فصلنامه پژوهش در مدیریت شماره۱- دوره۲- صفحات ۵۷۰-۵۵۶
Journal of Research in Management
Issn: 3060-6241

تأثیر تغییرات اقلیمی بر طراحی و اجرای پروژه‌های عمران شهری و ارائه راهکارهای سازگاری و تاب‌آوری

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

چکیده

تغییرات اقلیمی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های قرن بیست‌ویکم، به‌طور فزاینده‌ای بر ساختار، عملکرد و پایداری شهرها اثر گذاشته و پروژه‌های عمران شهری را با ریسک‌ها و عدم‌قطعیت‌های جدیدی مواجه ساخته است. شهرها به دلیل تمرکز بالای جمعیت، زیرساخت‌ها و فعالیت‌های اقتصادی، بیش از سایر سکونتگاه‌ها در معرض پیامدهای افزایش دما، تشدید بارش‌های حدی، سیلاب‌های شهری، موج‌های گرمایی و در برخی مناطق، بالا آمدن سطح آب دریا قرار دارند. در چنین شرایطی، تداوم رویکردهای سنتی طراحی و اجرای پروژه‌های عمرانی که عمدتاً بر داده‌های تاریخی اقلیم متکی هستند، نمی‌تواند پاسخگوی نیازهای آینده باشد و لزوم بازنگری اساسی در مبانی مهندسی و مدیریتی را آشکار می‌سازد. هدف این مقاله مروری، تحلیل جامع تأثیرات تغییرات اقلیمی بر طراحی و اجرای پروژه‌های عمران شهری و تبیین ضرورت حرکت به سوی رویکردهای سازگاری و تاب‌آوری در ابعاد فنی، مدیریتی و سیاست‌گذاری است. در این راستا، با بهره‌گیری از روش مطالعه مروری-تحلیلی، آثار و پیامدهای اقلیمی بر اجزای مختلف زیرساخت‌های شهری شامل شبکه‌های حمل‌ونقل، مدیریت آب‌های سطحی، مصالح و سازه‌ها، زیرساخت‌های انرژی و پروژه‌های ساحلی مورد بررسی قرار گرفته و راهکارهای نوین مهندسی و مدیریتی برای کاهش آسیب‌پذیری‌ها تحلیل شده است. یافته‌های مطالعه نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی نه‌تنها موجب افزایش نرخ خرابی و هزینه‌های نگهداری زیرساخت‌های شهری می‌شود، بلکه در صورت بی‌توجهی، می‌تواند تداوم خدمات شهری و ایمنی شهروندان را با مخاطره جدی مواجه سازد. در مقابل، به‌کارگیری رویکردهای تاب‌آور، استفاده از مصالح نوین، زیرساخت‌های سبز، فناوری‌های هوشمند و ادغام تحلیل ریسک اقلیمی در تصمیم‌گیری‌های عمرانی، نقش مؤثری در کاهش خسارات و افزایش پایداری پروژه‌ها دارد. در نهایت، نتیجه‌گیری مقاله بر این نکته تأکید دارد که تاب‌آوری اقلیمی باید به یک اصل بنیادین در برنامه‌ریزی، طراحی و اجرای پروژه‌های عمران شهری تبدیل شود تا شهرها بتوانند در برابر چالش‌های اقلیمی آینده، عملکردی ایمن، پایدار و انعطاف‌پذیر داشته باشند.

واژگان کلیدی:تغییرات اقلیمی، عمران شهری، تاب‌آوری شهری، طراحی سازگار با اقلیم، زیرساخت‌های پایدار

چکیده :

پدیده تغییرات اقلیمی، که مشخصه اصلی آن نوسانات نامتعارف در الگوهای آب و هوایی در طولانی‌مدت است، دیگر به عنوان یک تهدید آتی تلقی نمی‌شود، بلکه به یک واقعیت روزمره تبدیل شده که تأثیرات ملموس خود را بر ساختار فیزیکی و عملکردی محیط‌های زیست شهری آشکار می‌سازد. این تغییرات، که عمدتاً ناشی از فعالیت‌های انسان‌محور و انتشار گازهای گلخانه‌ای است، منجر به افزایش دما، تغییر در الگوی بارش‌ها، افزایش شدت وقوع رویدادهای جوی حدی مانند طوفان‌ها و سیلاب‌ها، و در مناطق ساحلی، بالا آمدن سطح آب دریاها شده است؛ این عوامل به طور مستقیم، اجزای حیاتی زیرساخت‌های عمرانی شهرها را تحت فشار قرار داده و کارایی و دوام آن‌ها را به طور جدی به مخاطره می‌اندازند، از این رو، درک سازوکارهای اثرگذاری این عوامل بر پروژه‌های عمرانی شهری به یک ضرورت استراتژیک برای حفظ سرمایه‌های ملی و تضمین تداوم خدمات شهری تبدیل شده است (منافلویان و همکاران، ۲۰۲۰). در این میان، پروژه‌های عمرانی شهری، از شبکه‌های پیچیده آب و فاضلاب گرفته تا سیستم‌های حمل و نقل و سازه‌های مسکونی و خدماتی، به عنوان خط مقدم مواجهه با این تغییرات عمل می‌کنند و هرگونه آسیب‌پذیری در طراحی یا اجرای آن‌ها می‌تواند منجر به خسارات اقتصادی هنگفت، اختلال در خدمات اساسی، و حتی بحران‌های اجتماعی شود که نیازمند رویکردهای پیشگیرانه و مهندسی مبتنی بر اقلیم آینده است تا بتوان از ظرفیت سازه‌ها در برابر سناریوهای نامطمئن محافظت کرد.

تأثیرات تغییرات اقلیمی بر پروژه‌های عمرانی شهری ماهیتی چندوجهی دارد و صرفاً به آسیب‌های فیزیکی محدود نمی‌شود؛ بلکه طیف وسیعی از پیامدهای عملکردی، مالی، و اجتماعی را در بر می‌گیرد؛ به عنوان مثال، افزایش دما می‌تواند بر خواص مصالح ساختمانی، به ویژه آسفالت معابر و ریل‌های راه‌آهن، تأثیر گذاشته و باعث فرسودگی زودرس آن‌ها گردد، در حالی که افزایش شدید بارش‌ها، ظرفیت زهکشی سنتی شهری را به سرعت اشباع می‌کند و موجب سیلاب‌های شهری و آسیب به فونداسیون سازه‌ها می‌شود، امری که نیازمند بازنگری در مبانی هیدرولوژی و طراحی زهکش‌ها است (رحمتی و همکاران، ۲۰۲۳). علاوه بر این، افزایش ریسک‌های مرتبط با بلایای طبیعی، بر فرآیندهای تصمیم‌گیری در مرحله امکان‌سنجی و انتخاب محل پروژه‌ها اثرگذار است و سرمایه‌گذاران و برنامه‌ریزان را وادار می‌سازد تا بازده اقتصادی را در کنار ارزیابی دقیق ریسک‌های اقلیمی بلندمدت در نظر بگیرند، که این امر مستلزم توسعه مدل‌های پیش‌بینی دقیق‌تر و ابزارهای ارزیابی آسیب‌پذیری پیشرفته است که بتوانند عدم قطعیت‌های محیطی را در تحلیل‌های مهندسی لحاظ کنند (بهنوا و پورزرگر، ۲۰۲۱). این لزوم تغییر پارادایم از طراحی صرفاً مبتنی بر داده‌های تاریخی به سمت طراحی تاب‌آور در برابر آینده، قلب تپنده تحقیقات معاصر در حوزه مهندسی عمران شهری محسوب می‌شود.

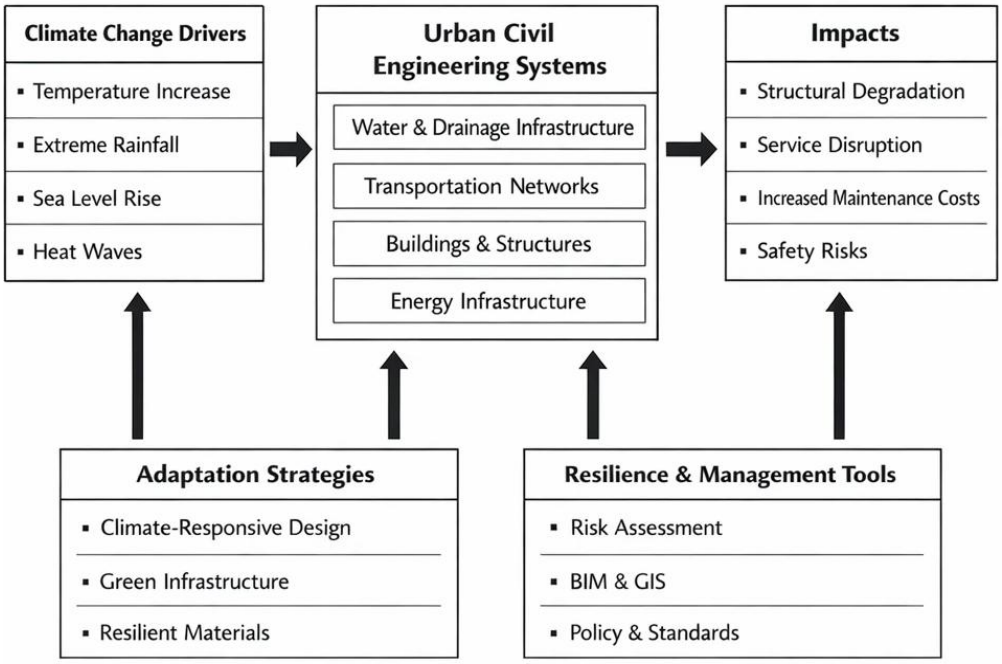
یکی از جنبه‌های حیاتی که تحت تأثیر مستقیم این تغییرات قرار می‌گیرد، مدیریت منابع آبی در شهرهاست؛ افزایش خشکسالی‌ها و کمبود منابع آب شیرین، برنامه‌ریزی برای پروژه‌های زیرساختی مانند شبکه‌های توزیع آب و تصفیه‌خانه‌ها را با چالش‌های جدی مواجه می‌سازد، از طرفی، افزایش طوفان‌ها و بارش‌های سیل‌آسا، بار اضافی بر سیستم‌های جمع‌آوری و دفع فاضلاب وارد کرده و خطر آلودگی محیط زیست شهری را تشدید می‌نماید، این وضعیت ضرورت اتخاذ رویکردهای سازگارانه مانند زیرساخت‌های سبز و راهکارهای مبتنی بر طبیعت (Nature-Based Solutions) را پررنگ‌تر می‌سازد تا بتوانند علاوه بر کارایی فنی، قابلیت جذب و مدیریت بهتر آب‌های سطحی را نیز فراهم آورند (سلطانی‌نژاد و رباطی، ۲۰۲۵). همچنین، تأثیرات اقلیمی بر بخش حمل و نقل شهری غیرقابل انکار است؛ اختلال در عملکرد سامانه‌های ریلی و جاده‌ای به دلیل آب‌گرفتگی یا تخریب سطوح در اثر گرمای شدید، نه تنها زیان‌های اقتصادی مستقیم به بار می‌آورد، بلکه از طریق ایجاد گلوگاه‌های ترافیکی، زنجیره‌های تأمین و دسترسی شهروندان به خدمات ضروری را مختل می‌سازد و لزوم سرمایه‌گذاری در

مسیرهای جایگزین و همچنین استفاده از مصالح مقاوم‌تر در برابر شرایط محیطی متغیر را ضروری می‌سازد (ایلدرآبادی و همکاران، ۲۰۱۹).

نظام‌های مدیریت پروژه‌های عمرانی نیز باید با این واقعیت‌های جدید سازگار شوند؛ فرآیندهای سنتی برنامه‌ریزی که بر اساس فرض ثبات نسبی اقلیم در طول عمر مفید پروژه (مثلاً ۵۰ یا ۱۰۰ سال) بنا شده‌اند، دیگر پاسخگو نیستند و این امر نیازمند به‌روزرسانی مداوم در معیارهای ارزیابی ریسک، روش‌های ساخت، و قراردادهای پیمانکاری است تا انعطاف‌پذیری لازم برای مواجهه با عدم قطعیت‌ها فراهم آید و ریسک‌های احتمالی به صورت شفاف بین کارفرما، پیمانکار، و مشاور تقسیم شود (لطفی و همکاران، ۲۰۲۰). این تغییر پارادایم مدیریتی شامل ادغام هوش مصنوعی و داده‌کاوی برای مدل‌سازی پیش‌بینانه آسیب‌پذیری‌ها و همچنین تقویت ظرفیت‌های محلی برای واکنش سریع در هنگام وقوع رویدادهای حدی است، زیرا سرعت واکنش در کاهش خسارات پس از وقوع بلایا نقشی محوری ایفا می‌کند.

از منظر مقررات و استانداردها، نیاز مبرمی به تدوین آیین‌نامه‌های جدید وجود دارد که به صراحت ملاحظات مربوط به تغییرات اقلیمی و سناریوهای آینده را در طراحی سازه‌های زیربنایی لحاظ کنند؛ عدم وجود این استانداردها موجب می‌شود که پروژه‌های کنونی با سطح مقاومتی طراحی شوند که برای شرایط اقلیمی دهه‌های آینده کافی نخواهد بود و در نتیجه، سرمایه‌گذاری‌های عظیم صورت گرفته در مدت زمان کوتاهی مستهلک شده و نیاز به بازسازی‌های پرهزینه خواهند داشت (تقوایی و همکاران، ۲۰۲۱). این امر نیازمند همکاری بین مراکز تحقیقاتی، سازمان‌های دولتی متولی استانداردسازی، و بخش خصوصی است تا دانش فنی روز دنیا در زمینه مهندسی سازگار با اقلیم به سرعت به بدنه فنی کشور منتقل و اجرایی شود، این فرآیند باید جامع بوده و شامل تمام اجزای چرخه حیات پروژه، از مطالعات اولیه تا بهره‌برداری و تخریب باشد.

تأثیرات روانی و اجتماعی ناشی از اختلالات ناشی از تغییرات اقلیمی بر پروژه‌های عمرانی نیز نباید نادیده گرفته شود؛ شهرهایی که زیرساخت‌های آن‌ها به دلیل وقوع سیل یا طوفان تخریب می‌شوند، با بحران‌های بی‌خانمانی، قطع دسترسی به خدمات درمانی و آموزشی، و از بین رفتن سرمایه‌های اجتماعی مواجه می‌گردند، لذا، طراحی پروژه‌های عمرانی باید فراتر از صرفاً استحکام فیزیکی، بر مفهوم «تاب‌آوری اجتماعی» نیز متمرکز شود تا شهر بتواند پس از شوک‌های اقلیمی به سرعت به شرایط عادی بازگردد و خدمات حیاتی خود را حفظ نماید (هرندی‌زاده و همکاران، ۲۰۱۹). این رویکرد نیازمند ایجاد فضاهای شهری منعطف و چندمنظوره است که در شرایط عادی کاربری متفاوتی داشته باشند اما در زمان بحران بتوانند به عنوان پناهگاه یا مراکز توزیع کمک استفاده شوند.



شکل ۱. مدل مفهومی تأثیر تغییرات اقلیمی بر پروژه‌های عمران شهری و نقش راهبردهای سازگاری و تاب‌آوری در کاهش پیامدها

شکل ۱ یک مدل مفهومی یکپارچه را نمایش می‌دهد که در آن، رابطه میان محرک‌های اصلی تغییرات اقلیمی، سامانه‌های مختلف عمران شهری و پیامدهای حاصل از این تأثیرات به‌صورت ساختاریافته تبیین شده است. در بخش سمت چپ مدل، محرک‌های تغییرات اقلیمی شامل افزایش دما، بارش‌های حدی، موج‌های گرمایی و بالا آمدن سطح آب دریا به‌عنوان عوامل فشار بیرونی معرفی شده‌اند که مستقیماً بر زیرساخت‌های شهری اثر می‌گذارند. این محرک‌ها از طریق پیکان‌های جهت‌دار، سامانه‌های اصلی عمران شهری را تحت تأثیر قرار می‌دهند که در مرکز مدل قرار گرفته‌اند و شامل زیرساخت‌های آب و زهکشی، شبکه‌های حمل‌ونقل، ساختمان‌ها و سازه‌ها و زیرساخت‌های انرژی هستند. در سمت راست مدل، پیامدهای ناشی از این تأثیرات اقلیمی نشان داده شده است که شامل تخریب تدریجی سازه‌ها، اختلال در تداوم خدمات شهری، افزایش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات و تشدید ریسک‌های ایمنی برای شهروندان می‌باشد. در بخش پایینی مدل، دو دسته راهبرد مکمل برای مواجهه با این چالش‌ها ارائه شده است؛ راهبردهای سازگاری اقلیمی مانند طراحی پاسخ‌گو به اقلیم، زیرساخت‌های سبز و استفاده از مصالح تاب‌آور، و همچنین ابزارهای مدیریتی و افزایش تاب‌آوری شامل ارزیابی ریسک، به‌کارگیری فناوری‌های BIM و GIS و تدوین سیاست‌ها و استانداردهای مناسب. پیکان‌های بازگشتی از این راهبردها به سامانه‌های عمران شهری بیانگر نقش آن‌ها در کاهش آسیب‌پذیری و افزایش ظرفیت سازگاری پروژه‌های عمرانی در برابر سناریوهای اقلیمی آینده است. این مدل مفهومی به‌طور مستقیم با مباحث مطرح‌شده در بخش مقدمه مقاله هم‌راستا بوده و چارچوب تحلیلی روشنی برای درک منطق کلی پژوهش فراهم می‌کند.

در مجموع، پروژه عمرانی شهری در عصر تغییرات اقلیمی، دیگر صرفاً یک مسئله فنی مهندسی نیست، بلکه یک موضوع پیچیده میان‌رشته‌ای است که سیاست‌گذاری، علم محیط زیست، جامعه‌شناسی، و مدیریت ریسک را در هم می‌آمیزد تا اطمینان حاصل شود که توسعه شهری نه تنها پایدار باشد، بلکه بتواند در برابر نوسانات شدید آینده نیز مقاومت کند و این

امر مستلزم بازنگری اساسی در تمامی مراحل تصمیم‌گیری و اجرا در حوزه عمران شهری است (شفقت و همکاران، ۲۰۱۹). پرداختن به این چالش‌ها از طریق رویکردهای نوآورانه و انطباقی، کلید تضمین بقا و شکوفایی شهرهای آینده در جهانی با عدم قطعیت‌های فزاینده محیطی خواهد بود.

۲: مبانی نظری تغییرات اقلیمی و زیرساخت‌های شهری

تغییرات اقلیمی، که ناشی از تغییرات بلندمدت در دما و الگوهای آب و هوایی است، از طریق مکانیزم‌های متعددی بر عملکرد و طول عمر پروژه‌های عمرانی شهری اثر می‌گذارد؛ این مکانیزم‌ها اغلب از طریق افزایش فراوانی و شدت پدیده‌های حدی مانند سیل، خشکسالی، و نوسانات شدید حرارتی اعمال می‌شوند که طراحی‌های سنتی، که غالباً بر پایه داده‌های تاریخی و فرضیات اقلیمی ثابت در طول دوره عمر مفید سازه بنا شده‌اند، را ناکارآمد می‌سازند (بهزادپور و خاک‌زند، ۲۰۲۱). به عنوان مثال، افزایش دماهای حداکثر روزانه مستقیماً بر مقاومت آسفالت در برابر تغییر شکل (شیارشدگی و تورق) و همچنین بر اتصالات قطعات پیش‌ساخته بتنی تأثیر می‌گذارد، در حالی که تغییرات در رژیم بارش، سیستم‌های زهکشی شهری را که برای بازه‌های بازگشت مشخصی طراحی شده‌اند، با افزایش حجم آب مواجه کرده و خطر آب‌گرفتگی معابر و آسیب به زیرساخت‌های زیرزمینی را به شدت افزایش می‌دهد، که این موضوع نیازمند استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی اصلاح‌شده است.

یکی از مهم‌ترین مفاهیم در این زمینه، «تاب‌آوری اقلیمی» (Climate Resilience) است که به توانایی سیستم‌های شهری برای جذب شوک‌های ناشی از تغییرات اقلیمی، بازیابی سریع پس از وقوع اختلال، و سازگاری برای کاهش آسیب‌پذیری‌های آتی اشاره دارد و این مفهوم باید به عنوان یک هدف اصلی در هر پروژه عمرانی جدید لحاظ شود، به ویژه در طراحی سازه‌های زیربنایی حیاتی مانند پل‌ها، تونل‌ها، و تأسیسات انرژی که دوره بهره‌برداری طولانی‌مدت دارند (طهماسیان و سواک، ۲۰۲۰). مفهوم تاب‌آوری فراتر از صرفاً مقاوم‌سازی فیزیکی است و شامل جنبه‌های مدیریتی و سازمانی نیز می‌شود؛ به این معنا که نهادهای شهری باید توانایی پیش‌بینی، برنامه‌ریزی، و اجرای مداخلات سریع در پاسخ به هشدارهای اقلیمی را داشته باشند تا از تبدیل شدن یک رویداد آب و هوایی به یک فاجعه شهری جلوگیری نمایند.

اثرات افزایش سطح آب‌های زیرزمینی (Groundwater Rise) ناشی از تغییر در الگوهای نفوذ آب و همچنین افزایش احتمالی نفوذ آب دریا در مناطق ساحلی، چالش دیگری است که به طور خاص بر فونداسیون سازه‌های شهری، دیواره‌های حائل، و زیرزمین‌ها تأثیر می‌گذارد و می‌تواند منجر به افزایش فشار جانبی، خوردگی میلگردها، و در نهایت، کاهش ایمنی سازه در طول زمان شود (شکری و نجفی، ۲۰۲۴). این پدیده نیازمند بازنگری در طراحی عمق فونداسیون‌ها، اجرای سیستم‌های زهکشی زیرسطحی پیشرفته، و استفاده از مصالح مقاوم در برابر رطوبت و نمک است؛ در مناطقی که پیش‌بینی می‌شود سطح آب‌های زیرزمینی افزایش یابد، مهندسان باید از مدل‌سازی ژئوتکنیکی پیشرفته برای ارزیابی تغییرات تنش مؤثر در خاک و تأثیر آن بر ظرفیت باربری سازه استفاده نمایند. در حوزه حمل و نقل، پروژه‌های عمرانی شهری باید برای تحمل شرایط حدی طراحی شوند که پیش از این نادر تلقی می‌شدند؛ برای مثال، راه‌آهن و بزرگراه‌ها باید قادر به حفظ عملکرد خود در برابر دمای بیش از ۵۰ درجه سانتی‌گراد باشند و همچنین، سیستم‌های تخلیه آب سطحی در تونل‌ها و زیرگذرها باید ظرفیتی بیش از بارش‌های سیل‌آسای حداکثر یک‌صدساله کنونی را پوشش دهند، که این امر مستلزم به‌کارگیری رویکردهای مهندسی متناسب با سناریوهای اقلیمی پیش‌بینی‌شده برای ۵۰ سال آینده است (صفری و همکاران، ۲۰۲۵). شکست در این انطباق،

نه تنها به معنای خسارت مستقیم به زیرساخت است، بلکه منجر به اختلالات زنجیره‌ای در اقتصاد شهری و کاهش کیفیت زندگی شهروندان خواهد شد، لذا ادغام تحلیل ریسک اقلیمی در مطالعات امکان‌سنجی پروژه‌ها امری حیاتی است.

تأثیرات تغییر اقلیم بر مواد و مصالح ساختمانی نیز قابل توجه است؛ مصالحی که در برابر چرخه ذوب و انجماد یا خوردگی شیمیایی ناشی از آلودگی‌های محیطی تشدید شده توسط شرایط اقلیمی جدید حساس هستند، نیاز به جایگزینی با مواد پایدارتر و مقاوم‌تر دارند (صدیری و همکاران، ۲۰۲۴). این مسئله، هزینه اولیه ساخت را افزایش می‌دهد، اما در بلندمدت با کاهش نیاز به تعمیرات مکرر و افزایش طول عمر مفید پروژه، به صرفه خواهد بود؛ برنامه‌ریزی برای استفاده از بتن‌های اصلاح‌شده، آسفالت‌های اصلاح‌شده با پلیمر، و پوشش‌های محافظتی پیشرفته‌تر، بخشی از استراتژی‌های سازگاری فنی محسوب می‌شود. از سوی دیگر، زیرساخت‌های حیاتی مانند شبکه‌های توزیع برق و گاز که در معرض آسیب‌پذیری ناشی از طوفان‌های شدید و وزش بادهای قوی قرار دارند، نیازمند تقویت سازه‌ای و یا دفن شدن در زیر زمین هستند تا از تأثیرات مستقیم عوامل جوی در امان بمانند (گیاه‌چی و همکاران، ۲۰۲۳). تصمیم‌گیری در مورد دفن یا هوایی بودن این تأسیسات باید بر اساس ارزیابی جامع ریسک‌های اقلیمی آتی در هر منطقه شهری صورت پذیرد؛ مناطقی که در معرض طوفان‌های با سرعت باد بالا یا یخبندان‌های شدید هستند، به طور قطع نیازمند رویکردهای زیرزمینی خواهند بود، هرچند که هزینه اولیه این امر ممکن است بالاتر از روش‌های سنتی باشد.

مفهوم «مهندسی سازگار با اقلیم» (Climate-Adaptive Engineering) ایجاب می‌کند که تحلیل‌های مهندسی از مدل‌های ایستا به مدل‌های پویا و مبتنی بر شبیه‌سازی‌های زمانی تغییر یابند تا بتوان تأثیر فرسایش تدریجی و همچنین اثرات ناگهانی بلایای اقلیمی را بر عملکرد سازه در طول عمر طراحی آن مدل‌سازی کرد (زندی و همکاران، ۲۰۲۳). این رویکرد نیازمند استفاده از نرم‌افزارهای پیشرفته مدل‌سازی چندفیزیکی است که بتوانند همزمان اثرات حرارتی، هیدرولوژیکی، و مکانیکی ناشی از تغییرات اقلیمی را بر روی اجزای مختلف پروژه عمرانی شبیه‌سازی نمایند. بنابراین، درک عمیق از مبانی نظری تغییرات اقلیمی و تبدیل دانش محیط زیستی به الزامات فنی مشخص برای پروژه‌های عمرانی، سنگ بنای توسعه زیرساخت‌های شهری تاب‌آور در آینده محسوب می‌شود؛ بدون این پایه نظری، تلاش‌های عمرانی صرفاً واکنشی خواهند بود و قادر به پیشگیری از خسارات آتی نخواهند بود (محمدی‌زاده و میرزاده، ۲۰۲۵).

۳: تحلیل تأثیرات سیلاب‌های شهری و مدیریت آب‌های سطحی

افزایش شدت و تناوب بارش‌های شدید، به ویژه در نواحی شهری با سطوح نفوذپذیری پایین به دلیل غالب بودن سطوح بتنی و آسفالتی، منجر به افزایش شدید رواناب سطحی و وقوع سیلاب‌های شهری می‌شود که یکی از مخرب‌ترین مخاطرات اقلیمی برای پروژه‌های عمرانی محسوب می‌گردد (رسول‌زاده و مشاری، ۲۰۲۵). در این شرایط، شبکه‌های جمع‌آوری و دفع آب‌های سطحی که بر اساس منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی تاریخی طراحی شده‌اند، به سرعت از ظرفیت اسمی خود فراتر رفته و منجر به آب‌گرفتگی معابر، خسارت به فونداسیون سازه‌ها، و بالا آمدن آب در تأسیسات زیرزمینی می‌شوند؛ این امر نشان می‌دهد که رویکرد سنتی «سیستم‌های زهکشی محصور» دیگر پاسخگوی نیازهای اقلیمی جدید نیست و باید جای خود را به رویکردهای جامع‌تر دهد. یکی از مهم‌ترین تغییرات لازم در پروژه‌های عمرانی، بازنگری در هیدرولوژی شهری و ظرفیت‌دهی سیستم‌های زهکشی است؛ این بازنگری باید بر اساس سناریوهای بارش شدید آینده انجام پذیرد، نه صرفاً داده‌های گذشته، که این امر مستلزم استفاده از مدل‌های جهانی و منطقه‌ای تغییرات اقلیمی برای استخراج پارامترهای جدید برای طراحی سیلاب‌ها است (پرویش و اسدی، ۲۰۲۴). در بسیاری از شهرها، افزایش سطح آب‌های زیرزمینی به دلیل نفوذ بیشتر آب باران

در مناطقی که پیشتر زهکشی طبیعی خوبی داشتند، همراه با افزایش رواناب سطحی، مشکل مضاعفی ایجاد می‌کند؛ زیرا این امر، فشار هیدرواستاتیک بر دیواره‌های زیرزمینی مانند پارکینگ‌های چندطبقه و تونل‌ها را افزایش داده و خطر آسیب‌پذیری سازه‌ای را تشدید می‌نماید.

رویکرد جایگزین و سازگارانه، که به طور فزاینده‌ای در پروژه‌های نوین عمرانی مطرح است، اتخاذ استراتژی‌های «مدیریت آب‌های سطحی مبتنی بر طبیعت» (Nature-Based Solutions for Stormwater Management) است؛ این راهکارها شامل ایجاد باغ‌بام‌ها، فضاهای سبز نفوذپذیر، حوضچه‌های آبگیر موقت (Detention Ponds) و کانال‌های طراحی‌شده با پوشش گیاهی (Swales) هستند که هدفشان نه صرفاً دفع سریع آب، بلکه مدیریت آهسته و نفوذ تدریجی آن در زمین است (منافلویان و همکاران، ۲۰۲۰). اجرای این زیرساخت‌های سبز، علاوه بر کاهش حجم رواناب ورودی به سیستم‌های محصور، مزایای جانبی از جمله بهبود کیفیت هوا، کاهش اثر جزیره حرارتی شهری، و افزایش فضاهای عمومی با کیفیت را برای شهر فراهم می‌آورد. در پروژه‌های بزرگ زیرساختی مانند احداث پل‌ها و بزرگراه‌های شهری، تغییرات در شرایط هیدرولیکی رودخانه‌ها و مسیل‌های مجاور، نیازمند ارزیابی مجدد میزان آب‌دهی مجاز برای پایه‌ها و عرض دهانه‌های پل‌ها است؛ اگر نرخ فرسایش بستر رودخانه (Scour Rate) به دلیل افزایش دبی سیلابی افزایش یابد، پایداری فیزیکی پایه‌های پل به خطر می‌افتد و احتمال فروریختن آن در رویدادهای بزرگ تشدید می‌شود (رحمتی و همکاران، ۲۰۲۳). لذا، در طراحی مجدد یا مقاوم‌سازی پل‌ها، باید حفاظت از پایه‌ها در برابر فرسایش شدید ناشی از سیلاب‌های آتی لحاظ شود و این ممکن است شامل استفاده از روش‌های مهندسی ژئوتکنیک پیشرفته برای تثبیت خاک اطراف پی‌ها باشد.

مسئله مهم دیگر در پروژه‌های عمرانی، آسیب‌پذیری شبکه‌های زیرزمینی توزیع آب شرب و فاضلاب در هنگام سیلاب است؛ آب‌های سطحی آلوده می‌توانند از طریق اتصالات ضعیف یا ترک‌های موجود در لوله‌ها به شبکه آب شرب نفوذ کرده و خطر شیوع بیماری‌های منتقله از طریق آب را افزایش دهند، در حالی که سیلاب شدید می‌تواند باعث شکستگی لوله‌های فاضلاب و انتشار آلودگی در محیط شود (بهنوا و پورزرگر، ۲۰۲۱). برای مقابله با این چالش، پروژه‌های نوسازی شبکه‌های زیرزمینی باید اولویت‌بندی شده و از لوله‌های با مقاومت بالاتر در برابر نفوذ و فشارهای خارجی، و همچنین سیستم‌های بازرسی پیشرفته (مانند روباتیک داخلی) برای تشخیص زودهنگام ترک‌ها استفاده نمایند.

برنامه‌ریزی برای پروژه‌های عمرانی در حوضه‌های آبریز شهری نیازمند یک رویکرد یکپارچه و فرابخشی است؛ ایجاد تضاد بین طراحی شهری با نفوذپذیری بالا و در عین حال، نیاز به جاده‌ها و پیاده‌روهای مقاوم در برابر تردد، یک چالش مهندسی است که باید با استفاده از مصالح ترکیبی و فناوری‌های نوین حل شود (سلطانی‌نژاد و رباطی، ۲۰۲۵). به عنوان مثال، استفاده از بتن‌های متخلخل یا سنگفرش‌های نفوذپذیر در مناطقی با بار ترافیکی کم، می‌تواند به کاهش حجم رواناب کمک کند، بدون اینکه عملکرد ضروری معابر مختل شود؛ این رویکرد نیازمند مدیریت دقیق نقشه‌های کاربری اراضی در ارتباط با توپوگرافی شهر است. در پروژه‌های ساختمانی بزرگ که نیازمند حفاری عمیق هستند، مانند ساخت مترو یا زیرزمین‌های بزرگ، مدیریت آب‌های زیرزمینی تشدید شده ناشی از تغییرات اقلیمی یک ریسک عمده محسوب می‌شود؛ اگرچه دیواره‌های دیافراگمی و شمع‌ها باید برای تحمل فشارهای هیدرواستاتیک در نظر گرفته شوند، اما نوسانات مکرر در سطح آب زیرزمینی می‌تواند منجر به فرسایش خاک در زیر پی‌ها (Piping) و به خطر افتادن پایداری سازه شود (ایلدرآبادی و همکاران، ۲۰۱۹). برای کاهش این ریسک، استفاده از روش‌های تزریق آب‌بند دائمی یا طراحی سیستم‌های پمپاژ دائمی و قابل اطمینان برای کنترل سطح آب در محدوده ایمن سازه، بخشی از طرح‌های مهندسی سازگار خواهند بود. در نهایت، آموزش و آگاهی‌بخشی به تیم‌های اجرایی و ناظران پروژه‌ها در مورد اهمیت طراحی برای شرایط حدی اقلیمی بسیار حیاتی است؛ زیرا کوچک‌ترین خطای

محاسباتی در ظرفیت‌دهی زهکش‌ها یا انتخاب نوع مصالح مقاوم در برابر رطوبت در شرایط سیلابی شدید می‌تواند کل پروژه را به یک نقطه شکست تبدیل کند و سرمایه‌گذاری کلان را تحت‌الشعاع قرار دهد (لطفی و همکاران، ۲۰۲۰). توجه به جزئیات طراحی زهکش‌ها، از جمله شیب‌بندی صحیح، تعداد و محل مناسب دریچه‌های جمع‌آوری، و اتصال مؤثر بین سیستم‌های زیرسطحی و فضاهای سبز طراحی‌شده، تضمین‌کننده اثربخشی کلی راهکارهای مدیریت سیلاب شهری است.

۴: تأثیر افزایش دما و موج‌های حرارتی بر مصالح و عملکرد سازه‌ها

افزایش مداوم میانگین دمای جهانی و به تبع آن، افزایش فرکانس و شدت موج‌های گرمایی شهری، تأثیرات منفی و غالباً پنهانی بر عملکرد و دوام طولانی‌مدت پروژه‌های عمرانی شهری اعمال می‌کند که فراتر از مسائل آسایش حرارتی شهروندان است و مستقیماً به سلامت ساختاری سازه‌ها مربوط می‌شود (تقوایی و همکاران، ۲۰۲۱). یکی از آشکارترین تأثیرات، بر عملکرد روسازی‌ها، به ویژه آسفالت در شبکه‌های حمل و نقل، نمایان می‌شود؛ افزایش دماهای محیطی، دمای آسفالت را به مراتب بالاتر برده و باعث نرم شدن و کاهش مقاومت برشی آن می‌شود که نتیجه آن شیارشدگی (Rutting)، تورق (Shoving)، و افزایش ترک‌های ناشی از خستگی زودرس خواهد بود و نیازمند تعمیرات اساسی و پرهزینه‌تر در مقایسه با شرایط اقلیمی گذشته است. تأثیرات حرارتی بر سازه‌های بتنی و فلزی نیز بسیار مهم است؛ اگرچه مصالح ساختمانی برای تحمل تنش‌های حرارتی ناشی از تغییرات روزانه دما طراحی می‌شوند، اما افزایش طولانی‌مدت دمای متوسط محیط، باعث انبساط حرارتی دائمی در اجزای سازه می‌شود که در صورت عدم لحاظ شدن در طراحی درزهای انبساط یا اتصالات، می‌تواند منجر به ایجاد تنش‌های داخلی مزمن، آسیب به پوشش بتنی، و تسریع در خوردگی میلگردها گردد (هرندی‌زاده و همکاران، ۲۰۱۹). همچنین، در سازه‌هایی که به طور مستقیم در معرض تابش شدید خورشید قرار دارند، مانند دیوارهای خارجی و سقف‌ها، افزایش نوسانات دمایی می‌تواند چرخه‌های انقباض و انبساط را تشدید کرده و منجر به خستگی سریع‌تر مصالح و کاهش نفوذناپذیری پوشش‌های عایق شود.

در زمینه پروژه‌های زیرزمینی، مانند تونل‌ها و سیستم‌های مترو، افزایش دمای محیطی و همچنین افزایش دمای ناشی از عملکرد تجهیزات الکتریکی، می‌تواند دمای داخل تونل را به سطوح خطرناکی برساند که نه تنها برای مسافران و کارکنان آزاردهنده است، بلکه بر عملکرد تجهیزات حساس الکترونیکی و ترمزها تأثیر منفی می‌گذارد و نیاز به سیستم‌های تهویه و خنک‌کاری پرهزینه و پرمصرف را افزایش می‌دهد (شفقت و همکاران، ۲۰۱۹). مدیریت حرارتی در این فضاها باید با در نظر گرفتن افزایش دمای ورودی هوای تازه ناشی از گرمایش جهانی، بازبینی شود تا اطمینان حاصل گردد که حداقل استانداردهای ایمنی و آسایش در طول عمر پروژه حفظ می‌شوند. یکی از راهکارهای اساسی در پروژه‌های عمرانی برای مقابله با اثرات گرمایی، استفاده از «مصالح خنک» (Cool Materials) است؛ این مواد شامل رنگ‌های روشن یا پوشش‌های با بازتابندگی بالا (High Albedo) برای سقف‌ها و روسازی‌ها هستند که می‌توانند تابش خورشیدی را به جای جذب، به محیط بازتابانده و دمای سطح و لایه‌های زیرین سازه را کاهش دهند (بهزادپور و خاک‌زند، ۲۰۲۱). برای روسازی‌ها، استفاده از آسفالت‌های اصلاح‌شده با پلیمرهای با کارایی بالا که مقاومت بهتری در برابر تغییر شکل در دماهای بالا دارند، یا استفاده از سنگفرش‌های نفوذپذیر که اجازه خنک‌سازی از طریق تبخیر آب ذخیره‌شده را می‌دهند، می‌تواند کمک‌کننده باشد.

تأثیر موج‌های گرمایی بر پایداری ژئوتکنیکی نیز قابل توجه است؛ اگرچه این اثر کمتر مورد توجه قرار می‌گیرد، اما گرمای شدید می‌تواند بر میزان رطوبت خاک‌های سطحی تأثیر بگذارد و منجر به انقباض و نشست‌های نامتوازن در مناطقی با خاک‌های رسی حساس شود، که این امر به فونداسیون سازه‌های کم‌ارتفاع آسیب می‌رساند (طهماسیان و سواک، ۲۰۲۰).

همچنین، در مناطق خشک، گرمای شدید می‌تواند فرآیند خشک شدن سریع‌تر بتن تازه را تسریع کرده و منجر به ترک‌های پلاستیک و کاهش مقاومت نهایی بتن شود، که این موضوع نیازمند برنامه‌ریزی دقیق‌تر برای عمل‌آوری (Curing) بتن در پروژه‌های ساختمانی در ماه‌های گرم سال است. پروژه‌های زیربنایی مانند خطوط لوله نفت و گاز یا انتقال نیرو که به صورت هوایی نصب می‌شوند، در معرض خطر افزایش افتادگی (Sagging) ناشی از انبساط حرارتی قرار دارند که می‌تواند فاصله ایمن آن‌ها از سطح زمین یا از سایر خطوط را کاهش داده و خطر اتصال کوتاه یا آتش‌سوزی را افزایش دهد (شکری و نجفی، ۲۰۲۴). برای مدیریت این ریسک، نیاز به استفاده از کابل‌ها و موادی است که ضریب انبساط حرارتی کمتری داشته باشند، یا افزایش ارتفاع دکل‌ها و برج‌ها در مناطقی که پیش‌بینی افزایش شدید دما می‌شود، تا حاشیه اطمینان کافی حفظ گردد. در نهایت، درک این نکته ضروری است که اثرات دمایی غالباً انباشته و تجمعی هستند؛ تنش‌های حرارتی جزئی در طول سال‌ها، به مرور زمان باعث تخریب تدریجی اجزای سازه می‌شود و هزینه نگهداری و تعمیرات را به شکلی نامحسوس اما قابل توجه افزایش می‌دهد (صفری و همکاران، ۲۰۲۵). بنابراین، ادغام تحلیل‌های دینامیک حرارتی در مدل‌سازی عمر سازه، از مراحل اولیه طراحی پروژه‌های عمرانی شهری، دیگر یک گزینه نیست بلکه یک الزام برای تضمین پایداری زیرساخت‌های شهری در برابر محیط‌های گرم‌تر آینده محسوب می‌شود.

۵: ریسک‌های مرتبط با افزایش سطح دریا و فرسایش ساحلی در پروژه‌های بندری و ساحلی

تغییرات اقلیمی، به ویژه در مناطق شهری ساحلی، با افزایش سطح متوسط دریاها (Sea Level Rise - SLR) و تشدید فرسایش ساحلی و طوفان‌های مخرب ساحلی، پروژه‌های عمرانی بزرگی مانند بنادر، اسکله‌ها، دیوارهای حفاظتی، و تأسیسات ساحلی را با چالش‌های وجودی مواجه ساخته است (صدیری و همکاران، ۲۰۲۴). این افزایش سطح آب، نه تنها به معنای غرق شدن دائمی بخشی از اراضی و زیرساخت‌های کم‌ارتفاع است، بلکه مهم‌تر از آن، شرایط هیدرودینامیکی سواحل را تغییر داده و نفوذ آب شور (Saltwater Intrusion) به آبخوان‌های زیرزمینی و تأسیسات زیرساختی نزدیک به ساحل را تشدید می‌کند.

افزایش سطح دریا به طور مستقیم بر طراحی سازه‌های دفاعی ساحلی مانند موج‌شکن‌ها و دیوارهای دریایی تأثیر می‌گذارد؛ این سازه‌ها باید اکنون برای ارتفاع موج و تراز آب بالاتر در افق‌های زمانی ۵۰ تا ۱۰۰ ساله طراحی شوند، که این امر نیازمند افزایش ارتفاع تاج سازه، تقویت مقطع سازه‌ای، و انتخاب مصالح مقاوم در برابر خوردگی ناشی از محیط شور است (گیاه‌چی و همکاران، ۲۰۲۳). در مواردی که افزایش سطح دریا از ظرفیت فیزیکی سازه‌های دفاعی موجود فراتر رود، پروژه‌های عمرانی باید به سمت راهکارهای مبتنی بر طبیعت مانند احیای تپه‌های شنی، ایجاد تالاب‌های حائل، یا استفاده از سیستم‌های «ساحل نرم» (Soft Shoreline Protection) گرایش پیدا کنند تا بتوانند انرژی امواج را به طور طبیعی مستهلک سازند. در پروژه‌های زیرساختی حمل و نقل مانند پایانه‌های کانتینری، اسکله‌ها، و خطوط ریلی ساحلی، افزایش سیلاب‌های ناشی از طوفان و امواج بزرگ‌تر، ریسک تخریب فیزیکی و اختلال طولانی‌مدت در عملیات بندری را به شدت افزایش می‌دهد (زندی و همکاران، ۲۰۲۳). این امر نیازمند ارتقاء سطح ارتفاع کف تمام تجهیزات عملیاتی، از جمله جرثقیل‌ها و تأسیسات اداری، و همچنین تقویت اتصالات سازه‌ای تأسیسات بندری به زمین اصلی شهر است تا از آسیب‌پذیری ناشی از جابجایی بستر در اثر فرسایش زیرین جلوگیری شود.

نفوذ آب شور به زیرساخت‌های شهری در نزدیکی ساحل، یک مشکل مهندسی پنهان اما جدی است؛ آب شور می‌تواند به سازه‌های بتنی، به ویژه اگر دارای ترک‌های مویی باشند، نفوذ کرده و فرآیند خوردگی فولادهای مسلح‌کننده را به شدت

تسریع بخشد، که این امر طول عمر مفید سازه‌های پل‌ها، دیوارهای حائل، و حتی فونداسیون ساختمان‌ها را در مناطق ساحلی به شدت کاهش می‌دهد (محمدی‌زاده و میرزاده، ۲۰۲۵). برای مقابله با این تهدید، در پروژه‌های جدید استفاده از بتن با نفوذپذیری بسیار پایین، میلگردهای اپوکسی یا فایبرگلاس، و یا سیستم‌های حفاظت کاتدی برای سازه‌های بحرانی ضروری است. پروژه‌های ساخت و ساز در مناطقی که پیش‌بینی می‌شود در آینده تحت تأثیر بالا آمدن سطح دریا قرار گیرند، باید با بازنگری در ارزش‌گذاری ریسک و زمان بازگشت سرمایه (Payback Period) همراه باشند؛ اگر عمر مفید مورد انتظار یک سازه ۵۰ سال باشد، اما پیش‌بینی شود که ظرف ۳۰ سال آینده بخشی از آن به طور مکرر زیر آب برود، توجیه اقتصادی پروژه زیر سؤال می‌رود (رفسنجانی‌اصل و همکاران، ۲۰۲۵). این امر ایجاب می‌کند که برنامه‌ریزی‌های شهری شامل ایجاد «مناطق حائل اقلیمی» و عقب‌نشینی تدریجی از خطوط ساحلی آسیب‌پذیر باشد، حتی اگر این امر مستلزم جابجایی یا تغییر کاربری پروژه‌های عمرانی فعلی باشد.

در طراحی سازه‌های جدید، مفهوم «پذیرش ریسک» به جای «حذف ریسک» باید مورد توجه قرار گیرد؛ به این معنا که باید پذیرفت که برخی رویدادهای حدی غیرقابل پیش‌بینی یا بسیار پرهزینه برای جلوگیری هستند، بنابراین، پروژه‌ها باید به گونه‌ای طراحی شوند که در صورت وقوع، به راحتی قابل بازیابی و تعمیر باشند (صدیری و همکاران، ۲۰۲۴). برای مثال، ساخت زیرساخت‌های متحرک یا ماژولار که قابلیت بلند شدن یا انتقال آسان‌تر به مناطق امن‌تر را دارند، می‌تواند راهکاری برای سازگاری با عدم قطعیت‌های بلندمدت سطح دریا باشد. تأثیرات مستقیم سیلاب‌های طوفانی بر زیرساخت‌های حیاتی مانند تأسیسات آب شیرین‌کن، ایستگاه‌های پمپاژ، و شبکه‌های برق در مناطق ساحلی به دلیل تهاجم آب شور و رسوبات، نیازمند تقویت این تأسیسات از طریق بالا بردن موقعیت آن‌ها (Elevation) و محافظت از آن‌ها در برابر نیروی عظیم موج است (گیاه‌چی و همکاران، ۲۰۲۳). در این پروژه‌ها، ملاحظات ژئوتکنیکی مربوط به تثبیت بستر در برابر شسته شدن (Scouring) در اثر جریان‌های قوی‌تر اهمیت مضاعفی پیدا می‌کند. در مجموع، پروژه‌های عمرانی ساحلی در برابر تغییرات اقلیمی، به ویژه افزایش سطح دریا، نیازمند یک رویکرد چندلایه هستند که شامل اقدامات سخت‌افزاری (مهندسی سازه)، راهکارهای نرم (برنامه‌ریزی کاربری زمین)، و سیاست‌های مدیریتی (بیمه و مدیریت بحران) باشد تا بتواند پایداری اقتصادی و اجتماعی این مناطق استراتژیک را تضمین کند (زندی و همکاران، ۲۰۲۳).

۶: تأثیرات بر شبکه‌های حمل و نقل شهری و زیرساخت‌های انرژی

تغییرات اقلیمی، شبکه‌های پیچیده حمل و نقل شهری را که شریان‌های حیاتی اقتصاد و خدمات‌رسانی هستند، از طریق چندین مسیر تحت تأثیر قرار می‌دهد که این امر نیازمند بازنگری بنیادین در طراحی و نگهداری این زیرساخت‌ها است (رسول‌زاده و مشاری، ۲۰۲۵). همانطور که پیشتر اشاره شد، افزایش دمای محیطی به طور مستقیم بر عملکرد روسازی‌ها تأثیر می‌گذارد، اما علاوه بر این، شبکه‌های ریلی شهری نیز در معرض تنش‌های حرارتی قرار دارند؛ افزایش دمای ریل‌ها می‌تواند منجر به ازدیاد طول آن‌ها، ایجاد کمانش (Buckling) و در نتیجه، توقف یا کندی حرکت قطارها شود، که این امر برای سیستم‌های شهری با فرکانس بالای حرکت بسیار مخرب است.

برای زیرساخت‌های ریلی، راهکارهای سازگارانه شامل استفاده از خطوط ریلی با قابلیت جذب تغییرات طول حرارتی بیشتر یا استفاده از ریل‌های از پیش تنیده شده است که بتوانند تغییرات دما را بهتر مدیریت کنند، همچنین، مدیریت دقیق‌تر سرعت قطارها در روزهای گرم شدید برای جلوگیری از آسیب‌های ساختاری به شبکه ضروری است (پرویش و اسدی، ۲۰۲۴). علاوه بر این، سیستم‌های انتقال قدرت و سیگنالینگ الکتریکی که در محیط‌های شهری نصب شده‌اند، به دلیل افزایش دمای

محیط، کارایی خود را از دست می‌دهند و نیاز به خنک‌کاری بیشتر دارند که این امر مصرف انرژی را افزایش داده و در عین حال، ریسک خرابی تجهیزات را در اوج نیاز به خدمات‌رسانی افزایش می‌دهد. در بخش زیرساخت‌های توزیع انرژی، به ویژه شبکه‌های برق شهری، طوفان‌ها و بادهای شدیدتر ناشی از تغییرات اقلیمی، اصلی‌ترین عامل آسیب‌رسان به خطوط انتقال هوایی هستند که منجر به قطع برق گسترده و اختلال در خدمات‌رسانی به کل شهر می‌شود (منافلویان و همکاران، ۲۰۲۰). برای افزایش تاب‌آوری این شبکه، پروژه‌های عمرانی باید به سمت دفن کردن خطوط برق در زیر زمین در مسیرهای پرخطر حرکت کنند، یا در مسیرهای هوایی، از دکل‌ها و کابل‌هایی با مقاومت مکانیکی بسیار بالاتر در برابر بارهای جانبی باد استفاده شود.

زیرساخت‌های انرژی شهری، به ویژه تأسیسات حساس مانند ایستگاه‌های انتقال برق و مراکز توزیع گاز، به شدت در برابر سیلاب‌های شهری آسیب‌پذیر هستند؛ بسیاری از این تأسیسات در مناطق کم‌ارتفاع یا در نزدیکی مسیل‌های آب قرار دارند و غوطه‌ور شدن آن‌ها در آب می‌تواند منجر به اتصال کوتاه، انفجار، یا آلودگی محیط زیست شود (رحمتی و همکاران، ۲۰۲۳). برای تضمین تداوم خدمات، برنامه‌های مقاوم‌سازی باید شامل بالا بردن ارتفاع کف تأسیسات، ایجاد دیوارهای سیل‌بند موقت یا دائمی در اطراف آن‌ها، و همچنین انتقال تجهیزات حساس به طبقات بالاتر باشد. تأثیر تغییرات اقلیمی بر زیرساخت‌های آبی (آب شرب) نیز از طریق افزایش دمای آب‌های سطحی و کاهش کیفیت آن، و همچنین افزایش تقاضای مصرف به دلیل گرمای شدید، خود را نشان می‌دهد؛ این امر بر طراحی مخازن و شبکه‌های توزیع فشار وارد می‌کند و نیاز به افزایش ظرفیت تصفیه و نگهداری آب در شرایط دمایی نامطلوب را ایجاد می‌نماید (بهنوا و پورزرگر، ۲۰۲۱). در طراحی پروژه‌های جدید تصفیه‌خانه، باید سیستم‌هایی تعبیه شوند که بتوانند نوسانات دمایی ورودی آب را مدیریت کرده و کیفیت خروجی را ثابت نگه دارند، که این معمولاً مستلزم استفاده از فناوری‌های پیشرفته‌تر فیلتراسیون و گندزدایی است. به طور کلی، پروژه‌های عمرانی در بخش حمل و نقل و انرژی باید از مفهوم «زیرساخت‌های چندمنظوره» تبعیت کنند؛ به این معنا که زیرساخت‌ها باید بتوانند در شرایط بحران، کارکردهای دیگری را نیز پشتیبانی کنند (سلطانی‌نژاد و رباطی، ۲۰۲۵). برای مثال، یک بزرگراه با قابلیت نفوذپذیری می‌تواند در زمان سیل نقش کانال تخلیه موقت را ایفا کند، یا زیرساخت‌های انرژی می‌توانند با قابلیت تولید غیرمتمرکز (Distributed Generation) از فروپاشی کامل شبکه در صورت آسیب دیدن یک نقطه مرکزی جلوگیری نمایند.

پروژه‌های عمرانی شهری باید به گونه‌ای طراحی شوند که قابلیت «انعطاف‌پذیری» در طول زمان را حفظ کنند؛ به دلیل عدم قطعیت در سناریوهای اقلیمی آتی، تثبیت یک طراحی برای یک دوره ۵۰ ساله ممکن است اشتباه باشد و باید طراحی‌ها دارای ظرفیت‌های رزرو یا قابلیت الحاق آسان باشند تا در صورت لزوم، با تغییر شرایط، به سادگی ارتقاء یابند (ایلدرآبادی و همکاران، ۲۰۱۹). این رویکرد، نیازمند انعطاف‌پذیری در فضای اختصاص‌یافته به زیرساخت‌ها در نقشه‌های جامع شهری است. در نهایت، اجرای موفقیت‌آمیز این پروژه‌های مقاوم‌سازانه در حوزه‌های حمل و نقل و انرژی، مستلزم یکپارچگی بین برنامه‌ریزی بلندمدت اقلیمی و اجرای روزمره پروژه‌های عمرانی است؛ صرفاً تعمیر خرابی‌ها پس از وقوع طوفان کافی نیست، بلکه باید ریسک‌های ناشی از افزایش احتمالات وقوع این رویدادها در محاسبات اولیه تمامی پروژه‌های جدید لحاظ گردد (لطفی و همکاران، ۲۰۲۰).

۷: نقش فناوری‌های نوین و سازوکارهای مدیریتی در افزایش تاب‌آوری پروژه‌ها

مواجهه مؤثر با چالش‌های ناشی از تغییرات اقلیمی در پروژه‌های عمرانی شهری، نیازمند به‌کارگیری گسترده فناوری‌های نوین در کنار بازنگری در شیوه‌های سنتی مدیریت پروژه است تا بتوان از مدل‌های مبتنی بر داده و پیش‌بینی برای افزایش تاب‌آوری استفاده کرد (تقوایی و همکاران، ۲۰۲۱). استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) پیشرفته و مدل‌سازی سه‌بعدی (BIM) در کنار داده‌های حسگرهای محیطی (IoT) به مهندسان اجازه می‌دهد تا یک «دوقلوی دیجیتال» از زیرساخت‌ها ایجاد کنند که عملکرد آن‌ها تحت شرایط اقلیمی مختلف به صورت زنده یا شبیه‌سازی شده قابل رصد باشد (هرندی‌زاده و همکاران، ۲۰۱۹). این فناوری‌ها امکان شناسایی نقاط بحرانی آسیب‌پذیر در برابر سیل، باد یا حرارت را در زمان واقعی فراهم می‌آورند و امکان واکنش سریع‌تر و پیشگیرانه‌تر را مهیا می‌سازند. در حوزه مدیریت ریسک، رویکرد «مدیریت ریسک مبتنی بر سناریو» جایگزین رویکردهای سنتی مبتنی بر احتمال شده است؛ به این معنی که به جای تکیه بر یک پیش‌بینی واحد، پروژه‌ها باید برای چندین سناریوی اقلیمی (مثلاً سناریوی خوش‌بینانه، محتمل، و بدبینانه) مورد ارزیابی قرار گیرند تا نقاط شکست مشترک در برابر تمامی سناریوها شناسایی شوند (شفقت و همکاران، ۲۰۱۹). این ارزیابی چندجانبه تضمین می‌کند که زیرساخت‌ها حتی در مواجهه با رویدادهای شدیدتر از آنچه پیش‌بینی می‌شد، از هم نپاشند؛ این امر مستلزم تعریف پارامترهای مهندسی جدید برای شرایط حدی (Extreme Load Cases) است که باید در آیین‌نامه‌های طراحی گنجانده شوند.

یکی از جنبه‌های حیاتی در مدیریت پروژه‌های اقلیم‌پذیر، توجه به زنجیره تأمین مصالح است؛ تغییرات اقلیمی می‌تواند بر تولید مواد اولیه، حمل و نقل آن‌ها، و حتی زمان‌بندی ساخت تأثیر بگذارد؛ برای مثال، افزایش خشکسالی ممکن است دسترسی به آب مورد نیاز برای تولید بتن یا انجام عملیات خاک‌برداری را محدود کند (بهزادپور و خاک‌زند، ۲۰۲۱). بنابراین، پروژه‌های عمرانی باید استراتژی‌های تأمین منعطف را در پیش بگیرند، از جمله تنوع بخشیدن به منابع مصالح و در نظر گرفتن تأخیرهای احتمالی در جدول زمانی پروژه به دلیل اختلالات محیطی. در زمینه فرآیندهای فنی، استفاده از تکنیک‌های مهندسی سبز مانند ساخت‌وساز با کربن کم (Low-Carbon Construction) و به حداکثر رساندن استفاده از مصالح محلی و بازیافتی، نه تنها به کاهش ردپای کربنی پروژه کمک می‌کند، بلکه با کاهش وابستگی به زنجیره‌های تأمین طولانی‌مدت، تاب‌آوری پروژه در برابر شوک‌های منطقه‌ای ناشی از بلایای اقلیمی را افزایش می‌دهد (طهماسیان و سواک، ۲۰۲۰). این رویکرد، که کاهش اثرات پروژه بر محیط زیست را با افزایش تاب‌آوری آن در برابر محیط زیست در حال تغییر همسو می‌سازد، به عنوان یک استاندارد طلایی جدید در مهندسی شهری در حال ظهور است.

شفافیت اطلاعات و مشارکت ذی‌نفعان، ستون فقرات مدیریت ریسک اقلیمی در پروژه‌های شهری است؛ پیمانکاران، مشاوران، و نهادهای نظارتی باید دسترسی مداوم و شفاف به داده‌های مربوط به ریسک‌های اقلیمی منطقه‌ای داشته باشند و مکانیسم‌های مشخصی برای گزارش‌دهی ریسک‌های نوظهور در طول فرآیند ساخت و بهره‌برداری وجود داشته باشد (شکری و نجفی، ۲۰۲۴). همچنین، طراحی باید مشارکتی باشد و نظرات گروه‌های اجتماعی که بیشترین آسیب‌پذیری را در برابر تغییرات اقلیمی دارند (مانند ساکنان مناطق کم‌درآمد یا آسیب‌پذیر از نظر جغرافیایی) در تصمیم‌گیری‌های مربوط به مکان‌یابی و نوع ساخت‌وساز لحاظ شود تا از ایجاد «نقاط داغ آسیب‌پذیری» جدید جلوگیری شود. نهایتاً، سرمایه‌گذاری در «آموزش و توانمندسازی نیروی انسانی» کلید اجرای موفقیت‌آمیز راهکارهای سازگارانه است؛ مهندسان، مدیران و کارگران باید در زمینه مهندسی اقلیم، مصالح نوین مقاوم‌ساز، و پروتکل‌های پاسخ سریع به بحران‌های اقلیمی آموزش ببینند تا بتوانند تصمیمات فنی لازم را در شرایط پیچیده و متغیر محیطی به درستی اتخاذ نمایند (صفری و همکاران، ۲۰۲۵). این سرمایه‌گذاری‌ها در سرمایه انسانی تضمین می‌کند که دانش نظری به راه‌حل‌های عملی و بادوام در عرصه پروژه‌های عمرانی شهری ترجمه شود.

نتیجه‌گیری نهایی و پیشنهادات سیاستی

در پرتو تحلیل‌های ارائه شده در بخش‌های پیشین، این نتیجه‌گیری حاصل می‌شود که تغییرات اقلیمی یک عامل محیطی ثانویه برای پروژه‌های عمرانی شهری نیست، بلکه یک پارامتر اساسی و غالب است که بر هر مرحله از چرخه حیات یک پروژه، از امکان‌سنجی اولیه تا تخریب، تأثیر می‌گذارد و نیازمند یک تغییر پارادایم بنیادین در نگرش مهندسی و مدیریتی است (صدیری و همکاران، ۲۰۲۴). سازه‌های شهری، از سیستم‌های زیربنایی حمل و نقل و انرژی گرفته تا ساختمان‌های مسکونی و خدماتی، تحت فشار افزایش دمای شدید، سیلاب‌های مکرر، و نوسانات سطح آب‌های زیرزمینی قرار دارند، و طراحی‌های مبتنی بر داده‌های تاریخی دیگر پاسخگوی تضمین ایمنی و کارایی در افق‌های زمانی آینده نیستند (گیاه‌چی و همکاران، ۲۰۲۳). این تحقیق تأکید می‌کند که شکست در ادغام ملاحظات اقلیمی در طراحی‌های فعلی، منجر به ایجاد زیرساخت‌هایی با عمر مفید کوتاه‌تر و هزینه‌های نگهداری نجومی در آینده خواهد شد.

برای دستیابی به شهری تاب‌آور، رویکردی جامع که هم شامل اقدامات سخت‌افزاری مهندسی باشد و هم راهکارهای نرم مدیریتی و برنامه‌ریزی شهری، امری ضروری است؛ در زمینه فنی، سرمایه‌گذاری در مواد نوین با مقاومت بالاتر در برابر حرارت و خوردگی، و اتخاذ استراتژی‌های مدیریت آب مانند زیرساخت‌های سبز برای کاهش رواناب‌های سطحی، باید به سرعت در اولویت قرار گیرند (زندی و همکاران، ۲۰۲۳). به طور خاص، در پروژه‌های ساحلی، بازنگری در ارتفاع سازه‌ها و استفاده از راهکارهای مهندسی ساحلی نرم برای مقابله با فرسایش و نفوذ آب شور حیاتی است، چرا که ریسک ناشی از افزایش سطح دریا، یک ریسک دائمی و غیرقابل بازگشت است. از منظر مدیریتی و سیاستی، چندین پیشنهاد کلیدی برای نهادینه‌سازی تاب‌آوری اقلیمی در پروژه‌های عمرانی ارائه می‌شود؛ اولاً، تدوین و اجباری ساختن «آیین‌نامه‌های طراحی مبتنی بر اقلیم آینده» که به صراحت سناریوهای اقلیمی پیش‌بینی شده برای ۵۰ تا ۱۰۰ سال آینده را در محاسبات بارگذاری و ظرفیت‌دهی لحاظ کنند، ضروری است (محمدی‌زاده و میرزاده، ۲۰۲۵). این آیین‌نامه‌ها باید به طور منظم و با به‌روزرسانی داده‌های علمی محیط زیستی مورد بازنگری قرار گیرند. ثانیاً، ادغام تحلیل‌های ریسک اقلیمی در تمامی مراحل ارزیابی پروژه‌های سرمایه‌گذاری عمومی و خصوصی باید اجباری شود و ابزارهای مالی مانند بیمه پروژه‌ها باید ریسک‌های اقلیمی را به درستی منعکس کنند تا توجیه اقتصادی پروژه‌های کم‌تاب‌آور از بین برود (رفسنجانی‌اصل و همکاران، ۲۰۲۵).

سومین پیشنهاد، تمرکز بر توسعه قابلیت‌های نظارتی و نگهداری هوشمند از طریق به‌کارگیری فناوری‌های سنجش از دور و اینترنت اشیاء برای پایش مستمر عملکرد سازه‌ها در برابر شرایط محیطی متغیر است؛ این امر به مدیران شهری اجازه می‌دهد تا از خرابی‌های بزرگ پیشگیری کرده و تعمیرات پیشگیرانه به موقع را انجام دهند، به جای آنکه منتظر وقوع فاجعه بمانند (رسول‌زاده و مشاری، ۲۰۲۵). در نهایت، تقویت همکاری‌های میان‌رشته‌ای بین مهندسان عمران، متخصصان هواشناسی، برنامه‌ریزان شهری، و سیاست‌گذاران اجتماعی برای اطمینان از اینکه راهکارهای فنی، پاسخگوی نیازهای اجتماعی و اقتصادی شهروندان در شرایط بحرانی نیز باشند، باید به یک اصل اساسی تبدیل گردد (پرویش و اسدی، ۲۰۲۴). اجرای این راهکارها، تضمین‌کننده آن خواهد بود که سرمایه‌گذاری‌های آتی در حوزه عمران شهری، نه تنها زیرساخت‌های کنونی را حفظ کند، بلکه شهرها را برای مواجهه موفقیت‌آمیز با چالش‌های محیطی پیچیده قرن بیست و یکم آماده سازد.

منابع

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.