



# ارزیابی رفتار میراگر تسلیمی لوله در لوله با استفاده از تحلیل دینامیکی غیر خطی فزاینده (IDA)

عبدالله چراغی<sup>۱</sup>، سید مهدی زهرائی<sup>۲\*</sup>

۱- استادیار، مهندسی عمران، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

۲- استاد، مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران

\* تهران، صندوق پستی ۱۱۱۵۵/۴۵۶۳، mzahrai@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۰۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۲۶)

## چکیده

عملکرد لرزه‌ای مناسب، قیمت نسبی پایین و سهولت در طراحی و اجرا از مزایای میراگرهای منفعل به شمار می‌رود، لیکن عدم امکان تغییر در مشخصات سیستم کنترل متناسب با نوع و میزان نیروی وارده، موجب افت عملکرد و کاهش راندمان عملکرد آنهاست. در این تحقیق در ابتدا یک میراگر چندسطحی غیرفعال لوله‌درلوله نوین با قابلیت تغییر سختی، مقاومت و میزان جذب انرژی در سطوح مختلف جهت کاهش ارتعاشات لرزه‌ای سازه‌ها ارائه گردیده و عملکرد آن در سه سازه ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه با انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی فزاینده با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاکی از آنست که علیرغم تفاوت ماهیت زلزله‌های انتخابی و مولفه‌های دینامیکی آنها نظیر مدت تداوم و نیز محتوای فرکانسی، در تمامی آنها میراگر پیشنهادی سبب بهبود محسوس عملکرد سازه گردیده که موید عملکرد موثر در بهسازی سازه‌ها تحت زلزله‌های مختلف به واسطه سختی و مقاومت متغیر آن است. همچنین نتایج تحلیل‌های دینامیکی فزاینده گویای افزایش سطح عملکرد سازه و افزایش ظرفیت جذب انرژی آن است. شتاب طیفی حداکثر مود اول سازه قاب خمشی ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه به ترتیب مقادیر ۴/۷۵، ۴/۵۳ و ۳/۳۶ ثبت گردید که موید روند نزولی محسوس پارامتر مذکور با افزایش تعداد طبقات قاب می‌باشد. لیکن به دلیل نیاز به مهاربندی و افزایش سختی جانبی، این مقادیر در سازه دارای میراگر به ترتیب ۵/۹۵، ۴/۹۸ و ۳/۹۳ حاصل شد. مقایسه نمودارهای میانه، موید تفاوت محسوس در رفتار سازه قاب خمشی و قاب دارای میراگر پیشنهادی است به طوری که با افزایش تغییر مکان نسبی طبقات، افت محسوس عملکرد سازه و افقی شدن منحنی رفتاری در اثر فقدان سختی و مقاومت لازم در قاب خمشی قابل مشاهده است. لیکن در هر سه سازه، اتصال میراگر پیشنهادی موجب بهبود عملکرد در نتیجه کاهش تغییر مکان‌های نسبی طبقات بوده و حتی در انتهای نمودار نیز ظرفیت قابل ملاحظه‌ای در سازه جهت مقابله با نیروهای جانبی وجود دارد. به نظر می‌رسد میراگر پیشنهادی در عین سادگی، قابلیت اجرا و هزینه نسبی پایین، از عملکرد مناسب و قابل قبول در کاهش دامنه ارتعاشات و در نتیجه نیروی وارد به سازه برخوردار باشد.

## واژگان کلیدی

کنترل چندسطحی، میراگر لوله در لوله، ظرفیت سازه، تحلیل دینامیکی فزاینده

## Performance Evaluation of Yielding Pipe in Pipe Damper Using Incremental Dynamic Analysis

A. Cheraghi, S.M. Zahrai

### Abstract

Suitable seismic performance, relatively low price and ease in design and implementation are benefits of passive dampers, but invariant performance parameters proportional to the type and amount of input energy decrease their efficiency. In this study, at first a new multi stage passive damper with variable stiffness, strength and energy absorption capacity is introduced and its performance in three 5, 10 and 15-story frames is evaluated by incremental nonlinear dynamic analysis using the SAP2000 software. Results indicate that despite differences in dynamic parameters of selected seismic records such as duration of strong ground motions and frequency content, structural performance has been significantly improved which proved new damper effectiveness on improving the seismic performance of structures. Besides, results show the structural performance improvement and increasing its energy absorption capacity. The first mode spectral acceleration of moment frame structures reached 4.75g, 4.53g and 3.36g respectively for 5, 10 and 15-story frames confirming the downward trend by increasing the number of stories. Moreover, the related amounts in the structures equipped by new damper, were 5.95g, 4.98g and 3.93g respectively. Comparing the median values, revealed significant differences in the behavior of moment frames and frame equipped by proposed damper such that increasing the spectral acceleration and relative displacement causes plateau portion in the moment frame IDA graphs due to the lack of lateral stiffness. But in all three damper equipped structures, performance enhancement and relative displacement decrement are visible and even at the end of the IDA curves there are remarkable capacity to cope with lateral forces. According to the results, the proposed damper despite its simplicity, applicability and relatively low cost, demonstrates good performance in reducing the input energy and seismic vibrations of structures.

### Keywords

Multi stage control system, Pipe in pipe damper, Structural capacity, Incremental dynamic analysis

نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد ۵/



کنترل منفعل سازه‌ها در مناطق زلزله‌خیز، یکی از مواردی است که همواره مورد توجه مهندسين سازه قرار گرفته است. وقوع یک زمین‌لرزه موجب ورود مقدار زیادی انرژی متناسب با پارامترهای دینامیکی سازه و نیز محتوای فرکانسی زلزله به سازه می‌گردد. در متداول‌ترین روش‌های طراحی با تکیه بر تغییرشکل‌های غیرارتجاعی قسمت‌های خاصی از سازه، فرض بر این است که انرژی ورودی تا حد زیادی مستهلک می‌گردد. برای کاهش خسارت‌های سازه‌ای در اعضاء اصلی، تولید و ساخت سیستم‌های جاذب انرژی منفعل مورد توجه قرار گرفته تا بتوان خسارت‌ها را به اعضاء فرعی و قابل تعویضی محدود نمود. استفاده از میراگرهای فلزی جاری شونده یکی از راهکارهای موثر در بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه است که ابتدا توسط Kelly و Skinner [۱] مطرح گردید. پس از آن تحقیقات متعددی در این زمینه انجام شده که طراحی میراگرهای ADAS [۲]، TADAS [۳]، و پانل‌های برشی [۴]، از جمله آنها می‌باشند. معمولاً طراحی به گونه‌ای است که عضو فیوزشونده قسمت قابل توجهی از انرژی ورودی به سازه را با ورود به مرحله غیرخطی و تشکیل مفاصل پلاستیک مستهلک نموده و از ورود سایر اعضاء سازه به مرحله غیرخطی و همچنین کماتش اعضاء مهاربند جلوگیری نماید. این ایده از جمله مواردی است که به طور گسترده در جهت اصلاح رفتار لرزه‌ای مهاربندها مورد توجه قرار گرفته است.

امکان استفاده از لوله به عنوان یک میراگر با رفتار شکل‌پذیر توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته است که به عنوان نمونه می‌توان به تحقیقات Maleki و Bagheri [۵] اشاره نمود. آنها با مطالعه رفتار لوله‌های فولادی توخالی و پر شده با بتن، به بررسی امکان استفاده از این ابزارها به عنوان میراگر هیستریزس لرزه‌ای تحت تنش برشی پرداختند. نتایج تحلیل‌های المان محدود حاکی از آن است که سختی و مقاومت میراگر لوله‌ای با افزایش طول لوله به صورت خطی و با افزایش ضخامت و کاهش قطر آن، به شکل غیرخطی افزایش خواهد یافت. لوله‌های فولادی پر شده با بتن، با بروز رفتار غیرشکل‌پذیر ناشی از شکست بتن دچار گسیختگی شده و رفتار هیستریزس مطلوب و پایداری از خود نشان نمی‌دهند. درحالی‌که، لوله‌های فولادی توخالی همانند شکل پایدار خود، از ظرفیت بالایی در جذب و استهلاک انرژی برخوردار بوده و میرایی و یسکوز معادل بزرگی در برابر تحریکات لرزه‌ای ایجاد می‌نمایند. Malek و

همکارانش [۶]، با استفاده از تحلیل اجزای محدود، رفتار چرخه‌ای میراگر حلقوی را بررسی نمودند. منحنی‌های هیستریزس پایدار بیانگر رفتار مناسب و قابلیت استهلاک انرژی بالای آن می‌باشد. ملکی و محجوبی [۷ و ۸] میراگرهای جدیدی با استفاده از دو لوله تودرتو و نیز لوله پر شده با سرب و روی ارائه نمودند. نتایج مطالعات آزمایشگاهی هر دو میراگر حاکی از شکل‌پذیری مناسب، جذب انرژی بالا و چرخه‌های هیستریزس پایدار می‌باشد. همچنین رفتار میراگر پیشنهادی بر روی سازه‌های مختلف نیز در تحلیل‌های عددی مورد بررسی قرار گرفته است [۹]. در تحقیق دیگر Abbasnia و همکارانش [۱۰] در مطالعاتی به بررسی بهبود رفتار مهاربندهای هم محور با استفاده از حلقه فولادی پرداختند. طراحی میراگر حلقه، متأثر از نیروی محوری بادبند بوده و باید قبل از وقوع کماتش عضو فشاری تحت تحریکات لرزه‌ای وارد فاز غیرارتجاعی شده و جذب انرژی نماید. نتایج آنالیز المان محدود با مطالعه رفتار حلقه فولادی در یک مهاربند قطری نشان داد این حلقه به عنوان یک عضو شکل‌پذیر، دارای عملکرد مناسب بوده و موجب بهبود رفتار مهاربند می‌گردد. اصلاح رفتار مهاربند همگرا با استفاده از نوعی اتصالات مفصلی خاص توسط Tirca و همکارانش [۱۱] مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از بهبود عملکرد لرزه‌ای مهاربند با تکیه بر تمرکز مفاصل پلاستیک در اتصالات و الاستیک ماندن رفتار عضو اصلی مهاربند بود. احمدی و همکاران میراگر هیستریزس نوینی با استفاده از تعدادی صفحات دایره‌ای شکل دندانه‌دار که حول محور لوله گذرنده از مرکز دوران می‌کنند ارائه نمودند. میله فولادی از یکسو به اعضاء مهاربندی و از طرف دیگر به تیر بالایی قاب متصل بوده و روش کار آن بر پایه استهلاک انرژی بر مبنای استفاده از مکانیزم خمش و لهیدگی در صفحات فولادی می‌باشد. همچنین نتایج تحلیلی گویای عملکرد مناسب آنها و پایداری منحنی‌های هیستریزس بوده که حاکی از اتلاف انرژی مناسب این سیستم می‌باشد [۱۲]. استفاده از سیستم‌های کنترل منفعل چندسطحی یکی از مواردی است که در سال‌های اخیر مورد توجه محققین مختلف قرار گرفته است. ایده اصلی در اینگونه سیستم‌ها، ترکیب دو سیستم کنترل منفعل دارای سختی و مقاومت متفاوت بوده که موجب تغییر مشخصات سیستم تحت نیروهای مختلف و بروز رفتارهای متفاوت تحت سطوح انرژی است. Balendra و همکارانش سیستم کنترل دوسطحی متشکل از مهاربند زانویی و اتصال پیچی شیاردار را ارائه نمودند [۱۳].



تحت بارهای سرویس و نیروهای کم، اتصال پیچی شیاردار با ایجاد میرایی اصطکاکی موجب استهلاک انرژی بوده و پس از آن در زلزله های شدید، استهلاک انرژی از طریق رفتار شکل پذیر و تسلیم عضو زانویی انجام می گیرد. همچنین Zahrai و Vosooq تحقیقاتی بر روی سیستم دوسطحی با استفاده از ترکیب تیر پیوند قائم و المان زانویی انجام دادند. تشکیل مفاصل پلاستیک بر روی تیر پیوند قائم تحت نیروهای خفیف موجب افزایش استهلاک انرژی سیستم بوده و در طی نیروهای شدید، تغییر شکل های پلاستیک المان زانویی سبب افزایش شکل پذیری و بهبود عملکرد لرزه ای سیستم می گردد [۱۴]. طراحی سیستم به گونه ای است که با افزایش نیروها، از تغییر مکان بیشتر تیر پیوند قائم ممانعت گردیده و عضو قوی تر وارد عمل می گردد. منحنی رفتاری سیستم موید رفتار دوسطحی سیستم پیشنهادی و توانایی جذب انرژی در دو سطح مختلف است.

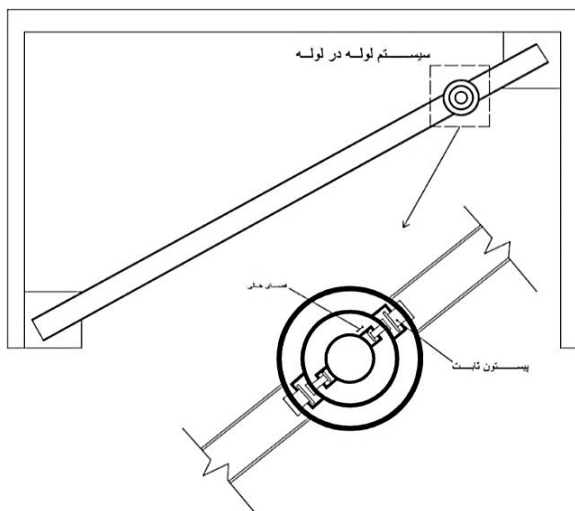
در تحقیق دیگر Hoseini Hashemi و Alirezai در سال ۲۰۱۵ به بررسی رفتار میراگر دوسطحی با ترکیب مهاربند واگرا و المان زانویی پرداختند. طراحی این سیستم به گونه ای است که در نیروهای پایین المان زانویی موجب استهلاک انرژی گردیده و در نیروهای بالاتر، مهاربند واگرا موجب جذب نیرو می گردد [۱۵]. یک سر مهاربند به المان زانویی و سر دیگر آن به تیر پیوند متصل گردیده است. همچنین جهت جلوگیری از سری شدن سختی المان های پیشنهادی از یک سیستم قفل شونده دو طرفه در پشت المان زانویی استفاده شده که با افزایش تغییر مکان المان زانویی وارد عمل شده و از تغییر شکل بیشتر آن جلوگیری می نماید. نتایج مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته تحت بارگذاری چرخه ای رفت و برگشتی گویای عملکرد مناسب، شکل پذیری بالا و رفتار غیر خطی مطلوب است.

با توجه به ضرورت افزایش شکل پذیری و استهلاک انرژی سازه های واقع در نواحی لرزه خیز، در این پژوهش به معرفی و بررسی رفتار یک میراگر منفعل چندسطحی با قابلیت تغییر سختی، مقاومت و جذب انرژی در سطوح مختلف پرداخته شده و سپس عملکرد لرزه ای آن با استفاده از تحلیل دینامیکی فزاینده مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- معرفی میراگر تسلیمی چندسطحی پیشنهادی

ایده اصلی میراگر پیشنهادی به صورت شماتیک در شکل (۱) نشان داده شده است [۱۶]. همانطور که ملاحظه می گردد، میراگر مذکور از تعدادی لوله تودرتو تشکیل گردیده که به وسیله پیستون هایی به هم متصل گردیده اند. بین هر لوله با لوله بعدی

فضای خالی تعبیه شده که این فاصله ناشی از مقاومت و سختی خمشی لوله های خارجی تر بوده که با توجه به قطر و ضخامت آنها قابل محاسبه خواهد بود. با اعمال نیروی جانبی به مهاربند، لوله خارجی شروع به تغییر شکل نموده و وقوع کرنش های پلاستیک موضعی موجب استهلاک انرژی می گردد. با افزایش نیرو و در نتیجه افزایش اعوجاج جدار لوله خارجی، اتصال آن به لوله داخلی تر، موجب افزایش سختی و مقاومت سیستم و مشارکت هر دو لوله در استهلاک انرژی می شود. با افزایش میزان نیروی وارد به سازه طی زلزله های شدید، سختی و مقاومت لوله مرکزی نیز وارد عمل شده و مجموعه مقاومت و سختی های خمشی هر سه لوله موجب استهلاک انرژی می گردد. نکته قابل توجه آنست که تعداد لوله ها از لحاظ تئوری دارای محدودیت نبوده و افزایش یا کاهش آنها موجب طراحی میراگر منفعل تسلیمی چندسطحی با سطوح عملکرد مختلف می شود. همچنین لازم به ذکر است که جهت جلوگیری از کمانش مهاربند و افزایش شکل پذیری رفتار آن باید مقاومت نهایی سیستم لوله های تودرتو از بار بحرانی کمانش مهاربند کمتر باشد. رعایت نکته مذکور سبب اطمینان از رفتار مناسب عضو مهاربند و در نتیجه افزایش شکل پذیری آن خواهد بود.

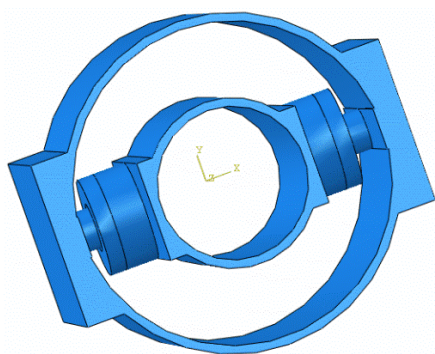


شکل ۱- ایده اصلی تحقیق

## ۲-۱ معرفی اجزا و قطعات میراگر پیشنهادی

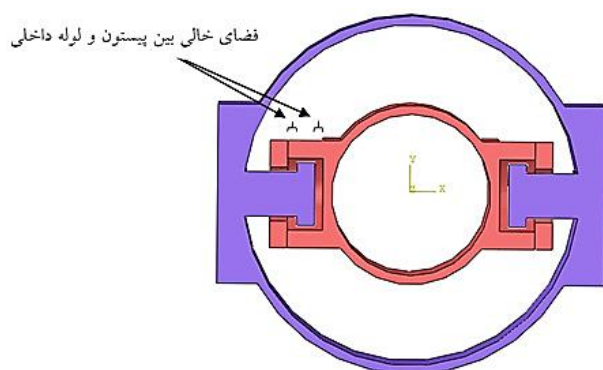
### ۲-۱-۱ لوله خارجی

همانطور که در شکل (۲) ملاحظه می شود در داخل جدار داخلی لوله خارجی، پیستون های ثابتی طراحی گردیده که موجب اتصال آن به لوله داخلی شده است. سر پهن تر پیستون موجب



شکل ۴- نمای میراگر دوسطحی پیشنهادی

جهت مشاهده بهتر مکانیزم رفتاری میراگر پیشنهادی، برش داخلی آن در شکل (۵) ترسیم گردیده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد در ابتدا دو لوله کاملاً از هم مستقل بوده و با اعمال نیرو از طرف مهاربند، تنها سختی خمشی لوله خارجی وارد عمل شده و تغییرشکل خمشی و وقوع کرنش‌های پلاستیک موجب استهلاک انرژی خواهد بود. افزایش نیروها و در نتیجه تغییر مکان‌ها و اعوجاج لوله خارجی، سبب پر شدن فضای خالی بین پیستون‌ها و لوله داخلی شده و اتصال دو لوله موجب عملکرد مرکب و مشارکت هر دو لوله در بازتوزیع نیروها خواهد بود. نکته حائز اهمیت در تعیین فاصله مناسب بین دو لوله در محدوده رفتار مناسب هر کدام از لوله‌ها نهفته است به طوری که قبل از وقوع خرابی عمده در لوله خارجی باید لوله داخلی وارد عمل شده و با افزایش سختی و رفتار مرکب، وقوع کرنش‌های پلاستیک در هر دو لوله موجب استهلاک انرژی گردد.

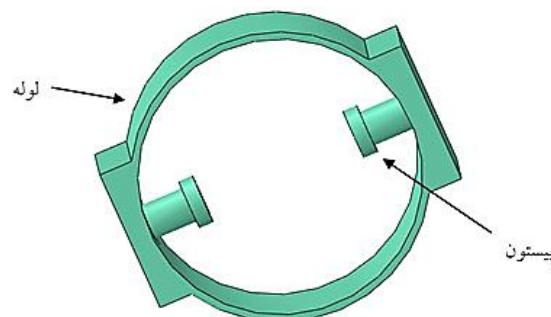


شکل ۵- مقطع میراگر دوسطحی پیشنهادی

### ۳- تحلیل دینامیکی فزاینده

تحلیل دینامیکی غیرخطی فزاینده روشی پارامتری است که در

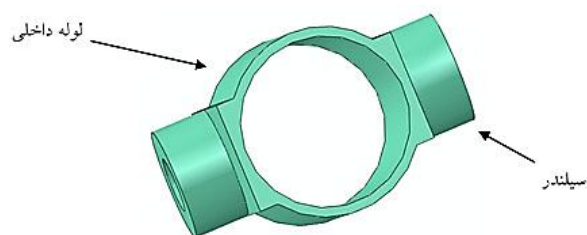
اتصال لوله‌های خارجی و داخلی، کاهش تمرکز تنش حین اعمال نیروی فشاری و نیز عدم خروج از داخل سیلندر تعبیه شده بر روی لوله داخلی هنگام بارگذاری کششی و در نتیجه عملکرد مرکب لوله‌ها می‌گردد. همچنین در طرفین لوله و محل اتصال مهاربند به لوله، سخت‌کننده‌هایی جهت جلوگیری از تمرکز تنش و وقوع کرنش‌های موضعی و افزایش شکل‌پذیری رفتار لوله نصب گردیده است.



شکل ۲- نمای لوله خارجی

### ۲-۱-۲- لوله داخلی

بر روی جدار خارجی لوله داخلی مطابق با شکل (۳)، سیلندرهایی تعبیه گردیده که موجب اتصال لوله‌های تودرتو به یکدیگر است. اتصال لوله‌ها به صورت نری مادگی بوده و باریک شدگی قسمت انتهایی سیلندر موجب عدم خروج پیستون‌های ثابت لوله خارجی از درون آن تحت نیروهای کششی می‌باشد.



شکل ۳- نمای لوله داخلی

شکل شماتیک میراگر دوسطحی پیشنهادی در شکل (۴) ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، قسمت دارای سطح مقطع بزرگ‌تر پیستون‌های لوله خارجی در سیلندرهایی لوله داخلی قرار گرفته و موجب رفتار مرکب آنها و مشارکت در توزیع نیروی جانبی تحت نیروهای کششی و فشاری وارد از طرف مهاربند خواهد بود.

آن تعدادی شتاب‌نگاشت زلزله، هر یک تا رسیدن به یک شدت خاص، مقیاس شده و از مقادیر کم تا زیاد بر سازه اعمال می‌گردند. به عبارت دیگر تحلیل مذکور روشی است که با استفاده از یک سری تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی و با مقیاس کردن شتاب‌نگاشت‌ها، پیش‌بینی قدرت‌مندی را از ظرفیت و تقاضای سازه ارائه می‌دهد. این روش دارای قابلیت نمایش رفتار لرزه‌ای سازه و نیز ظرفیت آن بوده و می‌تواند در تعیین عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها مورد استفاده قرار گیرد. حجم زیاد تحقیقات صورت گرفته حاکی از توانایی این تحلیل در ارزیابی عملکرد سازه‌هاست به طوری که محققین مختلف به تحلیل دینامیکی غیرخطی فزاینده در تخمین رفتار لرزه‌ای سازه‌های بتنی و فولادی تحت بارگذاری لرزه‌ای توجه ویژه‌ای نموده‌اند [۱۷ و ۱۸]. روش تحلیل دینامیکی فزاینده ابزاری کارآمد در مهندسی زلزله با قابلیت تخمین هم زمان نیاز و ظرفیت سازه است. همچنین در تحقیقات مختلف، به اصول و مفاهیم پایه تحلیل دینامیکی فزاینده، تعیین سطوح عملکردی، خلاصه کردن منحنی‌های IDA، مباحث احتمالاتی مربوط به مقادیر میانگین سالیانه تجاوز از حالات حدی و تخمین منحنی‌های IDA پرداخته شده است [۱۹ و ۲۰]. به طور کلی این روش از دقیق‌ترین روش‌های تحلیل سازه به شمار می‌رود لیکن حجم زیاد اطلاعات ورودی، زمان‌بر بودن و نیاز به تخصص بالا در تفسیر نتایج از معایب آن است.

مراحل تحلیل دینامیکی فزاینده شامل موارد ذیل می‌باشد:

- ساخت مدل عددی مناسب از سازه
- انتخاب تعدادی رکورد زلزله مناسب جهت انجام تحلیل‌های غیرخطی
- انتخاب شاخص شدت ( $IM$ ) و شاخص خرابی مناسب ( $DM$ )
- مقیاس هر رکورد به طور فزاینده و انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی
- رسم منحنی IDA با استفاده از داده‌های شدت و خرابی به دست آمده

### ۳-۱- مفاهیم و اصطلاحات مورد استفاده در تحلیل IDA

اهم مفاهیم و اصطلاحات مورد استفاده در این روش به شرح ذیل می‌باشد:

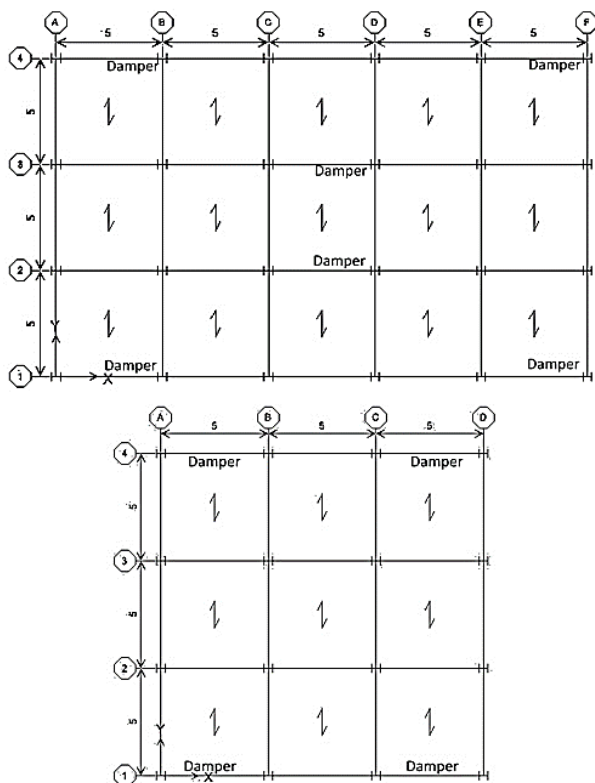
**ضریب مقیاس:** هر یک از رکوردهای انتخاب شده، دارای مقادیر شتاب‌هایی خواهد بود که باید با ضرابی از شدت کم تا

زیاد تقسیم‌بندی گردد. استفاده از ضریب مقیاس ساده‌ترین روش برای حصول شدت‌های مختلف زلزله‌ها محسوب شده ولی هیچ اطلاعاتی از میزان و اندازه انرژی جنبشی شتاب‌نگاشت و تاثیر آن بر روی سازه بدست نمی‌دهد. لیکن در حالت ایده‌آل، بایستی شتاب‌نگاشت‌ها طوری مقیاس شوند که رفتار لرزه‌ای سازه‌ها از حالت خطی تا غیرخطی و فروریزش کلی سازه را پوشش دهند. *اندازه شدت:* کمیت‌های مختلفی نظیر بیشینه شتاب زمین (PGA)، بیشینه سرعت زمین (PGV)، شتاب طیفی متناظر میرایی ۵ درصد برای مود اول ( $S_a, T_1, 5\%$ ) و ضریب نرمال‌سازی معادل با ضریب رفتار تسلیم برای بیان شدت زلزله‌های انتخابی در تحقیقات مختلف ارائه گردیده است. در این تحقیق، ضریب شتاب طیفی مود اول با میرایی ۵ درصد به عنوان یک اندازه شدت مناسب جهت تحلیل‌ها انتخاب گردید.

لحاظ یک شاخص شدت مناسب منجر به پراکندگی کمتر در پاسخ‌های ثبت شده در تحلیل‌ها و در نتیجه تقریب دقیق‌تر از شاخص‌های آماری این پاسخ‌ها می‌شود [۲۱].

*اندازه خسارت:* شاخص خسارت یک پارامتر حاصل از نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی مانند بیشینه برش‌پایه، بیشینه چرخش مفاصل پلاستیک، بیشینه جابجایی نسبی طبقات، بیشینه جابجایی نسبی بام، و شاخص‌های خرابی نظیر شاخص Park و Ang است. انتخاب یک کمیت مناسب برای اندازه خسارت بستگی به نوع کاربرد مسئله، مشخصات سازه مورد نظر و اهداف تحلیل دارد. در این تحقیق پارامتر بیشینه جابجایی نسبی طبقات به عنوان یک شاخص خسارت مناسب جهت ارزیابی عملکرد لرزه‌ای قاب‌ها لحاظ گردید.

به طور کلی برای انجام تحلیل دینامیکی فزاینده، حتی‌المقدور رکورد زلزله‌های منطبق با محل احداث سازه از نظر پارامترهای تعیین‌کننده خطر لرزه‌ای مانند شتاب حداکثر، محتوای فرکانسی، مکانیزم گسل و نوع خاک انتخاب می‌شوند. هر شتاب‌نگاشت در ابتدا به مقدار کوچکی از شاخص شدت که متضمن ایجاد رفتار خطی در مدل سازه‌ای باشد مقیاس شده و سازه تحت اثر آن تحلیل دینامیکی تاربخچه زمانی می‌شود. به تدریج با افزایش ضریب مقیاس با یک الگوی مناسب، تا رسیدن به حد فروریزش سازه‌ای ادامه یافته و پس از اتمام هر یک از مراحل تحلیل، مقدار شاخص تقاضا متناظر با آن ثبت می‌شود. در نهایت نمودار تغییرات شاخص شدت در مقابل شاخص تقاضا موسوم به منحنی IDA، برای تمامی رکوردهای مورد نظر رسم می‌شود.



شکل ۶- پلان سازه‌های مورد استفاده در تحلیل عددی

The diagram illustrates the proposed architecture, showing two main processing blocks. The left block has 10 input lines and 10 output lines, with a central 10x10 grid of processing elements. The right block has 10 input lines and 10 output lines, with a central 10x10 grid of processing elements. The inputs and outputs are labeled with IPB (Input/Output Port Block) and IP (Input/Output Port). The central grids are labeled with IPB (Input/Output Port Block) and IP (Input/Output Port). The inputs and outputs are labeled with IPB (Input/Output Port Block) and IP (Input/Output Port). The central grids are labeled with IPB (Input/Output Port Block) and IP (Input/Output Port).

شکل ۷- مشخصات مقاطع سازه‌ها

## ۶- مشخصات دینامیکی سازه‌ها

زمان تناوب سازه یکی از پارامترهای بسیار تاثیرگذار در رفتار آن طی بارگذاری دینامیکی است. لذا در ابتدا جهت بررسی میزان تاثیر میراگر پیشنهادی در تغییر مشخصات دینامیکی سازه، زمان تناوب مودهای اول و دوم با استفاده از تحلیل مودال ثبت شد.

#### ۴- بررسی تاثیر میراگر در بهبود پاسخ لرزه‌ای قاب‌های

## خمشی

در این بخش تاثیر میراگر پیشنهادی در بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. لذا بدین منظور ۳ ساختمان ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه با پلان نشان داده شده در شکل (۶)، به ترتیب به عنوان نماینده ساختمان‌های کوتاه، متوسط و بلند مطابق با ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ و مبحث ۱۰ مقررات ملی ساختمان [۲۲] و [۲۳] با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 [۲۴] طراحی و سپس یک قاب از هر پلان جهت تحلیل‌های دینامیکی تکمیلی مورد بررسی قرار گرفت. ارتفاع کلیه طبقات ۳/۲ متر بوده و بارگذاری مرده و زنده به ترتیب ۵۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع مطابق با مبحث ۶ مقررات ملی اعمال گردید [۲۵]. سازه دارای سیستم باربر جانبی قاب خمشی متوسط با فرض کاربری مسکونی و قرارگیری در منطقه با خطر نسبی بسیار زیاد واقع بر روی خاک نوع ۱ طراحی گردید. فولاد به کار رفته از نوع st37 با تنش تسلیم ۲۴۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع، مدول الاستیسیته  $2 \times 10^6$  کیلوگرم بر سانتیمتر مربع و ضریب پواسون ۰/۳ انتخاب گردید. همچنین جهت مدل‌سازی تیرها از مقاطع IPE و برای ستون‌ها از مقاطع IPB استفاده شد. مقاطع تیرها و ستون‌ها در شکل (۷) قابل مشاهده می‌باشد.

## ۵- رکوردهای زلزله‌های انتخابی

جهت بررسی عملکرد میراگر پیشنهادی طی بارگذاری لرزه‌ای از ۷ شتاب‌نگاشت [۲۶] با شتاب حداکثر، مدت تداوم و محتوای فرکانسی متفاوت استفاده گردید. بر طبق ضوابط استاندارد ۲۸۰۰، شتاب‌نگاشت‌های اعمالی ابتدا به حداکثر مقدار خود مقیاس شده به طوری که شتاب حداکثر تمام آنها برابر با  $g$  گردد. سپس طیف‌های پاسخ ترکیبی در محدوده زمانی  $0/2$  تا  $1/5$  برابر زمان تناوب سازه با طیف طرح استاندارد مقایسه می‌گردد. در نهایت ضریب مقیاس باید طوری انتخاب گردد که در محدوده مذکور مقادیر پاسخها از  $1/31$  برابر مقادیر طیف طرح استاندارد کمتر نباشد. حال با ضرب ضریب مقیاس مذکور در شتاب‌نگاشت‌ها می‌توان از آنها در تحلیل دینامیکی استفاده نمود. تحلیل دینامیکی فزاینده با استفاده از مولفه‌های افقی ۷ زوج شتاب‌نگاشت معرفی شده به شرح جدول (۱) و با انجام بیش از ۵۰۰ تحلیل، تاریخچه زمانی، صورت گرفته است.

جدول ۱- مشخصات رکوردهای مورد استفاده

| زلزله       | سال  | ایستگاه     | PGA (g) | PGV (cm/s) | فاصله ایستگاه از گسل (km) | مدت تداوم (s) |
|-------------|------|-------------|---------|------------|---------------------------|---------------|
| چی چی       | ۱۹۹۹ | TCU045      | ۰/۳۶    | ۱۰۵/۶      | ۸۵/۶۴                     | ۵۳            |
| امپریال ولی | ۱۹۷۹ | USGS 5115   | ۰/۳۲    | ۹۳/۲       | ۷۶/۲۱                     | ۳۹            |
| کوبه        | ۱۹۹۵ | Kakogawa    | ۰/۳۴    | ۸۶/۳       | ۹۸/۱۳                     | ۴۰/۹          |
| کوکائلی     | ۱۹۹۹ | YARIMCA     | ۰/۳۵    | ۶۶/۵       | ۲۹/۱۴                     | ۳۵            |
| نورتریچ     | ۱۹۹۴ | CDMG-24278  | ۰/۵۷    | ۱۱۷/۳      | ۲۶/۴۵                     | ۴۰            |
| لوماپریتا   | ۱۹۸۹ | CDMG -47381 | ۰/۳۷    | ۵۴/۶       | ۶۳/۵۶                     | ۳۹/۹          |
| هالیستر     | ۱۹۶۱ | USGS 1028   | ۰/۱۹    | ۲۳/۷       | ۸۱/۷۹                     | ۳۹/۹۳         |

همانطور که در جدول (۲) مشاهده می‌گردد، نتایج گویای تاثیر محسوس میراگر در کاهش زمان تناوب سازه بوده و میزان تاثیر نیز متاثر از مشخصات فنی میراگر و تعداد و نحوه چیدمان در سازه خواهد بود. لازم به ذکر است که تغییر در زمان تناوب سازه به عنوان پارامتر موثر در میزان نیروی وارد به آن طی بارگذاری لرزه‌ای با توجه به طیفهای طرح استاندارد همواره باید در طراحی و بهسازی سازه، مورد نظر قرار گیرد.

جدول ۲- تاثیر میراگر پیشنهادی بر زمان تناوب سازه

| نوع سازه            | زمان تناوب مود اول (s) | زمان تناوب مود دوم (s) |
|---------------------|------------------------|------------------------|
| ۵ طبقه بدون میراگر  | ۱/۰۵                   | ۰/۳۷                   |
| ۵ طبقه با میراگر    | ۰/۵۸                   | ۰/۲                    |
| ۱۰ طبقه بدون میراگر | ۱/۸۳                   | ۰/۶۸                   |
| ۱۰ طبقه با میراگر   | ۱/۱                    | ۰/۴۵                   |
| ۱۵ طبقه بدون میراگر | ۲/۳                    | ۰/۹                    |
| ۱۵ طبقه با میراگر   | ۱/۸۶                   | ۰/۶۵                   |

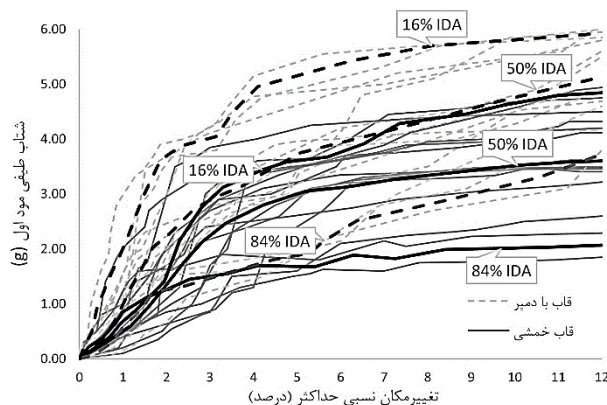
## ۷- نتایج تحلیل دینامیکی فزاینده

بر اساس نتایج حاصل از تحلیل‌ها، مقادیر پارامترهای شدت و خسارت بدست آمده در قاب خمشی و سازه مجهز به میراگر پیشنهادی مورد مقایسه قرار گرفته و نمودارهای مربوطه ترسیم شده است. به طور کلی ارزیابی مقادیر بدست آمده حاکی از آن است که با افزایش ارتفاع سازه برای یک مقدار معین شاخص تقاضا، مقادیر شاخص شدت در نمودارها کاهش یافته است. به عبارت دیگر با توجه به نمودارهای IDA مربوط به هر سه قاب، ظرفیت شتاب طیفی سازه‌ها با افزایش ارتفاع آنها کاهش می‌یابد. شتاب طیفی حداکثر مود اول سازه قاب خمشی ۵، ۱۰ و

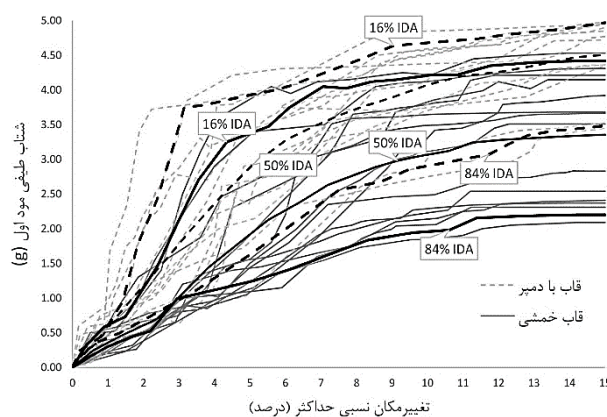
۱۵ طبقه به ترتیب مقادیر  $(g) ۴/۷۵$ ،  $(g) ۴/۵۳$  و  $(g) ۳/۳۶$  ثبت گردید که موید روند نزولی محسوس پارامتر مذکور با افزایش تعداد طبقات قاب می‌باشد. همچنین مقادیر مذکور در سازه دارای میراگر به ترتیب  $(g) ۵/۹۵$ ،  $(g) ۴/۹۸$  و  $(g) ۳/۹۳$  حاصل گردید. وجود ناحیه افقی در قسمت‌های پایانی نمودارها قابل توجه بوده و به نظر می‌رسد، فروریزش ساختمان‌های ۱۰ و ۱۵ طبقه در قاب خمشی با افت عملکرد شدیدی در این سازه‌ها همراه است. در حالی که این تمرکز خسارت و کاهش محسوس سختی در رفتار قاب ۵ طبقه مشهود نبوده و معمولاً توزیع تغییرمکان نسبی حداکثر طبقات با روند تقریباً ثابتی در ارتفاع ساختمان افزایش یافته است. لیکن در قاب ۱۰ و ۱۵ طبقه، روند توزیع تغییرمکان نسبی در طبقات دارای اختلاف فاحش بوده و معمولاً تمرکز تغییرمکان نسبی در تعداد محدودی از طبقات موجب بروز خسارت در آنها است. تفاوت در روند بروز خسارت و آسیب قاب‌های کوتاه و بلند در نمودارهای IDA کاملاً مشهود است. در واقع، مود خرابی سازه‌های بلند به دلیل افزایش تاثیر مودهای بالاتر از پیچیدگی بیشتری برخوردار است. تمرکز شدید تغییرمکان نسبی در تعداد محدودی از طبقات در شرایطی که تغییرمکان نسبی سایر طبقات مقادیر نسبتاً کمی دارند، منجر به ایجاد طبقه نرم و مکانیزم شدن سازه است. نمودارهای IDA قاب‌ها به همراه صدک‌های ۱۶، ۵۰ و ۸۴ آنها برای سازه ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه به ترتیب در شکل‌های (۸) تا (۱۰) نشان داده شده و مقادیر حاصله مورد مقایسه قرار گرفته است. به دلیل تفاوت و تغییر منحنی‌های بدست آمده برای هر شتاب‌نگاشت با شتاب‌نگاشت دیگر، ارزیابی منحنی‌های IDA دشوار است. لذا با استفاده از مقادیر حاصل از صدک‌های ۱۶، ۵۰ و ۸۴ و خلاصه‌سازی نمودارها، امکان مقایسه و ارزیابی دقیق‌تر مقادیر و بررسی روند تغییرات میسر می‌گردد. همانطور که در



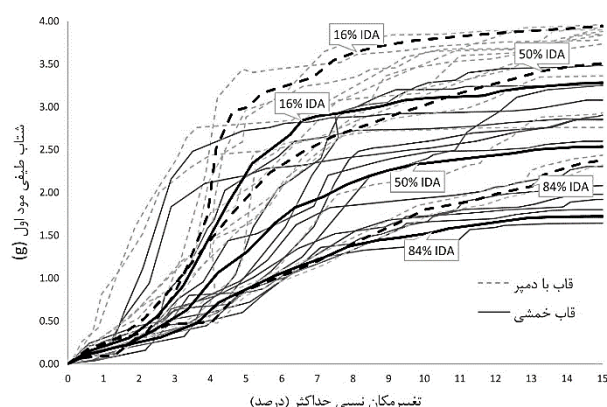
شکل‌های (۸) تا (۱۰) ملاحظه می‌گردد، تفاوت نمودارهای محسوس بوده و ظرفیت بالاتر سازه مجهز به میراگر پیشنهادی در تحمل نیروهای وارده کاملاً مشهود است.



شکل ۸- روند تغییرات منحنی‌های IDA در سازه ۵ طبقه به همراه صدک‌های ۱۶، ۵۰ و ۸۴ درصد

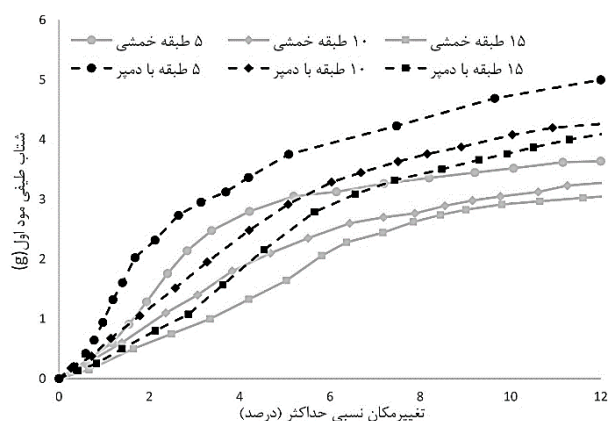


شکل ۹- روند تغییرات منحنی‌های IDA در سازه ۱۰ طبقه به همراه صدک‌های ۱۶، ۵۰ و ۸۴ درصد



شکل ۱۰- روند تغییرات منحنی‌های IDA در سازه ۱۵ طبقه به همراه صدک‌های ۱۶، ۵۰ و ۸۴ درصد

مقادیر میانه تغییر مکان نسبی حداکثر طبقات از بین ۱۴ تحلیل تاریخیچه زمانی برای هر سه قاب در شکل (۱۱) نشان داده شده است. مقایسه نمودارهای میانه، موید تفاوت محسوس در رفتار سازه قاب خمشی و قاب دارای میراگر پیشنهادی است به طوری که با افزایش شتاب طیفی و در نتیجه افزایش تغییر مکان نسبی طبقات، افت محسوس عملکرد سازه و افقی شدن منحنی رفتاری در اثر فقدان سختی و مقاومت لازم در قاب خمشی قابل مشاهده است. لیکن در هر سه سازه، اتصال میراگر پیشنهادی موجب بهبود عملکرد در نتیجه کاهش تغییر مکانهای نسبی طبقات بوده و حتی در انتهای نمودار نیز ظرفیت قابل ملاحظه‌ای در سازه جهت مقابله با نیروهای جانبی وجود دارد.

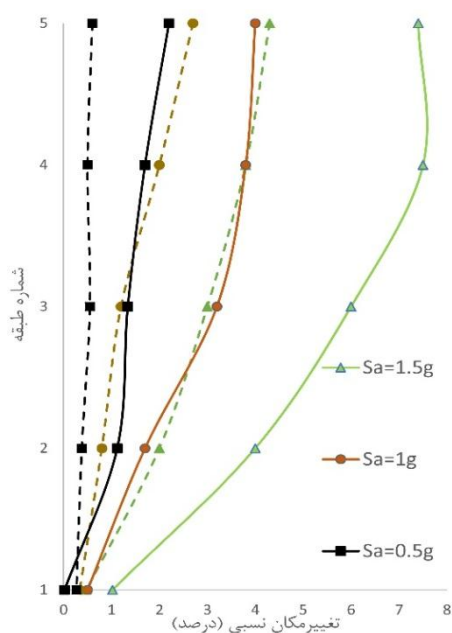


شکل ۱۱- مقایسه منحنی‌های IDA مربوط به مقادیر میانه (۵۰ درصد)

تعیین سطوح مختلف عملکرد سازه بر اساس توصیه‌های مندرج در استانداردها قابل تعیین و تفسیر می‌باشد. به عنوان مثال بر اساس راهنمای FEMA350 [۲۷] برای رکوردهای انتخابی، جهت حصول ظرفیت سطح عملکرد استفاده بی‌وقفه برای قاب خمشی ویژه، بیشینه تغییر مکان نسبی طبقات ( $\theta_{max} = 0.02$ ) و جهت حصول سطح عملکرد آستانه فروریزش، نقطه‌ای که شیب منحنی دینامیکی فزاینده بیست درصد شیب قسمت الاستیک منحنی باشد و یا در بیشینه تقاضای تغییر مکان نسبی زاویه‌ای بین طبقه‌ای ( $\theta_{max} = 0.01$ ) هر کدام که زودتر در IM کوچکتر رخ دهند را توصیه نموده است [۲۸] (شکل (۱۲)).

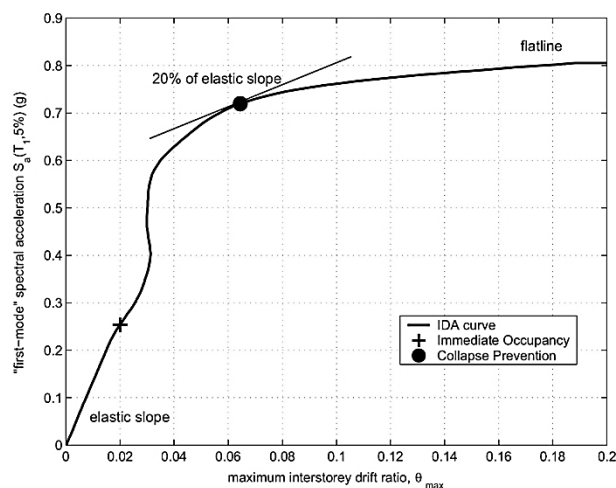
لذا با عنایت به مطالب فوق‌الذکر، در منحنی‌های شکل (۱۳)، سطوح مختلف عملکرد هر سه قاب خمشی در مقابل سه قاب مجهز به میراگر پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گرفت. همانطور که ملاحظه می‌گردد، نقطه متناظر با تغییر مکان نسبی

نحوه توزیع تغییرمکان نسبی طبقات یکی از موارد تاثیرگذار در میزان آسیب‌های رخ داده در یک ساختمان در مواجهه با بارگذاری دینامیکی است. لذا در این قسمت بررسی تاثیر میراگر پیشنهادی در کاهش تغییرمکان‌های نسبی و نحوه توزیع آن در ارتفاع مورد توجه قرار گرفت. به عنوان مثال تغییرمکان نسبی هر یک از طبقات طی شتاب‌نگاشت زلزله نورتریج برای ۳ سطح شتاب طیفی  $0.5g$ ،  $1g$  و  $1.5g$  ثبت و نمودار آن برای سازه ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه به ترتیب در شکل‌های (۱۴) تا (۱۶) ترسیم گردید. همانطور که ملاحظه می‌گردد مقایسه مقادیر تغییرمکان‌های نسبی بدست آمده در قاب خمشی تنها و سازه مجهز به میراگر بیانگر تاثیر محسوس استفاده از میراگر پیشنهادی در کاهش تغییرمکان‌های نسبی و بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه است.



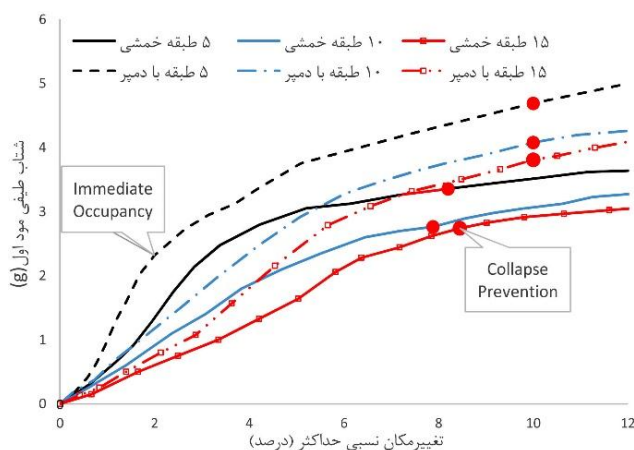
شکل ۱۴- توزیع تغییرمکان نسبی حداکثر در سازه ۵ طبقه (خطوط توپر: سازه بدون میراگر؛ خط‌چین: با میراگر)

در سازه ۵ طبقه بیشترین میزان تغییرمکان نسبی در طبقه چهارم ثبت گردید. مقدار بیشینه نسبت مذکور در سازه ۱۰ و ۱۵ طبقه به ترتیب در طبقات پنجم و چهارم حاصل شد. روند نمودارهای مذکور موید تاثیر محسوس میراگر در کاهش دریافت طبقات است، لیکن درصد تاثیر از روند یکسانی برخوردار نمی‌باشد. به عنوان مثال تاثیر میراگر در سازه کوتاه و متوسط دارای بیشترین میزان و در سازه بلند دارای کمترین مقدار



شکل ۱۲- شکل شماتیک نحوه تعیین سطوح عملکرد سازه روی منحنی IDA [۲۸]

۲ درصد به عنوان نقطه عملکرد قابلیت استفاده بی‌وقفه بر روی نمودار میانه مشخص گردیده است. همچنین نقاط متناظر با ۲۰ درصد شیب ناحیه الاستیک به صورت نقاط قرمز رنگ روی نمودارهای میانه نشان داده شده است. لازم به ذکر است که منحنی قابهای مجهز به میراگر، همگی ضابطه تغییرمکان نسبی حداکثر ۱۰ درصد را قبل از حصول ضابطه شیب ۲۰ درصد ناحیه الاستیک ارضا نموده و لذا مطابق با ضوابط مذکور، سطح آستانه فروریزش در نقطه تغییرمکان نسبی ۱۰ درصد تعیین گردیده است. علاوه بر این مقایسه مقادیر منحنی‌های عملکردی قاب‌های مجهز به میراگر پیشنهادی (منحنی خط‌چین) در هر ۳ قاب ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه گویای افزایش ظرفیت جذب انرژی و ارتقای سطح عملکرد آن است.



شکل ۱۳- شکل شماتیک نحوه تعیین سطوح عملکرد سازه روی منحنی IDA [۲۸]

می‌باشد. میزان افزایش نیروهای اعمالی با توجه به طیف طرح استاندارد در اثر افزایش سختی و کاهش پریود سازه از یک سو و نیز شکل ارتعاشی غالب خمشی سازه‌های بلند از طرف دیگر سبب کاهش تاثیر میراگر در بهبود مولفه‌های مذکور و کاهش راندها آن خواهد بود.

#### ۸- نتیجه‌گیری

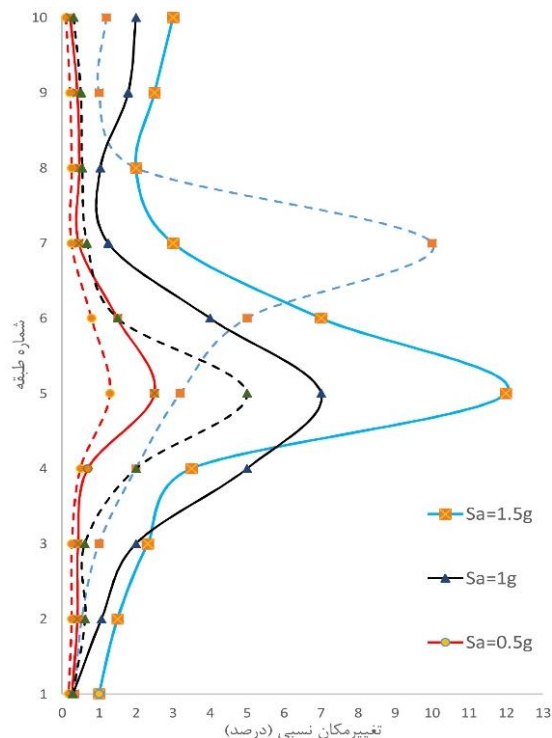
نتایج بدست آمده در این تحقیق تحت اثر رکوردهای انتخابی را می‌توان در قالب موارد زیر خلاصه نمود:

علیرغم تفاوت ماهیت زلزله‌های انتخابی و مشخصات لرزه‌شناسی آنها نظیر مدت تداوم و نیز محتوای فرکانسی، در تمامی آنها میراگر پیشنهادی سبب بهبود محسوس عملکرد سازه گردیده که موید عملکرد موثر در بهسازی سازه‌ها تحت زلزله‌های مختلف به واسطه سختی و مقاومت متغیر آن است. نتایج تحلیل‌های دینامیکی فزاینده گویای افزایش سطح عملکرد سازه و افزایش ظرفیت جذب انرژی آن است. شتاب طیفی حداکثر مود اول سازه قاب خمشی ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه به ترتیب مقادیر  $(g/75/4)$ ،  $(g/53/4)$  و  $(g/36/3)$  ثبت گردید که موید روند نزولی محسوس پارامتر مذکور با افزایش تعداد طبقات قاب می‌باشد. همچنین مقادیر مذکور در سازه دارای میراگر به ترتیب  $(g/95/5)$ ،  $(g/98/4)$  و  $(g/93/3)$  حاصل گردید.

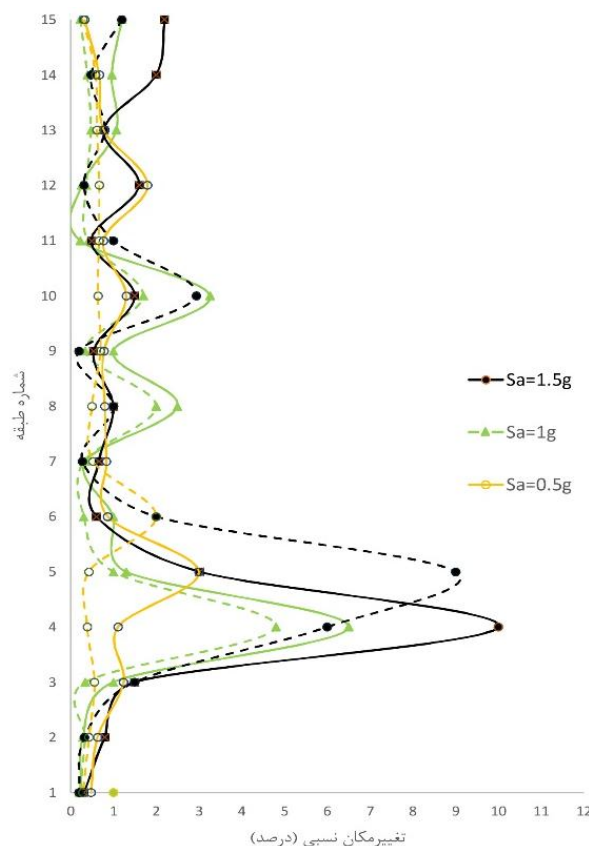
مقایسه نمودارهای میانه، موید تفاوت محسوس در رفتار سازه قاب خمشی و قاب دارای میراگر پیشنهادی است به طوری که با افزایش تغییرمکان نسبی طبقات، افت محسوس عملکرد سازه و افقی شدن منحنی رفتاری در اثر فقدان سختی و مقاومت لازم در قاب خمشی قابل مشاهده است. لیکن در هر سه سازه، اتصال میراگر پیشنهادی موجب بهبود عملکرد در نتیجه کاهش تغییرمکان‌های نسبی طبقات بوده و حتی در انتهای نمودار نیز ظرفیت قابل ملاحظه‌ای در سازه جهت مقابله با نیروهای جانبی وجود دارد.

منحنی قاب‌های مجهز به میراگر، همگی ضابطه تغییرمکان نسبی حداکثر ۱۰ درصد را قبل از حصول ضابطه شیب ۲۰ درصد ناحیه الاستیک ارضا نموده‌اند. علاوه بر این مقایسه

مقادیر منحنی‌های عملکردی قاب‌های مجهز به میراگر پیشنهادی در هر ۳ قاب ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه گویای افزایش ظرفیت جذب انرژی و ارتقای سطح عملکرد آن است. عملکرد چندسطحی و افزایش سختی و مقاومت متناسب با افزایش تغییرمکان اعمالی از مزایای بارز سیستم پیشنهادی بوده که موجب افزایش قابلیت



شکل ۱۵- توزیع تغییرمکان نسبی حداکثر در سازه ۱۰ طبقه (خطوط توپر: سازه بدون میراگر؛ خط‌چین: با میراگر)



شکل ۱۶- توزیع تغییرمکان نسبی حداکثر در سازه ۱۵ طبقه (خطوط توپر: سازه بدون میراگر؛ خط‌چین: با میراگر)



- [13] Balendra, T., YU, C.H. and Lee, F.L. (2001), "An Economical Structural System for Wind and Earthquake Loads", *Journal of Engineering Structures*, Vol. 23, pp. 491–501.
- [14] Zahrai, S.M. and Vosooq, A.K. (2013), "Study of an Innovative Two-Stage Control System: Chevron Knee Bracing & Shear Panel in Series Connection", *Journal of Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 47, pp. 881–898.
- [15] Hoseini Hashemi, B. and Alirezai, M. (2015), "Experimental Investigation of a Combined System in Steel Braced Frames", *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, Vol. 17, pp. 181–191.
- [16] Cheraghi, A. and Zahrai, S.M. (2016), "Innovative Multi-level Control with Concentric Pipes Along Brace to Reduce Seismic Response of Steel Frames", *Journal of Construct Steel Research*, Vol. 127, pp. 120–135.
- [17] Bazzurro, P. and Cornell, C.A. (1994), "Seismic Hazard Analysis for Non-Linear Structures. I: Methodology", *ASCE, Journal of Structural Engineering*, Vol. 120, pp. 3320–3344.
- [18] Bazzurro, P., and Cornell, C.A. (1994), "Seismic Hazard Analysis for Non-Linear Structures. II: Applications", *ASCE, Journal of Structural Engineering*, Vol. 120, pp. 3345–3365.
- [19] Cornell, C.A., Jalayer, F., Hamburger, R.O., Foutch, D.A., CORNELL, C.A., Hamburger, R., Foutch, D.A., Cornell, C. and Foutch, D.A. (2002), "The Probabilistic Basis for the 2000 SAC/FEMA Steel Moment Frame Guidelines", *ASCE, Journal of Structural Engineering*, Vol. 128, pp. 526–533.
- [20] Shome, N. and Cornell, C.A. (1999), "Probabilistic Seismic Demand Analysis of Nonlinear Structures", Report No. RMS-35, RMS program, Stanford University.
- [21] Vamvatsikos, D. and Cornell, C.A. (2002), "Incremental Dynamic Analysis", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 31, pp. 491–514.
- [22] آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله، (۱۳۹۴)، استاندارد ۲۸۰۰، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ویرایش چهارم، تهران.
- [23] دفتر مقررات ملی ساختمان، (۱۳۹۲)، طرح و اجرای ساختمان های فولادی، انتشارات توسعه، ویرایش چهارم.
- [24] دفتر مقررات ملی ساختمان، (۱۳۹۲)، بارهای وارد بر ساختمان، انتشارات توسعه، ویرایش سوم.
- [25] Computers and Structures, (2010), Inc. CSI Analysis Reference Manual for SAP2000, Computer and Structures, Inc., Berkley, California.
- [26] Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), (2010), Web-Based PEER Ground Motion Database Berkeley (CA) [http://peer.berkeley.edu/peer\\_ground\\_motion\\_database](http://peer.berkeley.edu/peer_ground_motion_database).
- [27] 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.
- [28] Vamvatsikos, D. and Cornell, C.A. (2002), "The Incremental Dynamic Analysis and Its Application to Performance-Based Earthquake Engineering", The 12th European Conference on Earthquake Engineering, London, England.

اعتماد از عملکرد سازه و جلوگیری از فروریزش در زلزله های شدید خواهد بود. با عنایت به اینکه در طراحی این سیستم، ظرفیت خمشی میراگر کمتر از بار کمانشی مهاربند انتخاب می گردد، در صورت طراحی مناسب می توان از عدم کمانش مهاربند اطمینان حاصل نمود.

## ۹- مراجع

- [1] Kelly, J.M. and Skinner, R.I. (1972), "Mechanisms of Energy Absorption in Special Devices for Use in Earthquake-Resistant Structures", *Bulletin of New Zeland Society for Earthquake Engineering*, Vol. 5, pp. 63–88.
- [2] Bergman, D.M. and Goel, S.C. (1987), "Evaluation of Cyclic Testing of Steel Plate Devices for Added Damping and Stiffness", Report No.UMCE87–10, The University of Michigan, MI, USA.
- [3] Tsai, K., Chen, H., Hong C. and Su, Y. (1993), "Design of Steel Triangular Plate Energy Absorbers for Seismic-Resistant Construction", *Journal of Earthquake Spectra*, Vol. 9, pp. 505–528.
- [4] Nakashima, M., Iwai, S., Iwata, M., Takeuchi, T., Konomi, S., Akazawa, T. and Saburi, K. (1994), "Energy Dissipation Behaviour of Shear Panels Made of Low Yield Steel", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 23, pp. 1299–1313.
- [5] Maleki, S. and Bagheri, S. (2010), "Pipe Damper, Part I: Experimental and Analytical Study", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 66, pp. 1088–1095.
- [6] مالک، ش.، پابینگ، پ. و لوح قلم، ا. (۱۳۸۵)، "معرفی یک سیستم میراگر غیرفعال نوین و مقایسه آن میراگر موسوم به TADAS"، اولین همایش بین المللی مقاوم سازی لرزه ای، تهران.
- [7] Maleki, S.H. and Mahjoubi, S. (2013), "Dual-Pipe Damper", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 85, pp. 81–91.
- [8] Maleki, S.H. and Mahjoubi, S. (2014), "Infilled-Pipe Damper", *Journal of Construct Steel Research*, Vol. 98, pp. 45–58.
- [9] Mahjoubi, S. and Maleki, S.H. (2016), "Seismic Performance Evaluation and Design of Steel Structures Equipped with Dual-Pipe Dampers", *Journal of Construct Steel Research*, Vol. 122, pp. 25–39.
- [10] عباس نیا، ر.، وتر، م.ق. و کافی، م.ع. (۱۳۸۵)، "بررسی عملکرد المان شکل پذیر در بادبندهای هم مرکز قاب های فولادی"، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر، هفتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، تهران.
- [11] Tirca, L., Danila, N. and Caprarelli, C. (2014), "Numerical Modelling of Dissipative Pin Devices for Brace-Column Connections", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 94, pp. 137–149.
- [12] Ahmady Jazany, R., Shademan Heidari, P. and Kayhani, H. (2010), "Using Circular Jagged Plates as Hysteretic Metallic Damper", 14<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering, Republic of Macedonia.

## پی نوشت

<sup>1</sup> Intensity Measure

<sup>2</sup> Damage Measure

