

ارزیابی احتمالاتی شکنندگی سازه‌های شبکه قطری با و بدون قاب خمشی داخلی و الگوی هندسی پیرامونی مختلف

مهیار روشنی^۱، افشین مشکوه الدینی^{۲*}، علی معصومی^۳

- ۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشگاه خوارزمی، تهران
۲- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران
۳- استاد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران

meshkat@khu.ac.ir*

تاریخ پذیرش: [۱۴۰۱/۰۹/۲۳]

تاریخ دریافت: [۱۴۰۱/۰۵/۲۳]

چکیده

مفهوم سازی و پیاده سازی تحلیل شکنندگی، یک رویکرد مناسب به منظور کنترل احتمالاتی رخداد سطوح عملکرد مختلف در اسکلت‌های مقاوم سازه‌ای است. هدف از این مقاله، ارزیابی تاثیر چیدمان قاب خمشی داخلی پلان بر عملکرد لرزه‌ای سازه‌های شبکه قطری با زوایای پیکربندی محیطی مختلف، بر پایه روابط شکنندگی است. بدین ترتیب، سه سازه ۲۴ طبقه شبکه قطری با زوایای المان مورب پیرامونی ۴۹، ۶۷ و ۷۴ درجه به دو صورت دارا و بدون قاب خمشی داخلی پلان، طراحی شد. با انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی و دینامیکی فزاینده (IDA)، شکل‌پذیری و ظرفیت مقاومت سازه‌های مطالعاتی تحت رکوردهای حوزه نزدیک حاوی موجک‌های پرنرزی، مورد بررسی قرار گرفت. سپس، نمودارهای شکنندگی سازه‌های شبکه قطری، بر اساس توزیع آماری لوگ-نرمال برای چهار وضعیت عملکرد لرزه‌ای، محاسبه شد. مطابق با نتایج به دست آمده، پیکربندی هندسی محیطی با زوایای ۴۹ درجه، بیشترین سطح اطمینان را در برابر رخداد سطوح عملکرد لرزه‌ای برای سازه‌های شبکه قطری ایجاد می‌کند. نمودارهای شکنندگی نشان دادند که روند خرابی کلی در سازه‌های شبکه قطری بدون قاب خمشی داخلی با آهنگ سریع‌تری نسبت به سازه‌های هم‌پایه دارای قاب خمشی پدیدار می‌شود. بر پایه ارزیابی آسیب‌پذیری سازه‌های مطالعاتی، اندازه و دامنه تاثیرگذاری چیدمان قاب‌های خمشی داخلی پلان بر بهبود و کاهش نسبی دامنه رفتار غیرخطی سازه‌های شبکه قطری، وابسته به زوایای المان مورب الگوی مثالی پیرامونی است. در این باره نیز تعبیه زوایای بزرگ پیکربندی محیطی، میزان اثر بخشی چیدمان قاب خمشی داخلی بر جلوگیری از وقوع ناپایداری کلی دینامیکی در سازه‌های شبکه قطری را افزایش می‌دهد. جایگزینی و چیدمان قاب‌های خمشی در بخش میانی پلان سازه سبب افزایش کارآمدی سازوکار استهلاک انرژی زلزله در ساختارهای شبکه قطری می‌شود.

واژه‌های کلیدی: سازه شبکه قطری، منحنی شکنندگی، تحلیل دینامیکی فزاینده (IDA)، فروریزش، عملکرد لرزه‌ای.

۱- مقدمه

آسیب پذیری اسکلت های مقاوم لرزه ای در برابر تحریکات زمین، بر پایه تحلیل شکنندگی ارزیابی می شود و می توان با استفاده از تعریف تابع شکست، احتمال تجاوز عملکرد سازه از سطوح خسارت در محدوده گسترده ای از شدت زلزله را محاسبه نمود. همچنین، امکان پرداختن به موضوعات مدیریت ریسک و تخمین ظرفیت فروریزش در ساختارهای مقاوم جانبی نیز بر پایه ارزیابی نمودارهای شکنندگی وجود دارد [1]. در این باره، تاثیر اندرکنش خاک و سازه بر روند شکست سیستم های مقاوم لرزه ای، از اهمیت ویژه ای برخوردار است [2]. مشهیدی و خیرالدین، با پیاده سازی روابط شکنندگی، پارامترهای رفتار غیرخطی سازه های هگزاگرید^۱ را بررسی نمودند. آنان دریافتند که زوایای ۳۰ الی ۴۰ درجه برای المان های قطری سبب ایجاد عملکرد مطلوب لرزه ای، در سازه های هگزاگرید می شود [3,4]. همچنین، Wang و همکاران در سال ۲۰۲۰ تاثیر هم زمان زلزله اصلی و پس لرزه را بر عملکرد دینامیکی سازه ترکیبی بتن آرمه، از دیدگاه احتمالاتی حالات حدی کنترل نمودند. آنان مشاهده کردند که پس لرزه نیرومند زمین، باعث افزایش احتمال فراگذشت از سطوح عملکرد لرزه ای می شود [5]. Hu و همکاران (۲۰۲۱) نیز با بررسی نتایج تحلیل شکنندگی برای سطوح مختلف خطر لرزه ای دریافتند که سازه دارای هسته دوگانه جذب کننده انرژی زلزله، دارای بیشترین ظرفیت مقاومت برای مقابله با وقوع وضعیت فروریزش، نسبت به سایر سازه های هم پایه آن مطالعه است [6].

شایان ذکر است که مشخصات تحلیلی تغییر شکل ها و مولفه تنش محوری اعضای مورب در الگوهای مثلثی پیرامونی ساختارهای شبکه قطری^۲، توصیف کننده و تاثیر گذار بر رفتار غیرخطی سازه تحت رکوردهای زلزله است [7]. در رابطه با ارزیابی وقوع شکست برای سازه های شبکه قطری، مرادی و همکاران (۲۰۲۰) پارامتر انرژی کرنشی را برای تعیین میزان خسارت بر اسکلت مقاوم، در حالات حدی مختلف پیشنهاد دادند. ملاحظه شد که پارامتر انرژی به دلیل

ارتباط با رفتار کلی سازه شبکه قطری، نتایج قابل اعتمادی را نشان می دهد [8]. نسبت ارتفاع به عرض سازه و زاویه المان های مورب، دو فاکتور تاثیر گذار بر عملکرد لرزه ای سازه های شبکه قطری می باشند. در این باره، در سال ۲۰۲۰، رفوئی و سید کاظمی با انجام تحلیل های دینامیکی فزاینده^۳، تاثیر تغییر طول دهانه سازه و زوایای الگوی هندسی محیطی را بر رفتار و مشخصات شکنندگی سازه های شبکه قطری بررسی کردند. در آن مطالعه با افزایش تعداد طبقات سازه، مقادیر کمتری برای ضرایب رفتار (R) و مقاومت افزون (Ω) در اسکلت های شبکه قطری محاسبه شد [9]. همچنین، محسنیان و همکاران (۲۰۲۰) پی بردند که ضریب رفتار برابر با ۴ برای سازه های شبکه قطری، حاشیه اطمینان مناسبی را در برابر رخداد سطوح عملکرد بالاتر از ایمنی جانی برای ساختارهای شبکه قطری ایجاد می کند [10]. در سال ۲۰۲۰ دباغچیان و همکاران، طرح ایجاد خروج از مرکزیت در الگوهای مثلثی را برای سازه های شبکه قطری ارائه نمودند. ارزیابی نتایج مرتبط با نمودارهای شکنندگی نشان داد که تعریف خروج از محوریت در پیکربندی الگوهای مثلثی پیرامونی شبکه های قطری، سبب افزایش قابلیت پایداری و ثبات رفتار الاستیک و افزایش نسبی مشخصات مقاومتی این سازه ها می شود [11]. Gilmore و همکاران (۲۰۲۱) نیز یک رویکرد تحلیلی بر پایه جابه جایی، به منظور تفهیم و گسترش روش طراحی بر اساس عملکرد برای سازه های شبکه قطری را مطرح کردند. با استفاده از این روش، بهینه سازی طراحی و قابلیت ارزیابی پاسخ جانبی در سازه های شبکه قطری ایجاد می شود [12]. Song و همکاران در سال ۲۰۲۰، تاثیر زوایای المان مورب پیرامونی را بر سختی جانبی سازه های شبکه قطری دارای پیچ خوردگی در ارتفاع بررسی کردند. آنان بر پایه تغییر شکل حاکم خمشی، برای سازه ۶۰ طبقه شبکه قطری با نرخ پیچ خوردگی در ارتفاع برابر با یک درجه، زوایای بهینه برای الگوهای مثلثی پیرامونی را در حدود ۵۵ الی ۷۱ درجه بدست آوردند [13]. Cascone و همکاران (۲۰۲۱) نیز یک روش طراحی را با لحاظ معیارهای مقاومت و سختی، با هدف ایجاد

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

وزن اسکلت کمتر در سازه‌های شبکه قطری، بر اساس بهینه‌یابی زوایای الگوی هندسی محیطی بیان کردند [14].

هدف از این مقاله، ارزیابی تاثیر وجود قاب خمشی میانی بر مشخصات شکنندگی سازه‌های شبکه قطری با زوایای پیکربندی پیرامونی مختلف می‌باشد. انعطاف پذیری بالای ساختارهای خمشی، نشان‌دهنده ظرفیت بزرگ تغییرشکل غیرالاستیک پایدار در این سیستم‌های باربر جانبی است. سازوکار تسلیم المان‌های تیر-ستون در این سازه‌ها، در حالت حاکمیت رفتار خمشی و نیز برای چشمه‌های اتصال^۱ به صورت برشی در نظر گرفته می‌شود [15]. در این باره، اهل حق و میرقادری (۲۰۲۰) با به‌کارگیری تیرهای متصل‌کننده طبقات در قاب‌های خمشی، افزایش قابلیت جذب انرژی زلزله در اسکلت‌های مقاوم را نتیجه‌گیری نمودند [16]. همچنین، وحدانی و همکاران (۲۰۱۷) با کنترل روند شکست لرزه‌ای در سازه‌های قاب خمشی، پی بردند که پیشینه شتاب متناظر با رخداد وضعیت فروریزش تحت رکوردهای حوزه نزدیک، کمتر از رکوردهای حوزه دور است [17]. بدین ترتیب در مطالعه حاضر، ساختار رفتاری و مشخصات شکنندگی سه سازه مطالعاتی ۲۴ طبقه شبکه قطری با الگوهای هندسی پیرامونی مختلف، در دو حالت دارای قاب خمشی میانی شکل (۱-الف) و بدون قاب خمشی شکل (۱-ب) بر پایه انجام تحلیل‌های غیرخطی تاریخچه زمانی^۲ و دینامیکی فزاینده (IDA) ارزیابی شده است. چیدمان قاب‌های خمشی با خطوط تیره پر رنگ و قاب‌های ساده مفصلی به صورت خطوط تیره نازک در پلان سازه‌ها مطابق شکل (۱) مشخص است.

۲- مشخصات سازه‌های مطالعاتی

در این مقاله، سه سازه شبکه قطری با زوایای پیکربندی ۴۹، ۶۷ و ۷۴ درجه شکل (۲) بر اساس مبحث دهم مقررات ملی ساختمان (ویرایش ۱۳۹۸) و ضوابط لرزه‌ای موجود در ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ و کاربرد نرم افزار SAP2000 طراحی

شده‌اند [18,19,20]. با توجه به معیار هم‌ارزی سختی، سازه‌های ۲۴ طبقه شبکه قطری به دو صورت دارای قاب خمشی میانی با نام Hybrid-Diagrid و بدون قاب خمشی میانی با نام Diagrid مدلسازی شدند.

مطابق با جدول (۱)، معیار رفتار پیچشی سخت در تحلیل مودال سازه‌های مطالعاتی در نظر گرفته شده است. المان‌های سازه‌ای از فولاد ST37 با تنش تسلیم $F_y = 2400 \text{ kg/cm}^2$ و تنش نهایی $F_u = 3700 \text{ kg/cm}^2$ ساخته شده‌اند. برپایه معیار ستون قوی-تیر ضعیف و کنترل نسبت‌های مقاومتی، مقاطع المان‌ها در هر شش ساختار شبکه قطری به صورت جدول‌های (۲ و ۳) لحاظ شد. کاربرد مقاطع باکس (Box) برای اعضای باربر جانبی سبب ایجاد توزیع هر چه یکنواخت‌تر جریان برش در پیکره پیوسته نیمرخ المان خواهد شد.

1. Panel zone (PZ)

2. Nonlinear time history analysis (NTHA)

پلان سازه‌های مطالعاتی شکل (۱) به صورت 36×36 متر و فاصله اعضای قطری از یکدیگر ۶ متر است. بارگذاری ثقلی بر اساس مبحث ششم مقررات ملی ساختمان (ویرایش ۱۳۹۸)، به صورت بار مرده برابر با ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمربع در همه طبقات و بار زنده در تراز $Z=H$ و نیز سایر طبقات به ترتیب برابر با ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع لحاظ شده است [21]. ارتفاع طبقات به صورت یکسان برابر با ۳.۵ متر همراه با تغییرات زوایای المان‌های مورب پیرامونی در نظر گرفته شد.

شکل ۲. نمای سازه‌های مطالعاتی ۲۴ طبقه قطری با الگوی هندسی مختلف؛ (الف) ۴۹ درجه، (ب) ۶۷ درجه، (پ) ۷۴ درجه.

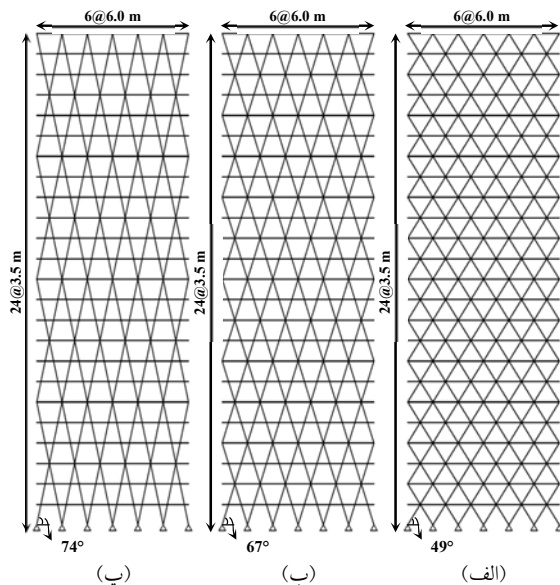


Fig. 2. Elevation view of the studied 24-story models with various perimeter geometric configurations.

ساختمان سازه‌ها نیز از خاک نوع II و در منطقه با خطر لرزه‌خیزی نسبی بالا می‌باشد. ساختارهای شبکه قطری به عنوان سیستم مقاوم بار جانبی در آیین‌نامه‌های ساختمان شناخته نشده‌اند. بدین ترتیب، ضریب رفتار (R) برابر با ۵، برای این سازه‌ها مطابق پیشنهادهای مطالعات گذشته فرض شد [22,23]. اتصالات المان‌های قطری در الگوی هندسی پیرامونی سازه‌ها، به صورت مفصل مدل شده است. مطابق با ضوابط

شکل ۱. پلان سازه‌های مطالعاتی؛ (الف) سازه‌های شبکه قطری دارای چیدمان قاب خمشی میانی (Hybrid-Diagrid)، (ب) سازه‌های شبکه قطری بدون قاب خمشی میانی (Diagrid)، C_M و C_S به ترتیب مراکز جرم و برش طبقه هستند.

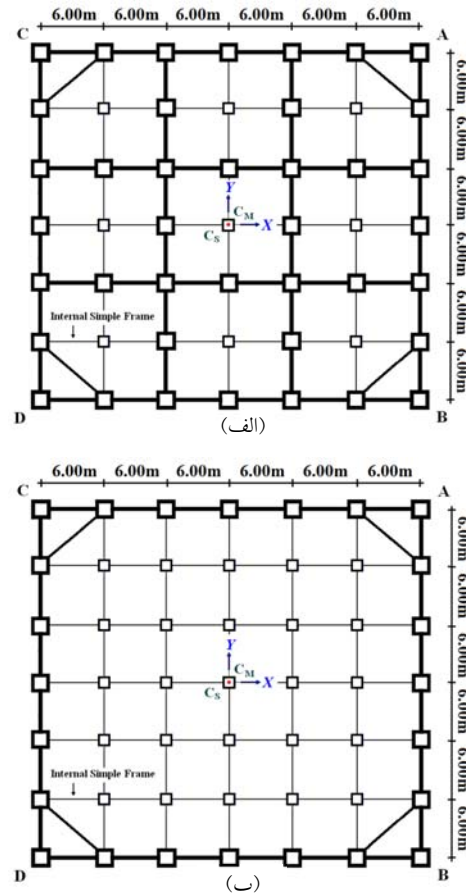


Fig. 1. Plan of the studied diagrid structures with and without internal moment frames.

جدول ۱. ویژگی‌های مودال سازه‌های مطالعاتی.

Structure	Transitional Modes		Torsional Mode
	T_{1x} (sec)	T_{1y} (sec)	T_{1z} (sec)
Diagrid (49°)	1.225	1.225	0.426
Hybrid-Diagrid (49°)	1.223	1.223	0.430
Diagrid (67°)	1.284	1.284	0.631
Hybrid-Diagrid (67°)	1.281	1.281	0.635
Diagrid (74°)	1.647	1.647	0.906
Hybrid-Diagrid (74°)	1.622	1.622	0.910

Table 1. Modal characteristics of the studied structures.

$$\Delta_T = \frac{T_{CE} L}{EA} \quad (۱)$$

$$\Delta_C = \frac{P_{CL} L}{EA} \quad (۲)$$

مطابق موارد ذکر شده، مشخصات مفصل پلاستیک برای المان‌های اصلی سازه‌های شبکه قطری اختصاص یافت. شکل (۳) ویژگی‌های رفتار غیرخطی اعضای باربر جانبی در قاب‌های داخلی و خارجی سازه‌ها را نشان می‌دهد.

ASCE/SEI 41-17 و توصیه‌های FEMA P-695، مدل رفتار غیرخطی برای اعضای قطری بر اساس نسبت برآیند نیروی دینامیکی به بیشینه نیروی قابل تحمل المان در حالت الاستیک، به صورت جابه‌جایی کششی و فشاری مشخص می‌شود [24,25]. با توجه به مساحت مقطع A و طول L المان، مدول الاستیک E و همچنین مقاومت کششی T_{CE} و فشاری P_{CL} مورد انتظار عضو، تغییرشکل‌های کششی Δ_T و فشاری Δ_C المان‌های قطری، به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

شکل ۳. تعریف مشخصات غیرخطی اعضای سازه‌های مطالعاتی؛ (الف) مدل رفتار غیرخطی المان قطری، (ب) مدل رفتار غیرخطی المان تیر-ستون، (پ) مدل رفتار غیرخطی المان ستون قاب ساده مفصلی [24,25].

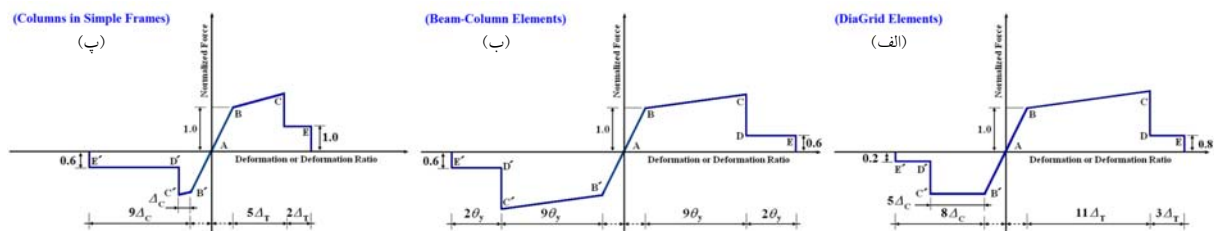


Fig. 3. The proposed nonlinear behavioral models for the diagrid elements and the beam-columns [24,25].

جدول ۲. مشخصات مقاطع المان‌های قاب‌های خمشی و پیکربندی قطری سازه‌های مطالعاتی (ابعاد به mm).

Story		1-6	7-12	13-18	19-24
Moment Frame	Column	BOX 600×30	BOX 550×25	BOX 500×20	BOX 450×15
	Bream	PL 500×15+350×25	PL 450×15+350×25	PL 450×10+350×25	PL 400×10+300×20
DiaGrid Frame	Diagonal Element - 49°	BOX 550×25	BOX 500×22	BOX 450×18	BOX 400×14
	Diagonal Element - 67°	BOX 500×28	BOX 450×25	BOX 400×22	BOX 350×18
	Diagonal Element - 74°	BOX 500×26	BOX 450×24	BOX 400×20	BOX 350×16
	Beam	PL 500×15+350×25	PL 450×15+350×25	PL 450×10+350×25	PL 400×10+300×20

Table 2. Section sizes assigned to the beam-columns and the diagrid elements of the studied structures.

جدول ۳. مشخصات مقاطع المان‌های قاب‌های با اتصالات مفصلی در سازه‌های شبکه قطری (ابعاد به mm).

Story		1-5	6-10	11-15	16-20	21-24
Simple Frame	Column	BOX 500×25	BOX 450×20	BOX 400×15	BOX 350×15	BOX 300×10
	Beam	PL 350×10+150×20				

Table 3. Section sizes assigned to the simple frame elements of the studied diagrid structures.

از زلزله‌های نورثریج ۱۹۹۴، امپریال ۱۹۷۹، لوماپریتا ۱۹۸۹، بم ۲۰۰۳ و طیس ۱۹۷۸ مطابق با جدول (۴) در نظر گرفته شده

۳- ویژگی‌های طیفی رکوردهای حوزه نزدیک زلزله

به منظور ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سازه‌های مطالعاتی، با استفاده از داده‌های سایت PEER، ۱۰ رکورد سه مولفه‌ای حوزه نزدیک

است [26]. رکوردهای حاوی پالس سرعت^۱ می‌توانند دارای مقادیر طیفی بزرگ در بازه بسامدی نزدیک به زمان تناوب^۲ پالس باشند. همچنین، ارزیابی ساختار طیف‌های پاسخ و نیز نسبت زمان تناوب پالس سرعت رکورد به زمان تناوب مود اول سازه (T_p/T_1) به عنوان دو فاکتور موثر در شناسایی تاثیر جنبش‌های نیرومند زمین بر عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها در نظر گرفته می‌شوند [27].

در شکل (۴)، طیف شتاب (S_a) همراه با میانگین محاسباتی مربوط به رکوردهای زلزله در دو راستای مولفه LN (موازی با صفحه شکست گسل) و مولفه TR (عمود بر صفحه شکست گسل) نشان داده شده است. دانسته شده که اعمال رکوردهای حوزه نزدیک با انواع آثار جهت‌داری، سبب احتمال رخداد فروپاشی در سازه‌ها با دامنه بیشتر نسبت به رکوردهای حوزه دور می‌شوند [28]. بنابراین، ارزیابی رفتار شکنندگی سازه‌ها

شکل ۴. طیف پاسخ شتاب رکوردهای زلزله انتخابی؛ (الف) مولفه LN (منطبق با راستای X پلان سازه‌های مطالعاتی)، (ب) مولفه TR (منطبق با راستای Y پلان سازه‌های مطالعاتی).

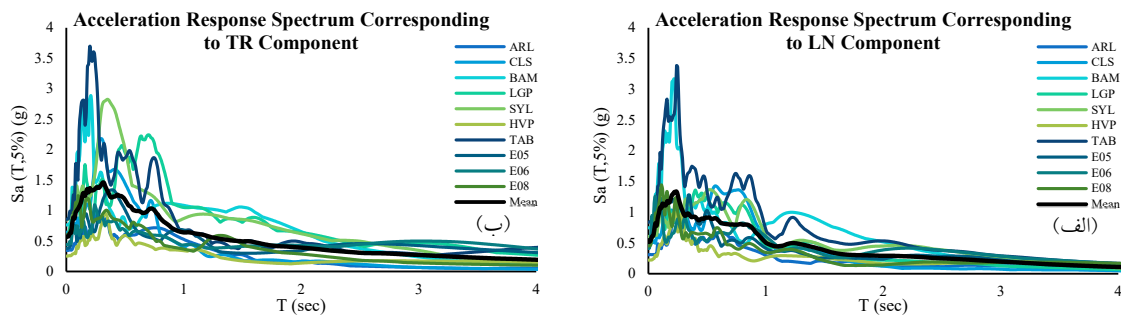


Fig. 4. The 5% damped acceleration response spectra of the selected earthquake records.

جدول ۴. مشخصات فیزیکی رکوردهای حوزه نزدیک انتخابی.

No.	Earthquake	Year	Station	Magnitude (M_w)	Distance (km)	T_{Pulse} (sec)	$PGA_{(TR)}$ (g)	$PGV_{(TR)}$ (cm/s)	$PGD_{(TR)}$ (cm)	Directivity
1	Bam	2003	BAM	6.6	1.0	3.65	0.793	123.70	35.14	Forward
2	Imperial Valley	1979	El Centro Array 5 (E05)	6.5	4.0	5.35	0.379	90.52	62.19	Forward
3	Imperial Valley	1979	El Centro Array 6 (E06)	6.5	1.0	4.65	0.439	110.14	69.31	Forward
4	Imperial Valley	1979	El Centro Array 8 (E08)	6.5	3.8	-	0.602	54.13	31.24	Forward
5	Imperial Valley	1979	Holtville Post Office (HVP)	6.5	7.5	-	0.253	50.03	32.05	Neutral
6	Loma Prieta	1989	Los Gatos (LGP)	6.9	6.1	7.30	0.563	96.23	37.12	Forward
7	Loma Prieta	1989	Corralitos (CLS)	6.9	5.1	-	0.644	55.48	10.46	Backward
8	Northridge	1994	Arleta (ARL)	6.7	12.9	-	0.345	42.04	10.09	Neutral
9	Northridge	1994	Sylmar Olive View (SYL)	6.7	6.4	2.60	0.843	129.61	32.93	Forward
10	Tabas	1978	TAB	7.4	3.0	7.95	0.852	122.66	101.73	Forward

Table 4. The physical specifications of the selected near-field earthquake records.

1. Velocity pulse
2. Period

سرعت، نیاز لرزه ای بالایی را در ساختارهای مقاوم جانبی ایجاد می کنند.

۴- ارزیابی عملکرد لرزه ای سازه های شبکه قطری

۴-۱- نتایج تحلیل های تاریخچه زمانی غیر خطی

ارزیابی طرح لرزه ای و تحلیل سازه های مطالعاتی شبکه قطری دارا و بدون قاب خمشی میانی شکل (۱) در نرم افزارهای SAP2000 و Perform3D انجام شده است [20,30]. بررسی هماهنگی و پردازش مشخصات تحلیلی مودال، پارامترهای سختی و مقاومت سازه های مطالعاتی در محیط هر دو نرم افزار SAP2000 و Perform3D صورت گرفت. در مطالعه حاضر، رفتار غیرخطی سازه های مطالعاتی به وسیله تحلیل های دینامیکی تاریخچه زمانی تحت رکوردهای حوزه نزدیک به صورت میدان آزاد مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از رکوردهای میدان آزاد زلزله، دربرگیرنده نمود واقعی از بارگذاری جانبی در کنترل طراحی سازه ها می باشد. بدین ترتیب، تاثیر قاب خمشی میانی بر شکل پذیری سازه های شبکه قطری، با ارزیابی پارامترهای بیشینه جابه جایی نسبی^۳ و تغییر مکان جانبی^۴ برای دو گروه سازه های مطالعاتی انجام شد.

در شکل های (۶ و ۷)، پوش بیشینه جابه جایی نسبی و تغییر مکان طبقات سازه های شبکه قطری دارا و بدون قاب خمشی داخلی ارائه شده است. در این شکل ها، میانگین نمودارها به صورت خط چین پررنگ نشان داده شده است. بر طبق این نتایج، سازه های شبکه قطری تحت رکوردهای انتخابی در حوزه الاستیک و خطی رفتار می کنند. جنبش های نیرومند زمین متاثر از آثار جهت داری پیشرونده، تغییر شکل های بزرگی را نسبت به رکوردهای دارای فقط جهش های پرانرژی و با گام زمانی کوچک، در سازه های مطالعاتی ایجاد کرده اند. با مشاهده

شکل ۵. نمودار تجمعی آزاد شدن انرژی جنبشی مربوط به سه رکورد حوزه نزدیک HVP، LGP و BAM متناظر با مولفه TR.

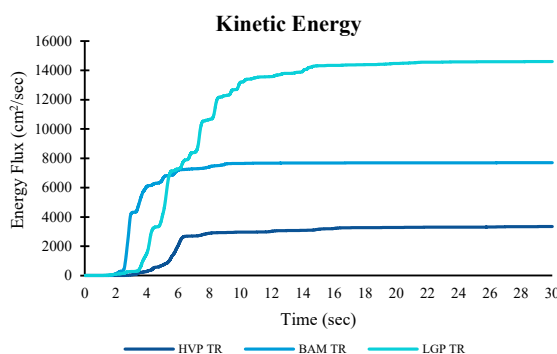


Fig. 5. Time histories of the cumulative approach related to the kinetic energy release of the HVP, LGP and BAM records.

تحت رکوردهای حوزه نزدیک به ویژه با اثر جهت داری پیشرونده^۱ از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در این باره، عزالدین و همکاران (۲۰۲۱) به منظور شبیه سازی رکوردهای حوزه نزدیک، رویکرد جدیدی را در برازش موجک پیوسته سرعت، بر اساس دو پارامتر دامنه و زمان تناوب پالس ارائه نمودند. در آن مطالعه، با ترکیب روش تخمین موجک شتاب و فرمولاسیون پیشنهادی برازش تک پالس سرعت، کمینه سازی خطای برآورد بر پایه طیف های الاستیک پاسخ لرزه ای و شدت آریاس انجام شد [29].

جنبش های نیرومند زمین حاوی پالس در تاریخچه زمانی سرعت، انرژی زیادی را به اسکلت های مقاوم وارد می کنند. شکل (۵)، روند تجمعی آزاد شدن انرژی جنبشی سه رکورد LGP، BAM و HVP متناظر با مولفه TR، هم راستا با محور Y پلان سازه های مطالعاتی را نشان می دهد. با توجه به این نمودار ملاحظه می شود که رکورد LGP به سبب حضور پالس سرعت بلند مدت و رکورد BAM با توجه به پالس با دامنه بالا، مقادیر انرژی بیشتری را نسبت به رکورد HVP تنها حاوی جهش های^۲ پرانرژی، دارد. پس می توان انگاشت که رکوردهای دارای پالس

1. Forward directivity effect
2. Spike
3. Drift
4. Displacement

نمودارهای پوش جابه‌جایی نسبی ملاحظه می‌شود برای سازه شبکه قطری با الگوی هندسی محیطی ۴۹ درجه، یک توزیع

شکل ۶. پوش بیشینه تغییر مکان و جابه‌جایی نسبی در جهت X پلان سازه‌های شبکه قطری دارا و بدون قاب خمشی داخلی.

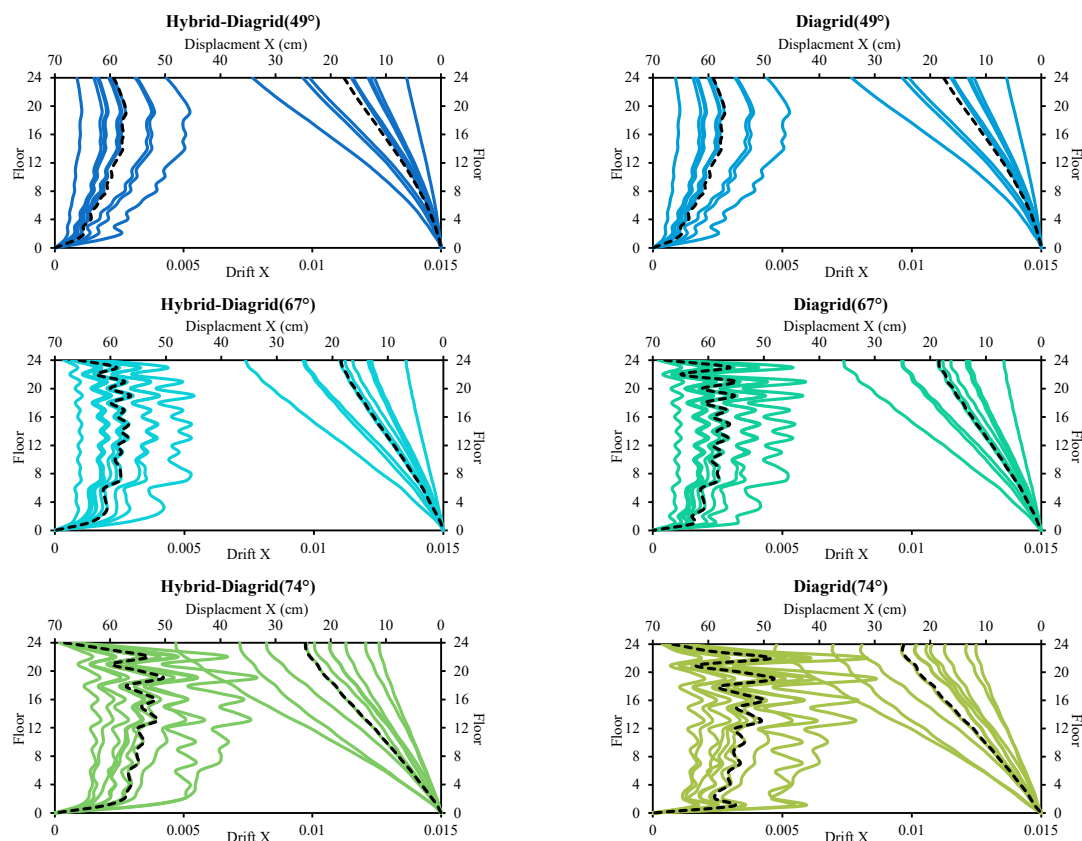


Fig. 6. The envelop of the maximum story drift and displacement responses in the X direction of plan.

شکل ۷. پوش بیشینه تغییر مکان و جابه‌جایی نسبی در جهت Y پلان سازه‌های شبکه قطری دارا و بدون قاب خمشی داخلی.

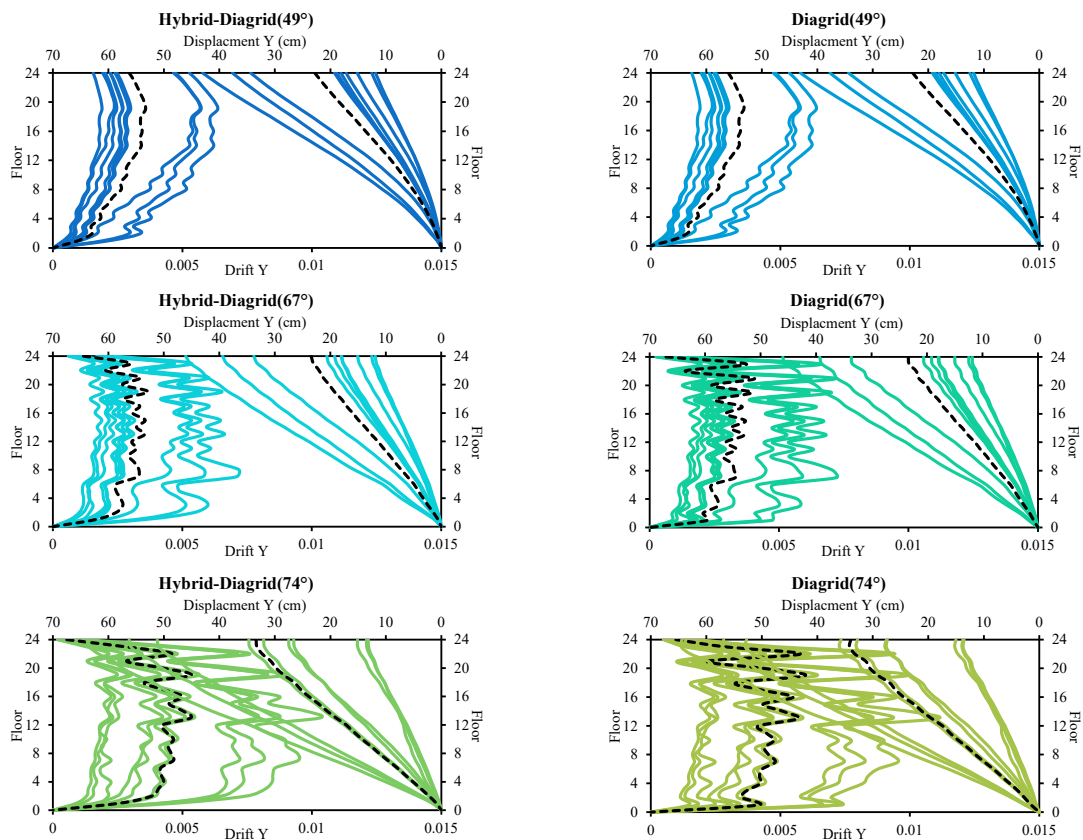


Fig. 7. The envelop of the maximum story drift and displacement responses in the Y direction of plan.

خمشی بر قابلیت استهلاک انرژی زلزله در سازه‌های شبکه قطری، بیشتر می‌شود.

نمودارهای پوش بیشینه تغییر مکان جانبی سازه‌های مطالعاتی (شکل‌های ۶ و ۷) نشان می‌دهد که انتخاب زوایای مناسب برای الگوی هندسی پیرامونی، قابلیت پوشش دامنه تغییرات این نیاز لرزه‌ای در طبقات سازه‌های شبکه قطری را در پی دارد. نمود آثار مودهای پایه رفتار خمشی و برشی در ساختار تحلیلی نمودارهای تغییر مکان جانبی حاصله فوق ملاحظه می‌شود. همچنین از این نمودارها دریافت می‌شود که چیدمان قاب‌های خمشی مشارکت ناچیزی در کاهش مقادیر بیشینه تغییر مکان جانبی طبقات سازه‌های شبکه قطری دارد.

نسبی یکنواخت برقرار است. در این باره، با افزایش زوایای پیکربندی محیطی، مقادیر پاسخ جابه‌جایی نسبی در اسکلت‌های مقاوم بیشتر می‌شود. این مورد نشان‌دهنده ظرفیت مقاومتی بزرگ برای سازه‌های شبکه قطری با زوایای کوچک‌تر المان‌های مورب پیرامونی، به ویژه تحت اثر رکوردهای حاوی پالس سرعت است.

سازه‌های شبکه قطری دارای قاب خمشی میانی (Hybrid-Diagrid)، مقادیر پاسخ جابه‌جایی نسبی کمتری نسبت به سازه‌های هم‌پایه بدون قاب خمشی داخلی (Diagrid) تحمل نموده‌اند. وجود پیکربندی قاب‌های خمشی میانی سبب یک کاهش نسبی و محدود نمودن تغییر شکل جانبی سازه‌های شبکه قطری به ویژه در طبقات انتهایی می‌شود. بر همین اساس، با افزایش زوایای الگوی مثلثی پیرامونی نیز میزان اثربخشی قاب

شکل ۸. نتایج تحلیل دینامیکی فزاینده (IDA) برای سازه های شبکه قطری دارا و بدون قاب خمشی داخلی، با زوایای پیکربندی ۴۹ درجه.

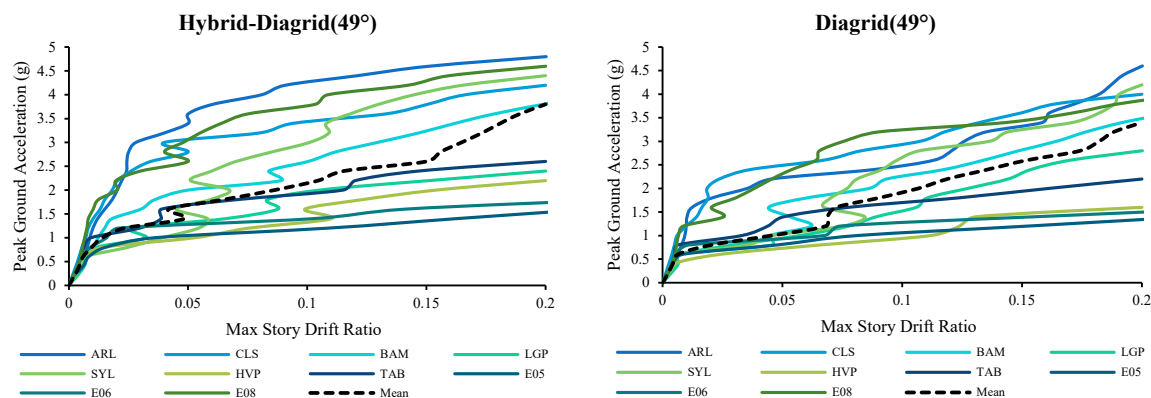


Fig. 8. The resulted IDA curves for the 24-story studied structures with skeletal configuration angle of 49°.

بر پایه نتایج به دست آمده، سازه شبکه قطری با زوایای پیکربندی ۴۹ درجه دارای عملکرد مناسب در حوزه رفتار غیرخطی به لحاظ مقابله با روند تصاعدی شدت لرزه ای است. به عبارت بهتر، سازه های شبکه قطری با زوایای کوچک الگوی مثلی

۴-۲- تحلیل دینامیکی فزاینده (IDA)

در مطالعه حاضر، ظرفیت فروریزش سازه های مطالعاتی تحت رکوردهای سه مولفه ای حوزه نزدیک مقیاس شده بر اساس بیشینه شتاب زمین^۱ مولفه TR، با استفاده از تحلیل های IDA مورد ارزیابی قرار گرفت و مقادیر پارامتر پاسخ لرزه ای نیز در سطوح مختلف شدت حرکت زمین مشخص شد [31,32]. در این مقاله، مقادیر بیشینه جابه جایی نسبی طبقات^۲ سازه های مطالعاتی در دو راستای X و Y به عنوان فاکتور نیاز لرزه ای^۳ و بیشینه شتاب زمین به عنوان اندازه شدت^۴ لحاظ شده است. شکل های (۸ تا ۱۰) نتایج تحلیل های دینامیکی فزاینده (IDA) برای سازه های شبکه قطری، با گام شتاب ۰.۲g را نشان می دهند.

1. Peak ground acceleration (PGA)
2. Max story drift ratio
3. Demand measure (DM)
4. Intensity measure (IM)

شکل ۹. نتایج تحلیل دینامیکی فزاینده (IDA) برای سازه‌های شبکه قطری دارا و بدون قاب خمشی داخلی، با زوایای پیکربندی ۶۷ درجه.

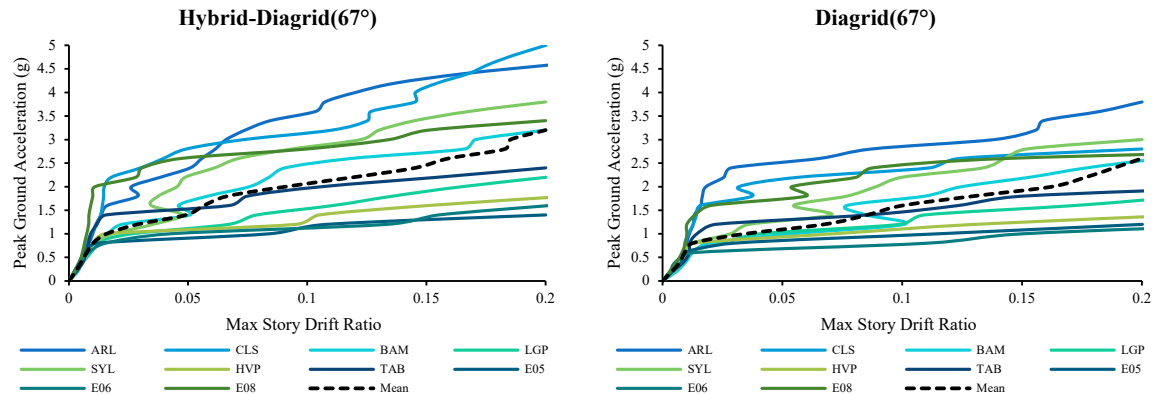


Fig. 9. The resulted IDA curves for the 24-story studied structures with skeletal configuration angle of 67°.

شکل ۱۰. نتایج تحلیل دینامیکی فزاینده (IDA) برای سازه‌های شبکه قطری دارا و بدون قاب خمشی داخلی، با زوایای پیکربندی ۷۴ درجه.

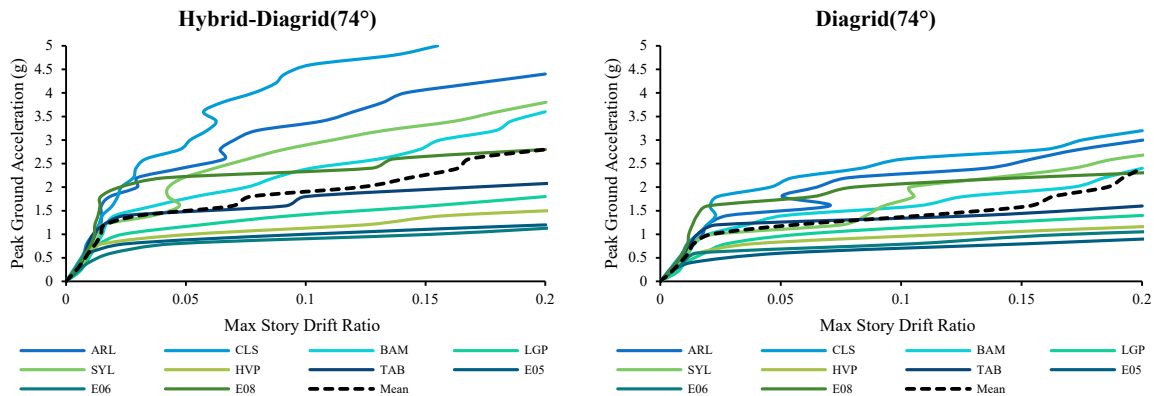


Fig. 10. The resulted IDA curves for the 24-story studied structures with skeletal configuration angle of 74°.

در برابر جنبش‌های نیرومند حاوی پالس سرعت مانند E05 و E06 بطور نسبی کمتر از رکوردهای فاقد پالس است. بدین ترتیب، رکوردهای حوزه نزدیک دارای موجک پیوسته با مقادیر بزرگ انرژی جنبشی در تاریخچه زمانی سرعت، سبب ایجاد خرابی با روند تندتری در اسکلت‌های مقاوم می‌شوند. نتایج پردازش‌های عددی روی نمودارهای حاصل از تحلیل‌های دینامیکی فزاینده مشخص می‌کند که چیدمان قاب‌های خمشی میانی، قابلیت جذب انرژی در سازه‌های شبکه قطری را افزایش می‌دهد.

همچنین، استفاده از زوایای بزرگ المان‌های مورب محیطی سطح تاثیر قاب خمشی داخلی را بر کارایی و عملکرد لرزه‌ای

پیرامونی، از ایمنی بالاتری در برابر رخداد فروریزش برخوردار هستند. شیب اولیه نمودارهای IDA نشان می‌دهد که سطح شتاب متناظر با کران بالایی رفتار الاستیک و خطی در سازه‌های شبکه قطری به نسبت قابل توجه می‌باشد. توصیف این مورد آن است که ساختارهای مقاوم مثلثی با ایجاد سازوکار تسلیم تحت سطوح بالاتر شتاب زلزله، دچار کاهش سختی و زوال مقاومت می‌گردند. به عنوان یک نتیجه‌گیری نیز با افزایش زوایای الگوی هندسی پیرامونی، روند ناپایداری دینامیکی سازه شبکه قطری با آهنگ سریع‌تری پدیدار می‌شود.

افزون بر مطلب فوق، ظرفیت فروریزش سازه‌های شبکه قطری

بیشینه مقادیر جابه‌جایی نسبی طبقات سازه به عنوان پارامتر نیاز مهندسی^۱ (EDP_d) در نظر گرفته شده است. همچنین، بر پایه ضوابط FEMA 356 نیز حدود وضعیت‌های عملکرد لرزه‌ای EDP_C برای سازه‌های مطالعاتی، مطابق با جدول (۵) لحاظ شد [35]. سپس، محاسبات نمودارهای شکنندگی سازه‌های مطالعاتی مطابق با توزیع احتمالاتی لوگ-نرمال، برای چهار حالت حدی استفاده بی‌وقفه^۲ (IO)، ایمنی جانی^۳ (LS)، آستانه فروریزش^۴ (CP) و ناپایداری احتمالی^۵ دینامیکی (GI) انجام شد. نتایج تحلیل شکست برای سازه‌های شبکه قطری با قاب خمشی میانی (Hybrid-Diagrid) و بدون قاب خمشی (Diagrid) در شکل‌های (۱۱ تا ۱۳) ارائه شده است.

جدول ۵. حدود وضعیت‌های عملکرد لرزه‌ای بر اساس جابه‌جایی نسبی [35].

Limit State	IO Performance Level	LS Performance Level	CP Performance Level	GI Performance Level
EDP_C	1%	2%	4%	10%

Table 5. The defined limit states based on drift parameter [31].

بر پایه این نتایج، در یک سطح معین از شدت لرزه‌ای، سازه شبکه قطری با زوایای پیکربندی ۴۹ درجه، کمترین احتمال تجاوز از سطوح عملکرد را دارد. در رابطه با این موضوع، افزایش زوایای المان مورب الگوی هندسی پیرامونی می‌تواند سبب کاهش نسبی تراز و قابلیت پایداری اسکلت مقاوم شبکه قطری در برابر رخداد حالات حدی بشود. بدین ترتیب، دانسته شد که سازه‌های شبکه قطری با زوایای کوچک پیکربندی محیطی تحت جنبش‌های نیرومند زمین، از میزان آسیب‌پذیری کمتری برخوردار هستند. مشخصات رفتار شکنندگی سازه‌های مطالعاتی در حالت حدی (GI) نشان می‌دهد که سازه‌های شبکه قطری با قاب

سازه‌های شبکه قطری بالا خواهد برد. نمود این مورد در نمودارهای IDA سازه‌های شبکه قطری دارا و بدون قاب خمشی، با الگوی هندسی ۶۷ و ۷۴ درجه (شکل‌های ۹ و ۱۰) متناظر با شدت لرزه‌ای وضعیت رخداد فروریزش قابل مشاهده است. وجود قاب‌های خمشی میانی در اسکلت شبکه قطری سبب می‌شود که این سازه با رویکرد مناسب‌تری، حوزه رفتار غیرالاستیک را تجربه نماید.

۴-۳- رفتار شکنندگی سازه‌های شبکه قطری

در این مقاله، ارزیابی احتمال رخداد وضعیت‌های عملکرد لرزه‌ای در سازه‌های شبکه قطری دارا و بدون قاب خمشی بر اساس تحلیل شکنندگی انجام گرفته است. بر همین اساس نیز روند آسیب‌پذیری ساختارهای مقاوم مطالعاتی بر پایه توابع شکست لرزه‌ای، بررسی شده است [33]. به منظور پیاده‌سازی احتمالاتی فراگذشت از حالات حدی مطابق با نتایج تحلیل‌های دینامیکی فزاینده (IDA)، از توزیع آماری لوگ-نرمال استفاده شده است [34]. تابع چگالی احتمال توزیع لوگ-نرمال به صورت فرمول زیر بدست می‌آید:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln(x) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

در رابطه (۳) فوق، میانگین و انحراف معیار مقادیر $w = \ln(x)$ در سطوح مختلف عملکرد به صورت، $\mu = E(w)$ و $\sigma = \sqrt{Var(w)}$ تعریف می‌شوند. بر همین اساس، مقادیر تابع شکست به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P[C | IM = im_i] = \quad (4)$$

$$P[EDP_d \geq EDP_C | IM = im_i] = 1 - \Phi\left(\frac{W - \mu}{\sigma}\right)$$

با توجه به فرمول (۴)، احتمال شرطی فروریزش سازه‌های مطالعاتی $P[C | IM = im_i]$ در سطوح مختلف شتاب زلزله (IM) بر پایه تابع توزیع نرمال استاندارد Φ بیان می‌شود. در این باره،

4. Collapse prevention (CP)
5. Global instability (GI)

1. Engineering demand parameter (EDP)
2. Immediate occupancy (IO)
3. Life safety (LS)

شکل ۱۱. نمودار شکنندگی سازه‌های شبکه قطری دارا و بدون قاب خمشی میانی با الگوی هندسی ۴۹ درجه.

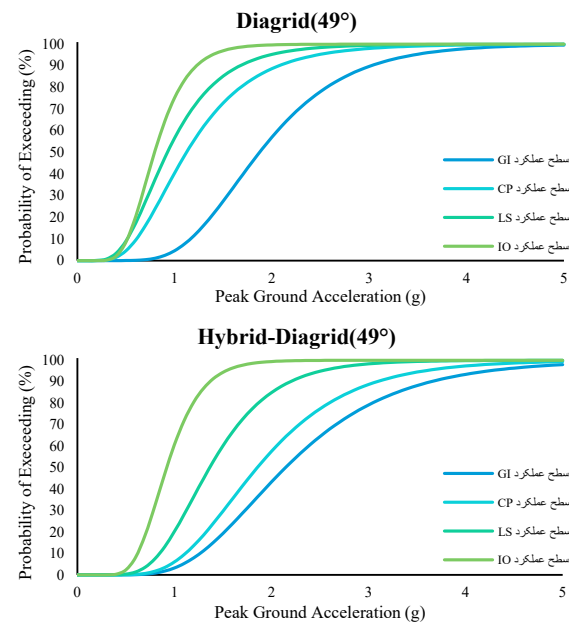


Fig. 11. The resulted fragility curves of the studied structures with skeletal diagonal angle of 49°.

شکل ۱۲. نمودار شکنندگی سازه‌های شبکه قطری دارا و بدون قاب خمشی میانی با الگوی هندسی ۶۷ درجه.

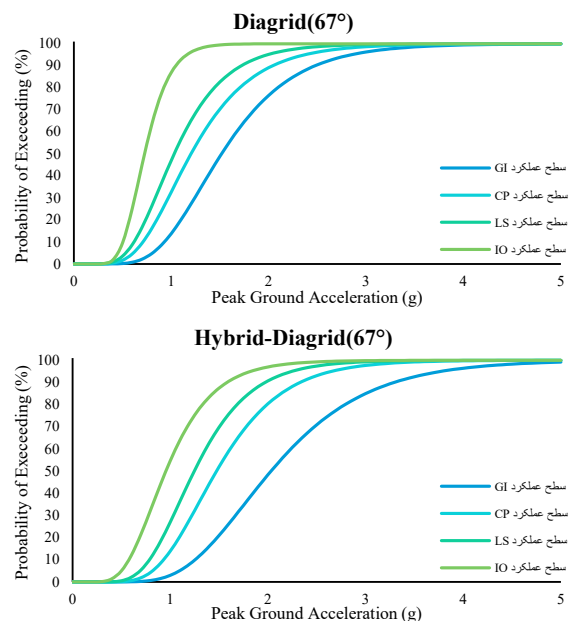


Fig. 12. The resulted fragility curves of the studied structures with skeletal diagonal angle of 67°.

خمشی داخلی (Hybrid-Diagrid) دارای ظرفیت مقاومتی بزرگی، در مقابله با وقوع ناپایداری کلی دینامیکی هستند. در این مورد، بر اساس تغییرات عملکرد مفاصل پلاستیک در ساختار قاب خمشی میانی (در بخش داخلی سازه شبکه قطری)، یک روند کندتر ایجاد و گسترش تدریجی ناپایداری همراه با فرآیند کاهش مقاومت المان‌های قطری پدیدار می‌شود. جدول (۶) شدت لرزه‌ای متناسب با احتمال فراگذشت از حالات حدی برابر با ۲۰، ۵۰ و ۸۰ درصد را برای سازه‌های مطالعاتی نشان می‌دهد. برطبق این جدول، در سطح خسارت یکسان، مقادیر شتاب متناظر با رویکرد احتمالاتی وضعیت‌های عملکردی به ویژه آستانه فروریزش (CP) و ناپایداری دینامیکی (GI)، در سازه‌های شبکه قطری دارای قاب خمشی میانی، بیشتر از ساختارهای مقاوم هم‌پایه بدون قاب خمشی است. بدین ترتیب، سختی سازه‌های شبکه قطری با به‌کارگیری قاب خمشی داخلی، در مقابل رویکرد تصاعدی خسارت لرزه‌ای افزایش می‌یابد. همچنین، استفاده از قاب خمشی داخلی در سازه‌های شبکه قطری، وقوع کماتش‌های الاستیک و غیرالاستیک در المان‌های مورب الگوی مثلی پیرامونی را محدود می‌سازد.

مطابق شکل (۱۴)، رفتار شکنندگی سازه‌های مطالعاتی در سطوح عملکرد لرزه‌ای، تحت جنبش‌های نیرومند انتخابی بر پایه مقادیر SRSS طیف‌های شتاب (S_a) مولفه LN و TR بررسی شده است. با ملاحظه این نمودارها دریافت می‌شود که رکوردهای حوزه نزدیک با اثر جهت‌داری پیش‌رونده، مقادیر احتمال رخداد حالات حدی بیشتری را در سازه‌های شبکه قطری ایجاد می‌کنند. بدین صورت که احتمال فراگذشت از وضعیت عملکرد ایمنی جانی (LS) در سازه شبکه قطری (Diagrid) با زوایای پیکربندی ۶۷ درجه، برای رکورد SYL حاوی پالس سرعت، برابر با ۵۳ درصد و تحت رکورد E08 دارای جهش پلکانی پرانرژی، حدود ۱۶ درصد است. این مورد

شکل ۱۳. نمودار شکنندگی سازه‌های شبکه قطری دارا و بدون قاب خمشی
میانی با الگوی هندسی ۷۴ درجه

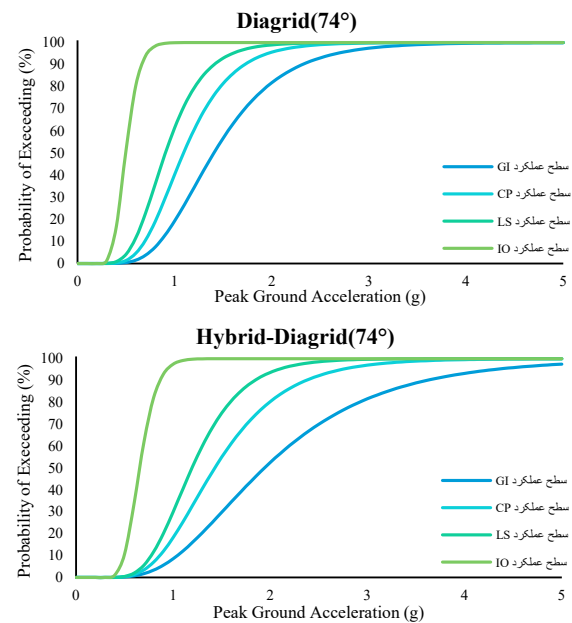


Fig. 13. The resulted fragility curves of the studied structures with skeletal diagonal angle of 74°.

نشان‌دهنده هماهنگی مشخصات مودال سازه‌های مطالعاتی با محتوای فرکانسی رکوردهای حوزه نزدیک حاوی آثار جهت‌داری پیش‌رونده، به ویژه پالس تاریخیچه زمانی سرعت است. در همین رابطه، دامنه تغییرات احتمالاتی رخداد وضعیت‌های عملکردی در سازه‌های مطالعاتی، تحت رکوردهای BAM، TAB و LGP بالاترین مقادیر شکنندگی

را دارد.

برپایه نتایج شکل (۱۴)، بطور نسبی کمترین و بیشترین تاثیر قاب خمشی میانی بر کاهش احتمال فراگذشت از سطوح عملکرد لرزه‌ای، به ترتیب در محدوده حالت حدی استفاده بی‌وقفه (IO) و آستانه فروریزش (CP) رخ داده‌است. همچنین، بهترین کارایی قاب خمشی داخلی بر جلوگیری از ناپایداری کلی دینامیکی (GI) ساختارهای مقاوم، مربوط به سازه شبکه قطری با زوایای ۶۷ درجه الگوی هندسی محیطی تحت رکورد BAM است. به عنوان یک نتیجه‌گیری، در طول روند

جدول ۶. مقادیر شدت لرزه‌ای حالات حدی، متناسب با احتمال رخداد ۲۰، ۵۰ و ۸۰ درصد در سازه‌های مطالعاتی.

Occurrence probability	Structure	Performance Level			
		IO	LS	CP	GI
20%	Diagrid (49°)	0.60	0.63	0.75	1.37
	Hybrid-Diagrid (49°)	0.71	1.00	1.33	1.52
	Diagrid (67°)	0.57	0.74	0.85	1.10
	Hybrid-Diagrid (67°)	0.69	0.92	1.09	1.48
	Diagrid (74°)	0.41	0.68	0.81	1.01
	Hybrid-Diagrid (74°)	0.54	0.90	1.03	1.29
50%	Diagrid (49°)	0.79	0.93	1.12	1.87
	Hybrid-Diagrid (49°)	0.92	1.37	1.85	2.14
	Diagrid (67°)	0.73	1.03	1.21	1.52
	Hybrid-Diagrid (67°)	0.96	1.25	1.48	2.03
	Diagrid (74°)	0.50	0.91	1.09	1.40
	Hybrid-Diagrid (74°)	0.66	1.19	1.43	1.94
80%	Diagrid (49°)	1.06	1.36	1.67	2.55
	Hybrid-Diagrid (49°)	1.19	1.86	2.58	3.02
	Diagrid (67°)	0.92	1.44	1.70	2.08
	Hybrid-Diagrid (67°)	1.33	1.68	1.98	2.78
	Diagrid (74°)	0.60	1.20	1.47	1.94
	Hybrid-Diagrid (74°)	0.79	1.58	1.98	2.90

Table 6. The calculated seismic intensities corresponding to the probability of exceeding performance levels of 20, 50 and 80%.

شکل ۱۴. نتایج تحلیل شکنندگی سازه‌های مطالعاتی تحت رکوردهای زلزله انتخابی، بر اساس مقادیر SRSS طیف‌های شتاب (S_a) مولفه‌های LN و TR.

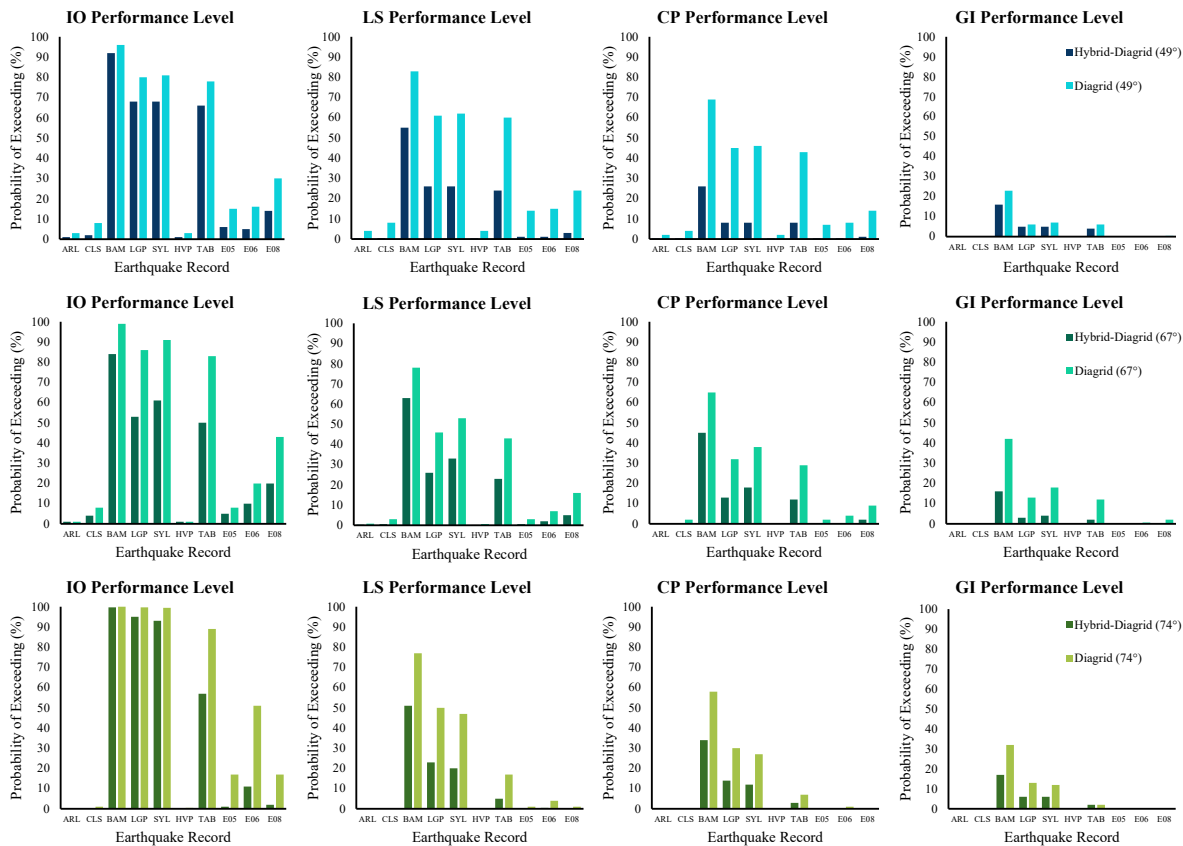


Fig. 14. The results of fragility analysis of the studied structures based on the rule of SRSS spectral combination.

قطری، به ویژه قبل از رخداد وضعیت فروریزش می‌شود. نکته دیگر آن که شدت اثر قاب خمشی داخلی، بر کنترل احتمالاتی فراگذشت از سطوح عملکرد لرزه‌ای، وابسته به زوایای المان‌های مورب پیکربندی پیرامونی سازه شبکه قطری می‌باشد. بر طبق نتایج تحلیل شکنندگی سازه‌ها در حالت حدی CP، زاویه ۴۹ درجه برای الگوی هندسی پیرامونی موثرترین پیکربندی را برای چگونگی به‌کارگیری قاب خمشی میانی در رفتار دینامیکی اسکلت‌های مقاوم شبکه قطری، ایجاد می‌نماید. بنابراین، خرابی کلی در سازه‌های ترکیبی (Hybrid-Diagrid) تحت رکوردهای حوزه نزدیک نیرومند، همراه با مقادیر بزرگ استهلاك انرژی در المان‌های اصلی رخ می‌دهد.

صعودی آسیب لرزه‌ای، میزان مشارکت قاب خمشی بر بهبود عملکرد سازه‌های شبکه قطری، یک روند افزایشی را در پی خواهد داشت.

منحنی‌های سطح نهایی خسارت لرزه‌ای (شکل ۱۵)، برای اسکلت‌های مقاوم مطالعاتی نشان می‌دهند که سازه‌های شبکه قطری با قاب خمشی داخلی (Hybrid-Diagrid)، ظرفیت باربری جانبی بیشتری نسبت به سازه‌های هم‌پایه بدون قاب خمشی میانی (Diagrid) دارند. بر همین اساس، روند شکست در سازه‌های شبکه قطری بدون قاب خمشی داخلی، با آهنگ سریع‌تری نسبت به سازه هم‌پایه دارای قاب خمشی پدیدار می‌شود. گروه قاب‌های خمشی میانی، سبب افزایش نسبی مقاومت اسکلت مقاوم در محدوده رفتار غیرخطی سازه شبکه

شکل ۱۵. مقایسه رفتار شکنندگی سازه های شبکه قطری دارا و بدون قاب خمشی با زوایای پیکربندی پیرامونی مختلف در سطح عملکرد آستانه فروریزش (CP)؛ (الف) الگوی هندسی ۴۹ درجه، (ب) الگوی هندسی ۶۷ درجه، (پ) الگوی هندسی ۷۴ درجه.

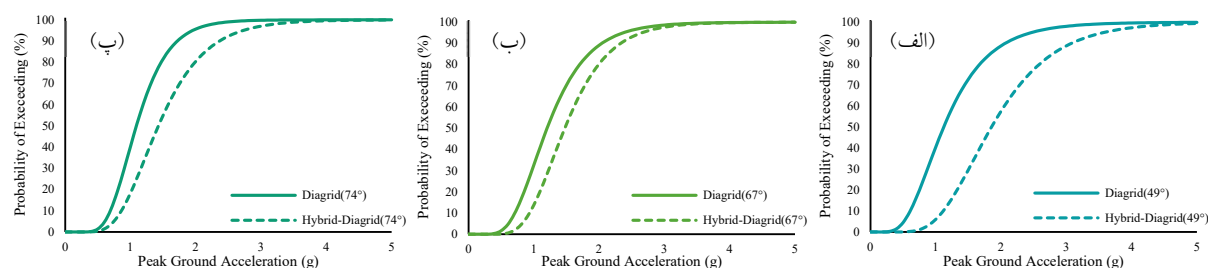


Fig. 15. Comparison between the resulted fragility curves of the studied diagrid structures with and without internal moment frames corresponding to the CP performance level.

۵- نتیجه گیری

همچنین، شیب اولیه نمودارهای IDA برای سازه های شبکه قطری نشان دهنده سازوکار مطلوب تسلیم این سازه ها در برابر رویکرد تصاعدی خسارت لرزه ای است.

- با ارزیابی نمودارهای IDA مشاهده شد که کاهش زوایای المان های مورب محیطی در سازه های شبکه قطری سبب می شود که ایمنی در برابر رخداد احتمالی وضعیت فروریزش در اسکلت های مقاوم افزایش یابد. در این رابطه، سازه شبکه قطری با زوایای پیکربندی پیرامونی ۴۹ درجه، از پایداری دینامیکی بیشتری در مقابل رکوردهای حوزه نزدیک برخوردار است.

- منحنی های شکست سازه های مطالعاتی نشان داد که زوایای کوچک المان مورب پیکربندی پیرامونی، کاهش احتمال رخداد وضعیت های عملکرد لرزه ای و در نتیجه افزایش ظرفیت مقاومت سازه شبکه قطری را به دنبال خواهد داشت. بر طبق این موضوع، سازه شبکه قطری با زوایای پیکربندی ۷۴ درجه، دارای بیشترین مقادیر فراگذشت از حالات حدی می باشد.

- با بررسی نتایج تحلیل شکنندگی اسکلت های مقاوم مورد نظر، ملاحظه شد که قاب خمشی داخلی سبب افزایش توان لرزه ای سازه شبکه قطری به ویژه در سطح عملکرد ناپایداری احتمالی دینامیکی (GI) می شود. بر همین اساس، روند خرابی کلی در سازه های شبکه قطری بدون قاب خمشی میانی (Diagrid) با آهنگ سریع تری نسبت به سازه هم پایه دارای قاب

در این مقاله، ارزیابی رفتار شکنندگی سازه های شبکه قطری در دو حالت سیستم مقاوم دارای قاب خمشی داخلی با نام Hybrid-Diagrid و نیز بدون قاب خمشی با نام Diagrid، تحت جنبش های نیرومند حوزه نزدیک به انجام رسید. بدین ترتیب، پارامترهای پاسخ لرزه ای این سازه ها بر پایه نتایج تحلیل های تاریخیچه زمانی غیرخطی (NTHA) و دینامیکی فزاینده (IDA) محاسبه شده اند. پیاده سازی تحلیلی توابع شکست برای سازه های شبکه قطری مطالعاتی در وضعیت های عملکرد استفاده بی وقفه (IO)، ایمنی جانی (LS)، آستانه فروریزش (CP) و ناپایداری احتمالی دینامیکی (GI) بر اساس توزیع احتمالاتی لوگ-نرمال انجام گردید. نتایج مهم از ارزیابی عملکرد سازه های مورد مطالعه در این مقاله به شرح زیر است:

- بر پایه نتایج تحلیل های تاریخیچه زمانی غیرخطی، استفاده از قاب خمشی میانی در اسکلت های شبکه قطری سبب محدود نمودن توزیع تغییرشکل، به ویژه در طبقات انتهایی می شود. در این باره، قاب خمشی داخلی در کاهش مقادیر تغییر مکان طبقات سازه های شبکه قطری دارای مشارکت ناچیز و کوچک می باشد.

- از نتایج تحلیل های دینامیکی فزاینده برداشت شد که تغییر الگوی هندسی پیرامونی سازه های شبکه قطری، بر میزان مشارکت قاب خمشی داخلی در قابلیت جذب انرژی زلزله، تاثیر گذار است.

- subjected to mainshock-aftershock sequences. *Structural Design of Tall and Special Buildings*, vol. 29, no. 15, DOI: 10.1002/tal.1786.
- [6] Hu, S. & Wang, W. (2021). Comparative seismic fragility assessment of mid-rise steel buildings with non-buckling (BRB and SMA) braced frames and self-centering energy-absorbing dual rocking core system. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 142, DOI: 10.1016/j.soildyn.2020.106546.
- [7] Mele, E., Torenio, M., Brandonisio, G. & De Luca, A. (2014). Diagrid structures for tall buildings: case studies and design considerations. *Structural Design of Tall and Special Buildings*, vol. 23, no. 2, pp. 124-145.
- [8] Moradi, M. & Abdolmohammadi, M. (2020). Seismic fragility evaluation of a diagrid structure based on energy method. *Constructional Steel Research*, vol. 174, DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106311.
- [9] Rofooei, F.R. & Seyedkazemi, A. (2020). Evaluation of the Seismic Performance Factors for Steel Diagrid Structural Systems Using FEMA P-695 and ATC-19 Procedures. *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 18, pp. 4873-4910.
- [10] Mohsenian, V., Padashpour, S. & Hajirasouliha, I. (2020). Seismic Reliability Analysis and Estimation of Multilevel Response Modification Factor for Steel Diagrid Structural Systems. *Building Engineering*, vol. 29, DOI: 10.1016/j.jobe.2019.101168.
- [11] Dabbaghchian, I., Mirghaderi, S.R. & Sayadi, S. (2021). Comparison of Seismic Behavior of the Eccentric and Conventional Diagrid Systems. *Structural Design of Tall and Special Buildings*, vol. 30, no. 3, DOI: 10.1002/tal.1824.
- [12] Teran-Gilmore, A., Roeslin, S., Tapia-Hernández, E. & Cuadros-Hipólito, E. (2021). Displacement-Based Design of Tall Earthquake-Resistant Diagrid Systems. *Building Engineering*, vol. 35, DOI: 10.1016/j.jobe.2020.102022.
- [13] Song, S. & Zhang, C.H. (2020). Lateral Stiffness and Preliminary Design Methodology of Twisted Diagrid Tube Structures. *Structural Design of Tall and Special Buildings*, vol. 29, no. 18, DOI: 10.1002/tal.1809.
- [14] Cascone, F., Faiella, D., Tomei, V. & Mele, E. (2021). Seismic fragility assessment of hybrid-diagrid structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 49, no. 1, pp. 1-21.
- خمش (Hybrid-Diagrid)، پدیدار خواهد شد. در این مورد، کمترین تاثیر قاب خمشی بر بهبود رفتار غیرخطی سازه شبکه قطری، در وضعیت عملکرد استفاده بی وقفه (IO) رخ داده است. - بیشترین مقادیر احتمالاتی رخداد سطح عملکرد آستانه فروریزش (CP) تحت رکوردهای حوزه نزدیک حاوی پالس سرعت شامل BAM، LGP و SYL در اسکلت‌های مقاوم لرزه‌ای ایجاد شده است. این مورد بیان‌کننده هماهنگی مشخصات مودال سازه‌های شبکه قطری و ویژگی‌های طیف فوریه جنبش‌های نیرومند زمین با اثر جهت‌داری پیشرونده می‌باشد.
- بر پایه ارزیابی‌های صورت گرفته، دریافت شد که حدود تاثیرگذاری چیدمان قاب‌های خمشی در بخش میانی پلان بر بهبود شاخص‌های شکنندگی سازه‌های شبکه قطری، وابسته به تغییر الگوی مثلثی پیرامونی است. در این باره، دانسته شد که افزایش زوایای پیکربندی محیطی سازه شبکه قطری می‌تواند بطور نسبی میزان اثر بخشی چیدمان قاب‌های خمشی داخلی بر عدم وقوع احتمالی مود کماتش ناهمگون در المان‌های اصلی سازه را بیشتر نماید.

۶- مراجع

- [1] Jaiswal, K., Wald, D. & D'Ayala, D. (2011). Developing empirical collapse fragility functions for global building types. *Earthquake Spectra*, vol. 27, no. 3, DOI: 10.1193/1.3606398.
- [2] Anvarsamarin, A., Rofooei, R.F. & Nekooei, M. (2020). Torsion effect on the RC structures using fragility curves considering with soil-structure interaction. *Rehabilitation in Civil Engineering*, vol. 8, no. 1, pp. 1-21.
- [3] Mashhadiali, N. & Kheyroddin, A. (2018). Seismic performance of concentrically braced frame with hexagonal pattern of braces to mitigate soft story behavior. *Engineering Structures*, vol. 175, pp. 27-40.
- [4] Mashhadiali, N. & Kheyroddin, A. (2019). Quantification of the seismic performance factors of steel hexagrid structures. *Constructional Steel Research*, vol. 157, pp. 82-92.
- [5] Wang, X., Wen, W. & Zhai, Ch. (2020). Vulnerability assessment of a high-rise building

- (PEER), Ground Motion Database, University of California Berkeley.
- [27] Kohrangi, M., Vamvatsikos, D. & Bazzurro, P. (2018). Pulse-like versus non pulse-like ground motion records: Spectral shape comparisons and record selection strategies. *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, vol. 48, no. 1, pp. 46–64.
- [28] Heshmati, M., Khatami, A. & Shakib, H. (2021). FEMA P695 Methodology for Safety Margin Evaluation of Steel Moment Resisting Frames Subjected to Near-Field and Far-Field Records. *SN Applied Sciences*, vol. 3, DOI: 10.1007/s42452-021-04230-2.
- [29] Ezzodin, A., Ghodrati Amiri, G. & Raissi Dehkordi, M. (2021). Simulation of fling step pulse of near-fault ground motion by using wavelet smoothening and improved bell-shaped function. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 140, DOI: 10.1016/j.soildyn.2020.106462.
- [30] CSI, User Guide PERFORM 3D. (2011). Nonlinear Analysis and Performance Assessment for 3D Structures”. Berkeley, California, USA.
- [31] Vamvatsikos, D. & Cornell, A.C. (2004). Applied incremental dynamic analysis. *Earthquake Spectra*, vol. 20, no. 2, pp. 523–553.
- [32] Vamvatsikos, D. & Cornell, A.C. (2006). Direct estimation of the seismic demand and capacity of oscillators with multi-linear static pushovers through IDA. *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, vol. 35, no. 9, pp. 1097–1117.
- [33] Porter, K., Kennedy, R. & Bachman, R. (2007). Creating fragility functions for performance-based earthquake engineering. *Earthquake Spectra*, vol. 23, no. 2, pp. 471–489.
- [34] Mai, C., Konakli, K. & Sudret, B. (2017). Seismic fragility curves for structures using non-parametric representations. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, vol. 11, pp. 169–186.
- [35] FEMA 356. (2000). Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings. Federal Energy Management Agency (FEMA), Reston, Virginia.
- (2021). A Structural Grammar Approach for the Generative Design of Diagrid-Like Structures. *Buildings*, vol. 11(3), DOI: 10.3390/buildings11030090.
- [15] Asgarian, B., Sadrinezhad, A. & Alanjari, P. (2010). Seismic performance evaluation of steel moment resisting frames through incremental dynamic analysis. *Construction Steel Research*, vol. 66, no. 2, pp. 178–190.
- [16] Ahleghagh, S. & Mirghaderi, S.R. (2020). Decoupling the Strength and Drift Criteria in Steel Moment-Resisting Frames. *Structural Design of Tall and Special Buildings*, vol. 29, no. 17, DOI: 10.1002/tal.1804.
- [17] Vahdani, R., Gerami, M. & Razi, M. (2017). Seismic Vulnerability Assessment of Steel Moment-Resisting Frames Based on Local Damage. *Earthquake and Tsunami*, vol. 11(5), DOI: 10.1142/S1793431117500166.
- [18] The Iranian National Building Code. (2014). Steel Structures. Issue 10, Tehran, Iran. (In Persian)
- [19] Standard No. 2800. (2014). Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings. 4th Edition, Tehran, Iran. (In Persian)
- [20] CSI, Analysis Reference Manual for SAP2000. (2010). Berkeley, California, USA.
- [21] The Iranian National Building Code. (2014). Design Loads for Buildings. Issue 6, Tehran, Iran. (In Persian)
- [22] Asadi, E. & Adeli, H. (2018). Seismic performance factors for low-to mid-rise steel diagrid structural systems. *Structural Design of Tall and Special Buildings*, vol. 27, no. 15, DOI: 10.1002/tal.1505.
- [23] Heshmati, M. & Aghakouchak, A.A. (2019). Quantification of seismic performance factors of steel diagrid system. *Structural Design of Tall and Special Buildings*, vol. 28, no. 3, DOI: 10.1002/tal.1572.
- [24] ASCE/SEI 41-17. (2017). Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.
- [25] FEMA P-695. (2009). Quantification of Building Seismic Performance Factors. Federal Energy Management Agency (FEMA), Redwood City, California.
- [26] Pacific Earthquake Engineering Research Center

Probabilistic evaluation of the fragility of diagrid structures with and without internal moment frames and various perimeter geometric configurations

Mahyar Roshani¹, Afshin Meshkat-Dini^{2*}, Ali Massumi³

1. M.Sc. Graduate, Department of Civil Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran.

2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran.

3. Professor, Department of Civil Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran.

* meshkat@khu.ac.ir

Abstract

The evaluation of the fragility functions is an analytical approach that allows different ground motions to be used at varying intensity levels and represent various characteristics of low-intensity and high-intensity shakings. The fragility curves demonstrate the structure's probability of collapse, or other limit states, as a function of some ground motion intensity measures (IM). The intensity measure is often quantified by spectral acceleration (S_a) or peak ground acceleration (PGA). Based on the statistical procedures, the parameters of the fragility functions are computed by assessing the results of nonlinear dynamic time history analyses. Therefore, the probability of failure associated with a prescribed criterion (e.g., the maximum inter-story drift) is estimated based on the probabilistic distribution relations.

This paper evaluates the effects of internal flexural frames on the seismic performance of diagrid structures based on fragility curves. This evaluation is achieved by designing a group of 24-story studied diagrid models with various diagonal angles of 49, 67, and 74 according to the Iranian Standard No. 2800 (4th edition) and the Iranian National Building Code (Steel Structures-Issue 10). Then, some specific interior gravity frames of the studied diagrid models are replaced with bending frames. The seismic vulnerability of the studied diagrid structures with and without internal bending frames is assessed using nonlinear time history and incremental dynamic analyses (IDA) under near-field earthquake records containing different directivity effects. Finally, the fragility curves for the studied structures were obtained based on the lognormal probabilistic distribution function for the seismic performance limit states including IO, LS, CP, and global instability (GI). Moreover, the seismic performance levels of the studied structures were determined based on the FEMA 356.

The results of performed nonlinear time history analyses indicate that the application of internal bending frames in diagrid structures would reduce the value of inter-story drift in upper floor levels, especially when the angles of exterior diagonal members are large. The results also show that the global instability of diagrid structures without internal bending frames can occur at a faster rate than the skeletal models with internal bents. Also, the contribution of the internal bending frames in improving the nonlinear behavior of diagrid structures depends on the perimeter triangular patterns. Due to this dependency, the increase in the angle of the inclined members in skeletal geometric configuration can increase the effectiveness of the internal bending frames in preventing the occurrence of global dynamic instability. The fragility curves of the studied diagrid structures illustrate that the internal bending frames reduce potentially excessive seismic performance levels. Furthermore, the internal bending frames amplify the seismic energy dissipation capability of the diagrid structures.

Keywords: Diagrid structure, Fragility curve, Incremental dynamic analysis, Collapse, Seismic performance level.