

Multiple limit state functions- based reliability analysis of steel frames equipped with FVD

Mohtasham Mohebbi^{1*}, Solmaz Moradpor²

1- Professor, Faculty of Technical and Engineering, University of Mohagheh Ardabili, Ardabil, Iran

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

ABSTRACT

In this paper, the reliability of steel frames equipped with fluid viscous damper (FVD) is discussed using multiple limit state functions defined based on the drift ratio and acceleration of the structure. Monte-Carlo Simulation (MCS) method has been used for reliability analysis and determining the failure probability. For numerical analysis, three steel frames of 4-, 8- and 12 -storey equipped with linear and non-linear FVDs designed based on direct-displacement method have been considered which FVDs distributed using shear-based and uniform distribution methods. By applying uncertainties in the structural and FVD parameters, for each frame the necessary number of random frames have been generated by using the Latin-Hypercube Sampling (LHS) method. The generated random frames subjected to 20 earthquake records and the time history dynamic analysis has been performed. By performing reliability analysis, the structural failure probability for single and multiple limit state functions has been determined with threshold values for maximum drift ratio and acceleration corresponding to different performance levels. The results of evaluations show that for the acceleration limit values almost corresponds to the moderate failure level in seismic codes, such as the limit value of 0.6g in Hazus-MH requirements, the increase in the probability of structure failure with multiple limit state functions compared to the drift ratio limit state function was less than 10%, while for a lower limit value of acceleration such as 0.3g, this increase is up to 87%. It was also observed that despite the fact that linear and non-linear dampers with different distributions have met the design criteria, they performed differently in reliability analysis. According to the results, it is suggested to consider the effect of acceleration-based limit state function in evaluating the reliability of acceleration-sensitive structures that have lower acceleration limit values.

ARTICLE INFO

Receive Date: 13 March 2023

Revise Date: 02 June 2023

Accept Date: 11 June 2023

Keywords:

Structural reliability Multiple limit state function Fluid viscous damper Latin Hypercube Performance level

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.388000.3054>

*Corresponding author: Mohtasham Mohebbi.

Email address: mohebbi@uma.ac.ir

تحلیل قابلیت اعتماد مبتنی بر توابع حالت حدی چندگانه قاب‌های فلزی مجهز به

میراگر ویسکوز مایع

محتشم محب^{۱*}، سولماز مرادپور^۲

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 این مقاله به ارزیابی قابلیت اعتماد قاب‌های فلزی مجهز به میراگر ویسکوز مایع با استفاده از توابع حالت حدی چندگانه پرداخته شده است که توابع حالت حدی بر اساس پاسخ دریافت و شتاب سازه تعریف شده است. برای تحلیل قابلیت اعتماد و تعیین احتمال خرابی از روش شبیه‌سازی مونت-کارلو (MCS) استفاده شده است. برای آنالیز عددی، سه قاب فلزی ۴، ۸ و ۱۲ طبقه مجهز به میراگر ویسکوز خطی و غیرخطی طراحی شده بر اساس روش جابجایی مستقیم با توزیع میراگرها به دو روش توزیع مبتنی بر برش طبقه و توزیع یکنواخت، در نظر گرفته شده است. با اعمال عدم قطعیت در پارامترهای سازه و میراگر، برای هر کدام از قاب‌ها به تعداد لازم قاب‌های تصادفی با استفاده از روش نمونه‌برداری لاتین هاپیر کیوب (LHS) تولید شده‌اند. سازه‌های تصادفی تولید شده تحت ۲۰ رکورد زلزله قرار گرفته و تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی انجام شده است. با انجام تحلیل قابلیت اعتماد، احتمال خرابی سازه به ازای توابع حالت حدی تک و چندگانه با مقادیر حدی متناظر با سطوح عملکرد مختلف برای حداکثر نسبت دریافت و شتاب تعیین شده است. نتایج ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که برای مقادیر حدی شتاب متناظر با سطح خرابی ملایم در دستورالعمل‌های لرزه‌ای نظیر مقدار حدی ۰/۶g در دستورالعمل Hazus-MH، افزایش احتمال خرابی سازه با توابع حدی چندگانه در مقایسه با تابع حدی فقط نسبت دریافت کمتر از ۱۰٪ بوده است، در حالیکه برای مقدار حدی کمتر شتاب نظیر ۰/۳g، این افزایش تا ۸۷٪ می‌باشد. همچنین مشاهده شد علیرغم اینکه میراگرهای خطی و غیرخطی با توزیع‌های مختلف معیارهای مورد نظر در طراحی را برآورده کرده‌اند، در تحلیل قابلیت اعتماد عملکرد متفاوتی داشته‌اند. براساس نتایج بدست آمده پیشنهاد می‌شود تاثیر تابع حدی متناظر با شتاب در ارزیابی قابلیت اعتماد سازه‌های حساس به شتاب که دارای مقادیر حدی شتاب پایین‌تری می‌باشند در نظر گرفته شود.

کلمات کلیدی: قابلیت اعتماد سازه، تابع حالت حدی چندگانه، میراگر ویسکوز مایع، لاتین هاپیر کیوب، سطح عملکرد.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2023.388000.3054	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2023.388000.3054	۱۴۰۲/۱۲/۲۹	۱۴۰۲/۰۳/۲۱	۱۴۰۲/۰۳/۲۱	۱۴۰۲/۰۳/۱۲	۱۴۰۱/۱۲/۲۲
محتشم محبی mohebbi@uma.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

در چند دهه گذشته استفاده از سیستم‌های کنترل سازه برای کاهش پاسخ سازه‌ها در مقابل بارهای جانبی نظیر بار باد و زلزله رایج شده و مکانیزم‌های مختلفی بخصوص انواع گوناگونی از میراگرها برای تحقق این هدف پیشنهاد شده است [۴-۱]. از بین مکانیزم‌های کنترلی، میراگر ویسکوز مایع (FVD)^۱ به‌عنوان یک سیستم مستهلک کننده انرژی، به دلیل سادگی نصب و اجرا، قابلیت هماهنگی با سایر اعضای سازه و داشتن تنوع در ظرفیت و ابعاد، کاربرد بسیاری پیدا کرده است [۵-۸]. میراگر ویسکوز مایع بر اساس رفتار به دو نوع میراگر ویسکوز خطی و غیرخطی تقسیم می‌شود. علیرغم اینکه میراگر ویسکوز مایع خطی به‌طور موثری می‌تواند پاسخ‌های سازه را کاهش دهد، این میراگر در سرعت‌های بالا نیروی بسیار بزرگتری را به سازه اعمال می‌کند. با استفاده از میراگرهای ویسکوز غیرخطی می‌توان در سرعت‌های بالا حداکثر نیروی اعمالی توسط میراگر را محدود کرد که این کار باعث کاهش حداکثر نیروی میراگر، عدم اشباع^۲ میراگر و همچنین کاهش هزینه تهیه میراگر ویسکوز می‌شود [۹-۱۲]. با توجه به احتمال ورود پاسخ سازه‌ها به محدوده غیرخطی، بخصوص تحت زلزله‌های شدید، استفاده از میراگر ویسکوز علاوه بر سازه‌های با رفتار خطی در سازه‌های با رفتار غیرخطی هم توسعه پیدا کرده است [۱۳-۱۶].

در کاربردهای عملی، میراگرهای ویسکوز معمولاً برای مقاوم‌سازی و بهبود عملکرد سازه‌ها به سازه‌های موجود اضافه شده یا در طراحی سازه‌های جدید، سازه و میراگر بصورت همزمان طراحی می‌شوند [۱۷-۱۹]. برای طراحی میراگر در هر دو حالت روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است. در این راستا، برای طراحی سازه‌های مجهز به میراگر ویسکوز بر اساس روش نیرویی^۳ مطالعات جامعی انجام شده است [۲۰-۲۲] که بر اساس نتایج حاصل از تحقیقات در فصل ۱۸ آیین‌نامه‌ی ASCE/SE17 دستورالعمل طراحی سازه و میراگر ویسکوز مایع ارائه شده است [۲۳]. همچنین برای طراحی میراگرهای ویسکوز مایع روش طراحی بر اساس عملکرد^۴ نیز مورد استفاده قرار گرفته است که می‌توان به استفاده از روش جابجایی برای ارزیابی عملکرد سازه‌های موجود و بهسازی لرزه‌ای^۵ آنها با استفاده از میراگر ویسکوز [۲۴]، روش جابجایی مستقیم (DDBD)^۶ [۲۵-۲۷] برای بهسازی لرزه‌ای سازه‌های موجود و طراحی ساختمان‌های جدید با استفاده از میراگرهای ویسکوز و طراحی بهینه مبتنی بر عملکرد میراگرهای ویسکوز غیرخطی برای بهسازی سازه‌های موجود [۹] اشاره کرد. مرادپور و دهستانی [۲۸] روش جابجایی مستقیم را برای طراحی بهینه میراگرهای ویسکوز برای قاب‌های خمشی فولادی توسعه دادند. در این روش ضرایب میرایی میراگرها به‌عنوان متغیرهای طراحی، کمینه کردن مجموع ضرایب میرایی میراگرهای الحاقی و تأمین درصد میرایی اضافه شده به سازه به‌ترتیب به‌عنوان تابع هدف و محدودیت در نظر گرفته شده است.

در زمینه تحلیل قابلیت اعتماد^۷ و ارزیابی احتمالاتی عملکرد لرزه‌ای سازه‌های مجهز به میراگر ویسکوز با اعمال اثر عدم قطعیت-های ذاتی^۸ و شناختی^۹ موجود در پارامترهای سازه، میراگر ویسکوز و بارهای ثقلی و زلزله مطالعات زیادی صورت گرفته است. توبالدی و همکاران [۲۹] روشی برای طراحی بهینه میراگرهای ویسکوز مایع اعم از خطی و غیرخطی با تعریف یک مسئله بهینه‌سازی مبتنی بر قابلیت اعتماد پیشنهاد دادند. در این تحقیق، تابع هدف محدود کردن احتمال فراگذشت پاسخ سازه از سطح عملکردی مطلوب در نظر گرفته شد، در حالی که هزینه تأمین سیستم کنترل که برحسب مجموع نیروی میراگرها بیان می‌شود، کمینه شده است. دل-آستا و همکاران [۳۰] 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 اعمال عدم قطعیت در پارامترهای میراگر ویسکوز با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت

¹ Fluid Viscous Damper(FVD)

² Saturation

³ Force-based Method

⁴ Performance-based Design Method

⁵ Seismic Retrofit

⁶ Direct Displacement-based Design(DDBD)

⁷ Reliability

⁸ Aleatory

⁹ Epistemic

کارلو (MCS)^{۱۰}، اثر عدم قطعیت در منحنی خطر پاسخ‌های سازه نظیر جابجایی، شتاب و همچنین حداکثر کشیدگی^{۱۱} و نیروی میراگر مورد بررسی قرار گرفت. اسکازس و همکاران [۳۱] حساسیت عملکرد احتمالاتی را با اعمال عدم قطعیت در پارامترهای میراگر ویسکوز خطی و غیرخطی مورد بررسی قرار دادند. روش پیشنهادی در قالب حل یک مسئله بهینه‌سازی مبتنی بر قابلیت اعتماد ارائه شده است که هدف اصلی در آن 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 اضافه شده است. در واقع هدف از کاربرد میراگر، مقاوم‌سازی و بهسازی رفتار لرزه‌ای احتمالاتی سازه موجود در مقابل زلزله بوده است. در تحقیقی که توسط کیتایاما و همکاران [۳۲-۳۳] صورت گرفت عملکرد احتمالاتی سازه‌های طراحی شده با چند سیستم کنترل غیرفعال از جمله میراگر ویسکوز به روش دستورالعمل‌های پیشنهادی فصل ۱۸ آیین نامه ASCE/SE17 [۲۳]، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از بررسی نشان داد که سازه‌های مجهز به سیستم کنترل دارای احتمال خرابی کمتری می‌باشند. مرادپور و دهستانی [۳۴] 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 مورد بررسی قرار دادند. برای نیل به این هدف از دو روش ارزیابی احتمالاتی بر اساس محاسبه میانگین فرکانس سالیانه^{۱۲} عبور از سطح عملکرد و فرمت طراحی خطر- شکنندگی^{۱۳} استفاده شد. همچنین اثر خرابی میراگر ویسکوز نظیر رسیدن به حالت حدی ظرفیت نیرویی میراگر و حداکثر کشیدگی میراگر روی عملکرد احتمالاتی سازه‌های مجهز به میراگر مورد بررسی قرار گرفته است [۳۵].

تعریف خرابی بر اساس چند معیار عملکردی در تحلیل شکنندگی و ارزیابی قابلیت اعتماد سیستم‌های سازه‌ای در مطالعات مختلفی استفاده شده است. در یک گزارش تحقیقاتی، سمیلارو و رینهورن [۳۶] مفهوم تابع حالت حدی چندگانه^{۱۴} را مطرح کردند و از دو معیار عملکردی شامل دریافت به عنوان معیار ایمنی و شتاب به عنوان معیار سرویس‌دهی، برای تعریف خرابی سازه استفاده کردند. ترکیبات مختلفی از همبستگی بین این دو معیار از وابسته تا مستقل فرض شده و شکنندگی سازه یک بیمارستان مورد بررسی قرار گرفت. همچنین در تحقیق مشابهی، با همین ملاحظات و فرضیات تحلیل شکنندگی سازه بیمارستان ارائه گردید [۳۷]. در تحقیقات دیگر هم معیار عملکردی چندگانه مورد بررسی قرار گرفته است که می‌توان به معیار عملکردی چندگانه دریافت، دریافت باقی مانده به عنوان معیار ایمنی پس از زلزله و همچنین معیار امکان اقتصادی تعمیر و بازسازی [۳۸]، ارزیابی قابلیت اعتماد و شکنندگی پل‌ها با تعریف مفهوم خرابی بر اساس خرابی چندگانه نظیر خرابی ناشی از لنگر عرشه بتنی، لنگر و برش تیرها و خرابی زیر سازه [۳۹-۴۳] اشاره کرد. استفاده از تابع خرابی چندگانه در ارزیابی شکنندگی سازه‌های مجهز به سیستم کنترل هم مورد مطالعه قرار گرفته است. در این راستا، بخشی‌نژاد و محبی [۴۴] منحنی شکنندگی یک قاب برشی ۸ طبقه مجهز به میراگر جرمی هماهنگ شده را با استفاده از تابع خرابی چندگانه مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق حداکثر نسبت دریافت بین طبقه‌ای، حداکثر شتاب مطلق و همچنین جابجایی میراگر جرمی به عنوان معیار خرابی انتخاب شدند. نتایج حاصل از پژوهش نشان دهنده افزایش شکنندگی سیستم در صورت استفاده از تابع خرابی چندگانه در مقایسه با تابع خرابی تک بوده است. همچنین در تحقیقی مشابه شکنندگی قاب مجهز به میراگر جرمی هماهنگ شده نیمه فعال با در نظر گرفتن تابع خرابی چندگانه و با اعمال عدم قطعیت در پارامترهای سازه، سیستم کنترل و ارتعاش ورودی بررسی شد که نتایج نشان دهنده افزایش شکنندگی در صورت استفاده از تابع خرابی چندگانه بوده است [۴۵].

در اغلب تحقیقات گذشته در رابطه با تحلیل قابلیت اعتماد یا ارزیابی احتمالاتی عملکرد سازه‌های مجهز به میراگر ویسکوز، تنها از یک تابع حالت حدی مبتنی بر یک معیار عملکردی استفاده شده است، حال آنکه الزام عملکرد مورد انتظار از سازه‌ها مبتنی بر تنها یک پاسخ سازه یا یک معیار عملکردی نمی‌باشد. بعنوان نمونه نمی‌توان با استفاده از نتایج حاصل از ارزیابی قابلیت اعتماد سازه براساس تابع حدی تعریف شده براساس فقط پاسخ دریافت سازه، در رابطه با برآورده شدن یا نشدن سایر معیارهای عملکردی نظیر معیارهای مبتنی بر

¹⁰ Monte-Carlo Simulation(MCS)

¹¹ Stroke Length

¹² Mean Annual Frequency (MAF)

¹³ Fragility/Hazard Design Format

¹⁴ Multi- Limit State Function

پاسخ شتاب سازه اظهار نظر کرد. با توجه به اینکه برای ارزیابی ایمنی سازه‌ها عموماً از پاسخ دریافت سازه و برای ارزیابی راحتی ساکنین یا عملکرد برخی اجزای غیرسازه‌ای از پاسخ شتاب کل سازه استفاده می‌شود، بنابراین واقع بینانه‌تر است که در ارزیابی قابلیت اعتماد سازه‌ها تابع حالت حدی مورد استفاده بر اساس ترکیب مناسبی از چند معیار عملکردی موثر در عملکرد سازه و بصورت توابع حدی چندگانه تعریف شود. با توجه به نتایج حاصل از تحقیقات گذشته که نشان دهنده تاثیر قابل توجه استفاده از تابع خرابی چندگانه در نتایج تحلیل احتمالاتی عملکرد انواع مختلفی از سازه‌ها می‌باشد [۴۵-۳۸،۴۴] و عدم بررسی کامل این موضوع در ارزیابی قابلیت اعتماد سازه‌های مجهز به میراگر ویسکوز در مطالعات گذشته، در تحقیق حاضر هدف اصلی ارزیابی قابلیت اعتماد قاب‌های فلزی مجهز به میراگر ویسکوز مایع با استفاده از توابع حالت حدی چندگانه می‌باشد. بنابراین نوآوری این پژوهش در مقایسه با مطالعات قبلی را می‌توان بصورت زیر خلاصه کرد:

(۱) تحلیل قابلیت اعتماد قاب‌های فلزی مجهز به میراگر ویسکوز مایع با استفاده از توابع حدی چندگانه که هر کدام از توابع حدی براساس یک معیار عملکردی تعریف شده است، (۲) تعیین مقادیر حدی تاثیرگذار برای هر کدام از توابع حدی، (۳) بررسی قابلیت اعتماد قاب‌های فلزی مجهز به میراگر ویسکوز با در نظر گرفتن تابع حدی متفاوت با معیار طراحی. در این مطالعه در ارزیابی قابلیت اعتماد از تابع حدی تعریف شده براساس شتاب کل سازه هم استفاده می‌شود، در حالیکه در طراحی اعضای قاب و میراگر ویسکوز براساس روش جابجایی مستقیم تنها از معیار عملکردی مبتنی بر نسبت دریافت استفاده شده است. بنابراین با استفاده از نتایج حاصل از تحلیل عددی قابلیت اعتماد با توابع حدی چندگانه می‌توان در رابطه با سطح قابلیت اعتماد سازه به‌ازای توابع حدی مختلف، بخصوص تابع حدی غیر دخیل در طراحی، اظهار نظر کرد. برای رسیدن به اهداف مورد نظر در این پژوهش و انجام تحلیل عددی، ۳ قاب فلزی مجهز به میراگر ویسکوز مایع که بر اساس روش جابجایی مستقیم طراحی شده‌اند، انتخاب شده و توابع حدی مختلف براساس پاسخ دریافت و شتاب سازه تعریف شده است. با اعمال عدم قطعیت در پارامترهای موثر سازه و میراگر ویسکوز، به تعداد مناسب قاب تصادفی به روش نمونه‌برداری لاتین هایپرکیوب تولید شده و تحت ۲۰ رکورد زلزله تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی انجام شده است. سپس به تحلیل قابلیت اعتماد سازه‌ها و تعیین احتمال خرابی به ازای تابع حدی تک و چندگانه و در نهایت به شناسایی میزان تاثیر توابع حدی مختلف در قابلیت اعتماد سازه‌ها پرداخته شده است.

۲- میراگر ویسکوز مایع

استهلاک انرژی در میراگرهای ویسکوز مایع براساس عبور سیال با فشار زیاد از درون روزنه تعبیه شده در کلاهک پیستون و جاری شدن آن از یک محفظه به محفظه دیگر می‌باشد که یک نیروی مقاوم وابسته به سرعت موسوم به نیروی میراگر ویسکوز بوجود می‌آید. برای تعیین رابطه بین نیروی میراگر ویسکوز و پارامترهای مدل‌های رفتاری مختلف ارائه شده است که می‌توان به مدل ماکسول^{۱۵}، کلونین^{۱۶} و بورگرس^{۱۷} اشاره کرد [۴۶-۴۷]. در صورتی که از اثر سختی در تعیین نیروی میراگر صرف‌نظر شده و نیروی میراگر تنها براساس سرعت بیان شود، نیروی میراگر از رابطه (۱) بدست می‌آید [۷].

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

F_d نیروی میراگر، C ضریب میرایی، \dot{u} سرعت نسبی بین دو انتهای میراگر، α توان سرعت و sign تابع علامت است. به دلیل سادگی این رابطه برای مدل‌سازی در نرم افزار و همینطور عملکرد مناسب در کاهش پاسخ‌های سازه در مقابل تحریکات لرزه‌ای، از این رابطه به طور گسترده‌ای برای مدل‌سازی میراگر ویسکوز مایع استفاده شده است. در کاربردهای لرزه‌ای از هر دو نوع میراگر با رفتار خطی ($\alpha=1$) و غیرخطی ($\alpha \neq 1$) استفاده می‌شود. در این پژوهش از میراگر ویسکوز خطی و میراگر ویسکوز غیرخطی با سطح غیر خطی بالا، $\alpha=0/3$ استفاده شده است.

¹⁵ Maxwell

¹⁶ Kelvin

¹⁷ Burgers

۳- تابع حالت حدی چندگانه

یک حالت حدی مرز بین عملکرد مطلوب و نامطلوب یک سازه است که این مرز با تابع حالت حدی یا تابع عملکرد بیان می‌شود. حالت خرابی وقتی اتفاق می‌افتد که تقاضای ناشی از بارها از ظرفیت سازه تجاوز نماید. اگر R بیانگر مقاومت سازه و S بیانگر اثر بار باشد، تابع عملکرد یا تابع حالت حدی را می‌توان به صورت رابطه (۲) تعریف کرد:

$$g = \frac{R}{S} - 1 \quad (2)$$

با توجه به رابطه فوق مرز بین عملکرد مطلوب و نامطلوب به صورت $g = 0$ تعریف می‌شود. اگر $g > 0$ سازه ایمن است (عملکرد مطلوب) و اگر $g < 0$ سازه ایمن نیست (عملکرد نامطلوب).

تعریف حالت حدی خرابی تنها بر اساس یکی از پاسخ‌های سازه ممکن است نتواند معیار مناسبی در ارزیابی عملکرد سازه باشد. زیرا سازه‌ای که بر اساس حالت حدی تعریف شده بر مبنای یک پاسخ عملکرد مطلوب دارد، ممکن است همزمان از محدوده‌ی قابل تحمل سایر پاسخ‌ها عبور نماید. بنابراین برای سازه‌ای که تحت اثر تحریکات لرزه‌ای قرار دارد مناسب‌تر است حالت حدی خرابی بر اساس ترکیب مناسبی از چند پاسخ سازه تعریف گردد. در این صورت تابع حالت حدی به صورت چند بعدی تعریف می‌شود که فرم کلی آن به صورت رابطه (۳) قابل تعریف است [۳۶-۳۷].

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

k تعداد توابع حالت حدی در نظر گرفته شده می‌باشد. حالت‌های حدی می‌تواند بر اساس پاسخ‌های مختلف سازه نظیر دریافت، شتاب مطلق، برش پایه و غیره تعریف شوند.

۴- قابلیت اعتماد سازه

ارزیابی قابلیت اعتماد سازه‌های مختلف از جمله سازه‌های مجهز شده به میراگر ویسکوز مایع را می‌توان با استفاده از روش‌های تحلیلی یا روش‌های شبیه‌سازی نظیر روش مونت کارلو انجام داد [۴۸]. روش مونت کارلو در مسائل پیچیده‌ای که تعداد متغیرهای تصادفی زیاد است، جزو روش‌های قوی و در عین حال ساده در ارزیابی قابلیت اعتماد محسوب می‌شود. این روش بر پایه تولید مجموعه‌ای از اعداد تصادفی است که احتمال خرابی مطابق رابطه (۴)، از نسبت تعداد دفعاتی که خرابی رخ داده (n) به تعداد کل مقادیر شبیه سازی شده (N) محاسبه می‌شود.

$$P_f = \frac{n}{N} \quad (4)$$

در روش مونت کارلو هر چقدر تعداد شبیه سازی‌ها بیشتر باشد دقت احتمال خرابی بدست آمده بیشتر خواهد بود، اما این موضوع از طرف دیگر باعث افزایش هزینه محاسبات خواهد شد. در چنین شرایطی می‌توان از روش نمونه‌برداری لاتین هایپر کیوب (LHS)^{۱۸} استفاده کرد که منجر به تولید تعداد نمونه‌های کمتر و در عین حال تخمین مناسبی از احتمال خرابی و قابلیت اعتماد سازه می‌شود [۴۸]. با توجه به این‌که در نرم‌افزار متلب امکان تولید نمونه تصادفی با این روش وجود دارد، در این تحقیق برای تولید نمونه‌های تصادفی از دستور مربوطه در نرم‌افزار متلب استفاده شده است. پس از تعیین احتمال خرابی، قابلیت اعتماد سازه (p_s) از رابطه (۵) بدست می‌آید.

¹⁸ Latin Hypercube Sampling (LHS)

$$P_s = 1 - P_f \quad (5)$$

با در نظر گرفتن هر یک از حالت‌های حدی مد نظر، یک تابع احتمال خرابی برای سازه قابل تعریف است. با این حال، احتمال خرابی کل سیستم سازه‌ای از ترکیب این حالت‌های حدی چندگانه تعیین می‌گردد. ارزیابی قابلیت اعتماد یک سازه وابسته است به نوع سیستم سازه‌ای که دارای اعضای موازی، سری و یا ترکیبی از این دو می‌باشد. در یک سازه با سیستم سری، خرابی زمانی رخ می‌دهد که تنها پاسخ یک عضو از آستانه قابل قبول حالت حدی، تجاوز کند. سیستم موازی نیز هنگامی خراب می‌شود که همه اعضای سیستم خراب شوند. در این مقاله ارزیابی قابلیت اعتماد قاب‌های مجهز به میراگر ویسکوز با در نظر گرفتن توابع خرابی مختلف بشرط برقراری همزمان، معادل با در نظر گرفتن سیستم سری می‌باشد که در این حالت با فرض استقلال آماری^{۱۹} میان توابع حالت‌های حدی، احتمال خرابی از رابطه (۶) تعیین می‌شود.

$$P_F = 1 - \prod_{j=1}^k (1 - P_j) \quad (6)$$

به طوریکه P_j و P_F به ترتیب احتمال خرابی کل سیستم و احتمال خرابی برای حالت حدی Z_j است. احتمال خرابی چنین سیستمی به وابستگی آماری^{۲۰} مابین توابع حالت حدی مختلف بستگی دارد بطوریکه حالت‌های حدی وابسته آماری منجر به حد پایین برای احتمال خرابی کل سیستم می‌شود، در حالی که با فرض استقلال آماری میان حالت‌های حدی، حد بالای احتمال خرابی بدست می‌آید. حد پایین و بالای احتمال خرابی یک سیستم سازه‌ای که توسط کرنل^{۲۱} پیشنهاد شده است به صورت رابطه (۷) بیان می‌شود [۴۹].

$$\max_{j=1}^k [P_j] \leq P_F \leq 1 - \prod_{j=1}^k (1 - P_j) \quad (7)$$

۵- منابع عدم قطعیت در عملکرد سازه-میراگر

در این تحقیق قابلیت اعتماد قاب‌های مجهز به میراگر ویسکوز، با اعمال عدم قطعیت در پارامترهای قاب و میراگر و همچنین در رکورد ورودی تعیین می‌شود. پارامترهای تصادفی تاثیرگذار قاب و میراگر به همراه اطلاعات آماری نظیر نوع توزیع احتمالاتی و ضریب پراکندگی هر یک از پارامترها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: خواص آماری متغیرهای تصادفی

پارامتر	نماد	(%) پراکندگی	توزیع	مرجع
جرم	M	۱۰	نرمال	[۴۸،۵۰]
مدول الاستیسیته	E	۵	نرمال	[۵۰]
نسبت سختی ثانویه	b	۵	نرمال	[۵۰]
تنش تسلیم	fy	۱۰	لگ-نرمال	[۵۱]
میرایی ذاتی	ζ	۴۰	نرمال	[۴۸،۵۲]
ضریب میرایی	c	۱۵	نرمال	[۵۳]
توان سرعت میراگر	α	۱۰	نرمال	[۵۳]

¹⁹ Statistical Independence

²⁰ Statistical Dependence

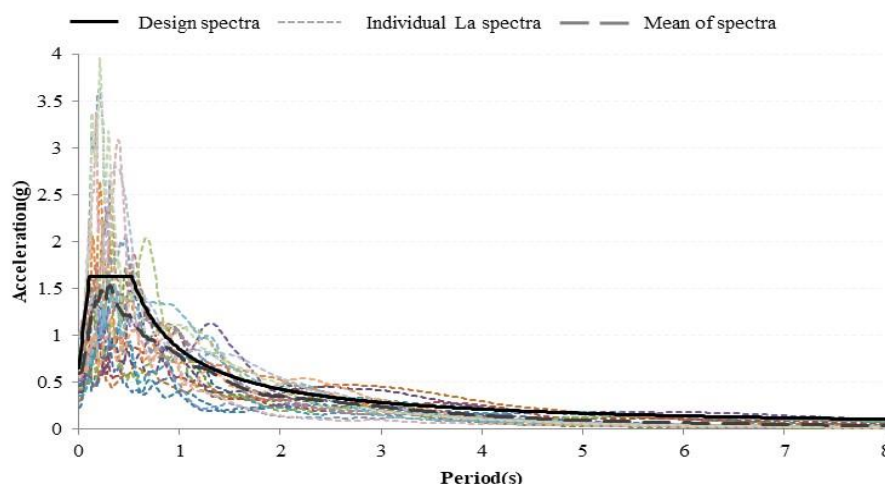
²¹ Cornell

۱-۵- انتخاب رکورد زلزله

برای لحاظ کردن اثرات عدم قطعیت ناشی از رکوردهای زلزله ورودی در تحلیل قابلیت اعتماد و ارزیابی احتمالاتی عملکرد سازه‌ها نیاز است از رکوردهایی با ویژگی‌های متفاوت جهت انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی سازه‌ها استفاده شود. با توجه به اینکه نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی سازه‌ها و در نتیجه تحلیل قابلیت اعتماد بستگی زیاد به رکوردهای انتخابی دارد، بنابراین انتخاب و مقیاس کردن شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده یکی از بخش‌های با اهمیت در فرآیند تحلیل قابلیت اعتماد سازه‌ها می‌باشد. روش‌های مختلفی برای انتخاب و مقیاس نمودن رکوردهای زلزله برای انجام تحلیل دینامیکی پیشنهاد شده است [۵۴]. در دستورالعمل FEMA-P58 [۵۵] پیشنهاد شده است که برای لحاظ اثر عدم قطعیت رکوردهای زلزله حداقل ۱۱ جفت رکورد زلزله مختلف مقیاس شده برای سطح خطر لرزه‌ای مورد نظر باید در تحلیل دینامیکی استفاده شود که این تعداد رکورد زلزله در صورت سازگار بودن شکل طیف شتاب رکوردهای انتخابی با شکل طیف طرح محل سازه مورد مطالعه، به حداقل ۷ جفت رکورد زلزله مختلف قابل کاهش می‌باشد. از آنجاییکه در این پژوهش فرض شده است که سازه مورد مطالعه در شهر لس‌آنجلس واقع شده و از مشخصات طیف طراحی منطقه لس‌آنجلس برای طراحی سازه در روش جابجایی مستقیم استفاده شده است، لذا در این مطالعه برای انجام تحلیل دینامیکی قاب‌ها از رکوردهای زلزله انتخابی در فاز دوم پروژه تحقیقاتی گروه SAC برای منطقه لس‌آنجلس استفاده شده است که شامل ۲۰ رکورد زلزله نزدیک و دورگسل می‌شوند. این رکوردها دارای محتوای فرکانسی، شدت و مدت زمان متفاوتی برای نشان دادن تغییرپذیری منبع لرزه‌ای هستند که اطلاعات مربوط به زلزله‌ها در جدول ۲ گزارش شده است. تمامی این رکوردها توسط گروه SAC انتخاب و به نحوی مقیاس شده‌اند که میانگین طیف زلزله‌ها سازگاری خوبی با طیف طراحی این منطقه داشته باشد. در شکل ۱ سازگاری مناسب میانگین طیف زلزله‌ها با طیف طراحی نشان داده شده است. اطلاعات بیشتر در خصوص نحوه انتخاب و مقیاس کردن این رکوردها توسط گروه SAC، در مرجع [۵۶] داده شده است.

جدول ۲: رکورد زلزله‌های مورد استفاده

	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 ۱: طیف پاسخ شتاب رکوردهای انتخاب شده، طیف میانگین و طیف طراحی برای میرایی بحرانی ۵ درصد

۶- مثال عددی

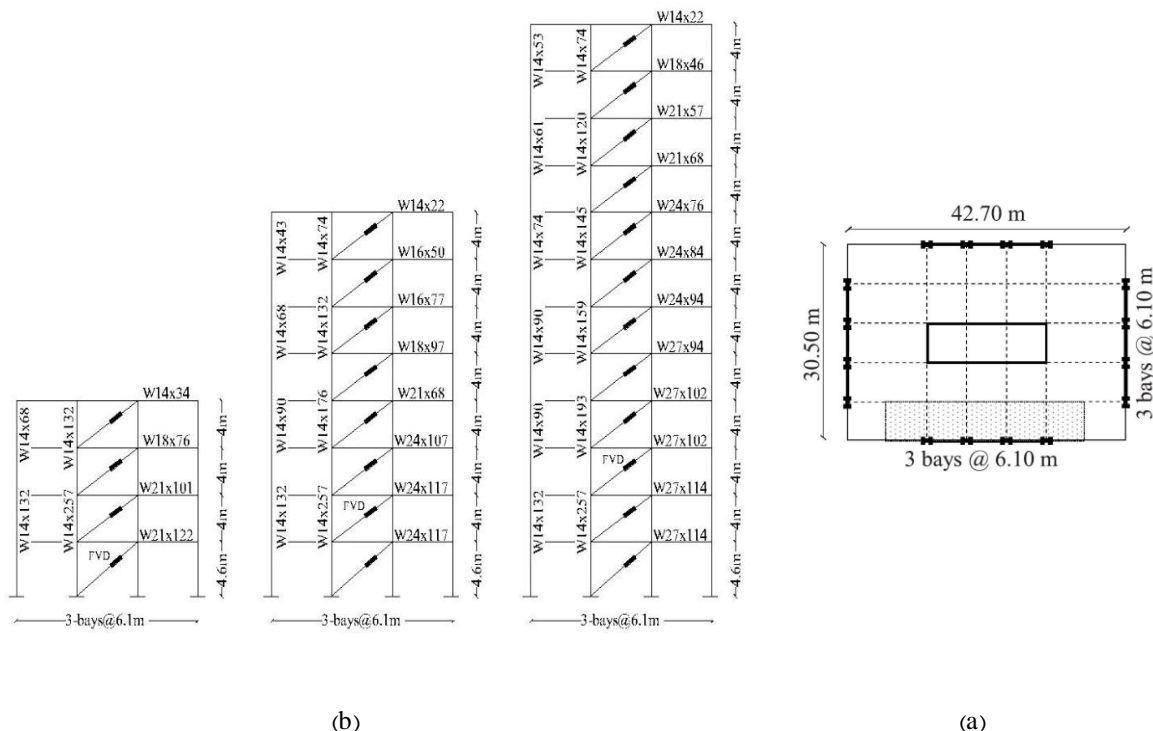
در این مطالعه برای شبیه‌سازی عددی از سه قاب خمشی ۴، ۸ و ۱۲ طبقه مجهز به میراگر ویسکوز مایع استفاده شده است که این قاب‌ها در پژوهش قبلی بر اساس روش جابجایی مستقیم طراحی شده‌اند [۲۸]. این سازه‌ها به نوعی معرف سازه‌های کوتاه مرتبه، میان مرتبه و بلند مرتبه می‌باشد تا بتوان اثر تنوع ارتفاع سازه را بصورت کلی در فرآیند ارزیابی قابلیت اعتماد مشاهده کرد. برای طراحی همزمان اعضای سازه و میراگر از روش پیشنهادی سالیوان ولاگو [۲۷] استفاده شده است. در روش طراحی جابجایی مستقیم حد دریافت طراحی متناظر با سطح عملکرد ایمنی جانی با توجه به توصیه آیین‌نامه‌ی بهسازی FEMA356 [۵۷] $\frac{2}{5}$ ٪ ارتفاع طبقه 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 ۲-a نشان داده شده است. مشخصات سازه‌های قاب‌های خمشی طراحی شده و محل قرارگیری میراگرها در شکل ۲-b ارائه شده است. فولاد مورد استفاده در اعضای سازه‌ای از نوع ASTM A992 Gr.50 با رفتار دوخطی با شیب ثانویه ۳ درصد و همچنین تنش تسلیم و مدول الاستیسیته به ترتیب برابر ۵۰ ksi و ۲۹۰۰۰ ksi می‌باشند. مشخصات بارگذاری شامل بار مرده ۹۰ psf، بار دیوار ۲۰ psf، بار زنده‌ی کاهش نیافته طبقات ۵۰ psf و بار زنده طبقه بام ۲۰ psf می‌باشد. جزئیات بیشتر در مورد مشخصات این سازه‌ها را می‌توان در مطالعات پیشین [۵۸-۵۹] مشاهده کرد. محل احداث قاب‌های مورد بررسی منطقه لوس آنجلس (Cite Class D; Coordinates 34.05°N, 118.24°W) فرض شده است.

در این مقاله، از میراگرهای خطی، $\alpha=1$ ، و غیر خطی با ضریب توان $\alpha=0.3$ استفاده شده است. برای بررسی اثر توزیع میراگر در قابلیت اعتماد سازه‌های مجهز به میراگر ویسکوز، در مثال عددی از سازه-میراگر طراحی شده با دو روش توزیع میراگرها در طبقات سازه، شامل توزیع میراگرها براساس برش طبقه^{۲۲} (SSBD) و توزیع یکنواخت^{۲۳} (UD) استفاده شده است. در این پژوهش برای توزیع میراگرها براساس برش طبقه، از روش سالیوان و لاگو [۲۷] استفاده شده است که برای طراحی میراگرها به روش عملکردی جابجایی مستقیم پیشنهاد شده است. در این روش پس از تعیین مقدار برش پایه طراحی سازه براساس هدف عملکردی مورد نظر و توزیع نیروی برش پایه در طبقات سازه، مقدار نیروی طراحی میراگر ویسکوز در هر طبقه بصورت درصدی از برش طبقه فرض می‌شود. براساس این فرض نیروی طراحی میراگر در هر طبقه محاسبه و در نتیجه ضریب میرایی آن تعیین می‌گردد. از آنجاییکه مقدار میرایی معادل که توسط میراگرها به سازه اضافه می‌شود تابعی از درصد مفروض می‌باشد بنابراین مقدار درصد مفروض براساس میزان میرایی معادل مورد انتظار میراگرها تعیین می‌شود. در روش توزیع میراگرها بصورت یکنواخت، ضریب میرایی میراگرها در تمام طبقات یکسان بوده و مقدار آن طوری تعیین می‌شود

²² Story Shear-based Distribution

²³ Uniform Distribution

تا میرایی معادل مورد انتظار میراگرها تامین شود. لازم به توضیح است که در این تحقیق در هر دو روش توزیع میراگر، مشخصات میراگرها طوری تعیین شده است که درصد میرایی معادل اضافه شده توسط میراگرها برابر ۱۵٪ باشد. برای تامین این مقدار میرایی معادل در توزیع میراگرها به روش برش طبقه، نیروی طراحی میراگرها در هر طبقه باید حدود ۳۰ درصد برش طبقه در نظر گرفته شود [۲۸]. در جداول ۳ تا ۵ مشخصات ضرایب میرایی میراگر و اسکوز برای دو روش توزیع میراگرهای خطی و غیرخطی ارائه شده است.



شکل ۲: (a) پلان قاب طراحی شده [۴۵] (b) برشی از قاب‌های طراحی شده به همراه مشخصات مقاطع و موقعیت میراگرها [۲۸]

جدول ۳: ضرایب میرایی بدست آمده برای توزیع‌های مختلف میراگرها در قاب ۴ طبقه [۲۸]

C(kN/(s/m) ^α)	α=۱		α=۰.۳	
	SSBD	UD	SSBD	UD
۱	۳۸۰۲	۳۶۱۵	۱۳۳۴	۱۰۷۷
۲	۴۰۳۳	۳۶۱۵	۱۱۹۳	۱۰۷۷
۳	۳۵۲۸	۳۶۱۵	۹۳۱	۱۰۷۷
۴	۲۲۶۶	۳۶۱۵	۵۲۲	۱۰۷۷

جدول ۴: ضرایب میرایی بدست آمده برای توزیع‌های مختلف میراگرها در قاب ۸ طبقه [۲۸]

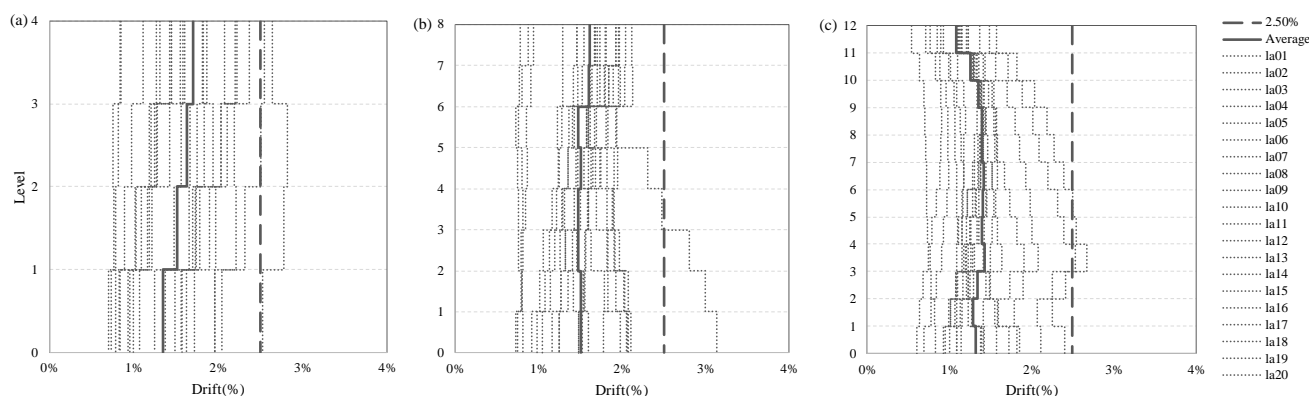
C(kN/(s/m) ^α)	α=۱		α=۰.۳	
	SSBD	UD	SSBD	UD
۱	۷۱۴۳	۶۷۷۶	۱۶۲۹	۱۲۶۷
۲	۷۷۳۹	۶۷۷۶	۱۵۷۳	۱۲۶۷
۳	۷۷۳۱	۶۷۷۶	۱۴۹۶	۱۲۶۷
۴	۷۴۶۳	۶۷۷۶	۱۳۶۹	۱۲۶۷
۵	۶۸۸۸	۶۷۷۶	۱۱۹۳	۱۲۶۷
۶	۵۹۴۳	۶۷۷۶	۹۶۷	۱۲۶۷
۷	۴۵۳۸	۶۷۷۶	۶۸۹	۱۲۶۷

۸	۲۵۴۰	۶۷۷۶	۳۵۷	۱۲۶۷
---	------	------	-----	------

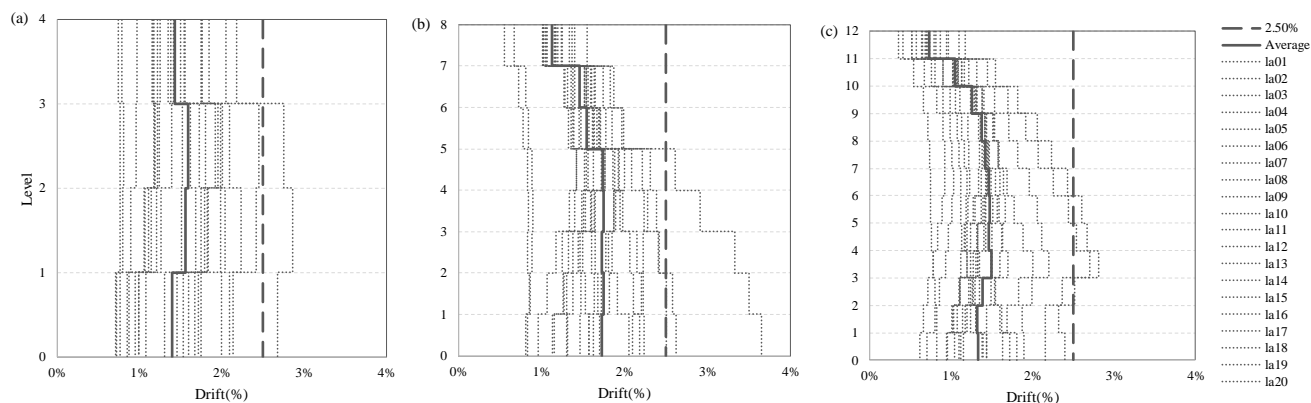
جدول ۵: ضرایب میرایی بدست آمده برای توزیع‌های مختلف میراگرها در قاب ۱۲ طبقه [۲۸]

C(kN(s/m) ^α)	α=۱		α=۰.۳	
	Level	SSBD	UD	SSBD
۱	۱۰۳۷۸	۹۸۴۹	۱۷۸۶	۱۴۷۶
۲	۱۱۲۱۸	۹۸۴۹	۱۷۵۱	۱۴۷۶
۳	۱۱۳۹۸	۹۸۴۹	۱۷۲۳	۱۴۷۶
۴	۱۱۴۴۱	۹۸۴۹	۱۶۷۴	۱۴۷۶
۵	۱۱۳۳۶	۹۸۴۹	۱۶۰۲	۱۴۷۶
۶	۱۱۰۶۴	۹۸۴۹	۱۵۰۷	۱۴۷۶
۷	۱۰۶۰۷	۹۸۴۹	۱۳۹۰	۱۴۷۶
۸	۹۹۳۹	۹۸۴۹	۱۲۵۰	۱۴۷۶
۹	۹۰۳۰	۹۸۴۹	۱۰۸۸	۱۴۷۶
۱۰	۷۸۴۱	۹۸۴۹	۹۰۲	۱۴۷۶
۱۱	۶۳۱۹	۹۸۴۹	۶۹۲	۱۴۷۶
۱۲	۴۳۹۹	۹۸۴۹	۴۵۷	۱۴۷۶

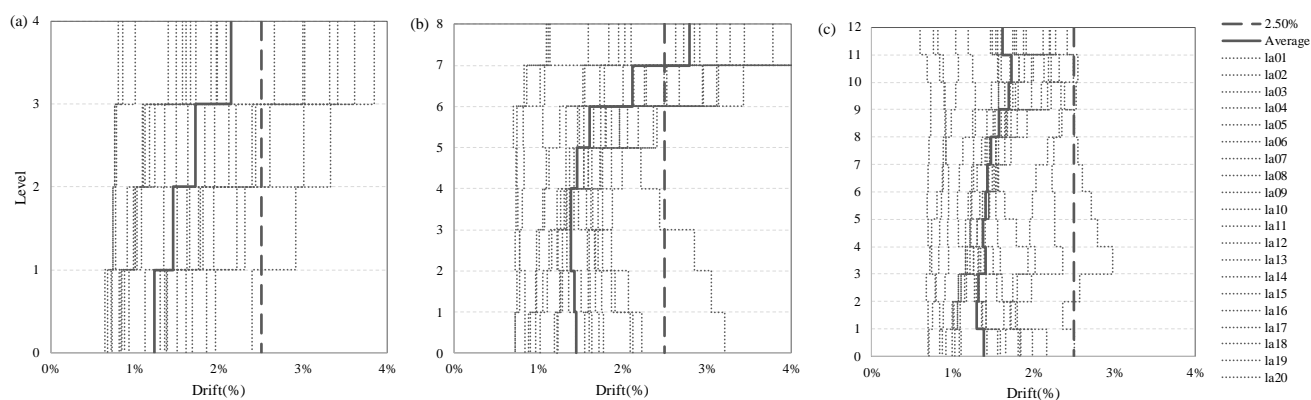
بدون اعمال عدم قطعیت در پارامترهای سازه و میراگر، قاب‌های طراحی شده با استفاده از نرم افزار Opensees [۶۰] تحت ۲۰ رکورد زلزله تحلیل دینامیکی غیرخطی شدند. حداکثر نسبت دررفت (حاصل تقسیم مقدار دررفت طبقه به ارتفاع طبقه) و شتاب کل طبقات سازه تحت رکوردهای مختلف و همچنین میانگین مقادیر فوق برای دو میراگر ویسکوز خطی و غیرخطی در شکل‌های ۳ تا ۱۰ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که پاسخ سازه تحت رکوردهای مختلف پراکندگی قابل توجهی داشته است که این موضوع در تحلیل قابلیت اعتماد لرزه‌ای سازه‌ها دارای اهمیت زیادی می‌باشد. بعنوان مثال حداکثر دررفت سازه در بازه حدود ۰/۲۶ تا ۴/۹ درصد برای قاب‌های مختلف می‌باشد. در هر سه قاب طراحی شده در اکثر حالات (بجز قاب ۸ طبقه مجهز شده به میراگر غیرخطی) مقدار حداکثر نسبت دررفت کمتر از ۲/۵٪ بوده و معیار دررفت مورد نظر در طراحی تحت رکوردهای اعمال شده ارضا شده است. همچنین بررسی شتاب کل طبقات نشان می‌دهد در اکثر حالت‌ها، حداکثر شتاب سازه‌ها تحت رکوردهای مورد بررسی در محدوده تقریبی ۰/۱g تا ۰/۶۴g می‌باشد در حالیکه حداکثر مقدار میانگین شتاب ماکزیمم برای قاب‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه به ترتیب برابر ۰/۴۸g، ۰/۴۱g و ۰/۴۰g می‌باشد.



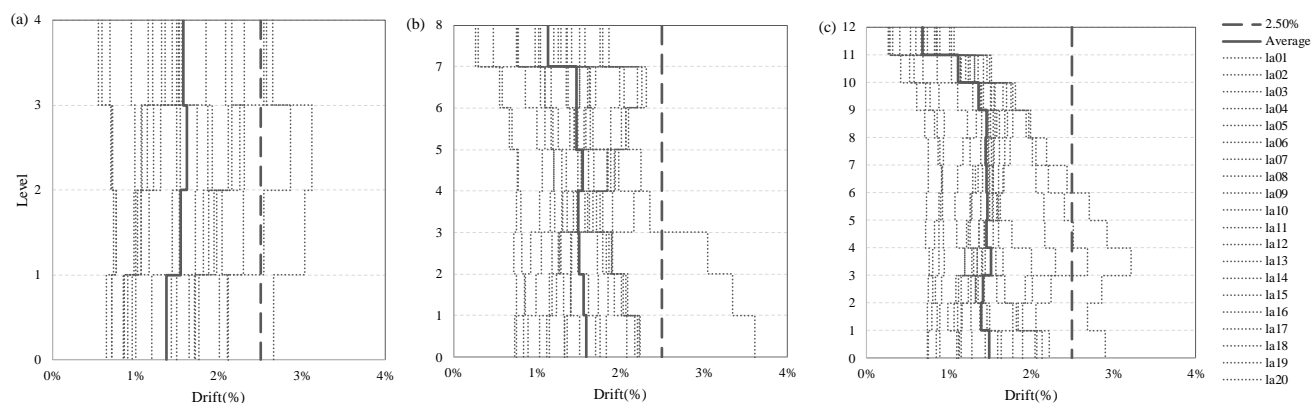
شکل ۳: پراکندگی و میانگین ماکزیمم نسبت دررفت قاب‌های (a) ۴ طبقه (b) ۸ طبقه (c) ۱۲ طبقه به ازای α=۱ در توزیع SSBD



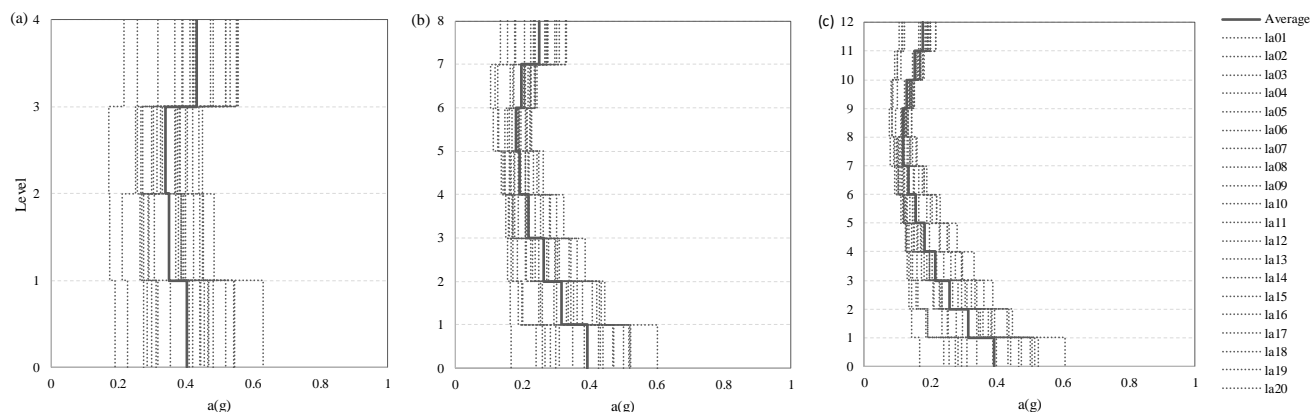
شکل ۴: پراکندگی و میانگین ماکزیمم نسبت دررفت قاب‌های (a) طبقه ۴ (b) طبقه ۸ (c) ۱۲ طبقه به ازای $\alpha=1$ در توزیع UD



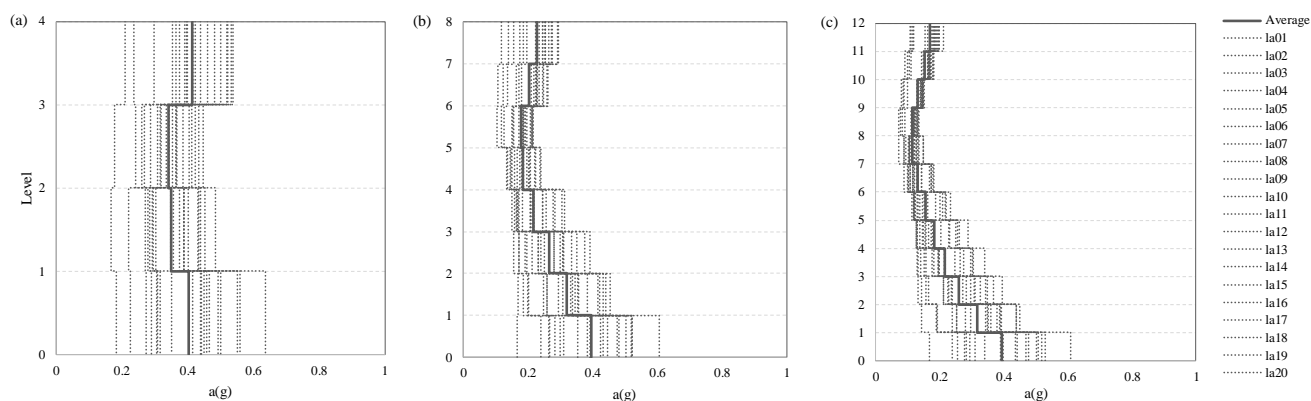
شکل ۵: پراکندگی و میانگین ماکزیمم نسبت دررفت قاب‌های (a) طبقه ۴ (b) طبقه ۸ (c) ۱۲ طبقه به ازای $\alpha=0.3$ در توزیع SSBD



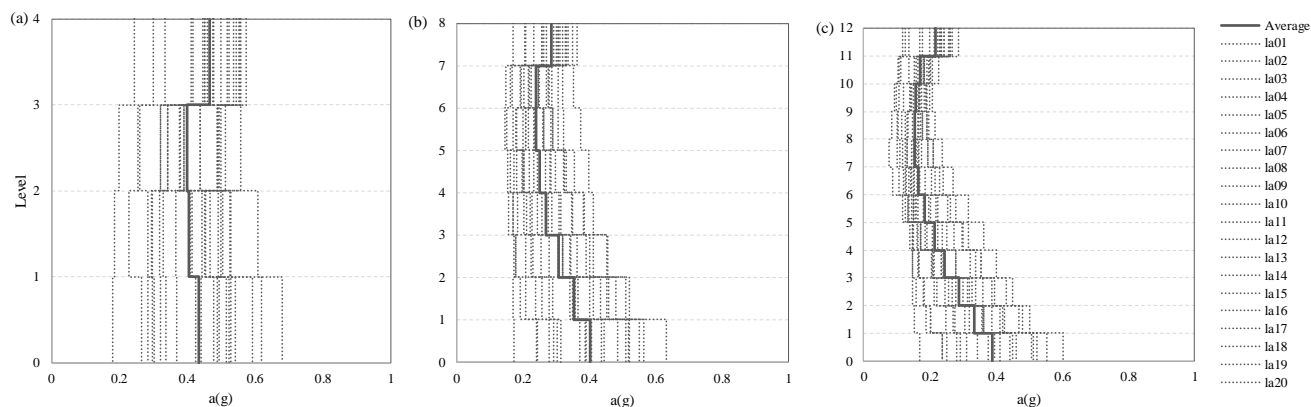
شکل ۶: پراکندگی و میانگین ماکزیمم نسبت دررفت قاب‌های (a) طبقه ۴ (b) طبقه ۸ (c) ۱۲ طبقه به ازای $\alpha=0.3$ در توزیع UD



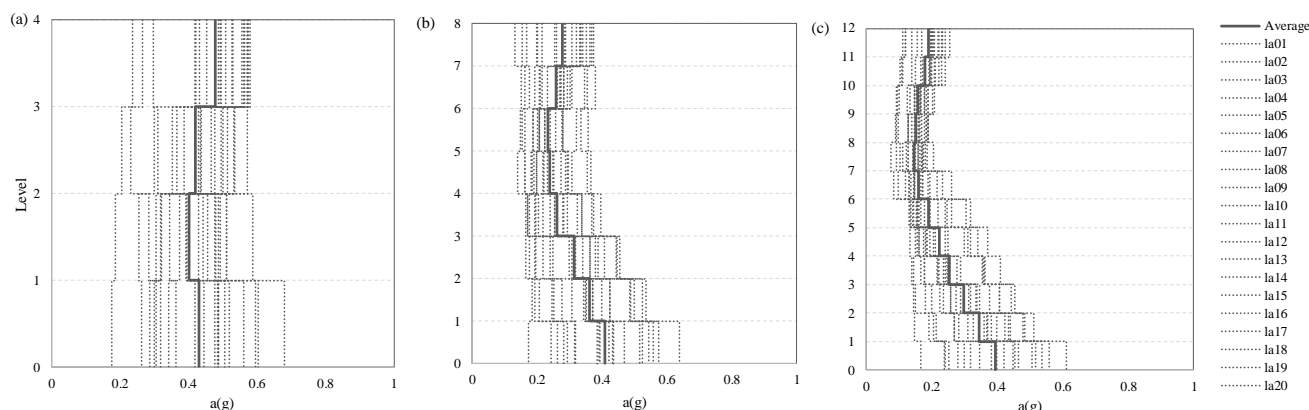
شکل ۷: پراکندگی و میانگین شتاب قاب‌های (a) ۴ طبقه (b) ۸ طبقه (c) ۱۲ طبقه به ازای $\alpha=1$ در توزیع SSBD



شکل ۸: پراکندگی و میانگین شتاب قاب‌های (a) ۴ طبقه (b) ۸ طبقه (c) ۱۲ طبقه به ازای $\alpha=1$ در توزیع UD



شکل ۹: پراکندگی و میانگین شتاب قاب‌های (a) ۴ طبقه (b) ۸ طبقه (c) ۱۲ طبقه به ازای $\alpha=0.3$ در توزیع SSBD



شکل ۱: پراکندگی و میانگین شتاب قاب‌های (a) طبقه ۴ (b) طبقه ۸ (c) طبقه ۱۲ به ازای $a=0.3$ در توزیع UD

۱-۶- تحلیل قابلیت اعتماد

با اعمال عدم قطعیت در پارامترهای تصادفی که در جدول ۱ ارائه شده است برای هر کدام از قاب‌ها، ۳۰ نمونه تصادفی با استفاده از روش لاتین هایپر کیوب تولید شدند. هر کدام از قاب‌های تصادفی تحت ۲۰ رکورد زلزله معرفی شده در جدول ۲ قرار گرفته و تحلیل دینامیکی تاریخیچه زمانی غیرخطی انجام شده است. بنابراین برای هر کدام از قاب‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه تعداد ۶۰۰ تحلیل انجام شده است. در این پژوهش برای ارزیابی قابلیت اعتماد قاب‌ها با لحاظ توابع حالت حدی مختلف و همچنین بررسی تاثیر لحاظ توابع حالت حدی چندگانه در قابلیت اعتماد سازه‌ها، به عنوان نمونه از توابع حالت حدی براساس معیارهای عملکردی توصیه شده در Hazus-MH [۶۱] استفاده شده است. در این دستورالعمل سه معیار عملکردی شامل نسبت دریافت میان طبقه‌ای برای سیستم سازه‌ای^{۲۴} (SS)، نسبت دریافت میان طبقه‌ای برای اعضای غیرسازه‌ای حساس به دریافت^{۲۵} (NSD) و شتاب مطلق سازه برای اعضای غیرسازه‌ای حساس به شتاب^{۲۶} (NSA) را برای چهار سطوح عملکردی با عناوین خرابی خفیف^{۲۷}، ملایم^{۲۸}، وسیع^{۲۹} و کامل^{۳۰} معرفی شده است. در جدول ۶ مقادیر حدی ارائه شده در این دستورالعمل برای سطوح مختلف ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل‌های ۳ تا ۶ مشخص است که برای حالت حدی نسبت دریافت، تحت رکوردهای مورد بررسی سطح عملکردی خرابی خفیف برقرار نمی‌شود، بنابراین نیازی به بررسی این سطح عملکردی نمی‌باشد. همچنین با توجه به اینکه سازه مورد نظر برای سطح عملکرد ایمنی جانی طراحی شده بود پیش بینی می‌شود احتمال خرابی برای سطح عملکرد خرابی کامل خیلی پایین باشد و ضرورتی برای بررسی وجود ندارد. بنابراین در این تحقیق برای دو سطح خرابی ملایم و وسیع، برای توابع حالت حدی SS، NSD و NSA به دو صورت تنها و چندگانه به بررسی احتمال خرابی پرداخته شده است. برای تابع حالت حدی مرتبط با SS یا NSD، با توجه به اینکه هر دو معیار براساس دریافت طبقه تعریف شده‌اند بنابراین این پیشامدها مستقل نبوده و در تعیین احتمال خرابی از بین این دو معیار، با توجه به مقادیر حدی ارائه شده در جدول ۶ معیار مربوط به SS کنترل کننده می‌باشد. بنابراین در تعیین احتمال خرابی کل، برای احتمال خرابی مرتبط با دریافت از مقدار بدست آمده براساس این معیار استفاده شده است. بدیهی است در موارد مرتبط با بررسی آسیب اجزای غیرسازه‌ای و سازه‌ای بایستی احتمال خرابی هر کدام جداگانه براساس مقدار حدی مورد نظر محاسبه شود.

در این تحقیق تحلیل قابلیت اعتماد سازه با توابع حدی چندگانه شامل دو مرحله است:

- ۱) تحلیل قابلیت اعتماد با تابع حدی تک. احتمال خرابی سازه به ازای تابع حالت حدی مختلف نظیر نسبت دریافت و شتاب با استفاده از روش مونت کارلو طبق رابطه (۴) تعیین می‌شود.

²⁴ - Structural System (SS)

²⁵ - Non-structural Drift-sensitive (NSD)

²⁶ - Non-structural Acceleration-sensitive (NSA)

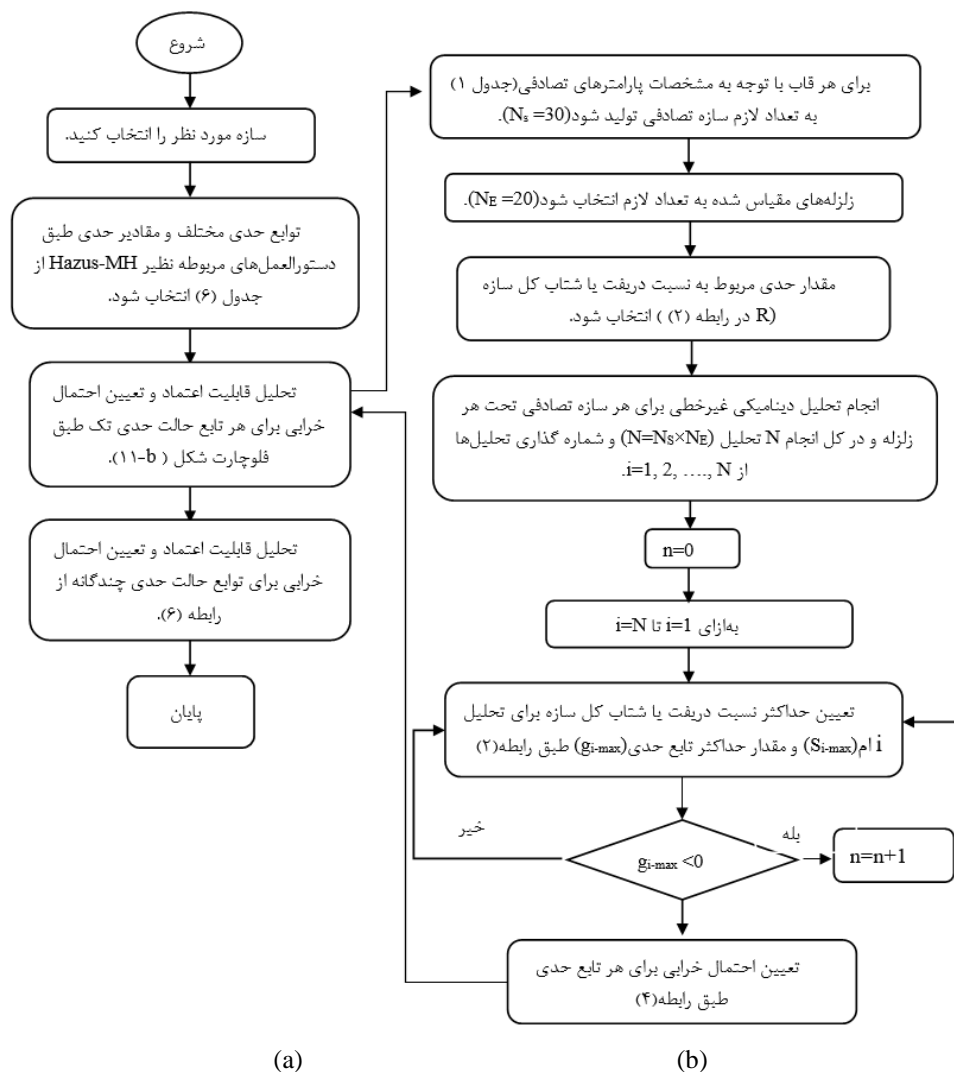
²⁷ - Slight

²⁸ - Moderate

²⁹ - Extensive

³⁰ - Complete

۲. تحلیل قابلیت اعتماد با توابع حدی چندگانه. برای تعیین احتمال خرابی براساس حالت حدی چندگانه، پس از تعیین احتمال خرابی برای هر تابع حدی تک مطابق توضیحات مرحله (۱)، احتمال خرابی ترکیبی برای توابع حالت حدی چندگانه، با استفاده از رابطه (۶) تعیین می‌شود. در شکل ۱۱ فلوجارت مراحل انجام کار (شامل مراحل ۱ و ۲) که نشان‌دهنده روند کلی مقاله می‌باشد، نشان داده شده است.



شکل ۱۱: فلوجارت (a) مسیر کلی تحلیل قابلیت اعتماد با توابع حالت حدی چندگانه، (b) تحلیل قابلیت اعتماد برای تابع حالت حدی تک

در جداول ۷ تا ۹ احتمال خرابی قاب‌های مختلف برای حالت حدی تک شامل حالت حدی نسبت دریافت برای اجزای سازه-ای (P_{ass}) و غیرسازه‌ای (P_{ansd}) و حالت حدی شتاب مطلق (P_a) و همچنین احتمال خرابی برای توابع حدی چندگانه ($P_{ass,a}$) برای دو نوع میراگر ویسکوز خطی و غیرخطی با توزیع یکنواخت و توزیع براساس برش طبقه میراگرها ارائه شده است.

جدول ۶: حدود عملکردی مورد استفاده [۶۱]

معیار عملکردی	مقادیر حدی سطوح عملکردی			
	کامل	وسیع	ملایم	خفیف
	Complete	Extensive	Moderate	Slight
SS(%)	۴	۱/۵	۰/۶	۰/۳
NSD(%)	۵	۲/۵	۰/۸	۰/۴
NSA(g)	۲/۴	۱/۲	۰/۶	۰/۳

جدول ۷: احتمال خرابی قاب ۴ طبقه برای توابع حالت حدی مختلف

	α	SSBD		UD	
		۰/۳	۱	۰/۳	۱
Moderate	$P_{dNSD}(\%)$	۹۷	۹۸/۷	۸۶/۲	۹۴/۸
	$P_{dSS}(\%)$	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
	$P_a(\%)$	۱۱/۷	۵	۱۱/۷	۵
	$P_{dSS,a}(\%)$	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
Extensive	$P_{dNSD}(\%)$	۳۴/۸	۱۰/۳	۱۴	۶/۵
	$P_{dSS}(\%)$	۷۳/۵	۶۳	۵۹	۵۳
	$P_a(\%)$	۰	۰	۰	۰
	$P_{dSS,a}(\%)$	۷۳/۵	۶۳	۵۹	۵۳

جدول ۸: احتمال خرابی قاب ۸ طبقه برای توابع حالت حدی مختلف

	α	SSBD		UD	
		۰/۳	۱	۰/۳	۱
Moderate	$P_{dNSD}(\%)$	۱۰۰	۹۹/۳	۹۵/۲	۹۹/۳
	$P_{dSS}(\%)$	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
	$P_a(\%)$	۵/۳	۳/۵	۷/۲	۴/۲
	$P_{dSS,a}(\%)$	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
Extensive	$P_{dNSD}(\%)$	۵۷/۷	۵/۲	۶/۷	۵/۲
	$P_{dSS}(\%)$	۸۶/۸	۷۲/۷	۶۴/۳	۶۵/۲
	$P_a(\%)$	۰	۰	۰	۰
	$P_{dSS,a}(\%)$	۸۶/۸	۷۲/۷	۶۴/۳	۶۵/۲

جدول ۹: احتمال خرابی قاب ۱۲ طبقه برای توابع حالت حدی مختلف

	α	SSBD		UD	
		۰/۳	۱	۰/۳	۱
Moderate	$P_{dNSD}(\%)$	۹۵/۲	۹۹/۸	۹۹/۸	۱۰۰
	$P_{dSS}(\%)$	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
	$P_a(\%)$	۲/۵	۵	۴/۳	۵
	$P_{dSS,a}(\%)$	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
Extensive	$P_{dNSD}(\%)$	۱۴/۳	۷/۷	۹/۵	۹/۳
	$P_{dSS}(\%)$	۷۴/۲	۴۷/۸	۷۲/۵	۵۱
	$P_a(\%)$	۰	۰	۰	۰
	$P_{dSS,a}(\%)$	۷۴/۲	۴۷/۸	۷۲/۵	۵۱

با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که در سطح عملکرد وسیع که حد نسبت دریافت سازه‌ای، غیر سازه‌ای و حد شتاب مطلق به ترتیب، ۱/۵، ۲/۵ درصد و ۱/۲g پیشنهاد شده است، شتاب مطلق در هیچ یک از قاب‌ها از مقدار حدی پیشنهادی عبور نکرده است. در نتیجه احتمال خرابی صفر برای حالت حدی شتاب مطلق بدست آمده است، به همین دلیل در تعیین احتمال خرابی چندگانه که با تاثیر احتمال خرابی برحسب تابع خرابی نسبت دریافت و شتاب مطلق محاسبه می‌شود تنها احتمال خرابی نسبت دریافت موثر واقع شده است. این نتیجه‌گیری براساس پاسخ شتاب سازه تحت رکوردهای مختلف که در شکل‌های ۷ تا ۱۰ نشان داده شده است، قابل پیش‌بینی بود. مقادیر بدست آمده نشان می‌دهد که پاسخ شتاب سازه تحت همه رکوردها فاصله قابل توجهی با مقدار حال حدی شتاب، ۱/۲g، دارد، بنابراین با اعمال اثر عدم قطعیت پارامترهای سازه و میراگر هم شتاب سازه به محدوده مقدار حدی نخواهد رسید. همچنین بررسی مقادیر

احتمال خرابی بدست آمده براساس حالت حدی دریافت برای دو مقدار حدی مربوط به اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای نشان می‌دهد که احتمال خرابی اجزای سازه‌ای در مقایسه با اجزای غیرسازه‌ای بیشتر است که این نتیجه با توجه به مقادیر حدی ارایه شده در جدول ۶ قابل پیش‌بینی بود. مقادیر بدست آمده برای احتمال خرابی مرتبط با حالت حدی اجزای سازه‌ای در محدوده ۵۱٪ تا ۸۶/۸٪ بوده که مقداری قابل ملاحظه می‌باشد. بنابراین سازه طراحی شده برای مقدار حدی نسبت دریافت ۲/۵ درصد در برآورده ساختن سطح عملکرد با مقادیر حدی پایین، ۱/۵ درصد در سطح عملکرد وسیع، زیاد موفق نبوده که دور از انتظار هم نمی‌باشد.

در سطح عملکرد ملایم نیز نتایج نشان می‌دهد احتمال خرابی بدست آمده بر اساس حالت حدی نسبت دریافت بسیار بالاست بطوری‌که در اکثر موارد مقدار به ۱۰٪ نیز رسیده است. در مقابل بیشترین احتمال خرابی مربوط به معیار شتاب مطلق مربوط به قاب ۴ طبقه با مقدار ۱۱/۷ درصد است. این نتیجه البته دور از انتظار هم نیست چرا که قاب‌های مورد بررسی با استفاده از روش جابجایی مستقیم و برای حد دریافت ۲/۵ درصد طراحی شده‌اند و براساس نتایج ارایه شده در شکل‌های ۳ تا ۶ مشخص است که تحت رکوردهای مختلف هر ۳ قاب بجز در چند مورد نسبت دریافت بالاتری در مقایسه با مقادیر حدی ۰/۸ و ۰/۶ درصد را تجربه می‌کنند. بنابراین برآورده شدن معیار سطح عملکردی ملایم با احتمال خرابی قابل قبول در سازه‌ای که براساس معیار سطح عملکردی ایمنی جانی (حد دریافت ۲/۵ درصد) طراحی شده است، دور از انتظار است. در این سطح عملکرد هم با توجه به مقدار بالای P_{ass} و مقدار پایین P_a ، مقدار احتمال خرابی چندگانه تفاوت قابل ملاحظه‌ای نسبت به مقدار احتمال خرابی بدست آمده برای حالت حدی فقط دریافت مشاهده نمی‌شود. بنابراین با توجه به نتایج تحلیل عددی می‌توان گفت که برای مقادیر حدی ارایه شده در جدول ۶ برای حالت حدی مختلف، دخالت دادن تابع حالت حدی شتاب و تعریف تابع خرابی چندگانه تاثیری در احتمال خرابی سازه نداشته و استفاده از تابع حالت حدی دریافت کافی می‌باشد.

۱-۶- تحلیل قابلیت اعتماد به ازای مقادیر حدی مختلف برای شتاب سازه

باتوجه به نتایج بدست آمده براساس مقادیر حدی سطوح عملکردی ملایم و وسیع می‌توان گفت که برای مقادیر حدی شتاب مربوط به این دو سطح عملکرد، اثر لحاظ حالت حدی شتاب در مقایسه با دریافت قابل توجه نبوده و انتظار آن است برای مقادیر حدی پایین شتاب اثر در نظرگرفتن تابع حدی چندگانه نسبت به توابع حدی تنها قابل ملاحظه خواهد شد که این موضوع برای سازه‌های حساس به شتاب قابل بررسی می‌باشد. در این قسمت برای درک بهتر تاثیر تابع حدی چندگانه در احتمال خرابی قاب-میراگرهای طراحی شده، برای مقادیر حدی مختلف شتاب سازه، احتمال خرابی تنها و چندگانه تعیین می‌شود تا بتوان به نحوه تاثیرگذاری تابع حدی مختلف در احتمال خرابی کل دست پیدا کرد. برای تحلیل عددی، مقدار حدی نسبت دریافت ۲/۵٪ انتخاب شده است که سازگار با حد دریافت طراحی قاب‌ها نیز می‌باشد و انتظار بر آن است که سازه‌ها بتوانند با احتمال خرابی قابل قبولی این معیار را برآورده سازند استفاده شده است. همچنین برای مقدار حدی شتاب، با توجه به مقادیر پاسخ شتاب سازه تحت رکوردهای مختلف مقادیر حدی $a_{L1}=0/3g$ تا $a_{L1}=0/6g$ انتخاب شده است تا بتوان به حساسیت خرابی سازه نسبت به معیار شتاب پی برد. نتایج این بررسی در جداول ۱۰ تا ۱۲ گزارش شده است. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان گفت که:

(۱) براساس حالت حدی فقط نسبت دریافت ۲/۵٪ (در جداول به اختصار با P_d نشان داده شده است) که همان مقدار حدی طراحی سازه-میراگر هم بوده، احتمال خرابی بدست آمده برای قاب‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه در محدوده‌ی ۵/۲ درصد تا ۵۷/۷ درصد می‌باشد که مقادیر بالاتر برای قاب‌های مجهز به میراگر غیرخطی است. این مقادیر نشان می‌دهد که در اکثر موارد (بجز قاب‌های ۴ و ۸ طبقه با میراگر غیرخطی) احتمال خرابی بالا نبوده و می‌توان گفت که در حد قابل قبولی می‌باشد. بنابراین با اعمال اثر عدم قطعیت‌های مختلف، سازه عملکرد مورد انتظار در طراحی را با سطح اطمینان خوبی برآورده کرده است. در دو مورد مربوط به قاب با میراگر غیرخطی احتمال خرابی بالا مربوط به طراحی میراگر می‌باشد که در قسمت بعدی به آن اشاره شده است.

(۲) همانطوریکه انتظار می‌رود با کاهش مقدار حدی شتاب احتمال خرابی بر مبنای این تابع خرابی زیادتر می‌شود بطوریکه به‌ازای مقدار حدی $0/6g$ احتمال خرابی براساس حالت حدی فقط شتاب برای ۳ قاب مورد مطالعه در بازه‌ی ۲/۵ تا ۱۱/۷ درصد بوده که مقادیر پایینی می‌باشد. در حالیکه برای مقدار حدی $0/3g$ ، این مقدار در بازه‌ی ۶۶/۳ تا ۹۵/۲ درصد می‌باشد. بنابراین برای مقادیر پایین مقدار حدی

شتاب، احتمال خرابی بدست آمده برای حالت حدی شتاب بالا و حتی از مقادیر بدست آمده برای حالت حدی دریافت بیشتر بوده و برای سازه‌های حساس به شتاب مقدار قابل قبولی نمی‌باشد.

جدول ۱۰: احتمال خرابی قاب ۴ طبقه برای توابع حالت حدی مختلف

	SSBD						UD					
	$\alpha=0.3$			$\alpha=1$			$\alpha=0.3$			$\alpha=1$		
	$P_a(\%)$	$P_d(\%)$	$P_{d,a}(\%)$	$P_a(\%)$	$P_d(\%)$	$P_{d,a}(\%)$	$P_a(\%)$	$P_d(\%)$	$P_{d,a}(\%)$	$P_a(\%)$	$P_d(\%)$	$P_{d,a}(\%)$
$a_L=0.6g$	۱۱/۷		۴۲/۴	۵		۱۴/۸	۱۱/۷		۲۴	۵		۱۱/۲
$a_L=0.5g$	۶۱/۳		۷۴/۷	۵۰/۵		۵۵/۶	۶۲/۳		۶۷/۵	۴۰		۴۳/۹
$a_L=0.4g$	۸۴/۳	۳۴/۸	۸۹/۸	۷۲/۵	۱۰/۳	۷۵/۳	۸۳/۵	۱۴	۸۵/۸	۶۹/۵	۶/۵	۷۱/۵
$a_L=0.3g$	۹۲/۷		۹۵/۲	۹۱/۸		۹۲/۷	۹۴/۵		۹۵/۳	۹۳/۵		۹۳/۹

جدول ۱۱: احتمال خرابی قاب ۸ طبقه برای توابع حالت حدی مختلف

	SSBD						UD					
	$\alpha=0.3$			$\alpha=1$			$\alpha=0.3$			$\alpha=1$		
	$P_a(\%)$	$P_d(\%)$	$P_{d,a}(\%)$	$P_a(\%)$	$P_d(\%)$	$P_{d,a}(\%)$	$P_a(\%)$	$P_d(\%)$	$P_{d,a}(\%)$	$P_a(\%)$	$P_d(\%)$	$P_{d,a}(\%)$
$a_L=0.6g$	۵/۳		۶۰	۳/۵		۸/۳	۷/۲		۱۳/۴	۴/۲		۹/۲
$a_L=0.5g$	۲۸/۵		۶۹/۸	۲۱/۸۳		۲۴/۸	۲۹/۵		۳۴/۲	۲۳/۸		۲۷/۸
$a_L=0.4g$	۵۱/۷	۵۷/۷	۷۹/۶	۵۰	۵/۲	۵۰/۱	۵۳/۲	۶/۷	۵۶/۳	۵۰	۵/۲	۵۲/۶
$a_L=0.3g$	۷۵/۵		۸۹/۶	۷۳/۸۳		۷۱/۴	۸۰/۷		۸۲	۷۱/۸		۷۳/۳

جدول ۱۲: احتمال خرابی قاب ۱۲ طبقه برای توابع حالت حدی مختلف

	SSBD						UD					
	$\alpha=0.3$			$\alpha=1$			$\alpha=0.3$			$\alpha=1$		
	$P_a(\%)$	$P_d(\%)$	$P_{d,a}(\%)$	$P_a(\%)$	$P_d(\%)$	$P_{d,a}(\%)$	$P_a(\%)$	$P_d(\%)$	$P_{d,a}(\%)$	$P_a(\%)$	$P_d(\%)$	$P_{d,a}(\%)$
$a_L=0.6g$	۲/۵		۱۶/۴	۵		۱۲/۳	۴/۳		۱۳/۴	۵		۱۳/۸
$a_L=0.5g$	۲۱/۳		۳۲/۶	۲۱		۲۷/۱	۲۴/۲		۳۱/۴	۲۱/۵		۲۸/۸
$a_L=0.4g$	۴۸/۳	۱۴/۳	۵۵/۷	۵۰/۵	۷/۷	۵۴/۳	۵۱/۳	۹/۵	۵۶	۵۰/۳	۹/۳	۵۵
$a_L=0.3g$	۶۶/۳		۷۱/۱	۷۰/۱۷		۷۲/۵	۷۱/۵		۷۴/۲	۷۰/۲		۷۲/۹

(۳) با کاهش مقدار حدی شتاب اثر لحاظ شتاب در مقدار احتمال خرابی بر مبنای تابع خرابی چندگانه بیشتر می‌شود. به ازای مقدار حدی $0.6g$ ، حداکثر مقدار اختلاف بین P_d و $P_{d,a}$ برای قاب‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه مورد مطالعه به ترتیب ۱۰، ۶/۷ و ۴/۶ درصد بوده است، در حالیکه برای مقدار حدی $0.3g$ ، مقدار اختلاف به ترتیب ۸۷/۴، ۷۵/۳ و ۶۴/۸ درصد می‌باشد. نتایج عددی نشان می‌دهد که علیرغم اینکه برای مقادیر بالای حدی شتاب تغییر در احتمال خرابی بین تابع حدی تنها و چندگانه زیاد نبوده است، برای مقادیر پایین حدی شتاب اختلاف بین دو حالت حدی تنها و چندگانه زیاد بوده و عملاً تابع حدی شتاب تعیین کننده خرابی سیستم می‌باشد. بنابراین در سازه‌های حساس به شتاب که مقدار حدی شتاب پایینی را نیاز دارد، تعیین احتمال خرابی بر مبنای تابع خرابی چندگانه امری اجتناب ناپذیر می‌باشد.

۲-۱-۶- تاثیر مشخصات میراگر در قابلیت اعتماد قاب‌ها

همانطوریکه در بخش اول مثال عددی توضیح داده شده است در قاب‌های مجهز به میراگر ویسکوز برای هر دو میراگر خطی و غیرخطی و هر دو توزیع براساس برش طبقه و یکنواخت، قاب و میراگر طوری طرح شده‌اند که معیار طراحی یکسان برای تمام حالت‌ها (در این مثال برقراری نسبت دریافت ۲/۵ درصد) برقرار شود، گرچه نتایج حاصل از طراحی نشان می‌دهد قاب‌ها و میراگرها دارای مشخصات متفاوتی هستند. بررسی مقادیر بدست آمده برای احتمال خرابی قاب‌ها برای توابع حدی مختلف نشان می‌دهد که عملکرد قاب-میراگرها به لحاظ شاخص قابلیت اعتماد متفاوت می‌باشد. بطوری‌که در قاب‌های مورد بررسی در اکثر موارد مقدار احتمال خرابی براساس تابع حدی تک نسبت دریافت و شتاب و در نتیجه تابع خرابی چندگانه در قاب‌های مجهز به میراگر خطی کمتر از قاب‌های مجهز به میراگر غیر خطی است (بجز قاب ۱۲ طبقه که احتمال خرابی بر مبنای حالت حدی شتاب مطلق به مقدار جزئی در قاب مجهز به میراگر خطی بیشتر از قاب مجهز به میراگر غیرخطی بدست آمده است) که مقدار اختلاف برای توزیع براساس برش طبقه بخصوص برای حالت حدی دریافت قابل توجه می‌باشد. به‌عنوان مثال مقدار احتمال خرابی در براساس برش طبقه برای قاب‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه مجهز به میراگر ویسکوز خطی بر مبنای حالت حدی دریافت ۲/۵٪ طبق نتایج ارایه شده در جداول ۱۰ تا ۱۲ به ترتیب ۱۰/۳، ۵/۲ و ۷/۷ درصد بوده در حالی‌که این مقدار برای قاب‌های مجهز به میراگر ویسکوز غیرخطی به ترتیب ۳۴/۸، ۵۷/۷ و ۱۴/۳ درصد می‌باشد. لازم به توضیح است که مقدار اختلاف در احتمال خرابی بین میراگر ویسکوز خطی و غیرخطی در توزیع یکنواخت در مقایسه با برش طبقه به مراتب کمتر است. در رابطه با علت افزایش احتمال خرابی در قاب‌های مجهز به میراگر غیرخطی در براساس برش طبقه لازم به ذکر است، در روش طراحی جابجایی مستقیم، برای تامین یک مقدار میرایی معادل مفروض استفاده از میراگرهای غیرخطی در طراحی سازه-میراگر، مطابق جداول ۳ تا ۵ منجر به استفاده از میراگرهایی با ظرفیت نیرویی پایین می‌شود. همانطوری که در شکل ۵ نیز نشان داده شده، این خروجی برای ظرفیت میراگرها در طراحی باعث می‌شود تا میانگین ماکزیمم نسبت دریافت در قاب‌های مجهز به میراگر ویسکوز غیرخطی بخصوص در قاب ۸ و سپس قاب ۴ طبقه‌ی مجهز به میراگر غیرخطی در توزیع مبتنی بر برش طبقه در مقایسه با سایر حالت‌ها افزایش داشته است. بنابراین قابل پیش بینی است که احتمال خرابی برای حالت حدی نسبت دریافت در این حالت بالاتر باشد. این موضوع به لحاظ اقتصادی در طراحی براساس پارامترهای قطعی دارای اولویت بوده [۲۸]، ولی در تحلیل قابلیت اعتماد سیستم دارای عملکرد پایین‌تری در مقایسه با میراگرهای خطی می‌شود. لازم به یادآوری است که در ارزیابی اقتصادی و مقایسه نتایج طراحی، مقایسه صرفاً ضریب میرایی میراگرهای خطی و غیرخطی در نتایج طراحی بدلیل داشتن واحد مختلف مناسب نمی‌باشد و باید ظرفیت نیرویی میراگرها مقایسه شوند.

مقایسه احتمال خرابی قاب‌های مجهز به میراگر ویسکوز با توزیع یکنواخت و توزیع مبتنی بر برش طبقه نشان می‌دهد که در قاب‌های مجهز به میراگر ویسکوز خطی تفاوت معناداری بین دو توزیع مشاهده نمی‌شود، در حالیکه در قاب‌های مجهز به میراگر ویسکوز غیرخطی در اکثر حالات نتایج نشان‌دهنده عملکرد بهتر توزیع یکنواخت بخصوص برای تابع حدی دریافت و در نتیجه تابع حدی چندگانه با توزیع یکنواخت می‌باشد. به‌عنوان مثال، در قاب‌های ۴ و ۸ طبقه مجهز به میراگر غیرخطی در توزیع مبتنی بر برش طبقه همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود نسبت دریافت نزدیک و حتی در برخی موارد بیش از حد دریافت طراحی می‌باشد، بنابراین احتمال خرابی بر مبنای تابع حدی دریافت ۲/۵٪ طبق جداول ۱۰ و ۱۱ به ترتیب به ۳۴/۸٪ و ۵۷/۷٪ می‌رسد در حالیکه با تغییر توزیع میراگر مقدار احتمال خرابی تا حد قابل توجهی کاهش پیدا کرده و با توزیع یکنواخت به ترتیب به ۱۴٪ و ۶/۷٪ می‌رسد. لازم به توضیح است که این موضوع مربوط به ظرفیت نیرویی پایین میراگرهای غیرخطی در مرحله طراحی می‌باشد که در قسمت قبل شرح داده شده است.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله به ارزیابی احتمال خرابی و قابلیت اعتماد سازه‌های مجهز به میراگرهای ویسکوز با اعمال عدم قطعیت در پارامترهای قاب، میراگر و رکورد زلزله ورودی و بر مبنای توابع حدی چندگانه پرداخته شده است. توابع حدی تنها و چندگانه مورد استفاده براساس نسبت دریافت و شتاب سازه تعریف شده است. برای تحلیل عددی، قاب‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه مجهز به میراگر ویسکوز خطی و غیرخطی که براساس روش جابجایی مستقیم طرح شده‌اند در نظر گرفته شده و برای هر یک از قاب‌ها ۳۰ نمونه تصادفی به روش نمونه‌گیری لاتین

هایپر کیوب تولید شدند. هر یک از قاب‌های تصادفی تولید شده، تحت ۲۰ رکورد زلزله پروژه SAC در منطقه لس‌آنجلس قرار گرفته و تحلیل دینامیکی غیرخطی انجام شد. براساس یافته‌های حاصل از تحلیل عددی می‌توان به نتایج زیر اشاره کرد:

۱. در قاب‌های مورد نظر که براساس معیار نسبت دررفت ۲/۵ درصد طراحی شده‌اند با اعمال اثر عدم قطعیت‌های مختلف مشاهده می‌شود که احتمال خرابی بر مبنای تابع حدی تک مرتبط با همین معیار، در اکثر موارد پایین بوده و سازه عملکرد مورد انتظار در طراحی را با سطح اطمینان خوبی برآورده کرده است.

۲. در قاب‌های مورد بررسی مشاهده می‌شود که احتمال خرابی سازه بر مبنای تابع حدی فقط شتاب برای دامنه گسترده‌ای از مقدار حدی شتاب قابل ملاحظه نبوده است. به‌عنوان مثال تا مقدار حدی شتاب برابر $0.16g$ که مقدار حدی نسبتاً پایینی براساس دستورالعمل‌های لرزه-ای می‌باشد، در قاب‌های مختلف قابلیت اعتماد در بازه $0.88/3$ تا $0.97/5$ درصد بوده است.

۳. استفاده از توابع حدی چندگانه می‌تواند احتمال خرابی سیستم را در مقایسه با تابع حدی تنها افزایش دهد که مقدار افزایش وابسته به مقادیر حدی در توابع حدی مورد نظر دارد. در قاب‌های مورد بررسی در نظر گرفتن همزمان توابع حدی تعریف شده برحسب نسبت دررفت و شتاب سازه نشان می‌دهد که تاثیر لحاظ تابع حدی شتاب با مقدار حدی پایین در احتمال خرابی قابل ملاحظه می‌باشد. به‌عنوان مثال در قاب‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه مورد مطالعه، به‌ازای مقدار حدی شتاب برابر با $0.16g$ ، حداکثر مقدار اختلاف بین احتمال خرابی براساس تابع حدی چندگانه شتاب و دررفت و تابع حدی فقط دررفت به ترتیب 0.10 ، $0.06/7$ و $0.04/6$ درصد بوده است، در حالیکه برای مقدار حدی شتاب برابر با $0.3/3g$ ، مقدار اختلاف به ترتیب $0.87/4$ ، $0.75/3$ و $0.64/8$ درصد می‌باشد.

۴. علیرغم اینکه هر دو میراگرهای خطی و غیرخطی در طراحی سیستم سازه-میراگر براساس پارامترهای قطعی معیار مورد نظر در طراحی را برآورده کرده‌اند ولی در قاب‌های مورد بررسی از لحاظ قابلیت اعتماد سیستم، قاب‌های مجهز به میراگر غیرخطی دارای عملکرد پایین‌تری در مقایسه با میراگرهای خطی می‌باشد. به‌عنوان مثال مقدار احتمال خرابی در توزیع براساس برش طبقه برای قاب‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه مجهز به میراگر ویسکوز خطی بر مبنای حالت حدی دررفت $0.2/5$ ٪ به ترتیب $0.10/3$ ، $0.05/2$ و $0.07/7$ درصد بوده در حالی که این مقدار برای قاب-های مجهز به میراگر ویسکوز غیرخطی به ترتیب $0.34/8$ ، $0.57/7$ و $0.14/3$ درصد می‌باشد.

۵. نتایج حاصل از مقایسه قابلیت اعتماد سازه با دو توزیع یکنواخت و توزیع مبتنی بر برش طبقه برای میراگرها نشان می‌دهد عملکرد قاب-های مورد مطالعه، زمانی که قاب مجهز به میراگر خطی است تقریباً نزدیک به هم می‌باشد. برای قاب‌های با توزیع یکنواخت محدوده احتمال خرابی مبتنی بر نسبت دررفت ۵ تا ۹ درصد و برای براساس برش طبقه بین ۵ تا ۱۰ درصد می‌باشد. در قاب‌های مجهز به میراگر غیرخطی عملکرد بهتر توزیع یکنواخت نسبت به توزیع براساس برش طبقه قابل توجه بوده است.

براساس نتایج بدست آمده از این پژوهش پیشنهاد می‌شود که در ارزیابی قابلیت اعتماد سازه‌های حساس به شتاب که دارای مقدار حدی شتاب پایین‌تری می‌باشند، اثر تابع حدی مربوط به شتاب هم در نظر گرفته شود. همچنین، جهت بهبود عملکرد احتمالاتی سازه‌های طراحی شده براساس روش‌های طراحی عملکردی نظیر جابجایی مستقیم تحت توابع حدی چندگانه، روش‌های طراحی این سازه‌ها براساس معیارهای عملکردی چندگانه توسعه پیدا کند.

مراجع

- [1] Soong, TT. and Spencer, BF. (2002). Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice. *Engineering Structures*, 24,243–259
- [2] Pachideh, G., Gholhaki, M. and Kafi, M. (2020). Experimental and numerical evaluation of an innovative diamond-scheme bracing system equipped with a yielding damper. *Steel and Composite Structures*, 36(2), 197-211.
- [3] Pachideh, G., Kafi, M., Gholhaki, M. (2020). Evaluation of cyclic performance of a novel bracing system equipped with a circular energy dissipater. *Structures*, 28, 467-481.
- [4] Fathizadeh, SF., Dehghani, S., Yang, TY., Vosoughi, AR., Farsangi, EN. and Hajirasouliha, I. (2021) Seismic performance assessment of multi-story steel frames with curved dampers and semi-rigid connections. *Journal of Construction Steel Research*, 182,106666.
- [5] Hanson, RD. and Soong, TT. (2001). *Seismic design with supplemental energy dissipation devices*. Oakland, CA: EERI.

- [6]Christopoulos, C. and Filiatrault, A. (2006). *Principles of passive supplemental damping and seismic isolation*. Pavia, Italy: IUSS Press.
- [7]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.
- [8]Dong, B., Sause, R. and Ricles, JM. (2016) Seismic response and performance of a steel MRF building with nonlinear viscous dampers under DBE and MCE. *Journal of Structural Engineering*, 142(6), 04016023.
- [9]De Domenico, D., Hajirasouliha, I. (2021). Multi-level performance-based design optimisation of steel frames with nonlinear viscous dampers. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19, 5015–5049.
- [10]Pollini, N., Lavan, O. and Amir, O. (2018). Optimization-based minimum-cost seismic retrofitting of hysteretic frames with nonlinear fluid viscous dampers. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 47(15), 2985-3005.
- [11]De Domenico, D. and Ricciardi, G. (2019). Earthquake protection of structures with nonlinear viscous dampers optimized through an energy-based stochastic approach. *Engineering Structures*, 179,523–39.
- [12]Altieri, D., Tubaldi, E., Angelis, M., Patelli, E. and Dall'Asta, A. (2018). Reliability-based optimal design of nonlinear viscous dampers for the seismic protection of structural systems. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(2): 963-982.
- [13]Akehashi, H. and Takewaki, I. (2019) Optimal viscous damper placement for elastic-plastic MDOF structures under critical double impulse. *Frontiers in Built Environment*, 5, 20.
- [14]Idels, O. and Lavan, O. (2021) Optimization-based seismic design of steel moment-resisting frames with nonlinear viscous dampers. *Structural Control and Health Monitoring*, 28(1), e2655.
- [16]Noruzvand, M., Mohebbi, M. and Shakeri, K. (2020) Modified direct displacement-based design approach for structures equipped with fluid viscous damper. *Structural Control and Health Monitoring*, 27, e2465.
- [17]Sorace, S. and Terenzi, G. (2009). Fluid viscous damper-based seismic retrofit strategies of steel structures: general concepts and design applications. *Advanced Steel Construction*, 5(3),325-342.
- [18]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.
- [19]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.
- [20]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.
- [21]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.
- [22]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.
- [23]ASCE. (2017). *Minimum design loads for buildings and other structures*. SEI/ASCE 7-16, Reston, VA.
- [24] Kim, J. and Choi, H. (2006). Displacement-based design of supplemental dampers for seismic retrofit of a framed structure. *Journal of Structural Engineering*, 132(6), 873-883.
- [25]Lin, YY., Chang, KC. and Chen, CY. (2008). Direct displacement-based design for seismic retrofit of existing buildings using nonlinear viscous dampers. *Bulletin of Earthquake Engineering*; 6, 535–552.
- [26]Lin, YY., Tsai, MH., Hwang, JS. and Chang, KC. (2003). Direct displacement-based design for building with passive energy dissipation systems. *Engineering Structures*, 25(1), 25-37.
- [27]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.
- [28]Moradpour, S. and Dehestani, M. (2019). Optimal DDBD procedure for designing steel structures with nonlinear fluid viscous dampers. *Structures*, 22, 154-174.
- [29]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.
- [30]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.
- [31]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.
- [32]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.

- [33] 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.
- [34] Moradpour, S. and Dehestani, M. (2021). Probabilistic seismic performance of steel structures with FVDs designed by DDBD procedure. *Journal of Building Engineering*, 43, 102581.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] Cimellaro, GP. and Reinhorn, AM. (2011). Multidimensional performance limit state for hazard fragility functions. *Journal of Engineering Mechanics*, 137, 47-60.
- [38] De Risi, R., Goda, K. and Tesfamariam, S. (2019). Multi-dimensional damage measure for seismic reliability analysis. *Structural Safety*, 78, 1-11.
- [39] Estes, AC. and Frangopol, DM. (1999). Repair optimization of highway bridges using system reliability approach. *Journal of Structural Engineering*, 125(7), 766-775.
- [40] Estes, AC. and Frangopol DM. (2001). Bridge Lifetime System Reliability under Multiple Limit States. *Journal of Bridge Engineering*, 6(6), 523-528.
- [41] Nielson, BG. and DesRoches, R. (2007). Seismic fragility methodology for highway bridges using a component level approach. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 36, 823-839.
- [42] Caciati, F., Cimellaro, GP. and Domaneschi, M. (2008). Seismic reliability of a cable-stayed bridge retrofitted with hysteretic devices. *Computers and Structures*, 86, 1769-1781.
- [43] Qiang, W., Ziyang, W. and Shukui, L. (2012). Seismic fragility analysis of highway bridges considering multi-dimensional performance limit state. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 11(2), 185-193.
- [44] Bakhshinejad, S. and Mohebbi, M. (2021). Multiple failure functions based fragility curves for structures equipped with TMD. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 20, 471-482.
- [45] Bakhshinejad, S. and Mohebbi, M. (2019). Multiple Failure Criteria-based Fragility Curves for Structures Equipped with SATMDs. *Earthquakes and Structures, An International Journal*, 17(5), 463-475.
- [46] Makris, N. and Constantinou, M. (1991). Fractional-derivative Maxwell model for viscous dampers. *Journal of Structural Engineering*, 117(9), 2708-2724.
- [47] Verma, NP. (2001). *Viscous dampers for optimal reduction in seismic response*. Virginia Tech.
- [48] Nowak, AS. and Collins, KR. (2013). *Reliability of structures*. University of Michigan, McGraw-Hill.
- [49] Cornell, C.A. (1967). Bounds on the reliability of structural systems. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 93, 171-200.
- [50] 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.
- [51] 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.
- [52] Melchers, R.E. (1999). *Structural Reliability Analysis and Prediction*—John Wiley & Sons. New York, NY.
- [53] ASCE/SEI 41-13. (2014). *Seismic evaluated and retrofit rehabilitation of existing building*. American Society of civil Engineers.
- [54] Shakeri, K., Khansoltani, E. and Pessiki, S. (2018). Ground motion scaling for seismic response analysis by considering inelastic response and contribution of the higher modes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 110, 70-85.
- [55] Federal Emergency Management Agency. (2018). *FEMA P-58-1 Seismic Performance Assessment of Buildings, Volume 1 - Methodology*. California: Washington, D.C.
- [56] Somerville PG, Smith N, Punyamurthula S, 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.
- [57] FEMA 356. *Pre-standard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings*. (2000). Federal Emergency Agency, Washington (DC).
- [58] 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.
- [59] 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.
- [60] Mazzoni, S. et al. (2006). *OpenSees—Open System for Earthquake Engineering Simulation— Command Language Manual*. Pacific Earthquake Engineering Center, University of California, Berkeley.

[61]Hazus-MH, (2003). *Hazus-MH 2.1, Technical Manual, Multi-hazard Loss Estimation Methodology*, FEMA.