

## افزایش قابلیت اطمینان سازه های قاب خمشی کوتاه مرتبه موجود با استفاده از میراگر جرمی نیمه فعال

آراد علویان قوانینی<sup>۱</sup>، پیمان همایی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران، Alavian@khu.ac.ir

۲- استادیار، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران، Homami@khu.ac.ir

### چکیده

ارزیابی عملکرد تجهیزات کنترلی بر روی قابلیت اعتماد سازه، موضوع مهمی است که تا کنون کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. در تحقیق حاضر، یک قاب خمشی ۴ طبقه یک بار مجهز به میراگر جرمی تنظیم شده نیمه فعال و یک بار بدون این سیستم کنترلی در حالت دوبعدی تحت اثر ۱۴ زلزله بر روی خاک سخت (تیپ C) مدل سازی شده است. پس از تحلیل پارامتریک برای یافتن مقادیر بهینه مقادیر فرکانس زاویه ای و میرایی سیستم کنترل نیمه فعال، عدم قطعیت در پارامترهای نیمه فعال میراگر جرمی نیمه فعال (جرم، فرکانس، سختی) و عدم قطعیت های ناشی از تداخل با عملکرد یا تأخیر زمانی سیستم (محدوده های بالا و پایین میرایی و درصد نیروی کنترل) با استفاده از روش نمونه برداری ابر مکعب لاتین شبیه سازی شد. در نهایت، تحلیل عملکردی سازه و تحلیل حساسیت انجام شد و منحنی های شکنندگی هر دو مدل استخراج شدند. نتایج نشان می دهد شاخص قابلیت اعتماد سازه مجهز به سیستم کنترلی حدود ۵۰٪ نسبت به سازه فاقد سیستم کنترلی، بیشتر است. فرکانس زاویه ای مهم ترین و تاثیرگذارترین متغیر تصادفی در پاسخ سازه است، چنان که می تواند پاسخ سازه را در خاک مورد نظر حدود ۱۰ درصد افزایش یا کاهش دهد. همچنین در نظر گرفتن عدم قطعیت لرزه ای به تنهایی برای ترسیم منحنی های شکنندگی کافی نیست و توصیه می شود تاثیر عدم قطعیت های شناختی در ارزیابی شکنندگی سازه ها در نظر گرفته شوند.

واژه های کلیدی: میراگر جرمی نیمه فعال، الگوریتم گرند هوک، ابرمکعب لاتین، عدم قطعیت، منحنی شکنندگی

### مقدمه

ارتعاشی مانند زلزله تغییر و تنظیم کنند و مانند یک میراگر غیرفعال و یا فعال عمل کنند. با توجه به مزایای فراوان کنترل فعال با انرژی و هزینه کمتر و عملکرد بهتر نسبت به سیستم کنترل غیرفعال، این سیستم ها به مرور زمان جایگاه خود را در پروژه های تحقیقاتی باز کرده است. [۵، ۶]

فوجینو حفاظت لرزه ای سازه های مجهز به سیستم های کنترل نیمه فعال تحت بارهای هارمونیک را بررسی کرد. [۷] بعدها، نجار جایا به تأثیر میراگرهای نیمه فعال بر روی نوسانگرهای خطی و استفاده از این نوع سیستم ها با میرایی و سختی متغیر تحت بارهای لرزه ای پرداخت. [۸، ۹]

ایده استفاده از میراگرهای جرمی برای کنترل ارتعاش اولین بار توسط فرام برای کاهش ارتعاش و حرکت بدنه کشتی ارائه شد. [۱] براساس مشاهدات و تحقیقات انجام شده در مورد تاثیر میراگرها در کنترل ارتعاشات در نهایت بیشاپ و فالکن روی بهینه سازی میراگرها کار کردند. [۲، ۳] و راندال جداولی برای طراحی میراگرها را در سازه های معمولی ارائه کرد. [۴]

برای کاهش تاخیر زمانی و افزایش قابلیت اطمینان سیستم های کنترلی غیرفعال، میراگرهای نیمه فعالی پیشنهاد شده اند که می توانند پارامترهای مکانیکی را بر اساس بازخورد دریافتی از پاسخ سازه تحت

جدول ۱: مشخصات تیرها و ستون ها

تیر	ستون	طبقه
IPE	BOX	
300	250x250x20	1
300	250x250x20	2
300	200x200x150	3
270	200x200x150	4

طبق مشاهدات شومی [۱۳]، انتخاب ۱۰ تا ۲۰ رکورد زلزله معمولاً دقت قابل قبولی را ارائه می دهند، اما بدیهی است که هر چه تعداد رکوردهای انتخاب شده بیشتر باشد، عدم قطعیت کاهش بیشتری خواهد داشت. بر این اساس، ۱۴ شتاب نگاشت که در جدول ۲ نمایش داده شده است در این مطالعه استفاده شد.

جدول ۲: لیست شتاب نگاشت های انتخابی

سال	بزرگا	ایستگاه	نام	شماره
1989	6.93	Corralitos	Lomap	۱
1989	6.93	Saratoga-aloha Ave	Lomap	۲
1992	7.01	Cape Mendocino	Cape Mendocino	۳
1992	7.01	Petrolia	Cape Mendocino	۴
1994	6.69	LA-Sepulveda	Northridge-01	۵
1994	6.69	Sylmar	Northridge-01	۶
1999	7.62	Tcu067	Chi-Chi	۷
1999	7.62	Tcu084	Chi-Chi	۸
1999	7.62	Tcu102	Chi-Chi	۹
1979	5.74	Gillroy array06	Coyote lake	۱۰
1984	6.19	Andersondam	Morgan hill	۱۱
1991	5.61	Cogswell	Sierra Madre	۱۲
1994	6.69	LA Dam	Northridge-01	۱۳
1999	6.2	Tcu129	Chi-Chi	۱۴

به منظور انجام تحلیل پارامتریک دو معیار  $C_1$  و  $C_2$  به صورت

زیر تعریف شد:

$$C_1 = \frac{\text{Max}|X_{s2}(t)|}{\text{Max}|X_{s1}(t)|} \quad (۱)$$

$$C_2 = \frac{\text{Max}\|X_{s2}(t)\|}{\text{Max}\|X_{s1}(t)\|} \quad (۲)$$

درفرمول های بالا  $X_{s2}(t)$  و  $X_{s1}(t)$  به ترتیب جابجایی افقی سازه در حضور و عدم حضور میراگر نیمه فعال هستند، با این تفاوت که معیار  $C_1$  بر اساس بیشترین پاسخ بوده و معیار  $C_2$  بر اساس مجذور میانگین پاسخ ها می باشد. با در نظر گیری معیارها و انجام تحلیل پارامتریک فرکانس بهینه ۱۰،۲۹ رادیان بر ثانیه و حد پایین و بالای ۷ و ۱۳ درصد برای میرایی به عنوان مقادیر بهینه برای همه رکوردها

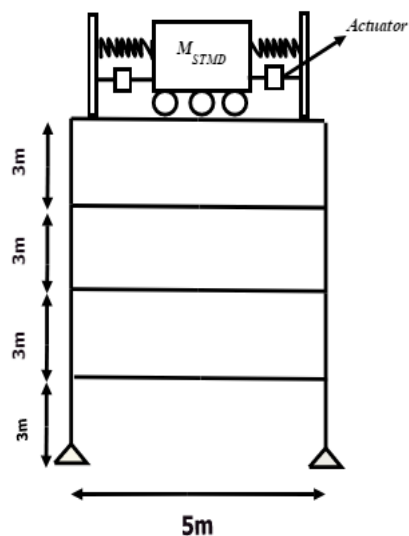
پاستیا و لوکا یک سازه ۳ طبقه تحت بارهای لرزه ای و هارمونیک را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که عدم قطعیت در سازه و زلزله نسبت به سیستم غیرفعال تأثیر بیشتری بر عملکرد سیستم کنترل نیمه فعال دارد. [۱۰]

اسگوبا و مارانو اثر عدم قطعیت های لرزه ای را بر روی یک مدل تصادفی در محدوده رفتار غیرخطی سازه و چترجی عملکرد سیستم های کنترل نیمه فعال را تحت ارتعاشات خود برانگیخته بررسی کردند. [۱۱]

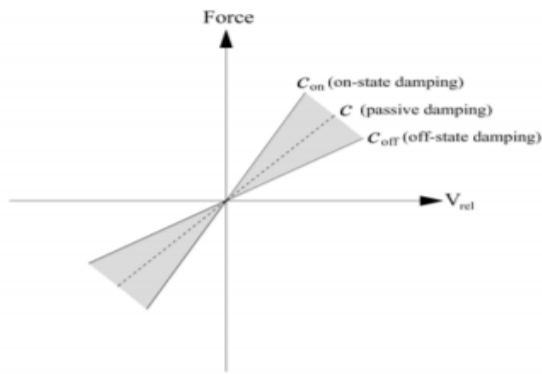
تمام مطالعات انجام شده به بررسی عدم قطعیت های لرزه ای یا شناختی سازه ها و میراگرهای غیرفعال و فعال به صورت جداگانه محدود شده است. بنابراین، کمبود مطالعات جامع در مورد کاربرد همزمان عدم قطعیت ها در پارامترهای میراگر جرمی نیمه فعال وجود دارد. در این خصوص، مطالعه حاضر با هدف بررسی کامل عدم قطعیت ها در میراگر جرمی نیمه فعال نصب شده بر روی قاب خمشی کوتاه مرتبه با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی مواد انجام شد.

## مدلسازی هندسی

در این تحقیق سازه ای ۴ طبقه با پلان منظم و با سیستم باربر جانبی قاب خمشی در منطقه ای با لرزه خیزی بالا مطابق با آیین نامه ۲۸۰۰ طراحی و بارگذاری ثقیل و لرزه ای سازه مطابق با مبحث ششم انجام شد. قاب میانی این سازه به صورت ۲ بعدی به منظور انجام تحلیل های دینامیکی غیرخطی انتخاب و با استفاده از نرم افزار Opensees مدل سازی مفصل های پلاستیک به صورت فایبر با پنج نقطه انتگرال گیری در امتداد عناصر تیر و ستون در نظر گرفته شد. شکل شماتیک سازه مدل شده و مشخصات اعضای سازه ای به ترتیب در شکل و جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۱: شماتیک سازه مدل شده در نرم افزار



شکل ۳: دیاگرام سرعت-نیرو برای میرایی [14]

همانطور که در شکل ۳ ملاحظه می شود با توجه به اینکه حد بالا و پایین برای میراگر در نظر گرفته شده اما میراگر به دلیل نیمه فعال بودن قادر به تولید درصدهای مختلف میرایی در این بازه می باشد.

تحلیل قابلیت اعتماد

متغیرهای تصادفی

این مطالعه به بررسی اثر عدم قطعیت های لرزه ای و عدم قطعیت های شناختی در پارامترهای میراگر جرمی نیمه فعال مانند جرم و فرکانس پرداخته، همچنین برای در نظر گرفتن اثرات تاخیر زمانی بر عملکرد سیستم به بررسی عدم قطعیت های موجود در سیستم کنترلی همانند، حدود میرایی بالا و پایین و نیروی کنترلی پرداخته است.

دامنه تغییرات در متغیرهای تصادفی و توزیع های مربوطه از پایگاه داده جمع آوری شده توسط کالینز و نوآک استخراج شده و در جدول ۴ ارائه شده است. [۱۵]

جدول ۴: شاخص های آماری متغیرهای تصادفی

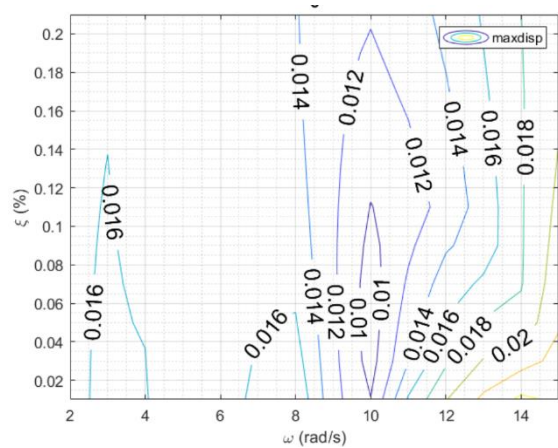
پارامتر	توزیع	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات	پارامترهای توزیع	
					A	B
نیرو	یکنواخت	1	0.05	0.05	0.9	1.1
حد بالای میرایی	یکنواخت	0.13	0.005	0.05	0.12	0.14
حد پایین میرایی	یکنواخت	0.07	0.005	0.05	0.06	0.08
جرم	نرمال	1400	143.68	0.1	-	-
فرکانس	نرمال	10.29	1.03	0.1	-	-

نمونه گیری ابر مکعب لاتین

در روش ابرمکعب لاتین، نمودار چگالی احتمال متغیرهای تصادفی به چند قسمت با احتمال یکسان تقسیم می شود که تعداد تقسیمات به پروژه و دقت مورد نیاز بستگی دارد. در نهایت با انتخاب نماینده برای

انتخاب شد. در شکل ۲ نمونه ای از تحلیل پارامتریک انجام شده برای مثال بر اساس معیار بیشترین پاسخ (maxdisp) آورده شده است.

شکل ۲: نمودار تحلیل پارامتریک برای زلزله Lomamp (زلزله شماره ۱ از جدول ۲)



بدین ترتیب با در نظرگیری نسبت جرمی ۵ درصد برای میراگر جرمی مشخصات پارامتری میراگر الحاقی به صورت زیر در جدول ۳ نمایش داده شده است:

جدول ۳: مشخصات میراگر جرمی تنظیم شونده

نام	جرم (کیلوگرم)	فرکانس (رادیان بر ثانیه)	حد پایین میرایی بر حسب درصد	حد بالای میرایی بر حسب درصد
مقدار	1400	10.29	0.07	0.13

در مطالعه حاضر از الگوریتم on-off DBG به منظور نیمه فعال کردن میراگر جرمی استفاده شده است که بر اساس سرعت نسبی بین دو سر میراگر و نقطه کنترلی (بام) نیرویی کنترلی محاسبه شده و در هر لحظه در جهت عکس نیروی لرزله به سازه وارد می کند معادلات ۳ و ۴ و نحوه خاموش و روشن بودن میراگر را نشان داده و در شکل ۳ دیاگرام نیرو بر اساس سرعت که توسط زهرایی [14] بیان شده است نمایش داده شده است:

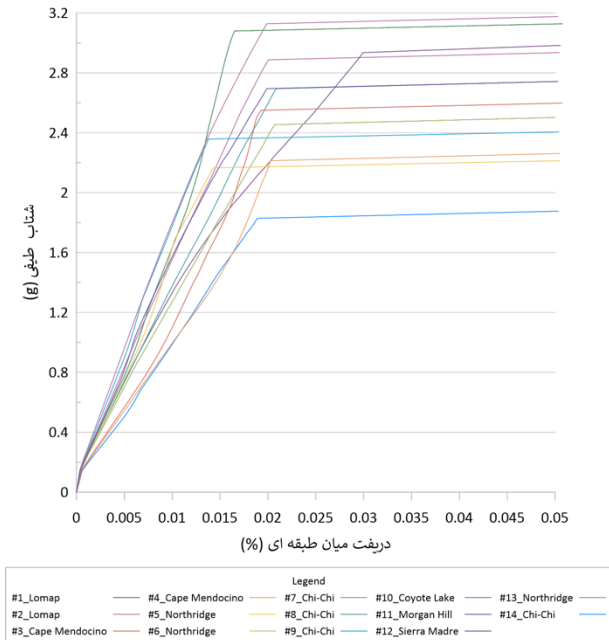
$$V_r = V_1 - V_2 \tag{3}$$

$$X_1 \times V_r \geq 0 \rightarrow \text{روشن} \tag{4}$$

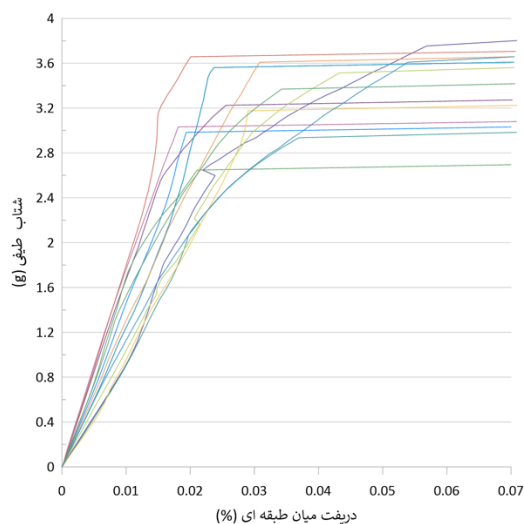
$$X_1 \times V_r \leq 0 \rightarrow \text{خاموش} \tag{5}$$

با توجه به معادله ۴ هنگامی که نیرو و جابجایی حاصله هم جهت باشند (هر دو مثبت و یا هر دو منفی) میراگر جرمی فعال شده و نیروی کنترلی را وارد خواهد کرد اما بر اساس فرمول ۵ هنگامی که نیرو زلزله و جابجایی به وجود آمده در سازه هم جهت نباشند میراگر جرمی خاموش باقی مانده و واکنشی نشان نخواهد داد.

ایمنی جانی طراحی می شوند نتایج منحنی شکنندگی برای این سطح عملکردی در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۴: نمودار تحلیل دینامیکی افزایشده برای سازه بدون میراگر



شکل ۵: نمودار تحلیل دینامیکی افزایشده برای سازه با میراگر جرمی نیمه فعال

هر قسمت، تحلیل سازه بر اساس مقادیر نماینده ها انجام شده و منحنی شکنندگی رسم می شود. برای این منظور ناحیه زیر نمودار تابع چگالی احتمال (PDF) به ۱۰ قسمت با احتمال وقوع یکسان تقسیم و میانه هر قسمت به عنوان نماینده انتخاب شد. سپس ۱۰ ترکیب برای متغیرهای تصادفی با توجه به اینکه هر نماینده فقط یک بار قابل انتخاب است به صورت تصادفی انتخاب و مقادیر در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵: مقادیر متغیرهای تصادفی در ۱۰ قسمت انتخابی

شماره	جرم	فرکانس	نیرو	حد پایین میرایی	حد بالای میرایی
1	1549.5	10.23	0.97	0.063	0.135
2	1806	9.96	1.07	0.079	0.127
3	1244.5	11.06	1.01	0.061	0.125
4	1453.05	9.26	1.09	0.075	0.129
5	991.5	10.74	0.95	0.077	0.121
6	1298.94	9.65	1.05	0.067	0.123
7	1415.4	13.34	0.91	0.065	0.139
8	1379.1	10.49	0.93	0.069	0.131
9	1495.25	11.45	0.99	0.071	0.137
10	1341.44	7.36	1.03	0.073	0.133

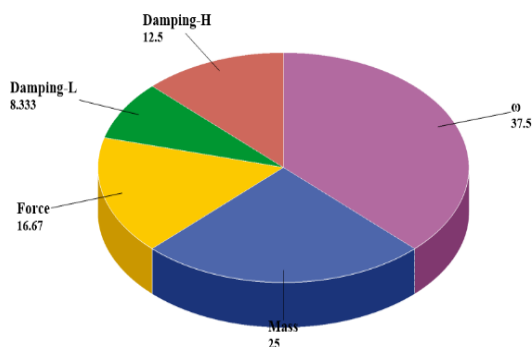
### تحلیل دینامیکی افزایشده و منحنی شکنندگی

برای ترسیم منحنی های شکنندگی، از تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA) با الگوریتم گام به گام استفاده شد، که در آن مقدار شتاب بیشینه (PGA) رکوردها به شتاب  $0.5g$ ، مقیاس بندی شد و سپس با گام افزایشی  $0.5$  افزایش یافت. موضوع بسیار مهم در ترسیم نمودارهای IDA، انتخاب یک شاخص شدت (IM) و یک شاخص خسارت (DM) مناسب برای دستیابی به هدف مورد نظر مطالعه است. در این مطالعه شتاب طیفی (Sa) به عنوان معیار شدت و حداکثر دریفت بین طبقه ای برای شاخص خسارت در نظر گرفته شد که به عنوان یک پارامتر مهم در تحلیل عملکردی و یک معیار ناپایداری دینامیکی جهانی شناخته می شود. به این ترتیب نمودارهای IDA شتابنگاشت ها در شکل ۴ و ۵ رسم شده است.

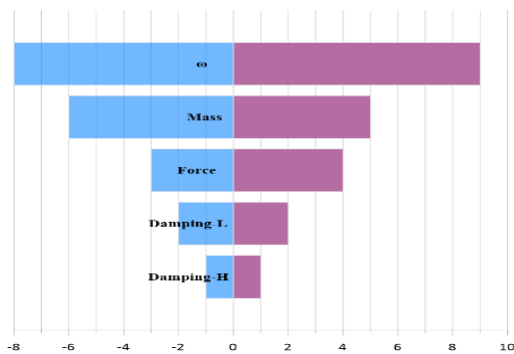
برای ترسیم منحنی های شکنندگی، از سطوح عملکرد توصیه شده توسط نشریه ۳۶۰ استفاده شد. در هر مرحله با استفاده از دریفت بین طبقه ای و دوران تیرها و ستونها سطح عملکرد سازه تعیین و احتمال فراگذشت از آن بدست آمد. این بار برای سازه بدون میراگر و یک بار سازه با میراگر انجام شد تا اثر میراگر الحاقی در سطح عملکردی سازه تعیین گردد از آن جا که سازه های معمول برای سطح عملکردی

سطح عملکردی سازه ترسیم شدند. اکنون، به مطالعه این پرداخته خواهد شد که کدام پارامتر تأثیر بیشتری بر نتایج تجزیه و تحلیل داشته است. برای این منظور، تنها یک متغیر تصادفی در هر یک از ۱۰ سازه مدل سازی شده موجود تغییر کرده و تأثیر این تغییر بر دررفت میان طبقه ای بررسی شده است.

به منظور درک بهتر نتایج یک نمودار دایره ای جهت بررسی تأثیر عدم قطعیت ها نسبت به یکدیگر و نمودار توردادو برای تأثیر عدم قطعیت ها بر روی دررفت میان طبقه ای خروجی گرفته شده است. نتایج این بررسی در شکل ۷ و ۸ نشان داده شده است.



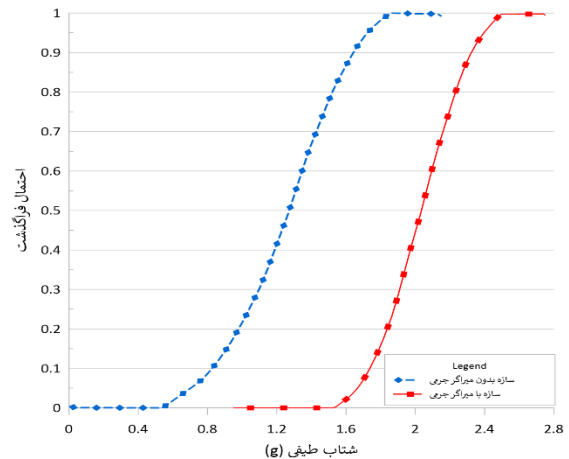
شکل ۷: نمودار دایره ای تأثیر عدم قطعیت ها نسبت به یکدیگر



شکل ۸: نمودار توردادو تأثیر عدم قطعیت ها بر دررفت میان طبقه ای

با دقت در شکل ۷ می توان برداشت کرد که فرکانس زاویه ای مهم ترین و تأثیرگذارترین عدم قطعیت در مطالعه این پژوهش بوده و جرم و نیروی کنترلی به ترتیب بعد از فرکانس اهمیت پیدا خواهند کرد. حد بالای میرایی تقریباً تأثیر ناچیزی داشته و می توان در مطالعات بعدی در نظر گرفته نشود.

از نتایج شکل ۸ می توان استنباط کرد فرکانس زاویه ای و جرم دو پارامتر تأثیرگذار و عدم قطعیت های مهمی در برآورد پاسخ سازه



شکل ۶: منحنی شکنندگی سازه در سطح عملکردی ایمنی جانی در حضور وعدم حضور میراگر

همانطور که در شکل های ۴ و ۵ نمایش داده شده است هنگامی که میراگر جرمی نیمه فعال به سازه اضافه شود منحنی IDA سازه تا شتاب طیفی بالاتری خواهد رفت و همچنین در دررفت میان طبقه ای بیشتری به حد فروریزش خود خواهد رسید. بنابراین میراگر جرمی توانسته ظرفیت سازه را افزایش دهد.

از طرفی با دقت در شکل ۶ می توان اینگونه برداشت کرد که در سطح عملکردی ایمنی جانی با اضافه شدن میراگر جرمی نیمه فعال احتمال فراگذشت از سطح عملکردی موجود سازه به ازای یک نقطه انتخابی بسیار کاهش پیدا کرده است که این قضیه بیانگر این می باشد که تاب آوری سازه مورد تحقیق افزایش یافته است. برای مثال سازه بدون میراگر با فراتر رفتن از شتاب طیفی ۰.۵۵، احتمال فراگذشت شروع به افزودن خواهد کرد این اتفاق در سازه به همراه میراگر بعد از شتاب طیفی ۱.۵۵ شروع می شود. این بدین معنی است که در حدود 1g رفتار سازه تحقیقاتی بهتر شده است.

### تأثیر عدم قطعیت شناختی

برای بررسی اثر افزودن عدم قطعیت های شناختی به تحقیق، افزایش احتمال فراگذشت با اضافه شدن عدم قطعیت شناختی بررسی شد این کار با تحلیل سازه هنگامی که عدم قطعیت های نیرو کنترلی حضور خواهد داشت و به بار بدون آن ها انجام شد و مشاهده شد که اضافه شدن عدم قطعیت شناختی بین ۱.۵ تا ۱۵ درصد در سطح عملکردی ایمنی جانی در خاک انتخابی می تواند تأثیرگذار باشد. بنابراین اینگونه می توان نتیجه گرفت که در نظر گرفتن این عدم قطعیت ها امری بسیار ضروری است و می تواند نتایج را دستخوش تغییرات محسوس کند.

### تحلیل حساسیت

همانطور که قبلاً ذکر شد عدم قطعیت ها در این مطالعه به دو دسته تقسیم می شوند و منحنی های IDA و شکنندگی برای عدم قطعیت ها در

۴. شاخص قابلیت اعتماد از ۱٫۷۵ به ۲٫۶۷ افزایش می یابد. متناسباً سطح عملکردی سازه بهبود یافته و مولفه استحکام در تاب آوری سازه بیشتر شده است.

### مراجع

- [1] H.H. Frahm, Results of trials of the anti-rolling tanks at sea, J. Am. Soc. Nav. Eng. 23(1911)571-597 <https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.1911.tb04595.x>.
- [2] R.E.D. Bishop, D.B. Welbourn, The problem of the dynamic vibration absorber, Eng. L. 174 (1952) 769.
- [3] K.C. Falcon, B.J. Stone, W.D. Simcock, C. Andrew, Optimization of Vibration Absorbers: A Graphical Method for use on Idealized Systems with Restricted Damping, J. Mech. Eng. Sci. 9(1967)374-381. [https://doi.org/10.1243/jmes\\_jour196700905802](https://doi.org/10.1243/jmes_jour196700905802).
- [4] S.E. Randall, D.M. Halsted, D.L. Taylor, Optimum vibration absorbers for linear damped systems, J. Mech. Des. Trans. ASME. 103(1981)908-913. <https://doi.org/10.1115/1.3255005>.
- [5] S.M. Zahrai, A. Zare, M.K. Khalili, A. Asnafi, Seismic design of fuzzy controller for semi-active tuned mass dampers using top stories as the mass, Asian J. Civ. Eng. 14 (2013) 383-396.
- [6] S. Pourzeynali, S. Salimi, M. Yousefifefat, H.E. Kalesar, Robust multi-objective optimization of STMD device to mitigate buildings vibrations, Earthquakes Struct. 11 (2016) 347-369 <https://doi.org/10.12989/eas.2016.11.2.347>.
- [7] T. Pinkaew, Y. Fujino, Effectiveness of semi-active tuned mass dampers under harmonic excitation, Eng. Struct. 23 (2001) 850856. [https://doi.org/10.1016/S01410296\(00\)00091-2](https://doi.org/10.1016/S01410296(00)00091-2).
- [8] R.P. Eason, C. Sun, A.J. Dick, S. Nagarajaiah, Attenuation of a linear oscillator using a nonlinear and a semi-active tuned mass damper in series, J. Sound Vib. 332 (2013) 154-166. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2012.07.048>.
- [9] C. Sun, S. Nagarajaiah, Study on semi-active tuned mass damper with variable damping and stiffness under seismic excitations, Struct. Control Heal. Monit. 21 (2014) 890-906 <https://doi.org/10.1002/stc.1620>.
- [10] C. Pastia, S.-G. Luca, Vibration control of a frame structure using semi-active tuned mass damper, Bul. Institutului Politeh. Din Lasi. Sect. Constr. Arhit. 59 (2013) 31.
- [11] S. Sgobba, G.C. p, Optimum design of linear tuned mass dampers for structures with nonlinear behavior, Mech. Syst. Signal Process. 24(2010)17391755. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2010.01.009>
- [12] J. Mondal, S. Chatterjee, Efficacy of Semi-active Absorber for Controlling Self-excited Vibration, J. Inst. Eng. Ser. C. 101 (2020) 97-103. <https://doi.org/10.1007/s40032-019-00521-1>.
- [13] N. Shome, Probabilistic seismic demand analysis of nonlinear structures, Stanford University. ProQuest Dissertations Publishing, 1999. 9924607..
- [14] M. Ramezani, A. Bathaei, S.M. Zahrai, comparing fuzzy type-1 and -2 in semi-active control with TMD considering uncertainties, Smart Struct. Syst. 23 (2019) 155-171. <https://doi.org/10.12989/ss.2019.23.2.155>.
- [15] A.S. Nowak, K.R. Collins, Reliability of structures, CRC press, 2012

خواهند بود فرکانس زاویه ای خود به تنهایی می تواند تا ۱۰ درصد نتایج را دستخوش تغییر کند. جرم به عنوان دومین متغیر تصادفی مهم توانسته تا ۶ درصد در نتایج تاثیرگذار باشد.

### شاخص قابلیت اطمینان

به منظور دستیابی به یک برآورد کلی و گرفتن نتیجه نهایی در خصوص کارایی و عملکرد سیستم کنترلی الحاقی، شاخص قابلیت اطمینان ( $\beta$ ) در حالت حضور و عدم حضور میراگر بررسی و محاسبه شد که در جدول ۶ نمایش داده شده است.

**جدول ۶:** شاخص قابلیت اطمینان و احتمال شکست در سطح عملکردی ایمنی

جانی در حضور و عدم حضور میراگر جرمی نیمه فعال

سیستم کنترلی	بدون میراگر جرمی نیمه فعال	با میراگر جرمی نیمه فعال
احتمال شکست	0.04	0.0037
شاخص قابلیت اطمینان	1.75	2.67

با استفاده از اطلاعات جدول ۶ نتیجه گیری می شود استفاده از سیستم میراگر جرمی نیمه فعال شاخص قابلیت اطمینان را ۰٫۹۳ ارتقا داده است و احتمال شکست را بسیار کاهش داده است. بدین ترتیب استفاده از سیستم پیشنهادی به منظور افزایش قابلیت اعتماد سازه های قاب خمشی کوتاه مرتبه توصیه خواهد شد.

### نتیجه گیری و جمع بندی

قابلیت اطمینان سازه های مجهز به تجهیزات کنترلی، موضوع مهمی است که تا کنون کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. در این تحقیق به بررسی قابلیت اطمینان قاب های خمشی کوتاه مرتبه مجهز به میراگر جرمی نیمه فعال پرداخته شد و نتایج زیر بدست آمد:

۱. عدم قطعیت های شناختی موجود تاثیر به سزایی در عملکرد و پاسخ سازه مورد بررسی خواهد داشت و توصیه می شود مورد توجه قرار گیرد. در مطالعه حاضر، فرکانس زاویه ای، تا ۱۰ درصد موجب تغییر نتایج شده است.
۲. با استفاده از میراگر جرمی نیمه فعال ظرفیت سازه افزایش یافته و در شتاب طیفی بالاتری به حد فروریزش خود خواهد رسید.
۳. منحنی شکنندگی سازه هنگام افزودن سیستم کنترلی نیمه فعال به سمت راست انتقال یافته و به ازای یک شتاب طیفی معین احتمال فراگذشت پایین تری را از خود نشان خواهد داد.