

تأثیر مشخصات زمین لرزه بر پتانسیل خرابی پیش رونده لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی تجهیز شده به مهاربند دروازه‌ای

فرزاد مقرون^۱، محسن ایزدی‌نیا^{۲*}، نصرت‌ا. صلح جویی^۳، اسماعیل ایزدی زمان‌آبادی^۴

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد

۴- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد

*نجف آباد، صندوق پستی ۸۵۱۴۱۴۳۱۳۱ izadinia@iaun.ac.ir

چکیده

خرابی پیش‌رونده در قاب‌های ساختمانی به گسترش یک خرابی موضعی اولیه در تمام و یا بخشی از سازه به صورت زنجیروار اطلاق می‌شود. این پدیده به دنبال حذف یک و یا چند جزء باربر آغاز و در نهایت منجر به خرابی کل و یا بخشی از سازه خواهد شد. مطالعات پیشین عمدتاً تحلیل خرابی پیش‌رونده را به شیوه پیشنهادی آیین‌نامه‌ها و تحت بارگذاری ثقلی با ترکیب بار تعریف شده انجام داده‌اند. در این مطالعه پدیده خرابی پیش‌رونده در قاب‌های خمشی فولادی تجهیز شده به مهاربند دروازه‌ای تحت بارگذاری لرزه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. سپس با معرفی گروه‌های متعدد شتاب‌نگاشت، اثر مشخصات لرزه‌ای شتاب‌نگاشت‌ها مانند بیشینه شتاب، شاخص آریاس، محتوای فرکانسی و مولفه قائم مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین تحلیل خرابی پیش‌رونده با حذف ستون‌های کناری و میانی در سناریوهای متعدد حین زمین‌لرزه دیده شده است. نتایج نشان داد که بیشینه شتاب و پریود غالب تأثیر زیادی تا حدود ۶۶ درصد، بر پاسخ قاب‌ها داشته ولیکن اعمال مولفه قائم تأثیر ناچیزی بر پاسخ قاب‌ها داشته است.

واژگان کلیدی

خرابی پیش‌رونده، قاب مهاربندی دروازه‌ای، تحلیل دینامیکی غیرخطی، مشخصات زمین لرزه، اپنسیس

Effects of earthquake characteristics on seismic progressive collapse potential of steel moment-resisting frames equipped with gate bracing

F. Maghroon, M. Izadinia, N. Solhjoei, E. Izadi Zaman Abadi

Abstract

The progressive collapse in building frames refers to the spread of an initial localized chain collapse in all or some parts of the structure. This phenomenon occurs following the removal of one or more load-bearing elements and eventually leads to the total or partial collapse of the structure. In previous studies, the progressive collapse has been analyzed mainly using the method proposed in building codes under gravitational loading with a defined load combination. This study aims to investigate the progressive collapse of steel moment-resisting frames equipped with gate (hat) bracing under seismic loading. For this purpose, the effect of the seismic properties of the acceleration records such as peak ground acceleration (PGA), Arias intensity, frequency content, and a vertical component are examined, following the introduction of several acceleration groups. Next, progressive collapse analysis with side and middle column removal is simulated under various scenarios during an earthquake. The results showed a high effect of about 66% PGA and predominant period on frame responses and, at the same time, a slight effect of the vertical component application on frame responses.

Keywords

Progressive Collapse; Gate (hat) Bracing Frame; Nonlinear Dynamic Analysis; Earthquake Characteristics; OpenSees

خرابی پیش‌رونده با گسترش یک خرابی محلی به صورت زنجیروار در کل یک سیستم سازه‌ای رخ می‌دهد. خرابی محلی عمدتاً ناشی از عوامل خارجی بوده که با حذف شدن المان‌های کلیدی در یک سیستم مانند ستون آغاز می‌گردد. این عوامل خارجی مانند انفجار از داخل و یا از خارج سازه، برخورد شدید وسایل نقلیه به سازه، ایرادات اجرایی و غیره می‌باشند. رونان پوینت یک ساختمان آپارتمانی بود که در لندن در سال‌های ۱۹۶۶ تا ۱۹۶۸ ساخته شد. در شانزدهم ماه می سال ۱۹۶۸ انفجار گاز در قست بیرونی پایین پانل دیوار بیرونی در طبقه هجدهم آپارتمان در گوشه ساختمان ۲۲ طبقه اتفاق افتاد [۱]. این حادثه گامی نخست برای بررسی خرابی پیش‌رونده در مطالعات و آیین‌نامه‌ها به شمار می‌رود. طراحی سازه‌ها عموماً برای بارگذاری‌های عادی و رایج مانند بار زنده، مرده، برف، باد و زلزله صورت می‌گیرد. در تمامی این حالات بارگذاری، فرض بر این است که در تمام مدت بارگذاری سختی سازه ثابت بوده و هیچ عضوی از آن حذف نمی‌شود. اما در طی بارگذاری‌های شدید و با احتمال وقوع کم عواملی مانند انفجار گاز، بمب گذاری، برخورد وسایل نقلیه و یا نیروهای لرزه‌ای شدید که می‌توانند باعث گسیختگی اعضا شوند، ممکن است موجب فروریزش بخش بزرگی از سازه و یا کل آن گردند. پدیده خرابی پیش‌رونده را می‌توان با روش‌های تحلیلی متنوعی که از روشهای بسیار ساده تا تحلیلهای بسیار پیچیده را شامل می‌شوند، مورد بررسی قرار داد که عموماً این تحلیل‌ها با بکارگیری نرم‌افزارهای اجزاء محدود که قابلیت کاملی برای در نظر گرفتن خواص دینامیکی و غیرخطی سازه‌ها دارند قابل انجام است. واضح است که پدیده خرابی پیش‌رونده، به دلیل وقوع آن در یک بازه زمانی بسیار کوتاه و تحمیل شدن تغییر شکل‌های غیرخطی به اجزاء پیش از گسیختگی، یک پدیده دینامیکی و غیرخطی می‌باشد.

روش‌های کاهش خطر فروریزش پیش‌رونده به سه دسته اصلی کنترل حادثه، روش طراحی غیر مستقیم و روش طراحی مستقیم تقسیم می‌شود. در روش کنترل حادثه تلاش برای کنترل و جلوگیری از بارگذاری غیرعادی می‌باشد. یعنی حذف یک حادثه، کاهش اثرات حادثه و محافظت در مقابل حادثه. روش کنترل حادثه، مقاومت سازه را افزایش نمی‌دهد و تحت کنترل مهندس سازه نیست و خارج از محدوده کاری اوست. قرار گرفتن ساختمان در نواحی دورتر از مناطق متراکم و ایجاد حصار پیرامون ستون جهت جلوگیری از ضربه وسایل نقلیه

مثال‌هایی از این روش می‌باشد. در روش طراحی غیرمستقیم حداقل مقاومت، شکل‌پذیری و نامعینی در سازه جهت کاهش پتانسیل فروریزش پیش‌رونده تأمین می‌گردد. بهبود اتصالات گرهی، تولید نامعینی و شکل‌پذیری از جمله تکنیک‌ها در این روش می‌باشد. روش طراحی مستقیم خود بر دو قسم است. روش مقاوم‌سازی محلی ویژه و روش مسیر جایگزین. در روش مقاوم‌سازی محلی ویژه که به روش طراحی اعضای کلیدی نیز مشهور است، ابزاری برای کاهش خطر خرابی موضعی فراهم می‌شود. در این روش اجزای سازه‌های بحرانی باید قادر به تحمل بارگذاری غیرعادی فرضی مانند فشار انفجار باشند. روش دیگر در این شاخه روش مسیر جایگزین می‌باشد. در این روش طراحی به نحوی انجام می‌شود که بعد از حذف جزء مفروض، شکل‌پذیری اجزای مجاور جزء حذف شده به نحوی کافی باشد که بتوانند با ایجاد مسیر جدید باربری، به ساکنین اجازه تخلیه محل را بدهند.

آیین‌نامه‌های متعددی در حوزه خرابی پیش‌رونده تدوین شده که به ارزیابی پتانسیل خرابی پیش‌رونده سازه‌ها تحت تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی پرداخته‌اند. راهنمای وزارت دفاع ایالات متحده طراحی تمامی ساختمان‌های دارای سه طبقه یا بیشتر را ملزم به در نظر گرفتن خرابی پیش‌رونده کرده است [۴-۲]. آیین نامه اداره خدمات عمومی آمریکا^۱ نیز به ارائه روش‌های بررسی ساختمان‌ها از نظر پتانسیل خرابی پیش‌رونده پرداخته است [۵]. این آیین نامه همچنین به ارائه ترکیب بارهای مناسب جهت بررسی خرابی پیش‌رونده در تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی پرداخته است. استاندارد اروپا نیز با دسته‌بندی ساختمان‌ها در چهار رده، بررسی خرابی پیش‌رونده را برای هر رده متفاوت در نظر گرفته و اگر چنانچه محدوده آسیب با حذف جزء برابر قائم خیلی گسترده باشد، این جزء را یک جزء کلیدی در نظر گرفته و در نظر گرفتن باری معادل ۳۴ کیلونیوتن بر مترمربع را برای طراحی جزء کلیدی در نظر گرفته است.

برای اولین بار، Gross و McGuier در سال ۱۹۸۳ میلادی با ایجاد یک برنامه کامپیوتری با قابلیت‌های گرافیکی جهت تحلیل و طراحی سازه‌ها در برابر خرابی پیش‌رونده، هر دو روش طراحی مستقیم شامل مقاومت موضعی ویژه و روش مسیر باربری جایگزین را توأماً مورد ارزیابی قرار دادند [۶]. Kaewkulchai و Williamson در سال ۲۰۰۳ با استفاده از یک مدل دو بعدی به مقایسه دو تحلیل استاتیکی و دینامیکی در بحث خرابی پیش‌رونده پرداخته و به این نتیجه دست یافت که در تحلیل استاتیکی چون اثرات دینامیکی ناشی از حذف ستون



دیده نمی شود، جوابها دست پایین می باشند [7]. Ruth و همکارانش در سال ۲۰۰۶ به بررسی تحلیل استاتیکی معادل برای خرابی پیش رونده پرداختند [8]. با توجه با اینکه در آیین نامه اداره خدمات عمومی آمریکا برای در نظر گرفتن اثرات دینامیکی از ضریب ۲ در تحلیل استاتیکی استفاده می شود، در این مطالعه مشخص شد که این ضریب بسیار محافظه کارانه بوده و در نظر گرفتن ضریب دینامیکی ۱/۵ در تحلیل استاتیکی برای این اثر بهتر بوده و منحصر به طراحی اقتصادی تر می شود. Kim و همکارانش در سال ۲۰۰۹ به بررسی خرابی پیش رونده در قابهای فولادی سه و شش طبقه پرداختند [9]. در این مطالعه تحلیل های استاتیکی و دینامیکی غیرخطی بر روی قابهای موردنظر در حالت های بدون مهاربند و همراه با مهاربند، اعمال گردید. نتایج این مطالعه نشان داد که در قابهای مهاربندی شده احتمال آسیب سازه کاهش یافته و همچنین جابجایی نقطه بالایی ستون حذف شده نیز کاهش می یابد. Kim و همکارانش همچنین در سال ۲۰۱۰ به بررسی خرابی پیش رونده در قابهای مهاربندی پرداختند [۱۰ و ۱۱]. با توجه به نتایج تحلیل دینامیکی مشخص شد که عموماً سازه ها در حین حذف ستون میانی پایدار باقی مانده اند. همچنین مشخص شد قاب هایی که دارای سیستم مهاربندی هشتی (V برعکس) هستند، در مقایسه با سایر سیستم های مهاربندی خرابی را به تاخیر می اندازند. Jiang و همکارانش در سال ۲۰۱۴ به بررسی دو سیستم مختلف مهاربندی در تاب آوری سازه های فولادی تحت خرابی پیشرونده حین آتش پرداختند. در این مطالعه سیستم مهاربندی عمودی و کلاهی (دروازه ای) مورد بررسی قرار گرفت [۱۲]. Tavakoli و همکارانش در سال ۲۰۱۵ به بررسی اثر جداساز لرزه ای بر مقاومت سازه ها در برابر خرابی پیش رونده، پرداختند [۱۳]. در این مطالعه اثر جداسازهای لاستیکی با هسته سربی در بهبود رفتار قاب های ساختمانی تحت تحلیل خرابی پیش رونده حین زلزله بررسی گردید. نتایج نشان داد در تحلیل های استاتیکی غیرخطی حضور جداساز در میزان تقاضاهای سیستم تقریباً بدون تاثیر می باشد. Faroughi و همکارانش در سال ۲۰۱۶ به بررسی اثر خرابی پیش رونده بر قاب های دوگانه خمشی به علاوه مهاربند واگرا پرداختند [۱۴]. در این مطالعه مشخص شد برای سازه ۵ طبقه میزان مناسب مهاربند به اندازه ۱۰ تا ۲۰ درصد دهانه قاب و در قاب ۸ طبقه این نسبت بین ۲۰ تا ۳۰ درصد می باشد. همچنین مشخص شد سیستم رایج مهاربندی دارای رفتار مناسب تری حین خرابی پیشرونده می باشد. لینگ Li و همکارانش در سال ۲۰۱۷ به

بررسی خرابی پیش رونده قاب های خمشی فولادی پرداختند [۱۵]. در این مطالعه اثر فاکتور نسبت دهانه به عمق تیرها در پاسخ سازه مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه مشخص شد که به جای طول دهانه، نسبت دهانه به عمق در میزان تحمل تیرها در دهانه ای که ستون حذف شده است، موثر می باشد. Tavakoli و همکارانش در مطالعه ای دیگر در سال ۲۰۱۷ به بررسی اثر مشخصات زلزله در پتانسیل خرابی قاب های خمشی فولادی تحت خرابی پیشرونده پرداختند [۱۶]. در این مطالعه قاب های فولادی ۵ و ۱۵ طبقه تحت تحلیل های استاتیکی و دینامیکی غیرخطی با در نظر گرفتن الگوی بار آیین نامه اداره خدمات عمومی آمریکا قرار گرفتند. نتایج تحلیل خرابی پیش رونده نشان داد که پتانسیل خرابی پیش رونده تا حد زیادی به محل ستون حذف شده در قاب و همچنین تعداد طبقات وابسته است. همچنین نتایج نشان داد که پاسخ دینامیکی سیستم تا حد زیادی به مشخصات زمین لرزه از جمله شدت آریاس، بیشینه شتاب زمین^۲ و محتوای فرکانسی وابسته است. نتایج نشان داد با افزایش شدت آریاس، با توجه به افزایش انرژی ورودی به سیستم، جابجایی قائم نهایی در محل ستون حذف شده افزایش می یابد. همچنین حذف ستون کناری شرایط بحرانی تری را به نسبت حذف ستون میانی ایجاد می کند. پس از حذف ستون حین زمین لرزه، زلزله باعث افزایش مقادیر جابجایی در محل حذف ستون می شود. Abdelwahed در سال ۲۰۱۹ به بررسی کلیاتی در خصوص خرابی پیش رونده ساختمان ها پرداخت. در این مطالعه بار دیگر روش های مستقیم و غیرمستقیم در طراحی ساختمان های مقاوم در برابر خرابی پیش رونده معرفی گردید. روش غیر مستقیم که در آن حداقل حد مقاومت و نامعینی سازه ها در نظر گرفته می شود و روش مستقیم که در آن رخداد زنجیروار تلاش های کششی و خمشی بعد از حذف المان در نظر گرفته می شود [۱۷].

مطالعات گذشته نشان می دهند که بررسی قاب های ساختمانی تحت اثر خرابی پیشرونده بسیار حائز اهمیت می باشد. از سوی دیگر رخداد خرابی پیش رونده حین زمین لرزه بسیار محتمل بوده و برخی مطالعات، به بررسی خرابی پیش رونده حین رخداد زمین لرزه پرداخته اند. همچنین به بررسی اثر مشخصات زمین لرزه بر روی پتانسیل خرابی پیش رونده قاب ها پرداخته شده است. در این مطالعه در نظر است با طراحی و مدل سازی قاب های خمشی با ارتفاع و تعداد طبقات مختلف ۴، ۸ و ۱۲ چهار دهانه و تجهیز این قاب ها به مهاربند دروازه ای و معرفی سناریوهای متعدد حذف ستون، به بررسی اثر مشخصات



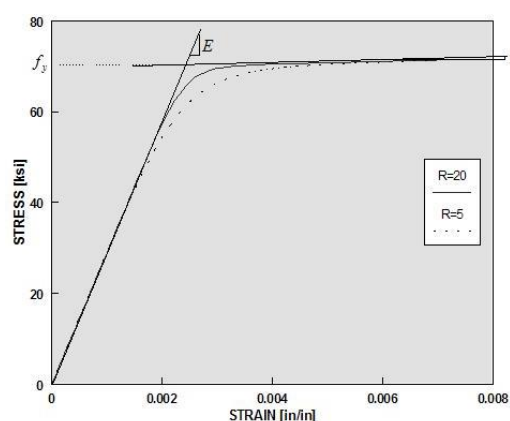
جدول ۱- مشخصات مقاطع

طبقه	شماره طبقه	تیر	ستون	مهاربند
۴ طبقه	۱-۴	IPE 220	BOX 20×20×1	2UNP 80
۸ طبقه	۱-۳	IPE 300	BOX 20×20×1.5	2UNP 100
	۴-۶	IPE 270	BOX 20×20×1	
	۷-۸	IPE 220	BOX 20×20×1	
۱۲ طبقه	۱-۳	IPE 300	BOX 20×20×2	2UNP 120
	۴-۷	IPE 300	BOX 20×20×1.5	
	۸-۱۰	IPE 270	BOX 20×20×1	
	۱۱-۱۲	IPE 220	BOX 20×20×1	

جدول ۲- مشخصات مصالح

مصالح	مدول الاستیسیته (GPa)	تنش جاری شدن (MPa)	جرم حجمی (kg/m ³)
فولاد	۲۱۰	۲۴۰	۷۸۵۰

برخوردار است. جهت مدل‌سازی المان‌های قاب‌ها از المان پلاستیسیته گسترده استفاده شده است [۱۹]. این المان در طول خود تعدادی نقاط گوسی را از کاربر گرفته و همچنین قابلیت دریافت جرم را به صورت گسترده دارد. جهت مدل‌سازی مقاطع نیز از دستور مقطع فایبر استفاده شده است. این دستور قابلیت ایجاد مقطع به صورت دقیق داشته و مقطع را به صورت مش‌بندی شده ایجاد می‌نماید. شکل رفتاری مصالح فولادی استفاده شده جهت شبیه سازی در شکل (۲) ارائه شده است.



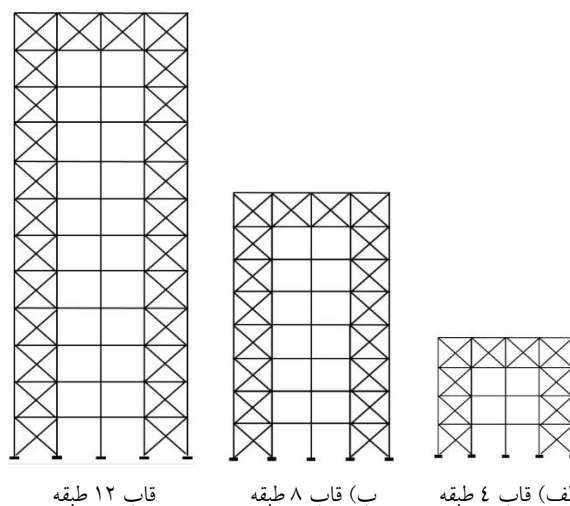
شکل ۲- رفتار مصالح فولادی در اپنسیس [۱۹]

مشخصات مصالح فولادی مطابق آنچه در گام طراحی

شتاب‌نگاشت‌ها و همچنین اثر حضور مولفه قائم در تحلیل خرابی پیش‌رونده، پرداخته شود. جهت مدل‌سازی و تحلیل از راهکار ارائه شده توسط آیین نامه اداره خدمات عمومی آمریکا و نرم افزار اپنسیس استفاده شده است.

۲- مدل‌سازی

قاب‌های مورد بررسی در این مطالعه، قاب‌های چهاردهانه ۴، ۸ و ۱۲ طبقه خمشی فولادی تجهیز شده به مهاربند دروازه‌ای بوده که مقاطع ستون از نوع باکس و مقاطع تیرها از نوع IPE و مهاربندها از نوع دویل ناودانی می باشند. قاب‌ها به صورت دوبعدی طراحی شده و بارهای در نظر گرفته شده در طراحی به میزان ۳۰۰۰ و ۵۰۰۰ نیوتن بر مترمربع به ترتیب برای بارهای زنده و مرده طبقات در نظر گرفته شده است. شکل شماتیک قاب‌های مدل‌سازی شده در شکل (۱) ارائه شده است. کلیه دهانه‌ها و ارتفاع طبقات به ترتیب ۴ و ۳ متر می‌باشند. فرض طراحی قاب‌ها بر این است که قاب مورد نظر قاب مسکونی واقع در منطقه اصفهان و خاک براساس استاندارد ۲۸۰۰ نوع سه انتخاب شده است. تمامی اتصالات تیر به ستون بصورت صلب فرض شده است. مقاطع طراحی شده در جدول (۱) ارائه شده است. همچنین مشخصات مصالح استفاده شده در نرم افزار در جدول (۲) آورده شده است.



شکل ۱- قاب‌های در نظر گرفته شده در مطالعه حاضر

۲-۱- مدل‌سازی قاب‌ها در نرم‌افزار

جهت مدل‌سازی قاب‌های مورد نظر از نرم‌افزار اپنسیس^۳ استفاده شده است [۱۸]. این نرم افزار یک نرم افزار متن باز و رایگان می‌باشد و در تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی از سرعت بالایی

(جدول ۲)) در نظر گرفته شده وارد شده است. همچنین در گام معرفی مقاطع با توجه به رفتار مقاطع مناسب‌ترین تعداد مش بندی در نظر گرفته شده است. برای بررسی صحت مدل‌های ایجاد شده در نرم افزار اپنسیس مقادیر فرکانس مدهای اصلی مدل‌ها با آنچه در گام طراحی در نظر گرفته شده، قیاس و اختلاف ناچیزی را بین مدل‌ها نشان داده است.

۲-۲- گروه‌های شتاب نگاشت

جهت بررسی خرابی پیش رونده جین زمین لرزه لازم است تعدادی شتاب نگاشت برای انجام تحلیل دینامیکی در نظر گرفته شود. از سوی دیگر با توجه به هدف اصلی این مطالعه در خصوص بررسی اثر مشخصات شتاب نگاشت‌ها بر پتانسیل خرابی پیش رونده لازم است که گروه‌های متعدد با مشخصات

تقریباً مشابه معرفی گردند. در این مطالعه از گروه شتاب نگاشت‌های حوزه دور استفاده شده در مرجع [۱۶] بهره برده شده و همچنین یک گروه شتاب نگاشت نیز با در نظر گرفته شدن مولفه قائم نیز به گروه‌های قبلی اضافه گردیده است. مشخصات شتاب نگاشت‌ها در قالب گروه در جدول (۳) ارائه گردیده است. شتاب‌های مورد نظر از مرجع تحقیقات لرزه‌ای پاسیفیک^۴ دانلود و اصلاح خط مبنا با استفاده از نرم افزار ساینموسینگنال^۵ انجام شده است. برای در نظر گرفتن مولفه قائم، شتاب نگاشت‌های گروه C را در نظر گرفته و حین تحلیل مولفه قائم این گروه نیز در نظر گرفته شده است. طیف فوریه گروه‌های شتاب نگاشت در شکل‌های (۳) تا (۶) ارائه شده است.

جدول ۳- گروه‌های شتاب نگاشت

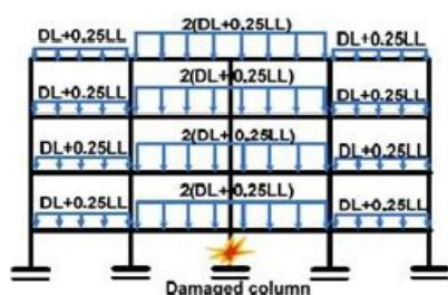
گروه زلزله	نام زلزله	ایستگاه	بزرگا	سرعت موج برشی (متر بر ثانیه)	شدت آریاس در مقیاس ۰/۳۵ (متر بر ثانیه)	شدت آریاس در مقیاس ۰/۵ (متر بر ثانیه)	PGA/PGV (متر)	پریود غالب (ثانیه)
A	Superstation hill 1987	El Centro imp	۶/۵۴	۱۹۲/۰۵	۱/۰۵	۲/۱۴	۰/۷۸	۰/۴۶
	Taiwan Smart 1986	Smart 008	۷/۳۰	۳۵۷/۴۳	۲/۴۲	۴/۹۴	۰/۷۶	۰/۴۲
	Chichi Taiwan 1999	Chy-088	۶/۲۰	۳۱۸/۵۲	۳/۳۰	۶/۷۴	۰/۷۶	۰/۴۴
	Coalinga 1983	Parkfield	۶/۳۶	۱۷۸/۲۷	۳/۸۸	۷/۹۲	۰/۷۸	۰/۴۸
B	Chalfant valley 020	McGee creek surface	۶/۱۹	۳۵۹/۲۳	۱/۱۳	۴/۵۵	۳/۸۸	۰/۰۶
	Taiwan Smart (33)	Smart I04	۵/۸۰	۳۱۴/۸۸	۱/۱۳	۴/۵۴	۲/۰۵	۰/۱۸
	Taiwan Smart (5)	Smart1-M07	۵/۹۰	۳۲۷/۶۱	۱/۱۲	۴/۴۸	۱/۰۲	۰/۳۴
	Northern Calif 03	Ferndale City Hall	۶/۵۰	۲۱۹/۳۱	۱/۱۴	۴/۵۹	۰/۷۹	۰/۸۰
C	Lyte creek	LA Hollywood-StorFF	۵/۳۳	۳۱۶/۴۶	۱/۱۸	۴/۷۵	۲/۱۸	۰/۲۴
	Northridge	Carson Catskill ave	۶/۶۹	۳۰۵/۱۴	۱/۲۰	۴/۸۰	۱/۴۵	۰/۴۰
	Taiwan smart 1	Smart 1 c00	۶/۳۲	۳۰۹/۴۱	۱/۱۸	۴/۷۴	۰/۵۷	۰/۸۰
D	Mammoth Lakes	Mammoth Elem school	۴/۸۵	۳۵۰/۵۴	۱/۶۶	۶/۶۴	۲/۶۰	۰/۱۲
	Humbolt Bay	Ferndale City Hall	۵/۸۰	۲۱۹/۳۱	۱/۶۴	۶/۵۴	۱/۰۵	۰/۴۲
	Taiwan Smart1	Smart 1 001	۶/۳۲	۲۶۷/۶۷	۱/۷۰	۶/۸۶	۰/۴۵	۰/۶۶

۳- تحلیل خرابی پیش‌رونده

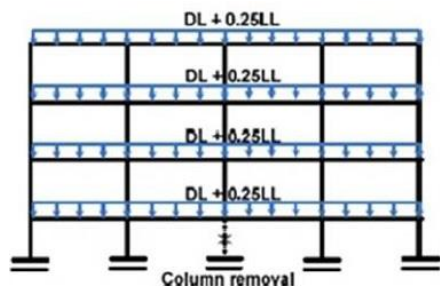
بنابر پیشنهاد آیین نامه‌های رایج دو شیوه برای انجام تحلیل خرابی پیش‌رونده به صورت استاتیکی و دینامیکی می‌توان در نظر گرفت. آیین نامه‌ها برای هر روش ترکیب بار خاصی را معرفی نموده‌اند. در این تحقیق از شیوه ارائه شده توسط آیین نامه اداره خدمات آمریکا جهت اعمال بار گسترده به قاب‌ها

استفاده شده است [۵]. در شیوه ارائه شده توسط این آیین نامه میزان بار گسترده اعمالی در تحلیل استاتیکی و دینامیکی متفاوت خواهد بود. شکل (۷) به صورت شماتیک نحوه بارگذاری توصیه شده توسط آیین نامه اداره خدمات آمریکا را نمایش می‌دهد.

با ستون حذف شده هستند به میزان دو برابر سایر دهانه‌ها می‌بایست که بارگذاری شوند. در شیوه ارائه شده در آیین نامه اداره خدمات عمومی آمریکا، نیروهای داخلی عضو مورد نظر را استخراج و سپس به صورت نیروی متمرکز خارجی در محل عضو حذف شده مدل‌سازی شده و پس از اعمال برای شبیه سازی حذف شدن المان، بارهای مورد نظر ناگهانی در ثانیه هفتم حذف خواهند شد (مشابه مطالعه Kim و همکارانش ۲۰۱۱ و Tavakoli و همکارانش ۲۰۱۷). جهت انجام تحلیل خرابی پیش رونده دینامیکی تحت شتاب نگاشت‌های مطرح شده، بارگذاری پیشنهادی آیین نامه حین تحلیل ثقلی به سازه اعمال و سپس سازه وارد تحلیل دینامیکی شده است.



الف) ترکیب بار ویژه تحلیل استاتیکی

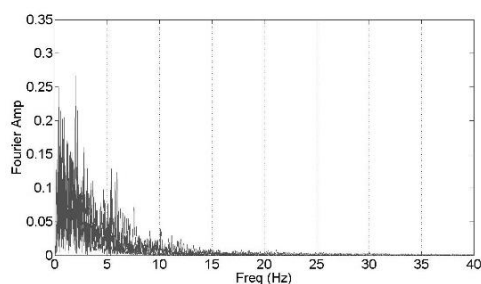


ب) ترکیب بار ویژه تحلیل دینامیکی

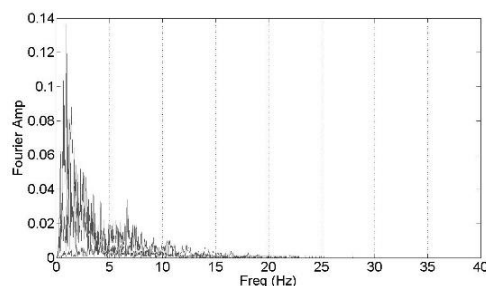
شکل ۷- ترکیب بار پیشنهادی آیین نامه اداره خدمات عمومی آمریکا [۵]

در گام تحلیل دینامیکی شتاب‌نگاشت‌ها به سازه اعمال و در گام مورد نظر المان در نظر گرفته شده در سناریوی از پیش تعریف شده، حذف خواهد شد. سناریوهای حذف المان برای قاب‌های مختلف در جدول (۴) ارائه شده است.

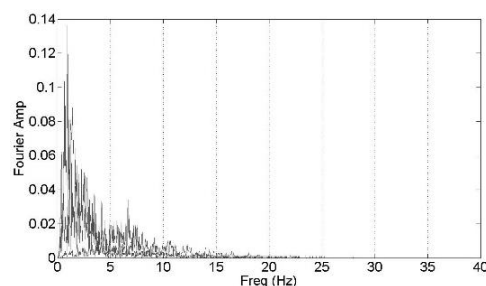
جهت اعتبار سنجی نحوه مدل‌سازی و همچنین نحوه شبیه سازی خرابی پیش‌رونده، از مطالعه آزمایشگاهی قاب فولادی دوبعدی که توسط Sadak و همکارانش [۲۰] در سال ۲۰۱۰ انجام شده استفاده شده است. در این مطالعه یک قاب دودانه فولادی در نظر گرفته شده که ستون میانی در حین آزمایش به سمت پایین تحت بارگذاری قرار گرفته و نمودار نیروی اعمالی



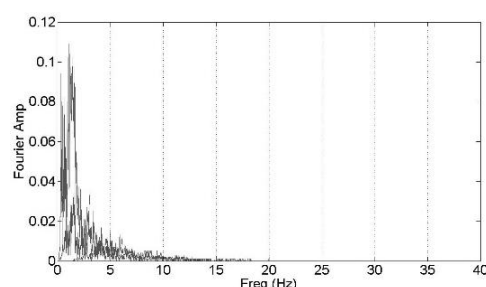
شکل ۳- طیف فوری شتاب‌نگاشت‌های گروه A



شکل ۴- طیف فوری شتاب‌نگاشت‌های گروه B



شکل ۵- طیف فوری شتاب‌نگاشت‌های گروه C



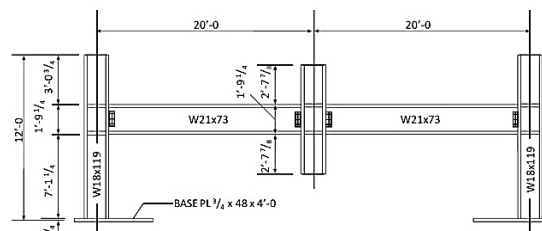
شکل ۶- طیف فوری شتاب‌نگاشت‌های گروه D

در این آیین نامه جهت انجام تحلیل خرابی پیش رونده به صورت دینامیکی تمامی دهانه‌ها ترکیب باری شامل بار مرده به علاوه یک چهارم بار زنده را تجربه می‌نمایند. این درحالیست که در تحلیل استاتیکی، بار دهانه‌ای که شامل ستون حذفی نمی‌باشند مشابه حالت دینامیکی، ولیکن دهانه‌هایی که در ارتباط

در برابر جابجایی قائم ترسیم گردیده است. شکل (۸) مشخصات قاب فولادی در نظر گرفته شده در این مطالعه را نمایش می‌دهد.

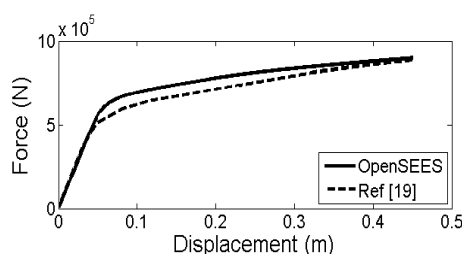
جدول ۴- سناریوی حذف ستون

سناریو	قاب	طبقه	محل ستون
S1	۴ طبقه خمشی	همکف	کناری
S2	۸ طبقه خمشی	همکف	کناری
S3	۱۲ طبقه خمشی	همکف	کناری
S4	۴ طبقه خمشی	همکف	میانی
S5	۸ طبقه خمشی	همکف	میانی
S6	۱۲ طبقه خمشی	همکف	میانی
S7	۴ طبقه خمشی	سوم	میانی
S8	۸ طبقه خمشی	هفتم	میانی
S9	۱۲ طبقه خمشی	یازدهم	میانی



شکل ۸- قاب دو بعدی در نظر گرفته شده در مطالعه مرجع [۱۹]

همانطور که از شکل (۸) مشاهده می‌شود این قاب دارای دو تیر و دو ستون اصلی بوده و ستون میانی جهت اعمال بار در جهت قائم در نظر گرفته شده است. جهت صحت سنجی نحوه مدل‌سازی قاب‌ها در نرم افزار اپنسیس، قاب فوق را مجدد در نرم افزار اپنسیس مدل‌سازی نموده و بار مورد نظر در جهت قائم به نقطه میانی اعمال می‌شود. شکل (۹) قیاس نتایج را نمایش می‌دهد.



شکل ۹- مقایسه نتایج قاب مطالعه NIST و مدل‌سازی در اپنسیس

قیاس نتایج اختلاف ۰ تا ۸ درصدی را نمایش می‌دهد، که

نشان دهنده شباهت مطلوب نمونه آزمایشگاهی و مدل ایجاد شده در نرم افزار اپنسیس است. در محیط نرم افزار اپنسیس قاب مورد نظر به شیوه پلاستیسیته گسترده توسط المان غیرخطی و اختصاص مقطع فایبر به صورت مش بندی شده مدل‌سازی شده است. تعداد نقاط انتگرال گیری در هر المان ۵ در نظر گرفته شده است.

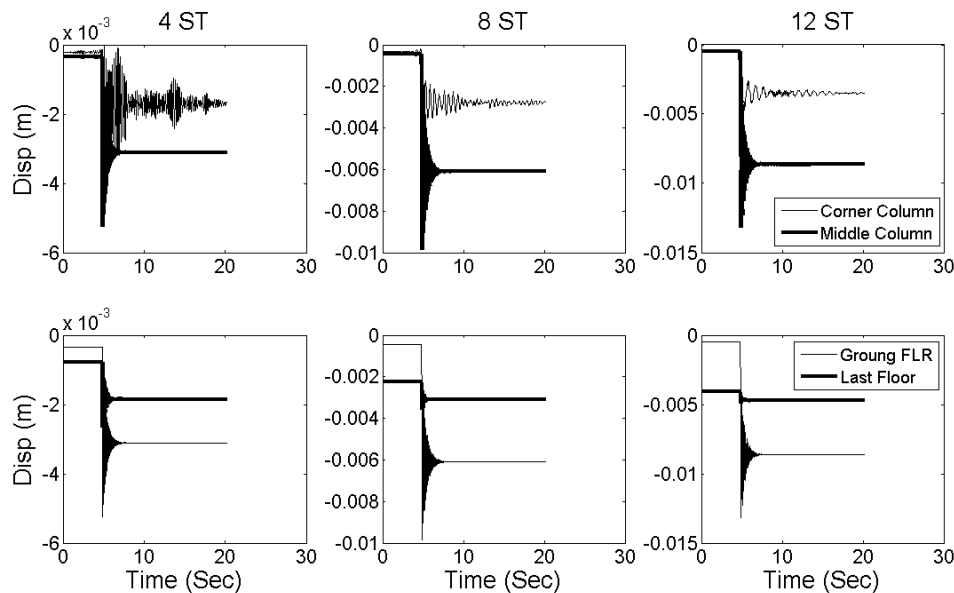
۳-۱- مدل‌سازی خرابی پیش‌رونده دینامیکی در نرم‌افزار اپنسیس

جهت شبیه‌سازی خرابی پیش‌رونده در نرم افزار اپنسیس ابتدا مدل اصلی قاب ایجاد و سپس بارگذاری ثقلی با توجه به پیشنهاد آیین نامه به سازه اعمال می‌گردد. در این مرحله مدل وارد چرخه تحلیل دینامیکی تحت اثر شتاب‌نگاشت شده و در گام مورد نظر المان و یا المان‌های پیش بینی شده در سناریو توسط دستور حذف المان به کلی از سیستم سازه حذف و تحلیل ادامه پیدا خواهد کرد. در این شیوه المان مورد نظر تماماً از سیستم باربر قاب حذف شده و خرابی پیش‌رونده بخوبی شبیه‌سازی خواهد شد. در این تحقیق در تمامی سناریوها، برای هر شتاب‌نگاشت، حذف المان در زمان رخداد بیشینه شتاب آن شتاب‌نگاشت در نظر گرفته شده است.

۴- نتایج تحلیل

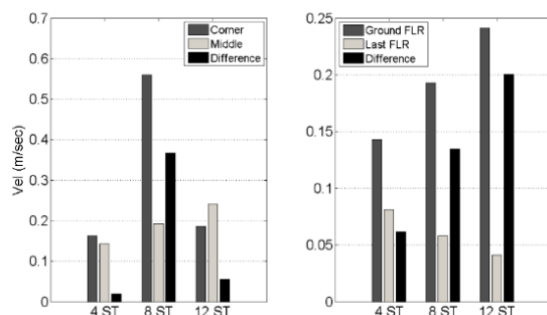
جهت بررسی نتایج تحلیل سازه‌های مورد نظر تحت اثر شتاب‌نگاشت‌های تمامی گروه‌ها قرار گرفته و در لحظه رخداد بیشینه شتاب هر شتاب‌نگاشت، المان مورد نظر با توجه به سناریوی در نظر گرفته شده حذف شده است. نمودارهای تاریخچه جابجایی، سرعت و شتاب برای تمامی شتاب‌نگاشت‌ها ترسیم شده است. به عنوان نمونه در شکل (۱۰) نمودار تاریخچه جابجایی گره فوقانی ستون حذف شده در قاب‌ها تحت شتاب‌نگاشت B1 ترسیم شده است.

همانطور که از شکل (۱۰) قابل مشاهده است حذف ستون کناری جابجایی‌های قائم بزرگتری را نسبت به حذف ستون میانی نشان داده است. ستون کناری با توجه به اینکه از یک سو توسط تیری مهار شده است، نسبت به ستون میانی که توسط دو تیر به قاب متصل است، پس از حذف، تأثیر بیشتری بر سازه داشته و در تمامی قاب‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه مقادیر بزرگتری را ثبت کرده است. ردیف پایینی نمودارهای شکل (۱۰) به قیاس جابجایی نقطه فوقانی ستون حذف شده در قاب‌های مختلف برای حالات حذف ستون طبقه همکف و آخرین طبقه، پرداخته است. با افزایش تعداد طبقات، اختلاف بیشتری بین پاسخ‌ها



شکل ۱۰- تاریخچه جابجایی گره بالایی ستون حذف شده تحت شتاب نگاشت B1

شکل (۱۲) به ارائه مقادیر بیشینه سرعت گره فوقانی ستون حذف شده تحت شتاب نگاشت A1 پرداخته است. همانطور که از این شکل قابل مشاهده است، میزان بیشینه سرعت گره فوقانی ستون حذف شده در سناریوی S2 بیش از دو قاب دیگر می باشد. همچنین مشاهده می شود که با افزایش تعداد طبقات، میزان سرعت گره فوقانی در حالت حذف ستون طبقه آخر کاهش یافته و این در حالیکه سرعت گره فوقانی در حالت حذف ستون طبقه همکف افزایش یافته است.

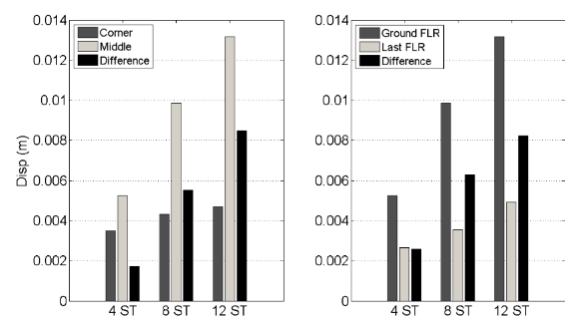


شکل ۱۲- بیشینه سرعت گره بالایی ستون حذف شده تحت شتاب نگاشت A1

همان طور که از شکل (۱۲) قابل مشاهده است، تفاوت پاسخ سرعت در قاب چهار طبقه برای حالات کناری و میانی و همچنین همکف و آخری، کمتر از سایر قابها می باشد. شکل (۱۳) نیز به ارائه بیشینه پاسخ شتاب قابها تحت شتاب نگاشت A1 پرداخته است. مقادیر بیشینه شتاب ثبت شده در شکل (۱۳)

نمایش داده شده است. بدیهی است که قاب با تعداد طبقات بیشتر دارای درجات نامعینی بیشتر بوده و با حذف ستون طبقه همکف، مقادیر کمتری از جابجایی را ثبت خواهد نمود.

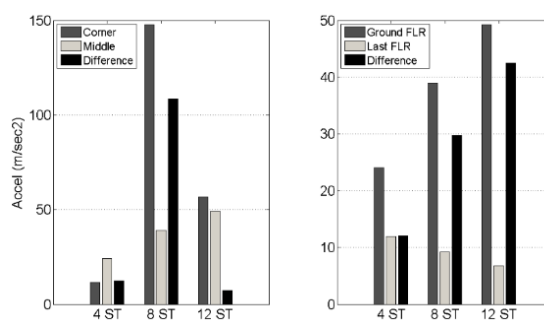
شکل (۱۱) به ارائه مقادیر بیشینه جابجایی قابها تحت شتاب نگاشت B1 پرداخته است. مشابه نتایجی که از تاریخچه نتایج گرفته شد، در نمودارهای شکل (۱۱) نیز بصورت دقیقتر قابل مشاهده می باشد. تفاوت پاسخ در حذف ستون کناری و میانی با افزایش ارتفاع قاب افزایش یافته و این بدان معنی است که در قابهای با ارتفاع و تعداد طبقات بیشتر تفاوت بیشتری در پاسخ سازه برای حذف ستون کناری و میانی در یک تراز مشخص، ایجاد شده است. البته نسبت تفاوت در میزان جابجایی در قاب های با ارتفاع ۴، ۸ و ۱۲ طبقه بترتیب برابر ۳۲، ۵۷ و ۶۳ درصد می باشد. البته این نتایج برای سایر شتاب نگاشتها اندکی متفاوت می باشد.



شکل ۱۱- بیشینه جابجایی گره بالایی ستون حذف شده تحت شتاب نگاشت B1



نشان می‌دهد که مقادیر شتاب ثبت شده برای حالت ستون کناری بیشتر از ستون میانی در قاب‌های ۸ و ۱۲ طبقه بوده و این روال برای قاب ۴ طبقه برعکس می‌باشد.



شکل ۱۳- بیشینه شتاب گره بالایی ستون حذف شده تحت شتاب نگاشت A1

همچنین مقادیر بیشینه شتاب ثبت شده در طبقه همکف بیشتر از مقادیر ثبت شده در طبقه بام می‌باشد، چراکه با حذف ستون هم کف، جرم موجود در بالای گره حذف شده بیشتر بوده و مقادیر بیشتری از شتاب را ثبت خواهد نمود.

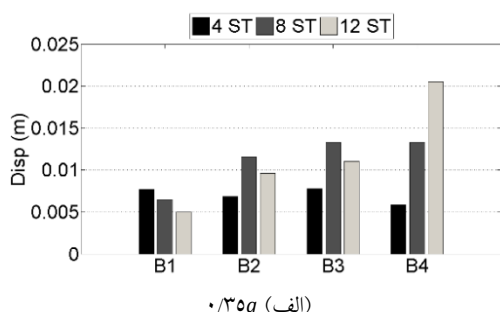
جهت بررسی اثر مشخصات زمین‌لرزه بر روی پاسخ قاب‌ها تحت خرابی پیش‌رونده به قیاس نتایج بین گروه‌های مختلف زمین‌لرزه می‌پردازیم. محتوای فرکانسی از مشخصات بسیار مهم یک شتاب نگاشت بوده و اثر زیادی بر پاسخ دینامیکی سازه خواهد داشت. مولفه‌های گوناگونی برای سنجش و گروه بندی شتاب نگاشت‌ها بر مبنای محتوای فرکانسی موجود بوده، ولیکن نسبت بیشینه شتاب به بیشینه سرعت و پیوند غالب، از مهمترین شاخص‌ها می‌باشند [۲۱ و ۲۲].

در مطالعات اخیر نظیر Tavakoli و همکارانش در سال ۲۰۱۷ محتوای فرکانسی بر اساس نسبت بیشینه شتاب بر بیشینه سرعت به سه دسته: بالا، برای مقادیر نسبت بزرگ‌تر از ۱/۲، متوسط، برای مقادیر نسبت بین ۰/۸ تا ۱/۲ و پایین، برای مقادیر نسبت کمتر از ۰/۸ در نظر گرفته شده است [۱۶]. برای بررسی تاثیر محتوای فرکانسی، شتاب نگاشت‌های گروه‌های B، C و D را که دارای شدت آریاس و بیشینه شتاب مشابه می‌باشند، به سازه‌ها اعمال و نتایج ارائه شده است.

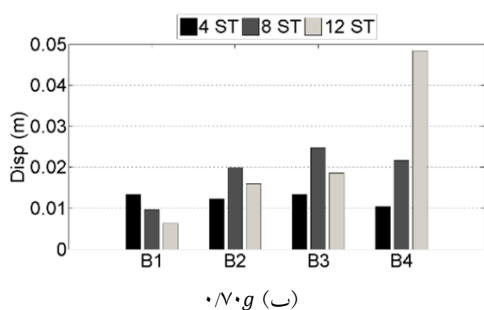
شکل‌های (۱۴) تا (۱۶) به ارائه مقادیر بیشینه جابجایی گره فوقانی ستون حذف شده کناری در قاب‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه تحت شتاب نگاشت گروه‌های B، C و D پرداخته‌اند.

همانطور که از شکل‌های (۱۴) تا (۱۶) قابل مشاهده هست با برابر بودن میزان بیشینه شتاب (با توجه به هم پایه سازی

شتاب نگاشت‌ها به مقادیر ۰/۳۵ و ۰/۷ برابر شتاب گرانش) و همچنین شدت آریاس، با افزایش پیوند غالب شتاب نگاشت، مقدار بیشینه جابجایی قائم گره مبنا، در قاب ۱۲ طبقه، افزایش در قاب ۴ طبقه کاهش ناچیز داشته و در قاب ۸ طبقه روال مشخصی نداشته است.

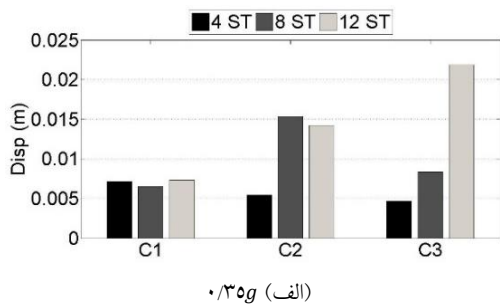


(الف) ۰/۳۵g

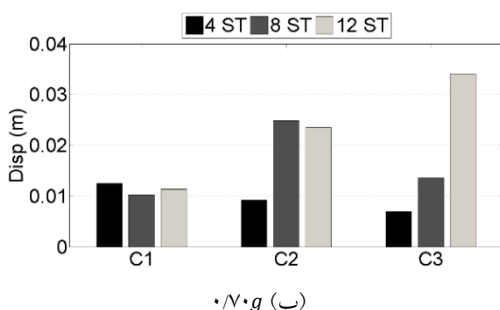


(ب) ۰/۷۰g

شکل ۱۴- بیشینه جابجایی گره بالایی ستون حذف شده تحت شتاب نگاشت گروه B

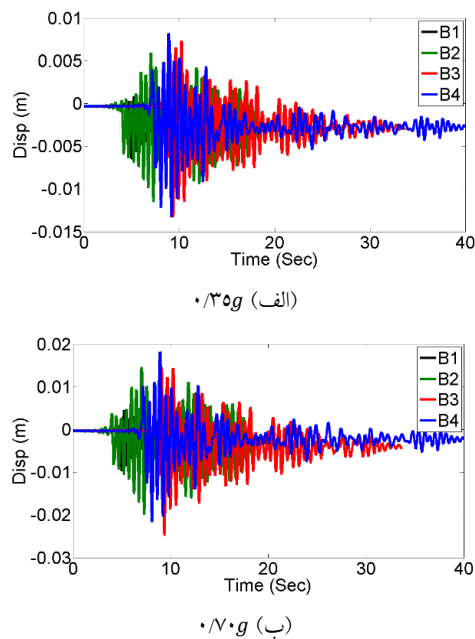


(الف) ۰/۳۵g

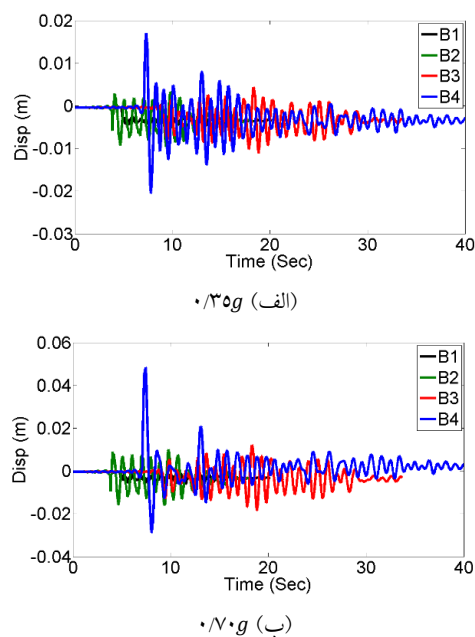


(ب) ۰/۷۰g

شکل ۱۵- بیشینه جابجایی گره بالایی ستون حذف شده تحت شتاب نگاشت گروه C

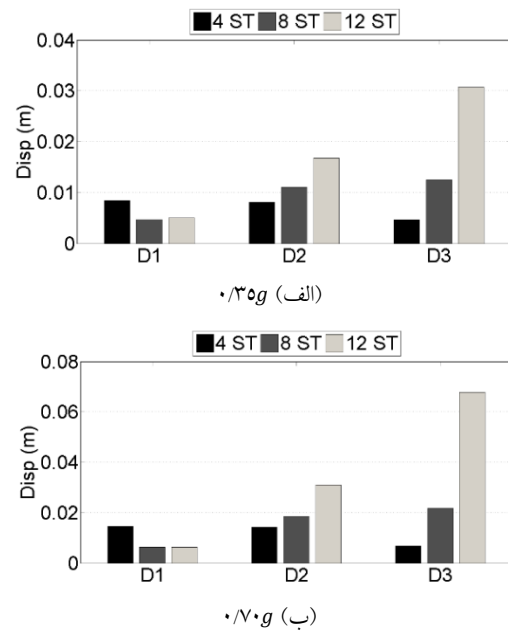


شکل ۱۸- تاریخچه جابجایی گره بالایی ستون حذف شده قاب ۸ طبقه تحت شتاب نگاشت گروه B



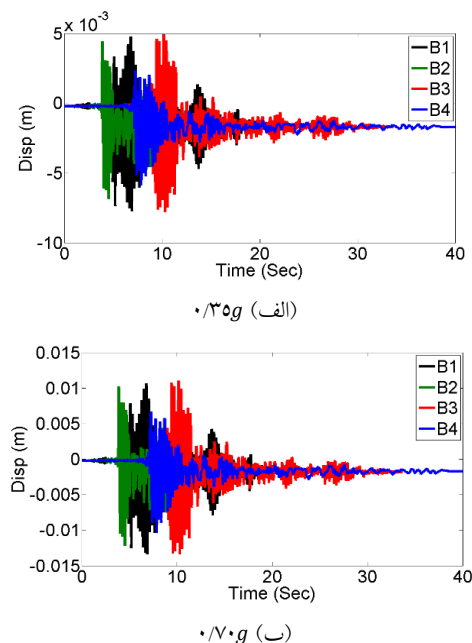
شکل ۱۹- تاریخچه جابجایی گره بالایی ستون حذف شده قاب ۱۲ طبقه تحت شتاب نگاشت گروه B

از شکل (۱۷) مشاهده می‌شود که شتاب نگاشت‌ها با پیروید غالب متفاوت نتایج مختلفی را ثبت نموده‌اند، به طوریکه با افزایش پیروید غالب شتاب نگاشت، دامنه نوسانات گره مبنا در راستای قائم افزایش یافته است. با رویکردی دیگر در بررسی شکل‌های (۱۷) تا (۱۹)



شکل ۱۶- بیشینه جابجایی گره بالایی ستون حذف شده تحت شتاب نگاشت گروه D

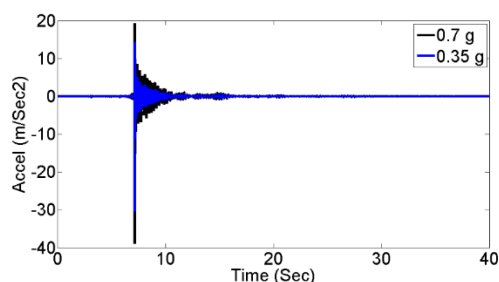
این نشان می‌دهد که جابجایی گره مبنا تا حد زیادی به پیروید غالب شتاب نگاشت و در واقع به محتوای فرکانسی شتاب نگاشت ورودی حساس می‌باشد. شکل‌های (۱۷) تا (۱۹) تاریخچه جابجایی گره مبنا در قاب‌ها را تحت شتاب نگاشت‌های گروه B در حالت حذف ستون کناری، نمایش می‌دهد.



شکل ۱۷- تاریخچه جابجایی گره بالایی ستون حذف شده قاب ۴ طبقه تحت شتاب نگاشت گروه B

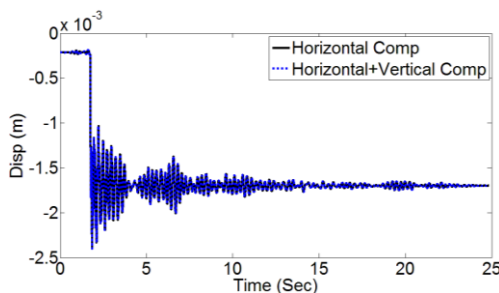


آریاس تاثیر زیادی در پاسخ قاب‌ها تحت اثر خرابی پیش رونده در حین رخداد زمین لرزه خواهند داشت.



شکل ۲۲- تاریخچه شتاب گره مبنای قاب ۴ طبقه تحت شتاب نگاشت Northen-Calif در سناریوی S1

جهت بررسی اثر مولفه قائم در پتانسیل خرابی پیش رونده قاب‌ها، شتاب نگاشت‌های گروه C را یک مرتبه صرفاً به صورت افقی و در مرتبه دیگر به طور همزمان مولفه قائم نیز در حین تحلیل به سازه‌ها اعمال گردید. در شکل‌های (۲۳) تا (۲۵) تاریخچه جابجایی قائم گره مبنای در سناریوی S1 تحت شتاب نگاشت‌های گروه C در حالت‌های اعمال مولفه افقی و اعمال مولفه‌های افقی و قائم به طور همزمان ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، تفاوت پاسخ در حالت اعمال مولفه قائم با حالت اعمال مولفه افقی به تنهایی، بسیار ناچیز می‌باشد.

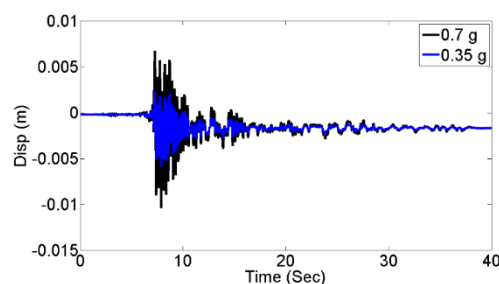


شکل ۲۳- تاریخچه جابجایی گره مبنای قاب ۴ طبقه تحت شتاب نگاشت Lytle creek در سناریوی S1

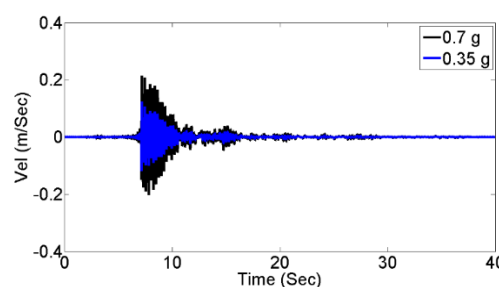
با حذف ستون یک شوک بسیار بزرگ به قاب اعمال شده و جابجایی‌های بسیار بزرگی را در راستای قائم تجربه می‌نماید. در این حالت اگر چنانچه مولفه قائم نیز در حین تحلیل در نظر گرفته شود، تفاوت پاسخ بسیار اندک بوده و تاثیر زیادتری نسبت به شوک ناشی از حذف نخواهد داشت.

مشاهده می‌شود که با افزایش میزان بیشینه شتاب و بنابراین با افزایش شدت آریاس، مقادیر بیشینه جابجایی در تمامی حالات افزایش یافته است.

برای بررسی دقیق تر تاثیر بیشینه شتاب و شدت آریاس، شکل (۲۰) به طور موردی تاریخچه جابجایی قائم گره مبنای تحت شتاب نگاشت Northen-Calif از گروه B را در دو حالت مقیاس نمایش داده است. مشاهده می‌شود که در این حالت جابجایی بیشینه در حالت مقیاس ۰/۳۵ به میزان ۶ میلی متر و در حالت مقیاس شده به ۰/۷ به میزان ۱۰ میلی متر بوده که حدوداً ۴۰ درصد افزایش را نشان می‌دهد. این افزایش میزان بیشینه جابجایی قائم در قاب‌های ۸ و ۱۲ طبقه نیز در سناریوهای S2 و S3 به ترتیب برابر ۳۸ و ۶۶ درصد مشاهده گردید. این تاثیر در تاریخچه سرعت و شتاب نیز مشاهده شده که در شکل‌های (۲۱) و (۲۲) به ترتیب تاریخچه سرعت و شتاب گره مبنای در سناریوی S1 تحت شتاب نگاشت Northen-Calif از گروه B نمایش داده شده است.



شکل ۲۰- تاریخچه جابجایی گره مبنای قاب ۴ طبقه تحت شتاب نگاشت Northen-Calif در سناریوی S1



شکل ۲۱- تاریخچه سرعت گره مبنای قاب ۴ طبقه تحت شتاب نگاشت Northen-Calif در سناریوی S1

بنابراین مشاهده می‌شود که محتوای فرکانسی که خود به پررود غالب و همچنین نسبت بیشینه شتاب بر بیشینه سرعت وابسته است و همچنین مقادیر بیشینه شتاب و بالطبع شدت

نتایج نشان داد که مقادیر بیشینه پاسخ در قاب‌های مهاربندی تا حد زیادی از مقادیر مشابه در قاب‌های خمشی کمتر می باشد و اثر مطلوب حضور مهاربند ضربدری در قاب‌ها جهت پتانسیل خرابی پیش‌رونده مشهود است.

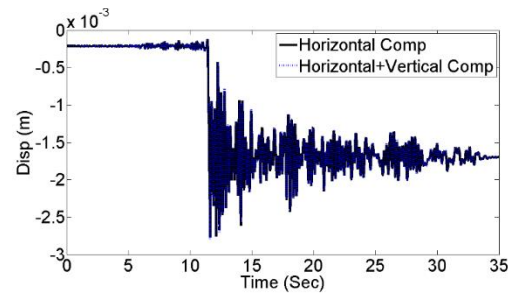
مقادیر بیشینه جابجایی گره فوقانی ستون حذف شده کناری در قاب‌های مهاربندی بدلیل حضور مهاربند در مجاورت ستون کناری بسیار کمتر از نمونه مشابه در قاب خمشی است.

نتایج نشان داد که تغییرات بیشینه شتاب و به دنبال آن تغییرات در شدت آریاس تاثیر زیادی در پاسخ قاب‌ها داشته و میزان جابجایی گره مبنا، که همان گره فوقانی ستون حذف شده می باشد، تا ۶۶ درصد می تواند متفاوت باشد. این تفاوت با نسبت‌های مختلف برای پاسخ سرعت و جابجایی گره مبنا نیز مشاهده گردید. بطور کلی با افزایش بیشینه شتاب، دامنه تمامی پاسخ‌های گره مبنا افزایش یافته است.

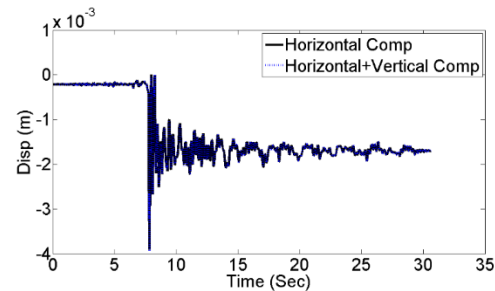
نتایج نشان داد که حذف ستون کناری جابجایی‌های قائم بزرگتری را نسبت به حذف ستون میانی نشان داده است. ستون کناری با توجه به اینکه از یک سو توسط تیری مهار شده است، نسبت به ستون میانی که توسط دو تیر به قاب متصل است، پس از حذف، تاثیر بیشتری بر سازه داشته و در تمامی قاب های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه مقادیر بزرگتری را ثبت کرده است.

با بررسی پاسخ قاب‌ها تحت شتاب نگاشت های گروه‌های متعدد تعریف شده در ابتدای تحقیق و همپایه سازی این شتاب نگاشت‌ها به مقادیر ۰/۳۵ و ۰/۷ برابر شتاب گرانش، با نزدیک بودن مقادیر شدت آریاس، اثرات تغییرات پررود غالب و همچنین نسبت بیشینه شتاب بر بیشینه سرعت که هر دو از شاخص‌های محتوای فرکانسی بوده و در مطالعات پیشین مبناي دسته بندی شتاب نگاشت‌ها در حوزه محتوای فرکانسی می باشند، مشخص شد که با افزایش پررود غالب در شتاب نگاشت‌ها و همچنین کاهش میزان نسبت بیشینه شتاب بر بیشینه سرعت، پاسخ‌های گره مبنا در قاب ۱۲ طبقه افزایش محسوسی داشته است. این روال برای قاب ۴ طبقه معکوس و در قاب ۸ طبقه روال مشخصی نداشته است.

در انتها جهت بررسی اثر اعمال مولفه قائم در حین تحلیل خرابی پیش رونده، شتاب نگاشت‌های یک گروه مبناي عمل قرار گرفته و در حالت دوم مولفه قائم متناظر با شتاب نگاشت‌های این گروه به قاب‌ها به طور همزمان با مولفه افقی اعمال گردید. نتایج در این حالت تفاوت محسوسی را بین پاسخ سازه نمایش نداده که نشان دهنده این است با توجه به اینکه در حین حذف ستون بطور ناگهانی، پاسخ‌های بزرگی در این ناحیه



شکل ۲۴- تاریخچه جابجایی گره مبناي قاب ۴ طبقه تحت شتاب نگاشت Northridge در سناریوی S1



شکل ۲۵- تاریخچه جابجایی گره مبناي قاب ۴ طبقه تحت شتاب نگاشت Taiwan Smart 1 در سناریوی S1

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثر مشخصات شتاب نگاشت‌ها نظیر شاخص آریاس، بیشینه شتاب، محتوای فرکانسی و همچنین اعمال مولفه قائم در حین تحلیل، در ارزیابی پتانسیل خرابی پیش رونده قاب‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه فولادی تجهیز شده به مهاربند دروازه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. برای انجام تحلیل خرابی پیش رونده از بارگذاری پیشنهادی آیین نامه اداره خدمات عمومی آمریکا در حالت تحلیل دینامیکی استفاده شده و حین اعمال تاریخچه شتاب نگاشت‌ها به قاب‌ها، در گام زمانی متناسب با رخداد بیشینه شتاب، ستون مورد نظر به طور کامل حذف و تحلیل دینامیکی ادامه یافت. جهت بررسی پتانسیل خرابی پیش رونده قاب‌ها، ۹ سناریوی حذف ستون معرفی گردید. سناریوها شامل حذف ستون کناری و میانی در طبقه همکف و همچنین ستون میانی در طبقه بام برای تمامی قاب‌ها در نظر گرفته شد. همچنین جهت بررسی اثرات مشخصات مختلف شتاب نگاشت که اشاره شد، ۴ گروه مختلف شتاب نگاشت معرفی گردیده و همچنین با همپایه سازی این شتاب نگاشت‌ها، دسته‌های متعدد از شتاب نگاشت معرفی و تحت سناریوهای تعریف شده به تمامی قاب‌ها اعمال گردید. در مجموع حدود ۴۶۱ مرتبه تحلیل انجام گردید.

- [13] Tavakoli, H.R., Naghavi, F. and Goltabar, A.R. (2015), "Effect of base isolation systems on increasing the resistance of structures subjected to progressive collapse", *Earthquakes and Structures*, Vol. 9, pp. 639-656.
- [14] Faroughi, A., Moghadam, A.S. and Hosseini, M. (2017), "Seismic progressive collapse of MRF-EBF dual steel systems", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, Vol. 170, pp. 67-75.
- [15] Li, L., Wang, W., Chen, Y. and Teh, L.H. (2017), "A basis for comparing progressive collapse resistance of moment frames and connections", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 139, pp. 1-5.
- [16] Tavakoli, H.R. and Hasani, A.H. (2017), "Effect of Earthquake characteristics on seismic progressive collapse potential in steel moment resisting frame", *Earthq. Struct.*, Vol. 12, pp. 529-541.
- [17] Abdelwahed, B. (2019), "A review on building progressive collapse, survey and discussion", *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 11, pp. e00264.
- [18] Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees), <https://opensees.berkeley.edu/>.
- [19] Foroughi, S.M.J. (2017), "The Most Complete Applied Reference of OpenSees", Book, Negarandeh Danesh Pub, ISBN: 978-600-6190-75-4, (In Persian).
- [20] Sadak, F., Main, J., Lew, H.S., Robert, S., Chiarito, V. and Tawil, Sh. (2010), "An experimental and computational study of precast concrete moment frames under a column removal scenario", NIST Technical Note 1886, US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology.
- [21] Kramer, S.L. (1996), "Geotechnical earthquake engineering", New Jersey, Prentice-Hall.
- [22] Tso, W.K., Zhu, T.J. and Heidebrecht, A.C. (1992), "Engineering implication of ground motion A/V ratio", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 11, pp. 133-144.

ثبت شده، اعمال مولفه قائم تاثیر زیادی در ایجاد تفاوت در پاسخ سازه نداشته است.

با توجه به محدودیت‌های موجود در این مطالعه پیشنهاد می‌گردد که در مطالعات آتی، اثرات پالس در رکوردهای حوزه نزدیک، اثرات دال بتنی سقف‌ها و همچنین اندرکنش خاک-سازه دیده شود.

۶- مراجع

- [1] Menchel, K. (2009), "Progressive collapse: comparison of main standards, formulation and validation of new computational procedures", *Universite Libre de Bruxelles, Faculte des Sciences Appliquees* (Ph. D. Thesis).
- [2] UFC 4-01-01, (2003), Unified facilities criteria (UFC), DoD minimum antiterrorism standards for buildings, department of defense (DoD)A.
- [3] UFC, (2009), Design of buildings to resist progressive collapse, Unified Facilities Criteria, Department of Defense (DoD), 4-023-03.
- [4] UFC 4-023-03, (2010), DoD, Minimum antiterrorism standards for buildings, Department of Defense, Design of Structures to Resist Progressive Collapse.
- [5] GSA, (2003), Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects, The U.S. General Services Administration.
- [6] Gross, J.L. and McGuire, W. (1983), "Progressive collapse resistance design", *Journal of Structural Engineering* (ASCE), Vol. 109, pp. 1-15.
- [7] Kaewkulchai, G. and Williamson, E.B. (2003), "Dynamic behavior of planar frames during progressive collapse", 16th ASCE engineering mechanics conference.
- [8] Ruth, P., Marchand, K.A. and Williamson, E.B. (2006), "Static equivalency in progressive collapse alternate path analysis: Reducing conservatism while retaining structural integrity", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol. 20, pp. 349-364.
- [9] Kim, H.S., Kim, J. and An, D.W. (2009), "Development of integrated system for progressive collapse analysis of building structures considering dynamic effects", *Advances in Engineering Software*, Vol. 40, pp. 1-8.
- [10] Kim, J. and An, D. (2009), "Evaluation of progressive collapse potential of steel moment frames considering catenary action", *The structural design of tall and special buildings*, Vol. 18(4), pp. 455-465.
- [11] Kim, J. and Kim, T. (2009), "Assessment of progressive collapse-resisting capacity of steel moment frames", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 65, pp. 169-179.
- [12] Jiang, J., Li, G.Q. and Usmani, A. (2015), "Effect of bracing systems on fire-induced progressive collapse of steel structures using OpenSees", *Fire Technology*, Vol. 51, pp. 1249-1273.

پی نوشت

- ¹ General Services Administration (GSA)
² Peak Ground Acceleration (PGA)
³ OpenSees
⁴ PEER
⁵ Seismo signal

