



## اثرات مودهای بالاتر و درجات آزادی بر نیاز انرژی در سازه‌های بتن آرمه با دیوار برشی فولادی

سیدرضا سلیم بهرامی<sup>۱</sup>، مجید قلهکی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشکده عمران، دانشگاه فنی و حرفه ای، مازندران، ساری، ایران

۲- دانشکده عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۰۷

بازنگری: ۱۳۹۸/۱۲/۲۶

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۲۹

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۶/۰۴

### کلمات کلیدی:

انرژی

دیوار برشی فولادی

سازه بتن آرمه

مودهای بالاتر

سازه یک درجه آزادی

**خلاصه:** لازم است جهت طراحی بهینه قاب‌های خمشی بتن آرمه با دیوار برشی فولادی به ارائه معیارهای طراحی لرزه‌ای سیستم‌های سازه‌ای به طور مناسب پرداخته شود. محققین برای اندازه‌گیری و کمینه‌سازی خسارت‌های تجمعی به سازه‌ها از نیازهای انرژی به عنوان ابزاری مهم و کارآمد استفاده نموده که این نیازهای انرژی به شدت و زمان تداوم زلزله وابسته است. لذا در این پژوهش تلاش می‌شود تا با بررسی ویژگی‌های پاسخ انرژی حاصل از تحلیل سیستم‌های یک درجه آزادی معادل در برابر شتاب‌نگاشت‌های نزدیک گسل پالس گونه به تخمین انواع بیشینه انرژی و رابطه آن با سیستم چند درجه آزادی برای سه سازه بتن آرمه با دیوار برشی فولادی کوتاه، میان و بلند مرتبه تحت ضرایب شکل‌پذیری ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ با مدل‌سازی در نرم‌افزار OpenSees پرداخته شود. از طرفی کلیه مدل‌ها به صورت یک سازه یک درجه آزادی مدل‌سازی شده‌اند. با توجه به اینکه در سال‌های اخیر دیوارهای برشی فولادی در قاب‌های بتن آرمه مورد استقبال مهندسان قرار گرفته و در زمینه‌ی نیاز انرژی با رویکرد تقاضای شکل‌پذیری در سازه‌های بتنی همراه با دیوار برشی فولادی کار تحقیقاتی مبسوطی صورت نگرفته است، لذا اهمیت مطالعه در این زمینه بیش از پیش تبیین می‌نماید. نتایج بررسی تغییرات نسبت انرژی چرخه‌ای به کل انرژی تلف شده در سازه‌ها نشان می‌دهد که در سیستم چند درجه آزادی مستقل از دوره تناوب بوده به قسمتی که اثر مودهای بالاتر چندان بر آن قابل توجه نیست. همچنین با افزایش ضریب شکل‌پذیری این نسبت برای سیستم چند درجه آزادی به نتایج سیستم یک درجه آزادی نزدیک‌تر شده و به تعبیری افزایش ضریب شکل‌پذیری منجر به کاهش اثرات مودهای بالاتر می‌گردد.

### ۱- مقدمه

متداول طراحی لرزه‌ای، زمانی مناسب فرض می‌شود که ظرفیت تغییر شکل و یا حد مقاومت سازه بیش از تقاضای زمین‌لرزه‌های بزرگ در نظر گرفته شود. این موضوع در حالی است که بخش عمده‌ای از خسارت ناشی از زمین‌لرزه در نتیجه چرخه‌های غیر ارتجاعی چرخه‌ای بوده و انرژی ورودی به سازه به عنوان یکی از پارامترهای وابسته به رفتار چرخه‌ای سازه‌ها است.

لذا مفهوم انرژی در مجامع تحقیقاتی مورد توجه دانشمندان قرار گرفته است و محققان زیادی مفهوم انرژی را در تحلیل سازه‌ها و مدل‌های خسارت به کار برده‌اند. برای نخستین بار هاوونر<sup>[۱]</sup>

در روش طراحی بر اساس انرژی، هدف تأمین ظرفیت اتلاف انرژی در سازه در برابر نیاز به مقدار انرژی لرزه‌ای ورودی است. در سال‌های آغازین فلسفه طراحی بر اساس انرژی، انرژی ورودی عمدتاً مستقل از ویژگی‌های سازه، از جمله توزیع سختی در ارتفاع فرض می‌شد. همچنین فرض می‌شد که در محدوده وسیعی از پریود، انرژی ورودی حتی مستقل از پریود بوده و مقدار طیفی آن ثابت است. با توسعه بیشتر فلسفه طراحی بر اساس انرژی، این فرض مورد نقد قرار گرفت و موضوعی چالش برانگیز گردید. مقاومت لرزه‌ای سازه‌ها در روش‌های

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mgholhaki@semnan.ac.ir



در سال ۱۹۵۶، روش طراحی حدی با استفاده از مفهوم انرژی برای مطالعه لرزه ای سازه ها استفاده نمود. با وجود ابتدایی بودن روابط پیشنهادی هاووزنر، پارامترهای مورد اشاره وی، سنگ بنایی برای توسعه آتی روش انرژی در طراحی لرزه ای سازه ها بود.

آکیاما<sup>۱</sup> [۲] در سال ۱۹۸۸ به این نتیجه دست یافت که اکثر مسائل اساسی در طراحی مقاوم لرزه ای، ارتباط بسیار تنگاتنگی با انرژی ورودی به سازه ناشی از رکوردهای زلزله دارد. همچنین نتایج او حاکی از آن دارد که انرژی ورودی می بایست به عنوان بارگذاری اصلی بر روی سازه در نظر گرفته و بر اساس مفهوم انرژی، یک ضابطه کلی برای طراحی مقاوم لرزه ای ایجاد شود. لذا او رابطه ای برای محاسبه انرژی ورودی بر واحد جرم تابع دوره تناوب اصلی سازه پیشنهاد داد. یانگ<sup>۲</sup> و برترو [۳] به عنوان افراد پیشرو در زمینه انرژی در سازه، با انجام مطالعه آزمایشگاهی به تقسیم بندی جدیدی از انرژی ورودی به سازه شامل انرژی ورودی مطلق و انرژی ورودی نسبی مطرح نمودند. بررسی های انجام شده توسط فخری نیاسر و غفوری آشتیانی [۴] در سال ۱۹۹۸ حاکی از آن بود 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 ویژه ای است؛ و پارامترهای انرژی در قالب طیف های انرژی از مهم ترین پارامترهای قابل اعتماد برای تعیین پتانسیل خسارت می باشند. در پژوهش دیگری که توسط غفوری آشتیانی و ملکی [۵] در سال ۲۰۰۰ انجام شد، انرژی لرزه ای در چند سازه قاب خمشی بتن مسلح مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج آنان نشان داد که با تغییر جزئیات طراحی و محاسبه میزان جذب انرژی چرخه ای نسبت به انرژی ورودی زلزله، می توان شیوه ای برای توزیع یکنواخت تر توزیع خسارت جستجو کرد که به روش جدیدی در توزیع نیروی برشی پایه در ارتفاع منجر می گردد.

در پژوهش های انجام شده توسط دکانینی و مولایولی<sup>۳</sup> در سال ۲۰۰۱ [۶] و یی<sup>۴</sup> و همکاران [۷] در سال ۲۰۰۹، اثر مدل چرخه ای و شیب ناحیه پسا تسلیم در مدل رفتاری سازه بر روی طیف انرژی ورودی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج آنان نشان داد که عموماً تأثیر مدل چرخه ای روی طیف انرژی ورودی قابل توجه نبوده و اگر شیب ناحیه پسا تسلیم بزرگ تر شود، موجب کاهش تغییر مکان های نسبی

1Akiyama  
2Uang  
3Decanini and Mollaioli  
4Ye

بین طبقات و توزیع یکنواخت تر تغییر شکل های غیر الاستیک شده و منجر به خسارت یکنواخت تر می گردد. در سال ۲۰۰۳ روزی<sup>۵</sup> [۸] با بررسی مفهوم انرژی در طراحی مقاوم لرزه ای به این نتیجه دست یافت که وابسته بودن اثر بارگذاری زلزله و مقاومت سازه در روش های رایج طراحی لرزه ای، یک نقص است.

خشائی و محرز [۹] در سال ۲۰۰۳ طی یک گزارش فنی در مؤسسه ملی استاندارد و فناوری امریکا، توزیع انرژی ورودی در سازه ها را مورد بررسی قرار دادند. این گزارش به بررسی تأثیر ویژگی های جنبش زمین (شدت، محتوای فرکانسی، مدت تکان قوی جنبش) و ویژگی های سازه ای (شکل پذیری، میرایی، رفتار هیسترتیک)، روی توزیع انرژی برای ساختمان ۱ و ۵ طبقه با استفاده از ۲۰ رکورد شتاب نگاشت پرداخته است. نتایج بررسی آن ها نشان داد که توزیع انرژی در ارتفاع سازه اغلب مستقل از محتوای فرکانسی و مدت تکان قوی زلزله است.

قدرتی و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۰۷ اثرات میرایی و مدت تکان قوی زلزله روی انرژی ورودی ارتجاعی به سازه مورد مطالعه قرار دادند. آن ها با استفاده از ۱۱۰ رکورد زلزله های ایران بر روی چهار نوع خاک، طیف های سرعت معادل انرژی را محاسبه نموده و نشان دادند که با افزایش مدت تکان های قوی زمین لرزه، انرژی ورودی به سازه نیز افزایش می یابد. حسینی و حداد شرق [۱۱] در سال ۲۰۱۱ به منظور کمیته سازی انرژی ورودی ناشی از زلزله، بر روی توزیع بهینه سختی در ارتفاع ساختمان های برشی مطالعه کردند. آن ها نشان دادند که برای سازه های میان مرتبه (تا حدود ۲۰ طبقه) توزیع بهینه سختی را می توان سهموی در نظر گرفت لیکن برای سازه های بلندتر، توزیع بهینه سختی در ارتفاع با منحنی زنگی شکل انطباق بیشتری پیدا می کند. یکی از نتایج مهم در پژوهش آن ها این است که حتی با بهینه شدن توزیع سختی در ارتفاع قاب، اختلاف قابل توجهی در مقدار انرژی ورودی مشاهده نمی شود.

کمالی [۱۲] در سال ۲۰۱۱ با به کارگیری روش انرژی به برآورد نیاز تغییر مکانی قاب های خمشی فولادی پرداختند. آن ها راهکاری وابسته به شدت طیفی (SI) جهت تخمین دقیق تری از انرژی انتقالی شتاب نگاشت لرزه ای پیشنهاد دادند و روشی بر پایه مفهوم سرعت و در دستگاه مختصات سرعت-تغییر مکان جهت تخمین تغییر مکان

5Ruzi  
6NIST

از پیوندها، طیف انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم سازه حساسیت چندان نسبت به تغییرات نسبت میرایی و شکل‌پذیری ندارد و تابعی از پیوند سازه می‌باشد. با توجه به عدم اطلاع مهندسان طراح از مقادیر واقعی نسبت میرایی و شکل‌پذیری در زمان طراحی سازه، این موضوع یک مزیت محسوب می‌گردد. برترو<sup>۱</sup> [۱۸] برای اولین بار به اهمیت پالس‌های موضعی موجود در شتاب زلزله‌های نزدیک و تأثیر آن بر شدت خرابی‌های وارد بر سازه پرداخت. از طرفی اثرات این ماهیت پالسی بر رفتار خطی و غیرخطی سیستم یک درجه آزادی نیز مورد توجه محققینی از جمله مارکریس و بلاک<sup>۲</sup> [۱۹] قرار گرفت.

از آنجا که در سال‌های اخیر، استفاده از دیوارهای برشی فولادی در قاب‌های بتن‌آرمه مورد توجه مهندسان قرار گرفته و از طرف دیگر در زمینه نیاز انرژی با رویکرد تقاضای شکل‌پذیری در سازه‌های بتنی همراه با دیوار برشی فولادی صورت نگرفته است، به نظر می‌رسد مطالعه در این زمینه بیش از پیش مورد اهمیت باشد. لازم به ذکر است عوامل مختلفی در پاسخ غیر ارتجاعی سیستم قاب خمشی بتنی دارای دیوار برشی فولادی دخیل می‌باشند که اثر عواملی همچون تعداد طبقات، شکل‌پذیری هدف، نوع نداشت ورودی، زمان تناوب مود اصلی، روش تحلیل سازه در برابر زلزله و نحوه برخورد با سازه اعم از اینکه به صورت یک سازه چند درجه آزادی مدل‌سازی شود و یا به صورت یک سازه تک درجه آزادی معادل مدل‌سازی گردد، به شدت حساس بوده و قابل تغییر است. بنابراین در یک هدف ساده و ابتدایی می‌توان به این موضوع اشاره نمود که امکان ایجاد ارتباط بین پاسخ چند درجه آزادی<sup>۳</sup> با سازه یک درجه آزادی<sup>۴</sup> می‌تواند در درک بهتر نیازهای لرزه‌ای ساده چند درجه آزادی تأثیرگذار باشد، چرا که محاسبه پاسخ فرا ارتجاعی سازه یک درجه آزادی بسیار ساده بوده و با صرف مدت زمان بسیار کم قابل دسترسی است.

هدف اصلی این پژوهش بررسی انرژی ورودی به سازه‌های بتن آرمه دارای دیوار برشی فولادی مطابق آخرین یافته‌های مرتبط با زلزله‌های نزدیک گسل است. با توجه به دسترسی مناسب به تعداد قابل توجه زلزله نزدیک گسل، تلاش شده است به صورت خاص در این پژوهش به تأثیر جهت‌پذیری پیش‌رونده بر انرژی ورودی به سازه

نهایی سازه معرفی کردند. آن‌ها با توجه به آنالیز دینامیکی افزایشی، روشی تحت عنوان انرژی افزایشی جهت تخمین ظرفیت انرژی سازه و انرژی لرزه ای ارائه نمودند.

سیاه پلو [۱۳] در سال ۲۰۱۵ به بررسی اثر لرزه‌ای حوزه نزدیک گسل بر تخمین نیازهای لرزه ای قاب خمشی فولادی با منظور نمودن اثرات چند درجه آزادی پرداخت. او در مطالعه تاریخیچه 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 تغییر شکل‌های پلاستیک فرصت کافی دارد؛ لیکن در زلزله‌های حوزه نزدیک انرژی ورودی در لحظات ابتدایی دارای رشد قابل توجهی بوده و در مدت زمان کوتاهی به سازه تحمیل می‌شود. لذا سازه در این حالت فرصت کافی برای اتلاف انرژی از طریق تغییر شکل‌های غیر ارتجاعی را ندارد و غالباً شکست ترد رخ می‌دهد. همچنین بین انرژی میرایی ویسکوز و انرژی تلف شده در اثر رفتار چرخه ای توازن برقرار است که باعث می‌شود مجموع این دو مکانیسم اتلاف انرژی چندان نسبت به درجه غیرخطی شدن سازه حساس نباشد.

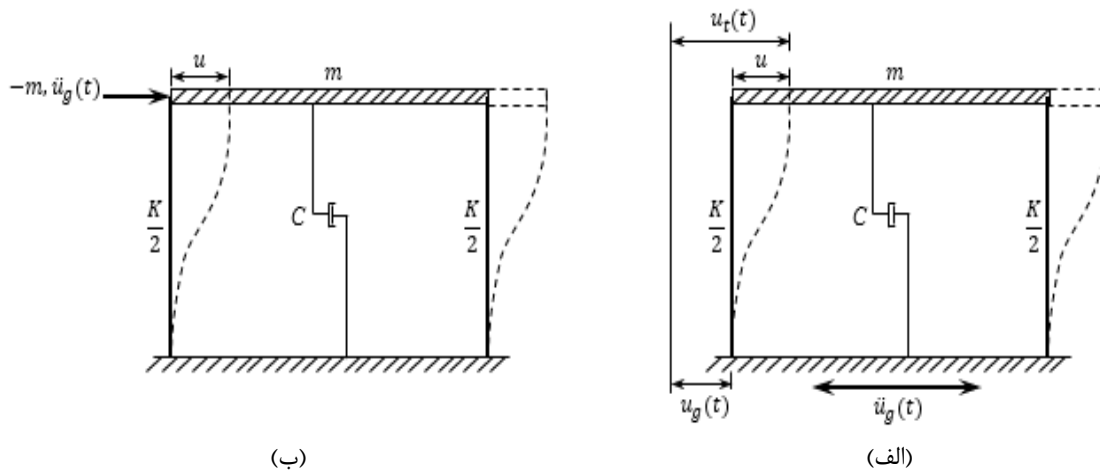
هوایی و موبدی [۱۴] در سال ۲۰۱۵ با بررسی اثرات اندرکنش و حرکت گهواره ای به سبب تسلیم شدن کف ستون‌ها بر روی پاسخ سازه‌های فولادی به این نتیجه دست یافتند که در سازه‌های فولادی مهاربندی شده، بلند شدگی و ایجاد حرکت گهواره ای در آن‌ها موجب استهلاک انرژی ورودی زلزله و کاهش پاسخ سازه می‌شود. بمانیان و شکیب [۱۵] در سال ۲۰۱۶ با ارزیابی رفتار غیرخطی سیستم دوگانه قاب-دیوار برشی فولادی تحت شتاب‌نگاشت‌های لرزه‌ای به این نتیجه دست یافتند که سیستم دوگانه قاب-دیوار برشی فولادی سیستم مناسبی جهت جذب بالای انرژی ورودی به سازه است. همچنین وهدانی و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۱۶ اثر اندرکنش خاک و سازه بر ارزیابی عملکرد شاخص خرابی تجمعی انرژی در قاب‌های بتن مسلح را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که اثر اندرکنش خاک و سازه بر روی شاخص خرابی تجمعی انرژی در المان تیر بیشتر از المان ستون است. در سال ۲۰۱۹ واثقی نیا [۱۷] به مطالعه اثر میرایی و شکل‌پذیری تغییر مکانی سازه بر طیف انرژی ورودی زلزله در سازه‌های یک درجه آزادی معادل پرداخت. نتایج او حاکی از آن بود که در حوزه رفتار غیر ارتجاعی و در محدوده وسیعی

1Bertero

2Markris and Black

3Multi-Degrees of Freedom (MDOF)

4Single-Degree of Freedom (SDOF)



شکل ۱. مدل‌های ریاضی سیستم یک درجه آزادی میرا (الف) سیستم دارای تکیه‌گاه مرتعش؛ (ب) سیستم معادل با تکیه‌گاه ثابت [۲۰]  
**Fig. 1. Mathematical models of a SDOF system a) a system with a vibrating support; b) System equivalent to a fixed support [20]**

[۲۰].

$$m\ddot{u}_t + c\dot{u} + f_s = 0 \quad (۱)$$

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f_s = -m\ddot{u}_g \quad (۲)$$

در روابط فوق  $m$  جرم سازه،  $u_t$  شتاب مطلق جرم شامل مجموع شتاب نسبی جرم نسبت به زمین و شتاب زمین حین زلزله،  $c$  ضریب میرایی،  $\dot{u}$  سرعت نسبی جرم نسبت به زمین،  $f_s$  نیروی ذخیره شده فنر در سیستم خطی،  $u$  شتاب نسبی جرم نسبت به زمین و  $\ddot{u}_g$  شتاب زمین حین زلزله است.

۲-۱- معادله انرژی ورودی مطلق سیستم یک درجه آزادی

اگر از رابطه (۱) نسبت به تغییر مکان نسبی انتگرال‌گیری شود، آن‌گاه رابطه (۳) برقرار است [۲۰]:

$$\int m\ddot{u}_t du + \int c\dot{u} du + \int f_s du = 0 \quad (۳)$$

مطابق مبحث مشتق در ریاضیات اگر  $\dot{u} = \frac{du}{dt}$  باشد، آن‌گاه می‌توان به جای  $du$  در رابطه (۳) عبارت  $\dot{u}dt$  را جایگذاری نمود. در این صورت معادله انتگرالی تعادل انرژی سیستم یک درجه آزادی میرا

پرداخته شود. همچنین در این پژوهش به محاسبه انرژی ورودی به سازه و مؤلفه‌های تشکیل دهنده آن شامل انرژی میرایی، انرژی چرخه‌ای و انرژی تلف شده در سازه‌های یک درجه آزادی معادل و چند درجه آزادی می‌پردازد. در انتهای این پژوهش تلاش شده است تا برای تبیین اثرات درجات آزادی بر نیاز انرژی، نسبت نیاز انرژی به دست آمده از سازه چند درجه آزادی را بر مقادیر متناظر با سازه یک درجه آزادی معادل تقسیم و نسبت‌های کاربردی مناسبی برای تخمین انرژی در سازه‌های چند درجه آزادی به دست آورد.

## ۲- مبانی نظری تحقیق

در این پژوهش ابتدا معادله تعادل نیرو برای سیستم یک درجه آزادی میرا تحت تحریک افقی تکیه‌گاه‌ها ارائه شده و سپس معادله انرژی های ورودی نسبی و مطلق مطرح می‌گردد. مطابق شکل ۱-الف سیستم یک درجه آزادی دارای تکیه‌گاه مرتعش را می‌توان مطابق شکل ۱-ب به صورت سیستم یک درجه آزادی دارای تکیه‌گاه ثابت و نیروی دینامیکی اعمال شده برابر  $-m\ddot{u}_g$  همسان نمود. 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. مطابق شکل های ۱-الف و ۱-ب از مبانی دینامیک سازه، معادله حرکت در سیستم یک درجه آزادی میرا به ترتیب روابط (۱) و (۲) می‌باشند

$$\int m\ddot{u} du + \int c\dot{u} du + \int f_s du = -\int m\ddot{u}_g du \quad (۸)$$

طرف راست رابطه (۸) بیانگر  $E_{RI}$  انرژی ورودی نسبی است که از نظر فیزیکی بیان کننده کار انجام شده توسط سازه با پای ثابت به وسیله نیروی جانبی معادل استاتیکی  $-m\ddot{u}_g$  است. همان طور که از مبحث مشتق در ریاضیات می دانیم،  $\dot{u} = \frac{du}{dt}$  بوده و می توان به جای  $du$  در رابطه (۸) عبارت  $\dot{u}dt$  را جایگذاری نمود. در این صورت معادله انتگرالی تعادل انرژی نسبی سیستم یک درجه آزادی برحسب متغیر زمان مطابق رابطه (۹) به دست می آید.

$$\int m\ddot{u} \dot{u} dt + \int c\dot{u} \dot{u} dt + \int f_s \dot{u} dt = -\int m\ddot{u}_g \dot{u} dt \quad (۹)$$

طرف راست رابطه (۹-۵) بیانگر  $E_{RI}$  انرژی ورودی نسبی و اولین قسمت از سمت چپ معادله (۹) مربوط به  $E_{RK}$  انرژی نسبی جنبشی سیستم، دومین قسمت از سمت چپ معادله (۹-۵) مربوط به  $E_{\xi}$  انرژی میرایی و سومین قسمت از سمت چپ معادله (۹)  $E_a$  مربوط به انرژی جذب شده توسط سیستم است. انرژی جذب شده  $E_a$  توسط سیستم در سیستم ارتجاعی شامل انرژی کرنشی برگشت پذیر  $E_H$  است؛ در حالی که انرژی جذب شده توسط سیستم  $E_a$  در سیستم غیر ارتجاعی شامل انرژی کرنشی برگشت پذیر  $E_S$  و انرژی چرخه ای  $E_H$  است. فرم بسته مؤلفه های انرژی ورودی نسبی در رابطه (۹) را می توان مطابق رابطه (۱۰) ارائه نمود.

$$E_{RK} + E_{\xi} + E_a = E_{RI} \quad (۱۰)$$

$$E_a = E_S \quad \text{در سیستم ارتجاعی} \quad (۱۱)$$

$$E_a = E_S + E_H \quad \text{در سیستم غیر ارتجاعی} \quad (۱۲)$$

۲-۳- اختلاف انرژی ورودی مطلق و نسبی در سیستم یک درجه آزادی  
برای محاسبه میزان اختلاف معادلات انرژی مطلق و نسبی در

برحسب متغیر زمان مطابق رابطه (۴) به دست می آید.

$$\int m\ddot{u}_t \dot{u}_t dt + \int c\dot{u}_t \dot{u}_t dt + \int f_s \dot{u}_t dt = 0 \quad (۴)$$

در اولین قسمت از سمت چپ رابطه (۴) می توان به جای  $\dot{u}$  عبارت  $\dot{u}_t - \dot{u}_g$  را مطابق رابطه (۵) جایگذاری نمود.

$$\int m\ddot{u}_t (\dot{u}_t - \dot{u}_g) dt + \int c\dot{u}_t \dot{u}_t dt + \int f_s \dot{u}_t dt = 0 \quad (۵)$$

با ساده سازی ریاضی رابطه (۵)، معادله انتگرالی تعادل انرژی مطلق سیستم یک درجه آزادی میرا برحسب متغیر زمان مطابق رابطه (۶) به دست می آید:

$$\int m\ddot{u}_t \dot{u}_t dt + \int c\dot{u}_t \dot{u}_t dt + \int f_s \dot{u}_t dt = \int m\ddot{u}_g \dot{u}_g dt \quad (۶)$$

طرف راست رابطه (۶) بیانگر  $E_{AI}$  انرژی ورودی مطلق و اولین قسمت از سمت چپ معادله (۶) مربوط به  $E_{AK}$ ، انرژی جنبشی مطلق سیستم است. دومین قسمت از سمت چپ رابطه (۶) مربوط به انرژی میرایی  $E_{\xi}$  و سومین قسمت از سمت چپ معادله (۶) مربوط به انرژی جذب شده توسط سیستم  $E_a$  است. 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 و انرژی چرخه ای  $E_H$  است. فرم بسته مؤلفه های انرژی ورودی مطلق در رابطه (۶) را می توان مطابق رابطه (۷) ارائه نمود.

$$E_{AK} + E_{\xi} + E_a = E_{AI} \quad (۷)$$

۲-۲- معادله انرژی ورودی نسبی سیستم یک درجه آزادی  
اگر از رابطه (۲) نسبت به تغییر مکان نسبی انتگرال گیری شود، آن گاه رابطه (۸) برقرار است.

در رابطه فوق،  $[m]$  ماتریس جرم قطری،  $[c]$  ماتریس میرایی و  $\{u\}$  بردار جابجایی نسبی طبقه است. همچنین  $m_j$  جرم متمرکز طبقه  $j$  و  $u_{t(j)}$  شتاب مطلق ثبت شده در طبقه  $j$  ام و  $N$  تعداد طبقات سازه است. سمت چپ رابطه (۱۶) متناظر با کل کار انجام شده توسط اینرسی  $(m_j u_{t(j)})$  در هر طبقه در اثر تغییر مکان زمین  $(u_g)$  و در تراز فونداسیون است. از همین طریق مطابق رابطه (۱۷) برای انرژی ورودی نسبی سیستم چند درجه آزادی خواهیم داشت:

$$\frac{1}{2} \{\dot{u}\}^T [m] \{\dot{u}\} + \int (\{\dot{u}\} [c]) d\{u\} + \int \{f(u)\} d\{u\} = \int \left( \sum_{j=1}^N m_j \ddot{u}_g \right) d\{u\} = \int \left( \sum_{j=1}^N m_j \ddot{u}_g \dot{u}_{t(j)} \right) dt \quad (17)$$

اختلاف بین دو رابطه (۱۶) و (۱۷) بر اساس انرژی جنبشی به صورت رابطه (۱۸) خواهیم داشت:

$$E_{AI} - E_{RI} = \frac{1}{2} m \dot{u}_g^2 + \sum_{j=1}^N m_j \dot{u}_g \dot{u}_{t(j)} \quad (18)$$

### ۳- معرفی مدل‌ها

در این مطالعه سه مدل سازه شامل قاب‌های ۶، ۱۲ و ۲۴ طبقه دارای دیوار برشی فولادی به صورت دو بعدی در نظر گرفته شده است. انتخاب سازه‌ها به لحاظ ارتفاع و تعداد طبقات به گونه‌ای صورت پذیرفته است که سازه ۶ طبقه معرف گروه سازه‌های کوتاه مرتبه  $(1.57 \geq H/B)$ ، سازه ۱۲ طبقه معرف گروه سازه‌های میان مرتبه  $(3.14 \geq H/B \geq 1.57)$  و سازه ۲۴ طبقه معرف گروه سازه‌های بلند مرتبه  $(4.71 \geq H/B \geq 3.14)$  هستند [۲۳]. همچنین در هر سازه ارتفاع طبقات برابر ۴ متر در نظر گرفته شده و تعداد دهانه‌ها برای کلیه قاب‌ها برابر ۵ و با عرض ۶ متر بوده و قاب خمشی بتنی از نوع شکل‌پذیری ویژه است. این سازه‌ها در دهانه‌های ۲ و ۴ مطابق شکل (۲) دارای دیوار برشی فولادی می‌باشند.

تمامی مدل‌های مورد مطالعه با فرض احداث بر روی منطقه

سیستم یک درجه آزادی میرا با استفاده از روابط (۷) و (۱۰)، رابطه (۱۳) برقرار است:

$$E_{AI} - E_{RI} = (E_{AK} + E_{\xi} + E_a) - (E_{RK} + E_{\xi} + E_a) = E_{AK} - E_{RK} \quad (13)$$

تمایز بین این دو انرژی ورودی در رابطه (۱۳) در حقیقت اختلاف بین انرژی جنبشی مطلق و نسبی است. با استفاده از اجزای روابط (۶) و (۹) و جایگذاری در رابطه (۱۳) مطابق رابطه (۱۴) خواهیم داشت:

$$E_{AI} - E_{RI} = E_{AK} - E_{RK} = \int m \ddot{u}_t \dot{u}_t dt - \int m \ddot{u} \dot{u} dt \quad (14)$$

با ساده سازی ریاضی رابطه (۱۴)، رابطه (۱۵) مربوط به اختلاف انرژی ورودی مطلق و نسبی حاصل می‌شود.

$$E_{AI} - E_{RI} = E_{AK} - E_{RK} = \frac{1}{2} m \dot{u}_g^2 + m \dot{u}_g \dot{u} \quad (15)$$

با توجه به این واقعیت که سرعت نسبی و جابجایی نسبی باعث بروز خسارات در سازه تحت زلزله شده و انرژی مستهلک شده در اثر میرایی یا تسلیم به حرکت نسبی وابسته است، لذا به منظور طراحی مقاوم لرزه ای ساختمان‌ها در برابر زلزله مفهوم انرژی نسبی بسیار پرمعنا تر و مفیدتر از انرژی مطلق می‌باشد [۲۱]. بنابراین در این پژوهش از مفهوم انرژی نسبی برای بررسی سازه‌های مورد مطالعه تحت شتاب‌نگاشت‌های نزدیک گسل پالس‌گونه استفاده شده است.

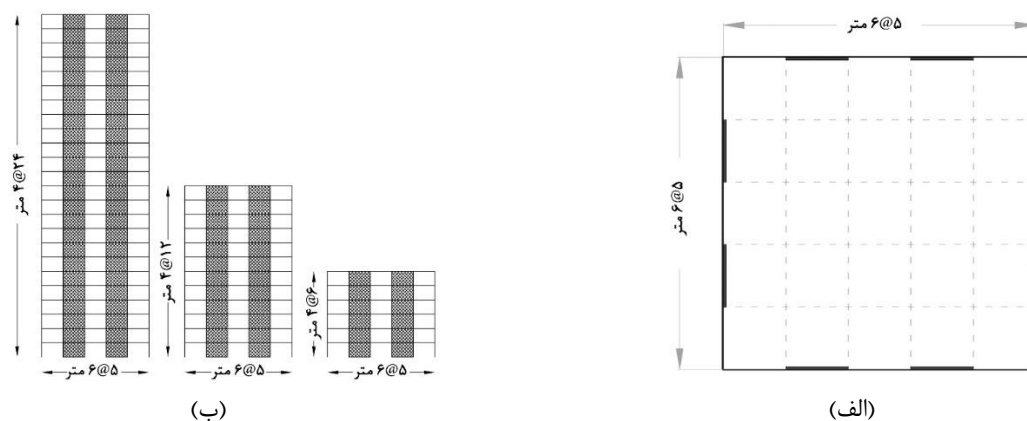
### ۲-۴- انرژی ورودی لرزه‌ای به سیستم چند درجه آزادی

فرم عمومی انرژی ورودی مطلق برای سازه یک درجه آزادی مطابق رابطه (۷) را می‌توان به سیستم  $n$  طبقه چند درجه آزادی به صورت رابطه (۱۶) تعمیم و توسعه داد [۲۲].

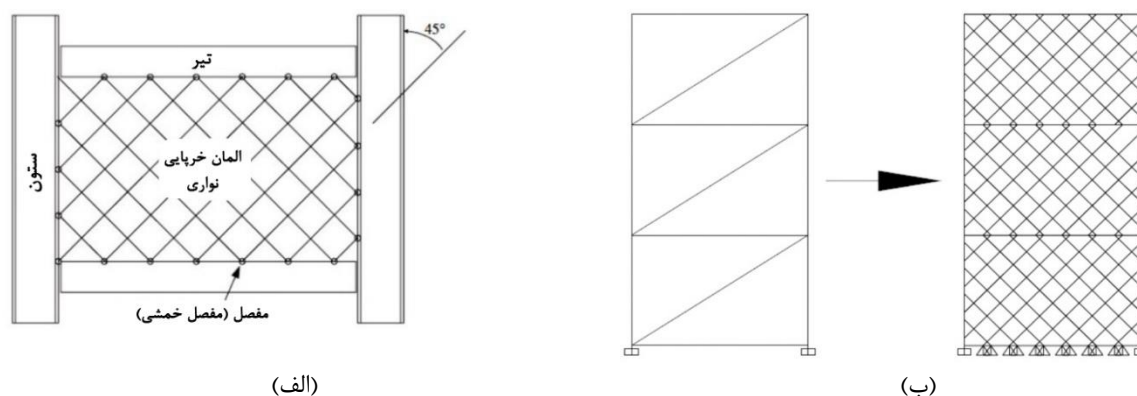
$$\frac{1}{2} \{\dot{u}_t\}^T [m] \{\dot{u}_t\} + \int (\{\dot{u}_t\}^T [c]) d\{u\} + \int \{f(u)\}^T d\{u\} = \int \left( \sum_{j=1}^N m_j \ddot{u}_{t(j)} \right) du_g = \int \left( \sum_{j=1}^N m_j \ddot{u}_{t(j)} \right) \dot{u}_g dt \quad (16)$$

1 H=Height & B=Width of structure





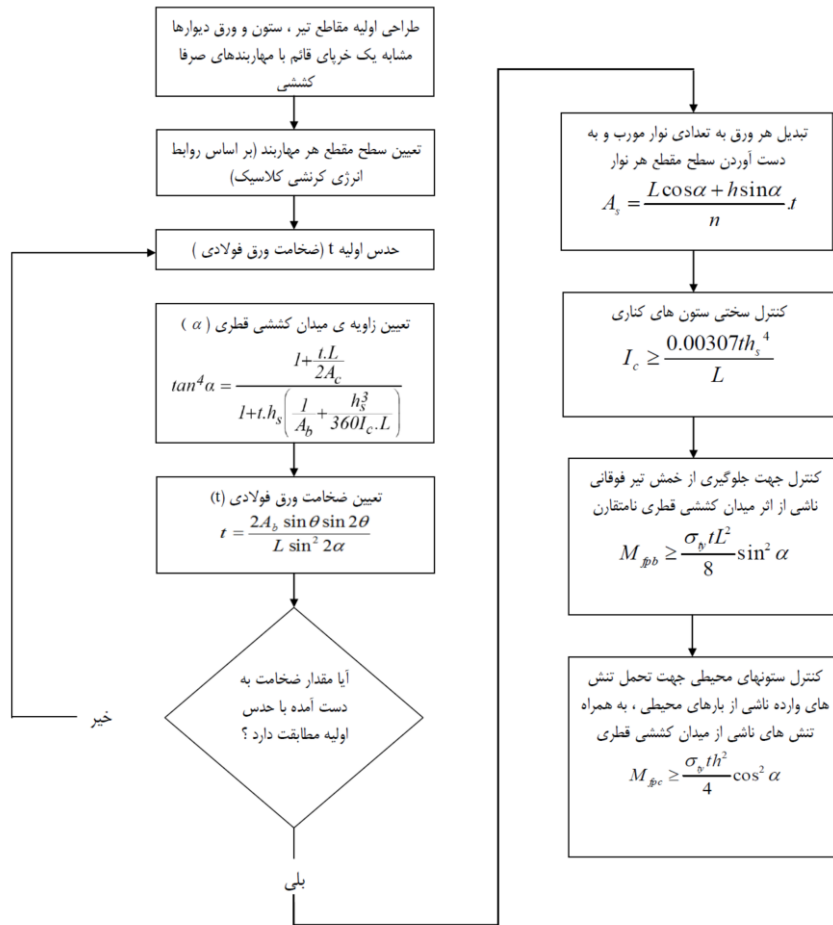
شکل ۲. مشخصات هندسی نمونه قاب‌های دو بعدی ۶، ۱۲، ۲۴ طبقه الف) پلان ساختمان ب) نمای ساختمان  
 Fig. 2. Geometric characteristics of 6, 12, 24 two-dimensional frame samples a) Building plan b) Building facade



شکل ۳. الف) مدل نواری پیشنهادی توربورن و همکاران [۳۴] ب) مهاربند معادل  
 Fig. 3. a) The strip model proposed by Thorburn et al. [34] b) Equivalent bracing

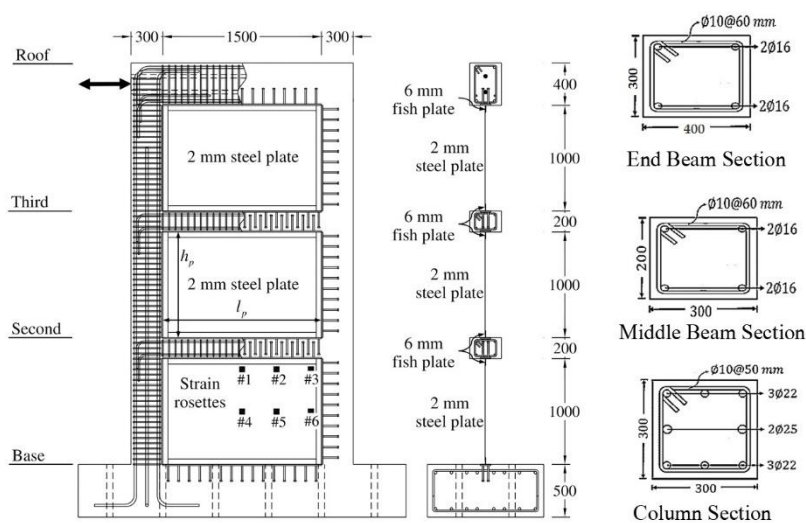
برنامه‌ی OpenSees (مازونی و همکاران [۳۱]) استفاده شده است. با توجه به ضوابط موجود در مبحث نهم [۳۲] و دهم [۳۳] مقررات ملی ساختمان، جهت طراحی ساختمان‌ها از بتن با مقاومت ۲۵ مگاپاسگال و آرماتور AIII استفاده و همچنین فولاد مدنظر برای مهاربندهای معادل نیز از فولاد  $A992F_y 50$  انتخاب شده است. در دیوارهای برشی فولادی با ورق نازک با ضریب لاغری بزرگ‌تر از ۴۰۰، بار بحرانی کمانش بسیار اندک بوده و مقاومت اصلی ورق وابسته به مقاومت پس کمانشی آن است که به صورت میدان کشش قطری ظاهر می‌شود. بر مبنای این فرضیه توربورن و همکاران [۳۴]، تیمرلر و کولاک [۳۵] و ترمپوش و کولاک [۳۶] یک الگوی تحلیلی برای محاسبه ظرفیت نهایی دیوارهای برشی فولادی با ورق نازک ارائه نمودند. در این الگو، به جای ورق نازک فولادی، تعدادی نوار کششی مورب با عرض و شیب برابر مطابق شکل (۳- الف) در نظر گرفته

با خطرپذیری نسبی زیاد و خاک تپ ۳ و نوع کاربری مسکونی با درجه اهمیت متوسط، مطابق با مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران [۲۴] و استاندارد ۲۸۰۰ زلزله ایران (ویرایش چهارم) [۲۵] و آیین‌نامه‌های AISC [۲۶] و ACI [۲۷] که بیشترین مطابقت را با آیین‌نامه ایران دارد به روش حالات حدی نهایی و در نرم‌افزار ETABS [۲۸] تحلیل و طراحی شده‌اند. بارهای مرده و زنده کلیه طبقات به ترتیب ۶۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع در نظر گرفته شده و ضریب رفتار سیستم دیوار برشی فولادی با توجه به نتایج آزمایشگاهی انجام شده بر روی قاب بتنی با دیوار برشی فولادی [۲۹] و ضوابطی که آیین‌نامه بارگذاری آمریکا ASCE07-2010 [۳۰] برای حالات حدی ارائه نموده، معادل ۷ در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی اجزاء محدود و تحلیل سازه‌های مورد مطالعه از



شکل ۴. روند طراحی دیوار برشی فولادی با استفاده از المان نواری مطابق آیین نامه های فولاد کانادا [۳۷] و آمریکا [۲۶]

Fig. 4. Steel shear wall design process using strip elements in accordance with Canadian and American steel regulations [37] [26]



شکل ۵. جزئیات هندسی و نحوه آرماتور گذاری قاب بتن آرمه دارای دیوار برشی فولادی نازک [29]

Fig. 5. Geometric details and reinforcement method of reinforced concrete frame with thin steel shear wall [29]



است.

جهت اعتبارسنجی مدل، تحلیل بار افزون انجام گرفت، برای این منظور تغییر مکانی برابر تغییر مکان حداکثر در نمودار هیستریزس نتایج آزمایشگاهی در گره‌های بالای قاب و در راستای تیر فوقانی اعمال شده است. بدین منظور مدل آزمایشگاهی  $SPIW_1$  با وارد کردن تغییر مکان ۱۲۰ میلی‌متر در تیر فوقانی تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی قرار گرفت. رفتار نیرو-تغییر مکان نسبی نمونه‌ی آزمایشگاهی و تحلیلی حاصل از نرم‌افزار OpenSees در شکل (۶-۱) قابل مشاهده است. با توجه به آنچه در شکل (۳-الف) نشان داده شده است سختی اولیه مدل‌های آزمایشگاهی و عددی دارای تطابق خوبی است ولی در ادامه بارگذاری مدل آزمایشگاهی زودتر از حالت خطی خارج شده و تسلیم‌شدگی در آن رخ می‌دهد. این امر به دلیل وقوع ترک در بتن است که امکان مدل‌سازی آن‌ها در نرم‌افزار نمی‌باشد و باعث می‌شود تسلیم‌شدگی و رفتار غیرخطی مدل عددی دیرتر اتفاق بیافتد. با توجه به شکل (۳-الف) ظرفیت نهایی به دست آمده از مدل عددی بسیار نزدیک به مدل واقعی است. در حالت کلی نتایج عددی تشابه بسیار خوب و قابل قبولی با نتایج حاصل از انجام آزمایش دارد و این یک مدرک خوب برای تأیید مدل نواری در نرم‌افزار OpenSees است. همان‌طور که در تشریح مشخصات نمونه آزمایشگاهی آورده شده، نمونه برای بازتاب یک رفتار برشی در مقابل بارهای جانبی طراحی شده است که این مورد در رفتار نمونه مدل عددی کاملاً مشهود است. شکل مدل عددی و مد شکست در نظر گرفته شده برای مدل‌های آزمایشگاهی و عددی تحت بار جانبی به ترتیب در شکل‌های (۶-ب) و (۶-ج) نشان داده شده است. برای بررسی مکانیسم شکست در شکل‌های (۶-ب) و (۶-ج) مشاهده می‌نمایید، ناحیه کششی در کل طبقه‌ها در ورق‌ها شکل گرفت و ورق‌های دیوار برشی فولادی در کل طبقات به مفصل پلاستیک تبدیل شدند. همچنین مفاصل پلاستیک در پای ستون طبقه اول و انتهای تیرهای طبقه اول و دوم اتفاق افتاد.

مقایسه نتایج شکل (۶-الف)، مطابق جدول (۱) نشان می‌دهد که حداکثر نیروی قابل تحمل و انرژی مستهلک شده نمونه مدل‌سازی اجزای محدود تا حدود زیادی با نمونه‌ی آزمایشگاهی مطابقت دارد. با توجه به جدول (۱) ظرفیت نهایی به دست آمده از مدل تحلیلی بسیار نزدیک به مدل واقعی و نسبت آن در حدود ۱/۰۲ و انرژی

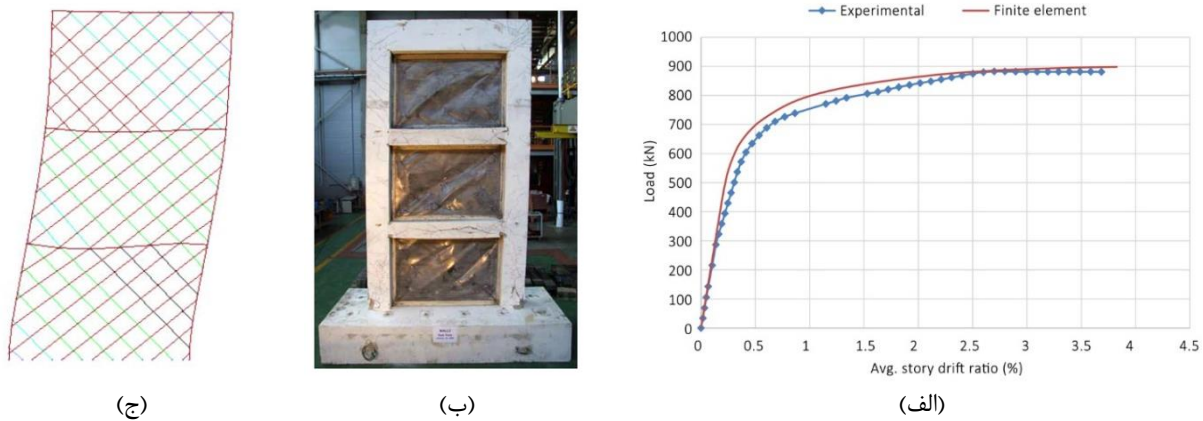
می‌شود. هر نوار همانند یک عضو خرپایی فقط قادر به تحمل نیروی محوری کششی بوده و سطح مقطع آن برابر عرض نوار در ضخامت ورق است. لذا برای تجزیه و تحلیل دیوار برشی با ورق فولادی نازک در نرم‌افزار OpenSees، از مدل نواری توسعه یافته توسط توربورن و همکاران [۳۴] استفاده شده است.

آیین‌نامه‌های فولاد کانادا [۳۷] و آمریکا [۲۶]، دیوار برشی فولادی را به عنوان یک سامانه باربر جانبی پذیرفته است. در این آیین‌نامه‌ها برای طراحی تیر، ستون و ورق دیوارها مشابه یک خرپای قائم با مهاربندهای کششی انجام می‌شود. بر این اساس به جای هر ورق فولادی، یک مهاربند معادل مطابق شکل (۳-ب) در نظر گرفته شده است. شکل (۴) روند طراحی این سیستم بر اساس مدل نواری مطابق آیین‌نامه‌های فولاد کانادا [۳۷] و آمریکا [۲۶] را نشان می‌دهد.

#### ۴- اعتبارسنجی مدل

در این پژوهش به منظور اعتبارسنجی مدل از مطالعه آزمایشگاهی چوی و پارک [۲۹] مطابق شکل (۵) استفاده شده است. نمونه‌های آزمایشگاهی، قاب‌های بتن‌آرمه یک دهانه سه طبقه با مقیاس ۱/۳ است که در آن‌ها از دیوار برشی فولادی نازک و دیوار برشی بتن‌آرمه به عنوان سیستم باربر جانبی استفاده شده و در نرم‌افزار OpenSees به صورت دو بعدی مدل شده است. جهت اعتبارسنجی در این پژوهش، از مدل  $SPIW_1$  مطالعه آزمایشگاهی [۲۹] استفاده شده که عملکرد ورق فولادی نازک در بهبود وضعیت قاب بتن‌آرمه را مورد بررسی قرار می‌دهد. قاب پیرامونی، قاب بتن‌آرمه ویژه است که مطابق آیین‌نامه ACI 318-08 [۲۷] طراحی شده است. همچنین جایجایی هدف برای بارگذاری چرخه‌ای مطابق با پیشنهاد پارک و همکاران [۳۸] تنظیم می‌شود.

به جهت مدل‌سازی در نرم‌افزار OpenSees برای مصالح میلگرد از  $Uniaxial\ Material\ Steel_{01}$  به صورت دو خطی با سخت‌شوندگی سینماتیک و برای مصالح بتنی از  $Uniaxial\ Material\ Concrete_{01}$  با مقاومت کششی صفر و همچنین جهت مدل‌سازی مصالح ورق نازک دیوار برشی فولادی که به صورت نواری (توسعه یافته توسط توربورن و همکاران [۳۴]) از مدل رفتاری  $Uniaxial\ Material\ Hystertic$  که قابلیت مدل‌سازی رفتار فولاد به صورت سه خطی در کشش و فشار را دارد، استفاده شده



شکل ۶. الف) اعتبارسنجی منحنی پوش مدل تحلیلی و نمونه آزمایشگاهی چوی و پارک [۲۹] ب) مکانیسم شکست در نمونه آزمایشگاهی چوی و پارک [۲۹] ج) مکانیسم شکست در نمونه تحلیلی

Fig. 6. a) Validation of the curve of the analytical model and the Choi and Park experimental sample [29] b) The failure mechanism in the Choi and Park experimental sample [29] c) The failure mechanism in the analytical sample

جدول ۱. مقایسه نتایج مدل تحلیلی و نمونه آزمایشگاهی چوی و پارک [۲۹]

[Table 1. Comparison of the results of the analytical model and the experimental sample of Choi and Park [29]

نمونه	حداکثر نیروی قابل تحمل ( $P_{max}$ )			انرژی مستهلک شده		
	مدل تحلیلی	مدل آزمایشگاهی	مدل تحلیلی / مدل آزمایشگاهی	مدل تحلیلی	مدل آزمایشگاهی	مدل تحلیلی / مدل آزمایشگاهی
	(kN)	(kN)		(kN-cm)	(kN-cm)	
SPIW1	۹۰۳	۸۸۶	۱/۰۲	۳۴۹۲۳/۱۵	۳۲۳۹۸/۵	۱/۰۷

وارده برای اولین بار توسط برترو<sup>۱</sup> مطرح گردید [۱۸]. از طرفی اثرات این ماهیت پالسی بر رفتار خطی و غیرخطی سیستم یک درجه آزادی نیز مورد توجه محققین مختلف بوده است [۴۱]. رابطه بین ویژگی‌های زلزله و انرژی ورودی حاصل از پالس سرعت با دوره تناوب بلند که یا به طور مشخص از شتاب‌نگاشت پالسی شکل منشأ می‌گیرد و یا در اثر شتاب پالس‌گونه با محتوای فرکانسی بالا شکل می‌گیرد، می‌تواند دریچه‌ای مفید برای درک بهتر اثرات مخرب زلزله‌های نزدیک گسل بر ساختمان‌های موجود محسوب گردد.

بدین منظور تعداد ۷ شتاب‌نگاشت که معرف زلزله‌های حوزه نزدیک گسل مطابق جدول (۲) انتخاب شده‌اند. زلزله‌های نزدیک گسل بر اساس طبقه‌بندی ارائه شده در مطالعه بیکر و همکاران [۴۲] انتخاب شده است.

مستهلک شده مدل تحلیلی به آزمایشگاهی در حدود ۱/۰۷ است. لذا به دلیل مطابقت مناسب می‌توان فرض نمود که مدل نواری جذب انرژی درستی از تحلیل‌ها را ارائه و پیش‌بینی می‌نماید.

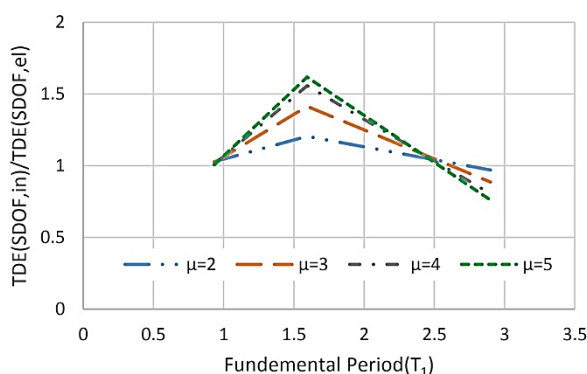
##### ۵- انتخاب شتاب‌نگاشت

در زلزله‌های نزدیک گسل به طور معمول دو مدل شامل اثرات حرکت پرتابه‌ای و جهت‌پذیری پیش‌رونده طبقه‌بندی می‌شوند. ویژگی بارز این رکوردها وجود پالس قابل توجه در رکورد سرعت و شتاب است. مطالعات اخیر بر زلزله‌های نزدیک گسل نشان می‌دهد که در طراحی ساختمان‌ها می‌بایست علاوه بر اعمال اثرات محتوای فرکانسی مشهود در تاریخچه شتاب زلزله، به موضوع پالس غالب نگاشت سرعت نیز توجه نمود [۴۰ و ۳۹]. در حقیقت اهمیت پالس‌های موضعی موجود در شتاب زلزله‌های نزدیک و تأثیر آن بر شدت خرابی‌های

جدول ۲. مشخصات زلزله‌های نزدیک گسل

Table 2. Characteristics of earthquakes near faults

ردیف	نام زمین لرزه	سال	نام ایستگاه	بیشینه شتاب زمین <sup>۱</sup> (g)	فاصله از گسل <sup>۲</sup> (km)	بزرگی <sup>۳</sup> (ریشتر)	سرعت موج برشی <sup>۴</sup> (m/s)
۱	Imperial Valley-06	۱۹۷۹	EC County Center FF	۰/۱۸۷	۷/۳۱	۶/۵۳	۱۹۲/۰۵
۲	Imperial Valley-06	۱۹۷۹	El Centro Array #4	۰/۳۸۹	۷/۰۵	۶/۵۳	۲۰۸/۹
۳	Imperial Valley-06	۱۹۷۹	El Centro Array #5	۰/۳۹۸	۳/۹۵	۶/۵۳	۲۰۵/۶
۴	Landers	۱۹۹۲	Yermo Fire Station	۰/۲۴۲	۳۲/۶۲	۷/۲۸	۳۵۳/۶
۵	Northridge-01	۱۹۹۴	Jensen Filter Plant	۰/۴۸۲	۵/۴۳	۶/۶۹	۳۷۳/۱
۶	Kobe, Japan	۱۹۹۵	KJMA	۰/۷۹۹	۰/۹۶	۶/۹	۳۱۲
۷	Chi-Chi, Taiwan	۱۹۹۹	TCU101	۰/۲۴۹	۲/۱۳	۷/۶۲	۲۷۲/۶



شکل ۷. تغییرات نسبت انرژی تلف شده غیر ارتجاعی به ارتجاعی در سیستم یک درجه آزادی معادل در برابر دوره تناوب

Fig. 7. Changes in the ratio of inelastic to elastic wasted energy in a system with SDOF equivalent to the periodicity

صورت یک سازه یک درجه آزادی مدل‌سازی شده‌اند. نیازهای انرژی به عنوان یکی از ابزارهای مهم و کارآمد در اندازه‌گیری و کمینه‌سازی خسارت‌های تجمعی مورد توجه محققین بوده و به شدت و زمان تداوم زلزله وابسته بوده و با تغییر در ضریب شکل‌پذیری، تغییر در شدت زلزله اتفاق خواهد افتاد. بنابراین جهت تحت تأثیر قرار نگرفتن نیازهای انرژی از دو عامل مذکور، نمودارهای کاربردی بدون بعد و به صورت نسبت‌های کاربردی انرژی تعریف شده‌اند.

#### ۷- نسبت نیاز انرژی تلف شده غیر ارتجاعی به ارتجاعی

#### ۶- روش تحقیق

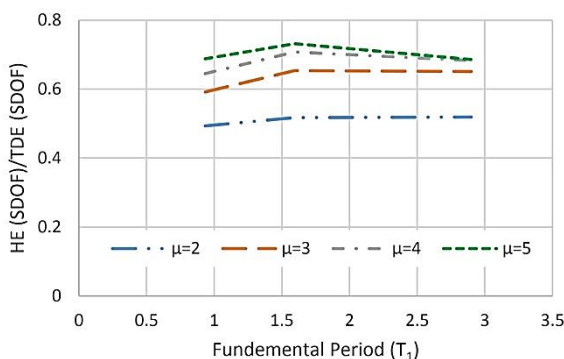
در این پژوهش تلاش می‌شود تا با بررسی ویژگی‌های پاسخ انرژی حاصل از تحلیل سیستم‌های یک درجه آزادی معادل در برابر شتاب‌نگاشت‌های نزدیک گسل پالس‌گونه به تخمین انواع بیشینه انرژی و رابطه آن با سیستم چند درجه آزادی پرداخته شود. در مدل‌های این مطالعه، دوره تناوب الاستیک از ۰/۹۸ تا ۲/۸۹ ثانیه است. از طرفی ضریب شکل‌پذیری نیز مقادیر ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ در نظر گرفته شده است. بدیهی است که منظور از شکل‌پذیری واحد تضمین بقای سازه در حوزه ارتجاعی است. از طرفی کلیه مدل‌ها به

چندان نسبت به درجه غیرخطی شدن سازه حساس نباشد.

#### ۸- نسبت نیاز انرژی چرخه ای به مجموع انرژی تلف شده

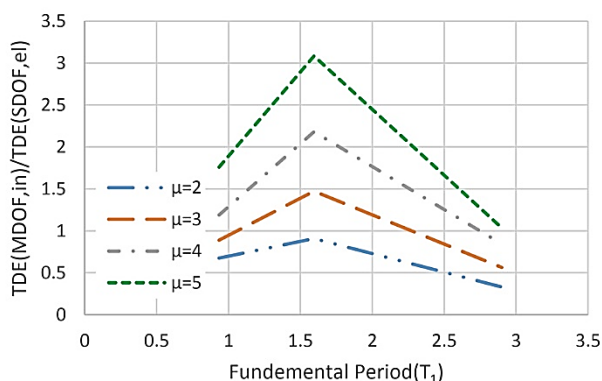
انرژی ورودی لرزه‌ای به سازه‌های دارای مقاومت جانبی اندک، توسط انرژی تلف شده چرخه ای متوازن و غالباً به درجه خسارت‌های سازه ای مرتبط می‌گردد. از آنجا که در شکل (۷) مشاهده گردید،  $TDE$  چندان به درجه غیرخطی شدگی  $\mu$  (به جز برای سازه‌های با پی‌رود متوسط) حساس نیست، منطقی به نظر می‌رسد که بخشی از  $TDE$  که انرژی تلف شده در اثر عملکرد چرخه ای ( $HE$ ) است، ارزیابی گردد. در شکل (۸) تغییرات نسبت انرژی چرخه‌ای به کل انرژی تلف شده در سیستم یک درجه آزادی ( $HE / TDE$ ) تحت رکورد نزدیک گسل پالس‌گونه محاسبه و نمایش داده شده‌اند. مطابق شکل (۸) برای سازه‌های مورد مطالعه، نسبت  $HE / TDE$  با افزایش  $\mu$  افزایش می‌یابد و با افزایش پی‌رود اصلی سازه، این نسبت در اثر رشد  $\mu$ ، کمتر و به صورت خطی کاهش می‌یابد. نرخ تغییرات

یکی از اهداف اساسی در طراحی بر اساس عملکرد این است که طرح لرزه‌ای تضمین نماید المان سازه‌ای شکل‌پذیری و ظرفیت استهلاک انرژی مناسب و کافی را به نحوی داشته باشند که سطوح خسارت وارده بر سازه برحسب زاویه دررفت طبقه و تغییر شکل اعضا به مقادیر حدی متناظر با سطوح عملکردی مدنظر طراح محدود شوند. لذا برای دستیابی به این هدف لازم است سازه را در فاز غیر ارتجاعی مورد ارزیابی قرارداد. نیاز انرژی تلف شده برابر با مجموع انرژی میرایی و چرخه ای در انتهای حرکت زمین است. در شکل (۷) تغییرات نسبت انرژی تلف شده غیر ارتجاعی به ارتجاعی ( $TDE^{in} / TDE^{el}$ )، ترسیم شده است. مطابق شکل (۷)، به جز در سازه‌های با پی‌رود متوسط ( $T = 1.59$ )،  $TDE$  چندان به درجه غیرخطی شدن سازه (ضریب  $\mu$ ) وابسته نیست. این بدان معنی است که بین انرژی تلف شده و انرژی میرایی ویسکوز توازن برقرار است که باعث می‌شود مجموع این دو مکانیسم اتلاف انرژی



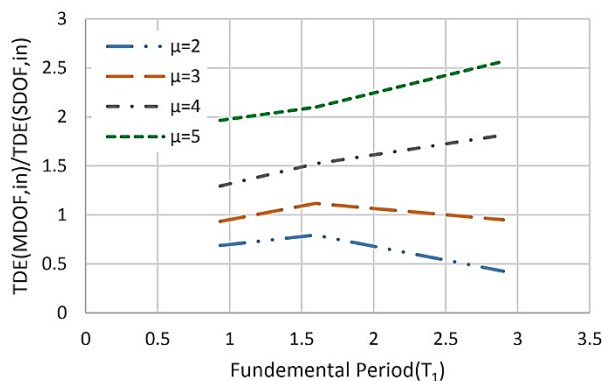
شکل ۸. تغییرات نسبت انرژی چرخه‌ای به کل انرژی تلف شده در سیستم یک درجه آزادی معادل در برابر دوره تناوب

Fig. 8. Changes in the ratio of cyclic energy to total wasted energy in a system with SDOF equivalent to the periodicity



شکل ۹. تغییرات نسبت مجموع انرژی تلف شده غیر ارتجاعی در سیستم چند درجه آزادی به مجموع انرژی تلف شده ارتجاعی در سیستم یک درجه آزادی معادل در برابر دوره تناوب سازه‌های مورد مطالعه

Fig. 9. Changes in the ratio of the total inelastic energy dissipated in a MDOF system to the total elastic-wasted energy in a SDOF system equivalent to the periodicity of the structures under study



شکل ۱۰. تغییرات نسبت مجموع انرژی لرزه‌ای تلف شده غیر ارتجاعی در سیستم چند درجه آزادی به مجموع انرژی لرزه‌ای تلف شده غیر ارتجاعی در سیستم یک درجه آزادی معادل در برابر دوره تناوب اصلی سازه‌های مورد مطالعه

Fig. 10. Changes in the ratio of total inelastic energy dissipated in a MDOF system to the sum of inelastic energy wasted in a SDOF equivalent to the main periodicity of the structures under study

نیاز  $TDE$  سیستم یک درجه آزادی معادل است. افزایش دوره تناوب و افزایش اهمیت اثرات درجات آزادی باعث می‌شود که نیاز  $TDE$  سیستم چند درجه آزادی تقویت شده و به یک همگرا گردد. همچنین با افزایش ضریب شکل‌پذیری مقدار نسبت  $TDE$  نیز افزایش می‌یابد. لذا تغییرات نسبت  $TDE$  تقریباً متناظر با ضریب شکل‌پذیری درجه غیرخطی شدگی است.

نتایج نشان داده شده در شکل (۱۰) اطلاعات مورد نیاز جهت تخمین نیاز  $TDE$  سازه قابی به کمک مقادیر حاصل از سیستم یک درجه آزادی معادل را فراهم می‌آورد. لازم به ذکر است که نتایج ارائه شده مربوط به زلزله‌های نزدیک گسل پالس‌گونه دارای اثرات جهت‌پذیری پیش‌رونده است. همان‌طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، با افزایش ضریب شکل‌پذیری مقدار نسبت مجموع انرژی تلف شده غیر ارتجاعی در سیستم چند درجه آزادی به مجموع انرژی تلف شده غیر ارتجاعی در سیستم یک درجه آزادی معادل نیز افزایش می‌یابد. با توجه به تأثیر اهمیت مودهای بالاتر و درجات آزادی، با افزایش دوره تناوب اصلی سازه و افزایش ضریب شکل‌پذیری، این نسبت مطابق شکل (۱۰) افزایش می‌یابد.

#### ۱۰- نیاز انرژی چرخه‌ای در سیستم چند درجه آزادی

نیاز انرژی چرخه‌ای به عنوان یکی از پارامترهای مورد نیاز جهت کمینه‌سازی خسارت‌های سازه‌ای، بخشی از انرژی ورودی است که به وسیله تسلیم المان‌های سازه تلف می‌شود. شکل (۱۱) تغییرات نسبت انرژی چرخه‌ای تلف شده به کل انرژی تلف شده در سیستم

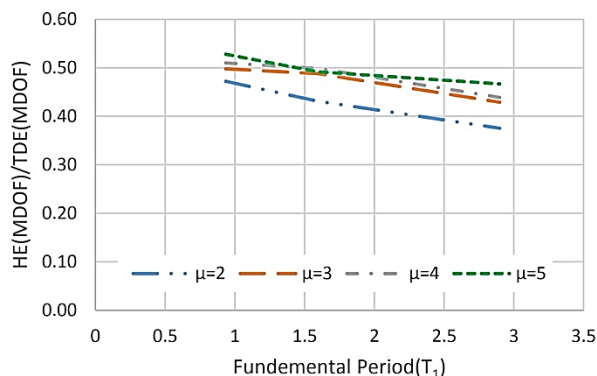
به دست آمده در محدوده پیرو بلند به شدت به محتوای انرژی زلزله وابسته است که البته این موضوع با مراجعه به طیف پاسخ الاستیک نیز مشاهده می‌گردد. به طور نمونه اگر در محدوده پیرو بلند نرخ تنزل طیف میانگین پاسخ شدید باشد، نسبت  $HE/TDE$  نیز با سرعت بیشتری کاهش می‌یابد.

#### ۹- مقایسه نیاز انرژی تلف شده در سیستم‌های چند درجه آزادی و یک درجه آزادی

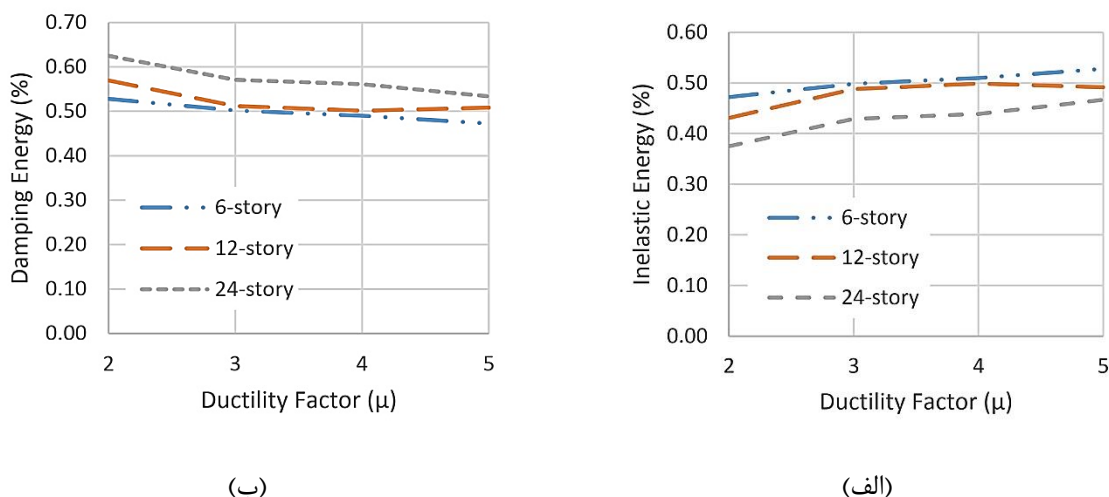
مطابق تعریفی که از انرژی تلف شده بیان شد، به مجموع انرژی میرایی و چرخه‌ای اطلاق شده و در انتهای فاز اعمال نیروی زلزله محاسبه می‌گردد. از آن جایی که در انتهای پاسخ، سازه دارای اندکی انرژی جنبشی است، این کمیت بسیار به اندازه انرژی ورودی نزدیک است. نتایج  $TDE$  به تفصیل در شکل‌های (۹) تا (۱۰) نمایش داده شده است. این نمودارها علاوه بر اینکه ارزیابی  $TDE$  سیستم سازه‌ای چند درجه آزادی را میسر می‌سازد، می‌تواند به عنوان اطلاعات اساسی جهت محاسبه  $TDE$  سیستم چند درجه آزادی به کمک طیف انرژی یک درجه آزادی فراهم آورد.

شکل (۹) تغییرات نسبت نیاز  $TDE$  سیستم چند درجه آزادی غیر ارتجاعی به نیاز ارتجاعی سازه یک درجه آزادی معادل است که به عنوان یکی از نسبت‌های کاربردی در ارزیابی رابطه بین سیستم چند درجه آزادی و یک درجه آزادی استفاده می‌گردد.

ان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌گردد، برای سازه‌های کوتاه مرتبه و بلند مرتبه، نیاز  $TDE$  سیستم چند درجه آزادی بزرگ‌تر از



شکل ۱۱. تغییرات نسبت انرژی چرخهای چرخهای تلف شده به کل انرژی تلف شده در سیستم چند درجه آزادی در برابر دوره تناوب سازه‌های مورد مطالعه  
**Fig. 11. Changes in the ratio of the energy of the lost cycle to the total energy lost in the system of MDOF against the periodicity of the structures under study**



شکل ۱۲. درصد انرژی تلف شده در اثر الف) تغییر شکل‌های غیر ارتجاعی ب) میرایی برای مقادیر مختلف ضریب شکل‌پذیری در سازه‌های مورد مطالعه  
**Fig. 12. Percentage of energy lost due to a) inelastic deformation b) damping for different values of ductility coefficient in the studied structures**

آزادی مستقل از دوره تناوب بوده به قسمتی که اثر موده‌های بالاتر چندان بر آن قابل توجه نیست. بنابراین از اطلاعات سیستم یک درجه آزادی معادل می‌توان استفاده نمود. همچنین با افزایش ضریب شکل‌پذیری ( $\mu$ ) این نسبت برای سیستم چند درجه آزادی به نتایج سیستم یک درجه آزادی نزدیک تر شده و به تعبیری افزایش  $\mu$  منجر به کاهش اثرات موده‌های بالاتر می‌گردد.

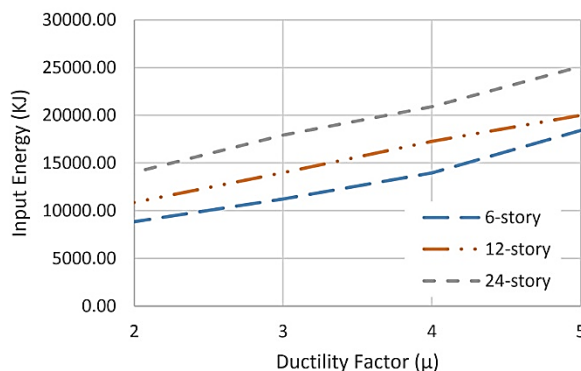
#### ۱۱- سهم مؤلفه‌های انرژی در سیستم چند درجه آزادی

انرژی کرنشی از دو بخش انرژی کرنشی ارتجاعی و انرژی کرنشی

چند درجه آزادی در برابر دوره تناوب اصلی سازه‌های مورد مطالعه است.

شکل کلی نمودار  $HE/TDE$  شبیه همان نموداری است که برای نسبت  $HE/TDE$  سیستم یک درجه آزادی متناظر با مود اول به دست آمد. بنابراین می‌توان از اطلاعات سیستم یک درجه آزادی معادل برای تخمین نسبت  $HE/TDE$  در مدل چند درجه آزادی استفاده نمود. شکل (۱۱) تغییرات نسبت انرژی چرخه‌ای تلف شده به کل انرژی تلف شده در سیستم چند درجه آزادی در برابر دوره تناوب سازه‌های مورد مطالعه ارائه شده‌اند. مراجعه به این تصاویر نشان می‌دهد که نسبت  $HE/TDE$  در سیستم چند درجه





شکل ۱۳. انرژی ورودی نسبی وارد به سازه

Fig. 13. Relative input energy entering the structure

جدول ۳. سهم انرژی ورودی نسبی، میرایی و چرخهای برای مقادیر مختلف ضریب شکل پذیری

Table 3. Share of relative input energy, damping and cycling for different values of ductility coefficient

انرژی تلف شده		انرژی ورودی نسبی (KJ)	$\mu$	دوره تناوب اصلی سازه
انرژی چرخه‌ای (%)	انرژی میرایی (%)			
۰/۴۷	۰/۵۳	۸۸۵۸/۱۵	۲	۰/۹۳۴
۰/۵	۰/۵	۱۱۲۳۳/۹۴	۳	
۰/۵۱	۰/۴۹	۱۳۹۴۵/۰۱	۴	
۰/۵۳	۰/۴۷	۱۸۴۲۵/۸۳	۵	
۰/۴۳	۰/۵۷	۷۱۶۷/۱۷	۲	
۰/۴۹	۰/۵۱	۱۰۸۷۵/۳۳	۳	۱/۵۹۴
۰/۵	۰/۵	۱۳۹۸۹/۶۰	۴	
۰/۴۹	۰/۵۱	۱۷۲۶۰/۲۴	۵	
۰/۳۸	۰/۶۲	۹۹۰۸/۱۰	۲	۲/۸۰۹۹
۰/۴۳	۰/۵۷	۱۴۰۰۹/۳۰	۳	
۰/۴۴	۰/۵۶	۱۷۹۳۳/۳۰	۴	
۰/۴۷	۰/۵۳	۲۰۸۹۵/۳۰	۵	

ضریب شکل‌پذیری ( $\mu$ ) مطابق شکل (۱۲) برای سازه‌های مورد مطالعه این پژوهش مقایسه شده‌اند. با توجه به شکل (۱۲) مشاهده می‌شود که با افزایش ضریب شکل‌پذیری ( $\mu$ ) سهم انرژی میرایی کاهش می‌یابد. از جهت دیگر کاهش سهم انرژی میرایی به ارتفاع سازه وابسته است. به نحوی که برای  $\mu = 5$ ، افزایش ارتفاع سازه باعث گردید سهم انرژی تلف شده در اثر میرایی افزایش یابد. علت این اتفاق از آنجاست که در سازه‌های بلند مرتبه با افزایش ضریب شکل‌پذیری ( $\mu$ ) یا افزایش درجه غیرخطی شدگی، بیشینه نیازهای

غیر ارتجاعی (چرخه‌ای) تشکیل شده است که در رابطه (۱۷) آورده شده است. انرژی کرنشی الاستیک بخشی از انرژی ورودی زلزله است که به شکل کرنش الاستیک در المان‌های سازه ذخیره می‌شود (که البته در خلال ارتعاش آزاد سازه به انرژی میرایی و جنبشی تبدیل می‌گردد). انرژی چرخه‌ای دربرگیرنده مجموع انرژی تلف شده در اثر تغییر شکل‌های غیر ارتجاعی در المان‌های سازه است. در انتهای ارتعاش سازه، درصد انرژی تلف شده در اثر میرایی و تغییر شکل‌های غیرخطی به همراه کل انرژی ورودی برای مقادیر مختلف

درجات آزادی نیاز انرژی به دست آمده برای سیستم‌های چند درجه آزادی با مقدار متناظر آن در سازه‌های یک درجه آزادی معادل هم‌پایه شده است. نتایج بررسی حاصل از این مطالعه در ادامه ارائه می‌گردد:

- به جز در سازه‌های با پیروید متوسط ( $T = 1.59$ )،  $TDE$  چندان به درجه غیرخطی شدن سازه (ضریب  $\mu$ ) وابسته نیست. این بدان معنی است که بین انرژی تلف شده و انرژی میرایی ویسکوز توازن برقرار است که باعث می‌شود مجموع این دو مکانیسم اتلاف انرژی چندان نسبت به درجه غیرخطی شدن سازه حساس نباشد. همچنین برای پیرودهای بالاتر از ۲/۵ ثانیه با افزایش ضریب شکل‌پذیری، نسبت  $TDE^{in} / TDE^{el}$  کاهش می‌یابد و در این محدوده پیروید، نسبت نیاز محاسبه شده وابستگی کمتری نسبت به تغییر پیروید دارند.

- بررسی نسبت نیاز انرژی چرخه‌ای به مجموع انرژی تلف شده ( $HE / TDE$ ) در سیستم یک درجه آزادی حاکی از آن است که برای سازه‌های کوتاه مرتبه نسبت  $HE / TDE$  با افزایش ضریب شکل‌پذیری، افزایش می‌یابد. ولی در سازه‌های میان مرتبه و بلندمرتبه با افزایش شکل‌پذیری این نسبت کاهش می‌یابد.

- یکی از نسبت‌های کاربردی که می‌توان برای ارزیابی رابطه بین سیستم چند درجه آزادی به سیستم یک درجه آزادی استفاده نمود، نسبت نیاز انرژی سیستم چند درجه آزادی غیر ارتجاعی به نیاز ارتجاعی سازه یک درجه آزادی است. بررسی این نسبت نشان می‌دهد که افزایش دوره تناوب و افزایش اهمیت اثرات درجات آزادی باعث می‌شود که نیاز سیستم چند درجه آزادی تقویت گردد. همچنین با افزایش ضریب شکل‌پذیری مقدار نسبت  $TDE$  نیز افزایش می‌یابد. لذا تغییرات نسبت  $TDE$  تقریباً متناظر با ضریب شکل‌پذیری درجه غیرخطی شدگی است.

- نیاز انرژی چرخه‌ای ( $HE$ ) در سیستم چند درجه آزادی بخشی از انرژی ورودی است که به وسیله تسلیم المان‌های سازه‌ای تلف می‌شود. نسبت نیاز  $HE / TDE$  برای مدل‌های چند درجه آزادی می‌تواند یک نسبت کاربردی مفید باشد. بررسی نسبت  $HE / TDE$  نشان می‌دهد که در سیستم چند درجه آزادی مستقل از دوره تناوب بوده به قسمتی که اثر موده‌های بالاتر چندان بر آن قابل توجه نیست. همچنین با افزایش ضریب شکل‌پذیری این نسبت برای سیستم چند درجه آزادی به نتایج سیستم یک درجه آزادی نزدیک‌تر شده و به

غیر ارتجاعی سازه در طبقات تحتانی متمرکز شده و با کاهش سهم اثر موده‌های بالاتر تعداد المان‌هایی که غیرخطی می‌شوند کمتر خواهد بود. پس برای برقراری توازن انرژی تلف شده، سهم انرژی میرایی افزایش می‌یابد.

شکل (۱۳) نمودار انرژی ورودی نسبی وارد بر سازه به مقادیر مختلف ضریب شکل‌پذیری ( $\mu$ ) نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود، با افزایش ضریب شکل‌پذیری ( $\mu$ ) و افزایش ارتفاع سازه، مقدار انرژی ورودی نسبی نیز افزایش پیدا می‌کند.

برای مقایسه بهتر بین سهم انرژی تلف شده در اثر میرایی و تغییر شکل‌های غیرخطی و تأثیر اندازه غیرخطی شدن سازه بر آن، جدول (۳) ارائه شده است. میانگین نتایج به دست آمده از جدول نشان می‌دهند که در سازه‌های کوتاه و میان مرتبه، چنانچه تراز غیرخطی شدن سازه اندک ( $\mu = 2$ )، سهم انرژی تلف شده در اثر میرایی بین ۱۰ تا ۳۹ درصد بیشتر از انرژی تلف شده چرخه‌ای است. البته با افزایش ضریب شکل‌پذیری این رویه برعکس می‌گردد. افزایش  $R$  باعث شد سهم انرژی میرایی ۴۷٪ تا ۶۲٪ و سهم انرژی چرخه‌ای بین ۳۸٪ تا ۵۳٪ تغییر داشته باشد. هرچه ارتفاع سازه کمتر باشد، سهم انرژی چرخه‌ای بیشتر از انرژی میرایی است. به طور نمونه در سازه ۲۴ طبقه برای  $\mu = 5$ ، سهم انرژی چرخه‌ای نسبت به انرژی میرایی قابل توجه‌تر می‌گردد. نکته دیگر اینکه با افزایش ارتفاع سازه تغییر در ضریب شکل‌پذیری ( $\mu$ ) تأثیری بر تغییر سهم انرژی تلف شده چرخه‌ای و میرایی نمی‌گذارد. به عبارتی تأثیر هر دو مکانیسم اتلاف انرژی یکسان و شبیه هم است.

## ۱۲- نتیجه‌گیری

به منظور ارتقای طراحی لرزه‌ای سازه‌ها، انرژی ورودی نسبی ناشی از زلزله به سازه به عنوان بارگذاری لرزه‌ای در طراحی سازه در نظر گرفته شده است. در این پژوهش با پیشنهاد نسبت‌های کاربردی و مفید به ایجاد ارتباط بین انرژی در سازه‌های یک درجه آزادی و چند درجه آزادی پرداخته شده است. بدین منظور نسبت‌هایی همچون نسبت انرژی تلف شده غیر ارتجاعی به ارتجاعی، نسبت انرژی تلف شده هیستریزیس به کل انرژی تلف شده برای سیستم‌های چند درجه آزادی و یک درجه آزادی معادل تعریف و برای منظور نمودن اثرات

[۱۳] ن. سیاهپلو، اثر زلزله های نزدیک گسل بر تخمین نیازهای لرزه ای قاب خمشی فولادی با منظور نمودن اثرات چنددرجه آزادی، دانشگاه سمنان، ۱۳۹۴

[14] G.R. Havaei, E. Mobedi, Effect of interaction and rocking motion on the earthquake response of buildings, (2015).

[15] R. Bemanian, H. Shakib, Evaluation of nonlinear behavior of dual steel frame-shear wall system by a group of real earthquakes, (2016).

[16] R. Vahdani, M. Bitarafan, M.I. Khodakarami, Effect of the soil-structure interaction on performance assessment of the energy-based cumulative damage index in concrete reinforced frames, (2016).

[۱۷] م.ع. واثقی نیا پیشنهاد روشی برای بهبود رفتار لرزه ای قاب های خمشی فولادی با رویکرد روش انرژی، دانشگاه سمنان، ۱۳۹۷.

[18] V.V. Bertero, R. Herrera, S. Mahin, Establishment of design earthquakes-evaluation of present methods, in: Proc., Int. Symp. on Earthquake Structural Engineering, Univ. of Missouri-Rolla Rolla, Mo., 1976, pp. 580-551.

[19] N. Makris, C.J. Black, Dimensional analysis of bilinear oscillators under pulse-type excitations, Journal of Engineering Mechanics, 1031-1019 (2004) (9)130.

[20] A.K. Chopra, Dynamics of Structures. Theory and Applications to, Earthquake Engineering, (2017).

[21] A.K. Chopra, Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering, Prentice-Hall, 2001.

[22] C.M. Uang, V.V. Bertero, Evaluation of seismic energy in structures, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 90-77 (1990) (1)19.

[23] B. Stafford Smith, A. Coull, Tall building structures: analysis and design, (1991)

[24] I.N.B. Code, Applied Loads on Buildings, Part 6 (2013).

[۲۵] آیین نامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله استاندارد ۲۸۰۰، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ۱۳۹۳

[26] A.I.o.S.C. (AISC), Specification for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 2010) (16-360).

[27] A.C.I. Committee, A.C. Institute, I.O.f. Standardization, Building code requirements for structural concrete (ACI 08-318) and commentary, in, American Concrete Institute, 2008.

[28] C.S.I. Berkeley, Computer Program ETABS Ultimate

تعبیری افزایش ضریب شکل پذیری منجر به کاهش اثرات مودهای بالاتر می گردد.

## مراجع

[1] G.W. Housner, Limit design of structures to resist earthquakes, in: Proc. of 1st WCEE, 1956, pp. 5.13-5.1.

[2] H. Akiyama, Earthquake resistant design based on the energy concept, in: Proceedings of 9th WCEE, 1988, pp. 910-905.

[3] C.-M. Uang, V.V. Bertero, Use of energy as a design criterion in earthquake-resistant design, Earthquake Engineering Research Center, University of California Berkeley ..., 1988.

[4] M. Fakhri-Niasar, The Energy Spectrum of the Iranian Earthquakes, Islamic Azad University, Tehran, 1998.

[5] H. Maleki, M. Ghafory-Ashtiany, Study on the Energy of Earthquakes in Reinforced Concrete Moment Frames, Journal of Seismology and Earthquake Engineering, (2)3 11 (2000)

[6] L.D. Decanini, F. Mollaioli, An energy-based methodology for the assessment of seismic demand, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 137-113 (2001) (2)21.

[7] L. Ye, G. Cheng, Z. Qu, X. Lu, Study on energy-based seismic design method and application on steel braced frame structures, Jianzhu Jiegou Xuebao(Journal of Building Structures), 45-36 (2012) (11)33.

[8] A. Ruzi, Energy concept in earthquake-resistant design, 2003.

[9] P. Khashaee, B. Mohraz, F. Sadek, H. Lew, J.L. Gross, Distribution of earthquake input energy in structures, Diane Publishing Company, 2003.

[10] A.G. GHODRATI, D.G. ABDOLLAHZADE, Z.M. KHAN, Earthquake duration and damping effects on input energy, (2007).

[11] F.H. Shargh, M. Hosseini, An optimal distribution of stiffness over the height of shear buildings to minimize the seismic input energy, Journal of Seismology and Earthquake Engineering, 32-25 (2011) (1)13.

[12] S.J. Kamali-Firozabadi, Using energy method to estimate the required displacement of steel moment frames, Khaje Nasir Toosi University of Technology, 2011.

- of Thin Panel Steel Plate Shear walls, (1987).
- [37] C.S. Association, CAN/CSA-S-1 .16M89. Limit States Design of Steel Structures, (1990).
- [38] H.-G. Park, J.-H. Kwack, S.-W. Jeon, W.-K. Kim, I.-R. Choi, Framed steel plate wall behavior under cyclic lateral loading, Journal of structural engineering, (2007) (3)133 388-378.
- [39] T.H. Heaton, J.F. Hall, D.J. Wald, M.W. Halling, Response of high-rise and base-isolated buildings to a hypothetical Mw 7.0 blind thrust earthquake, Science, (5195)267 211-206 (1995)
- [40] W. Iwan, Drift spectrum: measure of demand for earthquake ground motions, Journal of structural engineering, 404-397 (1997) (4)123.
- [41] H. Sucuoglu, A. Erberik, Energy-based hysteresis and damage models for deteriorating systems, Earthquake engineering & structural dynamics, 88-69 (2004) (1)33.
- [42] J.W. Baker, Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis, Bulletin of the Seismological Society of America, 1501-1486 (2007) 97.
- 2015, Computers and Structures Inc., Berkeley, California, (2015).
- [29] I.-R. Choi, H.-G. Park, Cyclic loading test for reinforced concrete frame with thin steel infill plate, Journal of Structural Engineering, 664-654 (2010) 137.
- [30] A.S.C. Engineers, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures: Second Printing, (2010).
- [31] S. Mazzoni, F. McKenna, M.H. Scott, G.L. Fenves, The open system for earthquake engineering simulation (OpenSEES) user command-language manual, (2006).
- [32] I.N.B. Code, Design and Implement of Concrete Buildings, Part 9 (2013).
- [33] I.N.B. Code, Design and Implement of Steel Buildings, Part 10 (2013).
- [34] L.J. Thorburn, G.L. Kulak, C.J. Montgomery, Analysis of steel plate shear walls, in: Structural engineering report no.107, Edmonton, AB, Canada, 1983.
- [35] P.A. Timler, G.L. Kulak, Experimental study of steel plate shear walls, (1983).
- [36] E.V.V. Tromposch, G.L. Kulak, Cyclic and Static Behavior

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Reza Salimbahrami S., Gholhaki M., Effects of higher modes and degrees of freedom on energy requirement in reinforced concrete structures with steel shear wall, Amirkabir J. Civil Eng., 53(10) (2022) 4143-4160.

DOI: [10.22060/ceej.2020.18001.6734](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18001.6734)

