

تاب‌آوری زیرساخت آبرسانی شهری: با رویکرد تحلیل زمانی در راستای بازیابی عملکرد خطوط آبرسانی به شهروندان (مطالعه موردی: منطقه ۲ تهران)

سیدمحسن علوی* - دانشجوی دکتری شهرسازی، دانشگاه هنر اصفهان
محمد مسعود - دانشیار گروه شهرسازی، دانشگاه هنر اصفهان
اسدالله کریمی - استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری و جی آی اس، دانشگاه اصفهان

تأیید نهایی: ۱۳۹۷/۰۹/۱۸

پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۰۸

چکیده

افزایش روزافزون وابستگی جوامع شهری به زیرساخت‌ها، به‌ویژه سیستم آبرسانی، اهمیت تاب‌آوری این زیرساخت را در هنگام بروز سوانح طبیعی، از جمله زلزله، بیش از پیش نمایان می‌کند. تاب‌آوری سیستم آبرسانی با شاخص‌های بازیابی عملکرد، افزایش روند خدمات‌رسانی به جمعیت هدف، و افزایش ایستایی تحلیل می‌شود. این پژوهش از نظر هدف کاربردی است که با استفاده از روش توصیفی-تحلیلی، با هدف ارزیابی زمان بازیابی عملکرد زیرساخت‌های خطوط آبرسانی در برابر زلزله در راستای افزایش تاب‌آوری آن در منطقه ۲ شهر تهران و ارائه راهکارهای کاهش زمان بازیابی و افزایش نرخ خدمات‌رسانی انجام شده است. در این پژوهش، نخست با استفاده از روش تحلیل خطر احتمالاتی، شاخص‌های لرزه‌ای همانند بیشینه شتاب زمین محاسبه شد. پس از تعیین میزان خسارات در خطوط سیستم به تحلیل زمان بازیابی عملکرد براساس سه سناریو مطابق با شاخص‌های مطالعاتی اقدام شد. نتایج نشان می‌دهد که زمان تعمیر و بازیابی خسارات ناشی از زلزله محتمل ۲۶۷/۵۶ روز تیم طول خواهد کشید که زمان تعمیر شکست‌ها ۸۹/۱۹۸ روز و زمان موردنیاز برای تعمیر نشت‌های خطوط ۱۷۸/۳۹۷ روز تیم است. نتایج حاکی از آن است که نرخ خدمات‌رسانی بلافاصله پس از وقوع زلزله ۷۲ درصد خواهد بود. براساس نرخ خدمات‌رسانی و میزان آسیب وارده به سیستم، سه سناریو بررسی شد که با تعیین متغیر منابع عملیاتی، زمان بازیابی به‌عنوان شاخص تاب‌آوری تحلیل شد.

کلیدواژه‌ها: بازیابی عملکرد، تاب‌آوری، زلزله، زیرساخت آب، منطقه ۲ شهر تهران.

مقدمه

جلوگیری از وقوع مخاطرات طبیعی امکان‌پذیر نیست، اما می‌توان با برنامه‌ریزی از تأثیرات منفی آن کاست و میزان خطرپذیری را کاهش داد (فریزر، ۲۰۱۳: ۵۲). ایران، با توجه به قرارگیری آن بر روی مناطق با لرزه‌خیزی فعال، دارای آسیب‌پذیری بسیار زیادی در میان کشورهای دنیا است (رمضانی بشلی، ۲۰۱۵: ۸۲۲؛ رضایی و همکاران، ۱۳۹۴: ۶۱۰) که از شانزده زلزله مهلک شناخته‌شده تاریخ جهان سه مورد آن با نزدیک به نیم میلیون کشته (هاف و بیلهام، ۱۳۹۲: ۲۷۹) در ایران به‌وقوع پیوسته و متأسفانه تاکنون باعث ازهم‌گسیختگی زیرساخت‌های شهری و عدم تاب‌آوری آن‌ها در کشور ایران و سطح جهان شده است. به‌دلیل تمرکز جمعیت و زیرساخت‌های حیاتی در تهران، پایتخت کشور، وضعیت ایمنی لرزه‌ای تهران از اهمیت بخصوصی در سطح ملی برخوردار است (هاف و بیلهام، ۱۳۹۲: ۳۳۹) و اهمیت تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری بخصوص شریان حیاتی آب را بیشتر مشخص می‌کند، زیرا زیرساخت‌های تاب‌آور برای شهرها در راستای پایداری و بازیابی سریع عملکردهای شهری بسیار ضروری است (چنگ و همکاران، ۲۰۱۴: ۴۱۶). بنابراین، در این پژوهش، پس از تعیین شاخص‌های تاب‌آوری زیرساخت آب‌رسانی شهری، به تحلیل زمان بازیابی عملکرد، ایستایی، و نرخ آب‌رسانی پس از وقوع زلزله و همچنین محاسبه جمعیت فاقد خدمات در مدت زمان بازیابی در منطقه ۲ شهر تهران پرداخته شده و با بررسی سناریوهای مختلف در راستای افزایش تاب‌آوری خطوط آب‌رسانی اقدام شده است.

مبانی نظری

تاب‌آوری

شناخت مفهوم تاب‌آوری، که در برخی موارد واضح و روشن تبیین نشده است، اهمیت بسزایی در راستای مقابله با حوادث در یک جامعه دارد (کمیته ملی تاب‌آوری در مقابل زلزله، ۲۰۱۱: ۲۵). به‌طور کلی، تاب‌آوری در معنای لغوی آن در مفهوم بازیابی وضع قبلی، بازگشت به گذشته، و بهبود سریع استفاده شده است (رضایی، ۲۰۱۳: ۶۱۱). واژه تاب‌آوری از دیدگاه پژوهشگران به‌ویژه در مدیریت بحران و مخاطرات طبیعی موارد مختلفی را دربر می‌گیرد؛ به‌طوری‌که برخی آن را ظرفیت یک سیستم، شبکه، یا یک بنگاه اقتصادی در راستای حفظ و بازیابی عملکرد خود پس از وقوع بحران دانسته‌اند. برخی دیگر تاب‌آوری زیرساخت‌ها را بیشتر به توانایی سیستم هر زیرساخت در راستای کاهش احتمال شوک و اثرهای ناشی از بحران تعریف کرده و همچنین به بازیابی سریع عملکرد پس از حادثه اشاره کرده‌اند (آگاروال، ۲۰۱۵: ۵؛ چنگ و همکاران، ۲۰۱۴: ۴۱۶).

تعداد زیادی از عوامل مختلف بر تاب‌آوری شهر تأثیر گذارند، اما بیشتر پژوهشگران بر این امر توافق دارند که عملکرد زیرساخت‌های شهری به‌ویژه سیستم آب‌رسانی شهر، که تأثیر مستقیمی در قابلیت امدادسانی، توان بازیابی، و همچنین سلامت شهروندان پس از وقوع زلزله محتمل را دارد، از اهمیت ویژه‌ای در افزایش تاب‌آوری شهر برخوردار است (باقری و همکاران، ۲۰۱۰: ۲۵۶۷؛ برنتو و همکاران، ۲۰۰۳: ۷۳۵؛ پاگانو و همکاران، ۲۰۱۷: ۴۳۵). سیر تحول کاربرد و استفاده از مفهوم تاب‌آوری در پژوهش‌های گوناگون نشان می‌دهد که برداشت‌های مختلفی از آن وجود دارد (عبداللهی، ۱۳۹۴). بنابراین، در این پژوهش، مفهوم تاب‌آوری از دیدگاه‌های مختلفی در طی زمان بررسی شد که خلاصه‌ای از آن‌ها در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. تعاریف تاب‌آوری از دیدگاه برخی پژوهشگران

تعاریف تاب‌آوری	پژوهشگران
میزان پایداری سیستم‌ها و قابلیت آن‌ها در جذب تغییرات ناشی از اختلال درحالی که وضعیت قبلی را حفظ نماید	Holling, 1973
ظرفیت یک سیستم یا بخشی از آن سیستم برای جذب و بازیابی پس از وقوع واقعه‌ای خطرناک	Timmerman, 1981
توانایی انطباق با تهدیدها و کاهش یا جلوگیری از آسیب. به‌عنوان مثال، در سازه‌های مقاوم در برابر آسیب یا در جوامع تطبیق‌پذیر دیده می‌شود	Pelling, 2003
تاب‌آوری در مقابل مخاطرات لرزه‌ای در افزایش توانایی زیرساخت‌های اجتماع، بخصوص زیرساخت‌های حیاتی همچون سیستم آب‌رسانی، در راستای امکان ادامه فعالیت آن‌ها در هنگام و پس از وقوع زلزله	Bruneau, 2003
ظرفیت یک سیستم، شبکه، یا یک بنگاه اقتصادی در راستای حفظ و بازیابی عملکرد، و خدمت‌رسانی پس از وقوع هر حادثه‌ای	U.S Department of Homeland Security, 2006
قابلیت یک سیستم یا جامعه در معرض مخاطرات در جذب، انطباق، و پایداری در برابر اثر مخاطرات در مدت زمان مناسب	UNISDR, 2009
ظرفیت جذب نیروهای مخرب ناشی از سوانح از طریق پایداری و سازگاری و همچنین حفظ ساختارها و عملکرد اساسی یک سیستم یا جامعه	رفعیان و همکاران، ۱۳۸۹
امکان جذب شوک‌های ناشی از بحران برای ادامه یافتن فعالیت عملکردی زیرساخت‌ها در راستای خدمات‌دهی به شهروندان	Chang et al., 2014
توانایی سیستم در ادامه عملکرد آن در طی زمان پس از وقوع بحران	Alderson et al., 2015
سرعت و زمان بازیابی حالت عملکرد زیرساخت‌های حیاتی از مشخه‌های اصلی تاب‌آوری شهری است	Meerow et al., 2016

منبع: نگارندگان

تاب‌آوری زیرساخت‌ها

عوامل مختلفی در تاب‌آوری کل شهر تأثیرگذارند، اما بیشتر پژوهشگران بر این امر توافق دارند که تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری و عملکرد آن‌ها به‌ویژه سیستم آب‌رسانی شهر، که تأثیر مستقیمی در زندگی شهروندان و توان بازیابی شهروندان پس از وقوع زلزله محتمل را دارد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (پاگانو و همکاران، ۲۰۱۷: ۴۳۷). سیستم آب‌رسانی شهری مهم‌ترین زیرساخت حیاتی محسوب می‌شود که غالباً در اثر وقوع حوادث طبیعی به‌ویژه زلزله و سیل آسیب می‌بیند. زیرساخت‌های تاب‌آور باعث افزایش تاب‌آوری شهر و جامعه می‌شوند (چنگ و همکاران، ۲۰۱۴: ۴۱۶؛ چنگ و همکاران، ۲۰۰۲: ۲۸۱)، زیرا زیرساخت‌های حیاتی تاب‌آور قادر به مقاومت در برابر شوک‌های شدید هستند و می‌توانند به شهروندان همچنان پس از وقوع بحران خدمات‌رسانی کنند.

عملکرد خطوط لوله سیستم آب‌رسانی تعیین‌کننده میزان تاب‌آوری و طراحی آن زیرساخت در مقابل مخاطرات عدیده طبیعی و ساختی است. در این میان، بازیابی عملکرد سیستم آب‌رسانی نقش بسیار حیاتی در پایداری شهری و بازسازی پس از وقوع بحران دارد و لازم است که در مواقع بروز بحران عملکرد آب‌رسانی به حالت اولیه برگردانده شود تا علاوه بر پشتیبانی از سلامت جامعه سایر فعالیت‌های بازیابی نیز امکان‌پذیر شود (باقری و همکاران، ۲۰۱۰: ۲۵۶۷). قابلیت خدمات‌رسانی سیستم آب در هر شهری بر میزان پایداری جامعه شهری در مقابل بحران‌های طبیعی به‌ویژه زلزله بسیار تأثیرگذار است. بنابراین، در موضوع تاب‌آوری زیرساخت‌ها نیز روش‌های مطرحی ارائه شده است که بر پایه آن‌ها نسبت به تحلیل تاب‌آوری زیرساخت‌ها اقدام می‌شود.

ابعاد تاب‌آوری

تاب‌آوری سیستم آب شهری ابعاد مختلفی را دربر می‌گیرد که مهم‌ترین آن نحوه عملکرد سیستم در راستای خدمات‌رسانی به شهروندان است. با افزایش توانایی یک زیرساخت در ارائه عملکرد و خدمات‌رسانی در زمان بحران و پس از وقوع بحران میزان تاب‌آوری شهر افزایش می‌یابد (چنگ و همکاران، ۲۰۱۴). با توجه به چندبعدی بودن تاب‌آوری

شهر از جمله تاب‌آوری فیزیکی، اجتماعی، اقتصادی، و نهادی، در خصوص سنجش کمی تاب‌آوری تاکنون شاخص‌های مدون و واحدی تدوین نشده است (رضایی و همکاران، ۱۳۹۴: ۶۱۲). بنابراین، در راستای سنجش تاب‌آوری در هر حوزه نسبت به نیاز، به تدوین شاخص‌های آن اقدام می‌شود. در حوزه تاب‌آوری زیرساخت‌ها با توجه به فیزیکی بودن حوزه تاب‌آوری و همچنین بررسی عملکرد آن بر پایه نیاز جامعه، ابعاد فیزیکی و جمعیتی در راستای تعیین عملکرد بررسی می‌شوند. بنابراین، در این مقاله ابعاد کالبدی سیستم آب‌رسانی با توجه به معیارهای پهنه‌بندی خطر، نوع خطوط لوله، خسارات ناشی از وقوع خطر، آسیب‌پذیری مکانی و فیزیکی بررسی شدند. در ادامه، پس از تحلیل و تعیین نحوه عملکرد سیستم، به بررسی تاب‌آوری بر پایه رویکرد بازیابی زمانی اقدام شد.

رویکردهای تاب‌آوری زیرساخت‌ها

با در نظر گرفتن تعاریف مختلف تاب‌آوری و مفهوم آن، در حوزه‌های مختلف رویکردهای مختلفی در راستای تاب‌آوری بررسی شد. رویکردهای مفهومی تاب‌آوری را می‌توان به‌طور کلی به سه طبقه خلاصه کرد: پایداری، بازیابی، و گذار (رفعیان و همکاران، ۱۳۹۰). در حوزه زیرساخت‌های شهری و کاهش خسارات رویکرد بازیابی غالباً دارای اهمیت ویژه‌ای است؛ به صورتی که در بسیاری از پژوهش‌های زیرساخت شهری همانند پژوهش‌های چنگ (۲۰۱۴)، برنتو و همکاران (۲۰۰۳)، پاگانو و همکاران (۲۰۱۷)، و بوزا و همکاران (۲۰۱۵) رویکرد بازیابی مدنظر قرار داشته است.

رویکرد بازیابی

در این رویکرد، تاب‌آوری براساس زمان موردنیاز در راستای بازیابی عملکرد یا بازگشت به حالت قبلی تعریف می‌شود. بنابراین، با افزایش زمان بازیابی تاب‌آوری کاهش می‌یابد و با کاهش آن تاب‌آوری افزایش خواهد یافت و سیستم و جامعه‌ای که نتواند به حالت قبلی بازگشت کند فاقد تاب‌آوری به‌شمار می‌رود. پیم (۱۹۸۴)، کاتر (۲۰۰۳)، چنگ (۲۰۱۴)، و پاگانو (۲۰۱۷) از پژوهشگران مطرحی هستند که دیدگاه مشابهی در این خصوص مطرح کرده‌اند. دیدگاه بازیابی به‌ویژه در زیرساخت‌های حیاتی و سیستم آب‌رسانی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا در راستای تشخیص زمان بازیابی، تعیین میزان خسارات و همچنین میزان ایستایی سیستم نیز لازم است که سنجیده شود.

رویکرد ایستایی

رویکرد ایستایی، در مفهوم تاب‌آوری، غالباً از دهه‌های ابتدایی ۱۹۷۰ میلادی با پژوهش‌های هولینگ وارد حوزه تاب‌آوری شد که غالباً به مطالعات اکولوژیکی وابسته بود؛ اما در سال‌های اخیر رویکرد ایستایی در تاب‌آوری سیستم‌ها در مقابل مخاطرات طبیعی استفاده روزافزونی یافته است. به‌عنوان نمونه، در پژوهش‌های اخیر همچون چنگ (۲۰۱۴)، پورتر (۲۰۱۶)، رضایی (۱۳۹۲)، و پاگانو (۲۰۱۷) از این رویکرد استفاده شده است. در این رویکرد در راستای تعیین ایستایی، مشخص نمودن هر دو متغیر، میزان خسارات و درصد عملکرد به‌ویژه در سیستم‌های شهری موردنیاز است تا براساس آن بتوان میزان جذب شوک را محاسبه کرد. بنابراین، در این رویکرد هرچه میزان ایستایی بالاتر باشد، تاب‌آوری نیز افزایش خواهد یافت و بالعکس.

رویکرد گذار

رویکرد گذار در تاب‌آوری غالباً در تاب‌آوری اجتماعی و اکولوژی مورد استناد واقع شده است. پژوهش‌های پیم (۱۹۸۳) و هولینگ (۱۹۹۵) را می‌توان در این رویکرد طبقه‌بندی کرد. در رویکرد گذار ظرفیت جامعه و سیستم اکولوژیکی در راستای واکنش به تغییرات براساس روند سازگاری مدنظر قرار می‌گیرد. به‌عنوان نمونه، جوامع می‌توانند نسبت به تغییر برخی ویژگی‌های ذاتی خود در راستای سازگاری با وضع جدید اقدام کنند و تاب‌آوری خود را در سطح مطلوب حفظ

نمایند. این رویکرد در سیستم‌های فیزیکی عملکردی همچون زیرساخت‌های حیاتی در حوزهٔ مقابله با مخاطرات طبیعی همچون زلزله غالباً مورد استناد واقع نشده است، زیرا زیرساخت‌های حیاتی براساس نیازهای ضروری شهروندان طراحی می‌شوند و امکان کاهش و سازگاری بسیار زیادی ندارند. باین‌حال، برخی از روش‌ها و پژوهش‌های تحلیل خسارات و آسیب‌پذیری همچون چنگ (۲۰۱۴) و فاما (۲۰۱۳) از روش بازیابی بر پایهٔ حداقل نیاز استفاده کرده‌اند که نتایج حاصله را می‌توان بر پایهٔ گذار و سازگاری با وضع موجود با حداقل‌های موردنیاز شهروندان طبقه‌بندی کرد.

رویکرد این مقاله

با در نظر گرفتن رویکردهای مفهومی فوق، می‌توان گفت که تاب‌آوری در همهٔ رویکردهای یادشده بر توانایی برگشت‌پذیری در حوزه‌های مختلف به‌عنوان جنبهٔ مشترک کلی تأکید داشته است. در حوزهٔ تاب‌آوری زیرساخت‌ها، غالب پژوهش‌های انجام‌پذیرفته یکی از دو رویکرد بازیابی عملکرد یا ایستایی را مدنظر داشته‌اند. بنابراین، در این مقاله، با توجه به بررسی خطوط سیستم آب‌رسانی، رویکرد بازیابی در راستای مشخص کردن تاب‌آوری مدنظر قرار گرفت.

جدول ۲. رویکردهای تاب‌آوری

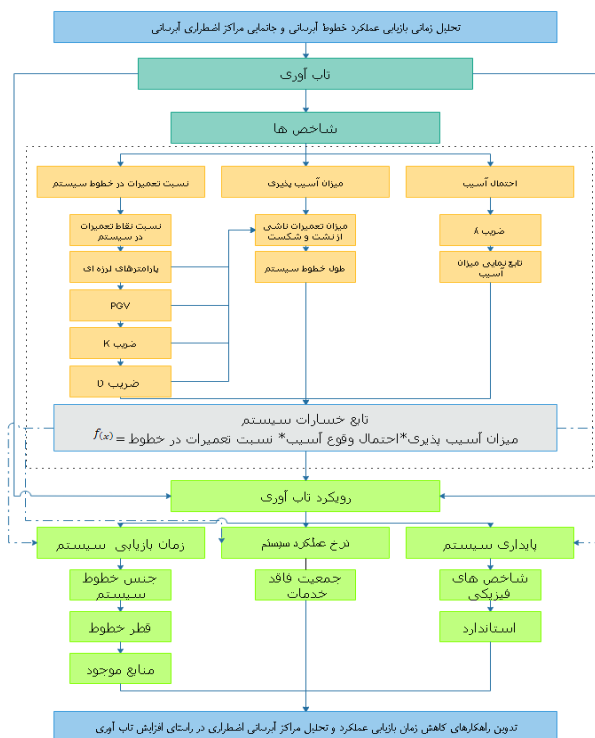
رویکرد تاب‌آوری	توضیح
پایداری	غالباً در پژوهش‌های اکولوژیکی مدنظر بوده که بر میزان اخلاقی که سیستم زیست‌محیطی توانایی تحمل آن را بدون شکست کامل دارد متمرکز است
بازیابی	این رویکرد غالباً در پژوهش‌های کالبدی و بررسی تاب‌آوری زیرساخت‌ها مدنظر قرار داشته که در خصوص توانایی جامعه یا سیستم در بازگشت به گذشته یا بازگشت به سطح عملکرد از پیش تعیین‌شده است که معیار سنجش آن براساس زمان موردنیاز بازیابی است
گذار	غالباً در تاب‌آوری اجتماعی مدنظر بوده که بر نوسازی و تطبیق با وضع به‌وجودآمده در اثر حادثه متمرکز است

منابع: بسطامی‌نیا و همکاران، ۲۰۱۷؛ بروئو و همکاران، ۲۰۰۳؛ رفیعیان و همکاران، ۱۳۹۰

در این مقاله، با توجه به اهداف پژوهش، ابعاد، و رویکردهای تاب‌آوری، که توضیح داده شد، رویکرد بازیابی عملکرد بررسی شد. البته، در راستای تحلیل بازیابی عملکرد سیستم آب‌رسانی در شهر، رویکرد پایداری نیز به‌صورت غیرمستقیم تجزیه و تحلیل شد. بنابراین، در این مقاله، بر پایهٔ رویکرد پایداری، به بررسی شاخص‌های خطرپذیری لرزه‌ای محدودهٔ مطالعاتی و همچنین تعیین کمی میزان آسیب‌های ناشی از وقوع زلزله بر سیستم آب در نمونهٔ موردی اقدام شد. سپس، بر پایهٔ رویکرد بازیابی در تاب‌آوری، به تحلیل زمان بازیابی عملکرد سیستم آب‌رسانی در راستای ارائهٔ حداقل آب موردنیاز شهروندان مطابق با استانداردهای شهری اقدام شد.

روش پژوهش

روش این پژوهش از نظر هدف کاربردی و به لحاظ روش توصیفی-تحلیلی است. در این پژوهش، تاب‌آوری از بُعد بازیابی عملکرد سیستم آب‌رسانی و زمان موردنیاز سیستم در راستای بازیابی پس از وقوع زلزله مدنظر قرار گرفت. بر این پایه، در راستای افزایش تاب‌آوری، نخست، شاخص‌های حرکت لرزه‌ای بررسی شد و در ادامه به محاسبات میزان خسارات اقدام شد. در ادامه، بر پایهٔ میزان خسارات محتمل براساس وضعیت موجود، تحلیل زمانی بازگشت عملکرد سیستم به حالت اولیه انجام پذیرفت. در ادامه، براساس تابع خسارات و تحلیل زمانی، به ارائهٔ راهکارهای افزایش تاب‌آوری شبکهٔ آب‌رسانی در راستای ادامهٔ خدمات‌رسانی و بازیابی عملکرد اقدام شد. شکل زیر چارچوب نظری تحلیل تاب‌آوری در این مقاله را نشان می‌دهد.



شکل ۱. چارچوب نظری و تحلیلی تبیین‌کننده رویکرد تاب‌آوری و تحلیل زمان بازبازی عملکرد سیستم
منبع: نگارندگان

برای مشخص کردن جزئیات خطر لرزه‌ای در نمونه موردی این پژوهش، از روش تحلیل احتمالی خطر^۱ با در نظر گرفتن گسل شمال تهران واقع در محدوده مطالعاتی استفاده شد. در این روش، عدم قطعیت‌ها شناسایی و در روندی مشخص تصویر کامل‌تری از خطر لرزه‌ای ترسیم می‌شود. در این روش، خطر زلزله در ساختمان براساس برآورد فراوانی ویژگی بیشینه شتاب زلزله در محدوده مطالعاتی در خلال زمان ثابت t حاصل می‌شود (مک‌گوایر، ۱۳۸۹).

در راستای تعیین تاب‌آوری سیستم بر پایه رویکرد پایداری، نخست با استفاده از کاتالوگ زلزله‌های به وقوع پیوسته قبلی در یک ساختمان و انتخاب یک مدل ریاضی، احتمال وقوع زلزله‌هایی با بزرگی مشخص برآورد شد. در راستای تحلیل احتمالی خطر زلزله، چهار مرحله زیر انجام پذیرفت:

۱. شناسایی و تشخیص منابع زلزله در منطقه مورد مطالعه و تعریف هندسه هر منبع و قابلیت لرزه‌ای آن که قادر به تولید حرکات مهم زمین هستند؛

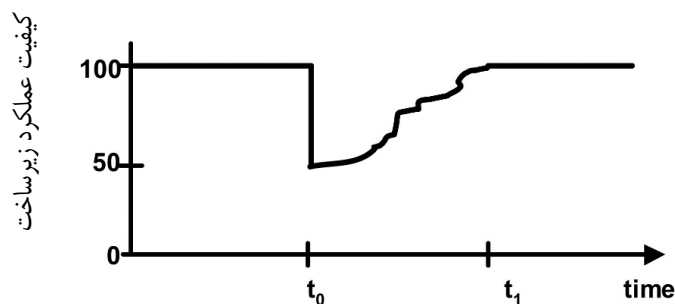
۲. تحلیل لرزه‌خیزی با توزیع موقتی تکرار زلزله انجام پذیرفت. در این مرحله از یک رابطه تکرار، که توسط آن سرعت متوسطی که ممکن است زلزله‌ای به اندازه خاص از آن تجاوز کند، استفاده شد تا لرزه‌خیزی هر محدوده منبع مشخص شود؛

۳. تعیین حرکت زمین ناشی از زلزله‌هایی با هر اندازه ممکن و در هر نقطه ممکن در محدوده منبع در منطقه مطالعاتی با کمک روابط پیش‌بینی‌کننده انجام پذیرفت؛

۴. تخمین پارامترهای حرکت زمین در راستای تعیین احتمالی که، در خلال فاصله زمانی خاص، پارامتر حرکت زمین ممکن است از آن تجاوز کند.

پس از اجرای مراحل یادشده، برای محاسبه پارامترهای لرزه‌خیزی، نخست کلیه اطلاعات مربوط به زلزله‌های پیشین در محدوده نمونه موردی با شعاع ۱۵۰ کیلومتر بررسی و کاتالوگ زلزله‌های تاریخی و زلزله‌های به‌وقوع‌پیوسته در تهران تعیین شد. داده‌های ثبت زلزله‌های دستگاهی موجود در کاتالوگ لرزه‌ای شهر تهران و نواحی پیرامون آن از سایت پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی استخراج شد. داده‌های لرزه‌ای شامل زلزله‌های دستگاهی ثبت‌شده تا سال ۱۳۹۵ است که دارای بزرگی Mw بزرگ‌تر از ۴ می‌باشند. پس از انجام‌دادن مراحل یادشده، تبدیل بزرگای زلزله‌ها به بزرگای گشتاوری^۱ انجام پذیرفت و حذف پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها از زلزله‌های دستگاهی با استفاده از روش پنجره متغیر زمانی و مکانی برای رویداد با بزرگای معین بر پایه روش نوپوف و گاردنر انجام پذیرفت. سپس، پارامترهای لرزه‌خیزی منطقه با استفاده از روش ارائه‌شده توسط کیچکو و گراهام (۱۹۹۸) در نرم افزار کیچکو^۲ مشخص شد.

در این مقاله از رابطه کاهندگی آبراهامسون و سیلوا (۲۰۰۸) استفاده شد که پس از محاسبه پارامترهای لرزه‌خیزی، مدل‌سازی گسل شمال تهران و انجام‌دادن محاسبات مربوط به تحلیل خطر لرزه‌ای برای رویداد با دوره بازگشت ۴۷۵ سال توسط نرم‌افزار ای زد اف ریسک^۳ انجام پذیرفت. سپس، از نرم‌افزار جی آی اس ۱۰ در راستای تهیه نقشه‌های تحلیلی استفاده شد. میزان حداکثر بزرگای زلزله محتمل، بیشینه شتاب^۴ و بیشینه سرعت زمین^۵، و ضرایب زلزله براساس داده‌های جانمایی گسل شمال تهران و روش محاسبه تحلیل خطر احتمالی محاسبه شد. در ادامه، محدوده مطالعاتی به شبکه‌های ۲۰۰ در ۲۰۰ متری تقسیم شد و کلیه اطلاعات لرزه‌ای و شهری موردنیاز از قبیل پارامترهای لرزه‌ای، بیشینه شتاب^۶ و بیشینه سرعت زمین^۷، جمعیت، جنس، طبقه‌بندی و مؤلفه‌های خطوط آب‌رسانی و مشخصه‌های گسل‌ها به هر شبکه اختصاص یافت. پس از تهیه بانک اطلاعاتی مربوطه، در راستای تعیین زمان موردنیاز بازیابی عملکرد سیستم آب‌رسانی، تعداد نقاط شکست و نشست خطوط لوله محاسبه شد. در ادامه، براساس میزان خسارات، طبقه‌بندی خطوط و وضعیت موجود تحلیل زمانی بازیابی عملکرد سیستم انجام پذیرفت. پس از تحلیل و تشخیص زمان بازیابی عملکرد سیستم، براساس استانداردهای جهانی و کشوری، به بررسی جمعیت تجمعی فاقد آب اقدام شد. از آنجا که اندازه‌گیری تاب‌آوری در شرایط مطلق دشوار است، در راستای افزایش تاب‌آوری بر مبنای عملکرد سیستم آب شهری، از رویکرد تطبیقی با استاندارد جهانی استفاده شد. شکل ۲ مفهوم کلی تاب‌آوری در زیرساخت‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۲. مفهوم تاب‌آوری لرزه‌ای زیرساخت

منبع: برونو و همکاران، ۲۰۰۳: ۷۳۷

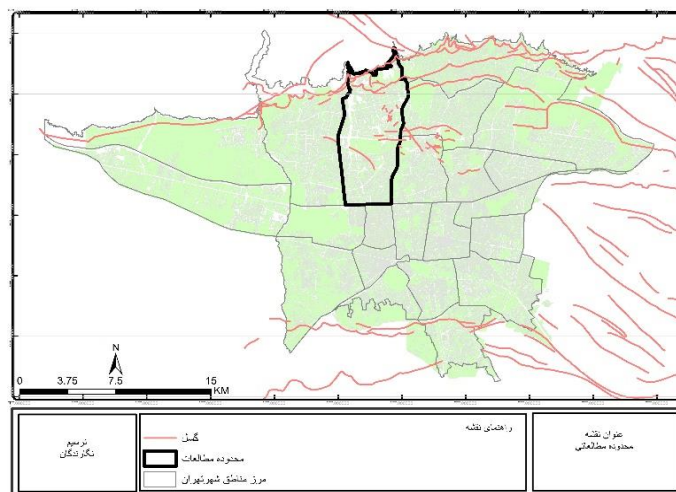
1. Mw
2. Kijko
3. EZ-FRISK 7.52
4. Peak Ground Acceleration
5. Peak Ground Velocity
6. Peak Ground Acceleration
7. Peak Ground Velocity

بحث و یافته‌ها

محدوده مکانی پژوهش

محدوده مطالعاتی پژوهش منطقه ۲ شهر تهران است. این منطقه، به دلیل نزدیکی به گسل شمال تهران، به عنوان یکی از گسل‌های اصلی شهر تهران، در محدوده‌ای با خطرپذیری بالای زلزله واقع شده است (بربریان و یاتس، ۲۰۱۶: ۲۹۱). با توجه به مکان عبور گسل‌های فعال شمال تهران، ری، و مشا، وقوع زلزله با بزرگای بالا در تهران و مناطق آن بسیار محتمل است (جایکا، ۲۰۰۰: ۶). علاوه بر موارد یادشده، نحوه عبور خطوط اصلی آب از محدوده مطالعاتی، اهمیت بررسی خطوط سیستم آبرسانی در منطقه مطالعاتی را بیشتر می‌کند.

منطقه ۲ شهر تهران در سال ۱۳۸۵ دارای ۶۱۷۸۱۱ نفر جمعیت بوده است. این منطقه از لحاظ جغرافیایی از غرب به رود دره فرحزاد، بلوار اشرفی اصفهانی، بزرگراه محمدعلی جناح، و میدان آزادی، از شرق به مسیل درکه و بزرگراه شهید چمران، از شمال به محدوده قانونی شهر تهران، و از جنوب به خیابان آزادی منتهی می‌شود (نقشه ۱)، که به دلیل عبور خطوط لوله اصلی انتقال آب از نمونه موردی هرگونه خللی در عملکرد سیستم در منطقه ۲ شهر تهران می‌تواند نتایج مخربی در عملکرد کل شبکه آبرسانی در هنگام وقوع زلزله بگذارد و بر تاب‌آوری سیستم اثرگذار باشد. عملکرد سیستم آبرسانی، به عنوان یکی از عوامل مهم تاب‌آوری، با توجه به خسارات محتمل بر خطوط، میزان تاب‌آوری سیستم در منطقه مطالعاتی را به عنوان نمونه موردی مشخص می‌کند. بنابراین، در این پژوهش زمان تعمیرات در راستای بازیابی عملکرد، ایستایی، و نرخ آبرسانی پس از وقوع زلزله محاسبه شد تا براساس آن‌ها جمعیت فاقد خدمات در مدت زمان بازیابی تعیین شود. در ادامه با تعیین سناریوهای مختلف در راستای تعیین تاب‌آوری خطوط آبرسانی اقدام شد. در این پژوهش، اطلاعات خطوط سیستم آبرسانی و توزیع آب شهر همراه داده‌های حاصل از محاسبات لرزه‌ای با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی جی‌آی‌اس تحلیل و بررسی شد.



نقشه ۱. محدوده مطالعاتی

منبع: نگارندگان

تحلیل آسیب‌پذیری و خسارت

آسیب‌پذیری به معنای بررسی تأثیرات زلزله احتمالی با توجه به خطر و احتمال آن بر سیستم است. بنابراین، برای تحلیل آسیب‌پذیری سیستم آبرسانی، در این پژوهش، به بررسی متغیرهای خطر زلزله شامل آسیب و احتمال و همچنین متغیرهای خسارت شامل خسارات کلی با عنوان تعداد نقاط شکست و خسارات جزئی با عنوان نشت خطوط در واحد کیلومتر (امیدوار، ۲۰۱۴: ۱۹۷۶) اقدام شد.

پس از انجام دادن تحلیل خطر بر پایه دوره بازگشت و تعیین بیشینه شتاب و سرعت زمین در محدوده مطالعاتی، در راستای تحلیل آسیب‌پذیری خطوط، از روش محاسبات خسارات و رابطه ارائه شده توسط فاما (۱۹۹۹) در هازوس اس آر^۱ و هازوس ام اچ^۲ بر پایه واحد نقطه در کیلومتر، مطابق رابطه ۱، استفاده شد. نتایج حاصل از تحلیل آسیب سپس در محیط جی آی اس به نقشه‌های تحلیلی تبدیل شد.

$$RR = \left[[v] * [\text{ضریب جنس خطوط } K] * [(PGV)^\alpha] \right] \quad (۱) \quad \text{میزان نرخ تعمیرات موردنیاز بر پایه خطر لرزه‌ای}$$

در رابطه ۱ نرخ تعمیرات براساس تعداد نقاط نیازمند به تعمیر در واحد طول خطوط تعیین می‌شود. در این رابطه، ضریب α برابر با ۲/۲۵ است. در محاسبات، مطابق روش یادشده، ضریب K ضریب جنس خطوط در نظر گرفته می‌شود. این ضریب برای خطوط شکننده همانند چدن، بتن، و آژبست برابر ۱ و برای خطوط منعطف همانند خطوط فولادی برابر با ۰/۳ است (فاما، ۱۹۹۹، ۲۰۱۳؛ پورتر، ۲۰۱۶). بنابراین، در این پژوهش متغیر جنس خطوط به‌عنوان یکی از عوامل احتمالی مؤثر بر تاب‌آوری تجزیه و تحلیل شد تا براساس آن نسبت به آزمون فرضیه اقدام شود. در رابطه ۱، ضریب v برابر با ۰/۰۰۰۱ است.

میزان آسیب در هر قطعه

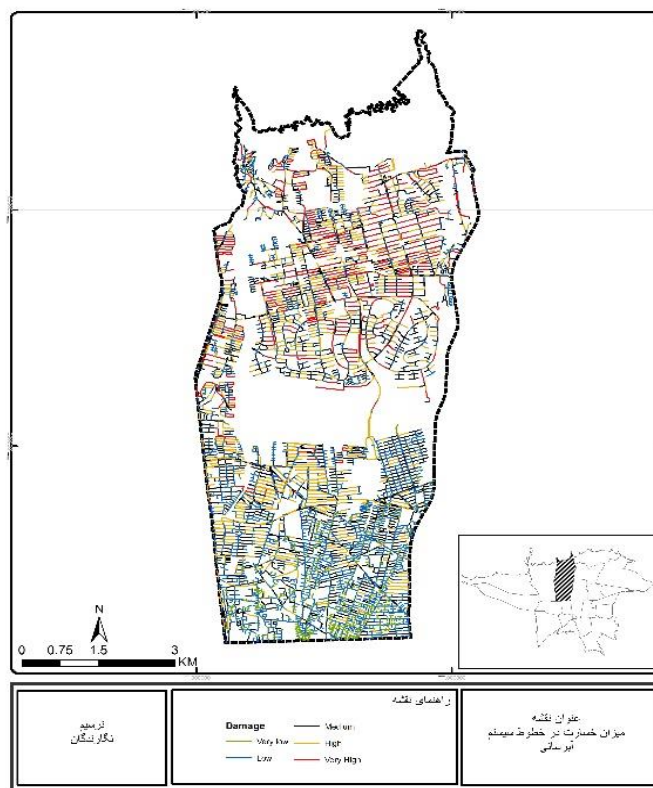
میزان آسیب در هر قطعه از خطوط تعیین‌کننده میزان کل آسیب وارده به سیستم آب‌رسانی در اثر وقوع زلزله محتمل در نمونه موردی است. بنابراین، در ادامه، به مشخص کردن میزان آسیب در هر قطعه از خطوط سیستم آب‌رسانی شهر، پس از مشخص کردن نقاط تعمیر براساس رابطه ۱ اقدام شد. در فرمول یادشده، Li طول خطوط در واحد کیلومتر و RRi شامل تعداد تعمیر موردنیاز ناشی از خرابی در هر خط براساس بیشینه سرعت زمین ناشی از وقوع زلزله محتمل (فاما، ۱۹۹۹؛ تورس ورا و آنتونیو کاناس، ۲۰۰۳: ۲۰۶) است. میزان خسارات از اهمیت بسزایی در راستای تعیین آسیب‌پذیری برخوردار است، زیرا تعداد شکست و نشت براساس نتایج تحلیل خسارات تعیین می‌شود.

$$Di = [RRi] * [Li] \quad (۲) \quad \text{میزان خسارات ناشی از زلزله}$$

نتایج خروجی تحلیل حاکی از بالاتر بودن میزان نرخ تعمیرات در مناطق شمالی محدوده مطالعاتی است که بیشینه آن ۰/۴۴ و کمینه نرخ تعمیرات ۰/۰۶ است. نتایج تحلیل در نقشه ۳ آمده است. پس از تعیین نرخ تعمیرات براساس روند تحلیل آسیب‌پذیری (شکل ۱)، به تعیین میزان خسارات در هر قطعه از خطوط لوله آب‌رسانی شهری در نمونه موردی اقدام شد. میزان خسارت به نرخ تعمیرات و همچنین طول هر قطعه وابستگی دارد (تورس ورا و آنتونیو کاناس، ۲۰۰۳: ۲۰۶؛ فاما، ۱۹۹۹: ۱۸). رابطه ۲ بیانگر روش تعیین میزان خسارات است. براساس خروجی تحلیل خسارات، میانگین میزان خسارات در سیستم ۰/۰۱۷ است که بیشینه آن در قطعه معادل ۰/۱۶۰ است. بر پایه روش لاند و شیف (۱۹۹۲)، در این پژوهش، شکست خطوط به‌عنوان آسیب کلی که باعث به صفر رسیدن عملکرد سیستم در آن نقطه می‌شود و نشت خطوط لوله به‌عنوان خسارت جزئی‌تر با امکان ادامه عملکرد سیستم آب‌رسانی مدنظر قرار گرفت. در این پژوهش خسارات لرزه‌ای ناشی از فعالیت گسل شمال تهران به میزان ۲۰ درصد کل خسارات به شکست و ۸۰ درصد به نشت (فاما، ۱۹۹۹؛ پورتر، ۲۰۱۶) در محاسبات خسارات بر پایه روش تحلیلی هازوس اس آر و هازوس ام اچ فرض گردید. مطابق روش هازوس ام اچ، در اثر فعالیت لرزه‌ای میزان ۲۰ درصد به ۸۰ درصد تناسب شکست به نشت (فاما، ۱۹۹۹؛ پورتر، ۲۰۱۶) در محاسبات تحلیلی مدنظر قرار گرفت.

نتایج تحلیل خسارات حاکی از آن است که در ۴۳ نقطه شکست در خطوط سیستم آب‌رسانی به‌وقوع خواهد پیوست که باعث قطع عملکرد سیستم آب‌رسانی می‌شود. نشت خطوط فرعی و اصلی در ۱۷۵ نقطه اتفاق خواهد افتاد. مناطق

شمالی و غربی محدوده مطالعاتی، به دلیل بالاتر بودن سرعت پیشینه زمین و همچنین جنس غیرمنعطف خطوط، خسارات بیشتری را متحمل خواهد شد (نقشه ۲).



نقشه ۲. میزان خسارت در خطوط سیستم
منبع: نگارندگان

تحلیل شاخص نرخ خدمات‌رسانی و عملکرد سیستم

رویکرد تاب‌آوری این مقاله مبتنی بر بازیابی است. در این میان شاخص عملکرد با مشخص کردن کمی وضعیت آب‌رسانی باعث تعیین میزان افت خدمت‌رسانی شبکه می‌شود که براساس آن می‌توان زمان بازیابی را محاسبه کرد. بنابراین، شاخص عملکرد از اهمیت بسیار زیادی در پژوهش برخوردار است. شاخص عملکرد آب‌رسانی شهری بیانگر عملکرد شبکه آب آشامیدنی بلافاصله پس از وقوع زلزله محتمل محاسبه شده در این پژوهش است. علاوه بر موارد یادشده، شاخص عملکرد تعیین‌کننده میزان کاهش خدمات‌رسانی سیستم است که براساس آن می‌توان استواری کل سیستم را محاسبه کرد. این شاخص بر پایه میزان متوسط شکست در خطوط سیستم براساس رابطه ۳ محاسبه شد.

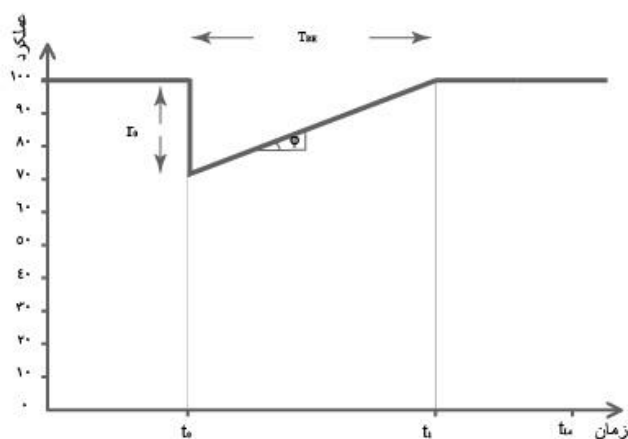
(۳) شاخص عملکرد شبکه پس از وقوع زلزله

$$Sf = \sum_{i=0}^{i=n} s(r)$$

$$s(r) = 1 - \varphi \left[\frac{\ln \left[\left(\frac{r}{L} \right) / q \right]}{b} \right] \quad \varphi = \text{log normal}$$

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt, \quad \Phi(x) = \frac{1}{2} \left[1 + \text{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{2}} \right) \right]$$

در رابطه شاخص عملکرد، (sf) به‌عنوان شاخص عملکرد کل سیستم است که مجموع عملکرد سیستم (sr) را دربر می‌گیرد. شاخص عملکرد بر پایه لگاریتم نرمال متوسط شکست خطوط (r) در طول به کیلومتر (L) است که تقسیم بر ضرایب ثابت q برابر ۰/۱ و b برابر ۰/۸۵ می‌شود. در لگاریتم نرمال میزان اشتباه براساس انتگرال تابع خطا محاسبه می‌شود که لگاریتم نرمال عملکرد شبکه براساس رابطه خطا در میزان عددی x بر جذر عدد ۲ است. نتایج خروجی تحلیل عملکرد و محاسبات لگاریتم نرمال شکست در خطوط حاکی از آن است که میزان عملکرد سیستم بلافاصله پس از وقوع خطر زلزله ۷۱ درصد است. این بدان معناست که سیستم آبرسانی یک‌سوم از عملکرد خود را از دست خواهد داد.



شکل ۳. نمودار سطح عملکرد سیستم پس از وقوع زلزله

منبع: نگارندگان

تحلیل زمان بازیابی عملکرد سیستم

در راستای تحلیل زمان بازیابی عملکرد سیستم، میزان خسارات در دو مرحله انجام پذیرفت که مرحله نخست شامل تعیین تعداد نقاط شکست در سیستم است که باعث قطع آبرسانی می‌شود و مرحله بعدی تعیین میزان نقاط نشت در خطوط سیستم است. پس از تکمیل مراحل تعیین خسارات، خطوط سیستم در شش طبقه براساس روش تحلیل هازوس اس آر و ام اچ^۱ طبقه‌بندی شد. جدول ۳، طبقه‌بندی خطوط و اولویت بازیابی آن‌ها را بر پایه شاخص قطر آن‌ها مطابق با روش تحلیلی فاما نشان می‌دهد.

جدول ۳. طبقه‌بندی ضرایب تعمیر خطوط و اولویت بازیابی

اولویت	ضریب تعمیر نشت خطوط ناشی از زلزله [Day/Team]	ضریب تعمیر شکست خطوط ناشی از زلزله [Day/Team]	حداکثر قطر [in]	حداقل قطر [in]	طبقه‌بندی
حیاتی ۱	۰/۶۶	۰/۳۳	۳۰۰	۶۰	a
بسیار زیاد ۲	۰/۶۶	۰/۳۳	۶۰	۳۶	b
زیاد ۳	۰/۶۶	۰/۳۳	۳۶	۲۰	c
متوسط ۴	۱/۰	۰/۵۰	۲۰	۱۲	d
کم ۵	۱/۰	۰/۵۰	۱۲	۸	e
کم ۶	۱/۰	۰/۵۰	نامشخص	نامشخص	u

منابع: پورتر، ۲۰۱۶؛ فاما، ۱۹۹۹، ۲۰۱۳؛ نگارندگان

در ادامه، خطوط سیستم در محدوده مطالعاتی به دو طبقه اصلی انتقال و فرعی توزیع تقسیم شد. سپس، ضریب تعمیر و شکست هر قطعه از خطوط سیستم براساس قطر در طبقه‌بندی شش‌گانه تحلیل شد (نقشه ۳). در ادامه، با به‌کارگیری نرم‌افزار جی آی اس ۱۰، لایه‌های خطوط اصلی و فرعی شبکه آبرسانی شهری تجزیه و تحلیل شد.



نقشه ۳. طبقه‌بندی خطوط سیستم آبرسانی
منبع: نگارندگان

سناریوهای بازیابی عملکرد

سناریوهای مقاله براساس حالات سه‌گانه موجود و همچنین بر پایه توان قابل‌افزایش عملی مطابق استراتژی مدیریت بحران شهر تهران و آبفا بررسی شد. در این راستا، نخست براساس خروجی تحلیل خسارات نسبت به تعیین زمان بازیابی در سیستم اقدام شد. بر پایه عملکرد تیم عملیاتی بازیابی موجود براساس چارت مدیریت بحران در محدوده مطالعاتی (یک پست امداد متشکل از ۱۲ نفر)، میزان بازیابی سیستم موجود در پارسل‌های محدوده مطالعاتی تعیین شد که براساس آن ۲۶۷/۵۹ روز برای بازیابی عملکرد ناشی از تعمیر خسارت کلی و جزئی در محدوده مطالعاتی موردنیاز است.

در سناریوی اول نسبت به تحلیل زمان بازیابی و تعمیر خسارات با درنظرداشتن منابع موجود فعلی براساس ساختار آبفا و مدیریت بحران در محدوده مطالعاتی اقدام شد و براساس آن زمان بازیابی در حالت وقوع زلزله در حال حاضر تعیین شد. بر پایه منابع انسانی موجود در مناطق آبفای تهران در منطقه ۳ گروه امدادی موجود به فعالیت می‌پردازند (آبفا، ۱۳۹۵). در حال حاضر، مدیریت بحران و پدافند غیرعامل آبفا دارای یک پست متشکل از سه گروه در منطقه است که سناریوی اول مبتنی بر آن استوار است. سناریوی دوم مبتنی بر استراتژی آبفا در راستای افزایش آتی گروه‌ها و سناریوی سوم بر پایه امکان مشارکت مردمی فعال و همچنین استراتژی بلندمدت آبفا در راستای تعداد گروه‌ها استوار شده است.

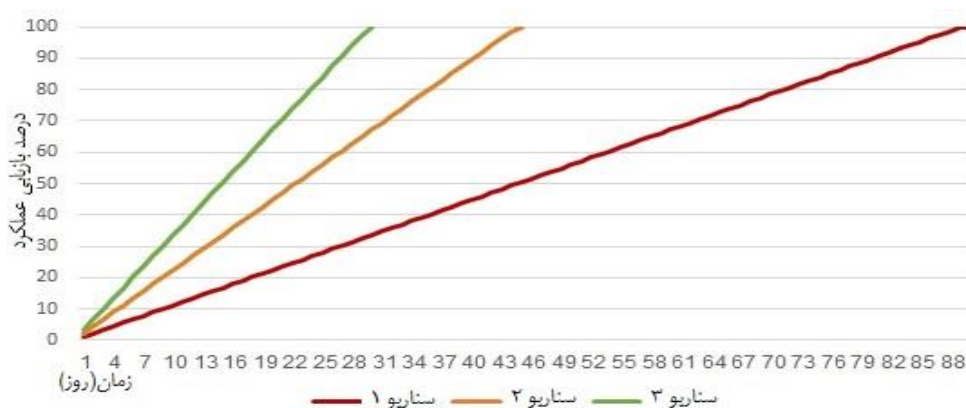
نتایج تحلیل حاکی از آن است که با توجه به تعداد گروه‌های عملیاتی فعلی با در نظر داشتن سه گروه دوازده نفره و پست امدادی، به‌عنوان نیروهای تعمیر سیستم، زمان بازیابی ۸۹/۲ روز خواهد بود.

جدول ۴. زمان بازیابی سیستم بر پایه سه حالت مختلف

سناریو	جمعیت اولیه	درصد اولیه	جمعیت	مجموع جمعیت (۱۰۰۰ نفر)	زمان بازیابی
۱	۶۱۷۸۱۱	۲۸	۱۷۲۹۸۷	۱۵۵۶۸	۹۰
۲	۶۱۷۸۱۱	۲۸	۱۷۲۹۸۷	۷۷۸۴	۴۵
۳	۶۱۷۸۱۱	۲۸	۱۷۲۹۸۷	۵۱۸۹	۳۰

منبع: نگارندگان

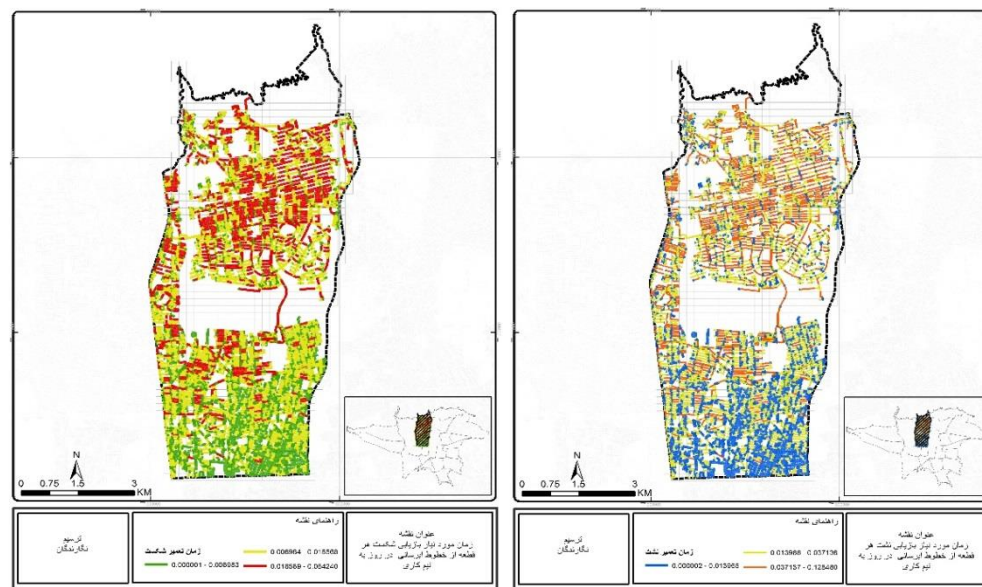
در سناریوی دوم با فرض ثابت ماندن وضعیت فعلی، به افزایش منابع انسانی تعمیر سیستم اقدام شد. بنابراین، به بررسی نتایج تحلیل بر پایه شش تیم عملیاتی از دو پست امداد اقدام شد. نتایج حاکی از آن است که زمان بازیابی عملکرد در سناریوی دوم در حدود ۴۴ روز کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج تحلیل سناریوی دوم نیز مشخص می‌شود که زمان حاصله ۴۸/۶ درصد بیش از زمان تاب‌آوری مورد نیاز است.



نمودار ۱. زمان بازیابی سیستم در سه سناریوی مختلف

منبع: نگارندگان

در سناریوی سوم با فرض ثابت ماندن وضعیت فعلی، به افزایش منابع انسانی تعمیر سیستم به نه گروه عملیاتی از سه پست امداد بر پایه استراتژی بلندمدت آبفا و همچنین استفاده از مشارکت‌های مردمی بر پایه چارت مدیریت بحران محلات و منطقه مورد مطالعه اقدام شد. نتایج حاکی از آن است که زمان بازیابی عملکرد در سناریوی سوم در حدود ۲۹ روز خواهد بود. با توجه به نتایج تحلیل سناریوی سوم مشخص می‌شود که زمان مطابق با زمان تاب‌آوری مورد نیاز بر پایه بازیابی عملکرد سیستم است. در سناریوی سوم با فرض ثابت ماندن وضعیت فعلی، به افزایش منابع انسانی تعمیر سیستم به نه تیم عملیاتی از سه پست امداد اقدام شد. نتایج حاکی از آن است که زمان بازیابی عملکرد در سناریوی سوم در حدود ۲۹ روز خواهد بود. با توجه به نتایج تحلیل سناریوی سوم مشخص می‌شود که ۲۹ روز مطابق با زمان تاب‌آوری مورد نیاز بر پایه بازیابی عملکرد سیستم است (نمودار ۱).



نقشه ۴. زمان موردنیاز بازیابی شکست خطوط
منبع: نگارندگان

نقشه ۵. زمان موردنیاز بازیابی نشت خطوط
منبع: نگارندگان

نتیجه‌گیری

تاب‌آوری سیستم آبرسانی به عوامل اصلی مدت زمان بازیابی، ایستایی، و شاخص عملکرد آن بستگی دارد. در این پژوهش، تحلیل زمان بازیابی عملکرد، شاخص عملکرد شبکه پس از وقوع زلزله، و جمعیت بدون آب پس از وقوع زلزله تعیین شدند. این پژوهش با هدف ارزیابی زمان بازیابی عملکرد زیرساخت‌های خطوط آبرسانی در برابر زلزله در راستای افزایش تاب‌آوری آن در منطقه ۲ شهر تهران و ارائه راهکارهای کاهش زمان بازیابی و افزایش میزان خدمات‌رسانی انجام شد. با توجه به نتایج و یافته‌ها، میزان نرخ آبرسانی بلافاصله پس از وقوع زلزله ۷۲ درصد است که نمایانگر این امر است که بیش از یک‌چهارم جمعیت منطقه در معرض خطر بی‌آبی کامل قرار دارند. نتایج تحلیلی حاکی از آن است که با افزایش منابع عملیاتی، زمان بازیابی کاهش و در نتیجه تاب‌آوری سیستم افزایش می‌یابد. با در نظر داشتن استاندارد حداکثر چهار هفته (اداره امنیت امریکا، ۲۰۰۷؛ جایکا، ۲۰۰۶؛ سمیعی، ۱۳۹۳)، تا بازیابی کامل سیستم و با در نظر داشتن این امر که بازیابی و تعمیر در یک خط توسط تیم‌های مختلف امکان‌پذیر نیست، سناریوی سه بهترین حالت ممکن در راستای تاب‌آوری سیستم آبرسانی را نشان می‌دهد که در کمتر از ۳۰ روز امکان بازیابی کامل را فراهم می‌کند.

با توجه به اهمیت بسیار زیاد تاب‌آوری سیستم آبرسانی و عملکرد آن در شهر، در این پژوهش در راستای افزایش تاب‌آوری و کاهش زمان بازیابی عملکرد و در نتیجه کاهش جمعیت بدون آب ناشی از وقوع زلزله در محدوده مطالعاتی موارد زیر پیشنهاد می‌شود:

- تعیین حداقل سه پست امداد متشکل از نه تیم در راستای بازیابی عملکرد کمتر از سی روز در محدوده مطالعاتی؛
- تدوین برنامه جامع بازیابی عملکرد سیستم در مواقع بروز زلزله و اولویت‌بندی بازیابی خطوط براساس اهمیت عملکردی آن‌ها؛
- تدوین و اجرای برنامه‌های میان‌مدت و بلندمدت در راستای تغییر جنس خطوط سیستم از غیر منعطف به منعطف در راستای کاهش خسارات آتی که امکان ۷۰ درصد کاهش شکست در وضعیت ثابت را فراهم خواهد آورد؛
- حمایت از مطالعات علمی و پژوهش‌های کاربردی در راستای مطالعات کاهش زمان بازیابی عملکرد و افزایش میزان آبرسانی سیستم در مناطق شهری.

منابع

۱. آبفای تهران. (۱۳۹۵). گزارش مرکز مدیریت بحران و پدافند غیرعامل آبفای تهران.
۲. بسطامی نیا، امیر؛ رضایی، محمدرضا؛ و سرائی، محمدحسین. (۱۳۹۵). تبیین و تحلیل مفهوم تاب‌آوری و شاخص‌ها و چارچوب‌های آن در سوانح طبیعی. فصلنامه علمی - ترویجی دانش پیشگیری و مدیریت بحران، ۶(۱)، ۳۲-۴۶.
۳. رضایی، محمدرضا، ۱۳۹۲، ارزیابی تاب‌آوری اقتصادی و نهادی جوامع شهری در برابر سوانح طبیعی، فصل‌نامه مدیریت بحران، ج ۱، ش ۲، صص ۲۷-۳۸.
۴. رضایی، محمدرضا؛ رفیعیان، مجتبی و حسینی، سیدمصطفی، ۱۳۹۴، سنجش و ارزیابی میزان تاب‌آوری کالبدی اجتماع‌های شهری در برابر زلزله (مطالعه موردی: محله‌های شهر تهران)، فصل‌نامه پژوهش‌های جغرافیایی انسانی، ج ۴۷، ش ۴، صص ۶۰۹-۶۲۳.
۵. رفیعیان، مجتبی؛ رضایی، محمدرضا؛ عسگری، علی؛ پرهیزکار، اکبر و شایان، سیاوش، ۱۳۸۹، تبیین مفهومی تاب‌آوری و شاخص‌سازی آن در مدیریت سوانح اجتماع‌محور (CBDM)، برنامه‌ریزی و آمایش فضا، ج ۱۵، ش ۴، صص ۱۹-۴۱.
۶. رفیعیان، مجتبی؛ نقشی‌زادیان، ساناز و مطوف، شریف، ۱۳۹۰، سنجش مؤلفه‌های اجتماعات تاب‌آور در فرایند مدیریت بحران شهری مورد منطقه ۱۷ شهرداری تهران. صفه، ۴(۴)، ۱۱۱-۱۲۴.
۷. سمیعی، عزیز، ۱۳۹۳، پروژه اسفیر: منشور بشردوستانه و حداقل استانداردها در پاسخ‌گویی‌های بشردوستانه، تهران: چالش.
۸. عبدالهی، مجید، ۱۳۹۴، تاب‌آوری شهری در برابر حوادث: رویکردی نوین در مدیریت بحران. بازیابی ۲۵ بهمن ۱۳۹۵، از تاب‌آوری شهری در برابر حوادث رویکردی نوین در مدیریت بحران-۱. <http://www.bohrannews.com>
۹. مک‌گواپر، رابین کی. ۱۳۸۹، تحلیل خطر و ریسک زمین لرزه. (پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله و ایران، مهدی زارع و مجید میبدیان، مترجمان). تهران: پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.
۱۰. مقدم، حسن، ۱۳۸۱، مهندسی زلزله: مبانی و کاربرد، تهران: فراهنگ.
۱۱. ناطقی الهی، فریبرز، ۱۳۷۹، مدیریت بحران زمین‌لرزه ابرشهرها با رویکرد به برنامه مدیریت بحران زمین‌لرزه شهر تهران، تهران: پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.
۱۲. هاف، سوزان الیزبت و بیلهام، راجر، جی، ۱۳۹۲، کتاب زلزله، پس از آن‌که زمین می‌لرزد، ترجمه مهدی زارع و فرناز کامران‌زاد، تهران: مازیار.
13. Abrahamson, N., & Silva, W. (2008). Summary of the Abrahamson & Silva NGA ground-motion relations. *Earthquake Spectra*. <https://doi.org/10.1193/1.2924360>
14. Agarwal, J., 2015, Improving resilience through vulnerability assessment and management, *Civil Engineering and Environmental Systems*, Vol. 32, No. 1-2, PP. 5-17.
15. Alderson, D. L.; Brown, G. G. and Carlyle, W. M., 2015, Operational Models of Infrastructure Resilience, *Risk Analysis*, Vol. 35, No. 4, PP. 562-586.
16. Alexander, D., 2007, Making research on geological hazards relevant to stakeholders' needs, *Quaternary International*, Vol. 171, No. 1, PP. 186-192.
17. Alexander, D. E., 2013, Resilience and disaster risk reduction: an etymological journey, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*, Vol. 13, No. 11, PP. 2707-2716.
18. Bagheri, A.; Darijani, M.; Asgary, A. and Morid, S., 2010, Crisis in Urban Water Systems during the Reconstruction Period: A System Dynamics Analysis of Alternative Policies after the 2003 Earthquake in Bam-Iran, *Water Resources Management*, Vol. 24, No. 11, PP. 2567-2596.
19. Berberian, M. and Yeats, R. S., 2016, Tehran: An earthquake time bomb, *Geological Society of America Special Papers*, Vol. 525, No. 1, PP. 291.

20. Boostan, E.; Tahernia, N. and Shafiee, A., 2015, Fuzzy—probabilistic seismic hazard assessment, case study: Tehran region, Iran, *Natural Hazards*, Vol. 77, No. 2, PP. 525-541.
21. Bruneau, M.; Chang, S. E.; Eguchi, R. T.; Lee, G. C.; O'Rourke, T. D.; Reinhorn, A. M.; ... and Winterfeldt, D. V., 2003, A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities, *Earthquake Spectra*, Vol. 19, No. 4, PP. 733-752.
22. Bozza, A.; Asprone, D. and Manfredi, G. (2015). Developing an integrated framework to quantify resilience of urban systems against disasters, *Natural Hazards*, Vol. 78, No. 3, PP. 1729-1748. doi:10.1007/s11069-015-1798-3.
23. Chang, S. E.; McDaniels, T.; Fox, J.; Dhariwal, R. and Longstaff, H., 2014, Toward disaster-resilient cities: characterizing resilience of infrastructure systems with expert judgments, *Risk analysis*, Vol. 34, No. 3, PP. 416-434.
24. Chang, S. E.; Svekla, W. D. and Shinozuka, M. (2002). Linking infrastructure and urban economy: simulation of water-disruption impacts in earthquakes, *Environment and Planning B-Planning & Design*, Vol. 29, No. 2, PP. 281-301. doi:10.1068/b2789.
25. Cutter, S. L.; Boruff, B. J. and Shirley, W. L., 2003, Social Vulnerability to Environmental Hazards*, *Social Science Quarterly*, Vol. 84, No. 2, PP. 242-261. doi:10.1111/1540-6237.8402002.
26. Dahlberg, R.; Johannessen-Henry, C. T.; Raju, E. and Tulsiani, S., 2015, Resilience in disaster research: three versions, *Civil Engineering and Environmental Systems*, Vol. 32, No. 1-2, PP. 44-54.
27. FEMA, 1999, Earthquake Loss Estimation Methodology, HAZUS 99, Technical Manual, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C, USA.
28. FEMA, 2013, *HAZUS-MH2.1 Multi Hazard Loss Estimation Methodology*, Washington.
29. Frazier, T. G., Walker, M. H., Kumari, A., & Thompson, C. M. (2013). Opportunities and constraints to hazard mitigation planning. *Applied Geography*. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.01.008>
30. Gardner, J.K., and Knopoff, L., 1974, Is the sequence of earthquakes in southern California with aftershocks removed Poissonian?, *Bull. Seism. Soc. Am*, Vol. 64, No. 1, PP. 1363-1367.
31. Holling, C. S., 1973, Resilience and Stability of Ecological Systems, *Annual Review of Ecology and Systematics*, Vol. 1, No. 4, PP. 1-23.
32. Hough, S. and Roger, B., 2014, *After the Earth quakes: elastic rebound on an urban planet*, translated by Kamranzadeh, F.; Zare, M., Tehran: Maziar.
33. JICA, 2000, *The Study on Seismic Microzoning of the Greater Tehran Area in the Islamic Republic of Iran*, Pacific Consultants International Report, Japan.
34. JICA, 2006, *The study on water supply system resistant to earthquakes in Tehran Municipality in the Islamic Republic of Iran*, Tokyo Engineering Consultants Co, Japan.
35. Kijko, A. and Graham, G., 1998, Parametric-historic Procedure for Probabilistic Seismic Hazard Analysis Part I: Estimation of Maximum Regional Magnitude m_{max} , *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 152, No. 3, PP. 413-442.
36. Lindell, M. K. and Prater, C. S., 2003, Assessing Community Impacts of Natural Disasters, *Natural Hazards Review*, Vol. 4, No. 4, PP. 176-185.
37. Lund, L.V., and Schiff, A.J., 1992, TCLEE pipeline failure database: New York, Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering, American Society of Civil Engineers.
38. Ma, X. and Ohno, R., 2012, Examination of Vulnerability of Various Residential Areas in China for Earthquake Disaster Mitigation, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol. 35, No. 1, PP. 369-377.
39. Meerow, S.; Newell, J. P. and Stults, M., 2016, Defining urban resilience: A review, *Landscape and Urban Planning*, Vol. 147, PP. 38-49. doi:<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.11.011>

40. Moghadam, H., 2002, *Earthquake Engineering*, Tehran: Farahang.
41. Nategielahi, F., 2000, *Megacities' Disaster Management with Resprct to Tehran's Earthquake Disaster Management*, Tehran: International Institute of Earthquake Engineering and Seismology.
42. National Research Council Committee on National Earthquake Resilience, 2011, *National earthquake resilience: research, implementation, and outreach*, Washington, D.C.: National Academies Press.
43. Omidvar, B.; Hojjati Malekshah, M. and Omidvar, H., 2014, Failure risk assessment of interdependent infrastructures against earthquake, a Petri net approach: case study-power and water distribution networks, *Natural Hazards*, Vol. 71, No. 3, PP. 1971-1993. doi:10.1007/s11069-013-0990-6.
44. O'Rourke, T. D.; Jung, J. K. and Argyrou, C. (2016). Underground pipeline response to earthquake-induced ground deformation, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 91, PP. 272-283. doi:https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.09.008.
45. Pagano, A.; Pluchinotta, I.; Giordano, R. and Vurro, M., 2017, Drinking water supply in resilient cities: Notes from L'Aquila earthquake case study, *Sustainable Cities and Society*, Vol. 28, No.1, PP. 435-449.
46. Pelling, M., 2003, *The vulnerability of cities: Natural disasters and social resilience*, London: Earthscan Publications.
47. Pimm, S. L., 1984, The Complexity and Stailityof Ecosystems, *Nature*, Vol. 307, No. 5949, PP. 321-326. doi:10.1038/307321a0.
48. Porter, K. A., 2016, *Damage and Restoration of Water Supply Systems in an Earthquake Sequence*, Colorado university, U.S.A.
49. Rafieian, M. et al., 2011, The concept of resilience and indicators of the community-based disaster management (CBDM), *Spatial Planning*, Vol. 15, No. 4, PP. 19-41.
50. Ramezani Besheli, P.; Zare, M.; Ramezani Umali, R. and Nakhaezadeh, G., 2015, Zoning Iran based on earthquake precursor importance and introducing a main zone using a data-mining process, *Natural Hazards*, Vol. 78, No. 2, PP. 821-835
51. Rezaei, M., 2013, Evaluating the economic and institutional resilience of urban communities to natural disasters using PROMETHE technique Case study: Tehran districts, *Disaster Management*, Vol. 2, No. 1, PP. 27-38.
52. Rezaei, M., 2016, Measurement and evaluation of physical resilience of urban communities against earthquake (Case study: Tehran neighborhoods), *Human Geography Research Quarterly*, Vol. 47, No. 4, PP. 609-623.
53. Samadi Alinia, H. and Delavar, M. R., 2011, Tehran's seismic vulnerability classification using granular computing approach, *Applied Geomatics*, Vol. 3, No. 4, PP. 229-240.
54. Samiee, A., ۲۰۱۴ , *Humanitarian Charter and Minimum Standards in Humanitarian Response*, Tehran: Chalesh,.
55. Sutanta, H.; Rajabifard, A. and Bishop, I. D., 2012, Disaster risk reduction using acceptable risk measures for spatial planning, *Journal of Environmental Planning and Management*, Vol. 56, No. 6, PP. 761-785.
56. Tanaka, Y., 2012, Disaster Policy and Education Changes over 15 Years in Japan, *Journal of Comparative Policy Analysis*, Vol. 14, No. 3, PP. 245-253.
57. Timmerman, P., 1981, *Vulnerability, Resilience and the Collapse of Society: A Review of Models and Possible Climatic Applications*, Institute for Environmental Studies, Canada: University of Toronto,
58. Torres-Vera, M. A. and Antonio Canas, J., 2003, A lifeline vulnerability study in Barcelona, Spain, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 80, No. 2, PP. 205-210.
59. UNISDR, 2009, *Terminology on Disaster Risk Reduction*, Network: United Nation.

60. United States, Department of Homeland Security., 2007, *Target capabilities list a companion to the national preparedness guidelines*, Department of Homeland Security, U.S.A.
61. U.S Department of Homeland Security, 2006, National Infrastructure Protection Plan, Retrieved from <https://fas.org/irp/agency/dhs/nipp.pdf>
62. Warner, K.; Bouwer, L. M. and Ammann, W., 2007, Financial services and disaster risk finance: Examples from the community level, *Environmental Hazards*, Vol. 7, No. 1, PP. 32-39.
63. Winchester, P., 2000, Cyclone mitigation, resource allocation and post-disaster reconstruction in south India: Lessons from two decades of research, *Disasters*, Vol. 24, No. 1, PP. 18-37. doi:10.1111/1467-7717.00129.