

# تأثیر جرم میراگر تنظیم شده بر روی احتمال وقوع خرابی در سازه‌ی قاب خمشی فولادی

فریبرز ناطقی الهی (استاد)

کریم ترابی\* (کارشناس ارشد)

پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۳  
دوره ۲، شماره ۲، ص. ۲۹-۲۳

در روند ارزیابی رفتار یک سیستم سازه‌یی، عدم قطعیت‌های موجود می‌تواند سبب رفتار یک سازه در واقعیت متفاوت از رفتاری باشد که در مدل ریاضی تعیینی از سازه برای آن متصور هستیم. از این رو لازم است در ارزیابی عملکرد سازه، عدم قطعیت‌های مؤثر در پاسخ سازه‌ی شناسایی و احتمال وقوع خرابی در سیستم با توجه به عملکرد مورد نظر محاسبه شود. در این مطالعه تأثیر سیستم کنترل ارتعاش جرم میراگر تنظیم شده (TMD)<sup>۱</sup> در کاهش احتمال وقوع خرابی در سازه‌ی قاب خمشی فولادی بررسی شده است. مقاومت و سختی المان‌های سازه‌یی و بارگذاری زلزله به صورت احتمالاتی در مدل ریاضی اعمال شده است. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که برای زلزله‌های دور از گسل با دوره‌ی تناوب میانگین پایین احتمال وقوع خرابی در سازه با TMD کمتر از سازه‌ی اصلی است و تأثیر استفاده از TMD با مشخصات مختلف در طبقات مختلف سازه متفاوت است.

واژگان کلیدی: احتمال وقوع خرابی، جرم میراگر تنظیم شده، مدل احتمالاتی، قاب خمشی فولادی.

## ۱. مقدمه

در روند ارزیابی رفتار یک سیستم سازه‌یی، عدم قطعیت‌های موجود می‌تواند سبب رفتار یک سازه در واقعیت متفاوت از رفتاری باشد که در مدل ریاضی تعیینی از سازه برای آن متصور هستیم. این تفاوت می‌تواند ناشی از احتمالاتی بودن مقادیر مربوط به مشخصات مصالح مصرف شده، خطاها و ضعف‌های اجرایی، عدم قطعیت در بارگذاری سازه، عدم شناخت دقیق از رفتار سیستم سازه‌یی و انجام فرض‌های به دور از واقعیت در روند تحلیل و طراحی، اشتباه در روند تحلیل و طراحی سازه و موارد دیگر باشد. ظهور امکانات محاسباتی (سخت‌افزار و نرم‌افزار) قدرتمند در دهه‌های اخیر سبب شده است که امکان عملی بیشتری برای تحلیل‌های احتمالاتی فراهم شود. بر همین اساس استفاده از تحلیل قابلیت اعتماد برای ارزیابی سیستم‌های مهندسی در زمینه‌ی مهندسی مکانیک و عمران مقبولیت یافته است. هدف اصلی از تحلیل قابلیت اعتماد، محاسبه‌ی احتمال وقوع خرابی در سیستم با توجه به عملکرد مورد نظر است. از جمله تحقیقاتی که در زمینه‌ی رفتار احتمالاتی سازه‌های قاب خمشی فولاد انجام گرفته است می‌توان به پژوهش‌هایی در سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۲ اشاره کرد.<sup>[۱،۲]</sup> روش ارائه شده در پژوهش‌های مذکور بر اساس برقراری رابطه‌ی ریاضی مابین پارامترهای احتمالاتی ظرفیت و نیاز، عدم قطعیت در تعیین عملکرد سازه لحاظ می‌شود. با وجود این از یک دیدگاه وسیع، مؤسسه‌ی PEER متدولوژی «مهندسی زلزله بر اساس عملکرد» را با رویکرد کاملاً احتمالاتی ارائه کرده است.<sup>[۳]</sup>

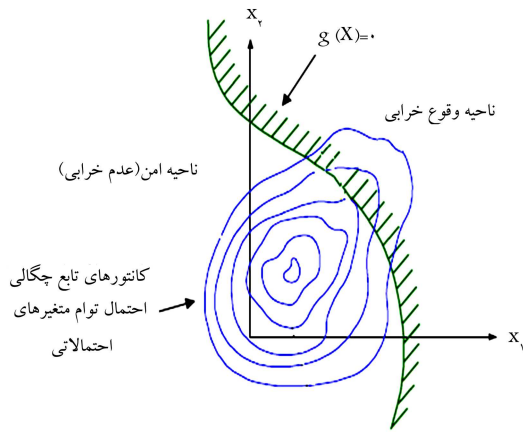
\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۵/۱۶، اصلاحیه ۱۳۹۱/۸/۱۶، پذیرش: ۱۳۹۱/۹/۶

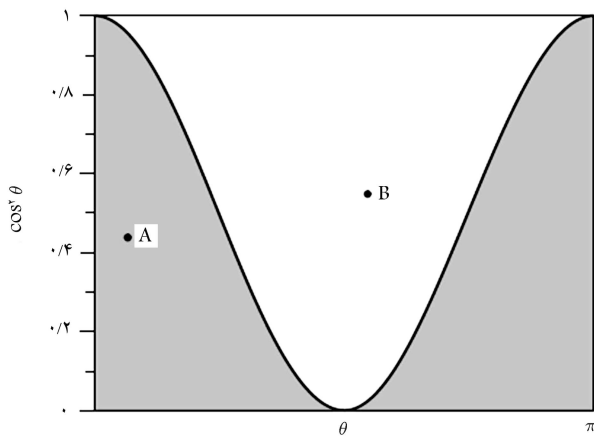
natoghi@iiees.ac.ir  
k.tarbali@iiees.ac.ir

در این متدولوژی، تک تک مؤلفه‌های دخیل در عملکرد سازه شامل: تعیین خطر لرزه‌یی، محاسبه‌ی پاسخ لرزه‌یی سازه، تخمین خسارت وارده به سازه، و در نهایت محاسبه‌ی پارامتر تصمیم‌گیری در مورد عملکرد سازه می‌تواند مستقلاً محاسبه و در تعیین عملکرد احتمالاتی کلی سازه استفاده شود. یکی از مؤلفه‌های اساسی در تعیین عملکرد سازه، محاسبه‌ی پاسخ احتمالاتی سازه است. در این پژوهش، پاسخ احتمالاتی سازه، به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های اساسی در این متدولوژی، در سازه‌ی مجهز به جرم میراگر مورد بررسی قرار گرفته است.

کاهش پاسخ سازه (سرعت، جابه‌جایی، و یا شتاب) با نصب سیستم‌های جذب ارتعاش از روش‌های مرسوم در مهندسی سازه برای بهبود پاسخ سازه در مقابل بارگذاری دینامیکی مانند بارگذاری باد و زلزله است. یکی از سیستم‌های کنترل ارتعاش در سازه‌ها، سیستم جرم میراگر تنظیم شده است. جرم میراگر تنظیم شده (TMD) ابزاری شامل جرم، یک فنر و یک میراگر است که به سازه‌ها (معمولاً در طبقه‌ی آخر) جهت جذب انرژی از سازه‌ی اصلی و در نتیجه کاهش پاسخ‌های دینامیکی (تغییر مکان، شتاب، نیروهای داخلی و غیره) متصل می‌شود. بسامد ارتعاش جرم میراگر به بسامد خاصی از سازه به گونه‌ی تنظیم می‌شود که وقتی سازه در آن بسامد تحریک شود، جرم میراگر در فاز مخالف شروع به ارتعاش کند و این امر سبب می‌شود که انرژی اعمال شده به سازه در اثر بارگذاری دینامیکی مستهلک شود.<sup>[۴-۷]</sup> جرم میراگر هماهنگ شده برای اولین بار در سال ۱۹۰۹ برای کاهش حرکات سالن کشتی مورد استفاده قرار گرفت، و برای اولین بار استفاده از جرم میراگرهای



شکل ۱. نمایش تابع عملکرد در فضای احتمالاتی دو متغیره.



شکل ۲. محاسبه‌ی انتگرال  $\cos^2(\theta)$  به روش شبیه‌سازی عددی.

مقادیر تابع عملکرد به وسیله‌ی تحلیل المان محدود به دست می‌آیند، که همگرایی آن در کل فضای احتمالاتی مسئله به سادگی ممکن نیست.<sup>[۱۷، ۱۶]</sup>

شبیه‌سازی عددی را می‌توان یکی از راه‌حل‌های دقیق برای مسائل قابلیت اعتماد با تعداد متغیرهای تصادفی کم و یگانه راه حل دقیق و با کارایی بالا برای مسائل قابلیت اعتماد با تعداد متغیرهای تصادفی زیاد دانست. ایده‌ی پایه‌ی برای استفاده از شبیه‌سازی عددی از این ایده‌ی ریاضی سرچشمه گرفته است که هر انتگرالی (برای مثال انتگرال محاسبه‌ی احتمال وقوع خرابی در مسائل قابلیت اعتماد) را می‌توان با شبیه‌سازی عددی حل کرد.<sup>[۱۷، ۱۸]</sup> با ارجاع به مثال موجود<sup>[۱۸]</sup>، برای محاسبه‌ی مساحت زیر نمودار تابع  $\cos^2(\theta)$  می‌توان نقاطی با مختصات تصادفی تولید کرد (شکل ۲). نسبت تعداد نقاط تولیدشده در ناحیه‌ی پر رنگ (مانند نقطه‌ی A) به تعداد نقاط تولیدشده در ناحیه‌ی روشن (مانند نقطه‌ی B) برابر با نسبت مساحت این دو ناحیه است. چون نقاط تصادفی تولیدشده در ناحیه‌ی مستطیلی شکل با مساحت مشخص قرار دارد، مساحت هر ناحیه به آسانی به دست خواهد آمد. این مثال در مقایسه با حل انتگرال قابلیت اعتماد بسیار ساده به نظر می‌رسد. با این حال اساس روش‌های شبیه‌سازی در تحلیل قابلیت اعتماد، آن چنان که<sup>[۱۷]</sup> به آن از دیدگاه کاملاً ریاضی پرداخته شده است، همین ایده‌ی ساده است.

دقت روش‌های شبیه‌سازی به ذات فیزیکی مسئله‌ی مورد بررسی مقادیر مرکزی، که اعداد تصادفی برای یک متغیر احتمالاتی حول آن تولید می‌شود (نقطه‌ی میانگین یا نقطه‌ی طراحی)، و تعداد دفعات شبیه‌سازی بستگی دارد. در کل با بیشتر شدن تعداد

هماهنگ‌شده با مشخصات بهینه جهت کاهش دامنه‌ی ارتعاش سیستم‌های تک درجه‌ی آزادی مورد مطالعه قرار گرفت.<sup>[۵]</sup> با توجه به اینکه میزان تأثیرگذاری TMD در کاهش پاسخ سازه به پارامترهای آن نظیر جرم، میرایی و سختی بستگی دارد؛ بیشتر مطالعات صورت‌گرفته در زمینه‌ی TMD در جهت تعیین مقادیر بهینه‌ی پارامترهای TMD نظیر سختی و میرایی بوده و معیارهای مختلفی در این رابطه پیشنهاد شده است.<sup>[۸-۱۵]</sup>

در کاربردهای عملی نیز تعداد زیادی جرم میراگر هماهنگ‌شده در ساختمان‌های بلند، پل‌ها، برج‌ها و دودکش‌ها عمدتاً به منظور کنترل پاسخ‌ها در برابر بارگذاری باد نصب و استفاده شده‌اند. برج سترپوینت<sup>۲</sup> در سیدنی استرالیا، مرکز سیتی‌کورپ<sup>۳</sup> در شهر نیویورک، برج جان‌هانکوک<sup>۴</sup> در بوستون، برج آمریکا ترنس<sup>۵</sup> در سانفرانسیسکو، برج بندر چیبیا<sup>۶</sup> در ژاپن، برج تاییبی<sup>۷</sup> در تایوان از جمله ساختمان‌هایی هستند که در آنها سیستم جرم میراگر تنظیم‌شده استفاده شده است.

در این پژوهش، قابلیت اعتماد قاب ساختمانی مجهز به سیستم جرم میراگر تنظیم‌شده (TMD) تحت بارگذاری احتمالاتی زلزله و مشخصات احتمالاتی مقاومت و سختی المان‌های سازه‌ی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. نتایج حاصل از تحلیل مونت‌کارلو برای سازه‌ی مجهز به سیستم کنترل ارتعاش با نتایج حالتی که سازه فاقد سیستم کنترل است، مقایسه و تأثیر مشخصات TMD در کاهش احتمال وقوع خرابی در طبقات سازه براساس جابه‌جایی نسبی طبقات بررسی خواهد شد.

## ۲. تحلیل قابلیت اعتماد

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، هدف از تحلیل قابلیت اعتماد، محاسبه‌ی احتمال وقوع خرابی در سیستم با توجه به عملکرد موردنظر است. عملکرد<sup>۸</sup> مورد نظر از سیستم توسط تابع عملکرد تعریف می‌شود. تابع عملکرد معمولاً در ساده‌ترین شکل خود به این صورت تعریف می‌شود:

پاسخ سازه - حد نهایی موردنظر برای عملکرد = تابع عملکرد

حد نهایی<sup>۹</sup> موردنظر برای عملکرد به صورت مقداری ثابت در مسئله‌ی قابلیت اعتماد وارد می‌شود. با این حال تابع عملکرد یک تابع با مقادیر تصادفی است؛ زیرا پاسخ سازه، تابعی از متغیرهای تصادفی مسئله است. اگر بردار حاوی متغیرهای تصادفی را با  $X$  نشان دهیم، مقادیر عددی تابع عملکرد  $g(X)$  فضای متغیرهای تصادفی مسئله را به دو ناحیه‌ی خرابی<sup>۱۰</sup> و عدم خرابی<sup>۱۱</sup> تقسیم می‌کند. معادله‌ی  $g(X) = 0$ ، مرز بین این دو ناحیه را مشخص می‌کند؛ که به آن معادله‌ی حالت حدی<sup>۱۲</sup> گویند (شکل ۱).

قابلیت اعتماد یک سیستم از طریق محاسبه‌ی احتمال وقوع خرابی آن با توجه به تابع عملکرد تعریف شده از طریق انتگرال رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود:

$$p_f = \int_{g(X) \leq 0} f(X) dX \quad (1)$$

که در آن،  $p_f$  احتمال وقوع خرابی،  $X$  بردار حاوی متغیرهای احتمالاتی مسئله،  $f(X)$  تابع چگالی احتمال توأم متغیرهای احتمالاتی مسئله و  $g(X)$  تابع عملکرد سیستم است. محاسبه‌ی این انتگرال از طریق روش‌های تحلیلی به جز برای سیستم‌های ساده، آن هم با متغیرهای احتمالاتی کم، ممکن نیست. همچنین حل عددی آن هم به جز در حالتی که تعداد متغیرهای احتمالاتی محدود باشد و مقادیر تابع عملکرد به سادگی محاسبه شوند، ممکن نیست (در مورد سیستم سازه‌ی بی رفتار غیرخطی،

جدول ۱. پارامترهای احتمالاتی لحاظ شدن در تحلیل مونت کارلو.

نوع توزیع آماری	انحراف معیار	ضریب تغییرات	میانگین	
Lognormal	۳۹۱	۰/۱۵	۲۶۰۶	تنش جاری شدگی تیرها
Lognormal	۵۴۳	۰/۱۵	۳۶۲۰	تنش جاری شدگی ستون‌ها
Lognormal	۶۳۰۰۰	۰/۰۳	۲۱۰۰۰۰۰	مدول کشسانی
Lognormal	۱۰۰۸۲	۰/۲	۵۰۴۱۰	جرم لرزه‌ی طبقات
Lognormal	۲/۹	۰/۳	۹/۸۱	بیشینه‌ی شتاب زلزله
Lognormal	۰/۰۱	۰/۲۵	۰/۰۴	نسبت میرایی

غیرخطی اعضای سازه‌ی از مدل فیبری برای مشخصات مقطع المان‌ها استفاده شده است. مدل فیبری علاوه بر مدل‌سازی دقیق رفتار غیرخطی مقطع المان، امکان مدل‌سازی دقیق رفتار احتمالاتی را نیز فراهم می‌کند. از آنجایی که در مدل فیبری مدل کشسانی و مشخصات تنش و کرنش هر یک از فیبرها به صورت جداگانه اختصاص می‌یابد، مقادیر میانگین و انحراف معیار هر پارامتر به صورت مستقل در مشخصات مقطع اثر می‌کند. در حالی که در مدل غیرخطی با مفاصل متمرکز، اثرات احتمالاتی پارامترهای مدل‌سازی مقطع به صورت نامشخص باید در یک پارامتر احتمالاتی (لنگر مقاوم مقطع) متمرکز شود. در قاب خمشی موردنظر برای مدل‌سازی احتمالاتی مشخصات مقاومتی و سختی المان‌های سازه‌ی در مقاطع فیبری اعضا، پارامترهای مدل‌سازی با مشخصات احتمالاتی موجود در جدول ۱ وارد شده است. همچنین در این جدول، پارامترهای دیگر احتمالاتی لحاظ شده در این مطالعه نیز ارائه شده است. در این جدول تنش و مدول کشسانی با واحد  $\text{kgf/cm}^2$  جرم طبقات با واحد  $\text{kgf}\cdot\text{sec}^2/\text{m}$  و شتاب با واحد  $\text{m/sec}^2$  ارائه شده است.

برای انجام تحلیل عددی و بررسی عملکرد یک سیستم سازه‌ی به روش قابلیت اعتماد، سازه‌ی قاب خمشی فولادی ۹ طبقه پروژه‌ی SAC که به ساختمان SAC-۹ مشهور است، مورد استفاده قرار گرفته است. برای مدل‌سازی قاب خمشی مقاوم در برابر بارهای جانبی در جهت شمالی - جنوبی انتخاب شده است. سیستم ساختمان‌های مورد استفاده در پروژه‌ی SAC از نوع سیستم سازه‌ی با قاب‌های خمشی پیرامونی مقاوم در برابر بارهای جانبی و سیستم باربر ثقلی داخلی است. این سازه طبق آیین‌نامه‌ی UCB۱۹۹۴ برای منطقه‌ی لس‌آنجلس طراحی شده است. جزئیات بیشتری از این سازه را می‌توان در مرجع [۲۶] یافت.

### ۲.۳. مدل‌سازی احتمالاتی بارگذاری لرزه‌ی

لازمه‌ی مطالعه‌ی پاسخ احتمالاتی سازه‌ها، انجام مدل‌سازی احتمالاتی از شرایط محیطی مؤثر بر سازه (بارگذاری و شرایط مرزی) است. برای بررسی پاسخ دینامیکی سازه به صورت احتمالاتی، بارگذاری دینامیکی احتمالاتی بر روی سازه باید مدل‌سازی شود. تأکید این مطالعه بر روی تولید زلزله‌ی مصنوعی براساس تحقیقات اخیر صورت‌گرفته‌ی محققان است. [۲۷، ۲۸] هدف از تولید زلزله‌ی مصنوعی با مشخصات نامانای [۲۴] در حوزه‌ی زمان و بسامد اطمینان از وجود مشخصات نامانای بارگذاری لرزه‌ی در تحلیل احتمالاتی است. براساس این مطالعات، مشخصات نامانای زلزله در حوزه‌ی زمان (شدت زلزله) و در حوزه‌ی بسامد را می‌توان با سیگنال نوفه‌ی سفیدی [۱۵]، که از فیلتر کاملاً نامانای رد شده است، به صورت کامل مدل شده است.

نمونه‌های شبیه‌سازی، جواب روش شبیه‌سازی به جواب تحلیلی انتگرال نزدیک‌تر خواهد شد. پژوهشگران بسیاری در زمینه‌ی ارائه‌ی روش‌های شبیه‌سازی عددی جدید برای حل مسئله‌ی قابلیت اعتماد مشغول تحقیق هستند. [۱۹-۲۳]

روش مونت‌کارلو [۱۳] مرسوم‌ترین روش عددی برای حل مسئله‌ی قابلیت اعتماد به شمار می‌رود. در این روش برای متغیرهای احتمالاتی مسئله، حول نقطه‌ی میانگین خود نمونه‌های تصادفی تولید می‌شود. سپس مقدار تابع عملکرد به تعداد دفعات موردنظر محاسبه می‌شود. با تقسیم تعداد دفعات وقوع خرابی در سازه (براساس مقدار تابع عملکرد) به تعداد کل دفعات محاسبه‌ی مقدار تابع عملکرد، احتمال وقوع خرابی محاسبه می‌شود. برای به دست آوردن دقت مقدار محاسبه‌شده برای احتمال وقوع خرابی، کوواریانس آن را به دست می‌آورند. معمولاً در تحلیل قابلیت اعتماد سیستم‌های سازه‌ی، برای به دست آوردن مقادیر تابع عملکرد، به تعداد دفعات موردنظر برای شبیه‌سازی باید تحلیل المان محدود انجام گیرد؛ که هزینه‌ی محاسباتی فراوانی را تحمیل خواهد کرد. البته مقدار احتمال وقوع خرابی محاسبه‌شده و دقت موردنظر در شبیه‌سازی تعیین‌کننده‌ی تعداد شبیه‌سازی مورد نیاز است. برای دقت محاسباتی ثابت (کوواریانس ثابت برای احتمال خرابی) هر چه احتمال وقوع بالا باشد، تعداد شبیه‌سازی کمتری لازم است. به همین دلیل برای محاسبه‌ی احتمال خرابی پایین، روش‌های شبیه‌سازی عددی نیاز به تعداد دفعات شبیه‌سازی بیشتری دارد؛ که با توجه به هزینه‌ی بالای محاسباتی برای تحلیل سیستم و یافتن مقدار تابع عملکرد، امکان استفاده از این روش را محدود می‌سازد. با این حال برای محاسبه‌ی احتمال خرابی بالا (برای مثال محاسبه احتمال خرابی در سازه‌ی ساختمانی معمول تحت بارگذاری زلزله) با صرف هزینه‌ی محاسباتی معقول می‌توان احتمال خرابی را به دست آورد. برای به دست آوردن تعداد دفعات شبیه‌سازی لازم برای رسیدن به دقت موردنظر در تخمین احتمال وقوع خرابی در مراجع [۲۵، ۲۴] فرمول ۲ معرفی شده است:

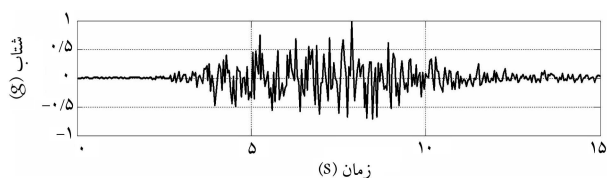
$$N = \frac{1 - Pf}{C.O.V.^2 [Pf] \cdot (Pf)} \quad (2)$$

که در آن،  $N$  تعداد شبیه‌سازی و  $C.O.V. [Pf]$  کوواریانس احتمال وقوع خرابی است. در این پژوهش کوواریانس (دقت) احتمال خرابی، که مقدار آن عدد خیلی کوچکی نیست (احتمال وقوع خرابی در سیستم‌های سازه‌ی تحت بارگذاری لرزه‌ی معمولاً مقدار بالایی است)، ۰.۵٪ لحاظ شده است. برای رسیدن به دقت محاسباتی ۰.۵٪ در محاسبه‌ی احتمال خرابی در سازه‌ی موردنظر، با استفاده از فرمول ۲، برای احتمال وقوع ۰.۲۸٪ لازم است ۱۰۰۰ مورد شبیه‌سازی صورت گیرد. برای احتمال وقوع بیشتر از ۰.۲۸٪، تعداد شبیه‌سازی کمتری لازم است. در این پروژه احتمال وقوع خرابی در سازه، در بیشتر حالت‌ها از ۰.۲۸٪ بیشتر است. بنابراین تعداد دفعات شبیه‌سازی ۱۰۰۰ برای بررسی احتمال وقوع خرابی در این سیستم ساختمانی مناسب است. در واقع برای احتمال وقوع بیشتر (مثلاً ۰.۵٪) تعداد دفعات شبیه‌سازی بیشتر سبب خواهد شد که جواب به دست آمده دقت بالایی داشته باشد (دقت ۰.۳۱٪ برای احتمال وقوع ۰.۵٪).

### ۳. مدل‌سازی احتمالاتی از سازه و بارگذاری لرزه‌ی

#### ۳.۱. مدل‌سازی احتمالاتی از سازه

برای انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی تحت بارگذاری زلزله، ابتدا باید هندسه‌ی سازه و سپس مشخصات سختی و مقاومت المان‌های سازه‌ی مدل شود. در این پژوهش، هندسه‌ی سازه به صورت تعیینی مدل شده است. برای مدل‌سازی رفتار



شکل ۴. تاریخچه‌ی شتاب رکورد تولیدشده براساس مدل Rezaeian و Der Kiureghian.

آماره‌ی تاریخچه‌ی زمانی شتاب زلزله‌های دورگسل با دوره‌ی تناوب میانگین پایین (۰/۲) تولید شده است.

#### ۴. محاسبه‌ی پارامترهای TMD براساس روش Sadek و همکاران

در این پژوهش براساس کار Sadek و همکاران،<sup>[۱۹]</sup> پارامترهای TMD برای قاب ساختمانی موردنظر محاسبه و تأثیر آن در کاهش احتمال وقوع خرابی در سازه بررسی شده است. در این روش برای مقدار مشخص جرم TMD (جرم اولیه)، بسامد و میرایی بهینه، سیستم کنترلی چنان محاسبه شده است که میرایی مد اول و دوم سازه با هم مساوی شوند. ایده‌ی اصلی این روش را ویلاورد<sup>۲۰</sup> ارائه کرده است،<sup>[۱۹]</sup> بدین صورت که برای مؤثر بودن TMD در کاهش پاسخ سازه، باید نسبت میرایی در دو مد اول مختلط سازه دارای سیستم کنترلی، تقریباً مساوی نصف مجموع نسبت میرایی سازه‌ی اصلی و نسبت میرایی در سیستم کنترل باشد (با اضافه کردن TMD به سازه، ماتریس میرایی سازه از حالت میرایی کلاسیک (میرایی رایلی) خارج می‌شود و مدهای سازه دارای مؤلفه‌ی مختلط خواهند بود). در روش ارائه‌شده‌ی Sadek و همکاران، برای کارگذاشتن سیستم کنترلی در درجات آزادی مختلف سیستم چند درجه‌ی آزاد (در طبقات مختلف سازه‌ی ساختمانی) می‌توان پارامترهای TMD را برای نسبت جرمی موردنظر محاسبه کرد. از آنجایی که مقادیر سختی فنر سیستم کنترل و میرایی آن برای مقدار مشخصی از جرم TMD محاسبه می‌شود، در ابتدای محاسبه‌ی مشخصات TMD باید جرم آن مشخص شود. نسبت جرم TMD به جرم مدی در مد اول سازه (با ضریب مشارکت مدی واحد) را با پارامتر  $\mu$  نشان می‌دهیم (فرمول ۴). از آنجایی که مد اول سازه، بیشترین سهم در پاسخ نهایی سازه را دارد (در سازه‌ی منظم) معمولاً جرم میراگر را برای مد اول سازه تنظیم می‌کنند.

$$\mu = \frac{m}{\phi_1^T [M] \phi_1} \quad (4)$$

که در آن،  $m$  جرم TMD،  $[m]$  ماتریس جرم سازه و  $\phi_1$  شکل مد اول سازه است. بسامد و نسبت میرایی TMD از طریق فرمول‌های ۵ و ۶ محاسبه می‌شوند:

$$f = \frac{1}{1 + \mu\Phi} \left[ 1 - \beta \sqrt{\frac{\mu\Phi}{1 + \mu\Phi}} \right] \quad (5)$$

$$\xi = \Phi \left[ \frac{\beta}{1 + \mu} + \sqrt{\frac{\mu}{1 + \mu}} \right] \quad (6)$$

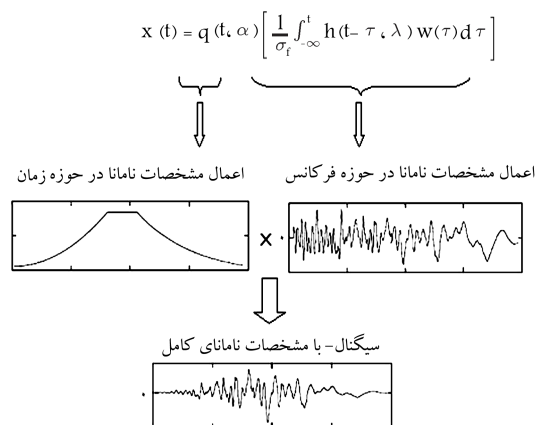
که در آن‌ها،  $\Phi$  مؤلفه‌ی مدی برای درجه‌ی آزادی (طبقه‌ی) است که TMD در آن نصب می‌شود و  $\beta$  نسبت میرایی سازه است. مقدار  $f$  مساوی نسبت بسامد دورانی TMD به بسامد دورانی مد اول سازه و  $\xi$  نسبت میرایی و  $c$  مشخصه‌ی میرایی در

از آنجایی که پاسخ لرزه‌ی سازه‌ها متأثر از مشخصات رکورد زلزله‌ی مورد استفاده در تحلیل تاریخچه‌ی زمانی است، استفاده از یک رکورد مشخص ثبت‌شده سبب خواهد شد که محتوای بسامدی زلزله‌ی موردنظر، تأثیر عمده‌ی در نتایج تحلیل داشته باشد. از این رو می‌توان برای لحاظ کردن تأثیر تمامی بسامدهای محتمل در یک رکورد زلزله، از سیگنال نوفه‌ی سفید استفاده کرد. با این حال مشخصات سیگنال نوفه‌ی سفید متفاوت از مشخصات زلزله‌های واقعی ثبت‌شده می‌شود. بخشی از این تفاوت ناشی از وجود مشخصات نامانای در حوزه‌ی زمان و بسامد است. برای لحاظ کردن اثرات نامانایی در حوزه‌ی زمان و بسامد بر روی سیگنال نوفه‌ی سفید تولیدشده در این مطالعه، از مدل ارائه‌شده‌ی Rezaeian و Der Kiureghian برای تولید زلزله‌ی مصنوعی از سیگنال نوفه‌ی سفید با مشخصات نامانای استفاده شده است.

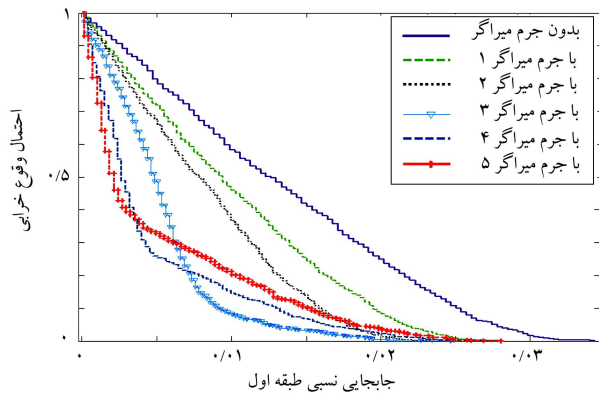
برای وارد کردن نامانایی در مشخصات زلزله در حوزه‌ی زمان (شدت عددی زلزله)، تابع  $q(t, \alpha)$  را، که تابع مشخصه‌ی زمان<sup>۱۶</sup> نام دارد، در پاسخ مانای فیلتر به تحریک نوفه‌ی سفید ضرب می‌کنیم (فرمول ۳):

$$x(t) = q(t, \alpha) \left[ \frac{1}{\sigma_f(t)} \int_{-\infty}^t h[t - \tau, \lambda(\tau)] w(\tau) d\tau \right] \quad (3)$$

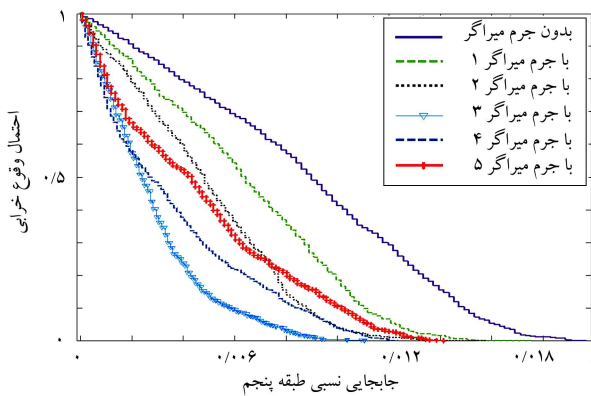
مناسب‌ترین راه حل ایجاد نامانایی در محتوای بسامدی زلزله، استفاده از فیلتر با مشخصات متغیر در طول زمان است که در فرمول ۳ به صورت تابع  $\lambda(\tau)$  نمود یافته است.<sup>[۲۸،۲۷]</sup> مشخصه‌ی بارز روش مذکور، جدا کردن نامانایی در حوزه‌ی زمان و بسامد است؛ که با نرمال کردن سیگنال با تقسیم سیگنال به مقدار انحراف معیار آن حاصل می‌شود. این جداسازی این امکان را فراهم می‌سازد که مدل مربوط به نامانایی در حوزه‌ی زمان مستقل از مدل مربوط به نامانایی در حوزه‌ی بسامد انتخاب شود (شکل ۳). مدل ارائه‌شده تضمین نمی‌کند که انتگرال اول (تاریخچه‌ی زمانی سرعت) و انتگرال دوم (تاریخچه‌ی زمانی جابه‌جایی) رکورد تولیدشده دارای مقدار صفر<sup>۱۷</sup> در انتهای رکورد باشند. معمولاً رکوردهای تولیدشده دارای مقادیر غیر صفر در انتهای تاریخچه‌ی زمانی سرعت و جابه‌جایی هستند و برای اصلاح این نقص، رکورد تولیدشده باید از فیلترگذر بالا<sup>۱۸</sup> عبور داده شود. این فیلتر یک سیستم یک درجه‌ی آزاد با بسامد طبیعی مساوی با فرکانس گوشه<sup>۱۹</sup> رکورد موردنظر با میرایی بحرانی است. برای کسب اطلاعات بیشتر در مورد تعیین پارامترهای ثابت استفاده‌شده در این مدل، به مراجع<sup>[۲۸،۲۷]</sup> مراجعه شود. شکل ۴، تاریخچه‌ی زمانی رکورد تولیدشده در این مطالعه را نشان می‌دهد. زلزله‌ی موردنظر براساس مشخصات



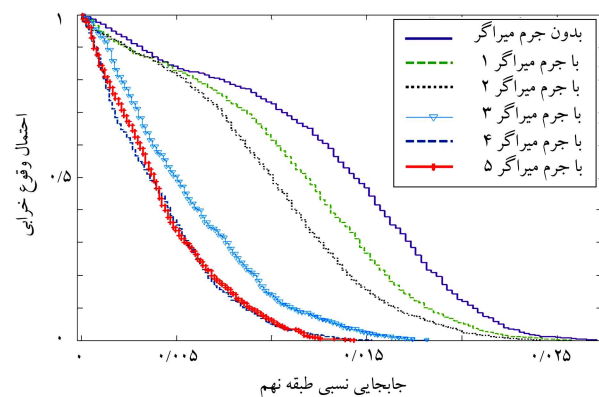
شکل ۳. جدابودن توابع مربوط به نامانای کردن سیگنال در حوزه‌ی زمان و بسامد.



شکل ۵. مقایسه‌ی احتمال وقوع خرابی براساس جابه‌جایی نسبی برای طبقه‌ی ۱ مابین حالت با TMD و بدون آن.



شکل ۶. مقایسه‌ی احتمال وقوع خرابی براساس جابه‌جایی نسبی برای طبقه‌ی ۵ مابین حالت با TMD و بدون آن.



شکل ۷. مقایسه‌ی احتمال وقوع خرابی براساس جابه‌جایی نسبی برای طبقه‌ی ۹ مابین حالت با TMD و بدون آن.

به TMD<sub>۴</sub> و TMD<sub>۵</sub> توجه شود). دلیل این امر را می‌توان در افزایش برش پایه‌ی طبقات جستجو کرد. با افزایش بیش از حد جرم TMD برش پایه‌ی طبقات افزایش قابل ملاحظه‌ی پیدا می‌کند و به همین دلیل احتمال وقوع جابه‌جایی نسبی بزرگ‌تر افزایش می‌یابد، که این امر به معنی احتمال خرابی بالاست. برای طبقات پایین‌سازه با افزایش جرم TMD تا مقدار ۳٪ جرم طبقه (TMD<sub>۳</sub>)، احتمال وقوع خرابی در حدود عملکرد بالا کاهش می‌یابد و با افزایش جرم TMD، احتمال وقوع خرابی نسبت به حالت TMD با جرم کمتر افزایش می‌یابد. برای طبقات بالای سازه با

جدول ۲. مشخصات مدل‌سازی TMD.

نسبت جرم TMD به جرم طبقه (%)	جرم TMD	مشخصه‌ی میراگر TMD	سختی فنر TMD
۵	۲۷۲۵	۲۵۱۶	۲۰۰۶۰
۱۰	۵۴۵۰	۶۳۵۸	۳۹۳۱۷
۳۰	۱۶۳۵۰	۲۷۹۶۴	۱۰۸۹۹۹
۴۷	۲۵۶۱۵	۵۰۷۲۵	۱۶۰۰۴۹
۶۰	۳۲۷۰۰	۶۹۶۷۹	۱۹۴۶۹۶

میراگر متصل به جرم TMD است.  $\omega_{TMD}$  بسامد دورانی TMD و  $\omega_1$  بسامد دورانی مد اول سازه (رابطه‌های ۷ و ۸):

$$f = \omega_{TMD} / \omega_1 \quad (7)$$

$$\xi = c / 2m\omega_{TMD} \quad (8)$$

برای بررسی تأثیر پارامترهای TMD در رفتار لرزه‌ی قاب ساختمانی از دیدگاه قابلیت اعتماد، پارامترهای TMD برای ۵ مقدار مختلف نسبت جرمی محاسبه و بر روی سازه‌ی موردنظر اعمال و نتایج حاصل با هم مقایسه شده است. در کلیه‌ی حالت‌ها، TMD به طبقه‌ی آخر سازه متصل است و پارامترهای آن نسبت به مد اول سازه هماهنگ<sup>۲۱</sup> شده است. جدول ۲، مشخصات TMD در ۵ حالت موردنظر را نشان می‌دهد. جرم TMD با واحد  $\text{kgf} \cdot \text{sec}^2 / \text{m}$ ، مشخصه‌ی میرایی با واحد  $\text{kgf} \cdot \text{sec} / \text{m}$  و سختی فنر با واحد  $\text{kgf} / \text{m}$  در این جدول ارائه شده است.

## ۵. نتایج تحلیل‌های عددی

در این بخش نتایج حاصل از تحلیل قابلیت اعتماد به روش مونت‌کارلو برای قاب ساختمانی موردنظر برای حالت‌های مختلف سازه (با TMD و بدون آن) ارائه شده است. نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی قاب ساختمانی موردنظر تحت تغییرهای احتمالاتی معرفی شده برای ۵ حالت مختلف سازه با TMD و سازه‌ی بدون آن، براساس جابه‌جایی نسبی طبقه در شکل‌های ۵ الی ۷ برای نمونه برای طبقات اول، پنجم و نهم ارائه شده است. برای هر حالت از سازه (۵ حالت با TMD و ۱ حالت بدون TMD) ۱۰۰۰ مورد شبیه‌سازی عددی صورت گرفته است، که در مجموع تعداد کل شبیه‌سازی ۶۰۰۰ مورد است.

همان‌طور که از این شکل‌ها می‌توان نتیجه گرفت احتمال وقوع خرابی در طبقات سازه با استفاده از TMD برای زلزله‌های دورگسل با دوره‌ی تناوب میانگین پایین می‌تواند کاهش یابد. مقدار این کاهش وابسته به مشخصات TMD مورد استفاده است. با افزایش جرم TMD تا یک حد مشخص احتمال وقوع خرابی در سازه کاهش می‌یابد، ولی برای مقادیر بزرگ‌تر از این حد، برای طبقات پایین سازه، افزایش جرم TMD عموماً سبب افزایش احتمال وقوع خرابی نسبت به حالت TMD با جرم کمتر می‌شود. برای مثال در شکل ۵، برای جابه‌جایی نسبی (حد عملکرد) کوچک‌تر از ۰٫۰۵ با افزایش جرم TMD احتمال وقوع خرابی کاهش می‌یابد. ولی برای جابه‌جایی نسبی بزرگ‌تر از این مقدار، افزایش جرم TMD سبب افزایش احتمال وقوع خرابی نسبت به حالت TMD با جرم کمتر می‌شود (به نمودار مربوط

شکل‌های ۸ و ۹ برای نمونه ارائه شده است. همان‌طور که از این شکل‌ها می‌توان نتیجه گرفت، استفاده از TMD سبب می‌شود که توزیع جابه‌جایی نسبی طبقات از مقادیر بزرگ‌تر به مقادیر کوچک‌تر انتقال یابد و به تبع آن چگالی جابه‌جایی نسبی طبقات در مقادیر کوچک‌تر در مقایسه با سازه‌ی بدون TMD افزایش قابل ملاحظه‌ی یابد.

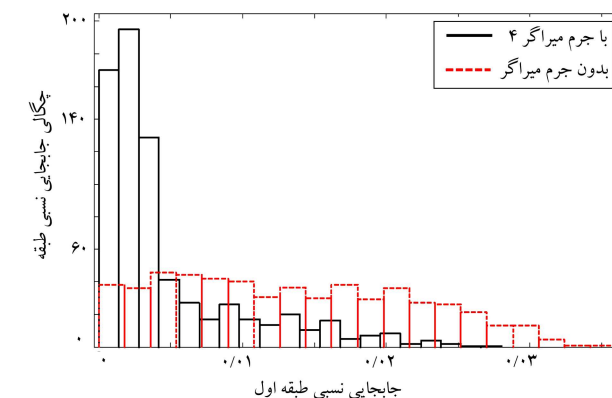
## ۶. نتیجه‌گیری

در این مطالعه تأثیر سیستم کنترل ارتعاش جرم میراگر تنظیم‌شده (TMD) در کاهش احتمال وقوع خرابی در سازه‌ی قاب خمشی فولادی بررسی شده است. از آنجایی که عدم قطعیت‌های موجود در سیستم سازه‌ی و بارگذاری زلزله می‌تواند عملکرد سیستم را تحت تأثیر قرار دهند، از این رو لازم است در ارزیابی عملکرد سازه این عدم قطعیت‌ها شناسایی و احتمال وقوع خرابی در سیستم با توجه به عملکرد موردنظر محاسبه شود. در مطالعه‌ی صورت‌گرفته مقاومت و سختی المان‌های سازه‌ی و بارگذاری زلزله به صورت احتمالاتی در مدل ریاضی اعمال شده است و احتمال وقوع خرابی در طبقات سازه براساس جابه‌جایی نسبی هر طبقه محاسبه شده است. زلزله‌ی موردنظر براساس مشخصات آماری زلزله‌های دورگسل با دوره‌ی تناوب میانگین پایین تولید شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهند که برای این نوع رکوردها استفاده از TMD سبب کاهش احتمال وقوع خرابی در سازه‌ی قاب خمشی فولادی می‌شود و مقدار این کاهش وابسته به مشخصات TMD مورد استفاده است. نتایج حاصل از این مطالعه را می‌توان به این صورت خلاصه کرد:

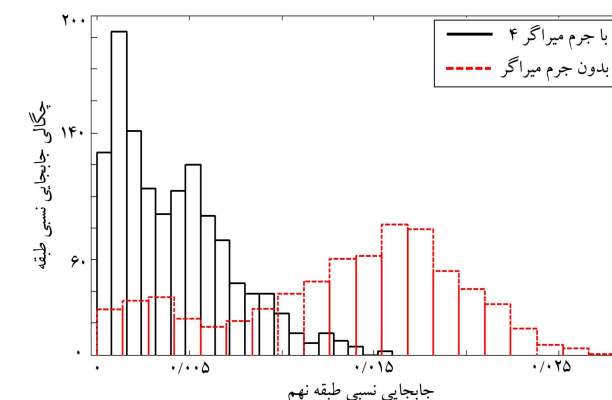
۱. استفاده از TMD سبب می‌شود که توزیع جابه‌جایی نسبی طبقات از مقادیر بزرگ‌تر به مقادیر کوچک‌تر انتقال یابد و به تبع آن چگالی جابه‌جایی نسبی طبقات در مقادیر کوچک‌تر در مقایسه با سازه‌ی بدون TMD افزایش قابل ملاحظه‌ی یابد.

۲. برای طبقات پایین با افزایش جرم TMD، احتمال وقوع خرابی در حدود عملکرد بالا کاهش می‌یابد، ولی با افزایش جرم TMD، احتمال وقوع خرابی، نسبت به حالت TMD با جرم کمتر، افزایش می‌یابد. این امر را می‌توان مرتبط با افزایش برش پایه‌ی طبقات برای TMD با جرم بیشتر دانست.

۳. برای طبقات بالای سازه با افزایش جرم TMD احتمال خرابی در این طبقات کاهش می‌یابد. با این حال نرخ این کاهش، با افزایش جرم TMD کمتر می‌شود.



شکل ۸. مقایسه‌ی چگالی جابه‌جایی نسبی طبقه‌ی ۱ مابین حالت با TMD و بدون آن.



شکل ۹. مقایسه‌ی چگالی جابه‌جایی نسبی طبقه‌ی ۹ مابین حالت با TMD و بدون آن.

افزایش جرم TMD به مقادیری بیشتر از مقدار ۳۰٪ جرم طبقه، احتمال خرابی در این طبقات کاهش می‌یابد. با این حال نرخ این کاهش، با افزایش جرم TMD کمتر می‌شود. برای طبقات میانی، بیشترین کاهش در احتمال وقوع خرابی برای TMD<sub>۳</sub> مشاهده می‌شود.

در حالت کلی برای پی بردن به تأثیر استفاده از TMD در کاهش احتمال وقوع خرابی در سازه، چگالی جابه‌جایی نسبی طبقات برای سازه با TMD<sub>۴</sub> در

## پانویس‌ها

1. tuned mass damper
2. Centrepont
3. Citicorp
4. John Hancock
5. Trans America
6. Chiba
7. Taipei
8. performance
9. threshold

10. failure
11. safe
12. limit-state function
13. Monte Carlo
14. stochastic
15. white-noise
16. time modulating function
17. zero residual
18. High-pass
19. Corner Frequency
20. Villaverde
21. tuned

## منابع (References)

1. Federal Emergency Management Agency (FEMA), *Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings*, Rep. No. FEMA-350, SAC Joint Venture, Washington, D.C. (2000).
2. Cornell, C.A., Jalayer, F., Hamburger, R.O. and Foutch, D.A. "Probabilistic basis for 2000 SAC federal emergency management agency steel moment frame guidelines", *Journal of Structural Engineering*, **128**(4), pp.340-349 (2002).
3. Cornell, C.A. and Krawinkler, H. "Progress and challenges in seismic performance assessment", *PEER Cent News*, **3**(2), pp. 1-3 (2000).
4. Deierlein, G.G., Krawinkler, H. and Cornell, C.A. "A framework for performance-based earthquake engineering", In: Seventh Pacific conference on earthquake engineering, Christchurch, New Zealand (2003).
5. Den Hartog, J.P., *Mechanical Vibrations*, 4th edn, McGraw-Hill, New York (1956).
6. McNamara, R.J. "Tuned mass dampers for buildings", *Journal of Structural Division*, **103**(9), pp. 1785-1798 (1977).
7. Soong, T.T. and Dargush, G.F., *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*, John Wiley and Sons, New York (1997).
8. Kaynia, N.M., Veneziano, D. and Biggs, J.M. "Seismic effectiveness of tuned mass dampers", *Journal of Structural Division*, **107**(8), pp. 1465-1484 (1981).
9. Warburton, G.B. "Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **10**(3), pp. 381-401 (1982).
10. Sadek, F., Mohraz, B., Taylor, A.W. and Chung, R.M. "A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic application", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **26**(6), pp. 617-635 (1997).
11. Rana, R. and Soong, T.T. "Parametric study and simplified design of tuned mass dampers", *Engineering Structures*, **20**(3), pp. 193-204 (1998).
12. Soto-Brito, R. and Ruiz, S.E. "Influence of ground motion intensity on the effectiveness of tuned mass dampers", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **28**(11), pp. 1255-1271 (1999).
13. Lukkunaprasit, P. and Wanitkorkul, A. "Inelastic buildings with tuned mass dampers under moderate ground motions from distant earthquakes", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **30**(4), pp. 537-551 (2001).
14. De Angelis, M., Perno, S. and Reggio, A. "Dynamic response and optimal design of structures with large mass ratio TMD", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **41**(1), pp. 41-60 (2012).
15. Mohebbi, M. and Joghataie, A. "Designing optimal tuned mass dampers for nonlinear frames by distributed genetic algorithms", *Struct. Design Tall Spec. Build.*, **21**(1), pp. 57-76 (2011).
16. Haukaas, T. and Der Kiureghian, A. "Finite element reliability and sensitivity methods for performance-based engineering", Report PEER 2003/14, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley (2004).
17. Ditlevsen, O. and Madsen, H.O., *Structural Reliability Methods*, Wiley, Chichester, New York, NY (1996).
18. Baecher, G.B. and Christian, J.T., *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*, Wiley, Chichester, New York, NY (2003).
19. Au, S.K. and Beck, J.L. "A new adaptive importance sampling scheme for reliability Calculations", *Structural Safety*, **21**(2), pp. 135-158 (1999).
20. Bucher, C.G. "Adaptive sampling-an iterative fast monte carlo simulation", *Structural Safety*, **5**(2), pp. 119-126 (1988).
21. Mahadevan, S. and Raghothamachar, P. "Adaptive simulation for system reliability analysis of large Structures", *Computers and Structures*, **77**(6), pp. 725-734 (2000).
22. Ching, J., Beck, J.L. and Au, S.K. "Hybrid subset simulation method for reliability estimation of dynamical systems subject to stochastic excitation", *Probabilistic Engineering Mechanics*, **20**(3), pp. 199-214 (2005).
23. Echard, B., Gayton, N. and Lemaire, M. "AK-MCS: An active learning reliability method combining kriging and monte carlo simulation", *Structural Safety*, **33**(2), pp. 145-154 (2011).
24. Soong, T. and Grigoriu, T., *Random Vibration of Mechanical and Structural System*, Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall (1993).
25. Nowak, A.S. and Collins, K.R., *Reliability of Structures*, Mc Graw Hill (2000).
26. Gupta, A. and Krawinkler, H. "Seismic demands for performance evaluation of steel moment resisting frame structures (SAC Task 5.4.3)", Report no. 132. Palo Alto, CA: John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University (1999).
27. Rezaeian, S. and Der Kiureghian, A. "A stochastic ground motion model with separable temporal and spectral nonstationarity", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **37**(13), pp. 1565-1584 (2008).
28. Rezaeian, S. and Der Kiureghian, A. "Stochastic modeling and simulation of ground motions for performance-based earthquake engineering", Report PEER 2010/02, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley (2010).