

## بررسی رفتار لرزه‌ای سیستم دوگانه کوتاه مرتبه قاب خمشی و پانل‌های مهاربندی شورون دارای ستون دوخت

رامین مدنی<sup>۱</sup>، سید علی مرتضوی<sup>۱</sup>، افشین مشکوة الدینی<sup>۲\*</sup>

۱-دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

۲-استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

### چکیده

در این پژوهش عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های فولادی ۵ طبقه با چهار سیستم دوگانه قاب خمشی - مهاربندی شورون، شورون همراه با ستون دوخت، شورون معکوس و شورون معکوس همراه با ستون دوخت بر اساس انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیر خطی تحت مجموعه‌ای از رکوردهای سه مولفه‌ای حوزه دور و نزدیک مورد ارزیابی قرار گرفته است. مشخصه‌های رفتاری اسکلت مقاوم دارای پانل‌های مهاربند شورون توسط عملکرد نزدیک به وضعیت کمانش اعضای مورب تحت فشار، کنترل می‌گردد. ملاحظه شده که هنگام وقوع زلزله‌های شدید، این نوع اسکلت مقاوم می‌تواند دچار کاهش تدریجی مشخصه‌های مقاومتی گردد و نمود اثرات دو پدیده کاهش سختی و زوال مقاومت، قابل توجه خواهد بود. یک راهکار مناسب جهت مرتفع ساختن این ضعف، اضافه کردن المان ستون دوخت در پانل مهاربندی شده است. معیار اصلی در انتخاب رکوردهای حوزه نزدیک، وجود پالس منفرد یا ترکیبی با پرپود بلند و دامنه بزرگ در تاریخچه زمانی سرعت زمین بوده است. ملاحظه شد که وجود این ویژگی، پارامترهای پاسخ لرزه‌ای سازه را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد. سازه‌های مطالعاتی با پلان منظم و بر اساس ضوابط لرزه‌ای موجود در استاندارد ۲۸۰۰ و نیز مباحث ششم و دهم مقررات ملی ساختمان طراحی شده‌اند. دیدگاه خاص این پژوهش در ارزیابی تغییرات پاسخ‌های بیشینه تغییر مکان نسبی، سرعت نسبی، شتاب مطلق طبقات، مکانیزم تشکیل مفاصل پلاستیک و نیروی محوری ستون‌ها می‌باشد. نتایج به دست آمده، نشان دهنده برتری حدودی عملکرد لرزه‌ای اسکلت دوگانه دارای المان‌های ستون دوخت (زیپر) نسبت به همین سیستم مقاوم در حالت نبود المان‌های زیپر می‌باشد.

کلمات کلیدی: قاب خمشی، مهاربند شورون، ستون دوخت، جهت‌داری شکست، پالس سرعت.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2018.121243.1486	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://10.22065/jsce.2018.121243.1486	۱۳۹۹/۰۱/۱۵	۱۳۹۹/۰۱/۱۵	۱۳۹۷/۰۵/۲۵	۱۳۹۷/۰۴/۲۳	۱۳۹۶/۱۲/۱۱
			افشین مشکوة الدینی		*نویسنده مسئول:	
			meshkat@khu.ac.ir		پست الکترونیکی:	

# Assessment of Seismic Response of Low-Rise Dual Resistant System comprising of Steel Moment Frame and Zipper Chevron Braced Panels

Ramin Madani<sup>1</sup>, Seyed Ali Mortazavi<sup>2</sup>, Afshin Meshkat-Dini<sup>3\*</sup>

1- MSc Graduate, Structural Engineering, International Campus, Kharazmi University, Tehran, Iran

2- MSc Graduate, Structural Engineering, School of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran

3- Assistant Professor, School of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran

## ABSTRACT

*In this research, the seismic performance of 5-story buildings having four dual systems of moment frame and chevron bracings, chevron panels along with zipper column, inverted chevron panels, inverted chevron panels along with zipper column is evaluated based on conducting nonlinear time history analyses under an ensemble of three components far and near-field records. Behavioral features of resistant skeletons having chevron braced panels are controlled through a near-buckling performance of diagonal limbs under pressure. It has been observed that when intensive earthquakes occur, this type of resistant skeleton reveals a gradual loss in resistant characteristics. The appearance of the effects of the two phenomena of stiffness deterioration and strength degradation would be remarkable. A desirable solution in dealing with this weakness is adding a zipper column to the braced panel. The major criterion in selecting near-field records has been the existence of distinct or compound pulses with long period and large amplitude in the ground velocity time history. It has been noticed that this feature affects the seismic response parameters of building to a great extent. All studied structures have been designed with a regular plan and according to seismic provisions in the code 2800 and also the 6th and 10th issues of the Iranian national building regulations. The specific outlook of this research lies in assessing the changes in maximum displacement responses, relative velocity, absolute acceleration of the floors, plastic hinge formation mechanism and the axial force of the columns. Results show a moderate superiority in the seismic performance of dual skeleton having zipper elements compared to the same resistant system with a lack of zippers.*

## ARTICLE INFO

**Receive Date:** 02 March 2018

**Revise Date:** 14 July 2018

**Accept Date:** 16 August 2018

### Keywords:

*Dual Resistant System*

*Chevron Bracing*

*Zipper Column*

*Rigid Frame*

*Velocity Pulse*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2018.121243.1486

\*Corresponding author: Afshin Meshkat-Dini

Email address: meshkat@khu.ac.ir

## ۱- مقدمه

جنبش‌های نیرومند زمین که تحت عنوان زلزله یا زمین‌لرزه از آن یاد می‌شود، خسارات و تلفات جبران ناپذیری را برای جوامع بشری موجب شده است. دامنه خسارات ایجاد شده در اثر وقوع زمین‌لرزه به عوامل متعددی بستگی دارد. مقوله‌ها و پارامترهای مشخص این موضوع شامل نوع خاک، فاصله گسل تا محل ساختگاه، مکانیزم شکست گسل، ویژگی‌های دینامیکی سازه و نیز مشخصات رکورد زلزله که خود در برگزیده مدت زمان، دامنه و محتوای فرکانسی می‌باشد، است. بدین لحاظ؛ بررسی ارتعاشات پرقدرت زمین از دو منظر مهندسی سازه (تحلیل رفتار سازه) و نیز مهندسی زلزله (تحلیل رفتار ساختگاه) بایستی مد نظر قرار گیرد. نکته دیگر آن که برای دستیابی به مقدار حداقل خسارت حاصل از زلزله‌های بزرگ، تدوین و گسترش دیدگاه‌های تحلیلی نسبت به ارتعاشات نیرومند زمین از اهمیت بسزایی برخوردار است [۴-۱].

ویژگی‌های لرزه‌شناسی جنبش‌ها و تکانه‌های زمین در محدوده نزدیک به گسل به طور چشمگیری با مناطق دور از گسل متفاوت است. در مناطق نزدیک گسل، حرکات نیرومند زمین متأثر از مکانیسم گسل بوده و نمود آن نیز در شکل اثرات جهت‌داری شکست و حرکت پرتابی<sup>۱</sup> زمین منجر می‌شود. نمود فیزیکی و اثرات فرایند جهت‌داری در مکانیزم گسیختگی گسل؛ شامل دو اثر شکست پیش-رونده<sup>۲</sup> و پس‌رونده<sup>۳</sup> می‌باشد. هنگامی که فعالیت‌های تکتونیک زمین سبب می‌شود تا ساختار گسل در آستانه شکست قرار گیرد، روند گسیختگی از محلی در محاذات گسل پدیدار گشته و با توجه به نقطه شروع آن به سمت ابتدا، انتها و یا هر دو جهت گسل گسترش خواهد یافت. گسترش گسیختگی در امتداد خط گسل با عنوان جهت‌داری شکست قلمداد می‌گردد. در این وضعیت چنانچه انتشار گسیختگی گسل در جهت ساختگاه باشد، جهت‌داری پیش‌رونده رخ می‌دهد. بطور معمول در این گونه فرایند جهت‌داری، سرعت شکست ساختار زمین‌شناسی گسل مقداری کمتر از سرعت انتشار امواج برشی ناشی از زلزله است [۸-۵].

رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک حاوی اثرات جهت‌داری پیش‌رونده، در محدوده کمتر از ۱۵ کیلومتر تا صفحه شکست گسل ثبت شده‌اند. این رکوردها دارای انرژی جنبشی بسیار زیادی بوده و ماهیت آزاد شدن آن نیز در یک بازه زمانی به نسبت کوتاه که متناظر با پدیدار شدن ساختارهای موجی شکل در تاریخچه زمانی شتاب و به ویژه سرعت زمین است، صورت می‌گیرد. این گونه ارتعاشات ضربه‌ای و بسیار نیرومند زمین در شکل رفتار موجی شکل برای تغییر مکان دینامیکی محیط پیوسته ساختگاه پدیدار می‌گردد. تاریخچه زمانی تغییر مکان زمین، متناظر با رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک، در شکل پالس‌های ترکیبی (با برازش توابع مثلثاتی) و به صورت‌های دو سوپه (پالس دینامیکی) و نیز یک سوپه (پالس استاتیکی) نمود پیدا می‌نماید. بر پایه تحقیقات لرزه‌شناسی، ملاحظه شده است که وقوع تغییر مکان موجی شکل دو سوپه در راستای عمود بر صفحه شکست گسل بوده و جنبش زمین بیشتر به صورت یک مجموعه ترکیبی توابع سینوس دارای چند فرکانس مشخص‌تر پر انرژی می‌باشد. ظهور پالس یک سوپه تغییرمکان زمین، بیشتر در راستای موازی با مکانیزم گسیختگی گسل است و با نام پالس حرکت پرتابی نیز شناخته می‌شود. حرکت پرتابی زمین در تاریخچه زمانی رکوردهای ثبت شده در ساختگاه‌های دارای خاک نرم، به روشنی دیده می‌شود [۹ و ۱۰].

نتایج تحقیقات انجام شده بر روی ساختار طیفی رکوردهای نیرومند ثبت شده در زلزله‌های گذشته و همچنین ارزیابی معیارهای محاسباتی بارگذاری جانبی در روش‌های طراحی بر مبنای عملکرد، بیان‌گر آن است که به دلیل ماهیت تصادفی یک رویداد زمین لرزه، نمی‌توان نمود کامل فیزیکی از ساختار بارگذاری متناظر آن را به دست آورد. شایان ذکر است که اندرکنش میان اثرات بسیار نیرومند دو فرایند شکست پیش‌رونده گسل و نیز انتشار سه بعدی امواج پر انرژی زلزله در محیط پیوسته ساختگاه‌های واقع در نواحی نزدیک گسل‌های فعال، سبب ایجاد مولفه‌های پرقدرت شتاب در گستره سه بعدی سازه و خاک خواهد شد. بدین ترتیب، تاریخچه زمانی هر دو مولفه شتاب

<sup>1</sup> Fling Step

<sup>2</sup> Forward Directivity

<sup>3</sup> Backward Directivity

زمین در راستای خط گسیختگی گسل<sup>۴</sup> و نیز مولفه عمود بر صفحه شکست گسل<sup>۵</sup> دارای باند فرکانس‌های پر انرژی؛ بخصوص در محدوده مشخص ۰/۵ تا ۱۵ هرتز خواهد شد. نمود این ویژگی برای مولفه قائم<sup>۶</sup> به طور مشخص در باند فرکانسی بالاتر صورت می‌گیرد.

تاثیرات دینامیکی حاصل از ویژگی‌های فوق در رفتار لرزه‌ای سازه‌های با پیوند بلند حایز اهمیت است. بدین لحاظ، بایستی به جنبه‌های تاثیرگذار و مرتبط با اثرات کانون لرزه، ساختگاه و فاصله از گسل و نیز ملاحظات کاربردی طیف‌های طراحی الاستیک اشاره نمود. در همین مقوله نیز تاثیرات فاکتورهای مقیاس‌کننده رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک در ارتباط با بروز ترازهای بسیار متفاوت عملکردی سازه و تبیین پارامتر شکل‌پذیری برای ساختگاه‌های نزدیک گسل، از موضوعات پژوهشی چالش برانگیز در زمینه طراحی لرزه‌ای است. نتایج مطالعات در این زمینه نشان می‌دهد که حضور پالس‌های سرعت پر دامنه و بلند مدت در تاریخچه زمانی رکورد اعمالی به سازه می‌تواند تولید کننده جنبش هجومی زمین در قالب تکانه‌های شدید باشد [۱۲و۱۱].

شایان ذکر است که در رفتار دینامیکی سازه‌های با ساختار پانل‌های مهاربندی، میزان ظرفیت شکل‌پذیری المان مهاربند و تغییر مکان نسبی طبقات<sup>۷</sup> از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد. بدین جهت تغییرات مقاومت فشاری مهاربندها بعد از کمانش به همراه ظرفیت مقاومت برشی پانل‌های مقاوم باید مورد بررسی قرار می‌گیرند. نکته حایز اهمیت این است که پس از تشکیل مفاصل پلاستیک در دهانه آزاد تیرهای لینک و همراه با وقوع وضعیت تعادل ناپایدار دینامیکی در حالت نزدیک به کمانش المان‌های واگرا<sup>۸</sup>، ظرفیت کششی این اعضا در حال تغییر بوده و طی این روند مقاومت فشاری نیز کاهش می‌یابد. بنابر این، اسکلت مقاوم سازه می‌بایست به نحوی محاسبه گردد که پس از وقوع کمانش المان‌های واگرا، تیرهای طرح شده در پانل مقاوم مهاربندی همچنان مقاومت و پایداری دینامیکی خود را حفظ نماید. اضافه می‌شود که با توجه به حجم بزرگ انرژی آزاد شده در بازه زمانی وقوع جنبش‌های حوزه نزدیک و ایجاد وضعیت تعادل دینامیکی متناظر با حالت کمانش جانبی-پیچشی در مهاربندها، ظرفیت مقاومتی و قابلیت جذب انرژی اسکلت مقاوم، به ویژه در طبقات پایینی سازه کاهش یافته و آثار خرابی ملاحظه خواهد شد [۱۳-۱۵].

پانل‌های مهاربندی همگرا<sup>۹</sup> نسبت به سایر عناصر مقاوم در برابر نیروی جانبی، بیشترین کارایی را از لحاظ کنترل تغییر مکان جانبی در سازه‌های فولادی دارا می‌باشند. پانل مقاوم شورون<sup>۱۰</sup> نیز که یکی از انواع آرایش مهاربندهای همگرا به حساب می‌آید، دارای مشخصه‌های رفتار پایدار دینامیکی به ویژه در زلزله‌های بزرگ است. سازه‌های با مهاربندی شورون نسبت به اسکلت قاب خمشی<sup>۱۱</sup> از صلبیت جانبی به مراتب بیشتری برخوردار بوده، به طوری که نسبت میان دو پارامتر متناظر تا حدود ده برابر نیز می‌رسد. قابل ذکر است که تحت جنبش‌های نیرومند زمین، عضو فشاری پانل مهاربند شورون دچار کمانش دینامیکی می‌شود و به تدریج مقاومت محوری آن کاهش می‌یابد. این در حالی است که نیرو در عضو کششی می‌تواند تا رسیدن به نقطه تسلیم نیز افزایش یابد. نتیجه روند فوق، ایجاد یک برآیند بزرگ نیروی عمودی نامتوازن در تیر پیوسته پانل مقاوم شورون خواهد بود. تشکیل و گسترش مشخصه‌های رفتار غیر خطی با دامنه بزرگ در المان مذکور و نیز اتصالات تکیه گاهی، احتمال تشکیل مکانیزم طبقه نرم را تشدید می‌نماید [۱۶-۱۸].

همچنین جهت به حداقل رساندن احتمال وقوع وضعیت فوق که همراه با ایجاد ناپایداری دینامیکی در رفتار پانل‌های شورون نیز خواهد بود، نیاز به طرح تیر رابط با ابعاد بزرگ است. بدیهی است که رعایت نامتناسب این معیار، سبب طرح یک اسکلت مقاوم غیر اقتصادی می‌شود. کاربرد و تعبیه المان ستون دوخت<sup>۱۲</sup> در پانل‌های مهاربند شورون، یک تدبیر مناسب طرح لرزه‌ای برای مقابله با مشخصه‌های رفتاری نامطلوب ذکر شده فوق است [۱۹و۲۰]. در مقابل از معایب کاربرد المان ستون دوخت می‌توان به ناکارآمد شدن پانل‌های مهاربندی از دیدگاه معماری اشاره نمود. همچنین احتمال شدید ورود به حوزه رفتار غیر خطی برای اعضای مهاربند متصل به المان ستون دوخت تحت رکوردهای پالس‌یو حوزه نزدیک نیز وجود خواهد داشت.

<sup>4</sup> Fault Parallel Component (LN)

<sup>5</sup> Fault Normal Component (TR)

<sup>6</sup> Fault Vertical Component (UP)

<sup>7</sup> Drift

<sup>8</sup> Eccentrically Brace Element

<sup>9</sup> Concentric Braced Panels

<sup>10</sup> Chevron Braced Panel

<sup>11</sup> Rigid Frame

<sup>12</sup> Zipper Column Element

در این پژوهش، یک ارزیابی تحلیلی بر روی کارایی المان‌های ستون زیپ در اسکلت مقاوم دوگانه<sup>۱۳</sup> شامل پانل‌های شورون-قاب خمشی صورت گرفته است. مشخصات پاسخ لرزه‌ای یک گروه سازه‌های ۵ طبقه با آرایش‌های مختلف مهاربندی، مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین برای انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی نیز یک مجموعه از رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک حاوی پالس‌های پیوسته و بزرگ سرعت انتخاب شده و رکوردهای انتخابی به صورت میدان آزاد و طبیعی به مدل‌های مطالعاتی اعمال شدند. مطالعه پارامترهای مشخصه رفتار لرزه‌ای نیز بر پایه ارزیابی تاریخچه زمانی تغییر مکان نسبی طبقات، نمودارهای پوش بیشینه شتاب مطلق و سرعت نسبی طبقه در محل مرکز جرم CM صورت گرفته است. بررسی تشکیل و آرایش مفاصل پلاستیک در اسکلت مقاوم و همچنین ارزیابی تاریخچه زمانی نیروی محوری المان‌های ستون تکیه گاهی مربوط به هر دو ساختار پانل‌های مهاربندی شورون و شورون همراه با ستون دوخت، جنبه دیگر مطالعاتی این پژوهش می‌باشند.

## ۲- بررسی جنبش‌های نیرومند حوزه نزدیک

اساسی‌ترین شاخص‌های حرکات نیرومند زمین که بر رفتار سازه‌ها اثرگذار است، شامل محتوای فرکانسی، بیشینه شتاب زمین و مدت زمان داوم جنبش‌های نیرومند زمین بوده که در شکل نیروهای بزرگ دینامیکی وارد بر اسکلت مقاوم، نمود پیدا می‌نمایند. اندازه و آهنگ آزاد شدن انرژی پتانسیل ذخیره شده در رفتار گسل‌ها نیز متناسب با گذشت زمان و روند تغییرات مولفه‌های تانسور تنش در محیط پیوسته صفحه شکست و حوزه اطراف آن می‌باشد. نتایج مطالعات لرزه‌شناسی مرتبط با زلزله‌های بزرگ و معروف از جمله نورتریج کالیفرنیا ۱۹۹۴<sup>۱۴</sup>، کوبه ژاپن ۱۹۹۵<sup>۱۵</sup>، کوکاییلی و ازمیت ترکیه ۱۹۹۹<sup>۱۶</sup> و چای‌چای تایوان ۱۹۹۹<sup>۱۷</sup> نشان می‌دهند که مشخصات طیفی حرکات نیرومند زمین در حوزه نزدیک یک گسل فعال، به صورت چشمگیری نسبت به جنبش‌های به ثبت رسیده در فواصل بیش از ۲۰ کیلومتر تا مکانیزم شکست، تفاوت دارد. قابل ذکر است که با وقوع زلزله سن فرناندو ۱۹۷۱<sup>۱۸</sup> کالیفرنیا جنوبی، نگرش تحلیلی بر ساختار و اثرات دینامیکی ناشی از زلزله‌های حوزه نزدیک گسل اهمیت پیدا نمود. همچنین؛ پس از آن با وقوع زمین لرزه‌های بزرگ نورتریج ۱۹۹۴ و کوبه ۱۹۹۵، توجه به این تاثیرات و ویژگی‌ها بیشتر گردید. بطور کلی؛ جنبش‌های نیرومند زمین در فاصله کمتر از ۲۰ کیلومتر از مکانیزم گسیختگی گسل به وقوع می‌پیوندد [۲۱ و ۲۲].

همچنین در محدوده نزدیک گسل، تکانه‌های زمین متاثر از نحوه عملکرد صفحه شکست بوده و راستای گسترش گسیختگی در مکانیزم گسل نیز در نیرومندترین وضعیت خود به سمت ساختگاه، همراه با احتمال ایجاد تغییر مکان بزرگ دایمی زمین می‌باشد. نحوه عملکرد صفحه شکست و انتشار گسیختگی موجب فرایند جهت‌داری شده و از سوی دیگر تغییر مکان دایمی زمین نیز یک عامل مهم در پدیدار شدن تغییر مکان استاتیکی و برگشت‌ناپذیر در ساختگاه می‌باشد. شکل ۱ نمود متفاوت رکوردهای متاثر از دو پدیده جهت‌داری پیشرونده و حرکت پرتابی را در مقایسه با ماهیت فیزیکی رکوردهای حوزه دور نشان می‌دهد [۲۳ و ۲۴].

<sup>13</sup> Dual System

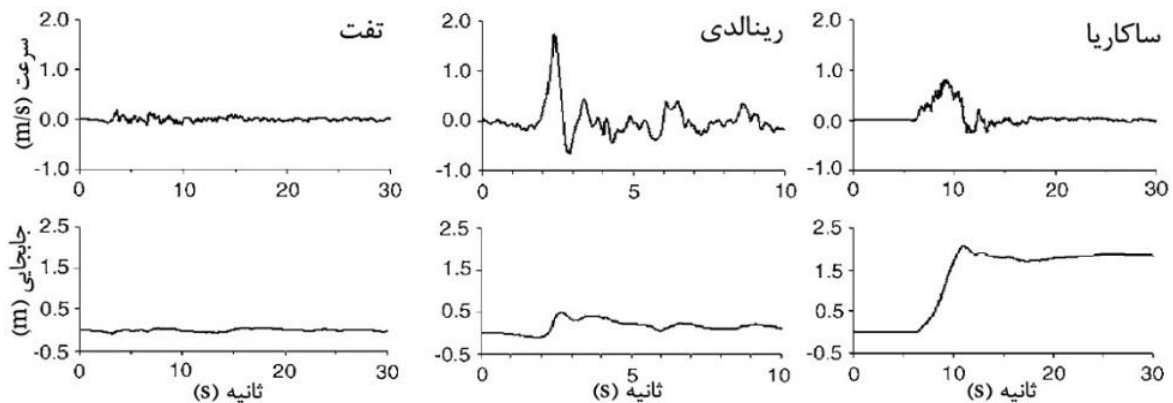
<sup>14</sup> The 1994 Northridge Earthquake

<sup>15</sup> The 1995 Kobe Earthquake - Japan

<sup>16</sup> The 1999 Kocaeli and Izmit Earthquakes - Turkey

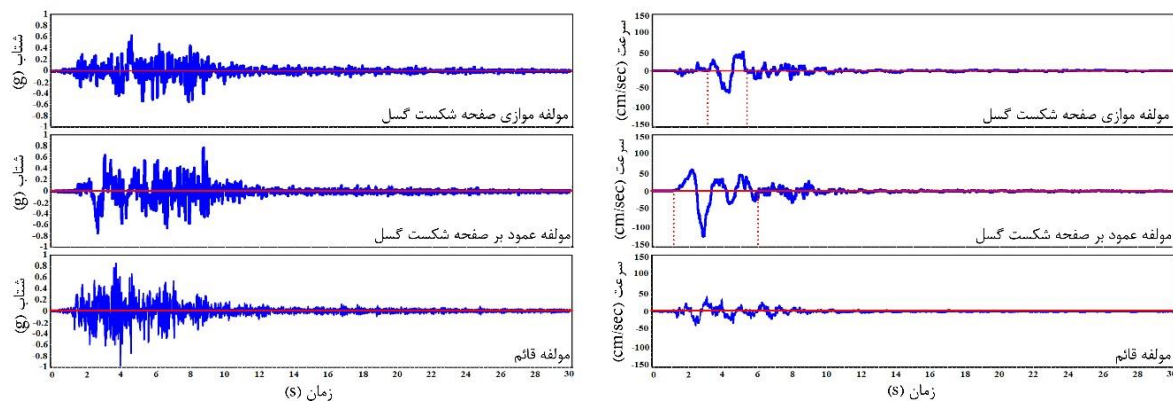
<sup>17</sup> The 1999 Chi Chi Earthquake - Taiwan

<sup>18</sup> The 1971 San Fernando Earthquake



شکل ۱: تاریخچه زمانی سرعت و جابجایی زمین متناظر با سه گونه رکورد حوزه دور تفت ۱۹۵۲<sup>۱۹</sup> کالیفرنیا، رکوردهای حوزه نزدیک رینالدی<sup>۲۰</sup> از زلزله نورتریج ۱۹۹۴ با اثر جهت‌داری پیشرو و نیز ساکاریا<sup>۲۱</sup> از زلزله کواکلی ۱۹۹۹ حاوی اثر حرکت پرتابی [۶].

نگاشت‌های زمین لرزه‌های حوزه نزدیک گسل به ویژه هنگامی که تحت اثر جهت‌داری پیش‌رونده قرار دارند، حاوی پالس‌های پریود بلند با دامنه‌های بزرگ بوده که به طور عمده در بازه ابتدایی رکورد زلزله نمایانگر می‌شوند (شکل ۲). نمود فرایند جهت‌داری پیش‌رونده؛ در زمان انتشار بردار امتداد شکست به سمت ساختگاه رخ می‌دهد. نکته دیگر آن که به سبب وجود پالس‌های پریود بلند قوی در رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک، نگاشت طیف فوریه متناظر نیز برای یک بازه به نسبت کوچک فرکانسی، دارای مولفه عمودی زیاد و با دامنه عددی بیش از ۱۰۰ سانتیمتر بر ثانیه خواهد بود [۲۵ و ۲۶]. تاریخچه زمانی هر دو مولفه موازی و عمود بر صفحه شکست گسل متناظر با شتاب مربوط به یک رکورد نیرومند حوزه نزدیک، دارای اسپیک‌های پر دامنه با پریود کمتر از ۰/۵ ثانیه و پالس‌های پیوسته با گام زمانی تا حدود ۱ ثانیه می‌باشند. پالس‌های پیوسته و بلند مدت سرعت نیز با پریود بیش از ۱ ثانیه در نیمه ابتدایی بازه زمانی رکورد دیده می‌شوند (شکل‌های ۱ و ۲).



شکل ۲: تاریخچه زمانی شتاب و سرعت رکورد اصلی زلزله بم ۲۰۰۳ میلادی شامل مولفه موازی با امتداد گسل (LN)، مولفه عمود بر امتداد گسل (TR) و مولفه قائم (UP)؛ بازه زمانی پالس مشخص سرعت هر دو مولفه LN و TR با یک مجموعه اسپیک‌های موجود در رکورد شتاب زمین، هم ارز می‌باشند. خطوط نقطه چین عمودی نیز نمایش‌دهنده موقعیت محور صفر در بازه زمانی پالس سرعت است [۲۷].

وجود پالس‌های نیرومند با پریود بلند در تاریخچه زمانی سرعت رکوردهای حوزه نزدیک گسل، موجب افزایش قابل توجه اعمال انرژی جنبشی ناشی از ارتعاشات پر دامنه زمین به سازه می‌شود. فرایند آزاد شدن این انرژی بسیار بزرگ، در یک مدت زمان کوتاه رخ می‌دهد. همچنین به جهت کوتاهی نسبی زمان اعمال انرژی مذکور به اسکلت مقاوم سازه، رفتار لرزه‌ای المان‌های اصلی و نیز کلیه اتصالات با

<sup>19</sup> The 1952 Taft Earthquake

<sup>20</sup> The Rinaldi Record

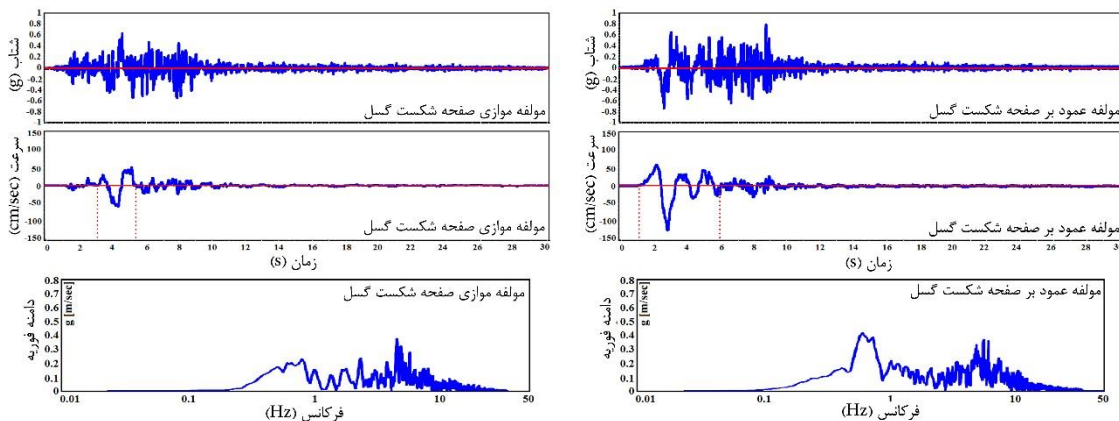
<sup>21</sup> The Sakaria Record



یک آهنگ پر شتاب وارد حوزه غیر خطی با دامنه‌های بزرگ خواهد شد. پدیدار شدن و گسترش سریع مفاصل غیر خطی در اسکلت مقاوم سازه نیز بر همین اساس رخ خواهد داد. بدین لحاظ؛ پارامترهای دامنه و پریود پالس بزرگ و مشخص در تاریخچه زمانی سرعت زمین از اصلی‌ترین شاخص‌های طیفی جنبش‌های حوزه نزدیک می‌باشند که تاثیرات برجسته در ساختار رفتار لرزه‌ای سازه‌ها دارند.

نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که پریود پالس معادل سرعت زمین<sup>۲۲</sup> در یک رکورد حوزه نزدیک، پارامتر مهمی در پیش‌بینی پدیدار شدن ویژگی‌های پاسخ موج‌گونه<sup>۲۳</sup> یا مودگونه<sup>۲۴</sup> سازه می‌باشد. اهمیت توجه به ساختار رفتاری موج‌گونه یا مودگونه سازه‌های طبقاتی میان مرتبه و بلند مرتبه نیز در همین راستا جامعیت پیدا می‌نماید. شایان ذکر است که به دلیل کاربرد انواع ساختارهای مقاوم در برابر زلزله در ساختمان‌های طبقاتی میان مرتبه و بلند، تبیین ویژگی‌های رفتار برشی که تنها در پاسخ سیستم‌های قاب خمشی نمود حاکم دارد، موضوع قابل قبولی نخواهد بود. بروز ویژگی‌های رفتار خمشی، بارزترین مشخصه در پاسخ لرزه‌ای اسکلت‌های مقاوم دارای مهاربندی شورون می‌باشد. مشخصه‌های رفتار دینامیکی این سیستم‌ها به مراتب پیچیده‌تر از واکنش لرزه‌ای قاب‌های خمشی است. بدین جهت، کاربرد تئوری انتشار امواج در تبیین پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های طبقاتی میان مرتبه و بلند، نیازمند در نظر گرفتن تعمیم‌های ساختاری خواهد بود. کارایی روش آنالیز مودال بر پایه لحاظ نمودن تعداد زیاد مودهای ارتعاشی، تایید شده است [۲۸-۳۰].

نکته دیگر آن که طیف فوریه نگاشت زمین لرزه‌های حاوی اثرات نیرومند جهت‌داری، در یک بازه به نسبت کوچک فرکانس‌ها (۰/۵ تا ۱۵ هرتز) و متناظر با یک یا دو پریود خاص، دارای بیشینه مقادیر می‌باشند (شکل ۳). چنانچه محور طیفی متناظر با فرکانس‌های ارتعاشی مودهای اول (انتقالی و پیچشی) سازه در محدوده فرکانسی مذکور (با مولفه ارتفاعی بزرگ) قرار گیرند، امکان نزدیکی برخی از مقادیر ویژه آنالیز مودال با یک محور تواتر دارای مشخصه عددی بزرگ برقرار خواهد بود. نمود این موضوع به شکل وقوع پدیده تشدید در رفتار دینامیکی سازه است که به ویژه در حالت مود ارتعاشی پایه (مود اول) بسیار مخرب می‌باشد. نتیجه این وضعیت نیز ایجاد و گسترش مفاصل غیر خطی در اسکلت مقاوم و تغییرات سریع دامنه عملکردی المان‌های اصلی به محدوده رفتار تشدید شده غیر خطی است [۳۱ و ۳۰].



شکل ۳: تاریخچه زمانی شتاب، سرعت و طیف فوریه متناظر با دو مولفه افقی موازی و عمود بر صفحه شکست گسل رکورد بم ۲۰۰۳ میلادی؛

خطوط نقطه چین عمودی نمایش‌دهنده موقعیت محور صفر در بازه زمانی پالس سرعت می‌باشند [۲۷].

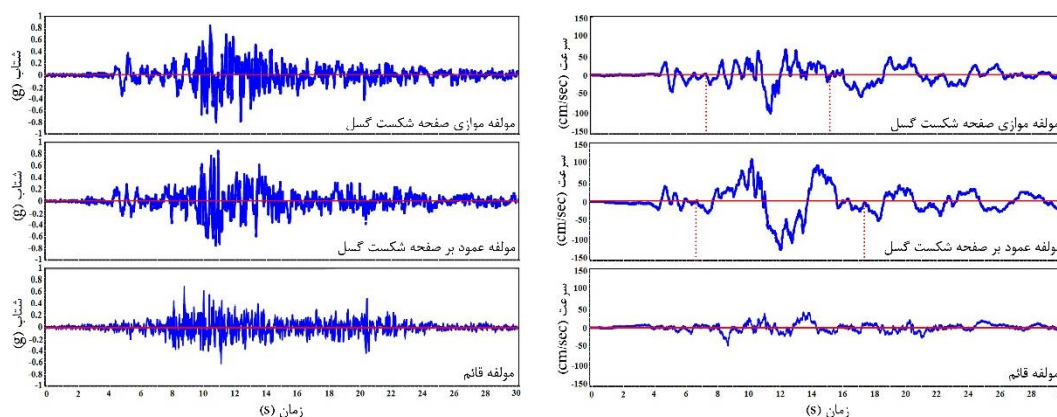
### ۳- رکوردهای مورد استفاده در این پژوهش

شاخص اصلی انتخاب رکوردهای زلزله در مطالعات پیش‌رو، وجود و گسترش تاثیرات گسلش جهت دار و پالس‌های متفاوت با پریودهای متوسط تا بلند در تاریخچه زمانی سرعت و نیز، وجود روند جهشی آزاد شدن انرژی جنبشی می‌باشد. همچنین در حوزه نزدیک

<sup>22</sup> T<sub>p</sub>  
<sup>23</sup> Wave Like Response  
<sup>24</sup> Mode Like Response

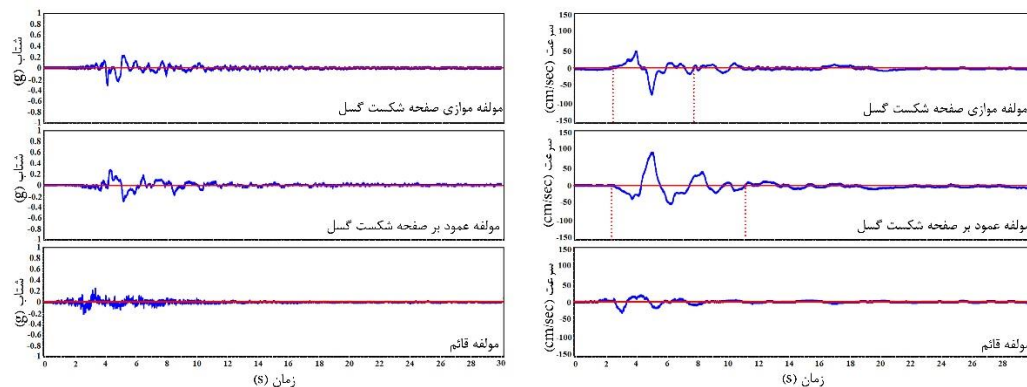
گسل، رکوردهای نیرومند حاصل از زمین لرزه امپریال ولی ۱۹۷۹<sup>۲۵</sup>، کیپ مندوسینو کالیفرنیا ۱۹۹۲<sup>۲۶</sup> و نیز رکورد اصلی زلزله طیس ۱۹۷۸<sup>۲۷</sup> ایران انتخاب گردیده‌اند. نام ایستگاه‌های لرزه‌نگاری مربوطه نیز ملولند اورپس<sup>۲۸</sup>، پترولیا<sup>۲۹</sup> و طیس می باشد. رکوردهای ملولند اورپس، پترولیا ناشی از فرایند گسلش امتداد لغز<sup>۳۰</sup> بوده و تاریخچه زمانی هر سه رکورد فوق حاوی اثرات نیرومند جهت‌داری پیشرو می-باشند. اطلاعات لرزه‌شناسی رکوردهای انتخابی بر اساس سایت PEER Strong Motion می‌باشد. [۳۲]

در طی روند مطالعات، مولفه‌های سه گانه رکوردهای انتخاب شده به صورت همزمان در جهات X، Y و Z مدل‌های مطالعاتی اعمال گردیدند. مولفه شتاب راستای صفحه شکست گسل در امتداد X پلان، مولفه قدرتمند عمود بر صفحه شکست گسل در امتداد Y پلان و مولفه قائم نیز در امتداد Z لحاظ شدند. نمودارهای تاریخچه زمانی مولفه‌های شتاب و سرعت رکوردهای مورد نظر به همراه پارامترهای فیزیکی آنها شامل بزرگای مومنتوم Mw، بیشینه سرعت زمین<sup>۳۱</sup> و بیشینه شتاب زمین<sup>۳۲</sup> در شکل‌های ۴ تا ۶ و جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۴: تاریخچه زمانی سه مولفه شتاب و سرعت رکورد اصلی ثبت شده در زلزله طیس ۱۹۷۸ میلادی؛

خطوط نقطه چین عمودی نمایش‌دهنده موقعیت محور صفر در بازه زمانی پالس سرعت می‌باشند [۲۷].

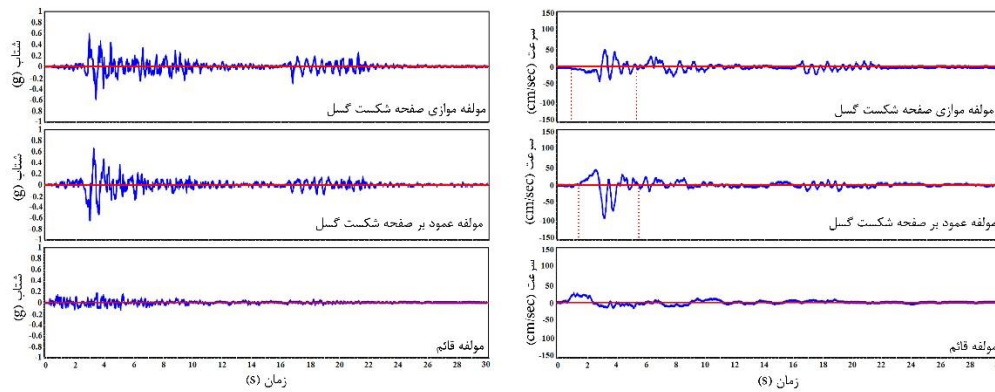


شکل ۵: تاریخچه زمانی سه مولفه شتاب و سرعت رکورد ملولند اورپس ثبت شده در زلزله امپریال ولی ۱۹۷۹؛

خطوط نقطه چین عمودی نمایش‌دهنده موقعیت محور صفر در بازه زمانی پالس سرعت می‌باشند [۲۷].

25 The 1979 Imperial Valley Earthquake  
26 The 1992 Cape Mendocino Earthquake  
27 The 1978 Tabas Earthquake  
28 The Meloland Overpass Record  
29 The Petrolia Record  
30 Strike-Slip Fault  
31 PGV  
32 PGA

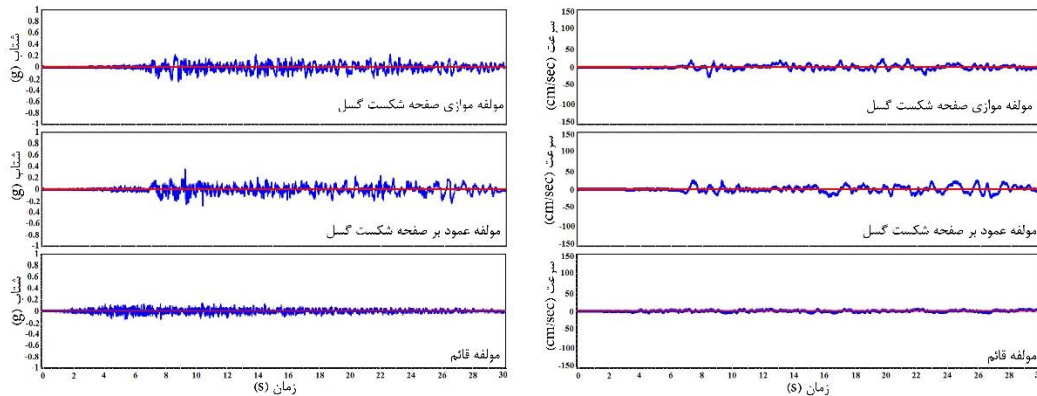




شکل ۶: تاریخچه زمانی سه مولفه شتاب و سرعت رکورد پترولیا ثبت شده در زلزله کیپ مندوسینو ۱۹۹۲ میلادی؛

خطوط نقطه چین عمودی نمایش دهنده موقعیت محور صفر در بازه زمانی پالس سرعت می باشد [۲۷].

رکورد حوزه دور انتخابی در این پژوهش، مربوط به ایستگاه دلتا ۳۳ از زلزله امپریال ولی ۱۹۷۹ می باشد. نگاهت شتاب هر سه مولفه این رکورد و تاریخچه زمانی سرعت زمین در شکل ۷ مشهود است. پارامترهای فیزیکی مشخصه این رکورد نیز در جدول ۱ آورده شده اند. تاریخچه زمانی رکورد دلتا به دلیل فاصله زیاد کانون زلزله از ایستگاه لرزه نگاری مربوطه، هیچ گونه ساختار پالس گونه ای را نشان نمی دهد.



شکل ۷: تاریخچه زمانی سه مولفه شتاب و سرعت رکورد حوزه دور دلتا ثبت شده در زلزله امپریال ولی ۱۹۷۹ میلادی؛

مجموعه ای از اسپایک های کم دامنه سرعت دیده می شود [۲۷].

جدول ۱: مشخصات طیفی رکوردهای مورد استفاده در این پژوهش.

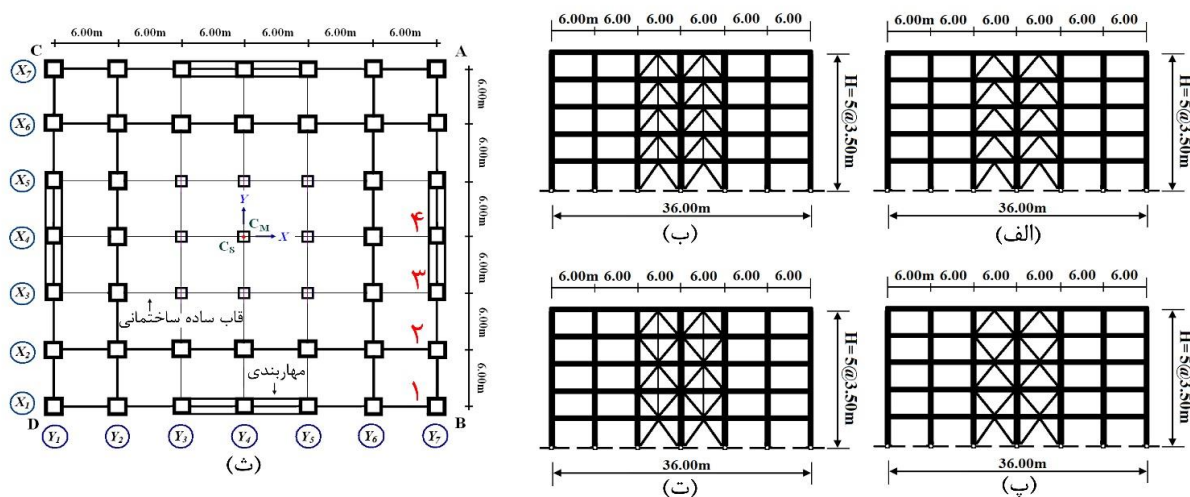
جنش زمین	مولفه	مدت زمان (sec)	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)	بزرگای زلزله Mw	PGV/PGA (sec)	PGD/PGV (sec)	Ds مدت دوام موثر (sec)
طیس ۱۹۷۸ شهر طیس - ۳ کیلومتر Tabas (TAB)	LN	۳۰	۰/۸۳۶	۹۷/۷۰	۳۹/۹۰	۷/۴	۰/۱۲	۰/۴۰	۱۷
	TR		۰/۸۵۱	۱۲۱/۳۰	۹۴/۵۰		۰/۱۴	۰/۷۸	۲۰
	UP		۰/۶۸۸	۴۵/۵۰	۱۷/۰۰		۰/۰۶	۰/۳۷	—
کیپ مندوسینو ۱۹۹۲ پترولیا - ۹/۵ کیلومتر Petrolia (PET)	LN	۳۰	۰/۵۸۹	۴۸/۰۲	۲۲/۲۹	۷/۱	۰/۰۸	۰/۴۶	۲۰
	TR		۰/۶۶۲	۸۹/۵۴	۲۹/۴۰		۰/۱۴	۰/۳۳	۱۹
	UP		۰/۱۶۳	۲۵/۳۰	۳۰/۳۶		۰/۱۶	۱/۲۰	—
امپریال ولی ۱۹۷۹	LN	۳۰	۰/۳۱۴	۷۱/۷۰	۲۵/۵۳	۶/۵	۰/۲۳	۰/۳۶	۱۴

ملولند اورپس - ۰/۵ کیلومتر Meloland Overpass (MEL)	TR	۳۰	۰/۲۹۶	۹۰/۵۰	۳۱/۷۱	۶/۵	۰/۳۱	۰/۳۵	۱۰
	UP		۰/۲۴۸	۲۸/۹۰	۸/۳۶		۰/۱۲	۰/۲۹	—
امپریال ولی ۱۹۷۹ دلتا - ۴۳/۶ کیلومتر Delta (DLT)	LN	۳۰	۰/۲۳۸	۲۶/۰۰	۱۲/۰۶	۶/۵	۰/۱۱	۰/۴۶	۲۷
	TR		۰/۳۵۱	۳۳/۰۰	۱۹/۰۲		۰/۰۹	۰/۵۸	۲۷
	UP		۰/۱۴۵	۱۴/۸۰	۸/۶۲		۰/۱۰	۰/۵۸	—

#### ۴- مشخصات طراحی ساختار مقاوم با پانل های شورون

چهار سازه مطالعاتی در این پژوهش، در هر دو جهت اصلی پلان شامل اسکلت مقاوم فولادی دوگانه حاوی پانل های از نوع شورون<sup>۳۴</sup>، شورون همراه با ستون دوخت<sup>۳۵</sup>، شورون معکوس<sup>۳۶</sup>، شورون معکوس همراه با ستون دوخت<sup>۳۷</sup> همراه با مدول های قاب خمشی می باشند. اسکلت مقاوم بصورت ۵ طبقه بوده و هر چهار ساختار سازه ای شکل ۸، دارای پیروید طبیعی  $T=0/587$  ثانیه می باشند. پلان سازه دارای تقارن هندسی منظم است. اندازه تمامی دهانه ها یکسان و به طول ۶ متر از محور تا محور ستون ها بوده و در هر جهت ۶ دهانه تعبیه شده است. ارتفاع طبقات نیز ۳/۵ متر منظور شده است. تمامی اتصالات در قاب های مهاربندی شده به صورت ساده و در قاب های خمشی از نوع صلب می باشند.

پوشش سقف ها از نوع دال دوطرفه بتنی به ضخامت ۱۵ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. بارهای ثقلی در طبقات بر اساس مبحث ششم مقررات ملی ساختمان [۳۳] برای ساختمان مسکونی، شامل بار مرده به میزان  $500 \text{ kg/m}^2$  و بار زنده  $200 \text{ kg/m}^2$  و در طبقه بام بار مرده به میزان  $500 \text{ kg/m}^2$  و بار زنده معادل  $150 \text{ kg/m}^2$  می باشند. طبقه بندی نوع زمین ساختگاه از نوع تیپ II و نسبت شتاب مبنای طرح در پهنه با خطر نسبی زیاد فرض شده است. ضریب رفتار سازه با قابلیت شکل پذیری متوسط برابر با ۶ بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم) [۳۴] و دیافراگم کف های طبقات با سختی درون صفحه بی نهایت نسبت به عناصر قائم باربر جانبی منظور شده اند. اطلاعات مشخصات مقاطع اعضای سازه به ترتیب در شکل ۹ و جدول های ۲ تا ۵ آورده شده و بر اساس مبحث دهم مقررات ملی ساختمان [۳۵] طرح شده اند. همچنین معیارهای محدودیت جابجایی نسبی طبقات، صلبیت چشمه های اتصال و نیز رعایت اصل ستون قوی-تیر ضعیف نیز در طرح لرزه ای لحاظ گردیده و پیرودهای ارتعاشی مدل های سازه ای در جدول ۶ نمایش داده شده است.



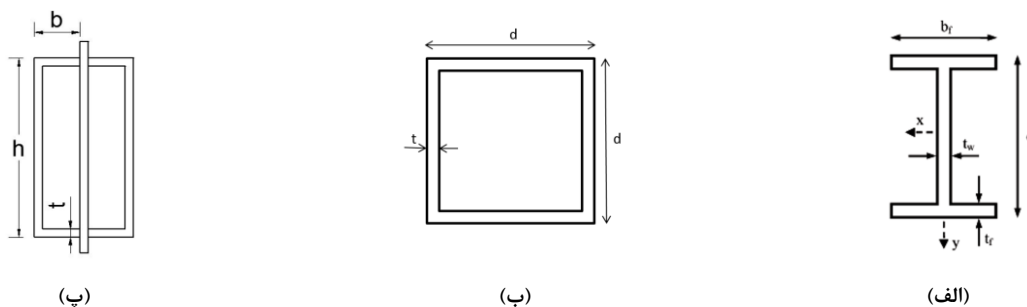
شکل ۸: چهار سازه مطالعاتی با سیستم دوگانه قاب خمشی همراه با؛ (الف) پانل های شورون؛ (ب) پانل های شورون دارای ستون دوخت، (پ) پانل های شورون معکوس، (ت) پانل های شورون معکوس دارای ستون دوخت؛ ستون های دوخت در محل خط محور تقارن پانل های شورون قرار دارند، (ث) پلان سازه شامل صفحات قاب های خمشی (خطوط پر رنگ) و صفحات قاب های مفصلی (خطوط نازک)،  $C_M$  و  $C_S$  به ترتیب مراکز جرم و برش طبقه می باشند [۲۷].

<sup>34</sup> Chevron

<sup>35</sup> Zipper Chevron

<sup>36</sup> Inverse Chevron

<sup>37</sup> Inverse Zipper Chevron



شکل ۹: مقاطع مورد استفاده در چهار سازه مطالعاتی (شکل ۸)؛ (الف) مقطع تیر به صورت تک جان؛ (ب) مقطع ستون به صورت باکس؛ (پ) مقاطع مهاربند و ستون‌های دوخت دارای یک پلیت سخت کننده می باشد. مقاومت پیچشی هر سه گروه المان‌های طراحی شده فوق بسیار بالا است و احتمال وقوع فاز کماتش جانبی-پیچشی بسیار پایین می‌باشد [۲۷].

جدول ۲: مشخصات نیمرخ ستون‌ها در چهار سازه مطالعاتی شکل ۸ (ابعاد به سانتیمتر است).

قالب	طبقه	محور محل قرارگیری ستون						
		Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7
X1-X1 & Y1-Y1 X7-X7 & Y7-Y7	1_2	BOX 35 × 1/5	BOX 35 × 1/5	BOX 45 × 1	BOX 45 × 1	BOX 45 × 1	BOX 35 × 1/5	BOX 35 × 1/5
	3_4	BOX 35 × 1/5	BOX 35 × 1/5	BOX 40 × 1	BOX 40 × 1	BOX 40 × 1	BOX 35 × 1/5	BOX 35 × 1/5
	5	BOX 25 × 1	BOX 25 × 1	BOX 35 × 1	BOX 35 × 1	BOX 35 × 1	BOX 25 × 1	BOX 25 × 1
X3-X3 & Y3-Y3 X4-X4 & Y4-Y4 X5-X5 & Y5-Y5	1_2	BOX 45 × 1	BOX 35 × 1/5	BOX 45 × 1	BOX 45 × 1	BOX 45 × 1	BOX 35 × 1/5	BOX 45 × 1
	3_4	BOX 40 × 1	BOX 35 × 1/5	BOX 40 × 1	BOX 40 × 1	BOX 40 × 1	BOX 35 × 1/5	BOX 40 × 1
	5	BOX 35 × 1	BOX 25 × 1	BOX 35 × 1	BOX 35 × 1	BOX 35 × 1	BOX 25 × 1	BOX 35 × 1
X2-X2 & Y2-Y2 X6-X6 & Y6-Y6	1_2	BOX 35 × 1/5	BOX 35 × 1/5	BOX 35 × 1/5	BOX 35 × 1/5	BOX 35 × 1/5	BOX 35 × 1/5	BOX 35 × 1/5
	3_4	BOX 35 × 1/5	BOX 35 × 1/5	BOX 35 × 1/5	BOX 35 × 1/5	BOX 35 × 1/5	BOX 35 × 1/5	BOX 35 × 1/5
	5	BOX 25 × 1	BOX 25 × 1	BOX 25 × 1	BOX 25 × 1	BOX 25 × 1	BOX 25 × 1	BOX 25 × 1

(نشانه گذاری نیمرخ‌ها به صورت  $d \times d$  قسمت (ب) شکل ۹ تعریف شده است)

جدول ۳: مشخصات نیمرخ شاه تیرها در چهار سازه مطالعاتی شکل ۸ (ابعاد به سانتیمتر است).

قالب	طبقه	Y1-Y2	Y2-Y3	Y3-Y4	Y4-Y5	Y5-Y6	Y6-Y7
X1-X1&Y1-Y1 X7X7&Y7-Y7	1_2	WF 48 × 20 × 2	WF 40 × 20 × 1/5	WF 40 × 20 × 1/5	WF 40 × 20 × 1/5	WF 40 × 20 × 1/5	WF 48 × 20 × 2
	3_4	WF 48 × 20 × 1/5	WF 40 × 20 × 1/5	WF 40 × 20 × 1/5	WF 40 × 20 × 1/5	WF 40 × 20 × 1/5	WF 48 × 20 × 1/5
	5	WF 30 × 15 × 1/5	WF 40 × 20 × 1/5	WF 40 × 20 × 1/5	WF 40 × 20 × 1/5	WF 40 × 20 × 1/5	WF 30 × 15 × 1/5
X3-X3&Y3-Y3 X4X4&Y4-Y4 X5X5&Y5-Y5	1_2	WF 40 × 20 × 1/5	WF 40 × 20 × 1/5	WF 40 × 20 × 1/5	WF 40 × 20 × 1/5	WF 40 × 20 × 1/5	WF 40 × 20 × 1/5
	3_4	WF 40 × 20 × 1/5	WF 40 × 20 × 1/5	WF 40 × 20 × 1/5	WF 40 × 20 × 1/5	WF 40 × 20 × 1/5	WF 40 × 20 × 1/5
	5	WF 40 × 20 × 1/5	WF 40 × 20 × 1/5	WF 40 × 20 × 1/5	WF 40 × 20 × 1/5	WF 40 × 20 × 1/5	WF 40 × 20 × 1/5

X2-X2&Y2-Y2 X6X6&Y6-Y6	1_2	WF 48 × 20 × 2	WF 48 × 20 × 2	WF 48 × 20 × 2	WF 48 × 20 × 2	WF 48 × 20 × 2	WF 48 × 20 × 2
	3_4	WF 48 × 20 × 1/5	WF 48 × 20 × 1/5	WF 48 × 20 × 1/5	WF 48 × 20 × 1/5	WF 48 × 20 × 1/5	WF 48 × 20 × 1/5
	5	WF 30 × 15 × 1/5	WF 30 × 15 × 1/5	WF 30 × 15 × 1/5	WF 30 × 15 × 1/5	WF 30 × 15 × 1/5	WF 30 × 15 × 1/5

(نشانه گذاری نیمرخ‌ها به صورت  $d \times b_f \times t_f$  قسمت (الف) شکل ۹ تعریف شده. نشانه‌های W و F به ترتیب بیانگر جان و بال می‌باشند)

جدول ۴: مشخصات نیمرخ مهاربندها در چهار سازه مطالعاتی شکل ۸ (ابعاد به سانتیمتر است).

قاب	طبقه	دهانه مهاربندی شده	
		Y3-Y4	Y4-Y5
X1-X1 & Y1-Y1	1_2	2UNP240	2UNP240
	3_4	2UNP200	2UNP200
X7-X7&Y7-Y7	5	2UNP180	2UNP180

جدول ۵: مشخصات نیمرخ ستون‌های دوخت در چهار سازه مطالعاتی شکل ۸ (ابعاد به سانتیمتر است).

قاب	طبقه	دهانه مهاربندی شده	
		Y3-Y4	Y4-Y5
X1-X1 & Y1-Y1	1_2	2UNP160	2UNP160
	3_4	2UNP140	2UNP140
X7-X7&Y7-Y7	5	2UNP120	2UNP120

جدول ۶: پی‌ود سه مود اول ارتعاشی انتقالی هر چهار سازه مطالعاتی شکل ۸

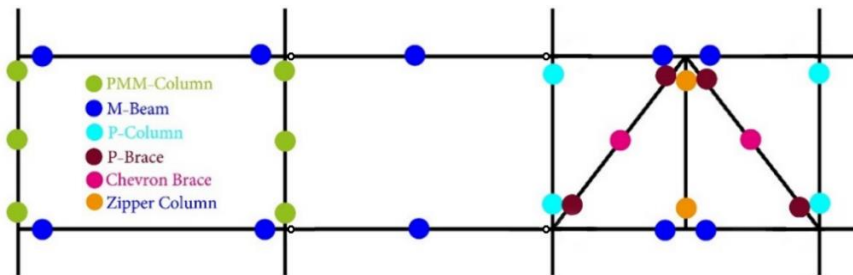
سیستم دوگانه مقاوم				پی‌ود مود ارتعاش
قاب خمشی - اینورس زپیور شورون	قاب خمشی - اینورس شورون	قاب خمشی - زپیور شورون	قاب خمشی - شورون	
0.588	0.588	0.588	0.588	اول (ثانیه)
0.545	0.547	0.566	0.569	دوم (ثانیه)
0.545	0.547	0.566	0.569	سوم (ثانیه)

توضیح: (وضعیت مود پیچشی در ۵ بردار ویژه متناظر با ۵ فرکانس اول دیده نشد)

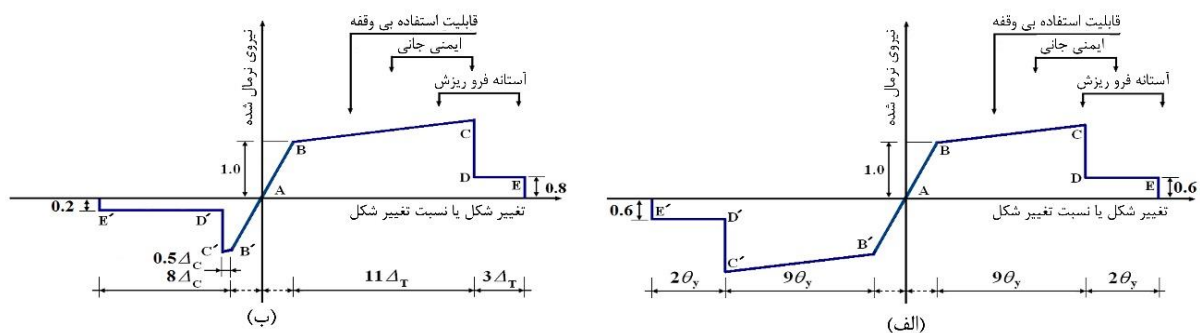
## ۵- مدل‌سازی رفتار غیر خطی المان‌های سازه

شایان ذکر است که برای مدل‌سازی سازه‌های مطالعاتی جهت توصیف رفتار غیرخطی المان‌ها، مطابق با توصیه‌های گزارش‌های FEMA356 و FEMA440 برای پانل‌های مهاربندی شده، آرایش مفصل‌های مختلف غیر خطی P (برآیند نیروی محوری) و در مدل‌های قاب خمشی نیز مفصل PMM (اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی) به ستون و مفصل M برای شاه تیرها اختصاص داده شده‌اند [۳۶ و ۳۷]. آرایش قرارگیری مفاصل احتمالی غیر خطی در المان‌های سازه‌ای مدل‌های مطالعاتی ۵ طبقه در شکل ۱۰ مشخص است.

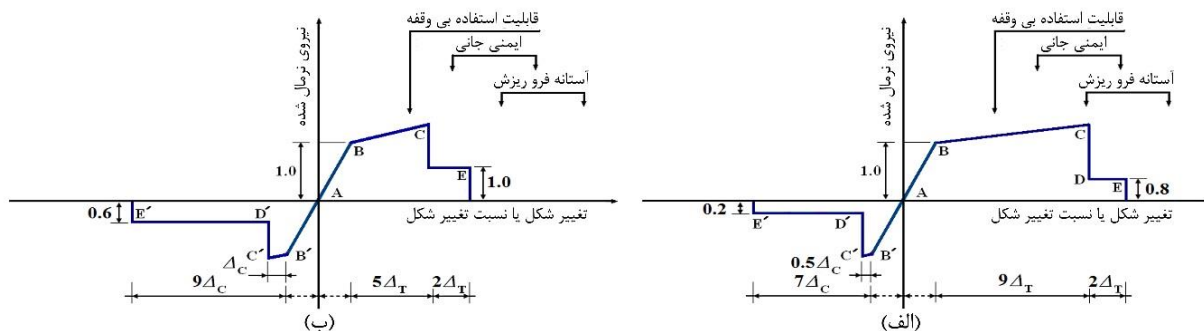
مفصل خمشی M-Beam توصیف کننده رفتار غیرخطی خمشی شاه تیرها است. مفصل‌های PMM-Column نیز نمایش دهنده رفتار غیرخطی خمشی-محوری در ستون‌های قاب خمشی اسکلت مقاوم می‌باشند. همچنین مشخصات دو مفصل با رفتار محوری P-Column و Brace نیز بر پایه توصیه‌های گزارش‌های FEMA به ترتیب برای المان‌های مهاربند و نیز ستون در پانل‌های بادبندی سازه مقاوم تعریف شده‌اند. به همین ترتیب مفصل‌های پلاستیک Chevron Brace و Zipper Column نیز به ترتیب برای رفتار غیرخطی در حوزه میانه دهانه المان مهاربند شورون و نیز دو حوزه انتهایی المان ستون دوخت در نظر گرفته شده است. مدل‌های تحلیلی رفتار غیرخطی مفصل‌های اشاره شده فوق در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مشهود می‌باشند.



شکل ۱۰: آرایش قرارگیری مفصل‌های احتمالی غیرخطی در المان‌های سازه‌ای مدل‌های مطالعاتی؛ پانل سمت راست از نوع مهاربندی شده و دارای المان ستون دوخت است و پانل سمت چپ از نوع خمشی می‌باشد [۲۷]



شکل ۱۱: (الف) مدل رفتار غیرخطی المان تیر - ستون در قاب خمشی؛ (ب) مدل رفتار غیرخطی اعضای مهاربند [۳۶ و ۳۷]



شکل ۱۲: (الف) مدل رفتار غیرخطی المان ستون دوخت؛ (ب) مدل رفتار غیرخطی المان ستون در پانل‌های بادبندی شده [۳۶ و ۳۷]

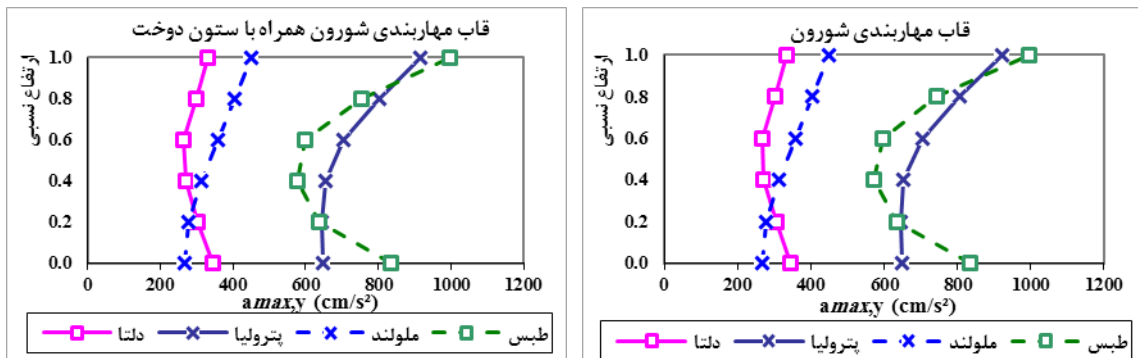
بخش بزرگ محاسباتی مدل های غیر خطی شکل های ۱۱ و ۱۲ مربوط به رفتار پیش از سطح عملکرد آستانه فرو ریزش است. همچنین، قسمت مستطیل باقی مانده انتهایی نیز مربوط به رفتار با معیار نیرو-کنترل و پس از سطح عملکرد آستانه فرو ریزش می باشد. میان دامنه های عددی هر چهار نمودار معیار رفتار غیرخطی فوق نیز هیچ نوع قرابت یا ساختار همسان شکلی وجود ندارد. موقعیت احتمالی تشکیل مفصل غیر خطی نیز برابر با فاصله ۰,۰۵ طول دهانه آزاد و از محل اتصال تعیین می شود.

## ۶- پاسخ غیر خطی سازه ها تحت رکوردهای انتخابی

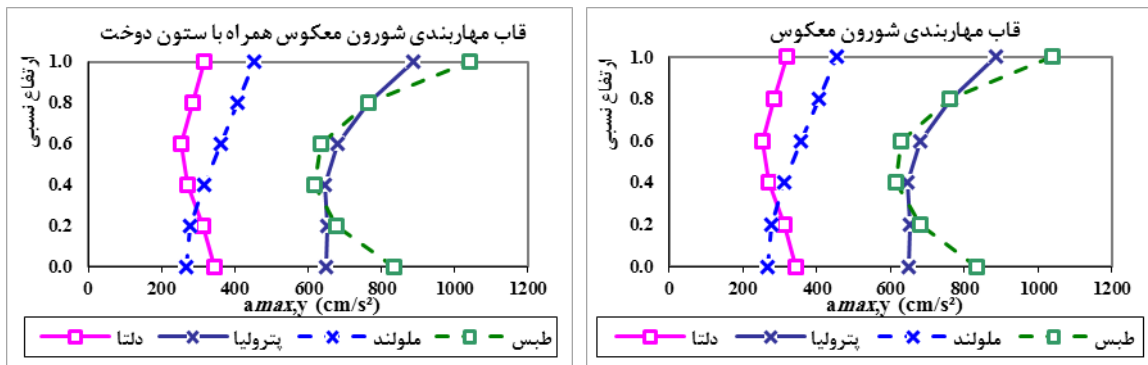
ساختار و رفتار دینامیکی سازه ها در مطالعات پژوهشی بر اساس رکوردهای انتخابی، مورد بررسی و ارزیابی قرار می گیرند. روش محاسبه و تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیر خطی اتخاذ شده در پژوهش حاضر بر پایه اعمال فرایند انتگرال گیری عددی به روش شتاب میانگین ثابت (نیومارک  $\gamma=0.5$  و  $\beta=0.125$ ) بر روی نگاشت رکوردهای انتخابی است [۳۸ و ۳۹]. مهمترین پارامترهای تحلیلی پاسخ لرزه ای مدل های مطالعاتی در این پژوهش؛ حداکثر شتاب مطلق و سرعت نسبی در محل مرکز جرم طبقات، حداکثر تغییر مکان نسبی طبقات، تاریخچه زمانی تغییر مکان نسبی در طبقه فوقانی، تاریخچه زمانی و حداکثر نیروی محوری ستون های قاب مهاربندی در پایین ترین طبقه، آرایش و مکانیزم مفاصل پلاستیک در اعضای سازه می باشند.

یک نمود کلی حاصل از پاسخ ها آن است که برای اسکلت های مقاوم کوتاه مرتبه، بکارگیری ستون دوخت در تغییر مکان نسبی طبقات فوقانی نقش موثری داشته ولی بر تغییرات سرعت نسبی و شتاب طبقات اثر چندانی ندارد. نمودارهای مربوط به پوش بیشینه شتاب مطلق، سرعت نسبی و تغییر مکان نسبی طبقات که بر اساس تحلیل های غیرخطی دینامیکی توسط نرم افزار SAP2000 [۴۰] انجام شده در شکل های ۱۳ تا ۱۵ بیانگر موضوع فوق می باشد. همچنین در نمودارهای شتاب مطلق، سرعت و تغییر مکان نسبی طبقات، محور عمودی مربوط به ارتفاع نسبی سازه و محور افقی نیز متناظر با پارامتر هدف می باشد. منحنی های مربوط به پوش بیشینه شتاب مطلق در راستای Y پلان در شکل ۱۳ نشان داده شده اند. ساختار این نمودارها نمایانگر آن است که اندازه پارامتر پاسخ مذکور تحت رکوردهای حوزه نزدیک، دارای مقادیر به مراتب بیشتری می باشد. ملاحظه می شود که برای مدل شورون همراه با ستون دوخت، طبقه فوقانی سازه تحت اعمال رکورد حوزه نزدیک طیس دارای شتاب مطلق به میزان  $997 \frac{cm}{s^2}$  بوده که این مقدار تحت رکورد حوزه دور دلتا برابر  $332 \frac{cm}{s^2}$  می باشد.

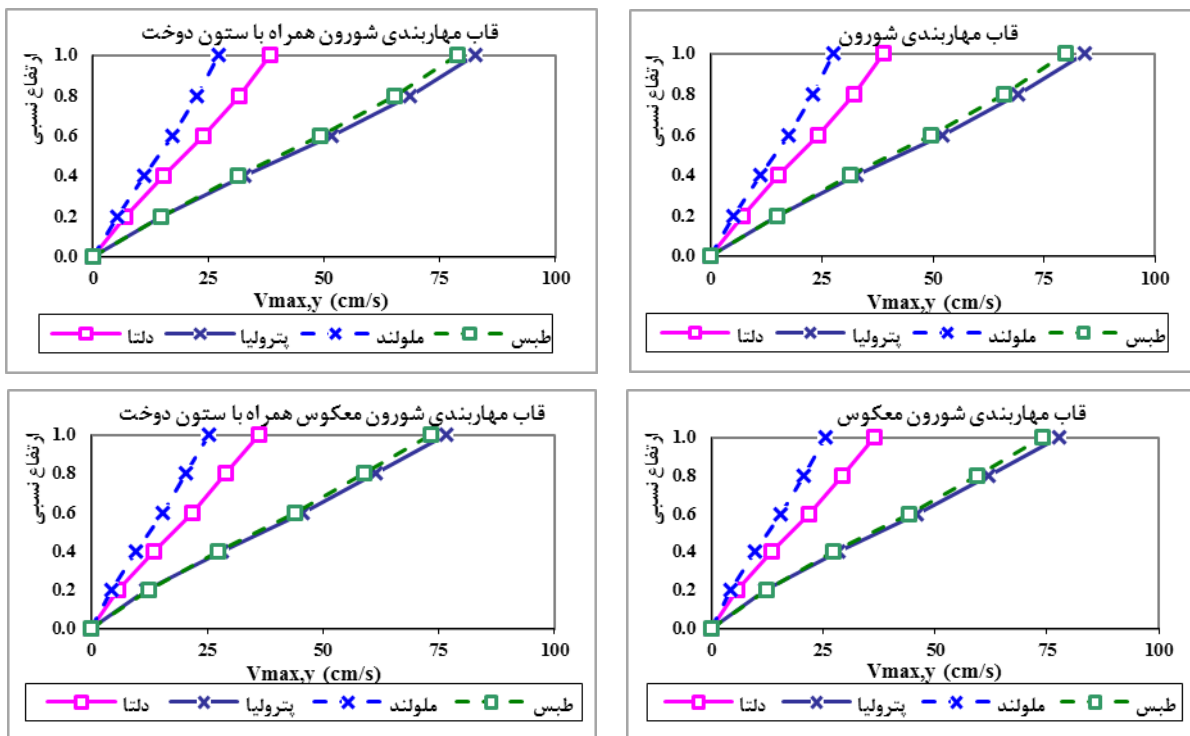
نتایج این پژوهش بیانگر آن است که تحت اثر رکوردهای پر قدرت حوزه نزدیک و تا حدود نیمه اول پالس بزرگ سرعت، مشخصات رفتار لرزه ای با نمود غیر خطی هندسی و همراه با ورود تدریجی به حوزه تغییر شکل های بزرگ است. همچنین پس از گذر از نیمه نخست پالس بزرگ سرعت متناظر با هر دو مؤلفه LN و TR، ماهیت رفتار لرزه ای اسکلت مقاوم با نمود جامع غیرخطی هندسی-مادی می باشد. بدین ترتیب، فرایند مشخص تشکیل و گسترش ویژگی های غیرخطی با دامنه به نسبت بزرگ پدیدار می شود. نمود این رفتار به صورت کاهش تدریجی سختی و زوال مقاومت اسکلت سازه بوده و احتمال تشکیل وضعیت ناپایداری دینامیکی کلی نیز وجود دارد.







شکل ۱۳: نمودار پوش بیشینه شتاب مطلق راستای Y پلان چهار سازه ۵ طبقه مطالعاتی؛ شامل سیستم دوگانه ترکیبی قاب خمشی و چهار ساختار جداگانه پانل های شورون، شورون همراه با ستون دوخت، شورون معکوس و نیز شورون معکوس همراه با ستون دوخت.

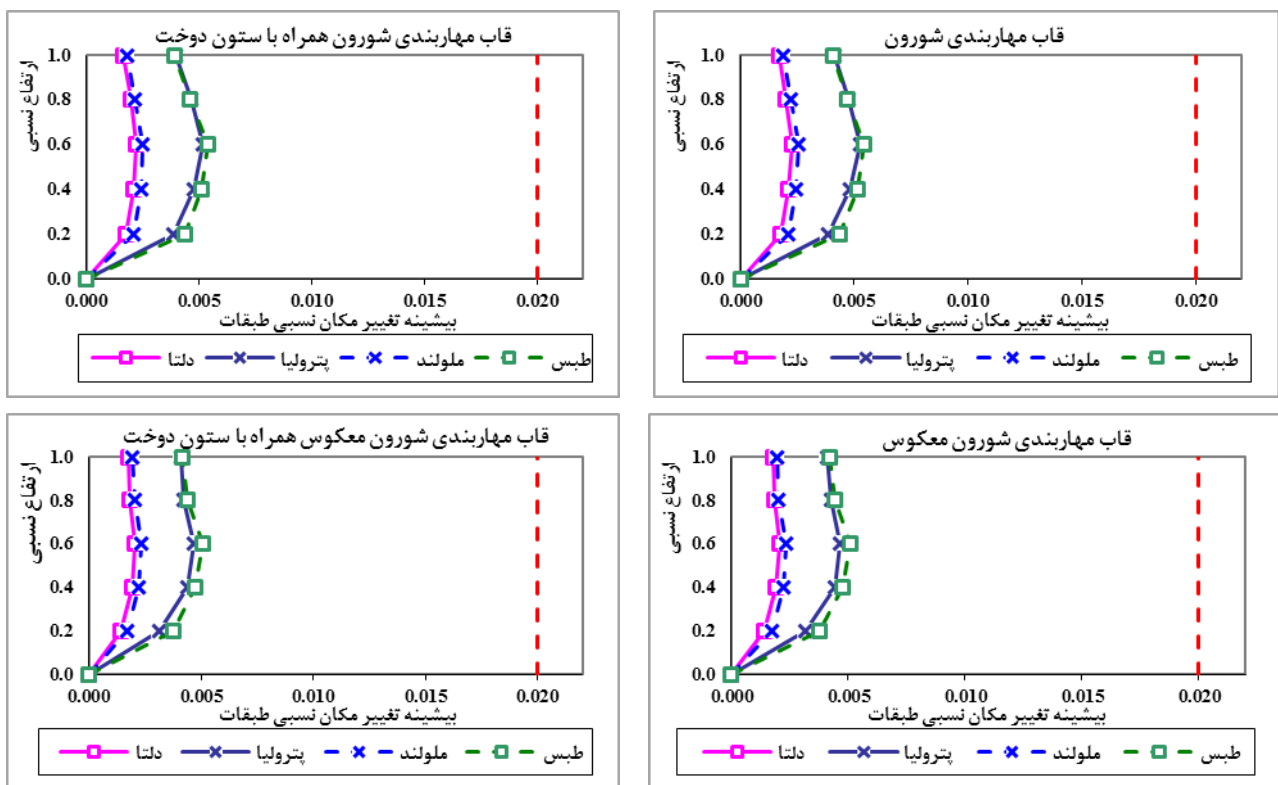


شکل ۱۴: نمودار پوش بیشینه سرعت نسبی راستای Y چهار سازه ۵ طبقه مطالعاتی؛ شامل سیستم دوگانه ترکیبی قاب خمشی و چهار ساختار جداگانه پانل های شورون، شورون همراه با ستون دوخت، شورون معکوس و نیز شورون معکوس همراه با ستون دوخت.

پارامتر مهم دیگر در این تحقیق، مقدار بیشینه سرعت نسبی در محل مرکز جرم طبقات است و بر اساس نتایج حاصل از تحلیل- های دینامیکی غیر خطی تحت رکوردهای سه مولفه ای حاصل شده اند. نمودارهای پوش مقادیر حداکثر سرعت نسبی طبقات مدل های مطالعاتی در شکل ۱۴ به نمایش در آمده است. بیشترین مقادیر این پارامتر پاسخ تحت رکوردهای حوزه نزدیک دارای پالس های نیرومند سرعت حاصل شده اند. همچنین این پالس ها نیز متناظر با مجموعه اسپایک های پر دامنه موجود در تاریخچه زمانی شتاب بوده و دارای مقادیر به مراتب بزرگتری در مقایسه با مشخصات رکورد حوزه دور دلتا است. بیشینه مقدار سرعت نسبی مربوط به رکوردهای حوزه نزدیک طبس و پترولیا بوده و مشخصات فیزیکی هر سه مولفه LN، TR و UP این رکوردها نیز به طور قابل توجهی متغیر می باشند. به عنوان

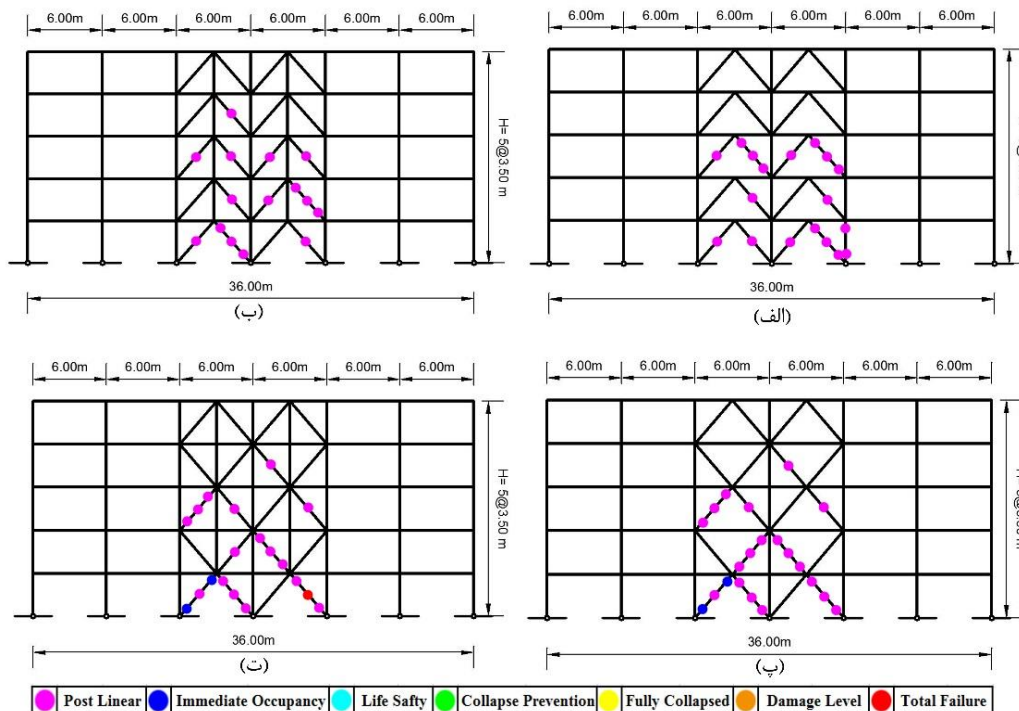
مثال در مورد تمامی سازه‌های ۵ طبقه این پژوهش، بیشینه سرعت نسبی در محل مرکز جرم طبقه تحت مولفه‌های موازی (LN) و عمود (TR) بر صفحه شکست گسل، مربوط به رکورد پترولیا و تحت مولفه قائم (UP) نیز مربوط به رکورد طبس است.

یک عامل مهم در ارزیابی عملکرد سازه، پارامتر تغییر مکان نسبی طبقه (دریفت) می‌باشد به طوری که یک ارتباط منطقی و ساختاری بین این پارامتر و ظرفیت شکل‌پذیری طبقه برقرار گردد. در شکل ۱۵ نمودارهای پوش بیشینه جابجایی نسبی طبقات حاصل از تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی به نمایش گذاشته شده است. در نمودارهای مذکور، نتایج حاصل از تاثیرات پالسی رکوردهای حوزه نزدیک، نمایانگر افزایش قابل توجه در مقدار جابجایی نسبی طبقه می‌باشد. همچنین مقدار آن با حد مجاز تعریف شده در استاندارد ۲۸۰۰ ایران که ۰/۰۲ می‌باشد، مقایسه شده است. بررسی پاسخ لرزه‌ای مدل‌های ۵ طبقه، بیانگر جابجایی نسبی طبقات در حد کمتر از ۲ درصد است. شکل تغییرات این پارامتر برای کلیه مدل‌های مطالعاتی ۵ طبقه تحت رکوردهای انتخابی، به صورت نسبی حاوی مقادیر یکسانی می‌باشد. روند تغییرات پارامتر جابجایی نسبی طبقات برای سازه‌های ۵ طبقه تحت رکوردهای طبس و پترولیا نسبت به سایر رکوردها بیشتر بوده به طوری که بزرگ‌ترین مقدار تحت رکوردهای مذکور برابر با ۰/۰۰۵ در طبقه سوم حاصل شده است.



شکل ۱۵: نمودار پوش تغییر مکان نسبی (دریفت) راستای Y چهار سازه ۵ طبقه مطالعاتی؛ شامل سیستم دوگانه ترکیبی قاب خمشی و چهار ساختار جداگانه پانل‌های شورون، شورون همراه با ستون دوخت، شورون معکوس و نیز شورون معکوس همراه با ستون دوخت.

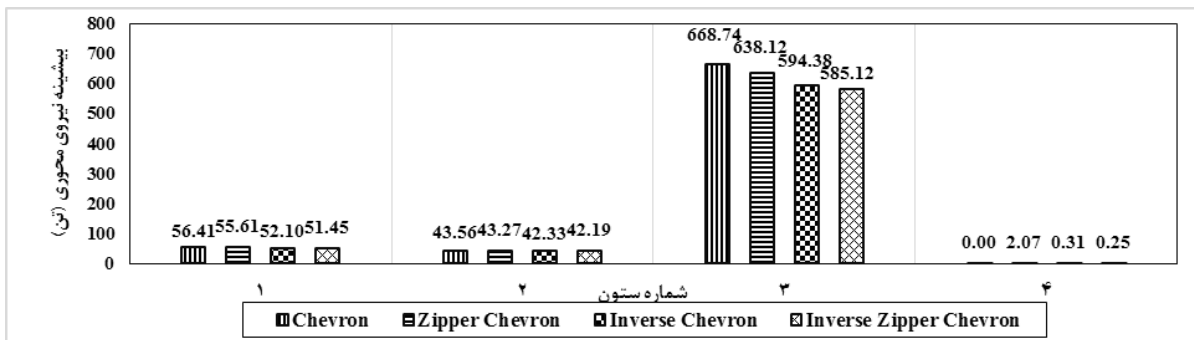
به منظور تفهیم ماهیت ویرانگر رکوردهای قوی حوزه نزدیک، مکانیزم تشکیل مفاصل پلاستیک در جهت Y پلان تحت رکورد طبس در شکل ۱۶ به نمایش در آمده است. همچنین تحت اعمال رکوردها در حالت طبیعی، مفاصل پلاستیک در محدوده عملکردی پایین‌تر از ایمنی جانی<sup>۳۸</sup> باقی مانده و تشکیل این ساختارها در تمامی مدل‌ها، به نسبت یکنواخت و مشابه می‌باشد. بکارگیری ستون دوخت در پانل‌های شورون اسکلت مقاوم سازه، موجب یک کاهش تقریبی برای دامنه رفتاری تشکیل مفاصل پلاستیک و نیز ویژگی‌های پاسخ در حوزه تغییر شکل‌های بزرگ می‌گردد.



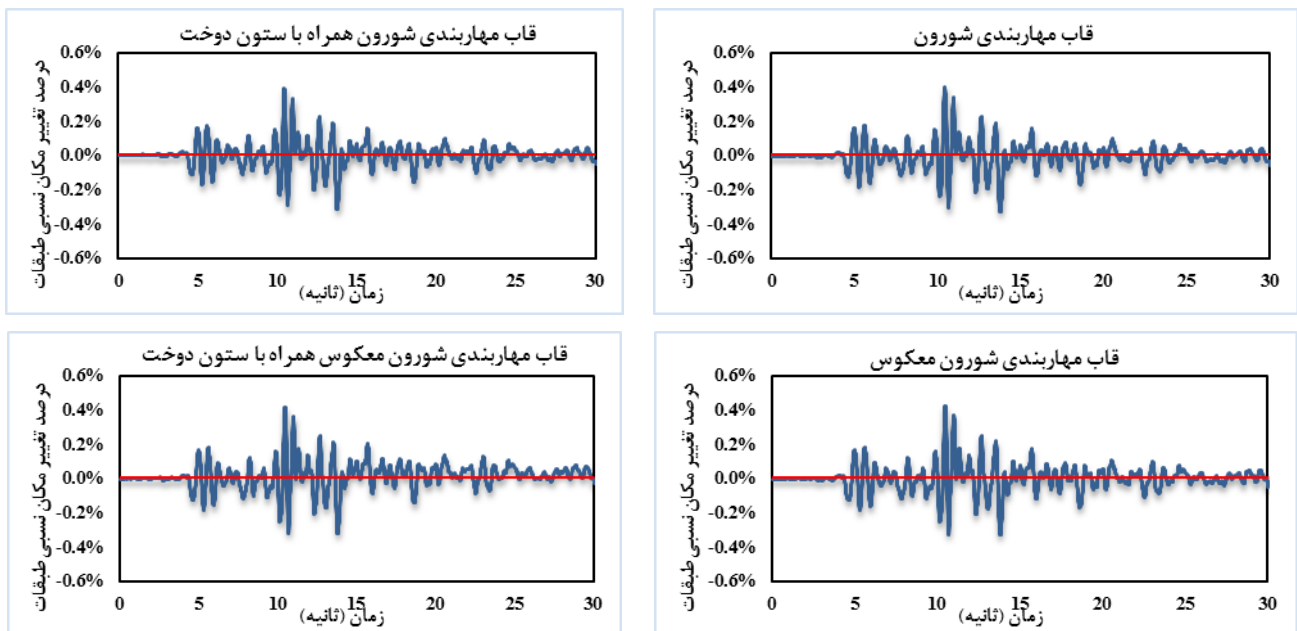
شکل ۱۶: ساختار مفصل پلاستیک تشکیل شده راستای Y چهار سازه ۵ طبقه مطالعاتی، شامل سیستم دوگانه ترکیبی قاب خمشی و چهار ساختار جداگانه پانل‌های؛ (الف) شورون؛ (ب) شورون همراه با ستون دوخت؛ (پ) شورون معکوس؛ (ت) شورون معکوس همراه با ستون دوخت.

نمودارهای میله‌ای شکل ۱۷ نمایشگر پارامتر بیشینه نیروی محوری در ستون‌های پایین‌ترین طبقه قاب پیرامونی در راستای محور Y پلان است که تحت رکورد پر قدرت طیس حاصل شده‌اند. اعمال و اثر نیروی جانبی در این طبقه به خصوص در محل تراز فونداسیون موجب ایجاد حداکثر نیروی محوری محتمل در ستون‌های کناری قاب مهاربندی شده، می‌گردد. استنباط منطقی از موضوع کاربرد روش تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی در ارزیابی پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های طبقاتی تحت زلزله‌های حوزه نزدیک، بر پایه توانایی این روش در لحاظ نمودن مولفه‌های پاسخ سازه به امواج دامنه بلند و پالس‌گونه زلزله با فرکانس پایین و نیز اسپایک‌های پر انرژی متناظر با باند فرکانس‌های میانه و بالا، حاصل می‌گردد [۴۱].

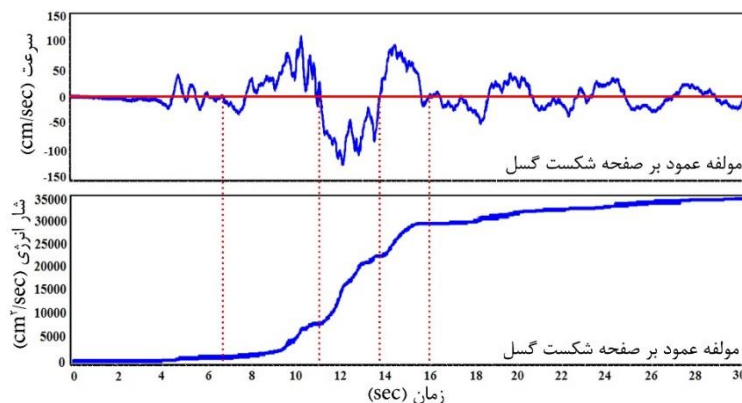
شایان ذکر است که در رکورد بسیاری از زلزله‌های حوزه نزدیک، ساختارهای مشخص موجی شکل وجود دارد. محتوای فرکانسی بسیاری از رکوردهای زلزله‌های بزرگ دارای بسامدهای پایین متناظر با پالس‌های نیرومند بلند مدت و همچنین دربرگیرنده فرکانس‌های بالا متناظر با ارتعاشات پیوسته دامنه متوسط تا کوتاه می‌باشد. برآیند نیروی محوری دینامیکی ستون‌های محیطی واقع در پلان هر چهار سازه مطالعاتی شکل ۸، تاثیر پذیرفته از انرژی متناظر با باند فرکانس‌های پر دامنه در طیف فوریه رکورد زلزله است. بر اساس شکل ۱۷ با تغییر آرایش و پیکربندی پانل‌های مهاربندی در سازه‌های مطالعاتی، تحت اثر رکورد طیس تاثیرات قابل ملاحظه‌ای در مقادیر نیروی محوری ستون‌ها ایجاد می‌شود. به عنوان نمونه نیروی محوری ستون شماره ۳ در مدل حاوی پانل‌های شورون معکوس همراه با ستون دوخت برابر با ۵۸۵ تن، دارای کمترین مقدار بوده و قابلیت نسبی بیشتری برای استفاده از ظرفیت باربری ستون ایجاد می‌گردد.



شکل ۱۷: پیشینه نیروی محوری ستون‌ها در راستای Y پلان چهار سازه ۵ طبقه مطالعاتی؛ شامل سیستم دوگانه ترکیبی قاب خمشی و چهار ساختار جداگانه پانل‌های شورون، شورون همراه با ستون دوخت، شورون معکوس و نیز شورون معکوس همراه با ستون دوخت تحت رکورد حوزه نزدیک طبس (شماره گذاری ستون‌ها مطابق شکل ۸ می‌باشد).

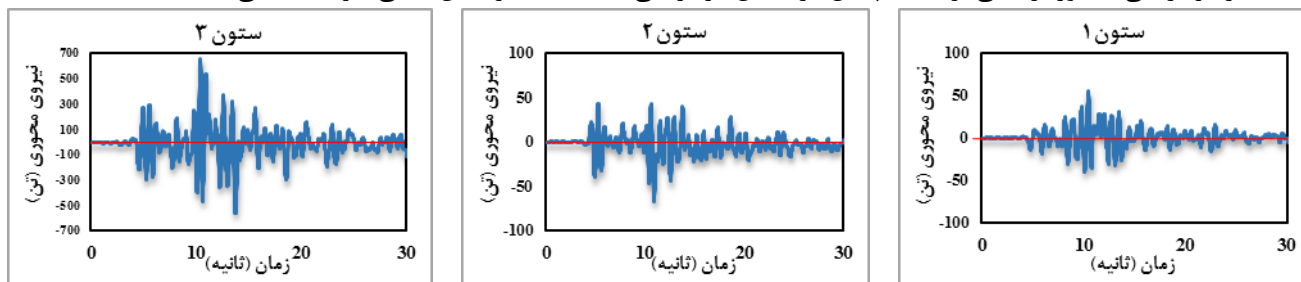


شکل ۱۸: تاریخچه زمانی پاسخ دررفت طبقه بام راستای Y چهار سازه ۵ طبقه مطالعاتی تحت رکورد حوزه نزدیک طبس؛ شامل سیستم دوگانه ترکیبی قاب خمشی و چهار ساختار جداگانه پانل‌های شورون، شورون همراه با ستون دوخت، شورون معکوس و نیز شورون معکوس همراه با ستون دوخت.

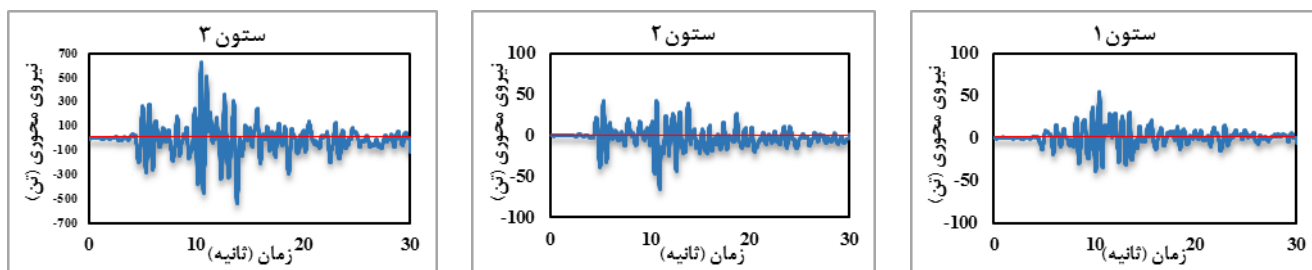


شکل ۱۹: تاریخچه زمانی سرعت و روند آزاد شدن تجمعی انرژی جنبشی مولفه عمود بر صفحه شکست گسل رکورد طبس.

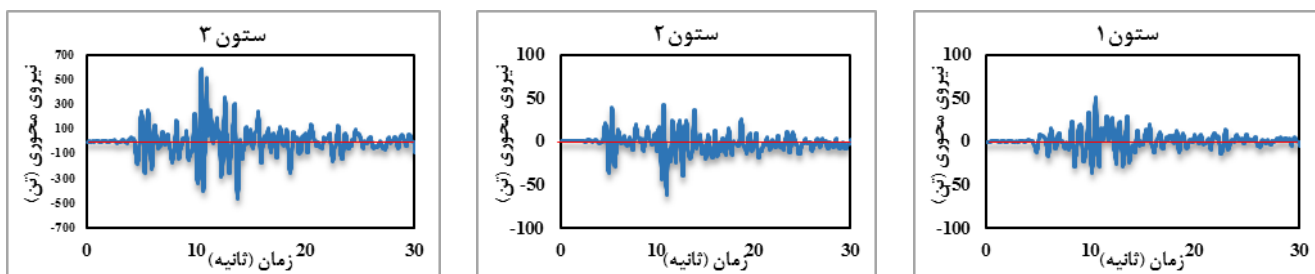
نمودار تاریخچه زمانی پاسخ تغییر مکان نسبی طبقه بام در راستای محور  $Y$  مدل‌ها، تحت اثر رکورد طیس در شکل ۱۸ نشان داده شده که محور قائم و افقی به ترتیب نمایان‌گر درصد تغییر مکان نسبی و زمان بر حسب ثانیه می‌باشند. بیشینه تغییر مکان نسبی در این نمودارها در حدود ۱۰ الی ۱۵ ثانیه اتفاق افتاده که این بازه زمانی با محدوده پالس سرعت (در نمودار تاریخچه زمانی سرعت) و نیز حوزه ایجاد پرش در روند آزاد شدن انرژی جنبشی رکورد (شکل ۱۹) متناظر می‌باشد. با توجه به شکل ۱۹ قابل مشاهده است که انرژی بسیار زیادی در بازه زمانی مذکور آزاد می‌گردد. همچنین در همین بازه زمانی، بیشینه تغییر مکان نسبی نیز بدست می‌آید.



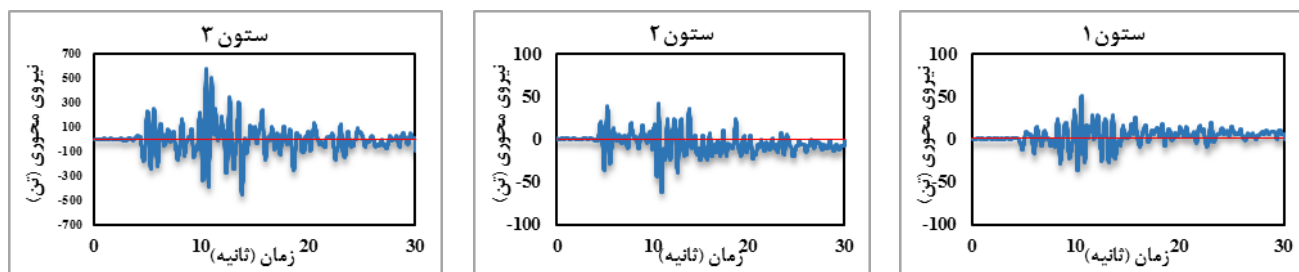
شکل ۲۰: تاریخچه زمانی نیروی محوری ستون‌های طبقه اول سازه (شکل ۸) با سیستم دوگانه قاب خمشی - پانل‌های شورون تحت رکورد طیس.



شکل ۲۱: تاریخچه زمانی نیروی محوری ستون‌های طبقه اول سازه (شکل ۸) با سیستم دوگانه قاب خمشی - پانل‌های شورون همراه با ستون دوجت تحت رکورد طیس.



شکل ۲۲: تاریخچه زمانی نیروی محوری ستون‌های طبقه اول سازه (شکل ۸) با سیستم دوگانه قاب خمشی - پانل‌های شورون معکوس تحت رکورد طیس.



شکل ۲۳: تاریخچه زمانی نیروی محوری ستون‌های طبقه اول سازه (شکل ۸) با سیستم دوگانه قاب خمشی - پانل‌های شورون معکوس همراه با ستون دوجت تحت رکورد طیس.

نمودارهای تاریخچه زمانی نیروی محوری ستون‌های شماره ۱ تا ۳ در شکل ۸ و در پایین‌ترین طبقه سازه‌های مطالعاتی، تحت اثر رکورد طیس در شکل‌های ۲۰ تا ۲۳ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که مقادیر ماکزیمم نیروی محوری در محدوده وقوع اوج دامنه پالس سرعت متناظر با مولفه TR رخ داده است (شکل ۱۹). با توجه به نمودارها می‌توان مشاهده نمود که نیروی محوری در ستون‌های کناری قاب مهاربندی شده (ستون شماره ۳) به شدت بیشتر از سایر ستون‌ها می‌باشد. به عنوان مثال بیشینه نیروی محوری در مدل حاوی پانل‌های شورون در ستون‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب ۵۶، ۶۳ و ۶۶۸ تن بوده و بیشینه نیروی محوری ستون ۳ به ترتیب حدود ۱۲ و ۱۱ برابر ستون‌های ۱ و ۲ است. مقادیر بیشینه و کمینه محور قائم نمودار تاریخچه زمانی نیروی محوری دینامیکی ستون شماره ۳ برابر با ۷۰۰ تن و برای دو ستون دیگر نیز مساوی ۱۰۰ تن لحاظ گردیده است.

## ۷- نتیجه‌گیری

این پژوهش، دربرگیرنده نتایج مطالعه مشخصات رفتار لرزه‌ای ساختارهای سازه‌ای دوگانه کوتاه مرتبه است. مدل‌های اسکلت مقاوم بر پایه آرایش‌های مختلف پانل‌های مهاربندی شورون با پیکربندی دارا و نیز بدون ستون‌های دوخت طراحی گردید. رکوردهای انتخابی حوزه نزدیک شامل جنبش‌های نیرومند زمین با ویژگی حضور پالس‌های پر دامنه و بلند مدت در تاریخچه زمانی سرعت است و به صورت سه مولفه‌ای به سازه‌های مطالعاتی اعمال شدند.

ارزیابی نتایج مربوط به تغییر مکان نسبی (دریفت) طبقات در اسکلت مقاوم مدل‌های سازه‌ای تحت رکوردهای پالسیو نشان می‌دهد که این پارامتر در قاب‌های مهاربندی شده شورون با ستون دوخت نسبت به پیکربندی متناظر فاقد ستون دوخت، دارای دامنه کوچکتری بوده و اندازه تغییر مکان نسبی (دریفت) نیز دچار یک کاهش میانگین حدود ۱۰ درصد می‌باشد. حوزه عملکرد غیرخطی مفاصل تشکیل شده در اسکلت مقاوم سازه‌های دوگانه کوتاه مرتبه چندان تغییری ندارد. تغییرات پاسخ‌های مختلف سازه‌ها تحت رکورد غیر پالسیو و حوزه دور دلتا در مقایسه با رکوردهای پالسیو، نمودی نسبی، متغیر بوده و بطور نسبی کمتر از ۳۰ درصد است. طراحی و تعبیه المان‌های ستون دوخت در قاب‌های مهاربندی شده شورون می‌تواند تاثیر نسبی در کاهش و یکنواخت نمودن دریفت طبقات داشته باشد. نکته دیگر آن که حضور المان‌های ستون دوخت سبب محدود شدن وقوع کمانش اعضای مهاربندی شده و افزایش سطح عملکرد لرزه‌ای اسکلت مقاوم را در پی دارد.

دامنه عملکرد مفاصل غیر خطی تشکیل شده در اسکلت مقاوم حاوی ستون‌های دوخت، بطور نسبی کمی کمتر از معیارهای محاسباتی متناظر در رفتار لرزه‌ای سازه بدون این المان‌ها می‌باشد. تعبیه المان‌های زیپر تأثیری کمتر از ۲ درصد در برش پایه دارد. همچنین حضور این المان‌ها بر روی بیشینه نیروی محوری مهاربندها تأثیر افزایشی می‌گذارد. به عنوان مثال بیشینه نیروی محوری مهاربندهای طبقه اول راستای Y سازه تحت رکورد طیس در اسکلت حاوی پانل‌های مهاربندی شورون از حدود ۳۵۰ تن به حدود ۴۰۰ تن در شرایط حضور المان‌های ستون دوخت رسیده است.

## مراجع

- [1] Ali, M.M. and Moon, K.S.; (2007). "Structural developments in tall buildings: Current trends and future prospects", *Architectural Science Review*, 50 (3), 205-223.
- [2] MacRae, G.D. and Roeder, C.; (2001). "Near-fault ground motion effects on simple structures", *Journal of Structural Engineering*, 127 (9), 996-1004.
- [3] Yang, D., Zhang, C., & Liu, Y.; (2015). "Multi-fractal characteristic analysis of near-fault earthquake ground motions", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 72, 12-23.
- [4] Puglia, R., Russo, E., Luzi, L., D'Amico, M., Felicetta, C., Pacor, F., & Lanzano, G.; (2018). "Strong-motion processing service: a tool to access and analyse earthquakes strong-motion waveforms", *Bulletin of Earthquake Engineering (Springer)*, <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0299-z>
- [5] Somerville P.G.; (2003). "Magnitude scaling of the near fault rupture directivity pulse", *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 137, 201-212.



- [6] Kalkan, E. and Kunnath, S.K.; (2006). "Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings", *Earthquake Spectra*, 22 (2), 367-390.
- [7] Raghunandan, M., & Liel, B.; (2013). "Effect of ground motion duration on earthquake-induced structural collapse", *Structural Safety*, 41, 119-133.
- [8] Oregon, J.P., Diosdado, A.M., Navarro, A.H.R., Saenz, A.G., Brown, F.A.; (2018). "On the possible correlation between the Gutenberg-Richter parameters of the frequency-magnitude relationship", *Journal of Seismology*, <https://doi.org/10.1007/s10950-018-9757-6>
- [9] Sehhati, R., Rodriguez-Marek, A., ElGawady, M., & Cofer W.F.; (2011). "Effects of near-fault ground motions and equivalent pulses on multi-story structures", *Engineering Structures*, 33, 767-779.
- [10] Nazari, S., Keyvani, J., Meshkat-Dini, A., & Azhdarifar, M.; (2017). "Study on the seismic response of mid-rise bundled tube resistant systems under simulated closed form near-field records", *Asian Journal of Civil Engineering*, 18(6), 961-976.
- [11] Muto, M., Krishnan, S.; (2011). "Hope for the best, prepare for the worst: response of tall steel buildings to the shake-out scenario earthquake", *Earthquake Spectra*, 27(2), 375-398.
- [12] Narayan, S., Shrimali, M.K., Bharti, S.D., & Datta, T.K.; (2018). "Collapse of damaged steel building frames because of earthquakes", *Journal of Performance of Constructed Facilities (ASCE)*, 32(1), DOI:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001125.
- [13] Rossi, P.P.; (2007). "A design procedure for tied braced frames", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 36(14), 2227-2248.
- [14] Bosco, M. and Rossi, P.P.; (2009). "Seismic behaviour of eccentrically braced frames", *Engineering Structures*, 31(3), 664-674.
- [15] Yeom, H.J. and Yoo, J.H.; (2018). "Analytical investigation on seismic behavior of inverted V-braced frames", *International Journal of Steel Structures*, 18(1), 189-198.
- [16] Shen, J., Wen, R., Akbas, B., Doran, B., Uckan, E.; (2014). "Seismic demand on brace-intersected beams in two-story X-braced frames", *Engineering Structures*, 76, 295-312.
- [17] Farahani, S., Amin Mohebbkhah, A.; (2016). "Overstrength of displacement-based designed eccentrically braced steel frames", *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*, 2(4), 48-61.
- [18] Vaseghi Amiri, J., Esmailnia Amiri, M., & Ganjavi B.; (2017). "Evaluation of performance levels of zipper-braced frames using structural damage index", *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 50(2), 353-374, DOI:10.7508/cej.2017.02.009
- [19] Kim, J., Cho, C., Lee, K.L. and Lee, C.; (2008). "Design of zipper column in inverted V-braced steel frames", *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*. Beijing, China.
- [20] Hajdú, G., Papp, F.; (2018). "Safety assessment of different stability design rules for beam-columns", *Structures*, 14, 376-388.
- [21] Burks, L.S., Baker, J.W.; (2016). "A predictive model for fling-step in near-fault ground motions based on recordings and simulations", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 80, pp. 119-126.
- [22] Mollaioli, F.B., Decanini, L.D., and Panza, G.F.; (2006). "Characterization of the dynamic response of structures to damaging pulse-type near-fault ground motions", *Meccanica*. 41 (1), 23-46.
- [23] Riahi, H.T., Amouzegar, H. and Fosoul, S.A.S.; (2015) "Comparative study of seismic structural response to real and spectrum matched ground motions", *Scientia Iranica*, 22 (1), 92.
- [24] Bray, J.D., Rodriguez-Marek, A.; (2004). "Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24 (11), 815-828.
- [25] Yaghmaei-Sabegh, S., Shoghian Z., Sheikh M.N.; (2014). "A new model for the prediction of earthquake ground motion duration in Iran", *Natural Hazards*, 70, 69-92.
- [26] Yang, D., Zhou J.; (2015). "A stochastic model and synthesis for near-fault impulsive ground motions", *Earthquake Engineering and Earthquake Engineering*, 44, 243-264.
- [27] Madani, R.; (2016). *Assessment of seismic response of steel mid-rise dual resistant system of zipper chevron braced panels and rigid frames subjected to strong ground motions*. MSc. Thesis. Kharazmi University.
- [28] Gaur, H. and Goliya, R.K.; (2015). "Mitigating shear lag in tall buildings", *International Journal of Advanced Structural Engineering (IJASE)*, 7 (3), 269-279.

- [29] Khazaei-Rad, P., Mortazavi S.A., & Meshkat-Dini, A. (2018). "Analytical aspects of velocity pulses on seismic behaviour of mid-rise compound skeleton of steel moment frame and eccentrically braced panels", *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*, Tehran, Iran, (Accepted).
- [30] Hall, J.F.; (1997). "Parameter study of the response of moment resisting steel frame buildings to near-source ground motions", Pasadena: California Institute of Technology.
- [31] Durucan, C. and Durucan, A.R.; (2016). "Ap/Vp specific inelastic displacement ratio for the seismic response estimation of SDOF structures subjected to sequential near-fault pulse-type ground motion records", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 89, 163-170.
- [32] PEER Strong Motion Database. <https://ngawest2.berkeley.edu/>
- [33] National Building Regulations Office, Ministry of Roads and Urban Development; (2014). "Iranian National Building Code: Design Loads for Buildings- Division 6". The 3rd Edition, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran.
- [34] Permanent Committee for Revising the Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, (2014). "Standard No. 2800. Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings". The 4th Edition, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran.
- [35] National Building Regulations Office, Ministry of Roads and Urban Development; (2014). "Iranian National Building Code: Design and Construction of Steel Structures – Division 10". The 4th Edition, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran.
- [36] Federal Energy Management Agency (FEMA), (1998). Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings: Report No. Fema 356: Createspace Independent Publication.
- [37] Federal Energy Management Agency (FEMA), (2005). Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures, Applied Technology Council (ATC-55 Project), Report No. Fema 440.
- [38] Chang, S.; (2009). "Nonlinear evaluations of unconditionally stable explicit algorithms", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 8 (3), 329-340.
- [39] Chang, S.; (2003). "Accuracy of time history analysis of impulses. *Journal of Structural Engineering*", 129 (3), 357-372.
- [40] SAP2000. (2010) *Static and Dynamic Finite Element Analysis of Structures*, Berkeley: Computers and Structures.
- [41] Azhdarifar, M., Meshkat-Dini, A. and Moghadam A.S.; (2018) "Analytical effects of interior rigid bents arrangement on seismic response of tall buildings", *Journal of Seismology and Earthquake Engineering (JSEE)*, Tehran, Iran, (Accepted).