فصلنامه پژوهش در مدیریت شماره۱- دوره۲- صفحات۵۹۷-۵۸۵
Journal of Research in Management
Issn: 3060-6241

ارزیابی عمر سازه‌ها در پروژه‌های عمرانی شهری و ارائه راهکارهای نگهداری، به‌سازی و بازسازی

حسین محسنی راد [۱]*
۱ -لیسانس مهندسی عمران گرایش ساختمان، دانشگاه علمی کاربردی شهرداری‌ها .
(رئیس اداره اجرائیات شهرداری مرکزی)

چکیده

رشد شتابان شهرنشینی و افزایش حجم پروژه‌های عمرانی شهری، موجب شده است که سازه‌های موجود نقش تعیین‌کننده‌ای در ایمنی عمومی، پایداری اقتصادی و تداوم خدمات شهری ایفا کنند. با گذشت زمان، این سازه‌ها تحت تأثیر عوامل متعددی همچون بارهای بهره‌برداری، شرایط محیطی، تغییرات اقلیمی و کاستی‌های اجرایی، دچار کاهش تدریجی عملکرد و دوام می‌شوند. در این میان، ارزیابی عمر سازه‌ها به عنوان یک ابزار کلیدی برای مدیریت بهینه دارایی‌های شهری، اهمیت فزاینده‌ای یافته است. هدف اصلی این مقاله، بررسی جامع مفهوم عمر سازه در پروژه‌های عمرانی شهری و ارائه چارچوبی تحلیلی برای نگهداری، به‌سازی و بازسازی سازه‌ها با رویکردی مبتنی بر چرخه عمر، پایداری و تاب‌آوری است. روش تحقیق این مطالعه از نوع مروری ـ تحلیلی بوده و با تکیه بر تحلیل مفاهیم نظری، رویکردهای مدیریتی و تجربیات اجرایی در حوزه عمران شهری انجام شده است. در این راستا، مفاهیم کلیدی نظیر دوام، عمر باقی‌مانده، مدیریت دارایی، نگهداری پیشگیرانه و نقش فناوری‌های نوین در ارزیابی سازه‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند. یافته‌های مقاله نشان می‌دهد که رویکردهای سنتی نگهداری واکنشی، نه‌تنها از نظر اقتصادی ناکارآمد هستند، بلکه ریسک‌های ایمنی قابل توجهی برای شهروندان ایجاد می‌کنند. در مقابل، استفاده از ارزیابی‌های مبتنی بر چرخه عمر، بهره‌گیری از فناوری‌هایی مانند مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و به‌کارگیری مصالح نوین و پایدار، می‌تواند به شکل مؤثری عمر مفید سازه‌ها را افزایش داده و هزینه‌های بلندمدت مدیریت شهری را کاهش دهد. در نهایت، نتایج این پژوهش بر ضرورت گذار از نگاه مقطعی به رویکردی نظام‌مند و داده‌محور در مدیریت سازه‌های شهری تأکید دارد؛ رویکردی که با تلفیق ملاحظات فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی، زمینه‌ساز ارتقای ایمنی، تاب‌آوری و پایداری زیرساخت‌های شهری در بلندمدت خواهد بود.

واژگان کلیدی: ارزیابی عمر سازه، مدیریت دارایی‌های شهری، نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، به‌سازی و بازسازی سازه‌ها، پایداری زیرساخت‌های شهری

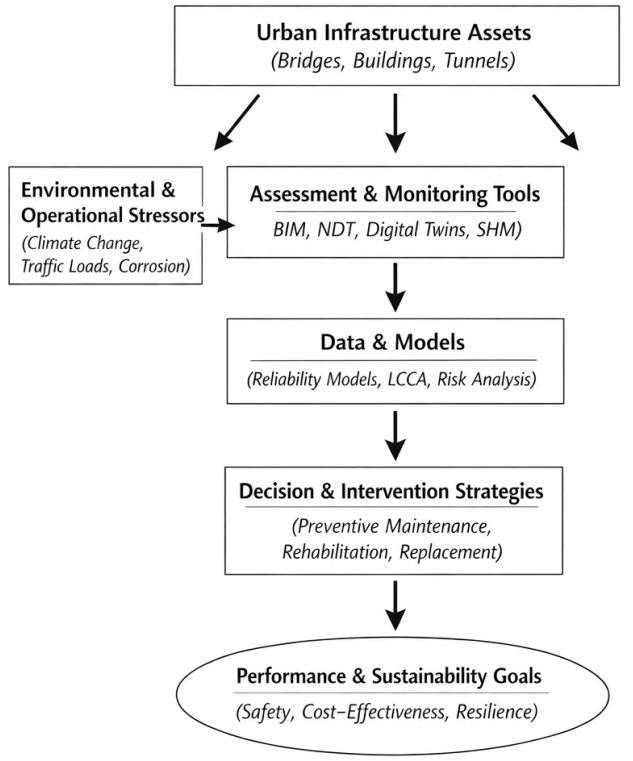
مقدمه

گستره پروژه‌های عمرانی شهری، از پل‌ها و تونل‌ها گرفته تا ساختمان‌های بلند و زیرساخت‌های حیاتی، ستون فقرات عملکرد اقتصادی و اجتماعی شهرها را تشکیل می‌دهند (سلطانی‌نژاد و همکاران، ۲۰۲۵). با گذشت زمان و در مواجهه با عوامل متعدد محیطی و بهره‌برداری، عملکرد این سازه‌ها دستخوش تخریب و کاهش تدریجی می‌شود، مسئله‌ای که مستقیماً بر ایمنی عمومی و هزینه‌های نگهداری بلندمدت شهرداری‌ها تأثیر می‌گذارد. درک دقیق مفهوم "عمر سازه" فراتر از طول عمر اسمی طراحی است و باید شامل عملکرد مورد انتظار تحت شرایط بهره‌برداری واقعی باشد (منافلویان و همکاران، ۲۰۲۰)؛ این امر نیازمند یک چارچوب ارزیابی علمی و مستمر است که بتواند تغییرات ناشی از خوردگی، خستگی، و آسیب‌های ناشی از زلزله یا بارگذاری غیرمتعارف را مدل‌سازی کند (بهنوا و همکاران، ۲۰۲۱). مفهوم دوام سازه‌ای (Durability) به عنوان یکی از ارکان اصلی طراحی مدرن مطرح شده است، اما در پروژه‌های موجود شهری، به دلیل عدم وجود سوابق دقیق نگهداری و شرایط محیطی متغیر، تخمین دقیق عمر باقی‌مانده (RUL) یک چالش فنی پیچیده محسوب می‌شود. در محیط‌های شهری، ترکیب عوامل مخرب مانند آلودگی هوا، نمک‌های یخ‌زدا، رطوبت و بارهای ترافیکی سنگین، فرآیند تخریب را تسریع می‌بخشد و منجر به بروز پدیده‌هایی چون کربناتاسیون بتن و خوردگی آرماتورها می‌شود که نیازمند توجه ویژه در ارزیابی‌های دوره‌ای هستند.

اهمیت این موضوع زمانی دوچندان می‌شود که مدیران شهری به دنبال بهینه‌سازی بودجه‌های عمومی و جلوگیری از شکست‌های فاجعه‌بار باشند (پرویش و همکاران، ۲۰۲۴)؛ یک رویکرد غیرفعال و واکنشی در برابر خرابی‌ها، نه تنها هزینه‌های تعمیرات را به شدت افزایش می‌دهد، بلکه می‌تواند منجر به اختلالات گسترده در شبکه حمل و نقل و خدمات شهری گردد. بنابراین، ارزیابی عمر سازه باید به عنوان یک فرآیند پیشگیرانه و مبتنی بر داده‌های مستمر، در دستور کار نهادهای متولی زیرساخت‌های شهری قرار گیرد تا امکان برنامه‌ریزی استراتژیک برای مداخلات مؤثر فراهم آید (هرندی‌زاده و همکاران، ۲۰۱۹). تحولات شهرنشینی سریع و فرسودگی زیرساخت‌های قدیمی، نیازمند تغییر پارادایم از نگهداری واکنشی به سمت مدیریت دارایی مبتنی بر عملکرد (Performance-Based Asset Management) است. این تغییر پارادایم مستلزم پذیرش مدل‌های تحلیلی پیشرفته‌تری است که بتوانند تأثیر متغیرهای محیطی و عملیاتی را بر نرخ تخریب کمی‌سازی کنند. به عنوان مثال، مدل‌های مبتنی بر تئوری قابلیت اطمینان (Reliability Theory) به مهندسان امکان می‌دهند تا احتمال شکست سازه در برابر بارهای طراحی و محیطی را در بازه‌های زمانی مشخص محاسبه کرده و اولویت‌های تعمیراتی را بر اساس تحلیل ریسک تعیین نمایند (رسول‌زاده و همکاران، ۲۰۲۵).

در پروژه‌های شهری، تنوع مصالح و پیچیدگی اتصالات سازه‌ای، ارزیابی را دشوارتر می‌سازد؛ مصالح سنتی مانند بتن و فولاد، اگرچه قابل اعتماد هستند، اما به شدت تحت تأثیر شرایط محیطی قرار می‌گیرند، در حالی که مصالح کامپوزیتی جدیدتر ممکن است نیاز به روش‌های ارزیابی متفاوتی داشته باشند (ایلدرآبادی و همکاران، ۲۰۱۹). این تنوع ایجاب می‌کند که هر پروژه با توجه به نوع سازه، مصالح مصرفی و شدت مواجهه با عوامل مخرب، یک استراتژی ارزیابی اختصاصی داشته باشد، که این امر مستلزم به‌روزرسانی مداوم دانش فنی تیم‌های ارزیابی است (لطفی و همکاران، ۲۰۲۰). یکی از موانع اصلی در ارزیابی عمر سازه‌های موجود، کمبود یا فقدان سوابق کیفی طراحی و اجرای اولیه است؛ بسیاری از سازه‌های قدیمی فاقد نقشه‌های دقیق اجرایی یا گزارش‌های کنترل کیفیت مصالح هستند، امری که باعث می‌شود ارزیابان مجبور به استفاده از مفروضات محافظه‌کارانه در مدل‌سازی خود باشند. برای غلبه بر این چالش، استفاده از روش‌های غیرمخرب پیشرفته (NDT) برای کسب اطلاعات دقیق از وضعیت داخلی سازه، مانند رطوبت، میزان کربناتاسیون و عمق خوردگی، حیاتی است و داده‌های حاصله باید به دقت در مدل‌های تحلیلی لحاظ گردند (صفری و همکاران، ۲۰۲۵).

مسائل اقتصادی نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی ایفا می‌کنند؛ یک سازه ممکن است از نظر فنی قابلیت ادامه خدمت داشته باشد، اما هزینه نگهداری آن در سال‌های آتی به قدری بالا رود که جایگزینی آن توجیه‌پذیر باشد. بنابراین، ارزیابی عمر سازه باید همواره با تحلیل هزینه-فایده چرخه عمر (LCCA) همراه باشد تا اطمینان حاصل شود که تصمیمات اتخاذ شده، از نظر مالی نیز بهینه‌ترین راهکار برای مدیریت شهری هستند. در نهایت، چارچوب کلی این مقاله بر این مبنا استوار است که ارزیابی عمر سازه‌ها دیگر یک فعالیت فنی مجزا نیست، بلکه باید به عنوان یک جزء جدایی‌ناپذیر از برنامه‌ریزی جامع زیرساخت‌های شهری، مبتنی بر فناوری‌های نوین، مدل‌سازی پیشرفته و رویکردهای پایداری، تعریف شود تا ایمنی، کارایی و تداوم خدمات شهری تضمین گردد (تقوایی و همکاران، ۲۰۲۱).



شکل ۱. مدل مفهومی ارزیابی عمر سازه در زیرساخت‌های شهری: پیونددهی دارایی‌های شهری با تنش‌های محیطی و بهره‌برداری، ابزارهای پایش و ارزیابی، مدل‌های تحلیلی و نهایتاً تصمیم‌های مداخله‌ای با هدف ارتقای ایمنی، تاب‌آوری و پایداری.

این شکل یک چارچوب کلان برای «ارزیابی عمر سازه» در پروژه‌های عمرانی شهری ارائه می‌کند. در این چارچوب، دارایی‌های شهری (مانند پل، تونل و ساختمان) به‌طور هم‌زمان تحت اثر تنش‌های محیطی و بهره‌برداری (نظیر تغییرات اقلیمی، بار ترافیک، خوردگی و رخدادهای لرزه‌ای) قرار دارند. داده‌های موردنیاز از طریق ابزارهای ارزیابی و پایش (مانند بازرسی‌های دوره‌ای، آزمون‌های غیرمخرب، پایش سلامت سازه و همچنین BIM/دوقلوی دیجیتال) جمع‌آوری و به لایه «داده و مدل‌ها» منتقل می‌شود تا با روش‌هایی مانند تحلیل قابلیت اطمینان، تحلیل ریسک و تحلیل هزینه چرخه‌عمر، وضعیت موجود و عمر باقی‌مانده برآورد گردد. خروجی این تحلیل‌ها به تصمیم‌های مدیریتی و فنی تبدیل می‌شود (نگهداری پیشگیرانه، تعمیر،

به‌سازی/مقاوم‌سازی یا جایگزینی) و در نهایت، به بهبود شاخص‌های عملکردی شامل ایمنی، کارایی هزینه، تداوم خدمت، تاب‌آوری و پایداری می‌انجامد.

۲. مفاهیم چرخه عمر، دوام، تاب‌آوری و پایداری سازه‌ای

مفهوم «چرخه عمر سازه» (Life Cycle) در مهندسی عمران مدرن از یک دیدگاه خطی ساده به یک رویکرد سیستمی و چرخه‌ای تبدیل شده است که شامل مراحل طراحی، ساخت، بهره‌برداری، نگهداری، تعمیر و در نهایت، بازنشستگی یا بازیافت سازه است؛ در مدیریت شهری، تمرکز اصلی باید بر بهینه‌سازی مراحل بهره‌برداری و نگهداری باشد که بیشترین سهم را در هزینه‌های کل و تأثیرات محیطی دارند. دوام سازه‌ای، که ارتباط تنگاتنگی با این چرخه دارد، توانایی سازه را برای مقاومت در برابر تخریب ناشی از عوامل محیطی و مکانیکی در طول عمر طراحی شده تعریف می‌کند، امری که در سازه‌های شهری به دلیل تعامل مداوم با محیط خورنده، یک پارامتر حیاتی تلقی می‌شود. پایداری سازه‌ای (Structural Sustainability) فراتر از صرفاً عمر طولانی مدت است و شامل ابعاد زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی نیز می‌شود؛ یک سازه پایدار، سازه‌ای است که منابع کمتری مصرف کند، اثرات مخرب کمتری بر محیط زیست بگذارد و در عین حال، خدمات مورد نیاز جامعه را با کمترین وقفه و بیشترین ایمنی فراهم آورد (گیاه‌چی و همکاران، ۲۰۲۳). مدیران شهری باید در ارزیابی‌های خود، نه تنها وضعیت فعلی مقاومت سازه، بلکه کارایی انرژی و میزان کربن مدفون (Embodied Carbon) مصالح مصرفی در طول عمر آن را نیز مد نظر قرار دهند.

تاب‌آوری سازه‌ای (Structural Resilience) به عنوان یک مفهوم پیشرفته‌تر، توانایی سازه را در جذب شوک‌های ناگهانی (مانند زلزله‌های شدید یا حوادث غیرمترقبه) و بازگشت سریع به عملکرد مورد نظر تعریف می‌کند؛ این مفهوم به ویژه در پروژه‌های شهری که ریسک بلایای طبیعی بالاست، اهمیت فوق‌العاده‌ای دارد. سازه‌هایی که برای تاب‌آوری طراحی شده‌اند، ممکن است پس از یک رویداد شدید دچار آسیب شوند، اما قابلیت خود را برای حفظ کاربری‌های حیاتی حفظ می‌کنند، که این امر مستلزم ارزیابی‌های دینامیکی و مدل‌سازی‌های غیرخطی پیچیده است. ارزیابی عمر باقی‌مانده (RUL) به طور مستقیم به مفهوم دوام وابسته است، اما نیازمند داده‌های کمی در مورد نرخ پیشرفت تخریب است؛ این نرخ‌ها اغلب با استفاده از مدل‌های تحلیلی مبتنی بر فرآیندهای تصادفی یا مدل‌های مبتنی بر وضعیت (Condition-Based Models) تخمین زده می‌شوند. برای مثال، تخریب ناشی از خوردگی آرماتورها در بتن مسلح را می‌توان با استفاده از معادلات انتشار یون کلرید یا نرخ افزایش عمق کربناتاسیون مدل‌سازی کرد، اما دقت این مدل‌ها قویاً به دقت داده‌های اولیه جمع‌آوری شده از نمونه‌برداری و تست‌های غیرمخرب وابسته است (صدیری و همکاران، ۲۰۲۴).

مدیریت دارایی‌های شهری به طور فزاینده‌ای به سمت رویکردهای مبتنی بر ریسک (Risk-Based Approach) حرکت کرده است، جایی که اولویت‌بندی تعمیرات بر اساس ترکیبی از احتمال وقوع شکست (بر اساس ارزیابی دوام) و پیامدهای ناشی از آن شکست (از منظر ایمنی و اقتصادی) تعیین می‌شود. این رویکرد مستلزم توسعه ماتریس‌های ریسکی است که پارامترهای متعددی از جمله شدت ترافیک، اهمیت سازه در شبکه شهری و وضعیت فنی فعلی را در بر می‌گیرد و امکان تخصیص بهینه منابع محدود را فراهم می‌سازد. یکی از ابعاد مهم در ارزیابی چرخه عمر، اثر زمان بر کارایی است؛ عملکرد سازه (Performance Level) یک مفهوم کلیدی است که تعریف می‌کند سازه در چه سطحی از آسیب‌پذیری می‌تواند همچنان خدمات مورد نیاز را ارائه دهد؛ این سطوح معمولاً شامل "عملیاتی کامل"، "عملیاتی محدود" و "ایمنی جانی" است. مدیران شهری باید تعیین

کنند که برای هر سازه، کدام سطح عملکرد باید در طول عمر باقی‌مانده حفظ شود و ارزیابی‌ها باید بر مبنای قابلیت سازه برای دستیابی به آن سطح تعیین شده در بازه‌های زمانی آتی متمرکز شوند (شفقت و همکاران، ۲۰۱۹).

همچنین، یکپارچه‌سازی مفاهیم تاب‌آوری و پایداری در ارزیابی عمر، نیازمند بازنگری در استانداردهای طراحی اولیه است؛ سازه‌هایی که صرفاً بر اساس بارهای حدی نهایی (Ultimate Limit State) طراحی شده‌اند، ممکن است پس از چند رویداد متوسط، به سطحی از تخریب برسند که از منظر پایداری شهری غیرقابل قبول باشد، حتی اگر همچنان از نظر ایمنی برقرار باشند. این امر لزوم توجه بیشتر به حالت‌های حدی بهره‌برداری (Serviceability Limit State) را در ارزیابی‌های دوره‌ای برجسته می‌سازد. در نهایت، تداوم ارزیابی و پایش مستمر، سنگ بنای مدیریت موفق چرخه عمر است؛ یک بار ارزیابی جامع کافی نیست، بلکه سازه‌های شهری نیازمند شبکه‌ای از حسگرها و سامانه‌های پایش سلامت سازه (SHM) هستند تا داده‌های لازم برای به‌روزرسانی مدل‌های تخریب و تخمین‌های RUL به طور لحظه‌ای فراهم شود و امکان مداخلات سریع و مؤثر در برابر فرسایش‌های ناگهانی فراهم گردد (حامد شکری و همکاران، ۲۰۲۴).

۳. نقش BIM و فناوری‌های نوین در ارزیابی عمر و نگهداری سازه‌ها

مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM)، به عنوان یک رویکرد مبتنی بر داده برای مدیریت اطلاعات سازه در طول چرخه حیات آن، انقلابی در روش‌های ارزیابی عمر و مدیریت دارایی‌های شهری ایجاد کرده است. استفاده از مدل‌های BIM نه تنها به صورت سه‌بعدی، بلکه با افزودن پارامترهای چهارم (زمان) و پنجم (هزینه) (۴D و ۵D BIM)، این امکان را فراهم می‌آورد که اطلاعات دقیق طراحی، مصالح مصرفی، سوابق نصب و همچنین نتایج بازرسی‌های دوره‌ای به صورت یکپارچه ذخیره و مدیریت شوند. این بانک اطلاعاتی متمرکز، مبنایی قوی برای تحلیل‌های پیشرفته عمر سازه فراهم می‌آورد. یکی از مهم‌ترین مزایای BIM در ارزیابی، امکان ادغام مستقیم با داده‌های حاصل از سیستم‌های پایش سلامت سازه (SHM) است؛ حسگرهای نصب شده بر روی سازه، داده‌های مربوط به تنش، کرنش، ارتعاشات و دما را به صورت بلادرنگ جمع‌آوری می‌کنند و این داده‌ها می‌توانند مستقیماً در مدل BIM بارگذاری شوند تا وضعیت واقعی سازه در هر لحظه مشخص گردد. این اتصال دوسویه، امکان کالیبراسیون مداوم مدل‌های تخریب را فراهم می‌سازد و دقت پیش‌بینی عمر باقی‌مانده را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد (طهماسیان و همکاران، ۲۰۲۰).

فناوری نقشه‌برداری لیزری سه‌بعدی (۳D Laser Scanning) و فتوگرامتری، ابزارهای مکملی هستند که در فرآیند به‌روزرسانی مدل BIM در حین بهره‌برداری کاربرد دارند؛ این فناوری‌ها امکان ثبت دقیق وضعیت هندسی سازه، شناسایی ترک‌ها، تغییر شکل‌ها و نواقص سطحی را فراهم می‌آورند، به‌ویژه در سازه‌هایی با دسترسی دشوار مانند عرشه پل‌ها یا نمای ساختمان‌های مرتفع. داده‌های ابرنقطه‌ای حاصل از اسکن لیزری، می‌توانند برای شناسایی خودکار خرابی‌ها با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین به کار روند. در زمینه نگهداری پیشگیرانه، BIM امکان شبیه‌سازی سناریوهای مختلف تعمیر و نگهداری را فراهم می‌سازد؛ مهندسان می‌توانند تأثیر یک برنامه تعمیراتی خاص (مثلاً اعمال پوشش محافظتی جدید یا تعویض بخش‌های آسیب‌دیده) را بر افزایش طول عمر سازه و کاهش هزینه‌های آتی، از طریق شبیه‌سازی بر روی مدل دیجیتال، پیش‌بینی کنند. این قابلیت به مدیران اجازه می‌دهد تا سرمایه‌گذاری‌های خود را بر اساس نتایج پیش‌بینی شده بهینه سازند.

روش‌های غیرمخرب (NDT) مانند اولتراسونیک پیشرفته، رادار نفوذ کننده در زمین (GPR) و تست‌های ترموگرافی مادون قرمز، اطلاعات حیاتی در مورد وضعیت داخلی سازه ارائه می‌دهند؛ این داده‌ها معمولاً به صورت جداگانه ثبت می‌شوند، اما

ادغام آن‌ها در یک محیط BIM امکان ایجاد یک مدل سه‌بعدی از نواقص داخلی (مانند میزان نفوذ رطوبت یا ابعاد دقیق آرماتورهای خورده شده) را فراهم می‌کند که تحلیل دقیقی از وضعیت دوام سازه را میسر می‌سازد. علاوه بر BIM سنتی، استفاده از دوقلوهای دیجیتال (Digital Twins) نمایانگر اوج یکپارچه‌سازی فناوری در ارزیابی عمر است (رفسنجانی‌اصل و همکاران، ۲۰۲۵)؛ دوقلوی دیجیتال یک نسخه مجازی پویا و زنده از یک دارایی فیزیکی است که به طور مداوم با داده‌های حسگرها به‌روز می‌شود و امکان شبیه‌سازی‌های پیچیده تحت شرایط عملیاتی فعلی را فراهم می‌کند. این ابزار برای پروژه‌های شهری حیاتی مانند تونل‌ها یا شبکه‌های انتقال آب، امکان شبیه‌سازی سناریوهای شکست و پاسخ اضطراری را به صورت مجازی فراهم می‌آورد.

فناوری‌های رباتیک و پهپادها نیز نقش مهمی در جمع‌آوری داده‌ها ایفا می‌کنند؛ بازرسی سازه‌های مرتفع یا پل‌های با دهانه‌های بزرگ که دسترسی به آن‌ها پرهزینه و خطرناک است، اکنون می‌تواند با استفاده از پهپادهای مجهز به دوربین‌های با وضوح بالا و حسگرهای NDT انجام شود. این فناوری‌ها دقت جمع‌آوری داده‌ها را افزایش داده و زمان مورد نیاز برای بازرسی‌های میدانی را به شدت کاهش می‌دهند و اطلاعات با کیفیتی را برای ورود به مدل‌های تحلیلی فراهم می‌آورند. در نهایت، چالش اصلی در به کارگیری این فناوری‌ها، استانداردسازی تبادل داده‌ها و تضمین امنیت اطلاعات است؛ برای آنکه مدل‌های BIM و دوقلوهای دیجیتال بتوانند به طور مؤثر در مدیریت زیرساخت‌های شهری به کار روند، نیاز به ایجاد پروتکل‌های مشترک میان نرم‌افزارهای مختلف و تأمین امنیت سایبری این زیرساخت‌های اطلاعاتی حیاتی وجود دارد تا مدیران شهری بتوانند به خروجی‌های تحلیلی اعتماد کنند (محمدی‌زاده و همکاران، ۲۰۲۵).

۴. ارزیابی اثرات تغییرات اقلیمی و محیطی بر عمر سازه‌های شهری

تغییرات اقلیمی، با افزایش فرکانس و شدت پدیده‌های حدی (مانند موج‌های گرمایی شدید، سیلاب‌های ناگهانی و افزایش سطح آب دریاها)، به یکی از مهم‌ترین عوامل تهدید کننده دوام و عمر سازه‌های شهری تبدیل شده‌اند. سازه‌های شهری، به ویژه آن‌هایی که در نزدیکی سواحل یا در مناطق با بارش شدید قرار دارند، اکنون باید در برابر شرایطی طراحی و ارزیابی شوند که فراتر از محدوده‌های تاریخی مورد استفاده در کدهای قدیمی ساختمانی است؛ این امر نیازمند تعدیل مدل‌های تخریب موجود برای لحاظ کردن این بارهای محیطی جدید است. افزایش دما و نوسانات حرارتی شدید، تأثیرات قابل توجهی بر عملکرد مواد می‌گذارند؛ در بتن، انبساط و انقباض مکرر می‌تواند منجر به ایجاد تنش‌های داخلی، ترک‌خوردگی و کاهش چسبندگی بین بتن و فولاد شود و در سازه‌های فولادی، تغییرات دمایی شدید می‌تواند باعث تسریع پدیده خستگی (Fatigue) و کاهش مقاومت در برابر بارهای دینامیکی شود. مدل‌سازی این اثرات نیازمند استفاده از تحلیل‌های ترمومکانیکی است که رفتار مصالح را در طیف وسیعی از دماها به درستی شبیه‌سازی کند (زندی و همکاران، ۲۰۲۳).

در مناطق ساحلی و شهری با استفاده گسترده از نمک‌های یخ‌زدا در زمستان، افزایش رطوبت و نفوذ یون‌های کلرید به داخل بتن، سرعت خوردگی آرماتورها را به طور تصاعدی افزایش می‌دهد؛ پیش‌بینی دقیق عمر باقی‌مانده در این مناطق مستلزم استفاده از مدل‌های پیشرفته نفوذ (Diffusion Models) است که نرخ ورود یون‌های کلرید را بر اساس غلظت محیطی و سطح پوشش بتن مدل‌سازی کنند. عدم در نظر گرفتن افزایش احتمالی غلظت نمک در اثر بارش‌های شدیدتر، منجر به تخمین بیش از حد خوش‌بینانه از عمر سازه خواهد شد. تأثیر سیلاب‌های شهری و نفوذ طولانی‌مدت آب به ساختارها، به ویژه در سازه‌های زیرزمینی مانند پارکینگ‌ها و تونل‌ها، یک چالش جدی است؛ آب می‌تواند نفوذ مواد شیمیایی خورنده را تسریع کند، باعث تورم مصالح جاذب شده و در صورت وجود نقص‌های ساختاری، منجر به آسیب‌های هیدرواستاتیک و

نشست‌های موضعی گردد. ارزیابی عمر در این شرایط باید شامل تحلیل ریسک در برابر آب‌گرفتگی و ارزیابی آسیب‌های ناشی از فرسایش خاک اطراف پی‌ها باشد (بهزادپور و همکاران، ۲۰۲۱).

همچنین، افزایش کربن دی‌اکسید در جو، اگرچه بیشتر بر دوام بتن تأثیر می‌گذارد، اما باید توجه داشت که تغییرات جوی می‌توانند بر اثربخشی پوشش‌های محافظتی سازه نیز اثرگذار باشند؛ پوشش‌های محافظتی پلیمری که برای جلوگیری از نفوذ رطوبت و آلودگی به کار می‌روند، خود در معرض تخریب ناشی از تابش فرابنفش شدیدتر و نوسانات دمایی قرار دارند که باید عمر مفید آن‌ها نیز در برنامه‌ریزی‌های نگهداری لحاظ شود. برای مواجهه با این چالش‌های اقلیمی، رویکرد ارزیابی باید از حالت ایستا خارج شده و به مدل‌های سازگارشونده (Adaptive Models) مجهز شود؛ این مدل‌ها باید با استفاده از داده‌های هواشناسی منطقه‌ای به‌روز شوند و نرخ تخریب را بر اساس پیش‌بینی‌های اقلیمی آتی تعدیل کنند. به عنوان مثال، اگر پیش‌بینی شود که میانگین دمای منطقه طی دو دهه آینده ۲ درجه افزایش خواهد یافت، تأثیر این امر بر عمر مفید مواد بتنی باید در محاسبات RUL لحاظ گردد. در زمینه مصالح، مقاوم‌سازی سازه‌های موجود در برابر شرایط اقلیمی تشدید شده، اغلب نیازمند اصلاحاتی در ترکیب مواد است؛ استفاده از بتن‌های مقاوم به نفوذ (SCC) یا افزایش پوشش بتنی بر روی آرماتورها می‌تواند به طور قابل توجهی در برابر عوامل محیطی مقاوم‌تر باشد، اما این مداخلات باید با در نظر گرفتن پتانسیل‌های موجود در سازه‌های قدیمی و محدودیت‌های باربری انجام پذیرد. در نهایت، ارزیابی اثرات محیطی باید از منظر مدیریت شهری، شامل تعیین مناطق حساس با ریسک بالا باشد؛ مناطقی که مستعد تجمع آلاینده‌ها، سیلاب‌های مکرر یا فرسایش شدید ناشی از عوامل جوی هستند، باید در اولویت بازرسی‌های تشدید یافته قرار گیرند و برنامه‌های نگهداری آن‌ها باید با هدف حفظ تاب‌آوری در برابر سناریوهای شدیدتر اقلیمی تنظیم شوند (رحمتی و همکاران، ۲۰۲۳).

۵. مصالح نوین، هوشمند و پایدار و نقش آن‌ها در افزایش عمر سازه

توسعه مصالح جدید، از جمله مصالح کامپوزیتی پیشرفته، بتن‌های خودتراکم (SCC)، بتن‌های خودترمیم‌شونده و بتن‌های دوستدار محیط زیست، پتانسیل قابل توجهی برای افزایش چشمگیر عمر مفید سازه‌های عمرانی شهری فراهم آورده است. بتن خودتراکم به دلیل قابلیت پر کردن کامل فضاهای پیچیده و حذف فرآیند لرزاندن، تراکم داخلی بسیار بالاتری ایجاد می‌کند که به طور طبیعی نفوذپذیری کمتری داشته و مقاومت بهتری در برابر عوامل مهاجم محیطی مانند یون‌های کلرید و سولفات‌ها نشان می‌دهد و مستقیماً دوام سازه را بهبود می‌بخشد. بتن‌های خودترمیم‌شونده (Self-Healing Concrete) که حاوی میکروکپسول‌های حاوی عامل ترمیم‌کننده یا باکتری‌های خاص هستند، یک پیشرفت انقلابی در زمینه دوام محسوب می‌شوند؛ این مصالح قادرند ترک‌های مویی ایجاد شده در طول زمان را به صورت خودکار و بدون نیاز به مداخله انسانی ترمیم کنند و بدین ترتیب، از نفوذ عوامل خورنده به درون مقطع سازه جلوگیری می‌نمایند. استفاده از این فناوری، به ویژه در سازه‌هایی که دسترسی به آن‌ها دشوار است یا نیاز به توقف سرویس‌دهی طولانی ندارند، می‌تواند هزینه‌های نگهداری بلندمدت را به شدت کاهش دهد (منافلویان و همکاران، ۲۰۲۰).

مصالح کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف (FRP)، به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا و مقاومت عالی در برابر خوردگی، به عنوان جایگزین‌های مطلوبی برای فولاد در محیط‌های خورنده شهری مطرح شده‌اند؛ استفاده از میلگردهای FRP یا ورقه‌های FRP برای تقویت سطحی در عملیات به‌سازی سازه‌های قدیمی، می‌تواند عمر مفید سازه را به میزان قابل توجهی افزایش دهد، زیرا مشکل اصلی خوردگی آرماتورها در بتن را به طور ریشه‌ای مرتفع می‌سازد. از منظر پایداری، گرایش به سمت استفاده از مصالح با کربن مدفون کمتر و قابلیت بازیافت بالاتر اهمیت یافته است؛ برای مثال، جایگزینی بخشی از سیمان پرتلند با

سرباره کوره بلند یا خاکستر بادی در تولید بتن، علاوه بر کاهش انتشار CO_2، می‌تواند خواص دوام بتن را از طریق بهبود ساختار میکروسکوپی و کاهش نفوذپذیری بهبود بخشد. ارزیابی عمر سازه در این بافت، باید شامل تعادلی میان افزایش دوام و کاهش اثرات زیست‌محیطی در کل چرخه عمر باشد.

مصالح هوشمند (Smart Materials)، مانند فولادهای خودترمیم‌شونده یا بتن‌هایی که حاوی حسگرهای پایش سلامت (Embedded Sensors) هستند، ارزیابی عمر را از حالت غیرفعال به حالت فعال تبدیل می‌کنند؛ این حسگرها می‌توانند اطلاعاتی در مورد میزان تنش، کرنش، دمای داخلی و وقوع خوردگی را مستقیماً به سیستم‌های مدیریتی ارسال کنند. این داده‌های لحظه‌ای امکان مداخله دقیق و به موقع را فراهم می‌آورند، به جای تکیه بر بازرسی‌های دوره‌ای با فواصل زمانی طولانی. با این حال، چالش اصلی در پذیرش مصالح نوین، عدم وجود داده‌های بلندمدت تجربی از عملکرد آن‌ها در شرایط واقعی محیطی شهری است؛ مدیران شهری معمولاً به دلیل ریسک‌پذیری پایین در پروژه‌های عمومی، تمایل به استفاده از مصالح اثبات شده دارند، هرچند که عمر مفید آن‌ها کوتاه‌تر باشد. بنابراین، لازم است که تحقیقات گسترده‌تری برای اعتبارسنجی عملکرد این مصالح در محیط‌های چالش‌برانگیز شهری صورت پذیرد و استانداردهای لازم برای کاربرد آن‌ها تدوین گردد.

علاوه بر خود مصالح، پوشش‌ها و سدهای محافظ نیز نقشی کلیدی در افزایش عمر سازه دارند؛ استفاده از پوشش‌های نانوکامپوزیتی یا غشاهای پلیمری پیشرفته می‌تواند به عنوان یک مانع نفوذپذیری در برابر رطوبت و آلاینده‌ها عمل کند. ارزیابی عمر در سازه‌هایی که از این پوشش‌ها استفاده می‌کنند، باید شامل یک برنامه پایش برای تخمین زمان از دست رفتن کارایی پوشش و لزوم تجدید آن باشد، زیرا خرابی پوشش می‌تواند به سرعت منجر به تخریب سریع‌تر سازه اصلی شود. در نهایت، انتخاب مصالح برای پروژه‌های جدید شهری باید بر اساس تحلیل جامع چرخه عمر (LCA) باشد که هم دوام و هم پایداری را در نظر بگیرد؛ مصالحی که طول عمر بیشتری دارند، حتی اگر هزینه اولیه بالاتری داشته باشند، در درازمدت به دلیل کاهش هزینه‌های نگهداری و ریسک‌های عملیاتی، از منظر اقتصادی و زیست‌محیطی برتری خواهند داشت و این دیدگاه باید توسط مدیران اجرایی مورد پذیرش قرار گیرد (پرویش و همکاران، ۲۰۲۴).

۶. روش‌های نگهداری، مدیریت دارایی و تعمیرات پیشگیرانه در زیرساخت‌های شهری

مدیریت مؤثر زیرساخت‌های شهری مستلزم حرکت از یک رویکرد واکنشی که صرفاً به خرابی‌ها پاسخ می‌دهد، به سمت یک استراتژی فعال و پیشگیرانه مبتنی بر ارزیابی عمر سازه است. این تغییر پارادایم، مدیریت دارایی‌های مبتنی بر ریسک (RBM) نامیده می‌شود و هدف آن به حداکثر رساندن ارزش دارایی‌های عمومی در طول عمر اقتصادی آن‌ها با کمترین هزینه کل چرخه عمر است. این استراتژی بر این اصل استوار است که مداخله زودهنگام و هدفمند، از بروز خرابی‌های بزرگ و پرهزینه در آینده جلوگیری می‌کند. اساس مدیریت دارایی‌های پیشگیرانه، اجرای دقیق و منظم بازرسی‌ها بر اساس یک برنامه زمان‌بندی شده و مبتنی بر ریسک است؛ این بازرسی‌ها باید ترکیبی از بازرسی‌های بصری استاندارد و استفاده از فناوری‌های پیشرفته NDT باشند تا وضعیت واقعی اجزای سازه‌ای به درستی ارزیابی شود. برنامه بازرسی باید بر اساس نوع سازه، اهمیت آن در شبکه شهری و شرایط محیطی منطقه‌ای که در آن قرار دارد، تدوین گردد، به گونه‌ای که سازه‌های با ریسک بالاتر، دفعات بازرسی بیشتری را تجربه کنند (رسول‌زاده و همکاران، ۲۰۲۵).

نتایج حاصل از ارزیابی عمر سازه، پارامتر اصلی در تعیین زمان‌بندی تعمیرات پیشگیرانه است؛ هنگامی که تحلیل‌ها نشان می‌دهند که احتمال شکست یک جزء در یک بازه زمانی مشخص از آستانه پذیرش ریسک فراتر می‌رود، یک مداخله تعمیراتی باید برنامه‌ریزی شود. این تعمیرات باید با هدف بازیابی سطح عملکردی مطلوب سازه انجام پذیرد، نه صرفاً ترمیم آسیب‌های ظاهری، و باید در قالب برنامه‌های کوتاه، متوسط و بلندمدت مدیریت شوند. تعمیرات پیشگیرانه شامل طیف وسیعی از اقدامات است، از جمله اعمال پوشش‌های محافظتی روی بتن و فولاد، تزریق اپوکسی برای ترمیم ترک‌ها، و یا تقویت موضعی اعضا. هدف اصلی در این مرحله، به تأخیر انداختن یا متوقف کردن فرآیندهای تخریب داخلی مانند خوردگی است، زیرا توقف این فرآیندها در مراحل اولیه، از نظر اقتصادی بسیار مؤثرتر از تعمیرات اساسی پس از رسیدن سازه به مرحله بحرانی است.

در مدیریت دارایی‌های شهری، استفاده از مدل‌های کمی‌سازی تخریب (Degradation Modeling) ضروری است؛ این مدل‌ها که اغلب مبتنی بر فرآیندهای مارکوف یا مدل‌های مبتنی بر داده‌های جمع‌آوری شده توسط SHM هستند، به مدیران اجازه می‌دهند تا با استفاده از یک تابع تبدیل وضعیت (Transition Function)، وضعیت سازه را در سال‌های آتی پیش‌بینی کنند. این پیش‌بینی‌ها امکان مدل‌سازی هزینه-اثرگذاری (Cost-Effectiveness) مداخلات مختلف تعمیراتی را فراهم می‌آورد. یکی از چالش‌های اجرایی، تخصیص بودجه محدود به تعداد زیاد دارایی‌های شهری است؛ در این شرایط، تحلیل هزینه چرخه عمر (LCCA) به عنوان ابزاری ضروری برای تصمیم‌گیری‌های کلان عمل می‌کند. LCCA به مدیران کمک می‌کند تا هزینه‌های اولیه تعمیر، هزینه‌های نگهداری دوره‌ای، هزینه‌های بهره‌برداری (مانند مصرف انرژی یا ترافیک ناشی از تعمیرات) و ارزش باقیمانده سازه را در افق زمانی مشخص محاسبه کرده و مداخلاتی را انتخاب کنند که کمترین هزینه خالص فعلی (NPV) را به همراه داشته باشند.

باید توجه داشت که تعمیرات مبتنی بر عملکرد (Performance-Based Repair) جایگزین مناسبی برای تعمیرات مبتنی بر استاندارد قدیمی هستند؛ به جای بازسازی یک عضو به وضعیت "نو"، تعمیرات باید بر اساس دستیابی مجدد به سطح عملکرد مورد نیاز برای آن عضو در شرایط محیطی فعلی تعریف شوند، که این رویکرد انعطاف‌پذیری بیشتری در انتخاب روش‌ها و مصالح فراهم می‌آورد. در نهایت، موفقیت استراتژی‌های نگهداری به شدت به یکپارچگی داده‌ها وابسته است؛ سیستم‌های مدیریت نگهداری کامپیوتری (CMMS) باید به طور مؤثر با سیستم‌های GIS و BIM ارتباط برقرار کنند تا سوابق هر جزء سازه‌ای، شامل تاریخچه بازرسی‌ها، نوع خرابی‌ها، و مداخلات انجام شده، به صورت جامع ثبت و در دسترس تحلیلگران قرار گیرد و اطمینان حاصل شود که هیچ سازه‌ای بدون پایش باقی نماند (صفری و همکاران، ۲۰۲۵).

۷. به‌سازی و بازسازی سازه‌ها با رویکرد اقتصادی، انرژی و چرخه عمر

هنگامی که ارزیابی عمر سازه نشان می‌دهد که دوام سازه به پایان رسیده یا هزینه‌های نگهداری پیشگیرانه به حدی رسیده که توجیه اقتصادی ندارد، باید تصمیم به به‌سازی (Rehabilitation) یا بازسازی کامل (Reconstruction) گرفته شود؛ انتخاب بین این دو رویکرد، یک تصمیم استراتژیک است که باید با در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی، عملکردی، انرژی و پایداری چرخه عمر سازه انجام شود. رویکرد به‌سازی با هدف تمدید عمر مفید سازه از طریق تقویت یا ترمیم اجزای آسیب‌دیده انجام می‌پذیرد و معمولاً از نظر هزینه اولیه و اختلال در خدمات شهری نسبت به بازسازی کامل ارجحیت دارد. بهسازی باید با هدف ارتقاء عملکرد سازه فراتر از سطح اولیه طراحی صورت گیرد، به ویژه برای انطباق با کدهای لرزه‌ای جدیدتر یا افزایش ظرفیت باربری برای پاسخگویی به نیازهای ترافیکی مدرن شهری (زندی و همکاران، ۲۰۲۳).

در ارزیابی‌های اقتصادی، تحلیل هزینه چرخه عمر (LCCA) نقش محوری دارد؛ یک پروژه به‌سازی ممکن است در کوتاه مدت ارزان‌تر به نظر برسد، اما اگر منجر به نیاز به مداخلات مکرر در آینده نزدیک شود، هزینه کل آن از یک بازسازی کامل که عمر طولانی‌تری را تضمین می‌کند، فراتر خواهد رفت. مدیران باید با استفاده از نرخ تنزیل مناسب، ارزش فعلی خالص (NPV) تمامی هزینه‌های آتی ناشی از هر سناریو را محاسبه کنند تا گزینه‌ای که کمترین هزینه را در طول عمر مورد انتظار به سیستم شهری تحمیل می‌کند، انتخاب شود. ملاحظات انرژی در فرآیند به‌سازی و بازسازی اهمیت فزاینده‌ای یافته است؛ در بهسازی، تلاش بر این است که با استفاده از مصالح سبک‌تر یا افزایش مقاومت سازه بدون افزایش قابل توجه وزن، کارایی انرژی کلی سازه حفظ یا بهبود یابد. در بازسازی، این فرصت فراهم می‌شود تا اصول طراحی با راندمان انرژی بالا (مانند عایق‌کاری حرارتی پیشرفته و استفاده از سیستم‌های فعال و غیرفعال انرژی) در سازه جدید لحاظ شود و کربن عملیاتی (Operational Carbon) سازه در طول عمر آینده به حداقل برسد (بهزادپور و همکاران، ۲۰۲۱).

استفاده از رویکردهای مبتنی بر قابلیت استفاده مجدد (Reusability) و بازیافت مصالح در فرآیند بازسازی، جنبه پایداری را تقویت می‌کند؛ در صورت تخریب، باید برنامه‌ریزی دقیقی برای جداسازی و بازیافت بتن، فولاد و سایر اجزا صورت گیرد تا میزان مواد ارسالی به محل دفن زباله کاهش یابد. این امر مستلزم استفاده از مدل‌های BIM از سازه قدیمی است که اجزای مختلف و قابلیت بازیافت آن‌ها را مشخص می‌سازد. به‌سازی سازه‌های شهری اغلب با محدودیت‌های فضایی و نیاز به تداوم خدمات همراه است؛ به عنوان مثال، تقویت یک پل بزرگراهی نباید منجر به انسداد طولانی مدت مسیر شود. بنابراین، روش‌های به‌سازی باید به سمت راه‌حل‌های سریع‌الاجرا و ماژولار حرکت کنند؛ استفاده از کامپوزیت‌های پیش‌ساخته (Precast Composites) یا سیستم‌های تقویتی که قابلیت نصب سریع دارند، برای به حداقل رساندن اختلالات عملیاتی ضروری است.

در مورد بازسازی کامل، تصمیم باید زمانی اتخاذ شود که عمر سازه به پایان رسیده باشد و هزینه‌های نگهداری یا تغییرات لازم برای تطابق با استانداردهای امروزی (مانند زلزله یا مقاومت در برابر آتش) آنقدر زیاد باشد که ساخت سازه‌ای جدید، کارآمدتر باشد. بازسازی فرصتی برای استفاده از آخرین دستاوردها در مهندسی سازه و فناوری‌های پایدار است تا سازه جدید برای یک دوره عمر طولانی‌تر و با الزامات عملکردی برتر طراحی شود. در نهایت، هرگونه تصمیم‌گیری در مورد به‌سازی یا بازسازی باید با یک ارزیابی دقیق از تأثیر اقتصادی بلندمدت و مقایسه آن با هزینه‌های نگهداری در صورت عدم مداخله همراه باشد؛ موفقیت در این حوزه نیازمند یک تحلیل جامع است که صرفاً بر مقاومت سازه‌ای متمرکز نباشد، بلکه رفاه شهری، بهره‌وری انرژی و پایداری محیط زیستی را نیز در بر گیرد (رحمتی و همکاران، ۲۰۲۳).

جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و ارائه راهبردهای اجرایی برای مدیریت شهری

این مقاله مروری تأکید کرد که ارزیابی عمر سازه‌ها در پروژه‌های عمرانی شهری از یک فعالیت فنی محدود به یک راهبرد مدیریتی جامع تبدیل شده است که برای تضمین ایمنی، دوام و پایداری زیرساخت‌های حیاتی ضروری است. نتایج نشان داد که سازه‌های شهری به طور فزاینده‌ای تحت فشار عوامل محیطی تشدید شده ناشی از تغییرات اقلیمی قرار دارند و مدل‌های سنتی ارزیابی دیگر قادر به ارائه تخمین‌های دقیقی از عمر باقی‌مانده نیستند. پذیرش فناوری‌های نوین مانند BIM و دوقلوهای دیجیتال برای یکپارچه‌سازی داده‌های طراحی، پایش لحظه‌ای و مدل‌های تخریب، کلید اصلی برای گذار به مدیریت دارایی‌های مبتنی بر عملکرد است. نتیجه‌گیری محوری این است که تداوم عمر سازه‌های شهری به شدت به انتقال از نگهداری واکنشی به مدیریت فعال و پیشگیرانه وابسته است؛ این امر مستلزم استقرار منظم سیستم‌های SHM برای کسب داده‌های بلادرنگ از وضعیت سازه و استفاده از این داده‌ها برای کالیبره کردن مستمر مدل‌های پیش‌بینی تخریب است. مدل‌های پیشرفته باید

نرخ تخریب را نه تنها بر اساس بارهای طراحی تاریخی، بلکه بر اساس پیش‌بینی‌های اقلیمی آتی تنظیم کنند تا تاب‌آوری سازه‌ها در برابر رویدادهای شدید تضمین شود.

برای مدیران اجرایی شهرداری، راهبردهای عملی زیر برای ارتقاء سطح ارزیابی عمر سازه‌ها پیشنهاد می‌شود:

۱. اولاً، استانداردسازی جمع‌آوری داده‌ها از طریق BIM: کلیه پروژه‌های جدید عمرانی شهری باید با مدل‌های BIM جامع (شامل D۶ و D۷) اجرا شوند که سوابق کیفیت ساخت و خواص مصالح را ذخیره کنند. این مدل‌ها باید به عنوان پایه و اساس مدیریت دارایی در طول عمر سازه عمل کرده و در زمان بازرسی، با داده‌های NDT و اسکن لیزری به‌روز شوند.
۲. دوماً، اجرای طرح‌های پایش سلامت سازه (SHM) هدفمند: پایش مستمر باید در سازه‌های حیاتی، مانند پل‌های بزرگ، سازه‌های تونلی و سازه‌های ساحلی، نصب شود. این سیستم‌ها باید قابلیت ارسال داده به یک پلتفرم مرکزی مدیریت دارایی را داشته باشند تا شاخص‌های ریسک به صورت خودکار محاسبه و هشدارهای اولیه صادر گردد.
۳. سوماً، اولویت‌بندی تعمیرات بر اساس تحلیل ریسک و LCCA: تخصیص بودجه‌های نگهداری باید بر اساس تحلیل هزینه چرخه عمر (LCCA) و ماتریس ریسک انجام شود. مداخلات باید به گونه‌ای برنامه‌ریزی شوند که با کمترین هزینه کل، بیشترین افزایش در عمر باقی‌مانده و بالاترین سطح عملکرد سازه‌ای را در افق زمانی مورد نظر تضمین کنند.
٤. چهارماً، ترویج استفاده از مصالح نوین و پایدار در به‌سازی: در پروژه‌های به‌سازی، استفاده از مصالح مقاوم در برابر خوردگی مانند FRP و بتن‌های با دوام بالا باید مد نظر قرار گیرد تا نه تنها مشکل فعلی حل شود، بلکه عمر مفید سازه برای یک دوره طولانی‌تر تضمین گردد و اثرات زیست‌محیطی مداخله کاهش یابد.
۵. پنجم، تدوین برنامه‌های نگهداری سازگارشونده (Adaptive Maintenance Plans): برنامه‌های نگهداری نباید ثابت باشند؛ آن‌ها باید بر اساس داده‌های لحظه‌ای از پایش سلامت و تغییرات شرایط محیطی تنظیم شوند، به طوری که بازرسی‌ها و تعمیرات تنها زمانی انجام شوند که مدل تخریب نشان‌دهنده کاهش عملکرد زیر سطح آستانه پذیرش باشد.

در مجموع، مدیریت مؤثر عمر سازه‌های شهری نیازمند سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های اطلاعاتی (BIM و SHM) و آموزش مهندسان و مدیران برای اتخاذ رویکردهای تحلیلی پیشرفته مبتنی بر دوام و پایداری است؛ این تغییر نگرش، تضمین‌کننده سرمایه‌گذاری‌های آتی شهری و حفظ ایمنی عمومی در برابر چالش‌های محیطی خواهد بود.

منابع

- صفری, علیان, زرعی چیان. (۲۰۲۵). بررسی پتانسیل پیاده سازی مدلسازی اطلاعات ساختمان در پروژه های انبوه سازی با در نظر گرفتن افزایش تقاضا مطالعه موردی مسکن مهر رشت. مهندسی سازه و ساخت, ۱۱(۱۲).
- رسول زاده, مشاری. (۲۰۲۵). اولویت شناسی در برنامه ریزی شهر سالم: تعامل شیمی نوین و رایانش مصالح سبز. نقش جهان-مطالعات نظری و فناوری های نوین معماری و شهرسازی, ۱۱(۱), ۹۴-۱۰۵.
- پرویش, اسدی. (۲۰۲۴). جایگاه عمران و نوسازی روستایی در برنامه پنجم (۱۳۵۲-۱۳۵۶) راهبردها و چالش ها. مجله تاریخ ایران, ۱۷(۲), ۸۹-۱۱۸.

- منافلویان, سعیده زرآبادی, بهزادفر. (۲۰۲۰). شناسایی و بررسی وضعیت موجود تغییرات اقلیمی و چالش‌های آن در تاب‌آوری بوم شناسانه. فصلنامه جغرافیا و برنامه ریزی منطقه ای, ۱۰(۳۹), ۴۴۷-۴۶۲.
- رحمتی, نوحه گر, نبی بیدهندی. (۲۰۲۳). تعدیل اثرات تغییرات آب و هوایی با ارتقاء الگوی کشاورزی شهری پایدار با استفاده از روش‌های BWM و ARAS (مطالعه موردی: منطقه ۲۲ شهرداری تهران). پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی, ۳(۱۲), ۹۱-۱۰۸.
- بهزادپور, خاک‌زند. (۲۰۲۱). بررسی تاثیر مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) در طراحی و چیدمان مبلمان فضاهای داخلی مجتمع‌های آموزشی (موردپژوهی: دانشکده معماری شهرسازی، عمران و مکانیک دانشگاه علم و صنعت ایران). معماری و شهرسازی پایدار, ۱۸(۹), ۱۷۷-۱۹۸.
- زندی, لرک, امین نژاد. (۲۰۲۳). توسعه یک سیستم ارزیابی فازی جهت تعیین اثربخشی سیاست‌گذاری‌های تشویقی موثر بر ارتقاء ساختمان‌های سبز. مهندسی سازه و ساخت, ۱۰(۷), ۱۵۳-۱۸۱.
- محمدی زاده, میرزاده. (۲۰۲۵). کاربرد مهندسی ارزش در بهینه‌سازی زنجیره تامین پروژه‌های ساختمانی و صنعتی. | نشریه عمران و پروژه| ماهنامه| .ISC|, e۲۳۷٤٥٥
- رفسنجانی اصل, ایمان, قاسمی, نظری, شقایق. (۲۰۲۵). ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای سازه‌های بلندمرتبه دیاگرید بهینه همراه با میراگر لزج با محاسبه چرخه عمر. مهندسی سازه و ساخت, ۱۲(۰۴), ۵-۲۸.
- طهماسیان, سواک. (۲۰۲۰). استفاده از مدل سازی اطلاعات ساختمان و نرم افزارهای رایانه ای در متره و برآورد پروژه‌های عمرانی. | نشریه عمران و پروژه|, ۱(۱۰), ۵۵-۶۲.
- حامد شکری, امیر نجفی. (۲۰۲۴). مروری بر مدلسازی اطلاعات ساختمان (BIM). نشریه علمی رویکردهای پژوهشی نوین مدیریت و حسابداری, ۸(۲۹), ۶۹۸-۷۱۴.
- شفقت, عرفان, تقدس, شرافت, بهنام. (۲۰۱۹). بررسی دقت متره و برآورد در نرم‌افزارهای مدل سازی اطلاعات ساختمان. مجله ی مهندسی عمران شریف, ۳۴(۴.۱), ۱۴۵-۱۵۲.
- صدیری, حسناء, بهرویان, قاسمی. (۲۰۲۴). استفاده از مدل سازی اطلاعات ساختمان در مدیریت نگهداری مخازن ذخیره سازی بتنی نفتی. مهندسی سازه و ساخت, ۱۱(۸), ۱۰۸-۱۲۶.
- گیاه چی, حسینی, سید عظیم, اخباری, صفا, اکبرپور. (۲۰۲۳). ارزیابی بهینه سازی بهره وری انرژی بر اساس تحلیل انرژی چرخه عمر ساختمان (مطالعه موردی؛ یک ساختمان آموزشی در شهر تهران). مهندسی سازه و ساخت, ۹(۱۱), ۵۰-۷۶.
- تقوایی, حسینی خواه, محمدی دوست, سلیمان. (۲۰۲۱). ارزیابی راهبردی ساختار فضایی شهرها با تأکید بر الگوهای نوین آمایش شهری (پژوهش موردی: شهر یاسوج). برنامه ریزی فضایی, ۱۱(۳), ۱۱۷-۱۴۴.
- ایلدرآبادی, پوریا, رحیمی, امیدوار, پیمان. (۲۰۱۹). بهینه سازی مصالح مصرفی ساخت با بکارگیری فناوری های نوین ساختمانی و پیامدهای آن در توسعه پایدار با دیدگاه کاهش انتشار آلاینده کربن دی اکسید. مطالعات علوم محیط زیست, ۴(۱), ۹۱۷-۹۲۸.
- لطفی, علیزاده الیزئی, احمدی. (۲۰۲۰). انتخاب مصالح نوین مناسب جهت اجرای دیوار غیرباربر در ساختمان ها به روش تحلیل سلسله مراتبی. مهندسی سازه و ساخت, ۷(شماره ویژه ۲), ۱۵۸-۱۷۱.
- هرندی زاده سعید, قاسمی الهام, کریمی شاهین. (۲۰۱۹). طراحی شبکه پیاده منسجم شهری با رویکرد ساختار سبز: راهی به سوی حل چالش تغییرات اقلیمی (مورد مطالعه: بافت تاریخی اصفهان).

- بهنوا, پورزرگر. (۲۰۲۱). نقش مصالح نوین ساختمانی بر پویایی نما در چهار دهه اخیر معماری ایران ۱۳۵۹-۱۳۹۹. نقش جهان-مطالعات نظری و فناوری های نوین معماری و شهرسازی, ۱۱(۳), ۴۹-۶۶.
- سلطانی نژاد, هادی, رباطی. (۲۰۲۵). بررسی امکان هوشمندسازی سبز در سازه با بکارگیری مصالح هوشمند نوین. | نشریه عمران و پروژه|, ۷(۳).