

Comparison of Median Collapse Capacity of Steel Plate Shear Walls Using Approximate (Pushover-to-Fragility) and Exact Methods

Pooya Arezoomand Langarudi¹, Mohammadreza Adibramezani^{2*}, Ata Hojatkashani², Saeed Farokhizadeh²

1- Ph.D. candidate, Department of Civil Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

ABSTRACT

Currently, seismic vulnerability assessment and collapse capacity evaluation of various structural systems require extensive nonlinear dynamic analyses using numerical modeling and appropriate ground motion records selection. This process demands significant computational effort and time. To overcome these challenges, the SPO2FRAG software has been introduced by previous researchers as an efficient alternative to performing incremental dynamic analyses (IDA) to extract fragility curves at different performance levels. In this study, a numerical model of a steel plate shear wall structural system was selected and validated against an experimental specimen to verify the accuracy of the results obtained from this software. Subsequently, 4-, 8-, 12-, and 16-story buildings were designed according to the building code, and their fragility curves at the collapse performance level were extracted and compared using two methods: (1) incremental dynamic analysis (IDA) under 22 pairs of far-field earthquake records and (2) SPO2FRAG software. The results showed that SPO2FRAG provides conservative results compared to the accurate method for 4- and 8-story buildings. However, its results become unreliable with an increasing number of stories. Therefore, this method is recommended only for buildings with a height of less than 16 stories. Hence, although SPO2FRAG can be used as a quick and low-cost tool for the preliminary assessment of structures with a height of less than 16 stories, more accurate methods such as IDA are necessary for detailed studies and the design of important structures.

ARTICLE INFO

Receive Date: 05 August 2024

Revise Date: 23 January 2025

Accept Date: 07 February 2025

Keywords:

Steel plate shear wall

Pushover analysis

Fragility curve

Incremental dynamic analysis

Performance-based assessment

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.470572.3482

*Corresponding author: Mohammadreza Adibramezani

Email address: mr_adib@azad.ac.ir

مقایسه ظرفیت میانه فروریزش دیوار برشی فولادی به روش تقریبی (تبدیل منحنی پوش اور به شکنندگی) و دقیق

پویا آرزومند امیددی لنگرودی^۱، محمدرضا ادیبرمضانی^{۲*}، عطا حجت کاشانی^۲، سعید فرخی زاده^۲

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده

در حال حاضر برای ارزیابی آسیب پذیری لرزه‌ای و بررسی ظرفیت فروریزش سیستم‌های مختلف سازه‌ای، نیاز به تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی گسترده با استفاده از مدل‌سازی عددی و انتخاب رکوردهای لرزه‌ای مناسب است که نیاز به تلاش محاسباتی پیچیده و زمان‌بر دارد. برای غلبه بر این موارد، نرم‌افزار SPO2FRAG برای استخراج منحنی شکنندگی در سطوح مختلف عملکردی، به عنوان جایگزینی کارآمد برای انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی فزاینده (IDA)، توسط محققین گذشته ارائه شده است. در این پژوهش برای صحت سنجی و دقت نتایج حاصل از این نرم‌افزار، مدل عددی از سیستم سازه‌ای دیوار برشی فولادی انتخاب و با نمونه آزمایشگاهی معتبر، اعتبارسنجی گردید. پس از آن، سازه‌هایی با تعداد طبقات ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ به کمک آیین‌نامه طراحی شدند و منحنی شکنندگی این سازه‌ها در سطح عملکردی فروریزش به کمک دو روش مختلف (۱- تحلیل دینامیکی فزاینده تحت ۲۲ جفت رکورد زلزله حوزه دور، ۲- نرم‌افزار SPO2FRAG) استخراج و مقایسه گردید. نتایج نشان داد که روش SPO2FRAG در سازه‌های ۴ و ۸ طبقه نتایج محافظه‌کارانه‌ای نسبت به روش دقیق ارائه می‌دهد. از طرفی با افزایش تعداد طبقات، دقت نتایج کاهش می‌یابد. بنابراین، استفاده از این روش فقط برای سازه‌هایی با ارتفاع کمتر از ۱۶ طبقه توصیه می‌شود. در نتیجه، اگرچه SPO2FRAG می‌تواند به عنوان ابزاری سریع و کم‌هزینه برای ارزیابی اولیه سازه‌هایی با ارتفاع کمتر از ۱۶ طبقه مورد استفاده قرار گیرد، اما برای مطالعات دقیق و طراحی سازه‌های مهم، استفاده از روش‌های دقیق‌تر مانند IDA ضروری است.

کلمات کلیدی: دیوار برشی فولادی، تحلیل پوش اور، منحنی شکنندگی، تحلیل دینامیکی افزایشی، ارزیابی عملکردی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2025.470572.3482	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2025.470572.3482	۱۴۰۴/۰۹/۳۰	۱۴۰۳/۱۱/۱۹	۱۴۰۳/۱۱/۱۹	۱۴۰۳/۱۱/۰۴	۱۴۰۳/۰۵/۱۵
				*نویسنده مسئول:		
				محمدرضا ادیبرمضانی		
				پست الکترونیکی:		
				mr_adib@azad.ac.ir		

۱- مقدمه

ظرفیت میانه فروریزش، یکی از پارامترهایی است که در ارزیابی عملکردی سازه‌ها کاربرد داشته و در دستورالعمل FEMA P695 [۱] به آن اشاره شده است. این ظرفیت در واقع به صورت شدت لرزه‌ای تعریف می‌شود که تحت آن شدت، بیش از نیمی از رکوردهای زلزله انتخابی، منجر به فروریزش سازه می‌گردند. محاسبه این پارامتر معمولاً با تحلیل‌های پیچیده و زمان‌بر دینامیکی فزاینده (IDA) انجام می‌گیرد.

مهندسان همواره برای پرهیز از روش‌های محاسباتی پیچیده و زمان‌بر در ارزیابی ظرفیت لرزه‌ای سازه (مانند تحلیل دینامیکی غیرخطی)، به استفاده از روش‌های تقریبی نظیر تحلیل‌های غیرخطی استاتیکی روی آورده‌اند. این روش‌ها با ساده‌سازی رفتار سازه و تبدیل آن به سیستم تک درجه آزاد معادل (SDOF)^۲، تقاضای لرزه‌ای را برآورد می‌کنند. مطالعات نشان داده که بین ظرفیت فروریزش سازه‌ها و منحنی رفتاری آن ارتباط مستقیمی وجود دارد و به کمک پارامترهای منحنی رفتار سازه، تخمین مناسبی از ظرفیت فروریزش سازه‌ها می‌توان داشت. در نتیجه، انگیزه‌ای برای پیاده‌سازی روش‌های ساده‌شده برای توسعه منحنی‌های شکنندگی به وجود آمد. ماهیت افزایش بارگذاری در هر دو روش پوش اور و IDA، این ایده را به پژوهشگران ارائه داد تا با ایجاد ارتباطی منطقی بین این دو روش، به تقریب مناسبی از نتایج IDA، بدون انجام تحلیل‌های زمان‌بر و پیچیده دست پیدا کنند. یکی از این روش‌های ساده‌شده SPO2IDA^۳ است [۲]، که از معادلات تجربی برای شبیه‌سازی تحلیل IDA از نتایج ارائه شده توسط تحلیل پوش اور استفاده می‌کند. معادلات تجربی SPO2IDA که منحنی IDA را با پیوند سازه و پارامترهای منحنی پوش اور مرتبط می‌سازد، از نتایج ارائه شده توسط تعداد زیادی IDA از نوسانگرهای SDOF، با طیف وسیعی از پیوندها و انواع روابط نیرو-تغییر مکان به دست آمده‌اند. این روش اخیراً به کمک کد نویسی متلب به تولید برنامه‌ای با نام SPO2FRAG^۴ [۳] انجامید، که با آن منحنی‌های شکنندگی را در حالت‌های حدی مختلف (به روشی تقریبی) می‌توان ایجاد کرد. این روش با استفاده از نمودار پوش اور سازه‌ها، منحنی شکنندگی را تخمین می‌زند [۴]. با این حال صحت کارایی و دقت نتایج حاصل از آن باید مورد ارزیابی قرار گیرد.

محققین مختلفی از این نرم‌افزار برای استخراج منحنی‌های شکنندگی در سازه‌های گوناگون استفاده کرده‌اند. تهرانی زاده و همکاران [۵] به منظور برآورد ظرفیت فروریزش قاب ساختمانی بتن آرمه ۱۲ طبقه، به جای استفاده از تحلیل‌های دینامیکی از SPO2FRAG استفاده نمودند.

یکرنگ‌نیا [۶] در مطالعه‌ای که با هدف ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های مسکونی بنایی از طریق منحنی‌های شکنندگی انجام شد، این منحنی‌ها را بدون استفاده از تحلیل IDA و با استفاده از نرم‌افزار SPO2FRAG استخراج نمود.

کاو و همکاران [۷] از نرم‌افزار SPO2FRAG برای به دست آوردن منحنی‌های IDA و شکنندگی در سطوح مختلف آسیب استفاده کردند. هدف این پژوهش بهینه‌سازی مبتنی بر عملکرد به کمک الگوریتم آشفته و به حداقل رساندن وزن کل طراحی قاب‌های خمشی مرکب ۸ و ۲۰ طبقه بود. همچنین محققینی دیگر برای دستیابی به منحنی‌های شکنندگی و ارزیابی عملکردی ساختمان‌های بتن مسلح ۱۷ و ۲۶ طبقه از SPO2FRAG استفاده کردند [۸]. در پژوهشی دیگر، صرفاً برای دوخطی سازی منحنی‌های پوش اور، از نرم‌افزار SPO2FRAG استفاده شد [۹].

در مطالعه‌ای به منظور روشن کردن رفتار پاسخ سازه‌های منظم و دارای طبقه نرم تحت بارگذاری لرزه‌ای، از تحلیل غیرخطی در سیستم قاب خمشی بتن مسلح استفاده شد. در بخشی از این پژوهش، مقایسه نتایج منحنی شکنندگی تولید شده از دو روش SPO2FRAG و IDA انجام شد. به طور قابل توجهی، برای قاب ۵ طبقه، سازه منظم نزدیک‌ترین تطابق را نشان می‌دهد، اما برای مدل طبقه نرم (۵ طبقه) مقداری انحراف مشاهده می‌شود. سازه ۱۱ طبقه برای هر دو حالت معمولی و طبقه نرم تناسب ضعیفی نشان داد [۱۰].

¹ Incremental Dynamic Analysis

² Single Degree of Freedom

³ Static PushOver to Incremental Dynamic Analysis

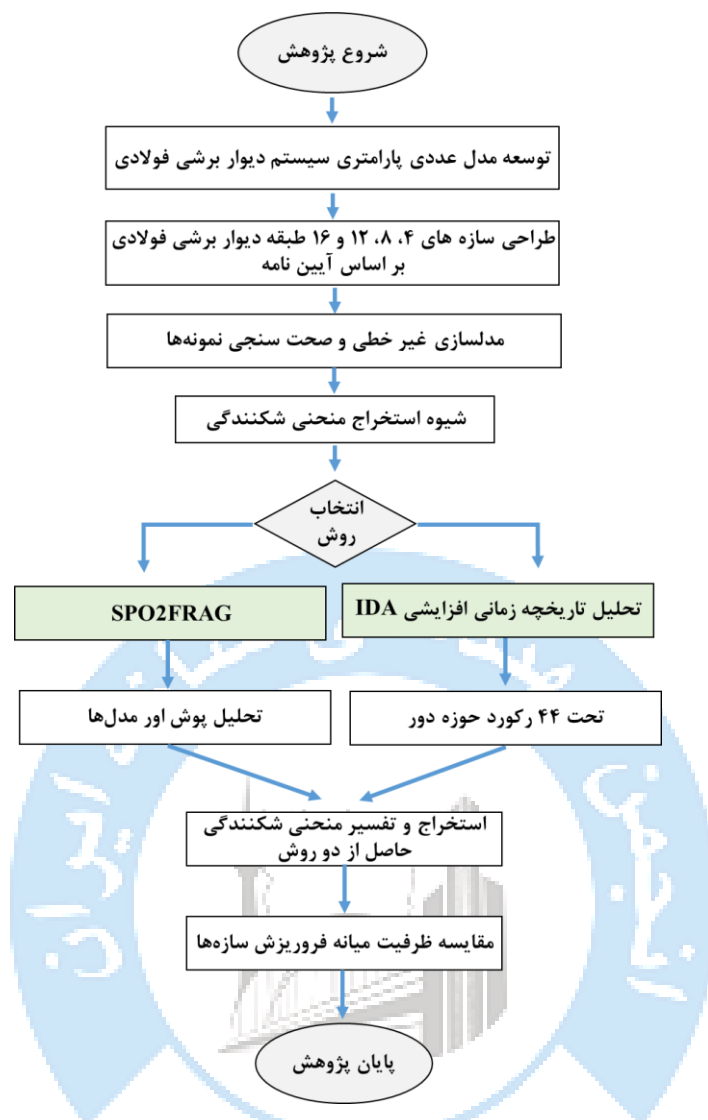
⁴ Static PushOver to FRAGility

اگرچه نرم افزار SPO2FRAG در پژوهش‌های پیشین به عنوان ابزاری برای ساده سازی فرایند استخراج منحنی‌های شکنندگی در سازه‌هایی مانند قاب‌های بتنی، بنایی و مرکب به کار رفته، تاکنون بررسی جامعی از دقت و کارایی آن در مقایسه با منحنی‌های شکنندگی حاصل از تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA) تحت رکوردهای زلزله متعدد انجام نشده است. همچنین، تأثیر تعداد طبقات سازه بر عملکرد این نرم افزار در پژوهش‌های گذشته بررسی نشده و این موضوع نیازمند توجه بیشتری است. در این پژوهش، از دیوارهای برشی فولادی به عنوان یکی از سیستم‌های مقاوم جانبی مؤثر با ویژگی‌هایی نظیر سختی بالا، ظرفیت جذب انرژی مطلوب استفاده شده است [۱۱-۱۳].

هدف این پژوهش، ارزیابی دقت و کارایی نرم افزار SPO2FRAG در پیش‌بینی ظرفیت فروریزش و استخراج منحنی‌های شکنندگی دیوارهای برشی فولادی در سازه‌هایی با ارتفاع‌های گوناگون (۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ طبقه) و مقایسه آن با نتایج تحلیل دقیق IDA تحت ۲۲ جفت رکورد زلزله حوزه دور است. یافته‌های این تحقیق می‌تواند مهندسان را در استفاده مطمئن تر از نرم افزار SPO2FRAG یاری دهد و کاهش زمان و هزینه تحلیل‌ها را به همراه داشته باشد. شکل ۱ نمای کلی فرایند پژوهش را نشان می‌دهد. سؤالات اصلی این پژوهش عبارتند از:

- آیا نرم افزار SPO2FRAG توانایی پیش‌بینی دقیق ظرفیت فروریزش دیوارهای برشی فولادی را دارد؟
- تا چه اندازه نتایج SPO2FRAG با نتایج تحلیل دقیق IDA همخوانی دارد؟
- تغییر تعداد طبقات سازه چه اثری بر دقت نرم افزار SPO2FRAG می‌گذارد؟





شکل ۱: فلوچارت روند انجام تحقیق

در بخش های بعدی این پژوهش به موضوعات زیر پرداخته خواهد شد:

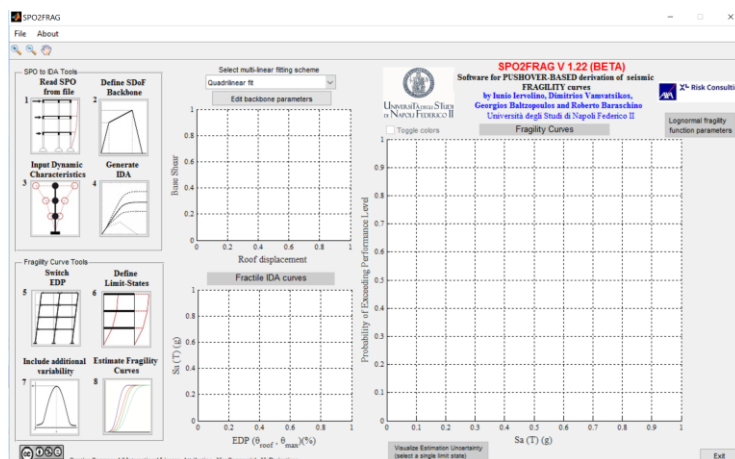
- (۱) بررسی نرم افزار SPO2FRAG (۲) مدل سازی و اعتبارسنجی مدلی آزمایشگاهی از دیوار برشی فولادی در نرم افزار OpenSees [۱۴] (۳) توضیح گام به گام روش طراحی SPSW بر اساس AISC 341-22 [۱۵]. (۴) طراحی مدل های مورد مطالعه بر اساس آیین نامه (۵) انجام تحلیل پوش اور و استخراج منحنی ظرفیت (۶) انجام تحلیل IDA و استخراج منحنی شکنندگی تحت ۲۲ جفت زلزله حوزه دور (۷) استخراج منحنی IDA و شکنندگی به کمک روش تقریبی SPO2FRAG (۸) مقایسه نتایج حاصل از دو روش مختلف استخراج منحنی شکنندگی (۹) خلاصه و نتیجه گیری

۲- بررسی نرم افزار SPO2FRAG

اساسی ترین مفهوم پشت SPO2FRAG، توانایی پیش بینی کارآمد نتایج IDA یک سیستم SDOF معین، بدون نیاز به اجرای هیچ تحلیلی است، پیش بینی که به لطف SPO2IDA به دست آمده است. SPO2FRAG تحلیل دینامیکی غیرخطی را از طریق الگوریتم SPO2IDA شبیه سازی می کند. SPO2IDA قادر است تخمین هایی از صدک های ۱۶٪، ۵۰٪ و ۸۴٪ منحنی های IDA سیستم SDOF را با پردازش منحنی یک بون چند بخشی-خطی به دست آمده از منحنی پوش اور سازه ای معین ارائه دهد. هرچند نتایج حاصل تقریبی است اما

این مزیت را دارد که از محاسبات پر زحمت و زمان بر اجتناب می کند. در هر صورت به کمک SPO2IDA، نرم افزار SPO2FRAG به منظور تخمین منحنی های شکنندگی برای سازه های ساختمانی به خصوص بتنی ارائه شد.

نرم افزار SPO2FRAG حول یک رابط کاربری گرافیکی می چرخد که به کاربر اجازه می دهد تا در هر مرحله، تمام نتایج تولید شده توسط ماژول های مختلف را به سرعت مشاهده کند. از نظر عملیاتی، SPO2FRAG شامل مجموعه ای از ماژول های جداگانه است که به طور مستقل عمل می کنند و یکدیگر را تکمیل می کنند. این ماژول ها شامل: رابط ورودی، ماژول چندخطی سازی خودکار، جعبه ابزار ویژگی های دینامیکی، ماژول SPO2IDA، رابط هایی برای تعریف حالت های حدی و آستانه های مربوطه آن ها و هرگونه منابع اضافی عدم قطعیت، ماژول منحنی شکنندگی و ماژول پس پردازش خروجی است. در شکل ۲ محیط گرافیکی این نرم افزار ارائه شده است.



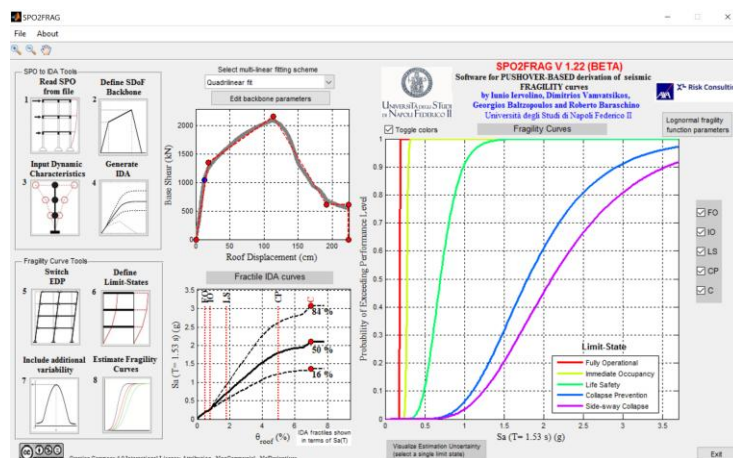
شکل ۲: محیط گرافیکی اولیه SPO2FRAG

ابزار SPO2FRAG شامل کد تحلیل سازه نمی شود و با این فرض عمل می کند که تحلیل غیرخطی استاتیکی لازم و هر تحلیل مودال اختیاری به صورت خارجی و از قبل انجام شود. بنابراین، هر پروژه SPO2FRAG از رابط ورودی داده شروع می گردد، که نتایج نیرو-تغییر مکان حاصل از تحلیل پوش اور سازه ها را از یک فایل متنی یا صفحه گسترده می خواند. در جدول ۱، مراحل اصلی کار با نرم افزار SPO2FRAG به طور خلاصه ارائه شده است. این جدول به خواننده کمک می کند تا درک جامعی از فرآیند تحلیل و استخراج منحنی های شکنندگی داشته باشد. مراحل شامل ورود داده ها، پردازش اطلاعات و تولید نتایج نهایی است.

جدول ۱: مراحل اصلی استفاده از نرم افزار SPO2FRAG

مرحله	توضیح مختصر
آماده سازی داده ها	وارد کردن داده های تحلیل پوش اور شامل تغییر مکان ها و برش پایه به نرم افزار و بررسی صحت داده ها.
برازش منحنی بکبون	تعریف منحنی بکبون معادل SDOF با استفاده از داده های تحلیل پوش اور.
مشخصات دینامیکی	وارد کردن مشخصات دینامیکی و هندسی سازه مانند جرم و ارتفاع طبقات، پرپودها و ضریب مشارکت جرمی.
پیش بینی IDA	استفاده از الگوریتم SPO2IDA برای پیش بینی صدک های ۱۶، ۵۰ و ۸۴ درصد منحنی های IDA.
تعریف حدود عملکردی	تعیین آستانه های مختلف مانند ایمنی جانی و آستانه فروریزش بر اساس معیارهای طراحی [۱۶].
استخراج شکنندگی	تولید منحنی های شکنندگی بر اساس داده ها و آستانه های تعریف شده.

در شکل ۳، خروجی نهایی نرم افزار شامل منحنی شکنندگی و نمودار IDA مشاهده می شود. این نتایج نه تنها به صورت گرافیکی نمایش داده شده اند، بلکه امکان استخراج خروجی های متنی برای تحلیل های دقیق تر نیز وجود دارد.



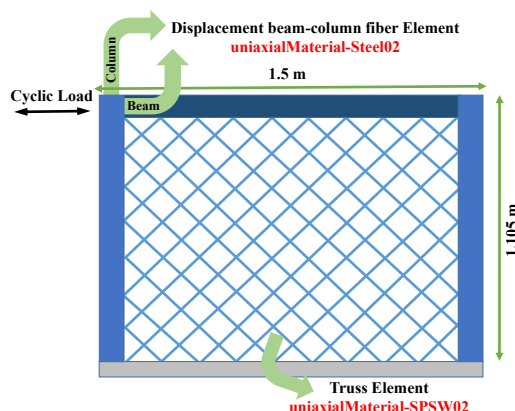
شکل ۳: ارائه منحنی‌های شکنندگی و IDA به کمک SPO2FRAG

۳- مدل سازی و اعتبار سنجی دیوار برشی فولادی

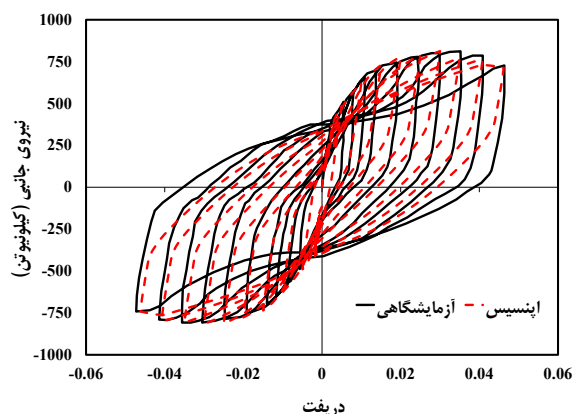
به منظور انجام مقایسه بین منحنی شکنندگی و ظرفیت میانه فروریزی که از دو روش ذکر شده حاصل می‌گردد، نیاز به مدلی غیرخطی و مناسب از سیستم دیوار برشی فولادی، برای انجام تحلیل IDA تحت رکوردهای لرزه‌ای است. برای اطمینان از مدلی غیرخطی مناسب که اثرات زوال مقاومت و سختی را در نظر می‌گیرد، اعتبارسنجی مدل عددی در برابر نمونه‌ای آزمایشگاهی قابل اعتماد، بسیار مهم است. در این مطالعه اعتبار سنجی با استفاده از نرم‌افزار OpenSees و بر روی نمونه DS-PSW به دست آمده از مطالعه صبوری قمی و سجادی [۱۷] انجام می‌شود.

المان DispBeamColumn (المان پلاستیسیته توزیع شده مبتنی بر جابجایی) برای تعریف اجزای مرزی با استفاده از مقاطع فایبر استفاده شد. مقاطع فایبر با مصالح تک محوری Steel02 که یک مدل تنش-کرنش دوخطی Menegotto-Pinto است مدل سازی شده‌اند. به منظور مدل سازی بر اساس توصیه AISC 341-22، ده نوار با انتهای مفصلی با فاصله مساوی که معرف ورق‌های فولادی می‌باشند، استفاده شده است که با استفاده از المان خرپایی [۱۸] مدل شده‌اند. مدل‌های هیستریزس متعددی برای توصیف ویژگی‌های پاسخ چرخه‌ای دیوار برشی فولادی معرفی شده‌اند، با این حال مدل جلالی و بنزاده [۱۹] با ترکیب معیارهای تسلیم مصالح، کمانش ورق، زوال چرخه‌ای و درون چرخه‌ای و سایر عوامل مرتبط متمایز است. پژوهش حاضر از مدل رفتاری فوق استفاده می‌کند.

در نهایت نتایج آزمایشگاهی با خروجی‌های مدل سازی عددی مقایسه شد و سطح بالایی از توافق را نشان داد. برای ارائه درکی جامع، پیکربندی مورد بررسی شده و منحنی مقایسه نیرو-دریفت بین دو مدل عددی و آزمایشگاهی در شکل ۴ و ۵ نشان داده شده است.



شکل ۴: پیکربندی مدل عددی در نرم‌افزار OpenSees



شکل ۵: مقایسه منحنی رفتاری نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی

۴- طراحی گام به گام دیوار برشی فولادی بر اساس AISC 341-22

به منظور طراحی سیستم دیوار برشی فولادی، از ضوابط آیین نامه AISC 341-22 [۱۵]، استفاده شد. خلاصه‌ای از مراحل طراحی به روش مبتنی بر این آیین نامه در ادامه ارائه شده است:

مرحله ۱: در ابتدا، زاویه اولیه نوارها ۴۵ درجه فرض شد که در محدوده ۳۰ درجه تا ۵۵ درجه آیین نامه قرار می‌گیرد. ضخامت ورق متعاقباً با استفاده از معادله (۱) محاسبه می‌گردد که برای ۱۰۰٪ نیروی برشی اعمال شده در هر طبقه محاسبه می‌شود:

$$t_w = \frac{2.645V_u}{F_u L_{ef} \sin 2\alpha} \quad (1)$$

که در آن V_u مقاومت برشی مورد نیاز، F_y مقاومت تسلیم ورق، L_{ef} فاصله‌ی بین بال‌های ستون و α زاویه تسلیم ورق نسبت به محور قائم است که بر حسب درجه اندازه‌گیری می‌گردد.

مرحله ۲: برای تعیین حداقل ممان اینرسی مورد نیاز ستون و تیرها از معادلات (۲) و (۳) استفاده خواهد شد. این مقادیر برای تعیین مقاطعی مناسب و اولیه برای اجزای مرزی استفاده می‌شود. این مشخصات تضمین می‌کند که ستون‌ها و تیرها سختی لازم برای تسلیم کامل تمام ورق‌های فولادی را مطابق آیین نامه فراهم می‌کنند.

حداقل ممان اینرسی ستون‌ها:

$$I_c \geq 0.0031 \frac{t_w h^4}{L} \quad (2)$$

حداقل ممان اینرسی تیرها:

$$I_b \geq 0.0031 \frac{\Delta t_w L^4}{h} \quad (3)$$

که در آن L فاصله بین مراکز ستون‌ها، h فاصله بین مراکز تیرها، t_w ضخامت ورق و Δt_w تفاوت ضخامت بین ورق‌های بالا و پایین تیر است.

مرحله ۳: پس از به دست آوردن مقاطع اولیه برای اعضای مرزی، زاویه جدید نوارها با استفاده از معادله (۴) محاسبه می‌شود و سپس ضخامت و نسبت تنش ورق‌های فولادی با استفاده از این زاویه جدید کنترل می‌گردد.

$$\tan^4 \alpha = \frac{1 + \frac{t_w L}{2A_c}}{1 + t_w h \left[\frac{1}{A_b} + \frac{h^3}{360I_c L} \right]} \quad (4)$$

که در آن A_c و A_b نشان دهنده سطح مقطع ستون و تیر، I_c ممان اینرسی ستون و سایر پارامترها قبلاً مشخص شده‌اند.

مرحله چهارم: به دنبال اعمال لنگرهای انتهایی متمرکز به تیرها و در نظر گرفتن نیروهای ناشی از تسلیم کششی یکنواخت ورق بر روی اجزای مرزی، همراه با ترکیب بارها، سازه مورد تحلیل قرار می‌گیرد. فرآیندی تکراری برای انتخاب مقاطع مناسب برای المان‌های مختلف تا زمانی که نسبت تقاضا به ظرفیت برای هر عضو کمتر یا مساوی ۱ باشد، انجام می‌شود و از طرفی کنترل می‌گردد تا دریافت سازه در محدوده‌ی مجاز باقی بماند.

کل فرآیند طراحی در این پژوهش، با استفاده از کد نویسی در MATLAB جهت کنترل قیود آیین‌نامه و OpenSees جهت تحلیل سازه‌ها انجام شد. استفاده از برنامه‌نویسی این اطمینان را حاصل می‌کند که طراحی دستی با دقت کافی و حداقل انحراف از طراحی بهینه اجرا شده است. این رویکرد پیچیدگی و زمان مورد نیاز برای محاسبات دستی آیین‌نامه‌ای را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد و در نتیجه احتمال خطا را به حداقل می‌رساند. نتایج طراحی در انتهای بخش ۵ آورده شده است.

۵- طراحی مدل‌های مورد مطالعه

چهار قاب دیوار برشی فولادی ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ طبقه، با ارتفاع طبقات ۴ متر و طول دهانه ۶ متر، برای این بررسی انتخاب شده‌اند. پلان و داده‌های ارتفاعی، بارهای اعمال شده در تحلیل استاتیکی معادل، در شکل ۶ نشان داده شده است. دو دیوار برشی فولادی در هر جهت، مقاومت در برابر بار جانبی را ایجاد می‌کنند. این سازه‌ها دارای پلان مربعی متقارن به ابعاد ۱۸×۱۸ متر می‌باشند. بار مرده برای طبقات و بام به ترتیب ۵۰۰ و ۶۰۰ کیلوگرم بر مترمربع است. علاوه بر این بارهای زنده ۲۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمربع برای طبقات و بام در نظر گرفته شده است. مقاطع W آمریکایی ساخته شده از فولاد ASTM A992 ($F_y = 345 \text{ MPa}$) برای المان‌های مرزی استفاده شد. ورق فولادی دارای تنش تسلیم ۲۳۹ مگاپاسکال است. همه نمونه‌ها در دسته طراحی لرزه‌ای D_{max} (پارامترهای مربوطه در جدول ۲ فهرست شده‌اند) و روی خاک‌هایی با ویژگی‌های کلاس D قرار دارند. تمامی مقررات و محدودیت‌های مربوط به دیوار برشی فولادی طبق آیین‌نامه آمریکا، به طور کامل رعایت شد.

لازم به ذکر است که پارامترهای طراحی از جمله ارتفاع طبقات (۴ متر)، طول دهانه (۶ متر) و عرض دیوار برشی (۶ متر) برای حفظ یکپارچگی تحلیل و مقایسه بین مدل‌ها ثابت در نظر گرفته شده‌اند. این محدودیت‌ها به‌عنوان چارچوبی برای مطالعه حاضر تعریف شده‌اند و بررسی سایر نسبت‌ها و مقادیر می‌تواند موضوع مناسبی برای تحقیقات آینده باشد.

جدول ۲: پارامترهای طراحی لرزه‌ای مورد نیاز برای D_{max}

S_s	S_I	S_{MS}	S_{MI}	S_{DS}	S_{DI}	T_s
۱/۵۰	۰/۶۰	۱/۵۰	۰/۹۰	۱/۰۰	۰/۶۰	۰/۶۰

ضریب اصلاح پاسخ (R) عدد ۷ و ضریب بزرگنمایی (C_d) ۶ در نظر گرفته شد. همچنین ضریب اهمیت سازه‌ها ۱ لحاظ شد. مدل‌سازی، سیستم ثقلی را در بر نمی‌گرفت. در عوض، ستون‌های متکی برای توضیح اثرات P-delta که توسط آن القا می‌گردد، همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده، استفاده گردید.

معادله (۵) روشی است که در ASCE 7-22 [۲۰] برای تعیین زمان تناوب اصلی ساختمان‌ها پیشنهاد شده است:

$$T = C_t H^x \quad (5)$$

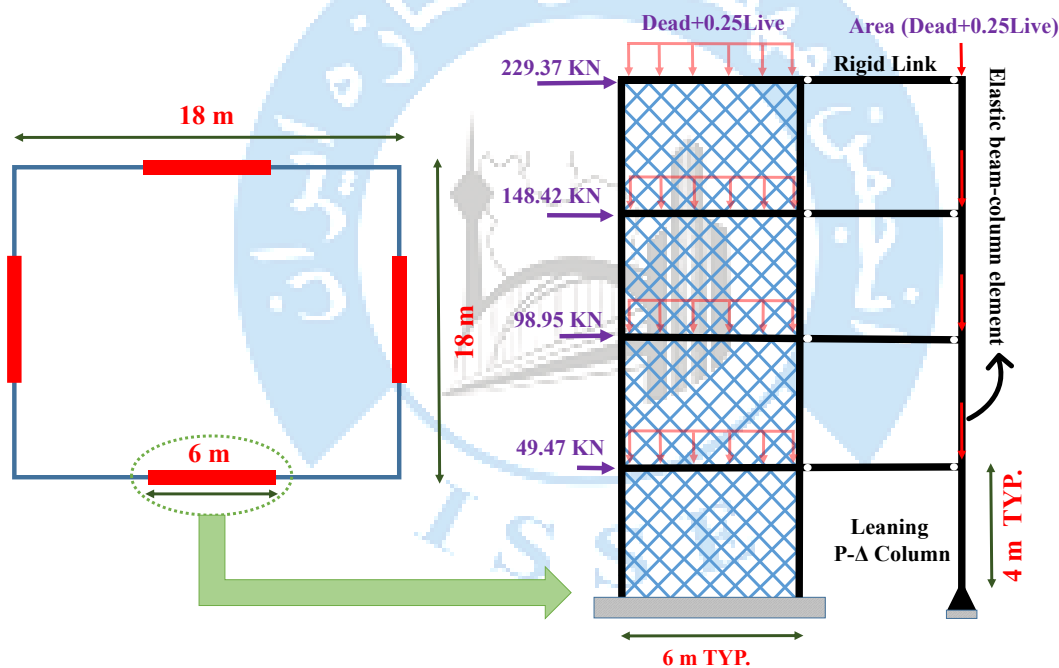
که در آن H ارتفاع ساختمان را نشان می دهد و برای سیستم دیوار برشی فولادی $C_t = 0.05$ و $x = 0.75$ است.

جدول ۳ مقادیر ضریب برش پایه (C_s) را برای هر مدل به همراه پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه آن نشان می دهد (T_i : زمان تناوب اصلی، $S_a(T_i, 5\%)$: شتاب طیفی مربوط به T_i).

جدول ۳: تعیین ضریب برش پایه سازه ها

C_s	$S_a(T_i, 5\%)$	T_i	تعداد طبقات
۰/۱۴	۱/۰۰	۰/۴۰	۴
۰/۱۳	۰/۹۰	۰/۶۷	۸
۰/۰۹	۰/۶۵	۰/۹۱	۱۲
۰/۰۸	۰/۵۳	۱/۱۳	۱۶

جدول ۴ مقاطع به دست آمده برای اجزای مختلف در هر مدل دیوار برشی فولادی را نشان می دهد. نسبت تنش برای هر عضو در شکل ۷ نشان داده شده است. نسبت تنش هر عضو با ترکیبی از حروف نشان دهنده نوع آن (ستون (C)، تیر (B)، ورق (P)) و عددی نشان دهنده شماره طبقه، نمایش داده می شود. علاوه بر این، جدول ۵ میانگین نسبت تنش و همچنین نسبت تغییر مکان جانبی نسبی طبقات (دریافت) برای هر سازه را ارائه می دهد.



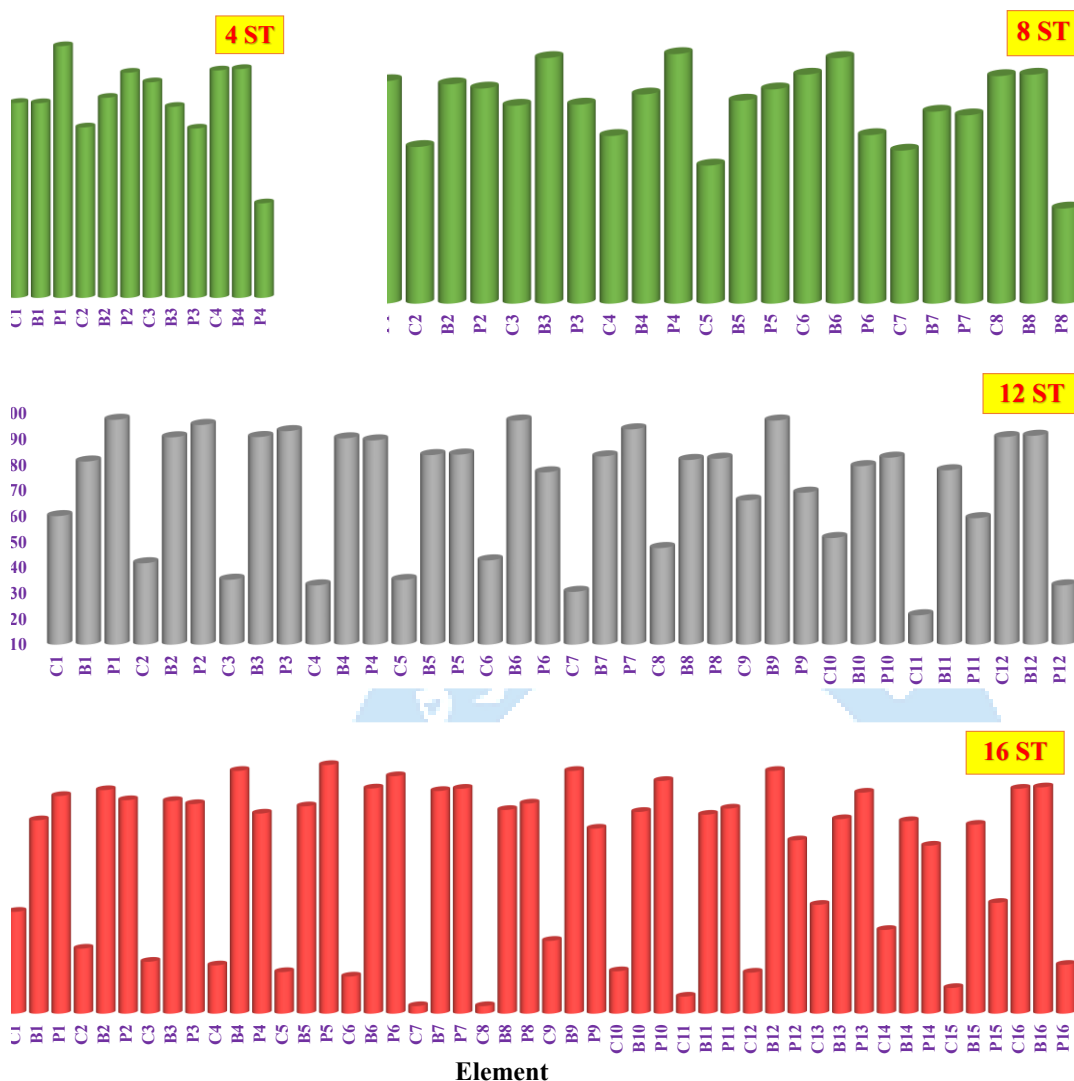
شکل ۶: نمایی از مدل سازه ۴ طبقه و پلان مربوط به آن

جدول ۴: مقاطع سازه های طراحی شده

			تعداد طبقات
۱۶	۱۲	۸	۴
			شماره طبقه
W14X311			۱۶
W14X233			۱۵
W14X233			۱۴
W14X233			۱۳
*W550	W14X311		۱۲
W550	W14X233		۱۱

W550	W14X233			۱۰	
W550	W14X233			۹	
*W700	W14X233	W14X311		۸	ستون‌ها
W700	W14X500	W14X176		۷	
W700	W14X500	W14X176		۶	
W700	W14X500	W14X176		۵	
*W750	W550	W14X257	W14X311	۴	
W750	W550	W14X257	W14X74	۳	
W750	W550	W14X257	W14X132	۲	
W750	W550	W14X257	W14X132	۱	
W14X211				۱۶	
W10X39				۱۵	
W10X39				۱۴	
W10X39				۱۳	
W12X136	W14X211			۱۲	
W10X39	W10X39			۱۱	
W10X39	W10X39			۱۰	
W12X136	W12X136			۹	
W10X39	W10X39	W14X211		۸	تیرها
W10X39	W10X39	W10X39		۷	
W10X39	W12X136	W12X136		۶	
W10X39	W10X39	W10X39		۵	
W12X136	W10X39	W10X39	W14X211	۴	
W10X39	W10X39	W12X136	W10X39	۳	
W10X39	W10X39	W10X39	W10X39	۲	
W10X39	W10X39	W10X39	W10X39	۱	
0.10				۱۶	
0.10				۱۵	
0.10				۱۴	
0.10				۱۳	
0.15	0.10			۱۲	
0.15	0.10			۱۱	
0.15	0.10			۱۰	
0.20	0.15			۹	
0.20	0.15	0.10		۸	ورق‌ها
0.20	0.15	0.10		۷	
0.20	0.20	0.15		۶	
0.20	0.20	0.15		۵	
0.25	0.20	0.15	0.10	۴	
0.25	0.20	0.20	0.10	۳	
0.25	0.20	0.20	0.10	۲	
0.25	0.20	0.20	0.10	۱	

* مقاطع Wx نیورورق‌های اضافه‌شده با ارتفاع X میلی‌متر هستند که از نسبت طول به ضخامت مقطع W14×370 تبعیت می‌کنند.



شکل ۷: نسبت تنش المان‌های سازه‌های با تعداد طبقات مختلف

جدول ۵: خلاصه‌ای از نتایج طراحی

تعداد طبقات	۴	۸	۱۲	۱۶
متوسط نسبت تنش	۰/۷۹	۰/۸۰	۰/۷۰	۰/۶۶
نسبت دریفت	۰/۶۱	۰/۹۳	۰/۹۷	۰/۹۹
زمان تناوب محاسباتی (ثانیه)	۰/۷۱	۱/۱۹	۱/۶۸	۲/۱۱

۶- استخراج منحنی پوش اور مدل‌ها

به منظور دستیابی به ظرفیت فروریزش سازه‌ها در روش تخمینی معرفی شده، نیاز به انجام تحلیل پوش اور بر روی مدل‌های مختلف دیوار برشی فولادی است. از نمودارهای حاصل از تحلیل پوش اور به عنوان ورودی نرم‌افزار SPO2FRAG برای دستیابی به منحنی‌های شکنندگی استفاده خواهد شد.

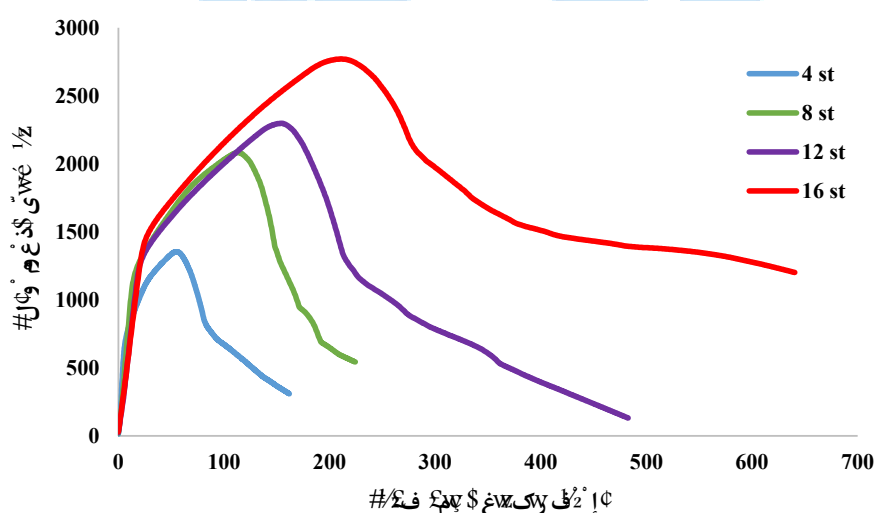
قبل از اعمال بارهای جانبی، سازه تحت بارگذاری اولیه با استفاده از ترکیبی از بارهای ثقلی مطابق FEMA P695 قرار گرفت. به دنبال آن، بارگذاری جانبی بر روی هر مدل بر اساس یک الگوی مثلثی، مطابق معادله ۶ اعمال شد. هر مدل تا ۱۰ درصد ارتفاع سازه پوش داده شد.

$$C_{vx} = \frac{W_x h_x^k}{\sum_{i=1}^{ns} W_i h_i^k} \quad (6)$$

که در آن C_{vx} نشان دهنده ضریب توزیع عمودی در هر تراز، W_x و W_i به ترتیب قسمتی از وزن لرزه‌ای تخصیص یافته به تراز طبقه x و i را نشان می‌دهند و h_x و h_i ارتفاع از پایه تا تراز طبقه x و i هستند. k با استفاده از معادله (۷) تعیین می‌شود:

$$K = \begin{cases} 1 & T \leq 0.5 \\ 2 & T \geq 2.5 \\ 0.5T + 0.75 & 0.5 < T < 2.5 \end{cases} \quad (7)$$

منحنی‌های تحلیل پوش اور برای هر مدل در شکل ۸ نشان داده شده است.

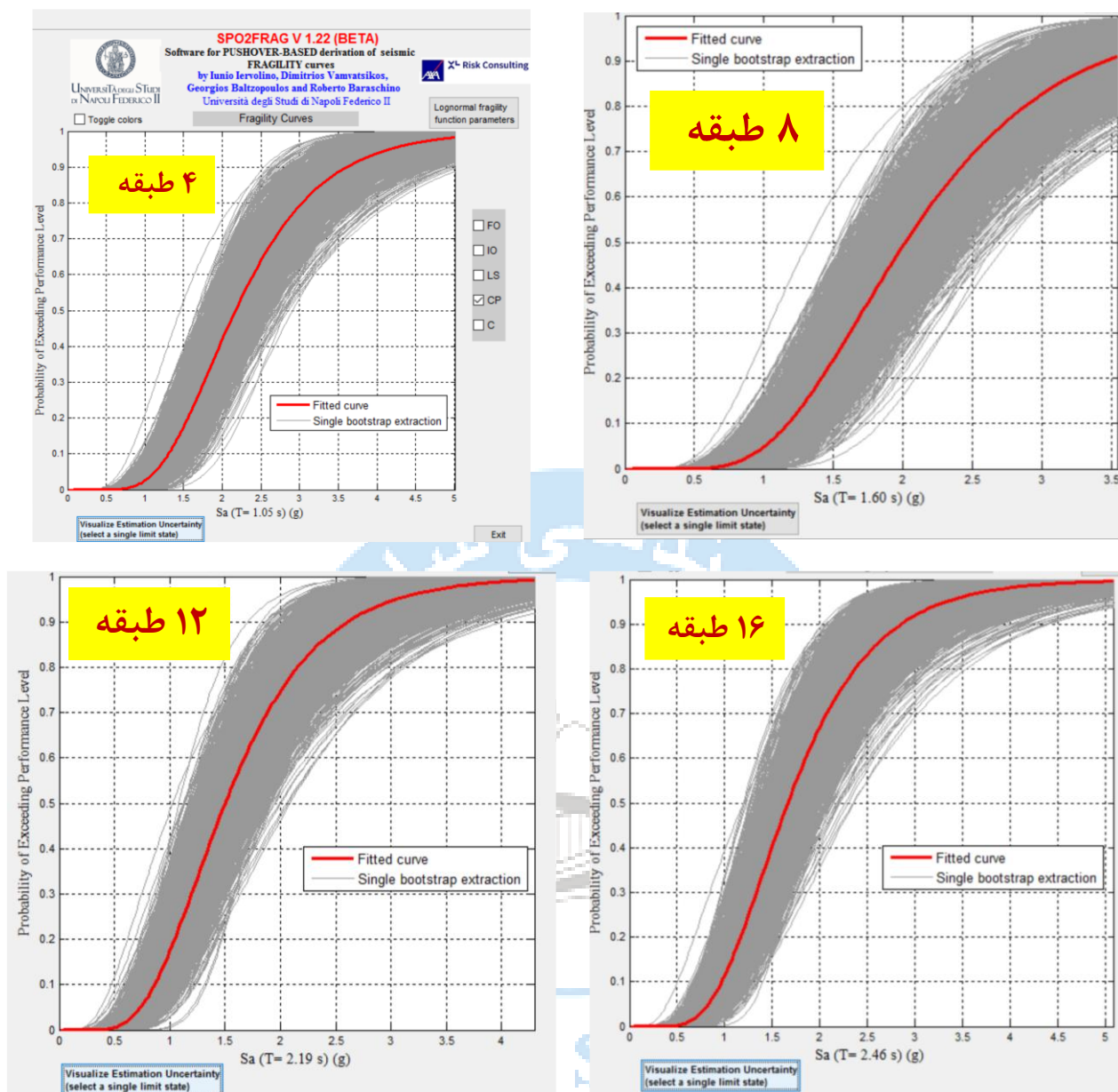


شکل ۸: منحنی پوش اور سازه‌های مختلف

۷- نتایج منحنی شکنندگی از طریق SPO2FRAG

منحنی شکنندگی ابزاری کارآمد برای برآورد احتمال وقوع خرابی‌های مشخص در اثر زلزله با شدت‌های مختلف است. این منحنی، رابطه بین شدت لرزه و میزان خرابی احتمالی را به تصویر می‌کشد [۲۱].

برای استخراج منحنی شکنندگی از طریق SPO2FRAG، در ابتدا منحنی پوش اور قاب‌های معرفی شده در بخش قبل، به عنوان ورودی برای SPO2FRAG استفاده می‌شود. مراحل انجام کار در بخش ۲ به طور کامل تشریح شده است. در این پژوهش سازه‌ها در سطح عملکردی آستانه فروریزش به کمک دو روش استخراج منحنی شکنندگی با همدیگر مقایسه خواهند شد. بنابراین در شکل ۹ منحنی شکنندگی سازه‌ها در این سطح نشان داده شده است. معیار دریافت آستانه فروریزش در SPO2FRAG، دریافتی در منحنی‌های IDA حاصل از این ابزار است که این منحنی شروع به تبدیل شدن به خطی صاف می‌کند.



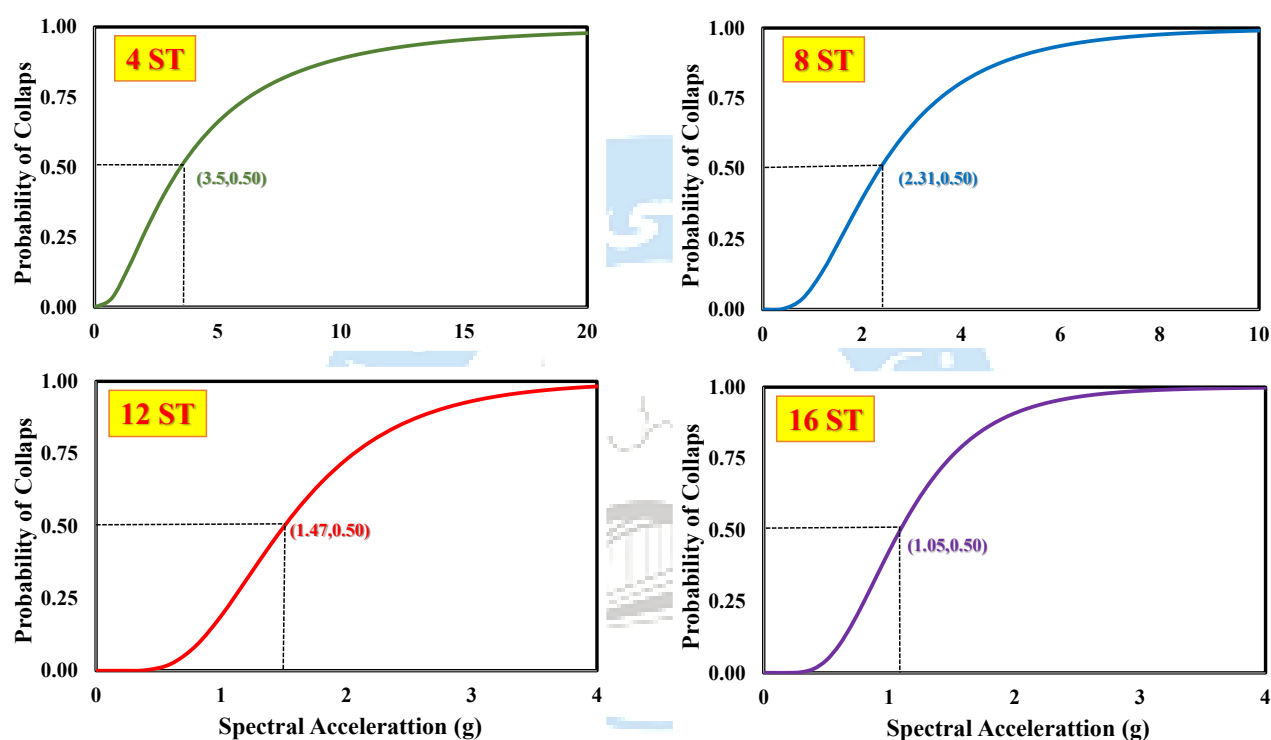
شکل ۹: منحنی شکنندگی سازه‌های مختلف در سطح فروریزش با SPO2FRAG

۸- نتایج منحنی شکنندگی با استفاده از تحلیل IDA

روش IDA شامل انجام یک سری تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی بر روی هر رکورد لرزه‌ای، به منظور تعیین دقیق دامنه کامل پاسخ‌های سازه‌ای است. در این تحقیق هدف اصلی این تحلیل‌ها محاسبه ظرفیت میانه فروریزش سازه‌ها (\hat{S}_{CT}) بوده تا نتایج این روش دقیق، به راحتی و به صورت کمی با نتایج روش تقریبی SPO2FRAG قابل مقایسه باشد. \hat{S}_{CT} سطح شدتی را نشان می‌دهد که در آن بیش از نیمی از رکوردهای لرزه‌ای منجر به فروریزش یک سازه می‌شود و برای هر مدل با استفاده از منحنی‌های شکنندگی که برای حالت دقیق و بر اساس نتایج IDA می‌تواند محاسبه گردد. به منظور تحلیل IDA، از ۴۴ رکورد حوزه دور منفرد (۲۲ جفت) که توسط FEMA P695 پیشنهاد گردیده استفاده شده است [۲۲]. تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی بر روی هر مدل با استفاده از رکوردهای لرزه‌ای انجام شد که به صورت خطی تا زمانی که نشانه‌هایی از فروریزش سازه آشکار شد، مقیاس بندی شدند. در مجموع بیش از ۲۵۰۰ تحلیل بر روی چهار

مدل موجود انجام شد. منحنی‌های IDA رابطه بین شدت طیفی حرکات زمین (به عنوان اندازه‌گیری شدت $(IM)^5$) در محور عمودی و حداکثر دررفت بین طبقه (به عنوان پارامتر تقاضای مهندسی (EDP)) در محور افقی را نشان می‌دهند [۲۲]. منحنی‌های IDA به دست آمده، شامل صدک‌های ۱۶، ۵۰ و ۸۴ درصد در شکل ۱۱ برای همه مدل‌ها ارائه شده‌اند. همچنین در این شکل منحنی‌های IDA حاصل از SPO2FRAG به منظور مقایسه دو روش ارائه شده است.

نقطه فروریزش به عنوان آستانه‌ای است که در آن شدت حرکت زمین باعث بیشینه دررفت بین طبقه‌ای 10^{-6} می‌شود یا زمانی که مماس موضعی منحنی IDA به ۲۰٪ شیب الاستیک نزدیک می‌گردد [۱۳]. در تحلیل‌های این پژوهش از هر دوی این معیارها به عنوان نقاط فروریزش استفاده شده است که شاخصی برای تعیین محدوده‌ی خرابی و شکست برای ترسیم منحنی شکنندگی در سطح فروریزش قرار می‌گیرند. در شکل ۱۰، منحنی شکنندگی سازه‌ها در سطح فروریزش به کمک روش دقیق IDA استخراج شده است.



شکل ۱۰: منحنی شکنندگی سازه‌های مختلف در سطح فروریزش به کمک روش دقیق IDA

۹- مقایسه نتایج حاصل از دو روش

در شکل ۱۱، منحنی‌های IDA برای صدک‌های ۱۶٪، ۵۰٪ و ۸۴٪ که از دو روش استخراج شده‌اند، تفاوت‌ها و شباهت‌هایی را در پیش‌بینی رفتار لرزه‌ای سازه‌های ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ طبقه نشان می‌دهند.

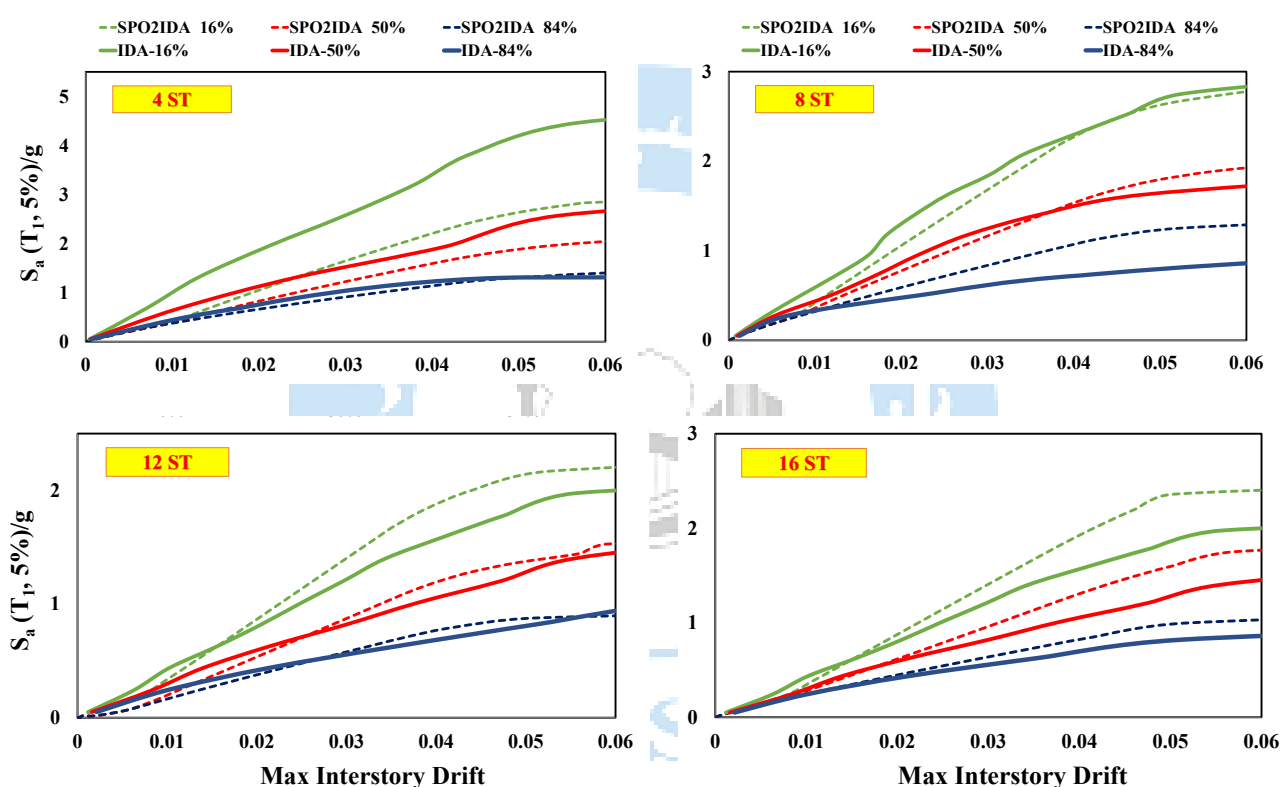
در سازه ۴ طبقه، صدک‌های حاصل از روش SPO2FRAG معمولاً کمتر از IDA برآورد شده‌اند. این رفتار محافظه‌کارانه احتمالاً به دلیل غالب بودن رفتار مود اول و پاسخ‌های ساده‌تر غیرخطی در سازه‌های کوتاه است، جایی که ظرفیت ظرفیت پایین‌تری را ارائه می‌دهد. در مقابل در سازه‌های بلندتر، به‌ویژه ۱۶ طبقه، صدک‌های SPO2FRAG بیشتر از IDA برآورد شده‌اند. این تفاوت بیشتر به پیچیدگی‌های دینامیکی سازه‌های بلند و تأثیر موده‌های بالاتر و محدودیت‌های روش پوش‌آور در مدل‌سازی دقیق رفتار غیرخطی مربوط می‌شود.

⁵ Intensity Measures

⁶ Maximum inter-story drift

در صدک ۵۰٪، انطباق نسبتاً خوبی بین دو روش برای سازه‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه مشاهده می‌شود. این انطباق نشان می‌دهد که SPO2FRAG در پیش‌بینی رفتار میانه، به‌ویژه برای سازه‌هایی که رفتار دینامیکی پیچیدگی کمتری دارند، عملکرد قابل قبولی دارد. با این حال، برای سازه ۱۶ طبقه، انحراف صدک ۵۰٪ در روش SPO2FRAG نسبت به IDA نشان‌دهنده آن است که این روش نتوانسته است به درستی تأثیر مودهای بالاتر و توزیع پیچیده‌تر تغییرشکل‌ها را لحاظ کند. این موضوع نشان‌دهنده تمایل این روش به ارائه پیش‌بینی خوش‌بینانه‌تر در سازه‌های بلندمرتبه است. این رفتار می‌تواند خطرناک باشد زیرا این برآورد بیش از حد ممکن است منجر به تصمیم‌گیری‌های غیرایمن شود.

به طور کلی، این تحلیل نشان می‌دهد که روش SPO2FRAG برای پیش‌بینی صدک‌های رفتار سازه‌های کوتاه و میان‌مرتبه عملکرد مناسبی دارد، اما در سازه‌های بلند، نتایج آن به دلیل ساده‌سازی‌های انجام شده در فرآیند مدل‌سازی ممکن است دچار انحراف‌های قابل توجه و غیر ایمن گردد.



شکل ۱۱: مقایسه منحنی IDA حاصل از دو روش

مقایسه بین مقادیر ظرفیت میانه فروریزش حاصل از دو روش استخراج منحنی شکنندگی تولید شده توسط SPO2FRAG و IDA، در شکل ۱۲ و جدول ۶ ارائه شد. منحنی شکنندگی حاصل از این دو روش به ترتیب در بخش‌های ۷ و ۸ ارائه شده بود. اختلاف درصد مثبت نشان دهنده بیش از حد برآورد کردن ظرفیت میانه فروریزش توسط روش تقریبی SPO2FRAG نسبت به روش IDA خواهد بود، در حالی که اختلاف درصد منفی نمادی از محافظه‌کارانه بودن روش SPO2FRAG است.

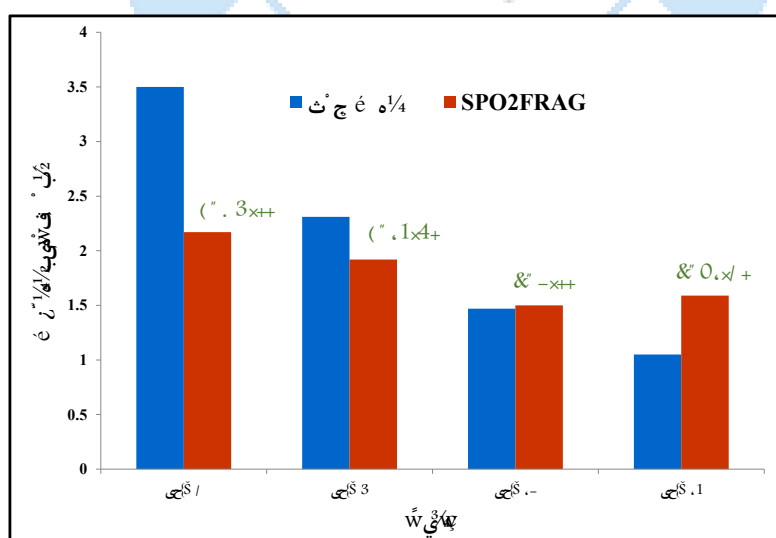
نتایج نشان می‌دهد که SPO2FRAG در برخی موارد (بسته به ارتفاع سازه)، ممکن است نتایجی محافظه‌کارانه یا برعکس، خوش‌بینانه ارائه دهد. روش SPO2FRAG برای سازه‌های ۴ و ۸ طبقه مقادیر ظرفیت میانه فروریزش را به صورت محافظه‌کارانه تخمین زده است در حالیکه هرچه سازه مرتفع‌تر می‌شود تخمین این نرم‌افزار دست بالا خواهد بود.

در سازه‌های کوتاه مرتبه (مانند ۴ طبقه)، روش SPO2FRAG ظرفیت میانه فروریزش را کمتر از روش دقیق IDA برآورد می‌کند. از آنجا که SPO2FRAG به رفتار مود اول وابسته است و از تقریب‌های ساده‌تری برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی استفاده می‌کند، نتایج آن ممکن است محافظه‌کارانه باشد. در مقابل، روش IDA که تحلیل دینامیکی جامع‌تری را ارائه می‌دهد، می‌تواند ظرفیت واقعی را بهتر مدل‌سازی کرده و مقادیر بیشتری برای ظرفیت میانه فروریزش تخمین بزند.

در سازه‌های میان مرتبه (مانند ۱۲ طبقه)، نتایج حاصل از دو روش بسیار به یکدیگر نزدیک است. در این نوع سازه‌ها، رفتار دینامیکی همچنان تا حد زیادی تحت تأثیر مود اول است، اما مودهای بالاتر نیز به طور محدود وارد پاسخ سازه می‌شوند. این تعادل در رفتار دینامیکی باعث می‌شود که تحلیل پوش‌آور (SPO2FRAG) بتواند عملکرد مناسبی از خود نشان دهد و نتایجی نزدیک به روش دقیق IDA ارائه دهد. در این حالت، پیچیدگی رفتار غیرخطی به حدی نیست که روش SPO2FRAG دقت خود را از دست بدهد و این روش می‌تواند به عنوان جایگزینی مناسب برای IDA در سازه‌های میان مرتبه استفاده شود.

در سازه‌های بلندمرتبه (مانند ۱۶ طبقه)، اختلاف قابل توجهی بین نتایج دو روش مشاهده می‌شود. در این حالت، SPO2FRAG ظرفیت میانه فروریزش را بیشتر از روش IDA تخمین می‌زند. این اختلاف به دلیل پیچیدگی‌های رفتاری است که در سازه‌های بلند بروز می‌کند. در این نوع سازه‌ها، مودهای لرزه‌ای بالاتر و اندرکنش‌های پیچیده بین آن‌ها نقش قابل توجهی در پاسخ دینامیکی دارند. از طرفی، رفتار غیرخطی اعضای سازه، مانند کمانش موضعی، کاهش سختی و اندرکنش نیروهای محوری و برشی، پیچیده‌تر از آن است که بتوان آن را با تحلیل پوش‌آور شبیه‌سازی کرد. SPO2FRAG به دلیل استفاده از منحنی پوش‌آور ساده‌شده، قادر به مدل‌سازی دقیق این رفتارها نیست و ظرفیت فروریزش را خوش‌بینانه تخمین می‌زند، در حالی که روش IDA به دلیل شبیه‌سازی جامع دینامیکی، ظرفیت واقعی‌تری ارائه می‌دهد.

به طور کلی، می‌توان گفت روش SPO2FRAG برای سازه‌های کوتاه و میان مرتبه، به دلیل ساده‌تر بودن رفتار دینامیکی و وابستگی کمتر به مودهای بالاتر، می‌تواند نتایج قابل اعتماد و ایمن‌تری ارائه دهد. اما در سازه‌های بلندمرتبه که رفتار دینامیکی پیچیده‌تر است و اثر مودهای بالاتر اهمیت بیشتری پیدا می‌کند، استفاده از روش‌های دقیق‌تری مانند IDA برای جلوگیری از برآورد بیش از حد ظرفیت ضروری است. این نتایج تأکید می‌کنند که انتخاب روش تحلیل باید با توجه به نوع سازه، ارتفاع آن و نیاز به دقت در ارزیابی ظرفیت سازه انجام شود.



شکل ۱۲: نمودار مقادیر ظرفیت میانه فروریزش حاصل از دو روش

جدول ۶: مقایسه بین مقادیر ظرفیت میانه فروریزش حاصل از دو روش

۱.۰۵	۱.۴۷	۲.۳۱	۳.۵۰	روش دقیق
۱.۵۹	۱.۵۰	۱.۹۲	۲.۱۷	SPO2FRAG
+۵۱.۴۰	+۲۰.۰۰	-۱۶.۹۰	-۳۸.۰۰	درصد اختلاف

۱۰- خلاصه و نتیجه گیری

این پژوهش به منظور ارزیابی دقت و کارایی نرم افزار SPO2FRAG در پیش بینی ظرفیت فروریزش سازه های دیوار برشی فولادی و تاثیر ارتفاع بر نتایج حاصل از آن انجام شد. در این مطالعه، مدل عددی سازه ها با نمونه آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده و سپس سازه هایی با ارتفاع های مختلف (۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ طبقه) با استفاده از MATLAB و OpenSees طراحی شدند. منحنی های شکنندگی این سازه ها با دو روش SPO2FRAG و تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA) استخراج و مقایسه گردید. بر اساس تحلیل نتایج و نمودارها، مهم ترین یافته های این پژوهش به شرح زیر است:

- ۱- روش SPO2FRAG به عنوان جایگزینی برای IDA، به طور چشم گیری هزینه و زمان محاسبات را کاهش می دهد. این موضوع به ویژه در پروژه هایی با منابع محدود یا نیاز به ارزیابی سریع، مزیت بزرگی محسوب می شود.
- ۲- در سازه های ۴ و ۸ طبقه، نتایج روش SPO2FRAG محافظه کارانه تر از روش دقیق IDA است. برای مثال، در سازه های ۴ طبقه، ظرفیت میانه فروریزش تخمین زده شده توسط SPO2FRAG تا ۳۸ درصد کمتر از IDA است. این رفتار محافظه کارانه ناشی از تسلط مود اول و سادگی رفتار غیرخطی در سازه های کوتاه است.
- ۳- در سازه های میان مرتبه (۱۲ طبقه)، اختلاف نتایج دو روش ناچیز بوده و SPO2FRAG دقت قابل قبولی دارد.
- ۴- با افزایش ارتفاع سازه، دقت نتایج SPO2FRAG کاهش می یابد. در سازه ۱۶ طبقه، ظرفیت میانه فروریزش تخمین زده شده توسط SPO2FRAG، ۵۱/۴۰ درصد بیشتر از مقدار محاسبه شده با IDA است. این اختلاف ناشی از پیچیدگی های دینامیکی در سازه های بلند، تأثیر مودهای بالاتر و محدودیت های روش پوش آور در مدل سازی رفتار غیرخطی است.
- ۵- در سازه های ۱۶ طبقه، روش SPO2FRAG به طور چشم گیری صدک ۵۰٪ را بیش از حد برآورد کرده است، که می تواند به تصمیم گیری های غیرایمن منجر شود. این موضوع تأکید می کند که استفاده از روش های دقیق تر برای سازه های بلندمرتبه ضروری است.
- ۶- برای سازه های بلندتر از ۱۲ طبقه یا در پروژه هایی با اهمیت بالا، استفاده از روش دقیق IDA توصیه می شود. این روش می تواند رفتار دینامیکی پیچیده تر، تأثیر مودهای بالاتر و اندرکنش های غیرخطی را بهتر مدل سازی کند.

بنابراین این پژوهش در یک نتیجه گیری کلی نشان داد که نرم افزار SPO2FRAG می تواند به عنوان روشی سریع و کم هزینه در تحلیل لرزه ای سازه های کوتاه و میان مرتبه مورد استفاده قرار گیرد. با این حال، در سازه های بلند، دقت این نرم افزار کاهش یافته و استفاده از روش های دقیق تری نظیر IDA ضروری است. بدیهی است که تمامی نتایج به دست آمده در این مقاله، مشروط به فرضیات و پارامترهای مندرج در این پژوهش می باشد و هر گونه تغییر در این عوامل ممکن است منجر به نتایج متفاوتی شود که نیاز به بررسی بیشتر توسط محققان در مطالعات آینده دارد. انجام مطالعات بیشتر برای ارزیابی عملکرد نرم افزار SPO2FRAG در انواع دیگر سازه ها و سطوح مختلف عملکردی توصیه می شود.

مراجع

[1] FEMA P695. (2009). *Quantification of building seismic performance factors*. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency.

- [2] Ren, Y., Ma, D., Wang, W., Guo, X., Wang, Z., Chen, D., Wu, J., Fei, Z. and Zhao, X. (2024), Application of SPO2IDA in Seismic Performance Evaluation of Ancient Timber Structures. *International Journal of Architectural Heritage*, 18(8), 1308-1322. <https://doi.org/10.1080/15583058.2023.2221215>
- [3] Baltzopoulos, G., Baraschino, R., Iervolino, I. and Vamvatsikos, D. (2017), SPO2FRAG: software for seismic fragility assessment based on static pushover. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15, 4399-4425. <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0145-3>
- [4] Dehviri, A.G. (2024), Fragility Analysis of Building Frames with Buckling Resistance Braces Using Incremental Dynamic Analysis Based on Pushover Curve. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 11(3). <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.405003.3164>
- [5] Shanehsazzadeh, H., Tehranizadeh, M. and Haj Najafi, L. (2023), Evaluation of the Collapse Capacity Ratio of the Near Fault to the Far Fault and Its Effect on Collapse Risk in Terms of Pulse Period and Formability. *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, 10(3), 31-48. <https://doi.org/10.48303/bese.2022.557180.1085>
- [6] Yekrangnia, M. (2023), Seismic Vulnerability Assessment of Masonry Residential Buildings in the Older Parts of Tehran through Fragility Curves and Basic RVS Scores. *Buildings*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/buildings13020302>
- [7] Kaveh, A., Mahdipour Moghanni, R. and Javadi, S.M. (2022), Chaotic optimization algorithm for performance-based optimization design of composite moment frames. *Engineering with Computers*, 38(3), 2729-2741. <https://doi.org/10.1007/s00366-020-01244-z>
- [8] Ugalde, D., Lopez-Garcia, D. and Parra, P.F. (2020), Fragility-based analysis of the influence of effective stiffness of reinforced concrete members in shear wall buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18(5), 2061-2082. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00786-3>
- [9] Sococol, I., Mihai, P., Petrescu, T.-C., Nedeff, F., Nedeff, V., Agop, M. and Luca, B.-I. (2022), Numerical Study Regarding the Seismic Response of a Moment-Resisting (MR) Reinforced Concrete (RC) Frame Structure with Reduced Cross-Sections of the RC Slabs. *Buildings*, 12(10), 1525. <https://doi.org/10.3390/buildings12101525>
- [10] Nazri, F.M., Yern, K.C., Kassem, M.M. and Noroozinejad Farsangi, E. (2018), Assessment of structure-specific fragility curves for soft storey buildings implementing IDA and SPO approaches. *International Journal of Engineering. Transactions C: Aspects*, 2016-2021.
- [11] Kashefzadeh, M.H., Azimzadeh Koocheh, M., Amiri, B. and Esmailabadi, R. (2018), Steel Plate Shear Wall with Different Infill Steel Plates. *Computational Engineering and Physical Modeling*, 1(3), 1-14. 10.22115/cepm.2018.118244.1011
- [12] Bakhshi, H., Khosravi, H. and Ghodduzi, M. (2019), Evaluation of Seismic Behavior of Steel Shear Wall by Time History Analysis. *Computational Engineering and Physical Modeling*, 2(1), 38-55. 10.22115/cepm.2019.160278.1055
- [13] Arezoomand Langarudi, P., Adibramezani, M., Hojatkashani, A. and Farokhzadeh, S. (2024), Effect of Design Optimality and Overstrength on the Seismic Performance of Steel Plate Shear Walls. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s40996-024-01513-7>
- [14] Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M.H. and Fenves, G. (2004), OpenSees users manual. PEER, University of California, Berkeley, 18, 56-57.
- [15] ANSI/AISC 341-22. (2022). *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*. Chicago (IL): American Institute for Steel Construction.
- [16] Fakharian, P., Naderpour, H., Sharbatdar, M.K. and Ghasemi, S.H. (2024), Advancements in structural target reliability: A comprehensive examination of theories and practical applications (2013-2024). *Structures*, 66, 106930. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106930>
- [17] Sabouri-Ghomi, S. and Sajjadi, S.R.A. (2012), Experimental and theoretical studies of steel shear walls with and without stiffeners. *Journal of Constructional Steel Research*, 75, 152-159. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.03.018>
- [18] Moradnezhad, B., Oghabi, M., TahamouliRoudsari, M. and Movahednia, M. (2023), Development of a new computational method based on truss elements to investigate the nonlinear static behavior of steel shear walls. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 10(5), 144-166. <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.344008.2827>

- [19] Jalali, S.A. and Banazadeh, M. (2016), Development of a new deteriorating hysteresis model for seismic collapse assessment of thin steel plate shear walls. *Thin-Walled Structures*, 106, 244-257. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.05.008>
- [20] ASCE/SEI 7-22. (2022). *Minimum design loads for buildings and other structures*. Reston: American Society of Civil Engineering.
- [21] Moula Hoveizeh, M., Emami, F. and Mansoori, m.R. (2023), Seismic vulnerability evaluation of trapezoidally Corrugated Steel Shear Walls under near-and far-fault earthquakes using fragility curves. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 10(5), 108-128. <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.352015.2877>
- [22] Asadi, a., Tajammolian, H. and Forotani, A. (2021), Seismic Assessment of Corrugated Steel Shear Walls with Different Configurations Based on Fragility Curves. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(10), 164-184. <https://doi.org/10.22065/jsce.2020.206152.1982>

