

Analytical Evaluation of the Effect of Geometry and Local Configuration of Diagrid Structures on the Performance and Robustness Component of Seismic Resilience

Maryam Khalajzadeh¹, Safoora Morshed-Shekarchi², Afshin Meshkat-Dini^{3*} , Ali Massumi⁴

1. M.Sc. Graduate, Department of Civil Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran.
2. PhD Student, Department of Civil Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran.
3. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran.
4. Professor, Department of Civil Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran.

Abstract

Nowadays, with the advancement of science and technology and the growing population, constructing high-rise structures is essential for the optimal use of urban spaces. Diagrid structure is an extended resistant skeleton based on a framed tube system which has been considered in high-rise building constructions due to its architectural aesthetics and configurational character. These general characteristics are demonstrated by reducing the consuming materials by removing columns and applying a grid configuration of diagonal elements. The main structural element in these resistant structures is triangular modules that consist of two diagonal members and a horizontal connecting beam. The triangular modules and the angle of the diagonal members are two factors affecting the lateral stiffness and efficiency of these structures. Finding the optimal angle in design is an important step and depends on parameters such as shape, floor height, aspect ratio, lateral load distribution, and building location for each structure.

The seismic behavior of such a structure is affected by the configuration angle and the axial capacity of the diagonal members. With the dominance of axial function, the diagonal elements also resist lateral loads caused by wind and earthquakes and also play a key role in limiting the amplitude of inelastic behavior. Therefore, the seismic performance of diagonal elements would reduce the process of formation and expansion of nonlinear zones in diagrid structures. According to the lack of guiding principles for the integrated design of diagrid structures, there is a high demand for extensive research in collecting comprehensive and effective criteria for estimating stiffness and strength parameters, establishing dynamic stability, and understanding how the resilience of these structures changes due to dynamic loads caused by wind and earthquake.

It should be noted that the destructive effects of large earthquakes quickly lead to human and financial losses and spread to various economic, social, political, and cultural dimensions of human society. Considering the continuity of these different dimensions and their influence on each other, it is important to consider a suitable and coherent multifaceted approach to manage and reduce the destructive effects of unexpected events. The resilience assessment is one of the integrated approaches to managing and reducing the destructive effects of disasters. There is an urgent need to pay attention to the measurement of the resilience index and the construction of concepts and relationships between scientific research on this index and practical measures, especially on all types of resistant skeletons. Moreover the explanation of this parameter has been done mostly in the field of resilience in communities and cities.

In this study, the seismic performance of three 20-story studied diagrid buildings with the same structural system under a set of near-field records has been evaluated. The particular focus of this study is on evaluating the effect of the geometry and configuration of the resistant skeleton on the ground floor and the entrance section on behavioural characteristics. In this paper, an analytical study has been run on the results of incremental dynamic analysis (IDA), fragility curve, and the seismic resilience component under the selected earthquake records. The analytical results of this study show a close convergence between the behavioural characteristics of all three studied structures.

Review History

Received: Aug 8, 2024

Revised: May 10, 2025

Accepted: Jul 19, 2025

Keywords

Diagrid Structure
Structural Configuration,
Near-field Record
Incremental Dynamic
Analysis (IDA)
Fragility Curve
Seismic Resilience

* Corresponding Author Email: meshkat@khu.ac.ir - ORCID: 0009-0003-5234-9554



نگرش تحلیلی بر تأثیر هندسه و پیکربندی موضعی سازه‌های شبکه قطری بر عملکرد و مؤلفه استحکام تاب‌آوری لرزه‌ای

مریم خلیج‌زاده^۱، صفورا مرشد شکرچی^۲، افشین مشکوه‌الدینی^{۳*}، علی معصومی^۴

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشگاه خوارزمی، تهران.

۲. دانشجوی دکتری مهندسی سازه، دانشگاه خوارزمی، تهران.

۳. دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران.

۴. استاد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران.

چکیده

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۸ امروزه با پیشرفت علم و فناوری و همچنین رشد روز افزون جمعیت، ساخت سازه‌های بلند مرتبه برای استفاده

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۲۰ بهینه از فضاهای شهری امری ضروری است. سازه شبکه قطری به عنوان یک ساختار تعمیم‌یافته بر پایه قاب خمشی

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۸ محیطی و به دلیل ماهیت معماری و قابلیت پیکربندی، در ساخت سازه‌های بلند مرتبه مورد توجه مهندسان طراح قرار

کلمات کلیدی

شبکه قطری

پیکربندی سازه

رکورد حوزه نزدیک

تحلیل IDA

نمودار شکنندگی

تاب‌آوری لرزه‌ای

گرفته است. المان اصلی سازه‌ای در این ساختارهای مقاوم، پیکره‌های مثلثی است. پیکره مثلثی و زاویه اعضای قطری دو عامل مؤثر بر سختی جانبی و کارایی این سازه‌ها می‌باشد. اعضای قطری نیز با حاکمیت عملکرد محوری در برابر بارهای جانبی ناشی از باد و زلزله مقاومت کرده و نقش اساسی در محدود نمودن گسترش حوزه‌های غیرخطی دارند. شایان ذکر است که به علت نبود ضوابط طراحی یکپارچه برای سازه‌های شبکه قطری، ضرورت انجام پژوهش‌های گسترده در زمینه تدوین معیارهای جامع و مؤثر در برآورد پارامترهای سختی و مقاومت، برقراری پایداری دینامیکی و چگونگی تغییرات تاب‌آوری این سازه‌ها در برابر بارهای دینامیکی ناشی از باد و زلزله، ملاحظه می‌شود. در این پژوهش، عملکرد لرزه‌ای سه سازه هم‌ساختار شبکه قطری با بلندای ۲۰ طبقه تحت مجموعه‌ای از رکوردهای حوزه نزدیک ارزیابی شده است. دیدگاه خاص این پژوهش در ارزیابی میزان تأثیرگذاری هندسه و پیکربندی اسکلت مقاوم در طبقه همکف و بخش ورودی سازه، روی پارامترهای مشخصه رفتاری است. یک مطالعه تحلیلی بر نتایج تحلیل دینامیکی فزاینده، نمودارهای شکنندگی و مؤلفه تاب‌آوری لرزه‌ای تحت رکوردهای انتخابی صورت گرفته است. نتایج و آورده‌های تحلیلی این پژوهش، نشان از همگرایی نسبی و همخوانی به نسبت نزدیک میان ویژگی‌های رفتاری هر سه سازه مطالعاتی دارد. پاره‌ای تفاوت‌های نسبی نیز به سبب تعبیه ورودی با ساختار هندسی متفاوت در مشخصه‌های رفتاری سازه‌های مطالعاتی ملاحظه می‌شود.

۱- مقدمه

سازه‌های شبکه قطری تحت بار باد نتیجه گرفت که این ساختارهای مقاوم با زاویه تندتر نسبت به تراز پایه، دارای عملکرد بهتری خواهند بود [6]. طبق تحقیقات کیم و کنگ تعریف زاویه اعضای قطری در حدود ۶۰ تا ۷۰ درجه، کارآمدترین زاویه برای مقاومت در برابر بارهای جانبی و ثقلی است [7]. با توجه به تحقیقات انجام شده توسط حشمتی و همکاران نیز برای بهبود عملکرد سازه‌های شبکه قطری می‌توان یک هسته مقاوم مرکزی با زاویه چیدمانی کمتر یا برابر با زاویه پیکربندی در ساختار پیرامونی، بکار برد [8]. طبق تحقیقات انجام شده توسط صادقی و رفویی نیز کاربرد مهاربندهای کمانش‌تاب^۲ (BRB) باعث تغییر در عملکرد لرزه‌ای و افزایش نسبی ضریب رفتار R می‌شود [9]. حشمتی و آقاچوچک برای سازه‌های شبکه قطری کوتاه و میان مرتبه، ضریب رفتار $R=4/5$ را پیشنهاد دادند [10].

لی و همکاران با بررسی عملکرد لرزه‌ای و سنجش تاب‌آوری برای مجموعه‌ای از سازه‌های شبکه قطری ۳۳ طبقه با هندسه ناهمگون و بخش‌های پیش‌آمده (برجسته) و پس‌رفته (تورفته) در پوسته پیرامونی، ضریب شکل‌پذیری $R=3$ را پیشنهاد دادند [11]. مرادی و عبدالمحمدی با معیارسازی روش انرژی، یک روند تحلیلی برای بررسی رفتار سازه‌های شبکه قطری بر پایه نتایج تحلیل‌های IDA و پردازش نمودارهای شکنندگی پایه‌ریزی نمودند [12]. نتایج تحقیق وحدانی و همکاران روی عملکرد لرزه‌ای سازه‌های قاب خمشی با استفاده از نمودارهای شکنندگی حاکی از دامنه بزرگ آسیب‌پذیری تحت رکوردهای حوزه نزدیک است [13].

زنتر و گوندل به بررسی روش‌های مختلف ارزیابی نمودارهای شکنندگی همچون، شبیه‌سازی عددی مرتبط با رگرسیون خطی (LR)، برآورد ماکزیمم احتمال (MLE)، پرداخته و معایب و مزایا هر کدام را مطرح نمودند [14]. ژو و همکاران با بررسی تأثیر رکوردهای حوزه نزدیک بر روی نمودارهای شکنندگی و تاب‌آوری دریافتند که دامنه‌های عددی مربوطه تحت رکوردهای حوزه نزدیک، پایین‌تر از رکوردهای حوزه دور می‌باشند [15].

توجه به ساختار و هندسه ورودی در ساختمان‌ها با کاربری متفاوت در فضای شهری نقش زیادی در زیبایی معماری و کارایی سازه دارد. همچنین با توجه به جامع نبودن مطالعات پیشین روی

سازه‌های شبکه قطری^۱ (دیاگرید) به دلیل قابلیت پیکربندی و ماهیت معماری، در سال‌های اخیر مورد توجه مهندسان و معماران قرار گرفته‌اند. بکار بردن اعضای قطری در هندسه سازه‌های بلند مرتبه سابقه پیشین دارد. این‌گونه ساختارها در طراحی سازه‌های با دهانه‌های بزرگ و تغییرات در پیکربندی و انحنا در هندسه، کاربرد گسترده دارند. ایده اصلی برای ابداع و توسعه این نوع پیکربندی سازه‌ای، کاهش مصرف مصالح در حذف ستون‌های عمودی و کاربرد شبکه المان‌های مورب بوده است. این ساختار سازه‌ای بر پایه یک چیدمان کامل از بخش‌های صلب مثلثی، متشکل از دو عضو قطری و یک تیر پیوند، ساخته می‌شود [1, 2].

اعضای قطری واقع در محیط پلان سازه، با عملکرد حاکم محوری در برابر بارهای وزنی و جانبی ناشی از باد و زلزله مقاومت می‌کنند. تیرهای افقی پیوند پانل‌ها نیز نقش زیادی در بهبود رفتار و جلوگیری از گسترش حوزه‌های غیرخطی دارد. پیکره صلب مثلثی و زاویه اعضای قطری، دو عامل تأثیرگذار در کارایی و سختی جانبی سازه‌های شبکه قطری است. زاویه اعضای قطری به پارامترهایی چون شکل، ارتفاع طبقه، توزیع بار جانبی، نسبت هندسی سازه بستگی داشته و برای هر سازه به صورت منحصر به فرد تعیین می‌شود. رفع تمرکز نسبی برآیندهای نیرویی، یکی از مزیت‌های این سیستم است. بدین ترتیب، با افزایش احتمال وقوع بارگذاری‌های شدید یافته و همچنین برای بهبود پاسخ‌های غیرخطی می‌توان در اندازه زاویه اعضای قطری، هندسه و آرایش قرارگیری اعضای مورب، تغییرات لازم را ایجاد نمود. نتایج تحقیقات مونت‌تری و همکاران نشان می‌دهد که تغییر در اندازه زوایای اعضای قطری به طور مستقیم روی مؤلفه‌های سختی و برشی تأثیرگذار است [3, 4].

تحقیقات انجام شده توسط اسدی و همکاران نشان می‌دهد که رفتار لرزه‌ای این سازه‌ها متأثر از زاویه پیکربندی و ظرفیت محوری اعضای قطری است. سازه‌های شبکه قطری به دلیل پیکربندی خاص و قابلیت بالای مقاومتی، دارای ظرفیت بسیار قابل توجه برای حفظ ایستایی و پایداری به ویژه در ترازهای عملکردی نزدیک به فروریزش کلی هستند [5]. مون با ارزیابی رفتار

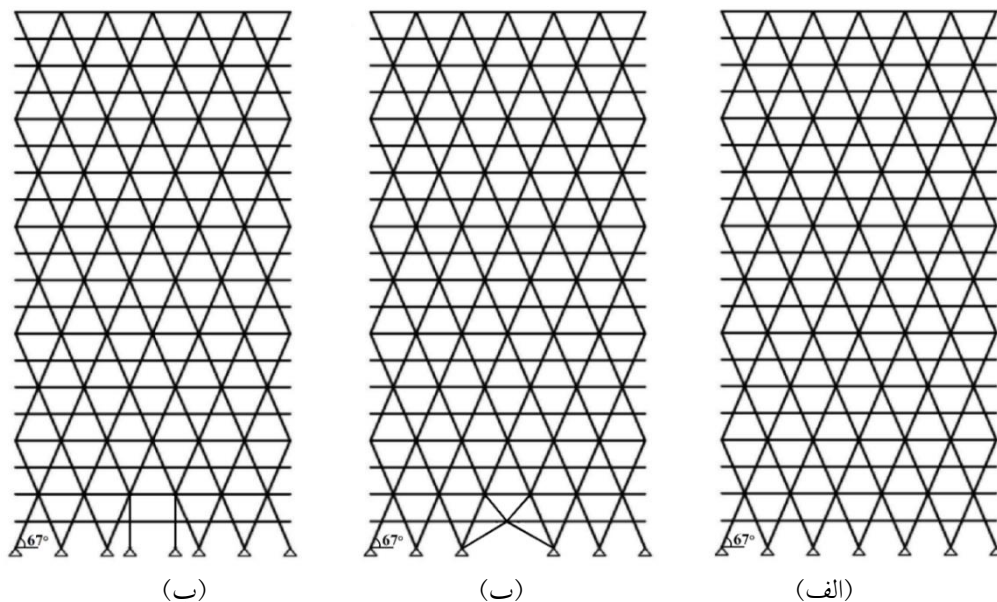
² Buckling Restrained Brace (BRB)¹ Diagrid

پیکربندی ۶۷ درجه و آرایش‌های متفاوت ورودی می‌باشند (شکل ۱). ساختار و طراحی سازه‌های مطالعاتی بر اساس مدل پایه قاب خمشی دسته شده و با تمرکز بر همپایگی پارامتر سختی در طبقات مختلف استوار است [16, 17]. کاربرد آرایش‌های متفاوت برای بخش ورودی سازه، مرتبط با موضوع ارزیابی آثار تشدید یافته ناشی از انتشار امواج لرزه‌ای در اسکلت مقاوم است. طرح نیمرخ المان‌های سازه‌های مطالعاتی با رعایت اصل ستون قوی-تیر ضعیف و ایجاد مشخصات رفتار پیش‌سخت و یکسان‌سازی مؤلفه سختی برای هر سه ساختار شبکه قطری در نظر گرفته شده است. شکل (۱) نمای سه سازه مطالعاتی ۲۰ طبقه را نشان می‌دهد. طراحی سازه‌های مطالعاتی بر اساس مبحث دهم مقررات ملی ساختمان و مطابق با ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ صورت گرفته است. پلان سازه‌های مطالعاتی، مربعی و متقارن به ابعاد 36×36 m می‌باشد. ارتفاع طبقات و فواصل اعضای قطری به ترتیب ۳٫۵ و ۶ متر بوده و همچنین، مقادیر بار مرده و زنده مطابق با مبحث ششم مقررات ملی ساختمان به ترتیب برابر ۵۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مربع در نظر گرفته شده است [18-20].

سازه‌های شبکه قطری در برابر رکوردهای زلزله و شاخص تاب آوری این سازه‌ها، توجه به پاسخ‌های دینامیکی این سازه‌ها در برابر رکوردهای حوزه نزدیک دارای آثار جهت‌داری نیازی مبرم است. به همین منظور در این مقاله به کمی‌سازی شاخص تاب‌آوری در سازه‌های شبکه قطری با هندسه‌های متفاوت ورودی پرداخته شده است. سازمان علمی این تحقیق دربرگیرنده ارزیابی عملکرد لرزه‌ای و نیز مؤلفه تاب‌آوری سه سازه ۲۰ طبقه دارای اسکلت مقاوم شبکه قطری است. پیکربندی هندسی اسکلت مقاوم سازه‌های مطالعاتی شامل تفاوت‌گذاری در چیدمان المان‌های مورب مربوط به طبقات پایینی می‌باشد. توصیف و پردازش پارامترهای پاسخ غیرخطی سازه‌های مطالعاتی، تحت رکوردهای نیرومند سه مولفه‌ای حوزه نزدیک و بر پایه ارزیابی نتایج تحلیل دینامیکی فزاینده (IDA) انجام شده است. همچنین در همین راستا نیز ساخت و بررسی نمودارهای شکنندگی، همراه با تدوین شاخص تاب‌آوری مطالعه شده است.

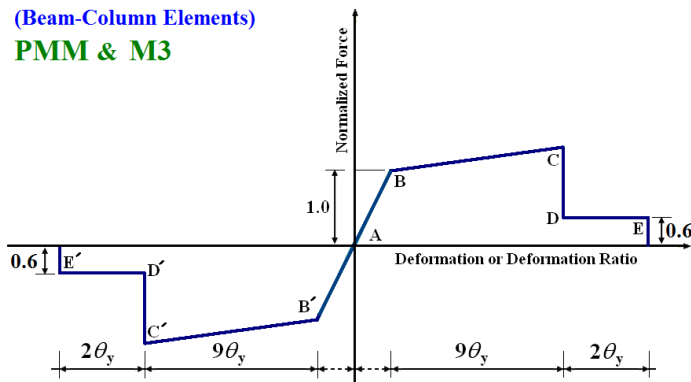
۲- ضوابط و مشخصات سازه‌های مطالعاتی

سازه‌های مطالعاتی در این پژوهش عبارت از ساختارهای شبکه قطری ۲۰ طبقه با مدول‌های مثلثی دو طبقه در ارتفاع و زوایای

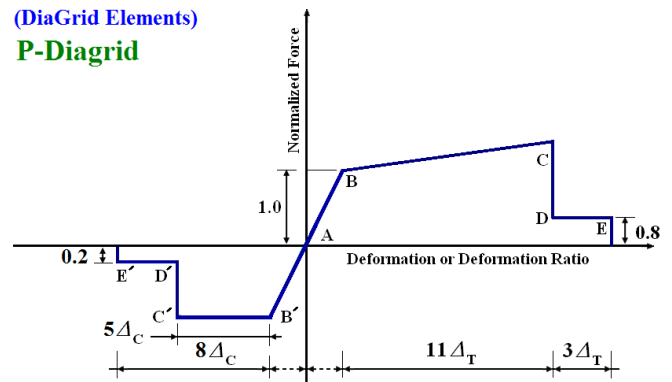


شکل ۱. چیدمان هندسی اسکلت پیرامونی سازه‌های مطالعاتی شبکه قطری ۲۰ طبقه با زوایای پیکربندی ۶۷ درجه و آرایش‌های متفاوت ورودی؛ (الف) سازه (۱) با ورودی چند ضلعی، (ب) سازه (۲) با ورودی مثلثی، (پ) سازه (۳) با ورودی مستطیلی، [۱۷]

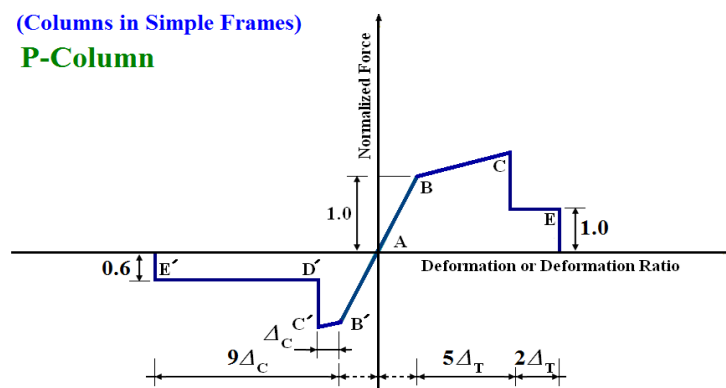
Fig. 1. Elevation view of the studied 20-story models with various perimeter geometric configurations; Structure 1 with a polygonal entrance, (b) Structure 2 with a triangular entrance, (c) Structure 3 with a rectangular entrance

(Beam-Column Elements)
PMM & M3

(ب)

(DiaGrid Elements)
P-DiaGrid

(الف)

(Columns in Simple Frames)
P-Column

(ب)

شکل ۲. مدل رفتار غیرخطی المان‌های سازه شبکه قطری بر اساس ضوابط FEMA

(الف) المان مورب قطری، (ب) المان تیر-ستون، (پ) المان ستون در قاب ساده مفصلی، [17, 23]

Fig. 2. The proposed nonlinear behavioral models for the diagrid elements and the beam-columns [17,23]

انتقالی (راستاهای X و Y پلان) نسبت به نخستین مود پیشگی برقرار است. تحلیل‌های مودال و پردازش‌های عددی با نرم‌افزار SAP2000 صورت گرفته است [22].

تعریف اتصالات المان‌های تیر-ستون داخلی بر اساس مشخصات رفتار خمشی بوده و اعضای مورب قطری نیز به صورت ستون‌های کج با دو سر مفصل خمشی و تیرهای پیرامونی به صورت گیردار برپا شده‌اند. تعریف مشخصات غیرخطی برای اعضای مورب قطری و نیز برای المان‌های تیر-ستون در آرایش قاب خمشی داخلی، مطابق شکل (۲) و بر اساس تمهیدات طراحی و تبیین موضوعی کاهش سختی و زوال مقاومت بوده و ضوابط FEMA لحاظ شده است [23, 24].

سنجش‌های محاسباتی و ارزیابی‌های عددی روی ساختار و طرح اسکلت مقاوم سازه‌های شبکه قطری مطالعاتی، همراه با توجه به تمهیدات لحاظ شده در ASCE\SEI7-10 بوده و ضریب رفتار R در این بررسی نیز طبق پیشنهاد اسدی و عادل برابری با ۵ لحاظ شده است [21]. جدول (۱) دربرگیرنده مشخصات و ابعاد مقاطع طراحی شده برای تیرها، ستون‌ها و المان‌های مورب پیرامونی سه سازه مطالعاتی است [17]. مقاطع تیرها به صورت I شکل و مقاطع ستون‌ها و المان‌های مورب پیرامونی به صورت باکس انتخاب و طراحی شده‌اند. بر اساس نتایج تحلیلی آرایش مودال سازه‌های مطالعاتی، پریمود اول انتقالی سازه‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب ۰.۲، ۰.۱، ۰.۳ و ۱.۰۴ ثانیه است. مشخصات رفتار پیشگی سخت این سازه‌ها نیز بر اساس بیشتر بودن پریمود ارتعاشی مودهای اول

جدول ۱. مشخصات اعضای سازه‌های مطالعاتی در شکل (۱)، (ابعاد به cm) [17]

Table 1. Section sizes assigned to the beam-columns and the diagrid elements of the studied structures

Story	Diagrid Element	Internal column		Beam	
		(Internal Moment Frame)	(Simple Frame)	(Internal Moment Frame)	(Simple Frame)
1-5	C55×2.5	C70 × 3.0	C65 × 2.5	B50×1.5×35×2.5	B35×1.0×15×2.0
6-10	C48×2.5	C60 × 3.0	C55 × 3.0	B45×1.5×35×2.5	B35×1.0×15×2.0
11-15	C40×2.5	C55 × 2.5	C48 × 2.5	B45×1.0×35×2.5	B35×1.0×15×2.0
16-20	C40×1.5	C48 × 2.0	C40 × 2.5	B40×1.0×30×2.0	B35×1.0×15×2.0

۳- رکوردهای زلزله انتخابی

انتخاب نوع رکورد زلزله و توجه به پالس بزرگ اصلی، ساختارهای موجی شکل کوچک‌تر و اسپایک‌های کم‌دامنه تا پردازنده موجود در هر دو تاریخچه زمانی شتاب و سرعت و نیز گام زمانی آنها (هم ارز با محتوای فرکانسی مربوطه)، به عنوان یک موضوع مهم در مباحث ارزیابی طرح لرزه‌ای اسکلت مقاوم و تدوین نگرش‌های جامع در شناخت رفتار غیرخطی سازه‌ها محسوب می‌شود. در این پژوهش مجموعه‌ای از رکوردهای حوزه نزدیک متأثر از جهت‌داری پیش‌رو^۱ با نام مشخصه BAM، SYL، و TAB، E06 و نیز حاوی مشخصه جهت‌داری پس‌رو^۲ با نام مشخصه CLS برگزیده شده‌اند. همچنین برای ارزیابی رکوردهای دارای آثار جهت‌داری خنثی^۳ نیز جنبش‌های با نام مشخصه ARL و HVP انتخاب شده‌اند. جدول (۲) مشخصات فیزیکی رکوردهای انتخابی را نشان می‌دهد. همچنین در بررسی پاسخ لرزه‌ای سازه‌های مطالعاتی، هر سه مؤلفه LN، TR و UP به صورت هم‌پایه شده در سطح شتاب ۱g (نسبت به مؤلفه TR) به طور هم‌زمان و به ترتیب در جهت X، Y و Z پلان اعمال شده‌اند. اطلاعات مربوطه از پایگاه تحقیقاتی PEER دریافت شده است [25, 26].

۴- ارزیابی پارامترهای پاسخ دینامیکی سازه‌های مطالعاتی

در این پژوهش، عملکرد لرزه‌ای سازه‌های مطالعاتی شبکه قطری با استفاده از نتایج تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی با نرم‌افزار PERFORM 3D مطالعه و ارزیابی شده است [27].

۴-۱- نمودارهای شکنندگی لرزه‌ای

یک روند کارآمد برای ارزیابی و تحلیل رفتار غیرخطی سازه‌ها،

کاربرد روش آنالیز دینامیکی فزاینده (IDA) می‌باشد. ساختار مفهومی این روش بر این اساس است که تغییرات یک پارامتر مشخصه EDP^۴ نسبت به یک پارامتر IM^۵ (با معیار بیشینه شتاب مولفه TR) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در شکل (۳) نمودارهای IDA متناظر با برآورد بیشینه پوش ترکیبی جابه‌جایی نسبی طبقات در هر دو جهت X و Y و نیز نمودارهای IDA خلاصه شده ۱۶٪، ۵۰٪ و ۸۴٪ نشان داده شده است. در روند پیاده‌سازی نمودارهای IDA، فاکتور مقیاس PGA به صورت گام به گام افزایش داده شده تا به تدریج معیار آستانه فروریزش (متناظر با دریافت ۲۰ درصد) برآورد شود [28, 29]. نتایج نشان می‌دهد، در (سازه ۱) روند گسترش حوزه‌های غیرخطی و تشکیل مفاصل پلاستیک با معیار CP نسبت به دو سازه مطالعاتی دیگر در سطوح شتاب به نسبت پایین‌تری رخ داده و ساختار مقاوم نیز دچار ناپایداری می‌شود.

برآورد خسارت ناشی از زلزله، یک مؤلفه مهم در تجزیه و تحلیل مبتنی بر ارزیابی عملکرد سازه‌ها است. نمودار شکنندگی، احتمال وقوع یک سطح خاص از خسارت در سازه (یا فراتر از آن سطح خاص) را به عنوان تابعی از شدت حرکت زمین و بر پایه کاربرد و مفهوم‌سازی تابع توزیع احتمال توصیف می‌نماید. نمودار شکنندگی، یک مؤلفه کلیدی در ارزیابی و برآورد فرضی فروریزش سازه است و با استفاده از آن می‌توان احتمال مربوطه را تحت رکوردهای زلزله، همراه با توجه به شدت IM به دست آورد. نکته دیگر آن که بر پایه نمودارهای شکنندگی می‌توان یک نگرش و توصیف مؤثر برای پردازش وقوع ناپایداری و احتمالی فروریزش اسکلت مقاوم را تخمین زد [28-30].

⁴ Engineering Demand Parameter

⁵ Intensity Measure

¹ Forward Directivity Effects

² Backward Directivity Effects

³ Neutral Directivity Effects

جدول ۲. مشخصات فیزیکی رکوردهای حوزه نزدیک انتخابی

Table 2. Physical specifications of the selected near-field earthquake records

	Ground Motion Station	Year	Magnitude (Mw)	Distance (km)	Component	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)
1	Tabas Tabas City	1978	7.4	3.0km	LN	0.836	97.70	39.91
					TR	0.851	121.3	94.50
2	Bam Bam City	2003	6.6	1.0km	LN	0.635	59.60	20.70
					TR	0.793	123.7	37.40
3	Northridge Sylmar (SYL)	1994	6.7	6.4km	LN	0.604	78.20	16.05
					TR	0.843	129.6	32.68
4	Imperial Valley Array (E06)	1979	6.5	1.0km	LN	0.410	64.90	27.69
					TR	0.439	109.8	65.89
5	Northridge Rinaldi (RRS)	1994	6.7	7.1km	LN	0.472	72.75	19.82
					TR	0.838	166.8	29.78
6	Northridge Sylmar (SCE)	1994	6.7	6.4km	LN	0.897	102.23	45.28
					TR	0.612	117.47	54.16
7	Northridge Newhall (NWH)	1994	6.7	5.0km	LN	0.583	74.93	17.55
					TR	0.589	97.32	37.92
8	Loma Prieta Corralitos (CLS)	1989	6.9	5.1km	LN	0.479	44.99	11.62
					TR	0.643	55.19	10.89
9	Imperial Valley Holtville (HVP)	1979	6.5	7.5km	LN	0.221	49.06	33.90
					TR	0.252	50.02	32.06
10	Northridge Arleta (ARL)	1994	6.7	12.9km	LN	0.307	23.04	10.18
					TR	0.345	42.04	10.09

می باشد [31-33]:

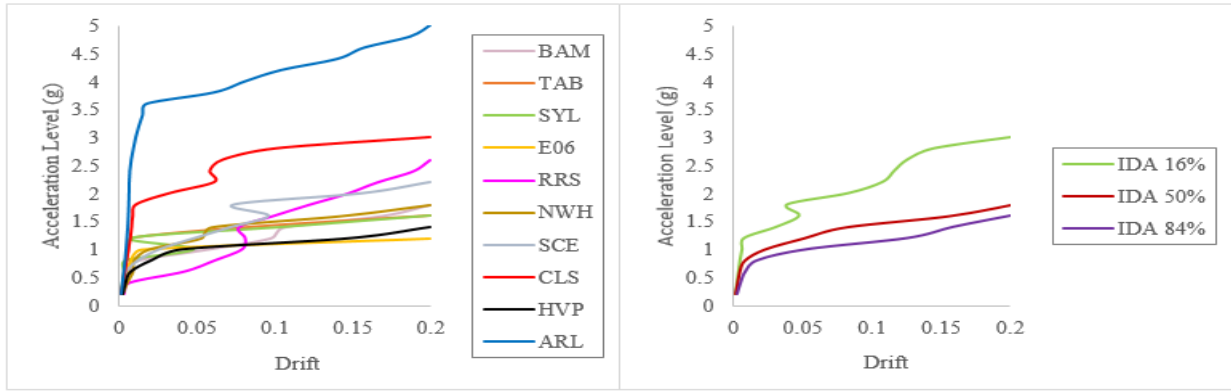
$$P(C|IM = im_i) = P(EDPd \geq EDPc | IM = im_i) \quad (1)$$

تبیین دیگر بحث فوق نیز در روند تعیین IM پیاده سازی شده و شتاب جانبی به طور مستقیم در تخمین احتمال فروریزش سازه مورد استفاده قرار می گیرد. در این روند، یک متغیر تصادفی به عنوان ظرفیت فروریزش با نماد IM_c مشخص می شود. پارامتر IM_c در واقع ماکزیمم شتاب جانبی است که در آن سازه ناپایداری دینامیکی را تجربه خواهد نمود. سپس، بر اساس ارزیابی نتایج تحلیل های IDA تحت یک مجموعه رکوردهای زلزله، تخمینی از ظرفیت فروریزش سازه مطالعاتی به دست می آید. همچنین در همین راستا نیز رابطه (۲) احتمال تجاوز IM از IM_c را نشان می دهد:

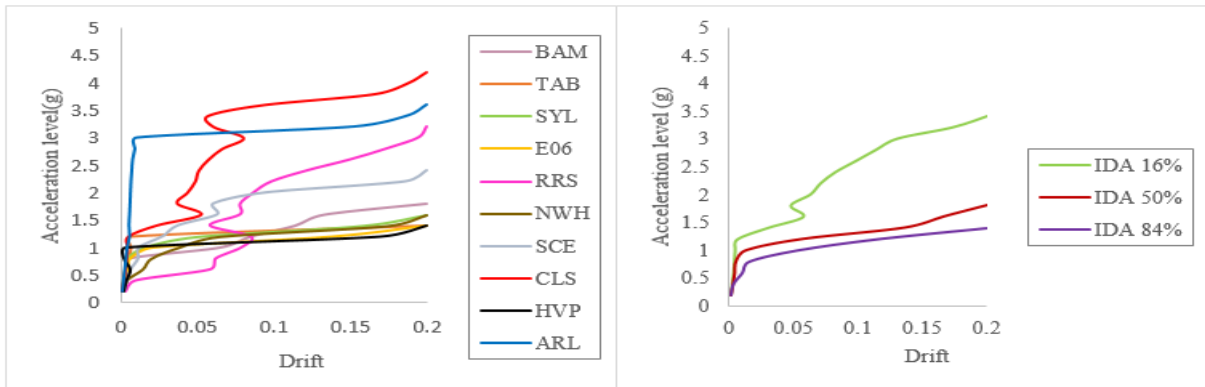
$$P(C|IM = im_i) = P(IM_c < IM = im_i) \quad (2)$$

شایان ذکر است که دو روند با جنبه احتمالاتی برای انتخاب و پردازش پارامترهای EDP و IM در تخمین و ارزیابی نمودارهای شکنندگی و برآورد احتمال فروریزش سازه کاربرد دارند. توصیفات عددی این موارد نیز با توجه به ارتباط پارامتر تقاضای مهندسی EDP (با معیار پوش ترکیبی بیشینه جابه جایی نسبی طبقات) و شاخص IM از طریق تحلیل های دینامیکی فزاینده به دست می آید.

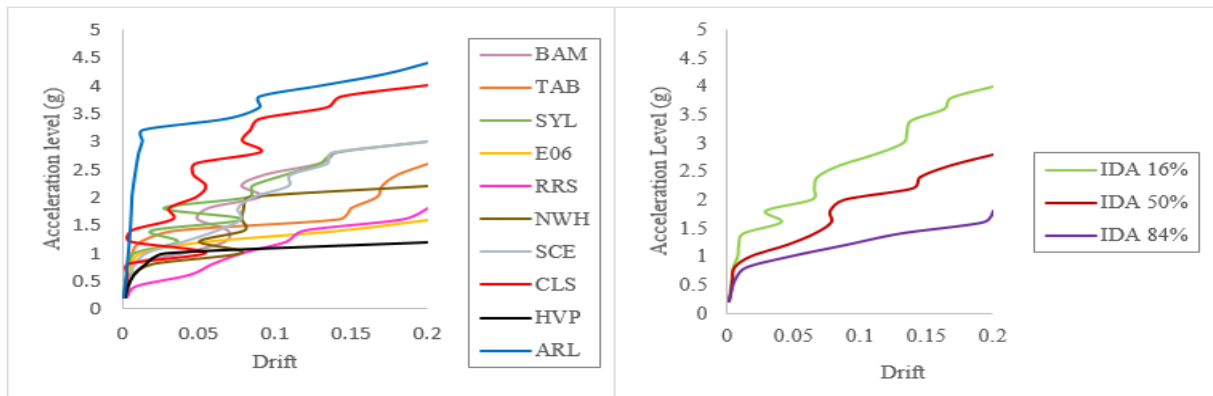
در معیارسازی EDP برای تخمین احتمال فروریزش سازه در تراز شدت IM، فرض می شود که اسکلت مقاوم در سطح عملکرد CP قرار دارد و مقدار تقاضای مفروض (با نشانه EDP Demand) از اندازه ظرفیت موجود (با نشانه EDP Capacity) در شدت $IM = im$ بیشتر می شود. بیان دیگر این موضوع به صورت عبارت $(EDPd \geq EDPc)$ است و این تعریف با رابطه (۱) معرفی شده و نشان دهنده احتمال تجاوز $EDPd$ از $EDPc$ در شدت $IM = im$



(الف)



(ب)



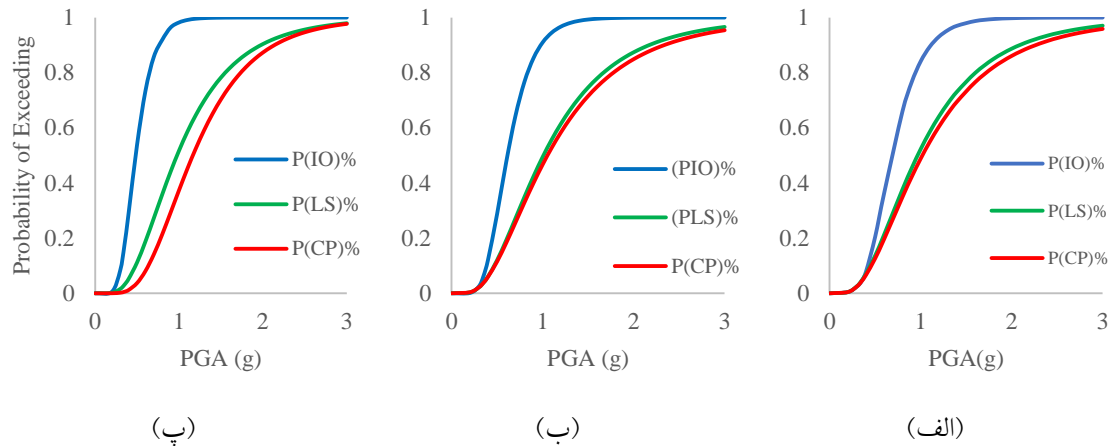
(پ)

شکل ۳. نمودارهای IDA متناظر با بیشینه دامنه پاسخ دررفت و سنجش‌های احتمالاتی 16% IDA، 50% IDA و 84% IDA برای سازه‌های مطالعاتی؛ (الف) سازه ۱، (ب) سازه ۲، (پ) سازه ۳

Fig. 3. The IDA diagrams corresponding to the maximum drift and the probabilistic assessments of the IDA results at the probability of 16%, 50%, and 84% for the studied structures

شده‌اند. جدول (۳) دامنه معیار فراگذشت از حالت حدی برای پارامتر دررفت را بر اساس مطالعات و بررسی‌ها مشخص می‌کند. رابطه (۳) بیان‌گر ساختار ریاضی تابع چگالی احتمال برای توسعه نمودارهای شکنندگی مربوط به سه سازه مطالعاتی است [34, 35]:

برآورد پارامتر IM_c در روند توصیف IM و نیز واکاوی پارامترهای EDPd و EDPc در روند تبیین EDP، وابستگی مستقیم به ماهیت تصادفی رکوردهای زلزله دارد. در این پژوهش، نمودارهای شکنندگی سازه‌های مطالعاتی تحت رکوردهای حوزه نزدیک و بر مبنای تحلیل‌های IDA برای هر یک از اسکلت‌های مقاوم مطالعاتی برآورد



شکل ۴. نمودار شکنندگی سازه‌های مطالعاتی؛ (الف) سازه ۱، (ب) سازه ۲، (پ) سازه ۳

Fig. 4. The resulting fragility curves of the studied structures

عملکردی مشخص) برای یک سازه خاص در یک دوره زمانی معین (زمان کنترل) می‌باشد.

برآورد خسارت به ویژه تلفات مربوط به بلایای شدید نیاز به بیان توصیفی مربوطه دارد. همچنین ملاحظه شده است که روش‌های متنوع برآورد خسارت، هیچ‌کدام از ضریب اطمینان بالایی برخوردار نیستند [31-35]. به‌طورکلی خسارات و آسیب‌های ناشی از یک حادثه، به دو دسته خسارات سازه‌ای (LS) و خسارات غیرسازه‌ای (LNS) طبقه‌بندی می‌شوند. خسارت غیرسازه‌ای وابسته به زمان بوده و خسارت سازه‌ای نیز به پارامتر سرعت بستگی داشته و در طی وقوع سانحه رخ می‌دهد. طبق ضوابط HAZUS 2005 [36] با معادل‌سازی نسبت آسیب‌ها و خسارات با حالات حدی عملکردی سازه، نسبت‌های خسارت برای هر حالت استخراج شده و سپس تابع خسارت طبق فرمول پیشنهادی MCEER محاسبه می‌شود. جدول (۳) مطابق با ضوابط HAZUS 2005، نمود آثار خسارات غیرسازه‌ای به صورت افزایشی را همراه با نسبت خسارات اعضای سازه‌ای نشان می‌دهد. تابع خسارت پیشنهاد شده توسط سایمرالو و همکاران [37] مطابق رابطه (۴) است:

$$L(I) = \sum_{j=1}^n \left[\frac{C_s}{I_s} \right] \times P_j \left\{ \bigcup_{i=1}^n (R_i \geq r_{lim i}) \right\} \quad (4)$$

پارامترهای C_s و I_s در رابطه فوق به ترتیب، نماد هزینه تعمیر سازه در حالت حدی مورد نظر و نماد هزینه کل جایگزینی سازه بوده که به صورت ضرایب خسارت در حالات حدی مختلف لحاظ می‌شوند. همچنین P_j احتمال فراگذشت از حالت حدی

$$P(D|PGA) = \Phi((\ln(PGA) - \mu)/\sigma) \quad (3)$$

پارامترهای D نشانه خسارت، Φ تابع توزیع تجمعی نرمال، μ میانگین و σ انحراف معیار می‌باشند. بر پایه شکل (۳) و نیز بررسی نتایج حاصل از نمودارهای شکنندگی (شکل ۴) مشخص است که سازه ۲ نسبت به دو سازه دیگر، با شیب و احتمال کمتری وارد محدوده‌های عملکردی ایمنی جانی و آستانه فروریزش می‌شود. همچنین، این موضوع پس از تعیین محدوده کنترل و ارزیابی مؤلفه تاب‌آوری، نمود روشن‌تری خواهد داشت.

بر همین اساس، طرح ورودی مثلثی شکل (سازه ۲) نیز سبب ایجاد مشخصه رفتاری مناسب تحت رکوردهای انتخابی می‌شود. اضافه می‌شود که تعبیه طرح هندسی ورودی مثلثی شکل، قابلیت خوبی برای حفظ سطح عملکرد خدمت‌پذیری بدون وقفه داشته و کمترین احتمال فراگذشت از تراز مذکور (برابر با ۸۴ درصد) را در پی دارد. نکته دیگر آنکه یک روند کاهشی برای احتمال فراگذشت از سطوح عملکرد LS و CP نیز با انتخاب سازه با ورودی چندضلعی، مثلثی و مستطیلی مشاهده می‌شود. مقادیر معیار مذکور در سطح عملکرد CP برای سه سازه مطالعاتی به ترتیب برابر ۴۹ و ۴۸ و ۳۷ درصد است. این مسئله نشان‌دهنده عملکرد به نسبت بهتر سازه مطالعاتی ۳ با طرح ورودی مستطیلی در سطح شتاب ۱g می‌باشد.

۲-۴- ضوابط تعیین تابع خسارت و برآورد مؤلفه تاب‌آوری

رویکرد تاب‌آوری یکی از نگرش‌های یکپارچه مدیریت و کاهش آثار تخریبی بلایا است. مفهوم تاب‌آوری (R) به عنوان یک تابع، نشان‌گر ظرفیت حفظ یک سطح عملکرد (و یا سطوح

همچنین پس از تعیین تابع خسارت و حد کنترل عملکرد لرزه‌ای سازه‌های مطالعاتی، پارامتر افت کیفیت کارایی سازه (کمیت Q) به صورت درصد ارزیابی می‌شود. این پارامتر توسط MCEER به عنوان مؤلفه استحکام تاب‌آوری یا به عبارت دیگر، تاب‌آوری سخت معرفی و شناخته می‌شود. جدول‌های (۵) و (۶) مقادیر محاسبه شده مؤلفه استحکام تاب‌آوری برای سازه‌های مطالعاتی را نشان می‌دهند [36-39].

$$Q = 1 - Li \quad (6)$$

شکل (۵) نشان‌دهنده شاخص تاب‌آوری (متناظر با کمیت Q) سازه‌های مطالعاتی تحت رکوردهای انتخابی جدول (۲) می‌باشند. طبق نتایج حاصل شده، شاخص تاب‌آوری در سازه‌های ۲ و ۳ دارای نمود مطلوب‌تری بوده و دامنه عددی مربوطه نیز مقدار بزرگ‌تری را نشان می‌دهد. طبق نتایج به دست آمده از جدول‌های (۵) و (۶)، سازه مطالعاتی ۱ دارای بزرگ‌ترین مقدار تابع خسارت و کمترین مؤلفه تاب‌آوری می‌باشد. این مسئله، نمودی از قابلیت آسیب‌پذیری بیشتر این سازه تحت رکوردهای انتخابی است. همچنین، پردازش‌های عددی مؤلفه تاب‌آوری (جدول ۶) نشان‌دهنده مقادیر یکسان و بیش از ۸۲ درصد برای دو سازه شبکه قطری ۲ و ۳ است. این مسئله بیان‌گر افت کارایی کمتر (متناظر با دامنه بزرگ‌تر برای پارامتر Q) در عملکرد لرزه‌ای سازه‌های با ورودی مثالی (سازه ۲) و مستطیلی (سازه ۳) نسبت به سازه با ورودی چندضلعی (سازه ۱) می‌باشد.

مورد نظر بوده که با توجه به نمودارهای شکنندگی لرزه‌ای قابل استخراج است. نکته دیگر آن که برای استخراج دامنه عددی و مقادیر مشخص مؤلفه تاب‌آوری، نیاز به تعیین محدوده کنترل مطابق با نمودار شکنندگی لرزه‌ای می‌باشد. در این پژوهش محدوده کنترل با توجه به رابطه (۵) تعیین شده است:

$$C_u = ABI \quad (5)$$

پارامترهای C_u حد کنترل عملکرد لرزه‌ای (کرانه پوششی عملکرد لرزه‌ای)، A ضریب شتاب مبنای طرح ساختگاه، B ضریب بازتاب ساختمان و I ضریب اهمیت سازه بوده و ضرایب مذکور وابستگی مستقیم به پریود طبیعی سازه و خاک ساختگاه (با فرض خاک نوع II) دارند. در این حالت با توجه به پریود ارتعاش آزاد سازه‌ها و با در نظر گرفتن ساختگاه در پهنه با خطر نسبی خیلی زیاد، تعریف بازتاب بین مقادیر ۱ و ۲/۵ به همراه ضریب شتاب مبنای $0.35g$ و ضریب اهمیت سازه به صورت ثابت، آنگاه حد کنترل لرزه‌ای سازه‌های مطالعاتی قابل ارزیابی است. نتایج آورده شده در جدول (۴) نشان‌دهنده احتمالات فراگذشت متناظر با حد کنترل لرزه‌ای مربوط به سازه‌های مطالعاتی است [20, 38].

رابطه (۶) نشان‌دهنده کمیت افت کیفیت کارایی سازه، پیشنهاد شده توسط برونو و همکاران می‌باشد. در این رابطه Q پارامتر افت کیفیت کارایی سازه و Li تابع خسارت می‌باشد. برآورد عددی کمیت Q نشان‌دهنده تاب‌آوری لرزه‌ای نهایی سازه می‌باشد.

جدول ۳. معیار فراگذشت از حالات حدی برای پارامتر دررفت [23, 34] و نیز تعریف نسبت خسارت (ضریب خسارت) بر طبق HAZUS 2005 [36]

Table 3. The defined limit states based on the drift parameter and Definition of the damage ratio (damage factor) according to HAZUS 2005

Damage	Insignificant	Average (Equivalent to the IO performance level)	Average (Equivalent to the LS performance level)	Average (Equivalent to the CP performance level)
Domain of EDP [23, 34]		0.005	0.015	0.02
Structural Type [36]	0.01	0.1	0.5	1
Non-Structural Type [36]	-	Equivalent to 0.1	Equivalent to 0.1	-
Sum	0	0.2	0.6	1

جدول ۴. تعیین احتمال فراگذشت از حدود عملکرد با توجه به حد کنترل لرزه‌ای سازه‌های مطالعاتی

Table 4. Determination of the probability of exceeding performance limits considering the seismic control limit of the studied structures

Structure	The probability of exceeding performance levels		
	IO	LS	CP
Structure (1)	0.2804	0.1488	0.1427
Structure (2)	0.1598	0.1012	0.0799
Structure (3)	0.4629	0.0906	0.0271

جدول ۵. تعیین توابع خسارت Li برای سازه‌های مطالعاتی بر پایه نتایج جدول‌های ۳ و ۴

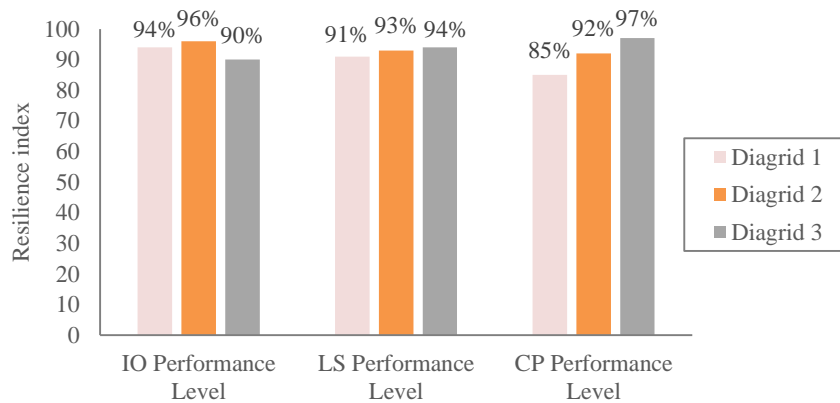
Table 5- Determination of the damage functions Li for the studied structures based on the results of Tables 3 and 4

Limit State	Structure (1)			Structure (2)		Structure (3)	
	Damage Ratio	The probability of exceeding	Damage Function	The probability of exceeding	Damage Function	The probability of exceeding	Damage Function
IO	0.2	0.2804	0.0560	0.1598	0.0319	0.4629	0.0926
LS	0.6	0.1488	0.0892	0.1012	0.0607	0.0906	0.0544
CP	1.0	0.1427	0.1427	0.0799	0.0799	0.0271	0.0271
Total (Table 5)		-	0.2880	-	0.1725	-	0.1741

جدول ۶. تعیین مؤلفه تاب‌آوری سازه‌های مطالعاتی بر پایه نتایج جدول ۵

Table 6. Determination of the seismic resilience component of the studied structures based on the results of Table 5

Structure	Damage Function Li	Quality Function Q	Resilience Component (%)
Structure (1)	0.2880	0.7118	71.18
Structure (2)	0.1725	0.8273	82.73
Structure (3)	0.1741	0.8258	82.58



شکل ۵. شاخص تاب‌آوری سازه‌های مطالعاتی در سطوح عملکرد IO، LS و CP بر پایه نتایج جدول ۶

Fig. 5. Resilience index of the studied structures at IO, LS, and CP performance levels based on the results of Table 6

شاخص تاب‌آوری سازه مطالعاتی ۳ برای سه سطح عملکردی IO، LS و CP به ترتیب برابر ۹۰، ۹۴ و ۹۷ درصد است. این مورد نیز بیان‌گر بهبود سطح عملکرد سازه با طرح ورودی مستطیلی شکل، همگام با افزایش سطح حالت حدی است.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، عملکرد لرزه‌ای سه سازه شبکه قطری با هندسه ورودی متفاوت در اسکلت مقاوم تحت ۱۰ رکورد حوزه نزدیک متاثر از آثار جهت‌داری پیش‌رو، پس‌رو و خنثی ارزیابی شد. هر سه سازه مطالعاتی بر پایه هم‌ارزی مشخصات سختی المان‌های اصلی اسکلت مقاوم با اعضای مدل قاب-پایه طراحی شده‌اند. همچنین، پیاده‌سازی و پردازش نتایج تحلیل دینامیکی فزاینده، نمودارهای شکنندگی لرزه‌ای و مؤلفه تاب‌آوری متناظر با

افزون بر این مطلب نیز در شکل (۵) ملاحظه می‌شود که سازه با ورودی مثلثی (سازه ۲) توانایی بیشتری برای انتقال بارهای دینامیکی در حوزه عملکردی IO دارد. همچنین، پردازش عددی مؤلفه تاب‌آوری در سطح عملکردی LS برای سازه‌های مطالعاتی ۱ تا ۳ به ترتیب برابر ۹۱ و ۹۳ و ۹۴ درصد محاسبه شده است. نکته دیگر آن که با افزایش دامنه دررفت و بررسی سطح عملکرد CP، سازه ۳ پایداری دینامیکی بیشتری دارد. آورده دیگر در این موضوع آن است که با افزایش سطح عملکرد، مقادیر شاخص تاب‌آوری برای سازه‌های ۱ و ۲ دارای روند کاهشی است. این مسئله نشان‌دهنده تسریع روند زوال مقاومت و افزایش احتمالی وقوع ناپایداری در اسکلت سازه با عبور از سطح عملکرد IO به سمت سطح عملکردی CP می‌باشد. همچنین طبق شکل (۵)، مقادیر

درصد به ترتیب برای سازه‌های مطالعاتی ۳ و ۲ محاسبه شد. از این رو، طرح ورودی مستطیلی شکل برای سازه‌های شبکه قطری، احتمال حفظ سطح عملکرد خدمت‌پذیری بی‌وقفه تحت جنبش‌های نیرومند زمین را تا حدودی کاهش می‌دهد. همچنین در پردازش عددی حالت حدی آستانه فروریزش نیز مقادیر شاخص تاب‌آوری برای سه سازه مطالعاتی ۱ تا ۳ به ترتیب برابر ۸۵، ۹۲ و ۹۷ درصد به دست آمد. بدین ترتیب، طراحی مستطیل شکل برای ورودی سازه سبب کارایی بهتر و کاهش آهنگ خرابی اسکلت مقاوم در حالت حدی CP می‌شود. نتایج این پژوهش بیان‌گر بهبود نسبی عملکرد لرزه‌ای سازه شبکه قطری طراحی شده با الگوی ورودی مستطیلی (سازه ۳)، همگام با افزایش سطح حالت حدی از IO به CP می‌باشد.

قدردانی نویسندگان

انجام این پژوهش تحت حمایت مادی از سوی مراکز یا نهادها نبوده است.

تعارض منافع

سهم نویسندگان برابر است.

سهم نویسندگان

این پژوهش منبع مالی نداشته است.

منابع مالی

این پژوهش منبع مالی نداشته است.

References

- [1] Kim J. and Lee Y.H., 2012. Seismic performance evaluation of diagrid system buildings. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 21, pp.736-749. <https://doi.org/10.1002/tal.643>.
- [2] Mele E., Toreno M., Brandonisio G. and De Luca A., 2014. Diagrid structure for tall buildings: case studies and design considerations. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 23(2), pp.124-145. <https://doi.org/10.1002/tal.1029>.
- [3] Rariei M. and Adeli H., 2016. Sustainability in high-rise building design and construction. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 25(13), pp.643-658. <https://doi.org/10.1002/tal.1276>.

- هر سه سازه مطالعاتی به شرح زیر ارزیابی محاسباتی شد.
- بررسی نتایج حاصل از تحلیل‌های دینامیکی فزاینده نشان‌گر آن است که در سازه مطالعاتی ۱ روند گسترش حوزه‌های غیرخطی و تشکیل مفاصل پلاستیک با معیار CP نسبت به دو سازه مطالعاتی دیگر در سطوح شتاب به نسبت پایین‌تری رخ داده و ساختار مقاوم نیز دچار ناپایداری می‌شود.
 - بر پایه نمودارهای شکنندگی به دست آمده، ملاحظه شد که سازه مطالعاتی ۲ نسبت به دو سازه مطالعاتی دیگر در سطح شتاب ۱g و با احتمال فراگذشت ۸۴ درصدی، شیب و احتمال کمتری برای ورود به محدوده عملکردی IO نشان می‌دهد. همچنین همراه با افزایش سطوح عملکردی، مقادیر احتمال فراگذشت در سطح شتاب ۱g نیز کاهش می‌یابد. نتایج پارامتر مذکور برای سازه با ورودی چند ضلعی (سازه ۱) متناظر با سطوح عملکردی IO، LS و CP به ترتیب برابر ۹۲، ۵۳ و ۴۹ درصد بدست آمد.
 - پیرو تعریف میزان فراگذشت از حدود عملکردی مشخصه و نیز محاسبه تابع خسارت با استفاده از فرمولاسیون پیشنهادی MCEER، پارامتر افت کیفیت کارایی و مؤلفه تاب‌آوری مربوطه محاسبه شد. مقادیر شاخص تاب‌آوری برای سازه شبکه قطری ۱ برابر ۷۱ درصد و درباره دو سازه دیگر نیز بیش از ۸۲ درصد به دست آمد. بنابر این، ایجاد طرح ورودی برای اسکلت مقاوم با ساختار مثلثی و مستطیلی، توانایی مقابله با عدم قطعیت‌های ناشی از رکوردهای زلزله را بهبود می‌بخشد.
 - در بررسی نتایج شاخص تاب‌آوری در سطح عملکرد IO، کمترین مقدار برابر ۹۰ درصد و بیشترین مقدار نیز برابر ۹۶

- [4] Montuori G.M., Mele E., Brandonisio G. and DeLuca A., 2014. Geometrical patterns for diagrids: exploring alternative design strategies from the structural point of view. *Engineering Structures*, 71, pp.112-127. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.04.017>.
- [5] Asadi E., Li, Y. and He Y., 2018. Seismic performance assessment and loss estimation of steel diagrid structures. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 144(10). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002164](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002164).
- [6] Moon K., 2008. Sustainable structural engineering for tall building. *International Journal of Tall and Special Buildings*, 17(5), 895-914. <https://doi.org/10.1002/tal.475>.

- [7] Kim J. and Kong J., 2013. Progressive collapse behavior of rotor-type diagrid buildings. *Journal of Structural Design of Tall and Special Buildings*, 22, pp.1199-1214. <https://doi.org/10.1002/tal.762>.
- [8] Heshmati M., Khatami A. and Shakib H., 2020. Seismic performance assessment of tubular diagrid structures with varying angles in tall steel buildings. *Journal of Structures*, 25, pp.113-126. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.02.030>.
- [9] Sadeghi S. and Rofooei F.R., 2020. Improving the seismic performance evaluation of steel diagrid structures using buckling restrained braces. *Journal of Construction Steel Research*, 166, 105905. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105905>.
- [10] Heshmati M. and Aghakouchak A., 2019. Quantification of seismic performance factors of steel diagrid system. *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 28(3), e1572. <https://doi.org/10.1002/tal.1572>.
- [11] Lee J., Kong J. and Kim J., 2018. Seismic performance evaluation of steel diagrid buildings. *International Journal of Steel Structures*, 18(3), pp.1035-1047. <https://doi.org/10.1007/s13296-018-0044-8>.
- [12] Moradi M. and Abdolmohammadi M., 2020. Seismic fragility of a diagrid structure based on energy method. *Journal of Constructional Steel Research*, 174, 106311. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106311>.
- [13] Vahdani R., Gerami M. and Razi M., 2017. Seismic vulnerability assessment of steel moment-resisting frames based on local damage. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 12, 1750016. <https://doi.org/10.1142/S1793431117500166>.
- [14] Zenter I. and Gundel M., 2017. Fragility analysis method: review of existing approaches and application. *Nuclear Engineering and Design*, 323, pp.245-258. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2016.12.021>.
- [15] Xu J.G., Wu G. and Feng D.C., 2020. Near fault ground motion effects on seismic resilience of frame structures damaged in Wenchuan earthquake. *Structure and Infrastructure Engineering*, 16, 1704801. <https://doi.org/10.1080/15732479.2019>.
- [16] Azhdarifar M., Meshkat-Dini A. and Sarvghd Moghadam A.R., 2017. Analytical study of interior rigid bents arrangement on seismic response of tall buildings. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering (JSEE)*, 19(3), pp.247-260.
- [17] Khalaj-Zadeh M., 2021. *Evaluation of Seismic Behavior and Stability of Diagrid Structures based on the Criterion of Fragility Curves in Near-Fault Zones*. MSc. Thesis, Kharazmi University, Tehran, Iran, (in Persian).
- [18] The Iranian National Building Code. 2014. *Steel structures*. Issue 10, Tehran, Iran.
- [19] The Iranian National Building Code. 2014. *Design loads for buildings*. Issue 6, Tehran, Iran.
- [20] Standard No. 2800. 2014. *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings*, 4th Edition, Tehran, Iran.
- [21] Asadi E. and Adeli H., 2018. Seismic performance factors for low-to mid-rise steel diagrid structural systems. *International Journal of Tall and Special Buildings*. <https://doi.org/10.1002/tal.1505>.
- [22] SAP2000, CSI, 2010. Analysis Reference Manual, Computers and Structures Inc., Berkeley, California, USA.
- [23] FEMA 356, 1998. Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, *Federal Emergency Management*.
- [24] FEMA 440, 2005. Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures. *Applied Technology Council (ATC-55 Project)*.
- [25] PEER Strong Ground Motion Database, <http://peer.berkeley.edu/>.
- [26] Li C., Meng K. and Gou Y., 2024. An efficient algorithm to identify strong pulse-like ground motions based on the smoothed significant velocity half-cycles, *Earthquake Engineering*, pp.1-17.
- [27] PERFORM 3D, CSI, 2011. Nonlinear Analysis and Performance Assessment for 3D Structures, Computers and Structures Inc., Berkeley, California, USA.
- [28] Lachanas C.G. and Vamvatsikos D., 2021. Model type effects on the estimates seismic response of a 20story steel moment resisting frame. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 147(6). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0003010](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003010).
- [29] Zhao D., Wang H., Wang D., Zhu R. and Zhang J., 2022. Quantitative classification of near-fault ground motions selected by energy indicators, *Structures*, 35, pp.780-791, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.11.032>.
- [30] Tian Y., Lin K., Zhang L., Lu X. and Xue H., 2021. Novel seismic progressive collapse resilient super-tall building system. *Journal of Building Engineering*, 102790.
- [31] Lallemand D., Kiremidjian A. and Burton H., 2015. Statical procedures for developing earthquake damage fragility curves. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 44, pp.1373-1389.
- [32] Pnevmatikos N.G., Papagiannopoulos G.A. and Papavasiliou G.S., 2019. Fragility curves for mixed concrete/steel frames subjected to seismic. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 116, pp.709-713.
- [33] Cimellaro G.P., Reinhorn A.M. and Bruneau M.,

2010. Framework for analytical quantification of disaster resilience. *Engineering Structures*, 32, 3639-3649. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.08.008>.
- [34] Zareian F., Krawinkler H., Ibarra L. and Lignos D., 2010. Basic concept and performance measures in prediction of collapse of buildings under earthquake ground motions. *Journal of Structural Design of Tall and Special Buildings*, 19, pp.167-181.
- [35] Xing L., Gardoni P. and Zhou Y., 2024. An Fragility estimates for high-rise buildings with outrigger systems under seismic and wind loads. *Earthquake Engineering*, 28:2, pp.496-531.
- [36] Multi-Hazard Loss Estimation Methodology (HAZUS), (2005). *Federal Emergency Management Agency & Department of Homeland Security*, Washington, D.C.
- [37] Cimellaro G.P., Fumo C., Reinhorn A.M. and Bruneau M., 2009. Quantification of Disaster Resilience of Health Care Facilities, *Technical Report MCEER*, University of Buffalo, State University of New York.
- [38] Baghaei E., Homami P. and Meshkat-Dini A., 2021. Evaluation of the robustness component of seismic resilience in low and mid-rise braced frame structures in near-field sites. *Sharif Journal of Civil Engineering*. Sharif University of Technology, Tehran, IRAN, 37.2 (2.2), pp.159-171, <https://doi.org/10.24200/J30.2020.56543.2839>. (in Persian).
- [39] Khademi M., Tehranizadeh M., Shirkhani A. and Hajirasouliha I., 2023. Earthquake-induced loss assessment of steel dual concentrically braced structures subjected to near-field ground motions. *Structures*, 51, pp.1123-1139, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.03.105>.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Khalajzadeh, M., Morshed-Shekarchi, S., Meshkat-Dini, A. and Massumi, A., 2026. Analytical Evaluation of the Effect of Geometry and Local Configuration of Diagrid Structures on the Performance and Robustness Component of Seismic Resilience. *Modares Civil Engineering journal*, 25(6), pp.19-32.

