فصلنامه پژوهش در مدیریت شماره۱- دوره۲- صفحات۵۵۵-۵۴۳
Journal of Research in Management
Issn: 3060-6241

استفاده از مصالح نوین و پایدار در پروژه‌های عمران شهری: بررسی مزایا، چالش‌ها و راهکارهای اجرایی

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

چکیده

توسعه شتابان شهرنشینی در دهه‌های اخیر و افزایش پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از الگوهای سنتی ساخت‌وساز، ضرورت بازنگری در انتخاب مصالح مورد استفاده در پروژه‌های عمران شهری را بیش از پیش آشکار ساخته است. در این میان، مصالح نوین و پایدار به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های کلیدی توسعه شهری پایدار، نقش مهمی در کاهش مصرف منابع طبیعی، بهبود عملکرد سازه‌ای و ارتقای کیفیت محیط شهری ایفا می‌کنند. هدف این مقاله مروری، ارائه تحلیلی جامع از مزایا، چالش‌ها و راهکارهای اجرایی به‌کارگیری مصالح نوین و پایدار در پروژه‌های عمران شهری است. روش تحقیق مبتنی بر مرور نظام‌مند ادبیات علمی و فنی موجود، شامل مقالات پژوهشی، گزارش‌های تخصصی و اسناد راهبردی مرتبط با مصالح پایدار در حوزه عمران شهری می‌باشد. تمرکز اصلی مطالعه بر شناسایی انواع مصالح نوین، ارزیابی عملکرد آن‌ها از منظر زیست‌محیطی، فنی و اقتصادی و بررسی موانع اجرایی در مقیاس پروژه‌های شهری است. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از مصالحی نظیر بتن‌های پیشرفته، مصالح بازیافتی، مواد خودترمیم‌شونده و فناوری‌های نوین ساختمانی، می‌تواند منجر به کاهش مصرف انرژی، افزایش دوام و طول عمر سازه‌ها، کاهش هزینه‌های نگهداری و بهبود مدیریت چرخه عمر پروژه‌ها شود. با این حال، چالش‌هایی همچون هزینه اولیه بالا، کمبود استانداردها و ضوابط اجرایی، محدودیت‌های زنجیره تأمین، عدم آشنایی نیروی انسانی و تردید نسبت به عملکرد بلندمدت این مصالح، مانع گسترش کاربرد آن‌ها در پروژه‌های عمران شهری شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که غلبه بر چالش‌های موجود مستلزم اتخاذ رویکردی یکپارچه شامل اصلاح سیاست‌ها و مقررات، ارتقای آموزش‌های تخصصی، استفاده از فناوری‌های نوین مدیریتی و اجرای پروژه‌های پایلوت است. در نهایت، توسعه و به‌کارگیری هدفمند مصالح پایدار می‌تواند زمینه‌ساز تحقق شهرهایی تاب‌آور، کارآمد و سازگار با محیط زیست در آینده باشد.

واژگان کلیدی: مصالح نوین، مصالح پایدار، عمران شهری، توسعه پایدار، مدیریت چرخه عمر

چکیده :

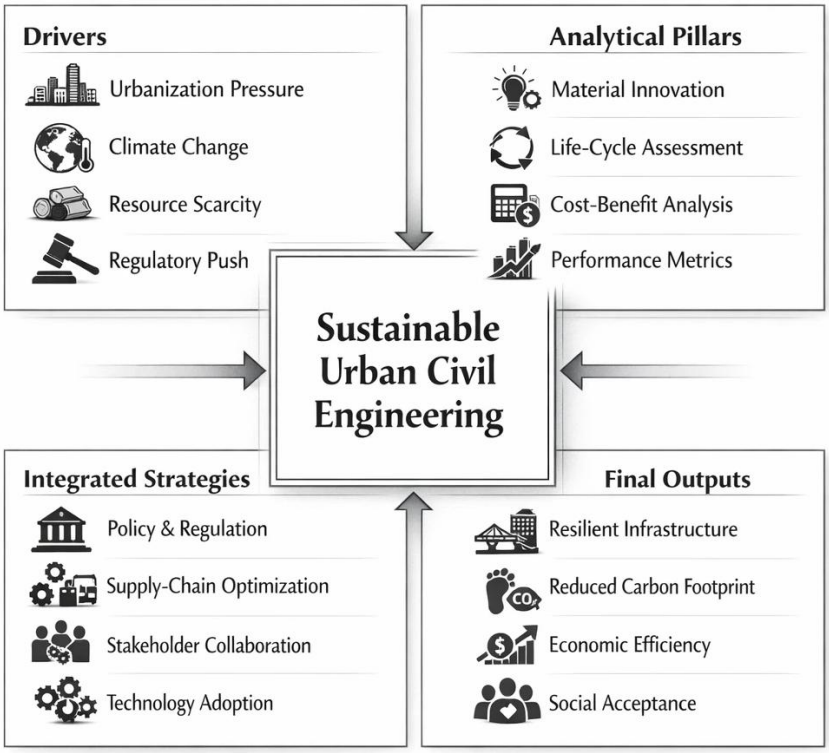
تحولات سریع شهرنشینی در دهه‌های اخیر، فشار بی‌سابقه‌ای را بر منابع طبیعی و محیط زیست وارد آورده است؛ این امر لزوم بازنگری اساسی در رویکردهای سنتی مهندسی عمران را به وضوح نمایان می‌سازد و صنعت ساختمان‌سازی را به کانون توجه برای دستیابی به توسعه پایدار شهری سوق می‌دهد (پرویش و اسدی، ۲۰۲۴). تاریخچه مهندسی عمران پیوندی ناگسستنی با منابع محلی و روش‌های ساخت متداول داشته است، اما با آگاهی یافتن از اثرات مخرب تولید سیمان پورتلند، استخراج مواد اولیه و تولید حجم عظیمی از پسماندهای ساختمانی، نیاز به گذار پارادایمی از مواد پرانرژی و غیرقابل تجدید به سمت مصالحی با اثر کربنی پایین و قابلیت بازیافت بالا، به یک اولویت استراتژیک تبدیل شده است (بهنوا و پورزرگر، ۲۰۲۱). در این راستا، مفهوم «مصالح نوین و پایدار» صرفاً به معنای جایگزینی مواد سنتی نیست، بلکه رویکردی جامع در مدیریت منابع، طراحی برای دوام طولانی‌مدت، و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و دفع در طول چرخه عمر سازه را مد نظر قرار می‌دهد که این امر مستلزم درک عمیق از ویژگی‌های عملکردی، زیست‌محیطی و اقتصادی آن‌ها است (رسول‌زاده و مشاری، ۲۰۲۵).

توسعه زیرساخت‌های شهری نیازمند تعادل دقیقی میان الزامات عملکردی مهندسی (مانند مقاومت، سختی و دوام) و اهداف زیست‌محیطی (مانند کاهش مصرف انرژی اولیه، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و حفظ تنوع زیستی) است (سلطانی‌نژاد و رباطی، ۲۰۲۵). مصالح نوین، اغلب با بهره‌گیری از پیشرفت‌های نانوتکنولوژی، شیمی مواد پیشرفته و مهندسی مواد هوشمند، امکان دستیابی به خواصی فراتر از مصالح سنتی را فراهم می‌آورند؛ به عنوان مثال، بتن‌هایی که می‌توانند ترک‌های کوچک را خودبه‌خود ترمیم کنند، یا فولادهایی با مقاومت کششی فوق‌العاده بالا که امکان کاهش چشمگیر وزن سازه را فراهم می‌سازند (ایلدرآبادی و همکاران، ۲۰۱۹). این نوآوری‌ها پتانسیل دارند تا بازدهی پروژه‌های عمرانی را نه تنها از منظر فنی، بلکه از دیدگاه اجتماعی و اقتصادی نیز بهبود بخشند، به ویژه در بافت‌های شهری پرتراکم که محدودیت فضا و حساسیت محیطی بالایی وجود دارد (رحمتی و همکاران، ۲۰۲۳). مرور ادبیات نشان می‌دهد که پذیرش این مصالح در کشورهای توسعه‌یافته شتاب بیشتری گرفته، اما در بسیاری از مناطق، شامل ایران، موانع متعددی بر سر راه اجرای گسترده آن‌ها قرار دارد؛ این موانع اغلب ریشه در عدم قطعیت‌های مربوط به طول عمر واقعی، هزینه‌های اولیه بالاتر، ضعف در زیرساخت‌های تولید، و نبود چارچوب‌های قانونی و مقرراتی مدون برای ارزیابی و تأیید کارایی بلندمدت آن‌ها دارد (بهزادپور و خاک‌زند، ۲۰۲۱). بنابراین، بررسی جامع مکانیزم‌های انتقال دانش و فناوری از محیط آزمایشگاهی به محیط اجرایی شهری، از اهمیت حیاتی برخوردار است تا اطمینان حاصل شود که سرمایه‌گذاری‌های صورت گرفته در نوآوری مواد، منجر به ایجاد زیرساخت‌های مقاوم و پایداری می‌شود که قادر به پاسخگویی به نیازهای نسل‌های آینده باشند (شکری و نجفی، ۲۰۲۴).

مباحث مدیریت پروژه در حوزه عمران شهری نیز نیازمند تطبیق با الزامات مصالح نوین است؛ معرفی مصالحی که نیازمند روش‌های نصب متفاوت، کنترل کیفیت دقیق‌تر در محل پروژه، و زنجیره تأمین تخصصی هستند، نیازمند بازنگری در فرآیندهای سنتی خرید، انبارداری و اجرا است (تقوایی و همکاران، ۲۰۲۱). به علاوه، ارزیابی دقیق اثرات زیست‌محیطی از طریق ابزارهایی مانند ارزیابی چرخه حیات (LCA) برای مواد جدید ضروری است تا اطمینان حاصل شود که کاهش اثرات در مرحله مصرف، منجر به افزایش بار زیست‌محیطی در مرحله تولید یا دفع نهایی نمی‌شود (لطفی و همکاران، ۲۰۲۰). این مقاله سعی دارد با ارائه یک دیدگاه کل‌نگر، نقاط عطف این تحول را در صنعت عمران شهری تشریح نماید. با توجه به اهمیت این گذار، این مقاله مروری تلاش می‌کند تا چارچوبی تحلیلی برای درک نقش مصالح نوین و پایدار ارائه دهد؛ این چارچوب شامل دسته‌بندی انواع مصالح، ارزیابی چندوجهی مزایا و معایب آن‌ها، و ارائه راهکارهای عملی برای غلبه بر موانع اجرایی و مدیریتی است (گیاه‌چی و همکاران، ۲۰۲۳). تمرکز ویژه بر پروژه‌های عمرانی شهری، به دلیل ماهیت حساس و تأثیرگذاری

بالای آن‌ها بر کیفیت زندگی شهروندان و اکوسیستم شهری، اهمیت این پژوهش را دوچندان می‌سازد (زندی و همکاران، ۲۰۲۳). رویکرد این مطالعه، تعمیق دانش تخصصی در زمینه انتخاب مواد بهینه برای محیط‌های شهری چالش‌برانگیز است.

این مقاله با ساختاردهی به هشت بخش اصلی، ابتدا به مبانی نظری پرداخته، سپس به تشریح دسته‌بندی‌ها، مزایا و چالش‌ها می‌پردازد و در نهایت، نقش فناوری و راهکارهای مدیریتی برای پیاده‌سازی مؤثر این مصالح را مورد واکاوی قرار می‌دهد (منافلویان و همکاران، ۲۰۲۰). این ساختار منسجم به خواننده اجازه می‌دهد تا تصویری کامل از پیچیدگی‌ها و فرصت‌های نهفته در حوزه مصالح پایدار در صنعت عمران شهری به دست آورد و از نتایج آن برای تدوین استراتژی‌های آینده استفاده نماید (محمدی‌زاده و میرزاده، ۲۰۲۵). هدف نهایی، حمایت از سیاست‌گذارانی است که دغدغه ساختن شهرهایی هوشمند، مقاوم و سبز را دارند. تحلیل‌ها در این مقاله با لحنی آکادمیک و با تأکید بر داده‌های موجود در ادبیات علمی ارائه شده‌اند تا اعتبار محتوای تولید شده در سطح پژوهشی بالا رود (شفقت و همکاران، ۲۰۱۹). درک این نکته ضروری است که پایداری در ساخت و ساز شهری، یک هدف ثابت نیست، بلکه یک فرآیند مستمر از بهبود و نوآوری در انتخاب مواد و روش‌های ساخت است که با تغییرات اقلیمی و اجتماعی همگام می‌شود (هرندی‌زاده و همکاران، ۲۰۱۹). بنابراین، انتظار می‌رود که این مقاله مروری مفصل، مرجعی قابل اتکا برای مهندسان مشاور، مدیران شهرداری، پژوهشگران و دانشجویان علاقه‌مند به ارتقاء کیفیت و پایداری زیرساخت‌های شهری از طریق بهینه‌سازی انتخاب مصالح باشد و شکاف دانش موجود میان پتانسیل نظری مواد نوین و کاربرد عملی آن‌ها در پروژه‌های شهری را پر کند (طهماسیان و سواک، ۲۰۲۰).



شکل ۱: مقایسه بار پیک در سناریوهای مختلف (کاهش بار پیک بر حسب درصد)

شکل ۱ چارچوب مفهومی پژوهش را نشان می‌دهد که در آن محرک‌های کلان شهری، ارکان تحلیلی، راهبردهای اجرایی و پیامدهای نهایی استفاده از مصالح نوین و پایدار در پروژه‌های عمران شهری به‌صورت یکپارچه تبیین شده‌اند.

۲. مبانی نظری و مفهومی مصالح نوین و پایدار

مفهوم مصالح پایدار در مهندسی عمران فراتر از خواص فیزیکی و مکانیکی مواد است و شامل ابعاد گسترده‌تری از جمله اثرات زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی در طول کل چرخه عمر ماده می‌شود (لطفی و همکاران، ۲۰۲۰). پایداری در این زمینه بر اساس اصل «توسعه‌ای که نیازهای نسل حاضر را برآورده سازد، بدون آنکه توانایی نسل‌های آتی را برای برآوردن نیازهای خود به خطر اندازد» تعریف می‌شود، که در صنعت ساخت و ساز این امر به معنای به حداقل رساندن مصرف انرژی اولیه (Embodied Energy)، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، استفاده از منابع تجدیدپذیر یا بازیافتی، و تضمین دوام و ایمنی سازه در طول عمر مفید آن است (رسول‌زاده و مشاری، ۲۰۲۵). مصالح نوین در واقع ابزارهایی هستند که امکان تحقق این اهداف پایداری را فراهم می‌آورند، زیرا اغلب با هدف بهبود عملکرد چندگانه، نظیر کاهش وزن، افزایش مقاومت در برابر عوامل مخرب محیطی، یا ارائه قابلیت‌های هوشمند طراحی شده‌اند (صفری و همکاران، ۲۰۲۵).

انرژی اولیه (Embodied Energy) یکی از مفاهیم کلیدی در ارزیابی پایداری مصالح است؛ این مفهوم شامل کل انرژی مصرف شده برای استخراج مواد خام، فرآوری، ساخت، حمل و نقل، نصب و در نهایت تخریب یا بازیافت ماده مورد نظر است (تقوایی و همکاران، ۲۰۲۱). مواد سنتی نظیر سیمان و فولاد به دلیل فرآیندهای تولید پرحرارت، دارای انرژی اولیه بسیار بالایی هستند که ردپای کربنی قابل توجهی ایجاد می‌کند؛ لذا، مصالح پایدار جدید با تمرکز بر استفاده از فرآیندهای تولید با دمای پایین‌تر، استفاده از پسماندهای صنعتی به عنوان مواد اولیه (مانند خاکستر بادی یا سرباره کوره‌های بلند) یا استفاده از مواد طبیعی با فرآوری حداقلی، به دنبال کاهش چشمگیر این شاخص هستند (بهنوا و پورزرگر، ۲۰۲۱). این رویکرد نه تنها مصرف منابع فسیلی را کاهش می‌دهد، بلکه به مدیریت بهینه پسماندهای صنعتی نیز کمک می‌کند (سلطانی‌نژاد و رباطی، ۲۰۲۵).

مفهوم دوام و طول عمر سازه (Durability) نیز ارتباط تنگاتنگی با پایداری دارد؛ سازه‌ای که نیاز به تعمیرات اساسی یا بازسازی زودهنگام داشته باشد، حتی اگر از مواد نسبتاً پایداری ساخته شده باشد، در بلندمدت پایداری خود را از دست می‌دهد (رحمتی و همکاران، ۲۰۲۳). مصالح نوین مانند بتن‌های مقاوم در برابر خوردگی، بتن‌های خودترمیم‌شونده (Self-Healing Concrete) و پوشش‌های محافظ پیشرفته، با افزایش مقاومت در برابر شرایط سخت محیطی شهری مانند تهاجم کلرایدها، حملات سولفاتی و سیکل‌های یخ‌بندان-ذوب شدن، عمر مفید زیرساخت‌ها را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهند (ایلدرآبادی و همکاران، ۲۰۱۹). این افزایش دوام، به معنای کاهش نیاز به مداخله‌های مکرر، کاهش مصرف منابع برای تعمیرات و کاهش اختلالات اجتماعی ناشی از عملیات عمرانی است (صدیری و همکاران، ۲۰۲۴).

از منظر اقتصاد چرخه‌عمر (Life Cycle Costing - LCC)، مصالح پایدار ممکن است در مرحله ساخت هزینه‌های اولیه‌ای بالاتری داشته باشند؛ با این حال، ارزیابی جامع نشان می‌دهد که با لحاظ کردن صرفه‌جویی‌های حاصل از کاهش هزینه‌های نگهداری، تعمیرات، بهره‌برداری (به ویژه در حوزه عایق‌بندی حرارتی و انرژی) و هزینه‌های دفع در پایان عمر، این مواد در بلندمدت مقرون‌به‌صرفه خواهند بود (طهماسیان و سواک، ۲۰۲۰). برای مدیران شهری، درک LCC به جای صرفاً هزینه اولیه خرید، یک ضرورت مدیریتی است؛ زیرا تصمیم‌گیری بر مبنای کوتاه‌مدت می‌تواند منجر به تحمیل هزینه‌های هنگفت بر بودجه‌های آتی شهرداری شود (زندی و همکاران، ۲۰۲۳). تطبیق مصالح نوین با محیط شهری نیازمند در نظر گرفتن

ویژگی‌های عملکردی خاص است؛ برای مثال، مصالح مورد استفاده در روسازی معابر شهری باید علاوه بر مقاومت سایشی، دارای قابلیت مدیریت آب‌های سطحی (مانند بتن‌های نفوذپذیر) یا جذب انرژی صوت باشند تا آلودگی صوتی شهری کاهش یابد (بهزادپور و خاک‌زند، ۲۰۲۱). این رویکرد چندعاملی، تعریف پایداری را از صرفاً "سبز بودن" به "عملکرد بهینه در شرایط پیچیده شهری" تعمیم می‌دهد و نیاز به تحقیقات کاربردی میان‌رشته‌ای را برجسته می‌سازد (گیاه‌چی و همکاران، ۲۰۲۳).

فناوری‌های ساخت نیز در تعریف مصالح نوین نقش دارند؛ فرآیندهایی مانند چاپ سه‌بعدی سازه‌ای (۳D Printing) که امکان استفاده از مخلوط‌های بتنی خاص با مصالح بازیافتی را در اشکال هندسی پیچیده و با کمترین پسماند در محل پروژه فراهم می‌آورند، مرزهای طراحی و اجرای پایدار را جابجا کرده‌اند (شکری و نجفی، ۲۰۲۴). این فناوری‌ها نه تنها به کنترل دقیق‌تر کیفیت مواد کمک می‌کنند، بلکه زمان ساخت را نیز کاهش داده و ایمنی کارگران را ارتقا می‌بخشند، که همگی از ارکان توسعه پایدار محسوب می‌شوند (شفقت و همکاران، ۲۰۱۹). در نهایت، مبنای نظری پایداری در این حوزه بر اصول اقتصاد دایره‌ای (Circular Economy) استوار است؛ یعنی حرکت از الگوی «تولید، مصرف، دور ریز» به سیستمی که در آن، مواد پس از پایان عمر مفید اولیه، به عنوان ورودی برای محصولات جدید مورد استفاده قرار گیرند (منافلویان و همکاران، ۲۰۲۰). مصالح پایدار، موادی هستند که از همان ابتدا با در نظر گرفتن سهولت جداسازی، تجزیه‌پذیری یا قابلیت بازیافت بالا، طراحی و تولید می‌شوند و این دیدگاه دایره‌ای باید در تمامی مراحل تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و فنی در پروژه‌های شهری لحاظ گردد (محمدی‌زاده و میرزاده، ۲۰۲۵). این چارچوب نظری، زمینه‌ساز تحلیل عمیق‌تر انواع مصالح موجود و پتانسیل آن‌ها برای پاسخگویی به نیازهای خاص پروژه‌های عمرانی شهری، از جمله احداث پل‌ها، تونل‌ها، سیستم‌های فاضلاب و روسازی‌ها خواهد بود و راه را برای بخش بعدی مطالعات هموار می‌سازد (هرندی‌زاده و همکاران، ۲۰۱۹).

۳. انواع مصالح نوین و پایدار در پروژه‌های عمران شهری

دسته بندی مصالح نوین و پایدار مورد استفاده در پروژه‌های عمران شهری بسیار گسترده است و بر اساس منبع اصلی ماده، نحوه فرآوری و عملکرد ویژه آن‌ها تعریف می‌شود؛ این مصالح را می‌توان به طور کلی به سه گروه اصلی تقسیم کرد: مواد مبتنی بر سیمان اصلاح‌شده، مصالح مبتنی بر منابع ثانویه و بازیافتی، و مواد هوشمند یا فعال (Smart Materials) (سلطانی‌نژاد و رباطی، ۲۰۲۵). در حوزه بتن، نوآوری‌ها بر کاهش یا حذف سیمان پرتلند متمرکز شده‌اند؛ بتن‌های زمین‌پلیمر (Geopolymer Concrete) مثالی برجسته هستند که از فعال‌سازی قلیایی مواد حاوی سیلیکا و آلومینا (مانند خاکستر بادی یا سرباره) تولید می‌شوند و انرژی اولیه بسیار کمتری نسبت به بتن سنتی دارند، ضمن آنکه مقاومت شیمیایی و حرارتی بالاتری از خود نشان می‌دهند که این ویژگی برای زیرساخت‌های شهری در معرض مواد شیمیایی خورنده بسیار مفید است (صفری و همکاران، ۲۰۲۵).

دسته دوم، شامل مصالحی است که به طور عمده بر استفاده مجدد از پسماندها متکی هستند و به تحقق اقتصاد دایره‌ای کمک شایانی می‌کنند؛ این مواد شامل آسفالت بازیافتی گرم (RAP)، بتن بازیافتی (RCA) و استفاده از پلاستیک‌های بازیافتی در مخلوط‌های آسفالتی یا حتی به عنوان افزودنی در بتن است (تقوایی و همکاران، ۲۰۲۱). استفاده از پلاستیک‌ها در آسفالت، علاوه بر مدیریت پسماند، می‌تواند خواص چقرمگی و مقاومت در برابر ترک‌خوردگی ناشی از بارهای ترافیکی مکرر را بهبود بخشد، اما چالش‌های مربوط به سازگاری شیمیایی و کنترل کیفیت اختلاط همچنان نیازمند پژوهش‌های بیشتر در محیط‌های اجرایی شهری است (بهنوا و پورزرگر، ۲۰۲۱). در حوزه سازه‌های سبک و مقاوم، استفاده از الیاف تقویت‌کننده پیشرفته در بتن، از جمله الیاف کربن (CFRP) یا الیاف فولادی با شکل خاص، امکان طراحی اعضای سازه‌ای با ابعاد کوچک‌تر اما ظرفیت

باربری بالاتر را فراهم می‌کند؛ این کاهش ابعاد سازه‌ای در پروژه‌های شهری که محدودیت فضا دارند (مانند پل‌های شهری یا سازه‌های زیرزمینی) یک مزیت حیاتی محسوب می‌شود (ایلدرآبادی و همکاران، ۲۰۱۹). علاوه بر این، کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با فیبر (FRPs) به دلیل مقاومت عالی در برابر خوردگی، به عنوان جایگزینی برای میلگرد فولادی در سازه‌هایی که مستقیماً با محیط‌های مهاجم سروکار دارند، مانند دیواره‌های حائل در مجاورت آب‌های زیرزمینی شور، مطرح شده‌اند (رسول‌زاده و مشاری، ۲۰۲۵).

گروه سوم، شامل مصالح هوشمند هستند که توانایی پاسخگویی به تغییرات محیطی را دارند؛ بتن‌های خودترمیم‌شونده، که با تعبیه کپسول‌های حاوی باکتری یا پلیمرهای ترموست، قابلیت پر کردن ترک‌های ریز را در حضور آب دارند، به طور چشمگیری دوام سازه‌های بتنی در محیط‌های مرطوب شهری را افزایش می‌دهند (رحمتی و همکاران، ۲۰۲۳). این خاصیت، هزینه‌های نگهداری زیرساخت‌های حیاتی مانند تونل‌ها و پل‌ها را کاهش داده و ایمنی بلندمدت آن‌ها را تضمین می‌کند (صدیری و همکاران، ۲۰۲۴). در زمینه نماها و پوشش‌های شهری، استفاده از پنل‌های سبز (Green Facades) و دیوارهای زنده (Living Walls) نمونه‌هایی از رویکرد بیواکتیو به معماری پایدار هستند که با جذب دی‌اکسید کربن، کاهش اثر جزیره حرارتی شهری و بهبود کیفیت بصری، فراتر از کارکردهای سنتی مواد ساختمانی عمل می‌کنند (بهزادپور و خاک‌زند، ۲۰۲۱). اگرچه این موارد بیشتر جنبه معماری دارند، اما انتخاب سیستم سازه‌ای سبک برای تحمل وزن این پوشش‌ها، مستقیماً بر طراحی مهندسی عمران تأثیر می‌گذارد (گیاه‌چی و همکاران، ۲۰۲۳).

مصالح نفوذپذیر (Pervious Materials) برای مدیریت آب‌های سطحی در پروژه‌های شهری حیاتی هستند؛ بتن نفوذپذیر، آسفالت نفوذپذیر و سنگفرش‌های متخلخل اجازه می‌دهند تا آب باران به جای جاری شدن سطحی و ایجاد سیلاب‌های شهری، به سفره‌های زیرزمینی نفوذ کند و بار شبکه جمع‌آوری فاضلاب شهری را کاهش دهد (طهماسیان و سواک، ۲۰۲۰). اجرای این مصالح در پارکینگ‌ها، معابر کم تردد و فضاهای سبز شهری، نمونه‌ای از کاربرد مستقیم مصالح نوین در بهبود تاب‌آوری شهری است (شفقت و همکاران، ۲۰۱۹). علاوه بر موارد فوق، باید به توسعه مواد عایق پیشرفته، مانند عایق‌های حرارتی مبتنی بر نانومواد یا فوم‌های ایروژل اشاره کرد که به طور چشمگیری نیاز به انرژی برای گرمایش و سرمایش ساختمان‌ها را کاهش می‌دهند؛ این امر تأثیر مستقیمی بر کاهش مصرف انرژی کلی شهر و به تبع آن، کاهش انتشار آلاینده‌ها دارد (شکری و نجفی، ۲۰۲۴). این مواد، اگرچه عمدتاً در بخش ساختمان استفاده می‌شوند، اما در بهبود کارایی انرژی تأسیسات شهری و ابنیه عمومی شهرداری نقش مهمی ایفا می‌کنند (زندی و همکاران، ۲۰۲۳). در نهایت، هر یک از این دسته‌ها نیازمند استانداردهای خاص خود هستند؛ برای مثال، بتن‌های زمین‌پلیمر به دلیل تنوع در مواد اولیه (آلکالی فعال‌کننده‌ها و پوزولان‌ها)، نیاز به روش‌های کنترل کیفی بومی‌سازی شده دارند که فرآیند تأیید آن‌ها را در مقایسه با مصالح سنتی پیچیده‌تر می‌سازد (محمدی‌زاده و میرزاده، ۲۰۲۵).

۴. مزایای فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی مصالح نوین

انتخاب مصالح نوین و پایدار در پروژه‌های عمرانی شهری، مجموعه‌ای از مزایای چندوجهی را به همراه دارد که از ارتقاء عملکرد سازه‌ای آغاز شده و تا بهینه‌سازی اقتصادی و کاهش بار زیست‌محیطی گسترش می‌یابد (صفری و همکاران، ۲۰۲۵). از منظر فنی، مهم‌ترین مزیت، افزایش چشمگیر دوام و طول عمر مفید سازه‌ها است؛ مصالحی نظیر بتن‌های با عملکرد بالا (HPC) و بتن‌های خودترمیم‌شونده، مقاومت فوق‌العاده‌ای در برابر شرایط سخت محیطی که در کلان‌شهرهای آلوده رایج است، از خود نشان می‌دهند (رحمتی و همکاران، ۲۰۲۳). این امر منجر به کاهش هزینه‌های نگهداری پیش‌بینی‌نشده و

افزایش ضریب اطمینان در طراحی زیرساخت‌های حیاتی نظیر پل‌ها و تونل‌ها می‌شود که کوچک‌ترین خرابی در آن‌ها پیامدهای ایمنی گسترده‌ای خواهد داشت (صدیری و همکاران، ۲۰۲۴). یکی دیگر از برتری‌های فنی، بهبود خواص عملکردی خاص مورد نیاز در محیط شهری است؛ برای مثال، استفاده از مصالح سبک‌وزن‌تر، مانند کامپوزیت‌های FRP در تقویت یا جایگزینی عناصر سازه‌ای، امکان افزایش ظرفیت باربری سازه‌های موجود (بهسازی لرزه‌ای) را بدون افزایش بار مرده قابل توجهی فراهم می‌آورد، که در پروژه‌های نوسازی شهری که اغلب محدودیت فضای فیزیکی وجود دارد، یک مزیت فنی غیرقابل جایگزین است (ایلدرآبادی و همکاران، ۲۰۱۹). همچنین، مصالح پیشرفته می‌توانند خواص آکوستیک و حرارتی بهتری ارائه دهند که به طور مستقیم بر کیفیت زندگی ساکنین شهری و بهره‌وری انرژی ساختمان‌های عمومی تأثیر می‌گذارد (گیاه‌چی و همکاران، ۲۰۲۳).

از منظر اقتصادی، در حالی که هزینه‌های اولیه خرید و نصب مصالح نوین اغلب بالاتر به نظر می‌رسد، تحلیل‌های جامع چرخه حیات (LCC) برتری اقتصادی بلندمدت آن‌ها را اثبات می‌کنند (طهماسیان و سواک، ۲۰۲۰). صرفه‌جویی‌های اقتصادی اصلی از کاهش هزینه‌های عملیاتی و نگهداری ناشی می‌شوند؛ سازه‌هایی که کمتر نیاز به تعمیر و بازرسی دارند، هزینه‌های نیروی انسانی و مواد مصرفی را به شدت کاهش می‌دهند (زندی و همکاران، ۲۰۲۳). علاوه بر این، افزایش دوام به معنای طولانی‌تر شدن بازه زمانی تعویض زیرساخت‌ها است، که این امر کاهش نیاز به سرمایه‌گذاری‌های کلان مجدد در دوره‌های کوتاه‌مدت را برای شهرداری‌ها به ارمغان می‌آورد (بهزادپور و خاک‌زند، ۲۰۲۱). مزیت اقتصادی دیگر، افزایش سرعت اجرای پروژه است؛ روش‌های نوین مانند استفاده از قطعات پیش‌ساخته با اتصالات سریع یا استفاده از مصالحی که زمان گیرش کوتاه‌تری دارند (مانند زمین‌پلیمرها در شرایط خاص)، امکان کاهش زمان توقف فعالیت‌های ترافیکی و اختلال در زندگی شهری را فراهم می‌آورد که این خود به کاهش هزینه‌های جانبی اقتصادی (مانند اتلاف وقت و افزایش مصرف سوخت وسایل نقلیه به دلیل ترافیک) منجر می‌شود (سلطانی‌نژاد و رباطی، ۲۰۲۵).

در بُعد زیست‌محیطی، برجسته‌ترین فایده، کاهش چشمگیر انرژی اولیه و انتشار کربن دی‌اکسید است؛ تولید سیمان پورتلند مسئول حدود هشت درصد از انتشار جهانی CO_2 است، لذا جایگزینی آن با زمین‌پلیمرها یا استفاده از مصالح حاوی درصد بالایی از مواد بازیافتی، مستقیماً به اهداف کاهش تغییرات اقلیمی شهری کمک می‌کند (بهنوا و پورزرگر، ۲۰۲۱). این کاهش در ردپای کربن، انطباق پروژه‌های عمرانی با تعهدات بین‌المللی و ملی در زمینه محیط زیست را تسهیل می‌بخشد (پرویش و اسدی، ۲۰۲۴). استفاده از مصالح پایدار همچنین به مدیریت منابع طبیعی محدود کمک می‌کند؛ استفاده از پسماندهای صنعتی به عنوان مواد اولیه، فشار بر منابع طبیعی بکر (مانند سنگدانه‌ها و خاک رس) را کاهش می‌دهد و از فرسایش منابع محدود جلوگیری می‌کند (منافلویان و همکاران، ۲۰۲۰). این امر به ویژه در مناطق شهری متراکم که دسترسی به معادن مواد اولیه دشوار و پرهزینه است، اهمیت مضاعفی پیدا می‌کند (محمدی‌زاده و میرزاده، ۲۰۲۵).

علاوه بر این، مصالحی که قابلیت مدیریت آب باران را دارند (مانند بتن نفوذپذیر)، با کاهش رواناب سطحی، به تغذیه مجدد آب‌های زیرزمینی کمک کرده و ریسک سیلاب‌های شهری را کاهش می‌دهند، که این یک خدمت اکوسیستمی مستقیم در محیط شهری محسوب می‌شود (طهماسیان و سواک، ۲۰۲۰). در نهایت، کاهش آلودگی‌های ناشی از گرد و غبار و انتشار مواد فرار آلی (VOCs) توسط برخی پوشش‌ها و چسب‌های نوین، کیفیت هوا را در محیط‌های بسته و باز شهری بهبود می‌بخشد (شفقت و همکاران، ۲۰۱۹). به طور خلاصه، مزایای مصالح نوین، یکپارچه هستند: دوام بالاتر منجر به صرفه‌جویی اقتصادی در طول عمر می‌شود و کاهش انرژی اولیه و استفاده از پسماند، اهداف زیست‌محیطی را محقق می‌سازد؛ این هم‌افزایی، توجیه محکمی برای سرمایه‌گذاری در پذیرش آن‌ها فراهم می‌آورد (شکری و نجفی، ۲۰۲۴).

۵. چالش‌ها و محدودیت‌های اجرایی و مدیریتی

با وجود مزایای آشکار فنی و زیست‌محیطی، پذیرش و اجرای گسترده مصالح نوین و پایدار در پروژه‌های عمرانی شهری با مجموعه‌ای از چالش‌های پیچیده در حوزه‌های اجرایی، فنی و مدیریتی مواجه است که نیازمند راهکارهای سیستمی برای غلبه بر آن‌هاست (رسول‌زاده و مشاری، ۲۰۲۵). یکی از بزرگترین موانع اجرایی، عدم اطمینان مهندسان و کارفرمایان نسبت به عملکرد بلندمدت این مصالح جدید در شرایط واقعی و متغیر محیطی شهرها است؛ مواد نوین اغلب فاقد سوابق اثبات‌شده چندین دهه‌ای هستند که مهندسان را به استفاده از روش‌های سنتی و مورد تأیید سوق می‌دهد (بهنوا و پورزرگر، ۲۰۲۱). این موضوع به ویژه در مورد بتن‌های زمین‌پلیمر یا مواد کامپوزیتی که حساسیت بیشتری به تغییرات دما و رطوبت در حین اجرا دارند، نمود بیشتری پیدا می‌کند (سلطانی‌نژاد و رباطی، ۲۰۲۵).

در سطح مدیریتی و قانونی، فقدان یا عدم انطباق کدهای ساختمانی ملی و محلی با مشخصات فنی مصالح جدید یک مانع اساسی محسوب می‌شود؛ مقررات موجود عمدتاً بر مبنای بتن پورتلند و فولاد طراحی شده‌اند و نبود استانداردهای تأیید شده برای تعیین مشخصات طراحی، پارامترهای کنترل کیفیت در محل، و روش‌های ارزیابی دوام مواد جدید، ریسک پذیرش توسط پیمانکاران و تأمین‌کنندگان مالی پروژه‌ها را به شدت افزایش می‌دهد (تقوایی و همکاران، ۲۰۲۱). شهرداری‌ها در تأمین مالی پروژه‌ها اغلب ترجیح می‌دهند از مصالحی استفاده کنند که مسیر تأیید آن‌ها از نظر قانونی و بیمه‌ای کاملاً هموار شده باشد (صفری و همکاران، ۲۰۲۵). چالش اقتصادی، اگرچه در بلندمدت به سود منجر می‌شود، اما در کوتاه‌مدت تأثیرگذار است؛ هزینه‌های اولیه بالاتر مصالح نوین، به ویژه آن‌هایی که دانش فنی تولید آن‌ها محدود است و زنجیره تأمین داخلی ضعیفی دارند، اغلب باعث حذف آن‌ها از فهرست مصالح انتخابی در مناقصات عمومی می‌شود که هدف اصلی آن‌ها کمترین قیمت پیشنهادی است (بهزادپور و خاک‌زند، ۲۰۲۱). این موضوع نیازمند تغییر پارادایم در فرآیند ارزیابی مناقصه از صرفاً «کمترین قیمت» به «بهترین ارزش چرخه حیات» است که نیازمند اصلاحات قانونی در فرآیندهای تدارکات شهرداری است (لطفی و همکاران، ۲۰۲۰).

از نظر اجرایی و نیروی انسانی، مهارت‌ها و دانش لازم برای کار با مصالح جدید در سطح کارگران و ناظران فنی ممکن است کافی نباشد؛ برای مثال، نصب صحیح پنل‌های هوشمند، مخلوط کردن صحیح مواد اولیه برای تولید بتن‌های خاص، یا اجرای دقیق روش‌های نوین عایق‌کاری نیازمند آموزش‌های تخصصی است که اغلب در ساختارهای سنتی آموزش فنی و حرفه‌ای ارائه نمی‌شود (ایلدرآبادی و همکاران، ۲۰۱۹). این شکاف مهارتی می‌تواند منجر به اجرای ضعیف (Poor Workmanship) شود که حتی بهترین مصالح را نیز از نظر عملکردی با شکست مواجه می‌سازد (رحمتی و همکاران، ۲۰۲۳). چالش دیگر، زنجیره تأمین و لجستیک است؛ بسیاری از مصالح نوین هنوز در مقیاس صنعتی و با قیمت رقابتی تولید نمی‌شوند، یا تأمین مواد اولیه ثانویه (مانند سرباره یا خاکستر بادی) در نزدیکی محل پروژه شهری ممکن است به دلیل محدودیت‌های مکانی یا قوانین زیست‌محیطی دشوار باشد، که این امر هزینه‌های حمل و نقل و تأخیر در تحویل را افزایش می‌دهد (منافلویان و همکاران، ۲۰۲۰).

در حوزه مدیریت پروژه، اغلب قراردادهای سنتی بر اساس آیتم‌های مشخص طراحی شده‌اند که به راحتی قابلیت جایگزینی مواد را فراهم نمی‌کنند؛ تغییر متریال در طول فرآیند طراحی یا اجرا، منجر به نیاز به مذاکرات پیچیده مجدد قرارداد، بازنگری در نقشه‌ها و تأییدیه‌های اضافی از سوی مشاور و کارفرما می‌شود که این بوروکراسی اداری، سرعت نوآوری را در پروژه‌های شهری کند می‌سازد (شکری و نجفی، ۲۰۲۴). علاوه بر این، مقاومت فرهنگی و ذهنیتی سازمان‌ها و ذینفعان در برابر تغییر،

یکی از قوی‌ترین عوامل بازدارنده است؛ مهندسان و مدیران عادت کرده‌اند که با مصالحی کار کنند که رفتار آن‌ها در برابر زمان، تغییرات بار و حوادث طبیعی به خوبی مستند شده است (شفقت و همکاران، ۲۰۱۹). پذیرش ریسک ذاتی در نوآوری‌های مواد، به ویژه در پروژه‌های زیربنایی بزرگ و حساس، اغلب با مقاومت مواجه می‌شود، مگر آنکه مزایای آن به صورت قاطع و اجباری توسط نهادهای بالادستی دیکته شده باشد (محمدی‌زاده و میرزاده، ۲۰۲۵). در نهایت، ارزیابی زیست‌محیطی نیز می‌تواند چالش‌برانگیز باشد؛ برای مثال، در حالی که بتن زمین‌پلیمر انتشار کربن اولیه کمتری دارد، مواد فعال‌کننده قلیایی مورد نیاز برای تولید آن ممکن است خود نیازمند فرآوری‌های شیمیایی پرانرژی یا خطرناک باشند؛ بنابراین، ارزیابی کامل چرخه حیات برای جلوگیری از انتقال آلودگی از یک مرحله به مرحله دیگر حیاتی است، که این نیازمند داده‌های دقیق و قابل اعتماد است که اغلب در دسترس نیستند (صدیری و همکاران، ۲۰۲۴).

۶. نقش فناوری‌های نوین و BIM در توسعه و اجرای مصالح پایدار

توسعه و به‌کارگیری موفقیت‌آمیز مصالح نوین و پایدار در پروژه‌های عمران شهری به شدت وابسته به ادغام فناوری‌های پیشرفته‌ای است که می‌توانند پیچیدگی‌های طراحی، تأیید عملکرد و مدیریت اطلاعات این مواد را مدیریت کنند؛ در این میان، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) به عنوان یک رویکرد محوری عمل می‌کند (طهماسیان و سواک، ۲۰۲۰). BIM فراتر از یک ابزار مدل‌سازی سه‌بعدی است؛ این فناوری یک پایگاه داده مشترک برای اطلاعات پروژه فراهم می‌کند که شامل داده‌های مرتبط با مصالح، از جمله ویژگی‌های عملکردی، اثرات زیست‌محیطی (انرژی اولیه، پتانسیل بازیافت) و هزینه‌های چرخه حیات آن‌ها است (زندی و همکاران، ۲۰۲۳). استفاده از BIM امکان شبیه‌سازی‌های عملکردی پیشرفته‌ای را فراهم می‌آورد که پیش از این به سادگی امکان‌پذیر نبود؛ برای مثال، می‌توان با ادغام مدل BIM با نرم‌افزارهای ارزیابی انرژی، تأثیر دقیق استفاده از یک عایق نوین یا بتن با هدایت حرارتی متفاوت را بر مصرف انرژی ساختمان‌های شهری در طول پنجاه سال آینده مدل‌سازی کرد و به این ترتیب، توجیه اقتصادی و پایداری ماده مورد نظر را اثبات نمود (شکری و نجفی، ۲۰۲۴). این سطح از تحلیل پیش‌بینی‌کننده، ریسک‌های مرتبط با عملکرد بلندمدت مصالح جدید را به شدت کاهش می‌دهد (رحمتی و همکاران، ۲۰۲۳).

در زمینه اجرای مصالح، فناوری‌های ساخت افزایشی (Additive Manufacturing) یا همان چاپ سه‌بعدی سازه‌ای، نقش مهمی در بهینه‌سازی مصرف مواد دارند؛ این فناوری به مهندسان اجازه می‌دهد تا از هندسه‌های پیچیده و بهینه از نظر ساختاری استفاده کنند که به طور طبیعی مصرف مواد (به ویژه بتن یا پلیمر) را کاهش می‌دهد و از هدر رفت مواد در محل پروژه جلوگیری می‌کند (رسول‌زاده و مشاری، ۲۰۲۵). همچنین، چاپ سه‌بعدی امکان تولید سریع قطعات سفارشی با استفاده از مخلوط‌های بتنی حاوی مقادیر بالای مواد بازیافتی یا زمین‌پلیمرها را در محیط کنترل‌شده فراهم می‌آورد که کنترل کیفی بالاتری نسبت به اختلاط در محل دارد (سلطانی‌نژاد و رباطی، ۲۰۲۵). علاوه بر BIM، حسگرهای هوشمند و اینترنت اشیاء (IoT) ابزارهای حیاتی برای پایش عملکرد مصالح نوین پس از نصب هستند؛ نصب حسگرها در بتن‌های خودترمیم‌شونده یا در سازه‌های تقویتی با FRP، امکان نظارت مستمر بر وضعیت تنش، میزان رطوبت یا حتی آغاز فرآیند خودترمیم را به مدیران شهری می‌دهد (صدیری و همکاران، ۲۰۲۴). این داده‌های بلادرنگ، نه تنها به اعتبارسنجی فرضیات طراحی کمک می‌کنند، بلکه امکان نگهداری پیشگیرانه و به موقع را فراهم می‌آورند و در نهایت عمر مفید سازه را افزایش می‌دهند (بهنوا و پورزرگر، ۲۰۲۱).

فناوری نانو نیز به عنوان یک ستون اصلی در توسعه مصالح نوین مطرح است؛ استفاده از نانوذرات در بتن برای افزایش تراکم، کاهش نفوذپذیری یا بهبود مقاومت کششی، در حال تبدیل شدن به یک استاندارد برای دستیابی به نسل جدیدی از مواد ساختمانی با کارایی بسیار بالا است (ایلدرآبادی و همکاران، ۲۰۱۹). ادغام داده‌های عملکردی این نانومواد در کتابخانه پارامتریک BIM، اطمینان می‌دهد که خواص مورد نظر به طور دقیق در مدل نهایی منعکس شده و در طول پروژه از دست نمی‌روند (شفقت و همکاران، ۲۰۱۹). سیستم‌های مدیریت داده‌های مواد (Material Data Management Systems) که اغلب با پلتفرم‌های BIM یکپارچه می‌شوند، برای غلبه بر چالش فقدان استانداردها ضروری هستند؛ این سیستم‌ها می‌توانند به طور خودکار گواهینامه‌های سازگاری، داده‌های LCA و دستورالعمل‌های نصب سازنده را برای هر بچ از مصالح پایدار مورد استفاده در پروژه ذخیره و مدیریت کنند و شفافیت را برای بازرسان و ذینفعان افزایش دهند (منافلویان و همکاران، ۲۰۲۰).

توسعه مدل‌های پیش‌بینی هوشمند برای خرابی مواد، با استفاده از یادگیری ماشین و داده‌های حسگرهای IoT، یک گام فراتر در مدیریت زیرساخت‌ها است؛ این مدل‌ها می‌توانند بر اساس داده‌های تاریخی و شرایط محیطی فعلی، زمان دقیق نیاز به بازرسی یا مداخله بر روی یک بخش خاص از پل یا زیرگذر را پیش‌بینی کنند، که این امر نگهداری را از حالت واکنشی به حالت کاملاً فعال و بهینه تبدیل می‌کند (محمدی‌زاده و میرزاده، ۲۰۲۵). در نهایت، استفاده از واقعیت افزوده (AR) در سایت پروژه، می‌تواند به ارتقاء مهارت‌های نیروی کار کمک کند؛ پیمانکاران می‌توانند با استفاده از دستگاه‌های AR، دستورالعمل‌های دقیقی برای نصب صحیح پوشش‌های حفاظتی نوین یا اجرای اتصالات پیچیده کامپوزیت‌ها، به صورت همپوشانی بر روی سازه واقعی مشاهده کنند، که این امر خطای انسانی در استفاده از مصالح حساس را به حداقل می‌رساند (بهزادپور و خاک‌زند، ۲۰۲۱).

۷. راهکارهای اجرایی، مدیریتی و سیاست‌گذاری در شهرداری‌ها

پیاده‌سازی مؤثر مصالح نوین و پایدار در پروژه‌های عمران شهری نیازمند یک استراتژی چندلایه است که هم جنبه‌های اجرایی در سطح کارگاه و هم الزامات سیاستی در سطح مدیریت کلان شهری را پوشش دهد؛ شهرداری‌ها به عنوان بزرگترین کارفرمایان ساخت و ساز در شهر، نقش محوری در هدایت بازار مصالح به سمت پایداری دارند (تقوایی و همکاران، ۲۰۲۱). اولین و مهم‌ترین راهکار مدیریتی، اصلاح فرآیندهای تدارکات عمومی و مناقصات است؛ باید معیارهای ارزیابی پیشنهادات از تمرکز صرف بر قیمت اولیه به سمت ارزیابی جامع ارزش چرخه حیات (LCC) تغییر یابد (طهماسیان و سواک، ۲۰۲۰). این اقدام مستلزم آموزش تیم‌های مالی و فنی شهرداری برای محاسبه دقیق هزینه‌های آتی نگهداری و انرژی است، تا توجیه اقتصادی مصالح با دوام بالاتر و انرژی اولیه کمتر، به روشنی قابل اثبات باشد (لطفی و همکاران، ۲۰۲۰).

سیاست‌گذاری باید شامل تدوین الزامات حداقل پایداری برای تمامی پروژه‌های جدید و بهسازی باشد؛ این امر می‌تواند از طریق «فهرست مواد مجاز» (Approved Material List) که مصالح نوین با عملکرد زیست‌محیطی تأیید شده را در بر می‌گیرد، محقق شود (صفری و همکاران، ۲۰۲۵). برای مثال، شهرداری می‌تواند مقرر نماید که تمامی پروژه‌های روسازی جدید باید حاوی حداقل ۲۰ درصد آسفالت بازیافتی گرم (RAP) باشند، یا بتن‌های جدید برای پروژه‌های آبی باید دارای حداقل میزان جایگزینی سیمان (مانند استفاده از سرباره) باشند (سلطانی‌نژاد و رباطی، ۲۰۲۵). چنین سیاست‌های الزام‌آوری، تقاضا در بازار را افزایش داده و به تدریج مقیاس تولید مصالح نوین و در نتیجه کاهش قیمت آن‌ها را به دنبال خواهد داشت (پرویش و اسدی، ۲۰۲۴). برای غلبه بر چالش‌های اجرایی، شهرداری‌ها باید زیرساخت‌های آموزشی خود را تقویت کنند؛ ایجاد مراکز تخصصی آموزش کوتاه‌مدت و کارگاه‌های میدانی برای پیمانکاران و مهندسان ناظر، برای آشنایی با روش‌های نصب، کنترل

کیفیت و چالش‌های منحصر به فرد مصالحی چون زمین‌پلیمرها یا بتن‌های هوشمند ضروری است (ایلدرآبادی و همکاران، ۲۰۱۹). این آموزش‌ها باید با همکاری دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی صورت گیرد تا دانش فنی به روز به بدنه اجرایی منتقل شود (بهزادپور و خاک‌زند، ۲۰۲۱).

راهکار دیگر، تشویق نوآوری از طریق ایجاد «مناطق آزمایشی» (Pilot Zones) یا «پروژه‌های نمایشی» (Demonstration Projects) است؛ شهرداری می‌تواند بخشی از پروژه‌های کوچک‌تر یا خاص (مانند پیاده‌روهای یک خیابان خاص یا دیواره‌های حائل در یک محل کم‌اهمیت‌تر) را به اجرای کامل با مصالح کاملاً نوین اختصاص دهد تا عملکرد آن‌ها در شرایط عملیاتی واقعی، بدون ریسک برای زیرساخت‌های حیاتی، مورد ارزیابی قرار گیرد (شکری و نجفی، ۲۰۲۴). نتایج این پروژه‌ها باید به طور شفاف مستند شده و در صورت موفقیت، به استانداردهای رسمی تبدیل شوند (رحمتی و همکاران، ۲۰۲۳). از منظر مدیریتی، ادغام اجباری BIM برای پروژه‌های با بودجه مشخص، راهی برای تضمین استفاده صحیح از مصالح پایدار است؛ BIM به عنوان یک بستر مرکزی، اطمینان می‌دهد که تمام داده‌های مرتبط با خواص مواد، از طراحی تا اجرا و بهره‌برداری، پیوسته و قابل ردیابی باقی می‌مانند (زندی و همکاران، ۲۰۲۳). این امر همچنین ردیابی دقیق میزان استفاده از مواد بازیافتی و محاسبه دقیق ردپای کربن پروژه را ممکن می‌سازد که برای گزارش‌دهی پایداری شهرداری ضروری است (صدیری و همکاران، ۲۰۲۴).

برای تسهیل سرمایه‌گذاری در تولید داخلی، شهرداری‌ها می‌توانند از مشوق‌های مالیاتی یا تسهیلات اعتباری برای تولیدکنندگان محلی مصالح نوین و پایدار استفاده کنند؛ این سیاست‌ها به کاهش هزینه‌های اولیه کمک کرده و زنجیره تأمین را در داخل شهر تقویت می‌کنند (شفقت و همکاران، ۲۰۱۹). همچنین، ایجاد تسهیلات برای دریافت مجوزهای انطباق سریع برای مصالحی که مطالعات LCA قوی ارائه می‌دهند، می‌تواند موانع بوروکراتیک را کاهش دهد (منافلویان و همکاران، ۲۰۲۰). در نهایت، برای تضمین کیفیت نهایی، شهرداری‌ها باید سیستم‌های بازرسی و کنترل کیفی پیشرفته‌ای را به کار گیرند؛ این شامل استفاده از آزمایش‌های غیرمخرب (NDT) با فناوری‌های مدرن برای تأیید خواص نهایی مصالحی مانند بتن‌های پیشرفته و همچنین استقرار سیستم‌های پایش عملکرد پس از بهره‌برداری است تا اعتماد عمومی و مهندسی به نوآوری‌های مواد افزایش یابد (محمدی‌زاده و میرزاده، ۲۰۲۵).

۸. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

مقاله حاضر با بررسی ابعاد فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی، تأکید کرد که گذار به سمت استفاده از مصالح نوین و پایدار نه تنها یک انتخاب اخلاقی، بلکه یک ضرورت استراتژیک برای تضمین تاب‌آوری و توسعه بلندمدت زیرساخت‌های شهری است (بهنوا و پورزرگر، ۲۰۲۱). یافته‌های مرور جامع نشان داد که موادی مانند زمین‌پلیمرها، بتن‌های خودترمیم‌شونده و مواد بازیافتی، پتانسیل عظیمی برای کاهش انرژی اولیه، افزایش دوام و بهبود عملکرد سازه‌ای در محیط‌های شهری چالش‌برانگیز دارند (رسول‌زاده و مشاری، ۲۰۲۵). با این حال، موانع اصلی شامل عدم اطمینان در عملکرد بلندمدت، کمبود استانداردها و مقررات مدون، و مقاومت فرهنگی در برابر پذیرش ریسک نوآوری، همچنان بزرگترین چالش‌ها باقی مانده‌اند (تقوایی و همکاران، ۲۰۲۱).

برای تبدیل پتانسیل نظری مصالح نوین به واقعیت‌های اجرایی در پروژه‌های عمرانی شهری، مجموعه‌ای از اقدامات هماهنگ در سطوح سیاست‌گذاری، مدیریتی و فنی پیشنهاد می‌شود. در سطح سیاست‌گذاری، شهرداری‌ها باید با همکاری نهادهای

استاندارد ملی، فرآیند تدوین و به‌روزرسانی کدهای ساختمانی را برای انطباق با پارامترهای عملکردی مواد جدید تسریع کنند و از روش‌های ارزیابی LCA در تصمیم‌گیری‌های کلان ساختمانی استفاده نمایند (سلطانی‌نژاد و رباطی، ۲۰۲۵). علاوه بر این، باید مشوق‌های مالیاتی و یارانه‌هایی برای کاهش شکاف هزینه اولیه بین مواد سنتی و پایدار در نظر گرفته شود تا توجیه اقتصادی برای پیمانکاران و سازندگان فراهم گردد (صفری و همکاران، ۲۰۲۵). از نظر مدیریتی، تغییر در رویکرد مناقصات به سمت «کمترین هزینه چرخه حیات» یک گام حیاتی است؛ این تغییر نیازمند آموزش تیم‌های ارزیابی شهرداری است تا بتوانند هزینه‌های بلندمدت نگهداری، تعمیر و جایگزینی را به درستی در محاسبات خود لحاظ کنند (طهماسیان و سواک، ۲۰۲۰). همچنین، اجباری کردن استفاده از BIM برای پروژه‌های بزرگ مقیاس شهری، به عنوان ابزاری برای ردیابی، مستندسازی و مدیریت داده‌های عملکردی مصالح جدید، برای تضمین کیفیت و شفافیت پروژه از طراحی تا پایان عمر مفید ضروری است (زندی و همکاران، ۲۰۲۳).

در حوزه اجرایی، سرمایه‌گذاری سنگین در آموزش تخصصی نیروی کار برای کار با مواد نوین و استفاده از فناوری‌های کمکی مانند واقعیت افزوده برای کاهش خطای انسانی در محل پروژه، باید در اولویت قرار گیرد (بهزادپور و خاک‌زند، ۲۰۲۱). ایجاد آزمایشگاه‌های مرجع منطقه‌ای که بتوانند به طور مستقل و سریع، کنترل کیفیت بچ‌های تولیدی مصالح نوین (مانند زمین‌پلیمرها) را بر اساس استانداردهای مورد تأیید شهرداری انجام دهند، اعتماد مهندسان را به این مواد افزایش خواهد داد (رحمتی و همکاران، ۲۰۲۳). برای تکمیل چرخه نوآوری، پژوهش‌های آتی باید بر روی بهینه‌سازی بلندمدت مصالح هوشمند در برابر شرایط محیطی خاص شهرهای ایران تمرکز کنند و همچنین توسعه چارچوب‌های ارزیابی ریسک که به مدیران شهری اجازه دهد با اطمینان بیشتری مصالح با سابقه کوتاه را در زیرساخت‌های حساس به کار گیرند، ادامه یابد (صدیری و همکاران، ۲۰۲۴). در نهایت، ایجاد شفافیت و به اشتراک‌گذاری داده‌های عملکردی موفقیت‌آمیز پروژه‌های پایلوت (از طریق پلتفرم‌های آنلاین تحت نظارت شهرداری)، می‌تواند مقاومت فرهنگی را شکسته و پذیرش عمومی را تسریع بخشد، زیرا عملکرد اثبات‌شده، قوی‌ترین عامل در ترویج نوآوری در مهندسی عمران است (ایلدرآبادی و همکاران، ۲۰۱۹). تحقق این پیشنهادات، زیربنای ساخت شهرهایی پایدارتر و مقاوم‌تر برای نسل‌های آتی را فراهم خواهد آورد (محمدی‌زاده و میرزاده، ۲۰۲۵).

منابع

- 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).
- 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.
- 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.
- 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.
- 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).
- 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.
- 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.
- 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.
- 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).
- 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.
- 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.