

کمّی سازی برگشت پذیری زیرساخت‌های شهری و کاربرد آن در انتخاب راهکارهای مقاوم سازی لرزه‌ای (مطالعه موردی: ایستگاه ۱۵ خرداد متروی شیراز)

بابک امیدوار*، دانشیار، دانشکده محیط‌زیست، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران
آسیه سلطانی، کارشناس ارشد مدیریت در سوانح طبیعی، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران

Email: bomidvar@ut.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۲۷ - پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۲۶

چکیده

ارزیابی برگشت پذیری در برابر سوانح به عنوان یک ابزار تصمیم‌گیری می‌تواند توسط مدیران بحران مورد توجه قرار گیرد. وارد کردن زمان احیا در روند تصمیم‌گیری‌های فاز آمادگی، باعث تفاوت رویکرد برگشت پذیری از دیگر رویکردهای تخمین خسارت و اثرهای وابسته به زمان آن‌ها می‌شود. فرایند احیا بعد از وقوع سوانح می‌تواند توسط توابع احیای ساده شده یا مدل‌های اجتماعی- سازمانی پیچیده تخمین زده شود. نکته بارز، استفاده از رویکرد برگشت پذیری آن است که می‌تواند به مدیران بحران دورنمایی از روند احیای شریان‌های حیاتی بعد از سوانح، با توجه به عامل تعیین‌کننده زمان، بدهد تا امکانات موجود را بر اساس معیار برگشت پذیری تخصیص دهند. در حال حاضر، راهکارهای مقاوم‌سازی شریان‌های حیاتی، به خصوص ایستگاه‌های مترو، به وسیله معیارهای اقتصادی و فنی و با توجه به شرایط پروژه تعیین می‌شوند. در این تحلیل‌ها، روند احیا و بازیابی عملکرد پس از سوانح در نظر گرفته نمی‌شود. در این مقاله، ابتدا مفهوم برگشت پذیری شریان‌های حیاتی بعد از سوانح، ابعاد و روش‌های تحلیل آن از یک سو و روش‌های مقاوم‌سازی ایستگاه‌ها و تونل‌های مترو از سوی دیگر، بررسی شده است. در مرحله بعد، با توجه به الگوریتم پیشنهادی برای دستیابی به مقدار کمّی برگشت پذیری، ابتدا ایستگاه زیرزمینی ۱۵ خرداد واقع در متروی شیراز مدل‌سازی شده و جابجایی سازه در اثر بار زلزله در ۱۰ نقطه کنترل و برای ۱۱ زلزله با PGA های مختلف تحلیل شده است. سپس، با توجه به مقادیر به دست آمده، احتمال گسسته و تجمعی شکست سازه با توجه به پارامتر جابجایی، در مقایسه با معیار آستانه خرابی، به دست آمده است. از روی مقادیر احتمال شکست به دست آمده و نیز با در نظر داشتن تابع احیا می‌توان عملکرد سیستم را ارزیابی کرد. در نهایت، با استفاده از روابط مربوط به ارزیابی کمّی برگشت پذیری ارائه شده، برگشت پذیری راهکارهای مختلف مقاوم‌سازی محاسبه شده است و بر اساس آن اولویت‌بندی شده‌اند. روش پیشنهادی قابلیت تعمیم به کلیه شریان‌های حیاتی را دارد.

واژه‌های کلیدی: برگشت پذیری، مقاوم‌سازی، ایستگاه مترو، توابع احیا، زلزله

۱. مقدمه

با توجه به مسائل مطرح شده، در مقاله حاضر، به ارتباط مقاوم سازی ایستگاه های مترو بعد از زلزله و بحث برگشت پذیری پرداخته شده است. در حال حاضر، راهکارهای مقاوم سازی ایستگاه های مترو در دنیا با رویکرد صرفاً فنی-اقتصادی و بدون توجه به شرایط بعد از سانحه انجام می شود. همچنین، برای برخی ایستگاه های موجود، مطالعات مقاوم سازی انجام نشده و یا بر اساس کدهای قدیمی انجام شده است. برای ایستگاه های جدید نیز مطالعات مقاوم سازی ایستگاه های مترو صرفاً از دید ایستادگی در برابر زلزله انجام می شود. نکته ای که در این میان حائز اهمیت است، برگشت پذیری ایستگاه ها بعد از زلزله است که در آن ها در نظر گرفته نشده است. مقاله حاضر به کارشناسان فنی و مدیران بحران دید مشترکی برای انتخاب بهینه راهکارهای مقاوم سازی ایستگاه های مترو در برابر زلزله با رویکرد برگشت پذیری می دهد.

یکی از نکات بارز و جدیدی که هدف این مقاله است، ارائه الگوریتمی برای انتخاب بهینه راهکارهای مذکور با رویکرد برگشت پذیری ایستگاه های مترو است. در حقیقت، در روش پیشنهادی، پارامترهای مهم که در تحلیل مقاوم سازی ایستگاه های مترو به کار می روند مانند توابع آسیب پذیری اجزای شبکه، احتمال آسیب پذیری اجزای شبکه، خسارت های اقتصادی با هدف افزایش خاصیت برگشت پذیری ایستگاه های مترو، همگی در یک چارچوب واحد در نظر گرفته شده اند. این چارچوب به عنوان یک تابع با هدف انتخاب بهینه بر اساس برگشت پذیری در نظر گرفته خواهد شد.

با استفاده از نتایج روش پیشنهادی می توان راهکارهایی برای مقاوم سازی ایستگاه های مترو ارائه داد که به افزایش برگشت پذیری نیز منجر خواهد شد. نتایج مطالعات روی یکی از ایستگاه های متروی شیراز بررسی خواهد شد.

با توجه به گسترش ترافیک در کلان شهرها، رویکرد مدیران شهری به استفاده از قطار شهری افزایش یافته است و ایستگاه های مترو به عنوان جزئی از این شریان حیاتی محسوب می شوند. با توجه به توسعه روزافزون سازه های زیرزمینی و هزینه های فراوانی که برای ساخت هر یک از این سازه ها صرف می گردد و نیز اهمیت آن ها در شبکه حمل و نقل بین شهری و داخل شهری لازم است که پایداری آن ها در برابر سوانح افزایش یابد. تخمین شرایط بعد از سوانح برای مدیریت شبکه دارای اهمیت بسیار زیادی است. به نحوی که با مقاوم سازی صحیح پیش از وقوع سانحه می توان شبکه را در زمان حادثه در حداقل زمان، با کمترین هزینه و تعیین اولویت ها بازسازی نمود. یکی از ابزارهای مدیریتی جدید مهم در این راستا ارزیابی برگشت پذیری و اولویت بندی مقاوم سازی در راستای افزایش آن، به منظور برنامه ریزی برای کاهش اثرهای سوانح است (وجودی، ۱۳۸۲).

تبیین رابطه برگشت پذیری در برابر زلزله، در واقع بررسی کمی نحوه تأثیرگذاری ظرفیت های اجتماعی، اقتصادی، نهادی، سیاسی و اجرایی شریان های حیاتی در افزایش برگشت پذیری و شناخت ابعاد آن است. شایان ذکر است که نوع نگرش به مقوله برگشت پذیری و نحوه تحلیل آن، از یک طرف در چگونگی شناخت برگشت پذیری وضع موجود و علل آن نقشی کلیدی دارد و از طرف دیگر سیاست ها و اقدامات کاهش خطرپذیری و نحوه رویارویی با آن را تحت تأثیر اساسی قرار می دهد. از این رو است که تبیین رابطه برگشت پذیری در برابر زلزله و کاهش اثرهای آن، با توجه به نتایجی که در بر خواهد داشت و تأکیدی که این تحلیل بر بعد برگشت پذیری دارد، از اهمیت بالایی برخوردار است. در واقع، هدف از این رویکرد، کاهش آسیب پذیری شریان های حیاتی و تقویت توانایی ها برای مقابله با خطرات ناشی از وقوع سوانح طبیعی است.

۲. پیشینه تحقیق

در چند سال اخیر، مدیریت بحران از جنبه‌های مختلفی بررسی شده و مفاهیم جدیدی به آن وارد شده است. یکی از این مفاهیم، برگشت‌پذیری است که توسط محققینی چون برونو و همکاران (۲۰۰۳) تحلیل شده است. آن‌ها با استفاده از دو جنبه کاهش آسیب‌پذیری و کاهش زمان احیا، برگشت‌پذیری را وارد مقوله مدیریت بحران کرده‌اند.

اولین بار، هالینگ (۱۹۷۳) اکولوژیست در سال ۱۹۷۳، برگشت‌پذیری را در سطح سیستم تعریف کرد. کارپنتر (۲۰۰۱) این مفهوم را در بُعد انسانی، برونو و همکاران (۲۰۰۳) در بحث مدیریت سوانح و آدگر و همکاران (۲۰۰۵) آن را در بُعد اجتماعی مطرح کردند. خروجی کنفرانس جهانی کاهش سوانح^۱ در سال ۲۰۰۵ ورود پارامتر برگشت‌پذیری به مقوله سوانح را به صورت رسمی تأیید کرد. همچنین، رسیدن به جوامع برگشت‌پذیر در چارچوب هیوگو در ۲۲ ژانویه ۲۰۰۵ به عنوان استراتژی (راهکار) بین‌المللی کاهش بحران سازمان ملل متحد^۲ به تصویب رسید. از زمان تصویب این لایحه قانونی، هدف اصلی برنامه‌ریزی برای مخاطره و کاهش خطر بحران، علاوه بر کاهش آسیب‌پذیری، به نحوی بارز به سمت تمرکز روی ایجاد برگشت‌پذیری در جوامع گرایش پیدا کرده است.

پس از اینکه چارچوب کلی برگشت‌پذیری توسط برونو و همکاران (۲۰۰۳) ارائه شد، مطالعات مختلفی با هدف ارزیابی مفهوم برگشت‌پذیری و واحدهای اصلی آن انجام شد. در این زمینه، مایلز و چانگ (۲۰۰۶) یک مدل مفهومی جامع احیا را ارائه کردند که در آن روابط میان جامعه، بازار، اسکان و بازسازی، شریان‌های حیاتی در محله‌های شهری تدوین شده بود.

دیویدسون و چانگان (۲۰۰۴) مدلی از فرایندهای بازسازی پس از زلزله را برای یک نیروگاه تولید برق توسعه دادند. آن‌ها یک مدل شبیه‌سازی رخداد گسسته، بر اساس داده‌های موجود، با هدف بهبود برآورد کمی فرایند بازسازی که مورد نیاز برای ارزیابی خسارات اقتصادی و شناسایی راه‌هایی برای بهبود فرایندهای ترمیم در زلزله آینده بود را ایجاد نمودند.

مایلز و چانگ (۲۰۰۶) بحث‌هایی در مورد اندازه‌گیری کمی برگشت‌پذیری بحران، بر اساس مطالعه موردی از سامانه آب شهر ممفیس، ارائه نمودند. آن‌ها مشخص کردند که مدل‌های برآورد خسارت تا چه حد می‌توانند برای اندازه‌گیری برگشت‌پذیری استفاده شوند. سیمالرو و همکاران (۲۰۰۵)، اقدام به تدوین و فرموله کردن اولین چارچوب کمی کردن برگشت‌پذیری کردند که در آن عدم قطعیت در اندازه‌گیری شدت زلزله در نظر گرفته شده است.

برگشت‌پذیری شریان‌های حیاتی، هم از لحاظ خود شریان و هم از لحاظ مشارکت در برگشت‌پذیری سایر شریان‌ها، مؤثر است. یک جامعه برگشت‌پذیر باید بتواند روی سرویس‌ها و خدماتش که توسط سازمان‌ها فراهم می‌شود حساب کند، تا بتواند برای آن‌ها برنامه‌ریزی کند، پاسخگو باشد، و از شرایط اضطرار و بحران احیا شود. برگشت‌پذیری سازمانی و جامعه دو روی یک سکه می‌باشند و سازمان‌ها و جامعه باید برای مواجهه با شرایط مذکور آماده باشند.

رضایی (۱۳۹۲) تحقیقی نظری در زمینه بررسی میزان برگشت‌پذیری در برابر سوانح طبیعی انجام داده است. وی در این پژوهش، برگشت‌پذیری را ظرفیت یک سیستم یا بخشی از آن برای جذب و بازسازی پس از وقوع حادثه‌ای مخاطره‌انگیز دانسته و معادله‌هایی چون

2 - United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR)

1- World Conference on Disaster Risk Reduction (WCDR)

کمی سازی برگشت پذیری زیرساخت های شهری و کاربرد آن در انتخاب راهکارهای مقاوم سازی لرزه ای
(مطالعه موردی: ایستگاه ۱۵ خرداد متروی شیراز)

بازگشت یا برگشت به عقب را نیز برای این مفهوم به کار برده است. برگشت پذیری، اغلب به مفهوم «بازگشت به گذشته» به کار می رود که از ریشه لاتین «Resilio» به معنای «برگشت به عقب» گرفته شده است. در جدول ۱، تعاریف مختلف برگشت پذیری ارائه شده است. تعریفی از برگشت پذیری که مورد نظر این مقاله است، مطابق تعریف سیمالارو و همکاران (۲۰۱۰) می باشد.

برگشت پذیری، که در بعضی منابع تاب آوری نیز معنی شده، در حوزه وسیعی از علوم از اکولوژی تا علوم اجتماعی، روان شناسی و اقتصاد به یک اصطلاح مهم تبدیل شده است. اجماعی از تعریف برگشت پذیری که مورد قبول همه رشته های علمی باشد وجود ندارد. واژه

جدول ۱. تعاریف مختلف برگشت پذیری

ردیف	سال	محقق	تعریف
۱	۱۹۷۳	هالینگ	برگشت پذیری معیاری از توانایی سیستم برای جذب تغییرات، در حالی که هنوز مقاومت قبلی را دارد، می باشد (هالینگ، ۱۹۷۳).
۳	۱۹۹۹	میلتی	برگشت پذیری به این معناست که جامعه قادر به تحمل سوانح طبیعی شدید بدون دریافت کمک زیاد از بیرون است، بدون آنکه دچار خسارت عمده، آسیب ها، توقف در تولید و یا کاهش کیفیت زندگی شود (میلتی، ۱۹۹۹).
۴	۲۰۰۵	آدگر و همکاران	برگشت پذیری را به صورت قدرت گروه ها و جوامع برای انطباق با فشارهای خارجی و تخریب هایی که در نتیجه تغییرات اجتماعی، سیاسی و ... به وجود می آید بیان کردند (قدرت گروه ها و جوامع برای انطباق با فشارهای خارجی و تخریب هایی است که در نتیجه تغییرات اجتماعی، سیاسی و ... به وجود می آید) (آدگر و همکاران، ۲۰۰۵)
۵	۲۰۰۱	کارپنتر و همکاران	برگشت پذیری میزان تخریب و زیانی که سیستم قادر است جذب کند بدون آنکه از حالت تعادل خارج شود (کارپنتر و همکاران، ۲۰۰۱).
۶	۲۰۰۳	بروننو و همکاران	توانایی سیستم در کاهش احتمال یک شوک در صورت رخداد (کاهش ناگهانی عملکرد) و بازیابی سریع پس از شوک (بازسازی عملکرد نرمال) برگشت پذیری است (بروننو و همکاران، ۲۰۰۳).
۷	۲۰۰۳	پلینگ	توانایی یک عامل اجتماعی برای مقابله یا هم خوانی با تنش های مخاطره آمیز (پلینگ، ۲۰۰۳)
۸	۲۰۰۴	دیویس	از برگشت پذیری به عنوان توانایی جوامع سیستم های فیزیکی، اجتماعی، سیاسی و اقتصادی، ساختمان ها و سکونتگاه های آن ها و تحمل ایستادگی در برابر خطرهای به وجود آمده از تنش ها و فشارها، که بتواند سریعاً به عقب برگشت کرده، تهدیدهای آتی را بپذیرد و یا با آن ها رویارویی کند، یاد کرد (دیویس، ۲۰۰۴).
۹	۲۰۰۶	مانینا	برگشت پذیری در برابر سوانح ظرفیت ذاتی سیستم، اجتماع یا جامعه است. این تعریف دارای نتایجی برای کاهش خطرهای سوانح و توسعه تجربه هاست (مانینا، ۲۰۰۶).
۱۰	۲۰۱۰	سیمالارو و همکاران	بازگشت به سطح قبلی عملکرد شریان حیاتی یا نزدیک به آن بعد از سوانح. با این مفهوم می توان گفت که برگشت پذیری خود تابع عملکرد سیستم و زمان است (سیمالارو و همکاران، ۲۰۱۰).

۲- To jump back

1- Bouncing back

۳. متدولوژی

۳-۱. الگوریتم پیشنهادی محاسبه برگشت پذیری
 مبنای انجام تحقیق، روش توصیفی- تحلیلی است که با توجه به کمبود اطلاعات مربوط به بحث برگشت پذیری، ابتدا بر مبنای مطالعات کتابخانه‌ای و جستجوی اینترنتی، مطالب لازم جمع‌آوری شده است. در مرحله بعد، با توجه به ابعاد برگشت‌پذیری، چارچوب‌های ارائه شده در مورد ارزیابی کیفی و کمی برگشت‌پذیری در تحقیقات مختلف گردآوری و بررسی شده و در نهایت مدلی ریاضی برای بیان کمی آن پیشنهاد شده است. سپس، با اجرای چارچوب پیشنهادی مدل در شبکه متروی شیراز پیاده‌سازی شده است. الگوریتم محاسبه برگشت‌پذیری در شکل ۱۱ ارائه شده است.

۳-۲. مؤلفه‌ها و ابعاد برگشت‌پذیری

مفهومی از برگشت‌پذیری که در این تحقیق مورد توجه است بازگشت به سطح قبلی عملکرد شریان حیاتی یا نزدیک به آن بعد از سوانح است. با این مفهوم، می‌توان گفت که برگشت‌پذیری خود تابع عملکرد سیستم و زمان است.

با تعریف بیان شده می‌توان چهار مؤلفه اساسی سرعت، استحکام، تدبیر و افزونگی را برای برگشت-پذیری در نظر گرفت. هر کدام از این مؤلفه‌ها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

سرعت: توانایی در نظر داشتن اولویت‌ها و دستیابی به اهداف در یک‌روند زمانی مناسب برای جلوگیری از خسارات و آسیب‌های بیشتر است که متوسط آن به صورت ریاضی به صورت زیر نشان داده می‌شود (سیملارو و همکاران، ۲۰۱۰):

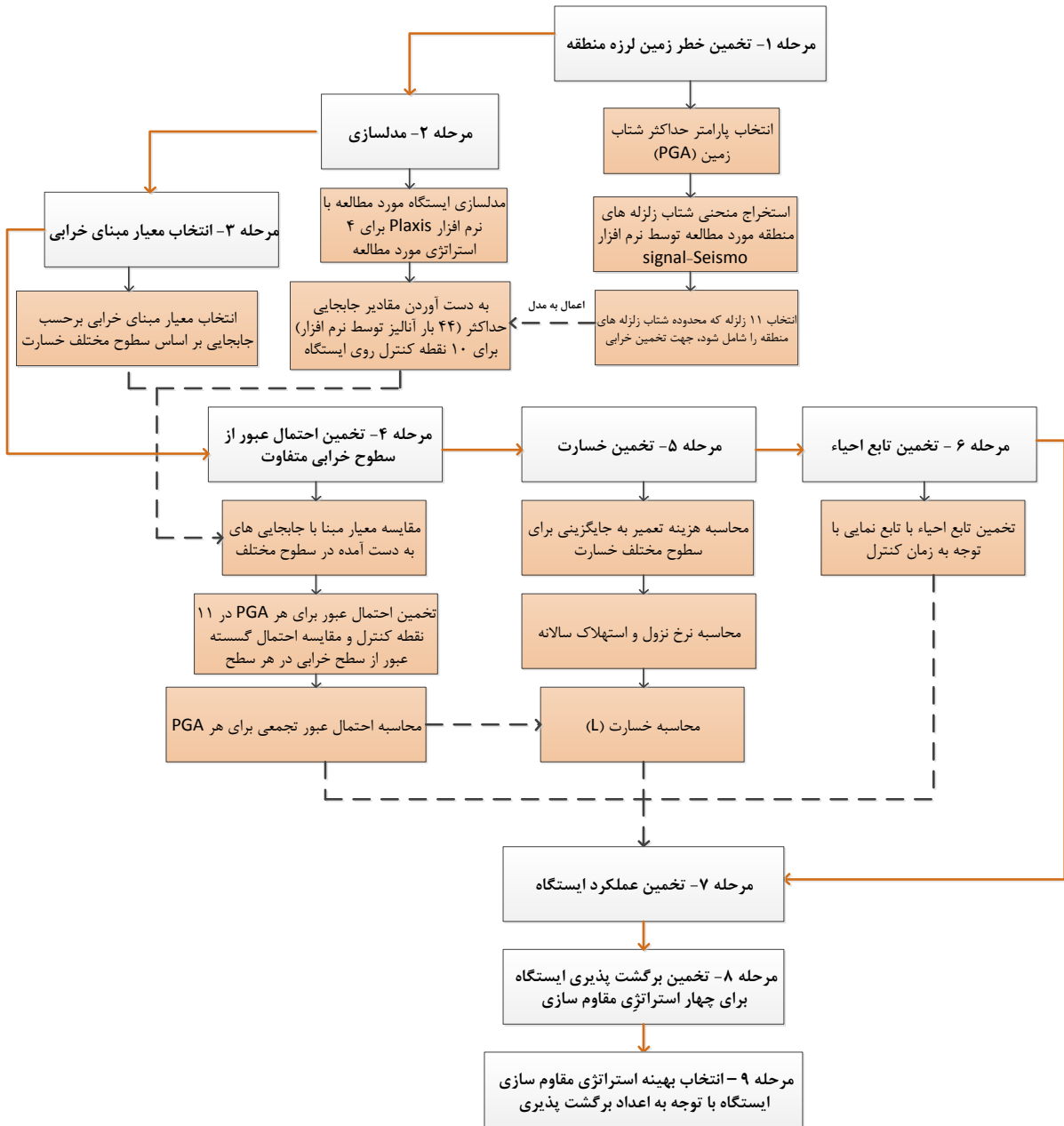
رجب پور و همکاران (۱۳۹۶) پس از بررسی روند شکل‌گیری مفهوم طراحی مبتنی بر عملکرد در دهه‌های گذشته، به مفهوم جدید طراحی مبتنی بر برگشت‌پذیری پرداخته و نشان دادند که در طراحی مبتنی بر عملکرد به پارامترهایی نظیر شدت خطر، تقاضای مهندسی، آستانه خرابی، خسارت و تصمیم به صورت متغیر تصادفی با دیدگاه احتمالاتی توجه می‌شود که بر اساس آن می‌توان ریسک تصمیمات طراحی را بر اساس توابع توزیع احتمال متغیرهای مذکور به دست آورد. آنها پس از بررسی محدودیت‌های روش فوق در ارزیابی دارایی‌ها و ارزیابی‌های اجتماعی، نسبت به ارائه فرمولاسیون تحلیلی برآورد شاخص برگشت‌پذیری پرداخته و سپس مقیاس-های مختلف فضایی و زمانی از برگشت‌پذیری اجتماعی را معرفی کرده‌اند. در تحلیل مبتنی بر برگشت‌پذیری، علاوه بر پارامترهای مهندسی، پارامترهای اقتصادی و اجتماعی هم دخالت داده می‌شوند که در آن می‌توان ابعاد مختلف فنی، نهادی، اقتصادی و اجتماعی را در کنار ویژگی‌های تاب‌آوری نظیر استحکام، افزونگی، تدبیر و چابکی لحاظ کرد. به عنوان مثال، در چارچوب PEOPLES^۱ (رنشور و همکاران، ۲۰۱۰) هفت جنبه مختلف تاب‌آوری لحاظ شده است.

در تحقیق حاضر، در روش پیشنهادی محاسبه کمی برگشت‌پذیری، علاوه بر پارامترهای مهندسی نظیر شدت زلزله، تقاضای لرزه‌ای آستانه ورود به سطح خرابی و منحنی‌های خرابی، پارامترهای اقتصادی- اجتماعی نظیر نسبت هزینه تعمیر به جایگزینی برای سطوح مختلف خرابی، نرخ تورم سالانه، نرخ استهلاک، نحوه تخصیص منابع و زمان احیا لحاظ شده است.

governmental services, Physical infrastructure, Lifestyle and community competence, Economic development, and Social-cultural capital.

^۱ - Population and demographics, Environmental/Ecosystem, Organized

کمی سازی برگشت پذیری زیرساخت های شهری و کاربرد آن در انتخاب راهکارهای مقاوم سازی لرزه ای
(مطالعه موردی: ایستگاه ۱۵ خرداد متروی شیراز)



شکل ۱. فلوچارت الگوریتم پیشنهادی برای محاسبه برگشت پذیری

عملکرد کمتری در برابر زلزله خواهد داشت. عملکرد با استفاده از تابع خسارت توسط رابطه زیر مشخص می شود:

$$(2) \quad \text{عملکرد} = 1 - \text{خسارت}$$

$$(1) \quad \text{خسارت} = \frac{\text{زمان احیا}}{\text{سرعت}}$$

استحکام: توانایی سیستم یا اجزای آن برای مقاومت در برابر بار اعمال شده بدون کاهش چشمگیر یا از دست دادن عملکرد است. هر اندازه که استحکام سیستم بیشتر باشد میزان خسارت آن کمتر خواهد بود و کاهش

۱- فنی (کالبدی- محیطی): توانایی فیزیکی سیستم که هنگام بحران بتواند عملکرد در سطوح قابل قبول داشته باشد.

۲- سازمانی (نهادی): ظرفیت سازمان، به خصوص سازمان‌هایی که شریان‌های حیاتی و زیرساخت‌ها را اداره می‌کنند، در ارتباط با عملکرد طوری که بتواند به گونه‌ای تصمیم‌گیری و عمل کند تا به سمت احیا پیش برود.

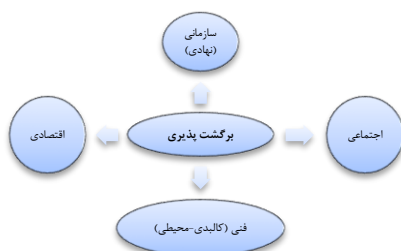
۳- اجتماعی: شامل اقدامات خاص جهت کاهش اثرهای اجتماعی سانحه و نیز توانایی در کنترل شرایط در حالتی که شریان‌های حیاتی در اثر سانحه خسارت دیده شده باشد.

۴- اقتصادی: توانایی کاهش خسارات اقتصادی مستقیم و غیرمستقیم ناشی از سانحه.

ابعاد مختلف برگشت‌پذیری در ارتباط با یکدیگر در شکل ۳ ارائه شده است. در مقاله حاضر، بُعد کالبدی- محیطی با دیدگاه خسارات وارد بر زیرساخت‌ها بررسی شده است.

۳-۳. کمی‌سازی مفهوم برگشت‌پذیری

بیان کمی تعریف برون‌تو از برگشت‌پذیری (R)، به عنوان تابع تعیین‌کننده ظرفیت برای نگهداشت سطح عملکرد و کارایی برای ساختمان مشخص، شریان‌های حیاتی یا جامعه در طول یک دوره مشخص تحت عنوان زمان کنترل بر اساس رابطه زیر است (سیمارو و همکاران، ۲۰۱۰):



شکل ۳. ابعاد مختلف برگشت‌پذیری

$$R = \int_{t_{OE}}^{t_{OE}+t_{LC}} \frac{Q(t)}{T_{LC}} dt \quad (3)$$

در این رابطه، خسارت با استفاده از احتمال شکست و روابطی که در ادامه در بخش کمی‌سازی مفهوم برگشت-پذیری ارائه خواهد شد، قابل اندازه‌گیری است.

تدبیر: توانایی تشخیص مشکلات، تعیین اولویت‌ها و تجهیز کردن منابع، زمانی که خطر برخی اجزای سیستم را تهدید می‌کند.

افزونگی: داشتن مسیرهای مختلف در سیستم به طوری که سیستم بتواند با وجود شکست برخی اجزا، همچنان در برابر بارهای وارده مقاومت کند و عملکرد خود را از دست ندهد.

در شکل ۲، برگشت‌پذیری سیستم به همراه مؤلفه‌های آن به صورت طرح‌واره نشان داده شده است. لازم به ذکر است که مؤلفه‌های تدبیر و افزونگی در مشخصه‌های سیستم و نیز زمان کنترل نهفته است و توسط کارشناسان و تصمیم‌گیران تعیین می‌شود. منظور از زمان شروع بحران در این نمودار، زمان کاهش عملکرد سیستم می‌باشد که حد پایینی انتگرال در رابطه (۳) می‌باشد.



شکل ۲. نمودار برگشت‌پذیری سیستم (سیمارو و همکاران، ۲۰۱۰)

لازم به ذکر است که فرم منحنی نشان داده شده در شکل ۲ بستگی به تابع احیا دارد. روند احیا بعد از بحران اغلب به توان و استحکام، آمادگی منابع انسانی و قوانین جامعه بستگی دارد و ممکن است فرم‌های متفاوتی به خود بگیرد.

ابعاد برگشت‌پذیری شامل بُعد فنی، سازمانی، اجتماعی و اقتصادی است که به صورت اجمالی در ادامه معرفی شده‌اند:

r_{limit} ظرفیت لرزه ای متناسب با سطح خسارت مشخص
(معیار آستانه مجاز) و I شدت زلزله است.

در حالت کلی، برای تابع احیا، f_{Rec} سه فرم در نظر گرفته می شود:

فرم خطی: وقتی استفاده می شود که اطلاعات در باره
آمادگی و منابع موجود و پاسخ جامعه در دسترس نیست.
فرم نمایی: هنگامی کاربرد دارد که سرعت احیا و پاسخ
جامعه در ابتدا به علت منابع زیاد در اختیار بلافاصله پس
از بحران زیاد است. ولی سرعت احیا در روند نزدیک به
انها به دلیل کاهش منابع کاهش می یابد.

فرم مثلثاتی: زمانی که پاسخ جامعه با کمبود یا محدودیت
زمان و منابع مواجه باشد مورد استفاده قرار می گیرد.

در مقاله حاضر، فرم نمایی در نظر گرفته شده است
زیرا پیش بینی می شود پاسخ بعد از زلزله در ابتدا ناشی از
منابع در دسترس، سرعت بیشتری داشته باشد. ولی با
گذشت زمان، سرعت احیا به دلیل کاهش منابع با توجه
به تجارب بازسازی های گذشته کاهش یابد.

۴. مطالعه موردی: ایستگاه ۱۵ خرداد متروی

شیراز

۴-۱. محدوده مورد مطالعه و سناریوهای لرزه ای

کریدور خط ۲ قطار شهری شیراز، شامل ۱۳ ایستگاه
می باشد. این خط از میدان گلستان شروع می شود و پس
از عبور از فلکه گاز و میدان ستاد، در امتداد خیابان
انقلاب به سمت میدان بسیج و از آنجا در امتداد بلوار
عدالت به سمت میانرود و میدان شکوفه ادامه می یابد.
ایستگاه ۱۵ خرداد در جنوب میدان ۱۵ خرداد، در خیابان
انقلاب، در راستای شمالی- جنوبی می باشد. در این
بخش از مطالعه، به بررسی ایستگاه ۱۵ خرداد پرداخته و
شرایط و داده های مورد استفاده در تحلیل تشریح خواهند
شد. موقعیت ایستگاه مورد مطالعه در شکل ۴ نشان داده
شده است.

که در آن عملکرد شریان حیاتی، T_{LC} زمان کنترل
سیستم و t_{OE} زمان شروع بحران به همراه کاهش عملکرد
است. عملکرد با استفاده از تابع خسارت و تابع احیا
به صورت زیر تعریف می شود:

$$Q(t) = (1 - L)(f_{Rec}) \quad (۴)$$

در این رابطه، L تابع خسارت و f_{Rec} تابع احیا می باشد.
در این مقاله، فقط خسارت مستقیم اقتصادی در نظر
گرفته شده که توسط رابطه زیر محاسبه شده است:

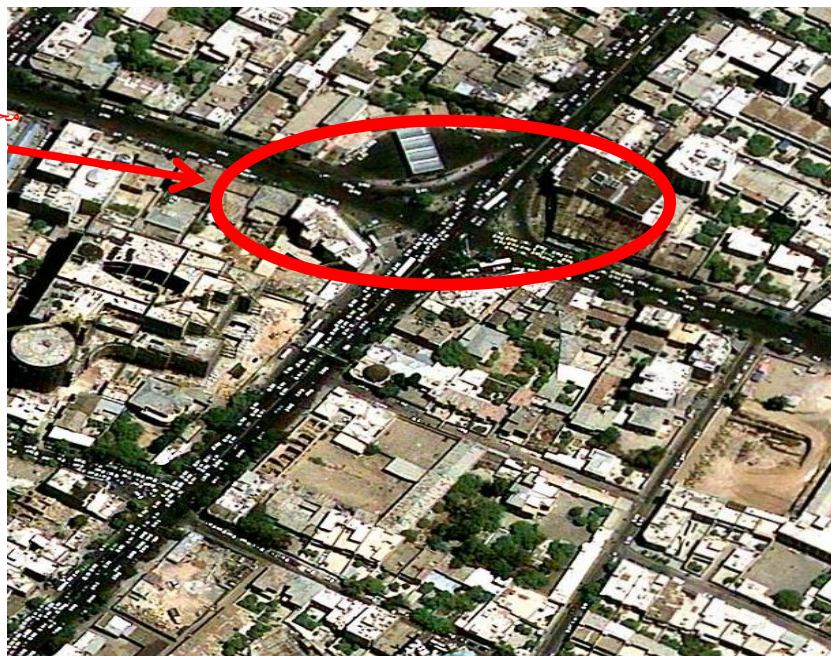
$$L = \sum_{j=1}^n \left[\frac{C_{sj}}{I_s} \cdot \prod_{T=1}^{T_i} \frac{(1 + \delta_T)}{(1 + r_T)} \times P_j \left[\bigcup_{i=1}^n (R_i \geq r_{limit}) / I \right] \right] \quad (۵)$$

در این رابطه، L خسارت مستقیم اقتصادی، j سطوح
خرابی است، که برای این مقاله چهار سطح خرابی سبک،
متوسط، گسترده و کامل در نظر گرفته شده، $\frac{C_{sj}}{I_s}$ نسبت
هزینه تعمیر مربوط به سطح خرابی j ام به هزینه
جایگزینی است (این عدد با توجه به مطالعات انجام شده
در متروی شیراز (پاسیلو، ۱۳۸۹) و با توجه به هزینه های
ساخت کامل و هزینه های تعمیر یا جایگزینی، برای
سطوح خسارت کم تا کامل به ترتیب برابر $0/1$ ، $0/3$ ، $0/7$
و $0/9$ است (FEMA، ۱۹۹۹). δ_i نرخ استهلاک سالانه
است. هزینه استهلاک به عنوان با اهمیت ترین هزینه مرتبط
با اموال، ماشین آلات و تجهیزات تلقی می گردد. با توجه
به مطالعات انجام شده، نرخ استهلاک سالانه در متروی
شیراز 4% در نظر گرفته شده است. r_i نرخ تورم سالانه
است که برای سال انجام تحقیق $30/6$ درصد در نظر
گرفته شده است.

$P_j \left[\bigcup_{i=1}^n ((R_j \geq r_{limit}) / I) \right]$ احتمال عبور از سطح
خرابی j ام به شرط وقوع زلزله با شدت I است که با توجه
به مدل سازی و مقایسه پارامتر تقاضای لرزه ای R_j با
معیارهای آستانه مجاز (ظرفیت) r_{limit} و تشکیل احتمال
شکست به دست می آید. n تعداد اعضای موجود در
سیستم مورد بررسی، R_i پارامتر تقاضای لرزه ای المان i

کمی سازی برگشت پذیری زیرساخت های شهری و کاربرد آن در انتخاب راهکارهای مقاوم سازی لرزه ای
(مطالعه موردی: ایستگاه ۱۵ خرداد متروی شیراز)

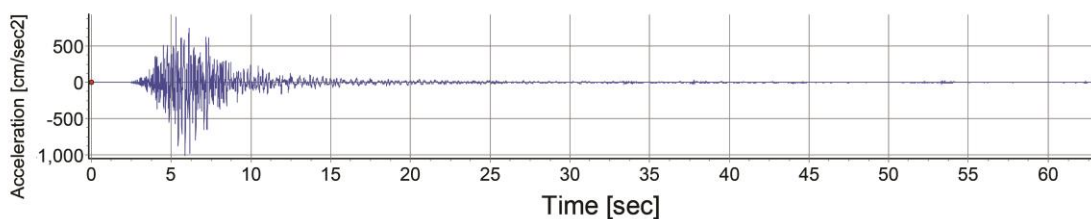
محدوده مورد مطالعه



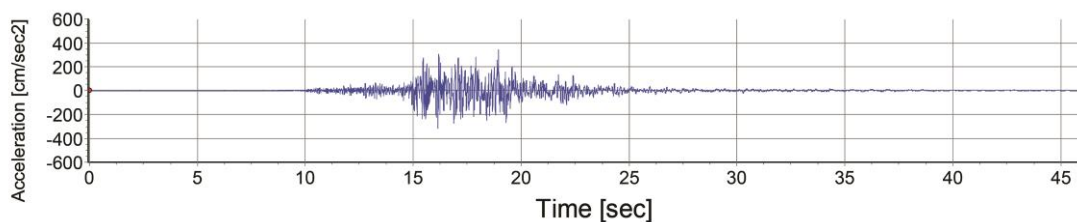
شکل ۴. تصویر هوایی از موقعیت ایستگاه ۱۵ خرداد (پاسیلو، ۱۳۸۹)

نمودارهای شتاب مربوط به زلزله های نامبرده از سایت مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی^۱ برداشت شده که با استفاده از نرم افزار Seismo-signal استخراج شده، در شکل های ۵ و ۶ نشان داده شده است.

در مقاله حاضر، دو زلزله مطابق زلزله های گذشته منطقه در نظر گرفته شده است. این زلزله ها مطابق شتاب نگاشت های زلزله های زنجیران واقع در ایستگاه زنجیران $M_s=5/7$ در سال ۱۳۷۳ و زلزله کره بس $M_w=6/1$ واقع در ایستگاه بالاده در سال ۱۳۷۸ استان فارس می باشند.



شکل ۵. شتاب نگاشت مربوط به زلزله زنجیران



شکل ۶. شتاب نگاشت مربوط به زلزله کره بس

^۱- <http://smd.bhrc.ac.ir/portal>

پارامترهای لرزه خیزی شهر شیراز به شرح زیر فرض شده است (توکلی و غفوری آشتیانی، ۱۹۹۹؛ امیری و همکاران، ۲۰۰۸): پارامتر β ($\beta=2/12$)، کمترین بزرگای $M_{min}=7/2$ ، نرخ فزونی سالانه زلزله^۱ با بزرگای ۴ یا بزرگتر از آن ($\lambda_{min}=0/9$) و بزرگای بیشینه ($M_{max}=7/2$). طبق استاندارد ۲۸۰۰، زلزله طرح با دوره بازگشت ۴۷۵ سال زلزله ای است که احتمال فراگذشت آن در ۵۰ سال ۱۰٪ باشد (مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۳۹۳). زلزله طرح در دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمان های موجود سطح خطر ۱ نامیده می شود. در دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمان های موجود، سطح خطر ۲ بر اساس ۲٪ احتمال رویداد در ۵۰ سال که معادل دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال است تعریف می شود. دوره بازگشت T_R و نرخ فزونی سالانه λ برای زلزله با بزرگای M بر حسب احتمال وقوع زلزله q در طول عمر سازه n با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود (معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی، ۱۳۹۲):

$$T_R = 1 / (1 - \sqrt[n]{1 - q}) = 1 / \lambda \quad (6)$$

با استفاده از رابطه کیکو (کیکو، ۲۰۰۰) و با توجه به پارامترهای لرزه خیزی مفروض و رابطه (۶)، زلزله با بزرگای $6/8$ و $7/1$ به ترتیب دارای دوره بازگشت ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال و با احتمال فزونی ۱۰ و ۲ درصد در طول ۵۰ سال می باشد. بر اساس مطالعات تحلیل خطر لرزه ای شهر شیراز، نواحی اطراف آن حداکثر شتاب ممکن در سنگ بستر برای دوره های بازگشت ۴۷۵ سال بین g و $0/18$ است (امیری و همکاران، ۲۰۰۸).

بر اساس استاندارد ۲۸۰۰، برای تحلیل بر اساس تاریخچه زمانی، حداقل سه زوج شتاب نگاشت متعلق به سه زلزله مختلف ثبت شده لازم است (مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۳۹۳). در نشریه ۳۶۰ معاونت

برنامه ریزی و نظارت راهبردی با عنوان "دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمان های موجود" نیز در روش تحلیل تاریخچه زمانی، تحلیل پاسخ مدل سازه تحت تحریک شتاب زمین را بر اساس حداقل سه شتاب نگاشت لازم می داند (معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی، ۱۳۹۲). طبق ATC40، در طراحی بر اساس نقطه عملکرد برای تحلیل های تاریخچه زمانی باید یک مجموعه از رکوردهای سایت دارای حداقل ده جفت شتاب نگاشت برای میدان دور (دارای حداقل ۱۰ کیلومتر فاصله از محل گسیختگی گسل) و حداقل ده جفت شتاب نگاشت برای میدان نزدیک (در محدوده ۵ کیلومتری از محل گسیختگی گسل) در نظر گرفته شود (ATC، ۱۹۹۶). در مرجع توواشیراپرن (۲۰۰۴) توصیه شده است که در استخراج و ترسیم منحنی های خسارت، حداقل ۱۰ سطح پارامتر زلزله در نظر گرفته شود. با توجه به اینکه رکورد شتاب زلزله های بیشتری در منطقه در دسترس نبود و با توجه به آنکه برای به دست آوردن احتمال شکست احتیاج به تعداد بیشتری PGA بود، بر اساس توضیحات فوق، ۱۱ شتاب نگاشت زلزله های دیگر دارای بزرگای و حداکثر شتاب زمین در محدوده زلزله طرح و کوچکتر از آن مطابق جدول ۲ از سایر نقاط انتخاب شد. اطلاعات این زلزله ها با توجه به اطلاعات سازمان زمین شناسی ایالات متحده آمریکا^۲ استخراج شده است. با توجه به فاصله گسل های موجود در منطقه تا سایت مورد مطالعه، فقط تحلیل زلزله های میدان دور در نظر گرفته شده است. در انتخاب این شتاب نگاشت ها شرایط لازم مطابق ATC40 رعایت شده است و تنها شرط مربوط به حداقل بزرگای رعایت نشده است. زیرا هدف از آنها طراحی سازه نیست؛ بلکه بررسی آسیب پذیری سازه است که نیازمند پوشش دادن دامنه ممکن سطح پارامتر

^۲ - www.usgs.gov

^۱ - Annual Exceedance Rate

دیگر استفاده شود. رکوردهای مورد استفاده دارای شرایط ساختگاهی خاک سخت یا متوسط بوده و ایستگاه دامنه آزاد (یا در طبقه اول ساختمان‌های کوچک) هستند.

زلزله می‌باشد. با توجه به اینکه در این مقاله تأکید بر معرفی الگوریتم محاسبه کمی برگشت‌پذیری و کاربرد آن می‌باشد، ترجیح داده شد که در غیاب دسترسی به تعداد کافی شتاب‌نگاشت منطقه به‌جای ساخت شتاب‌نگاشت-های شبیه‌سازی شده، از رکوردهای ثبت شده در نقاط

جدول ۲. مشخصات زلزله‌های انتخاب‌شده در محدوده شتاب زلزله طرح

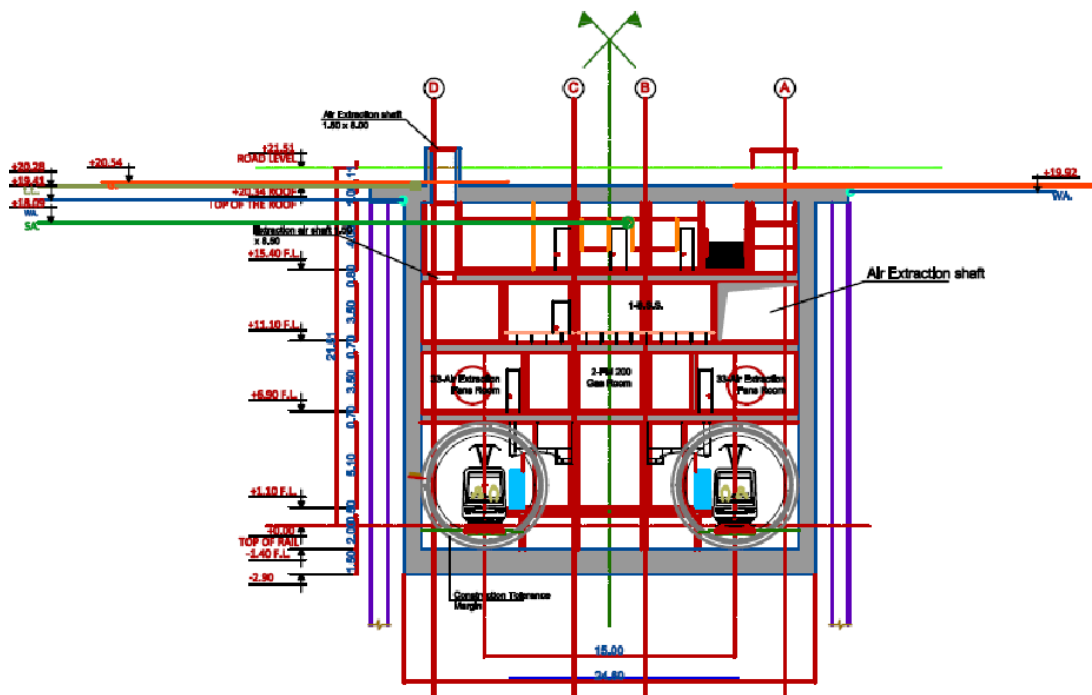
ردیف	زلزله	ایستگاه	زمان	حداکثر شتاب زمین (cm/s ²)	بزرگا
۱	Nisqually, WA	WA: Olympia; DNR Building	۲۸ ۰۲ ۲۰۰۱	۱۴۵/۹	۶/۸
۲	Kiholo Bay, Hawaii	Mauna Kea State Park	۱۵ ۱۰ ۲۰۰۶	۳۱۰	۶/۷
۳	Upland	0656	۲۸ ۰۲ ۱۹۹۰	۲۳۹/۸۷۴	۵/۴
۴	Hollister, CA	Airport, Bldg 3	۰۷ ۰۱ ۲۰۰۳	۶۴/۵	۴/۳
۵	Parkfield, CA	Fresno; NSMP USGS Office	۲۸ ۰۹ ۲۰۰۴	۴۱/۵۸	۶/۰
۶	Elmore Ranch	Parachute Test Site, Ctrl Bldg	۲۴ ۱۱ ۱۹۸۷	۹۳/۴۰۷	۶/۵
۷	Pahala, Hawaii	Ka'u Hospital	۱۸ ۰۱ ۲۰۱۰	۱۱/۹۳	۴/۳
۸	Kilauea Summit	Volc Nat Pk, HVO Svc	۲۴ ۰۵ ۲۰۰۷	۲۲/۸۷	۶/۶
۹	Nisqually, WA	Howard Hanson, lft abu	۲۸ ۰۲ ۲۰۰۱	۱۰۵/۹	۶/۸
۱۰	Nisqually, WA	Howard Hanson, toe	۲۸ ۰۲ ۲۰۰۱	۵۹/۱	۶/۸
۱۱	Offshore, N. CA	Ferndale; Centerville B&B	۱۵ ۰۶ ۲۰۰۵	۱۶/۲	۷/۱

۷، مشخصات هندسی مقطع مدل‌سازی شده در شکل ۸، محدوده مدل برحسب مختصات در جدول ۳ و مشخصات لایه‌های خاک در جدول ۴ مشاهده می‌شود.

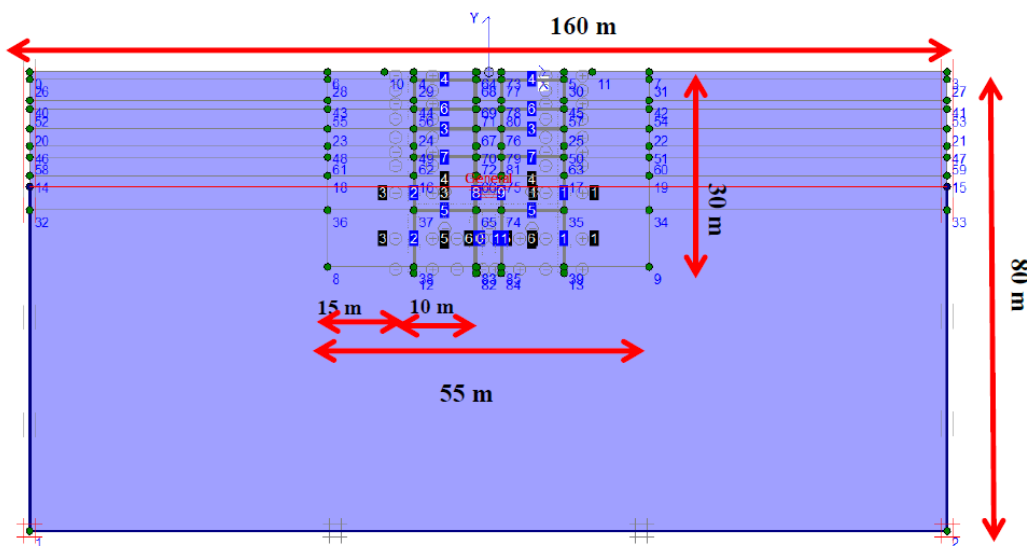
۲-۴. مدل‌سازی و تحلیل نتایج

سازه ایستگاه به روش عددی توسط نرم‌افزار Plaxis 8.6 مدل شده است. مقطعی از ایستگاه مورد مطالعه در شکل

کمی سازی برگشت پذیری زیرساخت های شهری و کاربرد آن در انتخاب راهکارهای مقاوم سازی لرزه ای
(مطالعه موردی: ایستگاه ۱۵ خرداد متروی شیراز)



شکل ۷. مقطعی از ایستگاه متروی ۱۵ خرداد- شیراز



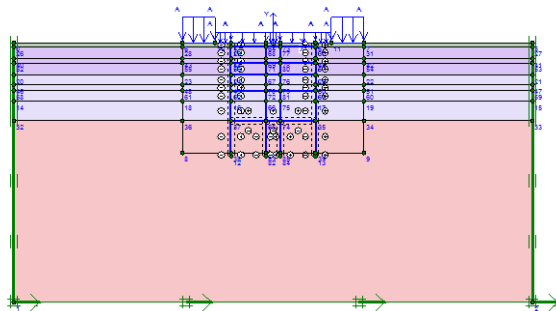
شکل ۸. مدل اولیه ایستگاه مورد مطالعه در نرم افزار

جدول ۳. مختصات محدوده مدل ایستگاه ۱۵ خرداد (متر)

مختصات	min.	max.
X	-۸۰/۰۰۰	۸۰/۰۰۰
Y	-۸۰/۰۰۰	۰/۰۰۰

جدول ۴. مشخصات لایه‌های خاک مورد استفاده در مدل‌سازی (پاسیلو، ۱۳۸۹)

پارامتر تناوبی (kN/m ²)		پارامتر سرعت (m/s)		پارامتر مقاومت			پارامتر سختی		پارامتر نفوذپذیری (m/day)		پارامتر وزن حجمی (kN/m ³)		لایه خاک / پارامتر خاک
E_{OED}	G_{ref}	V_p	V_s	k_0	ϕ	C_{ref} kN/m ²	ν	E_{ref} kN/m ²	k_y	k_x	γ_{sat}	γ_{unsat}	
3.793E4	3448.276	147.9	44.59	0	27	0.01	0.45	1E4	8.6E-3	8.6E-3	20	17	خاک دستی (۰-۲ متر)
5.114E4	1.563E4	171.7	94.91	0.913	27	10	0.28	4E4	8.6E-3	8.6E-3	20	17	لایه ۲ (۲-۱۰ متر)
7.031E4	2.148E4	201.3	111.3	0.913	27	20	0.28	5.5E4	8.6E-3	8.6E-3	20	17	لایه ۳ خارج محدوده ایستگاه (۱۰-۲۵ متر)
8.025E4	1.825E4	215.1	103.3	0.93	8	75	0.35	5E4	8.6E-3	8.6E-3	20	17	لایه ۴ زیر ایستگاه (۲۵-۳۵ متر)
8.025E4	1.825E4	215.1	103.3	0.93	8	75	0.35	5E4	8.6E-3	8.6E-3	20	17	لایه ۵ (۲۵-۸۰ متر)



شکل ۹. مدل سازه ایستگاه قبل از اعمال بار زلزله و خالی کردن داخل ایستگاه

در گام بعدی، مش‌بندی انجام گردید. در مرحله بعد از مش‌بندی باید شرایط اولیه تعریف شود. نحوه مش-بندی مدل در شکل ۱۰ آمده است. مرزهای جاذب انرژی مورد استفاده در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. مرزهای مختلفی توسط محققین مختلف برای انجام تحلیل‌های دینامیک پیشنهاد شده است. در این تحقیق از مرز لزوج لایزمر برای مدل کردن مرز جاذب انرژی استفاده

در ابتدا، صفحه جنرال نرم‌افزار المان ۱۵ گره‌ای انتخاب شده و زمان پیش‌فرض از روز به ثانیه تغییر داده شد. سپس، محدوده مدل با مختصات جدول ۳ معرفی گردید.

مدل ایستگاه شامل تیرها و ستون‌ها با المان PLATE تعریف شده است. مدل توسط قید استاندارد استاتیک مقید شده است و جهت مدل نمودن دینامیک قید زلزله، میراکننده‌هایی در دیواره‌های سمت چپ و راست و زیر مدل فعال شده است. سپس، بار وارده از جانب ساختمان‌ها و سربار ایستگاه روی سطح زمین اعمال شده است. مدل ایستگاه قبل از اعمال بار زلزله در شکل ۹ قابل مشاهده می‌باشد.

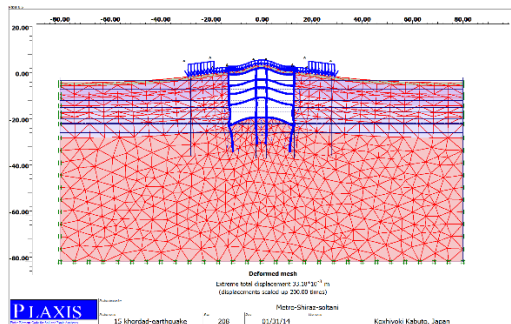
کمی سازی برگشت پذیری زیرساخت های شهری و کاربرد آن در انتخاب راهکارهای مقاوم سازی لرزه ای
(مطالعه موردی: ایستگاه ۱۵ خرداد متروی شیراز)

پس از تحلیل اولیه شرایط اولیه، با استفاده از ماژول تحلیل، فازهای تحلیل انجام شد. قبل از شروع محاسبات می بایست نقاط کنترل تعریف گردند. در غیر این صورت، در صورت تغییر و یا اضافه نمودن این نقاط می بایست تحلیل را از ابتدا صورت گیرد.

از آنجا که این نرم افزار به شبیه سازی دوبعدی می پردازد، لذا فرض شده که مقطع میانی ایستگاه تحت مؤلفه شتاب به صورت عمودی به آن (بدترین حالت ممکن) تحت بار زلزله قرار می گیرد. این شرایط هرچه به سمت دو سمت خارج ایستگاه بهبود می یابد. این روش از روش های سنتی شبه استاتیک بار- افزون و مونونوبه- اوکابه دقیق تر بوده، ولی نسبت به مدل سازی های سه بعدی دقت کمتری دارد.

خروجی های مورد استفاده، نمودارهای جابجایی- زمان^۱ می باشند. از آنجایی که این نمودارها در شدت های مختلف زلزله به دست آمده اند، جهت استخراج احتمال شکست کارا می باشند.

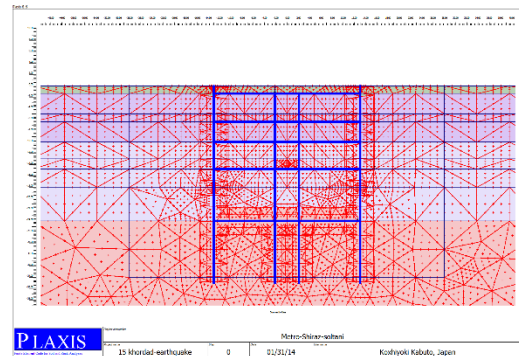
در شکل ۱۲، تغییر شکل ایستگاه بعد از اعمال بار زلزله مشاهده می شود.



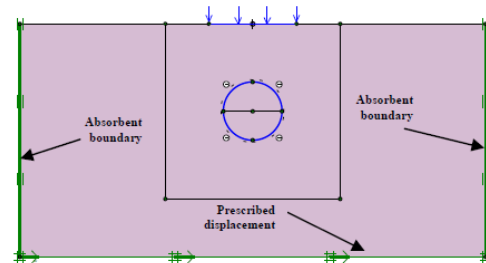
شکل ۱۲. تغییر شکل ایستگاه بعد از خالی کردن آن از خاک و اعمال بار زلزله (WA, Nisqually)

تغییر مکان نسبی آستانه ورود به سطوح خرابی براساس جدول ۵ برای جابجایی نسبی حداکثر محتمل سازه در نظر گرفته شده است.

شده است. در مدل سازی های صورت گرفته، میرایی برابر با ۰.۵٪ در نظر گرفته شده است. همانگونه که در بالا توضیح داده شد، بر اساس مطالعات خاص لرزه خیزی محل و با در نظر گرفتن شرایط لازم، از رکوردهای مختلف شتاب نگاشت برای تحلیل و طراحی در سطوح گوناگون انتخاب و استفاده شده است.



شکل ۱۰. نمایش مرزهای جاذب مورد استفاده در مدل سازی



شکل ۱۱. نمایش مرزهای جاذب مورد استفاده در مدل سازی

لازم به ذکر است که هر گونه تغییر در هندسه مدل مستلزم مش بندی مجدد است و حل شرایط اولیه و گام- های آتی به طور مجدد می باشد. بعد از اعمال شرایط مرزی و بارگذاری ها، نوبت شبیه سازی اولیه و لحاظ نمودن نیروهای هیدرولیک ناشی از آب های زیرزمینی و نیز نیروهای ثقلی ناشی از وزن خاک روی مدل می باشد. بدین منظور، در ابتدا فرض شد که داخل ایستگاه خاک وجود دارد و در گام های بعدی آن خاک حذف گردید.

1_ Displacement-time history

جدول ۵. معیار سطوح خرابی مرتبط با تغییر مکان نسبی (FEMA, ۱۹۹۹)

سطح خرابی	معیار تغییر مکان نسبی (δ)
S کم	۰/۰۰۵
M متوسط	۰/۰۰۹
E گسترده	۰/۰۲۳
C کامل	۰/۰۶

جدول ۶. استراتژی‌های مقاوم‌سازی به کار رفته در این مقاله به همراه شماره اختصاری

نام اختصاری	استراتژی‌های مقاوم‌سازی
استراتژی ۱	بدون راهکار مقاوم‌سازی استفاده از لایه رسوبات خاکی و
استراتژی ۲	دانه‌ای بین سطح حفاری و جدار تونل
استراتژی ۳	ایزولاسیون لرزه‌ای مقطع ایستگاه
استراتژی ۴	تعبیه اتصالات جابجایی

با توجه به اعداد جابجایی به دست آمده از تحلیل و مقایسه تغییر مکان نسبی با معیارهای جدول ۵ برای هر سطح خسارت، نقاط احتمال شکست گسسته و تجمعی به دست آمده است. به این منظور، ابتدا میزان جابجایی در ۱۰ نقطه اطراف ایستگاه برای ۱۱ زلزله انتخاب شده برای هر استراتژی به دست آمده است.

در مرحله بعد، با توجه به مقایسه تغییر مکان حداکثر در اثر زلزله و معیار خرابی بر حسب جابجایی نسبی (جدول ۵) احتمال عبور گسسته و تجمعی محاسبه شده است. منحنی احتمال تجمعی احتمال خرابی مربوط به سطوح خسارت متفاوت در استراتژی ۱ برای PGA های متفاوت در شکل ۱۳ نشان داده شده است. این شکل مربوط به حالت شرایط فعلی (استراتژی ۱) است و همین روند برای سه استراتژی مقاوم‌سازی انجام شده است. استراتژی‌های مقاوم‌سازی در جدول ۶ ارائه شده‌اند. از این پس، در ادامه مقاله، این حالت‌ها مطابق جدول ۶ با نام اختصاری استراتژی یاد می‌شوند.

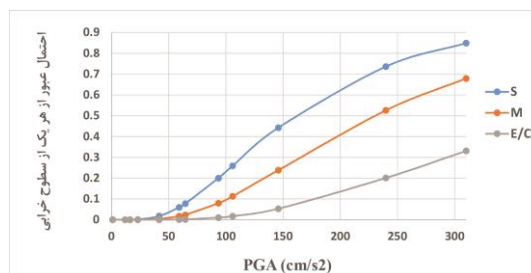
تحلیل برای چهار استراتژی مذکور صورت گرفته است. در نهایت، مقادیر جابجایی برای چهار استراتژی و ۱۱ زلزله مفروض محاسبه شده است و با مقایسه مقدار آنها با معیار خرابی، احتمال عبور از سطوح خرابی تعیین گشته است.

لازم به ذکر است که با توجه به اعداد جابجایی به دست آمده از تحلیل و معیارها، احتمال عبور از سطح خسارت گسترده و کامل با هم در نظر گرفته شده است. همانطور که در بالا ذکر شد، احتمال خرابی تجمعی سطوح مختلف خسارت برای استراتژی ۱ در شکل ۱۳ ارائه شده است. برای سایر استراتژی‌ها نیز محاسبه احتمال خرابی برای سطوح مختلف خرابی انجام گرفته است.

با توجه به مطالعات انجام شده در خصوص متروی شیراز، زمان احیا برابر ۲۹۷ روز در نظر گرفته شده است. رابطه نمایی مورد استفاده برای تابع احیا عبارت است از:

$$f_{rec}(t) = a \cdot \exp\left(-b \left(\frac{t - t_{OE}}{T_{LC}}\right)\right) \quad (7)$$

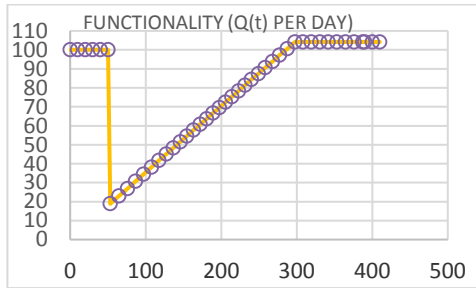
که T_{LC} زمان کنترل سیستم، t_{OE} زمان شروع بحران و a و b پارامترهای رابطه هستند. پارامترهای a و b در این رابطه با توجه به روابط تجربی مشابه در نظر گرفته شده‌اند. فرم تابع احیا به کار رفته در شکل ۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۱۳. منحنی تجمعی احتمال خرابی مربوط به سطوح خسارت متفاوت در استراتژی ۱

کمی سازی برگشت پذیری زیرساخت های شهری و کاربرد آن در انتخاب راهکارهای مقاوم سازی لرزه ای
(مطالعه موردی: ایستگاه ۱۵ خرداد متروی شیراز)

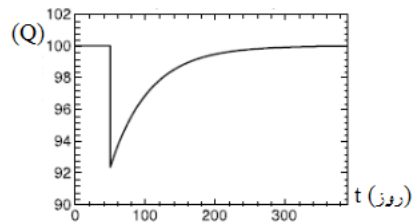
نمونه برای زلزله با $PGA=310$ سانتی متر بر مجذور ثانیه و حالت استراتژی ۱ در شکل ۱۵ نمایش داده شده است.



شکل ۱۵. نمودار درصد عملکرد ایستگاه در طول

زمان (روز) برای استراتژی ۱ ($PGA=310$) سانتی متر بر مجذور ثانیه)

با انتگرال گیری از نمودارهای عملکرد- زمان برای ترکیبات مختلف سناریوی زلزله و استراتژی های مقاوم سازی، برگشت پذیری استراتژی های مختلف مقاوم سازی به صورت عددی قابل بیان است (شکل ۱۶). در این شکل، برگشت پذیری به دست آمده برای چهار استراتژی مقاوم سازی، برای زلزله های سناریو با حداکثر شتاب های مختلف زمین ارائه شده است. محور قائم نشان دهنده مقادیر برگشت پذیری برای چهار استراتژی و محور افقی شتاب حداکثر زمین در اثر زلزله است.



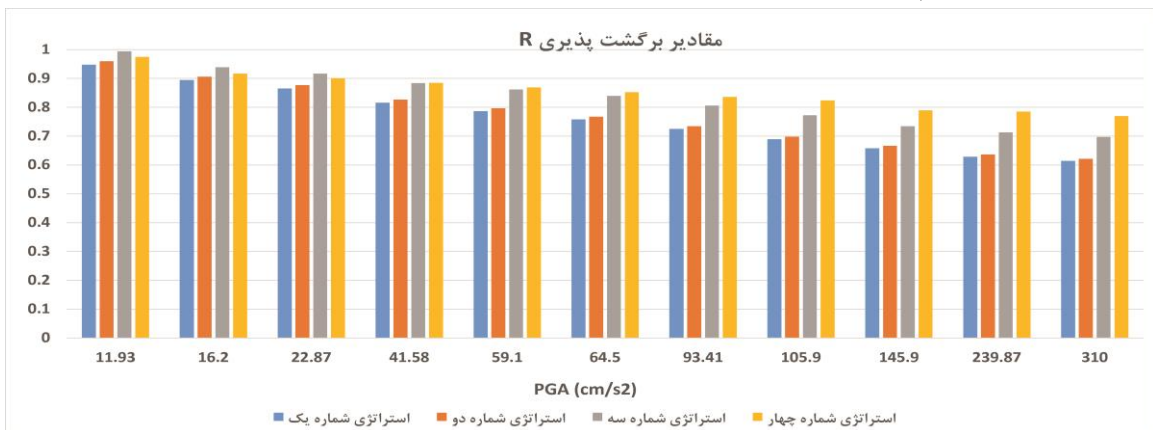
شکل ۱۴. فرم کلی تابع احیا به صورت نمایی برای عدم عملکرد اولیه و زمان احیای ۲۹۷ روز

مقادیر پارامترهای مورد استفاده در رابطه (۵) برای ایستگاه متروی مورد مطالعه در جدول ۷ آمده است. خسارت با توجه به رابطه (۵) و جدول ۷ قابل محاسبه است. عملکرد سیستم با توجه به خسارت L محاسبه شده و تابع احیای ارائه شده در شکل ۱۴ با استفاده از رابطه (۴) قابل محاسبه شده است.

جدول ۷. مقادیر نرخ های ثابت برای ایستگاه متروی مورد مطالعه

سطح خسارت	$\frac{C_{sj}}{I_s}$	δ_i (%)	r_i (%)
کم	۰/۱	۴	۳۰/۶
متوسط	۰/۳	۴	۳۰/۶
گسترده	۰/۷	۴	۳۰/۶

با توجه به توضیحات فوق، نمودار عملکرد سیستم برای چهار استراتژی مقاوم سازی محاسبه شده و به عنوان



شکل ۱۶. مقادیر برگشت پذیری محاسبه شده در چهار استراتژی

۵. جمع بندی

روش ارائه شده در این تحقیق جهت انتخاب بهینه استراتژی‌های مقاوم‌سازی شریان‌های حیاتی می‌تواند علاوه بر تخمینی از میزان آسیب‌پذیری آن‌ها، میزان برگشت‌پذیری آن‌ها به سطح عملکرد معمول را نیز به صورت کمی برآورد نماید. کمی‌سازی مفهوم برگشت‌پذیری در زیرساخت‌ها از مباحث روز جوامع علمی است و روش ارائه شده در این تحقیق بر مبنای مفهوم سطح زیر منحنی عملکرد نسبت به زمان به این امر پرداخته است. عدد برگشت‌پذیری به دست آمده هم برای بخش فنی و هم برای سیاست‌گذاران می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد و هر دو با استفاده از یک رویکرد واحد وظایف خود را انجام می‌دهند که این مسئله خود منجر به مدیریت یکپارچه بحران خواهد شد. چهار استراتژی مقاوم‌سازی در این بخش بررسی گردید:

- ۱- حالت عادی- بدون کاربرد راهکار مقاوم‌سازی
- ۲- استفاده از لایه رسوبات خاکی و دانه‌ای بین سطح حفاری
- ۳- ایزولاسیون لرزه‌ای مقطع ایستگاه
- ۴- تعبیه اتصالات جابجایی

کلیه مقادیر برگشت‌پذیری به دست آمده برای این چهار استراتژی قابل مقایسه با یکدیگر می‌باشند زیرا همگی مطابق یک چارچوب واحد محاسبه شده‌اند. با توجه به اعداد به دست آمده، بهترین راهکار جهت مقاوم‌سازی این ایستگاه برای PGA های کمتر از $0.16g$ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه ایزولاسیون لرزه‌ای ایستگاه است و برای PGA های بزرگتر، استراتژی تعبیه اتصالات جابجایی بهترین استراتژی افزایش برگشت‌پذیری است. همان‌طور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، پر کردن خاک اطراف ایستگاه در نمونه مورد مطالعه تأثیر چندانی بر افزایش برگشت‌پذیری نداشته است.

استفاده از مفهوم برگشت‌پذیری در کنار آسیب-پذیری نه تنها یک دید کلی از وضعیت شریان‌های حیاتی بعد از زلزله دهد، بلکه می‌تواند معیاری جهت زمان رسیدن به سطح عملکرد مطلوب نیز باشد و از این رو به صورت مستقیم در تصمیم‌گیری‌های مقاوم‌سازی مؤثر است. توصیه می‌شود در مرحله طراحی، جهت مقاوم‌سازی شریان‌های حیاتی، در کنار سایر روش‌های تصمیم‌گیری مالی و غیرمالی، از روش شرح داده شده در این مقاله نیز جهت دستیابی به استراتژی مناسب مقاوم‌سازی استفاده شود.

۶. مراجع

- پاسیلو، ۱۳۸۹. "مطالعات مرحله ۲ خط ۲ قطار شهری شیراز". گزارش ایستگاه ۱۵ خرداد، سازمان قطار شهری شیراز، شهرداری شیراز.
- راستگو، م.، اظهري، س. م. و میرزایی، ن. ۱۳۸۹. "تحلیل خطر زمین‌لرزه‌ای به روش قطعی در ناحیه شیراز". چهاردهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، تهران.
- رجب‌پور، ن.، نادرپور، ح. و فخاریان، پ. ۱۳۹۶. "ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای زیرساخت‌های شهری". نشریه مصالح و سازه‌های بتنی، ۲(۱): ۷۷-۸۷.
- رضایی، م. ر. ۱۳۹۲. "ارزیابی تاب‌آوری اقتصادی و نهادی جوامع شهری در برابر سوانح طبیعی". مدیریت بحران، ۱۲: ۲۷-۳۸.

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی. ۱۳۹۳. "آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰)". ویرایش ۴، کمیته دائمی بازنگری آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله.
معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی. ۱۳۹۲. "دستورالعمل بهسازی لرزه های ساختمان های موجود". نشریه شماره ۳۶۰، تجدید نظر اول، معاونت نظارت راهبردی، امور نظام فنی.
مهندسین مشاور ایمن سازان. ۱۳۸۷. "گزارش نهایی مکانیک خاک تونل های خط ۴ و ۷ متروی تهران و تونل توحید". شرکت مترو تهران، شهرداری تهران.

وجودی، م. ۱۳۸۲. "بررسی تأثیر زلزله بر سازه های زیرزمینی با نگرشی ویژه بر تونل ها و ایستگاه های مترو".

www.vojoudi.com

- Adger, W. N., Hughes, T. P., Folke, C., Carpenter, S. R. and Rockström, J. 2005. "Social-ecological resilience to coastal disasters". *Sci.*, 309(5737): 1036-1039.
- Amiri, G. G., Razeghi, H. R., Razavian Amrei, S. A., Aalae, H. and Rasouli, S. M. 2008. "Seismic hazard assessment of Shiraz, Iran". *J. Appl. Sci.*, 8(1): 38-48.
- Arango, I. 1970. "Design of earth retaining structures for dynamic loads". In *Proceedings of ASCE Specialty Conference on Lateral Stresses in Ground and Design of Earth Retaining Structures*, Cornell University, Ithaca, NY, pp. 103-147.
- ATC. 1996. "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings". Vol. 1, ATC-40 Report, Applied Technology Council, Redwood City, California.
- Attoh-Okine, N. O., Cooper, A. T. and Mensah, S. A. 2009. "Formulation of resilience index of urban infrastructure using belief functions". *IEEE Sys. J.*, 3(2): 147-153.
- Bruneau, M., Chang, S. E., Eguchi, R. T., Lee, G. C., O'Rourke, T. D., Reinhorn, A. M., ... and Von Winterfeldt, D. 2003. "A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities". *Earthq. Spectra*, 19(4): 733-752.
- Carlson, J. L., Haffenden, R. A., Bassett, G. W., Buehring, W. A., Collins III, M. J., Folga, S. M., ... and Whitfield, R. G. 2012. "Resilience: Theory and application". Argonne National Laboratory, No. ANL/DIS-12-1.
- Carpenter, S., Walker, B., Anderies, J. M. and Abel, N. 2001. "From metaphor to measurement: Resilience of what to what?". *Ecosys.*, 4(8): 765-781.
- Chadha, R. K., Papadopoulos, G. A. and Karanci, A. N. 2007. "Disasters due to natural hazards". *Nat. Hazards*, 40(3): 501-502.
- Cimellaro, G. P., Reinhorn, A. M. and Bruneau, M. 2005. "Seismic resilience of a health care facility". In: *Proceedings of the 2005 ANCER Annual Meeting, Session III, November 10-13, Jeju, Korea*.
- Cimellaro, G. P., Reinhorn, A. M. and Bruneau, M. 2010. "Framework for analytical quantification of disaster resilience". *Eng. Struct.*, 32(11): 3639-3649.
- Coghan, A. 2004. "Recovery management in Australia: A community based approach". In: *Proceedings of the New Zealand Recovery Symposium, Napier, New Zealand*, pp. 81-91.
- Corigliano, M. 2007. "Seismic response of deep tunnels in near-fault conditions". PhD Dissertation, Politecnico di Torino, Italy, 222 p.
- Coulomb, C. A. 1776. "Essai sur une application des regles de maximis et minimis a quelques problèmes de statique, relatifs à l'architecture". *Memoires de Mathematique et de Physique, presentes a l'Academie Royale des Sciences par divers Savans*, 7, pp. 34382, Paris, Reprinted in J. Heyman, Coulomb's Memoir on Statics, Cambridge University Press, 1972.
- Davidson, R. A. and Çagan, Z. 2004. "Restoration modeling of lifeline systems". *Research Progress*, 55.
- Davis, I. 2004. "Progress in analysis of social vulnerability and capacity. Mapping vulnerability: Disasters, development and people". Earthscan, London, pp. 128-144.
- De Coulomb, C. A. 1779. "Essai sur une application de maximis et minimis à quelques problèmes de statique, relatifs à l'architecture". *Mémoires de Mathématique et de Physique présentés à l'Académie Royale des Sciences, par divers Savans, et lûs dans les Assemblées, Paris, Année 1773, 1776*, pp. 343-382. P. Villaggio. An elastic theory of Coulomb friction', *Arch. Ratl, Mech. Anal.*, 70: 135-143.
- Fang, Y. S. and Chen, T. J. 1995. "Modification of Mononobe-Okabe theory". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech.*, 8(32); 406A.
- FEMA. 1999. "Earthquake loss estimation methodology-HAZUS 99". Federal Emergency Management Agency and National Institute of Buildings Sciences, Washington DC, USA.

- Ghiasi, V., Omar, H., Yusoff, Z. B. Md., Huat, B. K., Muniandy, R., Ghosni, N., Nushini, A., Afshar, M. A., Ghiasi, S., Hosaini, S. G. and Ghiasi, M. 2010. "Design criteria of subway tunnels". *Austral. J. Basic Appl. Sci.*, 4(12): 5894-5907.
- Hashash, Y. M., Hook, J. J., Schmidt, B., John, I. and Yao, C. 2001. "Seismic design and analysis of underground structures". *Tunn. Undergr. Sp. Tech.*, 16(4): 247-293.
- Holling, C. S. 1973. "Resilience and stability of ecological systems". *Ann. Rev. Ecol. System.*, 4(1): 1-23.
- Kijko, A. 2000. "Statistical estimation of maximum regional earthquake magnitude m_{max} ". *In: Workshop of Seismicity Modeling in Seismic Hazard Mapping, Poljce, Slovenia*, pp. 1-10.
- Kouretzis, G. P., Bouckovalas, G. D. and Gantes, C. J. 2006. "3-D shell analysis of cylindrical underground structures under seismic shear (S) wave action". *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 26(10): 909-921.
- Krinitzsky, E. L. 2002. "How to obtain earthquake ground motions for engineering design". *Eng. Geol.*, 65(1): 1-16.
- Lanzano, G., Bilotta, E. and Russo, G. 2008. "Tunnels under seismic loading: A review of damage case histories and protection methods". *In: Strategies for Reduction of the Seismic Risk, Publisher StreGa*, pp. 65-75.
- Li, Y. and Lence, B. J. 2007. "Estimating resilience for water resources systems". *Water Resour. Res.*, 43(7).
- Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R. L. 1969. "Finite dynamic model for infinite media". *J. Eng. Mech. Div.*, 95(4): 859-878.
- Manyena, S. B. 2006. "The concept of resilience revisited". *Disasters*, 30(4): 434-450.
- Miles, S. B. and Chang, S. E. 2006. "Modeling community recovery from earthquakes". *Earthq. Spectra*, 22(2): 439-458.
- Mileti, D. 1999. "Disasters by design: A reassessment of natural hazards in the United States". Joseph Henry Press.
- Mononobe, N. and Matsuo, H. 1929. "On the determination of earth pressures during earthquakes". *In: World Engineering Congress, Vol. 9, Tokyo*.
- Mostashari, A. 2009. "Measuring the resilience of the trans-oceanic telecommunication cable system". *IEEE Sys. J.*, 3(3): 295-303.
- Nakamura, S., Matsumoto, T., Niwa, S., Nakamura, H. and Mori, K. 2014. "Fragility evaluation of underground structure considering multi-failure mode". PP. 4431-4434. *In: Deodatis, G., Ellingwood, B. R. and Frangopol, D. M. (Eds.), "Safety, reliability, risk and life-cycle performance of structures and infrastructures"*. CRC Press.
- Okabe, S. 1924. "General theory on earth pressure and seismic stability of retaining wall and dam". *J. Japan Soc. Civ. Eng.*, 10(6): 1277-1323.
- Omer, M., Nilchiani, R., Reed, D. A., Kapur, K. C. and Christie, R. D. 2009. "Methodology for assessing the resilience of networked infrastructure". *IEEE Sys. J.*, 3(2): 174-180.
- Pelling, M. 2003. "The vulnerability of cities: Natural disasters and social resilience". Earthscan.
- Pitilakis, K. 2011. "Systemic seismic vulnerability and risk analysis for buildings, lifeline networks and infrastructures safety gain". *CORDIS, European Commission*.
- Renschler, C. S., Frazier, A. E., Arendt, L. A., Cimellaro, G. P., Reinhorn, A. M. and Bruneau, M. 2010a. "A framework for defining and measuring resilience at the community scale: The PEOPLES resilience framework". Buffalo, MCEER.
- Renschler, C. S., Frazier, A. E., Arendt, L. A., Cimellaro, G. P., Reinhorn, A. M. and Bruneau, M. 2010b. "Developing the 'PEOPLES' resilience framework for defining and measuring disaster resilience at the community scale". *In: Proceedings of the 9th US National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering*, pp. 25-29.
- Romero, V. S. and Caufield, R. J. 2012. "Improving the seismic resilience of lifeline tunnels". *In: NZSEE 2012 Conference*.
- Tavakoli, B. and Ghafory-Ashtiany, M. 1999. "Seismic hazard assessment of Iran". *Ann. Geophys.*, 42(6).
- Thessaloniki, A. U. 2012. "Systemic seismic vulnerability and risk analysis for buildings, lifeline networks and infrastructures safety gain". Norwegian Geotechnical Institute.
- Tierney, K. and Bruneau, M. 2007. "Conceptualizing and measuring resilience: A key to disaster loss reduction". *TR News 250, May-June*.
- Todini, E. 2000. "Looped water distribution networks design using a resilience index based on heuristic approach". *Urban Water*, 2(2): 115-122.
- Towashiraporn, P. (2004). *Building seismic fragilities using response surface metamodels* (Doctoral dissertation, Georgia Institute of Technology).

کمی سازی برگشت پذیری زیرساخت های شهری و کاربرد آن در انتخاب راهکارهای مقاوم سازی لرزه ای
(مطالعه موردی: ایستگاه ۱۵ خرداد متروی شیراز)

Tsinidis, G., Heron, C., Pitilakis, K. and Madabhushi, G. 2014. "Physical modeling for the evaluation of the seismic behavior of square tunnels". *In: Seismic Evaluation and Rehabilitation of Structures*, Springer, Cham., pp. 389-406.