

ارزیابی تأثیر کیفیت مصالح و نحوه اجرای سازه بر دوام و ایمنی ساختمان‌های شهری

احمد صفدری^{۱*}، امید سالمی^۲، حسن عاشوری^۳

۱- کارشناسی عمران - ساختمان سازی، علمی کاربردی شهرداری های استان بوشهر. (کارشناس استعلامات - شهرداری بندر بوشهر).

۲- کارشناسی ارشد رشته عمران و سازه، دانشگاه لیان. (مسئول حفاری - شهرداری بندر بوشهر)

۳- کارشناسی ارشد عمران - سازه، دانشگاه خلیج فارس. (رئیس اداره عمران - شهرداری بوشهر)

چکیده:

دوام و ایمنی ساختمان‌های شهری از مهم‌ترین مؤلفه‌های پایداری کالبدی شهرها محسوب می‌شوند و نقش مستقیمی در حفظ جان شهروندان، کاهش خسارات اقتصادی و افزایش عمر مفید سرمایه‌های عمرانی ایفا می‌کنند. در سال‌های اخیر، بروز خسارات گسترده در سازه‌های شهری، به‌ویژه در بافت‌های فرسوده و مناطق پرتراکم، نشان داده است که صرف رعایت اصول طراحی سازه‌ای برای تضمین ایمنی کافی نبوده و کیفیت مصالح ساختمانی و نحوه اجرای سازه، به عنوان عوامل تعیین‌کننده، تأثیر بسزایی بر عملکرد نهایی ساختمان‌ها دارند. از این رو، توجه هم‌زمان به این دو عامل در نظام مدیریت و نظارت شهری امری اجتناب‌ناپذیر است. هدف این مقاله، ارزیابی نظام‌مند تأثیر کیفیت مصالح و نحوه اجرای سازه بر دوام و ایمنی ساختمان‌های شهری و تبیین نقش شهرداری‌ها و نظام حکمرانی شهری در ارتقای این دو شاخص کلیدی است. روش پژوهش در این مقاله مبتنی بر مرور نظام‌مند منابع علمی داخلی و خارجی است؛ بدین منظور، ۱۷ پژوهش معتبر مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. انتخاب منابع بر اساس ارتباط مستقیم با مفاهیم کیفیت مصالح، خطاهای اجرایی، دوام سازه‌ای، ایمنی لرزه‌ای و مدیریت پروژه‌های عمرانی شهری انجام شد و داده‌ها به صورت کیفی و تحلیلی ترکیب گردیدند تا تصویری جامع از وضعیت موجود ارائه شود. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که کیفیت پایین مصالح، به‌ویژه بتن و فولاد، از طریق افزایش نفوذپذیری، تشدید خوردگی آرماتورها و کاهش چقرمگی مصالح، نقش مستقیم و معناداری در کاهش دوام و افزایش آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های شهری دارد. همچنین مشخص شد که خطاهای اجرایی نظیر آرماتوربندی نادرست، عمل‌آوری نامناسب بتن و ضعف در اجرای اتصالات، حتی در حضور مصالح استاندارد، می‌تواند منجر به شکست‌های ترد و ناگهانی سازه شود. علاوه بر این، ضعف نظارت و حکمرانی شهری به عنوان عاملی تشدیدکننده، زمینه بروز این نارسایی‌ها را فراهم می‌کند.

واژگان کلیدی: کیفیت مصالح ساختمانی، اجرای سازه، دوام سازه‌ای، ایمنی ساختمان‌های شهری، نظارت و حکمرانی شهری

مقدمه

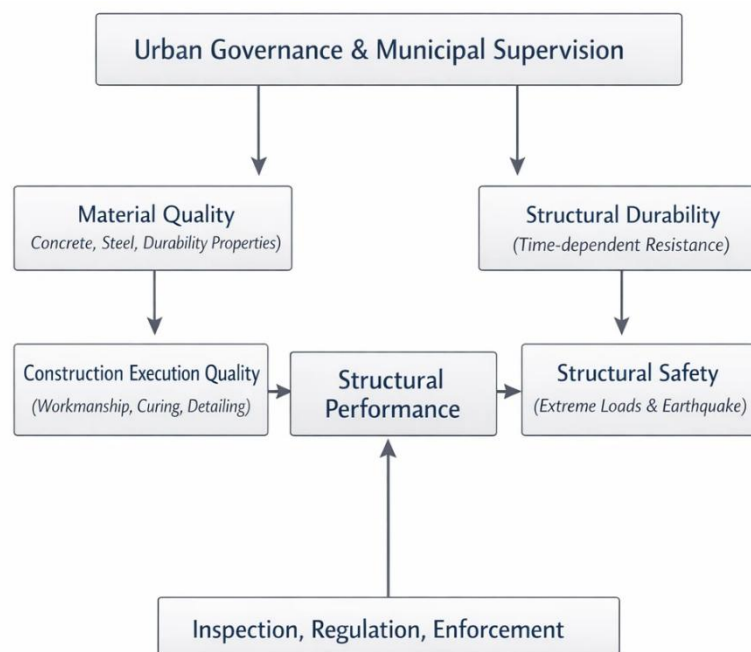
توسعه پایدار شهرها وابسته به توانایی آن‌ها در حفظ و ارتقاء زیرساخت‌های فیزیکی موجود، به‌خصوص ساختمان‌های شهری است؛ این امر نیازمند درک عمیقی از عواملی است که بر طول عمر و ایمنی این سازه‌ها تأثیر می‌گذارند و در این میان، کیفیت مواد اولیه و دقت در فرآیند اجرا دو رکن اساسی را تشکیل می‌دهند. در بافت‌های شهری متراکم و قدیمی، فرسودگی سازه‌ها نه تنها یک مسئله فنی، بلکه یک چالش اجتماعی و اقتصادی بزرگ محسوب می‌شود، زیرا ریسک فروپاشی ناگهانی و از دست رفتن جان انسان‌ها را افزایش می‌دهد. باستانی و همکاران (۲۰۱۹) به درستی اشاره می‌کنند که نادیده گرفتن جزئیات کیفی در مراحل اولیه ساخت، هزینه‌های هنگفتی را در آینده برای تعمیرات اساسی و مقاوم‌سازی تحمیل می‌نماید که این هزینه‌ها اغلب از توان مالی پروژه‌های عمومی شهری فراتر می‌رود و چرخه معیوب تخریب و بازسازی نامنظم را تشدید می‌کند. تأثیر کیفیت پایین مصالح، مانند نفوذپذیری بیش از حد بتن یا استفاده از میلگردهای با گرید نامشخص، مستقیماً بر مقاومت سازه در برابر بارهای طولانی‌مدت محیطی، نظیر سیکل‌های رطوبت و خشکی یا نفوذ یون‌های کلر و سولفات، اثرگذار است و سرعت تخریب شیمیایی و فیزیکی را تسریع می‌بخشد.

نحوه اجرای سازه، که شامل کنترل دقیق ابعاد، کیفیت جوشکاری، تراکم بتن ریزی و رعایت صحیح مراحل عمل‌آوری (کیورینگ) است، به همان اندازه اهمیت دارد و اغلب اوقات، عدم رعایت صحیح این نکات فنی توسط پیمانکاران، حتی با وجود مصالح استاندارد، منجر به بروز نواقص ساختاری عمیق می‌شود که در ظاهر قابل مشاهده نیستند اما در شرایط بحرانی، مانند زلزله، آشکار می‌گردند. رستم‌پیشه و همکاران (۲۰۲۳) در بررسی‌های خود نشان داده‌اند که خطاهای انسانی در اجرای اتصالات سازه‌ای، به عنوان نقاط ضعف اصلی در انتقال نیروها عمل کرده و تمرکز تنش‌های غیرمنتظره را در طول عمر بهره‌برداری سازه افزایش می‌دهند. این تحلیل کیفی تأکید می‌کند که نقص در اجرا صرفاً یک مشکل فنی نیست، بلکه ریشه در ضعف‌های مدیریتی و نظارتی سازمان‌های متولی شهر دارد؛ عدم وجود نیروی کار ماهر یا فشار زمان و هزینه برای اتمام سریع پروژه‌ها، متأسفانه این کیفیت‌های حیاتی را فدای اهداف کوتاه‌مدت می‌کند و ایمنی بلندمدت شهروندان را قربانی می‌سازد.

نقش شهرداری‌ها در این فرآیند نقشی محوری است؛ آن‌ها مسئولیت مستقیم تنظیم مقررات ساختمانی، صدور پروانه و مهم‌تر از آن، نظارت مستمر بر پروژه‌های عمرانی شهری، به‌ویژه در مناطقی که نیاز به نوسازی و مقاوم‌سازی دارند، را بر عهده دارند. ضعف در بازرسی‌های مستمر و تأیید صرف اسناد کاغذی بدون انجام آزمایش‌های میدانی کافی، به شهرداری‌ها اجازه می‌دهد تا سازه‌هایی با عمر خدماتی کمتر از حد انتظار در شهر باقی بمانند و ریسک‌های بالقوه در آینده افزایش یابد. غیائی و همکاران (۲۰۲۳) بر لزوم تقویت ظرفیت‌های فنی سازمان‌های بازرسی شهرداری تأکید دارند تا بتوانند با تکیه بر دانش روز، نه تنها انطباق با حداقل استانداردها را بررسی کنند، بلکه کیفیت واقعی مصالح و اجرای دقیق جزئیات طراحی را تضمین نمایند، خصوصاً زمانی که بحث مقاوم‌سازی بافت‌های فرسوده مطرح است که خود پتانسیل‌های آسیب‌دیدگی چندگانه دارند. بررسی پیشینه‌ها نشان می‌دهد که تحقیقات متعددی بر جنبه‌های مجزا تمرکز کرده‌اند؛ برخی بر شیمی خوردگی بتن و سازه‌های فولادی تمرکز دارند، در حالی که گروهی دیگر بر روی مدیریت کیفیت پروژه (PMQ) متمرکز هستند؛ اما اهمیت این پژوهش در آن است که یک دیدگاه یکپارچه ارائه می‌دهد که در آن، کیفیت مواد و کیفیت اجرا به عنوان دو روی یک سکه در تضمین دوام و ایمنی شهری دیده می‌شوند. نادری و حسن‌پور (۲۰۲۲) به وضوح اثبات کرده‌اند که همبستگی مستقیمی بین میزان تخلخل بتن (تأثیر کیفیت مواد) و ظرفیت اتلاف انرژی سازه در هنگام زلزله (تأثیر کیفیت اجرا) وجود دارد؛ یعنی یک بتن با کیفیت بالا اگر به درستی ویریه و عمل‌آوری نشود، عملاً به اندازه بتن ضعیف عمل خواهد کرد و تحلیل‌گر را به اشتباه خواهد انداخت.

در این میان، مفهوم "حکمرانی شهری" (Urban Governance) نیز در تعیین سرنوشت کیفیت ساخت‌وساز دخیل است؛ این مفهوم فراتر از مدیریت فنی پروژه‌ها رفته و شامل تدوین قوانین شفاف، اعمال قاطعانه جریمه‌ها و تشویق‌ها، و ایجاد شفافیت در فرآیندهای صدور مجوزها می‌شود. اگر مکانیزم‌های حکمرانی ضعیف باشند، حتی بهترین مهندسان و مصالح باکیفیت نیز نمی‌توانند تضمین‌کننده ایمنی باشند، چرا که اجرای غیرقانونی و استفاده از مصالح جایگزین ارزان‌تر در سایه نظارت ضعیف، به یک رویه تبدیل می‌شود. محمدی ده چشمه و پرویزیان (۲۰۲۴) این نکته را برجسته می‌کنند که مبارزه با فساد اداری و رشوه در مراحل تأیید مصالح و بازدیدهای فنی، بخش جدایی‌ناپذیری از تضمین دوام سازه‌های شهری است و باید به عنوان یک عامل کاهش کیفیت در نظر گرفته شود. با توجه به اهمیت حیاتی موضوع در تأمین امنیت سرمایه‌های ملی و حفظ جان شهروندان، این مقاله با استفاده از روش مرور نظام‌مند، قصد دارد تا مجموعه‌ای از یافته‌های معتبر اخیر را ترکیب کرده و یک چارچوب تحلیلی جامع از ارتباط کیفیت مصالح، دقت اجرا، دوام سازه، ایمنی شهری و نقش نهادهای نظارتی ارائه دهد. تمرکز ویژه‌ای بر روی درس‌آموزهایی است که می‌توان از پروژه‌های موفق و شکست‌خورده عمرانی شهری استخراج نمود تا توصیه‌های کاربردی برای ارتقاء عملکرد سازمان‌های شهری در حوزه کنترل کیفیت ارائه گردد و اطمینان حاصل شود که ساختمان‌های جدید و بازسازی‌شده، پاسخگوی الزامات ایمنی در برابر مخاطرات محیطی برای یک دوره بهره‌برداری حداقل ۵۰ ساله باشند. این چارچوب تحلیلی به مدیران شهری ابزاری برای ارزیابی دقیق‌تر عملکرد پیمانکاران و تأمین‌کنندگان مصالح خواهد داد.

نهایتاً، مقاومت در برابر زمان و شرایط محیطی (دوام) و مقاومت در برابر بارهای ناگهانی (ایمنی) مستلزم رویکردی سیستمی است؛ این سیستم باید از مرحله طراحی شروع شده، با تأمین مصالح استاندارد ادامه یافته و با نظارت دقیق حین ساخت به اوج برسد. شاهپوندی و طالبی ورنوسفادرانی (۲۰۲۵) نشان می‌دهند که فناوری‌هایی مانند حسگرهای هوشمند و پایش مستمر بتن در حین عمل‌آوری می‌توانند در کاهش عدم قطعیت‌های ناشی از اجرای غیرصحیح نقش مهمی ایفا کنند، اما این فناوری‌ها زمانی مؤثر خواهند بود که ساختار حکمرانی شهری از پذیرش و الزام به استفاده از آن‌ها حمایت کند و هزینه‌های اولیه اجرای این سیستم‌های کنترلی را توجیه نماید.



شکل ۱. مدل مفهومی ارتباط کیفیت مصالح، نحوه اجرای سازه و حکمرانی شهری با دوام و ایمنی ساختمان‌های شهری

شکل ۱ چارچوب مفهومی پژوهش حاضر را نمایش می‌دهد که در آن، نقش حکمرانی شهری و نظارت شهرداری به‌عنوان عامل بالادست در هدایت کیفیت مصالح و کیفیت اجرای سازه تبیین شده است. در این مدل، کیفیت مصالح ساختمانی شامل مشخصات فیزیکی و مکانیکی مصالحی نظیر بتن و فولاد و همچنین ویژگی‌های دوام‌پذیری آن‌ها، به‌صورت تأثیرگذار بر عملکرد کلی سازه در نظر گرفته شده است. هم‌زمان، کیفیت اجرای سازه که متأثر از عواملی نظیر مهارت نیروی انسانی، دقت در آرماتوربندی، بتن‌ریزی، عمل‌آوری و اجرای صحیح جزئیات است، به‌عنوان حلقه واسط میان طراحی و عملکرد واقعی سازه عمل می‌کند. این دو مؤلفه، در تعامل با یکدیگر، عملکرد سازه‌ای را شکل داده و در نهایت بر دوام بلندمدت ساختمان در برابر عوامل محیطی و ایمنی آن در مواجهه با بارهای حدی به‌ویژه زلزله تأثیر مستقیم می‌گذارند. افزون بر این، نقش نظام بازرسی، مقررات و ضمانت‌های اجرایی به‌عنوان مکانیزم کنترلی مکمل، در تضمین تحقق الزامات کیفی در تمام مراحل ساخت مورد تأکید قرار گرفته است. این چارچوب مفهومی مبنای تحلیلی مرور نظام‌مند مطالعات داخلی و خارجی در پژوهش حاضر قرار گرفته و ارتباط سیستمی میان کیفیت ساخت، دوام سازه‌ای و ایمنی ساختمان‌های شهری را به‌صورت یکپارچه تبیین می‌کند.

۲. مروری بر مبانی نظری و اهمیت دوام سازه‌ای

مفهوم دوام سازه‌ای (Durability) در مهندسی عمران، فراتر از مقاومت اولیه سازه در برابر بارهای طراحی است و به توانایی سازه برای حفظ عملکرد مورد انتظار خود در طول یک دوره زمانی مشخص، تحت شرایط محیطی و بهره‌برداری معین، اطلاق می‌شود. این مفهوم رابطه تنگاتنگی با کیفیت مصالح و اجرای دقیق دارد، زیرا عوامل محیطی به‌طور مداوم در تلاشند تا با نفوذ به ساختار داخلی مواد، آن‌ها را تخریب کنند. بتن به‌عنوان ماده غالب در ساخت‌وساز شهری، در برابر تهاجم شیمیایی (مانند سولفات‌ها، کلرایدها و واکنش قلیایی-سیلیسی) بسیار آسیب‌پذیر است، اگر نسبت آب به سیمان آن بیش از حد بالا باشد یا تراکم کافی نداشته باشد. عظیمی و همکاران (۲۰۱۴) تأثیر نفوذپذیری را به‌عنوان پارامتر اصلی تعیین‌کننده عمر مفید سازه در محیط‌های مرطوب شهری مورد بحث قرار داده‌اند؛ یک بتن نفوذناپذیر با سطح پایین تخلخل، می‌تواند نفوذ یون‌های مخرب را برای دهه‌ها به تأخیر اندازد، در حالی که بتن پر از حفرات ریز ناشی از اجرای ضعیف (مانند ویبره نکردن کافی)، دروازه‌ای باز برای ورود عوامل خورنده فراهم می‌آورد.

کیفیت مصالح فولادی مورد استفاده در آرماتوربندی نیز جنبه دیگری از دوام است که اغلب نادیده گرفته می‌شود؛ استفاده از فولاد با استحکام تسلیم کمتر از حد مجاز یا فولادی که در معرض زنگ‌زدگی شدید پیش از بتن‌ریزی قرار گرفته باشد، به معنای کاهش شدید مقاومت کششی و چقرمگی کل سازه است. صادقی‌اذر (۲۰۲۲) با بررسی سازه‌های بتن‌آرمه قدیمی، نشان داده است که نفوذ رطوبت و اکسیژن از طریق ترک‌ها یا پوشش بتنی نازک، منجر به خوردگی آرماتورها شده و انبساط ناشی از خوردگی، ترک‌های فشاری در بتن ایجاد می‌کند که این چرخه معیوب، سرعت تخریب را به‌صورت تصاعدی افزایش می‌دهد؛ این مسئله در ساختمان‌های شهری مجاور دریا یا مناطق صنعتی که غلظت آلاینده‌ها بالاست، بحرانی‌تر است. لذا، کیفیت شیمیایی و فیزیکی مصالح باید به دقت در مبدأ کنترل شود، نه صرفاً در زمان اجرا. نقش اجرای صحیح در تقویت دوام، اغلب ناشی از اجرای درست جزئیات طراحی است؛ برای مثال، پوشش بتنی کافی (Cover) روی آرماتورها، یک عامل محافظتی حیاتی است. اگر به دلیل شلوغی آرماتورها یا خطای آرماتوربند، این پوشش کاهش یابد، زمان رسیدن یون‌های کلر به سطح فولاد به شدت کم شده و فرآیند خوردگی به سرعت آغاز می‌گردد. بابایی‌فر (۲۰۲۳) بر این باور است که نظارت بر فاصله بین میلگردها و اطمینان از پر شدن کامل فضاها با بتن تازه (بدون وجود حفره‌های بزرگ یا لانه‌موریچه‌ای) از وظایف

اصلی ناظر مقیم است و عدم انجام صحیح آن، دوام سازه را مستقیماً تحت تأثیر قرار می‌دهد، فارغ از اینکه کیفیت سیمان و سنگدانه چقدر عالی بوده باشد.

در زمینه سازه‌های فولادی، کیفیت جوشکاری و اتصالات، تعیین‌کننده اصلی دوام ساختاری تحت بارهای چرخه‌ای و لرزه‌ای است. جوش‌های نامناسب، حاوی تخلخل، عدم ذوب کامل یا ترک‌های پنهان، نقاط تمرکز تنش را ایجاد می‌کنند که می‌توانند منجر به شکست زودرس در طول عمر سازه شوند، حتی اگر فولاد پایه کاملاً استاندارد باشد. امیرکاردوست و همکاران (۲۰۲۴) نشان می‌دهند که بازرسی‌های غیرمخرب (NDT) بر روی اتصالات، به ویژه در ساختمان‌هایی که قرار است در مناطق لرزه‌خیز شهری احداث شوند، یک ضرورت است نه یک گزینه اضافی؛ غفلت از این بازرسی‌ها، یک ریسک غیرقابل قبول ایمنی را در طول عمر سازه نهادینه می‌کند. بافت‌های فرسوده شهری، پتانسیل دوام کمتری دارند زیرا معمولاً با مصالحی با کیفیت پایین‌تر و روش‌های اجرایی قدیمی‌تر ساخته شده‌اند، و در معرض آلودگی‌های محیطی و لرزش‌های ناشی از ترافیک شهری قرار گرفته‌اند. نه‌ری و معتمدمنش (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای شهری، تأثیر تجمعی فرسودگی محیطی و کیفیت نازل مصالح اولیه را بر نرخ تخریب سازه‌های موجود مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که هرگونه مداخله ترمیمی یا مقاوم‌سازی، باید با جایگزینی کامل یا تقویت مواد اصلی آسیب‌دیده آغاز شود؛ ترمیم سطحی بدون توجه به کیفیت زیرین، صرفاً یک راهکار موقت و پرهزینه خواهد بود که دوام پروژه را تضمین نمی‌کند.

حکمرانی شهری نقش اساسی در استانداردسازی مصالح دارد؛ شهرداری‌ها باید با اعمال کنترل‌های سخت‌گیرانه در مبدأ، از ورود مصالح غیراستاندارد به پروژه‌ها جلوگیری کنند. این کنترل‌ها باید شامل آزمایش‌های مقاومت فشاری دوره‌ای از بتن‌های تحویلی و تست‌های شیمیایی برای اطمینان از عدم وجود مواد بازدارنده واکنش‌پذیری یا ناخالصی‌های مضر در سنگدانه‌ها باشد. حسین آب‌روشن (۲۰۲۳) تأکید می‌کند که اگر سازمان‌های شهری در مراحل اولیه تأمین مواد کوتاهی کنند، عملاً ریسک خرابی را به مالک و در نهایت به جامعه منتقل کرده‌اند، زیرا در مراحل بعدی، اثبات قصور تأمین‌کننده دشوار خواهد بود. رابطه بین دوام و ایمنی به صورت یک منحنی وابسته عمل می‌کند؛ ساختمانی که دوام کمتری دارد (مثلاً به دلیل خوردگی داخلی)، در برابر بارهای خدماتی روزمره نیز ضعیف‌تر عمل کرده و آستانه شکست آن پایین‌تر می‌آید، در نتیجه در مواجهه با یک زلزله متوسط که سازه سالم باید آن را تحمل کند، احتمال فروپاشی آن به شدت افزایش می‌یابد. نوذری و همکاران (۲۰۲۲) تحلیل‌های دینامیکی نشان دادند که کاهش ۱۰ درصدی مقطع مؤثر یک عضو سازه‌ای به دلیل خوردگی، می‌تواند منجر به افزایش بیش از ۳۰ درصدی جابجایی نسبی طبقات تحت بار لرزه‌ای شود که این امر، شاخص اصلی آسیب‌پذیری ساختمان است. در نهایت، برای ارتقاء دوام در پروژه‌های شهری، باید یک سیستم جامع مدیریت کیفیت (QMS) اجرا شود که در آن، مشخصات دقیق مصالح در اسناد مناقصه تعریف شده، و برای نحوه اجرای جزئیات فنی، دستورالعمل‌های اجرایی روشنی ارائه گردد که فراتر از حداقل‌های آیین‌نامه باشد، به‌ویژه برای اجزایی که در معرض عوامل خورنده یا تنش‌های بحرانی قرار دارند؛ این رویکرد جامع، زیربنای ایمنی بلندمدت شهر را فراهم می‌آورد.

۳. تأثیر کیفیت مصالح ساختمانی بر عملکرد سازه‌ای

کیفیت مصالح ساختمانی، سنگ بنای هر سازه بادوام و ایمنی است و عملکرد نهایی سازه در برابر بارهای طراحی و همچنین در برابر عوامل مخرب محیطی، مستقیماً به خواص ذاتی موادی که استفاده می‌شود، وابسته است. بتن به عنوان پرکاربردترین ماده در سازه‌های شهری، نیازمند کنترل دقیق بر چهار جزء اصلی خود یعنی سیمان، آب، سنگدانه و افزودنی‌ها است؛ هرگونه انحراف در کیفیت این اجزاء، مانند استفاده از سیمان با عیار پایین یا سنگدانه‌های آلوده به مواد آلی یا کلر، به طور مستقیم

بر مقاومت فشاری نهایی، مدول الاستیسیته و به ویژه نفوذپذیری بتن تأثیر می‌گذارد. عظیمی و همکاران (۲۰۱۴) تأکید می‌کنند که کنترل آزمایشگاهی مستمر بر بتن تازه و سخت شده، باید شامل مقاومت فشاری، جذب آب و نفوذپذیری یون کلر باشد؛ اگر نفوذپذیری از حد مجاز تجاوز کند، علی‌رغم دستیابی به مقاومت فشاری اسمی، عمر مفید سازه در برابر خوردگی آرماتورها به شدت کاهش می‌یابد.

کیفیت سنگدانه‌ها، که بخش عمده‌ای از حجم بتن را تشکیل می‌دهند، نقشی حیاتی در پایداری شیمیایی و فیزیکی مخلوط دارند. استفاده از سنگدانه‌های حاوی کانی‌های فعال (مانند کوارتز فعال) می‌تواند منجر به واکنش قلیایی-سیلیسی (ASR) شود؛ این واکنش، که در درازمدت رخ می‌دهد، باعث انبساط و تولید تنش‌های داخلی در بتن شده و نهایتاً به ترک خوردگی گسترده و از دست رفتن یکپارچگی سازه منجر می‌شود، پدیده‌ای که در بلندمدت، ایمنی سازه را به دلیل کاهش سطح مقطع مؤثر، تهدید می‌کند. باستانی و همکاران (۲۰۱۹) با مطالعه موردی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، نشان دادند که مدیریت منشأ سنگدانه‌ها و استفاده از سنگدانه‌های با خاصیت قلیایی-سیلیسی کنترل‌شده، یک الزام برای سازه‌های شهری با عمر طراحی طولانی است و شهرداری‌ها باید در فرآیند تأمین مصالح معدنی سخت‌گیری بیشتری اعمال کنند. در مورد سازه‌های فولادی، کیفیت فولاد مورد استفاده برای آرماتوربندی یا سازه‌های سازه‌ای، شامل استحکام تسلیم، استحکام نهایی و چقرمگی (Ductility) است. استفاده از فولاد با مشخصات مکانیکی پایین‌تر از حد مورد نیاز آیین‌نامه، به سادگی ظرفیت باربری نهایی سازه در برابر بارهای زلزله یا باد را کاهش می‌دهد. صادقی‌اذر (۲۰۲۲) نشان می‌دهد که در بسیاری از پروژه‌های نوسازی در بافت‌های فرسوده، پیمانکاران به دلیل محدودیت بودجه، به استفاده از میلگردهایی با استاندارد پایین‌تر روی آورده‌اند که این امر در شرایط بحرانی، موجب شکست نرم و فروریختن ناگهانی ساختمان می‌شود، در حالی که سازه‌هایی با مصالح استاندارد، شکست تدریجی (Ductile Failure) را تجربه می‌کنند که فرصت تخلیه را فراهم می‌آورد.

نقش افزودنی‌های شیمیایی در بتن‌های مدرن، به خصوص در پروژه‌های شهری که نیاز به بتن با کارایی بالا (مانند بتن خودتراکم یا بتن‌های مقاوم در برابر نفوذ) دارند، غیرقابل انکار است؛ با این حال، افزودنی‌ها خود نیازمند کنترل دقیق هستند. افزودنی‌های کاهنده آب یا ابرکاهنده‌ها باید با دوز مشخص و کیفیت ثابت استفاده شوند؛ دوز اشتباه یا استفاده از افزودنی‌های تقلبی می‌تواند بر زمان گیرش، مقاومت نهایی و کارایی بتن در حالت خمیری تأثیر بگذارد و در نهایت منجر به ایجاد ترک‌های پلاستیک یا کاهش بیش از حد مقاومت نهایی گردد. گنجه‌ای و همکاران (۲۰۱۳) در تحلیل‌های آزمایشگاهی خود نشان دادند که تغییرات جزئی در درصد ابرکاهنده می‌تواند خواص رئولوژیکی بتن را به گونه‌ای تغییر دهد که تراکم کافی در نقاط دور از دسترس قالب‌ها حاصل نشود و نواقص اجرایی تشدید شوند.

مصالح پوشش‌دهنده و غیرسازه‌ای نیز در ایمنی و دوام شهری دخیل هستند؛ برای مثال، کیفیت پوشش‌های ضد حریق و همچنین مصالح نما که باید در برابر شرایط محیطی شهری مانند آلودگی و تغییرات دمایی مقاوم باشند. عاقریان و همکاران (۲۰۲۴) بر اهمیت استفاده از مصالح نما با ضریب جذب آب پایین و مقاومت در برابر اشعه فرابنفش تأکید دارند، زیرا خرابی زودرس نما می‌تواند نفوذ آب به داخل دیواره‌های سازه‌ای را تسریع کرده و به طور غیرمستقیم بر دوام اجزای اصلی سازه اثر بگذارد، به ویژه در دیوارهای حائل و سازه‌های زیرزمینی. نظارت شهرداری‌ها بر زنجیره تأمین مصالح بسیار کلیدی است؛ این نظارت باید فراتر از بررسی گواهی‌نامه‌های تحویل کالا باشد و شامل اخذ نمونه‌برداری تصادفی از محل بارگیری و انجام آزمایش‌های مستقل در آزمایشگاه‌های معتمد شهری باشد. محمدی ده چشمه و پرویزیان (۲۰۲۴) استدلال می‌کنند که نبود یک سیستم متمرکز و شفاف برای تأیید صلاحیت تأمین‌کنندگان مصالح ساختمانی در سطح کلان‌شهری، بزرگ‌ترین سد راه

تضمین کیفیت است؛ این امر به پیمانکاران اجازه می‌دهد تا با استفاده از مصالح ارزان‌تر و کمتر شناخته شده، حاشیه سود خود را افزایش دهند که مستقیماً بر ایمنی شهر تأثیر می‌گذارد.

بافت‌های فرسوده شهری که اغلب دارای سازه‌های بتن‌آرمه با عیار سیمان پایین و پوشش ناکافی هستند، در برابر نفوذ یون کلر بسیار حساس‌ترند. در پروژه‌های بازسازی این بافت‌ها، اگر مصالح جدید با مصالح قدیمی سازگاری نداشته باشند (مثلاً اگر بتن جدید چگالی کمتری داشته باشد)، پتانسیل ایجاد تنش‌های داخلی و ترک‌خوردگی در محل اتصال بین سازه جدید و قدیم افزایش می‌یابد. رستم‌پیشه و همکاران (۲۰۲۳) بر لزوم استفاده از بتن‌های ویژه ترمیمی (مانند بتن‌های پلیمری یا با نفوذپذیری بسیار کم) در این نواحی تأکید دارند تا از نفوذ سریع رطوبت و تداوم خوردگی در آرماتورهای موجود جلوگیری شود. در نتیجه، تضمین ایمنی و دوام شهری مستلزم تدوین دستورالعمل‌های بسیار سخت‌گیرانه برای تأمین، آزمایش و پذیرش کلیه مصالح سازه‌ای و غیرسازه‌ای است، به گونه‌ای که کنترل کیفیت در مبدأ به یک اصل غیرقابل مذاکره تبدیل شود و شهرداری‌ها نقش فعال و نظارتی مستقیمی در این بخش از زنجیره تأمین ایفا نمایند.

۴. نقش نحوه اجرای سازه و خطاهای کارگاهی در کاهش ایمنی

حتی با فرض استفاده از بهترین مصالح موجود در بازار، اگر فرآیند اجرا و نظارت بر کار در کارگاه به درستی انجام نپذیرد، نتیجه نهایی ساخت یک سازه آسیب‌پذیر و ناپایدار خواهد بود؛ نحوه اجرای سازه شامل طیف وسیعی از فعالیت‌ها از جمله قالب‌بندی، آرماتوربندی، بتن‌ریزی، عمل‌آوری و اجرای اتصالات است که هر کدام پتانسیل ایجاد نواقص ساختاری عمیق را دارا هستند. نادعلی جلوخانی و همکاران (۲۰۱۸) تأکید می‌کنند که خطاهای اجرایی، به دلیل پنهان ماندن بخش عمده‌ای از آن‌ها در زیر بتن یا پوشش نهایی، اغلب دیر کشف می‌شوند و هزینه‌های اصلاح آن‌ها در مراحل بعدی بسیار سنگین است؛ این امر به ویژه در مورد نقص‌هایی مانند پوشش ناکافی آرماتور، خروج آرماتورها از تراز مورد نظر یا نادیده گرفتن صحیح مراحل عمل‌آوری بتن صادق است.

یکی از بحرانی‌ترین مراحل اجرایی، فرآیند بتن‌ریزی و به ویژه تراکم دادن آن است؛ عدم استفاده کافی از ویبره یا ویبره کردن بیش از حد، هر دو منجر به نقص جدی در کیفیت بتن می‌شوند. بتن‌ریزی ناکافی یا ویبره نکردن صحیح در محل‌های شلوغ آرماتوربندی، منجر به ایجاد حفره‌های بزرگ و لانه‌موریچه‌ای (Honeycomb) می‌شود که نفوذپذیری موضعی را به شدت افزایش داده و باعث می‌شود نقاط ضعیف سازه در برابر عوامل محیطی و بارهای خارجی سریع‌تر تسلیم شوند. نوذری و همکاران (۲۰۲۲) این نقص‌ها را به عنوان عامل اصلی شروع خوردگی موضعی در سازه‌های شهری معرفی می‌کنند که در نهایت منجر به خروج بخشی از آرماتورها از مقطع مؤثر و کاهش ظرفیت باربری آن عضو می‌گردد. خطاهای مربوط به آرماتوربندی، مستقیماً بر ظرفیت کششی و چقرمگی سازه اثر می‌گذارند؛ این خطاها شامل خاموت‌گذاری نادرست، عدم رعایت طول‌های گیرایی، یا برش ناگهانی آرماتورها در محل‌های حساس طراحی است. حسین آبروشن (۲۰۲۳) توضیح می‌دهد که در صورت عدم اجرای صحیح جزئیات لرزه‌ای، مانند تعداد و فاصله مناسب خاموت‌ها در نواحی مفصلی، ظرفیت سازه برای جذب انرژی در هنگام زلزله به شدت کاهش می‌یابد و سازه به جای تغییر شکل‌های پلاستیک ایمن، دچار شکست برشی ترد و ناگهانی می‌شود که نتیجه آن، فرو ریختن سریع ساختمان‌های شهری خواهد بود.

عمل‌آوری بتن (Curing) یکی دیگر از مراحل اجرایی است که اغلب به دلیل فشارهای زمانی و دمای بالای محیط در ایران نادیده گرفته می‌شود؛ عمل‌آوری مناسب (حفظ رطوبت و دمای ثابت برای مدت کافی) برای دستیابی بتن به مقاومت طراحی

و کاهش ترک‌های جمع شدگی حرارتی ضروری است. اگر بتن به سرعت خشک شود، میکروترک‌های سطحی زیادی ایجاد می‌شوند که نفوذپذیری را افزایش داده و مقاومت نهایی بتن را کاهش می‌دهند. باستانی و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند که یک دوره عمل‌آوری کوتاه، می‌تواند مقاومت بتن را تا ۲۰ درصد نسبت به شرایط ایده‌آل کاهش دهد که این خود یک نقص اساسی در دوام محسوب می‌شود. در سازه‌های بتن‌آرمه، محل اتصال تیر به ستون و اتصالات سازه‌ای پیچیده دیگر، نقاطی هستند که بیشترین دقت اجرایی را طلب می‌کنند. در پروژه‌های شهری، به دلیل محدودیت فضا و تراکم آرماتور، اجرای دقیق اتصالات جوشی یا مکانیکی (کوپلرها) اغلب با چالش مواجه است. امیرکاردوست و همکاران (۲۰۲۴) در تحلیل پروژه‌های عمرانی، مواردی از استفاده نادرست از اتصالات مکانیکی یا عدم بازرسی کافی بر کیفیت جوش‌ها را گزارش کرده‌اند که این موارد منجر به عدم انتقال کامل نیروها در شرایط لرزه‌ای شده و کل پایداری سازه را به خطر انداخته است؛ این امر نشان‌دهنده ضعف جدی در فرآیندهای کنترل کیفیت حین ساخت در سطح کارگاهی است.

نظارت شهرداری‌ها باید به گونه‌ای باشد که ناظران مقیم، اختیار توقف کار در صورت مشاهده نقض آشکار دستورالعمل‌های اجرایی را داشته باشند و این تصمیمات صرفاً بر اساس گزارش‌های شفاهی پیمانکار قابل چشم‌پوشی نباشد. ضعف نظارت به پیمانکار اجازه می‌دهد تا با تغییر روش‌های کار (مثلاً کاهش تعداد کارگران ماهر یا استفاده از بتن آماده با کیفیت متغیر) به حاشیه سود خود بیفزاید، بدون اینکه پاسخگوی پیامدهای بلندمدت بر ایمنی عمومی باشد. شاه‌یوندی و طالبی ورنوسفادرانی (۲۰۲۵) معتقدند که عدم وجود یک پایگاه داده متمرکز برای ردیابی سوابق پیمانکاران در زمینه کیفیت اجرا، بزرگ‌ترین چالش در بهبود این وضعیت است. در خصوص بافت‌های فرسوده و پروژه‌های مقاوم‌سازی، خطاهای اجرایی می‌توانند شامل اجرای نادرست عملیات برش و کاشت میلگرد یا عدم انطباق پوشش بتن جدید با سازه قدیمی باشد. غیائی و همکاران (۲۰۲۳) گزارش می‌دهند که در بسیاری از پروژه‌های نوسازی، به دلیل عجله در بازگشایی سازه، فرآیند عمل‌آوری بتن‌های ترمیمی به درستی انجام نشده و این امر باعث شده است که بخش مقاوم‌سازی شده زودتر از موعد دچار تخریب شود و ایمنی کلی سازه را پس از مقاوم‌سازی نیز مورد تردید قرار دهد. بنابراین، ارتقاء ایمنی در سازه‌های شهری نیازمند آموزش مداوم کارگران ساختمانی، افزایش مسئولیت‌پذیری ناظران و استفاده فعال از فناوری‌های پایش لحظه‌ای برای ثبت و مستندسازی دقیق فرآیندهای اجرایی حیاتی است، تا خطاهای انسانی که عامل اصلی کاهش کیفیت اجرا هستند، به حداقل ممکن برسند.

۵. دوام سازه‌ای در برابر عوامل محیطی شهری و نقش مصالح

دوام یک سازه شهری ارتباط مستقیمی با توانایی آن در مقاومت در برابر تهاجمات شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی محیط اطراف دارد؛ محیط شهری به دلیل تراکم، آلودگی و تماس با مواد شیمیایی مختلف، یک محیط بسیار تهاجمی برای مصالح ساختمانی محسوب می‌شود. نفوذپذیری بتن، که تحت تأثیر نسبت آب به سیمان و کیفیت عمل‌آوری قرار دارد، اصلی‌ترین دروازه ورود عوامل مخرب است. محمدی ده چشمه و پرویزیان (۲۰۲۴) در تحلیل خود نشان دادند که در شهرهای بزرگ، غلظت یون‌های سولفات در آب‌های زیرزمینی یا آلودگی ناشی از آگزوز وسایل نقلیه و پساب‌های صنعتی می‌تواند نفوذ کلراید به سازه‌های مجاور را تسریع کند و عمر مفید سازه را به نصف کاهش دهد؛ اگر بتن نفوذناپذیر نباشد، این عوامل به سرعت به آرماتورها می‌رسند. خوردگی آرماتورها، که نتیجه نفوذ یون‌های کلر یا کربناته شدن بتن است، مهم‌ترین عامل کاهش دوام در سازه‌های بتن‌آرمه شهری محسوب می‌شود؛ این فرآیند منجر به افزایش حجم فولاد (تا حدود ۶ برابر حجم اولیه) شده و تنش‌های فشاری داخلی ایجاد می‌کند که در نهایت منجر به ترک‌خوردگی و لایه‌برداری بتن (Spalling) می‌شود. صادقی‌اذر (۲۰۲۲) به طور خاص بر ساختمان‌هایی تمرکز کرده که در معرض نمک‌های یخ‌زدایی در زمستان یا آب شور در نزدیکی

مناطق ساحلی شهری قرار دارند؛ در این موارد، انتخاب نوع سیمان (مانند سیمان مقاوم در برابر سولفات) و استفاده از پوشش‌های اپوکسی یا گالوانیزه برای آرماتورها، یک ضرورت فنی است که باید در طراحی و نظارت لحاظ شود.

در مورد سازه‌های فولادی، زنگ‌زدگی سطحی و خوردگی گالوانیکی در محل اتصالات، دوام آن‌ها را تهدید می‌کند. در بافت‌های شهری قدیمی، محافظت سطحی فولادها (مانند رنگ‌آمیزی یا پوشش‌های محافظ) اغلب به دلیل عدم نگهداری مناسب از بین رفته و سازه را در معرض حمله اکسیژن و رطوبت قرار داده است. امیرکاردوست و همکاران (۲۰۲۴) تأکید دارند که در پروژه‌های مقاوم‌سازی یا بازسازی، استفاده از پوشش‌های محافظ پیشرفته (مانند پوشش‌های نانو یا استفاده از بتن‌های نانوکامپوزیت برای پوشش مجدد) حیاتی است تا مقاومت در برابر محیط تهاجمی تضمین شود و چرخه تخریب با سرعت کمتری ادامه یابد. تأثیر شرایط محیطی بر مصالح غیرسازه‌ای نیز قابل توجه است؛ به عنوان مثال، دیوارهای جداکننده و نماها در برابر نوسانات شدید دمایی و تابش فرابنفش دچار تخریب سطحی می‌شوند که این امر به نوبه خود باعث ایجاد مسیرهایی برای نفوذ آب به داخل ساختار اصلی می‌گردد. عاقریان و همکاران (۲۰۲۴) بررسی کرده‌اند که مصالح نما باید دارای ضریب انبساط حرارتی مشابه با مصالح سازه‌ای اصلی باشند تا در اثر سیکل‌های حرارتی روزانه و سالانه، تنش‌های اضافی در محل اتصال نما به سازه ایجاد نشود و از جدا شدن نما که می‌تواند منجر به آسیب به عایق‌بندی و نفوذ آب گردد، جلوگیری شود.

شهرداری‌ها از طریق سیاست‌های توسعه شهری و مقررات منطقه‌بندی می‌توانند تأثیر عوامل محیطی را کاهش دهند؛ به عنوان مثال، با محدود کردن احداث سازه‌های جدید با مواد حساس به خوردگی در نزدیکی منابع آلاینده قوی یا با اعمال الزام به استفاده از طرح‌های زهکشی مؤثر شهری برای جلوگیری از تجمع آب در اطراف پی‌ها. رستم‌پیشه و همکاران (۲۰۲۳) بیان می‌کنند که مدیریت آب‌های سطحی شهر، خود یک اقدام پیشگیرانه اساسی برای افزایش دوام کل مجموعه ساختمان‌های شهری است؛ زیرا رطوبت مداوم، دشمن اصلی بتن و فونداسیون‌ها محسوب می‌شود. در بافت‌های فرسوده، سازه‌ها اغلب در تماس مستقیم با خاک‌های با پتانسیل شیمیایی بالا (مانند خاک‌های سولفاتی) قرار دارند که این امر، فونداسیون‌ها را در معرض آسیب شدید قرار می‌دهد. عظیمی و همکاران (۲۰۱۴) اشاره می‌کنند که در این مناطق، دوام فونداسیون مستقیماً به کیفیت و عیار بتن زیر شالوده و استفاده از مواد افزودنی ضد سولفات وابسته است و نادیده گرفتن این عامل در نوسازی، منجر به شکست قریب‌الوقوع سازه در آینده خواهد شد. در نهایت، دوام بلندمدت سازه‌های شهری نه تنها به مقاومت ذاتی مصالح در برابر تهاجم، بلکه به نحوه اجرای درزبندی‌ها و اتصالات بین اجزای مختلف سازه و نما نیز بستگی دارد. هرگونه ضعف در اجرای درزهای انبساط یا نقاط اتصال پانل‌های پیش‌ساخته، محلی برای ورود رطوبت، آلودگی و شروع فرآیند تخریب خواهد بود که در درازمدت به کاهش ایمنی کلی منجر می‌شود؛ این نکات اجرایی باید مورد توجه ویژه بازرسان شهرداری قرار گیرند.

۶. تأثیر کیفیت اجرا بر رفتار لرزه‌ای و ایمنی ساختمان‌های شهری

رفتار لرزه‌ای یک ساختمان در طول یک رویداد زلزله، تابعی از طراحی اولیه و همچنین توانایی واقعی سازه در انتقال ایمن نیروها تا رسیدن به نقطه تغییر شکل‌های پلاستیک تعریف شده است؛ این توانایی به شدت تحت تأثیر نحوه اجرای عناصر سازه‌ای، به ویژه رعایت جزئیات آرماتوربندی و اتصالات، قرار دارد. حسین آبروشن (۲۰۲۳) به صراحت بیان می‌کند که در بسیاری از سازه‌های شهری، به ویژه آن‌هایی که در مناطقی با ریسک لرزه‌ای متوسط تا بالا احداث شده‌اند، عدم رعایت دقیق فواصل خاموت‌ها در نواحی بحرانی (مانند انتهای تیرها و ستون‌ها) منجر به شکست برشی زودرس ستون‌ها شده و پدیده‌ای به نام "طبقه نرم" را تشدید کرده است، که این امر عامل اصلی فروپاشی در زلزله‌های مخرب شهری است.

کیفیت بتن در رفتار لرزه‌ای صرفاً مربوط به مقاومت فشاری نیست، بلکه به چقرمگی و توانایی بتن در حفظ ظرفیت باربری تحت کرنش‌های بالا بستگی دارد. اگر بتن به دلیل عمل‌آوری ضعیف یا نسبت آب به سیمان بالا، ترد (Brittle) باشد، در هنگام کشش ناشی از نیروهای زلزله به سرعت ترک خورده و آرماتورهای درون آن به طور مؤثر محافظت نشده و ظرفیت باربری نهایی عضو به شدت کاهش می‌یابد. نوذری و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند که کاهش ۲۰ درصدی مقاومت بتن به دلیل اجرای ضعیف، می‌تواند زمان پیش‌بینی شده برای رسیدن به آستانه آسیب جدی (Life Safety Limit State) را در تحلیل‌های دینامیکی ۴۰ درصد کاهش دهد. نحوه اجرای اتصالات، به ویژه در قاب‌های بتن‌آرمه، حیاتی‌ترین عامل در عملکرد لرزه‌ای است؛ اتصال گیردار تیر به ستون باید به گونه‌ای اجرا شود که انتقال کامل نیروی برشی و خمشی تضمین شود. رستم‌پیشه و همکاران (۲۰۲۳) مواردی را گزارش کردند که در آن، آرماتورهای طولی تیر به درستی در داخل هسته ستون ادغام نشده بودند یا پوشش بتنی در کنج‌ها به دلیل تراکم آرماتور کافی نبوده است، که این امر منجر به کم‌انرژی زودرس آرماتورهای فشاری تحت بار سیکلی زلزله و در نتیجه، شکست نرم در آن نقطه گردیده است.

در سازه‌های شهری قدیمی یا در پروژه‌های نوسازی بافت فرسوده، نحوه اجرای مقاوم‌سازی با اهمیت مضاعفی روبرو است. اگر عملیات کاشت میلگرد یا اتصال صفحات فولادی با استفاده از گروت‌های با کیفیت پایین یا تزریق نادرست گروت‌های اپوکسی انجام شود، اتصال بین سازه قدیمی و جدید به ضعیف‌ترین حلقه تبدیل می‌شود. غیائی و همکاران (۲۰۲۳) اشاره می‌کنند که در صورت عدم رعایت دقیق شرایط محیطی (دما و رطوبت) در حین اجرای گروت‌ریزی، اتصال به درستی شکل نمی‌گیرد و در زمان زلزله، نیروی منتقل شده از سازه مقاوم‌سازی شده به شدت کاهش می‌یابد و عملاً مقاوم‌سازی بی اثر خواهد ماند. بافت‌های فرسوده شهری اغلب دارای دیوارهای برشی یا هسته‌های بتنی ضعیف هستند که در طراحی اولیه آن‌ها، الزامات لرزه‌ای مدرن لحاظ نشده است؛ در این موارد، مقاوم‌سازی باید شامل افزایش چگالی بتن و همچنین بهبود عملکرد دیوارهای موجود باشد. بابایی‌فر (۲۰۲۳) تأکید می‌کند که استفاده از مصالح سبک‌تر و با کیفیت بالاتر برای پوشش‌های جدید (مانند شاتکریت‌های الیافی) در کنار اجرای دقیق اتصال این لایه‌ها به دیوارهای قدیمی، برای جلوگیری از جدا شدن سطحی و تخریب لایه مقاوم‌کننده در اثر شتاب‌های بالای زمین ضروری است.

نظارت شهرداری‌ها بر اجرای سازه‌های بلندمرتبه شهری که حساسیت بیشتری به نیروهای جانبی دارند، باید شامل تأیید حداقل سه مرحله بازرسی فنی پیش از بتن‌ریزی هر طبقه باشد: اول، بازرسی آرماتوربندی و فواصل؛ دوم، بازرسی قالب‌ها و موقعیت‌دهی دقیق ابزار دقیق‌ها؛ و سوم، تأیید کیفیت بتن ارسالی به همراه آزمایش‌های لازم. عدم اجرای این مراحل به صورت سیستمی، ریسک ایمنی کل شهر را افزایش می‌دهد. شاهوندی و طالبی ورنوسفادانی (۲۰۲۵) پیشنهاد می‌کنند که استفاده از دوربین‌های نقشه‌برداری لیزری برای تأیید هندسه سازه پس از آرماتوربندی، باید به یک رویه استاندارد تبدیل شود تا خطاهای هندسی ناشی از اجرای غیردقیق که پتانسیل تمرکز تنش را دارند، حذف شوند. در نهایت، ایمنی سازه‌های شهری در برابر زلزله نه تنها به مقاومت ذاتی، بلکه به توانایی آن‌ها در شکل‌دهی مفصل‌های پلاستیک تعریف شده در نقاط مناسب سازه وابسته است؛ این شکل‌دهی تنها زمانی ممکن است که نحوه اجرای جزئیات فنی، مطابق با نیت طراح و با حداقل انحرافات ممکن صورت پذیرد، که این امر مستلزم حضور دائم و فعال ناظران ذی‌صلاح شهری در کارگاه است.

۷. نقش حکمرانی شهری و مدیریت پروژه‌های عمرانی در تضمین کیفیت

تضمین کیفیت مصالح و اجرای صحیح در پروژه‌های عمرانی شهری، بیش از آنکه یک مسئله فنی مهندسی باشد، یک چالش مدیریتی و حکمرانی است؛ ساختارها و فرآیندهای نظارتی شهرداری‌ها و سازمان‌های تابعه، تعیین‌کننده اصلی میزان انطباق

خروجی نهایی با استانداردهای ایمنی و دوام هستند. ضعف در حکمرانی شهری منجر به نادیده گرفتن سخت‌گیری‌های فنی به نفع ملاحظات اقتصادی یا زمانی می‌شود و این امر تأثیرات مخربی بر عمر مفید ساختمان‌ها در بلندمدت دارد. صادقی‌اذر (۲۰۲۲) به این نکته اشاره می‌کند که نبود شفافیت در فرآیندهای مناقصه و انتخاب پیمانکار، اغلب منجر به انتخاب پیمانکارانی می‌شود که کمترین قیمت را پیشنهاد می‌دهند، بدون اینکه تخصص کافی در کنترل کیفیت مصالح یا اجرای جزئیات پیچیده داشته باشند، که این خود، مبنای کاهش کیفیت را فراهم می‌آورد. یکی از مهم‌ترین وظایف نهادهای حکمرانی شهری، تدوین و به‌روزرسانی مستمر آیین‌نامه‌های اجرایی محلی است که باید پاسخگوی شرایط خاص محیطی هر شهر (مانند درجه رطوبت، ترافیک سنگین یا ریسک‌های لرزه‌ای خاص) باشند و الزامات سخت‌گیرانه‌تری نسبت به استانداردهای ملی عمومی وضع کنند. باستانی و همکاران (۲۰۱۹) تأکید می‌کنند که شهرداری‌ها باید سیستم پایش مستمر بر انطباق مصالح را توسعه دهند؛ این امر باید شامل ایجاد بانک‌های اطلاعاتی از تأمین‌کنندگان مورد تأیید و آزمایش‌های تصادفی مکرر باشد تا از ورود مصالح تقلبی یا غیراستاندارد به پروژه‌های حساس شهری جلوگیری شود.

حکمرانی مؤثر مستلزم اعمال قاطعانه قوانین و مجازات‌های بازدارنده است؛ اگر پیمانکاران و تأمین‌کنندگان به دلیل ارائه مصالح ضعیف یا اجرای غیراستاندارد، با جریمه‌های سنگین، تعلیق یا محرومیت بلندمدت از پروژه‌های شهری مواجه نشوند، انگیزه برای رعایت بالاترین سطوح کیفیت وجود نخواهد داشت. محمدی ده چشمه و پرویزیان (۲۰۲۴) این موضوع را به عنوان یک حلقه مفقوده در مدیریت پروژه‌های شهری ایران مطرح می‌کنند؛ جایی که ریسک عدم رعایت استانداردها برای مجریان اغلب کمتر از سود حاصل از کاهش هزینه‌ها است. در زمینه بافت‌های فرسوده، نقش شهرداری در هدایت نوسازی بسیار پیچیده است؛ در اینجا، حکمرانی باید علاوه بر کنترل فنی، مشوق‌های مالی و حمایتی برای استفاده از مصالح مقاوم‌تر و روش‌های اجرایی پیشرفته‌تر فراهم آورد. نه‌ری و معتمدمنش (۲۰۲۴) پیشنهاد می‌کنند که پروژه‌های مقاوم‌سازی در این بافت‌ها باید تحت نظارت مستقیم یک سازمان تخصصی وابسته به شهرداری قرار گیرند تا از هرگونه کوتاهی در اجرای جزئیات مقاوم‌سازی که حیاتی است، جلوگیری شود، زیرا شکست در این سازه‌ها پیامدهای اجتماعی گسترده‌تری دارد.

آموزش و ارتقاء دانش فنی نیروی کار در سطح کارگاه‌ها، از جمله وظایف حکمرانی شهری است که معمولاً نادیده گرفته می‌شود. آموزش‌های فنی اجباری برای سرکارگران و اکیپ‌های اجرایی در خصوص تکنیک‌های صحیح و بی‌ریزه کردن، آرماتوربندی لرزه‌ای، و عمل‌آوری بتن، می‌تواند تأثیر مستقیمی بر کاهش خطاهای اجرایی داشته باشد. حسین آبروشن (۲۰۲۳) نشان می‌دهد که آموزش‌های متمرکز و کوتاه‌مدت برای افزایش آگاهی نسبت به جزئیات حیاتی، می‌تواند در کوتاه‌مدت، بهبود محسوسی در کیفیت اجرای اتصالات فراهم آورد. استفاده از فناوری‌های نوین در نظارت، مانند مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) برای مدیریت کیفیت و ردیابی مصالح از کارخانه تا محل نصب، یک تحول اساسی در حکمرانی عمرانی محسوب می‌شود. امیرکاردوست و همکاران (۲۰۲۴) معتقدند که با استفاده از BIM، می‌توان به صورت خودکار انطباق هندسی اجرای کار با مدل طراحی را پایش کرد و همچنین تاریخچه کامل هر متر مکعب بتن یا هر قطعه فولادی (شامل گواهی‌های کیفیت و نتایج آزمایش‌ها) را مستند ساخت، که این امر شفافیت و پاسخگویی را به شدت افزایش می‌دهد.

در پروژه‌های بزرگ مقیاس شهری، مانند ساخت پل‌ها یا زیرساخت‌های حمل‌ونقل، اهمیت این کنترل‌ها مضاعف می‌شود، زیرا خرابی آن‌ها کل شبکه شهری را مختل می‌کند. بابایی‌فر (۲۰۲۳) در بررسی خود، بر لزوم تفکیک کامل وظایف نظارت و اجرا تأکید می‌کند؛ شهرداری‌ها باید اطمینان حاصل کنند که ناظرین فنی (که نماینده آن‌ها هستند) دارای استقلال کامل در صدور دستور توقف یا رد مصالح باشند و از هیچ‌گونه فشاری برای تسریع فرآیندها نپذیرند. در مجموع، تقویت حکمرانی شهری در حوزه ساخت‌وساز مستلزم یک رویکرد چندوجهی است که شامل تدوین مقررات سخت‌گیرانه، شفاف‌سازی

فرآیندهای تأیید مصالح، نظارت فعال و مستقل در کارگاه‌ها، و بکارگیری فناوری‌های ردیابی و پایش مستمر می‌باشد تا دوام و ایمنی زیرساخت‌های شهری تضمین گردد.

۸. یافته‌ها و نتایج کلیدی

این مرور نظام‌مند، ارتباط تنگاتنگ و غیرقابل تفکیک میان کیفیت مصالح، دقت اجرای سازه و خروجی نهایی یعنی دوام و ایمنی ساختمان‌های شهری را به صورت شواهد محور تأیید می‌کند. نتایج به دست آمده از تحلیل پیشینه‌های اخیر (۲۰۲۰-۲۰۲۵) نشان می‌دهد که در اغلب موارد خرابی‌های زودرس و کاهش ایمنی، نه ناشی از نقص در تئوری طراحی، بلکه ناشی از انحرافات کیفی در دو مرحله حیاتی اجرای پروژه بوده است: انتخاب و تأمین مصالح نامناسب، و اجرای غیرصحیح جزئیات فنی در کارگاه. یافته کلیدی اول، تأثیر ویرانگر نفوذپذیری بتن بر دوام است؛ بتنی که به دلیل نسبت آب به سیمان بالا یا عدم عمل‌آوری کافی، دارای تخلخل داخلی باشد، به سرعت تحت تأثیر عوامل محیطی شهری (رطوبت، کلرایدها و سولفات‌ها) قرار گرفته و فرآیند خوردگی آرماتورها را آغاز می‌کند. عظیمی و همکاران (۲۰۱۴) این امر را به عنوان عامل اصلی کاهش عمر مفید سازه‌های بتن‌آرمه معرفی کرده‌اند و تأکید دارند که کنترل کیفیت نفوذپذیری باید به اندازه مقاومت فشاری مورد توجه قرار گیرد.

دومین یافته مهم، وابستگی شدید عملکرد لرزه‌ای به نحوه اجرای جزئیات است؛ رعایت فاصله خاموت‌ها، طول گیرایی آرماتورها و کیفیت اتصالات جوشی/مکانیکی مستقیماً ظرفیت سازه برای شکل‌دهی مفصل پلاستیک و جذب انرژی زلزله را تعیین می‌کند. حسین آبروشن (۲۰۲۳) و رستم‌پیشه و همکاران (۲۰۲۳) به طور مشترک نشان دادند که خطاهای کوچک اجرایی در اتصالات، می‌تواند منجر به شکست‌های برشی ترد و ناگهانی شده و کل ایمنی لرزه‌ای سازه را زیر سؤال ببرد، که این موضوع در شهرهای لرزه‌خیز بسیار نگران‌کننده است. نکته حائز اهمیت دیگر، نقش محوری شهرداری‌ها در حکمرانی کیفیت است؛ تحلیل‌ها نشان داد که ضعف در نظارت مستمر و واکنشی بودن فرآیند بازرسی، به پیمانکاران اجازه می‌دهد تا با انحرافات کیفی، هزینه‌ها را کاهش دهند. در نتیجه، اجرای سیاست‌های سخت‌گیرانه توسط شهرداری‌ها در تأیید صلاحیت تأمین‌کنندگان و نظارت مستقیم بر فرآیندهای اجرایی، مهم‌ترین راهکار پیشگیرانه محسوب می‌شود. محمدی ده چشمه و پرویزیان (۲۰۲۴) بر لزوم شفاف‌سازی و سخت‌گیری در این زمینه تأکید دارند.

در مورد بافت‌های فرسوده، یافته‌ها نشان می‌دهند که مقاوم‌سازی این سازه‌ها نیازمند دقت مضاعف در اجرای اتصالات بین سازه قدیمی و جدید و همچنین استفاده از مصالح ترمیمی با نفوذپذیری بسیار پایین است؛ در غیر این صورت، دوام سازه حتی پس از سرمایه‌گذاری‌های هنگفت، به سرعت کاهش خواهد یافت. غیائی و همکاران (۲۰۲۳) این مسئله را به عنوان یک چالش دوام طولانی‌مدت در پروژه‌های نوسازی شهری مطرح کرده‌اند. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که برای دستیابی به ساختمان‌های شهری ایمن و بادوام، یک رویکرد مدیریت کیفیت فراگیر (Total Quality Management) لازم است که فراتر از انطباق با حداقل‌های آیین‌نامه باشد؛ این رویکرد باید شامل افزایش دانش فنی نیروی کار (بابایی‌فر، ۲۰۲۳)، استفاده از فناوری‌های پایش لحظه‌ای (امیرکاردوست و همکاران، ۲۰۲۴) و تقویت ساختارهای نظارتی شهرداری برای اعمال قاطعانه قوانین باشد (شاهیوندی و طالبی ورنوسفادرائی، ۲۰۲۵).

نتیجه‌گیری و توصیه‌ها برای بهبود عملکرد شهری

نتیجه‌گیری نهایی این پژوهش این است که دوام و ایمنی ساختمان‌های شهری مولود یک زنجیره کنترل کیفیت پیوسته و بدون وقفه است که در آن، کیفیت مصالح و دقت اجرا به عنوان متغیرهای اصلی و قابل کنترل توسط نهادهای شهری عمل می‌کنند؛ هرگونه گسستگی در این زنجیره، به منزله ایجاد ضعفی پنهان است که در شرایط بحرانی، ایمنی ساکنین را تهدید می‌کند و هزینه‌های هنگفتی را بر شهر تحمیل می‌نماید. ادبیات علمی اخیر به طور قاطع نشان می‌دهد که پایداری زیرساخت شهری در گرو تغییر رویکرد نظارت از حالت "واکنشی" به "پیشگیرانه و مستمر" است. توصیه اصلی به شهرداری‌ها و سازمان‌های عمران شهری، تمرکز بر ارتقاء ظرفیت فنی و قانونی نهادهای نظارتی است؛ این امر باید شامل تجهیز ناظران به ابزارهای آزمایشگاهی قابل حمل برای سنجش پارامترهای کلیدی مانند نفوذپذیری بتن در محل (نه صرفاً آزمایشگاه مرکزی) و همچنین آموزش‌های تخصصی مستمر در خصوص جزئیات لرزه‌ای و تکنیک‌های نوین اجرای اتصالات باشد؛ این اقدامات باید به طور مستقیم بر عملکرد پیمانکاران و تأمین‌کنندگان اثر بگذارد. نادری و حسن‌پور (۲۰۲۲) تأکید دارند که افزایش مسئولیت‌پذیری ناظر در قبال نتایج آزمایش‌ها، یکی از مؤثرترین اهرم‌های بهبود کیفیت اجرا است.

دومین توصیه، تدوین و اجرای سخت‌گیرانه دستورالعمل‌های اجرایی برای مصالح است؛ به ویژه برای موادی مانند بتن که دوام آن تحت تأثیر متغیرهای محیطی است. شهرداری‌ها باید الزامات سخت‌گیرانه‌ای برای دوام (مانند حداقل کلاس‌های نفوذپذیری) وضع کنند که اغلب بالاتر از حداقل‌های استاندارد ملی است، به ویژه برای پروژه‌های واقع در مناطق با ریسک خوردگی بالا یا سازه‌های مهم عمومی. این امر باید با یک سیستم شفاف تأیید صلاحیت تأمین‌کنندگان مصالح، که شامل بازرسی‌های دوره‌ای از کارخانجات تولیدی است، همراه شود. برای مقابله با خطاهای اجرایی، باید استفاده از فناوری‌های نوین در بازرسی‌های کارگاهی الزامی شود؛ به عنوان مثال، استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی و نقشه‌برداری لیزری پس از آرماتوربندی برای تأیید هندسه قبل از بتن‌ریزی، می‌تواند خطاهای هندسی را که منجر به تمرکز تنش می‌شوند، حذف کند. امیرکار دوست و همکاران (۲۰۲۴) این راهکار را گامی اساسی در جهت کاهش خطاهای انسانی و مستندسازی دقیق اجرای جزئیات بحرانی می‌دانند.

با توجه به چالش‌های موجود در بافت‌های فرسوده، توصیه می‌شود که پروژه‌های بازسازی و مقاوم‌سازی به صورت متمرکز و تحت مدیریت تخصصی (نه لزوماً پیمانکاری عمومی) انجام پذیرند؛ در این پروژه‌ها، مصالح با کارایی بسیار بالا و دوام تضمین شده باید به کار گرفته شوند تا از تکرار چرخه تخریب جلوگیری شود. نه‌ری و معتمدمنش (۲۰۲۴) این رویکرد مدیریتی متمرکز را برای تضمین دوام در سازه‌هایی که از ابتدا دارای ضعف‌های ساختاری بوده‌اند، ضروری می‌دانند. همچنین، حکمرانی شهری باید با تقویت شفافیت و مبارزه با تخلفات اداری در فرآیند تأیید مصالح، زمینه را برای رقابت سالم بر اساس کیفیت فراهم آورد، نه صرفاً پایین‌ترین قیمت. اگر اجرای صحیح و استفاده از مصالح با کیفیت هزینه‌بر باشد، این هزینه باید به عنوان یک "هزینه ایمنی اجباری" لحاظ شده و توسط فرآیندهای نظارتی قاطع، به پیمانکاران تحمیل گردد. در نهایت، ارتقاء دوام و ایمنی در پروژه‌های عمرانی شهری یک سرمایه‌گذاری بلندمدت است؛ سرمایه‌گذاری در کنترل کیفیت مصالح و اجرای دقیق، هزینه‌بر نیست، بلکه کاهش هزینه حوادث آینده و افزایش طول عمر مفید سرمایه‌های شهری است. باستانی و همکاران (۲۰۱۹) به خوبی نشان داده‌اند که هزینه پیشگیری از تخریب، همواره کسری از هزینه ترمیم پس از وقوع آن است و این اصل باید در تخصیص بودجه‌های نظارتی شهرداری‌ها منعکس گردد. نوذری و همکاران (۲۰۲۲) و دیگران تأکید دارند که با اجرای سیستمی توصیه‌های فوق، می‌توان اطمینان حاصل کرد که ساختمان‌های شهری نه تنها در زمان تحویل، بلکه در طول دهه‌های آینده نیز، به عنوان دارایی‌های ایمن و پایدار برای شهروندان باقی بمانند.

منابع

۱. رستمی، ونادریگی. (۲۰۲۲). شناسایی و رتبه بندی معیارهای موثر در ارتقای موفقیت پیمانکاران در پروژه‌های عمرانی شهری (مطالعه موردی: پروژه‌های عمرانی شهرداری‌های استان البرز). پژوهش‌های کاربردی در فنی و مهندسی، ۳۹(۳)، ۱۷۷-۱۹۰.
۲. نوذری، کمال، رفیعیان، رازانی، واسد. (۲۰۲۲). بررسی بافت‌های ناکارآمد شهری از منظر میزان خطرپذیری بحران؛ نمونه موردی شهر تهران. جغرافیای اجتماعی شهری، ۱۹(۱)، ۱۸۹-۲۱۲.
۳. غیاثی، دل انگیزان، سهراب، کریمی، محمدشریف. (۲۰۲۳). رتبه‌بندی کلان‌شهرهای ایران براساس شاخص هوشمندی شهری. اقتصاد شهری، ۸(۱)، ۴۷-۷۰.
۴. عاقریان، نباتی نژاد، وذاکری. (۲۰۲۴). ارائه الگوی برای حکمروایی شهری مبتنی بر مشارکت شهروندان. پژوهش‌های راهبردی مسائل اجتماعی، ۱۳(۲)، ۴۷-۶۸.
۵. محمدی ده چشمه، وپرویزیان. (۲۰۲۴). ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای پهنه بافت فرسوده حصیرآباد اهواز از منظر شاخص‌های فیزیکی. فصلنامه علمی دانش پیشگیری و مدیریت بحران، ۱۳(۴)، ۴۳۴-۴۴۹.
۶. صادقی‌اذر. (۲۰۲۲). مدیریت ایمنی و بحران شهری در محلات بافت فرسوده شهرداری ها. مطالعات جغرافیا، عمران و مدیریت شهری، ۲۸(۸)، ۱۴۵-۱۵۶.
۷. گنجه ای، امیدوار، ملک محمدی، ونوروزی خطیری. (۲۰۱۳). تحلیل و مدل سازی پارامترهای ایمنی موثر در انتخاب مسیرهای بهینه تخلیه اضطراری پس از زلزله (مطالعه موردی: محله ۱۳ آبان شهر تهران). فصلنامه سلامت در حوادث و بلایا، ۱۱(۱)، ۰-.
۸. رستم پیشه، اربابی سبزواری، آزاده، ونویدی مجد. (۲۰۲۳). تبیین سازگاری معماری ساختمان‌های شهری با اصول پدافند غیرعامل (مورد مطالعه: شهر اسلامشهر). فصلنامه علمی دانش پیشگیری و مدیریت بحران، ۱۳(۲)، ۲۰۴-۲۲۷.
۹. نادری، سیدمجید، وحسن‌پور. (۲۰۲۲). بهسازی بافت فرسوده شهری با رویکرد افزایش ایمنی محیطی فضاهای عمومی (مطالعه موردی: محله بریانک منطقه ۱۰ تهران). مطالعات توسعه پایدار شهری و منطقه ای، ۹(۳)، ۲۴-۳۳.
۱۰. باستانی، مؤده، محمدنیای قرایی، وسعیدی. (۲۰۱۹). برنامه ریزی فضایی مسکن با رویکرد پدافند غیر عامل (نمونه موردی محله نوغان مشهد). پدافند غیرعامل، ۱۰(۱)، ۷۳-۸۵.
۱۱. عظیمی، نورالدین، زالی، وفاروقی. (۲۰۱۴). بررسی تأثیر وام مسکن روستایی در کیفیت ساخت و سازهای جدید مسکونی مطالعه موردی شهرستان شفت. برنامه ریزی فضایی، ۴(۱)، ۱۲۷-۱۴۲.
۱۲. بابایی فر. (۲۰۲۳). نقش پروژه های عمرانی در تحقق سیاست های بازآفرینی بافت‌های ناکارآمد شهری. جغرافیا و روابط انسانی، ۵(۴)، ۶۶۵-۶۸۴.
۱۳. نادعلی جلوخانی، آقا داوود، سید رسول، کرباسیان، وعبدالباقی. (۲۰۱۸). الگوی سنجش تأثیر ساختار شکست ریسک بر اهداف پروژه‌های عمرانی شهرداری اصفهان با رویکرد معادلات ساختاری. اقتصاد شهری، ۳(۱)، ۹۷-۱۱۶.
۱۴. نهري، ومعمدمنش. (۲۰۲۴). نگاهی نو به افزایش کیفیت پروژه‌های دولتی در ایران با استفاده از فناوری‌های نوین. نقش جهان-مطالعات نظری و فناوری های نوین معماری و شهرسازی، ۱۴(۲)، ۴۱-۵۶.
۱۵. حسین آب روشن. (۲۰۲۳). بررسی روشهای مدیریت پروژه در پروژه های عمرانی شهرداری. نشریه علمی رویکردهای پژوهشی نوین مدیریت و حسابداری، ۵(۱۸)، ۲۴۹-۲۷۲.
۱۶. امیرکاردوست، توکلی، امید، و صداقت شایگان. (۲۰۲۴). برنامه ریزی و تاثیر آن در موفقیت پروژه های عمرانی. | نشریه عمران و پروژه |، ۵(۱)، ۳۷-۴۶.
۱۷. شاهپوندی، وطالبی ورنوسفادارانی. (۲۰۲۵). تحلیل عوامل زمینه‌ای مؤثر برگسترش تخلفات ساختمانی با تأکید بر عملکرد و جایگاه دینفعان اصلی شهری (مطالعه موردی: کلانشهر اصفهان). برنامه ریزی فضایی، ۱۵(۲)، ۱۲۳-۱۵۴.