

ارزیابی پایداری قاب‌های خمشی فولادی در برابر خرابی‌های پیشرونده

موسی محمودی صاحبی^{۱*}، سید هژیر کوزانی^۲، طه تیموری^۳ و سیدشاکر هاشمی^۴

^۱ دانشیار گروه عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران

^۲ کارشناس ارشد سازه، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران

^۳ کارشناس ارشد سازه، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران

^۴ استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه خلیج فارس بوشهر

چکیده

با توجه به حوادث ناشی از خرابی‌های پیشرونده در سال‌های اخیر، اکثر آیین‌نامه‌ها بر کنترل موضوع خرابی پیشرونده تأکید نمودند. تحلیل خرابی پیشرونده نقش مهمی در تشخیص پایداری سازه‌ها در اثر بمب‌گذاری، برخورد وسائل نقلیه، آتش‌سوزی و غیره دارد. تحقیق حاضر به تحلیل وضعیت خرابی پیشرونده سازه‌های طراحی شده بر اساس آیین‌نامه‌های رایج در ایران می‌پردازد. برای این منظور، چند نمونه ساختمان‌های با سیستم قاب خمشی فولادی متوسط (دارای تعداد طبقات و طول دهانه‌های متنوع)، انتخاب شد و با حذف ناگهانی هر یک از ستون‌های آن، امکان پل‌زدن بر روی المان‌های دیگر بررسی شد. در ارزیابی سازه‌ها از روش مسیر جایگزین، معرفی شده توسط آیین‌نامه DOD2009 استفاده شد. در تحلیل سازه‌ها، سه روش تحلیل استاتیکی خطی، تحلیل استاتیکی غیر خطی و تحلیل دینامیکی غیر خطی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهند که، اکثر تیرهای موجود در قاب، قادر هستند پس از حذف ستون، بر روی المان‌های دیگر پل بزنند. هر چند بر اساس نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی خطی بعضی از تیرها، در معرض خطر قرار دارند. تیرهای قرار گرفته در بالاترین طبقه ساختمان از این قاعده مستثنی هستند و در تمامی تحلیل‌ها از عملکرد مناسبی برخوردار نمی‌باشند. در مورد ستون‌ها نیز نتایج نشان می‌دهند که فقط بر اساس تحلیل استاتیکی خطی، بعضی از ستون‌ها مستعد خرابی هستند. به طور کلی می‌توان ادعا کرد بر اساس نتایج به دست آمده در این تحقیق، روش استاتیکی خطی نسبت به روش‌های دیگر محافظه‌کارانه‌تر عمل می‌نماید.

واژگان کلیدی: خرابی پیشرونده، مسیر جایگزین، تحلیل دینامیکی غیر خطی، تحلیل استاتیکی خطی، تحلیل استاتیکی غیر خطی، قاب خمشی.

۱- مقدمه

و GSA اشاره کرد [۱، ۲]. رویکرد این آیین‌نامه‌ها بدین گونه است که در اثر تخریب ناگهانی یکی از اعضای اصلی سازه، اعضای باقی‌مانده قادر به پل زدن به روی دیگر المان‌ها باشند و مسیر جایگزینی جهت انتقال بار داشته باشند. مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران نیز به کنترل سازه در برابر خرابی‌های پیشرونده اشاره می‌کند و اعلام می‌نماید که ساختمان‌ها می‌بایست در برابر این نوع خرابی‌ها براساس مبحث بیست و یکم مقررات ملی ساختمان کنترل شوند [۳]. آیین‌نامه DOD که به صورت خاص به کنترل خرابی‌های پیشرونده در قالب مجموعه ضوابط آیین‌نامه‌های UFC می‌پردازد، مبنای تحقیق حاضر قرار دارد.

Kim و همکاران [۴]، به بررسی عملکرد قاب‌های خمشی فولادی مقاوم در برابر خرابی پیشرونده پرداختند. در این تحقیق که بر روی سه ساختمان فولادی با قاب خمشی انجام پذیرفت، عملکرد سازه‌ها با استفاده از دو آیین‌نامه GSA2003 و DOD2005 مورد ارزیابی قرار گرفت. در تحلیل سازه‌ها از سه روش، تحلیل استاتیکی خطی (LS)، استاتیکی غیر خطی (NS) و دینامیکی غیر خطی (ND) استفاده شد. نتایج حاصل از این

خرابی پیشرونده، پدیده‌ای است که طی آن، خسارت جزئی در یکی از اعضای سازه، باعث خسارت کلی در سازه می‌شود. در حقیقت، با گسیختگی موضعی در بخشی از سازه، پایداری کل سازه مورد تهدید قرار می‌گیرد. خسارت جزئی در عضو می‌تواند ناشی از انفجار، آتش‌سوزی، برخورد وسیله نقلیه به سازه، نشست ناگهانی و غیره باشد. این آسیب‌ها اغلب در مدت زمان کوتاه و به صورت دینامیکی به سازه اعمال می‌شود.

در سال‌های اخیر، با توجه به حوادث ناشی از خرابی‌های پیشرونده، در اکثر آیین‌نامه‌ها بر کنترل این موضوع تأکید شده است. بعد از تخریب ساختمان رونان پوینتدر سال ۱۹۶۸ و توجه بیشتر مهندسیین به بحث خرابی پیشرونده، موجی از تحقیقات بر روی روش‌های پیشگیری و یا کاهش پتانسیل سازه به خرابی پیشرونده آغاز گردید. نتیجه آن در ابتدا به صورت تغییرات در آیین‌نامه‌ها بود؛ ولی پس از گذشت چند سال و وقوع چندین حادثه مشابه، از جمله حوادث تروریستی ۱۱ سپتامبر آمریکا، آیین‌نامه‌های مجزایی جهت کاهش و یا جلوگیری از تخریب تنظیم گردید. از جمله این آیین‌نامه‌ها که به صورت مجزا به بحث خرابی پیشرونده می‌پردازند، می‌توان به دو آیین‌نامه DOD

Ezoddin و Zahrai [۸] روش ساده‌ای را برای ارزیابی خرابی پیشرونده پیشنهاد کردند و نتایج حاصل از آن را با نتایج حاصل از روش‌های رایج مقایسه نمودند و نتیجه گرفتند که روش پیشنهادی آن‌ها می‌تواند سازه‌ها را به روش ساده ارزیابی نماید.

Osama در سال ۲۰۱۵ رابطه‌ای برای ضریب افزایش بار در تحلیل‌های خرابی پیشرونده پیشنهاد نمود که دقت تحلیل را افزایش می‌دهد [۹].

Seweryn و همکاران، روش‌های استاتیکی و دینامیکی را برای ارزیابی خرابی پیشرونده قاب‌های خمشی با دال تخت انتخاب نمودند و نتایج حاصل از آن‌ها مقایسه نمودند [۱۰].

در این تحقیق به ارزیابی قاب‌های خمشی فولادی متوسط (طراحی شده بر اساس آیین‌نامه‌های بارگذاری و طراحی ایران) در برابر خرابی‌های پیشرونده بر پایه روش مسیر بار جایگزین (معرفی شده در آیین‌نامه DOD آمریکا) پرداخته می‌شود. در این تحقیق، تحلیل‌های سه‌بعدی به کار گرفته می‌شود. هدف اولیه این مقاله ارزیابی میزان استقامت سازه‌های مورد بررسی در برابر خرابی‌های پیشرونده است. دومین هدفی که این مقاله پی‌گیری می‌کند مقایسه کارائی روش‌های سه‌گانه در ارزیابی خرابی پیشرونده است.

۲- روش‌های تحلیل خرابی پیشرونده

جهت بررسی سازه ساختمان‌ها در برابر خرابی پیشرونده با استفاده از روش مسیر بار جایگزین در آیین‌نامه DOD، سه نوع تحلیل استاتیکی خطی (LS)، استاتیکی غیر خطی (NS) و دینامیکی غیر خطی (ND) پیشنهاد می‌شود.

۲-۱- روش استاتیکی خطی

در این روش که ساده‌ترین روش محسوب می‌شود، برای ارزیابی اعضا در برابر خرابی پیشرونده، ضریبی تحت عنوان m_{LIF} برای تصحیح تأثیرات ناشی از هندسه اعضا و بار دینامیکی در بارگذاری ثقلی اعضای بالایی ستون حذف شده در نظر گرفته می‌شود. با توجه به نوع سازه، اعم از فولادی، بتنی یا غیره و همچنین نوع اتصالات، ضریبی تحت عنوان ضریب بزرگ‌نمایی (m) برای هریک از اعضا، استخراج می‌گردد. m_{LIF} کوچک‌ترین ضریب بزرگ‌نمایی (m) المان‌های متصل به تیر می‌باشد. در تحقیق حاضر، مقدار m با عنایت به اتصال گیردار بهبود یافته در نظر گرفته شده است. ضریب بارگذاری (Ω) با توجه به m_{LIF}

تحقیق به این صورت است که وضعیت ستون‌های گوشه نسبت به ستون‌های مشابه بسیار ضعیف بوده و از پتانسیل بالایی جهت گسترش خرابی برخوردار هستند. علت این امر، کمبود المان‌های اضافه^۱ جهت پل زدن بار می‌باشد. همچنین با افزایش تعداد طبقات، احتمال تشکیل خرابی پیشرونده در طبقات تحتانی کاهش می‌یابد. علاوه بر آن اگر چه تحلیل ساختمان به روش استاتیکی خطی بسیار ساده می‌باشد، لیکن این روش، در برخی موارد، محافظه کارانه می‌باشد.

Khandelwal و همکاران [۵]، برای اندازه‌گیری مقاومت سازه از روش پائین کشیدن^۲ استفاده کردند. در این روش، سازه به سه حالت، شامل بار افزایشی عمودی (به صورت گسترده^۳)، بار افزایشی عمودی بر روی دهانه^۴ و بار افزایشی عمودی به صورت دینامیکی^۵ بر اساس دو آیین‌نامه GSA و DOD مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهند که روش آیین‌نامه GSA در مقایسه با DOD محافظه کارانه‌تر می‌باشد.

Liu [۶] تأثیر نوع تحلیل خرابی پیشرونده را بر اقتصاد طرح بررسی کرد. برای این منظور ایشان چند سازه فولادی را انتخاب نمود و در چهار حالت آن‌ها را طراحی نمود. در حالت اول سازه‌ها را بدون لحاظ نمودن تأثیرات خرابی پیشرونده (MWD) طراحی کرد ولی در حالت‌های بعدی، تأثیرات خرابی پیشرونده نیز منظور شد. برای اعمال اثرات خرابی پیشرونده به صورت جداگانه از سه تحلیل استاتیکی خطی (PCLS)، استاتیکی غیر خطی (PCNS) و دینامیکی غیر خطی (PCND) استفاده نمود. نتایج تحقیق ایشان نشان می‌دهد که در نظر گرفتن اثرات خرابی پیشرونده در طراحی، سازه‌ها را سنگین‌تر می‌کند. این مورد برای تحلیل‌های استاتیکی خطی، استاتیکی غیر خطی و دینامیکی غیر خطی به ترتیب برابر ۳۸/۸ درصد، ۱۳/۲ درصد و ۸/۲ درصد است.

Rashidi و Tavakoli [۷] پدیده خرابی پیشرونده را برای قاب‌های خمشی تحت بارگذاری جانبی بررسی کردند و استقامت سازه آسیب دیده (سازه‌ای که یک ستون خود را از دست داد) را ارزیابی نمودند. آن‌ها در این تحقیق تأثیر تعداد طبقات و محل حذف ستون را مورد مطالعه قرار دادند.

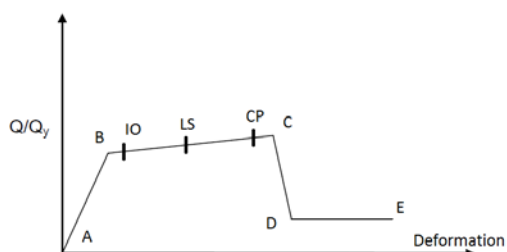
- 1- Redundancy
- 2- Pushdown
- 3- Uniform pushdown
- 4- Bay pushdown
- 5- Incremental dynamic pushdown

ضریب افزایش بار دینامیکی (DIF) برای تحلیل استاتیکی غیر خطی (Ω_N)، برای ساختمان فولادی با قاب خمشی از طریق رابطه (۲) به دست می‌آید:

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

در این رابطه θ_{pra} زاویه دوران پلاستیک عضو می‌باشد که باید از جداول آئین‌نامه ASCE41-06 [۱۳] و DOD [۱] انتخاب شود. در واقع این مقادیر، ظرفیت‌های مربوط به اعضا می‌باشند. θ_y زاویه دوران تسلیم عضو می‌باشد که از ضوابط پیشنهادی آئین‌نامه ASCE41-06 [۱۳] به دست می‌آید.

یکی از بخش‌های مهم در تحلیل استاتیکی غیر خطی تعریف مدل بار تغییر شکل اعضاست. در شکل (۲) رفتار بار-تغییر شکل عضو خمشی به همراه مقادیر مجاز آن (برای هر یک از عملکردهای IO (بهره برداری بی‌وقفه)، LS (ایمنی جانی) و CP (آستانه فروریزش)) که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت به صورت شماتیک نشان داده شده است.



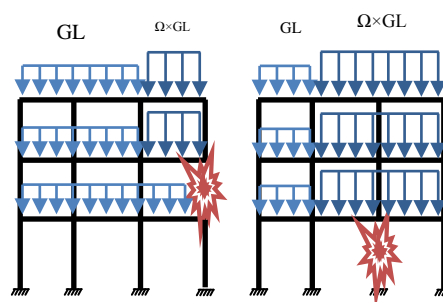
شکل ۲- معیارهای کنترل در تحلیل غیر خطی

پس از حذف ستون و انجام تحلیل، در صورتی که دوران مفاصل پلاستیک، تعریف شده در اعضا، از محدوده معیارهای تعیین شده مطابق شکل (۲) عبور نمایند، آن عضو آسیب‌پذیر تلقی می‌شود و باید باز طراحی شود و یا تقویت گردد [۱، ۱۰]. در شکل (۳) یکی از حالت‌های تغییر شکل یافته سازه پس از تحلیل استاتیکی غیر خطی که در آن دوران مفصل پلاستیک یکی از اعضا از حد مجاز CP فراتر رفته است، به عنوان نمونه، نشان داده شده است.

تعیین می‌گردد. این ضریب برای ترکیب بارگذاری در محدوده فوقانی ستون حذف شده، به ترکیب بارگذاری معرفی شده در آیین‌نامه DOD (رابطه (۱))، اعمال می‌گردد.

$$GL = (1/2D \text{ یا } D) + (0/5L \text{ یا } 1/2S) \quad (1)$$

در این رابطه D بار مرده، L بار زنده و S بار برف می‌باشد. نحوه بارگذاری، در شکل (۱) ارائه شده است.

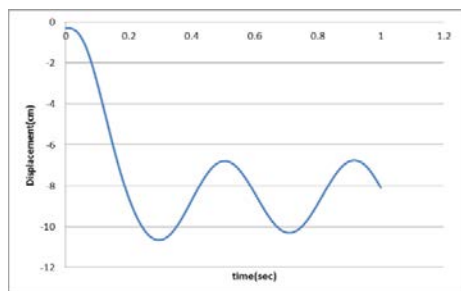


شکل ۱- نحوه یا اعمال بارگذاری در تحلیل استاتیکی خطی

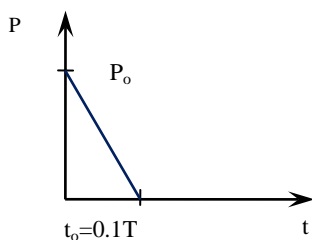
پس از اعمال بارگذاری ثقلی جدید بر روی سازه، نیرویی معادل $0.02\Sigma P$ به عنوان بار جانبی به هر یک از دو وجه سازه اعمال می‌گردد. مقدار ΣP برابر با مجموع بارهای مرده و زنده بدون ضریب وارده بر هر طبقه است. برای ارزیابی مقاومت اعضا، نسبت ظرفیتی اعضا که از تقسیم ظرفیت موجود به ظرفیت مجاز مقطع اعضا حاصل می‌گردد (DCR)، محاسبه می‌شود. اگر DCR به دست آمده از m_{LIF} بزرگ‌تر باشد، آن عضو آسیب‌پذیر تلقی می‌شود و باید مجدداً طراحی شود و یا تقویت گردد، در غیر این صورت آن عضو مشکلی ندارد [۱، ۱۱ و ۱۲].

۲-۲- روش استاتیکی غیر خطی

در روش استاتیکی غیر خطی (NS)، ضریبی که تنها ناشی از تأثیرات بارگذاری دینامیکی است، به بارگذاری ثقلی اعضا بالایی ستون حذف شده، افزوده می‌شود. این ضریب، با توجه به نوع سازه و همچنین نوع اتصالات آن، تعیین و از جداول تعریف شده در آیین‌نامه استخراج می‌شود. پس از اعمال بارگذاری جدید بر روی سازه، نیروی $0.02\Sigma P$ به عنوان بار جانبی به هر یک از دو وجه سازه اعمال می‌گردد. مقدار ΣP برابر مجموع بارهای مرده و زنده بدون ضریب وارده بر هر طبقه است.



شکل ۴- تغییرات جابه‌جایی قائم گره فوقانی ستون حذف شده در تحلیل دینامیکی غیر خطی

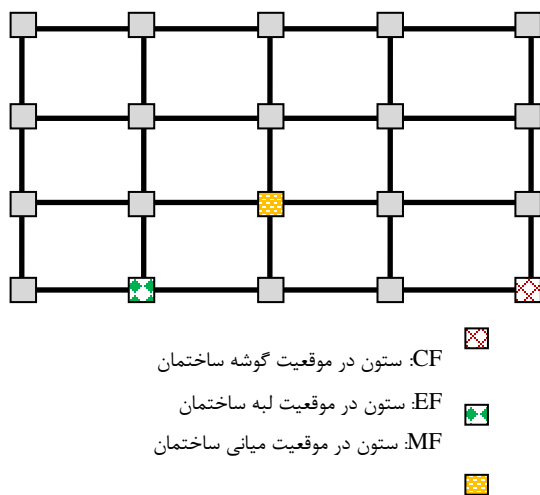


شکل ۵- تاریخچه بارگذاری در تحلیل دینامیکی غیر خطی

در صورتی که دوران مفاصل تعریف شده در اعضا از محدوده مجاز تعیین شده عبور نماید آن عضو آسیب‌پذیر تلقی می‌شود و باید بازطراحی شود و یا تقویت گردد [۱، ۱۱].

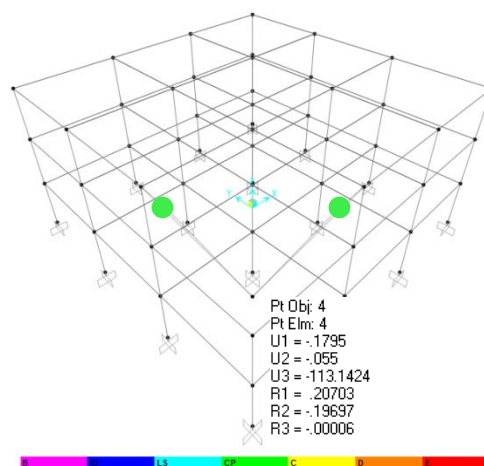
۳- روش تحقیق

در این تحقیق، سه حالت برای محل حذف ستون در نظر گرفته شد که عبارتند از: حذف ستون گوشه، حذف ستون کناری و حذف ستون میانی. در شکل (۶) موقعیت هر یک از این حالت‌ها در پلان و در شکل (۷) موقعیت ارتفاعی هر یک از آنها نشان داده شده است.



CF: ستون در موقعیت گوشه ساختمان
EF: ستون در موقعیت لبه ساختمان
MF: ستون در موقعیت میانی ساختمان

شکل ۶- موقعیت تخریب ستون در پلان طبقات



شکل ۳- سازه نمونه ۳ طبقه همراه با مشخصات مفصل پلاستیک تیر آسیب‌پذیر

۳-۲- روش دینامیکی غیر خطی

در روش دینامیکی غیر خطی (ND) که رفتار واقعی‌تر سازه را در بر می‌گیرد، ارزیابی اعضا به این صورت انجام می‌شود که ابتدا نیروهای داخلی موجود در اعضای متصل به گره محل حذف ستون محاسبه می‌شود (P_0). سپس ستون مذکور از مدل‌سازی حذف می‌شود و عکس‌العمل‌های متناظر در گره مذکور اعمال می‌شود. برای محاسبه تغییر مکان‌ها و مشخص شدن وضعیت مفاصل پلاستیک در اعضا، عکس‌العمل‌های وارده به صورت یک بار ضربه‌ای، در یک مدت زمان محدود، از روی سازه حذف می‌شود و برای سازه تحت بارگذاری جدید، تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیر خطی انجام می‌شود. در شکل (۴) نتیجه تحلیل تاریخچه زمانی برای یکی از گره‌ها به عنوان نمونه ترسیم شده است که در آن جابه‌جایی قائم گره فوقانی ستون حذف شده بر حسب زمان قابل مشاهده است. بر اساس آیین‌نامه DOD مدت زمان حذف ستون برابر یک دهم پریود ارتعاشی عمودی سازه در اثر حذف ستون در نظر گرفته می‌شود [۱]. در شکل (۵) الگوی بارگذاری در تحلیل دینامیکی غیر خطی نشان داده شده است. در این الگو، نیروی فشاری ستون در مدت زمان یک دهم پریود ارتعاشی سازه از مقدار P_0 به مقدار صفر می‌رسد. در مرجع [۱۴] تأثیر مقدار زمان تناوب ارتعاش بر پاسخ سازه‌ها بررسی شد و همچنین رابطه پارامتری برای تعیین آن پیشنهاد گردید.

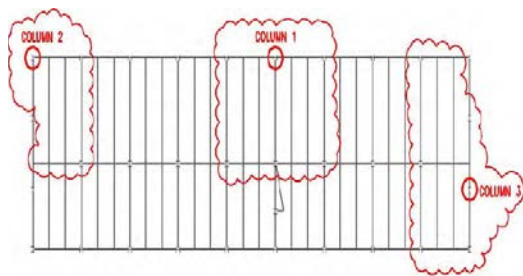
جدول ۱- مقایسه نتایج DCRهای به دست آمده به منظور

صحت سنجی

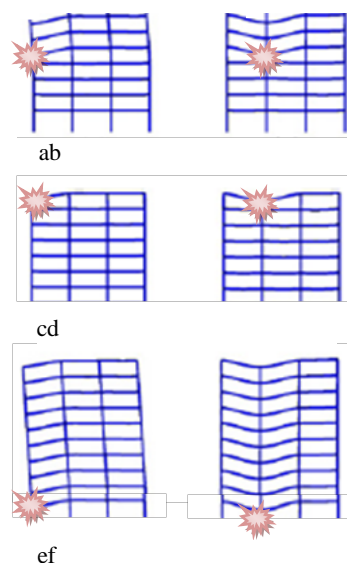
محل	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3
DOD	۱/۵۶	۱/۹۷	۱/۸۱	۱/۲۶	۱/۲	۰/۹	۱/۴۶
تحقیق	۱/۵۷	۱/۹۷	۱/۸۲	۱/۲۵	۱/۳	۰/۹	۱/۴۱

۳-۲- مدل‌های مورد بررسی

در این تحقیق، بیست و چهار مدل ساختمانی از نوع قاب خمشی فولادی متوسط با تعداد طبقات ۳، ۵، ۷ و ۱۰، تعداد دهانه‌های ۳ و ۵ دهانه و طول دهانه‌های متنوع ۴، ۵ و ۶ متری، مورد ارزیابی قرار گرفت. ارتفاع طبقات در همه مدل‌ها یکسان و برابر با ۳/۴ متر در نظر گرفته شد. تمامی مدل‌های مورد بررسی بر مبنای آیین‌نامه بارگذاری ایران [۱۲]، بارگذاری و بر مبنای آیین‌نامه طراحی سازه‌های فولادی ایران طراحی شده‌اند [۳]. این سازه‌ها در منطقه لرزه‌خیزی با خطر نسبی خیلی زیاد ($A=0.35$) و خاک نوع دو واقع شده‌اند. بار مرده برای تمامی ساختمان‌ها در طبقات ۶۰۰ کیلوگرم بر مترمربع و بار زنده متناسب با کاربری مسکونی (۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع) در نظر گرفته شده است. بار مرده بام، مشابه بار مرده طبقات و بار زنده آن (بار برف) برابر با ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمربع مد نظر قرار گرفت. مشخصات هندسه قاب‌ها در دو جهت عمود بر هم در پلان، مشابه در نظر گرفته شد و الگوی توزیع بار به صورت شطرنجی در چشمه‌های سقف، تنظیم شد. قاب‌ها به صورت سه بعدی مدل‌سازی و تحلیل شدند. طراحی کلیه ساختمان‌ها به روش حدی انجام گرفت. مشخصات قاب‌های خمشی در جداول (۲) تا (۴) ارائه شده است. در مجموع ۲۱۶ حالت خرابی برای قاب‌های انتخابی در نظر گرفته شد.



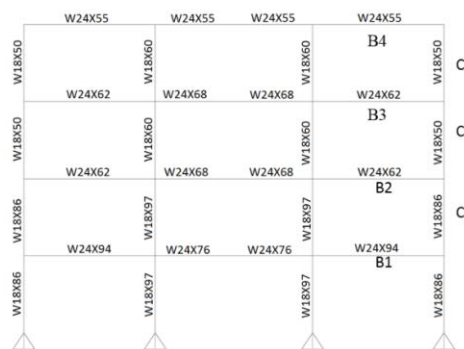
شکل ۹- موقعیت ستون‌های تخریب شده در مدل‌ها



شکل ۷- موقعیت تخریب ستون در ارتفاع ساختمان

۳-۱- صحت سنجی

برای کنترل درستی تحلیل‌های صورت گرفته از نتایج مثال حل شده در آیین‌نامه DOD استفاده شده است. در این مثال یک ساختمان فولادی چهار طبقه، مطابق شکل (۸) با استفاده از نرم‌افزار SAP2000، به کمک تحلیل استاتیکی خطی مورد ارزیابی قرار گرفت. محل‌های تخریب ستون مطابق شکل (۹) در نظر گرفته شد. با توجه به مشخصات مقاطع، مقادیر ضریب (m) و پس از آن m_{LIF} تعیین شد. پس از آن مقادیر DCR هر یک از اعضا محاسبه شد و در نهایت، نتایج حاصل از تحلیل آئین‌نامه DOD و نتایج حاصل از این تحقیق، مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که اختلاف نتایج حاصل در این دو حالت، بسیار ناچیز است (جدول (۱)).



شکل ۸- نمونه انتخابی و موقعیت اعضا در تحلیل صحت سنجی

جدول ۲- مشخصات اعضای سازه‌ای قاب‌ها با دهانه ۶ متر

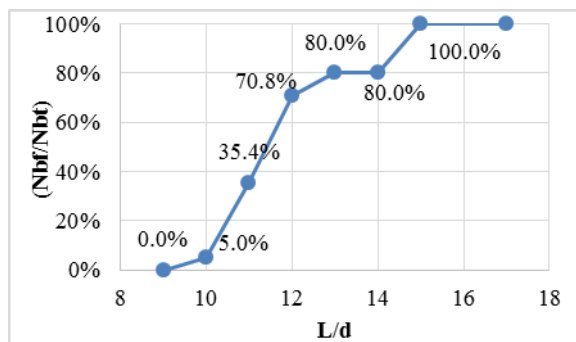
۱۰ طبقه		۷ طبقه		۵ طبقه		۳ طبقه		دهانه ۶ متر
ستون	تیر	ستون	تیر	ستون	تیر	ستون	تیر	
BOX 55-2	IPE 550	BOX 45-2	IPE 500	BOX 45-1.5	IPE 450	BOX 35-1.2	IPE 360	طبقه ۱
BOX 50-2	IPE 550	BOX 45-1.5	IPE 500	BOX 45-1.5	IPE 450	BOX 30-1	IPE 360	طبقه ۲
BOX 50-2	IPE 550	BOX 45-1.5	IPE 500	BOX 40-1.2	IPE 450	BOX 25-1	IPE 300	طبقه ۳
BOX 45-2	IPE 550	BOX 40-1.2	IPE 500	BOX 35-1.2	IPE 400			طبقه ۴
BOX 45-2	IPE 550	BOX 40-1.2	IPE 450	BOX 30-1	IPE 300			طبقه ۵
BOX 45-1.5	IPE 550	BOX 35-1.2	IPE 400					طبقه ۶
BOX 45-1.5	IPE 450	BOX 30-1	IPE 300					طبقه ۷
BOX 40-1.2	IPE 450							طبقه ۸
BOX 40-1.2	IPE 400							طبقه ۹
BOX 35-1.2	IPE 360							طبقه ۱۰

جدول ۳- مشخصات اعضای سازه‌ای قاب‌ها با دهانه ۵ متر

۱۰ طبقه		۷ طبقه		۵ طبقه		۳ طبقه		دهانه ۵ متر
ستون	تیر	ستون	تیر	ستون	تیر	ستون	تیر	
BOX 50-2	IPE 500	BOX 45-1.5	IPE 450	BOX 45-1.5	IPE 360	BOX 30-1	IPE 330	طبقه ۱
BOX 45-2	IPE 500	BOX 40-1.2	IPE 450	BOX 45-1.5	IPE 360	BOX 30-1	IPE 330	طبقه ۲
BOX 45-2	IPE 500	BOX 40-1.2	IPE 450	BOX 40-1.2	IPE 360	BOX 25-1	IPE 240	طبقه ۳
BOX 45-1.5	IPE 500	BOX 35-1.2	IPE 450	BOX 35-1.2	IPE 330			طبقه ۴
BOX 45-1.5	IPE 500	BOX 35-1.2	IPE 400	BOX 30-1	IPE 270			طبقه ۵
BOX 40-1.2	IPE 450	BOX 30-1	IPE 330					طبقه ۶
BOX 40-1.2	IPE 450	BOX 25-1	IPE 270					طبقه ۷
BOX 35-1.2	IPE 400							طبقه ۸
BOX 35-1.2	IPE 360							طبقه ۹
BOX 30-1	IPE 270							طبقه ۱۰

جدول ۴- مشخصات اعضای سازه‌ای قاب‌ها با دهانه ۴ متر

۱۰ طبقه		۷ طبقه		۵ طبقه		۳ طبقه		دهانه ۴ متر
ستون	تیر	ستون	تیر	ستون	تیر	ستون	تیر	
BOX 45-2	IPE	BOX 40-	IPE	BOX 40-1.2	IPE	BOX 30-1	IPE	طبقه ۱
BOX 45-1.5	IPE	BOX 40-	IPE	BOX 35-1.2	IPE	BOX 30-1	IPE	طبقه ۲
BOX 45-1.5	IPE	BOX 35-	IPE	BOX 30-1	IPE	BOX 25-1	IPE	طبقه ۳
BOX 40-1.2	IPE	BOX 35-	IPE	BOX 30-1	IPE			طبقه ۴
BOX 40-1.2	IPE	BOX 30-1	IPE	BOX 25-1	IPE			طبقه ۵
BOX 35-1.2	IPE	BOX 30-1	IPE					طبقه ۶
BOX 35-1.2	IPE	BOX 25-1	IPE					طبقه ۷
BOX 35-1.2	IPE							طبقه ۸
BOX 35-1.2	IPE							طبقه ۹
BOX 30-1	IPE							طبقه ۱۰



۴- روند ارزیابی

در ارزیابی اعضا تحت خرابی پیشرونده، بر اساس الزام آیین‌نامه DOD، کلیه تحلیل‌ها به صورت سه بعدی انجام شد. مفاصل پلاستیک، مطابق آیین‌نامه ASCE 41 تعریف شد [۱۳]. برای هر یک از تحلیل‌های دینامیکی غیر خطی (ND)، استاتیکی غیر خطی (NS) و استاتیکی خطی (LS) از ترکیب بارهای ارائه شده در آیین‌نامه DOD استفاده شد. اتصالات سازه‌ها از نوع اتصال مستقیم اصلاح شده به همراه جان پیچ شده در نظر گرفته شد.

۵- تفسیر نتایج

پس از تحلیل سازه‌های مذکور، محاسبه میزان نشست، پیروید ارتعاشی و تعیین DCR ها و غیره، قاب‌های خمشی فولادی در برابر خرابی‌های پیشرونده به شرح ذیل ارزیابی شدند.

۵-۱- وضعیت تیرها

پس از بررسی پاسخ سازه‌ها در سه حالت دینامیکی غیر خطی، استاتیکی غیر خطی و استاتیکی خطی، نتایج نشان می‌دهد که در تمامی مدل‌ها (ساختمان‌های ۳، ۵، ۷ و ۱۰ طبقه)، تیرهای واقع در بالاترین طبقه ساختمان از عملکرد مناسبی برخوردار نیستند، به طوری که پس از حذف ستون، این تیرها به سرعت ناپایدار می‌شوند. این موضوع می‌تواند به دلیل کمبود نامعینی در تراز بام، به ویژه عدم وجود ستون فوقانی باشد. کلیه تیرهای مورد مطالعه به غیر از تیرهای واقع در بالاترین طبقه ساختمان (که توسط روش دینامیکی غیر خطی و استاتیکی غیر خطی مورد بررسی قرار گرفته‌اند)، قابلیت پل زدن بر روی اعضای دیگر را دارند. این موضوع برای تحلیل استاتیکی خطی صادق نیست. یعنی این که در تحلیل استاتیکی خطی، بعضی از تیرها، قادر به پل زدن نیستند. نسبت تعداد تیرهای خراب شده به تعداد تیرهای فوقانی موجود در محدوده حذف ستون (N_{bf}/N_{bt}) با افزایش نسبت طول دهانه تیر (L) به ارتفاع تیر (d)، افزایش می‌یابد. N_{bf} تعداد تیرهای خراب شده در محدوده فوقانی ستون حذف شده است و N_{bt} تعداد تیرهای فوقانی در محدوده حذف ستون است. در حالت کلی، در صورتی که نسبت L/d کمتر از ۹ باشد ($L/d < 9$) پتانسیل خرابی در روش استاتیکی خطی به صفر می‌رسد. در شکل (۱۰) متوسط درصد تیرهای تخریب شده نشان داده شده است.

شکل ۱۰- وضعیت تیرهای تخریب شده به تیرهای موجود در محدوده حذف ستون بر حسب نسبت طول به ارتفاع تیر

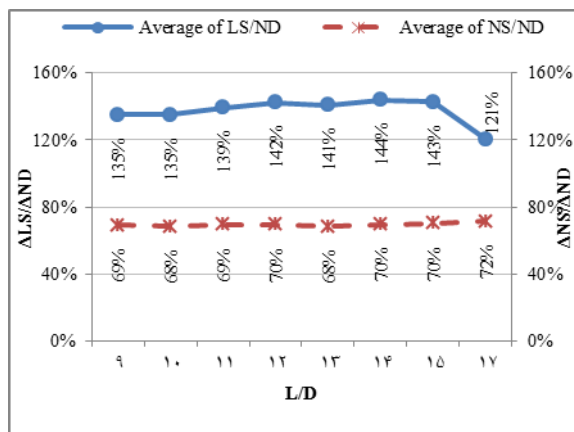
۵-۲- وضعیت ستون‌ها

پس از بررسی مدل‌ها بر اساس روش‌های تحلیل استاتیکی غیر خطی و دینامیکی غیر خطی، مشخص گردید، در تمامی مناطق کنترل شده (CF, EF, MF)، ستون‌ها قابلیت انتقال بار بر روی المان‌های دیگر را دارند ولی بر اساس روش تحلیل استاتیکی خطی مشخص شد با افزایش نسبت L/d ، علی-الخصوص فراتر از ۱۵ ($L/d > 15$)، ستون فوقانی محل تخریب در گوشه ساختمان، قابلیت انتقال بار را ندارد. همچنین در ستون‌های کناری ساختمان با عبور نسبت L/d از ۱۶ ($L/d > 16$)، DCR ستون فوقانی محل تخریب نیز از m_{LIF} بیشتر می‌گردد. این در حالی است که در تمامی ستون‌های داخلی ساختمان، DCR از m_{LIF} کمتر می‌باشد. در جدول (۵) به مقایسه وضعیت مقاومت ستون‌ها در برابر خرابی پیشرونده با توجه به موقعیت خرابی و تحلیل مورد استفاده می‌پردازد.

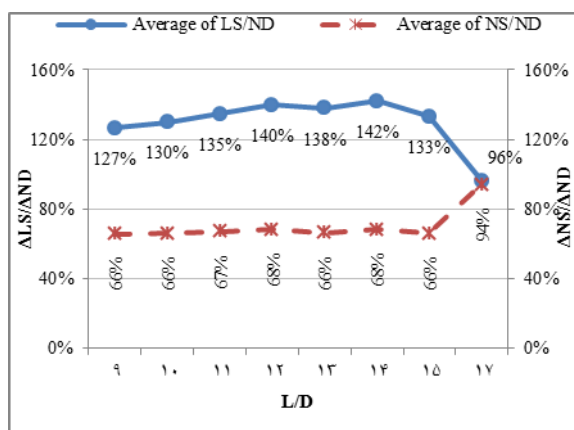
جدول ۵- مقایسه وضعیت ستون‌ها بر اساس موقعیت خرابی و

نوع تحلیل

محدوده خرابی	دینامیکی غیرخطی	استاتیکی غیرخطی	استاتیکی خطی
CF	در تمامی حالات مقاوم	در تمامی حالات مقاوم	برای $L/d < 15$ مقاوم
EF	در تمامی حالات مقاوم	در تمامی حالات مقاوم	برای $L/d < 16$ مقاوم
MF	در تمامی حالات مقاوم	در تمامی حالات مقاوم	در تمامی حالات مقاوم



شکل ۱۲- تغییرات نسبت نشست گره محل حذف ستون در حالت NS و LS به ND در موقعیت EF



شکل ۱۳- تغییرات نسبت نشست گره محل حذف ستون در حالت NS و LS به ND در موقعیت MF

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، خرابی قاب‌های خمشی فولادی با شکل‌پذیری متوسط (طراحی شده بر اساس آئین‌نامه‌های ایران) در اثر حذف ستون به صورت ناگهانی به سه روش تحلیل استاتیکی خطی، تحلیل استاتیکی غیر خطی و دینامیکی غیر خطی مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج ذیل حاصل شد:

۱- تیرهای موجود در طبقه آخر، در صورت حذف ستون زیر آنها، قادر به پل‌زدن بر اعضای دیگر نیستند و تخریب می‌شوند و ممکن است تخریب حادث در آنها، سبب تخریب کلی سازه شود که معمولاً در تحلیل خرابی پیشرونده این موضوع دیده نمی‌شود.

۲- بر اساس نتایج حاصل از تحلیل‌های دینامیکی غیر خطی و استاتیکی غیر خطی، تمامی تیرها (به غیر از تیرهای موجود در تراز بام)، در تمامی حالات مکانی ستون (MF، CF و EF) به

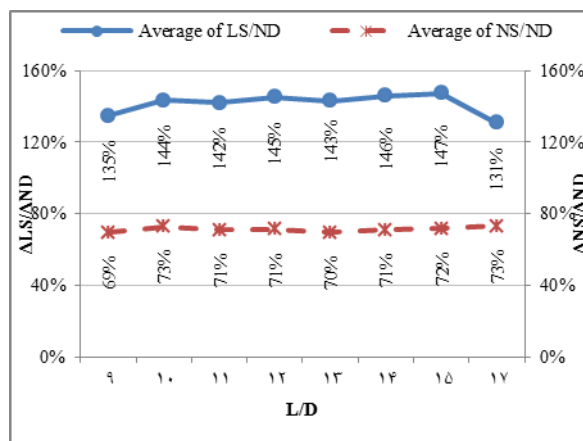
۵-۳- مقایسه میزان نشست

پس از تحلیل سازه‌ها به روش‌های دینامیکی غیر خطی (ND)، استاتیکی غیر خطی (NS) و استاتیکی خطی (LS) در موقعیت‌های مختلف (EF، CF، MF) میزان حداکثر نشست گره فوقانی هر یک از سازه‌ها استخراج شد. در تحلیل‌های مختلف مقایسه شد. در شکل‌های (۱۱) تا (۱۳) نسبت تغییرات نشست در تحلیل LS به ND و همچنین نسبت تغییرات نشست گره‌ها در تحلیل NS به ND بر حسب نسبت طول به ارتفاع تیر (L/d) رسم شد. با بررسی نمودارهای به دست آمده نتایج ذیل حاصل شد:

۱- بیشترین نشست گره فوقانی محل حذف ستون به ترتیب در تحلیل‌های LS، ND و NS رخ می‌دهد. به عبارت دیگر همواره $\Delta_{LS} > \Delta_{ND} > \Delta_{NS}$ است.

۲- در سازه‌های فولادی منظم، پاسخ اثر بار جانبی موهومی^۱ ($0.02\Sigma P$) در جهات مختلف، تقریباً برابر است و این اختلاف بسیار ناچیز می‌باشد.

۳- پس از بررسی میزان نشست گره محل تخریب، مشخص گردید، تغییر مکان‌های ناشی از تحلیل استاتیکی خطی حدوداً ۴۰٪ بیشتر از مقادیر حاصل از تحلیل دینامیکی غیر خطی می‌باشد. البته این مقدار با افزایش درجه نامعینی کم می‌شود. همچنین میزان نشست گره محل تخریب در روش NS نسبت به روش ND کمتر بوده و نسبت آن حدوداً ۳۰٪ می‌باشد.



شکل ۱۱- تغییرات نسبت نشست گره محل حذف ستون در حالت NS و LS به ND در موقعیت CF

1- Notional load

- [6] Liu, M., "A New Dynamic Increase Factor for Nonlinear Static Alternate Path Analysis of Building Frames Against Progressive Collapse", *Engineering Structures*, 2013, 48, 666-673.
- [7] Tavakoli, H. R., Rashidi A., "Evaluation of Progressive Collapse Potential of Multi-Story Moment Resisting Steel Frame Buildings Under Lateral Loading", *Scientia Iranica*, 2013, 20 (1), 77-86.
- [8] Zahrai, S. M., Ezoddin, A. R., "Numerical Study of Progressive Collapse in Intermediate Moment Resisting Reinforced Concrete Frame Due to Column Removal", *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 2014, 47 (1), 71-88.
- [9] Osama A. M., "Calculation of Load Increase Factors for Assessment of Progressive Collapse Potential in Framed Steel Structures", *Case Studies in Structural Engineering*, 2015, 3, 11-18.
- [10] Seweryn K., Armelle A., Paolo N., George S., "Static and Dynamic Analysis of a Reinforced Concrete Flat Slab Frame Building for Progressive Collapse", *Engineering Structures*, 2012, 40, 205-217.
- [11] ASCE, "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE 7-10)", US, 2010.
- [۱۲] دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، "مبحث ششم، بارهای وارد بر ساختمان"، ۱۳۸۸.
- [13] ASCE, "Seismic Rehabilitation of Existing Buildings (ASCE 41-06)", 2007.
- [۱۴] محمودی صاحبی، م.، تیموری، ط.، کوزانی، س. ه.، هاشمی، س. ش.، "ارزیابی زمان تناوب قائم ارتعاش سازه ناشی از حذف ستون و تأثیر آن بر پاسخ سازه در خرابی پیش‌رونده"، *مجله مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها*، ۱۳۹۳، ۴ (۳)، ۱-۱۰.
- شرط این که نسبت L به d کم‌تر از ۱۷ باشد ($L/d < 17$) در برابر خطرات ناشی از حذف ستون، مقاوم هستند.
- ۳- بر اساس نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی خطی، با کاهش نسبت طول به دهانه تیر (L/d) میزان خرابی المان‌ها کاهش می‌یابد. در این حالت در محدوده‌هایی از سازه با $L/d < 9$ ، پتانسیل خرابی در تیرها به صفر می‌رسد.
- ۴- در تحلیل دینامیکی غیر خطی و استاتیکی غیر خطی ستون‌ها هیچ‌گونه خرابی را نشان ندادند. لیکن در تحلیل استاتیکی خطی، ستون فوقانی محل خرابی در محدوده EF و MF، از وضعیت مناسبی برخوردار نیستند.
- ۵- روش استاتیکی خطی، نسبت به روش دینامیکی غیر خطی حدوداً ۴۰٪ محافظه‌کارانه‌تر می‌باشد.
- ۶- میزان نشست گرهی که در زیر آن ستون حذف شده است بر اساس تحلیل‌های مختلف متفاوت است. نسبت مقادیر حاصل از تحلیل‌های استاتیکی خطی و استاتیکی غیر خطی به مقادیر حاصل از تحلیل دینامیکی غیر خطی به ترتیب حدوداً برابر ۴۰ و ۳۰ درصد می‌باشد.

۷- مراجع

- [1] DoD, "Design of Buildings to Resist Progressive Collapse (UFC 4-023-03)", Washington DC, US, 2009.
- [2] GSA, "Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects", Washington DC, US, 2003.
- [۳] دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، "مبحث دهم مقررات ملی ساختمان، طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی"، ۱۳۸۸.
- [4] Kim, J., Kim, T., "Assessment of Progressive Collapse-Resisting Capacity of Steel Moment Frames", *Journal of Constructional Steel Research*, 2009, 65, 169-179.
- [5] Khandelwal, K., El-Tawil, S., "Pushdown Resistance as a Measure of Robustness in Progressive Collapse Analysis", *Journal of Engineering Structures*, 2011, 33, 2653-2661.