

Comparison of Conventional and Energy-Based Methods in Fragility Assessment of Steel Moment-Resisting Frames

Hossein Dehrouye, Ali Delnavaz*, Reza Farrokhzad, Mehran Seyed Razaghi

Department of Civil Engineering, Qa. c., Islamic Azad University, Qazvin, Iran.

ABSTRACT: Methods for generating fragility curves in buildings are generally based on the maximum inter-story drift. Moradi and Abdolmohammadi (2020) proposed an energy-based method. They stated that by considering the plastic strain energy in high-rise structures as an engineering demand parameter, fragility can also be derived. The aim of this study is to compare the maximum inter-story drift-based method and the energy-based method in 4-, 8-, and 12-story steel buildings. For this purpose, after initial design, the structures were modeled nonlinearly in PERFORM-3D software and subjected to 20 near-fault ground motion records. Incremental Dynamic Analysis (IDA) curves were extracted using both the energy and maximum drift methods and compared with each other. Finally, by calculating the energy limit states at two performance levels—Life Safety (LS) and Collapse Prevention (CP)—the fragility curves at these two levels, along with the elastic level, were computed and compared with the maximum drift-based method. The results showed that in low- and mid-rise structures, the maximum drift-based method provides a more conservative fragility estimation compared to the energy-based method. For example, the probability of exceeding 50% of the LS level in the energy-based method for 4-, 8-, and 12-story buildings occurs at peak accelerations of 1g, 1.25g, and 1.45g, respectively, while in the conventional method this occurs at peak accelerations of 0.65g, 0.9g, and 1g, respectively.

Review History:

Received: Oct. 31, 2025

Revised: May, 17, 2026

Accepted: Jun. 21, 2026

Available Online: Jun. 26, 2026

Keywords:

Fragility

Energy-Based Method

Drift-Based Method

Incremental Dynamic Analysis
(IDA) Curves

Steel Moment-Resisting Frame

1- Introduction

Earthquakes are among the most destructive natural disasters, potentially causing severe damage to the physical environment, disruption of economic and social activities, and resulting in thousands of fatalities, injuries, and displaced individuals. Although such high-impact events are relatively rare compared to other natural hazards and are characterized by low occurrence probabilities, their consequences are catastrophic and can affect large regions for extended periods of time [1-3].

Moradi and Abdolmohammadi (2020) stated that, since an earthquake is defined as the release of energy within the Earth, a structure maintains its stability during seismic events when the total internal energy in the structure is in equilibrium with the input energy from the earthquake. Therefore, plastic strain energy can be employed as an Engineering Demand Parameter (EDP) in fragility assessment of structures [4]. They were the first to develop Incremental Dynamic Analysis (IDA) curves based on the dissipated strain energy rather than maximum drift. Subsequently, they defined the Collapse Prevention (CP) and Life Safety (LS) performance levels in terms of plastic strain energy and developed corresponding

fragility curves. In their study, energy-based fragility was defined as the probability that the plastic strain energy demand in the structure exceeds the energy-based performance levels under varying seismic intensities [5, 6].

Based on previous studies, it has been demonstrated that the energy-based approach proposed by Moradi and Abdolmohammadi can serve as an effective method for assessing the seismic fragility of structures. However, their investigations were primarily conducted on high-rise steel and reinforced concrete buildings. In this study, the applicability of the energy-based method for evaluating the fragility of low- and mid-rise steel structures is examined and compared with the conventional (drift-based) approach. For this purpose, three buildings with 4, 8, and 12 stories were designed and modeled nonlinearly. First, the dynamic behavior and performance of the structures were analyzed. Subsequently, Incremental Dynamic Analysis (IDA) curves were developed based on both maximum drift and dissipated strain energy, and the results were compared. Finally, fragility curves derived from the two approaches—energy-based and drift-based—were computed and compared. The following sections present the numerical modeling and research methodology.

*Corresponding author's email: A.delnavaz@iau.ac.ir

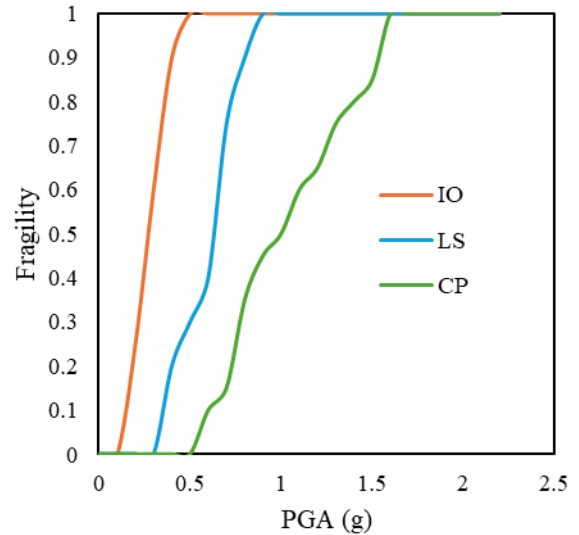
2- Structural Model Description

In this study, 4-, 8-, and 12-story regular-plan steel structures were selected for analysis. Each bay length was considered to be 6 meters, and the story height was set to 3 meters. The structures were designed for a high-seismicity region and soil type III, employing a special moment-resisting frame system with residential occupancy, in accordance with the Iranian Seismic Code Standard No. 2800 (4th edition). The steel material used was ST37 with a yield strength of 2400 kg/cm², a Young's modulus of 2,000,000 kg/cm², and a unit weight of 7.85 ton/m³. The floor system consisted of steel decking with a dead load of 560 kg/m² and a live load of 200 kg/m². Floor loads were distributed in a checkerboard pattern. For exterior spans, wall loads of 700 kg/m and parapet loads of 300 kg/m were considered. The structures were modeled and loaded in ETABS and designed based on strength adequacy and maximum allowable drift criteria.

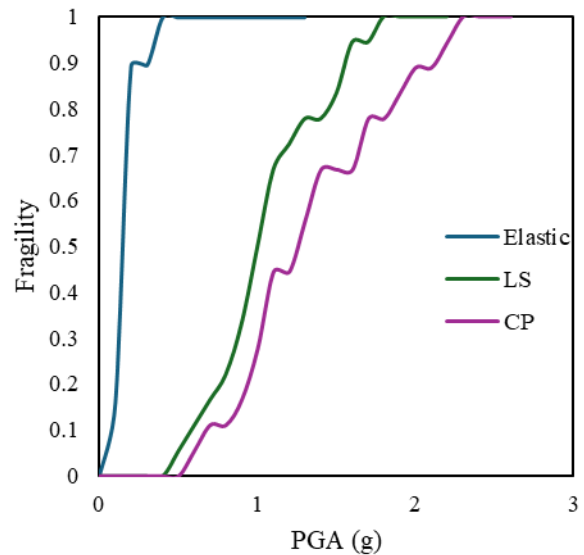
3- Fragility

Figure 1 presents the fragility curves of the 4-story structure obtained using both the conventional and energy-based methods. As previously discussed, the energy-based approach enables the estimation of fragility at the elastic, Life Safety (LS), and Collapse Prevention (CP) levels, whereas the conventional method can be used to derive fragility for different damage states or performance levels such as Immediate Occupancy (IO), Life Safety (LS), and Collapse Prevention (CP). In this study, the conventional method was applied to evaluate fragility at three performance levels: IO, LS, and CP. The results for the 4-story structure indicate that, as expected, the elastic state occurs at lower peak ground accelerations (PGAs) compared with the IO level, and its probability of exceedance reaches unity within a narrower acceleration range. Specifically, there is a 50% probability of exceeding the elastic level at a PGA of 0.15g, while the same probability for the IO level occurs at 0.25g. The 50% exceedance probability for the LS level in the energy-based method occurs at a PGA of 1.0g, compared with 0.65g in the conventional method. Similarly, the 50% probability of exceeding the CP level for the 4-story structure is observed at 1.2g in the energy-based method and at 1.0g in the conventional approach.

For 8 Stories structure, the 50% probability of exceeding the elastic level occurs at a peak ground acceleration (PGA) of 0.25g, indicating that the 8-story structure remains elastic under higher acceleration levels compared with the 4-story building. The 50% exceedance probability for the IO level occurs at 0.45g. For the LS performance level, the corresponding PGAs are 1.25g and 0.9g for the energy-based and conventional methods, respectively. Similarly, the 50% probability of exceeding the CP level occurs at a PGA of 1.7g for the energy-based method and 1.5g for the conventional approach.



a)



b)

Fig. 1. Fragility curves of the 4-story structure using (a) conventional method and (b) energy-based method.

References

- [1] M. Moradi, H. Tavakoli, Energy Balance on Steel Structure with Pall Damper under Blast Loading, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(10) (2020) 2415-2434.
- [2] M. Moradi, H. Tavakoli, Evaluation of the seismic sensitivity of steel frame with converging bracing to random variables, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(6) (2021) 2371-2388.

- [3] H. TAVAKOLI, M. MORADI, Evaluation of the response sensitivity of a cable bridge with a seismic isolation to material variation under a near fault earthquake, (2020).
- [4] M. Moradi, M. Abdolmohammadi, Seismic fragility evaluation of a diagrid structure based on energy method, *Journal of Constructional Steel Research*, 174 (2020) 106311.
- [5] M.J. Goodarzi, M. Moradi, P. Jalali, M. Abdolmohammadi, S.M. Hasheminejad, Fragility assessment of an outrigger structure system based on energy method, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 32(11-12) (2023) e2017.
- [6] F. Hosseinlou, M. Moradi, M. Sadrianzade, P. Jalali, An energy-based method for calculating the fragility curve of bridges: a case study, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, (2025) 1-26.



مقایسه روش متداول و روش انرژی در ارزیابی شکنندگی قاب خمشی فولادی

حسین دهرویه، علی دلنواز^{*}، رضا فرخزاد، مهران سید رزاقی

گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۹
بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۲۷
پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۳۱
ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۴/۰۵

کلمات کلیدی:

شکنندگی
روش انرژی
روش دررفت
منحنی های IDA
قاب خمشی فولادی

خلاصه: روش های تولید منحنی های شکنندگی در ساختمان ها عموماً مبنی بر ماکزیمم دررفت طبقات استوار است. مرادی و عبدالمحممدی در سال ۲۰۲۰ روشی مبتنی بر انرژی را ارائه دادند. آنها بیان کردند با در نظر گرفتن انرژی کرنشی پلاستیک در سازه های بلند مرتبه به عنوان پارامتر تقاضای مهندسی نیز می توان شکنندگی را استخراج کرد. هدف از این تحقیق مقایسه روش مبتنی بر ماکزیمم دررفت طبقات و روش مبتنی بر انرژی در سازه ختمان های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه فولادی است. برای این منظور سازه ها پس از طراحی اولیه به صورت غیر خطی در نرم افزار 3D-PERFORM مدل سازی شده و در معرض ۲۰ رکورد حوزه نزدیک قرار گرفتند. منحنی های دینامیکی افزایشده (IDA) با دو روش انرژی و ماکزیمم دررفت استخراج و با یکدیگر مقایسه شده است. در نهایت با محاسبه حالات حدی انرژی در دو سطح ایمنی جانی و آستانه فروریزش، منحنی های شکنندگی در این دو سطح به همراه سطح الاستیک محاسبه و با روش مبتنی بر ماکزیمم دررفت مقایسه شده است. نتایج نشان داده است در سازه های کوتاه و میان مرتبه روش مبتنی بر ماکزیمم دررفت شکنندگی را به صورت محافظه کارانه تر نسبت به روش انرژی ارائه می دهد. به عنوان مثال احتمال فراگذشت ۵۰٪ از سطح LS در روش انرژی برای سازه های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه به ترتیب در بیشینه شتاب ۰.۱ g، ۱/۲۵ g و ۱/۴۵ g در روش متداول به ترتیب در بیشینه شتاب ۰.۱۶۵ g، ۰.۹ g و ۱ g رخ داده است.

۱- مقدمه

زلزله یکی از مخرب ترین بلایای طبیعی است که بالقوه باعث تخریب محیط فیزیکی، قطع فعالیت های اقتصادی و اجتماعی و هزاران کشته، مجروح و بی خانمان می شود. اگرچه این رویدادهای با پتانسیل تخریب بالا در مقایسه با سایر بلایای طبیعی بسیار نادر هستند و با احتمال وقوع کم تعریف می شوند، اما پیامدهای آنها فاجعه بار است و می تواند حتی مناطق وسیعی را برای مدت طولانی تحت تأثیر قرار دهد [۱-۴].

آسیب پذیری فیزیکی ساختمان ها یکی از پارامترهای کلیدی مورد نیاز برای ارزیابی خطر زلزله و مدیریت مناسب بلایا در کشورهای زلزله خیز است [۵]. ارزیابی آسیب پذیری ساختمان های موجود در شدت های مختلف بار لرزه ای می تواند بر پیشبینی رفتار لرزه ای سازه ها در زلزله هایی که در آینده اتفاق می افتد تأثیر گذار باشد [۶، ۷]. یکی از روش های ارزیابی آسیب پذیری در سازه های موجود استفاده از منحنی های شکنندگی است. منحنی

های شکنندگی احتمال فراگذشت سازه را از حالات حدی در شدت های مختلف بار لرزه ای تعریف می نماید [۸]. حالات حدی می تواند شاخص آسیب یا سطوح عملکرد باشد [۹]. منحنی های شکنندگی می تواند به صورت تجربی و بر اساس رخداد های موجود با به صورت مدل ساختاری و تجزیه و تحلیل عددی و یا به صورت اکتشافی و بر مبنای نظر متخصص تولید شود [۱۰].

روش های متنوعی برای استخراج منحنی های شکنندگی به روش تجزیه و تحلیل عددی وجود دارد. به عنوان مثال در پل ها می توان از معیار آسیب و یا انحنا در پایه پل ها استفاده نمود [۱۱، ۱۲]. اما در ساختمان ها منحنی شکنندگی به این صورت تعریف می شود: احتمال فراگذشت ماکزیمم دررفت طبقات از سطوح مشخص عملکردی در شدت های مختلف بار لرزه ای. چنانچه ژاؤ و همکاران (۲۰۲۱) شکنندگی ساختمان های فولادی را با اتصالات مختلف با استفاده از ماکزیمم دررفت طبقات محاسبه و ارائه نمودند [۱۳]. باؤ و همکاران (۲۰۲۱) شکنندگی سازه های فولادی در معرض

^{*} نویسنده عهده دار مکاتبات: A.delnavaz@iau.ac.ir



بتن مسلح روش انرژی می تواند به عنوان یک روش کاربردی در تخمین شکنندگی لرزه ای سازه ها مورد استفاده قرار گیرد. این در حالی است که احتمال فراگذشت محاسبه شده در این رویکرد در یک شتاب خاص کمتر از روش متداول است [۲۱].

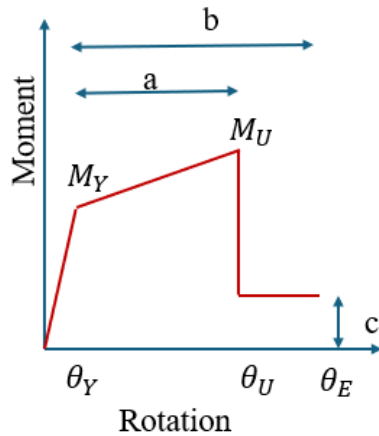
با توجه به تحقیقات انجام شده مشخص شده است که روش مبتنی بر انرژی که توسط مرادی و عبدالمحمدی پیشنهاد شده است می تواند به عنوان یک روش کاربردی در ارزیابی شکنندگی سازه ها مورد استفاده قرار گیرد. اما تحقیقات فوق در سازه های بلند مرتبه فولادی و یا سازه های بتن آرمه انجام شده است. در این تحقیق سعی شده است تا با استفاده از روش انرژی و روش متداول بررسی شود که روش انرژی چه میزان کارایی در سازه های کوتاه و میان مرتبه فولادی دارد. بر این اساس سه ساختمان ۴، ۸ و ۱۲ طبقه طراحی و سپس به صورت غیر خطی مدلسازی شده است. در ابتدا عملکرد و پاسخ دینامیکی سازه ها بررسی شده است. سپس با استفاده از روش تحلیل دینامیکی افزاینده (IDA) منحنی های IDA بر مبنای ماکزیمم دررفت و انرژی کرنشی تلف شده در سازه ترسیم و مقایسه شده است. در نهایت منحنی های شکنندگی حاصل از دو روش انرژی و ماکزیمم دررفت طبقات محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده است. در ادامه مدل عددی و روش تحقیق ارائه شده است.

۲- مشخصات مدل عددی

برای این تحقیق از سازه های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه با پلان منظم انتخاب شده است (شکل ۱). طول دهانه ۶ متر و ارتفاع طبقات ۳ متر در نظر گرفته شده است. سازه برای منطقه با لرزه خیزی زیاد و زمین نوع ۳ با سیستم قاب خمشی با شکل پذیری ویژه و کاربری مسکونی بر مبنای استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم بارگذاری لرزه ای شده است. فولاد مصرفی این سازه از نوع ST37 با تنش تسلیم ۲۴۰۰ کیلوگرم بر متر مربع، مدول یانگ برابر با ۲۰۰۰۰۰ کیلوگرم بر متر مربع و وزن واحد حجمی برابر با ۷/۸۵ تن بر متر مکعب در نظر گرفته شده است. سقف از نوع عرشه فولادی با بار مرده ای برابر با ۵۶۰ و بار زنده ای معادل با ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مربع در نظر گرفته شده است. توزیع بار در کف به صورت شطرنجی لحاظ شده است. برای دهانه های پیرامونی بار دیواری معادل ۷۰۰ کیلوگرم بر متر و بار جانپناه نیز برابر با ۳۰۰ کیلوگرم بر متر در نظر گرفته شده است. سازه پس از مدلسازی و بارگذاری در نرم افزار ایتبس بزمبنای معیار کفایت مقاومت و ماکزیمم دررفت مجاز طراحی شده است. نتایج طراحی در جدول ۱ ارائه شده است.

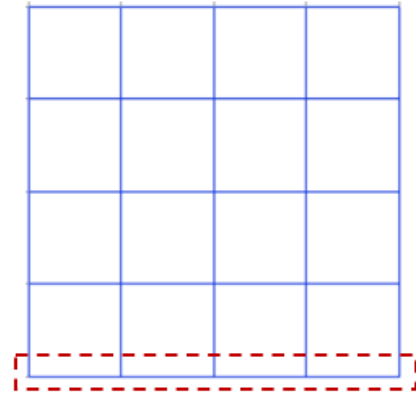
نشست زمین را بر مبنای ماکزیمم دررفت طبقات محاسبه کردند [۱۴]. ليو و همکاران (۲۰۲۲) شکنندگی سازه های فولادی با سیستم دیاگرید را بر مبنای ماکزیمم دررفت طبقات ارائه کردند [۱۵]. استفاده از ماکزیمم دررفت طبقات به عنوان پارامتر تقاضای مهندسی (EDP) به عنوان یک روش متداول از دیرباز در ارزیابی شکنندگی ساختمان ها مورد استفاده قرار گرفته است [۱۶]. از طرفی استاندارد های مختلف سطوح عملکرد و حالات حدی را برای این پارامتر ارائه داده اند. به عنوان مثال در صورتی که ماکزیمم دررفت یک قاب خمشی فولادی از مقدار 0.02 عبور نماید سازه از سطح عملکرد ایمنی جانی (LS) عبور کرده است [۱۷]. به دلیل اینکه ماکزیمم دررفت طبقات در روش های شبیه سازی عددی به راحتی قابل حصول است و همچنین استاندارد ها سطوح عملکرد را بر این مبنای ارائه داده اند استفاده از این روش متداول شده است [۱۸].

مرادی و عبدالمحمدی (۲۰۲۰) در یک پژوهشی عنوان نمودند از آنجایی که زلزله به صورت آزاد شدن انرژی در زمین تعریف می شود و سازه زمانی در زلزله پایداری خود را حفظ می کند که مجموع انرژی درونی در سازه با انرژی ورودی ناشی از زلزله در تعادل باشد، میتواند از انرژی و به صورت خاص انرژی کرنشی پلاستیک در سازه به عنوان EDP در ارزیابی شکنندگی در سازه استفاده نمود [۶]. آن ها برای اولین بار منحنی های دینامیکی افزاینده را نه بر مبنای ماکزیمم دررفت بلکه بر مبنای انرژی کرنشی تلف شده در سازه ارائه و سپس سطوح عملکرد آستانه فروریزش (CP) و ایمنی جانی (LS) را بر مبنای انرژی کرنشی پلاستیک تعریف کرده و سپس منحنی های شکنندگی را بر این اساس ارائه دادند. آنها شکنندگی بر مبنای انرژی را برابر با احتمال فراگذشت انرژی کرنشی پلاستیک در سازه از سطوح عملکرد مبتنی بر انرژی کرنشی پلاستیک در شدت های مختلف بار لرزه ای تعریف نمودند [۶]. ژو و همکاران (۲۰۲۲) تحقیقی را با عنوان منحنی های شکنندگی مبتنی بر انرژی در سازه های فولادی دارای مراکز ویسکوز ارائه کردند. آن ها با روش مرادی و عبدالمحمدی نشان دادند که از این روش می توان با دقت مناسبی به ارزیابی شکنندگی پرداخت [۱۹]. گودرزی و همکاران (۲۰۲۳) نیز با همین روش به ارزیابی شکنندگی سازه های فولادی بلند مرتبه دارای مهاربند بازویی پرداختند. آن ها ضمن مقایسه دو روش متداول (مبتنی بر ماکزیمم دررفت) و روش انرژی نشان دادند روش انرژی در سازه های بلند کمی محافظه کارانه تر از روش ماکزیمم دررفت است [۲۰]. حاجی صفری و همکاران (۲۰۲۴) به ارزیابی و مقایسه روش انرژی و روش متداول در قاب خمشی بتن آرمه پرداختند. آن ها نشان دادند در قاب های



شکل ۲. مدل رفتاری لنگر-دوران برای مدلسازی غیرخطی تیرها.

Fig. 2. Moment-rotation behavior model for nonlinear modeling of beams.



شکل ۱. پلان سازه.

Fig. 1. Plan structure.

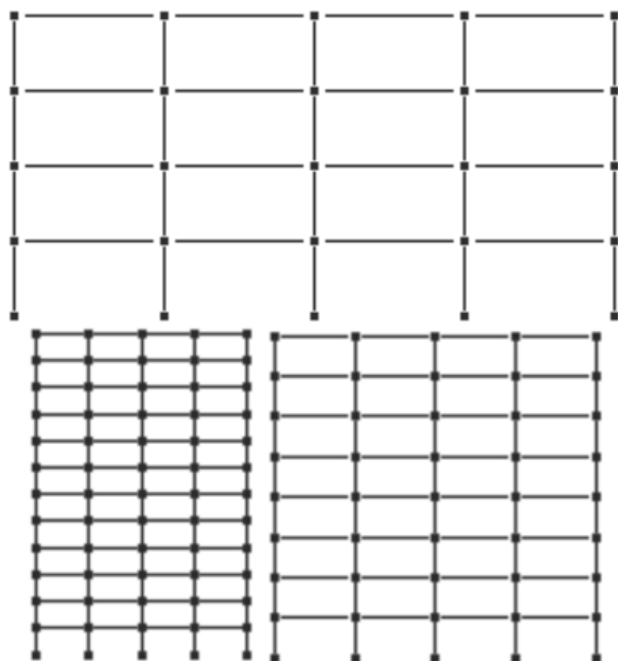
جدول ۱. مشخصات مقاطع (ابعاد به سانتی متر).

Table 1. Section specifications (dimensions in centimeters).

مقطع ستون	مقطع تیر	طبقه	سازه
Box 35*2 & Box 30*2	PG W25*1 F 15*1.2	۲-۱	چهار طبقه
Box 25*1.6	PG W25*1 F 15*1.2	۴-۳	
Box 40*2.5	PG W35*1 F15*1.5	۲-۱	
Box 35*2 & Box 30*2	PG W35*1 F15*1.5	۴-۳	هشت طبقه
Box 25*2	PG W35*1 F15*1.5	۶-۵	
Box 25*1.6	PG W25*1 F 15*1.2	۸-۷	
Box 45*3	PG W35*1 F15*2	۲-۱	دوازده طبقه
Box 40*2.5 & Box 35*2	PG W35*1 F15*2	۴-۳	
Box 30*2	PG W35*1 F15*2	۶-۵	
Box 30*2	PG W35*1 F15*1.5	۸-۷	
Box 25*1.6	PG W25*1 F 15*1.2	۱۰-۹	
Box 22*1.2	PG W25*1 F 15*1.2	۱۲-۱۱	

ستون ها از المان FEMA Column در کتابخانه نرم افزار Perform-3D استفاده شده است [۲۲]. مشخصات مفاصل پلاستیک بر اساس استاندارد FEMA 365 تعریف شده است. در شکل ۲ به صورت شماتیک مدلسازی مدل رفتاری لنگرخمش-دوران در تیرها ارائه شده است. منحنی رفتاری در ناحیه مفاصل پلاستیک از سه بخش تشکیل می شود. بخش اول مربوط به ناحیه الاستیک و رفتار خطی عضو است (دوران کمتر از دوران تسلیم) [۲۳].

پس از طراحی اولیه، یکی از قاب های پیرامونی از سازه انتخاب و به صورت غیر خطی و مبتنی بر ورش اجزای محدود در نرم افزار Perform-3D مدلسازی شده است. در مدلسازی غیر خطی از روش پلاستیسیته متمرکز استفاده شده است. مفاصل پلاستیک خمشی برای تیرها و مفاصل پلاستیکی مبتنی بر اندرکش نیروی محوری و لنگر خمشی برای ستون ها تعریف شده است. برای مدلسازی تیرها از المان FEMA Beam و برای



شکل ۳. مدل های غیر خطی ۴، ۸ و ۱۲ طبقه ایجاد شده در Perform-3D.

Fig. 3. 4, 8 and 12 story nonlinear models created in Perform-3D.

$$E_i = E_k + E_\xi + E_e + E_{in} \quad (3)$$

هریک از این پارامترها مطابق روابط موجود در ۴ تعریف می شود [۲۷].

$$\begin{aligned} E_k &= 1/2 m \dot{u}^2 \\ E_\xi &= \int C \dot{u}^2 dt \\ E_e + E_{in} &= \int f_s du \\ E_i &= - \int m \ddot{u}_g du_g \end{aligned} \quad (4)$$

که در آن m جرم، C ضریب میرایی، F_s نیرو، و U جابجایی است. از میان انرژی های درونی در سازه آنچه که بیشتر اهمیت دارد و موجب آسیب در سازه می شود انرژی کرنشی پلاستیک در سازه است. این انرژی زمانی در بالانس انرژی وارد می شود که انرژی ورودی در سازه از مقدار انرژی تلف شده ناشی از میرایی، انرژی جنبشی و انرژی کرنشی پلاستیک

با افزایش بار مقدار تلاش های عضو از محدوده الاستیک فراتر رفته و وارد محدوده غیر خطی می شود. پس از رسیدن عضو به مقاومت نهایی (M_u) افت مقاومت در عضو ایجاد شده و در نهایت با افزایش بیشتر بار، عضو به محدوده گسیختگی می رسد. رفتار غیر خطی تک تک اعضا، رفتار غیر خطی کلی سازه را تعریف می کند [۲۴]. در شکل ۳ مدل اجزای محدود غیر خطی ساخته شده در نرم افزار Perform-3D ارائه شده است.

۳- روش تحلیل

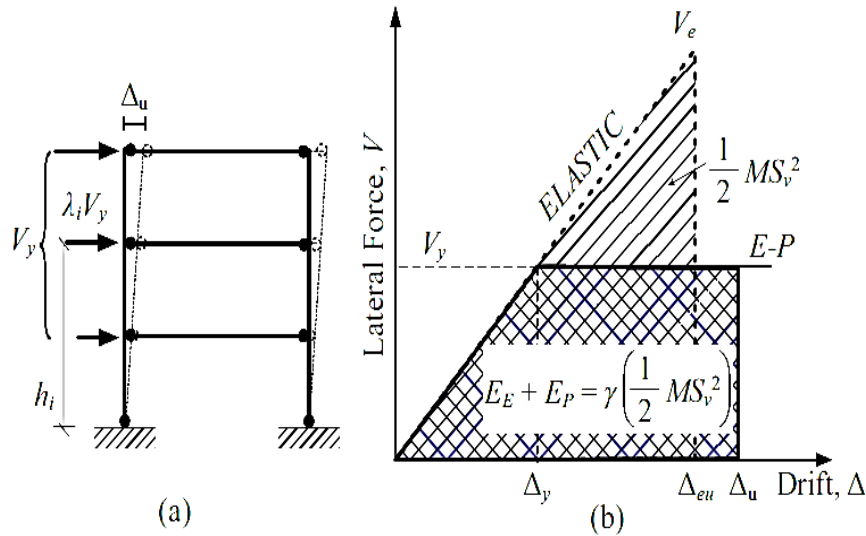
همانطور که در بخش ۱ بیان شده است شکنندگی به صورت کلی مطابق با رابطه ۱ تعریف می شود. شکنندگی برابر است با احتمال فراگذشت پارامتر تقاضای مهندسی (EDP) از حالات حدی مجاز (AC) در شدت های مختلف بارهای لرزه ای (IM).

$$Fragility = P(EDP > AC | IM) \quad (1)$$

معمولاً به صورت متداول مقدار ماکزیمم دریافت طبقات به عنوان EDP در سازه در نظر گرفته می شود. برای AC مطابق با سطوح عملکرد مختلف مقادیری تعریف شده است. این سطوح بر مبنای دریافت می تواند شامل IO، LS و CP باشد. در صورتی که معیار آسیب مد نظر قرار گیرد می تواند شامل آسیب کم، متوسط، زیاد، گسترده و فروپاشی کلی باشد [۲۵]. برای IM در تحقیقات مختلف از پارامترهایی مانند بیشینه شتاب زمین (PGA) شتاب طیفی (S_a)، جابجایی طیفی (S_d) و ... استفاده شده است [۲۶]. مرادی و عبدالمحمیدی بر مبنای انرژی شکنندگی را به صورت رابطه ۲ تعریف کردند [۶]:

$$Fragility = P(EDP = \text{Inelastic energy} > AC | IM) \quad (2)$$

در تحقیقات گوناگون بیان شده است که اگر انرژی ورودی در سازه (E_i) با مجموع انرژی های درونی در سازه در تعادل باشد سازه پایدار باقی می ماند (رابطه ۳). انرژی درونی سازه برابر است با انرژی تلف شده ناشی از میرایی (E_ξ)، انرژی جنبشی (E_k) و انرژی کرنشی. انرژی کرنشی برابر است با مجموع انرژی جذب شده (E_e) (انرژی کرنشی الاستیک) و انرژی تلف شده (E_{in}) (انرژی کرنشی پلاستیک).



شکل ۴. مفهوم انرژی ورودی طرح، ضریب اصلاح انرژی، انرژی الاستیک و انرژی پلاستیک در سازه.

Fig. 4. Concept of design input energy, energy correction factor, elastic energy and plastic energy in the structure.

که در آن M جرم، S_v شبه سرعت، S_a شبه شتاب، T پریود مود اول و g شتاب زمین است. مطابق شکل ۴ این انرژی را می توان با استفاده از ضریبی به نام ضریب اصلاح انرژی (γ) به مجموع انرژی کرنشی الاستیک و پلاستیک در سازه تبدیل نمود.

بنابر پیشنهاد هازنر و بسیاری از تحقیقاتی که بر روی مفهوم طراحی بر اساس انرژی کار کرده اند، ضریب اصلاح انرژی به صورت رابطه ۶ قابل تعریف است:

$$\gamma = (2\mu_s - 1) / (R_\mu^2) \quad (6)$$

که در آن μ_s شکل پذیری و R_μ ضریب کاهش شکل پذیری نام دارد. شکل پذیری برابر است با نسبت تغییر مکان تقاضا به تغییر مکان تسلیم و ضریب کاهش شکل پذیری نیز برای پریودهای بیشتر از ۰/۵۷ ثانیه برابر با ضریب شکل پذیری تعریف می شود.

بر اساس پیشنهاد مرادی و عبدالمحمدی (۲۰۲۰) [۶] و با استفاده از رابطه هازنر در صورتی که ضریب شکل پذیری و شتاب طیفی متناسب با سطح زلزله ۴۷۵ ساله محاسبه شود، مقدار E_{in} حاصل از رابطه ۵ معرف AC مبتنی بر انرژی برای سطح عملکرد LS است. و در صورتی که این

بیشتر باشد و سازه مجبور شود با وارد شدن در فاز غیر خطی و پذیرش تغییر شکل های پلاستیک با انرژی ورودی به تعادل دست یابد. هرچه میزان انرژی کرنشی پلاستیک بیشتر باشد، تغییر شکل های غیر خطی نیز بیشتر شده و سازه آسیب بیشتری می بیند [۲۸]. از طرفی انرژی دو معیار نیرو و تغییر مکان را باهم دارد. از آنجایی که معیار دررفت تنها ارائه دهنده تغییر مکان یا جابجایی است، انرژی می تواند معیاری از جابجایی و انرژی را با هم شامل شود. از این روی بنظر میرسد بتوان از مقدار انرژی کرنشی پلاستیک در سازه به عنوان یک پارامتر قابل اعتنا در ارزیابی شکنندگی سازه استفاده کرد. اما در صورتی که پذیرفته شود که انرژی کرنشی پلاستیک به عنوان EDP در نظر گرفته شود، هنوز معیاری به عنوان AC برای این پارامتر در استاندارد ها ارائه نشده است. مرادی و عبدالمحمدی پیشنهاد دادند از رابطه هازنر (۱۹۶۰) [۲۹] می توان برای معرفی AC مبتنی بر انرژی کرنشی پلاستیک استفاده نمود. هازنر بیان می دارد در صورتی که سازه یک سیستم یک درجه آزاد در نظر گرفته شود مقدار انرژی ورودی طرح در آن را می توان به صورت رابطه ۵ تعریف نمود:

$$E_t = 1/2 MS_v^2 = 1/2M (TS_a g / (2\pi))^2 = (E_e + E_p n) / \gamma \quad (5)$$

جدول ۲. مشخصات رکورد ها.

Table 2. Record specifications.

ID No.	Lowest Freq (Hz.)	PEER.NGA Record information		PGAmax (g)	PGVmax (cm/s.)
		FN Component	FP Component		
۱	۰/۱۳	IMPVALL/H-E06_233	IMPVALL/H-E06_323	۰/۴۴	۱۱۱
۲	۰/۱۳	IMPVALL/H-E07_233	IMPVALL/H-E07_323	۰/۴۶	۱۰۸
۳	۰/۱۶	ITALY/A-STU_223	ITALY/A-STU_313	۰/۳۱	۴۵
۴	۰/۱۵	SUPERST/B-PTS_037	SUPERST/B-PTS_127	۰/۴۲	۱۰۶
۵	۰/۱۳	LOMAP/STG_038	LOMAP/STG_128	۰/۳۸	۵۵
۶	۰/۱۳	ERZIKAN/ERZ_032	ERZIKAN/ERZ_122	۰/۴۹	۹۵
۷	۰/۰۷	CAPEMEND/PET_260	CAPEMEND/PET_350	۰/۶۳	۸۲
۸	۰/۱	LANDERS/LCN_239	LANDERS/LCN_329	۰/۷۹	۱۴۰
۹	۰/۱۱	NORTHR/RRS_032	NORTHR/RRS_122	۰/۸۷	۱۶۷
۱۰	۰/۱۲	NORTHR/SYL_032	NORTHR/SYL_122	۰/۷۳	۱۲۲
۱۱	۰/۱۳	KOCAELI/IZT_180	KOCAELI/IZT_270	۰/۲۲	۲۹
۱۲	۰/۰۸	CHICHI/TCU065_272	CHICHI/TCU065_002	۰/۸۲	۱۲۷
۱۳	۰/۰۶	CHICHI/TCU102_278	CHICHI/TCU102_008	۰/۲۹	۱۰۶
۱۴	۰/۱	DUZCE/DZC_172	DUZCE/DZC_262	۰/۵۲	۷۹
۱۵	۰/۰۶	GAZLI/GAZ_177	GAZLI/GAZ_267	۰/۷۱	۷۱
۱۶	۰/۱۳	IMPVALL/H-BCR_233	IMPVALL/H-BCR_323	۰/۷۶	۴۴
۱۷	۰/۰۶	IMPVALL/H-CHI_233	IMPVALL/H-CHI_323	۰/۲۸	۳۰
۱۸	۰/۱۳	NAHANNI/S2_070	NAHANNI/S2_160	۰/۴۵	۳۴
۱۹	۰/۱۳	LOMAP/BRN_038	LOMAP/BRN_128	۰/۶۴	۵۹
۲۰	۰/۲۵	LOMAP/CLS_038	LOMAP/CLS_128	۰/۵۱	۴۵

ویژگیهایی مانند فاصله کم از گسل، پرید غالب کمتر، نسبت PGV به PGA کمتری نسبت به رکوردهای حوزه دور هستند [۱۲]. معمولاً برای سازه های کوتاه و میان مرتبه رکوردهای حوزه نزدیک پاسخ بیشتری را ایجاد می نمایند. پیش از بررسی و محاسبه شکنندگی با دو روش متداول و روش انرژی، تحلیل دینامیکی افزایشده انجام شده است. برای این منظور از معیار PGA استفاده شده است. هر رکورد از مقدار $g/1$ تا نقطه ناپایداری سازه (ماکزیمم دررفت در سازه برابر با $g/1$) با گامهای $g/1$ مقیاس و سپس به سازه اعمال شده است. در هر گام مقدار انرژی کرنشی پلاستیک، انرژی کرنشی الاستیک و ماکزیمم دررفت سازه محاسبه و جمع اوری شده است. سپس منحنی های IDA ارائه و با استفاده از آن ها منحنی های شکنندگی محاسبه شده است.

دو پارامتر برای زلزله سطح ۲۵۰۰ ساله محاسبه شود، مقدار E_{in} حاصل از رابطه ۵ بیانگر حالت حدی در سطح CP خواهد بود. به این ترتیب با در نظر گرفتن انرژی کرنشی پلاستیک به عنوان EDP و انرژی کرنشی سطح LS و CP به عنوان AC می توان از رابطه ۲ برای محاسبه شکنندگی بر مبنای انرژی کرنشی پلاستیک استفاده نمود. برای توضیحات بیشتر پیشنهاد می شود به مراجع مراجعه [۱۹-۲۱] شود.

۴- بار لرزه ای

در این تحقیق برای انجام تحلیل شکنندگی از نتایج تحلیل دینامیکی افزایشده استفاده شده است. ۲۰ رکورد حوزه نزدیک (۱۴ با پالس و ۶ بدون پالس) مطابق با پیشنهاد استاندارد FEMA P-695 استفاده شده است [۳۰]. این رکورد ها در جدول ۲ معرفی شده اند. رکوردهای حوزه نزدیک دارای

۵- ارزیابی پاسخ دینامیکی و عملکرد سازه ها

پس از مدل سازی سازه ها و تعریف بارهای ثقلی و لرزه ای در مدل اجزای محدود، تحلیل های دینامیکی انجام شده است. نخست پاسخ لرزه ای و عملکرد سازه ها در قالب منحنی های جابجایی افقی بام و دوران مفاصل پلاستیک ارائه و بررسی شده است. در شکل ۵ منحنی های تاریخچه زمانی سازه های مورد نظر تحقیق تحت رکورد زلزله چی چی در بیشینه شتاب های مختلف ارائه شده است.

همانطور که از شکل ۵ پیداست، با افزایش شتاب وارده بر سازه های این تحقیق مقدار بیشینه جابجایی افقی در سازه افزایش می یابد. همچنین با افزایش مجدد شتاب وارده جابجایی افقی پسماند در سازه ها نمایان می شود. به عنوان مثال در سازه دوازده طبقه در بیشینه شتاب $g/0.8$ در این رکورد، جابجایی پسماندی به مقدار ۲ سانتی متر در انتهای تحلیل در سازه باقی مانده است. با افزایش مجدد شتاب میزان جابجایی جداگانه و جابجایی پسماند افزایش می یابد تا در نهایت در بیشینه شتاب $g/3.1$ سازه ۱۲ طبقه ناپایدار می شود. لازم به بیان این نکته است که سازه ۴ طبقه در این رکورد در شتاب $g/2.5$ و سازه ۸ طبقه نیز در بیشینه شتاب $g/3.1$ به مرز ناپایداری رسیده است.

در شکل ۶ دوران مفاصل پلاستیک در سازه در سطح ایمنی جانی (LS) برای رکورد GAZLI در دو بیشینه شتاب $g/1.6$ و $g/1.8$ ارائه شده است. در این شکل رنگ قرمز نشان می دهد که دوران مفاصل پلاستیک به سطح LS رسیده و یا از آن رد شده است. لازم به ذکر است در نرم افزار Per-3D form-3D برخلاف نرم افزار Sap2000 امکان مشاهده دوران مفاصل پلاستیک در سه سطح IO، LS و CP به صورت یکجا و همزمان وجود ندارد. نتایج بررسی دوران مفاصل پلاستیک نشان می دهد با افزایش شدت بار لرزه ای میزان دوراها در اعضای مختلف افزایش می یابد. همچنین نتایج نشان می دهد سازه به گونه ای طراحی شده است که هنگامی که تیرها به سطح LS رسیده اند دوران ستون ها از این سطح عملکرد دور است. بنابراین انتظار می رود در شتاب های میانی بیشترین انرژی توسط تیرها مستهلک شده است. بنابراین تیرها به خوبی توانسته اند نقش فیوز را بازی کنند.

۶- بررسی بالانس انرژی در سازه ها

همانطور که پیشتر بحث شد، انرژی ورودی به سازه باید با انرژی های درونی در تعادل باشد تا سازه پایدار بماند. در این بخش در سه حالت مختلف منحنی های تاریخچه زمانی سازه ها ارائه می شود. حالت اول مربوط به رفتار

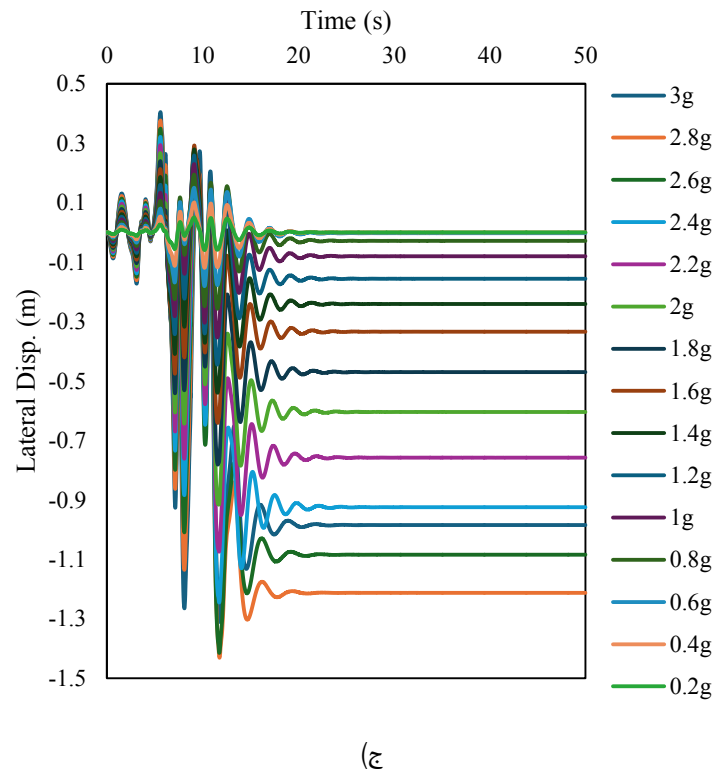
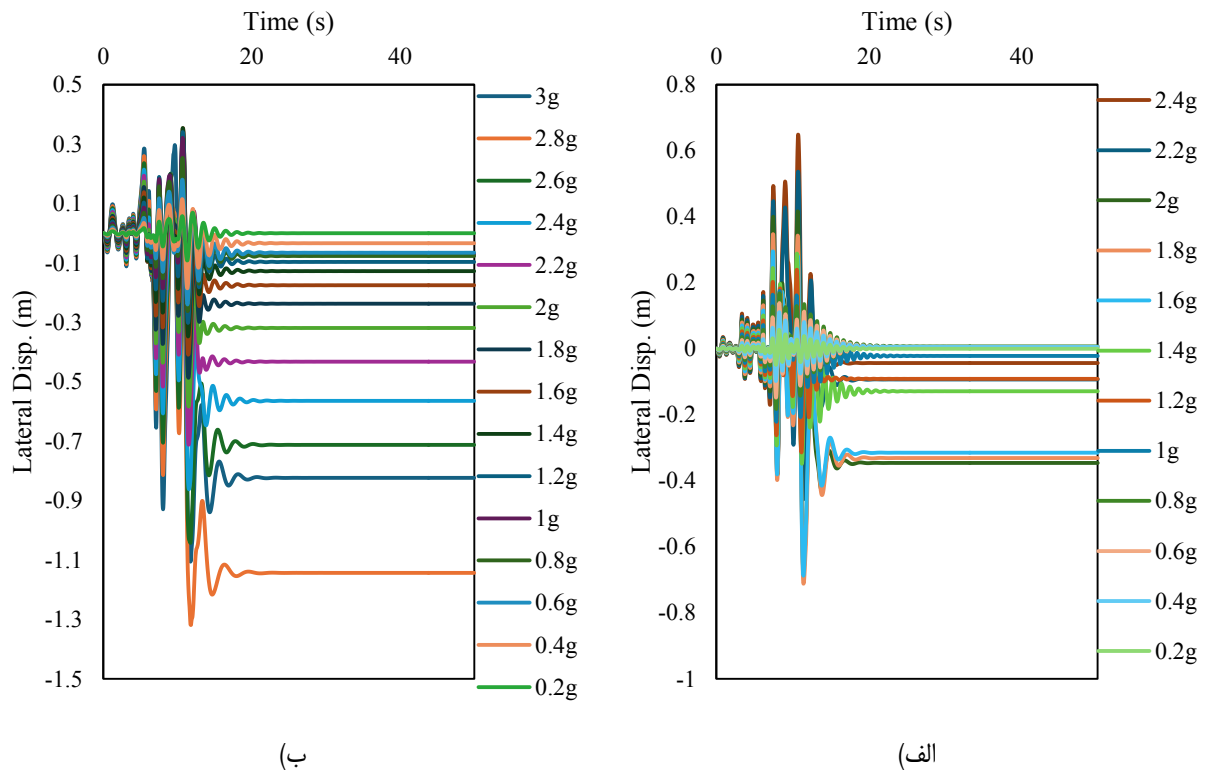
الاستیک سازه در بیشینه شتاب های کم، حالت دوم رفتار پلاستیک سازه در بیشینه شتاب های میانی و حالت سوم رفتار سازه در حالت ناپایداری و بیشینه شتاب های زیاد است. در شکل ۷ منحنی های تاریخچه زمانی انرژی های درونی سازه های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه تحت رکورد زلزله ایمپریال ولی در بیشینه شتاب $g/0.2$ ارائه شده است. همانطور که مشخص است در هر سه تیپ سازه ای مورد نظر این تحقیق مقدار انرژی کرنشی پلاستیک در سازه برابر صفر است. به عبارت دیگر با توجه به کم بودن مقدار انرژی کل در سازه (۱۷۳۶۰، ۱۰۵۸۰ و ۳۱۲۵۰ کیلوگرم در متر، برای سازه های ۱۲، ۸ و ۴ طبقه)، انرژی ورودی با انرژی های درونی در تغییر شکل های الاستیک در تعادل است.

در شکل ۸ منحنی های تاریخچه زمانی انرژی های درونی سازه های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه تحت رکورد زلزله ایمپریال ولی در بیشینه شتاب $g/0.6$ ارائه شده است. مقایسه شکل های ۷ و ۸ نشان می دهد که با افزایش شتاب وارده برای اینکه سازه بتواند در بالانس با انرژی ورودی بماند از ظرفیت انرژی کرنشی پلاستیک خود استفاده می کند. هرچه تعداد طبقات در سازه بیشتر باشد میزان انرژی درونی بیشتری در یک شتاب مشخص خواهد داشت. چراکه با گذر از سازه ۴ به ۱۲ طبقه در یک شتاب مشخص چه در حالتی که سازه الاستیک است و چه در حالت پلاستیک است، میزان انرژی های درونی بیشتر می شود.

در شکل ۹ منحنی های تاریخچه زمانی انرژی های درونی سازه های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه تحت رکورد زلزله ایمپریال ولی در بیشینه شتاب $g/1.4$ ارائه شده است. بر اساس این شکل هر سه سازه در این بیشینه شتاب ناپایدار شدند. بالانس انرژی بین انرژی ورودی و انرژی درونی در سازه شکل نگرفته و در نهایت در لحظه ناپایداری سازه به صورت ناگهانی مقادیر انرژی کرنشی پلاستیک، جنبشی و انرژی ناشی از میرایی به یکباره افزایش یافته و سازه ناپایدار شده است.

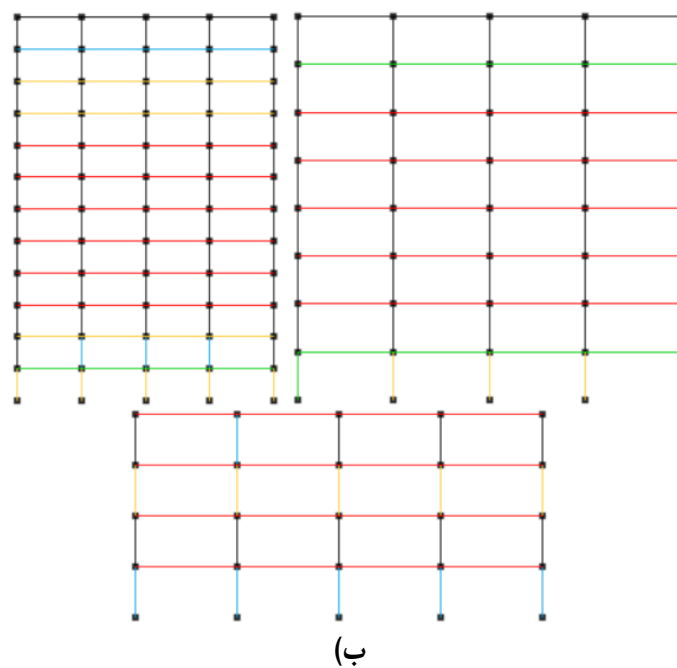
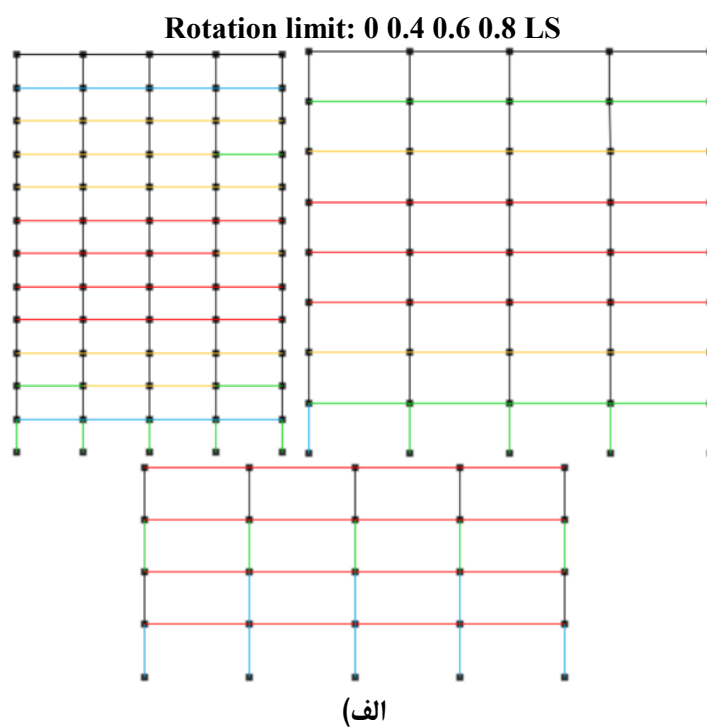
۷- مقایسه منحنی های IDA و شکنندگی در دو روش متداول و انرژی

در شکل ۱۰ منحنی های IDA سازه ۴ طبقه با دو روش متداول (مبتنی بر ماکزیمم دریافت طبقات) و روش مبتنی بر انرژی ارائه شده است. منحنی های IDA این دو روش تفاوت هایی باهم دارند. نخست اینکه با افزایش شدت بار لرزه ای منحنی IDA مبتنی بر ماکزیمم دریافت طبقات، افزایش می یابد. این در حالی است که در منحنی IDA مبتنی بر انرژی کرنشی پلاستیک تا یک بیشینه شتاب مشخص، مقدار انرژی کرنشی پلاستیک در سازه صفر است و سپس با افزایش شتاب زمانی که سازه وارد محدوده غیر



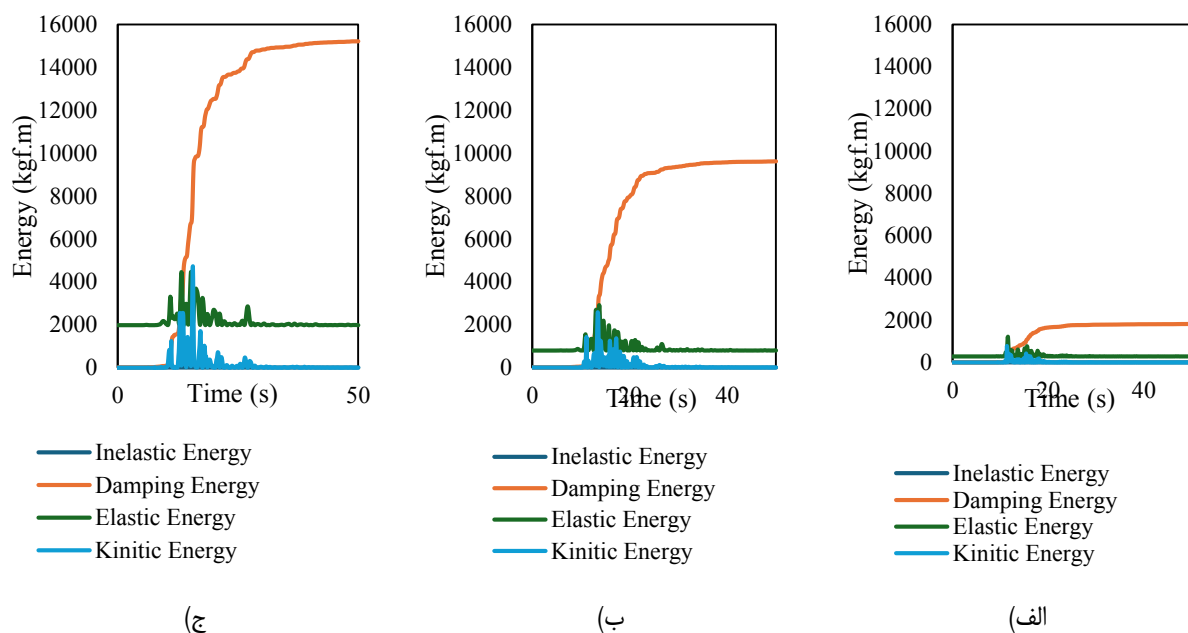
شکل ۵. منحنی تاریخچه زمانی جابجایی افقی بام در زلزله GAZLI در بیشینه شتاب های مختلف در سازه ی الف (۴ ب) ۸ ج) ۱۲ طبقه.

Fig. 5. Time history curve of horizontal roof displacement in the GAZLI earthquake at different maximum accelerations in a) 4 b) 8 c) 12-story structure.



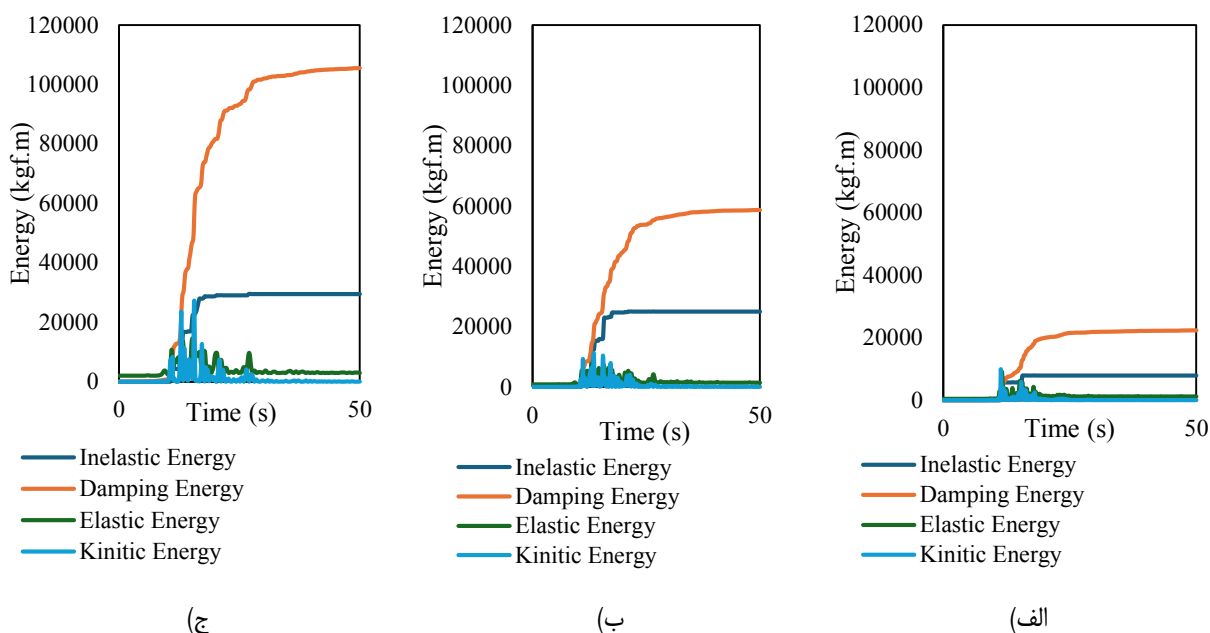
شکل ۶. دوران مفاصل پلاستیک در سطح LS در سازه ها تحت رکورد زلزله GAZLI در بیشینه شتاب الف) ۱/۶ ب) ۱/۸ g.

Fig. 6. Rotation of plastic joints at the LS level in structures under the GAZLI earthquake record at maximum acceleration a) 1.6 b) 1.8g.



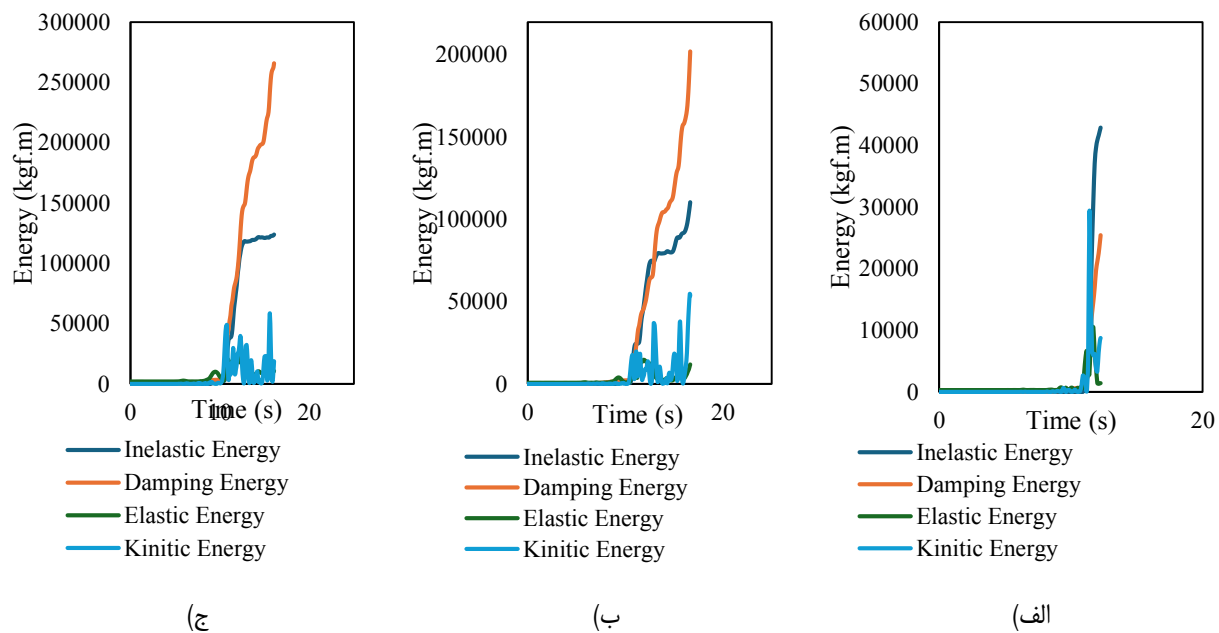
شکل ۷. منحنی های تاریخچه زمانی انرژی های درونی سازه تحت رکورد زلزله ایپریال ولی با بیشینه شتاب $0.2g$ (الف) سازه ۴ (ب) سازه ۸ (ج) سازه ۱۲ طبقه.

Fig. 7. Time history curves of the internal energies of the structure under the Imperial Valley earthquake record with a maximum acceleration of $0.2g$. A) Structure 4 B) Structure 8 C) Structure 12 stories.



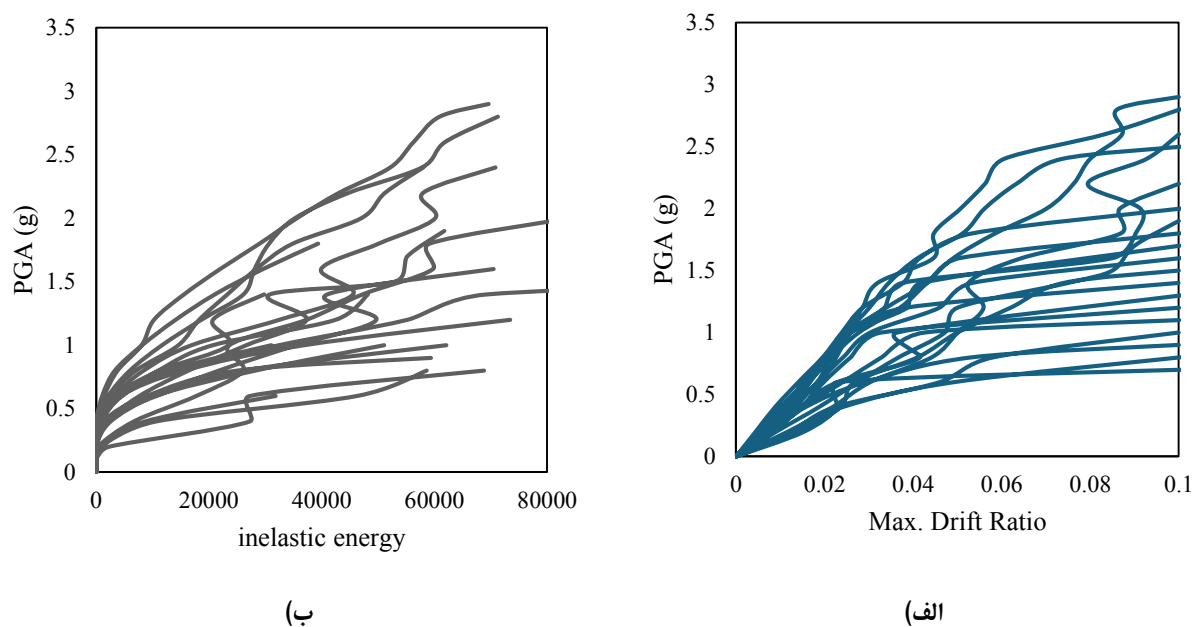
شکل ۸. منحنی های تاریخچه زمانی انرژی های درونی سازه تحت رکورد زلزله ایپریال ولی با بیشینه شتاب $0.6g$ (الف) سازه ۴ (ب) سازه ۸ (ج) سازه ۱۲ طبقه.

Fig. 8. Time history curves of the internal energies of the structure under the Imperial Valley earthquake record with a maximum acceleration of $0.6g$: a) Structure 4, b) Structure 8, and c) Structure 12 stories.



شکل ۹. منحنی های تاریخچه زمانی انرژی های درونی سازه تحت رکورد زلزله ایپریال ولی با بیشینه شتاب $g/1.4$ (الف) سازه ۴ (ب) سازه ۸ و (ج) سازه ۱۲ طبقه.

Fig. 9. Time history curves of the internal energies of the structure under the Imperial Valley earthquake record with a maximum acceleration of $1.4g$: a) 4-story structure, b) 8-story structure, and c) 12-story structure.

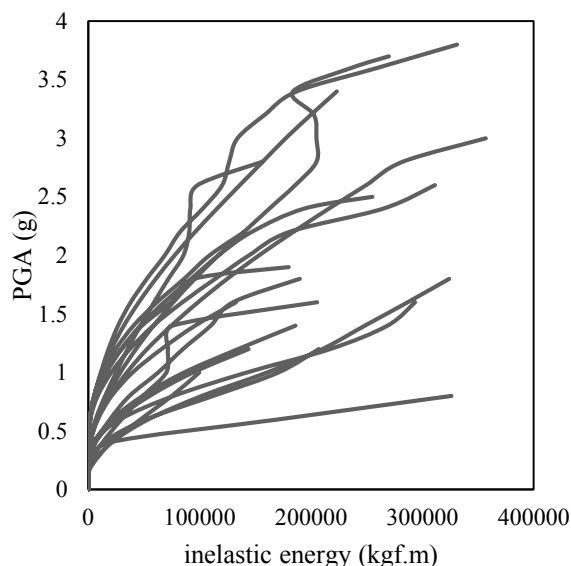


شکل ۱۰. منحنی های IDA سازه ۴ طبقه (الف) روش متداول (ب) روش انرژی.

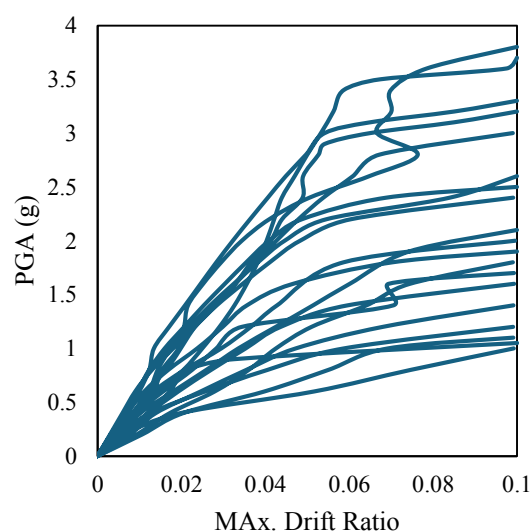
Fig. 10. IDA curves of a 4-story structure a) Conventional method b) Energy method.

های هسته ای نیز بهره برد. در شکل ۱۱ و ۱۲ به ترتیب منحنی های IDA حاصل از دو روش در سازه های ۸ و ۱۲ طبقه نیز ارائه شده است. در شکل ۱۳ به صورت خاص یکی از منحنی های IDA (رکورد زلزله NAHANNI در سازه ۸ طبقه) حاصل از روش متداول و روش انرژی با یکدیگر مقایسه شده اند. همانطور که قبلاً بیان شده است ابتدایی ترین ناحیه در منحنی های IDA به روش انرژی همان ناحیه الاستیک است. این ناحیه در محدوده کوچکتري نسبت به ناحیه IO (دریفت ۰/۰۱ [۳۲]) قرار دارد. انتهای ترین بخش منحنی های IDA به هر دو روش مختص به نقطه ناپایداری است. این نقطه با رنگ قرمز در هر دو منحنی نشان داده شده است. از منحنی IDA مبتنی بر ماکزیمم دریفت طبقات به راحتی می توان شدت زلزله در هر سطح عملکرد دلخواه را محاسبه نمود. اما در روش انرژی پارامتر AC در سطوح عملکرد LS و CP باید بر اساس رابطه ۵ محاسبه شد. برخی از پارامترهای موجود در رابطه ۵ مانند انرژی کرنشی الاستیک و ضریب شکل پذیری از منحنی پوش اول قابل محاسبه هستند. در شکل ۱۴ منحنی پوش اور سازه ۱۲ طبقه به همراه دو پارامتر عنوان شده نشان داده شده است.

خطی می شود، مقدار منحنی های IDA فراتر از صفر می شود. بنابراین منحنی های IDA به روش انرژی مشخص می کند در هر رکورد سازه تا چه شدت بار لرزه ای دارای رفتار الاستیک است و در چه شتابی رفتار غیر خطی سازه اتفاق می افتد. نکته ی دیگر این است که منحنی های IDA حاصل از روش ماکزیمم دریفت، دارای روند منظم تری هستند. منظم تر این نگاه که در یک شدت مشخص بار لرزه ای دریفت سازه به یکباره افزایش می یابد و وقتی به مرز ۰/۱ یا مقادیر بیشتر از آن رسید مشخص می شود که سازه ناپایدار شده است. این موضوع در منحنی های IDA حاصل از انرژی به چشم نمی خورد. اما با توجه به تحقیقات سینیزسکی (۲۰۱۲) [۳۱] همانند آنچه که مرادی و همکاران انجام داده اند انرژی کرنشی در سازه به یکباره افزایش می یابد و این افزایش را می تواند (علی رغم اینکه در نرم افزارمقدار دقیق آن قابل حصول نیست) در منحنی های IDA در نظر گرفت. اما در این تحقیق سعی شده است آنچه از نتایج استخراج شده است ارائه شود. از آنجایی که منحنی های IDA حاصل از روش انرژی می تواند در هر رکورد نشان دهد که در چه بیشینه شتاب هایی رفتار سازه کاملاً الاستیک است، از این روش می توان برای محاسبه شکندگی سازه های خاص مانند نیروگاه



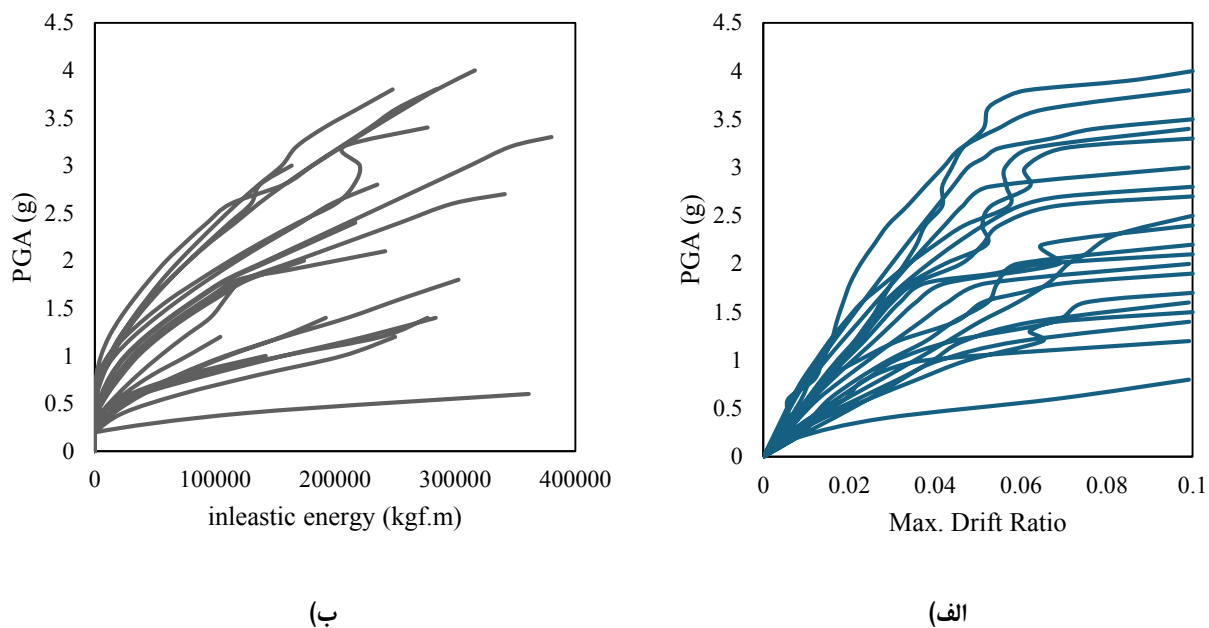
(ب)



(الف)

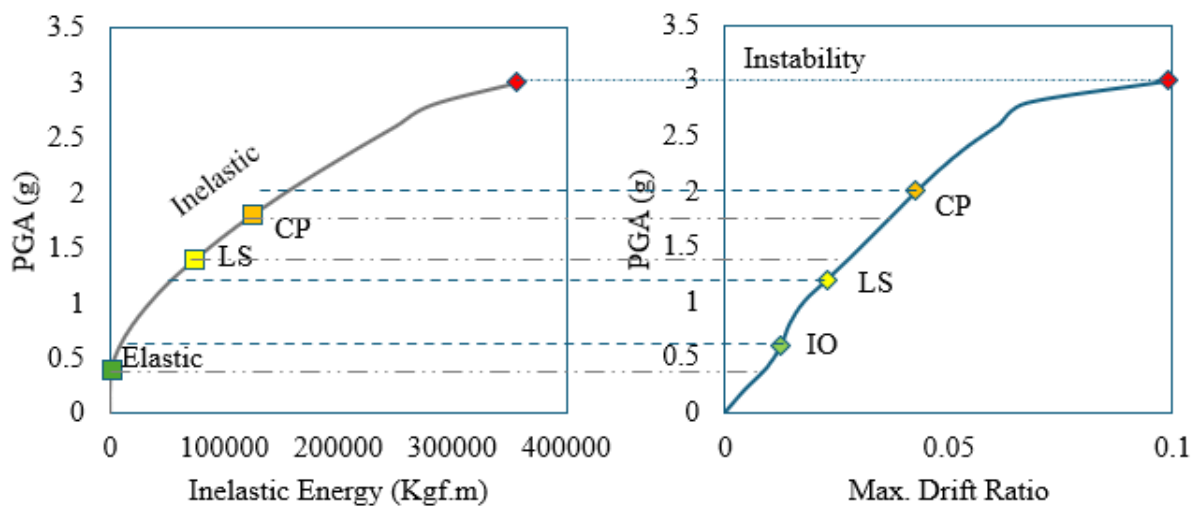
شکل ۱۱. منحنی های IDA سازه ۸ طبقه (الف) روش متداول (ب) روش انرژی

Fig. 11. IDA curves of an 8-story structure a) Conventional method b) Energy method.



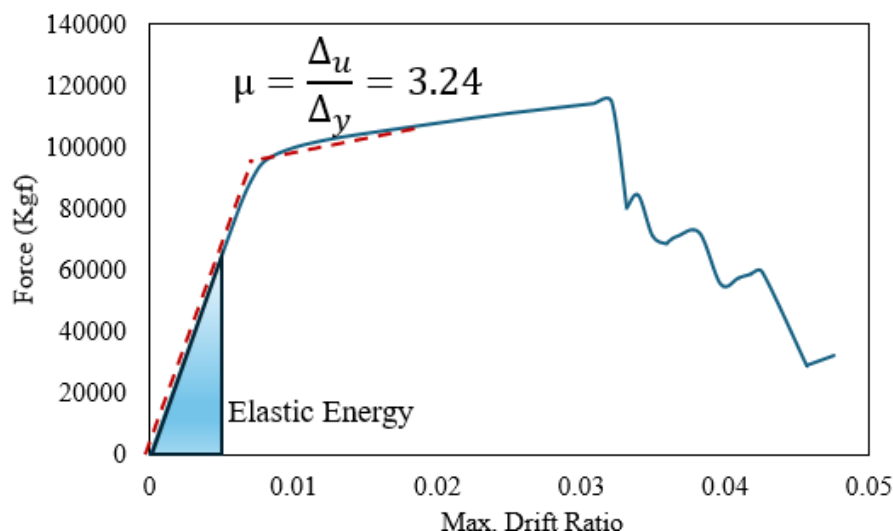
شکل ۱۲. منحنی های IDA سازه ۱۲ طبقه الف) روش متداول ب) روش انرژی.

Fig. 12. IDA curves of a 12-story structure a) Conventional method b) Energy method.



شکل ۱۳. مقایسه منحنی IDA در دو روش متداول و انرژی.

Fig. 13. Comparison of IDA curves in two conventional and energy methods.



شکل ۱۴. منحنی پوش اور سازه ۱۲ طبقه.

Fig. 14. Pushover curve of a 12-story structure.

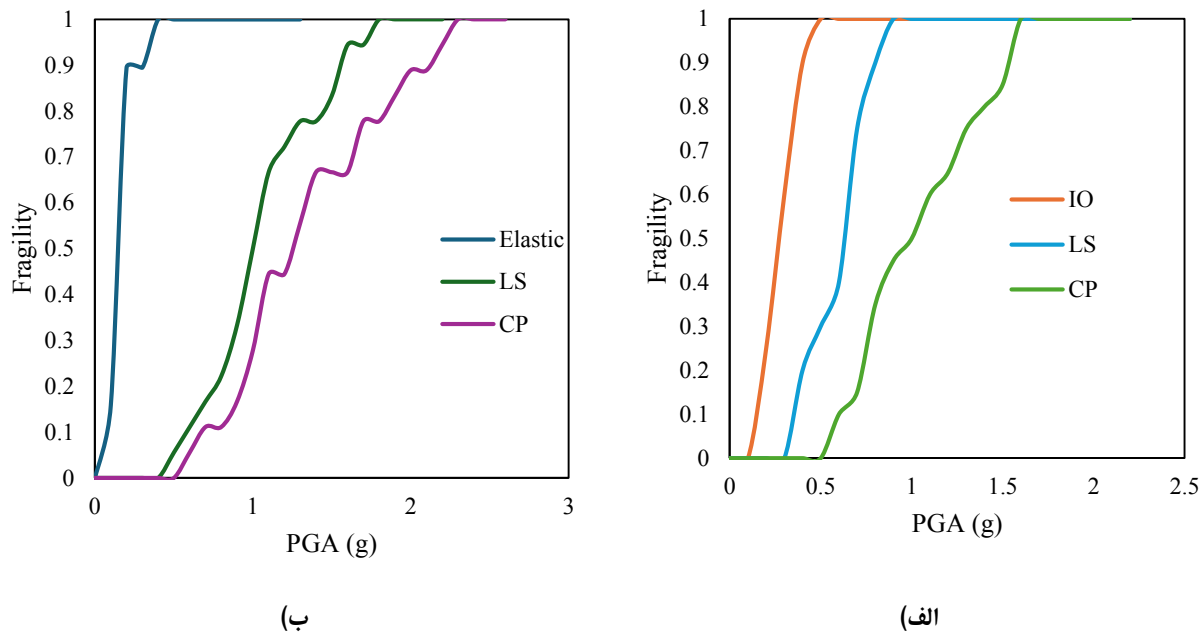
جدول ۳. پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه AC در دو سطح LS و CP با روش انرژی.

Table 3. Parameters required to calculate AC at two levels LS and CP using the energy method.

پارامتر	طبقه ۴		طبقه ۸		طبقه ۱۲		واحد
	LS	CP	LS	CP	LS	CP	
m	۱/۱E+۵	۱/۱E+۵	۲/۵E+۵	۲/۵E+۵	۳/۸E+۵	۳/۸E+۵	Kg
A	۳E-۱	۳E-۱	۳E-۱	۳E-۱	۳E-۱	۳E-۱	
B	۲/۸E+۰	۲/۸E+۰	۱/۹E+۰	۱/۹E+۰	۱/۳E+۰	۱/۳E+۰	
Sa	۸/۳E-۱	۱/۲E+۰	۵/۷E-۱	۸/۵E-۱	۴E-۱	۵/۹E-۱	
T	۶/۹E-۱	۶/۹E-۱	۱/۱E+۰	۱/۱E+۰	۱/۵E+۰	۱/۵E+۰	s
g	۹/۸E+۰	۹/۸E+۰	۹/۸E+۰	۹/۸E+۰	۹/۸E+۰	۹/۸E+۰	m/s ²
μ	۲/۴E+۰	۳/۸E+۰	۲/۹E+۰	۴/۱E+۰	۳/۲E+۰	۴/۲E+۰	
γ	۶/۶E-۱	۴/۶E-۱	۵/۷E-۱	۴/۳E-۱	۵/۲E-۱	۴/۲E-۱	
Ee	۲/۱E+۳	۲/۱E+۳	۳/۳E+۳	۳/۳E+۳	۵/۲E+۳	۵/۲E+۳	Kgf.m
Et	۴/۵E+۴	۱E+۵	۱/۲E+۵	۲/۷E+۵	۱/۷E+۵	۳/۹E+۵	Kgf.m
Ein	۲/۸E+۴	۴/۴E+۴	۶/۴E+۴	۱/۱E+۵	۸/۶E+۴	۱/۶E+۵	Kgf.m

که با پارامتر $\beta\{EDP|IM\}$ [۳۳] اندازه‌گیری می‌شود. مقادیر کمتر $\beta\{EDP|IM\}$ نشان‌دهنده کارایی بالاتر IM در پیش‌بینی پاسخ سازه است [۳۴-۳۷]. در این تحقیق، برای هر دو EDP متداول (حداکثر دریافت طبقات) و انرژی (انرژی کرنشی پلاستیک)، مقدار $\beta\{EDP|IM\}$ با استفاده از رگرسیون لگاریتمی خطی و محاسبه انحراف معیار باقیمانده‌ها در بازه‌های

به منظور اطمینان از انتخاب مناسب شاخص شدت لرزه‌ای (Intensity Measure, IM)، کارایی (Efficiency) و کفایت (Sufficiency) شتاب بیشینه زمین (PGA) به عنوان IM منتخب در این پژوهش مورد ارزیابی کمی قرار گرفته است. کارایی یک IM بیانگر میزان پراکندگی شرطی پارامتر تقاضای مهندسی (EDP) به ازای مقادیر مختلف IM است



شکل ۱۵. منحنی های شکنندگی سازه چهار طبقه با روش الف) متداول ب) انرژی.

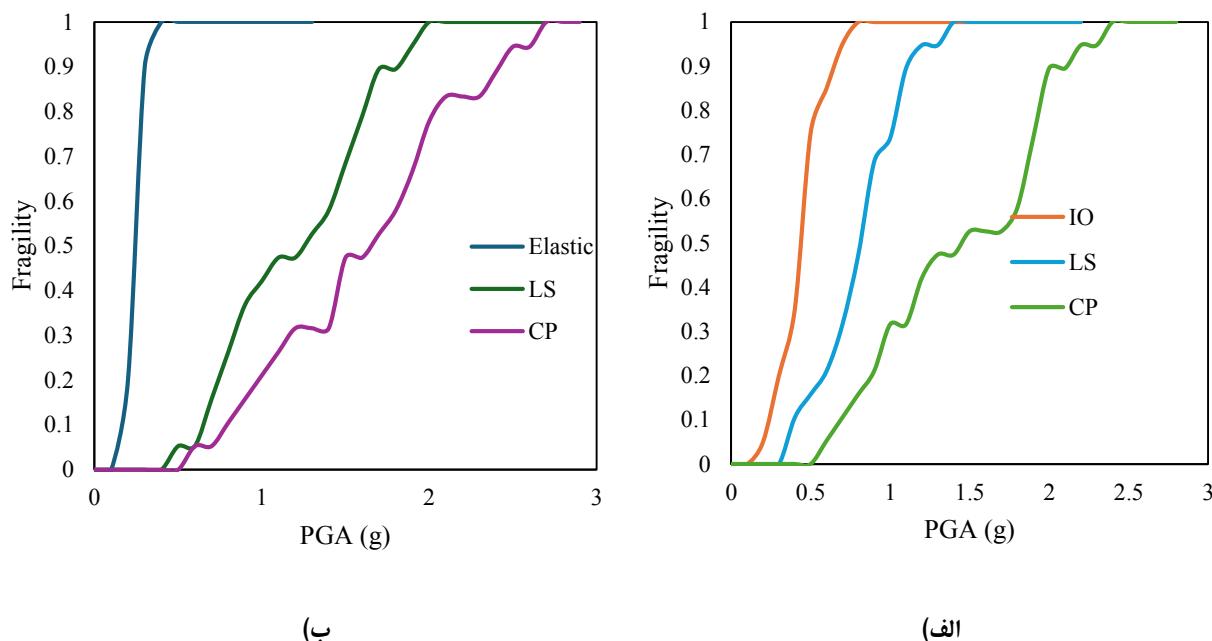
Fig. 15. Fragility curves of a four-story structure using the a) conventional b) energy method.

و در شکل ۱۵ تا ۱۷ ارائه شده است. در شکل ۱۵ منحنی های شکنندگی سازه ۴ طبقه با دو روش متداول و انرژی ارائه شده است. همانطور که پیش تر بیان شده است، روش انرژی توانایی محاسبه شکنندگی در سطح الاستیک، ایمنی جانی و آستانه فروریزش را دارد. این در حالیست که روش متداول می تواند برای شدت های مختلف آسیب و یا سطوح عملکردی مانند بهره برداری بی وقفه، ایمنی جانی و آستانه فروریزش شکنندگی را ارائه دهد. در این تحقیق در روش متداول شکنندگی برای سه سطح IO، LS و CP محاسبه شده است. نتایج مربوط به سازه چهار طبقه نشان می دهد که همانند انتظار سطح الاستیک در بیشینه شتاب های کمتری نسبت به سطح IO رخ می دهد و در دامنه شتاب کمتری احتمال رخداد آن از صفر به یک می رسد. در سازه چهار طبقه احتمال ۵۰٪ فراگذشت از سطح الاستیک در بیشینه شتاب $g/15$ رخ داده است. این در حالی است که احتمال فراگذشت ۵۰٪ از سطح IO در بیشینه شتاب $g/25$ رخ داده است. احتمال فراگذشت ۵۰٪ از سطح LS در روش انرژی برای سازه ۴ طبقه در بیشینه شتاب $g/1$ و در روش متداول در بیشینه شتاب $g/65$ رخ داده است. همچنین احتمال فراگذشت ۵۰٪ از سطح CP در روش انرژی برای سازه ۴ طبقه در بیشینه شتاب $g/12$ و در روش متداول در بیشینه شتاب $g/1$ رخ داده است.

مختلف PGA محاسبه گردید. نتایج نشان داد که مقدار β برای روش دریافت به طور میانگین 0.28 و برای روش انرژی 0.34 است که در محدوده قابل قبول (کمتر از 0.4) قرار داشته و بیانگر کارایی مناسب PGA به عنوان IM در هر دو روش می باشد.

علاوه بر این، کفایت IM به معنای عدم وابستگی پیش بینی پاسخ سازه به ویژگی های زمین لرزه ای غیر از خود IM (مانند بزرگی زمین لرزه، فاصله از گسل و مکانیسم گسیختگی) است. برای بررسی کفایت، همبستگی بین باقیمانده های رگرسیون لگاریتمی (ϵ) با بزرگی (M_w) و فاصله از گسل (R_{rup}) محاسبه شد. ضریب همبستگی پیرسون در تمام موارد کمتر از 0.2 به دست آمد که نشان دهنده عدم وابستگی معنادار باقیمانده ها به این پارامترهاست. بنابراین PGA به عنوان IM از کفایت قابل قبولی برای کاربرد در تحلیل شکنندگی سازه های مورد مطالعه برخوردار است. این ارزیابی ها نشان می دهد که استفاده از PGA در روش های متداول و انرژی منجر به نتایجی با پراکندگی کنترل شده و فاقد سوگیری سیستماتیک ناشی از خصوصیات جنبشی منبع زمین لرزه می گردد.

منحنی های شکنندگی سازه های مورد نظر تحقیق با دو روش متداول و روش مبتنی بر انرژی بر اساس داده های ارائه شده در جدول ۳ محاسبه شده



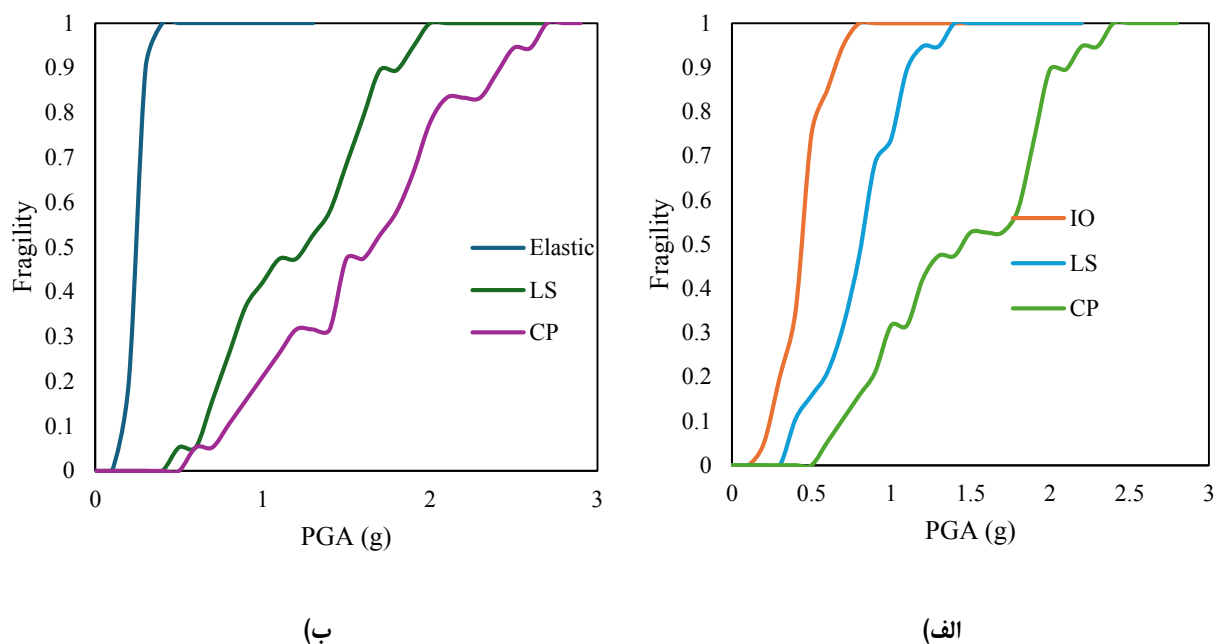
شکل ۱۶. منحنی های شکنندگی سازه هشت طبقه با روش (الف) متداول (ب) انرژی.

Fig. 16. Fragility curves of an eight-story structure using the a) conventional b) energy method.

سازه طبقه در بیشینه شتاب $g/9$ و در روش متداول در بیشینه شتاب g $1/7$ رخ داده است. به طور کلی نتایج نشان می دهد بر خلاف سازه های بلند ([۶، ۲۰]) که روش انرژی نتایج محافظه کارانه تری ارائه می داد، استفاده از روش انرژی در سازه های کوتاه و میان مرتبه می تواند مقدار شکنندگی کمتری را نسبت به روش متداول (ماکزیمم دریافت) ارائه دهد. برای بررسی سیف بودن شاخص شدت انتخاب شده (PGA)، منحنی های شکنندگی حاصل از دو EDP متفاوت (حداکثر دریافت و انرژی کرنشی پلاستیک) مستقیماً مقایسه شده اند (شکل های ۱۵ تا ۱۷). ملاحظه می شود که در کلیه سطوح عملکرد (LS و CP)، روش مبتنی بر دریافت همواره احتمال فراگذشت بیشتری را در IM یکسان نسبت به روش انرژی پیش بینی می کند. بنابراین اگر محافظه کاری به معنای پیش بینی ایمنی کمتر (یا خطر بیشتر) تعریف شود، روش دریافت محافظه کارانه تر است. این بدان معناست که PGA به عنوان IM، هنگامی که با EDP دریافت همراه شود، تخمین سمت امنی ارائه می دهد، در حالی که همراهی با EDP انرژی ممکن است تخمین خطر را کمتر نشان دهد. لذا توصیه می شود در کاربردهای عملی، بسته به نوع سازه و سطح عملکرد، انتخاب EDP به دقت مورد توجه قرار گیرد [۳۳، ۳۵].

در شکل ۱۶ شکنندگی برای سازه ۸ طبقه در دو روش متداول و انرژی ارائه شده است. در سازه ۸ طبقه احتمال ۵۰٪ فراگذشت از سطح الاستیک در بیشینه شتاب $g/25$ رخ داده است که نشان می دهد سازه ۸ طبقه در شتاب بیشتری نسبت به سازه ۴ طبقه الاستیک باقی می ماند. احتمال فراگذشت ۵۰٪ از سطح IO در بیشینه شتاب $g/45$ رخ داده است. احتمال فراگذشت ۵۰٪ از سطح LS در روش انرژی برای سازه ۸ طبقه در بیشینه شتاب $g/25$ و در روش متداول در بیشینه شتاب $g/9$ رخ داده است. همچنین احتمال فراگذشت ۵۰٪ از سطح CP در روش انرژی برای سازه ۸ طبقه در بیشینه شتاب $g/7$ و در روش متداول در بیشینه شتاب $g/5$ رخ داده است.

در شکل ۱۷ منحنی های شکنندگی برای سازه ۱۲ طبقه در دو روش متداول و انرژی بررسی شده است. در سازه ۱۲ طبقه نیز احتمال ۵۰٪ فراگذشت از سطح الاستیک در بیشینه شتاب $g/25$ رخ داده است. احتمال فراگذشت ۵۰٪ از سطح IO در بیشینه شتاب $g/55$ رخ داده است. احتمال فراگذشت ۵۰٪ از سطح LS در روش انرژی برای سازه ۱۲ طبقه در بیشینه شتاب $g/45$ و در روش متداول در بیشینه شتاب $g/1$ رخ داده است. همچنین احتمال فراگذشت ۵۰٪ از سطح CP در روش انرژی برای این



شکل ۱۷. منحنی های شکنندگی سازه دوازده طبقه با روش الف) متداول ب) انرژی.

Fig. 17. Fragility curves of a twelve-story structure using the a) conventional b) energy method.

۸- خلاصه و نتیجه گیری

در این تحقیق سعی شده است تا کاربرد روش انرژی در ارزیابی شکنندگی سازه های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه با سیستم قاب خمشی فولادی با شکل پذیری ویژه بررسی و با روش متداول مبتنی بر ماکزیمم دررفت طبقات مقایسه شود. در ابتدا پاسخ دینامیکی، دوران مفاصل پلاستیک و بالانس انرژی در سازه ها مورد ارزیابی قرار گرفت و سپس با در نظر گرفتن انرژی کرنشی تلف شده در سازه به عنوان EDP منحنی های IDA و شکنندگی استخراج و با روش متداول مقایسه شود. خلاصه نتایج به شرح زیر است:

- آنالیز بالانس انرژی در سازه (منحنی های تاریخچه زمانی انرژی کرنشی الاستیک، پلاستیک، انرژی تلف شده ناشی از میرایی و انرژی جنبشی) نشان می دهد در شدت های کم بار لرزه ای، انرژی ورودی با مجموع انرژی های ناشی از میرایی، انرژی کرنشی الاستیک و انرژی جنبشی در تعادل است. با افزایش شدت انرژی کرنشی پلاستیک نیز وارد معادلات بالانس انرژی می شود و با افزایش هرچه بیشتر شدت بار لرزه ای، میزان انرژی کرنشی تلف شده در سازه نیز افزایش می یابد. در لحظه ناپایداری سازه مقدار انرژی های جنبشی، انرژی تلف شده ناشی

- از میزایی و انرژی کرنشی پلاستیک به یکباره افزایش می یابد.
- منحنی های IDA حاصل از روش انرژی نشان می دهد که این منحنی ها از سه بخش کلی تشکیل شده اند. بخش الاستیک، بخش پلاستیک و نقطه ناپایداری سازه. وجود ناحیه الاستیک در سازه این قابلیت را به روش انرژی می دهد که بتوان برای سطح الاستیک نیز منحنی شکنندگی ترسیم کرد که این قابلیت در روش مبتنی بر دررفت وجود ندارد.
- نتایج حاصل از شکنندگی به روش متداول و روش انرژی نشان می دهد برخلاف تحقیقات گذشته انجام شده در سازه های بلند، در سازه های متداول و کوتاه (تحقیق حاضر) روش انرژی مقادیر شکنندگی محافظه کارانه ای را ارائه نمی دهد. مقادیر شکنندگی در سطوح LS و CP حاصل از روش انرژی کمتر از روش مبتنی بر ماکزیمم دررفت است.
- احتمال فراگذشت از سطح الاستیک با افزایش تعداد طبقات کاهش می یابد. در سازه چهار، هشت و دوازده طبقه احتمال ۵۰٪ فراگذشت از سطح الاستیک به ترتیب در بیشینه شتاب ۰/۱۵g و ۰/۲۵g و ۰/۲۵g رخ داده است.
- احتمال فراگذشت ۵۰٪ از سطح LS در روش انرژی برای سازه های

- Dynamics and Earthquake Engineering, 173 (2023) 108069.
- [9] M. Zucconi, F. Romano, B. Ferracuti, Typological fragility curves for RC buildings: influence of damage index and building sample selection, *Engineering Structures*, 266 (2022) 114627.
- [10] D. Lallemand, A. Kiremidjian, H. Burton, Statistical procedures for developing earthquake damage fragility curves, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 44(9) (2015) 1373–1389.
- [11] Z. Wang, X. Deng, X. Luo, X. Dang, J. Guo, Aftershock Fragility Assessment of Continuous RC Girder Bridges Using a Modified Damage Index, *Buildings*, 12(10) (2022) 1675.
- [12] M. Moradi, H. Tavakoli, G. Abdollahzade, Probabilistic evaluation of failure time of reinforced concrete frame in post-earthquake fire scenario, *Structural Concrete*, 25(5) (2024) 3487–3504.
- [13] H. Zhao, X. Wang, Z. Fang, S. Wu, M. Afzal, Assessment of fragility curve for steel frame construction under different categories of earthquakes, *Assessment*, 19 (2021).
- [14] C. Bao, X. Ma, K.S. Lim, G. Chen, F. Xu, F. Tan, N.H. Abd Hamid, Seismic fragility analysis of steel moment-resisting frame structure with differential settlement, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 141 (2021) 106526.
- [15] C. Liu, D. Fang, L. Zhao, J. Zhou, Seismic fragility estimates of steel diagrid structure with performance-based tests for high-rise buildings, *Journal of Building Engineering*, 52 (2022) 104459.
- [16] A. Kiani, A. Kheyroddin, M.A. Kafi, H. Naderpour, Seismic fragility assessment for mixed concrete/steel buildings considering the appropriate position of the transition story, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 163 (2022) 107552.
- [17] C. Goksu, Fragility functions for reinforced concrete columns incorporating recycled aggregates, *Engineering Structures*, 233 (2021) 111908.
- [18] F. Pourreza, M. Mousazadeh, M.C. Basim, An efficient ۴، ۸ و ۱۲ طبقه به ترتیب در بیشینه شتاب g ۱، g ۱/۲۵ و g ۱/۴۵ در روش متداول به ترتیب در بیشینه شتاب g ۰/۶۵، g ۰/۹ و g ۱ رخ داده است.
- احتمال فراگذشت ۵۰٪ از سطح CP در روش انرژی برای سازه های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه به ترتیب در بیشینه شتاب g ۱/۲، g ۱/۷ و g ۱/۹ در روش متداول به ترتیب در بیشینه شتاب g ۱، g ۱/۵ و g ۱/۷ رخ داده است.
- ## منابع
- [1] [1] M. Moradi, H. Tavakoli, Energy Balance on Steel Structure with Pall Damper under Blast Loading, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(10) (2020) 2415–2434.
- [2] M. Moradi, H. Tavakoli, Evaluation of the seismic sensitivity of steel frame with converging bracing to random variables, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(6) (2021) 2371–2388.
- [3] H. Tavakoli, M. Moradi, Sensitivity Analysis of Response of a Cable Bridge with Base Isolation to Material Variation under Near Earthquake, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(12) (2021) 3145–3160.
- [4] S. Rezaei, M. Moradi, A. Hasanzadeh, Numerical Investigation of the Parameters Influencing Site Effects, (2025).
- [5] M. Fallah Tafti, K. Amini Hosseini, B. Mansouri, Generation of new fragility curves for common types of buildings in Iran, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18 (2020) 3079–3099.
- [6] M. Moradi, M. Abdolmohammadi, Seismic fragility evaluation of a diagrid structure based on energy method, *Journal of Constructional Steel Research*, 174 (2020) 106311.
- [7] M. Moradi, S. Rezaei, The effect of considering soil-structure interaction on the seismic performance, sensitivity, and fragility of high-rise structures under near-fault records, in: *Structures*, Elsevier, 2026, pp. 111548.
- [8] S. Magapu, S. Setia, Fragility curves for assessment of seismic vulnerability of buildings on slopes, *Soil*

- Technology, Transactions of Civil Engineering, (2025) 1–26.
- [28] P. Amirchoupani, G. Abdollahzadeh, H. Hamidi, Development of inelastic displacement ratio using constant energy-based damage index for performance-based design, Bulletin of Earthquake Engineering, 21(7) (2023) 3461–3491.
- [29] G.W. Housner, The plastic failure of frames during earthquakes, Proc. of 2nd WCEE, VI, 1960, (1960) 997–1012.
- [30] FEMA, P., Quantification of building seismic performance factors. 2009, Washington, DC.
- [31] S. Szyniszewski, T. Krauthammer, Energy flow in progressive collapse of steel framed buildings, Engineering Structures, 42 (2012) 142–153.
- [32] H. Tavakoli, M. Moradi, M. Goodarzi, H. Najafi, Outrigger braced system placement effect on seismic collapse probability of tall buildings, Civil Engineering Infrastructures Journal, 55(2) (2022) 259–276.
- [33] D. Ostad, J. Shafaei, Comparison of Analytical Methods for Modelling Masonry Infill by Considering In-Plane and Out-of-Plane Interaction, Journal of Structural and Construction Engineering, 8(3) (2021) 96–113.
- [34] D. Ostad, J. Shafaei, Analytical study of the effect of different parameters on the seismic performance of masonry infill with opening in RC frames with seismic and non-seismic detailing, Modares Civil Engineering journal, 22(1) (2025) 67–81.
- [35] D. Ostad, J. Shafaei, Analytical Study of the Effect of Different Parameters on the Seismic Performance of Masonry Infilled RC Frames, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 53(3) (2021) 955–976.
- [36] S.A. Nezami, J. Shafaei, Parametric Non-Linear Finite Element Analysis of RC Beam-Column Joint under Monotonic and Cyclic Loading, Modares Civil Engineering journal, 20(4) (2020) 191–207.
- [37] J. Shafaei, Parametric study of the behavior of exterior post-tensioned slab column connections under lateral loading, Concrete Research, 15(4) (2022) 21–32.
- method for incorporating modeling uncertainties into collapse fragility of steel structures, Structural Safety, 88 (2021) 102009.
- [19] Y. Zhou, Y. Xiao, M.S. Sebaq, Energy-based fragility curves of building structures equipped with viscous dampers, in: Structures, Elsevier, 2022, pp. 1660–1679.
- [20] M.J. Goodarzi, M. Moradi, P. Jalali, M. Abdolmohammadi, S.M. Hasheminejad, Fragility assessment of an outrigger structure system based on energy method, The Structural Design of Tall and Special Buildings, 32(11-12) (2023) e2017.
- [21] M. Javaheri-tafti, M. Hajisafari, Comparison of conventional and energy method in evaluating the seismic fragility of reinforced concrete frames, Civil Engineering Infrastructures Journal, (2024).
- [22] M. Moradi, H. Tavakoli, Proposal of an energy based assessment of robustness index of steel moment frames under the seismic progressive collapse, Civil Engineering Infrastructures Journal, 53(2) (2020) 277–293.
- [23] M.J. Goodarzi, H. Najafi, M. Moradi, Energy-based analysis of a steel moment frame with viscous damper under blast loading, Journal of Structural and Construction Engineering, 9(5) (2022) 140–162.
- [24] D. Apritasari, J.I. Rastandi, M. Orientilize, B. Sentosa, Effect of Hinge Properties on Nonlinear Analysis of Eccentrically Steel Braced Frames, in: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, 2020, pp. 012048.
- [25] V. Sharma, M.K. Shrimali, S.D. Bharti, T.K. Datta, Seismic fragility evaluation of semi-rigid frames subjected to near-field earthquakes, Journal of Constructional Steel Research, 176 (2021) 106384.
- [26] A. Saha, S.K. Mishra, Implications of inter-storey-isolation (ISI) on seismic fragility, loss and resilience of buildings subjected to near fault ground motions, Bulletin of Earthquake Engineering, 20(2) (2022) 899–939.
- [27] F. Hosseinlou, M. Moradi, M. Sadrianzade, P. Jalali, An energy-based method for calculating the fragility curve of bridges: a case study, Iranian Journal of Science and

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. Dehrouye, A. Delnavaz, R. Farrokhzad, M. Seyed Razaghi, Comparison of Conventional and Energy-Based Methods in Fragility Assessment of Steel Moment-Resisting Frames, Amirkabir J. Civil Eng., 58(2) (2026) 243-266.

DOI: [10.22060/ceej.2026.25017.8374](https://doi.org/10.22060/ceej.2026.25017.8374)



