

ارزیابی خرابی پیش‌رونده در سازه‌های بتن مسلح با سیستم دال حبابی

سید شاکر هاشمی^{۱*}، روح‌الله خسروی^۲، علیرضا فیوض^۳

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه خلیج فارس بوشهر،

۲- کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه خلیج فارس بوشهر

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه خلیج فارس بوشهر

sh.hashemi@pgu.ac.ir

تاریخ دریافت: [۹۵/۱۱/۱۱]

تاریخ پذیرش: [۹۶/۱۱/۱۶]

چکیده

خرابی پیش‌رونده معمولاً به گسترش یک آسیب موضعی اولیه در درون سازه که مانند یک واکنش شیمیایی زنجیره‌ای منجر به فروپاشی جزئی و یا کلی سازه می‌شود، گفته می‌شود. به منظور جلوگیری یا کاهش خرابی پیش‌رونده، راهبردهای متنوعی برای طراحی در برابر گسیختگی پیش‌رونده در اسناد دولتی آمریکا مانند UFC و GSA ارائه شده است. در این پژوهش با استفاده از تحلیل غیرخطی پوش عمودی روی ساختمان‌های بتنی با سیستم دال حبابی، به بررسی عملکرد سازه پس از حذف ستون در موقعیت‌های متفاوت و تأثیر آن در پتانسیل ایجاد خرابی‌های پیش‌رونده پرداخته شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش تعداد طبقه عملکرد سازه‌های دارای دال حبابدار در برابر خرابی پیش‌رونده ضعیف‌تر شده و بهترین عملکرد را سازه‌های میان مرتبه از خود نشان می‌دهند. همچنین با افزایش نسبت طول دهانه به ارتفاع طبقه، مقاومت ساختمان‌ها در برابر خرابی پیش‌رونده کاهش می‌یابد. بیشترین خرابی بوجود آمده در دال حبابی برابر ۲۵ درصد مساحت کف و در سناریوی حذف ستون میانی است که در محدوده مجاز بوده و منجر به خرابی پیش‌رونده نشده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد در دهانه‌های بزرگ دال حبابی عملکرد خوبی داشته در برابر خرابی پیش‌رونده داشته و مسیر جایگزین لازم را برای اضافه بار ایجاد شده فراهم می‌کند.

واژگان کلیدی: خرابی پیش‌رونده، دال حبابی، تحلیل ایستایی غیرخطی، مسیر جایگزین بار

۱- مقدمه

بارگذاری، سختی سازه ثابت بوده و هیچ عضوی از آن حذف نمی‌شود. اما بارگذاری‌های شدید و با احتمال کم (بارگذاری‌های غیرعادی) مانند انفجار گاز، بمب‌گذاری، برخورد وسایل نقلیه و یا نیروهای لرزه‌ای شدید می‌تواند باعث گسیختگی اعضا و در نهایت فروریزش بخش بزرگی از سازه و یا کل آن شود [2]. تعاریف مختلفی از خرابی پیش‌رونده را

یکی از سازوکارهای که توجه زیادی را در دهه‌های اخیر به خود اختصاص داده است، خرابی پیش‌رونده است [1]. طراحی سازه‌ها بیشتر برای بارگذاری‌های عادی رایج مانند بار مرده، زنده، برف و زلزله صورت می‌گیرد. در تمامی این حالات بارگذاری، فرض بر این است که در تمامی مدت

محسوب می‌شود. با عنایت به احداث سازه‌های با اشکال و پلان‌های معماری متنوع، شکل‌گیری سقف‌هایی با ویژگی‌های منحصر به فرد افزایش یافته است. دال مجوف بادکنکی شکل (۱) یکی از انواع این سقف‌هاست که علاوه بر هماهنگی با پلان‌های گوناگون، به دلیل سبک بودن، افزایش مقاومت سازه آثار قابل توجهی در طراحی سازه‌ها در مقابل زلزله دارد [6].

شکل ۱. نمایی از روند اجرای سقف دال حبابی



Fig. 1. A view of the implementation of the ceiling of the bubble slab

یکی از موضوعات اصلی تحقیقات اخیر پژوهشگران، تحقیقات روی خرابی پیش‌رونده در سازه‌های مختلف است. Kokot و همکاران به ارزیابی استاتیکی و دینامیکی دال تخت بتنی در برابر خرابی پیش‌رونده پرداختند. نتایج نشان داده که در حالت ارزیابی استاتیکی، خرابی محدودی در حالت حذف ستون مرکزی اتفاق می‌افتد و چون پدیده حذف ستون یک حالت دینامیکی است جواب این نوع تحلیل محافظه‌کارانه است [7]. Li و Qian به بررسی اثر دال بر پاسخ سازه‌های بتن مسلح بر اثر حذف ستون گوشه پرداختند و به این نتیجه رسیدند که نادیده گرفتن اثر دال در سازه‌ها بسیار محافظه‌کارانه است و زمانی که اثر دال در نظر گرفته می‌شود ظرفیت باربری اعضا سازه‌ای در حدود ۵۰ درصد افزایش می‌یابد [8]. Li و Kai به بررسی آزمایشگاهی اثر دال بر پاسخ سازه‌های بتن مسلح بعد از حذف ستون گوشه پرداختند. نتایج نشان داده است که نادیده گرفتن اثر دال بسیار محافظه‌کارانه است و لحاظ کردن اثر دال باعث افزایش ظرفیت باربری سازه به مقدار

می‌توان با بررسی استانداردهای موجود در این زمینه یافت. تعبیر آیین‌نامه ASCE 7-05 از خرابی پیش‌رونده از این قرار است که "خرابی پیش‌رونده به صورت گسترش خرابی موضعی از المانی به المان دیگر تعریف می‌شود و در نهایت منتج به خرابی کل سازه یا قسمت وسیعی از سازه می‌شود" [3]. آیین‌نامه 2003 GSA عنوان می‌کند که "خرابی پیش‌رونده حالتی است که خرابی موضعی یک المان اصلی سازه، منجر به خرابی اجزای مجاور شده و به ترتیب خرابی‌های دیگری ایجاد می‌شود" [4]. در UFC 4-010-01 آمده است که "خرابی پیش‌رونده یک مجموعه‌ای از واکنش‌های خرابی اجزای سازه‌ای است که وسعت آن با خرابی موضعی اولیه قابل قیاس نیست" [5].

مثال‌ها از سازه‌هایی که خرابی پیش‌رونده به صورت جزئی یا کامل در آنها اتفاق افتاده است، اندک و کم سابقه است و در واقع توجه مهندسان بعد از انهدام بخشی از ساختمان مشهور آپارتمانی رونان پوینت در لندن در سال ۱۹۶۸ به این موضوع معطوف شد و بعد از حادثه‌ی انهدام ساختمان‌های تجارت جهانی در ۱۱ سپتامبر سال ۲۰۰۱ بود که چندین کمیته استانداردسازی برای بهبود استانداردهای روش‌های طراحی در برابر خرابی پیش‌رونده شروع به کار کردند و توجه ویژه‌ای به بحث خرابی پیش‌رونده در ساختمان‌های با اهمیت بیشتر، صورت گرفت و از آن تاریخ به بعد بارگذاری ویژه‌ی خرابی پیش‌رونده در طراحی‌ها لحاظ شد و لازم دانسته شد که ساختمان‌ها باید طوری طراحی شوند که بتوانند خرابی موضعی را با یکپارچه کردن اعضای سازه‌ای، بهبود بازپخش انرژی و توزیع مجدد بارها (با ایجاد مسیرهای جایگزین انتقال بار) محدود نمایند و در مقابله با بارهای غیرمعمول مقاومت کنند [1]. در جامعه مهندسی کشور ایران اگرچه هنوز به صورت گسترده به خرابی پیش‌رونده پرداخته نشده است ولی فروریزش پیش‌رونده ساختمانی ۱۵ طبقه با عنوان "پلاسکو" پس از وقوع آتش سوزی در زمستان ۱۳۹۵ باعث شد توجه ویژه‌ای در نگاه مهندسين نسبت به این پدیده نادر شکل بگیرد. با توجه به گسترش روز افزون ساختمان‌های بلند، سبک‌سازی و صنعتی‌سازی ساختمان‌ها جزء اولویت‌های اصلی

۲-۱- روش تحقیق

در روند تحلیل و طراحی سازه‌های مورد تحقیق از مباحث ششم [13] و نهم مقررات ملی ساختمان [14] در طراحی و انتخاب چگونگی بارگذاری ویژه سازه‌ها در محیط نرم‌افزاری و تعیین معیار پذیرش، از استاندارد رایج UFC2013 استفاده شده است [5].

برای درک بهتر عملکرد سازه‌ها، سازه‌های مورد بررسی بر اساس نسبت طول دهانه به ارتفاع طبقه به سه گروه ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ دسته‌بندی شده‌اند. تعداد طبقات بررسی شده برابر ۴، ۶ و ۸ طبقه بود. تنوع مقاطع مورد استفاده برای ستون‌ها در مدل‌های ۴ طبقه بین ۳۰ تا ۸۰ سانتی‌متر و در مدل‌های ۶ طبقه بین ۳۰ تا ۹۰ سانتی‌متر و در مدل‌های ۸ طبقه بین ۳۵ تا ۱۱۰ سانتی‌متر است. لازم به ذکر است که نوع مقطع مورد استفاده برای تمامی ستون‌ها مقطع دایره‌ای بوده و اعداد ذکر شده قطر مقاطع است. ضخامت دال حبابی با توجه به نسبت طول دهانه به ارتفاع طبقه ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ به ترتیب برابر ۲۳، ۳۹ و ۶۰ سانتی‌متر طراحی شده است. طراحی الاستیک سازه‌ها بر اساس ضوابط مبحث نهم مقررات ملی انجام شده است. ساختمان‌ها از نوع مسکونی فرض شده است. منطقه مورد مطالعه با لرزه‌خیزی خیلی زیاد و خاک از نوع III در نظر گرفته شده است. ارتفاع طبقات در تمامی مدل‌ها یکسان و برابر ۳/۵ متر می‌باشد. سیستم سقف از نوع دال بتنی حبابدار با عملکرد دوطرفه می‌باشد.

مطابق با توصیه آیین‌نامه DOD2013 در انجام تحلیل خرابی پیش‌رونده بار مشخصه وارد بر سازه می‌بایست طبق رابطه ۱ تعیین شود [5]:

$$U = \Omega_N (1.2DL + 0.5LL \text{ or } 0.2S) \quad (1)$$

که در آن، DL بار گسترده سقف به همراه دیوارهای داخلی، LL با گسترده سطحی زنده و S بار برف است.

ضریب بزرگ‌نمایی Ω_N نیز جهت لحاظ نمودن دخالت آثار دینامیکی، طبق راهنمایی UFC 4-023-03 از رابطه ۲ به دست می‌آید [5]:

$$\Omega_N = 1.08 + 0.76 \left(\frac{\theta_{pra}}{\theta_y} + 0.83 \right) \quad (2)$$

۵۱/۶ درصد نسبت به حالت مشابه بدون لحاظ کردن دال می‌شود [9]. Yi و همکاران در سال ۲۰۱۴ عملکرد دال‌های تخت بتن مسلح را در برابر خرابی پیش‌رونده در سازه‌های قابی بررسی کردند و نتیجه گرفتند که عملکرد غشایی در دال‌های تخت، مقاومت قابل توجهی در برابر بارهای عمودی فراهم می‌کند. در نتیجه این عملکرد اجازه تحمل بارهای بالاتری از مقدار بار طراحی شده را برای دال ایجاد می‌کند [10]. Li و ساسانی به ارزیابی یکپارچگی و مقاومت در برابر خرابی پیش‌رونده در سازه‌های بتن مسلح با سیستم قاب خمشی ویژه و معلولی پرداختند، نتایج به دست‌آمده نشان می‌دهد که تغییر شکل دائمی در قاب خمشی ویژه در حدود ۳۰٪ بیشتر از قاب خمشی عادی است [11]. با وجود سابقه نسبتاً طولانی مطالعه روی خرابی پیش‌رونده، این پژوهش‌ها همواره با کمبودهایی مواجه بوده است. از جمله این کمبودها می‌توان به بررسی اثر دال در جلوگیری از خرابی پیش‌رونده اشاره کرد. با توجه به سیستم دال-ستونی مورد استفاده در مدل‌ها لزوم ارزیابی عملکرد این سیستم و تأمین سختی کافی برای مقابله با پدیده خرابی پیش‌رونده حس می‌شود.

۲- تئوری تحقیق

یکی از راه‌های مدل‌سازی رفتار غیرخطی اعضا، اختصاص مفاصل دارای رفتار غیرخطی با طول معین در نقاطی مستعد رفتار غیرخطی است. مفاصل از نظر مدل‌سازی مقطع به انواع مختلفی تقسیم می‌شوند که یکی از این نوع مفاصل، مفصل فایبر است. این نوع مفصل سطح مقطع عضو را به اجزاء کوچک‌تر تقسیم کرده، که هر قسمت دارای طولی برابر با طول مفصل و رفتار غیرخطی محوری جداگانه است. در این پژوهش مفاصل پلاستیک معرفی شده به المان‌های سازه‌ای از این نوع مفصل است [12]. المان‌های ستون در نواحی ابتدایی و انتهایی از مفصل پلاستیک فایبر برخوردار هستند و قابلیت غیرخطی شدن دارند. برای رفتار غیرخطی المان‌های سقف نیز مطابق توضیحات بخش ۲-۴ رفتار غیرخطی لحاظ شده است.

شده در نرم افزار که قابلیت لحاظ کردن رفتار غیرخطی در هر دو حالت درون و برون صفحه‌ای را دارد، رفتار غیرخطی المان بتن مسلح لحاظ می‌شود. در سقف توپر، مقطع عرضی دال را به چند لایه تقسیم می‌کنیم، ولی برای سقف حبابدار، همان‌گونه که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، علاوه بر تقسیم مقطع به چند لایه، ضخامت هر لایه به نحوی به نرم افزار معرفی می‌شود که مساحت بتن موجود در هر لایه از مقطع عرضی برابر با مساحت بتن معرفی شده در نرم افزار باشد. برای اعتبار سنجی روش نیز اقدام به مدل‌سازی نتایج آزمایشگاهی Ibrahim و همکاران [16] کرده و نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی و تحقیق انجام‌شده، در قالب نمودار نیرو-تغییر مکان مورد مقایسه قرار گرفته است.

شکل ۳. مدل معرفی‌شده برای مدل‌سازی دال حبابی [17]

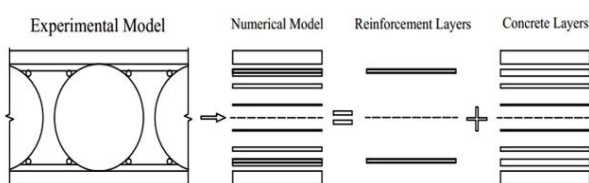


Fig. 3. Modeling of bubble slab [18]

چگونگی بارگذاری دال موردنظر در آزمایشگاه در شکل (۴) نشان داده شده است.

شکل ۴. برشی از مقطع دال حبابدار مورد آزمایش [16]

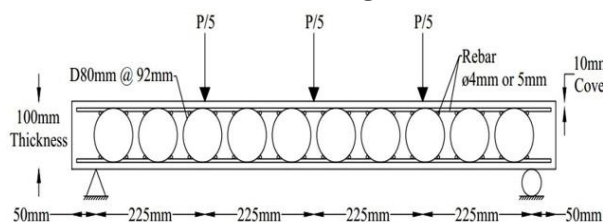


Fig. 4. The cross section of the tested bubble slab [16]

نتایج حاصل از این مدل‌سازی در شکل (۵) با مقایسه کمیتی بین مدل‌سازی عددی و مدل آزمایشگاهی به صورت نمودار نشان داده شده است. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی، هماهنگی بسیار خوبی در حوزه‌ی سختی و ظرفیت را نشان می‌دهد.

در رابطه فوق θ_{pra} زاویه چرخش پلاستیک داده شده در جدول معیار پذیرش UFC 4-023-03 برای سطح پاسخ سازه (ایمنی جانی یا آستانه فروریزش) و θ_y برابرزاویه چرخش تسلیم می‌باشد.

۲-۲- سناریوی موقعیت حذف ستون

ستون‌های بررسی شده در پلان ساختمان‌های مورد بحث به سه گروه داخلی، پیرامونی و گوشه تقسیم‌بندی شده‌اند شکل (۲). برای درک بهتر موقعیت حذف ستون‌ها در سناریوهای مختلف اقدام به نام‌گذاری موقعیت حذف کرده که این نام‌گذاری در جدول (۱) نشان داده شده است.

شکل ۲. چگونگی نام‌گذاری سناریوهای حذف ستون با توجه به

توضیحات جدول ۱

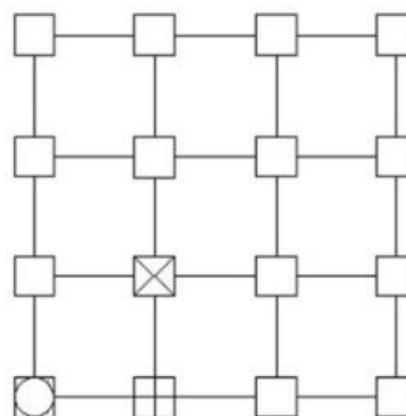


Fig. 2. Column deletion scenarios according to the description in table 1

جدول ۱. نام‌گذاری سناریوهای حذف ستون

Removing the corner column of the i-th floor		CFi
Removing the exterior column of the i-th floor		EFi
Removing the middle column of the i-th floor		MFi

Table. 1. Naming of column deletion scenarios

۲-۳- درستی آزمایشی تحقیق

برای بررسی و درستی آزمایشی تحلیل‌های صورت گرفته و قابلیت نرم‌افزار SAP 2000 [15] در انجام تحلیل غیرخطی دال حبابی به روش لایه‌ای معادل عمل شده است. در این روش با بهره‌گیری از قابلیت المان پوسته‌ای لایه‌ای تعریف

شکل ۶. موقعیت ستون حذف شده در مدل ST6-R3.5-CF4

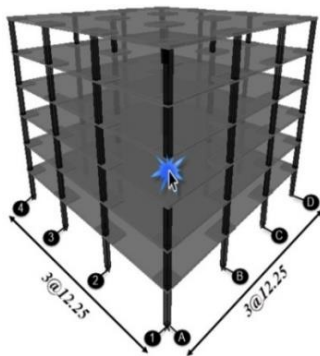


Fig. 6. The position of the removed column in the ST6-R3.5-CF4 model

شکل ۷. روند شکل گیری مفصل پلاستیک در مدل ST6-R3.5-CF4

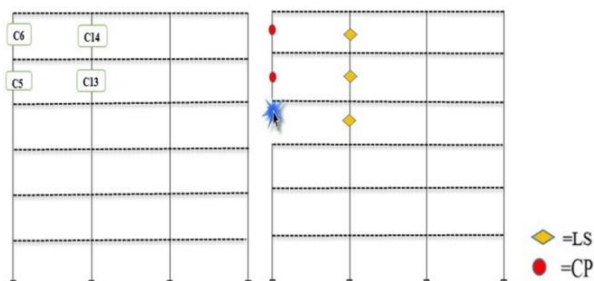


Fig. 7. The plastic hinge formation process in the ST6-R3.5-CF4 model

منحنی لنگر- چرخش مقطع بحرانی ستون‌های بالای محل حذف ستون در شکل (۸) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که میزان چرخش به وجود آمده در مقطع بحرانی ستون‌ها در بالای محل حذف ستون از مقدار مجاز آیین‌نامه عبور کرده و در ستون‌ها خرابی رخ داده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده برای همین مدل و حذف ستون در طبقه اول، می‌توان به این نتیجه رسید که حذف ستون در طبقات بالاتر حالت بحرانی‌تری نسبت به حذف ستون طبقه اول است.

خلاصه نتیجه ارزیابی مدل ST6-R3.5-CF4 به این شرح است که برای هیچ یک از دال‌ها و ستون‌ها خرابی رخ نداده است. برای ارزیابی دال تسلیم اولین میلگرد کششی به عنوان معیار پذیرش ارزیابی دال، قرار گرفته است. با توجه به اینکه آیین‌نامه مورد استفاده برای ارزیابی خرابی آیین‌نامه DOD2013 است و در این آیین‌نامه برای سیستم دال تحت معیار پذیرشی برای بررسی چگونگی تسلیم دال ارائه نشده است ولی با استناد به ماهیت تعریف خرابی که با تسلیم اولین میلگردها

۳- ارزیابی خرابی پیش رونده مدل‌ها

به دلیل اینکه سیستم سقف مورد استفاده در مدل‌ها، سیستم دال حبابی است و با توجه به اینکه در این سیستم تیرها مدل نمی‌شوند، عملاً سیستم سازه‌ای استفاده شده سیستم دال-ستون است. به همین منظور نتایج به دست‌آمده از تحلیل مدل‌ها، در دو بخش ارزیابی ستون‌ها و ارزیابی دال سازه ارائه شده است. به دلیل زیاد بودن تعداد مدل‌ها، هرکدام به صورت Sti-Rj-XX نام‌گذاری شده است. در این نام‌گذاری Sti به معنای تعداد طبقات مدل مورد بررسی و Rj به معنای نسبت طول دهانه به ارتفاع طبقه و XX به معنای نوع سناریوی بررسی شده است. برای نمونه نام‌گذاری ST4-R1.5-CF یعنی مدل با تعداد طبقات ۴، نسبت طول دهانه به ارتفاع ۱/۵ و سناریوی حذف ستون گوشه است.

شکل ۵. نمودار نیرو-تغییر مکان در مرکز دال حبابدار

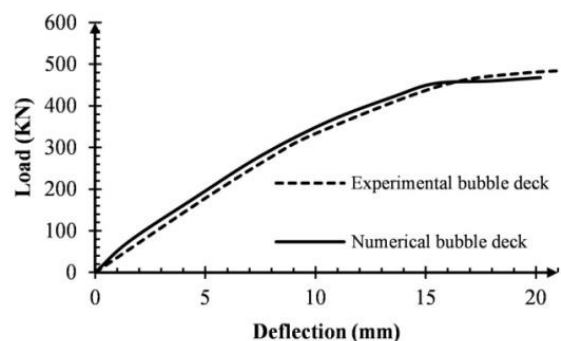


Fig. 5. load- deflection in the center of the bubble slab

۳-۱- ارزیابی در حالت حذف ستون گوشه

برای ارزیابی خرابی ستون‌ها از معیار پذیرش ارائه شده در آیین‌نامه ASCE41-06 استفاده شده است [3]. به این ترتیب با استفاده از نتایج مفصل خمیری به‌دست‌آمده از نرم‌افزار، میزان بیشینه چرخش ستون‌ها محاسبه شده و سطح عملکرد عضو (ایمنی جانی (LS) و آستانه فروریزش (CP)) تعیین می‌شود. در شکل (۶) موقعیت حذف ستون گوشه در مدل ST6-R3.5-CF4 نشان داده شده است.

روند تشکیل مفصل پلاستیک در اثر سناریوی حذف ستون گوشه در شکل (۷) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که ستون‌های بالای محل حذف ستون دچار خرابی شده‌اند.

نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در اثر حذف ستون طبقه سوم، تنش تسلیم هیچ‌یک از میلگردهای کششی سقف به تنش تسلیم خود نرسیده و در نتیجه هیچ‌گونه گسیختگی در میلگردها و خرابی سقف رخ نداده است.

با توجه به جدول (۲) مشاهده می‌شود که بیشتر خرابی‌ها در نسبت طول دهانه به ارتفاع $3/5$ و سناریوی حذف ستون گوشه رخ داده است و سازه‌های میان مرتبه بهترین عملکرد را در برابر سناریوی حذف ستون از خود نشان داده‌اند.

جدول ۲. خلاصه نتیجه ارزیابی مدل‌ها در سناریوی حذف ستون گوشه

Slab evaluation		Column evaluation		Model name
No Collapse occurred	Collapse occurred	No Collapse occurred	Collapse occurred	
✓		✓		ST4-R1.5-CF
✓		✓		ST4-R1.5-CF3
✓		✓		ST6-R1.5-CF
✓		✓		ST6-R1.5-CF4
✓		✓		ST8-R1.5-CF
✓		✓		ST8-R1.5-CF5
✓		✓		ST4-R2.5-CF
✓		✓		ST4-R2.5-CF3
✓		✓		ST6-R2.5-CF
✓		✓		ST6-R2.5-CF4
✓		✓		ST8-R2.5-CF
✓		✓		ST8-R2.5-CF5
✓		✓		ST4-R3.5-CF
✓			✓	ST4-R3.5-CF3
✓		✓		ST6-R3.5-CF
✓		✓		ST8-R3.5-CF
✓			✓	ST8-R3.5-CF5

Table 2. Summary of the evaluation results of models in the corner column removal scenario

در شکل (۱۱) به مقایسه میزان تغییر مکان قائم به وجود آمده در محل حذف ستون گوشه در نسبت‌های مختلف طول دهانه به ارتفاع طبقه پرداخته شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش نسبت طول دهانه به ارتفاع، میزان جابه‌جایی قائم در محل حذف ستون افزایش می‌یابد.

تحقق می‌یابد، این معیار در المان‌ها به صورت محلی و موضعی مورد پایش قرار گرفته است.

شکل ۸. منحنی لنگر-چرخش مقطع بحرانی ستون‌ها بالای محل حذف

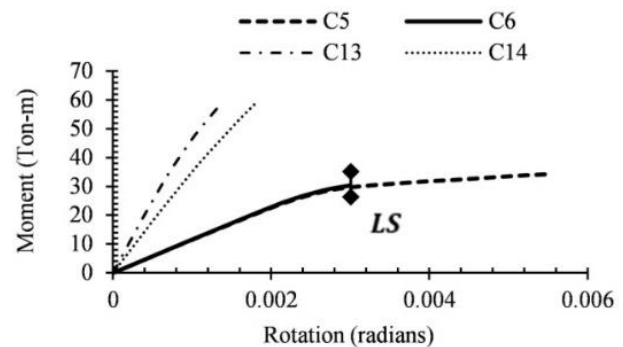


Fig. 8. Moment- rotation curve of the critical column above the removal location

شکل ۹. نمایش ارزیابی کلی سقف‌ها در مدل ST6-R3.5-CF4

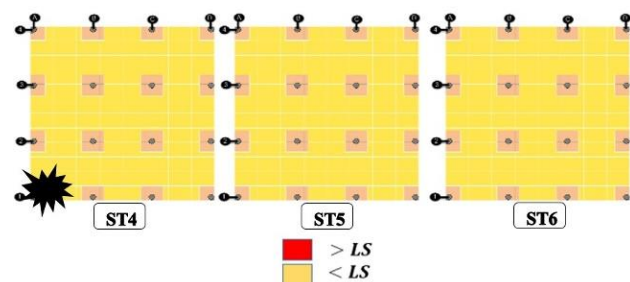


Fig. 9. Evaluation of the ceilings in the ST6-R3.5-CF4 model

شکل ۱۰. تغییرات تنش فون میسز میلگرد کششی دهانه متأثر به تغییر مکان قائم محل حذف ستون در مدل ST6-R3.5-CF4

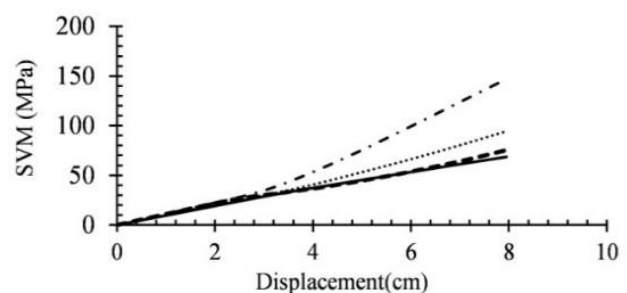


Fig. 10. V-M stress variation of tensile rebar in the span affected by vertical displacement of column removal model ST6-R3.5-CF4

وضعیت کلی هر سه سقف و نمودار تنش فون میسز به جابه‌جایی قائم محل حذف ستون به ترتیب در شکل‌های (۹ و ۱۰)

پرداخته شده است. ملاحظه می‌شود که اگرچه بیشترین میزان خرابی در نسبت ۳/۵ رخ داده است، اما مدل‌های ۶ طبقه در این نسبت کمترین میزان تغییر مکان قائم را نسبت به دیگر مدل‌ها داشته‌اند. پس می‌توان نتیجه گرفت که سازه‌های میان مرتبه در این سناریو بهترین عملکرد را در برابر خرابی از خود نشان می‌دهند.

جدول ۳. نتیجه ارزیابی مدل‌ها در سناریوی حذف ستون کناری

Slab evaluation		Column evaluation		Model name
No Collapse occurred	Collapse occurred	No Collapse occurred	Collapse occurred	
✓		✓		ST4-R1.5-EF
✓		✓		ST4-R1.5-EF3
✓		✓		ST6-R1.5-EF
✓		✓		ST6-R1.5-EF4
✓		✓		ST8-R1.5-EF
✓		✓		ST8-R1.5-EF5
✓		✓		ST4-R2.5-EF
✓		✓		ST4-R2.5-EF3
✓		✓		ST6-R2.5-EF4
✓		✓		ST8-R2.5-EF
✓		✓		ST8-R2.5-EF5
	✓		✓	ST4-R3.5-EF
	✓		✓	ST4-R3.5-EF3
✓		✓		ST6-R3.5-EF
✓		✓		ST6-R3.5-EF4
✓			✓	ST8-R3.5-EF
✓			✓	ST8-R3.5-EF5

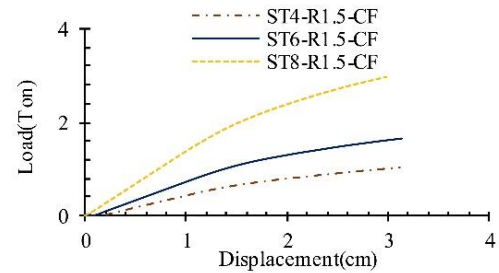
Table 3. Summary of the evaluation results of models in the exterior column removal scenario

۳-۳- ارزیابی در حالت حذف ستون میانی

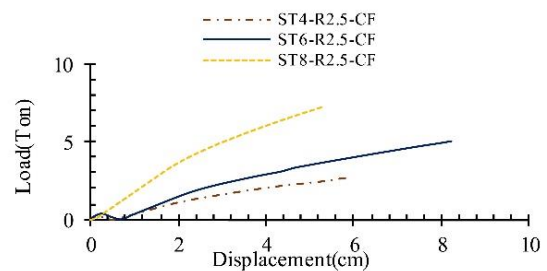
مقایسه وضعیت کلی ستون‌های مقطع بحرانی که در آن ستون میانی حذف شده است با وضعیت ستون‌های محور مجاور ستون حذف شده، نشان می‌دهد که در سناریوی حذف ستون میانی طبقه اول، ستون‌های محور مجاور محل حذف بیشتر در معرض خرابی قرار گرفته و وضعیت بحرانی‌تری نسبت به محور حذف ستون دارند. با توجه به شکل (۱۳) که وضعیت کلی سقف‌ها در ارزیابی مدل ST8-R3.5-MF را نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که در طبقه محل حذف ستون بدلیل کاهش

شکل ۱۱. مقایسه نمودارهای نیرو-تغییر مکان قائم محل حذف ستون در

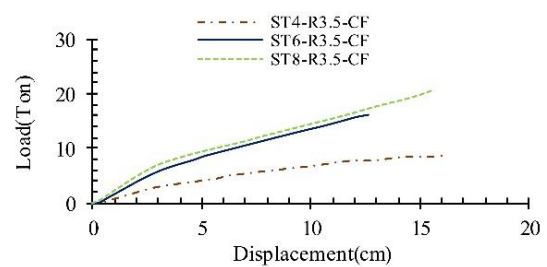
سناریوی حذف ستون گوشه



(a) The span-to-height ratio of 1.5



(b) The span-to-height ratio of 2.5



(c) The span-to-height ratio of 3.5

Fig. 11. Comparison of load-vertical displacement of the column removal in the corners removal scenario

۳-۲- ارزیابی در حالت حذف ستون کناری

بررسی روند تشکیل مفصل در مقطع بحرانی ستون‌های مستقر در محور محل حذف ستون (محور کناری) نشان داده است که عملکرد این ستون‌ها در محدوده ایمنی جانی قرار داشته و در نتیجه هیچ‌گونه خرابی در این محور رخ نداده است. خلاصه نتایج ارزیابی تمامی مدل‌ها در سناریو حذف ستون کناری در جدول (۳) ارائه شده است. مشاهده می‌شود که بیشتر خرابی‌ها در نسبت طول دهانه به ارتفاع ۳/۵ و تعداد طبقات ۴ و ۸ در اثر سناریوی حذف ستون کناری رخ داده است. در شکل (۱۲) به مقایسه میزان تغییر مکان قائم محل حذف در نسبت‌های مختلف طول دهانه به ارتفاع طبقه

شکل ۱۳. نمایش ارزیابی کلی سقف‌ها در مدل ST8-R3.5-MF

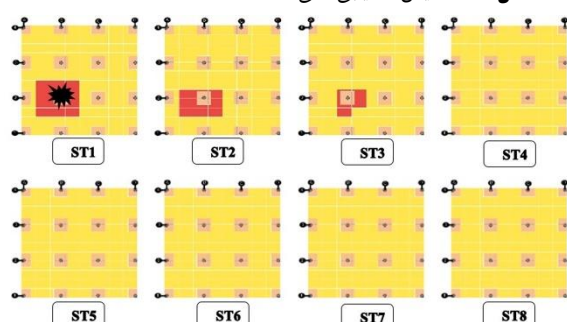


Fig. 13. General evaluation of the ceilings in the ST8-R3.5-MF

جدول ۴. خلاصه نتیجه ارزیابی مدل‌ها در سناریوی حذف ستون میانی

Slab evaluation		Column evaluation		Model name
No Collapse occurred	Collapse occurred	No Collapse occurred	Collapse occurred	
✓		✓		ST4-R1.5-MF
✓		✓		ST4-R1.5-MF3
✓		✓		ST6-R1.5-MF
✓		✓		ST6-R1.5-MF4
✓		✓		ST8-R1.5-MF
✓		✓		ST8-R1.5-MF5
✓		✓		ST4-R2.5-MF
✓		✓		ST4-R2.5-MF3
✓		✓		ST6-R2.5-MF
✓		✓		ST6-R2.5-MF4
✓		✓		ST8-R2.5-MF
✓		✓		ST8-R2.5-MF5
✓			✓	ST4-R3.5-MF
✓			✓	ST4-R3.5-MF3
✓		✓		ST6-R3.5-MF
✓		✓		ST6-R3.5-MF4
	✓		✓	ST8-R3.5-MF5

Table 4. Summary of the evaluation results of models in the middle column removal scenario

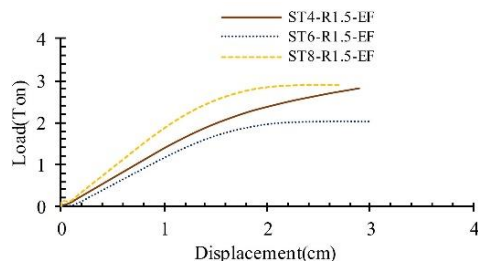
۵. نتیجه‌گیری

هدف این پژوهش ارزیابی خرابی پیش‌رونده در ساختمان‌های بتن مسلح با سیستم سقف دال حبابدار بوده است. برای این منظور چهل و هشت مدل ساختمانی یا سیستم دال-ستون انتخاب و اهداف پژوهش برای آن بررسی شد. با

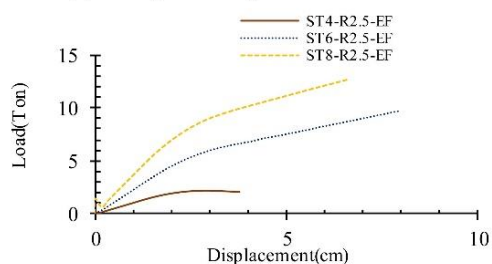
مسیر بار جایگزین بیشترین خرابی رخ می‌دهد.

شکل ۱۲. مقایسه نمودارهای نیرو-تغییر مکان قائم محل حذف ستون در

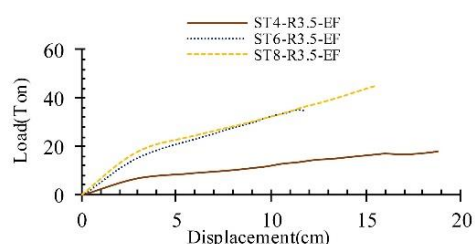
سناریوی حذف ستون کناری



(a) The span-to-height ratio of 1.5



(b) The span-to-height ratio of 2.5



(c) The span-to-height ratio of 3.5

Fig. 12. Comparison of load-vertical displacement of the column removal in the exterior removal scenario

بر اساس ارزیابی میزان تغییر مکان قائم به وجود آمده در محل حذف ستون در سناریوی حذف ستون میانی، نشان داده است که اگرچه بیشترین میزان خرابی سقف در نسبت طول دهانه به ارتفاع ۳/۵ رخ داده است، اما مدل‌های ۶ طبقه در این نسبت کمترین میزان جابه‌جایی را نسبت به دیگر مدل‌ها داشته‌اند. ارزیابی این است که سازه‌های میان مرتبه در این سناریو بهترین عملکرد را در برابر خرابی از خود نشان می‌دهند. همچنین با افزایش نسبت طول دهانه به ارتفاع طبقه ساختمان‌های کوتاه مرتبه دارای بیشترین تغییر مکان قائم محل حذف ستون می‌باشند. خلاصه کلی مدل‌ها در جدول (۴) ارائه شده است.

computational procedures, Doctoral dissertation, Ph.D. Thesis, Universite Libre de Bruxelles.

[2]. Khandelwal K. Multi-scale computational simulation of progressive collapse of steel frames, A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, University of Michigan, 2008.

[3]. ASCE. Seismic Rehabilitation of Existing Buildings (ASCE/SEI 41-06). Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 2007.

[4]. General Services Administration (GSA), Progressive collapse analysis and design guideline for new federal office buildings and major modernization, Washington(DC), 2003.

[5]. United States Department of Defence (DoD), Design of building to resist progressive collapse, unified facilities criteria (UFC), 4-023-03, Washington (DC), 2013.

[6]. Teja P.P., Kumar P.V., Anusha S. and Mounica CH. 2012 Structural behavior of bubble deck slab. *Advances in Engineering, Science and Management (ICAESM), International Conference.*, Nagapattinam, Tamil Nadu, 383-388.

[7]. Kokot S., Anthoine A., Negro P., Solomos G. 2012 Static and dynamic analysis of a reinforced concrete flat slab frame building for progressive collapse. *Engineering Structures*, **40**, 205-217.

[8]. Kai Q., Li B., 2012 Dynamic performance of RC beam-column substructures under the scenario of the loss of a corner column experimental results. *Engineering Structures*, **42**, 154-167.

[9]. Qian K., Li B., 2013: Experimental study of drop-panel effects on response of reinforced concrete flat slabs after loss of corner column. *ACI Structural Journal*, **110** (2), 319-329.

[10]. Yi WJ., Zhang FZ., Kunnath SK. 2014: Progressive collapse performance of RC flat plate frame structures. *Journal of Structural Engineering*, DOI:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000963.

[11]. Li M., Sasani M., 2015: Integrity and progressive collapse resistance of RC structures with ordinary and special moment frames. *Engineering Structures*, **95**, 71-79.

[12]. Hashemi S.Sh., Sadeghi K., Vaghefi M., Siadat A., 2017: Evaluation of ductility of RC structures constructed with Bubble Deck system. *International Journal of Civil Engineering*, DOI: 10.1007/s40999-017-0158-y.

[13]. Sixth National Building Regulations., Load on the building. 2013: Department of Housing and Urban Development. "In persian".

[14]. Chapter 9 of the National Building Regulations., Design and implementation of reinforced buildings. 2013: Department of Housing and Urban Development. "In persian".

[15]. Computers and Structures Inc., 2010: CSI Analysis Reference Manual, SAP2000 advanced 14.2.0, Berkeley, California, USA.

توجه به بررسی‌های صورت گرفته روی سازه‌های بتنی با سیستم سقف دال حبابی و ارزیابی آنها در برابر خرابی پیش‌رونده به روش مسیر جایگزین بار، نتایج ذیل حاصل شده است:

۱ - حذف ستون در طبقات بالاتر باعث ایجاد تغییر مکان‌های قائم بیشتری نسبت به تغییر مکان‌های حاصل از حذف ستون در طبقات پایین‌تر می‌شود.

۲ - از بین سناریوهای مختلف حذف ستون، سناریوی حذف ستون گوشه باعث ایجاد تغییر مکان‌های قائم بیشتری نسبت به دیگر سناریوهای حذف می‌شود.

۳ - با توجه به سیستم استفاده شده در این پژوهش، با افزایش تعداد طبقه، عملکرد سقف و ستون‌های سازه در برابر خرابی پیش‌رونده ضعیف‌تر بوده و سازه‌های میان مرتبه (۶ طبقه) بهترین عملکرد را در برابر خرابی پیش‌رونده دارند.

۴ - با توجه به ارزیابی‌های انجام‌شده، بیشترین خرابی به وجود آمده در سقف‌ها برابر ۲۵ درصد مساحت کف چشمه متأثر و مربوط به مدل ۸ طبقه با نسبت طول دهانه به ارتفاع ۳/۵ و سناریوی حذف ستون میانی است و در مقایسه با میزان خرابی مجاز آیین‌نامه ای کمتر از ۳۰ درصد مساحت کف پیشنهاد شده است، پس می‌توان گفت خرابی به وجود آمده در دال‌ها باعث ایجاد خرابی پیش‌رونده نمی‌شود.

۵ - با افزایش نسبت طول دهانه به ارتفاع طبقه، اگرچه ضخامت سقف‌ها نیز افزایش می‌یابد، اما با این‌وجود عملکرد سازه در برابر خرابی پیش‌رونده تضعیف می‌شود.

۶ - با توجه به اینکه در طراحی ساختمان‌های با سیستم دال حبابدار، تیر وجود نداشته و مدل‌سازی نمی‌شوند و سیستم دال نقش تیرها را نیز ایفا می‌کند، می‌توان به این نتیجه رسید که در مجموع سیستم دال حبابی در سازه‌های کوتاه و میان مرتبه عملکرد خوبی در برابر خرابی پیش‌رونده داشته اما در سازه‌ای بلند مرتبه عملکرد ضعیف‌تری از خود نشان می‌دهد.

References

۶- مراجع

[1]. Menchel K. 2008 Progressive collapse: comparison of main standards, formulation and validation of new

roof system equivalent layer method. *The 2nd national congress on engineering construction and evaluation of civil engineering project*, Semnan "In Persian".

- [16]. Ibrahim A.M., Ali N.K., Salman, W.D., 2013: Flexural capacities of reinforced concrete two-way bubbledeck slabs of plastic spherical voids. *Diyala Journal of Engineering sciences*, **6**(02), 12-20 .
- [17]. Hashemi S.Sh., Fiouz A., Khosravi R., Siadat A., 2015: Nonlinear analysis of reinforced concret bubble

Progressive collapse evaluation of RC structures with Bubble Deck floor system

S.Sh. Hashemi^{1*}, R. Khosravi², A. Fiouz³

1. Assistant. Prof., Civil Eng. Department, Persian Gulf University. Boushehr, Iran

2. Msc. Student, Civil Eng. Department, Persian Gulf University. Boushehr, Iran

3. Assistant. Prof., Civil Eng. Department, Persian Gulf University. Boushehr, Iran

*Sh.hashemi@pgu.ac.ir

Abstract:

Usually, progressive collapse is defined as the progress of a primary local damage within the structures that, like a chain chemical reaction, causes to partial or total collapse of the structures. Although, many researches on progressive collapse under blast load have been made, it can be seen that rupture aroused in structures during strong earthquake events will not happen suddenly, but because of failure in structural design or performance, the weak elements will destroy easier. Subsequently, energy redistribution will occur that may disconnect the adjacent members. Further, the progressive collapse phenomenon will take place and subsequently cause to collapse all the structures. In the recent years, the incidence of catastrophic events such as September 11 has attracted a lot of attention to the issue of the progressive collapse and lead to be considered in the design of new structures. In order to prevent damages by reducing the progressive collapse, different strategies for designing against the progressive collapse have been presented in the government documents of USA, such as UFC and GSA. Although, many researches have been made on the progressive collapse in recent years, but the structures deck effect on the progressive collapse has not been considered sufficiently.

Nowadays, due to the increase of the speed of construction and lightweight construction, the usage of new systems has been increased. Among these systems, Bubble Deck system is notable. This structural system functions as a two-way slab and a lightweight structural member. In Bubble Deck system, the plastic spherical hollow core (PSHC) is used instead of the concrete situated in the central zone of the cross sections around the slab's mid-span, where the shear stress is relatively small, compared to the supports. PSHC creates a hollow space in the slab. The Bubble Deck technology uses spheres, made of recycled industrial plastic, to create air voids, while providing the strength through the arch action.

The objective of this study is to evaluate the progressive collapse of reinforced concrete structures with Bubble Deck floor system. The behavior of structures, the amount, and the mode of the collapse distribution can be studied by various methods. SAP2000 software is used to model, design and analyze the structures. DoD2013 statement has been selected as the reference criteria, and based on that, all the uploading and collapse measurements has been determined. The equivalent nonlinear shell layered element is used to define the slab sections in numerical modeling. 48 structures with the same plans (3 spans on each direction) were modeled. Moment resisting system is chosen as lateral resisting systems. The models were in 4, 6 and 8 stories. Story height of all structures is 3.5 m, and also three types of span length to story height ratios including 1.5, 2.5 and 3.5 are investigated.

The results show by increasing the number of floors, the structure's performance against progressive collapse will decrease and the middle-rise structures (6 stories) have shown the best performance rather than others. Also, by increasing the ratio of span length to floor height, progressive collapse resistance is reduced. The most observed damage in the Bubble Deck floors is less than 25 percent of floor area which affected by progressive collapse in the middle-column removal scenario. This value of damage satisfy DoD2013 targets.

Keywords: Progressive Collapse, Bubble Deck, Nonlinear Static Analysis, Alternative Path Method