فصلنامه نوآوری در مهندسی و تکنولوژی شماره ۲- دوره ۲- صفحات۱۰۵-۹۵
Journal of Innovation in Engineering and Technology
ISSN 3060-6098

تحلیل و بهبود تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری در برابر مخاطرات طبیعی با رویکرد مدیریت یکپارچه شهری (مطالعه موردی: شبکه معابر و تأسیسات شهری)

علیرضا اهرمی [۱*]

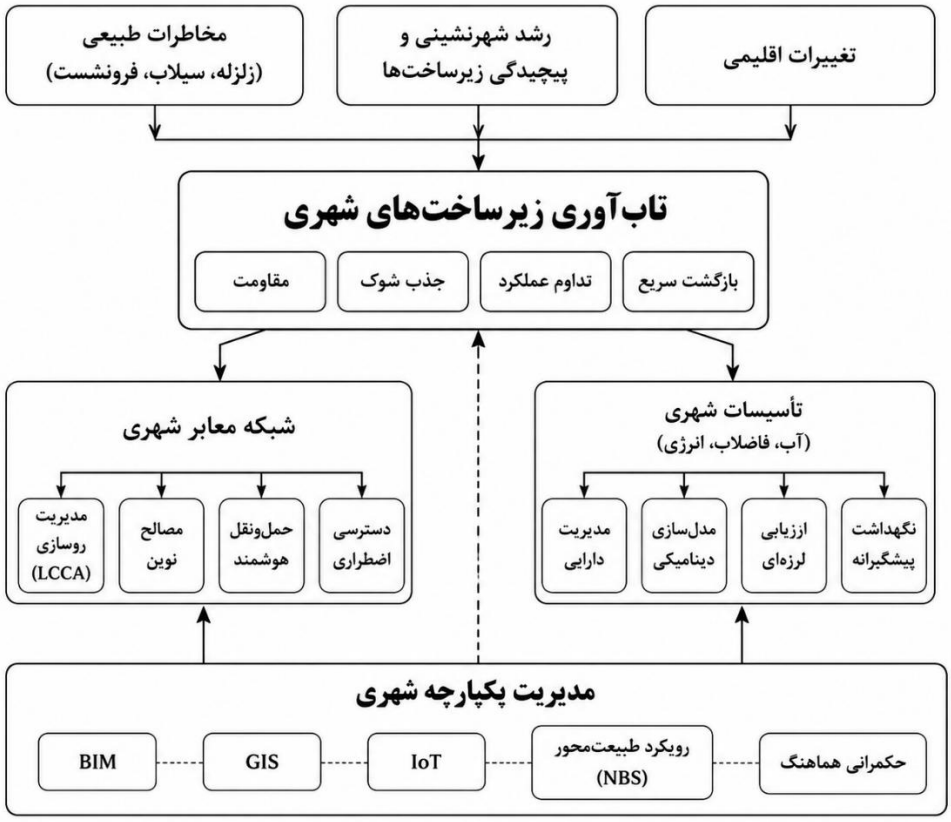
۱- کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران، گرایش سازه، دانشگاه لیان بوشهر. (پست سازمانی: کارشناس عمران).

چکیده:

تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری در برابر مخاطرات طبیعی به عنوان یکی از موضوعات کلیدی در مدیریت شهری معاصر مطرح شده است. رشد سریع شهرنشینی، افزایش تراکم جمعیتی و پیچیدگی شبکه‌های زیرساختی باعث شده است که شهرها در برابر مخاطرات طبیعی مانند زلزله، سیلاب، فرونشست زمین و امواج گرمایی آسیب‌پذیری بیشتری پیدا کنند. در چنین شرایطی، شبکه معابر و تأسیسات شهری به عنوان عناصر حیاتی عملکرد شهر نقش تعیین‌کننده‌ای در تداوم خدمات شهری و حفظ ایمنی شهروندان دارند. هدف این پژوهش مروری، تحلیل مفهومی و بررسی راهکارهای ارتقای تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری با تأکید بر شبکه معابر و تأسیسات شهری در چارچوب مدیریت یکپارچه شهری است. روش تحقیق مبتنی بر مرور تحلیلی منابع علمی مرتبط با مدیریت زیرساخت‌های شهری، تاب‌آوری شهری، فناوری‌های نوین در پروژه‌های عمرانی و رویکردهای مدیریت دارایی در زیرساخت‌ها است. در این مطالعه تلاش شده است با ترکیب مفاهیم مهندسی عمران، برنامه‌ریزی شهری و مدیریت زیرساخت، چارچوبی مفهومی برای افزایش تاب‌آوری شبکه‌های شهری ارائه شود. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که به‌کارگیری فناوری‌هایی نظیر مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM)، سیستم اطلاعات جغرافیایی(GIS) ، اینترنت اشیا، و همچنین استفاده از مصالح نوین و رویکردهای طبیعت‌محور می‌تواند نقش مؤثری در کاهش آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها و افزایش قابلیت بازیابی سیستم‌های شهری داشته باشد. علاوه بر این، مدیریت دارایی‌های زیرساختی و تحلیل چرخه عمر پروژه‌ها به عنوان ابزارهای مهم در تصمیم‌گیری‌های راهبردی شهری شناخته می‌شوند. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که تحقق تاب‌آوری شهری مستلزم اتخاذ رویکرد مدیریت یکپارچه شهری است که در آن برنامه‌ریزی، طراحی، نگهداری و بهره‌برداری از زیرساخت‌ها به صورت هماهنگ و مبتنی بر داده انجام شود. چنین رویکردی می‌تواند به افزایش پایداری عملکرد شبکه معابر و تأسیسات شهری در برابر مخاطرات طبیعی منجر شود و در نهایت کیفیت زندگی شهری و ایمنی شهروندان را بهبود بخشد.

واژگان کلیدی: تاب آوری شهری، زیرساخت های شهری، مدیریت یکپارچه شهری، شبکه معابر، مخاطرات طبیعی

رشد سریع شهرنشینی در دهه‌های اخیر موجب افزایش وابستگی شهرها به شبکه‌های پیچیده زیرساختی شده است. شبکه معابر، سامانه‌های آب و فاضلاب، شبکه‌های حمل‌ونقل و سایر تأسیسات شهری به عنوان شریان‌های حیاتی شهر عمل می‌کنند و اختلال در عملکرد آن‌ها می‌تواند پیامدهای گسترده‌ای برای اقتصاد شهری، ایمنی شهروندان و پایداری محیطی داشته باشد. در چنین شرایطی مفهوم تاب‌آوری شهری به عنوان یکی از رویکردهای مهم در مدیریت ریسک شهری مطرح شده است. تاب‌آوری به توانایی یک سیستم برای مقاومت در برابر شوک‌ها، جذب اثرات آن‌ها و بازگشت سریع به وضعیت عملکردی مناسب اشاره دارد (میرزاجانی ننه کران، ۱۴۰۵).در بسیاری از شهرهای در حال توسعه، توسعه زیرساخت‌ها بدون توجه کافی به ارزیابی ریسک مخاطرات طبیعی انجام شده است. این مسئله باعث شده است که شبکه‌های حیاتی شهری در برابر زلزله، سیلاب و سایر مخاطرات طبیعی آسیب‌پذیری قابل توجهی داشته باشند. به همین دلیل، توجه به برنامه‌ریزی تاب‌آور در حوزه زیرساخت‌های شهری به یک ضرورت اساسی در مدیریت شهری تبدیل شده است (رجب پور و همکاران، ۲۰۱۷).



شکل۱. مدل مفهومی تحلیل و بهبود تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری در برابر مخاطرات طبیعی با رویکرد مدیریت یکپارچه شهری (با تأکید بر شبکه معابر و تأسیسات شهری)

شکل ۱ چارچوب مفهومی پژوهش را برای تحلیل و ارتقای تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری در برابر مخاطرات طبیعی نشان می‌دهد. در این مدل، مخاطرات طبیعی مانند زلزله، سیلاب و سایر تهدیدهای محیطی به‌عنوان عوامل فشار بر

زیرساخت‌های شهری در نظر گرفته شده‌اند. این مخاطرات می‌توانند عملکرد شبکه‌های حیاتی شهری از جمله شبکه معابر، سیستم‌های حمل‌ونقل، شبکه آب و فاضلاب و سایر تأسیسات زیرساختی را تحت تأثیر قرار دهند. در این چارچوب، مدیریت یکپارچه شهری به‌عنوان بستر هماهنگ‌کننده میان اجزای مختلف مدیریت شهری عمل می‌کند و با استفاده از ابزارهای برنامه‌ریزی، سیاست‌گذاری و مدیریت دارایی‌های زیرساختی تلاش می‌کند سطح آسیب‌پذیری این شبکه‌ها را کاهش دهد. در این مدل، مجموعه‌ای از رویکردها و ابزارهای نوین مانند مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM)، سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS)، فناوری‌های هوشمند، مصالح نوین و رویکردهای طبیعت‌محور به‌عنوان عوامل تقویت‌کننده تاب‌آوری در نظر گرفته شده‌اند. این ابزارها امکان تحلیل دقیق‌تر وضعیت زیرساخت‌ها، مدیریت بهینه منابع و بهبود فرآیند تصمیم‌گیری در مدیریت شهری را فراهم می‌کنند. بر اساس این چارچوب مفهومی، تعامل میان مؤلفه‌های مدیریتی، فنی و محیطی می‌تواند به افزایش قابلیت مقاومت، تطبیق‌پذیری و بازیابی سریع زیرساخت‌های شهری در شرایط بحران منجر شود و در نهایت به ارتقای تاب‌آوری شهری و پایداری عملکرد شبکه‌های حیاتی شهر کمک کند.

شبکه معابر شهری نقش کلیدی در عملکرد سیستم حمل‌ونقل، مدیریت بحران و دسترسی به خدمات شهری دارد. در زمان وقوع حوادث طبیعی، این شبکه به عنوان مسیرهای اصلی امدادرسانی و تخلیه اضطراری مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین پایداری و عملکرد مناسب این شبکه در شرایط بحرانی از اهمیت بالایی برخوردار است. تحلیل چرخه عمر و مدیریت علمی روسازی معابر می‌تواند به بهبود عملکرد این شبکه در شرایط بحرانی کمک کند (خلیل گلصنملو و همکاران، ۱۳۹۶).از سوی دیگر، تأسیسات شهری مانند شبکه‌های آب، فاضلاب و انرژی نیز از اجزای حیاتی شهر محسوب می‌شوند. آسیب به این زیرساخت‌ها می‌تواند موجب اختلال گسترده در خدمات‌رسانی شهری شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که ارزیابی تاب‌آوری این شبکه‌ها در برابر مخاطراتی مانند زلزله از اهمیت زیادی برخوردار است و باید در برنامه‌های مدیریت شهری مورد توجه قرار گیرد (علوی، کریمی و اسدالله، ۱۳۹۷).

در سال‌های اخیر، رویکرد مدیریت یکپارچه شهری به عنوان چارچوبی برای هماهنگی میان بخش‌های مختلف مدیریت شهری مطرح شده است. این رویکرد بر هماهنگی میان برنامه‌ریزی فضایی، مدیریت زیرساخت‌ها و استفاده از فناوری‌های نوین تأکید دارد. استفاده از ابزارهای دیجیتال مانند BIM و GIS می‌تواند به بهبود تصمیم‌گیری در مدیریت زیرساخت‌های شهری کمک کند (خالقی و همکاران، ۱۴۰۱).علاوه بر فناوری‌های دیجیتال، استفاده از مصالح نوین و فناوری‌های پایدار در پروژه‌های عمرانی نیز می‌تواند نقش مهمی در افزایش دوام و تاب‌آوری زیرساخت‌ها ایفا کند. به‌کارگیری مصالح مقاوم، کاهش مصرف منابع و افزایش طول عمر سازه‌ها از جمله مزایای استفاده از این فناوری‌ها در پروژه‌های شهری است (یاراحمدی، ۱۴۰۴).

در کنار این موضوع، توجه به رویکردهای طبیعت‌محور در توسعه زیرساخت‌های شهری نیز به عنوان یکی از راهبردهای مؤثر در کاهش اثرات مخاطرات طبیعی مطرح شده است. این رویکردها با بهره‌گیری از ظرفیت‌های اکولوژیکی شهر می‌توانند به کاهش خطرات زیست‌محیطی و افزایش تاب‌آوری شهری کمک کنند (ایوبی، آهنی و عظیم‌پور، ۱۴۰۵).با توجه به اهمیت موضوع، این پژوهش تلاش دارد با رویکردی مروری به بررسی مفاهیم، روش‌ها و فناوری‌های مؤثر در ارتقای تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری بپردازد و چارچوبی تحلیلی برای مدیریت یکپارچه شبکه معابر و تأسیسات شهری ارائه دهد.

۲. مبانی نظری تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری

تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری مفهومی چندبعدی است که به توانایی سیستم‌های زیرساختی برای مقاومت در برابر اختلالات و بازگشت سریع به عملکرد عادی اشاره دارد. این مفهوم در سال‌های اخیر در حوزه‌های مختلفی مانند مهندسی عمران، برنامه‌ریزی شهری و مدیریت بحران مورد توجه قرار گرفته است. مطالعات نشان می‌دهد که افزایش پیچیدگی سیستم‌های شهری، نیاز به رویکردهای جدید برای مدیریت ریسک و افزایش تاب‌آوری را دوچندان کرده است (میرزاجانی ننه کران، ۱۴۰۵).

یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های تاب‌آوری زیرساخت‌ها، قابلیت اطمینان سیستم‌های شهری است. مهندسی قابلیت اطمینان با تمرکز بر نگهداشت پیشگیرانه و مدیریت دارایی‌های زیرساختی می‌تواند نقش مهمی در کاهش احتمال خرابی و افزایش پایداری سیستم‌ها ایفا کند. چارچوب‌های نوین مدیریت دارایی تلاش می‌کنند تا با تحلیل داده‌ها و ارزیابی عملکرد زیرساخت‌ها، تصمیم‌گیری‌های بهینه در حوزه نگهداری و توسعه زیرساخت‌ها را امکان‌پذیر سازند (برزگر، رمضانی و برزگر، ۱۴۰۱).مدیریت دارایی‌های زیرساختی یکی از رویکردهای مهم در ارتقای تاب‌آوری شهری محسوب می‌شود. این رویکرد بر مدیریت چرخه عمر دارایی‌ها از مرحله طراحی تا بهره‌برداری و نگهداری تأکید دارد. استفاده از مدل‌های پویایی سیستم‌ها می‌تواند در تحلیل تعاملات پیچیده میان اجزای زیرساختی و پیش‌بینی رفتار آن‌ها در شرایط بحرانی مؤثر باشد (طاهری، جنانی و همت‌فر، ۱۴۰۴).

از منظر برنامه‌ریزی شهری، تاب‌آوری به معنای توانایی شهر برای سازگاری با تغییرات محیطی و مخاطرات طبیعی است. این مفهوم شامل ابعاد مختلفی از جمله زیرساختی، اجتماعی، اقتصادی و مدیریتی می‌شود. برنامه‌ریزی تاب‌آور تلاش می‌کند تا با شناسایی نقاط ضعف سیستم شهری، راهکارهایی برای افزایش ظرفیت سازگاری شهر ارائه دهد (ناصحی و نوحه‌گر، ۱۴۰۳).در حوزه زیرساخت‌های شهری، شبکه معابر به عنوان یکی از مهم‌ترین عناصر ساختاری شهر شناخته می‌شود. عملکرد مناسب این شبکه نه تنها برای جابه‌جایی روزمره شهروندان بلکه برای مدیریت بحران نیز ضروری است. کیفیت روسازی، ظرفیت ترافیکی و طراحی مناسب معابر از جمله عواملی هستند که بر کارایی این شبکه تأثیر می‌گذارند (خیبری و سرفراز، ۱۳۹۹).علاوه بر شبکه معابر، شبکه‌های خدماتی مانند آب و فاضلاب نیز نقش حیاتی در عملکرد شهر دارند. آسیب‌پذیری این شبکه‌ها در برابر مخاطرات طبیعی می‌تواند پیامدهای گسترده‌ای برای سلامت عمومی و محیط زیست داشته باشد. بنابراین ارزیابی تاب‌آوری این شبکه‌ها و اتخاذ راهکارهای تقویت آن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است (علوی، کریمی و اسدالله، ۱۳۹۷).

یکی دیگر از ابعاد مهم تاب‌آوری زیرساخت‌ها، توجه به پایداری محیطی در طراحی و اجرای پروژه‌های عمرانی است. استفاده از فناوری‌های ژئوتکنیکی نوین می‌تواند به افزایش پایداری پروژه‌های شهری و کاهش اثرات زیست‌محیطی آن‌ها کمک کند (مهمانی و نعمتی عموقین، ۱۴۰۴).در مجموع، مبانی نظری تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری نشان می‌دهد که دستیابی به شهرهای تاب‌آور نیازمند ترکیبی از رویکردهای مهندسی، مدیریتی و فناوری است که بتواند عملکرد سیستم‌های شهری را در شرایط عادی و بحرانی تضمین کند.

۳. مخاطرات طبیعی و انواع آسیب‌پذیری در زیرساخت‌های شهری

مخاطرات طبیعی در شهرها بسته به ویژگی‌های جغرافیایی، اقلیمی و زمین‌شناختی می‌توانند به صورت‌های مختلفی بروز کنند و هر یک الگوی خاصی از آسیب‌پذیری را در زیرساخت‌های شهری ایجاد نمایند. زلزله، سیلاب، فرونشست زمین، رانش زمین، طوفان‌های شدید و امواج گرمایی از جمله مهم‌ترین این مخاطرات هستند که در صورت نبود برنامه‌ریزی مناسب می‌توانند عملکرد شبکه‌های حیاتی شهر را مختل کنند. شدت و گستره خسارات ناشی از این مخاطرات نه‌تنها به بزرگی رویداد، بلکه به کیفیت طراحی، اجرا، نگهداری و میزان آمادگی مدیریتی شهر نیز وابسته است.

زلزله یکی از مخرب‌ترین مخاطرات طبیعی برای زیرساخت‌های شهری است، زیرا در مدت زمان کوتاه می‌تواند به مجموعه‌ای از شبکه‌های به‌هم‌پیوسته آسیب وارد کند. در چنین شرایطی، شکست هم‌زمان در معابر، خطوط انتقال آب، شبکه فاضلاب، برق و ارتباطات، زنجیره‌ای از اختلالات را به وجود می‌آورد که بازگشت به شرایط عادی را دشوار می‌سازد. از این رو، ارزیابی تاب‌آوری سازه‌ای و غیرسازه‌ای زیرساخت‌ها در برابر زلزله باید در اولویت مدیریت شهری قرار گیرد.سیلاب نیز یکی از مخاطراتی است که به‌ویژه در شهرهای دارای توسعه نامتوازن، سطوح نفوذناپذیر گسترده و سیستم دفع آب‌های سطحی ناکافی، آسیب‌های فراوانی ایجاد می‌کند. نفوذ آب به زیرسازی معابر، تخریب روسازی، آب‌گرفتگی تقاطع‌ها و اختلال در دسترسی خدمات اضطراری از پیامدهای رایج سیلاب شهری است. همچنین، زیرساخت‌های زیرسطحی مانند لوله‌های آب و فاضلاب در اثر فشار هیدرولیکی و شست‌وشوی خاک ممکن است دچار خرابی شوند. در این شرایط، ترکیب اقدامات مهندسی با راهکارهای طبیعت‌محور می‌تواند نقش مهمی در کاهش خطر داشته باشد.

فرونشست زمین، که در بسیاری از دشت‌های شهری به دلیل برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی تشدید شده است، به یکی از چالش‌های جدی پایداری زیرساخت‌ها تبدیل شده است. این پدیده به‌تدریج اما به‌صورت گسترده موجب ترک‌خوردگی معابر، شکست لوله‌ها، ناپایداری شالوده‌ها و کاهش کارایی شبکه‌های شهری می‌شود. ویژگی خطرناک فرونشست آن است که اغلب در کوتاه‌مدت به‌خوبی مشاهده نمی‌شود، اما در بلندمدت خسارات سنگینی بر جا می‌گذارد. بنابراین پایش مستمر و تحلیل داده‌محور مناطق در معرض فرونشست، برای مدیریت تاب‌آور شهر ضروری است.از دیگر مخاطرات مهم، امواج گرمایی هستند که آثار آن‌ها بیشتر در حوزه آسایش حرارتی، مصرف انرژی، کاهش عملکرد تجهیزات و افزایش فرسایش مصالح آشکار می‌شود. افزایش دمای سطحی معابر، فشار بیشتر بر سامانه‌های انرژی و کاهش دوام برخی مصالح از جمله پیامدهایی است که باید در طراحی تاب‌آور زیرساخت‌ها مدنظر قرار گیرد. در این زمینه، استفاده از مصالح مقاوم‌تر، رنگ‌ها و پوشش‌های بازتابنده، توسعه فضاهای سبز و افزایش سایه‌اندازی شهری از راهکارهای مؤثر محسوب می‌شوند.

آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شهری تنها به ضعف فنی محدود نمی‌شود، بلکه ساختار مدیریتی، پراکندگی نهادی، نبود داده‌های یکپارچه و ضعف هماهنگی میان سازمان‌های مسئول نیز در تشدید آن نقش دارند. بسیاری از خرابی‌ها زمانی بحرانی می‌شوند که اطلاعات لازم درباره موقعیت، سن، ظرفیت و وضعیت نگهداری دارایی‌ها در دسترس نباشد. از این رو، تولید و به‌روزرسانی مستمر پایگاه‌های داده مکانی و فنی زیرساخت‌ها، برای کاهش آسیب‌پذیری و افزایش آمادگی پاسخ اهمیت ویژه دارد.در نتیجه، تحلیل مخاطرات طبیعی و پیوند آن با الگوهای آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شهری نشان می‌دهد که تاب‌آوری، صرفاً یک ویژگی فنی نیست، بلکه حاصل تعامل پیچیده میان طراحی مهندسی، مدیریت

داده، حکمرانی شهری و مشارکت نهادی است. هرچه این اجزا هماهنگ‌تر عمل کنند، احتمال شکست عملکردی شبکه‌های شهری در برابر مخاطرات طبیعی کمتر خواهد شد.

۴. نقش شبکه معابر و تأسیسات شهری در تداوم عملکرد شهر

شبکه معابر و تأسیسات شهری، به‌عنوان ستون فقرات عملکرد شهر، نقشی محوری در حفظ تداوم خدمات شهری و پاسخ‌گویی به نیازهای روزمره و بحرانی دارند. شبکه معابر نه‌تنها بستر جابه‌جایی انسان، کالا و خدمات است، بلکه در زمان بحران به مسیر اصلی امدادرسانی، تخلیه اضطراری و پشتیبانی لجستیکی تبدیل می‌شود. از این‌رو، هرگونه اختلال در عملکرد این شبکه می‌تواند پیامدهای دومینویی برای سایر بخش‌های شهری به همراه داشته باشد.کیفیت ساخت، نگهداری و بهره‌برداری از معابر شهری تأثیر مستقیمی بر تاب‌آوری آن‌ها دارد. معابری که با طراحی ناکافی، مصالح نامناسب یا نگهداری ضعیف احداث شده‌اند، در برابر بارش‌های شدید، نشست زمین و بار ترافیکی سنگین آسیب‌پذیرترند. در چنین شرایطی، تحلیل چرخه عمر روسازی و برنامه‌ریزی مبتنی بر اولویت‌بندی تعمیرات می‌تواند به افزایش دوام و کارایی این شبکه کمک کند. همچنین، توجه به سلسله‌مراتب معابر در برنامه‌ریزی اضطراری سبب می‌شود که مسیرهای حیاتی در شرایط بحران زودتر بازیابی شوند.

تأسیسات شهری مانند شبکه‌های آب، فاضلاب، برق، گاز و ارتباطات نیز اجزای حیاتی زیرساخت شهر هستند. این شبکه‌ها اغلب به‌صورت پنهان و زیرسطحی فعالیت می‌کنند، اما نقش آن‌ها در تداوم زندگی شهری بسیار برجسته است. خرابی هر یک از این سامانه‌ها می‌تواند خدمات شهری را متوقف یا محدود کند. برای مثال، آسیب به شبکه آب می‌تواند سلامت عمومی را تهدید کند، خرابی فاضلاب موجب آلودگی محیط و بروز مخاطرات بهداشتی می‌شود و اختلال در شبکه برق عملکرد سایر سامانه‌های وابسته را نیز مختل می‌سازد.

ویژگی مهم زیرساخت‌های شهری، وابستگی متقابل آن‌هاست. این وابستگی باعث می‌شود که آسیب به یک جزء، عملکرد بخش‌های دیگر را نیز تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین رویکردهای سنتی که هر شبکه را به‌صورت منفرد بررسی می‌کنند، برای مدیریت ریسک کافی نیستند. لازم است الگوی تحلیلی یکپارچه‌ای اتخاذ شود که ارتباطات میان شبکه‌ها، نقاط گلوگاهی و احتمال گسترش خرابی را نیز در نظر بگیرد. در این راستا، کاربرد مدل‌سازی شبکه‌ای و شبیه‌سازی سناریوهای بحران اهمیت فراوانی دارد.در زمان بحران، سطح عملکرد مورد انتظار از شبکه معابر و تأسیسات شهری متفاوت از شرایط عادی است. در این وضعیت، کافی است حداقلی از عملکرد برای حفظ دسترسی، امدادرسانی و تأمین خدمات حیاتی فراهم شود. از این منظر، تاب‌آوری تنها به معنای مقاومت کامل در برابر آسیب نیست، بلکه به معنای حفظ عملکرد پایه و بازیابی سریع است. این امر مستلزم آن است که زیرساخت‌ها در مرحله طراحی، با در نظر گرفتن سناریوهای شکست و ظرفیت‌های جایگزین، به‌صورت انعطاف‌پذیر طراحی شوند.به‌طور کلی، شبکه معابر و تأسیسات شهری را باید به عنوان دارایی‌های راهبردی شهر در نظر گرفت؛ دارایی‌هایی که کیفیت مدیریت آن‌ها مستقیماً بر تاب‌آوری کل شهر اثر می‌گذارد. هر اندازه این دارایی‌ها از نظر فنی، مدیریتی و اطلاعاتی بهتر پایش شوند، امکان حفظ خدمات شهری در شرایط مخاطره‌آمیز بیشتر خواهد بود.

۵. فناوری‌های نوین در ارتقای تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری

ورود فناوری‌های نوین به حوزه مدیریت زیرساخت‌های شهری، افق‌های جدیدی را برای افزایش تاب‌آوری و کارایی شبکه‌های شهری گشوده است. این فناوری‌ها نه‌تنها امکان پایش دقیق‌تر، تحلیل سریع‌تر و تصمیم‌گیری هوشمندانه‌تر را فراهم می‌کنند، بلکه می‌توانند هماهنگی میان بخش‌های مختلف مدیریت شهری را بهبود بخشند. در میان این ابزارها، BIM، GIS، اینترنت اشیا، حسگرهای هوشمند، و سامانه‌های پایش لحظه‌ای از جایگاه ویژه‌ای برخوردارند.

مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) یکی از ابزارهای مهم در مدیریت چرخه عمر پروژه‌های عمرانی است. هرچند BIM در ابتدا برای ساختمان‌ها توسعه یافت، اما قابلیت‌های آن در حوزه زیرساخت‌های شهری نیز بسیار ارزشمند است. استفاده از BIM می‌تواند اطلاعات فنی، مکانی و اجرایی دارایی‌ها را در یک محیط یکپارچه گردآوری کرده و امکان برنامه‌ریزی دقیق‌تر برای نگهداری و توسعه را فراهم سازد. در شرایط بحران، دسترسی سریع به اطلاعات فنی زیرساخت‌ها می‌تواند در تصمیم‌گیری برای ترمیم، اولویت‌بندی و مدیریت منابع نقش مؤثری داشته باشد (خالقی و همکاران، ۱۴۰۱).سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) نیز ابزاری کلیدی برای تحلیل فضایی زیرساخت‌ها و مخاطرات است. GIS با امکان لایه‌بندی داده‌ها، نمایش مناطق پرخطر، شناسایی نقاط حساس و بررسی روابط مکانی، به برنامه‌ریزان کمک می‌کند تا تصمیم‌های مبتنی بر مکان اتخاذ کنند. در حوزه تاب‌آوری زیرساخت‌ها، GIS می‌تواند برای تهیه نقشه‌های آسیب‌پذیری، تحلیل مسیرهای اضطراری و شناسایی زیرساخت‌های بحرانی مورد استفاده قرار گیرد.

اینترنت اشیا و حسگرهای هوشمند امکان پایش پیوسته وضعیت زیرساخت‌ها را فراهم می‌سازند. برای نمونه، حسگرهای نصب‌شده در معابر، پل‌ها، خطوط لوله و شبکه‌های فاضلاب می‌توانند تغییرات تنش، رطوبت، نشست یا دما را ثبت کنند و پیش از وقوع خرابی جدی، هشدار لازم را ارائه دهند. این قابلیت به‌ویژه در مدیریت پیشگیرانه اهمیت دارد، زیرا از تبدیل اختلال‌های کوچک به بحران‌های بزرگ جلوگیری می‌کند.فناوری‌های داده‌محور و تحلیل کلان‌داده نیز در مدیریت تاب‌آوری زیرساخت‌ها نقش روزافزونی یافته‌اند. با تجمیع داده‌های ترافیکی، اقلیمی، سازه‌ای و عملکردی، می‌توان الگوهای خرابی را شناسایی کرد و تصمیم‌های نگهداری را بر پایه شواهد اتخاذ نمود. چنین رویکردی موجب می‌شود منابع محدود شهری به‌صورت بهینه تخصیص یابند و هزینه‌های چرخه عمر کاهش یابد.از سوی دیگر، استفاده از مصالح نوین در پروژه‌های عمرانی نیز سهم مهمی در افزایش تاب‌آوری دارد. مصالحی که مقاومت بالاتر، دوام بیشتر و حساسیت کمتر به تغییرات محیطی دارند، می‌توانند عمر مفید زیرساخت‌ها را افزایش دهند و نیاز به تعمیرات مکرر را کاهش دهند. این موضوع به‌ویژه در معابر شهری، سازه‌های نگهدارنده، لوله‌های انتقال و اجزای در معرض فرسایش اهمیت ویژه دارد (یاراحمدی، ۱۴۰۴).در نهایت، هم‌افزایی میان فناوری‌های دیجیتال، مصالح نوین و سامانه‌های هوشمند، امکان ایجاد زیرساخت‌های شهری تاب‌آورتر را فراهم می‌کند. با این حال، تحقق این هدف نیازمند سرمایه‌گذاری، آموزش نیروی انسانی، استانداردسازی داده‌ها و ایجاد بستر نهادی مناسب است. بدون چنین زیرساخت مدیریتی، فناوری به‌تنهایی قادر به حل چالش تاب‌آوری نخواهد بود.

۶. رویکردهای مدیریت یکپارچه شهری و مدیریت دارایی زیرساختی

مدیریت یکپارچه شهری رویکردی است که بر هماهنگی میان سیاست‌گذاری، برنامه‌ریزی، اجرا و نظارت در بخش‌های مختلف شهر تأکید دارد. در زمینه زیرساخت‌های شهری، این رویکرد به معنای آن است که شبکه معابر، تأسیسات خدماتی، سامانه‌های پایش و واحدهای اجرایی به صورت جزیره‌ای عمل نکنند، بلکه در قالب یک نظام هماهنگ و داده‌محور فعالیت نمایند. این امر برای ارتقای تاب‌آوری حیاتی است، زیرا بسیاری از اختلال‌ها ناشی از ناهماهنگی نهادی و عدم اشتراک اطلاعات میان دستگاه‌ها است.یکی از مؤلفه‌های اصلی مدیریت یکپارچه شهری، مدیریت دارایی‌های زیرساختی است. مدیریت دارایی به معنای برنامه‌ریزی و کنترل نظام‌مند دارایی‌ها در طول چرخه عمر آن‌هاست؛ از مرحله طراحی و احداث تا بهره‌برداری، نگهداری، بازسازی و حتی جایگزینی. این رویکرد به مدیران شهری کمک می‌کند تا وضعیت فیزیکی و عملکردی دارایی‌ها را بشناسند، ریسک‌ها را اولویت‌بندی کنند و منابع محدود را در مسیرهای مؤثرتر تخصیص دهند (برزگر، رمضانی و برزگر، ۱۴۰۱).

در چارچوب مدیریت دارایی، تحلیل چرخه عمر از اهمیت بالایی برخوردار است. هزینه‌های واقعی یک زیرساخت تنها به مرحله ساخت محدود نمی‌شود، بلکه بخش عمده آن در دوره بهره‌برداری و نگهداری رخ می‌دهد. بنابراین، انتخاب گزینه‌های ارزان‌تر در مرحله ساخت، لزوماً به معنای تصمیم اقتصادی بهتر نیست. در بسیاری از موارد، به‌کارگیری مصالح با دوام‌تر، طراحی مقاوم‌تر و نگهداری پیشگیرانه می‌تواند هزینه‌های بلندمدت را کاهش دهد و تاب‌آوری را افزایش دهد.یکی دیگر از جنبه‌های مدیریت یکپارچه، اولویت‌بندی بر اساس ریسک است. در این رویکرد، زیرساخت‌هایی که در صورت خرابی پیامدهای شدیدتری دارند، در اولویت بازرسی، تقویت و بازسازی قرار می‌گیرند. این امر نیازمند شاخص‌های عملکردی روشن، پایگاه داده دقیق و ابزارهای تحلیلی مناسب است. بدون چنین سازوکاری، توزیع منابع به شکل واکنشی و غیرهدفمند انجام می‌شود و تاب‌آوری واقعی حاصل نخواهد شد.

مدیریت یکپارچه همچنین مستلزم مشارکت میان‌سازمانی و فرابخشی است. بهبود تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری تنها وظیفه یک نهاد نیست، بلکه نیازمند همکاری شهرداری، شرکت‌های خدمات‌رسان، سازمان‌های مدیریت بحران، نهادهای پژوهشی و بخش خصوصی است. هر یک از این بازیگران بخشی از زنجیره تصمیم و اجرا را در اختیار دارند و تنها از طریق هم‌افزایی می‌توان به عملکرد پایدار دست یافت.در این میان، نقش داده و شفافیت اطلاعاتی بسیار مهم است. سامانه‌های مدیریتی یکپارچه باید بتوانند اطلاعات مکانی، فنی، زمانی و مالی دارایی‌ها را در اختیار تصمیم‌گیران قرار دهند. اتصال BIM، GIS، سامانه‌های پایش و پایگاه‌های داده نگهداری، زمینه‌ای فراهم می‌کند تا مدیریت شهری از حالت واکنشی به حالت پیش‌نگر و هوشمند حرکت کند. این تحول، یکی از پیش‌شرط‌های اساسی تاب‌آوری زیرساختی در شهرهای آینده است.

۷. راهکارهای عملی برای افزایش تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری

ارتقای تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری نیازمند مجموعه‌ای از راهکارهای هم‌زمان در سطوح طراحی، اجرا، نگهداری و حکمرانی است. این راهکارها باید متناسب با نوع مخاطره، ویژگی‌های بومی شهر و ظرفیت نهادی موجود تنظیم شوند.

رویکردهای صرفاً فنی یا صرفاً مدیریتی به‌تنهایی کافی نیستند و باید در قالب یک بسته سیاستی و عملیاتی یکپارچه مورد استفاده قرار گیرند.

نخستین راهکار، انجام ارزیابی ریسک و آسیب‌پذیری پیش از طراحی و اجرای پروژه‌هاست. این ارزیابی باید شامل شناسایی مخاطرات محتمل، تحلیل پیامدهای احتمالی، تعیین نقاط حساس و برآورد احتمال خرابی باشد. نتایج این ارزیابی می‌تواند مبنای انتخاب مسیرها، مصالح، نوع سازه و الگوی نگهداری قرار گیرد. در شهرهایی که با خطر زلزله یا سیلاب روبه‌رو هستند، این مرحله باید به‌صورت الزامی در فرآیند تصمیم‌گیری لحاظ شود.راهکار دوم، افزایش کیفیت طراحی و مقاوم‌سازی زیرساخت‌هاست. استفاده از اصول طراحی مقاوم در برابر مخاطرات، به‌کارگیری جزئیات اجرایی مناسب، رعایت استانداردهای کیفی و توجه به شرایط اقلیمی و ژئوتکنیکی از جمله اقداماتی است که می‌تواند از بروز آسیب‌های گسترده جلوگیری کند. در روسازی معابر، انتخاب مصالح متناسب با بارگذاری و شرایط محیطی و در تأسیسات شهری، استفاده از لوله‌ها و اتصالات مقاوم‌تر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.راهکار سوم، نگهداری پیشگیرانه و مبتنی بر وضعیت است. به‌جای آنکه تعمیرات تنها پس از وقوع خرابی انجام شود، باید با استفاده از داده‌های پایش، زمان مناسب مداخله پیش از بروز شکست تعیین گردد. این شیوه ضمن کاهش هزینه‌های بلندمدت، موجب افزایش قابلیت اطمینان شبکه‌ها و کاهش زمان ازکارافتادگی می‌شود.راهکار چهارم، توسعه زیرساخت‌های سبز و طبیعت‌محور است. ایجاد سطوح نفوذپذیر، توسعه باغ‌راه‌ها، احیای آبراهه‌های طبیعی، تقویت پوشش گیاهی و استفاده از سامانه‌های مدیریت آب‌های سطحی مبتنی بر طبیعت می‌تواند خطر سیلاب و جزیره گرمایی را کاهش دهد. این راهکارها علاوه بر افزایش تاب‌آوری، به بهبود کیفیت محیط شهری نیز کمک می‌کنند (ایوبی، آهنی و عظیم‌پور، ۱۴۰۵).راهکار پنجم، استفاده از فناوری‌های پایش و هشدار زودهنگام است. سامانه‌هایی که بتوانند تغییرات بحرانی را به‌صورت لحظه‌ای گزارش دهند، زمان واکنش را افزایش داده و از گسترش خسارات جلوگیری می‌کنند. ترکیب این سامانه‌ها با مراکز مدیریت بحران و پلتفرم‌های تصمیم‌یار می‌تواند اثربخشی پاسخ شهری را به‌طور قابل توجهی ارتقا دهد.

راهکار ششم، ارتقای آموزش، هماهنگی نهادی و مشارکت ذی‌نفعان است. حتی پیشرفته‌ترین فناوری‌ها بدون نیروی انسانی آموزش‌دیده و ساختار مدیریتی هماهنگ، کارایی مطلوب نخواهند داشت. آموزش کارکنان، تدوین دستورالعمل‌های مشترک، تمرین‌های دوره‌ای و مشارکت جامعه محلی در نگهداشت و پایش، از عوامل تقویت تاب‌آوری در سطح نهادی و اجتماعی است.در نهایت، به‌کارگیری رویکردهای مبتنی بر داده و تحلیل سناریو ضروری است. برنامه‌ریزان شهری باید بتوانند با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی، پیامدهای سناریوهای مختلف را پیش‌بینی کنند و بر اساس آن، سرمایه‌گذاری‌های زیرساختی را اولویت‌بندی نمایند. چنین رویکردی به شهرها امکان می‌دهد که به‌جای واکنش صرف به بحران‌ها، به‌صورت پیش‌دستانه برای کاهش اثرات آن‌ها آماده شوند.

۸. نتیجه‌گیری

تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری در برابر مخاطرات طبیعی یکی از مهم‌ترین پیش‌شرط‌های پایداری و امنیت شهرهای معاصر است. رشد شهرنشینی، افزایش پیچیدگی زیرساخت‌ها و تشدید مخاطرات طبیعی سبب شده است که توجه به این موضوع از سطح یک بحث نظری فراتر رفته و به یک ضرورت عملی در مدیریت شهری تبدیل شود. در این میان،

شبکه معابر و تأسیسات شهری به عنوان شریان‌های حیاتی شهر باید با رویکردی یکپارچه، داده‌محور و آینده‌نگر مدیریت شوند.یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری صرفاً با تقویت سازه‌ای حاصل نمی‌شود، بلکه نیازمند ترکیبی از طراحی مناسب، نگهداری پیشگیرانه، مدیریت دارایی، پایش مستمر و هماهنگی نهادی است. استفاده از فناوری‌هایی مانند BIM، GIS و اینترنت اشیا می‌تواند شناسایی، پایش و مدیریت زیرساخت‌ها را بهبود بخشد و زمینه تصمیم‌گیری دقیق‌تر را فراهم سازد. همچنین، مصالح نوین و رویکردهای طبیعت‌محور می‌توانند در کاهش آسیب‌پذیری و افزایش دوام شبکه‌های شهری مؤثر باشند.

مدیریت یکپارچه شهری به عنوان چارچوبی برای هم‌راستاسازی سیاست‌ها، داده‌ها و اقدامات اجرایی، نقش محوری در تحقق تاب‌آوری دارد. در این رویکرد، برنامه‌ریزی، طراحی، اجرا، نگهداری و بازیابی زیرساخت‌ها باید در یک نظام هماهنگ و مبتنی بر شواهد صورت گیرد. تنها در چنین شرایطی است که شهر می‌تواند در برابر مخاطرات طبیعی مقاومت کرده، عملکرد خود را حفظ کند و پس از بحران به‌سرعت به وضعیت عادی بازگردد.در نتیجه، ارتقای تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری باید به عنوان یکی از اولویت‌های راهبردی در سیاست‌گذاری شهری مورد توجه قرار گیرد. این امر نه‌تنها به کاهش خسارات ناشی از مخاطرات طبیعی می‌انجامد، بلکه کیفیت زندگی شهری، اعتماد عمومی و پایداری توسعه را نیز تقویت می‌کند. بنابراین، حرکت به سوی شهرهای تاب‌آور مستلزم سرمایه‌گذاری هم‌زمان در فناوری، حکمرانی، دانش فنی و مشارکت نهادی است.

منابع

- مهمانی رقیه, نعمتی عموقین رامین. (۱۴۰۴). کاربرد فناوری های نوین ژئوتکنیکی در بهبود پایداری زیست محیطی پروژه های عمرانی در شهر تهران: رویکردها و چالش های اجرایی.
- فخیمی حسین زاد سمیه, علوی متین یعقوب, ایرانزاده سلیمان. (۱۴۰۰۳). شبیه سازی مدیریت یکپارچه دارایی های سیستم های شبکه های توزیع آب و جمع آوری فاضلاب شهری با استفاده از مدل سازی دینامیکی نرم افزار ونسیم (مطالعه موردی شهر تبریز).
- خلیل گلصنملو ابراهیم, علی نژاد توحید, شهری رضا. (۱۳۹۶). نقش تحلیل هزینه چرخه عمر (LCCA) در مدیریت روسازی معابر در شهرستان خوی.
- عابدینی, آزمون, آذرکیش, کیارش, مشتاقی, سینا. (۱۴۰۳). کاهش اثرات جزایر گرمایشی شهر از طریق مصالح روسازی خنک (نمونه مطالعاتی: منطقه ۸کلان‌شهر تبریز). توسعه پایدار شهری, ۴(۱۳), ۱۰۵-۱۲۸.
- خیبری, سرفراز. (۱۳۹۹). ارزیابی ویژگیهای فردی رانندگان حمل ونقل همگانی بر واکنش نسبت به وضعیت روسازی معابر شهری. مطالعات مدیریت ترافیک, ۵۶(۱۵), ۳۷-۶۴.
- میرزاجانی ننه کران. (۱۴۰۵). ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای شهری: مطالعه موردی کلان‌شهر تبریز. برنامه ریزی فضایی, ۱۶(۱), ۳۷-۸۰.
- اسگندری, صادقزاده تبریزی, حیدری پارام, بهنام. (۱۴۰۴). هوشمندسازی مدیریت ساخت با تلفیق BIM و IoT برای کاهش هدررفت مصالح و بهینه‌سازی هزینه پروژه‌های عمرانی. پژوهش های معماری نوین, ۵(۳), ۷-۲۲.

- طاهری, ستایش, جنانی, همت فر. (۱۴۰۴). ارائه مدل مدیریت دارائی‌ها و بدهی‌های بانک مبتنی بر مدیریت ریسک با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها. دانش سرمایه‌گذاری, ۱۴(۵۴), ۱۲۹-۱۵۹.
- امیر حسین یار احمدی. (۱۴۰۴). کاربست مصالح نوین و فناوری‌های پایدار در پروژه‌های عمرانی شهری. نشریه علمی رویکردهای پژوهشی نوین مدیریت و حسابداری, ۹(۳۴), ۱۶۴-۱۷۴.
- سید مرتضی رضوی. (۱۴۰۴). بهینه‌سازی طراحی سیستم‌های حمل و نقل شهری با استفاده از مدل‌سازی BIM. نشریه علمی رویکردهای پژوهشی نوین مدیریت و حسابداری, ۹(۳۴), ۱۰-۱۷.
- برزگر علی اکبر, رمضانی سعید, برزگر حمید. (۱۴۰۱). ارائه چارچوبی برای مهندسی قابلیت اطمینان و تعالی نگهداشت (iREAM۳)، مبتنی بر اصول مدیریت دارایی.
- علوی, کریمی, اسدالله. (۱۳۹۷). ارزیابی تاب‌آوری زیرساخت‌های شبکهٔ آب شهری در برابر زلزله (مطالعهٔ موردی: منطقهٔ ۲ تهران). پژوهشهای جغرافیای انسانی, ۵۰(۴), ۹۷۷-۹۹۱.
- ناصحی, نوحه گر. (۱۴۰۳). طراحی مدل جامع ارزیابی تاب آوری زیرساخت های سبز با رویکرد چند معیاره فازی و طب سوزنی شهری. جغرافیا و پایداری محیط, ۱۵(۴), ۵۳-۷۹.
- ایوبی, آهنی, عظیم پور. (۱۴۰۵). تاب‌آوری در برابر سوانح طبیعی: ارزیابی کاربست رویکرد طبیعت‌محور (NBS) در زیرساخت‌های شهری (مطالعه موردی: مناطق منتخب تهران). مطالعات ساختار و کارکرد شهری.
- خالقی, علیزاده, شبیر, عزیزی. (۱۴۰۱). تلفیق مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) به منظور توسعه شهر هوشمند. نقش جهان-مطالعات نظری و فناوری های نوین معماری و شهرسازی, ۱۲(۲), ۴۶-۷۳.
- رجب پور, نگار, نادرپور, فخاریان, پویان. (۲۰۱۷). ارزیابی تاب آوری لرزه ای زیرساخت های شهری. مصالح و سازه های بتنی, ۲(۱), ۷۷-۸۷.
- بهنوا, پورزرگر. (۱۴۰۲). واکاوی نقش فناوری‌های نوین بر ساختار کالبدی ساختمان‌های منتخب معماری معاصر ایران ۱۳۶۰-۱۴۰۰. نقش جهان-مطالعات نظری و فناوری های نوین معماری و شهرسازی, ۱۳(۱), ۳۰-۴۷.
- علوی سیدمحسن, مسعود محمد, کریمی اسداله. (۱۳۹۸). ارزیابی تاب آوری زیرساخت های شبکه ی آب شهری در برابر زلزله (مطالعه ی موردی: منطقه ی ۲ تهران).
- علمشاهی, رامین, فرجی, امید, رستم‌آبادی, سینا, ... امین. (۱۴۰۱). بررسی مزایای مدل‌سازی اطلاعات ساخت (BIM) در پروژه‌های تونلی مطالعه موردی ایستگاه متروی میدان نماز اسلامشهر. مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی, ۱۱(۳), ۲۷۷-۲۹۹.
- بشارتی فر, درخشنده. (۱۳۹۹). سازماندهی و انتخاب مکان بهینه نخاله های ساختمانی مطالعه موردی: شهر یاسوج. جغرافیا و برنامه ریزی منطقه‌ای, ۹(۳۷), ۹۵۸-۹۷۳.