

شبیه سازی اثر اندرکنش میان قاب آجری - قاب بتن مسلح بر پتانسیل فروریزش پیش رونده

سپیده رحیمی^۱، مسعود سلطانی محمدی^{۲*}، علی اکبر آقاچوک^۳

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشیار مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۳- استاد سازه، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

msoltani@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۲/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۲/۲۳

چکیده- ساختمان های بتنی در فرایند تحلیل و طراحی به صورت قاب هایی که از اعضای اصلی سازه ای مانند تیرها، ستون ها و دیوارهای برشی ساخته شده، در نظر گرفته می شوند. اما در بیشتر مناطق شهری، قاب های ساختمانی در نواحی میانی یا پیرامونی ساختمان با دیوارهای مصالح بنایی به عنوان جداکننده ها یا عایق های صوتی و حرارتی پر می شوند که رفتار آن ها با رفتار قاب خالی، یکسان نیست. در این پژوهش پاسخ میان قاب تحت تغییر شکل های ناشی از حذف ستون و اثر آن بر رفتار سازه، مطالعه عددی شده است. وجود میان قاب با استفاده از مدل سازی اجزای تشکیل دهنده (ریز مدل سازی) و در نظر گرفتن اندرکنش آن با قاب، مدل شده است. بر اساس نتایج بررسی استاتیکی غیرخطی روی قاب دارای میان قاب با هندسه و ویژگی های مصالح گوناگون و بررسی الگوی گسترش ترک ها و خرابی در میان قاب، مدل ساده شده ای برای در نظر گرفتن میان قاب در قاب های بتن مسلح با حذف ستون ارائه شده و با استفاده از نتایج مدل ریزمقیاس، اعتبار سنجی شده است. برای نمایش کاربرد مدل و کنترل کارایی آن، پاسخ دو ساختمان بتن مسلح به حذف ستون با در نظر گرفتن میان قاب و بدون در نظر گرفتن آن، با استفاده از آنالیز استاتیکی غیرخطی بررسی و مقایسه شده است.

کلیدواژگان: میان قاب بنایی، فروریزش پیش رونده، دستک فشاری، قاب بتن مسلح.

۱- مقدمه

بود. در سال ۱۹۹۵ با خرابی ساختمان فدرال امریکا، توجه بسیاری از مهندسان به این نوع تخریب جلب شد و راهبردهایی برای طراحی سازه برابر فروریزش پیش رونده در اسناد دولتی امریکا مانند GSA^۱، UFC^۲ [۱، ۲] ارائه شد. بررسی و طراحی در هر دو آیین نامه، در برابر بارهای

فروریزش پیش رونده یک رویداد نادر است که در آن، همه یا قسمتی از یک سازه، به علت آسیب یا گسیختگی قسمت کوچکی از سازه، تخریب می شود.

خرابی ساختمان های موره، مرکز خرید جهانی و رونان سرآغاز بسیاری از بحث ها برای تغییر قوانین آیین نامه ها

1- General Services Administration

2- The Unified Facilities Criteria

غیرعادی، به خاطر محاسبات پیچیده و آسیب‌های بزرگ و ناشناخته‌ای که به سازه وارد می‌شود، مستقل از بار است. اتلاف انرژی در این آیین‌نامه‌ها از راه شکل‌پذیری، نامعینی و پیوستگی پیشنهاد شده است.

به طور کلی ۳ روش کنترل رویداد، روش طراحی غیرمستقیم و روش طراحی مستقیم برای کاهش خطر فروریزش پیش‌رونده وجود دارد [۳]. در روش کنترل رویداد، تلاش برای کنترل و جلوگیری از بارگذاری غیرعادی است و از آن‌جا که این روش از کنترل مهندس طراح خارج است، روش کارآمدی نیست. در روش طراحی غیرمستقیم، باید کمینه‌های مقاومت، شکل‌پذیری و نامعینی در سازه برآورده شود. این روش به خاطر استفاده از ضریب اطمینان برای همه‌ی اعضای سازه‌ای، اقتصادی نیست. در روش طراحی مستقیم از دو راهکار مقاومت موضعی ویژه و مسیر جایگزین برای کاهش خطر فروریزش استفاده می‌شود. در روش مقاومت موضعی ویژه نیاز به تعیین بار غیر عادی است، در حالی که بار غیرعادی نامشخص است. ولی روش مسیر جایگزین نیاز به تعیین بار غیر عادی ندارد و پایداری کلی سازه را با حذف المان برابر بررسی می‌کند. از این رو، این روش به عنوان اقتصادی‌ترین و منطقی‌ترین روش در آیین‌نامه‌ها استفاده می‌شود. آیین‌نامه‌های UFC و GSA از روش مسیر جایگزین برای طراحی سازه در برابر فروریزش پیش‌رونده استفاده می‌کنند. در این دو آیین‌نامه، پایداری کلی سازه با حذف یکی از ستون‌های بحرانی ساختمان بررسی می‌شود.

از مواردی که به تازگی درباره‌ی فروریزش پیش‌رونده مطرح شده است، بررسی اثر میان‌قاب‌ها بر رفتار فروریزش پیش‌رونده است. اولین بار ساسانی [۴] در سال ۲۰۰۸ اثر میان‌قاب روی پتانسیل فروریزش پیش‌رونده را بررسی کرد. ساسانی آزمایشی روی ساختمان بتن مسلح هتل سان دیگو

انجام داد و خرابی این ساختمان با حذف ۲ ستون کنار هم را مورد بررسی قرار داد. برای مدل کردن دیوارهای پرکننده ساختمان از المان پوسته‌ای بدون در نظر گرفتن آثار ترک خوردگی و مدل دستک فشاری FEMA356^۱ استفاده نمود. نتایج حاصل از بکارگیری المان پوسته‌ای حدود ۴ درصد با نتایج واقعی تفاوت داشت ولی نتایج مدل دارای دستک، ۸۰ درصد بیشتر از نتایج مدل دارای المان پوسته‌ای به دست آمد. همچنین نتایج بررسی ساختمان در برابر فروریزش پیش‌رونده نشان داد که تغییر مکان ساختمان بدون در نظر گرفتن میان‌قاب، تقریباً ۲/۴ برابر پاسخ ساختمان با در نظر گرفتن میان‌قاب است. این نتیجه بیان‌کننده تأثیر میان‌قاب‌ها در بازپخش بارهای وارد شده است. مطالعه دیگری درباره‌ی میان‌قاب تحت فروریزش پیش‌رونده به وسیله‌ی تسای و تسوی [۵] در سال ۲۰۰۹ انجام شد. در این مطالعه اثر میان‌قاب بنایی با ارزیابی استاتیکی خطی آیین‌نامه GSA بررسی شد. مقادیر نسبت نیرو به ظرفیت (DCR)^۲ لنگر خمشی، در انتهای تیرها محاسبه و با حالت ساختمان، بدون مدل کردن میان‌قاب، مقایسه شد. در حالت وجود میان‌قاب، DCR، کمتر از حالت بدون میان‌قاب به دست آمد که بیان‌کننده اثر مثبت میان‌قاب بر افزایش مقاومت ساختمان در برابر فروریزش پیش‌رونده است.

با وجود گستردگی پژوهش‌های انجام‌شده درباره‌ی قاب مرکب تحت بار جانبی، دیده می‌شود که رفتار میان‌قاب‌ها تحت فروریزش پیش‌رونده، هنوز به طور جامع بررسی نشده است و در آیین‌نامه‌های طراحی سازه در مقابل فروریزش پیش‌رونده از آثار میان‌قاب‌ها در محاسبه پتانسیل مقاومت در برابر فروریزش پیش‌رونده چشم‌پوشی شده است. بنابراین در این پژوهش سعی شده است با کمک روش‌های مدل‌سازی مصالح بنایی و ریز مدل‌سازی، یک مدل بزرگ‌مقیاس

1- Federal Emergency Management Agency

2- Demand to Capacity Ratio

(ماکرو) برای تحلیل استاتیکی غیرخطی قاب‌های بتنی با میان‌قاب‌های بنایی تحت اثر حذف ستون ارائه شود. برای نمایش کاربرد مدل و کنترل کارایی آن، پاسخ دو ساختمان بتنی به عنوان نمونه، در اثر حذف ستون، با در نظر گرفتن میان‌قاب و بدون در نظر گرفتن آن با استفاده از روش استاتیکی غیرخطی UFC2009 مقایسه می‌شود.

۲- مدل‌سازی

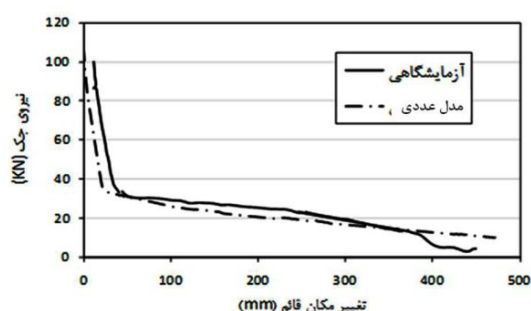
در این پژوهش از نرم‌افزار اجزای محدود غیرخطی COM3 توسعه یافته در دانشگاه توکیو استفاده شده است [۶]. این نرم افزار با استفاده از مجموعه‌ای از المان‌های گوناگون، توانایی مدل کردن رفتار غیرخطی سازه‌های بتنی، در حالات مختلف بارگذاری را دارد و با توجه به در اختیار بودن مجوز استفاده و توسعه آن برای نویسندگان، این برنامه در فرایند پژوهش استفاده شد.

در این نرم افزار، مدل‌سازی بتن مسلح با استفاده از روش ترک پخشی ثابت انجام می‌شود. در روش ترک پخشی، سازوکار اصلی و مؤثر بر رفتار غیر خطی اعضای بتن مسلح ترک‌خورده، با ایده‌آل‌سازی قسمت ترک‌خورده به صورت ترک گسترده و با توجه به معادلات تعادل و شرایط سازگاری و استفاده از مدل‌های رفتاری متوسط بتن و فولاد تعیین می‌شود. قبل از ترک‌خوردگی، رفتار المان بر پایه‌ی نظریه خمیری با در نظر گرفتن آثار سه محوره تنش‌های اعمال شده، تعیین می‌شود. بعد از ترک‌خوردگی، شرکت‌پذیری سازوکارهای مختلف مانند اندرکنش بتن و آرماتور، درهم فرو رفتگی دانه‌های بتن، برش انتقال یافته به وسیله فولاد و تأثیر ترک‌خوردگی بر رفتار فشاری بتن، رفتار المان را کنترل خواهد کرد. در این نرم‌افزار از مدل‌های رفتاری دانشگاه توکیو که به وسیله‌ی مائکاو و دیگر همکاران توسعه یافته [۶]، استفاده شده است. این مدل‌های رفتاری،

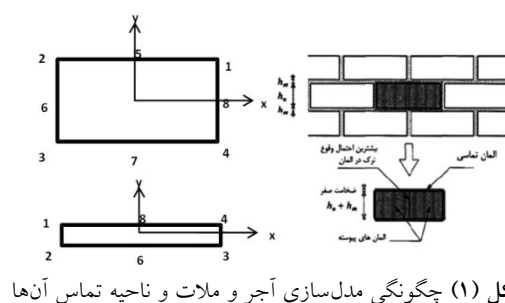
رابطه بین تنش متوسط و کرنش متوسط را ارائه می‌دهند. در این نرم‌افزار برای مدل‌سازی اعضای قابی بتن مسلح، می‌توان از المان با مقطع فیبری استفاده کرد. مقطع اعضا به تعدادی سلول تقسیم‌بندی شده و با توجه به موقعیت سلول‌ها، مقدار آرماتور آن و مشخصات مصالح تعیین می‌شود. اثر تنش‌های عرضی (محصورکننده) ناشی از وجود خاموت‌ها در مدل رفتاری تک‌محوره مصالح منظور می‌شود.

میان‌قاب‌های بنایی به صورت ریزمدل و با مدل‌سازی آجر و ملات بین آن‌ها شبیه‌سازی می‌شوند. برای مدل‌سازی نواحی ناپیوسته سازه، همچون جدا شدن و لغزش آجرها در محل تماس با ملات، از المان تماسی استفاده می‌شود. این المان یک المان شش‌گره‌ی است که مدل رفتاری آن بر پایه‌ی مدل چگالی تماسی لی و همکاران [۷] است. این مدل به وسیله‌ی صالحی و همکاران [۸] و غیائی [۹] برای مدل‌سازی دیوارهای بنایی توسعه داده شده است.

در این پژوهش، هر آجر با دو المان مدل‌سازی می‌شود، به گونه‌ای که یک المان تماسی بین آن‌ها و در امتداد درز ملات‌های قائم قرار داده می‌شود (شکل ۱). این المان تماسی به گونه‌ای تعریف می‌شود که ویژگی‌های مشابه رفتار آجر داشته باشد. المان تماسی افزون بر مکان‌های یادشده در نقاطی که بیشترین احتمال گسیختگی وجود دارد نیز قرار داده می‌شود تا احتمال وقوع ترک‌خوردگی و جداشدگی بررسی شود. این نواحی شامل ملات بین آجرها، محل اتصال دیوارهای بنایی به تیر و ستون و همچنین محل اتصال ستون به شالوده است. در محل تماس میان‌قاب و قاب بتنی (پیرامون دیوار میان‌قاب) نیز برای شبیه‌سازی جداشدگی و لغزش میان‌قاب نسبت به قاب از المان تماسی استفاده می‌شود. توضیحات تکمیلی درباره‌ی مدل‌های رفتاری در مرجع شماره ۶ قابل پیگیری است.



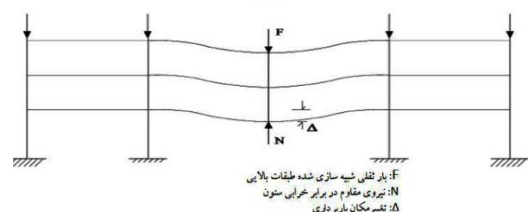
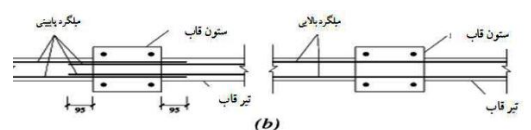
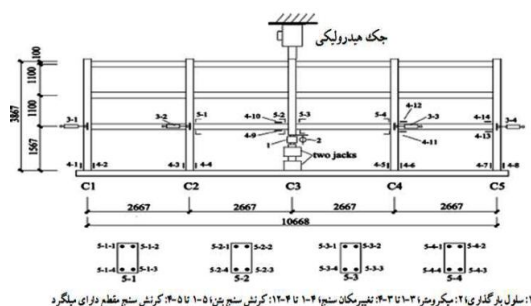
شکل (۳) مقایسه نمودار بار- تغییر مکان آزمایشگاهی و مدل عددی



شکل (۱) چگونگی مدل سازی آجر و ملات و ناحیه تماس آن‌ها

۳- اعتبار سنجی مدل سازی انجام شده

برای بررسی درستی مدل سازی حذف ستون در ساختمان با نرم افزار COM3، از نتایج آزمایشگاهی وی- جیان و همکارانش [۱۰] که روی قاب بتن مسلح، تحت اثر حذف ستون انجام داده‌اند، استفاده شده است (شکل ۲). این آزمایش روی یک قاب بتنی ۴ طبقه ۳ دهانه انجام شد. برای مطالعه خرابی، ستون با روش باربرداری استاتیکی حذف شده است. نتیجه به دست آمده، بیانگر توانایی نرم افزار COM3 در شبیه سازی حذف ستون است (شکل ۳).



شکل (۲) ویژگی های قاب آزمایش شده، ابعاد مقاطع و سامانه بارگذاری [۱۰]

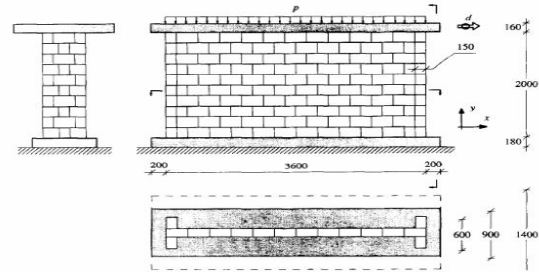
برای سنجش درستی مدل سازی مصالح بنایی، نتایج آزمایش های انجام شده به وسیله گنز و تولیمان [۱۱] بررسی می شود. آن‌ها چهار دیوار را در شرایط بارگذاری متفاوت آزمایش کردند. اولین دیوار تحلیل شده $W1$ ، در معرض بار قائم گسترده 0.61 kg/cm^2 قرار گرفته است. این دیوار در برابر اعمال جابه جایی افقی در تراز دال بتنی بالای دیوار، پاسخ شکل پذیر همراه با شکست برشی و کششی در امتداد ترک های پله ای قطری، نشان داده است. هندسه دیوار و چگونگی اعمال بار در شکل ۴ و ویژگی های مصالح در راستای متعامد، در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی دیوار $W1$ در شکل ۵ و الگوی ترک خوردگی حاصل از مدل سازی عددی دیوار در شکل ۶ ارائه شده است.

جدول (۱) ویژگی های مصالح مصرف شده در قاب مرکب

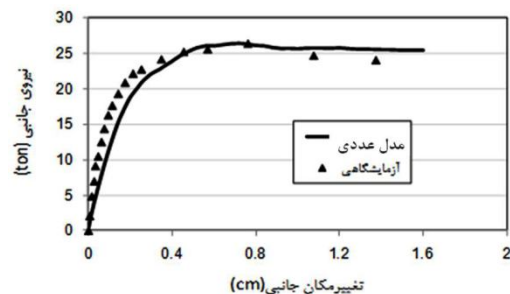
$E_x \text{ (N/mm}^2\text{)}$	۲۴۶۰
$f_{m_x} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	۱/۸۷
$f_{m_y} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	۷/۶۱
$f_{t_x} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	۰/۲۸
$f_{t_y} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	۰/۰۵

مقایسه نتایج، گویای دقت قابل قبول مدل عددی در مدل سازی رفتار قاب بتنی تحت فروریزش و همچنین مدل سازی اندرکنش سامانه قاب بتنی و میان قاب بنایی

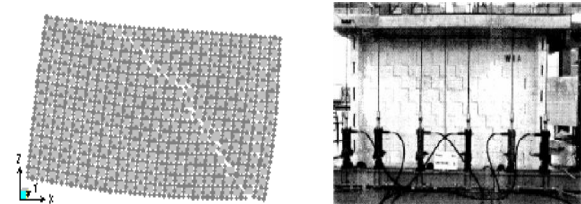
است و در ادامه، مبنای محاسبات و توسعه مدل ماکرو^۱ قرار می‌گیرد.



شکل (۴) هندسه دیوار آزمایش شده و چگونگی اعمال بار



شکل (۵) مقایسه منحنی مدل عددی و آزمایشگاهی دیوار W1

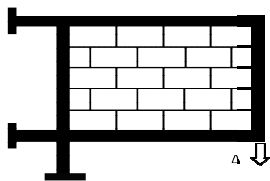


شکل (۶) تغییر شکل و ترک خوردگی آزمایشگاهی و تحلیلی دیوار

۴- مدل قاب پیشنهاد شده برای در نظر گرفتن میان قاب تحت فروریزش پیش‌رونده

میان قاب با جلوگیری از حرکت آزاد قاب، موجب می‌شود در اثر اندرکنش بین آن‌ها، انتقال نیرو از روش انتقال خمشی در قاب خالی به روش انتقال خرابایی در قاب مرکب تبدیل شود. تحت بار جانبی، انتقال نیرو به روش خرابایی باعث افزایش نیروی محوری و در عوض کاهش

لنگرهای خمشی و نیروهای برشی در ستون‌ها می‌شود. درحالی که در قاب، تحت فروریزش پیش‌رونده، انتقال نیرو به روش خرابایی باعث افزایش نیروی محوری و کاهش لنگر خمشی و نیروی برشی در تیرها می‌شود. به عبارت دیگر، ساز و کار رفتاری قاب، تحت بار جانبی و بار قائم متفاوت است. بنابراین نمی‌توان از مدل‌های قاب مرکب، تحت بار جانبی برای ارزیابی رفتار میان قاب، تحت بار قائم استفاده کرد. برای بررسی رفتار قاب، تحت بار جانبی از مدل قاب مرکب ساده با تکیه‌گاه گیردار در پایه استفاده می‌شود. از آنجا که در حالت بارگذاری قائم و جانبی، میان قاب به صورت قطری عمل می‌کند، می‌توان از مدل قاب، تحت بار جانبی با ۹۰ درجه چرخش برای حالت بارگذاری قائم استفاده کرد؛ با این تفاوت که برای حفظ پایداری این قاب، در این پژوهش از قاب مرکب با شرایط مرزی نمایش داده شده در شکل ۷، استفاده می‌شود. با در نظر گرفتن قاب مرکب شکل ۷ و با انجام مطالعات پارامتریک روی قاب مرکب با نسبت ابعادی و ویژگی‌های مصالح متفاوت، در نهایت مدل ساده‌شده‌ای برای در نظر گرفتن اثر میان قاب تحت بارگذاری قائم ناشی از حذف ستون ارائه شده است.



شکل (۷) مدل قاب پیشنهاد شده برای در نظر گرفتن میان قاب در برابر حذف ستون

۵- مدل دستک فشاری برابر برای مدل سازی میان قاب

اگرچه با ریزمدل سازی یک میان قاب (مدل سازی آجر، ملات و اتصال بین آن‌ها) می‌توان به پاسخ مناسب از رفتار

E_{me} : ضریب ارتجاعی مورد انتظار مصالح میان‌قاب
(kg/cm^2)

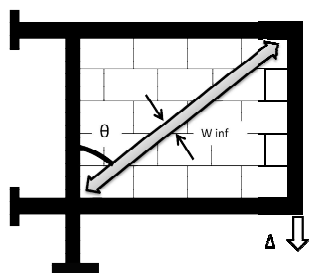
I_b : لنگر اینرسی تیر (cm^4)

r_{inf} : طول قطری پانل میان‌قاب (cm)

t_{inf} : ضخامت پانل میان‌قاب و دستک فشاری معادل (cm)

θ : زاویه‌ای که تانژانت آن برابر با نسبت طول به ارتفاع پانل می‌باشد.

λ : ضریبی برای محاسبه عرض دستک فشاری است.



شکل (۸) مدل دستک فشاری تحت اثر حذف ستون

پس با توجه به رابطه ۱، عرض مقطع دستک معادل تعیین می‌شود. عمق مقطع، برابر ضخامت دیوار و مدول ارتجاعی آن برابر مدول ارتجاعی دیوار خواهد بود.

- تعیین مقاومت دستک معادل

در آیین‌نامه ASCE41^۱ مقاومت میان‌قاب بنایی بر اساس ظرفیت برش ملات آن در راستای افقی تعیین می‌شود که قابل استفاده برای بارگذاری در راستای قائم نیست. پس در این پژوهش مقاومت دستک فشاری برپایه‌ی فرض مود شکست کششی قطری پیشنهاد شده است. پیش‌بینی دقیق ترک قطری برای هر دیوار بسیار مشکل است و شاید ممکن نباشد. زیرا به دست آوردن ضرایب مقاومت برشی هر دیوار به چگونگی چیدن دیوار، نوع ملات و آجر، عمل آوردن ملات و عوامل دیگر بستگی دارد که می‌توانند از یک دیوار به دیوار دیگر تغییر کنند. مقاومت و سختی قاب، تأثیر چندانی بر مقاومت

سازه رسید، اما این نوع شبیه‌سازی در پروژه‌های واقعی و در مقیاس‌های بزرگ عملاً غیرقابل استفاده است. در این قسمت سعی شده یک مدل ساده با استفاده از ایده دستک فشاری برای شبیه‌سازی رفتار میان‌قاب‌ها تحت اثر حذف ستون معرفی شود.

برای مدل‌سازی رفتار میان‌قاب‌ها تحت بارهای جانبی همچون زلزله، از المان دستک فشاری با رفتار ارتجاعی-خمیری استفاده می‌شود. در گزارش‌های FEMA، پارامترهای این دستک معادل برای بارگذاری جانبی ارائه شده است. برای برابر سازی رفتار میان‌قاب با دستک فشاری، به تعیین سختی محوری و مقاومت فشاری دستک نیاز است.

- تعیین سختی دستک معادل

رابطه معرف سختی دستک فشاری در گزارش FEMA306، برای میان‌قاب تحت بار جانبی است و کافی است برای حالت بارگذاری قائم به جای ارتفاع از طول میان‌قاب و همچنین به جای ممان اینرسی ستون، از ممان اینرسی تیر استفاده شود. سختی ارتجاعی درون‌صفحه‌ای یک پانل از میان‌قاب مصالح بنایی غیرمسلح، پیش از ترک‌خوردگی را باید با به کارگیری یک دستک قطری فشاری برابر به عرض w طبق رابطه ۱ به دست آورد [۱۲]. عرض دستک w برابر است با (شکل ۸):

$$w = 0.175(\lambda L_{beam})^{-0.4} r_{inf} \quad (۱)$$

که در آن:

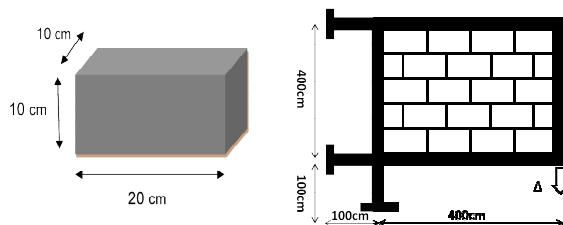
$$\lambda = \left[\frac{10 E_{me} t_{inf} \sin 2\theta}{E_{fe} I_b L_{inf}} \right]^{0.25} \quad (۲)$$

L_{beam} : طول مرکز به مرکز ستون (cm)

L_{inf} : طول پانل میان‌قاب (cm)

E_{fe} : ضریب ارتجاعی مورد انتظار مصالح قاب (kg/cm^2)

۴ قاب مرکب با ابعاد و ویژگی‌های مصالح گوناگون در نرم‌افزار COM3 ساخته و نتایج بررسی آن‌ها با نتایج استفاده شده دستک فشاری، مقایسه شده است. در این بخش ویژگی‌ها و نتایج بررسی ریزمدل‌سازی و مدل دارای دستک برای هر ۴ قاب مرکب آمده است. قاب شماره ۱ با ابعاد ۳۰۰ و بلندی ۴۰۰ سانتی‌متر انتخاب شده است. هندسه قاب در شکل ۱۰، ابعاد آجر مصرف شده در شکل ۱۱، و ویژگی‌های مصالح میان‌قاب در جدول ۲ و مشخصات تیر و ستون در جدول ۳، نشان داده شده است.



شکل (۱۰) ویژگی‌های قاب ۱ شکل (۱۱) ابعاد آجر مصرف شده

جدول (۲) ویژگی‌های مصالح مصرف شده در قاب مرکب

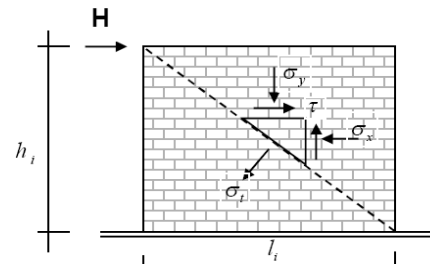
مقاومت فشاری بتن	۲۱۰ kg/cm^2	مقاومت فشاری آجر	۷۵ kg/cm^2
مقاومت کششی بتن	۱۸ kg/cm^2	مقاومت فشاری ملات	۵۰ kg/cm^2
مدول ارتجاعی فولاد	۲۰۰۰۰۰ kg/cm^2	تنش تسلیم فولاد	۴۰۰۰ kg/cm^2

جدول (۳) ویژگی‌های تیر و ستون قاب مرکب

سطح مقطع ستون	۴۰×۴۰ cm	سطح مقطع تیر	۳۰×۳۰ cm
میلگرد گوشه ستون	۴Φ۱۶	میلگرد گوشه تیر	۳Φ۲۰
میلگرد میانی ستون	۴Φ۱۶	میلگرد میانی تیر	۲Φ۲۰

مقاومت فشاری، مدول ارتجاعی منشور مصالح بنایی، و مقاومت چسبندگی و ضریب اصطکاک داخلی در جدول ۴

ترک قطری ندارد؛ بلکه این مقاومت تنها به نسبت ابعادی قاب و نوع مصالح مصرف شده در میان‌قاب بستگی دارد. مقادیر بحرانی تنش‌های برشی، قائم و کششی قطری در مرکز یک میان‌قاب برپایه‌ی ارزیابی دقیق اجزای محدود [۱۳] با روابط زیر محاسبه می‌شود: (شکل ۹):



شکل (۹) تنش‌ها در مرکز میان‌قاب به ضخامت t

$$\tau = \frac{1.43H}{l_i t}, \quad \sigma_v = \frac{(0.8h_i/l_i - 0.2)H}{l_i t}, \quad \sigma_t = \frac{0.58H}{l_i t} \quad (۳)$$

با در نظر گرفتن معیار گسیختگی کولمب و تحت بارگذاری قائم می‌توان نوشت:

$$\tau = \tau_0 + \mu \sigma_y \quad (۴)$$

$$\frac{1.43H}{h_i t} = \tau_0 + \frac{\mu H}{h_i t} (0.8l_i/h_i - 0.2) \quad (۵)$$

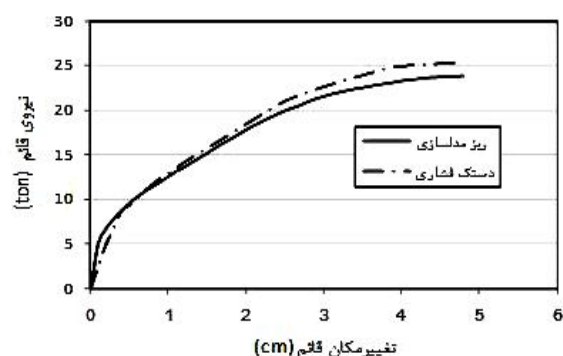
و بر این اساس، مقاومت دستک فشاری در راستای برشی به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$H_{DK} = \frac{\tau_0 h_i t}{1.43 - \mu \left(\frac{0.8l_i}{h_i} - 0.2 \right)} \quad (۶)$$

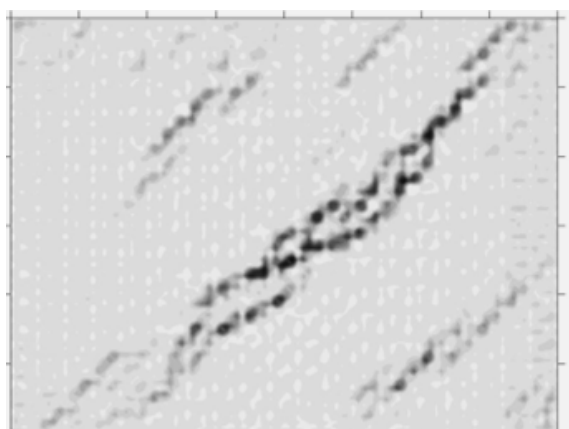
با تصویر مقاومت گفته شده به راستای محوری دستک معادل، مقاومت فشاری دستک، تعیین می‌شود.

۶- مقایسه پاسخ ریزمدل و مدل دارای دستک

برای اعتبارسنجی مدل بزرگ مقیاس معرفی شده در بند بالا،



شکل (۱۲) مقایسه منحنی بار قائم - تغییر مکان در ریزمدل و دستک فشاری قاب مرکب ۱



شکل (۱۳) مود شکست قاب شماره ۱

ویژگی‌های مدل‌های دیگر در جدول ۵ آمده است. به جز پارامتری که در جدول نشان داده شده است، بقیه پارامترها نسبت به قاب شماره ۱ ثابت است. عرض دستک فشاری و مقاومت قاب مرکب هر مدل نیز در جدول ۵ با استفاده از روابط ارائه شده برای دستک فشاری به دست می‌آید.

جدول (۵) ویژگی‌های مدل‌های دیگر

مدل ۲	طول میان‌قاب	عرض دستک	مقاومت دستک
	۵۰۰ cm	۶۱/۳ cm	۸۰۰۲ kg
مدل ۳	مقاومت فشاری بتن	عرض دستک	مقاومت دستک
	۳۵۰ kg/cm ²	۵۷/۱۷ cm	۶۲۷۸ kg
مدل ۴	ضخامت پانل	عرض دستک	مقاومت دستک
	۲۰ cm	۵۲ cm	۱۲۵۵۶ kg

آمده است. از مقادیر جدول ۴ برای ریزمدل‌سازی دیوار بنایی استفاده می‌شود.

جدول (۴) ویژگی‌های مصالح بنایی در قاب مرکب

مقاومت	۴۴	مقاومت	۱/۷۶
فشاری منشور	kg/cm ²	چسبندگی ملات	kg/cm ²
مدول	۲۴۲۰۰	ضرب	۰/۶۸
ارتجاعی منشور	kg/cm ²	اصطکاک داخلی	

برای جایگزینی میان‌قاب با دستک فشاری در نرم‌افزار COM3 از المان خریپای غیرخطی استفاده شد. مقاومت تسلیم، مدول ارتجاعی و سطح مقطع، پارامترهای لازم برای تعریف این المان است. مدول ارتجاعی دستک برابر مدول ارتجاعی مصالح بنایی است. عرض دستک از رابطه ۱ به دست می‌آید و با ضرب آن در ضخامت میان‌قاب، سطح مقطع دستک محاسبه می‌شود. تنش تسلیم دستک از تقسیم مقدار نیروی به دست آمده از رابطه ۶ بر سطح مقطع دستک به دست می‌آید. عرض دستک فشاری با توجه به رابطه ۱ برابر است با:

$$w = 55.72 \text{ cm}$$

$$A = w.t = 55.72 \times 10 = 557.2 \text{ cm}^2$$

مقاومت قاب مرکب با توجه به رابطه (۴) برابر است با:

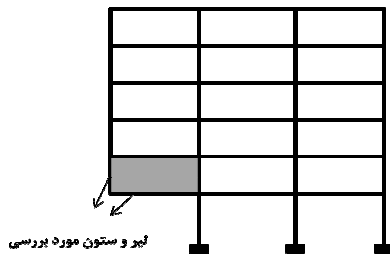
$$H_{DK} = 6278 \text{ kg}$$

نمودار بار- تغییر مکان ریزمدل و مدل دارای دستک فشاری در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همان‌گونه که نمودار نشان می‌دهد، مدل درست شده برای دستک فشاری، جایگزین مناسبی برای میان‌قاب است. مود شکست قاب شماره ۱ در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، مود شکست قطری کششی است و با فرض در نظر گرفته شده برای تعیین مقاومت دستک فشاری، همخوانی دارد.

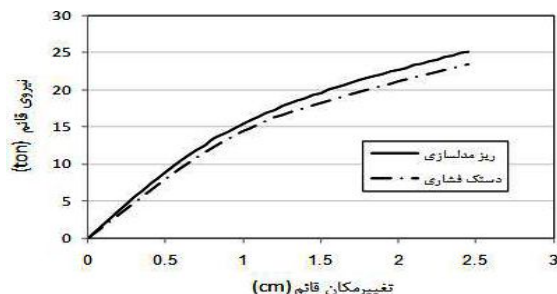
طرح بهسازی توجه شود.

۷- بررسی مدل ارائه شده در یک قاب کامل

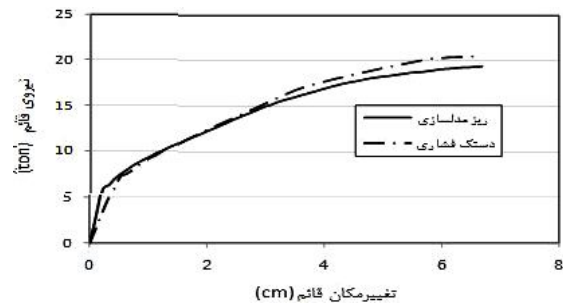
در این بخش، درستی مدل دستک معرفی شده در یک قاب کامل بتنی بررسی شده است. برای انجام این بررسی، قاب ۶ طبقه بتنی با شکل پذیری زیاد و طراحی شده مطابق آبا، انتخاب و در یکی از دهانه های قاب، میان قاب بنایی قرار داده شده است. بلندی هر طبقه، ۳ متر و طول هر دهانه، ۵ متر است. ابتدا قاب با میان قاب درون آن، با حذف ستون، ریزمدل سازی شده است (شکل ۱۷) و سپس برای بررسی درستی مدل دستک اصلاح شده، در مدل سازی از دستک فشاری به جای میان قاب استفاده شده است. ضخامت میان قاب، ده سانتی متر و ویژگی های مصالح آن مانند مدل ۲ است. نتایج به دست آمده از ریزمدل سازی و مدل دارای دستک در شکل ۱۸ دیده می شود. در مدل سازی میان قاب، از اثر کمایش خارج از صفحه دیوار چشم پوشی شده است.



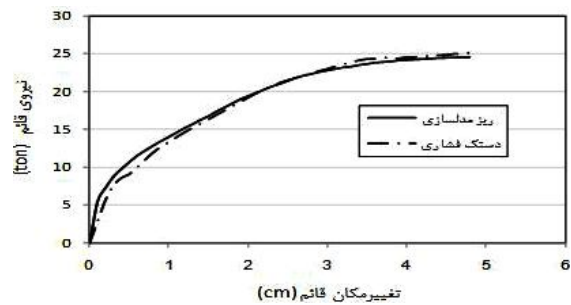
شکل (۱۷) قاب دارای میان قاب با حذف ستون گوشه (ریزمدل سازی شده در نرم افزار COM3)



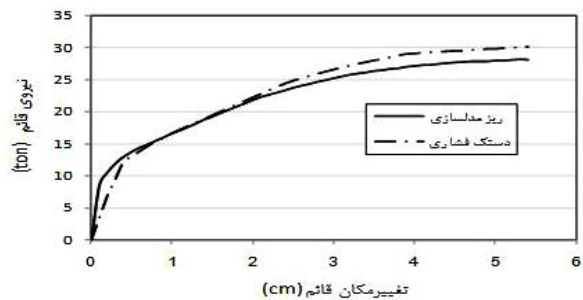
شکل (۱۸) مقایسه منحنی بار قائم - تغییر مکان در ریزمدل و دستک فشاری قاب کامل



شکل (۱۴) مقایسه منحنی بار قائم - تغییر مکان در ریزمدل و دستک فشاری قاب مرکب ۲



شکل (۱۵) مقایسه منحنی بار قائم - تغییر مکان در ریزمدل و دستک فشاری قاب مرکب ۳

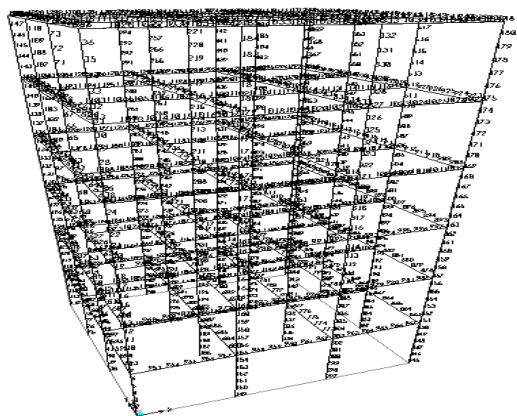


شکل (۱۶) مقایسه منحنی بار قائم - تغییر مکان در ریزمدل و دستک فشاری قاب مرکب ۴

نتایج به دست آمده از ریزمدل سازی و مقایسه آن با نتایج استفاده از دستک، گویای توانایی مدل ارائه شده در برآورد رفتار غیرخطی درون صفحه ای قاب های مرکب بتنی تحت بار قائم استاتیکی فزاینده است. چون میان قاب اثر زیادی بر پاسخ سازه نسبت به پوش بار قائم حاصل از حذف ستون دارد، در ساختمان های با پتانسیل بالای فروزش پیش رونده باید به نقش میان قاب های موجود برای ارزیابی و همچنین

۸-۱- ساخت مدل

در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار ETABS، ساختمان ۶ طبقه با و بدون در نظر گرفتن بار لرزه‌ای، طراحی شد. نمای کلی ساختمان طراحی شده در نرم‌افزار ETABS در شکل ۱۹ دیده می‌شود. ساختمان، پلان مربعی ۲۲۵ متر مربع و ۳ دهانه در هر ضلع دارد؛ بلندی طبقات، ۳ متر و عرض دهانه‌های ساختمان، ۵ متر است. برای ساختمان با شکل‌پذیری زیاد (قاب خمشی بتنی ویژه)، ضریب رفتار ۱۰ در نظر گرفته شده است. مشخصات مصالح و پارامترهای طراحی برای هر دو حالت در جدول ۷ آمده است.



شکل (۱۹) نمای کلی ساختمان‌های طراحی شده با نرم افزار ETABS و ساخته شده با نرم‌افزار COM3

جدول (۷) مشخصات مصالح و پارامترهای طراحی

مقاومت فشاری بتن	$210 (kg/cm^2)$	ضریب اهمیت	۱
مقاومت تسلیم فولاد	$4000 (kg/cm^2)$	ضریب رفتار	۱۰ و ۴
مدول الاستیک فولاد	$2000000 (kg/cm^2)$	شتاب مبنای طرح	۰/۳۵
بار زنده طبقات	$200 (kg/cm^2)$	بار مرده طبقات	$530 (kg/cm^2)$
بار زنده بام	$150 (kg/cm^2)$	بار مرده بام	$500 (kg/cm^2)$

نتیجه به دست آمده از ریزمدل‌سازی و مدل دارای دستک، نشان‌دهنده درستی مدل پیشنهادی برای دستک فشاری است. افزون بر کنترل تغییر مکان- بار، می‌توان مقدار نیروهای ایجادشده در تیرها و ستون‌ها را در حالت ریزمدل‌سازی شده و مدل دارای دستک برای قاب بتنی، کنترل کرد. نتایج مقایسه بیشینه نیروهای تیر و ستون مشخص شده در شکل ۱۷، در حالت ریزمدل و مدل دارای دستک، در جدول ۶ آمده است. نتایج گویای توانایی مدل دستک برای تعیین نیروهای داخلی اعضا است.

جدول (۶) مقایسه نیروهای محوری و برشی در ریزمدل و دستک

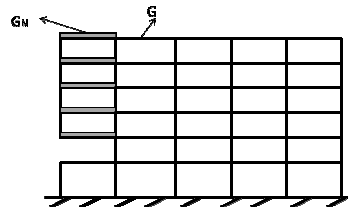
فشاری قاب کامل

عضو	ریزمدل	مدل دارای دستک
تیر	نیروی محوری (kg)	$4E+2/25$
	برش (kg)	$4E+3/37$
ستون	نیروی محوری (kg)	$4E+2/0$
	برش (kg)	$4E+3/8$

۸- پاسخ ساختمان بتنی با و بدون میان‌قاب به حذف ستون

برای بررسی فروریزش پیش‌رونده در ساختمان‌های بتنی، [بر پایه‌ی مبحث ششم مقررات ملی ساختمان مربوط به بارهای وارد بر ساختمان و آیین‌نامه بتن ایران (آبا)]، ساختمان ۶ طبقه‌ای با سامانه‌ی قاب خمشی ویژه و شکل‌پذیری زیاد و با در نظر گرفتن شرایط لرزه‌ای آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) و همچنین ساختمان ۶ طبقه‌ای بتنی بدون در نظر گرفتن بار لرزه‌ای و با شکل‌پذیری کم، با نرم‌افزار ETABS طراحی شد. برای بررسی فروریزش پیش‌رونده، این ساختمان‌ها در نرم‌افزار COM3 به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی شده و با حذف ناگهانی ستون کناری ساختمان، پاسخ استاتیکی غیرخطی آن‌ها تعیین شد.

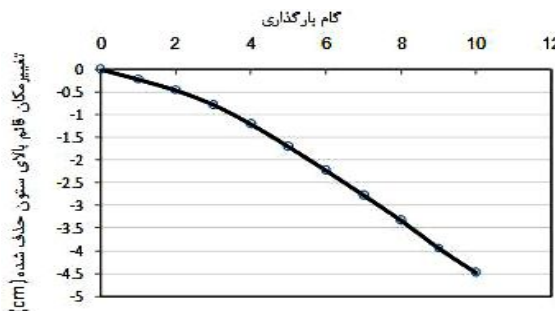
این که در بررسی این دو سازه بتنی، پاسخ برای ستون گوشه، بحرانی تر است [۱۴]، از نتایج حذف ستون میانی چشم پوشی شده است.



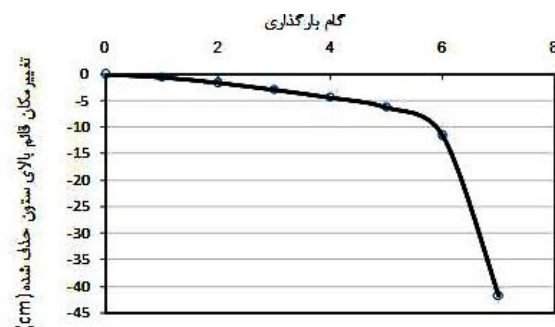
شکل (۲۰) محل اثر بار، با اثر حذف ستون

۳-۸- پاسخ ساختمان بتنی بدون میان قاب به حذف ستون

نمودار تغییر مکان قائم بالای ستون حذف شده در برابر گام بارگذاری برای ساختمان با شکل پذیری زیاد و ساختمان بدون در نظر گرفتن بار لرزه‌ای، به ترتیب در شکل ۲۱ و ۲۲ نشان داده شده است.



شکل (۲۱) نمودار تغییر مکان قائم گره بالایی ستون حذف شده در برابر گام‌های بارگذاری ساختمان با شکل پذیری زیاد



شکل (۲۲) نمودار تغییر مکان قائم گره بالایی ستون حذف شده در برابر گام‌های بارگذاری ساختمان، بدون در نظر گرفتن بار لرزه‌ای

۲-۸- تحلیل استاتیکی غیرخطی پدیده حذف ستون

برای بررسی استاتیکی غیرخطی باید مدل سازی غیرخطی اعضا و اتصالات انجام شود. برای بررسی، المان برابر از سازه حذف می شود و بارهای اعمال شده از بار صفر تا همه‌ی بار به صورت افزایشی به سازه وارد می شود. برای دهانه‌های بالای ستون حذف شده، مقدار بار برابر است با:

$$G_N = \Omega_N (1.2DL + 0.5LL) \quad (۷)$$

DL بار مرده و LL بار زنده و Ω_N ضریب اثر دینامیکی است که برای ساختمان بتن مسلح مطابق آیین نامه UFC2009 از رابطه زیر به دست می آید.

$$\Omega_N = 1.04 + 0.45 / (\theta_{pra} / \theta_Y + 0.48) \quad (۸)$$

برای باقی مانده دهانه‌ها، بارگذاری به صورت زیر است:

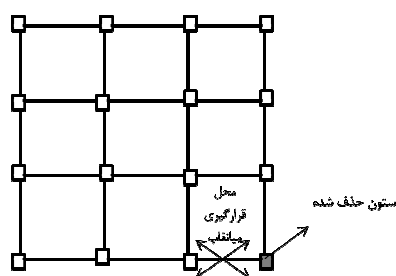
$$G = 1.2DL + 0.5LL \quad (۹)$$

برای در نظر گرفتن آثار P-Δ نیز بار جانبی به اندازه $\sum P \times 0.02$ به سازه وارد می شود. P مجموع بار مرده و زنده هر طبقه است. پس از بارگذاری، مقدار چرخش مفصل خمیری با مقادیر چرخش مجاز آیین نامه UFC 2009 مقایسه می شود. در صورتی که چرخش ها از مقادیر مجاز عبور نکرده باشد، سازه در برابر فروریزش پیشرونده مقاوم است؛ در غیر این صورت، سازه جدید باید تحت فروریزش، دوباره طراحی شود و سازه موجود در برابر فروریزش مقاوم سازی شود. محل اثر بارها برای قاب با ستون حذف شده در شکل ۲۰ نشان داده شده است. بر پایه‌ی آیین نامه UFC 2009، برای بررسی پتانسیل فروریزش پیشرونده در سازه‌ها باید ستون گوشه، ستون میان وجه بزرگ تر و ستون میان وجه کوچک تر، حذف شده و بحرانی ترین حالت در نظر گرفته شود. با توجه به

۸-۴- مدل‌سازی فروریزش پیش‌رونده در ساختمان

بتنی دارای میان‌قاب بنایی

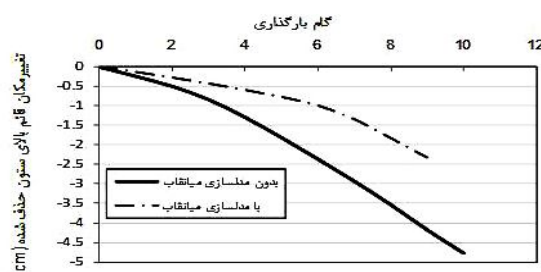
برای بررسی فروریزش پیش‌رونده در ساختمان‌های بتنی دارای میان‌قاب بنایی، ساختمان با شکل‌پذیری زیاد و ساختمان بدون در نظر گرفتن بار لرزه‌ای و شکل‌پذیری کم، انتخاب شده و میان‌قاب‌های موجود در ساختمان با استفاده از مدل دستک ساده‌شده، جایگزین شده است. مشخصات میان‌قاب، مانند شماره ۱ است و میان‌قاب تنها در دهانه مجاور ستون حذف‌شده در همگی طبقات قرار دارد (شکل ۲۳).



شکل (۲۳) محل قرارگیری میان‌قاب

۸-۵- پاسخ ساختمان میان‌قاب بنایی به حذف ستون

میان‌قاب‌های بنایی با استفاده از مشخصات دستک پیشنهادی در نرم‌افزار COM3، مدل شد. نتایج تحلیل استاتیکی غیر خطی ساختمان بتنی، با و بدون مدل‌سازی میان‌قاب‌های موجود برای ساختمان با شکل‌پذیری زیاد و ساختمان بدون در نظر گرفتن بار جانبی و شکل‌پذیری کم، به ترتیب در شکل ۲۴ و ۲۵ نشان داده شده است.



شکل (۲۴) تغییر مکان بالای ستون حذف‌شده در ساختمان با

شکل‌پذیری، زیاد با و بدون میان‌قاب

بارهای اعمال شده ناشی از حذف ستون در دو ساختمان، طی ۱۰ گام به سازه وارد می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۲۲ دیده می‌شود، ساختمان با شکل‌پذیری کم و بدون در نظر گرفتن بار جانبی، قبل از رسیدن بار به مقدار نهایی، دچار فروریزش شده است. چرخش گره‌ای با چرخش مجاز آیین‌نامه 2009 UFC برای دو ساختمان در جدول ۸ و ۹ مقایسه شده است. همان‌گونه که در جدول ۸ دیده می‌شود، ساختمان با شکل‌پذیری زیاد، در برابر فروریزش مقاوم است و ضوابط آیین‌نامه بتن ایران برای دوری از این نوع فروریزش کافی است.

این در حالی است که برای ساختمان بدون در نظر گرفتن بار لرزه‌ای و با شکل‌پذیری کم، همانطور که از شکل ۲۲ مشهود است، تغییر مکان زیادی در ساختمان ایجاد شده است که ناشی از خرابی بعضی از المان‌های سازه‌ای است. نتایج جدول ۹ حاکی از آن است که ساختمان بدون در نظر گرفتن بار لرزه‌ای دچار فروریزش شده و در برابر فروریزش نیاز به مقاوم‌سازی دارد.

جدول (۸) مقایسه چرخش گره‌ای با مقادیر مجاز آیین‌نامه 2009 UFC

در ساختمان با شکل‌پذیری زیاد

مقدار چرخش		چرخش مفصل پلاستیک Radian	رعایت حد مجاز Radian ۰.۰۶۳
قاب ۱	طبقه اول	۰/۰۱	OK
	بام	۰/۰۰۸۷	OK

جدول (۹) مقایسه چرخش گره‌ای با مقادیر مجاز آیین‌نامه 2009 UFC

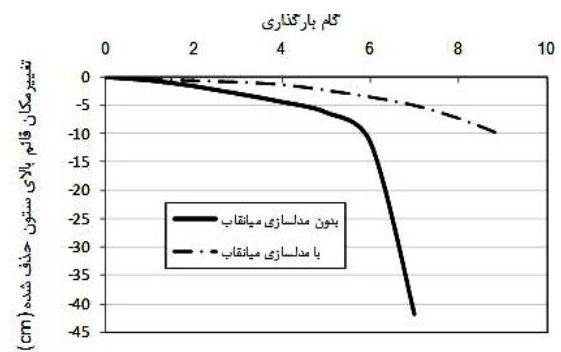
در ساختمان، بدون در نظر گرفتن بار لرزه‌ای

مقدار دوران		چرخش مفصل پلاستیک (Radian)	رعایت حد مجاز Radian ۰.۰۶۳
قاب ۱	طبقه اول	۰/۱۳۹	NOT OK
	بام	۰/۱۳۶	NOT OK

برابر ضخامت میان قاب مدل می شود و ظرفیت بیشینه قاب مرکب در بارگذاری قائم، متناظر با شکست قطری- کششی میان قاب است. از آنجا که میان قاب تأثیر زیادی در پاسخ سازه نسبت به پوش بار قائم حاصل از حذف ستون دارد، در ساختمان های با پتانسیل بالا در مقابل فروریزش پیش رونده باید به نقش میان قاب های موجود برای ارزیابی و همچنین طرح بهسازی توجه شود. همچنین با مدل کردن فروریزش پیش رونده در ساختمان های بتنی با و بدون میان قاب، مشخص شد که میان قاب های بنایی تأثیر زیادی در پاسخ سازه نسبت به حذف ستون دارند؛ پس لازم است در فرایند بررسی فروریزش پیش رونده ساختمان ها، به آثار میان قاب ها توجه شود.

۱۰- مراجع

- [1] General Services Administration, "Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects", U.S., Nov. 2003.
- [2] Design of Buildings to Resist Progressive Collapse. "The Unified Facilities Criteria (UFC) 4-023-03", Department of Defense, Approved for public release, 2009.
- [3] Leyendecker EV, Ellingwood BR. "Design methods for reducing the risk of progressive collapse in Buildings". US Department of Commerce, National Bureau of Standards, Washington, April 1977.
- [4] Sasani, M. "Response of a reinforced concrete infilled-frame structure to removal of two adjacent columns," Engineering Structures, vol.30, no.9, pp.2478-2491, Sep.2008.
- [5] Meng-Hao Tsai and Tsuei-Chiang Huang, "Effect of Interior Brick-infill Partitions on the Progressive Collapse Potential of a RC Building": Linear Static Analysis Results, Proceedings of World academy of Science, Engineering and Technology Volume ,ISSN: 2070-374038, February 2009.



شکل (۲۵) تغییر مکان بالای ستون حذف شده در ساختمان بدون در نظر گرفتن بار لرزه ای، با و بدون میان قاب

وجود میان قاب در ساختمان با شکل پذیری زیاد، (شکل ۲۴)، باعث افزایش مقاومت در برابر فروریزش خواهد شد؛ اگر چه این ساختمان به طور کلی در برابر فروریزش مقاوم است، ولی وجود میان قاب باعث کاهش تغییر شکل ها و چرخش مفاصل پلاستیک در مقایسه با حالت بدون میان قاب خواهد شد که گویای اثر مثبت میان قاب برابر فروریزش است. در شکل ۲۵ مشاهده می شود که میان قاب تأثیر زیادی بر پاسخ ساختمانی که صرفاً برای بار ثقلی طراحی شده است نسبت به پوش بار قائم دارد. در ساختمان با میان قاب، چرخش ها از مقادیر مجاز عبور نکرده ولی در حالت بدون میان قاب، فروریزش اتفاق افتاده و چرخش ها از مقادیر مجاز عبور کرده است. نتایج بررسی نشان می دهد در ساختمان های با پتانسیل بالای فروریزش باید به نقش میان قاب های موجود برای ارزیابی و همچنین طرح بهسازی توجه شود.

۹- نتیجه گیری

نتایج به دست آمده از ریز مدل سازی و مقایسه آن با نتیجه استفاده از دستک، گویای توانایی مدل پیشنهادی در برآورد رفتار غیر خطی درون صفحه ای قاب های مرکب بتنی تحت بار قائم استاتیکی فزاینده است. سختی به دست آمده از میان قاب، با دستکی به عرض w و ضخامت

- [11] Ganz, H. R., and Thurlimann, B. "Tests on masonry walls under normal and shear loading." Rep. No.7502-4, Inst. Of Struct. Engrg., ETH Zurich, Zurich, Switzerland (in German), 1984.
- [12] FEMA 306, "Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings: Basic Procedures Manual", Federal Emergency Management Agency, US, 1998.
- [13] Stafford-Smith, B., and Coul, A., "Tall building structures: analysis and design" John Wiley and Sons, Toronto, Ont, 1991.
- [۱۴] رحیمی، سپیده. "مدل‌سازی و ارزیابی فروریزش پیش‌رونده در قاب‌های بتن مسلح با میان‌قاب‌های بنایی؛" پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس؛ ۱۳۸۹.
- [6] Maekawa K., "General Information for COM3 Version 9.11 in MULTI-COM," Department of Civil Engineering, University of Tokyo, Jul. 2006.
- [7] Okamura H., Maekawa K., "Nonlinear Analysis and Constitutive Models of Reinforced Concrete," Tokyo, Japan: Gihodo-Shuppan, 1991.
- [۸] صالحی دلارستانی، ایمان، سلطانی محمدی. مسعود، تسنیمی. عباسعلی. "رفتار غیر خطی المان اتصالی بنایی در برش و اعتبارسنجی آن." فصلنامه فنی و مهندسی مدرس، شماره ۳۶، تابستان ۱۳۸۸.
- [۹] غیاثی. بهمن. "همگن سازی و توسعه مدل‌های رفتاری جهت ارزیابی عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های آجری تقویت شده با شبکه فولادی و پوشش بتن؛" پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس؛ ۱۳۸۷.
- [10] Wei-Jian Yi, et al, "Experimental Study on Progressive Collapse-Resistant Behavior of Reinforced Concrete Frame Structures", ACI STRUCTURAL JOURNAL, V. 105, No. 4, July-August 2008.