

## ارزیابی تاب‌آوری زیرساخت‌های شبکه آب شهری در برابر زلزله (مطالعه موردی: منطقه ۲ تهران)

سید محسن 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: ۱۳۹۶/۰۳/۲۴

پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۲۰

### چکیده

توسعه شهرها در نواحی‌ای با خطرپذیری بالا و وقوع زلزله‌های مخرب در سال‌های اخیر، نشان‌دهنده ضرورت برنامه‌ریزی پیش از وقوع بحران است. براین اساس تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری، به‌ویژه سیستم آب‌رسانی اهمیت بسیاری در مدیریت بحران زلزله دارد. پژوهش کاربردی و توصیفی-تحلیلی حاضر، با هدف ارزیابی میزان آسیب‌پذیری زیرساخت‌های خطوط آب‌رسانی در برابر زلزله، افزایش تاب‌آوری این سیستم در منطقه ۲ شهر تهران و ارائه راهکارهای کاهش آسیب‌پذیری انجام شده است. با توجه به خطرپذیری بالای این شهر در برابر زلزله و موقعیت عبور خطوط لوله اصلی از منطقه ۲، این منطقه به‌عنوان نمونه موردی برای بررسی خطوط آب‌رسانی انتخاب شد. با استفاده از روش‌های تحلیل احتمال حرکت لرزه‌ای، پارامترهای حرکت لرزه‌ای براساس گسل شمال تهران به‌دست آمد. سپس با توجه به شاخص حداقل آب مورد نیاز جامعه، مقوله آب‌رسانی اضطراری مدنظر قرار گرفت و راهکارهای افزایش تاب‌آوری ارائه شد. با توجه به نتایج پژوهش، کمینه نرخ تعمیرات بر کیلومتر  $0.06+$  و بیشینه آن  $0.44+$  است؛ بنابراین، احتمال شکست خطوط و نشست آن‌ها در محله‌های شمالی منطقه ۲ در رتبه‌های زیاد و خیلی زیاد و در محله‌های جنوبی در رتبه متوسط به پایین قرار دارد. براساس نتایج تحلیل خسارت، در ۴۳ نقطه شکست کامل خطوط و در ۱۷۵ نقطه نشست قابل مشاهده است. در پایان، با در نظر گرفتن آسیب‌پذیری خطوط، خطر لرزه‌خیزی و شاخص‌های آب‌رسانی اضطراری، راهکارهای افزایش تاب‌آوری ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: آسیب‌پذیری، تاب‌آوری، زلزله، زیرساخت آب، منطقه ۲ شهر تهران.

## مقدمه

در سال‌های اخیر وقوع زلزله‌های ناگوار در شهرهای گوناگون جهان، پیکره شهرها به‌ویژه زیرساخت‌های شهری را با خسارات فراوانی مواجه کرده است. در این جوامع به‌دلیل برنامه‌ریزی نامناسب، تاب‌آوری کافی در برابر بحران‌هایی مانند زلزله وجود نداشته و در کنار خسارات فراوان جانی و مالی، امکان بهبود عملکردهای شهر و حتی بازگشت به حالت اولیه از بین رفته است. در دهه آخر قرن بیستم و اوایل قرن حاضر، بسیاری از بحران‌های طبیعی مدنظر جامعه جهانی قرار گرفته است (تاناکا، ۲۰۱۲: ۲۴۵). در دو دهه گذشته، میزان تلفات انسانی و خسارات اقتصادی ناشی از بحران‌های طبیعی افزایش یافته است که می‌توان دلیل آن را سرعت روزافزون توسعه شهرها و مواجه‌شدن زیرساخت‌های شهری و شهروندان با خطر ناشی از این بحران‌ها دانست (سوتانتا و همکاران، ۲۰۱۲: ۱؛ لیندل و پراتنر، ۲۰۰۳: ۱۷۷). با توجه به این مخاطرات، مناطق مختلف شهری با مشخصه‌های گوناگونی مواجه می‌شوند که به خطرپذیری آن‌ها می‌انجامد (ما و اوهنو، ۲۰۱۲: ۳۷۶)؛ از این‌رو بررسی میزان آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شهری بسیار مهم است؛ زیرا امری ضروری در روند پایداری و بازیابی سریع عملکردهای شهری به‌شمار می‌آیند (چنگ و همکاران، ۲۰۱۴: ۴۱۶).

می‌توان گفت مشخص کردن میزان آسیب‌پذیری احتمالی زیرساخت‌های آب شهر یکی از مهم‌ترین نیازهای شهروندان است و اهمیت ویژه‌ای در افزایش تاب‌آوری دارد. عملکرد مناسب سیستم آب از مقوله‌های ضروری در تداوم حیات ساکنان شهری و کاهش میزان خطرپذیری افراد، سیستم‌ها و زیرساخت‌های حیاتی شهر به‌ویژه شریان‌های اصلی محسوب می‌شود. امروزه با توجه به افزایش آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شهری (همان: ۴۱۷)، تأثیر آن‌ها بر جامعه و لزوم توجه به برنامه‌ریزی پیش از وقوع زلزله (الکساندر، ۲۰۰۷: ۱۹۱)، افزایش تاب‌آوری جوامع در مقابل زلزله اهمیت زیادی دارد؛ زیرا در حفظ عملکردهای مهم زیرساخت‌های حیاتی شهر تأثیرگذار است.

با توجه به لرزه‌خیزی فعال ایران و سابقه طولانی زلزله‌های بزرگ در کشور (مقدم، ۱۳۸۱: ۷۶) آسیب‌پذیری تهران در برابر زلزله، پیامدهای مخرب و نامطلوبی به‌همراه دارد (ناطق‌الهی، ۱۳۷۹: ۳). شهر تهران به‌دلیل تمرکز جمعیت و زیرساخت‌های حیاتی، اهمیت ویژه‌ای در سطح ملی دارد (هاف و همکاران، ۱۳۹۲: ۳۳۹) و ضرورت تاب‌آوری جوامع شهری به‌ویژه بر پایه شریان حیاتی آب را بیشتر مشخص می‌کند. در این پژوهش، میزان خسارات خطوط شبکه آب‌رسانی شهری هنگام بروز زلزله از جمله شکست و نشت سیستم آب‌رسانی، همچنین قطع خدمات‌رسانی بررسی شده است تا راهکارهای افزایش تاب‌آوری براساس استانداردهای جهانی ارائه شود.

## مبانی نظری

### تاب‌آوری

تاب‌آوری از دیدگاه لغوی به معنای بازیابی وضع قبلی، بازگشت به گذشته و بهبود سریع است (رضایی، ۲۰۱۳: ۶۱۱). این مفهوم که متضمن استحکام و بازگشت‌پذیری است، قرن‌ها کاربرد داشته است (الکساندر، ۲۰۱۳: ۲۷۰۷). با این حال تاب‌آوری در شهرسازی مفهومی جدید محسوب می‌شود (داوودی و همکاران، ۲۰۱۲: ۳۰۰) که امروزه در محیط‌زیست، اقتصاد، جغرافیای انسانی، مدیریت بحران و کاهش آسیب‌پذیری کاربردی گسترده دارد (دالبرگ و همکاران، ۲۰۱۵: ۴۴).

هولینگ (۱۹۷۳) از اولین پیشگامان تبیین مفاهیم تاب‌آوری در دهه ۷۰ میلادی، تاب‌آوری را توانایی سیستم برای جذب تغییرات می‌داند (مانینا، ۲۰۰۶: ۴۳۴). از دیدگاه او سنجش تاب‌آوری به میزان اخلاص و آشفتگی‌ای که سیستم تحمل کرده است و همچنان مقاومت می‌کند گفته می‌شود (هولینگ، ۱۹۷۳: ۷). نخستین بار تیمرمن در سال ۱۹۸۱ مفهوم تاب‌آوری را در حوزه مخاطرات طبیعی به‌کار برد (بسطامی‌نیا، ۲۰۱۷: ۲۷۰). درحقیقت این مفهوم برای توصیف

مقاومت سیستم‌های طبیعی در مقابل اختلال و بیان توانایی آن‌ها در نوسازی و سازمان‌دهی خودشان استفاده شد (اکسلی، ۲۰۱۳: ۶؛ داوودی، ۲۰۱۲: ۳۰۰).

به اعتقاد بسطامی‌نیا، تاب‌آوری اجتماع در مقابل سوانح به میزان اختلالی گفته می‌شود که یک سیستم می‌تواند جذب کند و همچنان در همان وضعیت باقی بماند. به عبارت دیگر، تاب‌آوری یعنی توانایی سیستم در خودسازمان‌دهی، تولید، گسترش یادگیری و ظرفیت تطبیق‌پذیری خود (بسطامی‌نیا و همکاران، ۲۰۱۷: ۲۷۰). روند تکامل تاب‌آوری نشان می‌دهد که این مقوله با معانی و پیچیدگی‌های گوناگونی همراه است و امروزه در حوزه‌های متنوعی از قبیل آسیب‌پذیری و کاهش خسارات کاربرد دارد. در برخی پژوهش‌های تاب‌آوری در حوزه بحران، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری دو مقوله مجزا، اما مرتبط با یکدیگر هستند؛ به طوری که تاب‌آوری یکی از اجزای سه‌گانه تعیین‌کننده آسیب‌پذیری به‌شمار می‌آید (مومبی، ۲۰۱۴: ۲۴) و افزایش آن سبب کاهش آسیب‌پذیری می‌شود. در مجموع می‌توان گفت رویکرد آسیب‌پذیری به‌دلیل تمرکز بیشتر بر سیستم‌های انسانی به تکامل تاب‌آوری انجامیده است (بسطامی‌نیا و همکاران، ۲۰۱۷: ۲۷۰).

به‌دلیل گستردگی استفاده از مفهوم تاب‌آوری، تعریف جامعی از این مقوله که از نظر فرارشته‌ای پذیرفته باشد ارائه نشده است (رضایی، ۱۳۹۲: ۲۸). در جدول ۱، تعاریف تاب‌آوری پژوهشگران مطرح در زمینه‌های مرتبط آمده است.

جدول ۱. تعاریف تاب‌آوری از دیدگاه برخی پژوهشگران

پژوهشگران	تعاریف تاب‌آوری
تیمرن، ۱۹۸۱	ظرفیت یک سیستم یا بخشی از آن برای جذب و بازیابی پس از وقوع واقعه‌ای خطرناک
هولینگ، ۱۹۹۵	ظرفیت ضربه‌پذیری و قابلیت سیستم در جذب اختلالات یا میزان آشفتگی‌ای که پیش از تغییر ساختار سیستم به آن وارد می‌شود.
پلینگ، ۲۰۰۳	توانایی انطباق با تهدیدها، کاهش آسیب یا جلوگیری از آن که به‌عنوان مثال در سازه‌های مقاوم در برابر آسیب یا جوامع تطبیق‌پذیر دیده می‌شود.
برونو و همکاران، ۲۰۰۳	افزایش توانایی زیرساخت‌های اجتماع، به‌ویژه زیرساخت‌های حیاتی مانند سیستم آبرسانی در روند تداوم فعالیت آن‌ها هنگام وقوع زلزله و پس از آن
کانگ و همکاران، ۲۰۰۷	توانایی سیستم در بازیابی پس از وقوع مخاطرات که با مدت‌زمان پذیرفته‌نبودن سیستم محاسبه می‌شود.
راهبرد جهانی کاهش خطرپذیری بلایا، سازمان ملل متحد، ۲۰۰۹	قابلیت سیستم یا جامعه مواجهه با مخاطرات، در جذب، انطباق و پایداری در برابر آثار مخاطرات در مدت‌زمان مناسب
رفیعیان و همکاران، ۱۳۸۹	ظرفیت جذب نیروهای مخرب ناشی از سوانح به‌وسیله پایداری و سازگاری، همچنین حفظ ساختارها و عملکرد اساسی سیستم یا جامعه
چنگ، ۲۰۱۴	امکان جذب شوک‌های ناشی از بحران به‌منظور تداوم فعالیت عملکردی زیرساخت‌ها برای خدمات‌دهی به شهروندان
آلدرسون و همکاران، ۲۰۱۵	توانایی سیستم در تداوم عملکرد خود در طول زمان پس از وقوع بحران
بسطامی‌نیا و همکاران، ۲۰۱۷	توانایی سیستم در خودسازمان‌دهی، تولید، گسترش یادگیری و ظرفیت تطبیق‌پذیری خود

منبع: نگارندگان

## ابعاد تاب‌آوری

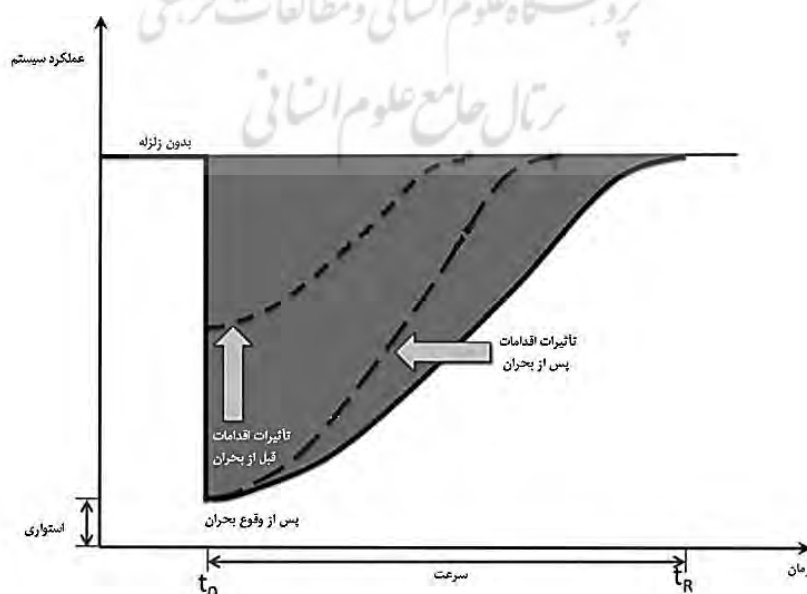
برای دستیابی به تاب‌آوری می‌توان توانایی زیرساخت‌ها را در ارائه عملکرد و خدمات‌رسانی در زمان بحران و پس از وقوع آن افزایش داد (چنگ و همکاران، ۲۰۰۸: ۳). با توجه به چندبعدی‌بودن تاب‌آوری شهر مانند تاب‌آوری فیزیکی، اجتماعی،

اقتصادی و نهادی، تاکنون شاخص‌های مدون و واحدی دربارهٔ سنجش کمی تاب‌آوری مشخص نشده است (رضایی و همکاران، ۱۳۹۴: ۶۱۲)؛ از این رو به‌منظور سنجش تاب‌آوری در هر حوزه با توجه به نیاز آن، شاخص‌های مورد نظر تدوین شده است. در حوزهٔ تاب‌آوری زیرساخت‌ها، با توجه به فیزیکی بودن حوزهٔ تاب‌آوری و بررسی عملکرد آن بر پایهٔ نیاز جامعه، ابعاد کالبدی و نیازهای انسانی برای تعیین عملکرد بررسی شده‌اند. در این پژوهش نیز، به تحلیل ابعاد کالبدی سیستم آبرسانی با شاخص‌های خطوط لوله، زمان بازیابی، آسیب‌پذیری و سطح عملکرد پرداخته شده است.

### تاب‌آوری زیرساخت‌ها

عوامل گوناگونی بر تاب‌آوری شهرها تأثیرگذارند، اما از دیدگاه بیشتر پژوهشگران، تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری و عملکرد آن‌ها به‌ویژه سیستم آبرسانی شهر که تأثیری مستقیم بر قابلیت امداد رسانی، توان بازیابی و سلامت شهروندان پس از وقوع زلزله دارد، بسیار مهم است (پاگانو و همکاران، ۲۰۱۷: ۴۳۷). سیستم آبرسانی شهری مهم‌ترین زیرساخت حیاتی به‌شمار می‌آید که معمولاً در اثر وقوع حوادث طبیعی به‌ویژه زلزله و سیل آسیب می‌بیند؛ از این رو عملکرد خطوط لولهٔ سیستم آبرسانی، تعیین‌کنندهٔ میزان تاب‌آوری و طراحی زیرساخت در برابر مخاطرات متعدد طبیعی و ساختی است (ارورک، ۲۰۱۶: ۲۷۲).

بازیابی عملکرد سیستم آبرسانی نقشی حیاتی در تاب‌آوری و بازسازی پس از وقوع بحران دارد (وینچستر، ۲۰۰۰: ۱۸)؛ بنابراین ضروری است در مواقع بروز بحران، این سیستم به حالت اولیه بازگردد تا علاوه بر پشتیبانی از سلامت جامعه، سایر فعالیت‌های بازیابی امکان‌پذیر شود (باقری و همکاران، ۲۰۱۰: ۲۵۶۸). از دیدگاه چنگ (۲۰۱۴) تاب‌آوری سیستم آبرسانی بر پایهٔ منحنی زمانی در طول زمان با سطح عملکرد سنجیده می‌شود. براساس این مدل، هرچه زمان بازیابی کاهش یابد، تاب‌آوری سیستم افزایش خواهد یافت (چنگ، ۲۰۱۴: ۴۱۸). این مدل را می‌توان برگرفته از مدل برونتو (۲۰۰۳) دانست که کیفیت عملکرد در آن با درصد بازیابی عملکرد سیستم براساس وضعیت پیش از بحران سنجیده می‌شود (شکل ۱). براین اساس مهم‌ترین شاخص سنجش تاب‌آوری زیرساخت‌های حیاتی شهر بر پایهٔ زمان بازیابی عملکرد ارزیابی می‌شود (جدول ۲).



شکل ۱. مدل مفهوم سنجش تاب‌آوری زیرساخت از دیدگاه چنگ

منبع: همان

شاخص زمان بازیابی، استواری و عملکرد سیستم از شاخص‌های اصلی سنجش کمی تاب‌آوری به‌شمار می‌آیند. باید توجه داشت محاسبه میزان آسیب‌هایی که عملکرد سیستم را کاهش می‌دهند ضروری است؛ زیرا این آسیب‌ها نیز به احتمال وقوع خطر و ریسک بحران وابسته هستند.

سیستم حیاتی تاب‌آور ممکن است به کاهش عملکرد در برابر نیروهای مخاطره‌انگیز بینجامد، اما موجب ازهم‌پاشیدگی آن نشود. با توجه به بیشتر تعاریف، تاب‌آوری سیستمی است که توانایی بازیابی عملکرد را به حالت قبل یا از پیش تعیین‌شده دارد. همچنین می‌تواند شوک‌های ناشی از بروز خطر را تحمل کند. برونو (۲۰۰۳) شاخص‌های چهارگانه‌ای برای سنجش تاب‌آوری مرکز محور معرفی می‌کند که با توجه به چارچوب تاب‌آوری به عواملی مانند استواری، افزونگی، تدبیر و سرعت وابسته است (جدول ۳). سنجش تکنیکی استواری مرتبط با زیرساخت‌ها، شامل اجتناب از خسارت و ادامه میزان سرویس‌دهی سیستم مورد نظر است.

جدول ۲. شاخص‌های سنجش تاب‌آوری در مدل چانگ

زیرساخت	زمان بازیابی (سرعت)	میزان اخلاص	آسیب
سیستم آبرسانی	زمان مورد نیاز برای بازیابی عملکرد از نقطه آغاز بحران	درصد کاهش عملکرد سیستم آب	تشخیص آسیب و روش‌های تعیین آن

منبع: نگارندگان

جدول ۳. شاخص‌های سنجش تاب‌آوری در مدل برونو

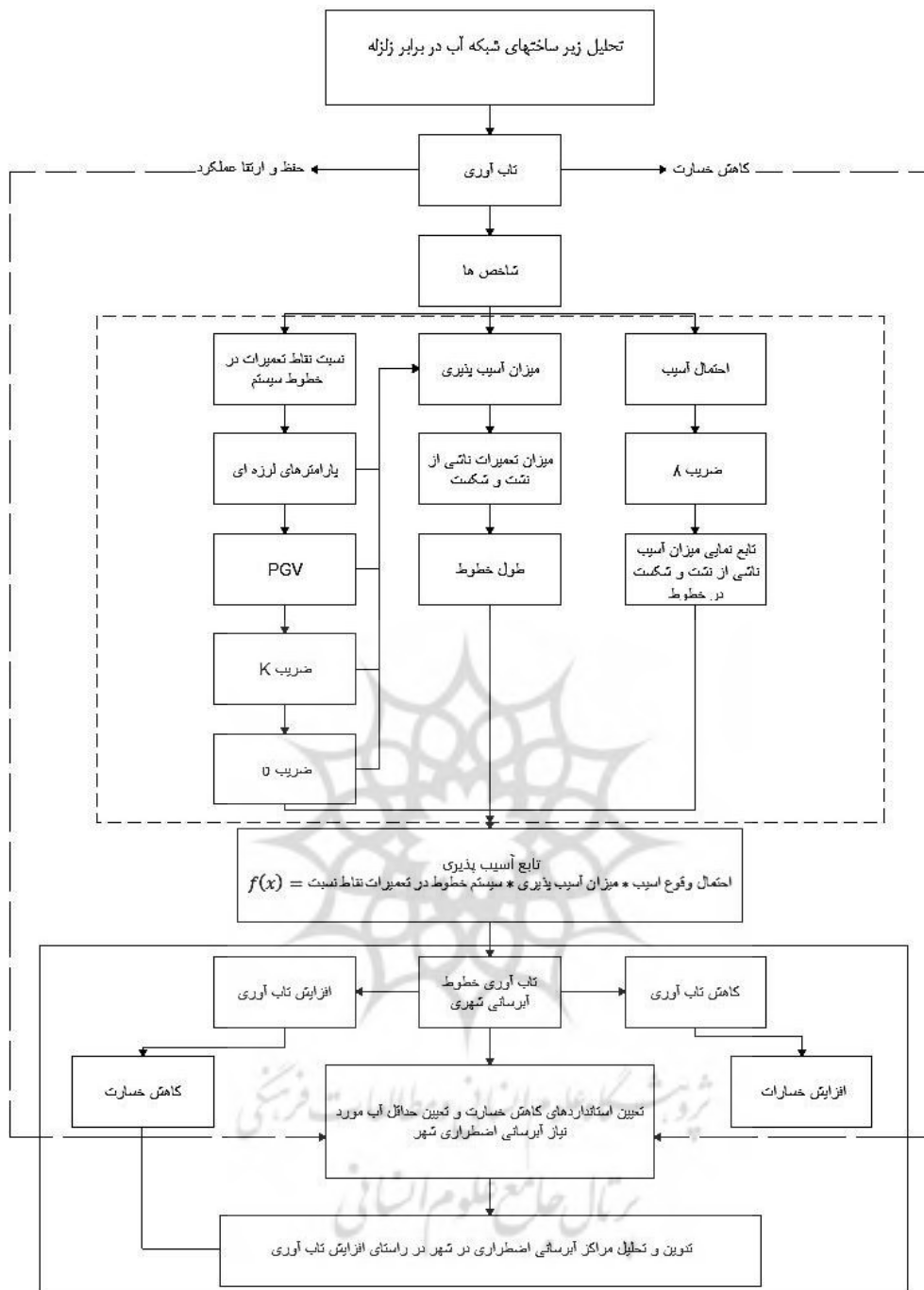
سیستم	استواری	افزونگی	تدبیر	سرعت
تکنیکی	اجتناب از خسارت و ادامه میزان سرویس	پشتیبانی	تشخیص آسیب و روش‌های تعیین آن	بهینه‌سازی زمان بازگشت به حالت اولیه
ارگان	امکان ادامه فعالیت	پشتیبانی	برنامه‌ای برای مقابله با آسیب‌ها	کاهش زمان بازیابی سرویس
اجتماع	اجتناب از خسارات جانی	جایگزینی نیاز جامعه	برنامه و منابع مرتبط با نیاز جامعه	بهینه‌سازی زمان بازگشت جامعه به حالت عملکردی قبل

منبع: نگارندگان

در این پژوهش، با توجه به اهداف و تعاریف تاب‌آوری، تعریف چنگ (۲۰۱۴) و برونو و همکاران (۲۰۰۳) که بیشتر در پژوهش‌های زیرساخت شهری به آن‌ها استناد شده است، مدنظر قرار گرفتند؛ بنابراین پس از تعیین میزان آسیب‌پذیری و خسارات، استاندارد عملکرد آبرسانی به شهروندان و زمان مورد نیاز آن به‌منظور افزایش تاب‌آوری بررسی شد.

## روش پژوهش

مطالعه حاضر کاربردی و توصیفی-تحلیلی است؛ از این‌رو موضوع و مشخصه‌های مربوط به نمونه مورد بررسی، و داده‌های کمی و کیفی تجزیه و تحلیل شد. در این پژوهش، تاب‌آوری از بعد کاهش خسارات و آمادگی در برابر نتایج وقوع خطر مدنظر قرار گرفت. براین اساس مهم‌ترین اصل در روند افزایش تاب‌آوری، آگاهی از میزان آسیب‌پذیری سیستم و خسارات احتمالی است تا براساس آن راهکارهای افزایش تاب‌آوری شبکه آبرسانی و اجتماع شهری ارائه شود. در ادامه، خسارت خطوط آب و تشخیص آسیب‌ها براساس آنالیز حرکت لرزه‌ای زمین و مبتنی بر عملکرد سیستم برآورد شد. در شکل ۲، چارچوب نظری تحلیل تاب‌آوری در پژوهش آمده است.



شکل ۲. چارچوب نظری و تحلیلی تبیین کننده آسیب پذیری سیستم آبرسانی و تاب آوری آن در پژوهش حاضر

### تحلیل حرکت لرزه‌ای در نمونه موردی

در این پژوهش، به کمک روش احتمالاتی<sup>۱</sup> و با تحلیل گسل شمال تهران، پارامترهای حرکت لرزه‌ای در نمونه موردی به دست آمد. در این روش، احتمال خطر زلزله براساس برآورد خطر زمین لرزه در محدوده مطالعاتی تحلیل می‌شود و برآورد احتمال وقوع زلزله‌هایی با بزرگی مشخص با استفاده از کاتالوگ زلزله‌های پیشین در یک ساختمان و انتخاب یک مدل ریاضی صورت می‌گیرد. در این پژوهش، ابتدا تمامی اطلاعات مربوط به زلزله‌های پیشین در محدوده مورد نظر در

فاصله ۱۵۰ کیلومتر بررسی شد تا پارامترهای لرزه‌خیزی محاسبه شود. سپس کاتالوگ زلزله‌های تاریخی و زلزله‌های تهران بررسی شد و تبدیل بزرگای زلزله‌ها به بزرگای گشتاوری<sup>۱</sup> صورت گرفت. پس از این، پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها از زلزله‌های دستگاهی با استفاده از روش پنجره متغیر زمانی و مکانی نوپوف و گاردنر (۱۹۷۴) حذف شد. همچنین پارامترهای لرزه‌خیزی منطقه به کمک روش کیجکو و گراهام (۱۹۹۸)، در برنامه کیجکو ۲۰۰۱ به دست آمد.

در این پژوهش، از رابطه کاهندگی آبراهامسون و سیلوا (۲۰۰۸) استفاده شد و مدل‌سازی گسل شمال تهران در نرم‌افزار ای.زد.اف ریسک<sup>۲</sup> انجام شد. همچنین به منظور تکمیل تحلیل و ارائه نقشه‌های خطرپذیری و آسیب‌پذیری سیستم، نرم‌افزار جی.آی.اس ۱۰ به کار رفت. میزان حداکثر بزرگای زلزله، سناریو، بیشینه شتاب<sup>۳</sup> و بیشینه سرعت زمین<sup>۴</sup>، احتمال وقوع زلزله و ضرایب زلزله محتمل، براساس داده‌های جانمایی گسل شمال تهران و روش محاسبه تحلیل خطر احتمالی بررسی شد. برای تعیین میزان خسارات به سیستم آبرسانی و تحلیل خروجی آن، محدوده مورد مطالعه به شبکه‌های ۲۰۰ در ۲۰۰ متری تقسیم شد. تمام اطلاعات مورد نیاز از قبیل لرزه‌خیزی، جمعیت، مشخصات سیستم آبرسانی و مشخصه‌های گسل‌ها به هر شبکه تعلق یافت و تعداد نقاط شکست و نشت خطوط لوله محاسبه شد. در ادامه طبقه‌بندی منطقه براساس آسیب‌ها و نیازهای تاب‌آوری صورت گرفت و زمان مورد نیاز برای تعمیر خطوط و احتمال قطع آبرسانی مشخص شد. همچنین براساس استانداردهای مورد نیاز، راهکارهایی برای افزایش تاب‌آوری ارائه شد. از آنجاکه اندازه‌گیری تاب‌آوری در شرایط مطلق دشوار است، برای افزایش تاب‌آوری بر مبنای عملکرد سیستم آب شهری، رویکرد تطبیقی با استاندارد جهانی به کار رفت.

## بحث و یافته‌ها

### محدوده مورد مطالعه

شهر تهران به عنوان پایتخت سیاسی و اقتصادی کشور، در منطقه‌ای با خطرپذیری بالای زلزله قرار دارد (بربریان و یاتس، ۲۰۱۶: ۵۲۵) که وجود گسل‌های فعال شمال، مشا و ری خطرپذیری آن را در برابر زلزله افزایش داده است (بوستان و همکاران، ۲۰۱۶: ۵۲۶). با توجه به خطرپذیری بالا و مکان عبور گسل‌های یادشده، وقوع زلزله با بزرگای بالا در تهران بسیار محتمل است (جایکا، ۲۰۰۰: ۶). در این میان، منطقه ۲ (با جمعیت ۶۱۷,۸۱۱ نفر در سال ۱۳۸۵) به دلیل نزدیکی به گسل شمال تهران، رشد روزافزون، قرارگیری زیرساخت‌های مهم آب و عبور خطوط لوله اصلی انتقال آب از آن، اهمیت زیادی در تاب‌آوری سیستم شهری دارد. تا آنجا که هرگونه خللی در عملکرد این منطقه ممکن است نتایج مخربی بر تاب‌آوری شهر و شبکه آبرسانی هنگام وقوع زلزله داشته باشد.

در این پژوهش، اطلاعات خطوط لوله اصلی انتقال، و خطوط اصلی توزیع و فرعی توزیع آب شهر براساس داده‌های موجود به دست آمد. داده‌ها نیز به کمک سیستم اطلاعات جغرافیایی جی.آی.اس تحلیل و بررسی شدند. با توجه به اینکه مهم‌ترین بخش سیستم آبرسانی خطوط انتقال و توزیع است، در مطالعه حاضر آسیب‌پذیری خطوط اصلی انتقال بررسی شد. این خطوط شامل لوله‌های آب خام، خطوط بین تصفیه‌خانه‌ها، مخازن توزیع و خطوط بین چاه‌های عمیق هستند. تمامی لوله‌هایی که آب تصفیه‌شده را میان شهروندان توزیع می‌کنند، به عنوان خطوط توزیع مدنظر قرار گرفتند.

1. Mw

2. EZ-FRISK 7.52

3. Peak Ground Acceleration

4. Peak Ground Velocity

### بررسی آسیب‌پذیری

به‌منظور تعیین میزان آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها، گسل‌های موجود و وقوع زلزلهٔ محتمل ارزیابی شدند. در ابتدا گسل‌های فعال در تمام شهر تهران مدنظر قرار گرفت و مکان عبور خطوط آن‌ها براساس داده‌ها در نقشهٔ جی.آی.اس تهیه شد. پس از بررسی مکان گسل‌ها با توجه به سه عامل فاصله، بزرگای زلزله و مکان عبور خطوط، گسل شمال تهران به‌عنوان مهم‌ترین گسل و عامل خطرپذیری لرزه‌ای منطقهٔ ۲ شهر تهران مشخص شد. در مرحلهٔ بعد، براساس روش تحلیل خطر احتمالی زلزله، پارامترهای زلزلهٔ محتمل تعیین شد. در جدول ۴، مشخصات و مدل گسل‌ها در اطراف منطقهٔ مورد نظر آمده است.

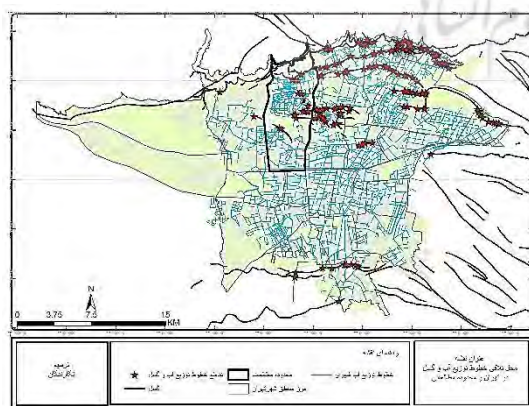
### تحلیل نقاط عبور سیستم آبرسانی از گسل در مناطق شهری

در ابتدا نقاط عبور گسل‌های اصلی و فرعی در نمونهٔ موردی تحلیل شد. همچنین بر مبنای جانمایی نواحی عبور گسل در شهر تهران، نقاط عبور خطوط سیستم آبرسانی از کل شهر و از منطقهٔ ۲ بررسی شد. براساس نتایج، نقاط شکست خطوط سیستم، شامل خطوط اصلی انتقال آب، خطوط اصلی شهر و خطوط توزیع در سه مرحله به‌دست آمد. نتیجه اینکه این خطوط در ۴۵ مورد در شهر تهران و در ۵ مورد در منطقهٔ ۲، با گسل‌های موجود تقاطع دارند. خطوط توزیع سیستم آبرسانی شهری نیز در ۱۸۹ نقطهٔ عبور از گسل‌های شهر تهران مشخص شد که از این میزان ۱۷ مورد به منطقهٔ ۲ شهر تهران مربوط است (نقشه‌های ۱ و ۲).

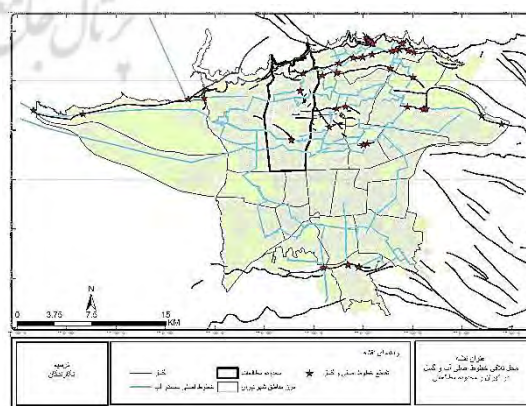
جدول ۴. مشخصات گسل‌های نمونهٔ موردی به‌عنوان منابع عامل خطرپذیری

گسل	طول (کیلومتر)	عرض مؤثر مدل (کیلومتر)	بزرگای زلزله (Mw)	مبدأ	
				°N	°E
شمال تهران	۹۰	۲۷	۷/۲	۳۵/۶۸۱۵	۵۲/۴۹۵۵
مشا	۲۰۰	۳۰	۷/۲	۳۵/۵۸۷۶	۵۱/۵۰۶۱
ری	۲۶	۱۶	۶/۷	۳۵/۸۲۵۵	۵۱/۷۳۹۲

منبع: جایکا ۲۰۰۰؛ صمدی و همکاران، ۲۰۱۱



نقشهٔ ۲. تلاقی خطوط فرعی آب و گسل در تهران



نقشهٔ ۱. تلاقی خطوط اصلی آب و گسل در تهران



### آسیب‌پذیری خطوط سیستم

مهم‌ترین عامل در تحلیل آسیب‌پذیری سیستم آب‌رسانی، تعداد نقاط شکست و نشت خطوط در واحد کیلومتر (امیدوار و کریمی، ۲۰۱۶: ۷۱۱) است که در این پژوهش براساس مشخصه‌های لرزه‌ای منطقه محاسبه شد. همچنین برای آسیب‌پذیری خطوط، روش محاسبات خسارات و رابطه‌ی فما (۱۹۹۹) در هازوس اس.آر.<sup>۱</sup> و هازوس ام.اچ.<sup>۲</sup> (پورتر، ۲۰۱۶) بر پایه‌ی واحد نقطه در کیلومتر و براساس رابطه‌ی ۱ به کار رفت و نتایج آن در محیط جی.آی.اس به نقشه‌های تحلیلی تبدیل شد.

$$RR = \left[ [v] * [\text{ضریب جنس خطوط } K] * [(PGV)^{\alpha}] \right] \quad (1)$$

در این رابطه، نرخ تعمیرات براساس تعداد نقاط نیازمند به تعمیر در واحد طول خطوط تعیین شده است. ضریب آلفا نیز ۲/۲۵ است. در محاسبات، ضریب K به‌عنوان ضریب جنس خطوط در نظر گرفته شد. این ضریب برای خطوط شکننده مانند چدن، بتن و آزیست ۱ و برای خطوط منعطف از قبیل خطوط فولادی، ۰/۳ است (فما، ۱۹۹۹). در رابطه‌ی ۱، ضریب  $v$  ۰/۰۰۰۱ است. در این پژوهش برای تعیین ضریب K، جنس تمامی خطوط اصلی و فرعی در نمونه‌ی موردی بررسی شد و هر دو مجموعه‌ی خطوط اصلی انتقال آب و خطوط توزیع شهری در دو گروه قرار گرفت. براساس نتایج تحلیل حرکت لرزه‌ای تهران، میزان عددی بیشینه‌ی سرعت زمین در زلزله‌ی محتمل با دوره‌ی بازگشت ۴۷۵ سال به‌دست آمد. میزان تعمیر خطوط سیستم آب‌رسانی نیز مشخص شد. با توجه به پارامترهای لرزه‌خیزی و جانمایی گسل‌های فعال در نمونه‌ی موردی، میزان بیشینه‌ی سرعت زمین در منطقه‌ی ۲ متغیر، و در مناطق شمالی بیشتر از مناطق جنوبی است؛ بنابراین نرخ تعمیرات ب کیلومتر در تمامی المان‌های خطوط سیستم تعیین شد که کمینه‌ی آن ۰/۰۶ و بیشینه‌ی آن ۰/۴۴ است. نتایج تحلیل در نقشه‌ی ۳ قابل مشاهده است.

افزون بر آنچه بیان شد، میزان آسیب خطوط سیستم آب‌رسانی شهر در هر قطعه، پس از مشخص کردن نقاط تعمیر براساس رابطه‌ی ۲ تعیین شد. براساس رابطه‌ی ۱،  $Li$  طول خطوط و  $RRi$  شامل تعداد تعمیر مورد نیاز ناشی از خرابی در هر خط بر مبنای بیشینه‌ی سرعت زمین به دلیل وقوع زلزله‌ی محتمل است (تورس و آنتونیو، ۲۰۰۳: ۲۰۶؛ فما، ۱۹۹۹: ۱۸).

$$Di = [RRi] * [Li] \quad (2)$$

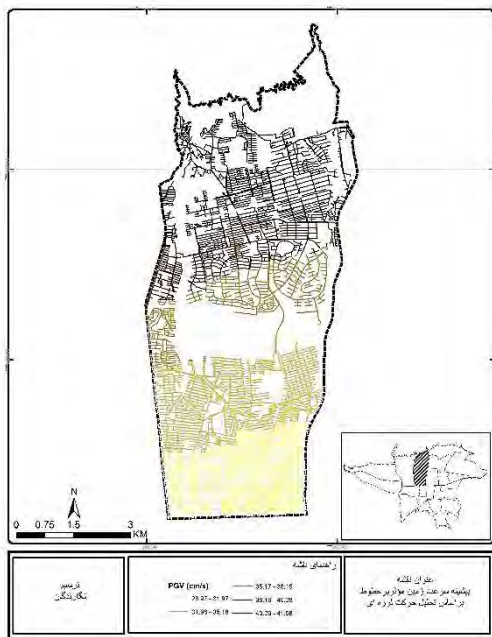
پس از تعیین آسیب در خطوط، مقادیر مربوط به احتمال شکست خطوط سیستم آب‌رسانی و خسارت فیزیکی به آن‌ها، بر پایه‌ی رابطه‌ی ۳ محاسبه شد (تورس و آنتونیو، ۲۰۰۳: ۲۰۷).

$$Pf = [A] - [\exp(-RRi * Li)] \quad (3)$$

به‌دنبال فعالیت گسل شمال تهران در منطقه‌ی ۲، سیستم آب‌رسانی این منطقه دچار آسیب و شکست شد (نقشه‌های ۳ و ۴). جانمایی خطوط و میزان بیشینه‌ی سرعت مؤثر زمین بر خطوط (نقشه‌ی ۴) نشان‌دهنده‌ی خسارات متعددی است. در این پژوهش براساس نظر لاند و شیف (۱۹۹۱)، شکست لوله به‌عنوان آسیب کلی مدنظر قرار گرفت که سبب قطع کامل آب‌رسانی می‌شود. نشت لوله آسیبی جزئی‌تر است، اما امکان آب‌رسانی با آن ادامه دارد. براساس روش هازوس ام.اچ در اثر فعالیت لرزه‌ای، ۲۰ درصد به ۸۰ درصد تناسب شکست به نشت (فما، ۱۹۹۹؛ پورتر، ۲۰۱۶) در محاسبات تحلیلی مدنظر قرار گرفت. نقشه‌های آسیب‌پذیری سیستم نیز با توجه به تحلیل‌ها تهیه شد. با توجه به شاخص آسیب‌پذیری و شکست خطوط آب، توقف عملکرد سیستم در برخی نقاط منطقه‌ی ۲ مشاهده می‌شود.

1. HAZUS -SR

2. HAZUS-MH



نقشه ۴. بیشینه سرعت مؤثر زمین بر خطوط



نقشه ۳. نقاط تعمیر در سیستم

میزان خسارات براساس نتایج، ۲۱۹ نقطه در کل شبکه است. با توجه به شبکه‌بندی ۲۰۰ در ۲۰۰ منطقه مورد نظر، نقاط تعمیر در سیستم (نقشه ۳) و میزان آسیب و خسارت به تفکیک هر قطعه مشخص شده است (نقشه ۵). براساس روابط یادشده، ۴۳ نقطه شکست کامل در سیستم به‌وجود می‌آید که سبب قطع آب و عملکرد سیستم آبرسانی می‌شود. تعداد نشت خطوط فرعی و اصلی نیز ۱۷۵ نقطه است که نحوه جانمایی فضایی آسیب‌های آن در نقشه ۵ آمده است. با توجه به نتایج، خسارات در مناطق شمالی محدوده مطالعاتی مشهودتر است.



نقشه ۶. طبقه‌بندی منطقه براساس احتمال خسارات



نقشه ۵. میزان خسارت در خطوط سیستم

احتمال شکست خطوط و آسیب به آن‌ها براساس فرمول ۳، و نتایج تحلیل تمامی خطوط لوله براساس مشخصات لرزه‌ای، جنس خطوط، مکان و طول هریک تعیین شد. نتایج پژوهش نشان می‌دهد احتمال شکست در خطوط منعطف بسیار کمتر است. در مناطق شمالی نیز احتمال آسیب ۰/۱۴ و بیشتر از مناطق جنوبی محدوده مطالعاتی است. طبقه‌بندی خسارت مؤثر بر تاب‌آوری در پنج طبقه مطابق روش ورا و کاراس (۲۰۰۲) در نقشه ۶ آمده است. براین‌اساس بیشترین خسارات در مناطق شمالی و غربی به دلیل نزدیکی به گسل، سرعت زیاد بیشینه زمین و جنس متفاوت خطوط رخ می‌دهد.

### تاب‌آوری پس از وقوع زلزله

تاب‌آوری جوامع در مقابل اختلال عملکرد سیستم آبرسانی شهری، به حداقل آب مورد نیاز هریک از شهروندان در مواقع اضطراری بستگی دارد. در این پژوهش براساس نیازمندی‌های شهروندان مطابق استانداردهای جهانی، شاخص حداقل آب مورد نیاز براساس جمعیت و تراکم منطقه ۲ بررسی شد. در جدول ۵ میزان حداقل آب مورد نیاز برای پایداری و تاب‌آوری جوامع آمده است.

جدول ۵. میزان حداقل آب مورد نیاز برای پایداری و تاب‌آوری جوامع

فاصله متر	نوع استفاده	میزان حداقل آب مورد نیاز برای پایداری اجتماعی (لیتر به نفر در روز) LPCD	بعد از وقوع زلزله روز
۲۰۰۰ تا ۱۰۰۰	آب شرب برای ادامه حیات	۲ تا ۳	تا ۳ روز
۲۵۰	آب شرب، دستشویی، حداقل نیاز روزانه	۲۰	۴ روز تا ۲ هفته
۱۰۰	آب شرب، دستشویی، حمام و پخت‌وپز	۱۰۰	۲ تا ۳ هفته
۱۰	روال عادی زندگی	۲۵۰ تا ۲۰۰	۴ هفته (تقریباً یک ماه)

منبع: اداره امنیت آمریکا، ۲۰۰۷؛ جایکا ۲۰۰۶؛ سمیعی، ۱۳۹۳

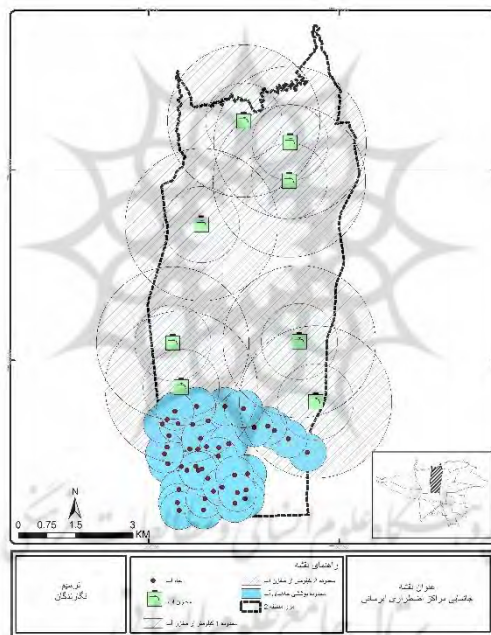
پس از بررسی نتایج آسیب‌پذیری سیستم آبرسانی و طبقه‌بندی میزان خسارات محتمل، جانمایی و اختصاص پایگاه‌های آبرسانی اضطراری براساس شاخص تاب‌آوری در جدول ۵ تعیین شد. پایگاه‌های آبرسانی اضطراری یکی از راهکارهای اساسی افزایش تاب‌آوری اجتماع است که تا زمان بازیابی کامل عملکرد شبکه پس از وقوع بحران کاربرد دارد. در این پژوهش، با توجه به شرایط جغرافیایی، اجتماعی، تراکم و عوامل شهری، جانمایی مراکز اضطراری آبرسانی با شعاع حداکثر یک کیلومتر براساس استاندارد دسترسی شهروندان (جدول ۳) انجام شد. این استاندارد در شهر توکیو ژاپن دو کیلومتر است (جایکا، ۲۰۰۶).

به‌منظور افزایش تاب‌آوری، این مراکز در دو گروه شامل مخازن و چاه‌ها طبقه‌بندی شدند. با توجه به اینکه آب مخازن سیستم آبرسانی شهر تصفیه‌شده است، اولویت مخازن از چاه‌های آب بیشتر است. در این پژوهش چاه‌های آبی که مورد استفاده آب شرب مصرفی شهروندان است و به سیستم آبرسانی موجود اتصال دارد، بررسی شد.

براساس آمار سال ۱۳۹۰، تراکم جمعیت در منطقه مورد نظر، ۱۲۸ نفر در هکتار است؛ بنابراین، جمعیت تحت پوشش در هر منطقه حائل یک کیلومتری اطراف مراکز اضطراری آبرسانی حدود ۴۰,۲۰۰ نفر است. با توجه به مطالعات سازمان آب و جایکا (۲۰۰۶) ۳۰ درصد جمعیت مورد نظر نیازمند دسترسی به مخازن اضطراری آب هستند که با احتساب آن حداقل آب مورد نیاز شرب ۲۴۱۲۰ تا ۳۶۱۸۰ لیتر در روز تا ۳ روز، ۲۴۱۲۰ لیتر در روز تا ۲ هفته و بیش از دو هفته،

حداقل مورد نیاز تاب‌آوری شهروندان ۱,۲۰۶,۰۰۰ لیتر در روز تا حداکثر سه هفته و در نهایت تا حداکثر چهار هفته ۳۰۱۵۰۰۰ لیتر در روز مورد نیاز است. در این پژوهش با توجه به ذخیره بیشتر آب مخازن، نزدیکی و هم‌پوشانی زیاد مخازن و همچنین استاندارد یادشده، فواصل هم‌پوشانی دو کیلومتر نیز مدنظر قرار گرفت. در موارد بحرانی لازم است سیستم آب‌رسانی مانند روزهای قبل از بحران ادامه یابد.

مطابق شکل ۱، هرچه میزان  $t$  کاهش یابد، ضلع خسارت کم و میزان تاب‌آوری شهر افزایش می‌یابد. با توجه به حداقل میزان آب مورد نیاز برای پایداری شهروندان، با ۸ مخزن موجود می‌توان آب مورد نیاز در مواقع اضطراری وقوع زلزله را در محدوده مطالعاتی تأمین کرد؛ البته در قسمت جنوبی محدوده امکان پوشش حداقل مورد نیاز تاب‌آوری کمتر است؛ بنابراین در این نواحی از پوشش چاه‌های فعال و مرتبط با سیستم و با توجه به مشخصات یادشده در شعاع عملکردی ۵۰۰ متر استفاده می‌شود. از ویژگی‌های برجسته تأمین آب از این چاه‌ها بهره‌برداری به صورت مجموعه‌ای است. در حال حاضر آب برداشت‌شده از چاه‌های عمیق به مخازن توزیع منتقل، و پس از ترکیب با کلر میان مشترکان توزیع می‌شود. در نقشه ۷، جانمایی مراکز اضطراری آب‌رسانی براساس ارزیابی آسیب‌ها به‌منظور تأمین نیازهای شهروندان برای افزایش تاب‌آوری آمده است.



نقشه ۷. جانمایی مراکز اضطراری آب‌رسانی

## نتیجه‌گیری

نبود سیستم آب‌رسانی به شهروندان تاب‌آوری شهر را کاهش می‌دهد و مشکلات گوناگونی را به‌همراه دارد. براساس نتایج این پژوهش، آسیب‌پذیری سیستم آب‌رسانی شهری در منطقه ۲ تهران زیاد است؛ بنابراین با توجه به تراکم جمعیت در این منطقه و خطرپذیری زیاد آن، ارائه راهکارهای افزایش تاب‌آوری سیستم آب در برابر زلزله بسیار ضروری است. پژوهش‌های مرتبط با تاب‌آوری، به‌ویژه بررسی زیرساخت‌های سیستم آب‌رسانی شهری در علوم شهرسازی از مطالعات نوپا به‌شمار می‌آید. این پژوهش با هدف مشخص کردن میزان خسارات ناشی از زلزله محتمل برای افزایش تاب‌آوری سیستم آب‌رسانی شهری در منطقه ۲ شهر تهران انجام شد تا میزان عملکرد مورد نیاز و توانایی حفظ آن در مواجهه با زلزله احتمالی شناسایی شود. براین‌اساس تاب‌آوری خطوط سیستم آب‌رسانی در منطقه مدنظر با توجه به میزان

آسیب‌پذیری و خسارات محتمل در طبقات متفاوتی قرار دارند. می‌توان گفت محله‌ها و مناطق شمالی محدوده مطالعاتی از قبیل سعادت‌آباد و شهرک غرب، به خسارات بیشتری دچار می‌شوند، اما آسیب‌ها در مناطق جنوبی کمتر است. تاب‌آوری محله‌های غربی و شمالی با توجه به وجود مخازن هشت‌گانه، براساس ادامه خدمات‌رسانی و بر مبنای حداقل نیاز جمعیتی بهتر از محله‌های توحید و شادمهر است. خسارات ناشی از قطع کامل خدمات‌رسانی در ۴۳ مکان رخ داده که با توجه به شاخص‌های آسیب‌پذیری در کل منطقه صورت گرفته است. با این حال احتمال آسیب‌پذیری سیستم خطوط آب‌رسانی در مناطق شمال و شمال غرب این منطقه زیاده‌تر و بیشتر از ۰/۱۴۸ است. با توجه به اهمیت زیاد خدمات‌رسانی و تاب‌آوری سیستم آب‌رسانی در شهر، به‌منظور افزایش تاب‌آوری و کاهش میزان خسارات ناشی از وقوع زلزله در محدوده مطالعاتی پیشنهادهایی مطرح می‌شود:

- اولویت‌بندی مناطق براساس میزان خسارات محتمل و آسیب‌پذیری سیستم آب‌رسانی، به‌منظور اجرای برنامه‌های افزایش تاب‌آوری؛
- تدوین قوانین برای مقاوم‌سازی و تغییر خطوط فرسوده سیستم آب‌رسانی و اولویت‌دادن تغییر جنس خطوط سیستم به خطوط منقطع، با هدف افزایش ایستایی سیستم در هنگام وقوع زلزله محتمل؛
- حمایت از مطالعات علمی و پژوهش‌های کاربردی به‌منظور تحلیل خطرات و تعیین خسارات زلزله بر زیرساخت‌های شهری، به‌ویژه سیستم آب‌رسانی در مناطق شهری؛
- ایجاد مراکز آب‌رسانی اضطراری با هدف تقویت عملکرد سیستم آب‌رسانی به‌کمک اولویت مخازن موجود در محدوده مورد نظر؛
- اهمیت ارائه مسیره‌های جایگزین به‌منظور توسعه آبی و اجتناب از عبور خطوط از گسل در برنامه بلندمدت؛
- افزایش هماهنگی نهادهای ارائه خدمات شهری در افزایش مشارکت و آگاهی شهروندان از آسیب‌پذیری سیستم آب‌رسانی و نحوه استفاده از مراکز آب‌رسانی اضطراری؛
- تدوین برنامه جامع کنترل کیفیت چاه‌های آب در حال بهره‌برداری به‌منظور دسترس‌پذیری عموم مردم در مواقع اضطراری.

## منابع

۱. رضایی، محمدرضا، ۱۳۹۲، ارزیابی تاب‌آوری اقتصادی و نهادی جوامع شهری در برابر سوانح طبیعی، فصلنامه مدیریت بحران، سال اول، شماره ۲، صص ۲۷-۳۸.
۲. رضایی، محمدرضا، رفیعیان، مجتبی و سید مصطفی حسینی، ۱۳۹۴، سنجش و ارزیابی میزان تاب‌آوری کالبدی اجتماع‌های شهری در برابر زلزله (مطالعه موردی: زلزله محله‌های شهر تهران)، فصلنامه پژوهش‌های جغرافیای انسانی، سال چهل‌وهفتم، شماره ۴، صص ۶۰۹-۶۲۳.
۳. رفیعیان، مجتبی و همکاران، ۱۳۸۹، تبیین مفهومی تاب‌آوری و شاخص‌سازی آن در مدیریت سوانح اجتماع‌محور (CBDM)، برنامه‌ریزی و آمایش فضا، سال پانزدهم، شماره ۴، صص ۱۹-۴۱.
۴. سمیعی، عزیز، ۱۳۹۳، پروژه اسفیر: و حداقل استانداردها در پاسخگویی‌های بشردوستانه، چاپ اول، انتشارات چالش، تهران.
۵. مقدم، حسن، ۱۳۸۱، مهندسی زلزله: مبانی و کاربرد، انتشارات فرهنگ، تهران.
۶. ناطقی الهی، فریبرز، ۱۳۷۹، مدیریت بحران زمین‌لرزه ابرشهرها با رویکرد به برنامه مدیریت بحران زمین‌لرزه شهر تهران، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران.

۷. هاف، سوزان و همکاران، ۱۳۹۲، کتاب زلزله، پس از آنکه زمین می‌لرزد، انتشارات مازیار، تهران.

8. 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.
9. Alexander, D., 2007, **Making Research on Geological Hazards Relevant to Stakeholders' Needs**, Quaternary International, Vol. (SPEC. ISS.), No. 1, PP. 186-192.
10. Alexander, D. E., 2013, **Resilience and Disaster Risk Reduction: An Etymological Journey**, Nat, Hazards Earth Syst, Sci, Vol. 13, No. 11, PP. 2707-2716.
11. Bastaminia, A., Rezaei, M. R., and Dastoorpoor, M., 2017, **Identification and Evaluation of the Components and Factors Affecting Social and Economic Resilience in City of Rudbar Iran**, International Journal of Disaster Risk Reduction, Vol. 22, No. 1, PP. 269-280. *(In Persian)*
12. Berberian, M., and Yeats, R. S., 2016, **Tehran: An Earthquake Time Bomb**, Geological Society of America Special Papers, Vol. 45, No. 1, PP. 671-675.
13. Boostan, E., Tahernia, N., and Shafiee, A., 2015, **Fuzzy Probabilistic Seismic Hazard Assessment, Case Study: Tehran Region, Iran**, Natural Hazards, Vol. 2, No. 1, PP. 525-541. *(In Persian)*
14. Bruneau, M. et al., 2003, **A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities**, Earthquake Spectra, Vol. 19, No. 4, PP. 733-752.
15. Chang, S. E. et al., 2014, **Toward Disaster-Resilient Cities: Characterizing Resilience of Infrastructure Systems with Expert Judgments**, Risk Analysis, Vol. 34, No. 3, PP. 416-434.
16. Dahlberg, R. et al., 2015, **Resilience in Disaster Research: Three Versions, Civil Engineering and Environmental Systems**, Vol. 32, No. 1 and 2, PP. 44-54.
17. FEMA, 1999, **Earthquake Loss Estimation Methodology HAZUS 99 Technical Manual**, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C, USA.
18. Gardner, J. K., and Knopoff, L., 1974, **Is the Sequence of Earthquakes in Southern California with Aftershocks Removed Poisoning?** Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 64, No. 1, PP. 1363-1367.
19. Holling, C. S., 1973, **Resilience and Stability of Ecological Systems**, Annual Review of Ecology and Systematics, Vol. 4, No. 1, PP. 1-23.
20. Hough S. et al., 2014, **After the Earth Quakes: Elastic Rebound on an Urban Planet**, Maziar, Tehran. *(In Persian)*
21. JICA, 2000, **The Study on Seismic Microzoning of the Greater Tehran Area in the Islamic Republic of Iran**, Pacific Consultants International Report, Japan.
22. 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.
23. Kijko, A., and Graham, G., 1998, **Parametric-Historic Procedure for Probabilistic Seismic Hazard Analysis Part I: Estimation of Maximum Regional Magnitude Mmax**, Pure and Applied Geophysics, Vol. 3, No.1, PP. 413-442.
24. Lindell, M. K., and Prater, C. S., 2003, **Assessing Community Impacts of Natural Disasters**, Natural Hazards Review, Vol. 4, No. 4, PP. 176-185.
25. Lund, L. V., Schiff, A. J., and Engineering, 1992, **TCLEE Pipeline Failure Database: Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering**, American Society of Civil Engineers, U.S.A.
26. 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.
27. Moghadam H., 2002, **Earthquake Engineering**, Farahang, Tehran. *(In Persian)*

28. Nategielahi, F., 2001, **Megacities' Disaster Management with Respect to Tehran's Earthquake Disaster Management**, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran. *(In Persian)*
29. Omidvar, B., and Kivi, H. K., 2016, **Multi-Hazard Failure Probability Analysis of Gas Pipelines for Earthquake Shaking, Ground Failure and Fire Following Earthquake**, Natural Hazards, Vol. 82, No. 1, PP. 703-720.
30. 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, No. 1, PP. 272-283.
31. Pagano, A. et al., 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.
32. Pelling, M., 2003, **The Vulnerability of Cities: Natural Disasters and Social Resilience**, London: Earthscan Publications.
33. Porter, K. A., 2016, **Damage and Restoration of Water Supply Systems in an Earthquake Sequence**, Colorado University, U.S.A.
34. 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. *(In Persian)*
35. 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. *(In Persian)*
36. 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.
37. 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. *(In Persian)*
38. Samiee A., 2011., **Humanitarian Charter and Minimum Standards in Humanitarian Response**, Chalesh, Tehran. *(In Persian)*
39. 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. 5, No. 6, PP. 761-785. *(In Persian)*
40. 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.
41. Timmerman, P., 1981, **Vulnerability, Resilience and the Collapse of Society: A Review of Models and Possible Climatic Applications**, Institute for Environmental Studies, University of Toronto, Canada.
42. Torres-Vera, M. A., and Antonio Canas, J., 2003, **A Lifeline Vulnerability Study in Barcelona, Spain**, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 80, No. 2, PP. 205-210.
43. UNISDR, 2009, **Terminology on Disaster Risk Reduction**, Network, United Nation.
44. United States. Department of Homeland Security, 2007, **Target Capabilities List a Companion to the National Preparedness Guidelines**, Department of Homeland Security, U.S.A.
45. 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.
46. 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.