش، محققان طبقه‌بندی مناسبی برای ارزیابی میزان آسیب‌پذیری ساختمان ارائه نموده‌اند که اکثر پارامترهای کلیدی مرتبط با تاب‌آوری ساختمان در برابر نشست و آسیب در آن لحاظ شده است (جدول ۱).

۲-۳- معرفی پروژه‌های مورد مطالعه

همان‌طور که اشاره شد، در پژوهش حاضر از داده‌های پروژه‌های تونل قطعه شرقی-غربی خط ۷ متروی تهران و پروژه خط A متروی قم استفاده خواهد شد. در ادامه، به معرفی مشخصات کلی این دو پروژه پرداخته می‌شود.

جدول (۱). عوامل مورد استفاده برای برآورد میزان آسیب‌پذیری ساختمان در روش چیریوتی و همکاران (۲۰۰۱) [۷]

ردیف	پارامتر	انواع	امتیاز
۱	رفتار سازه‌ای بنا	المان‌های سازه‌ای افقی	۰ تا ۶
		المان‌های سازه‌ای قائم	۰ تا ۶
		پی ـ نحوه دریافت اطلاعات	۰ تا ۴
		نوع کارهای تعمیراتی (در صورت انجام)	۰ تا ۶
		وجود طبقه زیرزمین	۰ تا ۳
۲	جهت‌گیری و موقعیت بنا نسبت به تونل	جهت‌گیری	۰ تا ۱۰
		اثر گروه ساختمان‌ها	۰ تا ۱۵
۳	عملکرد سازه‌ای بنا (کاربری)	-	۰ تا ۱۰
۴	مشخصات معماری بنا	تاریخی / میراث فرهنگی	۰ تا ۱۲
		نوع دیوارهای غیرباربر داخلی	۱ تا ۴
		نمای ساختمان	۱ تا ۴
۵	شرایط فعلی ساختمان	شرایط بصری ساختمان	۰ تا ۸
		نشانه‌های نشست در محیط اطراف	۰ تا ۴
		نوع ترک‌ها	۳ تا ۸

۲-۳-۱- پروژه قطعه شرقی-غربی خط ۷ متروی تهران

خط ۷ متروی تهران، از شهرک امیرالمؤمنین در شرق تهران شروع می‌شود و با اتصال به بزرگراه نواب صفوی، مسیر آن در امتداد شمالی- جنوبی ادامه می‌یابد و در نهایت به میدان کاج می‌رسد. قطعه‌ی شرقی- غربی این خط ۷ از شهرک امیرالمومنین (ایستگاه A7) در شرق تهران شروع شده و پس از عبور از بزرگراه بسیج، در طول بزرگراه شهید محلاتی به مسیر خود ادامه داده و پس از اتصال به میدان قیام، در امتداد خیابان‌های مولوی و هلال‌احمر ادامه می‌یابد. پس از رسیدن به بزرگراه نواب صفوی مسیر آن در امتداد شمالی- جنوبی و در طول بزرگراه نواب تغییر کرده و تا تقاطع خیابان قزوین و بزرگراه نواب (ایستگاه N7) ادامه می‌یابد. این قطعه به جز ایستگاه N7، شامل ۱۳ ایستگاه است. طول تونل با احتساب طول ایستگاه‌ها، ۱۲/۳۶ کیلومتر است. علاوه بر تونل، اجرای این پروژه شامل احداث دسترسی میانی در متراژ حدود ۵۵۰۰ (ایستگاه G7 واقع در تقاطع بزرگراه محلاتی و خیابان ۱۷ شهریور) و شفت دمونتاژ دستگاه قبل از ایستگاه A7 می‌باشد. این تونل دارای مقطع دایره‌ای و با قطر حفاری ۹/۱۶ متر بوده که به‌وسیله یک ماشین حفار تمام مقطع (TBM) احداث شده است [10]. پروژه خط ۷ متروی تهران در رسوبات آبرفتی دوره‌ی کواترنری حفر می‌شود. این رسوبات به طور عمده شامل خاک‌های شنی و ماسه‌ای رس و سیلت‌دار و در بخش‌هایی نیز خاک‌های رسی و سیلتی شن و ماسه‌دار است [11].

۲-۳-۲- پروژه خط A متروی قم

خط A قطار شهری قم با طول حدود ۱۴۷۰۰ متر و تعداد ۱۴ ایستگاه از مسجد جمکران شروع شده و با طی مسیر میدان انتظار، میدان بقیه ا...، بلوار خلیج فارس، میدان ولیعصر، خیابان شهید دل‌آذر، میدان پلیس، میدان میرزای قمی، تقاطع خیابان عمار یاسر، عبور از زیر رودخانه، میدان مطهری، میدان سعیدی، میدان معصومیه، خیابان امامزاده ابراهیم و میدان کشاورز، به قلعه کامکار ختم می‌شود. بخش مکانیزه این تونل، از ایستگاه A14 آغاز شده و تا ایستگاه A3 با طول ۱۰۳۰۰ متر با یک دستگاه EPB-TBM حفاری شده است. با توجه به عبور این خط مترو از محدوده‌های پرتراکم شهری، بررسی وضعیت آسیب‌پذیری ساختمان‌ها طی احداث پروژه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده است.

لایه‌های خاکی مسیر این خط مترو به چهار گونه زمین‌شناسی مهندسی (دو واحد خاکی ریزدانه و دو واحد خاکی درشت‌دانه) تفکیک شده‌اند. دو واحد خاکی درشت‌دانه، گسترش زیادی در مسیر پروژه داشته و به صورت لایه‌هایی نسبتاً ضخیم و بعضاً به صورت لنزهای گسترده و ضخیم در میان واحدهای خاکی ریزدانه قابل مشاهده هستند [12].

۲. ۴. بررسی روش برآورد شاخص آسیب‌پذیری ساختمان در پروژه‌های مورد مطالعه

در پروژه‌های مورد مطالعه یعنی خط ۷ متروی تهران و خط A متروی قم، با بررسی پروژه‌های مشابه در زمینه برآورد ریسک نشست، از روش چیریوتی و همکاران (۲۰۰۱) با کمی ویرایش استفاده شده است. همان‌طور که اشاره شد، محاسبه شاخص آسیب‌پذیری ساختمان در این روش بر اساس امتیازدهی به برخی از مشخصات ساختمان صورت می‌پذیرد. پارامترهای کلی استفاده‌شده به‌منظور برآورد شاخص آسیب‌پذیری ساختمان‌ها در پروژه‌های مورد مطالعه تا حد زیادی مشابه روش چیریوتی و همکاران (۲۰۰۱) بوده و فقط در امتیازهای جزئی تغییرات اندکی لحاظ شده است. تغییرات اعمال‌شده مربوطه شامل این موارد می‌باشد:

- تغییراتی در دسته‌بندی المان‌های سازه‌ای افقی که نهایتاً شامل انواع چوبی، طاق ضربی (آجر و فلز)، تیرچه بلوک و بتن مسلح شده است.
- لحاظ نمودن آیین‌نامه ۲۸۰۰ ساختمان در تعیین میزان اهمیت ساختمان.
- در نظر گرفتن عمر ساختمان به جای شرایط بصری ساختمان.
- افزایش تعداد دسته‌های وضعیت ترک‌ها از ۳ دسته به ۵ دسته.

در این روش با تعیین امتیاز هر پارامتر بر اساس شرایط ساختمان، مجموع امتیازها محاسبه و در نتیجه عدد شاخص آسیب‌پذیری مربوط به هر ساختمان به دست می‌آید. عدد حاصل مقداری بین صفر تا ۱۰۰ خواهد داشت و بر اساس آن، وضعیت آسیب‌پذیری ساختمان به‌صورت توصیفی مطابق جدول ۲ قابل رده‌بندی است. در این جدول، جزئیات مربوط به امتیاز مربوط به هر بخش ثبت گردیده و به عنوان نمونه عدد مربوط به ساختمان در دو بخش نشست کوتاه‌مدت و بلندمدت محاسبه شده است.

جدول (۲). رده‌بندی توصیفی ساختمان بر اساس شاخص آسیب‌پذیری

امتیاز شاخص	شاخص آسیب‌پذیری بنا	رده آسیب‌پذیری بنا
۰ – ۲۰	قابل صرف نظر	A
۲۰ – ۴۰	خفیف	B
۴۰ – ۶۰	کم	C
۶۰ – ۸۰	متوسط	D
۸۰ – ۱۰۰	زیاد	E

از جمله مزیت‌های روش استفاده‌شده برای برآورد شاخص آسیب‌پذیری در پروژه‌های خط ۷ متروی تهران و خط A متروی قم می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

- لحاظ نمودن مشخصات نسبتاً متنوع و کاملی از ساختمان.
- در این روش با افزایش پارامترهای مورد بررسی و اختصاص دادن امتیاز برای هر پارامتر، خطای مربوط به محاسبات کم می شود. به عبارت دیگر، اگر به هر دلیلی امتیاز مربوط به یک پارامتر اشتباه ثبت شود، تاثیر زیادی در شاخص آسیب‌پذیری نهایی و رده آسیب مربوطه نخواهد داشت.
- با ثبت اطلاعات کلی و جزئیات مربوط به هر ساختمان مانند ترک و یا آسیب‌های موجود به همراه تصاویر، مستندسازی مناسبی انجام می‌شود. این مستندسازی می‌تواند در بررسی دعاوی حقوقی مالک ساختمان و یا پیمانکار مورد استفاده قرار گیرد.

بررسی روش مورد استفاده برای برآورد شاخص آسیب‌پذیری ساختمان‌ها در پروژه‌های خط ۷ متروی تهران و خط A متروی قم نشان می‌دهد که همچنان کاستی‌هایی در این خصوص وجود دارد که برخی از مهم‌ترین آن‌ها شامل موارد ذیل است:

- در نظر نگرفتن تعداد طبقات ساختمان
- لحاظ نکردن وضعیت چاه و انباره فاضلاب زیر ساختمان
- عدم توجه به نوع پی ساختمان
- در نظر نگرفتن شرایط ژئوتکنیک در محدوده ساختمان

۲. ۵. رویه بومی‌سازی برآورد شاخص آسیب‌پذیری ساختمان‌ها

در این پژوهش تلاش می‌شود با بهره‌گیری از تجارب حاصل از پروژه‌های خط ۷ متروی تهران و خط A متروی قم، کاستی‌های مربوط به روش مورد استفاده در برآورد میزان آسیب‌پذیری ساختمان‌ها در پروژه‌های تونل‌سازی ایران به حداقل برسد. در این راستا، برای بومی‌سازی روش برآورد شاخص آسیب‌پذیری ساختمان‌ها، مراحل ذیل طی می‌شود.

مرحله ۱) طی عملیات تونل‌سازی در پروژه‌های مورد بررسی، برخی از ساختمان‌های واقع در حوزه تاثیر حفاری متحمل آسیب شده‌اند. در این میان، آسیب وارده به برخی از ساختمان‌ها فراتر از پیش‌بینی‌های مربوطه بوده است. این موضوع در ارتباط با خطا در برآورد شاخص آسیب‌پذیری ساختمان می‌باشد، چراکه پیش‌بینی میزان آسیب‌های وارد بر ساختمان بر اساس شاخص آسیب‌پذیری (به ازای میزان مشخص نشست) صورت می‌پذیرد. بنابراین می‌توان با رفع نواقص موجود در تعیین شاخص آسیب‌پذیری ساختمان، پیش‌بینی مناسب‌تری در خصوص آسیب‌های آتی محتمل در اثر حفاری تونل داشت.

مرحله ۲) به‌منظور اصلاح رویه برآورد شاخص آسیب‌پذیری ساختمان، در ابتدا عوامل اصلی موثر بر آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مرحله، چنانچه موردی از عوامل اصلی موثر بر شاخص در رویه پیشین مغفول مانده باشد، به رویه پژوهش حاضر اضافه می‌شود.

مرحله ۳) طی این مرحله، امتیازهای کلی مربوط به عوامل اصلی با بهینه کردن وزن آن‌ها به‌نحوی تعدیل می‌شود که امتیاز حداکثر مربوط به شاخص آسیب‌پذیری برابر با ۱۰۰ باشد. به عبارت دیگر، مجموع امتیاز عوامل مختلف موثر بر شاخص نسبت به رویه پیشین تغییری نخواهد کرد و از رده‌بندی توصیفی موجود (جدول ۲) برای ساختمان‌ها استفاده خواهد شد.

مرحله ۴) پس از مشخص شدن عوامل اصلی موثر بر برآورد شاخص آسیب‌پذیری و امتیازهای مربوطه، دسته‌بندی عوامل زیرمجموعه آن‌ها مورد بازنگری و به‌روزرسانی قرار می‌گیرد. در این مرحله، امتیاز مربوط به هر دسته با توجه به میزان تاثیر بر آسیب‌پذیری ساختمان و با لحاظ نمودن حداکثر امتیاز عامل اصلی تعیین می‌شود.

مرحله ۵) در انتها نیز به‌منظور اعتبارسنجی تغییرات اعمال‌شده در رویه برآورد شاخص آسیب‌پذیری ساختمان‌ها، از داده‌های پروژه‌های خط ۷ متروی تهران و خط A متروی قم استفاده می‌شود. در این راستا، میزان شاخص آسیب‌پذیری ساختمان‌های مربوطه بر اساس رویه پیشین و رویه پیشنهادی در پژوهش حاضر محاسبه می‌گردد. سپس نتایج حاصل با رده آسیب واقعی ساختمان‌ها که ناشی از عملیات حفاری تونل در محدوده آن‌ها بوده است مقایسه می‌شود. بنابراین می‌توان عملکرد رویه پیشنهادی برای برآورد شاخص آسیب‌پذیری ساختمان را مورد ارزیابی قرار داد.

۳- نتایج و بحث

با بررسی ساختمان‌های شاخص آسیب‌دیده در پروژه‌های خط ۷ متروی تهران و خط A متروی قم، عوامل اصلی موثر بر آسیب‌پذیری ساختمان‌ها ناشی از عملیات تونل‌سازی مورد ارزیابی قرار گرفت. بر این اساس، امتیاز مربوط به رفتار سازه‌ای بنا افزایش داده شد. در مقابل امتیازهای مربوط به جهت‌گیری و موقعیت بنا نسبت به تونل و مشخصات معماری بنا کاهش یافت. همچنین امتیازهای مربوط به عملکرد سازه‌ای بنا و شرایط فعلی آن ثابت ماند. به‌علاوه، عاملی تحت عنوان شرایط زمین‌شناسی

مهندسی محدوده به عوامل اصلی مورد استفاده در برآورد شاخص آسیب‌پذیری ساختمان اضافه شد. شایان ذکر است که این به‌روزرسانی امتیازهای عوامل موثر بر آسیب‌پذیری ساختمان‌ها بر اساس شرایط ساختمان‌های آسیب‌دیده در پروژه‌های مورد بررسی و با قضاوت مهندسی صورت پذیرفته است.

۳-۱- به‌روزرسانی دسته‌بندی و امتیازهای عوامل موثر بر شاخص آسیب‌پذیری ساختمان

در جدول (۳) امتیازهای مربوط به هریک از عوامل موثر در برآورد شاخص آسیب‌پذیری ساختمان‌ها مربوط به رویه قبلی و رویه پیشنهادی در مطالعه حاضر ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مجموع امتیازات عوامل اصلی در هر دو روش برابر با ۱۰۰ بوده و رده‌بندی توصیفی آسیب‌پذیری ارائه‌شده در جدول (۲) برای روش جدید نیز برقرار می‌باشد. پس از به‌روزرسانی عوامل اصلی موثر بر آسیب‌پذیری ساختمان‌ها و امتیازهای مربوطه، زیرعوامل آن‌ها مورد بررسی و به‌روزرسانی قرار گرفته است.

جدول (۳). عوامل اصلی موثر در برآورد شاخص آسیب‌پذیری ساختمان‌ها در روش پیشین و مطالعه حاضر

عامل	حداکثر امتیاز	
	روش پیشین	مطالعه حاضر
رفتار سازه‌ای بنا	۲۵	۳۰
جهت‌گیری و موقعیت بنا نسبت به تونل	۲۵	۲۰
عملکرد سازه‌ای بنا (کاربری)	۱۰	۱۰
مشخصات معماری بنا	۲۰	۱۰
شرایط فعلی ساختمان	۲۰	۲۰
شرایط زمین‌شناسی مهندسی محدوده	-	۱۰
مجموع	**۱۰۰**	**۱۰۰**

دسته‌بندی به‌روزشده عوامل موثر بر برآورد شاخص آسیب‌پذیری ساختمان‌ها و امتیازهای هر دسته که طی انجام پژوهش حاضر به‌دست آمده در جدول (۴) ارائه شده است.

شایان ذکر است که این امتیازها بر اساس اطلاعات حاصل از پروژه‌های خط ۷ متروی تهران و خط A متروی قم و با قضاوت مهندسی تعیین شده است. طی بررسی دسته‌بندی‌های عوامل و تعیین امتیازهای مربوطه در این پژوهش، سعی شده امتیازهای مورد استفاده در روش پیشین حداقل تغییر را داشته باشد. در ادامه این بخش، تغییرات اعمال‌شده در هریک از دسته‌ها به تفکیک ارائه می‌گردد.

۳-۲- محاسبه شاخص آسیب‌پذیری ساختمان‌ها بر اساس روش پژوهش حاضر

در بخش قبلی این پژوهش، روش پیشین برآورد شاخص آسیب‌پذیری مورد اصلاح و ارتقاء قرار گرفت. با استفاده از روش جدید حاصل، شاخص آسیب‌پذیری برای تمامی ساختمان‌های مورد مطالعه محاسبه شد که مقادیر حاصل در بخش اعتبارسنجی پژوهش ارائه می‌گردد. نمونه محاسبه این شاخص بر اساس روش حاضر که مربوط به ساختمان B0001 واقع در ۵۰۰ متر ابتدایی پروژه قطعه شرقی- غربی خط ۷ متروی می‌باشد، در جدول ۵ ملاحظه می‌شود. در این جدول، دسته‌بندی و امتیازهای کلی مربوط به هر عامل به همراه امتیازهای خاص ساختمان مورد بررسی مشخص می‌باشد.

در بخش بعدی مقاله که به اعتبارسنجی یافته‌ها اختصاص دارد، مقادیر محاسبه‌شده شاخص آسیب‌پذیری ساختمان‌های تحت بررسی با استفاده از روش پیشین و روش گزارش حاضر ارائه می‌گردد و رده‌های آسیب پیش‌بینی‌شده و واقعی آن‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

جدول (۴). دسته‌بندی عوامل موثر در برآورد شاخص آسیب‌پذیری ساختمان‌ها در مطالعه حاضر

ردیف	پارامتر	انواع	امتیاز
۱	رفتار سازه‌ای بنا	المان‌های سازه‌ای افقی	۰ تا ۶
		المان‌های سازه‌ای قائم	۰ تا ۶
		پی ـ نحوه دریافت اطلاعات	۰ تا ۶
		نوع کارهای تعمیراتی (در صورت انجام)	۰ تا ۶
		تعداد طبقات و وجود طبقه زیرزمین	۰ تا ۶
۲	جهت‌گیری و موقعیت بنا نسبت به تونل	جهت‌گیری	۰ تا ۱۰
		اثر گروه ساختمان‌ها	۰ تا ۱۰
۳	عملکرد سازه‌ای بنا (کاربری)	-	۰ تا ۱۰
۴	مشخصات معماری بنا	نوع دیوارهای غیربارربر داخلی	۱ تا ۵
		نمای ساختمان	۱ تا ۵
۵	شرایط فعلی ساختمان	عمر ساختمان	۰ تا ۶
		نشانه‌های نشست در محیط اطراف	۰ تا ۴
		نوع ترک‌ها	۰ تا ۵
		وجود چاه یا فضای خالی در زیر ساختمان	۰ تا ۵
۶	شرایط زمین‌شناسی	جنس زمین	۰ تا ۶
		وضعیت آب زیرزمینی	۰ تا ۴

۳-۳- اعتبارسنجی یافته‌ها

به‌روزرسانی عوامل مربوط به برآورد شاخص آسیب‌پذیری ساختمان و امتیاز آن‌ها در بخش‌های قبل ارائه گردید. همان‌طور که اشاره شد، این به‌روزرسانی بر اساس داده‌ها و تجارب حاصل از پروژه‌های خط ۷ متروی تهران و خط A متروی قم با لحاظ کردن قضاوت مهندسی صورت گرفته است.

در این بخش از تحقیق به ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی برای برآورد شاخص آسیب‌پذیری ساختمان‌ها پرداخته می‌شود. به این منظور، وضعیت آسیب و نشست ساختمان‌های شاخص پروژه‌ها بررسی شده و رده آسیب واقعی آن‌ها پس از حفاری تونل تعیین می‌شود. همچنین رده آسیب پیش‌بینی‌شده آن‌ها بر اساس شاخص آسیب‌پذیری (روش پیشین و روش فعلی) نیز برآورد می‌شود و با رده آسیب واقعی مقایسه می‌گردد. بنابراین عملکرد روش پیشنهادی این پژوهش در خصوص پیش‌بینی صحیح و دقیق آسیب‌های آتی ساختمان‌ها ناشی از عملیات تونل‌سازی در محدوده آن‌ها مشخص می‌شود. این روند مقایسه‌ای برای تمامی ساختمان‌های مورد مطالعه طی شده و عوامل موثر بر آسیب‌پذیری مورد بررسی قرار گرفته که در برخی موارد به اصلاح دسته‌بندی و امتیازهای مربوطه آن‌ها منجر شده است. در ادامه این بخش، فرآیند طی‌شده به‌منظور اعتبارسنجی یافته‌های پژوهش حاضر ارائه می‌گردد.

۳-۳-۱- پارامترهای کنترلی محدوده مورد بررسی

عوامل کنترلی مختلفی مانند نشست، چرخش، کرنش کششی و بازشدگی ترک‌ها به‌عنوان پارامترهای کنترلی برای رصد و جلوگیری از ایراد آسیب در ساختمان‌های محدوده تونل‌های شهری مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۳]، [۱۴] و [۱۵]. بروز نشست در زیر پی ساختمان‌ها در اثر عواملی مانند ساخت تونل می‌تواند منجر به افزایش غیرمجاز نیروهای داخلی المان‌های سازه‌ای و بروز ترک در ساختمان گردد. در برخی موارد نیز بدون آنکه پایداری سازه به مخاطره بیفتد، ممکن است تغییرشکل‌های غیرمجاز ساختمان، بهره‌برداری آن را با مشکل مواجه کند. تعیین و تعریف مقادیر قابل تحمل نشست و تغییرشکل یا به اصطلاح "حدود مجاز" برای انواع مختلف سازه‌ها، به علت پیچیدگی اندرکنش سه بخش سازه- پی- خاک، مسئله بسیار مشکلی است که به روش‌های تجربی یا نظری نمی‌توان راه‌حل عام و کلی برای آن یافت. با این حال، بر اساس گردآوری نتایج مشاهدات، توصیه‌هایی در مورد حدود مجاز نشست و تغییرشکل ساختمان‌ها در مراجع مختلف ارائه شده است. به‌منظور رده‌بندی آسیب ساختمان‌ها، پارامترهای کنترلی که قابل اندازه‌گیری و یا محاسبه باشند، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در این پژوهش، از معیار رانکین[1] که کاربرد گسترده‌ای در رده‌بندی آسیب ساختمان‌ها در پروژه‌های مختلف شهری داشته استفاده شده است [۱۵]. در ادامه، مشخصات و مبانی این معیارها ارائه می‌گردد.

جدول (۵). محاسبه شاخص آسیب‌پذیری بنا بر اساس روش پژوهش حاضر

تونل قطعه شرقی ـ غربی خط ۷ مترو تهران		تاریخ:	کد بنا
محاسبه شاخص آسیب‌پذیری بنا ـ جدول ۱		ساعت:	B0001
A . رفتار سازه‌ای بنا			
مشخصه		امتیاز شاخص	امتیاز بنا
A1 . المان‌های سازه‌ای افقی			
ـ چوبی		6	
ـ طاق ضربی (آجر و فلز)		4	4 √
ـ تیرچه بلوک		3	
ـ بتن مسلح		0	
A2 . المان‌های سازه‌ای قائم			
ـ بنایی		6	
ـ ترکیبی		4	
ـ بتن مسلح		3	
ـ فلزی		0	√
A3 . پی ـ نحوه دریافت اطلاعات			
پی ندارد		6	
پی منفرد و دریافت غیرمستقیم اطلاعات		4	4 √
پی منفرد و دریافت مستقیم اطلاعات		3	
پی غیرمنفرد و دریافت غیرمستقیم اطلاعات		2	
پی غیرمنفرد و دریافت مستقیم اطلاعات		0	
A4 . نوع کارهای تعمیراتی (در صورت انجام)			
ـ نامشخص		2	2 √
ـ افزایش بازشوها در بخشهای خارجی یا دیوارهای باربر	6		
ـ اصلاحات با حفظ ساختار قبلی		0	
ـ اصلاحات با تقویت ساختار قبلی	3		
ـ تقویت (المانهای باربر یا پی)		5	
ـ اضافه کردن طبقه	4		
ـ کارهای داخلی جزیی		0	
• وضعیت عملیات تعمیراتی بنا (ضریب تصحیح)			
• در حال انجام یا پایان یافته	1	0	√
• طراحی شده	0	1	
A5 . وجود طبقه زیرزمین			
وجود طبقه زیرزمین و تعداد طبقات سطح زمین سه یا بیشتر		6	
عدم وجود طبقه زیرزمین و تعداد طبقات سطح زمین سه یا بیشتر		4	
وجود طبقه زیرزمین و تعداد طبقات سطح زمین کمتر از سه		2	2 √
عدم وجود طبقه زیرزمین و تعداد طبقات سطح زمین کمتر از سه		0	
مجموع امتیاز بخش A			12

حداکثر امتیاز : 30

تونل قطعه شرقی ـ غربی خط ۷ مترو تهران		تاریخ:	کد بنا
محاسبه شاخص آسیب‌پذیری بنا ـ جدول ۲		ساعت:	B0001
B . جهت‌گیری (Orientation) و موقعیت بنا نسبت به تونل			
مشخصه		امتیاز شاخص	امتیاز بنا
B1 . جهت‌گیری			
ـ L1 / L2 < 0.5		10	
ـ 0.5 < L1 / L2 < 2		6	6 √
ـ L1 / L2 > 2		10	
B2 . اثر گروه ساختمان‌ها			
ـ ساختمان‌های ایزوله نوع A (L1 , L2 < 2D)		10	
ـ ساختمان‌های ایزوله نوع B (L1 , L2 > 2D)		3	
ـ ساختمان‌های ایزوله نوع C (L1 < 2D; L2 > 2D)		7	7 √
ـ ساختمان‌های ایزوله نوع D (L1 > 2D; L2 < 2D)		7	
ـ گروه ساختمان‌های موازی محور تونل		5	
ـ گروه ساختمان‌های عمود بر محور تونل		5	
B3 . موقعیت نسبت به تونل (مقادیر این آیتم در دو آیتم B1 و B2 ضرب می‌شود)			
ـ x / D < 1		1	1 √
ـ 1 < x / D < 3		0.5	
ـ x / D > 3		0	
مجموع امتیاز بخش B			13

حداکثر امتیاز : 20

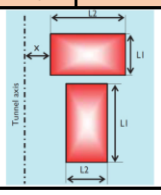
راهنما

L1 : میانگین ابعاد بنا در جهت موازی با راستای تونل

L2 : میانگین ابعاد بنا در جهت عمود بر راستای تونل

x : فاصله ساختمان از محور تونل

D : قطر تونل



[1] Rankin

ادامه جدول (۵). محاسبه شاخص آسیب‌پذیری بنا بر اساس روش پژوهش حاضر

تونل قطعه شرقی ـ غربی خط ۷ مترو تهران		تاریخ:	کد بنا	
محاسبه شاخص آسیب‌پذیری بنا ـ جدول ۳		ساعت:	B0001	
C . عملکرد سازه‌ای بنا				حداکثر امتیاز: 10
مشخصه		امتیاز شاخص	امتیاز بنا	
C1 . کاربری ساختمان (با توجه به آیین نامه ۲۸۰۰)				
ـ اهمیت خیلی زیاد (بیمارستان، تاسیسات آب و برق بناهای حاوی تجهیزات بسیار حساس)		10		
ـ اهمیت زیاد (مدارس، مساجد، استادیوم، سینما، فروشگاه، ترمینال، بناهای تاریخی، موزه ها)	√	7	7	
ـ اهمیت متوسط (همه ساختمان ها به غیر از سه گروه دیگر از جمله ساختمان های مسکونی)		5		
ـ اهمیت کم (ساختمان با بهره برداری موقت یا احتمال تلفات پایین در اثر تخریب)		0		
مجموع امتیاز بخش C			7	

تونل قطعه شرقی ـ غربی خط ۷ مترو تهران		تاریخ:	کد بنا	
محاسبه شاخص آسیب‌پذیری بنا ـ جدول ۴		ساعت:	B0001	
D . مشخصات معماری بنا				حداکثر امتیاز: 10
مشخصه		امتیاز شاخص	امتیاز بنا	
D1 . دیوارهای غیر باربر داخلی				
ـ چوبی		1		
ـ آلومینیوم و شیشه‌ای		2		
ـ پنل‌های پیش‌ساخته		3		
ـ آجری	√	4	4	
ـ بلوک بتنی		5		
D2 . نمای ساختمان				
ـ ترکیبی (آلومینیوم و شیشه) با هنری		5		
ـ سنگی		4		
ـ آجری	√	3	3	
ـ پلاستر (سیمانی)		2		
ـ غیره		1		
مجموع امتیاز بخش D			7	

تونل قطعه شرقی ـ غربی خط ۷ مترو تهران		تاریخ:	کد بنا	
محاسبه شاخص آسیب‌پذیری بنا ـ جدول ۵		ساعت:	B0001	
E . شرایط فعلی ساختمان				حداکثر امتیاز: 20
مشخصه		امتیاز شاخص	امتیاز بنا	
E1 . عمر ساختمان				
ـ نوساز		0		
ـ کمتر از ۱۰ سال	√	1	1	
ـ بین ۱۰ تا ۲۰ سال		3		
ـ بین ۲۰ تا ۳۰ سال		4		
ـ بیشتر از ۳۰ سال		6		
E2 . نشانه‌های نشست در محیط اطراف				
ـ بله		4		
ـ خیر	√	0		
E3 . وضعیت ترک‌ها و آسیب‌های موجود (بر اساس معیار برلند)				
ـ رده چهار و پنج معیار برلند		5		
ـ رده سه معیار برلند		3		
ـ رده دو معیار برلند	√	1	1	
ـ رده یک و صفر معیار برلند		0		
E4 . وجود چاه یا فضای خالی در زیر ساختمان				
ـ وجود در محدوده پی		5		
ـ وجود در خارج از محدوده پی	√	2	2	
ـ عدم وجود		0		
مجموع امتیاز بخش E			4	

تونل قطعه شرقی ـ غربی خط ۷ مترو تهران		تاریخ:	کد بنا	
محاسبه شاخص آسیب‌پذیری بنا ـ جدول ۵		ساعت:	B0001	
F . شرایط زمین‌شناسی مهندسی خاک				حداکثر امتیاز: 10
مشخصه		امتیاز شاخص	امتیاز بنا	
F1 . جنس زمین				
ماسه بادی		6		
ریزدانه (میزان رس بیشتر از ۳۵ درصد)	√	4	4	
درشت‌دانه (میزان رس کمتر از ۳۵ درصد)		2		
سنگ		0		
F2 . شرایط آب زیرزمینی				
نوسان تراز آب بیش از ۵ متر در حین اجرا	√	4	4	
عمق آب نسبت به سطح زمین کمتر از ۵ متر		2		
عمق آب نسبت به سطح زمین بین ۵ متر تا ۱۰ متر		1		
عمق آب نسبت به سطح زمین بیشتر از ۱۰ متر		0		
مجموع امتیاز بخش F			8	

معیار رانکین بر مبنای دو پارامتر کنترلی میزان نشست حداکثر (Smax) و چرخش حداکثر ساختمان (Bmax) به تحلیل وضعیت آسیب ساختمان‌ها می‌پردازد. مطابق جدول (۶)، معیار رانکین شامل چهار رده آسیب (از رده ظاهری تا سازه‌ای) می‌باشد. توصیف مربوط به هر رده در این جدول مشخص شده است. پارامترهای کنترلی مورد استفاده در این معیار با سهولت بیشتری در حین اجرای پروژه‌ها قابل اندازه‌گیری هستند. به‌طور معمول پارامتر نشست با استفاده از ابزار نشست‌سنج ساختمانی[1] و پارامتر چرخش با استفاده از ابزار چرخش‌سنج[2] تحت پایش قرار می‌گیرد. در پژوهش حاضر، با توجه به اینکه در حین اجرای پروژه‌ها روند نشست ساختمان‌های مورد مطالعه اندازه‌گیری و ثبت گردیده، میزان نشست حداکثر به عنوان پارامتر کنترلی لحاظ شده است.

۳-۳-۲- ارتباط بین رده آسیب ساختمان‌ها، شاخص آسیب‌پذیری و مقادیر حدی پارامتر کنترلی

مقادیر حدی پارامترهای کنترلی که در بخش قبل ارائه گردید مربوط به ساختمان‌هایی است که شاخص آسیب‌پذیری آن‌ها در بازه صفر تا ۲۰ قرار دارد و به عبارت دیگر میزان آسیب‌پذیری آن‌ها بسیار کم می‌باشد. به‌منظور افزایش ضریب ایمنی ساختمان‌ها در برابر ایراد آسیب‌های احتمالی، ضریب کاهنده‌ای (F_R) برای کاهش مقادیر حدی پارامترهای کنترلی به‌کار گرفته می‌شود. در این راستا، با توجه به مقدار شاخص آسیب‌پذیری هر ساختمان، فاکتور کاهنده متناظر در مقادیر حدی پارامترهای کنترلی اعمال می‌شود تا حدود مجاز خاص هر ساختمان تعیین گردد. بدین صورت که اگر SR نشست مجاز بیان‌شده در معیارها برای ساختمان ایده‌آل (دارای شاخص آسیب‌پذیری در بازه صفر تا ۲۰) باشد، نشست مجاز ساختمان مورد بررسی (S_A)، مطابق رابطه (۱) محاسبه خواهد شد:

$$S_A = S_R / F_R \qquad (۱)$$

بنابراین با استفاده از ضریب کاهنده، حدود پارامترهای کنترلی مورد نظر در این پژوهش شامل نشست و کرنش کششی تعیین می‌شود. ارتباط بین رده آسیب ساختمان‌ها، شاخص آسیب‌پذیری و مقادیر حدی پارامترهای کنترلی مربوط به معیار رانکین در جدول (۷) ارائه شده است. مطابق این جداول، ضریب کاهنده می‌تواند مقداری بین ۱ تا ۲ داشته باشد و در شرایطی که شاخص آسیب‌پذیری ساختمان بسیار زیاد (در بازه ۸۰ تا ۱۰۰) است، مقادیر حدی پارامترهای کنترلی با اعمال ضریب کاهنده ۲ به نصف کاهش می‌یابد.

به‌منظور پیش‌بینی و تحلیل وضعیت آسیب‌ها و پایداری ساختمان‌هایی که در محدوده تاثیر حفاری تونل‌ها قرار دارند، از

[1] Building Leveling Pin (BLP)
[2] Tiltmeter

رده‌بندی ارائه‌شده در جدول (۷) استفاده می‌شود. در این راستا، با محاسبه شاخص آسیب‌پذیری ساختمان پیش از شروع عملیات حفاری تونل، حدود مجاز پارامترهای کنترلی آن به‌ویژه نشست مشخص می‌گردد. بنابراین با توجه به رده‌های آسیب مربوطه، می‌توان آسیب‌های محتمل آتی که با افزایش مقدار پارامتر کنترلی در ساختمان بروز می‌نماید را پیش‌بینی کرد.

در مرحله بعدی پژوهش، با توجه به مقدار شاخص آسیب‌پذیری ساختمان‌های مورد مطالعه و بر اساس مقادیر حدی پارامتر نشست، رده آسیب آن‌ها تعیین می‌شود. در نتیجه می‌توان با مقایسه رده آسیب واقعی این ساختمان‌ها و رده آسیب برآوردشده از معیار رانکین، عملکرد روش پژوهش حاضر در خصوص محاسبه شاخص آسیب‌پذیری ساختمان‌ها را مورد ارزیابی قرار داد.

۳-۳-۳- مقایسه رده آسیب پیش‌بینی‌شده و واقعی ساختمان‌های مورد بررسی

به‌منظور اعتبارسنجی روش پیشنهادی پژوهش حاضر برای برآورد شاخص آسیب‌پذیری ساختمان‌ها در ارتباط با حفاری تونل‌های شهری، از رده آسیب ساختمان‌های مورد بررسی استفاده می‌شود.

با توجه به اینکه میزان آسیب وارده به ساختمان‌ها بستگی به شاخص آسیب‌پذیری آن‌ها دارد، درصورت محاسبه صحیح این شاخص می‌توان تخمین مطلوبی از رده آسیب احتمالی ساختمان در مقابل حفاری تونل داشت. بر اساس دسته‌بندی‌ها و امتیازات مربوط به روش‌های پیشین و حاضر، برآورد شاخص آسیب‌پذیری ساختمان که در بخش‌های قبل ارائه گردید، مقادیر این شاخص برای ساختمان‌های مورد بررسی محاسبه شده و در جدول (۸) ارائه گردیده است. همچنین در این جدول، پارامترهای کنترلی حداکثر نشست و کرنش کششی مربوط به هر یک از ساختمان‌ها مشخص شده است. بر اساس مقادیر شاخص آسیب‌پذیری و پارامترهای کنترلی و با استفاده از آستانه‌های ارائه‌شده در جدول ۷، رده آسیب ساختمان‌ها تعیین گردیده است. مطابق جدول ۸، برای هر ساختمان به ازای معیار رانکین سه رده آسیب مشخص شده است. در این میان، دو مورد از رده‌های آسیب بر اساس روش پیشین و روش پژوهش حاضر حاصل گردیده که در واقع یک پیش‌بینی از وضعیت آسیب‌های احتمالی ساختمان را نشان می‌دهند. حال آنکه چه میزان این پیش‌بینی‌ها دقیق می‌باشد، به رده آسیب واقعی ساختمان پس از حفاری تونل بستگی دارد.

جدول (۶). رده‌بندی آسیب ساختمان (رانکین و همکاران (۱۹۸۸)) [۱۵].

	نوع آسیب	شدت آسیب	توصیف نمونه‌های بارز آسیب	پارامتر کنترلی	
				β_{max}	S_{max} [mm]
۱	ظاهری	قابل صرف نظر	آسیب ظاهری بعید است.	<1/500	<10
۲	ظاهری	کم	آسیب ظاهری احتمالی که بعید است از اهمیت سازه‌ای برخوردار باشد.	1/500-1/200	10-50
۳	کارکردی	متوسط	آسیب ظاهری در ساختمان‌ها و خسارات مورد انتظار در خطوط لوله صلب.	1/200-1/50	50-75
۴	قابلیت استفاده و سازه‌ای	زیاد	آسیب سازه‌ای مورد انتظار در ساختمان‌ها و آسیب در خطوط لوله صلب؛ آسیب احتمالی در سایر خطوط لوله.	>1/50	>75

جدول (۷). ارتباط بین مقادیر حدی ارائه‌شده توسط رانکین و شاخص آسیب‌پذیری (برگرفته از [۱۵])

رده آسیب	شاخص آسیب‌پذیری (I_v) ساختمان				
	قابل صرف نظر	کم	خفیف	متوسط	زیاد
	$0<I_v<20$	$20<I_v<40$	$40<I_v<60$	$60<I_v<80$	$80<I_v<100$
	ضریب کاهنده (F_R)				
	1.0	1.25	1.50	1.75	2.0
	نشست حداکثر (S_{max} [mm])				
۱	<10	<8	<6.7	<5.7	<5
۲	10-50	8-40	6.7-33	5.7-28.5	5-25
۳	50-75	40-60	33-50	28.5-43	25-37.5
۴	>75	>60	>50	>43	>37.5

جدول (۸). تعیین رده‌های آسیب واقعی و پیش‌بینی‌شده ساختمان‌ها بر اساس شاخص‌های آسیب‌پذیری و پارامترهای کنترلی

کد/نام ساختمان	شاخص آسیب‌پذیری بنا		پارامتر کنترلی	رده آسیب بر اساس معیار رانکین		
	روش پیشین	روش جدید	S_{max} [mm]	روش پیشین	روش جدید	وضعیت موجود
B0001	46	52	37	2	2	2
B0004	56	65	31	2	3	3
B0008	56	62	44	3	4	4
B0009	53	62	47	3	4	4
B0013	36	46	14.5	2	3	2
قاصدک	57	64	46	3	4	3
فرش نگین	59	67	49	3	4	4
کوچه اکبری	46	60	45	3	4	4
باباخانی	58	60	18	2	2	2
بداغی	57	61	31	2	3	3

همان‌طور که در جدول (۸) ملاحظه می‌گردد، رده آسیب ساختمان‌ها بر اساس وضعیت موجود آن‌ها پس از حفاری تونل نیز مشخص شده است. شایان ذکر است که برای تعیین رده آسیب موجود ساختمان‌ها، تصاویر و یافته‌های حاصل از بازدیدهای میدانی پس از احداث تونل مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به اهم آسیب‌های وارده به ساختمان‌های مورد بررسی و با عنایت به توصیف رده‌های آسیب معیار رانکین که در جدول ۶ ارائه شد، رده آسیب واقعی هریک از ساختمان‌ها تعیین شده است. به‌منظور مقایسه رده‌های آسیب پیش‌بینی‌شده (با استفاده از روش‌های قبلی و جدید برآورد شاخص آسیب‌پذیری) و رده آسیب واقعی ساختمان‌های مورد بررسی، نتایج مربوطه به‌صورت نمودارهای ستونی در شکل (۲) نشان داده شده است.

شکل (۲). مقایسه رده آسیب واقعی و پیش‌بینی‌شده ساختمان‌های مورد بررسی بر اساس معیار رانکین

۴- نتیجه‌گیری

استفاده از شبکه حمل و نقل زیرزمینی در اکثر شهرهای پرترافیک جهان به یک نیاز ضروری تبدیل شده است. در این راستا، با توجه به اینکه حفاری تونل در محیط‌های شهری ناگزیر در نزدیکی ساختمان‌ها نیز انجام می‌شود، عمدتاً چالش‌هایی ایجاد می‌شود. مهم‌ترین مشکل در این زمینه، تاثیر حفاری روی پی سازه‌های مجاور است و برای جلوگیری از ایراد آسیب در این ساختمان‌ها باید تدابیر لازم اندیشیده شود.

در مقاله حاضر، تلاش شده است تا دقت تخمین وضعیت آسیب‌پذیری ساختمان‌های محدوده تونل‌ها پیش از شروع عملیات حفاری ارتقاء یابد. در این راستا، موارد اصلی ارائه‌شده بدین شرح بوده است:

- ✓ مروری بر منابع مرتبط با موضوع به‌ویژه مطالعات صورت‌گرفته در زمینه برآورد آسیب‌پذیری ساختمان‌ها.
- ✓ معرفی مشخصات کلی پروژه‌های قطعه شرقی-غربی خط ۷ متروی تهران و خط A متروی قم
- ✓ بررسی روش مورد استفاده برای برآورد شاخص آسیب‌پذیری ساختمان‌ها در پروژه‌های مورد مطالعه.و مشخص نمودن نقاط قوت و ضعف کلی آن.
- ✓ ارائه رویه بومی‌سازی برآورد شاخص آسیب‌پذیری ساختمان‌ها.
- ✓ مروری بر موارد شاخص ایراد آسیب در ساختمان‌های پروژه‌های مورد بررسی.
- ✓ ارزیابی و به‌روزرسانی عوامل موثر بر آسیب‌پذیری ساختمان‌ها و امتیازهای مربوطه.

- ✓ اعتبارسنجی نتایج حاصل با مقایسه رده آسیب پیش‌بینی‌شده و واقعی ساختمان‌های مورد بررسی.

اهم نتایج حاصل از این پژوهش که بر اساس تجارب حاصل از پروژه‌های قطعه شرقی-غربی خط ۷ متروی تهران و خط A متروی قم حاصل شده است شامل موارد زیر می‌باشد:

- ✓ برای تعیین میزان آسیب‌پذیری ساختمان‌ها در پروژه‌های مورد مطالعه از روش چیریوتی و همکاران (۲۰۰۱) به همراه اعمال اصلاحات اندکی در آن استفاده شده است. بررسی اطلاعات مربوطه نشان می‌دهد که روش اصلاح‌شده مورد استفاده همچنان کاستی‌هایی دارد که موجب شده است در برخی موارد، پیش‌بینی میزان آسیب‌پذیری ساختمان با رفتار واقعی آن پس از حفاری تونل تفاوت داشته باشد.
- ✓ بر اساس اطلاعات حاصل از ساختمان‌های آسیب‌دیده و با قضاوت مهندسی، دسته‌بندی و امتیازهای مربوط به عوامل موثر در برآورد شاخص آسیب‌پذیری مورد بازنگری و به‌روزرسانی قرار گرفت. در این راستا، عوامل اصلی بررسی گردیده و امتیازهای آن‌ها تعدیل شد.
- ✓ طی این به‌روزرسانی، موارد مهمی شامل نوع پی، تعداد طبقات، وجود چاه یا فضای خالی در زیر ساختمان، جنس زمین و وضعیت آب زیرزمینی به عوامل موثر در برآورد شاخص آسیب‌پذیری اضافه شد.
- ✓ به‌منظور اعتبارسنجی روش پیشنهادی در پژوهش حاضر، رده آسیب ساختمان‌های مربوطه مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، رده آسیب آن‌ها بر اساس معیار معتبر رانکین که کاربرد گسترده‌ای در تحلیل وضعیت آسیب و پایداری ساختمان‌ها داشته است، با استفاده از روش پیشین و روش پژوهش حاضر تعیین شد. نتایج حاصل نشان داد که در اکثر ساختمان‌های مورد بررسی، رده آسیب پیش‌بینی‌شده با استفاده از روش پیشنهادی در پژوهش حاضر منطبق بر رده آسیب واقعی ساختمان بوده است؛ در حالیکه اختلاف در رده آسیب واقعی و رده آسیب پیش‌بینی‌شده با استفاده از روش قبلی به مراتب بیشتر می‌باشد.
- ✓ بنابراین استفاده از روش جدید موجب ارتقای قابل توجهی در دقت تخمین رده آسیب ساختمان‌ها می‌شود. علت اصلی افزایش دقت روش پیشنهادی در پژوهش حاضر، اضافه کردن عوامل ذکرشده در برآورد میزان آسیب‌پذیری ساختمان‌ها می‌باشد که در روش پیشین مغفول مانده بود.

۵- مراجع

[1] New, B. M. and O'ReilIy, M. P. 1991. Tunneling induced ground movements; Predicting their magnitude and effects. Proceedings of the 4th International Conference on Ground Movements and Structures, invited review paper, Cardiff, Pentech Press, London, July 7, 1991, 671-697.

[2] Zhang, L., Wu, X., Zhu, H., & AbouRizk, S. M. 2017. Perceiving safety risk of buildings adjacent to tunneling excavation: An information fusion approach. Automation in Construction, 73, 88-101.

[3] Foroughi, M.,Tarigh Azali, S., Karimi M., Oruji, M., Mirmehrabi, S. 2012. Building Risk Assessment for Safe Tunnelling in an urban area Case study: Tehran metro line7 (East-West lot). World Tunnelling Congress, Bangkok.

[4] Loganathan, N., 2011. An innovative method for assessing tunnelling-induced risks to adjacent structures, Parsons Brinckerhoff Inc. New York, United States.

[5] Peck, R. B. 1969. Deep excavations and tunneling in soft ground. Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, State-of-the-art volume, Mexico city, 1969, 225-290.

[6] Dzegniuk, B., Hejmanowski, R. and Sroka, A., 1997, November. Evaluation of the damage hazard to building objects on the mining areas considering the deformation course in time. In Proceedings of Xth international congress of the international society for mine surveying (pp. 2-6).

[7] Chiriotti, E. and Grasso, P.: Porto Light Metro System, Lines C, S and J. Compendium to the Methodology Report on Building Risk Assessment Related to Tunnel Construction. Normetro – Transmetro, Internal technical report (in English and Portuguese), 2001.

[8] Saeidi, A., Deck, O. and Verdel, T., 2009. Development of building vulnerability functions in subsidence regions from empirical methods. Engineering Structures, 31(10), pp.2275-2286.

[9] Giardina, G., Hendriks, M.A. and Rots, J.G., 2015. Damage functions for the vulnerability assessment of masonry buildings subjected to tunneling. Journal of Structural Engineering, 141(9), p.04014212.

[10] Sahel Consulting Engineers. 2009. Engineering services of Tehran Metro Line 7 tunnel project, East-West lot, Mechanized excavation method. Tehran. (In Persian)

[11] Sahel Consulting Engineers. 2012. Engineering geology and geotechnical studies of Qom metro project path. (In Persian)

[12] Sahel Consulting Engineers. 2010. Engineering geological and geotechnical studies of the tunnel path (East-West lot). Tehran. (In Persian)

[13] Boscardin M. D. and Cording E. J. 1989. Building Response to Excavation-Induced Settlement, Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 115, No. 1, pp. 1-21.

[14] Burland, J.B. Broms, J.B. and de Mello, V.F.B. 1977. Behavior of foundations and structures on soft ground. Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (SMFE), Tokyo, Japan, July 10- 15, 1977, 495-546.

[15] Rankin, W. J. 1988. Ground movements resulting from urban tunneling: Predictions and effects. Engineering Geology of Underground Movements. 5, 79-92.