



# Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir



## Probabilistic analysis of damper failure in steel frames equipped with fluid viscous damper

Mohtasham Mohebbi<sup>1</sup>, Solmaz Moradpor<sup>2\*</sup>

1- Professor, Engineering and Technical Department, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2- Ph.D, Civil Engineering Department, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

### ABSTRACT

*In the seismic performance assessment of structures equipped with fluid viscous dampers (FVDs), damper failures such as reaching the force capacity or stroke length limit can cause the viscous damper to deviate from the expected performance in controlling the seismic response of structures. The objective of this study is to determine the probability of damper failure based on various limit state functions related to the maximum force and displacement of the damper, while incorporating uncertainty in the structural parameters, damper properties, and input ground motion records. For the numerical analysis, two steel moment resisting frames with 4 and 12 stories, equipped with linear FVDs designed according to the direct displacement-based design method, have been considered. By applying uncertainties in the structural and damper parameters, random frames were generated using the Latin Hypercube Sampling (LHS) method. A reliability analysis was then conducted to calculate the probability of damper failure under different safety factors applied to the maximum force and displacement of the dampers. The results for the studied structures indicate that without any safety factor, the maximum probability of damper failure based on the force capacity and stroke length limit state functions is approximately 15% and 16.3%, respectively. However, by applying a safety factor of 2, as recommended by design guidelines, the effect of damper failure can be ignored in the probabilistic assessment of structures equipped with FVDs.*

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 19 July 2025

**Revise Date:** 18 October 2025

**Accept Date:** 28 November 2025

### Keywords:

Structural reliability  
Damper failure  
Damper force capacity  
Damper stroke length  
Latin Hypercube

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.533248.3768

\*Corresponding author: Mohtasham Mohebbi  
Email address: mohebbi@uma.ac.ir

## تحلیل احتمالاتی خرابی میراگر در قاب‌های فولادی مجهز به میراگر ویسکوز مایع

محتشم محبی<sup>\*</sup>، سولماز مرادپور<sup>۲</sup>

۱- استاد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- فارغ التحصیل دکترای مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

### چکیده

در ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سازه‌های مجهز به میراگر ویسکوز مایع، خرابی میراگر ویسکوز مایع نظیر رسیدن به ظرفیت نیرویی یا طول بازوی جابجایی میراگر می‌تواند باعث عدم تحقق عملکرد مورد انتظار از میراگر ویسکوز در کنترل پاسخ لرزه‌ای شود. در این پژوهش هدف تعیین احتمال خرابی میراگر براساس توابع حدی مختلف مرتبط با حداکثر نیرو و جابجایی میراگر با اعمال عدم قطعیت در پارامترهای سازه، میراگر و رکورد ورودی می‌باشد. برای آنالیز عددی، دو قاب خمشی فولادی ۴ و ۱۲ طبقه مجهز به میراگر ویسکوز خطی که به روش جابجایی مستقیم طراحی شده، در نظر گرفته شده است. با اعمال عدم قطعیت در پارامترهای سازه و میراگر، با استفاده از روش نمونه‌گیری لاتین هاپر کیوب (LHS) قاب‌های تصادفی تولید شده و با انجام تحلیل قابلیت اعتماد، به ازای مقادیر مختلف ضرایب اطمینان در حداکثر نیرو و جابجایی میراگر احتمال خرابی میراگر محاسبه شده است. نتایج ارزیابی روی سازه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که در صورت عدم اعمال ضریب اطمینان، حداکثر مقدار احتمال خرابی میراگر براساس تابع حدی مرتبط با حداکثر نیرو و جابجایی میراگر به ترتیب حدود ۱۵ و ۱۶/۳ درصد بوده است. با اعمال ضریب اطمینان برابر ۲ طبق توصیه دستورالعمل‌های طراحی، می‌توان از تاثیر خرابی میراگر در ارزیابی احتمالاتی سازه‌های مجهز به میراگر صرف‌نظر کرد.

کلمات کلیدی: قابلیت اعتماد سازه، خرابی میراگر، ظرفیت نیرویی میراگر، طول بازوی جابجایی میراگر، لاتین هاپر کیوب.

| شناسه دیجیتال:                 |                                | سابقه مقاله:   |               |            |            |                 |
|--------------------------------|--------------------------------|--|---------------|------------|------------|-----------------|
| doi:                           | شناسه دیجیتال:                 | چاپ  | انتشار آنلاین | پذیرش      | بازنگری    | دریافت          |
| 10.22065/jsce.2025.533248.3768 | 10.22065/jsce.2025.533248.3768 | ۱۴۰۵/۰۴/۳۱   | ۱۴۰۴/۰۹/۰۷    | ۱۴۰۴/۰۹/۰۷ | ۱۴۰۴/۰۷/۲۶ | ۱۴۰۴/۰۴/۲۸      |
|                                |                                | محتشم محبی   |               |            |            | *نویسنده مسئول: |
|                                |                                | <a href="mailto:mohebbi@uma.ac.ir">mohebbi@uma.ac.ir</a> |               |            |            | پست الکترونیکی: |

## ۱- مقدمه

میراگر ویسکوز مایع<sup>۱</sup> به عنوان یک مکانیزم مستهلک کننده انرژی برای کاهش پاسخ سازه تحت اثر نیروهای باد یا زلزله استفاده می‌شود [۱-۲]. این سیستم با توجه به سادگی در کاربرد و داشتن ظرفیت‌های مختلف بطور گسترده در طراحی سازه‌های جدید و مقاوم سازی سازه‌های موجود مورد استفاده قرار گرفته است. روشهای مختلفی برای طراحی سازه‌های مجهز به میراگر ویسکوز مایع پیشنهاد شده است که شامل روش‌های نیرویی و عملکردی می‌باشند. در رابطه با روش‌های نیرویی می‌توان به مطالعات رامیرز و همکاران [۳-۴] و ویتاکر و همکاران اشاره کرد [۵]. در فصل ۱۸ آیین نامه ASCE/SE17 بر اساس نتایج حاصل از این تحقیقات دستورالعمل طراحی میراگر ویسکوز مایع ارائه شده است [۶]. طراحی میراگر ویسکوز مایع بر اساس عملکرد نیز اخیراً در تحقیقاتی پیشنهاد شده است. مرادپور و دهستانی [۷] با توسعه روش طراحی جابجایی مستقیم برای طراحی بهینه میراگرهای ویسکوز، این سیستم را برای قاب‌های خمشی فولادی طراحی کردند. در این روش کمینه کردن مجموع ضرایب میرایی الحاقی به سازه به عنوان تابع هدف و برابر بودن نسبت میرایی اضافه شده میراگرها با مقدار پیش فرض به عنوان قید تعریف شده‌اند.

برای توزیع میراگر و تعیین ضریب میرایی روشهای مختلف شامل روش‌های طراحی ابتکاری، تحلیلی و تکاملی پیشنهاد شده است. در یک گروه از این روشها، با فرض یک مقدار برای نسبت میرایی اضافه شده توسط میراگرهای ویسکوز، روابط طراحی ساده‌ای با استفاده از روش‌های توزیع ساده نظیر توزیع یکنواخت، توزیع متناسب با برش طبقه [۸]، توزیع متناسب با جرم، توزیع متناسب با سختی طبقه و توزیع بر اساس انرژی کرنش برشی طبقه [۹] ارائه شده است. کارایی این روش‌های ساده در طراحی سازه‌های جدید و در مقاوم سازی سازه‌های موجود منظم و نامنظم مورد بررسی قرار گرفته است [۱۰-۱۲]. در گروه دیگر، طراحی میراگر ویسکوز با استفاده از تعریف یک مسئله بهینه‌سازی و حداقل کردن یک تابع عملکرد با لحاظ برخی محدودیت‌ها صورت می‌گیرد. در این روش‌ها بهینه‌سازی با استفاده از روش‌های مختلف نظیر روش‌های سنتی بهینه‌سازی یا روش‌های مدرن نظیر الگوریتم‌های تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک<sup>۲</sup> حل می‌شود [۱۳-۱۵].

تحلیل قابلیت اعتماد سازه‌های ساختمانی و غیرساختمانی تحت بارهای مختلف در مطالعات قبلی بطور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است [۱۶-۲۰]. همچنین برای بهبود شاخص قابلیت اعتماد سازه‌ها، طراحی سازه‌های مختلف بر مبنای قابلیت اعتماد هم در مطالعات متعددی بررسی شده است [۲۱]. در این زمینه می‌توان به بهینه‌سازی بر مبنای قابلیت اعتماد ستون‌های فلزی پر شده با بتن [۲۲]، جانمایی بهینه بادبندها در سازه سه‌بعدی فولادی بر مبنای قابلیت اعتماد [۲۳]، طراحی بهینه سازه‌های فولادی جهت حداقل کردن وزن سازه با لحاظ محدودیت‌های مقاومت، دررفت و قابلیت اعتماد [۲۴]، طراحی بهینه حرپاهای گنبدی بر اساس قابلیت اعتماد [۲۵]، بهینه‌سازی طراحی تیرهای فولادی بر اساس قابلیت اعتماد [۲۶] و طراحی بهینه مقاوم قاب‌های خمشی فولادی دو بعدی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها در مصالح و بارگذاری [۲۷] اشاره کرد. در سال‌های اخیر یکی از مهم‌ترین تحول در ارزیابی قابلیت اعتماد سازه‌ها استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای کاهش هزینه محاسباتی در تحلیل قابلیت اعتماد است. بررسی‌ها نشان می‌دهند که روش‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی و سایر الگوریتم‌ها می‌توانند تقریب‌های با دقت مناسب برای پاسخ سازه ارائه کنند و در کنار مدل‌های مبتنی بر فیزیک در تحلیل قابلیت اعتماد استفاده شوند [۲۸-۳۰]. همچنین مدل‌سازی افت عملکرد سازه در طول زمان (به‌خاطر خوردگی، خزش، خستگی و تأثیرات محیطی) و تحلیل قابلیت اعتماد وابسته به زمان یکی از موضوعات پژوهشی در حوزه قابلیت اعتماد سازه‌ها می‌باشد [۳۱-۳۲]. قابلیت اعتماد و ارزیابی احتمالاتی عملکرد لرزه‌ای سازه‌های کنترل شده با سیستم‌های کنترلی مختلف نظیر میراگر هیسترسیس [۳۳] و میراگر ویسکوز با اعمال اثر عدم قطعیت‌های ذاتی و شناختی در مطالعات زیادی بررسی شده است. توبالدي و همکاران [۳۴] یک روشی مبتنی بر تکنیک بهینه‌سازی بر مبنای قابلیت اعتماد برای طراحی میراگرهای ویسکوز مایع اعم از خطی و غیر خطی پیشنهاد دادند. در این تحقیق، هدف محدود کردن احتمال فراگذشت پاسخ سازه از سطح عملکردی مطلوب بوده در حالی که هزینه تامین سیستم کنترل کمینه شده است. دلاستا و همکاران [۳۵] با در نظر گرفتن اثر عدم قطعیت در مشخصات میراگر، اثر دامنه پراکندگی این عدم قطعیت‌ها در احتمال خرابی سازه را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه با استفاده از روش شبیه سازی مونت کارلو با اعمال عدم قطعیت در پارامترهای میراگر ویسکوز، اثر عدم قطعیت در منحنی

<sup>1</sup> Fluid Viscous Damper (FVD)

<sup>2</sup> Genetic Algorithm (GA)

خطر پاسخ‌های سازه نظیر جابجایی، شتاب و همچنین حداکثر جابجایی و نیروی میراگر مورد بررسی قرار گرفت. اسکوز و همکاران [۳۶] حساسیت عملکرد احتمالاتی را با اعمال عدم قطعیت در پارامترهای میراگر ویسکوز خطی و غیرخطی مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، هدف اصلی جستجوی یک ترکیب از پارامترهای میراگر است که منجر به بهترین عملکرد احتمالاتی سیستم سازه-میراگر می‌شوند. در اغلب این تحقیقات که در رابطه با ارزیابی عملکرد احتمالاتی با اعمال عدم قطعیت در پارامترهای سازه، میراگر و ارتعاش ورودی بوده، میراگر ویسکوز به صورت یک عضو الحاقی به سازه موجود می‌باشد. در واقع هدف از کاربرد میراگر، مقاوم‌سازی و بهسازی رفتار لرزه‌ای احتمالاتی سازه موجود در مقابل زلزله بوده است. کیتایاما و همکاران [۳۷-۳۸] عملکرد احتمالاتی سازه‌های طراحی شده با چند سیستم کنترل غیرفعال از جمله میراگر ویسکوز به روش دستورالعمل پیشنهادی فصل ۱۸ آیین نامه ASCE/SE17 [۶] را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از بررسی نشان داد که سازه‌های مجهز به سیستم کنترل دارای احتمال خرابی کمتری می‌باشند. مرادپور و دهستانی [۳۹] عملکرد احتمالاتی سازه‌های فلزی مجهز به میراگر ویسکوز مایع خطی و غیرخطی را که به روش جابجایی مستقیم طراحی شده‌اند، با در نظر گرفتن اثر عدم قطعیت‌های ذاتی و شناختی ارزیابی کردند. در این مطالعه از دو روش ارزیابی احتمالاتی میانگین فرکانس سالیانه عبور از سطح عملکرد و فرمت خطر- شکنندگی استفاده شد.

در اکثر مطالعات قبلی در رابطه با تحلیل قابلیت اعتماد و ارزیابی احتمالاتی عملکرد سازه‌های مجهز به میراگر ویسکوز، از خرابی میراگر ویسکوز صرف‌نظر شده و ارزیابی قابلیت اعتماد با این فرض انجام شده است که میراگر به حداکثر ظرفیت نیرویی یا جابجایی نخواهد رسید. در مطالعه اسکوزس و همکاران [۴۰]، در تحلیل سازه‌های مجهز به میراگر ویسکوز رسیدن میراگر به ظرفیت خود و در نتیجه خرابی میراگر ویسکوز مدل سازی شده و تاثیر خرابی میراگر ویسکوز در ارزیابی عملکرد احتمالاتی سازه‌های مجهز به میراگر ویسکوز بررسی شده است. در بررسی آنها تمرکز عمدتاً روی بررسی پارامتریک و بررسی تاثیر عوامل مختلف نظیر ظرفیت میراگر و مشخصات رکوردهای مورد استفاده در ارزیابی خرابی میراگر بوده است. برای این منظور با در نظر گرفتن مقادیر مختلف برای ظرفیت نهایی نیرویی و جابجایی میراگر ویسکوز، به مدل‌سازی رفتار واقعی میراگر با لحاظ شرایط رسیدن به خرابی پرداخته شده است. با انجام تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی تحت رکوردهای مختلف زلزله احتمال خرابی میراگر و سازه تعیین شده است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که محدودیت ظرفیت میراگر را باید به‌طور دقیق مدل‌سازی کرد. در غیر این صورت، ممکن است در زلزله‌های شدید خرابی هم‌زمان میراگر و سازه اتفاق افتد.

در دستورالعمل‌های طراحی سازه‌های مجهز به میراگر ضرایب اطمینان مختلف برای ظرفیت نیرویی و جابجایی میراگر پیشنهاد شده است که این ضرایب در کاربردهای عملی برای تعیین ظرفیت میراگر بدون نیاز به مدل‌سازی خرابی میراگر استفاده می‌شود. در مطالعه حاضر در راستای پژوهش قبلی مرتبط با این موضوع، تمرکز عمدتاً روی بررسی کفایت یا عدم کفایت ضرایب اطمینان پیشنهادی دستورالعمل‌های طراحی در تعیین ظرفیت میراگر می‌باشد تا در کارهای عملی بتوان با انتخاب ضریب اطمینان مناسب، بدون نیاز به مدل‌سازی خرابی میراگر که دارای پیچیدگی در کارهای مهندسی باشد به طراحی میراگر پرداخت. برای این منظور، در این پژوهش به بررسی پاسخ میراگر ویسکوز با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مختلف پرداخته شده است تا بتوان احتمال رسیدن میراگر ویسکوز به حالت خرابی مرتبط با حداکثر ظرفیت نیرویی یا جابجایی را بررسی کرد. براساس نتایج حاصل از ارزیابی احتمالاتی می‌توان به تعیین ضریب اطمینان مناسب برای تعیین حداکثر ظرفیت نیرویی و طول جابجایی میراگر ویسکوز پرداخت. بنابراین نوآوری این پژوهش در مقایسه با مطالعات قبلی را می‌توان بصورت زیر خلاصه کرد:

(۱) در نظر گرفتن توابع حدی مرتبط با ظرفیت نیرویی و جابجایی میراگر در حالیکه در پژوهش‌های قبلی عمدتاً خرابی سازه مورد توجه بوده است و از خرابی میراگر در تحلیل قابلیت اعتماد صرف‌نظر شده است. (۲) استفاده از تابع حدی تک و چندگانه مرتبط با خرابی میراگر در تعیین احتمال خرابی میراگر در حالیکه در پژوهش قبلی [۴۰] تحلیل خرابی بر اساس تابع خرابی تک انجام شده است. (۳) تعیین احتمال خرابی میراگر ویسکوز با اعمال ضرایب اطمینان مختلف در تعیین ظرفیت نیرویی و طول جابجایی میراگر و بررسی کفایت و عدم کفایت ضرایب اطمینان پیشنهادی دستورالعمل‌های طراحی.

برای رسیدن به اهداف مورد نظر در این پژوهش و انجام تحلیل عددی، دو قاب خمشی فولادی ۴ و ۱۲ طبقه مجهز به میراگر ویسکوز مایع انتخاب شده و با تعیین ظرفیت نیرویی و طول جابجایی میراگر طبق توصیه دستورالعمل طراحی، توابع حدی مختلف متناظر با

ظرفیت نیرویی و طول جابجایی میراگر تعریف شده است. در ادامه به تعداد مناسب قاب تصادفی به روش نمونه برداری لاتین هایپرکیوب با اعمال عدم قطعیت در پارامترهای سازه و میراگر ویسکوز تولید شده و با انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی روی سازه‌های تصادفی و تعیین پاسخ سازه و میراگر ویسکوز تحت ۲۰ رکورد زلزله، احتمال خرابی میراگر به ازای تابع حدی تک و چندگانه محاسبه شده است.

## ۲- میراگر ویسکوز مایع

در میراگرهای ویسکوز مایع، با عبور سیال با فشار زیاد از درون روزنه تعبیه شده در کلاهک پیستون و جاری شدن آن از یک محفظه به محفظه دیگر یک نیروی مقاوم وابسته به سرعت بوجود می‌آید. مقدار این نیرو با استفاده از مدل‌های رفتاری مختلف نظیر مدل ماکسول<sup>۱</sup>، کلوین<sup>۲</sup> و بورگرس<sup>۳</sup> تعیین می‌شود [۴۱-۴۲]. در صورتیکه از اثر سختی میراگر صرف‌نظر شود، رابطه بین نیرو- سرعت میراگر با رابطه (۱) بیان می‌شود [۴۳].

$$F_d = C | \dot{u} |^\alpha \text{sign}(\dot{u}) \quad (1)$$

$F_d$  نیروی میراگر،  $C$  ضریب میرایی،  $\dot{u}$  سرعت نسبی بین دو انتهای میراگر،  $\alpha$  توان سرعت و  $\text{sign}$  تابع علامت است. مقدار ضریب توان سرعت به مشخصات ویسکوزیته مایع و روزنه‌های پیستون بستگی دارد که توسط کارخانه سازنده مشخص می‌شود. بسته به مقدار این ضریب، میراگرهای ویسکوز مایع به دو گروه اصلی میراگر ویسکوز با رفتار خطی ( $\alpha=1$ ) و غیرخطی ( $\alpha \neq 1$ ) تقسیم می‌شوند.

## ۳- قابلیت اعتماد سازه

برای تحلیل قابلیت اعتماد سازه‌ها روش‌های مختلف تحلیلی و شبیه‌سازی پیشنهاد شده است. از روش‌های مختلف تحلیلی می‌توان به روش مرتبه اول<sup>۴</sup> و روش مرتبه دوم<sup>۵</sup> [۴۴] و همچنین روش‌های شبیه‌سازی نظیر شبیه‌سازی مونت-کارلو<sup>۶</sup> اشاره کرد. در این تحقیق برای ارزیابی قابلیت اعتماد سازه‌ها از روش مونت-کارلو استفاده شده است. این روش در تحلیل قابلیت اعتماد مسائل پیچیده با تعداد زیاد متغیرهای تصادفی بسیار مفید است که با تولید تعداد زیاد داده تصادفی می‌توان دقت آن را بالا برد. در این روش احتمال خرابی با استفاده از رابطه (۲) تعیین می‌شود:

$$P_f = \frac{n}{N} \quad (2)$$

$n$  تعداد دفعاتی که هدف عملکردی برآورده نمی‌شود و  $N$  تعداد کل مقادیر شبیه‌سازی شده است.

در بسیاری از سازه‌ها با توجه به نوع کاربری نیاز به برآورده شدن معیارهای عملکردی متفاوتی می‌باشد که بعضاً ممکن است این معیارها با یکدیگر در تضاد باشند. به عنوان نمونه در سازه‌های با اهمیت بالا از قبیل بیمارستان برقراری همزمان معیار ایمنی برای اعضای سازه‌ای و غیرسازه‌ای و همچنین راحتی ساکنین لازم و ضروری به نظر می‌رسد. در این سازه‌ها در صورتیکه تابع حالت حدی با استفاده از یکی از پاسخ‌های سازه تعریف شود این تابع نمی‌تواند برای ارزیابی عملکرد سازه کافی باشد. ممکن است سازه بر اساس تابع حالت حدی تعریف شده عملکرد مطلوب داشته باشد در حالیکه سایر پاسخ‌های سازه از مقادیر مجاز تجاوز کرده باشند. بنابراین برای ارزیابی صحیح

<sup>1</sup> Maxwell

<sup>2</sup> Kelvin

<sup>3</sup> Burgers

<sup>4</sup> First Order Reliability Method (FORM)

<sup>5</sup> Second Order Reliability Method (SORM)

<sup>6</sup> Monte Carlo Simulation (MCS)

عملکرد سازه با لحاظ پاسخ‌های مختلف تحت‌اثر تحریکات لرزه‌ای مناسب‌تر است تابع حالت حدی خرابی بر اساس ترکیب مناسبی از چند پاسخ سازه تعریف شود. برای این منظور، تابع حالت حدی را می‌توان بصورت رابطه (۳) تعریف کرد [۴۶-۴۵].

$$g_j = \frac{R_j}{S_j} - 1 \quad j=1,2,3,\dots,k \quad (3)$$

بطوریکه،  $R$  بیانگر مقاومت و  $S$  بیانگر اثر بار،  $k$  تعداد حالت‌های حدی در نظر گرفته شده می‌باشد. حالت‌های حدی مختلف می‌تواند بر اساس پاسخ‌های سازه یا میراگر بسته به معیار عملکردی مورد نظر تعریف شود. اگر  $g > 0$  سیستم ایمن بوده و اگر  $g < 0$  سیستم ایمن نیست. با توجه به اینکه در این مطالعه هدف اصلی بررسی احتمال خرابی میراگر بوده و در دستورالعمل‌های طراحی میراگر، خرابی میراگر بر اساس جابجایی و نیروی میراگر تعریف شده است، بنابراین برای تعریف توابع خرابی مختلف از این دو پارامتر استفاده شده است. در صورتیکه هدف ارزیابی احتمالاتی عملکرد لرزه‌ای رفتار سازه در سازه‌های کنترل شده باشد در اینصورت باید در تعریف تابع خرابی پاسخ سازه نظیر جابجایی و مقایسه با ظرفیت جابجایی سازه مورد توجه قرار گیرد که در مطالعاتی هم از همین مفاهیم استفاده شده است. بنابراین در این پژوهش در تعیین مقدار  $R$  و  $S$  از ظرفیت و پاسخ میراگر بجای سازه استفاده می‌شود.

با در نظر گرفتن هر یک از حالت‌های حدی مورد نظر، احتمال خرابی متناظر برای سیستم قابل تعیین است. پس از تعیین احتمال خرابی متناظر با هر کدام از توابع حالت حدی، احتمال خرابی کل سیستم با ترکیب این حالت‌های حدی چندگانه تعیین می‌گردد. در این حالت ارزیابی قابلیت اعتماد یک سیستم وابسته به نوع ترکیب سیستم‌های مختلف می‌باشد که شامل ترکیب موازی، سری و یا ترکیبی از این دو می‌باشد. در یک سازه با سیستم سری، خرابی زمانی رخ می‌دهد که تنها یک عضو از آستانه‌ی قابل قبول حالت حدی در نظر گرفته شده، تجاوز کند. سیستم موازی نیز هنگامی خراب می‌شود که همه اعضای سیستم خراب شوند. در ارزیابی قابلیت اعتماد سیستم‌های با چندین تابع حالت حدی، در صورتیکه هدف برآورده شدن تمام حالت‌های حدی باشد، این حالت معادل با در نظر گرفتن سیستم بصورت سری می‌باشد. در این حالت با فرض استقلال آماری میان حالت‌های حدی، احتمال خرابی کل از رابطه (۴) تعیین می‌شود.

$$P_F = 1 - \prod_{j=1}^k (1 - P_j) \quad (4)$$

به طوریکه  $P_F$  و  $P_j$  به ترتیب احتمال خرابی کل سیستم و احتمال خرابی برای حالت حدی زام است. در اکثر موارد برای ساده‌سازی محاسبات عددی از فرض استقلال آماری بین حالت‌های مختلف حدی استفاده می‌شود. در صورتیکه در واقعیت استقلال آماری وجود نداشته باشد استفاده از رابطه فوق دارای خطا بوده که میزان خطا وابسته به میزان وابستگی بین توابع حدی می‌باشد. برای استفاده از رابطه فوق برای تعیین احتمال خرابی کل یک سیستم مراحل کار بصورت زیر است:

۱) ابتدا احتمال خرابی سیستم به ازای هر تابع حالت حدی با استفاده از یکی از روش‌های تحلیل قابلیت اعتماد نظیر شبیه‌سازی مونت کارلو تعیین شود ( $P_j$ ). ۲) پس از تعیین احتمال خرابی برای هر تابع حالت حدی، با فرض استقلال آماری بین توابع حدی مقدار احتمال خرابی کل سیستم ( $P_F$ ) از رابطه (۴) تعیین می‌شود. در صورتیکه از تحقق استقلال آماری بین توابع حدی اطمینان حاصل نشود بجای استفاده از رابطه فوق می‌توان احتمال خرابی کل سیستم را در حالت سری با روش شبیه‌سازی مونت-کارلو بدین صورت محاسبه کرد که در برای هر بار تحلیل سازه تصادفی در صورتیکه یکی از حالت‌های حدی برآورده نشود بعنوان یک عدم موفقیت در تعداد کل خرابی لحاظ شود. پس از انجام تمام تحلیل‌ها و تعیین تعداد کل عدم موفقیت، از رابطه (۲) مقدار احتمال خرابی کل محاسبه می‌شود. مزیت این روش عدم نیاز به فرض استقلال آماری بین توابع حدی بوده ولی لازم است برای هر آزمون برآورده شدن یا نشدن تمام حالت‌های حدی کنترل شود. در این پژوهش برای افزایش میزان دقت در محاسبات، از این روش برای تعیین احتمال خرابی کل میراگر استفاده شده است که مقایسه نتایج نشان می‌دهد که با حالت استفاده از رابطه (۴) دارای اختلاف کمی می‌باشد.

#### ۴- منابع عدم قطعیت در عملکرد سازه-میراگر

در ارزیابی قابلیت اعتماد سازه‌ها، دو نوع عدم قطعیت شامل عدم قطعیت‌های موجود در محاسبه نیاز سازه و عدم قطعیت‌های موجود در محاسبه ظرفیت سازه وجود دارد. از پارامترهای دارای عدم قطعیت مربوط به نیاز سازه می‌توان به بارهای زنده، بارهای مرده، رکورد زلزله ورودی، میرایی و سختی سازه، اندرکنش خاک و سازه اشاره کرد. همچنین از پارامترهای مربوط به عدم قطعیت در محاسبه ظرفیت سازه می‌توان مشخصات مصالح، مشخصات هندسی مقاطع و اثر اجزاء غیر سازه‌ای را نام برد.

در این تحقیق در تحلیل قابلیت اعتماد و تعیین احتمال خرابی عدم قطعیت‌های مربوط به بارگذاری ثقلی (بار مرده، بار زنده) و بار جانبی (زلزله)، میرایی سازه، مشخصات مقاومت مصالح سازه (نظیر مدول یانگ و مقاومت تسلیم) و مشخصات میراگر (شامل ضریب تون،  $\alpha$ ، و ضریب ثابت میراگر،  $C$ ) در نظر گرفته شده است. متغیرهای تصادفی تاثیرگذار در ارزیابی قابلیت اعتماد با استفاده از تحلیل حساسیت انتخاب شده است که در بخش تحلیل عددی با جزئیات آورده شده است. در ادامه به معرفی و بررسی ویژگی‌های آماری توصیه شده در مراجع اشاره می‌شود.

#### ۴-۱- بارگذاری ثقلی

بارگذاری ثقلی شامل بار مرده و زنده می‌باشد. بار مرده عموماً شامل نیروی ثقلی ناشی از وزن خود سازه و اجزای غیر سازه‌ای دائمی می‌باشد. تغییرات بار مرده تحت تاثیر وزن مواد سازنده مانند سقف، ابعاد و جنس تیر و ستون‌ها، اجزای غیر سازه‌ای مانند پارتیشن‌ها می‌باشد. بارهای ثقلی غیر دائمی در طول عمر سرویس‌دهی ساختمان به عنوان بارهای زنده در نظر گرفته می‌شود. از ترکیب بار مرده، بار پارتیشن‌ها، دیوار جانبی و بار زنده طبق آیین‌نامه‌های طراحی جرم لرزه‌ای محاسبه می‌شود. برای جرم طبقات توزیع احتمالاتی نرمال با ضریب پراکندگی ۱۰ درصد توسط الینگوود و همکاران [۴۷] پیشنهاد شده است.

#### ۴-۲- میرایی

در میرایی یک سیستم بیش از یک مکانیزم نقش داشته و در سازه‌های واقعی تعداد این مکانیزم‌های شرکت کننده زیاد است. میرایی ذاتی یک سازه دارای عدم قطعیت بالاتری در مقایسه با سایر پارامترها می‌باشد. پورتر و همکاران [۴۸] ضریب پراکندگی ۴۰ درصد با توزیع احتمالاتی نرمال را برای میرایی پیشنهاد دادند.

#### ۴-۳- پارامترهای مربوط به مقاومت

مقاومت تسلیم فولاد ( $f_y$ ) و مدول الاستیسیته فولاد ( $E$ ) در طراحی سازه‌های فولادی نقش اساسی دارند که تغییرات آنها می‌تواند تاثیر قابل توجهی در ظرفیت سازه داشته باشد. ملچرز [۴۹] توزیع احتمالاتی نرمال با ضریب پراکندگی ۵ درصد را برای  $E$  و توزیع احتمالاتی لوگ نرمال با ضریب پراکندگی ۱۰ درصد را برای  $f_y$  پیشنهاد دادند.

#### ۴-۴- پارامترهای مربوط به میراگر ویسکوز

در بررسی تاثیر تغییرات پارامترهای میراگر ویسکوز مایع بر عملکرد لرزه‌ای سازه‌های مجهز به این میراگر، مقادیر پارامترهای میراگر نظیر ضریب میرایی و ضریب تون سرعت از محدوده مشخص شده توسط کارخانه‌های تولید کننده انتخاب می‌شود [۵۱-۵۰]. همچنین می‌توان از توزیع احتمالاتی و ضرایب پراکندگی توصیه شده در دستورالعمل‌هایی نظیر ASCE 41-2017 [۵۲] و منابع موجود در این زمینه استفاده کرد. اطلاعات آماری پارامترهای سازه و میراگر نظیر نوع توزیع احتمالاتی و ضریب پراکندگی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: خواص آماری متغیرهای تصادفی

| مرجع    | توزیع    | (%) پراکندگی | نماد | پارامتر          |
|---------|----------|--------------|------|------------------|
| [۴۲,۴۷] | نرمال    | ۱۰           | M    | جرم              |
| [۴۹]    | نرمال    | ۵            | E    | مدول الاستیسیته  |
| [۴۷]    | نرمال    | ۵            | b    | نسبت سختی ثانویه |
| [۴۹]    | لگ-نرمال | ۱۰           | fy   | تنش تسلیم        |
| [۴۸]    | نرمال    | ۴۰           | ζ    | میرایی ذاتی      |
| [۵۲]    | نرمال    | ۱۵           | C    | ضریب میرایی      |
| [۵۲]    | نرمال    | ۱۰           | α    | توان سرعت میراگر |

## ۵- دستورالعمل‌های لرزه‌ای برای تعیین ظرفیت میراگر ویسکوز

دستورالعمل‌های لرزه‌ای بیان می‌کنند برای تعیین ظرفیت سیستم‌های کنترل لازم است مقادیر حداکثر پارامترهای کنترلی نظیر نیروی میراگر تحت زلزله‌های با احتمال وقوع مشخص شده در آن دستورالعمل تعیین شده، سپس ظرفیت سیستم کنترل مورد نظر با اعمال ضریب اطمینان نسبت به مقادیر حداکثر بدست آمده تعیین شود. انتخاب رکوردهای زلزله برای تعیین مقادیر حداکثر پاسخ‌ها و همچنین ضریب اطمینان مورد استفاده از چالش‌های اساسی می‌باشد که در دستورالعمل‌های مختلف ضوابط متعدد ارائه شده است [۵۲-۵۴]. بعنوان نمونه، برای تعیین مقدار آستانه خرابی میراگرها، ضوابط استاندارد ایالات متحده برای مقاوم سازی ساختمان‌های موجود (ASCE 41-2017) [۵۲] بیان می‌کند که تمام سیستم‌های اتلاف انرژی باید قادر به تحمل نیرو و جابجایی مرتبط با سرعتی برابر با ۱۳۰ درصد ( $\gamma=1.3$ ) یا ۲۰۰ درصد ( $\gamma=2.0$ ) حداکثر سرعت محاسبه شده برای آن سیستم تحت زلزله‌های مورد نظر باشند. ضریب افزایش اولی زمانی استفاده شود که بیش از چهار سیستم اتلاف انرژی در هر طبقه در امتداد یک جهت اصلی ساختمان نصب شده باشد، در غیر این صورت ضریب افزایش دومی باید اعمال شود. رکوردهای مورد استفاده برای بدست آوردن حداکثر پارامتر کنترلی نظیر حداکثر سرعت، طبق ضوابط این نشریه زلزله‌های با احتمال وقوع ۲ درصد در ۵۰ سال برای سازه‌های جدید الاحداث (حداکثر زلزله محتمل-MCE) و زلزله‌های با احتمال وقوع ۵ درصد در ۵۰ سال برای سازه‌های موجود می‌باشد.

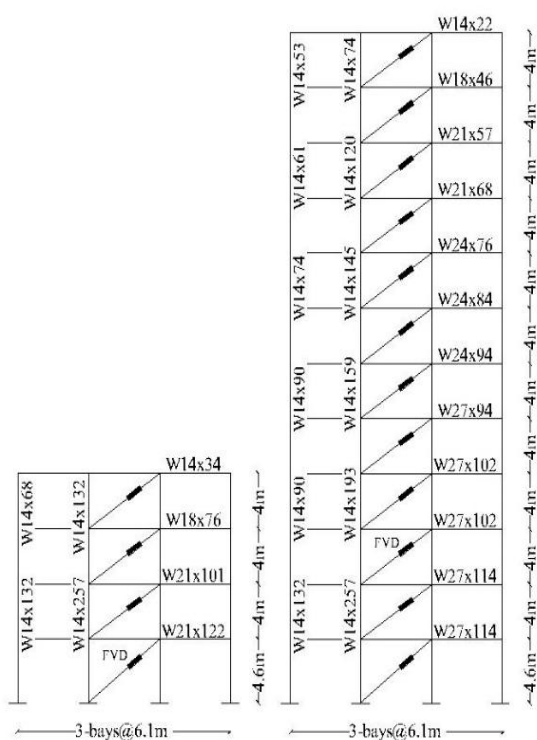
## ۶- مثال عددی

در این مطالعه برای آنالیز عددی از دو قاب خمشی فولادی ۴ و ۱۲ طبقه مجهز به میراگر ویسکوز مایع استفاده شده است که این قاب‌ها در پژوهش قبلی بصورت عملکردی و بر اساس روش جابجایی مستقیم طراحی شده‌اند [۷]. برای طراحی اعضای سازه و میراگر از روش پیشنهادی سالیوان ولاگو [۵۵] با فرض ۱۵ درصد میرایی معادل اضافه شده ناشی از میراگرها، استفاده شده است. در روش طراحی جابجایی مستقیم حد دریفت طراحی متناظر با سطح عملکرد ایمنی جانی ۲/۵ درصد ارتفاع طبقه طبق توصیه آیین نامه بهسازی FEMA356 [۵۶] در نظر گرفته شده است. پلان سازه مورد نظر که قاب مورد مطالعه یکی از قاب‌های پیرامونی آن می‌باشد (سطح هاشور زده شده) در شکل ۱-الف نشان داده شده است. مشخصات سازه‌ای قاب‌های خمشی طراحی شده و محل قرارگیری میراگرها در شکل ۱-ب ارائه شده است. برای اعضای سازه‌ای از فولاد نوع ASTM A992 Gr.50 با رفتار دوخطی با شیب ثانویه ۳ درصد با تنش تسلیم و مدول الاستیسیته به ترتیب ۵۰ ksi و ۲۹۰۰۰ ksi استفاده شده است. برای بارگذاری ثقلی هم، بار مرده ۹۰ psf، بار دیوار ۲۰ psf، بار زنده کاهش نیافته طبقات ۵۰ psf و بار زنده طبقه بام ۲۰ psf انتخاب شده است. جزئیات بیشتر در مورد مشخصات این سازه‌ها را می‌توان در مطالعات پیشین [۵۷-۵۸] مشاهده کرد. محل احداث قاب‌ها در منطقه‌ی لوس آنجلس (Cite Class D; Coordinates 34.05°N, 118.24°W) فرض شده است.

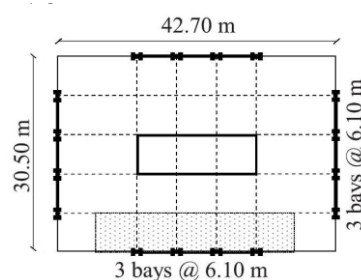
در این تحقیق برای مدل سازی اعضای تیر و ستون از المان تیرستون نیرویی با پلاستیسیته‌ی گسترده در طول المان استفاده شده است. برای مدل سازی با این المان بایستی مصالح و سطح مقطع در نظر گرفته شده به آن اختصاص داده شود. مصالح اختصاص یافته به المان



تیرستون، مصالح فولاد ۰۱ مطابق شکل (۲) می باشد. برای تعریف مشخصات مصالح در این مدل تنش تسلیم،  $F_y$ ، مدول الاستیسیته  $E_0$ ، و هم چنین نسبت سخت شوندگی کرنشی،  $b$ ، به کار می رود. برای مدل سازی اعضای تیر و ستون از مقطع فایبر استفاده شده است. این مقطع از پرکاربردترین مقطع در مدل سازی سازه‌ای در OpenSees است [۵۹]. در مقطع فایبر، سطح مقطع به نواحی کوچکتر که به آنها فایبر گفته می شود تقسیم شده و پاسخ تنش-کرنش مصالح برای هر فایبر تعیین و سپس انتگرال گیری روی مقطع انجام می شود. در هر المان چند نقطه برای انتگرال گیری تعیین می شود که هر چقدر تعداد این نقاط بیشتر باشد دقت تحلیل افزایش و از طرفی دیگر سرعت تحلیل کاهش می یابد. در این تحقیق ۵ نقطه‌ی انتگرال گیری برای هر المان در نظر گرفته شده است. از روش انتگرال گیری نیومارک برای تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی استفاده شده است. برای مدل سازی میراگر ویسکوز در قاب‌های مجهز به میراگر از المان میراگر ویسکوز کلاسیک مطابق رابطه (۱) استفاده شده است که لازم است ضریب میرایی و ضریب توان سرعت مشخص شود.



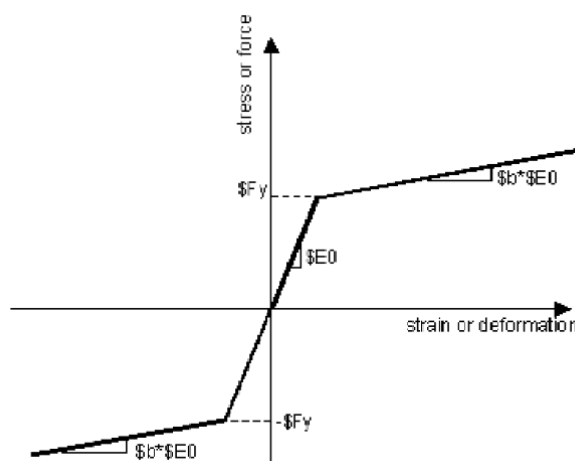
(ب)



(الف)

شکل ۱: الف) پلان قاب طراحی شده [۴۰] ب) برشی از قاب‌های طراحی شده به همراه مشخصات مقاطع و موقعیت میراگرها [۷].

در این پروژه، از میراگر خطی ( $\alpha = 1$ ) استفاده شده است. میراگرها به روش توزیع مبتنی بر برش طبقه [۵۵] در طبقات سازه توزیع شده‌اند. در جدول ۲ مشخصات ضرایب میرایی میراگر ویسکوز ارائه شده است.



شکل ۲: مدل رفتاری مصالح فولاد ۱۰۱ [۵۹]

جدول ۲: ضرایب میرایی میراگرها برحسب  $kN(s/m)$  [۷]

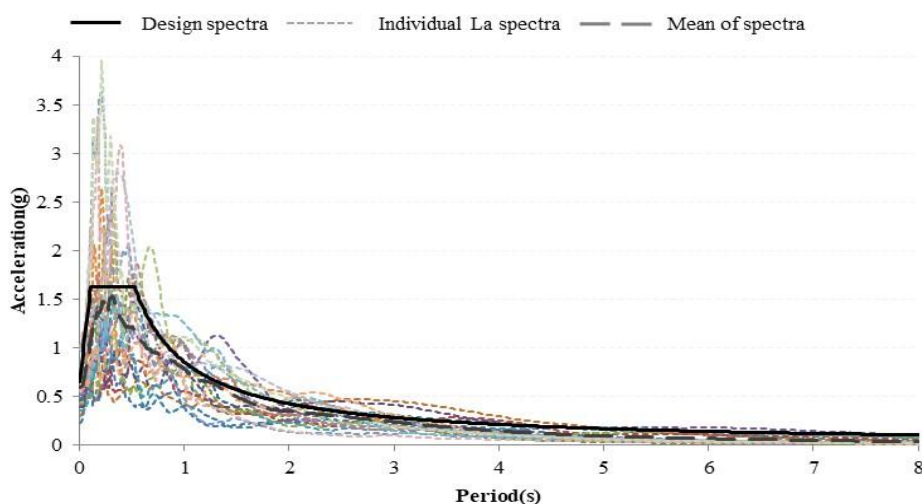
| Level | قاب ۴ طبقه | قاب ۱۲ طبقه |
|-------|------------|-------------|
| ۱     | ۳۸۰۲       | ۱۰۳۷۸       |
| ۲     | ۴۰۳۳       | ۱۱۲۱۸       |
| ۳     | ۳۵۲۸       | ۱۱۳۹۸       |
| ۴     | ۲۲۶۶       | ۱۱۴۴۱       |
| ۵     | -          | ۱۱۳۳۶       |
| ۶     | -          | ۱۱۰۶۴       |
| ۷     | -          | ۱۰۶۰۷       |
| ۸     | -          | ۹۹۳۹        |
| ۹     | -          | ۹۰۳۰        |
| ۱۰    | -          | ۷۸۴۱        |
| ۱۱    | -          | ۶۳۱۹        |
| ۱۲    | -          | ۴۳۹۹        |

## ۶-۱-۶- رکوردهای زلزله

برای اعمال اثر عدم قطعیت موجود در رکورد زلزله ورودی در بررسی عملکرد سازه‌های تحت اثر زلزله می‌توان از رکوردهای واقعی نظیر رکوردهای ارائه شده در دستورالعمل FEMA-P695 [۶۰]، رکورد زلزله‌های پیشنهاد شده در پروژه‌ی SAC با احتمال‌های وقوع مختلف [۶۱] و یا از رکوردهای مصنوعی تولید شده استفاده کرد. در این پژوهش فرض شده است که سازه مورد مطالعه در شهر لس‌آنجلس واقع شده و از مشخصات طیف طراحی منطقه برای طراحی سازه در روش جابجایی مستقیم استفاده شده است، لذا در این مطالعه برای انجام تحلیل دینامیکی سازه‌ها از رکوردهای زلزله انتخابی در فاز دوم پروژه تحقیقاتی گروه SAC برای منطقه لس‌آنجلس استفاده شده است. این رکوردها دارای محتوای فرکانسی، شدت و مدت زمان متفاوتی برای نشان دادن تغییرپذیری منبع لرزه‌ای هستند. برای تحلیل قابلیت اعتماد و تعیین احتمال خرابی میراگر از ۲۰ رکورد زلزله با احتمال وقوع ۱۰٪ در ۵۰ سال (گروه یک) استفاده شده است که اطلاعات مربوط به زلزله‌ها در جدول ۳ گزارش شده است. تمامی این رکوردها توسط گروه SAC انتخاب و به نحوی مقیاس شده‌اند که میانگین طیف زلزله‌ها تطابق خوبی با طیف طراحی این منطقه داشته باشد. در شکل ۳ سازگاری مناسب میانگین طیف زلزله‌ها با طیف طراحی نشان داده شده است.

جدول ۳: رکورد زلزله‌های با احتمال وقوع ۱۰ درصد در ۵۰ سال (گروه یک)

|      | Earthquake                       | Earthquake Magnitude | Distance (Km) | Scale Factor | Scaled PGA(g) |
|------|----------------------------------|----------------------|---------------|--------------|---------------|
| la01 | Imperial Valley, 1940, El Centro | ۶/۹                  | ۱۰            | ۲/۰۱         | ۰/۴۶          |
| la02 | Imperial Valley, 1940, El Centro | ۶/۹                  | ۱۰            | ۲/۰۱         | ۰/۶۸          |
| la03 | Imperial Valley, 1979, Array #05 | ۶/۵                  | ۴/۱           | ۱/۰۱         | ۰/۳۹          |
| la04 | Imperial Valley, 1979, Array #05 | ۶/۵                  | ۴/۱           | ۱/۰۱         | ۰/۴۹          |
| la05 | Imperial Valley, 1979, Array #06 | ۶/۵                  | ۱/۲           | ۰/۸۴         | ۰/۳۰          |
| la06 | Imperial Valley, 1979, Array #06 | ۶/۵                  | ۱/۲           | ۰/۸۴         | ۰/۲۳          |
| la07 | Landers, 1992, Barstow           | ۷/۳                  | ۳۶            | ۳/۲          | ۰/۴۲          |
| la08 | Landers, 1992, Barstow           | ۷/۳                  | ۳۶            | ۳/۲          | ۰/۴۳          |
| la09 | Landers, 1992, Yermo             | ۷/۳                  | ۲۵            | ۲/۱۷         | ۰/۵۲          |
| la10 | Landers, 1992, Yermo             | ۷/۳                  | ۲۵            | ۲/۱۷         | ۰/۳۶          |
| la11 | Loma Prieta, 1989, Gilroy        | ۷                    | ۱۲            | ۱/۷۹         | ۰/۶۷          |
| la12 | Loma Prieta, 1989, Gilroy        | ۷                    | ۱۲            | ۱/۷۹         | ۰/۹۷          |
| la13 | Northridge, 1994, Newhall        | ۶/۷                  | ۶/۷           | ۱/۰۳         | ۰/۶۸          |
| la14 | Northridge, 1994, Newhall        | ۶/۷                  | ۶/۷           | ۱/۰۳         | ۰/۶۶          |
| la15 | Northridge, 1994, Rinaldi RS     | ۶/۷                  | ۷/۵           | ۰/۷۹         | ۰/۵۳          |
| la16 | Northridge, 1994, Rinaldi RS     | ۶/۷                  | ۷/۵           | ۰/۷۹         | ۰/۵۸          |
| la17 | Northridge, 1994, Sylmar         | ۶/۷                  | ۶/۴           | ۰/۹۹         | ۰/۵۷          |
| la18 | Northridge, 1994, Sylmar         | ۶/۷                  | ۶/۴           | ۰/۹۹         | ۰/۸۲          |
| la19 | North Palm Springs, 1986         | ۶                    | ۶/۷           | ۲/۹۷         | ۱/۰۲          |
| la20 | North Palm Springs, 1986         | ۶                    | ۶/۷           | ۲/۹۷         | ۰/۹۹          |



شکل ۳: طیف پاسخ شتاب رکوردهای انتخاب شده، طیف میانگین و طیف طراحی برای میرایی ۵ درصد [۷].

همچنین طبق توصیه دستورالعمل‌های طراحی [۵۲] برای بدست آوردن حداکثر مقدار پارامتر کنترلی نظیر حداکثر سرعت برای تعیین ظرفیت میراگرها، در این پژوهش از ۲۰ رکورد زلزله‌های پیشنهادی در پروژه SAC برای منطقه لوس آنجلس با احتمال وقوع ۲ درصد در ۵۰ سال (گروه

دو) استفاده شده است که مشخصات آنها در جدول ۴ گزارش شده است. اطلاعات بیشتر در خصوص نحوه انتخاب و مقیاس کردن این رکوردها توسط گروه SAC، در مرجع [۶۱] داده شده است.

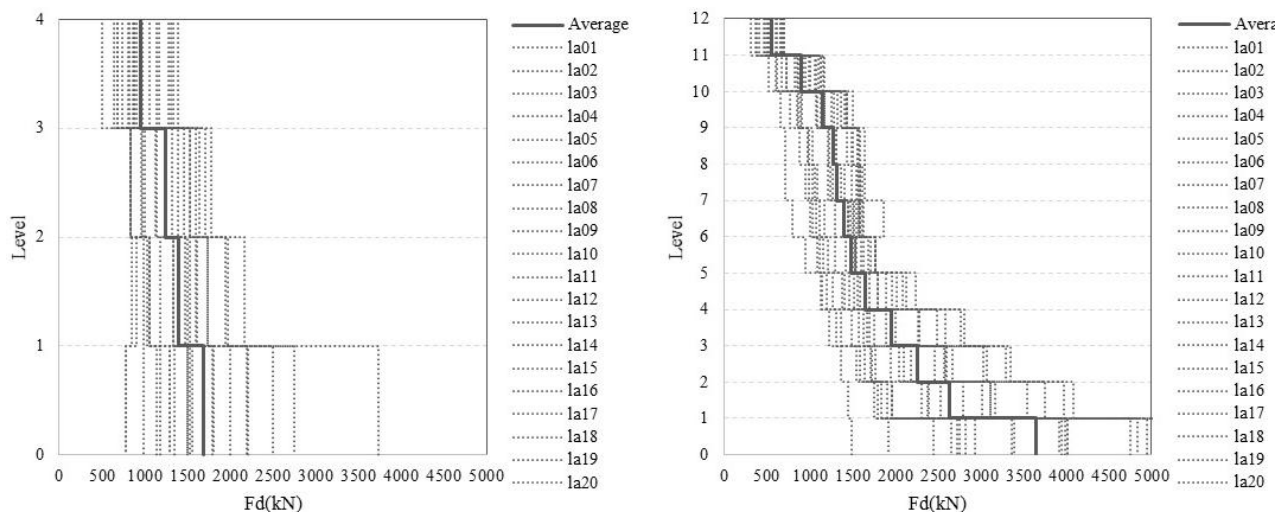
جدول ۴: رکورد زلزله‌های با احتمال وقوع ۲ درصد در ۵۰ سال (گروه دو)

|      | Earthquakes                 | Earthquake Magnitude | Distance (km) | Scale Factor | Scaled PGA(g) |
|------|-----------------------------|----------------------|---------------|--------------|---------------|
| la21 | fn 1995 Kobe                | ۶/۹                  | ۳/۴           | ۱/۱۵         | ۱/۲۸          |
| la22 | fp 1995 Kobe                | ۶/۹                  | ۳/۴           | ۱/۱۵         | ۰/۹۲          |
| la23 | fn 1989 Loma Prieta         | ۷/۰                  | ۳/۵           | ۰/۸۲         | ۰/۴۲          |
| la24 | fp 1989 Loma Prieta         | ۷/۰                  | ۳/۵           | ۰/۸۲         | ۰/۴۷          |
| la25 | fn 1994 Northridge          | ۶/۷                  | ۷/۵           | ۱/۲۹         | ۰/۸۷          |
| la26 | fp 1994 Northridge          | ۶/۷                  | ۷/۵           | ۱/۲۹         | ۰/۹۴          |
| la27 | fn 1994 Northridge          | ۶/۷                  | ۶/۴           | ۱/۶۱         | ۰/۹۳          |
| la28 | fp 1994 Northridge          | ۶/۷                  | ۶/۴           | ۱/۶۱         | ۱/۳۳          |
| la29 | fn 1974 Tabas               | ۷/۴                  | ۱/۲           | ۱/۰۸         | ۰/۸۱          |
| la30 | fp 1974 Tabas               | ۷/۴                  | ۱/۲           | ۱/۰۸         | ۰/۹۹          |
| la31 | fn Elysian Park (simulated) | ۷/۱                  | ۱۷/۵          | ۱/۴۳         | ۱/۳۰          |
| la32 | fp Elysian Park (simulated) | ۷/۱                  | ۱۷/۵          | ۱/۴۳         | ۱/۱۹          |
| la33 | fn Elysian Park (simulated) | ۷/۱                  | ۱۰/۷          | ۰/۹۷         | ۰/۷۸          |
| la34 | fp Elysian Park (simulated) | ۷/۱                  | ۱۰/۷          | ۰/۹۷         | ۰/۶۸          |
| la35 | fn Elysian Park (simulated) | ۷/۱                  | ۱۱/۲          | ۱/۱۰         | ۰/۹۹          |
| la36 | fp Elysian Park (simulated) | ۷/۱                  | ۱۱/۲          | ۱/۱۰         | ۱/۱۰          |
| la37 | fn Palos Verdes (simulated) | ۷/۱                  | ۱/۵           | ۰/۹۰         | ۰/۷۱          |
| la38 | fp Palos Verdes (simulated) | ۷/۱                  | ۱/۵           | ۰/۹۰         | ۰/۷۸          |
| la39 | fn Palos Verdes (simulated) | ۷/۱                  | ۱/۵           | ۰/۸۸         | ۰/۵           |
| la40 | fp Palos Verdes (simulated) | ۷/۱                  | ۱/۵           | ۰/۸۸         | ۰/۶۳          |

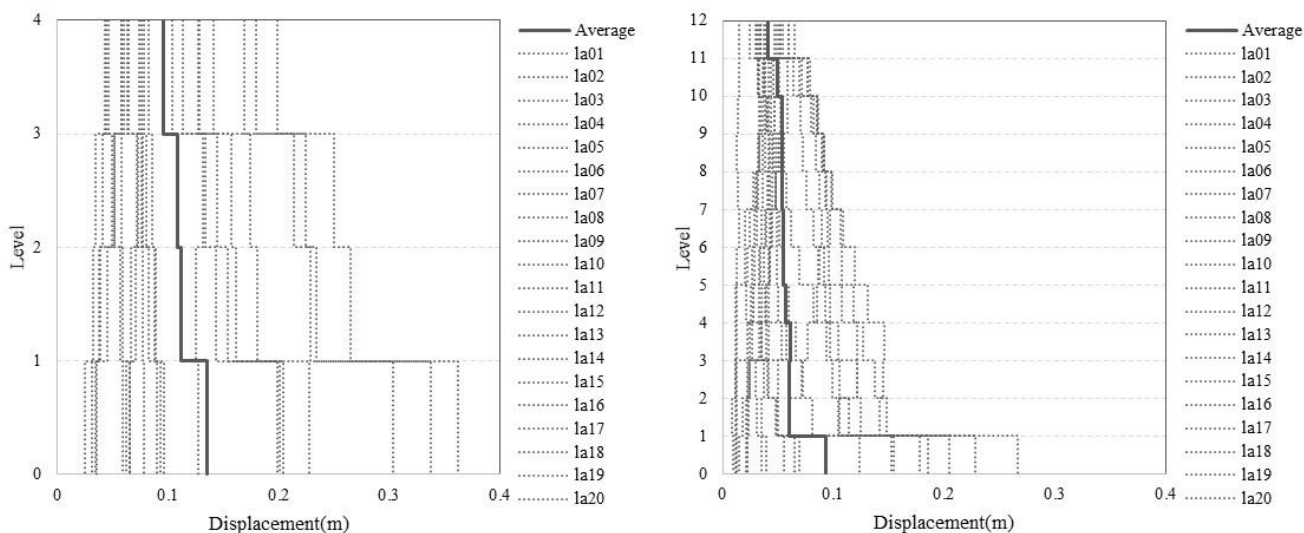
## ۶-۲- پاسخ قطعی سازه و میراگر

بدون اعمال عدم قطعیت در پارامترهای سازه و میراگر، قاب‌های ۴ و ۱۲ طبقه طراحی شده تحت ۲۰ رکورد زلزله با احتمال وقوع ۲ درصد در ۵۰ سال (گروه ۲) با استفاده از نرم افزار Opensees تحلیل دینامیکی غیرخطی شدند. بعنوان نمونه حداکثر مقدار نیرو و جابجایی میراگر تحت رکوردهای مختلف و همچنین میانگین مقادیر فوق در شکل‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که نیرو و جابجایی میراگر تحت رکوردهای مختلف پراکندگی قابل ملاحظه‌ای دارد که این موضوع در تحلیل خرابی دارای اهمیت زیادی می‌باشد.

در جداول ۵ و ۶ بطور خلاصه میانگین حداکثر مقدار سرعت نسبی طبقات، نیرو و جابجایی میراگر در سازه‌های ۴ و ۱۲ طبقه تحت رکوردهای گروه ۲ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر مقدار سرعت، نیرو و جابجایی میراگر در طبقه اول ایجاد شده و عموماً به تدریج در طبقات کاهش می‌یابد. این موضوع به نحوه توزیع میراگر در طبقات و مقدار ضریب میرایی مربوط می‌شود. طبق دستورالعمل‌های طراحی میراگر، ظرفیت نیرویی و طول جابجایی هر میراگر با اعمال ضریب اطمینان در حداکثر نیرو و جابجایی میراگر تعیین می‌شود. بنابراین میراگرها در طبقات مختلف دارای ظرفیت متفاوتی خواهند بود.



شکل ۴: نیروی میراگر تحت زلزله‌های گروه ۲ در قاب ۴ و ۱۲ طبقه



شکل ۵: جابجایی میراگر تحت زلزله‌های گروه ۲ در قاب ۴ و ۱۲ طبقه

جدول ۵: میانگین حداکثر سرعت طبقات، نیرو و جابجایی میراگر در سازه ۴ طبقه تحت زلزله‌های گروه دو

| Story | Vmax(m/s) | Fmax(kN) | Displacement(m) |
|-------|-----------|----------|-----------------|
| ۱     | ۰/۶۸۵۷    | ۱۶۷۱     | ۰/۱۳۲۷          |
| ۲     | ۰/۵۱۷۲    | ۱۴۱۱     | ۰/۱۱۲۹          |
| ۳     | ۰/۵۰۵۲    | ۱۲۵۸     | ۰/۱۱۰۰          |
| ۴     | ۰/۵۵۹۹    | ۹۵۳      | ۰/۰۹۶۳          |

جدول ۶: میانگین حداکثر سرعت طبقات، نیرو و جابجایی میراگر در سازه ۱۲ طبقه تحت زلزله‌های گروه دو

| Story | Vmax(m/s) | Fmax(kN) | Displacement (m) |
|-------|-----------|----------|------------------|
| ۱     | ۰/۵۳۷۸    | ۳۶۰۲     | ۰/۰۸۶۷           |
| ۲     | ۰/۳۶۹۵    | ۲۶۶۶     | ۰/۰۶۳۹           |
| ۳     | ۰/۳۲۳۴    | ۲۲۸۰     | ۰/۰۶۲۰           |
| ۴     | ۰/۳۸۲۲    | ۱۹۶۳     | ۰/۰۶۱۱           |
| ۵     | ۰/۲۴۹۱    | ۱۶۶۳     | ۰/۰۵۷۹۲          |
| ۶     | ۰/۲۳۱۶    | ۱۴۹۲     | ۰/۰۵۵۸۳          |
| ۷     | ۰/۲۲۴۹    | ۱۳۹۲     | ۰/۰۵۵۷۱          |
| ۸     | ۰/۲۲۳۱    | ۱۳۱۶     | ۰/۰۵۴۵           |
| ۹     | ۰/۲۲۶۶    | ۱۲۷۱     | ۰/۰۵۴۴۲          |
| ۱۰    | ۰/۲۲۵۳    | ۱۱۴۴     | ۰/۰۵۳۶           |
| ۱۱    | ۰/۲۱۳۳    | ۸۹۶      | ۰/۰۴۹۶           |
| ۱۲    | ۰/۱۸۴۷    | ۵۴۶      | ۰/۰۴۱۲           |

### ۳-۶- ارزیابی احتمالاتی خرابی میراگر

در این مقاله برای تعیین احتمال خرابی میراگر از تحلیل قابلیت اعتماد با روش شبیه سازی مونت-کارلو استفاده شده است که مبتنی بر تولید سازه تصادفی و آنالیز سازه‌های تصادفی تحت تعدادی از رکوردهای زلزله به تعداد لازم می‌باشد. یک روش دیگر برای ارزیابی احتمال خرابی تحلیل شکنندگی و استفاده از منحنی IDA<sup>۱</sup> می‌باشد که می‌تواند در مطالعات بعدی بررسی شود. برای تعیین احتمال خرابی میراگرها، توابع حدی بر اساس ظرفیت نیرویی و جابجایی میراگر در نظر گرفته شده است. برای این منظور براساس مقادیر حداکثر نیرو و جابجایی میراگر بدست آمده در بخش ۶-۲، با اعمال ضرایب اطمینان مختلف مقادیر حدی توابع حدی متناظر با نیرو و جابجایی میراگر تعیین شده است. در ادامه با انجام آنالیز حساسیت پارامترهای تصادفی تاثیر گذار و تعداد قاب تصادفی تعیین شده است.

#### - آنالیز حساسیت

متغیرهای زیادی در تحلیل وجود دارد که می‌توانند بر روی قابلیت اعتماد سازه‌ها موثر باشند و می‌توان آن‌ها را به عنوان متغیرهای تصادفی در نظر گرفت. با این حال به علت تعداد زیاد متغیرها لازم است پارامترهایی که بیشترین تاثیر را در تابع حالت حدی یا احتمال گسیختگی دارند به کمک آنالیز حساسیت مورد شناسایی قرار گیرند. در آنالیز حساسیت یک جامعه آماری، فاکتوری به عنوان فاکتور حساسیت بیان کننده میزان حساسیت یا تغییرات جامعه نسبت به تغییرات متغیر تصادفی می‌باشد و یا به عبارت دیگر فاکتور حساسیت بیانگر اهمیت نسبی هر متغیر تصادفی نسبت به احتمال خرابی می‌باشد. برای تعیین میزان حساسیت احتمال خرابی سازه لازم است تغییرات نقاط عملکرد بدست آمده از تغییرات هر پارامتر تصادفی تعیین و حساسیت شاخص ایمنی بررسی شود. یکی از روش‌های آنالیز حساسیت که در بسیاری از مدل‌های مختلف در علوم مهندسی و اقتصاد مورد استفاده قرار می‌گیرد روش SR<sup>۲</sup> می‌باشد [۶۲] که در این تحقیق نیز از این روش استفاده شده است. همان‌طور که در رابطه (۵) نشان داده شده است این شاخص برابر با نسبت درصد تغییر در خروجی (به عنوان مثال احتمال خرابی) به درصد تغییر در ورودی برای یک متغیر ورودی خاص است.

1 Incremental Dynamic Analysis (IDA)  
2 Sensitivity Ratio (SR)

$$SR = \frac{\left(\frac{Y_2 - Y_1}{Y_1}\right) \times 100}{\left(\frac{X_2 - X_1}{X_1}\right) \times 100} \quad (5)$$

که  $Y_1$  مقدار اولیه خروجی با استفاده از مقادیر اولیه ی متغیرهای تصادفی،  $Y_2$  مقدار خروجی پس از تغییر در یکی از متغیرهای تصادفی،  $X_1$  مقدار اولیه متغیر تصادفی و  $X_2$  مقدار متغیر تصادفی پس از تغییر که در اینجا  $X_2$  مجموع مقدار اولیه متغیر و انحراف استاندارد آن متغیر می باشد.

- آنالیز حساسیت برای تعیین متغیرهای تصادفی:

به منظور تعیین موثرترین پارامترهایی که اعمال عدم قطعیت در آنها بیشترین تاثیر در خروجی و در واقع بر رفتار سازه- میراگر را دارند، آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای معرفی شده در جدول (۱) انجام می شود. برای این کار ابتدا در هر مرحله مقدار هریک از پارامترهای تصادفی به میزان انحراف استاندارد آن پارامتر افزایش داده می شود در حالی که سایر پارامترها بدون تغییر باقی می ماند. سپس با انجام آنالیز دینامیکی غیرخطی مقدار پاسخ مورد نظر سازه یا میراگر به ازای مقادیر در نظر گرفته شده برای متغیرهای تصادفی تعیین و نسبت حساسیت محاسبه می شود. این روند برای همه ی پارامترهای مورد نظر تکرار می شود. نتایج حاصل از آنالیز حساسیت در جدول (۷) به عنوان نمونه روی مقدار حداکثر دریفت سازه نشان داده شده است. با توجه به نتایج مشخص می شود که کمترین مقدار SR مربوط به نسبت سختی ثانویه به اولیه است. بنابراین اعمال عدم قطعیت در نسبت سختی ثانویه به اولیه با ضریب پراکندگی ۵ درصد نسبت به سایر پارامترهای سازه تاثیر ناچیزی در تغییرات پاسخ سازه و میراگر داشته و در نتیجه این پارامتر بصورت متعین و سایر پارامترها غیرمتعین در نظر گرفته می شوند.

جدول ۷: نسبت حساسیت بدست آمده با اعمال عدم قطعیت در پارامترهای سازه و میراگر

| پارامتر          | SR    |
|------------------|-------|
| جرم              | ۰/۴   |
| مدول الاستیسیته  | -۰/۳۶ |
| نسبت سختی ثانویه | -۰/۰۱ |
| تنش تسلیم        | ۰/۴۳  |
| میرایی ذاتی      | -۰/۱۴ |
| ضریب میرایی      | -۰/۴۱ |
| توان سرعت میراگر | ۰/۲۹  |

با توجه به اینکه تعداد نمونه های متغیر تصادفی در برآورد احتمال خرابی اهمیت زیادی دارد، در آنالیز مونت-کارلو هر چه قدر تعداد نمونه ها بیشتر باشد دقت تخمین احتمال بیشتر خواهد بود. از طرف دیگر افزایش تعداد نمونه ها هزینه محاسبات را بالا می برد، بخصوص در سازه های مجهز به سیستم های کنترل که تعداد متغیرهای تصادفی زیاد می باشد. بنابراین، برای آنالیز قابلیت اعتماد سازه ها لازم است ابتدا تعداد مناسب نمونه های تصادفی با ایجاد تعادل بین دقت تعیین احتمال خرابی و هزینه محاسبات تعیین شود. برای تعیین تعداد مناسب نمونه های تصادفی، برای هر سازه نمونه های تصادفی با تعداد مختلف تولید و برای هر دسته از متغیرهای تصادفی تولید شده احتمال خرابی محاسبه می شود. تعداد مناسب نمونه های تصادفی طوری تعیین می شود که با تغییر تعداد نمونه ها، N، اختلاف در احتمال خرابی بدست آمده ناچیز می باشد. در این پژوهش مطابق نتایج حاصل از پژوهش های قبلی [۶۳]، تعداد ۳۰ قاب تصادفی و ۲۰ رکورد زلزله برای تحلیل ارزیابی

قابلیت اعتماد قاب‌های مجهز به میراگر انتخاب شده است. بنابراین از ۶۰۰ نمونه برای تعیین احتمال خرابی با روش مونت-کارلو استفاده می‌شود.

### ۶-۳-۱- ارزیابی خرابی میراگر براساس ظرفیت نیروی

برای هر قاب، ۳۰ قاب تصادفی براساس پارامترهای تصادفی انتخاب شده تولید شده و هر کدام از قابها تحت ۲۰ رکورد زلزله با احتمال وقوع ۱۰ درصد در ۵۰ سال (گروه اول) قرار گرفته و تحلیل دینامیکی غیرخطی انجام شده است. برای هر میراگر در هر طبقه مقدار حداکثر نیروی میراگر تعیین شده و با مقدار ظرفیت نیروی میراگر مقایسه شده و وقوع یا عدم وقوع خرابی تعیین شده است. براساس نتایج حاصل از کل تحلیل، احتمال خرابی میراگر با استفاده از شبیه‌سازی عددی مونت-کارلو محاسبه شده است. در جداول ۸ و ۹ احتمال خرابی میراگر براساس تابع حدی مربوط به ظرفیت نیروی میراگر با اعمال ضرایب اطمینان مختلف ارایه شده است.

در این مقاله هدف اصلی بررسی کفایت ضرایب اطمینان پیشنهادی دستورالعمل‌های طراحی میراگر بوده، بنابراین به ازای اطمینان مختلف احتمال خرابی هر میراگر بطور جداگانه و مستقل تعیین شده است. در نهایت پیشنهاد شده است که با اعمال ضرایب اطمینان مورد نظر می‌توان از خرابی میراگر صرف‌نظر کرده و لزومی به مدل‌سازی خرابی میراگر نمی‌باشد. در صورتیکه ضرایب اطمینان مقادیر کمتری انتخاب شود خرابی میراگر محتمل بوده و در مدل‌سازی سازه-میراگر باید لحاظ شود. در این حالت بررسی موضوع خرابی پیشرونده در صورت وقوع خرابی در میراگر یکی از طبقات، تاثیر خرابی یک میراگر در یک طبقه بر خرابی میراگر در سایر طبقات و در نتیجه وابستگی خرابی میراگرها و همچنین رسیدن یا نرسیدن سازه به حد خرابی مطرح می‌شود که می‌تواند در مطالعات بعدی مورد بررسی قرار گیرد.

جدول ۸: احتمال خرابی میراگر ویسکوز براساس ظرفیت نیروی در قاب ۴ طبقه

| Storey | $P_f$      |              |            |
|--------|------------|--------------|------------|
|        | $\gamma=1$ | $\gamma=1/3$ | $\gamma=2$ |
| ۱      | ۱/۳۳       | ۰            | ۰          |
| ۲      | ۸/۸۳       | ۰            | ۰          |
| ۳      | ۱۴         | ۰/۳۳         | ۰          |
| ۴      | ۱۴/۸۳      | ۰/۱۷         | ۰          |

جدول ۹: احتمال خرابی میراگر ویسکوز براساس ظرفیت نیروی در قاب ۱۲ طبقه

| Storey | $P_f$      |              |            |
|--------|------------|--------------|------------|
|        | $\gamma=1$ | $\gamma=1/3$ | $\gamma=2$ |
| ۱      | ۰          | ۰            | ۰          |
| ۲      | ۲          | ۰            | ۰          |
| ۳      | ۲/۶۷       | ۰            | ۰          |
| ۴      | ۲/۵۰       | ۰            | ۰          |
| ۵      | ۱/۸۳       | ۰            | ۰          |
| ۶      | ۱          | ۰            | ۰          |
| ۷      | ۲/۱۷       | ۰            | ۰          |
| ۸      | ۳/۶۷       | ۰            | ۰          |
| ۹      | ۴/۶۷       | ۰            | ۰          |
| ۱۰     | ۴/۶۷       | ۰            | ۰          |
| ۱۱     | ۴/۸۳       | ۰            | ۰          |
| ۱۲     | ۶/۵۰       | ۰            | ۰          |



از بررسی نتایج مشخص می‌شود که براساس تابع حدی ظرفیت نیرویی میراگر مقدار احتمال خرابی میراگر در طبقات مختلف متفاوت بوده که این موضوع به دلیل استفاده از میراگر با ظرفیت‌های مختلف در طبقات، نحوه توزیع میراگرها در طبقات سازه و میزان غیرخطی شدن متفاوت سازه تحت رکوردهای زلزله مورد استفاده برای طراحی میراگر (گروه دو) و ارزیابی پاسخ میراگر (گروه یک) مربوط می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود احتمال خرابی میراگر در قاب ۴ طبقه بیشتر از قاب ۱۲ طبقه می‌باشد. در صورت عدم اعمال ضریب اطمینان ( $\gamma=1.0$ )، احتمال خرابی میراگر در طبقات مختلف قاب ۴ طبقه براساس تابع حدی مربوط به ظرفیت نیرویی میراگر در محدوده ۱/۳۳ تا ۱۴/۸۳ درصد و در قاب ۴ طبقه در بازه صفر تا ۶/۵ درصد می‌باشد. با افزایش ضریب اطمینان مشاهده می‌شود مقدار احتمال خرابی کمتر شده، بطوریکه با اعمال ضریب اطمینان برابر ۲ در قاب‌های مورد مطالعه خرابی میراگر اتفاق نمی‌افتد. بنابراین با اعمال ضریب اطمینان برابر ۲ طبق توصیه دستورات عمل‌های طراحی، می‌توان اثر خرابی میراگر ناشی از ظرفیت نیرویی میراگر را در ارزیابی عملکرد احتمالاتی سازه‌های مجهز به میراگر ویسکوز نادیده گرفت.

### ۶-۳-۲- ارزیابی خرابی میراگر براساس طول بازوی جابجایی میراگر

برای تابع حدی مرتبط با طول بازوی جابجایی میراگر هم احتمال خرابی مشابه روند توضیح داده شده برای حالت حدی ظرفیت نیرویی محاسبه و نتایج در جداول ۱۰ و ۱۱ به ازای اعمال ضرایب اطمینان مختلف ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد در این حالت هم مقادیر احتمال خرابی در طبقات متفاوت بوده و مقدار آن برعکس معیار خرابی ظرفیت نیرویی میراگر، در قاب ۴ طبقه کمتر از قاب ۱۲ طبقه می‌باشد. در صورت عدم اعمال ضریب اطمینان، احتمال خرابی میراگر براساس تابع حدی مربوط به ظرفیت جابجایی میراگر در قاب ۴ طبقه بین صفر تا ۰/۸۳ درصد و در قاب ۱۲ طبقه در بازه ۱/۵ تا ۱۶/۳ درصد می‌باشد. با افزایش ضریب اطمینان مقدار احتمال خرابی کمتر شده بطوریکه با اعمال ضریب اطمینان برابر ۲ طبق توصیه دستورات عمل‌های طراحی، احتمال خرابی میراگر صفر می‌شود.

جدول ۱۰: احتمال خرابی میراگر ویسکوز براساس ظرفیت جابجایی در قاب ۴ طبقه

| Storey | $P_f$      |              |            |
|--------|------------|--------------|------------|
|        | $\gamma=1$ | $\gamma=1/3$ | $\gamma=2$ |
| ۱      | .          | .            | .          |
| ۲      | .          | .            | .          |
| ۳      | .          | .            | .          |
| ۴      | ۰/۸۳       | .            | .          |

جدول ۱۱: احتمال خرابی میراگر ویسکوز بر اساس ظرفیت جابجایی در قاب ۱۲ طبقه

| Storey | $P_f$      |              |            |
|--------|------------|--------------|------------|
|        | $\gamma=1$ | $\gamma=1/3$ | $\gamma=2$ |
| ۱      | ۱/۵۰       | .            | .          |
| ۲      | ۹/۱۷       | .            | .          |
| ۳      | ۱۰/۶۷      | ۰/۱۷         | .          |
| ۴      | ۱۶/۳۳      | ۶/۶۷         | .          |
| ۵      | ۱۶         | ۵/۵۰         | .          |
| ۶      | ۱۵         | .            | .          |
| ۷      | ۱۵         | ۶/۱۷         | .          |
| ۸      | ۱۴/۸۳      | ۰/۳۳         | .          |
| ۹      | ۱۴/۳۳      | .            | .          |
| ۱۰     | ۱۱/۵۰      | .            | .          |
| ۱۱     | ۸/۶۷       | .            | .          |

## ۶-۳-۳- ارزیابی خرابی میراگر براساس توابع خرابی دوگانه

در این حالت دو تابع حدی مربوط به ظرفیت نیرویی و جابجایی میراگر بصورت همزمان در نظر گرفته شده و تجاوز پاسخ میراگر از هر مقدار حدی به عنوان وقوع خرابی در نظر گرفته می‌شود. احتمال خرابی میراگر با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت-کارلو محاسبه شده و نتایج در جداول ۱۲ و ۱۳ برای ضریب اطمینان برابر یک ( $\gamma=1.0$ ) ارایه شده است.

جدول ۱۲: احتمال خرابی میراگر ویسکوز براساس ظرفیت نیرویی و جابجایی در قاب ۴ طبقه

| Storey | $P_f$ |
|--------|-------|
| ۱      | ۱/۳۳  |
| ۲      | ۸/۸۳  |
| ۳      | ۱۴    |
| ۴      | ۱۵/۶۷ |

جدول ۱۳: احتمال خرابی میراگر ویسکوز براساس ظرفیت نیرویی و جابجایی در قاب ۱۲ طبقه

| Storey | $P_f$ |
|--------|-------|
| ۱      | ۱/۵۰  |
| ۲      | ۱۱/۱۷ |
| ۳      | ۱۳/۳۳ |
| ۴      | ۱۸/۸۳ |
| ۵      | ۱۷/۸۳ |
| ۶      | ۱۶    |
| ۷      | ۱۶/۵۰ |
| ۸      | ۱۸/۳۳ |
| ۹      | ۱۹    |
| ۱۰     | ۱۶/۱۷ |
| ۱۱     | ۱۳/۵۰ |
| ۱۲     | ۲۱    |

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد مشخص می‌شود احتمال خرابی میراگر براساس تابع خرابی چندگانه در طبقات مختلف قاب‌های ۴ و ۱۲ طبقه به ترتیب در محدوده ۱/۳ تا ۱۵/۷ درصد و ۱/۵ تا ۲۱ درصد می‌باشد. در این حالت هم با اعمال ضریب اطمینان برابر ۲ احتمال خرابی صفر می‌شود. مقایسه نتایج بدست آمده برای توابع خرابی چندگانه و تابع خرابی تکی نشان می‌دهد که برای ضریب اطمینان برابر یک احتمال خرابی در حالت استفاده از تابع حدی چندگانه نسبت به تابع حدی تک زیاد شده است. بطوریکه حداکثر احتمال خرابی میراگر برای تابع خرابی چندگانه در قاب ۴ و ۱۲ طبقه به ترتیب برابر ۱۵/۷ و ۲۱ درصد بوده در حالیکه مقادیر مربوطه برای تابع خرابی ظرفیت نیرویی ۱۴/۸۳ و ۶/۵ درصد و ظرفیت جابجایی میراگر برابر ۰/۸۳ و ۱۶/۳ درصد بوده است.

## ۷- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی احتمال خرابی میراگر ویسکوز براساس توابع حدی مختلف پرداخته شده است تا بتوان ضریب اطمینان مورد نیاز برای جلوگیری از خرابی میراگر را تعیین کرد. برای این منظور با اعمال عدم قطعیت در پارامترهای سازه، میراگر و رکورد زلزله ورودی و تعریف توابع حدی مرتبط با حداکثر نیرو و جابجایی میراگر، احتمال خرابی میراگر ویسکوز با استفاده از روش مونت-کارلو تعیین شده است.

برای آنالیز عددی، دو قاب فولادی ۴ و ۱۲ طبقه مجهز به میراگر ویسکوز خطی در نظر گرفته شده و ابتدا مقادیر حداکثر سرعت، نیرو و جابجایی میراگر تحت زلزله‌های با احتمال وقوع ۲ درصد در ۵۰ سال تعیین شده است. با اعمال ضرایب اطمینان مختلف ظرفیت نیرویی و جابجایی میراگرها تعیین شده و سپس به ارزیابی عملکرد احتمالاتی میراگر تحت زلزله‌های با احتمال وقوع ۲ درصد در ۵۰ سال پرداخته شده است. براساس یافته‌های حاصل از تحلیل عددی می‌توان به نتایج زیر اشاره کرد:

۱. در قاب‌های مورد نظر مشاهده می‌شود که در صورت عدم اعمال ضریب اطمینان ( $\gamma=1.0$ ) براساس تابع حدی مربوط به ظرفیت نیرویی میراگر، میراگرها در طبقات مختلف دچار خرابی می‌شوند. با توجه به ظرفیت متفاوت میراگرها در طبقات، احتمال خرابی در طبقات مختلف متفاوت می‌باشد. با اعمال ضریب اطمینان برابر ۲ طبق توصیه دستورالعمل‌های طراحی، می‌توان اثر خرابی میراگر ناشی از رسیدن به ظرفیت نیرویی را در ارزیابی عملکرد احتمالاتی سازه‌های مجهز به میراگر ویسکوز نادیده گرفت.

۲. بررسی نتایج نشان می‌دهد که جهت جلوگیری از خرابی میراگر براساس تابع حدی مربوط به جابجایی میراگر نیاز به اعمال ضریب اطمینان در تعیین ظرفیت جابجایی میراگر می‌باشد که برای قاب با تعداد طبقات بالاتر (در این مطالعه قاب ۱۲ طبقه) ضرورت بیشتری دارد. با اعمال ضریب اطمینان برابر ۲ که در دستورالعمل‌ها توصیه شده است خرابی میراگر اتفاق نمی‌افتد.

۳. استفاده از تابع خرابی چندگانه مرتبط با ظرفیت نیرویی و جابجایی میراگر می‌تواند احتمال خرابی میراگر ویسکوز را در مقایسه با تابع خرابی تکی افزایش دهد که مقدار افزایش وابسته به مقادیر حدی در توابع خرابی مورد نظر دارد. در قاب‌های مورد بررسی مشاهده می‌شود که در صورت عدم اعمال ضریب اطمینان، حداکثر احتمال خرابی میراگر براساس تابع خرابی چندگانه در طبقات مختلف قاب‌های ۴ و ۱۲ طبقه به ترتیب ۱۵/۷ و ۲۱ درصد می‌باشد.

در نهایت با توجه به نتایج می‌توان گفت که با اعمال ضریب اطمینان پیشنهادی در دستورالعمل‌های طراحی سازه‌های مجهز به میراگر در تعیین ظرفیت نیرویی و طول بازوی جابجایی میراگر ویسکوز، احتمال خرابی میراگر ویسکوز با اعمال عدم قطعیت‌های مختلف ناچیز بوده و می‌توان در ارزیابی احتمالاتی عملکرد سازه‌های مجهز به میراگر ویسکوز از اثر خرابی میراگر ویسکوز صرف‌نظر کرد. پیشنهاد می‌شود در راستای تکمیل این پژوهش موضوع خرابی میراگرهای با رفتار غیرخطی، تاثیر خرابی میراگر بر خرابی سازه و وابستگی بین خرابی میراگرها در طبقات مختلف مورد بررسی قرار گیرد.

## مراجع

- [1] Hwang JS. (2002). *Seismic design of structures with viscous dampers*. International Training Programs for Seismic Design of Building Structures, National Center for Research on Earthquake Engineering, National Science Council, 124-138.
- [2] Constantinou, MC. Syman, MD. Tsopelas, P. and Taylor, DP. (1993). *Fluid viscous dampers in applications of seismic energy dissipation and seismic isolation*. ATC-17-1, 581-591.
- [3] Ramirez, OM. Constantinou, MC. Kircher, CA. Whittaker, AS. Johnson, MW. Gomez, JD. and Chrysostomou, CZ. (2000). *Development and evaluation of simplified procedures for analysis and design of buildings with passive energy dissipation systems*. MCEER-00-0010, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY.
- [4] Ramirez, OM. Constantinou, MC. Whittaker, AS. Kircher, CA. Johnson, MW. and Chrysostomou, CZ. (2003). Validation of the 2000 NEHRP provisions' equivalent lateral force and modal analysis procedures for buildings with damping systems. *Earthquake Spectra*, 19(4), 981-999.
- [5] Whittaker, AS. Constantinou, MC. Ramirez, OM. Johnson, MW. and Chrysostomou, CZ. (2003). *Equivalent lateral force and modal analysis procedures of the 2000 NEHRP provisions for buildings with damping systems*. *Earthquake Spectra*, 19 (4), 959-980.
- [6] ASCE. (2017). *Minimum design loads for buildings and other structures*. SEI/ASCE 7-16, Reston, VA.
- [7] Moradpour, S. and Dehestani, M. (2019). *Optimal DDBD procedure for designing steel structures with nonlinear fluid viscous dampers*. *Structures*, 22, 154-174.
- [8] Pekcan, G. Mander, JB. and Chen, SS. (1999). *Design and retrofit methodology for building structures with supplemental energy dissipating systems*. Report No. MCEER-99- 0021. New York: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo.
- [9] Hwang, JS. Lin, WC. and Wu, NJ. (2013). *Comparison of distribution methods for viscous damping coefficients to buildings*. *Structure and Infrastructure Engineering*, 9(1), 28-41.
- [10] Whittle, JK. Williams, MS. Karavasilis, TL. and Blakeborough, A. (2012). *A comparison of viscous damper placement methods for improving seismic building design*. *Journal of Earthquake Engineering*, 16(4), 540-560.

- [11] Landi, L. Conti, F. and Diotallevi, PP. . (2015). Comparison of different methods for viscous damper placement in existing frame buildings. *ISEC-8th International Structural Engineering and Construction Conference: Implementing Innovative Ideas in Structural Engineering and Project Management*. 275-280.
- [12] Hwang, JS. Hwang, YN. Yi, SL. and Ho, SH. (2008). *Design formulations for supplemental viscous dampers to building structures*. Journal of Structural Engineering, 134 (1), 22–31.
- [13] Aydin, E. Öztürk, B. and Dutkiewicz, M. (2019). *Analysis of efficiency of passive dampers in multistorey buildings*. Journal of Sound and Vibration, 439, 17-28.
- [14] Lin, TK. Hwang, JS. and Chen, KH. (2017). *Optimal distribution of damping coefficients for viscous dampers in buildings*. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 17(4), 1750054.
- [15] De, Domenico. D. Ricciardi, G. and Takewaki, I. (2019). *Design strategies of viscous dampers for seismic protection of building structures: a review*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 118, 144-165.
- [16] Song, C. Sun, B. Zhang, C. and Xiao, R. (2025). *High-dimensional reliability-based structural design optimization: A surrogate model-assisted decoupled method based on importance sampling quantiles*. Engineering Structures, 327, 119549.
- [17] Alotaibi, E. Nassif, N. and Barakat, S. (2023). *Data-driven reliability and cost-based design optimization of steel fiber reinforced concrete suspended slabs*. Structural Concrete, 24(2), 1856-1867.
- [18] Siddiqui, N. Abbas, H. Almusallam, T. Li, Q. M. and Al-Salloum, Y. (2023). *Reliability assessment of steel-lined and prestressed FRC slabs against projectile impact*. Applied Sciences, 13(1), 90.
- [19] Szép, J. Habashneh, M. Lógó, J. and Movahedi Rad, M. (2023). *Reliability assessment of reinforced concrete beams under elevated temperatures*. Sustainability, 15, 6077.
- [20] Primo, G.S.P. Silva, R. Evangelista, F. and Oliveira, M.H. (2025). *Statistical reliability analysis for assessing bridge structural integrity: A review paper*. Infrastructures, 10(7), 156.
- [21] Hu, W. Cheng, S. Yan, J. Cheng, J. Peng, X. Cho, H. and Lee, I. (2024). *Reliability-based design optimization: a state-of-the-art review of its methodologies, applications, and challenges*. Structural and Multidisciplinary Optimization, 67(9), Article 168.
- [22] Haji Mazdarani, M.J. Hoseini Vaez, S.R. Hosseini, P. and Fathali, M.A. (2023). *Reliability-based layout optimization of concentrically braced in 3D steel frames*. Structures, 1094-1112.
- [23] Phan, H. C. Le, T. T. Duong, H. T. and Le, M. L. (2024). *Reliability-based optimization for concrete-filled steel tubular columns incorporating multi-advanced techniques and model constraints*. Advances in Mechanical Engineering, 16(10), 1-15.
- [24] Hosseini, P. Kaveh, A. Fathali, M. A. and Hoseini Vaez, S. R. (2024). *A two-loop RBDO approach for steel frame structures using EVPS, GWO, and Monte Carlo simulation*. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 32(4), 605–624.
- [25] Hosseini, P. Hatami, N. and Hoseini Vaez, S.R. (2023). *Reliability-based optimum design of dome truss structures through enhanced vibration particle system*. Journal of Rehabilitation in Civil Engineering, 11(3), 47-67.
- [26] Zabojszcza, P. Radoń, U. and Tazowski, P. (2023). *Robust and reliability-based design optimization of steel beams*. Archives of Civil Engineering, 69(4), 125-140.
- [27] Hosseini, P. Lajvardi, F. S. and Hoseini Vaez, S. R. (2026). *Optimum robust design of 2D steel moment-resisting frames using enhanced vibrating particles system algorithm*. Journal of Rehabilitation in Civil Engineering, 14(2), 2284.
- [28] Saraygord, S. Enayatollahi, F. Xu, X. and Liang, X. (2022). *Machine learning-based methods in structural reliability analysis: A review*. Reliability Engineering and System Safety, 219, 108223.
- [29] Degtyarev, V. V. and Hicks, S. J. (2023). *Reliability-based design shear resistance of headed studs in solid slabs predicted by machine learning models*. Architecture, Structures and Construction, 3, 447-473.
- [30] Sufyan, M. S. Samui, P. and Mishra, S. S. (2023). *Reliability analysis of frame structures under top-floor lateral load using artificial intelligence*. Asian Journal of Civil Engineering, 24, 3653-3665.
- [31] Yang, W. Zhang, B. Wang, W. and Li, C.Q. (2023). *Time-dependent structural reliability under nonstationary and non-Gaussian processes*. Structural Safety, 100, 102286.
- [32] Qin, X. Huang, X. and Kaewunruen, S. (2025). *Time-dependent reliability assessment and durability analysis of industrial and recycled steel fiber reinforced concrete beams*. Engineering Structures 336, 120442.
- [33] Bruschi, E. and Quaglino, V. (2024). *Reliability analysis of two archetype RC buildings with hysteretic dampers*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 176, 108290.
- [34] Tubaldi, E. Dall'Asta, A. Broggi, M. and Patelli, E. (2014). *Reliability-based design of fluid viscous damper for seismic protection of building frames*. In Vulnerability, Uncertainty and Risk, ASCE, 1767-1776.
- [35] Dall'Asta, A. Dcozzese, F. Ragini, L. and Tubaldi, E. (2017). *Effect of the damper property variability on the seismic reliability of linear systems equipped with viscous dampers*. Bulletin of Earthquake Engineering, 15(11), 5025-5053.
- [36] Scozzese, F. Dall'Asta, A. and Tubaldi, E. (2019). *Seismic risk sensitivity of structures equipped with anti-seismic devices with uncertain properties*. Structural Safety, 77, 30-47.
- [37] Kitayama, S. and Constantinou, MC. (2016). *Development and evaluation of procedures for analysis and design of building with fluidic self-centering system*. MCEER-16-0003, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY.
- [38] Kitayama, S. and Constantinou, MC. (2018). *Seismic performance of buildings with viscous damping systems designed by the procedures of ASCE/SEI 7-16*. Journal of Structural Engineering, 144(6), DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002048.
- [39] Moradpour, S. and Dehestani, M. (2021). *Probabilistic seismic performance of steel structures with FVDs designed by DDBD procedure*. Journal of Building Engineering, 43, 102581.
- [40] Scozzese, F. Gioiella, L. Dall'Asta, A. Ragni, L. and Tubaldi, E. (2021). *Influence of viscous dampers ultimate capacity on the seismic reliability of building structures*. Structural Safety, 91, 102096.

- [41] Makris, N. and Constantinou, M. (1991). *Fractional-derivative Maxwell model for viscous dampers*. Journal of Structural Engineering, 117(9), 2708-2724.
- [42] Verma, NP. (2001). *Viscous dampers for optimal reduction in seismic response*. Virginia Tech.
- [43] Seleemah, AA. and Constantinou, MC. (1997). *Investigation of seismic response of buildings with linear and nonlinear fluid viscous dampers*. Report No. NCEER- 97-0004, New York, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo.
- [44] Nowak, AS. and Collins, KR. (2013). *Reliability of structures*. University of Michigan, McGraw-Hill.
- [45] Cimellaro, GP. Reinhorn, AM. Bruneau, M. and Rutenberg, A. (2006). *Multi-dimensional fragility of structures: Formulation and evaluation*. Technical Report MCEER-06-0002, University of Buffalo, New York, USA.
- [46] Cimellaro, GP. and Reinhorn, AM. (2011). *Multidimensional performance limit state for hazard fragility functions*. Journal of Engineering Mechanics, 137, 47-60.
- [47] Ellingwood, B. Galambos, TV. MacGregor, JG. and Cornell, CA. (1980). *Development of a probability based load criterion for American National Standard A58*. National Bureau of Standards, Washington, DC.
- [48] Porter, KA. Beck, JL. and Shaikhutdinov, RV. (2002). *Investigation of sensitivity of building loss estimates to major uncertain variables for the Van Nuys testbed*. PEER Report 2002/03.
- [49] Melchers, R.E. (1999). *Structural Reliability Analysis and Prediction*—John Wiley & Sons. New York, NY.
- [50] Tubaldi, E. Barbato, M. and DallAsta, A. (2014). *Performance-based seismic risk assessment for buildings equipped with linear and nonlinear viscous dampers*. Engineering Structures, 78: 90–99.
- [51] Tubaldi, E. Barbato, M. and DallAsta, A. (2015). *Efficient approach for the reliability-based design of linear damping devices for seismic protection of buildings*. ASCE-ASME Journal of Risk Uncertain Engineering Systems, Part A: Civil Engineering 2(2): C4015009.
- [52] ASCE/SEI 41-17. (2017). *Seismic evaluation and retrofit rehabilitation of existing buildings*. American Society of Civil Engineering.
- [53] European Committee for Standardization. (2010). EN 15129:2010. Antiseismic devices, Brussels, Belgium.
- [54] European Committee for Standardization. (2004). *Euro code 8- Design of Structures for Earthquake Resistance, Part 1: General Rules Seismic Actions and Rules for buildings*, Brussels, Belgium.
- [54] European Committee for Standardization. (2004). *Euro code 8- Design of Structures for Earthquake Resistance, Part 1: General Rules Seismic Actions and Rules for buildings*. Brussels, Belgium.
- [55] Sullivan, TJ. and Lago, A. (2012). *Toward a simplified direct DBD procedure for the seismic design of moment resisting frames with viscous dampers*. Engineering Structures, 35, 140-148.
- [56] FEMA 356. (2000). *Pre-standard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings*. Federal Emergency Agency, Washington (DC).
- [57] Zareian, F. Lignos, DG. and Krawinkler, H. (2010). Evaluation of seismic collapse performance of steel special moment resisting frames using FEMA P695 (ATC-63) methodology. In: *Proceedings of the ASCE Structures Congress*, Orlando, Florida.
- [58] Elkady, A. and Lignos, DG. (2015). *Effect of gravity framing on the overstrength and collapse capacity of steel frame buildings with perimeter special moment frames*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 44(8), 1289-1307.
- [59] Mazzoni, S. McKenna, F. Scott, M. H. and Fenves, G. L. (2006). *OpenSees: Open system for earthquake engineering simulation—Command language manual*. Pacific Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, CA.
- [60] FEMA P-58-1 (2018). *Seismic Performance Assessment of Buildings*, Volume 1 - Methodology. California: Washington, D.C.
- [61] Somerville, P.G. Smith, N. Punyamurthula, S. and Sun, J. (1997). *Development of ground motion time histories for phase 2 of the FEMA/SAC steel project*. SAC background document, report no. SAC/BD 97/04.
- [62] Perloff, J. M. (2020). *Microeconomics: Theory and applications with calculus*. 5th Ed., Pearson Education, London, U.K.
- [63] Moradpour, S. (2020). *Reliability of steel frames equipped with fluid viscous dampers designed using direct displacement-based design method*. Ph.D. dissertation, Dept. of Civil Engineering, Babol Noshirvani Univ. of Technology, Babol, Iran