

Evaluation and Comparison of Response Modification Factor of the Base-Isolated Steel Moment Frames by Incremental Dynamic Analysis versus Pushover Method

Hamid Reza Sadrarhami

PhD. student, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

Farshid Fathi*

Faculty Member, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

f-fathi@iaun.ac.ir

DOI: 10.30495/CIVIL.2023.701146

Keywords:

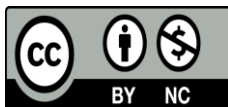
Response Modification Factor, steel structure, Base Isolator, nonlinear static analysis (pushover), Incremental dynamic analysis (IDA)

Abstract

The Response Modification Factor (R), which represents the non-elastic performance of structures during severe earthquakes is widely utilized in Codes to determine the seismic demand and to design the structures. The closer the calculated value of R is to the reality, the more accurate the determination of the required resistance of the structure will be. The common analytical method for calculating the Response Modification Factor of ordinary buildings is the non-linear static analysis (Pushover) method. But the use of this method for buildings with base-isolation is doubtful. Incremental nonlinear dynamic analysis (IDA) is one of the new methods with wide application, which can be a suitable alternative for calculating the R of buildings with isolated bases. In the present research, the Response Modification Factor of the steel moment frame structure equipped with base isolation has been calculated and compared for 5-, 8-, and 12-steel story models by using two methods: the incremental nonlinear dynamic analysis (IDA) versus the Pushover analysis (conventional method). The results indicate that the incremental nonlinear dynamic analysis method is more accurate than the pushover analysis, due to the direct use of earthquake records, as well as considering all the dynamic characteristics of the structure, especially the dynamic characteristics of its base isolator. So that, the Response Modification Factor obtained from the IDA analysis compared to the pushover analysis, exhibits an increase of 2.8% in the 5-story, 16.61% in the 8-story, and 8.84% in the 12-story structures. The Response Modification Factors obtained from the above-mentioned analyzes have been compared with the values recommended in the FEMA P695 Code.

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

(این نشریه تحت قانون بین المللی کپی رایت Creative Commons: BY-NC می باشد).



ارزیابی و مقایسه‌ی ضریب رفتار سازه‌های فولادی مجهز به جداساز پایه به دو روش تحلیل پوش‌آور و تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشده

حمیدرضا صدرارحامی

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

فرشید فتحی

عضو هیأت علمی، دانشکده مهندسی عمران، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

f-fathi@iaun.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۲۹ فروردین ۱۴۰۲

تاریخ دریافت: ۲۷ دی ۱۴۰۱

چکیده

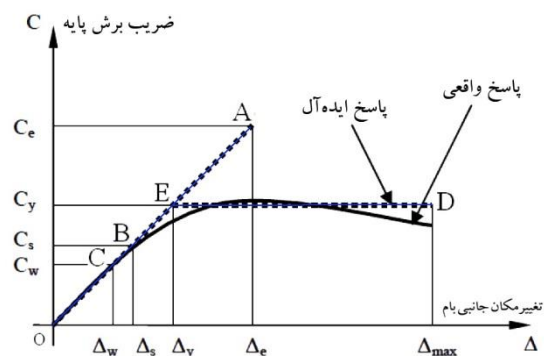
ضریب رفتار بعنوان عاملی که دربرگیرنده‌ی عملکرد غیرارتجاعی سازه‌ها در برابر زلزله‌های شدید است، کاربرد وسیعی در آیین‌نامه‌ها برای تعیین نیاز لرزه‌ای و طراحی سازه‌ها دارد. هراندازه مقدار محاسبه شده‌ی ضریب رفتار به واقعیت نزدیک‌تر باشد، تعیین مقاومت مورد نیاز سازه دقیق‌تر خواهد بود. روش تحلیلی متداول برای محاسبه‌ی مقدار ضریب رفتار ساختمان‌های معمولی، روش تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش‌آور) است. اما استفاده از این روش برای ساختمان‌های دارای جداساز پایه با تردیدهایی همراه است. تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشده (IDA) یکی از روش‌های نوین با کاربرد گسترده است که می‌تواند جایگزین مناسبی برای محاسبه‌ی ضریب رفتار ساختمان‌های دارای جداساز پایه باشد. در این مقاله ضریب رفتار سازه‌ی فولادی خمشی مجهز به جداساز پایه، برای سه مدل ۵، ۸ و ۱۲ طبقه‌ی فولادی با استفاده از دو روش، یکی تحلیل پوش‌آور (روش مرسوم) و دیگری تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشده محاسبه و مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاکی از دقیق‌تر بودن روش تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشده نسبت به تحلیل پوش‌آور، به دلیل استفاده‌ی مستقیم از رکورددهای زلزله و همچنین منظور نمودن تمام مشخصات دینامیکی سازه و خصوصاً مشخصات دینامیکی جداساز پایه‌ی آن، می‌باشد. بطوریکه ضریب رفتار حاصل از تحلیل IDA نسبت به تحلیل پوش‌آور در سازه‌ی ۵ طبقه ۲/۸٪، در سازه‌ی ۸ طبقه ۱۶/۶۱٪ و در سازه‌ی ۱۲ طبقه ۸/۸۴٪ افزایش را نشان می‌دهد. همچنین ضریب رفتار حاصل از تحلیل‌ها با مقادیر توصیه شده در آیین‌نامه‌ی FEMA P695 مقایسه شده است.

کلید واژگان: ضریب رفتار، سازه‌ی فولادی، جداساز پایه، تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش‌آور)، تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشده (IDA).

۱- مقدمه

ایده‌ی استفاده از ضریب رفتار (Response Modification Factor) برای محاسبه‌ی نیروی زلزله، اولین بار در سال ۱۹۷۷ توسط فریمن پیشنهاد گردید و در سال ۱۹۸۸ برای اولین بار در طراحی سازه مورد استفاده قرار گرفت. این ضریب در آیین‌نامه‌های مختلف با عناوین متفاوتی از جمله ضریب اصلاح پاسخ، ضریب اصلاح نیرو، ضریب عملکرد سازه، ضریب شکل‌پذیری و ضریب رفتار مورد استفاده قرار گرفته است. در واقع استفاده از ضریب رفتار به طراح اجازه می‌دهد بصورت غیرمستقیم عملکرد غیرارتجاعی سازه‌ها را در طراحی سازه‌ها اعمال نماید. عوامل مختلفی در تعیین ضریب رفتار سازه تأثیرگذار است که از مهم‌ترین آنها می‌توان به ضریب شکل‌پذیری، ضریب اضافه مقاومت و زمان تناوب سازه اشاره نمود. برای تعیین ضریب رفتار روش‌های مختلفی پیشنهاد و مورد استفاده قرار گرفته است که متداول‌ترین آنها روش پژوهشگران آمریکایی نظیر روش ظرفیت فریمن و روش ضریب شکل‌پذیری یانگ و دیگری روش پژوهشگران اروپایی نظیر روش تئوری شکل‌پذیری و روش انرژی می‌باشد. در اغلب کارهای مهندسی جهت تعیین ضریب رفتار سازه‌ها از گروه نخست، که دارای تئوری‌های کاربردی‌تری هستند، بخصوص روش شکل‌پذیری یانگ استفاده می‌شود.

تحلیل استاتیکی غیرخطی (Nonlinear Static Analysis) یا پوش‌آور (Pushover) که یک روش متداول و مرسوم در تعیین ضریب رفتار سازه‌ها است، مبانی طراحی آن بر پایه‌ی روش یانگ استوار است. در این روش تحلیل، ابتدا سازه تحت الگوی بارگذاری جانبی مشخصی قرار گرفته و این بارگذاری تا رسیدن سازه به تغییرشکل مورد انتظار در زلزله با سطح خطر معین تدریجاً و گام به گام افزایش می‌یابد. با تعیین مقدار جابجایی و نیروی وارد بر سازه در هر گام، منحنی ظرفیت سازه مطابق شکل (۱) رسم می‌گردد. سپس با معادل‌سازی منحنی ظرفیت بصورت یک نمودار دوخطی و با استفاده از روابط (۱) و (۲) ضرایب شکل‌پذیری (R_{μ}) و اضافه مقاومت (R_s) تعیین و در نهایت ضریب رفتار (R) از رابطه‌ی (۳) بدست می‌آید.



شکل ۱- منحنی ظرفیت سازه و نمودار دو خطی معادل آن

$$R_s = C_y / C_s \quad (1)$$

$$R_{\mu} = C_e / C_s \quad (2)$$

$$R = R_s * R_{\mu} \quad (3)$$

در روابط فوق، C_y ضریب برش پایه‌ی نظیر تسلیم، C_s ضریب برش پایه‌ی اولین تسلیم و C_e ضریب برش پایه‌ی نظیر رفتار ارتجاعی سازه می‌باشد.

روش تحلیل دیگری که جهت محاسبه‌ی ضریب رفتار می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد، روش تحلیل دینامیکی غیرخطی افزاینده (Incremental Dynamic Analysis) است که اخیراً مورد توجه محققین زیادی واقع شده است. ابداع و ایده‌ی این روش توسط برترو و به سال ۱۹۷۷ بر می‌گردد، که در سال ۲۰۰۲ توسط وموانسیکس و کرنل به‌شکلی قانونمند تدوین گردید. روش IDA به عنوان یک روش چند منظوره با کاربردهای گسترده همچنان در حال بررسی و تکمیل است. بعضی از این اهداف و کاربردها عبارتند از:

- درک بهتر از مقاوت سازه نسبت به سطح زلزله اعمالی،
- درک بهتر از عملکرد سازه و اجزای آن در برابر زلزله‌های نادر و شدید،
- درک بهتر ماهیت تغییرات پاسخ سازه و اجزای آن با افزایش شدت شتاب‌نگاشت،
- امکان بررسی اثرات تغییرات پارامترهای مختلف شتاب‌نگاشت‌ها و تأثیرات نسبی آنها بر یکدیگر.

با وجود مزایای فوق، به دلیل پیچیدگی‌ها و حجم بالای عملیات تحلیلی، این روش هنوز مورد استقبال عمومی قرار نگرفته است. در این روش، برخلاف روش تحلیل پوش‌آور، مستقیماً از رکوردهای زلزله برای رسم منحنی ظرفیت استفاده می‌شود. به اینصورت که مقدار بیشینه‌ی هر شتاب‌نگاشت به صورت افزایشی و گام به گام از مقدار حدود 0.05g تا حداکثر 2.0g به سازه اعمال و در هر گام، تحلیل دینامیکی غیرخطی انجام می‌گیرد و سپس با تعیین مقدار برش پایه و جابجایی نظیر آن، منحنی ظرفیت سازه رسم می‌گردد.

استفاده از تحلیل پوش‌آور در سازه‌های دارای سیستم میراگر بخصوص سیستم‌های دارای جداساز لرزه‌ای (Seismic Base Isolation) به دلیل عدم امکان لحاظ کردن مستقیم میرایی جداساز و همچنین مشخصات هیسترتیک آن، نتایج حاصله همواره با تردید همراه بوده است. در چنین شرایطی استفاده از روش IDA به دلیل به‌کارگیری مستقیم رکوردهای زلزله و لحاظ کردن تمامی مشخصات دینامیکی سازه و مشخصات مکانیکی جداساز پایه می‌تواند جایگزین مناسبی نسبت به روش قبلی باشد. تحقیقاتی که اخیراً نیز روی این گونه از سازه‌ها انجام شده این موضوع را تأیید می‌کند: ثابت و همکاران در سال ۲۰۲۲ در مقاله‌ای به بررسی خصوصیات لرزه‌ای سازه‌های مجهز به جداساز پرداختند [۱]. در این مقاله از مدل‌های مختلف سازه با جداگرهای متفاوت از جمله جداساز با هسته‌ی سربی استفاده شده و خصوصیات

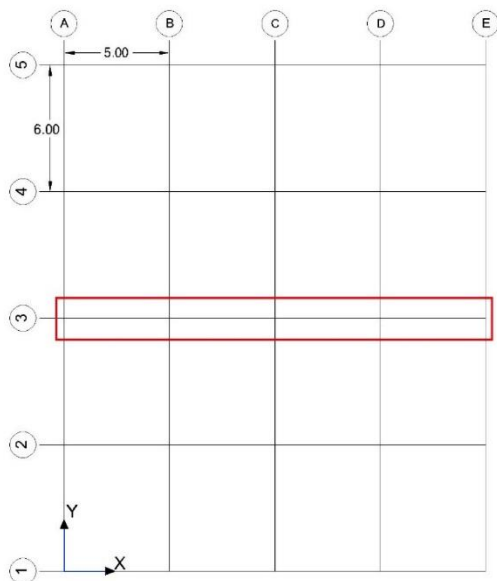
لرزه‌ای از جمله ضریب‌رفتار آنها به روش IDA محاسبه شده است. نتایج نشان داد که ضرایب‌رفتار بدست آمده نسبت به مقادیر آیین‌نامه بیشتر شده و شتاب و جابجایی نسبی کاهش داشته است. Gunes در سال ۲۰۲۲ با استفاده از روش IDA خصوصیات لرزه‌ای سازه‌های مجهز به جداساز لرزه‌ای را مورد بررسی قرار داد و به روابط جدیدی در طراحی اولیه‌ی این نوع از سازه‌ها دست پیدا نمود [۲]. نتایج نشان داد که معادلات بدست آمده را می‌توان در ساختمان‌های بتنی میان مرتبه‌ی دارای جداساز لرزه‌ای مورد استفاده قرار داد. عسگریان و همکاران در سال ۲۰۲۱ ضریب‌رفتار سازه‌های فولادی مجهز به مهاربند SMA (Shape Memory Alloy) را مورد ارزیابی قرار دادند [۳]. مهاربندهای SMA یک نوع آلیاژ حافظه‌دار فوق‌الاستیک بوده که توانایی تغییر شکل‌های بزرگ را دارد و پس از تخلیه به حالت تغییر شکل نیافته باز می‌گردد. در این مقاله با استفاده از برنامه‌ی OpenSees و با حالت‌های مختلف سازه‌ای، ضریب‌رفتارها محاسبه شده است. نتایج حاکی از آن است که سیستم هیبریدی پیشنهادی ضریب‌رفتار را در مقایسه با سیستم ساده سازه‌ای افزایش داده و مشکلات طراحی به حداقل می‌رسد. Liu و همکاران در سال ۲۰۲۱ تأثیر آسیب به سازه‌های جداسازی شده در نزدیک گسل را مورد بررسی قرار دادند [۴]. در این مقاله، از جداساز لاستیکی در پایه‌ی سازه استفاده شده و با استفاده از تحلیل IDA منحنی‌های شکنندگی ترسیم و مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان داد که میزان خرابی و آسیب به سازه در مقایسه با گسل دور به میزان قابل توجهی زیاده‌تر است. همچنین با افزایش شدت زلزله میزان آسیب به جداساز بصورت غیرخطی افزایش می‌یابد. در سال ۲۰۲۱ مقصودی و همکاران عملکرد جداساز بلبرینگ الاستومری تقویت شده با فولاد (Steel Reinforced Elastomeric Bearings) را در کاهش نیروی زلزله بر روی پل بزرگراه مورد ارزیابی قرار دادند [۵]. در این مقاله جهت ارزیابی بهتر عملکرد جداساز، از تحلیل IDA استفاده شده و با استفاده از ۲۰ رکورد زلزله، ضریب اصطکاک جداساز برای هر رکورد بدست آمده است. نتایج نشان داد که جداساز SREBs عملکرد خوبی در کاهش نیروی ورودی زلزله به پل دارد و ضریب اصطکاک تأثیر محسوسی در عملکرد آن ندارد. Elias و همکاران در سال ۲۰۲۰ عملکرد ساختمان جداسازی شده در پایه همراه با میراگر در طبقات را با استفاده از منحنی‌های شکنندگی حاصل از تحلیل IDA مورد بررسی قرار دادند [۶]. در این مقاله از سه حالت الف) میراگر تکی روی بام، ب) میراگر چندگانه روی بام و ج) میراگر چندگانه در طبقات استفاده گردید و نتیجه‌ی تحقیق نشان داد که خرابی سازه در هنگام استفاده از میراگر همراه با جداساز نسبت به سازه‌ی بدون میراگر بشدت کاهش داشته است. همچنین خرابی در حالت‌های نوع دو و سه کمتر از نوع یک بوده است. در سال ۲۰۲۰ قاسمی و حق‌الهی رفتار لرزه‌ای قاب فولادی خمشی مجهز به مهاربند بیضوی (Elliptic Braced Moment Resisting Frame) را مورد ارزیابی قرار دادند [۷]. استفاده از این نوع مهاربند امکان ایجاد بازشو در محل مهاربند را داده و به معمار در ایجاد فضای بهتر کمک می‌کند. لذا در این مقاله ضریب‌رفتار ساختمان مذکور با استفاده از تحلیل IDA و در

دو حالت حدی و تنش مجاز محاسبه و مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان داده که مقدار ضریب‌رفتار بدست آمده حداقل ۳۰٪ نسبت به قاب خمشی افزایش داشته است. در سال ۲۰۲۰ Patil و همکاران در مقاله‌ی خود عملکرد جداساز پایه را در سازه‌های بلند مرتبه با سیستم خمشی دوگانه مورد بررسی قرار دادند [۸]. در این مقاله از جداساز لاستیکی با هسته‌ی سربی در مدل‌ها استفاده شده و از تحلیل IDA جهت تعیین نتایج و ارزیابی عملکرد جداسازها بهره برده شده است. نتایج نشان داده که تعداد مفاصل پلاستیک در سازه‌ی با سیستم دوگانه نسبت به سیستم معمولی خمشی کمتر و اکثراً در تیرها تشکیل می‌گردد. محسنیان و همکاران در سال ۲۰۲۰ ضریب‌رفتار سازه‌های دیگرایید را مورد بررسی قرار دادند [۹]. در این مقاله با استفاده از ۱۲ رکورد زلزله و با روش IDA ضریب‌رفتار این نوع از سازه‌ها در سه تیپ ۱۶، ۲۴ و ۳۲ طبقه در سطوح مختلف ایمنی محاسبه و مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در دو سطح خطر (LS و CP)، ساختمان‌های دیگرایید سطوح عملکردی بالاتر از ایمنی زندگی (LS) با حدود ۹۹٪ از خود نشان می‌دهند. در سال ۲۰۱۹ طباری و همکاران ضریب‌رفتار سازه‌های فولادی را با استفاده از رکوردهای حوزه‌ی نزدیک محاسبه و مورد بررسی قرار دادند [۱۰]. در این مقاله از چهار تیپ سازه و از دو نوع متفاوت رکورد (پالس مانند و بدون پالس) استفاده و ضریب‌رفتار آنها با روش IDA محاسبه شده است. نتایج نشان داده که رفتار لرزه‌ای سازه‌ها در برابر حرکات بدون پالس ۱/۱۹ برابر بیشتر از حرکات زمین دارای پالس می‌باشد. رحیم‌زاده و همکاران در سال ۲۰۲۱ اثر تحلیل IDA را بر سازه‌های فولادی با بادبند قطری مورد ارزیابی قرار داده است [۱۱]. در این مقاله پاسخ لرزه‌ای مدل‌ها یکبار با تحلیل پوش‌آور و بار دیگر با تحلیل IDA بدست آمده و نتایج با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان داده که ضریب‌رفتار بدست آمده از روش اول محافظه کارانه بوده و مقدار ضریب‌رفتار حاصل از روش IDA منطقی و دقیقتر است. همچنین نتایج نشان داده که ضریب‌رفتار با افزایش ارتفاع تغییر پیدا کرده بطوریکه می‌توان بجای استفاده از مقادیر آیین‌نامه که محافظه کارانه به نظر می‌رسد، برای هر سازه ضریب‌رفتار جداگانه‌ای تعیین نمود. خیرالدین و همکاران در سال ۲۰۱۸ ضریب‌رفتار سازه‌ی مهاربندی شده‌ی متحدالمرکز Hexa-BR (Hexagonal Pattern of Bracing) را با استفاده از تحلیل IDA محاسبه و مورد بررسی قرار دادند [۱۲]. در این مقاله سه نوع سازه‌ی ۴، ۱۰ و ۲۰ طبقه در محیط برنامه‌ی OpenSees مدل‌سازی و با استفاده از ۲۲ رکورد ضرایب‌رفتار محاسبه و با سازه‌ی دارای مهاربند ضریب‌ری مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. نتایج نشان داده که عملکرد مهاربند جدید نسبت به مهاربندهای سنتی بهتر بوده است. همانطور که مشاهده گردید، اکثر تحقیقاتی که در سال‌های اخیر بر روی سازه‌های جداسازی شده انجام گرفته، با استفاده از تحلیل IDA بوده که نشان از دقت و قابل اعتماد بودن آن نسبت به تحلیل پوش آور دارد.

۲- فرضیات و مراحل انجام تحلیل‌ها

۲-۱- معرفی مدل‌ها

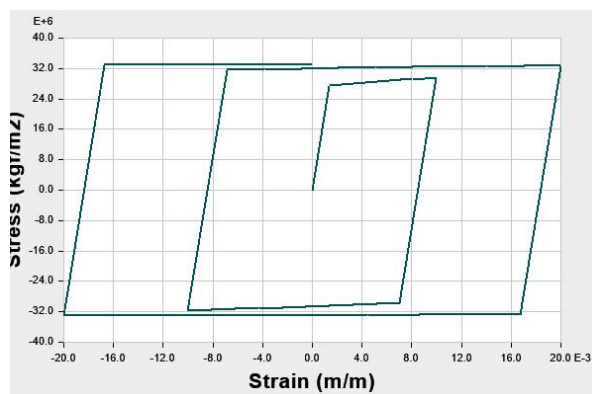
در این مقاله از سه تیپ سازه‌ی فولادی با ارتفاع‌های مختلف ۵، ۸ و ۱۲ طبقه و مجهز به جداساز پایه استفاده شده است. کاربری سازه‌ها مسکونی و در اصفهان واقع شده‌اند. سازه‌ها در منطقه‌ی با خطر لرزه خیزی متوسط و روی خاک نوع III قرار گرفته‌اند. هر سازه دارای چهار قاب اصلی در هر دو جهت می‌باشد. طول هر دهانه در جهت X، ۵ متر و در جهت Y، ۶ متر می‌باشد. ارتفاع هر طبقه نیز ۳/۲ متر در نظر گرفته شده است. سیستم سازه‌ها قاب خمشی فولادی با شکل‌پذیری متوسط و مصالح مصرفی شامل فولاد از نوع St37 و بتن با مقاومت فشاری ۲۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. در شکل (۲) منحنی رفتاری پروفیل‌های فولادی مورد استفاده برای تحلیل‌ها نشان داده شده است.



شکل ۳- پلان سازه‌ها

IPE240	IPE240	IPE240	IPE240
Box25x25	Box25x25	Box25x25	Box25x25
IPE330	IPE330	IPE330	IPE330
Box25x25	Box25x25	Box25x25	Box25x25
IPE360	IPE360	IPE360	IPE360
Box25x25	Box25x25	Box25x25	Box25x25
IPE360	IPE360	IPE360	IPE360
Box30x30	Box30x30	Box30x30	Box30x30
IPE400	IPE400	IPE400	IPE400
Box30x30	Box30x30	Box30x30	Box30x30
IPE400	IPE400	IPE400	IPE400
Box30x30	Box30x30	Box30x30	Box30x30
IPE400	IPE400	IPE400	IPE400
Box35x35	Box35x35	Box35x35	Box35x35
IPE400	IPE400	IPE400	IPE400
Box35x35	Box35x35	Box35x35	Box35x35
IPE400	IPE400	IPE400	IPE400
Box35x35	Box35x35	Box35x35	Box35x35
IPE400	IPE400	IPE400	IPE400
Box35x35	Box35x35	Box35x35	Box35x35
IPE400	IPE400	IPE400	IPE400
Box40x40	Box40x40	Box40x40	Box40x40

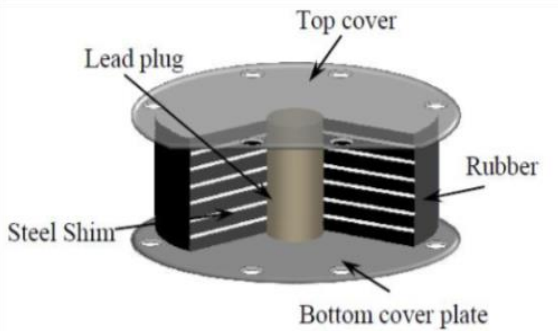
شکل ۴- مشخصات مقاطع تیر و ستون‌های سازه‌ی ۱۲ طبقه



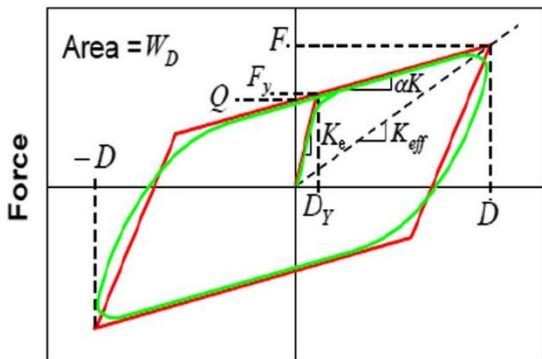
شکل ۲- منحنی رفتاری مصالح فولادی

مدل‌سازی، تحلیل و طراحی اولیه‌ی سازه‌ها بصورت سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 V20 و براساس آیین‌نامه‌های ASCE7-16، AISC360-16 و FEMA-P695، انجام شده است [۱۳-۱۵]. در ادامه جهت بدست آوردن ضریب رفتار سازه‌ها، به دلیل زمان‌بر بودن تحلیل‌های IDA، یک قاب میانی در جهت Xها انتخاب و تحلیل‌ها بصورت دوبعدی انجام شده است. مقایسه‌ی پاسخ‌های قاب‌های سه‌بعدی و دوبعدی نشان‌دهنده‌ی یکسان بودن آن‌ها است. لازم به‌ذکر است که در تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی در نرم‌افزار SAP2000 رفتار غیرخطی اعضا با تعرف مفاصل پلاستیک متمرکز انجام شده است. در شکل (۳) پلان و در شکل‌های (۴) الی (۶)، مشخصات مقاطع قاب میانی سازه‌ها در جهت X نشان داده شده است.

به سازه می‌گردد. در این تحقیق از جداساز لاستیکی با هسته‌ی سربی (Lead Rubber Bearing) LRB که جزء گروه اول محسوب می‌شود، استفاده شده است. در شکل (۷) نمای جداساز LRB نشان داده شده است. این جداساز اولین بار توسط رایینسون استفاده شد. وجود هسته‌ی سربی در جداساز باعث افزایش میزان میرایی سامانه در تغییرشکل‌های بزرگ می‌شود. همچنین بعلت سختی اولیه‌ی کافی سرب موجود، جداساز در برابر بارهای ناشی از بادهای خفیف و یا زلزله های ضعیف‌تر مقاوم است. در شکل (۸) منحنی رفتاری جداساز LRB نشان داده شده است.



شکل ۷- جداساز لرزه‌ای با هسته‌ی سربی



شکل ۸- منحنی رفتاری جداساز LRB

۲-۳- پارامترهای مورد نیاز در مدل‌سازی جداساز LRB

برنامه‌ی SAP2000 V20 قابلیت مدل‌سازی انواع جداساز از جمله جداساز لاستیکی با میرایی بالا، جداساز پاندولی اصطکاکی و همچنین جداساز لاستیکی با هسته‌ی سربی در دو حالت خطی و غیرخطی را دارد. با استفاده از گزینه‌ی Link Support/Rubber Isolator برنامه، پارامترهای مورد نیاز جهت مدل‌سازی جداساز LRB به برنامه داده می‌شود. جهت تعیین مشخصات جداساز از روابط موجود در آیین‌نامه‌ی FEMA P695 استفاده شده است [۱۵]. در این آیین‌نامه، معادله‌ی کلی جابجایی سازه‌های دارای جداساز به شکل رابطه‌ی (۴) است.

$$\ddot{x}_g + 2\zeta_{eff}\omega_0\dot{S} + \omega_0^2 S + \frac{N}{M}Q = \quad (4)$$

IPE270	IPE270	IPE270	IPE270
Box25x25	Box25x25	Box25x25	Box25x25
IPE330	IPE330	IPE330	IPE330
Box25x25	Box25x25	Box25x25	Box25x25
IPE360	IPE360	IPE360	IPE360
Box25x25	Box25x25	Box25x25	Box25x25
IPE360	IPE360	IPE360	IPE360
Box30x30	Box30x30	Box30x30	Box30x30
IPE400	IPE400	IPE400	IPE400
Box30x30	Box30x30	Box30x30	Box30x30
IPE400	IPE400	IPE400	IPE400
Box30x30	Box30x30	Box30x30	Box30x30
IPE400	IPE400	IPE400	IPE400
Box35x35	Box35x35	Box35x35	Box35x35
IPE400	IPE400	IPE400	IPE400
Box35x35	Box35x35	Box35x35	Box35x35

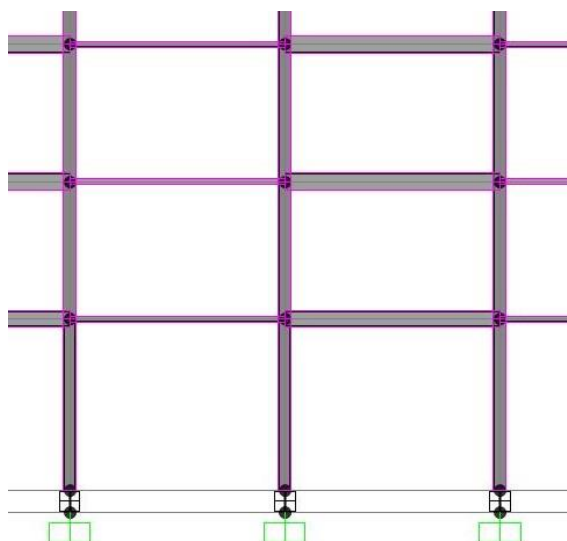
شکل ۵- مشخصات مقاطع تیر و ستون‌های سازه‌ی ۸ طبقه

IPE240	IPE240	IPE240	IPE240
Box25x25	Box25x25	Box25x25	Box25x25
IPE330	IPE330	IPE330	IPE330
Box25x25	Box25x25	Box25x25	Box25x25
IPE360	IPE360	IPE360	IPE360
Box25x25	Box25x25	Box25x25	Box25x25
IPE400	IPE400	IPE400	IPE400
Box30x30	Box30x30	Box30x30	Box30x30
IPE400	IPE400	IPE400	IPE400
Box30x30	Box30x30	Box30x30	Box30x30
IPE400	IPE400	IPE400	IPE400
Box35x35	Box35x35	Box35x35	Box35x35
IPE400	IPE400	IPE400	IPE400
Box35x35	Box35x35	Box35x35	Box35x35

شکل ۶- مشخصات مقاطع تیر و ستون‌های سازه‌ی ۵ طبقه

۲-۲- مشخصات جداساز پایه

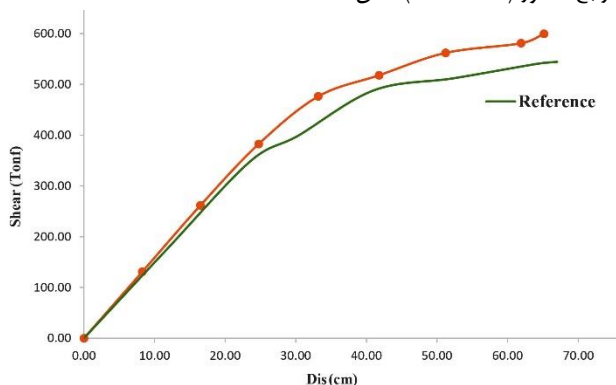
استفاده از جداساز لرزه‌ای در ساختمان، باعث افزایش زمان تناوب سازه و در نتیجه باعث کاهش انرژی انتقال‌یافته و کاهش نیاز لرزه‌ای به آن می‌گردد. دو ویژگی مهم در جداسازها یعنی سختی جانبی اندک و میرایی، باعث کاهش پاسخهای سازه، خصوصاً کاهش جابجایی نسبی (دریفت) در آنها می‌گردد. جداسازهای لرزه‌ای پایه به دو گروه کلی جداسازهای لاستیکی و جداسازهای اصطکاکی تقسیم می‌شوند. جداسازهای لاستیکی باعث افزایش زمان تناوب سازه و استفاده از جداسازهای اصطکاکی باعث استهلاک انرژی و کنترل نیروی وارده



شکل ۹- مدل سازی جداساز در نرم افزار SAP2000

۲-۴- صحت سنجی مدل سازی در نرم افزار SAP2000

جهت صحت سنجی مدل سازی، از داده های سازه های مدل شده در تحقیق کلبادی [۱۶] استفاده شده است. بدین صورت که ابتدا سازه ها در نرم افزار SAP2000 V20 مدل سازی و سپس روی مدل ها تحلیل تاریخچه ی زمانی افزایش یافته انجام، و نتایج آن با مقادیر بدست آمده در تحقیق مذکور مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان دهنده ی آنست که اختلاف مقادیر ضریب رفتار حاصل از دو تحقیق کمتر از ۵٪ بوده است و می توان با دقت قابل قبولی به نتایج مدل سازی استناد نمود. بعنوان نمونه در شکل (۱۰) منحنی ظرفیت مربوط به یک سازه ی ۶ طبقه تحت اثر زلزله ی طیس با استفاده از نرم افزار SAP2000 V20 و مرجع مذکور (Reference) نشان داده شده است.



شکل ۱۰- منحنی ظرفیت سازه ی ۶ طبقه تحت زلزله ی طیس

۲-۵- رکوردهای زلزله

جهت انجام تحلیل IDA، ابتدا می بایست رکوردهای زلزله را تعیین نمود. در این مقاله از هفت رکورد استفاده شده است. تمامی رکوردها از سایت PEER استخراج شده است. رکوردها براساس بزرگای بیش از ۶ ریشتر، سرعت موج برشی بین ۱۷۵ تا ۳۷۵ متر بر ثانیه (خاک نوع سه) و فاصله از گسل بیش از ۲۰ کیلومتر (حوزه ی دور) انتخاب شده اند. مشخصات این رکوردها در جدول (۲) آمده است.

در رابطه ی فوق، S جابجایی نسبی بین تکیه گاه سازه و زمین، \dot{S} شتاب نسبی، \dot{S} سرعت نسبی، \ddot{X}_g شتاب زمین، N تعداد جداسازهای پایه، M جرم کل سازه و Q نیروی بازگرداننده تولید شده توسط جداساز بوده که از روابط (۵) و (۶) محاسبه می شود.

$$Q = \alpha \cdot \frac{F_y}{D_y} \cdot s + (1 - \alpha) \cdot F_y \cdot z \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{K_p}{K_e} \quad (6)$$

در روابط فوق، F_y و D_y جابجایی و نیروی متناظر آن در زمان تسلیم جداساز، K_p و K_e سختی پلاستیک و الاستیک جداساز و z جابجایی بدون بعد هیسترتیک جداساز می باشد. ζ_{eff} نیز میرایی جداساز بوده که از رابطه ی (۷) بدست می آید.

$$\zeta_{eff} = \frac{2 \cdot Q \cdot (D - D_y)}{\pi \cdot D^2 \cdot K_{eff}} \quad (7)$$

در رابطه ی فوق، D جابجایی کل جداساز می باشد و K_{eff} سختی مؤثر بوده که از رابطه ی (۸) بدست می آید.

$$K_{eff} = \alpha \cdot K_e + \frac{Q}{D} \quad (8)$$

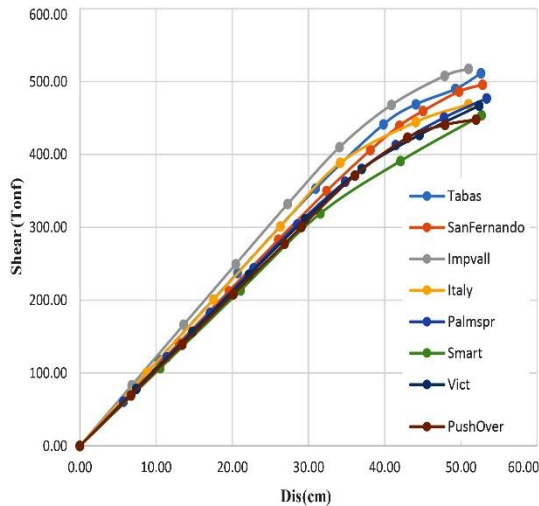
در جدول (۱) مقادیر پارامترهای مورد نیاز برنامه ی SAP2000 V20 که از روابط (۵) الی (۸) بدست آمده، برای هر سه مدل ۵، ۸ و ۱۲ طبقه آورده شده است.

جدول ۱- مقادیر پارامترهای مورد نیاز جداساز لرزه ای در برنامه ی SAP2000

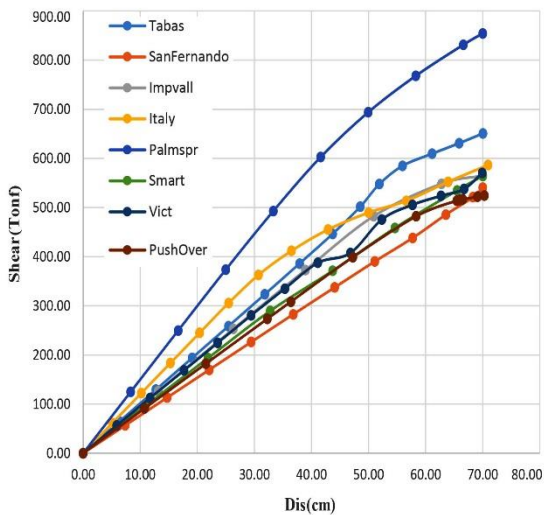
Parameter	Story		
	5	8	12
W (Kgf)	120000	200000	310000
T_D (s)	4.5	6.4	8.16
S (s)	1.75	1.75	1.75
T_s (s)	0.7	0.7	0.7
D (m)	0.51	0.72	0.92
K_{eff} (Kgf/m)	23824	19630	18717
ζ_{eff} (Kgf.s/m)	33493	39250	47716
K_e (Kgf/m)	114021	108961	118667
Q (Kgf)	6280	6280	6280

در شکل (۹) نمونه ای از مدل سازی جداساز در برنامه ی SAP2000 نشان داده شده است.

افزایش ثابت 0.1g در هر گام) و در هر مرحله، تحلیل دینامیکی غیرخطی انجام و با تعیین جابجایی و نیروی برشی پایه‌ی نظیر هر گام منحنی ظرفیت رسم شده است. در این حالت نیز حداکثر تغییر مکان سازه به تغییر مکان هدف محدود شده است. در مجموع منحنی ظرفیت برای هر مدل شامل یک منحنی حاصل از تحلیل پوش‌آور و هفت منحنی (برای هر رکورد یک منحنی) حاصل از تحلیل IDA می‌باشد. در اشکال (۱۱) الی (۱۳) نمودار ظرفیت برای هر سه مدل ۵، ۸ و ۱۲ طبقه و برای هر دو نوع تحلیل آورده شده است.



شکل ۱۱- منحنی‌های ظرفیت سازه برای هر دو نوع تحلیل، ساختمان ۵ طبقه‌ی دارای جداساز پایه



شکل ۱۲- منحنی‌های ظرفیت سازه برای هر دو نوع تحلیل، ساختمان ۸ طبقه‌ی دارای جداساز پایه

جدول ۲- مشخصات رکوردهای زلزله

Record	PGA(g)	Year	Vs (m/s)	Mag.	Dis. (km)
San Fernando	0.21	1971	308.38	6.61	43.95
Impvall	0.35	1979	205.78	6.53	23.17
Italy	0.3	1980	356.39	6.9	44.62
Smart	0.57	1986	268.37	6.32	59.64
Palmspr	0.57	1986	360.45	6.06	42.17
Tabas	0.43	1978	324.57	7.35	24.07
Victoria	0.11	1980	259.59	6.33	39.10

۶-۲- تعیین ضریب رفتار

در این مقاله جهت تعیین ضریب رفتار از روش یانگ استفاده شده است. براساس این روش، ابتدا برای کلیه‌ی مدل‌ها منحنی ظرفیت هر سازه رسم شده، سپس منحنی‌ها دوخطی و با تعیین پارامترهای مورد نیاز همچون R_s و R_{μ} ضریب رفتار بدست آمده است. برای رسم منحنی ظرفیت با کمک تحلیل پوش‌آور و مطابق با آیین‌نامه‌ی ATC-40 ابتدا مفاصل پلاستیک معرفی و به سازه اختصاص داده شده [۱۷]. سپس با معرفی بارهای جانبی و تعیین و تنظیم پارامترهای مورد نیاز از جمله طیف پاسخ و تغییر مکان هدف، تحلیل انجام شده است. مطابق آیین‌نامه تغییر مکان هدف از رابطه‌ی (۹) بدست می‌آید:

$$\delta_t = C_0 C_1 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad (9)$$

در رابطه‌ی فوق، S_a : شتاب طیفی، T_e : زمان تناوب اصلی مؤثر و C_0, C_1 : ضرایب مرتبط با زمان تناوب و مد اول سازه می‌باشند. در جدول (۳) مقادیر تغییر مکان هدف برای هر سه مدل آورده شده است.

جدول ۳- مقادیر تغییر مکان هدف

Story	T_e	S_a	C_1	C_0	δ_t (cm)
5St.	1.46	0.69	1.0	1.48	55
8St.	2.12	0.53	1.0	1.50	75
12St.	2.72	0.41	1.0	1.75	90

با افزایش تدریجی بار و تا رسیدن تغییر مکان سازه به تغییر مکان هدف، تحلیل ادامه پیدا می‌کند. با داشتن جابجایی و نیروی برشی پایه‌ی نظیر آن در هر گام، منحنی ظرفیت رسم می‌گردد. در روش IDA بر خلاف روش پوش‌آور بجای معرفی بار جانبی از رکوردهای زلزله استفاده شده است. مطابق آیین‌نامه‌ی FEMA-351 معیار شدت، شتاب زمین و معیار خسارت، تغییر مکان حداکثر بام در نظر گرفته شده است [۱۸]. روند تحلیل بدین صورت است که برای هر رکورد بیشینه‌ی شتاب آن از مقدار حداقل 0.05g تا حداکثر 2.0g افزایش یافته (با

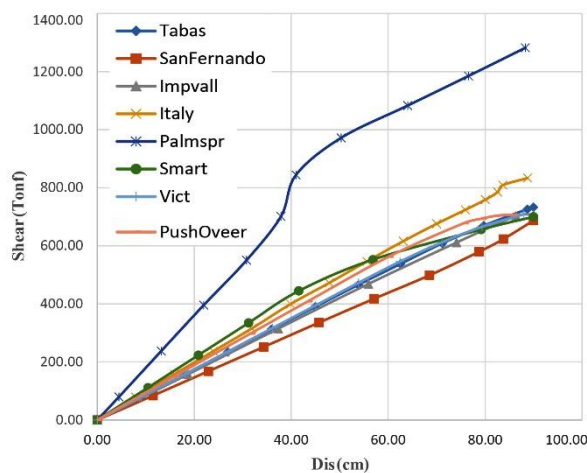
جدول ۴- نحوه‌ی تعیین ضریب رفتار سازه‌ی پنج طبقه تحت زلزله‌ی طبس

Parameter	Amount
Δ_{max} (cm)	52.63
C_{max} (Tonf)	511.4
C_s (Tonf)	353.2
Δ_s (cm)	30.94
Δ_e (cm)	51
C_e (Tonf)	592.86
C_y (Tonf)	424.03
Δ_y (cm)	37.14
$R_{\mu} = C_e / C_s$	1.68
$R_s = C_y / C_s$	1.2
$R = R_s * R_{\mu}$	2.02

جدول ۵- مقادیر ضریب رفتار برای مدل‌ها

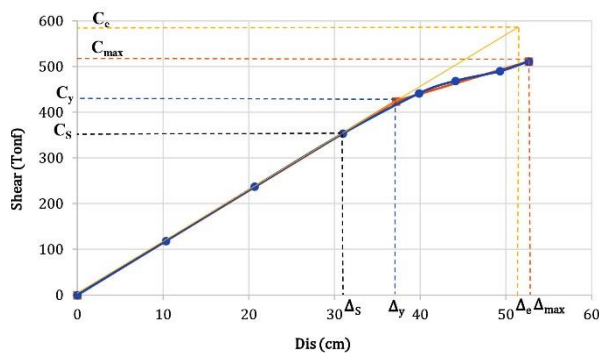
Record	5St.			8St.	12St.
	R_{μ}	R_s	R	R	R
Tabas	1.68	1.2	2.02	3.18	3.26
San Fernando	1.9	1.34	2.55	3.68	3.31
Impvall	1.82	1.33	2.42	3.28	3.36
Italy	1.99	1.35	2.69	3.39	3.53
Palmspr	2.19	1.29	2.83	3.61	3.26
Smart	2.4	1.05	2.52	3.56	4.32
Vict	2.21	1.34	2.96	3.4	3.95
Ave.			2.57	3.44	3.57
PushOver	1.9	1.37	2.5	2.95	3.28
FEMA P695			2	2	2

در شکل (۱۵) نیز ضریب رفتار برای هر مدل و برای هر دو تحلیل پوش آور و IDA بصورت میله‌ای جهت مقایسه‌ی بهتر آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، ضریب رفتار بدست آمده حاصل از هر دو تحلیل پوش آور و IDA نسبت به ضریب رفتار توصیه شده در آیین‌نامه ی FEMA P695 بیشتر شده است. مقدار افزایش ضریب رفتار حاصل از تحلیل IDA نسبت به آیین‌نامه برای سازه‌ی پنج طبقه $28/50\%$ ، برای سازه‌ی هشت طبقه 72% و برای سازه‌ی دوازده طبقه، $78/50\%$ شده است. همچنین مقدار افزایش ضریب رفتار حاصل از تحلیل پوش آور نسبت به آیین‌نامه برای سازه‌ی پنج طبقه 25% ، برای سازه‌ی هشت طبقه $47/50\%$ و برای سازه‌ی دوازده طبقه 64% شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر توصیه شده در آیین‌نامه در جهت اطمینان و بصورت محافظه‌کارانه بوده است. براساس این پژوهش، البته با انجام مطالعات تکمیلی و منظور کردن دیگر پارامترها، به نظر می‌رسد که بتوان پیشنهادی مبنی بر افزایش مقادیر ضریب رفتار ارائه شده در آیین‌نامه به میزان 30% برای طراحی روسازه‌ی ساختمان‌های فولادی دارای جداساز پایه را ارائه نمود.



شکل ۱۳- منحنی‌های ظرفیت سازه برای هر دو نوع تحلیل، ساختمان ۱۲ طبقه‌ی دارای جداساز پایه

پس از رسم منحنی‌های ظرفیت حاصل از هر دو نوع تحلیل پوش آور و IDA و برای هر سه مدل ۵، ۸ و ۱۲ طبقه، ابتدا هر منحنی مشابه شکل (۱) دوخطی شده و سپس با تعیین شاخص‌های مورد نیاز، نظیر برش پایه‌ی الاستیک، برش جاری شدگی سازه و برش اولین مفصل پلاستیک و با استفاده از روابط (۱) الی (۳) ضریب رفتار آن بدست آمده است. بعنوان نمونه، در شکل (۱۴) منحنی ظرفیت و رسم نمودار دوخطی آن برای سازه‌ی پنج طبقه تحت رکورد زلزله‌ی طبس آورده شده است. همچنین در جدول (۴)، مقادیر بدست آمده از نمودار دوخطی و محاسبات برای تعیین ضریب رفتار آورده شده است.



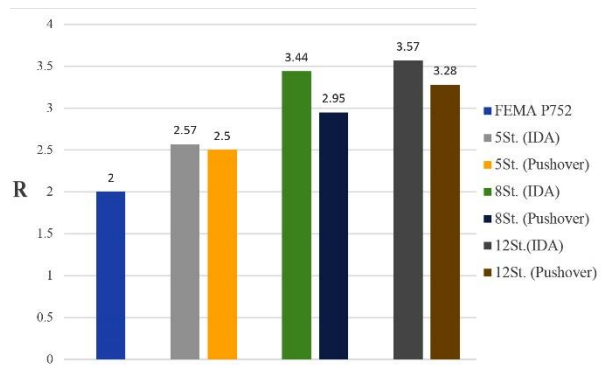
شکل ۱۴- منحنی ظرفیت و نمودار دوخطی سازه‌ی پنج طبقه تحت زلزله‌ی طبس

۷-۲- نتایج تحلیل‌ها

با توجه به موارد ذکر شده در بخش‌های قبل، در جدول (۵) نتایج عددی ضریب رفتار برای مدل‌های ۵، ۸ و ۱۲ طبقه آورده شده است. این نتایج شامل ضریب رفتار حاصل از تحلیل IDA برای هر رکورد و ضریب رفتار حاصل از تحلیل پوش آور می‌باشد. که در نهایت میانگین ضریب رفتار هفت رکورد با ضریب رفتار تحلیل پوش آور و همچنین با ضریب رفتار توصیه شده در آیین‌نامه‌ی FEMA P695 مورد مقایسه قرار گرفته است [۱۵].

۴- مراجع

- [1] Sabet B, Talaeitaba B. IDA analysis of regular and irregular seismically isolated structures in different stories and different seismic categories. Structures. 2022; 43: 779-804.
- [2] Gunes N, Risk-targeted design of seismically isolated buildings. Journal of Building Engineering. 2022; 46: 665-678.
- [3] Asgarian B, Jamalian A, Jalaefar A. Response Modification Factor of Steel Braced Frames Equipped with Smart Hybrid Re-Centering Device. Int Journal of Steel Struct. 2021; 4: 423-438.
- [4] Liu C, Fang D, Yan Z. Seismic Fragility Analysis of Base Isolated Structure Subjected to Near-fault Ground Motions. Periodica Polytechnica Civil Engineering. 2021; 65(3): 768-783.
- [5] Maghsoudi A, Khansefid A, Khaloo A, Ehteshami M. Probabilistic seismic performance assessment of optimally designed highway bridge isolated by ordinary unbonded elastomeric bearings. Engineering Structures Journal. 2021; 247: 115-129.
- [6] Elias S, Stanikzai MH, Rupakhety R. Seismic Response Mitigation of Base-Isolated Buildings. Applied Sciences. 2020; 10(4): 1-17.
- [7] GhasemiJouneghani H, Haghollahi A. Assessing the seismic behavior of steel moment frames equipped by elliptical brace through incremental dynamic analysis (IDA). Earthquake Engineering and Engineering Vibration. 2020; 19: 435-449.
- [8] Patil PR, Talasadar RG. seismic evaluation of base isolated reinforced concrete building considering effect of dual system. Journal of composition theory. 2020; 13(3): 593-596.
- [9] Mohsenian V, Padashpour S, Hajrasouliha I. Seismic reliability analysis and estimation of multilevel response modification factor for steel diagrid structural systems. Journal of Building Eng. 2020; 29: 112-127.
- [10] Taiyari F, Formisano A, Mazzolani F. Seismic Behaviour Assessment of Steel Moment Resisting Frames Under Near-Field Earthquakes. International Journal of Steel Structures. 2019; 19: 1421-1430.
- [11] RahimzadehRofooei F, Seyedkazemi A. Comparison of static pushover analysis and IDA-based probabilistic methods for assessing the seismic performance factors of diagrid structures. Scientia Iranica. 2021; 28(1): 124-137.
- [12] Kheyroddin A, Mashhadiali N. Response modification factor of concentrically braced frames with hexagonal pattern of braces. Journal of Constructional Steel Research. 2018; 148: 658-668.
- [13] Standard Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures (ASCE7-16). American Society of Civil Engineers. 2016; Document No 20191-4382.



شکل ۱۵- مقادیر ضرایب رفتار حاصل از تحلیل‌های پوش‌آور و IDA برای مدل‌های ۵، ۸ و ۱۲ طبقه

از نمودار فوق ملاحظه می‌گردد که با افزایش تعداد طبقات ضریب رفتار سازه در هر دو حالت تحلیل افزایش پیدا نموده است. این افزایش برای تحلیل IDA و در سازه‌ی هشت طبقه نسبت به پنج طبقه به میزان $31/80\%$ و در سازه‌ی دوازده طبقه نسبت به هشت طبقه به میزان $3/64\%$ می‌باشد. همچنین در تحلیل پوش‌آور میزان افزایش برای سازه‌ی هشت طبقه نسبت به پنج طبقه $13/46\%$ و برای سازه‌ی دوازده طبقه نسبت به هشت طبقه $11/19\%$ می‌باشد.

۳- نتیجه گیری

در این مقاله ضرایب رفتار سازه‌های فولادی مجهز به جداساز پایه به روش تحلیل استاتیکی خطی و تحلیل دینامیکی غیرخطی افزاینده برای مدل‌های مورد بررسی تعیین و مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان‌دهنده آنست که ضریب رفتار حاصل از تحلیل IDA، بیشتر از مقادیر حاصل از تحلیل پوش‌آور برای سازه‌های مجهز به جداساز پایه بوده و این اختلاف وابسته به ارتفاع طبقات می‌باشد. این افزایش برای سازه‌ی پنج طبقه، $2/8\%$ ، برای سازه‌ی هشت طبقه $16/61\%$ و برای سازه‌ی دوازده طبقه $8/84\%$ حاصل شده است. نتایج نشان می‌دهد که در سازه‌های کوتاه به دلیل نزدیک بودن مقادیر ضریب رفتار در هر دو نوع تحلیل، همچنان می‌توان از تحلیل پوش‌آور بجای تحلیل IDA استفاده نمود. ولی در سازه‌های بلند مرتبه، کارایی تحلیل پوش‌آور کاهش یافته و استفاده از تحلیل IDA نتایج دقیق‌تری را به همراه خواهد داشت.

باتوجه به وجود جداساز پایه در ساختمان‌ها، تغییر مکان مورد توجه در تحلیل پوش‌آور در هر گام شامل مجموع تغییر مکان‌های جداساز پایه و تغییر مکان جانبی قاب می‌باشد و از این رو نمی‌تواند مبنای درستی در تخمین رفتار واقعی غیرخطی در روسازه (قاب خمشی فولادی) قرار بگیرد. در سازه‌های کوتاه، تغییر شکل جداساز پایه کمتر بوده و این اثر قابل اغماض می‌باشد. در مقابل در تحلیل‌های IDA به دلیل استفاده‌ی مستقیم از مشخصات دقیق جداساز پایه (خصوصاً لحاظ شدن میرایی آن) و همچنین مشخصات روسازه و رکوردهای زلزله، دقت محاسبات بسیار بالا خواهد بود.

[14] Standard Specification for Structural Steel Buildings (AISC360-16). American Institute of Steel Construction. 2016; Document No 60601-6204.

[15] Standard Quantification of Building Seismic Performance Factors (FEMA-P695). Federal Emergency Management Agency. 2009; Document No 10-917-8.

[16] Kolbadi M. Investigating the seismic behavior of steel structures equipped with base isolation system with incremental dynamic analysis (IDA). Islamic Azad University, Isfahan branch. 2015; Dissertation: 28-65.

[17] Standard Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings (ATC-40). 2010;

[18] Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings (FEMA-351). Federal Emergency Management Agency. 2010; Document No 95-C-4770.