



فروپاشی پیش رونده در سازه‌ها

مروری انتقادی بر چهارچوب‌های آئین نامه‌ای، طراحی
تجویزی، چالش‌های مدل سازی و مسیرهای آینده

پیمان همامی
دکترای عمران-سازه، دانشگاه تربیت مدرس، عضو هیئت علمی دانشگاه خوارزمی، عضو سازمان نظام مهندسی ساختمان استان تهران
homami@khu.ac.ir



فروپاشی پیش‌رونده یکی از پیچیده‌ترین پدیده‌های خرابی در مهندسی سازه است که در آن یک آسیب موضعی اولیه می‌تواند به گسترش زنجیره‌ای خرابی و در نهایت فروپاشی کلی سازه منجر شود.



شکل ۱- فرایند کلی فروپاشی پیش‌رونده

۱- چکیده

فروپاشی پیش‌رونده یکی از پیچیده‌ترین پدیده‌های خرابی در مهندسی سازه است که در آن یک آسیب موضعی اولیه می‌تواند به گسترش زنجیره‌ای خرابی و در نهایت فروپاشی کلی سازه منجر شود. حوادثی همچون فروپاشی ساختمان Ronan Point (۱۹۶۸) و مرکز تجارت جهانی (۲۰۰۱) ضرورت بازنگری در فلسفه طراحی سازه‌ها در برابر خرابی نامتناسب را آشکار ساخت. طی دودهمه اخیر دستورالعمل‌ها و آئین‌نامه‌های متعددی نظیر Eurocode و UFC, GSA برای کاهش احتمال فروپاشی پیش‌رونده تدوین شده‌اند. با این حال چالش‌های مهمی در زمینه واقع‌گرایی رفتاری، وابستگی به سناریو، عدم قطعیت مدل‌سازی و تحلیل انتشار خرابی همچنان پابرجا است.

در این مطلب، ضمن مرور انتقادی چهارچوب‌های آئین‌نامه‌های موجود، چالش‌های مدل‌سازی غیرخطی، رفتار زنجیری و غشایی، اثرات چندمخاطره‌ای، اندرکنش خاک-سازه و بی‌نظمی‌های سازه‌ای بررسی می‌شود. همچنین نتایج منتخب پژوهش‌های نویسنده و دانشجویان وی در زمینه تأثیر سیستم‌های مهاربندی، شکل‌پذیری و ضعف موضعی اعضای مجاور بر مقاومت در برابر فروپاشی پیش‌رونده ارائه می‌گردد. در ادامه، گذار از طراحی تجویزی به طراحی مبتنی بر ریسک و نقش فناوری‌های نوین نظیر هوش مصنوعی، دولوی دیجیتال و پایش سلامت سازه بحث می‌شود.

نتایج نشان می‌دهد رویکردهای فعلی عمدتاً بر شروع خرابی متمرکزند در حالی که کنترل انتشار خرابی و حفظ یکپارچگی مسیرهای بار نقش تعیین‌کننده‌تری در جلوگیری از فروپاشی کلی ایفا می‌کند.

۲- مقدمه

فروپاشی پیش‌رونده (Progressive Collapse) به پدیده‌ای اطلاق می‌شود که در آن خرابی موضعی اولیه در یک یا چند عضو سازه‌ای، موجب توزیع مجدد نیروها و گسترش زنجیره‌ای خرابی در سایر اجزا شده و ممکن است به فروپاشی نامتناسب کل سازه بیانجامد. اهمیت این موضوع پس از دو رویداد شاخص جهانی بیش از پیش مورد توجه قرار گرفت:

■ Ronan Point (۱۹۶۸): انفجار گاز در طبقه ۱۸ یک ساختمان ۲۲ طبقه با سیستم دیوار باربر موجب حذف یک پانل دیوار باربر در گوشه ساختمان شد. این حذف موضعی زنجیره‌ای از خرابی را به پایین‌ترین طبقات منتقل کرد و یک

سوم عرض ساختمان فرو ریخت. این حادثه نخستین هشدار جدی به جامعه مهندسی بود که شکست موضعی کوچک می‌تواند عواقب فاجعه‌بار داشته باشد.

■ World Trade Center (۲۰۰۱): برخورد هواپیماها به برج‌های دوقلو مرکز تجارت جهانی علاوه بر آسیب مستقیم باعث آتش‌سوزی گسترده و طولانی‌مدت شد. حرارت حاصل از آتش مقاومت فولاد را به شدت کاهش داد و در نهایت طبقات فوقانی بر روی طبقات پایین‌تر فرو ریخت. این رویداد نشان داد که فروپاشی پیش‌رونده غالباً ماهیتی «چندمخاطره‌ای» دارد و هم افزایی ضربه، آتش و آسیب سازه‌ای مکانیزم‌های پیچیده‌ای ایجاد می‌کند.

فروپاشی پیش‌رونده غالباً ماهیتی «چندمخاطره‌ای» دارد و هم افزایی ضربه، آتش و آسیب سازه‌ای مکانیزم‌های پیچیده‌ای ایجاد می‌کند.



یکی از روش‌های ارزیابی ساختمان‌ها در برابر فروپاشی پیش‌رونده حذف یک ستون و تحلیل رفتار سازه به تبع حذف آن عضو است.

۳-۲- تفاوت استحکام و افزونگی (Robustness vs. Redundancy)

در بسیاری از پروژه‌ها افزونگی سازه‌ای (وجود نامعینی استاتیکی و مسیرهای متعدد بار) به اشتباه معادل پایداری در برابر فروپاشی پیش‌رونده در نظر گرفته می‌شود. در حالی که وجود مسیرهای متعدد لزوماً تضمین‌کننده رفتار ایمن نیست. سازه‌ای با تعداد زیاد مسیرهای بار اما اتصالات شکننده یا شکل‌پذیری پایین همچنان مستعد فروپاشی است. استحکام واقعی مستلزم وجود همزمان چهار ویژگی است:

- شکل‌پذیری مناسب اعضا و اتصالات
- پیوستگی مسیرهای بار (بار از یک عضو به عضو دیگر قابل انتقال باشد)
- ظرفیت جذب انرژی کافی
- توانایی تحمل تغییر شکل‌های بزرگ بدون افت ناگهانی مقاومت

۳-۳- آسیب‌پذیری مسیر بار (Load Path Vulnerability)

مسیرهای انتقال بار ممکن است به دو شکل دچار ضعف شوند:

- شکست ناگهانی: ناشی از انفجار، ضربه یا حذف عضو.
 - تخریب تدریجی: ناشی از خوردگی، خستگی، خزش یا کرناتاسیون بتن.
- تحلیل‌های متعارف تنها خرابی ناگهانی را مدل‌سازی می‌کنند و ضعف تدریجی مسیرهای بار را نادیده می‌گیرند که اختلاف بزرگ بین تحلیل و واقعیت است.

۲. آیا می‌توان پایداری سازه را در برابر فروپاشی پیش‌رونده به شکلی قابل اعتماد اندازه‌گیری کرد؟
۳. اگر سازه پس از حذف ستون در نرم‌افزار پایدار باقی بماند آیا در واقعیت نیز چنین رفتاری مشاهده خواهد شد؟

این پرسش‌ها نشان می‌دهد که فروپاشی پیش‌رونده فقط یک مسئله ساده سازه‌ای نیست بلکه پدیده‌ای «چندفیزیکی، غیرخطی، دارای عدم قطعیت» و متأثر از رفتار سیستم‌های پیچیده است.

۳- مفاهیم بنیادی فروپاشی پیش‌رونده

۳-۱- تفاوت استحکام (تاب‌آوری) و مقاومت (Robustness vs. Strength)

فرایند فروپاشی پیش‌رونده معمولاً با یک آسیب موضعی آغاز می‌شود. این آسیب به حد مقاومت (Strength) اعضا بستگی دارد. هر عضو سازه‌ای دارای مقاومت معینی است و به دلیل کمبود مقاومت دچار خسارت می‌شود. پس از خرابی اولیه نیروها در سازه به دنبال مسیرهای جدید انتقال بار می‌گردند. اگر اعضا و اتصالات مجاور دارای مقاومت کافی نباشند خرابی به سایر بخش‌ها گسترش می‌یابد.

تجربه حوادث واقعی نشان می‌دهد که عامل تعیین‌کننده در بقا یا فروپاشی کامل سازه نحوه انتشار خرابی است نه صرفاً شروع آن. تاب‌آوری و توان ادامه‌ی بقا پس از آسیب موضعی به Robustness تعبیر می‌شود که افزونگی سازه، شکل‌پذیری اعضا و پیوستگی مسیرهای بار از مهم‌ترین مولفه‌های آن هستند.

شکل ۱ فرایند فروپاشی پیش‌رونده را نشان می‌دهد. این فرایند متشکل از چهار مرحله کلی است. مرحله نخست شامل آسیب موضعی در اجزای اصلی باربر سازه ناشی از انفجار، خوردگی شدید، آتش سوزی یا ... است که منجر به حذف یک یا تعدادی از آن‌ها می‌شود. حذف این اعضا منجر به توزیع مجدد بارها بین اعضای باقیمانده در سازه می‌شود که به عنوان مرحله دوم فرایند معرفی شده است. در مرحله سوم اعضایی که بارهای اضافی را متحمل شده‌اند دچار خرابی می‌شوند. در نهایت، خرابی اعضا زنجیروار رخ می‌دهد و به فروپاشی یا خرابی گسترده و نامتناسب منتهی می‌شود.

آئین‌نامه‌هایی برای پیشگیری از پدیده‌ی فروپاشی پیش‌رونده در دهه‌های اخیر تدوین شده‌اند. مهم‌ترین آن‌ها عبارت هستند از:

- دستورالعمل GSA (General Services Administration, USA)
- آیین‌نامه (Department of Defense, USA) UFC ۴-۰۲۳-۰۳
- بخش ENY-۱-۱۹۹۱ یوروکد

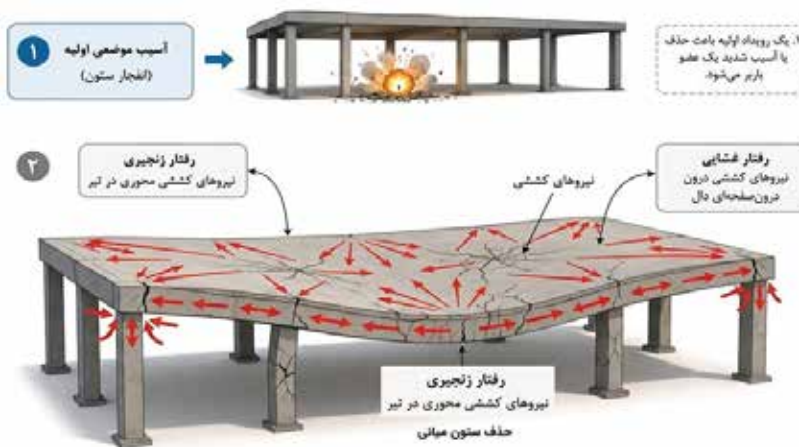
با این وجود ابهاماتی بر روش‌های توصیه شده در این آئین‌نامه‌ها وجود دارد. به‌عنوان نمونه یکی از روش‌های ارزیابی ساختمان‌ها در برابر فروپاشی پیش‌رونده حذف یک ستون و تحلیل رفتار سازه به تبع حذف آن عضو است. اما چنین روشی پرسش‌های اساسی بدنبال دارد از جمله:

۱. آیا حذف یک یا چند ستون یا تیر در مدل عددی، سناریوهای خرابی واقعی را به طور واقع بینانه بازنمایی می‌کند؟

فرایند فروپاشی پیش‌رونده معمولاً با یک آسیب موضعی آغاز می‌شود.



تجربه حوادث واقعی نشان می‌دهد که عامل تعیین‌کننده در بقا یا فروپاشی کامل سازه نحوه انتشار خرابی است نه صرفاً شروع آن.



شکل ۲- عملکرد زنجیری تیرها و عملکرد غشایی دال‌ها

۴- چهارچوب‌های آئین‌نامه‌ای و رویکردهای کلی طراحی در مقابل فروپاشی پیش‌رونده

۴-۱- روش نیروی همبندی (Tie Force Method)

این روش قدیمی‌ترین رویکرد برای مقابله با فروپاشی پیش‌رونده است. در این روش با تأمین پیوستگی مناسب بین اجزای سازه (استفاده از میلگردهای مهار یا اتصالات ویژه)، تلاش می‌شود تا حد امکان از جداسدگی اعضا جلوگیری شود. **مزیت:** سادگی و قابلیت استفاده در طراحی متعارف.

محدودیت اصلی: ماهیت تجویزی دارد و رفتار واقعی سازه در شرایط تغییرشکل‌های بزرگ و پاسخ دینامیکی شدید را مدل نمی‌کند. این روش شرطی لازم اما ناکافی برای تأمین پایداری است.

۴-۲- روش مسیر جایگزین (Alternate Path Method, APM)

در این روش حذف ناگهانی یک عضو کلیدی (معمولاً ستون) مستقیماً در مدل اعمال می‌شود و توانایی سازه در بازتوزیع نیروها بررسی می‌گردد. این رویکرد در دستورالعمل‌های GSA و UFC استفاده گسترده دارد.

مزیت: واقع‌گرایی بیشتر نسبت به روش نیروی همبندی. **محدودیت‌ها:**

۱. به شدت به فرض‌های مدل‌سازی وابسته است (ظرفیت دوران مفاصل پلاستیک، نوع مدل‌سازی سخت‌شوندگی و نرم‌شوندگی، ضرایب میرایی،

۵- چالش‌های مدل‌سازی و تحلیل فروپاشی پیش‌رونده

۵-۱- حساسیت تحلیل فروپاشی پیش‌رونده به فرضیات مدل‌سازی

تحلیل فروپاشی پیش‌رونده به شدت نسبت به جزئیات مدل‌سازی حساس است. تغییر در فرضیات مربوط به مفاصل پلاستیک، قوانین مصالح، سختی مؤثر اعضا یا حتی ابعاد مش‌بندی می‌تواند نتایج متفاوتی ایجاد کند.

عوامل کلیدی مؤثر:

- ظرفیت دوران مفاصل پلاستیک
- مدل‌سازی افت مقاومت و کاهش سختی
- ضرایب میرایی (معمولاً ۲ تا ۵ درصد برای سازه‌های فولادی و ۵ تا ۱۰ درصد برای بتن‌آرمه)
- نرخ کرنش متناسب بارخداد (بارگذاری انفجاری، زلزله یا خوردگی)

اثرات نرخ کرنش، نحوه مدل‌سازی رفتار زنجیری).

۲. وابستگی به سناریو: حذف ستون گوشه ممکن است منجر به بقا شود، اما حذف ستون داخلی همان سازه باعث فروپاشی کامل گردد. به عبارت دیگر اتکا به نتایج برخی از سناریوها ممکن است گمراه‌کننده باشد.

۴-۳- رویکرد مبتنی بر ریسک در Eurocode

یوروکد EN ۷-۱-۱۹۹۱ رویکرد مبتنی بر ریسک را پیشنهاد می‌کند که در آن، ریسک = احتمال وقوع رخداد آغازین × پیامد (هزینه) آن است.

مزیت: تغییر نگرش از قطعی‌گرایی به احتمالاتی.

محدودیت: شکاف میان فلسفه و عمل همچنان پابرجاست و دستورالعمل‌های کاربردی مناسب برای محاسبه احتمال، ارزیابی پیامد و معیارهای پذیرش ریسک ارائه نشده است.

تحلیل‌های متعارف تنها خرابی ناگهانی را مدل‌سازی می‌کنند.



تحلیل فروپاشی پیش رونده به شدت نسبت به جزئیات مدل سازی حساس است.

۲-۶- هوش مصنوعی و یادگیری ماشین

یادگیری ماشین در پیش بینی مسیرهای خرابی و توسعه مدل های جایگزین سریع (surrogate models) یکی از حوزه های نوظهور است. شبکه های عصبی مبتنی بر فیزیک (PINNs) و مدل های داده محور می توانند جایگزین بخشی از شبیه سازی های پرهزینه اجزای محدود شوند. چالشی که با وجود این ابزار باقی می ماند، تعمیم پذیری مدل ها به سازه های جدید و نامنظم است.

۳-۶- دوقلوی دیجیتال (Digital Twin) و پایش سلامت سازه (SHM)

دوقلوی دیجیتال مدلی پویا در فضای نرم افزار است که با استفاده از داده های حسگرهایی که بر روی سازه نصب شده اند، وضعیت واقعی سازه را پیوسته به روزرسانی می کند و می تواند بر اساس پردازش داده ها می تواند سناریوهای مختلف خرابی را شبیه سازی کند.

سامانه های پایش سلامت سازه (SHM) قادر هستند تخریب تدریجی مسیرهای بار و ضعف های پنهان را پیش از رسیدن به شرایط بحرانی شناسایی کنند. برای سازه های حیاتی، با ارزش و حساس، استفاده از شبکه حسگرهای متنوع برای اندازه گیری و پایش تغییرات کرنش ها، تنش ها، انحراف، چرخش، جابه جایی و شتاب ها به طور پیوسته توصیه می شود. در شکل ۳ فرایند شماتیک پایش سلامت سازه شامل ثبت داده های میدانی از وضعیت و رفتار سازه (تغییر مکان ها و ...)، سپس انتقال و پردازش داده ها و تصمیم گیری هوشمند با اتکا بر سناریوهای خرابی که دوقلوی دیجیتال و یادگیری ماشین شناسایی می کنند، نمایش داده شده است.

۴-۵- اثر بی نظمی سازه ای

اکثر مطالعات بر روی سازه های منظم انجام شده اند اما ساختمان های واقعی غالباً دارای بی نظمی هندسی و سختی هستند؛ عقب نشینی ها، طبقات نرم، قاب های غیرموازی و تغییرات ناگهانی سختی. این بی نظمی ها مدل سازی توزیع مجدد بار را بسیار پیچیده و غیرقابل پیش بینی می کنند.

۵-۵- فروپاشی پیش رونده به عنوان مسئله ای چندمخاطره ای

در حوادث واقعی فروپاشی پیش رونده معمولاً ناشی از یک خطر منفرد نیست. زلزله، انفجار، آتش سوزی، ضربه و خوردگی می توانند به صورت همزمان یا متوالی اثر بگذارند. به عنوان مثال در حادثه فروپاشی مرکز تجارت جهانی ترکیب ضربه اولیه و آتش سوزی طولانی مدت منجر به کاهش شدید ظرفیت باقیمانده شد. بنابراین در اغلب شرایط طراحی برای یک خطر منفرد کافی نیست. نیاز به مدل های چندمخاطره ای وجود دارد.

۶- ابزارها و رویکردهایی که دقت ارزیابی فروپاشی پیش رونده را ارتقا می دهند

۱-۶- طراحی مبتنی بر ریسک (Risk-Based Design)

رویکردهای آئین نامه ها برای ارزیابی فروپاشی پیش رونده تجویز می کنند. همانطور که در شکل ۳ به طور شماتیک نمایش داده شده است، رویکرد مبتنی بر ریسک می تواند احتمال وقوع، پیامد خرابی و سطح قابل قبول خطر را به صورت کمی وارد طراحی کند. گذار به این رویکرد نیازمند موارد زیر می باشد:

- توسعه مدل های احتمالاتی
- داده های میدانی از حوادث واقعی
- ابزارهای تحلیل پیشرفته

■ نوع المان (پوسته، تیر-ستون، المان حجمی) و تراکم مش بندی
نتیجه: دو تحلیلگر با فرضیات متفاوت اما منطقی ممکن است به نتایج متناقض برسند. این موضوع قابلیت اعتماد نتایج تحلیل را کاهش می دهد.

۲-۵- رفتار زنجیری (Catenary Action) و عملکرد غشایی (Membrane Action)

یکی از مهم ترین مکانیزم های مقاومتی در برابر فروپاشی پیش رونده رفتار زنجیری تیرها است. پس از حذف ستون تیرها از رفتار خمشی غالب به رفتار کششی غالب منتقل می شوند و نیروها از طریق کشش محوری منتقل می گردند.

به طور مشابه دال های بتنی پس از ترک خوردگی وارد عملکرد غشایی می شوند و از طریق کشش درون صفحه ای بخشی از بارها را منتقل می کنند. مطالعات نشان داده اند که این مکانیزم ها نقش بسیار مهمی در جلوگیری از فروپاشی دارند، با این حال در بسیاری از تحلیل های متداول به طور دقیق مدل سازی نمی شوند.

این دو پدیده در شکل ۲ نمایش داده شده اند.

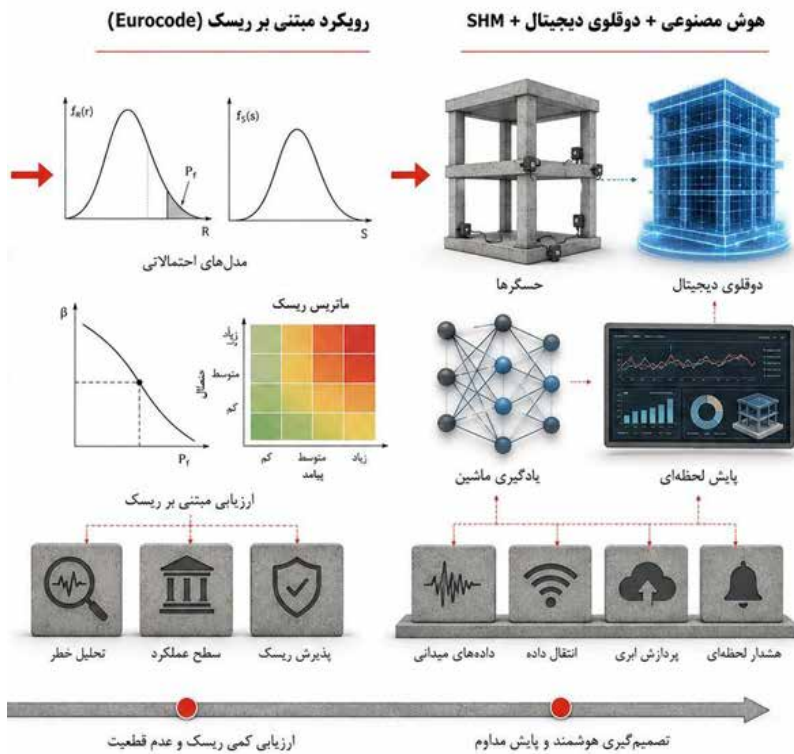
توصیه عملی این است که برای مدل سازی واقع بینانه از المان های پوسته با قابلیت غشایی و المان های تیر-ستون با در نظر گرفتن اندرکنش نیروی محوری-خمشی استفاده شود.

۳-۵- اندرکنش خاک و سازه (Soil-Structure Interaction, SSI)

انعطاف پذیری خاک و فونداسیون می تواند مسیرهای انتقال بار را تغییر دهد. در بسیاری از تحلیل های فروپاشی پیش رونده، SSI نادیده گرفته می شود. این موضوع به ویژه در ساختمان های موجود بر روی خاک های نرم یا پی های کم عمق اهمیت دارد.

پس از حذف ستون تیرها از رفتار خمشی غالب به رفتار کششی غالب منتقل می شوند و نیروها از طریق کشش محوری منتقل می گردند.

انعطاف پذیری خاک و فونداسیون می‌تواند مسیرهای انتقال بار را تغییر دهد.



شکل ۳- ابزارها و رویکردهایی که دقت ارزیابی فروپاشی پیش‌رونده را ارتقا می‌دهند

۷- جمع‌بندی

فروپاشی پیش‌رونده فراتر از یک مسئله صرفاً سازه‌ای است و باید آن را به عنوان یک مسئله چندخطری، غیرخطی و دارای عدم قطعیت در نظر گرفت.

نکات کلیدی:

- روش‌های تجویزی و آئین‌نامه‌های موجود عمدتاً بر کنترل شروع خرابی متمرکزند، در حالی که عامل تعیین‌کننده نحوه انتشار خرابی است.
- روش نیروی هم‌بندی شرطی لازم‌اماناکافی است.
- روش مسیر جایگزین به شدت وابسته به سناریو و فرضیات مدل‌سازی است.
- رویکرد مبتنی بر ریسک یوروکد هنوز فاصله زیادی تا کاربرد عملی دارد.

پیشنهاد‌های عملی برای مهندسان:

- همواره سناریوهای متعدد حذف یک و یا چند عضو (ستون گوشه، لبه، داخلی) و خسارت همزمان در اعضای مجاور آن‌ها را بررسی کنید.
 - اثر رفتار زنجیری و غشایی را در مدل‌سازی لحاظ کنید.
 - حساسیت نتایج را نسبت به فرض‌های کلیدی (میرایی، ظرفیت دوران، نرخ کرنش) آزمایش کنید.
 - در صورت وجود خاک نرم، اندرکنش خاک و سازه را مدل کنید.
 - برای سازه‌های مهم از پایش سلامت سازه و در آینده از دوقلوی دیجیتال استفاده کنید.
- چشم‌انداز آینده:
- طراحی در برابر فروپاشی پیش‌رونده به سمت رویکردهای مبتنی بر ریسک، مدل‌سازی چندمخاطره‌ای، استفاده از هوش مصنوعی و توسعه دوقلوهای دیجیتال حرکت خواهد کرد. تحقق این هدف نیازمند تغییر نگرش از طراحی تجویزی به طراحی مبتنی بر درک عمیق از رفتار واقعی سازه‌ها است.

۸- مراجع

Buildings and Other Structures. 2022

[6] Ellingwood, B. R., Strategies for Mitigation of Progressive Collapse, Journal of Structural Engineering, 2019.

[7] Khandelwal, K., El-Tawil, S., Pushdown resistance as a measure of robustness in progressive collapse analysis, Engineering Structures, 2011.

[8] Ruth, P., et al., Multi-hazard approaches in structural collapse assessment, ASCE Congress Proceedings, 2020.

[1] UFC4-023-03, Design of Buildings to Resist Progressive Collapse, Department of Defense, USA, 2023

[2] General Services Administration (GSA), Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines, 2016.

[3] EN 1991-1-7, Eurocode 1: Actions on Structures - Part 1-7: Accidental Actions. 1991

[4] Starossek, U. Progressive Collapse of Structures, Thomas Telford, 2009.

[5] ASCE/SEI 7-22, Minimum Design Loads and Associated Criteria for