



ارزیابی رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های قاب فولادی SAC مقاوم‌سازی شده با میراگرهای ویسکوز تحت تاثیر زلزله های گسل دور و نزدیک

سعید قشلاقی^۱، مازیار فهیمی فرزام^۲، فریبرز ناطقی الهی^{۳*}

۱- پژوهشگاه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران
۲- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۲۳
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۵/۱۸
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۳
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۶/۰۹

کلمات کلیدی:

قاب فولادی SAC
میراگر ویسکوز
ظرفیت باربری
جذب انرژی
تحلیل تاریخچه زمانی

خلاصه: اخیراً به کارگیری راهکارهای افزایش مقاومت و میرایی سازه‌ها در برابر بارهای لرزه‌ای، با هدف افزایش ایمنی در برابر کاهش هزینه اجرا و نگهداری، مورد توجه محققین قرار گرفته است. از جمله مهم‌ترین این راهکارها می‌توان به ترکیب قاب‌های فولادی به همراه میراگرهای ویسکوز اشاره نمود. همچنین در زمینه کنترل غیرفعال سازه‌ها، یکی از توانمندترین ابزارها، میراگرهای ویسکوز می‌باشند که در جهت جذب انرژی زلزله و اتلاف آن جهت کاهش پاسخ سازه مورد استفاده قرار می‌گیرند. لذا هدف این پژوهش تحلیل اثر این سیستم سازه‌ای بر پاسخ قاب‌های معیار SAC که در ۳، ۹ و ۲۰ طبقه احداث شده‌اند، در مقابله با بارهای لرزه‌ای می‌باشد. برای بررسی این موضوع در این مطالعه ابتدا مدل عددی میراگر ویسکوز با استفاده از نرم افزار آباکوس ایجاد شده است. در ادامه، اثر اعمال شتاب گسل دور و نزدیک زلزله‌های امپریال ولی، لوماپریتا و نورث‌ریچ بر رفتار این سیستم سازه‌ای به طور جداگانه ارزیابی شده و نتایج شامل دریفت طبقات، ظرفیت باربری (به صورت برش پایه بیشینه) و جذب انرژی سازه (در دو حالت کار خارجی و انرژی کرنشی) مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. نتایج به طور میانگین برای سه سازه مورد بحث، بیانگر کاهش ۲۰ درصدی دریفت، افزایش ۳۰ درصدی ظرفیت باربری و افزایش ۳۵ درصدی جذب انرژی سازه‌های فولادی معیار SAC پس از اعمال میراگر ویسکوز بوده است.

۱- مقدمه

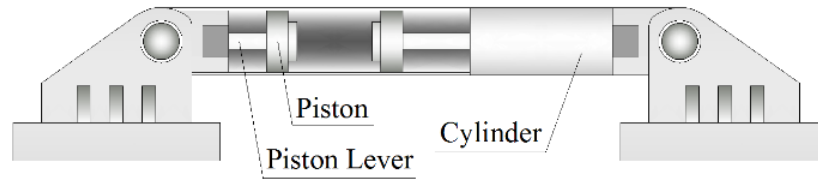
تحقیقات نشان داده‌اند که استفاده از میراگرهای ویسکوز می‌تواند نقش موثری در کنترل پاسخ سازه‌ها در برابر باد [۱۲ و ۱۱]، انفجار [۱۴ و ۱۳] و زلزله [۱۶ و ۱۵] داشته باشد و در نتیجه موجب افزایش میرایی و کاهش پاسخ‌های سازه می‌شود [۱۷]. به این ترتیب بررسی شاخص‌های رفتاری استفاده از میراگرهای ویسکوز از ضرورت خاصی برخوردار می‌باشد. میراگر ویسکوز اولین بار در قرن نوزدهم به منظور خنثی‌سازی اثرات ضربه در کشتی‌ها مورد استفاده قرار گرفت [۱۹ و ۱۸]. بعدها استفاده از این وسایل در صنعت هوافضا برای پرتاب موشک و صنایع نظامی گسترش زیادی یافت [۲۱ و ۲۰]. تا اینکه در نیمه اول قرن بیستم از این تکنولوژی در کارخانه‌های خودروسازی نیز استفاده شد [۲۳ و ۲۲]. ورود میراگر ویسکوز به صنعت مقاوم‌سازی ساختمان با انجام آزمایشاتی در دانشگاه بوفالو آغاز شد [۲۴]. در ادامه به مهم‌ترین مطالعاتی که در این زمینه صورت پذیرفته است اشاره می‌گردد.

میراگرهای ویسکوز یکی از سیستم‌های کنترل غیرفعال است که در محل مهاربندی جانمایی شده و بخشی از انرژی لرزه‌ای ورودی به سازه را جذب کرده و سبب می‌شود که تقاضا استهلاک انرژی روی المان‌های سازه کاهش یافته و خرابی سازه‌ای به حداقل برسد [۴-۱]. سازه‌های متعارف انرژی را از طریق تسلیم شدن یا گسیختگی مصالح ساختمان جذب می‌کنند. به عنوان مثال در تیرها و ستون‌های فولادی انرژی لرزه‌ای با تشکیل مفصل پلاستیک و در سازه‌های بتنی با ایجاد ترک جذب می‌شود. میراگرهای ویسکوز یک راهکار در تسلیم شدن یا گسیختگی ارائه می‌دهند [۸-۵]. این میراگرها یک نیرو تامین می‌کنند که همیشه در مقابل حرکت سازه مقاومت می‌کند. این نیرو متناسب با سرعت نسبی دو سر میراگر می‌باشد [۹]. نمای کلی از یک میراگر ویسکوز در شکل ۱ ارائه شده است. در سال‌های اخیر، بررسی کنترل پاسخ سازه‌ها در زلزله با استفاده از تجهیزات استهلاک انرژی نظیر میراگرها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده است.

چانگ و همکاران در سال ۲۰۰۸ مطالعه‌ای آزمایشگاهی با استفاده از میز لرزان در طراحی مبتنی بر جابجایی برای مقاوم‌سازی لرزه‌ای ساختمان‌های

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: nateghi@iiees.ac.ir





شکل ۱. جزئیات یک میراگر ویسکوز [۱۰]

Fig. 1. Details of a viscous damper

مطالعه نمودند. ایشان یک رابطه برای محاسبه سرعت ایجاد شده در طبقات سازه فولادی پس از استفاده از میراگرهای ویسکوز بیان کردند. برای اثبات صحت مدل تحلیلی ایجاد شده نیز چندین مورد سازه در حالات مختلف را بررسی کرده و پژوهش خود را راستی آزمایی نمودند [۱۹].

قدرتی امیری و همکاران (۲۰۲۱) عملکرد لرزه‌ای قاب‌های فولادی خمشی ویژه را تحت رکوردهای دور از گسل، با و بدون میراگر ویسکوز و با استفاده از FEMA P-695 بررسی کردند. قاب‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه در دو حالت با و بدون میراگر ویسکوز بر اساس ASCE 7-10 و AISE 360 بارگذاری، تحلیل و طراحی شده و مشخصات میراگرهای ویسکوز برای یک نسبت میرایی مشخص لحاظ شده است. نتایج نشان می‌دهد که در قاب‌های خمشی با میراگرهای ویسکوز، ظرفیت فروریزش قاب‌ها به طور قابل توجهی افزایش یافته است. همچنین طراحی ساختمان‌های دارای میراگرهای ویسکوز، تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر کاهش وزن ساختمان و هزینه‌های ساخت و بهبود رفتار و معیارهای فنی داشته است [۲۸].

با توجه به بررسی مطالعات پیشین یک خلاء پژوهشی در این میان قابل درک است. پاسخ به این پرسش اساسی که "استفاده از میراگرهای ویسکوز بر رفتار سازه‌های فولادی کوتاه مرتبه، میان مرتبه و بلند مرتبه در برابر زلزله‌های مختلف تا چه حد اثرگذار خواهد بود؟"، گام موثری در این زمینه به شمار می‌رود.

لذا هدف از انجام پژوهش حاضر، بررسی اثر افزودن میراگر ویسکوز در ساختمان‌های مختلف فولادی بر عملکرد سازه است. این میراگر علاوه بر افزایش قابلیت استهلاک انرژی باعث کاهش دررفت سازه در برابر زلزله نیز می‌شود و از این طریق صدمه به اجزای غیرسازه‌ای نیز کاهش می‌یابد [۳۲-۲۹]. در این راستا سعی می‌شود تا با استفاده بهینه از ظرفیت این سیستم‌ها، از میزان پاسخ‌ها و خرابی‌های احتمالی ناشی از زمین لرزه کاسته شود.

موجود با استفاده از میراگرهای ویسکوز را توسعه دادند. ایشان از یک قاب سه طبقه با مقیاس یک سوم بر روی میز لرزان استفاده نمودند. از نتایج این مطالعه به عنوان صحت‌سنجی و کالیبره نمودن مدل اجزای محدود حاضر استفاده می‌گردد [۲۵].

دومنیکو و همکاران (۲۰۱۹) همچنین چیدمان‌های مختلف میراگرهای ویسکوز بر رفتار لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاصل از این پژوهش شامل میرایی طبقات، تغییر مکان و نیروی عکس‌العمل ایجاد شده در دو حالت قبل و پس از اعمال میراگر، تنش ماکزیمم ایجاد شده و انرژی دمپ شده در سازه بوده است. در این مطالعه این نتیجه حاصل شد که با اعمال میراگرها بر دهانه بیرونی قاب، می‌توان بهترین طرح را با کمترین هزینه ارائه نمود [۲۶]. میلان چیان و حسینی (۲۰۱۹) با استفاده از نمودارهای هیستریزس، رفتار میراگرهای ویسکوز در سازه را مورد ارزیابی قرار دادند. ایشان یک پارامتر سطح پذیرش برای هر مورد میراگر تعریف نمودند. این پارامتر از تقسیم تعداد ترکیب بارهایی که میراگر آن‌ها را اغنا نموده، بر کل ترکیب بارهای وارده به دست می‌آید و هر چه به ۱ نزدیک‌تر باشد، نشان دهنده این است که میراگر مورد نظر در مقابل ترکیب بارهای بیشتری مقاومت نموده است [۱۰]. افشین مصلحی تبار (۲۰۱۹) تکنیک خطی‌سازی تحلیل دینامیکی غیرخطی را پیشنهاد نمود. وی یک مطالعه به منظور کاهش هزینه محاسباتی (زمان) مورد نیاز برای تحلیل تاریخچه زمانی میراگرهای ویسکوز صورت داد. برای دستیابی به این هدف، تحلیل غیرخطی مورد نظر را به تحلیل‌های خطی در بازه‌های کوچک‌تر تقسیم نمود. به این صورت، نتایج حاصل از روش پیشنهادی را با نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی مستقیم مقایسه نموده و صحت پاسخ حاصل از روش خود را به اثبات رساند [۲۷].

لوگوتوری و همکاران (۲۰۲۰) پارامترهای لرزه‌ای در طبقات سازه فولادی قبل و پس از تجهیز سازه به میراگرهای ویسکوز را در برابر ۲۲ زلزله مختلف

ابعاد قاب آزمایش شده ۳ متر در ۲ متر در پلان و ارتفاع طبقات ۱، ۲ و ۳ به ترتیب ۲ متر، ۱٫۷۵ متر و ۱٫۷۵ متر می‌باشد. وزن طبقات به ترتیب ۳۲٫۹ کیلونیوتن در طبقه اول، ۳۲٫۹ کیلونیوتن در طبقه دوم و ۲۲٫۷ کیلونیوتن در طبقه سوم می‌باشد. مشخصات مقاطع سازه فوق در جدول ۱ مشخص شده است.

مقاومت جاری شدن و نهایی که از آزمایش کشش به دست آمده به ترتیب برابر ۰٫۳۴ کیلونیوتن بر میلی‌متر مربع و ۰٫۴۵ کیلونیوتن بر میلی‌متر مربع برای تیرها و ۰٫۳۲ کیلونیوتن بر میلی‌متر مربع و ۰٫۴۵ کیلونیوتن بر میلی‌متر مربع برای ستون‌ها می‌باشد.

معادله حرکت دینامیکی سازه با ابزار میرایی الحاقی به صورت زیر است:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx + \Gamma x = -(M + \bar{M})\ddot{x}_g + P \quad (1)$$

در این رابطه، Γx نیروی مربوط به ابزار میرایی، \bar{M} جرم این وسایل و F حاوی نیروهای ناشی از بارهای دینامیکی می‌باشند. با فرض $F = -f_T$ و $\bar{M} = 0$ می‌توان نوشت:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx + f_T = -(M)\ddot{x}_g + P \quad (2)$$

برای یک سازه چند درجه آزادی (با یک درجه آزادی در هر طبقه)، بردار نیروی میراگر f_T ، در برگیرنده جزء افقی نیروی میراگرها در هر طبقه است، به طوری که:

$$f_T = ((n_1 p_1 - n_1 p_2)(n_2 p_2 - n_2 p_3) \dots (n_j p_j - n_{j+1} p_{j+1}) \dots (n_N p_N))^T \quad (3)$$

که n_j تعداد میراگرهای به طور یکنواخت متصل شده به سازه در طبقه j ام و p نیروی افقی مربوط به هر میراگر است که در این پژوهش از میراگرهای ویسکوز غیرخطی با روابط ۴، ۵ و ۶ استفاده شده است.

ثابت میرایی و توان سرعت استفاده شده در این پژوهش، از آزمون خواص میراگر تحت تحریک افقی سینوسی در فرکانس‌های ۰٫۵، ۱، ۲ و ۴ کیلوهرتز به دست آمده است. بر اساس نتایج به دست آمده از آزمایش، رابطه بین نیروی میراگر (F_d) و سرعت (V) برای میراگرهای طبقه ۱، ۲

برای انجام این تحقیق، سه ساختمان ۳، ۹ و ۲۰ طبقه معیار SAC [۳۳] که به ترتیب در شهرهای لس‌آنجلس، سیاتل و بوستون بر مبنای آیین‌نامه FEMA355 [۳۴] طراحی و اجرا شده‌اند، صورت پذیرفته است. سپس یک قاب بیرونی از سازه‌های مذکور در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس در حالت‌های با و بدون استفاده از میراگر ویسکوز تحت زلزله‌های گسل دور و نزدیک قرار داده شده است. با به کارگیری تحلیل‌های تاریخچه زمانی میزان تغییرات شاخص‌های دینامیکی سازه نظیر دریفت طبقات، ظرفیت باربری و جذب انرژی ایجاد شده در کل سازه مورد مطالعه قرار گرفته شده است.

۲- مدل‌سازی به منظور صحت‌سنجی پاسخ اجزای محدود

برای مدل‌سازی نرم‌افزاری نمونه آزمایشگاهی مجهز به میراگر، مطابق شکل ۲ که رفتار لرزه‌ای آن توسط کو-چون چانگ و همکاران [۲۵] گزارش شده، در نظر گرفته می‌شود. نمونه آزمایشگاهی، یک قاب سه طبقه، با مقیاس دو سوم مقیاس واقعی می‌باشد که با میراگر ویسکوز غیرخطی مقاوم‌سازی شده و آن را بر روی میز لرزان تحت ارتعاش مؤلفه شمال-جنوب زلزله السترو با بیشینه شتاب زمین $0.34g$ قرار دادند.



شکل ۲. نمونه آزمایش شده توسط کو-چون چانگ و همکاران [۲۵]

Fig. 2. Sample tested by Ko-chun Chang et al

جدول ۱. مشخصات مقاطع سازه آزمایش شده [۲۵]

Table 1. Material properties of experimental structure

Section	H×B (mm)	t _w (mm)	t _f (mm)	Area (cm ²)	I _x (cm ⁴)	I _y (cm ⁴)
Column	H100×100	100×100	6	21.04	369	133
Beam	H125×60	125×60	6	16.14	394	29
Brace	Tube891	-	-	10.69	97.02	-

یوسته استفاده می‌شود. و نیز برای مدل‌سازی میراگر ویسکوز غیرخطی از المان Translator استفاده شده است.

وزن هر طبقه به صورت گسترده به سقف آن طبقه اعمال شده است. باید توجه داشت که مهاربندهای موجود در جهت عمود بر راستای بادبندهای دارای میراگر، تأثیری ناچیزی بر نتایج تحلیل دارند.

برای ارزیابی نتایج مدل‌سازی نرم‌افزاری حاضر، ابتدا قاب مورد نظر بدون وجود میراگر مورد تحلیل اجزای محدود قرار گرفت. سپس مقادیر مودهای اول، دوم و سوم از نرم‌افزار استخراج گردید. همان گونه که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، مقادیر فرکانس ۳ مود اول سازه بدون میراگر که با نرم‌افزار مدل‌سازی شده است با نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی دارند.

میرایی سازه با مقادیر \hat{a} و \hat{a} طبق روابط (۷) و (۸) (رابطه رایلی) محاسبه و در مدل اعمال می‌شود. مقادیر فرکانس به دست آمده از نرم‌افزار مطابق جدول ۲، برای مود اول ۱/۸۲ و برای مود دوم ۵/۹۵ می‌باشد که در رابطه مذکور استفاده شده است.

$$\alpha = \frac{2\xi\omega_1\omega_2}{(\omega_1 + \omega_2)} = \frac{2 \times 0.015 \times (2 \times \pi \times 1.82) \times (2 \times \pi \times 5.95)}{2 \times \pi \times (1.82 + 5.95)} = 0.262705 \quad (7)$$

$$\beta = \frac{2\xi}{(\omega_1 + \omega_2)} = \frac{2 \times 0.015}{2 \times \pi \times (1.82 + 5.95)} = 0.006144 \quad (8)$$

که ω_1 و ω_2 فرکانس مودهای اول و دوم سازه و ξ میرایی مورد اول سازه و برابر ۱/۵ درصد می‌باشد. نتایج آزمایشگاهی و عددی به دست آمده برای تغییر مکان بام تحت ۱۰۰ درصد زلزله السترو در شکل ۴ قابل مشاهده می‌باشد.

همان طور که از شکل ۴ قابل مشاهده است نتایج تطابق خوبی با هم

و ۳ عبارتند از:

$$F_{d,1F} = 0.477V^{0.51} \text{ kN} * \left(\frac{S}{mm}\right)^{0.51} \quad (4)$$

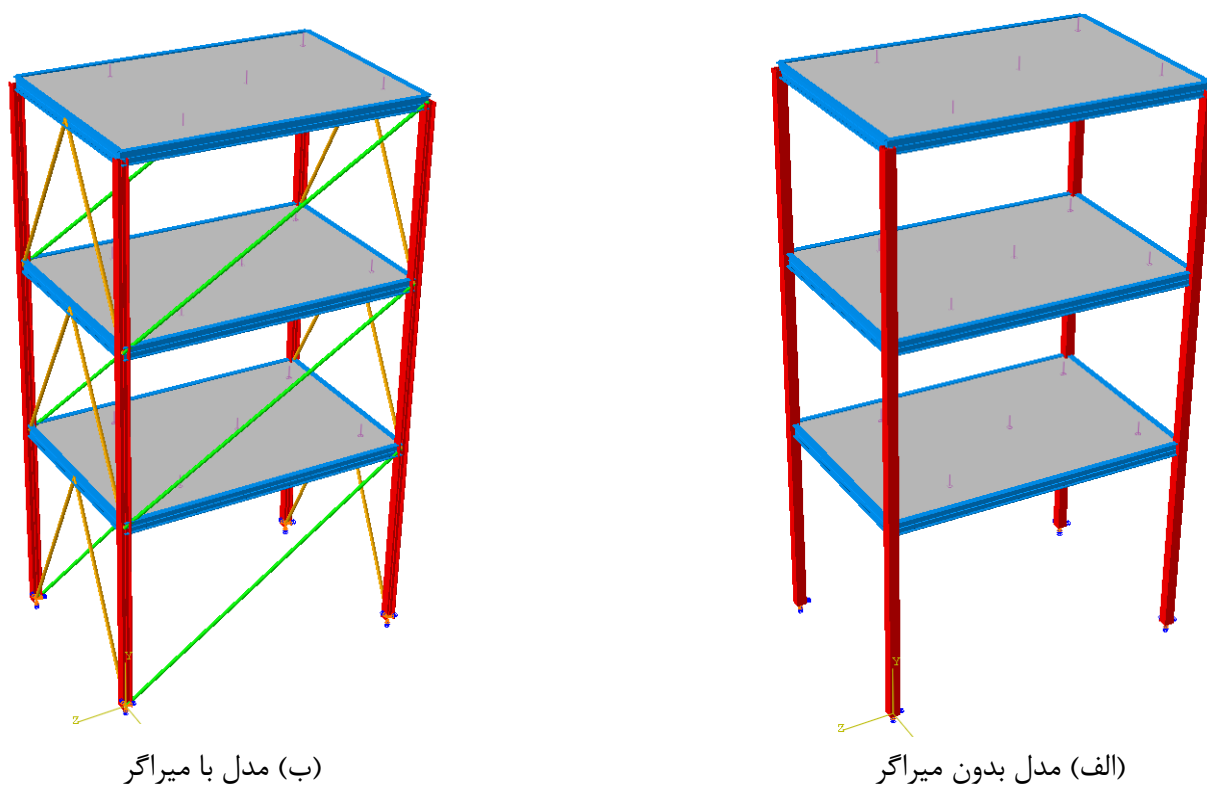
$$F_{d,2F} = 0.44V^{0.48} \text{ kN} * \left(\frac{S}{mm}\right)^{0.48} \quad (5)$$

$$F_{d,3F} = 0.17V^{0.55} \text{ kN} * \left(\frac{S}{mm}\right)^{0.55} \quad (6)$$

که در آن V سرعت نسبی دو سر میراگر می‌باشد. همچنین $F_{d,1F}$ ، $F_{d,2F}$ و $F_{d,3F}$ به ترتیب نیروی میرایی میراگرهای طبقه ۱، ۲ و ۳ می‌باشند. وزن، ظرفیت نیرویی و ماکزیم مقدار جابجایی پیستون به ترتیب ۰/۱۵۶ کیلونیوتن، ۲۲/۲۵ کیلونیوتن و ۱۰۱± میلی‌متر می‌باشند. برای اتصال دو قسمت مختلف یک مدل که در یک مکان مشخص با هم در تماس هستند از اتصال دهنده‌ها استفاده می‌شود. در این پژوهش برای مدل‌سازی میراگر ویسکوز غیرخطی از المان اتصال دهنده Translator استفاده شده است. این المان، حرکات میراگرهای ویسکوز را به دو صورت چفت شده^۱ (مشابه حرکت پیستون و سیلندر) و هم‌راستا^۲ شبیه‌سازی می‌نماید. در این المان امکان تعریف سختی، میرایی و اصطکاک در جهت u1 (راستای محور طولی میراگر) فراهم شده و باقی درجات آزادی بسته می‌شود [۳۵].

مدل ساخته شده با نرم‌افزار آباکوس در شکل ۳ نشان داده شده است. برای مدل‌سازی تیرها و ستون‌ها از المان تیر تیمو شینکو استفاده شده که در نرم‌افزار با B31 نام‌گذاری شده است برای مدل‌سازی سقف‌ها از المان

- 1 Connector
- 2 Slot
- 3 Align



شکل ۳. مدل ۳ بعدی ساخته شده با میراگر در نرم افزار آباکوس

Fig. 3. 3D model equipped with dampers developed in ABAQUS software package

جدول ۲. مقایسه فرکانس (بر حسب هرتز) ۳ مود اول کار آزمایشگاهی با نتایج تحلیل اجزای محدود (بدون وجود میراگر)

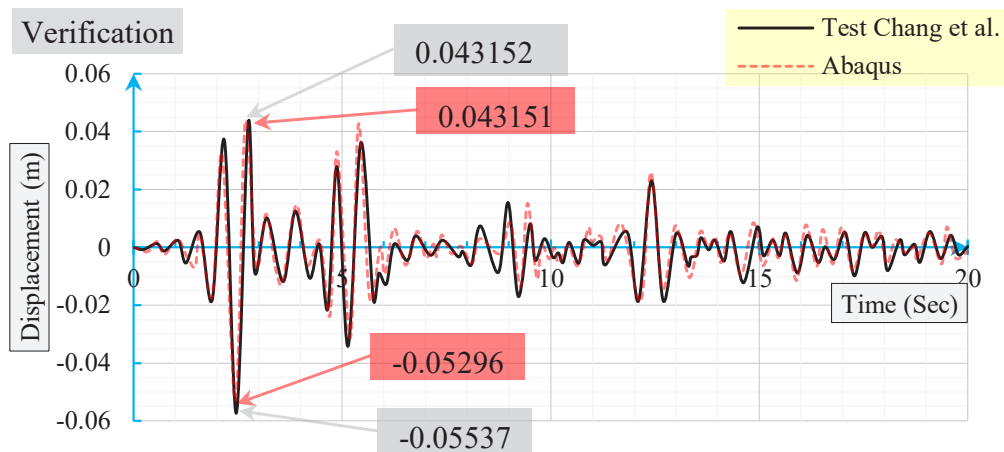
Table 2.

Mode	Experimental frequency (H)	Numerical frequency (H)
1	1.81	1.82
2	5.92	5.95
3	10.42	10.57

۳- طراحی سازه های فولادی

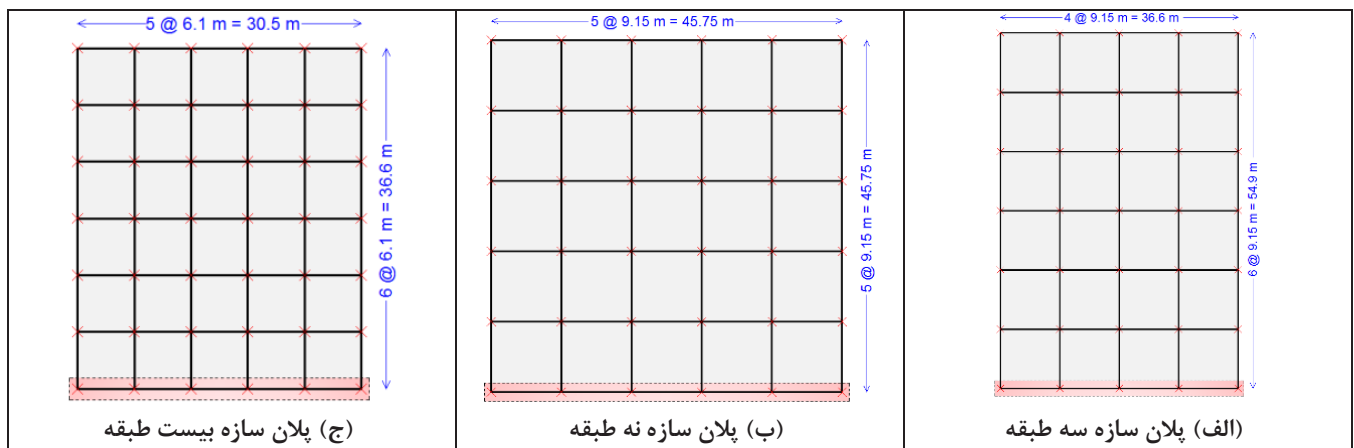
در این پژوهش، تحلیل قاب های فولادی بر مبنای مدل اجزای محدود برای مطالعه عملکرد این قاب ها تحت زلزله با و بدون میراگر مورد توجه قرار گرفته است. هندسه و ویژگی های قاب فولادی خمشی مورد استفاده در این مطالعه مبتنی بر قاب های معیار ۳، ۹ و ۲۰ طبقه پروژه فولادی SAC است

دارند. تغییر مکان ماکزیمم در مطالعه آزمایشگاهی در بدترین حالت در بخش منفی نمودار در مطالعه آزمایشگاهی به میزان ۵۳٫۳۷ میلی متر حاصل شده که در مدل عددی با ۴٫۲۵ درصد اختلاف به میزان ۵۲٫۹۶ میلی متر به دست آمده است. مقادیر گزارش شده در صحت سنجی مبین این امر است که می توان با دقت بالایی به پاسخ های به دست آمده از مطالعه حاضر اعتماد نمود.



شکل ۴. مقایسه تغییر مکان بام در دو حالت آزمایشگاهی و عددی

Fig. 4. Comparison of roof displacement in both experimental and numerical models

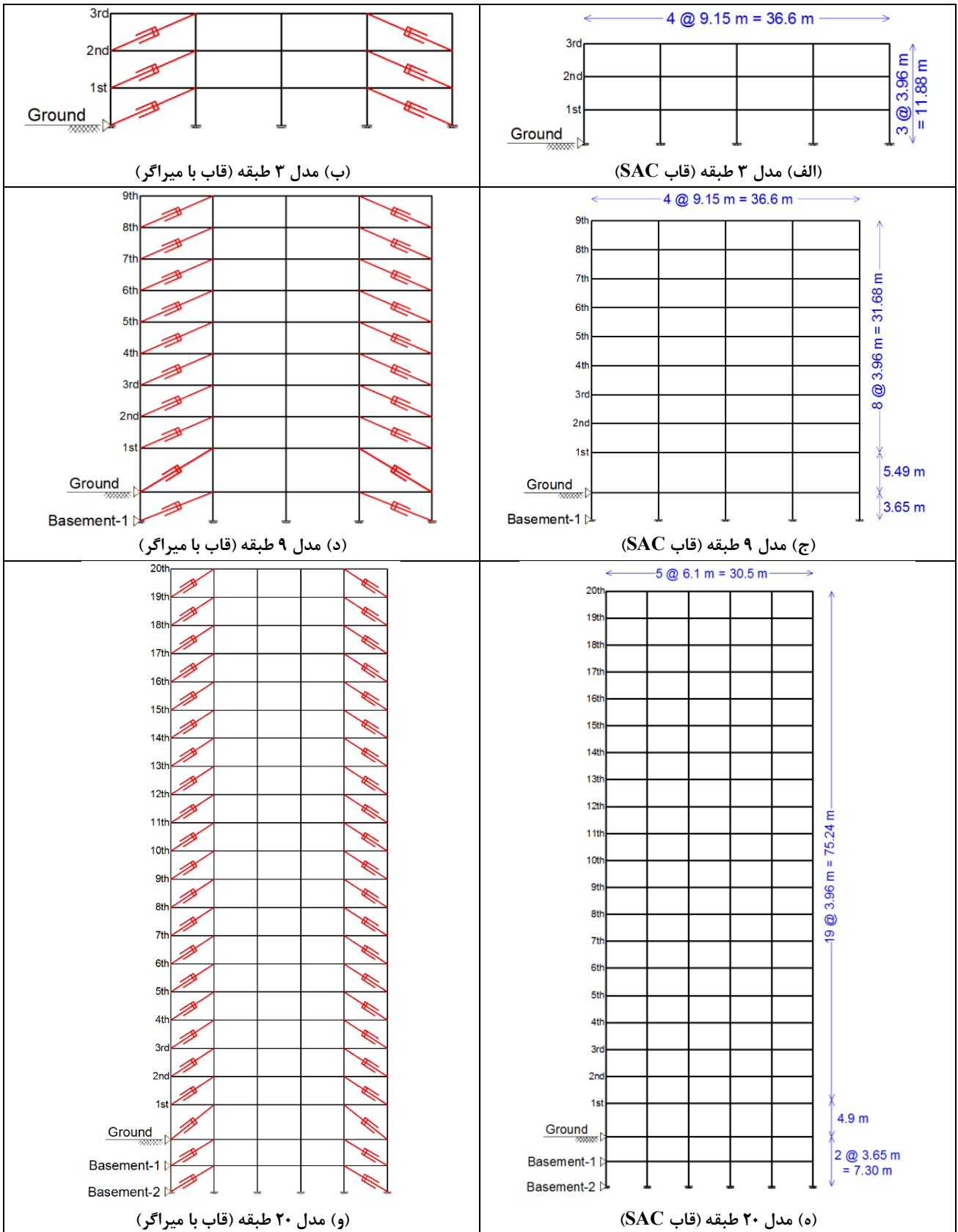


شکل ۵. پلان سازه های معیار SAC و قاب مورد نظر برای تحلیل

Fig. 5. Plan of SAC benchmark structures and modeled frame for analysis

هم یکسان هستند. اتصال ستون‌ها در تکیه‌گاه، مفصلی است و در تراز سطح زمین از تغییر مکان جانبی آن‌ها جلوگیری شده است. پس از مدل‌سازی قاب‌های نشان داده شده در آباکوس، میراگرهای ویسکوز با میرایی معادل مطابق با پژوهش چانگ و همکاران ایجاد شده و قاب‌ها در دو حالت با و بدون میراگر تحلیل می‌شوند. گام‌های حل مسئله شامل استاتیکی برای محاسبه نیروهای ثقلی و دینامیکی برای محاسبه پاسخ لرزه‌ای ایجاد می‌شوند. زلزله‌های مورد نظر نیز شامل شتاب‌نگاشت‌های گسل

[۳۳]. همانطور که ذکر شد پروژه SAC شامل قاب‌های نمونه ۳، ۹ و ۲۰ طبقه به ترتیب واقع در لس‌آنجلس، سیاتل و بوستون است. ساختمان‌ها به صورت یک ساختمان اداری استاندارد و در هر دو نوع خاک نرم و سخت طراحی شده‌اند. پلان سازه‌ها و قاب مدنظر برای تحلیل اثر میراگر در شکل ۵ و ارتفاع طبقات سازه‌ها و موقعیت قرارگیری میراگر در شکل ۶ نشان داده شده است. ساختمان‌ها دارای قاب خمشی فولادی هستند که از خمش دو محوره در گوشه‌ها ممانعت می‌کنند. قاب‌های خمشی در دو جهت عمود بر



شکل ۶. ابعاد هندسی قاب های مورد بحث و موقعیت قرارگیری میراگرها

Fig. 6. Geometric dimensions of mentioned frames with the mounting position of the dampers

جدول ۳. مشخصات زمین لرزه‌های گسل دور و نزدیک مورد استفاده در مطالعه حاضر

Table 3. Characteristics of far near-field earthquakes used in the present study

No	Year	Earthquake	MW	Mech*	Station	PGA (g)	PGV ($\frac{cm}{s}$)	PGD (cm)	$\frac{PGV}{PGA}$	$\frac{PGD}{PGV}$
(a) Near Fault Earthquakes										
1	1979	Imperial Valley	6.5	SS	Bond corner	0.59	46.75	20.21	79.23	0.43
2	1989	Loma Prieta	7	OB/Rev	Capitola	0.51	38.02	7.06	74.54	0.18
3	1994	Northridge	6.7	Rev	Saticoy	0.34	31.43	8.95	92.44	0.28
(b) Far Fault Earthquakes										
4	1979	Imperial Valley	6.5	SS	Calexico	0.27	21.24	9.03	78.66	0.42
5	1989	Loma Prieta	7	OB	Presidio	0.10	12.91	4.32	129.1	0.33
6	1994	Northridge	6.7	TH	Moorpark	0.29	20.97	5.48	72.3	0.26

* Faulting Mechanism = TH: Thrust; REV: Reverse; SS: Strike-slip; OB: Oblique

۵- نتایج و بحث

سه قاب خمشی فولادی معیار SAC ۳، ۹ و ۲۰ طبقه در دو حالت با و بدون میراگر در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شدند. سپس شتاب زلزله‌های سه زمین لرزه امپریال ولی، لوماپریتا و نورثریج، ثبت شده در مناطق دور و نزدیک به گسل، بر این سازه‌ها اعمال شد. بنابراین با شبیه‌سازی ۳ مدل در حالت ۲ با و بدون میراگر ویسکوز، تحت ۶ زلزله، رفتار این سیستم سازه‌ای مورد بحث قرار داده شده است. لذا ۳۶ مدل مختلف ایجاد و تحلیل شدند که نتایج آن‌ها در ادامه ارائه شده است. برای نام‌گذاری مدل‌ها، ابتدا تعداد طبقات سازه ذکر می‌شود. سپس نام زلزله شامل Loma Imperial و Northridge ارائه می‌شود و در نهایت از حرف N نشان دهنده نزدیک (Near) و F مخفف دور (Far) بودن گسل استفاده شده است. نتایج در هر نمودار برای دو حالت با و بدون میراگر ارائه شده است که در راهنمای نمودار، برای حالت بدون میراگر نام UnControlled و برای حالت با میراگر نام Controlled بیان شده است.

نتایج نیز شامل سه بخش اساسی زیر می‌باشند:

- تحلیل اثر اعمال میراگر بر میزان دریافت طبقات سازه‌های معیار SAC؛
- تحلیل اثر اعمال میراگر بر میزان ظرفیت باربری سازه‌های معیار SAC؛
- تحلیل اثر اعمال میراگر بر میزان جذب انرژی سازه‌های معیار SAC.

دور و نزدیک زمین لرزه‌های امپریال ولی^۱، لوماپریتا^۲ و نورثریج^۳ هستند که در بخش بعد در مورد آن‌ها شرح داده می‌شود. لازم به ذکر است که تغییرات تاریخچه زمانی این شتاب‌نگاشت‌ها با ضریب ۹/۸۱ به صورت شرایط مرزی به انتهای تحتانی ستون‌ها اعمال می‌شوند.

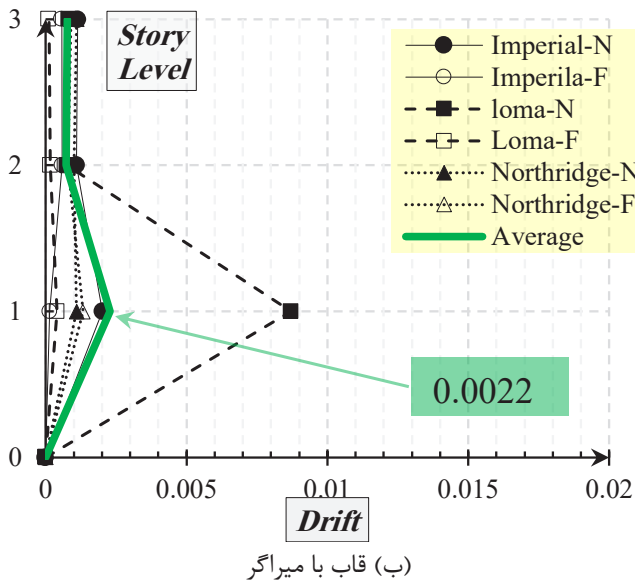
۴- معرفی زمین لرزه‌های مورد بررسی

برای انجام تحلیل دینامیکی و انتخاب و اعمال شتاب زمین لرزه در مدل، سه زمین لرزه امپریال ولی، لوماپریتا و نورثریج با ماهیت‌های نزدیک به گسل و دور از گسل انتخاب شد و به سیستم قاب در دو حالت با و بدون میراگر ویسکوز به صورت شرایط مرزی شتاب اعمال می‌شوند. برای نام‌گذاری زلزله‌ها نیز از حرف N نشان دهنده نزدیک (Near) و یا F مخفف دور (Far) بودن گسل استفاده شده است.

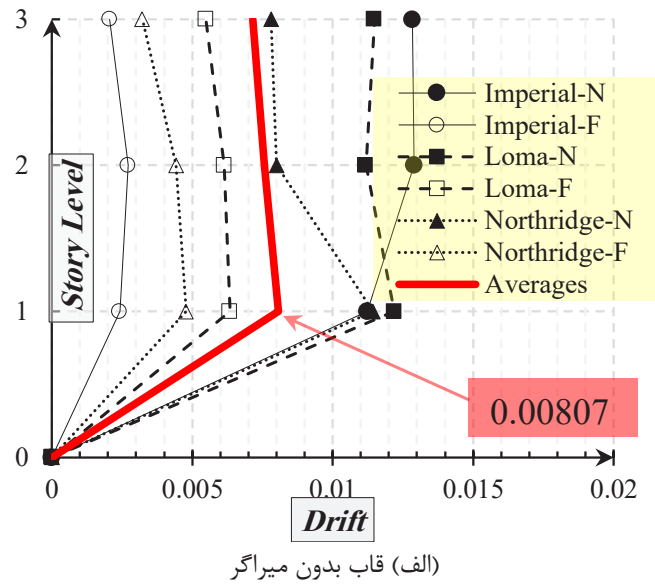
مقادیر حداکثر شتاب (PGA)، حداکثر سرعت (PGV) و حداکثر تغییر مکان (PGD) (به صورت قدر مطلق) و همچنین نسبت‌های حداکثر سرعت به حداکثر شتاب ($\frac{PGV}{PGA}$) و حداکثر تغییر مکان به حداکثر سرعت ($\frac{PGD}{PGV}$) برای تمامی زلزله‌های مورد بحث در جدول ۳ ارائه شده‌اند. با بررسی نمودارهای تاریخچه زمانی مشخص است که زلزله‌هایی که در دامنه تاریخچه زمانی سرعت و جابجایی آن‌ها پالس‌های شدید و سریع دیده می‌شود، معمولاً نسبت ($\frac{PGV}{PGA}$) بالاتر و نسبت ($\frac{PGD}{PGV}$) پایین‌تری دارند. لازم به ذکر است که شتاب این زمین لرزه‌ها بر مبنای توصیه آیین‌نامه FEMA به ماکزیمم مقدار $0.2g$ با استفاده از نرم‌افزار Seismosignal نگاشت شده‌اند [۳۳].

- 1 Imperial Valley
- 2 Lomaprieta
- 3 Northridge

3 Story - Controlled



3 Story - UnControlled



شکل ۷. دریفت سازه ۳ طبقه در برابر زلزله ها

Fig. 7. The drift of the 3-story structure subjected to earthquakes

مقدار میانگین دریفت در حالت قاب بدون میراگر برابر با 0.000807 بوده است. اما پس از اعمال میراگر بر سازه، این مقدار به 0.00022 نزول یافته و دریفت سازه تا حد چشم‌گیری کاهش یافته است.

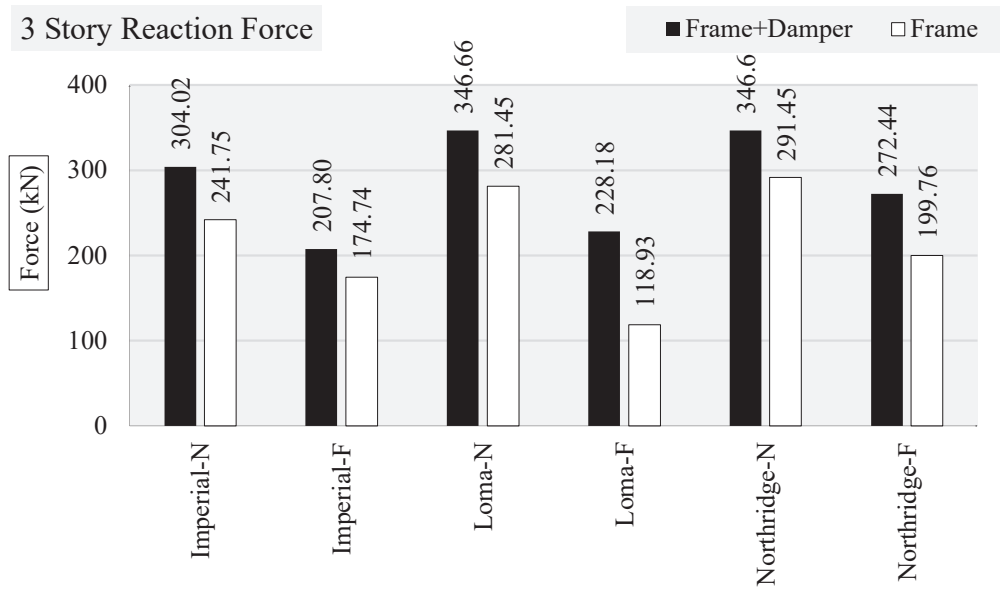
ظرفیت باربری سازه تحت بارهای لرزه‌ای با استفاده از محاسبه بیشینه مقدار برش پایه سازه تحت هر زلزله به دست آمده است. با توجه به نمودار ارائه شده در شکل ۸ اثر میراگر بر میزان افزایش ظرفیت باربری قاب سه طبقه معیار SAC مشهود است. به طور میانگین، ظرفیت باربری قاب در حالت بدون میراگر برابر با ۲۱۸ کیلو نیوتن بوده که میانگین ظرفیت باربری قاب سه طبقه به همراه میراگر با ۲۴ درصد رشد به مقدار ۲۸۴ کیلو نیوتن افزایش یافته است.

در بررسی انرژی‌های سازه، دو مورد ALLIE بیانگر انرژی داخلی سازه (و یا انرژی حاصل از کرنش اجزای سازه) و ALLWK نیز نشان دهنده انرژی جنبشی (و یا کار انجام شده تحت نیروهای وارده خارجی) می‌باشند که در مورد هر سازه از نرم‌افزار استخراج شده و مورد بحث قرار می‌گیرند. همچنین با توجه به شکل ۹-الف مشاهده شد که در سازه ۳ طبقه، میراگر ویسکوز نقش اساسی در مستهلک نمودن نیروهای وارده داشته است. میانگین انرژی جنبشی جذب شده در قاب ۳ طبقه بدون میراگر ۶۲۳

لازم به ذکر است که جذب انرژی نیز در دو بخش انرژی جنبشی کل مدل (ALLWK) و انرژی داخلی پلاستیسیته مدل (ALLIE) می‌باشد. تفاوت این دو معیار در عملکرد سازه در بخش پلاستیسیته می‌باشد. انرژی جنبشی کل بیانگر تمامی انرژی جذب شده در سازه از لحظه آغاز بارگذاری می‌باشد. اما انرژی داخلی بیانگر میزان انرژی جذب شده در سازه از لحظه رخداد اولین کرنش پلاستیک در سازه می‌باشد.

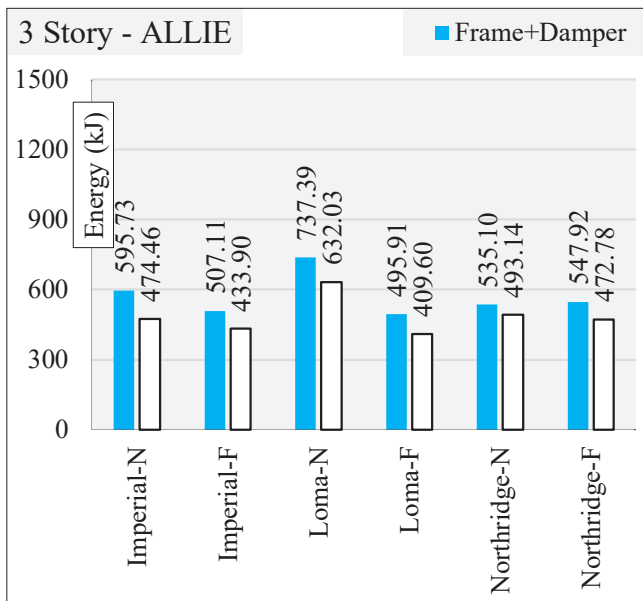
۵-۱- نتایج تحلیل لرزه‌ای قاب ۳ طبقه

در این بخش نتایج حاصل از تحلیل قاب ۳ طبقه که توسط میراگر ویسکوز مقاوم‌سازی شده است، در مقابل زمین‌لرزه‌های گسل دور و نزدیک امپریال‌ولی، لوماپریتا و نورثریج ارائه شده است. همانطور که ذکر شد نتایج ارائه شده شامل سه بخش دریفت، ظرفیت باربری و جذب انرژی در برابر شش زمین‌لرزه مورد بحث می‌باشند که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود. کاهش دریفت طبقات پس از اعمال میراگر ویسکوز بر سازه سه طبقه با مقایسه نتایج ارائه شده در شکل ۷ در دو بخش (الف) و (ب) به وضوح مشهود است. میانگین دریفت سازه در هر حالت در برابر زمین‌لرزه‌ها نیز با یک خط ضخیم نشان داده شده است. همانطور که مشخص است، بیشینه

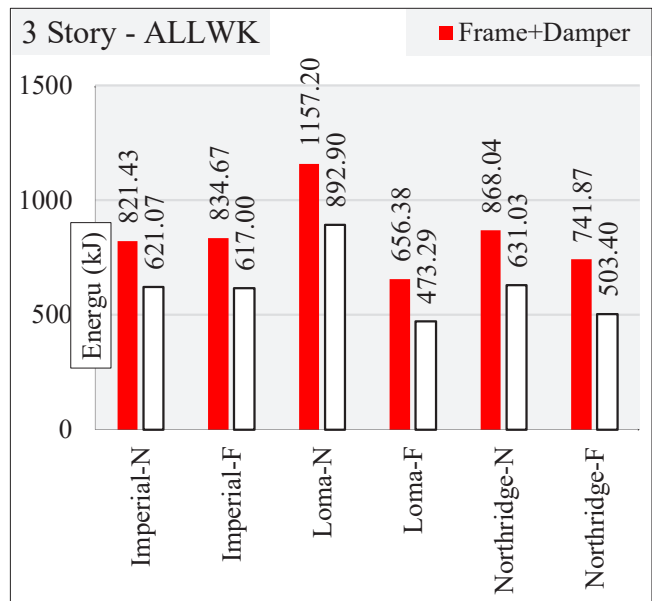


شکل ۸. ظرفیت باربری سازه ۳ طبقه در برابر زلزله ها

Fig.8. The bearing capacity of the 3-story structure subjected to earthquakes



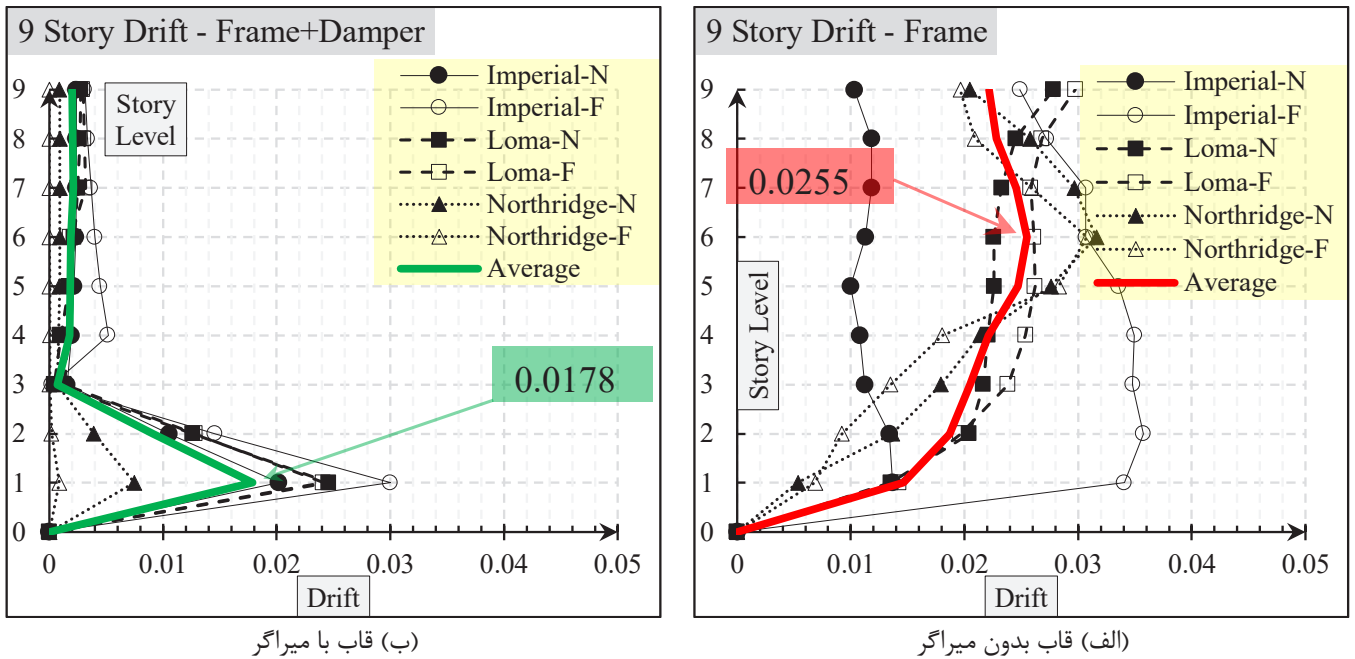
(ب) بیشینه مقادیر انرژی داخلی



(الف) بیشینه مقدار انرژی جنبشی

شکل ۹. بیشینه مقادیر انرژی جنبشی سازه ۳ طبقه

Fig. 9. The maximum values of the kinetic energy of the 3-story structure



شکل ۱۰. دریفت سازه ۹ طبقه در برابر زلزله ها

Fig. 10. The drift of the 9-story structure subjected to earthquakes

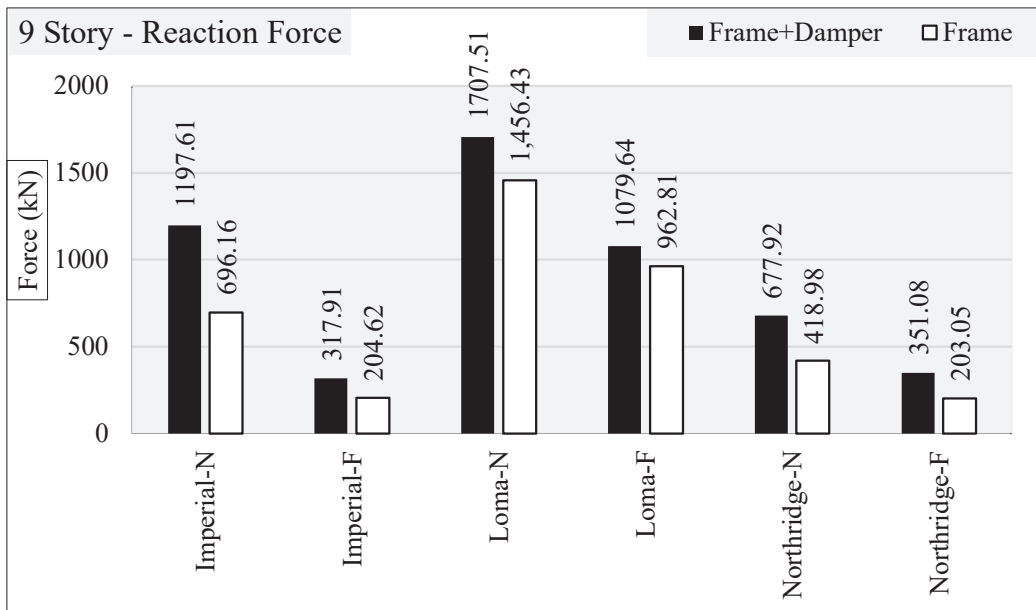
نزول یافته و دریفت سازه تا حد چشم‌گیری کاهش یافته است. با توجه به نمودار ارائه شده در شکل ۱۱ اثر میراگر بر میزان افزایش ظرفیت باربری قاب نه طبقه معیار SAC مشهود است. به طور میانگین، ظرفیت باربری قاب در حالت بدون میراگر برابر با ۶۵۷ کیلونیوتن بوده که میانگین ظرفیت باربری قاب نه طبقه به همراه میراگر با ۳۵ درصد رشد به مقدار ۸۸۸ کیلونیوتن افزایش یافته است.

همچنین با توجه به شکل ۱۲-الف مشاهده شد که در سازه نه طبقه، میراگر ویسکوز نقش اساسی در جذب انرژی‌های وارده داشته است. میانگین انرژی جنبشی جذب شده در قاب ۹ طبقه بدون میراگر ۲۰۵۸ کیلوژول بوده است. میانگین مذکور بعد از اعمال میراگر با ۲۰ درصد رشد همراه بوده و به ۲۴۷۸ کیلوژول صعود نموده است. مطابق با نتایج ارائه شده در بخش (ب) شکل ۱۲، میانگین انرژی داخلی قاب ۹ طبقه معیار SAC در برابر بارگذاری شش زلزله مورد بحث به مقدار ۱۰۶۳ کیلوژول بوده که پس از اعمال میراگر ویسکوز بر این قاب، میانگین انرژی‌های جذب شده با مقدار چشم‌گیر ۶۱ درصد رشد، به ۱۷۱۹ کیلوژول رسیده‌اند.

کیلوژول بوده است. میانگین مذکور بعد از اعمال میراگر با ۳۵ درصد رشد همراه بوده و به ۸۴۶ کیلوژول صعود نموده است. مطابق با نتایج ارائه شده در بخش-ب شکل ۹، میانگین انرژی داخلی قاب ۳ طبقه معیار SAC در برابر بارگذاری شش زلزله مورد بحث به مقدار ۴۸۵ کیلوژول بوده که پس از اعمال میراگر ویسکوز بر این قاب، میانگین انرژی‌های جذب شده با ۱۷ درصد رشد، به ۵۶۹ کیلوژول رسیده‌اند.

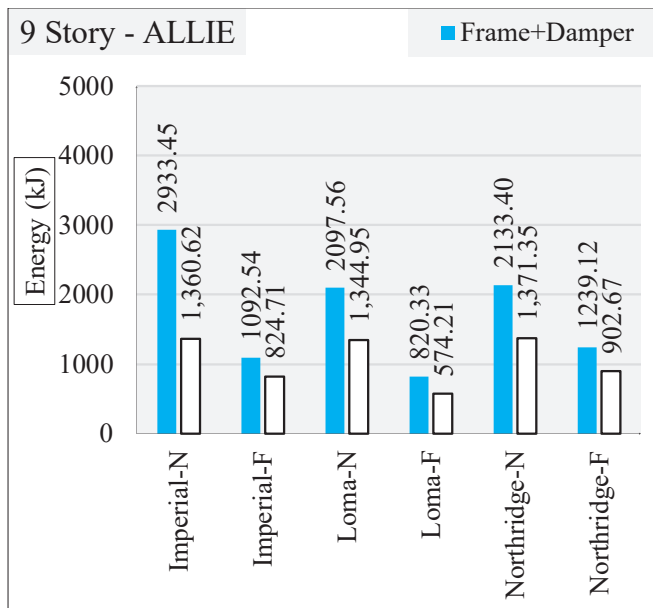
۵-۲- نتایج تحلیل لرزه‌ای قاب ۹ طبقه

در این بخش نتایج حاصل از تحلیل قاب ۹ طبقه که توسط میراگر ویسکوز مقاوم‌سازی شده است، در مقابل زمین‌لرزه‌های گسل دور و نزدیک امپریال ولی، لوماپریتا و نورثریج ارائه شده است. مطابق با روند قبل، نتایج در سه بخش اساسی دریفت، ظرفیت باربری و جذب انرژی بیان می‌گردند. کاهش دریفت طبقات پس از اعمال میراگر ویسکوز بر سازه نه طبقه با مقایسه نتایج ارائه شده در شکل ۱۰ در دو بخش (الف) و (ب) به وضوح مشهود است. بیشینه مقدار میانگین دریفت در حالت قاب بدون میراگر برابر با ۰٫۰۲۵۵ بوده است. اما پس از اعمال میراگر بر سازه، این مقدار به ۰٫۰۱۷۸

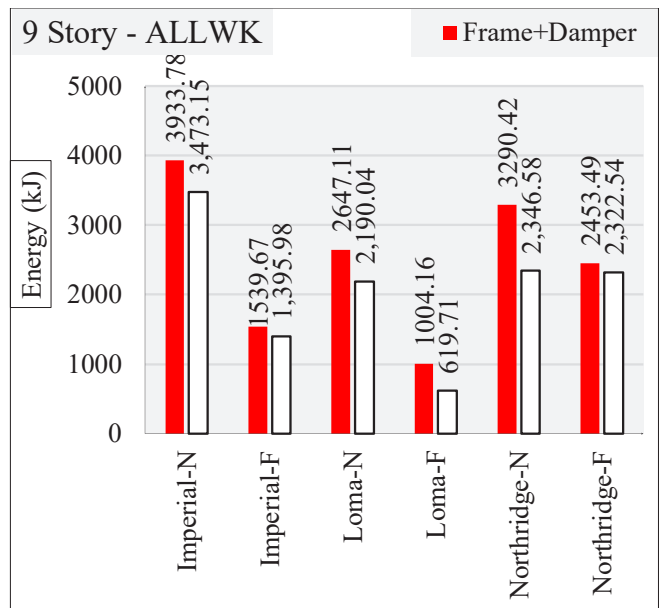


شکل ۱۱. ظرفیت باربری سازه ۹ طبقه در برابر زلزله ها

Fig. 11. The bearing capacity of 9-story structures subjected to earthquakes



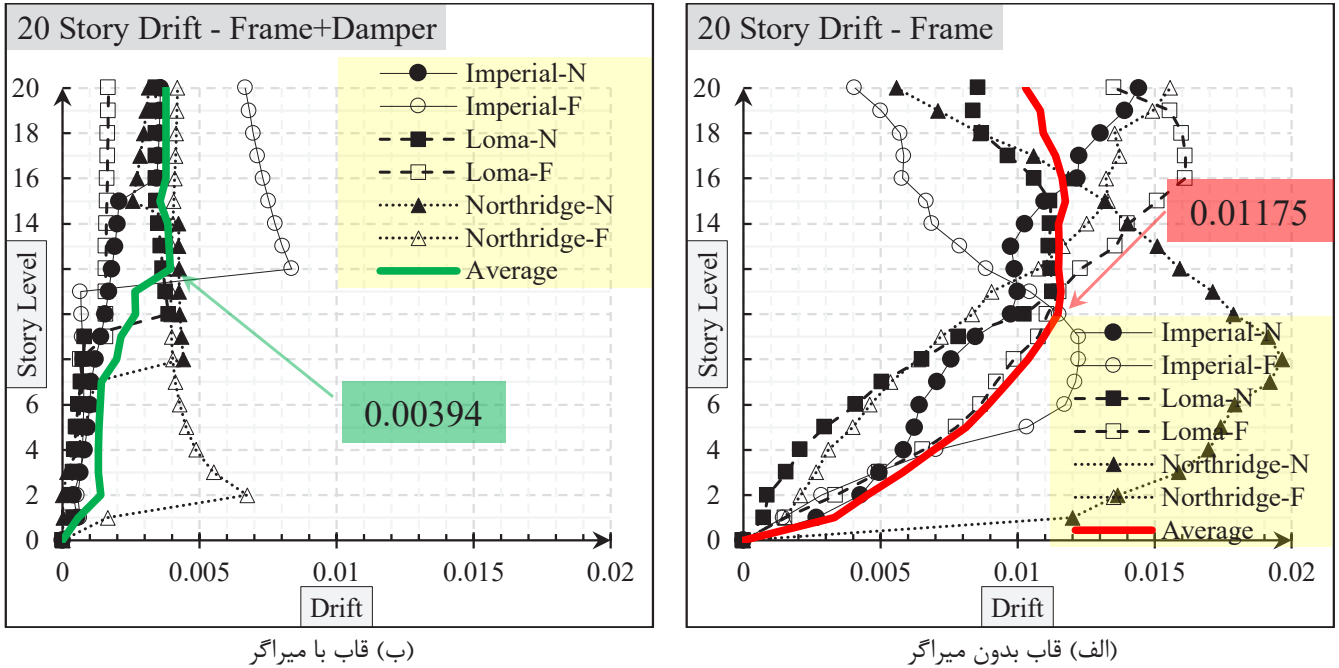
(ب) بیشینه مقادیر انرژی داخلی



(الف) بیشینه مقدار انرژی جنبشی

شکل ۱۲. بیشینه مقادیر انرژی جنبشی سازه ۹ طبقه

Fig. 12. The maximum values of the kinetic energy of the 9-story structure



شکل ۱۳. دریفت سازه ۲۰ طبقه در برابر زلزله ها

Fig. 13. The drift of the 20-story structure subjected to earthquakes

۵-۳- نتایج تحلیل لرزه‌ای قاب ۲۰ طبقه

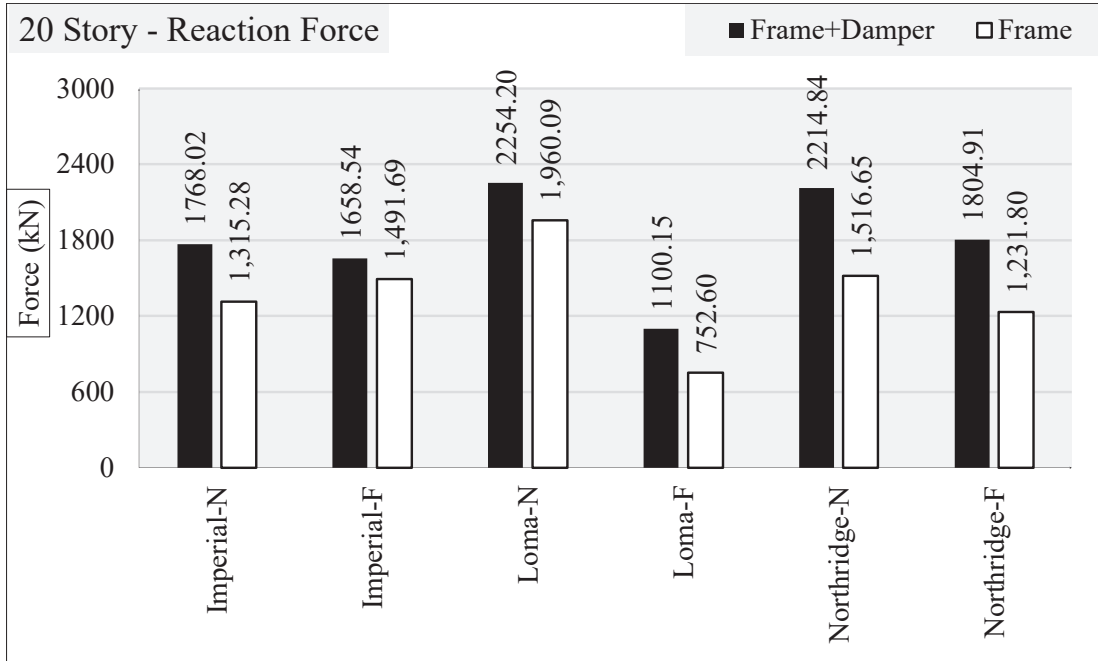
در این بخش نتایج حاصل از تحلیل قاب ۲۰ طبقه که توسط میراگر ویسکوز مقاوم‌سازی شده است، در مقابل زمین‌لرزه‌های گسل دور و نزدیک امپریال ولی، لوماپریتا و نورتریج ارائه شده است. مطابق با روند قبل، نتایج در سه بخش اساسی دریفت، ظرفیت باربری و جذب انرژی بیان می‌گردند. کاهش دریفت طبقات پس از اعمال میراگر ویسکوز بر سازه ۲۰ طبقه با مقایسه نتایج ارائه شده در شکل ۱۳ در دو بخش (الف) و (ب) به وضوح مشهود است. بیشینه مقدار میانگین دریفت در حالت قاب بدون میراگر برابر با ۰٫۰۱۱۷۵ بوده است. اما پس از اعمال میراگر بر سازه، این مقدار به ۰٫۰۰۳۹۴ نزول یافته و دریفت سازه تا حد چشمگیری کاهش یافته است.

با توجه به نمودار ارائه شده در شکل ۱۴ اثر میراگر بر میزان افزایش ظرفیت باربری قاب ۲۰ طبقه معیار SAC مشهود است. به طور میانگین، ظرفیت باربری قاب در حالت بدون میراگر برابر با ۱۳۷۸ کیلو نیوتن بوده که میانگین ظرفیت باربری قاب ۲۰ طبقه به همراه میراگر با ۳۰ درصد رشد به

مقدار ۱۸۰۰ کیلو نیوتن افزایش یافته است.

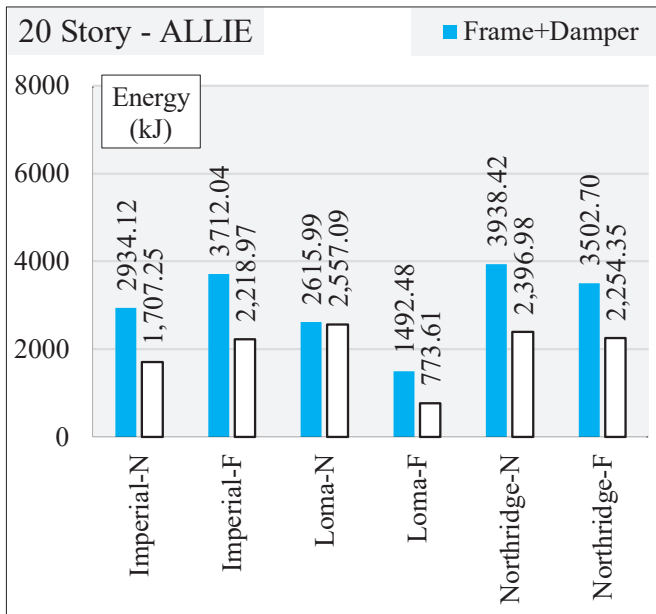
همچنین با توجه به شکل ۱۲-الف مشاهده شد که در سازه ۲۰ طبقه، میراگر ویسکوز نقش اساسی در جذب انرژی‌های وارده داشته است. میانگین انرژی جنبشی جذب شده در قاب ۲۰ طبقه بدون میراگر ۲۹۰۷ کیلوژول بوده است. میانگین مذکور بعد از اعمال میراگر با ۲۹ درصد رشد همراه بوده و به ۳۷۷۹ کیلوژول صعود نموده است. مطابق با نتایج ارائه شده در بخش (ب) شکل ۱۵، میانگین انرژی داخلی قاب ۲۰ طبقه معیار SAC در برابر بارگذاری شش زلزله مورد بحث به مقدار ۱۹۸۴ کیلوژول بوده که پس از اعمال میراگر ویسکوز بر این قاب، میانگین انرژی‌های جذب شده با مقدار چشم‌گیر ۵۲ درصد رشد، به ۳۰۳۲ کیلوژول رسیده‌اند.

در بخش بعد نتایج کلی حاصل از این مطالعه ارائه می‌شود.

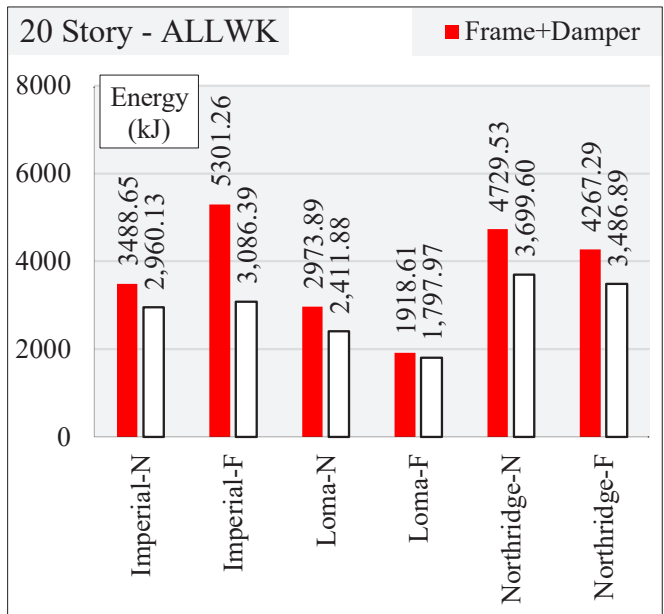


شکل ۱۴. ظرفیت باربری سازه ۹ طبقه در برابر زلزله ها

Fig. 14. The bearing capacity of 20-story structures subjected to earthquakes



(ب) بیشینه مقادیر انرژی داخلی



(الف) بیشینه مقدار انرژی جنبشی

شکل ۱۵. بیشینه مقادیر انرژی جنبشی سازه ۲۰ طبقه

Fig. 15. The maximum values of the kinetic energy of the 20-story structure

۶- نتیجه گیری

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از هم‌فکری اساتید محترم پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله و از همکاری مسئولان و کارمندان پژوهشگاه بابت در اختیار گذاشتن سایت و امکانات مناسب کمال سپاسگزاری را دارند.

منابع

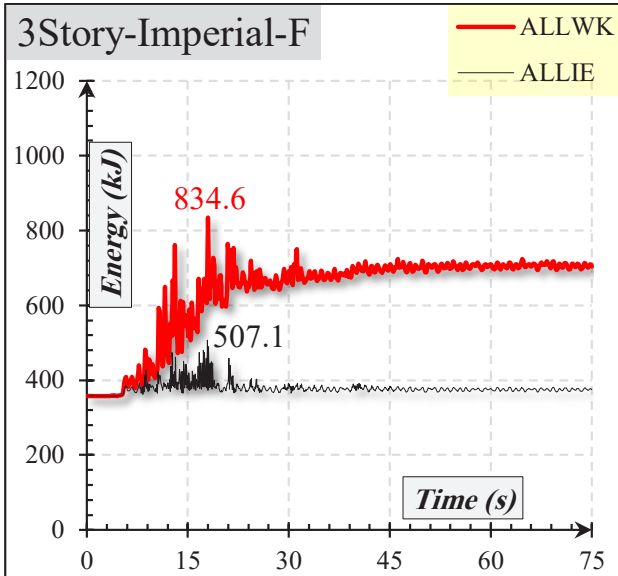
- [1] R. Kamgar, R. Dehghan, R. Rahgozar, Performance of Lead Core Rubber Bearing and Viscous Damper in Steel Structures, *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, 7(3) (2020) 115-133, (in Persian).
- [2] M.V. Waghmare, S.N. Madhekar, V.A. Matsagar, Influence of nonlinear fluid viscous dampers on seismic response of RC elevated storage tanks, *Civil engineering journal*, 6 (2020) 98-118
- [3] R. Ezzati, H.S. Monir, Gh.R. Amiri, Experimental Studies of New Hybrid Inertia Rotational Friction Damper and the Compare of It's Performance with Inertia Rotational Viscous Damper, *Journal of structure & steel*, 20 (2017), 23-30, (in Persian).
- [4] M. Pasandideh, IMPROVEMENTS IN THE ENERGY DISTRIBUTION OF STEEL BUILDINGS USING FLUID VISCOUS DAMPERS, *Sharif Journal of Civil Engineering*, 32(2.1) (2016) 39-48, (in Persian).
- [5] M. Noruzvand, K. Shakeri, Direct displacement based design approach for steel moment frames equipped with nonlinear fluid viscous damper, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(9) (2021) 10-10, (in Persian)
- [6] N.K. Hazaveh, J.G. Chase, G.W. Rodgers, S. Pampanin, R. Kordani, Seismic behavior of a self-centering system with 2-4 viscous damper, *Journal of Earthquake Engineering*, 24(3) (2020) 470-484.
- [7] M. Mansoori, H. Nasseri, A. Moghadam, Experimental

در پژوهش حاضر با استفاده از مدل‌های رفتاری مناسب مصالح، پاسخ‌های سازه کنترل شده با میراگر ویسکوز به دست آمده است. تقریب بسیار مناسب نتایج به دست آمده از مدل عددی با مدل پژوهش چانگ و همکاران توانسته است صحت نتایج مدل عددی حاضر را به اثبات برساند. مطابق نتایج بخش صحت‌سنجی، مقدار تغییر مکان سیستم در مدل ایجاد شده توسط آباکوس، تنها ۴/۲۵ درصد اختلاف با مدل مورد نظر دارد. با استناد به دقت حاصل از مدل حاضر و نادیده گرفتن مقادیر ذکر شده خطاها، مدل مورد نظر برای سازه‌های ۳، ۹ و ۲۰ طبقه توسعه داده شد. طبق نتایج به دست آمده، می‌توان ابراز داشت که رفتار سیستم تا حد زیادی به شکل دامنه شتاب زلزله ورودی وابسته است. به طور کلی می‌توان گفت که در هر سه سازه، برش پایه ایجاد شده تحت زمین‌لرزه‌های گسل نزدیک، بیشتر از برش‌های پایه ایجاد شده تحت زلزله‌های گسل دور بوده‌اند. این پدیده باعث می‌شود تا ظرفیت بیشتری از مصالح سازه در مقابله با بارهای وارده طلب شود و ظرفیت باربری بزرگ‌تری در سازه‌ها در مواجهه با بارهای لرزه‌ای زلزله‌های گسل نزدیک مشاهده گردد. با افزایش تعداد طبقات، تغییر مکان‌ها و دررفت‌های ایجاد شده محسوس‌تر می‌باشند. لذا این تغییر مکان‌ها در سازه ۲۰ طبقه بیشتر از دیگر سازه‌ها بوده است. همچنین دیده شده است که در بسیاری از حالات، تغییر مکان‌های وارد شده به سازه نیز، تحت زلزله‌های گسل نزدیک، بسیار بزرگ‌تر از زلزله‌های گسل دور بوده‌اند. نکته بسیار حائز اهمیت در رفتارشناسی سازه‌ها، که در بسیاری از مطالعات نادیده گرفته می‌شود، شناسایی و پیش‌بینی محل ایجاد خرابی در سازه است. در این مطالعه با توجه به دررفت‌های حاصل از تحلیل‌ها، مشاهده شد که ناحیه خرابی به دست آمده در سازه‌ها تقریباً در طبقات ابتدایی قاب بوده است. لذا موقعیت‌های مذکور در سازه‌های با تعداد طبقات مختلف، مستعد تقویت بوده و می‌بایست به طور دقیق مورد توجه قرار داده شوند. مسئله قابل توجه دیگر میزان کاهش دررفت، افزایش ظرفیت باربری و افزایش انرژی جذب شده در سازه‌ها پس از اعمال میراگر بوده است. اعمال میراگر ویسکوز به طور میانگین در سه قاب ۳، ۹ و ۲۰ طبقه توانست میزان دررفت را تا بیش از ۲ برابر کاهش دهد. همچنین ظرفیت باربری سه قاب پس از استفاده از میراگر به طور میانگین به مقدار ۳۰ درصد افزایش یافته است. انرژی جنبشی کل و انرژی داخلی نیز به طور میانگین پس از اعمال میراگر به ترتیب به مقدار ۲۸ درصد و ۴۳ درصد افزایش یافته است.

- Structural Integrity, 8(4) (2014) 273-290.
- [15] A. Naeem, J. Kim, Seismic performance evaluation of a spring viscous damper cable system, *Engineering Structures*, 176 (2018) 455-467.
- [16] Z. Zhao, K. Dai, E.R. Lalonde, J. Meng, B. Li, Z. Ding, G. Bitsuamlak, Studies on application of scissor-jack braced viscous damper system in wind turbines under seismic and wind loads, *Engineering Structures*, 196 (2019) 109294.
- [17] D. Altieri, E. Tubaldi, E. Patelli, A. Dall'Asta, Assessment of optimal design methods of viscous dampers, *Procedia engineering*, 199 (2017) 1152-1157.
- [18] Y. Zhou, L. Xing, Seismic performance evaluation of a viscous damper-outrigger system based on response spectrum analysis, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 142 (2021) 106553.
- [19] V.E. Logotheti, T.C. Kafetzi, G.A. Papagiannopoulos, D.L. Karabalis, On the use of interstorey velocity for the seismic retrofit of steel frames with viscous dampers, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 129 (2020) 105312.
- [20] S. Chen, D. Chen, S. Fan, L. Huo, G. Song, Monitoring of viscous damper fluid viscosity using piezoceramic transducers—a feasibility study, *Smart Materials and Structures*, 30(2) (2021) 025034.
- [21] M. Fahiminia, A. Shishegaran, Evaluation of a developed bypass viscous damper performance, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 14(3) (2020) 773-791.
- [22] M. Vaezi, A. Pourzangbar, M. Fadavi, S.M. Mousavi, P. Sabbahfar, M. Brocchini, Effects of stiffness and configuration of brace-viscous damper systems on the response mitigation of offshore jacket platforms, *Applied and Analytical Study of Asymmetric Structures with Different Viscous Damper Distribution*, *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 45(2) (2011) 233-245, (in Persian).
- [8] F. Kondori, G. Nouri, P. Homami, Seismic Reliability of Steel Frames Systems Equipped with Viscose Dampers, *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, 7(4) (2020) 113-127, (in Persian).
- [9] K. Kariniotakis, T.L. Karavasilis, Limits for the interstorey drift sensitivity coefficient θ of steel MRFs with viscous dampers designed according to Eurocode 8, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 117 (2019) 203-215.
- [10] R. Milanchian, M. Hosseini, Study of vertical seismic isolation technique with nonlinear viscous dampers for lateral response reduction, *Journal of Building Engineering*, 23 (2019) 144-154.
- [11] C. Maraveas, K.D. Tsavdaridis, Assessment and retrofitting of an existing steel structure subjected to wind-induced failure analysis, *Journal of Building Engineering*, 23 (2019) 53-67.
- [12] M. Song, Z. Jiang, W. Yuan, Numerical and analytical analysis of a monopile-supported offshore wind turbine under ship impacts, *Renewable Energy*, 167 (2021) 457-472.
- [13] H. Dadkhah, M. Mohebbi, Performance assessment of an earthquake-based optimally designed fluid viscous damper under blast loading, *Advances in Structural Engineering*, 22(14) (2019) 3011-3025.
- [14] P.D. Mondal, A. Ghosh, S. Chakraborty, Fluid viscous damper in mitigation of structural vibration effect due to underground blast, *International Journal of Materials and*

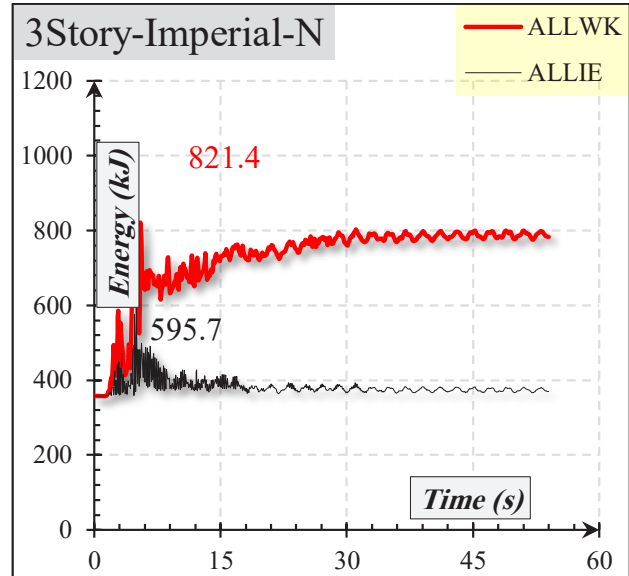
- [29] L. Chen, S. Nagarajaiah, L. Sun, A unified analysis of negative stiffness dampers and inerter-based absorbers for multimode cable vibration control, *Journal of Sound and Vibration*, 494 (2021) 115814.
- [30] B. Wei, Z. Hu, X. He, L. Jiang, System-based probabilistic evaluation of longitudinal seismic control for a cable-stayed bridge with three super-tall towers, *Engineering structures*, 229 (2021) 111586.
- [31] Y. Nurchasanah, M.L. Harnadi, Assessment of Viscous Damper Placement as Passive Energy Dissipation on High-rise Building, a Numerical Study, in: *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, (2021), pp. 012096.
- [32] L. Lu, J. Xu, Y. Zhou, W. Lu, B.F. Spencer Jr, Viscous inertial mass damper (VIMD) for seismic responses control of the coupled adjacent buildings, *Engineering Structures*, 233 (2021) 111876.
- [33] M. Memari, H. Mahmoud, Multi-resolution analysis of the SAC steel frames with RBS connections under fire, *Fire Safety Journal*, 98 (2018) 90-108.
- [34] S.J. Venture, State of the art report on systems performance of steel moment frames subject to earthquake ground shaking, FEMA 355C, (2000).
- [35] S. Cheng, N. Darivandi, F. Ghrib, The design of an optimal viscous damper for a bridge stay cable using energy-based approach, *Journal of Sound and Vibration*, 329(22) (2010) 4689-4704.
- Ocean Research, 107 (2021) 102482.
- [23] X. Hu, R. Zhang, X. Ren, C. Pan, X. Zhang, H. Li, Simplified design method for structure with viscous damper based on the specified damping distribution pattern, *Journal of Earthquake Engineering*, (2020) 1-21.
- [24] J. Whittle, M. Williams, T. Karavasilis, A. Blakeborough, A comparison of viscous damper placement methods for improving seismic building design, *Journal of Earthquake Engineering*, 16(4) (2012) 540-560.
- [25] K.-C. Chang, Y.-Y. Lin, C.-Y. Chen, Shaking table study on displacement-based design for seismic retrofit of existing buildings using nonlinear viscous dampers, *Journal of structural engineering*, 134(4) (2008) 671-681.
- [26] D. De Domenico, G. Ricciardi, I. Takewaki, Design strategies of viscous dampers for seismic protection of building structures: a review, *Soil dynamics and earthquake engineering*, 118 (2019) 144-165.
- [27] A.M. Tabar, Linearization of seismic response of structures equipped with nonlinear viscous dampers using perturbation technique, *Engineering Structures*, 184 (2019) 459-468.
- [28] A. Abbaszadeh Shaha-naghi, G. Ghodrati Amiri, M. Raissi Dehkordi, M. Eghbali, Seismic evaluation of low and \ mid-rise steel special moment frames equipped with viscous dampers based on FEMA-P695 collapse prevention criteria, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(6) (2021) 17-17.

پیوست ۱. نمودارهای تاریخچه زمانی جذب انرژی سازه ۳ طبقه مقاوم‌سازی شده توسط میراگر ویسکوز در برابر زلزله‌های مختلف



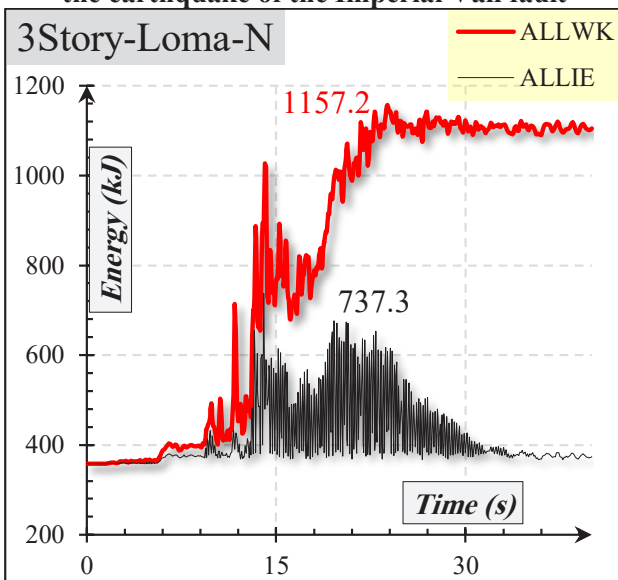
شکل پ-۲. انرژی قاب ۳ طبقه در برابر زلزله گسل دور امپریال ولی

Figure P-2. Energy of the 3-story frame against the earthquake of the Imperial Vali fault



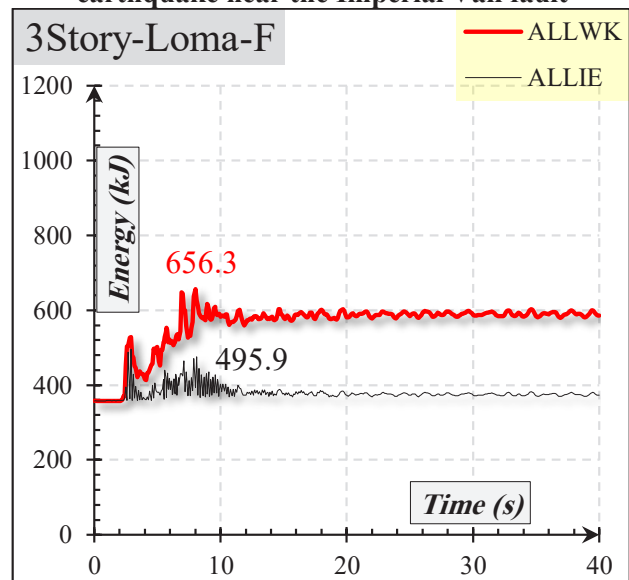
شکل پ-۱. انرژی قاب ۳ طبقه در برابر زلزله گسل نزدیک امپریال ولی

Figure P-1. Energy of a 3-story frame against an earthquake near the Imperial Vali fault



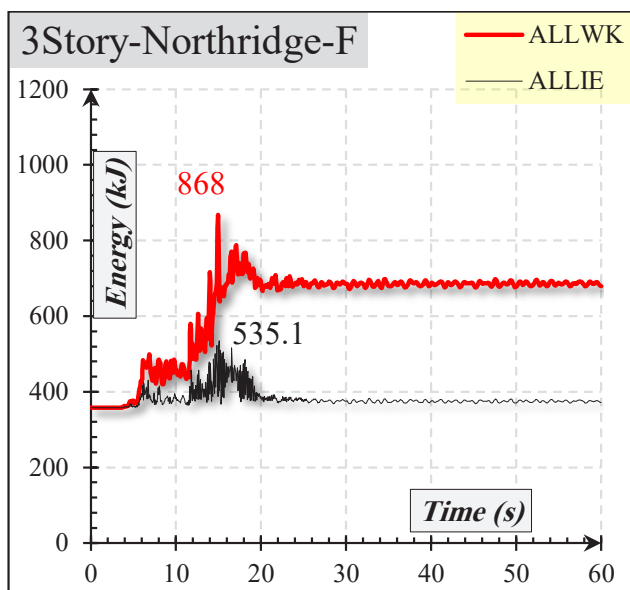
شکل پ-۴. انرژی قاب ۳ طبقه در برابر زلزله گسل دور لوماپریتا

Figure P-4. Energy of the 3-story frame against the Lomaprita fault earthquake

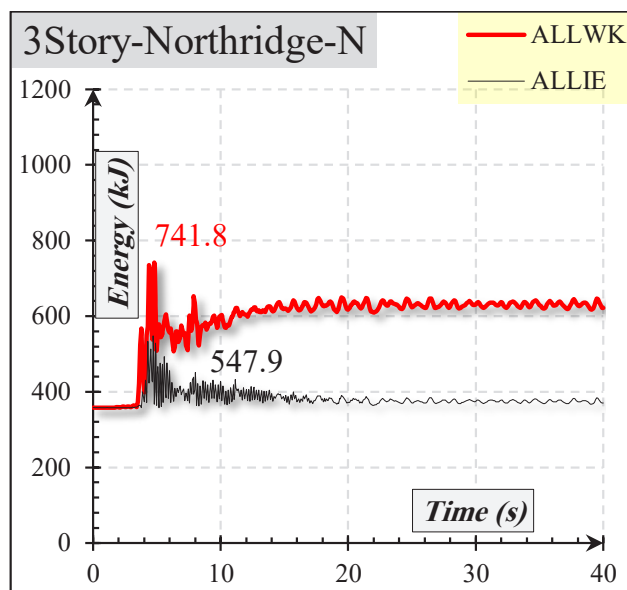


شکل پ-۳. انرژی قاب ۳ طبقه در برابر زلزله گسل نزدیک لوماپریتا

Figure P-3. Energy of a 3-story frame against an earthquake near the Lomaprita fault

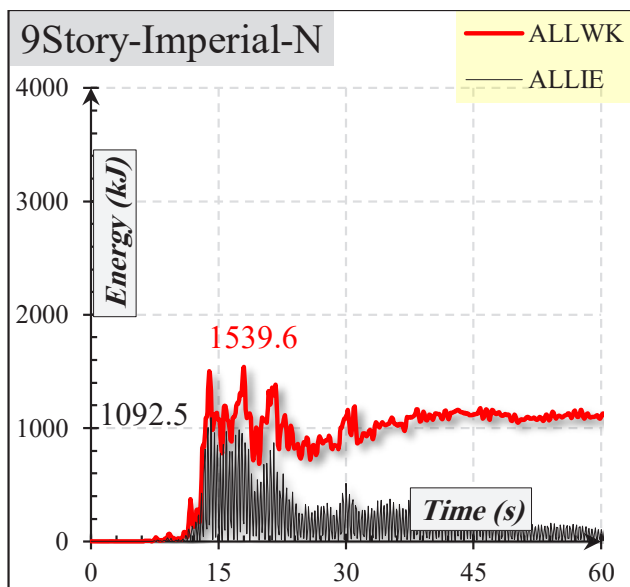


شکل پ-۶. انرژی قاب ۳ طبقه در برابر زلزله گسل دور نورتریج
Figure P-6. 3-story frame energy against Northridge fault earthquake

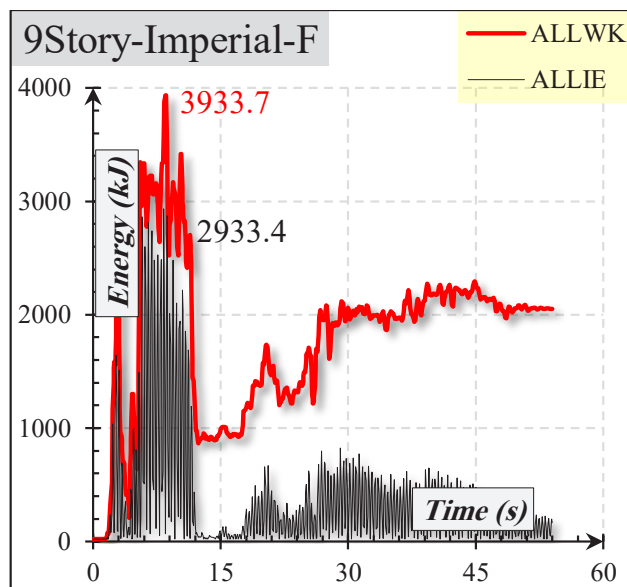


شکل پ-۵. انرژی قاب ۳ طبقه در برابر زلزله گسل نزدیک نورتریج
Figure P-5. Energy of a 3-story frame against an earthquake near the Northridge fault

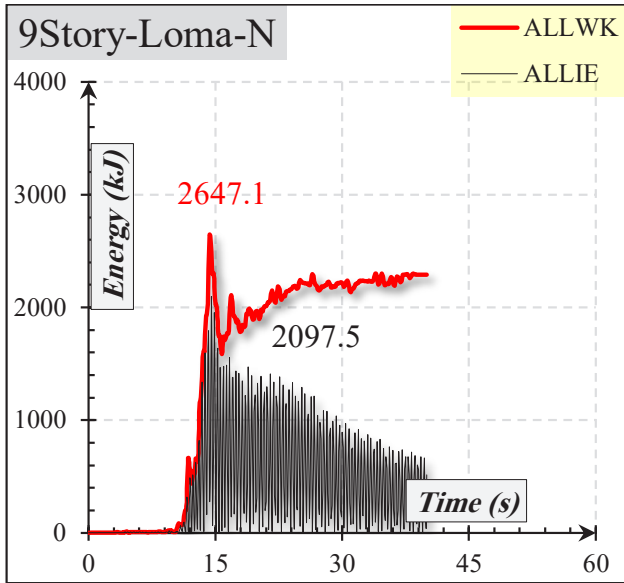
پیوست ۲. نمودارهای تاریخچه زمانی جذب انرژی سازه ۹ طبقه مقاوم‌سازی شده توسط میراگر ویسکوز در برابر زلزله‌های مختلف



شکل پ-۸. انرژی قاب ۹ طبقه در برابر زلزله گسل دور امپریال ولی
Figure P-8. Energy of the 9-story frame subjected to a far-filed earthquake (Imperial Vali)

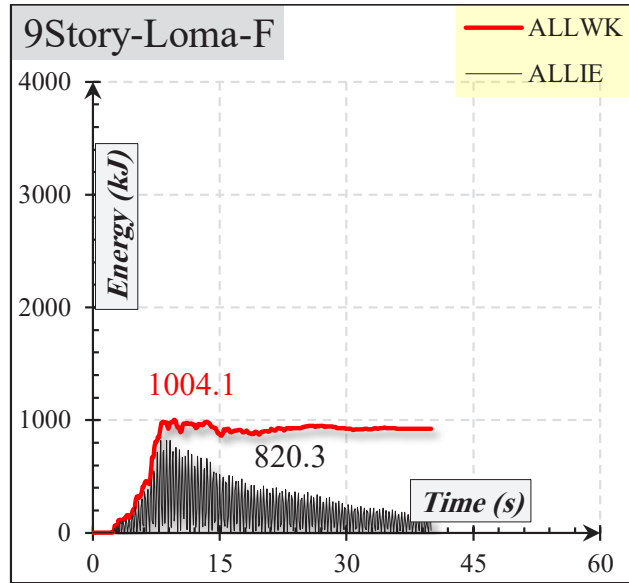


شکل پ-۷. انرژی قاب ۹ طبقه در برابر زلزله گسل نزدیک امپریال ولی
Figure P-7. Energy of a 9-story frame subjected to a near-filed earthquake (Imperial Vali)



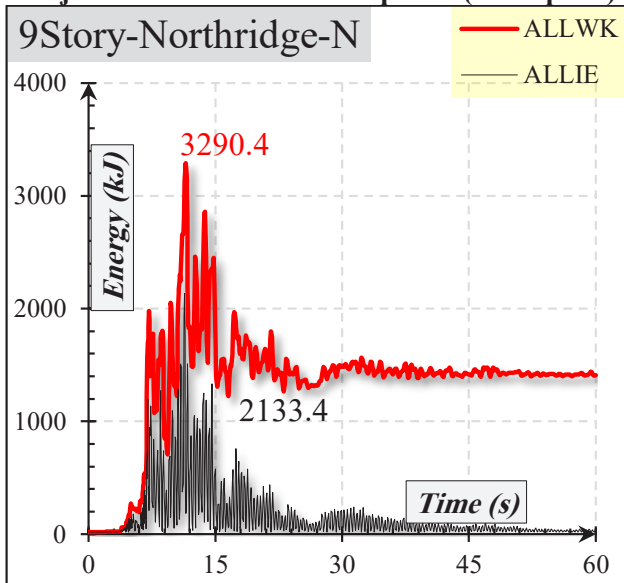
شکل پ-۱۰. انرژی قاب ۹ طبقه در برابر زلزله گسل دور لوماپریتا

Figure P-10. Energy of the 9-story frame subjected to a far-field earthquake (Lomaprita)



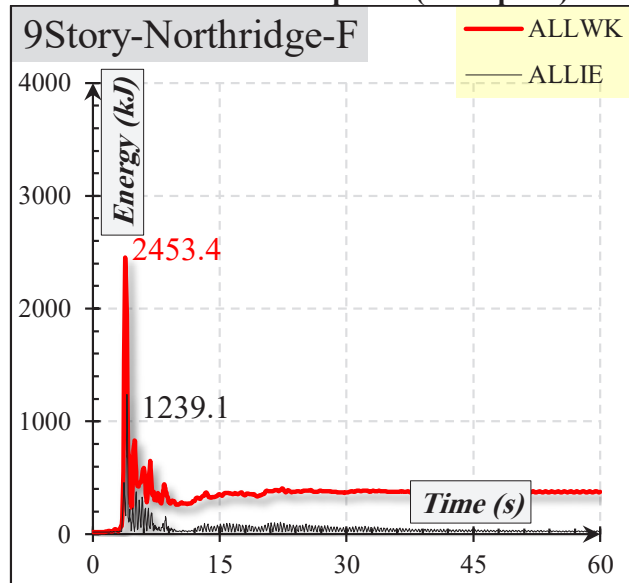
شکل پ-۹. انرژی قاب ۹ طبقه در برابر زلزله گسل نزدیک لوماپریتا

Figure P-9. Energy of the 9-story frame subjected to a near-field earthquake (Lomaprita)



شکل پ-۱۲. انرژی قاب ۹ طبقه در برابر زلزله گسل دور نورتریج

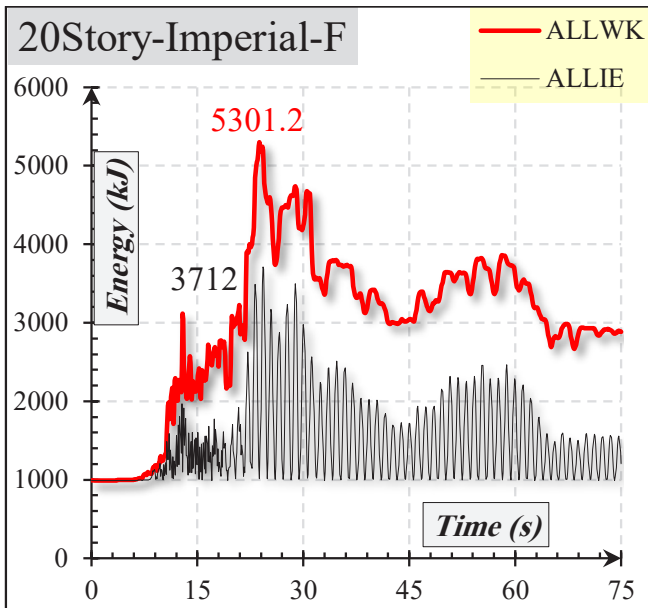
Figure P-12. Energy of the 9-story frame subjected to a far-field earthquake (Northridge)



شکل پ-۱۱. انرژی قاب ۹ طبقه در برابر زلزله گسل نزدیک نورتریج

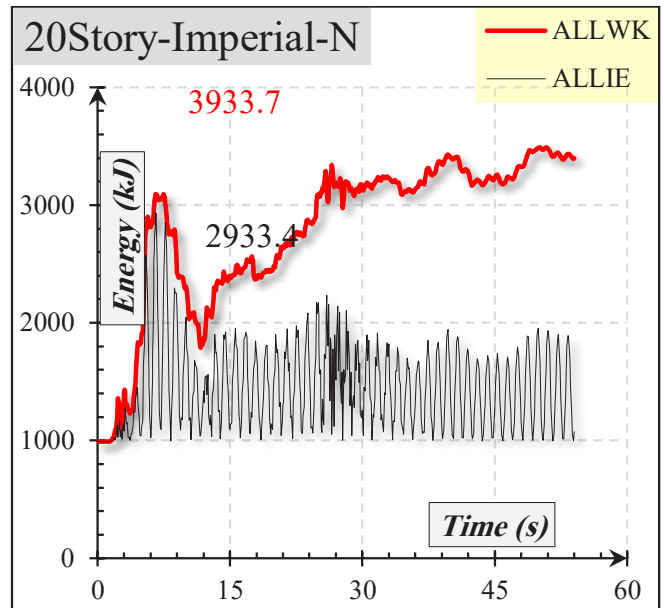
Figure P-11. Energy of a 9-story frame subjected to a near-field earthquake (Northridge)

پیوست ۳. نمودارهای تاریخچه زمانی جذب انرژی ۲۰ طبقه مقاوم‌سازی شده توسط میراگر ویسکوز در برابر زلزله‌های مختلف



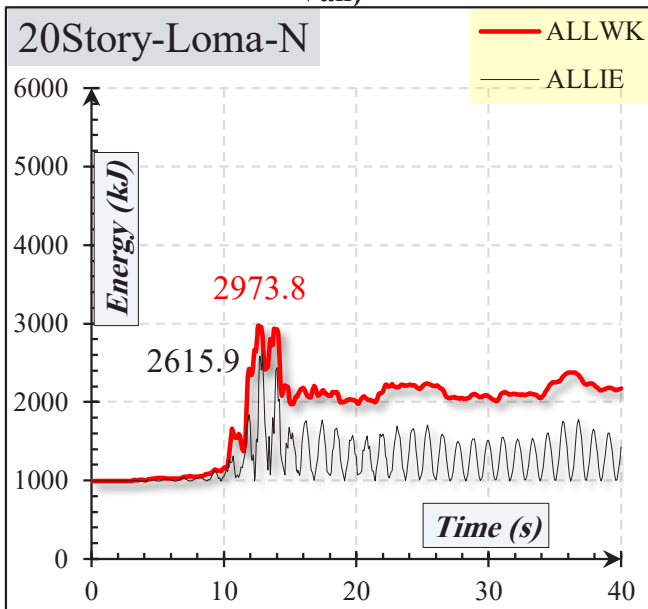
شکل پ-۱۴. انرژی قاب ۲۰ طبقه در برابر زلزله گسل دور امپریال ولی

Figure P-14. Energy of a 20-story frame subjected to the far-field earthquake (Imperial Vali)



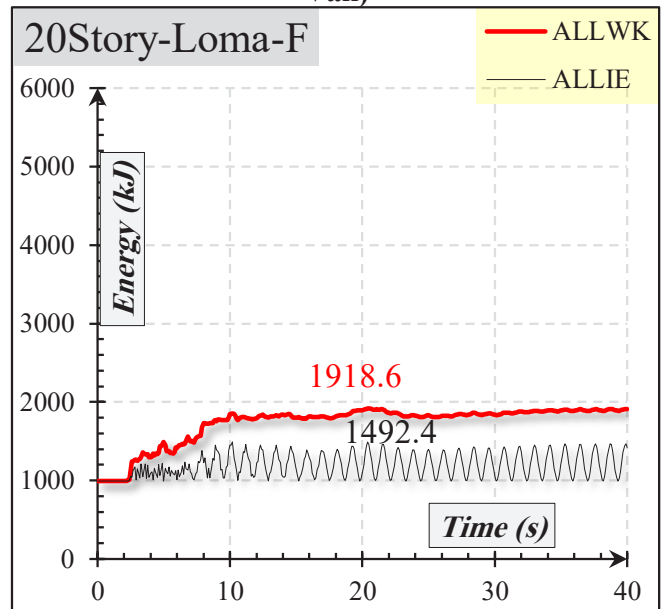
شکل پ-۱۳. انرژی قاب ۲۰ طبقه در برابر زلزله گسل نزدیک امپریال ولی

Figure P-13. Energy of a 20-story frame subjected to near-field earthquake (Imperial Vali)



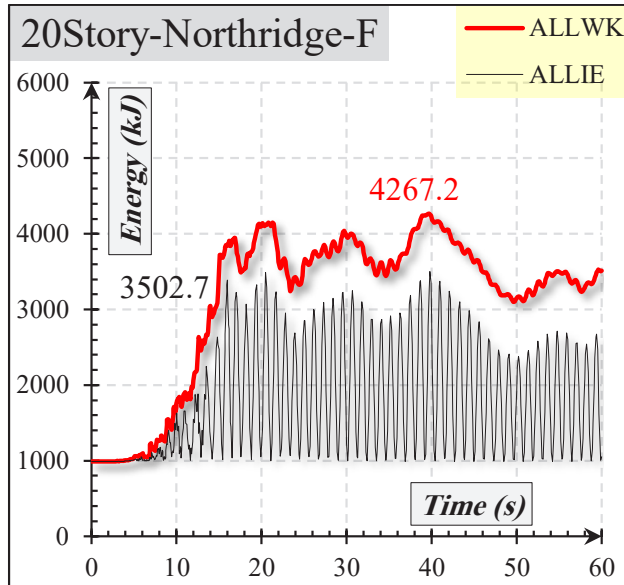
شکل پ-۱۶. انرژی قاب ۲۰ طبقه در برابر زلزله گسل دور لوماپریتا

Figure P-16. Energy of a 20-story frame subjected to a far-field earthquake (Lomaprita)



شکل پ-۱۵. انرژی قاب ۲۰ طبقه در برابر زلزله گسل نزدیک لوماپریتا

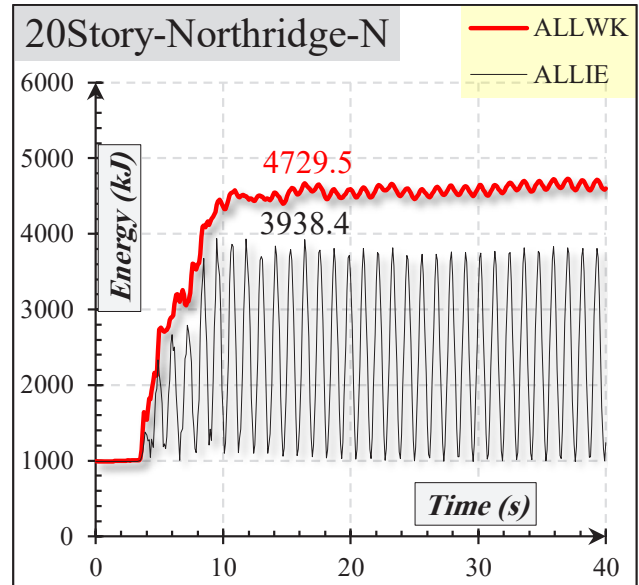
Figure P-15. Energy of a 20-story frame subjected to a near-field earthquake (Lomaprita)



شکل پ-۱۸. انرژی قاب ۲۰ طبقه در برابر زلزله گسل دور

نورتریج

Figure P-18. Energy of a 20-story frame subjected to a far-field earthquake (Northridge)



شکل پ-۱۷. انرژی قاب ۲۰ طبقه در برابر زلزله گسل نزدیک

نورتریج

Figure P-17. Energy of a 20-story frame subjected to a near-field earthquake (Northridge)

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Gheshlaghi, M. Fahimi Farzam, F. Nateghi-A, Evaluation of the seismic behavior of SAC steel frame buildings retrofitted with viscous dampers affected by far and near fault earthquakes, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(5) (2022) 1983-2004.

DOI: 10.22060/ceej.2021.20042.7324

