

## Seismic Performance and Resilience Assessments of Concrete Filled Tube (CFT) Composite Column Buildings

Amir Heidari<sup>1</sup>, Ehsan Tafakori<sup>2\*</sup>

1- MSc of Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Zanjan University, Zanjan, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Zanjan University, Zanjan, Iran

### ABSTRACT

Considering the need of infrastructures and societies for suitable and flexible behavior against disasters, such as earthquake, concepts such as resilience have been defined in order to quantify the ability of a system to reduce the consequences of an earthquake or other disasters and quickly recover the structure after it. In this research, in order to study and investigate the seismic performance of steel structures with composite columns, a group of steel structures are redesigned with the assumption of using composite box columns. The nonlinear models of these structures are created. Then, losses and resilience indexes are evaluated and compared in different seismic risk levels using results of IDA analysis. Despite the reduction of steel consumption, the results of this research show the advantage and appropriate seismic performance of composite columns compared to steel columns in most of the seismic risk levels. So that the resilience index of structures with composite columns in an earthquake with a return period of 2500 years increases between 2% and 5% compared to structures with steel box columns. This improvement in performance occurs while the amount of steel consumed in the columns of moment frames and braced ones shows an average reduction of 33%.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 15 April 2023

**Revise Date:** 31 July 2023

**Accept Date:** 25 October 2023

### Keywords:

Composite Columns Nonlinear  
Evaluation  
Loss Evaluation  
Resilience  
IDA Analysis

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.390336.3067>

\*Corresponding author: Ehsan Tafakori  
Email address: tafakori@znu.ac.ir

## ارزیابی عملکرد و تاب‌آوری لرزه‌ای سازه‌های فولادی با ستون‌های فولادی پر شده با بتن

### بتن

امیر حیدری<sup>۱</sup>، احسان تفکری<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

### چکیده

با توجه به نیاز زیر ساخت‌ها و جوامع به داشتن رفتار انعطاف پذیر در مقابل فجایع طبیعی و غیرطبیعی، مفاهیمی مانند تاب‌آوری به منظور کمی‌سازی توانایی یک سیستم برای کاهش تبعات ناشی از زمین‌لرزه و بازیابی سریع سازه بعد از به وقوع پیوستن آن تعریف شده است. در این پژوهش به منظور بررسی عملکرد لرزه‌ای سازه‌های فولادی با ستون‌های مرکب تشکیل شده از بتن و فولاد، با بازطراحی یک دسته سازه‌ی فولادی با فرض داشتن ستون‌های مرکب فولادی و بتنی و یا باکس فولادی، این سازه‌ها به صورت غیرخطی مدل‌سازی و با استخراج پاسخ‌های آن‌ها به کمک تحلیل IDA خسارات و شاخص تاب‌آوری در سطوح مختلف خطر لرزه‌ای ارزیابی و محاسبه و با هم مقایسه گردیده است. نتایج این پژوهش نشان دهنده مزیت و عملکرد لرزه‌ای مناسب ستون‌های مرکب فولادی و بتنی نسبت به ستون‌های فولادی در اغلب سطوح خطر لرزه‌ای علی‌رغم کاهش مصرف فولاد می‌باشد. به طوریکه میزان شاخص تاب‌آوری سازه‌های با ستون‌های مرکب در زلزله با دوره بازگشت ۲۵۰۰ ساله نسبت به سازه‌های با ستون‌های باکس فولادی بین ۲ تا ۵ درصد افزایش یافته است. این بهبود عملکرد در حالی رخ می‌دهد که میزان فولاد مصرفی در ستون‌های قاب‌های خمشی و مهاربندی شده به‌طور متوسط ۳۳٪ کاهش را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: ستون‌های مرکب، ارزیابی غیرخطی، محاسبه خسارت، شاخص تاب‌آوری، تحلیل IDA

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	شناسه دیجیتال:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2023.390336.3067">https://doi.org/10.22065/jsce.2023.390336.3067</a>					
	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2023.390336.3067">10.22065/jsce.2023.390336.3067</a>	۱۴۰۳/۰۴/۳۱	۱۴۰۲/۰۷/۰۳	۱۴۰۲/۰۷/۰۳	۱۴۰۲/۰۵/۰۹	۱۴۰۲/۰۱/۲۶
			احسان تفکری		*نویسنده مسئول:	
			tafakori@znu.ac.ir		پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

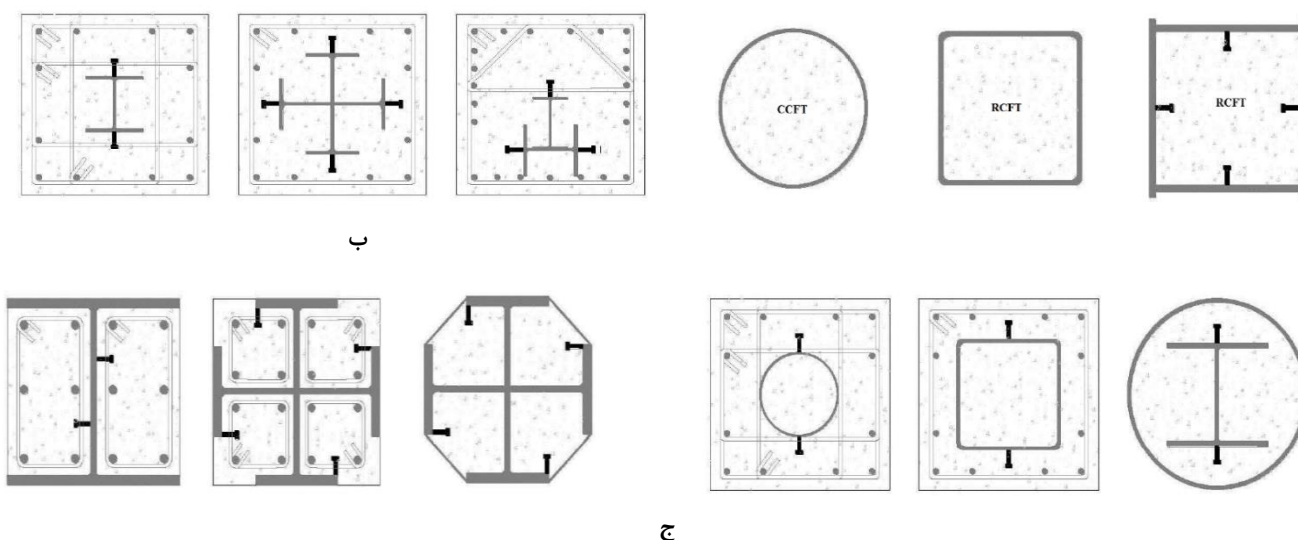
یافته‌های اخیر نشان دهنده‌ی آسیب‌پذیر بودن سازه‌های حیاتی مانند بیمارستان‌ها و ... در مقابل زلزله و سایر بحران‌های طبیعی می‌باشد. به منظور کاهش خسارات وارده، تمرکز مهندسان روی اقدامات بازدارنده و پیشگیری کننده پیش از وقوع بحران می‌باشد. این اقدامات بازدارنده می‌تواند تا حدودی آسیب‌پذیری این سازه‌ها را کاهش دهد. با این وجود در صورت کافی نبودن اقدامات بازدارنده و یا در صورت خارج از پیش‌بینی بودن بحران به وقوع پیوسته، خسارت به سازه‌ها وارد شده و برای ادامه‌ی عملکرد سازه مورد نظر فرآیند بازسازی سازه ضروری می‌باشد. تاب‌آوری لرزه‌ای شاخصی به منظور توصیف خسارات وارده و بازیابی آن‌ها به منظور حفظ عملکرد سازه با ایجاد کمترین اختلال می‌باشد [۱]. در حالی که اقدامات بازدارنده پیش از وقوع بحران ممکن است بر استفاده از فن‌آوری‌ها و اجرای سیاست‌ها برای کاهش خسارات تاکید کند، تاب‌آوری، فرآیند بازسازی و حتی رفتار افراد و سازمان‌ها در مرحله پس از وقوع بحران را نیز در نظر می‌گیرد [۱]. مفهوم تاب‌آوری یک مفهوم مختص به سازه‌ها نمی‌باشد و کاربردهای گسترده‌ای در زمینه‌ی بوم‌شناسی، علوم اجتماعی، اقتصادی و مهندسی با معانی و مفاهیم مختلف دارد. ریشه لغوی این واژه را باید در واژه لاتین *resilio* که در ادبیات به معنای برگشتن به عقب است، جستجو کرد [۲]. مفهوم اولیه تاب‌آوری، به این صورت بیان شده است: سرعت یک سیستم برای رسیدن هر چه زودتر به پایداری و تعادل [۳]، توانایی مقابله و بازگشت به عقب [۴]، توانایی وفق دادن خود با شرایط جدید [۵]، به طور ذاتی قوی و انعطاف‌پذیر بودن [۶]، توانایی تحمل فشار خارجی و بازیابی کردن خود با کمترین دخالت خارجی [۷]. در علوم مهندسی، تاب‌آوری به عنوان توانایی یک سیستم برای حفظ عملکرد سازه در مواجهه با تغییرات داخلی و خارجی تعریف می‌گردد [۸]. در حالت کلی تاب‌آوری بر حسب ظرفیتی که یک سیستم می‌تواند به وسیله آن در برابر بیشترین ضربه مقاومت کند و سرعتی که می‌تواند طی آن خود را از یک اختلال یا بی‌نظمی بازیابی کند، اطلاق می‌گردد. برونو و همکاران [۹] تعریف گسترده‌ای از تاب‌آوری برای پوشش تمام اقدامات لازم برای کاهش خسارات ناشی از بحران، شامل اقدامات بازدارنده و بازیابی سریع‌تر را ارائه کردند. تاب‌آوری را می‌توان در چهار بعد مرتبط با هم فهم کرد. این ابعاد شامل ابعاد فنی، سازمانی، اجتماعی و اقتصادی می‌باشند [۱]. چنگ و همکاران [۱۰] مجموعه‌ای از روابط کمی برای تاب‌آوری را پیشنهاد کرده‌اند و آن روابط را در بررسی یک سیستم واقعی انتقال آب به کار برده‌اند. سیمیلارو و همکاران [۱۱] تلاش‌هایی در زمینه کمی کردن روابط مربوط به محاسبه شاخص تاب‌آوری انجام دادند و روابطی برای محاسبات مربوط به خسارات وارده، زمان بازیابی سازه و ... ارائه دادند و روابط مربوطه را برای یک بیمارستان با قاب خمشی فولادی مورد آزمایش قرار دادند. پنگ یو و همکاران [۱۱] پژوهشی در زمینه‌ی روش-های محاسبه تاب‌آوری انجام دادند و تاب‌آوری یک بیمارستان شهری را محاسبه نمودند. عبدالله شفیع زاده و همکاران [۱۲] پژوهشی در زمینه محاسبه تاب‌آوری بر مبنای سناریو برای سازه‌های حیاتی انجام دادند و تاب‌آوری یک بندر دریای را محاسبه کردند. آندریک و همکاران [۱۳] پژوهشی در زمینه پیش‌بینی تاب‌آوری لرزه‌ای پل‌ها بر اساس روش فازی<sup>۱</sup> انجام دادند. در گذشته مطالعاتی در مورد ستون-های مرکب و عملکرد آن‌ها در برابر زلزله انجام شده است. لازم به ذکر است که ستون‌های مرکب از ترکیب بتن و فولاد ساخته می‌شوند و این ستون‌ها از اعضای رایج مورد استفاده در سازه‌ها و پل‌های امروزی می‌باشد [۱۴]. از آنجایی که جدار فولادی، محصورشدگی سه‌محوری را فراهم می‌کنند و علاوه بر آن مقداری از نیروی محوری و لنگر خمشی را هم تحمل می‌کنند، بهبود عملکرد ستون از طریق افزایش مقاومت و سختی و شکل‌پذیری قابل انتظار است [۱۷-۱۵]. استفاده از ستون‌های مرکب خصوصاً در سازه‌های با تعداد طبقات بالا می‌تواند با توجه به قیمت فولاد و بتن در بازار از لحاظ اقتصادی هم به‌صرفه‌تر باشد [۱۸]. در گذشته پژوهش‌هایی در زمینه عملکرد لرزه‌ای ستون‌های مرکب و کارایی مناسب این ستون‌ها در برابر زلزله انجام شده است. سوان ته هو و همکاران [۱۹] عملکرد ستون‌های مرکب با مقاطع متفاوت را تحت اثر نیروی محوری و لنگر خمشی همزمان، بررسی و مدل‌سازی کرده‌اند و عملکرد مناسب مقاطع از لحاظ میزان محصورکنندگی جدار را بررسی کرده‌اند. متیاس جوهانسون [۲۰] عملکرد ستون مرکب و محصورشدگی ایجاد شده توسط جدار فولادی در ستون‌های مرکب را بررسی کرده است و کارآمدی این ستون‌ها در ایجاد محصورشدگی مناسب برای بتن را نشان داده است. مائو و همکاران [۲۱] نیز عملکرد لرزه‌ای ستون‌های مرکب را بررسی کرده‌اند و استفاده از محصورشدگی مضاعف در ستون‌های کامپوزیت در محل‌های مفاصل پلاستیک را برای عملکرد لرزه‌ای بهتر پیشنهاد داده‌اند. کتان پاتل و همکاران [۲۲] در یک پژوهش به بررسی رفتار سازه‌های با

<sup>۱</sup> Fuzzy

ستون‌های مرکب، بتن مسلح و فولادی تحت اثر بارگذاری جانبی در سازه‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ طبقه پرداختند و نتیجه گرفتند که سازه‌های با ستون‌های مرکب، با وجود داشتن سطح مقطع کوچکتر، ظرفیت باربری بالاتر و عملکرد مناسب‌تری دارند. با این حال پژوهش آن‌ها بازه‌ی گسترده‌ای از شاخص شدت زلزله برای بررسی رفتار سازه‌ها را در نظر نگرفته است. به علاوه مقایسه صورت گرفته بر مبنای محاسبات آیین-نامه‌ای مربوط به برش پایه سازه‌ها و میزان جابجایی طبقات و دوره تناوب سازه‌ها بوده است. در پژوهش حاضر به محاسبه و بررسی شاخص تاب‌آوری سازه‌های فولادی و سازه‌های مشابه با ستون‌های مرکب و مقایسه این دو نوع سیستم سازه‌ای پرداخته خواهد شد.

## ۲- ستون‌های مرکب و مزایای آن‌ها

ستون‌های مرکب بر اساس نحوه‌ی قرارگیری فولاد و بتن به سه دسته کلی تقسیم می‌شوند. ستون‌های مرکب پر شده با بتن (CFT) و ستون‌های مرکب مدفون در بتن (SRC) و ترکیبی از حالات مذکور که استفاده از آنها در هر یک از این حالات می‌تواند مزیت‌های نسبی فراوانی ایجاد کند. اشکال متداول ستون‌های مرکب در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱: روش‌های متفاوت استفاده از ستون‌های مرکب: الف) مقاطع پر شده با بتن، ب) مقاطع محصور شده توسط بتن و ج) مقاطع ترکیبی

با توجه به خصوصیات مکانیکی فولاد و بتن، یکی از هوشمندانه‌ترین روش‌های استفاده هم‌زمان از هر دو مصالح در ستون‌ها، ستون‌هایی با مقاطع فولادی جدار نازک بسته (قوطی) و پر شده با بتن (CFT)<sup>۲</sup> است. در این مقاطع از طرفی فولاد در پیرامون مقطع که تنش‌های ناشی از لنگر خمشی حداکثر است قرار گرفته و از طرفی با توجه به هندسه مسئله همین فولاد موجب محصورشدگی بالا در بتن مصرفی در ستون می‌گردد و از طرف دیگر با توجه به اینکه قالب‌برداری اتفاق نمی‌افتد عمل‌آوری بتن نیز به صورت کامل انجام خواهد شد [۲۳]. همچنین بتن مصرفی با توجه به محصورشدگی بالا رفتار مناسبی خواهد داشت و می‌تواند در تحمل تنش‌های ناشی از نیروهای محوری نقش مؤثری داشته باشد. بنابراین در قاب‌های مهاربندی که به دلیل وجود مهاربند پتانسیل ایجاد نیروهای محوری در ستون‌ها نسبت به قاب خمشی به‌طور چشمگیری بیشتر است، استفاده از این نوع ستون‌ها می‌تواند مزایای زیادی را ایجاد کند. از سوی دیگر بتن استفاده شده در مقاطع CFT می‌تواند کماتش موضعی در فولاد را تا حد زیادی به تأخیر بیندازد و موجب بهبود رفتار سازه گردد. با توجه به مزایای ذکر شده، در این پژوهش از ستون‌های مرکب پر شده با بتن استفاده شده است.

<sup>2</sup> Concrete Filled Tube

## ۳- طراحی و مدل‌سازی قاب‌ها

همانطور که قبلاً ذکر شد هدف اصلی از انجام این پژوهش مقایسه‌ی تاب‌آوری قاب‌های فولادی با و بدون استفاده از ستون‌های مرکب می‌باشد. بدین منظور سه سازه فولادی کوتاه، متوسط و بلند با تعداد طبقات ۴، ۸ و ۱۶ طبقه که قبلاً در مرجع [۲۴] با ستون‌های فولادی با مقطع I شکل طراحی شده بودند انتخاب شده است. این سازه‌ها در غرب آمریکا واقع شده‌اند و با توجه به آیین‌نامه‌های IBC2012, ASCE7-10, AISC360-10, AISC341-10, AISC358-10 طراحی شده‌اند که تمام فرضیات طراحی اعم از مشخصات لرزه‌ای، نوع خاک و ... در مرجع مذکور قابل مشاهده است. به منظور مقایسه، سازه‌های مذکور با همان شرایط طراحی و همان مصالح یکبار با فرض استفاده از ستون‌های مرکب CFT و یک بار باکس فولادی با آیین‌نامه‌های موجود در مرجع [۲۴] در نرم افزار ETABS 2019 مدل‌سازی و بازطراحی شده‌اند. همچنین کلیه مشخصات سازه‌ها، مقاطع و مصالح در مرجع [۲۴] موجود می‌باشد. لازم به ذکر است در بازطراحی با ستون‌های مرکب از بتن با مقاومت فشاری ۲۵ مگاپاسکال استفاده شده است.

لازم به ذکر است پس از بازطراحی سازه‌ها با ستون‌های مرکب، میزان فولاد مصرفی در سازه‌های با ستون‌های مرکب نسبت به سازه‌های با ستون‌های باکس فولادی کاهش پیدا کرد. که میزان کاهش فولاد مصرفی در ستون‌ها به شرط استفاده از ستون‌های مرکب به شرح زیر است:

- میزان فولاد مصرفی در ستون‌های سازه‌ی چهار طبقه با ستون‌های مرکب نسبت به حالت استفاده از ستون‌های باکس ۳۵٪ کاهش از خود نشان می‌دهد.
- میزان فولاد مصرفی در ستون‌های سازه‌ی هشت طبقه با ستون‌های مرکب نسبت به حالت استفاده از ستون‌های باکس ۳۳٪ کاهش از خود نشان می‌دهد.
- میزان فولاد مصرفی در ستون‌های سازه‌ی شانزده طبقه با ستون‌های مرکب نسبت به حالت استفاده از ستون‌های باکس ۳۰٪ کاهش از خود نشان می‌دهد.

همچنین مقایسه‌ای از جرم کلی سازه‌های با ستون‌های باکس فولادی و مرکب بر حسب کیلوگرم در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: جرم سازه‌های با ستون‌های باکس فولادی و مرکب و مقایسه آن‌ها

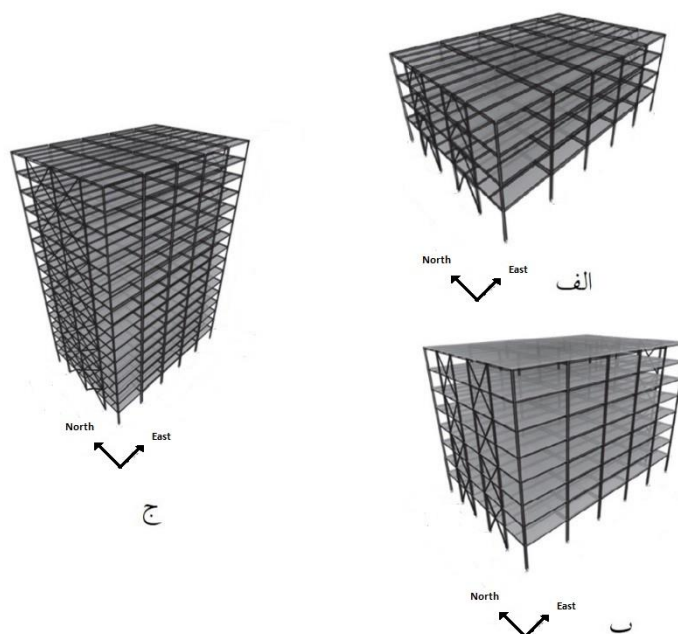
تعداد طبقات	جرم کلی سازه با ستون - های باکس فولادی	جرم کلی سازه با ستون - های مرکب	میزان کاهش جرم سازه با ستون‌های مرکب نسبت به سازه با ستون‌های باکس فولادی	درصد کاهش جرم سازه با ستون‌های مرکب نسبت به سازه با ستون‌های باکس فولادی
۴	۵۸۲۶۴۳۵	۵۷۹۱۲۳۶	۴۵۱۹۹	۰/۷۷
۸	۲۱۴۷۱۶۴۵	۲۱۳۲۴۸۷۱	۱۴۶۷۷۴	۰/۶۸
۱۶	۸۳۸۷۶۶۳۶	۸۳۲۰۲۱۹۱	۶۷۴۴۴۵	۰/۸۰

## ۳-۱- مشخصات قاب‌ها

در جدول ۲ مشخصات قاب‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر به صورت خلاصه آورده شده است. لازم به ذکر است که شکل سه‌بعدی و نمادین سازه‌ها در شکل ۲ و مشخصات پلان سازه‌ها نیز در شکل ۳ ارائه شده است. در این اشکال محل قرارگیری مهاربندها و قاب‌های خمشی مشخص است.

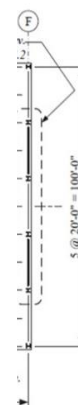
جدول ۲: مشخصات سازه‌های مدل شده در پژوهش [۲۴]

توضیحات	سیستم باربر جانبی در جهت شمالی-جنوبی	سیستم باربر جانبی در جهت شرقی-غربی	ابعاد در جهت شمالی-جنوبی	ابعاد در جهت شرقی-غربی	تعداد طبقات	شناسه سازه
قاب خمشی ویژه به شکل سه دهانه ۳۰ فوتی است و قاب مهاربندی همگرا به شکل ۱ دهانه ۲۰ فوتی با بادبند شورون و مقطع HSS	قاب مهاربندی همگرای ویژه فولادی <sup>۴</sup>	قاب خمشی ویژه فولادی <sup>۳</sup>	۵ دهانه ۲۰ فوتی = ۱۰۰ فوت	۵ دهانه ۳۰ فوتی = ۱۵۰ فوت	۴	MC4
قاب خمشی ویژه به شکل سه دهانه ۳۰ فوتی است و قاب مهاربندی همگرا به شکل ۱ دهانه ۲۰ فوتی با بادبند ضربدری در دو طبقه و مقطع HSS	قاب مهاربندی همگرای ویژه فولادی	قاب خمشی ویژه فولادی	۵ دهانه ۲۰ فوتی = ۱۰۰ فوت	۵ دهانه ۳۰ فوتی = ۱۵۰ فوت	۸	MC8
قاب خمشی ویژه به شکل سه دهانه ۳۰ فوتی است و قاب مهاربندی همگرا به شکل ۱ دهانه ۲۰ فوتی با بادبند ضربدری در دو طبقه و مقطع HSS	قاب مهاربندی همگرای ویژه فولادی	قاب خمشی ویژه فولادی	متفاوت (شکل ۹ و ۱۱ (ملاحظه شوند)	۵ دهانه ۳۰ فوتی = ۱۵۰ فوت	۱۶	MC16



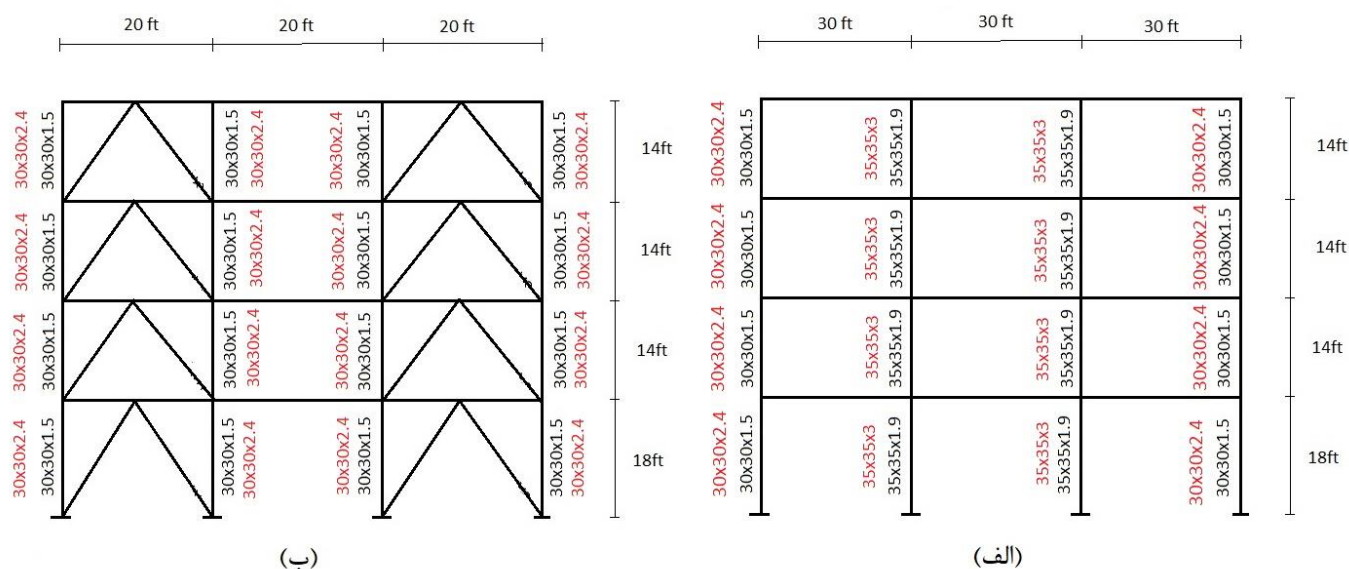
شکل ۲: شکل سه‌بعدی سازه‌ها. الف) سازه ۴ طبقه، ب) سازه ۸ طبقه و ج) سازه ۱۶ طبقه [۲۴]

<sup>3</sup> SMF – Special Moment Frames<sup>4</sup> SCBF – Special Concentrically Braced Frames

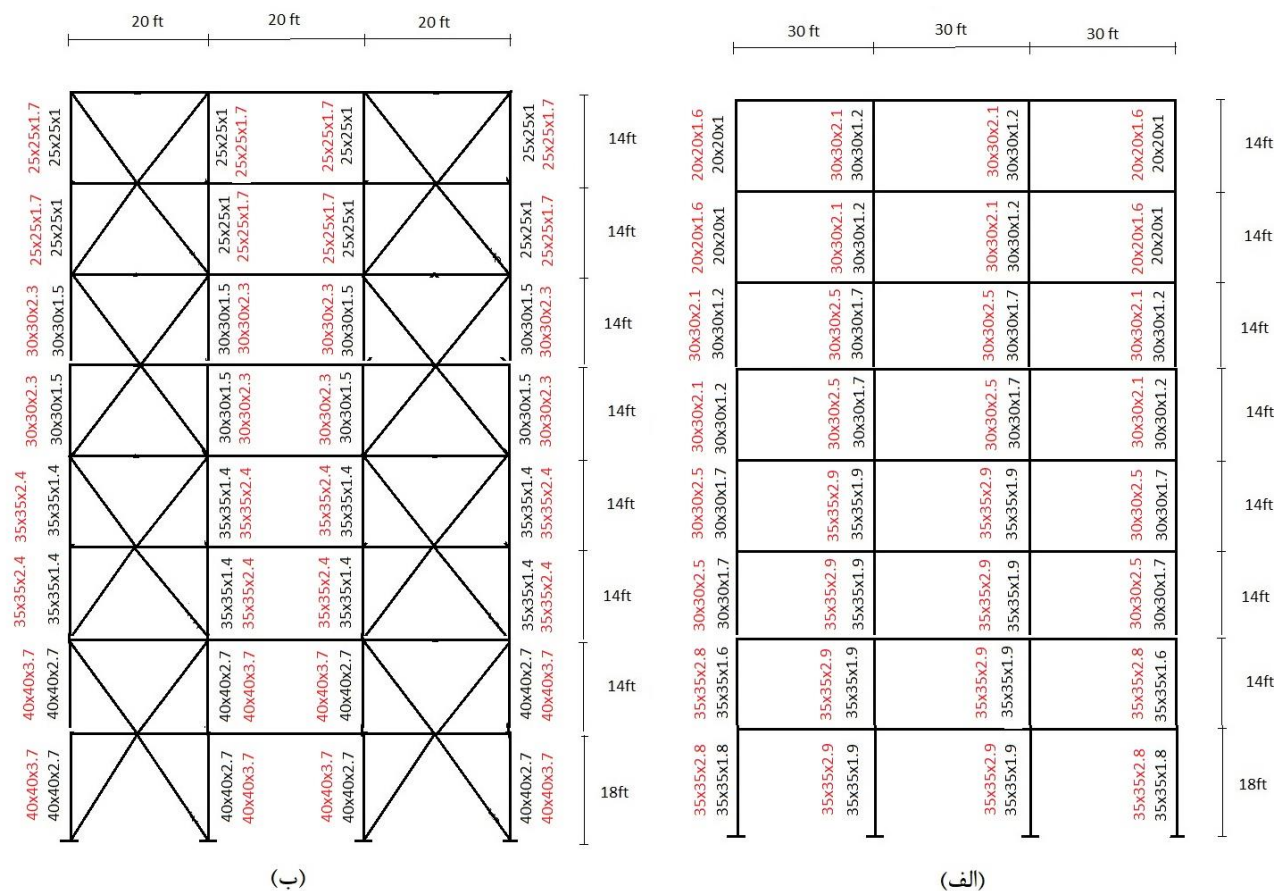


شکل ۳: پلان سازه‌ها. الف) سازه های ۴ و ۸ طبقه و ب) سازه ۱۶ طبقه [۲۴]

در این پژوهش سازه‌های فوق برای ارزیابی تاب‌آوری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این سازه‌ها در نرم افزار اپنسیس مدل‌سازی و تحلیل شدند. سیستم این سازه‌ها در جهت شمالی جنوبی به صورت مهاربندی شده و در جهت شرقی غربی به صورت قاب خمشی می‌باشد. پس از تحلیل این سازه‌ها، ستون‌های باکس به ستون‌های مرکب CFT تبدیل و بازطراحی شده‌اند و مجدداً مدل‌سازی و تحلیل در نرم افزار اپنسیس برای سازه‌های مرکب انجام شده است. مقاطع ستون‌های باکس فولادی و مرکب جایگزین شده در قاب‌های خمشی و بادبندی در اشکال ۴ الی ۷ ارائه شده است. لازم به ذکر است در این اشکال عدد اول بیانگر عرض مقطع، عدد دوم بیانگر ارتفاع مقطع و عدد سوم بیانگر ضخامت جدار فولادی می‌باشد و مقطع مرکب پر شده با بتن و مقطع باکس فولادی توخالی می‌باشد. پس از آن نتایج حاصل از تحلیل برای سازه‌های فولادی و مرکب بررسی و با هم دیگر مقایسه شد که نتایج حاصل از تحلیل و مقایسه‌ها در ادامه بیان خواهد شد.

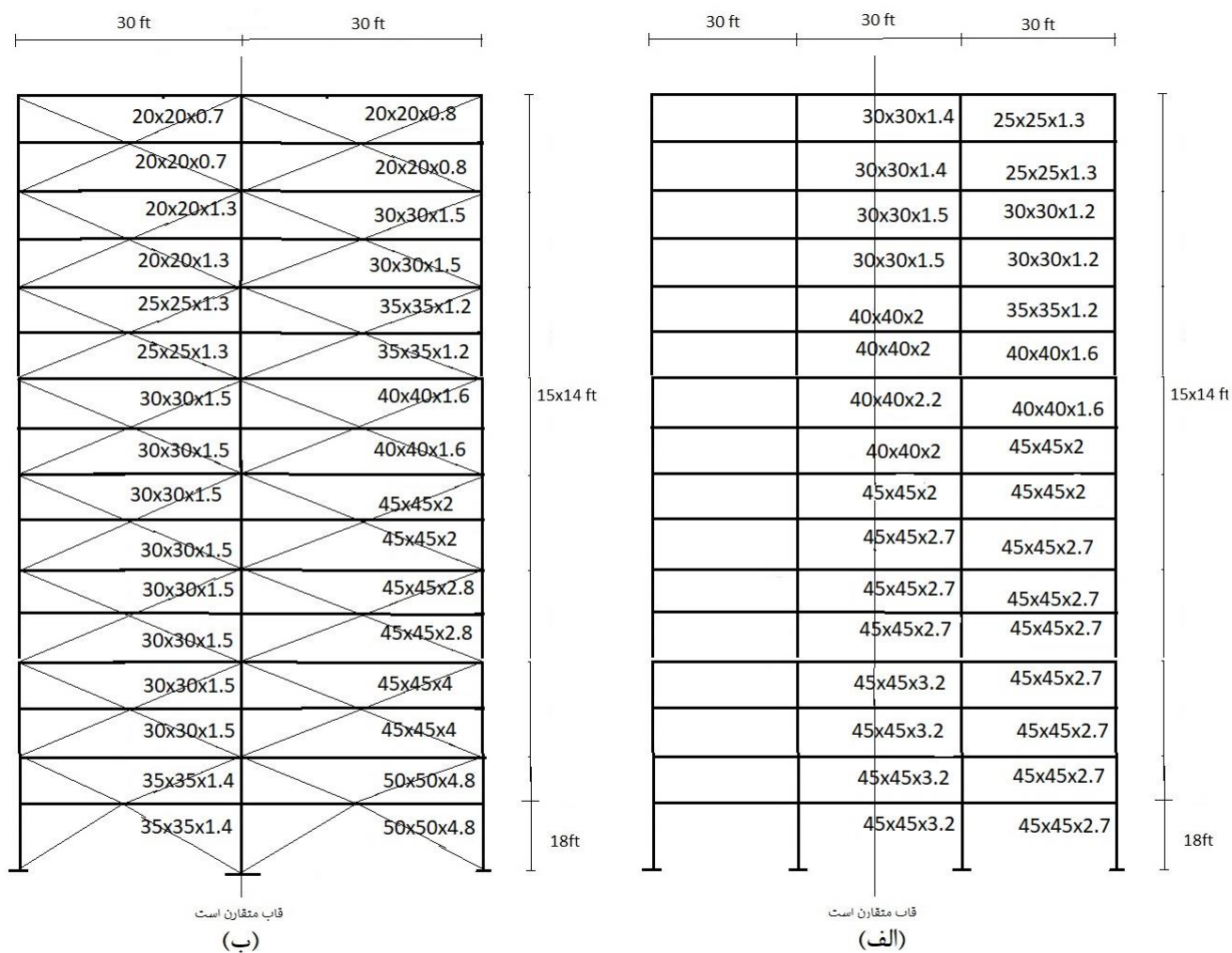


شکل ۴: مقاطع ستون‌های سازه ۴ طبقه در جهت (الف): خمشی و (ب): بادبندی (رنگ سیاه مقاطع مرکب و رنگ قرمز مقاطع باکس فولادی)



شکل ۵: مقاطع ستون‌های سازه ۸ طبقه در جهت (الف): خمشی و (ب): بادبندی (رنگ سیاه مقاطع مرکب و رنگ قرمز مقاطع باکس فولادی)

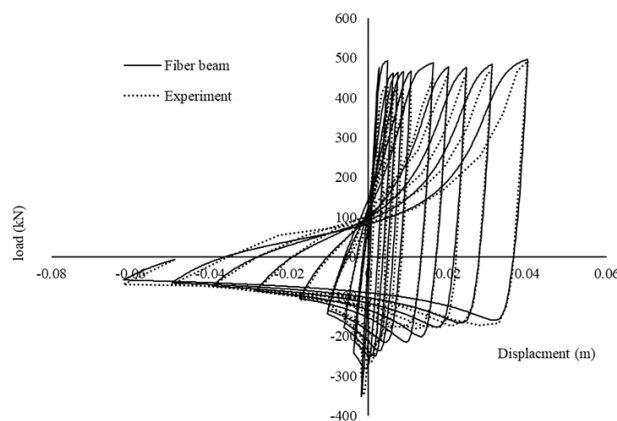




شکل ۶: مقاطع ستون‌های مرکب سازه ۱۶ طبقه در جهت (الف): خمشی و (ب): بادبندی



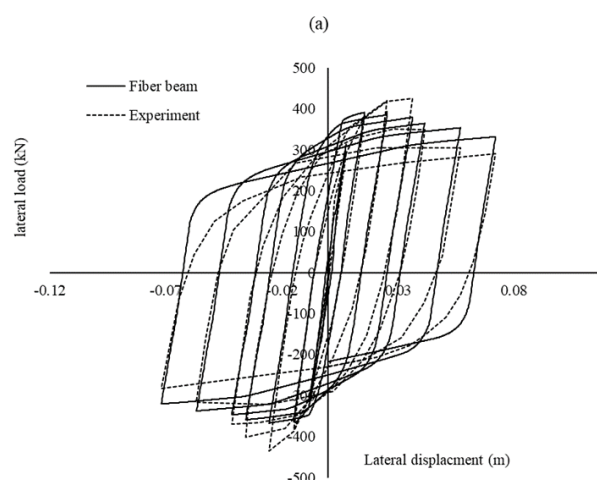
در این آزمایش یک بادبند با مقطع لوله ای و به صورت دو سر مفصل با طول ۳ متر و نسبت  $Kl/r$  برابر ۸۰ تحت بارگذاری محوری چرخه‌ای قرار گرفته و منحنی هیستریزس نیرو-تغییر شکل مربوطه به دست آمده است. به منظور انجام مدل‌سازی، بادبند مذکور با شش المان تیر-ستون با طول‌های برابر و با نقص اولیه برابر ۱٪ طول عضو مدل‌سازی و با دستورالعملی مشابه آزمایش مذکور بارگذاری گردیده و با نتایج آزمایش مقایسه شده است. که نمودار آنها در شکل ۸ ارائه شده است.



شکل ۸: نمودار نیرو تغییر مکان بادبند

#### ۴-۳- مدل‌سازی ستون‌ها

همچنین با توجه به اثرات اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی در ستون‌ها بهتر است این اجزا نیز با استفاده از پلاستیسیته گسترده و مقطع فایبر مدل‌سازی گردند. در مرجع [۲۷]، روشی برای مدل‌سازی ستون‌ها با پلاستیسیته گسترده و در نظر گرفتن اثرات کاهندگی چرخه‌ای به منظور مدل‌سازی ستون با مقطع باکس فولادی ارائه شده است. بررسی‌های انجام شده در این پژوهش نشان می‌دهد با اعمال تغییراتی در روش مذکور می‌توان از آن برای مدل‌سازی مقاطع مرکب مستطیلی نیز استفاده کرد. در این راستا برای مدل‌سازی مقطع مرکب در اجزای فولادی با اعمال اصلاحاتی بر روی کالیبراسیون مصالح فولادی پیشنهادی در مرجع [۲۷] استفاده شده است. همچنین با اعمال کالیبراسیون مناسب بر روی مدل پیشنهادی مندر [۲۸] و اختصاص آن به قسمت‌های بتنی مقطع مورد نظر مدل‌سازی گردیده است. به منظور صحت‌سنجی روش پیشنهادی در مدل‌سازی صحیح ستون مرکب از آزمایش‌های مرجع [۲۹] استفاده شده است و با این روش به صورت کامل مدل‌سازی و با نتایج آزمایش مقایسه گردید که نمودار آن در شکل ۹ ارائه می‌شود. نمونه آزمایش به صورت طره بوده که تحت بارگذاری جانبی و بار ثابت محوری به میزان ۲۲۷۰ کیلو نیوتن که ۲۰ درصد ظرفیت محوری آن است قرار می‌گیرد. مقطع نمونه به صورت باکس مربعی بوده که ضخامت آن ۵/۸ میلی‌متر می‌باشد. نسبت عرض به ضخامت اسمی آن ۴۸ و طول نمونه نیز ۱/۵ متر می‌باشد. مطابق مرجع [۲۷] برای مدل‌سازی ستون، ستون به سه قسمت تقسیم شده که طول المان‌های ابتدایی و انتهایی به اندازه عرض ستون بوده و تمرکز پلاستیک‌شدگی در این نواحی ایجاد می‌شود. با توجه به استفاده از مدل فایبر پیاده‌سازی شده در نرم افزار اپنسیس برای مدل‌سازی ستون‌های مرکب، توزیع کرنش ناشی از لنگر خمشی در ارتفاع مقطع به صورت خطی بوده و میزان کرنش در فولاد و یا بتن در نقاطی که فاصله یکسانی از تار خنثی مقطع دارند با هم برابر است. بنابراین با فرضیات مذکور در مدل‌سازی، مقطع مرکب عملاً یکپارچه رفتار نموده و از لغزش بین فولاد و بتن در مدل‌سازی مقطع مرکب صرف نظر شده است. که این امر می‌تواند در رفتار سازه تاثیر گذار باشد. اما با توجه به صحت‌سنجی صورت گرفته مدل‌سازی مقطع مرکب با فرض ساده کننده مذکور از دقت نسبتاً مناسبی برخوردار است. بدیهی است در صورت مدل‌سازی این پدیده می‌توان با دقت بالاتری رفتار ستون‌های مرکب را مدل‌سازی کرد اما با توجه به محدودیت‌های نرم‌افزار از مدل‌سازی این پدیده صرف‌نظر گردیده است.



شکل ۹: نمودار نیرو و تغییر مکان ستون

با توجه به اینکه اغلب در هنگام تحلیل مدل‌های غیرخطی در نرم‌افزار Opensees مشکل همگرایی رخ می‌دهد، در این پژوهش برای همگرایی سریع‌تر، از بسته نرم‌افزاری "SmartAnalyze" که توسط هانلین دونگ<sup>۵</sup> توسعه داده شده، استفاده شده است در این بسته نرم‌افزاری هر دو نوع تحلیل دینامیکی و استاتیکی غیرخطی با قابلیت همگرایی بالا پیش‌بینی شده است.

لازم به ذکر است در مدل‌سازی‌ها در نرم‌افزار Opensees اثر  $P-\Delta$  نیز لحاظ شده است.

#### ۴- مبانی و روش‌های ارزیابی بر مبنای عملکرد

در نسل اول آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای ساختمان‌ها، تغییر مکان‌های ناشی از زلزله در سازه در طی مراحل اولیه طراحی به‌طور مستقیم لحاظ نمی‌شود. در عوض فرض می‌شود هر یک از اعضای سازه‌ای در صورت طراحی صحیح قادر به تحمل سطح خاصی از تغییر مکان غیرخطی پایدار باشد و اضافه ظرفیت ناشی از رفتار غیرخطی اعضا در آیین‌نامه‌ها به کمک ضریب رفتار لحاظ می‌شود [۳۰]. این آیین‌نامه‌ها عمدتاً با هدف محدود کردن تلفات جانی ناشی از زلزله تدوین شده‌اند. از طرفی زلزله‌های بزرگ سالیان اخیر نمایانگر این است که میزان خسارت‌های سازه‌ای و غیر سازه‌ای وارد به ساختمان‌ها در مواردی بسیار شدید بوده و خسارات مالی سنگین به دنبال داشته است که روش‌های طراحی نسل اول قابلیت ارزیابی این خسارات را به طور صریح ندارند. هدف از طراحی بر مبنای عملکرد این است که بتوان سازه‌ای ساخت که عملکرد آن در مقابل زلزله‌های مختلف قابل پیش‌بینی باشد و کارفرمای پروژه و طراح بتوانند عملکرد مورد نظر را با توجه به هدف سازه انتخاب کنند. طراحی بر مبنای عملکرد بیش از آنکه بر اساس فرمول‌های آیین‌نامه‌های تجربی باشد، کوششی برای پیش‌بینی رفتار سازه‌ها به هنگام قرار گرفتن در برابر زلزله‌های مورد نظر است. از طرفی ارزیابی بر مبنای عملکرد به دلیل عامه فهم بودن، می‌تواند بین مهندسان عمران و کارفرمایان غیر عمرانی که در زمینه اصطلاحات عمرانی تخصص ندارند فهم مشترکی ایجاد کند.

#### ۴-۱- تحلیل دینامیکی افزایشی<sup>۶</sup>

پس از مدل‌سازی اولیه به منظور انجام تحلیل‌های غیرخطی IDA، قاب‌ها برای سه سازه کوتاه، بلند و متوسط برای ساختمان‌های فولادی و با ستون‌های مرکب در نرم‌افزار Opensees مدل‌سازی می‌شوند. نتایج حاصل از تحلیل‌های غیرخطی به صورت نمودارهای تحلیل IDA و منحنی‌های شکنندگی برای تمامی قاب‌ها استخراج شد. تحلیل دینامیکی افزایشی یکی از روش‌های شبیه‌سازی خسارت سازه در زلزله‌های مختلف است. این تحلیل روشی پارامتریک برای تحلیل رفتار و عملکرد سازه‌ها تحت بارهای لرزه‌ای می‌باشد. در این روش سازه

<sup>5</sup> Hanlin Dong - <https://gist.github.com/Hanlin-Dong>

<sup>6</sup> Incremental Dynamic Analysis (IDA)

تحت اثر یک یا چندین رکورد زلزله که هر یک به تدریج افزایش می‌یابد قرار می‌گیرد. امروزه این روش بسیار مورد توجه قرار گرفته است و در برخی دستورالعمل‌های لرزه‌ای مانند FEMA350 [۳۱] نیز آمده است. از جمله مزایای عمده این تحلیل می‌توان به ارزیابی پاسخ‌های سازه در سطوح مختلف شدت زلزله و برآورد ظرفیت دینامیکی آنها اشاره کرد.

## ۲-۴- منحنی شکنندگی<sup>۷</sup>

یکی از روش‌های پر استفاده که در سالیان اخیر برای ارزیابی عملکرد یک سازه تحت سطوح عملکردی مختلف به صورت گسترده توسط محققین و پژوهشگران حوزه مهندسی سازه و زلزله مورد استفاده قرار می‌گیرد، منحنی شکنندگی است [۳۲]. طبق تعریف منحنی شکنندگی احتمال شرطی فراگذشت از یک حالت حدی خرابی به صورت تابعی از شاخص شدت است و از روش احتمالاتی به منظور در نظر گرفتن انواع حالت‌ها و عدم قطعیت‌های مختلف سازه و زلزله بهره می‌برد. منحنی شکنندگی اطلاعات مناسبی از سهم خسارات به وسیله توزیع تجمعی زیان‌ها ارائه می‌دهد و بیان می‌دارد که آیا احتمال وقوع سطح مشخصی از خسارات رسیده یا فراتر رفته است. منحنی شکنندگی می‌تواند تجربی و یا تحلیلی باشد. از نظر تحلیلی منحنی شکنندگی احتمال اینکه پاسخ R یک سازه از یک آستانه مشخص  $r_{lim}$  فراتر رود را بیان می‌کند و توسط رابطه پیشنهادی (۱) بیان می‌شود [۳۳ و ۳۴].

$$Fragility = F_y = P\{R \geq r_{lim} | I\} \quad (1)$$

که R پارامتر پاسخ (تغییر شکل، جابجایی، نیرو، سرعت، شتاب و ...)،  $r_{lim}$  پارامتر آستانه پاسخ (مرتبط با خسارت) و I شدت واقعه می‌باشد.

## ۳-۴- محاسبه خسارت و زمان بازیابی

در این پژوهش برای محاسبه خسارات سازه‌ای از نرم افزار پکت<sup>۸</sup> که بر مبنای آیین نامه ATC-58 می‌باشد استفاده شده است. این نرم افزار خسارات سازه‌ای را بر پایه سناریو، شدت و زمان محاسبه می‌کند. این نرم افزار می‌تواند خسارت سازه را طبق خروجی‌های تحلیل‌های غیرخطی و خطی محاسبه کند. در این آیین‌نامه برای محاسبه خسارت سه راهبرد در نظر گرفته می‌شود که شامل ارزیابی خسارت بر مبنای شدت زمین‌لرزه، بر مبنای زمان و سناریو است. محصول یک ارزیابی بر مبنای شدت زمین‌لرزه توزیع خسارت احتمالی برای ساختمانی است که تحت زلزله‌ای با شدت مشخص قرار گرفته است. حاصل به کارگیری ارزیابی خسارت بر مبنای شدت زمین‌لرزه، توزیع تجمعی احتمال است که در آن احتمال اینکه خسارت وارده با در نظر گرفتن شدت لرزش معین بالاتر از یک مقدار مشخص باشد نشان داده می‌شود. حاصل ارزیابی عملکرد لرزه‌ای یک سازه بر اساس سناریو، توزیع خسارت لرزه‌ای احتمالاتی با در نظر گرفتن وقوع زمین لرزه‌ای با سناریوی مشخصی می‌باشد. سناریو زمین‌لرزه می‌تواند ترکیبی از بزرگای زمین‌لرزه و فاصله ساختمان مورد نظر از گسلی که زلزله در آن رخ می‌دهد، باشد. ارزیابی عملکرد لرزه‌ای بر اساس زمان، توزیع احتمال خسارت ناشی از وقوع زمین‌لرزه را با در نظر گرفتن کلیه زمین‌لرزه‌های محتمل در یک بازه زمانی مشخص با احتساب احتمال وقوع هر یک از این زمین‌لرزه‌ها محاسبه می‌نماید. برای ارزیابی خسارت بر اساس زمان می‌توان از مجموعه‌ای از ارزیابی‌های بر اساس شدت و منحنی خطر لرزه‌ای مناسب استفاده کرد و نرخ سالانه گذشتن<sup>۹</sup> شدت زمین‌لرزه ( $\lambda(e)$ ) در مقابل شدت زمین لرزه (e) که معمولاً شتاب طیفی در پیوند مود اول سازه است را به دست آورد. با به کارگیری منحنی‌های خطر لرزه‌ای در رابطه (۲)، می‌توان احتمال سالانه گذشتن خسارت از مقدار مشخص I را محاسبه نمود.

$$P(L > l) = \int_A P(L > l | E = e) d\lambda(e) \quad (2)$$

<sup>7</sup> Fragility Curve

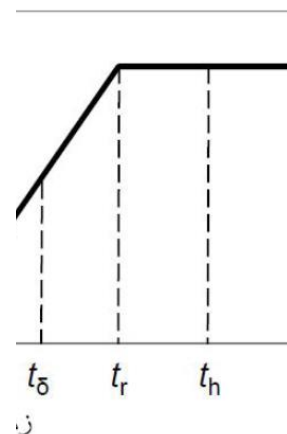
<sup>8</sup> PACT (Performance Assessment Calculation Tool)

<sup>9</sup> Annual rate of exceedance

که در این معادله عبارت  $P(L>1 | E=e)$ ، حاصل شده از ارزیابی بر اساس شدت  $e$  می‌باشد. این معاله را می‌توان با استفاده از روش‌های عددی حل کرد. لازم به ذکر است زمان بازیابی سازه تحت تاثیر متغیرهای زیادی از جمله شرایط مکانی، زمانی، میزان توسعه یافتگی و آمادگی جوامع و ... می‌باشد. زمان بازیابی با دو رویکرد محاسبه می‌شود، رویکرد اول به صورت موازی، بدین صورت که بازیابی در تمام طبقات به صورت همزمان انجام می‌شود و رویکرد دوم به صورت سری، بدین صورت که ابتدا یک طبقه بازسازی شده و طبقات بعدی هم به ترتیب بازسازی می‌شوند. محاسبه زمان بازیابی با توجه به روابط و رویکرد های ارائه شده در آیین‌نامه قابل محاسبه می‌باشد. لازم به ذکر است که رویکرد پژوهش حاضر، محاسبه خسارات سازه‌ای بر پایه شدت بوده است و شدت لرزش مورد استفاده شتاب طیفی الاستیک مود اول با میرایی ۵٪ است. این نتایج برای کلیه سازه‌ها و در بیست شدت زلزله و برای هر شدت زلزله با احتمال شکست ۵۰٪ محاسبه شده و برای محاسبه میزان تاب‌آوری سازه‌ها استفاده شده است.

#### ۴-۴- تاب‌آوری<sup>۱۰</sup>

میزان تاب‌آوری یک سیستم به وسیله‌ی شاخص تاب‌آوری بیان می‌شود که عددی بین ۰ و ۱۰۰ درصد می‌باشد. که هرچقدر این عدد به ۱۰۰ نزدیک‌تر باشد نشان دهنده‌ی تاب‌آوری بیشتر سیستم خواهد بود. لازم به ذکر است که به‌دست آوردن شاخص تاب‌آوری با داشتن زمان بازیابی سیستم و میزان خسارات وارده امکان‌پذیر خواهد بود. از نظر مفهومی چند طرح برای برآورد کمی شاخص تاب‌آوری وجود دارد که همه آن‌ها از یک نمودار عملکرد در برابر زمان استفاده می‌کنند. حادثه مخرب در زمان  $t_0$  اتفاق می‌افتد و عملکرد سیستم قبل از حادثه معمولاً  $Q(t_0)=100\%$  در نظر گرفته می‌شود. پس از حادثه، عملکرد به تدریج کاهش می‌یابد تا زمانیکه به حداقل مقدار یعنی  $Q(t_d)$  برسد و این مقدار را تا زمانیکه عملیات بازیابی در زمان  $t_i$  آغاز شود را حفظ می‌کند. برای یک زلزله و بدون تاثیر سایر سیستم‌ها، احتمالاً  $t_0$  و  $t_d$  همزمان خواهند بود. به عبارتی این سیستم بلافاصله پس از حادثه به پایین‌ترین سطح عملکرد خود خواهد رسید. بازیابی کامل در زمان  $t_r$  محقق خواهد شد و پس از آن سیستم به کیفیت قبل از حادثه باز می‌گردد [۳۵]. نمودار عملکرد در برابر زمان در شکل ۱۰ ارائه شده است.



شکل ۱۰: نمودار عملکرد در برابر زمان [۳۵]

تعریفی از تاب‌آوری به صورت محاسبه سطح زیر منحنی عملکردی از  $t_0$  تا بازیابی کامل در  $t_r$  به شکل رابطه (۳) می‌باشد [۳۶]:

$$R = \int_{t_0}^{t_r} Q(t) dt \quad (3)$$

<sup>10</sup> Resilience

## ۵- نتایج حاصل از تحلیل‌ها

پس از انجام مدل‌سازی‌ها از روش تحلیل دینامیکی فزاینده استفاده شد. به وسیله پاسخ‌های غیرخطی به دست آمده منحنی‌های شکنندگی برای قاب‌ها ترسیم شد و پس از محاسبه خسارت و زمان بازیابی به شرحی که قبلاً بیان شد شاخص تاب‌آوری قاب‌ها محاسبه و با یکدیگر مقایسه شدند که این نتایج به شرح ذیل ارائه می‌شوند.

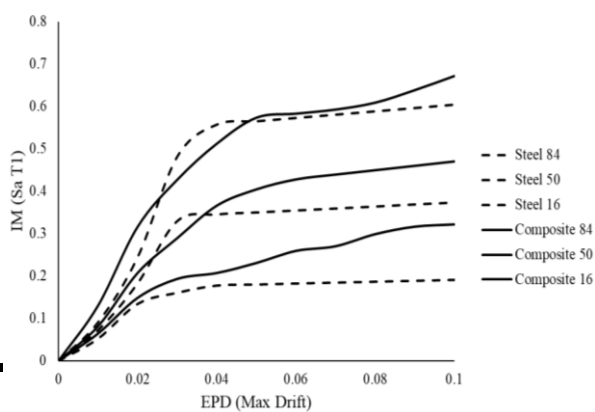
### ۵-۱- نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی فزاینده

رکوردهای زلزله برای تحلیل دینامیکی فزاینده در نظر گرفته شد و مدل‌سازی‌ها در نرم افزار اپنسیس انجام شد. رکوردهای زلزله استفاده شده، رکوردهای زلزله FEMA 695 [۳۷] در نظر گرفته شد که مشخصات این رکوردها در جدول ۳ ارائه می‌شود و برای نرمال-سازی و مقیاس کردن این رکوردها نیز از همین آیین‌نامه استفاده شد.

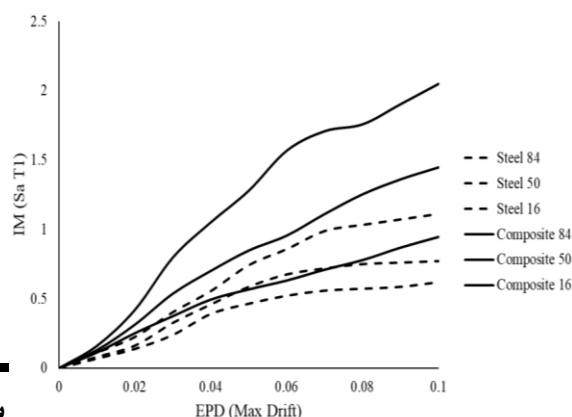
جدول ۳: رکوردهای زلزله استفاده شده برگرفته از FEMA695 [۳۷]

Recording Station	
Name	Owner
Beverly Hills - Mulhol	USC
Canyon Country-WLC	USC
Bolu	ERD
Hector	SCSN
Delta	UNAMUCSD
El Centro Array #11	USGS
Nishi-Akashi	CUE
Shin-Osaka	CUE
Duzce	ERD
Arcelik	KOERI
Yermo Fire Station	CDMG
Coolwater	SCE
Capitola	CDMG
Gilroy Array #3	CDMG
Abbar	BHRC
El Centro Imp. Co.	CDMG
Poe Road (temp)	USGS
Rio Dell Overpass	CDMG
CHY101	CWB
TCU045	CWB
LA - Hollywood Stor	CDMG
Tolmezzo	--

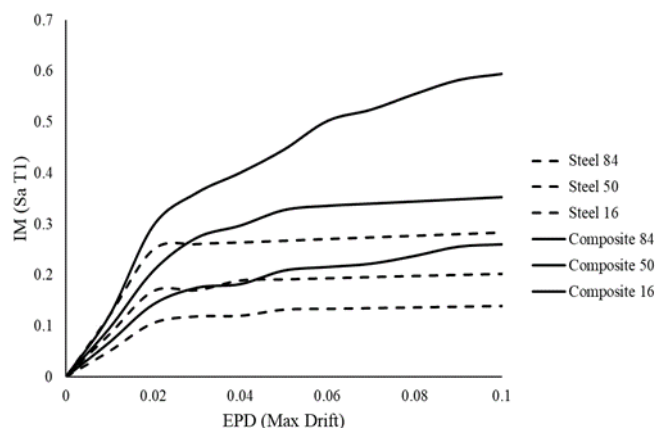
مقایسه بین نتایج به دست آمده از تحلیل دینامیکی فزاینده برای سازه‌های با ستون‌های فولادی و مرکب در جهت با سیستم سازه‌ای خمشی و با داشتن نمودارهای مربوط به دهک‌های ۱۶، ۵۰ و ۸۴ به شرح زیر می‌باشند:



شکل ۱۲: نمودارهای سازه‌های فولادی و مرکب ۸ طبقه



شکل ۱۱: نمودارهای سازه‌های فولادی و مرکب ۴ طبقه

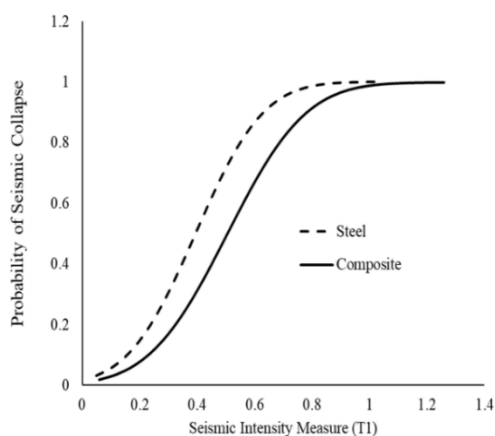


شکل ۱۳: نمودارهای سازه‌های فولادی و مرکب ۱۶ طبقه

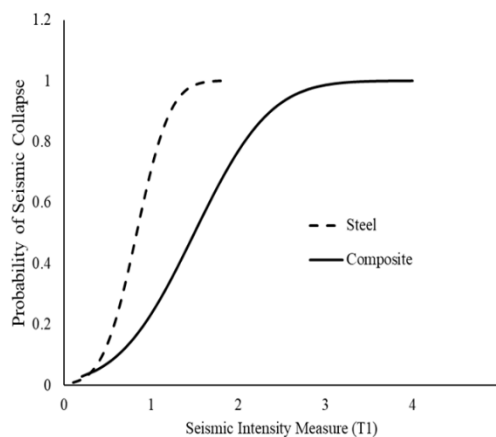
با مقایسه منحنی‌های IDA بین سازه‌های فولادی و مرکب، مشاهده می‌شود که از نظر دریافت طبقات، سازه‌های مرکب در جهت خمشی عملکرد مناسب‌تری نسبت به سازه‌ی مشابه فولادی دارند.

## ۲-۵- مقایسه بین منحنی‌های شکنندگی

نتایج حاصل از مقایسه بین منحنی‌های شکنندگی برای سطح عملکردی آستانه فروریزش برای سازه‌های با ستون‌های فولادی و مرکب در سیستم سازه‌ای قاب خمشی به شرح زیر می‌باشد:

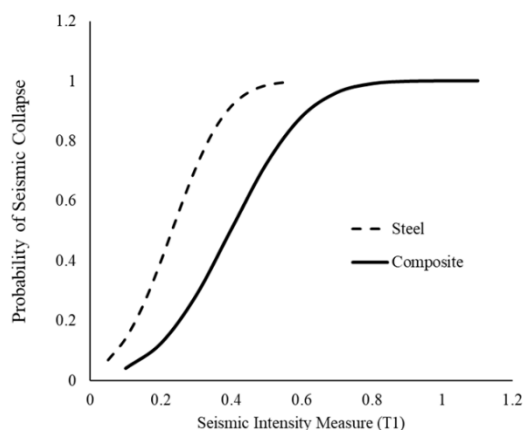


شکل ۱۵: نمودارهای سازه‌های فولادی و مرکب ۸ طبقه



شکل ۱۴: نمودارهای سازه‌های فولادی و مرکب ۴ طبقه



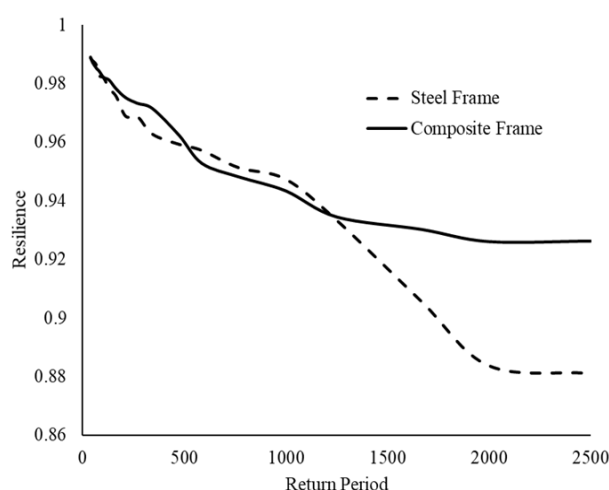


شکل ۱۶: نمودارهای سازه‌های فولادی و مرکب ۱۶ طبقه

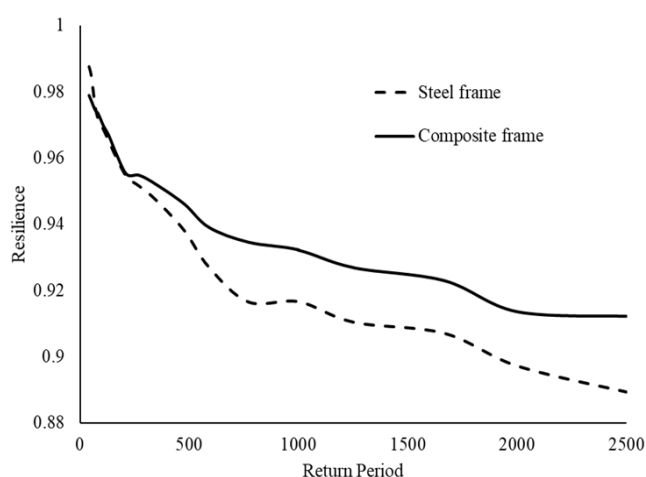
با مقایسه منحنی‌های شکنندگی برای سازه‌های مختلف، مشاهده می‌شود که سازه‌های مرکب عملکرد مناسب‌تری نسبت به سازه‌های فولادی در جهت خمشی دارند.

### ۳-۵- بررسی میزان تاب‌آوری سازه‌ها

با توجه به نتایج حاصل از تحلیل و ارزیابی سازه‌ها و پاسخ‌های به‌دست آمده و نتایج به‌دست آمده از تحلیل‌های IDA و با استفاده از نرم‌افزار PACT، زمان بازیابی سازه‌ها و میزان خسارات وارده برای ۲۰ شدت زلزله با دوره بازگشت تا ۲۵۰۰ ساله و با احتمال شکست ۵۰٪ محاسبه شده و با استفاده از این داده‌ها و فرمول مربوط به محاسبه شاخص تاب‌آوری، شاخص تاب‌آوری برای شدت زلزله‌های مختلف محاسبه شده و با استفاده از ۲۰ شاخص تاب‌آوری مربوط به هر قاب، نموداری بر حسب شاخص تاب‌آوری و دوره بازگشت زلزله به داده‌های هر قاب برازش داده شده است. نتایج مربوط به مقایسه عملکرد سازه‌های فولادی و مرکب با داشتن نمودارهای مربوطه برای زلزله‌های با

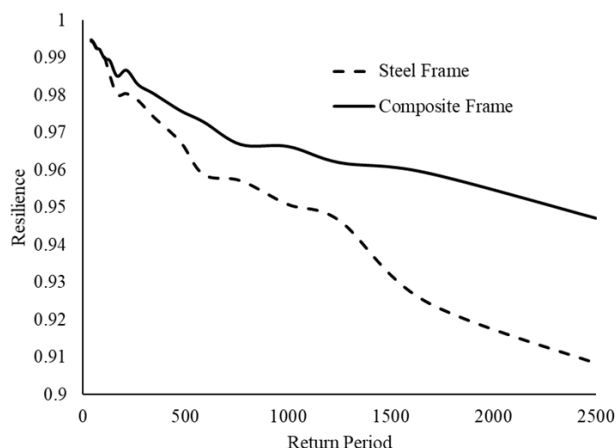


شکل ۱۸: نمودارهای سازه‌های فولادی و مرکب ۸ طبقه



شکل ۱۷: نمودارهای سازه‌های فولادی و مرکب ۴ طبقه

دوره بازگشت تا ۲۵۰۰ ساله در شکل‌های ۱۷ الی ۱۹ ارائه می‌شود.



شکل ۱۹: نمودارهای سازه‌های فولادی و مرکب ۱۶ طبقه

با مشاهده نمودارهای مربوط به تاب‌آوری سازه‌های مرکب و فولادی و مقایسه‌ی آن‌ها، مشاهده می‌شود که سازه‌های مرکب در بیشتر شدت‌های لرزه‌ای تاب‌آوری بالاتری نسبت به سازه‌های مشابه فولادی دارند، که این تاب‌آوری مناسب‌تر در زلزله‌های با دوره‌ی بازگشت بزرگ‌تر، محسوس‌تر می‌باشد. برای درک بهتر و کمی تغییرات، میزان تغییرات شاخص تاب‌آوری برای دوره بازگشت زلزله ۲۵۰۰ ساله و همچنین میزان تغییرات شاخص تاب‌آوری متوسط برای ۲۰ شدت زلزله در جدول ۴ ارائه می‌شود.

جدول ۴: تغییرات شاخص تاب‌آوری برای سازه‌های مختلف

سازه	شاخص تاب‌آوری سازه فولادی در زلزله با دوره بازگشت ۲۵۰۰ ساله	شاخص تاب‌آوری سازه مرکب در زلزله با دوره بازگشت ۲۵۰۰ ساله	متوسط شاخص تاب‌آوری سازه فولادی در ۲۰ شدت زلزله	متوسط شاخص تاب‌آوری سازه مرکب در ۲۰ شدت زلزله	میزان تغییرات شاخص تاب‌آوری سازه مرکب نسبت به سازه فولادی در زلزله با دوره بازگشت ۲۵۰۰ ساله	میزان تغییرات شاخص تاب‌آوری سازه مرکب نسبت به سازه فولادی
۴ طبقه	۰/۸۸۹۲	۰/۹۱۲۱	۰/۹۴۲۶	۰/۹۴۹۴	+ ۰/۲۵۷	+ ۰/۱۷۲
۸ طبقه	۰/۸۸۱۰	۰/۹۲۶۲	۰/۹۵۵۶	۰/۹۶۲۸	+ ۰/۱۳	+ ۰/۱۷۵
۱۶ طبقه	۰/۹۰۸۳	۰/۹۴۷۰	۰/۹۶۹۱	۰/۹۷۸۶	+ ۰/۲۶	+ ۰/۱۹۸

## ۶- نتیجه گیری

در این پژوهش سعی شده است که با بررسی و مقایسه عملکردی سازه‌های با ستون‌های باکس فولادی و مرکب تشکیل شده از بتن و فولاد (CFT) مزایای استفاده از این نوع ستون‌ها در سازه‌های فولادی با استفاده از شاخص‌هایی مانند خسارات لرزه‌ای، منحنی شکنندگی و شاخص تاب‌آوری بررسی گردد. به جهت انجام این امر پس از مدل‌سازی غیرخطی این قاب‌ها به کمک روش تحلیل دینامیکی افزایشنده، منحنی‌های IDA و پاسخ‌های لازم به منظور ارزیابی و برآورد خسارات لرزه‌ای استخراج شده‌اند. سپس با استفاده از چهارچوب

ATC58 خسارات لرزه‌ای و زمان بازیابی سازه‌ها محاسبه و نهایتاً با بهره‌گیری از پارامترهای مذکور، شاخص تاب‌آوری برای هر دو دسته سازه (قاب خمشی با ستون‌های فولادی و یا ستون‌های مرکب) برآورد گردیده است. سپس به کمک نتایج حاصل و روابط مربوط به محاسبه شاخص تاب‌آوری این پارامتر نیز برای سازه‌های مذکور برآورد شده است. براساس نتایج بدست آمده می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

۱- با بررسی و ارزیابی منحنی‌های IDA سازه‌های با ستون‌های فولادی و مرکب در سیستم سازه‌های قاب خمشی ملاحظه می‌شود که سازه‌های با ستون مرکب با وجود کاهش ۳۳ درصدی فولاد مصرفی در ستون‌ها ظرفیت بیشتری در مواجهه با بارهای لرزه‌ای از خود نشان می‌دهند.

۲- با بررسی و ارزیابی منحنی‌های شکنندگی سطح عملکردی آستانه فروریزش سازه‌های با ستون‌های فولادی و مرکب در سیستم سازه‌های قاب خمشی ملاحظه می‌شود که در سازه‌های با ستون مرکب احتمال وقوع این سطح عملکردی کاهش یافته است. به طور مثال برای سازه‌های ۴، ۸ و ۱۶ طبقه فولادی، شاخص شدت متناسب با احتمال فروریزش ۰/۵۰، به ترتیب تقریباً ۰/۸، ۰/۴ و ۰/۲۲ می‌باشد در حالی که این مقدار برای سازه‌های مرکب ۴، ۸ و ۱۶ طبقه به ترتیب تقریباً برابر ۱/۴، ۰/۵ و ۰/۴ می‌باشد.

۳- با بررسی و ارزیابی منحنی‌های تاب‌آوری سازه‌های با ستون‌های فولادی و مرکب ملاحظه می‌شود که سازه‌های با ستون‌های مرکب در اکثر شدت‌های لرزه‌ای شاخص تاب‌آوری بالاتری دارند. به طوریکه در زلزله با دوره بازگشت ۲۵۰۰ ساله سازه‌های مرکب از ۲ تا ۵ درصد افزایش تاب‌آوری لرزه‌ای از خود نشان می‌دهند.

## مراجع

- [1] Cimellaro, Gian Paolo, Andrei M. Reinhorn, and Michael Bruneau. (2006). *Quantification of seismic resilience*. Proceedings of the 8th US National conference on Earthquake Engineering, Vol. 8. No. 1094
- [2] M. Klein, A. Sadiki, and J. Janicka. (2003). *Investigation of the influence of the Reynolds number on a plane jet using direct numerical simulation* Int. J. Heat Fluid Flow, vol. 24, no. 6, pp. 785–794
- [3] W. N. Adger. (2000). *Social and ecological resilience: are they related?* Prog. Hum. Geogr., Vol. 24, No. 3, pp. 347–364
- [4] Wildavsky.A. (1991). *The beleaguered presidency*
- [5] L. Comfort et al. (1999). *Reframing disaster policy: the global evolution of vulnerable communities*. Environ. Hazards, Vol. 1, No. 1, pp. 39–44
- [6] M. B. K Tierney. (2007). *Conceptualizing and measuring resilience: A key to disaster loss reduction*.
- [7] D. Mielti. (1999). *Disasters by Design: A Reassessment of Natural Hazards in the United States*.
- [8] B. Allenby. (2005). *Toward Inherently Secure and Resilient Societies*. Science (80-.), Vol. 309, No. 5737, pp. 1034–1036
- [9] Bruneau, M., Chang, S., Eguchi, R. Lee, G., O'Rourke, T., Reinhorn, A., Shinozuka, M., Tierney, K., Wallace, W., von Winterfelt, D., (2003). *A framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities*. EERI Spectra Journal, 19, (4), 733-752
- [10] Chang, S., Shinozuka M., (2004). *Measuring Improvements in the disaster Resilience of Communities*. EERI Spectra Journal, 20, (3), 739-755
- [11] Yu, Peng, et al., (2019). *A framework to assess the seismic resilience of urban hospitals*. Advances in Civil Engineering 2019: 1-11

- [12] Shafieezadeh, Abdollah, and Lindsay Ivey Burden. (2014). *Scenario-based resilience assessment framework for critical infrastructure systems: Case study for seismic resilience of seaports*. Reliability Engineering & System Safety 132: 207-219
- [13] Andrić, Jelena M., and Da-Gang Lu. (2017). *Fuzzy methods for prediction of seismic resilience of bridges*. International Journal of Disaster Risk Reduction 22: 458-468
- [14] Hwang, Ju-young, Hyo-Gyoung Kwak, and Yangsu Kwon. (2018). *A numerical model for considering the bond-slip effect in axially loaded circular concrete-filled tube columns*. Advances in Structural Engineering 21.12: 1923-1935
- [15] Lai Z and Varma AH. (2016). *Effective stress-strain relationships for analysis of non-compact and slender filled composite (CFT) members*. Engineering Structures 124: 457-472
- [16] Li X, Zhang DY, Yan WM, et al. (2014). *Effects of model updating on the estimation of stochastic seismic response of a concrete-filled steel tubular arch bridge*. Structure and Infrastructure Engineering 10(12): 1620-1637
- [17] Montuori R and Piluso V. (2015). *Analysis and modelling of CFT members: moment curvature analysis*. Thin-Walled Structures 86: 157-166
- [18] Debaroti G, Mahbuba B. (2012). *Formulation of Equivalent Steel Section for Partially Encased Composite Column under Concentric Gravity Loading*. International Journal of Advanced Technology in Civil Engineering, PP. 88-93
- [19] Hu, Hsuan-Teh, Chiung-Shiann Huang, and Zhi-Liang Chen. (2005). *Finite element analysis of CFT columns subjected to an axial compressive force and bending moment in combination*. Journal of Constructional Steel Research 61.12: 1692-1712
- [20] Johansson, Mathias. (2002). *The efficiency of passive confinement in CFT columns*. Steel and Composite Structures, An International Journal 2.5: 379-396
- [21] Mao, X. Y., and Y. Xiao. (2006). *Seismic behavior of confined square CFT columns*. Engineering structures 28.10: 1378-1386
- [22] Patel, Ketan, and Sonal Thakkar. (2013). *Analysis of CFT, RCC and STEEL building subjected to lateral loading*. Procedia Engineering 51: 259-265
- [23] Yin, Fei, et al. (2020). *Experimental and analytical study of seismic behavior of special-shaped multicell composite concrete-filled steel tube columns*. Journal of Structural Engineering 146.1: 04019170
- [24] Harris, J. L., and M. S. Speicher. (2015). *Assessment of First Generation Performance-Based Seismic Design Methods for New Steel Buildings. Volume 2: Special Concentrically Braced Frames*. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology.
- [25] Lignos, Dimitrios G., and Helmut Krawinkler. (2007). *A database in support of modeling of component deterioration for collapse prediction of steel frame structures*. Structural Engineering Research Frontiers. 1-12
- [26] Gary Black, R., W. A. Bill Wenger, and P. Popov Egor. (1980). *Inelastic buckling of steel struts under cyclic load reversals*. Report to Sponsors. National Science Foundation, American Iron and Steel Institute
- [27] Suzuki, Yusuke, and Dimitrios G. Lignos. (2020). *Fiber-based hysteretic model for simulating strength and stiffness deterioration of steel hollow structural section columns under cyclic loading*. Earthquake Engineering & Structural Dynamics 49.15: 1702-1720
- [28] Mander, John B., Michael JN Priestley, and R. Park. (1988). *Theoretical stress-strain model for confined concrete*. Journal of structural engineering 114.8: 1804-1826
- [29] Skalomenos, Konstantinos A., George D. Hatzigeorgiou, and Dimitri E. Beskos. (2014). *Parameter identification of three hysteretic models for the simulation of the response of CFT columns to cyclic loading*. Engineering structures 61: 44-60

- [30] A. S. Elnashai and B. M. Broderick. (1996). *Seismic response of composite frames—II. Calculation of behavior factors*. Eng. Struct., vol. 18, no. 9, pp. 707–723
- [31] FEMA. (2000). *Recommended seismic design criteria for new steel moment-frame buildings*. Report No. FEMA-350, SAC Joint Venture, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
- [32] G. C. Marano, R. Greco, and E. Morrone. (2011). *Analytical evaluation of essential facilities fragility curves by using a stochastic approach*. Eng. Struct., Vol. 33, No. 1, pp. 191–201
- [33] Barron-Corvera, R. (2000). *Spectral evaluation of seismic fragility of structures*. State University of New York at Buffalo. PhD thesis
- [34] Reinhorn, A., Barron-Corvera, R., and Ayala, A. (2001). *Spectral evaluation of seismic fragility of structures*. In Proceedings ICOSSAR, volume 2001.
- [35] Cimellaro, Gian Paolo, Andrei M. Reinhorn, and Michel Bruneau. (2010). *Framework for analytical quantification of disaster resilience*. Engineering structures 32.11: 3639-3649
- [36] Bruneau, Michel, and Andrei Reinhorn. (2007). *Exploring the concept of seismic resilience for acute care facilities*. Earthquake spectra 23.1: 41-62.
- [37] Kircher, Charles, et al. (2010). "Evaluation of the FEMA P-695 methodology for quantification of building seismic performance factors."