

بررسی اثر شمع‌بندی به هنگام حذف ستون در انهدام پیش‌رونده سازه‌های فولادی و بتن آرمه

علی خیرالدین

استاد ممتاز گروه سازه، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

احسان جهانخانی*

دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

مهدی فخرالدین

دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

چکیده

در بحث خرابی پیش‌رونده، خرابی یک عضو می‌تواند باعث تخریب زنجیره‌وار، دنباله‌ای و متوالی اعضا شود و در نهایت به تخریب قسمتی از سازه یا خرابی کامل سازه منتهی شود. در بحث کنترل خرابی پیش‌رونده و جلوگیری از آن، تعیین المان کلیدی و تقویت آن می‌تواند از تخریب کلی سازه یا بخش وسیعی از سازه جلوگیری کند. یکی از موضوعات مهم در زمینه انهدام پیش‌رونده، بحث بار دینامیکی حاصل از حذف ناگهانی اعضا و اثر شمع‌بندی می‌باشد که در تحقیق حاضر این عامل با نگاه مبسوط مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق سازه‌های فولادی و بتن آرمه ۱۰ طبقه، هر دو با سیستم مقاوم جانبی قاب خمشی ویژه بررسی قرار گرفته‌اند. به منظور مشخص نمودن المان کلیدی، از روش شاخص حساسیت و با تحلیل استاتیکی غیرخطی افزاینده قائم استفاده شده است. با بررسی‌های صورت گرفته، ستون‌های موجود در گوشه‌ی پلان ساختمان دارای میزان شاخص خرابی بیشتری می‌باشند. این شاخص در دو سازه بتنی و فولادی به ترتیب ۰/۷۲ و ۰/۶۸ می‌باشد. اثر شمع‌بندی در محل حذف ستون در انهدام پیش‌رونده در سازه‌ی فولادی و بتن آرمه نشان داد؛ که این امر باعث کاهش میزان شاخص خرابی عضو مورد نظر در سازه‌ی بتن آرمه و فولادی می‌گردد. مقدار شاخص خرابی در یکی از ستون‌های مورد مطالعه، در سازه‌ی بتن آرمه و فولادی به ترتیب از ۰/۶۸ به ۰/۶۰ و از ۰/۴۷ به ۰/۳۶ کاهش پیدا کرده است. درصد کاهش شاخص حساسیت در سازه‌ی بتن آرمه و سازه‌ی فولادی به ترتیب ۱۱٪ و ۲۳٪ است؛ که نشان‌دهنده‌ی عملکرد بهتر سازه‌ی دارای شمع‌بندی در انهدام پیش‌رونده می‌باشد. لازم به ذکر است که تحقیق حاضر فقط به بررسی و ارزیابی تأثیر شمع‌بندی در انهدام پیش‌رونده پرداخته است و به الزام انجام و دفاع از این روش نمی‌پردازد. نتایج نشان داد که سازه‌ی فولادی از سازه‌ی بتن آرمه متناظر، شاخص خرابی کمتری داشته و عملکرد بهتری را در انهدام پیش‌رونده از خود نشان داده است. عملکرد بهتر سازه‌ی فولادی نسبت به بتن آرمه به دلیل وزن کمتر سازه فولادی، عدم ترک‌خوردگی و شکل‌پذیری بیشتر سازه‌ی فولادی نسبت به سازه‌ی بتنی است.

واژه‌های کلیدی: انهدام پیش‌رونده، شمع‌بندی، تحلیل غیرخطی استاتیکی، المان کلیدی، سازه‌ی فولادی و بتن آرمه.

* نویسنده مسئول: ehsanjahankhani@gmail.com

۱- مقدمه

ساختمان‌ها در طول مراحل ساخت‌وساز همیشه در معرض امکان فروریزش هستند، همان‌طور که در برج اسکای لاین^۸ در ویرجینیا، ایالات متحده در سال ۱۹۷۳ در طول ساخت‌وساز، پایه‌ها (شمع‌ها) در طبقه ۲۲ به‌طور زود هنگام برداشته شد و باعث شکست برشی دوطرفه شد که این معضل در تمام ارتفاع ساختمان انتشار یافت. به پدیده‌ی مذکور بعضاً به‌عنوان پنکیک شدن^۹ یاد می‌شود. ضربه ناشی از آوار همچنین باعث شد که انهدام به طرفین پیش روی کند و یک پارکینگ کامل در حال ساخت در مجاورت برج از بین برود. ساختمان لامیناس پلازا^{۱۰} در بریچپورت، ایالات متحده آمریکا در سال ۱۹۸۷ نیز در مرحله ساخت‌وساز فرو ریخت [9]. در پژوهشی که توسط ساسانی و کاظمی در سال ۲۰۱۱ [10] صورت گرفته است؛ آزمایش انهدام پیش‌رونده در هتل ۱۱ طبقه بتن آرمه هتل کرون پلازا^{۱۱} در تگزاس، ایالات متحده آمریکا انجام شد. چهارستون با استفاده از مواد منفجره برداشته شد. دو تا از ستون‌ها در خط مرکزی محیط ساختمان قرار داشتند و دو ستون داخلی بلافاصله در مجاورت هم قرار گرفته بودند. ساختمان تخلیه شد و تنها با جابجایی کل ۵۰ میلی‌متر توانست در برابر افت ستون مقاومت کند و توزیع مجدد بار به‌عنوان عملکرد قوسی در صفحات کف و همچنین عمل ویراندل^{۱۲} در قاب ارزیابی شد که با استفاده از بتن درجا ساخته شده بود.

خیرالدین و مشهدی علی [11]، پتانسیل خرابی پیش‌رونده در سازه‌های بلند دارای سیستم جدید هگزاگرید با سیستم‌های صلب معمولی را با استفاده از تحلیل استاتیکی و دینامیکی غیرخطی بررسی کردند. در تحقیق مذکور از سازه‌های 28، 48 طبقه که بر اساس بار باد طراحی شده بود استفاده شده است. نتایج بررسی مذکور نشان داده است که سیستم هگزاگرید دارای مقاومت کافی در برابر پتانسیل خرابی پیش‌رونده نسبت به سیستم‌های متداول می‌باشد.

در مطالعه‌ی صورت گرفته توسط کیم و هونگ در سال ۲۰۱۷ [12] به بررسی و مطالعه‌ی خرابی پیش‌رونده از طریق تحلیل‌های

انهدام پیش‌رونده^۱ خرابی تسلسل‌واری است؛ که از خرابی عضوی از سازه آغاز شده و به‌مرور منجر به تخریب قسمت عظیمی از سازه یا انهدام کل سازه می‌شود. خرابی پیش‌رونده اولین بار در سال ۱۹۶۸ مورد توجه و بررسی قرار گرفته است. این امر به دلیل وقوع اتفاقی در ساختمان رونان پوینت^۲ در کشور انگلستان صورت گرفته است. رونان پوینت ساختمانی ۲۲ طبقه بود که سیستم پیش‌ساخته و دیوارهای باربر بتنی داشت [1]. مفاهیمی همچون پل زدن^۳ و مسیر جایگزین بار^۴ بعد از اتفاق مذکور مورد مطالعه و تحقیق قرار گرفته است [2,3]. عدم حساسیت به شکست موضعی^۵ به‌عنوان استحکام^۶ شناخته می‌شود. سیستم‌های سازه‌ای مختلف درجات مختلفی از استحکام را نشان می‌دهند. چنین تفاوت‌هایی حتی در روش‌های مدرن طراحی مبتنی بر احتمال با استفاده از پارامترهای ایمنی جزئی نادیده گرفته می‌شوند؛ بنابراین ملاحظات اضافی برای اطمینان از ایمنی سازه پس از شکست محلی اولیه ضروری است. چنین ملاحظات اضافی در گذشته فقط در موارد خاص، به‌عنوان مثال، برای ساختمان‌های سفارت یا پل‌های طویل انجام شده است [4]. فروریزش ساختمان رونان پوینت در اثر انفجار گاز طبیعی ایجاد شد. انفجارهای خودروهای بمب‌گذاری شده به‌وسیله‌ی وسایل انفجاری دست‌ساز نیز توانایی اثبات شده‌ای در ایجاد انهدام پیش‌رونده ساختمان‌ها دارند [5,6]. ضعف‌های موضعی سازه‌ای، گاهی اوقات با بارگذاری بیش‌ازحد^۷ همراه می‌شود که می‌تواند باعث فروپاشی شود. شکست برشی دوطرفه دال‌های تخت شایع‌ترین علت در ساختمان‌های دارای اسکلت بتنی مسلح است. در پارکینگ پایپر رز^۸، از دست دادن مقاومت به دلیل فرسودگی بتن باعث شکست برشی دوطرفه شد [7].

در فروشگاه سامپونگ^۹، عدم کفایت آرماتور در ناحیه اتصال ستون به دال تخت، همراه با اضافه‌بار، باعث شکست برشی دوطرفه و فروریزش شد که منجر به کشته شدن ۵۰۱ نفر شد [8].

⁸ Pipers Row

⁹ Sampoong

¹⁰ Skyline

¹¹ Pancaking

¹² L'Ambiance Plaza

¹³ Crowne Plaza hotel

¹⁴ Vierendeel

¹ Progressive collapse

² Ronan point

³ Bridging

⁴ Alp (Alternate Load Path)

⁵ Local failure

⁶ Robustness

⁷ Overload

انهدام پیش‌رونده در این سازه‌ها انجام شده است. در تحقیق مذکور مشخص شد که تمامی مدل‌های تولیدشده دارای پتانسیل انهدام پیش‌رونده می‌باشند و در انهدام پیش‌رونده‌ی مدل‌ها موقعیت قرارگیری اعضا بسیار پراهمیت است.

خیرالدین و همکاران به مطالعه و بررسی تأثیر موقعیت قرارگیری المان کلیدی^۲ در انهدام پیش‌رونده در سال ۲۰۱۹ [18] پرداختند. در پژوهش مذکور، تجزیه و تحلیل حساسیت با پیروی از دستورالعمل‌های GSA^۳ و DoD^۴ اصلاح شده و برای یافتن عنصر کلیدی سازه‌های متقارن با ارتفاع‌های مختلف استفاده شده است. چهار سازه با ارتفاع‌های مختلف برای هر رویداد از دست‌رفته ستون آنالیز شده و شرایط تحمل بار سازه‌ها پایش شده است. نتایج نشان داد که محل قرارگیری عنصر کلیدی در پلان و ارتفاع سازه در سازه‌هایی با ارتفاع‌های مختلف متفاوت است.

در مطالعه‌ی صورت گرفته در سال ۲۰۲۲ توسط وانگ و همکاران [19] بر روی انهدام پیش‌رونده‌ی تیرهای بتن آرمه و اثرات سقف تیر دال، نتیجه اخذ شده چنین بیان گردیده است که با در نظر گرفتن اثرات تیر عرضی و دال می‌توان ظرفیت باربری یک تیر دو دهانه را ۳۴٪ افزایش داد بنابراین نباید اثرات تیر عرضی و دال را در انهدام پیش‌رونده نادیده گرفت.

پژوهش جدیدی در سال ۲۰۲۲ توسط ژائو و همکاران [20] به صورت آزمایشگاهی و عددی بر روی انهدام پیش‌رونده‌ی تیرها و ستون‌های بتن آرمه صورت گرفته است. تحقیق مذکور به بهره‌گیری و بررسی سناریو حذف ستون‌های میانی و تأثیر آن بر انهدام پیش‌رونده پرداخته است.

در تحقیق صورت گرفته توسط نیراجا و کانیش [21] در سال ۲۰۲۲ مشخص شد که انهدام ستون میانی از انهدام ستون‌های دیگر در سازه‌ی تحت مطالعه اثر بیشتری بر شکست سایر اعضا و انهدام کلی و پیش‌رونده‌ی سازه دارد. در تحقیق مذکور مشخص شده است که خرابی و شکست اعضا در سازه‌های دارای نامنظمی سختی نسبت به سازه‌های منظم بیشتر است و اعضا دارای استعداد بیشتری برای خرابی در سازه‌های دارای نامنظمی سختی نسبت به سازه‌های منظم هستند؛ در نتیجه در سازه‌های دارای نامنظمی سختی، انهدام پیش‌رونده خرابی بیشتری را ایجاد می‌کند.

دینامیکی و استاتیکی پرداختند. پژوهش صورت گرفته بر روی انهدام پیش‌رونده در سازه‌های بلند غیرمنظم انجام شده است. از مطالعه صورت گرفته نتیجه گرفته شد که احتمال رخداد انهدام پیش‌رونده در سازه‌های با تعداد اعضای بیشتر کمتر است.

فرانگوپل و کرلی [13] شاخص مربوط به نامعینی و المان کلیدی را مطرح نمودند و به بررسی عدم قطعیت‌های در خرپاها پرداختند. در پژوهش انجام شده چنین استنتاج شد که در نظرگیری عدم قطعیت‌ها می‌تواند در تعیین المان کلیدی مؤثر باشد. در تحقیقی دیگر توسط ایتو و همکاران در سال ۲۰۱۴ [14] در پی اعمال یک تغییر شکل بزرگ، به بررسی پتانسیل انهدام پیش‌رونده دارای عمل زنجیره‌وار در سازه پرداختند. در تحقیق مذکور، تحلیل حساسیت دو نوع سازه قاب‌بندی شده، یک قاب منظم چندطبقه دارای سیستم خرابایی و بدون سیستم خرابایی یا سیستم ابرسازه‌ای^۱ و یک سازه درختی شکل انجام شده است. زمانی که سازه‌ی قاب‌بندی شده دارای سیستم خرابایی است این سیستم احتمال خرابی در ستون‌ها را در سازه کاهش داده است.

در پژوهشی دیگر خیرالدین و مداحی در سال ۱۳۹۵ [15] به مطالعه خرابی پیش‌رونده در قاب خمشی فولادی با پلان L شکل پرداختند. در پژوهش مذکور با انجام تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی و با توجه به شاخص حساسیت استنباط شد که در سازه قاب خمشی فولادی با پلان L شکل، حذف ستون مرکزی وضعیت بحرانی‌تری را در خرابی پیش‌رونده ایجاد می‌کند.

در تحقیق صورت گرفته در سال ۲۰۰۹ توسط کیم [16] بر روی قاب‌ها، به بررسی انهدام پیش‌رونده‌ی قاب‌ها پرداخته شده است و قاب‌های خمشی در برابر بارهای جانبی وارده رفتار بهتری را در انهدام پیش‌رونده از خود نشان می‌دهند. در تحقیق مذکور به تحلیل قاب‌ها به دو روش استاتیکی خطی و دینامیکی غیرخطی پرداخته شده است. اگر ستون‌های گوشه‌ای در پلان تخریب شوند پتانسیل خرابی به شدت افزایش می‌یابد و با افزایش تعداد طبقات مقاومت در برابر انهدام پیش‌رونده افزایش می‌یابد و احتمال وقوع انهدام پیش‌رونده کاهش می‌یابد.

در پژوهش صورت گرفته در سال ۲۰۱۲ توسط محرابی و همکاران [17]، مطالعه‌ای بر روی ۴۶ مدل سازه‌ی فولادی برای بررسی

³ The US General Services Administration

⁴ United States Department of Defense

¹ megastructural system

² Key element

تأثیر موقعیت ستون حذف شده در پتانسیل وقوع انهدام پیش‌رونده در سازه پرداخته شده است. مباحث مورد بررسی در دو سازه فولادی و بتن‌آرمه بررسی شده‌اند مدل‌های سازه‌ای در نرم‌افزار ETABS-2020 مدل‌سازی شده است و تحلیل استاتیکی غیرخطی بار افزاینده قائم^۴ بر روی آن صورت پذیرفته است. تکیه‌گاه‌های سازه به صورت گیردار در نظر گرفته شده‌اند.

تحلیل حساسیت در انهدام پیش‌رونده به وسیله شاخص حساسیت که از طریق میزان ظرفیت باربری سازه‌ی حذف ستون شده و ظرفیت باربری سازه‌ی اولیه انجام پذیرفته است. بررسی عملکرد تسلسل وار و موقعیت ستون حذف شده از دیگر اهداف این پژوهش می‌باشد. لازم به ذکر است که بحث شمع‌بندی در هنگام حذف ستون ضریب دینامیکی وارده بر سازه به علت حذف ناگهانی ستون و ضربه‌ی ناشی از این حذف ناگهانی ستون را از بین می‌برد و مدل‌سازی و تحلیل جداگانه‌ای برای این موضوع در تحلیل حاضر صورت پذیرفته است و اثرات آن در انهدام پیش‌رونده بررسی شده است.

۲- بررسی تأثیر شمع‌بندی در انهدام پیش‌رونده

شمع‌بندی یکی از تکنیک‌های اجرایی جهت اجرای المان‌های خمشی است که از بارگیری و تغییر شکل عضو قبل از گیرش نهایی بتن جلوگیری می‌نماید. اساس کار شمع‌بندی انتقال بار از طریق سازه موقت (شمع) می‌باشد.

همواره یکی از موارد استفاده‌ی شمع‌بندی در مهندسی عمران در هنگام بهسازی و مقاوم‌سازی سازه‌ها بوده است. در زمان باربرداری از سازه و زمان حذف قسمت یا عضوی از سازه همچون ستون، برای جلوگیری از اعمال ناگهانی بار عضو حذف شده به بقیه‌ی اعضای سازه و متعاقباً جلوگیری از انهدام پیش‌رونده‌ی ناشی از اعمال ناگهانی بار عضو حذف شده به سازه و بار دینامیکی ناشی از حذف ناگهانی عضو به سازه، از شمع‌بندی استفاده می‌شود. زمانی که ستونی از سازه به دلایل مختلف همچون ملاحظات معماری حذف می‌شود تعداد دهانه‌ها از دو دهانه در قسمتی از سازه به تک دهانه کاهش پیدا می‌کند که این موضوع با کاهش نامعینی سازه و افزایش تنش‌ها در اعضای دیگر بعد از

همچنین ابراهیم و همکاران در سال ۲۰۲۳ [22] با ارائه‌ی راهکاری برای در نظرگیری ضریب دینامیکی مرتبط با حذف ناگهانی ستون‌ها روش نوینی را برای مباحث انهدام پیش‌رونده سازه‌ها ارائه نمودند. مطالعات صورت گرفته نشان‌دهنده و حاکی از بهتر بودن حذف و انهدام ستون‌ها یا دیوارهای برشی در طبقات بالایی نسبت به طبقات زیرین برای عدم رخداد انهدام پیش‌رونده است؛ زیرا طبقات بیشتری برای جذب انرژی آزاد شده شرکت می‌نمایند.

پژوهش دیگری توسط الساناددی و همکاران در سال ۲۰۲۳ [23] بر روی مدل‌سازی عددی ارزیابی خطر انهدام پیش‌رونده ساختمان‌های بتن‌آرمه در معرض بار انفجار صورت گرفته است. در پژوهش مذکور احتمال رخداد انهدام پیش‌رونده‌ی ناشی امواج انفجار را مورد بررسی قرار گرفته است.

تحقیق صورت گرفته توسط اکرامی کاخکی و همکاران در سال ۲۰۲۳ [24] بر روی بررسی عددی انهدام پیش‌رونده‌ی سازه‌های دیوار- قاب بتن‌آرمه با در نظرگیری اندرکنش خاک و سازه صورت گرفته است. انهدام پیش‌رونده در تحقیق مذکور بر اساس حذف ستون‌های میانی و شاخص حساسیت صورت گرفته است. برای ارزیابی اثرات اندرکنش خاک - سازه، سازه‌های دیوار- قاب به همراه خاک (خاک سخت) و پی به‌طور هم‌زمان در نرم‌افزار FLAC مدل‌سازی و با قاب‌های موجود در نرم‌افزار سائزمو استراکت^۱ مقایسه شدند. نتایج نشان داد که شاخص حساسیت با در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه در سازه‌های دیوار - قاب کاهش می‌یابد.

در مطالعه‌ی صورت گرفته توسط سانگ و همکاران در سال ۲۰۲۳ [25] بیان شده است که با استفاده از پیچ و مهره‌های فولادی ضدزنگ انعطاف‌پذیر و مقاطع/صفحات گرم نورد شده به‌عنوان اجزای اصلی اتصالات، مقاومت در برابر انهدام پیش‌رونده اتصالات تیر به ستون می‌تواند به‌طور مؤثر با هزینه‌های نسبتاً کم افزایش یابد. برای تأیید قابلیت این مفهوم، یک مطالعه عددی جامع برای بررسی عملکردهای مقاوم در برابر خرابی اتصالات صفحه انتهایی (FEP)^۲ و نبشی جان (WA)^۳ مجهز به اجزای فولاد ضدزنگ انجام شده است.

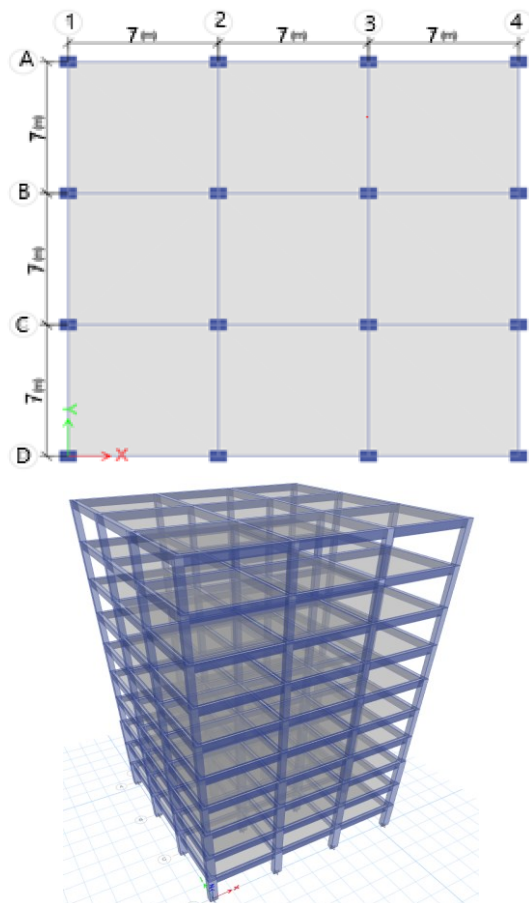
در پژوهش حاضر به بررسی اثر شمع‌بندی به هنگام حذف ستون و

³ Web angle

⁴ Push down

¹ Seismostruct

² Flush end-plate



شکل ۲- پلان مربع شکل سازه و شکل سه بعدی آن

برای تحلیل و طراحی از مبحث نهم مقررات ملی ساختمان سال ۱۳۹۹ [26]، استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم [27] و مبحث ششم مقررات ملی ساختمان [28] استفاده شده است. برای تحلیل استاتیکی غیرخطی افزاینده‌ی قائم از آیین‌نامه‌ی GSA-2013 [2] استفاده شده است. کاربری ساختمان اداری می‌باشد و بار مرده‌ی ناشی از کف سازی وارد به طبقات طبق مبحث ششم مقررات ملی $2 \frac{kN}{m^2}$ و بار زنده‌ی طبقات $2/5$ در نظر گرفته شده است بار مرده‌ی ناشی از کف‌سازی وارد به بام $3 \frac{kN}{m^2}$ و بار زنده‌ی آن $1/5 \frac{kN}{m^2}$ در نظر گرفته شده است. ابعاد ستون‌ها و تیرها برای سازه‌ی بتنی و فولادی اولیه به ترتیب در جداول ۱ و ۲ ارائه گردیده است. فرضیات تحقیق: تکیه‌گاه‌های سازه به صورت گیردار در نظر گرفته شده‌اند. منطقه‌ی مورد مطالعه خطرپذیری زیادی دارد و خاک مورد بررسی از تیپ نوع II است. آرماتورهای استفاده شده تنش تسلیم 40 مگاپاسکال دارند. بتن استفاده شده مقاومت فشاری مشخصه‌ی 25 مگاپاسکال دارد.

حذف ستون خود را نشان می‌دهد. شمع‌بندی می‌تواند اعمال بار اضافی وارده را یکنواخت‌تر نماید و مانع ایجاد ضربه‌ی ناگهانی و اعمال بار دینامیکی به سازه شود. در شکل ۱ کاربرد شمع‌بندی در هنگام مقاوم‌سازی و حذف ستون و همچنین استفاده از روشی خاص به وسیله‌ی پروفیل‌های فولادی برای جلوگیری از اعمال ضربه و بار دینامیکی و مقاوم‌سازی سازه مشاهده می‌شود.



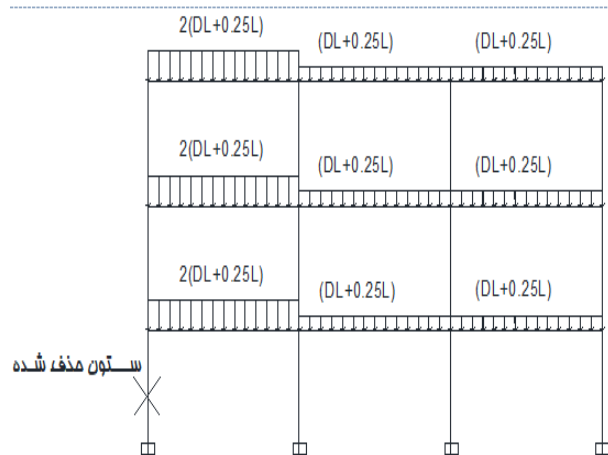
شکل ۱- شمع‌بندی و استفاده از پروفیل‌ها به روشی خاص برای جلوگیری از انهدام پیش‌رونده‌ی ناشی از برداشتن ستون به علت ملاحظات معماری

۳- مدل‌سازی

مدل‌های پیاده‌سازی شده سه‌بعدی در پژوهش حاضر عبارت است از: مدل سازه‌ای بتن آرمه با سیستم باربر جانبی قاب خمشی ویژه در دو راستا و مدل سازه‌ای فولادی با سیستم باربر جانبی قاب خمشی ویژه در دو راستا. سیستم سقف مدل‌سازی شده برای سازه‌ی بتنی و فولادی به ترتیب دال بتن آرمه و سیستم عرشه فولادی است. سازه‌های مدل‌سازی شده دارای ۱۰ طبقه می‌باشند. پلان سازه‌ای مورد بررسی قرار گرفته در تمامی سازه‌ها یکسان در نظر گرفته شده است. پلان به صورت مربع شکل است و دارای ۳ دهانه در هر جهت است. طول دهانه‌های موجود پلان ۷ متر می‌باشد. ارتفاع هر طبقه ۴ متر است. پلان سازه‌ی مدل‌سازی شده به همراه تصویر سه‌بعدی سازه در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

نیروی برابر با نیرویی که ستون تحمل می کند و در خلاف جهت آن وارد می گردد تا تعادل استاتیکی نقطه حفظ شود. سپس نقطه‌ی مورد نظر به سمت پایین کشیده می شود و این کشیده شدن و تغییر مکان وارده تا زمان فروریزش ادامه می یابد.

بر اساس آیین نامه‌ی مدیریت تعمیرات کلی ایالات متحده امریکا [2] GSA-2013، ترکیب بارهای ثقلی وارد به سازه به صورت DL+0/25L به سازه اعمال گردیده است. این موضوع در حالی است که برای دهانه‌های مجاور ستون حذف شده ضریب بزرگنمایی دینامیکی ۲ در ترکیب بار مذکور ضرب شده است و نتیجه به صورت 2(DL+0/25L) اعمال می گردد (شکل ۳). لازم به ذکر است که در هنگام شمع بندی و حذف ستون ضریب بزرگنمایی دینامیکی ۲ به سازه‌ی حذف عضو شده اعمال نمی گردد؛ زیرا شمع بندی اثر ضربه‌ی ناگهانی وارد به سازه به علت حذف ستون را از بین می برد. در این تحلیل از روش جابجایی- کنترل^۲ استفاده شده است که جابجایی هدف به عنوان جابجایی در نظر گرفته شده برای جابجا شدن سازه قبل از فروریزش است.



شکل ۳- ترکیب بارها در تحلیل استاتیکی غیرخطی افزایشی قائم بر اساس آیین نامه‌ی GSA [2]

۳-۲- موقعیت ستون‌های حذف شده در سازه

همان طور که در شکل ۴ مشاهده می شود. ستون‌های حذف شده در پلان پژوهش حاضر ستون‌های D3، D4 و C3 در نظر گرفته شده‌اند. اثر حذف هر کدام از ستون‌ها در انهدام پیش رونده به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است. ستون D4 در

جدول ۱- مشخصات ابعادی ستون و تیرهای سازه‌ی بتن آرمه اولیه

طبقه	ستون‌های کناری	ستون‌های میانی	تیرهای میانی	تیرهای پیرامونی
۱	مستطیلی ۸۰*۶۰	مستطیلی ۸۰*۶۰	مستطیلی ۷۰*۴۰	مستطیلی ۸۰*۴۰
۳-۲	مستطیلی ۸۰*۵۰	مستطیلی ۸۰*۶۰	مستطیلی ۷۰*۴۰	مستطیلی ۸۰*۴۰
۶-۴	مربعی ۵۰*۵۰	مستطیلی ۸۰*۵۰	مستطیلی ۷۰*۴۰	مستطیلی ۸۰*۴۰
۱۰-۷	مستطیلی ۴۰*۵۰	مستطیلی ۴۰*۵۰	مستطیلی ۷۰*۴۰	مستطیلی ۷۰*۴۰

جدول ۲- مشخصات ابعادی ستون و تیرهای سازه‌ی فولادی اولیه

طبقه	ستون‌های کناری	ستون‌های میانی	تیرهای میانی	تیرهای پیرامونی
۱	قوطی 45*45	قوطی 45*45	تیرورق ۲۵*۵۵	تیرورق ۲۵*۵۵
۳-۲	قوطی 45*45	قوطی 45*45	تیرورق ۲۵*۵۵	تیرورق ۲۵*۵۵
۶-۴	قوطی 40*40	قوطی 40*40	تیرورق ۲۵*۴۰	تیرورق ۲۵*۴۰
۱۰-۷	قوطی ۳۵*۳۵	قوطی ۳۵*۳۵	تیرورق ۲۵*۴۰	تیرورق ۲۵*۴۰

۳-۱- تحلیل استاتیکی غیرخطی بار افزایشی قائم

از روش‌های مرسوم تحلیل استاتیکی برای استفاده در مباحث انهدام پیش رونده به روش تحلیل استاتیکی بار افزایشی قائم اشاره شده است. این روش، شبیه به روش تحلیل بار افزون^۱ می باشد. یکی از تفاوت‌های این روش وارد شدن بار به صورت قائم است در حالی که در تحلیل بار افزون بار به صورت افقی و جانبی به سازه وارد می شود.

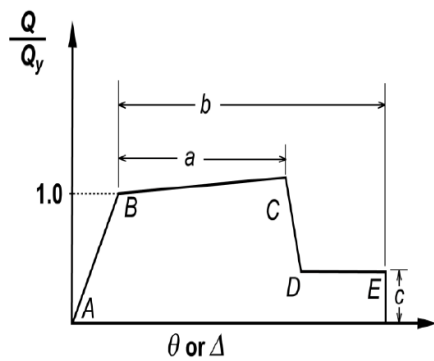
در تحلیل استاتیکی بار افزون قائم تغییر مکان قائمی متناظر با نیروی تحمل شده توسط عضو حذف شده در انهدام پیش رونده اعمال می شود و این روند تا زمان انهدام سازه ادامه می یابد. برای وجود تعادل استاتیکی در نقطه‌ای که حذف عضو صورت پذیرفته است؛

² Displacement control

¹ Push over

پایه با تغییر مکان جانبی سازه‌ای توصیه شده در نشریه ی ۳۶۰ نشان داده شده است. در منحنی مذکور نقاط B و C نشان دهنده مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی هستند. نقاط D و E نشان دهنده حالت شکست اولیه و نهایی هستند. این نقاط ویژگی‌های رفتار غیرخطی یک سازه را نشان می‌دهند که در آیین‌نامه ی ASCE/SEI-41-17 [31] تعریف شده‌اند. Q_y مقاومت مورد انتظار عضو می‌باشد.

شکل ۵ بر اساس سطوح عملکردی سازه‌ای و غیر سازه‌ای ترسیم و ارائه شده است. به مجموع سطوح عملکردی سازه‌ای و غیر سازه‌ای، سطح عملکردی ساختمان گفته می‌شود. سطوح عملکردی اجزای سازه‌ای به ۴ سطح عملکردی اصلی و ۲ سطح عملکردی میانی تقسیم می‌شود. سطوح عملکردی اصلی عبارت‌اند از قابلیت استفاده ی بی‌وقفه، ایمنی جانی، آستانه ی فروریزش، لحاظ نشده. سطوح عملکردی میانی به دو سطح خرابی محدود و ایمنی جانی تقسیم‌بندی می‌شود. همچنین سطوح عملکردی اجزای غیر سازه‌ای عبارت‌اند از A: خدمت‌رسانی بی‌وقفه، B: قابلیت استفاده ی بی‌وقفه، C: ایمنی جانی، D: ایمنی جانی محدود، E: لحاظ نشده. سطوح عملکردی ساختمان عبارت‌اند از خدمت‌رسانی بی‌وقفه (A-OP¹، قابلیت استفاده ی بی‌وقفه (B-1) IO³، ایمنی جانی (C-LS³ 1)، آستانه ی فروریزش (E-5) CP⁴.



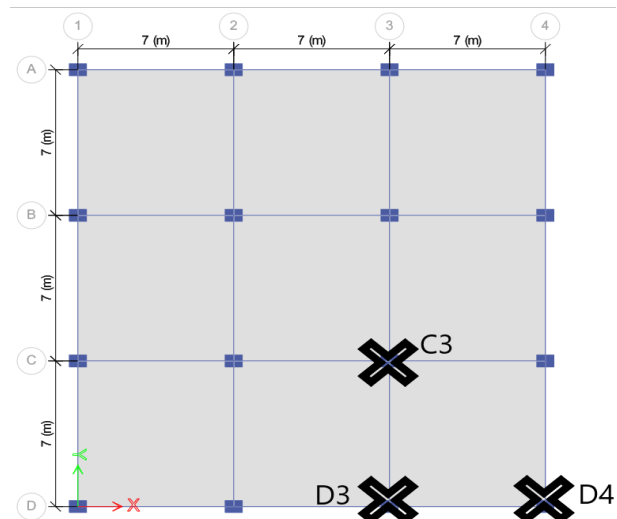
شکل ۵- برش پایه - تغییر مکان جانبی [29-30]

۳-۳- تعیین المان کلیدی در انهدام پیش‌رونده و تحلیل حساسیت سازه در انهدام پیش‌رونده

برای تعیین المان کلیدی در انهدام پیش‌رونده، ابتدا سازه بدون حذف ستون و با تحلیل استاتیکی خطی مورد بررسی قرار گرفته است و

گوشه ی ساختمان قرار گرفته است و انهدام آن باعث ایجاد کنسول بزرگ در گوشه ی سازه می‌شود و عمل پل زدن و انتقال بار ستون منهدم شده به اعضای دیگر به علت اتصال اعضای کمتر نسبت به ستون‌های D3 و C3 با کیفیت کمتری رخ داده و انتظار می‌رود که در انهدام پیش‌رونده ی سازه تأثیر بیشتری را از خود نشان دهد و المان کلیدی محسوب شود.

یکی از مسائل مهم در مقاومت در برابر انهدام پیش‌رونده پل زدن بین اعضا بعد از فقدان عضو می‌باشد و در طی این پدیده بار تحمل شده توسط عضو مفقوده از طریق مسیرهای جایگزین به اعضای دیگر انتقال می‌یابد. هر چقدر نامعینی سازه بیشتر باشد می‌تواند امتیازی در بحث افزایش تعداد مسیرهای جایگزین و پل زدن تلقی شود.



شکل ۴- ستون‌های حذف شده در انهدام پیش‌رونده در پلان طبقات

در تحلیل استاتیکی غیرخطی بار افزاینده قائم نقطه ی کنترل باید به مقدار جابجایی هدف جابجا شود و سازه فروریزد. مقدار تغییر مکان هدف از رابطه ی (۱) به دست می‌آید [29-30]:

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad (1)$$

در رابطه ی (۱)، T_e ، C_0 ، C_1 ، C_2 و S_a به ترتیب زمان تناوب مؤثر اصلی ساختمان، ضریب اصلاح برای ارتباط تغییر مکان طیفی، ضریب اعمال تغییر مکان غیر ارتجاعی سیستم، ضریب کاهش اثرات سختی و مقاومت اعضای سازه، شتاب طیفی به ازای زمان تناوب مؤثر نشریه ۳۶۰ [29] می‌باشد. در شکل ۵ ارتباط بین برش

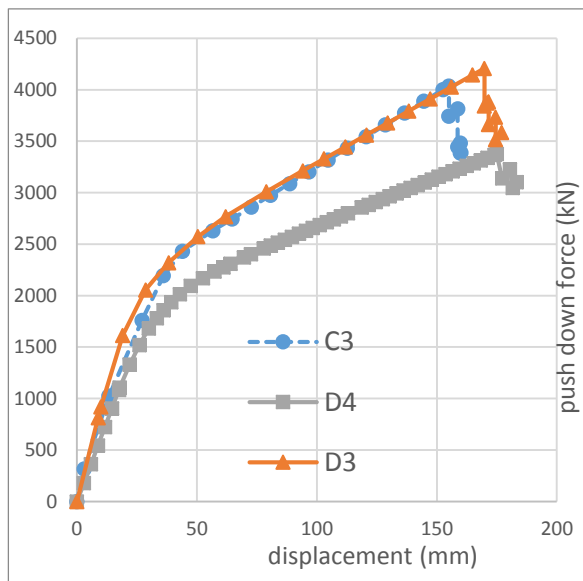
³Life Safety Performance

⁴ Collapse Prevention Performance

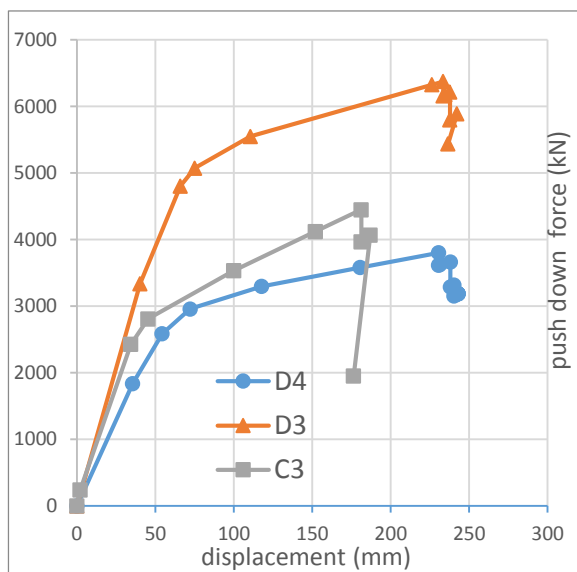
¹ Operational Performance

² Immediate Occupancy Performance

شکل ۶ و ۷ به ترتیب نشان‌دهنده منحنی تغییر مکان سازه‌ی بتن آرمه و سازه‌ی فولادی بعد از حذف ستون‌های C3، D3 و D4 است.



شکل ۶- منحنی‌های نیرو- تغییر مکان سازه‌ی بتن آرمه حذف ستون شده



شکل ۷- منحنی‌های نیرو- تغییر مکان سازه‌ی فولادی حذف ستون شده

همان‌طور که در شکل ۶ و ۷ مشاهده می‌شود ظرفیت سازه‌ی حذف ستون شده به وسیله‌ی تحلیل استاتیکی غیرخطی به‌دست آمده است. از طریق اطلاعات به‌دست آمده به محاسبه‌ی شاخص حساسیت برای هر کدام از ستون‌ها پرداخته شده است. در جداول ۳ و ۴ شاخص حساسیت ستون‌ها در سازه‌ی بتن آرمه و فولادی نشان داده شده است.

طراحی شده است؛ سپس بیشترین ظرفیت سازه به‌عنوان λ_0 در نظر گرفته شده است. در گام بعد سازه یکی از ستون‌های سازه حذف شده است و ترکیب بار $2(DL+0/25L)$ برای دهانه‌های اطراف ستون حذف شده اعمال شده است. در نقطه‌ی حذف ستون بار متناظر با ستون حذف شده به‌صورت استاتیکی و به سمت خلاف جهت بار وارد می‌شود. سپس نقطه‌ی حذف ستون به‌عنوان نقطه‌ی کنترل در نظر گرفته شده است، تحلیل استاتیکی غیرخطی بار افزاینده‌ی قائم صورت گرفته است و ظرفیت سازه حذف ستون شده (آسیب‌دیده) با توجه به نمودارهای به‌دست آمده از تحلیل به‌عنوان λ_{damage} معرفی شده است. سپس به محاسبه‌ی شاخص حساسیت برای ستون حذف شده از طریق رابطه‌ی (۲) اقدام شده است [2].

$$SI = \frac{\lambda_0 - \lambda_{damage}}{\lambda_0} \quad (2)$$

در رابطه‌ی (۲)، λ_0 ظرفیت باربری سازه‌ی اولیه، λ_{damage} ظرفیت سازه‌ی آسیب‌دیده (حذف عضو شده) و SI شاخص حساسیت سازه می‌باشد. این روند برای تمامی ستون‌ها صورت گرفته است و میزان SI که همان شاخص خرابی است برای هر ستون مشخص شده است. اگر SI مقدار کمتری داشته باشد نشان‌دهنده‌ی توانایی و ظرفیت بیشتر سازه بعد از حذف المان حذف شده است که نشان‌دهنده‌ی دور شدن المان از عنوان المان کلیدی است. اگر SI مقدار بیشتری داشته باشد نشان‌دهنده‌ی ظرفیت پایین سازه بعد از حذف المان و بعد از خرابی است؛ که این امر نشان‌دهنده‌ی حساسیت بالای المان است زیرا بعد از حذف المان ظرفیت سازه با افت بسیار زیادی روبرو بوده است. المانی که بالاترین SI را دارا می‌باشد؛ در انهدام پیش‌رونده المان کلیدی در نظر گرفته می‌شود.

۴- بررسی شاخص حساسیت ستون‌ها و مشخص نمودن المان کلیدی

یکی از روش‌های تشخیص المان کلیدی و به‌دست آوردن شاخص حساسیت در انهدام پیش‌رونده، استفاده از تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی بار افزاینده‌ی قائم است. برای هر سه ستون مورد مطالعه قرار گرفته در پژوهش حاضر در طبقه‌ی اول سازه‌ی فولادی و بتنی منحنی‌های نیرو- تغییر مکان بعد از حذف ستون ترسیم شده است.

¹ Sensitivity Index

جدول ۳- شاخص حساسیت ستون‌های حذف‌شده در سازه‌ی بتن آرمه

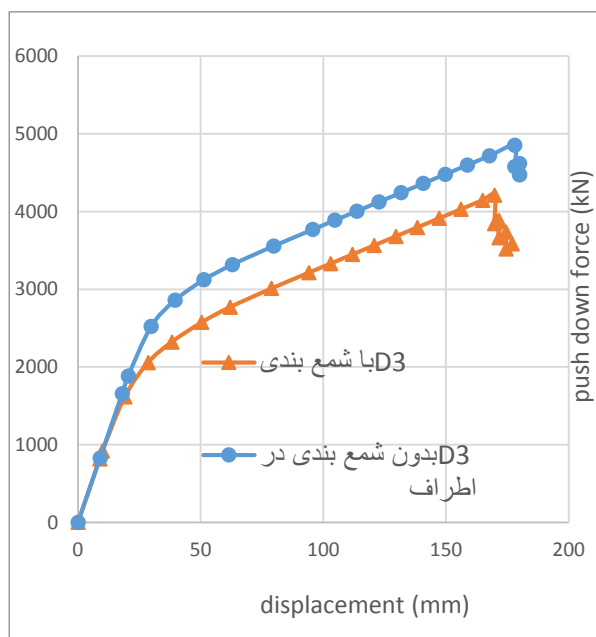
اسم ستون	λ_0 (kN)	λ_{damage} (kN)	SI	درصد خرابی	المان کلیدی (المان بحرانی)
D3	11463	3587/07	۰/۶۸۷	۶۸/۷	
D4	11463	3104	۰/۷۳	۷۲/۹	✓
C3	11463	3393.1	۰/۷	۷۰/۴	

جدول ۴- شاخص حساسیت ستون‌های حذف‌شده در سازه‌ی فولادی

اسم ستون	λ_0 (kN)	λ_{damage} (kN)	SI	درصد خرابی	المان کلیدی (المان بحرانی)
D3	12219	6374/91	۰/۴۷	۴۷/۸	
D4	۱۲۲۱۹	3804/98	۰/۶۸۸	۶۸/۸	✓
C3	۱۲۲۱۹	4454.18	۰/۶۵۳	۶۵/۳	

۵- بررسی اثر شمع‌بندی بر شاخص حساسیت انهدام پیش‌رونده

شمع‌بندی در ناحیه‌ی اطراف ستون حذف‌شده‌ی D3 انجام گرفته است و اثرات آن در شاخص حساسیت انهدام پیش‌رونده در دو سازه‌ی فولادی و بتنی مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۸ و ۹ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی منحنی نیرو و تغییر مکان سازه‌ی بتن آرمه با حذف ستون D3 و سازه‌ی فولادی با حذف ستون D3 هستند و شکل ۱۰ نشان‌دهنده دو سازه‌ی بتنی و فولادی حذف ستون شده است.



شکل ۸- منحنی نیرو-تغییر مکان سازه‌ی بتن آرمه با حذف ستون D3 با در نظرگیری شمع‌بندی و بدون شمع‌بندی

با توجه به نتایج به‌دست آمده مشاهده می‌شود که ستون D4 (ستون گوشه) نسبت به ستون‌های دیگر از λ_{damage} کمتر و SI بیشتری برخوردار است. مقدار λ_{damage} ستون D4 در سازه‌ی بتن آرمه ۳۱۰۴ kN و در سازه‌ی فولادی ۳۸۰۴/۹۸ kN است. مقدار SI ستون D4 در سازه‌ی بتن آرمه ۰/۷۲ و در سازه‌ی فولادی ۰/۶۸ هست.

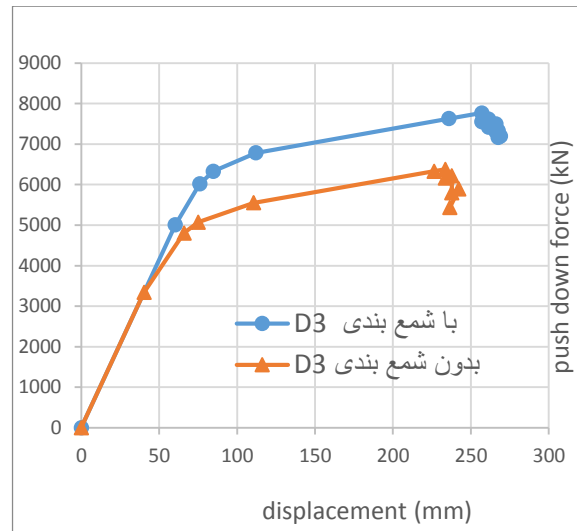
این موضوع نشان‌دهنده‌ی حساسیت بالای این المان نسبت به المان‌های بررسی‌شده‌ی دیگر است. اگر المان مذکور تخریب شود؛ احتمال رخداد انهدام پیش‌رونده و در نهایت انهدام کل سازه بیشتر است. همان‌طور که انتظار می‌رفت حذف ستون D4 به علت ایجاد کنسول بزرگ در گوشه‌ی سازه، وجود مسیرهای انتقال بار کمتر و توانایی کمتر در پل زدن، عضوی بحرانی‌تر در انهدام پیش‌رونده محسوب می‌شود؛ که این امر به‌وسیله‌ی محاسبه و مقایسه‌ی شاخص حساسیت ستون D4 با ستون‌های مورد مطالعه‌ی دیگر اثبات شده است.

در جایگاه بعد ستون C3 (ستون میانی) قرار گرفته است. این ستون شاخص حساسیت ۰/۷۳ را در سازه‌ی بتن آرمه و ۰/۶۵ را در سازه‌ی فولادی دارا است؛ که شاخص حساسیت بالاتری نسبت به ستون D3 است و کمترین حساسیت نیز متعلق به ستون (ستون کناری) D3 با شاخص حساسیت ۰/۶۸. در سازه‌ی بتن آرمه و شاخص حساسیت ۰/۴۷ در سازه‌ی فولادی است. با توجه به مسائل مطرح‌شده ستون D4 المان کلیدی در انهدام پیش‌رونده در سازه‌ی بتن آرمه محسوب شده است.

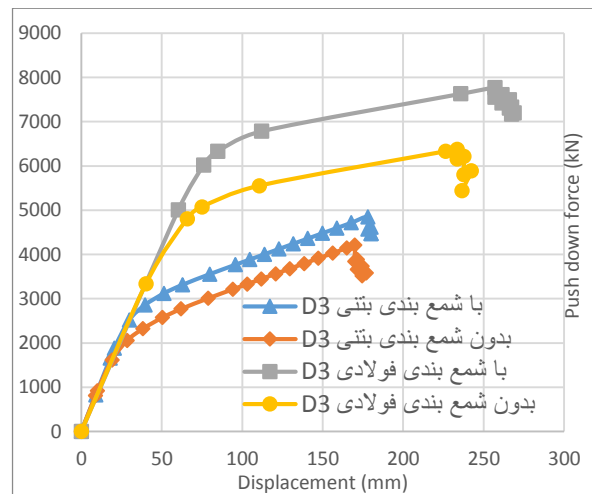
جدول ۵ و ۶ میزان شاخص حساسیت ستون محذوف D3 را با در نظرگیری اثر شمع‌بندی و بدون شمع‌بندی نشان می‌دهند. مقادیر λ_0 و λ_{damage} نیز در جدول ۴ برای سازه با حذف ستون D3 با دو حالت در نظرگیری اثر شمع‌بندی در اطراف ستون و بدون در نظرگیری اثر شمع‌بندی مشخص شده فولادی است.

همان‌طور که در جداول ۵ و ۶ مشاهده می‌شود اثر شمع‌بندی باعث افزایش میزان λ_{damage} در سازه شده است و مقدار این پارامتر در سازه‌ی بتن آرمه از ۳۵۸۷/۰۷ kN به ۴۴۷۴/۳۸ kN و در سازه‌ی فولادی از ۴۴۴۷/۳۱ به ۷۷۷۱/۷۷ افزایش یافته است. این موضوع به معنای افزایش میزان ظرفیت باربری سازه‌ی آسیب‌دیده (حذف ستون شده) دارای شمع‌بندی نسبت به سازه‌ی آسیب‌دیده بدون شمع‌بندی است. شمع‌بندی منجر به کاهش میزان شاخص حساسیت SI برای ستون در انهدام پیش‌رونده شده است و مقدار آن در سازه‌ی بتن آرمه از ۰/۶۸۷ به ۰/۶۰ و در سازه‌ی فولادی از ۰/۴۷ به ۰/۳۶ کاهش یافته است.

این امر حاکی از مقاومت بیشتر سازه در مقابل رخداد انهدام پیش‌رونده است و کاهش احتمال انهدام پیش‌رونده در زمان حذف ستون در صورت انجام شمع‌بندی است. شمع‌بندی عمل حذف ناگهانی ستون را که به دنبال خود اعمال ضربه و بار دینامیکی به سازه را دارا است به صورت تدریجی کرده است و به تبع آن ضریب بزرگنمایی دینامیکی حذف می‌شود. این موضوع به پایداری بیشتر سازه کمک به سزایی کرده است و بار وارده به دهانه‌های اطراف ستون محذوف را به شدت کاهش می‌دهد.



شکل ۹- منحنی نیرو-تغییر مکان سازه‌ی فولادی با حذف ستون D3 با در نظرگیری شمع‌بندی و بدون شمع‌بندی



شکل ۱۰- منحنی نیرو-تغییر مکان سازه‌های فولادی و بتنی با حذف ستون D3 با در نظرگیری شمع‌بندی و بدون شمع‌بندی

جدول ۵- شاخص حساسیت ستون‌های حذف‌شده در سازه‌ی بتن آرمه

نام ستون	λ_0 (kN)	λ_{damage} (kN)	SI	درصد خرابی
D3 بدون شمع‌بندی (حذف ناگهانی)	11463	3587/07	۰/۶۸۷	۶۸/۷
D3 دارای شمع‌بندی در اطراف (حذف تدریجی)	11463	4474/38	۰/۶۰	۶۰/۹

جدول ۶- شاخص حساسیت ستون‌های حذف‌شده در سازه‌ی فولادی

نام ستون	λ_0 (kN)	λ_{damage} (kN)	SI	درصد خرابی
D3 بدون شمع‌بندی (حذف ناگهانی)	12219	4447/31	۰/۴۷	۴۷/۸
D3 دارای شمع‌بندی در اطراف (حذف تدریجی)	12219	7771/77	۰/۳۶	۳۶/۴

در انهدام پیش‌رونده در سازه‌های فولادی و بتن آرمه پرداخته شده است. بر اساس تحلیل‌های صورت پذیرفته استاتیکی غیرخطی

۶- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به بررسی تأثیر شمع‌بندی به هنگام حذف ستون

بالای شمع‌بندی در کاهش احتمال رخداد انهدام پیش‌رونده می‌باشد. علت کاهش شاخص حساسیت ستون بعد از شمع‌بندی به دلیل تبدیل مکانیسم ناگهانی حذف ستون به مکانیسم تدریجی و به تبع آن حذف ضریب بزرگنمایی دینامیکی می‌باشد.

۷- مراجع

- [1] C. Pearson and N. Delatte, "Ronan point apartment tower collapse and its effect on building codes," *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 19, no. 2, pp. 172-177, 2005.
- [2] GSA, "Alternate path analysis & design guidelines for progressive collapse resistance," *General Services Administration*, 2013.
- [3] "Design of buildings to resist progressive collapse," *Unified Facil. Criteria*, 2005.
- [4] U. Starossek, "Progressive collapse study of a multi-span bridge," *Structural Engineering International*, vol. 9, no. 2, pp. 121-125, 1999.
- [5] J. Goodwin and M. Davis, "Buda's Wagon: A Brief History of the Car Bomb," *Archives Européennes de Sociologie*, vol. 49, no. 3, p. 444, 2008.
- [6] M. Davis, *Buda's Wagon: a brief history of the car bomb*. Verso Books, 2017.
- [7] J. G. Wood, "Pipers Row Car Park, Wolverhampton, quantitative study of the causes of the partial collapse on 20th March 1997," *SS&D Contract Report to HSE, on HSE Website*. <http://www.hse.gov.uk/research/misc/pipersrow.htm>. or go to www.hse.gov.uk, then search for 'Pipers Row'. *The first*, vol. 20, 2003.
- [8] P. Wearne, *Collapse: When buildings fall down*. TV Books Incorporated, 2000.
- [9] R. Martin and N. J. Delatte, "Another look at the L'Ambiance Plaza collapse," *Journal of performance of constructed facilities*, vol. 14, no. 4, pp. 160-165, 2000.
- [10] M. Sasani and A. Kazemi-Moghaddam, "Experimental and analytical evaluation of progressive collapse resistance of a full-scale structure following sever loss of load bearing elements," in *Applied Mechanics and Materials*, 2011, vol. 82, pp. 326-331: Trans Tech Publ.
- [11] N. Mashhadiali and A. Kheyroddin, "Progressive collapse assessment of new hexagrid structural system for tall buildings," *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, vol. 23, no. 12, pp. 947-961, 2014.
- [12] Kim, J. and Hong, S. (2012). *Progressive Collapse Performance of Irregular Buildings*. *Structu Design of Tall and Special*

افزاینده‌ی قائم شاخص حساسیت برای سه ستون C3، D3 و D4 در سازه‌ی بتن آرمه و سازه‌ی فولادی به ترتیب ۰/۷۲، ۰/۶۸۷، ۰/۷۰، ۰/۶۸۸، ۰/۴۷، ۰/۶۵ و ۰/۶۵ است. ستون D4 به علت داشتن شاخص حساسیت بیشتر نسبت به ستون‌های مورد مطالعه‌ی دیگر در هر دو سازه‌ی ۱۰ طبقه‌ی فولادی و بتن آرمه دارای حساسیت بیشتری در انهدام پیش‌رونده‌ی سازه است و به‌عنوان المان کلیدی در انهدام پیش‌رونده از آن یاد شده است.

علت حساسیت بالا در ستون D4 (ستون گوشه) و انتخاب این ستون به علت زیاد بودن شاخص حساسیت انهدام پیش‌رونده به‌عنوان المان کلیدی در بین ستون‌های دیگر به دلیل ایجاد کنسولی بزرگ در گوشه‌ی سازه بعد از حذف ستون D4 می‌باشد. حذف ستون مذکور به علت تعداد کم مسیرهای جایگزین بار و کاهش توانایی پل زدن، احتمال وقوع انهدام پیش‌رونده در سازه را افزایش داده است و این ستون در انهدام پیش‌رونده‌ی سازه از حساسیت بیشتری برخوردار است.

یکی از موارد تشدیدکننده‌ی انهدام پیش‌رونده در سازه‌ها حذف ناگهانی اعضا همچون حذف ناگهانی ستون می‌باشد. این حذف ناگهانی باعث ایجاد ضربه در نقطه‌ی متناظر با حذف عضو درون سازه است. ضربه‌ی حاصله از حذف ناگهانی ستون به‌صورت ضریب بزرگنمایی دینامیکی در ترکیب بار اعمالی بروز داده شده است. این امر باعث ایجاد یک اضافه‌بار به سازه در دهانه‌های اطراف ستون حذف شده است. در مقاوم‌سازی و بهسازی سازه‌ها گاهی اوقات طرح بهسازی به حذف ستون در سازه می‌انجامد. با توجه به نتایج استخراج شده از تحقیق حاضر یکی از روش‌های کاهش احتمال وقوع انهدام پیش‌رونده در این طرح‌ها اقدام به شمع‌بندی در اطراف ستون قبل از تخریب و حذف کردن ستون می‌باشد.

شاخص حساسیت در انهدام پیش‌رونده به‌دست آمده بر اساس تحلیل‌های صورت پذیرفته برای ستون D3 (ستون کناری) بدون شمع‌بندی در اطراف ستون در سازه‌ی بتن آرمه ۰/۶۸۷ و در سازه‌ی فولادی ۰/۴۷۸ است در حالی که شاخص حساسیت برای ستون D3 با اعمال شمع‌بندی در اطراف ستون در سازه‌ی بتن آرمه ۰/۶۰ و در سازه‌ی فولادی ۰/۳۶ است. کاهش چشم‌گیر شاخص حساسیت بعد از اعمال شمع‌بندی در اطراف ستون در سازه‌ی بتن آرمه ۱۱٪ و در سازه‌ی فولادی ۲۳٪ است. این موضوع نشان‌دهنده‌ی توانایی

- [24] S. A. Ekrami Kakhki, A. Kheyroddin, and A. Mortezaei, "Numerical Investigation of the Progressive Collapse of the Reinforced Concrete Wall-Frame Structures Considering the Soil-Structure Interaction," *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 17, no. 1, p. 22, 2023.
- [25] Y. Song, M. C. Yam, and J. Wang, "Enhanced progressive collapse resistance of bolted beam-to-column connections with ductile stainless steel components," *Engineering Structures*, vol. 275, p. 115337, 2023.
- [26] 9 Code, Design and implementation of reinforced concrete structures, Mabhas 9, 99st Version (In Persian). 2021.
- [27] 2800 Code, 2800 Code, Seismic resistant desing of buildings-Code of the practice of Iran. 4st version (In Persian).
- [28] 6 Code, Loads on the building, Mabhas 6 (In Persian).
- [29] دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمان های موجود (نشریه ۳۶۰)، تجدید نظر اول سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، معاونت امور فنی، دفتر امور فنی و تدوین معیارها (۱۳۹۲)
- [30] ق. تکلیمی، س. مرضیه، و خیرالدین، "بررسی اثر تیر طره در خرابی پیشرونده سازه‌های بتن آرمه با سیستم مقاوم دوگانه،" *تحقیقات بتن، دوره ۱۵، شماره ۳، صفحات ۸۱ تا ۹۲، تاریخ انتشار ۲۰۲۲.*
- [31] ASCE standard ASCE/SEI 41-17, American Society of Civil Engineers, Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings. 2018.
- Buildings, 20, 721–734.
- [13] D. M. Frangopol and J. P. Curley, "Effects of damage and redundancy on structural reliability," *Journal of structural engineering*, vol. 113, no. 7, pp. 1533-1549, 1987.
- [14] T. Ito and T. Takemura, "Sensitivity Analysis Related to Redundancy of Regular and Irregular Framed Structures after Member Disappearance," *International Journal of High-Rise Buildings*, vol. 3, no. 4, pp. 297-304, 2014.
- [15] خیرالدین، ع. و مداحی، م. (۱۳۹۵). بررسی خرابی پیشرونده در قاب های خمشی فولادی با پلان L شکل به کمک آنالیز حساسیت. مهندسی سازه و ساخت، شماره (۲)، صفحه ی ۷۳ تا ۸۵
- [16] J. Kim and T. Kim, "Assessment of progressive collapse-resisting capacity of steel moment frames," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 65, no. 1, pp. 169-179, 2009.
- [17] F. Mehrabi, A. Kheiroddin, and M. Gerami, "A SSESMENT OF PROGRESSIVE COLLAPSE P OTENTIAL OF STEEL STRUCTURES THAT A RE DESIGNED ON IRANIAN CODE," *Sharif Journal of Civil Engineering*, vol. 2, no. 4, pp. 65-72, 2012.
- [18] A. Kheyroddin, M. K. Sharbatdar, and A. Farahani, "Effect of structural height on the location of key element in progressive collapse of RC structures," *Civil Engineering Infrastructures Journal*, vol. 52, no. 1, pp. 41-58, 2019.
- [19] Y. Wang, B. Zhang, X.-L. Gu, and F. Lin, "Experimental and numerical investigation on progressive collapse resistance of RC frame structures considering transverse beam and slab effects," *Journal of Building Engineering*, vol. 47, p. 103908, 2022.
- [20] Z. Zhao et al., "Experimental and numerical investigation of dynamic progressive collapse of reinforced concrete beam-column assemblies under a middle-column removal scenario," in *Structures*, 2022, vol. 38, pp. 979-992: Elsevier.
- [21] P. Neeraja and K. Anish, "Investigation on progressive collapse failure in a multistorey irregular structure," *Materials Today: Proceedings*, vol. 51, pp. 538-542, 2022.
- [22] A. Ibrahim, D. Makhloof, and X. Ren, "Probabilistic progressive collapse assessment for RC framed-wall structure," in *Structures*, 2023, vol. 48, pp. 551-575: Elsevier.
- [23] H. Elsanadedy, M. Khawaji, H. Abbas, T. Almusallam, and Y. Al-Salloum, "Numerical modeling for assessing progressive collapse risk of RC buildings exposed to blast loads," in *Structures*, 2023, vol. 48, pp. 1190-1208: Elsevier.

Investigating the effect of piling during column removal in the progressive collapse of steel and reinforced concrete structures

Ali kheyroddin

Distinguished Professor of Structure Department, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Iran.

Ehsan jahankhani *

Ph.D. student in structural civil engineering at Semnan University.

Mehdi fakhreddin

Ph.D. student in structural civil engineering at Semnan University.

Abstract

In the discussion of progressive collapse, the failure of a member can cause a chain, sequential and consecutive destruction of members and ultimately lead to the destruction of a part of the structure or the complete collapse of the structure. One of the most important issues in the discussion of progressive collapse control and its prevention is determining the key element and strengthening it, which can prevent the total destruction of the structure or a large part of the structure. One of the other very important issues in the field of progressive collapse is the discussion of the dynamic load resulting from the sudden removal of members. In the current research, 10-story steel and reinforced concrete structures, both with a special bending frame lateral resistance system, have been investigated. In order to determine the key element, the method of sensitivity index and push down analysis was used. With the investigations carried out in this research, the column in the corner of the current building plan has a higher damage index. This index is 0.72 and 0.68 in two concrete and steel structures, respectively. In the current research, the effect of piling at the place of column removal in the progressive collapse of steel and reinforced concrete structures has been investigated; This reduces the damage index of the desired member in the reinforced concrete and steel structure. The value of failure index in one of the studied columns in reinforced concrete and steel structure has decreased from 0.68 to 0.60 and from 0.47 to 0.36, respectively. The percentage of sensitivity index reduction in reinforced concrete structure and steel structure is 11%, respectively. is 23%; which indicates the better performance of the piled structure in progressive collapse. As can be seen, the steel structure has a lower failure index than the corresponding reinforced concrete structure and has shown better performance in the present study in progressive collapse. The better performance of the steel structure compared to the reinforced concrete is due to the lower weight of the steel structure, the lack of cracking and the greater plasticity of the steel structure compared to the concrete structure.

Keywords: Progressive collapse, piling, nonlinear static analysis, key element, steel structure and reinforced concrete.

* Corresponding Author: ehsanjahankhani@gmail.com

