

## مطالعه اثر میرایی و شکل پذیری تغییر مکانی سازه بر طیف انرژی ورودی زلزله

رضا وهدانی<sup>۱</sup>، محسن گرامی<sup>۲\*</sup>، محمد علی واثقی نیا<sup>۳</sup>

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۳- دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

### چکیده

برای ارتقای طراحی لرزه‌ای سازه‌ها، آرایه معیارهای جامع‌تر نسبت به معیارهای رایج در طراحی لرزه‌ای برای جامعه مهندسی ضروری است. در مجامع تحقیقاتی استفاده از مفهوم انرژی به عنوان فلسفه طراحی لرزه‌ای مورد توجه قرار گرفته است لیکن برای کاربردی شدن مفهوم انرژی و توسعه آن در طراحی لرزه‌ای خلأهایی وجود دارد که هدف اصلی این پژوهش پرکردن بخش کوچکی از این خلأها است. معیار انرژی کمیته ساده، اسکالر و مفهومی است. سهولت استفاده از طیف‌ها به عنوان ابزار کارآمد در مهندسی مورد توجه است؛ لذا مطالعه اثر میرایی و شکل پذیری بر روی طیف انرژی ورودی زلزله به سازه، برای بکارگیری معیار انرژی در طراحی لرزه‌ای گامی مؤثر است. در این پژوهش با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی برای ۴ نسبت میرایی و ۴ مقدار شکل پذیری، طیف‌های انرژی ورودی نسبتی بر واحد جرم سازه برای ۴ زلزله ایران تولید شده است. با بررسی ۶۴ طیف تولید شده در این پژوهش، نتایج بدست آمده مورد بحث قرار گرفته است. بررسی طیف‌ها نشان می‌دهد که افزایش نسبت میرایی و شکل پذیری موجب هموارتر شدن طیف انرژی ورودی نسبتی و کاهش تغییرات این طیف می‌شود. همچنین اثر تغییرات شکل پذیری بر طیف انرژی ورودی نسبتی محسوس‌تر از اثر تغییرات نسبت میرایی بر طیف مذکور می‌باشد. تغییرات نسبت میرایی و شکل پذیری تأثیر ناچیزی بر تغییر پریود متناظر با قله طیف انرژی ورودی نسبتی دارد. در مجموع و با تقریب مهندسی و در محدوده نسبت‌های میرایی و شکل پذیری مطالعه شده در این پژوهش نتیجه گیری شده است که در حوزه رفتار غیرارتجاعی و در محدوده وسیعی از پریودها، طیف انرژی ورودی نسبتی بر واحد جرم سازه حساسیت چندانی نسبت به تغییرات نسبت میرایی و شکل پذیری ندارد و تابعی از پریود سازه می‌باشد؛ و با توجه به عدم اطلاع مهندسان طراح از مقادیر واقعی نسبت میرایی و شکل پذیری در زمان طراحی سازه، این موضوع یک مزیت محسوب می‌شود.

**کلمات کلیدی:** طیف انرژی، نسبت میرایی، شکل پذیری تغییر مکانی، انرژی ورودی نسبتی، انرژی ورودی بر واحد جرم.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2017.80788.1138	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2017.80788.1138	۱۳۹۷/۰۵/۳۰	۱۳۹۶/۰۴/۰۳	۱۳۹۶/۰۴/۰۳	۱۳۹۶/۰۳/۱۳	۱۳۹۶/۰۱/۲۰
			نویسنده مسئول: محسن گرامی mgerami@semnan.ac.ir		پست الکترونیکی:	

# Structural damping and displacement ductility effects on input energy spectrum of earthquake

Reza Vahdani<sup>1</sup>, Mohsen Gerami\*<sup>2</sup>, Mohamad Ali Vaseghinia<sup>3</sup>

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

3- PhD Student in Earthquake Engineering, Department of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

## ABSTRACT

To improve seismic design of structures, providing more comprehensive criterion than the common criterions in structural seismic design is essential for the engineering community. The concept of energy has been considering as a seismic design philosophy in research communities; But there are some gaps for application of energy concept and its development in seismic design, and filling a small part of these gaps is the main objective of this study. Energy criterion is simple, scalar and conceptual quantity. Easy using of spectrum as an efficient tool in engineering is noteworthy; therefore, study on effects of damping and ductility on input energy spectrum is effective step to exert the energy criterion in structural seismic design. In this research, by using nonlinear dynamic analysis for 4 damping ratios and 4 ductility factors, relative input energy spectra per unit mass of structure have been produced for 4 Iranian earthquakes. Then 64 spectra that produced in this study have been reviewed and obtained-results have been discussed. Scrutiny of spectra show that increasing of damping ratio and ductility have reduced spectrum's changes. Also, variation of ductility factor is more effective than the variation of damping ratio on relative input energy spectrum. Variation of damping ratio and ductility factor have little effect on changing of peak corresponding period in relative input energy spectrum. Overall, with engineering estimate and in the range of damping ratios and ductility that have been studied in this research, has been concluded that in inelastic behavior range, input energy spectrum per unit mass has little sensitivity to changes of damping ratio and ductility in wide range of periods, and it is a function of structure's period. Because lack of design engineer's awareness on real amounts of damping ratio and ductility when designing structure, it is one advantages of relative input energy spectrum.

## ARTICLE INFO

Received: 09/04/2017

Revised: 03/06/2017

Accepted: 24/06/2017

## Keywords:

Energy Spectrum

Damping Ratio

Displacement Ductility

Relative Input Energy

Input Energy Per Unit Mass

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2017.80788.1138

\*Corresponding author: Mohsen Gerami.

Email address: mgerami@semnan.ac.ir

## ۱- مقدمه

در روش‌های متداول طراحی لرزه‌ای، مقاومت لرزه‌ای سازه‌ها زمانی مناسب فرض می‌شود که ظرفیت تغییرشکل و یا حد مقاومت سازه بیش از تقاضای زمین لرزه‌های بزرگ باشد؛ در حالی که بخش عمده‌ای از خسارت‌های ناشی از زمین لرزه در نتیجه چرخه‌های غیرارتجاعی رفت و برگشتی است و پارامتری که بیشترین بستگی را به رفتار چرخه‌ای سازه‌ها و در نتیجه پتانسیل تخریب زمین لرزه دارد، انرژی ورودی به سازه است.

اگرچه روش‌های متداول در طراحی لرزه‌ای پارامترهایی نظیر نیرو، تغییرمکان و شکل‌پذیری را در نظر می‌گیرند لیکن رفتار تعداد قابل توجهی از سازه‌هایی که طراحی شده و زلزله واقعی را تجربه کرده اند نشان می‌دهد که معیارهای موجود ناکافی می‌باشند و می‌بایست از معیارهای جامع تری استفاده کنیم؛ لذا مفهوم انرژی در مجامع تحقیقاتی مورد توجه دانشمندان قرار گرفته است و محققان زیادی مفهوم انرژی را در تحلیل سازه‌ها و مدل‌های خسارت بکار برده اند.

هاوزنر در سال ۱۹۵۶ برای اولین بار از مفهوم انرژی برای مطالعه لرزه‌ای سازه‌ها استفاده کرد [۱]. با وجود ابتدایی بودن روابط پیشنهادی هاوزنر، پارامترهای مورد اشاره وی انگیزه اولیه جهت توسعه آتی روش انرژی در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها را فراهم نمود.

آکیاما در سال ۱۹۸۸ طراحی مقاوم لرزه‌ای بر مبنای مفهوم انرژی را مورد بررسی قرار داد. وی معتقد بود اکثر مسائل اساسی در طراحی مقاوم لرزه‌ای، ارتباط بسیار تنگاتنگی با ورودی لرزه‌ای به سازه دارد. آکیاما بیان کرد که انرژی ورودی می‌بایست به عنوان بارگذاری اصلی روی ساختمان در نظر گرفته شود و بر اساس مفهوم انرژی، یک ضابطه کلی برای طراحی مقاوم لرزه‌ای می‌تواند حاصل شود [۲]. آکیاما رابطه‌ای برای محاسبه انرژی ورودی بر واحد جرم پیشنهاد داد، بصورتی که مقدار انرژی ورودی بر واحد جرم سازه تابع پیوند سازه است.

یانگ و برترو در سال ۱۹۸۸ با انجام مطالعه آزمایشگاهی، انرژی لرزه‌ای در سازه‌ها را ارزیابی کرده و تقسیم بندی جدیدی شامل انرژی ورودی مطلق و انرژی ورودی نسبی را برای انرژی ورودی به سازه مطرح کردند [۳]. آنها انرژی ورودی را به عنوان یک پارامتر قابل اعتماد و خوش آتیه برای تعریف پتانسیل خرابی سازه‌ها معرفی نمودند. یانگ و برترو را می‌توان از افراد پیشرو در زمینه انرژی دانست.

فخری نیاسر و غفوری آشتیانی در سال ۱۹۹۸ طی پژوهشی بیان کردند که پارامتر انرژی جامع بوده و در بر گیرنده تمام خصوصیات زلزله می‌باشد. تحقیقات آنها نشان داد که برای بیان کاملی از خصوصیات دینامیکی زلزله و تعیین ارتباط صحیحی بین توان زلزله و پتانسیل خرابی آن، استفاده از پارامتر انرژی دارای اهمیت ویژه‌ای است؛ و پارامترهای انرژی در قالب طیف‌های انرژی از مهم‌ترین پارامترهای قابل اعتماد برای تعیین پتانسیل خسارت می‌باشند. آنها بیان کردند به علت اسکالر بودن انرژی، جمع کردن مقادیر انرژی مربوط به مؤلفه‌های مختلف رکورد زلزله نسبت به حالتی که انرژی یک مؤلفه رکورد زلزله به تنهایی در نظر گرفته شود، منطقی تر می‌باشد [۴]. در مطالعه دیگری که در سال ۲۰۰۰ توسط غفوری آشتیانی و ملکی انجام شد، انرژی زمین‌لرزه در چند سازه قاب خمشی بتن مسلح مطالعه شد و پیشنهاد دادند که با استفاده از زلزله‌های ایران، روابطی برای پیشینه انرژی ورودی در واحد جرم سازه استخراج شود [۵].

روزی در سال ۲۰۰۳ مفهوم انرژی در طراحی مقاوم لرزه‌ای را بررسی کردند. آنها معتقد بودند که انرژی ورودی به عنوان ابزاری قوی و کارآمد در طراحی لرزه‌ای بوده و انرژی ورودی پارامتر پایداری برای نمایش اثر بارگذاری لرزه‌ای است. آنها بیان کردند که وابسته بودن اثر بارگذاری زلزله و مقاومت سازه در روش‌های رایج طراحی لرزه‌ای، یک نقص است [۶].

خشائی و محرز در سال ۲۰۰۳ طی یک گزارش فنی در مؤسسه ملی استاندارد و فناوری آمریکا (NIST)، توزیع انرژی ورودی در سازه‌ها را مطالعه کردند [۷]. آنها تأثیر ویژگی‌های جنبش زمین (نظیر شدت، محتوای فرکانسی، مدت تکان قوی جنبش) و ویژگی‌های سازه‌ای (نظیر شکل‌پذیری، میرایی، رفتار هیسترتیک) را روی توزیع انرژی ورودی برای ساختمان ۱ و ۵ طبقه با استفاده از ۲۰ رکورد شتابنگاشت بررسی کردند. نتایج بررسی آنها نشان داد که توزیع انرژی در ارتفاع سازه اغلب مستقل از محتوای فرکانسی و مدت تکان قوی زلزله می‌باشد؛ همچنین جداسازی لرزه‌ای و میراگرهای الحاقی و کنترل نیمه فعال بواسطه کاهش تقاضای انرژی‌های ورودی و هیسترتیک، موجب کاهش پتانسیل خسارت می‌شود و تأثیر قابل توجهی روی توزیع انرژی در ارتفاع سازه دارد.

قدرتی و همکاران در سال ۲۰۰۷ اثرات میرایی و مدت تکان قوی زلزله را روی انرژی ورودی الاستیک مطالعه کردند. آنها با استفاده از ۱۱۰ رکورد زلزله‌های ایران بر روی چهار نوع خاک، طیف‌های سرعت معادل انرژی را محاسبه کردند. آنها نتیجه گرفتند که با افزایش مدت تکان‌های قوی زمین‌لرزه، انرژی ورودی به سازه نیز افزایش می‌یابد؛ همچنین انرژی ورودی به سازه در خاک‌های نرم بیشتر از خاک‌های سخت می‌باشد و با افزایش سختی خاک محل ثبت رکورد، انرژی ورودی کاهش می‌یابد [۸]. در مطالعه دیگری که در سال ۲۰۰۸ توسط عبداله‌زاده و قدرتی انجام شد، طیف طرح انرژی ورودی ارتجاعی برای ایران پیشنهاد شد [۹].

حسینی و حداد شرق در سال ۲۰۱۱ به منظور کمینه کردن انرژی ورودی لرزه‌ای، بر روی توزیع بهینه سختی در ارتفاع ساختمان‌های قاب برشی مطالعه کردند. آنها نشان دادند که برای سازه‌های میان مرتبه (تا حدود ۲۰ طبقه) توزیع بهینه سختی را می‌توان سهموی در نظر گرفت لیکن برای سازه‌های بلندتر، توزیع بهینه سختی در ارتفاع با منحنی زنگی شکل انطباق بیشتری پیدا می‌کند. همچنین در محدوده مورد بررسی، انرژی ورودی وقتی کمینه خواهد شد که توزیع بهینه سختی در ارتفاع قاب موجب یکنواختی جابجایی‌های نسبی طبقات گردد. یکی از نتایج مهم در پژوهش آنها این است که حتی با بهینه شدن توزیع سختی در ارتفاع قاب، اختلاف قابل توجهی در مقدار انرژی ورودی مشاهده نمی‌شود لیکن توزیع بهینه سختی در ارتفاع سازه موجب کاهش چشمگیر شاخص‌های خسارت می‌شود [۱۰].

کمالی و بهشتی اول در سال ۲۰۱۱ بکارگیری روش انرژی جهت برآورد نیاز تغییرمکانی قاب‌های خمشی فولادی را مطالعه نمودند [۱۱]. آنها راهکاری وابسته به شدت طیفی (SI) جهت تخمین دقیق‌تری از انرژی انتقالی رکورد پیشنهاد دادند و روشی بر پایه مفهوم سرعت و در دستگاه مختصات سرعت- تغییرمکان جهت تخمین تغییرمکان نهایی سازه معرفی کردند. آنها با توجه به آنالیز دینامیکی افزایشی، روشی تحت عنوان انرژی افزایشی جهت تخمین ظرفیت انرژی سازه و انرژی لرزه‌ای ارائه نمودند.

سیاه‌پلو در سال ۲۰۱۵ اثر زلزله‌های حوزه نزدیک گسل بر تخمین نیازهای لرزه‌ای قاب خمشی فولادی با منظور نمودن اثرات چند درجه آزادی را مطالعه کرد [۱۲]. او در مطالعه تاریخچه زمانی انرژی ورودی در زلزله‌های حوزه دور نشان داد که مجموع انرژی ورودی به صورت تدریجی به سازه وارد می‌شود و سازه برای اتلاف انرژی در چندین چرخه تغییرشکل‌های پلاستیک فرصت کافی دارد؛ لیکن در زلزله‌های حوزه نزدیک انرژی ورودی در لحظات ابتدایی دارای رشد قابل توجه بوده و در مدت زمان کوتاهی به سازه تحمیل می‌شود لذا سازه در این حالت فرصت کافی برای اتلاف انرژی از طریق تغییرشکل‌های پلاستیک را ندارد و غالباً شکست ترد رخ می‌دهد. همچنین بین انرژی میرایی ویسکوز و انرژی تلف شده در اثر رفتار چرخه‌ای توازن برقرار است که باعث می‌شود مجموع این دو مکانیسم اتلاف انرژی چندان نسبت به درجه غیرخطی شدن سازه حساس نباشد. برای سازه‌های با پیوند کوتاه، سهم عمده‌ای از کل انرژی تلف شده مربوط به انرژی تلف شده چرخه‌ای است. همچنین تغییرات نسبت انرژی مطلق به نسبی در برابر دوره تناوب برای زلزله نزدیک گسل را بررسی کرد و نشان داد که افزایش اثرات غیرخطی شدن سازه موجب کاهش تغییرات نسبت مذکور می‌شود.

هوائی و موبدی در سال ۲۰۱۵ اثرات اندرکنش و حرکت گهواره‌ای به سبب تسلیم شدن کف ستون‌ها بر روی پاسخ سازه‌های فولادی را مطالعه کردند [۱۳]. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که در سازه‌های فولادی مهاربندی شده، بلندشدگی و ایجاد حرکت گهواره‌ای در آنها موجب استهلاک انرژی ورودی زلزله و کاهش پاسخ سازه می‌شود.

بمانیان و شکیب در سال ۲۰۱۶ رفتار غیرخطی سیستم دوگانه قاب-دیوار برشی فولادی تحت گروهی از زلزله‌های واقعی را ارزیابی کرده و نتیجه گرفتند که سیستم دوگانه قاب-دیوار برشی فولادی سیستم مناسبی جهت جذب انرژی ورودی بسیار بالا است [۱۴].

وهدانی و همکاران در سال ۲۰۱۶ اثر اندرکنش خاک و سازه بر ارزیابی عملکرد شاخص خرابی تجمعی انرژی در قاب‌های بتن مسلح را مطالعه کردند. آنها نشان دادند که اثر اندرکنش خاک و سازه بر روی شاخص خرابی تجمعی انرژی در المان تیر بیشتر از المان ستون می‌باشد؛ همچنین اثر مذکور در خاک‌های سست دارای اهمیت بیشتری است [۱۵].

در پژوهش‌های انجام شده توسط دکانینی و مولایولی در سال ۲۰۰۱ و بی در سال ۲۰۰۹، اثر مدل هیسترتیک و شیب ناحیه پسا تسلیم در مدل رفتاری سازه بر روی طیف انرژی ورودی مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۶ و ۱۷]. آنها نتیجه گرفتند که عموماً تأثیر مدل

هیستریتیک روی طیف انرژی ورودی قابل توجه نمی‌باشد؛ و اگر شیب ناحیه پسا تسلیم بزرگتر شود، موجب کاهش تغییر مکان‌های نسبی بین طبقات و توزیع یکنواخت‌تر تغییر شکل‌های غیرالاستیک شده و منجر به خسارت یکنواخت‌تر می‌گردد.

همان طور که با مرور پیشینه تحقیقات مشاهده می‌شود، روش‌هایی که تاکنون در زمینه انرژی توسط محققین پیشنهاد شده است بیشتر جنبه ارزیابانه از سازه‌های موجود را دارند و برای استفاده از مفهوم انرژی در طراحی لرزه‌ای سازه‌های جدید، خلأهای زیادی وجود دارد. هدف اصلی این پژوهش برداشتن یک گام بسوی استفاده از مفهوم انرژی در طراحی لرزه‌ای سازه‌های جدید می‌باشد تا بدین طریق بتوان در راستای کاربردی نمودن و توسعه علوم گامی برداشته و در راه پیشرفت این مرز و بوم به پژوهشگران و مهندسين یاری رسانده شود. برای استفاده از مفهوم انرژی در طراحی لرزه‌ای سازه‌های جدید می‌توان از طیف انرژی ورودی به عنوان بارگذاری لرزه‌ای استفاده نمود؛ بنابراین مطالعه تأثیر نسبت میرایی و شکل‌پذیری تغییر مکانی سازه بر روی طیف انرژی ورودی ناشی از زلزله به سازه دارای اهمیت است. انتظار می‌رود افزایش مقادیر نسبت میرایی و شکل‌پذیری موجب کاهش تغییرات مقادیر طیف انرژی ورودی و هموارتر شدن آن شود.

## ۲- مبانی نظری تحقیق

برای محاسبه تاریخچه زمانی انرژی ورودی و تولید طیف انرژی ورودی می‌بایست مبانی نظری آن بیان گردد. در این قسمت از مقاله ابتدا معادله تعادل نیرو برای سیستم یک درجه آزاد میرا تحت تحریک افقی تکیه گاه‌ها نوشته شده است و سپس معادله انرژی‌های ورودی نسبی و مطلق بیان شده است. ارجحیت استفاده از انرژی ورودی نسبی در انتهای همین بخش بیان شده است.

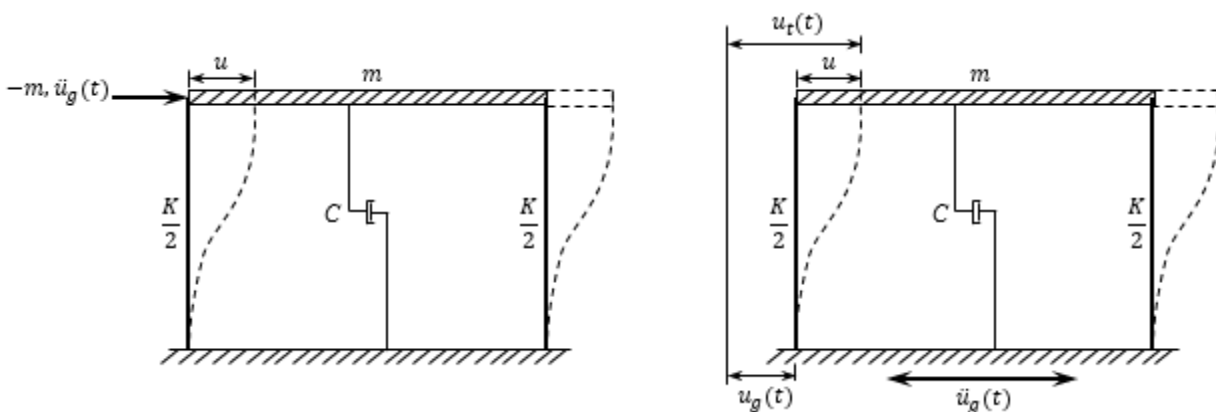
سیستم یک درجه آزاد که تحت ارتعاش و حرکت پی قرار دارد (شکل ۱-الف) را می‌توان بصورت سیستمی دارای تکیه گاه ثابت و نیروی دینامیکی اعمال شده برابر  $m \cdot \ddot{u}_g$  معادل نمود (شکل ۱-ب)؛ اگرچه هر دو سیستم جابجایی نسبی یکسانی دارند ولی بسته به استفاده از هر یک از روابط (۱) یا (۲)، دو تعریف متفاوت برای انرژی ورودی و انرژی جنبشی حاصل می‌شود که در ادامه توضیح داده شده است.

روابط (۱) و (۲) بیانگر معادله تعادل نیرو در سیستم یک درجه آزاد میرا بترتیب مطابق شکل‌های ۱-الف و ۱-ب می‌باشند:

$$m \cdot \ddot{u}_t + C \cdot \dot{u} + f_s = 0 \quad (1)$$

$$m \cdot \ddot{u} + C \cdot \dot{u} + f_s = -m \cdot \ddot{u}_g \quad (2)$$

که در روابط فوق:  $m$  جرم سیستم،  $\ddot{u}_t$  شتاب مطلق جرم (مجموع شتاب نسبی جرم نسبت به زمین و شتاب زمین حین زلزله)،  $C$  ضریب میرایی ویسکوز،  $\dot{u}$  سرعت نسبی جرم نسبت به زمین،  $f_s$  نیروی بازگرداننده،  $\ddot{u}$  شتاب نسبی جرم نسبت به زمین و  $\ddot{u}_g$  شتاب زمین حین زلزله می‌باشد.



شکل ۱: مدل‌های ریاضی سیستم یک درجه آزاد میرا: الف) سیستم با حرکت تکیه گاهی؛ ب) سیستم معادل با تکیه گاه ثابت.

## ۲-۱- معادله انرژی نسبی سیستم یک درجه آزاد

با انتگرال گیری از معادله (۲) نسبت به جابجایی نسبی جرم خواهیم داشت:

$$\int m \cdot \ddot{u} \cdot du + \int C \cdot \dot{u} \cdot du + \int f_s \cdot du = - \int m \cdot \ddot{u}_g \cdot du \quad (3)$$

طرف راست رابطه (۳) بیانگر انرژی ورودی نسبی  $E_{ri}$  است که از نظر فیزیکی بیان کننده کار انجام شده به وسیله نیروی جانبی معادل استاتیکی  $-m \cdot \ddot{u}_g$  در سیستم معادل دارای تکیه گاه ثابت (فونداسیون بدون حرکت) می باشد.

از مشتق گیری در ریاضیات می دانیم که  $\dot{u} = \frac{du}{dt}$  بنابراین می توان بجای  $du$  در رابطه (۳) عبارت  $\dot{u} \cdot dt$  را جایگذاری نمود؛ در این صورت معادله انتگرالی تعادل انرژی نسبی سیستم یک درجه آزاد میرا بر حسب متغیر زمان بدست می آید:

$$\int m \cdot \ddot{u} \cdot \dot{u} \cdot dt + \int C \cdot \dot{u} \cdot \dot{u} \cdot dt + \int f_s \cdot \dot{u} \cdot dt = - \int m \cdot \ddot{u}_g \cdot \dot{u} \cdot dt \quad (4)$$

طرف راست رابطه (۴) بیانگر انرژی ورودی نسبی  $E_{ri}$  و اولین قسمت از سمت چپ معادله (۴) مربوط به انرژی نسبی جنبشی سیستم  $E_{rk}$  می باشد. دومین قسمت از سمت چپ معادله (۴) مربوط به انرژی میرایی  $E_d$  و سومین قسمت از سمت چپ معادله (۴) مربوط به انرژی جذب شده توسط سیستم  $E_a$  می باشد. انرژی جذب شده توسط سیستم  $E_a$  در سیستم ارتجاعی شامل انرژی کرنشی برگشت پذیر  $E_s$  است؛ در حالی که انرژی جذب شده توسط سیستم  $E_a$  در سیستم غیر ارتجاعی شامل انرژی کرنشی برگشت پذیر  $E_s$  و انرژی هیسترتیک  $E_h$  می باشد:

$$E_{rk} + E_d + E_a = E_{ri} \quad (5)$$

$$E_a = E_s \quad \text{در سیستم ارتجاعی} \quad (6)$$

$$E_a = E_s + E_h \quad \text{در سیستم غیر ارتجاعی} \quad (7)$$

## ۲-۲- معادله انرژی مطلق سیستم یک درجه آزاد

با انتگرال گیری از معادله (۱) نسبت به جابجایی نسبی جرم خواهیم داشت:

$$\int m \cdot \ddot{u}_t \cdot du + \int C \cdot \dot{u} \cdot du + \int f_s \cdot du = 0 \quad (8)$$

می توان بجای  $du$  در رابطه (۸) عبارت  $\dot{u} \cdot dt$  را جایگذاری نمود؛ در این صورت معادله انتگرالی تعادل انرژی سیستم یک درجه آزاد میرا بر حسب متغیر زمان بدست می آید:

$$\int m \cdot \ddot{u}_t \cdot \dot{u} \cdot dt + \int C \cdot \dot{u} \cdot \dot{u} \cdot dt + \int f_s \cdot \dot{u} \cdot dt = 0 \quad (9)$$

می توان بجای  $\dot{u}$  در اولین قسمت از سمت چپ رابطه (۹) عبارت  $\dot{u}_t - \dot{u}_g$  را جایگذاری نمود:

$$\int m \cdot \ddot{u}_t \cdot (\dot{u}_t - \dot{u}_g) \cdot dt + \int C \cdot \dot{u} \cdot \dot{u} \cdot dt + \int f_s \cdot \dot{u} \cdot dt = 0 \quad (10)$$

با ساده سازی ریاضی رابطه (۱۰)، معادله انتگرالی تعادل انرژی مطلق سیستم یک درجه آزاد میرا بر حسب متغیر زمان بدست می آید:

$$\int m \cdot \ddot{u}_t \cdot \dot{u}_t \cdot dt + \int C \cdot \dot{u} \cdot \dot{u} \cdot dt + \int f_s \cdot \dot{u} \cdot dt = \int m \cdot \ddot{u}_t \cdot \dot{u}_g \cdot dt \quad (11)$$

طرف راست رابطه (۱۱) بیانگر انرژی ورودی مطلق  $E_{ai}$  و اولین قسمت از سمت چپ معادله (۱۱) مربوط به انرژی جنبشی مطلق سیستم  $E_{ak}$  می باشد. دومین قسمت از سمت چپ معادله (۱۱) مربوط به انرژی میرایی  $E_d$  و سومین قسمت از سمت چپ معادله (۱۱) مربوط به انرژی جذب شده توسط سیستم  $E_a$  می باشد. همانند روابط (۶) و (۷)، انرژی جذب شده توسط سیستم  $E_a$  در سیستم ارتجاعی شامل

انرژی کرنشی برگشت پذیر  $E_s$  است؛ در حالی که انرژی جذب شده توسط سیستم  $E_a$  در سیستم غیر ارتجاعی شامل انرژی کرنشی برگشت پذیر  $E_s$  و انرژی هیسترتیک  $E_h$  می‌باشد. رابطه (۱۲) بیان دیگری از رابطه (۱۱) می‌باشد.

$$E_{ak} + E_d + E_a = E_{ai} \quad (12)$$

### ۲-۳- اختلاف معادلات انرژی نسبی و مطلق در سیستم یک درجه آزاد

برای محاسبه میزان اختلاف معادلات انرژی نسبی و مطلق در سیستم یک درجه آزاد با استفاده از روابط (۵) و (۱۲) داریم:

$$E_{ri} - E_{ai} = (E_{rk} + E_d + E_a) - (E_{ak} + E_d + E_a) = E_{rk} - E_{ak} \quad (13)$$

رابطه (۱۳) بیان می‌کند که اختلاف بین انرژی ورودی نسبی و مطلق برابر است با اختلاف بین انرژی جنبشی نسبی و مطلق. با استفاده از اجزای روابط (۴) و (۱۱) و جایگذاری در رابطه (۱۳) خواهیم داشت:

$$E_{ri} - E_{ai} = E_{rk} - E_{ak} = \int m \cdot \dot{u} \cdot \dot{u} \cdot dt - \int m \cdot \dot{u}_t \cdot \dot{u}_t \cdot dt \quad (14)$$

با ساده سازی ریاضی رابطه (۱۴)، رابطه مربوط به اختلاف انرژی ورودی نسبی و مطلق حاصل می‌شود:

$$E_{ri} - E_{ai} = E_{rk} - E_{ak} = \frac{1}{2} m \cdot \dot{u}^2 - \frac{1}{2} m \cdot \dot{u}_t^2 = \frac{1}{2} m \cdot \dot{u}^2 - \frac{1}{2} m \cdot (\dot{u} + \dot{u}_g)^2 = -\frac{1}{2} m \cdot \dot{u}_g^2 - m \cdot \dot{u} \cdot \dot{u}_g \quad (15)$$

با توجه به این واقعیت که سرعت نسبی و جابجایی نسبی باعث بروز خسارت در سازه تحت زلزله می‌شوند، و همچنین انرژی مستهلک شده در اثر میرایی یا تسلیم به حرکت نسبی وابسته می‌باشد لذا به منظور طراحی مقاوم لرزه‌ای ساختمان‌ها در برابر زلزله مفهوم انرژی نسبی بسیار پر معناتر و مفیدتر از انرژی مطلق می‌باشد [۱۸]. بنابراین در این تحقیق از مفهوم انرژی نسبی برای تهیه طیف انرژی ورودی بر واحد جرم سازه تحت زلزله استفاده شده است.

### ۳- روش تحقیق

معرفی شتابنگاشت‌ها، مدل سازی و تحلیل، تولید طیف‌های انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه و بررسی آنها در این بخش انجام شده است. به علت رعایت پیوستگی مطلب و سهولت در مشاهده اعداد بر روی شکل‌ها برای خوانندگان محترم، بررسی مشاهدات مربوط به هر زلزله در نزدیکی طیف‌های تولید شده مربوط به همان زلزله ارائه شده است.

#### ۳-۱- شتابنگاشت‌ها

در این پژوهش از رکوردهای مربوط به ۴ عدد از زلزله‌های ایران استفاده شده است؛ که مشخصات آنها در جدول ۱ ارائه شده است. رکوردهای مربوط به زلزله طبس و منجیل از سایت دانشگاه برکلی PEER و رکوردهای مربوط به زلزله بم و سیلاخور از مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی دریافت شده است [۱۹ و ۲۰]. رکوردهایی که از سایت دانشگاه برکلی PEER دریافت شده اند نیازی به اصلاح و پردازش ندارند؛ لیکن رکوردهایی که از مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی دریافت شده اند نیازمند اصلاح و پردازش هستند. نرم افزار SeismoSignal برای اصلاح و پردازش شتابنگاشت‌ها مورد استفاده قرار گرفته است [۲۱]. برای اصلاح خط مبنا از تابع درجه دو Quadratic و برای فیلتراسیون از فیلتر Butterworth با محدوده فرکانسی ۰/۱ تا ۲۵ هرتز استفاده شده است.

برای تعیین نوع خاک ایستگاه محل ثبت رکورد زلزله از سرعت موج برشی خاک و طبقه بندی ارائه شده در استاندارد ۲۸۰۰ ایران استفاده شده است [۲۲]. مطالعه اثر حوزه و دور نزدیک گسل در این مقاله مد نظر نمی‌باشد؛ لیکن در صورتی که فاصله حدود ۲۰ کیلومتر از گسل به عنوان معیار حوزه دور و نزدیک فرض شود [۲۳]، رکورد مربوط به زلزله‌های طبس و بم در حوزه نزدیک گسل و رکورد زلزله‌های سیلاخور و منجیل در حوزه دور از گسل دسته بندی می‌شوند.

جدول ۱: مشخصات رکورد شتابنگاشت‌های استفاده شده در این مطالعه

نام زلزله	سال وقوع زلزله (شمسی)	نام ایستگاه محل ثبت رکورد	نوع خاک ایستگاه	فاصله از گسل (km)	بزرگا ( $M_w$ )	بیشینه شتاب افقی (g)	مرجع	شماره رکورد در مرجع
طیس	۱۳۵۷	طیس	۱	۲	۷/۳۵	۰/۸۶	PEER	۱۴۳
بم	۱۳۸۲	بم	۲	۶	۶/۵۰	۰/۷۸	BHRC	۳۱۶۸/۲
سیلاخور	۱۳۸۵	توشک آبسرد	۱	۴۱	۵/۹۰	۰/۳۹	BHRC	۴۰۳۵/۳
منجیل	۱۳۶۹	تنکابن	۳	۹۳	۷/۳۷	۰/۱۴	PEER	۱۶۴۰

## ۳-۲- مدل سازی و تحلیل

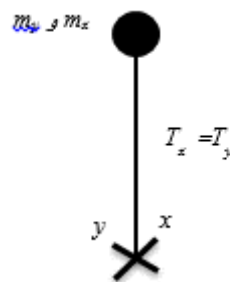
در این تحقیق برای تولید "طیف انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه"، سازه‌های مورد نیاز در نرم افزار OpenSees مدل سازی و تحلیل شده اند. از ستون طره‌ای سه بعدی مطابق شکل ۲ در این تحقیق استفاده شده است به نحوی که جرم لرزه‌ای متمرکز در انتهای ستون در دو جهت انتقال افقی تعریف شده است؛ و جرم لرزه‌ای و دوره تناوب سیستم در هر دو جهت  $x$  و  $y$  با یکدیگر برابر می‌باشد. بدلیل آن که مد نظر است تا طیف‌های مورد نظر برای محدوده پریودهای بین ۰/۱ تا ۶ ثانیه تولید شود و همچنین برای افزایش تعداد نقاط محاسباتی طیف و در نتیجه افزایش دقت طیف‌های تولید شده، سازه‌های مورد نیاز به نحوی مدل سازی شده اند که پریود آنها محدوده ۰/۱ تا ۶ ثانیه را با گام‌های ۰/۱ ثانیه پوشش دهد. دوره تناوب سازه‌های مدل شده با دوره تناوب حاصل از محاسبات دستی تطابق خوبی دارند. برای این که تأثیر نسبت میرایی سازه ( $\xi$ ) را بر روی "طیف انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه" بررسی شود، چهار نسبت میرایی با مقادیر ۰/۳، ۰/۵، ۰/۱۰ و ۰/۱۵ در مدل سازی سازه‌ها در نظر گرفته شده اند.

به منظور بررسی تأثیر نسبت شکل‌پذیری تغییرمکانی سازه بر روی "طیف انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه"، چهار ضریب شکل‌پذیری تغییرمکانی با مقادیر ۱، ۳، ۵ و ۷ مد نظر قرار گرفته‌اند؛ شکل‌پذیری ۱ بیانگر رفتار سازه در محدوده ارتجاعی و شکل‌پذیری ۳، ۵ و ۷ بیانگر رفتار سازه در محدوده غیر ارتجاعی می‌باشند. از المان تیر-ستون الاستیک با مدول الاستیسیته  $2 \times 10^{11} N/m^2$  و مدول برشی  $7/7 \times 10^{10} N/m^2$  در مدل سازی سازه با شکل‌پذیری ۱ استفاده شده است. در مدل سازی سازه غیرارتجاعی (شکل‌پذیری ۳، ۵ و ۷) از المان تیر-ستون غیرخطی با ۱۰ نقطه انتگرال گیری در طول المان، از مقدار پیش فرض صفر برای جرم واحد طول المان و تلووانس  $10^{-6}$  برای ارضای معادلات سازگاری المان استفاده شده است؛ همچنین مقطع فیبر و مصالح فولادی Steel01 با مدول الاستیسیته اولیه  $2 \times 10^{11} N/m^2$  نسبت سخت شدگی پس از تسلیم ۰/۰۲ و حالت پیش فرض بدون سخت شوندهگی ایزوتروپیک استفاده شده و نسبت پواسن ۰/۳ در نظر گرفته شده است. برای تولید سازه‌های با شکل‌پذیری هدف ۳، ۵ و ۷ بدین ترتیب اقدام شده است:

- گام اول: سازه بصورت ارتجاعی و تحت دو مؤلفه افقی از یک زلزله بارگذاری و تحلیل شده و بیشینه تنش در مقطع ستون  $\sigma$  در طول زلزله محاسبه می‌شود.
- گام دوم: سازه بصورت غیرارتجاعی و به نحوی مدل می‌شود که تنش جاری شدن مصالح آن برابر با  $0/99 \times \sigma$  باشد و تحت همان دو مؤلفه افقی زلزله بارگذاری شده و بیشینه جابجایی جرم در هر دو جهت  $x$  و  $y$  تعیین می‌شود ( $u_{mx}$  و  $u_{my}$ ). بیشینه جابجایی سازه مورد نظر تحت آن زلزله عبارت است از:
 
$$u_m = \max \{u_{mx}, u_{my}\}$$
- گام سوم: جابجایی تسلیم سازه  $u_y$  با استفاده از تنش جاری شدن  $0/99 \times \sigma$  و به کمک روابط تحلیل سازه محاسبه می‌شود.
- گام چهارم: ضریب شکل‌پذیری تغییرمکانی سازه از رابطه مقابل محاسبه می‌شود:
 
$$\mu = \frac{u_m}{u_y}$$



- گام پنجم: ضریب شکل پذیری محاسبه شده  $\mu$  با شکل پذیری هدف (۳، ۵ و ۷) مقایسه می‌شود. در صورتی که  $\mu$  به شکل پذیری هدف نزدیک باشد سازه مورد نظر با شکل پذیری هدف تولید شده است و خروجی‌های مورد نیاز از آن ثبت می‌شود؛ در غیر این صورت بیشینه تنش در مقطع ستون  $\sigma$  در سازه غیرارتجاعی محاسبه شده و به گام دوم باز می‌گردیم. به عبارت دیگر تنش جاری شدن مصالح غیرارتجاعی را به تدریج کاهش می‌دهیم تا جایی که  $\mu$  به قدر کافی به شکل پذیری هدف نزدیک شود.
- برای تحلیل دینامیکی از میرایی رایلی، الگوریتم نیوتن و انتگرال گیری به روش نیومارک با ضرایب  $\gamma=0/5$  و  $\beta=0/25$  استفاده شده است. با استفاده از رکوردهای معرفی شده در جدول ۱ بارگذاری لرزه‌ای بر روی سازه‌ها انجام شده است و تاریخچه زمانی پاسخ‌های مورد نظر برای جرم سازه استخراج شده اند.



شکل ۲: مدل استفاده شده در این تحقیق.

### ۳-۳- تولید طیف‌های انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه و بررسی آنها

با استفاده از نتایج تحلیل‌ها و بکارگیری سمت راست رابطه (۴)، تاریخچه زمانی انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه بصورت تجمعی در راستای هر یک از محورهای  $x$  و  $y$  بطور جداگانه تهیه شده است؛ سپس با توجه به اسکالر بودن کمیت انرژی، تاریخچه زمانی انرژی ورودی نسبی تجمعی در راستای محورهای  $x$  و  $y$  مطابق رابطه (۱۶) با یکدیگر جمع شده و تاریخچه کل انرژی ورودی نسبی تجمعی برای واحد جرم سازه تعیین شده است:

$$\frac{E_{ri}}{m} = \left(\frac{E_{ri}}{m}\right)_x + \left(\frac{E_{ri}}{m}\right)_y \quad (16)$$

با تعیین بیشینه مقدار کل انرژی ورودی نسبی تجمعی در هر تاریخچه زمانی، "طیف انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه" برای مقادیر مختلف نسبت میرایی  $\xi$  و شکل پذیری تغییرمکانی سازه  $\mu$  تولید شده است. با توجه به بارگذاری ۴ زوج رکورد زلزله (طبس، بم، سیلاخور و منجیل) و استفاده از ۴ مقدار برای نسبت میرایی سازه (۰/۳، ۰/۵، ۰/۱۰ و ۰/۱۵) و ۴ مقدار برای شکل پذیری تغییرمکانی سازه (۱، ۳، ۵ و ۷)، در مجموع ۶۴ طیف انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه تولید شده است.

برای مطالعه اثر نسبت میرایی  $\xi$  و شکل پذیری تغییرمکانی سازه  $\mu$  بر روی طیف انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه  $\frac{E_{ri}}{m}$ ، طیف‌های تولید شده دسته بندی شده و در شکل‌های ۳ تا ۱۰ نمایش داده شده اند. در هر یک از شکل‌های ۳ تا ۱۰، چهار دسته طیف مشاهده می‌شود بصورتی که در هر دسته طیف، یکی از پارامترهای نسبت میرایی  $\xi$  و یا شکل پذیری تغییرمکانی  $\mu$  ثابت است و تأثیر تغییرات پارامتر دیگر مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر تغییرات  $\xi$  و  $\mu$  بر روی میانگین مقادیر طیف  $\frac{E_{ri}}{m}$  زلزله‌های طبس، بم، سیلاخور و منجیل بترتیب با استفاده از جدول‌های ۲، ۴، ۶ و ۸ مورد بررسی قرار گرفته است؛ همچنین تأثیر تغییرات  $\xi$  و  $\mu$  بر روی پرپود متناظر با قله طیف زلزله‌های مذکور بترتیب به کمک جدول‌های ۳، ۵، ۷ و ۹ بررسی شده است.

طیف‌های انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه  $\frac{E_{ri}}{m}$  برای زلزله‌های مختلف تولید شده و به همراه بررسی آنها در ادامه ارائه می‌گردد. بدلیل این که سازه در زلزله سطح طراحی دارای رفتار غیرارتجاعی است لذا بررسی طیف‌های تولید شده در محدوده شکل پذیری‌های ۳، ۵ و ۷ انجام شده است. تفسیر یافته‌ها در بخش ۴ انجام خواهد شد.

## ۳-۳-۱- طیف‌های مربوط به زلزله طبس و بررسی آنها:

طیف‌های تولید شده برای  $\frac{E_{ri}}{m}$  مربوط به زلزله طبس در شکل‌های ۳ و ۴ نمایش داده شده است. اعداد مندرج در جدول‌های ۲ و ۳ از روی شکل‌های مذکور استخراج شده اند و بررسی طیف‌ها به کمک این جداول انجام شده است. با استفاده از جدول ۲ درمی‌یابیم که تغییر  $\xi$  از ۳٪ به ۵٪، از ۵٪ به ۱۰٪ و از ۱۰٪ به ۱۵٪ موجب می‌شود تا میانگین مقادیر طیف  $\frac{E_{ri}}{m}$  بین صفر تا ۳٪- تغییر یابد؛ و تغییر  $\mu$  از ۳ به ۵ و از ۵ به ۷ باعث می‌شود تا میانگین مقادیر طیف  $\frac{E_{ri}}{m}$  بین ۶٪- تا ۱۰٪- تغییر کند. همچنین به کمک جدول ۳ می‌توان گفت که تغییر  $\xi$  از ۳٪ به ۵٪، از ۵٪ به ۱۰٪ و از ۱۰٪ به ۱۵٪ موجب می‌شود تا پریود متناظر با قله طیف  $\frac{E_{ri}}{m}$  بین ۰/۱- تا ۰/۳+ ثانیه تغییر نماید؛ و تغییر  $\mu$  از ۳ به ۵ و از ۵ به ۷ موجب می‌شود تا دوره تناوب متناظر با قله طیف  $\frac{E_{ri}}{m}$  بین ۰/۱- تا ۰/۷- ثانیه تغییر کند.

جدول ۳: پریود متناظر با قله طیف  $\frac{E_{ri}}{m}$  در زلزله طبس (Sec)

نسبت میرایی شکل پذیری	$\xi=3\%$	$\xi=5\%$	$\xi=10\%$	$\xi=15\%$
$\mu=1$	۰/۷۶	۰/۷۶	۰/۷۷	۰/۷۹
$\mu=3$	۰/۷۳	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۷۴
$\mu=5$	۰/۶۶	۰/۶۷	۰/۷۰	۰/۷۳
$\mu=7$	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۶۸	۰/۷۱

جدول ۲: میانگین مقادیر طیف  $\frac{E_{ri}}{m}$  در زلزله طبس (N.m/kg)

نسبت میرایی شکل پذیری	$\xi=3\%$	$\xi=5\%$	$\xi=10\%$	$\xi=15\%$
$\mu=1$	۷/۳۲۳	۶/۹۱۶	۶/۳۲۴	۶/۰۱۲
$\mu=3$	۵/۷۳۴	۵/۶۴۱	۵/۴۸۴	۵/۳۷۸
$\mu=5$	۵/۱۵۰	۵/۱۲۰	۵/۰۶۷	۵/۰۲۶
$\mu=7$	۴/۶۹۱	۴/۷۰۰	۴/۷۱۶	۴/۷۲۴

## ۳-۳-۲- طیف‌های مربوط به زلزله بم و بررسی آنها:

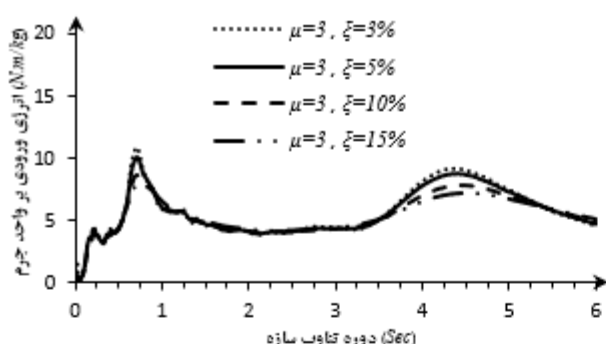
طیف‌های تولید شده برای  $\frac{E_{ri}}{m}$  مربوط به زلزله بم در شکل‌های ۵ و ۶ ترسیم شده اند؛ جدول‌های ۴ و ۵ با توجه به مشاهدات شکل‌های مذکور تکمیل شده و در بررسی طیف‌ها بکار رفته اند. با بهره‌گیری از جدول ۴ چنین دریافت می‌شود که تغییر  $\xi$  از ۳٪ به ۵٪، از ۵٪ به ۱۰٪ و از ۱۰٪ به ۱۵٪ موجب شد تا میانگین مقادیر طیف  $\frac{E_{ri}}{m}$  بین ۲٪- تا ۳٪+ تغییر داشته باشد؛ و تغییر  $\mu$  از ۳ به ۵ و از ۵ به ۷ باعث می‌شود تا میانگین مقادیر طیف  $\frac{E_{ri}}{m}$  بین ۷٪- تا ۱۶٪- تغییر یابد. با استفاده از جدول ۵ می‌توان دریافت که تغییر  $\xi$  از ۳٪ به ۵٪، از ۵٪ به ۱۰٪ و از ۱۰٪ به ۱۵٪ موجب می‌شود تا دوره تناوب متناظر با قله طیف  $\frac{E_{ri}}{m}$  حداکثر به اندازه ۰/۴- تا ۰/۹+ ثانیه تغییر نماید؛ و تغییر  $\mu$  از ۳ به ۵ و از ۵ به ۷ موجب شده است تا پریود متناظر با قله طیف  $\frac{E_{ri}}{m}$  بین ۰/۴- تا ۰/۲۹- ثانیه تغییر پیدا کند.

جدول ۵: پریود متناظر با قله طیف  $\frac{E_{ri}}{m}$  در زلزله بم (Sec)

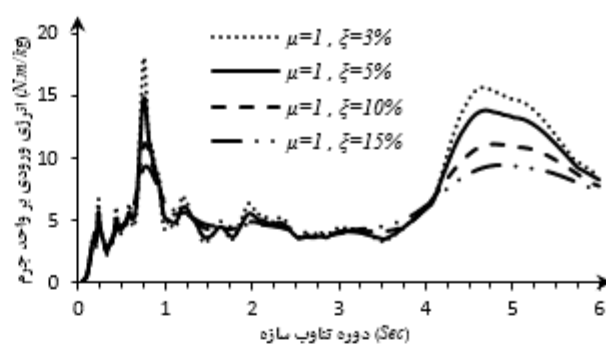
نسبت میرایی شکل پذیری	$\xi=3\%$	$\xi=5\%$	$\xi=10\%$	$\xi=15\%$
$\mu=1$	۱/۵۰	۱/۵۳	۱/۵۵	۱/۶۰
$\mu=3$	۱/۴۰	۱/۴۲	۱/۴۴	۱/۴۲
$\mu=5$	۱/۱۸	۱/۱۶	۱/۱۶	۱/۱۳
$\mu=7$	۱/۰۴	۱/۰۴	۱/۰۰	۱/۰۹

جدول ۴: میانگین مقادیر طیف  $\frac{E_{ri}}{m}$  در زلزله بم (N.m/kg)

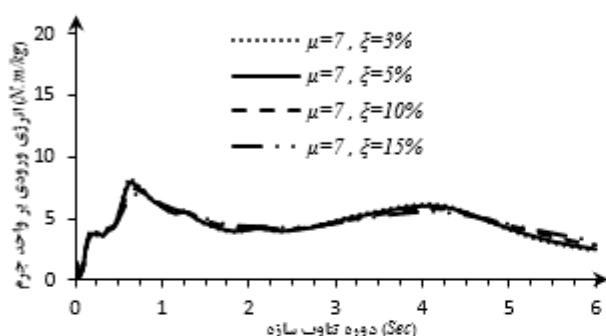
نسبت میرایی شکل پذیری	$\xi=3\%$	$\xi=5\%$	$\xi=10\%$	$\xi=15\%$
$\mu=1$	۲/۲۳۶	۲/۱۷۳	۲/۱۰۲	۲/۰۹۵
$\mu=3$	۱/۸۵۶	۱/۸۲۹	۱/۷۹۶	۱/۷۹۲
$\mu=5$	۱/۵۵۸	۱/۵۵۳	۱/۵۵۶	۱/۵۷۶
$\mu=7$	۱/۴۳۵	۱/۴۳۵	۱/۴۴۷	۱/۴۷۰



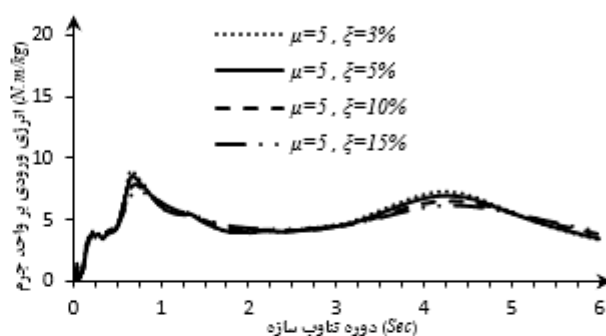
ب: طیف انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه با شکل پدیری ۳



الف: طیف انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه با شکل پدیری ۱

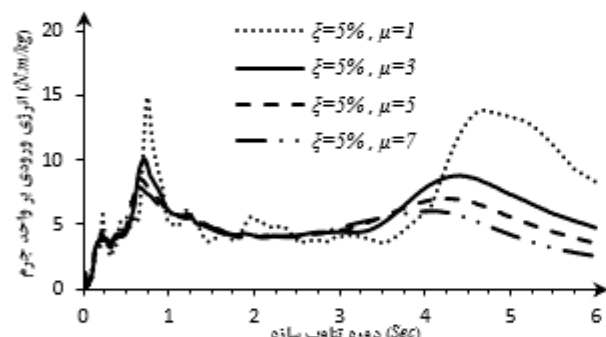


د: طیف انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه با شکل پدیری ۷

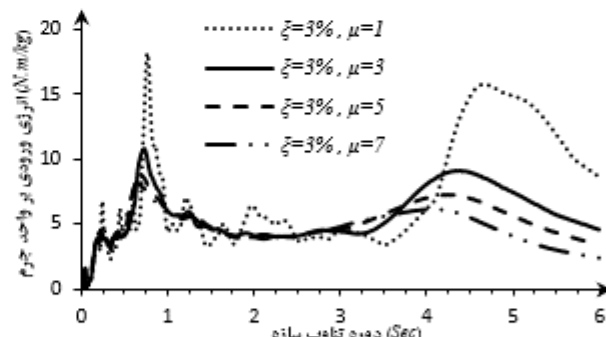


ج: طیف انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه با شکل پدیری ۵

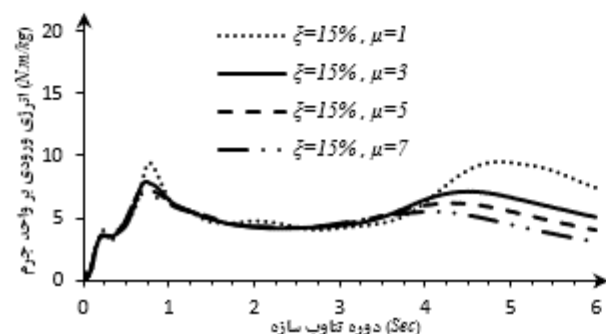
شکل ۳: طیف انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه در زلزله طبیس برای مقادیر مختلف شکل پدیری



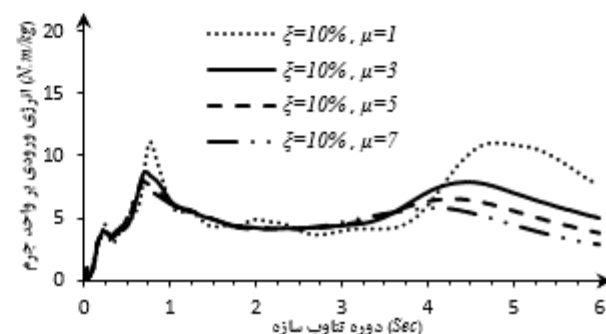
ب: طیف انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه با نسبت میرایی ۵٪



الف: طیف انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه با نسبت میرایی ۳٪

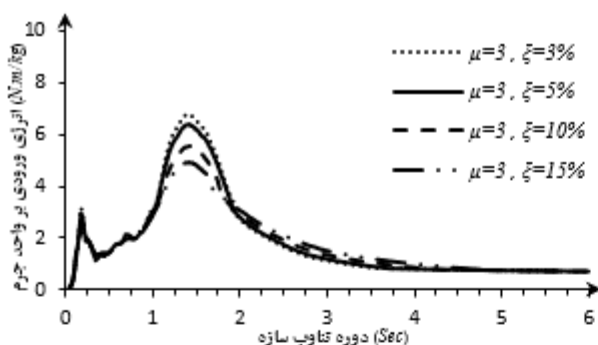


د: طیف انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه با نسبت میرایی ۱۵٪

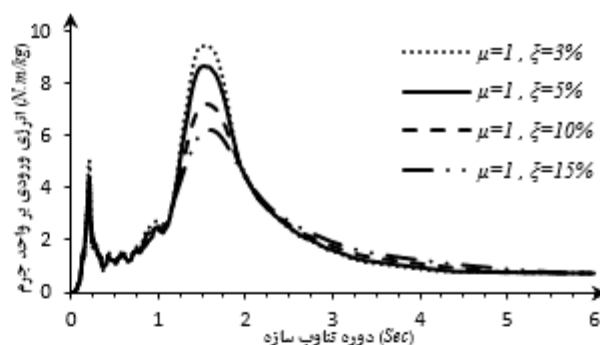


ج: طیف انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه با نسبت میرایی ۱۰٪

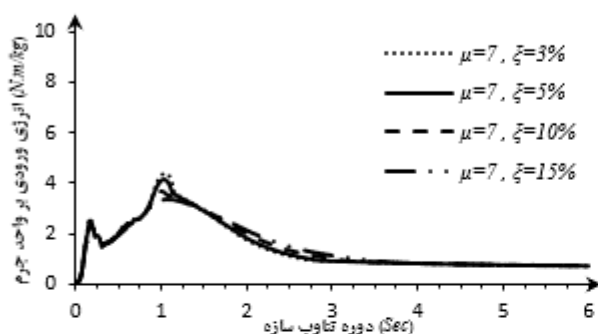
شکل ۴: طیف انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه در زلزله طبیس برای مقادیر مختلف نسبت میرایی



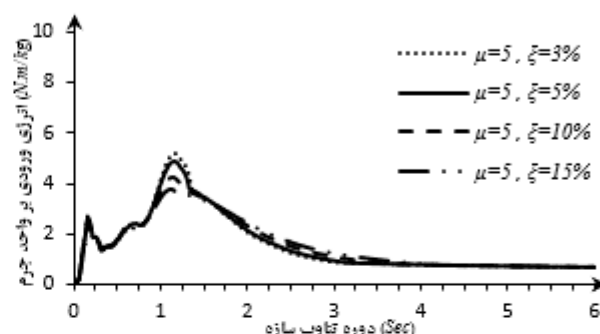
ب: طیف انرژی ورودی نسبتی بر واحد جرم سازه با شکل پدیزی ۳



الف: طیف انرژی ورودی نسبتی بر واحد جرم سازه با شکل پدیزی ۱

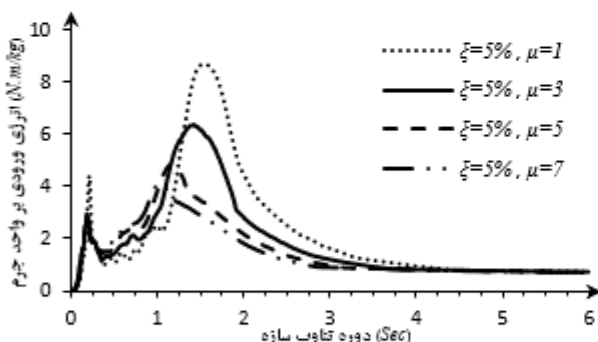


د: طیف انرژی ورودی نسبتی بر واحد جرم سازه با شکل پدیزی ۷

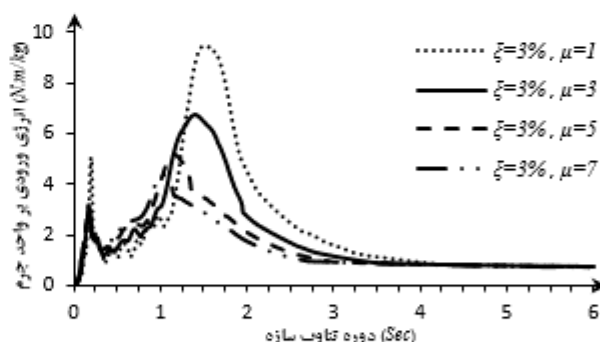


ج: طیف انرژی ورودی نسبتی بر واحد جرم سازه با شکل پدیزی ۵

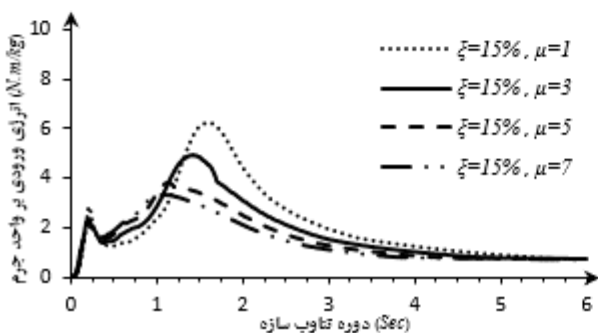
شکل ۵: طیف انرژی ورودی نسبتی بر واحد جرم سازه در زلزله بم برای مقادیر مختلف شکل پدیزی



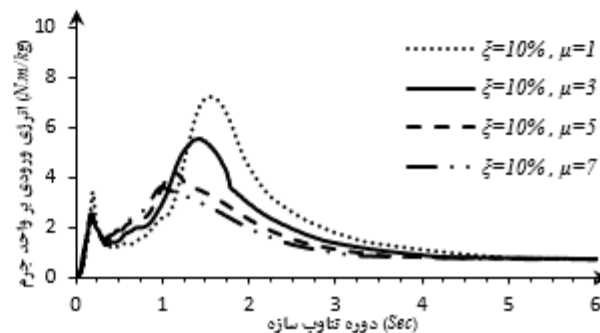
ب: طیف انرژی ورودی نسبتی بر واحد جرم سازه با نسبت میرایی ۵٪



الف: طیف انرژی ورودی نسبتی بر واحد جرم سازه با نسبت میرایی ۳٪



د: طیف انرژی ورودی نسبتی بر واحد جرم سازه با نسبت میرایی ۱۵٪



ج: طیف انرژی ورودی نسبتی بر واحد جرم سازه با نسبت میرایی ۱۰٪

شکل ۶: طیف انرژی ورودی نسبتی بر واحد جرم سازه در زلزله بم برای مقادیر مختلف نسبت میرایی

## ۳-۳-۳- طیف‌های مربوط به زلزله سیلاخور و بررسی آنها:

طیف‌های تولید شده برای  $\frac{E_{ri}}{m}$  مربوط به زلزله سیلاخور در شکل‌های ۷ و ۸ نمایش داده شده است؛ و با مشاهده شکل‌های مذکور اعداد مندرج در جدول‌های ۶ و ۷ استخراج شده اند. با استفاده از جدول ۶ درمی‌یابیم که تغییر  $\xi$  از ۳٪ به ۵٪، از ۵٪ به ۱۰٪ و از ۱۰٪ به ۱۵٪ موجب می‌شود تا میانگین مقادیر طیف  $\frac{E_{ri}}{m}$  بین صفر تا ۱۴٪+ تغییر یابد؛ و تغییر  $\mu$  از ۳ به ۵ و از ۵ به ۷ موجب می‌شود تا میانگین مقادیر طیف  $\frac{E_{ri}}{m}$  بین صفر تا ۱۲٪- تغییر کند. به کمک جدول ۷ می‌توان نتیجه گرفت که تغییر  $\xi$  از ۳٪ به ۵٪، از ۵٪ به ۱۰٪ و از ۱۰٪ به ۱۵٪ موجب می‌شود تا پریود متناظر با قله طیف  $\frac{E_{ri}}{m}$  بین صفر تا ۰/۰۱+ ثانیه تغییر نماید؛ و تغییر  $\mu$  از ۳ به ۵ و از ۵ به ۷ موجب می‌شود تا دوره تناوب متناظر با قله طیف  $\frac{E_{ri}}{m}$  بین صفر تا ۰/۰۱- ثانیه تغییر داشته باشد.

جدول ۷: پریود متناظر با قله طیف  $\frac{E_{ri}}{m}$  در زلزله سیلاخور (Sec)

نسبت میرایی شکل پذیری	$\xi=3\%$	$\xi=5\%$	$\xi=10\%$	$\xi=15\%$
$\mu=1$	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۱۰
$\mu=3$	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۹
$\mu=5$	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۹
$\mu=7$	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰۹

جدول ۶: میانگین مقادیر طیف  $\frac{E_{ri}}{m}$  در زلزله سیلاخور (N.m/kg)

نسبت میرایی شکل پذیری	$\xi=3\%$	$\xi=5\%$	$\xi=10\%$	$\xi=15\%$
$\mu=1$	۰/۰۱۹	۰/۰۱۹	۰/۰۲۰	۰/۰۲۱
$\mu=3$	۰/۰۱۶	۰/۰۱۷	۰/۰۱۸	۰/۰۱۹
$\mu=5$	۰/۰۱۵	۰/۰۱۵	۰/۰۱۶	۰/۰۱۸
$\mu=7$	۰/۰۱۴	۰/۰۱۴	۰/۰۱۶	۰/۰۱۷

## ۳-۳-۴- طیف‌های مربوط به زلزله منجیل و بررسی آنها:

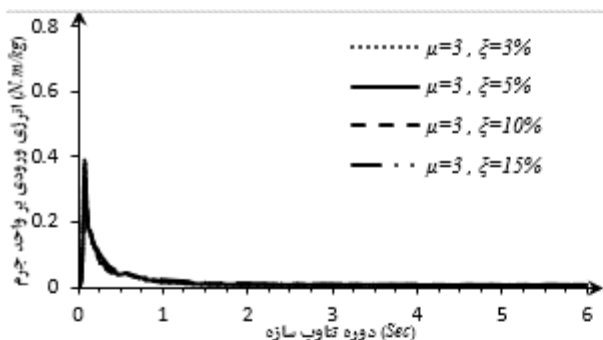
طیف‌های تولید شده برای  $\frac{E_{ri}}{m}$  مربوط به زلزله منجیل در شکل‌های ۹ و ۱۰ نمایش داده شده است؛ و به کمک شکل‌های مذکور جدول‌های ۸ و ۹ تکمیل شده اند و در بررسی طیف‌ها مورد استفاده قرار گرفته اند. با استفاده از جدول ۸ چنین دریافت می‌شود که تغییر  $\xi$  از ۳٪ به ۵٪، از ۵٪ به ۱۰٪ و از ۱۰٪ به ۱۵٪ موجب می‌شود تا میانگین مقادیر طیف  $\frac{E_{ri}}{m}$  بین صفر تا ۵٪+ تغییر کند؛ و تغییر  $\mu$  از ۳ به ۵ و از ۵ به ۷ موجب می‌شود تا میانگین مقادیر طیف  $\frac{E_{ri}}{m}$  بین ۱۰٪- تا ۱۴٪- تغییر یابد. به کمک جدول ۹ می‌توان گفت که تغییر  $\xi$  از ۳٪ به ۵٪، از ۵٪ به ۱۰٪ و از ۱۰٪ به ۱۵٪ موجب می‌شود تا دوره تناوب متناظر با قله طیف  $\frac{E_{ri}}{m}$  بین صفر تا ۰/۰۳+ ثانیه تغییر نماید؛ و تغییر  $\mu$  از ۳ به ۵ و از ۵ به ۷ موجب می‌شود تا دوره تناوب متناظر با قله طیف  $\frac{E_{ri}}{m}$  بین ۰/۰۲- تا ۰/۰۷- ثانیه تغییر داشته باشد.

جدول ۹: پریود متناظر با قله طیف  $\frac{E_{ri}}{m}$  در زلزله منجیل (Sec)

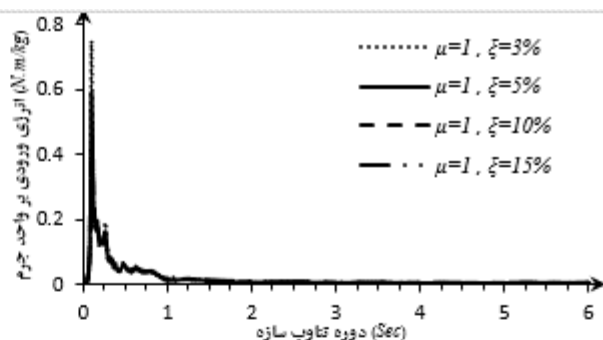
نسبت میرایی شکل پذیری	$\xi=3\%$	$\xi=5\%$	$\xi=10\%$	$\xi=15\%$
$\mu=1$	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵
$\mu=3$	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۷۲
$\mu=5$	۰/۶۷	۰/۶۷	۰/۶۸	۰/۶۹
$\mu=7$	۰/۶۰	۰/۶۱	۰/۶۴	۰/۶۷

جدول ۸: میانگین مقادیر طیف  $\frac{E_{ri}}{m}$  در زلزله منجیل (N.m/kg)

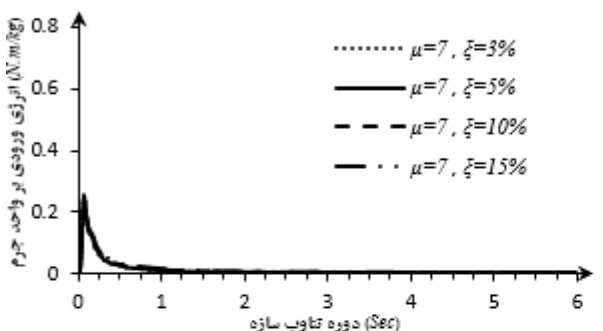
نسبت میرایی شکل پذیری	$\xi=3\%$	$\xi=5\%$	$\xi=10\%$	$\xi=15\%$
$\mu=1$	۰/۲۰۸	۰/۲۰۶	۰/۲۰۸	۰/۲۱۰
$\mu=3$	۰/۱۷۴	۰/۱۷۵	۰/۱۸۰	۰/۱۸۵
$\mu=5$	۰/۱۴۹	۰/۱۵۲	۰/۱۵۹	۰/۱۶۴
$\mu=7$	۰/۱۳۴	۰/۱۳۶	۰/۱۴۲	۰/۱۴۷



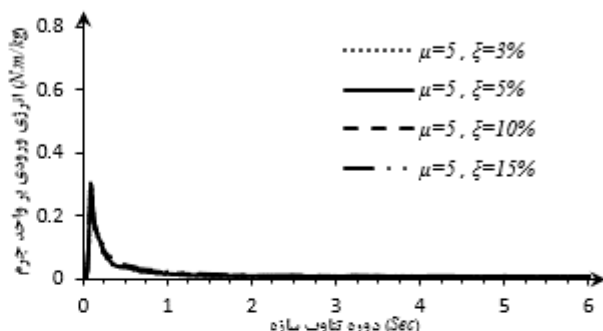
ب: طیف انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه با شکل پذیری ۳



الف: طیف انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه با شکل پذیری ۱

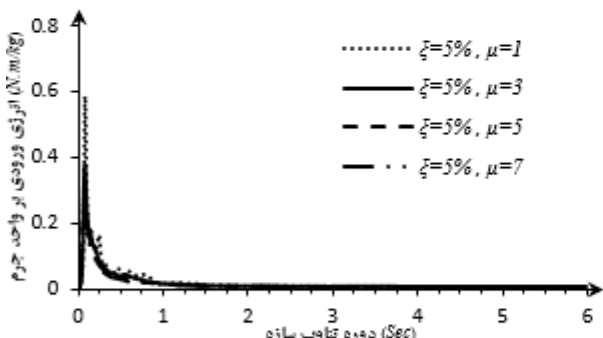


د: طیف انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه با شکل پذیری ۷

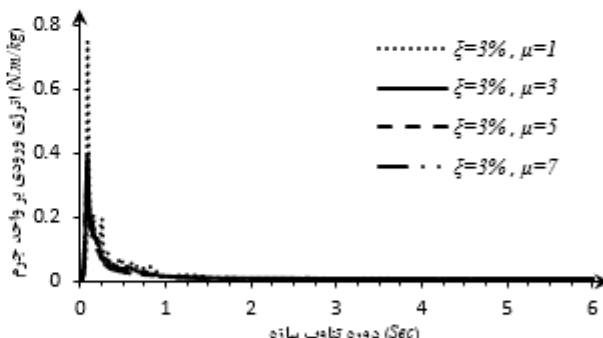


ج: طیف انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه با شکل پذیری ۵

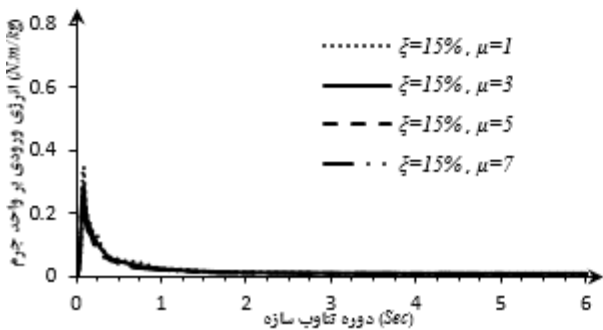
شکل ۷: طیف انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه در زلزله سیلاخور برای مقادیر مختلف شکل پذیری



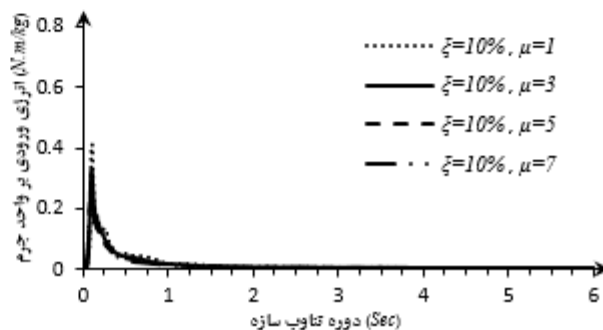
ب: طیف انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه با نسبت میرایی ۵٪



الف: طیف انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه با نسبت میرایی ۳٪

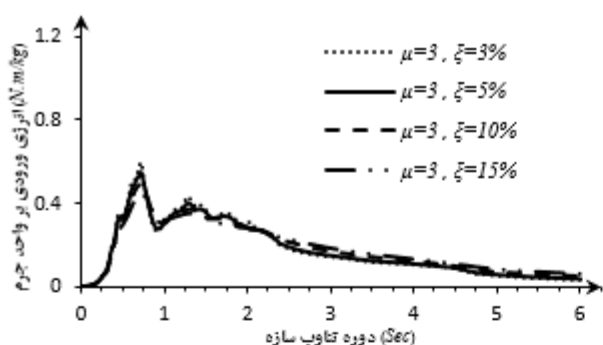


د: طیف انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه با نسبت میرایی ۱۵٪

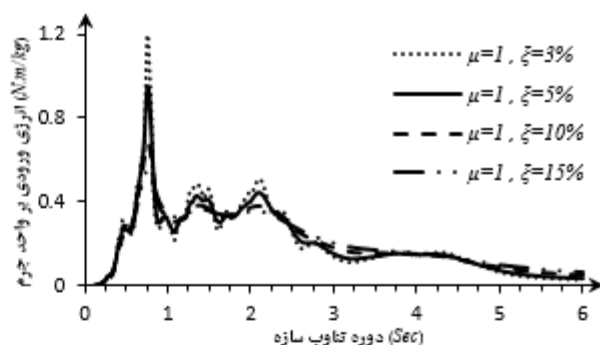


ج: طیف انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه با نسبت میرایی ۱۰٪

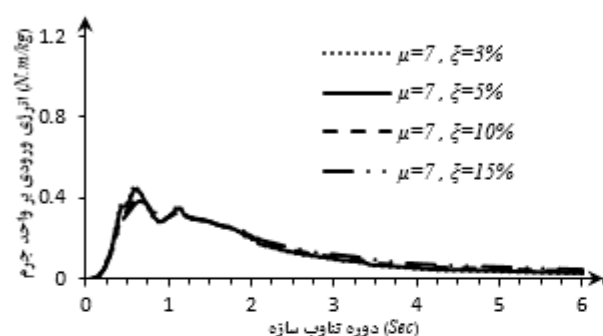
شکل ۸: طیف انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه در زلزله سیلاخور برای مقادیر مختلف نسبت میرایی



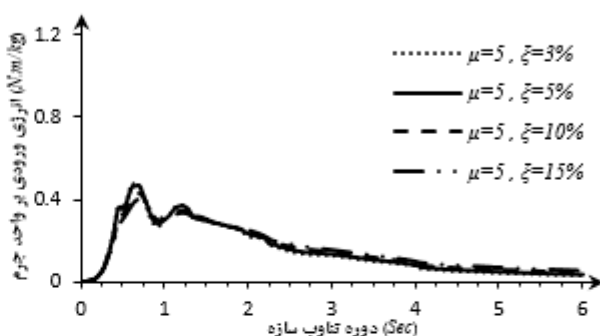
ب: طیف انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه با شکل پدیری ۳



الف: طیف انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه با شکل پدیری ۱

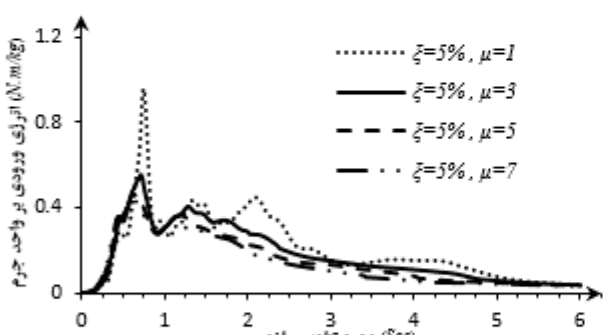


د: طیف انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه با شکل پدیری ۷

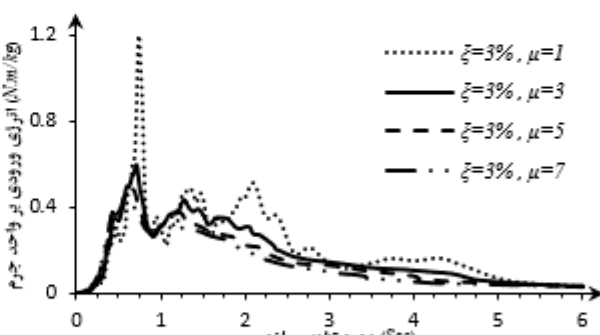


ج: طیف انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه با شکل پدیری ۵

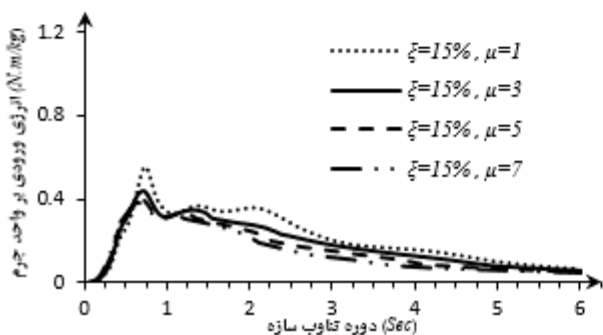
شکل ۹: طیف انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه در زلزله منجیل برای مقادیر مختلف شکل پدیری



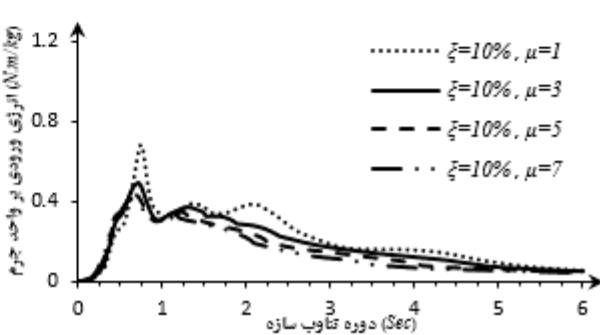
ب: طیف انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه با نسبت میرایی ۵٪



الف: طیف انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه با نسبت میرایی ۳٪



د: طیف انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه با نسبت میرایی ۱۵٪



ج: طیف انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه با نسبت میرایی ۱۰٪

شکل ۱۰: طیف انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه در زلزله منجیل برای مقادیر مختلف نسبت میرایی

## ۴- تفسیر یافته‌ها و مشاهدات

در محدوده زلزله‌ها و تغییرات نسبت میرایی و شکل‌پذیری لحاظ شده در این تحقیق، تفسیر یافته‌های بخش‌های ۳-۱ تا ۳-۴ در این قسمت انجام شده است. با استفاده از سمت راست رابطه (۴)، رابطه انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه بدین صورت می‌باشد:

$$\frac{E_{ri}}{m} = - \int \ddot{u}_g \cdot \dot{u} \cdot dt \quad (17)$$

معرفی پارامترهای رابطه فوق در ذیل رابطه (۲) آمده است. با استفاده از رابطه (۱۷) می‌توان گفت که سرعت نسبی جرم  $\dot{u}$  و شتاب زمین  $\ddot{u}_g$  در مقدار  $\frac{E_{ri}}{m}$  تأثیر گذار هستند. با توجه به این که هر طیف برای رکورد زلزله مشخصی تهیه می‌شود، بنابراین  $\ddot{u}_g$  در هر طیف ثابت است لذا کاهش سرعت نسبی سازه  $\dot{u}$  منجر به کاهش مقدار انتگرال فوق در آن گام زمانی خواهد شد. افزایش شکل‌پذیری تغییرمکانی  $\mu$  و افزایش درجه غیرخطی شدن سازه موجب کاهش سرعت نسبی جرم سازه  $\dot{u}$  می‌شود و به تبع آن موجب کاهش انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه خواهد شد؛ لذا افزایش  $\mu$  موجب کاهش مقدار میانگین طیف  $\frac{E_{ri}}{m}$  شده است. بدلیل این که افزایش  $\xi$  و  $\mu$  موجب کاهش نوسانات طیف سرعت زلزله می‌شود بنابراین افزایش  $\xi$  و  $\mu$  موجب شده است تا طیف  $\frac{E_{ri}}{m}$  هموارتر شده و دامنه تغییرات طیف کاهش یابد.

در بررسی طیف‌ها می‌توان دریافت که در محدوده رفتار غیرارتجاعی، با تغییرات  $\xi$  و  $\mu$  سازه مقدار میانگین طیف  $\frac{E_{ri}}{m}$  تغییر قابل ملاحظه‌ای پیدا نمی‌کند؛ همچنین با تغییر  $\xi$  و  $\mu$  سازه، محل قله طیف  $\frac{E_{ri}}{m}$  بر روی محور افقی طیف اندکی جابجا شده و پیوند متناظر با قله طیف به اندازه ناچیزی تغییر می‌یابد؛ ضمناً بدلیل این که در مقایسه با نسبت میرایی، تأثیر شکل‌پذیری بر تغییر پیوند سازه و به تبع آن تغییر سرعت نسبی بیشتر است لذا تأثیر تغییرات  $\mu$  بر طیف  $\frac{E_{ri}}{m}$  محسوس‌تر از تأثیر تغییرات  $\xi$  بر طیف مذکور می‌باشد.

اثر حوزه دور و نزدیک گسل هدف اصلی این تحقیق نیست لیکن برای طرح موضوع مطالعات بعدی و به کمک جدول‌های ۲، ۴، ۶ و ۸ می‌توان گفت که در مقایسه با زلزله‌های سیلاخور و منجیل، رکورد زلزله‌های طبس و بم در فاصله نزدیکتری از گسل ثبت شده‌اند لذا میانگین مقادیر طیف  $\frac{E_{ri}}{m}$  مربوط به زلزله‌های طبس و بم بزرگتر است.

## ۵- جمع بندی و نتیجه گیری

به منظور ارتقای طراحی لرزه‌ای سازه‌ها، انرژی ورودی نسبی ناشی از زلزله به سازه به عنوان بارگذاری لرزه‌ای در طراحی سازه مد نظر قرار گرفته است. سهولت استفاده از طیف‌ها به عنوان یک ابزار کلیدی و مفید برای مهندسين طراح مورد توجه است لذا تهیه طیف انرژی ورودی نسبی موجب می‌شود تا استفاده از معیار انرژی در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها با اقبال بیشتری از سوی طراحان سازه همراه شود؛ لذا در این پژوهش به مطالعه اثر نسبت میرایی  $\xi$  و شکل‌پذیری تغییرمکانی  $\mu$  سازه بر "طیف انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه  $\frac{E_{ri}}{m}$ " مربوط به چهار زلزله ایران پرداخته شده است. با استفاده از تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی، طیف‌های  $\frac{E_{ri}}{m}$  برای زلزله‌های طبس، بم، سیلاخور و منجیل برای نسبت‌های میرایی ۳٪، ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ و مقادیر شکل‌پذیری تغییرمکانی ۱، ۳، ۵ و ۷ تولید شده‌اند و سپس اثر تغییرات  $\xi$  و  $\mu$  بر روی طیف‌های  $\frac{E_{ri}}{m}$  مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است.

افزایش  $\xi$  و  $\mu$  موجب می‌شود تا نوسانات طیف  $\frac{E_{ri}}{m}$  کاهش یابد و دامنه تغییرات طیف کوچکتر شود. در محدوده وسیعی از محور افقی طیف‌های  $\frac{E_{ri}}{m}$ ، افزایش  $\xi$  و  $\mu$  موجب کاهش مقادیر طیف می‌شود؛ و در نزدیکی نقاط قله طیف‌ها، این کاهش محسوس‌تر است. افزایش  $\mu$  و افزایش رفتار غیرارتجاعی سازه موجب می‌شود تا اثر  $\xi$  بر طیف  $\frac{E_{ri}}{m}$  کاهش پیدا کند؛ همچنین افزایش  $\xi$  باعث شده است تا اثر  $\mu$  بر طیف  $\frac{E_{ri}}{m}$  کاهش یابد؛ ضمناً در مقایسه با تغییرات  $\xi$ ، تغییرات  $\mu$  اثر بیشتری بر طیف  $\frac{E_{ri}}{m}$  دارد.

در محدوده زلزله‌ها و تغییرات  $\xi$  و  $\mu$  که در این تحقیق مد نظر قرار گرفته‌اند، نتیجه گرفته شده است که در حوزه رفتار غیرارتجاعی و در محدوده وسیعی از پروده‌ها به جز در نزدیکی قله طیف‌ها، تغییرات  $\xi$  و  $\mu$  تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر شکل کلی طیف  $\frac{E_{ri}}{m}$  و مقادیر آن ندارد؛ لیکن در حوزه رفتار ارتجاعی، تأثیر مذکور بیشتر است. برای مقاصد مهندسی می‌توان گفت که انرژی ورودی بر واحد جرم سازه تقریباً مستقل از نسبت میرایی و شکل‌پذیری سازه بوده و تابعی از دوره تناوب سازه می‌باشد.



در رابطه پیشنهاد شده توسط آکیاما برای زلزله‌های ژاپن  $\frac{E_{ri}}{m}$  تابع پرپود سازه است [۲]؛ همچنین حسینی و حداد شرق به منظور کمینه نمودن انرژی ورودی لرزه‌ای به سازه تحقیقاتی را انجام داده‌اند [۱۰]؛ نتایج این مقاله همسو با نتایج پژوهش‌های ایشان است. در حوزه رفتار غیرارتجاعی، شکل کلی و تغییرات طیف  $\frac{E_{ri}}{m}$  بصورتی است که تخمین پوش طیف‌های مربوط به چند زلزله از طریق روابط ساده امکان‌پذیر است؛ لذا استخراج این روابط به منظور استفاده توسط مهندسين طراح سازه، به عنوان موضوعی برای پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود.

## مراجع

- [1] Housner, G. W. (1956). Limit Design of Structures to Resist Earthquakes. In: *Proceedings of the 1<sup>st</sup> World Conference on Earthquake Engineering*. California: Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley. 13 pages.
- [2] Akiyama, H. (1988). Earthquake Resistant Design Based on The Energy Concept. In: *Proceedings of the Ninth World Conference on Earthquake Engineering*. Tokyo: International Association for Earthquake Engineering, 6 pages.
- [3] Uang, C.M. Bertero, V.V. (1988). *Use of Energy as a Design Criterion in Earthquake Resistant Design*. Report No. UCB/EERC-88/18. California: University of California, Pages used 3-9.
- [4] Fakhri-Niasar, Mohsen. (1998). *the energy spectrum of the Iranian earthquakes*. Master of Science Thesis. Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Faculty of Engineering. (In Persian)
- [5] Maleki, H. and Ghafory-Ashtiany, M. (2000). Study on the Energy of Earthquakes in Reinforced Concrete Moment Frames. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, Volume 3, No. 2, 11 Pages (In Persian)
- [6] Ruzi, Ali. (2003). *Energy Concept in Earthquake-Resistant Design*. Master of Science Thesis. Istanbul Technical University, Department of Civil Engineering.
- [7] Khashae, P. and Mohraz, B. and Sadek, F. and Lew, H.S. and Gross, J.L. (2003). *Distribution of Earthquake Input Energy in Structures*. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology (NIST), NISTIR 6903.
- [8] Ghodrati-Amiri, G. and Abdollahzadeh-Darzi, G. and Khanzadi, M. (2007). Earthquake Duration and Damping Effects on Input Energy, *International Journal of Civil Engineering*, Volume 5, No. 1, 16 Pages.
- [9] Ghodrati-Amiri, G. and Abdollahzadeh-Darzi, G. and Vaseghi-Amiri, J. (2008). Design Elastic Input Energy Spectra Based on Iranian Earthquake. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Volume 35, No. 6, 12 Pages.
- [10] Haddad-Sharh, F. and Hosseini, M. (2011). An Optimal Distribution of Stiffness over the Height of Shear Buildings to Minimize the Seismic Input Energy. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering (JSEE)*, Volume 13, No. 1, 8 Pages.
- [11] Kamali-Firozabadi, S.J. (2011). *Using energy method to estimate the required displacement of steel moment frames*. Master of Science Thesis. Khaje Nasir Toosi University of Technology, Department of Civil Engineering. (In Persian)
- [12] Siahpolo, N. (2015). *the Effect of Near-Field Earthquake on Seismic Demands of SMRFs with MDOF's and Higher Modes Considerations*. Ph.D. Thesis. Semnan University, Faculty of Civil Engineering. (In Persian)
- [13] Havaei, G. and Mobedi, E. (2015). Effect of Interaction and Rocking Motion on the Earthquake Response of Buildings. *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*, Volume 1, Issue 1, 11 Pages. (In Persian)
- [14] Bemanian, R. and Shakib, H. (2016). Evaluation of Nonlinear Behavior of Dual Steel Frame-Shear Wall System by a Group of Real Earthquakes. *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*, Volume 2, Issue 4, 13 Pages
- [15] Vahdani, R. and Bitarafan, M. and Khodakarami, M.I. (2016). Effect of the soil-structure interaction on performance assessment of the energy-based cumulative damage index in concrete reinforced frames. *JSCE*, Volume 3, Issue 3, 14 Pages.
- [16] Mollaioli, F. and Decanini, L. (2001). An Energy-Based Methodology for the Assessment of Seismic Demand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Volume 21, Issue 2, 25 Pages.
- [17] Ye, L. and Cheng, G. and Qu, Z. (2009). Study on Energy-Based Seismic Design Method and the Application for Steel Braced Frame Structures. In: *Sixth International Conference on Urban Earthquake Engineering*. Tokyo: Tokyo Institute of Technology, 12 pages.
- [18] Chopra, A.K. (2012). *DYNAMICS OF STRUCTURES Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Fourth Edition. New York: Prentice Hall, 944 Pages.
- [19] Pacific Earthquake Engineering Research Center, (1997). *PEER Ground Motion Database*. [Online] Available at: <http://ngawest2.berkeley.edu> [Accessed 2017].
- [20] Road, Housing and Urban Development Research Center. *Iran Strong Motion Network*. [Online] Available at: <http://ismn.bhrc.ac.ir> [Accessed 2017].
- [21] Earthquake Engineering Software Solutions, (2002). *Seismosignal 2016*. [Online] Available at: <http://www.seismosoft.com/SeismoSignal-2016-Release-1> [Accessed 2017].
- [22] Road, Housing and Urban Development Research Center, (2014). *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings (Standard No. 2800, 4<sup>th</sup> Edition)*. Tehran, 212 Pages. (In Persian)
- [23] Yaghmaei-Sabegh, S. and Mohamad-Alizadeh, H. (2012). Improvement of Iranian Seismic Design Code Considering the Near-Fault Effects. *International Journal of Engineering*, Volume 25, No. 2, 11 Pages.