

## تولید منحنی های خرابی برای ارزیابی آسیب پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های بتن مسلح با آلیاژ حافظه دار شکلی در حالات منظم، نامنظمی زیاد و نامنظمی شدید پیچشی

پدرام امیدیان<sup>۱</sup>، حمید صفاری<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

### چکیده

طراحی و ساخت ساختمان‌های نامنظم بدلیل تقاضا جهت داشتن سازه‌های زیبا و خاص همواره مد توجه بوده است. از سوی دیگر استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی (SMA) بدلیل بهبود رفتار ساختمان‌های بتن مسلح در دهه اخیر گسترش یافته است. از مزایای اصلی استفاده از این آلیاژ می‌توان به خاصیت سوپر الاستیک بودن آن و امکان برگشت تغییر مکان‌های غیر ارتجاعی سازه اشاره نمود. وجود نامنظمی در سازه‌ها سبب می‌شود که در اثر بارهای جانبی و بخصوص زلزله پیچش در سازه بوجود آید و نیروها و تغییر مکان‌ها افزایش یابند. در صورتیکه اثرات مخرب نامنظمی در طراحی اولیه لحاظ نشده باشد خطر فروریزش ساختمان با توجه به درجه نامنظمی وجود دارد. در این مقاله به بررسی رفتار سازه‌های بتن آرمه با آلیاژ SMA در حالات منظم، نامنظمی زیاد و نامنظمی شدید پیچشی پرداخته شده و اثر استفاده از این آلیاژ نسبت به ساختمانهای بتنی معمولی در درجات مختلف نامنظمی با منحنی های شکنندگی نشان داده شده است. در این راستا به بررسی تاثیرات آلیاژهای حافظه‌دار شکلی به عنوان میگردها طولی در سازه‌های کوتاه مرتبه، میان مرتبه و بلند مرتبه بتن مسلح با سه آرایش مختلف آرماتورهای طولی پرداخته شده است. نوع آرایش متفاوت میگردها شامل حالت تماما میگردها فولادی، حالت میگردها آلیاژ حافظه‌دار شکلی در محل ناحیه مفصل پلاستیک تیرها و میگردها فولادی در سایر نواحی و حالت میگردها آلیاژ حافظه‌دار شکلی در تمام طول تیرها می‌باشد. در کلیه حالات فوق در ستون‌ها از میگردها فولادی جهت اقتصادی استفاده شده است. سپس تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی فزاینده (IDA) تحت اثر ده شتابنگاشت منتخب صورت پذیرفت و تغییر مکان نسبی حداکثر هر حالت محاسبه و منحنی‌های شکنندگی مطابق با دستورالعمل HAZUS برای هر یک از حالات سازه‌ای محاسبه گردیدند. نتایج به دست آمده نشان دهنده این حقیقت است که وجود آلیاژ حافظه‌دار در ساختمان‌های نامنظم سبب تخفیف اثرات مخرب نامنظمی از جمله تغییر مکان نسبی حداکثر و تغییر مکان نسبی پسماند سازه خواهد شد. این نتیجه بیانگر آن است که استفاده از آلیاژ SMA در ساختمان‌های نامنظم پیچشی زیاد و شدید می‌تواند به کاهش خسارات سازه در اثر زلزله شدید احتمالی بیانجامد.

کلمات کلیدی: آلیاژ حافظه‌دار شکلی، سازه بتن مسلح، تحلیل دینامیکی فزاینده، تغییر مکان نسبی حداکثر، تغییر مکان نسبی پسماند، منحنی خرابی، نامنظمی پیچشی

| شناسه دیجیتال: |  | سابقه مقاله: |                     |            |                 |            |
|----------------|--|--------------|---------------------|------------|-----------------|------------|
| doi:           | 10.22065/jsce.2018.121215.1485         | چاپ          | انتشار آنلاین       | پذیرش      | بازنگری         | دریافت     |
|                | https://10.22065/jsce.2018.121215.1485 | ۱۳۹۸/۱۰/۰۱   | ۱۳۹۷/۰۴/۲۱          | ۱۳۹۷/۰۴/۲۱ | ۱۳۹۷/۰۳/۲۲      | ۱۳۹۶/۱۲/۱۱ |
|                |  |              | حمید صفاری          |            | *نویسنده مسئول: |            |
|                |  |              | h_saffari@sbu.ac.ir |            | پست الکترونیکی: |            |

# Fragility curves for seismic assessment of reinforced concrete buildings with shape memory alloy in regular, torsional irregularity and extreme torsional irregularity

pedramomidian<sup>1</sup> Hamid Saffari<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> M.Sc. in Civil-Earthquake Engineering, University of ShahidBeheshti, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Assistant Professor, Faculty of Civil & Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

## ABSTRACT

The design and construction of irregular buildings has always been the focus of attention due to the demand for a beautiful and unique structure. Furthermore, the use of Shape Memory Alloys (SMAs) has expanded due to the improvement of the behavior of RC structures in the last decade. The main advantages of using this alloy are its super-elasticity and the reversibility of inelastic displacements of the structure. In this paper, the behavior of reinforced concrete structures with SMA alloy in regular, torsional irregularity and extreme torsional irregularity are investigated. The effect of using this alloy has been shown using fragility curves in different degrees of irregularities than conventional concrete structures. In this regard, the effects of memory-shaped alloys as longitudinal reinforcement in short-order, intermediate, and high-order structures with three different arrangements of longitudinal reinforcements have been investigated. Different types of reinforcement arrangements are the case of full Steel, the case of SMA at the plastic region of the beams and steel reinforcement in other regions and finally the case of SMA reinforcement over the entire length of the beams. In all of the above cases, steel bars are used in columns for economic purposes. Then, several increasing nonlinear dynamic analysis (IDA) were performed under the influence of the 10 selected accelerometers, and maximum drift of each analysis was obtained and the fragility curves were calculated in accordance with the HAZUS instruction for each structural case. The results indicate that the presence of memory alloy in irregular buildings will reduce the damaging effects of irregularities, including maximum drift and residual drift of the structure. This result suggests that the use of SMA alloy in torsional irregular and extreme torsional irregular buildings can reduce the structural damage caused by a possible severe earthquake.

## ARTICLE INFO

**Receive Date:** 02 March 2018

**Revise Date:** 12 June 2018

**Accept Date:** 12 July 2018

### Keywords:

Shape Memory Alloy,  
Irregular Concrete Structure,  
Incremental Dynamic  
Analysis,  
Maximum Drift,  
Residual Drift,  
Fragility curve,  
Torsional Irregularity

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2018.121215.1485

\*Corresponding author: Hamid Saffari.

Email address: h\_saffari@sbu.ac.ir

## ۱- مقدمه

یکی از آسیب های متداول سازه های بتنی در زلزله های شدید تغییر شکل های جانبی زیاد می باشد. آئین نامه های طراحی سازه های بتن مسلح در چند دهه اخیر توجه زیادی بر افزایش شکل پذیری ساختمانهای بتنی خصوصا در مناطق با لرزه خیزی زیاد داشته اند. در مبانی طراحی لرزه ای نوین سازه های بتن مسلح، مورد انتظار است که سازه تحت اثر زلزله های شدید وارد ناحیه غیرخطی گردد و آرماتورهای فولادی به حد تسلیم رسیده و طی تغییر شکل های دائمی اجزا و نیز خرابی بتن غیرمحصور بخشی از انرژی مستهلک می گردد. بدیهی است ساختمان های بتن آرمه تحت زلزله های شدید دچار جابجایی های پسماندی می گردد که ممکن است غیر قابل ترمیم و در نتیجه سبب عدم استفاده مجدد از سازه شود. آلیاژهای حافظه دار شکلی (SMA)<sup>۱</sup> ماده ای منحصر به فردی است که می تواند تغییر شکل های بزرگ و غیرالاستیک را تحمل کرده و از طرف دیگر با برداشت تنش بار دیگر به شکل اوله خود باز می گردد. استفاده از این آلیاژها می تواند راه حل مناسبی جهت برطرف نمودن مشکل تغییر شکل های پسماند باشد. وجود آلیاژ حافظه دار شکلی این اجازه را به طراحان خواهد داد که سازه های بتن مسلح را به نحوی طراحی نمایند که خرابی کم تر و تعمیرات پس از زمین لرزه کاهش یابد. البته آلیاژهای حافظه دار شکلی مدول الاستیسیته و حلقه های هیسترتیک نسبتا کوچکتری نسبت به فولاد دارد، که همین عامل سبب تغییرات قابل ملاحظه ای در رفتار لرزه ای ساختمان های بتنی می گردد. از این رو استفاده از آلیاژهای حافظه دار شکلی از اهمیت ویژه ای در مناطق با لرزه خیزی زیاد خواهد داشت. تحقیقات آزمایشگاهی و عددی صورت گرفته سال های اخیر نشان دهنده کاربرد مناسب این آلیاژ به صورت میلگرد و وایر (سیم) در مهندسی سازه و زلزله است. سایدی و ونگ به مطالعه دو ستون که در نقاط مفصل پلاستیک یکی از آنها از آلیاژهای حافظه دار شکلی و در دیگری از فولادهای متداول در کارهای عمرانی استفاده گردیده بود، پرداختند [۱]. علم و همکاران در سال ۲۰۰۹ به بررسی و تحلیل یک قاب بتنی خمشی که در مفصل پلاستیک آن ها از آلیاژهای حافظه دار شکلی استفاده گردید بود، همت گماشتند [۲]. عبدولرپها دست به آزمایشاتی بر روی تیرهای دارای آلیاژهای حافظه دار شکلی زد [۳]. علم و همکاران به بررسی قاب های سه، شش و هشت طبقه با سه نوع آرایش متفاوت میلگرد های طولی در تیرها پرداختند [۴]. رحیمی، تقی پور و همکاران به مدلی سازی آزمایشگاهی و کامپیوتری خصوصات مکانیکی استوانه های بتنی دورپیچ شده با آلیاژهای حافظه دار شکلی پرداختند [۵]. امیدیان به بررسی ارزیابی سازه های بتن مسلح مجهز به آلیاژ هوشمند در سازه های منظم و کوتاه مرتبه پرداخت [۶]. نتایج بدست آمده از تحقیقات بالا نشان می دهد که وجود آلیاژ حافظه دار شکلی سبب افزایش توان بازگرداندگی تغییر شکل ها و نیز ظرفیت عضو مسلح به این الیاژ و متعاقبا افزایش محصور شدگی عضو می گردد.

بر اساس آیین نامه های لرزه ای، محل قرارگیری اجزاء سازه ای و نحوه توزیع جرم در ساختمان، پیکربندی هر ساختمان را تشکیل می دهد. مطابق با آیین نامه لرزه ای ایران، آیین نامه ۲۸۰۰ [۷]، سازه های نامنظم پیچشی به دو دسته، نامنظم پیچشی زیاد و شدید تقسیم بندی می گردد، در صورتی که نسبت حداکثر تغییر مکان طبقه به میانگین تغییر مکان دو انتهای سازه در آن طبقه بیش از ۱/۲۰ باشد، سازه دارای نامنظمی زیاد و چنانچه این نسبت بیش از ۱/۴۰ گردد، سازه دارای نامنظمی شدید می باشد. افزایش نامنظمی پیچشی در یک سازه منجر به افزایش تغییر مکان های ناشی از زمین لرزه و در نتیجه افزایش تلاش های داخلی المان های باربرجانبی می گردد که باعث تسلیم و خرابی این اجزا و در نهایت فروریزش سازه خواهد شد. از این رو ضروری است که در طراحی لرزه ای سازه های بتن مسلح ضوابط کاملتری اعمال گردد تا بتوانند سطوح عملکرد لرزه ای را مطابق با آیین نامه های مربوطه ارضاء کند. وظیفه، سازه های ۱۵ طبقه دارای نامنظمی جرم و سختی در نقاط مختلف آن ایجاد شده بود را مورد مطالعه قرار داد. نتایج حاصله بیانگر تاثیر چشمگیر نامنظمی بر رفتار لرزه ای سازه ها است [۸]. سروقد مقدم و تی سو با استفاده از روش بار افزون مطالعاتی بر روی سازه های بتن مسلح صورت گرفت. در این روش از دو تحلیل بار افزون سه بعدی استفاده شد که در تحلیل اول نقطه عملکرد حاصل شد و در تحلیل دوم سطح عملکرد و ویرانی های سازه مورد بررسی قرار گرفت [۹]. در یک مطالعه عددی توسط هاشمی، عملکرد ساختمان های بتنی با قاب خمشی متوسط گسترش یافته در پلان و ارتفاع،

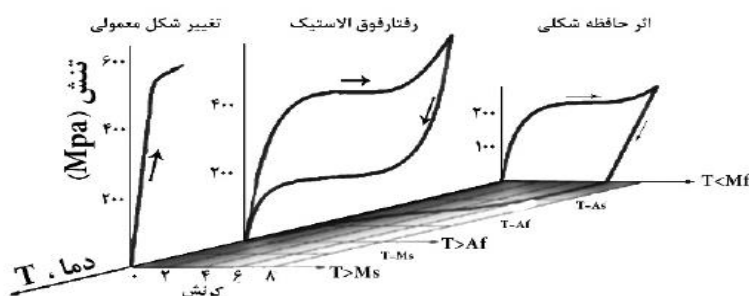
<sup>۱</sup> Shape Memory Alloys

با استفاده از تحلیل های بار افزون و تاریخچه زمانی، در محدوده غیرخطی مورد بررسی قرار گرفت [۱۰]. فجفر و کیلار روش N2 را برای سازه های نامتقارن فرمول بندی کردند. روش N2 اصلاح شده شامل دو آنالیز بار افزون سه بعدی است که نیرو در مرکز جرم وارد می گردد. تغییر مکان هدف به طور جداگانه در دو جهت به دست آمده و سپس مشخصه مورد مطالعه که شامل تغییر مکان و یا شکل پذیری است را بوسیله روش SRSS ترکیب می گردند. در این پژوهش اگرچه نتایج به دست آمده پراکندگی زیاد با آنالیز دینامیکی داشته اند، اما پیش بینی پاسخ سازه در این روش مطلوب بوده است. باید افزود در مواردی که عدم تقارن در سازه زیاد باشد، از این روش نمی توان استفاده نمود [۱۱]. امیدیان و صفاری به ارزیابی آسیب پذیری لرزه ای ساختمان های بتن مسلح در دو سطح منظم و نامنظم زیاد پرداختند و نشان دادند که وجود نامنظمی سبب بحرانی تر شدن وضعیت میگردد [۱۲].

در این مقاله بنا به ضرورت های ذکر شده، آسیب پذیری لرزه ای ساختمان های بتن مسلح کوتاه، متوسط و بلند مرتبه که در سه حالت منظم، نامنظمی پیچشی زیاد و نامنظمی پیچشی زیاد که در آنها از آلیاژهای حافظه دار شکلی در چند نوع آرایش مختلف در تیر به-کار رفته بود، مورد بررسی ارزیابی قرار گرفته است. همچنین توابع شکنندگی خسارت در تمامی حالات ذکر شده بطور جداگانه محاسبه و ارائه شده است.

## ۲- خصوصیات آلیاژهای حافظه دار شکلی و نحوه مدلسازی آنها

از خصوصیات بارز آلیاژهای حافظه دار شکلی می توان به عدم نیاز به تعویض آلیاژها پس از زلزله، مقاومت بالا در برابر خوردگی و خستگی، قابلیت بازگشت به حالت اولیه به وسیله اعمال دما، قابلیت استهلاک انرژی زیاد و تحمل کرنش تا حدود ده درصد بدون باقی گذاشتن کرنش پسماند اشاره نمود [۱۳]. الندر محقق سوئدی، در سال ۱۹۳۲ برای نخستین بار به رفتار فوق ارتجاعی در Au-Cd (طلا-کادمیم) پی برد [۱۴]. بوهرلر و همکاران در سال ۱۹۶۳، در آزمایشگاه تسلیحات نیروی دریایی آمریکا اثر حافظه شکلی را در آلیاژ نیکل-تیتانیوم کشف کردند که نام آن را نایتینول نهادند [۱۵]. معروف ترین و پرکاربردترین آلیاژ حافظه دار شکلی، نیتینول که ترکیبی از نیکل و تیتانیوم می باشد. خصوصیت اصلی این مواد، رفتار فوق الاستیک<sup>۲</sup> و حافظه شکلی<sup>۳</sup> آنها می باشد، بدین معنی که قادر به تحمل کرنش های بزرگ تا حدود ده درصد بدون ایجاد کرنش پسماند هستند و همچنین قادر به حذف کرنش های پسماند به کمک اعمال دما می باشند [۱۶]. ویژگی های رفتاری منحصر به فرد آلیاژهای حافظه دار شکلی را می توان به چند فازی یا چند ساختاری بودنشان نسبت داد. به عبارت دیگر، چینش اتم های آلیاژهای حافظه دار شکلی در داخل شبکه کریستالی آن ها باعث به وجود آمدن دو فاز رفتاری ماتینزیت<sup>۴</sup> و آستینیت<sup>۵</sup> می شود. فاز ماتینزیت مسئول رفتار حافظه دار شکلی می باشد و در دماهای پایین پایدار است. فاز آستینیت مسئول رفتار فوق ارتجاعی و دماهای بالا پایدار می باشد. در شکل ۱ سه رفتار فوق الاستیک، نیمه الاستیک و اثر حافظه شکلی و ارتباط آن ها با دماهای مرزی تبدیل فاز آستینیت و ماتینزیت نمایش داده شده است.



شکل ۱: رفتار مکانیکی آلیاژهای حافظه دار شکلی [۱۷]

<sup>2</sup> super elastic

<sup>3</sup> Shape Memory Effect (SME)

<sup>4</sup> Martensite

<sup>5</sup> Austenite

مدل‌های رفتاری ارائه شده برای آلیاژهای حافظه‌دار شکلی را می‌توان در دو دسته بندی کلی طبقه بندی نمود که شامل مدل‌های پدیده شناختی و مدل‌های بر پایه ترمودینامیک می‌باشند. اساس مدل‌های پدیده شناختی بر نتایج آزمایشگاهی استوار می‌باشد. بسیاری از این مدل‌ها به صورت یک بعدی ارائه گردیده و به لحاظ سادگی برای کاربردهای مهندسی مناسب‌تر هستند، مخصوصاً در مهندسی سازه که از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی به صورت های مفتول و یا میله استفاده می‌شود. از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل‌های پیشنهادی توسط راجرز و همکاران [۱۸]، ایوشن و همکاران [۱۹]، لگوداس و همکاران [۲۰] و آریوکو [۲۱] نام برد. مدل‌های ترمودینامیکی بر اساس قوانین ترمودینامیک و انرژی استوار هستند. مدل‌های پیشنهاد شده توسط هونگ [۲۲] و گوو و همکاران [۲۳] نمونه‌هایی از مدل‌های ترمودینامیکی هستند. در این پژوهش از نرم‌افزار المان محدود SeismoStruct [۲۴] جهت مدلسازی این آلیاژ استفاده شده است.

### ۳- مدلسازی سازه

در این تحقیق از سازه با تعداد طبقات ۳، ۶ و ۹ قاب خمشی متوسط بتن مسلح که نماینده ساختمان‌های کوتاه، میان و بلند مرتبه مطابق با تعاریف HAZUS-MH MR5 [۲۵] مطابق جدول ۱ بهره گرفته شده است. دلیل استفاده از ارتفاع‌های متفاوت، بررسی رفتار انواع سازه‌ها در برابر زلزله‌های متفاوت می‌باشد. همچنین به منظور بررسی اثرات نامنظمی، ساختمان‌ها در سه حالت منظم، نامنظمی زیاد و نامنظمی شدید در پلان بررسی شده‌اند.

جدول ۱: طبقه بندی انواع قاب خمشی بتن مسلح مطابق با گزارش HAZUS-MH MR5 [۲۵]

| Description           | Height         |         |         |        |
|-----------------------|----------------|---------|---------|--------|
|                       | Range          |         | Typical |        |
|                       | Name           | Stories | Stories | Meters |
| Concrete Moment Frame | Low-Rise(C1L)  | 1-3     | 2       | 6.5    |
|                       | Mid-Rise(C1M)  | 4-7     | 5       | 15.5   |
|                       | High-Rise(C1H) | 8+      | 12      | 36.5   |

در مدلسازی سازه‌های منظم و نامنظم سطح طبقه و جرم یکسان در نظر گرفته شده است. همچنین ارتفاع طبقات برای کلیه مدل‌ها ۳،۲ متر می‌باشد. برای هر ساختمان سه آرایش متفاوت میلگرد در نظر گرفته شده است: (۱) تماماً میلگرد فولادی (Steel)، (۲) استفاده از میلگرد آلیاژ حافظه‌دار شکلی در محل ناحیه مفصل پلاستیک تیرها و سایر نواحی میلگردها فولادی (Steel-SMA)، (۳) استفاده از میلگرد آلیاژ حافظه‌دار شکلی در تمام طول تیرها و سایر نواحی از میلگردها فولادی (SMA). در هر مورد میلگرد تمامی ستون‌ها از نوع فولادی می‌باشد. برای مدل‌های Steel-SMA در ناحیه مفصل پلاستیک تیر مورد استفاده قرار می‌گیرند که طول ناحیه مفصل پلاستیک بر اساس رابطه پاولی [۲۶] طبق رابطه ۱ محاسبه می‌گردد:

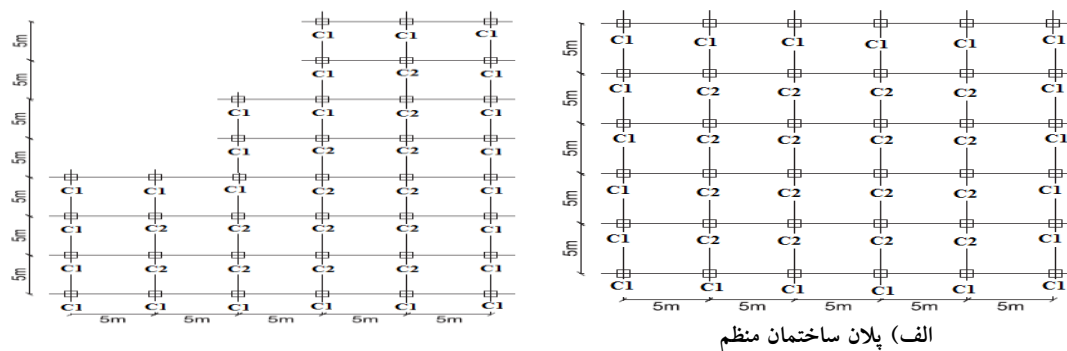
$$L_p = 0.08l + 0.22d_b f_y \quad (1)$$

سازه‌های بتن مسلح فولادی با طبقات مختلف و ضرایب پیچش مختلف در سه سطح منظم، نامنظمی زیاد پیچشی و نامنظمی پیچشی شدید بر اساس [۲۸] [۷] آنالیز شده‌اند. و طراحی اعضای بتنی مطابق مبحث نهم مقررات ملی ایران [۲۷] صورت پذیرفت. همچنین بر اساس جدول ۲ مشخصات مصالح انتخاب شده برای طراحی و آنالیز به کار ارائه شده است.

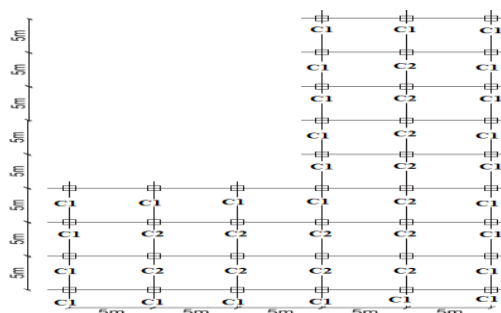
جدول ۲: مشخصات مصالح مورد استفاده

| Material | Mechanical property                            | Value   |
|----------|--|---------|
| Concrete | Compressive strength (Mpa)                     | 35      |
|          | Tensile strength (Mpa)                         | 3.5     |
|          | Strain at peak stress (%)                      | 0.2     |
| Steel    | Modulus of elasticity (Mpa)                    | 200.000 |
|          | Yield strength (Mpa)                           | 400     |
|          | Strain hardening parameters (%)                | 0.5     |
| SMA      | Modulus of Elasticity (Mpa)                    | 60.000  |
|          | Austenite to Martensite starting stress (Mpa)  | 400     |
|          | Austenite to Martensite finishing stress (Mpa) | 500     |
|          | Martensite to Austenite starting stress (Mpa)  | 300     |
|          | Martensite to Austenite finishing stress (Mpa) | 100     |
|          | Super elastic plateau strain length (%)        | 6       |

پلان‌های مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. در این مقاله مطابق با شکل ۱، ساختمان منظم به نام (Regular)، ساختمان با درجه نامنظمی زیاد پیچشی، (Irregular1) و ساختمان با درجه نامنظمی پیچشی شدید، (Irregular2) نامیده می‌شود. ابعاد مقاطع برای عضوهای ساختمان بتن مسلح فولادی و میلگردهای طولی و عرضی آنها بر اساس نیازهای برشی و خمشی محاسبه شد سپس برای سایر آرایش میلگردها از مقاطع و آرماتورهای یکسان با نوع آلیاژ حافظه‌دار شکلی و ترکیبی از آلیاژ حافظه‌دار و فولاد استفاده گردید. اطلاعات مقاطع تیر و ستون‌های بدست آمده در جدول ۳ و ۴ آورده شده است.



ب) پلان ساختمان با نامنظمی پیچشی زیاد



شکل ۲: پلان ساختمان‌های استفاده شده در تحقیق

جدول ۳: مشخصات ستون‌های طراحی شده

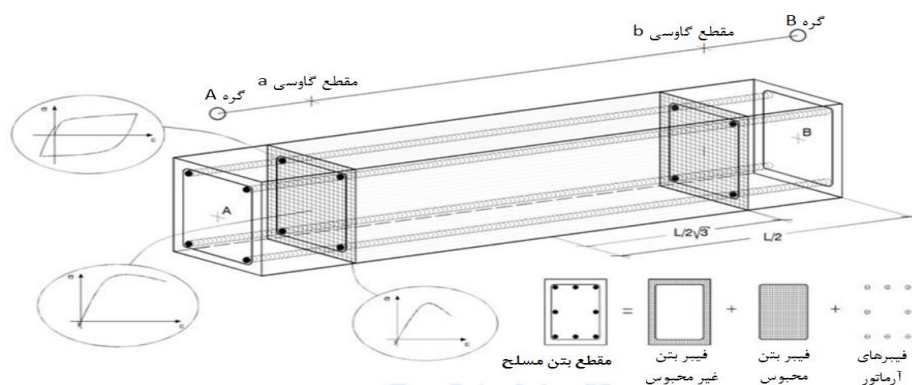
| نام ستون |         | توضیحات                                     | شماره طبقه | تعداد طبقه ساختمان |
|----------|---------|---|------------|--------------------|
| C2       | C1      |   |            |                    |
| ۴۰۰*۴۰۰  | ۳۰۰*۳۰۰ | ابعاد ستون (برحسب میلیمتر)                  | ۱ الی ۳    | سه طبقه            |
| ۸-۱۶     | ۴-۲۰    | تعداد آرماتور - قطر آرماتور (برحسب میلیمتر) |            |                    |
| ۴۵۰*۴۵۰  | ۳۰۰*۳۰۰ | ابعاد ستون (برحسب میلیمتر)                  | ۱ الی ۳    | شش طبقه            |
| ۸-۲۵     | ۶-۲۰    | تعداد آرماتور - قطر آرماتور (برحسب میلیمتر) |            |                    |
| ۴۵۰*۴۵۰  | ۳۰۰*۳۰۰ | ابعاد ستون (برحسب میلیمتر)                  | ۴ الی ۶    |                    |
| ۸-۲۰     | ۴-۲۰    | تعداد آرماتور - قطر آرماتور (برحسب میلیمتر) |            |                    |
| ۵۵۰*۵۵۰  | ۳۵۰*۳۵۰ | ابعاد ستون (برحسب میلیمتر)                  | ۱ الی ۳    | نه طبقه            |
| ۸-۲۵     | ۶-۲۵    | تعداد آرماتور - قطر آرماتور (برحسب میلیمتر) |            |                    |
| ۵۵۰*۵۵۰  | ۳۵۰*۳۵۰ | ابعاد ستون (برحسب میلیمتر)                  | ۴ الی ۹    |                    |
| ۶-۲۵     | ۶-۲۰    | تعداد آرماتور - قطر آرماتور (برحسب میلیمتر) |            |                    |

جدول ۴: مشخصات تیرهای طراحی شده

| مشخصات آرماتورگذاری |                     | توضیحات  | شماره طبقه | تعداد طبقه ساختمان |
|---------------------|---------------------|--|------------|--------------------|
| سایر نواحی          | در محل مفصل پلاستیک |  |            |                    |
| ۳۰۰*۴۵۰             | ۳۰۰*۴۵۰             | ابعاد تیر - عرض*ارتفاع (برحسب میلیمتر)                     |            |                    |
| ۲-۲۰(T)             | ۲-۲۰(T)             | تعداد آرماتور - قطر آرماتور - محل قرارگیری (برحسب میلیمتر) | ۱ الی ۳    | سه طبقه            |
| ۲-۲۰(B)             | ۲-۲۰(B)             |  |            |                    |
| ۳۰۰*۵۰۰             | ۳۰۰*۵۰۰             | ابعاد تیر - عرض*ارتفاع (برحسب میلیمتر)                     |            |                    |
| ۵-۲۵ (T)            | ۳-۲۵ (T)            | تعداد آرماتور - قطر آرماتور - محل قرارگیری (برحسب میلیمتر) | ۱ الی ۳    | شش طبقه            |
| ۴-۲۰ (B)            | ۴-۲۵ (B)            |  |            |                    |
| ۳۰۰*۵۰۰             | ۳۰۰*۵۰۰             | ابعاد تیر - عرض*ارتفاع (برحسب میلیمتر)                     |            |                    |
| ۳-۲۰ (T)            | ۲-۲۰ (T)            | تعداد آرماتور - قطر آرماتور - محل قرارگیری (برحسب میلیمتر) | ۴ الی ۶    |                    |
| ۲-۲۰ (B)            | ۳-۲۰ (B)            |  |            |                    |

|          |          |  |         |
|----------|----------|--|---------|
| ۳۰۰*۵۰۰  | ۳۰۰*۵۰۰  | ابعاد تیر - عرض*ارتفاع (برحسب میلیمتر)                     |         |
| ۵-۲۸ (T) | ۳-۲۸ (T) | تعداد آرماتور - قطر آرماتور - محل قرارگیری (برحسب میلیمتر) | ۱ الی ۳ |
| ۴-۲۰ (B) | ۴-۲۵ (B) |  | نه طبقه |
| ۳۰۰*۵۰۰  | ۳۰۰*۵۰۰  | ابعاد تیر - عرض*ارتفاع (برحسب میلیمتر)                     |         |
| ۳-۲۰ (T) | ۳-۲۰ (T) | تعداد آرماتور - قطر آرماتور - محل قرارگیری (برحسب میلیمتر) | ۹ الی ۹ |
| ۳-۲۰ (B) | ۳-۲۰ (B) |  |         |

در برنامه اجزاء محدود SeismoStruct به منظور تخمین صحیح از توزیع آسیب در عضو باید نحوه توزیع خاصیت غیرالاستیک در طول عضو و در مقاطع عرضی عضو به گونه‌ای صحیح تخمین زده شود. برای این منظور سطح مقطع عضو به تعداد مشخصی فیبر (۲۰۰ عدد برای یک تحلیل معمول و ۴۰۰ عدد برای تحلیل مقاطع پیچیده) تقسیم می‌گردد. که این تقسیم بندی فیبر در تمام طول عضو رعایت شده است. سپس منحنی تنش - کرنش مقطعی عضو از طریق اندرکنش منحنی تنش کرنش غیر خطی فیبرهای مجزا به دست می‌آید. به عنوان مثال یک تیر بتن مسلح (شکل ۳) را به صورت زیر می‌توان تفکیک نمود و برای هر قسمت تفکیکی تعدادی فیبر در نظر گرفته شود در شکل ۳ ترسیمی از نحوه استفاده از المان‌های فیبری را که در نرم افزار مورد استفاده قرار می‌گیرد را نشان داده شده است.



شکل ۳: ترسیمی از نحوه استفاده از المان‌های فیبری را که در نرم افزار SeismoStruct [۲۴]

#### ۴- انتخاب شاخص خرابی و آستانه های مختلف خرابی

در این پژوهش حالات خرابی ساختمان‌ها مطابق با گزارش HAZUS-MH MR5 [۲۵] انتخاب گردیده است. آستانه مختلف شاخص خسارت با توجه به نوع خرابی سازه‌ها تعیین شده است. در این دستورالعمل احتمال وقوع چهار نوع حالت خرابی در سازه مطابق جدول ۵ محتمل می‌باشد.



جدول ۵: آستانه تغییر شکل نسبی طبقات متناظر با خرابی‌های مختلف بر اساس گزارش HAZUS-MH MR5 [۲۵]

| Type           | Interstory Drift at Threshold of Damage State |          |           |          |
|----------------|---|----------|-----------|----------|
|                | Slight  | Moderate | Extensive | Complete |
| Low-Rise(C1L)  | 0.0050  | 0.0100   | 0.0300    | 0.0800   |
| Mid-Rise(C1M)  | 0.0033  | 0.0067   | 0.0200    | 0.0533   |
| High-Rise(C1H) | 0.0025  | 0.0050   | 0.0150    | 0.0400   |

حالات خرابی پیشنهادی در گزارش HAZUS-MH MR5 عبارتند از:

- حالت خسارت کم (Slight): در خرابی کم، آسیب‌های بسیار ناچیزی به اجزای غیر سازه‌ای وارد می‌شود و اجزای سازه‌ای بدون آسیب باقی می‌مانند.
- حالت خسارت متوسط (Moderate): در خرابی متوسط، اجزای سازه‌ای آسیب جزئی می‌بینند و اجزای غیر سازه‌ای، آسیب زیاد متحمل می‌شوند.
- حالت خسارت شدید (Extensive): در خرابی وسیع، خرابی اجزای سازه‌ای بسیار زیاد و اجزای غیر سازه‌ای خراب کامل شده‌اند.
- حالت خسارت کامل (Complete): در حالت خرابی کامل، سازه یا خراب می‌گردد و یا در آستانه خرابی است.

## ۵- تحلیل خرابی سازه در سطوح مختلف لرزه‌ای با استفاده از تحلیل دینامیکی افزاینده

روش تحلیل دینامیکی افزاینده [۲۸] برای اولین بار در سال ۲۰۰۰ توسط کرنل مطرح گردید. در واقع تحلیل دینامیکی افزاینده یک تحلیل دینامیکی غیرخطی است که به کمک آن می‌توان مقدار خسارت وارد به سازه را بر حسب شدت تحریک زلزله‌ی وارده شده، مشخص نمود. همانطور که پیشتر اشاره گردید، شاخص ارزیابی خرابی ساختمان بتن مسلح مطابق دستورالعمل HAZUS-MH MR5 [۳۱] تغییرمکان جانبی نسبی انتخاب گردیده است. از این رو، تغییرمکان جانبی نسبی مدل‌های معرفی شده در سطوح مختلف لرزه‌ای باید محاسبه گردد. یکی از آنالیزهای موثر برای برآورد تقاضای لرزه‌ای و ظرفیت سازه‌ها تحلیل دینامیکی افزاینده می‌باشد. این روش برای تعیین ظرفیت فروریزش کلی توسط FEMA پایه گذاری شد [۲۹ و ۳۰] و در آن شتاب نگاشت اعمال شده به سازه با مقیاس به مقادیر مختلف از ناچیز به زیاد در تحلیل‌های متوالی افزایش داده شده و مقادیر حداکثر تغییرمکان جانبی نسبی برای هر سطح شتاب رسم گردیده و یک منحنی پوش دینامیکی برای هر رکورد تولید می‌شود.

در این مطالعه جهت انجام تحلیل دینامیکی افزاینده، از تعداد ۱۰ رکورد مطابق جدول ۳ استفاده شده است. ابتدا رکوردها به شتاب حداکثر ۱g نرمال شده و سپس در گام‌های زمانی به فاصله ۰/۱g از مقدار ۰/۱ تا حداکثر ۳g مقیاس شده‌اند. همچنین حداکثر تغییرمکان جانبی نسبی طبقات به عنوان شاخص خرابی و ماکزیمم شتاب زلزله (PGA) به عنوان شاخص شدت جنبش زلزله در نظر گرفته شده و منحنی پاسخ سازه در برابر شدت لرزه‌ای رسم شده است. با استفاده از نتایج دینامیکی افزاینده و رسم منحنی‌های حداکثر تغییرمکان جانبی نسبی بین طبقات-حداکثر شتاب، حد ناپایداری در بعضی رکوردهای زلزله مشاهده شد. حد ناپایداری یکی از حالت‌های رسیدن به ناحیه صاف در منحنی و مشاهده‌ی انحنا روی به بالا در منحنی حداکثر جابجایی نسبی بین طبقات-حداکثر شتاب تعریف شد.

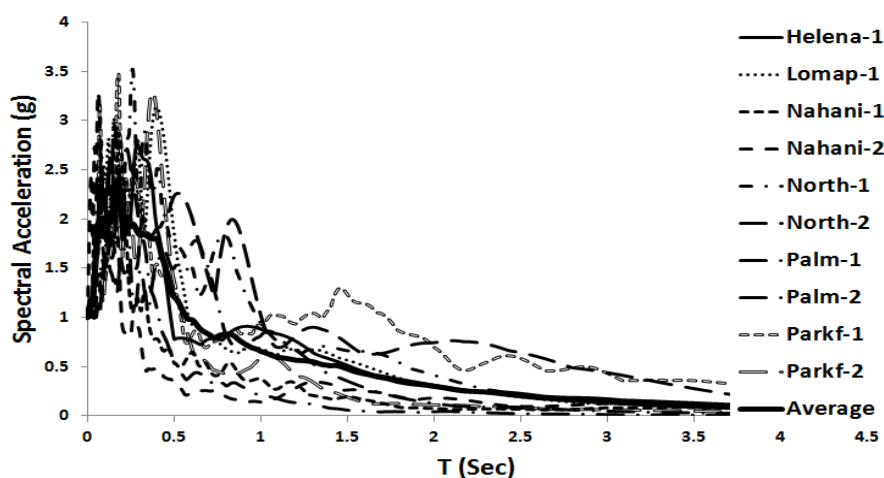
<sup>6</sup> Incremental Dynamic Analysis

## ۶- شتابنگاشت‌های انتخابی

در تهیه منحنی‌های خرابی تعیین شتابنگاشت‌های وارد بر سازه بدلیل اثر گذاری مستقیم آنها بر نتایج از اهمیت زیادی برخوردار می باشد. نکته ی دوم تعداد رکوردها می باشد. تعداد رکوردهای کم نمی تواند بیانگر پاسخی کاملی از سازه باشد و همچنین تعداد زیاد شتاب نگاشت موجب خواهد شد که زمان بسیار زیادی صرف تحلیل‌های IDA شود. با توجه به توصیه Shome and Cornell تعداد ۱۰ تا ۲۰ رکورد دقت قابل قبولی در برآورد تقاضای لرزه‌ای می‌دهند [۳۱]. همچنین گزارش FEMA-P695 برای آنالیزهای دینامیکی غیرخطی فزاینده مجموعه‌ای از رکوردهای زلزله را معرفی کرده است [۳۲]. در این تحقیق تعداد ۱۰ شتاب نگاشت از بانک شتابنگاشت‌های پایگاه اطلاعاتی PEER انتخاب شده اند که در جدول ۶ نشان داده شده‌اند [۳۳]. در شکل ۴ نمودار طیف‌های پاسخ مقیاس شده زلزله‌های مورد استفاده در این پژوهش نشان داده شده است. لازم به ذکر است در این جدول منظور از Strike-slip و Reverse به ترتیب راستا لغز و معکوس بودن گسل می‌باشد.

جدول ۶: مشخصات رکوردهای انتخابی

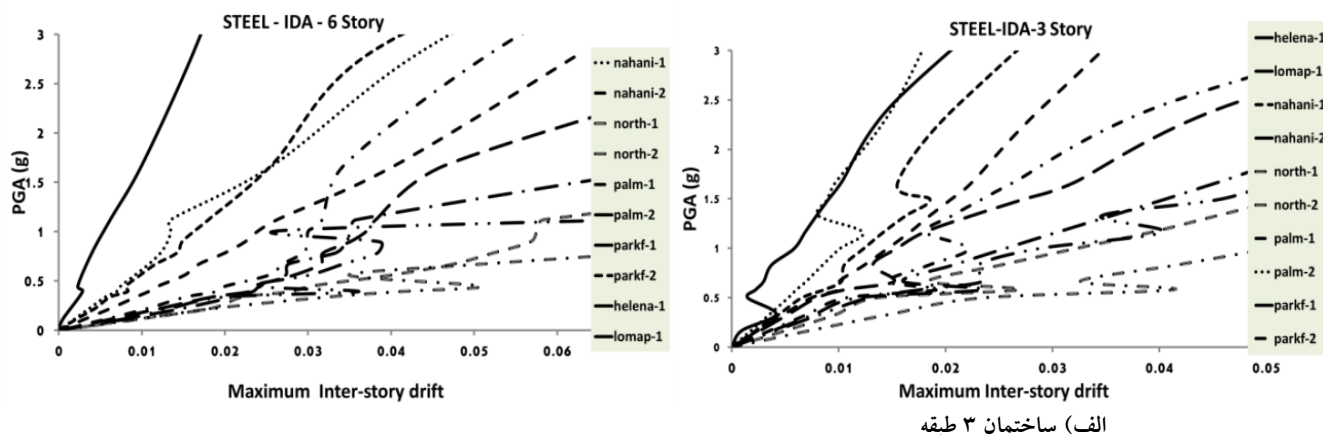
| Record | Earthquake    | Year | Station                    | Mw  | Distance(Km) | Type        |
|--------|---------------|------|----------------------------|-----|--------------|-------------|
| 1      | Helena        | 1935 | Carroll College            | 6.1 | 3.5          | Strike-slip |
| 2      | Loma Prieta   | 1989 | Gilroy –GavilanColl        | 6.9 | 9.2          | Reverse     |
| 3      | Nahanni       | 1985 | Site 1                     | 6.8 | 2.5          | Reverse     |
| 4      | Nahanni       | 1985 | Site 3                     | 6.8 | 5            | Reverse     |
| 5      | Northridge    | 1994 | Castaic – Old Ridge Route  | 6.7 | 20.11        | Reverse     |
| 6      | Northridge    | 1994 | Sylmar – Olive View Med FF | 6.7 | 1.7          | Reverse     |
| 7      | N.PalmSprings | 1986 | Cranston Forest Station    | 6.1 | 27.2         | Reverse     |
| 8      | N.PalmSprings | 1986 | Hurkey Creek Park          | 6.1 | 29.5         | Reverse     |
| 9      | Parkfield     | 1966 | Cholame –Shandon Array     | 6.2 | 17.6         | Strike-slip |
| 10     | Parkfield     | 1966 | Temblor pre-1969           | 6.2 | 15.9         | Strike-slip |



شکل ۴: طیف پاسخ زلزله‌های انتخابی

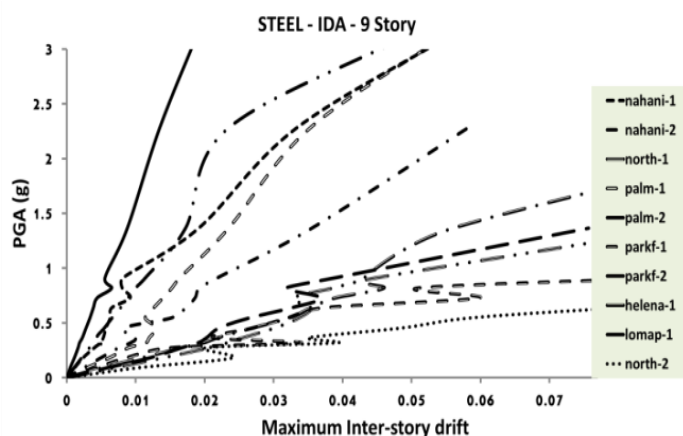
## ۷- خروجی تحلیل دینامیکی غیر خطی فزاینده

به علت مدول الاستیسیته کمتر آلیاژهای حافظه دار شکلی نسب به فولاد متداول مورد استفاده در سازه‌های بتن مسلح، سختی جانبی سازه کاهش می‌یابد در نتیجه محتمل است که به مقداری تغییر مکان در حین زلزله افزایش یابد وجود دارد. از طرفی به علت کمتر شدن سختی سازه به علت وجود SMA مقدار پرید سازه افزایش یافته و مقدار برش پایه محتملا کمتر می‌گردد. در این بخش خروجی مقدار تغییر مکان جانبی نسبی ماکزیمم سازه‌های ۳، ۶ و ۹ طبقه در سطوح مختلف PGA تحت ۱۰ شتابنگاشت و برای ساختمان کوتاه، میان و بلند مرتبه در حالت منظم ارائه گردیده است. در شکل ۵ جهت اختصار منحنی‌های IDA برای سازه منظم آورده شده است.



ب) ساختمان ۶ طبقه

الف) ساختمان ۳ طبقه

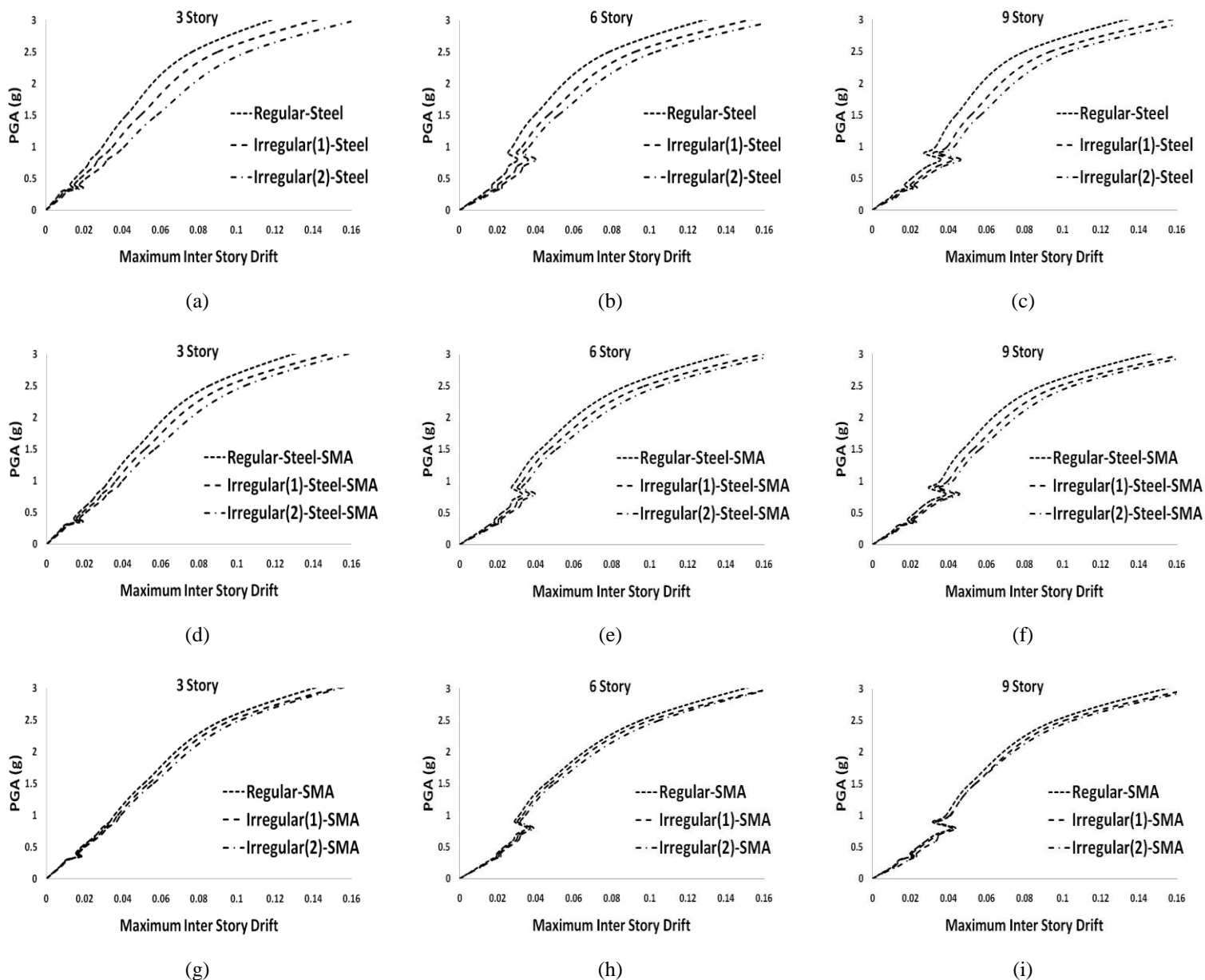


ج) ساختمان ۹ طبقه

شکل ۵: منحنی‌های IDA برای سازه منظم و حالت Steel بر اساس طبقات مختلف

با استفاده از منحنی‌های شکنندگی میزان حد تسلیم، آستانه فروریزش و ناپایداری ساختمان‌ها مشخص می‌گردد. همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد ساختمان‌ها ابتدا رفتار الاستیک داشته سپس وارد ناحیه غیرالاستیک می‌شوند و تا فروریزش و ناپایداری پیش می‌روند. در مرحله فروریزش سازه مقاومتی نداشته و با افزایش اندک پارامتر شدت لرزه‌ای دچار افزایش ناگهانی و قابل ملاحظه در میزان تغییر مکان می‌گردد. اولین نقطه تغییر شیب منحنی‌ها حد تسلیم سازه در نظر گرفته شده است. بر اساس گزارش FEMA آخرین نقطه در منحنی که شیب آن ۲۰٪ شیب الاستیک باشد به عنوان آستانه فروریزش در نظر گرفته می‌شود [۲۹ و ۳۰]. با توجه به متفاوت بودن محتوای فرکانسی زلزله‌های انتخابی، مقادیر سطوح تحریک برای رسیدن به ناپایداری در مدل برای هر رکورد زلزله متفاوت می‌باشد. از این رو با توجه به تحلیل‌های انجام گرفته برای بعضی زلزله‌ها حالت ناپایداری مشاهده نشده است. همچنین با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع، مقدار حداکثر جابه‌جایی بین طبقات افزایش خواهد یافت.

به منظور بررسی اثرات منظمی و نامنظمی در پلان، تحلیل‌ها در سه حالت منظم، نامنظمی زیاد پیچشی و نامنظمی پیچشی شدید انجام گرفت. متوسط نتایج دررفت در ده رکورد به ازای حالت منظم و نامنظم در سه حالت متفاوت آرایش آرماتور بشرح زیر برای سازه های ۳، ۶ و ۹ طبقه در شکل ۶ آورده شده است.



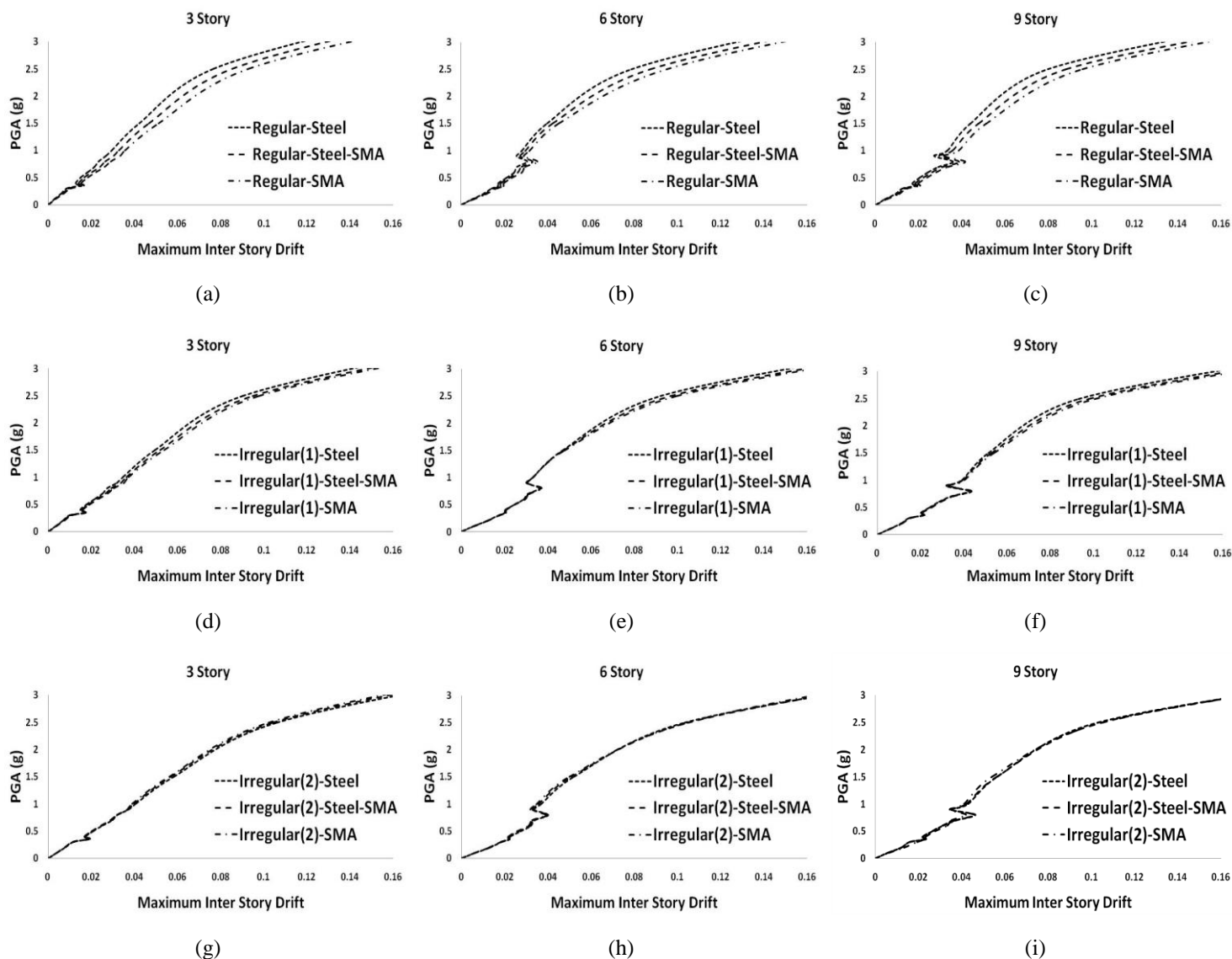
شکل ۶: میانگین منحنی‌های IDA برای هر یک از حالات انتخابی

در ساختمان‌های منظم با آرایش Steel، با افزایش طبقات، ساختمان‌های ۶ و ۹ طبقه، به ترتیب ۱۲٪ و ۱۸٪ افزایش دررفت نسبت به ساختمان ۳ طبقه داشته‌اند. این افزایش برای حالت Steel-SMA برابر ۹٫۵٪ و ۱۶٪ و در حالت SMA برابر ۷٫۵٪ و ۱۳٫۵٪ بوده است.

در ساختمان‌های دارای نامنظمی زیاد، در حالت Steel ساختمان‌های ۶ و ۹ طبقه، به ترتیب ۱۳٪ و ۱۹٪ افزایش دررفت نسبت به ساختمان ۳ طبقه داشته‌اند. این درصد افزایش برای حالت Steel-SMA برابر ۹٪ و ۱۵٪ و در حالت SMA برابر ۷٪ و ۱۲٫۵٪ می باشد.

در ساختمان‌های دارای نامنظمی شدید، در حالت Steel ساختمان‌های ۶ و ۹ طبقه، به ترتیب ۱۳٫۵٪ و ۱۹٫۵٪ افزایش دررفت نسبت به ساختمان ۳ طبقه داشته‌اند. این درصد افزایش برای حالت Steel-SMA برابر ۸٫۵٪ و ۱۴٫۵٪ و در حالت SMA برابر ۶٫۵٪ و ۱۱٫۵٪ می‌باشد.

در شکل ۷ مقدار متوسط این منحنی‌های IDA برای مقایسه بهتر تاثیر درجه نامنظمی و اثر آلیاژ حافظه‌دار شکلی در ساختمان با طبقات مختلف و حالات مختلف نامنظمی نشان داده است.



شکل ۷: میانگین منحنی‌های IDA بر اساس درجه نامنظمی

مطابق نتایج به دست آمده، دررفت حداکثر در سازه‌های دارای نامنظمی زیاد نسبت به منظم در سه ، Steel-SMA و SMA به ترتیب ۱٫۲۳، ۱٫۱۵ و ۱٫۱ برابر شده است. دررفت حداکثر در سازه‌های دارای نامنظمی شدید نسبت به منظم در سه آرایش Steel، Steel-SMA و SMA به ترتیب ۱٫۳۵، ۱٫۲۲ و ۱٫۱۲ برابر شده است. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که گرفت چنانچه سازه‌ای بدلیل شرایط معماری نامنظم گردد، در صورت استفاده از آلیاژهای SMA درصد افزایش دررفت کمتری نسبت به سازه‌های بتن مسلح با فولاد

معمولی خواهد داشت. روند کاهشی ذکر شده تا جایی ادامه داشته است که در سازه‌های دارای نامنظمی پیچشی شدید مقدار دریافت حداکثر در حالت SMA کمتر از حالت Steel شده است.

## ۸- منحنی‌های آسیب پذیری ساختمان‌های در حالات منظم و نامنظم

منحنی شکنندگی، احتمال افزایش میزان خسارت از میزان مشخص شده در سطوح مختلف از جنبش‌های لرزه‌های زمین است. از دیدگاه ریاضی شکنندگی ساختمان به صورت احتمال بروز خرابی در ساختمان بر اثر یک زلزله خاص با شدت  $Z$  و براساس خسارت  $i$  مطابق رابطه ۲ تعریف می‌شود:

$$F_{ij} = \text{prob}(D \geq d_i | IM) \quad (2)$$

در رابطه فوق  $F_{ij}$  تابع شکنندگی،  $IM$  پارامتر اندازه گیری شدت زلزله است. این مقیاس حتی میتواند متفاوت باشد، مانند بیشینه شتاب زمین (PGA)، بیشینه سرعت زمین (PGV)، بیشینه تغییر مکان زمین (PGD)، شتاب طیفی ( $Sa$ ) و غیره،  $D$  میزان خرابی در سازه بر اثر وقوع این رخدادها تصادفی (برای مثال تغییر مکان نسبی طبقات)،  $d_i$  میزان خرابی مشخصی از سازه است که به آن خرابی حالت  $i$  می‌باشد. این خرابی به صورت کیفی بیان و از نظر کمی با شاخص‌های متفاوتی مانند شکل پذیری سازه، تغییر مکان نسبی و شاخص خرابی پارک وانگ اندازه گیری میشود.

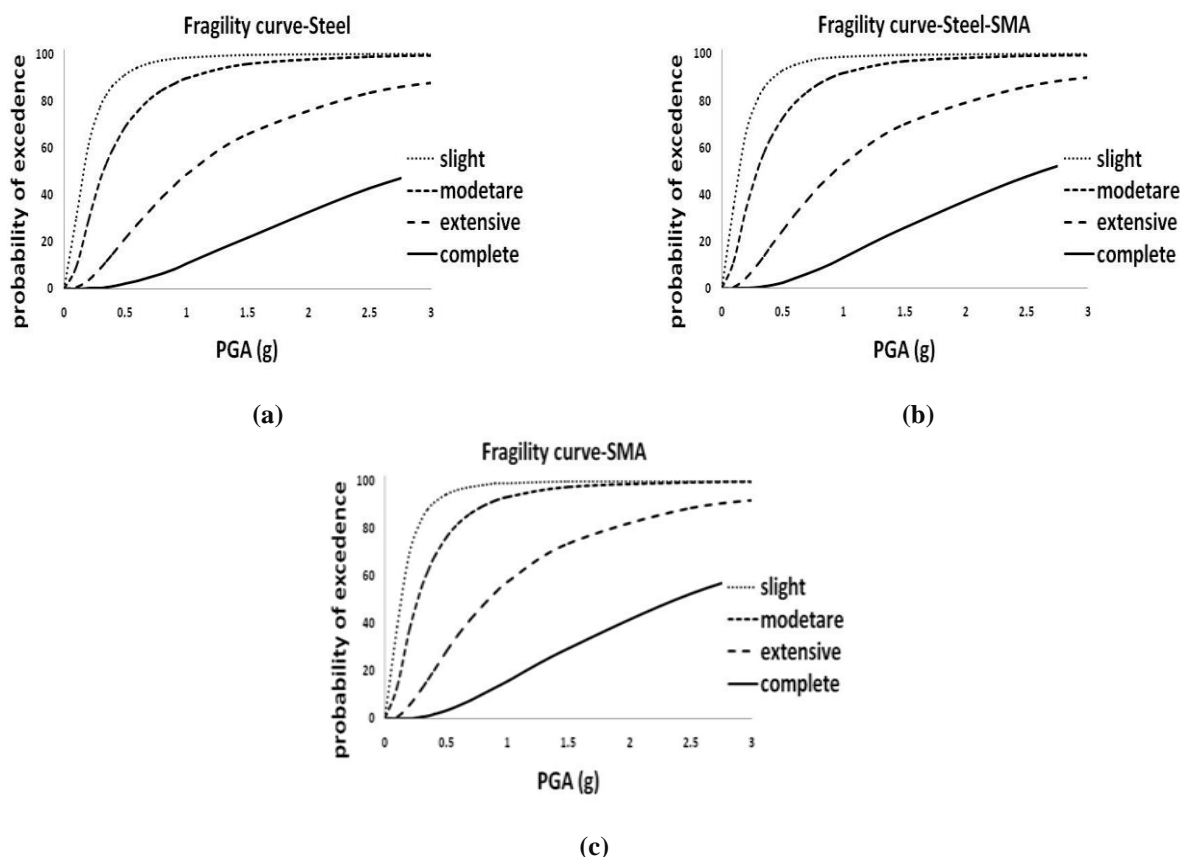
بر اساس مطالعات صورت گرفته مشاهده گردید که توزیع لگاریتم نرمال، توزیع مناسب تری برای بیان این توزیع هاست. مناسب بودن این توزیع در مطالعات گذشته محققان دیگر از جمله جلاپر و بیکر و همکاران نیز مورد تأکید قرار گرفته است [۳۴ و ۳۵]. به منظور ارزیابی احتمال خرابی در هر شدت از زلزله، میزان پارامترهای توزیع احتمالاتی در هر شدت از زلزله، بر اساس برازش توزیع لگاریتم نرمال به داده‌ها به دست آمده است. حال میتوان احتمال افزایش شاخص از مقادیر مختلف را با استفاده از رابطه (۷) به دست آورد. با توجه به استفاده از توزیع لگاریتم نرمال این رابطه به صورت رابطه (۳) بازنویسی شده است.

$$P(d > D_i | I) = 1 - P(d \leq D_i | I) = 1 - \Phi \left( \frac{1}{\beta} \ln \left( \frac{ISD_i}{ISD_{im}} \right) \right) \quad (3)$$

این رابطه برای چهار حالت خرابی (کم، متوسط، زیاد و کامل) و برای مقادیر مختلف بزرگای زمین لرزه برآورد شده است. تابع شکنندگی توسط برازش تابع توزیع تجمعی لگاریتم نرمال که با نتایج عددی به دست آمده، حاصل میشود:

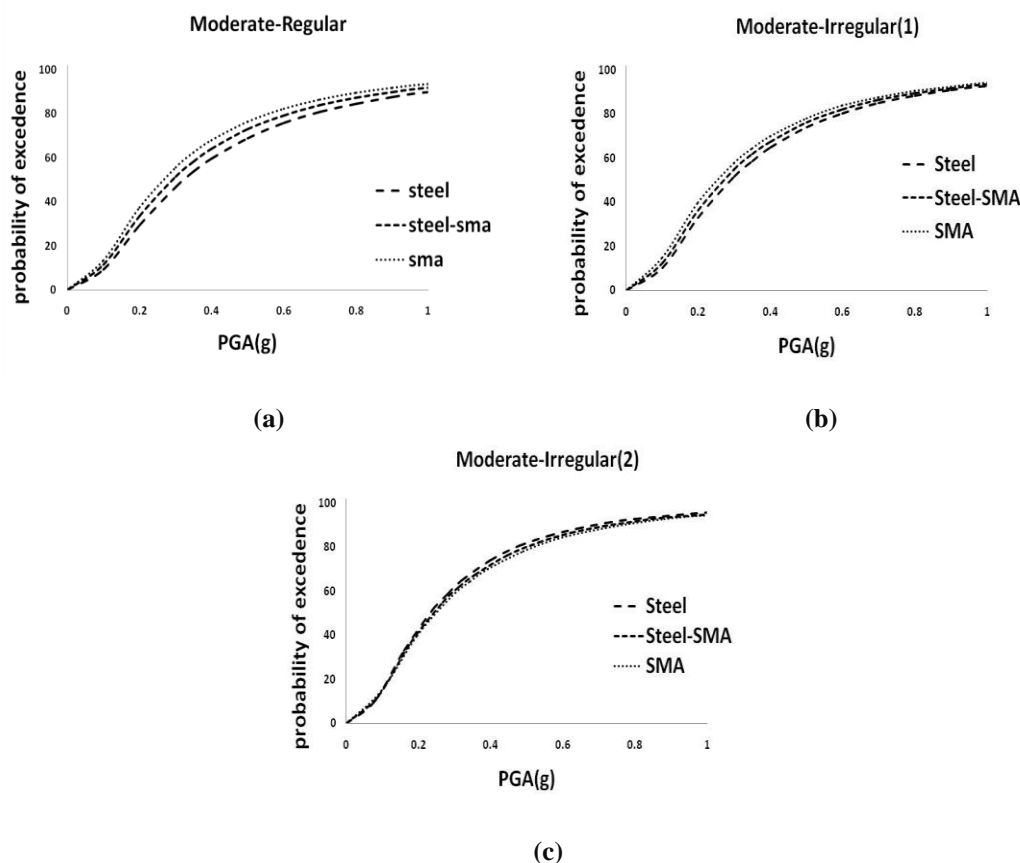
$$P(D > d_i | Sa) = \Phi \left( \frac{1}{\beta_i} \ln \left( \frac{Sa}{Sa_i} \right) \right) \quad (4)$$

در این رابطه،  $P(D > d_i | Sa)$  احتمال افزایش خرابی  $d_i$  بوده،  $Sa$  پارامتر حرکت زمین (حداکثر شتاب زمین)،  $Sa_i$  مقدار میانگین و  $\beta_i$  انحراف معیار تابع لگاریتم نرمال آن برای حالت خرابی  $i$  ام است. توابع برازش شده با اطلاعات به دست آمده برای سازه‌های مورد بررسی محاسبه و در شکل ۸ منحنی‌های شکنندگی ساختمان ۳ طبقه براساس نوع آرماتورگذاری مختلف نشان داده شده است.



شکل ۸: منحنی های شکنندگی سازه سه طبقه با ارایش های متفاوت

مقایسه منحنی های شکنندگی فوق نشانگر آن هستند که در سازه منظم کوتاه (مثلا ۳ طبقه) در سطح خرابی متوسط (Moderate) درصد خرابی در حالت SMA و Steel-SMA نسبت به حالت Steel به ترتیب برابر ۳٫۵٪ و ۵٫۸٪ می باشد که همین شرایط برای سازه دارای نامنظمی زیاد برابر ۱٫۸٪ و ۳٫۱٪ می باشد و اما در سازه دارای نامنظمی شدید این درصد ها به ۰٫۸٪ - ۱٫۳٪ و ۰٫۸٪ - ۳٫۱٪ می رسد و این بدان معناست که وجود آلیاژ حافظه دار در حالت نامنظمی شدید احتمال خرابی نسبت به حالت تمام فولادی کمتر بود و این به معنای عملکرد موثر این آلیاژ در سطح نامنظم می باشد (شکل ۹).



شکل ۹: منحنی‌های خرابی در حد خرابی Moderate با درجه نامنظمی متفاوت

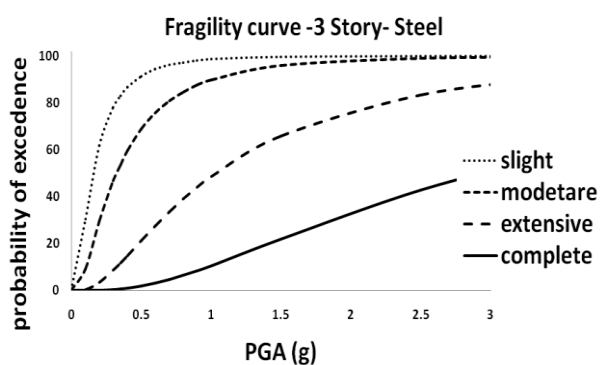
به طور کلی افزایش درصد احتمال خرابی برای ساختمان ۳ طبقه برای حالات Steel-SMA و SMA نسبت به حالت Steel در حالت منظم برابر ۲٫۹٪ و ۵٪ می‌باشد که همین درصد برای سازه نامنظمی زیاد به ۱٫۷۵٪ و ۲٫۴٪ کاهش پیدا می‌کند و در نهایت برای سازه نامنظمی شدید برابر ۱٪ و ۰٫۶٪ می‌باشد.

برای سازه‌های ۶ طبقه منظم حالات Steel-SMA و SMA نسبت به Steel به ترتیب نسبت افزایش احتمال خرابی به ۱٫۶٪ و ۳٫۱٪ می‌رسد و برای سازه نامنظمی زیاد برابر ۰٫۲۶٪ و ۰٫۵٪ و سازه نامنظمی شدید برابر ۰٫۳۲٪ و ۰٫۷٪ می‌باشد.

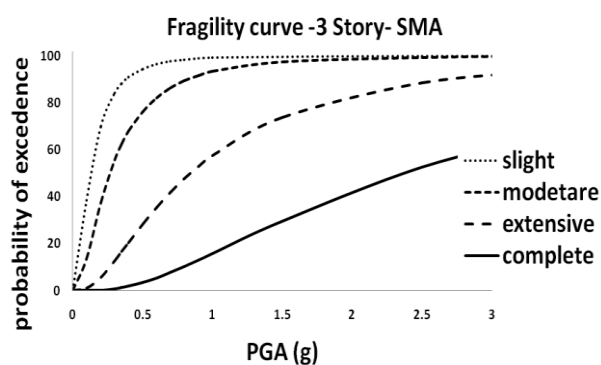
در سازه ۹ طبقه منظم حالات Steel-SMA و SMA نسبت افزایش احتمال خرابی به Steel به ترتیب ۱٫۳۲٪ و ۲٫۱٪ و برای سازه نامنظمی زیاد به ۰٫۲۴٪ و ۰٫۴۷٪ و سازه نامنظمی شدید به ۰٫۴۱٪ و ۰٫۴۶٪ می‌رسد. در نتیجه وجود آلیاژ حافظه‌دار شکلی که داری قدرت بازگرداندگی بسیار بالایی است در سازه نامنظم نسبت به سازه منظم بسیار بهتر عمل کرده است و تاثیر بهتری دارد. و هرچه نامنظمی در سازه بیشتر شود با توجه به روند مشاهده شده اثر بهبود بخشی SMA بیشتر مشخص می‌گردد.

در شکل ۱۰ منحنی‌های خرابی برای دو حالت تمام فولادی و تمام آلیاژ هوشمند با تعداد طبقات مختلف در سازه منظم به منظور بررسی تاثیر ارتفاع بر احتمال خرابی آورده شده است.

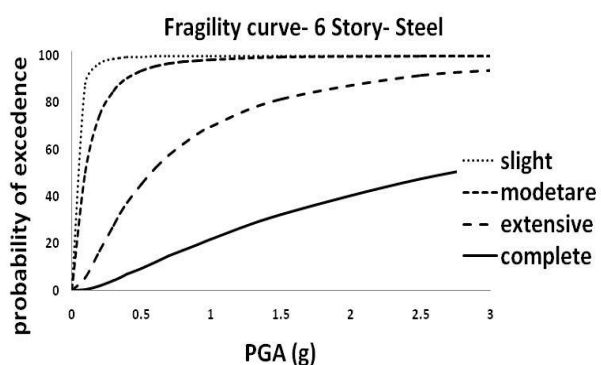




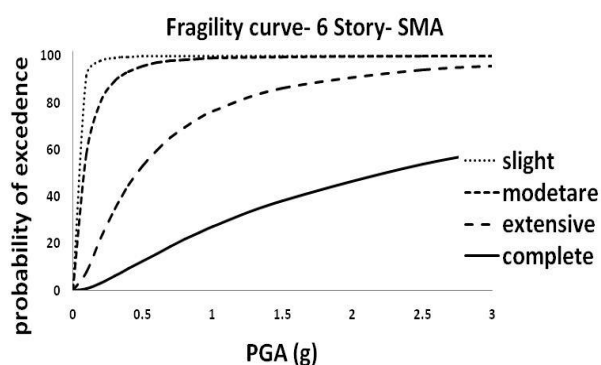
(a)



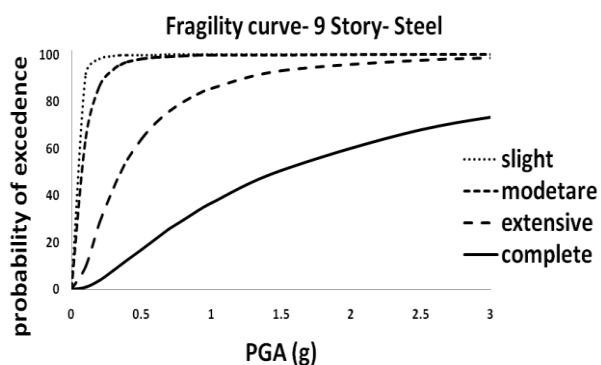
(d)



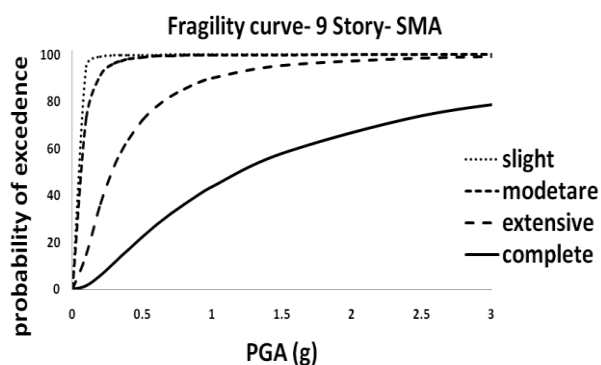
(b)



(e)



(c)



(f)

شکل ۱۰: منحنی خرابی سازه با تعداد طبقات مختلف در حالت منظم بر اساس آرمان‌ورگ‌گذاری Steel و SMA

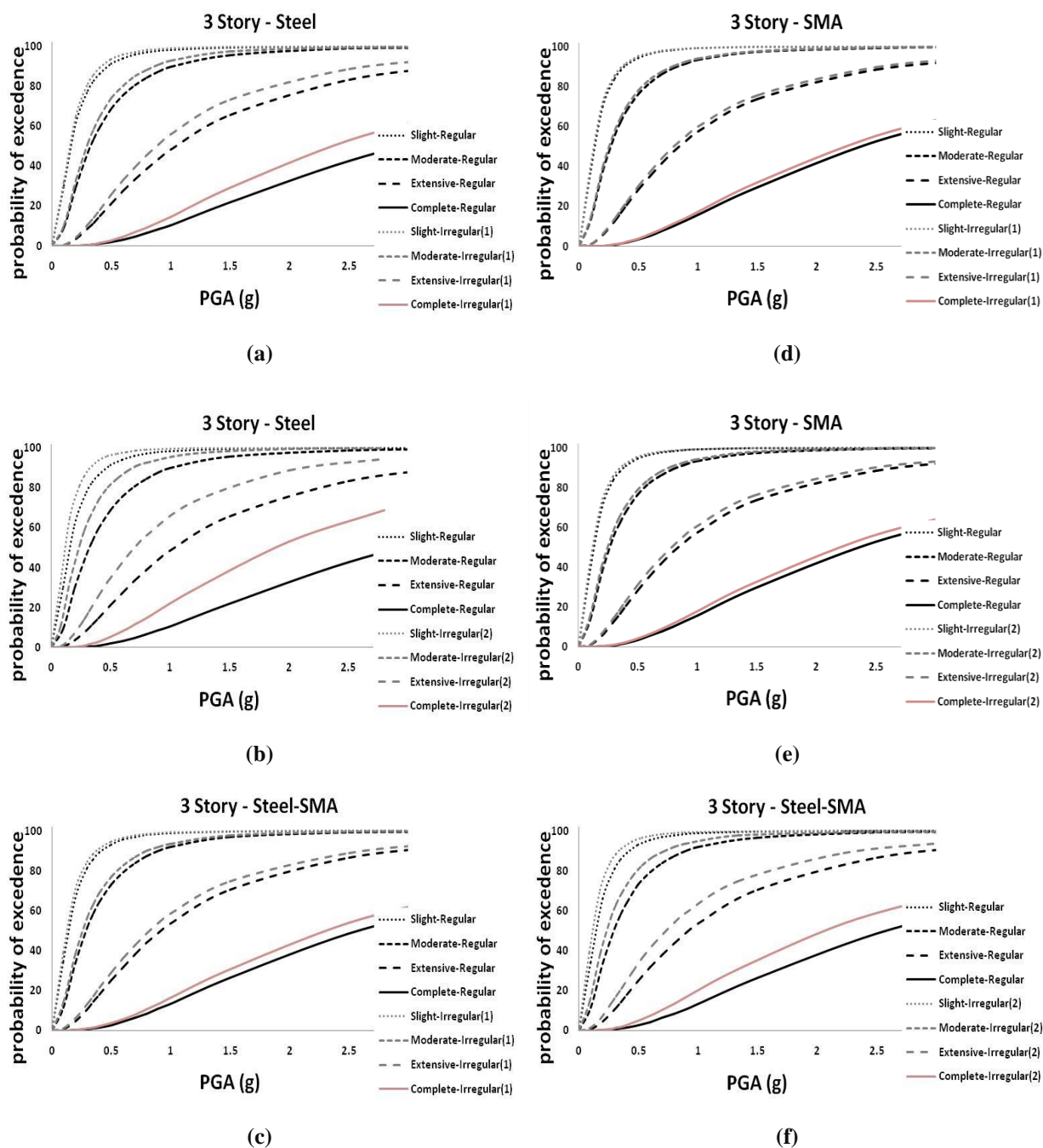
از طرفی احتمال خرابی با افزایش تعداد طبقات نیز افزایش می‌یابد، که در ساختمان بتن مسلح با آرایش Steel با افزایش طبقات از ۳ به ۶ و ۹ به ۹ و ۶ در حالت منظم احتمال خرابی به ترتیب ۱،۸۷ و ۲،۴۵ درصد افزایش می‌یابد، که همین شرایط برای حالت Steel-SMA، ۱،۷۷، ۲،۳۲ و برای حالت SMA ۱،۶۹ و ۲،۱۷ می‌باشد.

احتمال خرابی برای سازه نامنظمی زیاد در حالت Steel از سه به شش و نه طبقه به ترتیب ۱،۹۳، ۲،۴۸ درصد افزایش می‌یابد و در همین شرایط برای حالت Steel-SMA ۱،۷ و ۲،۱۵ و در حالت SMA ۱،۶۵ و ۲،۰۹ است.

برای سازه نامنظمی شدید احتمال خرابی در حالت Steel از سه به شش و نه طبقه به ترتیب ۲،۰۵، ۲،۵۶ درصد افزایش می‌یابد. در همین وضعیت برای حالت Steel-SMA ۱،۵۵ و ۲،۰۳ و در حالت SMA ۱،۴۶ و ۱،۹۸ درصد افزایش احتمال خرابی مشاهده شده

است. وجود آلیاژ حافظه دار در ساختمان با طبقات زیاد موجب افزایش کمتری در درصد احتمال خرابی می شود و عملکرد بهتری را ایجاد می نماید.

در شکل (۱۱) تفاوت احتمال خرابی برای سازه های منظم و نامنظم برای نمونه در سه طبقه و آرایش متفاوت نشان داده شده است.

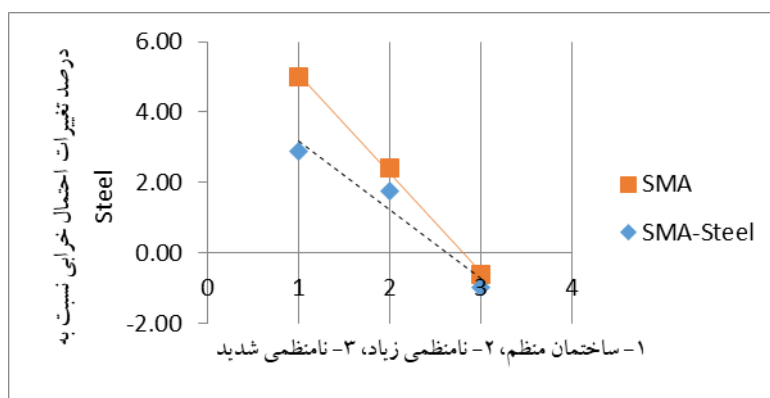


شکل ۱۱: مقایسه منحنی های خرابی سازه سه طبقه هر حالت با آرایش های متفاوت

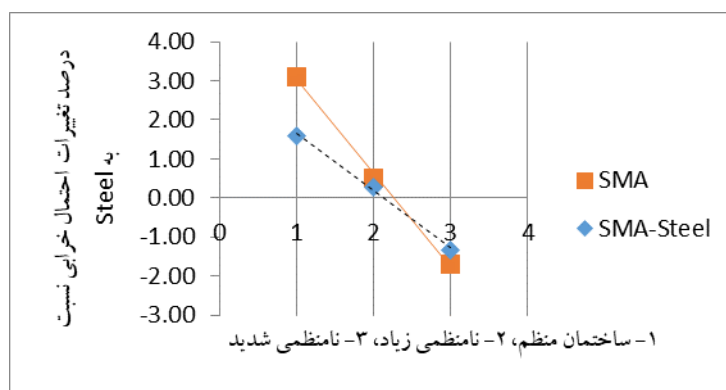
به طور کلی احتمال خرابی در سازه بتن آرمه برای حالت Steel از حالت منظم به نامنظمی شدید در حدود ۸٪ افزایش می کند در حالی که در حالت Steel-SMA این مقدار برابر ۳٫۵٪ و برای حالت SMA برابر ۱٫۷٪ می باشد. همچنین برای حالت Steel از حالت منظم

به نامنظمی شدید در حدود ۱۵٪ افزایش می‌یابد، در حالی که در حالت Steel-SMA این مقدار برابر ۴٫۹٪ و برای حالت SMA برابر ۲٫۵٪ می‌باشد که این اعداد بیانگر آن هستند که وجود آلیاژ حافظه دار به کاهش احتمال خرابی ساختمان‌های بتن مسلح مخصوصا در نامنظمی زیاد پیچشی کمک می‌نماید.

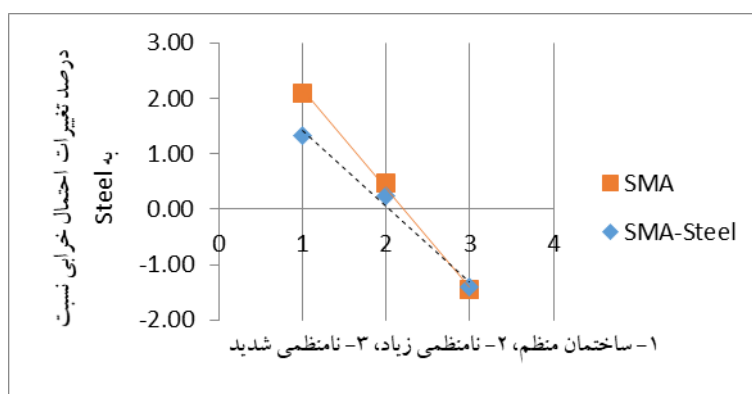
برای مقایسه بهتر اثر نامنظمی، اثر آرایش و ارتفاع نتایج حاصل در شکل ۱۲ ترسیم شده‌اند.



درصد تغییرات احتمال خرابی نسبت به Steel در ساختمان ۳ طبقه



درصد تغییرات احتمال خرابی نسبت به Steel در ساختمان ۶ طبقه



درصد تغییرات احتمال خرابی نسبت به Steel در ساختمان ۹ طبقه

شکل ۱۲: مقایسه درصد تغییرات احتمال خرابی نسبت به Steel در ساختمان های ۳، ۶ و ۹ طبقه

## ۱۰- نتیجه گیری

در این تحقیق برای تولید منحنی های شکنندگی ساختمان های بتن مسلح با آلیاژ حافظه دار شکلی سه ساختمان با تعداد طبقات ۳، ۶ و ۹ قاب خمشی که نماینده سازه های کوتاه تا بلند هستند، مدلسازی شدند. سپس سه نوع آرایش متفاوت میلگرد برای هر کدام از ساختمان ها شامل حالت تماما میلگرد فولادی، حالت میلگرد آلیاژ حافظه دار شکلی در محل ناحیه مفصل پلاستیک تیرها و میلگردها فولادی در سایر نواحی و حالت سوم میلگرد آلیاژ حافظه دار شکلی در تمام طول تیرها در نظر گرفته شد. در ادامه تعداد ۱۰ رکورد زلزله از زلزله های تاثیرگذار برای انجام آنالیز دینامیکی افزایشی غیرخطی انتخاب شد. بعنوان خروجی های و نتایج اصلی این تحقیق می توان به موارد زیر اشاره نمود:

- تولید منحنی های شکنندگی خرابی ساختمانهای بتنی با آلیاژ هوشمند در حالات، منظم، نامنظم زیاد و نامنظم شدید در ارتفاع های مختلف (کوتاه، متوسط و بلند مرتبه) با آرایش های مختلف آرماتورهای طولی به ازای بیشینه شتاب سطح زمین بعنوان خروجی اصلی این تحقیق
- هر چه مقدار نامنظمی بدلیل الزامات معماری افزایش یابد اثر بهبود دهنده استفاده از SMA و نیز ترکیب SMA-Steel بیشتر می گردد و حتی در ساختمان های بلند (مثلا ۹ طبقه) تا ۱.۵٪ کاهش احتمال خرابی نسبت به حالت Steel ایجاد می نماید.
- بالفزایش ارتفاع سازه در ساختمان های نامنظم، تفاوت بین تاثیر بهبود دهنده آرایش SMA و SMA-Steel کمتر می شود. بعنوان مثال در سازه بلند ۹ طبقه تفاوت بین دو آرایش مذکور به کمتر از ۱ درصد می رسد.
- هر چه مقدار نامنظمی افزایش یابد اثر بهبود دهنده آرایش SMA به SMA-Steel نزدیک و اختلاف آنها ناچیز می گردد.

منحنی های شکنندگی تولید شده در این مقاله می توانند بخوبی مرجعی برای ارزیابی سریع احتمال خرابی در سازه های با آلیاژ حافظه دار شکلی در ارتفاع های مختلف و سطوح مختلف نامنظمی شوند. منحنی ها و مقایسه آنها نشان می دهد که استفاده از آلیاژ حافظه دار شکلی در سازه های بتن مسلح در حالت نامنظمی تاثیر بهبود دهنده بیشتری نسبت به سازه های منظم دارد.

## ۱۱- مراجع

- [1] Saiidi, M.S. and H. Wang. (2006). Exploratory study of seismic response of concrete columns with shape memory alloys reinforcement. ACI structural journal, 103(3).
- [2] Alam, M.S., M. Youssef, and M. Nehdi. (2009). Seismic performance of concrete frame structures reinforced with superelastic shape memory alloys. Smart Struct Syst, 5(5), 565-585.
- [3] Abdulridha, A., et al. (2013). Behavior and modeling of superelastic shape memory alloy reinforced concrete beams. Engineering Structures, 49, 893-904.
- [4] Alam, M.S., M. Moni, and S. Tesfamariam. (2012). Seismic overstrength and ductility of concrete buildings reinforced with superelastic shape memory alloy rebar. Engineering Structures, 34, 8-20.
- [5] Rahimi, M., Naghipour, M., Shakhchizadeh, M., Rezapour, M., Hashemvand, A. (2014), "Laboratory and Computer Modeling of Mechanical Properties of Concrete Cylinders Commutated with Alloyed Memory Structures
- [6] Omidian, P, (2017), Vulnerability of low-rise concrete buildings with intelligent memory alloys using fragility curves, Contemporary International Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Planning

- [7] Road, housing and Urban Development Research Center., (2014). Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings, standard No. 2800 (4th Edition). Tehran: BHRC publication No: S-253.(In Persian)
- [8] Vazife, Sh, (2012), Seismic performance of irregular concrete structures with asymmetric backwardness in height, Master thesis, Islamic Azad University, Central Tehran Branch, Faculty of Engineering.
- [9] Moghadam, A. S. and Tso, W. K. (2000). “*Push over analysis for asymmetric and set-back multistory building, in proceedings.*” World Conference On Earthquake Engineering , 12th, Acapulco, PP. 1093.
- [10] Hashemi, R, (2014), The effect of irregularities in height and plan on seismic behavior of regular concrete buildings, Master's thesis, Ministry of Science and Technology Research, University of Science and Culture, Faculty of Civil Engineering.
- [11] Kilar, V. and Fajfar, P. (2002). “*Simplified nonlinear seismic analysis of Asymmetric multistory building, in proceeding.*” European Conference on Earthquake Engineering , 12th Upper Hutt, PP. 1093
- [12] Omidian, P. and Saffari, H. (2017). Seismic vulnerability assessment of regular and irregular concrete structures using fragility curves. J. of Structural and Construction Engineering (JSCE).
- [13] Cai C, Wenjie Wu, Suren C, Voyiadjis G. (2003) “Applications of smart materials in structural engineering”. Louisiana Transportation, Louisiana Transportation Research Center.
- [14] Otsuka, K. and C.M. Wayman. (1999). Shape memory materials: Cambridge University Press
- [15] Song, G., N. Ma, and H.-N. Li. (2006). Applications of shape memory alloys in civil structures. Engineering Structures, 28(9), 1266-1274.
- [16] Des roches, R., Delmont, M., Seismic retrofit of simply supported bridges using Shape memory Alloys. Engineering structures. 2002, 325-332
- [17] Graesser EJ, Cozzarelli FA. Shape Memory Alloys as new materials for aseismic Isolation Journal of Engineering Mechanics 1991 AIME VOL, 189, 45-52
- [18] Liang, C. and C. Rogers. (1990). One-dimensional thermomechanical constitutive relations for shape memory materials. Journal of intelligent material systems and structures, 1(2), 207-234.
- [19] Ivshin, Y. and T.J. Pence. (1994). A thermomechanical model for a one variant shape memory material. Journal of intelligent material systems and structures, 5(4), 455-473.
- [20] Bo, Z. and D.C. Lagoudas. (1999). Thermomechanical modeling of polycrystalline SMAs under cyclic loading, Part IV: Modeling of minor hysteresis loops. International Journal of Engineering Science, 37(9), 1205-1249.
- [21] Auricchio, F. and E. Sacco. (1997). A superelastic shape-memory-alloy beam model. Journal of intelligent material systems and structures, 8(6), 489-501.
- [22] Huang, M. and L. Brinson. (1998). A multivariant model for single crystal shape memory alloy behavior. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 46(8), 1379-1409.
- [23] Goo, B. and C. Lexcellent. (1997). Micromechanics-based modeling of two-way memory effect of a single crystalline shape-memory alloy. Acta Materialia, 45(2), 727-737.
- [24] SeismoSoft (2013). SeismoStruct – A computer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures, (online): Available from URL: [www.seismosoft.com](http://www.seismosoft.com)
- [25] HAZUS (1999). Earthquake loss estimation methodology-Technical manual, Federal Emergency Management Agency and National Institute of Building Science.

- [26] Alam M.S., Youssef M.A., Nehdi M. (2008), "Analytical prediction of seismic behavior of superelastic shape memory alloy reinforced concrete elements", Journal of Engineering Structures
- [27] Ministry of road and urban development., (2013). *Iranian National Building Code, Part 9: Design and Construction of Concrete buildings*. Tehran: Nashre Tose'e. (In Persian)
- [28] Vamvatsikos, D. and Cornell, C.A. "Incremental Dynamic Analysis, Earthquake Engineering and Structural dynamics, the Joun Blume Erathquake Engineering center, Report NO.151, 31(2002) 491-514.
- [29] FEMA.-350, "Recommended seismic design criteria for new steel moment-frame buildings", Prepared by SAC Joint Venture for Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., (2000).
- [30] FEMA-351, "Recommended Seismic Evaluation and Upgrade Criteria for Existing Welded Steel Moment-Frame Buildings", prepared by the SAC Joint Venture for Federal Emergency Management Agency, Washington D.C.,( 2000).
- [31] Shome, N., Cornel, CA. (1999). *Probabilistic seismic demand analysis of nonlinear structures*. Ph.D. dissertation, Stanford University.
- [32] FEMA, P.,695 (2009). Quantification of Building Seismic Performance Factors. FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY, Washington DC.
- [33] Pacific Earthquake Engineering Reasearch center (PEER) online strong motion database, <http://peer.berkeley.edu/smcat/search.html>
- [34] Baker, J.W. and Cornell, C.A. (2005). A *vectorvalued ground motion intensity measure consisting of spectral acceleration and epsilon*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, p. 1193-1217.
- [35] Jalayer, F. (2003). *Direct Probabilistic Seismic Analysis: implementing non-linear dynamic assessments*. Ph.D. thesis, Stanford University