

نمود اثر مودهای بالاتر در عملکرد لرزه‌ای اسکلت‌های قاب صلب میان مرتبه با رویکرد تحلیلی پوش آور مودال

ربحانه ربیعی^۱، افشین مشکوه‌الدینی^{۲*}، پیمان همایی^۳

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی، تهران

۲- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی، تهران

۳- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی، تهران

*تهران، صندوق پستی ۱۴۹۱۱-۱۵۷۱۹، meshkat@khu.ac.ir

چکیده

در این پژوهش ویژگی‌های رفتار غیرخطی دو سازه میان‌مرتبه با اسکلت قاب صلب دسته شده^۱ و قاب صلب ترکیبی مورد بررسی قرار گرفته و عملکرد لرزه‌ای آنها با تاکید بر اثر مودهای بالاتر مقایسه شده است. برای دستیابی به این هدف، مجموعه‌ای از رکوردهای حوزه نزدیک با در نظر گرفتن خصوصیات آنها برای انجام تحلیل‌های غیرخطی تاریخچه زمانی^۲، به منظور بررسی پاسخ لرزه‌ای انتخاب شدند. پارامترهای عملکرد لرزه‌ای هر یک از سازه‌های مطالعاتی، مانند بیشینه تغییر مکان جانبی، شتاب مطلق و تاریخچه زمانی دررفت طبقات با دقت ارزیابی شده‌اند. بر اساس نتایج این تحقیق ملاحظه گردید که ساختار تغییرات پارامترهای پاسخ لرزه‌ای، بستگی مستقیم به حضور اسپایک‌های پرنرژژی شتاب و ماهیت موج‌گونه رکورد زلزله دارد. همچنین دانسته شد که نمود متفاوت پالس‌های سرعت می‌تواند تاثیر ویژه‌ای در نیاز دررفت سازه داشته باشد. تمرکز دررفت در قسمت‌های بالایی سازه قاب صلب دسته شده نسبت به سازه قاب ترکیبی، قابل توجه‌تر است. با توسعه مفاهیم طراحی لرزه‌ای و ابزارهای محاسباتی، روش تحلیل استاتیکی غیرخطی بار افزون یا پوش آور^۳ بر اساس سادگی، سرعت انجام و سهولت تفسیر نتایج در مقایسه با روش تحلیل دینامیکی غیرخطی، مورد توجه می‌باشد. در این مقاله کارایی روش تحلیل استاتیکی غیرخطی بار افزون مودی یا پوش آور مودی^۴ بر روی هر دو سازه مطالعاتی فوق بررسی شده است. بررسی‌ها شامل مطالعه اندازه و دامنه تغییرات پارامترهای اصلی پاسخ لرزه‌ای سازه‌های مطالعاتی، حاصل از روش تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی و روش استاتیکی غیرخطی پوش آور مودی می‌باشد. نتایج این تحقیق مبین آن است که خطای روش MPA که مقادیر آن در تراز طبقات مختلف نیز متفاوت است، با توجه به تعداد مودهای ارتعاشی لحاظ شده، نوع پاسخ مورد نظر و نوع ساختار مقاوم لرزه‌ای تغییر می‌کند.

واژگان کلیدی

قاب صلب دسته شده، قاب صلب ترکیبی، رکورد حوزه نزدیک، پاسخ غیرخطی، مودهای بالاتر، تحلیل پوش آور مودی

Demonstration of the effect of higher modes on the seismic performance of middle-rise rigid frame skeletons with modal pushover analysis approach

R. Rabiei, A. Meshkat-Dini, P. Homami

Abstract

This research reviews the characteristics of strong ground motions in near-fault zones and analyzes their effects on the seismic behavior of mid-rise structures with two types of earthquake resistant skeletons. The studied structural models are mid-rise 10-story buildings with bundled tube and 3d moment frame skeletons. Also, the analytical capability of the modal pushover analysis (MPA) method has been studied based on the estimation of structural response parameters. The maximum inter-story drift, axial force, and roof maximum displacement of the studied structures were determined by conducting nonlinear dynamic time history analyses (NTHA) and the MPA method under the effects of lateral loads. An analytical comparison was accomplished among the obtained results. The processing point with the updated approach has also been investigated based on the effects of near-field earthquakes affected by various directivity processes, in the implementation of the analytical procedure and the computational efficiency of the modal pushover method. The results of this study show that the error of the modal pushover analysis method, the values of which also differ in the different floor levels, changes according to the number of vibration modes, the type of response parameter, and the type of seismic resistant structure.

Keywords

Bundled tube frame, 3D rigid frame, Near-field record, Nonlinear response, Higher modes, Modal pushover analysis

ویژگی‌های رفتار دینامیکی سازه‌ها از عوامل متعددی تبعیت می‌کند. فرضیات تحلیلی و مدل‌سازی، مشخصات اسکلت مقاوم، شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده، الزامات طراحی، طیف طرح، ساختار زمین‌شناسی منطقه پروژه از جمله مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در مشخصات رفتاری و پاسخ لرزه‌ای سازه هستند. در همین موضوع می‌توان به روش انتخاب رکوردهای زلزله برای انجام تحلیل‌های تاریخیچه زمانی سازه اشاره نمود. هر گاه مجموعه‌ای از شتاب‌نگاشت‌های زلزله بر اساس معیارهایی مانند بزرگا و فاصله انتخاب شوند، می‌توان تنوع چشمگیری را نیز در پاسخ‌های محاسبه شده سازه‌ها انتظار داشت. وجود ویژگی‌ها و ساختارهای فیزیکی گوناگون در ماهیت رکوردهای مختلف از یک زلزله، انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها را برای انجام تحلیل تاریخیچه زمانی بسیار دشوار می‌نماید [۱ و ۲]. توجه به این مقوله نیز در تبیین روش مقیاس‌گذاری شتاب‌نگاشت‌ها برای انجام تحلیل‌های تاریخیچه زمانی، تأثیرگذار خواهد بود. همچنین از آنجایی که انتخاب دقیق مجموعه‌های متفاوت از رکوردهای زلزله برای هر حالت حدی (سطح عملکردی) سازه غیرعملی است، بدین لحاظ فرایند مقیاس‌گذاری به عنوان یک رویه تحلیلی مؤثر، ضروری خواهد بود. یکی از موضوعات لرزه‌شناسی و طراحی لرزه‌ای، ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی حرکات نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل و اثرات آن‌ها بر عملکرد سازه‌ها به ویژه ساختمان‌های میان مرتبه تا بلند است. انجام پژوهش‌های جامع در موضوع شناخت حرکات پالس‌شکل و موج‌گونه زمین که از مشخصه‌های بارز جنبش‌های حوزه نزدیک گسل است، از دیدگاه بررسی رفتار لرزه‌ای سه بعدی سازه‌ها نیز دارای اهمیت بسزایی می‌باشد [۳ و ۴]. پارامتر پریرود پالس در ساختارشناسی این‌گونه رکوردهای نیرومند زلزله نقش مهمی ایفا می‌کند. در صورت نزدیک بودن پریرود پالس بزرگ موجود در تاریخیچه زمانی یک رکورد حوزه نزدیک به زمان تناوب طبیعی سازه، پارامترهای پاسخ لرزه‌ای تا میزان چشمگیری تشدید خواهند شد. یکی از مشخص‌ترین ویژگی‌های رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک، وجود پالس‌های بلند مدت در تاریخیچه سرعت جنبش زمین است. این ساختار موج‌گونه، انرژی جنبشی بسیار زیادی را در یک بازه زمانی به نسبت کوتاه به سازه وارد می‌نماید. اسکلت سازه باید بتواند این انرژی جنبشی را در چندین چرخه شدید رفت و برگشتی مستهلک نماید [۵-۷].

سازه‌های مطالعاتی در این پژوهش از دو نوع قاب صلب

سه بعدی با پیکربندی دسته شده و همچنین قاب صلب ترکیبی است. چندین اسکلت مقاوم با سازه پایه قاب محیطی همراه با چیدمان‌های مختلف المان‌های باربر جانبی، برای ساختمان‌های میان‌مرتبه تا بلند ابداع شده است. ساختارهای سازه‌ای قاب خمشی محیطی^۵، قاب محیطی با اسکلت ترکیبی کمر بند سخت‌کننده^۶، قاب خمشی محیطی دسته شده، سیستم لوله در لوله^۷ از جمله اسکلت‌های مقاوم یاد شده هستند.

طرح اسکلت‌های مذکور بر اساس پیکره ترکیبی سلول‌های صلب با آرایش و چیدمان هندسی مختلف است. سازه قاب صلب دسته شده در طرح ساختمان‌های میان‌مرتبه نیز کاربرد دارد. نکته دیگر آن که آرایش چند گانه سلول‌های صلب، سبب کاهش چشمگیر در برآیندهای تنش نامتقارن خمشی-برشی و اثرات لنگی برش^۸ می‌شود. پیکربندی هندسی سازه قاب صلب دسته شده نیز می‌تواند متفاوت باشد. بدین لحاظ، می‌توان بدون بر هم خوردن نظم و تقارن سازه، آرایش‌های متفاوت پلان را برای ترازهای ارتفاعی مختلف بدست آورد [۸-۱۰].

موضوع چگونگی لحاظ نمودن سهم مودهای بالاتر مربوط به پاسخ دینامیکی ساختمان‌های میان‌مرتبه تا بلند، یک مسئله پراهمیت در فرایند طراحی لرزه‌ای است. روند تأثیرگذاری اثرات مودهای بالاتر در دامنه تغییرات پاسخ مدل‌های چند درجه آزادی تحت حرکات لرزه‌ای، می‌تواند متغیر باشد. بدین لحاظ، پاسخ کلی سازه تا اندازه‌ای متفاوت از پاسخ متناظر با مود اول ارتعاش خواهد بود. مقدار این اثر به عوامل مختلف از قبیل نوع پارامتر پاسخ دینامیکی، مشخصات فیزیکی زلزله، پیکربندی سازه و سطح شکل‌پذیری بستگی دارد. همچنین، نادیده گرفتن مودهای بالاتر ممکن است به نتایج با تقریب زیاد منجر شود. حساسیت پاسخ سازه‌ها به اثرات مودهای بالاتر نیز متفاوت است [۱۱-۱۴]. بدین ترتیب در این پژوهش، با استفاده از رکوردهای مقیاس‌گذاری شده و انجام تحلیل‌های غیرخطی تاریخیچه زمانی، پارامترهای پاسخ لرزه‌ای سازه‌های مطالعاتی محاسبه شده و ارزیابی تحلیلی گردیده است. همچنین به منظور بررسی اثر مودهای بالاتر، روش MPA مورد استفاده قرار گرفته و از نتایج آنالیز تاریخیچه زمانی غیرخطی نیز برای ارزیابی روش پوش‌آور استفاده می‌شود [۱۵].

۲- ویژگی‌های رکوردهای حوزه نزدیک

پس از زلزله لوماپریتا^۹ ۱۹۸۹، Mohraz یک طبقه‌بندی سه‌گانه برای رکوردهای زلزله در نظر گرفت. رکوردهای حوزه نزدیک با فاصله بین سایت و گسل کمتر از ۲۰ کیلومتر، زمین‌لرزه‌های



حوزه میانه با فاصله مذکور میان ۲۰ تا ۵۰ کیلومتر و زمین‌لرزه‌های حوزه دور که با فاصله ثبت بیش از ۵۰ کیلومتر تعریف شوند. همچنین در برخی از مطالعات نیز فاصله ثبت رکوردهای حوزه نزدیک، کمتر از ۱۰ یا ۱۵ کیلومتر در نظر گرفته شده است [۱۶]. در فواصل نزدیک به یک گسل فعال، ماهیت جنبش‌های پر قدرت زمین توسط حرکات ضربه‌ای نیرومند کوتاه مدت، همراه با جابه‌جایی بزرگ (استاتیکی و دینامیکی ساختگاه) و محتوای فرکانسی پرنرژی شناخته می‌شود [۱۷]. تاریخچه زمانی رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک، دارای پالس‌های با پریود بلند است و نمود این پالس‌ها نیز بیشتر در شکل یک ساختار موجی شکل مشخص و یا ترکیبی از چند موجک پر دامنه می‌باشد.

نکته دیگر آن که تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک، پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها به شدت تحت تاثیر قرار گرفته و ویژگی‌های خاص در رفتار دینامیکی آنها ملاحظه می‌شود. رفتار مودگونه سازه که در آن مشارکت چند مود ارتعاشی در ترکیب با هم پاسخ نهایی را تعیین می‌کند، به رفتار موج‌گونه تاثیر پذیرفته از اثرات امواج منتشر شده در اسکلت مقاوم تبدیل می‌گردد. همچنین می‌توان به کاهش سریع پارامتر سختی، افزایش نیاز شکل‌پذیری، ایجاد محدودیت در کاربرد انواع چیدمان میراگرهای ویسکوز (اضافه شده) به اسکلت مقاوم اشاره نمود [۱۸]. هنگامی که پریود ارتعاشی سازه به نسبت بزرگ‌تر از پریود پالس سرعت باشد، در نظر گرفتن اثر محاسباتی مشارکت مودهای بالاتر نیز ضروری است. همچنین، افزایش نسبی برش پایه و بزرگ شدن دامنه تغییرات پارامترهای پاسخ سازه‌ها نیز تحت جنبش‌های نیرومند حوزه نزدیک ایجاد می‌شود [۱۹].

پتانسیل تخریب یک رکورد نیرومند حوزه نزدیک با ساختار فیزیکی پالس پیوسته و پر دامنه سرعت زمین ارتباط دارد. در همین راستا، توجه به پالس (احتمالی) و گروه اسپایک‌های پر دامنه شتاب زمین به همراه پالس پیوسته سرعت، اهمیت پیدا می‌نماید. دانسته شده که پالس‌های سرعت بویژه در ساختار پاسخ لرزه‌ای سازه‌های با پریود بالا (بیشتر از ۲ ثانیه) تاثیرات بزرگ دارند [۲۰].

ماهیت انتشار امواج نیرومند برشی در یک زلزله بزرگ و نیز تاثیرگذاری مکانیزم گسلش به گونه‌ای است که پالس‌های سرعت و تغییر مکان موجود در تاریخچه زمانی مولفه عمود بر صفحه شکست گسل (مولفه TR)، نمود مشخص و بزرگتری نسبت به مولفه موازی صفحه شکست (مولفه LN) دارند. همچنین، حرکات زمین بطور قابل ملاحظه‌ای متاثر از مکانیزم

گسیختگی و جهت انتشار شکست گسل نسبت به ساختگاه می‌باشد. وجود این عوامل می‌تواند منجر به نمود اثرات جهت‌داری گسیختگی^{۱۱} و نیز حرکت پرتابی^{۱۱} گردد.

فرایند گسیختگی گسل، شامل دو اثر مشخص‌تر جهت‌داری پیش‌رونده^{۱۲} و نیز پس‌رونده^{۱۳} است. هنگامی که فرایند گسیختگی در مکانیزم یک گسل شروع می‌شود، شکست از نقطه‌ای بر روی امتداد گسل ایجاد شده و بسته به محل آغاز گسیختگی، به سوی ابتدا یا انتهای گسل و یا هر دو جهت گسترش می‌یابد. این گسترش گسیختگی در امتداد راستای گسل با نام فرایند جهت‌داری گسیختگی (جهت‌داری شکست) شناخته می‌شود و برای ایجاد اثرات جهت‌داری پیش‌رونده، حضور دو عامل ضروری است. نخست آن که جهت انتشار گسیختگی به طرف سایت بوده و همچنین جهت لغزش گسل نیز هم راستا با تغییر مکان سایت باشد. ملاحظه شده که در تاریخچه زمانی یک رکورد دارای اثرات جهت‌داری پس‌رونده، ساختارهای موجی کم دامنه در یک بازه زمانی به نسبت طولانی به چشم می‌خورند و روند آزاد شدن انرژی جنبشی نیز در طی زمان به نسبت زیاد صورت می‌گیرد. همچنین بیشینه سرعت، شتاب و تغییر مکان در این حالت به مراتب کمتر از جنبش‌های نیرومند حاوی اثرات جهت‌داری پیش‌رونده است.

وقوع گام پرتابی در هنگام گسیختگی یک گسل، وابسته به تغییر شکل دائمی و نسبی لبه‌های گسل است. در این حالت حرکت یک لبه از گسل که ناشی از تغییر شکل تکتونیکی است بر مولفه جنبش موازی صفحه شکست اثر گذاشته و سرعت آن را افزایش می‌دهد. حرکات نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل، به شدت باعث آسیب رسیدن به ساختمان‌ها شده و سبب اعمال مقدار زیادی انرژی جنبشی به اسکلت مقاوم سازه می‌شوند. این حرکات نیازهای طراحی و تغییر مکان‌های بزرگتری را نسبت به یک رکورد حوزه دور به سازه تحمیل می‌کنند [۲۱ و ۲۲].

۱-۲- مشخصات رکوردهای انتخابی

دقت ارزیابی پارامترهای عملکردی و مشخصات طراحی لرزه‌ای به انتخاب مناسب رکوردها و مدل‌سازی دقیق المان‌های سازه‌ای وابسته است. همچنین انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها، مقیاس‌گذاری و انطباق طیفی آنها تاثیر بسیار مهمی بر روی نتایج تحلیل رفتار سازه دارد [۲۳]. رکوردهای انتخابی در این پژوهش و مهمترین پارامترهای فیزیکی آنها شامل بزرگای مومنتوم M_w ، بیشینه سرعت زمین (PGV) و بیشینه شتاب زمین (PGA) در جدول (۱) نمایش داده شده است. رکوردهای انتخابی از زلزله امپریال ولی^{۱۴} کالیفرنیا هستند. دو رکورد DLT و CAL از نوع حوزه دور بوده و

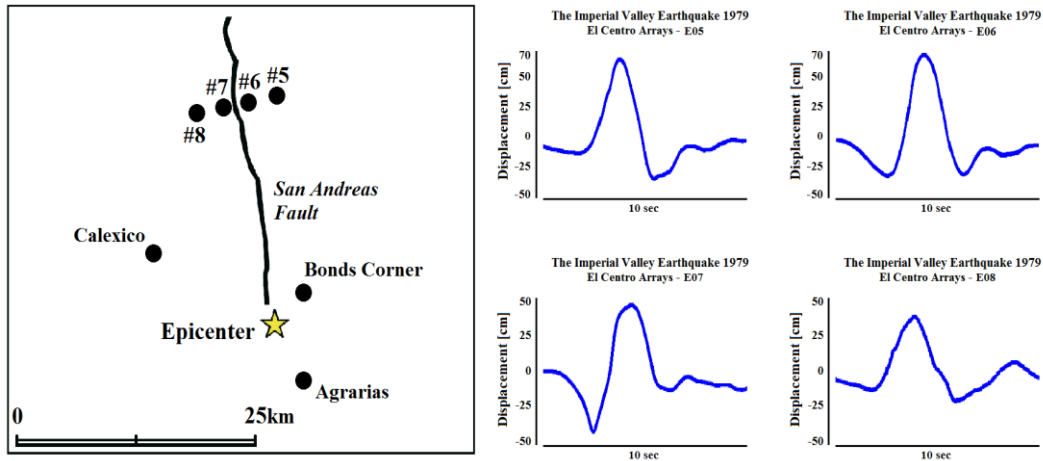
چهار رکورد حاوی اثرات نیرومند جهت‌داری پیش‌رونده می‌باشند. شکل (۲) تاریخچه زمانی سرعت رکوردهای حوزه نزدیک انتخابی را نشان می‌دهند. مولفه موازی با صفحه شکست گسل (مولفه LN) در راستای X پلان سازه‌های مطالعاتی، مولفه نیرومندتر TR در راستای Y پلان و مولفه قائم UP در جهت Z اسکلت مقاوم وارد گردیده اند. نکته دیگر آن که نیروهای جانبی ناشی از زلزله، عامل حاکم در ملاحظات طراحی ساختمان‌های طبقاتی بوده و دامنه جابجایی جانبی ساختمان‌های میان مرتبه تا بلند، نه تنها برای ایمنی و راحتی ساکنان بلکه برای کنترل اثرات ثانویه سازه‌ای نیز باید با دقت ارزیابی شوند [۹].

رکوردهای نیرومند E05 و E06 دارای اثرات جهت‌داری پیش‌رو و حاوی پالس‌های پردامنه هستند. رکوردهای BCR، AGR و CXO نیز به ترتیب دارای اثرات جهت‌داری پس‌رو (Agrarias)، اثرات ضعیف گسیختگی جهت‌داری همراه با اسپایک‌های پردامنه شتاب (Bonds Corner) و اثرات جهت‌داری خنثی حاوی اسپایک‌های کم‌دامنه شتاب و سرعت (Calexico) می‌باشند. شکل (۱) حوزه لرزه‌خیز دره امپریال کالیفرنیا و پالس‌های پردامنه و پیوسته تغییرمکان متناظر با مولفه TR رکورد شتاب ایستگاه‌های E05، E06، E07 و E08 را نشان می‌دهد. این

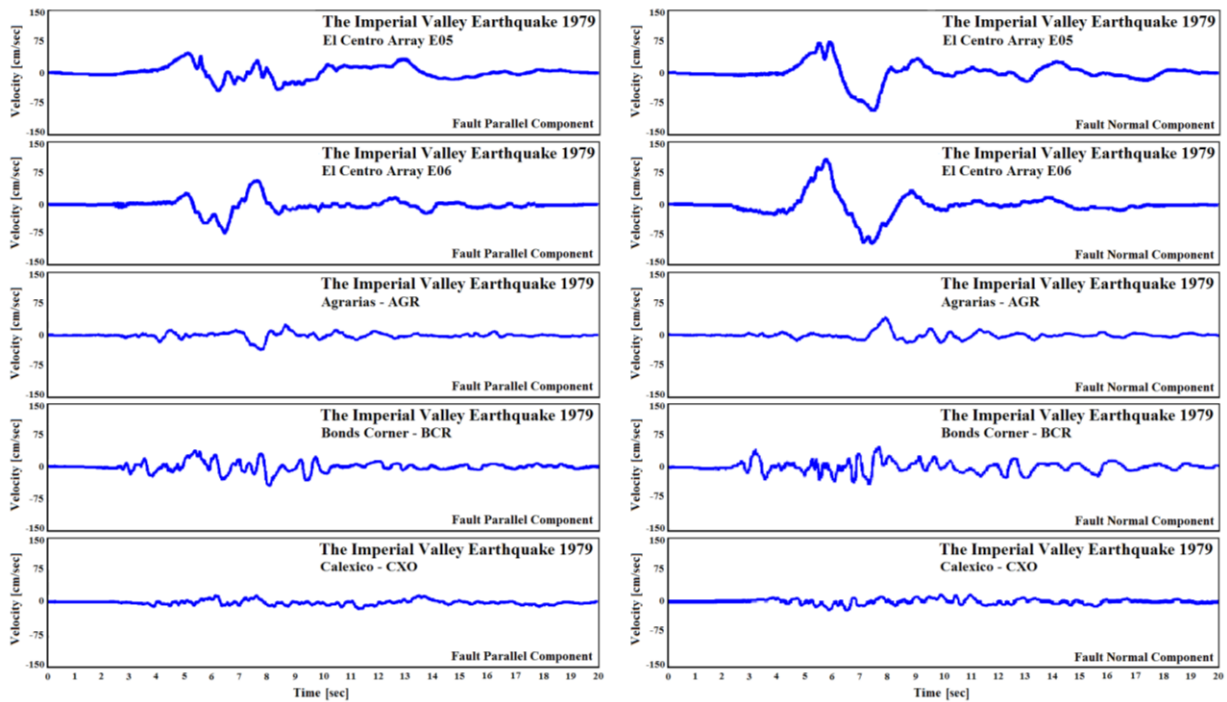
جدول ۱- مشخصات رکوردهای انتخابی

| زمین لرزه | ایستگاه | مولفه رکورد | حداکثر شتاب زمین، PGA (g) | حداکثر سرعت زمین، PGV (cm/s) | حداکثر جابجایی زمین، PGD (cm) | فاصله (km) | بزرگا M_w |
|----------------------|-------------------------------|-------------|---------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------|-------------|
| Imperial Valley ۱۹۷۹ | Agrarias (AGR) | LN | ۰/۳۷۰ | ۳۵/۲۱ | ۹/۷۳ | ۱۲/۹ | ۶/۵ |
| | | TR | ۰/۲۲۱ | ۴۲/۱۲ | ۱۱/۴۷ | | |
| | | UP | ۰/۸۳۵ | ۱۰/۱۶ | ۴/۹۶ | | |
| Imperial Valley ۱۹۷۹ | Bonds Corner (BCR) | LN | ۰/۵۸۸ | ۴۵/۲۵ | ۱۶/۴۸ | ۲/۵ | ۶/۵ |
| | | TR | ۰/۷۷۵ | ۴۵/۹۱ | ۱۵/۰۱ | | |
| | | UP | ۰/۴۲۵ | ۱۲/۱۸ | ۳/۹۷ | | |
| Imperial Valley ۱۹۷۹ | Calipatria Fire Station (CAL) | LN | ۰/۰۷۸ | ۱۳/۳۱ | ۶/۲۶ | ۲۳/۸ | ۶/۵ |
| | | TR | ۰/۱۲۸ | ۱۵/۳۷ | ۱۱/۳۰ | | |
| | | UP | ۰/۰۵۵ | ۳/۹۱۰ | ۲/۵۳ | | |
| Imperial Valley ۱۹۷۹ | Calexico Fire Station (CXO) | LN | ۰/۲۰۲ | ۱۵/۹۴ | ۹/۳۴ | ۱۰/۶ | ۶/۵ |
| | | TR | ۰/۲۷۵ | ۲۱/۰۶ | ۱۲/۲ | | |
| | | UP | ۰/۱۸۷ | ۶/۶۶۰ | ۳/۴۶ | | |
| Imperial Valley ۱۹۷۹ | Delta (DLT) | LN | ۰/۲۳۷ | ۲۴/۹۱ | ۹/۱۷ | ۴۳/۶ | ۶/۵ |
| | | TR | ۰/۳۵۱ | ۳۱/۶۸ | ۱۰/۳۴ | | |
| | | UP | ۰/۱۴۵ | ۵/۲۷۴ | ۳/۲۴۵ | | |
| Imperial Valley ۱۹۷۹ | El Centro Array 5 (E05) | LN | ۰/۵۱۹ | ۴۶/۸۶ | ۳۵/۲۷ | ۴/۰ | ۶/۵ |
| | | TR | ۰/۳۷۹ | ۹۰/۴۹ | ۶۳/۲۱ | | |
| | | UP | ۰/۵۳۷ | ۳۸/۴۹ | ۲۰/۰۵ | | |
| Imperial Valley ۱۹۷۹ | El Centro Array 6 (E06) | LN | ۰/۴۱۲ | ۶۴/۸۸ | ۲۷/۹۱ | ۱/۰ | ۶/۵ |
| | | TR | ۰/۴۳۹ | ۱۰۹/۷ | ۶۵/۳۱ | | |
| | | UP | ۱/۶۵۵ | ۵۶/۲۵ | ۲۷/۴۴ | | |
| Imperial Valley ۱۹۷۹ | El Centro Array 7 (E07) | LN | ۰/۳۳۸ | ۴۷/۶۲ | ۲۴/۴۸۶ | ۰/۶ | ۶/۵ |
| | | TR | ۰/۴۶۳ | ۱۰۹/۲۳ | ۴۴/۷۲۹ | | |
| | | UP | ۰/۵۴۴ | ۲۶/۲۸ | ۹/۳۷۶ | | |
| Imperial Valley ۱۹۷۹ | El Centro Array 8 (E08) | LN | ۰/۴۵۴ | ۴۹/۳۶ | ۳۴/۴۱ | ۳/۸ | ۶/۵ |
| | | TR | ۰/۶۰۲ | ۵۴/۱۴ | ۳۲/۱۴ | | |
| | | UP | ۰/۴۳۹ | ۲۲/۳۱ | ۱۲/۳۹ | | |





شکل ۱- حوزه لرزه خیز دره امپریال در زلزله ۱۹۷۹ کالیفرنیا و نمایش پالس‌های پدانه و پیوسته تغییر مکان متناظر با مولفه TR رکورد ایستگاه‌های E05, E06, E07 و E08



شکل ۲- تاریخچه زمانی مربوط به سرعت رکوردهای حوزه نزدیک انتخابی از زلزله امپریال ولی ۱۹۷۹ کالیفرنیا، (جدول (۱))

است. مطابق شکل (۳)، مدل‌های مطالعاتی دارای پلان منظم و شامل چهار دهانه ۶ متر در هر دو جهت X و Y می‌باشند. این دو سازه بر اساس ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم) و مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران طراحی شده‌اند. [۲۴] و [۲۵]. سطح شکل‌پذیری متوسط و ضریب رفتار ۵ در نظر گرفته شده است. ارتفاع طبقات برای هر دو سازه برابر با ۳ متر بوده و

۳- سازه‌های مطالعاتی و ملاحظات طراحی

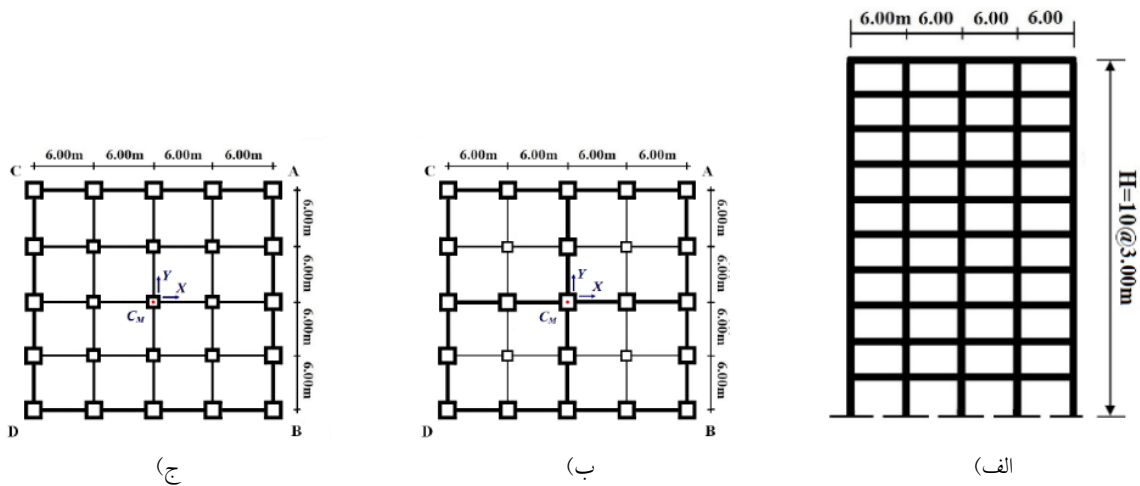
با افزایش ارتفاع ساختمان، ملاحظات مربوط به سختی و پایداری سازه ای اهمیت افزون‌تری نسبت به معیار مقاومت که در سازه‌های کوتاه عامل حاکم بر طراحی است، می‌یابد. مدل‌های سازه‌ای بررسی شده در این پژوهش، شامل سازه قاب صلب دسته شده و قاب صلب سه بعدی^{۱۵} فولادی در ارتفاع ده طبقه

(محور Y) و پیچشی به دست آمده است. پریود نخستین مود پیچشی (مود سوم ارتعاش) هر دو سازه ده طبقه شکل ۳، به ترتیب برابر با $1/32$ و $1/24$ ثانیه است. بدین ترتیب، بیشتر بودن پریود مود اول انتقالی در راستاهای X و Y پلان نسبت به اولین مود پیچشی، نشان دهنده رفتار سازه‌های مطالعاتی به صورت پیچشی سخت می‌باشد (جداول (۲) و (۳)). بارگذاری سازه‌ها بر پایه مبحث ششم مقررات ملی ساختمان بوده و ملاحظات طراحی شامل کنترل دررفت مجاز، رعایت اصل تیر ضعیف-ستون قوی در روند طراحی در نظر گرفته شده است [۲۷].

مطابق شکل (۴) در روند مدل‌سازی هر دو سازه مطالعاتی برای تعریف رفتار غیرخطی المان‌های تیر و ستون، به ترتیب از مفصل M (خمشی) و نیز مفصل غیرخطی PMM (اندراکنش نیروی محوری و لنگر خمشی) طبق توصیه‌های FEMA 356 استفاده گردید [۲۸]. خاک ساختمانی از نوع تیپ ۲ و منطقه پروژه در پهنه‌بندی با خطر نسبی زیاد فرض شده است. ضریب مقیاس رکوردها بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ محاسبه شده است (جدول (۴)).

جزئیات نما و پلان در شکل (۳-الف، ب و ج)، نمایش داده شده است. خطوط کمرنگ در پلان سازه‌های مطالعاتی، بیان‌گر قاب‌های ساده دارای اتصالات مفصلی و همچنین خطوط پررنگ نیز نمایش‌گر صفحات قاب‌های خمشی دارای اتصالات صلب تیر به ستون است [۲۶].

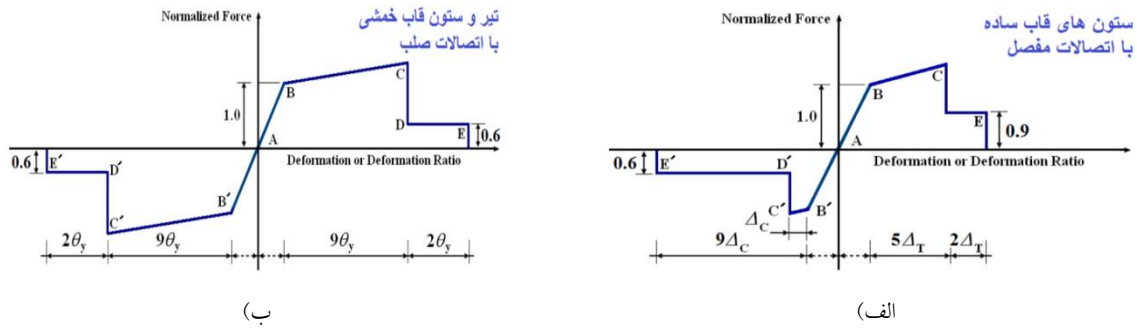
مشخصات طراحی شاه تیرها و ستون‌های هر دو مدل مطالعاتی به گونه‌ای محاسبه شده که سختی جانبی طبقات متناظر در هر دو اسکلت مقاوم برابر باشد. بدین ترتیب، امکان مقایسه میان پارامترهای پاسخ هر دو سازه مطالعاتی وجود دارد. نتایج آنالیز مودال برای سازه‌های مطالعاتی نیز به صورت $T=1/80$ ثانیه برای پریود مود اول سازه با اسکلت مقاوم قاب صلب دسته شده و $T=1/52$ ثانیه برای پریود مود اول سازه با اسکلت مقاوم قاب صلب ترکیبی است. همچنین با توجه به تقارن هندسی و بارگذاری هر دو اسکلت سازه‌ای، پریود مودهای اول ارتعاشی نسبت به دو محور X و Y به شکل یکسان و برابر به دست می‌آیند. آرایش طیفی پریود سه مود اول ارتعاشی رفتار سه بعدی سازه‌های مطالعاتی به صورت انتقالی (محور X)، انتقالی



شکل ۳- نما و پلان سازه‌های مطالعاتی: (الف) نمای هر دو سازه، (ب) اسکلت مقاوم قاب صلب دسته شده و (ج) اسکلت مقاوم قاب صلب سه بعدی، خطوط پررنگ نمایش‌دهنده محور قاب‌های صلب بوده و خطوط نازک نیز نشان‌دهنده قاب‌های دارای اتصالات مفصل است [۲۶]

جدول ۲- نیمرخ‌های تیرها و ستون‌ها در هر دو سازه مطالعاتی (ابعاد به cm) [۲۶]

| سازه | طبقه | ستون‌های قاب‌های خمشی محیطی در هر دو سازه | ستون‌های قاب‌های خمشی داخلی سازه صلب سه بعدی | ستون‌های قاب‌های ساده در سازه صلب دسته شده | تیرها در هر دو سازه (تیر ورق با دو پلیت جان) |
|---------|------|---|--|--|--|
| ۱۰ طبقه | ۱-۲ | Box 50x2.5 | Box 43x2.5 | Box 36x2.5 | 2WPG 40x20x3.0 |
| | ۳-۴ | Box 48x2.0 | Box 40x2.0 | Box 30x1.5 | 2WPG 40x20x3.0 |
| | ۵-۶ | Box 40x2.0 | Box 34x2.0 | Box 23x1.5 | 2WPG 40x20x2.5 |
| | ۷-۸ | Box 39x1.5 | Box 34x1.5 | Box 23x1.0 | 2WPG 40x20x2.0 |
| | ۹-۱۰ | Box 29x1.5 | Box 25x1.5 | Box 16x1.0 | 2WPG 30x15x1.5 |



شکل ۴- مدل تحلیلی و دامنه های عددی مفاصل غیرخطی المان‌های تیر-ستون در سازه های مطالعاتی: (الف) مفاصل غیرخطی خمشی M و خمشی - محوری PMM و (ب) مفصل غیرخطی محوری P [۱۵ و ۲۸]

جدول ۳- مشخصات مودهای انتقالی [۲۶]

| درصد مشارکت جرمی مودی | TUBE BUNDLED | 3D FRMAE | نوع سازه |
|-----------------------|--------------|-------------|-------------------|
| | پریود (sec) | پریود (sec) | شماره مود انتقالی |
| ۰/۷۳۰ | ۱/۸۰ | ۱/۵۲ | ۱ |
| ۰/۱۱۰ | ۰/۶۹ | ۰/۵۹ | ۲ |
| ۰/۰۵۰ | ۰/۴۰ | ۰/۳۵ | ۳ |
| ۰/۰۲۸ | ۰/۲۶ | ۰/۲۳ | ۴ |

جدول ۴- ضرایب مقیاس محاسباتی رکوردها بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ [۲۶]

| E06 | E05 | CXO | CAL | DLT | BCR | AGR | Scale Factor |
|------|------|------|------|------|------|------|--------------|
| ۱/۶۷ | ۱/۷۹ | ۳/۶۸ | ۲/۵۹ | ۲/۵۴ | ۴/۱۹ | ۱/۹۶ | Bundled Tube |
| ۱/۶۷ | ۱/۷۹ | ۳/۳۹ | ۲/۵۹ | ۲/۵۴ | ۳/۲۴ | ۲/۱۷ | 3D Frame |

شده است.

ساختار تحلیلی نتایج حاصل از تحلیل‌های MPA با نتایج حاصل از NTHA مقایسه شده، تا بتوان یک نگرش محاسباتی بر روی دامنه خطای روش MPA بدست آورد. مشخصات مودهای انتقالی انتخابی در جدول (۳) آورده شده است. در روش MPA فرض می‌شود که پاسخهای مودی در حالت غیرالاستیک به صورت غیر همبسته می‌باشند. بنابراین پاسخ لرزه ای سازه در هر مود به صورت مستقل، تحت اثر بارگذاری نمودی یک جهته جانبی (با الگوی پخش ثابت) ناشی از نیروهای اینرسی در آن مود تا رسیدن به تغییر مکان هدف حاصل می‌گردد. سپس پاسخ کلی سازه از روی ترکیب پاسخ مودها با استفاده از روش جذر مجموع مربعات (SRSS) بدست می‌آید.

۴-۱- گام‌های روش پوش اور مودال (MPA)

گام ۱- انجام تحلیل مقادیر ویژه جهت تعیین پریود مودهای ارتعاش T_n و اشکال مودی ϕ_n .

۴- روند انجام پژوهش

ضرایب مقیاس برای هر یک از رکوردهای انتخابی (جدول (۱)) طبق استاندارد ۲۸۰۰ محاسبه شده (جدول (۴)) و در تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی مورد استفاده قرار گرفته است. مجموعه تحلیل‌های غیرخطی تاریخچه زمانی با استفاده از مدل‌سازی عددی بارگذاری جانبی متناظر با شتاب‌نگاشت رکوردهای انتخابی و کاربرد نرم افزار SAP2000 انجام گرفته است [۲۹]. نمودارسازی پارامترهای پاسخ لرزه‌ای سازه های مطالعاتی (شکل (۳)) برای بررسی و مقایسه تفاوت‌های میان ویژگی‌های رفتاری هر دو اسکلت مقاوم، تنظیم شده است. همچنین، روش MPA بر روی هر دو سازه اعمال شده و پارامتر پاسخ دررفت جهت بررسی اثر مودهای بالاتر، نمودارسازی شده است. توضیح آن که در انجام روش MPA، یکبار تنها اثر مود پایه ارتعاش در بارگذاری محاسباتی راستاهای X و Y پلان (با نماد MPA-1MODE) استفاده شده و بار دیگر اثرات چهار مود انتقالی در هر دو راستای مذکور (با نماد MPA-4MODES) بکار برده

گام ۴- محاسبه جابجایی بالاترین تراز ارتفاعی سازه ($Z=H$) در مود n ام برای مولفه X و Y حرکت زمین بر طبق رابطه (۳)؛

$$U_{rn} = \Gamma_{nx,y} \phi_{rn} D_{nx,y} \quad (3)$$

گام ۵- اعمال بار جانبی یک سویه بر سازه با الگوی توزیع ناشی از سنجش معیار SRSS نیروهای اینرسی متناظر با هر مود در هر دو راستای پلان تا رسیدن به حد SRSS تغییر مکان‌های محاسبه شده مودها در گام ۴.

گام ۶- مقادیر پاسخ‌های کمیت‌های دلخواه r_n مانند جابجایی و نیز جابجایی نسبی طبقه، دوران مفاصل پلاستیک از روی نتایج تحلیل Pushover هنگامی که جابجایی تراز $Z=H$ برابر با اندازه SRSS جابجایی‌های محاسبه شده در گام ۴ به ازای تعداد مودهای کافی باشد، تعیین می‌شوند [۳۰ و ۳۱].

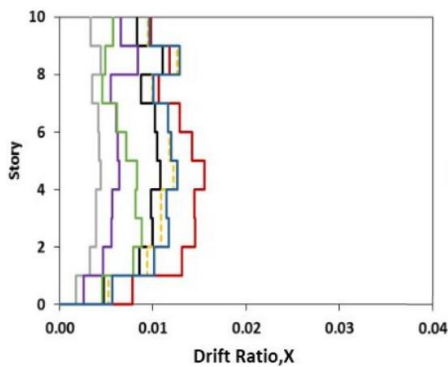
گام ۲- برای هر تعداد مود کافی (یا تمام مودهای نوسانی که مجموع جرم موثر آن‌ها حداقل ۹۰٪ جرم کل سازه) در هر دو راستای X و Y اشکال مودی و پیوندهای ارتعاش و الگوی توزیع بار بر طبق رابطه (۱) محاسبه شود.

$$S_n^* = m \phi_n \quad (1)$$

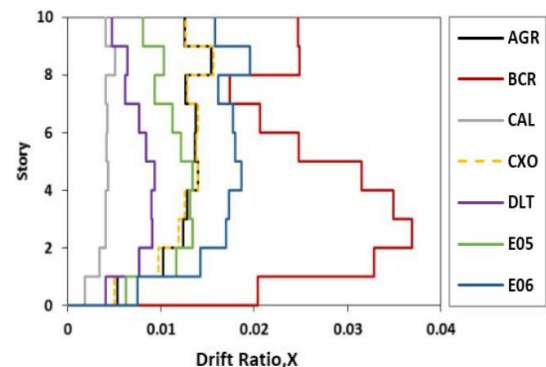
پارامترهای m و S_n^* به ترتیب عبارت از جرم محاسباتی طبقه و نیروی اینرسی معادل سازی شده به ازای طبقه n ام است.

گام ۳- محاسبه ماکزیمم جابجایی مربوط به مود n ام (D_n) سیستم غیرالاستیک از طریق تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی یا تحلیل طیفی و همچنین محاسبه ضریب مشارکت مودی از رابطه (۲)؛

$$\Gamma_n = \frac{\sum_{k=1}^N m_k \phi_{kn}}{\sum_{k=1}^N m_k \phi_{kn}^2} \quad (2)$$

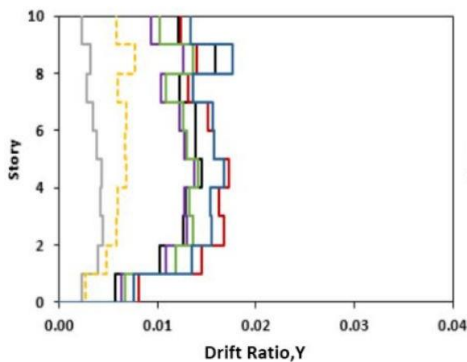


(ب)

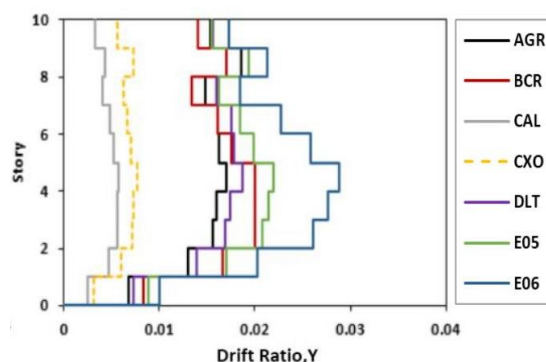


(الف)

شکل ۵- پوش بیشینه جابجایی نسبی طبقات در راستای X پلان: (الف) سازه Bundled Tube و (ب) سازه 3D FRAME (شکل (۳))



(ب)



(الف)

شکل ۶- پوش بیشینه جابجایی نسبی طبقات در راستای Y پلان: (الف) سازه Bundled Tube و (ب) سازه 3D FRAME (شکل (۳))

۵- ارزیابی نتایج تحلیلی

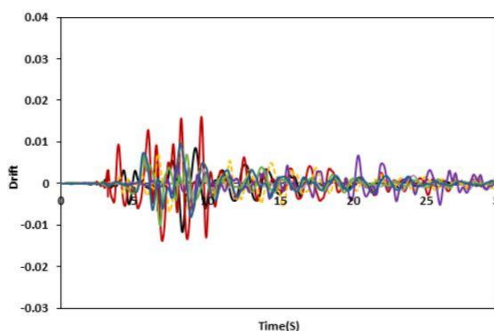
در روند مطالعاتی این پژوهش پس از انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی تحت رکوردهای مقیاس شده بر مدل‌های ده طبقه (شکل (۳))، نمودارهای پوش بیشینه تغییرات پارامترهای دررفت ماکزیمم طبقات و نیز تاریخچه زمانی دررفت و نیروی محوری ستون انتخابی، تنظیم و ارزیابی شده است. رکوردهای جدول (۱) بصورت سه مولفه ای و مقیاس شده در تحلیل‌های دینامیکی غیر خطی تاریخچه زمانی لحاظ گردیده‌اند. نمودارهای شکل (۵) و (۶) نمایش‌گر تغییرات بیشینه جابجایی نسبی طبقات (دررفت جانبی) مدل‌های ده طبقه (شکل (۳))، به دست آمده از نتایج تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی تحت رکوردهای مقیاس شده است.

با اعمال ضرایب مقیاس گذاری بر رکوردهای زلزله، شدت آنها تغییر می‌کند. هر اندازه که این ضرایب بزرگتر باشند، رکوردهای نیرومندتری به سازه وارد شده و در نتیجه امکان تشکیل مکانیزم‌های پلاستیک با دامنه غیرخطی بزرگتر در اسکلت مقاوم افزایش خواهد یافت. دامنه دررفت جانبی سازه قاب صلب ترکیبی از مقدار مجاز 0.02 کمتر می‌باشد. ملاحظه شد که تحت برخی رکوردهای (مقیاس شده) مانند BCR اندازه دررفت طبقات سازه قاب صلب دسته شده، بیش از مقدار مجاز بدست می‌آید. رکورد مذکور حاوی اسپایک‌های بزرگ و پرانرژی شتاب است و با اعمال ضرایب مقیاس نیز بزرگی دامنه‌های عددی شتاب نگاشت و محتوای انرژی جنبشی هر سه مولفه این رکورد افزوده می‌شود. نکته دیگر آن که دامنه بزرگتر دررفت در راستای Y پلان هر دو سازه حاصل گردید. با توجه به

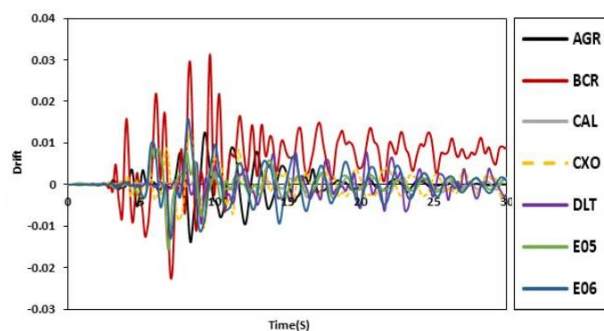
مقارن بودن اسکلت مقاوم هر دو سازه، این نابرابری به دلیل وجود ساختارهای موج گونه بزرگتر در تاریخچه زمانی مؤلفه TR رکوردها می‌باشد.

بر پایه نتایج این پژوهش ملاحظه شد که تحت اثر رکوردهای نیرومند و مقیاس شده حوزه نزدیک، به صورت تدریجی و تا حدود نیمه اول پالس بزرگ سرعت، رفتار لرزه‌ای با نمود جامع‌تر غیرخطی هندسی است. همچنین پس از گذر از نخستین نقطه اوج پالس بزرگ سرعت (به ویژه متناظر با مؤلفه TR) ماهیت رفتار لرزه ای با نمود جامع غیرخطی هندسی-مادی خواهد بود. بدین ترتیب، یک روند مشخص شکل‌گیری و گسترش مولفه های غیرخطی با دامنه به نسبت بزرگ در اسکلت مقاوم سازه پدیدار می‌شود. نمود این رفتار به صورت روند نرم شدن اسکلت و افزایش پریودهای مودال (ناشی از تشکیل و گسترش مفاصل غیرخطی) خواهد بود.

همانطور که از شکل (۷) مشخص است، تاریخچه زمانی دررفت مرکز جرم تراز $(Z=H)$ سازه Bundled Tube مقادیر بیشتری را نشان می‌دهد. دامنه مقادیر دررفت ماندگار به بطور نسبی از تغییرات شتاب زمین در تاریخچه زمانی هر سه مولفه رکورد زلزله پیروی می‌نماید. احتمال ایجاد مقادیر زیاد نیروی محوری در ستون های اسکلت مقاوم سازه، بویژه در بازه زمانی پالس مشخص و پیوسته سرعت (مولفه‌های LN و TR) هنگام زلزله‌های بزرگ، وجود دارد (شکل (۸)). بدین ترتیب، تغییرات تنش محوری ستون ها ممکن است که تا مرز تسلیم نیز برسد. این روند با وقوع تدریجی تغییر شکل‌های بزرگ در اعضای اسکلت مقاوم سازه همراه است.

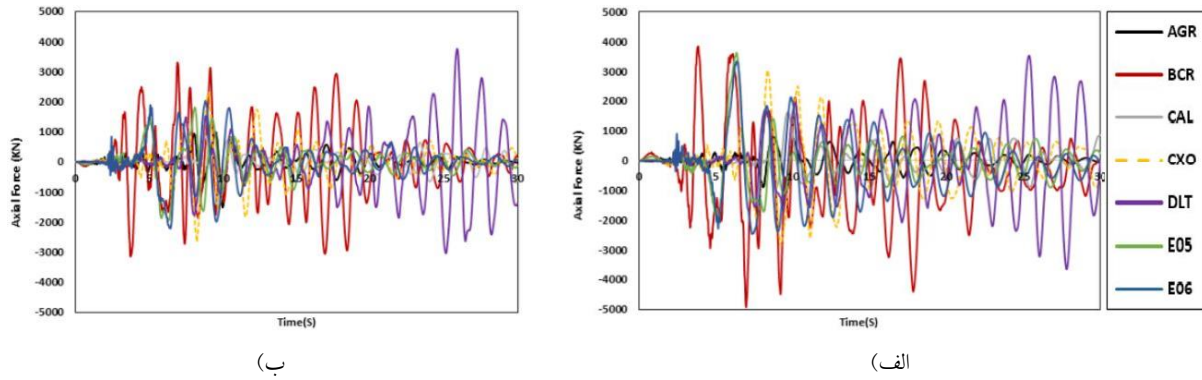


(ب)



(الف)

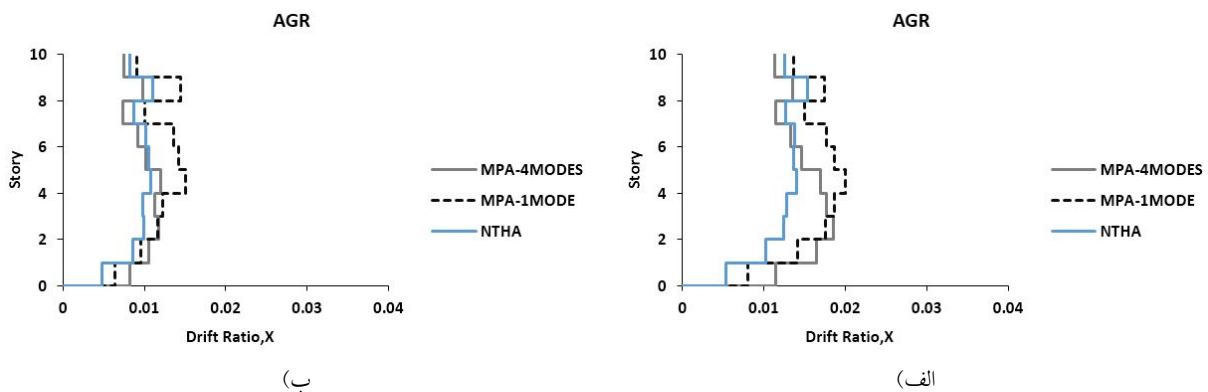
شکل ۷- تاریخچه زمانی دررفت مرکز جرم تراز $Z=H$ در راستای Y پلان: (الف) سازه Bundled Tube و (ب) سازه 3D FRAME (شکل (۳))



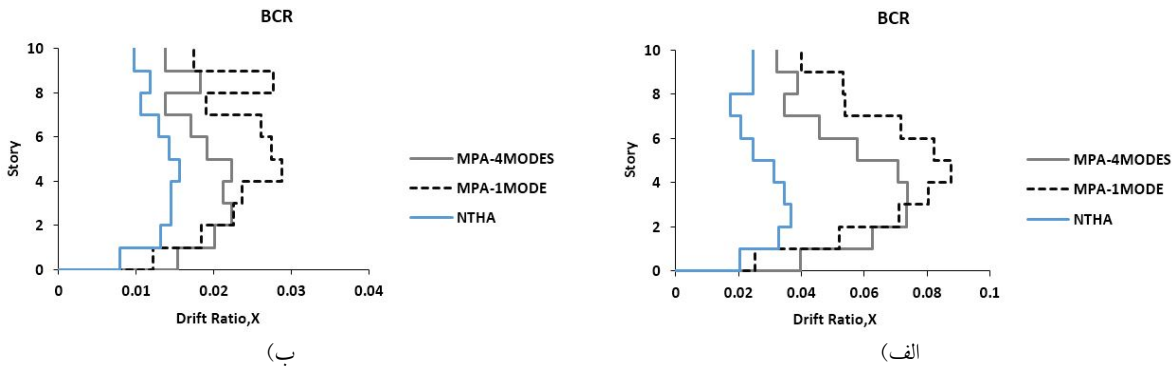
شکل ۸- تاریخچه زمانی نیروی محوری ستون گوشه (آکس D) طبقه اول (شکل ۳): (الف) سازه Bundled Tube و (ب) سازه 3D FRAME

نمودارهای شکل‌های (۹) تا (۱۴) نشان دهنده تغییرات بیشینه دررفت طبقات هر دو سازه مطالعاتی در راستای X پلان است. بیشینه دررفت سازه‌های مطالعاتی با روش‌های MPA (1Mode) و MPA (4Modes) محاسبه شده و سپس با نتایج حاصل از تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی مقایسه شده است. معیارسازی بارگذاری‌های جانبی و نیز تعیین تغییر مکان هدف براساس توجه به ماهیت فیزیکی و ضرایب مقیاس رکوردهای انتخابی صورت گرفته است. همچنین در این خصوص تاثیر مشخصات فیزیکی رکوردهای حوزه دور ضعیف DLT و CAL، رکوردهای دارای اثرات جهت‌داری پیش‌رو E05 و E06 حاوی پالس‌های پر دامنه، رکوردهای AGR و BCR و CXO به ترتیب دارای اثرات جهت‌داری پس‌رو، حوزه نزدیک ضعیف و جهت‌داری خنثی، بر روی آرایه‌های ورودی روش MPA نیز دارای گستردگی و جنبه‌های مختلف تحلیلی می‌باشد.

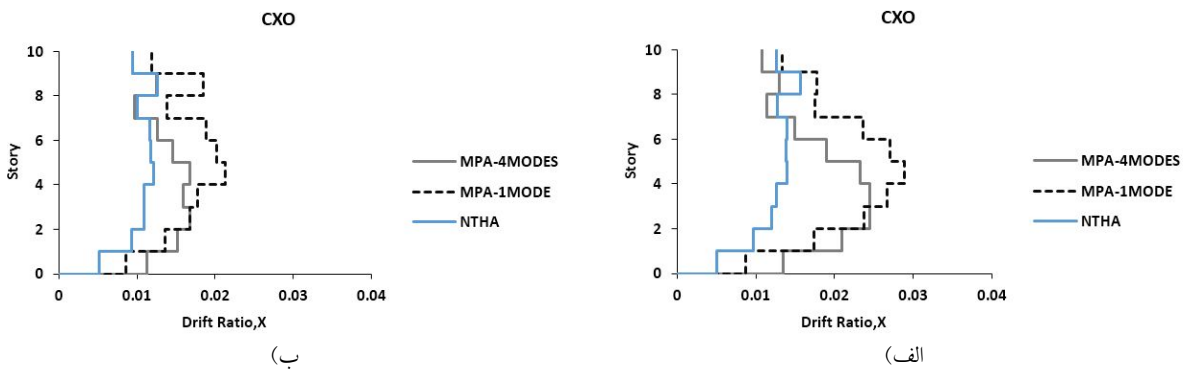
در این پژوهش با اعمال الگوهای بار مودی روش MPA بر روی هر دو سازه مطالعاتی، به مقایسه دقت و قابلیت این روش در برآورد پارامترهای پاسخ نسبت به نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی (به عنوان روش دقیق) پرداخته شده است. تغییر مکان نسبی (دررفت) طبقات به عنوان یک پارامتر پاسخ اصلی در نظر گرفته شده است. انجام آنالیزهای MPA نیز با نرم‌افزار SAP2000 صورت گرفته است. ماهیت تحلیلی به کار برده شده برای روش MPA بصورت معیارسازی بارگذاری جانبی با اثر یک و چهار مود ارتعاش جانبی بوده و نتایج حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی NTHA نیز مبنای مقایسه‌ها می‌باشد. چنانچه در کاربرد روش MPA برای تعیین بارگذاری معیارسازی شده متناظر با هر یک از رکوردها، تنها از مشارکت مود ارتعاش اصلی و یا چهار مود نخست ارتعاش انتقالی استفاده شود، تفاوت نتایج به نسبت زیاد است.



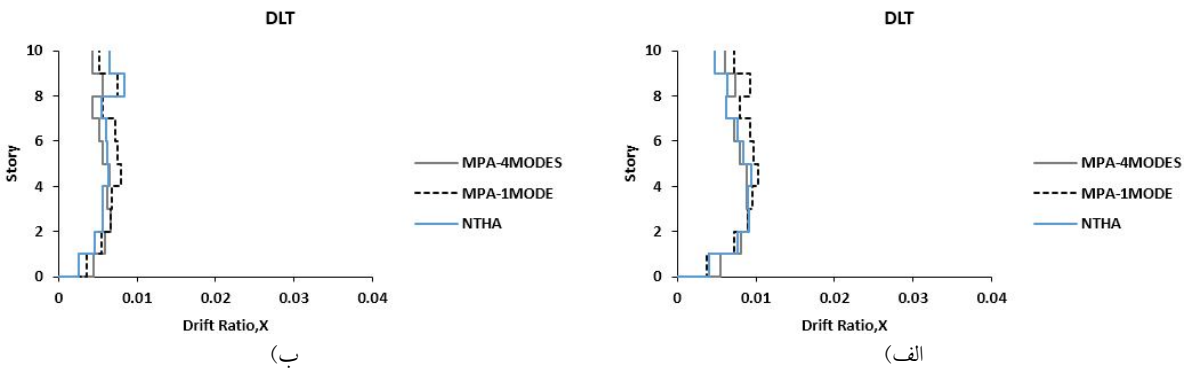
شکل ۹- پوش بیشینه دررفت در راستای X تحت رکورد مقیاس شده AGR: (الف) سازه Bundled Tube و (ب) سازه 3D FRAME (شکل ۳)



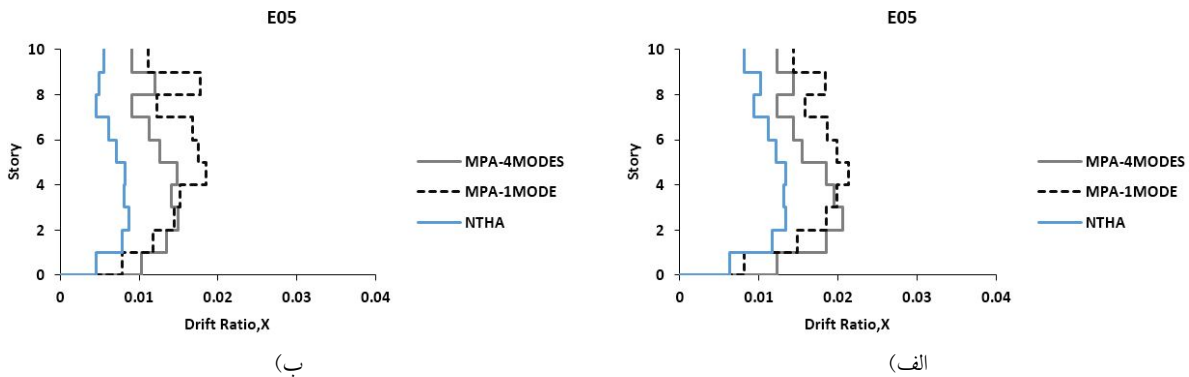
شکل ۱۰- پوش بیشینه دررفت در راستای X تحت رکورد مقیاس شده BCR: الف) سازه Bundled Tube و ب) سازه 3D FRAME (شکل ۳)



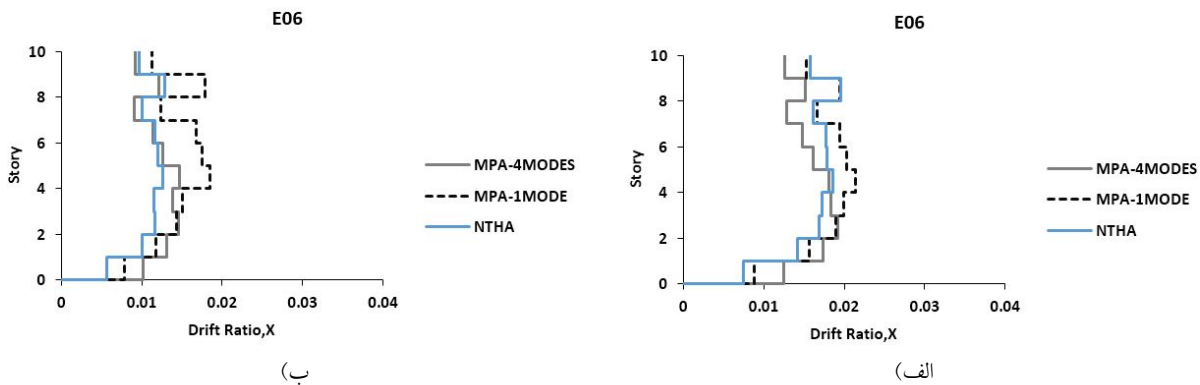
شکل ۱۱- پوش بیشینه دررفت در راستای X تحت رکورد مقیاس شده CXO: الف) سازه Bundled Tube و ب) سازه 3D FRAME (شکل ۳)



شکل ۱۲- پوش بیشینه دررفت در راستای X تحت رکورد مقیاس شده DLT: الف) سازه Bundled Tube و ب) سازه 3D FRAME (شکل ۳)



شکل ۱۳- پوش بیشینه دررفت در راستای X تحت رکورد مقیاس شده E05: الف) سازه Bundled Tube و ب) سازه 3D FRAME (شکل ۳)



شکل ۱۴- پوش بیشینه دررفت در راستای X تحت رکورد مقیاس شده E06: (الف) سازه Bundled Tube و (ب) سازه 3D FRAME (شکل ۳)

پاسخ دینامیکی غیرخطی نزدیک‌تر می‌شود. استفاده از مشارکت چهار مود ارتعاشی نسبت به مود ارتعاش پایه، درصد خطا را به طور چشمگیری تا نزدیک ۵۰٪ کاهش داده است. مقدار خطای کلی به شکل نمودارهای افقی کوچک و بر اساس فرمول زیر در داخل هر دو شکل (۱۵) و (۱۶) نمایش داده شده و پارامتر Δ نیز تغییر مکان جانبی طبقه حاصل از دو روش MPA و NTHA است.

Total Error (%) =

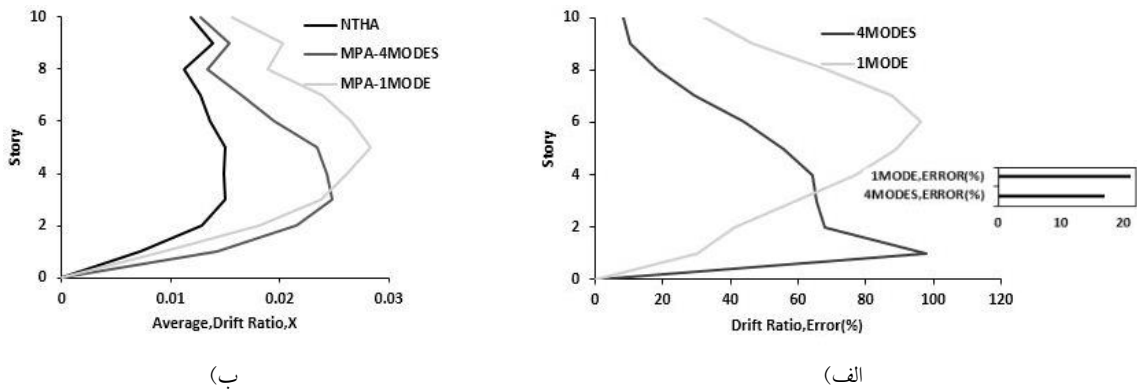
$$100 \times \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta_{i.MPA} - \Delta_{i.NTHA}}{\Delta_{NTHA}} \right)^2} \quad (4)$$

۶- نتیجه‌گیری

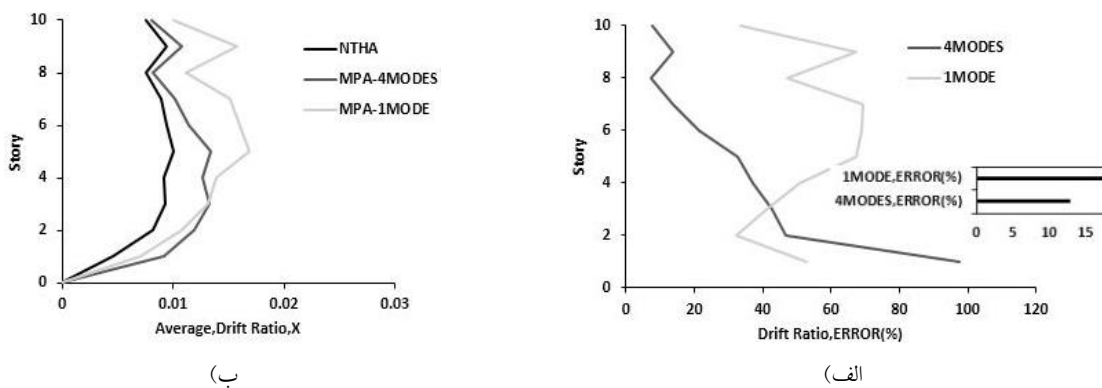
این پژوهش در برگرنده یک نگرش کوتاه تحلیلی بر مشخصات جنبش‌های نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل می‌باشد و همچنین تاثیرات آنها بر رفتار لرزه‌ای سازه‌های میان مرتبه با دو نوع ساختار مقاوم لرزه‌ای، بررسی شده است. سازه‌های مطالعاتی در این تحقیق دارای پیکربندی ده طبقه با اسکلت قاب صلب دسته شده و قاب صلب ترکیبی می‌باشند. پاسخ لرزه‌ای سازه‌های مطالعاتی از منظر شاخص‌های شتاب مطلق، پوش بیشینه دررفت و تاریخچه زمانی دررفت طبقات و تاریخچه زمانی نیروی محوری ستون، مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفتند. رکوردهای انتخابی حاوی پالس‌های نیرومند و پر دامنه در تاریخچه زمانی سرعت بوده و بصورت سه مولفه‌ای و مقیاس شده به سازه‌های مطالعاتی اعمال گردید. بر اساس نتایج این تحقیق ملاحظه گردید که ساختار تغییرات پارامترهای پاسخ لرزه‌ای، بستگی مستقیم به حضور اسپایک‌های پرنرژی شتاب و ماهیت موج‌گونه رکورد زلزله دارند. همچنین دانسته شد که نمود

مطابق با شکل (۹) مشخص است که تحت رکورد AGR با اثر جهت‌داری پس‌رو، پروفیل‌های دررفت به دست آمده از روش MPA تطبیق مناسبی با روش NTHA دارد. نمودارهای شکل (۱۰) تغییرات دررفت را تحت رکورد BCR نشان می‌دهد. این رکورد دارای اسپایک‌های بزرگ شتاب است. ملاحظه می‌شود که تحت این رکورد به خصوص برای سازه Bundled Tube، خطای دو حالت تحلیلی روش MPA به نسبت زیاد است. این موضوع در نمودارهای هر دو شکل (۱۱) و (۱۲) که پاسخ سازه‌های مطالعاتی را تحت حالت مقیاس شده رکوردهای CXO (جهت‌داری خنثی) و DLT (حوزه دور) نشان می‌دهند، نیز مشاهده می‌شود. همچنین در نمودارهای شکل (۱۲) مربوط به رکورد حوزه دور و مقیاس شده DLT، تطابق نسبی برای پروفیل‌های دررفت طبقات وجود دارد. به دلیل شباهت زیاد نتایج مربوط به دو رکورد حوزه دور DLT و CAL، تنها یک مورد آورده شد. بر طبق شکل (۱۳) و (۱۴) ساختار نمودارهای دررفت تحت اثر رکوردهای نیرومند مقیاس شده E05 و E06 (با ویژگی جهت‌داری پیش‌رو)، نشان‌دهنده افزایش قابلیت محاسباتی روش MPA با لحاظ نمودن اثرات مودهای بالاتر است. نمود این موضوع برای سازه Bundled Tube کمی بیش از اسکلت مقاوم دیگر می‌باشد.

تحلیل خطای کلی محاسباتی برای متوسط بیشینه دررفت طبقات سازه‌های مطالعاتی، در شکل (۱۵) و (۱۶) نمایش داده شده است. بررسی نمودارهای این دو شکل، حصول دقت بالاتر برای روش MPA با لحاظ نمودن مشارکت چهار مود ارتعاشی را بیشتر نمایان می‌کند. استفاده از مشارکت چهار مود ارتعاشی در برآورد جابجایی نسبی (دررفت) طبقات به ویژه در نیمه بالایی اسکلت مقاوم سازه‌ها، نمود روشن‌تری دارد. بدین ترتیب، روند تغییرات دررفت حاصل از روش MPA به نتایج



شکل ۱۵- متوسط بیشینه دررفت طبقات سازه Bundled Tube و متوسط مقادیر خطای محاسباتی: (الف) تغییرات متوسط پارامتر پاسخ به تفکیک روش تحلیل و (ب) دامنه تغییرات خطای محاسباتی (نمودار افقی کوچک بیان‌گر اندازه خطای کلی طبق فرمول (۴) است).



شکل ۱۶- متوسط بیشینه دررفت طبقات سازه 3D FRAME و متوسط مقادیر خطای محاسباتی: (الف) تغییرات متوسط پارامتر پاسخ به تفکیک روش تحلیل و (ب) دامنه تغییرات خطای محاسباتی، (نمودار افقی کوچک بیان‌گر اندازه خطای کلی فرمول (۴) است).

جابجایی نسبی طبقات، بویژه در نیمه بالایی اسکلت مقاوم سازه‌ها می‌گردد. بدین ترتیب، تقریب محاسباتی برای پارامتر دررفت جانبی به خصوص در طبقات فوقانی، به نتایج روش دینامیکی غیرخطی نزدیکتر می‌شود. ملاحظه گردید که استفاده از چهار مود ارتعاشی نسبت به کاربرد اثر فقط مود اول (مود پایه)، درصد خطا را بسیار کاهش داده و در برخی موارد تا ۵۰٪ نیز بدست آمد.

۷- مراجع

- [1] Ahlehagh, S. and Mirghaderi, S.R. (2020), "Decoupling the strength and drift criteria in steel moment-resisting frames", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 29, pp.e1804.
- [2] Lachanas, C.G. and Vamvatsikos, D. (2021), "Model type effects on the estimated seismic response of a 20-story steel moment resisting frame", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 147 pp.04021078.
- [3] Kohrangi, M., Vamvatsikos, D. and Bazzurro, P. (2018), "Pulse-like versus non pulse-like ground motion records: Spectral shape comparisons and record selection strategies", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 48, pp. 46-64.

متفاوت پالس‌های سرعت می‌تواند تاثیر ویژه‌ای در پارامتر دررفت سازه داشته باشد. بر همین اساس، تمرکز نیاز دررفت در ترازهای میانی و تا حدودی بالایی سازه قاب صلب دسته شده از ساختار قاب صلب ترکیبی، تا اندازه‌های بزرگتر است.

افزون بر این، نتایج کاربرد هر دو روش تحلیل استاتیکی غیرخطی پوش‌آور مودی (MPA) و تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخیچه زمانی (NTHA) بر روی سازه‌های مطالعاتی، محاسبه و بررسی شده است. تغییرات بیشینه دررفت جانبی سازه‌های مطالعاتی محاسبه و با یکدیگر مقایسه گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که خطای محاسباتی حاصل از روش MPA که مقادیر آن در طبقات سازه نیز متفاوت است، با توجه به مشارکت تعداد مودهای ارتعاشی، نوع پارامتر پاسخ مورد نظر و نیز نوع اسکلت مقاوم تغییر می‌نماید.

کاربرد مشارکت چهار مود ارتعاشی در معیارسازی بارگذاری جانبی برای روش MPA منجر به برآورد دقیق‌تر

- structure SDOF system", International Journal of Civil Engineering, Vol. 13, pp. 153-166.
- [18] Sharif, V. and Behnamfar, F. (2012), "Evaluating the effects of near-field earthquakes on the behavior of moment resisting frames", Computational Methods in Civil Engineering, Vol. 3, pp. 79-91.
- [19] Hosseini, M. and Salemi, A. (2008), "Studying the effect of earthquake excitation angle on the internal forces of steel building's elements by using nonlinear time history analyses", 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.
- [20] Makris, N. and Black, C. (2003), "Dimensional analysis of inelastic structures subjected to near fault ground motions", California Earthquake Engineering Research Center (EERC), Vol. 5, 89-91.
- [21] Ghahari, F. and Khaloo, R. (2013), "Considering rupture directivity effects, which structures should be named 'long-period buildings'?", The Structural Design of Tall and Special Buildings, Vol. 22, pp. 165-178.
- [22] Balendra, T., Yu, C. and Lee, F.L. (2001), "An economical structural system for wind and earthquake loads", Engineering Structures, Vol. 23, pp. 491-501.
- [23] Tajmir-Riahi, H., Amouzegar, H. and Saheb-Fosoul, S.A. (2015), "Comparative study of seismic structural response to real and spectrum matched ground motions", Scientia Iranica, Sharif University of Technology, Vol. 22, pp. 92-106.
- [24] استاندارد ۲۸۰۰، (۱۳۹۳)، "آیین نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله"، ویرایش چهارم، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.
- [25] مقررات ملی ساختمان ایران، مبحث دهم، (۱۳۹۲)، "طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی"، نشر توسعه ایران.
- [26] ربیعی، ر. (۱۳۹۶)، "نمود تحلیلی اثر مودهای بالاتر بر نیاز لرزه‌ای اسکلت‌های قاب خمشی دسته شده تحت جنبش‌های حوزه نزدیک گسل"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه خوارزمی تهران.
- [27] مقررات ملی ساختمان ایران، مبحث ششم، (۱۳۹۲)، "بارهای وارد بر ساختمان"، نشر توسعه ایران.
- [28] Federal Energy Management Agency, (1998), "FEMA 356: Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings", Createspace Independent Publication.
- [29] SAP2000, Structural Analysis Program, Computer and Structures, Berkeley.
- [30] Chopra, A., Goel, R. and Chintanapakdee, C. (2004), "Evaluation of a modified MPA procedure assuming higher modes as elastic to estimate seismic demands", Earthquake Spectra, Vol. 20, pp. 757-778.
- [31] Chopra, A. and Goel, R. (2004), "A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for unsymmetric-plan buildings", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 33, pp. 903-927.
- [4] FEMA P-695, (2009), Quantification of building seismic performance factors, Federal Energy Management Agency (FEMA), Redwood City, California.
- [5] Uang, C.M. and Bruneau, M. (2018), "State of the art review on seismic design of steel structures", Structural Engineering (ASCE), Vol. 144, p.03118002.
- [6] Fadae, E., Shakib, H. and Azarbakht, A. (2020), "Structural global performance assessment versus individual element-oriented performance based assessment", Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, Vol. 44, pp.141-150.
- [7] Alavi, B. and Krawinkler, H. (2004), "Behaviour of Moment Resisting Frame Structures subjected to Near-Fault Ground Motions", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 33, pp. 687-706.
- [8] Jayachandran, P. (2009), "Design of tall buildings", National Workshop on High-Rise and Tall Buildings, University of Hyderabad, Hyderabad, India.
- [9] Dileep, N. and Renjith, R. (2015), "Analytical investigation on the performance of tube-in-tube structures subjected to lateral loads", International Journal of Technical Research and Applications, Vol. 3, pp. 284-288.
- [10] Azhdarifar, M., Meshkat-Dini, A. and Sarvghad-Moghadam, A. (2017), "Analytical study of interior rigid bents arrangement on seismic response of tall building", Journal of Seismology and Earthquake Engineering (JSEE), Vol. 19, pp. 247-260.
- [11] Reyes, J. and Chopra, A. (2011), "Three-dimensional modal pushover analysis of buildings subjected to two components of ground motion, including its evaluation for tall buildings", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 40, pp. 789-806.
- [12] Poursha, M., Khoshnoudian, F. and Moghadam, A.S. (2014), "The extended consecutive modal pushover procedure for estimating the seismic demands of two-way unsymmetric-plan tall buildings under influence of two horizontal components of ground motions", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 63, pp. 162-173.
- [13] Ferraioli, M. (2017), "Multi-mode pushover procedure for deformation demand estimates of steel moment-resisting frames", International Journal of Steel Structures, Vol. 17, pp. 653-676.
- [14] Vafaei, M.H. and Saffari, H. (2017), "Evaluation of the higher modes contribution in the seismic demands of buildings subjected to far-field and near-field ground motions", Asian Journal of Civil Engineering (BHRC), Vol. 18, pp 719-746.
- [15] Federal Energy Management Agency, (1998), FEMA 440: Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures, Createspace Independent Publication.
- [16] Haj Najafi, L. and Tehranizadeh, M. (2013), "Evaluation of seismic behavior for moment frames and eccentrically braced frames due to near-field ground motions", Asian Journal of Civil Engineering, Vol. 14, pp. 809-830.
- [17] Davoodi, M. and Sadjadi, M., (2015), "Assessment of near-field and far-field strong ground motion effects on soil

پی نوشت

⁹ Loma prieta 1989

¹⁰ Rupture directivity

¹¹ Fling step

¹² Forward directivity

¹³ Backward directivity

¹⁴ Imperial Valley 1979

¹⁵ Rigid 3D frame

¹ Rigid bundled tube

² Nonlinear time history analysis - NTHA

³ Pushover

⁴ Modal pushover - MPA

⁵ Flexural framed tube

⁶ Outrigger mega braced tube

⁷ Tube in tube

⁸ Shear lag

