

## ارزیابی اثر مؤلفه افقی و قائم زلزله بر عملکرد لرزه ای قاب خمشی سوله های با دهانه عریض مستقر بر بستر صلب و انعطاف پذیر بکمک تحلیل IDA

محمد ملکی زاده<sup>۱</sup>، علی اکبر پیراسته<sup>۲</sup>، نوید سیاه پلو<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سازه، جهاد دانشگاهی خوزستان، اهواز، ایران

۲- استادیار، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۳- استادیار، جهاد دانشگاهی خوزستان، اهواز، ایران

### چکیده

به علت این که سوله ها اساسا دارای وزن سبکی هستند، در بیشتر موارد علاوه بر مؤلفه افقی زلزله از مؤلفه قائم آن ها نیز صرف نظر می شود. این در حالی است که با افزایش دهانه قاب خمشی سوله ها، جرم سازه بطور قابل ملاحظه ای افزایش یافته و در نتیجه حرکت قائم زمین می تواند باعث بوجود آمدن نیروهای اینرسی قابل توجهی در اعضای سازه شوند. نتایج تحقیقات، اثرات مخرب این مؤلفه را در سازه های بتنی و فولادی تأیید می کند ولی علی رغم مطالعات متعدد، تاکنون اثر مؤلفه قائم زلزله در سوله ها مورد بررسی قرار نگرفته است که این مطالعه می تواند پنجره جدیدی از مطالعات را بر روی این نوع از سازه ها گشاید. به علاوه بررسی رفتار این نوع از سازه ها با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک-سازه می تواند به درک صحیح و دقیق تر از رفتار سازه کمک کند. برای این منظور در این پژوهش بر روی چهار عدد قاب خمشی سوله با دهانه ۲۰ و ۶۰ متر و ارتفاع ۶ و ۱۲ متر، تحلیل دینامیکی افزاینده (IDA) با و بدون لحاظ نمودن اثرات مؤلفه قائم زلزله و همچنین اندرکنش خاک-سازه انجام گردید. سپس نتایج در قالب منحنی های شکست در سه سطح عملکرد مختلف ارائه شدند. نتایج حاکی از آن است که مؤلفه قائم زلزله، نقش بسیار مهم و تعیین کننده ای در بررسی دقیق تر رفتار سوله ها داشته و باعث زودتر رسیدن سازه به ناحیه غیرخطی، کاهش ظرفیت، افزایش احتمال وقوع شکست و سرعت بخشیدن خرابی در این نوع سازه ها می شود، اما در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه اثر چندانی بر رفتار لرزه ای سازه های مذکور ندارد.

کلمات کلیدی: قاب خمشی سوله، مؤلفه قائم زلزله، اندرکنش خاک-سازه، تحلیل دینامیکی افزاینده، سطح عملکرد، منحنی شکست

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2018.94460.1283	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2018.94460.1283	۱۳۹۸/۰۶/۱۰	۱۳۹۶/۱۲/۱۲	۱۳۹۶/۱۲/۱۲	۱۳۹۶/۱۱/۱۷	۱۳۹۶/۰۵/۱۷

\*نویسنده مسئول: نوید سیاه پلو

پست الکترونیکی: n\_siahpolo@yahoo.com

# Evaluating the Effect of Earthquake Vertical Component on Large Bay Steel Gabled Frame Located on Flexible Substrate using IDA

Mohammad Malekizadeh<sup>1</sup>, Ali Akbar Pirasteh<sup>2</sup>, Navid Siahpolo<sup>3\*</sup>

1-MSc, Department of Civil Engineering, Institute for High Education, ACECR, Khuzestan, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Institute for High Education, ACECR, Khuzestan, Iran

## ABSTRACT

Because Steel Gabled Frame, SGF, is essentially a lightweight, in most cases, in addition to the horizontal earthquake component, their vertical component is also ignored. That's while with an increase of SGF bay, structural mass increases significantly and as a Result, vertical motion can produce large inertial forces in the structural members. Previous research shows destructive effects of this component in both concrete and steel structure systems, but so far the effect of earthquake vertical component on SGF has not been Studied before. Therefore this paper could open a new window of study on this type of Structure against both horizontal and vertical motions. Moreover, reviewing the behavior of SGF under the effect of Soil-Structure Interaction (SSI) can help to achieve the better understanding of the SGF Structural Behavior. For this purpose, in this research 4 types of SGF with 20 and 60 m span, and 6 and 12 m height has been considered. Incremental Dynamic Analysis (IDA) with and without regard to the effects of the vertical component as well as SSI was conducted. Then, results were presented in the form of fragility curves at three different performance levels. Results Indicate that vertical component of an earthquake has an important and decisive role in the behavior of SGFs. For example, with considering both vertical and horizontal motion effects, the SGFs enters nonlinear region immediately in comparison with considering horizontal component only. Moreover, reducing the capacity and increasing the probability of fragility and collapse are the most important effects of vertical and horizontal motion simultaneously. But, Consider Soil-Structural Interaction has a less impact on the seismic behavior of SGFs.

## ARTICLE INFO

**Receive Date:** 07 August 2017

**Revise Date:** 06 February 2018

**Accept Date:** 03 March 2018

### Keywords:

Steel Gabled Frame ,  
Vertical Component ,  
Soil-Structural Interaction,  
Incremental Dynamic  
Analysis,  
Performance Level,  
Fragility Curve

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

Doi: 10.22065/jsce.2018.94460.1283

\*Corresponding author: Navid Siahpolo  
Email address: n\_siahpolo@yahoo.com

## ۱- مقدمه

ساختمان های صنعتی یکی از اجزای اصلی و مهم در رشد صنعتی یک کشور محسوب می شوند. با توجه به روند رو به رشد صنعت در کشور ایران، ساخت سالن های صنعتی افزایش یافته است [۱]. امروزه برای پوشش ساختمان های صنعتی با دهانه های بزرگ از سوله ها و سازه های فضاکار استفاده می شود که اجرای سوله ها نسبت به سازه های فضاکار فراگیر تر بوده، به طوری که اکثر فضاها توسط سوله ها محافظت می شوند. سوله ها به دلیل مزایای ویژه ای از جمله ایجاد دهانه های بزرگ بدون ستون میانی، عملکرد مناسب سازه در اغلب موارد به علت داشتن تقارن، نصب سریع به علت اتصالات پیچ و مهره ای، امکان انتقال سازه به مکان دیگر به علت اتصالات پیچ و مهره ای و داشتن وزن کم با وجود ابعاد زیاد سازه، امروزه به طور وسیعی از این سازه ها در شهرک های صنعتی و بعضاً در شهر ها برای کاربری های مختلفی از قبیل آشیانه هواپیما، کارخانه های صنعتی، انبار ها، مجموعه های ورزشی، سالن های همایش، استخرها و... استفاده می کنند.

قاب خمشی سوله ها به صورت تک دهانه، دو دهانه، دو یا چند دهانه با ستون مشترک، قوسی و چند ضلعی اجرا و ساخته می شود که از بین قاب های مذکور، قاب تک دهانه متداول تر بوده و بیشترین کاربرد را دارد. در کشور های صنعتی و پیشرفته ای مانند آمریکا، کره جنوبی، ژاپن، قطر و... ساخت سوله های با قاب تک دهانه عریض گسترش چشمگیری داشته است [۲].

قاب خمشی سوله ها به دلیل درجات نامعینی کم، دارای شکل پذیری قابل توجهی نیستند و با تشکیل تعداد مفاصل کم، ناپایداری در این نوع از سازه ها ایجاد خواهد شد. به همین دلیل انجام تحلیل های غیر خطی برای سوله ها چندان مرسوم نمی باشد، ولی با توجه به این که این نوع از سازه ها حساسیت زیادی نسبت به تشکیل مفصل از خود نشان می دهند نیاز است که در ناحیه غیر خطی رفتار آن ها مورد بررسی قرار گیرد و به نظر می رسد که استفاده از تحلیل دینامیکی افزاینده<sup>۱</sup> برای این نوع از سازه ها گزینه مناسبی به حساب آید. این در حالی است که محققین به دلیل مورد ذکر شده از انجام تحلیل های غیر خطی در سوله ها به ندرت استفاده نموده و مطالعات کمی ناحیه غیر خطی سوله ها را مورد بررسی و ارزیابی قرار داده است.

بر اساس تحقیقی که ملکی زاده و همکاران بر روی ۱۸ عدد سوله انجام دادند، نتایج نشان داد که با افزایش دهانه قاب خمشی سوله هایی که در منطقه با لرزه خیزی خیلی زیاد طراحی می شوند، جرم سازه و به دنبال آن نیروی اینرسی در سازه افزایش چشمگیری داشته به گونه ای که بار زلزله به مراتب بحرانی تر از بار باد خواهد شد، که این مورد نشان دهنده اهمیت بار زلزله در سوله های با دهانه عریض است [۳]. به علاوه ارزیابی لرزه ای ساختمان های صنعتی از جمله سوله ها با توجه به هزینه های هنگفت تجهیزات صنعتی و تعداد قابل توجه افراد مشغول به کار در این سازه ها، از اهمیت بالایی برخوردار بوده و یک موضوع کلیدی در هر ناحیه لرزه خیز می باشد.

با توجه به این که سوله ها جزء سازه های سبک به شمار می آیند، در اغلب موارد علاوه بر مولفه افقی زلزله از مولفه قائم آن ها نیز صرف نظر می شود. این در حالی است که با افزایش دهانه قاب خمشی سوله ها جرم سازه به طور قابل ملاحظه ای افزایش یافته و در نتیجه حرکت قائم زمین می تواند باعث به وجود آمدن نیروی اینرسی قابل توجهی در اعضای سازه شوند. نتایج تحقیقات، اثرات مخرب این مؤلفه را در سازه های بتنی و فولادی تأیید می کند که در ادامه به تعدادی از آن ها اشاره خواهد شد، ولی علی رغم مطالعات متعدد، تا به امروز اثر مؤلفه قائم زلزله در سوله ها مورد بررسی قرار نگرفته است.

در سال ۲۰۱۳، شریفیان و فاتحی اثر مؤلفه قائم زلزله را بر روی سه سازه بتنی مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسیده اند که با افزایش خروج از مرکزیت جرم و همچنین ارتفاع سازه، اثر مؤلفه قائم زمین لرزه تشدید می شود. همچنین در این تحقیق دریافتند که اثر این مؤلفه در ناحیه غیر خطی نسبت به ناحیه خطی بیشتر است [۴]. در سال ۲۰۱۴، صدیقی و جانعلیزاده با بررسی عددی اثر مؤلفه قائم زلزله های حوزه نزدیک بر رفتار دینامیکی سد های خاکی (مطالعه موردی سد البرز)، نشان دادند که این مؤلفه اثر قابل توجهی در افزایش نشست تاج سد تا حدود ۴۵ درصد، افزایش تغییر شکل های افقی محور سد و کاهش ضریب بزرگ نمایی تاج سد دارد [۵]. در سال ۲۰۱۵، صادقی اثر مؤلفه قائم زلزله را بر رفتار چلیک های دو لایه مورد ارزیابی قرار داده و نشان داد که در نظر گرفتن این مؤلفه باعث افزایش تغییر مکان کل سازه می شود. همچنین نشان داد که مؤلفه قائم زلزله اثر چندانی در زمان وقوع اولین کمانش را نداشته است [۶]. در سال ۲۰۱۶، قلهکی

<sup>1</sup> Incremental Dynamic Analysis (IDA)

و ستاری اثر مؤلفه قائم زلزله را بر پاسخ های لرزه ای دیوار های برشی فولادی با ورق نازک بررسی کردند. نتایج تحلیل ها، نشان داد که این مؤلفه تأثیر چشمگیری در افزایش نیروی محوری و لنگر خمشی ستون ها داشته ولی تأثیر اندکی بر افزایش نیروی برشی و لنگر خمشی تیر ها دارد و این در حالی است که برش طبقات و تغییر مکان افقی طبقات تحت اثر این مؤلفه کاهش می یابد [۷]. در سال ۲۰۱۷، حسینی و صدرآرا با ارزیابی اثر مؤلفه قائم زلزله بر روی قاب های خمشی بزرگ دهانه در ساختمان های فولادی، نشان دادند که این مؤلفه در دهانه های بیشتر از ۲۰ متر، مقادیر لنگر، برش و جابجایی نسبی را به شدت افزایش داده است، به طوری که با روابط موجود در آیین نامه ها نمی توان اثر مؤلفه قائم را در نظر گرفت [۸].

تقریباً همه مهندسیین طراح، بارگذاری جانبی و ثقلی سوله را با فرض بستر صلب<sup>۲</sup> انجام می دهند و از اثرات اندرکنش خاک-سازه<sup>۳</sup> صرفه نظر می کنند، به همین دلیل تحقیقات انجام شده در زمینه اثرات اندرکنش خاک-سازه در سوله ها بسیار اندک است. اگر سوله روی خاک سخت بنا شود، صرفه نظر کردن از اثرات اندرکنش خاک-سازه فرض نادرستی نمی باشد اما اگر قرار باشد که سازه بر بستر خاک نرم اجرا شود، ممکن است اثرات اندرکنش خاک-سازه قابل توجه باشد. هر چند در اغلب موارد عدم در نظر گیری اثر اندرکنش خاک-سازه موجب طراحی دست بالای سوله خواهد شد و تنها هزینه های اقتصادی به همراه خواهد داشت اما ممکن است در برخی شرایط منجر به ناپایداری های سازه ای گردد [۹]. همچنین بررسی رفتار این نوع از سازه ها با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک-سازه می تواند به درک صحیح و دقیق تر از رفتار سازه کمک کند.

در سال ۲۰۱۳، امین فر و همکاران اثر اندرکنش خاک-سازه را بر روی پنج ساختمان بتنی به روش المان محدود مورد مطالعه قرار داده اند. نتایج تحلیل ها نشان داد که اثر اندرکنش خاک-سازه با افزایش ارتفاع سازه و به طبع آن با افزایش وزن سازه، چشمگیر تر می شود [۱۰]. در سال ۲۰۱۴، صادقی و همکاران با ارزیابی اثر اندرکنش خاک-شمع-سازه بر رفتار دینامیکی سازه های چند درجه آزاد، نشان دادند که با افزایش ارتفاع سازه، نرخ افزایش لنگر خمشی در عناصر شمع بیشتر شده و در اثر حرکت زمین نیروی اینرسی بیشتر توسط سازه جذب می شود [۱۱]. در سال ۲۰۱۵، حسینی و قنبری اثر اندرکنش خاک-سازه را بر روی دو عدد سوله بدون در نظر گرفتن اثرات لرزه ای مورد بررسی قرار دادند. نتایج به دست آمده نشان داد که اندرکنش خاک-سازه باعث کاهش برش پایه و لنگر خمشی و همچنین افزایش تغییر مکان بالای سوله می شود که این امر بیانگر آن است که در سوله های با ارتفاع زیاد و حساسیت کاربری بالا، هنگامی که بر روی خاک نرم احداث شوند بهتر است اثرات اندرکنش خاک-سازه در طراحی آن ها لحاظ شود [۹]. در سال ۲۰۱۶، بهشتی اول و همکاران با بررسی قابلیت اعتماد لرزه ای ساختمان های بتنی قالب تونلی با احتساب اثر اندرکنش خاک-سازه، نشان دادند که در مناطق با لرزه خیزی بالا و خاک های نرم، اثر نامبرده می تواند سبب کاهش بازه قابلیت اعتماد سازه های بلند در حصول به عملکرد های از پیش تعیین شده گردد [۱۲]. در سال ۲۰۱۷، شکیب و همکاران تأثیر اندرکنش خاک-سازه را در سطوح قابلیت اطمینان احتمالاتی ساختمان های فولادی دارای نامنظمی هندسی در ارتفاع مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسیده اند که اندرکنش خاک-سازه موجب تغییر در نتایج شده، به طوری که عدم در نظر گرفتن آن در طراحی می تواند منجر به برآورد نادرستی از عملکرد لرزه ای سازه شود [۱۳].

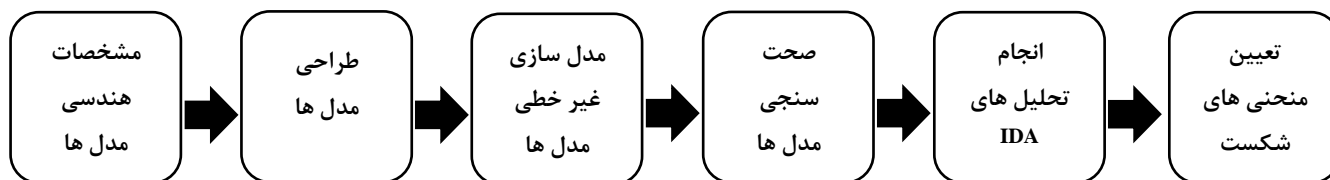
مرور ادبیات فنی و تحقیقات پیشین حاکی از عدم مطالعات تجربی و عددی در زمینه ارزیابی اثرات مؤلفه قائم زلزله و اندرکنش خاک-سازه در قالب تحلیل های غیر خطی و احتمالاتی بر روی عملکرد لرزه ای قاب خمشی سوله ها بوده و چنانکه باید به آن توجه نشده است. این در حالی است که در سوله های با دهانه عریض و همچنین سوله هایی که بر روی خاک نرم ساخته می شوند، عدم در نظر گیری اثرات نامبرده می تواند تأثیر قابل توجهی در پاسخ های لرزه ای این نوع از سازه داشته و به دلیل شکل پذیری کم آن ها نیاز است که در ناحیه غیر خطی رفتار آن ها به دقت مورد بررسی قرار گیرد. به همین خاطر انجام پژوهش حاضر یک امر ضروری در علم مهندسی سازه و زلزله تلقی می شود.

<sup>2</sup> Rigid Base (RB)

<sup>3</sup> Soil-Structure Interaction (SSI)

## ۲- روش تحقیق

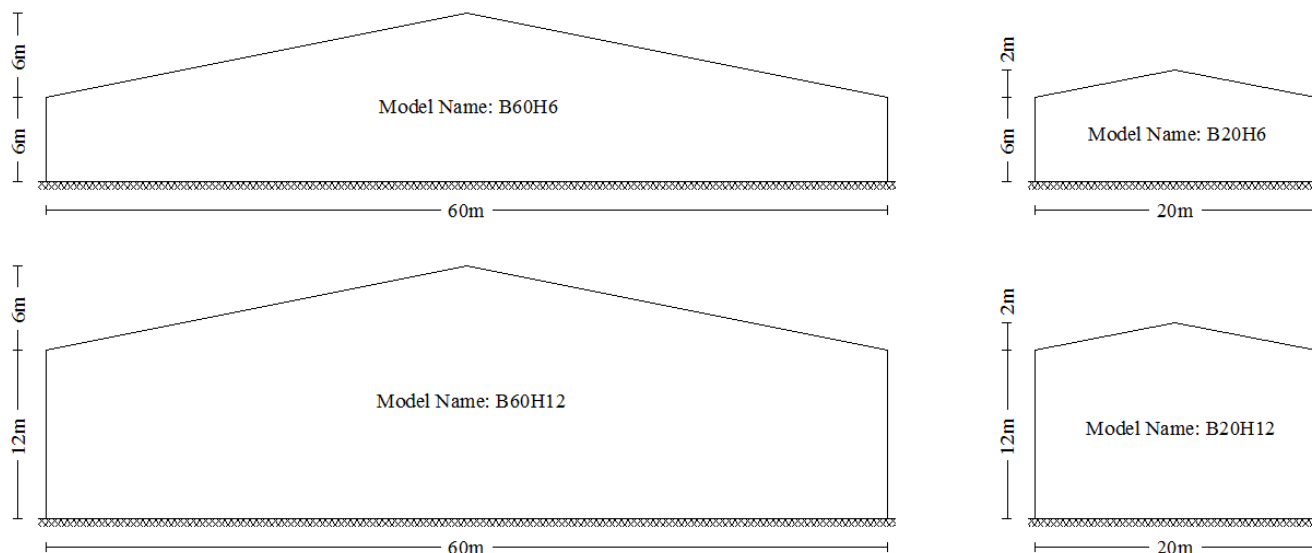
هدف اصلی این مطالعه، بررسی و ارزیابی اثر مولفه قائم زلزله بر عملکرد لرزه ای قاب خمشی سوله های مستقر بر بستر انعطاف پذیر بوده به طوری که اثرات مولفه قائم زلزله و اندرکنش خاک-سازه در مدل های با دهانه و ارتفاع های مختلف، با استفاده از منحنی شکست در چهارچوب احتمالاتی بیان گردد. جهت رسیدن به هدف نام برده، می توان از مراحل پیشنهادی نشان داده شده در شکل ۱ استفاده نمود.



شکل ۱: روش پیشنهادی جهت تعیین منحنی های شکنندگی

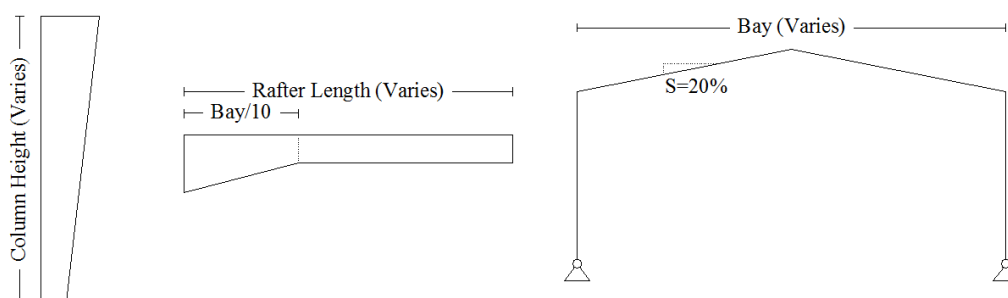
## ۲-۱- مشخصات هندسی مدل ها

در این مطالعه از چهار مدل قاب خمشی سوله استفاده شده است. نام مربوط به هر مدل و همچنین ابعاد هندسی آن ها در شکل ۲ مشاهده می شود. به عنوان نمونه، مدلی که با دهانه ۶۰ متر و ارتفاع ستون ۱۲ متر می باشد، با نام اختصاری B60H12 تعریف شده است. همچنین مشخصات هندسی مدل ها به گونه ای می باشد که می توان هر کدام را نماینده ای از قاب های خمشی سوله با دهانه و ارتفاع کم و زیاد تعریف نمود. به عنوان نمونه، مدل B60H12 را می توان نماینده ای از قاب های خمشی سوله با دهانه و ارتفاع زیاد تعریف نمود. بنابراین با توجه به مدل هایی که در نظر گرفته شده می توان اثرات مؤلفه قائم زلزله و همچنین اندرکنش خاک-سازه را هم در ارتفاع و هم در دهانه های مختلف قاب خمشی سوله ها مورد بررسی و ارزیابی قرار داد.



شکل ۲: ابعاد هندسی مدل های مورد مطالعه

شیب بام در تمامی مدل ها ۲۰ درصد بوده و مقاطع رفتار و ستون، تیرورق هایی به صورت I شکل و با مقطع متغیر در نظر گرفته شده و دارای شالوده منفرد با مقطع مربعی می باشند. مقاطع رفتار ها و ستون های مدل های مورد بررسی در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: مقاطع رafter ها و ستون های مدل های مورد بررسی

## ۲-۲- طراحی مدل ها

طراحی المان های رafter و ستون هر کدام از مدل ها در نرم افزار SAP2000 v18.2.0 [۱۴] انجام گردیده و برای طراحی شالوده ها از نرم افزار SAFE v12.3.2 [۱۵] استفاده شده است. تنش مجاز خاک در محل و مقاومت فشاری بتن فونداسیون به ترتیب برابر با ۱/۵ و ۲۱۰ (kgf/cm<sup>2</sup>) و همچنین مدول بستر برابر با ۱/۸ (kgf/cm<sup>3</sup>) در نظر گرفته شده است. نوع فولاد مصرفی المان های رafter و ستون ST37 بوده و مدول الاستیسیته آن برابر با ۲/۰۳۹×۱۰<sup>۶</sup> (kgf/cm<sup>2</sup>) می باشد. در تمامی مدل های مورد بررسی، سیستم باربر جانبی، قاب خمشی معمولی در نظر گرفته شده است. محل احداث سازه ها در شهر تهران است. طبقه بندی نوع خاک در شهر تهران از نوع ۱ در شمال شهر تا نوع ۳ در جنوب متغیر است [۱۷، ۱۶]. با توجه به اینکه آثار اندرکنش خاک-سازه در پاسخ لرزه ای سازه بیشتر روی خاک های نرم بارز می شود، بنابراین در این پژوهش خاک قرار گرفته در زیر شالوده سازه ها از نوع ۳ استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش ۴ [۱۸] (نوع D مطابق آیین نامه ASCE.SEI 41-13) در نظر گرفته شده است. برای بارگذاری ثقلی و باد در مدل های مورد مطالعه از مبحث ۶ ویرایش ۹۲ [۱۹] و برای بارگذاری زلزله از استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش ۴ استفاده شده است. بار های ثقلی اعمال شده به مدل های مورد بررسی شامل بار مرده، بار برف متقارن و بار برف نامتقارن می باشد. دیوار های پیرامونی و سقف پوشش دهنده سازه های مورد بررسی از نوع ساندویچ پانل با وزن ۳۶۰ کیلو گرم بر متر در نظر گرفته شده است. برای طراحی سوله ها می توان از روش طراحی تنش مجاز<sup>۴</sup> و حالت حدی<sup>۵</sup> استفاده نمود که تحقیقات انجام شده نشان دهنده اقتصادی بودن روش حالت حدی نسبت به تنش مجاز است [۲۰]. به همین دلیل برای طراحی المان های رafter و ستون هر کدام از مدل ها از روش حالت حدی مطابق مبحث ۱۰ ویرایش ۹۲ [۲۱] استفاده شده است. تلاش شده مدل های مورد بررسی در این مطالعه به صورت اقتصادی و با ارضای تمامی الزامات آیین نامه ای تحلیل و طراحی شوند. بعد از طراحی و سعی و خطا جهت رسیدن به یک طرح اقتصادی، ابعاد المان های رafter، ستون و فونداسیون هر کدام از مدل ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: ابعاد مقاطع مدل های مورد مطالعه

ابعاد بر حسب متر	مدل B20H6	مدل B20H12	مدل B60H6	مدل B60H12
ارتفاع جان در محل شانه	۰/۷۵	۱	۱/۵	۱/۵
ارتفاع جان در راس رafter	۰/۴	۰/۵	۱	۱
ضخامت جان رafter و ستون	۰/۰۰۷	۰/۰۱	۰/۰۱۴	۰/۰۱۴
عرض بال رafter و ستون	۰/۱۸	۰/۲۴	۰/۳۴	۰/۴
ضخامت بال رafter و ستون	۰/۰۰۹	۰/۰۱۲	۰/۰۱۷	۰/۰۲
طول و عرض شالوده (B و L)	۱	۱	۱/۸	۱/۸

## ۲-۳- مدل سازی غیر خطی مدل ها

<sup>4</sup> Allowable Stress Design (ASD)

<sup>5</sup> Load and Resistance Factor Design (LRFD)

### ۱-۳-۲- سیستم سازه

مدل سازی قاب های خمشی سوله در محیط نرم افزار <sup>6</sup> OPENSEES [۲۲] انجام شده است. مصالح فولادی دو خطی یک محوره با سخت شدگی سینماتیک ۰/۰۲ تحت عنوان steel01 در نظر گرفته شده و در تعریف مقاطع اعضا، اعم از مقاطع ا شکل برای رقتر ها و ستون ها، از مقاطع ساخته شده از الیاف استفاده گردیده است. این نوع از مقاطع با بکارگیری مصالح غیرخطی تعریف شده، امکان غیر خطی شدن در کلیه اجزای تشکیل دهنده مقطع را فراهم می سازد. در این مطالعه اثر تغییر شکل های برشی به صورت خطی برای مقاطع تعریف شده است. همچنین مفاصل پلاستیک گسترده در طول المان های رقتر و ستون برای مدل سازی رفتار غیر خطی این اعضا تعبیه گردید.

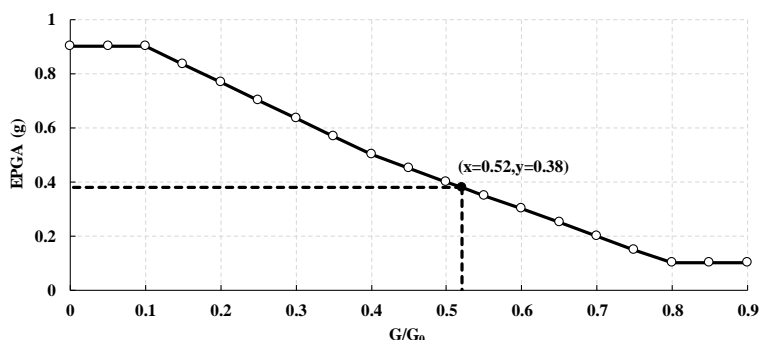
### ۲-۳-۲- سیستم خاک و شالوده

مدل سازی فنر های معادل خاک در محیط نرم افزار OPENSEES انجام پذیرفت. برای مدل نمودن فنر های غیر همبسته که به صورت خطی در این پژوهش در نظر گرفته شده اند، از مصالح الاستیک و المان های با طول صفر استفاده شده است.

برای مدل سازی بستر انعطاف پذیر از روابط موجود در FEMA 356 [۲۳] استفاده می شود که در آن سازه پی مدل های مورد بررسی نسبت به خاک زیر پی، صلب در نظر گرفته شده است. برای این منظور ابتدا مدول برشی اولیه ( $G_0$ ) از رابطه ۱ محاسبه می گردد.

$$G_0 = \frac{\gamma V_{s0}^2}{g} \quad (1)$$

برای مدل های تحلیلی، سرعت موج برشی در کرنش های کوچک ( $V_{s0}$ ) برابر ۲۰۰ (m/s) لحاظ شد که در استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش ۴، در طبقه بندی نوع ۳ قرار می گیرد. شتاب ثقل (g) برابر ۹/۸۰۶ ( $m/s^2$ ) می باشد. همچنین با توجه به این که خاک نوع ۳ در استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش ۴ به خاک های متراکم تا متوسط اطلاق می شود، وزن مخصوص ( $\gamma$ ) و ضریب پواسون ( $\nu$ ) متناسب با آن خاک به ترتیب برابر ۱۸۰۰ ( $kgf/m^3$ ) و ۰/۳۵ تعیین شده است [۲۴]. مدول برشی دینامیکی خاک (G)، که با افزایش کرنش در حین زلزله کاهش می یابد، می تواند برحسب مدول برشی اولیه ( $G_0$ ) و حداکثر شتاب موثر زمین (EPGA)، مطابق شکل ۴ تخمین زده شود.



شکل ۴: تغییرات نسبت مدول برشی دینامیکی به مدول برشی اولیه برای شدت های موثر مختلف زلزله

بر اساس شکل ۵، در هر گره از شالوده سه فنر برای سه درجه آزادی تعریف می شود (دو فنر انتقالی و یک فنر پیچشی). ضمن این که برای محاسبه ضرایب سختی این فنر ها که به صورت مستقل از یکدیگر فرض می شوند، از روابط ۲ تا ۴ استفاده شده است.

<sup>6</sup> Open System for Earthquake Engineering Simulation (OPENSEES)



شکل ۵: مدل سازی پی با استفاده از فنر های غیر همبسته. الف) مدل فنر غیر هم بسته، ب) بارگذاری پی [۲۲]

$$K_{sh} = \frac{GB}{2-\nu} \left[ 3.4 \left( \frac{L}{B} \right)^{0.65} + 1.2 \right] \quad (2)$$

$$K_{sv} = \frac{GB}{1-\nu} \left[ 1.55 \left( \frac{L}{B} \right)^{0.75} + 0.8 \right] \quad (3)$$

$$K_{sr} = \frac{GB^3}{1-\nu} \left[ 0.47 \left( \frac{L}{B} \right)^{2.4} + 0.034 \right] \quad (4)$$

با توجه به روابط تعریف شده، سختی فنر های معادل مدل های مورد مطالعه محاسبه گردیده و در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲: سختی فنر های معادل مدل های مورد مطالعه

مدل B60H12	مدل B60H6	مدل B20H12	مدل B20H6	سختی فنر های معادل (Tonf/cm)
۱۹۱/۵۹	۱۹۱/۵۹	۱۰۶/۴۴	۱۰۶/۴۴	$K_{sh}$
۲۴۸/۴۷	۲۴۸/۴۷	۱۳۸/۰۴	۱۳۸/۰۴	$K_{sv}$
.	.	.	.	$K_{sr}$

## ۲-۴- صحت سنجی مدل ها

با توجه به این که مرجعی وجود ندارد که مدل غیر خطی سوله ساخته شده در برنامه OPENSEES را بخواهیم با آن مقایسه کنیم، به همین دلیل جهت صحت سنجی، از سه تحلیل مودال، پوش آور و تاریخچه زمانی غیر خطی در دو نرم افزار SAP2000 و OPENSEES استفاده شده و سپس با هم مقایسه گردیده است. بنابراین لازم است برای مدل ها در نرم افزار SAP2000، مشخصات مصالح، مقاطع و المان های غیر خطی مطابق مشخصات تعریف شده در نرم افزار OPENSEES انجام شود. با تکمیل مدل های غیر خطی در SAP2000، نتایج دو نرم افزار برای سه تحلیل مذکور در دو حالت مستقر بر بستر صلب و انعطاف پذیر مقایسه شده است که در این مقاله فقط صحت سنجی مدل



B60H12 ارائه می شود. لازم به ذکر است دلیل انتخاب SAP2000، مقبولیت و عمومیت داشتن آن در بین مهندسیین طراح قاب های صنعتی و البته سادگی در فرآیند تولید مدل است.

## ۲-۴-۱- تحلیل مودال

زمان تناوب مود اول سازه مربوط به تحلیل مودال در SAP2000 و OPENSEES در جدول ۳ نشان داده شده است.

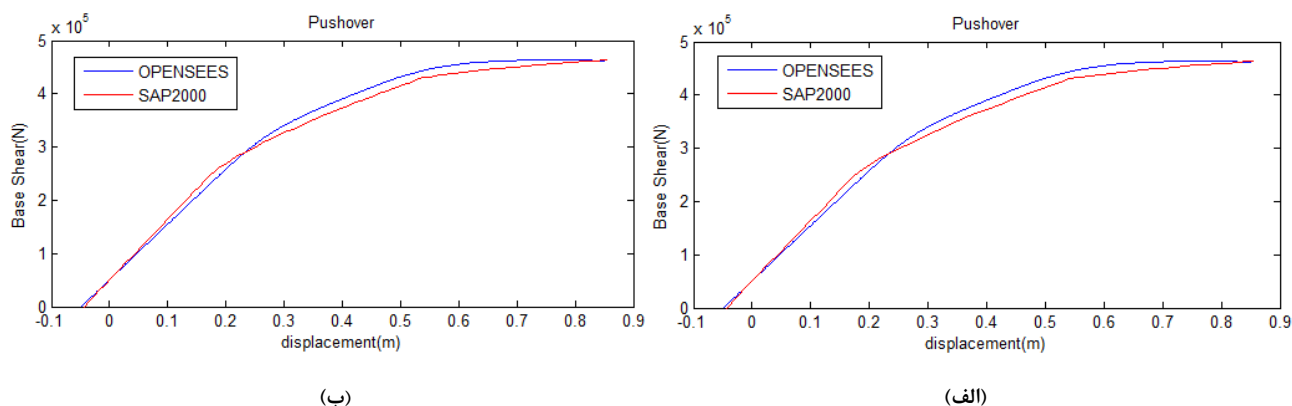
جدول ۳: زمان تناوب مود اول در نرم افزار SAP2000 و OPENSEES

نوع بستر	زمان تناوب مود اول در نرم افزار SAP2000	زمان تناوب مود اول در نرم افزار OPENSEES	درصد اختلاف
صلب	۱/۳۱۹	۱/۳۵۵	۲/۶۶
انعطاف پذیر	۱/۳۲۳	۱/۳۵۹	۲/۶۳

همان گونه که در جدول ۳ مشاهده می شود، درصد اختلاف زمان تناوب ها در دو نرم افزار ناچیز بوده که بیانگر مدل سازی صحیح قاب ها در ناحیه الاستیک است. همچنین در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه به مقدار ناچیزی باعث افزایش زمان تناوب سازه نسبت به حالت بستر صلب شده است.

## ۲-۴-۲- تحلیل پوش آور

با انجام تحلیل استاتیکی غیر خطی در OPENSEES و SAP2000، نمودار تغییر مکان به برش پایه ترسیم شده و در شکل های ۶ مشاهده می شود. لازم به ذکر است که در این مقاله نقطه توقف تحلیل، ۱/۵ برابر حد آستانه فروریزش مطابق Fema 356 در نظر گرفته شده است.

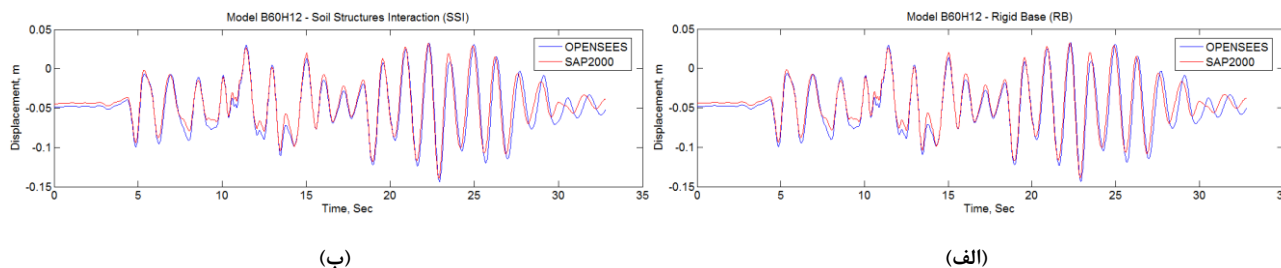


شکل ۶: نمودار پوش آور در نرم افزار OPENSEES و SAP2000 (الف) مستقر بر بستر صلب (ب) مستقر بر بستر انعطاف پذیر

با توجه به نمودار پوش آور شکل های ۶، اختلاف کمی در ناحیه خطی دیده می شود که نشان دهنده مدل سازی صحیح این دو نرم افزار بوده که در قسمت تحلیل مودال هم صحت سنجی این ناحیه به اثبات رسیده بود. در طرف مقابل در ناحیه غیر خطی هم رفتار نزدیکی مشاهده می شود.

## ۲-۴-۳- تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی

بر روی مدل های مورد نظر با استفاده از زلزله طیس با حداکثر شتاب  $0.4g$  تحلیل تاریخچه زمانی انجام شده و نمودار تاریخچه جابجایی-زمان آن را رسم گردیده و در شکل های ۷ مشاهده می شود. از آنجایی که تحلیل مورد استفاده در این مقاله، از مجموعه ای تحلیل تاریخچه زمانی تشکیل شده است، برای همین مهمترین بخش صحت سنجی مربوط به تحلیل تاریخچه زمانی است.



شکل (۷): تاریخچه جابجایی-زمان در نرم افزار OPENSEES و SAP2000 (الف) مستقر بر بستر صلب (ب) مستقر بر بستر انعطاف پذیر

همان طور که در شکل های ۷ مشاهده می شود، ویژگی های دینامیکی سازه ها در نرم افزار OPENSEES و SAP2000، برای هر دو حالت مستقر بر بستر صلب و انعطاف پذیر با اختلاف ناچیزی، تقریباً یکسان است.

## ۲-۵- انجام تحلیل های IDA

### ۲-۵-۱- انتخاب رکورد های زلزله

از آنجا که پاسخ دینامیکی سیستم ها وابستگی های زیادی به رکورد زلزله دارند، بنابراین بایستی تعداد رکورد زلزله مناسبی انتخاب گردد تا محدوده پاسخ سازه را پوشش دهد. بدین منظور FEMA p695 یک مجموعه رکورد شامل ۲۲ جفت زلزله حوزه دور و ۲۸ جفت زلزله حوزه نزدیک با و بدون پالس را معرفی نموده است. معیار هایی چون بزرگا و شدت رخداد لرزه ای، نوع زلزله و محل ثبت آن و نیز کیفیت و قابل اطمینان بودن روند ثبت رکورد در این گزینش لحاظ شده اند. اطلاعات بیشتر در مورد این مجموعه رکورد و چگونگی انتخاب آن ها در پیوست A از FEMA p695 قابل دسترسی است [۲۵]. همچنین طبق توصیه شوم و کرنل [۲۶] استفاده از ۱۰ تا ۲۰ رکورد زلزله معمولاً از دقت قابل قبولی برای برآورد تقاضای آسیب برخوردار است. به همین منظور در این مطالعه پس از بارگذاری ثقلی اولیه، تحلیل های IDA تحت ۲۰ عدد از رکورد های معرفی شده به وسیله FEMA p695 انجام گرفته اند. این ۲۰ عدد رکورد از پایگاه داده ای PEER-NGA [۲۷] با ویژگی های زمین ساختی نوع ۳ برداشت گردیده اند، به طوری که ۱۱ عدد از رکورد های انتخابی دور از گسل، ۳ عدد نزدیک گسل بدون پالس و ۶ عدد نزدیک گسل با پالس بوده اند. مشخصات رکورد های انتخابی در جدول ۴ آمده است. لازم به ذکر است که برای ترسیم طیف پاسخ ارتجاعی از نرم افزار SeismoSignal [۲۸] استفاده شده است.

جدول (۴): زلزله های انتخاب شده برای تحلیل های IDA

ID No.	Event	Station	Magnitude (M <sub>w</sub> )	R (km)	V <sub>s30</sub> (m/sec)	PGA <sub>v</sub> / H <sub>max</sub>	Record Set
1	Duzce Turkey	Bolu	7.14	12.04	293.57	0.248	Far-Field
2	Loma Prieta	Capitola	6.93	15.23	288.62	1.087	Far-Field
3	Chi-Chi Taiwan	CHY101	7.62	9.94	258.89	0.417	Far-Field
4	Landers	Coolwater	7.28	19.74	352.98	0.424	Far-Field
5	Imperial Valley-06	Delta	6.53	22.03	242.05	0.407	Far-Field
6	Loma Prieta	Gilroy Array #3	6.93	12.82	349.85	0.613	Far-Field

7	Superstition Hills	El Centro Imp. Co. Cent	6.54	18.2	192.05	0.358	Far-Field
8	Northridge-01	Canyon-W Lost Cany	6.69	12.44	325.6	0.641	Far-Field
9	Northridge-01	Beverly Hills-Mulhol	6.69	17.15	355.81	0.667	Far-Field
10	San Fernando	LA-Hollywood Stor FF	6.61	22.77	316.46	0.73	Far-Field
11	Kobe Japan	Shin-Osaka	6.9	19.15	256	0.289	Far-Field
12	Imperial Valley-06	Bonds Corner	6.53	2.66	223.03	0.685	Near-Field (No Pulse)
13	Imperial Valley-06	Chihuahua	6.53	7.29	242.05	0.885	Near-Field (No Pulse)
14	Kocaeli Turkey	Yarimca	7.51	4.83	297	0.752	Near-Field (No Pulse)
15	Duzce Turkey	Duzce	7.14	6.58	281.86	0.671	Near-Field (Pulse)
16	Imperial Valley-06	El Centro Array #6	6.53	1.35	203.22	4.167	Near-Field (Pulse)
17	Imperial Valley-06	El Centro Array #7	6.53	0.56	210.51	1.235	Near-Field (Pulse)
18	Erzican Turkey	Erzincan	6.69	4.38	352.05	0.474	Near-Field (Pulse)
19	Northridge-01	Rinaldi Receiving Sta	6.69	6.5	282.25	1.099	Near-Field (Pulse)
20	Chi-Chi Taiwan	TCU065	7.62	0.57	305.85	0.333	Near-Field (Pulse)

## ۲-۵-۲- برآورد عملکرد لرزه ای سازه ها

از روش های شناخت عملکرد سازه و تعیین حد نهایی ظرفیت سازه قبل از فروریزش، استفاده از حد و معیاری است که حالت حدی رفتار یک سازه را نشان می دهد و با عبور رفتار سازه از آن معیار، حالت حدی رخ خواهد داد و سازه وارد ناحیه جدید می شود. در پژوهش پیش رو طبق تعریف FEMA 356 برای مدل های مورد بررسی در یفت نسبی برای سطح عملکرد قابلیت استفاده بی وقفه<sup>۷</sup>، ایمنی جانی<sup>۸</sup> و آستانه فروریزش<sup>۹</sup> به ترتیب برابر ۰/۷، ۲/۵ و ۵ درصد تعیین شده است. عملکرد لرزه ای مدل های مورد بررسی با استفاده از تحلیل های IDA صورت می گیرد. در این پروسه، سازه های مستقر بر بستر صلب و نیز سازه های متأثر از اثرات اندرکنش خاک-سازه، تحت تاثیر مؤلفه افقی و توام مؤلفه های قائم و افقی زلزله قرار گرفته و با استفاده از رکورد های زلزله ای که در سطوح شدت گوناگون مقیاس شده اند، پاسخ آن ها از مرحله رفتار خطی تا حد فرو ریزش و ناپایداری سازه مورد ارزیابی قرار می گیرد. ضریب مقیاس رکورد های زلزله به صورت مضربی از معیار شدت حرکت زمین<sup>۱۰</sup> به تدریج از یک سطح بسیار پایین، تا سطح بالایی که سبب فروریزش در سازه گردد تعریف می شود که در اینجا از شتاب طیفی سازه در مود اول با میرایی ۵ درصد ( $S_a(T_1, 5\%)$ ) به عنوان معیار شدت استفاده گردید. پس از اعمال رکورد زلزله به سازه، پاسخ سازه با استفاده از تقاضای مهندسی<sup>۱۱</sup> سنجیده می شود تا با استفاده از آن، عملکرد لرزه ای و میزان خسارت در سازه برآورد شود. در

<sup>7</sup> Immediate Occupancy (IO)

<sup>8</sup> Life Safety (LS)

<sup>9</sup> Collapse Prevention (CP)

<sup>10</sup> Intensity Measure (IM)

<sup>11</sup> Engineering Demand Parameter (EDP)

اینجا، از حداکثر تغییر مکان جانبی نسبی ( $\theta_{max}$ ) به عنوان شاخص EDP استفاده شده است. هدف اصلی این روش به دست آوردن پاسخ های سازه برای مقادیر مختلف شدت زلزله می باشد و سپس نمودار IM هر رکورد بر حسب EDP ترسیم می شود که نمودار IDA نام دارد و نتایج این تحلیل در واقع به شکل مجموعه ای از منحنی های IDA ارائه می گردد. این منحنی ها اختلاف زیادی را از یک رکورد به رکورد دیگر نشان می دهند. در نتیجه این منحنی ها باید خلاصه سازی شوند تا پراکندگی اطلاعات کاهش یابد که یکی از این روش ها، استفاده از مقادیر ۰.۱۶٪، ۰.۵۰٪ و ۰.۸۴٪ می باشد. به منحنی های خلاصه شده IDA، منحنی ظرفیت دینامیکی سازه (مقدار IM قابل تحمل سازه) هم گفته می شود که عمدتاً برای مقایسه سازه ها نسبت به هم کاربرد دارد.

## ۲-۶- تعیین منحنی های شکست

منحنی های شکنندگی سازه<sup>۱۲</sup> توابعی هستند که احتمال فراگذشت برای حالات عملکردی در سطوح مختلف خرابی به ازای شدت های مختلف زلزله را بیان می کند. این توابع به صورت توابع توزیع احتمالاتی، نه روابط قطعی، بیان می شوند تا بتوانند ماهیت متغیر و عدم قطعیت های موجود در فرآیند پیش بینی خرابی سازه ای را به صورت تابعی از پاسخ سازه توصیف نمایند. برای بدست آوردن مقدار احتمال یک توزیع نرمال از مساحت سطح زیر منحنی توزیع نرمال موسوم به تابع توزیع تجمعی نرمال استفاده می شود [۲۹]. تابع چگالی توزیع نرمال با رابطه ۵ و تابع چگالی توزیع تجمعی نرمال توسط رابطه ۶ نشان داده می شوند. همچنین منحنی شکنندگی نوعی تابع توزیع تجمعی برای پارامتر شدت زمین لرزه است که مقادیر احتمال ایجاد خسارت در سازه با فرض وقوع زمین لرزه ای با یک شدت مفروض یا کمتر را مشخص می کند که در رابطه ۷ تعریف شده است.

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

$$F_x(X) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx = f\left(\frac{x_1 - \mu}{\sigma}\right) \quad (6)$$

$$\text{Fragility Curves: } P[EDP > AC | IM] \quad (7)$$

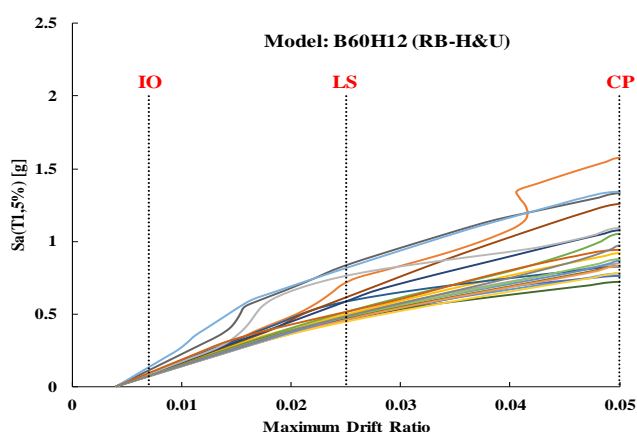
در روابط ۵ و ۶،  $\mu$  و  $\sigma$  به ترتیب میانگین و انحراف معیار پاسخ هستند. همچنین در رابطه ۷، AC شرایط قابل قبول مربوط به حالت حدی مفروض می باشد.

## ۳- تجزیه و تحلیل نتایج

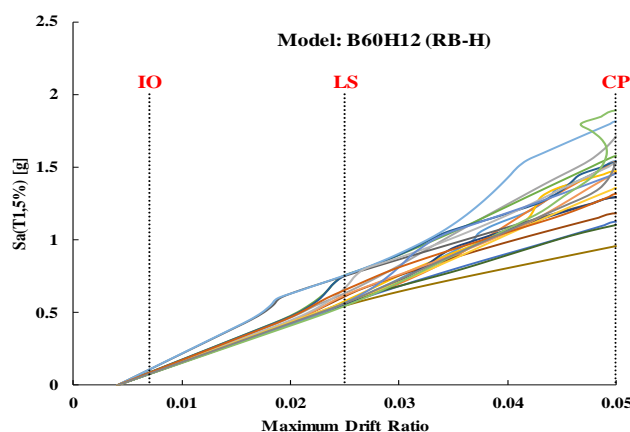
### ۳-۱- منحنی چند رکورده IDA

نمودار های چند رکورده IDA به خوبی رفتار سازه را برای مجموعه شتاب نگاشت هایی که بر اساس خصوصیات مورد نظر انتخاب شده اند را نشان می دهند که در این مقاله برای صرفه جویی در ارائه مطالب صرفاً منحنی چند رکورده IDA مربوط به مدل B20H6 در حالت های با مولفه قائم (H&U) و بدون مولفه قائم (H) مستقر بر بستر صلب و انعطاف پذیر در شکل ۸ آورده شده است.

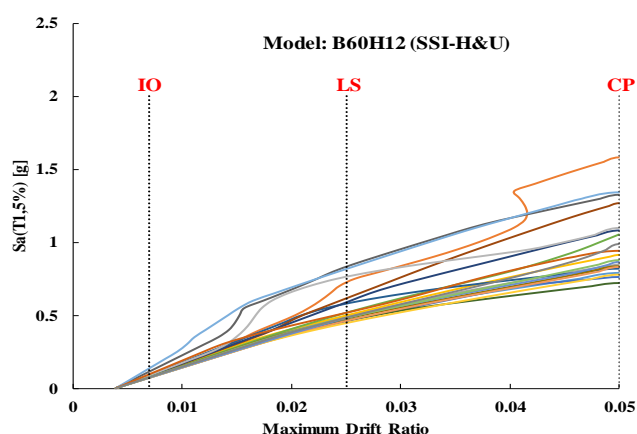
<sup>12</sup> Structure Curve Fragility (SCF)



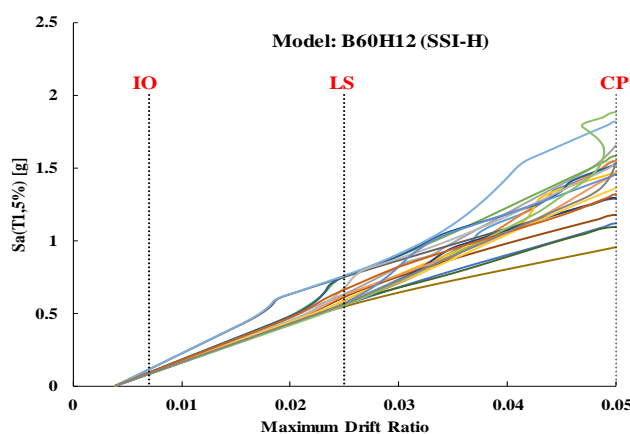
ب) منحنی IDA مدل B20H6 با مولفه قائم بر بستر صلب



الف) منحنی IDA مدل B20H6 بدون مولفه قائم بر بستر صلب



د) منحنی IDA مدل B20H6 با مولفه قائم بر بستر انعطاف پذیر



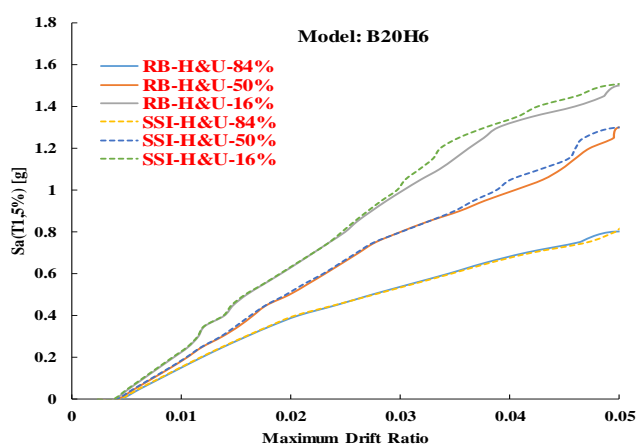
ج) منحنی IDA مدل B20H6 بدون مولفه قائم بر بستر انعطاف پذیر

شکل (۸): منحنی های چند رکورده IDA برای قاب مدل B20H6 با و بدون مولفه قائم مستقر بر بستر صلب و انعطاف پذیر

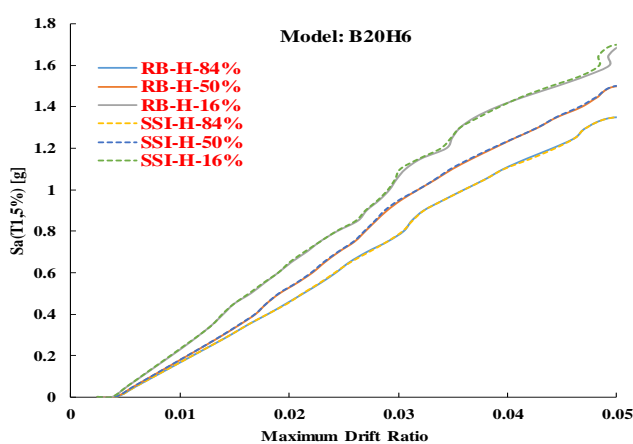
همان گونه که در ادبیات فنی اشاره گردید و در شکل ۸ هم مشاهده می شود، به دلیل درجات نامعینی کم قاب های خمشی سوله، رفتار خطی در این نوع سازه ها چشمگیر بوده و دارای محدوده بیشتری است. در تمامی نمودار های چند رکورده IDA این مورد کاملاً مشهود است، به طوری که رفتار سازه در تمامی رکورد ها در سطح عملکرد قابلیت استفاده بی وقفه به صورت خطی بوده و با عبور هر سازه از محدوده رفتار خطی، سازه وارد ناحیه غیر خطی شده و سختی سازه نسبت به قبل دچار کاهش و یا افزایش شده که همین امر باعث می شود نمودار ها در ناحیه غیر خطی از هم دور شده و به صورت خوشه درآیند. با رسیدن سازه به سطح عملکرد آستانه فروریزش، سازه ناپایدار شده و بعد از این نقطه انتظار می رود که نمودار ها به تدریج به یک خط صاف تبدیل شده و این گونه پایان یابند. در نظر گرفتن اثر توام مولفه قائم و افقی باعث تغییرات بیشتر سختی در ناحیه غیر خطی شده و ناحیه خطی در این حالت نسبت به مولفه افقی به تنهایی، کاهش یافته، به طوری که در نظر گرفتن این مؤلفه در ناحیه غیر خطی تأثیر بیشتری نسبت به ناحیه غیر خطی داشته است. همچنین در نظر گرفتن توام مولفه قائم و افقی باعث شده بیشتر رکورد ها در شدت کمتری سازه را به سطح عملکردی فروریزش برسانند که این مورد در تمامی مدل ها به وضوح قابل مشاهده است. در حالت های مختلف، سازه در مقابل رکورد های کمی دچار پدیده احیا شدگی شده است. میزان پراکندگی ها در حالتی که اثر توام مولفه قائم و افقی در نظر گرفته شود، به میزان چشمگیری افزایش یافته است. لازم به ذکر است که اندرکنش خاک-سازه نسبت به حالت صلب تغییرات چندانی در رفتار سازه تحت رکورد های مختلف نداشته است.

## ۳-۲- منحنی خلاصه شده IDA

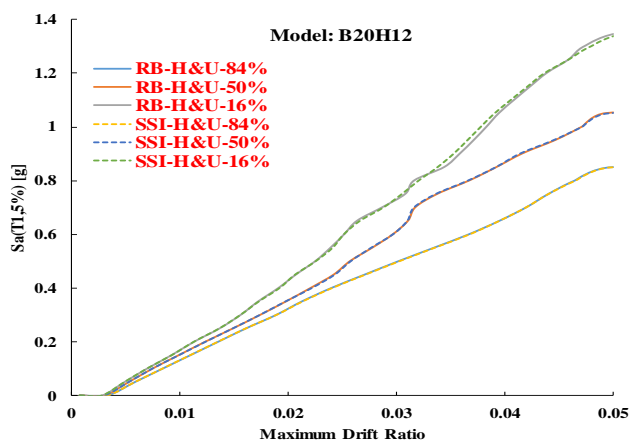
با این که هر منحنی IDA برای یک سازه و یک رکورد زمین لرزه بخصوص به صورت قطعی و کامل مشخص می گردد، اگر بخواهیم احتمال این که کدام رکورد زمین لرزه ممکن است در طول عمر مفید سازه به آن اثر کند را وارد مساله کنیم خصوصیات احتمالاتی وارد مساله می گردد؛ پس از آن دیگر منحنی IDA حالت قطعی ندارد، پس به صورت تابع احتمالاتی در می آید. ساده ترین روشی که برای عمومیت دادن به نتایج این تحلیل پیشنهاد شده است استفاده از مقادیر ۱۶٪، ۵۰٪ و ۸۴٪ می باشد. برای این منظور منحنی های خلاصه شده هر سازه را با و بدون مولفه قائم مستقر بر بستر صلب و انعطاف پذیر، تعیین کرده و در شکل های ۹ نمایش داده شده است.



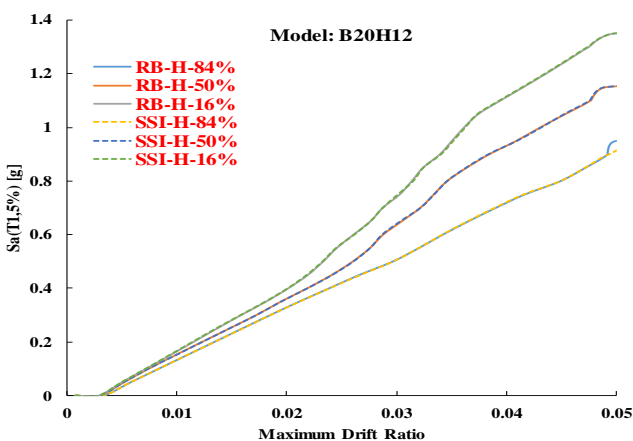
ب) منحنی خلاصه شده IDA مدل B20H6 با مولفه قائم



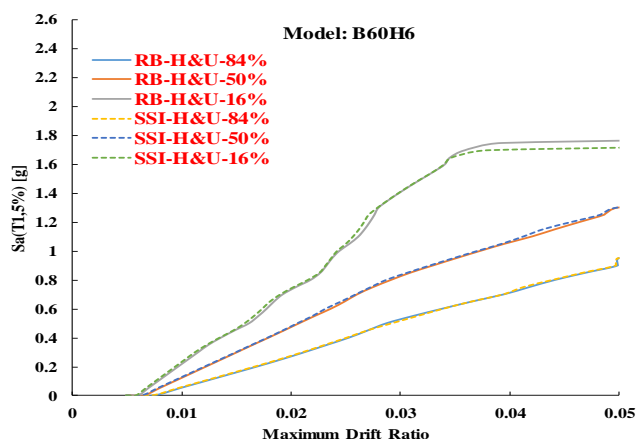
الف) منحنی خلاصه شده IDA مدل B20H6 بدون مولفه قائم



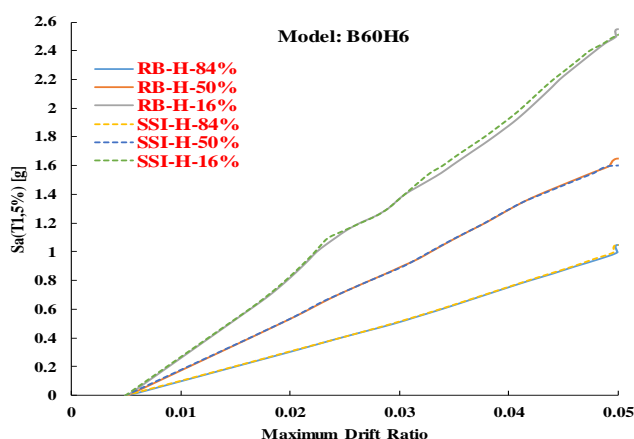
د) منحنی خلاصه شده IDA مدل B20H12 با مولفه قائم



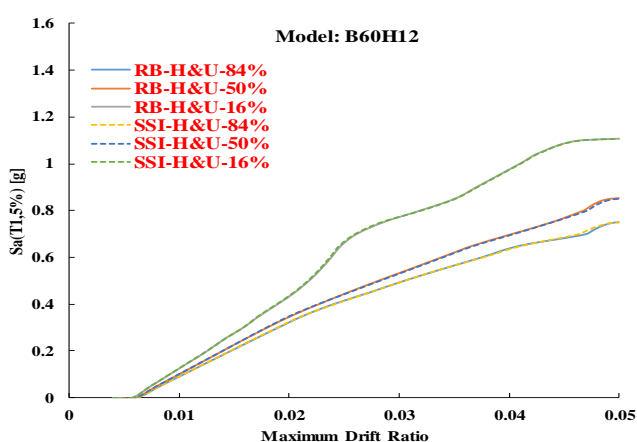
ج) منحنی خلاصه شده IDA مدل B20H12 بدون مولفه قائم



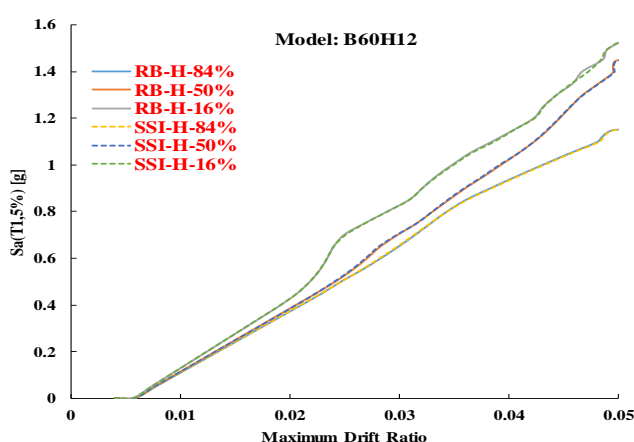
و) منحنی خلاصه شده IDA مدل B60H6 با مولفه قائم



ه) منحنی خلاصه شده IDA مدل B60H6 بدون مولفه قائم



ح) منحنی خلاصه شده IDA مدل B60H12 با مولفه قائم



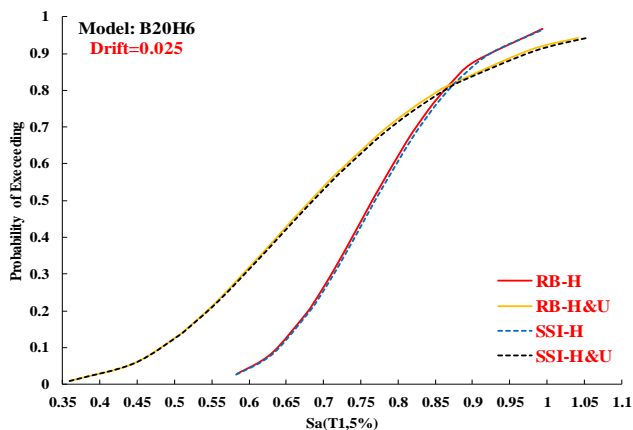
ز) منحنی خلاصه شده IDA مدل B60H12 بدون مولفه قائم

شکل (۹): منحنی های خلاصه شده IDA برای مدل های مورد بررسی با و بدون مولفه قائم بر بستر صلب و انعطاف پذیر

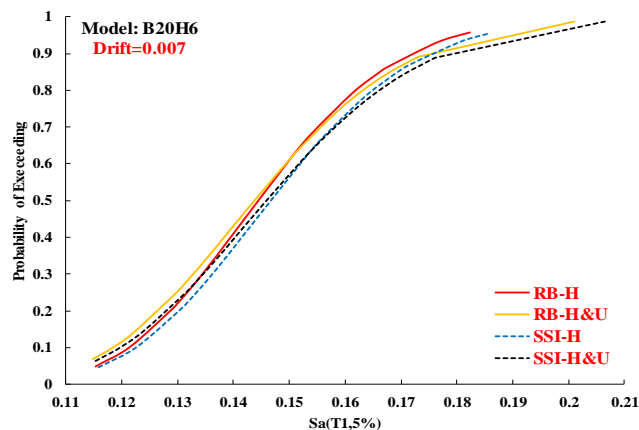
با توجه به شکل های ۹، مقادیر ظرفیت به دست آمده از منحنی های خلاصه سازی شده IDA، به وضوح اختلاف رفتار قاب های با دهانه و ارتفاع مختلف را هنگامی که مولفه قائم به آن ها اعمال شود، به نسبت حالت مولفه افقی تنها نشان می دهد، به طوری که در منحنی میانگین ۵۰ درصد برای مدل های B60H6، B20H12، B60H12 و B20H6 با رسیدن سازه به سطح عملکرد آستانه فروریزش کاهش ظرفیت دینامیکی سازه (مقدار IM قابل تحمل سازه) در حالت توأم مولفه افقی و قائم نسبت به حالت مولفه افقی تنها، به ترتیب در حدود ۱۳، ۸، ۱۹ و ۴۱ درصد و در منحنی فوق میانگین ۸۴ درصد که برای سازه های مهم کاربرد دارد، به ترتیب در حدود ۴۰، ۶، ۱۰ و ۳۵ درصد را نشان می دهد. در مقایسه بین منحنی های میانگین ۵۰ درصد مدل های مورد بررسی در سطح عملکرد آستانه فروریزش در تمامی مدل ها اثر مولفه قائم زلزله باعث کاهش ظرفیت دینامیکی سازه شده است، به طوری که بیشترین کاهش ظرفیت دینامیکی سازه مربوط به قاب B60H12 در حدود ۴۱ درصد کاهش می باشد. همچنین در منحنی فوق میانگین ۸۴ درصد، در تمامی مدل ها اثر مولفه قائم زلزله باعث کاهش ظرفیت دینامیکی سازه شده که بیشترین کاهش ظرفیت دینامیکی سازه مربوط به قاب B20H6 در حدود ۴۰ درصد مشاهده شده است. لازم به ذکر است که لحاظ نمودن اندرکنش خاک-سازه در تمامی مدل ها اثرات بسیار کمی در ظرفیت سازه نسبت به حالت صلب ایجاد کرده است، به طوری که در بعضی از مدل ها در نظر گرفتن اثرات اندرکنشی خاک-سازه باعث افزایش ظرفیت و در برخی دیگر باعث کاهش ظرفیت شده و از رابطه خاصی پیروی نکرده است.

## ۳-۳- منحنی شکست

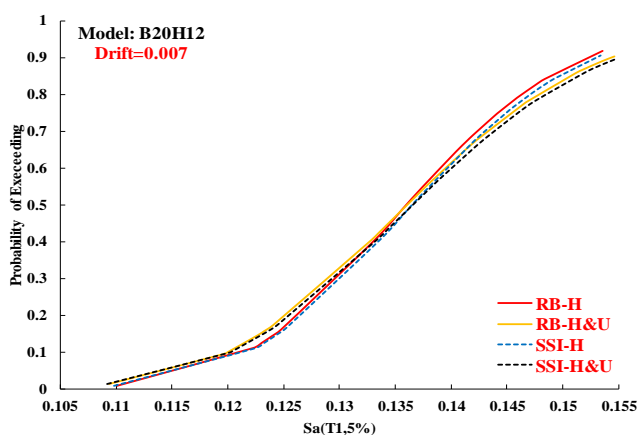
همان گونه که بیان شد، منحنی های شکنندگی، توزیع احتمال تجمعی از خسارت را بیان می کنند. به همین منظور برای مدل های مورد بررسی این منحنی ها تعیین شده و در شکل های ۱۰ آورده شده اند.



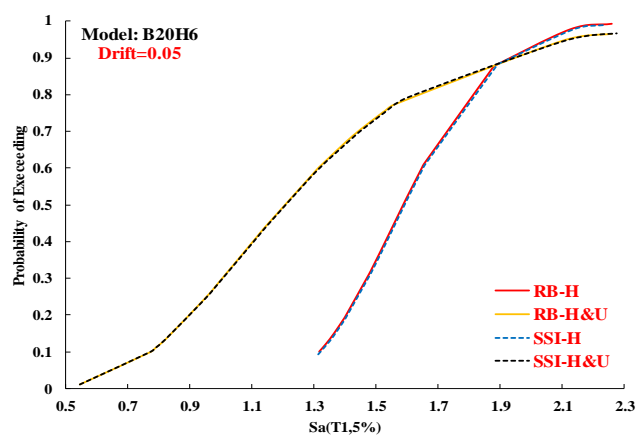
ب) منحنی شکست مدل B20H6 در سطح عملکرد LS



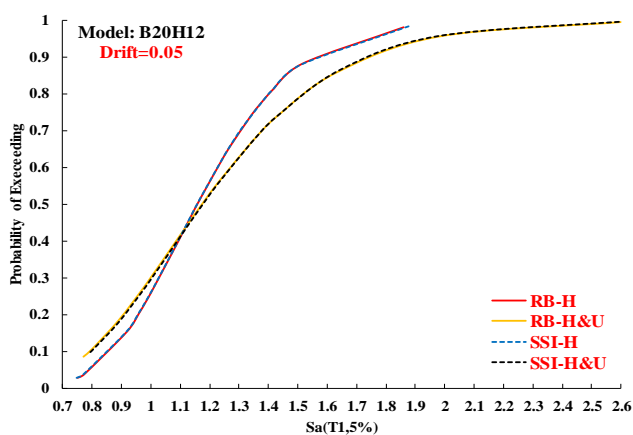
الف) منحنی شکست مدل B20H6 در سطح عملکرد IO



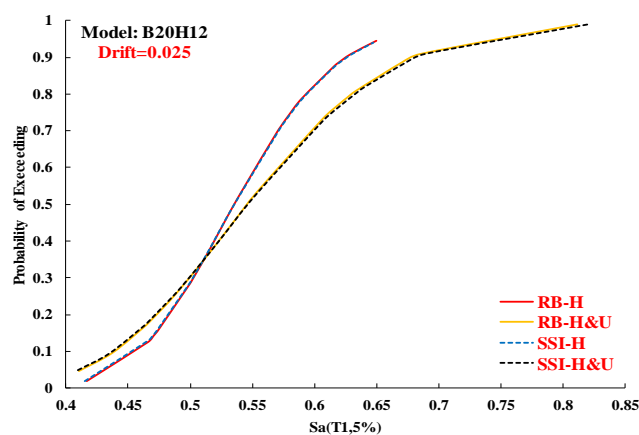
د) منحنی شکست مدل B20H12 در سطح عملکرد IO



ج) منحنی شکست مدل B20H6 در سطح عملکرد CP

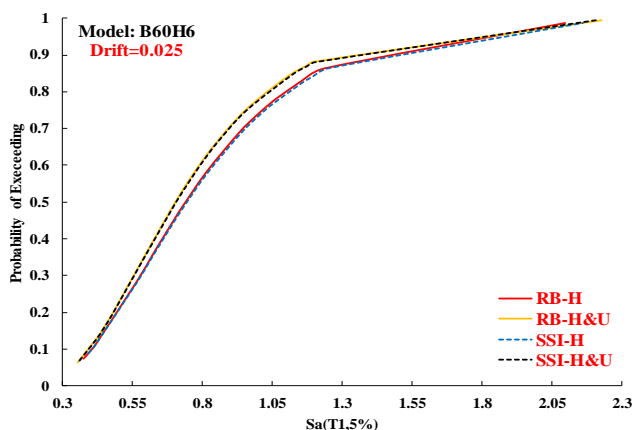


و) منحنی شکست مدل B20H12 در سطح عملکرد CP

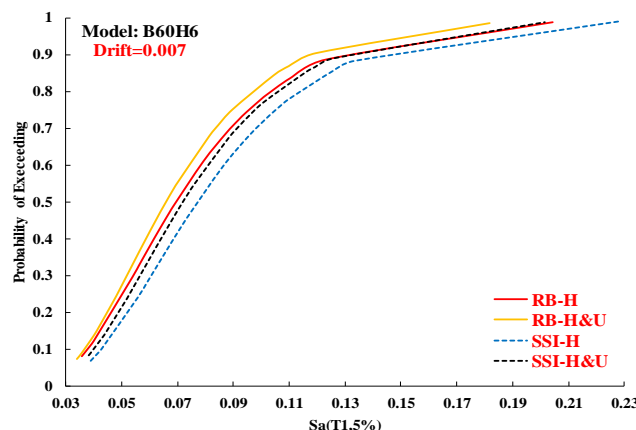


ه) منحنی شکست مدل B20H12 در سطح عملکرد LS

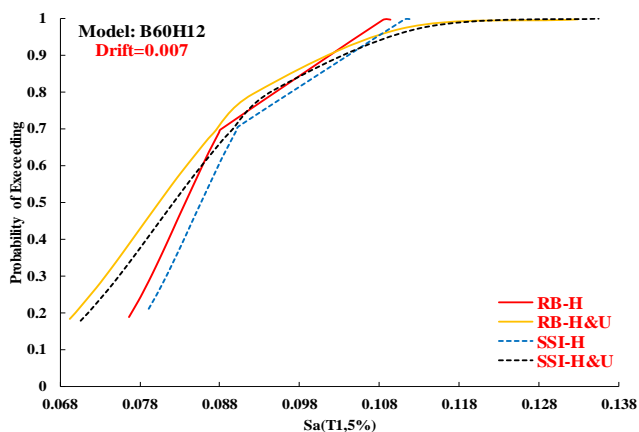




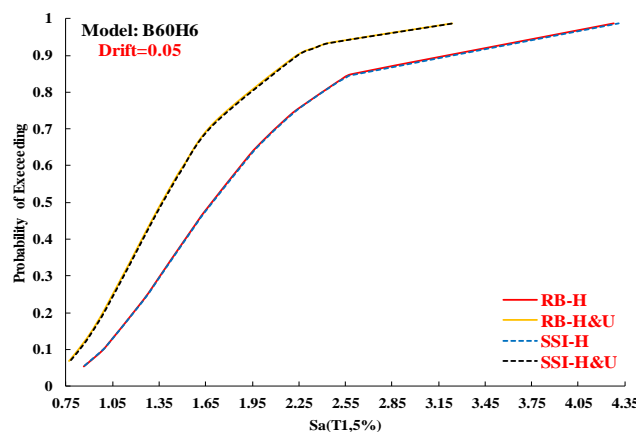
ج) منحنی شکست مدل B60H6 در سطح عملکرد LS



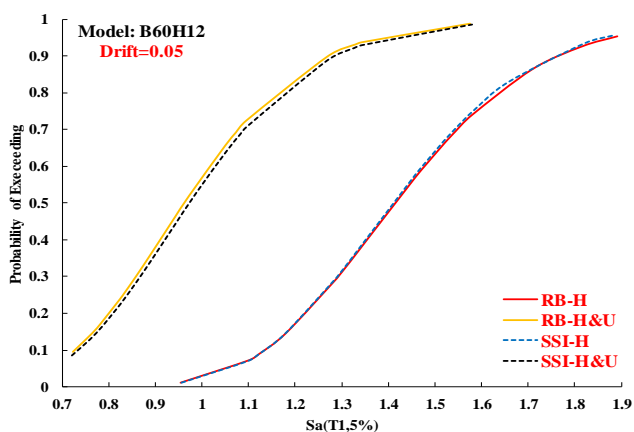
ز) منحنی شکست مدل B60H6 در سطح عملکرد IO



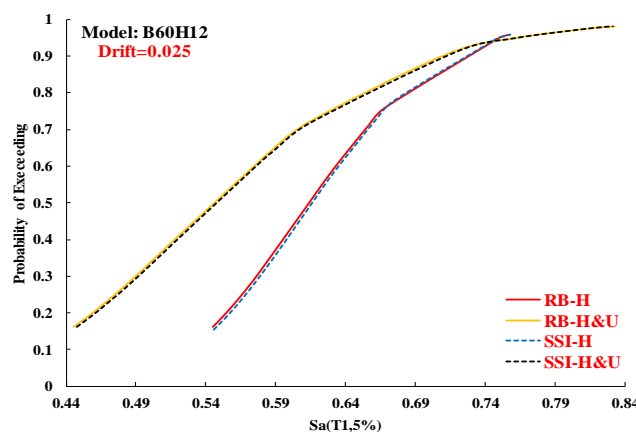
ی) منحنی شکست مدل B60H12 در سطح عملکرد IO



ط) منحنی شکست مدل B60H6 در سطح عملکرد CP



ل) منحنی شکست مدل B60H12 در سطح عملکرد CP



ک) منحنی شکست مدل B60H12 در سطح عملکرد LS

شکل (۱۰): منحنی های شکنندگی قاب مدل B20H6 با و بدون مولفه قائم زلزله مستقر بر بستر صلب و انعطاف پذیر در ۳ سطح عملکرد تعریف شده

منحنی های شکنندگی مربوط به مدل B20H6 مبین آن است که در تمامی سطوح عملکرد مولفه قائم زلزله در شدت های بالا باعث کاهش و در شدت های پایین باعث افزایش احتمال وقوع شکست گردیده، به طوری که با افزایش سطوح عملکردی این میزان چشمگیریتر شده است. همچنین در حالت در نظر گیری مولفه قائم زلزله، با بحرانی تر شدن سطوح عملکرد سرعت خرابی در هر سطح از شدت چشمگیریتر می شود. در منحنی های شکنندگی مربوط به مدل B20H12 مشاهده می شود که در تمامی سطوح عملکرد مولفه قائم زلزله در شدت های پایین باعث افزایش و در شدت های بالاتر باعث کاهش احتمال وقوع شکست در سازه شده، به طوری که در سطوح عملکرد ایمنی جانی و آستانه فرو ریزش این میزان چشمگیریتر است. همچنین در حالت در نظر گیری مولفه قائم زلزله، با بحرانی تر شدن سطوح عملکرد سرعت خرابی در هر سطح از شدت بیشتر بوده ولی در شدت های بالاتر سرعت خرابی چشمگیریتر می شود. منحنی های شکنندگی مربوط به مدل B60H6 مبین آن است که در تمامی سطوح عملکرد، مولفه قائم زلزله باعث افزایش احتمال وقوع شکست در هر سطح از شدت شده، اما در سطح عملکرد آستانه فرو ریزش این میزان چشمگیریتر شده است. همچنین در نظر گیری مولفه قائم زلزله در تمامی سطوح عملکرد تأثیر چندانی در سرعت خرابی سازه نداشته است. در منحنی های شکنندگی مربوط به مدل B60H12 مشاهده می شود که در سطح عملکرد قابلیت استفاده بی وقفه و ایمنی جانی، مولفه قائم زلزله در شدت های کم باعث افزایش و در شدت های بالا باعث کاهش احتمال وقوع شکست می شود، این در حالی است که مولفه قائم زلزله در سطح عملکرد آستانه فرو ریزش باعث افزایش احتمال وقوع شکست در هر سطح از شدت شده است. همچنین مولفه قائم زلزله در سطح عملکرد قابلیت استفاده بی وقفه و ایمنی جانی باعث افزایش سرعت خرابی می شود که در شدت های بالاتر چشمگیریتر است، ولی در سطح عملکرد آستانه فرو ریزش مولفه قائم تأثیر چندانی در سرعت خرابی ندارد.

با مقایسه اثر مولفه قائم زلزله در سطح عملکرد قابلیت استفاده بی وقفه و ایمنی جانی در سازه های مورد بررسی، مشاهده می شود که مدل B60H6 رفتاری کاملاً متفاوت نسبت به سه سازه دیگر دارد، به طوری که احتمال وقوع شکست در سطوح عملکرد ذکر شده در هر سطح از شدت زلزله، سازه را زودتر به احتمال فراگذشت می رساند، این در حالی است که در سه سازه دیگر اثر مولفه قائم زلزله در شدت های کم باعث افزایش و در شدت های بالاتر باعث کاهش احتمال وقوع شکست شده است. همچنین اثر مولفه قائم زلزله در مدل B60H6 تأثیری در سرعت خرابی نداشته ولی در سه سازه دیگر مولفه قائم زلزله باعث افزایش سرعت خرابی در سازه شده است. با مقایسه اثر مولفه قائم زلزله در سطح عملکرد آستانه فرو ریزش در سازه های مورد بررسی، مشاهده می شود که مدل های B60H6 و B60H12 رفتاری کاملاً متفاوت نسبت به مدل های B20H6 و B20H12 دارند، به طوری که در سازه های با دهانه زیاد احتمال وقوع شکست در سطح عملکرد مذکور در هر سطح از شدت زلزله، سازه را زودتر به احتمال فراگذشت می رساند، این در حالی است که در سازه های با دهانه کوتاه اثر مولفه قائم زلزله در شدت های کم باعث افزایش و در شدت های زیاد باعث کاهش احتمال وقوع شکست شده است. لازم به ذکر است که در تمامی مدل ها در سطح عملکرد قابلیت استفاده بی وقفه، اثر اندرکنش خاک-سازه سبب کاهش احتمال وقوع شکست گردیده ولی در مدل های B60H6 و B60H12 نمود بیشتری داشته است. این در حالی است که در سطوح عملکرد ایمنی جانی و آستانه فرو ریزش، اثر در نظر گیری آن تغییرات چندانی بر احتمال وقوع شکست نداشته است.

#### ۴- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، آثار مؤلفه قائم زلزله و همچنین اندرکنش خاک-سازه بر عملکرد لرزه ای قاب خمشی سوله های با دهانه و ارتفاع مختلف بررسی گردید. ارزیابی ها در قالب ارائه منحنی های چند رکورده و خلاصه شده IDA و همچنین منحنی های شکنندگی در سطوح عملکرد IO، LS و CP صورت پذیرفت. نتایج نشان دهنده اهمیت پارامتر مولفه قائم زلزله بر عملکرد لرزه ای قاب های خمشی سوله، بویژه قاب های با دهانه و ارتفاع زیاد است، به طوری که این مولفه نقش بسیار مهم و تعیین کننده ای در بررسی دقیق تر رفتار این نوع سازه ها به منظور کاهش ریسک خطر پذیری و افزایش ایمنی داشته و سبب زودتر رسیدن سازه به ناحیه غیر خطی، کاهش ظرفیت، افزایش احتمال وقوع

شکست و سرعت بخشیدن خرابی در این نوع سازه ها می شود و اگر به مولفه قائم زلزله در قاب های خمشی سوله توجه نشود، نتایج بررسی رفتار سازه با مقدار واقعی تفاوت چشمگیری می تواند داشته باشد. در طرف مقابل اندرکنش خاک-سازه بر روی قاب های خمشی سوله اثرات قابل توجهی نداشته و تا حدودی شباهت به رفتار صلب داشته است. از این رو توصیه می شود برای تحلیل و طراحی قاب های خمشی سوله، علل الخصوص هنگامی که دارای دهانه و ارتفاع زیادی هستند، مولفه قائم زلزله همانند مولفه افقی در نظر گرفته شود، اما نیازی به در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه در آن ها نیست و می توان از آن چشم پوشی کرد. همچنین نتایج ذکر شده با توجه به تعداد محدود سازه های بررسی شده و بر اساس مفروضات، پارامتر ها و شتاب نگاشت های در نظر گرفته شده ارائه گردید و هر گونه تغییرات در این پارامتر ها می تواند نتایج به دست آمده را تحت تاثیر قرار دهد. بنابراین بدیهی است که جمع بندی نهایی نیاز به تحلیل روی سازه های بیشتری دارد. همچنین تلاش شده است در این مطالعه از مدل هایی که مشابه آن ها در واقعیت ساخته شده است، مورد بررسی قرار گیرند و کاربردی تر باشند.

## مراجع:

- [1] Abbasi, M., and Mehrvand, M., and Haghollahi, A. (2014). *Comprehensive Design of Industrial Structures and Practical examples by Software*. Civil Science Publications, Tehran, Iran.
- [2] PEB Steel Buildings Co. (2012). *Pre-Engineered Buildings*. Available at: <http://www.PEBsteel.com> [20 Apr. 2017].
- [3] Malekizadeh, M. and Pirasteh, A. and Siahpolo N. (2017). "Evaluation and Comparison Wind and Earthquake Loads Lateral in the Industrial Structure." In: *National Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture and Urbanism*. Tabriz, Iran.
- [4] Sharafiyani, A., and Fatehi, A. (2013). "Vertical Component of the Earthquake on Concrete." In: *5<sup>th</sup> National Conference of Concrete*. Tehran, Iran.
- [5] Sadighi, R. and Janalizadeh, A. (2014). "Numerical Evaluation of the Effect of Vertical Component of Near - Field Earthquakes on the Dynamic Behavior of Embankment Dams, A Case Study: Alborz Dam." In: *Modares Civil Engineering Journal*. 14(4), 67-79.
- [6] Sadeghi, A. (2015). "Assessing the Simultaneous Effects of Horizontal and Vertical Components of Earthquakes on the Double Layer Barrel Vaults." In: *University of Tabriz Journal Civil and Environmental Engineering*. 45(2), 35-45.
- [7] Gholhaki, M. and Satari, M.J. (2016). "Study of Effect of Vertical Components of Earthquake on Thin Steel Plate Shear Walls." In: *Ferdowsi Journal of Civil Engineering*. 27(2), 145-160.
- [8] Hosseini, M. and Sadrara, M. (2017). "The Effect of Vertical Component of Earthquake on the Long Span Frames in Steel Buildings." In: *Sharif Journal of Civil Engineering*. 33.2(1.2), 105-111.
- [9] Hosseini, S. and Ghanbari, A. (2015). "Consider Effect Soil - Structure Interaction on Natural Period Industrial Structure." In: *2<sup>th</sup> National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Qum, Iran.
- [10] Aminfar, M. H. and Farahmand, B. and Safari, H. and Biklariyan, M. (2013). "Dynamic Soil - Structure Interaction Analysis of Concrete Structures by Using Finite Elements Method." In: *Ferdowsi Journal of Civil Engineering*. 24(2), 69-82.
- [11] Sadeghi, A. and Fatahi, B. and Samali, B. (2014). "Physical Modeling of Seismic Soil-Pile-Structure Interaction for Buildings on Soft Soils." In: *International Journal of Geomechanics*. 15(2), 1-18.
- [12] Beheshti, B. and Gharebaghi, S and Mohseniyan, V. (2016). "Case Evaluation Seismic Reliability Tunnel Form Concrete Building Counting Effect of Soil-Structure Interaction." In: *Journal of Steel and Structure*. 3(3), 11-29.

- [13] Shakib, H. and Fatahi, B. and Samali, B. (2017). "Probabilistic Seismic Performance Evaluation of Vertically Irregular Steel Building Considering Soil-Structure Interaction." In: *International Journal of Civil Engineering*. 15(4), 611-625.
- [14] Computers and Structures Inc. (2016) SAP2000 v18.2.0 Analysis and Design Reference Manual. CSI, Berkeley.
- [15] Computers and Structures Inc. (2008) Safe v12.3.2 Analysis and Design Reference Manual. CSI, Berkeley.
- [16] Jafari, M.K. (2002). "Supplementary Studies of Seismic Microzonation of South of Tehran." In: *International Institute of Earthquake Engineering and Seismology*. Tehran, Iran.
- [17] Jafari, M.K. (1999). "Seismic Microzonation of North of Tehran from the View Point of Site Conditions." In: *International Institute of Earthquake Engineering and Seismology*. Tehran, Iran.
- [18] Permanent Committee for Revising the Standard 2800 (2014). *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings*, 4<sup>th</sup> Edition. Building and Housing Research Center, Tehran, Iran.
- [19] Codification Office of National Building Code (2014). Iranian National Building Code, Part 6: *Loads on buildings*, 3<sup>th</sup> Edition. Ministry of Road and Urbanization, Tehran, Iran.
- [20] Malekizadeh, M. and Pirasteh, A. and Siahpolo N. (2017). "Evaluation and Comparison Design Results Industrial Structures to Methods Allowable Stress and Limit State." In: *National Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture and Urbanism*. Tabriz, Iran.
- [21] Codification Office of National Building Code (2014). Iranian National Building Code, Part 10: *Design and construction of steel*, 4<sup>th</sup> Edition. Ministry of Road and Urbanization, Tehran, Iran.
- [22] Mazzoni, S. and McKenna, F. and Scott, M. and Fenves, G. and et al. (2007). OPENSEES Command Language Manual. *University of California*. Berkeley.
- [23] Federal Emergency Management Agency, Report No. FEMA 356 (2000). *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. Washington, D.C., Part: Foundations and Geologic Site Hazards, 10-22.
- [24] Wolf, J. P. (1985). *Dynamic Soil-Structure Interaction*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- [25] Federal Emergency Management Agency, Report No. FEMA P695 (2009). *Quantification of Building Seismic Performance Factors*. Washington, D.C., Part: Ground Motion Record Sets, A20-A24.
- [26] Shome, N. and Cornell C.A. (1999). *Probabilistic Seismic Demand Analysis of Nonlinear Structures*. Ph.D. Dissertation. Stanford University.
- [27] PEER Ground Motion Database (2014). *Pacific Earthquake Engineering Research Center*, Available at: [http://peer.berkeley.edu/peer\\_ground\\_motion\\_database](http://peer.berkeley.edu/peer_ground_motion_database) [15 Apr. 2017].
- [28] Antoniou, S. and Pinho, R. (2008). "SeismoSignal"; Version 3.2.0.
- [29] Hancilar, U. and Cakti, E. and Erdik, M. and Deodatis, G. (2014). "Earthquake Vulnerability of School Buildings: Probabilistic structural fragility analyses." In: *J. Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 67, 169-178.