



راهبردهای مقاوم سازی برای ارتقای تاب آوری سازه های بتن آرمه در برابر انفجار

کوثر یزدان نجاد^{۱*}، علیرضاهائی^۲

^۱ دکترای عمران-سازه، دانشگاه کردستان، رئیس گروه مطالعات فنی و عمرانی مرکز مطالعات و برنامه ریزی شهر تهران، عضو سازمان نظام مهندسی ساختمان استان تهران

^۲ عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

*yazdannejadk@gmail.com





افزایش مخاطرات ناشی از انفجار در محیط‌های شهری، لزوم ارتقای تاب‌آوری سازه‌های بتن آرمه را به یک اولویت مهندسی تبدیل کرده است.



۱- چکیده

افزایش مخاطرات ناشی از انفجار در محیط‌های شهری، لزوم ارتقای تاب‌آوری سازه‌های بتن آرمه (RC) را به یک اولویت مهندسی تبدیل کرده است. این پژوهش با هدف تدوین یک تحلیل فنی و مدیریتی از راهبردهای تقویت سازه‌ها به بررسی رفتار دینامیکی اعضای سازه‌ای تحت بارگذاری‌های انفجاری می‌پردازد. با مروری بر رویدادهای تاریخی و حوادث اخیر نظیر وقایع اخیر تهران و انفجارهای ناشی از تعارضات منطقه‌ای، مشخص شده است که بخش عمده‌ای از ساختمان‌های موجود برای مقابله با بارهای انفجاری طراحی نشده‌اند. در این مقاله ضمن تبیین ماهیت فیزیکی امواج انفجار و مکانیسم‌های پاسخ سازه‌ای (شامل شکست‌های ترد برشی و نفوذ)، روش‌های مقاوم‌سازی در سه سطح تقویت سازه، سپرگذاری و کنترل آوار با استفاده از مصالح پیشرفته FRP، پلی‌اوره، فوم آلومینیوم و کامپوزیت‌های سیمانی ارزیابی شده‌اند. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که علاوه بر ارتقای ظرفیت باربری، استفاده از سیستم‌های مهاربندی مکانیکی و راهکارهای ترکیبی نقشی کلیدی در افزایش شکل‌پذیری و جذب انرژی دارد. در نهایت، با تلفیق این یافته‌های فنی، یک چهارچوب مدیریتی راهبردی برای اولویت‌بندی عملیات مقاوم‌سازی در ساختمان‌های شهری ارائه شده است. با توجه به یافته‌های این پژوهش، تدوین دستورالعمل‌های بومی و ابلاغ ضوابط اجرایی توسط سازمان نظام مهندسی ساختمان، نقشی حیاتی در نظارت بر کیفیت مقاوم‌سازی و استانداردسازی رویکردهای نوین در صنعت ساخت‌وساز کشور ایفا می‌کند تا از طریق هم‌افزایی میان دانش فنی و ظرفیت‌های نظارتی، تاب‌آوری عمومی در برابر تهدیدات نوین ارتقا یابد.

۲- مقدمه

در دهه‌های اخیر افزایش قابل توجهی در رویدادهای انفجاری در سراسر جهان مشاهده شده است. این رویدادها ممکن است ناشی از حوادث صنعتی، انفجار گاز یا حملات تروریستی باشند و در بسیاری از موارد باعث تخریب گسترده ساختمان‌ها و تلفات انسانی شده‌اند. حوادثی مانند فروپاشی ساختمان رونان پوینت ۱ در سال ۱۹۶۸، بمب‌گذاری مرکز تجارت جهانی ۲ در سال ۱۹۹۳، انفجار اوکلاهما سیتی ۳ در سال ۱۹۹۵، انفجار لندن در سال ۲۰۰۵ و سایر رویدادهای مشابه از جمله حوادث جنگ رمضان و جنگ ۱۲ روزه در ایران، نشان داده‌اند که بسیاری از ساختمان‌های موجود برای مقاومت در برابر بارهای انفجاری طراحی نشده‌اند. انفجار به پدیده‌ای اطلاق می‌شود که در آن مقدار زیادی انرژی در مدت زمان بسیار کوتاهی آزاد می‌شود. این

آزادسازی انرژی منجر به تشکیل موج ضربه‌ای با فشار بالا می‌شود که در فاصله کوتاهی به سازه برخورد کرده و باعث ایجاد تنش‌های شدید و تغییر مکان‌های ناگهانی در اعضای سازه‌ای می‌شود. رفتار سازه‌ها در برابر چنین بارگذاری‌هایی به عوامل متعددی از جمله وزن ماده منفجره، فاصله انفجار، شرایط محصور بودن انفجار و ویژگی‌های مکانیکی مصالح سازه‌ای وابسته است [۱-۸]. موج انفجار معمولاً شامل دو فاز اصلی است. در مرحله نخست فشار محیط به‌طور ناگهانی افزایش یافته و به مقدار اوج فشار مثبت می‌رسد. سپس این فشار کاهش یافته و حتی از فشار اتمسفری کمتر می‌شود که منجر به ایجاد فشار منفی و جریان مکشی هوا به سمت مرکز انفجار می‌گردد. این تغییرات سریع فشار باعث ایجاد نرخ کرنش بسیار بالا در مصالح سازه‌ای شده و رفتار آن‌ها را به شدت غیرخطی می‌کند [۶، ۷].

بررسی‌های انجام‌شده در حوادث واقعی نشان داده است که بخش قابل توجهی از تلفات انسانی ناشی از انفجار به دلیل فروپاشی سازه و تولید آوار خطرناک رخ می‌دهد. برای مثال در بررسی انجام‌شده پس از انفجار اوکلاهما سیتی مشخص شد که حدود ۸۷ درصد از افراد حاضر در بخش فرو ریخته ساختمان جان خود را از دست دادند در حالی که در بخش سالم ساختمان تنها حدود ۵ درصد تلفات گزارش شده است. این موضوع نشان می‌دهد که حفظ یکپارچگی سازه و جلوگیری از فروپاشی نقش اساسی در کاهش تلفات دارد.

از آنجاکه بسیاری از ساختمان‌های موجود برای مقاومت در برابر انفجار طراحی نشده‌اند، مقاوم‌سازی آن‌ها به یکی از موضوعات مهم در مهندسی سازه تبدیل شده است. روش‌های مقاوم‌سازی معمولاً با هدف افزایش مقاومت، افزایش شکل‌پذیری، کاهش اثر موج انفجار یا کنترل آوار انجام می‌شوند. با این حال در بسیاری از ساختمان‌های موجود افزایش جرم سازه‌ای یا افزایش ابعاد مقاطع ممکن است با محدودیت‌هایی مانند ظرفیت پی یا محدودیت‌های اجرایی مواجه باشد. در سال‌های اخیر استفاده از مصالح پیشرفته مانند پلیمرهای مسلح به الیاف (FRP)، پلی‌اوره، کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی‌شده، ژاکت‌های فولادی و فوم آلومینیومی به عنوان راهکارهای مؤثر برای مقاوم‌سازی سازه‌ها در برابر انفجار مورد توجه قرار گرفته است. این مصالح علاوه بر افزایش ظرفیت باربری، می‌توانند نقش مهمی در جذب انرژی و کنترل آوار ایفا کنند. هدف این مقاله ارائه یک تحلیل فنی و مدیریتی از روش‌های مقاوم‌سازی سازه‌ها در برابر بارهای انفجاری است. در این راستا راهبردهای مختلف مقاوم‌سازی بر اساس سه دسته اصلی شامل تقویت سازه، سپرگذاری و کنترل آوار خطرناک بررسی شده و عملکرد مصالح مختلف در مقاوم‌سازی اعضای سازه‌ای مانند ستون‌ها، دال‌ها و دیوارها مورد تحلیل قرار می‌گیرد. علاوه بر این، پیامدهای این راهکارها برای ایمنی شهری، مدیریت ریسک و



انفجار به پدیده‌ای اطلاق می‌شود که در آن مقدار زیادی انرژی در مدت زمان بسیار کوتاهی آزاد می‌شود.





خرابی کف‌های یکی از متداول‌ترین پیامدها در انفجارهای نزدیک است.

تغییر شکل خمشی و جابه‌جایی‌های بزرگ ظاهر می‌شود. در مقابل، مقادیر کوچک‌تر از این حد، مربوط به انفجارهای نزدیک بوده و با اعمال بیش فشار بسیار شدید در مدت زمان کوتاه مشخص می‌شوند؛ شرایطی که به‌طور بالقوه منجر به شکست‌های ترد برشی، خردشدگی بتن، پدیده نفوذ، اسپال و پرتاب قطعات می‌گردد. ماهیت آسیب‌زایی موج انفجار بدین شکل است که جبهه ضربه ابتدا به جداره خارجی ساختمان، که معمولاً آسیب‌پذیرترین بخش سیستم سازه‌ای است برخورد کرده و موجب شکست دیوارهای خارجی، خرابی پوسته و تخریب شیشه‌ها می‌شود. در ادامه موج وارد سازه شده و هم‌زمان فشارهای رو به بالا و رو به پایین را بر دال‌های کف اعمال می‌کند. با توجه به سطح زیاد و ضخامت کم دال‌ها و همچنین عدم طراحی آن‌ها برای بارهای رو به بالا، خرابی کف‌ها یکی از متداول‌ترین پیامدها در انفجارهای نزدیک است. این فرایند در بازه‌ای بین چند ده تا چند صد میلی‌ثانیه رخ می‌دهد؛ اما چنانچه آسیب‌های اولیه به کاهش ظرفیت اعضای باربر منجر شود، احتمال آغاز فروپاشی پیش‌رونده وجود دارد که معمولاً در چند ثانیه پس از انفجار بروز می‌کند [۱، ۲، ۱۵، ۲۳، ۲۴].

پاسخ اعضای سازه‌ای را می‌توان به سه مکانیسم اصلی تقسیم کرد: خمش، برش، و نفوذ/بریدگی. رفتار خمشی به دلیل شکل‌پذیری بالا و قابلیت جذب انرژی مناسب، مطلوب‌ترین نوع پاسخ در طراحی‌های مقاوم در برابر انفجار محسوب می‌شود. در مقابل، شکست برشی، اعم از برش مورب یا برش مستقیم، ماهیتی ترد و فاقد شکل‌پذیری دارد و وقوع آن باید تا حد امکان محدود شود. برش مورب زمانی رخ می‌دهد که تنش‌های کششی مورب عضو از مقاومت کششی بتن پیشی بگیرد، در حالی که برش مستقیم غالباً در نزدیکی انفجار رخ داده و ظرفیت عضو در این شرایط، به مقاومت برشی مقطع و مشارکت مکانیکی آرماتورهای دال وابسته است. هر دو حالت منجر به شکست ناگهانی می‌شوند و از این رو کنترل آن‌ها از اصول کلیدی طراحی مقاوم در برابر انفجار است [۸، ۲۲].

در فاصله‌های بسیار نزدیک، پدیده نفوذ رخ می‌دهد که طی آن بخش‌هایی از بتن یا مصالح دیوار به‌طور کامل خرد شده یا از مقطع جدا می‌شوند. در مواردی که نفوذ کامل رخ ندهد، امکان وقوع اسپال در وجه پشتی دیوار وجود دارد که موجب پرتاب قطعات به فضای داخلی می‌شود. این حالت از خطرناک‌ترین اشکال خرابی برای استفاده‌کنندگان ساختمان است و معمولاً از طریق افزایش ضخامت عضو، اعمال قیدگذاری مناسب یا استفاده از لایه‌های ضد اسپال مانند FRP یا سیستم‌های گیرنده ژئوتکستایل کنترل می‌شود [۱۱، ۱۴، ۲۵-۳۱]. از منظر تحلیل سازه، پاسخ تحت بار انفجار غالباً با مدل‌های دینامیکی غیرخطی، روابط تنش-تغییر شکل الاستیک-کاملاً پلاستیک و در نظر گرفتن شرایط واقعی تکیه‌گاهی و اثرات $P-\Delta$ مدل‌سازی

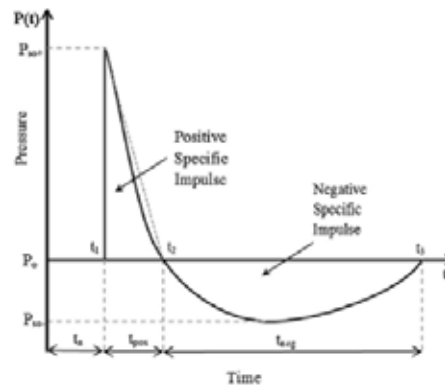
برنامه‌ریزی زیرساخت‌های حیاتی نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد [۹-۲۴].

۳- ماهیت بارهای انفجاری و پاسخ سازه‌ها

بارهای انفجاری از شدیدترین و آنی‌ترین انواع بارگذاری دینامیکی هستند که می‌توانند در بازه زمانی چند میلی‌ثانیه انرژی بسیار زیادی را به سازه منتقل کنند و پاسخ‌هایی کاملاً متفاوت از بارهای ثقلی یا جانبی متعارف ایجاد نمایند. ماهیت موج انفجار به گونه‌ای است که در لحظه وقوع انفجار، یک جبهه شوک با سرعت بسیار بالا و فشار اوج قابل توجه تشکیل می‌شود و پس از گذر از نقطه بیشینه، با رفتار مشخصه فریدلندر کاهش می‌یابد. رفتار فشار-زمان موج انفجار معمولاً با معادله فریدلندر مدل‌سازی می‌شود [۲]:

$$(1) \quad P(t) = P_0 + P_{SO} + \left(1 - \frac{t}{t_{pos}}\right) e^{-b \frac{t}{t_{pos}}}$$

که در آن، $P(t)$ بیش فشار برخوردی در هر لحظه زمانی است؛ P_0 فشار محیطی است؛ P_{SO} و P_{SO-} به ترتیب بیش فشار اوج مثبت برخوردی و کم فشار اوج منفی برخوردی هستند؛ t_{pos} و t_{neg} مدت زمان فاز مثبت و فاز منفی موج انفجار برخوردی را نشان می‌دهند؛ t_a زمان رسیدن موج است و b پارامتر میرایی موج می‌باشد. در شکل ۱، نمودار فشار-زمان برای موج انفجار نشان داده شده است.



شکل ۱- نمودار فشار-زمان برای موج انفجار [۲]

شدت اثرگذاری انفجار معمولاً با استفاده از فاصله مقیاس‌شده ارزیابی می‌شود؛ پارامتری که برابر با نسبت فاصله انفجار به ریشه سوم وزن ماده منفجره است و بیانگر ماهیت تضعیف انرژی موج در فضا می‌باشد. مقادیر بزرگ‌تر از حدود ۱.۲ متر بر ریشه سوم کیلوگرم معمولاً معرف انفجارهای دوربرد هستند که در آن‌ها فشار اوج کاهش یافته و پاسخ سازه غالباً به صورت

ماهیت موج انفجار به گونه‌ای است که در لحظه وقوع انفجار، یک جبهه شوک با سرعت بسیار بالا و فشار اوج قابل توجه تشکیل می‌شود و پس از گذر از نقطه بیشینه، با رفتار مشخصه فریدلندر کاهش می‌یابد.



جدول ۱- ماهیت انفجار، مکانیسم‌های پاسخ سازه‌ای و انواع آسیب [۳۷-۸]

فاصله و شدت انفجار	ماهیت بار وارده بر سازه	پاسخ سازه (مکانیسم‌های حاکم)	نوع آسیب متداول
انفجار بسیار نزدیک ($Z > 1,2$)	فشار اوج بسیار بالا، مدت زمان بسیار کوتاه، بارگذاری چندجهته و رو به بالا	برش مستقیم، برش مورب، نفوذ، اسپال	شکست ترد برشی، خردشدگی بتن، پرتاب قطعات، شکست کف، نفوذ در دیوار
انفجار نزدیک ($1,2 > Z > 2$)	فشار بالا با میرایی سریع	ترکیب خمش-برش، تسلیم خمشی محدود	شکست دیوار خارجی، شکست شیشه‌ها، آسیب موضعی دال
انفجار دوربرد ($Z < 3$)	فشار کمتر، مدت زمان طولانی‌تر	پاسخ غالباً خمشی، تغییر مکان‌های بزرگ	تغییر شکل خمشی اعضا، آسیب قاب‌ها بدون خرابی ترد
انفجار داخل سازه	فشار داخلی چندجهتی	شکست موضعی شدید، برش، اسپال پشت دیوار	فروپاشی سریع اجزای سبک و شیشه، آسیب کف‌ها

سازه، اجزای غیرسازه‌ای و تجهیزات در برابر سناریوهای مختلف انفجار تأکید دارد. هدف اصلی دستیابی به سطوح مشخصی از بقا، ایمنی جانی و تداوم عملیاتی پس از حادثه است. در چهارچوب PBD، می‌توان پاسخ سازه به انفجار را در چهار سطح عملکردی طبقه‌بندی کرد [۱۷-۱۲]:

۱. بهره‌برداری کامل^۴: سازه و سیستم‌های حیاتی بدون آسیب معنادار، به عملیات عادی خود ادامه می‌دهند. این سطح نیازمند حداقل تغییر شکل دائمی (مثلاً $L/100$ برای تیرها، $L/200$ برای ستون‌ها) و کرنش پلاستیک ناچیز (کمتر از ۰,۲٪) در اعضای سازه‌ای اصلی است. اجزای غیرسازه‌ای و تجهیزات نیز باید بدون اختلال کار کنند [۱۲, ۱۷, ۳۵].

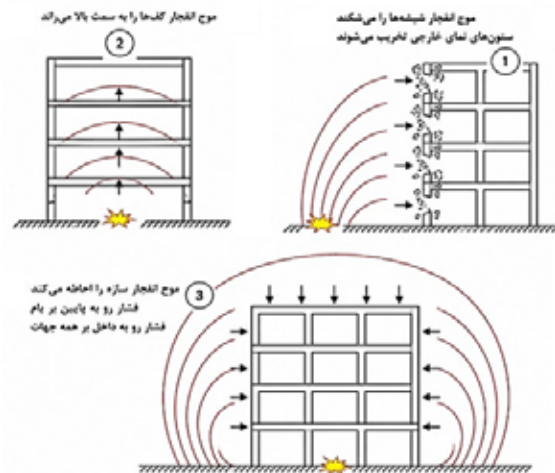
۲. عمدتاً کارآمد^۵: آسیب‌های جزئی قابل قبول است، اما عملیات اصلی و حیاتی باید ادامه یابد. این سطح، تحمل تغییر شکل‌های بیشتری (مانند $L/75$ برای تیرها، $L/150$ برای ستون‌ها) و کرنش پلاستیک تا ۱٪ را مجاز می‌داند. برای اجزای غیرسازه‌ای، آسیب محدود و برای تجهیزات، اختلال جزئی یا از سرویس خارج شدن برخی واحدها-ی غیربحرانی قابل تصور است.

۳. آسیب محدود^۶: آسیب‌های متوسط تا زیاد در سازه رخ می‌دهد، اما پایداری کلی و ایمنی جانی حفظ می‌شود. تغییر شکل‌های دائمی تا $L/50$ برای تیرها و $L/100$ برای ستون‌ها و کرنش پلاستیک تا ۷,۵٪ مجاز است. اجزای غیرسازه‌ای ممکن است دچار آسیب متوسط شده و برخی مسیرهای فرار مسدود شوند. تجهیزات فرایندی نیز ممکن است با افت عملکرد قابل توجه مواجه شوند، اما از نشت مواد خطرناک باید جلوگیری شود [۱۲, ۱۷, ۳۵].

۴. جلوگیری از فروریزش^۷: هدف اصلی، جلوگیری از فروپاشی سازه و حفظ ایمنی جانی افراد است. در این سطح، آسیب‌های شدید سازه‌ای (تغییر شکل بیش از $L/25$ برای تیرها، $L/50$ برای ستون‌ها و کرنش پلاستیک تا ۱۲,۵٪) رخ می‌دهد. اجزای غیرسازه‌ای ممکن است فرو بریزند و تجهیزات آسیب گسترده ببینند، اما بقای کلی سازه و قابلیت تخلیه اضطراری تضمین می‌شود.

پیاده‌سازی این رویکرد مستلزم نگرشی یکپارچه به تعامل سازه، اجزای غیرسازه‌ای و تجهیزات فرایندی است. استفاده از شاخص‌های کمی مهندسی شامل تغییر شکل‌های ماندگار و کرنش‌های پلاستیک در کنار پارامترهای

می‌شود. بار مرده به همراه ۲۵ درصد بار زنده نیز معمولاً با بار انفجار ترکیب شده و مبنای تحلیل قرار می‌گیرد. در انفجارهای نزدیک با فاصله مقیاس شده کمتر از ۲، رفتار سازه بسیار پیچیده است و باید پیش از تحلیل کلی عضو، احتمال نفوذ و شکست موضعی در مقطع ارزیابی شود. در شکل ۲ تعامل موج انفجار با سازه تشریح شده است. جدول اینز ماهیت انفجار، مکانیسم‌های پاسخ سازه‌ای و انواع آسیب را نشان می‌دهد.



شکل ۲- مراحل تعامل موج انفجار با سازه: (۱) تخریب نما و شیشه‌ها، (۲) اعمال فشار رو به بالا بردال‌ها و (۳) محاصره سازه و اعمال فشار همه‌جانبه [۸]

۴- سطوح عملکرد سازه‌ها در برابر انفجار

رویکرد طراحی بر مبنای عملکرد (PBD) در برابر انفجار، چهارچوبی استراتژیک برای مدیریت ریسک در تأسیسات حساس ارائه می‌دهد. این رویکرد به جای تمرکز بر صرف مقاومت سازه‌ای، بر سطوح عملکردی از پیش تعریف شده



رویکرد طراحی بر مبنای عملکرد در برابر انفجار، چهارچوبی استراتژیک برای مدیریت ریسک در تأسیسات حساس ارائه می‌دهد.

که تمرکز غالب تحقیقات بر روش‌های کامپوزیتی (CFRP) است، در حالی که تکنیک‌های نوین مانند فوم‌های فلزی و کامپوزیت‌های پایه سیمانی (SHCC) با وجود پتانسیل عملکردی بالا، سهم اندکی در مطالعات دارند.



شکل ۴- فراوانی روش‌های مقاوم‌سازی سازه‌های بتن‌آرمه در برابر انفجار در پژوهش مورد بررسی [۳۹-۲]

تحلیل تطبیقی ارائه شده در جدول ۲ نشان‌دهنده تفاوت بنیادین در مکانیزم عملکرد هر سیستم است؛ به طوری که، در حالی که سیستم‌های غلاف فولادی و کامپوزیت‌های سیمانی بر افزایش سختی و محصورشدگی تمرکز دارند، راهکارهایی مانند پلیوریا و فوم‌های فلزی عمدتاً با اتکا به ظرفیت بالای جذب انرژی غیرالاستیک، نقش المان‌های فداشونده یا لایه‌های محافظ برای کاهش شدت فشار منتقل شده به سازه اصلی را ایفا می‌کنند.

۵-۲- روش سپرگذاری و کاهش اثر انفجار

در روش سپرگذاری، هدف اصلی کاهش شدت بار دینامیکی پیش از برخورد موج انفجار با سازه اصلی است. این راهبرد با بهره‌گیری از موانع حفاظتی و لایه‌های جذب‌کننده انرژی، پیک فشار انفجار را کاهش داده و نرخ بارگذاری بر المان‌های سازه‌ای را تعدیل می‌کند. انتخاب سیستم سپرگذاری مناسب به سناریوی تهدید، فاصله تا منبع انفجار و محدودیت‌های معماری وابسته است. در جدول ۳، تحلیل فنی سیستم‌های سپرگذاری در برابر انفجار تشریح شده است [۳۶، ۳۳].

۵-۳- کنترل آوار و محدودسازی پرتاب قطعات

کنترل آوار و مهار قطعات جدا شده از سازه (پرتابه‌ها)، راهکاری حیاتی برای کاهش تلفات انسانی در حوادث انفجاری است. حتی در شرایطی که سازه دچار آسیب‌های ساختاری می‌شود، سیستم‌های کنترل آوار با حفظ یکپارچگی المان‌های غیرسازه‌ای و مهار قطعات بتنی، ریسک خطر را به شکل قابل توجهی کاهش می‌دهند. مکانیزم عملکردی این سیستم‌ها بر مبنای افزایش شکل‌پذیری سطحی و مهار حرکت قطعات استوار است [۳۴، ۲۵].

۶- مقاوم‌سازی اعضای سازه‌ای

تحقیقات نشان می‌دهد که تمرکز اصلی در مهندسی پدافند غیرعامل

مدیریتی نظیر زمان بازیابی و هزینه‌های تعمیرات، مبنای تصمیم‌گیری‌های فنی دقیق را فراهم می‌آورد. این رویکرد به مدیران اجازه می‌دهد با اولویت‌بندی سطوح عملکردی بر اساس اهمیت راهبردی بخش‌ها و توان تحمل مخاطرات، تخصیص منابع را بهینه کنند.

بهره‌برداری کامل (سطح ۱)	بدون آسیب، عملیات پیوسته آسیب ناچیز ممکن است نیاز به تعمیر داشته باشد.	ناچیز
عمدتاً کارآمد (سطح ۲)	عملیات پس از بازرس از سر گرفته می‌شود. سازه برای بهره‌برداری ایمن است. سیستم‌های حیاتی محافظت شده‌اند. آسیب جزئی نیاز به تعمیر دارد.	سبک
آسیب محدود (سطح ۳)	آسیب متوسط است؛ اجرای منتخب برای جلوگیری از تشدید حادثه محافظت شده‌اند. سازه آسیب دیده اما پایدار است.	متوسط
جلوگیری از فروریزش (سطح ۴)	فروریزش جزئی، اما فروریزش کلی قریب‌الوقوع نیست. مسیرهای خروج در دسترس هستند. ایمنی جانی به طور کلی محافظت شده است.	شدید

شکل ۳- سطح عملکرد سازه در برابر انفجار [۱۲، ۱۷، ۳۵]

۵-۵- راهبردهای مقاوم‌سازی سازه‌ها در برابر انفجار

در این مطالعه راهبردهای مقاوم‌سازی سازه‌ها در برابر انفجار به سه دسته اصلی طبقه‌بندی شده است [۲۱، ۱۴، ۱۱]:

۵-۱- راهبردهای تقویت سازه

ارتقای ظرفیت باربری اعضای سازه محور اصلی راهبردهای مقاوم‌سازی در برابر انفجار است که با هدف افزایش هم‌زمان مقاومت، سختی و جذب انرژی انجام می‌شود. این روش‌ها با بهبود پاسخ سازه در برابر فشارهای دینامیکی شدید، احتمال گسیختگی ترد را کاهش داده و سطح عملکرد ایمنی را ارتقا می‌دهند. انتخاب روش مناسب نه تنها به ظرفیت باربری مورد نیاز بلکه به محدودیت‌های اجرایی، پایداری در برابر شرایط محیطی و مدیریت اثرات ثانویه مانند پرتاب ترکش بستگی دارد. انتخاب نهایی باید بر اساس تحلیل دقیق تقاضای کرنش در سناریوی انفجار و سازگاری مصالح با هسته بتنی انجام شود تا ضمن تأمین ضریب اطمینان لازم، از تحمیل هزینه‌های غیرضروری و ایجاد نقاط ضعف جدید جلوگیری شود. در این پژوهش روش‌های مختلف مقاوم‌سازی سازه‌ها در برابر انفجار بررسی و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. وزن آرمی‌هریک‌ها از این روش‌ها، در شکل ۴ ارائه شده است. داده‌ها نشان می‌دهند

ارتقای ظرفیت باربری اعضای سازه محور اصلی راهبردهای مقاوم‌سازی در برابر انفجار است که با هدف افزایش هم‌زمان مقاومت، سختی و جذب انرژی انجام می‌شود.



جدول ۲- تحلیل راهکارهای تقویت سازه در برابر بارهای انفجاری

نوع روش	مزایا	محدودیت‌ها	کاربرد اصلی	مکانیزم جذب انرژی
افزایش ظرفیت خمشی و اتلاف انرژی از طریق کشش الیاف	دیوارها و دال‌های بتنی	هزینه اولیه بالا؛ جداسدگی در کرنش‌های بسیار زیاد؛ ایجاد ترکش ثانویه	وزن کم؛ مقاومت بالا؛ اجرای آسان؛ مقاومت در برابر خوردگی	پلیمرهای مسلح به الیاف (Fiber Reinforced Polymers)
تغییر شکل پلاستیک و کرنش سختی غشایی	سطوح در معرض انفجار (پوشش محافظ)	نیاز به تجهیزات پاشش خاص؛ عملکرد حفاظتی کمتر در مقایسه با الیاف	ظرفیت کرنش بالا؛ قابلیت ترکیب با سایر مصالح؛ مهار ترکش	پلیوریا (Polyurea)
ظرفیت کرنش کششی بسیار بالا و کنترل ترک خوردگی ریز	اتصالات تیر به ستون و المان‌های حساس	نیاز به مهارت اجرایی بالا؛ چالش تأمین مواد اولیه؛ تست‌های گسترده	سازگاری فیزیکی با بتن؛ مقاومت بالا در برابر پوسته شدن و ضربه	کامپوزیت‌های سیمانی پیشرفته (SHCC/ECC)
محصورشدگی جانبی بتن و تسلیم فولاد	ستون‌های بتنی و پایه پل‌ها	وزن مرده بالا؛ حساسیت به خوردگی؛ شکست جوش در انفجار نزدیک	افزایش ظرفیت محوری و شکل‌پذیری؛ کارایی در سطوح کرنش زیاد	غلاف‌های فولادی (Steel Jacketing)
تغییر شکل فشرده‌سازی پلاستیک (تخت شدن سلول‌ها)	پنل‌های فداشونده در نمای سازه	محدودیت در بارهای دائمی	اقتصادی؛ جذب انرژی بسیار بالا در وزن کم	فوم آلومینیوم (Aluminium Foam)

جدول ۳- تحلیل فنی سیستم‌های سپرگذاری در برابر انفجار

کارایی فنی	کاربرد	نوع سیستم سپرگذاری
افزایش بازتاب موج انفجار و کاهش فشار وارده بر سازه اصلی	حفاظت پیرامونی و محیطی ساختمان	دیوار بتنی محافظ (Concrete Blast Wall)
افزایش مقاومت در برابر بارگذاری فشاری بالا و جلوگیری از نفوذ	حفاظت موضعی و تقویت نمای سازه	صفحات فولادی (Steel Plates)
تغییر شکل پلاستیک و اتلاف انرژی جنبشی از طریق تراکم سلولی	پنل‌های فداشونده و جاذب انرژی	فوم آلومینیوم (Aluminium Foam)

جدول ۴- تحلیل فنی سیستم‌های کنترل آوار و مهار قطعات

مکانیزم عملکرد	کاربرد	سیستم کنترل آوار
ایجاد لایه پلیمری انعطاف‌پذیر با چسبندگی بالا جهت جلوگیری از گسیختگی بتن	سطوح نمای بیرونی و داخلی دیوارها	پوشش پلی‌اوره (Polyurea Coating)
مهار مکانیکی و نگهداری قطعات جدا شده در محل	نماهای شیشه‌ای و دیوارهای غیرسازه‌ای	شبكة‌های فولادی (Steel Meshes)
جذب انرژی حرکتی قطعات و جلوگیری از انتشار آوار در فضا	فضاهای داخلی و مسیرهای عبور و مرور	سیستم‌های گیرانداز (Catcher Systems)

می‌کنند. محصورشدگی با استفاده از الیاف پلیمری (FRP) یا ژاکت‌های فولادی، مکانیزم انتقال بار را تقویت کرده و ظرفیت برشی و شکل‌پذیری عضو را افزایش می‌دهد. این روش‌ها با جلوگیری از کمانش میلگردهای طولی و افزایش کرنش نهایی بتن، ظرفیت جذب انرژی را در برابر بارهای ضربه‌ای ارتقا می‌دهند.

بر ستون‌ها، دال‌ها و دیوارها است. آسیب‌دیدگی این اعضا، عامل محرک فروپاشی پیش‌رونده در ساختمان‌ها محسوب می‌شود [۲، ۸، ۱۵، ۱۸، ۲۲، ۲۶، ۳۰، ۳۸، ۳۹].

۱-۶- ستون‌های بتن آرمه

ستون‌ها به عنوان اعضای کلیدی در انتقال بارهای قائم و جانبی عمل



کنترل آوار و مهار قطعات جدا شده از سازه (پرتابه‌ها)، راهکاری حیاتی برای کاهش تلفات انسانی در حوادث انفجاری است.

ضعف در این بخش می‌تواند منجر به تمرکز تنش موضعی، پارگی زودرس لایه‌های تقویتی و در نتیجه، ناکارآمدی کل سیستم در برابر بارهای دینامیکی شود. در نهایت، یافته‌ها حاکی از برتری استراتژی سیستم‌های ترکیبی است که با تلفیق هوشمندانه مصالح صلب و شکل‌پذیر، ظرفیت جذب انرژی سازه را در حین انفجار به طور بهینه ارتقا می‌دهند. مجموع این محورها نشان می‌دهد که طراحی بهینه مقاوم‌سازی، مستلزم هم‌گرایی میان تحلیل‌های دقیق دینامیکی، درک رفتار مصالح پیشرفته و رعایت استانداردهای سخت‌گیرانه در اجرای جزئیات اتصالی است.

۱-۷- چهارچوب مدیریتی و تصمیم‌گیری راهبردی

در راستای بهینه‌سازی منابع و ارتقای سطح تاب‌آوری سازه‌ها در کلان‌شهر تهران، تدوین یک چهارچوب مدیریتی و تصمیم‌گیری راهبردی با مشارکت و هدایت سازمان نظام‌مهندسی ساختمان، به‌عنوان راهکاری مؤثر پیشنهاد می‌شود. با توجه به تراکم بالای جمعیت و حساسیت زیرساخت‌های پایتخت، به نظر می‌رسد، رویکرد عملیاتی باید بر مبنای طبقه‌بندی اهمیت سازه‌ها تدوین گردد؛ به طوری که برای زیرساخت‌های حیاتی تهران، بهره‌گیری از سیستم‌های ترکیبی و مهاربندی‌های مکانیکی پیشرفته جهت حفظ تداوم خدمات و افزایش تاب‌آوری، اولویت داشته باشد. در مراکز استراتژیک نیز تقویت سازه‌ای از طریق کامپوزیت‌ها و اصلاح اتصالات جهت حفظ یکپارچگی و کاهش احتمال فروپاشی پیشنهاد می‌گردد؛ همچنین در ساختمان‌های عمومی و پهنه‌های دارای بافت متراکم، تمرکز بر تقویت دیوارها و اجرای راهکارهای کنترل آوار، می‌تواند گامی مؤثر در جهت تأمین ایمنی شهروندان و کاهش خسارات ثانویه باشد.

در افق آینده، بهینه‌سازی طراحی مقاوم در برابر انفجار، به‌ویژه برای سازه‌های دارای هندسه نامنظم و ساختمان‌های بلندمرتبه تهران، ضروری است. در این راستا، پیشنهاد می‌شود سازمان نظام‌مهندسی ساختمان با رویکردی فراتر از نظارت‌های معمول، بررسی تدوین ضوابط بومی‌سازی شده، الزام مهندسان محاسب به رعایت دقیق جزئیات اجرایی در اتصالات و پایش کیفیت اجرای سیستم‌های ترکیبی را در دستور کار قرار دهد. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که تلفیق راهکارهای نوین مقاوم‌سازی با دستورالعمل‌های مدیریتی، می‌تواند مسیر دست‌یابی به تاب‌آوری پایدار در برابر تهدیدات احتمالی را هموار سازد. این هم‌افزایی انتظار می‌رود که اثربخشی استراتژی‌های بهسازی را در ساخت‌وسازهای تهران بهبود بخشد و بستری مناسب برای بازنگری در مباحث مقررات ملی ساختمان و تدوین کدهای اجرایی جامع فراهم آورد.

در راستای بهینه‌سازی منابع و ارتقای سطح تاب‌آوری سازه‌ها در کلان‌شهر تهران، تدوین یک چهارچوب مدیریتی و تصمیم‌گیری راهبردی با مشارکت و هدایت سازمان نظام‌مهندسی ساختمان، به‌عنوان راهکاری مؤثر پیشنهاد می‌شود.

۶-۲- دال‌های بتن آرمه ۹

دال‌ها تحت فشار موج انفجار، مستعد خمش شدید و سوراخ‌شدگی هستند. نصب صفحات کامپوزیتی (CFRP/GFRP) یا ورق‌های فولادی در وجه کششی دال، با ایجاد مقاومت خمشی مضاعف، تغییر مکان‌های ماندگار را کنترل می‌کند. این تقویت، با مهار گسیختگی‌های موضعی، از گسترش شکست به سایر سطوح جلوگیری به عمل می‌آورد.

۶-۳- دیوارهای بتن آرمه ۱۰

در دیوارهای بتن آرمه، بزرگترین چالش، جداشدگی زودرس الیاف از سطح بتن پیش‌از رسیدن به ظرفیت نهایی است. استفاده از سیستم‌های اتصال‌دهنده مکانیکی، پیوستگی رفتاری بین کامپوزیت و عضو را تضمین می‌کند. این اتصال، انتقال تنش‌های برشی را تسهیل کرده و پاسخ سازه را در شرایط بارگذاری دینامیکی شدید، یکپارچه می‌سازد.

۶-۴- دیوارهای بنایی ۱۱

دیوارهای بنایی به دلیل ضعف در مقاومت کششی، در برابر بارهای انفجاری بسیار آسیب‌پذیر هستند و مستعد گسیختگی خارج از صفحه می‌باشند. اجرای پوشش‌های پلیمری (Polyurea) یا شبکه‌های مسلح‌کننده، با ایجاد یک غشای مقاوم، مقاومت خمشی را افزایش می‌دهد. این رویکرد، ضمن بهبود رفتار پس‌از شکست، مانع از خردشدگی و پرتاب آوار در محیط پیرامونی می‌شود.

۷- جمع‌بندی و راهبردهای مدیریتی

مطالعات انجام شده در این پژوهش نشان می‌دهد که مقاوم‌سازی سازه‌های بتن‌آرمه در برابر تهدیدات انفجاری، فراتر از تقویت ساده مقاطع، نیازمند اتخاذ یک رویکرد سیستماتیک و چندجانبه است. تحلیل یافته‌های گردآوری شده از فرس‌های تخصصی، چهار محور راهبردی را به‌عنوان ارکان اصلی بهینه‌سازی عملکرد سازه‌ای تبیین می‌کند. نخست، ضرورت تنوع‌بخشی به سید مصالح تقویتی، فراتر از کامپوزیت‌های متداول مانند FRP، به سمت مواد نوینی همچون آلیاژهای حافظه‌دار (SMA)، کامپوزیت‌های پایه سیمانی (ECC) و فوم‌های آلومینیومی جهت بهبود خواص مکانیکی است. دوم، تمرکز بر نقش کلیدی تقویت‌کننده‌ها در ارتقای یکپارچگی سازه‌ای؛ به طوری که این راهکارها با کنترل گسیختگی‌های ترد و مدیریت انتشار آوار، سهم بسزایی در تقلیل تلفات انسانی و خسارات ثانویه دارند. سوم، تأکید بر طراحی مهندسی جزئیات اتصال و سیستم‌های مهاربندی؛ چرا که تحلیل‌های تنش نشان می‌دهد





21(5), 04017028.

[26] Zhang, Y. (2019). Evaluation of debris control systems in urban blast events. *Engineering Failure Analysis*, 97, 310–325.

[27] Chen, Y., & Li, V. C. (2020). Dynamic behavior of SHCC under blast loading. *Construction and Building Materials*, 254, 119237.

[28] Zhou, X., et al. (2021). Retrofitting strategies for RC structures against blast. *Structural Safety*, 89, 102049.

[29] Liu, H., et al. (2021). Application of metal foams in blast protection. *Thin-Walled Structures*, 162, 107572.

[30] Kim, S., et al. (2022). Performance-based assessment of blast-resistant RC walls. *Journal of Structural Engineering*, 148(4), 04022030.

[31] Choi, J., et al. (2023). Experimental analysis of polyurea coating on masonry walls under explosion. *Engineering Structures*, 275, 115264.

[32] Ahmed, M., et al. (2023). Debris mitigation techniques in urban environments. *Safety Science*, 158, 105995.

[33] Park, H., et al. (2024). Integrated blast-resistant design guidelines for urban infrastructure. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*, 15(2), 112–130.

[34] Lee, K. (2024). Optimization of structural protective layers. *Journal of Protective Structures*, 15(1), 45–62.

[35] Gholamhoseini, A., et al. (2024). Blast mitigation strategies for critical facilities. *Structural Engineering International*, 34(1), 22–38.

[36] Sadeghi, M., et al. (2025). Numerical assessment of blast response in retrofitted RC frames. *Journal of Constructional Steel Research*, 225, 109150.

[37] Bahadori, A., et al. (2025). Managerial approach to blast-resistant retrofitting in urban zones. *Journal of Civil Engineering and Management*, 31(2), 210–225.

[38] Engineering Research Group. (2025). Goal Setting Approach for Blast-Resistant Infrastructure Design. Technical Report, 85 pp.

[39] Scientific Reports. (2025). Advanced numerical simulation of structural response to blast loading. *Nature Scientific Reports*, 15(1), 1–18. DOI: 10.1038/s41598-025-16606-0.

reinforced concrete structures. *Structures*, 3, 225–238.

[13] Yi, W. J., He, X. G., Xiao, Y., & Tan, K. H. (2008). Progressive collapse of reinforced concrete structures. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 22(1), 11–19.

[14] Remennikov, A. M. (2003). A review of methods for calculating blast loads on building structures. *Journal of Battlefield Technology*, 6(3), 3–10.

[15] Gebbeken, N., & Ruppert, M. (2008). A new blast load definition for structural analysis. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 8(2), 27–40.

[16] Fischer, G., & Li, V. C. (2002). Deformation behavior of fiber-reinforced polymer reinforced ECC flexural members. *ACI Structural Journal*, 99(1), 51–59.

[17] Williamson, E. B., & Winget, D. G. (2005). Risk management and modeling of progressive collapse in buildings. *Journal of Structural Engineering*, 131(1), 15–25.

[18] Park, R. (2002). A perspective on the seismic design of reinforced concrete structures. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 35(3), 135–155.

[19] Teng, J. G., Chen, J. F., Smith, S. T., & Lam, L. (2002). FRP-Strengthened RC Structures. John Wiley & Sons.

[20] Xiao, Y. (1997). Strengthening of RC columns with carbon fiber reinforced plastic. *Journal of Structural Engineering*, 123(1), 108–112.

[21] Ghasemzadeh, S., et al. (2018). Blast resistance of RC elements strengthened with various materials. *Construction and Building Materials*, 175, 456–468.

[22] Fan, H., Jin, F., & Diani, J. (2011). Numerical investigation of the blast resistance of aluminum foam sandwich panels. *International Journal of Impact Engineering*, 38(10), 807–818.

[23] Wang, Z., et al. (2014). Blast-resistant performance of SHCC panels. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(11), 04014095.

[24] Li, J., & Hao, H. (2016). Numerical study of concrete wall response to blast loads. *International Journal of Impact Engineering*, 92, 126–141.

[25] Wang, W., et al. (2017). Experimental study on blast-resistant performance of RC columns strengthened with CFRP. *Journal of Composites for Construction*,

۸- پی‌نوشت

- 1- Ronan Point
- 2- World Trade Center
- 3- Oklahoma City
- 4- Fully Operational
- 5- Mostly Functional
- 6- Limited Damage
- 7- Collapse Prevention
- 8- Reinforced Concrete Columns
- 9- Reinforced Concrete Slabs
- 10- Reinforced Concrete Walls
- 11- Masonry Walls

۹- مراجع

- [1] Unified Facilities Criteria (UFC) 3-340-02. (2008). Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions. Department of Defense, Washington, DC.
- [2] ASCE 59-11. (2011). Blast-Resistant Design of Buildings. American Society of Civil Engineers, Reston, VA.
- [3] Jacques, E. (2011). Blast response of concrete masonry infill walls retrofitted with polyurea. Master's Thesis, University of Ottawa, Canada.
- [4] Smith, P. D., & Hetherington, J. G. (1994). Blast and Ballistic Loading of Structures. Butterworth-Heinemann.
- [5] Biggs, J. M. (1964). Introduction to Structural Dynamics. McGraw-Hill Education.
- [6] Baker, W. E. (1973). Explosions in Air. University of Texas Press.
- [7] Mays, G. C., & Smith, P. D. (1995). Blast Effects on Buildings. Thomas Telford Publishing.
- [8] Krauthammer, T. (2008). Modern Protective Structures. CRC Press.
- [9] Ngo, T., Mendis, P., Gupta, A., & Ramsay, J. (2007). Blast loading and blast effects on structures – An overview. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 7, 76–91.
- [10] Luccioni, B. M., Ambrosini, R. D., & Danesi, R. F. (2006). Blast load assessment on buildings. *Engineering Structures*, 28(10), 1436–1448.
- [11] Tedesco, J. W., Ross, C. A., & Kuennen, S. T. (1995). Dynamic analysis of blast-loaded reinforced concrete slabs. *Journal of Structural Engineering*, 121(11), 1644–1652.
- [12] Hsieh, C. C. (2015). Performance-based blast-resistant design of