مجله پژوهش های معاصر در علوم و تحقیقات
سال هفتم، شماره ۷۸، دی ۱۴۰۴
ISSN: ۲۶۷۶-۵۷۶٤
www.jocrisar.ir

آینده نگری در استفاده از مصالح پایدار و هوشمند برای ساخت زیر ساخت های مقاوم در برابر تغییرات اقلیمی

مهدی شعبانی[۱]

[۱]کارشناسی ارشد عمران گرایش راه و ترابری، دانشکده فنی، دانشگاه تهران. تهران. ایران

چکیده

تغییرات اقلیمی به‌عنوان یکی از چالش‌های بنیادین قرن بیست‌ویکم، پایداری و عملکرد زیرساخت‌های حیاتی را تحت تأثیر قرار داده و ضرورت بازنگری در انتخاب مصالح مورد استفاده در ساخت و نگهداری آن‌ها را برجسته کرده است. در این میان، مصالح پایدار و هوشمند به‌عنوان دو رویکرد مکمل برای افزایش تاب‌آوری زیرساخت‌ها مطرح شده‌اند. این پژوهش با هدف تحلیل روندهای کلیدی توسعه این مصالح و تبیین سناریوهای آینده‌نگرانه به‌منظور شناسایی نقش آن‌ها در ایجاد زیرساخت‌های مقاوم در برابر تغییرات اقلیمی انجام شده است.روش‌شناسی تحقیق مبتنی بر رویکردی ترکیبی شامل مرور نظام‌مند منابع علمی، تحلیل روندهای فناورانه در حوزه مصالح پایدار و هوشمند، و تدوین سناریوهای آینده‌پژوهانه بوده است. تحلیل روندها نشان داد که توسعه مصالح پایدار از مسیر کاهش اثرات زیست‌محیطی، بهبود دوام و ادغام فناوری‌های نوین مانند نانو و زیست‌فناوری پیروی می‌کند. در مقابل، مصالح هوشمند با ایجاد قابلیت‌هایی مانند پایش لحظه‌ای سازه، خودترمیمی و پاسخ‌دهی فعال، امکان مدیریت پیش‌بینانه و افزایش تاب‌آوری زیرساخت‌ها را فراهم می‌سازند. سناریوهای تدوین‌شده نیز نشان می‌دهند که در تمامی مسیرهای محتمل آینده—اعم از گذار سریع، گذار تدریجی، فشار اقلیمی یا رکود فناورانه—نقش این مصالح در بهبود عملکرد زیرساخت‌ها اجتناب‌ناپذیر است.نتایج پژوهش بیانگر آن است که مصالح پایدار و هوشمند ستون‌های اصلی توسعه زیرساخت‌های مقاوم در برابر تغییرات اقلیمی هستند. هم‌افزایی میان این دو رویکرد، همراه با بهره‌گیری از آینده‌پژوهی، پایه‌ای برای طراحی سامانه‌های زیرساختی نسل آینده فراهم می‌کند که قادرند در برابر شرایط اقلیمی متغیر عملکردی پایدار، قابل‌اعتماد و سازگار ارائه دهند.

واژه‌های کلیدی: مصالح پایدار، مصالح هوشمند، تاب‌آوری زیرساخت، تغییرات اقلیمی، آینده‌پژوهی.

مقدمه

تغییرات اقلیمی به یکی از تأثیرگذارترین چالش‌های قرن بیست‌ویکم تبدیل شده است و پیامدهای آن تمامی ابعاد زندگی انسان، ازجمله طراحی، ساخت و بهره‌برداری از زیرساخت‌های حیاتی را تحت تأثیر قرار داده است. افزایش دما، تشدید رخدادهای حدی مانند سیلاب‌ها، طوفان‌ها، موج‌های گرمایی و دوره‌های خشکسالی از مهم‌ترین تهدیدهایی هستند که ثبات و پایداری زیرساخت‌ها را با مخاطره مواجه می‌سازند. از آنجا که بسیاری از زیرساخت‌های موجود طی دهه‌های گذشته و با فرض ثبات نسبی شرایط اقلیمی طراحی شده‌اند، امروزه ظرفیت کافی برای تطابق با شرایط جدید را ندارند و خطر آسیب‌پذیری آن‌ها به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. (سلطانی شریف زاده، یادگاری، ۱۴۰۱) در چنین بستری، مفهوم «تاب‌آوری زیرساخت» و به‌ویژه نقش مصالح نوین در ارتقای آن، بیش از پیش اهمیت می‌یابد. یکی از راهبردهای کلیدی برای تقویت تاب‌آوری زیرساخت‌های آینده، بهره‌گیری از مصالح پایدار و هوشمند است؛ مصالحی که نه‌تنها اثرات زیست‌محیطی کمتری دارند، بلکه قادرند نسبت به تغییرات محیطی واکنش نشان دهند، رفتار خود را تنظیم کنند، و حتی به‌صورت خودکار ترمیم شوند.مصالح پایدار به موادی اطلاق می‌شود که در چرخه تولید تا مصرف، کمترین آسیب را به محیط‌زیست وارد می‌کنند و اغلب دارای ردپای کربن پایین، قابلیت بازیافت بالا و دوام بیشتر نسبت به مصالح سنتی هستند. با توجه به اینکه صنعت ساخت‌وساز یکی از بزرگ‌ترین تولیدکنندگان گازهای گلخانه‌ای در جهان است، حرکت به سمت استفاده از مصالح کم‌کربن مانند بتن‌های ژئوپلیمری، سیمان‌های LC3 ، آسفالت‌های بازیافتی و مواد زیستی الهام‌گرفته از الگوهای طبیعی، به‌عنوان یک ضرورت ساختاری مطرح شده است. مطالعات نشان می‌دهند که جایگزینی مصالح مرسوم با انواع پایدار، علاوه بر کاهش قابل توجه آلودگی‌های زیست‌محیطی، می‌تواند طول عمر سازه را افزایش داده و هزینه‌های نگهداری را در بلندمدت کاهش دهد. (اصغری آرپاتپه، مجتهدزاده، ۱۴۰۳) این رویکرد نه‌فقط یک انتخاب فنی، بلکه یک الزام جهانی در چارچوب سیاست‌های کاهش اثرات تغییرات اقلیمی محسوب می‌شود. در کنار این تحولات، توسعه مصالح هوشمند افق تازه‌ای را پیش روی مهندسی زیرساخت گشوده است. مصالح هوشمند دارای قابلیت حسگری، خودترمیمی، و پاسخ‌دهی فعال در برابر تنش‌های محیطی هستند؛ ویژگی‌هایی که می‌توانند رفتار سازه را در شرایط متغیر اقلیمی پایدارتر و قابل پیش‌بینی‌تر سازند. برای نمونه، بتن‌های خودترمیم‌شونده با استفاده از باکتری‌ها، کپسول‌های شیمیایی یا پلیمرهای واکنش‌پذیر می‌توانند ترک‌های ایجادشده را بدون نیاز به مداخله انسانی ترمیم کنند. این ویژگی به‌ویژه در زیرساخت‌هایی که در معرض سیکل‌های یخ‌زدگی–ذوب یا رطوبت شدید قرار دارند بسیار ارزشمند است. همچنین مصالح خودحسگر مانند بتن و آسفالت مجهز به الیاف کربنی یا حسگرهای نانوفناورانه، امکان پایش لحظه‌ای رفتار سازه را فراهم می‌کنند و به مدیریت نگهداری پیش‌بینانه کمک می‌کنند؛ رویکردی که نقش کلیدی در کاهش ریسک آسیب‌دیدگی زیرساخت‌ها در مواجهه با رخدادهای اقلیمی دارد.(روستایی، پرنگ، فتاح زاده، التیام، ۱۴۰۴)

در چنین شرایطی، ترکیب «مصالح پایدار» با «مصالح هوشمند» و هدایت این روند از منظر آینده‌نگری برای مهندسان و سیاست‌گذاران اهمیتی استراتژیک پیدا می‌کند. آینده‌نگری مجموعه‌ای از روش‌ها و ابزارها برای پیش‌بینی روندهای محتمل، تحلیل عدم‌قطعیت‌ها و طراحی سناریوهای آینده است. این رویکرد به‌طور گسترده در حوزه‌های فناوری، انرژی و سیاست‌گذاری مورد استفاده قرار گرفته، اما در زمینه انتخاب مصالح ساخت زیرساخت‌ها، هنوز به‌صورت نظام‌مند توسعه نیافته است. در مواجهه با تغییرات سریع شرایط اقلیمی، استفاده از رویکرد آینده‌نگرانه به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا پیامدهای بلندمدت انتخاب یک ماده، الزامات عملکردی سازه در دهه‌های آینده، و امکان انطباق مصالح با شرایط شدید اقلیمی را بهتر ارزیابی کنند. (دارند، ۱۳۹۴). به عبارت دیگر، آینده‌نگری پلی است بین علم مواد، مهندسی زیرساخت و سیاست‌های سازگاری با تغییرات اقلیمی.تحقیقات جدید نشان می‌دهند که روندهای جهانی در توسعه مصالح، به‌سمت افزایش «هوشمندی»، «پایداری زیست‌محیطی» و «یکپارچه‌سازی با داده» حرکت می‌کند. ترکیب نانوفناوری، زیست‌فناوری و فناوری اطلاعات با

مصالح سنتی، نسل جدیدی از مواد مهندسی را به وجود آورده که نه‌تنها نقش سازه‌ای دارند، بلکه به‌عنوان منابع داده، واحدهای تشخیصی و گاه عناصر کنترلی عمل می‌کنند. این تغییر پارادایم، فرصت‌های مهمی برای طراحی زیرساخت‌هایی فراهم کرده است که بتوانند شرایط اقلیمی آینده را نه‌تنها تحمل کنند، بلکه در برابر آن‌ها واکنش منطقی و تطبیقی نشان دهند. بااین‌حال، اجرای گسترده این مصالح هنوز با چالش‌هایی مانند هزینه اولیه بالاتر، نبود استانداردهای بین‌المللی، عدم قطعیت در عملکرد بلندمدت، پیچیدگی تولید و محدودیت‌های پذیرش در صنعت مواجه است. بنابراین، تحلیل ترکیبی پیشرفت‌های فناورانه، ملاحظات اقتصادی–زیست‌محیطی و پیش‌بینی روندهای اقلیمی، برای انتخاب مصالح مناسب در دهه‌های آینده ضروری است.بر این اساس، این مقاله با هدف تحلیل آینده‌نگرانه نقش مصالح پایدار و هوشمند در ارتقای تاب‌آوری زیرساخت‌ها در برابر تغییرات اقلیمی تدوین شده است. روش‌شناسی این پژوهش مبتنی بر رویکردی ترکیبی شامل مرور نظام‌مند منابع، تحلیل روندهای فناورانه و سناریونویسی آینده‌پژوهانه است.

مبانی نظری و ادبیات پژوهش

تغییرات اقلیمی

تغییرات اقلیمی در دهه‌های اخیر به یکی از مهم‌ترین معضلات جهانی تبدیل شده و آثار آن به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم بر عملکرد و پایداری زیرساخت‌های حیاتی نمایان شده است. افزایش میانگین دما، تشدید رخدادهای حدی اقلیمی، تغییر الگوهای بارش، بالا آمدن سطح دریاها و افزایش بسامد سیلاب‌ها، تنها بخشی از پیامدهای شناخته‌شده این پدیده هستند که آسیب‌پذیری سیستم‌های حمل‌ونقل، انرژی، آب، فاضلاب، ساختمان و سایر زیرساخت‌های شهری و بین‌شهری را افزایش می‌دهند. از آنجا که بخش بزرگی از زیرساخت‌های کنونی برای شرایط اقلیمی گذشته طراحی و ساخته شده‌اند، شکاف قابل‌توجهی میان توان عملکردی موجود و شرایط موردانتظار آینده ایجاد شده است. این شکاف، ضرورت بازنگری در الزامات طراحی، ساخت و نگهداری زیرساخت‌ها را بیش از پیش نمایان می‌سازد(روستایی، پرنگ، فتاح زاده، التیام، ۱۴۰۴).یکی از مهم‌ترین چالش‌ها، افزایش دمای هوا و اثرات آن بر مصالح سازه‌ای است. افزایش دما می‌تواند موجب تسریع فرآیندهای انبساط حرارتی، تشدید ترک‌خوردگی، کاهش دوام مواد پلیمری، و کاهش مقاومت مصالح آسفالتی شود. برای مثال، روسازی‌های آسفالتی در دماهای بالا دچار نرم‌شدگی و شیارافتادگی می‌شوند، در حالی که بتن تحت چرخه‌های مکرر انبساط–انقباض احتمال ترک‌خوردگی بیشتری پیدا می‌کند. این امر لزوم توسعه مصالحی با مقاومت حرارتی بالاتر و توان تطابق با تغییرات شدید دمایی را روشن می‌سازد.(انصاری، مساح بوانی، باقری، ۱۳۹۷). از سوی دیگر، افزایش شدت و فراوانی بارش‌های ناگهانی و سیلاب‌ها به‌عنوان یکی از مهم‌ترین تهدیدها برای زیرساخت‌ها مطرح است. پل‌ها، جاده‌ها، خطوط راه‌آهن و شبکه‌های آب و فاضلاب به‌طور مستقیم در معرض فرسایش، شستگی، زیرشویی و فشارهای هیدرودینامیکی ناشی از رخدادهای سیلابی قرار می‌گیرند. تخریب‌های ناشی از سیلاب فقط خسارت فیزیکی نیست، بلکه اختلالات گسترده اقتصادی و اجتماعی را نیز در پی دارد.(دارند، ۱۳۹۴). بنابراین، طراحی زیرساخت‌ها باید علاوه بر مقاومت سازه‌ای، از توان تطبیق با بارهای غیرقابل پیش‌بینی و تغییرات ناگهانی برخوردار باشد. این موضوع توجه را به سمت مصالح با دوام بیشتر، رفتار غیرخطی بهبودیافته، و عملکرد قابل‌اطمینان در شرایط اشباع جلب می‌کند.در مناطق سردسیر، افزایش تعداد چرخه‌های یخزدگی–ذوب، یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب سازه‌هاست. این چرخه‌ها موجب گسترش ریزترک‌ها، کاهش دوام بتن، تخریب پوشش‌ها و فرسایش روسازی‌ها می‌شوند. تغییرات اقلیمی با تغییر الگوهای دما، تعداد این چرخه‌ها را در بسیاری از مناطق افزایش داده و باعث شده است مصالح سنتی دیگر پاسخگوی نیازهای آینده نباشند.(اسلامیان، اخروی، ۱۳۹۴). در نتیجه استفاده از مصالح ضدیخزدگی، بتن‌های پربازیافت با ترکیبات پیشرفته، و مواد افزودنی نانوفناورانه که توان بالا در مقاومت به چرخه‌های یخزدگی دارند، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند.تغییرات اقلیمی همچنین مصالح و زیرساخت‌ها را با بارهای مکانیکی جدید مواجه می‌کند. طوفان‌ها و بادهای شدیدتر، فشار مضاعف بر خطوط انتقال انرژی، سازه‌های ساحلی و تأسیسات حمل‌ونقل وارد می‌سازند. زیرساخت‌های

ساحلی و بنادر در معرض تهدید مستقیم بالا آمدن سطح آب دریا، فرسایش سواحل و آب‌شستگی قرار گرفته‌اند. این شرایط نیازمند مصالحی با مقاومت بالاتر در برابر خوردگی، فرسایش و شستگی است. در این راستا، استفاده از کامپوزیت‌های مقاوم در برابر خوردگی، بتن‌های با چگالی بالا، نانوپوشش‌ها، و مصالح هوشمندی که بتوانند شرایط محیطی را حس و گزارش کنند، اهمیت مضاعف می‌یابد.(روستایی، پرنگ، فتاح زاده، التیام، ۱۴۰۴)

مصالح پایدار

گسترش نگرانی‌های جهانی نسبت به تغییرات اقلیمی، کمبود منابع طبیعی، و افزایش تولید گازهای گلخانه‌ای موجب شده است که استفاده از مصالح پایدار در صنعت ساخت‌وساز به یک ضرورت استراتژیک تبدیل شود. مصالح پایدار به موادی گفته می‌شود که در کل چرخه عمر خود از استخراج مواد اولیه تا فرایند تولید، کاربرد، نگهداری و مدیریت پسماند کمترین اثر منفی را بر محیط‌زیست بر جای می‌گذارند و در عین حال از دوام، کارایی و ایمنی لازم برای استفاده در زیرساخت‌ها برخوردارند.(فروزین، پاکدل فرد، ۱۴۰۴) این مصالح نقش مهمی در کاهش ردپای کربن، مدیریت مصرف انرژی، ارتقای تاب‌آوری سازه‌ها و حمایت از اقتصاد چرخشی دارند و به‌عنوان رکن اساسی توسعه پایدار در مهندسی عمران مطرح هستند.یکی از مهم‌ترین دسته‌های مصالح پایدار، مصالح کم‌کربن هستند که هدف آن‌ها کاهش انتشار CO_2 در مرحله تولید است. صنعت سیمان به‌تنهایی حدود ۸ درصد از کل انتشار جهانی دی‌اکسیدکربن را تولید می‌کند؛ ازاین‌رو، توسعه جایگزین‌هایی مانند سیمان LC۳ (ترکیب رس کلسینه‌شده، آهک و کلینکر کم) و بتن‌های ژئوپلیمری اهمیت ویژه‌ای یافته است. بتن ژئوپلیمری با استفاده از مواد باطله صنعتی مانند خاکستر بادی و سرباره کوره بلند تولید می‌شود و در مقایسه با بتن‌های پرتلند سنتی، دوام بالاتر، مقاومت بهتر در برابر محیط‌های خورنده و انتشار کربن بسیار کمتری دارد. (نجارنژاد مشهدی، ظفری، ۱۴۰۲)این ویژگی‌ها آن را به گزینه‌ای ایده‌آل برای ساخت زیرساخت‌هایی تبدیل می‌کند که باید در برابر تغییرات اقلیمی و بارهای محیطی شدید مقاومت کنند.دسته دیگری از مصالح پایدار، مصالح بازیافتی و بازیافت‌پذیر هستند که نقش مهمی در کاهش استخراج منابع طبیعی و مدیریت پسماندهای صنعتی و عمرانی دارند. استفاده از آسفالت بازیافتی(RAP) ، بتن بازیافتی(RCA) ، الیاف حاصل از پسماندهای پلاستیکی، و حتی مواد زیستی مانند چوب اصلاح‌شده، همگی در زمره اقداماتی قرار می‌گیرند که به کاهش اثرات زیست‌محیطی کمک کرده و چرخه عمر سازه‌ها را افزایش می‌دهند. در بسیاری از کشورها، استفاده از درصد مشخصی از مصالح بازیافتی در پروژه‌های عمرانی نه‌تنها یک انتخاب فنی بلکه یک الزام قانونی است. این روند نشان می‌دهد که حرکت به سمت اقتصاد چرخشی در بخش ساخت‌وساز به یک سیاست جهانی تبدیل شده است.(رحیمی، حاتمی، ۱۴۰۲)

از سوی دیگر، مصالح پایدار تنها بر کاهش اثرات زیست‌محیطی تمرکز ندارند، بلکه هدف آن‌ها بهبود عملکرد و دوام سازه در شرایط اقلیمی متغیر نیز هست. به عنوان مثال، بتن‌های توانمند با افزودنی‌های نانویی، قابلیت مقاومت بهتر در برابر نفوذپذیری، خوردگی و چرخه‌های یخ‌زدگی دارند. این موضوع به‌ویژه در زیرساخت‌هایی که در معرض بارش‌های شدید، سیکل‌های دما، و رطوبت بالا قرار دارند اهمیت مضاعف دارد. استفاده از نانوذرات سیلیس، نانورس‌ها و الیاف بازالت در بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن اثبات شده است و در بسیاری از پژوهش‌ها به‌عنوان رویکردی مؤثر در افزایش تاب‌آوری معرفی می‌شود.افزون‌بر مصالح معدنی و بازیافتی، رشد مصالح زیستی نیز چشمگیر بوده است. مصالحی همچون بتن زیستی با استفاده از باکتری‌های تولیدکننده کربنات کلسیم، چوب مهندسی‌شده با استحکام بالا، و پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر، نمونه‌هایی از تلاش برای الهام‌گیری از طبیعت و بهره‌گیری از فرایندهای کم‌مصرف هستند. مصالح زیستی معمولاً وابستگی کمتری به انرژی فسیلی دارند و دارای انتشار کربن پایین یا حتی منفی هستند.(فاضلی، ۱۴۰۴) این ویژگی آن‌ها را به گزینه‌هایی کارآمد برای مقابله با اثرات تغییرات اقلیمی تبدیل می‌کند.در کنار جنبه‌های فنی، ابعاد سنجش‌پذیری و مدیریت چرخه عمر (LCA) نقش مهمی در تعریف مصالح پایدار ایفا می‌کند. ارزیابی چرخه عمر به پژوهشگران و مهندسان این امکان را می‌دهد که اثرات زیست‌محیطی مصالح را از مرحله تولید تا پایان عمر بررسی و مقایسه کنند. معیارهایی مانند مصرف انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای، قابلیت بازیافت، و طول عمر عملکردی مصالح، شاخص‌های کلیدی در تعیین میزان پایداری آن‌ها هستند. امروزه

بسیاری از پروژه‌های عمرانی ملزم به رعایت استانداردهایی مانند LEED و Envision هستند که بر استفاده از مصالح پایدار تأکید دارند.(فروزین، پاکدل فرد، ۱۴۰۴)

آینده‌پژوهی در مهندسی زیرساخت

آینده‌پژوهی در دهه‌های اخیر به‌عنوان رویکردی راهبردی برای تحلیل تغییرات بلندمدت و طراحی پاسخ‌های مناسب در حوزه‌های مختلف علمی، صنعتی و سیاست‌گذاری مورد توجه قرار گرفته است. در مهندسی زیرساخت، آینده‌پژوهی نقشی حیاتی دارد؛ زیرا زیرساخت‌ها معمولاً برای افق زمانی طولانی (۳۰ تا ۱۰۰ سال) طراحی می‌شوند و باید قادر باشند در برابر عدم‌قطعیت‌های گسترده، شامل تغییرات اقلیمی، تحولات فناورانه، تغییرات جمعیتی و الزامات اقتصادی، عملکرد قابل‌اعتمادی ارائه دهند.(Naderi, Shojaei, ۲۰۲۲:) ازاین‌رو، استفاده از چارچوب‌های آینده‌پژوهی می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان کمک کند تا روندهای نوظهور را تحلیل، سناریوهای متنوع را بررسی و راهبردهای پایدار و مقاوم را برای توسعه زیرساخت‌های آینده تدوین کنند.یکی از رایج‌ترین چارچوب‌های آینده‌پژوهی در حوزه مهندسی، تحلیل روندها است که شامل شناسایی و بررسی روندهای کلیدی مؤثر بر آینده زیرساخت‌ها می‌شود. روندهایی مانند رشد شهری، نوسانات اقلیمی، توسعه مصالح هوشمند، دیجیتالی‌شدن فرایندهای مهندسی و تغییر الگوی مصرف انرژی، همگی تأثیر مستقیم بر عملکرد زیرساخت‌ها دارند. تحلیل این روندها به پژوهشگران اجازه می‌دهد مسیرهای احتمالی تحول را تشخیص دهند و نقاط عطفی را که ممکن است نیازمند تغییر در طراحی و انتخاب مصالح باشند، پیش‌بینی کنند. این روش به‌ویژه در مرحله برنامه‌ریزی کلان و تعیین اولویت‌های سرمایه‌گذاری کاربرد گسترده‌ای دارد (Abdel-Kader, Ebid, Onyelowe, Mahdi, Abdel-Rasheed, ۲۰۲۲) .در کنار تحلیل روندها، روش سناریونویسی یکی از اصلی‌ترین ابزارهای آینده‌پژوهی در مهندسی زیرساخت است. سناریوها مجموعه‌ای از روایت‌های سازگار و مبتنی بر داده هستند که نشان می‌دهند چگونه عوامل مختلف می‌توانند بر آینده تأثیر بگذارند. هدف سناریونویسی پیش‌بینی آینده نیست؛ بلکه ایجاد آگاهی نسبت به طیف متنوعی از آینده‌های ممکن است. برای مثال، سناریوهایی شامل «افزایش شدید رخدادهای اقلیمی حدی»، «تحول گسترده در مصالح هوشمند»، یا «کمبود شدید منابع معدنی» می‌توانند به مهندسان کمک کنند تا طراحی‌های مقاوم و منعطف‌تری ارائه دهند. این روش ابزار مهمی برای ارزیابی ریسک و بهینه‌سازی تصمیمات در شرایط عدم‌قطعیت است (Lahna, Kamsu-Foguem, Abanda, ۲۰۲۳) .یکی دیگر از چارچوب‌های پرکاربرد در آینده‌پژوهی مهندسی زیرساخت، روش دلفی[۱] است که بر مبنای جمع‌آوری نظرات متخصصان و ایجاد اجماع در مورد روندها، مخاطرات و راهبردهای آینده شکل می‌گیرد. این روش به‌ویژه زمانی مفید است که داده‌های کمی کافی برای پیش‌بینی دقیق وجود ندارد یا موضوع دارای پیچیدگی بالایی است؛ مانند ارزیابی آینده فناوری‌های مصالح هوشمند یا پیش‌بینی اثرات بلندمدت تغییرات اقلیمی بر دوام سازه‌ها. (Al-Mhdawi, O'connor, Qazi, Rahimian, Dacre, ۲۰۲۵)دلفی با ایجاد بازخوردهای مکرر میان متخصصان، امکان شفاف‌سازی پیش‌فرض‌ها و دستیابی به دیدگاهی جامع‌تر و قابل اتکاتر را فراهم می‌کند.در سال‌های اخیر، چارچوب‌های ترکیبی مانند مدل‌های چندمعیاره تصمیم‌گیری آینده‌نگر و تحلیل چرخه عمر آینده‌محور نیز در پژوهش‌های مهندسی زیرساخت به‌کار گرفته شده‌اند. (Wang, Mazumder, Salarieh, Salman, Shafieezadeh, Li, ۲۰۲۲Ninan, Hertogh, Liu, ۲۰۲۲)این روش‌ها امکان مقایسه و رتبه‌بندی مصالح مختلف را بر اساس عملکرد آن‌ها در سناریوهای اقلیمی آینده فراهم می‌کنند و به انتخاب مصالح

[۱] Delphi Method

پایدار و هوشمند کمک می‌نمایند. به‌ویژه، رویکرد LCA آینده‌محور می‌تواند اثرات زیست‌محیطی مصالح را در افق‌های زمانی مختلف و تحت شرایط اقلیمی متفاوت ارزیابی کند(Lopez-Cantu, Dzombak, Samaras, ۲۰۲۲) .

یافته‌های پژوهش

توسعه مصالح پایدار در سال‌های اخیر تحت تأثیر مجموعه‌ای از روندهای فناورانه، محیطی و اقتصادی قرار گرفته است که به‌طور مستقیم بر آینده مهندسی زیرساخت اثر می‌گذارند. این روندها نه‌تنها پاسخ به بحران تغییرات اقلیمی و کمبود منابع را ممکن می‌سازند، بلکه چشم‌انداز جدیدی را برای افزایش کارایی، دوام و تاب‌آوری زیرساخت‌ها فراهم می‌کنند. بررسی روندهای کلیدی نشان می‌دهد که مسیر تحول مصالح پایدار از صرفاً کاهش آلودگی زیست‌محیطی فراتر رفته و به سمت بهبود عملکرد سازه، افزایش سازگاری با شرایط اقلیمی شدید و ادغام قابلیت‌های هوشمندانه حرکت کرده است. در ادامه، مهم‌ترین این روندها با تحلیل علمی ارائه می‌شود.

گذار به مصالح کم‌کربن و کاهش ردپای محیطی

یکی از برجسته‌ترین روندهای توسعه مصالح پایدار، حرکت جهانی به سمت مصالح کم‌کربن است. با توجه به اینکه صنعت سیمان و بتن سهم قابل توجهی در انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد، تلاش‌ها برای کاهش مصرف کلینکر و جایگزینی آن با افزودنی‌های معدنی سرعت گرفته است. سیمان LC^3 ، بتن‌های ژئوپلیمری، سیمان‌های سولفوآلومینات کلسیم و مواد مبتنی بر جایگزین‌های صنعتی نظیر سرباره و خاکستر بادی در حال تبدیل‌شدن به گزینه‌های عملی برای کاهش کربن هستند (امامی کورنده، میرزایی، ۱۴۰۳) این مصالح علاوه بر کاهش انتشار CO_2 ، در بسیاری از موارد عملکرد مهندسی بهتری نیز ارائه می‌دهند؛ از جمله مقاومت حرارتی بالاتر، دوام بیشتر در محیط‌های خورنده، و افت کمتر ناشی از کربناته‌شدن. ترکیب این مصالح با فناوری‌های نوین اختلاط و عمل‌آوری، امکان ایجاد سازه‌هایی با طول عمر بیشتر و نیاز کمتر به تعمیرات را فراهم می‌کند. این روند نشان می‌دهد که آینده زیرساخت‌ها بر پایه مصالح با انرژی تجسم‌یافته کمتر و اثرات محیطی حداقلی استوار خواهد بود.(لطفی، ۱۴۰۴)

توسعه مصالح مبتنی بر اقتصاد چرخشی و بازیافت

روند دوم که طی سال‌های اخیر رشد چشمگیری داشته، حرکت به سمت اقتصاد چرخشی در بخش ساخت‌وساز است. در این رویکرد، پسماندهای صنعتی، عمرانی و حتی پسماندهای شهری به‌عنوان منابع ارزشمند تلقی می‌شوند و در تولید مصالح جدید مورد استفاده قرار می‌گیرند.استفاده از بتن بازیافتی(RCA) ، آسفالت بازیافتی(RAP) ، الیاف پلاستیکی بازیافتی، پسماند شیشه و ضایعات فلزی نمونه‌هایی از این روند هستند. این مصالح علاوه بر کاهش نیاز به استخراج مواد خام، مزایایی مانند کاهش هزینه، کاهش حجم پسماند دفنی، و بهبود خواص مکانیکی در برخی کاربردها ارائه می‌دهند.تحقیقات نشان داده است که استفاده از درصدهای مناسب مصالح بازیافتی در مخلوط بتن و آسفالت می‌تواند عملکرد سازه را حفظ کند یا حتی بهبود دهد. (میرموید، ۱۴۰۴)همچنین، فناوری‌های جدید جداسازی و فرآوری امکان تولید مواد بازیافتی با کیفیت بالا و مشخصات قابل پیش‌بینی را فراهم کرده‌اند. این روند نشان‌دهنده تغییر بنیادین در نحوه مدیریت منابع در صنعت ساخت‌وساز است و انتظار می‌رود در دهه‌های آینده نقش تعیین‌کننده‌ای داشته باشد.(طلایی، ۱۴۰۰)روند مهم دیگر توسعه مصالح زیستی است که استفاده از مواد طبیعی، زیست‌تخریب‌پذیر و با انرژی تجسم‌یافته پایین را هدف قرار می‌دهد. این مصالح معمولاً از منابع تجدیدپذیر، فرایندهای کم‌انرژی و ترکیبات الهام‌گرفته از سیستم‌های طبیعی بهره می‌برند.نمونه‌هایی از این روند شامل موارد زیر است:

- بتن زیستی مبتنی بر باکتری‌های تولیدکننده کربنات کلسیم
- چوب مهندسی‌شده با استحکام بالا و مقاومت به آتش
- پلیمرهای زیستی تولیدشده از منابع گیاهی
- کامپوزیت‌های طبیعی ساخته‌شده از الیاف گیاهی مانند کنف، بامبو و کتان.(امامی کورنده، میرزایی، ۱۴۰۳)

این مصالح غالباً اثرات زیست‌محیطی بسیار کمتر و عملکرد مناسبی در برابر بارهای مکانیکی و شرایط اقلیمی دارند. توسعه فناوری‌های اصلاح زیستی و استفاده از افزودنی‌های نانویی موجب شده است این مصالح در مقایسه با نسل‌های اولیه از نظر دوام و کارایی به‌مراتب قابل‌اعتمادتر باشند.

افزایش دوام و طول عمر سازه‌ها از طریق اصلاح ساختاری مصالح

یکی از روندهای کلیدی که مستقیماً بر تاب‌آوری زیرساخت‌ها اثر می‌گذارد، تمرکز بر بهبود دوام مصالح از طریق اصلاح ساختار میکروسکوپی آن‌ها است. توسعه نانوذرات، الیاف تقویتی، ترکیبات معدنی پیشرفته و افزودنی‌های عملکردی موجب شده است بتن، آسفالت و مصالح بنایی مقاومت بیشتری در برابر نفوذپذیری، خوردگی، یخ‌زدگی–ذوب، حملات شیمیایی و سایش نشان دهند.به‌عنوان مثال افزودن نانوسیلیس موجب کاهش تخلخل و افزایش پیوستگی ماتریس سیمانی می‌شود.استفاده از الیاف بازالت و الیاف PVA ترک‌خوردگی را کنترل و جذب انرژی را افزایش می‌دهد.اصلاح ترکیبات آسفالتی با پلیمرهای پایدار مقاومت حرارتی و انعطاف‌پذیری را بهبود می‌دهد.این روند نشان می‌دهد که مصالح پایدار تنها به‌معنای کاهش اثرات محیطی نیست، بلکه شامل توانمندسازی سازه برای مواجهه با چالش‌های اقلیمی آینده نیز می‌شود.(بازیاری، ۱۴۰۲)گرایش گسترده به توسعه مصالح خودترمیم‌شونده یکی از تحول‌آفرین‌ترین روندهای سال‌های اخیر است. (طلایی، ۱۴۰۰،محمدی، ۱۴۰۴) این مصالح با استفاده از فناوری‌های مختلف، قابلیت ترمیم ترک‌ها و آسیب‌ها بدون دخالت انسان را فراهم می‌کنند. فناوری‌های رایج خودترمیمی شامل موارد زیر است:

- کپسول‌های حاوی عامل ترمیم‌کننده
- باکتری‌های خودترمیم‌گر
- پلیمرهای گرمانرم یا حساس به رطوبت
- واکنش‌های شیمیایی فعال‌شونده در مواجهه با ترک.(ملک محمدی، قربانی پارام، ۱۴۰۱)

مصالح خودترمیم‌شونده با کاهش نیاز به تعمیرات، افزایش عمر سازه و جلوگیری از پیشرفت آسیب‌های ریزترک، نقشی اساسی در ارتقای پایداری و تاب‌آوری دارند. در سناریوهای اقلیمی آینده که سازه‌ها در معرض تنش‌های شدید، دماهای متغیر و سیکل‌های یخ‌زدگی–ذوب بیشتری قرار می‌گیرند، این مصالح می‌توانند نقش محوری ایفا کنند.یکی دیگر از روندهای نوظهور، ادغام قابلیت‌های پایش در مصالح پایدار است. هرچند این روند مرز مشترکی با مصالح هوشمند دارد، اما بخش مهمی از توسعه مصالح پایدار نیز محسوب می‌شود. مصالح مجهز به حسگرهای درونی اطلاعاتی درباره رطوبت، تنش، دما و خوردگی ارائه می‌دهند و امکان مدیریت پیش‌بینانه و کاهش هزینه‌های نگهداری را فراهم می‌کنند. مسیر آینده این فناوری معطوف به مصالح پایدار و قابل بازیافت با قابلیت پایش درونی است.(عبدی پور بستی، ۱۳۹۶).

استانداردسازی و الزامات بین‌المللی در توسعه مصالح پایدار

یکی از روندهای مهم اما کمتر مورد توجه، رشد استانداردها و مقررات جهانی مربوط به مصالح پایدار است. الزامات زیست‌محیطی نظیرLEED ، Envision، BREEAMو استانداردهای ارزیابی چرخه عمر (LCA) به‌طور فزاینده‌ای در پروژه‌ها اجباری شده‌اند. این امر به جهت‌دهی بازار مصالح به‌سمت تولید موادی با قابلیت ردیابی زیست‌محیطی، مستندسازی انتشار و امکان بازیافت کمک می‌کند. هم‌زمان، مراکز تحقیقاتی و دولت‌ها در حال توسعه معیارهایی هستند که سازگاری مصالح با سناریوهای اقلیمی آینده را نیز ارزیابی کنند.آخرین روند کلیدی، حرکت به سمت مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای انتخاب مصالح پایدار است. در این مدل‌ها، پایداری تنها به کاهش انتشار کربن محدود نمی‌شود، بلکه شامل هزینه چرخه عمر، دوام بلندمدت، سازگاری اقلیمی، ایمنی و امکان بازیافت مواد نیز هست. استفاده از تحلیل‌های آینده‌محور LCA و مدل‌های MCDAزمینه انتخاب مصالحی را فراهم می‌کند که در دهه‌های آینده بیشترین سازگاری با شرایط اقلیمی و اقتصادی را داشته باشند(Qureshi, Yadav, Garg, Sachdeva, Abdulrahman, Alghamd, Qureshi, ۲۰۲٤).

روندهای کلیدی در توسعه مصالح هوشمند

مصالح هوشمند نسل جدیدی از مواد مهندسی هستند که با توانایی حسگری، پاسخ‌دهی، خودترمیمی یا تغییر رفتار در برابر محرک‌های محیطی، نقش مهمی در افزایش تاب‌آوری، دوام و کارایی زیرساخت‌ها ایفا می‌کنند. توسعه این مصالح طی سال‌های اخیر تحت تأثیر پیشرفت‌های فناوری در حوزه نانو، زیست‌فناوری، اینترنت اشیا و مواد پیشرفته شتاب گرفته و مسیر آینده مهندسی زیرساخت را دگرگون کرده است. بررسی روندهای کلیدی در این حوزه نشان می‌دهد که مصالح هوشمند از حالت مواد تخصصی آزمایشگاهی به عناصر کارکردی قابل استفاده در زیرساخت‌های واقعی تبدیل شده‌اند. در ادامه مهم‌ترین روندهای نوظهور در توسعه این مصالح بررسی می‌شود.یکی از برجسته‌ترین روندها، توسعه مصالح خودحسگر است که امکان پایش لحظه‌ای رفتار سازه را بدون نیاز به نصب حسگرهای خارجی فراهم می‌کنند. این مصالح با تغییر مقاومت الکتریکی، ظرفیت خازنی یا پاسخ الکترومکانیکی خود، می‌توانند تنش، کرنش، رطوبت، دما یا آسیب‌های سطحی را تشخیص دهند.مهم‌ترین فناوری‌های این حوزه شامل:

- افزودن الیاف کربنی یا نانولوله‌های کربنی به بتن برای ایجاد قابلیت هدایت‌پذیری.
- استفاده از الیاف پیزوالکتریک در کامپوزیت‌ها برای ثبت تغییرات کرنش.
- افزودن نانوذرات گرافن و نانورس‌ها برای افزایش حساسیت مکانیکی.
- توسعه آسفالت‌های خودحسگر برای پایش فشار و دمای روسازی.(المعی، ۱۳۹۹)

این مواد به‌ویژه در زیرساخت‌های بحرانی مانند پل‌ها، تونل‌ها، خطوط ریلی و باندهای فرودگاه اهمیت دارند، زیرا اطلاعات لحظه‌ای درباره وضعیت سازه فراهم کرده و امکان مدیریت پیش‌بینانه را افزایش می‌دهند. این روند یکی از ستون‌های اصلی آینده زیرساخت هوشمند تلقی می‌شود.مصالح خودترمیم‌شونده یکی از تحول‌آفرین‌ترین روندهای توسعه مصالح هوشمند هستند. هدف این مصالح، ترمیم ترک‌ها و آسیب‌ها بدون دخالت انسان و افزایش عمر مفید سازه است.سه مسیر اصلی فناوری در این حوزه عبارت‌اند از۱ـ خودترمیمی شیمیایی ، ۲ـ خودترمیمی زیستی، ۳ـ خودترمیمی فیزیکی–پلیمری. این روندها به دلیل کاهش قابل‌توجه هزینه‌های نگهداری و افزایش تحمل سازه‌ها در برابر بارهای اقلیمی آینده اهمیت بسیار دارد و انتظار می‌رود به یکی از فناوری‌های پایه‌ای مصالح نسل آینده تبدیل شود.همچنین نانوفناوری نقشی محوری در توسعه مصالح هوشمند داشته است. افزودن نانوذرات به ماتریس بتن، آسفالت یا کامپوزیت‌ها، علاوه بر افزایش مقاومت و دوام، قابلیت‌های هوشمندانه‌ای همچون حسگری، تغییر خواص حرارتی یا کاهش نفوذپذیری ایجاد می‌کند.نمونه‌های مهم شامل:

- نانوذرات TiO_2 برای ایجاد خاصیت فوتوکاتالیستی و خودپاک‌شوندگی.
- گرافن و اکسید گرافن برای افزایش رسانایی و قابلیت خودحسگری.
- نانوذرات سیلیس و آلومینا برای تقویت ساختار ریزمقیاس و افزایش دوام.
- نانورس‌ها برای ایجاد رفتار رئولوژیکی هوشمندانه.

نانوفناوری امکان مهندسی مصالح را در سطح مولکولی فراهم کرده و مسیر توسعه مصالح هوشمند چندکارکردی را هموار کرده است.موضوع مهم دیگر، رشد مصالحی است که می‌توانند در برابر محرک‌های محیطی مانند گرما، رطوبت، میدان مغناطیسی، بار مکانیکی یا نور پاسخ فعال نشان دهند. این مواد در دسته مصالح با حافظه شکلی(SMA) ، پلیمرهای حساس به دما (SMP)، مصالح مگنتورئولوژیک (MR) و الکترورئولوژیک (ER) قرار می‌گیرند ,Qureshi, Yadav, Garg, Sachdeva). Abdulrahman, Alghamd, Qureshi, ۲۰۲٤).

یکپارچه‌سازی مصالح هوشمند با فناوری‌های دیجیتال و اینترنت اشیا

یکی از روندهای نوظهور، ادغام مصالح هوشمند با سیستم‌های اینترنت اشیا (IoT) و پردازش داده‌های ابری است. مصالح خودحسگر به‌عنوان منابع داده عمل می‌کنند و اطلاعات آن‌ها از طریق شبکه‌های بی‌سیم به سیستم‌های مدیریتی منتقل می‌شود.این روند امکان توسعه زیرساخت‌های "خودآگاه" را فراهم کرده است؛ زیرساخت‌هایی که وضعیت خود را در لحظه گزارش می‌دهند، الگوهای رفتاری خود را می‌آموزند و امکان انجام تعمیرات پیش‌بینانه را فراهم می‌سازند.(ملک محمدی، قربانی پارام، ۱۴۰۱)

این تحول هم‌راستا با توسعه مفهوم Digital Twin(دوقلو دیجیتال) است که عملکرد سازه را در محیط مجازی شبیه‌سازی و پیش‌بینی می‌کند.روند دیگر، رشد کامپوزیت‌هایی است که خواص مکانیکی، حرارتی و الکترومغناطیسی ترکیبی دارند و می‌توانند نقش ماده‌ای چندمنظوره را ایفا کنند. این کامپوزیت‌ها در صنایع هوافضا، انرژی و زیرساخت کاربرد فزاینده‌ای یافته‌اند.مصالح تغییر فازدهنده نیز با قابلیت ذخیره و آزادسازی انرژی حرارتی، به یکی از روندهای مهم در توسعه زیرساخت‌های سازگار با تغییرات اقلیمی تبدیل شده‌اند. این مصالح می‌توانند دمای سازه را تثبیت و از شوک‌های حرارتی جلوگیری کنند. (بازیاری، ۱۴۰۲)کاربردهای آن‌ها شامل روسازی‌ها، ساختمان‌های نیروگاهی و سامانه‌های ذخیره انرژی حرارتی است.روند جدیدی در حال شکل‌گیری است که مصالح هوشمند را با الزامات زیست‌محیطی ترکیب می‌کند. این روند به توسعه مصالح هوشمند پایدار منجر شده است؛ موادی که علاوه بر قابلیت‌های عملکردی، کم‌کربن، قابل بازیافت و زیست‌سازگار هستند. برای مثال، بتن‌های خودترمیم‌شونده مبتنی بر باکتری یا پلیمرهای زیستی حسگر، نمونه‌هایی از این ادغام هستند.(عبدی پور بستی، ۱۳۹۶)

سناریوهای آینده‌نگرانه

با توجه به سرعت تحول فناوری‌های مهندسی، شدت‌گرفتن تغییرات اقلیمی و عدم‌قطعیت‌های گسترده در حوزه‌های اقتصادی، زیست‌محیطی و سیاست‌گذاری، آینده زیرساخت‌ها نیازمند برنامه‌ریزی مبتنی بر سناریوهای متنوع و محتمل است. رویکرد سناریونویسی آینده‌پژوهانه این امکان را فراهم می‌سازد که آینده نه‌به‌عنوان ادامه خطی گذشته، بلکه مجموعه‌ای از مسیرهای ممکن با پیامدهای متفاوت در نظر گرفته شود. در این چارچوب، کاربرد مصالح پایدار و هوشمند نقش محوری در شکل‌گیری زیرساخت‌های نسل آینده دارد. تحلیل سناریوهای آینده‌نگرانه در این حوزه نشان می‌دهد که چند مسیر کلیدی می‌توانند آینده زیرساخت‌ها را در دهه‌های پیش‌رو رقم بزنند-(Abdel-Kader, Ebid, Onyelowe, Mahdi, Abdel . Rasheed, ۲۰۲۲)

سناریو اول

گذار فراگیر و شتاب‌گرفته به مصالح پایدار و هوشمند

در این سناریو، فشارهای بین‌المللی برای کاهش انتشار کربن، همراه با پیشرفت‌های سریع فناوری، موجب می‌شود که استفاده از مصالح پایدار و هوشمند به یک استاندارد رایج در صنعت ساخت‌وساز تبدیل شود. سرمایه‌گذاری گسترده در فناوری‌های کم‌کربن، توسعه مصالح خودترمیم‌شونده، و مصالح مجهز به حسگرهای داخلی باعث می‌شود زیرساخت‌ها از مرحله «پاسخ منفعلانه» به مرحله «خودآگاهی و خودتنظیمی» برسند.ویژگی‌های این سناریو شامل کاهش چشمگیر انتشار کربن ناشی از صنعت ساخت‌وساز؛استفاده گسترده از بتن ژئوپلیمری، LC۳و آسفالت‌های تقویت‌شده کم‌کربن؛ ادغام کامل مصالح خودحسگر با سیستم‌های دیجیتال و دوقلوهای دیجیتالی، مدیریت پیش‌بینانه نگهداری زیرساخت‌ها، مبتنی بر تحلیل داده‌های بلادرنگ؛کاهش هزینه‌های عملیاتی به‌واسطه افزایش دوام و کاهش نیاز به تعمیرات؛تصویب مقررات سختگیرانه برای استفاده از مصالح غیرپایدا است. در چنین آینده‌ای، زیرساخت‌های حمل‌ونقل، ساختمان‌ها و شبکه‌های انرژی مقاوم‌تر، هوشمندتر و سازگارتر با اقلیم‌های مختلف خواهند بود. این سناریو تصویر یک تحول ساختاری و موفق را ارائه می‌کند که در آن فناوری، سیاست و بازار در یک مسیر هم‌افزا قرار گرفته‌اند (Wang, Mazumder, Salarieh, Salman, Shafieezadeh, Li, ۲۰۲۲Ninan, Hertogh, Liu, ۲۰۲۲) .

سناریو دوم

گذار تدریجی و محدود به مصالح پایدار و هوشمند

در این سناریو، باوجود آگاهی نسبت به اثرات تغییرات اقلیمی، محدودیت‌های مالی، نبود استانداردهای کافی و مقاومت ساختاری در صنعت ساخت‌وساز موجب می‌شود گذار به مصالح پیشرفته با سرعت کم و پراکنده انجام شود. در نتیجه، استفاده از مصالح پایدار بیشتر در پروژه‌های خاص یا با بودجه‌های دولتی مشاهده می‌شود و مصالح هوشمند فقط در برخی زیرساخت‌های حساس مانند پل‌های بزرگ یا نیروگاه‌ها به کار می‌روند. مشخصه‌های این سناریو عبارت‌اند از افزایش استفاده از مصالح پایدار اما بدون جایگزینی کامل؛کاربرد محدود مصالح خودحسگر و خودترمیم‌شونده به دلیل هزینه اولیه بالا؛شکاف قابل توجه میان کشورهای توسعه‌یافته و درحال‌توسعه در پذیرش فناوری؛نبود چارچوب‌های قانونی یکپارچه و استانداردهای الزام‌آور؛وابستگی به پروژه‌های دولتی برای هدایت تغییر. در این روش روندها به‌سمت پایداری پیش می‌روند اما سرعت تغییر کند است، زیرساخت‌ها بخشی از قابلیت‌های هوشمند را کسب می‌کنند، اما همچنان آسیب‌پذیری قابل توجهی در برابر رخدادهای شدید اقلیمی باقی خواهد ماند.

سناریو سوم

رکود فناوری و تداوم وابستگی به مصالح سنتی

در این سناریو، بحران‌های اقتصادی، ضعف سیاست‌گذاری، نبود سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه، و مقاومت صنعتی موجب رکود فناوری در حوزه مصالح می‌شود. صنعت ساخت‌وساز همچنان به مصالح سنتی وابسته می‌ماند و مصالح هوشمند به فناوری‌هایی لوکس و کم‌کاربرد محدود می‌شوند.پیامدهای این سناریو شامل افزایش آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها در برابر تغییرات اقلیمی؛افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری؛کاهش رقابت‌پذیری صنعتی و عقب‌ماندگی فناورانه؛عدم‌استفاده از داده‌های هوشمند برای مدیریت زیرساخت؛وابستگی بلندمدت به مدل‌های سنتی ساخت است. این سناریو نشان‌دهنده آینده‌ای پرریسک است که در آن فرصت‌های نوآوری از دست می‌رود و شکنندگی زیرساخت‌ها به‌صورت پایدار افزایش می‌یابد(Lopez- .

(Cantu, Dzombak, Samaras, ۲۰۲۲&Lahna, Kamsu-Foguem, Abanda, ۲۰۲۳در واقع سناریوهای آینده‌نگرانه نشان می‌دهند که مسیر آینده مصالح پایدار و هوشمند قطعی نیست و به تعامل پیچیده‌ای بین فناوری، اقلیم و سیاست بستگی دارد. بااین‌حال، در تمامی سناریوها چه خوش‌بینانه، چه میانه، چه اضطراری و چه بدبینانه یک نکته مشترک وجود دارد:مصالح پایدار و هوشمند نقش غیرقابل‌انکاری در تاب‌آوری زیرساخت‌های آینده خواهند داشت.این سناریوها به مهندسان و سیاست‌گذاران کمک می‌کنند تا تصمیم‌ها را بر اساس طیفی از آینده‌های ممکن اتخاذ کنند و مسیرهای آمادگی، نوآوری و مدیریت ریسک را تقویت نمایند.

نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که گذار به مصالح پایدار و هوشمند نه‌تنها ضرورتی ناشی از بحران تغییرات اقلیمی است، بلکه بخشی از یک تحول ساختاری در مهندسی زیرساخت به شمار می‌آید؛ تحولی که زیرساخت‌های آینده را از سازه‌هایی منفعل و وابسته به تعمیرات دوره‌ای، به سامانه‌هایی فعال، هوشمند، و سازگار با شرایط متغیر محیطی تبدیل می‌کند. تحلیل روندهای کلیدی در توسعه مصالح پایدار و هوشمند آشکار می‌سازد که این دو گروه از مصالح در حال همگرایی هستند و در مسیر شکل‌دهی نسل جدیدی از مواد چندکارکردی قرار دارند که می‌توانند هم‌زمان نیازهای زیست‌محیطی، عملکردی و اقلیمی زیرساخت‌ها را پاسخ دهند. این همگرایی در قلب تحول آینده زیرساخت‌ها قرار دارد و مبنایی اساسی برای تدوین راهبردهای طراحی و ساخت در دهه‌های پیش رو ایجاد می‌کند.مطالعه حاضر نشان داد که توسعه مصالح پایدار به‌عنوان یکی از محورهای اصلی کاهش اثرات زیست‌محیطی صنعت ساخت‌وساز، نقشی تعیین‌کننده در کاهش انتشار کربن، ارتقای دوام سازه و بهبود چرخه عمر زیرساخت‌ها دارد. مصالح کم‌کربن، مصالح بازیافتی، مواد زیستی و افزودنی‌های نانویی، همگی مسیری را شکل می‌دهند که در آن دوام سازه با کاهش مصرف منابع طبیعی و کاهش آلودگی محیط‌زیست هم‌سو می‌شود. این روند بیانگر تغییری بنیادین در نگرش مهندسی است؛ تغییری که در آن عملکرد سازه نه در تضاد با محیط‌زیست، بلکه در هماهنگی با آن طراحی و ارزیابی می‌شود. مصالح پایدار از جایگاه مواد جایگزین و تجربی، به رکن اصلی چرخه عمر زیرساخت‌ها تبدیل شده‌اند و یافته‌های مطالعه تأکید می‌کند که نقش آن‌ها در آینده تنها افزایش خواهد یافت.از سوی دیگر، مصالح هوشمند با ایجاد قابلیت حسگری، خودترمیمی و پاسخ‌دهی فعال، ابعاد جدیدی به مفهوم تاب‌آوری زیرساخت‌ها افزوده‌اند. این مصالح با ارائه داده‌های لحظه‌ای و امکان خودتنظیمی سازه، میان سیستم‌های فیزیکی و سامانه‌های دیجیتال پیوندی مستقیم برقرار می‌کنند. این امر سبب می‌شود زیرساخت‌ها نه‌تنها بهتر در برابر تغییرات اقلیمی مقاومت کنند، بلکه در برابر آن‌ها رفتار تطبیقی نشان دهند. تحلیل روندهای هوشمندسازی مصالح نشان می‌دهد که آینده زیرساخت‌ها به سمت سامانه‌هایی می‌رود که قادرند وضعیت خود را تشخیص دهند، از آسیب جلوگیری کنند و رفتار سازه را به‌صورت فعال مدیریت نمایند. مصالح خودحسگر، مصالح خودترمیم‌شونده، مصالح واکنش‌پذیر نسبت به دما یا بارگذاری، و کامپوزیت‌های تقویتی چندمنظوره، مجموعه‌ای را شکل می‌دهند که به‌طور هم‌زمان اطلاعات، مقاومت و عملکرد را در یک ماده جمع می‌کنند. این تحول نشان می‌دهد که آینده مصالح دیگر صرفاً در بهبود ویژگی‌های مکانیکی خلاصه نمی‌شود، بلکه در افزایش توانایی شناخت و تعامل مصالح با محیط تعریف می‌شود.

بررسی سناریوهای آینده‌نگرانه نیز نشان می‌دهد که مسیرهای متفاوتی می‌توانند آینده مصالح و زیرساخت‌ها را شکل دهند، اما در تمامی این مسیرها نقش مصالح پایدار و هوشمند برجسته است. در سناریوهای خوش‌بینانه، توسعه فناوری و سیاست‌گذاری هم‌زمان باعث گسترش فراگیر این مصالح و ایجاد زیرساخت‌هایی می‌شود که مقاومت بالا، سازگاری اقلیمی و طول عمر افزایش‌یافته دارند. در سناریوهای میانه، استفاده از این مصالح با سرعتی محدود اما رو به رشد ادامه می‌یابد و سطحی از

تاب‌آوری ایجاد می‌کند، هرچند کامل و همه‌جانبه نیست. حتی در سناریوهای بحرانی یا رکود فناورانه نیز، اهمیت این مصالح از بین نمی‌رود؛ بلکه ضرورت آن به‌صورت ملموس‌تر آشکار می‌گردد، زیرا زیرساخت‌ها تحت فشار شدید اقلیمی آسیب‌پذیرتر شده و نیاز به مصالح مقاوم‌تر افزایش می‌یابد. این همسویی در تمامی سناریوها نشان می‌دهد که مصالح پایدار و هوشمند بخشی ناگزیر از آینده زیرساخت‌ها هستند.بحث درباره یافته‌ها روشن می‌سازد که تغییرات اقلیمی تنها یک چالش خارجی برای مهندسی زیرساخت نیست، بلکه محرکی اساسی برای نوآوری در علم مواد است. به عبارت دیگر، اقلیم آینده نه‌فقط بر عملکرد زیرساخت‌ها تأثیر می‌گذارد، بلکه خود به عامل شکل‌دهنده نسل جدید مصالح تبدیل می‌شود. مصالحی که توانایی مقابله با موج‌های گرما، بارش‌های شدید، سیکل‌های یخزدگی و ذوب و تغییرات رطوبتی را دارند، محصول مستقیم فشارهای اقلیمی و نیازهای عملکردی هستند. این امر یک نقطه چرخش در رابطه میان مهندسی زیرساخت و علوم اقلیمی ایجاد می‌کند: هرچه اقلیم متغیرتر و بی‌ثبات‌تر می‌شود، مصالح نیز باید پویا، سازگار و هوشمندتر شوند.نتایج تحلیل روندها و سناریوها همچنین نشان می‌دهد که مرز میان مصالح پایدار و هوشمند به‌طور روزافزون در حال محو شدن است. مصالح هوشمند زیستی، بتن‌های خودترمیم با منشاء طبیعی، کامپوزیت‌های هوشمند قابل بازیافت و مصالح کم‌کربن مجهز به حسگرهای تعبیه‌شده، نمونه‌هایی از این هم‌گرایی هستند. این مواد ترکیب معناداری از پایداری محیطی و عملکرد هوشمندانه ارائه می‌کنند و مسیر آینده‌ای را شکل می‌دهند که در آن سازه‌ها نه‌تنها کمتر به محیط‌زیست آسیب می‌زنند، بلکه با آن به‌صورت هوشمندانه تعامل می‌کنند. این هم‌افزایی میان پایداری و هوشمندی، یکی از مهم‌ترین دستاوردهای علمی در حوزه مهندسی مواد و زیرساخت در سال‌های اخیر به شمار می‌آید.پژوهش حاضر نشان می‌دهد که آینده مهندسی زیرساخت در تقاطع سه جریان اصلی شکل خواهد گرفت : پایداری محیطی، هوشمندسازی و آینده‌نگری .مصالح پایدار راهکاری برای کاهش فشار محیطی و بهبود دوام سازه‌ها فراهم می‌کنند؛ مصالح هوشمند امکان مدیریت فعال و سازگار با شرایط اقلیمی را ایجاد می‌کنند؛ و آینده‌نگری به مهندسان اجازه می‌دهد این دو جریان را در قالب راهبردهای بلندمدت به هم پیوند دهند. نتیجه این ترکیب، زیرساخت‌هایی است که نه‌تنها مقاوم هستند، بلکه از محیط خود می‌آموزند، با آن سازگار می‌شوند و در برابر چالش‌های آینده عملکرد قابل اتکایی ارائه می‌دهند.

منابع

اسلامیان، س. و اخروی، س. (۱۳۹۴). نگاه کمّی به پدیدهٔ تغییر اقلیم و راهکارهای سازش با آن، سامانه‌های سطوح آبگیر باران، ۳(۳): ۲۶-۱۵.

اصغری آرپاتپه، علی و مجتهدزاده، عرفان،۱۴۰۳،مدیریت هوشمند در طراحی و ساخت ساختمان های پایدار با استفاده از مصالح قابل تجدید پذیر،https://civilica.com/doc/۲۲۰۰۵۳۳

امامی کورنده، محمد و میرزایی، حمیدرضا،۱۴۰۳،بررسی فناوری های نوین در تولید بتن کم کربن و تاثیر آنها بر کاهش اثرات زیست محیطی،چهارمین کنفرانس سراسری مطالعات و یافته های نوین در حوزه عمران، معماری، شهرسازی و محیط زیست ایران،قم،https://civilica.com/doc/۲۲٤۱۷٦٦

انصاری، ث.؛ مساح بوانی، ع. و باقری، ع. (۱۳۹۷). ارزیابی راهکارهای سازگاری با تغییر اقلیم بر اساس نشانگرهای اجتماعی، اقتصادی، و زیست‌محیطی امنیت آبی، تحقیقات منابع آب ایران، ۱۴(۵): ۲۳۷-۲۵۳.

بازیاری، ایوب،۱۴۰۲،فناوری های جدید در مصالح ساختمانی با رویکرد صنعتی سازی ساختمان،نهمین کنفرانس ملی مهندسی عمران، معماری و شهر هوشمند،تهران،https://civilica.com/doc/۱۹۷۷۰٥٤

پایزه، مهران و شجاعی، فرشید،۱۳۹۴،استفاده از مصالح ساختمان هوشمند در نما؛ رویکردی پایدار در معماری،کنفرانس بین المللی عمران ، معماری و زیرساخت های شهری،تبریز،https://civilica.com/doc/٤٤٧٦٧٢

جهان‌بخش اصل، س.؛ خورشیددوست، ع.؛ عالی‌نژاد، م. و پوراصغر، ف. (۱۳۹۵). تأثیر تغییر اقلیم بر دما و بارش با درنظرگرفتن عدم قطعیت مدل‌ها و سناریوهای اقلیمی (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ شهرچای ارومیه)، هیدروژئومورفولوژی، ۳(۷): ۱۰۷-۱۲۲.

دارند، م. (۱۳۹۴). ارزیابی و شناخت تغییر اقلیم در ایران زمین طی دهه‌های اخیر، مجلهٔ علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۹(۳۰): ۱-۱۴.

رحیمی، رعنا و حاتمی، طیبه،۱۴۰۲،بررسی تاثیر استفاده از مصالح پایدار نوین در معماری سبز و پایدار،سومین کنفرانس بین المللی معماری،عمران،شهرسازی،محیط زیست و افق های هنر اسلامی در بیانیه گام دوم انقلاب،تبریز،https://civilica.com/doc/۱۹۵۸۹۱٤

روستایی، سجاد و پرنگ، سارا و فتاح زاده، مسعود و التیام، حمید،۱۴۰۴،بررسی تغییرات اقلیمی و اثرات آن در ایران،یازدهمین کنفرانس بین المللی مهندسی محیط زیست، جغرافیا و منابع طبیعی،تهران،https://civilica.com/doc/۲٤۱۲۸۲۱

سلطانی شریف زاده، نسیم و یادگاری، علیرضا،۱۴۰۱،تاثیر استفاده از مصالح هوشمند بر طراحی معماری پایدار در فضاهای انعطاف پذیر،هشتمین کنگره سالانه بین المللی عمران، معماری و توسعه شهری،تهران،https://civilica.com/doc/1655811

طلایی، میترا،۱۴۰۰،شیوه های مبتنی بر اقتصاد چرخشی در سازه های انسانی،دومین کنفرانس بین المللی شهرسازی، معماری، عمران، محیط زیست،https://civilica.com/doc/۱۲٦٦۳۳۲

عبدی پور بستی، مستانه،۱۳۹۶،استفاده از مصالح نوین هوشمند در روند توسعه پایدار شهری،سومین کنفرانس ملی مهندسی عمران، معماری و توسعه شهری،بابل،https://civilica.com/doc/٦۸۷۰٤۷

فاضلی، عالم،۱۴۰۴،بررسی نقش مصالح ساختمانی پایدار در کاهش اثرات زیست محیطی پروژه های عمرانی،چهارمین کنفرانس بین المللی تحقیقات نوین در آموزش و پرورش،تهران،https://civilica.com/doc/۲۳۲٦۸۳۰

فروزین، میرجواد و پاکدل فرد، محمدرضا،۱۴۰۴،نقش مصالح پایدار در توسعه معماری سبز: بررسی چالش ها و فرصت های روبرو،چهارمین کنفرانس بین المللی معماری، عمران، شهرسازی، محیط زیست و افق های هنر اسلامی در بیانیه گام دوم انقلاب،https://civilica.com/doc/۲٤۲۸۱۰۷

لطفی، امیررضا،۱۴۰۴،رویکرد فناورانه کاهش کربن در معماری پایدار،چهارمین کنفرانس بین المللی معماری، عمران، شهرسازی، محیط زیست و افق های هنر اسلامی در بیانیه گام دوم انقلاب،https://civilica.com/doc/۲٤۲۸٥٤۷

محمدی، فاطمه،۱۴۰۴،راهبرد طراحی مبتنی بر اقتصاد چرخشی در معماری ایران: بازسازی تطبیقی و بازیافت مصالح،بیست و ششمین کنفرانس ملی مهندسی عمران، معماری و شهرسازی،شیروان،https://civilica.com/doc/۲۲۸۸۰۹۹

مددی، سعید و ناظری، حسین و کاظم پور، ذکریا،۱۴۰۴،تحلیل ساختاری کلان روندهای موثر در مدیریت زیرساخت های حیاتی ج.ا.ایران،https://civilica.com/doc/۲۲۷۸۳۲۴

المعی، ارسلان،۱۳۹۹،بررسی نقش استفاده از مصالح هوشمند در طراحی داخلی ساختمان های مسکونی با هدف بهینه سازی مصرف انرژی،اولین کنفرانس محیط زیست، عمران، معماری و شهرسازی،https://civilica.com/doc/۱۰۲٥۷۲۸

ملک محمدی، مرتضی و قربانی پارام، افشین،۱۴۰۱،افزایش مقاومت ساختمان ها با سبک سازی و بکارگیری مصالح نوین،نهمین کنفرانس بین المللی عمران، معماری و مدیریت شهری،https://civilica.com/doc/۱٦۰۹۷٦۹

میرموید، سید مهران،۱۴۰۴،توسعه مصالح سبز و کم کربن برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار در مهندسی عمران،چهارمین کنفرانس بین المللی پژوهش ها و دستاوردهای نو در علوم، مهندسی و فناوری های نوین،https://civilica.com/doc/۲۳۱۷۳۳۱

نجارنژاد مشهدی، مرجانه و ظفری، محمدرضا،۱۴۰۲،بررسی مصالح پایدار با رویکرد اقتصادی،شانزدهمین سمپوزیوم بین المللی پیشرفت های علوم و تکنولوژی،مشهد،https://civilica.com/doc/۲۰۱۹٦۹۸

Abdel-Kader, M. Y., Ebid, A. M., Onyelowe, K. C., Mahdi, I. M., & Abdel-Rasheed, I. (۲۰۲۲). in infrastructure projects—Gap study. *Infrastructures*, *7*(۱۰), ۱۳۷.

Al-Mhdawi, M. K. S., O'connor, A., Qazi, A., Rahimian, F., & Dacre, N. (۲۰۲۵). Review of studies on risk factors in critical infrastructure projects from ۲۰۱۱ to ۲۰۲۳. *Smart and Sustainable Built Environment*, *14*(۲), ۳٤۲-۳۷٦.

Lahna, T., Kamsu-Foguem, B., & Abanda, H. F. (۲۰۲۳). Maintenance in airport infrastructure: A bibliometric analysis and future research directions. *Journal of Building Engineering*, *76*, ۱۰٦۸۷٦.

Lai, Y., Lopez-Cantu, T., Dzombak, D. A., & Samaras, C. (۲۰۲۲). Framing the use of climate model projections in infrastructure engineering: practices, uncertainties, and recommendations. *Journal of Infrastructure Systems*, *28*(۳), ۰٤۰۲۲۰۲۰.

Naderi, H., & Shojaei, A. (۲۰۲۲). Civil infrastructure digital twins: Multi-level knowledge map, research gaps, and future directions. *IEEE Access*, *10*, ۱۲۲۰۲۲-۱۲۲۰۳۷.

Ninan, J., Hertogh, M., & Liu, Y. (۲۰۲۲). Educating engineers of the future: T-shaped professionals for managing infrastructure projects. *Project Leadership and Society*, *3*, ۱۰۰۰۷۱.

Qureshi, K. M., Yadav, A., Garg, R. K., Sachdeva, A., Abdulrahman, A., Alghamd, S. Y., & Qureshi, M. R. N. M. (۲۰۲٤). Are polymer-based smart materials unlocking the path to sustainable manufacturing for a net-zero economy? Current trends and potential applications. *IEEE Access*.

Wang, X., Mazumder, R. K., Salarieh, B., Salman, A. M., Shafieezadeh, A., & Li, Y. (۲۰۲۲). Machine learning for risk and resilience assessment in structural engineering: Progress and future trends. *Journal of Structural Engineering*, *148*(۸), ۰۳۱۲۲۰۰۳.