

## توصیف پارامترهای نیاز لرزه ای اسکلت قاب خمشی مودولار بر پایه آنالیز پوش آور مودال

محمد علی رستم خانی<sup>۱\*</sup>، مهدی امیرحسینی<sup>۲</sup>، سید حسین حسینی لواسانی<sup>۳</sup>،  
افشین مشکوه الدینی<sup>۴</sup>

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشگاه خوارزمی تهران، [std\\_mohammadaliroostamkhani@khu.ac.ir](mailto:std_mohammadaliroostamkhani@khu.ac.ir)
- ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشگاه خوارزمی تهران، [std\\_amirhosseini@khu.ac.ir](mailto:std_amirhosseini@khu.ac.ir)
- ۳- استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی تهران، [lavasani@khu.ac.ir](mailto:lavasani@khu.ac.ir)
- ۴- استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی تهران، [meshkat@khu.ac.ir](mailto:meshkat@khu.ac.ir)

### چکیده:

امروزه برای ارزیابی لرزه ای سازه ها، انواع روش های تحلیل غیرخطی استاتیکی و دینامیکی به سرعت در حال گسترش می باشند. بیشتر روش های دینامیکی غیرخطی، نیازمند حجم زیاد محاسبات و زمان طولانی برای تحلیل های عددی می باشند. علاوه بر آن، برای تفسیر و تحلیل داده های حاصل از پردازش رایانه ها به مهارت ویژه ای نیاز است. همچنین برای تقریب، ساده سازی و کوتاه کردن زمان پردازش محاسباتی، روش های استاتیکی غیرخطی بکار برده می شوند. کاربرد این روش ها؛ نمودی از کاهش دقت و بروز خطای نسبی را در پی دارد. در این پژوهش به بررسی عملکرد محاسباتی و ارزیابی نتایج روش آنالیز پوش آور مودال (Modal Pushover Analysis-MPA) به عنوان روش استاتیکی غیرخطی در جایگزینی با تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی (Nonlinear Time History Analysis-NTHA) پرداخته می شود. مجموعه ای از رکوردهای حوزه نزدیک حاوی انواع اثرات سه گانه جهت داری و همچنین جنبش های ثبت شده دور از گسل برای ساخت بارگذاری جانبی معادل در انجام تحلیل های غیرخطی انتخاب شده اند. یک سازه مطالعاتی ۲۰ طبقه با اسکلت قاب خمشی ترکیبی محیطی طراحی شده است. اسکلت مقاوم سازه مطالعاتی دارای تقارن هندسی و بارگذاری در طبقات بوده و همچنین طول کلیه دهانه های بزرگ آن در هر دو جهت پلان برابر با ۷,۳۲ متر است. بر پایه ارزیابی نتایج تحلیل های پوش آور مودال و تاریخچه زمانی غیرخطی برای سازه مطالعاتی، تعدادی از پارامترهای پاسخ لرزه ای، ارزیابی عددی شده اند. ملاحظه گردید که دامنه عددی نمودار پوش بیشینه دریافت بویژه در ترازهای میانی اسکلت مقاوم، به بیشترین اندازه خود می رسد. همچنین آن که این دامنه عددی می تواند از سطح عملکرد ایمنی جانی نیز فراتر رود.

واژه های کلیدی: سازه بلند، دهانه بزرگ، حوزه نزدیک گسل، تحلیل غیرخطی، پوش آور مودال

### ۱- مقدمه

امروزه احداث سازه های بلند به دلایلی مانند افزایش جمعیت، کمبود فضای در دسترس و استفاده بهینه از فضاهای محدود به طرز چشمگیری رواج یافته است. همچنین از دیدگاه سازه ای علاوه بر مسایل اقتصادی، انتخاب بهترین فرم اسکلت مقاوم، آن انتخابی است که اعضای اصلی بتوانند ترکیب های مختلف بارهای قائم و افقی را به صورت بهینه تحمل نمایند. هر چه ساختمان بلندتر و لاغرتر باشد، عوامل سازه ای از درجه اهمیت بیشتری برخوردار می گردند. با گسترش تکنولوژی و تسریع در انجام محاسبات، انجام بسیاری از محاسبات پیچیده و طولانی به صورت سریع و آسان توسط کامپیوترهای پیشرفته صورت می گیرد. ابداع انواع روش های جدید تحلیل و ارزیابی لرزه ای سازه ها برای

ارزیابی عملکرد لرزه ای یک سازه جهت بدست آوردن جابه جایی های در جهات مختلف و تعیین نیروها، نمونه ای از پیشرفت های موجود می باشد. در پی ارتقا ضوابط و معیارهای طراحی سازه های بلند مرتبه، روند ساخت و ساز آنها در حال گسترش روز افزون است. انتخاب یک سیستم سازه ای مناسب همراه با رعایت بهینه ضوابط طراحی و تضمین محدودیت های معماری، مقوله بسیار گسترده ای در موضوع مهندسی ساختمان می باشد [۱].

با توجه به ویژگی های سازه های با شکل پذیری بیشتر، موضوعات طراحی سیستم های مقاوم نیز از دیدگاه داشتن قابلیت و توانایی توانایی بهینه به نیازهای طراحی، مطرح می گردند. سیستم قاب خمشی ترکیبی محیطی، یک پیکربندی مناسب سازه ای در طراحی ساختمان های بلند می باشد. عملکرد این سازه بطور نسبی همانند رفتار خمشی یک کنسول بلند است و رفتار آن متأثر از ترکیب دو مود خمشی و برشی است [۲]. هنگامی که سازه تحت اثر بار جانبی قرار می گیرد، قاب های صلب در جهت بارگذاری به صورت "بخش پیوسته جان" و قاب های صلب عمود بر راستای بارگذاری نیز به صورت "بخش پیوسته بال" کنسول بلند عمل می کنند. چنانچه دهانه های بزرگ در پیکربندی اسکلت مقاوم تعبیه شود، بررسی و ارزیابی ویژگی های رفتاری ستون های نگهدارنده اسکلت مقاوم نیز از دیدگاه چگونگی اندرکنش نیرویی خمشی-برشی و همچنین از منظر احتمال وقوع مودهای کمانشی باید مطالعه شود. این موضوع مطرح است که ستون های واقع در دهانه های میانی قاب های بخش پیوسته بال نسبت به ستون های گوشه ای، تحت اثر تنش کمتری قرار می گیرند. بدین لحاظ از تمام ظرفیت مقاومتی بخش پیوسته بال سازه استفاده نمی شود [۳-۵].

شناخت خصوصیات و مشخصه های رکوردهای نیرومند زلزله مانند محتوای فرکانسی پالس، اثرات جهت داری، انتشار امواج، انرژی جنبشی و توجه به پالس های سرعت و اسپایک های پر انرژی شتاب حایز اهمیت می باشد. با توجه به ایجاد تغییر شکل های غیرخطی و رفتار دینامیکی با دامنه بزرگ در هنگام زلزله، کاربرد تحلیل های غیرخطی دارای جنبه واقع گرایانه مفهومی است. در سال های اخیر، تحقیقات بسیاری در جهت ارایه روش های مختلف تحلیل غیرخطی انجام شده است. عمده نتایج این تلاش ها در ابتدا به ارایه روش تحلیل استاتیکی غیرخطی یا تحلیل بار افزون منجر شد. در این روش تحلیل، سازه مورد نظر تحت یک بارگذاری جانبی یکنواخت یا مثلثی با آهنگ ثابت افزایشی قرار می گیرد. سپس این روند افزایشی تا جایی ادامه پیدا می کند که سازه به تغییر مکان هدف محاسبه شده، برسد تا بتوان به تخمینی از ظرفیت های مقاومت، تغییر شکل ها و نیروهای داخلی اعضا دست یافت. سپس مقادیر بدست آمده ظرفیت ها با مقادیر تقاضا ها در سطوح عملکرد مختلف مقایسه می شود [۶].

این پژوهش شامل نگرش تحلیلی بر روند فوق در ارزیابی پارامترهای رفتاری یک سازه بلند مرتبه قاب ترکیبی محیطی دارای دهانه های بزرگ، همراه با معیارسازی بارگذاری جانبی بر اساس مشخصات رکوردهای نیرومند زلزله است. انتخاب رکوردهای زلزله نیز با توجه به در برداشتن خصوصیات جهت داری، پالس های پر دامنه سرعت و اسپایک های پر انرژی شتاب صورت گرفته است. ماهیت واقعی رفتار ساختگاه در حوزه نزدیک گسل نیز با لحاظ نمودن هر دو مولفه افقی شتاب نگاشت رکورد همراه با در نظر گرفتن اثر مولفه قائم تعریف شده است. اثرات هم پایه سازی رکوردهای انتخابی و ضرایب مقیاس در معیار سازی و محاسبه بارگذاری جانبی، دخالت داده شد.

## ۲- آنالیز پوش آور مودال

تحلیل بار افزون مودال (MPA) یکی از روش های تعمیم یافته پوش آور است. اصلاح محاسباتی روش نیز با لحاظ نمودن اثرات مودهای بالاتر صورت می گیرد. نتایج حاصل از این روش دارای دقت مناسب و قابل قبولی است. همچنین تخمین با تقریب خوب از پارامترهای پاسخ لرزه ای سازه نظیر دریفت و تغییر مکان طبقات ارائه می دهد. روش MPA در سال ۲۰۰۱ میلادی توسط Chopra و Goel مطرح شد [۷-۸]. رابطه سازی تحلیل بار افزون با استفاده از فرمول زیر انجام می شود:

$$S_n = M \phi_n \quad (1)$$

پارامتر  $S_n$  معرف الگوی بارگذاری جانبی،  $M$  جرم مودی و  $\phi_n$  الگوی تغییر شکل جانبی در مود  $n$  ام سازه چند درجه آزاد (MDOF) می باشند. سیستم یک درجه آزاد (SDOF) معادل به عنوان جایگزین مدل چند درجه آزاد (MDOF) دارای زمان تناوب (T) و میرایی ( $\xi$ ) برابر با سازه اصلی می باشد. منحنی معیار نیرو-تغییر شکل سیستم معادل بر اساس روابط زیر بدست می آید:

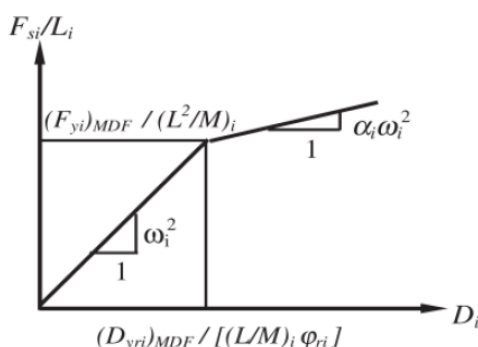
$$(F_{yi})_{SDOF} = (F_{yi})_{MDOF} / (L/M)_i \quad (2)$$

$$(U_{riy})_{SDOF} = (U_{riy})_{MDOF} / [(L/M)_i \phi_{ri}] \quad (3)$$

$$\alpha_{SDOF} = \alpha_{MDOF} \quad (4)$$

$$L_i = \sum m_j \phi_{ji} \cdot M_i = \sum m_j \phi_{ji}^2 \quad (5)$$

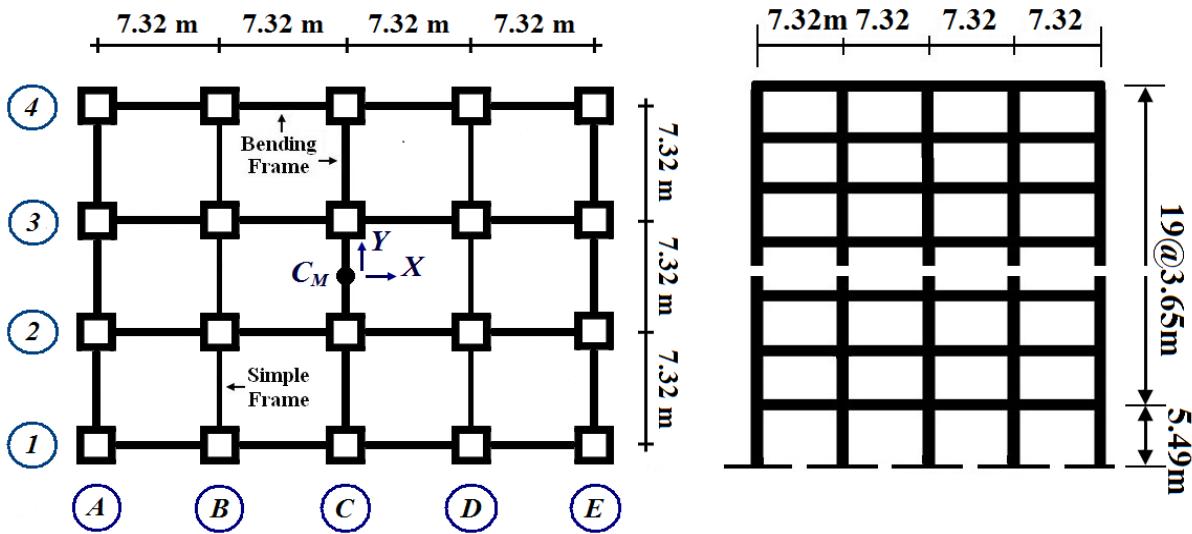
پارامتر  $F_{yi}$  مقاومت تسلیم در مود  $i$  ام،  $U_{riy}$  تغییر مکان تسلیم بام در مود  $i$  ام،  $\phi_{ri}$  شکل مودی بام در مود  $i$  ام،  $\alpha$  سختی کرنشی مصالح و  $F_{si}$  سختی مقیاس شده سیستم متناسب با پاسخ زمانی سازه می باشد [۹-۱۰]. نمودار پارامتریک شکل ۱ نشان دهنده مبنای رابطه سازی فوق است.



شکل ۱. منحنی معیار نیرو-تغییر شکل سازه یک درجه آزاد معادل (SDOF)

### ۳- معرفی مدل مطالعاتی

سازه مورد مطالعه در این مقاله، در برگیرنده مدل سه بعدی قاب خمشی فولادی با ساختار بزرگ دو سلولی است (شکل های ۲ و ۳). اسکلت مقاوم بصورت ۲۰ طبقه و با پلان منظم می باشد. ساختار مقاوم قاب خمشی دسته شده محیطی با دهانه بزرگ در در شکل های ۲ و ۳ مشخص است. اندازه هر دهانه ۷,۳۲ متر می باشد که بیشتر از حد متعارف و معمول است. اسکلت مقاوم سازه مطالعاتی دارای تقارن هندسی و بارگذاری در طبقات می باشد. ارتفاع طبقه اول ۵,۴۹ متر و ارتفاع بقیه طبقات بصورت یکسان و برابر با ۳,۶۵ متر می باشد (شکل ۲).



شکل ۳. پلان منظم سازه ۲۰ طبقه اسکلت فولادی

شکل ۲. نمای سازه ۲۰ طبقه اسکلت فولادی

خاک ساختمانی از نوع تیپ ۲ بوده و منطقه پروژه در پهنه بندی با خطر نسبی خیلی زیاد فرض گردیده است. بارگذاری ثقلی مدل بر اساس مبحث ششم مقررات ملی ساختمان و بارگذاری لرزه ای بر اساس ویرایش چهارم آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) انجام شده است. بار مرده و زنده اعمال شده به سازه بر اساس استاندارد ملی ساختمان ایران (مبحث ششم) برای تمام طبقات به ترتیب  $0.5 \text{ t/m}^2$  و  $0.2 \text{ t/m}^2$  و برای بام (تراز کف بیستم)  $0.5 \text{ t/m}^2$  و  $0.15 \text{ t/m}^2$  می باشد. مشخصات مقاطع اعضا بر اساس استاندارد ملی ساختمان ایران (مبحث دهم مقررات ملی ساختمان) طراحی شده و در جدول های ۱ و ۲ مشخص است [۱۱-۱۳].

همچنین در فرآیند طراحی اعضا نیز دو معیار محدودیت جابه جایی نسبی لرزه ای طبقات و رعایت اصل ستون قوی - تیر ضعیف<sup>۱</sup> در اتصالات نیز لحاظ گردیده است. نسبت ضریب میرایی سازه ۵٪ می باشد. ضریب رفتار با قابلیت شکل پذیری برابر با ۵ در نظر گرفته شده است. پرپود سه مود اول ارتعاشی سازه مطالعاتی در جدول ۳ آورده شده است. با توجه به اعداد بدست آمده در جدول، به دلیل بیشتر بودن پرپود مود اول انتقال نسبت به اولین مود پیچشی، سازه به صورت پیچشی سخت رفتار می نماید.

جدول ۱. مشخصات مقاطع ستون های مدل مطالعاتی (ابعاد به cm)

طبقه	قاب های خمشی محیطی	قاب های خمشی در جهت X پلان	قاب های مفصلی در جهت X پلان	قاب های خمشی در جهت Y پلان
۱	Box 80x86x3-2PL *	Box 80x86x3-2PL 3	Box 80x86x3-2PL 3	Box 80x86x3-2PL 3
۲	Box 80x2.5-2PL 3	Box 80x2.5-2PL 3	Box 80x2.5-2PL 3	Box 80x2.5-2PL 3
۳ - ۷	Box 75x2.5	Box 75x78x3	Box 75x78x3	Box 75x78x3
۸ - ۱۰	Box 70x2.5	Box 70x72x3	Box 70x72x3	Box 70x72x3
۱۱ - ۱۲	Box 65x2	Box 65x68x3	Box 65x68x3	Box 65x68x3
۱۳ - ۱۶	Box 60x2	Box 60x62x2	Box 60x62x2	Box 60x62x2
۱۷ - ۱۸	Box 55*2	Box 55x58x3	Box 55x58x3	Box 55x58x3
۱۹ - ۲۰	Box 50x2	Box 50x52x3	Box 50x52x3	Box 50x52x3

\* چهارستون گوشه (کنج) طبقه همکف سازه 3-2PL 82x82x3-2PL

<sup>1</sup> Strong Column Weak Beam (SCWB)

جدول ۲. مشخصات مقاطع شاه تیرهای مدل مطالعاتی (ابعاد به cm)

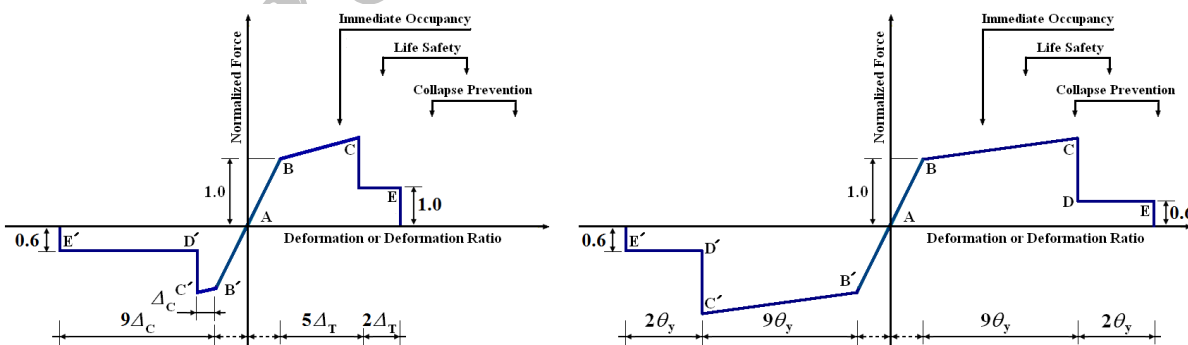
مشخصات	طبقه
2IPE30x2x1.5	۱-۴
2IPE25x2x1.5	۵-۱۳
2IPE20x2x1.5	۱۴-۱۶
2IPE20x2x1.5	۱۷-۲۰

جدول ۳. پریود سه مود اول ارتعاشی سازه مطالعاتی

مود ۱ (پیچشی) راستای Z	مود ۱ (انتقالی) راستای X	مود ۱ (انتقالی) راستای Y
2.07 s	2.32 s	3.04 s

#### ۴- مدل سازی رفتار غیرخطی المان های سازه

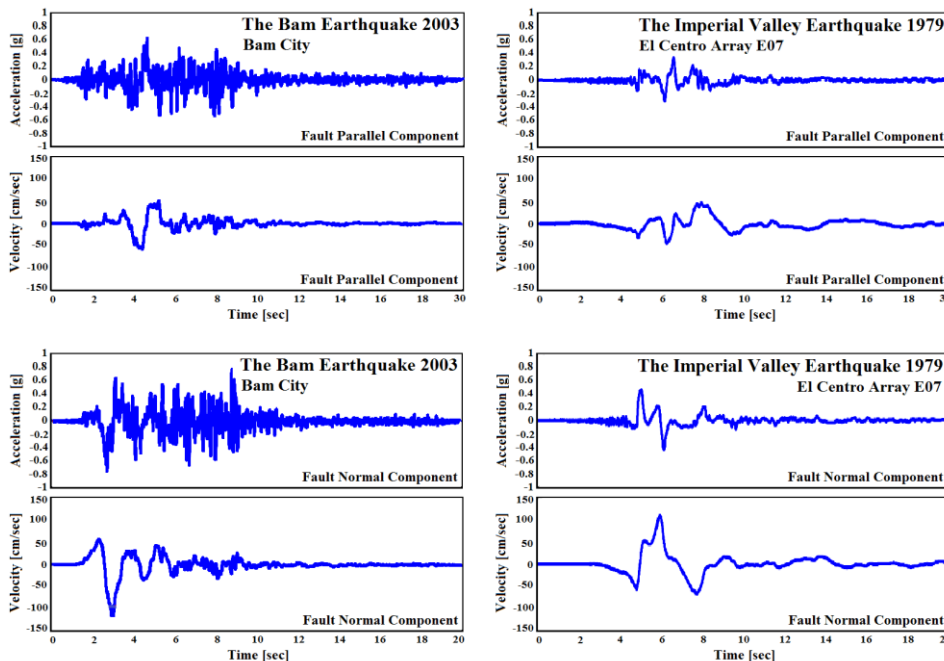
قابلیت رفتار غیرخطی المان های اصلی سازه به وسیله تخصیص مدل های مفصل پلاستیک متمرکز به نواحی محتمل تعریف می شود. تعریف منحنی معیار عمومی نیرو-تغییر شکل در حوزه غیر خطی نیز بر اساس گزارش های FEMA ۳۵۶ و FEMA ۴۴۰ برای پارامترهای تحلیلی مفصل پلاستیک انجام شده است. مفصل پلاستیک با ساختار اندرکنشی خمشی M برای شاه تیرها ، PMM برای ستون های سازنده قاب های صلب خمشی لحاظ گردید. همچنین مدل رفتار غیر خطی P ناشی از کمانش محوری تشدید یافته (Bowling Effect) و نمود اثرات P-Δ برای همگی ستون های دو قاب ساده (اتصالات مفصل) محور های B و D منظور شد. ساختار عددی هر سه مفصل غیر خطی M ، PMM و P در شکل ۴ آورده شده است [۱۴-۱۶].



(ب) مفصل غیر خطی محوری P

(الف) مفصل غیر خطی خمشی M و خمشی - محوری PMM

شکل ۴. مدل رفتار غیرخطی مفصل پلاستیک بر اساس گزارش های FEMA [۱۴، ۱۵]



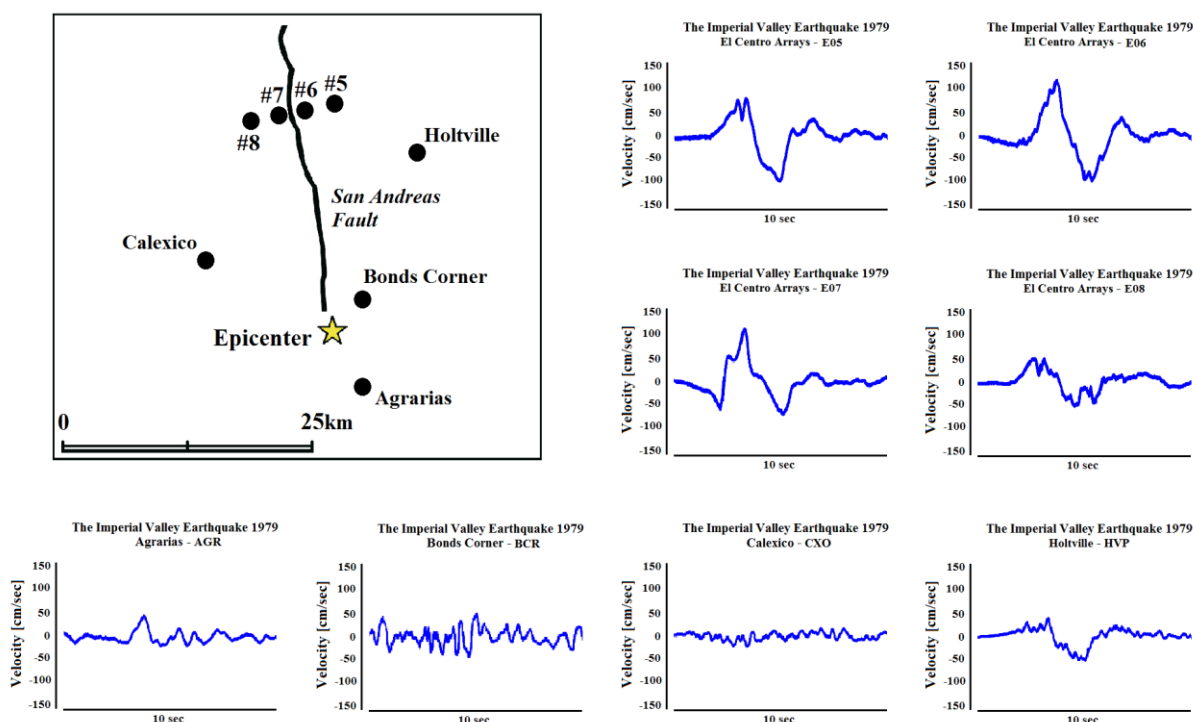
شکل ۵. اسپایک های پردامنه شتاب و پالس های پیوسته و مشخص سرعت در تاریخچه زمانی دو رکورد BAM و E07

## ۵- رکوردهای انتخابی

بطور معمول، رکورد های حوزه نزدیک در ایستگاه های با فاصله کمتر از ۲۰ Km نسبت به صفحه شکست گسل ثبت شده اند. نواحی گسیختگی گسل دارای ساختار زمین شناختی بسیار متفاوت بوده و نمود اثرات آن در تاریخچه زمانی رکوردهای حوزه نزدیک نیز بصورت گوناگون می باشد. رکوردهای حوزه نزدیک حاوی دامنه بیشتر شتاب و سرعت زمین بوده و محتوای توانی طیف فوری آنها دارای باند مشخص تر و باریک تر فرکانس های پر انرژی است. همچنین مولفه های ارتفاعی متناظر با باند مشخص فرکانس های پر انرژی در طیف فوری این رکوردها نیز به مراتب از محتوای فرکانسی گسترده رکوردهای حوزه دور، بزرگتر است. نمود این موضوع در شکل متفاوت طیف های فوری متناظر با دو نوع رکوردهای مذکور است.

ساختار انتشار امواج برشی نیرومند زلزله های بزرگ در حوزه نزدیک گسل، به گونه ای است که پالس های پیوسته سرعت در تاریخچه زمانی مؤلفه عمود بر صفحه شکست گسل (مؤلفه شتاب TR) دارای نمود مشخص و بزرگتری نسبت به مؤلفه موازی صفحه مذکور (مؤلفه شتاب LN) می باشند. متناظر با حضور پالس های سرعت، تاریخچه تغییر مکان دینامیکی زمین نیز حاوی پالس های بزرگ با ساختار شبه سینوس است. این ساختارهای موجی شکل دارای دامنه بلند و پر بود بزرگ بیش از ۲ ثانیه می باشند. نکته دیگر آن که متناظر با مؤلفه شتاب TR و پالس بزرگ سرعت هم ارز آن، تغییر مکان های موجی شکل دو سویه (رفت و برگشتی) در قالب یک پالس بلند مدت پدیدار می شوند. پالس های تغییر مکان مذکور در مقایسه با موارد متناظر حاصل از مؤلفه شتاب LN و تاریخچه زمانی سرعت زمین هم ارز آن، بزرگتر و پر انرژی تر هستند.

روند آزاد شدن انرژی جنبشی رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک بویژه در بازه زمانی پالس های سرعت و تغییر مکان، دچار یک جهش بزرگ و شدید می شود. تاثیرات وقوع جهش بزرگ در روند آزاد شدن انرژی جنبشی یک رکورد نیرومند حوزه نزدیک (متناظر با تاریخچه زمانی هر دو مؤلفه LN و TR) به شکل ایجاد تغییر مکان های جانبی به نسبت زیاد و برآیند تنش در حد تسلیم، بخصوص در المان های ستون طبقات پایینی اسکلت مقاوم خواهد بود. این روند بویژه با گذر از نخستین پیک بزرگ پالس سرعت و در بخش دوم آن، بسیار شدید است.



شکل ۶. حوزه لرزه خیز امپریال ولی ۱۹۷۹ کالیفرنیا و تاریخچه زمانی سرعت متناظر با مولفه TR رکورد های انتخابی؛ یک پالس پیوسته و پر یود بلند در تاریخچه زمانی سرعت مولفه TR رکوردهای E05 ، E06 ، E07 ، E08 مشاهده می شود. تاریخچه زمانی رکورد BCR حاوی اثرات ضعیف تر جهت داری پیشرونده نسبت به چهار رکورد فوق می باشد. ساختار طیفی رکورد AGR نشان دهنده اثرات جهت داری پسرونده شکست گسل بوده و دو رکورد CXO و HVP ویژگی های جهت داری حثی را توصیف می نمایند [۲۰].

وجود تعداد قابل توجه اسپایک های به نسبت کوتاه مدت (۰,۲-۰,۵ sec) و پر دامنه شتاب زمین، همراه با آشکار شدن پالس های بزرگ و پیوسته سرعت با پر یود بیش از ۱ ثانیه در تاریخچه زمانی، از ویژگی های بارز رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک می باشد. نکته دیگر آن که وجود اثرات هر دو فرایند جهت داری شکست و گام پرتابی زمین نیز سبب آشکار شدن پالس های متناظر سرعت و تغییر مکان برای رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک خواهد شد. رفتار زمین ساختگاه تحت اثرات اینگونه پالس های بزرگ و پر انرژی، بصورت ضربه های بسیار نیرومند است. وجود یک پالس بزرگ و پیوسته در بازه ابتدایی تاریخچه زمانی رکورد به معنای آزاد شدن انرژی جنبشی بسیار زیاد در یک مدت زمان کوتاه می باشد که ناشی از فرایند گسیختگی گسل است [۱۷، ۱۸].

در این مقاله، انجام تحلیل های مودال پوش آور تحت بارگذاری جانبی معیار سازی شده زلزله ها، بر اساس انتخاب یک مجموعه رکورد صورت گرفته است. تعداد ۱۰ رکورد با ویژگی های حوزه دور و نزدیک از زلزله بزرگ حوزه لرزه خیز گسل سن آندریاس کالیفرنیا با نام Imperial Valley 1979 انتخاب شده اند. همچنین رکورد اصلی دو زلزله بسیار نیرومند بم ۲۰۰۳ و طبس ۱۹۷۸ نیز جهت محاسبات معیار سازی بارگذاری جانبی در آنالیزهای MPA در نظر گرفته شده اند [۲۰]. محاسبات هم پایه سازی رکوردهای انتخابی بر اساس ساختگاه با خاک نوع II تکمیل شده و نسبت طیفی میان دو مولفه LN و TR هر رکورد نیز حفظ گردیده است. شکل ۵ نمایش گر اسپایک های پر دامنه و پر قدرت شتاب، به همراه پالس های پیوسته و پر یود بلند سرعت

موجود در تاریخچه زمانی رکورد BAM از زلزله بزرگ بم ایران و همچنین رکورد E07 از زلزله امپریال ولی ۱۹۷۹ کالیفرنیا می باشد.

موقعیت ایستگاه های لرزه نگاری انتخابی در ناحیه نزدیک و با فاصله کمتر از ۲۰ کیلومتر تا گسل سن آندریاس (حوزه دره امپریال) در شکل ۶ مشهود است. همچنین بازه اصلی و پرنرزی ۱۰ ثانیه ای از تاریخچه زمانی رکورد ایستگاه های مذکور در زلزله ۱۹۷۹ این حوزه نیز نشان داده شده اند. نمود شکل های مختلف اثرات جهت داری پیشرو و فرایند شکست پیشرونده گسل، بر پایه پالس های ترکیبی و پیوسته سرعت مربوط به رکورد ایستگاه های چهار گانه E05 تا E08 ملاحظه می شود. یک پالس کم دامنه و با پریود نزدیک ۱,۵ ثانیه در تاریخچه زمانی سرعت مولفه TR از رکورد AGR (حاوی اثرات جهت داری پسرو) وجود دارد. همچنین در تاریخچه زمانی رکورد HVP (حاوی اثرات جهت داری خنثی) نیز یک پالس پریود بلند و کم دامنه مشاهده می شود. رکورد CXO دارای ویژگی های جهت داری خنثی می باشد و نمود آن متفاوت از HVP است. تاریخچه زمانی سرعت متناظر با مولفه TR رکورد CXO، تنها در برگرفته مجموعه ای از اسپایک های بسیار کوچک سرعت بوده و انرژی جنبشی ناچیزی را حمل می نمایند. رکورد به نسبت نیرومند BCR دارای یک مجموعه اسپایک های پر دامنه و نیرومند شتاب است. متناظر با اسپایک های شتاب فوق، گروهی از پالس ها و اسپایک های کوچک و کم دامنه سرعت وجود دارند. ویژگی های طیفی رکورد BCR به گونه ای است که بویژه در حالت مقیاس شده برای سازه ها بلند مرتبه، به شکل یک جنبش پالس گونه بسیار پرنرزی تبدیل می گردد. رکوردهای مقیاس شده حوزه دور Delta (DLT) و Calipatria (CAL) نیز در محاسبات روش MPA بر اساس فرمولاسیون پارامتری مشروح فوق در نظر گرفته شده اند.

#### ۶- رابطه سازی روش تحلیل استاتیکی غیر خطی

تحلیل پوش آور مودال (MPA) با لحاظ نمودن اثرات مودهای بالاتر و همچنین استفاده از مفاهیم ساده کننده محاسباتی، کارایی خوبی در برآورد پارامترهای نیاز غیر خطی دارد. همچنین باید یک مجموعه محاسبات پایه برای لحاظ نمودن وضعیت باز توزیع نیروهای اینرسی ایجاد شده در اسکلت مقاوم سازه بعد از وقوع نخستین تسلیم در المان های اصلی، انجام گردد [۱۹,۲۱]. نکته مهم آن است که برای انجام این مورد باید نخست درصد مشارکت جرم های مودی محاسبه شوند (جدول ۴). اعداد مشارکت مودی را می توان از خروجی های حاصل از آنالیز مودال سازه مطالعاتی در نرم افزار SAP2000 بدست آورد [۲۱]. شایان ذکر است که با توجه به بزرگی نسبی ضرایب مشارکت جرمی مودی متناظر با نخستین سه مود ارتعاشی هر دو راستای X و Y سازه مطالعاتی (شکل ۳)، تنها سه مود برای معیارسازی بارگذاری جانبی در هر جهت پلان (شکل ۲) در نظر گرفته شد. همچنین ضرایب مشارکت مربوط به مودهای پیچشی، بسیار کوچک بوده و از آنها صرف نظر گردید.

جدول ۴. مقادیر درصد مشارکت جرمی مودی برای مودهای انتقالی اول تا سوم هر دو راستای X و Y؛

زیر نویس عبارات ردیف نخست جدول بر اساس شماره مود ارتعاشی در آنالیز مودال سه بعدی است [۲۱].

U ۸x	U ۷y	U ۵x	U ۴y	U ۲x	U ۱y
مود ۳ محور پلان X	مود ۳ محور پلان Y	مود ۲ محور پلان X	مود ۲ محور پلان Y	مود ۱ محور پلان X	مود ۱ محور پلان Y
۰,۰۴۷	۰,۰۴۹	۰,۱۱۵	۰,۱۱۶	۰,۷۶۸	۰,۷۵۵

قابل ذکر است که اعداد بدست آمده برای درصد مشارکت های جرمی مودی، در درایه متناظر شکل مود ارتعاشی i ام (معرف جابه جایی نرمالیزه) در تراز مرکز جرم CM طبقات، به صورت جداگانه و برای هر مود ارتعاشی ضرب می گردد. سپس مقادیر SRSS آنها برای راستای X و Y هر طبقه محاسبه شده و مقادیر عددی SRSS هر دو راستا به صورت جداگانه و متناظر با



ترازهای متوالی طبقات سازه، از یکدیگر کم می شوند. همچنین پس از انجام مراحل ذکر شده بالا، مقادیر بدست آمده از تفاضل پارامتر محاسباتی SRSS طبقات در دو راستا به صورت جداگانه در جرم طبقات ضرب می شوند. مجموعه اعداد حاصل داری دیمانسیون نیرو بوده و توصیف کننده بارگذاری معیارسازی شده جانبی است. این بارگذاری، بطور همزمان در هر دو راستای X و Y هر طبقه، بر روی مرکز جرم CM وارد می شوند. این بردار اعداد بارگذاری در آنالیز MPA متناظر با همان آرایه شتاب دو مولفه LN و TR مربوط به یک رکورد زلزله است. نکته تحلیلی دیگر در این مورد، آن است که باید همان نسبت طیفی میان PGA دو مولفه LN و TR رکورد زلزله هدف، برای دو آرایه بارگذاری در آنالیز MPA نیز رعایت گردد.

نکته دیگر آن که "تغییرمکان هدف" برای هر رکورد زلزله در حالت مقیاس شده، برابر با مقدار جا به جایی جانبی مرکز جرم CM در تراز طبقه ۲۰ ام بوده و بر اساس انجام تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی (تحت رکورد مقیاس شده مورد نظر) بدست می آید. در واقع هدف این است که سازه تحت آنالیز پوش آور مودال به همان جابه جایی برابر با تغییرمکان جانبی حاصل از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی برسد. جدول ۵ شامل جابه جایی های مرکز جرم CM در تراز طبقه ۲۰ ام بدست آمده از تحلیل های غیر خطی تاریخچه زمانی تحت رکوردهای مقیاس شده، می باشد. این اعداد در واقع همان تغییرمکان های هدف سازه در حالت اعمال بارگذاری معیارسازی شده متناظر با هر رکورد، برای انجام آنالیز پوش آور مودال هستند. شایان ذکر است که هم پایه کردن نتایج آنالیزهای MPA و NTHA نیز بر پایه همسان سازی برش پایه ماکزیمم محاسباتی حاصل از هر دو روش صورت می گیرد. بر این اساس می توان نسبت های متناظر محاسباتی را برای پارامترهای پاسخ لرزه ای سازه مطالعاتی اعمال نمود.

جدول ۵. جابه جایی های مرکز جرم CM در تراز طبقه ۲۰ ام بر پایه تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی

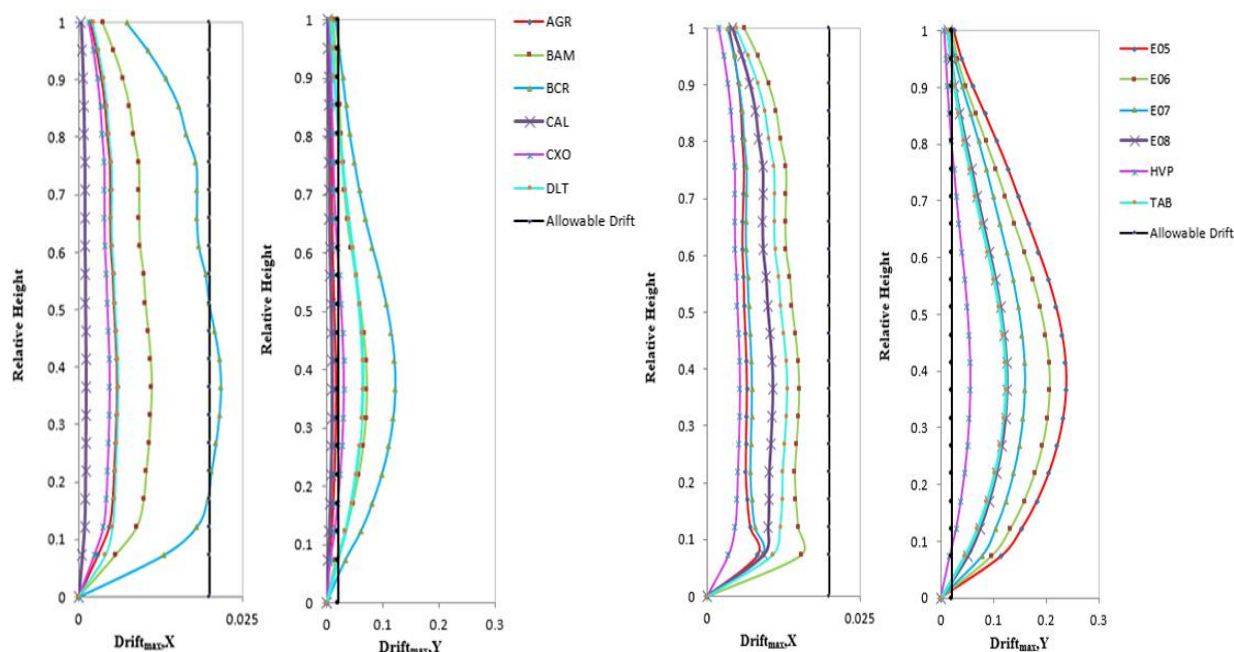
	جابه جایی در راستای X (m)	جابه جایی در راستای Y (m)	معیار SRSS (m)
BAM	۱,۱۷۸۹	۱,۹۶۹۴	۲,۲۹۵
TAB	۰,۹۵۰۲	۱,۳۸۸۳	۱,۶۸۲
E05	۱,۱۲۵۶	۴,۶۹۰۲	۴,۸۲۰
E06	۱,۶۶۳۸	۲,۹۸۸۲	۳,۴۲۰
E07	۰,۸۲۵۳	۲,۱۵۱۸	۲,۳۰۰
E08	۰,۹۲۰۹	۱,۵۹۶۶	۱,۸۴۰
HVP	۰,۴۳۷۵	۰,۸۵۴۶	۰,۹۵۹
CXO	۰,۲۷۱۴	۰,۴۵۹۳	۰,۵۳۳
AGR	۰,۳۶۹۸	۰,۴۱۸۱	۰,۵۵۸۲
BCR	۱,۰۶۰	۱,۲۵۰	۱,۶۴۴
CAL	۰,۰۸۹۹	۰,۲۳۵۹	۰,۲۵۲۴
DLT	۰,۳۷۸۳	۰,۶۹۸۱	۰,۷۹۳۹

## ۷- بررسی نتایج حاصل از تحلیل پوش آور مودال

### ۷-۱- پوش بیشینه دریافت طبقات

ماکزیمم دریافت حاصله از تحلیل های پوش آور مودال در شکل ۷ در دو جهت X و Y پلان سازه مطالعاتی نشان داده شده است. ملاحظه می شود که دامنه تغییرات دریافت مربوط به همگی رکوردهای حوزه نزدیک به ویژه در جهت Y از مقدار مجاز آیین نامه ای (۲درصد) طراحی لرزه ای تجاوز کرده اند. تحت اثر رکوردهای نیرومند مقیاس شده، تغییر شکل های بزرگ در رفتار لرزه ای سازه پدیدار می شود. همراه با زیاد شدن میزان تغییرمکان های جانبی اسکلت مقاوم، وضعیت تعادلی کلی سازه به سمت فرو ریزش پیش می رود. نمود این اثرات در بزرگ شدن دامنه تغییرات پارامتر دریافت سازه می باشد. همراه با این

روند نیز احتمال آشکار شدن وضعیت "نیرو-کنترل"<sup>۲</sup> در رفتار المان های اصلی اسکلت مقاوم و ایجاد ناپایداری دینامیکی موضعی وجود دارد. برقراری این وضعیت در گام های تحلیلی روش MPA ، امکان تشکیل طبقه نرم را در پی دارد. عامل مهم تاثیرگذار در این خصوص نیز تعریف بارگذاری معیارسازی شده جانبی برای یک رکورد نیرومند در حالت مقیاس شده است. توجه دقیق به شرایط و ضوابط برقراری معیار "ستون قوی - تیر ضعیف" در طرح لرزه ای سازه، به عنوان یک مقوله اساسی مورد نظر است. بدین ترتیب می توان با حفظ پایداری کامل دینامیکی اسکلت مقاوم، برقراری و ثابت ماندن وضعیت "تغییرمکان-کنترل"<sup>۳</sup> در رفتار المان های اصلی را نیز تا حد زیادی تضمین نمود.



شکل ۷. دریافت حاصله از تحلیل پوش آور مودال در دو جهت X,Y پلان و مقایسه مقادیر آن ها با مقدار مجاز آیین نامه

## ۷-۲- بیشینه نیروی محوری ستون های گوشه پلان

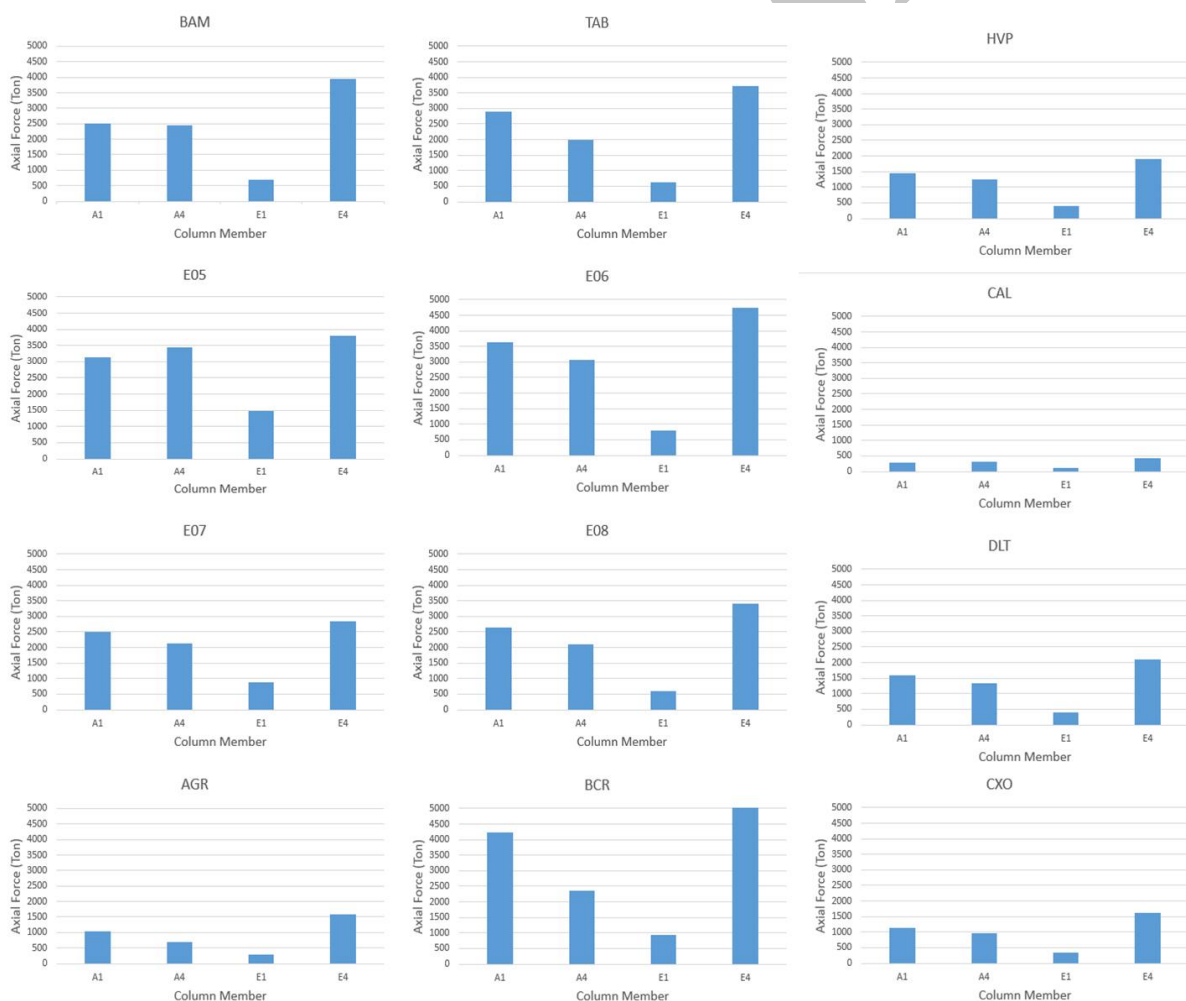
بر پایه ارزیابی نتایج تحلیل های پوش آور مودال، برآیند نیروی محوری چهار ستون گوشه ای  $A_1$  ،  $A_4$  ،  $E_1$  و  $E_4$  در پلان شکل ۳ استخراج شدند. شکل ۸ نمایش گر نتایج است و می توان یک ساختار عددی به نسبت همانند را برای آرایش بیشینه نیروی محوری چهار ستون مذکور مشاهده نمود. یک دلیل عمومی این مقوله، کاربرد حالت مقیاس گذاری شده رکوردهای انتخابی در محاسبه تغییرمکان هدف می باشد. تعریف حالت هم پایه شده رکوردها بویژه با ضرایب مقیاس بزرگ، در موضوع ارزیابی عملکرد لرزه ای ساختمان های بلند مرتبه، سبب افزایش چشمگیر بارگذاری جانبی و دامنه عددی برآیندهای نیرویی المان های سازه خواهد شد. بدین لحاظ، روند شکل گیری و گسترش مفاصل پلاستیک در اسکلت مقاوم سازه، فزونی گرفته و تغییر شکل های بزرگ بوجود خواهند آمد.

موضوع مهم دیگر در خصوص پیکربندی نمودارهای شکل ۸ ، مسئله اثرات تشدید یافته انتشار امواج زلزله در اسکلت مقاوم سازه است. ضرایب مقیاس بزرگ بویژه برای رکوردهای نیرومند حاوی اثرات جهت داری شکست سبب افزایش بسیار

<sup>2</sup> Force Control

<sup>3</sup> Displacement Control

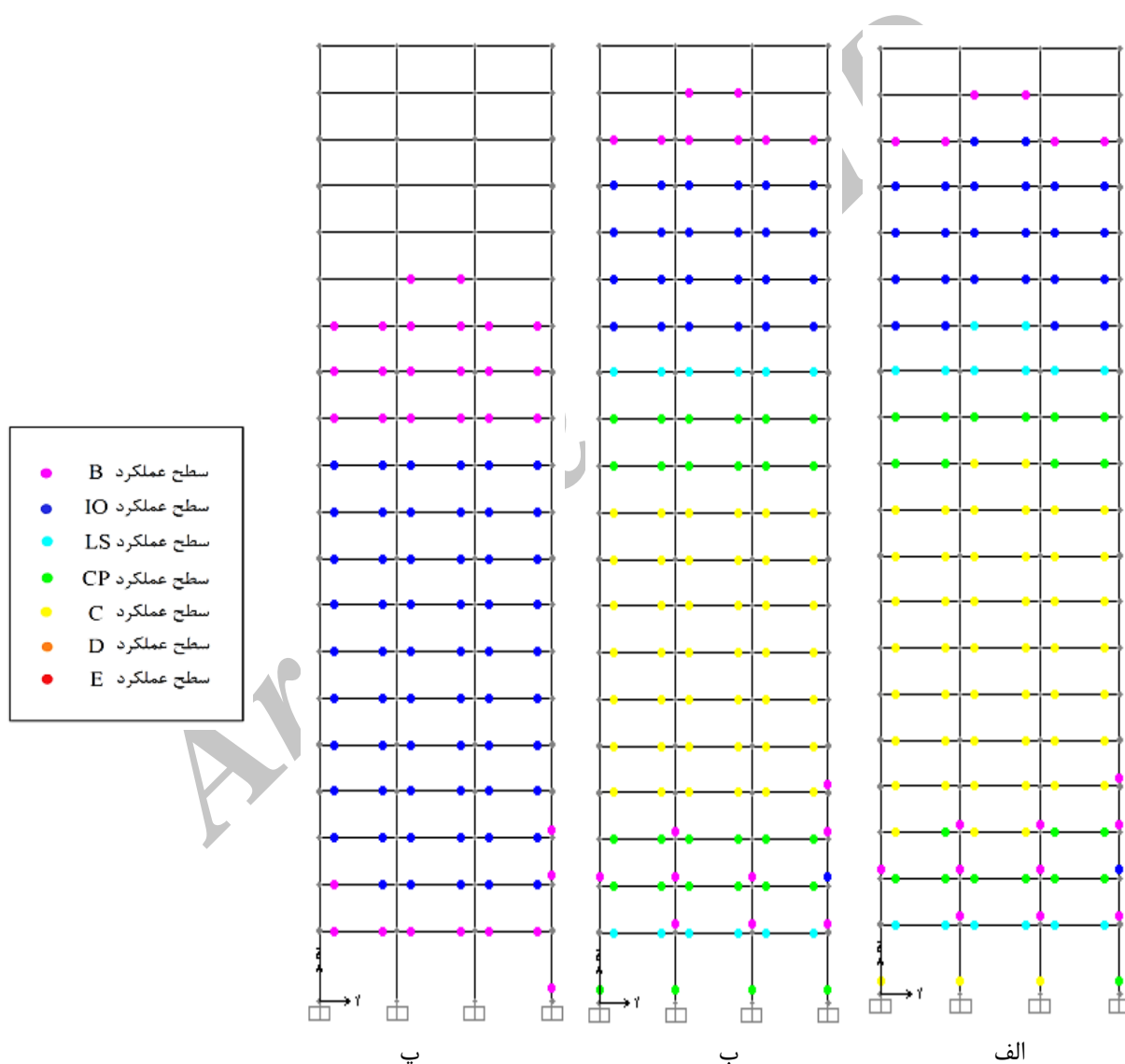
زیاد محتوای انرژی جنبشی آنها شده و نیازهای لرزه ای پر دامنه را به اسکلت مقاوم سازه اعمال خواهد نمود. این موضوع برای رکوردهای حوزه نزدیک دارای اثرات جهت داری پسرو و خنثی نیز یک افزایش قابل توجه در میزان انرژی جنبشی آنها در پی دارد. باند فرکانس های بالا (بیش از ۲۵ هرتز) برای رکوردهای حوزه نزدیک با هر سه نوع اثرات جهت داری، چندان پر انرژی نیست. نکته دیگر آن که با اعمال ضرایب مقیاس به نسبت بزرگ متناظر با پرپود پایه ساختمان های بلند، قابلیت حمل انرژی باند فرکانسی مذکور به شدت تقویت می گردد. این موضوع نیز تاثیرگذار در افزایش شدید برآیندهای نیرویی المان های سازنده اسکلت مقاوم داشته و ایجاد ناپایداری های دینامیکی موضعی خواهد نمود. اثرات مذکور نیز با انتشار پیوسته ارتعاشات نیرومند شده حاصل از رکورد زلزله دارای مقیاس، ارتباط مستقیم دارد. بدین ترتیب، همراه با تشکیل مودهای ناپایداری دینامیکی کلی برای اسکلت مقاوم ناشی از تقویت باند فرکانس های پایین رکورد زلزله، احتمال بزرگتر شکل گیری ناپایداری های موضعی نیز بیشتر خواهد شد. نمود این دو فرایند به شکل افزایش قابل توجه برای برآیندهای نیرویی است. پیکربندی نمودارهای شکل ۸ مفاهیم فوق را توصیف می نماید.



شکل ۸. بیشینه نیروی محوری ستون های گوشه پلان شکل ۳ برگرفته از نتایج MPA

### ۳-۷ - ساختار مکانیزم پلاستیک در سازه

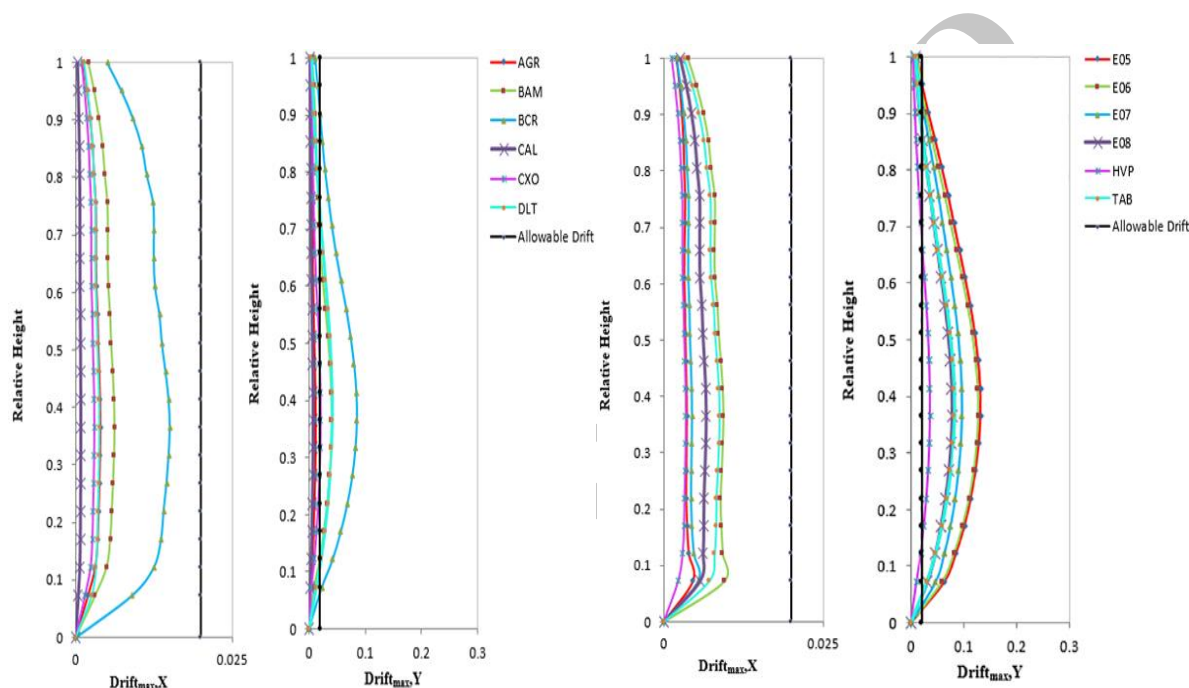
ساختار تشکیل مفاصل پلاستیک در اسکلت مقاوم سازه مطالعاتی تحت تحلیل MPA و بارگذاری جانبی معیارسازی شده برای رکوردهای زلزله دارای پالس های سرعت (مانند شکل ۵) ، دارای روند افزایشی است. همچنین رعایت اصل ستون قوی - تیر ضعیف در طرح لرزه ای سازه مطالعاتی، نمود بیشتر دامنه رفتار غیرخطی برای المان های شاه تیرها واقع در طبقات میانی را نشان می دهد. آرایش نهایی مفاصل پلاستیک تحت بارگذاری معیارسازی شده در MPA و متناظر با رکوردهای E05 , Bam , E07 , در شکل ۹ آورده شده است. ملاحظه می شود که در بسیاری از المان های شاه تیر بویژه در نیمه پایین سازه، مفصل پلاستیک با دامنه غیر خطی بسیار بزرگ تشکیل ایجاد شده است.



شکل ۹. آرایش نهایی مفاصل پلاستیک در قاب خمشی محور C شکل ۳ حاصل از تحلیل های MPA با معیار سازی بارگذاری جانبی بر اساس رکورد زلزله، (الف) معیار رکورد E05 ، (ب) معیار رکورد E07 ، (پ) معیار رکورد Bam؛ تعریف سطوح عملکرد بر اساس گزارش FEMA 356 و نرم افزار SAP 2000 می باشد.

#### ۷-۴ - بیشینه دررفت طبقات در آنالیز پوش آور تک مود (مود اول)

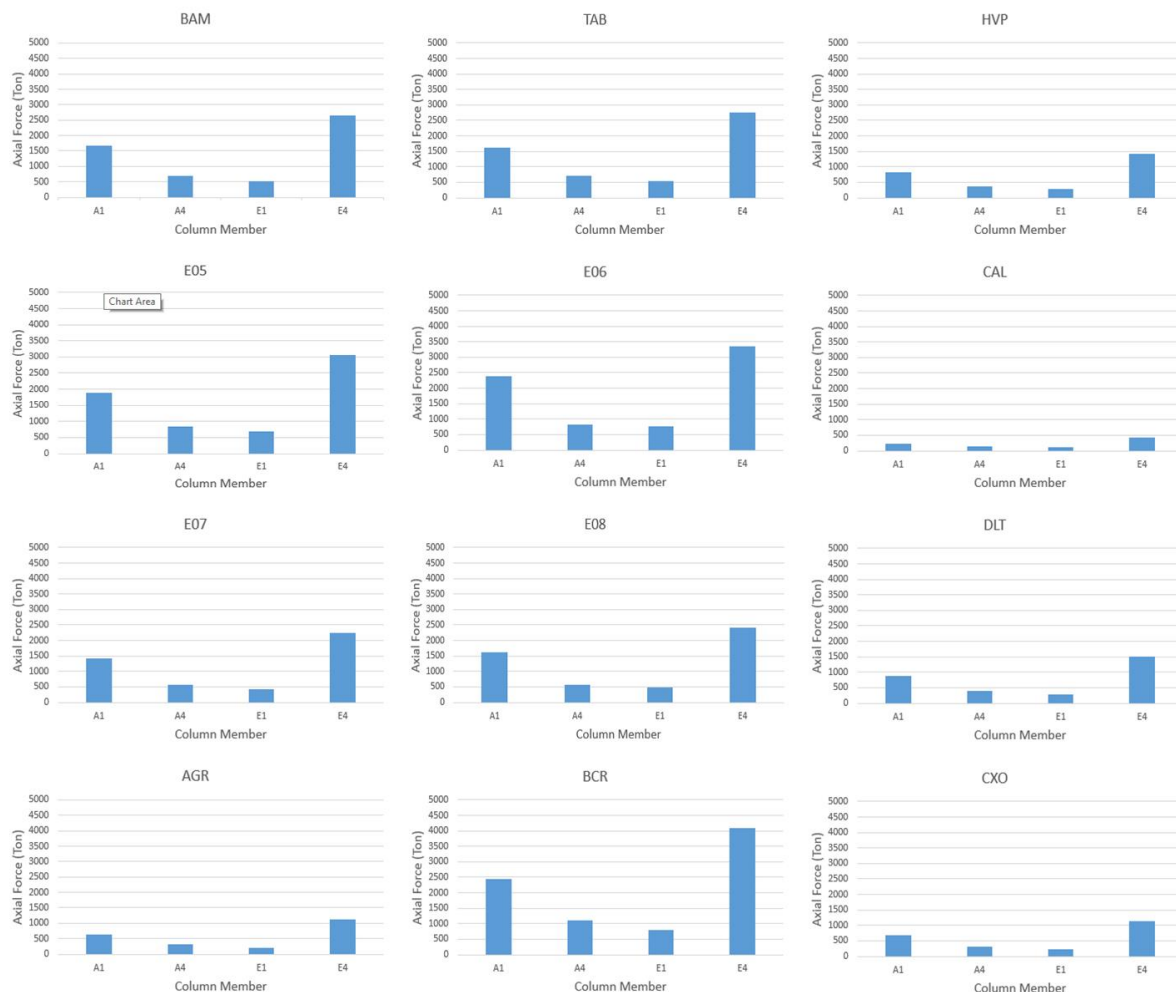
با انجام آنالیز پوش آور مود اول (بارگذاری معیار سازی شده با مود پایه) ماکزیمم دررفت حاصله در شکل ۱۰ در دو جهت X و Y پلان سازه مطالعاتی نشان داده شده است. ملاحظه می شود که دامنه تغییرات دررفت مربوط به همگی رکوردهای حوزه نزدیک به ویژه در جهت Y از مقدار مجاز آیین نامه ای (۲ درصد) طراحی لرزه ای تجاوز کرده اند. با مقایسه شکل ۱۰ و شکل ۷ ملاحظه می شود که مقادیر ماکزیمم کمتری در کاربرد آنالیز پوش آور مود اول نسبت به آنالیز پوش آور مودال بدست می آید. همچنین برای سازه متقارن مطالعاتی با دهانه های بزرگ، چنانچه معیارسازی بارگذاری جانبی بر اساس تنها مود اول ارتعاش صورت گیرد، روش پوش آور منتهی به نتایج دارای تقریب خواهد شد.



شکل ۱۰. دررفت حاصله از تحلیل پوش آور مود اول در دو جهت X,Y پلان و مقایسه مقادیر آن ها با مقدار مجاز آیین نامه

#### ۷-۵ - بیشینه نیروی محوری ستون های گوشه پلان در آنالیز پوش آور تک مود

بر پایه ارزیابی نتایج تحلیل های پوش آور مود اول، برآیند نیروی محوری چهار ستون گوشه ای A1، A4 و E1، E4 در پلان شکل ۳ استخراج شدند. شکل ۱۱ نمایش گر نتایج است و می توان ساختار عددی یکسانی برای بیشینه مقدار آن در نظر گرفت. یکی از دلایل آن، کاربرد حالت مقیاس گذاری شده رکوردهای انتخابی در محاسبه تغییرمکان هدف می باشد. با مقایسه مقادیر بدست آمده از شکل ۱۱ و شکل ۸ می توان مشاهده نمود که مقادیر عددی بدست آمده برای ۴ ستون گوشه در پوش آور تک مود به مراتب کوچکتر از اعداد بدست آمده برای پوش آور مودال می باشد. قابلیت تخمین محاسباتی در روش پوش آور مودال بیشتر بوده و نتایج با مقیاس بزرگ تر را در تعیین ظرفیت سازه در حوزه رفتار غیر خطی بر اساس روش نیرو ارائه می دهد. نمود دیگر نتایج MPA در برآورد با دقت بالاتر برای مکانیسم های احتمالی خرابی و آسیب پذیری سازه است.



شکل ۱۱. بیشینه نیروی محوری ستون های گوشه پلان شکل ۳ بر گرفته از نتایج پوش آور مود اول

## ۸- نتیجه گیری

نگرش تحلیلی بر پارامترهای پاسخ غیر خطی سازه قاب ترکیبی محیطی با ارتفاع ۲۰ طبقه و دارای دهانه های بزرگ انجام گردید. توصیف بارگذاری جانبی بر اساس معیارسازی اثرات اینرسی سازه و مشخصات طیفی مقیاس گذاری رکوردهای نیرومند زلزله صورت گرفت. انتخاب رکوردهای زلزله جهت امر فوق نیز با توجه به حضور پالس های بزرگ و پیوسته سرعت و اسپایک های متناظر شتاب زمین صورت داده شد.

ارزیابی نتایج روش MPA متاثر از اثرات تشدید یافته انتشار امواج زلزله در اسکلت مقاوم ساختمان های بلند مرتبه است. محاسبه ضرایب مقیاس بزرگ بویژه برای رکوردهای حاوی اثرات جهت داری شکست و پالس های پیوسته سرعت سبب افزایش زیاد سطح انرژی جنبشی آنها می گردد. نمود مستقیم این مورد نیز در تعیین حدود بزرگ برای تغییرمکان هدف می باشد. بدین ترتیب، نیازهای لرزه ای بزرگ و پر دامنه به اسکلت مقاوم سازه اعمال خواهد شد. همچنین، این احتمال وجود دارد که نتایج تحلیلی روش MPA نیز در سطح عملکردی آستانه فروریزش و یا بالاتر از آن بدست آید. موضوع فوق باید در توصیف نتایج تحلیلی روش MPA و روش NTHA بویژه برای حالت محاسبه بارگذاری جانبی معیارسازی شده متناظر با یک رکورد نیرومند حوزه نزدیک زلزله، در نظر گرفته شود.

نتایج روش پوش آور مودال تحت بارگذاری پارامتریک معرف زلزله های حوزه نزدیک، با لحاظ نمودن اثرات موده‌های بالاتر به سمت تقاضای کمتری میل می کند. ملاحظه گردید که دامنه عددی نمودار پوش بیشینه دریافت، بویژه در ترازهای میانی اسکلت مقاوم، به بیشترین اندازه خود می رسد. همچنین آن که این دامنه عددی می تواند از سطح عملکرد ایمنی جانی نیز فراتر رود.

## مراجع

- [1] Smith, B. S., Coull, A., and Stafford-Smith, B. S. Tall Building Structures: Analysis and Design (Vol. 5). New York: Wiley, 1991.
- [۲] ازهری، مجتبی. میرقادری، سید رسول. "طراحی سازه های فولادی (جلد چهارم، مبحث طراحی لرزه ای)". چاپ سوم، ۱۳۹۰.
- [3] Azhdarifar, M., Meshkat-Dini, A., and Sarvghad-Moghadam, A., Study on the seismic response Parameters of Steel Medium-Height Buildings with framed-tube skeleton under near-fault Records. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 15, 1, 2015.
- [4] Gaur, H., and Goliya, R.K., Mitigating shear lag in tall buildings. *International Journal of Advanced Structural Engineering (IJASE)*, 7(3), 269-279, 2015.
- [5] Ahmadi, A., Azhdarifar, M., and Meshkat-Dini, A., A study on the effects of the frame modulation changes in the seismic response parameters of bundled tube structures under near-field records. International Conference on Civil Engineering Architecture and Urban Infrastructure, Iran, Tabriz, 2015.
- [6] Chopra, A.K., and Goel, R.K., "A modal pushover analysis procedure to estimate seismic Demands for Buildings: Theory and preliminary evaluation", PEER Report 2001/03. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2001.
- [7] Chopra, A.K., and Goel, R.K., A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31(3), 561-582, 2002.
- [8] Eghbali, M., Amiri, G. G., and Dehkordi, M. R., 1840. Evaluation of modified nonlinear dynamic and static analyses for seismic behavior of steel moment resisting frames. *Journal of Vibroengineering*, 17(8), 2015
- [۹] اقبالی، م.، قدرتی امیری، غ.، یغمایی سابق، س. مقایسه روش های تقریبی و دقیق تحلیل دینامیکی فزاینده در ارزیابی لرزه ای قاب های خمشی فولادی، نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد، تهران، ۱۳۹۱.
- [۱۰] حسینی، م و صدرآرا، م. اثر مولفه ی قائم زلزله در قاب خمشی بزرگ دهانه در ساختمان های فولادی، مهندسی عمران شریف، تهران، ۱۳۹۶.
- [۱۱] آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش ۴).
- [۱۲] مقررات ملی ساختمان ایران، مبحث دهم: طرح و اجرای ساختمان های فولادی، تهران، ۱۳۹۲.
- [۱۳] مقررات ملی ساختمان ایران، مبحث ششم: بارهای وارده بر ساختمان، تهران، ۱۳۹۲.
- [14] FEMA 356, Federal Emergency Management, 1998.
- [15] FEMA 440, Federal Emergency Management, 2005.
- [۱۶] صادق پور، م.، مشکوه الدینی، ا. نگرش تحلیلی بر روند تغییرات پاسخ لرزه ای اسکلت های ترکیبی قاب محیطی مهاربندی شده و کمربند سخت کننده ، پنجمین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین المللی مصالح و سازه های نوین در مهندسی عمران، تهران، ۱۳۹۵.
- [17] Mollaioli, F., Bruno, S., Decanini, L. D., and Panza, G. F., Characterization of the dynamic response of structures to damaging pulse-type near-fault ground motions. *Meccanica*, 41(1), 23-46, 2006.
- [18] Kalkan, E., and Kunnath, S. K., Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings. *Earthquake Spectra*, 22(2), 367-390, 2006.



**5<sup>th</sup>.International Congress on Civil Engineering , Architecture  
and Urban Development**  
**26-28 December 2017, Shahid Beheshti University , Tehran , Iran**



[19] Mortezaei, A., Ronagh, H. R., Kheyroddin, A., and Amiri, G. G., Effectiveness of modified pushover analysis procedure for the estimation of seismic demands of buildings subjected to near-fault earthquakes having forward directivity. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 20(6), 679-699, 2011.

[20] PEER Ground Motion Database, <http://peer.berkeley.edu/>

[21] SAP2000, A Computer Program for Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, California, Berkeley.

Archive of SID