

## Seismic vulnerability evaluation of trapezoidally Corrugated Steel Shear Walls under near-and far-fault earthquakes using fragility curves

Mohammad Moula Hoveizeh<sup>1</sup>, Fereshteh Emami<sup>2\*</sup>, Mohamadreza Mansouri<sup>3</sup>

1- Master of Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

### ABSTRACT

To make structures resistant to earthquakes, various systems are used, one of the most important of these systems is a steel Moment frame with a steel shear wall, which has been used as one the systems since the 1970s. Steel shear walls are usually made in two types, stiffened and unstiffened. The idea of corrugated steel shear walls was proposed as a replacement for stiffened shear walls. These plates have high buckling resistance due to their out-of-plane stiffness. This research investigated the seismic behavior and vulnerability of steel structures with horizontally and vertically corrugated steel shear walls using ABAQUS nonlinear analysis software. For this purpose, after validation of the modeling by controlling with an experimental study, 280-time history analyses were conducted. Then fragility curves were produced on 3 and 10-story structures. 7-acceleration records of the far-Fault earthquakes and 7 acceleration records of the near-fault earthquakes were used to generate the fragility curves. The results showed the 3-story structure suffered damage at a lower acceleration compared to the 10-story structure. The structure was more fragile under near-fault rather than far-fault earthquakes. The highest percentage of damage reduction in the far-fault earthquakes compared to the near-fault occurred in the 10-story structure at the life safety performance level (LS). Further in trapezoidal samples, by changing the direction of placement of corrugation plates from horizontal to vertical, the probability of wall failure decreased at different PGA levels.

### ARTICLE INFO

Receive Date: 23 July 2022

Revise Date: 01 October 2022

Accept Date: 30 October 2022

### Keywords:

Steel shear wall  
Corrugated plate  
Fragility curve  
Incremental dynamic analysis  
Near-Fault  
Far-Fault

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.352015.2877>

\*Corresponding author: Fereshteh Emami.  
Email address: f-emami@srbiau.ac.ir

## ارزیابی آسیب پذیری لرزه ای دیوارهای برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای در حوزه

### نزدیک و دور از گسل با استفاده از منحنی‌های شکنندگی

محمد مولا هویزه<sup>۱</sup>، فرشته امامی<sup>۲\*</sup>، محمدرضا منصوری<sup>۳</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی سازه، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

#### چکیده

برای مقاوم کردن سازه‌ها در برابر زلزله، سیستم‌های مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد که یکی از مهم‌ترین این سیستم‌ها، قاب خمشی فولادی به همراه دیوار برشی فولادی است که از دهه ۱۹۷۰ میلادی به عنوان یکی از سیستم‌های باربر جانبی مطرح شد. دیوارهای برشی فولادی معمولاً در دو نوع سخت شده و سخت نشده ساخته می‌شوند. ایده دیوار برشی فولادی موجدار به عنوان یک جایگزین برای دیوارهای برشی سخت شده مطرح گردید. این ورق‌ها به دلیل دارا بودن سختی ذاتی برون صفحه‌ای، از مقاومت کمانشی بالایی برخوردار هستند. در این تحقیق رفتار لرزه‌ای و آسیب‌پذیری سازه‌های فولادی دارای دیوار برشی فولادی موجدار به صورت افقی و قائم، با استفاده از نرم‌افزار تحلیل غیرخطی ABAQUS، بررسی گردید. به همین منظور پس از اطمینان از صحت مدل‌سازی توسط کنترل با یک مدل آزمایشگاهی، با انجام ۲۸۰ تحلیل تاریخچه زمانی، بر روی سازه‌های ۳ و ۱۰ طبقه، منحنی‌های شکنندگی تولید گردید. برای تولید منحنی شکنندگی از ۷ شتاب‌نگاشت حوزه دور و ۷ شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک گسل استفاده شد. نتایج نشان داد سازه ۳ طبقه در قیاس با سازه ۱۰ طبقه، در شتاب پایین‌تری دچار آسیب‌پذیری می‌شود و سازه در حوزه نزدیک گسل شکنندگی بیشتری نسبت به حوزه دور از گسل دارد. بیشترین درصد کاهش خرابی در زلزله‌های حوزه دور نسبت به حوزه نزدیک در سازه ۱۰ طبقه در سطح عملکرد ایمنی جانی (LS) اتفاق افتاد که برابر ۸۵ درصد بود. همچنین در نمونه‌های دوزنقه‌ای با تغییر راستای قرارگیری ورق موجدار از افقی به قائم، احتمال خرابی دیوار در سطح‌های مختلف PGA کاهش یافت.

کلمات کلیدی: دیوار برشی فولادی، ورق موجدار، منحنی شکنندگی، تحلیل دینامیکی افزایشی، حوزه نزدیک، حوزه دور

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.352015.2877	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.352015.2877	۱۴۰۲/۰۵/۳۱	۱۴۰۱/۰۸/۰۸	۱۴۰۱/۰۸/۰۸	۱۴۰۱/۰۷/۰۹	۱۴۰۱/۰۵/۰۱
فرشته امامی f-emami@srbiau.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

در مناطق لرزه‌خیز از سازه‌های فولادی باتوجه به سرعت اجراء، سختی و شکل‌پذیری مناسب به طور گسترده استفاده می‌شود. سیستم‌های سازه‌ای فولادی شامل سیستم مهاربندی، قاب خمشی و دیوار برشی فولادی می‌باشد که در چهار دهه اخیر سیستم دیوار برشی فولادی به دلیل سختی اولیه زیاد، مقاومت نهایی بالا، جذب انرژی و شکل‌پذیری زیاد، اقتصادی بودن و سادگی اجرا مورد توجه قرار گرفته است. در کنار مزایای این سیستم یکی از مهم‌ترین معایب آن کماتش ورق فولادی می‌باشد که این کماتش به علت مقاومت ناچیز ورق در راستای عمود بر صفحه رخ می‌دهد که برای رفع این مشکل از سخت‌کننده استفاده می‌شود که سبب افزایش وزن سازه و هزینه تمام شده آن می‌شود. استفاده از دیوار برشی فولادی موج‌دار باعث جلوگیری از کماتش زود هنگام ورق فولادی می‌شود در نتیجه سختی اولیه، جذب انرژی و شکل‌پذیری بالاتری نسبت به دیوار برشی فولادی معمولی دارد.

وقوع پدیده زلزله دارای ماهیتی تصادفی می‌باشد، لذا باید با رویکردی احتمالاتی به بررسی آن پرداخت. باتوجه به ماهیت تصادفی و وجود عدم قطعیت‌های زیاد در زلزله، نمی‌توان با بیان قطعی، رفتار سازه را در شدت‌های مختلف زلزله بررسی کرد؛ بنابراین، نیاز به ابزارهایی برای ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای سازه‌ها ضرورت می‌یابد. منحنی‌های شکنندگی یکی از ابزارهای مفید در جهت تحقق این منظور است. منحنی‌های مذکور در واقع احتمال فراگذشت خسارت سازه از یک حد مشخص را در مقابل جنبش‌های لرزه‌ای زمین بیان می‌کنند. منحنی‌های شکنندگی در ارزیابی خسارت لرزه‌ای ساختمان‌ها از اهمیت قابل توجهی برخوردار است.

در سال ۲۰۱۳، امامی و همکاران به بررسی آزمایشگاهی دیوارهای برشی فولادی ساخته شده از ورق موج‌دار تحت بارگذاری چرخه‌ای پرداختند. در این خصوص سه نمونه دیوار برشی فولادی با ورق صاف، ورق موج‌دار دوزنقه‌ای قائم و ورق موج‌دار دوزنقه‌ای افقی مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج به دست آمده در این پژوهش اگرچه مقاومت نهایی نمونه صاف ۱۷ درصد از نمونه‌های موج‌دار بیشتر است، اما ظرفیت اتلاف انرژی، شکل‌پذیری و سختی اولیه نمونه‌های موج‌دار به ترتیب ۵۲، ۴۰ و ۲۰ درصد بیشتر از نمونه صاف بوده است [۱].

در سال ۲۰۱۵ یداللهی و همکاران به بررسی رفتار دیوار برشی فولادی موج‌دار دوزنقه‌ای پرداختند. در این تحقیق با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی به بررسی عددی رفتار غیرخطی دیوار برشی فولادی موج‌دار دوزنقه‌ای پرداخته شد. نتایج تحقیق نشان داد که دیوار با ابعاد ثابت ورق موج‌دار دوزنقه‌ای نسبت به ورق موج‌دار سینوسی از اتلاف انرژی، شکل‌پذیری و مقاومت نهایی بالاتری برخوردار است و همچنین مقدار مصرف فولاد مصرفی کاهش پیدا می‌کند همچنین اثر افزایش عمق موج بر روی سختی و مقاومت نهایی، در ورق سینوسی نسبت به ورق موج‌دار دوزنقه‌ای بیشتر است. در دیوار برشی فولادی موج‌دار دوزنقه‌ای با افزایش طول دهانه، مقاومت نهایی کاهش اما سختی اولیه آن افزایش پیدا می‌کند. همچنین نتایج نشان داد که افزایش طول ورق بر مقاومت نهایی مدل سینوسی اثرگذار نیست؛ اما در حالت کلی با شرایط یکسان، دیوار برشی فولادی موج‌دار دوزنقه‌ای نسبت به دیوار برشی فولادی موج‌دار سینوسی عملکرد بهتری دارد [۲].

فرزام پور و لامان<sup>۱</sup> در سال ۲۰۱۵ به بررسی رفتار دیوار برشی فولادی موج‌دار دارای بازشو و بدون بازشو پرداختند. آن‌ها در این پژوهش یک سری نمونه‌های دیوار برشی فولادی موج‌دار دوزنقه‌ای را در نرم‌افزار ABAQUS مورد تحلیل قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از دیوار برشی فولادی موج‌دار دوزنقه‌ای موجب افزایش سختی اولیه سیستم شده و باعث به تعویق افتادن مقاومت نهایی در مقایسه با دیوار برشی فولادی ساده می‌گردد. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که کرنش‌های پلاستیک ایجاد شده در نزدیکی لبه‌های بازشو در دیوار برشی فولادی موج‌دار دوزنقه‌ای کمتر از نمونه متناظر دیوار برشی فولادی ساده است [۳].

مطالعات متعدد آزمایشگاهی و تئوریک بر روی دیوارهای برشی فولادی توسط محققین مختلف صورت پذیرفته است. گرامی و همکاران در سال ۱۳۹۴ به ارزیابی آسیب‌پذیری سازه‌های فولادی با دیوار برشی فولادی جدار نازک بر اساس توسعه منحنی‌های شکنندگی پرداختند. در این تحقیق با انجام ۳۶۰ تحلیل تاریخچه زمانی بر روی سازه‌های ۳، ۱۰ و ۲۰ طبقه، منحنی‌های شکنندگی تولید گردیده است. به منظور طراحی دیوارهای برشی فولادی با ورق نازک، ابتدا طراحی اولیه مقاطع تیر، ستون و ورق دیوارها مشابه یک خرپای قائم با

<sup>1</sup>Laman

مهاربندهای صرفاً کششی انجام شد. پس از تولید منحنی‌های شکنندگی مشاهده گردیده است که سازه‌های میان مرتبه و بلندمرتبه عملکرد بهتر و سطح خرابی کمتری در مقایسه با سازه‌های کوتاه مرتبه در زلزله‌های حوزه دور و نزدیک گسل دارند [۴].

کلالی و همکاران در سال ۲۰۱۶ به بررسی عددی دیوار برشی فولادی موجدار سینوسی پرداختند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که صفحه فولادی با زاویه ۳۰ درجه کاملاً نسبت به ضخامت ورق حساس می‌باشد [۵].

یانگ<sup>۲</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۶ به بررسی مودهای خرابی و پارامترهای کلیدی دیوار برشی فولادی موجدار پرداختند. از آنجایی که ورق فولادی در دیوار برشی فولادی معمولی به آسانی کمانش می‌کند برای جلوگیری از کمانش باید از سخت‌کننده استفاده شد که غیر اقتصادی است. لذا بکارگیری سیستم دیوار برشی فولادی موجدار برای مهار کمانش موثر و اقتصادی می‌باشد. در این پژوهش با استفاده از تحلیل استاتیکی غیر خطی مودهای خرابی، کمانش و ظرفیت نهایی بررسی شد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت ورق موجدار، دیوار برشی فولادی موجدار سه مود خرابی دارد که شامل کمانش در ورق موجدار، خرابی در تیر و خرابی در ستون می‌شود. دیوار برشی فولادی موجدار می‌تواند قبل از کمانش ورق به حد تسلیم برسد [۶].

در سال ۲۰۱۶ یادگاری و همکاران به مطالعه نیروها و گشتاورهای محوری طراحی در ستون‌های مرزی دیوارهای برشی کامپوزیتی (C-PSW) پرداختند که نشان داد مفاهیم طراحی ظرفیت مطابقت خوبی با آنالیزهای لرزه‌ای غیرخطی دارند [۷].

در سال ۲۰۱۶ پاچیده و همکاران به دیوارهای برشی ورق فولادی نازک (SPSW) پرداختند. یک سیستم موثر در برابر نیروی جانبی که به طور فزاینده‌ای در سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. بر اساس مدل نواری، این مقاله یک مدل ساده شده جدید برای SPSW ها به نام مدل سه نواری پیشنهاد می‌کند که در آن صفحات پرکننده SPSW ها با سه نوار فقط کششی جایگزین می‌شوند. مقایسه‌های تجربی به دست آمده از پاسخ‌های فشار SPSWs و آن‌هایی که توسط مدل پیشنهادی پیش‌بینی شده‌اند ارائه شده و پاسخ منطقی مشاهده می‌شود. یک مطالعه پارامتری تأثیر نسبت ابعاد و انعطاف‌پذیری ستون را بر دقت رفتار غیرکشسانی پیش‌بینی شده از مدل سه نواری بررسی می‌کند. علاوه بر این، ظرفیت مدل پیشنهادی در پیش‌بینی نیروهای قاب بر اساس نتایج مدل آزمایشی و نواری تأیید می‌شود. مشخص شد که مدل سه نواری می‌تواند نتایج کلی دقیقی را برای SPSW ارائه کند و در عین حال حجم کار مدل‌سازی و هزینه محاسباتی را کاهش دهد. [۸].

شون<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۷ به بررسی آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای پرداختند. به منظور بررسی رفتار سیستم از بارگذاری رفت و برگشتی استفاده شد. در این تحقیق یک مدل دیوار برشی فولادی ساده و دو مدل دیوار برشی فولادی موجدار افقی و قائم مورد آزمایش قرار گرفت، با مشاهده تغییر شکل‌ها در نمونه‌ها مشخص شد که در ورق فولادی با موج قائم ابتدا کمانش موضعی شکل می‌گیرد و سپس کمانش کلی رخ می‌دهد اما در ورق فولادی افقی تنها کمانش کلی شکل می‌گیرد [۹].

حسین‌زاده و همکاران در سال ۲۰۱۷ به بررسی آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای با زوایای مختلف پرداختند. در این پژوهش اثرات تغییر زاویه موج با سه نمونه با زاویه موج ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش زاویه، تمرکز تنش در گوشه ورق افزایش می‌یابد. همچنین گسترش و تشکیل میدان کشش قطری و گسیختگی دیوار به هندسه ورق وابسته است. با افزایش زاویه ورق، سختی و اتلاف انرژی و مقاومت نهایی کاهش پیدا کرده است [۱۰].

در سال ۲۰۱۸ پنگ<sup>۴</sup> و همکارانش یک روش طراحی برای دیوار برشی فولادی موجدار تحت اثر حرکت زمین لرزه ارائه کردند. در این پژوهش با در نظر گرفتن یک ساختمان اداری ۶ طبقه به عنوان نمونه، بر مبنای تئوری طراحی مقاومت برشی اعضای فولادی یک روش

<sup>2</sup> Qiang

<sup>3</sup> Shon

<sup>4</sup> Xiao-Tong PENG

طراحی برای دیوار برشی فولادی موجدار ارائه شد که در آن راستای موج، انتخاب شکل موج، ضخامت ورق و مقاومت اتصالات و مفاصل در نظر گرفته شد. نتایج نشان می‌دهد که روش طراحی ارائه شده، کاربردی و مؤثر می‌باشد [۱۱].

عسکریانی و شهبابیان در سال ۱۳۹۸ به تعیین آسیب پذیری لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی موجدار پرداختند و به منظور مقایسه و ارزیابی رفتار لرزه‌ای آن‌ها منحنی‌های شکنندگی تولید و ترسیم کردند. برای این کار، اثر شکل، زاویه‌ی موج و همچنین راستای قرارگیری ورق موجدار مورد بررسی قرار گرفته است. تولید این منحنی‌ها از طریق انجام ۴۲ تحلیل دینامیکی غیرخطی برای هر قاب به وسیله‌ی نرم‌افزار ABAQUS با اعمال شتاب نگاشت‌هایی با شدت‌ها و محتوای فرکانسی مختلف و به‌کارگیری توابع آماری و احتمالاتی میسر شد. در این پژوهش با به‌دست‌آوردن منحنی‌های شکنندگی و مقایسه نتایج برای حالت‌های دیوار برشی موجدار دوزنقه‌ای، مثلی و قائم به این نتایج دست‌یافتند که در نمونه‌های دوزنقه‌ای قائم در شدت‌های پایین لرزه‌ای با افزایش زاویه‌ی موج احتمال خرابی دیوار کاهش یافته است، این در حالی است که در شدت‌های بالای لرزه‌ای با افزایش زاویه‌ی موج احتمال خرابی آنها افزایش یافته است [۱۲].

در سال ۲۰۱۹ دسوک<sup>۵</sup> و همکاران، به بررسی ظرفیت نهایی دیوار برشی فولادی موجدار با استفاده از روش اجزا محدود پرداختند. پارامترهای مورد بررسی شامل ضخامت ورق موجدار، ابعاد موج، راستای موج و مشخصات هندسی قاب پیرامونی می‌باشد. نتایج نشان داد که استفاده از ورق موجدار به‌جای ورق صاف، مستقیماً بر ظرفیت نهایی سیستم اثرگذار است. مقاومت نهایی در سیستم دیوار برشی فولادی موجدار الزاماً از مقاومت نهایی دیوار برشی فولادی معمولی بیشتر نیست. ورق موجدار قائم بیشترین مقدار ظرفیت را نسبت به سایر مدل‌ها دارد. عملکرد دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای نسبت به دیوار برشی فولادی موجدار سینوسی بهتر است [۱۳].

در سال ۲۰۱۹ پاچیده و همکاران در این مقاله ۲۷ قاب شامل ۱۸ قاب با دیوارهای برشی ورق فولادی نازک به عنوان سیستم مقاوم در برابر بار جانبی و همچنین ۹ قاب ویژه خمشی با سه ارتفاع مختلف در اندازه‌های کوتاه مرتبه، میان مرتبه و بلند مرتبه مورد تجزیه و تحلیل قرار داده‌اند. آسیب به هر قاب برای سطوح مختلف عملکرد با استفاده از شاخص پارک-انگ، شاخص جابجایی نسبی حداکثر، شاخص تغییر شکل و شاخص شکل‌پذیری پلاستیک محاسبه می‌شود. مشاهدات نشان می‌دهد که شاخص آسیب برای سیستم‌های بار جانبی دیوار برشی ورق فولادی در قاب‌های بلندتر منجر به نتایج بهتر و ایمنی بالاتر نسبت به سایر قاب‌ها می‌شود. [۱۴].

در سال ۲۰۱۹ پاچیده و همکاران به مطالعه روش مقاوم‌سازی لرزه‌ای در سازه‌های بتن آرمه با استفاده از بادبندهای فولادی پرداختند. در این مقاله، تأثیر سیستم مهاربندی همگرا و واگرا بر عملکرد لرزه‌ای سیستم‌های ساختمان‌های بتن آرمه دوگانه از طریق هفت رکورد زلزله نزدیک به گسل بررسی شد. [۱۵].

در سال ۲۰۲۱ جینیو لوه<sup>۶</sup> و همکاران عملکرد دیوارهای برشی ورق فولادی خود محور با برش (SC - SPSWS) را مورد بررسی قرار دادند که یک سیستم مقاوم در برابر بار لرزه‌ای جدید است که شکل‌پذیری خوب، ظرفیت اتلاف انرژی دیواره‌ای برشی ورق فولادی با برش (SPSWS) و قابلیت‌های ورودی قاب‌های فولادی خود محور (SCSF) را ترکیب می‌کند. این مقاله تحلیل المان محدود SCSF تحت بارگذاری چرخه‌ای را ارائه می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که سازه با لایه‌های اتصال خمشی بیشتر و صفحات فولادی ضخیم‌تر دارای ظرفیت تحمل نهایی بالاتر و ظرفیت اتلاف انرژی بهتر است، اما در عین حال قابلیت ورود مجدد تضعیف می‌شود. همچنین نتیجه گرفته شده است که با کاهش ارتفاع دهانه، شکل‌پذیری سازه به شدت کاهش می‌یابد [۱۶].

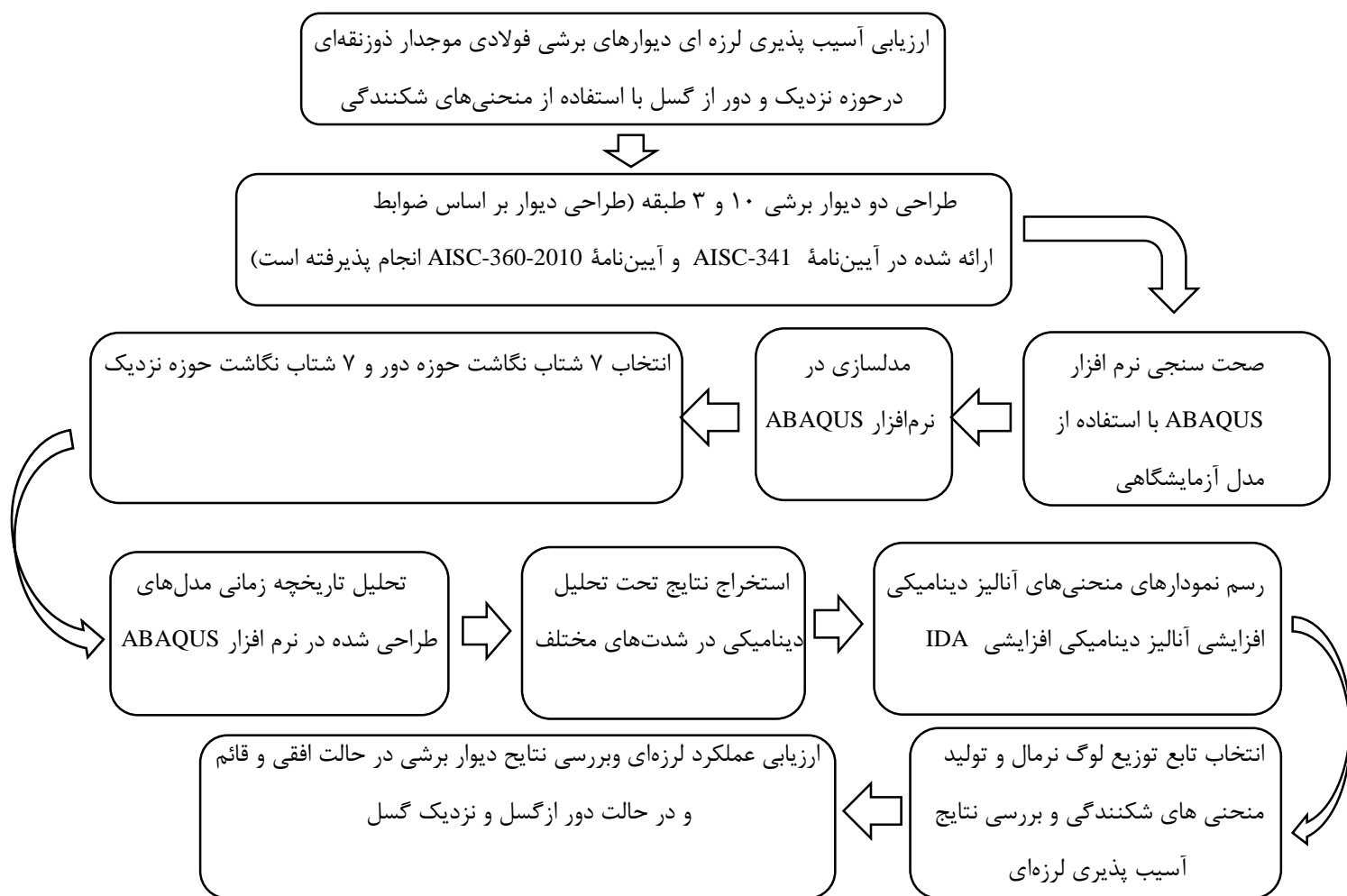
در سال ۲۰۲۱ اسعدی و همکاران اثر چیدمان دیوار برشی فولادی موج‌دار سرد نورد شده با استفاده از منحنی شکنندگی را بررسی کردند. در این تحقیق، تأثیر چیدمان دیوار برشی فولادی موج‌دار با فولاد سرد نورد شده در سازه‌های ۳، ۵ و ۷ طبقه بررسی شده است. [۱۷].

<sup>5</sup> Dessouki

<sup>6</sup> Jinyu Lu

در سال ۲۰۲۱ مرادیان و همکاران رفتار لرزه ای قاب های مهاربندی شده واگرا تحت زلزله اصلی و پس لرزه را مورد مطالعه قرار دادند. برای این منظور ساختمان های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه با استفاده از پس لرزه های منتخب تحت تحلیل های فزاینده، تاریخچه زمانی غیرخطی و دینامیکی افزایشی قرار گرفتند. همچنین منحنی های شکنندگی برای سطوح مختلف شکست قبل و بعد از زلزله اصلی ارائه شد. نتایج نشان دهنده استحکام بالا و ظرفیت باربری مناسب قاب های مهاربندی شده واگرا تحت زلزله های متعدد است که می تواند به سطوح کارایی بالا دست یابد [۱۸].

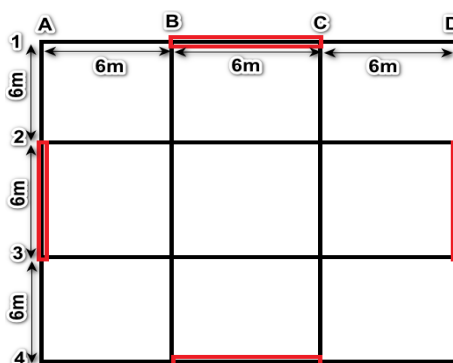
هدف از این تحقیق، تحلیل و ارزیابی شکنندگی لرزه ای و رسم منحنی های شکنندگی برای دیوارهای برشی فولادی موجدار دوزنقه ای تحت زلزله های دور و نزدیک گسل می باشد. برای انجام این کار، سازه های ۳ طبقه فولادی به عنوان سازه کوتاه مرتبه و ۱۰ طبقه فولادی به عنوان سازه میان مرتبه، با ورق های موجدار قائم و افقی در نظر گرفته شده است. در این راستا، تحلیل های دینامیکی افزایشی بر روی نمونه ها هم برای زلزله های حوزه دور و هم برای زلزله های حوزه نزدیک انجام شده است. در این خصوص از بیشینه تغییر مکان بین طبقه ای به عنوان شاخص خسارت و از PGA به عنوان شاخص شدت تحریک استفاده شده است. در پایان، با در نظر گرفتن سطوح عملکردی مختلف و انجام تحلیل های آماری، توابع شکنندگی گسترش یافته و منحنی های شکنندگی تولید و ترسیم شده اند. روند انجام تحقیق در قالب فلوجارتی در شکل ۱ آمده است.



شکل ۱- فلوجارت روند انجام تحقیق

## ۲- مدل سازی

در این تحقیق به منظور ارزیابی آسیب پذیری لرزه ای دیوار برشی فولادی موجدار تحت زلزله های حوزه نزدیک و دور از گسل، دو نمونه دیوار برشی فولادی ۳ و ۱۰ طبقه با ورق های موجدار قائم و افقی در نظر گرفته شده است. برای طراحی دیوار برشی فولادی، یک ساختمان ۳ طبقه و ۱۰ طبقه با پلان مشابه واقع در شهر تهران در نظر گرفته شده است. پلان استفاده شده در طراحی سازه ها در شکل ۲ نشان داده شده است. در این پلان در هر راستا ۲ دیوار برشی فولادی قرار گرفته است و اتصالات تیرها مفصلی می باشد. ارتفاع طبقات ۳۲۰ سانتی متر در نظر گرفته شده است. مشخصات لرزه ای ساختمان مذکور در جدول ۱ ارائه شده است. برای تمامی اعضای سیستم لرزه ای از فولاد St37 با مقاومت تسلیم ۲۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع استفاده شده است. برای محاسبه بار ثقلی از ترکیب بار  $1.2D+0.5L$  استفاده شده است. بارگذاری زلزله نیز مطابق با روش استاتیکی معادل ارائه شده در آیین نامه ۲۸۰۰ ویرایش چهارم [۱۹] محاسبه شده است. طراحی دیوار بر اساس ضوابط ارائه شده در آیین نامه AISC-341 [۲۰] و آیین نامه AISC-360-2010 [۲۱] انجام پذیرفته است.



شکل ۲: پلان ساختمان

در طراحی اولیه از آنجایی که ابعاد هندسی تیرها و ستون ها مشخص نیست، لذا فرض می شود که صفحه جان در هر طبقه در برابر برش کل آن طبقه مقاومت نماید. به دلیل اینکه زاویه میدان کششی در صفحه جان به مشخصات سطح مقطع تیر و ستون، ضخامت صفحه جان و ابعاد قاب وابسته است، لذا زاویه میدان کششی در طراحی اولیه فرض می شود. طراحی های معمول نشان می دهد که مقدار زاویه میدان کششی در محدوده ۳۰ تا ۵۵ درجه متغیر است [۲۲]. در اینجا با توجه به پیشنهاد AISC 341 [۲۰] زاویه  $\alpha$  برابر ۴۰ درجه فرض گردید. برای طراحی اعضای مرزی قائم در دیوارهای برشی فولادی (VBE) هر دو معیار مقاومت و سختی باید در نظر گرفته شود. حداقل مقدار ممان اینرسی مورد نیاز مقطع ستون بر اساس معیار سختی که بر اساس مشخصات هندسی قاب و ضخامت ورق در طبقه مورد نظر می باشد، تعیین شده است. همچنین برای طراحی تیرها ممان اینرسی حداقل تیر که البته با اصلاح مراجع باید درست نوشته شود در نظر گرفته شده است. مشخصات هندسی ورق موج دار مطابق مدل های آزمایشگاهی امامی و همکاران [۱] در نظر گرفته شده است که در شکل ۳ مشاهده می گردد. مطالعات پارامتریک حسین زاده و همکاران [۱۰] نیز چنین مشخصات هندسی را برای ورق های موج دار تایید می کند. در جدول ۲ و ۳ ضخامت نهایی ورق برشی و مقاطع به دست آمده ارائه شده است. در این پژوهش از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS به منظور مدل سازی و تحلیل عددی سازه ها مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل ۴ مدل سازی سازه ۳ طبقه در نرم افزار ABAQUS با حالت ورق های دیوار برشی موجدار دوزنقه ای افقی و قائم نشان داده شده است. در این پژوهش از مدل کشسان - مومسان برای تعریف نمودار تنش - کرنش فولاد استفاده شده است. در این پژوهش، برای مدل سازی ورق فولادی از المان پوسته (S4R) استفاده شده است که یک المان چهار گرهی دو انحنایی با انتگرال گیری کاهش یافته است. هر گره از این المان ۶ درجه آزادی یعنی ۳ درجه آزادی دورانی و ۳ درجه آزادی انتقالی دارد.

جدول ۱: مشخصات لرزه‌ای سازه ۳ و ۱۰ طبقه

مشخصات	
0.35	شتاب مبنای طرح (A)
1	ضریب اهمیت (I)
8	ضریب رفتار (R)
III	نوع خاک

جدول ۲: مقاطع سازه ۳ طبقه (mm)

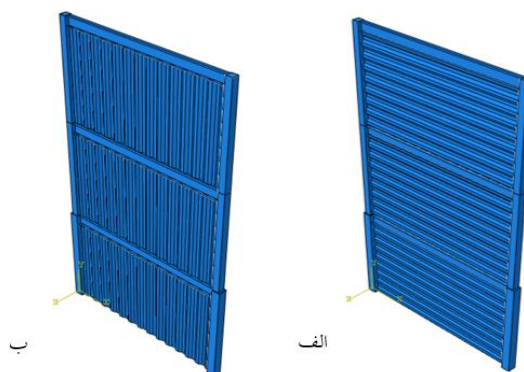
طبقه	ستون	تیر	ضخامت دیوار برشی
1	BOX250X250X15	IPE 330	2.0
2	BOX250X250X15	IPE 330	1.5
3	BOX200X200X15	IPE 300	1.5

جدول ۳: مقاطع سازه ۱۰ طبقه (mm)

طبقه	ستون	تیر	ضخامت دیوار برشی
1	BOX280X280X30	IPE 330	5.5
2	BOX280X280X30	IPE 330	5.5
3	BOX280X280X30	IPE 330	5.5
4	BOX280X280X25	IPE 300	5
5	BOX280X280X25	IPE 300	5
6	BOX280X280X25	IPE 300	4
7	BOX280X280X20	IPE 300	3.5
8	BOX250X250X20	IPE 300	3
9	BOX250X250X15	IPE 300	2
10	BOX200X200X15	IPE 300	1



شکل ۳: مشخصات هندسی ورق موجدار دوزنقه‌ای (mm) [۹]

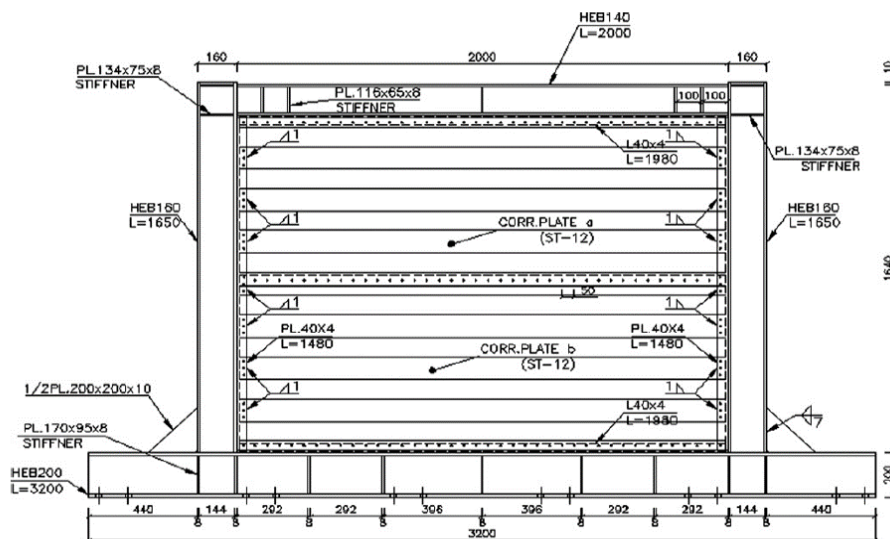


شکل ۴: دیوار برشی فولادی ۳ طبقه (الف) ورق دوزنقه‌ای افقی (ب) ورق دوزنقه‌ای قائم



## ۳- صحت سنجی نرم افزار

در این تحقیق به منظور صحت سنجی نرم افزار ABAQUS از مدل آزمایشگاهی امامی و همکاران استفاده شده است [۱]. در کار آزمایشگاهی سه نمونه دیوار برشی فولادی با ورق صاف، ورق موج دار دوزنقه ای قائم و ورق موج دار دوزنقه ای افقی تحت بار چرخه ای مورد بررسی قرار گرفته است. طول و ارتفاع تمامی دیوارهای تحت بارگذاری به ترتیب برابر با ۲۳۲۰ میلی متر و ۱۶۴۰ میلی متر است. همچنین طول و عرض ورق جان دیوار برشی فولادی به ترتیب برابر ۲۰۰۰ میلی متر و ۱۵۰۰ میلی متر است. ستون ها از نوع HEB160 و تیر از نوع HEB140 هستند که متناسب با IPB160 و IPB140 هستند. نحوه اتصال تیر به ستون به صورت گیردار می باشد. در این آزمایش از ورق های موج دار دوزنقه ای به ضخامت ۱/۲۵ میلی متر استفاده شده است که جزئیات آن در شکل ۳ بیان شده است. در نمونه ها از اثر بار ثقلی صرف نظر شده است. از سوی دیگر، از حرکت خارج از صفحه تیر و ستون ها جلوگیری به عمل آمده است. در این تحقیق فقط نمونه موج دار افقی مدل سازی و صحت سنجی گردید (شکل ۵).



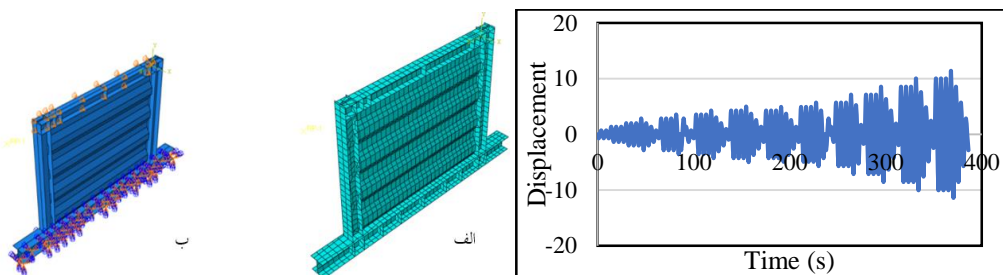
شکل ۵: نمای کلی و جزئیات نمونه دیوار برشی فولادی مدل آزمایشگاهی امامی و همکاران

مدل سازی دیوار برشی فولادی بر اساس اطلاعات موجود از کار آزمایشگاهی، در نرم افزار ABAQUS صورت گرفته است (شکل ۶). در این پژوهش از مدل کشسان- مومسان برای تعریف نمودار تنش- کرنش فولاد استفاده شده است. این رفتار در فشار و کشش یکسان می باشد. همچنین، ضریب کشسانی مصالح در بار برداری برابر با ضریب کشسانی اولیه فرض می گردد. در نمونه ها اثر بار ثقلی در نظر گرفته نشده است. از سوی دیگر، از حرکت خارج از صفحه تیر و ستون ها جلوگیری به عمل آمده است. برای مدل سازی تمام اعضای مرزی و ورق

فولادی در نرم افزار ABAQUS، از المان پوسته (S4R) استفاده شده است. بارگذاری از نوع کنترل تغییر مکان بوده و در بالای قاب اعمال گردیده است. الگوی بارگذاری در شکل ۷ نشان داده شده است. رفتار غیر خطی مصالح به صورت ایزوتروپیک فرض شده است. مشخصات فولادهای مصرفی در این راستی آزمایی در جدول ۴ آورده شده است. تحلیل انجام شده به صورت Dynamic Implicit از نوع شبه استاتیکی Quasi Static است.

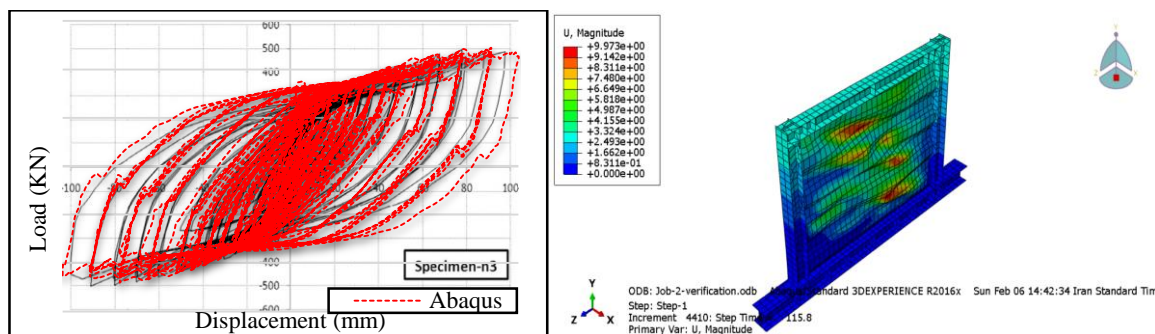
جدول ۴: مشخصات فولادهای مصرفی

نوع عضو	ضریب کشسانی E (GPa)	تنش تسلیم $f_y$ (MPa)	تنش نهایی $f_u$ (MPa)	ضریب پواسون
ورق	210	207	290	0.3
ستون	210	300	443	0.3
تیر	210	288	456	0.3



شکل ۶: الف) نحوه شبکه بندی (ب) شرایط مرزی ایجاد شده در مدل / شکل ۷: الگوی بارگذاری بر اساس تغییر مکان

تصویر تغییر شکل یافته دیوار برشی فولادی با ورق موجدار قائم پس از اعمال بارگذاری در شکل ۸ ارائه شده است. همچنین منحنی هیستریزس به دست آمده از تحلیل به همراه منحنی متناظر حاصل از آزمایش نیز در شکل ۹ ارائه شده است که بیانگر تطابق خوب آنها در مقاومت، سختی و جذب انرژی می باشد. به طور کلی، بر اساس نتایج به دست آمده اختلاف مقاومت نهایی نمونه های عددی و آزمایشگاهی در حدود ۱ درصد است. بررسی نتایج به دست آمده و نیز بررسی رفتار نمونه مدل سازی شده در طول بارگذاری نشان می دهد نتایج عددی و آزمایشگاهی انطباق قابل قبولی با یکدیگر دارند. اختلاف بدست آمده از نمونه آزمایشگاهی و مدل سازی عددی در جدول ۵ آورده شده است.



شکل ۹: نمودار مقایسه مدل آزمایشگاهی و مدل نرم افزاری

شکل ۸: تصویر تغییر شکل یافته نمونه موجدار افقی

جدول ۵: اختلاف به دست آمده از مدل آزمایشگاهی و مدل سازی عددی

Max strength Abaq (KN)	489.3734	اختلاف %	0.127876
Maxstrength Exp(KN)	490		

#### ۴- شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده در تحقیق

در بررسی عملکرد یک سازه و تحلیل شکنندگی آن، انتخاب شتاب‌نگاشت‌های مناسب زلزله امری مهم است. در این پژوهش، برای انجام تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی از هفت شتاب‌نگاشت میدان نزدیک و دور مربوط به خاک نوع III استفاده شده است. در مراجع مختلف فاصله ایستگاه تا گسل مسبب زلزله ۱۰،۱۵ و ۲۰ کیلومتر به عنوان مرز بین زلزله های حوزه نزدیک و دور ارائه گردیده است. در این تحقیق با توجه به فاصله رکوردهای داده شده در FEMA P965 [۲۳] شتاب‌نگاشت‌های مربوط به حوزه دور و نزدیک انتخاب شده است. مشخصات شتاب‌نگاشت‌های در نظر گرفته شده در جدول ۵ و ۶ بیان شده است.

جدول ۵: شتاب‌نگاشت‌های حوزه دور

بزرگا	PGA(g)	فاصله (Km)	نام ایستگاه	نام زلزله	شماره در دیتابیس (PEER BERKELEY)
7/2	0/136	102/82	Mecca	El Mayor	5861
7/14	0/118	97/51	Yarimca	Duzce	1621
7/51	0/1109	126/03	Botas	Kocaeli	1153
6/9	0/15	95/72	HIK	Kobe	1105
7	0/129	119/11	HMCS	Darfield	6910
6/53	0/168	31/92	Victoria	Imperial Valley	191
6/54	0/259	27	Calipatria	Superstition	720

جدول ۶: شتاب‌نگاشت‌های حوزه نزدیک

بزرگا	PGA (g)	فاصله (Km)	نام ایستگاه	نام شتاب‌نگاشت	شماره در دیتابیس (PEER BERKELEY)
7/2	0/406	9/98	El Centro	El Mayor	8161
7/14	0/806	12/02	Bolu	Duzce	1602
7/51	0/32	1/38	Yarimca	Kocaeli	1176
6/9	0/348	3/31	Port Island	Kobe	1114
7	0/764	1/22	GDLC	Darfield	6906
6/53	0/529	1/76	El Centro	Imperial Valley	180
6/54	0/432	0/95	Parachute	Superstition	723

#### ۵- مقیاس کردن رکوردها برای تحلیل های دینامیکی افزایشی (IDA)

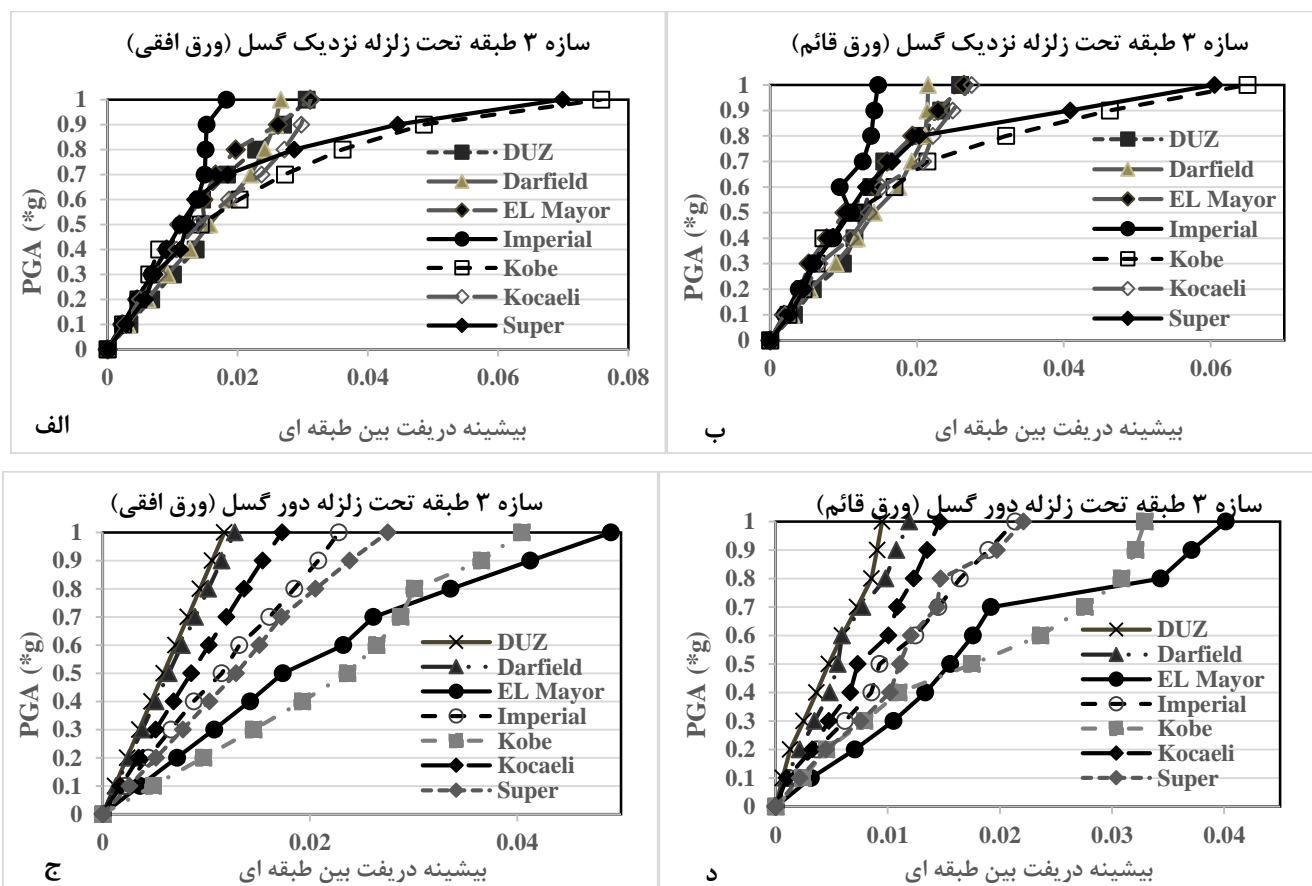
در تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی، هنگامی که مقدار حداکثر شتاب زمین و متناسب با آن کلیه شتاب‌های یک شتاب‌نگاشت مرتباً افزایش داده می‌شوند، طیف پاسخ ارتجاعي حاصل از آن شتاب‌نگاشت نیز متناسباً افزایش می‌یابد. با افزایش تدریجی طیف حاصل از شتاب‌نگاشت، این طیف تمام بخش‌های طیف طراحی را که در محدوده زمان تناوب ارتعاش مدهای مختلف ارتعاشی سازه واقع شده‌اند را پوشش می‌دهد [۲۴].

به منظور به دست آوردن شتاب‌نگاشت زمین لرزه‌ای با سطوح شدت ضعیف تا خیلی قوی، بردار شتاب‌نگاشت مقیاس نشده با اعضای  $a_1(t_i)$ ، در ضریب مقیاس  $\lambda$ ، به صورت  $\alpha_\lambda = \lambda a_1$  ضرب می‌گردد. ضریب مقیاس،  $\lambda$  یک مقدار اسکالر مثبت است. اگر بردار

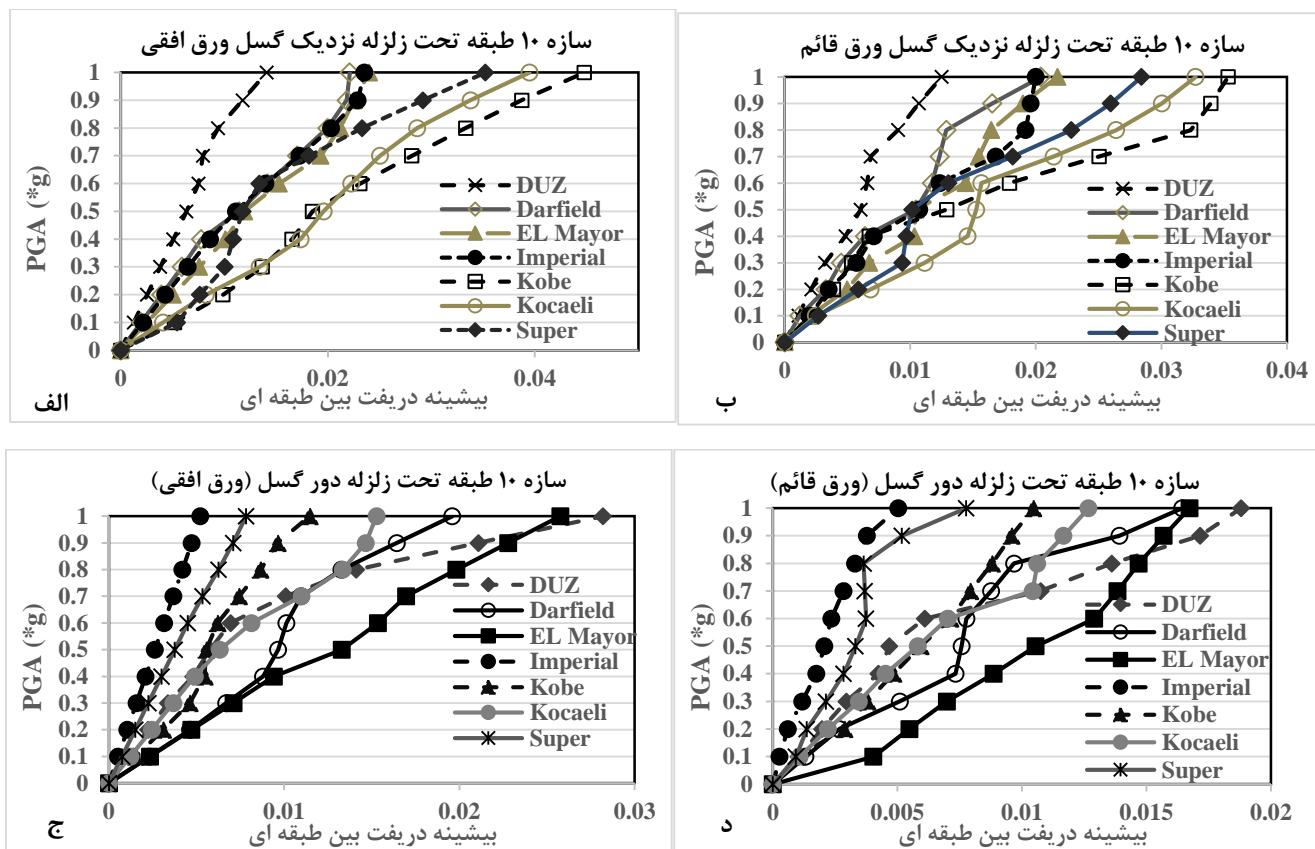
شتاب‌نگاشت مقیاس نشده را  $a_1$  و بردار شتاب‌نگاشت مقیاس شده را  $\alpha_1$  بنامیم، با در نظر گرفتن  $\lambda = 1$ ، شتاب‌نگاشت اولیه،  $\lambda < 1$  یک شتاب‌نگاشت ضعیف شده و با  $\lambda > 1$  یک شتاب‌نگاشت تقویت شده حاصل می‌شود [۲۴].

این ضریب باید به گونه‌ای انتخاب شود که بتواند محدوده رفتار خطی، غیرخطی و در نهایت فروریزش سازه را تحت پوشش قرار دهد. یک IDA تک رکوردی نمی‌تواند به طور کامل رفتار سازه را بیان نماید. IDA می‌تواند وابستگی زیادی به رکورد انتخابی داشته باشد، از این رو تعداد کافی رکوردها برای پوشش کامل پاسخ مورد نیاز است. پس از اعمال ضرایب ثابت بر مقادیر شتاب‌نگاشت‌ها با استفاده از نرم‌افزار سایز موسیگنال، فاصله خالی رکوردهای با شدت غایب را پر می‌کنیم. در این تحقیق از گام افزایشی ۰٫۱ برای هر یک از ۷ زلزله حوزه دور و ۷ زلزله حوزه نزدیک استفاده گردیده است که تا عدد یک ادامه پیدا می‌کند.

منحنی‌های تحلیل دینامیکی افزایشی برای حوزه دور و نزدیک گسل برای قرارگیری ورق به صورت افقی و قائم در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ برای سازه ۳ و ۱۰ طبقه به ترتیب نشان داده شده است. تحلیل دینامیکی افزایشی بر اساس شاخص دریافت بین طبقه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. در شاخص خرابی دریافت بین طبقه‌ای برای سازه ۳ طبقه با ورق افقی، زلزله ال‌مایر در حوزه دور از گسل (شکل ۱۰-ج) و زلزله کوبه در حوزه نزدیک گسل (شکل ۱۰-الف) بیشترین دریافت بین طبقه‌ای را ایجاد کردند. در شاخص خرابی دریافت بین طبقه‌ای برای سازه ۳ طبقه با ورق قائم، زلزله ال‌مایر در حوزه دور از گسل (شکل ۱۰-د) و زلزله کوبه در حوزه نزدیک گسل (شکل ۱۰-ب) بیشترین دریافت بین طبقه‌ای را ایجاد کردند. همچنین با مقایسه نتایج بدست آمده از سازه ۳ طبقه با ورق‌های موجدار دوزنقه‌ای افقی و قائم مشاهده می‌شود که سازه ۳ طبقه با دیواربرشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای افقی دریافت بین طبقه‌ای بیشتری را تجربه نموده است.



شکل ۱۰: منحنی‌های آنالیز دینامیکی افزایشی برای سازه ۳ طبقه



شکل ۱۱: منحنی‌های آنالیز دینامیکی افزایشی برای سازه ۱۰ طبقه

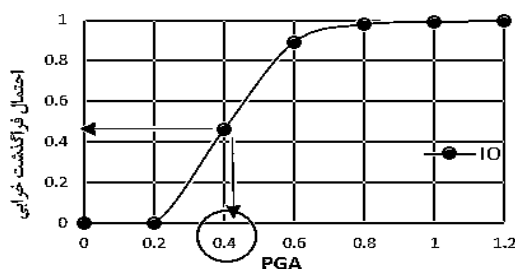
شکل ۱۱ نشان می‌دهد در شاخص خرابی دررفت بین طبقه‌ای برای سازه ۱۰ طبقه با ورق افقی، زلزله ال‌مایر در حوزه دور از گسل (شکل ۱۱-ج) و زلزله کوبه در حوزه نزدیک گسل (شکل ۱۱-الف) بیشترین دررفت بین طبقه‌ای را ایجاد کردند. در شاخص خرابی دررفت بین طبقه‌ای برای سازه ۱۰ طبقه با ورق قائم، زلزله ال‌مایر در حوزه دور از گسل (شکل ۱۱-د) و زلزله کوبه در حوزه نزدیک گسل (شکل ۱۱-ب) بیشترین دررفت بین طبقه‌ای را ایجاد کردند. همچنین با مقایسه نتایج بدست آمده از سازه ۱۰ طبقه با ورق‌های موجدار دوزنقه‌ای افقی و قائم مشاهده می‌شود که سازه ۱۰ طبقه با دیواربرشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای افقی دررفت بین طبقه‌ای بیشتری را تجربه نموده است.

## ۶- تولید توابع و منحنی‌های شکنندگی

از آنجایی که وقوع زمین‌لرزه یک ماهیت تصادفی می‌باشد لذا باید با یک رویکرد احتمالاتی به این مسئله نگریست و با در نظر گرفتن کلیه عدم قطعیت‌ها، میزان خطرپذیری در طراحی ساختمان‌های موجود را محاسبه کنیم [۲۵]. برای تولید منحنی‌های شکنندگی بر اساس نتایج تحلیل تاریخچه زمانی از روشهای احتمالاتی استفاده می‌شود. هر نقطه از منحنی شکنندگی برای شتاب زلزله‌ی بیشینه اختصاص یافته شکل ۱۲ و در حالت کلی منحنی‌های شکنندگی به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شوند:

$$\text{Fragility} = P[\text{EDP} > \text{AC} | \text{IM}] \quad (1)$$

در رابطه فوق IM شدت زلزله‌ای است که معمولاً برابر شتاب حداکثر زمین فرض می‌شود و EDP پارامتر تقاضای مهندسی است که از خروجی‌های تحلیل دینامیکی غیرخطی به دست می‌آید و AC شرایط قابل قبول مربوط به حالت حدی مفروض است.

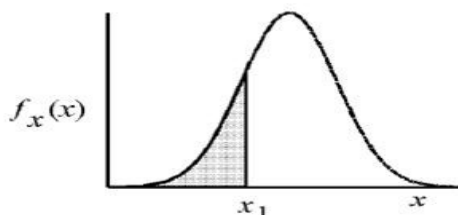


شکل ۱۲: منحنی شکنندگی [۱۵]

یک متغیر تصادفی  $X$  دارای توابع توزیع نرمال لگاریتمی (توزیع لوگ نرمال) است، اگر متغیر  $Y = \ln(X)$  دارای توزیع نرمال باشد، در این صورت تابع چگالی احتمال متغیر  $X$  به صورت رابطه (۲) در می آید:

$$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\xi_x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda}{\xi_x}\right)^2\right] \quad 0 \leq x \leq \infty \quad (2)$$

که در آن  $\lambda = LN[X]$  و  $\xi_x = \sqrt{\text{var}(\ln(x))}$  به ترتیب میانگین و انحراف استاندارد متغیر  $\ln(x)$  هستند، پارامترهای توزیع اند. در این بخش  $f_x(x)$  تابع توزیع نرمال است. توزیع نرمال یکی از مهمترین توزیع‌های آماری است. این توزیع که به منحنی نرمال معروف است، حالت زنگی شکل دارد و بیشتر وقایعی که در طبیعت و تحقیقات علمی به وقوع می‌پیوندد از این منحنی پیروی می‌کند، منحنی نرمال را منحنی گوس هم می‌نامند (شکل ۱۳).

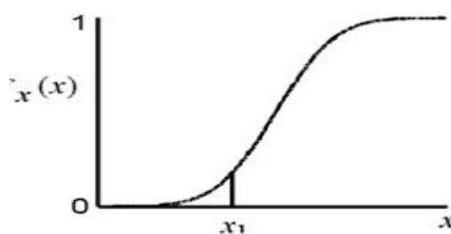


شکل ۱۳: تابع توزیع نرمال [۱۵]

متغیر تصادفی  $X$  که منحنی توزیع آن زنگی شکل است را متغیر تصادفی نرمال می‌نامیم، تابع چگالی این توزیع به صورت رابطه (۳) است:

$$f_x(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (3)$$

در روابط بالا  $\mu$  میانگین،  $\sigma$  انحراف معیار هستند. برای به دست آوردن مقدار احتمال یک توزیع نرمال از مساحت سطح زیر منحنی نرمال استفاده می‌شود، که به آن تابع توزیع تجمعی نرمال می‌گویند (شکل ۱۴).



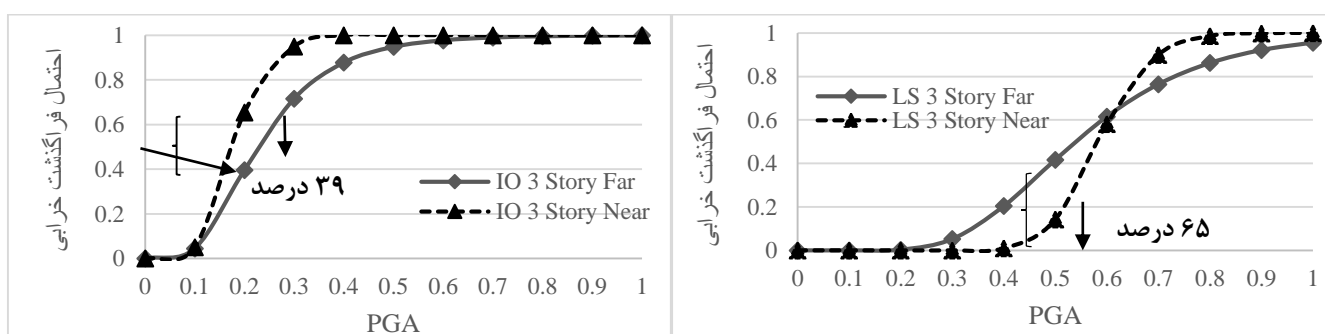
شکل ۱۴: تابع توزیع نرمال [۱۵]

$$F_x(x) = F(X|\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad (4)$$

$$F_x(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx = \Phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) \quad (5)$$

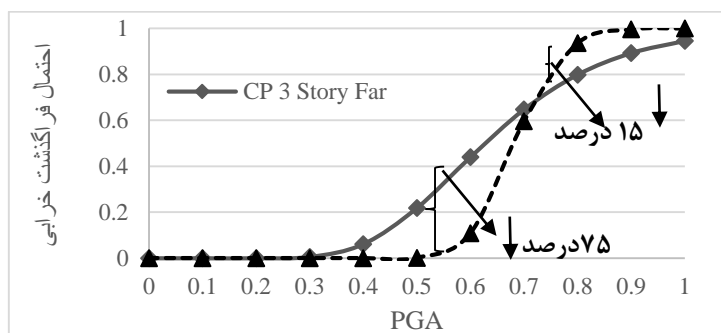
### ۷- منحنی شکنندگی سازه ۳ طبقه

منحنی‌های تولید شده در سه سطح عملکرد قابلیت استفاده بی‌وقفه، ایمنی جانی و آستانه فروریزش هستند که با استفاده از شاخص دریافت بین طبقه‌ای به دست آمده است. سطوح عملکرد خرابی ساختمان‌های تحلیل شده که با شاخص دریافت بین طبقه‌ای هستند، براساس FEMA 356 [۲۶] برای سطح عملکرد IO برابر با 0.5 درصد، LS برابر با 1.5 درصد و CP برابر با 2 درصد می‌باشد. شکل-های ۱۵ تا ۱۹ تفاوت میزان درصد خرابی برای حوزه دور و نزدیک را برای منحنی‌های تولید شده با شاخص دریافت بین طبقه‌ای نشان می‌دهند.



شکل ۱۵: منحنی شکنندگی سازه ۳ طبقه با ورق افقی

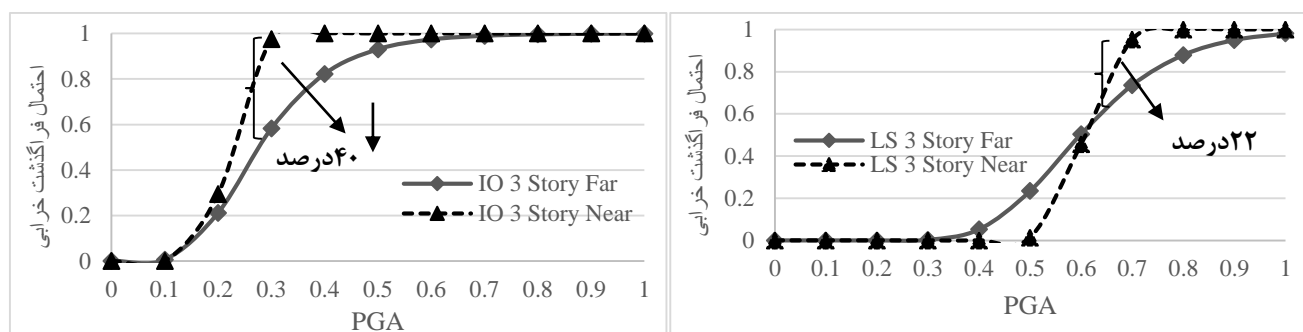
شکل ۱۶: منحنی شکنندگی سازه ۳ طبقه با ورق افقی



شکل ۱۷: منحنی شکنندگی سازه ۳ طبقه با ورق افقی

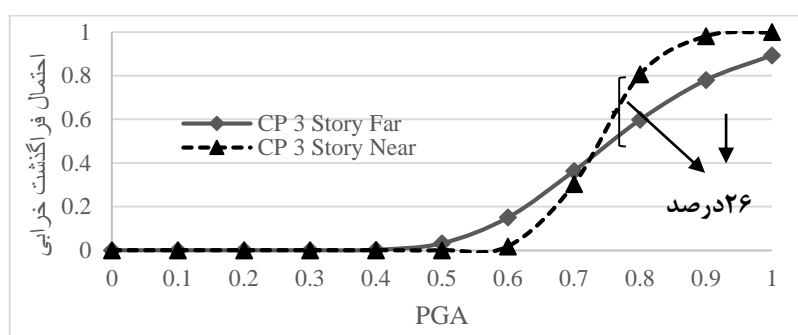
در شکل ۱۵ نمودار منحنی شکنندگی سازه ۳ طبقه با ورق افقی در سطح عملکرد استفاده بی‌وقفه (IO) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود احتمال خرابی در زلزله‌های حوزه دور در شتاب 0.2g نسبت به حوزه نزدیک ۳۹٪ کاهش یافته است. در شکل ۱۶ منحنی شکنندگی سازه ۳ طبقه با ورق افقی در سطح عملکرد ایمنی جانی (LS) نشان داده شده است. با بررسی شکل ۱۶ مشاهده می‌شود که در شتاب‌های پایین احتمال خرابی در زلزله‌های حوزه نزدیک نسبت به حوزه دور کمتر می‌باشد که در شتاب 0.5g احتمال خرابی در زلزله‌های حوزه نزدیک نسبت به حوزه دور ۶۵ درصد کاهش یافته است. در شتاب‌های بالا احتمال خرابی در زلزله‌های حوزه دور نسبت به حوزه نزدیک کاهش یافته است که بیشترین درصد کاهش در شتاب 0.7g به میزان ۱۵٪ می‌باشد. شکل ۱۷ منحنی شکنندگی سازه ۳ طبقه با ورق افقی در سطح عملکرد آستانه فروریزش نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در شتاب 0.6g احتمال خرابی در زلزله حوزه نزدیک

به میزان ۷۵٪ نسبت به حوزه دور کاهش یافته است. همچنین با بررسی در شتاب 0.8g مشاهده می‌شود که احتمال خرابی در زلزله‌های دور به میزان ۱۵٪ کاهش یافته است.



شکل ۱۹: منحنی شکنندگی سازه ۳ طبقه با ورق قائم

شکل ۱۸: منحنی شکنندگی سازه ۳ طبقه با ورق قائم



شکل ۲۰: منحنی شکنندگی سازه ۳ طبقه با ورق قائم

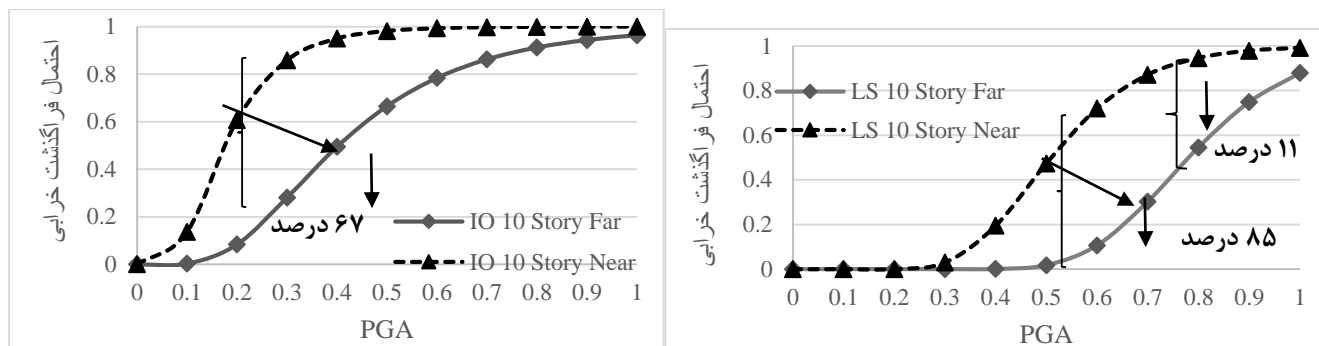
در شکل ۱۸ نمودار منحنی شکنندگی سازه ۳ طبقه با ورق قائم در سطح عملکرد استفاده بی‌وقفه (IO) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود احتمال خرابی در زلزله‌های حوزه دور در شتاب 0.3g نسبت به حوزه نزدیک ۴۰٪ کاهش یافته است. در شکل ۱۹ منحنی شکنندگی سازه ۳ طبقه با ورق قائم در سطح عملکرد ایمنی جانی (LS) نشان داده شده است. با بررسی شکل ۱۹ مشاهده می‌شود که در شتاب‌های پایین احتمال خرابی در زلزله‌های حوزه نزدیک نسبت به حوزه دور کاهش یافته است. در شتاب‌های بالا احتمال خرابی در زلزله‌های حوزه دور نسبت به حوزه نزدیک کاهش یافته است که بیشترین درصد کاهش در شتاب 0.7g به میزان ۲۲٪ می‌باشد. شکل ۲۰ منحنی شکنندگی سازه ۳ طبقه با ورق قائم در سطح عملکرد آستانه فروریزش نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در شتاب 0.6g احتمال خرابی در زلزله حوزه نزدیک نسبت به حوزه دور کاهش یافته است. همچنین با بررسی در شتاب 0.8g مشاهده می‌شود که احتمال خرابی در زلزله‌های دور به میزان ۲۶٪ نسبت به زلزله‌های حوزه نزدیک کاهش یافته است.

## ۸- منحنی شکنندگی سازه ۱۰ طبقه

در سازه ۱۰ طبقه نیز منحنی‌های تولید شده در سه سطح عملکرد قابلیت استفاده بی‌وقفه، ایمنی جانی و آستانه فروریزش هستند که با استفاده از شاخص دریافت بین طبقه‌ای به دست آمده است. شکل‌های ۲۱ تا ۲۶ تفاوت میزان درصد خرابی برای حوزه دور و نزدیک را برای منحنی‌های تولید شده با شاخص دریافت بین طبقه‌ای نشان می‌دهند. در شکل ۲۱ نمودار منحنی شکنندگی سازه ۱۰ طبقه با ورق افقی در سطح عملکرد استفاده بی‌وقفه (IO) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود احتمال خرابی در زلزله‌های حوزه دور در شتاب 0.3g نسبت به حوزه نزدیک ۶۷٪ کاهش یافته است. در شکل ۲۲ منحنی شکنندگی سازه ۱۰ طبقه با ورق افقی در سطح عملکرد ایمنی

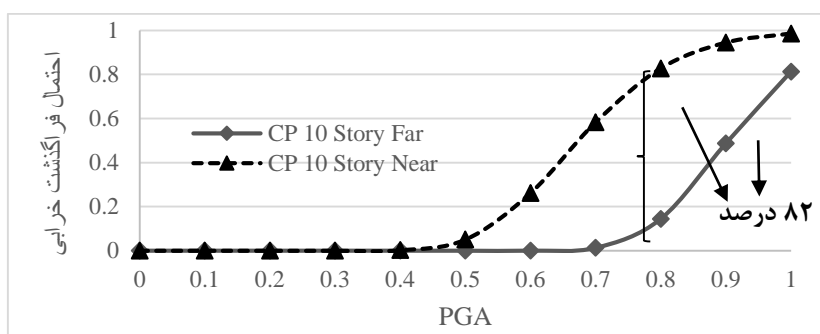


جانی (LS) نشان داده شده است. با بررسی شکل ۲۲ مشاهده می‌شود که احتمال خرابی در زلزله‌های حوزه دور نسبت به زلزله‌های حوزه نزدیک به میزان ۸۵٪ کاهش یافته است. شکل ۲۳ منحنی شکنندگی سازه ۱۰ طبقه با ورق افقی در سطح عملکرد آستانه فروریزش نشان داده شده است. مشاهده می‌شود در شتاب 0.8g احتمال خرابی در زلزله حوزه دور به میزان ۸۲٪ نسبت به حوزه نزدیک کاهش یافته است.



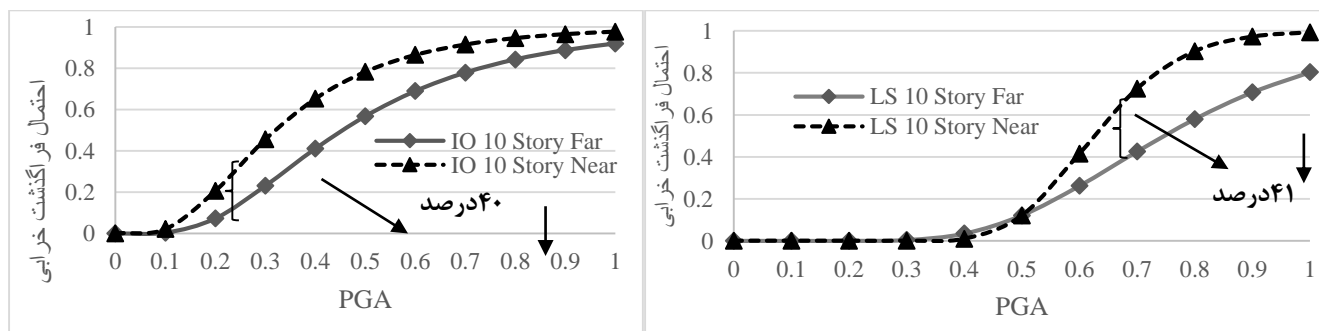
شکل ۲۱: منحنی شکنندگی سازه ۱۰ طبقه با ورق افقی

شکل ۲۲: منحنی شکنندگی سازه ۱۰ طبقه با ورق افقی



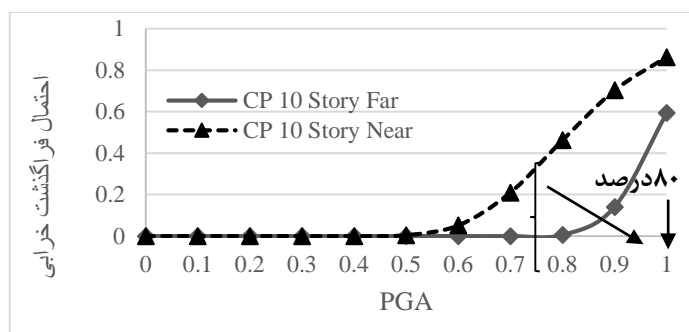
شکل ۲۳: منحنی شکنندگی سازه ۱۰ طبقه با ورق افقی

در شکل ۲۴ نمودار منحنی شکنندگی سازه ۱۰ طبقه با ورق قائم در سطح عملکرد بی‌وقفه (IO) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود احتمال خرابی در زلزله‌های حوزه دور در شتاب 0.3g نسبت به حوزه نزدیک ۴۰٪ کاهش یافته است. در شکل ۲۵ منحنی شکنندگی سازه ۱۰ طبقه با ورق قائم در سطح عملکرد ایمنی جانی (LS) نشان داده شده است. با بررسی شکل ۲۵ مشاهده می‌شود که احتمال خرابی در زلزله‌های حوزه دور نسبت به زلزله‌های حوزه نزدیک به میزان ۴۱٪ کاهش یافته است. در شکل ۲۶ منحنی شکنندگی سازه ۱۰ طبقه با ورق قائم در سطح عملکرد آستانه فروریزش نشان داده شده است. در شکل ۲۶ مشاهده می‌شود که در شتاب 0.9g احتمال خرابی در زلزله حوزه دور به میزان ۸۰٪ نسبت به حوزه نزدیک کاهش یافته است.



شکل ۲۴: منحنی شکنندگی سازه ۱۰ طبقه با ورق قائم

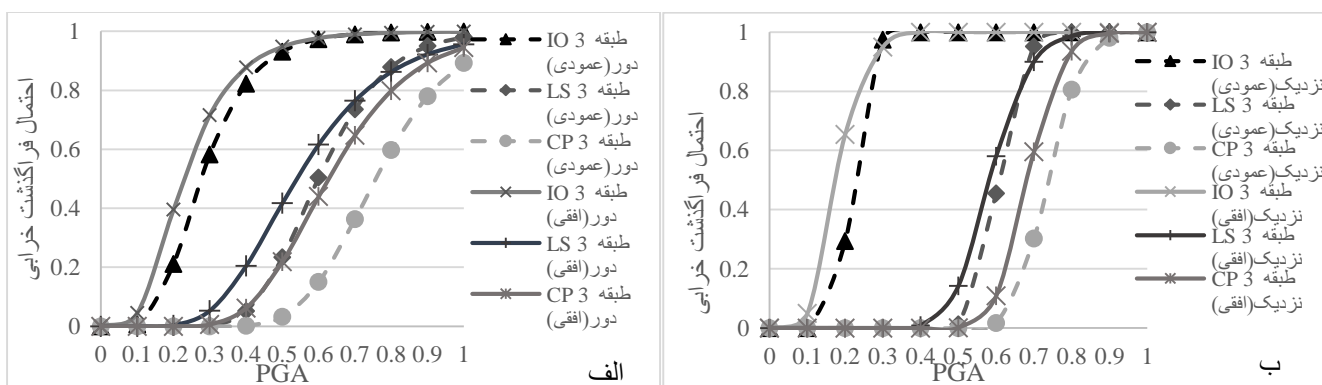
شکل ۲۵: منحنی شکنندگی سازه ۱۰ طبقه با ورق قائم



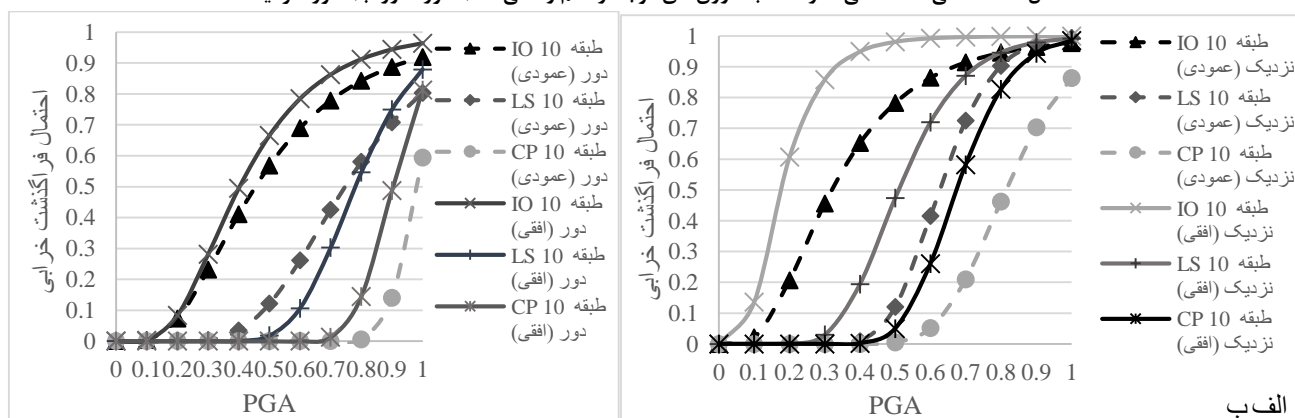
شکل ۲۶: منحنی شکنندگی سازه ۱۰ طبقه با ورق قائم

### ۹- مقایسه منحنی‌های شکنندگی تولید شده در دیوار برشی موجدار دوزنقه‌ای افقی و قائم با شاخص دریافت بین طبقه‌ای

در این قسمت به مقایسه منحنی شکنندگی نمونه دوزنقه‌ای قائم و دوزنقه‌ای افقی در سطح‌های مختلف عملکرد پرداخته شده است. با بررسی شکل‌های ۲۷ و ۲۸ مشاهده می‌شود، در نمونه‌های دوزنقه‌ای با تغییر راستای قرارگیری ورق موجدار از افقی به قائم، احتمال خرابی دیوار در سطح‌های مختلف PGA کاهش یافته است. همچنین با بررسی دقیق مشاهده می‌شود که شیب احتمال فراگذشت خرابی در نمونه‌های دوزنقه‌ای افقی نسبت به قائم در سازه‌های ۳ و ۱۰ طبقه تندتر می‌باشد که این موضوع نشان می‌دهد دیوار با ورق قائم خرابی کمتری نسبت به ورق افقی به جای می‌گذارند.



شکل ۲۷: منحنی شکنندگی سازه ۳ طبقه ورق‌های موجدار قائم و افقی (الف) حوزه دور (ب) حوزه نزدیک



شکل ۲۸: منحنی شکنندگی سازه ۱۰ طبقه ورق‌های موجدار قائم و افقی (الف) حوزه دور (ب) حوزه نزدیک

## ۱۰- نتیجه گیری

در این پژوهش، آسیب پذیری سازه های فولادی با دیوار برشی فولادی موجدار مورد بررسی قرار گرفت. باتوجه به ماهیت تصادفی و وجود عدم قطعیت های زیاد در زلزله، نمی توان با بیان قطعی، رفتار سازه را در شدت های مختلف زلزله بررسی کرد. منحنی های شکنندگی احتمال خسارت وارد بر سازه در سطوح عملکرد مورد بررسی را نمایش می دهند. در این پژوهش آسیب پذیری سیستم دیوار برشی فولادی موجدار در حوزه دور و نزدیک گسل با استفاده از روش احتمالاتی (تولید منحنی شکنندگی) مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور دو سازه با تعداد طبقات ۳ و ۱۰ طبقه با سامانه دیوار برشی فولادی طراحی، و ضوابط مبحث دهم مقررات ملی ساختمان در مورد آن ها کنترل شده است. همچنین منحنی های شکنندگی برای سطوح عملکرد قابلیت استفاده بی وقفه، ایمنی جانی و آستانه فروریزش برای سازه های ۳ و ۱۰ طبقه، با استفاده از شاخص خرابی دریافت بین طبقه ای ترسیم گردیده است. که به طور کلی میزان خرابی در زلزله های نزدیک گسل مخرب تر از دور گسل بوده است و همچنین قرار گیری صفحه دیوار برشی در حالت عمودی باعث کاهش تخریب می شود. نتایج به دست آمده از منحنی های حاصل شده به طور خلاصه در ادامه آمده است:

- ۱- با مشاهده نمودارهای حاصل از دریافت سازه های با سیستم دیوار برشی فولادی موجدار در شتاب های مختلف شتابنگاشت ها، مشاهده گردید دریافت بیشتری در سازه ۳ طبقه نسبت به سازه ۱۰ طبقه وجود دارد همچنین سازه ۳ طبقه به دلیل دریافت زیاد در شتاب پایین تری به آسیب پذیری می رسد.
- ۲- با بررسی منحنی های شکنندگی تولید شده با استفاده از شاخص دریافت بین طبقه ای، مشاهده گردید در سازه ۱۰ طبقه آسیب پذیری کمتری نسبت به سازه ۳ طبقه وجود دارد و عملکرد مناسب تری از خود نشان داده است.
- ۳- در نمونه های دوزنقه ای با تغییر راستای قرارگیری ورق موجدار از افقی به قائم، احتمال خرابی دیوار در سطح های مختلف PGA کاهش یافته است.
- ۴- باتوجه به منحنی های خرابی در ورق موجدار دوزنقه ای افقی، اختلاف ماکسیمم بین دو حالت زلزله حوزه نزدیک و دور برای یک PGA خاص نشان می دهد در سطح عملکرد IO برای سازه ۳ و ۱۰ طبقه میزان خرابی در زلزله حوزه دور نسبت به زلزله حوزه نزدیک به ترتیب ۳۹ و ۶۷ درصد کاهش پیدا کرده است.
- ۵- باتوجه به منحنی های خرابی در ورق موجدار دوزنقه ای قائم، اختلاف ماکسیمم بین دو حالت زلزله حوزه نزدیک و دور برای یک PGA خاص نشان می دهد در سطح عملکرد IO برای سازه ۳ و ۱۰ طبقه میزان خرابی در زلزله حوزه دور نسبت به زلزله حوزه نزدیک به ترتیب ۴۰ و ۴۰ درصد کاهش پیدا کرده است.
- ۶- با بررسی نمودارهای شکنندگی ورق موجدار دوزنقه ای افقی در سطح عملکرد LS برای سازه ۳ و ۱۰ طبقه میزان خرابی در زلزله حوزه دور نسبت به زلزله حوزه نزدیک به ترتیب ۱۵ و ۸۵ درصد کاهش پیدا کرده است.
- ۷- با بررسی نمودارهای شکنندگی ورق موجدار دوزنقه ای افقی در سطح عملکرد CP برای سازه ۳ و ۱۰ طبقه میزان خرابی در زلزله حوزه دور نسبت به زلزله حوزه نزدیک به ترتیب ۱۵ و ۸۲ درصد کاهش پیدا کرده است.
- ۸- با بررسی نمودارهای شکنندگی ورق موجدار دوزنقه ای قائم در سطح عملکرد LS برای سازه ۳ و ۱۰ طبقه میزان خرابی در زلزله حوزه دور نسبت به زلزله حوزه نزدیک به ترتیب ۲۲ و ۴۱ درصد کاهش پیدا کرده است.
- ۹- با بررسی نمودارهای شکنندگی ورق موجدار دوزنقه ای قائم در سطح عملکرد CP برای سازه ۳ و ۱۰ طبقه میزان خرابی در زلزله حوزه دور نسبت به زلزله حوزه نزدیک به ترتیب ۲۶ و ۸۰ درصد کاهش پیدا کرده است. و به طور کلی می توان گفت دیوار موجدار قائم رفتار لرزه ای مناسب تری نسبت به نمونه افقی از خود نشان داده است.

## مراجع

- [1] Emami, F., Mofid, M., & Vafai, A. (2013). *Experimental study on cyclic behavior of trapezoidally corrugated steel shear walls*. Engineering Structures, 48, 750-762.
- [2] Yadollahi, Y., Pakar, I., & Bayat, M. (2015). Evaluation and comparison of behavior of corrugated steel plate shear walls. Latin American Journal of Solids and Structures, 12, 763-786.
- [3] Farzampour, A., Laman, J.A., (2015), Behavior prediction of corrugated steel plate shear walls with openings, Journal of Constructional Steel Research, 114, 258-268.
- [4] Gerami, M., Ghaffari, S., & Heidari Tafreshi, A. (2016). An investigation on vulnerability assessment of steel structures with thin steel shear wall through development of fragility curves. Journal of structural and construction engineering (JSCE), 5-20
- [5] Kalali, H., Ghazijahani, T. G., Hajsadeghi, M., Zirakian, T., & Alaei, F. J. (2016). Numerical study on steel shear walls with sinusoidal corrugated plates. Latin American Journal of Solids and Structures, 13, 2802-2814.
- [6] CAO Qiang., HUANG Jingyu., WANG Peng., ZHANG Long., WU DI., CHEN Heng and ZHANG Yansheng. (2016). Research on Failure Modes and Key Parameters of Corrugated Steel Shear Walls. MATEC Web of Conferences, 05008. DOI: 10.1051/mateconf/20166.
- [7] Yadegari, A., Pachideh, G., Gholhaki, M., Shiri, M. (nov.2016). Seismic Performance of C-PSW, 2nd international conference on civil engineering, architecture & urban planning elites.
- [8] Pachideh, G., Gholhaki, M., Yadegari, A., Shiri, M. (nov.2016). Modeling and Analysis of Thin Steel Plate Shear Walls Using the New Method, 2nd international conference on civil engineering, architecture & urban planning elites.
- [9] Sudeok Shon., Mina Yoo., Seungjae Lee. (2017). An Experimental Study on the Shear Hysteresis and Energy Dissipation of the Steel Frame with a Trapezoidal-Corrugated Steel Plate. Journal of Materials (MDPI). 10(3), 261
- [10] Hosseinzadeh, L., Emami, F., & Mofid, M. (2017). Experimental investigation on the behavior of corrugated steel shear wall subjected to the different angle of trapezoidal plate. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 26(17), e1390.
- [11] Peng, X. T., Lin, C., Zhang, T. T., & Zhang, X. (2018, September). A Design Method of Corrugated Steel Shear Wall under Earthquake Motion. In 2018 7th International Conference on Energy and Environmental Protection (ICEEP 2018) (pp. 1084-1088). Atlantis Press.
- [12] Askariani, S., Shahabian, F. (2019). Seismic Vulnerability Assessment of Corrugated Steel Shear Walls Using Fragility Curves. Journal of structural and construction engineering (JSCE)(69-84).
- [13] Abdelrahim K., Dessouki, Sherif A. Ibrahim, P.E., Ibrahim N. N. Shenouda. (2019). Ultimate capacity of steel shear Walls with corrugated plate. Al-Azhar University Civil Engineering Research Magazine (CERM), Vol. (41) No. (3).
- [14] Pachideh, G., Gholhaki, M., Daryan, A.S. (2019). Analyzing the damage index of steel plate shear walls using pushover analysis, Structures 20, 437-451.
- [15] Pachideh, G., Gholhaki, M., Kheyroddin, A. (2019) Seismic evaluation of reinforced concrete moment frames retrofitted with steel braces using IDA and pushover methods in the near-fault field, Journal of Rehabilitation in Civil Engineering 7 (1), 159-173.
- [16] Lu J., Zhang H., Yu S. Study on seismic behaviors of self-centering steel plate shear walls with slits. Journal of Constructional Steel Research. (2021) Oct 1;185:106878.

- [17] Asadi, A., Tajammolian, H. Forotani, A. (2021). Seismic Assessment of Corrugated Steel Shear Walls with Different Configurations Based on Fragility Curves. (JSCE)(164-184)
- [18] Moradian, M,H., Pachideh, G., Moshtagh, A. (2021) Study of seismic behavior and development of fragility curves of divergent braced frames under successive earthquakes, Journal of Structural and Construction Engineering 8 (Special Issue 4), 156-175.
- [19] Iranian Standard 2800, (2014), Regulations for the design of buildings against earthquakes, standard 2800, Fourth edition
- [20] AISC 341-16 (American Institute of Steel Construction).(2016). Design guide 20: steel plate shear walls. American Institute of Steel Construction. Chicago, IL, USA.: AISC.
- [21] AISC 360-10 (American Institute of Steel Construction). (2010). Seismic provisions for structural steel buildings. Chicago: AISC.
- [22] Vamvatsikos, D., & Cornell, A. (2006). Incremental dynamic analysis with two components of motion for a 3D steel structure. In Proceedings of the 8th US national conference on earthquake engineering.(491-514)
- [23] FEMA P965. (2009). Quantification of Building Seismic Performance Factors. *Federal Emergency Management Agency* Michael Mahoney, Publication No. 965. Hanson, Technical Monitor Washington (DC).
- [24] Daneshjo, F.(2008). Basics of earthquake engineering and risk analysis.Tehran,Danesh Farda.
- [25] Hoseini, M & Majd. (2008). Preparation of fragility curves for regular steel buildings with cross braced frames using nonlinear dynamic analysis. Journal of Civil Engineering Sharif, 27, 55-63.
- [26] FEMA 356. (2000). Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. *Federal Emergency Management Agency*. Publication No. 356, Washington (DC).