

# Investigating the Effect of Vertical Component of Earthquake on Seismic Responses of Concrete Slabs with Opening

*Majid Khosrow Beigi*

*M.Sc., Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Urmia Branch, Islamic Azad University, Urmia*

*Ashkan KhodaBandehLou \**

*Corresponding Author: Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Urmia Branch, Islamic Azad University, Urmia*

*a.khodabandehlou@iaurmia.ac.ir*

## **ABSTRACT**

*Buildings are subjected to stimulations of earthquake seismic components, which affect the structure in three perpendicular directions. In estimations of the earthquake forces, the vertical component is usually neglected. However, the vertical earthquake component can lead to drastic stress changes in the structural elements, especially the concrete slabs with an opening. In this study, the effect of vertical earthquake component on concrete slabs with opening has been investigated. Three concrete structures with 5, 8, and 12 stories and slab openings of 0, 15, 30, and 45 percent were subjected to the effect of the near-field record of Bam, Northridge, and El Centro earthquakes. Non-linear time history analysis was used to study the structural displacements and stresses comparatively. The results indicated that the contribution of vertical earthquake component in slabs displacements was not significant compared to that of three direction combination. On the other hand, it was inferred that the resulting stresses have a direct relationship with deformations generated in the slabs, so that in models with larger displacements, higher stress levels were detected. For both the three direction combination and the vertical direction earthquakes, increasing the opening percentage would increase stress in the concrete slabs. Generally, the maximum produced stress in the slabs was about 60 percent of the maximum stresses induced by three-directional combined earthquakes in some cases.*

**Keywords:** Earthquake vertical component, Concrete slab, Opening, Near-field earthquake, Non-linear time history analysis

# بررسی پاسخ‌های ارتعاشی دال‌های بتنی دارای بازشو تحت تأثیر مولفه قائم زلزله

دریافت مقاله: ۱۸-۰۶-۱۳۹۹

پذیرش مقاله: ۲۰-۰۸-۱۳۹۹

مجید خسروبیگی

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

اشکان خدابنده لو\*

نویسنده مسئول: استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران

[a.khodabandehlou@iaurmia.ac.ir](mailto:a.khodabandehlou@iaurmia.ac.ir)

## چکیده

ساختمان‌ها در اثر زمین‌لرزه تحت اثر تحریک مولفه‌های لرزه‌ای قرار می‌گیرند که در سه راستای متعامد بر سازه وارد می‌شوند. در بیشتر موردها، در برآورد نیروهای زلزله به طور معمول از زلزله‌های راستای قائم صرف نظر و یا اثر آن‌ها ناچیز در نظر گرفته می‌شود. در حالی که مولفه‌ی قائم زلزله می‌تواند باعث ایجاد تغییر مکان‌ها و تنش‌های شدیدی بر المان‌های سازه‌ای، به‌ویژه دال‌های بتنی دارای بازشو، شود. در این پژوهش به بررسی اثر مولفه‌ی قائم زلزله بر دال‌های بتنی دارای بازشو پرداخته شده است. برای این منظور ساختمان‌های بتنی ۵، ۸ و ۱۲ طبقه دارای دال‌های بتنی با ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درصد بازشو تحت اثر سه رکورد زلزله حوزه نزدیک بم، نورث ریچ و السنترو قرار گرفتند و به کمک تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی مقایسه‌ای بین تغییر مکان‌ها و تنش‌های ایجاد شده در آن‌ها انجام شد. نتیجه‌ی بررسی‌ها نشان دادند که سهم زلزله‌ی راستای قائم در تغییر مکان دال‌ها نسبت به تغییر مکان دال‌ها در اثر ترکیب سه راستا مقدار قابل توجهی نمی‌باشد. از طرف دیگر، مقایسه‌ی تنش‌ها در دال‌های بتنی نشان داد که تنش‌های ایجاد شده با تغییر شکل‌های به‌وجود آمده در دال‌ها رابطه‌ی مستقیم دارد، به طوری که در مدل‌هایی که تغییر مکان بیشتری مشاهده شده است، تنش‌های برشی ایجاد شده نیز مقدارهای بالاتری نشان می‌دهند. در همه‌ی سازه‌ها، هم در زلزله ترکیبی و هم راستای قائم، با افزایش درصد بازشو، تنش ایجاد شده در دال‌ها نیز افزایش می‌یابد. در حالت کلی، بیشینه تنش ایجاد شده در دال‌ها در اثر رکوردهای راستای قائم در برخی از موردها به اندازه‌ی ۶۰ درصد بیشینه تنش‌های ایجاد شده در اثر زلزله‌های ترکیبی می‌باشد. کلمات کلیدی: مولفه‌ی قائم زلزله، دال بتنی، بازشو، تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی.

ساختمان‌ها در هنگام وقوع زمین‌لرزه تحت تاثیر تحریک مولفه‌های لرزه‌ای قرار می‌گیرند. زمین‌لرزه‌ها شامل دو مولفه‌ی افقی و یک مولفه‌ی قائم می‌باشند. در بیشتر آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای، به اندازه‌ی کافی تاثیر مولفه قائم منظور نشده است و مولفه‌های افقی را مولفه‌های غالب در تخریب سازه‌های مختلف می‌دانند [۱]. کاستی‌های موجود در آیین‌نامه‌ها در مورد مولفه‌های قائم زلزله‌ها، پژوهش‌گران را بر آن داشته است تا به ارزیابی اثر این مولفه‌ی زمین‌لرزه بر رفتار سازه‌ها بپردازند. نتیجه‌ی بررسی‌های برخی از پژوهش‌گران نشان می‌دهد که تاثیر مولفه قائم در زلزله‌های حوزه نزدیک با افزایش ارتفاع نسبت مستقیم دارد و باعث افزایش برش پایه در سازه می‌شود [۲-۶]. در سال‌های اخیر، با در نظر گرفتن ضریب‌هایی در طیف طرح، تاثیر مولفه‌های قائم زلزله در برخی از آیین‌نامه اعمال می‌شود. در ویرایش سوم استاندارد ۲۸۰۰ [۷] در بالکن‌ها و تیرهای با دهانه بیش از ۱۵ متر، اثر مولفه‌ی قائم زلزله در نظر گرفته شده است. در ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ [۸] تاثیر نیروهای قائم ناشی از زلزله‌ها علاوه بر بالکن‌ها و تیرها با دهانه‌ی زیاد، در سازه‌ی ساختمان‌هایی که در پهنه‌ی با خطر نسبی زیاد واقع شده‌اند و تیرهای دارای بار قائم متمرکز نیز در نظر گرفته شده است. در پژوهش خوشنودیان و همکاران [۹] به بررسی اثر مولفه‌ی قائم نیروی زلزله و مطالعه این اثر بر روی ساختمانهای فولادی با سیستم قاب خمشی فولادی پرداخته شده است. در این پژوهش، نتیجه‌های به‌دست آمده با پیشنهادها و ویرایش سوم استاندارد ۲۸۰۰ [۷] مقایسه شده‌اند. نتیجه‌ی بررسی‌ها نشان دادند که در بیشتر موردها، طراحی ستون‌ها بر مبنای استاندارد ۲۸۰۰ محافظه کارانه است و هم‌چنین طراحی بالکن‌ها بر این مبنا باعث تشدید اثر مولفه‌ی قائم بر ستون‌های متصل به آن‌ها می‌شود. در پژوهشی دیگر، ان‌جی و همکاران [۱۰] به ارزیابی عددی ظرفیت باربری نهایی دال‌های مربعی شکل دارای بازشو پرداختند و اعلام کردند که تا ۳۰ درصد بازشو در دال‌ها اثری بر ظرفیت باربری ندارد و با افزایش بازشو بیش از ۵۰ درصد ظرفیت باربری دال به‌شدت کاهش می‌یابد. خواجه‌دهی و پناهشاهی [۱۱] تاثیر بازشو در دال‌های بتنی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند کاهش ظرفیت باربری در اثر بارگذاری خارج از صفحه، کم‌تر از کاهش ظرفیت در اثر بازشو در دال است و ساز و کار شکست دال در اثر وجود بازشو، تغییر می‌کند. حسین‌پور و همکاران [۱۲] اثر مولفه‌ی قائم نیروی زلزله بر سازه‌های بتنی را مورد بررسی قرار دادند. نتیجه‌ی بررسی آن‌ها نشان داد که افزایش نیروی زلزله با تاثیر هم‌زمان مولفه‌های قائم و افقی بین ۳۰ تا ۵۰ درصد نسبت به حالت تاثیر فقط مولفه افقی است. نتیجه‌های پژوهش مسلح و همکاران [۱۳] نشان می‌دهد که بیشینه تغییرمکان‌های نسبی به‌دست آمده از آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های بهسازی از روش‌های خطی، مقدارهای کم‌تری از تحلیل دینامیکی غیرخطی دارند و محاسبه‌ی تغییرمکان نسبی از روش‌های خطی در بعضی از طبقه‌ها تخمین بیشتر و در بعضی از طبقه‌ها تخمین کم‌تری نسبت به روش دینامیکی غیر خطی ارائه می‌دهد. از این رو، در آن پژوهش پیشنهاد شده است که در ارزیابی سازه‌ها به‌ویژه در اثر زلزله‌های نزدیک گسل از روش دینامیکی غیرخطی استفاده شود.

بررسی حرکت‌های قائم زمین در زلزله‌های مختلف نشان می‌دهد که حرکت قائم زمین به فاصله تا سایت مورد نظر و هم‌چنین، نسبت طیف پاسخ عمودی به افقی و زمان تناوب سازه وابسته است. این نسبت در نواحی حوزه نزدیک در زمان تناوب‌های کوتاه بیشتر است و تا مقدار ۳/۲ نیز می‌رسد. در زمان تناوب‌های بلندتر، از مقدار این نسبت کاسته می‌شود [۱۳]. در پژوهش هو و همکاران [۱۴] با بررسی‌هایی که بر روی یک قاب فلزی سه طبقه انجام دادند، دریافتند که هم‌زمانی دامنه‌ی حداکثر مولفه‌ی قائم و افقی زلزله تأثیر بسیار بزرگی بر روی پاسخ سازه دارد. هم‌چنین، آن‌ها به این نتیجه رسیدند که اگر بیشینه شتاب افقی و قائم زلزله هم‌زمان نباشد، بیشینه نیروی کششی در ستون‌های سازه باید به کمک نیروی محرک قائم زلزله تعیین شود. نتیجه‌های پژوهش یزدی و همکاران [۱۵] نشان می‌دهد که در مکان‌های نزدیک‌تر به منبع زلزله، تداوم زمین لرزه شدیدتر و سرعت طیفی سازه‌ها دارای مقدارهای بیشتری نسبت به مکان‌های دور از منبع زلزله هستند. طیف دامنه‌ی فوریه برای مولفه‌ی قائم حوزه

نزدیک بیشینه مقدار خود را در گستره‌ی خیلی کوچکی از فرکانس‌ها یا یک فرکانس مشخص دارد. مشخصه‌ی دیگری از زلزله‌های حوزه نزدیک در مقایسه با زمین لرزه‌های حوزه دور، این است که طیف پاسخ مولفه قائم بزرگ‌تر از طیف طراحی معرفی می‌شود. کوهرنگی و همکاران [۱۶] اثر مولفه‌ی قائم ۱۰ زلزله حوزه نزدیک که مطابق با آیین‌نامه مقیاس شده بودند را روی سه ساختمان فولادی ۴، ۸ و ۱۲ طبقه با مهاربندهای خارج از مرکز بررسی کردند. نتیجه‌ی تحلیل طیفی و تحلیل دینامیکی بر روی ساختمان‌ها نشان داد که اثر مولفه‌ی قائم با افزایش ارتفاع سازه بیشتر می‌شود و باید در ساختمان‌های بلند اثر مولفه‌ی قائم زلزله‌های حوزه نزدیک را منظور کرد. در پژوهش آن‌ها، بررسی ساختمان ۱۲ طبقه نشان داد که برش پایه و تغییرمکان جانبی حاصل از اثر مولفه‌ی قائم زلزله‌های حوزه نزدیک بیشتر از اثر مولفه‌ی افقی زلزله‌ها می‌باشد. هم‌چنین، با انجام تحلیل طیفی و دینامیکی مشاهده شد که پاسخ‌های به‌دست آمده از تحلیل طیف میانگین زلزله‌های حوزه نزدیک بسیار بیشتر از پاسخ سازه حاصل از طیف طرح استاندارد آیین‌نامه می‌باشد و در نتیجه، طیف طرح نمی‌تواند نیاز لرزه‌ای سازه‌ها در برابر زلزله‌های حوزه نزدیک را برآورده کند. در پژوهشی دیگر، Xiang و همکاران [۱۷] اثر مولفه‌ی قائم زلزله‌های دور و نزدیک گسل بر سازه‌ها را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که یکی از ویژگی‌های مولفه‌ی قائم زلزله که بر نوع خرابی ایجادشده تاثیر می‌گذارد، اثر نامتقارن مولفه‌ی قائم زلزله است. به عبارت دیگر، اثر مولفه‌ی افقی زلزله بر سازه، هنگامی که در راستای افقی و در جهت راست و یا در جهت چپ عمل می‌کند، یکسان است. ولی از آن‌جا که بارهای ثقلی همواره در جهت پایین بر سازه عمل می‌کنند، اثر مولفه‌ی قائم هنگامی که در راستای قائم و در جهت بالا عمل می‌کند با اثر آن در جهت پایین متفاوت است. از این رو، نوع خرابی ایجادشده در سازه بستگی به اثر ترکیبی مولفه‌های افقی و قائم در جهت‌های مختلف دارد. مولفه‌ی شتاب قائم از مشخصه‌های زلزله‌های حوزه نزدیک است که با افزایش فاصله نسبت به مرکز زلزله، مقدار آن با شدت بسیار شدیدتر از شتاب افقی کاهش می‌یابد. با بررسی مدل‌های ارایه‌شده، این نتیجه به‌دست آمد که از آن‌جایی که زمان تناوب سازه‌های بلند از زمان تناوب سازه‌های کوتاه و متوسط بیشتر است، سازه‌های بلند در زلزله‌های دور از گسل امکان تخریب بیشتری دارند. هم‌چنین، زلزله‌های حوزه نزدیک که پالس‌های موجود در رکورد مولفه قائم آن‌ها از شدت بیشتری برخوردار است.

در برخی از پژوهش‌ها به کمک تحلیل‌های غیرخطی، اثر استفاده از خاکستر بر افزایش مقاومت فشاری بتن [۱۸]، بهره‌جویی از کامپوزیت‌های مختلف برای افزایش مقاومت بتن [۱۹ و ۲۰] و هم‌چنین بهره‌جویی از مصالح هوشمند مانند آلیاژهای حافظه‌دار شکلی [۲۱] به‌ویژه در دال‌های بتنی دارای بازشو مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. در بیشتر پژوهش‌های پیشین که در زمینه‌ی ارزیابی اثر مولفه‌های قائم زلزله بر روی رفتار سازه‌ها انجام شده است، مقدار تغییرمکان جانبی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است [۲۲ - ۲۶]. در حالی که، خسارت‌های وارد بر ساختمان‌های مختلف بر اثر زمین لرزه، به‌صورت کلی ناشی از دو عامل اساسی جابجایی نسبی طبقه‌ها نسبت به یکدیگر و علاوه بر آن، شتاب ایجادشده در کف طبقه‌های ساختمان می‌باشد. تغییرشکل طبقه‌های ساختمان، در ارتفاع‌های مختلف، ایجاد جابجایی‌های نسبی می‌کند. از آن‌جا که طبقه‌ها در یک زمان و با یک سرعت حرکت نمی‌کنند، در هنگام وقوع زلزله، یک جابجایی نسبی افقی بین آن‌ها به وجود می‌آید. حتی گاهی بر اثر تغییر جهت نیروی وارده بر ساختمان، به علت همسان نبودن انتقال نیرو به تمامی طبقه‌ها، آن‌ها در جهت‌های مختلف حرکت می‌کنند که باعث تخریب دیوارهای داخلی، شکستن پنجره‌ها و انهدام تاسیسات خدماتی ساختمان می‌شود و امکان بهره‌برداری از آن را سلب می‌کند. از طرف دیگر، شتاب ناشی از زلزله به کف‌های ساختمان که محل تمرکز جرم سازه می‌باشند منتقل می‌شود و در هر کف، شتابی متناسب با جرم آن به‌وجود می‌آید. از این رو، مساله‌ی اصلی برای فراهم کردن مقاومت لرزه‌ای یک ساختمان، علاوه بر چگونگی به حداقل رساندن تغییرمکان بین طبقه‌ای، کاهش شتاب‌های به‌وجود آمده در طبقه‌های آن است. از این رو، در این پژوهش، به‌منظور پیشبرد پژوهش‌های پیشین و ارزیابی همه‌ی عامل‌های موثر بر رفتار سازه‌ها در برابر مولفه‌ی قائم زلزله، با تمرکز بر دو عامل جابجایی و شتاب، به بررسی اثر مولفه‌ی قائم زلزله

بر دال‌های بتنی دارای بازشو پرداخته شده است. برای این منظور ساختمان‌های بتنی ۵، ۸ و ۱۲ طبقه دارای دال‌های بتنی با ۰، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درصد بازشو تحت اثر سه رکورد زلزله حوزه نزدیک بم، نورتریچ و السنترو قرار گرفتند و به کمک تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی مقایسه‌ای بین تغییرمکان‌ها و تنش‌های ایجاد شده در آن‌ها انجام شد. در ادامه به بررسی مدل‌های عددی و نتیجه‌های به دست آمده از آن‌ها پرداخته می‌شود.

## ۲- مدل‌های عددی

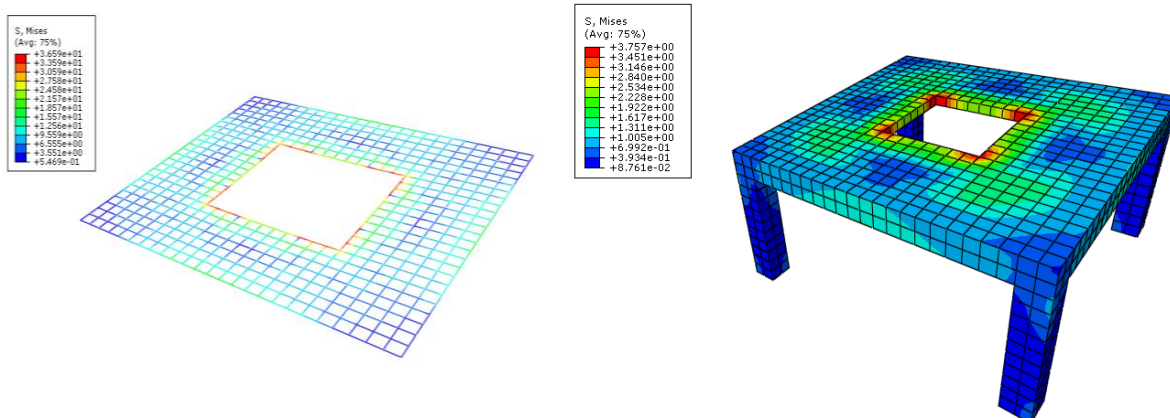
در این پژوهش، ابتدا سه سازه با تعداد ۵، ۸ و ۱۲ طبقه در نرم افزار Etabs مدل‌سازی شدند، مقطع‌های هندسی عضوهای آن‌ها طراحی شد و ویژگی‌های هندسی سازه‌ها به دست آمدند. با توجه به این‌که سازه‌ها دارای تعداد طبقات مختلفی بودند، به منظور مقایسه درست تر و از بین بردن تاثیر مقاطع برای همه‌ی موردها با توجه به طراحی انجام شده، تیرها و ستون‌های سازه‌های مختلف به صورت یکسان و معادل مقطع‌هایی با ابعاد  $500\text{ mm} \times 500\text{ mm}$  و ابعاد دال‌های بتنی نیز برابر  $5\text{ m} \times 5\text{ m}$  و ضخامت همه‌ی آن‌ها برابر  $200\text{ mm}$  در نظر گرفته شدند. از سوی دیگر، به منظور بررسی تاثیر بازشو در دال‌های بتنی، چهار حالت بازشو با نسبت‌های ۰، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درصد مورد بررسی قرار گرفتند.

در این پژوهش از روش تاریخچه زمانی غیرخطی به کمک سه زلزله‌ی حوزه نزدیک بم، نورتریچ و السنترو برای تحلیل سازه‌ها استفاده شده است. برای این منظور، هر یک از این زلزله‌ها به طور هم‌زمان در سه راستای متعامد به سازه اعمال شده است و خروجی آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده‌اند. باید اشاره کرد که مطابق با ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ [۸] رکوردهای راستای افقی با ترکیب ۱۰۰ درصد رکورد قوی‌تر و ۳۰ درصد رکورد ضعیف‌تر و هم‌چنین رکورد راستای قائم نیز به صورت ۱۰۰ درصد اعمال شده‌اند. جدول ۱، ویژگی‌های سازه‌های مورد بررسی در این پژوهش را گزارش کرده است.

جدول ۱: ویژگی‌های مکانیکی مصالح فولاد و بتن

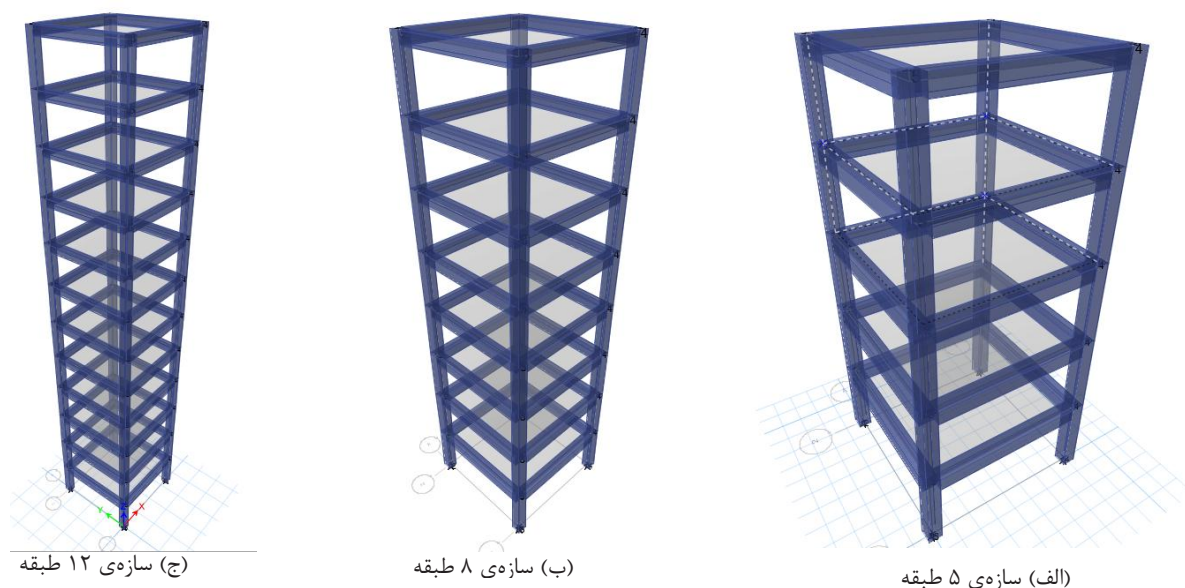
مقدار	ویژگی	مصالح
۷۸۵۰	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	فولاد
۲۰۰	ضریب کشسانی (GPa)	
۴۰۰	تنش تسلیم (MPa)	
۰/۳	ضریب پواسن	
۲۵۰۰	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	بتن
۲۳	ضریب کشسانی (GPa)	
۲۵	مقاومت فشاری (MPa)	
۰/۲	ضریب پواسن	

در این پژوهش، پیش از انجام مدل‌سازی در نرم‌افزار Etabs، به منظور ارزیابی رفتار دال‌های بتنی همراه با بازشو، ابتدا دال‌های مورد نظر با درصدهای بازشو مختلف در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی شدند. شکل ۱ نمایی از دال با بازشو که در نرم‌افزار ABAQUS [۲۷] مدل‌سازی شده است را نشان می‌دهد. در الگوهای عددی ساخته شده در آباکوس، تمرکز بر رفتار دال‌ها تحت اثر مولفه‌های قائم زلزله‌ها بوده است و از این رو، تیرهای زیرسری دال‌ها دارای ارتفاعی برای با ضخامت دال‌ها و عرضی برابر با عرض ستون‌های متصل به آن‌ها در نظر گرفته شدند که دال‌ها با تکیه‌گاه‌های ساده بر روی تیرهای زیرین در نظر گرفته شدند.



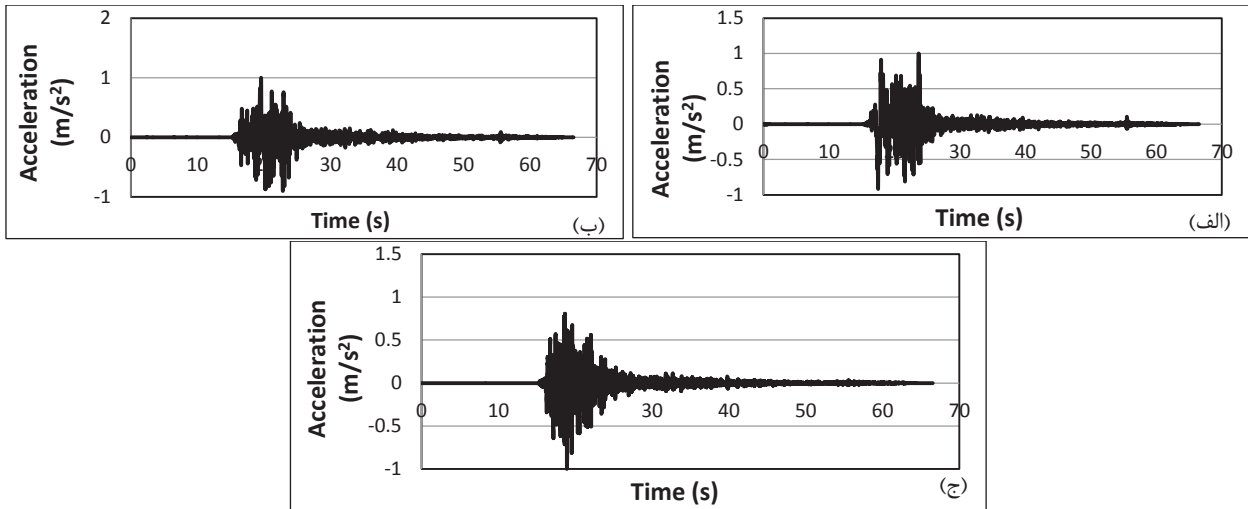
شکل ۱: نمایی از مدل سازی دال بتنی همراه با بازشو در نرم افزار ABAQUS

پس از ارزیابی رفتار دال‌های بتنی همراه با بازشو در نرم‌افزار ABAQUS، مطابق با شکل ۲، مدل عددی هر یک از سازه‌های ۵، ۸ و ۱۲ طبقه در نرم‌افزار Etabs [۲۸] ساخته می‌شود. از نتیجه‌های الگوهای عددی در آباکوس برای تعیین ویژگی‌ها و بیشینه تنش‌های ایجادشده در دال‌ها و به‌ویژه میزان تمرکز تنش در گوشه‌های بازشوها استفاده شده است. بر اساس این نتیجه‌ها، دال‌های دارای بازشو به‌صورت المان‌های صفحه‌ای در نرم‌افزار ایتبس الگوسازی شدند.

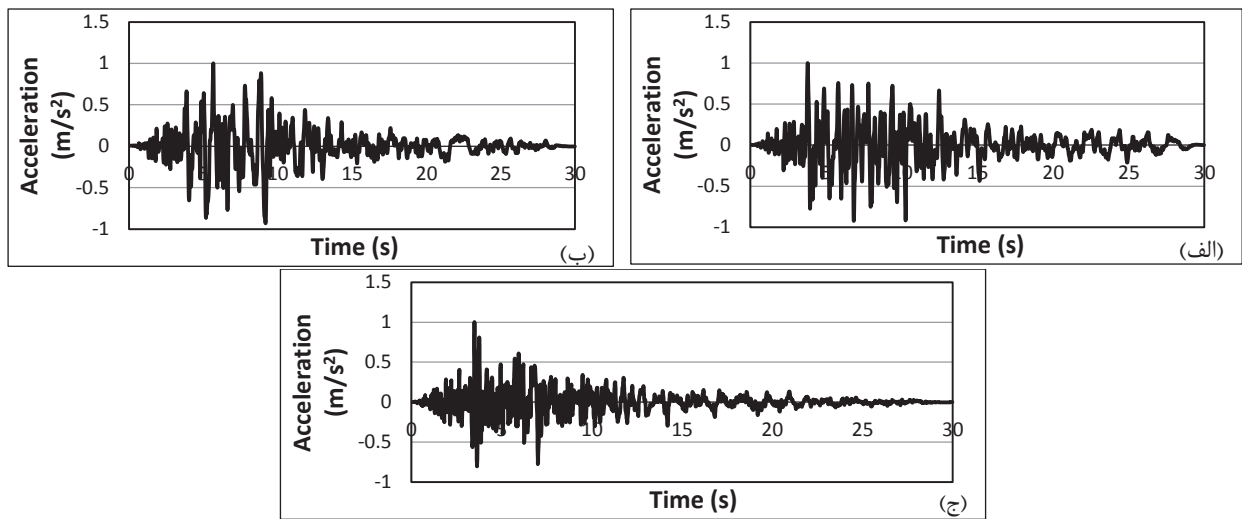


شکل ۲: مدل عددی سازه‌ها در نرم‌افزار Etabs: (الف) ۵ طبقه؛ (ب) ۸ طبقه و (ج) ۱۲ طبقه

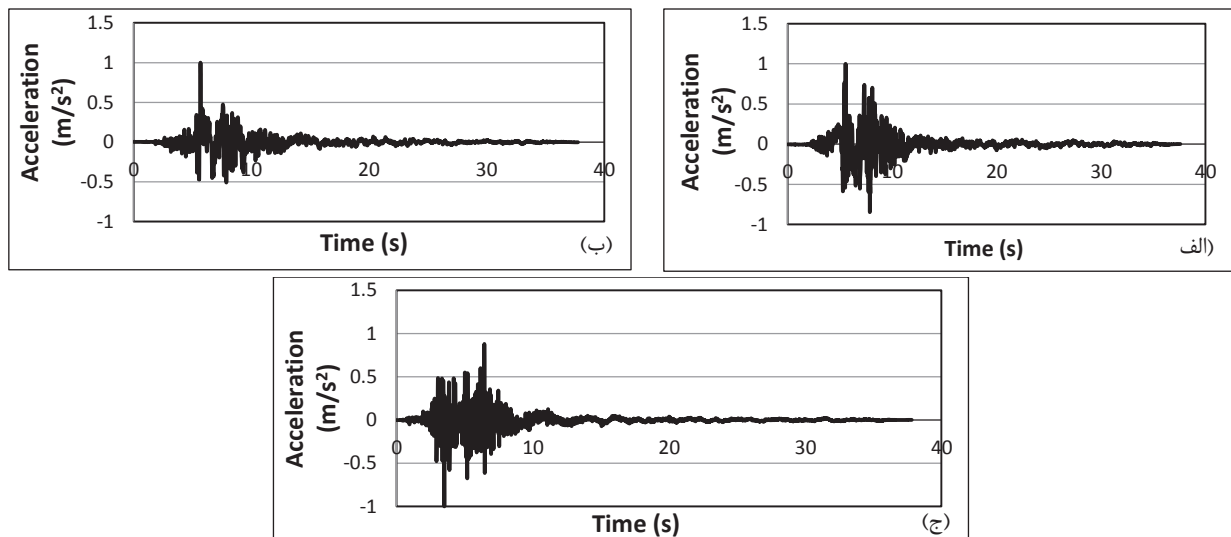
برای انجام تحلیل تاریخچه‌ی زمانی در این پژوهش، سه رکورد حوزه‌ی نزدیک گسل بم، نورتریچ و السنترو در سه راستای X، Y و Z برای انجام تحلیل عددی در نظر گرفته شدند که به‌ترتیب در شکل ۳ تا شکل ۵ نشان داده شده‌اند.



شکل ۳: رکورد زلزله‌ی بم: الف) راستای X؛ ب) راستای Y و ج) راستای Z

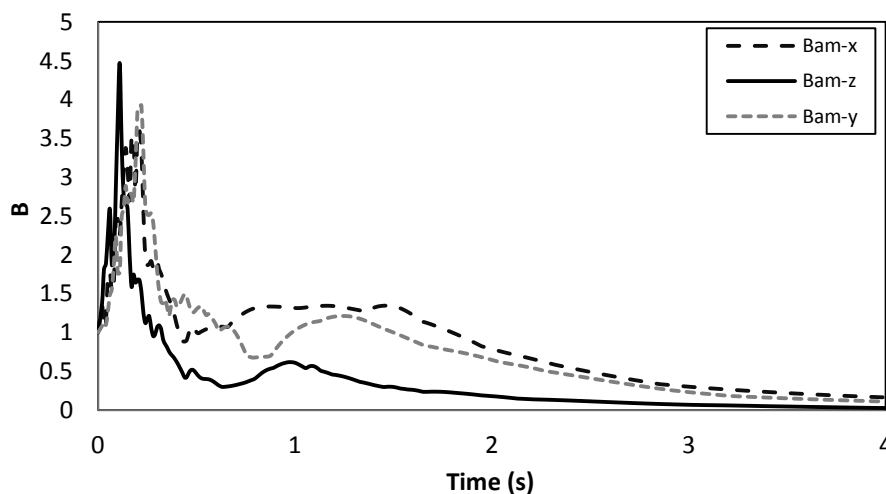


شکل ۴: رکورد زلزله‌ی نورتریج: الف) راستای X؛ ب) راستای Y و ج) راستای Z

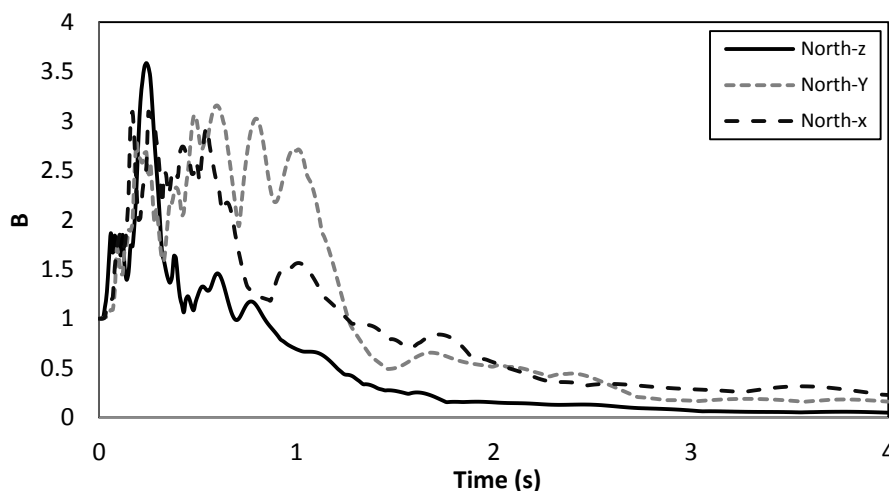


شکل ۵: رکورد زلزله‌ی السنترو: الف) راستای X؛ ب) راستای Y و ج) راستای Z

برای انجام تحلیل تاریخچه‌ی زمانی، در ابتدا باید رکوردهای زلزله به بزرگ‌ترین مقدار خود مقیاس شوند، به‌طوری که بزرگ‌ترین مقدار شتاب برابر ۱ شود. برای این منظور، ابتدا باید طیف پاسخ هر یک از رکوردهای زلزله برای میرایی ۵ درصد رسم شود. شکل ۶ تا شکل ۸ به‌ترتیب طیف زلزله‌های مربوط به رکوردهای بم، نورتریچ و السنترو را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، طیف پاسخ رکورد بم در پریود پایین تک‌قله‌ی بلندی دارد و این بازتاب در زمان کوتاهی اتفاق می‌افتد. نکته حائز اهمیت آن‌که در طیف پاسخ زلزله بم حداکثر طیف پاسخ متعلق به راستای قائم است. مطابق با شکل ۷، طیف پاسخ زلزله‌ی نورتریچ با قدرت زیادی تا حدود پریود ۱/۵ ثانیه ادامه پیدا می‌کند. در این حالت نیز زلزله قائم نسبت به دو راستای افقی حداکثر مقدار بیشتری دارد. در شکل ۸ مشاهده می‌شود که در طیف پاسخ زلزله السنترو نیز چند قله در پریود پایین اتفاق می‌افتد و در این زلزله حداکثر مقدار راستای قائم بین دو راستای متعامد افقی قرار دارد.

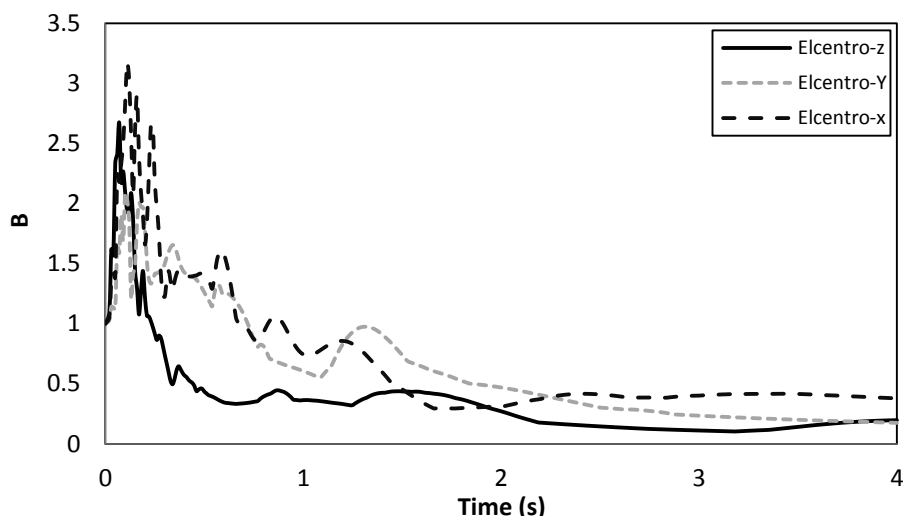


شکل ۶: نمودار طیف پاسخ زلزله بم



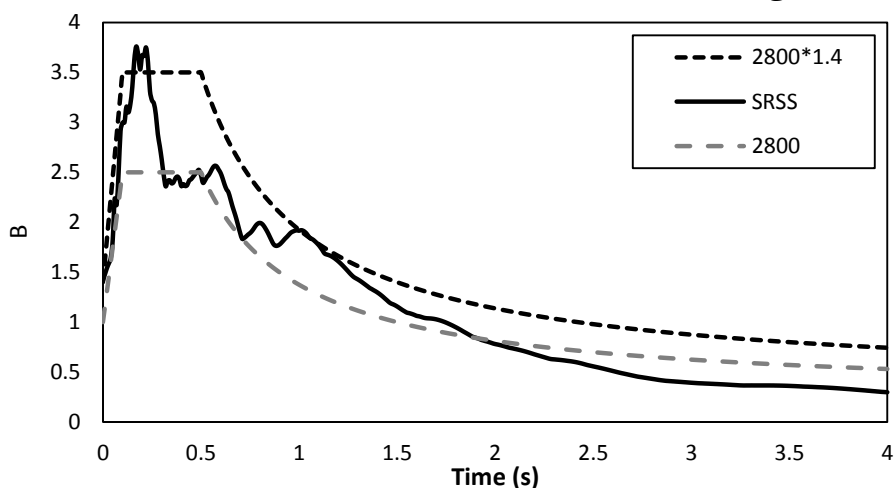
شکل ۷: نمودار طیف پاسخ زلزله نورتریچ





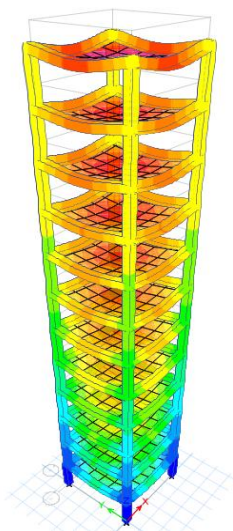
شکل ۸: نمودار طیف پاسخ زلزله السنترو

ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ و نشریه ی ۳۶۰ بیان می کنند که برای مقیاس نمودن رکوردها بایستی طیف های پاسخ ترکیبی سه زوج شتاب نگاشت به روش جذر مجموع مربعات متوسط گیری شده و در محدوده زمان های تناوب  $0.2T$  تا  $1.5T$  با طیف طرح استاندارد مقایسه شود و ضریب مقیاس آن چنان تعیین شود که در محدوده ی مقادیر متوسطها در هیچ حالت کم تر از  $1/4$  برابر مقدار نظیر آن در طیف استاندارد نباشد. از آن جایی که برای زلزله قائم طیف پاسخ استاندارد در آیین نامه ۲۸۰۰ تعریف نشده است، برخی از مرجع های دیگر [۱] بیان می دارند برای این حالت ضریب مقیاس برای دو راستای افقی بر اساس طیف پاسخ محاسبه شود و برای راستای قائم نیز همان مقدار ضریب مقیاس در نظر گرفته شود. در شکل ۹ مقایسه ی طیف پاسخ ۲۸۰۰ مقیاس شده با متوسط جذر مجموع مربعات رکوردهای افقی سه زلزله نشان داده شده است.

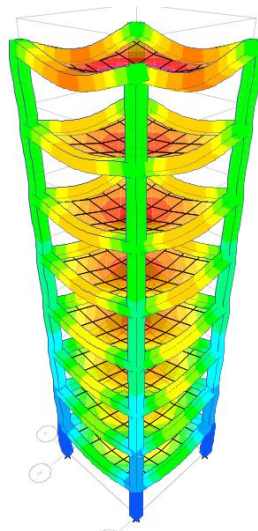


شکل ۹: مقایسه طیف پاسخ ۲۸۰۰ مقیاس شده با متوسط جذر مجموع مربعات رکورد های افقی سه زلزله

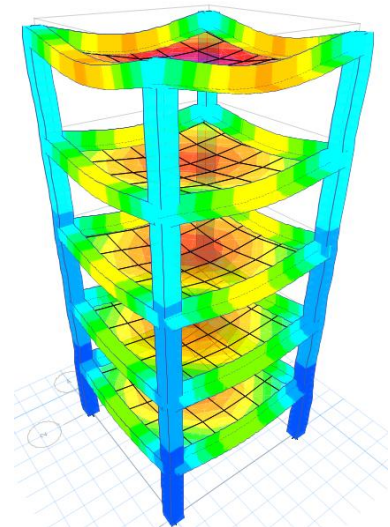
پس از تعیین ضریب مقیاس هر یک از زلزله ها در دو راستای افقی متعامد و راستای قائم، شتاب نگاشت های مقیاس شده در هر سه راستا به طور هم زمان بر هر یک از الگوهای عددی ساختمان های ۵، ۸ و ۱۲ طبقه اعمال شدند. به عنوان نمونه، شکل ۱۰ و شکل ۱۱ به ترتیب تغییر شکل های سازه های ۵، ۸ و ۱۲ طبقه در دو حالت دارای دال های بدون باز شو و دارای دال های بتنی با ۳۰ درصد باز شو را تحت بار ثقلی به همراه مولفه های قائم بار زلزله ها نشان می دهند.



(ج) سازه‌ی ۱۲ طبقه

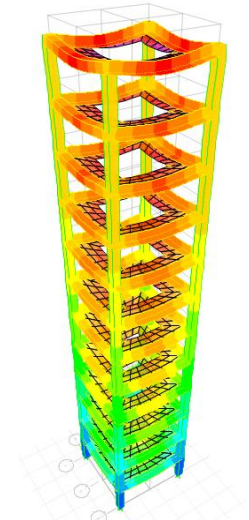


(ب) سازه‌ی ۸ طبقه

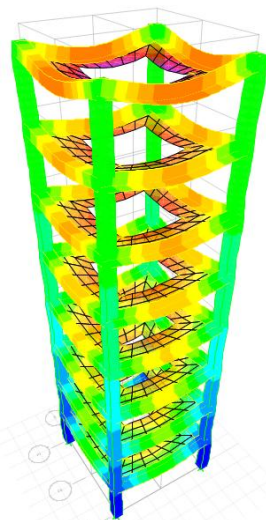


(الف) سازه‌ی ۵ طبقه

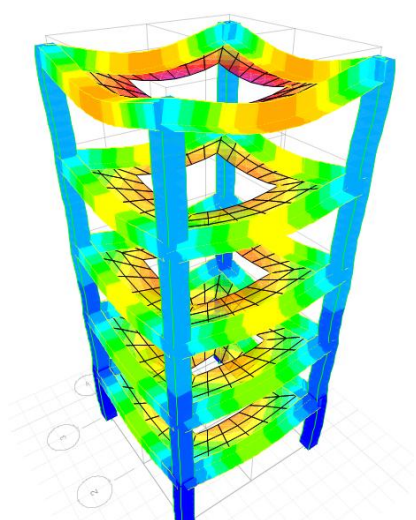
شکل ۱۰: تغییرشکل‌های سازه‌های دارای دال بتنی بدون بازشو تحت بار ثقلی و مولفه‌های قائم بار زلزله



(ج) سازه‌ی ۱۲ طبقه



(ب) سازه‌ی ۸ طبقه



(الف) سازه‌ی ۵ طبقه

شکل ۱۱: تغییرشکل‌های سازه‌های دارای دال‌های بتنی با ۳۰ درصد بازشو تحت بار ثقلی و مولفه‌های قائم بار زلزله

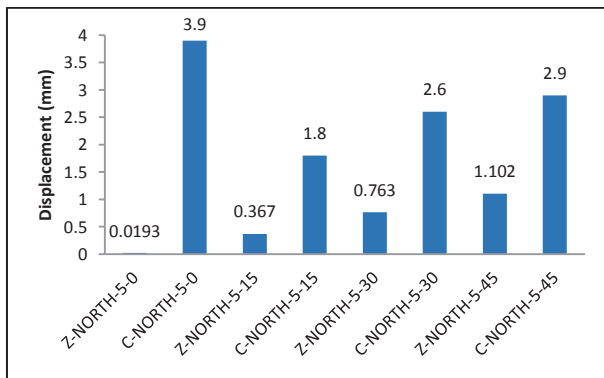
### ۳- نتیجه‌ها

رفتار و تغییرشکل دال‌ها در سازه‌های مختلف تحت اثر عوامل گوناگونی مانند نوع و شدت رکورد زلزله، سختی و درجه‌ی آزادی دال، طول دال طره‌ای شده، سطح بارگیر دال و طیف پاسخ طبقات سازه قرار دارد. هر یک از این عامل‌ها بر نتیجه‌های به‌دست آمده تا حدودی زیاد تاثیر می‌گذارند. از این رو، بررسی و نتیجه‌گیری کلی و تعمیم این نتیجه برای همه‌ی موردها کار دشواری است. با این رویکرد، در این پژوهش بیشینه تغییرمکان و بیشینه شتاب ایجادشده در دال‌های بتنی با درصدهای مختلف بازشو مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. در ادامه، نتیجه‌های این ارزیابی ارائه می‌شوند.

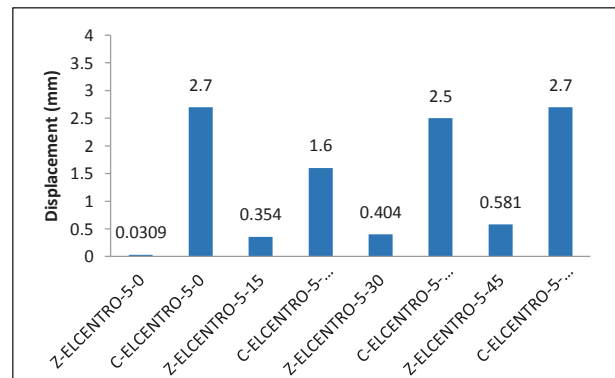
### ۱-۳- بیشینه تغییرمکان

با توجه به این که در این مقاله چهار حالت بازشو برای سازه‌های بررسی شده در نظر گرفته شده است، در حالت بدون بازشو، بازتاب تغییرمکان برای طبقات مختلف محاسبه شد و نتیجه‌ها نشان داد که بیشترین تغییر مکان در بالاترین طبقه اتفاق می‌افتد. از این رو، بررسی نمودارهای تاریخچه پاسخ تغییرمکان وسط دال در دال‌های بدون بازشو و تغییرمکان گوشه‌ی بازشو در دال‌های دارای بازشو نشان می‌دهد که بیشترین اثر زلزله بر سازه در محدوده‌ی زمانی ۱۰ ثانیه‌ای می‌باشد که قبل و بعد از این زمان، سازه تغییرشکل‌های بزرگی را تجربه نمی‌کند. رکورد های نورتریج و السنترو در حدود ۵ تا ۱۵ ثانیه بیشینه تغییرمکان‌ها را تجربه کرده‌اند ولی در رکورد بم این تغییرمکان‌های بزرگ در بازه زمانی ۲۰ تا ۳۰ ثانیه رخ داده است. نتیجه‌ها نشان می‌دهند که، شدت این تغییر مکان‌ها در رکوردهای مختلف و در سازه‌های با طبقات و درصدهای مختلف بازشو متفاوت است. از طرف دیگر، در حالت بدون بازشو در هر سه سازه، بیشینه تغییرمکان به سمت بالا و پایین در زمان‌های متفاوتی رخ داده است، ولی در حالت‌های دارای بازشو، این دو مقدار در یک زمان اتفاق افتاده است.

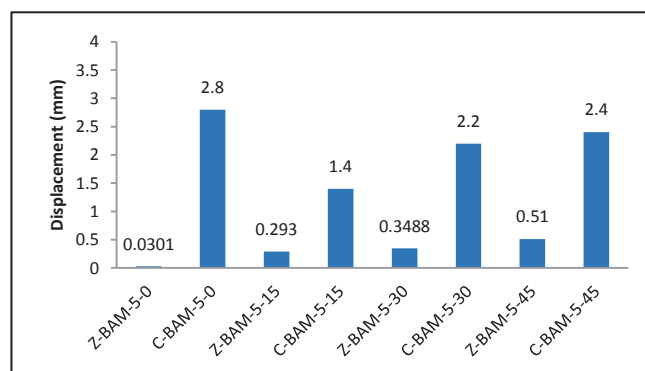
بیشینه تغییرمکان سازه‌های ۵، ۸ و ۱۲ طبقه به ترتیب در شکل ۱۲، شکل ۱۳ و شکل ۱۴ نشان داده شده است. در این شکل‌ها، نام‌گذاری مدل‌ها به صورت چندبخشی انجام شده است تا شناسایی آن راحت‌تر باشد. در بخش اول، C نشان‌گر سازه تحت زلزله‌ی ترکیبی و Z نشانگر اعمال رکورد راستای قائم به مدل می‌باشد. بخش دوم، نام رکورد زلزله و بخش سوم تعداد طبقات را نشان می‌دهد. بخش پایانی این نام‌گذاری درصد بازشو در دال را بیان می‌کند. به عنوان نمونه، مدل Z-Bam-8-30 بیانگر سازه ۸ طبقه با ۳۰ درصد بازشو و تحت اثر رکورد قائم زلزله بم می‌باشد.



(ب)

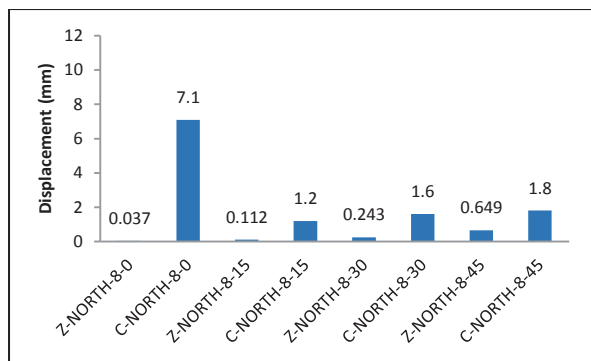


(الف)

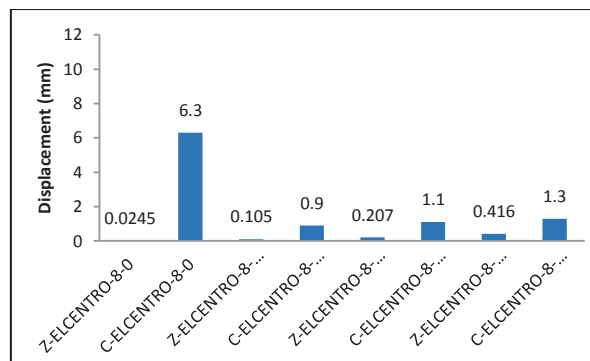


(ج)

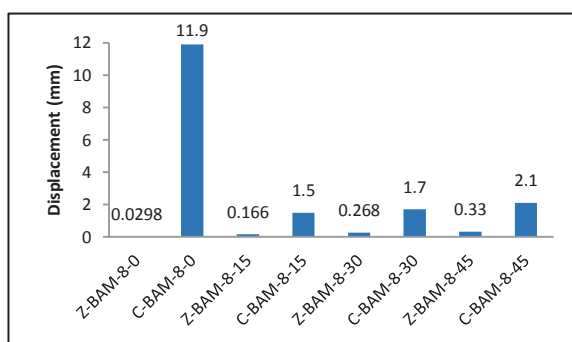
شکل ۱۲: مقایسه‌ی تغییرمکان سازه‌ی ۵ طبقه تحت راستای قائم و ترکیبی زلزله‌های: (الف) السنترو؛ (ب) نورتریج و (ج) بم



(ب)

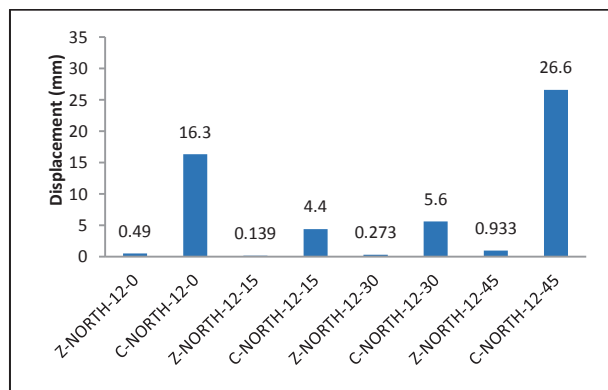


(الف)

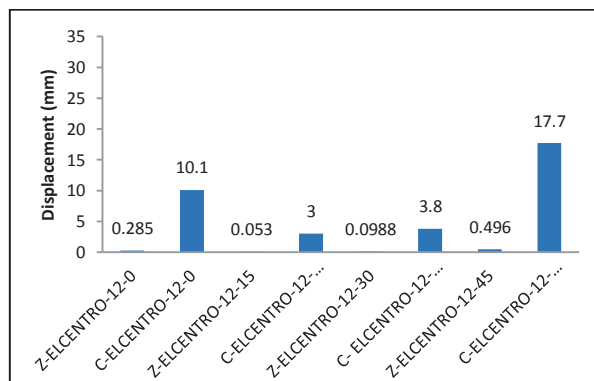


(ج)

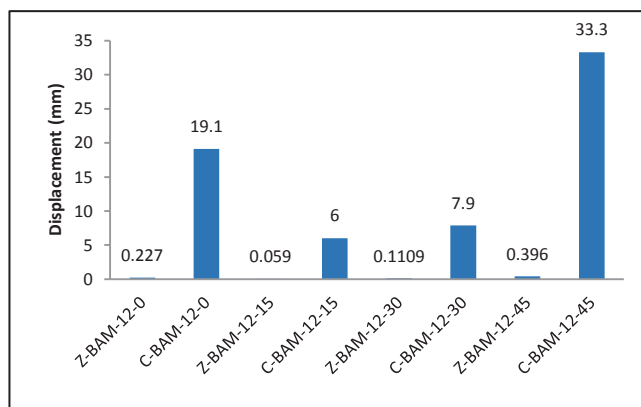
شکل ۱۳: مقایسه‌ی تغییرمکان سازه‌ی ۸ طبقه تحت راستای قائم و ترکیبی زلزله‌های: الف) السنترو؛ ب) نورتریج و ج) بم



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۱۴: مقایسه‌ی تغییرمکان سازه‌ی ۱۲ طبقه تحت راستای قائم و ترکیبی زلزله‌های: الف) السنترو؛ ب) نورتریج و ج) بم

مطابق با شکل ۱۲، در سازه‌های ۵ طبقه، سازه بدون بازشو در همه‌ی رکوردهای زلزله بیشترین مقدار تغییرمکان قائم را نشان می‌دهد و در سازه‌های دارای بازشو، با افزایش درصد بازشو، تغییرمکان قائم دال افزایش می‌یابد، ولی هم‌چنان به مقدار تغییرمکان دال بدون بازشو نمی‌رسد. بیشترین میزان این تغییرمکان تحت رکورد زلزله نورتریج برای سازه بدون بازشو برابر ۴ میلی‌متر بوده است. در سازه‌های دارای بازشو نیز بیشترین تغییر مکان مربوط به سازه با ۴۵ درصد بازشو و تحت رکورد نورتریج بوده است که برابر ۲/۹ میلی‌متر می‌باشد.

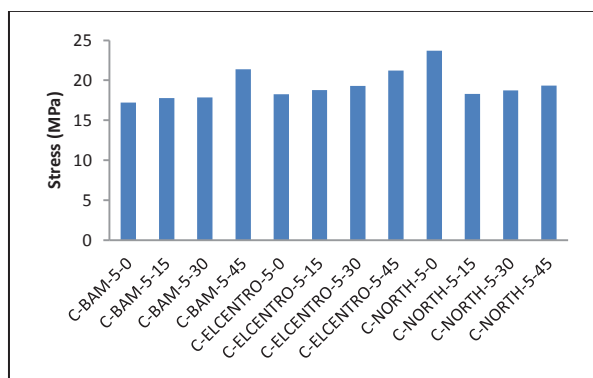
بررسی شکل ۱۳ نشان می‌دهد که در سازه‌های ۸ طبقه، مهم‌ترین نکته‌ی حائز اهمیت اختلاف چند برابری دال‌های بدون بازشو و دارای بازشو تحت اثر هر یک از سه رکود زلزله است. در این حالت، بیشترین تغییر مکان قائم مربوط به سازه بدون بازشو تحت زلزله بم برابر ۱۱/۹ میلی‌متر می‌باشد. در دال‌های دارای بازشو نیز بیشترین تغییرمکان قائم مربوط به دال ۴۵ درصد بازشو و تحت زلزله بم برابر ۲/۱ میلی‌متر می‌باشد.

نتیجه‌های ارایه‌شده در شکل ۱۴ نشان می‌دهد که در سازه‌های ۱۲ طبقه، بر خلاف سازه‌های ۵ و ۸ طبقه، بیشترین تغییرمکان در دال‌های دارای ۴۵ درصد بازشو رخ داده است. در این حالت نیز، بیشترین تغییرمکان قائم مربوط به سازه‌ی دارای دال‌هایی با ۴۵ درصد بازشو و تحت زلزله بم بوده است.

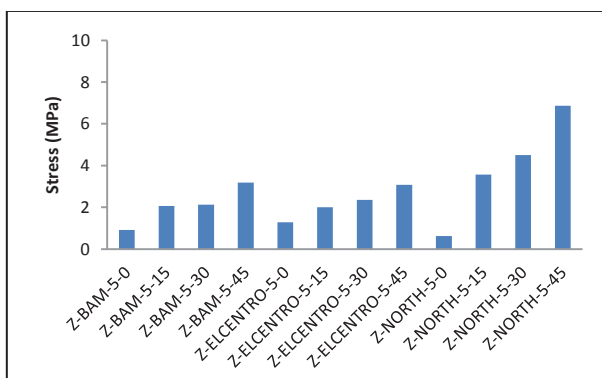
در حالت کلی می‌توان بیان کرد که در سازه‌هایی که تنها تحت اثر رکود زلزله در راستای قائم قرار گرفته‌اند، نتیجه‌ها نشان می‌دهند که در سازه‌های ۵ طبقه با افزایش میزان بازشو تغییرمکان دال نیز در تمامی رکوردها افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، در سازه‌های ۵ طبقه، بیشینه تغییرمکان دال‌ها در اثر رکوردهای ترکیبی در دال بدون بازشو رخ داده است، درحالی‌که در حالت زلزله در یک راستا، تغییر مکان حداکثر در دال با بیشترین بازشو رخ می‌دهد. در سازه‌های ۸ طبقه نیز روال به همین صورت است. ولی در سازه‌های ۱۲ طبقه، تغییرمکان دال‌های بدون بازشو از تغییرمکان دال‌های دارای ۱۵ و ۳۰ درصد بازشو بیشتر است، ولی در دال‌های دارای ۴۵ درصد بازشو، تغییرمکان افزایش می‌یابد. علاوه بر آن، با مقایسه‌ی تغییرمکان دو حالت ترکیب زلزله در راستاهای متعامد و زلزله در راستای قائم می‌توان بیان کرد که سهم زلزله‌ی راستای قائم در تغییرمکان دال‌ها نسبت به تغییرمکان دال‌ها در اثر ترکیب سه راستا مقدار قابل توجهی نمی‌باشد، به‌طوری‌که بیشینه تغییرمکان دال‌ها در اثر زلزله‌های راستای قائم در بیشتر موردها از ۱ میلی‌متر کم‌تر است.

### ۳-۲- بیشینه تنش برشی

علاوه بر بیشینه مقدار تغییرمکان، تنش ایجادشده در دال‌ها یکی از عامل‌های مهم در بررسی رفتار دال‌ها تحت اثر رکود زلزله‌های ترکیبی و قائم می‌باشد. در این مقاله، مطابق با شکل ۱۵، شکل ۱۶ و شکل ۱۷، به‌ترتیب، بیشینه شتاب‌های ایجادشده در دال‌های بتنی سازه‌های ۵، ۸ و ۱۲ طبقه با دال‌های دارای درصد‌های مختلفی از بازشو مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.

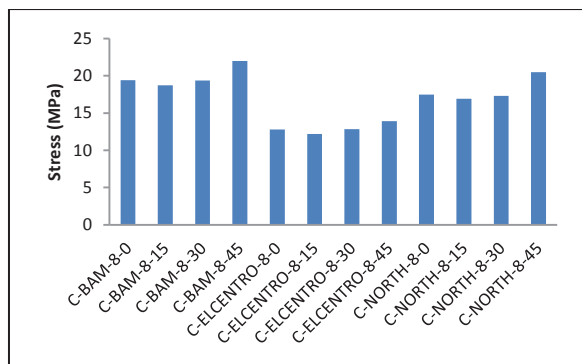


(ب)

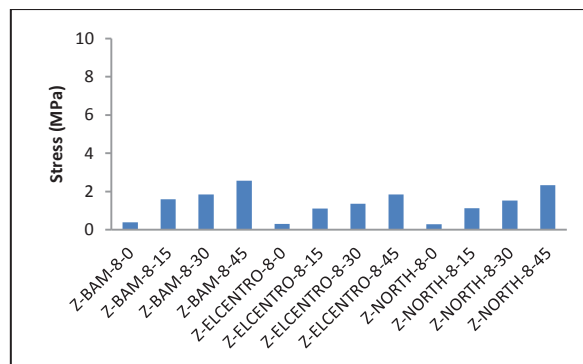


(الف)

شکل ۱۵: تنش دال بتنی در سازه ۵ طبقه تحت رکورد: الف) قائم؛ ب) ترکیبی

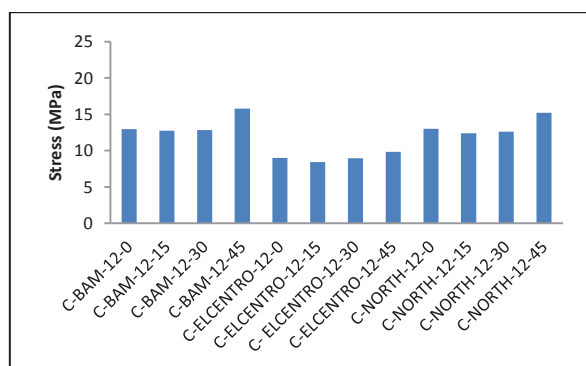


(ب)

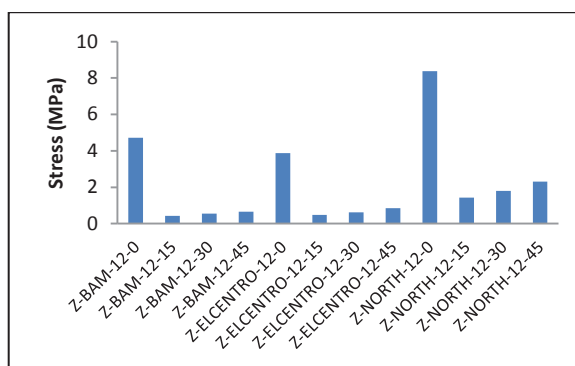


(الف)

شکل ۱۶: تنش دال بتنی در سازه ۸ طبقه تحت رکورد: (الف) قائم؛ (ب) ترکیبی



(ب)



(الف)

شکل ۱۷: تنش دال بتنی در سازه ۱۲ طبقه تحت رکورد: (الف) قائم؛ (ب) ترکیبی

بر اساس نتیجه‌های ارائه‌شده در شکل ۱۵، شکل ۱۶ و شکل ۱۷، می‌توان بیان کرد که تنش‌های ایجادشده با تغییرشکل‌های به‌وجود آمده در دال‌ها رابطه‌ی مستقیم دارد، به‌طوری‌که در مدل‌هایی که تغییرمکان بیشتری مشاهده شده است، تنش‌های ایجادشده نیز مقدارهای بالاتری را نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل ۱۵، شکل ۱۶ و شکل ۱۷ مشاهده می‌شود، در همه‌ی سازه‌ها، هم در زلزله ترکیبی و هم راستای قائم، با افزایش درصد بازشو، تنش ایجادشده در دال‌ها نیز افزایش می‌یابد. در سازه‌های مورد بررسی در این مقاله تحت زلزله قائم، بیشینه تنش حدود ۸ مگاپاسگال است که در سازه‌ی ۱۲ طبقه تحت زلزله قائم نورتریج رخ داده است. در اثر زلزله‌های ترکیبی، بیشینه تنش حدود ۲۳ مگاپاسگال است که در سازه‌ی ۵ طبقه تحت زلزله سه راستای متعامد نورتریج به‌وجود آمده است. در حالت کلی، نتیجه‌ی بررسی‌ها نشان می‌دهند که بیشینه تنش ایجادشده در دال‌ها در اثر رکوردهای راستای قائم در برخی از موردها به اندازه‌ی ۶۰ درصد بیشینه تنش‌های ایجادشده در اثر زلزله‌های ترکیبی می‌باشد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی اثر مولفه‌ی قائم زلزله بر دال‌های بتنی دارای بازشو پرداخته شده است. برای این منظور، ساختمان‌هایی با ۵، ۸ و ۱۲ طبقه دارای دال‌های بتنی با ۰، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درصد بازشو تحت اثر سه رکورد زلزله حوزه نزدیک بم، نورتریج و السنترو قرار گرفتند. سپس، مقایسه‌ای بین بیشینه تغییرمکان‌ها و تنش‌ها در اثر زلزله‌ها در سه راستای متعامد و فقط زلزله‌ها در راستای قائم به کمک تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی انجام شد. نتیجه‌ی بررسی تغییرمکان‌ها نشان می‌دهد که در حالت کلی تحت اثر رکود زلزله در راستای قائم، در سازه‌های ۵ طبقه با افزایش میزان بازشو تغییرمکان دال نیز در تمامی رکوردها افزایش می‌یابد. در این سازه‌ها، بیشینه تغییرمکان دال‌ها در اثر رکوردهای ترکیبی در دال بدون بازشو رخ داده است، درحالی‌که در حالت زلزله در یک راستا، تغییر مکان حداکثر در دال با بیشترین بازشو رخ می‌دهد. در سازه‌های ۸ طبقه نیز روال به همین صورت است. ولی در سازه‌های ۱۲ طبقه، تغییرمکان دال‌های بدون بازشو از تغییرمکان دال‌های دارای ۱۵ و ۳۰ درصد

بازشو بیشتر است، ولی در دال‌های دارای ۴۵ درصد بازشو، تغییرمکان افزایش می‌یابد. علاوه بر آن، با مقایسه‌ی تغییرمکان دو حالت ترکیب زلزله در راستاهای متعامد و زلزله در راستای قائم می‌توان بیان کرد که سهم زلزله‌ی راستای قائم در تغییرمکان دال‌ها نسبت به تغییرمکان دال‌ها در اثر ترکیب سه راستا مقدار قابل توجهی نمی‌باشد، به طوری که بیشینه تغییرمکان دال‌ها در اثر زلزله‌های راستای قائم در بیشتر موردها از ۱ میلیمتر کم‌تر است. مقایسه‌ی تنش‌ها در دال‌های بتنی نشان داد که تنش‌های ایجادشده با تغییرشکل‌های به وجود آمده در دال‌ها رابطه‌ی مستقیم دارد، به طوری که در مدل‌هایی که تغییرمکان بیشتری مشاهده شده است، تنش‌های ایجادشده نیز مقادیرهای بالاتری را نشان می‌دهند. در همه‌ی سازه‌ها، هم در زلزله ترکیبی و هم راستای قائم، با افزایش درصد بازشو، تنش ایجادشده در دال‌ها نیز افزایش می‌یابد. در سازه‌های مورد بررسی در این مقاله تحت زلزله قائم، بیشینه تنش در سازه‌ی ۱۲ طبقه و تحت اثر زلزله‌ی نورتریج رخ داده است، در حالی که در اثر زلزله‌های ترکیبی، بیشینه تنش در سازه‌ی ۵ طبقه تحت زلزله سه راستای متعامد نورتریج به وجود آمده است. در حالت کلی، نتیجه‌ی بررسی‌ها نشان می‌دهند که بیشینه تنش ایجادشده در دال‌ها در اثر رکوردهای راستای قائم در برخی از موردها به اندازه‌ی ۶۰ درصد بیشینه تنش‌های ایجادشده در اثر زلزله‌های ترکیبی می‌باشد.

## منابع

- [1] H. Kawase, Y. Mori, F. J. E. Nagashima, Planets et al., "Difference of horizontal-to-vertical spectral ratios of observed earthquakes and microtremors and its application to S-wave velocity inversion based on the diffuse field concept," vol. 70, no. 1, pp. 1, 2018.
- [2] B. J. K. J. o. C. E. Shrestha, "Seismic response of long span cable-stayed bridge to near-fault vertical ground motions," vol. 19, no. 1, pp. 180-187, 2015.
- [3] S. J. George, "Effects of Vertical Ground Motion on Seismic Performance of Reinforced Concrete Flat-Plate Buildings," 2016.
- [4] H. Abdollahiparsa, P. Homami, and F. J. K. J. o. C. E. Khoshnoudian, "Effect of vertical component of an earthquake on steel frames considering soil-structure interaction," vol. 20, no. 7, pp. 2790-2801, 2016.
- [5] Z. Gülerce, R. Kamai, N. A. Abrahamson et al., "Ground motion prediction equations for the vertical ground motion component based on the NGA-W2 database," vol. 33, no. 2, pp. 499-528, 2017.
- [6] L.-h. Zhao, X. Cheng, H.-c. Dan et al., "Effect of the vertical earthquake component on permanent seismic displacement of soil slopes based on the nonlinear Mohr-Coulomb failure criterion," vol. 57, no. 2, pp. 237-251, 2017.
- [7] I. S. Code, "Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings, Standard No. 2800 (3th Edition)," Building and Housing Research Center, Iran Google Scholar, 2005.
- [8] I. S. Code, "Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings, Standard No. 2800 (4th Edition)," Building and Housing Research Center, Iran Google Scholar, 2015.
- [9] F. Khoshnoudian, and H. V. Rezaei, "Response of pure-friction sliding structures to three components of earthquake excitation considering variations in the coefficient of friction," 2009.
- [10] C. K. Ng, T. J. Edward, and D. Lee, "Theoretical Evaluation on Effects of Opening on Ultimate Load-carrying Capacity of Square Slabs," vol. 8, no. 2008, 2004.
- [11] R. Khajehdehi, and N. Panahshahi, "Effect of openings on in-plane structural behavior of reinforced concrete floor slabs," vol. 7, pp. 1-11, 2016.
- [12] F. Hosseinpour, A. J. S. D. Abdelnaby, and E. Engineering, "Effect of different aspects of multiple earthquakes on the nonlinear behavior of RC structures," vol. 92, pp. 706-725, 2017.
- [13] A. Mosleh, H. Rodrigues, H. Varum, A. Costa, A. Arêde, "Seismic behavior of RC building structures designed according to current codes." In Structures (Vol. 7, pp. 1-13). Elsevier. 2016
- [14] H. Hou, W. Fu, W. Wang, B. Qu, Y. Chen, C. Qiu, "Horizontal seismic force demands on nonstructural components in low-rise steel building frames with tension-only braces." Engineering Structures, 168, 852-864. 2018.

- [15] S. M. Z. Yazdi, M. T. J. I. J. o. S. S. Kazemi, and Dynamics, "Investigation of Damages in RC Frames Under Near Field Earthquakes Using a Damage Index," vol. 16, no. 02, pp. 1450094, 2016.
- [16] M. Kohrangi, P. Bazzurro, D. Vamvatsikos, A. Spillatura, "Conditional spectrum-based ground motion record selection using average spectral acceleration." *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 46(10), 1667-1685. 2017
- [17] Y. Xiang, Y.-f. Luo, Q.-l. Huang et al., "Vertical ductility demand and residual displacement of roof-type steel structures subjected to vertical earthquake ground motions," vol. 104, pp. 259-275, 2018.
- [18] Jahangir, H., Bagheri, M., Delavari, S.M.J., "Estimation of Concrete Compressive Strength by Substitution of Pinyon Pine Ash for Cement (In Persian)" *Journal of Structural and Construction Engineering*, 2018; 5(Special Issue 2): 5-19. DOI: 10.22065/jsce.2018.126900.1517.
- [19] 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.
- [20] Jahangir, H., Esfahani, M.R., "Strain of Newly – Developed Composites Relationship in Flexural Tests (In Persian)" *Journal of Structural and Construction Engineering*, 2018; 5(Special Issue 3): 92-107. DOI: 10.22065/jsce.2017.91828.1255.
- [21] 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.
- [22] A. R. Salazar, A. J. C. Haldar, and Structures, "Structural responses considering the vertical component of earthquakes," vol. 74, no. 2, pp. 131-145, 2000.
- [23] V. Loghman, F. Khoshnoudian, M. J. J. o. V. Banazadeh et al., "Effect of vertical component of earthquake on seismic responses of triple concave friction pendulum base-isolated structures," vol. 21, no. 11, pp. 2099-2113, 2015.
- [24] F. J. B. o. E. E. Mazza, "Effects of near-fault vertical earthquakes on the nonlinear incremental response of rc base-isolated structures exposed to fire," vol. 14, no. 2, pp. 433-454, 2016.
- [25] F. Mazza, M. Mazza, and A. J. E. S. Vulcano, "Nonlinear response of rc framed buildings retrofitted by different base-isolation systems under horizontal and vertical components of near-fault earthquakes," vol. 12, pp. 135-144, 2017.
- [26] J. C. Guzman Pujols, K. L. J. E. E. Ryan, and S. Dynamics, "Computational simulation of slab vibration and horizontal-vertical coupling in a full-scale test bed subjected to 3D shaking at E-Defense," vol. 47, no. 2, pp. 438-459, 2018.
- [27] Hibbitt, Karlsson, Sorensen. *ABAQUS/Explicit: user's manual*. Hibbitt, Karlsson and Sorenson Incorporated; 2016.
- [28] Wilson EL, Hollings JP, Dovey HH. *ETABS: Three Dimensional Analysis of Building Systems (extended Version)*. National Information Service for Earthquake Engineering/Computer Applications, Earthquake Engineering Research Center, University of California; 2013.