

ارزیابی خسارت ناشی از انفجار و تاب‌آوری لحظه‌ای ساختمان‌ها با روش CatBoost

فیزیک‌راهنمای سوئیچ‌رژیمی

مهدی بیطرفان^{۱*}، شاهین لعل عارفی^۲، فاطمه شهبازپور^۳

۱- پژوهشکده مدیریت خطرپذیری و بحران، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

۲- گروه مهندسی عمران، مجتمع آموزش عالی فنی و مهندسی اسفراین، اسفراین، ایران

۳- پژوهشگر، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

*نویسنده مسئول: مهدی بیطرفان mahdi.bitarafan@iiees.ac.ir

چکیده

ارزیابی سریع میزان خسارت ساختمان‌ها بلافاصله پس از وقوع انفجار، نقش مهمی در اولویت‌بندی بازرسی‌ها و تصمیم‌گیری‌های اضطراری دارد. در این پژوهش، یک چارچوب یادگیری ماشین فیزیک‌راهنما با ساختار سوئیچ‌رژیمی توسعه داده شد تا درصد خسارت و تاب‌آوری لحظه‌ای ساختمان‌ها پس از انفجار برآورد شود. مجموعه داده شامل ۴۳۲ نمونه و ۱۱ متغیر مرتبط با شدت انفجار، شرایط مواجهه، ویژگی‌های معماری و سازه‌ای و وضعیت حفاظتی ساختمان بود. برای بازنمایی بهتر تفاوت میان سازوکارهای خسارت، سناریوهای برخورد مستقیم در یک شاخه تخصصی و سایر سناریوها در شاخه عمومی مدل‌سازی شدند. همچنین، برای افزایش قابلیت تعمیم و کاهش سوگیری پیش‌بینی، تقسیم گروه‌آگاه داده‌ها، تصحیح خطای باقیمانده و کالیبراسیون خروجی در فرایند توسعه مدل به کار گرفته شد. نتایج ارزیابی روی مجموعه آزمون مستقل داخلی نشان داد مدل پیشنهادی با میانگین قدر مطلق خطای ۷/۱۳، ریشه دوم میانگین مربعات خطای ۱۰/۰۷ و ضریب تعیین ۰/۸۷۲، توان مناسبی در پیش‌بینی خسارت دارد. اگرچه مدل تقویت‌گرایانی شدید در ارزیابی کلی، میانگین قدر مطلق خطای اندکی کمتر برابر با ۷/۰۰ به دست آورد، اختلاف دو مدل از نظر آماری معنادار نبود. در مقابل، در سناریوهای برخورد مستقیم، مدل پیشنهادی عملکرد بهتری نشان داد و میانگین قدر مطلق خطا را از ۱۱/۲۱ به ۸/۱۹ کاهش داد. تحلیل‌های تفسیرپذیری نیز نشان دادند که فاصله مقیاس‌شده، فاصله از مرکز انفجار، شرایط حفاظتی پیرامونی و شدت انفجار از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر پیش‌بینی خسارت هستند. همچنین، بازه عدم قطعیت ایمنی محور با پوشش ۹۳ درصدی، ضرورت همراه کردن پیش‌بینی نقطه‌ای با بیان عدم قطعیت را تأیید کرد. در مجموع، چارچوب پیشنهادی می‌تواند به عنوان ابزاری برای ارزیابی تاب‌آوری لحظه‌ای ساختمان‌های آسیب‌دیده و برآورد عملکرد باقیمانده پس از انفجار به کار رود.

واژگان کلیدی: خسارت ناشی از انفجار، تاب‌آوری لحظه‌ای، یادگیری ماشین فیزیک‌راهنما، سوئیچ‌رژیمی، تحلیل SHAP.

انفجار از جمله بارگذاری‌های شدید و کوتاه‌مدتی است که می‌تواند در مدت زمانی بسیار محدود، خسارات گسترده‌ای به اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای ساختمان وارد کند. برخلاف بسیاری از مخاطرات متعارف، پاسخ ساختمان در برابر انفجار تحت تأثیر افزایش ناگهانی فشار، بازتاب موج، انتقال ضربه و در برخی سناریوها برخورد مستقیم قرار دارد. پیامد این فرایند می‌تواند از شکست شیشه و آسیب نما تا تخریب اعضای باربر، فروریزش موضعی و حتی از دست رفتن بخش عمده عملکرد ساختمان متغیر باشد. از این‌رو، واکاوی شناسایی خرابی در سازه‌ها تحت تأثیر مخاطرات طبیعی (همچون زلزله) و یا عوامل غیرطبیعی، پیوسته مورد توجه بسیاری از محققین بوده است [۴-۱].

فرآیندهایی نظیر انتشار موج انفجار، افزایش ناگهانی فشار، بازتاب موج از سطوح و انتقال ضربه به اعضای سازه‌ای می‌تواند پیامدهایی از قبیل شکست شیشه و آسیب به نما تا تخریب اعضای باربر و فروریزش موضعی یا گسترده در پی داشته باشد. مطابق با یافته‌های کارلوس و سولوموس (۲۰۱۴) و دستورالعمل‌های وزارت دفاع آمریکا (۲۰۰۸)، شدت این پیامدها مستقیماً با ویژگی‌های منبع انفجار، موقعیت وقوع و مشخصات هندسی ساختمان در ارتباط است؛ لذا تحلیل پاسخ سازه‌ها در برابر انفجار جهت ارتقای طراحی حفاظتی، بهبود مدیریت بحران و نهایتاً کاهش خسارات جانی و اقتصادی، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است [۵، ۶].

تحلیل اجزای محدود، مدل‌سازی اندرکنش سیال-سازه و روابط مهندسی انفجار ابزارهای ارزشمندی برای بررسی این پدیده هستند و امکان مطالعه دقیق فشار، ضربه و پاسخ دینامیکی اجزای سازه را فراهم می‌کنند. با این حال، استفاده از تحلیل‌های تفصیلی برای ارزیابی تعداد زیادی ساختمان به اطلاعات هندسی و مصالح نسبتاً کامل، تعریف شرایط مرزی مناسب و منابع محاسباتی قابل توجه نیاز دارد. این محدودیت زمانی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند که ارزیابی باید در ساعات اولیه پس از حادثه انجام شود؛ زمانی که تصمیم‌گیرندگان نیاز دارند ساختمان‌های دارای خسارت شدید را سریع‌تر شناسایی کنند و بازرسی، تخلیه، محدودسازی دسترسی و تخصیص منابع را اولویت‌بندی کنند. در چنین شرایطی، یک مدل سریع داده‌محور می‌تواند نقش ابزار غربالگری و پشتیبان تصمیم را ایفا کند، هرچند جایگزین بازرسی میدانی یا تحلیل تفصیلی مهندسی نیست.

در پژوهش حاضر، وضعیت ساختمان علاوه بر درصد خسارت، از منظر تاب‌آوری لحظه‌ای مبتنی بر خسارت نیز بیان می‌شود. مفهوم کلاسیک تاب‌آوری، افت عملکرد و مسیر بازیابی سیستم را در طول زمان در بر می‌گیرد و بنابراین ماهیتی ذاتاً زمان‌مند دارد [۷، ۸]. داده‌های این مطالعه، در مقابل، وضعیت ساختمان را بلافاصله پس از رخداد توصیف می‌کنند و اطلاعاتی درباره مدت تعمیر، هزینه بازیابی یا روند بازگشت عملکرد در اختیار نمی‌گذارند. به همین دلیل، اصطلاح تاب‌آوری لحظه‌ای در این مقاله صرفاً برای بیان سهم عملکرد باقیمانده ساختمان در وضعیت اولیه پس از انفجار به کار می‌رود و نباید با تاب‌آوری کامل یا ظرفیت بازیابی بلندمدت یکسان تلقی شود. الگوریتم‌های یادگیری ماشین، به‌ویژه مدل‌های تقویت گرادینانی مبتنی بر درخت، برای تحلیل داده‌های ساختمانی دارای روابط غیرخطی و ترکیبی ظرفیت مناسبی دارند. الگوریتم‌های XGBoost و CatBoost از جمله روش‌هایی هستند که در مسائل داده‌های جدولی عملکرد قابل توجهی نشان داده‌اند [۹، ۱۰]. با این حال، در کاربردهای مهندسی، صرف دستیابی به خطای پیش‌بینی کمتر کافی نیست. محدودیت حجم نمونه، عدم توازن سناریوهای شدید و شباهت میان برخی رکوردها می‌تواند باعث بیش‌برازش یا ارائه تصویری خوش‌بینانه از قابلیت تعمیم مدل شود. از این‌رو، نحوه جداسازی داده‌ها و ارزیابی مدل باید به گونه‌ای طراحی شود که نمونه‌های بسیار مشابه به‌طور همزمان در مجموعه آموزش و ارزیابی قرار نگیرند [۱۱]. همزمان، تفسیرپذیری و بیان عدم قطعیت برای استفاده عملی از مدل‌های یادگیری ماشین اهمیت زیادی دارد. روش‌هایی مانند تحلیل مقادیر شاپلی و اثرات موضعی تجمعی می‌توانند نقش و جهت اثر متغیرهای ورودی را در پیش‌بینی مدل روشن کنند [۱۲، ۱۳]. از سوی دیگر، گزارش یک مقدار نقطه‌ای برای خسارت، بدون بیان دامنه عدم قطعیت، به‌ویژه در سناریوهای بحرانی و کم‌نمونه، می‌تواند برای تصمیم‌گیری کافی نباشد. بازه‌های پیش‌بینی کانفورمال یکی از روش‌هایی هستند که امکان ارائه محدوده‌ای برای عدم قطعیت پیش‌بینی را بدون اتکای شدید به فرض‌های توزیعی فراهم می‌کنند [۱۴]. افزون بر این، وارد کردن دانش فیزیکی مسئله در تعریف ویژگی‌ها و تفکیک رژیم‌های بارگذاری می‌تواند مدل را از اتکای صرف به همبستگی‌های آماری دور کند و تفسیر مهندسی نتایج را تقویت سازد.

بر این اساس، هدف این پژوهش توسعه یک چارچوب یادگیری ماشین فیزیک‌راهنما در مقیاس ساختمان برای پیش‌بینی درصد خسارت و برآورد تاب‌آوری لحظه‌ای پس از انفجار است. در این چارچوب، ویژگی‌های مرتبط با شدت انفجار، فاصله، شرایط حفاظتی و مشخصات معماری و سازه‌ای ساختمان به‌صورت همزمان در نظر گرفته می‌شوند و سناریوهای برخورد مستقیم به دلیل تفاوت در سازوکار

خسارت، به صورت رژیمی مجزا پردازش می شوند. ارزیابی مدل نیز علاوه بر دقت کلی، بر قابلیت تعمیم، عملکرد در سناریوهای بحرانی، تفسیرپذیری و عدم قطعیت متمرکز است. در نهایت، خروجی های این مدل با هدف ارزیابی سریع خسارات، برآورد عملکرد باقی مانده و پشتیبانی از تصمیم گیری جهت اولویت بندی بررسی های میدانی پس از رویداد انفجاری، طراحی و پیاده سازی شده اند.

۲- پیشینه تحقیق

مطالعات مرتبط با آسیب پذیری ساختمان ها در برابر انفجار، در طول زمان از بررسی نسبتاً محدود پارامترهای بارگذاری و پاسخ اعضای منفرد، به سمت درک یکپارچه تری از رفتار ساختمان حرکت کرده اند. در این نگاه، شدت خسارت صرفاً با جرم ماده منفجره یا فاصله از منبع توضیح داده نمی شود، بلکه نتیجه برهم کنش شرایط مواجهه با ویژگی های معماری، سازه ای و محیط پیرامونی است. فرم ساختمان، سطح روبه موج، سیستم سازه ای، تعداد طبقات، بازشوهای پوسته و شرایط حفاظتی اطراف بنا می توانند مسیر انتقال بار و الگوی گسترش آسیب را تغییر دهند. به همین دلیل، ارزیابی ساختمان در برابر انفجار به تدریج از روابط منفرد خطر-پاسخ فاصله گرفته و به سمت چارچوب هایی حرکت کرده است که چند گروه از متغیرهای مؤثر را به صورت هم زمان در نظر می گیرند.

در حوزه طراحی حفاظتی نیز تمرکز اولیه بر اصلاح فرم، جانمایی فضاها و انتخاب مناسب مصالح پوسته بود، اما مطالعات جدیدتر نشان داده اند که عملکرد حفاظتی را نمی توان به مقاومت یک ماده یا جزء محدود کرد. آرایش لایه ها، هندسه و ضخامت اجزا، کیفیت اتصال و ظرفیت جذب انرژی همگی در میزان انتقال اثر انفجار به بخش های داخلی ساختمان نقش دارند. توسعه سامانه های ساندویچی، هسته های جاذب انرژی و مصالح فوق عملکردی، این حوزه را از انتخاب ساده مصالح به سمت طراحی هماهنگ ماده و هندسه سوق داده است. در مقیاس شهری نیز وجود ساختمان های مجاور، فاصله میان بلوک ها و سطوح بازتابنده می تواند شرایط مواجهه هر ساختمان را تغییر دهد؛ بنابراین، ارزیابی واقع بینانه تر مستلزم آن است که ساختمان مستقل از محیط پیرامون خود در نظر گرفته نشود.

هم زمان، مفهوم عملکرد و تاب آوری نیز وارد مطالعات انفجاری شده است. در این رویکرد، صرف مشاهده خرابی فیزیکی برای توصیف وضعیت ساختمان کافی نیست و باید پیامد خسارت بر ظرفیت عملکردی سازه نیز مورد توجه قرار گیرد. چنین نگاهی امکان ارتباط میان شدت خطر، توسعه خسارت و کاهش عملکرد را فراهم می کند. با این حال، سنجش کامل تاب آوری معمولاً به اطلاعاتی درباره تعمیر، منابع بازیابی و زمان بازگشت عملکرد نیاز دارد؛ داده هایی که در ساعات اولیه پس از حادثه اغلب در دسترس نیستند. از این رو، ارزیابی فوری خسارت و برآورد عملکرد باقیمانده می تواند به عنوان یک سطح عملیاتی تر از ارزیابی تاب آوری در مرحله پاسخ اضطراری مورد استفاده قرار گیرد.

گسترش داده های عددی، آزمایشگاهی و میدانی نیز مسیر دیگری را در این حوزه باز کرده است. روش های یادگیری ماشین می توانند روابط غیرخطی و برهم کنش میان ویژگی های خطر و ساختمان را بدون تحمیل یک رابطه تحلیلی ثابت یاد بگیرند. مدل های تقویت گرادیانی، به ویژه در داده های جدولی، برای این منظور ظرفیت مناسبی نشان داده اند و استفاده هم زمان از روش های تفسیرپذیری، امکان بررسی نقش متغیرها در پیش بینی را فراهم کرده است. با این حال، بخش قابل توجهی از مدل های موجود هنوز در مقیاس ستون، دال یا سایر اعضای منفرد توسعه یافته اند و انتقال آنها به ارزیابی کل ساختمان با محدودیت همراه است. مطالعات ساختمان محور جدیدتر نشان داده اند که ویژگی هایی مانند هندسه سه بعدی، جهت گیری، نسبت بازشوها، فاصله از انفجار و شرایط حفاظتی می توانند اطلاعات قابل توجهی برای پیش بینی خسارت فراهم کنند. در کنار این تحول، جهت گیری پژوهش ها از انتخاب قطعی یک گزینه به سمت چارچوب هایی حرکت کرده است که عدم قطعیت و قابلیت تفسیر تصمیم را نیز در نظر می گیرند. این موضوع به ویژه در انتخاب مصالح و اجزای ساختمان در شرایط چندمخاطره ای اهمیت دارد؛ زیرا گزینه ای که در یک معیار بهترین عملکرد را دارد، لزوماً در برابر مجموعه ای از مخاطرات و محدودیت های اجرایی برتری مطلق ندارد. چارچوب های جدیدتر نشان می دهند که ترکیب تصمیم گیری چندمعیاره، تحلیل عدم قطعیت و روش های تفسیرپذیری می تواند تصمیمات طراحی را شفاف تر کند، هرچند ماهیت این مدل ها با پیش بینی مستقیم خسارت پس از حادثه متفاوت است.

در جدول ۱ به مرور اجمالی مطالعات منتخب در ارزیابی خسارت و تاب آوری انفجاری پرداخت شده است.

جدول ۱: مرور اجمالی مطالعات منتخب در ارزیابی خسارت و تاب‌آوری انفجاری

Table 1. Summary of representative literature on blast damage and resilience assessment

دست‌آورد مرتبط	رویکرد اصلی	محدودیت نسبت به پژوهش حاضر	مقیاس/موضوع	منبع
وارد کردن ویژگی‌های ساختمان در ارزیابی سریع آسیب‌پذیری انفجاری	SWARA-SMART	خروجی رتبه‌ای؛ فاقد پیش‌بینی مستقیم درصد خسارت	آسیب‌پذیری ساختمان اداری	[۱۵]
پیوند خطر انفجار، توسعه خسارت و افت عملکرد	چارچوب مبتنی بر عملکرد	فاقد چارچوب داده‌محور برای ارزیابی سریع تعداد زیادی ساختمان	عملکرد و تاب‌آوری سازه	[۱۶]
نشان دادن نقش مصالح پوسته در کاهش آسیب‌پذیری انفجاری	Fuzzy Delphi-Fuzzy EDAS	مبتنی بر رتبه‌بندی مصالح و نظر خبرگان؛ بدون پیش‌بینی خسارت ساختمان	مصالح نمای ساختمان	[۱۷]
بهینه‌سازی ضخامت و آرایش لایه‌ها برای کاهش انتقال نیرو و تغییر شکل	تحلیل اجزای محدود و بهینه‌سازی	تمرکز بر جزء حفاظتی و داده‌های شبیه‌سازی شده	سازه ساندویچی چندلایه	[۱۸]
بهبود جذب انرژی و کاهش تغییر شکل از طریق اصلاح هندسه هسته	تحلیل عددی و بهینه‌سازی چندهدفه	محدود به مقیاس پانل و شرایط عددی	پانل ساندویچی با هسته auxetic	[۱۹]
شناسایی و وزن‌دهی ابعاد و شاخص‌های مؤثر بر تاب‌آوری شهری و آشکارسازی تفاوت‌های مکانی در تاب‌آوری	IHWP، نظر خبرگان و تحلیل فضایی GIS	ارزیابی در مقیاس شهری و مبتنی بر شاخص؛ فاقد پیش‌بینی مستقیم درصد خسارت ساختمان و تفکیک رژیم‌های بارگذاری	تاب‌آوری شهری	[۲۰]
تبیین ظرفیت UHPC و سامانه‌های مرکب برای مقاومت در برابر بار انفجار	مرور جامع مطالعات آزمایشگاهی و عددی	مطالعه مروری؛ فاقد مدل پیش‌بینی در مقیاس ساختمان	UHPC و سامانه‌های مرکب	[۲۱]
پیش‌بینی سریع میزان خسارت و تفسیر سهم متغیرهای مؤثر	SHAP و CatBoost، ML	محدود به عضو سازه‌ای و انفجار نزدیک	ستون مرکب CFST	[۲۲]
نشان دادن نقش جهت‌گیری، نسبت ابعادی و بازشوها در پیش‌بینی خسارت	داده‌های سه‌بعدی و ML	محدود به ساختمان‌های بنایی و یک رخداد انفجاری	ساختمان‌های واقعی آسیب‌دیده	[۲۳]
تلفیق عدم قطعیت و تفسیرپذیری در انتخاب مصالح مقاوم در برابر مخاطرات مختلف	RANCOM-CRITIC-Monte Carlo، GRA و Shapley	تصمیم‌یار انتخاب مصالح، فاقد پیش‌بینی پسا رخداد درصد خسارت ساختمان	انتخاب مصالح و اجزای ساختمان چندمخاطره‌ای	[۲۴]
تلفیق عوامل انفجار، ساختمان و شرایط حفاظتی در یک چارچوب توضیح‌پذیر	SHAP، RF-XGBoost و تحلیل حساسیت	فاقد تفکیک صریح رژیم‌های خسارت و چارچوب یکپارچه عدم قطعیت پیش‌بینی	ساختمان و زیرساخت شهری	[۲۵]

مرور جدول ۱ نشان می‌دهد که سه تحول اصلی در ادبیات قابل تشخیص است که عبارتند از حرکت از ارزیابی یک عامل منفرد به سمت تلفیق ویژگی‌های خطر و ساختمان، گذار از ارزیابی‌های رتبه‌ای و عضو محور به مدل‌های پیش‌بینی داده‌محور، و افزایش توجه به تفسیرپذیری و عدم قطعیت. با این حال، کنار هم قرار گرفتن این مؤلفه‌ها لزوماً به معنای حل کامل مسئله نیست. در ارزیابی سریع پس از انفجار، مدل باید علاوه بر دقت کلی، در برابر تفاوت سازوکارهای خسارت، نمونه‌های شدید و کم‌تعداد و ناهمگنی ساختمان‌های واقعی نیز رفتار قابل اعتمادی داشته باشد. این ملاحظات، زمینه روش‌شناختی لازم را برای تبیین شکاف پژوهش و نوآوری چارچوب پیشنهادی در بخش بعد فراهم می‌کنند.

۳- شکاف پژوهش و نوآوری

با وجود توسعه روش‌های عددی، چندمعیاره و یادگیری ماشین برای ارزیابی خسارت انفجاری، هنوز یک خلأ مهم باقی است. بیشتر مطالعات یا بر اجزای منفرد و داده‌های شبیه‌سازی شده تمرکز دارند، یا در مقیاس ساختمان، همه سناریوهای انفجاری را با یک مدل واحد بررسی می‌کنند. این در حالی است که برخورد مستقیم، انفجار با فاصله و سایر حالت‌های بارگذاری می‌توانند سازوکار خسارت متفاوتی ایجاد کنند و یک مدل عمومی لزوماً در سناریوهای شدید و کم‌نمونه عملکرد قابل‌اعتمادی ندارد.

برای رفع این محدودیت، پژوهش حاضر یک چارچوب فیزیک‌راهنمای سوئیچ‌رژیمی در مقیاس ساختمان ارائه می‌کند که در آن سناریوهای برخورد مستقیم از سایر حالات تفکیک می‌شوند و ویژگی‌های مرتبط با شدت انفجار، فاصله، شرایط حفاظتی و مشخصات معماری و سازه‌ای به‌صورت همزمان در مدل وارد می‌شوند. نوآوری اصلی پژوهش در ترکیب تفکیک رژیمی، مهندسی ویژگی فیزیک‌راهنما، کنترل نشت اطلاعات، تفسیرپذیری و کمی‌سازی عدم قطعیت در یک چارچوب یکپارچه است. از نظر مفهومی نیز این پژوهش میان خسارت فوری و تاب‌آوری بلندمدت تمایز قائل می‌شود و تاب‌آوری لحظه‌ای را صرفاً به‌عنوان عملکرد باقیمانده ساختمان بلافاصله پس از حادثه در نظر می‌گیرد.

۴- روش تحقیق

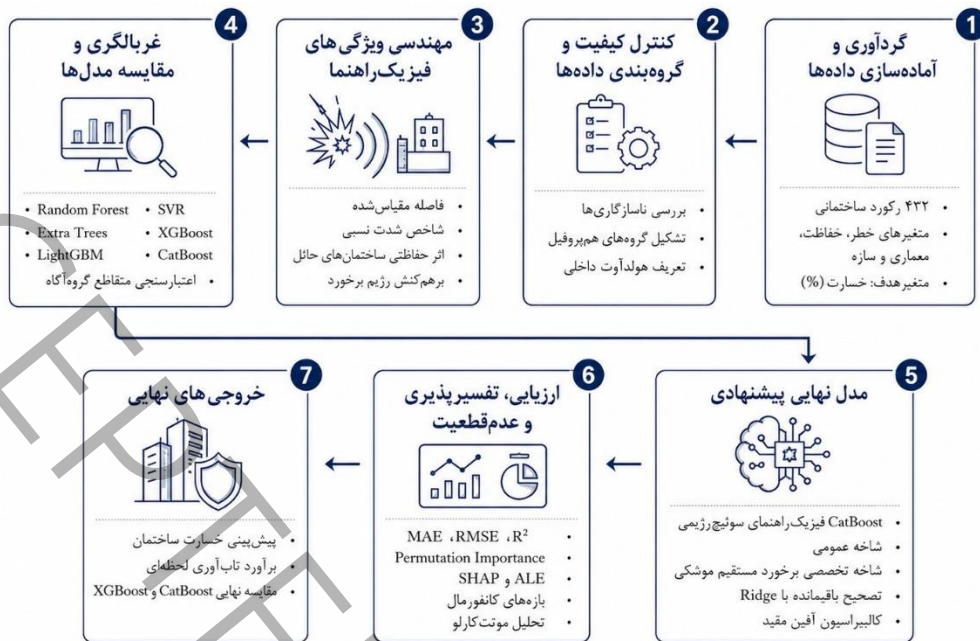
این پژوهش با هدف پیش‌بینی درصد خسارت و برآورد تاب‌آوری لحظه‌ای ساختمان‌های تحت اثر انفجار، بر پایه یک چارچوب یادگیری ماشین فیزیک‌راهنما و رژیم‌آگاه توسعه یافته است. منطق روش بر این فرض استوار است که سناریوهای انفجاری مختلف الزاماً رفتار خسارت یکسانی ندارند؛ از این رو، ساختار مدل باید علاوه بر ویژگی‌های معماری و سازه‌ای ساختمان، تفاوت میان رژیم‌های بارگذاری را نیز بازنمایی کند.

چارچوب پژوهش، داده‌های مربوط به شدت انفجار، شرایط مواجهه، حفاظت پیرامونی و مشخصات ساختمان را در یک ساختار یکپارچه ترکیب می‌کند. برای کاهش خطر نشت اطلاعات و دستیابی به ارزیابی واقع‌بینانه‌تر، تقسیم داده‌ها در سطح گروه‌های دارای پروفایل مشابه انجام شد و مجموعه هولد‌آوت تا پایان توسعه مدل مستقل باقی ماند. ویژگی‌های فیزیک‌راهنما نیز با هدف تقویت ارتباط میان ورودی‌های داده‌محور و منطق فیزیکی مسئله تعریف شدند. در ادامه، مدل پیشنهادی با استفاده از اعتبارسنجی گروه‌آگاه توسعه یافت و عملکرد آن از نظر دقت پیش‌بینی، رفتار در سناریوهای بحرانی، تفسیرپذیری و عدم قطعیت ارزیابی شد. شکل ۱ نمای کلی این چارچوب را نشان می‌دهد و ارتباط میان داده‌های ورودی، مهندسی ویژگی، ساختار سوئیچ‌رژیمی، ارزیابی مدل و تولید خروجی‌های خسارت و تاب‌آوری را خلاصه می‌کند.

۴-۱- مجموعه داده و متغیرهای پژوهش

مجموعه داده این پژوهش شامل ۴۳۲ نمونه از ساختمان‌های آسیب‌دیده در رخداد‌های انفجاری است. داده‌ها از ترکیب مستندات تاریخی، مشاهدات میدانی و تحلیل تصاویر هوایی و ماهواره‌ای گردآوری شدند. بخشی از اطلاعات به مستندات موشک‌باران تهران در جنگ ایران و عراق و بخشی دیگر به ارزیابی ساختمان‌های آسیب‌دیده در تهران و نمونه‌های مستندسازی شده از رخداد‌های انفجاری مختلف مربوط است [۲۶]. این تنوع، دامنه‌ای از شدت انفجار، فاصله، نحوه برخورد و مشخصات ساختمانی را پوشش می‌دهد؛ با این حال، تفاوت در زمان رخداد، شرایط محیطی و سطح جزئیات منابع، ناهمگنی اجتناب‌ناپذیری در داده‌ها ایجاد کرده است. همچنین، به دلیل نبود شناسه یکتای ساختمان یا رخداد در فایل نهایی، جداسازی نمونه‌ها بر پایه حادثه واقعی امکان‌پذیر نبود؛ بنابراین، این محدودیت در طراحی تقسیم داده و تفسیر نتایج مورد توجه قرار گرفت.

داده خام شامل ۱۱ متغیر پیش‌بین و یک متغیر هدف است. متغیرهای ورودی پنج جنبه اصلی مسئله را بازنمایی می‌کنند: شدت خطر انفجار، شرایط مواجهه، نوع و رژیم حمله، حفاظت محیطی و ویژگی‌های معماری و سازه‌ای ساختمان. مشخصات این متغیرها در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۱: چارچوب روش تحقیق و مراحل توسعه مدل پیشنهادی

Fig. 1. Research methodology framework and development stages of the proposed model.

جدول ۲: مشخصات متغیرهای اولیه مجموعه داده

Table 2. Characteristics of the initial dataset variables.

گروه متغیر	متغیر	نوع داده	دامنه یا طبقات موجود
خطر انفجار	جرم معادل TNT	عددی پیوسته	۵۰ تا ۵۰۰۰ کیلوگرم
مواجهه	فاصله ساختمان از مرکز انفجار	عددی پیوسته	صفر تا ۲۰۰ متر
سناریوی حمله	نوع عملیات	طبقه‌ای	حمله موشکی، حمله پهپادی، بمب‌گذاری تروریستی
رژیم برخورد	نوع درگیری	طبقه‌ای	برخورد مستقیم و غیرمستقیم
هندسه ساختمان	تعداد طبقات	عددی گسسته	۱ تا ۴۷ طبقه
حفاظت محیطی	تعداد بلوک‌های ساختمانی حائل	عددی گسسته	صفر تا ۷ بلوک
ویژگی نما	نسبت پنجره به دیوار	عددی پیوسته	۱۰ تا ۱۰۰ درصد
مشخصات سازه‌ای	نوع سیستم سازه‌ای	طبقه‌ای	بتن‌آرمه، فولادی، بتنی و سازه سبک فولادی
اجزای ساختمانی	نوع دیوار	طبقه‌ای	بلوک بتنی، آجر، کرتن وال و بلوک سیمانی
اجزای ساختمانی	نوع سقف	طبقه‌ای	دال بتن‌آرمه، طاق ضربی، تیرچه‌بلوک، سازه سبک فولادی و خرپای چوبی
اجزای ساختمانی	نوع نمای خارجی	طبقه‌ای	اندود سیمانی، سنگ، آجر، کرتن وال، شیشه و کامپوزیت
متغیر هدف	سطح خسارت ساختمان	عددی پیوسته	صفر تا ۱۰۰ درصد

در میان متغیرهای ورودی، جرم معادل TNT و فاصله، شدت و موقعیت نسبی منبع خطر را توصیف می‌کنند. تعداد ساختمان‌های حائل به عنوان یک شاخص ساده شده از اثر حفاظتی بافت پیرامونی در نظر گرفته شد، در حالی که نسبت پنجره به دیوار میزان بازشدگی پوسته خارجی را بازنمایی می‌کند. این متغیرها جانشین اطلاعات تفصیلی درباره هندسه موانع، خواص واقعی مصالح، کیفیت اتصالات یا وضعیت اعضای سازه‌ای نیستند؛ از این رو، مدل حاضر برای ارزیابی سریع در مقیاس کل ساختمان طراحی شده و جایگزین تحلیل تفصیلی سازه محسوب نمی‌شود.

متغیر هدف، درصد خسارت کلی ساختمان با نماد $DE[0,100]$ تعریف شد؛ به گونه‌ای که افزایش D نشان‌دهنده افزایش شدت خسارت است. تعیین این متغیر بر پایه شواهد سازه‌ای و غیرسازه‌ای، از جمله وضعیت اعضای باربر، ترک و تغییر شکل، خرابی دیوار و

سقف، جداسدگی نما، شکست بازشوها، فروریزش و حجم تقریبی آوار انجام شد. ساختمان‌ها ابتدا در شش سطح «بدون خسارت»، «جزئی»، «متوسط»، «شدید»، «تزدیک به فروپاشی» و «فروپاشی کامل» طبقه‌بندی شدند و سپس مقدار عددی خسارت در دامنه متناظر، به ترتیب ۰، ۱-۱۰، ۱۱-۳۰، ۳۱-۶۰، ۶۱-۸۵ و ۸۶-۱۰۰ درصد، تعیین شد. بنابراین، D باید به عنوان یک برآورد مهندسی از خسارت کلی ساختمان تفسیر شود، نه شاخص دقیق آسیب یک عضو یا هزینه تعمیر.

لازم بذکر است که ترکیب سناریوهای موجود در داده‌ها متوازن نیست. از ۴۳۲ نمونه، ۳۶۳ رکورد مربوط به حملات موشکی، ۳۵ رکورد مربوط به حملات پهپادی، ۳۰ رکورد مربوط به بمب‌گذاری تروریستی و ۴ رکورد مربوط به حملات موشک ضدزره است. همچنین، ۹۹ نمونه در گروه برخورد مستقیم و ۳۳۳ نمونه در گروه برخورد غیرمستقیم قرار دارند. این عدم توازن، به ویژه در سناریوهای شدید و کم‌نمونه، یکی از دلایل اصلی استفاده از ارزیابی زیرگروهی و ساختار سوئیچ‌رژیمی در مراحل بعدی مدل‌سازی بود.

۲-۴- آماده‌سازی و تقسیم گروه‌آگاه داده‌ها

پیش از مدل‌سازی، داده‌ها از نظر کامل بودن، دامنه مقادیر و سازگاری متغیرهای طبقه‌ای بررسی شدند. در مجموعه ۴۳۲ رکورد، داده ناشناخته‌ای مشاهده نشد و مقادیر خسارت نیز همگی در دامنه تعریف‌شده قرار داشتند؛ بنابراین، نیازی به حذف رکورد ناقص یا برآورد مقادیر گم‌شده نبود. اصلاحات اولیه تنها به یکسان‌سازی نحوه نگارش طبقات اسمی محدود شد و هیچ یک از مقادیر ورودی یا برچسب‌های خسارت تغییر نکرد.

بررسی ساختار داده نشان داد برخی ساختمان‌ها دارای پروفایل ورودی یکسان هستند. یازده گروه تکراری کامل شناسایی شد و در ۴۱ گروه شامل ۸۷ رکورد، ترکیب متغیرهای پیش‌بین یکسان بود. در ۳۱ مورد از این گروه‌ها، مقدار خسارت یکسان نبود و در مجموع ۶۷ رکورد در گروه‌های دارای برچسب متفاوت قرار داشتند؛ تفاوتی که می‌تواند ناشی از عوامل ثبت‌نشده‌ای مانند کیفیت اجرا، مشخصات واقعی مصالح، شرایط موضعی حادثه یا عدم قطعیت ارزیابی باشد. به همین دلیل، این نمونه‌ها حذف یا میانگین‌گیری نشدند. در عوض، هر ترکیب یکتای متغیرهای پیش‌بین به عنوان یک گروه پروفایل تعریف شد که در نهایت ۳۸۶ گروه مستقل ایجاد کرد. این تصمیم اجازه داد تغییرپذیری موجود در داده حفظ شود و در عین حال، خطر نشت اطلاعات میان آموزش و ارزیابی کنترل شود.

تقسیم داده‌ها در سطح این گروه‌ها انجام شد، نه در سطح رکوردهای منفرد؛ بنابراین، نمونه‌های دارای پروفایل یکسان همواره در یک بخش مشترک باقی ماندند. مجموعه داده با نسبت تقریبی ۸۰ به ۲۰ به مجموعه توسعه و هولد‌آوت داخلی تقسیم شد. برای یافتن تفکیکی با استقلال کامل گروه‌ها و توزیع متوازن خسارت، ۵۰ هزار تقسیم‌کنند با روش الگوریتم تفکیک تصادفی گروه‌آگاه^۱ ایجاد شد. تقسیم نهایی فقط بر اساس نبود هم‌پوشانی گروهی و شباهت توزیع خسارت در دو مجموعه انتخاب شد و هیچ معیار عملکرد مدل در این انتخاب دخالت نداشت. مشخصات تقسیم گروه‌آگاه مجموعه داده در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳: مشخصات تقسیم گروه‌آگاه مجموعه داده

Table 3. Group-aware dataset splitting characteristics.

مشخصه	مجموعه توسعه	هولد‌آوت داخلی
تعداد رکوردها	۳۴۶	۸۶
سهم از کل داده‌ها	۸۰٪/۱	۱۹٪/۹
تعداد گروه‌های یکتا	۳۰۸	۷۸
میانگین خسارت	۲۶/۶۹	۲۶/۳۵
انحراف معیار خسارت	۲۹/۰۵	۲۸/۲۵
اشتراک گروهی	صفر	صفر

نزدیکی میانگین و پراکندگی خسارت در دو مجموعه، همراه با اختلاف استاندارد شده میانگین خسارت برابر با ۰٫۱۲ نشان می‌دهد هولد‌آوت از نظر توزیع متغیر هدف با مجموعه توسعه سازگار است، بدون آنکه گروه مشترکی میان آنها وجود داشته باشد. مجموعه توسعه

^۱ Group Shuffle Split

برای انتخاب ویژگی‌ها، تنظیم مدل و تصمیم‌های روش‌شناختی استفاده شد، درحالی‌که هولدآوت تا پایان فرایند توسعه دست‌نخورده باقی ماند و تنها برای ارزیابی نهایی به کار رفت. از آنجا که هر دو مجموعه از یک مخزن داده مشترک استخراج شده‌اند، این ارزیابی باید به‌عنوان هولدآوت داخلی مستقل تفسیر شود و نه اعتبارسنجی خارجی.

۳-۴ مهندسی ویژگی‌های فیزیک‌راهنما

برای آنکه مدل صرفاً به همبستگی‌های آماری میان متغیرها متکی نباشد، بخشی از دانش مهندسی انفجار در قالب ویژگی‌های مشتق‌شده به فضای ورودی افزوده شد. هدف از این مرحله، جایگزینی تحلیل فیزیکی با یادگیری ماشین نبود؛ بلکه تلاش شد ارتباط میان جرم ماده منفجره، فاصله، شرایط حفاظتی و رژیم برخورد به شکلی در اختیار مدل قرار گیرد که با منطق فیزیکی مسئله سازگارتر باشد. تمام ویژگی‌های مشتق‌شده پس از تفکیک داده‌ها ساخته شدند تا هیچ اطلاعاتی از هولدآوت وارد فرایند توسعه مدل نشود. مهم‌ترین ویژگی فیزیک‌راهنما، فاصله مقیاس‌شده هاپکینسون-کرانز بود که اثر هم‌زمان فاصله ساختمان از منبع انفجار و جرم معادل ماده منفجره را بیان می‌کند:

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (1)$$

که در آن R فاصله ساختمان از مرکز انفجار بر حسب متر و W جرم معادل TNT بر حسب کیلوگرم و Z فاصله مقیاس‌شده است. کاهش Z به‌طور کلی نشان‌دهنده مواجهه شدیدتر ساختمان با بار انفجار است. با این حال، این متغیر برای بازنمایی کامل انفجارهای تماسی، نفوذ پرتابه یا پیچیدگی بازتاب موج در محیط شهری کافی نیست؛ از این‌رو، در مدل به‌عنوان یک شاخص فیزیکی مکمل و نه توصیف کامل بار انفجار استفاده شد. برای تعدیل دامنه گسترده جرم و فاصله و نیز بازنمایی بهتر روابط غیرخطی، تبدیل‌های لگاریتمی و برخی برهم‌کنش‌های مهندسی‌شده بررسی شدند. در رکوردهای دارای فاصله صفر، محاسبات به‌صورت عددی ایمن انجام شد تا از تقسیم بر صفر جلوگیری شود؛ این نمونه‌ها نیز از طریق متغیر رژیم برخورد به‌طور جداگانه مشخص شدند. شاخص‌های شدت نسبی حاصل از این تبدیل‌ها صرفاً برای مقایسه سناریوها به کار رفتند و نباید معادل اندازه‌گیری مستقیم فشار، ضربه یا انرژی منتقل‌شده تلقی شوند.

اثر حفاظتی محیط پیرامونی نیز با استفاده از تعداد ساختمان‌های حائل بازنمایی شد. این متغیر تنها یک جانشین ساده‌شده برای اثر سایه‌اندازی بافت شهری است و اطلاعاتی درباره ارتفاع، شکل، فاصله یا مصالح موانع ندارد. به همین ترتیب، نسبت پنجره به دیوار و تعداد طبقات برای بازنمایی تقریبی آسیب‌پذیری پوسته و هندسه ساختمان وارد شدند و برهم‌کنش آنها با شدت بارگذاری در پیکربندی‌های توسعه‌یافته بررسی شد. برای رژیم برخورد مستقیم، یک نشانگر اختصاصی تعریف شد تا مدل بتواند رفتار این سناریو را مستقل از الگوی عمومی سایر انفجارها یاد بگیرد. تعامل این نشانگر با جرم معادل ماده منفجره، فاصله مقیاس‌شده، تعداد طبقات، نسبت پنجره به دیوار و شرایط حفاظتی بررسی شد. لازم بذکر است که جرم معادل ماده منفجره فقط به‌عنوان جانشینی نسبی برای شدت برخورد در نظر گرفته شد و به دلیل نبود داده‌های مربوط به سرعت، زاویه و نفوذ، بازتاب‌دهنده انرژی کل فیزیکی برخورد نیست.

جدول ۴: گروه‌های اصلی ویژگی‌های فیزیک‌راهنما و نقش آنها در مدل

Table 4. Main groups of physics-guided features and their roles in the model.

گروه ویژگی	متغیرهای اصلی	نقش در مدل
مقیاس انفجار	Z ، تبدیل‌های جرم و فاصله	بازنمایی شدت نسبی مواجهه
حفاظت محیطی	تعداد موانع و شاخص حفاظتی	تقریب اثر سایه‌اندازی شهری
هندسه و پوسته	طبقات، نسبت پنجره به دیوار	بازنمایی آسیب‌پذیری کالبدی
برهم‌کنش‌ها	شدت × پوسته، شدت × ارتفاع	یادگیری اثر وابسته به سناریو
رژیم برخورد مستقیم	نشانگر برخورد و برهم‌کنش‌های اختصاصی	تفکیک رفتار سناریوهای بحرانی

۴-۴- انتخاب مجموعه ویژگی‌ها و طراحی مقایسه

افزودن ویژگی‌های فیزیک‌راهنما زمانی مفید است که واقعاً قابلیت تعمیم مدل را بهبود دهد، نه اینکه فقط فضای ویژگی را بزرگ‌تر و خطر بیش‌برازش را بیشتر کند. برای بررسی این موضوع، پنج پیکربندی از یک خط مبنای صرفاً داده‌محور تا مجموعه‌های توسعه‌یافته‌تر تعریف شد (جدول ۵). این مقایسه امکان داد اثر فاصله مقیاس‌شده و سایر ویژگی‌های مهندسی‌شده جدا از پیچیدگی اضافی مدل ارزیابی شود.

جدول ۵: پیکربندی‌های مورد بررسی در تحلیل حذف ویژگی‌ها

Table 5. Feature configurations evaluated in the feature ablation analysis.

مجموعه	تعداد ویژگی	ساختار کلی	هدف مقایسه
A: متغیرهای خام	۱۱	تمام متغیرهای اولیه ساختمان و سناریوی انفجار	تشکیل خط مبنای داده‌محور
B: فیزیکی فشرده	۱۰	حذف جرم TNT و فاصله خام و جایگزینی آن‌ها با فاصله مقیاس‌شده	بررسی کفایت فاصله مقیاس‌شده به‌عنوان شاخص ترکیبی خطر
C: متغیرهای خام به‌علاوه Z	۱۲	تمام متغیرهای خام همراه با فاصله مقیاس‌شده	بررسی ارزش افزوده اصلی‌ترین ویژگی فیزیک‌راهنما
D: فیزیکی توسعه‌یافته	۱۹	مجموعه C همراه با تبدیل‌های لگاریتمی، عامل حفاظتی، شاخص شدت و برهم‌کنش‌های نما و ارتفاع	بررسی اثر مجموعه گسترده ویژگی‌های مهندسی‌شده
E: فیزیکی فشرده بدون جرم و فاصله خام	۱۵	فاصله مقیاس‌شده و ویژگی‌های مشتق‌شده بدون جرم TNT و فاصله اولیه	کاهش افزونگی میان ویژگی‌های خام و مشتق‌شده

مقایسه این مجموعه‌ها فقط بر داده‌های توسعه شده انجام شد. برای حفظ استقلال گروه‌ها، اعتبارسنجی متقاطع گروه‌آگاه پنج‌بخشی در حلقه بیرونی و تنظیم ابرپارامترها با اعتبارسنجی چهاربخشی در حلقه داخلی انجام شد؛ بنابراین، هولد‌آوت داخلی در انتخاب ویژگی یا تنظیم مدل نقشی نداشت. معیار اصلی انتخاب، میانگین قدر مطلق خطا بود و در نتایج نزدیک، ریشه میانگین مربعات خطا و سادگی مجموعه ویژگی به‌عنوان معیارهای مکمل در نظر گرفته شدند. در نهایت، مجموعه C به‌عنوان ترکیب اصلی انتخاب شد. این پیکربندی ضمن حفظ اطلاعات مستقل جرم و فاصله، فاصله مقیاس‌شده Z را نیز به مدل اضافه می‌کند و تعادل مناسبی میان محتوای فیزیکی و پیچیدگی ایجاد می‌کند. افزودن تبدیل‌ها و برهم‌کنش‌های بیشتر در مجموعه D، بهبودی متناسب با افزایش پیچیدگی ایجاد نکرد؛ بنابراین، برای کاهش خطر بیش‌برازش کنار گذاشته شد. از آنجا که Z به‌صورت قطعی از R و W محاسبه می‌شود، حضور هم‌زمان این سه متغیر نوعی وابستگی ساختاری ایجاد می‌کند. این وابستگی نشت اطلاعات محسوب نمی‌شود، زیرا Z فقط از متغیرهای ورودی ساخته شده و هیچ اطلاعاتی از متغیر هدف یا هولد‌آوت وارد آن نشده است. با این حال، به دلیل همین وابستگی، اهمیت منفرد R، W و Z نباید به‌عنوان اثر کاملاً مستقل هر متغیر تفسیر شود.

۴-۵ مدل فیزیک‌راهنمای سوئیچ‌رژیمی

ساختار مدل پیشنهادی بر این فرض بنا شد که همه سناریوهای انفجاری را نمی‌توان با یک الگوی واحد توصیف کرد. این موضوع به‌ویژه در برخورد مستقیم اهمیت دارد؛ زیرا تمرکز موضعی بار، احتمال نفوذ و الگوی خرابی در این حالت می‌تواند با انفجارهای دارای فاصله یا برخورد غیرمستقیم متفاوت باشد. بر همین اساس، مدل به دو شاخه عمومی و تخصصی تقسیم شد تا رفتار رژیم بحرانی بدون تحمیل پیچیدگی اضافی به سایر نمونه‌ها آموخته شود.

شاخه عمومی بر پایه CatBoost و مجموعه ویژگی منتخب شامل ۱۱ متغیر اولیه به‌همراه فاصله مقیاس‌شده Z توسعه یافت. انتخاب CatBoost با ساختار داده‌ها سازگار بود؛ زیرا مجموعه‌داده ترکیبی از متغیرهای عددی و طبقه‌ای، مانند نوع عملیات، سیستم سازه‌ای، دیوار، سقف و نما را در بر می‌گیرد. پردازش مستقیم متغیرهای طبقه‌ای و توانایی مدل در یادگیری روابط غیرخطی، امکان بررسی هم‌زمان اثر مشخصات انفجار و ساختمان را فراهم می‌کند. شاخه تخصصی نیز بر پایه CatBoost ساخته شد، اما برای نمونه‌های برخورد مستقیم موشکی، علاوه بر ویژگی‌های عمومی، بلوکی از متغیرهای اختصاصی رژیم مستقیم را دریافت کرد. این بلوک شامل نشانگر برخورد مستقیم و برهم‌کنش آن با شدت نسبی انفجار، تعداد طبقات، نسبت پنجره به دیوار و شرایط حفاظتی بود. هدف، ایجاد

یک مدل فیزیکی مستقل برای برخورد موشکی نبود، بلکه فراهم کردن امکان یادگیری روابطی بود که ممکن است در این رژیم با رفتار عمومی داده‌ها تفاوت داشته باشند. جرم معادل TNT نیز در این شاخه تنها به عنوان جانشینی نسبی برای شدت سناریو استفاده شد و به دلیل نبود اطلاعاتی مانند سرعت، زاویه برخورد و عمق نفوذ، معادل انرژی یا تکانه واقعی اصابت در نظر گرفته نشد. سوئیچ میان دو شاخه به صورت قطعی و از پیش تعریف شده انجام شد. رکوردی که هم‌زمان حمله موشکی و برخورد مستقیم بود به شاخه تخصصی هدایت شد و سایر نمونه‌ها توسط شاخه عمومی پردازش شدند. بنابراین، خروجی دو مدل میانگین‌گیری یا وزن‌دهی نشد و برای هر ساختمان تنها پیش‌بینی شاخه متناظر با رژیم آن به عنوان خروجی پایه پذیرفته شد. این قاعده مستقل از مقدار واقعی خسارت و خطای پیش‌بینی بود و در آموزش و ارزیابی بدون تغییر باقی ماند.

۴-۶- تصحیح باقیمانده و کالیبراسیون خروجی

پیش‌بینی اولیه هر شاخه CatBoost مستقیماً به عنوان خروجی نهایی پذیرفته نشد؛ زیرا ممکن بود بخشی از خطا در برخی ترکیب‌های ساختمانی یا سناریوهای انفجاری به صورت منظم باقی بماند. برای اصلاح این مؤلفه بدون افزایش بیش از حد پیچیدگی مدل، یک فرایند دومرحله‌ای شامل تصحیح باقیمانده با رگرسیون ریب و کالیبراسیون آفین مقید برای هر شاخه به طور مستقل اعمال شد. برای جلوگیری از آنکه مدل اصلاح‌کننده خطاهای همان داده‌هایی را یاد بگیرد که CatBoost قبلاً با آنها آموزش دیده است، باقیمانده‌ها از پیش‌بینی‌های برون‌نمونه‌ای حاصل از اعتبارسنجی گروه‌آگاه محاسبه شدند. برای نمونه ii، باقیمانده به صورت زیر تعریف شد:

$$e_i = D_i - \hat{D}_i^{base} \quad (2)$$

که در آن D_i خسارت مشاهده شده، $\hat{D}_i^{base}$ پیش‌بینی برون‌نمونه‌ای CatBoost و e_i باقیمانده متناظر است. رگرسیون ریب برای برآورد بخش قابل‌یادگیری این خطا به کار رفت؛ متغیرهای عددی پیش از برازش استاندارد و متغیرهای طبقه‌ای کدگذاری شدند. استفاده از منظم‌سازی نیز اثر ویژگی‌های همبسته را کنترل کرده و احتمال برازش نوسانات تصادفی خطا را کاهش می‌دهد. پیش‌بینی اصلاح شده از جمع خروجی مدل پایه و باقیمانده پیش‌بینی شده به دست آمد:

$$\hat{D}_i^{Corr} = \hat{D}_i^{base} + \hat{e}_i \quad (3)$$

در این ساختار، مدل ریب نقش یک مدل پیش‌بینی مستقل را ندارد؛ بلکه تنها الگوی باقی‌مانده در خطای CatBoost را اصلاح می‌کند. تنظیم آن نیز صرفاً بر مجموعه توسعه و در چارچوب تقسیم‌بندی گروه‌آگاه انجام شد. در گام بعد، برای اصلاح محدودیت شیفت و مقیاس پیش‌بینی‌ها، کالیبراسیون آفین بر خروجی اصلاح شده اعمال شد:

$$\hat{D}_i^{final} = a + b\hat{D}_i^{Corr} \quad (4)$$

که در آن a عرض از مبدأ و b ضریب مقیاس است. همچنین ضرایب با کمینه‌سازی خطای مربعی و با قیود $-50 \leq a \leq 50$ و $0 \leq b \leq 2$ برآورد شدند. این محدودیت‌ها مانع تغییر افراطی سطح پیش‌بینی و وارونه‌شدن جهت رابطه میان خسارت اولیه و خروجی نهایی می‌شوند. تمام ضرایب کالیبراسیون از پیش‌بینی‌های برون‌نمونه‌ای مجموعه توسعه به دست آمدند و هولد‌آوت در برازش آنها نقشی نداشت. در نهایت، خروجی به محدوده فیزیکی خسارت محدود شد:

$$\hat{D} = \min(100, \max(0, \hat{D}_{final})) \quad (5)$$

بنابراین، مسیر پیش‌بینی نهایی از یک منطق روشن پیروی می‌کند CatBoost که الگوی اصلی خسارت را یاد می‌گیرد، ریب خطای ساختاری باقی‌مانده را اصلاح می‌کند و کالیبراسیون فقط سطح و مقیاس خروجی را تنظیم می‌کند. به این ترتیب، دو مرحله اصلاحی مکمل مدل پایه‌اند و جایگزین آن محسوب نمی‌شوند.

۴-۷- راهبرد آموزش، اعتبارسنجی و مقایسه مدل‌ها

تمام مراحل انتخاب ویژگی، تنظیم ابرپارامترها و توسعه مدل فقط بر مجموعه توسعه انجام شد. برای جلوگیری از حضور پروفایل‌های مشابه در بخش‌های آموزش و ارزیابی، از اعتبارسنجی متقاطع تودرتوی گروه‌آگاه استفاده گردید؛ به طوری که حلقه بیرونی شامل پنج

بخش و حلقه داخلی شامل چهار بخش بود و گروه‌های دارای پروفایل یکسان همواره در یک بخش باقی ماندند. مجموعه هولدآوت نیز تا پایان توسعه مدل دست‌نخورده حفظ شد و فقط برای ارزیابی نهایی به کار رفت. میانگین قدر مطلق خطا معیار اصلی انتخاب مدل بود و ریشه میانگین مربعات خطا و ضریب تعیین به‌عنوان معیارهای مکمل گزارش شدند. علاوه بر عملکرد کلی، ثبات مدل میان بخش‌های اعتبارسنجی و رفتار آن در سناریوهای خسارت شدید و برخورد مستقیم نیز بررسی شد تا نتایج صرفاً تحت تأثیر نمونه‌های پرتعداد قرار نگیرند. پس از غربالگری الگوریتم‌های مختلف، XGBoost به‌عنوان معیار اصلی داده‌محور برای مقایسه با چارچوب پیشنهادی انتخاب شد. اختلاف عملکرد دو مدل، علاوه بر معیارهای خطا، با آزمون زوجی ویلکاکسون و فاصله اطمینان بوت‌استرپ بررسی شد. روابط کلاسیک انفجار نیز فقط به‌عنوان مرجع مهندسی مکمل و برای رکوردهای دارای فاصله مثبت استفاده شدند و در مقایسه اصلی مدل‌ها نقشی نداشتند.

۴-۸- تفسیرپذیری، تحلیل حساسیت و عدم قطعیت

برای آنکه ارزیابی مدل به معیارهای خطا محدود نماند، رفتار آن از سه منظر تفسیرپذیری، حساسیت و عدم قطعیت بررسی شد. اهمیت جایگشتی برای سنجش سهم هر متغیر در عملکرد کل چارچوب به کار رفت؛ به این صورت که افزایش خطا پس از برهم‌زدن تصادفی یک ویژگی، به‌عنوان نشانه‌ای از اهمیت آن در پیش‌بینی در نظر گرفته شد. برای ویژگی‌های اختصاصی شاخه برخورد مستقیم، متغیرهای مرتبط به‌صورت یک بلوک مشترک نیز بررسی شدند تا همبستگی درونی آنها باعث برداشت نادرست از اهمیت منفرد متغیرها نشود. برای تفسیر جهت و شدت اثر متغیرها، تحلیل SHAP به‌طور جداگانه برای شاخه عمومی و تخصصی CatBoost انجام شد. این تحلیل فقط رفتار مدل پایه را توضیح می‌دهد و شامل تصحیح رنج و کالیبراسیون نهایی نیست؛ بنابراین، نتایج آن به کل زنجیره پیش‌بینی تعمیم داده نشد. از نمودارهای ALE نیز برای بررسی شکل اثر متغیرهای عددی استفاده شد؛ انتخاب این روش به‌ویژه به دلیل وابستگی میان جرم TNT، فاصله و فاصله مقیاس‌شده مناسب بود. پایداری ساختار مدل با حذف ویژگی‌های فیزیک‌راهنما و بلوک اختصاصی برخورد مستقیم بررسی شد. مدل‌های کاهش‌یافته با همان تقسیم‌بندی و پروتکل آموزشی بازآموزی شدند و تغییر عملکرد در کل داده‌ها، برخورد مستقیم و خسارت‌های شدید مقایسه شد. هدف این تحلیل، مشخص کردن این بود که بهبود مدل واقعاً به اجزای فیزیک‌راهنما وابسته است یا می‌توان آن را تنها به پیچیدگی بیشتر نسبت داد. تفسیر نتایج SHAP، ALE و اهمیت جایگشتی نیز صرفاً به‌عنوان الگوهای آموخته‌شده از داده‌ها در نظر گرفته شد و نه رابطه علی.

عدم قطعیت پیش‌بینی با بازه‌های کانفورمال گروه‌آگاه کمی‌سازی شد. علاوه بر بازه سراسری، یک پیکربندی رژیم‌آگاه و یک حالت ایمنی‌محور بررسی شد که برای برخورد مستقیم موشکی پوشش محافظه‌کارانه‌تری در نظر می‌گیرد. ارزیابی این بازه‌ها بر پایه نرخ پوشش و عرض متوسط بازه انجام شد و نتایج زیرگروه‌های بحرانی نیز جداگانه بررسی شدند. تحلیل مونت‌کارلو نیز فقط به‌عنوان مکمل برای سنجش حساسیت خروجی نسبت به تغییرپذیری مفروض ورودی‌ها استفاده شد. این تحلیل جایگزین بازه کانفورمال نیست؛ زیرا بازه کانفورمال از خطاهای مشاهده‌شده مدل استخراج می‌شود، درحالی‌که نتایج مونت‌کارلو به دامنه تغییرات فرض‌شده برای ورودی‌ها وابسته است.

۴-۹- تعریف تاب‌آوری لحظه‌ای

در این پژوهش، تاب‌آوری لحظه‌ای به معنای سهم عملکرد باقی‌مانده ساختمان بلافاصله پس از انفجار در نظر گرفته شد. این شاخص وضعیت فوری ساختمان را نشان می‌دهد و مؤلفه‌هایی مانند زمان تعمیر، هزینه بازسازی یا روند بازیابی را شامل نمی‌شود؛ بنابراین، نباید با تاب‌آوری بلندمدت یکسان تلقی شود.

از آنجا که خروجی اصلی مدل، درصد خسارت ساختمان D در بازه صفر تا ۱۰۰ است، شاخص تاب‌آوری لحظه‌ای مبتنی بر خسارت به‌صورت زیر تعریف شد:

$$R_d = 1 - \frac{D}{100}$$

(۶)

در نتیجه، R_d در بازه صفر تا یک قرار می‌گیرد؛ مقدار یک بیانگر حفظ کامل عملکرد و مقدار صفر متناظر با خسارت کامل است. از آنجا که R_d مستقیماً از خسارت محاسبه می‌شود، مدل جداگانه‌ای برای پیش‌بینی آن آموزش داده نشد و ارزیابی دقت مدل در مقیاس خسارت انجام گرفت. برای تکمیل این شاخص، یک مدل تفسیرپذیر ظرفیت-خطر نیز به‌عنوان تحلیل مکمل تعریف شد:

$$R_{CH} = \frac{C^*}{C^* + H^*} = \frac{1}{1 + \exp(h - c)} \quad (7)$$

که در آن C^* و H^* به ترتیب امتیازهای نسبی و بدون بُعد ظرفیت و خطر هستند و $c = \ln C^*$ و $h = \ln H^*$ نمایش لگاریتمی آنها را بیان می‌کنند. ویژگی‌های ساختمانی و حفاظتی در مؤلفه ظرفیت و متغیرهای شدت انفجار و مواجهه در مؤلفه خطر وارد شدند. این امتیازها بیانگر ظرفیت مکانیکی واقعی یا بار فیزیکی اندازه‌گیری شده نیستند و فقط برای تفسیر تعادل نسبی ظرفیت و خطر به کار می‌روند. مدل ظرفیت-خطر مستقل از فرایند آموزش CatBoost است و نقشی در انتخاب یا تنظیم مدل اصلی ندارد؛ در این پژوهش، R_d شاخص اصلی تاب‌آوری لحظه‌ای است و R_{CH} فقط برای تفسیر مهندسی و بررسی همگرایی نتایج استفاده می‌شود.

۵- بحث و نتایج

۵-۱- مقایسه الگوریتم‌ها و انتخاب مدل‌های برتر

به منظور شناسایی الگوریتم‌های کارآمد در پیش‌بینی خسارت، چندین روش خطی و غیرخطی مورد ارزیابی قرار گرفتند. مقایسه الگوریتم‌ها یک الگوی روشن نشان داد که مدل‌های مبتنی بر تقویت گرادیانی نسبت به روش‌های خطی و مدل مبنای میانگین، توان بیشتری در بازنمایی رابطه پیچیده میان شدت انفجار، شرایط مواجهه و ویژگی‌های ساختمان داشتند. در این میان، XGBoost با میانگین خطای مطلق ۷/۸۸۴ بهترین عملکرد کلی را به دست آورد و CatBoost اصلاح‌شده با مقدار ۸/۱۲۷ در فاصله نزدیکی از آن قرار گرفت. برتری محسوس این دو مدل نسبت به رگرسیون ریب و مدل مبنای میانگین نشان می‌دهد که رابطه میان متغیرهای خطر و پاسخ ساختمان را نمی‌توان با یک ساختار خطی ساده در نظر گرفت.

جدول ۶: مقایسه عملکرد الگوریتم‌های پیش‌بینی خسارت در مجموعه توسعه

Table 6. Performance comparison of damage prediction algorithms on the development set.

رتبه	الگوریتم	میانگین MAE	انحراف معیار MAE	میانگین RMSE	میانگین R^2	میانگین سوگیری
۱	XGBoost	۷/۸۸۴	۱/۳۶۱	۱۱/۵۵۹	۰/۸۳۷	۰/۰۰۱
۲	CatBoost اصلاح‌شده با ریب و کالیبراسیون آفین	۸/۱۲۷	۱/۲۳۱	۱۱/۷۷۹	۰/۸۳۲	۰/۱۴۲
۳	LightGBM	۸/۲۰۹	۱/۴۱۲	۱۲/۱۲۶	۰/۸۲۱	۰/۲۲۱
۴	Gradient Boosting	۸/۲۸۷	۱/۴۰۸	۱۲/۰۶۹	۰/۸۲۲	-۰/۱۶۶
۵	CatBoost پایه	۸/۴۶۴	۱/۲۷۶	۱۲/۰۱۶	۰/۸۲۵	۰/۰۸۵
۶	جنگل تصادفی	۸/۶۵۵	۱/۲۶۲	۱۲/۴۹۷	۰/۸۱۰	۰/۱۶۶
۷	درختان اضافی	۸/۹۲۶	۱/۱۳۲	۱۲/۹۹۰	۰/۷۹۷	۰/۰۸۹
۸	ماشین بردار پشتیبان رگرسیونی با هسته RBF	۹/۱۶۷	۰/۷۶۸	۱۳/۹۶۸	۰/۷۶۴	-۰/۹۹۵
۹	مدل رگرسیون ریب	۱۲/۵۳۳	۲/۰۶۸	۱۷/۲۷۴	۰/۶۴۱	۰/۸۷۳
۱۰	مدل مبنای میانگین	۲۴/۳۴۴	۰/۴۹۴	۲۹/۰۰۴	تقریباً صفر	تقریباً صفر

فاصله عملکرد XGBoost و CatBoost اصلاح‌شده در مقایسه با اختلاف آنها با مدل‌های ساده‌تر، کوچک است. XGBoost از نظر دقت عددی کلی اندکی بهتر بود، اما CatBoost اصلاح‌شده تغییرپذیری کمتری میان بخش‌های اعتبارسنجی نشان داد. این تفاوت مهم است، زیرا در کاربردهای ارزیابی خسارت، مدلی که در زیرمجموعه‌های مختلف رفتار یکنواخت‌تری دارد می‌تواند از نظر قابلیت تعمیم ارزشمند باشد، حتی اگر کمترین خطای متوسط را ثبت نکرده باشد. بنابراین، انتخاب CatBoost برای ادامه توسعه چارچوب پیشنهادی بر اساس رتبه دوم بودن صورت نگرفت، بلکه بر مبنای ترکیب دقت نزدیک به بهترین مدل، ثبات بیشتر و قابلیت توسعه ساختار رژیم‌آگاه انجام شد. اثر تصحیح باقیمانده نیز از مقایسه دو نسخه CatBoost قابل مشاهده است. میانگین خطای مطلق از

۸/۴۶۴ در مدل پایه به ۸/۱۲۷ در نسخه اصلاح شده کاهش یافت؛ همزمان RMSE نیز اندکی بهبود پیدا کرد. این کاهش حدود چهاردرصدی نشان می‌دهد بخشی از خطای CatBoost ماهیت تصادفی نداشته و دارای الگویی بوده که مرحله تصحیح باقیمانده توانسته آن را بازیابی کند. با این حال، اندازه این بهبود محدود است و نشان می‌دهد بخش اصلی توان پیش‌بینی همچنان از مدل پایه و ویژگی‌های ورودی حاصل می‌شود، نه از مرحله پس‌پردازش.

عملکرد نزدیک چند الگوریتم تقویت گرادیانی نیز این پیام فنی مهم را دارد که ساختار غیرخطی مسئله بیش از انتخاب یک الگوریتم خاص تعیین‌کننده است. در مقابل، افت محسوس عملکرد رگرسیون رنج نشان می‌دهد اثر جرم انفجار، فاصله، حفاظت پیرامونی و ویژگی‌های ساختمانی احتمالاً از طریق روابط غیرخطی و برهم‌کنش‌ها شکل می‌گیرد. بنابراین، نتایج این مرحله بیش از آنکه صرفاً رتبه‌بندی الگوریتم‌ها باشند، ضرورت استفاده از یک چارچوب غیرخطی برای مدل‌سازی خسارت انفجاری را تأیید می‌کنند.

۵-۲- انتخاب مجموعه ویژگی‌ها و کنترل بیش‌برازش و کم‌برازش

مقایسه پیکربندی‌های ویژگی نشان داد که افزودن صرف تعداد بیشتری از متغیرهای مهندسی شده لزوماً به تعمیم بهتر منجر نمی‌شود. بهترین عملکرد زمانی به دست آمد که ۱۱ متغیر اولیه همراه با فاصله مقیاس شده Z استفاده شدند. اضافه شدن Z نسبت به مجموعه متغیرهای خام، خطای مطلق را حدود ۲/۶ تا ۲/۸ درصد کاهش داد؛ اما حذف جرم انفجار و فاصله واقعی و جایگزینی کامل آنها با Z نتیجه ضعیف‌تری داشت. این الگو نشان می‌دهد فاصله مقیاس شده اطلاعات فیزیکی مفیدی درباره اثر مشترک جرم و فاصله فراهم می‌کند، ولی نمی‌تواند تمام اطلاعات موجود در مقادیر مستقل W و R را جایگزین کند.

از سوی دیگر، توسعه فضای ویژگی تا ۱۹ متغیر به بهبود پایدار عملکرد منجر نشد. وجود ۲۳ زوج ویژگی با همبستگی اسپیرمن حداقل ۰/۹۰ نشان می‌دهد بخشی از ویژگی‌های توسعه‌یافته اطلاعات مشابهی حمل می‌کنند. بنابراین، افزایش پیچیدگی در این مرحله بیش از آنکه اطلاعات تازه‌ای به مدل اضافه کند، احتمال افزونگی و ناپایداری را افزایش می‌داد. بر همین اساس، مجموعه C به‌عنوان نقطه تعادل میان اطلاعات فیزیکی، دقت و سادگی انتخاب شد.

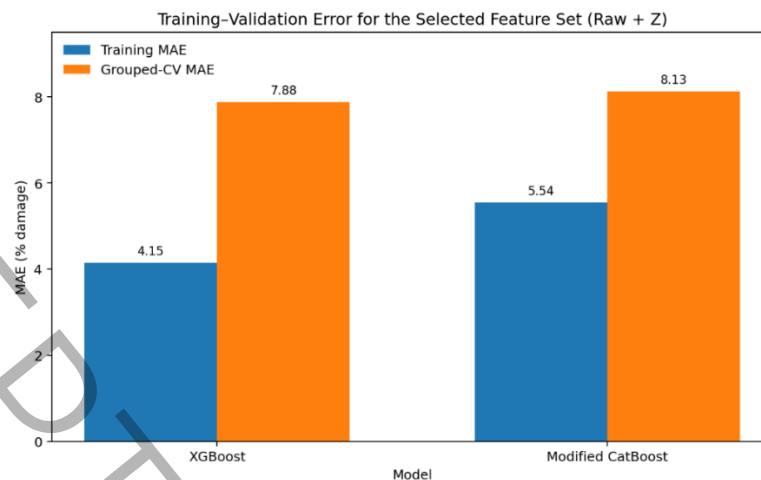
جدول ۷: عملکرد مجموعه ویژگی منتخب در اعتبارسنجی متقاطع گروه‌آگاه

Table 7. Performance of the selected feature set in group-aware cross-validation.

مدل	MAE آموزش	MAE ارزیابی	انحراف معیار MAE	RMSE ارزیابی	R^2 ارزیابی	شکاف آموزش-ارزیابی
XGBoost	۴/۱۵	۷/۸۸	۱/۳۶	۱۱/۵۶	۰/۸۳۷	۳/۷۴
CatBoost اصلاح شده	۵/۵۴	۸/۱۳	۱/۲۳	۱۱/۷۸	۰/۸۳۲	۲/۵۹

با توجه به نتایج بدست آمده، XGBoost همچنان دقت عددی بالایی داشت، اما فاصله بیشتر میان خطای آموزش و ارزیابی نشان می‌دهد این مدل نسبت به CatBoost اصلاح شده حساسیت بیشتری به داده‌های آموزشی دارد. در مقابل، CatBoost با وجود خطای اندکی بیشتر، شکاف محدودتر و تغییرپذیری کمتر میان بخش‌های اعتبارسنجی نشان داد. بنابراین، تفاوت این دو مدل را نمی‌توان فقط با بهتر یا بدتر بودن MAE توضیح داد؛ XGBoost مزیت جزئی در دقت کلی داشت، درحالی‌که CatBoost رفتار متعادل‌تری از نظر تعمیم نشان داد.

شکل ۲ همین تفاوت را از منظر پیچیدگی مدل روشن‌تر می‌کند. مدل‌های بسیار ساده در آموزش و ارزیابی هم‌زمان خطای بالایی داشتند، درحالی‌که افزایش بیش از حد پیچیدگی، خطای آموزش را کاهش می‌داد بدون آنکه بهبود متناظری در داده‌های ارزیابی ایجاد کند. بهترین عملکرد در محدوده‌ای به دست آمد که عمق مدل و شدت منظم‌سازی متعادل بودند؛ بنابراین، انتخاب نهایی بر اساس کمینه کردن صرف خطای آموزش انجام نشد، بلکه تعادل میان برازش و قابلیت تعمیم معیار اصلی بود. منحني‌های یادگیری نیز نشان دادند که با افزایش داده آموزشی، خطای ارزیابی کاهش یافته و فاصله آن با خطای آموزش کمتر می‌شود. این روند بیانگر آن است که بخشی از خطای باقی‌مانده ناشی از محدودیت حجم داده، به‌ویژه در سناریوهای شدید و کم‌نمونه است، نه صرفاً انتخاب نامناسب پیچیدگی مدل. همچنین، حذف رکوردهای کاملاً تکراری تنها افزایش محدودی در خطای XGBoost و CatBoost ایجاد کرد؛ بنابراین، مزیت مدل‌ها را نمی‌توان صرفاً به حضور این نمونه‌ها نسبت داد.



شکل ۲: مقایسه MAE آموزش و اعتبارسنجی متقاطع گروه آگاه برای مجموعه ویژگی C

Fig. 2. Comparison of training and group-aware cross-validation MAE for feature set C.

نتیجه این بخش روشن است مدل بهتر الزاماً مدلی با ویژگی‌های بیشتر نیست. حفظ متغیرهای خام در کنار یک ویژگی فیزیکی کلیدی، یعنی Z، برای این داده‌ها مؤثرتر از توسعه گسترده فضای ویژگی بود و مجموعه C مبنای ادامه تحلیل قرار گرفت.

۵-۳- اثر تکنیک سوئیچ‌رژیمی در برخوردهای مستقیم

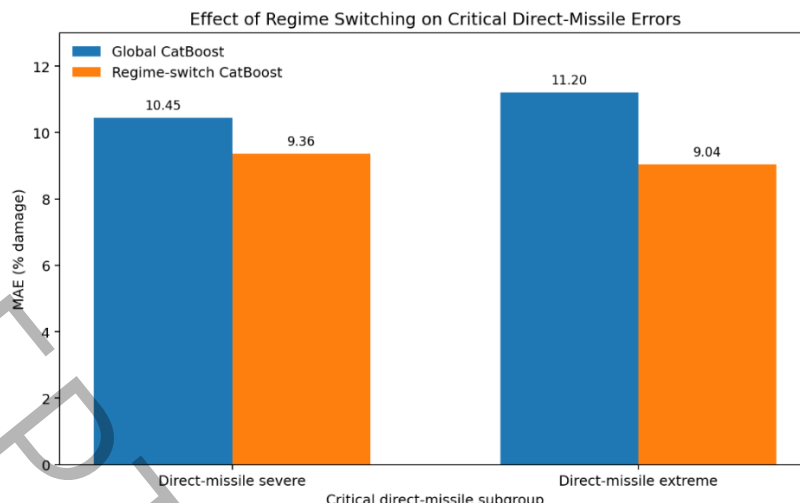
هدف از افزودن شاخه تخصصی، کاهش خطای متوسط در تمام نمونه‌ها نبود؛ بلکه بررسی این موضوع بود که آیا تفکیک یک رژیم فیزیکی متفاوت می‌تواند رفتار مدل را در برخوردهای مستقیم و شدید بهبود دهد. نتایج مجموعه توسعه این فرض را تأیید کردند. MAE مدل عمومی CatBoost برابر با ۸/۱۳ بود و پس از اعمال ساختار سوئیچ‌رژیمی کامل به ۸/۱۵ رسید؛ بنابراین، تفکیک رژیم عملاً هزینه محسوسی برای عملکرد کلی مدل ایجاد نکرد. در مقابل، اثر ساختار پیشنهادی در همان زیرگروه‌هایی آشکار شد که برای آنها طراحی شده بود. در برخوردهای مستقیم موشکی شدید، MAE از ۱۰/۴۵ در مدل عمومی به ۹/۳۶ کاهش یافت و در موارد بسیار شدید از ۱۱/۲۰ به ۹/۰۴ رسید. به بیان دیگر، بهبود مدل زمانی پررنگ‌تر شد که شدت خسارت افزایش یافت. این الگو نشان می‌دهد استفاده از یک مدل واحد برای همه سناریوها می‌تواند عملکرد قابل قبولی در میانگین کل داشته باشد، اما بخشی از رفتار ویژه رژیم‌های بحرانی را از دست بدهد.

جدول ۸: اثر تکنیک سوئیچ‌رژیمی بر MAE

Table 8. Effect of the regime-switching technique on MAE.

پیکربندی مدل	MAE کل مجموعه توسعه	MAE مستقیم موشکی	MAE مستقیم موشکی بسیار شدید
CatBoost عمومی	۸/۱۳	۱۰/۴۵	۱۱/۲۰
سوئیچ‌رژیمی بدون بلوک جانشین شدت سرچنگی	۸/۳۵	۹/۸۵	۹/۸۶
CatBoost سوئیچ‌رژیمی کامل	۸/۱۵	۹/۳۶	۹/۰۴

لازم به توضیح است که تغییر فقط به کاهش خطای مطلق محدود نبود. مدل عمومی در برخوردهای مستقیم شدید گرایش به کم‌برآوردی خسارت داشت و ساختار سوئیچ‌رژیمی بخشی از این سوگیری منفی را کاهش داد. از دید کاربردی، این موضوع اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا در سناریوهای بحرانی، کم‌برآوردی خسارت می‌تواند نسبت به یک افزایش کوچک در خطای متوسط پیامد جدی‌تری برای اولویت‌بندی بازرسی و تصمیم‌گیری اولیه داشته باشد.



شکل ۳: مقایسه MAE مدل عمومی و CatBoost سوئیچ‌رژیمی در زیرگروه‌های مستقیم موشکی شدید و بسیار شدید

Fig. 3. Comparison of MAE between the general model and regime-switching CatBoost across severe and very severe direct missile impact subgroups.

آزمون حذف مؤلفه‌ها نیز نشان داد که این بهبود صرفاً حاصل جداکردن نمونه‌های برخورد مستقیم نیست. زمانی که بلوک اختصاصی شدت از شاخه تخصصی حذف شد، MAE برخوردهای مستقیم شدید از ۹/۳۶ به ۹/۸۵ و در گروه بسیار شدید از ۹/۰۴ به ۹/۸۶ افزایش یافت. بنابراین، بخشی از مزیت شاخه تخصصی به برهم‌کنش اطلاعات مربوط به شدت انفجار، فاصله مقیاس‌شده و ویژگی‌های ساختمان وابسته است. با این حال، این متغیرها تنها جانشین‌هایی برای شدت نسبی برخورد هستند و نباید معادل مستقیم انرژی جنبشی، تکانه یا سازوکار نفوذ تفسیر شوند. در مجموع، ساختار سوئیچ‌رژیمی برتری محسوسی در معیار کلی مجموعه توسعه ایجاد نکرد، اما بدون افت عملی در عملکرد عمومی، خطا و کم‌برآوردی را در رژیم مستقیم و شدید کاهش داد. با توجه به محدودبودن تعداد نمونه‌های مستقیم شدید و بسیار شدید، این نتیجه به‌عنوان شاهدهی در حمایت از منطق تفکیک رژیم قابل تفسیر است، نه اثبات برتری قطعی مدل. ارزیابی مستقل این الگو در بخش ۴-۵ و بر روی هولد‌آوت قفل‌شده انجام می‌شود.

۴-۵- ارزیابی نهایی در هولد‌آوت داخلی قفل‌شده

ارزیابی نهایی روی ۸۶ رکورد متعلق به ۷۸ گروه مستقل انجام شد؛ مجموعه‌ای که در انتخاب ویژگی، تنظیم مدل و طراحی ساختار سوئیچ‌رژیمی نقشی نداشت. هدف این مرحله دیگر انتخاب مدل نبود، بلکه بررسی این بود که آیا الگوهای مشاهده‌شده در توسعه، روی داده‌های دیده‌نشده نیز حفظ می‌شوند یا خیر.

جدول ۹: عملکرد نهایی مدل‌ها در کل مجموعه هولد‌آوت قفل‌شده

Table 9. Final performance of predictive models on the locked overall holdout set.

مدل	MAE	RMSE	R^2	سوگیری میانگین
XGBoost	۷/۰۰	۹/۸۵	۰/۸۷۷	۰/۷۰
CatBoost عمومی اصلاح‌شده	۷/۳۹	۱۰/۳۱	۰/۸۶۵	-۰/۱۵
CatBoost فیزیک‌راهنمای سوئیچ‌رژیمی	۷/۱۳	۱۰/۰۷	۰/۸۷۲	۰/۲۱

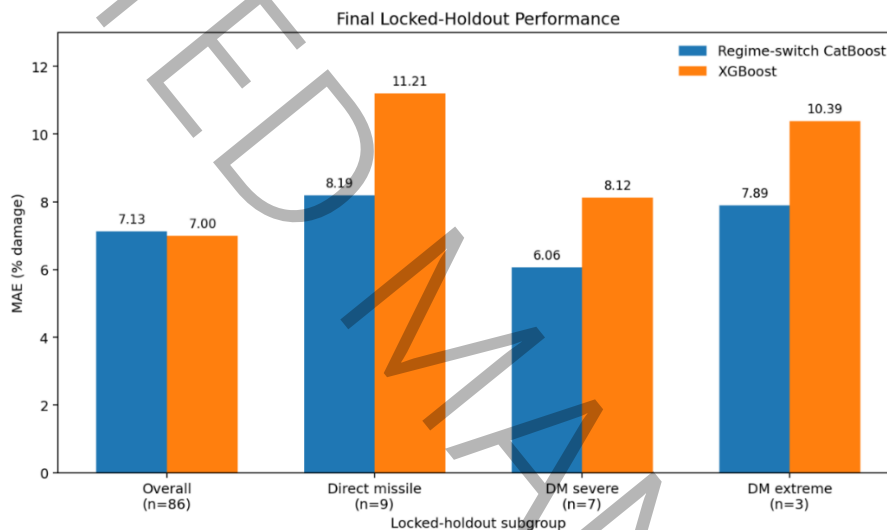
در مقیاس کل هولد‌آوت، XGBoost اندکی دقیق‌تر بود؛ با این حال، فاصله میان آن و مدل سوئیچ‌رژیمی بسیار کوچک است. مهم‌تر اینکه مقایسه زوجی خطاها نیز برتری آماری روشی برای هیچ‌یک از دو مدل نشان نداد؛ فاصله اطمینان اختلاف، صفر را در بر گرفت و آزمون ویلکاکسون نیز معنادار نبود ($p=0.540$). بنابراین، از نظر عملکرد کلی نمی‌توان ادعا کرد مدل پیشنهادی بر XGBoost برتری دارد. تفاوت اصلی زمانی آشکار می‌شود که ارزیابی از میانگین کل داده‌ها به رژیم برخورد مستقیم منتقل شود.

جدول ۱۰: مقایسه عملکرد مدل‌ها در زیرگروه‌های مستقیم هولد‌آوت

Table 10. Performance comparison of models across holdout direct subgroups.

زیرگروه	تعداد	MAE CatBoost سوئیچ رژیمی	MAE XGBoost	بهبود CatBoost نسبت به XGBoost	سوگیری CatBoost	سوگیری XGBoost
تمام برخوردهای مستقیم موشکی	۹	۸/۱۹	۱۱/۲۱	۲۷٪	-۲/۰۳	-۴/۱۶
مستقیم موشکی شدید	۷	۶/۰۶	۸/۱۲	۴۰٪	-۳/۲۷	-۶/۰۴
مستقیم موشکی بسیار شدید	۳	۷/۸۹	۱۰/۳۹	۲۴٪	-۷/۸۹	-۱۰/۳۹

الگوی زیرگروهی با نتیجه مجموعه توسعه هم‌جهت است. در تمام برخوردهای مستقیم موشکی، خطای مدل پیشنهادی حدود ۲۷ درصد کمتر از XGBoost بود و میزان کم‌برآوردی نیز از حدود ۴/۱۶ - به ۲/۰۳ - کاهش یافت. این موضوع از نظر کاربردی اهمیت دارد، زیرا مزیت مدل نه در بردن معیار کلی، بلکه در کاهش خطا در سناریویی دیده می‌شود که کم‌برآوردی خسارت می‌تواند تصمیم‌های بازرسی و اولویت‌بندی را تحت تأثیر قرار دهد.



شکل ۴: MAE مدل CatBoost سوئیچ رژیمی و XGBoost در کل هولد‌آوت و زیرگروه‌های برخورد مستقیم

Fig. 4. MAE of regime-switching CatBoost and XGBoost across the overall holdout set and direct impact subgroups.

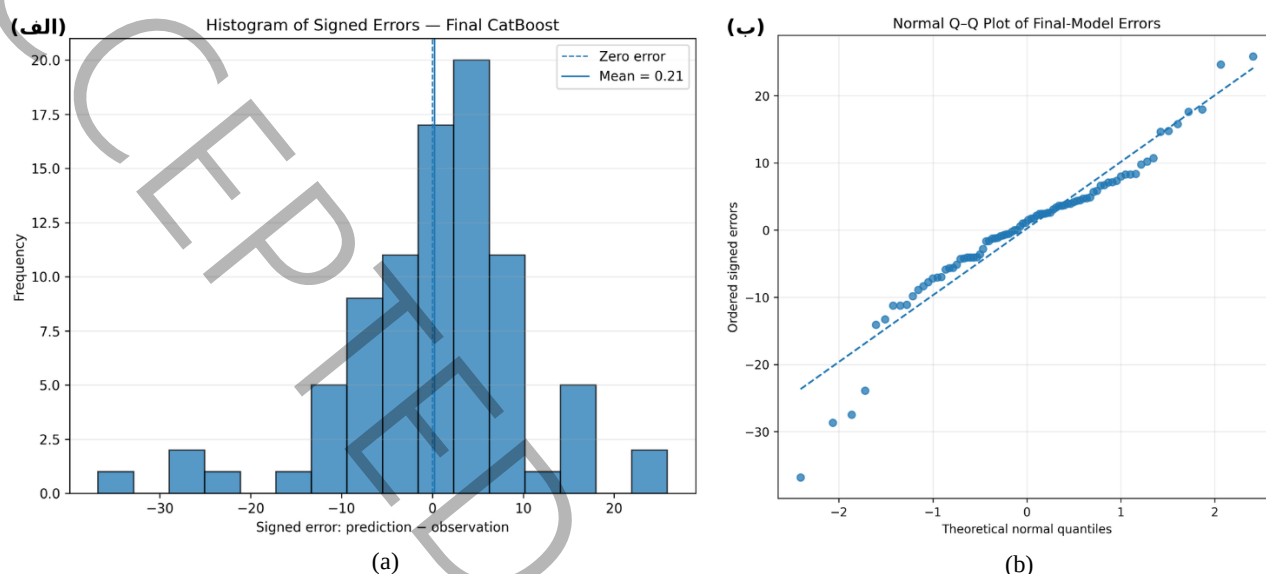
با این حال، این نتیجه نباید به همه خسارت‌های بسیار شدید تعمیم داده شود. در کل پنج نمونه هولد‌آوت با خسارت ۸۱ تا ۱۰۰ درصد، مستقل از نوع حمله، XGBoost خطای کمتری از CatBoost داشت. بنابراین، مزیت مشاهده‌شده به‌طور مشخص به رژیم برخورد مستقیم موشکی مربوط است، نه به هر نمونه‌ای با خسارت بسیار شدید. این تفکیک برای تفسیر صحیح نتیجه ضروری است و از نسبت‌دادن یک برتری کلی به مدل پیشنهادی جلوگیری می‌کند.

همچنین، کاهش خطای هر دو مدل در هولد‌آوت نسبت به اعتبارسنجی توسعه نباید به‌عنوان بهبود ذاتی مدل تفسیر شود؛ این تفاوت می‌تواند از ترکیب نمونه‌ها و توزیع خسارت در دو مجموعه ناشی شده باشد. آنچه اهمیت بیشتری دارد، حفظ سطح عملکرد روی داده‌هایی است که در فرایند تنظیم مدل استفاده نشده‌اند. با این حال، چون این هولد‌آوت از همان مخزن داده اصلی استخراج شده است، نتایج همچنان بیانگر اعتبارسنجی داخلی مستقل هستند و نه اعتبارسنجی خارجی روی یک رخداد یا منطقه کاملاً مستقل.

۵-۵- تحلیل خطا و رفتار مدل در سطوح مختلف خسارت

معیارهای کلی نشان می‌دهند مدل در سطح کل هولد‌آوت عملکرد مناسبی دارد، اما برای کاربرد مهندسی مهم‌تر است بدانیم خطا در کجا و با چه الگویی رخ می‌دهد. میانگین خطای جهت‌دار تنها ۰/۲۱ واحد درصد بود؛ بنابراین، در کل مجموعه گرایش آشکاری به

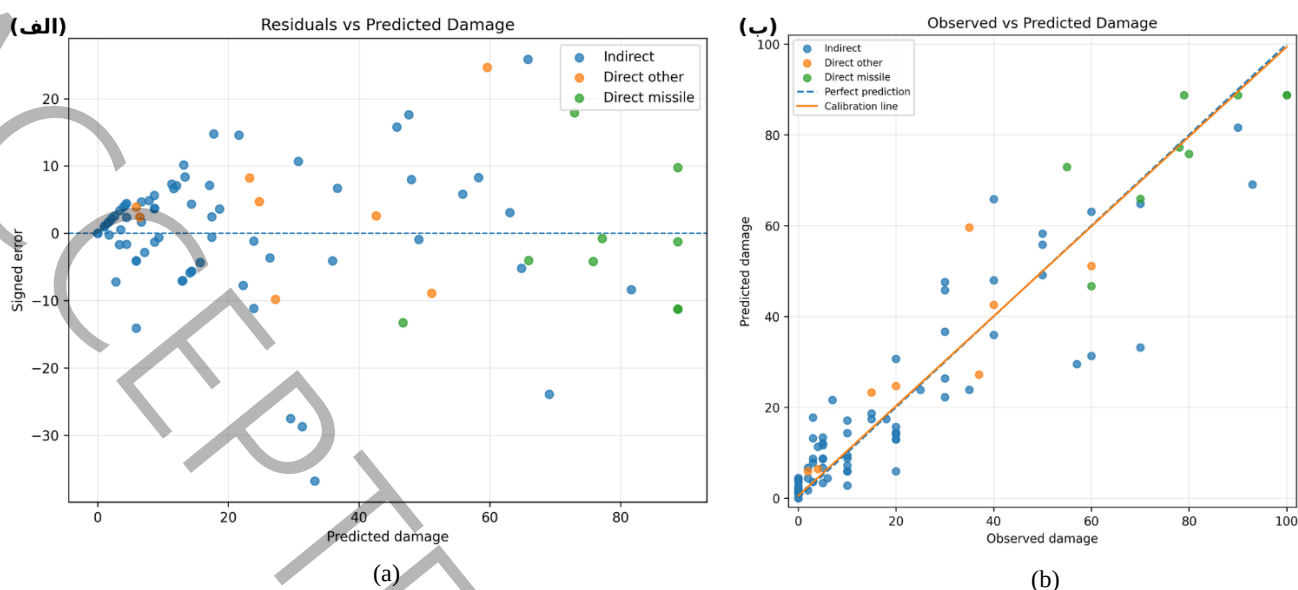
بیش برآوردی یا کم برآوردی دیده نمی شود. با این حال، توزیع خطا متقارن نبود زیرا چولگی منفی -0.76 و کشیدگی اضافی 2.728 نشان می دهد تعداد محدودی خطای بزرگ، عمدتاً در جهت کم برآوردی در دنباله توزیع باقی مانده اند. آزمون های نرمال بودن نیز این رفتار غیر نرمال را تأیید کردند. از این رو، مقدار نزدیک به صفر سوگیری متوسط نباید به معنای یکنواخت بودن دقت مدل در تمام نمونه ها تفسیر شود که شکل ۵ همین نکته را روشن تر می کند.



شکل ۵: (الف) هیستوگرام خطای جهت دار مدل CatBoost سوئیچ رژیمی؛ (ب) نمودار Q-Q خطاها در برابر توزیع نرمال
Fig. 5. (a) Directional error histogram of the regime-switching CatBoost model, (b) Q-Q plot of errors versus normal distribution.

مطابق شکل ۵، بیشتر خطاها در اطراف صفر متمرکزند، اما انحراف نقاط انتهایی از خط مرجع و امتداد دنباله منفی نشان می دهد خطاهای حدی هنوز وجود دارند. این رفتار از یک نظر برای چارچوب عدم قطعیت تحقیق مهم است؛ زیرا اتکا به فرض نرمال بودن باقیمانده ها می توانست خطر این خطاهای حدی را کمتر از واقع برآورد کند و استفاده از روش های ناپارامتری و بازه های کانفورمال را توجیه می کند.

الگوی خطا با افزایش شدت خسارت نیز تغییر می کند. پراکندگی خطا در پیش بینی های کم خسارت محدود است، اما در مقادیر بالاتر گسترش می یابد؛ یعنی عدم قطعیت مدل در ساختمان های متوسط تا شدید بیشتر است. این رفتار با ماهیت داده ها نیز سازگار است، زیرا نمونه های شدید کم ترند و بخش مهمی از آنها به رژیم های برخورد مستقیم تعلق دارند. بنابراین، افزایش خطا در این ناحیه را نمی توان صرفاً به ضعف کلی مدل نسبت داد؛ محدودیت تراکم داده در دامنه های شدید نیز در آن نقش دارد.



شکل ۶: (الف) خطای جهت‌دار در برابر خسارت پیش‌بینی‌شده؛ (ب) مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده همراه با خط برابری و خط کالیبراسیون تشخیصی

Fig. 6. (a) Directional error versus predicted damage, (b) observed versus predicted damage with equality and diagnostic calibration lines.

در مقیاس کلی، نزدیکی خط کالیبراسیون به خط برابری نشان می‌دهد مدل از نظر سطح و مقیاس پیش‌بینی رفتار قابل قبولی دارد. با این حال، پراکندگی نقاط در خسارت‌های متوسط و زیاد یادآور می‌شود که کالیبراسیون مناسب در سطح جمعیت، تضمین‌کننده دقت یکسان در سطح هر ساختمان نیست. این تمایز برای کاربرد مدل در غربالگری سریع ضروری است؛ پیش‌بینی نقطه‌ای باید همراه با عدم قطعیت آن تفسیر شود، به‌ویژه زمانی که مقدار خسارت بالا پیش‌بینی می‌شود. برای نشان دادن این تغییر رفتار، نتایج طبقات مختلف خسارت به صورت فشرده در جدول ۱۱ ارائه شده است.

جدول ۱۱: عملکرد مدل اصلی در طبقات مختلف خسارت هولداوت

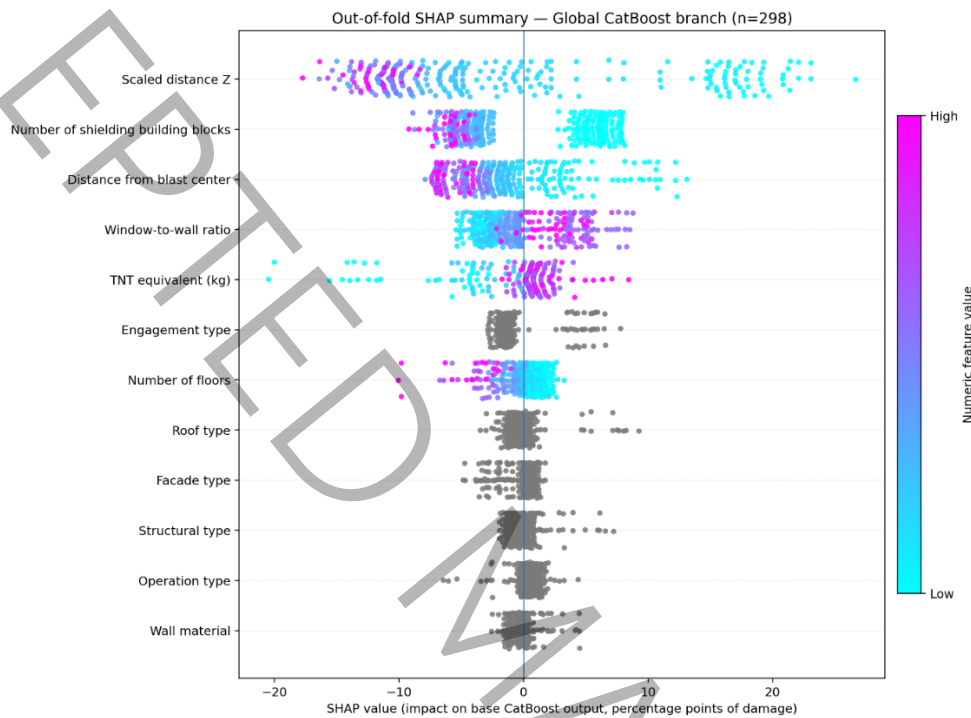
Table 11. Performance of the primary model across different holdout damage classes.

طبقه خسارت	تعداد	MAE	RMSE	سوگیری	صدک ۹۰ خطای مطلق
صفر	۱۲	۲/۱۷	۲/۶۳	۲/۱۷	۷/۱۷
۱-۲۰	۴۱	۵/۳۱	۶/۴۳	۱/۷۱	۱۰/۱۸
۲۱-۴۰	۱۳	۱۰/۶۶	۱۳/۱۹	۴/۹۰	۲۳/۲۳
۴۱-۶۰	۹	۱۲/۷۱	۱۵/۸۸	-۴/۹۰	۲۷/۷۳
۶۱-۸۰	۶	۱۰/۱۲	۱۵/۸۷	-۶/۸۷	۲۳/۲۹
۸۱-۱۰۰	۵	۱۱/۱۹	۱۳/۳۸	-۱۱/۱۹	۱۸/۸۴

جدول ۱۱ یک تغییر رفتاری مشخص را نشان می‌دهد. مدل در خسارت‌های پایین عمدتاً گرایش خفیفی به بیش‌برآوردی دارد، اما از محدوده ۴۱ درصد به بالا جهت سوگیری معکوس شده و به سمت کم‌برآوردی حرکت می‌کند. این موضوع در طبقه ۸۱ تا ۱۰۰ برجسته‌تر است؛ جایی که همه پنج نمونه با سوگیری منفی همراه بودند. بنابراین، مسئله اصلی مدل در انتهای دامنه خسارت نه یک سوگیری عمومی، بلکه کم‌برآوردی در بخشی از سناریوهای شدید است. با توجه به تعداد محدود نمونه‌های این طبقات، اندازه این اثر محتاطانه تفسیر می‌شود، اما جهت آن از نظر تصمیم‌گیری ایمنی قابل چشم‌پوشی نیست. در عین حال، خطاهای بزرگ رفتار غالب مدل نیستند. حدود ۷۹ درصد پیش‌بینی‌ها حداکثر ۱۰ واحد درصد و ۹۳ درصد آنها حداکثر ۲۰ واحد درصد با مقدار مشاهده‌شده اختلاف داشتند. بنابراین، دنباله خطا توسط تعداد نسبتاً محدودی از نمونه‌های دشوار شکل گرفته است؛ همان نمونه‌هایی که باعث افزایش RMSE نسبت به MAE و ضرورت استفاده از بازه‌های عدم قطعیت می‌شوند.

۵-۶- تفسیر فنی رفتار مدل

تفسیرپذیری مدل نشان داد که تصمیم‌های آن عمدتاً حول سه محور شدت و مقیاس هندسی انفجار، شرایط مواجهه و حفاظت پیرامونی، و ویژگی‌های آسیب‌پذیری ساختمان شکل می‌گیرند. در هر دو شاخه عمومی و تخصصی، فاصله مقیاس‌شده Z مهم‌ترین متغیر بود. در شاخه عمومی، پس از Z ، تعداد ساختمان‌های حائل، فاصله واقعی، نسبت پنجره به دیوار و جرم معادل TNT بیشترین نقش را داشتند. این ترتیب با منطق فیزیکی مسئله سازگار است و نشان می‌دهد مدل فقط شدت انفجار را دنبال نمی‌کند، بلکه نحوه قرارگیری ساختمان در محیط و ویژگی‌های پوسته را نیز در تصمیم خود وارد می‌کند.



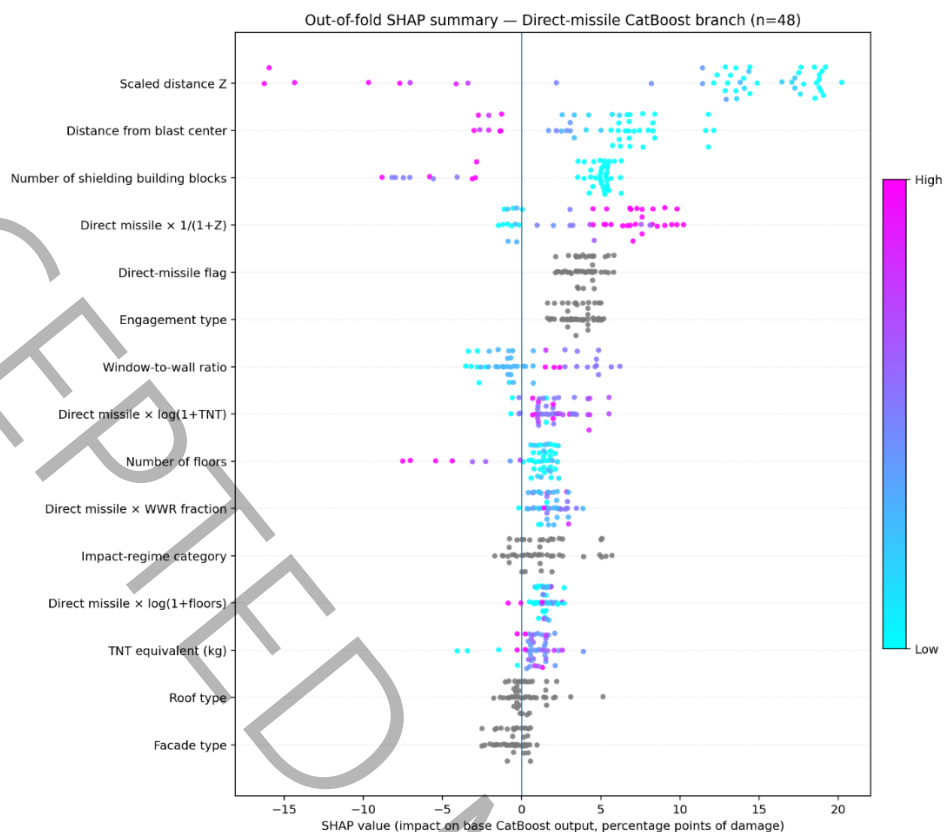
شکل ۷: نمودار زنبوری SHAP بر روی نمونه‌های شاخه عمومی CatBoost

Fig. 7. Out-of-sample SHAP beeswarm plot for the general CatBoost branch.

جهت اثر متغیرها نیز از نظر مهندسی قابل تفسیر است. مقادیر پایین‌تر Z و فاصله کمتر عمدتاً با افزایش خسارت پیش‌بینی شده همراه بودند، در حالی که افزایش تعداد ساختمان‌های حائل بیشتر با کاهش خسارت ارتباط داشت. نسبت بالاتر پنجره به دیوار نیز عمدتاً اثر افزایشی نشان داد که می‌تواند بازتاب آسیب‌پذیری بیشتر پوسته و اجزای شفاف باشد. باین حال، این روابط نباید به صورت ساده به رابطه علی تعبیر شوند؛ برای مثال، تعداد موانع اطلاعاتی درباره ارتفاع، فاصله و هندسه واقعی آنها ندارد و نسبت پنجره به دیوار نیز جزئیاتی مانند نوع شیشه یا کیفیت اتصال را در بر نمی‌گیرد.

رفتار شاخه تخصصی نکته مهم‌تری را آشکار می‌کند. در این شاخه نیز Z متغیر غالب بود، اما برهم‌کنش برخورد مستقیم با فاصله مقیاس‌شده اهمیت بالایی پیدا کرد. این نتیجه نشان می‌دهد شاخه تخصصی صرفاً نسخه دیگری از مدل عمومی نیست؛ بلکه در ترکیب «برخورد مستقیم، شدت بالا و فاصله مقیاس‌شده کوچک الگوی متفاوتی فرا گرفته است. این یافته با نتایج بخش قبل هم‌راستا است، جایی که مزیت مدل سوئیچ‌رژیمی دقیقاً در سناریوهای برخورد مستقیم و شدید ظاهر شد.

تحلیل ALE نیز همین الگوی کلی را از زاویه دیگری تأیید کرد. افزایش فاصله با کاهش نسبتاً منظم خسارت پیش‌بینی شده همراه بود و جرم TNT رابطه‌ای افزایشی اما غیرخطی نشان داد. اثر تعداد ساختمان‌های حائل عمدتاً کاهشی و اثر نسبت پنجره به دیوار افزایشی بود. در مقابل، اثر تعداد طبقات یکنواخت نبود؛ بنابراین، نمی‌توان از این متغیر به تنهایی نتیجه گرفت که ساختمان‌های بلندتر یا کوتاه‌تر ذاتاً مقاوم‌تر هستند. رفتار آن احتمالاً بازتاب تعامل با سیستم سازه‌ای، کیفیت ساخت و سایر متغیرهای ثبت‌نشده است.



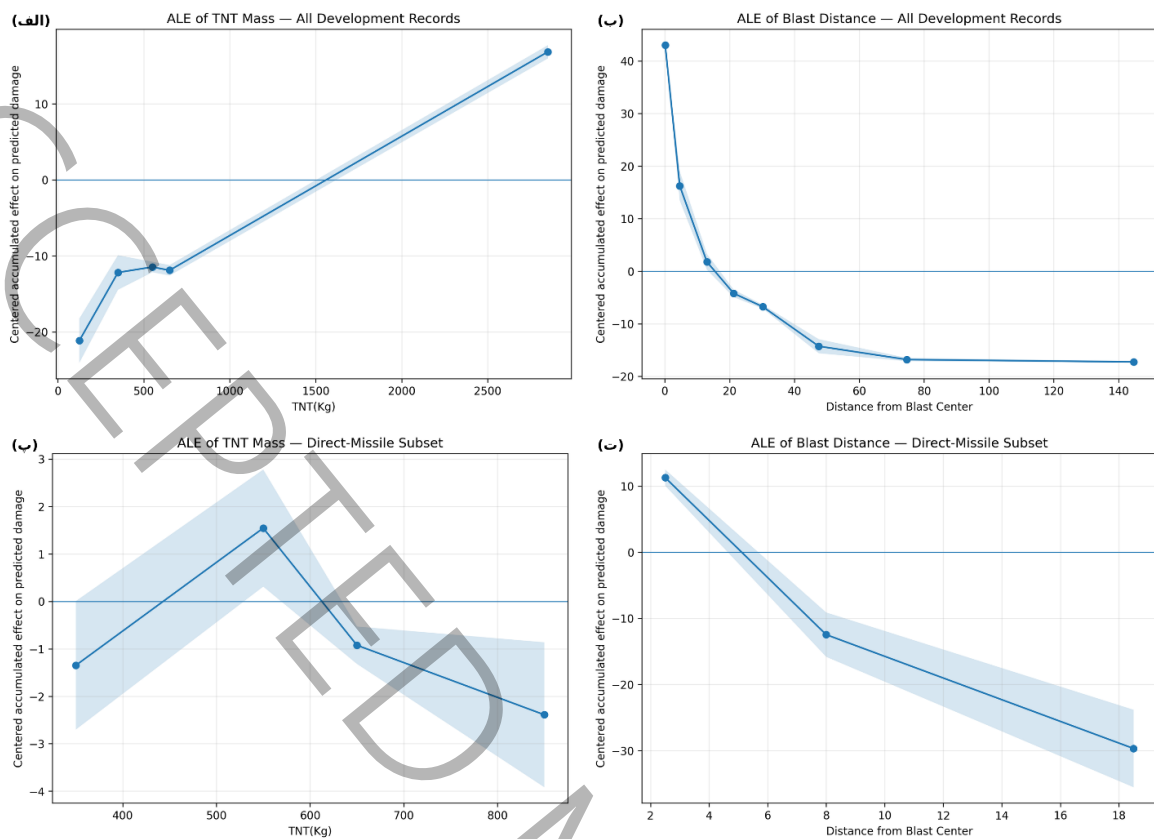
شکل ۸: نمودار زنبوری SHAP برون نمونه‌ای شاخه تخصصی CatBoost برای ۴۸ رکورد برخورد مستقیم

Fig. 8. Out-of-sample SHAP beeswarm plot for the specialized CatBoost branch across 48 direct impact records.

در مجموع، همگرایی SHAP و ALE نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی، خسارت را از یک متغیر منفرد استخراج نمی‌کند، بلکه به ترکیب شدت انفجار، فاصله، حفاظت پیرامونی و آسیب‌پذیری پوسته متکی است. اهمیت برهم‌کنش‌های رژیم مستقیم نیز از منطق اصلی ساختار سوئیچ‌رژیمی حمایت می‌کند. با این حال، این نتایج بیانگر الگوهای آموخته‌شده از داده‌ها هستند و نباید به‌عنوان اثبات رابطه علی یا رتبه‌بندی قطعی مقاومت سیستم‌های سازه‌ای و مصالح تفسیر شوند.

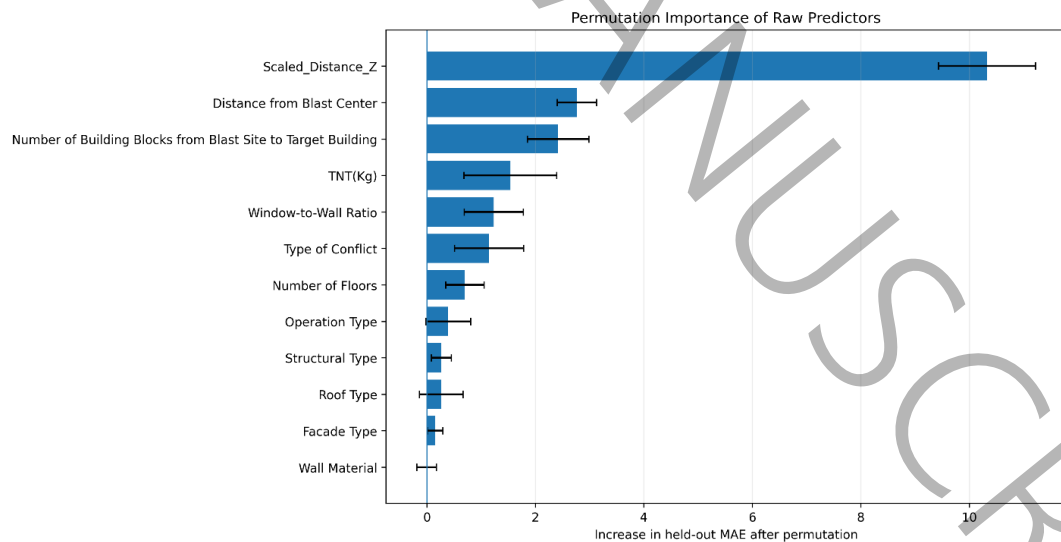
۵-۷- تحلیل حساسیت و آزمون حذف مؤلفه‌ها

تحلیل‌های تفسیرپذیری بخش قبل نشان دادند مدل چه الگویی از داده‌ها آموخته است؛ اما برای سنجش اینکه عملکرد کل زنجیره پیش‌بینی تا چه اندازه به هر ورودی وابسته است، تحلیل حساسیت روی ساختار کامل مدل انجام شد. نتایج اهمیت جایگشتی، فاصله مقیاس‌شده Z را با فاصله زیادی در رتبه نخست قرار داد؛ پس از آن فاصله واقعی، تعداد ساختمان‌های حائل، جرم معادل TNT، نسبت پنجره به دیوار و نوع درگیری بیشترین اثر را بر خطای مدل داشتند. هم‌جهتی این نتیجه با SHAP و انتخاب ویژگی نشان می‌دهد رابطه ترکیبی جرم-فاصله یکی از ستون‌های اصلی پیش‌بینی است، درحالی‌که حفاظت پیرامونی و ویژگی‌های پوسته نیز سهم مستقلی در عملکرد مدل دارند.



شکل ۹: نمودارهای ALE برای جرم معادل TNT و فاصله در کل مجموعه توسعه و زیرمجموعه برخورد مستقیم

Fig. 9. ALE plots for TNT equivalent mass and standoff distance across the overall development set and direct impact subset.



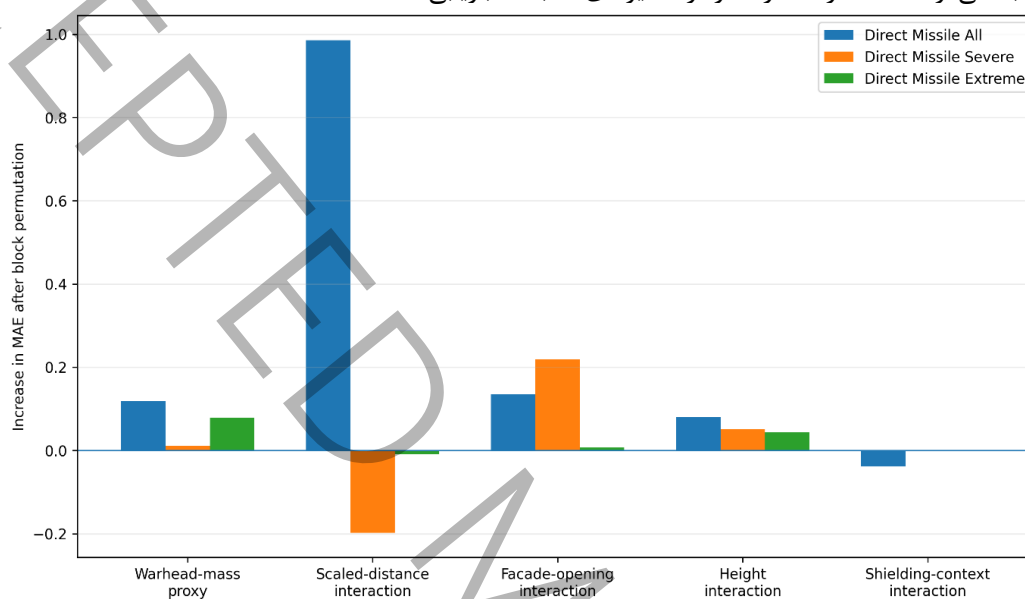
شکل ۱۰: اهمیت جایگشتی متغیرهای ورودی در کل فرآیند مدل‌سازی سوئیچ‌رژیمی

Fig. 10. Permutation feature importance of input variables across the complete regime-switching modeling pipeline.

با این حال، برتری Z نباید به عنوان یک اثر علی مستقل تفسیر شود. این متغیر به طور مستقیم از جرم و فاصله ساخته شده است و جایگشت جداگانه آن می‌تواند ترکیب‌هایی ایجاد کند که از نظر فیزیکی با رابطه اصلی سازگار نیستند. به همین دلیل، نتیجه مهم شکل

۹ نه غلبه یک متغیر منفرد، بلکه وابستگی مدل به یک بلوک اطلاعاتی مرتبط با شدت و هندسه انفجار است. اهمیت کمتر متغیرهایی مانند نوع سازه، سقف یا نما نیز به معنای بی‌اهمیت‌بودن مهندسی آنها نیست؛ داده‌های موجود جزئیاتی مانند مقاومت مصالح، کیفیت اتصال و مشخصات اعضا را در اختیار مدل قرار نمی‌دهند.

در شاخه تخصصی، بیشترین حساسیت به برهم‌کنش رژیم مستقیم با فاصله مقیاس‌شده مربوط بود. برهم‌زدن هم‌زمان این بلوک خطای زیرگروه برخورد مستقیم را تقریباً یک واحد افزایش داد؛ نتیجه‌ای که با تحلیل SHAP نیز هم‌خوان است. در مقابل، اثر مستقل بلوک جانشین شدت برخورد محدودتر بود، زیرا اطلاعات شدت هم‌زمان در جرم TNT، فاصله، Z و برهم‌کنش‌های آنها توزیع شده است و مدل می‌تواند بخشی از اطلاعات از دست‌رفته را از متغیرهای همبسته بازیابی کند.



شکل ۱۱: افزایش MAE پس از جایگشت بلوک‌های اختصاصی شاخه مستقیم

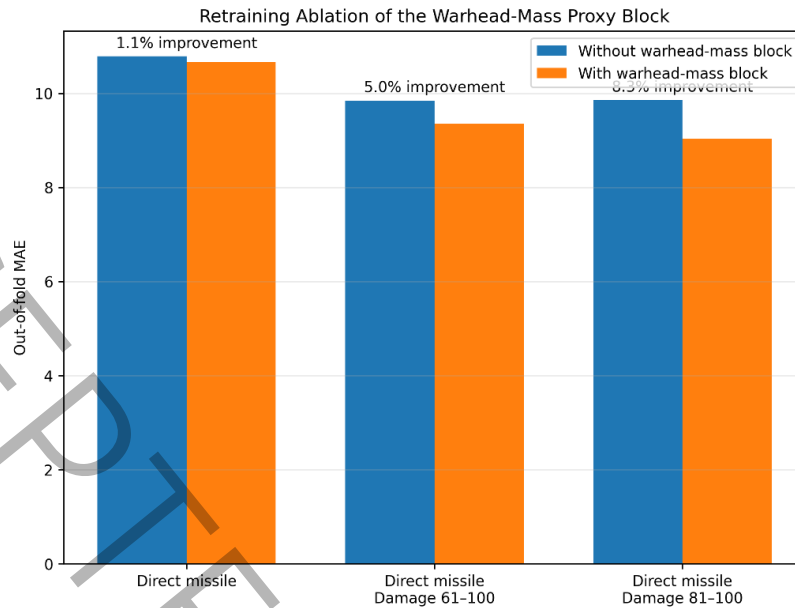
Fig. 11. MAE increases following permutation of specialized blocks in the direct impact branch.

برای آزمون سخت‌گیرانه‌تر این موضوع، مدل بدون بلوک جانشین شدت برخورد از ابتدا بازآموزی شد. حذف این بلوک در عملکرد کلی تقریباً اثری نداشت، اما با افزایش شدت خسارت، تفاوت آشکارتر شد زیرا در برخوردهای مستقیم شدید، MAE از ۹/۸۵ به ۹/۳۶ و در موارد بسیار شدید از ۹/۸۶ به ۹/۰۴ کاهش یافت. هم‌زمان، گرایش به کم‌برآوردی نیز تا حدی تعدیل شد. بنابراین، ارزش این مؤلفه در بهبود عمومی تمام نمونه‌ها نیست؛ کارکرد اصلی آن در همان رژیم بحرانی است که برای آن طراحی شده است.

این تفاوت در تمام مقایسه‌های گروه‌آگاه به نفع مدل کامل بود، اما به دلیل محدودبودن تعداد نمونه‌های مستقیم، فاصله‌های اطمینان همچنان صفر را در بر گرفتند و آزمون آماری به سطح معناداری نرسید. از این‌رو، نتایج از سودمندی احتمالی و سازگاری مهندسی بلوک تخصصی حمایت می‌کنند، اما برای ادعای یک مزیت قطعی به داده‌های مستقل و بزرگ‌تر نیاز است. همچنین، جانشین شدت استفاده‌شده فقط یک شاخص نسبی است و نباید معادل انرژی، تکانه یا سازوکار واقعی نفوذ موشک تفسیر شود.

۵-۸- کمی‌سازی عدم‌قطعیت پیش‌بینی

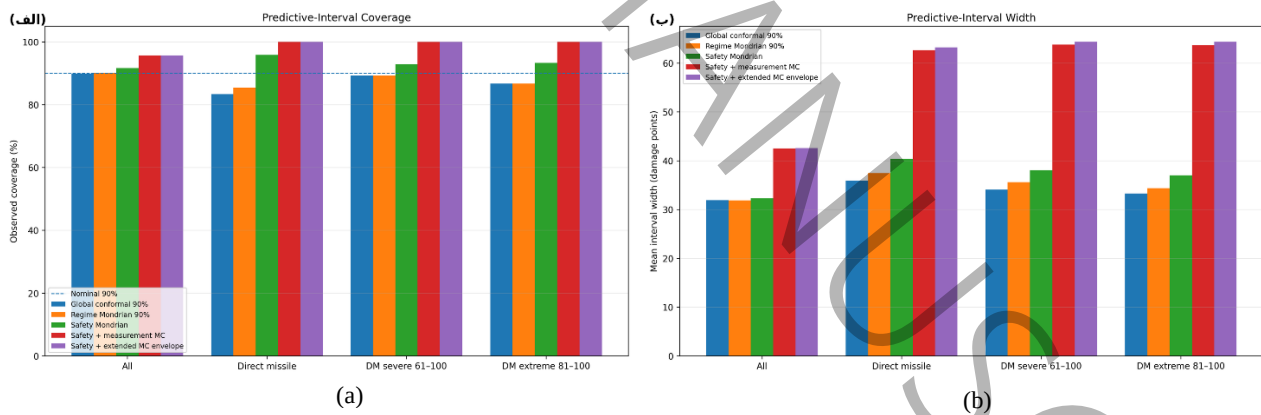
در کاربردهای ارزیابی سریع، یک مقدار نقطه‌ای به‌تنهایی برای تصمیم‌گیری کافی نیست؛ دو ساختمان با خسارت پیش‌بینی‌شده مشابه می‌توانند از نظر اطمینان مدل شرایط متفاوتی داشته باشند. به همین دلیل، عدم‌قطعیت از دو منظر بررسی شد؛ بازه‌های کانفورمال برای بیان عدم‌قطعیت آماری پیش‌بینی، و تحلیل مونت‌کارلو برای سنجش حساسیت خروجی نسبت به تغییرپذیری احتمالی ورودی‌ها. این دو تحلیل مکمل یکدیگرند و نباید به‌جای هم تفسیر شوند.



شکل ۱۲: مقایسه مدل کامل و مدل بازآموزی شده بدون بلوک جانشین شدت برخورد

Fig. 12. Comparison between the full model and retrained model without the warhead intensity proxy block.

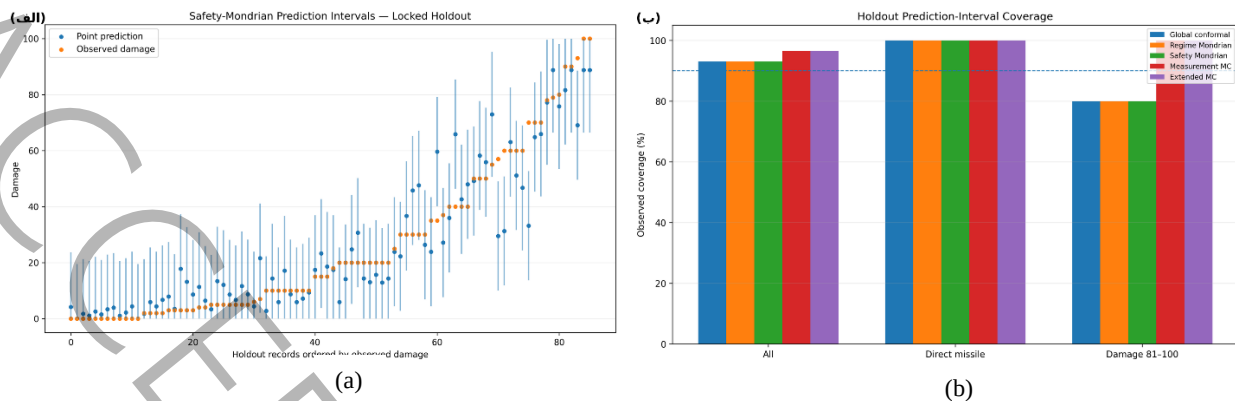
مقایسه سه پیکربندی کانفورمال نشان داد استفاده از یک بازه یکسان برای همه رکوردها، اگرچه در کل داده‌ها پوشش مناسبی ایجاد می‌کند، در برخوردهای مستقیم موشکی محافظت کافی ندارد. تفکیک رژیم این وضعیت را بهبود داد، اما بهترین توازن با پیکربندی موندریان ایمنی محور به دست آمد؛ در این حالت، پوشش زیرگروه مستقیم افزایش یافت، درحالی‌که عرض متوسط بازه در کل داده‌ها فقط اندکی بیشتر شد. این نتیجه نشان می‌دهد افزایش محافظه‌کاری را می‌توان به همان زیرگروهی متمرکز کرد که مدل در آن با عدم قطعیت و پیامد ایمنی بیشتری روبه‌رو است، بدون آنکه همه پیش‌بینی‌ها بیش از حد گسترده شوند.



شکل ۱۳: (الف) پوشش تجربی روش‌های کانفورمال و سناریوهای مونت کارلو در مجموعه توسعه؛ (ب) میانگین عرض بازه‌های متناظر

Fig. 13. (a) Empirical coverage of conformal prediction methods and Monte Carlo scenarios on the development set, (b) mean width of the corresponding prediction intervals.

در هولد‌آوت مستقل داخلی، بازه منتخب به پوشش ۹۳ درصدی با میانگین عرض ۳۲/۵۵ واحد درصد خسارت رسید. مهم‌تر از مقدار کلی، حفظ رفتار محافظه‌کارانه در رژیم مستقیم بود؛ هر ۹ نمونه برخورد مستقیم درون بازه قرار گرفتند. با این حال، پوشش کامل این زیرگروه نباید به عنوان تضمین تعمیم تعبیر شود، زیرا تعداد نمونه‌ها محدود است. در مقابل، در طبقه خسارت ۸۱ تا ۱۰۰ درصد، پوشش به ۸۰ درصد کاهش یافت؛ نتیجه‌ای که با تحلیل خطا هم‌جهت است و نشان می‌دهد بخش اصلی عدم قطعیت باقیمانده به برخی خسارت‌های بسیار شدید، به‌ویژه خارج از رژیم مستقیم، مربوط می‌شود.



شکل ۱۴: (الف) خسارت مشاهده شده، پیش‌بینی نقطه‌ای و بازه Mondrian Safety برای رکوردهای هولداوت، مرتب‌شده بر اساس خسارت واقعی؛ (ب) پوشش روش‌های مختلف در کل هولداوت، زیرگروه مستقیم موشکی و طبقه خسارت ۸۱ تا ۱۰۰ درصد.

Fig. 14. (a) Observed damage, point predictions, and Mondrian Safety prediction intervals for holdout records sorted by observed damage, (b) empirical coverage of different methods across the overall holdout set, the direct missile impact subgroup, and the 81–100% damage class.

تحلیل مونت کارلو تصویر متفاوتی ارائه می‌دهد. زمانی که عدم‌دقت احتمالی در جرم انفجار، فاصله، نسبت پنجره به دیوار و شرایط حفاظتی نیز وارد محاسبه شد، دامنه خروجی به‌طور محسوسی گسترده‌تر شد. این افزایش در برخوردهای مستقیم شدیدتر بود؛ موضوعی که نشان می‌دهد پیش‌بینی این رژیم نه‌تنها به خطای مدل، بلکه به کیفیت برآورد متغیرهای شدت و مواجهه نیز حساس است. بنابراین، بخشی از عدم‌قطعیت در این سناریوها از خود الگوریتم ناشی نمی‌شود و به دقت اطلاعات ورودی وابسته است.

در نتیجه، بازه موندریان ایمنی‌محور به‌عنوان بازه رسمی عدم‌قطعیت پژوهش حفظ می‌شود، زیرا پوشش آن مستقیماً از خطاهای مشاهده‌شده مدل کالیبره شده است. مونت کارلو در مقابل، یک تحلیل سناریویی است و دامنه آن به فرض‌های انتخاب‌شده برای تغییرپذیری ورودی‌ها وابسته است. بنابراین، در ساختمان‌هایی که خسارت شدید یا برخورد مستقیم پیش‌بینی می‌شود، عدد نقطه‌ای باید همراه با بازه عدم‌قطعیت و کیفیت داده‌های ورودی تفسیر شود.

۹-۵- مقایسه تکمیلی با روابط کلاسیک انفجار و مدل ظرفیت-خط

برای بررسی اینکه عملکرد مدل پیشنهادی تا چه اندازه فراتر از روابط متعارف مبتنی بر شدت انفجار است، نتایج آن با روابط کلاسیک برآورد موج انفجار مقایسه شد. این مقایسه فقط برای ۷۵ رکورد دارای فاصله مثبت انجام گرفت، زیرا روابط کلاسیک فاصله مقیاس‌شده برای شرایط تماس و فاصله صفر در دامنه کاربرد متعارف خود قرار ندارند. این تحلیل نقش تأییدی دارد و در آموزش یا تنظیم مدل اصلی دخالتی نداشته است.

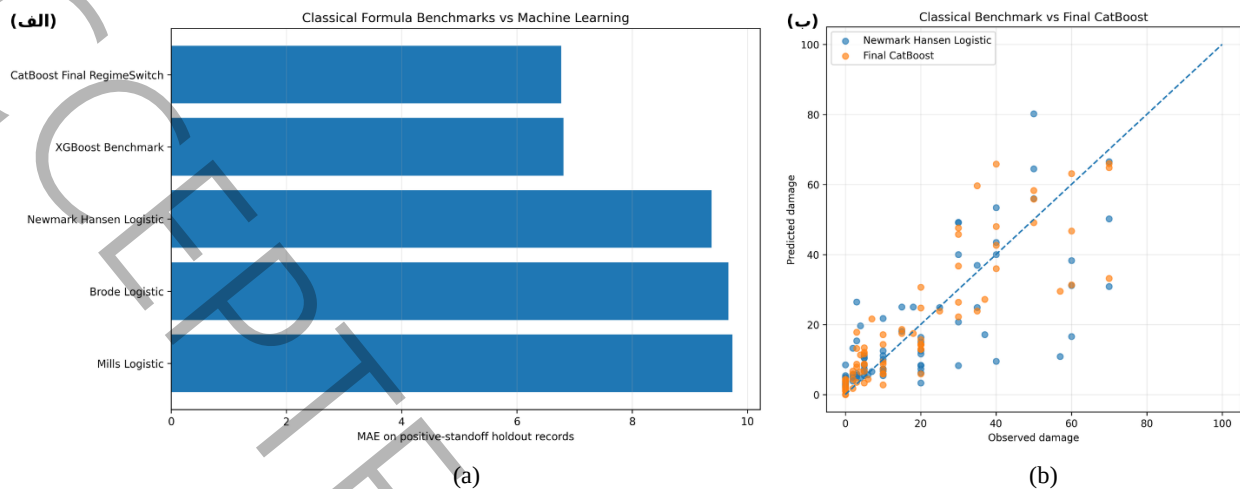
جدول ۱۲: مقایسه مدل‌های یادگیری ماشین و روابط کلاسیک در هولداوت دارای فاصله مثبت

Table 12. Performance comparison of machine learning models and classical blast relationships on the positive-standoff holdout subset.

مدل	تعداد	MAE	RMSE	R^2	سوگیری
CatBoost فیزیک‌راهنمای سوئیچ‌رژیمی	۷۵	۶/۷۷	۹/۸۲	۰/۷۵۹	۰/۷۰
XGBoost	۷۵	۶/۸۱	۹/۷۴	۰/۷۳۶	۱/۰۳
Newmark–Hansen با نگاشت لجستیکی	۷۵	۹/۳۸	۱۳/۸۱	۰/۵۲۴	-۱/۲۶
Brode با نگاشت لجستیکی	۷۵	۹/۶۷	۱۴/۱۳	۰/۵۰۱	-۱/۰۷
Mills با نگاشت لجستیکی	۷۵	۹/۷۳	۱۴/۱۷	۰/۴۹۸	-۱/۱۷

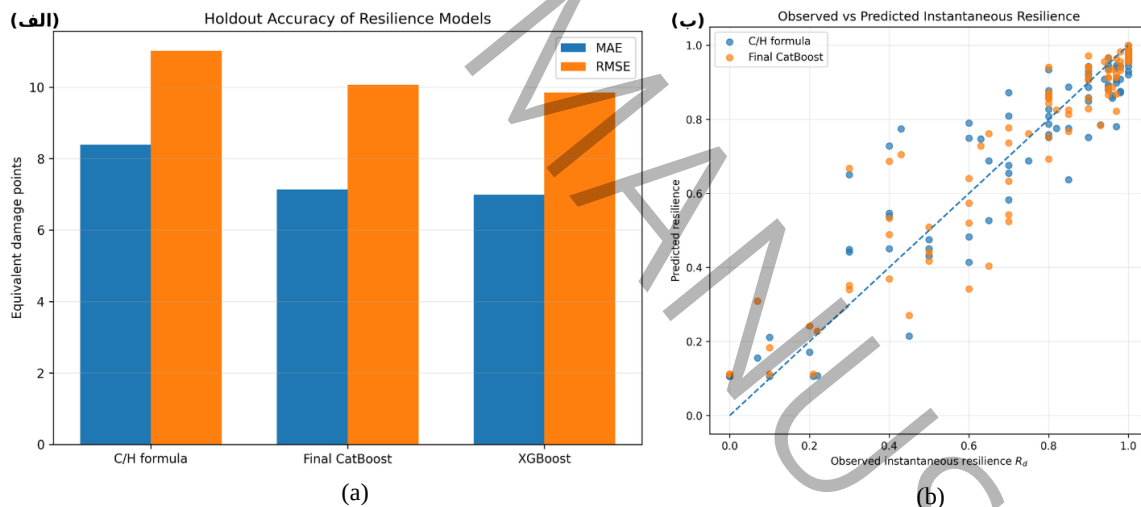
بهترین رابطه کلاسیک، Newmark–Hansen، همچنان خطایی حدود ۲۸ درصد بیشتر از مدل‌های یادگیری ماشین داشت. این اختلاف نشان می‌دهد جرم TNT و فاصله، اگرچه بخش بنیادی مسئله‌اند، برای توضیح خسارت کل ساختمان کافی نیستند. عملکرد بهتر مدل‌های یادگیری ماشین نشان می‌دهد شرایط حفاظتی، ویژگی‌های ساختمان و نوع مواجهه اطلاعاتی را وارد پیش‌بینی می‌کند

که در روابط ساده فشار-فاصله وجود ندارد. در عین حال، برتری مدل داده‌محور به معنای رد روابط کلاسیک نیست؛ این روابط همچنان پایه فیزیکی مفیدی برای توصیف شدت تهدید فراهم می‌کنند، اما دامنه آنها با هدف پیش‌بینی خسارت کل ساختمان متفاوت است.



شکل ۱۵: (الف) مقایسه MAE مدل‌های یادگیری ماشین و روابط کلاسیک؛ (ب) مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده توسط CatBoost و بهترین رابطه کلاسیک در رکوردهای دارای فاصله مثبت

Fig. 15. (a) Comparison of MAE between machine learning models and classical blast relationships; (b) observed versus predicted damage obtained from CatBoost and the best-performing classical relationship for positive-standoff records.



شکل ۱۶: (الف) مقایسه خطای مدل ظرفیت-خطر، CatBoost و XGBoost؛ (ب) مقایسه تاب‌آوری مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده در هولد‌آوت.

Fig. 15. (a) Comparison of prediction error among the capacity-hazard model, CatBoost, and XGBoost; (b) observed versus predicted instantaneous resilience on the holdout set.

تحلیل دوم، مدل ظرفیت-خطر را بررسی کرد. برخلاف CatBoost که برای بیشینه‌کردن دقت پیش‌بینی توسعه یافته است، این مدل ساختاری فشرده‌تر دارد و ظرفیت نسبی ساختمان را در برابر شدت تهدید به صورت صریح تفکیک می‌کند. در هولد‌آوت، MAE تاب‌آوری آن برابر با ۰/۰۸۳۹ بود؛ در حالی که این مقدار برای CatBoost سوئیچ‌رژیمی ۰/۰۷۱۳ به دست آمد. بنابراین، مدل ظرفیت-خطر از نظر دقت جایگزین مدل اصلی نیست، اما همبستگی اسپیرمن ۰/۸۹۸ نشان می‌دهد توانسته ترتیب نسبی تاب‌آوری ساختمان‌ها را با دقت قابل‌قبولی بازنمایی کند. اهمیت این مدل مکمل بیشتر در همگرایی مهندسی نتایج است تا دقت عددی آن. فاصله، شدت انفجار، ساختمان‌های حائل و نسبت پنجره به دیوار در مدل ظرفیت-خطر نیز در همان جهتی ظاهر شدند که در SHAP، ALE و تحلیل حساسیت مشاهده شده بود. تکرار این الگو در روش‌هایی با منطق محاسباتی متفاوت، اطمینان بیشتری ایجاد می‌کند که رفتار

مدل اصلی صرفاً حاصل یک الگوی آماری تصادفی نیست. با این حال، ضرایب مربوط به سیستم سازه‌ای و مصالح همچنان نباید به عنوان رتبه‌بندی علی مقاومت آنها تفسیر شوند. در مجموع، سه چارچوب نقش‌های متفاوتی دارند CatBoost: سوئیچ‌رژیمی ابزار اصلی پیش‌بینی خسارت و تاب‌آوری لحظه‌ای است؛ XGBoost معیار اصلی مقایسه داده‌محور باقی می‌ماند؛ و روابط کلاسیک همراه با مدل ظرفیت-خطر، شواهد مکملی برای بررسی سازگاری فیزیکی و تفسیر مهندسی فراهم می‌کنند. این همگرایی اعتبار مفهومی نتایج را تقویت می‌کند، اما جایگزین اعتبارسنجی خارجی روی رخداد یا منطقه‌ای مستقل نیست.

۱۰-۵- جایگاه و تفسیر شاخص‌های تاب‌آوری لحظه‌ای

در این پژوهش، تاب‌آوری لحظه‌ای از دو مسیر مکمل بررسی شد که نباید نقش آنها با یکدیگر اشتباه شود. شاخص مبتنی بر خسارت، خروجی عملیاتی مدل اصلی است و مستقیماً میزان عملکرد باقیمانده ساختمان را پس از انفجار بیان می‌کند؛ در مقابل، مدل ظرفیت-خطر برای توضیح این موضوع به کار می‌رود که تعادل میان ویژگی‌های حفاظتی ساختمان و شدت تهدید چگونه می‌تواند به سطح متفاوتی از تاب‌آوری منجر شود. بنابراین، اولی برای پیش‌بینی و رتبه‌بندی ساختمان‌ها و دومی برای تفسیر مهندسی نتیجه مناسب‌تر است.

جدول ۱۳: تفاوت نقش دو رویکرد تاب‌آوری لحظه‌ای

Table 13. Difference between the operational roles of the two instantaneous resilience approaches.

ویژگی	تاب‌آوری مبتنی بر خسارت $\bar{R}_d$	تاب‌آوری ظرفیت-خطر R_{CH}
نقش در پژوهش	شاخص اصلی و عملیاتی	مدل تفسیری مکمل
منبع محاسبه	خسارت پیش‌بینی شده مدل CatBoost	تعادل نسبی ظرفیت و شدت خطر
نیاز به برازش مستقل	ندارد	دارد
ارتباط با عدم قطعیت	مستقیماً از بازه خسارت منتقل می‌شود	در تحلیل حاضر بازه مستقل ندارد
مزیت اصلی	دقت بیشتر و ارتباط مستقیم با خروجی مدل	ساختار فشرده و تفسیر روشن ظرفیت-خطر
MAE هولد‌آوت در مقیاس تاب‌آوری	۰/۰۷۱۳	۰/۰۸۳۹
کاربرد مناسب	ارزیابی و رتبه‌بندی نهایی ساختمان‌ها	تحلیل مفهومی عوامل ظرفیت و خطر
محدودیت	شامل فرایند زمانی ارزیابی نیست	مؤلفه‌های ظرفیت و خطر نسبی و بدون بُعد هستند

مدل ظرفیت-خطر، با وجود ساختار ساده‌تر، توانست ترتیب نسبی تاب‌آوری ساختمان‌ها را با همبستگی اسپیرمن ۰/۸۹۸ بازنمایی کند؛ با این حال، خطای آن از مدل CatBoost بیشتر بود. این تفاوت نشان می‌دهد سادگی و تفسیرپذیری لزوماً معادل دقت بیشتر نیستند. ارزش مدل ظرفیت-خطر در این است که همان عواملی را برجسته می‌کند که در تحلیل‌های SHAP، ALE و حساسیت نیز مهم بودند؛ از جمله فاصله، شدت انفجار، ساختمان‌های حائل و ویژگی‌های پوسته. چنین همگرایی‌ای، تفسیر فیزیکی مدل اصلی را تقویت می‌کند، بدون آنکه مدل ساده‌تر را جایگزین مدل پیش‌بینی کند. در کاربرد ایمنی، مقدار مرکزی تاب‌آوری به تنهایی کافی نیست. هرچه بازه عدم قطعیت خسارت وسیع‌تر باشد، اطمینان به مقدار تاب‌آوری متناظر نیز کمتر خواهد بود؛ بنابراین، در ساختمان‌هایی که خسارت شدید یا عدم قطعیت بالا دارند، تفسیر نتیجه باید محافظه‌کارانه‌تر باشد و نیاز به بازرسی میدانی یا تحلیل تفصیلی افزایش می‌یابد. این برداشت همان نقش عملی بازه‌های عدم قطعیت را به زبان تاب‌آوری منتقل می‌کند، بدون آنکه به فرمول‌های اضافی نیاز باشد.

نکته مهم این است که هر دو شاخص فقط وضعیت اولیه ساختمان بلافاصله پس از انفجار را توصیف می‌کنند. زمان و هزینه تعمیر، منابع ارزیابی، بازگشت به بهره‌برداری و تغییر عملکرد در طول زمان در این چارچوب وارد نشده‌اند. بنابراین، تعبیر دقیق خروجی‌ها «تاب‌آوری لحظه‌ای» یا «عملکرد باقیمانده اولیه» است، نه تاب‌آوری کامل و زمان‌مند ساختمان.

۶- نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان داد که پیش‌بینی خسارت انفجاری در مقیاس ساختمان را نمی‌توان صرفاً به یک رابطه عمومی میان شدت انفجار و پاسخ ساختمان تقلیل داد. تفاوت رفتار سناریوهای برخورد مستقیم با سایر رژیم‌ها، ضرورت استفاده از ساختاری را مطرح می‌کند که بتواند این ناهمگونی را به طور صریح در فرایند یادگیری لحاظ کند. بر همین اساس، چارچوب فیزیک‌راهنمای سوئیچ‌رژیمی توسعه‌یافته

در این مطالعه، اطلاعات مربوط به شدت انفجار، شرایط مواجهه، حفاظت پیرامونی و ویژگی‌های ساختمان را در یک ساختار غیرخطی یکپارچه کرد. ارزیابی هولدآوت مستقل داخلی نشان داد مدل پیشنهادی با $MAE=7.13$ ، $RMSE=10.07$ و $R^2 = 0.872$ از دقت مناسبی برخوردار است. اگرچه XGBoost در کل هولدآوت MAE اندکی پایین‌تر برابر با ۷/۰۰ داشت، اختلاف دو مدل از نظر آماری معنادار نبود. تفاوت اصلی در برخوردهای مستقیم ظاهر شد؛ جایی که خطای مدل سوئیچ‌رژیمی به ۸/۱۹ رسید، درحالی‌که XGBoost خطای ۱۱/۲۱ را نشان داد. بنابراین، ارزش ساختار پیشنهادی نه در ادعای برتری مطلق در همه داده‌ها، بلکه در بهبود رفتار مدل در رژیمی است که از نظر فیزیکی متفاوت و از نظر ایمنی حساس‌تر است. با توجه به تعداد محدود نمونه‌های این زیرگروه، این مزیت باید به‌عنوان شواهد حمایت‌کننده تفسیر شود و برای تعمیم قطعی به داده‌های مستقل بیشتری نیاز دارد. تحلیل‌های تفسیرپذیری و حساسیت نیز تصویر نسبتاً منسجمی از منطق مدل ارائه کردند. فاصله مقیاس‌شده، فاصله واقعی، ساختمان‌های حائل، جرم معادل TNT و نسبت پنجره به دیوار در روش‌های مختلف تفسیرپذیری به‌طور مکرر در میان متغیرهای اثرگذار ظاهر شدند. هم‌جهتی این نتایج نشان می‌دهد پیش‌بینی خسارت تنها تابع شدت انفجار نیست و شرایط محیط پیرامونی و آسیب‌پذیری پوسته ساختمان نیز در آن نقش دارند. در عین حال، این روابط بیانگر الگوهای آموخته‌شده از داده‌ها هستند و نباید به‌عنوان روابط علی یا رتبه‌بندی قطعی مقاومت سیستم‌های ساختمانی تفسیر شوند. یکی دیگر از نتایج مهم پژوهش، ضرورت همراه کردن پیش‌بینی نقطه‌ای با بیان عدم قطعیت است. بازه موندریان ایمنی‌محور در هولدآوت پوشش ۹۳ درصدی ایجاد کرد، اما افزایش خطا و کاهش پوشش در بخشی از خسارت‌های بسیار شدید نشان داد که اطمینان مدل در تمام دامنه خسارت یکسان نیست. از این رو، چارچوب پیشنهادی اساساً برای غربالگری سریع، اولویت‌بندی بازرسی‌های فنی و پشتیبانی از تصمیم‌گیری اولیه طراحی شده است و به‌هیچ‌وجه جایگزین بازرسی‌های میدانی یا تحلیل‌های تفصیلی سازه‌ای به شمار نمی‌رود.

منابع

- [1] S.L. Arefi, A. Gholizad, Damage Detection of Truss Structures by Reduction of Degrees of Freedom Using the Serep Method, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 15(1) (2020) 1–25.
- [2] M. Bitarafan, S. Hashemkhani Zolfani, S.L. Arefi, E.K. Zavadskas, Evaluating the construction methods of cold-formed steel structures in reconstructing the areas damaged in natural crises, using the methods AHP and COPRAS-G, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 12(3) (2012) 360–367.
- [3] S. Lale Arefi, A. Gholizad, S.M. Seyedpoor, Damage Detection of Structures Using Modal Strain Energy with Guyan Reduction Method, *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 8(4) (2020) 47–60.
- [4] Z. Luo, J. Chen, C. Chiu, R. Luo, H. Liu, Improved sensitivity equation of mode shapes and adaptive strategy with elastic net regularization for structural damage detection, *Structures*, 78 (2025) 109304.
- [5] V. KARLOS, G. SOLOMOS, Calculation of Blast Loads for Application to Structural Components. Administrative Arrangement No JRC 32253-2011 with DG-HOME Activity A5-Blast Simulation Technology Development, (2013).
- [6] US Department of Defense, Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, UFC 3-340-02, Unified Facilities Criteria (UFC), US Department of Defense, Washington, DC, USA, 2008.
- [7] M. Bruneau, S.E. Chang, R.T. Eguchi, G.C. Lee, T.D. O'Rourke, A.M. Reinhorn, M. Shinozuka, K. Tierney, W.A. Wallace, D. Von Winterfeldt, A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities, *Earthquake spectra*, 19(4) (2003) 733–752.
- [8] G.P. Cimellaro, A.M. Reinhorn, M. Bruneau, Framework for analytical quantification of disaster resilience, *Engineering Structures*, 32(11) (2010) 3639–3649.
- [9] T. Chen, C. Guestrin, Xgboost: A scalable tree boosting system, in: *Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining*, 2016, pp. 785–794.

- [10] L. Prokhorenkova, G. Gusev, A. Vorobev, A.V. Dorogush, A. Gulin, CatBoost: unbiased boosting with categorical features, *Advances in neural information processing systems*, 31 (2018).
- [11] D.R. Roberts, V. Bahn, S. Ciuti, M.S. Boyce, J. Elith, G. Guillera-Arroita, S. Hauenstein, J.J. Lahoz-Monfort, B. Schröder, W. Thuiller, D.I. Warton, B.A. Wintle, F. Hartig, C.F. Dormann, Cross-validation strategies for data with temporal, spatial, hierarchical, or phylogenetic structure, *Ecography*, 40(8) (2017) 913–929.
- [12] D.W. Apley, J. Zhu, Visualizing the Effects of Predictor Variables in Black Box Supervised Learning Models, *Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology*, 82(4) (2020) 1059–1086.
- [13] S.M. Lundberg, S.-I. Lee, A unified approach to interpreting model predictions, *Advances in neural information processing systems*, 30 (2017).
- [14] A.N. Angelopoulos, S. Bates, Conformal prediction: A gentle introduction, *Foundations and Trends in Machine Learning*, 16(4) (2023) 494–591.
- [15] J. Nakhaei, M. Bitarafan, S. Lale Arefi, O. Kapliński, Model for rapid assessment of vulnerability of office buildings to blast using SWARA and SMART methods (a case study of swiss re tower), *Journal of Civil Engineering and Management*, 22(6) (2016) 831–843.
- [16] S.E. Quiel, S.M. Marjanishvili, B.P. Katz, Performance-Based Framework for Quantifying Structural Resilience to Blast-Induced Damage, *Journal of Structural Engineering*, 142(8) (2016) C4015004.
- [17] H. Hasheminasab, S. Hashemkhani Zolfani, M. Bitarafan, P. Chatterjee, A. Abhaji Ezabadi, The Role of Façade Materials in Blast-Resistant Buildings: An Evaluation Based on Fuzzy Delphi and Fuzzy EDAS, *Algorithms*, 12(6) (2019) 119.
- [18] B. Alanbay, R. Batra, Optimization of blast mitigating sandwich structures with fiber-reinforced face sheets and PVC foam layers as core, *Thin-Walled Structures*, 179 (2022) 109721.
- [19] F. Jiang, S. Yang, C. Qi, H.-T. Liu, A. Remennikov, L.-Z. Pei, Blast response and multi-objective optimization of graded re-entrant circular auxetic cored sandwich panels, *Composite structures*, 305 (2023) 116494.
- [20] M. Bitarafan, K. Amini Hosseini, Developing a Model for Assessing Urban Resilience to Aerial Attacks Using the IHWP Method: A Case Study of District 5, Tehran, *Journal of Safe City*, 6(1) (2023) 116–142 (in Persian).
- [21] J. Liu, J. Wei, J. Li, Y. Su, C. Wu, A comprehensive review of ultra-high performance concrete (UHPC) behaviour under blast loads, *Cement and Concrete Composites*, 148 (2024) 105449.
- [22] X. Wang, T. Li, Y. Wang, Y. Xu, Postblast damage assessment of concrete-filled double-skin tube columns by intelligence-based techniques, *Journal of Constructional Steel Research*, 215 (2024) 108486.
- [23] J. Kallas, R. Napolitano, Beyond field surveys: Understanding the role of 3D spatial attributes for data-driven blast vulnerability assessment of masonry buildings, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 128 (2025) 105672.
- [24] A. Nemati, O. Mikaeili, M. Bitarafan, S.L. Arefi, Material Selection for Multi-Hazard Resilient Buildings using an Uncertainty-Aware, Interpretable Decision-Support Framework, *Journal of Building Engineering*, (2026) 117247.
- [25] M. Bitarafan, A. Nemati, Constructed urban infrastructure safety prediction under explosive effects using hybrid explainable ML approaches, *Structures*, 84 (2026) 110928.
- [26] A. Asgharian Jedi, S.E. Mirhashemi Rooteh, Defense Lessons Learned from Tehran Missile Attack Documents: Passive Defense, Decentralization, and Their Impact on Reducing Physical Vulnerability of Tehran, Shahid Beheshti University Press, Tehran, 2015 (in Persian).