

Assessing the Height-Dependency of SPO2FRAG Accuracy in Estimating the Collapse Capacity of Steel Plate Shear Wall

Pooya Arezoomand Langarudi

Department of Civil Engineering, ST.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran
Mohammadreza Adibramezani *

Department of Civil Engineering, ST.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran
Ata Hojatkashani

Department of Civil Engineering, ST.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran
Saeed Farokhizadeh

Department of Civil Engineering, ST.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran
mr_adib@iau.ac.ir

Keywords:

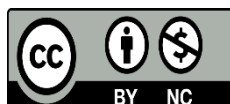
Steel plate shear wall,
Collapse capacity,
Incremental dynamic
analysis (IDA),
Higher-mode effects,
SPO2FRAG,
Performance-based
assessment

Abstract

Methods based on nonlinear static analysis, such as the one implemented in the SPO2FRAG tool, have been introduced as rapid alternatives to Incremental Dynamic Analysis (IDA) for evaluating the collapse capacity of structures. However, the validity and accuracy of these approximate methods, especially for structural systems of varying heights, remain an active area of research. This study specifically investigates the dependency of SPO2FRAG's accuracy on building height for Steel Plate Shear Wall (SPSW) systems. To this end, four SPSW structures of 4, 8, 12, and 16 stories were designed according to seismic design codes. The median collapse capacity of these structures was computed using two approaches: (1) the accurate IDA method, utilizing 22 pairs of far-field ground motion records, and (2) the approximate SPO2FRAG method. The results demonstrate that the accuracy of SPO2FRAG is strongly influenced by building height. While the method provides conservative results for low-rise buildings (4 and 8 stories), it yields non-conservative and significantly overestimated collapse capacities (by over 50%) for the high-rise (16 story) structure. This discrepancy is attributed to the method's inability to capture the significant contribution of higher modes of vibration in tall buildings. This finding underscores that while SPO2FRAG is a useful tool for the preliminary assessment of low-rise structures, its application to high-rise buildings is not recommended as it can lead to unreliable and unsafe estimations by failing to account for complex dynamic responses.

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 بین‌المللی کپی‌رایت Creative Commons: BY-NC است.



* Corresponding Author

بررسی وابستگی دقت روش SPO2FRAG به ارتفاع سازه در تخمین ظرفیت فروریزش دیوارهای برشی فولادی

پویا آرزومند امیدی لنگرودی

گروه مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
محمدرضا ادیب رمضانی*

گروه مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
عطا حجت کاشانی

گروه مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
سعید فرخی زاده

گروه مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

mr_adib@iau.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۲۰ آذر ۱۴۰۳

تاریخ دریافت: ۲۲ مرداد ۱۴۰۳

چکیده

روش های مبتنی بر تحلیل استاتیکی غیرخطی، مانند آنچه در ابزار SPO2FRAG پیاده سازی شده، به عنوان جایگزینی سریع برای تحلیل دینامیکی فزاینده (IDA) جهت ارزیابی ظرفیت فروریزش سازه ها معرفی شده اند. با این حال، دامنه اعتبار و دقت این روش های تقریبی، به ویژه برای سیستم های سازه ای با ارتفاع های متفاوت، همچنان یک حوزه فعال پژوهشی است. این مطالعه به طور خاص، وابستگی دقت برآوردهای SPO2FRAG به ارتفاع سازه را در سیستم دیوار برشی فولادی (SPSW) ارزیابی می کند. برای این منظور، چهار سازه ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ طبقه با سیستم SPSW مطابق با ضوابط طراحی لرزه ای طراحی شدند. ظرفیت میانه فروریزش این سازه ها یک بار از طریق تحلیل دقیق IDA با استفاده از ۲۲ جفت رکورد زلزله حوزه دور و بار دیگر با روش تقریبی SPO2FRAG محاسبه گردید. نتایج نشان می دهد که دقت SPO2FRAG به شدت تحت تأثیر ارتفاع سازه است. این روش برای سازه های کوتاه مرتبه (۴ و ۸ طبقه) نتایجی محافظه کارانه ارائه می دهد، اما برای سازه بلندمرتبه (۱۶ طبقه) با نادیده گرفتن اثرات مودهای بالاتر، ظرفیت فروریزش را به شکلی غیر محافظه کارانه و قابل توجه (بیش از ۵۰٪) بیش از مقدار حاصل از تحلیل دقیق برآورد می کند. این یافته تأکید می کند که اگرچه SPO2FRAG ابزار مفیدی برای ارزیابی اولیه سازه های کوتاه است، اما کاربرد آن برای سازه های بلند به دلیل عدم توانایی در ثبت پاسخ دینامیکی پیچیده، توصیه نمی شود و می تواند به نتایج غیرقابل اطمینان منجر شود.

کلیدواژه ها: دیوار برشی فولادی، ظرفیت فروریزش، تحلیل دینامیکی فزاینده (IDA)، اثر مودهای بالاتر، PO2FRAG، ارزیابی عملکردی

۱- مقدمه

ارزیابی دقیق ظرفیت فروریزش لرزه‌ای سازه‌ها، یکی از ارکان اصلی مهندسی زلزله مبتنی بر عملکرد است که در دستورالعمل‌های معتبری چون FEMA^۱ P695 به آن پرداخته شده است [۱]. 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. روش معیار برای این ارزیابی، تحلیل دینامیکی فزاینده (IDA) است که با وجود دقت بالا، فرآیندی بسیار زمان‌بر و پرهزینه از نظر محاسباتی است. این چالش، جامعه مهندسی را به سمت توسعه روش‌های تقریبی سوق داده است که بر پایه تحلیل استاتیکی غیرخطی (بارافزون)^۲ استوار هستند.

ایده اصلی این روش‌های تقریبی، برقراری ارتباط بین پارامترهای منحنی بارافزون یک سازه چند درجه آزاد با پاسخ دینامیکی سیستم تک درجه آزاد (SDOF)^۴ معادل آن است. یکی از برجسته‌ترین تلاش‌ها در این زمینه، روش SPO2IDA^۵ است که مجموعه‌ای از معادلات تجربی را برای تخمین منحنی‌های IDA از روی منحنی بارافزون ارائه می‌دهد [۲]. این رویکرد، پایه و اساس ابزار SPO2FRAG^۶ را تشکیل می‌دهد که به کاربر اجازه می‌دهد منحنی‌های شکنندگی را برای حدود عملکردی مختلف به سرعت تولید کند [۳].

بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که نرم‌افزار SPO2FRAG به‌عنوان ابزاری برای ارزیابی سریع عملکرد لرزه‌ای در سیستم‌های سازه‌ای مختلف، به‌ویژه سازه‌های بتنی و بنایی، مورد استفاده قرار گرفته است. در جدول ۱، خلاصه‌ای از کاربردهای شاخص این نرم‌افزار در تحقیقات پیشین ارائه شده است تا زمینه و چارچوب پژوهش حاضر روشن‌تر گردد.

جدول ۱- خلاصه‌ای از مطالعات پیشین در زمینه کاربرد SPO2FRAG

محقق (مرجع)	سیستم سازه‌ای	تعداد طبقات	هدف اصلی پژوهش / یافته کلیدی
سوکول و همکاران ^۷ [۴]	قاب خمشی بتن مسلح	۲	استفاده از SPO2FRAG صرفاً برای دو خطی‌سازی منحنی بار افزون.
شانه‌ساززاده و همکاران [۵]	قاب بتن آرمه	۱۲	برآورد ظرفیت فروریزش به‌عنوان جایگزین IDA به کمک SPO2FRAG
کاوه و همکاران [۶]	قاب خمشی مرکب	۸ و ۲۰	بهینه‌سازی مبتنی بر عملکرد و تولید منحنی‌های IDA تقریبی به کمک SPO2FRAG
اوگالده و همکاران ^۸ [۷]	ساختمان‌های بتن مسلح	۱۷ و ۲۶	ارزیابی عملکرد و دستیابی به منحنی‌های شکنندگی به کمک SPO2FRAG
یکرنگ‌نیا [۸]	ساختمان‌های بنایی مسکونی	۲	استخراج منحنی شکنندگی بدون نیاز به تحلیل IDA به کمک SPO2FRAG
ناظری و همکاران ^۹ [۹]	قاب خمشی بتن مسلح (منظم و طبقه نرم)	۵ و ۱۱	دقت SPO2FRAG برای سازه کوتاه مرتبه (۵ طبقه) قابل قبول ولی برای سازه بلندتر (۱۱ طبقه) ضعیف است.

مرور پژوهش‌های پیشین (جدول ۱) دو نکته کلیدی را آشکار می‌سازد. اولاً، علی‌رغم کاربرد نرم‌افزار برای سازه‌های بتنی و بنایی، ارزیابی جامع آن برای سیستم دیوار برشی فولادی (SPSW) که رفتار غیرخطی و شکل‌پذیری منحصربه‌فردی دارد، یک حوزه کمتر شناخته شده باقی‌مانده است. ثانیاً، نتایج متناقضی مانند مطالعه ناظری و همکاران [۹] بر روی قاب‌های بتنی، یک پرسش بنیادین را مطرح می‌کند: آیا دقت روش‌های تقریبی مبتنی بر بارافزون با افزایش ارتفاع سازه، و در نتیجه افزایش اهمیت مودهای بالاتر، تغییر می‌کند؟

پژوهش حاضر ضمن پاسخ به این پرسش در حوزه دیوارهای برشی فولادی، یک گام فراتر می‌رود. این مطالعه صرفاً به مقایسه نتایج نمی‌پردازد، بلکه به دنبال تحلیل ریشه فیزیکی و کمی‌سازی میزان اختلاف است؛ بنابراین، نوآوری اصلی این پژوهش در دو حوزه تعریف می‌شود:

^۱ Federal Emergency Management Agency^۲ Incremental Dynamic Analysis^۳ Pushover Analysis^۴ Single Degree of Freedom^۵ Static PushOver to Incremental Dynamic Analysis^۶ Static PushOver to FRAGility^۷ Sococol et al.^۸ Ugalde et al.^۹ Nazri et al.

۲-۱-۱- مجموعه رکوردهای زلزله و شاخص‌های تحلیل

به منظور انجام تحلیل دینامیکی فزاینده (IDA) و ارزیابی آماری ظرفیت فروریزش سازه‌ها، انتخاب یک مجموعه مناسب از حرکات لرزه‌ای زمین ضروری است. در این پژوهش، از مجموعه رکوردهای استاندارد توصیه شده برای تحلیل‌های حوزه دور^{۱۱} در دستورالعمل FEMA P695 [۸] استفاده گردید. این مجموعه شامل ۲۲ جفت مؤلفه افقی (مجموعاً ۴۴ رکورد) است که از پایگاه داده معتبر PEER-NGA استخراج شده‌اند.

معیار اصلی در انتخاب این رکوردها، فقدان مشخصه‌های پالس سرعت بارز است که مشخصه اصلی حرکات لرزه‌ای حوزه دور در نظر گرفته می‌شود. اگرچه به عنوان یک قاعده کلی، رکوردهای حوزه دور اغلب دارای فاصله گسیختگی (R_{jb}) بزرگتر از ۱۰ کیلومتر هستند، اما در این مجموعه استاندارد، چند رکورد با فاصله کمتر نیز وجود دارند که به دلیل عدم نمایش رفتار پالسی، در مجموعه گنجانده شده‌اند.

این رکوردها در مجموع از ۱۴ رخداد لرزه‌ای منحصربه‌فرد با بزرگای گشتاوری (M_w) در بازه ۶/۵ تا ۷/۶ انتخاب شده‌اند. برای پوشش‌دهی تنوع مکانیزم‌های لرزه‌ای، رکوردهایی از هر دو نوع گسل امتدادلغز^{۱۲} و رانشی/معکوس^{۱۳} در این مجموعه گنجانده شده‌اند. همچنین، سرعت موج برشی میانگین در ۳۰ متر بالای زمین (V_{s30}) در محل ۲۲ ایستگاه، بازه گسترده‌ای از شرایط خاک (عمدتاً کلاس C و D) را نمایندگی می‌کند. مشخصات کلیدی هر یک از ۲۲ جفت رکورد مورد استفاده، شامل بزرگا، فاصله گسیختگی و مقادیر بیشینه شتاب و سرعت زمین، در جدول ۲ ارائه شده است.

- ارزیابی کارایی SPO2FRAG برای سیستم SPSW در ارتفاع‌های مختلف که تاکنون کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است.

- تحلیل ریشه فیزیکی وابستگی دقت این روش به ارتفاع سازه. برای این منظور، با استفاده از تحلیل مودال، سهم مودهای بالاتر در پاسخ دینامیکی سازه‌ها کمی‌سازی شده و ارتباط آن با کاهش دقت SPO2FRAG در سازه‌های بلندمرتبه به صورت مستدل نشان داده می‌شود.

برای دستیابی به این اهداف، ابتدا چهار سازه ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ طبقه با سیستم دیوار برشی فولادی مطابق با ضوابط معتبر طراحی می‌شوند. سپس، با استناد به مدل‌سازی اعتبارسنجی شده توسط نویسندگان در مطالعات پیشین [۱۰]، منحنی‌های شکنندگی فروریزش با دو روش استخراج می‌گردند: (۱) روش دقیق تحلیل دینامیکی فزاینده (IDA) به عنوان معیار، و (۲) روش تقریبی SPO2FRAG. در نهایت، مقایسه کمی و کیفی نتایج به ما اجازه می‌دهد تا در خصوص قابلیت اطمینان این ابزار و ارائه نتایج محافظه کارانه یا غیرمحافظه کارانه توسط آن برای ارتفاع‌های گوناگون در سیستم SPSW، نتیجه‌گیری مستدل و کاربردی ارائه دهیم.

۲- روش‌شناسی ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای

در این پژوهش، ارزیابی آسیب‌پذیری و استخراج منحنی‌های شکنندگی فروریزش برای سازه‌های دیوار برشی فولادی با استفاده از دو رویکرد انجام شده است: (۱) روش دقیق مبتنی بر تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA) و (۲) روش تقریبی مبتنی بر تحلیل استاتیکی غیرخطی (SPO2FRAG). در ادامه، هر یک از این روش‌ها تشریح می‌گردد.

۲-۱- روش دقیق: ارزیابی ظرفیت فروریزش با تحلیل دینامیکی فزاینده (IDA)

برای محاسبه دقیق ظرفیت فروریزش سازه‌ها، از روش تحلیل دینامیکی فزاینده (IDA) که توسط وامواتسیکوس و کرنل^{۱۰} [۱۱] ارائه شده، استفاده گردید. این فرآیند شامل تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی متعدد تحت مجموعه‌ای از رکوردهای زلزله است که شدت آن‌ها به صورت فزاینده افزایش می‌یابد تا دامنه کامل رفتار سازه، از حالت الاستیک تا فروریزش کامل، مشخص گردد.

¹¹ Far-Field

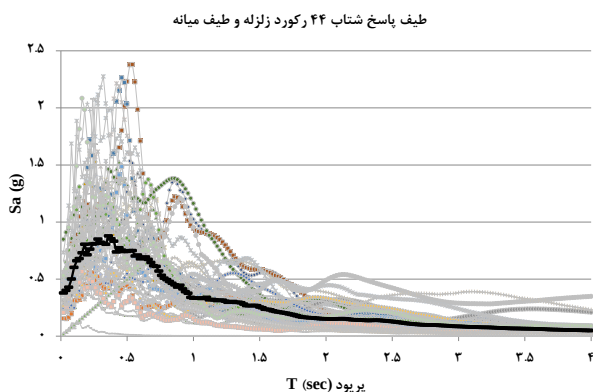
¹² Strike-Slip

¹³ Thrust/Reverse

¹⁰ Vamvatsikos and Cornell

جدول ۲- مشخصات رکوردهای حوزه‌ی دور مورد استفاده

نام رکورد	ایستگاه	سال	بزرگا	فاصله (km)	PGA_{max} (g)	PGV_{max} (cm/s)
Northridge	Beverly Hills - Mulhol	1994	6.7	9.4	0.52	63
Northridge	Canyon Country-WLC	1994	6.7	11.4	0.48	45
Duzce, Turkey	Bolu	1999	7.1	12.0	0.82	62
Hector Mine	Hector	1999	7.1	10.4	0.34	42
Imperial Valley	Delta	1979	6.5	22.0	0.38	33
Imperial Valley	El Centro Array #11	1979	6.5	12.5	0.35	42
Kobe, Japan	Nishi-Akashi	1995	6.9	7.1	0.51	37
Kobe, Japan	Shin-Osaka	1995	6.9	19.1	0.24	38
Kocaeli, Turkey	Duzce	1999	7.5	13.6	0.36	59
Kocaeli, Turkey	Arcelik	1999	7.5	10.6	0.22	40
Landers	Yermo Fire Station	1992	7.3	23.6	0.24	52
Landers	Coolwater	1992	7.3	19.7	0.42	42
Loma Prieta	Capitola	1989	6.9	8.7	0.53	35
Loma Prieta	Gilroy Array #3	1989	6.9	12.2	0.56	45
Manjil, Iran	Abbar	1990	7.4	12.6	0.51	54
Superstition Hills	El Centro Imp. Co.	1987	6.5	18.2	0.36	46
Superstition Hills	Poe Road (temp)	1987	6.5	11.2	0.45	36
Cape Mendocino	Rio Dell Overpass	1992	7.0	7.9	0.55	44
Chi-Chi, Taiwan	CHY101	1999	7.6	10.0	0.44	115
Chi-Chi, Taiwan	TCU045	1999	7.6	22.8	0.51	39
San Fernando	LA - Hollywood Stor	1971	6.6	22.8	0.21	19
Friuli, Italy	Tolmezzo	1976	6.5	15.0	0.35	31



شکل ۱- طیف پاسخ شتاب الاستیک مربوط به ۴۴ رکورد منتخب و طیف میانه آنها

برای انجام تحلیل IDA، شاخص‌های زیر تعریف شدند:

- شاخص شدت (IM^{14}): شتاب طیفی مود اول سازه با میرایی ۵٪ ($S_a(T_1, 5\%)$) به عنوان IM انتخاب شد. این شاخص به دلیل ارتباط قوی با پاسخ دینامیکی مود اول، به عنوان شاخصی کارآمد و استاندارد شناخته می‌شود.
- شاخص پاسخ (EDP^{15}): حداکثر دررفت نسبی بین طبقه‌ای^{۱۶} به عنوان EDP در نظر گرفته شد. این شاخص به طور مستقیم با آسیب‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای و همچنین ناپایداری‌های هندسی در ارتباط است.

۲-۱-۲- استخراج منحنی شکندگی فروریزش

پس از انجام تحلیل‌های IDA برای هر یک از ۴۴ رکورد، از این داده‌ها، ظرفیت فروریزش متناظر با هر رکورد ($S_{a,C,i}$) استخراج گردید. برای هر رکورد، تحلیل دینامیکی به صورت فزاینده ادامه می‌یابد تا سازه به نقطه فروریزش برسد. نقطه فروریزش به عنوان کمترین سطح شاخص شدت (IM) تعریف می‌شود که در آن یکی از دو معیار زیر برآورده گردد:

- معیار دررفت حدی: حداکثر دررفت نسبی بین طبقه‌ای (EDP) از آستانه ۱۰٪ فراتر رود که نشان‌دهنده ناپایداری کلی سازه است.
- معیار ناپایداری دینامیکی: شیب منحنی IDA (نمودار IM در مقابل EDP) به کمتر از ۲۰٪ شیب الاستیک اولیه خود کاهش یابد. این

برای نمایش ویژگی‌های فرکانسی این مجموعه رکورد، طیف پاسخ شتاب الاستیک (با میرایی ۵٪) برای هر یک از ۴۴ رکورد در شکل ۱ ترسیم شده است. به منظور نمایش گرایش مرکزی این مجموعه و افزایش خوانایی، طیف پاسخ میانه آنها نیز با خط ضخیم‌تر در شکل نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، طیف میانه یک باند فرکانسی وسیع را پوشش می‌دهد که این امر اطمینان می‌دهد ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها محدود به یک دامنه پریود خاص نخواهد بود.

¹⁴ Intensity Measure

¹⁵ Engineering Demand Parameter

¹⁶ Maximum Inter-story Drift Ratio

این منحنی، نتیجه نهایی روش دقیق در این پژوهش است

۲-۲ روش تقریبی مبتنی بر تحلیل استاتیکی غیرخطی (SPO2FRAG)

به منظور غلبه بر چالش‌های محاسباتی تحلیل دینامیکی فزاینده (IDA)، در این پژوهش از یک روش تقریبی مبتنی بر تحلیل استاتیکی غیرخطی (بار افزون) برای تخمین ظرفیت فروریزش استفاده شده است. این رویکرد بر پایه الگوریتم SPO2IDA استوار است که ارتباطی تجربی بین مشخصات منحنی بار افزون و نتایج آماری تحلیل IDA برقرار می‌سازد. در این تحقیق، برای پیاده‌سازی این روش از ابزار محاسباتی SPO2FRAG استفاده گردید که این الگوریتم را به صورت خودکار اجرا می‌کند [۳].

فرایند مفهومی این روش که در فلوچارت شکل (شکل ۲) نشان داده شده است، شامل مراحل تئوریک زیر می‌باشد:

۱- تبدیل سازه چند درجه آزادی به تک درجه آزادی معادل: ابتدا، منحنی ظرفیت سازه (رابطه برش پایه و تغییر مکان بام) که از تحلیل بارافزون به دست آمده است، به همراه مشخصات دینامیکی سازه (شامل جرم، پریود اصلی ارتعاش و ضریب مشارکت جرمی مود اول، برای تعریف یک سیستم SDOF معادل به کار گرفته می‌شود.

۲- برازش منحنی ایده‌آل چندخطی (Backbone): منحنی ظرفیت سیستم SDOF معادل، با یک منحنی چندخطی ایده‌آل (در این پژوهش، چهارخطی یا Quadrilinear) برازش داده می‌شود. پارامترهای این منحنی ایده‌آل، رفتار غیرخطی سازه از جمله شاخه‌های سختی پس از تسلیم و نزولی را به صورت ساده‌شده توصیف می‌کنند.

۳- تعریف مشخصات دینامیکی: پارامترهای دینامیکی اصلی سازه، شامل پریود ارتعاشی اول، جرم لرزه‌ای مؤثر و ضریب مشارکت مودی مود اول، به عنوان ورودی به نرم‌افزار داده می‌شود.

۴- پیش‌بینی تقریبی صدک‌های IDA: با استفاده از پارامترهای دینامیکی سیستم SDOF معادل و مشخصات منحنی چندخطی آن، الگوریتم SPO2IDA صدک‌های کلیدی منحنی‌های IDA (شامل صدک‌های ۱۶٪، ۵۰٪ و ۸۴٪) را پیش‌بینی می‌کند. این پیش‌بینی بدون نیاز به انجام تحلیل‌های دینامیکی متعدد و بر اساس یک پایگاه داده آماری از پیش موجود انجام می‌شود.

۵- استخراج پارامترهای شکنندگی فروریزش: در این گام، معیار حد فروریزش (که در این پژوهش معادل آستانه فروریزش در تحلیل IDA در نظر گرفته شده (با سه منحنی صدک IDA پیش‌بینی شده تلاقی داده می‌شود. مقادیر شاخص شدت (S_a) متناظر با این سه نقطه تقاطع، به ترتیب به عنوان برآوردی از صدک‌های ۱۶٪، ۵۰٪ و ۸۴٪ توزیع

معیار، نشان‌دهنده نزدیک شدن سازه به یک منطقه پاسخ با شیب منفی و عدم توانایی آن برای تحمل شدت لرزه‌ای بیشتر است. مقدار $S_{a,C,i}$ برای هر رکورد، همان مقدار $S_a(T_1, 5\%)$ است که در آن، اولین شرط از شرایط فوق محقق می‌شود.

با در دست داشتن مجموعه‌ای از مقادیر ظرفیت فروریزش ($S_{a,C,i}$)، فرایند استخراج منحنی شکنندگی لگ‌نرمال به صورت زیر انجام شد:

۱- فرض می‌شود که ظرفیت‌های فروریزش از یک توزیع لگ‌نرمال تبعیت می‌کنند. این فرض به طور گسترده در مهندسی زلزله پذیرفته شده است.

۲- پارامترهای این توزیع، یعنی میانه ظرفیت فروریزش و پراکندگی لگاریتمی کل محاسبه می‌شوند. در این پژوهش، برای میانه ظرفیت فروریزش از نماد آماری θ_{CT} (معادل نماد $\widehat{S_{CT}}$ در دستورالعمل FEMA P-695) و برای پراکندگی از نماد β_T (معادل β_{RTR} در همان دستورالعمل) استفاده شده است. این پارامترها با استفاده از روش برآورد حداکثر درستنمایی از داده‌های ظرفیت فروریزش، طبق روابط زیر به دست می‌آیند:

$$\ln(\theta_{CT}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln(S_{a,C,i}) \quad (۱)$$

$$\beta_T = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\ln(S_{a,C,i}) - \ln(\theta_{CT}))^2} \quad (۲)$$

که در این روابط:

$S_{a,C,i}$: مقدار شاخص شدت (IM)، یعنی $S_a(T_1, 5\%)$ که در آن سازه تحت رکورد زلزله i -ام به فروریزش می‌رسد.

N : تعداد کل رکوردهای زلزله مورد استفاده در تحلیل این پژوهش، $N=44$.

۳- در نهایت، منحنی شکنندگی فروریزش که احتمال فروریزش را به ازای یک سطح مشخص از S_a نشان می‌دهد، با استفاده از تابع توزیع تجمعی (vCDF) لگ‌نرمال به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P(\text{Collapse} | S_a = x) = \Phi\left(\frac{\ln(x) - \ln(\theta_{CT})}{\beta_T}\right) \quad (۳)$$

که در این رابطه:

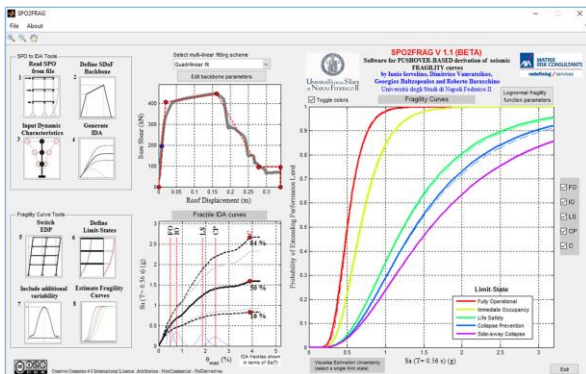
$P(\text{Collapse} | S_a = x)$: احتمال شرطی فروریزش سازه، به شرط

آنکه شدت زلزله برابر با $x=S_a$ باشد.

x : یک مقدار معین برای شاخص شدت لرزه (S_a).

$\Phi(\cdot)$: تابع توزیع تجمعی نرمال استاندارد.

¹⁷ Cumulative distribution function



شکل ۳- خروجی گرافیکی روش تقریبی، شامل منحنی بارافزون، صدک‌های IDA و منحنی‌های شکنندگی

۳- طراحی، مدل‌سازی و مشخصات سازه‌های مورد مطالعه

در این پژوهش، عملکرد لرزه‌ای چهار سازه قابی فولادی مجهز به دیوار برشی ویژه (SPSW) مورد ارزیابی قرار گرفت. این بخش به تشریح فرایند گام‌به‌گام طراحی این سازه‌ها بر اساس ضوابط آیین‌نامه‌ای، جزئیات توسعه و اعتبارسنجی مدل‌های عددی غیرخطی و در نهایت مشخصات دینامیکی مدل‌های نهایی می‌پردازد.

۳-۱- مشخصات عمومی سازه‌ها

سازه‌های مورد مطالعه شامل چهار ساختمان اداری با تعداد طبقات ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ طبقه می‌باشند. پلان معماری برای تمامی سازه‌ها یکسان، مربعی به ابعاد ۱۸×۱۸ متر و دارای سه دهانه ۶ متری در هر دو جهت است. ارتفاع تمام طبقات ۴ متر در نظر گرفته شده است. سیستم باربر جانبی در دهانه‌های میانی قاب‌های پیرامونی، دیوار برشی فولادی ویژه با اتصالات گیردار است، در حالی که سایر اتصالات تیر به ستون از نوع مفصلی می‌باشند. شماتیکی از پلان و قاب مورد تحلیل در شکل ۴ نشان داده شده است.

ظرفیت فروریزش سازه در نظر گرفته می‌شوند. با داشتن این سه مقدار، پارامترهای توزیع لگ‌نرمال، یعنی میانه ظرفیت فروریزش (θ_{CT}) و پراکندگی لگاریتمی کل (β_T)، محاسبه می‌گردند.

فرایند محاسباتی شرح داده شده، از منحنی بار افزون سازه به‌عنوان ورودی اصلی استفاده کرده و در نهایت منحنی‌های شکنندگی را به‌عنوان خروجی ارائه می‌دهد. شکل ۳ یک نمونه از نتایج به دست آمده از نرم‌افزار SPO2FRAG را نشان می‌دهد که در آن ارتباط بین منحنی بارافزون ورودی، صدک‌های پیش‌بینی شده IDA و منحنی‌های شکنندگی نهایی به صورت گرافیکی نمایش داده شده است.

نتیجه نهایی این روش، تخمینی از منحنی شکنندگی فروریزش سازه است که در بخش نتایج با مقادیر به‌دست‌آمده از روش دقیق IDA مقایسه خواهد شد تا دقت و کارایی این روش تقریبی برای سازه‌های دیوار برشی فولادی مورد مطالعه، ارزیابی گردد.



شکل ۲- فلوچارت مراحل روش SPO2FRAG برای تخمین منحنی شکنندگی

استفاده شد. ورق فولادی دارای تنش تسلیم ۲۳۹ مگاپاسکال است. همه نمونه‌ها در دسته طراحی لرزه‌ای D_{max} (پارامترهای مربوطه براساس FEMA P695 در جدول ۳ 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.

جدول ۳- پارامترهای طراحی لرزه‌ای مورد نیاز برای D_{max}

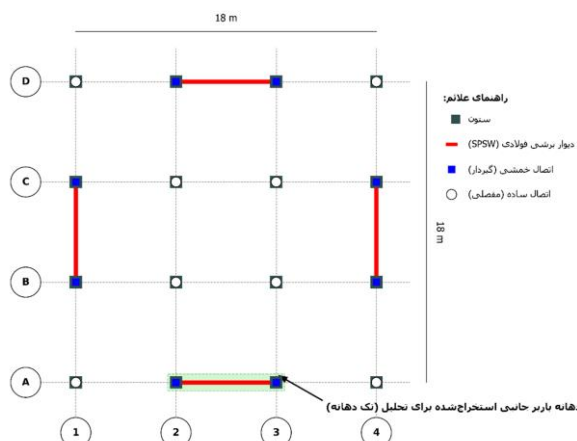
پارامتر	شرح	مقدار
S_S	شتاب طیفی در پریودهای کوتاه	1.5g
S_1	شتاب طیفی در پریود ۱ ثانیه	0.6g
S_{MS}	شتاب طیفی تعدیل شده برای اثر ساختمان (پریود کوتاه)	1.5g
S_{M1}	شتاب طیفی تعدیل شده برای اثر ساختمان (پریود ۱ ثانیه)	0.9g
S_{DS}	شتاب طیفی طراحی در پریودهای کوتاه	1.0g
S_{D1}	شتاب طیفی طراحی در پریود ۱ ثانیه	0.6g
T_s	پریود مشخصه طیف طرح (S_{D1}/S_{DS})	0.6 s
R	ضریب رفتار	7
I_e	ضریب اهمیت	1
C_d	ضریب بزرگ‌نمایی تغییر مکان	6
Ω_0	ضریب اضافه مقاومت	2.5
Site Class	کلاس خطر لرزه‌ای	D

۳-۲-۱- مبانی و اصول طراحی دیوار برشی فولادی مطابق آیین‌نامه AISC-341-22

به‌منظور طراحی سیستم دیوار برشی فولادی، از ضوابط آیین‌نامه AISC 341-22 استفاده شد. خلاصه‌ای از مراحل طراحی به روش مبتنی بر این آیین‌نامه در ادامه ارائه شده است:

مرحله ۱: در ابتدا، زاویه اولیه نوارها ۴۵ درجه فرض شد که در محدوده ۳۰ درجه تا ۵۵ درجه آیین‌نامه قرار می‌گیرد. ضخامت ورق متعاقباً با استفاده از معادله (۴) محاسبه می‌گردد که برای ۱۰۰٪ نیروی برشی اعمال شده در هر طبقه محاسبه می‌شود:

$$t_w = \frac{2.645 V_u}{F_y L_{cf} \sin 2\alpha} \quad (4)$$



شکل ۴- پلان و قاب مورد تحلیل سازه‌ها

۳-۲-۲- فرآیند طراحی لرزه‌ای سازه‌ها (تحلیل خطی)

طراحی سازه‌ها بر اساس روش استاتیکی معادل مطابق با آیین‌نامه ASCE 7-22 [۱۲] و ضوابط طراحی لرزه‌ای AISC 341-22 [۱۹] انجام شده است. برای این منظور، از یک ابزار طراحی یکپارچه توسعه داده شده توسط محققین [۱۰] در محیط MATLAB استفاده گردید که با نرم‌افزار تحلیلی OpenSees [۱۴] کوپل شده است.

در این فرایند تکرارشونده، ابتدا یک طراحی اولیه برای مقاطع تیر، ستون و ضخامت ورق دیوار برشی انجام می‌شود. سپس، مدل سازه در OpenSees ساخته شده و تحت تحلیل استاتیکی خطی قرار می‌گیرد. نیروهای داخلی اعضا و تغییر مکان‌های جانبی (دریفت) از خروجی OpenSees استخراج شده و به MATLAB بازگردانده می‌شود. در محیط MATLAB، تمامی ضوابط آیین‌نامه‌ای، شامل کنترل نسبت‌های تقاضا به ظرفیت برای تمام اعضا و کنترل دریفت طبقات، به دقت بررسی می‌گردد. در صورتی که عضوی ضوابط را ارضا نکند یا دریفت از حدود مجاز فراتر رود، فرایند طراحی با اصلاح مقاطع تکرار می‌شود تا در نهایت تمامی معیارها برآورده شوند. این حلقه طراحی - تحلیل تا رسیدن به یک طرح بهینه و قابل قبول ادامه می‌یابد.

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

¹⁸ American Society of Civil Engineers

¹⁹ American Institute of Steel Construction

²⁰ Open System for Earthquake Engineering Simulation

جدول ۲ مقادیر ضریب برش پایه (C_s) را برای هر مدل به همراه پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه آن نشان می‌دهد (T_1 : زمان تناوب اصلی، $S_a(T_1, 5\%)$: شتاب طیفی مربوط به T_1).

جدول ۴- پارامترهای لرزه‌ای مورد استفاده در طراحی سازه‌ها

عدد طبقات	T_1	$S_a(T_1, 5\%)$	C_s
۴	۰/۴	۱/۰۰	۰/۱۴۲
۸	۰/۶۷	۰/۹۰	۰/۱۲۸
۱۲	۰/۹۱	۰/۶۵	۰/۰۹۳
۱۶	۱/۱۳	۰/۵۳	۰/۰۷۶

۳-۲-۲- مدل سازی تحلیلی برای طراحی

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، فرایند طراحی در این پژوهش با استفاده از یک ابزار یکپارچه که توسط محققین در محیط MATLAB توسعه داده شده و با نرم‌افزار تحلیل سازه‌ای OpenSees کوپل شده است، انجام پذیرفت. در این فرایند، یک حلقه تکرارشونده طراحی - تحلیل پیاده‌سازی گردید؛ به این صورت که تحلیل‌های خطی در OpenSees انجام شده و نتایج آن (نیروهای داخلی اعضا و تغییر مکان‌های جانبی) برای MATLAB ارسال می‌شد. سپس در محیط MATLAB، کنترل ضوابط آیین‌نامه‌ای شامل نسبت تنش و نسبت دریافت طبقات انجام می‌گرفت. در صورت عدم ارضای ضوابط، مقاطع اعضا، اصلاح و فرایند تحلیل تکرار می‌شد. این چرخه تا رسیدن به یک طراحی بهینه و ایمن ادامه می‌یافت. در این مدل‌ها، تمامی اعضای قاب اصلی باربر جانبی (شامل تیرها، ستون‌ها و ورق‌های جان دیوار برشی) به صورت المان‌های الاستیک در نظر گرفته شدند.

به‌منظور در نظر گرفتن اثرات مرتبه دوم ($P-\Delta$) ناشی از بارهای ثقلی که توسط قاب‌های غیر باربر جانبی تحمل می‌شوند، از روش ستون متکی^{۲۱} استفاده گردید. همان‌طور که در شکل ۵ نمایش داده شده است، این ستون که تنها دارای سختی محوری است، از طریق بازوهای صلب^{۲۲} به گره‌های قاب اصلی متصل می‌شود. این رویکرد تضمین می‌کند که اثرات مرتبه دوم ($P-\Delta$) ناشی از کل وزن لرزه‌ای ساختمان در تحلیل لحاظ شود، بدون آنکه سختی جانبی سازه به صورت غیرواقعی افزایش یابد. بارهای ثقلی (مرده و زنده) و نیروهای جانبی معادل زلزله مطابق ضوابط به مدل اعمال شدند.

که در آن V_u مقاومت برشی مورد نیاز، F_y مقاومت تسلیم ورق، L_{cf} فاصله 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 (۵) و (۶) استفاده خواهد شد. این مقادیر برای تعیین مقاطع 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 آیین‌نامه فراهم می‌کنند. حداقل ممان اینرسی ستون‌ها:

$$I_c \geq 0.0031 \frac{t_w h^4}{L} \quad (5)$$

حداقل ممان اینرسی تیرها:

$$I_b \geq 0.0031 \frac{\Delta t_w h^4}{h} \quad (6)$$

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 نواریا با استفاده از معادله (۷) محاسبه می‌شود و سپس ضخامت و نسبت تنش ورق‌های فولادی با استفاده از این زاویه جدید کنترل می‌گردد.

$$\tan^4 \alpha = \frac{1 + \frac{t_w L}{2A_c}}{1 + t_w h \left[\frac{1}{A_b} + \frac{h^3}{360 I_c L} \right]} \quad (7)$$

که در آن A_c و A_b نشان‌دهنده 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. فرایندی 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.

معادله (۸) روشی است که در ASCE 7-22 برای تعیین زمان تناوب اصلی ساختمان‌ها پیشنهاد شده است:

$$T = C_t H^x \quad (8)$$

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

²¹ Leaning P-Δ Column

²² Rigid Links

برای درک مشخصات دینامیکی سازه‌های طراحی شده، تحلیل مودال برای هر چهار مدل انجام شد. این تحلیل برای استخراج پریودهای تناوب طبیعی و درصد‌های مشارکت جرمی مودال صورت گرفت. جدول ۶ نتایج سه مود اصلی اول را برای هر سازه خلاصه می‌کند.

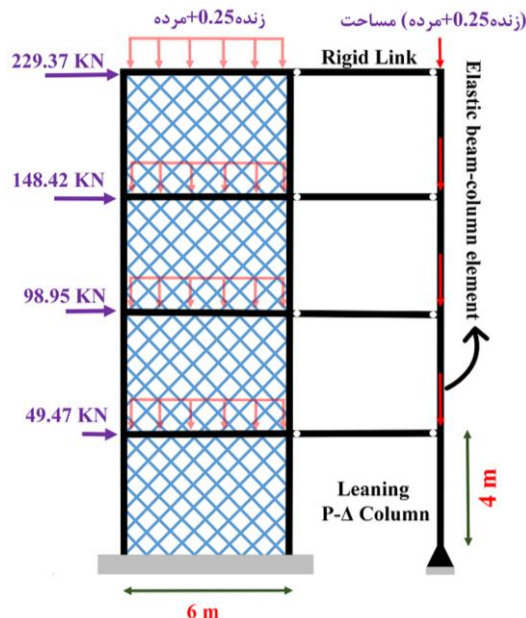
جدول ۶- مشخصات دینامیکی مودهای اصلی سازه‌ها

سازه (طبقه)	مود (Mode)	زمان تناوب (T) (ثانیه)	درصد مشارکت جرمی (%)	مجموع مشارکت جرمی (%)
۴	1	0.710	83.04	83.04
	2	0.250	11.45	94.49
	3	0.168	2.84	97.33
۸	1	1.189	76.53	76.53
	2	0.441	13.98	90.51
	3	0.244	4.79	95.30
۱۲	1	1.684	72.04	72.04
	2	0.548	16.07	88.11
	3	0.300	4.38	92.49
۱۶	1	2.108	70.32	70.32
	2	0.686	15.54	85.86
	3	0.379	5.95	91.81

همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد طبقات از ۴ به ۱۶، پریود مود اول از ۰٫۷۱ ثانیه به ۲٫۱۱ ثانیه افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده افزایش انعطاف‌پذیری سازه‌های بلندتر است. نکته حائز اهمیت دیگر، کاهش سهم مشارکت جرمی مود اول با افزایش ارتفاع است. در سازه ۴ طبقه، مود اول به تنهایی ۸۳٪ از پاسخ دینامیکی را شامل می‌شود، در حالی که این سهم در سازه ۱۶ طبقه به ۷۰٪ کاهش می‌یابد. این موضوع بیانگر اهمیت روزافزون اثرات مودهای بالاتر در پاسخ لرزه‌ای سازه‌های بلند می‌باشد. با این حال، مجموع مشارکت جرمی سه مود اول برای تمام مدل‌ها بیش از ۹۰٪ است که کفایت تعداد مودهای در نظر گرفته شده برای تحلیل‌های دینامیکی را طبق ضوابط آیین‌نامه‌ای تأیید می‌کند.

به‌منظور نمایش جزئیات و توزیع تنش در ارتفاع سازه‌ها، نمودار نسبت تنش برای تمامی اعضای اصلی در شکل ۶ ارائه 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 می‌شود. تحلیل نمودارهای ارائه شده در شکل ۲، اهداف کلیدی طراحی و اعتبار مدل‌های مبنای این پژوهش را تبیین می‌کند. اولاً، همان‌طور که در ادامه در شکل ۶ نشان داده خواهد شد، نسبت تنش در اکثر اعضا بسیار نزدیک به حد مجاز ۱٫۰ است. این امر نشان‌دهنده یک طراحی کارا و

شکل ۵ جزئیات این مدل‌سازی را به صورت شماتیک برای سازه نمونه ۴ طبقه نمایش می‌دهد.



شکل ۵- نمای شماتیک مدل تحلیلی استفاده شده برای طراحی سازه ۴ طبقه.

۳-۲-۳- نتایج طراحی و مقاطع نهایی

فرایند طراحی تکراری بر اساس ضوابط AISC 341-22 برای دستیابی به طرحی بهینه و ایمن انجام شد. خلاصه نتایج نهایی کنترل طراحی برای هر چهار سازه در جدول ۵ ارائه شده است. این جدول شامل حداکثر نسبت تنش (نسبت تقاضا به ظرفیت) در اعضای اصلی و حداکثر نسبت دریافت طبقات است.

جدول ۵- خلاصه نتایج نهایی کنترل ضوابط طراحی

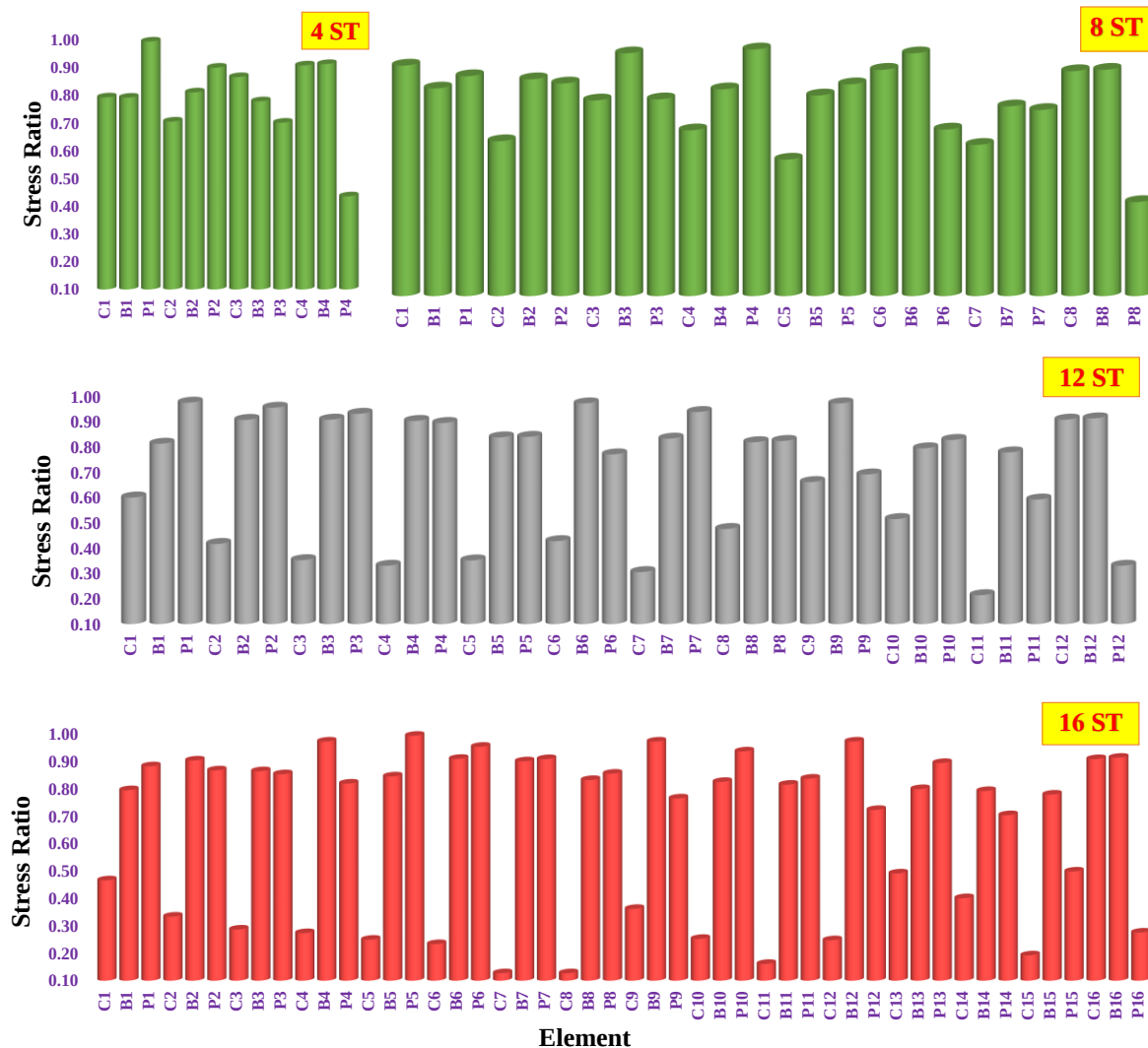
سازه	حداکثر نسبت تنش (ستون)	حداکثر نسبت تنش (تیر)	حداکثر نسبت تنش (ورق)	نسبت دریافت	تحلیلی T (ثانیه)
4	0.91	0.91	0.99	0.62	0.71
8	0.93	0.97	0.98	0.94	1.19
12	0.91	0.97	0.97	0.98	1.68
16	0.91	0.97	0.99	0.99	2.11

همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، نسبت دریافت در تمام سازه‌ها کمتر از حد مجاز آیین‌نامه است. همچنین، متوسط نسبت تنش در اعضای کلیدی مانند تیرها و ورق‌های جان نزدیک به مقادیر بهینه طراحی است.

در مجموع، این نتایج تأیید می‌کنند که تحلیل‌های فروریزش این مقاله بر روی مدل‌هایی استوار است که بر اساس یک‌پایه طراحی معتبر، استاندارد و بهینه توسعه یافته‌اند.

برای تکمیل مستندات طراحی و فراهم‌آوردن امکان بازتولید نتایج این پژوهش، مقاطع نهایی به کاررفته برای اعضای اصلی سازه‌های ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ طبقه، در جدول ۷ ارائه شده است. ضخامت ورق‌های فولادی (مطابق جدول ۷)، بین ۱ تا ۲/۵ میلی‌متر متغیر است. این ضخامت‌های کم، با رعایت ضوابط لرزه‌ای آیین‌نامه AISC 341-22 برای دیوارهای برشی فولادی بدون سخت‌کننده، بهینه‌سازی شده‌اند.

اقتصادی است که در آن از ظرفیت مصالح به شکل بهینه استفاده شده و از طراحی بیش از حد محافظه‌کارانه پرهیز شده است. ثانیاً، نسبت تنش نسبتاً پایین‌تر در ستون‌های مرزی، به ویژه در طبقات میانی سازه‌های بلندتر، یک یافته مهم را آشکار می‌سازد: طراحی این اعضا تحت حاکمیت ضابطه حداقل سختی آیین‌نامه AISC 341-22 بوده است، نه معیار مقاومت. این فلسفه طراحی تضمین می‌کند که اعضای مرزی عمودی به عنوان یک تکیه‌گاه قوی عمل کرده و اجازه می‌دهند میدان کششی در ورق جان به طور کامل توسعه یابد که این امر برای دستیابی به رفتار شکل‌پذیر و پایدار سیستم ضروری است.



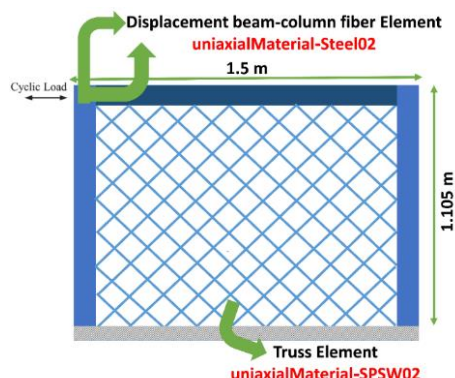
شکل ۶- نسبت تنش المان‌های سازه‌های با تعداد طبقات مختلف

جدول ۷- مقاطع نهایی اعضای قاب مرزی و ضخامت ورق جان در سازه‌ها

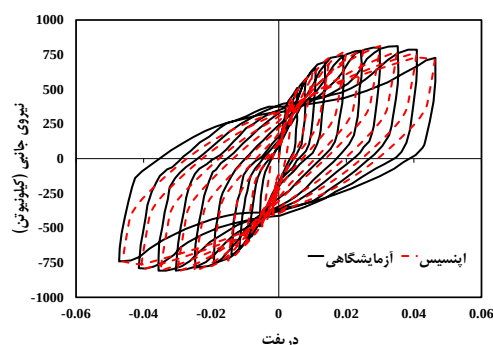
تعداد طبقات				شماره طبقه	
۱۶	۱۲	۸	۴		
W14X311				۱۶	ستون‌ها
W14X233				۱۵	
W14X233				۱۴	
W14X233				۱۳	
W550	W14X311			۱۲	
W550	W14X233			۱۱	
W550	W14X233			۱۰	
W550	W14X233			۹	
W700	W14X233	W14X311		۸	
W700	W14X500	W14X176		۷	
W700	W14X500	W14X176		۶	
W700	W14X500	W14X176		۵	
W750	W550	W14X257	W14X311	۴	
W750	W550	W14X257	W14X74	۳	
W750	W550	W14X257	W14X132	۲	
W750	W550	W14X257	W14X132	۱	
W14X211				۱۶	تیرها
W10X39				۱۵	
W10X39				۱۴	
W10X39				۱۳	
W12X136	W14X211			۱۲	
W10X39	W10X39			۱۱	
W10X39	W10X39			۱۰	
W12X136	W12X136			۹	
W10X39	W10X39	W14X211		۸	
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	ورق‌ها (سانتی‌متر)
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	
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 با پیشوند W_x ، معرف مقاطع ساخته شده هستند که با جوشکاری ورق‌ها ایجاد شده‌اند. در این مقاطع، x نشان‌دهنده ارتفاع جان ورق (بر حسب میلی‌متر) است و ابعاد بال‌ها بر اساس نسبت‌های هندسی مقطع استاندارد W14x370 تعیین گردیده است.



شکل ۷- پیکربندی مدل عددی نواری دیوار برشی فولادی در نرم افزار OpenSees



شکل ۸- مقایسه منحنی رفتاری نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی

برای ارزیابی کمی دقت مدل عددی، پارامترهای کلیدی عملکرد لرزه‌ای شامل سختی اولیه (K_e)، حداکثر مقاومت جانبی (F_{max}) و انرژی مستهلک شده تجمعی (E_d) از نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی استخراج و در جدول ۸ مقایسه شده‌اند. لازم به ذکر است که چون دررفت طبقه (محور افقی نمودار) یک پارامتر بی‌بعد است، هر سه پارامتر استخراج شده واحد نیرو (kN) خواهند داشت.

جدول ۸- مقایسه کمی نتایج مدل عددی و نمونه آزمایشگاهی

پارامتر کلیدی	نمونه آزمایشگاهی	مدل عددی	اختلاف (%)
سختی اولیه (K_e) (kN)	161.4	154.6	-4.2%
حداکثر نیروی جانبی (F_{max}) (kN)	811.5	778.2	-4.1%
انرژی مستهلک شده (E_d) (kN)	205.8	196.3	-4.6%

۳-۳- توسعه و اعتبارسنجی مدل عددی غیرخطی برای ارزیابی عملکرد

پس از تعیین مقاطع نهایی سازه‌ها در مرحله طراحی، برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ای واقعی تا مرز فروریزش، مدل‌های عددی غیرخطی در نرم‌افزار OpenSees توسعه داده شدند. پیش از به‌کارگیری این مدل‌ها برای تحلیل سازه‌های اصلی، لازم است دقت و صحت رویکرد مدل‌سازی مورد استفاده، از طریق مقایسه با نتایج آزمایشگاهی معتبر، ارزیابی گردد.

۳-۳-۱- اعتبارسنجی المان دیوار برشی فولادی

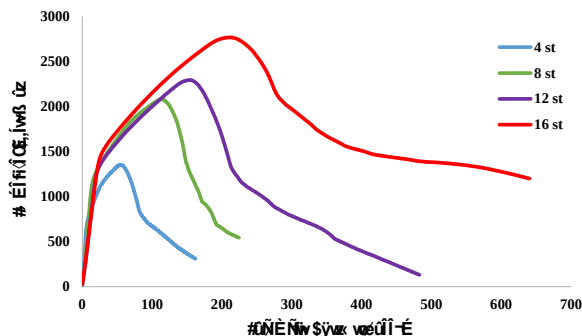
در این مطالعه اعتبارسنجی با استفاده از نرم‌افزار OpenSees و بر روی نمونه DS-PSW به‌دست‌آمده از مطالعه صبوری قمی و سجادی [۱۵] انجام می‌شود.

المان DispBeamColumn (المان پلاستیسیته توزیع شده مبتنی بر جابه‌جایی) برای تعریف اجزای مرزی با استفاده از مقاطع فایبر استفاده شد. مقاطع فایبر با مصالح تک‌محوری Steel02 که یک مدل تنش - کرنش دوخطی Menegotto-Pinto است مدل‌سازی شده‌اند. به‌منظور مدل‌سازی بر اساس توصیه AISC 341-22، ده نوار با انتهای مفصلی بافاصله مساوی که معرف ورق‌های فولادی هستند، استفاده شده است که با استفاده از المان خرابایی مدل شده‌اند. مدل‌های هیستریزس متعددی برای توصیف ویژگی‌های پاسخ چرخه‌ای دیوار برشی فولادی معرفی شده‌اند، با این حال مدل جلالی و بنازاده [۱۶] (SPSW02)، 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 مدل‌سازی عددی مقایسه شد و سطح بالایی از توافق را نشان داد. برای ارائه درکی جامع، پیکربندی مورد بررسی شده و منحنی مقایسه نیرو - دررفت بین دو مدل عددی و آزمایشگاهی در شکل ۷ و ۸ نشان داده شده است.

$$k = \begin{cases} 1 & T \leq 0.5 \text{ s} \\ 2 & T \geq 2.5 \text{ s} \\ 0.5 T + 0.75 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases} \quad (۱۱)$$

منحنی‌های ظرفیت (برش پایه بر حسب تغییر مکان بام) حاصل از تحلیل بار افزون برای هر چهار مدل در شکل ۹ ارائه شده است. این منحنی‌ها به عنوان ورودی اصلی برای نرم‌افزار SPO2FRAG عمل می‌کنند.



شکل ۹- منحنی بارافزون سازه‌های مختلف

۴-۲- منحنی‌های شکنندگی فروریزش به روش تقریبی (SPO2FRAG)

منحنی شکنندگی، ابزاری آماری است که احتمال فراگذشت یک سازه از یک سطح عملکردی مشخص (مانند فروریزش) را به‌ازای شدت‌های مختلف حرکت زمین نشان می‌دهد. در این پژوهش، از ابزار SPO2FRAG برای استخراج منحنی‌های شکنندگی فروریزش به روش تقریبی استفاده شد. این ابزار با بهره‌گیری از نتایج تحلیل بار افزون که در بخش قبل تشریح گردید، منحنی‌های شکنندگی را بدون نیاز به انجام تحلیل‌های دینامیکی زمان‌بر تولید می‌کند.

ورودی اصلی این نرم‌افزار، منحنی بار افزون سازه معادل یک درجه آزاد است. معیار تعریف‌کننده آستانه فروریزش در این پژوهش، نقطه‌ای بر روی شاخه نزولی منحنی بار افزون در نظر گرفته شد که در آن، مقاومت جانبی سازه به ۸۰٪ مقاومت جانبی بیشینه آن افت می‌کند. این معیار، یک تعریف متداول در ادبیات فنی برای تعیین ظرفیت نهایی تغییر شکل سازه است که به‌عنوان معادل استاتیکی برای پدیده ناپایداری دینامیکی در تحلیل‌های IDA در نظر گرفته می‌شود [۱، ۱۷].

پس از اعمال این معیار، منحنی‌های شکنندگی فروریزش برای هر چهار سازه مورد مطالعه استخراج گردید. شکل ۱۰ تا ۱۳، نتایج حاصل را به

همان‌طور که در جدول ۸ مشهود است، مدل عددی توسعه‌یافته با دقت بسیار بالایی قادر به پیش‌بینی پارامترهای کلیدی رفتار چرخه‌ای دیوار برشی فولادی بوده و اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های آزمایشگاهی برای تمام پارامترهای اصلی کمتر از ۵٪ است. این سطح از تطابق، صحت و اعتبار مدل را برای انجام تحلیل‌های آتی به طور کامل تأیید می‌کند.

بالین وجود، شایان‌ذکر است که مدل عددی در هر سه پارامتر، نتایج اندکی محافظه‌کارانه (تخمین پایین‌تر) ارائه داده است. این ویژگی در فرایندهای ارزیابی و طراحی سازه‌ها یک مزیت محسوب می‌شود، زیرا تضمین می‌کند که ظرفیت سازه بیش از حد تخمین زده نشده و ارزیابی در سمت ایمن قرار دارد؛ بنابراین، مدل عددی حاضر نه تنها دقیق است، بلکه برای کاربردهای مهندسی عملی نیز قابل اتکا است و برای تحلیل‌های بار افزون و دینامیکی فزاینده در این پژوهش مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۴-۳- منحنی‌های شکنندگی حاصل از دو روش

۴-۱- منحنی‌های ظرفیت استاتیکی غیرخطی

به‌منظور دستیابی به ظرفیت فروریزش سازه‌ها در روش تقریبی (SPO2FRAG)، نیاز به انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی (بار افزون) بر روی مدل‌های مختلف دیوار برشی فولادی است. این تحلیل با اعمال یک الگوی بار جانبی مشخص و افزایش تدریجی آن تا رسیدن به تغییر مکان هدف یا ناپایداری سازه انجام می‌شود. قبل از اعمال بارهای جانبی، سازه تحت بارگذاری اولیه با استفاده از ترکیبی از بارهای ثقلی مطابق FEMA P695 قرار گرفت. الگوی بار جانبی مورد استفاده در این پژوهش، مطابق با توزیع مود اول سازه و بر اساس رابطه (۹) از استاندارد ASCE 7-22 تعیین گردید:

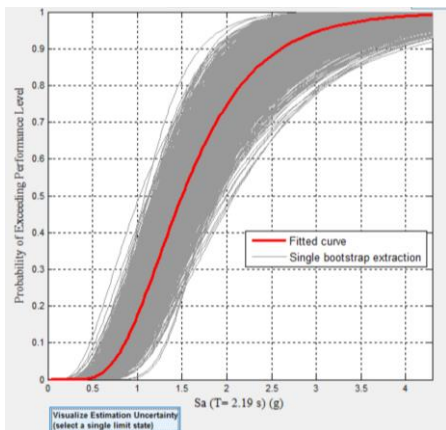
$$F_x = C_{vx} \cdot V \quad (۹)$$

که در آن V برش پایه کل و C_{vx} ضریب توزیع نیروی جانبی در تراز x است که از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود:

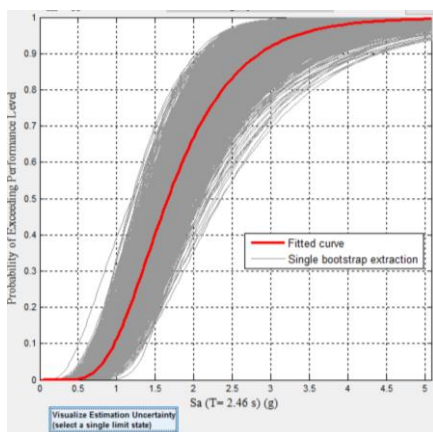
$$C_{vx} = \frac{W_x h_x^k}{\sum_{i=1}^{ns} W_i h_i^k} \quad (۱۰)$$

در این رابطه، W_x و W_i وزن طبقات در ترازهای i و x هستند، h_x و h_i ارتفاع این ترازها از سطح پایه هستند و k به پیوند اصلی سازه (T_1) بستگی دارد (معادله (۱۱)).

تفکیک برای سازه‌های ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ طبقه نمایش می‌دهد. هر نمودار شامل منحنی شکنندگی برازش شده (Fitted Curve) به همراه مجموعه‌ای از منحنی‌های استخراج شده با روش بوت‌استرپ (Single Bootstrap Extraction) است. این منحنی‌های متعدد، پراکندگی و عدم قطعیت در نتایج را به خوبی نشان می‌دهند.



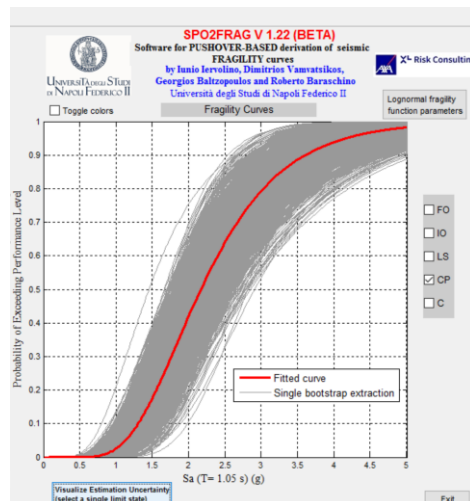
شکل ۱۲- منحنی شکنندگی ۱۲ طبقه با SPO2FRAG



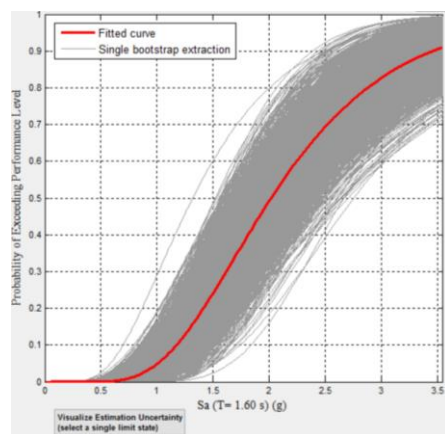
شکل ۱۳- منحنی شکنندگی ۱۶ طبقه با SPO2FRAG

۳-۴- منحنی‌های شکنندگی فروریزش به روش دقیق (IDA)

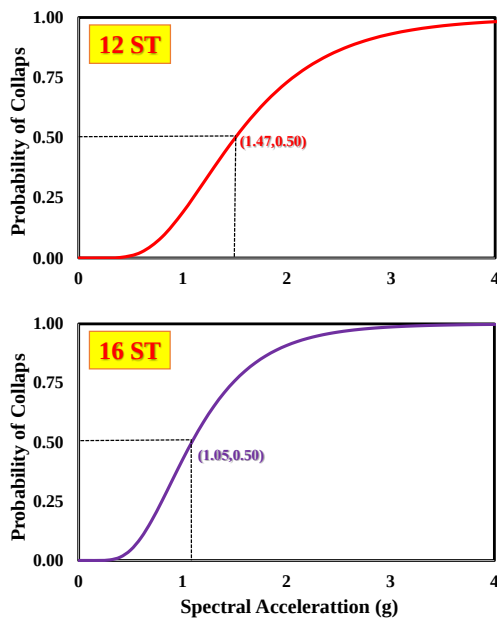
این بخش، نتایج حاصل از ارزیابی دقیق ظرفیت فروریزش سازه‌ها با استفاده از روش تحلیل دینامیکی فزاینده (IDA) ارائه می‌شود. همان‌طور که در بخش ۱-۲ تشریح گردید، هر یک از چهار مدل سازه‌ای تحت مجموعه ۴۴ رکورد لرزه‌ای قرار گرفتند و با استفاده از معیار دوگانه فروریزش (شامل دریافت حدی ۱۰٪ و افت شیب منحنی IDA)، تعداد ۴۴ مقدار ظرفیت فروریزش برای هر سازه استخراج شد.



شکل ۱۰- منحنی شکنندگی ۴ طبقه با SPO2FRAG



شکل ۱۱- منحنی شکنندگی ۸ طبقه با SPO2FRAG



شکل ۱۴- منحنی شکنندگی سازه‌های مختلف در سطح فروریزش به کمک روش دقیق IDA

۵- مقایسه نتایج حاصل از دو روش

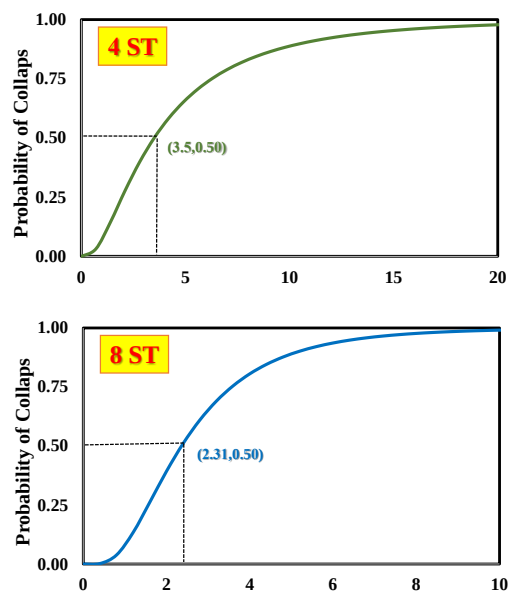
۵-۱- مقایسه کیفی منحنی‌های IDA

در شکل ۱۵ منحنی‌های IDA حاصل از دو روش ارائه شده است. این مقایسه برای صدک‌های ۱۶، ۵۰ و ۸۴٪ انجام شده است. با توجه به نمودارها در سازه ۴ طبقه صدک‌ها برای SPO2FRAG کمتر برآورد شده در حالی که در سازه‌های دیگر این قضیه برعکس است. به هر حال به جز سازه ۱۶ طبقه، صدک ۵۰٪ تطابق نسبتاً خوبی با نتایج IDA واقعی تحت جفت رکورد لرزه‌ای دارد.

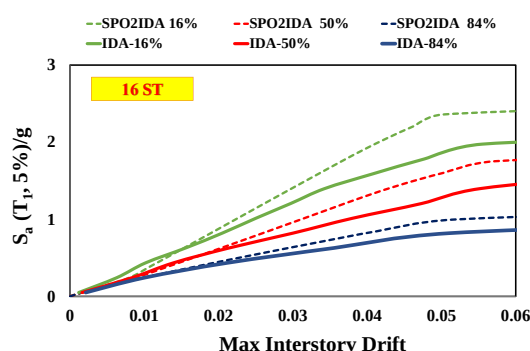
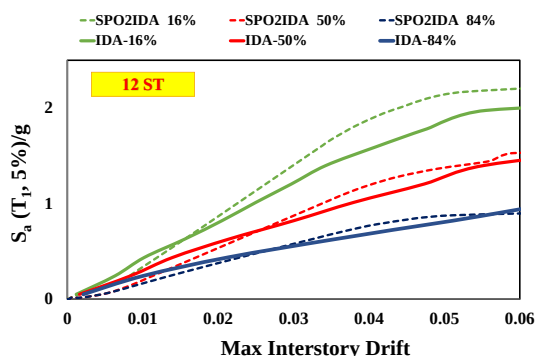
تفسیر مهندسی این نتایج به اصول اولیه روش تحلیل بارافزون بازمی‌گردد. روش SPO2FRAG که بر پایه تحلیل بار افزون استوار است، عمدتاً رفتار سازه را بر اساس مود اول ارتعاش تقریب می‌زند. در سازه‌های کوتاه (۴ و ۸ طبقه) که مود اول شکل غالب پاسخ دینامیکی است، این تقریب دقت قابل‌قبولی دارد. اما با افزایش ارتفاع سازه، حاکمیت مود اول کاهش‌یافته و اثرات مودهای بالاتر به‌شدت اهمیت پیدا می‌کنند. همان‌طور که در جدول ۶ نشان‌داده‌شده است، درصد مشارکت جرمی مود

آنالیزهای دینامیکی غیرخطی بر روی هر مدل با استفاده از رکوردهای لرزه‌ای انجام شد که به‌صورت خطی تا زمانی که نشانه‌هایی از فروریزش سازه آشکار شد، مقیاس‌بندی 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)) در محور عمودی و حداکثر دررفت بین طبقه (به عنوان پارامتر تقاضای مهندسی (EDP)) در محور افقی را نشان می‌دهند. منحنی‌های IDA به‌دست‌آمده، شامل صدک‌های ۱۶، ۵۰ و ۸۴ درصد در شکل ۱۵ برای همه مدل‌ها ارائه شده‌اند. همچنین منحنی‌های IDA حاصل از روش SPO2FRAG به منظور مقایسه دو روش ارائه شده است.

با برازش توزیع تجمعی لگ‌نرمال بر این داده‌ها، منحنی‌های شکنندگی فروریزش برای هر چهار سازه به دست آمد. این منحنی‌ها که احتمال فروریزش را در برابر شتاب طیفی مود اول ($S_a(T_1, 5\%)$) نشان می‌دهند، در شکل ۱۴ برای تمام سازه‌ها ترسیم شده‌اند.



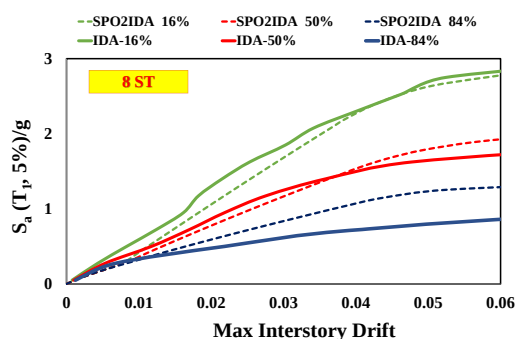
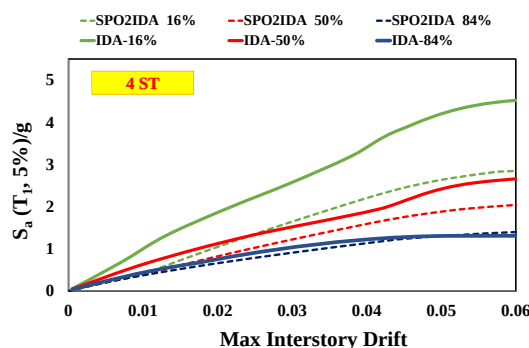
اول از ۸۳٪ در سازه ۴ طبقه به ۷۰,۳۲٪ در سازه ۱۶ طبقه کاهش می‌یابد. این کاهش حاکمیت، با افزایش سهم مودهای بالاتر، به‌ویژه مود دوم (که از ۱۱,۴۵٪ به ۱۶,۰۷٪ در سازه ۱۲ طبقه می‌رسد)، همراه است. این مودهای بالاتر باعث توزیع متفاوتی از نیرو و تغییر مکان در ارتفاع می‌شوند که الگوی بار ثابت تحلیل بار افزون قادر به پیش‌بینی دقیق آن نیست. در نتیجه، روش تقریبی در تخمین ظرفیت فروریزش سازه‌های بلند دچار خطای قابل توجهی شده و نتایج غیر محافظه‌کارانه (خوش‌بینانه) ارائه می‌دهد.



شکل ۱۵- مقایسه منحنی IDA حاصل از دو روش

۲-۵- مقایسه منحنی شکندگی و ظرفیت میانه فروریزش

در این بخش، نتایج حاصل از روش تقریبی SPO2FRAG با نتایج روش مرجع و دقیق IDA مقایسه می‌شود تا دقت و محدوده کاربرد روش تقریبی ارزیابی گردد. شکل ۱۶ مقادیر ظرفیت میانه فروریزش را که از هر دو روش به‌دست آمده، به‌صورت بصری مقایسه می‌کند، درحالی که جدول ۹ نتایج کمی دقیق و درصد اختلاف را خلاصه می‌کند.



(۵۱٪) بیش از واقع برآورد می‌کند که نتیجه‌ای غیر محافظه‌کارانه (خوش‌بینانه) و غیرقابل اطمینان است.

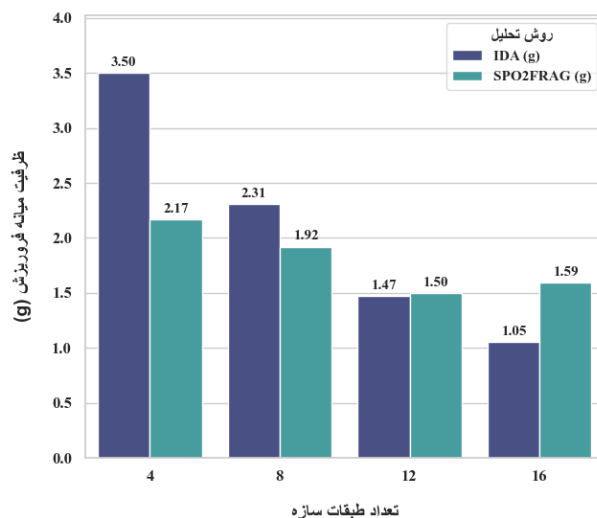
همان‌طور که در بخش قبل به تفصیل شرح داده شد، دلیل اصلی این اختلاف، ناتوانی روش‌های مبتنی بر تحلیل استاتیکی غیرخطی در نظر گرفتن اثرات مودهای بالاتر است. این تقریب در سازه‌های کوتاه مرتبه که مود اول غالب است، نتایج قابل قبولی (و در این مورد، محافظه‌کارانه) ارائه می‌دهد. اما با افزایش ارتفاع سازه، مشارکت مودهای بالاتر در پاسخ دینامیکی، به خصوص در محدوده غیرخطی، بسیار چشمگیر می‌شود و منجر به تخمین نادرست و بیش از واقع ظرفیت فروریزش می‌گردد. این یافته با نتایج سایر محققین [۹] که کارایی محدود روش‌های مشابه را برای سازه‌های بلند گزارش کرده‌اند، همخوانی دارد.

در نتیجه‌گیری نهایی از این مقایسه، اگرچه SPO2FRAG ابزاری سریع و کارآمد برای ارزیابی‌های اولیه و سریع در سازه‌های کوتاه تا میان مرتبه است، اما برای ارزیابی دقیق سازه‌های بلند (در این مطالعه ۱۶ طبقه و بالاتر)، اتکا به آن می‌تواند به نتایج خطرناک و غیر محافظه‌کارانه منجر شود؛ بنابراین، در پروژه‌هایی که تعیین دقیق ظرفیت فروریزش اهمیت بالایی دارد (مانند ارزیابی ضریب رفتار طبق دستورالعمل FEMA P695)، استفاده از روش دقیق تحلیل دینامیکی فزاینده (IDA) الزامی است.

۶- خلاصه و نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر باهدف ارزیابی دقت و کارایی روش تقریبی SPO2FRAG در تخمین ظرفیت میانه فروریزش دیوارهای برشی فولادی، به مقایسه نتایج آن با روش معیار تحلیل دینامیکی فزاینده (IDA) برای سازه‌هایی با ارتفاع‌های متفاوت پرداخت. یافته‌ها حاکی از آن است که عملکرد روش SPO2FRAG حساسیت قابل توجهی به ارتفاع سازه نشان می‌دهد. برای سازه‌های کوتاه مرتبه (۴ و ۸ طبقه)، این روش با ارائه نتایج محافظه‌کارانه (به ترتیب ۳۸٪ و ۱۷٪ کمتر از مقادیر IDA)، می‌تواند به عنوان یک ابزار غربالگری سریع و قابل اطمینان در ارزیابی‌های اولیه مورد استفاده قرار گیرد.

با این حال، با افزایش ارتفاع، دقت روش به شدت افت کرده و نتایج به سمت غیر محافظه‌کارانه سوق می‌یابد. این روند که برای سازه ۱۶ طبقه به خطای نگران‌کننده ۵۱٪ می‌رسد، به طور مستقیم به نقص بنیادین



شکل ۱۶- مقایسه نتایج ظرفیت فروریزش سازه‌ها در دو روش تحلیل دقیق (IDA) و تقریبی (SPO2FRAG)

جدول ۹- مقایسه بین مقادیر ظرفیت میانه فروریزش حاصل از دو روش

سازه (طبقه)	روش دقیق IDA (g)	روش تقریبی SPO2FRAG (g)	درصد اختلاف
4	3.50	2.17	-38.0٪
8	2.31	1.92	-16.9٪
12	1.47	1.50	+2.0٪
16	1.05	1.59	+51.4٪

همان‌طور که در شکل ۱۶ و جدول ۹ مشهود است، یک روند مشخص در نتایج وجود دارد:

- برای سازه‌های کوتاه مرتبه (۴ و ۸ طبقه)، روش SPO2FRAG ظرفیت میانه فروریزش را کمتر از روش دقیق IDA برآورد کرده و نتایجی محافظه‌کارانه ارائه می‌دهد. این اختلاف برای سازه ۴ طبقه حدود ۳۸٪ و برای سازه ۸ طبقه حدود ۱۷٪ است.
- برای سازه میان مرتبه (۱۲ طبقه)، نتایج دو روش تطابق بسیار نزدیکی دارند و اختلاف آن‌ها تنها حدود ۲٪ است.
- برای سازه بلندمرتبه (۱۶ طبقه)، روند کاملاً معکوس شده و روش SPO2FRAG ظرفیت میانه فروریزش را به میزان قابل توجهی (حدود

استفاده ایمن و آگاهانه از ابزارهای تحلیلی تقریبی در مهندسی عملکردی برداشته است. پیگیری پیشنهادهای ارائه شده می‌تواند به توسعه نسل بعدی ابزارهای ساده‌سازی شده‌ای منجر شود که ضمن حفظ سرعت و کارایی، دقت بالاتری را برای طیف گسترده‌تری از سازه‌ها فراهم آورند.

مراجع

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

[2] Vamvatsikos D, Allin Cornell C. Direct estimation of the seismic demand and capacity of oscillators with multi-linear static pushovers through IDA. *Earthq Eng Struct Dyn*. 2006; 35 (9): 1097-117.

[3] Baltzopoulos G, Baraschino R, Iervolino I, Vamvatsikos D. SPO2FRAG: software for seismic fragility assessment based on static pushover. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2017; 15: 4399-425. <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0145-3>

[4] Sococol I, Mihai P, Petrescu T-C, Nedeff F, Nedeff V, Agop M, et al. 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*. 2022; 12 (10): 1525. <https://doi.org/10.3390/buildings12101525>

[5] Shanehsazzadeh H, Tehranizadeh M, Haj Najafi L. 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*. 2023; 10 (3): 31-48. <https://doi.org/10.48303/bese.2022.557180.1085>

[6] Kaveh A, Mahdipour Moghanni R, Javadi SM. Chaotic optimization algorithm for performance-based optimization design of composite moment frames. *Engineering with Computers*. 2022; 38 (3): 2729-41. <https://doi.org/10.1007/s00366-020-01244-z>

تحلیل بار افزون استاتیکی تک‌موده (SPO^{23}) در لحاظ کردن اثرات مودهای بالاتر ارتعاشی نسبت داده می‌شود؛ پدیده‌ای که در پاسخ دینامیکی سازه‌های بلندمرتبه غالب است. از آنجایی که الگوریتم SPO2FRAG بر پایه منحنی بار افزون استاتیکی عمل می‌کند، این محدودیت ذاتی را به ارث می‌برد.

بنابراین، نتیجه‌گیری کلیدی و کاربردی این تحقیق آن است که دامنه کاربرد نرم‌افزار SPO2FRAG و روش‌های مشابه مبتنی بر بار افزون استاندارد، برای تحلیل دیوارهای برشی فولادی باید به سازه‌های کوتاه و میان مرتبه (در این مطالعه، تا ۸ طبقه) محدود گردد. اتکا به این روش برای سازه‌های بلندمرتبه به دلیل پتانسیل بالای ایجاد خطا و ارزیابی نادرست از حاشیه ایمنی، اکیداً توصیه نمی‌شود و برای این دسته از سازه‌ها، انجام تحلیل‌های دقیق دینامیکی غیرخطی الزامی است.

این یافته‌ها، اهمیت درک عمیق محدودیت‌های روش‌های تقریبی را برجسته ساخته و مسیر را برای تحقیقات آتی جهت رفع این نواقص هموار می‌سازد. در این راستا، پیشنهادهای زیر ارائه می‌گردد: پیشنهادها برای تحقیقات آتی:

۱- به کارگیری تحلیل‌های بارافزون پیشرفته: بررسی شود که آیا استفاده از منحنی‌های ظرفیت حاصل از روش‌های بارافزون چندموده (مانند MPA^{24}) یا تطبیقی (مانند APA^{25}) به عنوان ورودی الگوریتم SPO2FRAG، می‌تواند دقت تخمین فروریزش را در سازه‌های بلند بهبود بخشد یا خیر.

۲- توسعه ضرایب اصلاحی وابسته به مشخصات دینامیکی: می‌توان برای خروجی روش SPO2FRAG، ضرایب اصلاحی تابعی از پارامترهای کلیدی دینامیکی سازه (مانند نسبت مشارکت جرمی مود دوم به اول یا پرپود تناوب اصلی سازه) توسعه داد تا خطای ناشی از نادیده گرفتن مودهای بالاتر جبران شود.

۳- کالیبراسیون مجدد الگوریتم برای سازه‌های بلند: الگوریتم SPO2IDA که موتور محاسباتی SPO2FRAG است، می‌تواند با استفاده از نتایج IDA سازه‌های بلندمرتبه مجدداً کالیبره گردد تا معادلات تجربی آن، رفتار دینامیکی این کلاس از سازه‌ها را بهتر پوشش دهد.

در نهایت، این پژوهش با تعیین کمی مرزهای کاربردپذیری روش SPO2FRAG برای دیوارهای برشی فولادی، گامی مهم در جهت

²³ Static Pushover Analysis

²⁴ Modal Pushover Analysis

²⁵ Adaptive Pushover Analysis

without stiffeners. J Constr Steel Res. 2012; 75: 152-9.
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.03.018>

[16] Jalali SA, Banazadeh M. Development of a new deteriorating hysteresis model for seismic collapse assessment of thin steel plate shear walls. Thin-Walled Struct. 2016; 106: 244-57.
<https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.05.008>

[17] Arezoomand Langarudi P, Ebrahimnejad M. Numerical study of the behavior of bolted shear connectors in composite slabs with steel deck. Structures. 2020; 26: 501-15.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.04.037>

[7] Ugalde D, Lopez-Garcia D, Parra PF. Fragility-based analysis of the influence of effective stiffness of reinforced concrete members in shear wall buildings. Bulletin of Earthquake Engineering. 2020; 18 (5): 2061-82.
<https://doi.org/10.1007/s10518-020-00786-3>

[8] Yekrangnia M. Seismic Vulnerability Assessment of Masonry Residential Buildings in the Older Parts of Tehran through Fragility Curves and Basic RVS Scores. Buildings. 2023; 13 (2).
<https://doi.org/10.3390/buildings13020302>

[9] Nazri FM, Yern KC, Kassem MM, Noroozinejad Farsangi E. Assessment of structure-specific fragility curves for soft storey buildings implementing IDA and SPO approaches. International Journal of Engineering Transactions C: Aspects. 2018: 2016-21.

[10] Arezoomand Langarudi P, Adibramezani M, Hojatkashani A, Farokhzadeh S. 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. 2025; 49 (2): 1401-19.
<https://doi.org/10.1007/s40996-024-01513-7>

[11] Vamvatsikos D, Cornell CA. Incremental dynamic analysis. Earthq Eng Struct Dyn. 2002; 31 (3): 491-514. <https://doi.org/10.1002/eqe.141>

[12] ASCE/SEI 7-22. Minimum design loads for buildings and other structures. Reston: American Society of Civil Engineering; 2022.
<https://doi.org/10.1061/9780784415788>

[13] ANSI/AISC 341-22. Seismic Provisions for Structural Steel Buildings. Chicago (IL): American Institute for Steel Construction; 2022.

[14] Mazzoni S, McKenna F, Scott MH, Fenves G. OpenSees users manual. PEER, University of California, Berkeley. 2004; 18: 56-7.

[15] Sabouri-Ghomi S, Sajjadi SRA. Experimental and theoretical studies of steel shear walls with and

