

## مطالعه رفتار لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی فولادی با عملکرد گهواره‌ای مجهز به فیوزهای استهلاک انرژی

حسن امیرذهنی<sup>۱</sup>، ابادر اصغری<sup>۲\*</sup>، عرفان شافعی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

۲- استادیار، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

۳- استادیار، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

### چکیده

سیستم‌های باربر جانبی متداول، انرژی لرزه‌ای وارد بر سازه را از طریق تغییرشکل‌های ماندگار در اعضای اصلی سازه‌ای خود مستهلک می‌کنند. این عملکرد منجر به وقوع خرابی‌های سازه‌ای قابل ملاحظه‌ای در ساختمان‌ها پس از وقوع زمین‌لرزه‌های شدید می‌شود که در بسیاری از موارد تعمیر این خرابی‌ها حتی در صورت امکان‌پذیر بودن، توجیه اقتصادی نخواهد داشت. سیستم‌های با عملکرد گهواره‌ای نوع جدیدی از سیستم‌های باربر جانبی هستند که با هدف کاهش تغییرشکل‌های ماندگار در سازه پس از وقوع زمین‌لرزه‌های شدید و جلوگیری از ایجاد خرابی در اعضای کلیدی سازه‌ای از طریق هدایت این خرابی‌ها به سمت اعضای قابل تعویض، ایجاد شده‌اند و به سرعت در حال توسعه هستند. در یک قاب با عملکرد گهواره‌ای پای ستون‌ها در قاب باربر لرزه‌ای به پی متصل نمی‌شود و قاب قادر است آزادانه روی پی دوران کند. کابل‌های پس‌تنیده‌ای که بالای قاب را به پی متصل می‌کنند، وظیفه بازگرداندن قاب دوران یافته به حالت اولیه خود را دارند و انرژی لرزه‌ای در هر دوران قاب، از طریق تغییرشکل‌های پلاستیک در المان‌های قابل تعویض که فیوز نامیده می‌شوند، مستهلک می‌گردد. در این پژوهش، رفتار لرزه‌ای یک قاب مهاربندی سه طبقه با عملکرد گهواره‌ای از طریق انجام آنالیز دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی، تحت دو شتابنگاشت *Kobe* و *Northridge* و هر یک با سه مقیاس سطح *MCE*،  $1/2$  برابر سطح *MCE* و  $1/5$  برابر سطح *MCE* ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهد که سیستم قاب مهاربندی شده با عملکرد گهواره‌ای عملکرد بسیار مطلوبی در استهلاک انرژی لرزه‌ای حتی تحت بارگذاری‌های سطح *MCE* دارد. همچنین، تغییرمکان ماندگار در سازه در انتهای مسیر بارگذاری ناچیز است. تنها نگرانی در مورد این سیستم، احتمال وقوع خستگی در کابل‌های پس‌تنیده است که در اثر افزایش شدت تحریک‌های تکیه‌گاهی، قابلیت مرکزگرایی سیستم را تحت تأثیر قرار داده و پایداری آن را به خطر می‌اندازد.

کلمات کلیدی: عملکرد گهواره‌ای، مرکزگرایی، فیوز استهلاک انرژی، کابل پس‌تنیده، آنالیز تاریخچه زمانی.

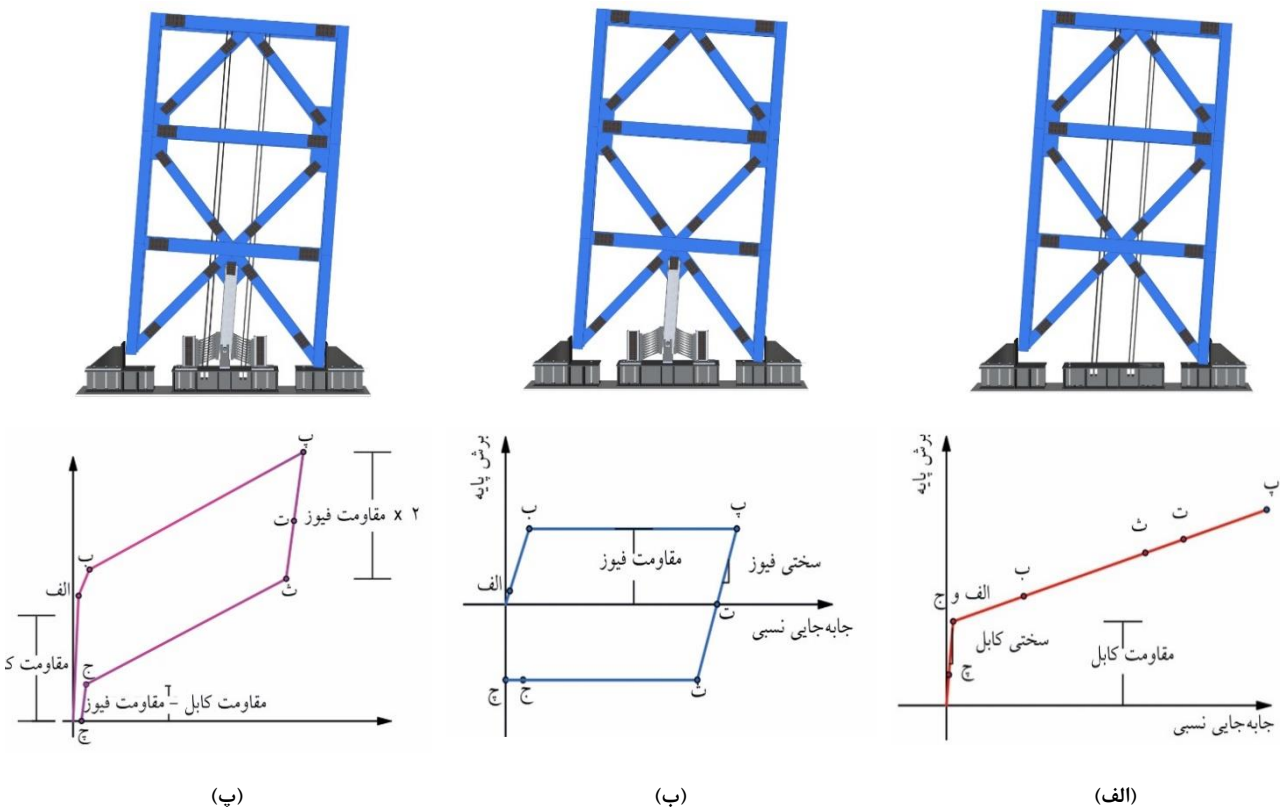
\*نویسنده مسئول: ابادر اصغری

پست الکترونیکی: abcd1386@gmail.com

## ۱- مقدمه

## ۱-۱ معرفی سیستم

عملکرد سیستم‌های باربر جانبی متداول به گونه‌ای است که انرژی لرزه‌ای وارد بر ساختمان در اثر وقوع زمین‌لرزه را از طریق تغییرشکل‌های پلاستیک در اعضای کلیدی سازه‌ای خود مستهلک می‌کنند که منجر به بروز خرابی‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای قابل توجهی پس از وقوع زمین‌لرزه‌های با شدت بالا می‌شود. سیستم‌های گهواره‌ای با هدف کاهش خرابی‌های ایجاد شده در ساختمان‌ها و هدایت این خرابی‌ها به سمت اعضای قابل تعویض ایجاد شده‌اند و به سرعت در حال گسترش می‌باشند. یک قاب فولادی با عملکرد گهواره‌ای شامل سه جزء اصلی است: (۱) قاب مهاربندی شده فولادی که به پی متصل نمی‌شود و تحت تحریک‌های جانبی قادر است آزادانه روی پی دوران کند؛ (۲) کابل‌های پس‌تنیده که نقطه بالای قاب را به پی متصل می‌کنند و وظیفه بازگرداندن قاب به جایگاه اولیه خود را بعد از هر دوران بر عهده دارند؛ و (۳) فیوزهای جایگزین‌پذیر استهلاک انرژی که انرژی لرزه‌ای وارد بر سازه را از طریق متحمل شدن تغییرشکل‌های پلاستیک جذب می‌کنند. در قاب مهاربندی شده با عملکرد گهواره‌ای انتظار شکل‌پذیری و استهلاک انرژی از هیچ کدام از اجزای قاب مهاربندی و کابل‌های پس‌تنیده نمی‌رود. طراحی این اعضا به گونه‌ای خواهد بود که حین تحریک‌های تکیه‌گاهی در محدوده الاستیک باقی بمانند. در واقع این اعضا در سیستم به عنوان اعضای کنترل‌شونده توسط نیرو شناخته می‌شوند و وظیفه تأمین معیارهای سختی، مقاومت و پایداری سازه را بر عهده دارند. معیار شکل‌پذیری سیستم نیز، توسط وقوع تغییرشکل‌های پلاستیک در فیوزهای جایگزین‌پذیر استهلاک انرژی تأمین می‌شود. منحنی‌های رفتار نیرو-تغییر مکان سیستم مجهز به کابل، سیستم مجهز به فیوز و سیستم ترکیبی مجهز به کابل و فیوز در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: منحنی نیرو-تغییر مکان (الف) سیستم مجهز به کابل، (ب) سیستم مجهز به فیوز، (ج) سیستم مجهز به کابل و فیوز [۱].

به منظور تعیین مشخصات مورد نیاز برای مصالح فولاد به کار گرفته شده در کابل‌های پس‌تنیده، آزمایشی در دانشگاه Illinois آمریکا، توسط تانامال و همکاران [۲] طراحی و اجرا شد. این آزمایش شامل ۴ کابل فولادی پس‌تنیده با مدول الاستیسیته‌های متفاوت بود که هر یک تحت آزمایش کشش به وسیله دستگاه MTS (مطابق شکل ۲-الف) قرار گرفت و نمودار تنش-کرنش برای هر ۴ مصالح تعیین گردید.

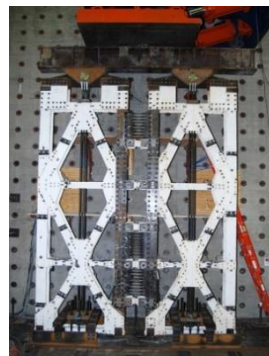
در دانشگاه Stanford آمریکا، با هدف دستیابی به یک الگوی هندسی مناسب برای فیوزهای استهلاک انرژی، الگوهای مختلفی از صفحات فولادی، طراحی شد و مورد آزمایش قرار گرفت و صفحات با الگوی پروانه‌ای (شکل ۲-ب) به علت شکل‌پذیری و قابلیت جذب انرژی بیشتر درکنار متحمل شدن آسیب‌های کمتر، به عنوان المان‌های مناسب برای جذب انرژی در سیستم با عملکرد گهواره‌ای معرفی شدند [۳].

به منظور بررسی رفتار قاب با عملکرد گهواره‌ای، آزمایش بارگذاری چرخه‌ای و بارگذاری لرزه‌ای در دانشگاه Illinois آمریکا انجام گرفت. این آزمایش شامل ۹ نمونه قاب فولادی سه طبقه با مقیاس یک‌دوم می‌شد که هر کدام از این نمونه‌ها در المان فیوز، سطح پس‌تنیدگی اولیه کابل‌ها و تاریخچه بارگذاری جانبی، با یکدیگر تفاوت داشتند تا اثر این متغیرها روی رفتار سیستم بررسی شود. شکل ۲-پ تصویر یکی از قاب‌های آزمایش شده را نشان می‌دهد. جزئیات کامل این آزمایش توسط اترتون و حجار [۴] گزارش شده است. نتایج این آزمایش نشان داد که حتی به ازای بارگذاری ۱/۲ برابر زلزله کوبه که ۲/۶ برابر زلزله سطح DBE و ۱/۷۴ برابر زلزله سطح MCE است، تغییرمکان جانبی نسبی قاب آزمایش شده ۲/۵٪ و تغییرمکان ماندگار سازه نزدیک به صفر است. همچنین میزان خرابی ایجاد شده در فیوز و آفت سطح پس‌تنیدگی اولیه کابل‌ها بسیار ناچیز می‌باشد [۵].

با هدف بررسی رفتار دینامیکی و مطالعه امکان اجرایی بودن سیستم، آزمایش قاب با عملکرد گهواره‌ای، روی میز لرزه E-Defense در شهر Miki ژاپن انجام گرفت [۶]. این پروژه شامل یک قاب فولادی سه طبقه با مقیاس دوسوم، با سه نوع فیوز متفاوت می‌شد که تحت دو شتابنگاشت Kobe و Northridge، با مقیاس‌های متفاوت قرار گرفت.



(ت)



(پ)



(ب)



(الف)

شکل ۲: تحقیقات آزمایشگاهی. الف) آزمایش کابل‌های پس‌تنیده [۲]، ب) آزمایش فیوز [۳]، ج) آزمایش بارگذاری چرخه‌ای [۵] و د) آزمایش میز لرزه [۷].

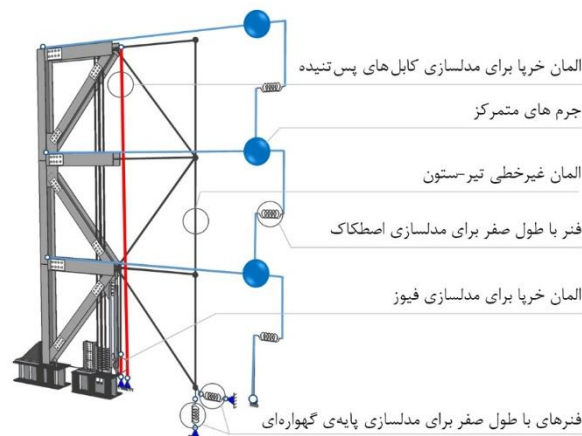
در این آزمایش، برای شبیه‌سازی بهتر اثر جرم لرزه‌ای سایر دهانه‌های ساختمان بر روی قاب مهاربندی، از یک دستگاه شبیه‌ساز جرم استفاده شد که نیروی زلزله از طریق اهرم‌های این دستگاه و در تراز هر طبقه به قاب مهاربندی وارد می‌شد. شکل ۲-ت قاب مهاربندی و دستگاه شبیه‌ساز جرم را بر روی میز لرزه نشان می‌دهد. نتایج این آزمایش علاوه بر اثبات رفتار نیرو-تغییرمکان پرچمی شکل در سیستم گهواره‌ای، فرض وقوع دوران صلب در قاب را نیز تأیید کرد. [۷].

## ۲- مدل سازی رایانه‌ای

## ۲-۱ معرفی مدل صحت‌سنجی

به منظور ارزیابی رفتار لرزه‌ای قاب فولادی مهاربندی با عملکرد گهواره‌ای، یک مدل رایانه‌ای دو بعدی از این سیستم در نرم‌افزار OpenSees [۸] مدل سازی شد و مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. مشخصات هندسی مدل مشابه با یکی از نمونه‌های آزمایش شده در پروژه‌ی آزمایشگاهی میز لرزه E-Defense در ژاپن است که پیش‌تر معرفی شد. این نمونه شامل یک قاب سه طبقه با طول دهانه ۴/۱ متر و ارتفاع هر طبقه ۲/۸ متر می‌شود که تحت شتابنگاشت Kobe با مقیاس ۰/۶۵ قرار گرفته بود. شمای کلی مدل ساخته شده در نرم‌افزار در شکل ۳ نشان داده شده است. مطابق این شکل، برای ایجاد قابلیت بلندشدن پای ستون‌ها، از فنرهایی که فقط دارای سختی فشاری هستند استفاده شده است. ساخت این فنرها در نرم‌افزار OpenSees با استفاده از المان‌های با طول صفر و اختصاص مصالح الاستیک بدون سختی کششی انجام گرفته است. کابل‌های پس‌تنیده و فیوز نیز با المان خرپایی و به ترتیب با معرفی رفتار تنش-کرنش و رفتار نیرو-تغییر مکان ساخته شده‌اند. اعمال حد گسیختگی برای کابل‌ها به کمک دستور MinMax و اعمال شکست در فیوز نیز در رفتار نیرو-تغییر مکانی معرفی شده به این المان انجام گرفته است.

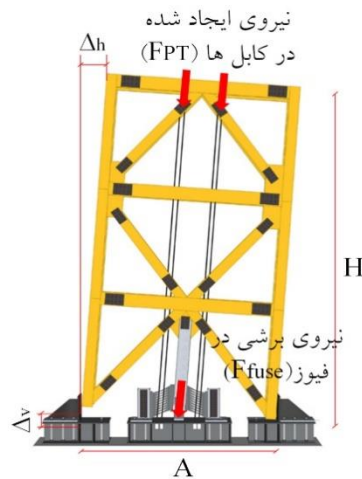
با توجه به این که در این نوع از سیستم‌های باربر جانبی از مهاربندها انتظار شکل‌پذیری نداریم و همچنین جهت اطمینان از وقوع دوران صلب در قاب، تمامی اتصالات موجود در قاب مهاربندی به صورت صلب می‌باشند. در مدل ساخته شده در نرم‌افزار نیز برای تمام گره‌های مربوط به قاب مهاربندی، هم درجات آزادی انتقالی و هم درجه آزادی دورانی در نظر گرفته شده است [۹]. دستگاه شبیه‌ساز جرم نیز که در آزمایش میز لرزه مورد استفاده قرار گرفته بود به شکل یک ستون معادل در کنار قاب مدل شده است. اصطکاک ایجاد شده بین طبقات این دستگاه با فنرهای با طول صفر به مدل اختصاص داده شده که سختی این فنرها از نتایج آزمایشات میز لرزه برداشت شده است. جرم لرزه‌ای وارد بر سیستم در هر طبقه، به صورت جرم متمرکز بر روی گره‌های ستون معادل قرار داده شده است. همچنین نیمی از جرم خود قاب به گره‌های سمت راست قاب و نیمه دیگر جرم به همراه جرم اتصالات بین قاب و دستگاه شبیه‌ساز جرم، به گره‌های سمت چپ قاب اختصاص داده شده است. هر نقطه توپر روی شکل معرف اتصالی با درجات آزادی دورانی و انتقالی (اتصال صلب) و هر نقطه توخالی معرف اتصالی تنها با درجات آزادی انتقالی (اتصال مفصلی) است. برای مدل، میرایی رایلی ۰/۵٪ در نظر گرفته شده که این مقدار بر اساس نتایج به دست آمده از تحلیل‌های Takeuchi [۱۰] برداشت شده است.



شکل ۳: شمای کلی مدل ساخته شده در OpenSees [۹].

۲-۲ صحت‌سنجی مدل رایانه‌ای

پارامترهای کلیدی ارزیابی پاسخ سیستم گهواره‌ای در شکل ۴ نشان داده شده است. شکل ۵-الف نیز، تاریخچه پاسخ تغییرمکان جانبی نسبی نقطه بام (RDR)، را برای آزمایش میزلرزه و برای مدل رایانه‌ای نشان می‌دهد. بیشینه تغییرمکان جانبی نسبی ثبت شده برای نقطه بام در آزمایش میزلرزه ۲/۴۱٪ و برای مدل رایانه‌ای ۲/۳۷٪ است که بیانگر خطای مدل‌سازی قابل قبولی به میزان ۱/۶٪ می‌باشد. شکل ۵-ب نیز نمودار لنگر مقاوم در برابر واژگونی را برای نمونه آزمایش شده و نمونه مدل‌سازی شده نشان می‌دهد. در اصل این لنگر مقاوم در برابر واژگونی در سیستم، برآیند لنگر ناشی از نیروی محوری کششی ایجاد شده در کابل‌های پس‌تنیده و لنگر ناشی از نیروی برشی ایجاد شده در المان فیوز در اثر ایجاد تغییرشکل برشی در این المان است. بنابراین مطابقت نمودار لنگر واژگونی با نتایج آزمایش، نشان از عملکرد قابل قبول نمونه رایانه‌ای در مدل‌سازی کابل و فیوز دارد.



Roof drift ratio (RDR)

$$RDR = \frac{\Delta h}{H}$$

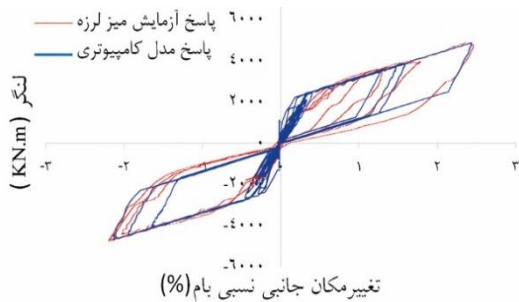
Uplift ratio (ULR)

$$ULR = \frac{\Delta v}{A}$$

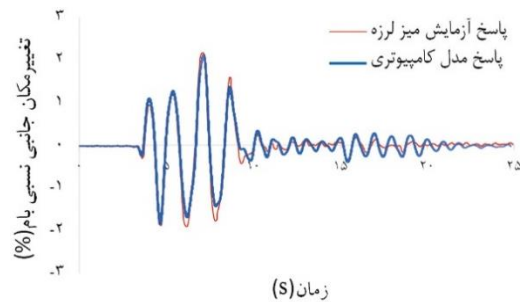
Restoring moment

$$M_{rs} = (FPT + F_{fuse}) \cdot A/2$$

شکل ۴: پارامترهای کلیدی ارزیابی پاسخ سیستم [۹].



(ب)



(الف)

شکل ۵: الف) تاریخچه پاسخ تغییرمکان نسبی بام. ب) لنگر مقاوم در برابر واژگونی [۱۰].

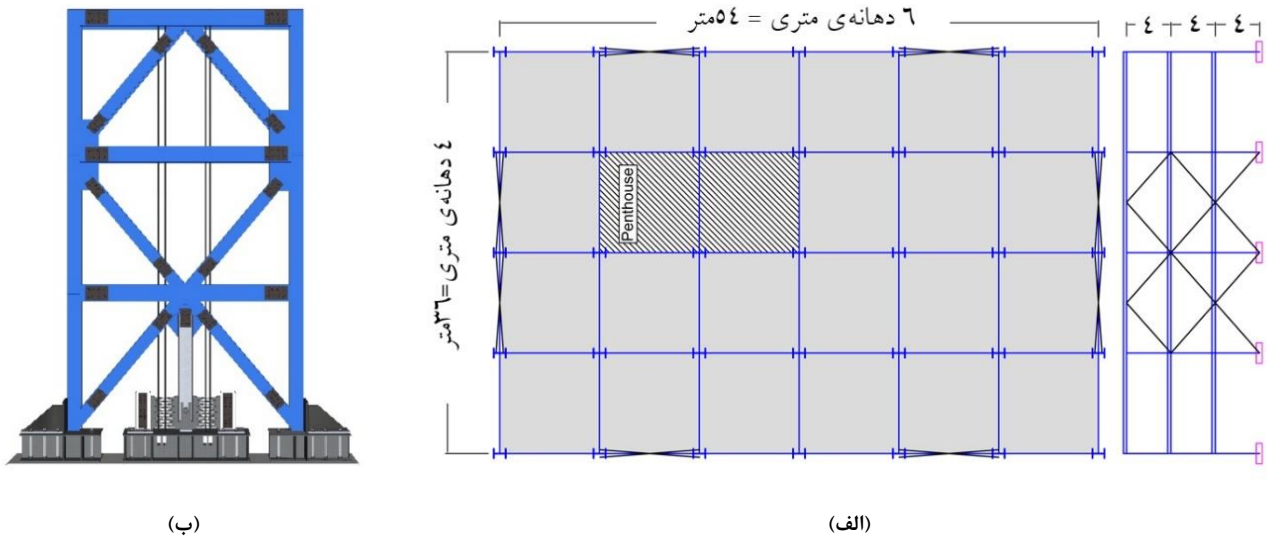
جدول ۱ مقادیر خطاهای مدل‌سازی را در پاسخ سایر اجزای کلیدی سیستم نشان می‌دهد. مطابق این جدول بیشترین خطای مدل‌سازی ۶/۲٪ است که مربوط به بیشینه نیروی ایجاد شده در کابل می‌شود.

جدول ۱: مقادیر خطاهای مدل سازی

متغیر	پاسخ نمونه آزمایش شده	پاسخ مدل کامپیوتری	درصد خطا
بیشینه نیروی ایجاد شده در کابل (kN)	۲۳۳/۵	۲۱۹	-۶/۲
نیروی پسماند در فیوز در پایان تحریک (kN)	۵۶۹	۵۴۴/۸	-۴/۲
بیشینه RDR (%)	۲/۴۱	۲/۳۷	-۱/۶
بیشینه ULR (%)	۲/۶۲	۲/۲	-۱/۶

## ۳-۲ معرفی مدل ها

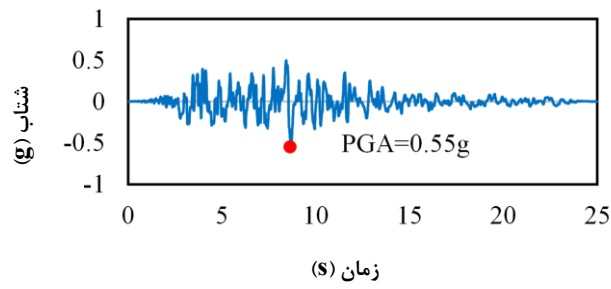
به منظور مطالعه رفتار لرزه‌ای قاب با عملکرد گهواره‌ای، یک قاب مهاربندی سه طبقه مدل سازی شد و مورد بررسی قرار گرفت. پلان این قاب مربوط به ساختمانی است که پیش‌تر در پروژه‌ی SAC [۱۱] توسط Krawinkler مورد بررسی قرار گرفته بود. شکل ۶-الف پلان ساختمان مورد نظر و شکل ۶-ب قاب مورد مطالعه را نشان می‌دهد. طول ساختمان ۵۷ متر و عرض آن ۳۶ متر است. ساختمان در پلان و در ارتفاع منظم بوده و در هر راستا دارای ۴ قاب برابر لرزه‌ای می‌باشد.



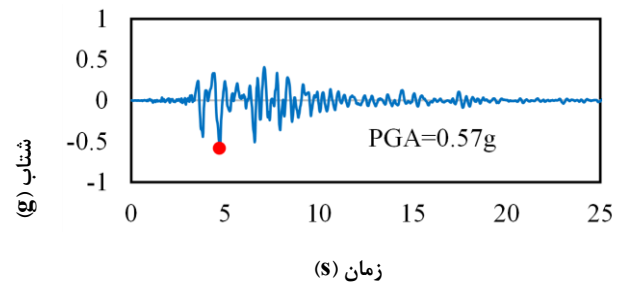
شکل ۶: الف) پلان ساختمان مورد استفاده در مدل سازی [۱۱]، ب) قاب مورد مطالعه [۹].

برای مصالح کابل و فیوز از ماده فولاد ۱۰ با اختصاص رفتار تنش-کرنش برای کابل و رفتار نیرو-تغییر مکان برای فیوز استفاده شده است. سایر مشخصات مدل سازی نیز مشابه المان‌ها و مصالح مورد استفاده در مدل صحت‌سنجی است که پیش‌تر معرفی شد. مدل ساخته شده تحت شتاب‌نگاشت زمین‌لرزه Kobe با مقیاس‌های ۰.۶۹٪، ۰.۸۳٪ و ۱.۰۳٪ و شتاب‌نگاشت زمین‌لرزه Northridge با مقیاس‌های ۰.۱۴۰٪، ۰.۶۸٪ و ۲.۱۰٪ قرار گرفت که هر کدام به ترتیب متناظر با زمین‌لرزه سطح MCE، ۱/۲ برابر سطح MCE و ۱/۵ برابر سطح MCE است. شکل ۷ شتاب‌نگاشت‌های به کار گرفته شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. به منظور پیشگیری از ایجاد پیچیدگی در متن هر کدام از نمونه‌ها با شناسه‌هایی کدگذاری شده‌اند. شناسه مربوط به هر نمونه به همراه مشخصات بارگذاری آن نمونه در جدول ۲ معرفی شده است.

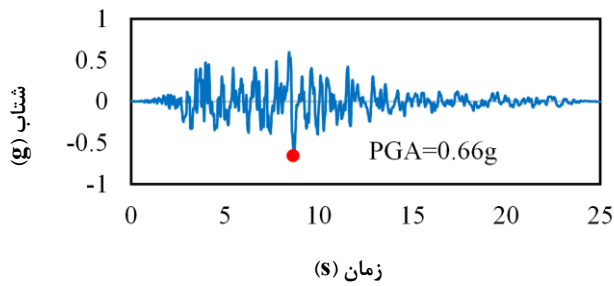
<sup>1</sup> Steel01 material, OpenSees



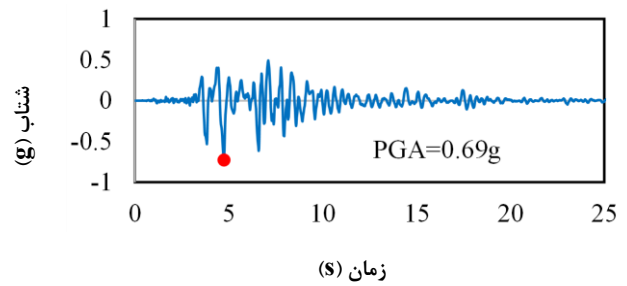
ت- ۱۴٪ Northridge



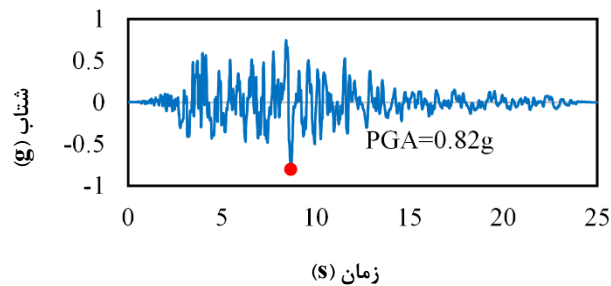
الف- ۶۹٪ Kobe



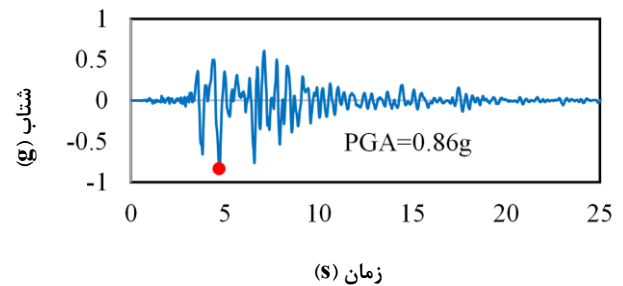
ث- ۱۶٪ Northridge



ب- ۸۳٪ Kobe



ج- ۲۱٪ Northridge



پ- ۱۰۳٪ Kobe

شکل ۷: شتاب‌نگاشت‌های به کار گرفته شده در انجام تحلیل‌های غیرخطی تاریخچه زمانی.

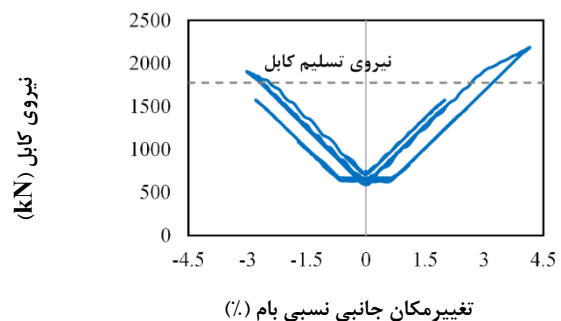
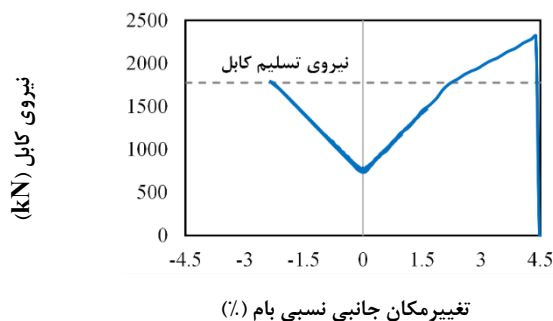
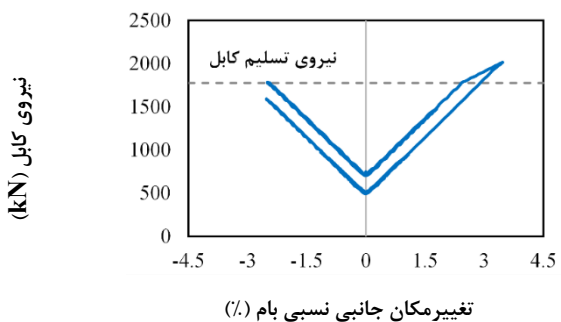
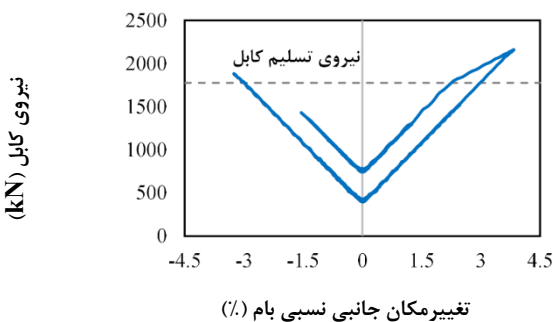
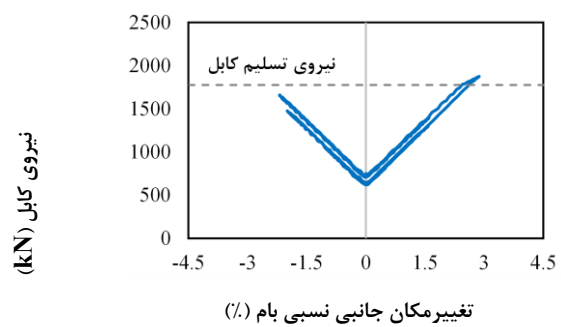
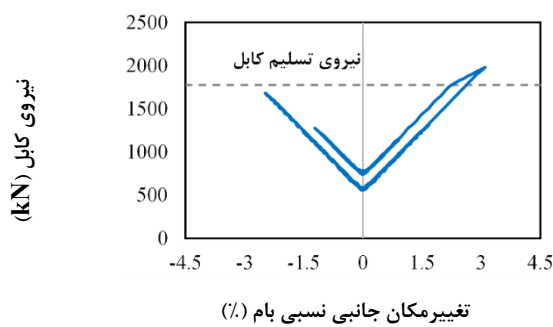
جدول ۲: مشخصات بارگذاری قاب مهاربندی مورد مطالعه

ردیف	نام نمونه	شتاب‌نگاشت بارگذاری	ضریب مقیاس شتاب‌نگاشت (/)	شدت طیف شتاب‌نگاشت
۱	K۶۹	JMA Kobe	۰/۶۹	۱ X MCE
۲	K۸۳	JMA Kobe	۰/۸۳	۱/۲ X MCE
۳	K۱۰۳	JMA Kobe	۱/۰۳	۱/۵ X MCE
۴	N۱۴۰	Northridge	۱/۴	۱ X MCE
۵	N۱۶۸	Northridge	۱/۶۸	۱/۲ X MCE
۶	N۲۱۰	Northridge	۲/۱۰	۱/۵ X MCE

## ۳- نتایج

## ۳-۱ بررسی پاسخ کابل

شکل ۸ پاسخ نیروهای ایجاد شده در کابل را به ازای تغییر مکان جانبی نسبی بام نشان می‌دهد. مطابق این شکل کابل‌ها در هر سه حالت وارد ناحیه‌ی غیرخطی شده‌اند. با توجه به این که کابل‌های پس‌تنیده به عنوان کلیدی‌ترین عضو سازه‌ای در ایجاد قابلیت مرکزگرایی سیستم شناخته می‌شوند، وقوع این تغییر شکل‌های پلاستیک می‌تواند پایداری کلی سازه را به خطر بیندازد. البته میزان تغییر شکل پلاستیک ایجاد شده در کابل‌های نمونه‌های K۶۹، K۸۳، N۱۴۰ و N۱۶۸ بسیار ناچیز است و موجب ناپایداری سازه نمی‌شود. مطابق شکل ۸-پ و شکل ۸-ج، به ازای بارگذاری‌های با شدت ۱/۵ برابر سطح MCE، کابل‌ها دچار تغییر شکل‌های پلاستیک قابل توجهی شده‌اند که این تغییر شکل‌ها پایداری سازه را تحت تأثیر قرار داده است. در نمونه N۲۱۰، افزایش تغییر شکل‌های ماندگار در کابل منجر به گسیختگی این المان و در نتیجه ناپایداری سازه شده است. مقادیر قابل توجه تغییر مکان جانبی نسبی باقی مانده در سازه در انتهای بارگذاری، به ازای هر دو نمونه K۱۰۳ و N۲۱۰، بیانگر ناتوانی سیستم در تأمین قابلیت مرکزگرایی است.



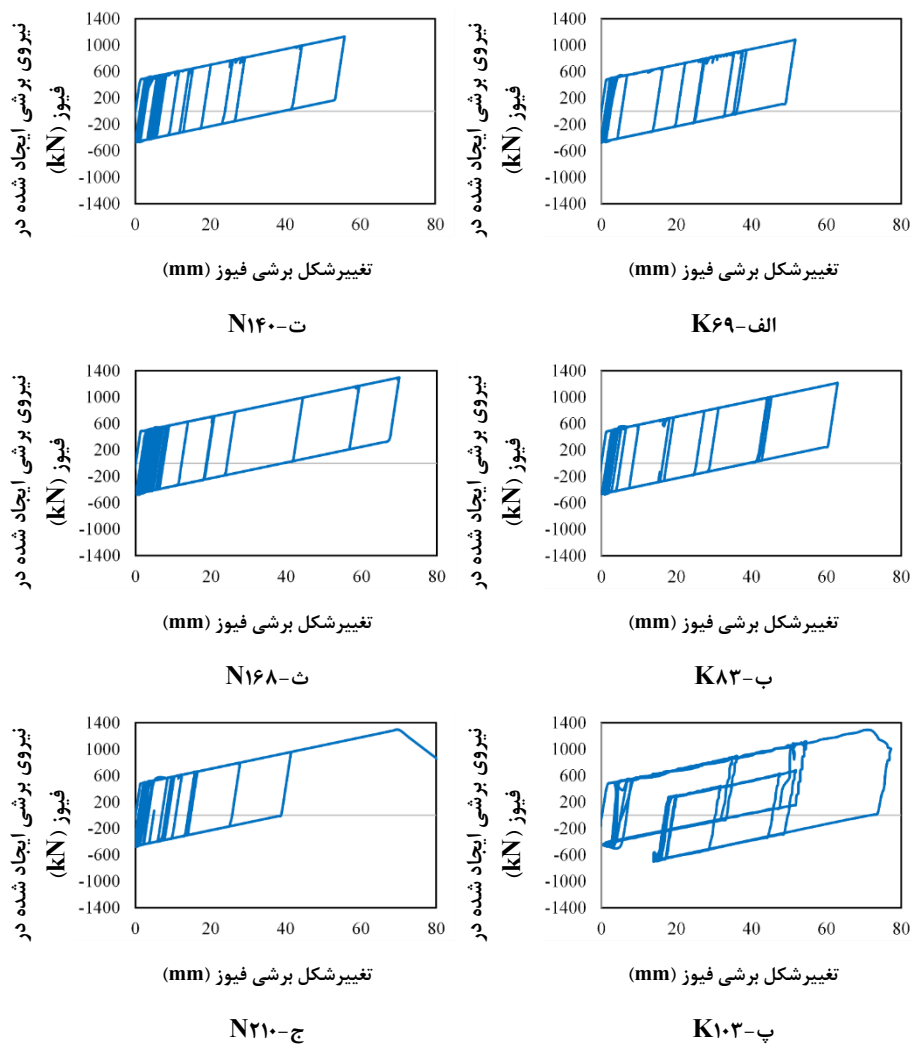
شکل ۸: پاسخ نیرویی کابل‌های پس‌تنیده.



## ۳-۲ بررسی پاسخ فیوز

قابلیت استهلاک انرژی در فیوز از دو جهت به عملکرد نیرویی کابل وابسته است: (۱) فرآیند جذب انرژی در فیوز، نیازمند تشکیل چرخه‌های رفت و برگشت دوران قاب است که وابسته به ایجاد قابلیت مرکزگرایی در سیستم توسط کابل می‌باشد و (۲) ورود کابل‌ها به ناحیه غیرخطی موجب کاهش سختی سازه و افزایش تغییرمکان قاب و در نتیجه افزایش تغییرشکل برشی ایجاد شده در فیوز می‌شود که چنین افزایشی ممکن است موجب شکست فیوز و متوقف شدن فرآیند جذب انرژی توسط این المان شود.

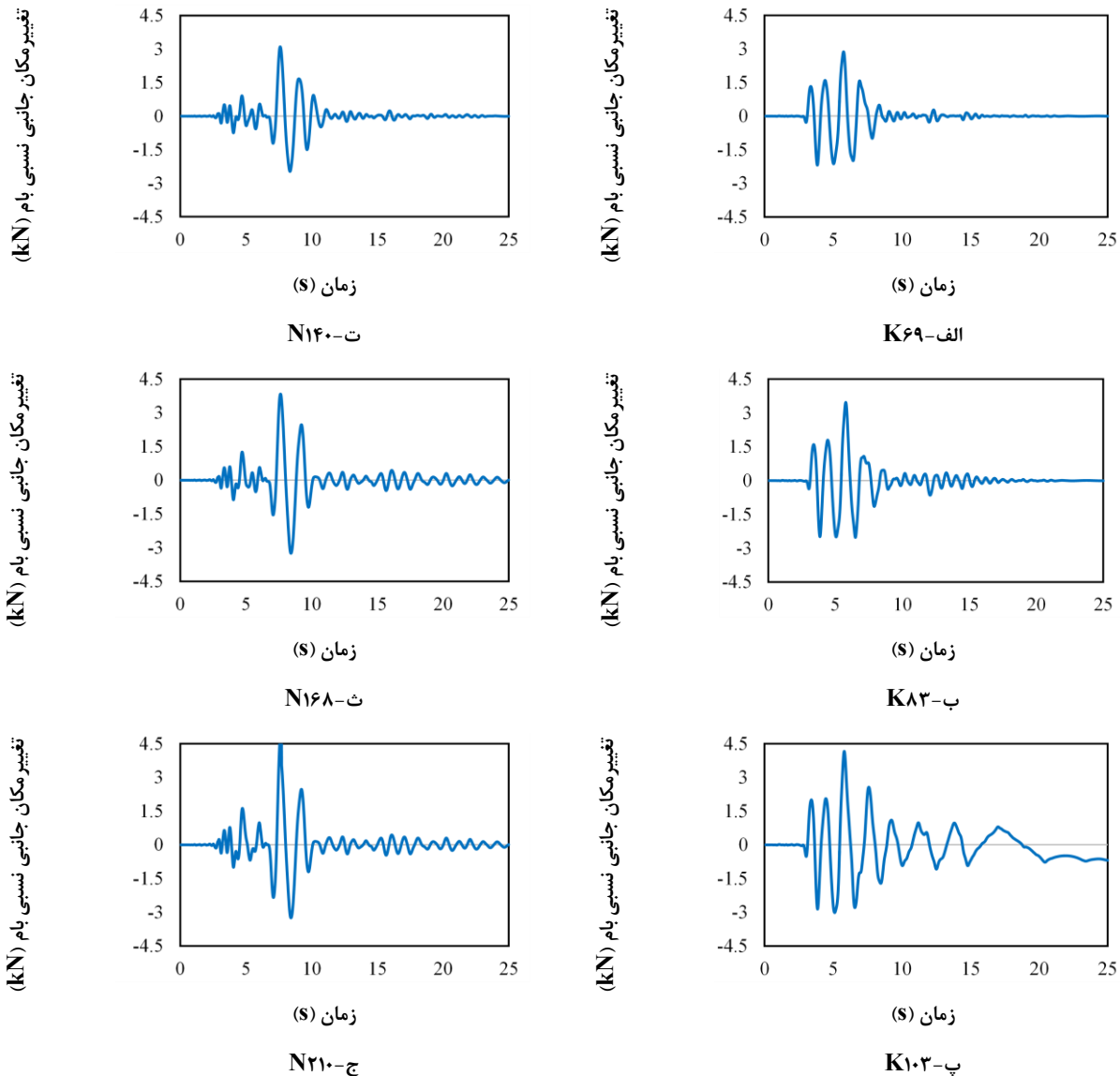
شکل ۹ پاسخ نیرو-تغییرمکان فیوز را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، تا زمانی که خستگی در کابل اتفاق نیافتاده است، حلقه‌های استهلاک انرژی به شکل کامل تشکیل می‌شوند. مطابق شکل ۹-پ در نمونه‌ی K103 خارج شدن کابل از ناحیه خطی، به سرعت عملکرد جذب انرژی در فیوز را تحت تأثیر قرار داده است و با افزایش تغییرشکل‌های برشی تحمیل شده به فیوز، این المان را به حد گسیختگی خود نزدیک کرده است. در این وضعیت همچنین، به علت عدم توانایی کابل‌ها در ایجاد قابلیت مرکزگرایی در سیستم، چرخه‌های رفت و برگشت دوران در قاب به طور منظم انجام نشده و حلقه‌های جذب انرژی در فیوز به طور کامل تشکیل نشده است. برای نمونه N210 نیز، همانگونه که در شکل ۸-ج مشاهده شد، افزایش شدت تحریک لرزه‌ای نه تنها باعث وقوع خستگی در کابل شد، بلکه موجب گسیختگی این المان نیز گردید. مطابق شکل ۹-ج، خارج شدن کابل از ناحیه خطی و حذف این المان از سیستم برابر جانی، موجب وارد شدن تمام نیروهای جانبی به المان فیوز گشته و با افزایش تغییرشکل‌های برشی در آن، باعث شکست فیوز شده است.



شکل ۹: نمودار نیرو-تغییرشکل برش فیوزها.

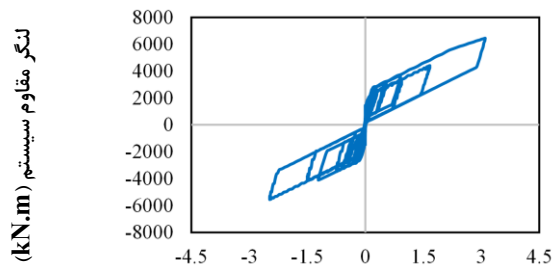
## ۳-۳ بررسی پاسخ قاب مهاربندی

تغییر مکان جانبی نسبی سازه در نمونه K69 برابر با ۲/۸٪ است که از محدودیت آیین نامه ASCE7-05 [۱۲] تجاوز نکرده است. چنین وضعیتی بیانگر رفتار بسیار مطلوب قاب‌های با عملکرد گهواره‌ای حتی در بارگذاری‌هایی با شدت MCE می‌باشد. این میزان دوران برای سازه‌های با سیستم باربر جانبی متداول ممکن است موجب بروز خسارات سازه‌ای و غیر سازه‌ای فراوانی شود اما در سیستم قاب مهاربندی دارای عملکرد گهواره‌ای به علت وقوع دوران صلب و رفتار الاستیک اعضای قاب مشکلی ایجاد نخواهد کرد. افزایش شدت بارگذاری تا ۱/۵ برابر سطح MCE باعث تجاوز پاسخ تغییر مکانی سیستم از مقادیر مجاز آیین‌نامه‌ای شده است. در نمونه‌های K69، K83، N140 و N168، تغییر مکان‌های ماندگار در سازه در پایان بارگذاری جانبی، ناچیز است که بیانگر قابلیت سازه در تأمین مرکزگرایی حتی تحت بارگذاری‌های با شدت بالا می‌باشد. شکل ۱۰ تاریخچه جابجایی نسبی بام را به ازای هر شش الگوی بارگذاری نشان می‌دهد.



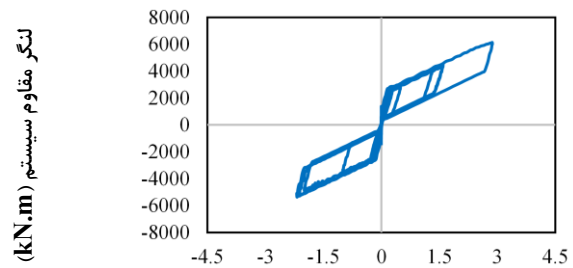
شکل ۱۰: نمودار تغییر مکان جانبی نسبی سیستم در طول تحریک تکیه‌گاهی.

نمودار رفتار نیرو-تغییرمکان قاب مهاربندی در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. ظاهر پرچمی شکل این نمودار بیانگر سیستمی با قابلیت جذب انرژی بالا در عین تغییرشکل‌های ماندگار کوچک است. حلقه‌های استهلاک انرژی در این نمودارها در اثر جذب انرژی توسط فیوز ایجاد می‌شوند و ناچیز بودن تغییرمکان جانبی نسبی ماندگار در سیستم در اثر قابلیت خودمرکزی است که توسط کابل‌های پس‌تنیده در سیستم ایجاد می‌شود. در نمونه‌های K۶۹، K۸۳، N۱۴۰ و N۱۶۸ که تغییرشکل پلاستیک ایجاد شده در کابل‌ها ناچیز بوده و پایداری سیستم را دچار مشکل نکرده است، تشکیل حلقه‌های پرچمی شکل در رفتار قاب مشاهده می‌شود. ورود کابل به ناحیه‌ی غیرخطی موجب تمایل سازه به تشکیل حلقه‌های چاق‌تر در کنار تغییر مکان‌های ماندگار بیشتر در هر چرخه می‌شود که چنین عملکردی را می‌توان به افزایش تغییرشکل‌های برشی تحمیل شده به فیوز در اثر کاهش سختی سازه نسبت داد. این رفتار به خصوص در نمودار ۱۱-پ به خوبی قابل ملاحظه است. البته تمایل سازه به تشکیل حلقه‌های جذب انرژی چاق‌تر، خیلی زود با گسیخته شدن فیوز بی‌پاسخ باقی می‌ماند و تشکیل حلقه‌های پرچمی شکل رفتاری در سیستم عملاً متوقف می‌شود.



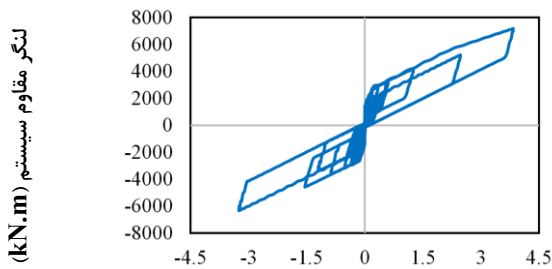
تغییر مکان جانبی نسبی بام (%)

ت- N۱۴۰



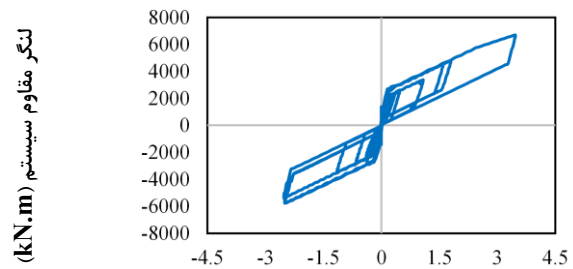
تغییر مکان جانبی نسبی بام (%)

الف- K۶۹



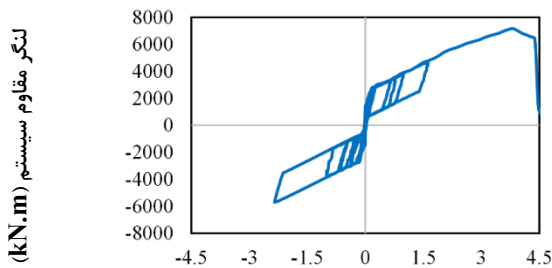
تغییر مکان جانبی نسبی بام (%)

ث- N۱۶۸



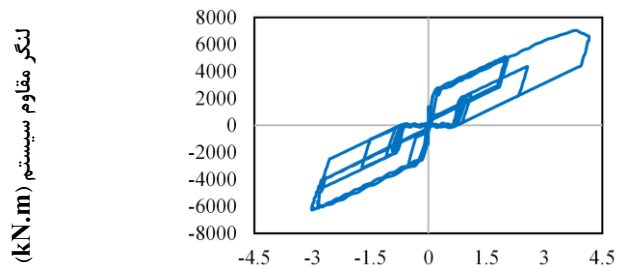
تغییر مکان جانبی نسبی بام (%)

ب- K۸۳



تغییر مکان جانبی نسبی بام (%)

ج- N۲۱۰



تغییر مکان جانبی نسبی بام (%)

پ- K۱۰۳

شکل ۱۱: نمودار لنگر مقاوم ایجاد شده در سیستم.

مقادیر پاسخ‌های اعضای کلیدی سازه‌ای برای سیستم مورد مطالعه به‌ازای شدت‌های مختلف بارگذاری جانبی در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳: مقادیر پاسخ های کلیدی سازه

نمونه‌ها	شتاب‌نگاشت	مقیاس شتاب‌نگاشت	بیشینه ۱RDR	بیشینه نیروی کابل		RDR* ماندگار در انتهای بارگذاری
				نیروی ماندگار در فیوز	نیروی ماندگار در فیوز	
				kN	kN	
K69	JMA Kobe	٪۶۹	٪۲/۸۷	۱۸۷۵	-۳۳۱	٪۰/۰۰۲
K۸۳	JMA Kobe	٪۸۳	٪۳/۴۷	۲۰۱۶	-۳۴۲	٪۰/۰۰۶
K۱۰۳	JMA Kobe	٪۱۰۳	٪۱/۴	۲۱۸۸	-۶۵۴	٪۰/۷
N۱۴۰	Northridge	٪۱۴۰	٪۳/۰	۱۹۸۰	-۳۵۲	٪۰/۰۰۵
N۱۶۸	Northridge	٪۱۶۸	٪۳/۸	۲۱۶۲	-۴۲۴	٪۰/۰۱
N۲۱۰	Northridge	٪۲۱۰	٪۵/۳	۲۳۱۸	-۴۲۳	٪۰/۱

\* تغییرمکان جانبی نسبی بام

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش رفتار قاب‌های فولادی مهاربندی با عملکرد گهواره‌ای، از طریق انجام آنالیز دینامیکی غیرخطی بر روی یک قاب فولادی یک دهانه ۳ طبقه با عملکرد گهواره‌ای مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد حتی تحت بارگذاری‌های لرزه‌ای با شدت سطح MCE نیز سیستم دچار ناپایداری نمی‌شود و قابلیت‌های جذب انرژی و مرکزگرایی تا پایان مسیر بارگذاری در سازه حفظ می‌شوند. این رفتار بیانگر عملکرد بسیار مطلوب این نوع از سیستم‌های باربر جانبی حتی تحت بارگذاری‌های با شدت بالا می‌باشد. با افزایش شدت بارگذاری به ۱/۲ برابر سطح MCE، مقادیر تغییرمکان جانبی نسبی قاب مهاربندی، از مقادیر مجاز آیین‌نامه‌ای تجاوز می‌کنند ولی با این وجود سازه دچار ناپایداری نمی‌گردد. تغییرمکان جانبی نسبی ماندگار پس از وقوع زلزله در سیستم در این شدت از بارگذاری نیز بسیار ناچیز است. عملکرد مطلوب سیستم قاب با عملکرد گهواره‌ای تا جایی ادامه می‌یابد که کابل‌های پس‌تنیده که به عنوان کلیدی‌ترین عضو در تأمین معیار پایداری در سیستم شناخته می‌شوند، از ناحیه خطی خارج نشوند. وقوع کوچکترین تغییرشکل پلاستیک در کابل‌ها ممکن است قابلیت مرکزگرایی سیستم را به خطر بیاندازد. در اصل، خارج شدن کابل‌های پس‌تنیده از محدوده الاستیک نه تنها پایداری کلی سیستم را تهدید می‌کند، بلکه عملکرد استهلاک انرژی در فیوز را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. در واقع کاهش سختی کابل‌ها در اثر وقوع خستگی، موجب کاهش سختی سیستم و در نتیجه افزایش تغییرمکان‌های برشی تحمیل شده به فیوز و در نهایت گسیختگی این المان می‌گردد. از طرفی تشکیل حلقه‌های جذب انرژی در فیوز نیازمند تشکیل دوره‌های رفت و برگشت دوران قاب است که در صورت وقوع تغییرشکل پلاستیک در کابل‌ها و تأمین نشدن قابلیت مرکزگرایی در سیستم، این نیاز بدون پاسخ باقی خواهد ماند و فرآیند جذب انرژی در فیوز عملاً متوقف خواهد شد.

#### مراجع

- [1]Deierlein, G., Ma, X., Hajjar, J., Eatherton, M., Krawinkler, H., Takeuchi, T., & Kasai, K. (2010). Large-scale shaking table test of steel braced frame with controlled rocking and energy dissipating fuses. In 9th US National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering.
- [2]Tanamal, A., Eatherton, M., Hajjar, J. F. (2007). Controlled Rocking of Steel-Framed Buildings with Replaceable Energy Dissipating Fuses Post-Tensioning Strand Material Tests. Internal report, Department of Civil and Environmental Engineerin University of Illinois at Urbana-Champaign Urbana, Illinois 61801.
- [3]Ma, X., Borchers, E., Pena, A., Krawinkler, H., & Deierlein, G. (2010). Design and behavior of steel shear plates with openings as energy-dissipating fuses. John A. Blume Earthquake Engineering Center Technical Report, (173).
- [4]Eatherton, M. R., Hajjar, J. F., Deierlein, G. G., Krawinkler, H., Billington, S., & Ma, X. (2008, October). Controlled rocking of steel-framed buildings with replaceable energy-dissipating fuses. In Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering (pp. 12-17).
- [5]Eatherton, M. R., Ma, X., Krawinkler, H., Deierlein, G. G., & Hajjar, J. F. (2014). Quasi-static cyclic behavior of controlled rocking steel frames. Journal of Structural Engineering, 140(11), 04014083.
- [6]Ma, X., Krawinkler, H., & Deierlein, G. G. (2011). Seismic design and behavior of self-centering braced frame with controlled rocking and energy dissipating fuses, blume earthquake Eng (Vol. 174). Center TR.

- [7]Ma, X. (2010). Seismic Design and Behaviour of Self-Centering Braced Frame with Controlled Rocking and Energy-Dissipating Fuses. PhD, Stanford University.
- [8]OpenSees Website, <http://opensees.berkeley.edu>.
- [9]Amirzehni, H. (2016). Seismic Response Evaluation of Steel Braced Frames with Controlled Rocking and Energy Dissipaters. Master of Science. Urmia University of Technology, Civil Engineering College.
- [10]Takeuchi, T., Kasai, K., Midorikawa, M., Matsuoka, Y., Asakawa, T., Kubodera, I., & Ando, H. (2008). Shaking table test using multipurpose test bed. Proceedings of 14WCEE.
- [11]Gupta, A., & Krawinkler, H. (1999). Seismic demands for the performance evaluation of steel moment resisting frame structures (Doctoral dissertation, Stanford University).
- [12]ASCE 7. (2005). Minimum design loads for buildings and other structures, ASCE 7- 05, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.