

Seismic Evaluation of Reinforced Concrete Cores in High-Rise Buildings with Void Tube in Tube Systems

Hamed Bidar

M.Sc. Student, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Urmia Branch, Islamic Azad University, Urmia, Iran

Ashkan KhodaBandehLou*

Assistant Professor, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Urmia Branch, Islamic Azad University, Urmia, Iran

Ashkan.KhodaBandehLou @iau.ac.ir

Abstract

In this paper, the seismic behavior of reinforced concrete (RC) high-rise buildings with frame-core tube systems as one of the lateral bearing systems are studied. In order to investigate the effect of the core tube system on the seismic behavior of the high-rise building, the structural model is evaluated in two cases with the inner core tube and without the inner core tube. Three methods of equivalent static analysis, dynamic nonlinear time history analysis and nonlinear static analysis (push-over analysis) are used. Also, a 25-story high-rise building with a frame-core tube system having voids in the last floors is implemented. The results showed that the use of RC core as a central tube significantly reduces the lateral displacement and drift of floors. Also, the results obtained from the nonlinear static analysis indicated that using the central RC core, the ultimate capacity of the building as well as the ductility of the building increase significantly. Finally, the results obtained from the nonlinear time history showed that the nonlinear static analysis have good accuracy in calculating the maximum displacement of the structure.

Keywords: High-Rise Building, Frame-Core Tube System, Time History Analysis, Push-over Analysis, Seismic Response

* Corresponding Author

Bidar, H., KhodaBandehLou, A. Seismic Evaluation of Reinforced Concrete Cores in High-Rise Buildings with Void Tube in Tube Systems. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 2021; 6(2): 26-45.

<http://doi.org/10.30478/jcsm.2021.296164.1214>

2538-5828/ © 2021 The Authors. Published by Iranian Concrete Society

This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

ارزیابی لرزه‌های هسته‌های مقاوم بتن آرمه در ساختمان‌های بلندمرتبه با سیستم لوله در لوله دارای بازشو در دیافراگم

دریافت مقاله: ۱۴۰۰-۰۵-۰۱

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰-۰۸-۰۸

حامد بیدار

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران

اشکان خدابنده لو

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران

Ashkan.KhodaBandehLou @iaau.ac.ir

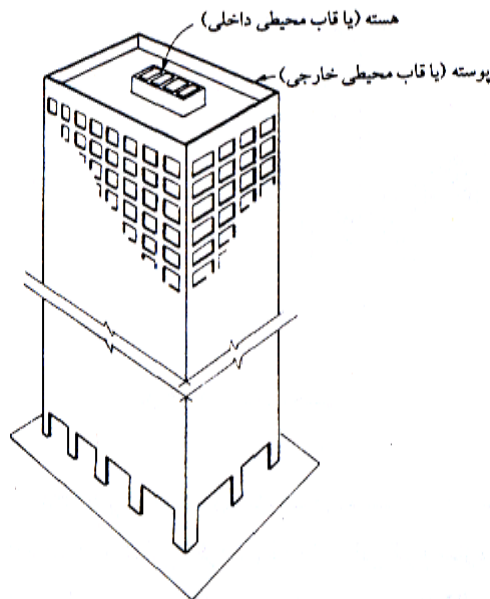
(نویسنده مسئول)

چکیده:

در این مقاله رفتار و عملکرد لرزه‌ای سازه‌های بلند با سیستم سازه‌ای لوله در لوله به‌عنوان یکی از سیستم‌های باربر جانبی با هسته بتنی دارای بازشو در دیافراگم مورد مطالعه قرار می‌گیرد. به منظور بررسی تأثیر سیستم لوله در لوله با هسته مرکزی بر رفتار لرزه‌ای سازه بلند، مدل سازه‌ای در دو حالت با لوله داخلی و بدون در نظر گرفتن لوله داخلی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. جهت بررسی رفتار لرزه‌ای مدل سازه‌ای از سه روش تحلیل استاتیکی معادل، تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی و تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش‌اور) استفاده می‌شود. همچنین از یک مدل سازه‌ای ۲۵ طبقه با سیستم لوله در لوله با هسته بتنی استفاده می‌شود به طوری که این مدل سازه‌ای در طبقات آخر دارای بازشو در دیافراگم می‌باشد. نتایج بدست آمده از مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد که استفاده از هسته بتنی به‌عنوان لوله مرکزی موجب کاهش محسوسی در جابجایی جانبی و دررفت طبقات می‌شود. همچنین نتایج بدست آمده از تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش‌اور) نشان می‌دهد که با استفاده از هسته بتنی مرکزی، ظرفیت نهایی سازه و شکل‌پذیری سازه افزایش چشم‌گیری پیدا می‌کند. نتایج بدست آمده از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی نشان می‌دهند که برای این سیستم سازه‌ای روش استاتیکی غیرخطی از دقت خوبی در محاسبه حداکثر تغییر مکان سازه برخوردار می‌باشد.

واژگان کلیدی: سازه‌های بلند، سیستم لوله در لوله، تحلیل تاریخچه زمانی، تحلیل پوش‌اور، پاسخ‌های لرزه‌ای سازه

در سالیان گذشته سیستم‌های سازه‌ای مختلفی شامل قاب خمشی، قاب مهاربندی شده، دیوارهای برشی فولادی و بتن‌آرمه و سیستم دوگانه مهاربندی جانبی در مقاوم‌سازی جانبی سازه‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. امروزه با پیشرفت علم ساختمان و بلندسازی، سیستم‌های نوین دیگری نیز وارد این عرصه گشته‌اند که از جمله آنها می‌توان به سیستم هسته مرکزی، کمربندهای خرپایی و غیره اشاره نمود. سیستم هسته مرکزی که استفاده از آن بیشتر در تأمین مقاومت جانبی سازه‌های بلند کاربرد دارد، یکی از پیشرفته‌ترین این سیستم‌ها است، که علی‌رغم دارا بودن وزن کمتر رفتار مناسبی در برابر بارهای جانبی اعم از باد و زلزله خواهد داشت. از آنجایی که افزایش ارتفاع سازه‌های ساختمانی بلندمرتبه محدودیت‌هایی در ضوابط طراحی ایجاد می‌کند و همچنین به دلیل ظهور گسترده فرم‌های نامنظم و پیچیده ساختمانی و نیز بازشو در دیافراگم و ضرورت رعایت الزامات سازه‌ای اینگونه فرم‌ها و نیز قابلیت ساخت آنها، انتخاب سیستم سازه‌ای مناسب به نحوی که با مصرف کمترین مقدار مصالح بیشترین کارایی را ایجاد کند، امری ضروری است. یکی از این سیستم‌ها، سازه هسته مرکزی با سیستم لوله در لوله است که امروزه به علت کارایی سازه‌ای بالا در تحمل نیروهای جانبی به صورت گسترده‌ای در ساختمان‌های بلندمرتبه استفاده می‌شود. سیستم هسته مرکزی و مقاوم جانبی لوله در لوله یک سیستم نوین و کارآمد می‌باشد که در بسیاری از سازه‌های بلند طراحی و اجرا شده است و از این رو می‌تواند گزینه‌ای مناسب جهت اجرای سازه‌های بلند و با کاربری خاص باشد. ساختمان ۱۰۰ طبقه جان‌هنکوک^۱ در شیکاگو نمونه‌هایی از ساختمان‌های لوله‌ای موجود است. مطالعات زیادی در خصوص عملکرد این سیستم‌ها در ساختمان‌های با فرم جعبه‌ای صورت گرفته است. فرم اولیه سیستم‌های لوله‌ای به صورت قاب‌های محیطی است که در آن، قاب‌های صلب پیرامونی وظیفه تحمل بارهای جانبی را برعهده دارند. با این حال یکی از معایب سیستم‌های قاب محیطی، پدیده لنگی برش (Shaer Lag) است که منجر به توزیع غیریکنواخت تنش‌های محوری بین ستون‌های گوشه و میانی می‌شود [۱]. در فرم‌های بهبود یافته سیستم قاب محیطی، همچون قاب محیطی دسته شده و قاب محیطی مهاربندی شده، مشکل لنگی برش تا حدی برطرف شده است. از طرفی دیگر، برخی از محدودیت‌های معماری، مهندس محاسب را مجبور به تعبیه بازشو در هسته می‌نماید. به‌صورت ویژه، سازه‌های بلند دارای هسته مرکزی بتنی پیرامون بازشو در دیافراگم محل مناسبی برای تعبیه دیوار برشی می‌باشد و متصل نمودن آنها در راستای یکدیگر باعث ایجاد دیوار برشی می‌شود، اما به منظور تعبیه ورودی بازشو در دیافراگم ناچار به ایجاد بازشو در یکی از دیوارها بوده که اتصالات مربوط به بازشو در دیافراگم بر رفتار هسته بتن‌آرمه تأثیر خواهد گذاشت. شکل شماتیک سیستم لوله در لوله با بازشو در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. شکل شماتیک سیستم لوله در لوله با بازشو در دیافراگم

در سال ۱۳۸۱ صفاری و همکاران، تحلیل تقریبی سازه‌های بلند مقاوم شده با قاب محیطی را در مقابل نیروهای جانبی مورد مطالعه قرار دادند [۱]. دره‌شیری و طاروق در سال ۱۳۸۸، تحلیل استاتیکی غیرخطی در ساختمان‌های بتن مسلح با شکل‌پذیری معمولی و پلان نامنظم طراحی شده براساس آیین‌نامه‌های ایران را بررسی نمودند [۲]. در سال ۱۳۹۰ نادرپور و خیرالدین به بررسی پدیده لنگی برش در ساختمان‌های بلند بتن آرمه با سیستم لوله ای پرداختند [۳]. در سال ۱۳۹۲ نجفقلی‌زاده و یثربی نیا، رفتار سازه‌های فولادی بلند با سیستم کمربند خرپایی و مهار بازویی را مورد مطالعه قرار دادند [۴]. رهگذر و فیض‌آباد در سال ۱۳۹۲ به مقایسه تحلیل تقریبی در سیستم قاب محیطی تودرتو، مهار بازویی و کمربند خرپایی در ساختمان‌های بلند پرداختند [۵]. فریدون و محمدزاده در سال ۱۳۹۳، طراحی بهینه هسته در سازه‌های لانه زنبوری تحت بار فشاری با استفاده از روش رقابت استعماری انجام دادند [۶]. در سال ۱۳۹۵، سیاه‌پلو و همکاران، مزایا و معایب انواع سیستم‌های رایج در سازه‌های بلند را در مقایسه با سیستم لوله پیرامونی تحت بارگذاری باد مورد مقایسه قرار دادند [۷]. در سال ۱۳۹۷، رئیسی و همکاران تعیین موقعیت بهینه مهاربازویی و کمربند خرپایی در سازه‌های بلند مرتبه با سطح مقطع غیر یکنواخت بررسی نمودند [۸].

در سال ۲۰۰۷، اسکات^۱ و همکاران [۹] به بررسی و مطالعه مسائل و ابزارهای مورد استفاده برای دستیابی به راه حل مؤثر در سازه‌های بلند، چرخش یافته و دارای برجستگی پرداختند. همچنین در سال ۲۰۰۷، موون^۲ و همکاران پیشرفت‌ها و تکامل سازه‌ای در ساختمان‌های بلند را مورد بررسی قرار دادند [۱۰] و انواع سیستم‌های سازه‌ای و مکانیزم‌های مستهلک کننده انرژی در این سیستم‌ها را بررسی نمودند. در سال ۲۰۰۸، ال‌نیمیری^۳ و گوپتا^۴ استراتژی‌های لازم در تأمین پایداری سازه‌ای در ساختمان‌های بلند را مورد مطالعه قرار دادند [۱۱]. در سال ۲۰۱۰ چن^۵ و همکاران [۱۲] سازه‌های بلند مجهز به کمربندهای میراگر را مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش

Scott^۱
Moon^۲
Elnimeiri^۳
Gupta^۴
Chen^۵

روش‌های مدل‌سازی و تحلیل سازه‌های بلند دارای کمربندهای مجهز به میراگر ارائه شد. همچنین در سال ۲۰۱۰ امین^۱ و اوجا^۲ اصلاحات آیرودینامیکی در شکل ساختمان‌های بلند را مورد بررسی قرار دادند [۱۳]. در این پژوهش اصلاح آیرودینامیکی ناشی از تأثیر گوشه ساختمان‌ها مطالعه گردید و تأثیر آن در کاهش اثرات ناشی از تحریکات باد در ساختمان‌های بلند بررسی شد. در سال ۲۰۱۱، کیم^۳ و هونگ^۴ مقاومت سازه‌های نامنظم مانند ساختمان‌های چرخش‌یافته یا ساختمان‌های کج را تحت خرابی پیش‌رونده مورد مطالعه قرار دادند [۱۴]. در سال ۲۰۱۲، موون به بررسی سازه‌های دیاگرید در ساختمان‌های بلند با اشکال پیچیده پرداختند و تأثیر سازه‌های دیاگرید در رفتار لرزه‌ای ساختمان پیش‌یافته و ساختمان‌های کج را مورد ارزیابی قرار دادند [۱۵]. در سال ۲۰۱۳، تانگ^۵ و همکاران [۱۶] شبیه‌سازی عددی نیروی باد در ساختمان‌های بلند با پلان چند ضلعی راست و پیش‌یافته مورد بررسی قرار دادند. در سال ۲۰۱۴، موون گزینه‌های مختلف طراحی سیستم سازه‌ای مختلف برای ساختمان‌های پیش‌یافته و عملکرد آنها را مطالعه کردند و ساختمان‌های بلند پیش‌یافته با ارتفاع و نرخ پیش‌یافتگی مختلف با انواع مختلف از سیستم‌های سازه‌ای بلند مانند دیاگرید، لوله مهاربندی شده و سیستم کمربندی طراحی شدند [۱۷]. در سال ۲۰۱۴، لی^۶ و شین^۷ سازه‌های دیاگرید با فولادهای پرمقاومت را با استفاده از تحلیل پوش‌اور مورد مطالعه قرار دادند [۱۸]. همچنین در سال ۲۰۱۴، ژی^۸ به منظور ارتقا ایمنی و قابلیت بهره‌برداری، بهینه‌سازی آیرودینامیکی شکل ساختمان‌های بلند تحت بادهای شدید را با استفاده از یک روش کارآمد مورد مطالعه قرار دادند [۱۹]. در سال ۲۰۱۷، موون^۹ به ارزیابی و مقایسه تأثیر انواع سیستم‌های سازه‌ای ساختمان‌های بلند پرداختند [۲۰]. لو^{۱۰} و همکاران در سال ۲۰۱۷ یک مدل عددی قابل اعتماد جهت شناسایی دقیق مشخصات مکانیکی و تغییر شکل‌های بزرگ دیوارهای برشی برای شبیه‌سازی واقعی فروپاشی ساختمان‌های بلند ارائه دادند. برای این منظور بر اساس نظریه المان منطبق تعمیم‌یافته^{۱۱}، یک عنصر پوسته مسطح چهار ضلعی با عملکرد بالا پیشنهاد گردید؛ به طوری که تغییر شکل‌های بزرگ را با استفاده از فرمول لاگرانژی^{۱۲} به روز شده محاسبه می‌کند [۲۱]. شن^{۱۳} و همکاران در سال ۲۰۱۹ به ارزیابی دینامیکی غیرخطی یک ساختمان بلند مرتبه ۲۰ طبقه لوله در لوله دارای هسته بتن‌آرمه تحت حرکات متوالی زمین با استفاده از یک ابرایانه قوی پرداختند. در این مطالعه ۱۰۴ زلزله اصلی و پس‌لرزه از چهار مکان مختلف مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از یک ابرایانه قوی می‌تواند هزینه‌های محاسباتی در مهندسی سازه را به طور چشمگیری کاهش دهد. همچنین ملاحظه گردید که اثرات پس‌لرزه‌ها باید در طراحی سازه‌ها علی‌الخصوص ساختمان‌های بلند لوله در لوله دارای هسته بتن‌آرمه مورد توجه ویژه‌ای قرار گیرد [۲۲]. ژو^{۱۴} و همکاران در سال ۲۰۲۰ با استفاده از روش اجزا محدود، تأثیر پارامترهای مختلف دیافراگم را بر عملکرد لرزه‌ای سازه‌های بلند لوله در لوله دارای هسته بتن‌آرمه را مورد تجزیه قرار دادند. نتایج نشان داد که در محدوده خاصی، با افزایش ضخامت دیافراگم و نسبت آرماتورگذاری، بار نهایی و جابجایی

Amin¹
 Ahuja²
 Kim³
 Hong⁴
 Tang⁵
 Lee⁶
 Shin⁷
 Xie⁸
 Moon⁹
 Lu¹⁰
 the theory of generalized conforming element¹¹
 Lagrangian formulation¹²
 Shen¹³
 Zhu¹⁴

نهایی سازه افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که تیر اصلی در نزدیکی هسته بتن‌آرمه دارای بیشترین تنش و آرماتورهای دیافراگم دارای کمترین میران تنش بودند [۲۳]. در سال ۲۰۲۱ چنگ^۱ و همکاران به مطالعه شکنندگی لرزه‌ای و میزان آسیب‌پذیری سازه‌های بلندمرتبه لوله در لوله با استفاده از تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA²) پرداختند. در این مطالعه ابتدا، محتویات فرکانسی حرکات طولانی زمین مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. سپس، مدل‌های اجزای محدود سازه‌های بلند لوله در لوله تحت حرکات چندبعدی زمین قرار گرفته و منحنی‌های IDA و منحنی‌های شکنندگی بدست آمدند. نتایج تحلیلی نشان داد که زلزله‌های طولانی مدت بیش‌تر از زلزله‌های معمولی باعث فروپاشی سازه می‌شوند [۲۴]. در برخی از پژوهش‌های اخیر، از روش‌های نوین تحلیل پوش‌اور [۲۵ - ۲۷] و تحلیل دینامیکی [۲۸] برای ارزیابی رفتار سازه‌ها بهره‌جویی شده است. همانطور که از پیشینه تحقیقات ملاحظه می‌شود، تا به حال تأثیر بازشو در دیافراگم بر رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های بلند با سیستم لوله در لوله دارای هسته بتن‌آرمه مورد بررسی قرار نگرفته است که این موضوع هدف اصلی و نوآوری این پژوهش می‌باشد. لذا با توجه به مطالب عنوان شده، به منظور بررسی رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های بلند با سیستم سازه‌ای لوله در لوله با هسته مرکزی بتن‌آرمه دارای بازشو در دیافراگم، اهداف زیر در این مقاله مدنظر است:

- بررسی رفتار و پاسخ دینامیکی ساختمان‌های بلند با سیستم لوله در لوله دارای هسته بتن‌آرمه
- مطالعه رفتار دینامیکی سازه‌های بلند دارای بازشو در دیافراگم
- بررسی تأثیر بازشو در دیافراگم در رفتار لرزه‌ای سیستم‌های لوله در لوله با هسته بتن‌آرمه
- بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر بر رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های بلند با سیستم لوله در لوله دارای هسته بتن‌آرمه دارای بازشو در دیافراگم.

۲- مواد و روش‌ها

روش‌های تحلیل براساس استاتیکی یا دینامیکی و خطی یا غیرخطی بودن تقسیم‌بندی می‌شوند. مطابق با الزامات آیین‌نامه زلزله ایران (استاندارد ۲۸۰۰) نوع روش تحلیل لرزه‌ای تحت تأثیر مشخصات هندسی و نوع سیستم سازه‌ای می‌باشد. روش تحلیل استاتیکی خطی معادل را می‌توان در ساختمان‌های منظم با ارتفاع کمتر از ۵۰ متر از تراز پایه استفاده کرد. همچنین روش تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش‌اور) و تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی قابل استفاده در بیشتر سازه‌ها می‌باشند. دو روش اخیر نتایج بهتر و دقیق‌تری نسبت به روش تحلیل استاتیکی معادل ارائه می‌دهند. در این میان نتایج بدست آمده از تحلیل پوش‌اور از سادگی در تفسیر نتایج برخوردار می‌باشد. به زبان ساده هدف از بهسازی لرزه‌ای ساختمان و طراحی براساس سطح عملکرد این است که اعضای سازه‌ای و ملحقات غیرسازه‌ای به گونه‌ای طراحی یا تقویت شوند که در صورت وقوع زلزله، آسیب‌های کمتری به این اجزا وارد شود. در اکثر آیین‌نامه‌ها با توجه به اهمیت ساختمان و کارایی آن بعد از وقوع زلزله، آسیب‌های احتمالی تقسیم‌بندی شده و سطوح عملکرد با بهسازی براساس آن تعریف می‌شود. از این رو کل ساختمان به دو گروه اجزای سازه‌ای و اجزای غیرسازه‌ای تقسیم‌بندی شده و برای هر گروه معیارهایی از سطح کارکرد کامل تا خرابی زیاد برای یک زلزله با دوره بازگشت معین در نظر گرفته می‌شود.

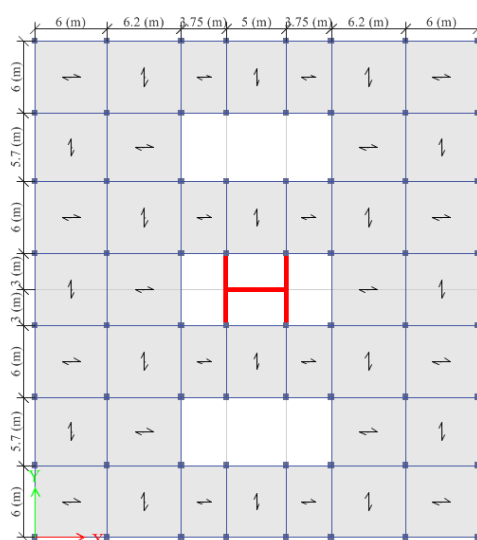
در ادامه مدل سازه‌ای مناسب و سازگار با اهداف پژوهش و مطابق با الزامات مقررات ملی ساختمان انتخاب کرده و با توجه به مبحث ششم مقررات ملی ساختمان (بارهای وارد بر ساختمان) و استاندارد ۲۸۰۰ (طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله) تحت بارگذاری ثقلی و جانبی قرار داده می‌شود. سپس تحلیل و طراحی استاتیکی خطی انجام شد و در ادامه جهت بررسی رفتار لرزه‌ای سازه، زمان تناوب اصلی، نیروی برش پایه ناشی از زلزله و دیگر پارامترها، مدل

Cheng¹
incremental dynamic analysis²

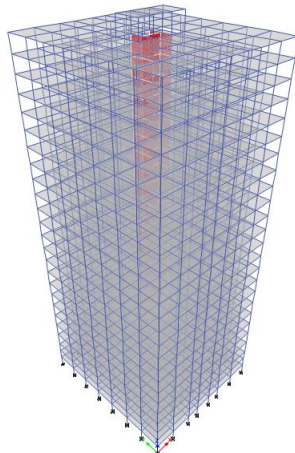
سازه‌ای با سیستم لوله در لوله با هسته به همراه بازشو در دیافراگم، مورد تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش‌اور) و تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی قرار گرفته و نتایج پاسخ‌های سازه‌ای مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

۳- ساختمان مورد مطالعه

در این بخش به معرفی مشخصات و جزئیات مدل سازه‌ای مورد مطالعه پرداخته می‌شود. مشخصات هندسی سازه مانند ارتفاع سازه، تعداد دهانه‌ها، عرض دهانه، مقاطع اعضای سازه‌ای و بارهای ثقلی و جانبی وارد بر سازه ارائه می‌شود. جهت انجام مدل‌سازی و تحلیل‌ها از نرم‌افزار SAP2000 استفاده گردیده است. در شکل ۲ پلان ساختمان مورد نظر نشان داده شده است. با توجه به این‌که هدف این مقاله، مطالعه و بررسی تأثیر هسته‌های مقاوم بتنی در سیستم‌های سازه‌ای لوله در لوله به همراه بازشو در دیافراگم می‌باشد، جهت درک بهتر از رفتار سازه‌ای از قاب سه بعدی منظم و متقارن، سازگار با شرایط مدل‌سازی استفاده می‌شود. مدل سازه‌ای به صورت یک سازه بلند با سیستم لوله در لوله با هسته مقاوم بتن مسلح دارای بازشو در دیافراگم انتخاب می‌شود. شکل ۳ نمای سه بعدی مدل سازه‌ای انتخاب شده را نشان می‌دهد.



شکل ۲. پلان ساختمان مورد بررسی در طبقه دارای بازشو در دیافراگم



شکل ۳. نمای سه بعدی از ساختمان مورد مطالعه

مدل سازه‌ای شامل یک سازه با سیستم لوله در لوله با هسته بتنی مقاوم دارای بازشو در دیافراگم با ارتفاع ۲۵ طبقه می‌باشد که نماینده‌ای از ساختمان‌های بلند می‌باشد. لوله بیرونی شامل قاب‌های خمشی می‌باشند و لوله داخلی شامل یک هسته بتنی مسلح به همراه بازشو در دیافراگم می‌باشد. تعداد و عرض دهانه در هر راستای پلان سازه در

شکل ۲ نشان داده شده است. همچنین ارتفاع طبقات (۱-) تا (۳-) برابر با سه متر و ارتفاع طبقات همکف تا آخر برابر با چهار متر در نظر گرفته می‌شود. در این مدل‌ها تمام تکیه‌گاه‌ها و اتصالات تیر به ستون به صورت گیردار مدلسازی شده‌اند.

در این مدل‌ها برای اعضای سازه‌ای، از بتن رده C30 با مقاومت فشاری مشخصه ۳۰ مگاپاسکال و مدول الاستیسیته ۳۰۰ گیگاپاسکال استفاده می‌شود. برای میلگردهای طولی از میلگرد رده AIII و میلگرد عرضی از رده AII استفاده می‌شود. مقاطع مورد استفاده در مدل‌های سازه‌ای برای اعضای سازه‌ای نظیر تیرها و ستون‌ها از مقاطع بتنی مستطیلی با میلگردگذاری مستطیلی و تنگ بسته و برای دیوارهای هسته بتنی از مقطع مستطیلی استفاده می‌شود. همچنین سیستم سقف از نوع تیرچه یونولیت با بارگذاری یک طرفه انتخاب شده است.

با در نظر گرفتن وزن سیستم کف‌سازی و بار گسترده معادل تیغه بندی، بار مرده وارد بر طبقات سازه برابر با ۶۳۰ کیلوگرم بر متر مربع می‌باشد. همچنین مقدار بار زنده وارد بر کف طبقات با توجه به نوع کاربری طبقات انتخاب می‌شود. جدول ۱ خلاصه‌ای از بارهای ثقلی وارد بر طبقات سازه را نشان می‌دهد. برای محاسبه جرم از کل بار مرده و سهم مشارکتی بار زنده استفاده خواهد شد. با توجه به نوع کاربری مدل سازه‌ای، سهم مشارکتی بار زنده ۲۰ درصد در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه جرم هر طبقه DL+0.2LL خواهد بود.

جدول ۱. بارگذاری ثقلی در سازه

| طبقه | ارتفاع (m) | بار مرده (kg/m ²) | بار زنده (kg/m ²) |
|----------|------------|-------------------------------|-------------------------------|
| ۱- تا ۳- | ۳ | ۶۳۰ | ۳۰۰ |
| همکف | ۴ | ۶۳۰ | ۳۰۰ |
| ۱ و ۲ | ۴ | ۶۳۰ | ۶۰۰ |
| ۳ تا ۱۹ | ۴ | ۶۳۰ | ۲۰۰ |
| ۲۰ و ۲۱ | ۴ | ۶۳۰ | ۵۰۰ |
| سقف | ۴ | ۶۳۰ | ۱۵۰ |

نیروی جانبی زلزله مؤثر بر ساختمان با استفاده از سه روش تحلیل استاتیکی معادل، استاتیکی غیرخطی (پوش‌اور) و روش تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی انجام خواهد گرفت. ترکیبات بارگذاری برای طراحی اولیه مقاطع سازه‌ای مطابق با مبحث ششم مقررات ملی ساختمان برای ساختمان‌های بتنی مسطح در حالت حدی نهایی به صورت زیر تعریف و استفاده می‌شود (در این روابط DL بارهای مرده، LL بارهای زنده، EX بار زلزله در راستای x و EY بار زلزله در راستای y می‌باشد):

$$1.25DL+1.5LL$$

$$1.0DL+1.2LL\pm 0.84EX$$

$$1.0DL+1.2LL\pm 0.84EY$$

$$0.85DL\pm 0.84EX$$

$$0.85DL\pm 0.84EY$$

(۱)

مطابق با ضوابط آیین‌نامه زلزله ایران (استاندارد ۲۸۰۰) علاوه بر طراحی اعضای سازه‌ای در برابر نیروهای داخلی و تأمین مقاومت مورد نیاز در اعضای سازه، مقدار جابجایی نسبی بین طبقات سازه (دریفت) نباید از مقدار مشخص شده در این آیین‌نامه تجاوز نماید. مقدار دریفت طبقات از طریق تحلیل غیرخطی سازه قابل محاسبه می‌باشد ولی با تقریب مناسب از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$\Delta_m = C_d \cdot \Delta_{eu} \quad (2)$$

در این رابطه Δ_m تغییرمکان نسبی غیرخطی یا تغییرمکان نسبی واقعی، C_d ضریب بزرگنمایی برای سیستم سازه‌ای مورد نظر و Δ_{eu} تغییرمکان نسبی در اثر زلزله طرح می‌باشد. مقدار Δ_m در هر حالت نباید از مقدار مجاز Δ_a تجاوز کند.

برای ساختمان‌های تا پنج طبقه:

$$\Delta_a = 0.025h$$

سایر ساختمان‌ها:

$$\Delta_a = 0.02h$$

مقدار مجاز تغییرمکان جانبی نسبی برای مدل‌های سازه‌ای مورد نظر در این مقاله مطابق جدول ۲ می‌باشد.

جدول ۲. تغییرمکان جانبی نسبی مجاز

| ساختمان | ضریب اصلاح (C_d) | Δ_a | Δ_{eu} |
|---------|----------------------|------------|---------------|
| ۲۵ طبقه | ۵/۵ | 0.02 h | 0.0036h |

۴- روش استاتیکی خطی معادل

نخستین گام در منظور نمودن اثرات بار جانبی ناشی از زمین‌لرزه در اواخر اولین دهه قرن ۲۰ برداشته شد. در روش استاتیکی معادل، حداقل نیروی برشی پایه یا مجموع نیروهای جانبی زلزله در هر یک از امتدادهای ساختمان با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$V = C.W \quad (3)$$

که در این رابطه W وزن کل ساختمان، شامل تمام بار مرده به اضافه درصدی از بار زنده و C ضریب زلزله که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$C = \frac{A.B.I}{R} \quad (4)$$

که در آن A نسبت شتاب مبنای طرح شتاب زلزله به شتاب ثقل، B ضریب بازتاب ساختمان که با استفاده از طیف بازتاب طرح به دست می‌آید، I ضریب اهمیت ساختمان و R ضریب رفتار ساختمان می‌باشد.

برای طی روند محاسبات، فرض می‌شود مدل سازه‌ای مورد نظر در منطقه با خطر لرزه‌خیزی نسبی زیاد و زمین با خاک نوع سوم (III) قرار دارد. همچنین با توجه به کاربری مدل سازه‌ای انتخابی، این ساختمان جز گروه ۲ (ساختمان‌های با اهمیت زیاد) دسته‌بندی می‌شود.

ضریب بازتاب ساختمان بیانگر نحوه‌ی پاسخ ساختمان به حرکت زمین با توجه به نوع آن است این ضریب با استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$B = B_1 \cdot N \quad (5)$$

در این رابطه B_1 ضریب شکل طیف و N ضریب اصلاح طیف می‌باشد. ضریب شکل طیف با توجه به مقدار ضریب بزرگنمایی خاک در زمان تناوب‌ها و میزان لرزه‌خیزی منطقه با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} B_1 &= S_0 + (S - S_0 + 1) \left(\frac{T}{T_0} \right) & 0 \leq T \leq T_0 \\ B_1 &= S + 1 & T_0 \leq T \leq T_s \\ B_1 &= (S + 1) \left(\frac{T_s}{T} \right) & T \geq T_s \end{aligned} \quad (6)$$

جدول ۳. پارامترهای لرزه‌ای روش استاتیکی معادل در ساختمان مورد مطالعه

| عامل‌ها | I | R | A |
|----------|----------|------------------------------|------------------------------|
| ویژگی‌ها | با اهمیت | قاب خمشی ویژه با هسته‌ی بتنی | منطقه با خطر لرزه‌پذیری زیاد |
| مقدارها | ۱/۲ | ۷/۵ | ۰/۳ |

ضریب اصلاح طیف N برای پهنه‌بندی با خطر نسبی زیاد و خیلی زیاد از روابط زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$\begin{aligned} N &= 1 & T < T_s \\ N &= \frac{0.7}{4 - T_s} (T - T_s) + 1 & T_s < T < 4 \text{sec} \\ N &= 1.7 & T > 4 \text{sec} \end{aligned} \quad (7)$$

زمان تناوب اصلی نوسان برای ساختمان‌های با سیستم قاب خمشی بتنی با هسته بتنی مقاوم، از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$T = 0.05 \times H^{0.75} \quad (8)$$

با تخصیص فرضیات و مقادیر مربوط به پارامترهای لرزه‌ای، مقدار ضریب برش پایه برای مدل انتخاب شده در این مقاله مطابق جدول ۴ محاسبه می‌شود.

جدول ۴. مقدار ضریب برش پایه

| ارتفاع (m) | T (sec) | B | C | C _{min} | ضریب توزیع (k) |
|------------|---------|--------|--------|------------------|----------------|
| ۹۷ | ۱/۵۴۵ | ۱/۴۶۹۳ | ۰/۰۷۰۵ | ۰/۰۴۳۲ | ۱/۵۲۳۰ |

۵- روش استاتیکی غیرخطی (پوش اور)

در روش تحلیل استاتیکی غیرخطی، بار جانبی به صورت یک الگوی خاص، مرحله به مرحله افزایش می‌یابد و تغییر مکان جانبی یک نقطه کنترلی با استفاده از نمودار برش پایه-تغییر مکان جانبی ارزیابی می‌شود. با توجه به این که اصل جمع آثار قوا در تحلیل‌های غیرخطی معتبر نیست، در تحلیل پوش اور ابتدا بارهای ثقلی به سازه اعمال می‌شوند و سپس بارهای جانبی به مجموعه بارها اضافه می‌شوند. بنابراین بارهای جانبی همراه با بارهای ثقلی به سازه اعمال می‌شوند.

در تحلیل استاتیکی غیرخطی می‌توان، نوع بارهای جانبی وارد بر سازه را به سه حالت نیرو، شتاب و مودال تعریف نمود. برای ایجاد الگوی بار براساس توزیع متناسب با توزیع بار جانبی در روش استاتیکی خطی از بارگذاری براساس نیرو استفاده می‌شود. برای ایجاد توزیعی یکنواخت متناسب با جرم هر طبقه، از بارگذاری برحسب شتاب استفاده می‌شود. همچنین برای ایجاد الگویی براساس توزیع متناسب با شکل مود اول ارتعاش از بارگذاری مودال با مود اول استفاده می‌شود. با توجه به سطح عملکردی که برای ساختمان انتخاب می‌شود، سازه باید بتواند حد معینی از جابجایی جانبی را بدون این که تغییر شکل‌های سازه از حد مجاز فراتر رود تحمل کند. براساس روش FEMA-356 و دستورالعمل بهسازی (نشریه ۳۶۰) تغییر مکان هدف برابر است با:

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad (9)$$

در این رابطه T_e زمان تناوب مؤثر سازه در جهت مورد بررسی بر حسب ثانیه می‌باشد و به صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$T_e = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} \quad (10)$$

که T_i زمان تناوب اصلی سازه با فرض رفتار خطی می‌باشد. K_i سختی جانبی الاستیک و K_e سختی جانبی مؤثر می‌باشد.

در رابطه (۹)، C_0 ضریب اصلاح برای ارتباط تغییر مکان طیفی سیستم یک درجه آزادی به تغییر مکان بام سیستم چند درجه آزادی می‌باشد. پارامتر C_1 ضریب اصلاح برای تبدیل تغییر مکان‌های محاسبه شده از پاسخ خطی الاستیک به حداکثر تغییر مکان‌های غیرالاستیک مورد انتظار سازه می‌باشد. این ضریب برابر است با:

$$C_1 = 1 \quad T_e \geq T_s$$

$$C_1 = \max \left\{ 1.0, \frac{\left(1 + (R-1) \frac{T_s}{T_e} \right)}{R} \right\} \quad T_e \leq T_s \quad (11)$$

در رابطه (۹) ضریب C_2 ضریب اصلاحی برای در نظر گرفتن شکل منحنی هیستریزس، کاهش سختی و زوال مقاومت اعضای سازه‌ای بر حداکثر تغییر مکان‌ها می‌باشد. همچنین در رابطه (۹) ضریب C_3 ضریب اصلاحی برای در نظر گرفتن افزایش تغییر مکان‌های ناشی از اثرات دینامیکی P-Delta می‌باشد. این ضریب بستگی به شیب خط در ناحیه غیرالاستیک دارد و برای سازه‌های دارای سختی پس از تسلیم مثبت و منفی متفاوت است. مقدار این ضریب از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$C_3 = 1 \quad \alpha > 0$$

$$C_3 = \frac{|\alpha|(R-1)^{3/2}}{T_e} \quad \alpha < 0$$

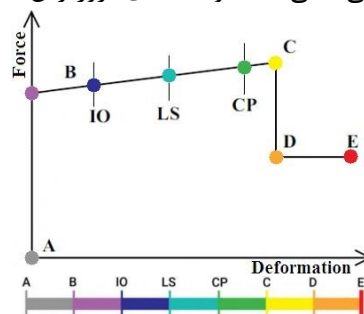
(۱۲)

در این رابطه α مقدار شیب سختی پس از تسلیم می‌باشد. در رابطه‌ی (۹)، بیان‌گر میزان جابجایی هدف است که پس از محاسبه‌ی ضریب‌های C_0 تا C_3 در یک فرآیند سعی و خطا به دست می‌آید. به‌منظور انجام تحلیل پوش‌اور در این مقاله، مطابق با جدول ۵، مفصل‌های پلاستیک در یک‌دهم دهانه‌های تیرها و ستون‌ها در نظر گرفته شده‌اند.

جدول ۵. اختصاص مفصل پلاستیک در اعضای سازه‌ای

| المان سازه‌ای | مقطع المان | نیروی داخلی | نوع مفصل پلاستیک |
|---------------|------------|-------------------------|------------------|
| تیر | مستطیلی | لنگر خمشی | M3 |
| ستون | مستطیلی | لنگر خمشی و نیروی محوری | P-M2-M3 |
| دیوار | مستطیلی | لنگر خمشی | M3 |
| | | نیروی برشی | V2 |

شکل ۴ موقعیت سطوح عملکردی اعضای سازه‌ای بر روی مفصل پلاستیک را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. این سطح‌ها شامل استفاده بلادرنگ (IO)، ایمنی جانی (LS) و آستانه‌ی فروریزش (CP) هستند.



شکل ۴. منحنی مفصل پلاستیک و تخصیص سطوح عملکرد

۶- روش دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی

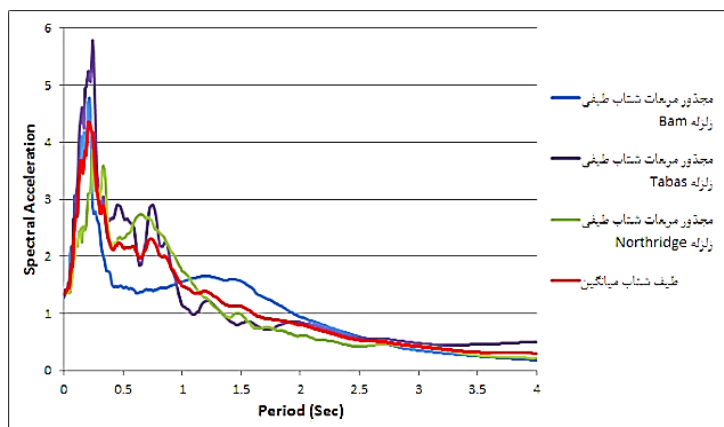
به منظور بررسی تأثیر هسته بتنی مقاوم به همراه بازشو در دیافراگم بر عملکرد لرزه‌ای سازه‌های بلند با سیستم لوله در لوله می‌بایست از روش تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی استفاده شود. حرکت زمین در تعیین اثر زلزله بر ساختمان‌ها را می‌توان مستقیماً با منظور نمودن تغییرات شتاب با زمان در تحلیل دینامیکی سازه به دست آورد. استفاده از این روش در کلیه ساختمان‌ها اعم از منظم و نامنظم مجاز است. در این راستا، شتاب‌نگاشت‌هایی که در تعیین اثر حرکت زمین مورد استفاده قرار می‌گیرند باید تا حد امکان نمایانگر حرکت واقعی زمین در محل احداث بنا، در هنگام وقوع زلزله باشند. برای نیل به این هدف لازم است که حداقل سه زوج شتاب‌نگاشت متعلق به مؤلفه‌های افقی سه زلزله مختلف ثبت شده انتخاب گردند. شتاب‌نگاشت‌ها متعلق به زلزله‌هایی باشند که شرایط زلزله طرح را ارضا کنند و در آنها آثار بزرگا، فاصله از گسل و ساز و کار چشمه لرزه‌زا در نظر گرفته شده باشد. ساختگاه‌های شتاب‌نگاشت‌ها باید به لحاظ ویژگی‌های زمین‌شناسی تکتونیکی لرزه‌شناسی و به خصوص مشخصات لایه‌های خاک با زمین محل ساختمان، تا حد امکان مشابهت داشته باشند. مدت زمان حرکت شدید زمین در

شتاب‌نگاشت‌ها حداقل برابر با ۱۰ ثانیه یا سه برابر زمان تناوب اصلی سازه، هر کدام بیشتر است، باشد. با توجه به این که تحلیل سازه به صورت سه بعدی انجام می‌شود، ترکیب طیف مؤلفه‌های هر دو راستای شتاب‌نگاشت باید با طیف طرح استاندارد مقایسه گردد. با توجه به مطالب عنوان شده، برای تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی مدل سازه‌ای انتخاب شده از سه شتاب‌نگاشت زلزله‌های بم، طیس و نورتریج استفاده شده است. مشخصات شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده در جدول ۶ گردآوری شده است.

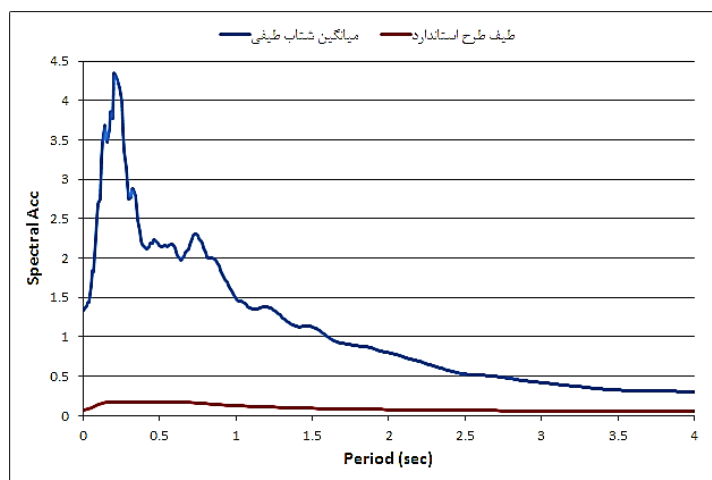
جدول ۶. مشخصات شتاب‌نگاشت زلزله‌های مورد استفاده

| زلزله | ایستگاه | فاصله گسل (km) | بزرگی (Richter) | PGA (g) |
|---------|---------|-------------------|--------------------|------------|
| بم | Bam | ۶ | ۶/۵ | ۰/۸۱۵ |
| طیس | TBS-A | ۶۰ | ۷/۴ | ۰/۸۵۲ |
| نورتریج | Arleta | ۹/۵ | ۶/۷ | ۰/۳۴۴ |

شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده براساس مقایسه میانگین طیف شتاب بدست آمده از مجذور مربعات دو مؤلفه افقی هر سه زمین‌لرزه با طیف طرح استاندارد، براساس ضوابط آیین نامه زلزله (استاندارد ۲۸۰۰)، مقیاس شده و برای تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در شکل ۵ و شکل ۶ به ترتیب طیف شتاب برای هر سه شتاب‌نگاشت و طیف طرح استاندارد را می‌توان مشاهده نمود.



شکل ۵. مجذور مربعات مؤلفه‌های طیف شتاب برای سه زلزله



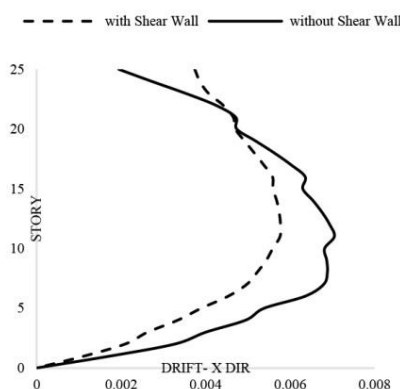
شکل ۶. مقایسه میانگین مجذور مربعات طیف شتاب سه زلزله و طیف طرح استاندارد

۷- بحث و نتایج

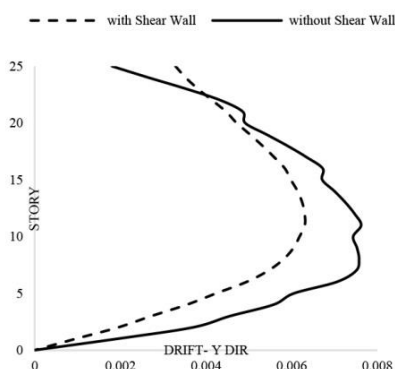
در این قسمت از مقاله نتایج و پاسخ‌های بدست آمده از تحلیل لرزه‌ای مدل سازه‌ای، شامل تحلیل استاتیکی معادل، تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش‌اور) و تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی ارائه می‌گردد. پاسخ‌های لرزه‌ای شامل برش پایه وارد شده بر سازه، دریفت طبقات و تغییرمکان جانبی سازه در تراز بام برای تحلیل‌های مختلف می‌باشد.

۷-۱- پاسخ‌های لرزه‌ای تحلیل استاتیکی خطی

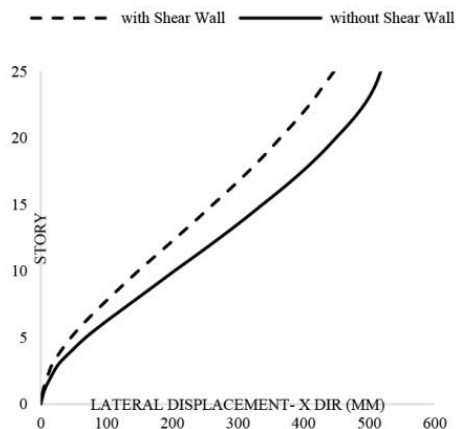
با توجه به روش تحلیل استاتیکی معادل، مقدار نیروی برشی محاسبه شده برای سازه، اعمال شده و مقدار تغییرشکل‌های سازه تحت نیروی جانبی معادل، محاسبه می‌شود. تحلیل استاتیکی معادل برای این مدل سازه‌ای در دو حالت با در نظر گرفتن هسته بتنی و بدون در نظر گرفتن هسته بتنی انجام شده است. شکل ۷ و شکل ۸ مقدار دریفت طبقات مدل سازه‌ای را در دو راستای X و Y تحت تحلیل استاتیکی معادل نشان می‌دهد. مقایسه نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که استفاده از هسته بتنی موجب کاهش محسوس دریفت طبقات در سازه‌های بلند می‌شود. همچنین شکل ۹ و شکل ۱۰ مقدار جابجایی جانبی طبقات مدل سازه‌ای را در دو راستای X و Y تحت تحلیل استاتیکی معادل نشان می‌دهد. مطابق با نتایج بدست آمده جابجایی جانبی سازه در هر دو راستا با استفاده از هسته بتنی مرکزی کاهش محسوسی می‌یابد.



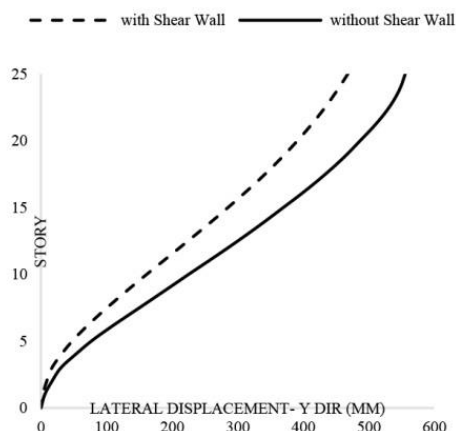
شکل ۷. دریفت جانبی طبقات در راستای X تحت تحلیل استاتیکی خطی



شکل ۸. دریفت جانبی طبقات در راستای Y تحت تحلیل استاتیکی خطی



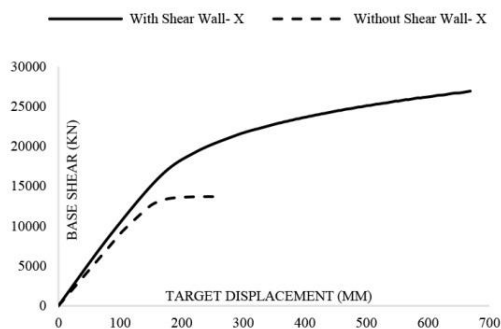
شکل ۹. جابجایی جانبی طبقات در راستای X تحت تحلیل استاتیکی خطی



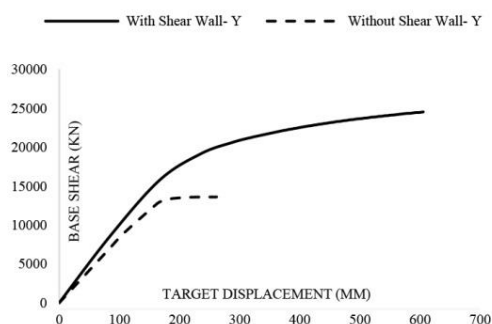
شکل ۱۰. جابجایی جانبی طبقات در راستای Y تحت تحلیل استاتیکی خطی

۲-۷- پاسخ‌های لرزه‌ای تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش‌اور)

پاسخ‌های بدست آمده از تحلیل پوش‌اور شامل منحنی‌های رفتاری جابجایی جانبی- نیروی برشی پایه می‌باشد که برای مدل سازه‌ای در هر یک از راستاهای X و Y در دو حالت بدون در نظر گرفتن هسته بتنی و با در نظر گرفتن هسته بتنی مرکزی ترسیم شده است. شکل ۱۱ منحنی رفتاری مدل سازه‌ای را در راستای X نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار مشاهده می‌شود که با استفاده از هسته بتنی مرکزی شیب اولیه منحنی در ناحیه الاستیک افزایش محسوسی می‌یابد که نشان دهنده افزایش سختی جانبی سازه در حالت الاستیک سازه می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که ظرفیت نهایی مدل سازه‌ای و شکل‌پذیری سازه با در نظر گرفتن هسته بتنی مرکزی افزایش چشم‌گیری می‌یابد. شکل ۱۲ منحنی رفتاری مدل سازه‌ای را در راستای Y نشان می‌دهد. مشابه با نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی در راستای X، رفتار سازه در راستای Y نیز با در نظر گرفتن هسته بتنی مرکزی به عنوان لوله داخلی، بهبود می‌یابد.



شکل ۱۱. منحنی برش پایه-جابجایی برای تحلیل پوش اور در راستای X

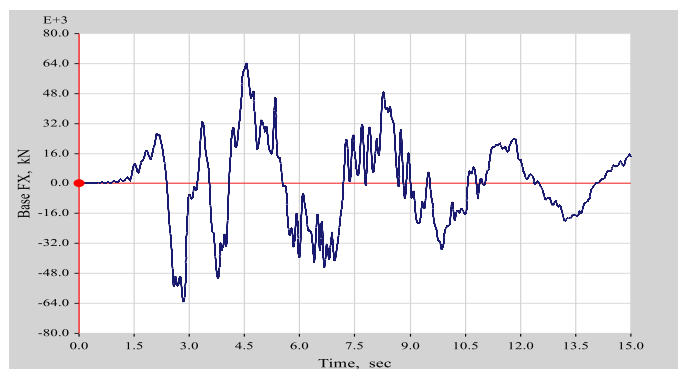


شکل ۱۲. منحنی برش پایه-جابجایی برای تحلیل پوش اور در راستای Y

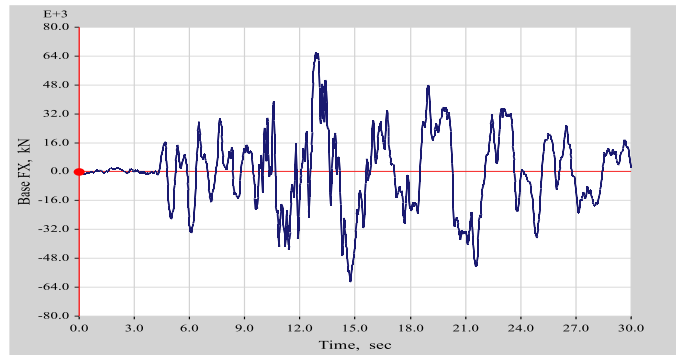
۷-۳- پاسخ‌های لرزه‌ای تحلیل تاریخچه زمانی

یکی از پارامترها و پاسخ‌های تأثیرگذار در تحلیل لرزه‌ای سازه‌ها، مقدار برش پایه اعمال شده به سازه در طی یک زمین لرزه می‌باشد. نیروی برش پایه در یک سازه با توجه به شرایط سیستم سازه‌ای در طبقات و قاب‌های ساختمانی توزیع می‌شود. بنابراین برش پایه یکی از پارامترهای مؤثر در نیروی اعمال شده به سازه و طراحی مقاطع مورد نیاز اعضای سازه‌ای می‌باشد. در حالت کلی برش پایه با سختی سازه رابطه مستقیم دارد. از شکل ۱۳ تا شکل ۱۵، تاریخچه زمانی برش پایه اعمال شده بر مدل سازه‌ای ۲۵ طبقه تحت زمین لرزه‌های بم، طیس و نورث‌ریچ نمایش داده شده است.

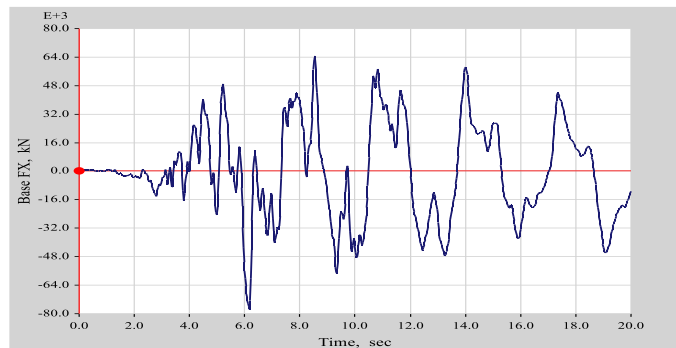
حداکثر برش پایه وارد بر این مدل سازه‌ای تحت زمین لرزه بم، در زمان ۴/۵۴ ثانیه و برابر با ۶۴۳۱۵ کیلونیوتن می‌باشد. همچنین مقدار حداکثر برش پایه برای زلزله طیس برابر با ۶۵۹۲۱ کیلونیوتن می‌باشد که در زمان ۱۲/۸۶ ثانیه رخ می‌دهد. این مقدار برای زلزله نورث‌ریچ برابر با ۷۷۶۵۲ کیلونیوتن می‌باشد که در لحظه ۶/۱۸ ثانیه رخ می‌دهد.



شکل ۱۳. تاریخچه زمانی برش پایه اعمال شده به سازه تحت زلزله بم

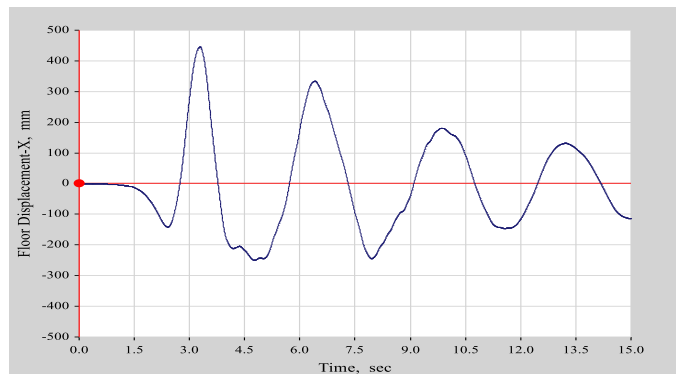


شکل ۱۴. تاریخچه زمانی برش پایه اعمال شده به سازه تحت زلزله طبس

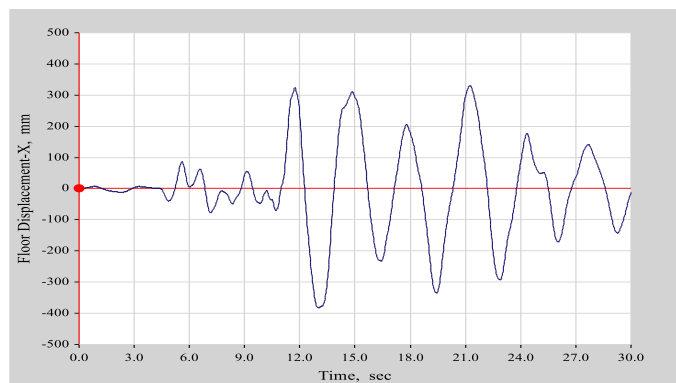


شکل ۱۵. تاریخچه زمانی برش پایه اعمال شده به سازه تحت زلزله نورث ریج

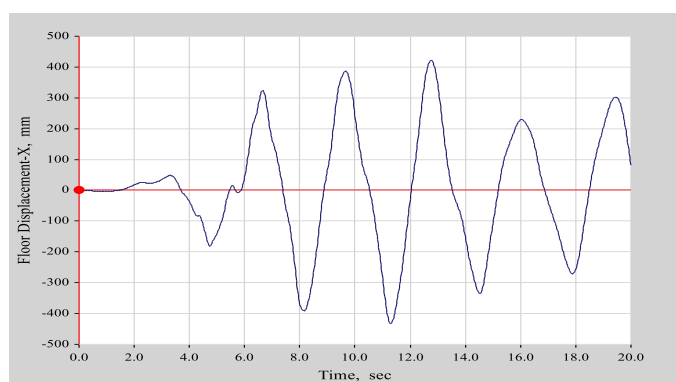
یکی دیگر از پارامترها و پاسخ‌های تأثیرگذار در تحلیل لرزه‌ای سازه‌ها، مقدار تغییرشکل‌ها و جابجایی جانبی در تراز طبقات و بام سازه در طی یک زمین‌لرزه می‌باشد. تغییرشکل در یک سازه با توجه به شرایط هندسی در طبقات و قاب‌ها توزیع می‌شود. بنابراین جابجایی جانبی سازه یکی از پارامترهای مؤثر در کنترل عملکرد سازه می‌باشد. در حالت کلی جابجایی جانبی سازه با سختی سازه رابطه معکوس دارد. از شکل ۱۶ تا شکل ۱۸ تاریخچه زمانی جابجایی جانبی بام سازه در مدل سازه‌ای ۲۵ طبقه تحت زلزله‌های بم، طبس و نورث ریج نمایش داده شده است. حداکثر جابجایی جانبی در تراز بام این مدل سازه‌ای تحت زمین‌لرزه بم، در زمان $3/28$ ثانیه و برابر با ۴۴۵ میلی‌متر می‌باشد. همچنین مقدار حداکثر جابجایی برای زلزله طبس برابر با $381/8$ میلی‌متر می‌باشد که در زمان ثانیه ۱۳ رخ می‌دهد. این مقدار برای زلزله نورث ریج برابر با ۴۳۲ میلی‌متر می‌باشد که در لحظه $11/28$ ثانیه رخ می‌دهد.



شکل ۱۶. تاریخچه زمانی جابجایی بام سازه تحت زلزله بم



شکل ۱۷. تاریخچه زمانی جابجایی بام سازه تحت زلزله طبس



شکل ۱۸. تاریخچه زمانی جابجایی بام سازه تحت زلزله نورثریج

۸- نتیجه گیری

در این مقاله رفتار و عملکرد لرزه‌ای سازه‌های بلند با سیستم سازه‌ای لوله در لوله با هسته بتنی دارای بازشو در دیافراگم مورد مطالعه قرار گرفت. به منظور بررسی تأثیر سیستم لوله در لوله با هسته مرکزی بر رفتار لرزه‌ای سازه بلند، مدل سازه‌ای در دو حالت با لوله داخلی و بدون در نظر گرفتن لوله داخلی مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور بررسی رفتار لرزه‌ای مدل سازه‌ای از سه روش تحلیل استاتیکی معادل، تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی و تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش‌اور) استفاده شد. همچنین از یک مدل سازه‌ای ۲۵ طبقه با سیستم لوله در لوله با هسته بتنی استفاده شد که این مدل سازه‌ای در طبقات آخر دارای بازشو در دیافراگم می‌باشند. برای تحلیل تاریخچه زمانی از شتاب‌نگاشت ۳ زمین‌لرزه بم، طبس و نورثریج استفاده گردید. برای انجام تحلیل استاتیکی معادل از ضوابط آیین نامه زلزله ایران (استاندارد ۲۸۰۰) استفاده شد همچنین تحلیل پوش‌اور براساس ضوابط دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای (نشریه ۳۶۰) انجام شد. نتایج بدست آمده از مطالعات صورت گرفته به صورت زیر دسته‌بندی می‌شوند:

- با توجه به نتایج تحلیل استاتیکی معادل، استفاده از هسته بتنی به عنوان لوله مرکزی موجب کاهش محسوسی در جابجایی جانبی و دریافت طبقات می‌شود.

- نتایج بدست آمده از تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش‌اور) نشان می‌دهد که با استفاده از هسته بتنی مرکزی، ظرفیت نهایی سازه و شکل‌پذیری سازه افزایش چشم‌گیری پیدا می‌کند.

نتایج بدست آمده از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی نشان می‌دهند که برای این سیستم سازه‌ای روش استاتیکی معادل از دقت خوبی در محاسبه حداکثر تغییرمکان سازه برخوردار می‌باشد.

اعلام تعارض منافع: نویسنده (نویسندگان) اعلام می‌کنند که هیچ نوع تعارض منافی وجود ندارد.

- [1] H. Saffari, R. Rahgozar and R. Mahjoub, "Approximate analysis of tall structures strengthen with peripheral frame against lateral forces", *The First Conference on Safety and Rehabilitation of Structures, Tehran, Iran, 2002 (In Persian)*.
- [2] H.A. DareShiri and M. Taregh, "Nonlinear static analysis of RC buildings with regular ductility and irregular plan designed based on Iranian regulations", *The 8th National Congress of Civil Engineering, Shiraz, Iran, 2009. (In Persian)*.
- [3] H. Naderpour, A. Kheyroddin, "Shear lag phenomenon in RC tall buildings with tubular system", *Journal of Modeling in Engineering, Vol. 9, No. 26, 2011, pp. 33-48. doi: 10.22075/jme.2017.1594 (In Persian)*.
- [4] A. Najafgholizadeh and Y. Yasrebinia, "Investigation of the behavior of tall steel structures using truss belt system and brachial restraint", *The First National Conference on Sustainable Building, Mashhad, Iran, 2013 (In Persian)*.
- [5] R. Rahgozar and M. Feyzabad, "Approximate analysis of the nested peripheral frame system, arm restraint and truss belt in tall buildings", *The 7th National Congress of Civil Engineering, Zabol, Iran, 2013. (In Persian)*.
- [6] A. Fereydoon, A. Mohammadzadeh, "Optimal design in honeycomb sandwich panels under the pressure load with ICA method", *Journal of Modeling in Engineering, Vol. 12, No. 38, 2014, pp. 117-128. doi: 10.22075/jme.2017.1683 (In Persian)*.
- [7] N. Siahpolo, A. Kheyroddin and M. Gerami, "Analytical assessment of pros and cons for prevalent tall building system in comparison with tube system using ASCE7-05 wind load specifications", *Amirkabir Journal of Civil Engineering, Vol. 48, No. 1, 2016, pp. 87-100. (In Persian)*
- [8] H. Raeisi, M. Malekinejad, R. Rahgozar, "Determination optimum location of outrigger and belt truss system in tall buildings with non-uniform cross section", *Journal of Modeling in Engineering, Vol. 16, No. 53, 2018, pp. 289-297. doi: 10.22075/jme.2017.6163 (In Persian)*
- [9] D. Scott, D. Farnsworth, M. Jackson and M. Clark, "The effects of complex geometry on tall towers", *The Structural Design of Tall and Special Buildings, Vol. 16, 2007, pp. 441-455*.
- [10] M.M. Ali and K.S. Moon, "Structural developments in tall buildings: current trends and future prospects", *Architectural Science Review, Vol. 50, No. 3, 2007, pp. 205-223*.
- [11] M. Elnimeiri and P. Gupta, "Sustainable structure of tall buildings", *The Structural Design of Tall and Special Buildings, Vol. 17, 2008, pp. 881-894*.
- [12] Y. Chen, D.M. McFarland, Z. Wang and B.F. Spencer Jr, "Analysis of tall buildings with damped outriggers", *Journal of Structural Engineering, Vol. 136, 2010, pp.1435-1443*.
- [13] J.A. Amin and A.K. Ahuja, "Aerodynamic modifications to the shape of the buildings: A review of the state of the art", *Asian Journal of civil engineering (Building and Housing), Vol. 11, No. 4, 2010, pp. 433-450*.
- [14] J. Kim and S. Hong, "Progressive collapse performance of irregular buildings", *The Structural Design of Tall and Special Buildings, Vol. 20, 2011, pp. 721-734*.
- [15] K.S.Moon, "Diagrid structures for complex-shaped tall buildings", *Advanced Materials Research, Vol. 450, No. 451, 2012, pp. 1489-1492*.
- [16] J.W. Tang, Y.M. Xie, P. Felicetti, J.Y. Tu and J.D. Li, "Numerical simulations of wind drags on straight and twisted polygonal buildings", *The Structural Design of Tall and Special Buildings, Vol. 22, 2013, pp. 62-73*.
- [17] K.S. Moon, "Studies on various structural system design options for twisted tall buildings and their performances", *The Structural Design of Tall and Special Buildings, Vol. 23, No. 5, 2014, pp. 319-333*.

- [18] D. Lee, and S. Shin, "Advanced high strength steel tube diagrid using TRIZ and nonlinear pushover analysis", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 96, 2014, pp. 151-158.
- [19] J. Xie, "Aerodynamic optimization of super-tall buildings and its effectiveness assessment", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 130, 2014, pp. 88-98.
- [20] K.S. Moon, "Comparative evaluation of structural systems for tall buildings: diagrids vs. outrigger structures", *International Journal of Engineering Technology Science and Research*, Vol. 4, No. 12, 2017, pp.1187-1194.
- [21] X. Lu, Y. Tian, S. Cen, H. Guan, L. Xie, and L. Wang, "A high-performance quadrilateral flat shell element for seismic collapse simulation of tall buildings and its implementation in OpenSees," *J. Earthq. Eng.*, vol. 22, no. 9, pp. 1662–1682, 2018.
- [22] J. Shen, X. Ren, Y. Zhang, and J. Chen, "Nonlinear dynamic analysis of frame-core tube building under seismic sequential ground motions by a supercomputer," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 124, pp. 86–97, 2019.
- [23] Q. Zhu, S. Zou, and B. Yang, "Seismic Performance Analysis of RC Frame Core Tube Structure Considering Floor Parameters," in *Innovative Computing*, Springer, 2020, pp. 1567–1573.
- [24] Y. Cheng, Y.-R. Dong, G.-L. Bai, and Y.-Y. Wang, "IDA-based seismic fragility of high-rise frame-core tube structure subjected to multi-dimensional long-period ground motions," *J. Build. Eng.*, vol. 43, p. 102917, 2021.
- [25] Jalilkhani, M., Ghasemi, S. H., & Danesh, M. "A multi-mode adaptive pushover analysis procedure for estimating the seismic demands of RC moment-resisting frames." *Engineering Structures*, 213, 2020, 110528.
- [26] Jahangir, H., Bagheri, M. "Evaluation of Seismic Response of Concrete Structures Reinforced by Shape Memory Alloys" *International Journal of Engineering*, 2020, 33(3): 410-418. DOI: 10.5829/IJE.2020.33.03C.05.
- [27] Triller, J., Immel, R., Timmer, A., & Harzheim, L. (2021). "The difference-based equivalent static load method: an improvement of the ESL method's nonlinear approximation quality." *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2021, 1-16.
- [28] Bagheri, M., Chahkandi, A., and Jahangir, H., "Seismic Reliability Analysis of RC Frames Rehabilitated by Glass Fiber-Reinforced Polymers" *International Journal of Civil Engineering*, 2019, 17: 1785–1797. DOI: 10.1007/s40999-019-00438-x.