

تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی قاب‌های فولادی با مهاربندهای کمانش‌تاب برون‌محور تحت رکوردهای نزدیک گسل

حمزه شکیب* (استاد)

راضیه صافی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی عمران شریف، بهار ۱۳۹۴ (دوره ۲ - شماره ۱/۲، ص. ۱۲۳-۱۳۰، یادداشت شتی)

در سیستم‌های مهاربندی کمانش‌تاب، تسلیم هسته‌ی فولادی به کشش و فشار به جذب مقادیر بالایی از انرژی کمک می‌کند. پیکربندی متداول این سیستم‌ها هم‌محور است، با استفاده از تیرهای شکل‌پذیر وصله‌شده به همراه مهاربندی کمانش‌تاب با پیکربندی برون‌محور می‌توان هم از مزایای معماری مهاربندی برون‌محور و هم از مزایای طراحی مهاربندهای کمانش‌تاب بهره برد. هدف این نوشتار، ارزیابی و مقایسه‌ی عملکرد دینامیکی سیستم مهاربندی برون‌محور متداول و مهاربندی کمانش‌تاب با پیکربندی برون‌محور تحت اثر رکوردهای حوزه‌ی دور و نزدیک است. بدین منظور تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی قاب‌های دوبعدی با طول دهانه و تعداد طبقات مختلف انجام شده و پارامترهایی مختلف برای دو سیستم مهاربندی تعیین شده است. نتایج نشان می‌دهد که سیستم مهاربندی کمانش‌تاب برون‌محور در مناطقی با لرزه‌خیزی بالا و در نزدیکی گسل‌های لرزه‌زا نسبت به سیستم مهاربندی برون‌محور متداول عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: رکوردهای حوزه‌ی نزدیک، مهاربند کمانش‌تاب با پیکربندی

برون‌محور، مهاربند برون‌محور، تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی.

shakib@modares.ac.ir
r.safi@modares.ac.ir

۱. مقدمه

جلوگیری از این قبیل تغییرشکل‌ها، روش‌های مختلف در قاب‌های فولادی مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از این روش‌ها استفاده از بادبندها به عنوان اعضاء سازه‌ی الحاقی جهت افزایش سختی، استهلاک انرژی، و کنترل تغییرشکل نسبی طبقات است.

از طرفی وجود المان مهاربند می‌تواند از لحاظ معماری مشکل آفرین باشد، از این رو استفاده از سیستم مهاربندی برون‌محور (EBF)^۲ به دلیل مزایای معماری کاربرد فراوانی دارد. در یک سیستم مهاربندی EBF، که به صورت دقیق و مناسب طراحی شده باشد، قاب و اعضاء خارج از تیر رابط در تمامی طول اعمال نیروی باد یا زلزله در محدوده‌ی ارتجاعی باقی مانده و تغییرشکل‌های غیرارتجاعی فقط مربوط به تیر رابط می‌شود.^[۱]

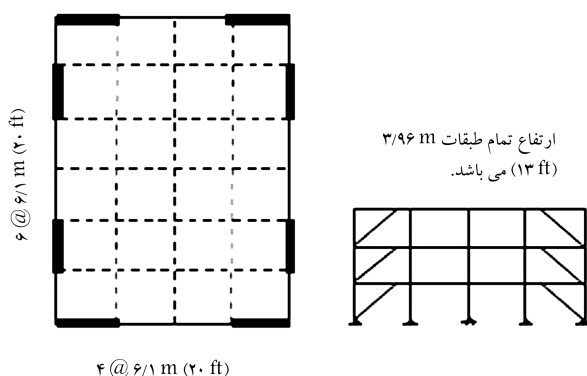
در سازه‌های متداول که توسط مهاربندهای هم‌محور فولادی در برابر زلزله مقاوم شده‌اند، عمده‌ی اتلاف انرژی فقط زمانی صورت می‌پذیرد که بادبندها در کشش قرار گیرند و از طریق تسلیم شدن، انرژی زیادی را تلف کنند. اما زمانی که در فشار قرار می‌گیرند، قبل از اینکه به تنش تسلیم برسند، کمانش می‌کنند و در نتیجه نه فقط اتلاف انرژی صورت نمی‌پذیرد، بلکه گاهی اوقات پایداری سازه نیز به خاطر کمانش‌های ترد و ناپایدار به خطر می‌افتد. به منظور غلبه بر مسائل مذکور، از ۳۰ سال قبل در ژاپن نوع جدیدی از مهاربندها رواج یافته‌اند. در این مهاربندها با

حرکات زمین در مناطق نزدیک به گسل می‌تواند تفاوت‌های قابل توجهی را با مناطق دور از گسل داشته باشد. معمولاً ناحیه‌ی نزدیک گسل^۱ در محدوده‌ی بین گسل و فاصله‌ی در حدود ۲۰ الی ۶۰ کیلومتر از آن فرض می‌شود. در واقع وسعت این محدوده می‌تواند با توجه به عواملی همچون بزرگای زلزله، زمین‌ساخت منطقه و عوامل دیگر دست‌خوش تغییر شود. در این محدوده، حرکات زمین به‌طور قابل ملاحظه‌ی مؤثر از مکانیسم گسلش، جهت انتشار گسیختگی و جابجایی احتمالی پسماند زمین ناشی از لغزش گسل است. این عوامل منجر به اثراتی می‌شوند که در اصطلاح لاتین به آنها "Rupture-directivity" و "Fling step" می‌گویند. در فارسی پژوهشگران این دو اصطلاح را به ترتیب با عنوان‌های جهت‌پذیری گسیختگی یا سوگیرش گسیختگی و گام جهشی تغییرمکان یا تغییرمکان ماندگار مورد استفاده قرار داده‌اند. تخمین حرکات زمین در نزدیکی گسل‌های فعال باید با توجه به ویژگی‌های حرکت زمین در این مناطق صورت گیرد.^[۱]

قاب‌های فولادی معمولی هنگامی که تحت اثر زلزله‌های قوی قرار می‌گیرند، متحمل تغییرشکل‌های جانبی بزرگی می‌شوند؛ در صورتی که این تغییرشکل‌ها بیش از اندازه باشند، موجب آسیب مشهود اجزاء سازه‌ی و غیرسازه‌ی می‌شوند. برای

* نویسنده مسئول

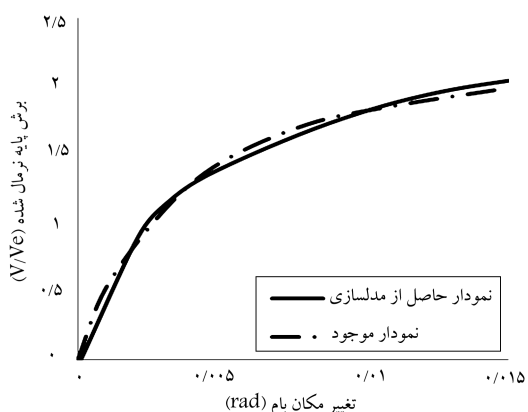
تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۸/۱۰، اصلاحیه ۱۳۹۲/۵/۲۶، پذیرش: ۱۳۹۲/۶/۱۶.



شکل ۱. هندسه‌ی قاب. [۵]

جدول ۱. مقاطع قاب.

طبقه	تیر	مهاربند	ستون سمت راست	ستون سمت چپ
۱	W۱۶ × ۸۹	W۱۴ × ۱۴۵	W۱۲ × ۵۳	W۱۲ × ۱۲۰
۲	W۱۶ × ۵۷	W۱۲ × ۹۶	W۱۲ × ۵۳	W۱۲ × ۱۲۰
۳	W۱۰ × ۶۸	W۱۲ × ۷۲	W۱۲ × ۵۳	W۱۲ × ۱۲۰



شکل ۲. نمودار حاصل از تحلیل استاتیکی بارافزون جهت کنترل صحت مدل‌سازی.

۳. مشخصات قاب‌ها

در این نوشتار ۸ قاب بررسی شده‌اند، که شامل قاب‌هایی با طول دهانه‌ی ۴ و ۶ متر، ارتفاع ۳ و ۹ طبقه و دو نوع سیستم مهاربندی EBF و BRBF-E با تیر پیوند میانه دهانه هستند. به منظور مقایسه‌ی عملکرد دو سیستم، ابتدا قاب‌های EBF طراحی و سپس قاب‌های BRBF-E به نحوی مدل‌سازی شده‌اند که مقاومتی برابر با این قاب‌ها داشته باشند. قاب‌های برون‌محور به نحوی طراحی شده‌اند که رفتاری کنترل‌شونده توسط برش داشته باشند. وصله‌ی تیرها در قاب مهاربندی کماتش‌تاب برون‌محور به صورت اتصالات کاملاً مفصلی در نظر گرفته شده است. [۶]

در قاب‌ها از فولاد ST۳۷ استفاده شده است. حد بالای تنش مجاز نیز مطابق با دستورالعمل بهسازی ساختمان‌های موجود برابر $1/1 F_y$ فرض شده است. در بارگذاری ثقیلی، طبقات قاب تحت بار مرده‌ی (بار سقف + بار دیوار جانبی + بار تیغه‌بندی) برابر 1200 kg/m^2 ، بار زنده‌ی 200 kg/m^2 ، بام تحت بار مرده‌ی 1100 kg/m^2 و بار زنده‌ی 150 kg/m^2 بارگذاری شده‌اند.

محصورسازی هسته‌ی فولادی شکل‌پذیر در میان حجمی از بتن از کماتش هسته جلوگیری می‌شود و منحنی هیستریزس متقارنی در سیکل‌های فشاری و کششی دارند. این مهاربدها با عنوان مهاربدهای کماتش‌تاب (مقاوم در برابر کماتش) نام برده می‌شوند. [۳] این سیستم مهاربندی قابلیت اتلاف انرژی بسیار بالایی دارد، چرا که هسته‌ی فلزی آن هم به کشش و هم به فشار تسلیم خواهد شد. از طرفی استفاده از این سیستم روشی برای طراحی اقتصادی قاب‌هاست. [۴] ساختار هم‌محور متداول مهاربدهای کماتش‌تاب اهداف معماری را برآورده نمی‌سازد، از این رو استفاده از این سیستم مهاربندی به صورت برون‌محور می‌تواند مؤثر باشد.

در پژوهشی در سال ۲۰۱۰ پیشنهاد شد که مهاربدهای کماتش‌تاب به صورت برون‌محور مورد استفاده قرار گیرند. [۵] با استفاده از مهاربدهای کماتش‌تاب به صورت برون‌محور، می‌توان عملکرد لرزه‌ی مناسب‌تر قاب مهاربندی و اتصال تیر پیوند و ستون را انتظار داشت. در حقیقت با استفاده از این سیستم مهاربندی هم از مزایای معماری مهاربندی برون‌محور و هم از مزایای طراحی مهاربدهای کماتش‌تاب بهره برده‌ایم. در این سیستم مهاربندی، عضو مهاری سختی جانبی قاب فولادی را تأمین می‌کند و به گونه‌ی طراحی می‌شود که تغییرشکل‌های غیرکشسان بزرگی را بپذیرد، در حالی که تیر پیوند به گونه‌ی طراحی می‌شود که در حین انتقال نیروهای عضو مهاری به ستون، کشسان باقی بماند. از این رو با تمرکز خسارت در مهاربند به جای تیر، تعمیر و تعویض عضو آسیب‌دیده پس از زلزله، نسبت به قاب‌های برون‌محور ساده‌تر است. در این سیستم مهاربندی، المان مهاربند سختی جانبی قاب فولادی را تأمین می‌کند و به گونه‌ی طراحی می‌شود که تغییرشکل‌های محوری غیرکشسان بزرگی را بپذیرد، در حالی که تیر پیوند باید حین انتقال نیروهای نهایی مهاربند به ستون‌ها، کشسان باقی بماند. پرینز (۲۰۱۰)، [۵] تعدادی قاب ۳، ۶ و ۹ طبقه با دهانه‌های ۶ و ۹ متر و دو نوع سیستم مهاربندی برون‌محور متداول و سیستم مهاربندی کماتش‌تاب با خروج از مرکزیت (BRBF-Ec) مورد مطالعه و مقایسه قرار داد و به این نتیجه رسید که سیستم BRBF-E می‌تواند جایگزین مناسبی برای EBF باشد. به علاوه از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه است. از آنجا که خسارات سازه‌ی BRBF-E در ناحیه‌ی مهاربند اتفاق می‌افتد، تعمیر قاب پس از زلزله نسبت به سیستم مهاربندی EBF، که در آن تیر پیوند تسلیم می‌شود، ساده‌تر است. [۵]

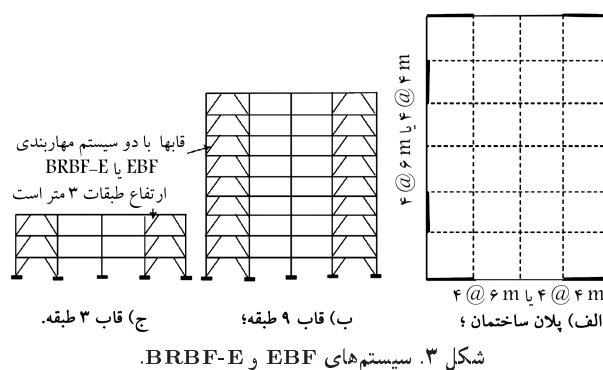
در این نوشتار، عملکرد دینامیکی مهاربدهای برون‌محور کماتش‌تاب پیشنهادی پرینز و مهاربدهای برون‌محور متداول در زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک و دور ارزیابی و مقایسه شده است. بدین منظور تعدادی قاب با مهاربندی برون‌محور متداول و قاب با مهاربندی برون‌محور کماتش‌تاب با ارتفاع ۳ و ۹ طبقه و با تغییرات در طول دهانه‌ها طراحی شده‌اند، و سپس عملکرد لرزه‌ی آنها با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲. کنترل صحت مدل‌سازی

جهت کنترل صحت مدل‌سازی، یک نمونه از قاب‌های مهاربندی برون‌محور مورد مطالعه توسط پرینز (۲۰۱۰)، [۵] انتخاب شده است. مشخصات این قاب در شکل ۱ نشان داده شده است. مقاطع مورد استفاده در این قاب مطابق جدول ۱ است. پس از ساخت مدل و انجام تحلیل استاتیکی بارافزون، نمودار حاصل از تحلیل مطابقت قابل قبولی را در مقایسه با نمودار حاصل از مطالعه‌ی پرینز، [۵] نشان داده است. این نمودارها در شکل ۲ ارائه شده‌اند.

جدول ۴. رکوردهای دور از گسل.

ردیف	ایستگاه	زلزله	بیشینه‌ی شتاب (g)
۱	Loma Priet	Fremont	۰٫۱۹۲
۲	Loma Priet	A PEELYE Hayward Muir	۰٫۱۷۱
۳	Loma Priet	Hayward BART Sta	۰٫۱۵۹
۴	Northridge	Inglewood Union Oil	۰٫۱۰۱
۵	Northridge	LA - Baldwin Hills	۰٫۲۳۹
۶	Kocaeli	Mecidiyko	۰٫۶۸
۷	Kern Country	Taft Lincoln School	۰٫۱۷۸



قاب‌های موردنظر قسمتی از یک ساختمان واقع در منطقه‌ی با خطر نسبی زیاد ($A = 0.35$) با کاربری مسکونی و واقع بر سنگ هستند. هندسه‌ی قاب‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. پس از طراحی اولیه‌ی قاب‌ها تحلیل ارتعاش آزاد انجام شده است. دوره‌ی تناوب مود اول قاب‌های EBF و BRBF-E مطابق جدول ۲ است.

۴. معرفی رکوردها

جهت انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی از ۷ رکورد نزدیک گسل و ۷ رکورد دور از گسل واقعی، واقع بر سنگ استفاده شده است. نام و مشخصات رکوردها در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. جهت انجام تحلیل دینامیکی قاب‌ها، مؤلفه‌ی عمود بر جهت گسیختگی گسل استفاده شده است.

جدول ۲. دوره‌ی مود اول قاب‌ها.

تعداد طبقات	سیستم مهاربندی	طول دهانه (m)
۳	EBF	۰٫۳۸
	BRBF-E	۰٫۴
۹	EBF	۰٫۹۵
	BRBF-E	۰٫۹۶

جدول ۳. رکوردهای نزدیک گسل.

ردیف	ایستگاه	زلزله	بیشینه‌ی شتاب (g)
۱	Gilroy array	Morgan hill	۰٫۲۹۲
۲	LGPC	Loma prieta	۰٫۵۶۳
۳	LA dam	Northridge	۰٫۵۱۱
۴	KJMA	Kobe	۰٫۵۹۹
۵	Arcelike	Kocaeli	۰٫۱۴۹
۶	Tabas, Iran	Tabas	۰٫۷۹۵
۷	Manjil, Iran	Abhar	۰٫۵۰۹

۵. مطالعات عددی و مباحث

به منظور ارزیابی سیستم BRBF-E، عملکرد دینامیکی این سیستم با سیستم EBF متداول مقایسه شده است. در ابتدا، مکانیسم رفتاری دو سیستم مهاربندی با هم مقایسه شده است. سپس جابجایی نسبی بین طبقات برای دو سیستم مهاربندی در مقادیر مختلف بیشینه‌ی شتاب زمین با هم مقایسه و در نهایت، سطوح عملکرد دینامیکی برای دو سیستم از روی منحنی‌های IDA تعیین شده است.

۱.۵. مقایسه‌ی مکانیسم رفتاری در سیستم مهاربندی کمانش تاب و سیستم مهاربندی برون محور

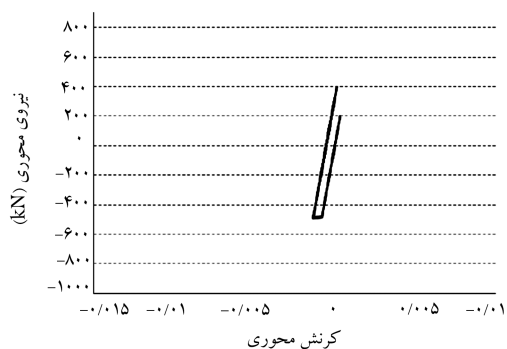
همان‌گونه که قبلاً بیان شد، تفاوت اصلی دو سیستم مهاربندی مورد مطالعه در این است که در سیستم مهاربندی EBF، قاب و اعضاء خارج از تیر رابط در تمامی طول اعمال نیروی زلزله در محدوده‌ی ارتجاعی باقی مانده‌اند و تغییرشکل‌های غیرارتجاعی فقط مربوط به تیر رابط می‌شود، در حالی که در سیستم مهاربندی BRBF-E، عضو مهاربندی سختی جانبی قاب فولادی را تأمین می‌کند و تغییرشکل‌های غیرکشسان بزرگی را می‌پذیرد و تیر پیوند، کشسان باقی می‌ماند.

به منظور نشان دادن این مکانیسم رفتاری نمونه‌هایی از چرخه‌ی هیستریزس مهاربندهای کمانش تاب در سیستم BRBF-E و تیرهای پیوند در سیستم EBF تحت اثر رکوردهای ثبت شده از زلزله‌ی نورتریج در دو ایستگاه دور (Union Oil - Inglewood) و نزدیک (LA dam) در $g = 1$ PG A در شکل‌های ۴ و ۵ ارائه شده‌اند.

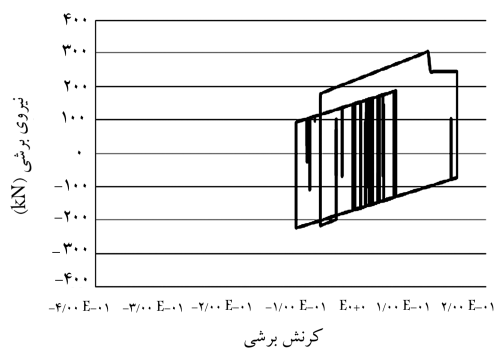
به منظور بررسی رفتار هر قاب، طبقه‌بندی انتخاب شده است که دارای بیشینه‌ی جابجایی نسبی طبقات بوده است. از این رو طبقه‌ی اول: قاب‌های ۳ طبقه، طبقه‌ی دوم: قاب‌های ۶ طبقه، و طبقه‌ی سوم: قاب‌های ۹ طبقه با طول دهانه‌ی ۴ متر جهت ترسیم چرخه‌های هیستریزس به عنوان نمونه انتخاب شده‌اند. این چرخه‌ها برای تیر پیوند قاب‌های برون محور، تغییرات کرنش برشی در مقابل نیروی برشی تیر، و برای مهاربند قاب کمانش تاب، تغییرشکل محوری مهاربند در مقابل نیروی محوری را نشان می‌دهند.

در شکل‌های ۴ و ۵، چرخه‌های هیستریزس وقوع تسلیم برشی در تیر پیوند قاب‌های EBF و تسلیم محوری در مهاربند کمانش تاب قاب BRBF-E را نشان می‌دهند، که این مطابق همان مکانیسم‌های تعریف شده‌ی دنظرگرفته شده در طراحی اولیه است.

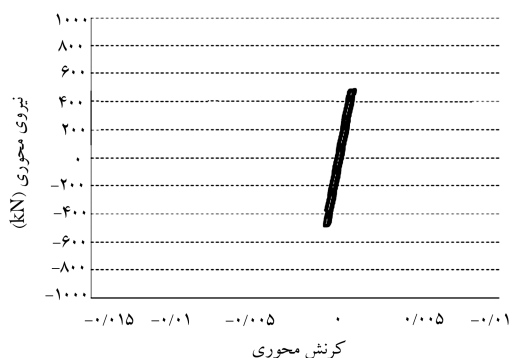
مطابق شکل ۴، تیر پیوند قاب EBF سه طبقه تحت اثر رکورد حوزه‌ی دور و نزدیک به برش تسلیم شده است، ولی میزان تسلیم برشی تحت اثر رکورد حوزه‌ی



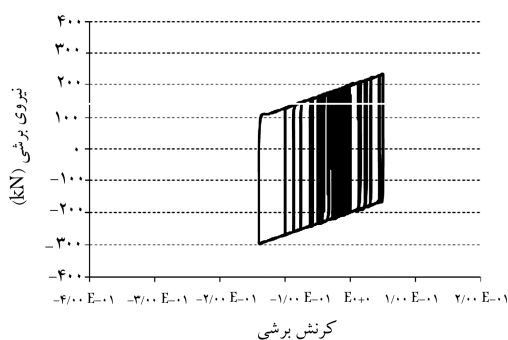
ج) مهاربند سیستم BRBF-E تحت اثر رکورد نزدیک گسل؛



الف) تیر پیوند سیستم EBF تحت اثر رکورد نزدیک گسل؛

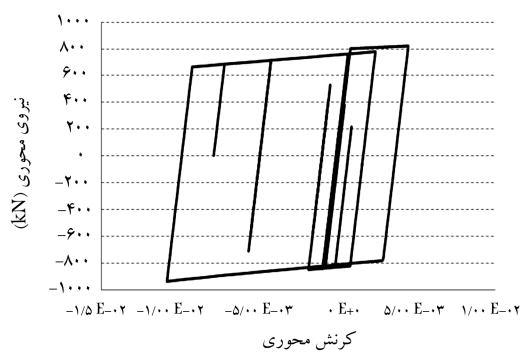


د) مهاربند سیستم BRBF-E تحت اثر رکورد دور از گسل.

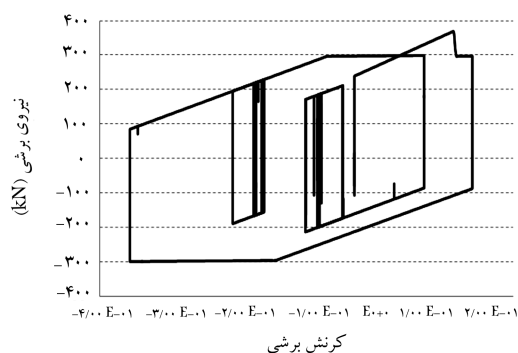


ب) تیر پیون سیستم EBF تحت اثر رکورد دور از گسل؛

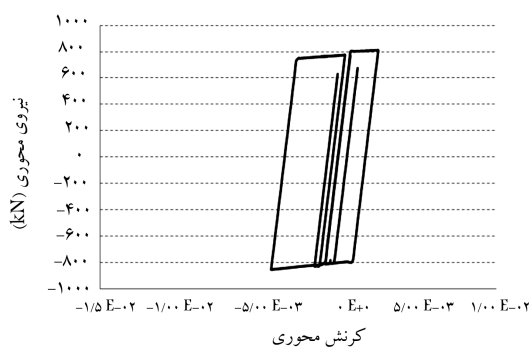
شکل ۴. چرخه‌ی هیستریزیس طبقه‌ی اول قاب‌های ۳ طبقه با طول دهانه‌ی ۴ متر.



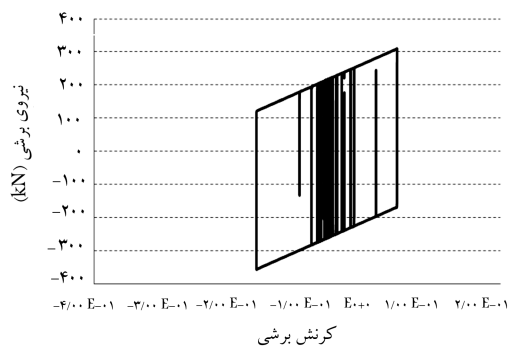
ج) مهاربند سیستم BRBF-E تحت اثر رکورد نزدیک گسل؛



الف) تیر پیوند سیستم EBF تحت اثر رکورد نزدیک گسل؛



د) مهاربند سیستم BRBF-E تحت اثر رکورد دور از گسل.



ب) تیر پیون سیستم EBF تحت اثر رکورد دور از گسل؛

شکل ۵. چرخه‌ی هیستریزیس سوم قاب‌های ۹ طبقه با طول دهانه‌ی ۴ متر.

نزدیک بیشتر بوده است، به نحوی که شاهد افت مقاومت در چرخه‌ی هیستریزیس هستیم. به علاوه در حالتی که از سیستم مهاربندی کماتش تاب استفاده شده است، مهاربند تحت اثر رکوردهای حوزه‌ی دور و نزدیک وارد محدوده‌ی غیرخطی نشده است و از این رو در قاب‌های ۳ طبقه‌ی سیستم BRBF-E عملکرد بهتری داشته است.

همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، در قاب‌های ۹ طبقه تحت اثر رکوردهای حوزه‌ی نزدیک و دور، تیر پیوند سیستم EBF و مهاربند سیستم BRBF-E هر دو تغییرشکل‌های غیرکشیان داشته و تسلیم شده‌اند. اما از بررسی چرخه‌های هیستریزیس دو سیستم مشاهده می‌شود که مهاربندهای کماتش تاب دارای چرخه‌های هیستریزیس از نوع پایدار هستند و طی چرخه‌های بارگذاری و باربرداری متعدد افت در مقاومت و سختی سیستم مشاهده نشده و مهاربند هم به کشتش و هم به فشار تسلیم شده است. به علاوه تغییرشکل محوری مهاربند کماتش تاب تحت اثر رکورد نزدیک گسل نسبت به رکورد دور از گسل به مقدار قابل توجهی بیشتر است.

در تیر پیوند قاب‌های EBF نیز تحت اثر رکوردهای نزدیک گسل، کرنش برشی بیشتری نسبت به رکوردهای دور از گسل مشاهده می‌شود. در چرخه‌ی هیستریزیس تیر برشی تحت رکوردهای نزدیک گسل شاهد افت مقاومت در چرخه‌های بارگذاری و باربرداری هستیم. دلیل این اختلاف در چرخه‌های هیستریزیس قاب‌ها تحت رکوردهای حوزه‌ی دور و نزدیک، می‌تواند وجود پالس‌هایی با دوره‌ی تناوب بلند در رکوردهای نزدیک گسل باشد.

۲.۵. بررسی و مقایسه‌ی بیشینه‌ی جابجایی نسبی بین طبقات برای قاب‌های EBF و BRBF-E

در این قسمت به منظور مقایسه‌ی دو سیستم مهاربندی، مقادیر میانگین بیشینه‌ی جابجایی نسبی بین طبقات در مقادیر بیشینه‌ی شتاب زمین $g = 0.3$ و $g = 0.6$ و $g = 1.0$ برای رکوردهای حوزه‌ی دور و نزدیک مقایسه شده‌اند. مقادیر میانگین بیشینه‌ی جابجایی نسبی بین طبقات برای دو سیستم مهاربندی مورد مطالعه تحت اثر رکوردهای حوزه‌ی نزدیک در شکل‌های ۶ الی ۹ و تحت اثر رکوردهای حوزه‌ی دور در شکل‌های ۱۰ الی ۱۳ ارائه شده‌اند.

از مقایسه‌ی دو سیستم مهاربندی EBF و BRBF-E تحت اثر رکوردهای حوزه‌ی نزدیک مشاهده می‌شود که در مقادیر پایین PGA، که سازه هنوز در مرحله‌ی کشش باقی مانده است، مقدار میانگین جابجایی نسبی بین طبقات برای قاب‌های BRBF-E بیشتر از قاب‌های EBF است. اما با افزایش PGA، که سازه وارد محدوده‌ی غیرکشیان می‌شود، مقدار میانگین جابجایی نسبی بین طبقات در قاب‌های EBF بیشتر از قاب‌های BRBF-E است. از این رو با توجه به اینکه قاب‌ها با دو سیستم مهاربندی مختلف به نحوی طراحی شده‌اند که مقاومت یکسانی دارند، می‌توان نتیجه گرفت که در صورتی که قاب‌ها تحت تأثیر رکوردهای حوزه‌ی نزدیک باشند، در مقادیر پایین PGA سیستم EBF و در مقادیر بالای PGA سیستم BRBF-E عملکرد بهتری داشته‌اند.

اختلاف بین جابجایی نسبی طبقات در قاب‌های ۳ طبقه برای دو سیستم مهاربندی بیشتر است، اما با افزایش تعداد طبقات این اختلاف کاهش می‌یابد، به طوری که برای قاب‌های ۹ طبقه تفاوت دو سیستم بسیار کم است. با تغییر در طول دهانه‌ی مهاربندی نیز نتایج به همین صورت بوده است. به‌طور کلی در این شکل‌ها مشاهده می‌شود که در سیستم BRBF-E، توزیع جابجایی نسبی بین طبقات یکنواخت‌تر از سیستم EBF است.

در حالتی که قاب‌ها تحت تأثیر رکوردهای حوزه‌ی دور قرار دارند، نتایج متفاوت است. در این حالت به ازاء مقادیر مختلف PGA، مقدار میانگین جابجایی نسبی بین طبقات در قاب‌های EBF، تاحدودی کمتر از قاب‌های BRBF-E بوده است. اگرچه اختلاف دو سیستم تحت اثر رکوردهای حوزه‌ی نزدیک ناچیز است، به‌طور کلی می‌توان گفت تحت اثر رکوردهای حوزه‌ی دور سیستم EBF تا حدودی بهتر عمل کرده است. در این حالت نیز تغییر طول دهانه‌ی مهاربندی تأثیر چندانی در نتایج نداشته است. از این قسمت از مطالعات می‌توان نتیجه گرفت که در قاب‌های ۳ طبقه، سیستم مهاربندی BRBF-E در مناطقی با لرزه‌خیزی بالا و در نزدیکی گسل‌های لرزه‌زا نسبت به سیستم مهاربندی EBF عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. اما در قاب‌های بلند، عملکرد هر دو سیستم مهاربندی مناسب است و تفاوت جابجایی نسبی بین طبقات ناچیز است.

در نتیجه استفاده از سیستم مهاربندی BRBF-E به جای سیستم EBF قابل قبول است. خصوصاً در حالتی که قاب‌ها تحت تأثیر رکوردهای حوزه‌ی نزدیک قرار داشته‌اند.

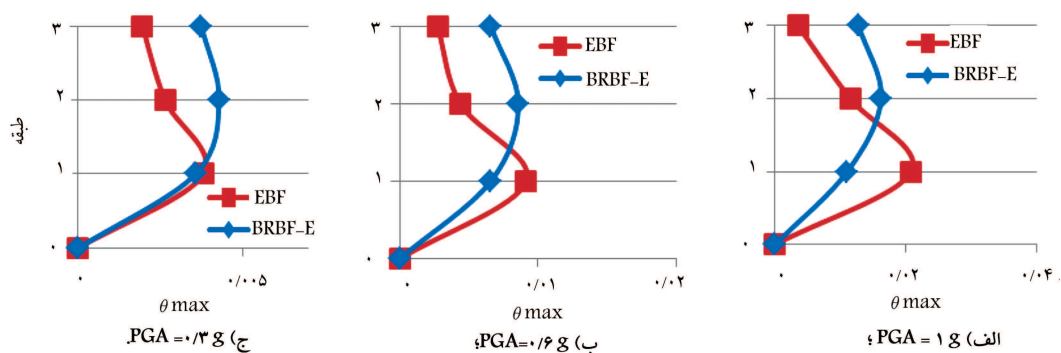
۳.۵. تحلیل IDA و تعیین سطوح عملکرد

در ادامه، منحنی‌های IDA قاب‌های مورد مطالعه برای ۷ رکورد نزدیک گسل ترسیم شده است. بیشینه‌ی شتاب زمین (PGA) به‌عنوان شاخص شدت و بیشینه‌ی جابجایی نسبی بین طبقات (θ_{max}) به‌عنوان شاخص خسارت انتخاب شده‌اند. نقطه‌ی که 2% شیب ناحیه‌ی کشش در طول منحنی IDA را داشته باشد یا بیشینه‌ی تغییرمکان نسبی ($\theta_{max} = 1\%$) (هر کدام زودتر روی محور IM رخ دهد)، به منزله‌ی سطح عملکرد آستانه‌ی فروریزش CP و نقطه‌ی که اولین اعضاء (تیر پیوند یا مهاربند) وارد محدوده‌ی غیرخطی شوند، به‌عنوان سطح عملکرد قابلیت استفاده بی‌وقفه IO^[۲] در نظر گرفته شده‌اند. از آنجا که برای ضوابط طراحی سیستم مهاربندی BRBF-E هنوز آیین‌نامه‌ی لحاظ نشده است و مقادیر مشخصی برای سطوح عملکردی این سیستم مهاربندی ارائه نشده است، در این قسمت سطوح عملکردی این سیستم مهاربندی تعیین و با سیستم EBF مقایسه شده است.

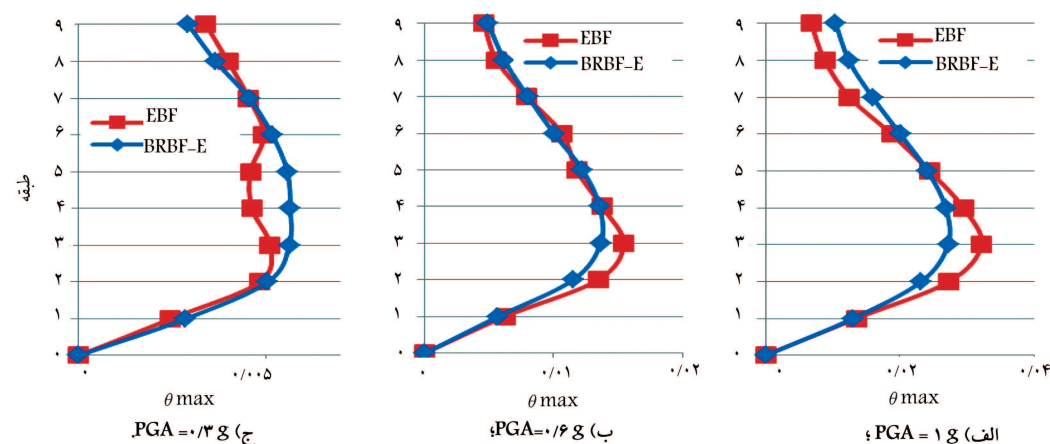
برای بررسی بهتر رفتار سازه و سطوح عملکردی، منحنی‌های IDA براساس اصول آماری خلاصه‌سازی شده‌اند، تا رفتار سازه بهتر قابل درک باشد. در این نوشتار برای خلاصه‌سازی از درصد‌های ۱۶، ۵۰ و ۸۴ استفاده شده است و دوباره با استفاده از روش‌های آماری، سطوح عملکردی مورد بررسی بر روی این منحنی‌ها نشان داده شده است (شکل‌های ۱۳ تا ۱۷). در کلیه‌ی شکل‌ها، سطح عملکرد CP با علامت Δ ، سطح عملکرد ایمنی جانی با علامت $\circ$ و سطح عملکرد قابلیت استفاده بی‌وقفه با علامت * نشان داده شده‌اند.

از مقایسه‌ی سطوح عملکردی قاب‌های ۳ طبقه با دهانه‌ی ۴ متر در جدول‌های ۵ و ۶ مشخص است که در این حالت قاب BRBF-E عملکرد بهتری دارد و در مقایسه با قاب EBF در مقادیر بالاتر، جابجایی نسبی بین طبقات سطوح عملکردی مختلف را تجربه می‌کند. به‌عنوان نمونه، 50% رکوردها در سیستم EBF، سیستم مهاربندی را مجبور به تجربه‌ی سطح عملکرد CP در $PGA = 1.3g$ و تغییرمکان نسبی 28% می‌کنند. در حالی که در سیستم BRBF-E، 50% رکوردها سیستم مهاربندی را مجبور به تجربه‌ی سطح عملکرد CP در $PGA = 3.7g$ و تغییرمکان نسبی 68% می‌کنند.

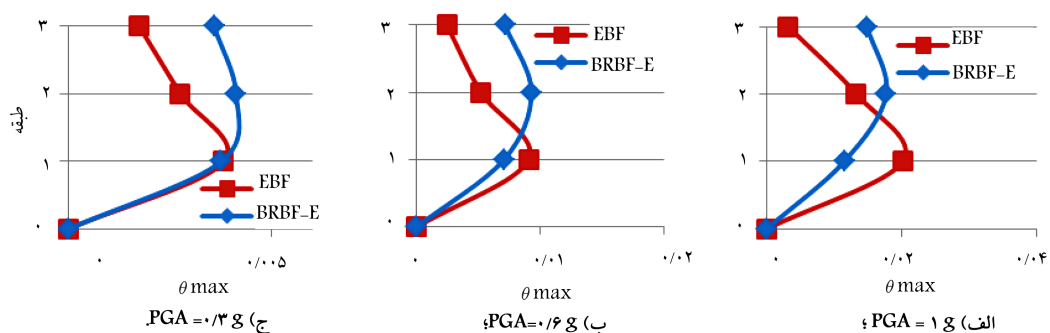
همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در قاب‌های ۹ طبقه نیز عملکرد سیستم BRBF-E مناسب‌تر از سیستم EBF بوده و البته اختلاف بیشینه‌ی جابجایی



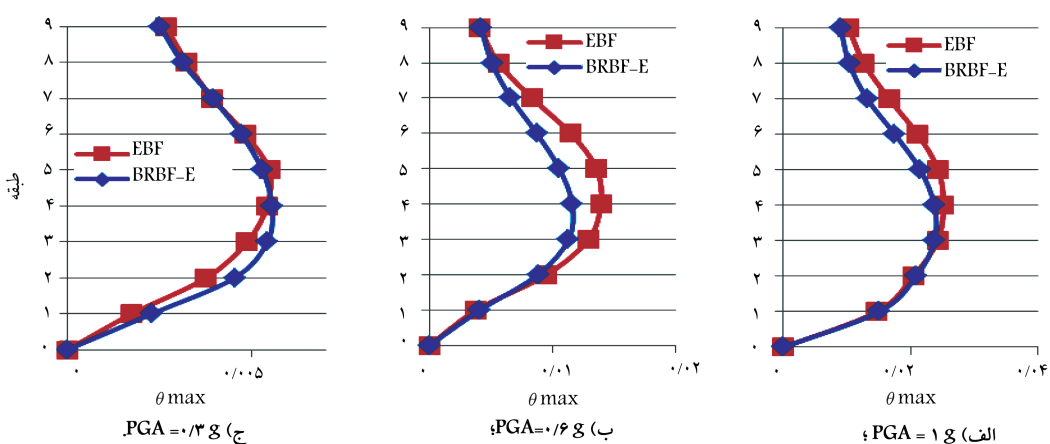
شکل ۶. میانگین بیشینه‌ی جابجایی نسبی بین طبقات برای قاب‌های ۳ طبقه با طول دهانه‌ی ۴ متر تحت اثر رکوردهای حوزه‌ی نزدیک.



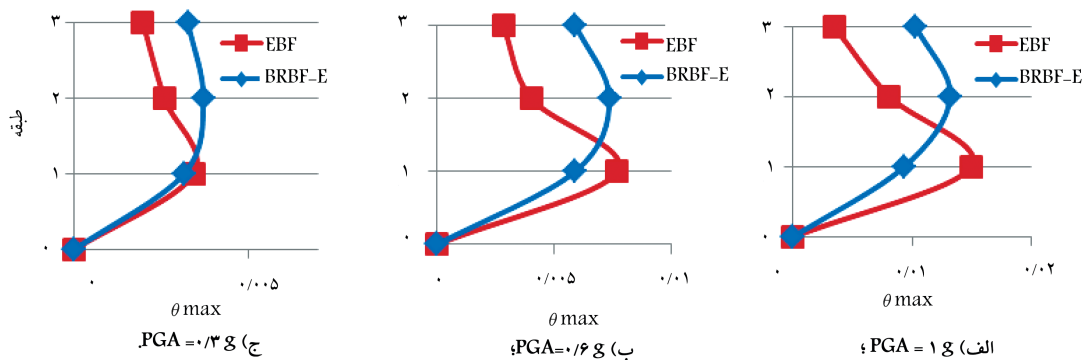
شکل ۷. میانگین بیشینه‌ی جابجایی نسبی بین طبقات برای قاب‌های ۹ طبقه با طول دهانه‌ی ۴ متر تحت اثر رکوردهای حوزه‌ی نزدیک.



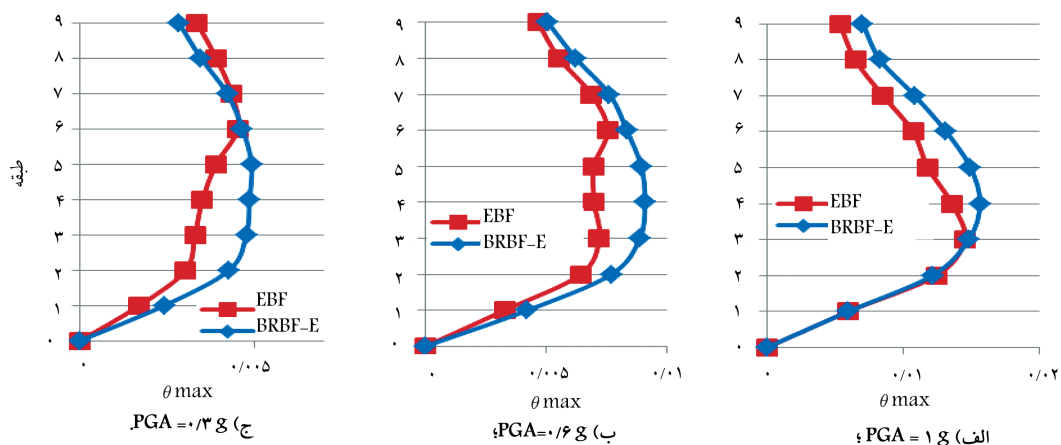
شکل ۸. میانگین بیشینه‌ی جابجایی نسبی بین طبقات برای قاب‌های ۳ طبقه با طول دهانه‌ی ۶ متر تحت اثر رکوردهای حوزه‌ی نزدیک.



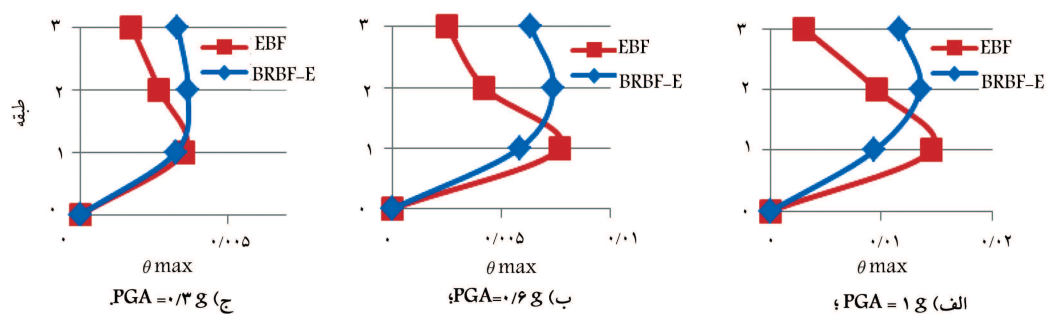
شکل ۹. میانگین بیشینه‌ی جابجایی نسبی بین طبقات برای قاب‌های ۹ طبقه با طول دهانه‌ی ۶ متر تحت اثر رکوردهای حوزه‌ی نزدیک.



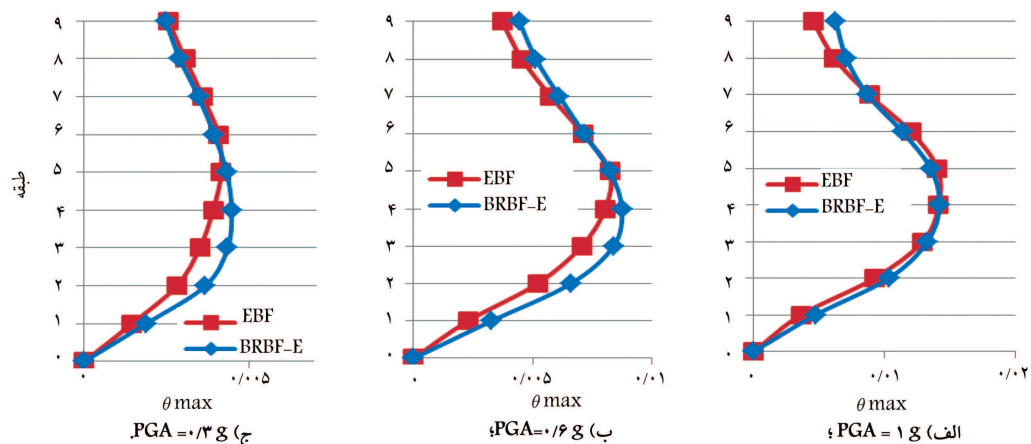
شکل ۱۰. میانگین بیشینه‌ی جابجایی نسبی بین طبقات برای قاب‌های ۳ طبقه با طول دهانه‌ی ۴ متر تحت اثر رکوردهای حوزه‌ی دور.



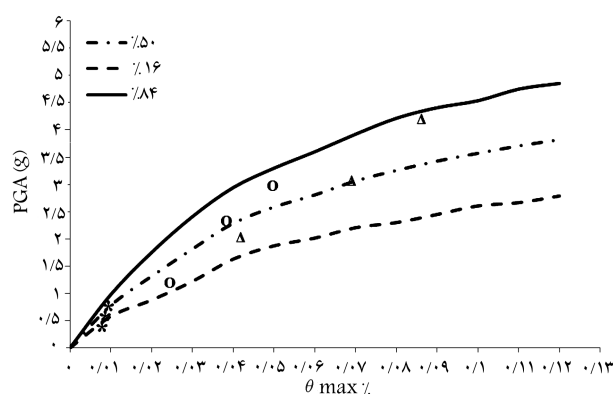
شکل ۱۱. میانگین بیشینه‌ی جابجایی نسبی بین طبقات برای قاب‌های ۹ طبقه با طول دهانه‌ی ۴ متر تحت اثر رکوردهای حوزه‌ی دور.



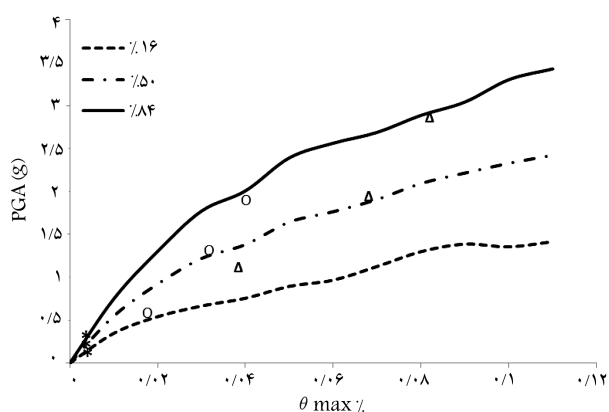
شکل ۱۲. میانگین بیشینه‌ی جابجایی نسبی بین طبقات برای قاب‌های ۳ طبقه با طول دهانه‌ی ۶ متر تحت اثر رکوردهای حوزه‌ی دور.



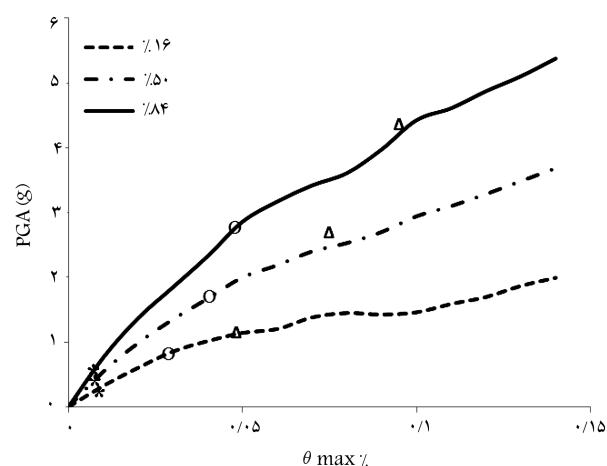
شکل ۱۳. میانگین بیشینه‌ی جابجایی نسبی بین طبقات برای قاب‌های ۹ طبقه با طول دهانه‌ی ۶ متر تحت اثر رکوردهای حوزه‌ی دور.



شکل ۱۵. منحنی ۱۶٪، ۵۰٪ و ۸۴٪ قاب BRBF-E سه طبقه با دهانه‌ی ۴ متر.



شکل ۱۶. منحنی ۱۶٪، ۵۰٪ و ۸۴٪ قاب EBF نه طبقه با دهانه‌ی ۴ متر.



شکل ۱۷. منحنی ۱۶٪، ۵۰٪ و ۸۴٪ قاب BRBF-E نه طبقه با دهانه‌ی ۴ متر.

نسبی بین طبقات برای دو سیستم مهاربندی در این قاب ۹ طبقه ناچیز است. برای قاب‌های ۹ طبقه به دهانه‌ی ۴ متر، مطابق جدول‌های ۷ و ۸ مشخص است که در این حالت نیز قاب BRBF-E عملکرد بهتری دارد و در مقایسه با قاب EBF در مقادیر بالاتر جابجایی نسبی بین طبقات، سطوح عملکرد مختلف را تجربه می‌کند. اما در این حالت مقادیر جابجایی نسبی طبقات در سطوح عملکرد، به خصوص در سطح عملکرد، آستانه‌ی فروریزش برای دو سیستم مهاربندی مختلف تفاوت چندانی ندارد. به عنوان نمونه در سیستم EBF، ۵۰٪ رکوردها سیستم مهاربندی را مجبور

جدول ۵. سطوح عملکرد روی منحنی ۱۶٪، ۵۰٪ و ۸۴٪ قاب EBF سه طبقه با دهانه‌ی ۴ متر.

	CP		LS		IO	
	θ_{max} (%)	PGA	θ_{max} (%)	PGA	θ_{max} (%)	PGA
۱۶٪	۲٫۱	۰٫۹	۱٫۳	۰٫۷	۰٫۳	۰٫۲
۵۰٪	۲٫۸	۱٫۳	۱٫۶	۱٫۰	۰٫۴	۰٫۳
۸۴٪	۳٫۴	۱٫۷	۱٫۹	۱٫۳	۰٫۴	۰٫۵

جدول ۶. سطوح عملکرد روی منحنی ۱۶٪، ۵۰٪ و ۸۴٪ قاب BRBF-E سه طبقه با دهانه‌ی ۴ متر.

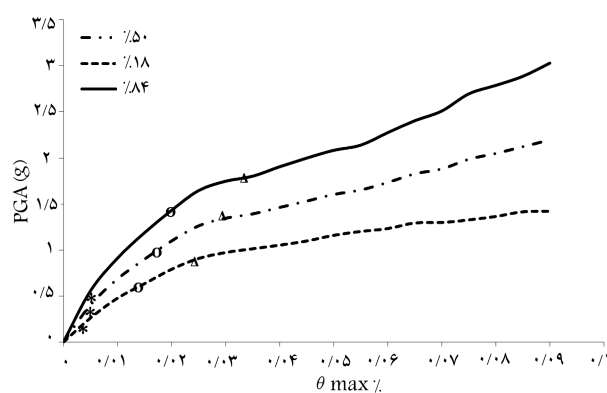
	CP		LS		IO	
	θ_{max} (%)	PGA	θ_{max} (%)	PGA	θ_{max} (%)	PGA
۱۶٪	۳٫۹۹	۲٫۰۷	۲٫۳۶	۱٫۴۶	۰٫۷۰	۰٫۴۱
۵۰٪	۶٫۸۱	۳٫۰۷	۳٫۷۹	۲٫۱۶	۰٫۷۷	۰٫۵۹
۸۴٪	۹٫۶۴	۴٫۰۷	۵٫۲۳	۲٫۸۷	۰٫۸۵	۰٫۷۷

جدول ۷. سطوح عملکرد روی منحنی ۱۶٪، ۵۰٪ و ۸۴٪ قاب EBF نه طبقه با دهانه‌ی ۴ متر.

	CP		LS		IO	
	θ_{max} (%)	PGA	θ_{max} (%)	PGA	θ_{max} (%)	PGA
۱۶٪	۳٫۶۲	۱٫۲۰	۲٫۰۲	۰٫۷۵	۰٫۳۲	۰٫۱۸
۵۰٪	۶٫۶۶	۱٫۹۹	۳٫۵۳	۱٫۳۴	۰٫۴۱	۰٫۲۳
۸۴٪	۹٫۶۹	۲٫۷۷	۵٫۰۴	۱٫۹۲	۰٫۵۰	۰٫۲۷

جدول ۸. سطوح عملکرد روی منحنی ۱۶٪، ۵۰٪ و ۸۴٪ قاب BRBF-E نه طبقه با دهانه‌ی ۴ متر.

	CP		LS		IO	
	θ_{max} (%)	PGA	θ_{max} (%)	PGA	θ_{max} (%)	PGA
۱۶٪	۴٫۷۶	۱٫۱۱	۲٫۷۵	۰٫۹۱	۰٫۷۰	۰٫۲۹
۵۰٪	۷٫۲۹	۲٫۷۱	۴٫۰۳	۱٫۸۵	۰٫۷۶	۰٫۴۴
۸۴٪	۹٫۸۱	۴٫۳۲	۵٫۳۰	۲٫۷۸	۰٫۸۳	۰٫۵۹



شکل ۱۴. منحنی ۱۶٪، ۵۰٪ و ۸۴٪ قاب EBF ۳ طبقه با دهانه‌ی ۴ متر.

داشته و جابجایی نسبی بین طبقات این قاب‌ها در سطوح عملکردی مناسب است. و براساس نتایج به‌دست‌آمده: درمورد سازه‌های ۳ طبقه جابجایی نسبی طبقات در سطوح عملکردی مختلف برای دو سیستم مهاربندی EBF و BRBF-E و در هر دو مقدار طول دهانه‌ی قاب‌ها، تفاوت زیادی دارند و همان‌طور که ذکر شد، طبقات قاب BRBF-E جابجایی نسبی حدود ۲ برابر قاب‌های EBF را تحمل می‌کنند. درمورد قاب‌های ۹ طبقه این دو سیستم مهاربندی سطوح عملکردی نزدیک‌تری دارند و از این رو کاربرد سیستم BRBF-E در قاب‌هایی با دوره‌ی تناوب بلندتر نیز قابل قبول است. در نتیجه قاب‌های مهاربندی BRBF-E تحت رکوردهای نزدیک گسل رفتار دینامیکی مناسبی دارند و سطوح عملکردی قابل قبولی را نتیجه می‌دهند. از مقایسه‌ی ۲ سیستم مهاربندی EBF و BRBF-E تحت اثر رکوردهای حوزه‌ی نزدیک مشاهده می‌شود، که در مقادیر پایین PGA که سازه هنوز در مرحله‌ی کشسان باقی مانده است، مقدار میانگین جابجایی نسبی بین طبقات برای قاب‌های BRBF-E (۵ تا ۱۰ درصد) بیشتر از قاب‌های EBF است. اما با افزایش PGA، که رفتار سازه از حالت کشسان خارج می‌شود، مقدار میانگین جابجایی نسبی بین طبقات در قاب‌های EBF (۳ تا ۱۰ درصد) بیشتر خواهد شد. از این رو با توجه به اینکه قاب‌ها با دو سیستم مهاربندی مختلف به نحوی طراحی شده‌اند که مقاومت یکسانی داشته باشند، می‌توان نتیجه گرفت در صورتی که قاب‌ها تحت تأثیر رکوردهای حوزه‌ی نزدیک باشند، در مقادیر پایین PGA سیستم EBF و در مقادیر بالای PGA سیستم BRBF-E عملکرد بهتری دارند.

در حالتی که قاب‌ها تحت تأثیر رکوردهای حوزه‌ی دور قرار گیرند و مقدار PGA کم باشد، مقدار میانگین جابجایی نسبی بین طبقات در قاب‌های EBF (۵ تا ۱۰ درصد) کمتر خواهد بود، اما در مقادیر بیشتر PGA تفاوت چندانی بین مقدار میانگین جابجایی نسبی بین طبقات برای دو سیستم مهاربندی وجود ندارد. و به‌طور کلی می‌توان گفت تحت اثر رکوردهای حوزه‌ی دور، سیستم EBF بهتر عمل می‌کند. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که سیستم مهاربندی BRBF-E در مناطقی با لرزه‌خیزی بالا و در نزدیکی گسل‌های لرزه‌زا نسبت به سیستم مهاربندی EBF عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد.

به تجربه‌ی سطح عملکرد CP در $PGA = 1/99$ g و تغییرمکان نسبی 0.666% می‌کنند. در حالی که در سیستم BRBF-E، 0.5% رکوردها سیستم مهاربندی را مجبور به تجربه‌ی سطح عملکرد CP در $PGA = 2/71$ g و تغییرمکان نسبی 0.779% می‌کنند. اگرچه در این حالت نیز سیستم مهاربندی BRBF-E عملکرد دینامیکی مناسبی داشته است، اما اختلاف سطوح عملکرد در قاب‌های ۹ طبقه نسبت به قاب‌های ۳ طبقه کمتر بوده است.

از این رو مشاهده می‌شود که در قاب‌هایی به طول دهانه‌ی ۴ متر سیستم مهاربندی BRBF-E نسبت به سیستم EBF عملکرد بهتری داشته است. این مسئله در قاب‌هایی با ارتفاع کمتر مشهودتر بوده است، اما در قاب‌های بلندتر عملکرد دو سیستم تفاوت چندانی نداشته است.

۶. نتیجه‌گیری

در این نوشتار، رفتار دو سیستم مهاربندی برون‌محور متداول (EBF) و کمناش‌تاب با پیکربندی برون‌محور (BRBF-E) تحت تأثیر رکوردهای حوزه‌ی دور و نزدیک ارزیابی و مقایسه شده‌اند. با استفاده از سیستم مهاربندی کمناش‌تاب برون‌محور هم از مزایای معماری مهاربندی برون‌محور و هم از مزایای طراحی مهاربندهای کمناش‌تاب بهره برده‌ایم. در این سیستم مهاربندی عضو مهاری سختی جانبی قاب فولادی را تأمین می‌کند و به گونه‌ی طراحی می‌شود که تغییرشکل‌های غیرکشسان بزرگی را بپذیرد، در حالی که تیر پیوند به گونه‌ی طراحی می‌شود که در حین انتقال نیروهای عضو مهاری به ستون کشسان باقی بماند. از این رو با تمرکز خسارت در مهاربند به جای تیر، تعمیر و تعویض عضو آسیب‌دیده پس از زلزله، نسبت به قاب‌های برون‌محور ساده‌تر است. جهت ارزیابی این سیستم و مقایسه‌ی آن با سیستم مهاربند برون‌محور متداول از روش تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی (IDA) استفاده شده و این نتایج به‌دست آمده است:

سیستم مهاربندی BRBF-E در مقابل رکوردهای نزدیک گسل عملکرد خوبی

پانویس‌ها

1. near-fault
2. eccentrically braced frame
3. buckling-restrained braced frame in eccentric configuration

منابع (References)

1. Stewart, J.P., Chiou, S., Bray, J.D., Graves, R.W., Somerville, P.G. and Abrahamson, N.A. "Ground motion evaluation procedures for performance-based design", Pacific Earthquake Engineering Research center (PEER) (2001).
2. Zarmehrakhsh, Sh. and Shakib, H. "Evaluation of inelastic behavior of EBFs", MSc thesis, Tarbiat Modarres

University, Tehran-Iran (1998)

3. Tirca, L. and Tremblay, R., *Incremental Dynamic Analysis of Multi-Story Concentrically Braced Steel Frames*, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-56326-0 (2009)
4. Tsai, K.C. and et al "Buckling restrained braces: Research and implementation in Taiwan", Steel Innovations Conference 2013, Christchurch, New Zealand (2013)
5. Prinz, G.S. "Using buckling-restrained braces in eccentric configurations", Ph.D. Dissertation Department of Civil and Environmental Engineering, Brigham Young University (2010)
6. Prinz, G.S. and Richards, P.W. "Seismic response of buckling-restrained braced frames with beam splices", *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China (2008).