

# آنالیز تاب‌آوری لرزه‌یی سازه‌های شبکه‌ی قطری بلندمرتبه با پیکربندی پیرامونی مختلف براساس معیار شاخص نیرومندی

مهیار روشنی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

افشین مشکوه‌الدینی\* (استادیار)

علی معصومی (استاد)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۱  
دوری ۲ - ۳۸، شماره ۲/۲، ص. ۲۸-۱۵، (پژوهشی)

در پژوهش حاضر، تأثیر الگوی هندسی المان‌های قطری بر تاب‌آوری لرزه‌یی سازه‌های شبکه‌ی قطری با استفاده از نمودارهای شکنندگی بررسی شده است. بدین منظور، بر روی سه سازه‌ی ۲۴ طبقه‌ی شبکه‌ی قطری با زوایای پیکربندی ۴۹، ۶۷ و ۷۴ درجه به همراه یک سازه‌ی قاب خمشی محیطی دسته شده‌ی مینا، تحلیل‌های تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی (NTHA) و دینامیکی فزاینده (IDA) تحت رکوردهای نیرومند حوزه‌ی نزدیک انجام شده است. با پیاده‌سازی سطح عملکرد کرانه‌ی رفتار کشسان، استفاده‌ی بی‌وقفه، ایمنی جانی و آستانه‌ی فروریزش براساس ضوابط FEMA بر روی نمودارهای شکنندگی، احتمال تجاوز از حالت‌های حدی برای سازه‌های مطالعاتی محاسبه شده است. درنهایت، با در نظر گرفتن فرمولاسیون تابع خسارت پیشنهادی MCEER، شاخص نیرومندی تاب‌آوری لرزه‌یی برای سازه‌ها مشخص شده است. بر پایه‌ی ارزیابی نمودارهای شکنندگی سازه‌های مطالعاتی ملاحظه شد که تعبیه‌ی زوایای بزرگ برای المان‌های مورب محیطی، احتمال رخداد سطح عملکرد در مقابل زلزله را افزایش می‌دهد. براساس پردازش‌های عددی تاب‌آوری لرزه‌یی، مقادیر شاخص نیرومندی برای سازه‌های شبکه‌ی قطری با زوایای ۴۹، ۶۷ و ۷۴ درجه و سازه‌ی قاب خمشی محیطی دسته شده به ترتیب ۹/۹۵، ۷/۹۱، ۶/۸۸ و ۱/۸۵ درصد محاسبه شده است. مطابق نتایج اخیر نتیجه‌گیری شد که ایجاد الگوی مثلی در قاب‌های پیرامونی باعث کاهش افت کیفیت کارایی و بهبود پایداری دینامیکی سازه‌ها بعد از وقوع زلزله می‌شود.

**واژگان کلیدی:** سازه‌ی شبکه‌ی قطری، نمودار شکنندگی، تحلیل دینامیکی فزاینده، تاب‌آوری لرزه‌یی، شاخص نیرومندی.

mahyar\_roshani@yahoo.com  
meshkat@khu.ac.ir  
massumi@khu.ac.ir

## ۱. مقدمه

سازه تشکیل شده‌اند. تأثیر بارهای لرزه‌یی به صورت برآیندهای نیرویی فشاری و کششی در المان‌های مورب سازه‌ی شبکه‌ی قطری ایجاد می‌شود. این در حالی است که در سازه‌های قاب خمشی<sup>۲</sup>، تأثیر نیروهای جانبی سبب برآیندهای لنگر خمشی و نیروی محوری در ستون‌ها می‌شود. سازه‌های شبکه‌ی قطری ظرفیت مقاومتی بالایی در برابر لنگر واژگونی و نیروی برشی ناشی از زلزله دارند.<sup>[۱]</sup>

حصول عملکرد مطلوب برای سازه‌های شبکه‌ی قطری، وابسته به انتخاب یک الگوی هندسی بهینه و روش مناسب برای کنترل نسبت‌های مقاومتی و طراحی است. تامی و همکاران (۲۰۱۸)، طراحی مقاطع اعضاء مورب سازه‌ی شبکه‌ی قطری را براساس کاهش وزن طبقات مطرح کردند. آنان با بررسی انواع

در سال‌های اخیر، توجه زیادی به توسعه‌ی اسکلت‌های مقاوم برای بهبود رفتار لرزه‌یی سازه‌ها شده است. سیستم‌های شبکه‌ی قطری<sup>۱</sup> به عنوان یک ساختار جایگزین برای سازه‌های بلندمرتبه با ویژگی‌های معماری و عملکرد مناسب در برابر بارهای جانبی هستند که در آن‌ها، همه‌ی ستون‌های محیطی برخلاف سیستم‌های مرسوم قاب خمشی و مهاربندی، حذف و با گروه المان‌های مورب تیر - ستون جایگزین می‌شوند. ساختارهای شبکه‌ی قطری از یک مجموعه الگوهای مثلی شامل المان‌های مورب بزرگ و تیرها، با پیکربندی‌های مختلف در راستای ارتفاع

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۰۶/۱۹، اصلاحیه ۱۴۰۰/۱۰/۲۸، پذیرش ۱۴۰۰/۱۲/۲۱.

DOI:10.24200/J30.2022.58867.3012

پیکربندی منظم و نامنظم پیرامونی با زوایای مختلف در سازه‌های شبکه‌ای قطری، به‌شیب‌یابی الگوهای مثلی را ارزیابی کردند.<sup>[۲]</sup> محسنیان و همکاران (۲۰۲۰)، با کنترل توزیع کرنش محوری در المان‌های مورب پیکربندی پیرامونی، پارامترهای طراحی براساس عملکرد را برای سازه‌های شبکه‌ای قطری بررسی و برای سطح عملکرد ایمنی جانی، ضریب رفتار ( $R$ ) را برای سازه‌های شبکه‌ای قطری برابر ۴ محاسبه کردند.<sup>[۳]</sup> همچنین مطالعات حشمتی و همکاران (۲۰۲۰)، در مورد آثار وجود هسته‌ی مقاوم مرکزی در سازه‌های شبکه‌ای قطری نشان داد که وجود بخش مذکور می‌تواند سبب افزایش سختی و کاهش روند زوال مقاومت در رفتار لرزه‌یی سازه‌های شبکه‌ای قطری شود. علاوه بر آن نتیجه‌گیری شد که به منظور افزایش حاشیه‌ی اطمینان سازه‌ی شبکه‌ای قطری از سطوح آسیب، زوایای پیکربندی هسته‌ی داخلی باید کوچکتر از پوسته‌ی خارجی باشد.<sup>[۴]</sup> صادقی و رفوئی (۲۰۲۰)، بر پایه‌ی بررسی نتایج تحلیل‌های دینامیکی فزاینده (IDA)<sup>۳</sup> پی بردند که استفاده از مهاربند کم‌انرژی‌تاب در سازه‌های شبکه‌ای قطری، منجر به کاهش آثار  $P - \Delta$  در المان‌های مورب محیطی و افزایش ظرفیت فروریزش می‌شود.<sup>[۵]</sup> وجود مؤلفه‌های سختی برشی و خمشی بزرگ در سازه‌های شبکه‌ای قطری سبب شده است که ساختارهای مقاوم مذکور، برای طراحی سازه‌های با پیچ‌خوردگی هندسی در ارتفاع نیز استفاده شوند. بر همین اساس، سانگ و همکاران (۲۰۲۰)، تأثیر زوایای پیکربندی پیرامونی در سازه‌های شبکه‌ای قطری دارای پیچ‌خوردگی در ارتفاع را بررسی کردند و دریافتند که در سازه‌های شبکه‌ای قطری پیچ‌خورده در ارتفاع، الگوی نامتقارن برای المان‌های مورب محیطی، نتایج مطلوب‌تری را در پی خواهد داشت.<sup>[۶]</sup> گیلمور و همکاران (۲۰۲۱)، نیز طراحی براساس جابه‌جایی را برای سازه‌های شبکه‌ای قطری مطرح و با استفاده از یک روش پیشنهادی، پایداری سازه‌ی دامنه‌ی تغییرات تغییرشکل‌های جانبی را در طول رویدادهای لرزه‌یی تبیین و رابطه‌سازی کردند.<sup>[۷]</sup>

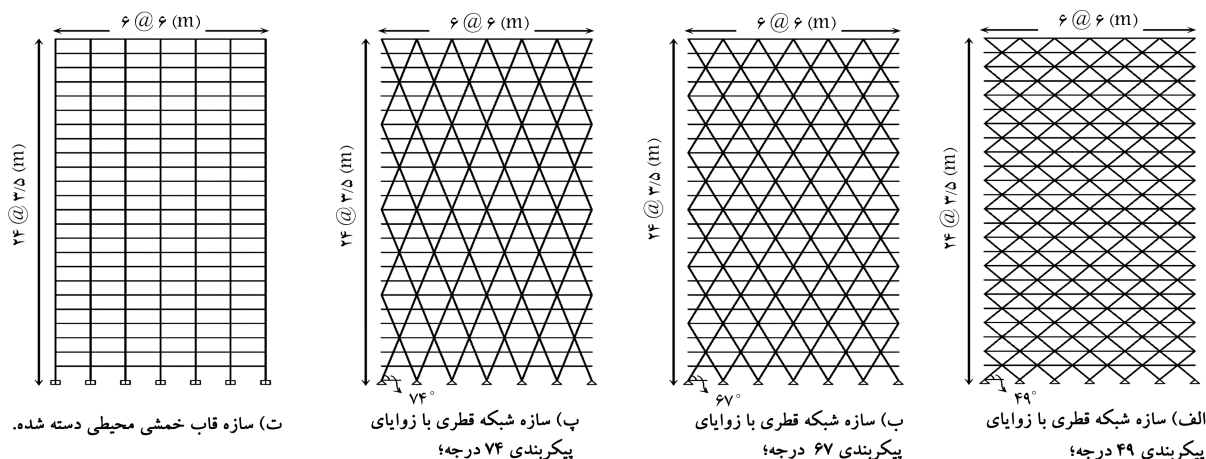
ارزیابی صحیح از رفتار لرزه‌یی و شناسایی سطح عملکرد سازه‌ها، نیازمند کنترل روند آسیب‌پذیری در ساختارهای مقاوم جانبی است. نمودارهای شکنندگی<sup>۴</sup>، احتمال تجاوز پارامتر پاسخ سازه از معیاری مشخص را بر پایه‌ی تابع شدت حرکت زمین نشان می‌دهند. با استفاده از نمودارهای شکنندگی، میزان خسارت، همچنین احتمال وقوع فروریزش و کنترل طراحی برای سازه‌ها بررسی می‌شود.<sup>[۸]</sup> بدین منظور، تحلیل‌های دینامیکی فزاینده (IDA) براساس پارامتر نیاز لرزه‌یی (DM) موردنظر در سطوح مختلف شدت حرکت زمین (IM) انجام می‌شود.<sup>[۹]</sup> درنهایت، با محاسبه‌ی احتمال رخداد سطوح عملکرد بر پایه‌ی توزیع احتمالاتی پاسخ لرزه‌یی، نمودارهای شکنندگی محاسبه می‌شوند. رفوئی و سیدکاسمی (۲۰۲۰)، با محاسبه‌ی نمودارهای شکنندگی، تأثیر تغییرات طول دهانه و زوایای پیکربندی پیرامونی را بر مشخصات طراحی سازه‌های شبکه‌ای قطری ارزیابی کردند و دریافتند که افزایش طول دهانه‌ها، تأثیر قابل توجهی در مشخصات رفتار غیرخطی سازه‌های شبکه‌ای قطری ندارد و نیز تأثیر زاویه‌ی المان‌های مورب محیطی در ضریب رفتار ( $R$ ) سازه‌های شبکه‌ای قطری، وابستگی به ارتفاع سازه دارد.<sup>[۱۱]</sup> مرادی و عبدالمحمیدی (۲۰۲۰)، برای محاسبه‌ی نمودارهای شکنندگی در سازه‌های شبکه‌ای قطری، مقادیر پاسخ انرژی کرنشی خمیری را لحاظ کردند و دریافتند که پارامتر مشخصه‌ی انرژی برخلاف دررفت، ارزیابی مناسب‌تری را برای توابع شکنندگی اسکلت مقاوم به دنبال خواهد داشت.<sup>[۱۲]</sup> دباغچیان و همکاران (۲۰۲۱) نیز با انجام تحلیل دینامیکی فزاینده و استخراج نمودارهای شکنندگی، به بررسی رفتار غیرخطی سازه‌های شبکه‌ای قطری دارای خروج از مرکزیت در الگوی هندسی محیطی پرداختند و دریافتند که استفاده از تیرهای متصل‌کننده‌ی برشی<sup>۵</sup> در پیکربندی

پیرامونی سبب بهبود سختی کشسان و ظرفیت فروریزش سازه‌های شبکه‌ای قطری می‌شود.<sup>[۱۳]</sup>

در پژوهش حاضر، عملکرد لرزه‌یی یک گروه سازه‌های هم‌ساختار با دو پیکربندی شبکه‌ای قطری و نیز قاب خمشی دسته‌شده مقایسه شده است. به‌طورکلی، سازه‌ی قاب خمشی به‌علت انعطاف‌پذیری بالا در برابر حرکت‌های زمین، مقادیر پاسخ جابه‌جایی زیادی را ایجاد می‌کند. در این مورد، اهل‌حق و میرقادر (۲۰۲۰) به منظور کنترل پاسخ دررفت در سازه‌های قاب خمشی، استفاده از المان‌های اضافی متصل‌کننده‌ی دو تیر در طبقات مجاور را مطرح کردند. ایشان با بررسی نمودارهای شکنندگی نشان دادند که المان‌های اضافی متصل‌کننده‌ی تیرها باعث افزایش پتانسیل جذب انرژی زلزله و کاهش فولاد مصرفی می‌شوند.<sup>[۱۴]</sup>

به‌طورکلی، پدیده‌ی با ماهیت تصادفی زمین‌لرزه، عدم قطعیت زیادی را وارد طراحی سازه‌ها می‌کند. پیش‌بینی به صورت زمان و دوره‌ی بازگشت برای رخداد این وقایع، امری غیرممکن است. این عدم قطعیت در مهندسی زلزله با دو رویکرد از دیدگاه‌های رکوردهای زلزله و نیز رفتار سازه‌ها تعریف می‌شود. رویکرد ارزیابی آسیب‌پذیری و تاب‌آوری لرزه‌یی سازه‌ها می‌تواند از عدم قطعیت موجود در رفتار دینامیکی اسکلت‌های مقاوم جلوگیری کند.<sup>[۱۵]</sup> تاب‌آوری لرزه‌یی برای سازه‌ها به‌عنوان توانایی سیستم باربر جانبی برای کاهش احتمال آسیب ناشی از رویداد لرزه‌یی و یا جذب انرژی آن بیان می‌شود. همچنین، تاب‌آوری به‌صورت قابلیت اسکلت مقاوم در بازسازی هر چه سریع‌تر اعضاء سازه‌یی و غیرسازه‌یی مطرح می‌شود. بر طبق مطالعات برونو و راینهون<sup>۶</sup> (۲۰۰۶)، برای یک ساختار لرزه‌یی تاب‌آور، موضوعات کاهش در احتمال خرابی، خسارت‌های اقتصادی و جانی متحمل شده به وسیله‌ی زلزله و زمان بازایی سیستم مقاوم لرزه‌یی مطرح می‌شوند.<sup>[۱۶]</sup> سایملارو<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۱۰)،<sup>[۱۷]</sup> تاب‌آوری لرزه‌یی سازه‌ها را براساس چهار معیار نیرومندی<sup>۸</sup>، افزونگی<sup>۹</sup>، توانمندسازی<sup>۱۰</sup>، و سرعت<sup>۱۱</sup> در نظر می‌گیرند.

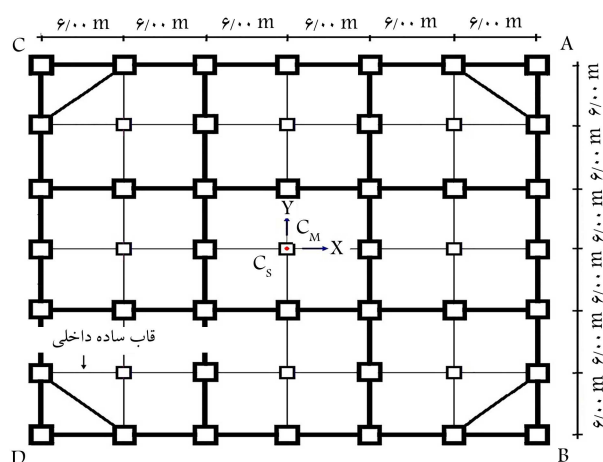
شاخص نیرومندی (استحکام)، سنجش توانایی سیستم باربر جانبی برای مقاومت در برابر سطح مشخصی از نیاز لرزه‌یی است که بدون تضعیف و خسارت در سازه تعریف می‌شود. شاخص افزونگی نیز تعیین قابلیت جایگزینی مسیر انتقال بار لرزه‌یی است که برای حفظ پایداری سازه در اثر خرابی یک عضو لحاظ می‌شود. بر همین اساس، مؤلفه‌ی توانمندسازی، ظرفیت شناسایی مشکلات و تعیین اولویت آن‌ها به منظور هماهنگی‌سازی منابع در زمان اختلال در عملکرد المان و یا سیستم باربرجانبی سازه است. در نهایت، با استفاده از پارامتر سرعت، ظرفیت دستیابی به اهداف موردنظر در زمان مطلوب برای جلوگیری از خسارت‌ها و نقص در عملکرد لرزه‌یی سازه‌ها تعیین می‌شود.<sup>[۱۷]</sup> در واقع، روند پردازش تاب‌آوری، یک درک بهتر برای مدیریت بحران در سازه‌ها را مطرح می‌کند. از میان توابع تاب‌آوری، شاخص نیرومندی به سبب بیان ایمنی سازه برای حفظ پایداری در برابر آسیب‌های موضعی، اهمیت ویژه‌یی نسبت به سایر معیارها دارد. در این باره لیو و فنگ<sup>۱۲</sup> (۲۰۲۰)، شاخص نیرومندی سازه‌ی شبکه‌ای قطری را با درنظرگرفتن ضرایب آسیب‌پذیری و اهمیت لرزه‌یی برای المان‌های اصلی محاسبه کردند. آنان برای پردازش و توصیف روابط پیشنهادی نیز از نتایج برگرفته از مدل آزمایشگاهی استفاده کردند.<sup>[۱۸]</sup> هدف از پژوهش حاضر، بررسی تأثیر الگوی مثلی محیطی در توابع تاب‌آوری لرزه‌یی سازه‌ها با رویکرد احتمالاتی نمودارهای شکنندگی است. رفتار غیرخطی و مشخصات تاب‌آوری سه سازه‌ی شبکه‌ای قطری با زوایای پیکربندی ۴۹، ۶۷ و ۷۴ درجه به همراه سازه‌ی هم‌ساختار قاب خمشی محیطی دسته شده، بر پایه‌ی نتایج تحلیل‌های تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی و دینامیکی فزاینده (IDA)،



شکل ۱. نمای سازه‌های ۲۴ طبقه‌ی مطالعاتی.

زیاد لرزه‌ی در نظر گرفته شده‌اند. براساس مبحث ششم مقررات ملی ساختمان، بار مرده‌ی طبقات برابر با  $500 \text{ کیلوگرم بر مترمربع}$  و بار زنده‌ی همه‌ی طبقات و تراز  $Z = H$  به ترتیب  $200$  و  $1500 \text{ کیلوگرم بر مترمربع}$  تعیین شده است.<sup>[۲۱]</sup> ارزیابی عملکرد لرزه‌ی سیستم‌های مقاوم جانبی، نیازمند تعریف رفتار غیرخطی برای اعضاء سازه‌ی است. بر پایه‌ی توجه به ضوابط ۴۱-۱۷ ASCE/SEI و گزارش FEMA P-۷۹۵، حوزه‌ی عملکرد غیرخطی المان‌های تیر - ستون، تیر و المان‌های قطری در سازه‌های مطالعاتی به ترتیب با نمود بیشتر رفتار محوری - خمشی، خمشی و محوری به صورت مفصل متمرکز اختصاص یافته است.<sup>[۲۲]</sup> در شکل ۳، مشخصات رفتار غیرخطی المان‌های سازه‌ها مشاهده می‌شود.

با توجه به اهمیت تعریف مشخصات رفتار کشسان برای سازه‌ها براساس ضوابط ۷-۱۰ ASCE، مقاطع نیمرخ‌های فولادی برای المان‌های سازه‌ی به صورت جدول‌های ۱ الی ۴ در نظر گرفته شده‌اند.<sup>[۲۳]</sup> همچنین کنترل نسبت‌های مقاومتی و برقراری رفتار پیش‌بینی سخت برای هر ۴ سازه‌ی مطالعاتی تأیید شده است. آنالیز و ارزیابی طراحی سازه‌های مطالعاتی شبکه‌ی قطری و سازه‌ی قاب خمشی محیطی دسته شده در نرم‌افزارهای Sap۲۰۰۰ و Perform-۳D انجام شده است.<sup>[۲۴،۲۵]</sup> مطابق جدول ۵، سنجش نزدیکی مشخصات مودال، بردارها و مقادیر ویژه‌ی سازه‌های مطالعاتی برپا شده در محیط نرم‌افزار Perform-۳D، در هماهنگی با نتایج متناظر حاصل از نرم‌افزار Sap۲۰۰۰ تأیید می‌شود.



شکل ۲. پلان سازه‌های مطالعاتی.

ارزیابی جامع محاسباتی شده است. نمای سازه‌های مطالعاتی در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

## ۲. روش و سازمان پژوهش

### ۲.۱. طراحی مدل‌های مطالعاتی

در پژوهش حاضر، به منظور ارزیابی تغییر زوایای پیکربندی محیطی بر مشخصات رفتار غیرخطی، سه سازه‌ی شبکه‌ی قطری با زوایای ۴۹، ۶۷ و ۷۴ درجه به ترتیب با مدل مثلی ۱، ۲ و ۳ طبقه، همراه با یک سازه‌ی قاب خمشی محیطی دسته شده‌ی مینا برپا شده‌اند. منظور از مدل شبکه‌ی قطری، تعداد طبقاتی است که توسط المان‌های مورب پیرامونی محصور شده‌اند.

چهار سازه‌ی ۲۴ طبقه‌ی مطالعاتی با رعایت معیار هم‌ارزی سختی، براساس مبحث دهم مقررات ملی ساختمان و ضوابط طرح لرزه‌ی مطابق با ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ طراحی شده‌اند.<sup>[۲۶،۲۷]</sup> ارتفاع طبقات و طول دهانه‌ها به‌طور یکسان و به ترتیب برابر با  $3/5$  و  $6$  متر لحاظ شده است. در شکل ۲، پلان مربعی سازه‌های مطالعاتی به ابعاد  $36 \times 36$  متر مشهود است.

سازه‌های مطالعاتی بر روی خاک نوع II و در منطقه با خطر نسبی خیلی

### ۲.۲. رکوردهای زلزله‌ی انتخابی

رکوردهای حوزه‌ی نزدیک به سبب حضور پالس در تاریخچه‌ی زمانی سرعت، انرژی جنبشی زیادی را نسبت به رکوردهای حوزه‌ی دور به سازه‌ها تحمیل می‌کنند. همچنین، جنبش‌های نیرومند زمین در میدان نزدیک گسل، مؤلفه‌ی سرعت طیفی بالاتر و باند با پهنای باریک‌تر بسامدهای پراثری (کمتر از  $10$  هرتز) در طیف فوری، نسبت به رکوردهای حوزه‌ی دور دارند. پالس رکوردهای حوزه‌ی نزدیک به خصوص با اثر جهت‌داری پیش‌رونده، نیاز لرزه‌ی زیادی را در سازه‌ها ایجاد می‌کند.<sup>[۲۷]</sup> در این باره صحتی و همکاران (۲۰۱۱) دریافتند که پالس و اسپایک‌های پراثری در تاریخچه‌ی زمانی سرعت رکوردهای نیرومند، می‌تواند سبب ایجاد آثار قابل توجه  $P - \Delta$  در سازه‌ها شود.<sup>[۲۸]</sup> در پژوهش حاضر،  $10$  رکورد سه مؤلفه‌ی حوزه‌ی

جدول ۱. مشخصات مقاطع المان‌های قاب خمشی (میلی‌متر).

طبقه	ستون‌ها	تیرها
۱ تا ۶	BOX۶۰۰ × ۳۰	PL۵۰۰ × ۱۵ + ۳۵۰ × ۲۵
۷ تا ۱۲	BOX۵۵۰ × ۲۵	PL۴۵۰ × ۱۵ + ۳۵۰ × ۲۵
۱۳ تا ۱۸	BOX۵۰۰ × ۲۰	PL۴۵۰ × ۱۰ + ۳۵۰ × ۲۵
۱۹ تا ۲۴	BOX۴۵۰ × ۱۵	PL۴۰۰ × ۱۰ + ۳۰۰ × ۲۰

جدول ۲. مشخصات مقاطع المان‌های قاب ساده (میلی‌متر).

طبقه	ستون‌ها	تیرها
۱ تا ۵	BOX۵۰۰ × ۲۵	
۶ تا ۱۰	BOX۴۵۰ × ۲۰	
۱۱ تا ۱۵	BOX۴۰۰ × ۱۵	PL۳۵۰ × ۱۰ + ۱۵۰ × ۲۰
۱۶ تا ۲۰	BOX۳۵۰ × ۱۵	
۲۱ تا ۲۴	BOX۳۰۰ × ۱۰	

جدول ۳. مشخصات مقاطع، اعضاء مورب پیکربندی قطری پیرامونی (میلی‌متر).

طبقه	المان‌های قطری با زاویه‌ی		
	۴۹°	۶۷°	۷۴°
۱ تا ۶	BOX۵۵۰ × ۲۵	BOX۵۰۰ × ۲۸	BOX۵۰۰ × ۲۶
۷ تا ۱۲	BOX۵۰۰ × ۲۲	BOX۴۵۰ × ۲۵	BOX۴۵۰ × ۲۴
۱۳ تا ۱۸	BOX۴۵۰ × ۱۸	BOX۴۰۰ × ۲۲	BOX۴۰۰ × ۲۰
۱۹ تا ۲۴	BOX۴۰۰ × ۱۴	BOX۳۵۰ × ۱۸	BOX۳۵۰ × ۱۶

جدول ۴. مشخصات مقاطع، تیرهای پیکربندی قطری پیرامونی (میلی‌متر).

طبقه	تیرهای محیطی در سازه‌های شبکه‌ی قطری
۱ تا ۶	PL۵۰۰ × ۱۵ + ۳۵۰ × ۲۵
۷ تا ۱۲	PL۴۵۰ × ۱۵ + ۳۵۰ × ۲۵
۱۳ تا ۱۸	PL۴۵۰ × ۱۰ + ۳۵۰ × ۲۵
۱۹ تا ۲۴	PL۴۰۰ × ۱۰ + ۳۰۰ × ۲۰

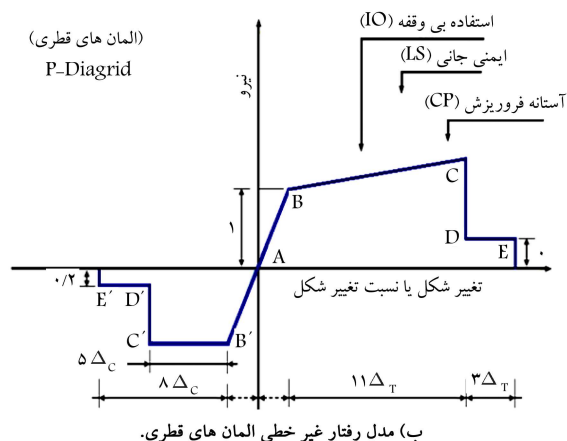
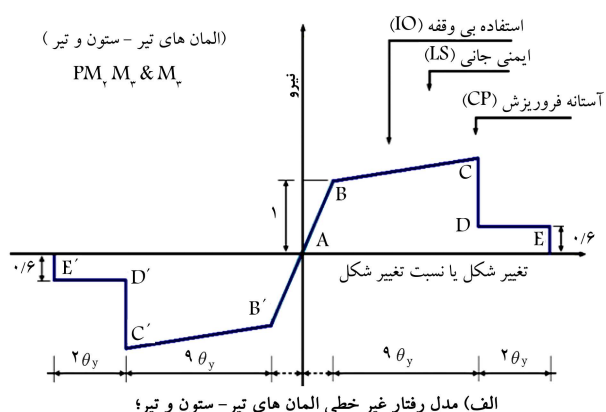
جدول ۵. دوره‌ی تناوب ارتعاش مود اول سازه‌های مطالعاتی (شکل ۱).

سازه‌های مطالعاتی	نرم‌افزار	
	Sap۲۰۰۰	Perform-۳D
قاب خمشی دسته شده محیطی	۳/۱۹۸	۳/۱۹۶
شبکه‌ی قطری با زوایای (۴۹°)	۱/۲۲۳	۱/۲۲۳
شبکه‌ی قطری با زوایای (۶۷°)	۱/۲۸۱	۱/۲۸۱
شبکه‌ی قطری با زوایای (۷۴°)	۱/۶۲۲	۱/۶۲۳

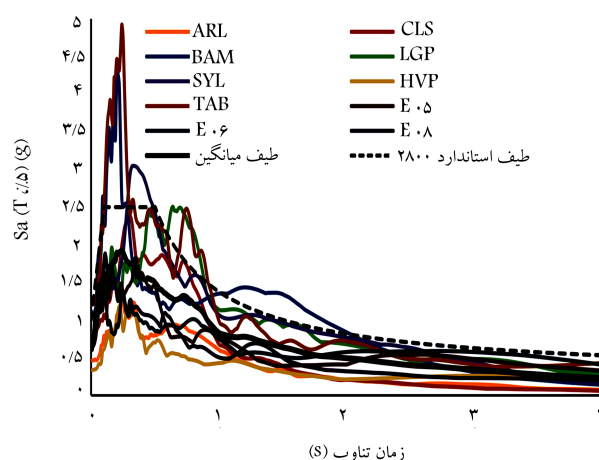
### ۳. ارزیابی عملکرد لرزه‌یی سازه‌های مطالعاتی

#### ۱.۳. نتایج تحلیل‌های غیرخطی تاریخچه‌ی زمانی

رکوردهای انتخابی به صورت سه مؤلفه‌ی و هم‌زمان درجهت‌های  $X$ ،  $Y$  و  $Z$  سازه‌های مطالعاتی در نظر گرفته شده‌اند. مؤلفه‌ی موازی با صفحه‌ی شکست گسل (مؤلفه‌ی



شکل ۳. مشخصات رفتار غیرخطی اعضاء سازه‌یی. [۲۳، ۲۲]

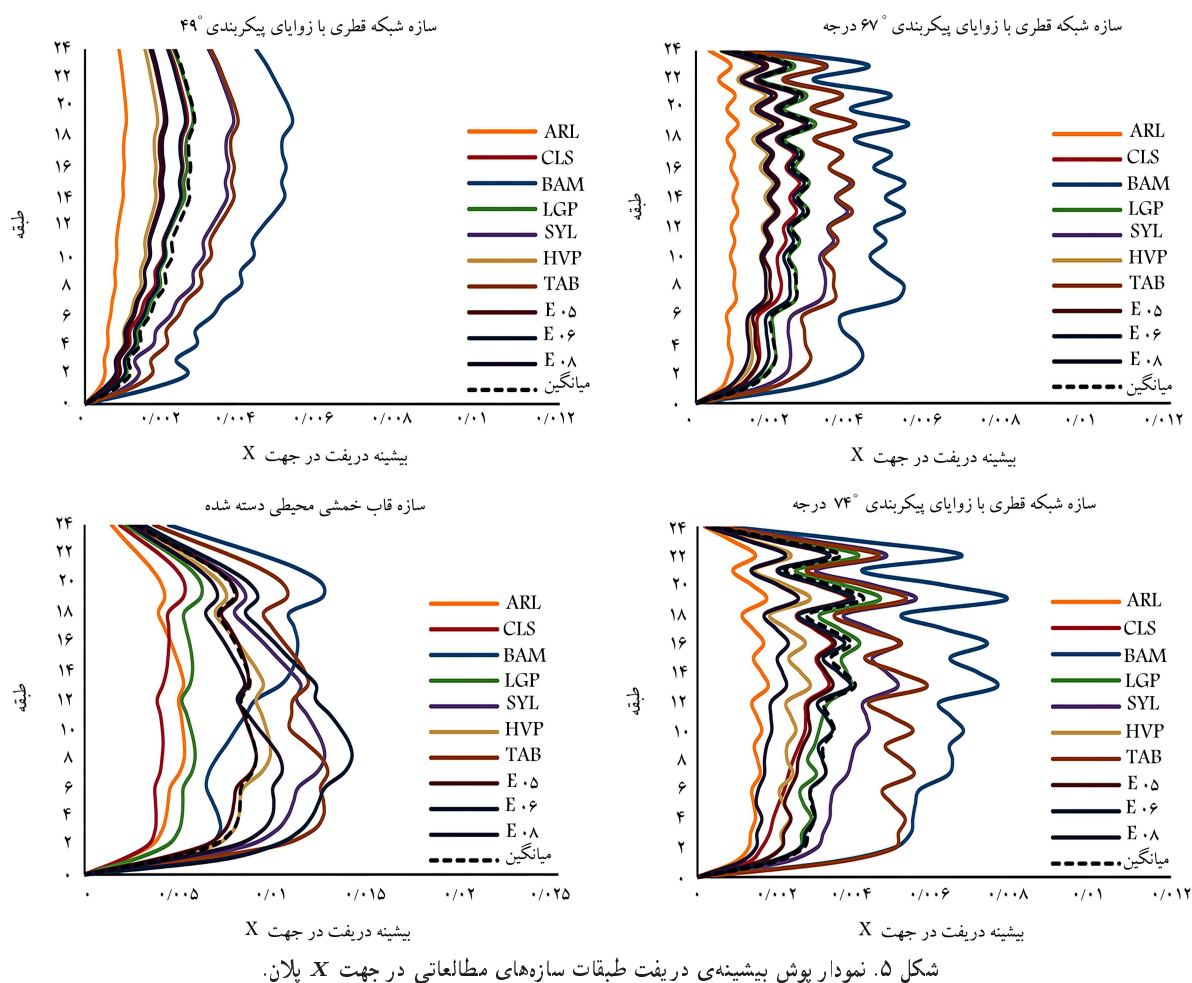


شکل ۴. طیف SRSS پاسخ شتاب رکوردهای زلزله با میرایی ۵٪.

نزدیک، حاوی انواع اثرات جهت‌داری پیش‌رونده<sup>۱۳</sup>، پس‌رونده<sup>۱۴</sup> و خنثی<sup>۱۵</sup> از پنج زلزله (مطابق جدول ۶) در نظر گرفته شده است. [۲۹] ساختارهای متفاوتی از پالس پدافینه و بلندمدت سرعت در تاریخچه‌ی زمانی رکوردهای مربوط به زلزله‌های نورتریج<sup>۱۶</sup> (۱۹۹۴)، امپریال‌ولی<sup>۱۷</sup> (۱۹۷۹)، لوماپیتا<sup>۱۸</sup> (۱۹۸۹) (کالیفرنیا جنوبی)، بم (۲۰۰۳) و طیس (۱۹۷۸) وجود دارد. در شکل ۴، طیف پاسخ شتاب رکوردهای موردنظر به صورت ترکیب SRSS، مؤلفه‌های LN و TR (در جهت موازی و عمود بر صفحه‌ی شکست گسل)، به همراه طیف استاندارد ۲۸۰۰ مشاهده می‌شود.

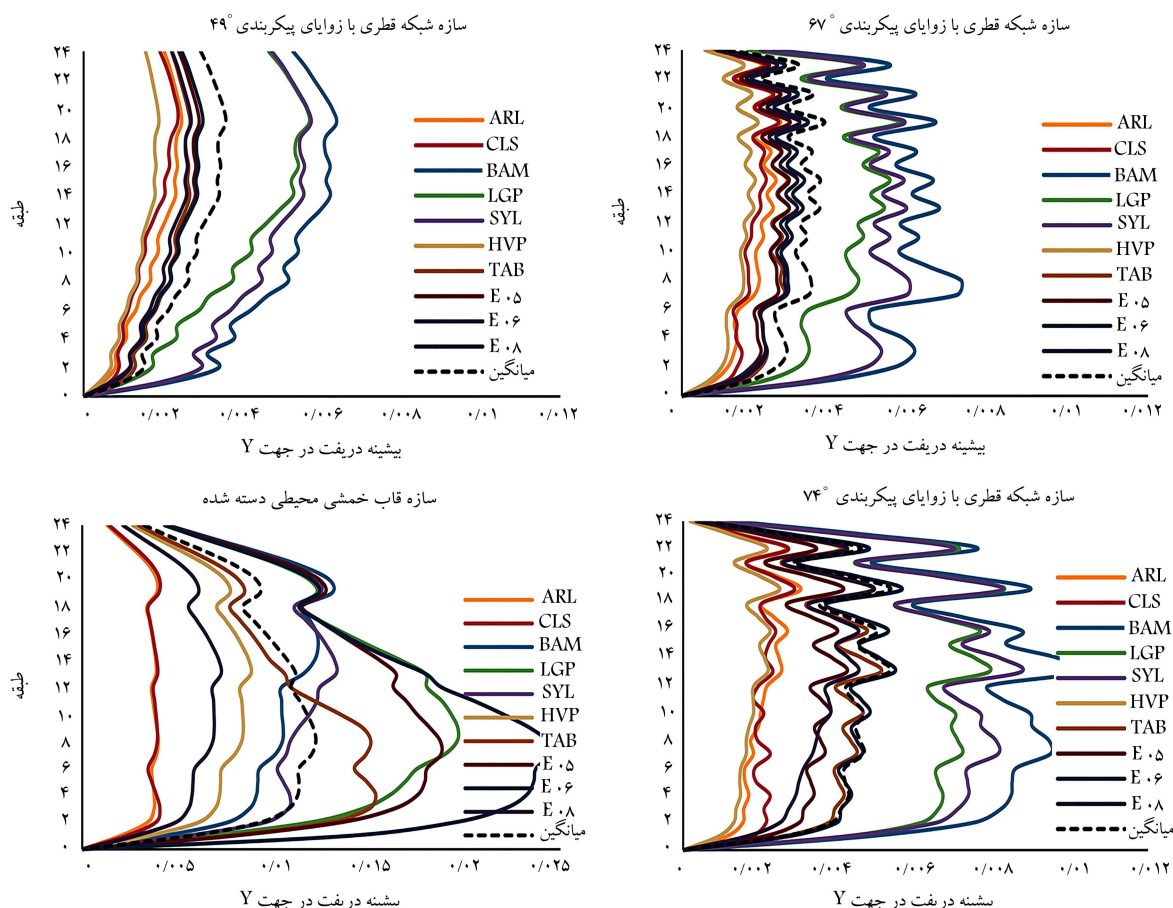
جدول ۶. مشخصات رکوردهای زلزله‌ی انتخابی.

شماره‌ی نگاشت	زلزله	سال رخداد	ایستگاه	بزرگا ( $M_w$ )	شتاب ( $g$ )	سرعت ( $cm/s$ )	پیشینه‌ی مؤلفه TR	اثر جهت‌داری
۱	بم	۲۰۰۳	BAM	۶/۶	۰/۷۶۴	۱۰۷/۴۳	۳۱/۸۲	Forward Dir.
۲	امپریال ولی	۱۹۷۹	El-Centro Array ۵ ( $E^{\circ}5$ )	۶/۵	۰/۳۷۹	۹۰/۵۲	۶۲/۱۹	Forward Dir.
۳	امپریال ولی	۱۹۷۹	El-Centro Array ۶ ( $E^{\circ}6$ )	۶/۵	۰/۴۳۹	۱۱۰/۱۴	۶۹/۳۱	Forward Dir.
۴	امپریال ولی	۱۹۷۹	El-Centro Array ۸ ( $E^{\circ}8$ )	۶/۵	۰/۶۰۲	۵۴/۱۳	۳۱/۲۴	Forward Dir.
۵	امپریال ولی	۱۹۷۹	Holtville(HVP)	۶/۵	۰/۲۵۳	۵۰/۰۳	۳۲/۰۵	Neutral Dir.
۶	لوما پریتا	۱۹۸۹	Los Gatos(LGP)	۶/۹	۰/۵۶۳	۹۶/۲۳	۳۷/۱۲	Forward Dir.
۷	لوما پریتا	۱۹۸۹	Corralitos(CLS)	۶/۹	۰/۶۴۴	۵۵/۴۸	۱۰/۴۶	Backward Dir.
۸	نورث ریج	۱۹۹۴	Arleta(ARL)	۶/۷	۰/۳۴۵	۴۲/۰۴	۱۰/۰۹	Neutral Dir.
۹	نورث ریج	۱۹۹۴	Sylmar Olive View(SYL)	۶/۷	۰/۸۴۳	۱۲۹/۶۱	۳۲/۹۳	Forward Dir.
۱۰	طیس	۱۹۷۸	TAB	۷/۴	۰/۸۵۲	۱۲۱/۶۹	۱۰۰/۴۶	Forward Dir.



نمودارهای پوش پیشینه‌ی دررفت نشان می‌دهند که رکوردهای حوزه‌ی نزدیک با اثرات جهت‌داری پیش‌رونده، در سازه‌های مطالعاتی تغییرشکل بیشتری را ایجاد می‌کنند. شایان ذکر است که رکوردهای دارای پالس سرعت، به علت تطابق بسامدهای پراثری با محورهای طیفی متناظر با مشخصات مودال سازه‌های بلندمرتبه، قابلیت ایجاد روند کاهش سختی سازه را با شدت بیشتر دارند. نمود اثر مذکور برای رکورد TAB حاوی یک پالس بلندمدت در مؤلفه‌ی TR و نیز برای رکورد SYL دارای

LN در جهت X پلان، مؤلفه‌ی عمود بر صفحه‌ی شکست گسل (مؤلفه‌ی TR) در جهت Y و مؤلفه‌ی قائم در راستای محور Z اسکلت سازه‌های مطالعاتی وارد شده است. یکی از معیارهای مهم برای سنجش طرح لرزه‌ی اسکلت‌های مقاوم، ارزیابی تغییرشکل سازه‌ها است. به منظور ارزیابی نیاز لرزه‌ی در سازه‌های مطالعاتی شبکه‌ی قطری و قاب خمشی دسته‌شده، مطابق شکل‌های ۵ و ۶، مقادیر پارامتر پاسخ پیشینه‌ی دررفت طبقات تحت رکوردهای حوزه‌ی نزدیک به صورت میدان آزاد بررسی شده‌اند.



شکل ۶. نمودار پوش بیشینه‌ی دررفت طبقات سازه‌های مطالعاتی در جهت Y پلان.

هندسی پیرامونی، از شدت بکنواختی در نمودار پوش بیشینه‌ی دررفت به‌ویژه در طبقات انتهایی کاسته می‌شود. به عبارت بهتر، هر چه زوایای المان مورب در پیکربندی محیطی بیشتر شود، نمود رفتار غیرخطی سازه‌ی شبکه‌ی قطری به‌طورنسبی به سازه‌ی قاب خمشی نزدیک می‌شود. بر طبق نتایج تحلیل‌های تاریخچه‌ی زمانی مشاهده شد که کاربرد شبکه‌ی قطری در پیکربندی اسکلت مقاوم نسبت به قاب خمشی محیطی دسته‌شده، سبب کاهش مقادیر بیشینه‌ی دررفت به‌ویژه در تراز طبقات ابتدایی می‌شود.

### ۲.۳. آنالیز شکنندگی ساختارهای مقاوم

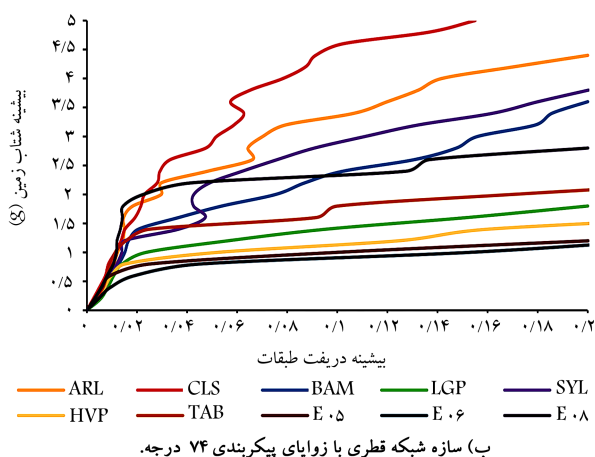
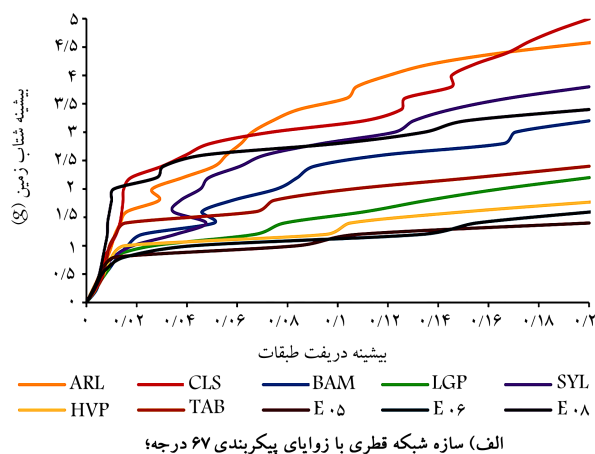
نمودارهای شکنندگی، یک معیار سنجشی مهم در بررسی میزان آسیب‌پذیری سازه‌ها هستند. در واقع، احتمال رخداد حالت‌های حدی عملکرد سازه در سطوح مختلف شدت زلزله، با استفاده از منحنی‌های شکست محاسبه می‌شود.<sup>[۳۱،۳۲]</sup> بر همین اساس، تحلیل دینامیکی فراینده (IDA) تحت رکوردهای زلزله‌ای انتخابی با گام معادل  $0.2g$  بر روی هر ۴ سازه‌ی مطالعاتی انجام گرفت. در تحلیل‌های مذکور، بیشینه‌ی دررفت متناظر با جهات  $X$  و  $Y$  در مرکز جرم تراز کف طبقات سازه به عنوان پارامتر نیاز (DM) و بیشینه‌ی شتاب رکورد زلزله (PGA)<sup>۱۹</sup> به عنوان معیار شدت لرزه‌ی (IM) لحاظ شده‌اند.<sup>[۳۲،۳۳]</sup> نتایج تحلیل‌های دینامیکی فراینده در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود. بر طبق نتایج مذکور نتیجه‌گیری شد که سازه‌ی قاب خمشی محیطی دسته‌شده تحت رکوردهای حوزه‌ی نزدیک، با شدت شتاب

بالس پیوسته‌ی پر دامنه‌ی سرعت، در مقادیر بیشینه‌ی دررفت طبقات سازه‌های مطالعاتی قابل مشاهده است.

سازه‌ی قاب خمشی محیطی دسته‌شده به سبب انعطاف‌پذیری بالا، دارای دامنه‌ی تغییر مکان جانبی بیشتری تحت جنبش‌های نیرومند زمین است. رفتار غیرخطی سازه‌ی قاب خمشی محیطی دسته‌شده نشان می‌دهد که معمولاً مقادیر بیشینه‌ی دررفت در نیمه‌ی پایینی ارتفاع سازه رخ می‌دهد. با مقایسه‌ی پوش بیشینه‌ی دررفت سازه‌های مطالعاتی تحت رکوردهای حوزه‌ی نزدیک دریافت می‌شود که پیکربندی قاب خمشی محیطی، نیاز لرزه‌ی به مراتب بیشتری نسبت به شبکه‌ی قطری پیرامونی در اسکلت مقاوم سازه ایجاد می‌کند. همچنین رکوردهای نیرومند BAM و LGP به سبب مقادیر جابه‌جایی نسبی بزرگ، باعث ناپایداری کلی دینامیکی در سازه‌ی قاب خمشی محیطی شده‌اند. همچنین در کنار نتایج مذکور ملاحظه شد که برای سازه‌های شبکه‌ی قطری با زوایای ۴۹، ۶۷ و ۷۴ درجه تحت همه‌ی رکوردهای حوزه‌ی نزدیک، مشخصات رفتار با جنبه‌ی حاکم خطی برقرار است. این مورد نیز نشان‌دهنده‌ی کارایی خوب و قابلیت بالا برای عملکرد لرزه‌ی اسکلت مقاوم با استفاده از پیکربندی با آرایش الگوهای مثلی محیطی است.

پارامتر بیشینه‌ی دررفت (شکل‌های ۵ و ۶) در سازه‌های شبکه‌ی قطری با پیکربندی محیطی مختلف دارای توزیع به نسبت بکنواخت در راستای ارتفاع است. در این مورد، سازه‌ی شبکه‌ی قطری با زوایای پیکربندی ۴۹ درجه، کمترین مقادیر بیشینه‌ی دررفت را نسبت به دیگر سازه‌های مطالعاتی دارد. روند تغییر شکل سازه‌های شبکه‌ی قطری بدین گونه است که با افزایش زوایای المان‌های مورب در الگوی





شکل ۸. نتایج تحلیل دینامیکی فزاینده (IDA) برای سازه‌های مطالعاتی.

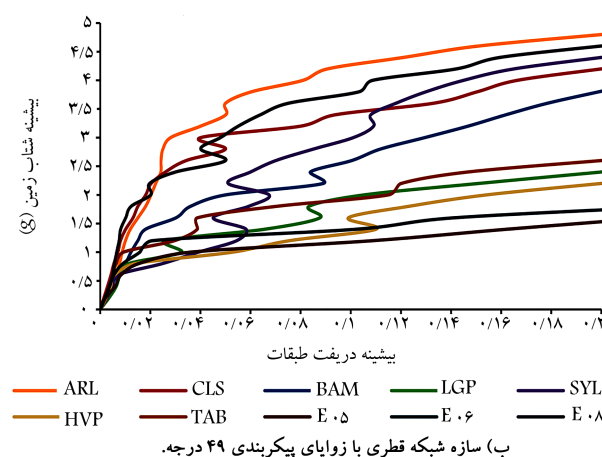
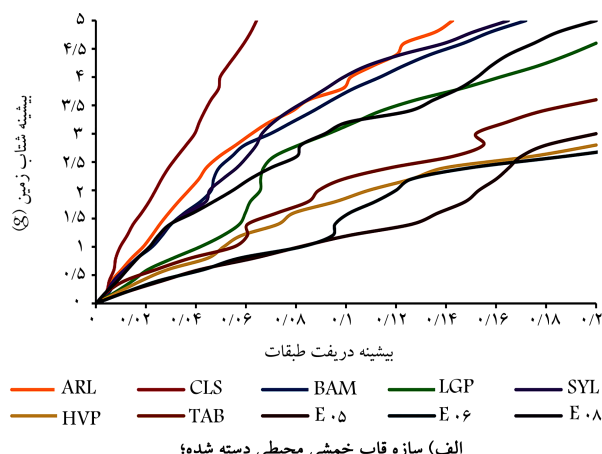
ظرفیت مقاومتی سازه را در مقابل وقوع ناپایداری دینامیکی افزایش دهد و قابلیت ثبات اسکلت مقاوم در صورت رخداد احتمالی سطوح عملکردی بالاتر بیشتر شود. در پژوهش حاضر، به منظور سنجش احتمال فراگذشت از سطوح عملکرد برای سازه‌های مطالعاتی، یک فرایند جامع مطالعاتی بر روی منحنی‌های شکست صورت گرفته است. براساس توابع شکنندگی، روند تجاوز از حالت‌های حدی برای سازه‌ی هدف در سطوح مختلف آسیب لرزه‌ی بررسی شده است. [۹] ساختار تحلیلی نمودارهای شکنندگی مطابق با رابطه‌ی ۱ ارزیابی و محاسبه شده است:

$$Frag(IM; \delta) = P(\Delta \geq \delta | IM) \quad (1)$$

که در آن،  $P(\Delta \geq \delta | IM)$  برابر با احتمال شرطی تجاوز مقادیر پاسخ سازه  $\Delta$  از حالت حدی عملکردی  $\delta$  در سطوح مختلف شدت حرکت زمین (با نماد IM) است. در مطالعه‌ی حاضر، تولید و ارزیابی نمودارهای شکنندگی از نتایج تحلیل‌های دینامیکی فزاینده بر پایه‌ی توزیع احتمالاتی لوگ - نرمال انجام شده است. تابع چگالی احتمال توزیع لوگ - نرمال به صورت رابطه‌ی ۲ تعریف می‌شود:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \left[ -\frac{(\ln x - \theta)^2}{2\omega^2} \right] \quad 0 < x < \infty \quad (2)$$

که در آن، پارامترهای  $\theta$  و  $\omega^2$  به ترتیب میانگین و واریانس توزیع نرمال هستند. همچنین، در پردازش‌های عددی نمودارهای شکنندگی، مقدار بیشینه‌ی دررفت طبقات به عنوان متغیر تصادفی  $\Delta$  برای جامعه‌ی آماری توزیع لوگ - نرمال لحاظ



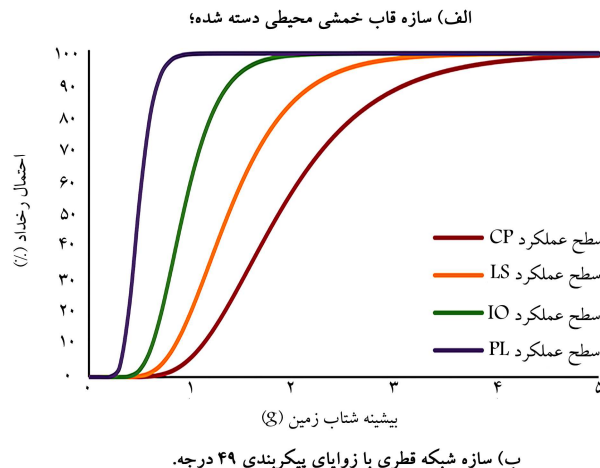
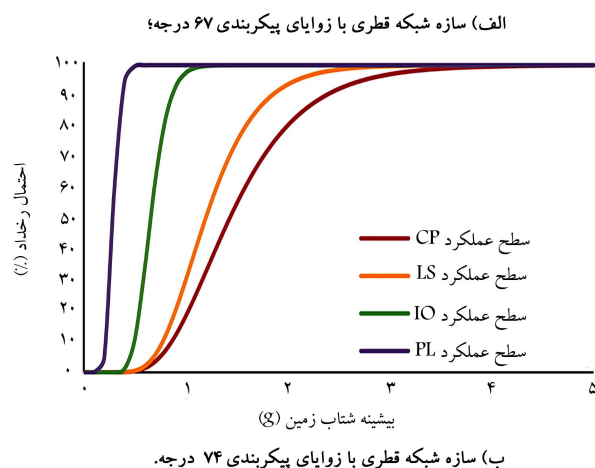
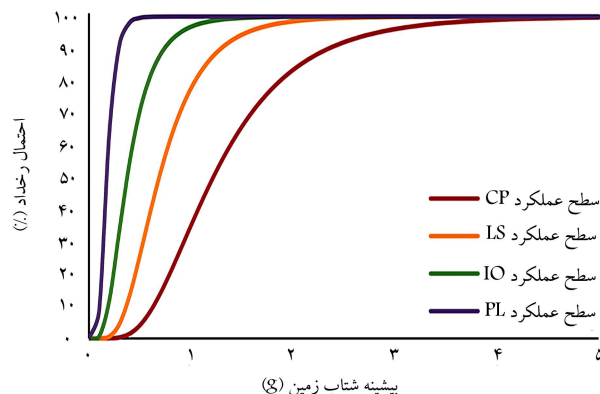
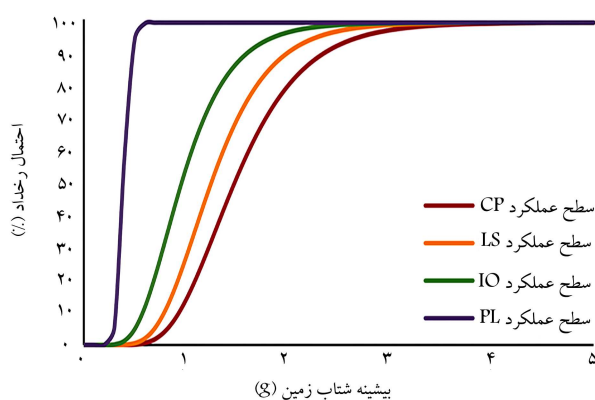
شکل ۷. نتایج تحلیل دینامیکی فزاینده (IDA) برای سازه‌های مطالعاتی.

کمتری محدوده‌ی رفتار غیرخطی را تجربه می‌کند. سازه‌ی مطالعاتی قاب خمشی دسته شده با داشتن قابلیت انعطاف پذیری بالا، براساس الگوهای گسترده‌ی حوزه‌های غیرخطی و مفصل خمیری به تدریج وارد تراز عملکردی آستانه‌ی فروریزش خواهد شد. این در صورتی است که برای سازه‌های شبکه‌ی قطری با سختی جانبی بزرگ و نیز تحت رکوردهای نیرومند حوزه‌ی نزدیک، تمرکزهای حوزه‌ی آسیب‌ها و سپس گسترش ناپایداری‌های موضعی اتفاق می‌افتد.

ملاحظه شد که ظرفیت فروریزش سازه‌های مطالعاتی تحت رکوردهای فاقد پالس در تاریخچه‌ی زمانی سرعت، نظیر ARL و CLS، بیشتر از رکوردهای حوزه‌ی نزدیک حاوی پالس سرعت است. بررسی نتایج رفتاری و نیز توجه به شیب اولیه‌ی نمودارهای IDA برای سازه‌های شبکه‌ی قطری نشان می‌دهد که این ساختارهای مقاوم در برابر رکوردهای نیرومند حوزه‌ی نزدیک، مشخصات عملکردی مطلوبی دارند و مکانیزم احتمالی تسلیم با روندی آهسته تشکیل می‌شود. مشخصه‌ی بالای مقاومتی سازه‌های شبکه‌ی قطری در حوزه‌ی رفتار غیرخطی بارز است. همچنین، دانسته شد که برای سازه‌های شبکه‌ی قطری مطالعاتی با افزایش زوایای المان‌های مورب پیکربندی محیطی، سطح شتاب متناسب با عملکرد آستانه‌ی فروریزش نیز کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش تعداد مدول‌های مثلی در سازه‌های شبکه‌ی قطری، یک روند سریع‌تر زوال مقاومت و کاهش سختی پدیدار خواهد شد. نکته‌ی دیگر آنکه، سازه‌ی شبکه‌ی قطری با زوایای پیکربندی ۴۹ درجه، قابلیت جذب انرژی بیشتری نسبت به سایر سازه‌های مطالعاتی دارد. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که استفاده از پیکربندی قطری محیطی به عنوان سیستم باربر جانبی، می‌تواند

جدول ۷. محدوده‌ی سطوح عملکرد لرزه‌یی با معیار دررفت. [۳۵، ۳۴]

سطح عملکرد	کرانه‌ی رفتارکشسان (PL)	استفاده‌ی بی‌وقفه (IO)	ایمنی جانی (LS)	آستانه‌ی فروریزش (CP)
مقادیر مجاز بیشینه‌ی دررفت (درصد)	۵ / ۰٪	۱٪	۲٪	۴٪



شکل ۱۰. نمودارهای شکنندگی سازه‌های مطالعاتی برای حالات حدی مختلف.

ساختارهای شبکه‌ی قطری است. این مسئله نشان می‌دهد که با افزایش شتاب زلزله، تغییرشکل‌های بزرگی در سازه‌ی قاب خمشی محیطی دسته شده ایجاد می‌شود. همچنین شیب ساختار نمودارهای شکنندگی مطابق با شکل‌های ۹ و ۱۰، برای وضعیت فروریزش احتمالی سازه‌های مطالعاتی بیان‌کننده‌ی آن است که با افزایش شدت لرزه‌یی، وقوع مود کمانش برای المان‌های اصلی در سازه‌ی قاب خمشی محیطی دسته شده با روند سریع‌تری نسبت به سازه‌های شبکه‌ی قطری رخ می‌دهد. همچنین مشاهده می‌شود که احتمال تجاوز از سطح عملکرد کرانه‌ی رفتارکشسان (PL) برای هر چهار سازه‌ی مطالعاتی در شکل ۱ تفاوت کمی دارد. پردازش نمودارهای مذکور نشان می‌دهد که در صورت رخداد زلزله با بیشینه‌ی شتاب  $1g$  احتمال فراگذشت از تراز عملکرد LS برای سازه قاب خمشی در حدود ۷۸٪ و برای سازه‌های شبکه‌ی قطری نیز کمتر از ۳۰٪ بوده است. بنابراین ساختارهای شبکه‌ی قطری (مطابق شکل ۱)، ظرفیت بالایی به منظور برقراری ایمنی جانی در سازه‌های مطالعاتی، معادل با تراز عملکرد LS دارند.

شایان ذکر است که مقادیر شتاب متناظر با رویکرد تصاعدی خسارت برای سازه‌های شبکه‌ی قطری بیشتر از سازه با اسکلت مقاوم قاب خمشی است. کاربرد پیکربندی پیرامونی قطری می‌تواند میزان آسیب مطابق با رخداد حالت‌های حدی

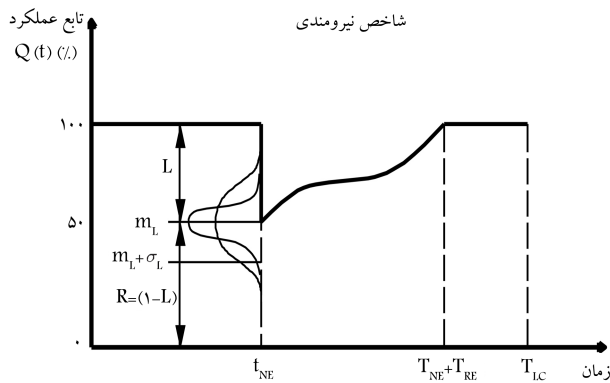
شکل ۹. نمودارهای شکنندگی سازه‌های مطالعاتی برای حالت‌های حدی مختلف.

شده است. همچنین با توجه به پارامترهای تعریف شده در توزیع لوگ - نرمال، نمودارهای شکنندگی براساس رابطه‌ی ۳ به دست آورده می‌شوند:

$$Frag(IM; \delta) = 1 - P(x \leq \delta) = 1 - \Phi \left[ \frac{x - \mu}{\sigma} \right] \quad (3)$$

در فرمول نهایی با جایگزینی میانگین  $\mu = E(x) = e^{\theta + \frac{\omega^2}{2}}$  و انحراف معیار  $\sigma = \sqrt{e^{2\theta + \omega^2}(e^{\omega^2} - 1)}$  و متغیر وابسته‌ی  $X$  بر پایه‌ی تابع توزیع لوگ - نرمال، مقادیر احتمال فراگذشت از حالت‌های حدی برای سازه‌های مطالعاتی محاسبه می‌شوند. مقادیر مجاز سطوح عملکرد ( $\delta$ ) برای حالت‌های حدی کرانه‌ی رفتارکشسان (PL)<sup>۲۰</sup> استفاده‌ی بی‌وقفه (IO)<sup>۲۱</sup> ایمنی جانی (LS)<sup>۲۲</sup> و آستانه‌ی فروریزش (CP)<sup>۲۳</sup> در محاسبات منحنی شکست سازه‌های شبکه‌ی قطری و قاب خمشی محیطی دسته شده، براساس ضوابط FEMA P-۶۹۵ و FEMA ۳۵۶ (جدول ۷) پیاده‌سازی شده است. [۳۵، ۳۴] فروریزش احتمالی دینامیکی، مربوط به وضعیتی است که خرابی کلی در اسکلت مقاوم رخ داده است. در شکل‌های ۹ و ۱۰، منحنی شکست سازه‌های مطالعاتی برای چهار حالت حدی پایه مشاهده می‌شود. بر طبق این نتایج ملاحظه شد که در مقادیر شدت لرزه‌یی یکسان، احتمال رخداد سطوح عملکرد برای سازه‌ی قاب خمشی محیطی دسته شده بیشتر از





شکل ۱۱. پردازش عددی مؤلفه‌ی نیرومندی تاب‌آوری لرزه‌یی. [۱۷]

همچنین هر گروه نیز بر پایه‌ی خسارت‌های مالی و جانی تعریف می‌شود. مهم‌ترین بخش خسارت‌های زلزله بر روی سیستم‌های مقاوم، مربوط به خسارت‌های مستقیم بر المان‌های سازه‌یی و غیرسازه‌یی است. بر طبق مفاهیم مطرح شده در مطالعات سایملارو و همکاران (۲۰۰۹)، تابع خسارت سازه‌ها به صورت رابطه‌ی ۷ به دست آورده می‌شود:

$$L_{DE}(I) = \sum_{j=1}^n \left[ \frac{C_{S,j}}{I_S} \cdot \prod_{i=1}^{T_i} \left( \frac{1 + \delta_i}{1 + r_i} \right) \right] \cdot P_j \left\{ \bigcup_{i=1}^n (R_i \geq r_{lim i}) / I \right\} \quad (7)$$

که در آن، پارامتر  $P_j$  احتمال تجاوز از سطح عملکرد  $j$  برای هر شدت رکورد زلزله  $I$  است. همچنین  $C_{S,j}$  هزینه تعمیر سازه در هر سطح عملکرد  $j$ ،  $I_S$  هزینه جایگزینی المان‌های سازه،  $r$  نرخ کاهش سالانه،  $t_i$  فاصله‌ی زمانی بین سرمایه‌ی اولیه و رویداد زلزله و  $\delta_i$  نرخ استهلاک سالانه هستند. در رابطه‌ی ۷، براساس گزارش PEER/۲۰۰۶/۱۱، اثر آسیب ناشی از زلزله در اعضا سازه‌یی و غیرسازه‌یی اسکلت مقاوم به صورت جدول ۸ در نظر گرفته شده است. [۳۷]

شایان ذکر است که پس از تعیین مقادیر پیش فرض برای ضرایب آسیب، ناحیه‌ی خطرپذیری سازه‌های مطالعاتی براساس پارامتر شدت حرکت زمین محاسبه می‌شود. به عبارت بهتر، محدوده‌ی کنترل اسکلت‌های مقاوم، مبتنی بر مشخصات آنالیز مودال سازه‌ها و ویژگی‌های طیفی رکوردهای حوزه‌ی نزدیک تعیین و تخمین زده می‌شود. مطابق با ضوابط ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰، به منظور ایجاد محدوده‌ی کنترل بر روی نمودارهای شکنندگی سازه‌ها، رابطه‌ی ۸ استفاده می‌شود:

$$C_u = ABI \quad (8)$$

که در آن، با استفاده از نسبت شتاب مبنای طرح به شتاب پایه‌ی  $A$ ، ضریب بازتاب  $B$  و پارامتر اهمیت  $I$  سازه‌های مطالعاتی، حد کنترل عملکرد سازه‌ها ( $C_u$ ) مشخص می‌شود. با توجه به فرض ساختگاه با خطرپذیری نسبی زیاد، ضریب شتاب مبنای طرح سازه‌ها برابر  $0.35g$  لحاظ شده است. سپس، با توجه به ساختگاه با خاک نوع II و دوره‌های تناوب سازه‌های مطالعاتی، ضریب بازتاب  $B$  محاسبه می‌شود. در نهایت، با فرض ضریب اهمیت برابر ۱، معین‌سازی محدوده‌ی کنترل رفتار لرزه‌یی برای سازه‌های شبکه‌ی قطری و سازه‌ی قاب خمشی محیطی دسته‌شده انجام شد. در شکل ۱۲، کران بالا و پایین محدوده‌ی خطرپذیری سازه‌های مطالعاتی براساس بیشینه و کمینه‌ی ضریب بازتاب  $B$  در رابطه‌ی ۸ مشاهده می‌شود. محاسبات محدوده‌ی کنترل سازه‌های مطالعاتی (مطابق جدول ۹) نشان می‌دهند که سازه‌های با دوره‌ی تناوب کمتر، حد پذیرش بالاتری برای شدت زلزله دارند. همچنین

را در اسکلت مقاوم کاهش دهد. بر طبق نتایج به دست آمده، سازه‌ی شبکه‌ی قطری با زوایای پیکربندی محیطی ۴۹ درجه، بیشترین سطح اطمینان را در برابر احتمال فراگذشت از وضعیت‌های عملکرد لرزه‌یی دارد. بنابراین، به منظور حصول وضعیت رفتار غیرخطی با ایجاد کمترین خرابی در سازه‌های شبکه‌ی قطری، تعریف زوایای کمتر برای الگوی پیکربندی المان‌های مورب پیرامونی همراه با حفظ هم‌ارزی پارامترهای سختی و مقاومت، می‌تواند نتایج مطلوب‌تری را برای رسیدن به یک طرح بهیود یافته‌ی اسکلت مقاوم در پی داشته باشد.

احتمال فراگذشت از حالت حدی آستانه‌ی فروریزش در سطح شتاب لرزه‌یی  $1g$  برای سازه‌های شبکه‌ی قطری با زوایای پیکربندی ۴۹، ۶۷ و ۷۴ درجه و سازه‌ی قاب خمشی محیطی دسته‌شده به ترتیب برابر با ۶، ۱۴، ۱۸ و ۳۵ درصد است. بر همین اساس، ساختار تحلیلی نمودار شکنندگی سازه‌های مطالعاتی در سطح عملکرد (CP) نشان می‌دهد که توانایی و قابلیت اسکلت مقاوم سازه‌های شبکه‌ی قطری در جلوگیری از وقوع ناپایداری کلی دینامیکی تحت رکوردهای نیرومند حوزه‌ی نزدیک، به مراتب بیشتر از سازه‌ی قاب خمشی محیطی دسته شده است. کاربرد و تعبیه‌ی الگوی مثالی پیرامونی سبب افزایش پایداری سازه و ایجاد روند مناسب‌تر برای انتقال بارهای دینامیکی در حوزه‌ی رفتار غیرخطی می‌شود.

### ۳.۳. تاب‌آوری لرزه‌یی براساس شاخص نیرومندی

توانایی پایداری سازه‌ها، در یک سطح عملکرد لرزه‌یی برای سراسر یک بازه‌ی زمانی مشخص، به عنوان شاخص تاب‌آوری لرزه‌یی بیان می‌شود. ارزیابی قدرت سازه‌ها در برابر زلزله مطابق با متغیر تصمیم و سنجش تاب‌آوری ( $R$ ) بر پایه‌ی مفاهیم و موضوعات مربوطه در گزارش MCEER-۰۹-۰۰۰۹ توسط یک تابع عملکرد  $Q(t)$  وابسته به زمان، به صورت رابطه‌های ۴ و ۵ تعریف می‌شود [۳۶]:

$$R = \int_{t_E}^{t_E + T_{LC}} Q(t) / T_{LC} dt \quad (4)$$

$$Q(t) = [1 - L(I, T_{RE})] [H(t - t_E) - H(t - (t_E + T_{RE}))] \times f_{Rec}(t, t_E, T_{RE}) \quad (5)$$

که در آن، عبارت‌های  $L(I, T_{RE})$  تابع خسارت،  $f_{Rec}(t, t_E, T_{RE})$  تابع بازایی سازه،  $H()$  تابع سنجش هوساید،  $T_{LC}$  زمان کنترل،  $T_{RE}$  زمان بازایی اسکلت مقاوم از زلزله‌ی  $E$  و  $t_E$  زمان رخداد زلزله‌ی  $E$  هستند. بر پایه‌ی مطالعات سایملارو و همکاران (۲۰۱۰)، کنترل تاب‌آوری لرزه‌یی سازه‌ها به وسیله‌ی ۴ پارامتر: نیرومندی، افزونگی، توانمندسازی و سرعت انجام می‌گیرد. اصلی‌ترین معیار تاب‌آوری، شاخص نیرومندی است که مطابق با رابطه‌ی ۶ محاسبه می‌شود [۱۷]:

$$Robustness = 1 - \bar{L}(m_L, \sigma_L) \quad (6)$$

که در آن،  $\bar{L}$  به عنوان یک متغیر تصادفی و تابعی از میانگین  $m_L$  و انحراف معیار  $\sigma_L$  است. همچنین بر پایه‌ی ساختار تحلیلی و پردازش مطابق شکل ۱۱، شاخص نیرومندی و ارزیابی ظرفیت مقاومتی سازه‌های شبکه‌ی قطری و سازه‌ی قاب خمشی محیطی دسته شده در برابر سطوح مختلف شدت زلزله بررسی شده است. روند محاسباتی خسارت‌های زلزله بر روی اسکلت‌های مقاوم نیز دارای عدم قطعیت است. تابع خسارت  $L(I, T_{RE})$  براساس دو پارامتر شدت رکورد زلزله و  $T_{RE}$  زمان بازایی سازه لحاظ شده است. به طور کلی آسیب‌های متحمل یک سازه با تقسیم‌بندی دو گروه خسارت‌های مستقیم و غیرمستقیم در نظر گرفته می‌شود.



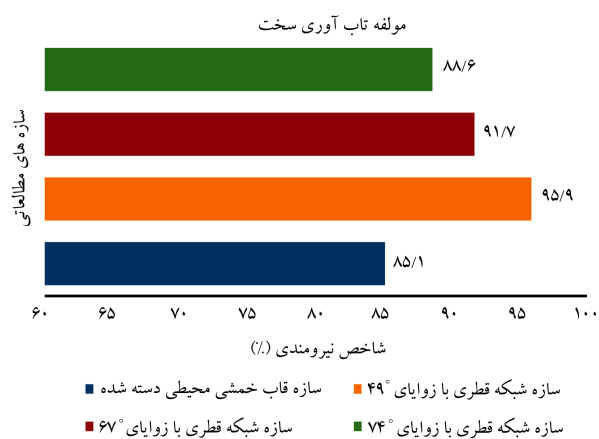
جدول ۱۰. مقادیر تابع خسارت براساس فرمولاسیون ۹-۰۰۰۹-MCEER [۳۶]

سازه‌ی قاب خمشی			سازه‌ی شبکه‌ی قطری با زوایای			حالت‌های حدی		
محیطی دسته شده						ضریب آسیب		
			۴۹°	۶۷°	۷۴°			
تابع خسارت	احتمال	(LDE)	تابع خسارت	احتمال	(LDE)	تابع خسارت	احتمال	(LDE)
کرانه‌ی رفتارکشسان (PL)	۰/۱۵	۰/۶۸۳	۰/۱۰۲	۰/۲۶	۰/۳۹	۰/۵۲۵	۰/۷۹	۰/۷۵۹
استفاده‌ی بی‌وقفه (IO)	۰/۳	۰/۱۳۸	۰/۴۱	۰/۰۰۴	۰/۰۰۱	۰/۰۱۱	۰/۰۰۳	۰/۰۰۱
ایمنی جانی (LS)	۰/۶	۰/۰۰۸	۰/۰۰۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱
آستانه‌ی فروریزش (CP)	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
مجموع	-	-	۰/۱۴۹	-	-	۰/۰۸۳	-	-

جدول ۱۱. مقادیر پارامترهای تاب‌آوری برای سازه‌های مطالعاتی.

سازه‌ی مطالعاتی	تابع خسارت	شاخص کیفیت کارایی	شاخص نیرومندی
سازه‌ی قاب خمشی محیطی دسته شده	۰/۱۴۹	۰/۸۵۱	۸۵/۱
سازه‌ی شبکه‌ی قطری با زوایای ۴۹°	۰/۴۱	۰/۹۵۹	۹۵/۹
سازه‌ی شبکه‌ی قطری با زوایای ۶۷°	۰/۸۳	۰/۹۱۷	۹۱/۷
سازه‌ی شبکه‌ی قطری با زوایای ۷۴°	۰/۱۱۴	۰/۸۸۶	۸۸/۶

به‌دست آمده، با افزایش زوایای المان‌های مورب در سازه‌های شبکه‌ی قطری از میزان اثربخشی پیکربندی قطری پیرامونی برکنترل سطح خسارت در اسکلت مقاوم کاسته می‌شود. در نتیجه، الگوی هندسی پیرامونی با زوایای ۷۴ درجه، به‌طورنسبی کمترین کارایی را نسبت به زوایای پیکربندی ۴۹ و ۶۷ درجه، در ایجاد بهبود عملکرد لرزه‌یی سیستم مقاوم دارد. بنابراین، الگوی مثلی سبب کاهش احتمال آسیب ناشی از رویداد لرزه‌یی بر رفتار دینامیکی سازه‌می‌شود. این مورد، در مقادیر شاخص نیرومندی (مؤلفه‌ی استحکام تاب‌آوری) سازه‌های مطالعاتی (شکل ۱۳) نمود بیشتری دارد. لذا بر طبق نتایج پژوهش حاضر، می‌توان با تغییر الگوی هندسی پیرامونی سازه، افت و شاخص کیفیت کارایی ناشی از یک زلزله‌ی بزرگ و پراورزی را در ساختارهای مقاوم کنترل کرد. نکته‌ی مهم آن است که کاربرد پیکربندی مقاوم شبکه‌ی قطری با الگوهای مثلی نسبت به انتخاب یک سازه‌ی قاب خمشی دسته شده، توانایی اسکلت مقاوم برای مقابله با سطح مشخصی از شدت زلزله، همچنین برآورد و رسیدن به شاخص تاب‌آوری سخت را افزایش می‌دهد.



شکل ۱۳. مقایسه‌ی معیار شاخص نیرومندی تاب‌آوری برای سازه‌های مطالعاتی.

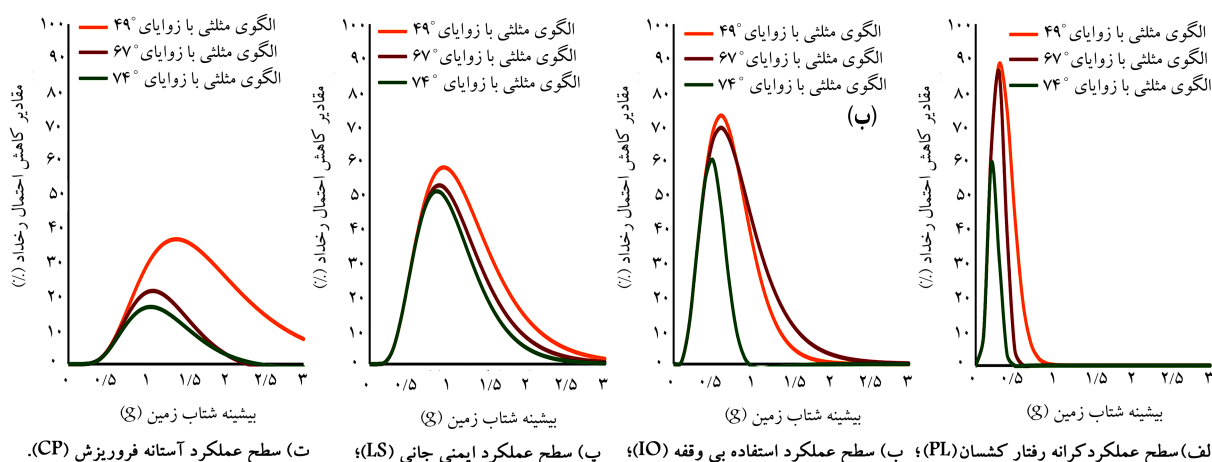
کوچک برای المان‌های مورب در الگوی مثلی محیطی، سبب تقویت نسبی در قابلیت میرا ساختن انرژی زلزله در سطوح مختلف خسارت می‌شود. در این باره، پیکربندی پیرامونی با زوایای ۴۹ درجه، بیشترین شاخص نیرومندی را در سازه‌های شبکه‌ی قطری ایجاد می‌کند.

بنابراین ایجاد پیکربندی قطری در سیستم مقاوم، توانایی مقابله با عدم قطعیت‌های فیزیکی رکوردهای زلزله و به ویژه جنبش‌های نیرومند حوزه‌ی نزدیک را در ماهیت رفتاری سازه‌ها بهبود می‌بخشد. همچنین، مطابق با نمودارهای شکل ۱۴ مشخص شد که استفاده از سازه‌ی شبکه‌ی قطری نسبت به ساختار ترکیبی قاب خمشی در اسکلت مقاوم، سبب کاهش نسبی احتمال رخداد سطوح عملکردی در حدود ۲۰ تا ۹۰ درصد می‌شود. بیشترین اختلاف احتمال فراگذشت از حالت‌های حدی، مربوط به سطح عملکرد کرانه‌ی رفتارکشسان (PL) است. در این باره، بالاترین تأثیرگذاری الگوی مثلی محیطی در جلوگیری از وقوع عملکرد احتمالی آستانه‌ی فروریزش (CP) در سازه به ازاء سطح شتاب ۰/۵g الی ۲g ایجاد می‌شود. برطبق نتایج

#### ۴. نتیجه‌گیری

هدف از پژوهش حاضر، سنجش میزان آسیب‌پذیری سازه‌های مطالعاتی شبکه‌ی قطری و قاب خمشی دسته شده در برابر رکوردهای نیرومند حوزه‌ی نزدیک، مطابق با روابط تاب‌آوری لرزه‌یی بوده است. بدین منظور، تحلیل‌های تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی و دینامیکی فزاینده (IDA) بر روی سازه‌های مطالعاتی انجام شده است. نمودارهای شکنندگی سازه‌ها از روی نتایج تحلیل‌های دینامیکی فزاینده، براساس توزیع آماری لوگ - نرمال پیاده‌سازی شده است. همچنین، پردازش‌های عددی مربوط به شاخص نیرومندی سازه‌های مطالعاتی، بر پایه‌ی روابط پیشنهادی MCEER در نظر گرفته شده و این نتایج به‌دست آمده است:

۱. با مقایسه‌ی پوش بیشینه‌ی دریافت سازه‌های مطالعاتی، مشخص شد که سازه‌ی



شکل ۱۴. اختلاف احتمال رخداد حالت‌های حدى مختلف برای سازه‌های مطالعاتی شبکه قطری.

شبکه‌ی قطری دارای ظرفیت مقاومتی بالایی برای کنترل رویکرد خرابی تحت رکوردهای حاوی پالس سرعت هستند.

۶. مطابق با نتایج عددی تاب‌آوری لرزه‌یی، شاخص نیرومندی برای سازه‌های شبکه‌ی قطری با زوایای ۴۹، ۶۷ و ۷۴ درجه و سازه‌ی قاب خمشی محیطی دسته‌شده، به ترتیب ۹۵/۹، ۹۱/۷، ۸۸/۶ و ۸۵/۱ درصد محاسبه شده است. بدین ترتیب، سازه‌های شبکه‌ی قطری دارای مقادیر مؤلفه‌ی تاب‌آوری سخت در دامنه‌ی عددی بیشتری نسبت به اسکلت مقاوم قاب خمشی هستند. بنابراین ایجاد و تعبیه‌ی الگوی مثلثی محیطی در اسکلت مقاوم لرزه‌یی، افت کیفیت کارایی سازه بعد از وقوع زلزله را کاهش می‌دهد.

۷. بر پایه نتایج به‌دست آمده، به منظور کاهش مقادیر تابع خسارت حالت‌های حدى مختلف در سازه‌های شبکه‌ی قطری، استفاده از زوایای کوچک‌تر برای پیکربندی پیرامونی نتایج مطلوب‌تری را در پی خواهد داشت. بر همین اساس، چیدمان زوایای ۴۹ درجه برای المان‌های مورب در شبکه‌ی قطری پیرامونی، همراه با کاهش مقادیر احتمالاتی شکنندگی در حدود ۴۰٪ نسبت به سازه‌ی قاب خمشی، بیشترین سطح اطمینان را در برابر رخداد سطح عملکرد آستانه‌ی فروریزش (CP) ایجاد می‌کند.

۸. طراحی و کاربرد پیکربندی قطری محیطی در ساختارهای مقاوم، توانایی مقابله با عدم قطعیت‌های ناشی از رکوردهای حوزه‌ی نزدیک به ویژه حاوی اثرات جهت‌داری پیش‌رونده را بهبود می‌بخشد. در این باره نیز با افزایش زوایای المان مورب الگوی هندسی پیرامونی، به‌طور نسبی از میزان تأثیرگذاری شبکه‌ی قطری بر کنترل احتمال رخداد وضعیت‌های عملکردی کاسته می‌شود.

شبکه‌ی قطری با زوایای ۴۹ درجه تحت رکوردهای حوزه‌ی نزدیک، دارای مقادیر با دامنه‌ی عددی کمتری نسبت به سایر سازه‌های مطالعاتی است. بر همین اساس، در سازه‌های شبکه‌ی قطری نیز با افزایش زوایای پیکربندی المان‌های مورب پیرامونی از شدت یکنواختی توزیع دررفت کاسته شده و مقادیر بیشینه‌ی پارامتر مذکور افزایش می‌یابد.

۲. بر طبق ارزیابی نمودارهای IDA می‌توان دریافت که قابلیت شکل‌پذیری بالا برای سازه قاب خمشی محیطی دسته شده سبب می‌شود که سازه‌ی مذکور به تدریج دچار زوال مقاومت و کاهش سختی شود.

۳. در پردازش نمودارهای شکنندگی سازه‌های مطالعاتی مشاهده شد که در سطح شدت لرزه‌یی یکسان، احتمال رخداد حالت‌های حدى برای سازه‌های شبکه‌ی قطری به شدت کمتر از سازه‌ی قاب خمشی محیطی دسته‌شده است. همچنین ایجاد الگوی مثلثی در قاب‌های پیرامونی، توانایی اسکلت مقاوم را برای جلوگیری از وقوع ناپایداری کلی دینامیکی تحت رکوردهای نیرومند حوزه‌ی نزدیک افزایش می‌دهد.

۴. بر طبق نتایج محاسباتی شاخص‌های شکنندگی، مقادیر شتاب متناظر با رویکرد تصاعدی خسارت در سازه‌ی قاب خمشی کمتر از سازه‌های شبکه‌ی قطری است. به عبارت بهتر، وقوع مودهای کم‌انرژی برای اعضاء اصلی در سازه‌ی قاب خمشی محیطی دسته‌شده با آهنگ سریع‌تری رخ می‌دهد.

۵. بر پایه‌ی پردازش تحلیلی شاخص‌های تاب‌آوری لرزه‌یی مشخص شد که سازه‌های

## پانویس‌ها

1. Diagrid structure
2. Moment frame
3. Incremental dynamic analysis (IDA)

4. Fragility Curve
5. Shear-link beam
6. Bruneau & Reinhorn
7. Cimellaro
8. Robustness
9. Redundancy

10. Resourcefulness
11. Rapidity
12. Liu & Fang
13. Forward directivity
14. Backward directivity
15. Neutral directivity
16. Northridge
17. Imperial Valley
18. Loma Prieta
19. Peak ground acceleration (PGA)
20. Post-linear (PL)
21. Immediate occupancy (IO)
22. Life safety (LS)
23. Collapse prevention (CP)
24. Hard resilience
25. Quality of structures

## منابع (References)

1. Montuori, G.M., Mele, E., Brandonisio, G. and De Luca, A. "Design criteria for diagrid tall buildings: Stiffness versus strength", *Structural Design of Tall and Special Buildings*, **23**(17), pp. 1294-1314 (2013).
2. Tomei, V., Imbimbo, M. and Mele, E. "Optimization of structural patterns for tall buildings: The case of diagrid", *Engineering Structures*, **171**(15), pp. 280-297 (2018).
3. Mohsenian, V., Padashpour, S. and Hajirasouliha, I. "Seismic reliability analysis and estimation of multilevel response modification factor for steel diagrid structural systems", *Building Engineering*, **29**, 101168 (2020).
4. Heshmati, M., Khatami, A. and Shakib, H. "Seismic performance assessment of tubular diagrid structures with varying angles in tall steel buildings", *Structures*, **25**, pp. 113-126 (2020).
5. Sadeghi, S. and Rofooei, F.R. "Improving the seismic performance of diagrid structures using buckling restrained braces", *Constructional Steel Research*, **166**, 105905 (2020).
6. Song, S. and Zhang, C.H. "Lateral stiffness and preliminary design methodology of twisted diagrid tube structures", *Structural Design of Tall and Special Buildings*, **29**(18) (2020).
7. Teran-Gilmore, A., Roeslin, S., Tapia-Hernandez, E. "Displacement-based design of tall earthquake-resistant diagrid systems", *Building Engineering*, **35**, 102022 (2021).
8. Zareian, F., Krawinkler, H., Ibarra, L. and et al. "Basic concepts and performance measures in prediction of collapse of buildings under earthquake ground motions", *Structural Design of Tall and Special Buildings*, **19**(1-2), pp. 167-181 (2010).
9. Mai, Ch., Konakli, K. and Sudret, B. "Seismic fragility curves for structures using non-parametric representations", *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, **11**, pp. 169-186 (2017).
10. Vamvatsikos, D. and Cornell, C.A. "Direct estimation of seismic demand and capacity of multi-degree of freedom systems through incremental dynamic analysis of single degree of freedom approximation", *Structural Engineering*, **131**(4), pp. 589-599 (2005).
11. Rofooei, F.R. and Seyedkazemi, A. "Evaluation of the seismic performance factors for steel diagrid structural systems using FEMA P-695 and ATC-19 procedures", *Bulletin of Earthquake Engineering*, **18**, pp. 4873-4910 (2020).
12. Moradi, M. and Abdolmohammadi, M. "Seismic fragility evaluation of a diagrid structure based on energy method", *Constructional Steel Research*, **174**, 106311 (2020).
13. Dabbaghchian, I., Mirghaderi, S.R. and Sayadi, S. "Comparison of seismic behavior of the eccentric and conventional diagrid systems", *Structural Design of Tall and Special Buildings*, **30**(3), e1824 (2021).
14. Ahleghagh, S. and Mirghaderi, S.R. "Decoupling the strength and drift criteria in steel moment-resisting frames", *Structural Design of Tall and Special Buildings*, **29**(17), e1804 (2020).
15. Takewaki, L. "Beyond uncertainties in earthquake structural engineering". *Frontiers in Built Environment* (2015).
16. Bruneau, M. and Reinhorn, A. "Overview of the Resilience Concept", *The 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, California, USA, Paper No. 2040 (2006).
17. Cimellaro, G.P., Reinhorn, A.M. and Bruneau, M. "Framework for analytical quantification of disaster resilience", *Engineering Structures*, **32**(11), pp. 3639-3649 (2010).
18. Liu, C. and Fang, D. "Robustness analysis of vertical resistance to progressive collapse of diagrid structures in tall buildings", *Structural Design of Tall and Special Buildings*, **29**(13), e1775 (2020).
19. The Iranian National Building Code, "Steel structures", 10, Tehran, Iran (2014).
20. Standard No. 2800., *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings*, <sup>th</sup> Edition, Tehran, Iran (2014).
21. The Iranian National Building Code., *Design loads for buildings*, 6, Tehran, Iran (2014).
22. ASCE/SEI 41-17, "Seismic evaluation and retrofit of existing Buildings", American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia (2017).
23. FEMA P-795, "Quantification of building seismic performance factors: Component equivalency methodology", Federal Energy Management Agency (FEMA), Redwood City, California (2011).
24. ASCE 7-10, "Minimum design loads for buildings and other structures", American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia (2010).
25. CSI, Analysis Reference Manual for SAP2000. Berkeley, California, USA (2010).
26. CSI, User Guide PERFORM 3D, "Nonlinear analysis and performance assessment for 3D structures". Berkeley, California, USA (2011).
27. Alavi, B. and Krawinkler, H. "Effects of near-fault ground motions on frame structures", Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, California, USA (2001).

28. Sehhati, R., Rodriguez-Marek, A., ElGawady, M. and et al. "Effects of near-fault ground motions and equivalent pulses on multi-story structures", *Engineering Structures*, **33**(3), pp. 767-779 (2011).
29. Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), Ground Motion Database, University of California Berkeley.
30. Lallemant, D., Kiremidjian, A. and Burton, H. "Statistical procedures for developing earthquake damage fragility curves", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **44**(9), pp. 1373-1389 (2015).
31. Hajikazemi, M., Mohebi, B. and Montazeri-Pour, M. "Analysis of steel special moment frames including damaged column subjected to far and near-field ground motions", *Australian Journal of Structural Engineering*, **21**(3), pp. 193-207 (2020).
32. Vamvatsikos, D. and Fragiadakis, M. "Incremental dynamic analysis for estimating seismic performance sensitivity and uncertainty", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **39**(2), pp. 141-163 (2009).
33. Lachanas, C.G. and Vamvatsikos, D. "Model type effects on the estimated seismic response of a 20-story steel moment resisting frame", *Structural Engineering*, **147**(6), 04021078 (2021).
34. FEMA P-695, "Quantification of Building Seismic Performance Factors", Federal Energy Management Agency (FEMA), Redwood City, California (2009).
35. FEMA 356, "Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings", Federal Energy Management Agency (FEMA), Reston, Virginia (2000).
36. Cimellaro, G.P.; Fumo, C.; Reinhorn, A.M. and Bruneau, M. "Quantification of Disaster Resilience of Health Care Facilities", Technical Report MCEER-09-0009, University of Buffalo, State University of New York (2009).
37. Tothong, P. and Cornell, C.A. "Probabilistic Seismic Demand Analysis Using Advanced Ground Motion Intensity Measures, Attenuation Relationships, and Near-Fault Effects", Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER Report 2006/11, College of Engineering, University of California, Berkeley (2007).