



Research Article

Studying the Impact of Near and Far Earthquakes on Concrete Buildings with Structural Light Concrete

Mohammad Javad Gudarzi¹, Mahdi Vajdian^{2*}

1. Masters Student, Faculty of Civil Engineering, Islamic Azad University, Aligudarz Branch, Aliguderz, Lorestan, Iran

2. Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Islamic Azad University, Aligudarz Branch, Aliguderz, Lorestan, Iran

Received: 25 April 2023; Revised: 26 May 2023; Accepted: 29 May 2023

Abstract

Concrete strength as an important parameter can play an important role in the behavior and performance of the structure. Therefore, the use of high-strength concrete can improve the performance of the structure, of course, this is an assumption that must be checked by testing and modeling. In this article, the effect of compressive strength on the behavior of concrete structures has been investigated. In this research, three frames with 5, 10, and 15 floors, which have a system, a medium-type bending frame according to the standard (2800) and the ninth topic of the national design regulations, finally, nonlinear dynamic analysis is applied to the model. The analysis and design of frames was done with the help of ETABS software. In this study, the compressive stress parameter of concrete is considered as the main variable, and two types of light concrete with a strength of 25 MPa and 55 MPa will be considered. After obtaining the sections of the desired structure, it is coded in OpenSees software. 10 records have been used to obtain fragility curves. By examining the results related to heavy and light concrete, it can be seen that in all three studied structures (five, ten and fifteen stories), the structure with heavy concrete has less drift in the same PGA as the structure with light concrete, with an averaging of the observation results. It has been found that the structure with heavy concrete has less relative displacement in the range of 15 to 24% than the structure with light concrete.

Keywords:

High strength concrete; Nonlinear dynamic analysis; Medium bending frame; Concrete structure; Fragility curve.

Cite this article as: Gudarzi, M. J., & Vajdian, M. (2023). Studying the Impact of Near and Far Earthquakes on Concrete Buildings with Structural Light Concrete. *Civil and Project Journal*, 5(2), 33-49. <https://doi.org/10.22034/cpj.2023.399201.1201>

ISSN: 2676-511X / Copyright: © 2023 by the authors.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

* Corresponding author E-mail address: m.vajdian@gmail.com



نشریه عمران و پروژه

<http://www.cpjournals.com/>

مطالعه تاثیر زلزله‌های حوزه نزدیک و دور در ساختمان‌های بتنی با بتن سبک سازه‌ای

محمدجواد گودرزی^۱، مهدی وجدیان^{*۲}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد الیگودرز، الیگودرز، لرستان، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد الیگودرز، الیگودرز، لرستان، ایران

تاریخ دریافت: ۵ اردیبهشت ۱۴۰۲؛ تاریخ بازنگری: ۵ خرداد ۱۴۰۲؛ تاریخ پذیرش: ۸ خرداد ۱۴۰۲

چکیده

مقاومت بتن به عنوان یک پارامتر مهم می‌تواند نقش مهمی در رفتار و عملکرد سازه داشته باشد. لذا استفاده از بتن پرمقاومت می‌تواند موجب بهبود رفتار عملکرد سازه شود، البته این به عنوان یک فرض می‌باشد که باید با آزمایش و مدلسازی دقیق بررسی شود. در این مقاله به بررسی اثر مقاومت فشاری بر روی رفتار سازه بتنی پرداخته شده است. در این پژوهش سه قاب با تعداد طبقات ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه که دارای سیستم، قاب خمشی از نوع متوسط می‌باشد برطبق استاندارد (۲۸۰۰) و می‌بخت نهم مقررات ملی طراحی در نهایت تحلیل دینامیکی غیرخطی بر روی مدل اعمال می‌شود. تحلیل و طراحی قاب‌ها به کمک نرم‌افزار ETABS انجام گرفت. در این مطالعه پارامتر تنش فشاری بتن به عنوان متغیر اصلی مدنظر می‌باشد و دو نوع بتن سبک با مقاومت ۲۵ مگاپاسکال و ۵۵ مگاپاسکال در نظر گرفته خواهد شد. بعد از بدست آوردن مقاطع سازه مورد نظر در نرم‌افزار OpenSees کدنویسی شده است. برای بدست آوردن منحنی‌های شکنندگی از ۱۰ عدد رکورد استفاده شده است. با بررسی نتایج مربوط به بتن سنگین و سبک نیز مشاهده می‌شود که در هر سه سازه مورد مطالعه (پنج، ده و پانزده طبقه) سازه با بتن سنگین دریفت کمتری در PGA یکسان با سازه که دارای بتن سبک داشته است با یک میانگین‌گیری از نتایج مشاهده شده است که سازه با بتن سنگین تقریباً در محدوده ۱۵ تا ۲۴ درصد جابجایی نسبی کمتری نسبت به سازه با بتن سبک داشته است.

کلمات کلیدی

بتن پرمقاومت، تحلیل دینامیکی غیرخطی، قاب خمشی متوسط، سازه بتنی، منحنی شکنندگی

۱- مقدمه

یکی از پارامترهایی که در طراحی لرزه ای و رفتار سازه های بتن آرمه هنگام زلزله موثر است، مقاومت فشاری بتنی است که در ساخت سازه مورد استفاده قرار می گیرد.

بلایای جانی اجتنابناپذیرند، بیشترین خسارات و تلفات را زمین لرزه به خود اختصاص داده است. با وجود پیشرفت های زیادی که در زمینه دانش ساخت و ساز علوم مهندسی مرتبط با سازه ایجاد شده است تا به امروز در زمینه پیش بینی زمان، محل وقوع زلزله و شدت زمین لرزه ای که در یک محل روی خواهد داد بشر ناتوان است.

اولین یافته هادر مورد زلزله های نزدیک گسل به مطالعه انجام یافته پس از زلزله کرن کانتی (۱۹۲۵) باز می گردد (هوانگ و همکاران، ۲۰۲۱).

در سال (۱۹۵۵) مطالعه بر روی زلزله حوزه نزدیک توسط بنیف^۱ براساس کرن کوینت^۲ کالیفرنیا انجام گرفته است (بنیف، ۱۹۵۵). در سال (۱۹۵۷) مهم ترین مطالعات در خصوص اثرات و خصوصیات زلزله های حوزه نزدیک توسط هادسون - هوسنر - بولت - برتر و همکارانشان انجام گرفت هوسنر و هادسون دریافتند که زلزله های حوزه نزدیک شامل پالس های بحرانی انرژی هستند هر چند ممکن است که این زلزله ها دارای بزرگای کوچکی از نظر ریشتر و یا دامنه کوچکی باشد ولی دارای پتانسیل تخریبی بالا می باشد. در سال (۱۹۹۹) کرنل و نیکولاس در مطالعاتشان روش هایی برای بهبود رفتار قاب ها در برابر حرکات زمین لرزه نزدیک گسل ارائه کردند آن ها در بررسی های خود از زلزله های بزرگ کوبه (۱۹۹۵) و نورنویچ (۱۹۹۴) نشان دادند که نیاز تغییر مکانی زلزله های نزدیک گسل بسیار بالاست و این امر ناشی از اعمال یک انرژی حجیم در یک مدت زمان کوتاه توسط رکورد های نزدیک گسل است در سال (۲۰۰۰) علوی و کراونیکر رفتار الاستیک و غیر الاستیک قاب های بازه ای را بر اثر زلزله های نزدیک گسل مورد بررسی قرار دادند (بلاسونه^۳ و همکاران، ۲۰۲۲). حسینی کرد خیلی و مرتضائی در سال (۱۳۹۴) به پژوهشی تحت عنوان ارزیابی ستون های ساختمان بتن آرمه تحت اثر مولفه قائم زمین لرزه ای حوزه نزدیک پرداختند. ایران پور مبارکه و همکاران در سال (۱۳۹۵) به پژوهشی تحت عنوان بررسی عملکرد قاب های دارای مهر بند بدون محور با تیر پیوند قائم تحت زلزله های نزدیک گسل پرداختند. یکی از مشکلات مهم در طراحی و اجرای ساختمان ها به خصوص ساختمان های مرتفع و پل های بزرگ بتنی وزن مرده قابل توجه به کار رفته در آن است. از این رو در صورت استفاده از بتن سبکی که دارای خواص مکانیکی مطلوب باشد امتیازات قابل توجهی را می توان به دست آورد که از جمله آن کاهش مقاطع در تیر ستون دال و پی است که در نهایت به اقتصادی شدن طرح منجر خواهد شد. تاکنون تلاش های زیادی برای ساختن بتن سبک سازه ای صورت گرفته است. بررسی های نوشچنو و ویتکومب^۴ (۱۹۹۰) نشان داد که با استفاده از سبک دانه های سیلیسی منبسط شده با مصرف سیمان تا 520 kg/m^3 و میکروسیلیس تا ۲۰٪ وزن سیمان می توان به مقاومتی معادل $70,5 \text{ Mpa}$ با وزن مخصوص 1860 kg/m^3 دست یافت. کیهی آتیز یاسر وازکان^۵ (۲۰۰۳)، نشان دادند که می توان با دانه های بازالت- پومیس 450 kg/m^3 سیمان و ۱۰٪ وزنی سیمان استفاده از میکروسیلیس به صورت جایگزین می توان به مقاومت فشاری $43,8 \text{ Mpa}$ با وزن مخصوص خشک 1820 kg/m^3 بعد از گذشت ۳ ماه دست یافت. پژوهش های صورت گرفته توسط سیلیکا^۶ و همکاران (۱۹۹۰) درباره نوع سیمان نشان می دهد که بتن سبک ساخته شده با سیمان نوع II هم در سنین پایین و هم در سنین زیاد نسبت به سیمان نوع I دارای مقاومت فشاری بالاتری است و افزایش مقاومت فشاری در

¹ Benif

² Kern count

³ Blasone

⁴ V.Norok Shchenov and w. whit comb

⁵ A.Kilic, C.D.Atis,E.Yaser,F.ozcan

⁶ Silica

حدود ۶ Mpa است. پادماپریمیا و همکاران (۲۰۲۲) بر روی بتن ژئوپلیمری با سرباره مس به عنوان سنگدانه ریز راهی برای توسعه تکنیک های ساخت و ساز سبز پرداخته اند.

فی^۱ و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی عددی رفتار ریزش پیشرونده قابهای بتنی مسلح چند طبقه پرداخته شده است. این مقاله شبیه سازی های عددی قاب های بتن مسلح چند طبقه را تحت سناریوهای فروپاشی پیشرونده ارائه می کند. قاب های بتن آرمه با طبقات مختلف با استفاده از DIANA مدل سازی می شوند. مقاومت بار و حالت شکست قاب ها از شبیه سازی عددی به دست می آید. تغییرات نیروی محوری و لنگر خمشی در انتهای تیر نیز تعیین و تجزیه و تحلیل می شود تا مکانیسم انتقال نیرو را روشن کند. بر اساس نتایج عددی، یک روش طراحی برای قاب های چند طبقه برای مقاومت در برابر ریزش پیشرونده پیشنهاد شده است. مقایسه بین نتایج عددی و روش های طراحی نشان می دهد که روش طراحی می تواند مقاومت فروپاشی پیشرونده قاب های چند طبقه را با دقت خوبی ارزیابی کند.

کیان و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی تجربی و عددی مقاومت ریزش پیشرونده زیر مجموعه های تیر-ستون بتنی پیش ساخته پس از تنش پرداخته اند. در این مقاله، چهار زیرمجموعه تیر-ستون بتن پیش ساخته با مقیاس ۱/۲ با اتصال با عملکرد بالا تحت روش بارگذاری فشار به پایین مورد آزمایش قرار گرفتند تا مکانیسم مقاومت در برابر بار قاب های پیش ساخته تحت سناریوهای مختلف حذف ستون مورد مطالعه قرار گیرد. پارامترهای مورد بررسی شامل محل برداشتن ستون و پیش تنیدگی موثر در تاندون ها می باشد. نتایج آزمایش نشان داد که حالت های شکست قاب های بتن پیش ساخته پس تنیده غیر پیوندی با قاب های خمشی بتن مسلح متفاوت است: هیچ ترکی در تیرها ایجاد نشد و دهانه گسترده در نزدیکی رابط تیر به ستون ایجاد شد. برای نمونه های بدون تیرهای آویزان، شکست ستون کناری شکست فشاری غیرعادی بود. علاوه بر این، مکانیسم های مقاوم در برابر بار در قاب های پیش ساخته به طور قابل توجهی با قاب های خمشی بتن مسلح متفاوت بود: عمل قوس فشاری که در بتن در حین برداشتن ستون ایجاد شد، عمدتاً به دلیل اعمال فشار پیش فشاری فعال در بتن بود. هنگامی که له شدگی شدید در بتن رخ دهد، عمل قوس فشاری از بین نمی رود. بنابراین، زمانی که جابجایی از عمق یک پرتو بیشتر شود، ممکن است سهم منفی برای مقاومت بار داشته باشد. نیروی کششی که در تاندون ها ایجاد می شود می تواند از ابتدای آزمایش، عمل کاتناری را فراهم کند. علاوه بر این، برای درک عمیق تر رفتار نمونه های آزمایش شده، آنالیزهای عددی انجام شد. اثرات مقاومت بتن، نسبت تراکم محوری در ستون های جانبی، و رویکردهای بارگذاری بر رفتار مجموعه های فرعی نیز بر اساس تحلیل های عددی معتبر مورد بررسی قرار گرفت.

بر روی زمینه مقاومت بتن تحقیقات مختلفی صورت گرفته است. از جمله ارزیابی عملکرد سازه های قاب-دیوار خمشی بتن مسلح با استفاده از تحلیل دینامیکی افزایشی توسط دسای^۲ و همکاران (۲۰۲۲)، یان^۳ و همکاران (۲۰۲۳) بر روی تحلیل ضریب اهمیت پل های دریایی تحت زلزله بر اساس شکنندگی لرزه ای و تحلیل دینامیکی افزایشی، هووانگ^۴ و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی عملکرد لرزه ای و ظرفیت مقاومت فروریختگی قاب های بتن مسلح پر شده با در نظر گرفتن اندرکنش محوری-برشی-خمشی ستون ها، اونات و یون^۵ (۲۰۲۱) تجزیه و تحلیل دینامیک افزایشی ساختمانهای خمشی بتنی با ارتفاع متوسط برای ارزیابی اثر مقاومت بتن و نسبت تقویت کشش در تیر، وانگ^۶ و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی عددی قاب های بتنی پیش ساخته اتصالات میانی، کاو^۷ و همکاران (۲۰۲۲) ارزیابی عملکرد لرزه ای دینامیکی و احتمالی قاب های بتن مسلح پیش تنیده پیش تنیده با تأثیر دال از طریق مدل فضایی سه بعدی پرداختند.

¹ Fu

² Desai

³ Yan

⁴ Huang

⁵ Onat and Yon

⁶ Wang

⁷ Cao

در این مطالعه، تحلیل دینامیکی غیرخطی برای سازه‌ی قاب خمشی متوسط انجام می‌پذیرد. کمیت تنش فشاری به عنوان پارامتری که برای بتن سبک و پرمقاومت قابل ساخت می باشد، به عنوان یک متغیر در نظر گرفته شده است. در این مطالعه تاثیر مقاومت بتن در رفتار لرزه ای سازه های بتن آرمه بتن بررسی می گیرد. سازه های بتنی ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه واقع در تهران، دارای خاک نوع II در دو جهت قاب خمشی با مقاومت ۲۵ مگا پاسکال و ۵۵ مگاپاسکال مورد بررسی قرار گرفته است.

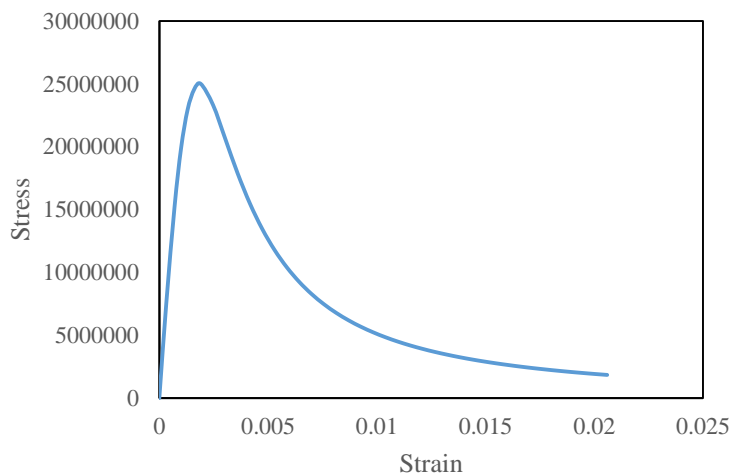
۲- روش تحقیق

در این مطالعه از تحلیل دینامیکی غیرخطی که به صورت تحلیل دینامیکی افزایشی می‌باشد، در نرم‌افزار Opensees جهت مدلسازی و تحلیل انجام شده است. برای مدلسازی اولیه و مشخص شدن مقاطع از نرم‌افزار Etabs استفاده شده است. بنابراین طراحی اولیه سازه در نرم‌افزار Etabs بوده است، سپس بعد از مشخص شدن مقاطع در نرم‌افزار OpenSees با دستورات مشخص کد نویسی انجام شده است. برای اعمال بار دینامیکی ۱۰ عدد شتاب‌نگاشت انتخاب شده است. سپس با بدست آمدن خروجی از مدل کدنویسی شده در نرم‌افزار OpenSees داده‌ها در اکسل مورد پردازش قرار گرفته است و منحنی‌های شکنندگی رسم شده است.

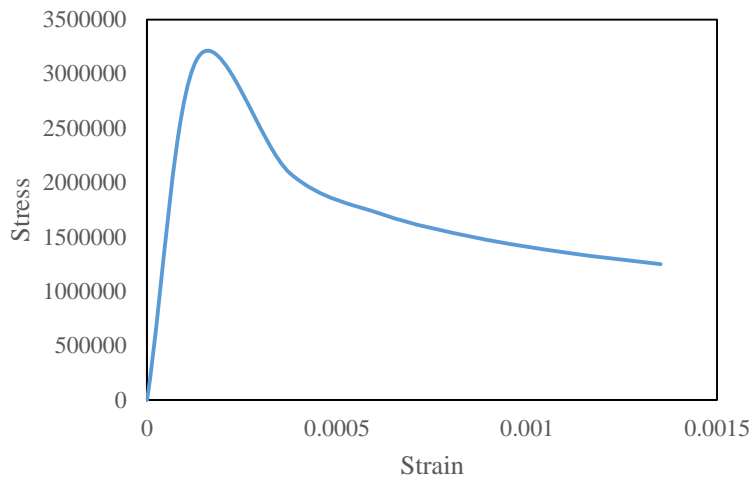
۲-۲- مدلسازی سه بعدی

برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های بتنی با سیستم قاب خمشی در زلزله، سه تیپ ساختمان بتنی با تعداد طبقات ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه که در سه رده کوتاه، متوسط و بلند مرتبه می‌باشد، در نظر گرفته شده است. سازه مورد نظر در منطقه‌ای با خطر نسبی زیاد قرار دارد. خاک محل پروژه از نوع II می‌باشد. سازه در جهت X دارای ۴ دهانه ۵ متری و در جهت Y دارای سه دهانه ۵ متری می‌باشد. ارتفاع طبقات ۳/۲ متر می‌باشد. تنش تسلیم میلگرهای طولی $f_y = 4000 \text{ kg/cm}^2$ می‌باشند. بتن دارای مقاومت فشاری بتن سبک $f_c = 250 \text{ kg/cm}^2$ و سنگین $f_c = 550 \text{ kg/cm}^2$ می‌باشد. سقف از نوع تیرچه بلوک می‌باشد و سقف صلب در نظر گرفته شده است. تکیه‌گاه سازه به صورت گیردار می‌باشد. برای طراحی از استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم (۱۳۹۴) استفاده شده است.

نمودار بتن سبک با تنش فشاری ۲۵ مگاپاسکال در شکل ۱ و ۲ برای فشاری و کشش نمایش داده شده است.

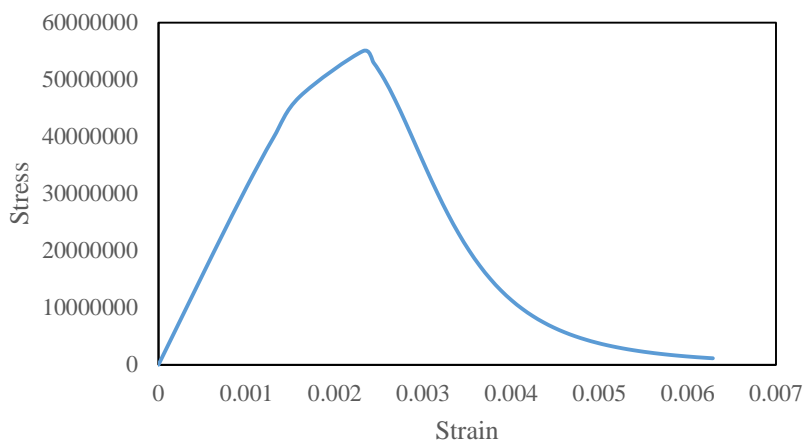


شکل ۱- تنش- کرنش در فشار.

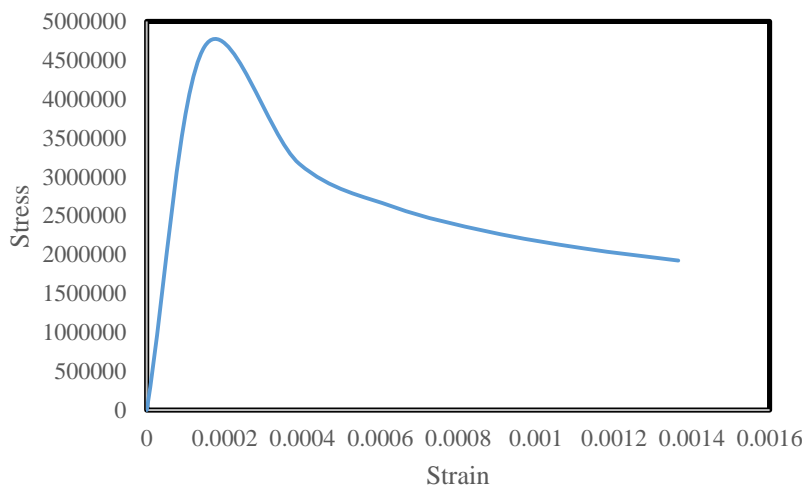


شکل ۲- تنش- کرنش در کشش.

نمودار بتن سبک با تنش فشاری ۵۵ مگاپاسکال در شکل ۳ و ۴ برای فشاری و کشش نمایش داده شده است.



شکل ۳- تنش- کرنش در فشار.



شکل ۴- تنش- کرنش در کشش.

۲-۲- بارگذاری

بار مرده کف طبقات و بام به همراه پارتیشن‌های دیوارها برابر با ۷۰۰ کیلوگرم بر متر مربع و بار زنده طبقات ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مربع و بار زنده بام ۱۵۰ کیلوگرم بر متر مربع اعمال شده است. برای بارگذاری جانبی از زوج رکوردهای شتاب نگاشت استفاده شده است. در این مجموعه رکوردهای زلزله‌ای که در فاصله بیشتر از ۱۰ کیلومتر از محل گسل، ثبت شده‌اند را به عنوان رکورد دور از گسل و رکوردهایی که در فاصله نزدیک‌تر از ۱۰ کیلومتر ثبت شده باشند را رکوردهای نزدیک به گسل شناخته است.

رکوردهای انتخابی براساس معیارهای زیر انتخاب شده‌اند.

- منطبق با خاک نوع II باشند.
- مدت زمان موثر جنبش بیش از ۱۰ ثانیه باشد.
- شدت زلزله رکوردهای انتخابی بالای ۵ ریشتر می‌باشد.
- تعداد ۱۰ عدد به صورت زوج رکورد شتاب‌نگاشت انتخاب شده است.
- رکوردها نزدیک گسل انتخاب شده است.

مشخصات رکوردهای استفاده شده در این مقاله در جدول ۱ ارائه شده است. برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های بتنی با سیستم قاب خمشی در زلزله، سه تیپ ساختمان بتنی با تعداد طبقات ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه در نظر گرفته شد. در دستورالعمل HAZUS-MH MR5 (۲۰۰۳)، ساختمان قاب خمشی بتنی را با نماد C1 و نوع ساختمان از نظر کوتاه مرتبه متوسط مرتبه و یا بلند مرتبه بودن را به ترتیب با نمادهای L، M، H در جلوی C1 نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات رکوردها اعمالی در این مطالعه.

ID NO.	Earthquake			Station Name	NEHRP Class	PGA Max (g)
	M	Year	Name			
R1	6.7	1994	San Fernando	LA - Hollywood Stor	B	0.21
R2	6.7	1994	Northridge	Canyon Country-WLC	B	0.48
R3	7.6	1999	Chi-Chi, Taiwan	WGK	B	0.334
R4	6.5	1979	Imperial Valley	Delta	B	0.35
R5	6.5	1979	Imperial Valley	El Centro Array #11	B	0.38
R6	6.9	1995	Kobe, Japan	Shin-Osaka	B	0.24
R7	7.4	1978	Tabas, Iran	71 Ferdows	B	0.108
R8	7.3	199	Landers	Yermo Fire Station	B	0.24
R9	6.9	1989	Loma Prieta	Gilroy Array #3	B	0.56
R10	6.5	1987	Superstition Hills	El Centro Imp. Co.	B	0.36

جدول ۲- تیپ بندی ساختمان‌ها از نظر ارتفاع (HAZUS-MH MR5، ۲۰۰۳).

Lable	Description	Range	
		Name	Stories
C1L		Low-Rise	1-3
C1M	Concrete Moment Frame	Mid-Rise	4-7
C1H		High-Rise	8+

برای طراحی سازه از نرم‌افزار ETABS استفاده شده است. مقاطع بدست آمده بعد از طراحی برای هر یک از المان‌های تیر و ستون سازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه در جداول ۳ تا ۵ نمایش داده شده است.

جدول ۳- مقاطع بدست آمده برای سازه پنج طبقه.

طبقه	مقطع ستون (cm)	میلگردها ستون		مقطع تیر (cm)	میلگردها تیر	
		تعداد میلگرد	قطر میلگرد (mm)		تعداد میلگرد	قطر میلگرد (mm)
اول	60x60	16	22	40x40	12	18
دوم	50x50	16	22	40x40	12	18
سوم	50x50	16	22	40x40	12	18
چهارم	40x40	16	20	40x40	12	18
پنجم	40x40	16	20	40x40	12	18

جدول ۴- مقاطع بدست آمده برای سازه ده طبقه.

طبقه	مقطع ستون (cm)	میلگردها ستون		مقطع تیر (cm)	میلگردها تیر	
		تعداد میلگرد	قطر میلگرد (mm)		تعداد میلگرد	قطر میلگرد (mm)
اول	80x80	28	22	40x40	12	18
دوم	80x80	28	22	40x40	12	18
سوم	70x70	24	22	40x40	12	18
چهارم	60x60	16	22	40x40	12	18
پنجم	50x50	16	22	40x40	12	18
ششم	50x50	16	22	40x40	12	18
هفتم	50x50	16	22	40x40	12	18
هشتم	40x40	16	20	40x40	12	18
نهم	40x40	16	20	40x40	12	18
دهم	40x40	16	20	40x40	12	18
سوم	70x70	24	22	40x40	12	18
چهارم	60x60	16	22	40x40	12	18
پنجم	50x50	16	22	40x40	12	18
ششم	50x50	16	22	40x40	12	18
هفتم	40x40	16	20	40x40	12	18

جدول ۵- مقاطع بدست آمده برای سازه پانزده طبقه.

طبقه	مقطع ستون (cm)	میلگردها ستون		مقطع تیر (cm)	میلگردها تیر	
		تعداد میلگرد	قطر میلگرد (mm)		تعداد میلگرد	قطر میلگرد (mm)
اول	90x90	32	22	40x40	12	18
دوم	90x90	32	22	40x40	12	18
سوم	90x90	32	22	40x40	12	18
چهارم	80x80	28	22	40x40	12	18
پنجم	80x80	28	22	40x40	12	18
ششم	80x80	28	22	40x40	12	18
هفتم	70x70	24	22	40x40	12	18
هشتم	70x70	24	22	40x40	12	18
نهم	70x70	24	22	40x40	12	18
دهم	70x70	24	22	40x40	12	18
یازدهم	60x60	22	22	40x40	12	18
دوازدهم	60x60	22	22	40x40	12	18
سیزدهم	50x50	16	22	40x40	12	18
چهاردهم	50x50	16	22	40x40	12	18
پانزدهم	40x40	16	20	40x40	12	18

۳-۲- ترسیم منحنی‌های شکنندگی

هنگامی که ظرفیت سازه‌ای و تقاضای لرزه‌ای دو متغیری باشند که از توزیع نرمال یا لگاریتم نرمال پیروی کنند با استفاده از قاعده حد مرکزی می‌توان نشان داد که عملکرد مرکب حاصل شده، توزیع لگاریتم نرمال خواهد داشت. بنابراین منحنی شکنندگی را می‌توان به صورت تابع توزیع تجمعی لگاریتمی نرمال مطابق رابطه زیر نشان داد.

$$p(\leq D) = \phi\left[\frac{1}{\beta_{sd}} \ln\left(\frac{S_d}{S_c}\right)\right] \quad (1)$$

در این رابطه p احتمال رسیدن یا فراگذشت از حالت خرابی D (حداکثر تغییرمکان بین طبقه‌ای)، β_{sd} انحراف معیار لگاریتم نرمال، S_d متوسط مقدار نیاز لرزه‌ای، S_c مقدار متوسط حالت حدی مجاز برای انواع تیپ‌های ساختمانی و حالت‌های خرابی است. در جدول ۴-۵ مقدار متوسط حالت حدی مجاز (S_c) برای ساختمان‌های قاب خمشی بتنی متوسط در حالات خرابی مختلف ارائه گردیده است.

جدول ۶- مقدار متوسط حالت حدی مجاز برای انواع حالت‌های خرابی.

نوع ساختمان	دریافت سازه در حالت خرابی			
	کم	متوسط	زیاد	کامل
سازه بتنی با ریسک پایین	0.005	0.0087	0.0233	0.06
سازه بتنی با ریسک متوسط	0.0033	0.0058	0.0156	0.04
سازه بتنی با ریسک بالا	0.0025	0.0043	0.0117	0.03

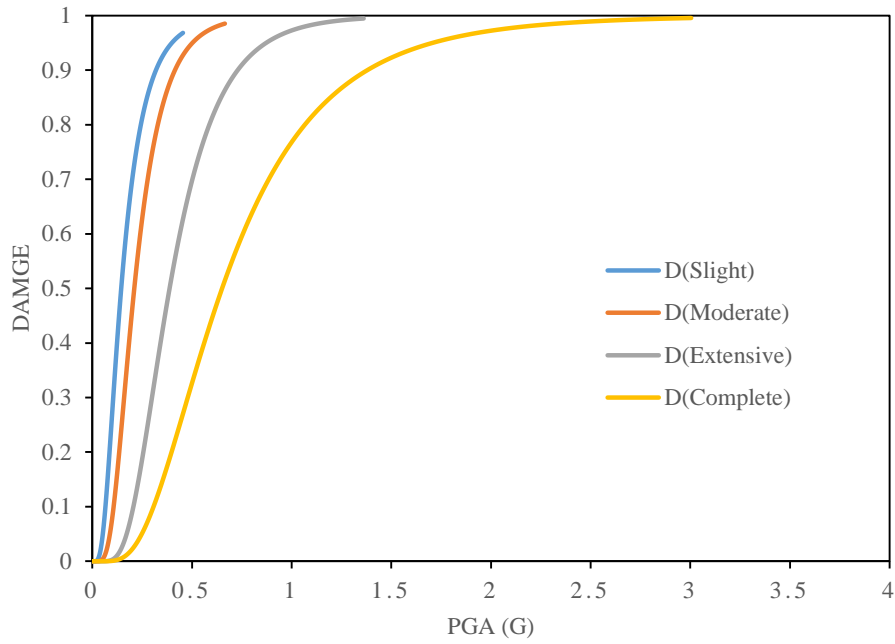
مقدار S_d نیز از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\ln(S_d) = a \ln(x) + b \quad (2)$$

در این رابطه X پارامتر شدت جنبش زمین (PGA) می‌باشد و مقادیر a ، b ضرایب رگرسیونی هستند که از طریق تحلیل رگرسیون لگاریتمی، حداکثر تغییرمکان بین طبقه‌ای، در مقابل PGA های مختلف به دست می‌آید.

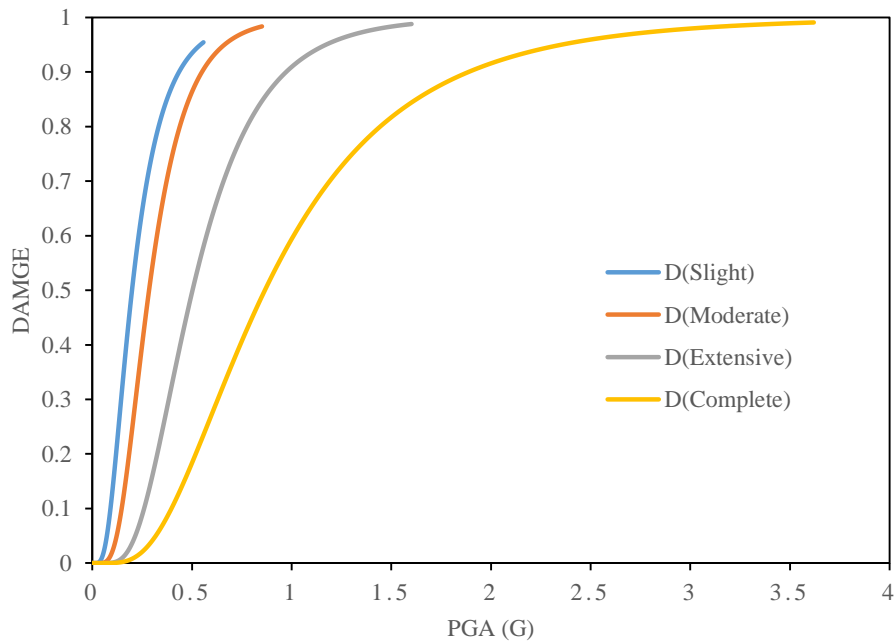
منحنی‌های شکنندگی مورد بررسی در واقع بیان‌گر احتمال خرابی خطرپذیری و یا ریسک سازه‌ها می‌باشد که در ادامه به ترسیم این منحنی‌ها پرداخته شده است.

در شکل ۵ منحنی شکنندگی سازه پنج طبقه با بتن سبک نمایش داده شده است.



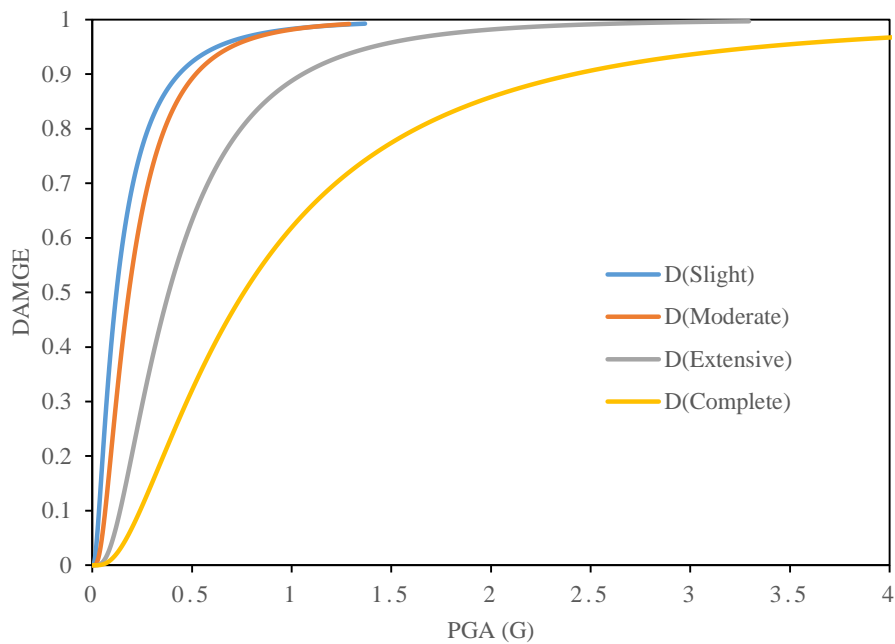
شکل ۵- منحنی شکنندگی سازه ۵ طبقه با چهار حالت خرابی با بتن سبک.

در شکل ۶ منحنی شکنندگی سازه پنج طبقه با بتن سنگین نمایش داده شده است.



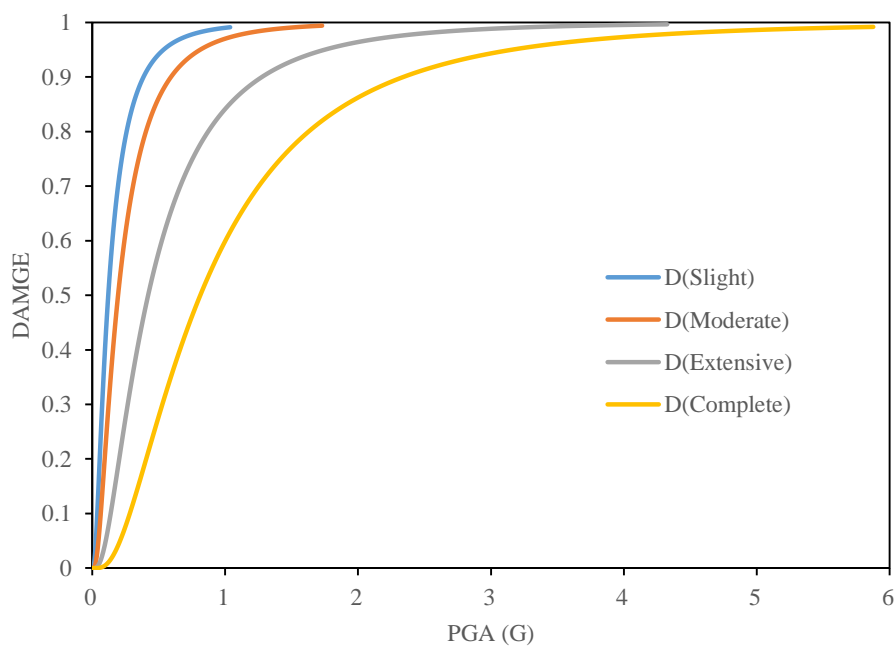
شکل ۶- منحنی شکنندگی سازه ۵ طبقه با چهار حالت خرابی با بتن سنگین.

در شکل ۷ منحنی شکنندگی سازه ده طبقه با بتن سبک نمایش داده شده است.



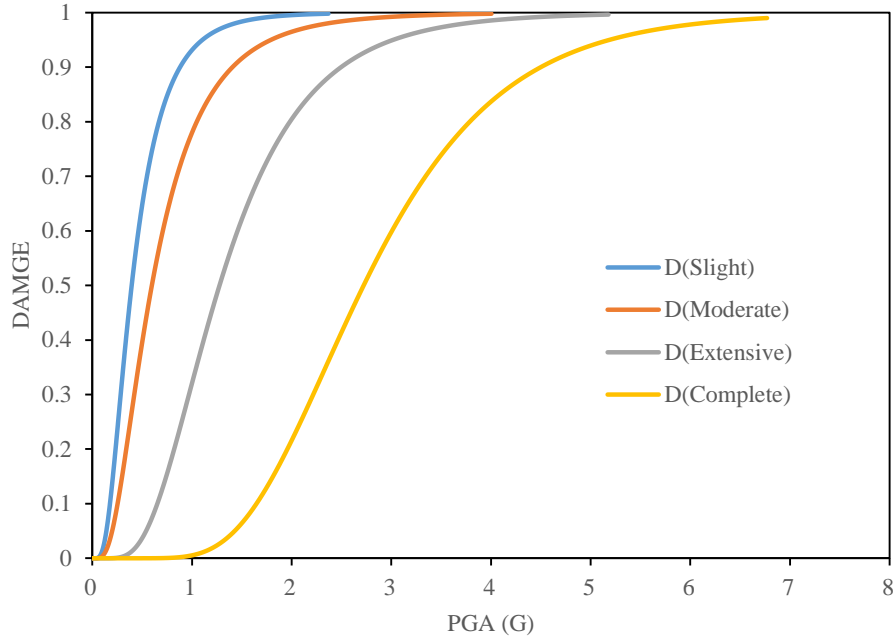
شکل ۷- منحنی شکنندگی سازه ۱۰ طبقه با چهار حالت خرابی با بتن سبک.

در شکل ۸ منحنی شکنندگی سازه ده طبقه با بتن سنگین نمایش داده شده است.



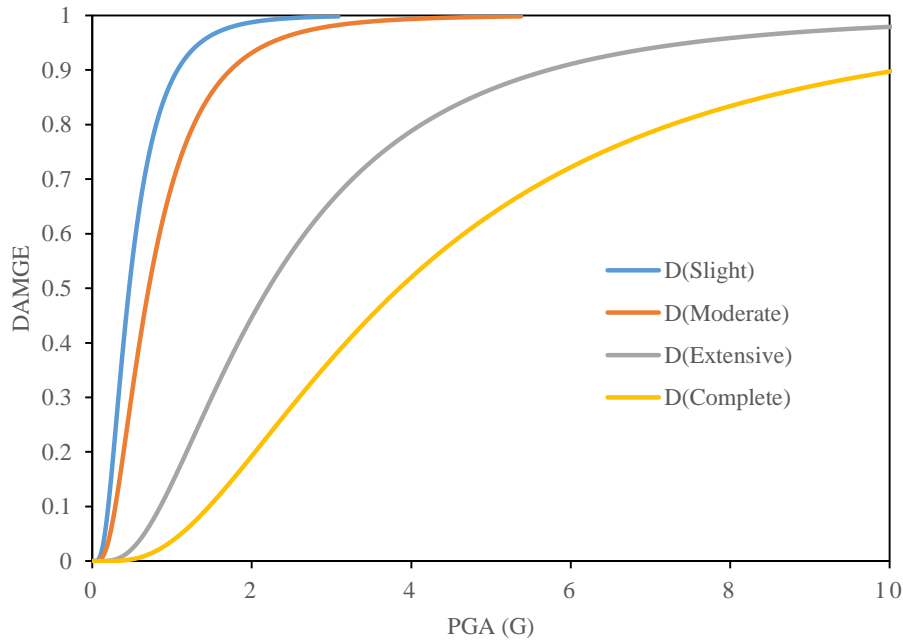
شکل ۸- منحنی شکنندگی سازه ۱۰ طبقه با چهار حالت خرابی با بتن سنگین.

در شکل ۹ منحنی شکنندگی سازه پانزده طبقه با بتن سبک نمایش داده شده است.



شکل ۹- منحنی شکنندگی سازه ۱۵ طبقه با چهار حالت خرابی با بتن سبک.

در شکل ۱۰ منحنی شکنندگی سازه پانزده طبقه با بتن سنگین نمایش داده شده است.



شکل ۱۰- منحنی شکنندگی سازه ۱۵ طبقه با چهار حالت خرابی با بتن سنگین.

۳- تفسیر نتایج

با بررسی نتایج بدست آمده از منحنی‌های شکنندگی برای سازه پنج طبقه در حالتی که بتن سبک مدلسازی شود، ملاحظه می‌شود که مقادیر سازه پنج طبقه برای حالت‌های شکنندگی کم، زیاد، متوسط و کامل با انجام تحلیل دینامیکی افزایشی به حد خرابی کم، متوسط، زیاد و کامل رسیده است. در حالت خرابی کم با اعمال ۰/۱ تا ۰/۳ مقدار شتاب g سازه از حد مجاز

جابجایی نسبی عبور کرده و در حد مجاز مربوطه به حالت خرابی کم وارد می‌شود، برای حالت خرابی متوسط شتاب g نیز نزدیک به حالت خرابی کم می‌باشد و با اختلاف ناچیز در محدوده شتاب $0/2$ تا $0/4$ مقدار g قرار دارد. برای خرابی زیاد مقدار شتاب در محدوده $0/2$ تا $1/2$ از شتاب g واقع شده است. برای حالت خرابی کامل نیز این شتاب از محدوده $2/5$ تا 3 از شتاب g قرار دارد. در این مطالعه با توجه به رکوردهای اعمالی مشاهده می‌شود که سازه پنج طبقه در حالت شکنندگی کم، زیاد، متوسط و کامل به عددی یک رسیده‌اند.

بررسی نتایج بدست آمده از منحنی‌های شکنندگی برای سازه پنج طبقه در حالتی که بتن سنگین مدلسازی شود، ملاحظه می‌شود که مقادیر سازه پنج طبقه برای حالت‌های شکنندگی کم، زیاد، متوسط و کامل با انجام تحلیل دینامیکی افزایش یافته به حد خرابی کم، متوسط، زیاد و کامل رسیده است. در حالت خرابی کم با اعمال $0/1$ تا $0/4$ مقدار شتاب g سازه از حد مجاز جابجایی نسبی عبور کرده و در حد مجاز مربوطه به حالت خرابی کم وارد می‌شود، برای حالت خرابی متوسط شتاب g نیز نزدیک به حالت خرابی کم می‌باشد و با اختلاف ناچیز در محدوده شتاب $0/25$ تا $0/55$ مقدار g قرار دارد. برای خرابی زیاد مقدار شتاب در محدوده $0/2$ تا $1/6$ از شتاب g واقع شده است. برای حالت خرابی کامل نیز این شتاب از محدوده $2/5$ تا $3/5$ از شتاب g قرار دارد. در این پایان‌نامه با توجه به رکوردهای اعمالی مشاهده می‌شود که سازه پنج طبقه در حالت شکنندگی کم، زیاد، متوسط و کامل به عددی یک رسیده‌اند.

با مقایسه نتایج مربوط به منحنی‌های شکنندگی سازه پنج طبقه در حالت بتن سبک و سنگین مشاهده می‌شود که در حالت بتن سنگین به دلیل اینکه مقاومت فشاری بتن بیشتر بوده است موجب شده است تا انرژی بیشتری جذب نماید و از اینرو برای وارد شدن به هر یک از حالت‌های خرابی باید رکورد با شدت بیشتری به سازه اعمال شود تا وارد محدوده خرابی از چهار حالت خرابی کم، متوسط، زیاد و کامل وارد شود. از اینرو در سازه پنج طبقه با رعایت ضوابط می‌توان با استفاده از بتن پر مقاومت می‌توان از ظرفیت باربری بیشتر سازه استفاده نمود.

با بررسی نتایج بدست آمده از منحنی‌های شکنندگی برای سازه ده طبقه در حالتی که بتن سبک مدلسازی شود، ملاحظه می‌شود که مقادیر سازه ده طبقه برای حالت‌های شکنندگی کم، زیاد، متوسط و کامل با انجام تحلیل دینامیکی افزایش یافته به حد خرابی کم، متوسط و زیاد به حالت یک رسیده است و برای خرابی کامل به مقدار $0/95$ از خرابی رسیده است. در حالت خرابی کم با اعمال $0/1$ تا $1/1$ مقدار شتاب g سازه از حد مجاز جابجایی نسبی عبور کرده و در حد مجاز مربوطه به حالت خرابی کم وارد می‌شود، برای حالت خرابی متوسط شتاب g نیز نزدیک به حالت خرابی کم می‌باشد و با اختلاف ناچیز در محدوده شتاب $0/2$ تا 1 مقدار g قرار دارد. برای خرابی زیاد مقدار شتاب در محدوده $0/2$ تا 3 از شتاب g واقع شده است. برای حالت خرابی کامل نیز این شتاب از محدوده $0/3$ تا 4 از شتاب g قرار دارد. در این پایان‌نامه با توجه به رکوردهای اعمالی مشاهده می‌شود که سازه ده طبقه در حالت شکنندگی کم، زیاد، متوسط به عدد یک و در حالت خرابی کامل به مقدار $0/95$ رسیده‌اند.

بررسی نتایج بدست آمده از منحنی‌های شکنندگی برای سازه ده طبقه در حالتی که بتن سنگین مدلسازی شود، ملاحظه می‌شود که مقادیر سازه ده طبقه برای حالت‌های شکنندگی کم، زیاد، متوسط و کامل با انجام تحلیل دینامیکی افزایش یافته به حد خرابی کم، متوسط، زیاد به عدد یک و در حالت خرابی کامل به مقدار $0/95$ رسیده است. در حالت خرابی کم با اعمال $0/1$ تا 1 مقدار شتاب g سازه از حد مجاز جابجایی نسبی عبور کرده و در حد مجاز مربوطه به حالت خرابی کم وارد می‌شود، برای حالت خرابی متوسط شتاب g نیز نزدیک به حالت خرابی کم می‌باشد و با اختلاف ناچیز در محدوده شتاب $0/25$ تا $1/5$ مقدار g قرار دارد. برای خرابی زیاد مقدار شتاب در محدوده $0/2$ تا $4/5$ از شتاب g واقع شده است. برای حالت خرابی کامل نیز این شتاب از محدوده $0/2$ تا $5/5$ از شتاب g قرار دارد. در این پایان‌نامه با توجه به رکوردهای اعمالی مشاهده می‌شود که سازه ده طبقه در حالت شکنندگی کم، زیاد، متوسط به عددی یک و در حالت خرابی کامل به عدد $0/95$ رسیده است.

با مقایسه نتایج مربوط به منحنی‌های شکنندگی سازه ده طبقه در حالت استفاده از بتن سبک و پرمقاومت (سنگین) مشاهده می‌شود که در حالت بتن سنگین به دلیل اینکه مقاومت فشاری بتن بیشتر بوده است موجب شده است تا انرژی بیشتری جذب نماید و از اینرو برای وارد شدن به هر یک از حالت‌های خرابی باید رکورد با شدت بیشتری به سازه اعمال شود تا وارد محدوده خرابی از چهار حالت خرابی کم، متوسط، زیاد و کامل وارد شود. از اینرو در سازه پنج طبقه با رعایت ضوابط می‌توان با ایجاد صلبیت بیشتر ظرفیت باربری سازه را افزایش داد.

با بررسی نتایج بدست آمده از منحنی‌های شکنندگی برای سازه پانزده طبقه در حالتی که بتن سبک مدلسازی شود، ملاحظه می‌شود که مقادیر سازه پانزده طبقه برای حالت‌های شکنندگی کم، زیاد، متوسط و کامل با انجام تحلیل دینامیکی افزایش یافته به حد خرابی کم، متوسط و زیاد به حالت یک رسیده است و برای خرابی کامل نیز به مقدار ۰/۹۵ از خرابی رسیده است. در حالت خرابی کم با اعمال ۰/۱ تا ۱/۵ مقدار شتاب g سازه از حد مجاز جابجایی نسبی عبور کرده و در حد مجاز مربوطه به حالت خرابی کم وارد می‌شود، برای حالت خرابی متوسط شتاب g نیز نزدیک به حالت خرابی کم می‌باشد و با اختلاف ناچیز در محدوده شتاب ۰/۲ تا ۳/۵ مقدار g قرار دارد. برای خرابی زیاد مقدار شتاب در محدوده ۰/۲ تا ۵ از شتاب g واقع شده است. برای حالت خرابی کامل نیز این شتاب از محدوده ۰/۳ تا ۶/۷ از شتاب g قرار دارد. در این پایان‌نامه با توجه به رکوردهای اعمالی مشاهده می‌شود که سازه پانزده طبقه در حالت شکنندگی کم، زیاد، متوسط به عدد یک و در حالت خرابی کامل به مقدار ۰/۹۵ رسیده‌اند.

بررسی نتایج بدست آمده از منحنی‌های شکنندگی برای سازه پانزده طبقه در حالتی که بتن سنگین مدلسازی شود، ملاحظه می‌شود که مقادیر سازه پانزده طبقه برای حالت‌های شکنندگی کم، زیاد، متوسط و کامل با انجام تحلیل دینامیکی افزایش یافته به حد خرابی کم و متوسط به عدد یک و در حالت خرابی زیاد به عدد ۰/۹۵ و در حالت خرابی کامل به مقدار ۰/۹ رسیده است. در حالت خرابی کم با اعمال ۰/۱ تا ۲ مقدار شتاب g سازه از حد مجاز جابجایی نسبی عبور کرده و در حد مجاز مربوطه به حالت خرابی کم وارد می‌شود، برای حالت خرابی متوسط شتاب g نیز نزدیک به حالت خرابی کم می‌باشد و با اختلاف ناچیز در محدوده شتاب ۰/۲۵ تا ۴/۵ مقدار g قرار دارد. برای خرابی زیاد مقدار شتاب در محدوده ۰/۲ تا ۱۰ از شتاب g واقع شده است. برای حالت خرابی کامل نیز این شتاب از محدوده ۰/۲ تا ۱۰ از شتاب g قرار دارد. در این پایان‌نامه با توجه به رکوردهای اعمالی مشاهده می‌شود که سازه پانزده طبقه در حالت شکنندگی کم و زیاد به عدد یک و در حالت متوسط به عددی ۰/۹۵ و در حالت خرابی کامل به عدد ۰/۹ رسیده است.

با مقایسه نتایج مربوط به منحنی‌های شکنندگی سازه پانزده طبقه در حالت استفاده از بتن سبک و پرمقاومت (سنگین) مشاهده می‌شود که در حالت بتن سنگین به دلیل اینکه مقاومت فشاری بتن بیشتر بوده است موجب شده است تا انرژی بیشتری جذب نماید و از اینرو برای وارد شدن به هر یک از حالت‌های خرابی باید رکورد با شدت بیشتری به سازه اعمال شود تا وارد محدوده خرابی از چهار حالت خرابی کم، متوسط، زیاد و کامل وارد شود. از اینرو در سازه هشت طبقه با رعایت ضوابط می‌توان با ایجاد صلبیت بیشتر ظرفیت باربری سازه را افزایش داد.

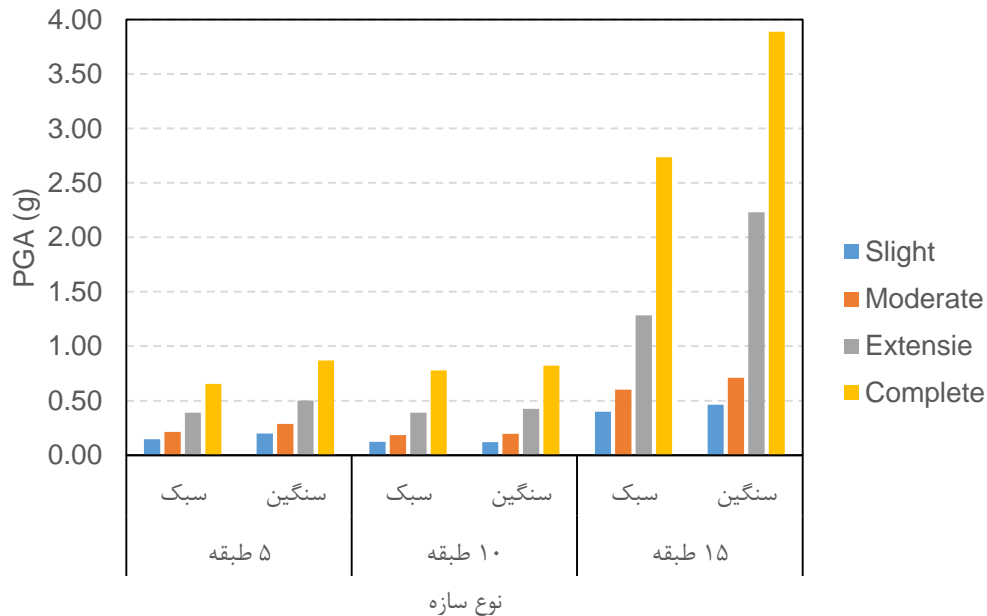
در نهایت به عنوان یک نتیجه‌گیری کلی، می‌توان دریافت که نقش بتن سنگین و سبک در میزان عملکرد سازه بسیار اهمیت دارد، در حالی که این بخش از طراحی در سازه‌های ایران از اهمیت کمتری برخوردار می‌باشد. با توجه به نتایج حاصل از منحنی‌های شکنندگی مشاهده شده است که در سازه‌های با افزایش ارتفاع این میزان تاثیر بیشتری بر روی رفتار سازه داشته است به طوری که در سازه پانزده طبقه در سازه‌ای که اتصال منعطف بوده است در حالت خرابی زیاد به عدد یک رسیده است ولی در سازه با بتن سنگین در خرابی زیاد به عدد ۰/۹۵ و در خرابی کامل به عدد ۰/۹ از خرابی رسیده است که نشان از رفتار بهتر اتصال در سازه دارد.

با در نظر گرفتن ۵۰ درصد از خرابی برای منحنی‌های شکنندگی مقدار عددی مربوط به PGA از نمودارها استخراج شده است. این اعداد در جدول ۷ نمایش داده شده است.

جدول ۷- مقایسه PGAها برای ۵۰ درصد آسیب برای چهار سطح مورد مطالعه.

تعداد طبقات	نوع اتصال	Slight	Moderate	Extensie	Complete
۵ طبقه	سبک	0.15	0.21	0.39	0.65
	سنگین	0.20	0.29	0.50	0.87
۱۰ طبقه	سبک	0.12	0.19	0.39	0.78
	سنگین	0.12	0.20	0.42	0.82
۱۵ طبقه	سبک	0.40	0.60	1.28	2.74
	سنگین	0.46	0.71	2.23	3.89

در شکل ۱۱ نمودار مقایسه‌ای برای PGAها مختلف ترسیم شده است.



شکل ۱۱- نمودار مقایسه‌ای برای شتاب PGAها مربوط به ۵۰ درصد از شاخص آسیب.

همان‌طور که از روی نمودار شکل فوق مشاهده می‌شود، در ۵۰ درصد از آسیب سازه برای چهار سطح مختلف رسم شده است. این سطوح از کم، متوسط و زیاد و خرابی کامل می‌باشد. با افزایش سطح خرابی میزان شدت شتاب زلزله نیز افزایش داشته است. این افزایش برای سازه پنج و ده طبقه نزدیک به هم بوده است و این نشان از آن دارد که رکوردهای انتخابی برای سازه کوتاه مرتبه و میان مرتبه تاثیر بیشتری داشته است. برای سازه بلند مرتبه ۱۵ طبقه نیاز به شدت بیشتری برای تخریب کامل بوده است که می‌توان آن به شدت و اثر این رکوردها بر سازه بلند مرتبه دانست. در سطوح خرابی کم و متوسط رفتار تمامی سازه مانند خرابی کامل مشاهده شده است. برای سازه پانزده طبقه باید شدت شتاب بیشتری اعمال شود تا سازه وارد سطح خرابی ۵۰ درصد برسد. علاوه بر این با مقایسه محل بتن سنگین و سبک نیز این نتیجه بدست می‌آید که در سازه با بتن سنگین نیاز به شدت شتاب رکورد بیشتری در حدود ۱۰ تا ۳۳ درصد نسبت به سازه با بتن سبک در شدت خرابی ۵۰ درصد می‌باشد.

۴- نتیجه گیری

با بررسی و ارزیابی نتایج مشاهده می‌شود که در سازه‌هایی که در آنها از بتن سبک استفاده شده است، سازه زودتر به حد شکست می‌رسد، به عبارت دیگر در این سازه‌های با PGA کمتر به چهار حالت خرابی کم، متوسط، زیاد و کامل می‌رسد. در حالی که در سازه صلب برای رسیدن به چهار حالت خرابی ذکر شده نیاز به PGA بزرگتری می‌باشد.

با بررسی تمامی منحنی‌های شکنندگی برای سازه‌های پنج، ده و پانزده طبقه در حالت‌های مختلف خرابی مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع سازه با توجه به اینکه نیروی بیشتری برای خرابی باید به سازه اعمال شود و وزن سازه نیز افزایش داشته است، احتمال خرابی با افزایش ارتفاع کاهش داشته است. یعنی سازه پنج طبقه احتمال خرابی بیشتر از ده طبقه و ده طبقه بیشتر از پانزده طبقه بوده است. این نشان می‌دهد که برای سازه با ارتفاع بیشتر باید PGA بزرگتری بر سازه اعمال شود تا سازه در حد خرابی کامل قرار گیرد. علاوه بر این با افزایش PGA احتمال فراگذشت خرابی سازه از یک سطح مشخص افزایش می‌یابد.

با بررسی نتایج مربوط به بتن سنگین و سبک نیز مشاهده می‌شود که در هر سه سازه مورد مطالعه (پنج، ده و پانزده طبقه) سازه با بتن سنگین در PGA یکسان با سازه که دارای بتن سبک داشته است با یک میانگین‌گیری از نتایج مشاهده شده است که سازه با بتن سنگین تقریباً در محدوده ۱۵ تا ۲۴ درصد جابجایی نسبی کمتری نسبت به سازه با بتن سبک داشته است.

با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که در صورتی که برای سازه از اهمیت زیادی برخوردار باشد و نیاز است که در زلزله مورد بهره‌برداری قرار گیرد، باید از بتن سنگین استفاده نماییم، که از ظرفیت باربری بالاتری برخوردار می‌باشد و می‌توان در هنگام زلزله نیروی بیشتری را جذب نماید.

مراجع

- ایران پور مبارکه، فرهاد همایی، پیمان محبی مقدم بهروز، (۱۳۹۵)، بررسی عملکرد قاب های دارای مهاربند برون محور با تیر پیوند قائم تحت زلزله های نزدیک گسل، سومین کنفرانس ملی مهندسی عمران و توسعه پایدار ایران، تهران موسسه آموزش عالی مهراروند، مرکز راهکار ها دستیابی به توسعه پایدار
- آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۹۴.
- حسین کرد خیلی، سید محمد مرتضائی، علیرضا (1394). ارزیابی ستون های ساختمان بتن آرمه تحت اثر مولفه قائم زمین لرزه ای حوزه نزدیک-دومین کنفرانس ملی زلزله، قزوین، گروه تخصصی سازه سازمان نظام مهندسی ساختمان استان قزوین.
- A.Kilic, C.D.Atis,E.Yaser,F.ozcan, (2003). High-Strength light weight concrete made with Scoria aggregate containing mineral admixtures, Cement and concrete research.
- Benioff, H. (1955). Mechanism and strain characteristics of the White Wolf fault as indicated by the aftershock sequence. Bull., Calif. Div. Mines, 171, 199-202.
- Blasone, V., Basaglia, A., De Risi, R., De Luca, F., & Spacone, E. (2022). A simplified model for seismic safety assessment of reinforced concrete buildings: framework and application to a 3-storey plan-irregular moment resisting frame. Engineering Structures, 250, 113348.
- Cao, X. Y., Xiong, C. Z., Feng, D. C., & Wu, G. (2022). Dynamic and probabilistic seismic performance assessment of precast prestressed reinforced concrete frames incorporating slab influence through three-dimensional spatial model. Bulletin of Earthquake Engineering, 20(12), 6705-6739.
- Desai, K. Y., Sheth, R. K., & Patel, K. R. (2022, December). Performance Evaluation of RC Frame-Wall Structures Using Incremental Dynamic Analysis. In ASPS Conference Proceedings (Vol. 1, No. 6, pp. 1719-1725).
- FEMA, F. (2003). HAZUS-MH MR5. Washington, DC.

- Fu, Q. L., Tan, L., Long, B., & Kang, S. B. (2023). Numerical Investigations of Progressive Collapse Behaviour of Multi-Storey Reinforced Concrete Frames. *Buildings*, 13(2), 533.
- Huang, L., Han, J., Wen, H., Li, C., He, H., Luo, Y., & Qian, Z. (2022). The Seismic Performance and Global Collapse Resistance Capacity of Infilled Reinforced Concrete Frames Considering the Axial-Shear-Bending Interaction of Columns. *Buildings*, 12(11), 2030.
- Hwang, Seong-Hoon, et al. "Machine learning-based approaches for seismic demand and collapse of ductile reinforced concrete building frames." *Journal of Building Engineering* 34 (2021): 101905.
- Onur, O. N. A. T., & Burak, Y. Ö. N. (2021). Incremental dynamic analysis of mid-rise rc buildings to assess effect of concrete strength and tension reinforcement ratio in beam. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 26(1), 283-300.
- Padmapriya, R., Sudarsan, J. S., Rohini, I., & Sunmathi, N. (2022, November). Geopolymer concrete with copper slag as fine aggregate a way towards developing green construction techniques. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2615, No. 1, p. 020001). AIP Publishing LLC.
- Qian, K., Liang, S. L., Feng, D. C., Fu, F., & Wu, G. (2020). Experimental and numerical investigation on progressive collapse resistance of post-tensioned precast concrete beam-column subassemblages. *Journal of Structural Engineering*, 146(9), 04020170.
- V.M Malhotra. (1990), Properties of High-strength Lightweight concrete Incorporating Fly ash, silica and fume, *ACI . SP121-31,P.645*.
- V.Norok Shchenov and w. whit comb. How to obtain-strength concrete using Density Aggregate, *ACI.SP 121-33,P.683(1990)*.
- Wang, G. J., Jiang, S. Y., Wang, G. T., & Ingham, J. M. (2023, May). Numerical investigation of precast concrete frames with grouted sleeves and intermediate connections. In *Structures* (Vol. 51, pp. 1474-1496). Elsevier.
- Yan, J., Liang, Y., & Du, X. (2023). Analysis of the importance coefficient of offshore bridges under earthquakes based on seismic fragility and incremental dynamic analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 171, 107987.