

# ارزیابی قابلیت اعتماد قاب‌های فولادی با پیوندهای نیمه‌سخت و تکیه‌گاه‌های کشسان دورانی در تحلیل خمیری

محسن بمبائی‌چی<sup>۱\*</sup>، مصطفی سلیمی نیک<sup>۲</sup>

۱- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان

\* قوچان، صندوق پستی ۹۴۷۷۱-۶۷۳۳۵، [m.bambaechee@qiet.ac.ir](mailto:m.bambaechee@qiet.ac.ir)

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۱۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۲۷)

## چکیده

در تحلیل و طرح قاب‌های فولادی، عامل‌های فراوانی وجود دارند که تصادفی پنداشتن هر یک از آنها می‌تواند اثر چشم‌گیری بر ایمنی سازه داشته باشد. در این میان، سختی دورانی پیوندها (اتصالات)، به سبب وجود عدم قطعیت‌هایی مانند چگونگی ساخت، اجرا و نصب قاب‌های فولادی، می‌تواند به عنوان یکی از این عامل‌ها پنداشته شود. باید افزود، اثر پیوندهای نیمه‌سخت (نیمه‌صلب)، به سبب تغییر توزیع لنگرها و مقدار تغییر مکان‌های گرهی در بیشتر آئین‌نامه‌های پیشرفته، وارد تحلیل می‌گردد. از این رو، در این پژوهش، نخست، اثرهای سختی دورانی پیوندهای تیر به ستون و ستون به تکیه‌گاه، در دو قاب فولادی یک طبقه- یک دهانه (F1) و یک طبقه- دو دهانه (F2)، به شیوه مفصل خمیری (پلاستیک)، مورد تحلیل خمیری یقین‌اندیشانه قرار گرفت. باید افزود، رفتار پیوندها با فنرهای دورانی سه‌خطی الگوسازی شدند. در ادامه، با تصادفی پنداشتن سختی دورانی و لنگر خمیری پیوندهای تکیه‌گاهی و عضوی و همچنین، در نظر گرفتن چند توزیع احتمال با ضریب‌های پراکندگی متفاوت، رفتار سازه در تحلیل خمیری احتمال‌اندیشانه بررسی گردید. در این راستا، از شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای برآورد احتمال شکست قاب‌های فولادی با پیوندهای نیمه‌سخت و تکیه‌گاه‌های کشسان دورانی بهره‌جویی شد. بر این پایه، هر یک از قاب‌های F1 و F2، ۸۴۰۰۰۰ مرتبه شبیه‌سازی گردیدند و ظرفیت بار شکست وارد بر سازه در دسترس قرار گرفت. ظرفیت باربری سازه در دو حالت یقین‌اندیشانه و احتمال‌اندیشانه حساب و پاسخ‌ها در جدول‌ها و نمودارهایی بررسی شدند. باید افزود، از نرم‌افزار OpenSees برای انجام تحلیل‌های خمیری قطعی و احتمالاتی بهره‌جویی گردید. یافته‌ها نشان داد، سختی و لنگر خمیری پیوندهای عضوی و تکیه‌گاهی، اثر قابل توجهی بر پاسخ‌های تحلیل‌های خمیری یقین‌اندیشانه و احتمال‌اندیشانه دارند.

## واژگان کلیدی

قابلیت اعتماد، پیوند نیمه‌سخت، شبیه‌سازی مونت‌کارلو، تکیه‌گاه کشسان دورانی، تحلیل خمیری

## Assessment of reliability of steel frames with semi-rigid joints and elastic rotational restraints on plastic analysis

M. Bambaechee, M. Salimi Nik

### Abstract

In the analysis and design of steel frames, there are various factors that the uncertainty of each of them can have a significant effect on structural safety. Hence, the investigation and recognition of these factors is important for understanding the true behavior of the structure. In the meantime, the stiffness beam-to-column connection can be considered as one of the factors due to uncertainties such as how to construct, execute, install and model the parts and joints steel structures. The effect of semi-rigid joint on structural analysis not only changes the moment distribution along the beams and columns, but also increases the frame's displacement due to second-order effects. Therefore, in most advanced specifications, it is allowed to consider semi-rigid joints behavior. Hence, in this paper, first, the effect of stiffness of the connections in the plastic analysis based on plastic hinge will be studied in two steel frames. In the following, by randomly assuming the stiffness of rotation of beam to column and stiffness of column joints to the support and plastic moment of members and joints, and considering several probability distributions with different coefficients of variant, the behavior of the structure in the probabilistic plastic analysis can be investigated. Accordingly, the Monte-Carlo simulation is used to estimate the probability of failure of semi-rigid steel frames. On this Basis, each frame is simulated 840000 times and the load failure capacity on the structure is available. It should be added, the OpenSees software was used to deterministic and probabilistic analysis. The results showed that the rotational stiffness of the joints and restraints and plastic moment of members had a significant effect on the responses of deterministic and probabilistic analysis.

### Keywords

Reliability, Semi-rigid connection, Monte Carlo simulation, Elastic rotational support, Plastic analysis

در طول دو دهه گذشته، مطالعه‌ی سازه‌های فولادی در فضای عدم قطعیت ناشی از تصادفی بودن ویژگی مواد، بارگذاری، هندسه و مانند آن، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. اهمیت این‌گونه مطالعه‌ها، بیشتر از پژوهش‌هایی می‌باشد که از طبیعت آماری ویژگی‌های سازه چشم‌پوشی می‌کنند. اگر تعیین ویژگی‌های آماری کمیت‌های دارای عدم قطعیت، میسر باشد، تحلیل احتمال‌اندیشانه<sup>۱</sup>، مناسب‌ترین انتخاب است. در این راستا، پژوهشگران از روش‌های احتمال‌اندیشانه مانند شیوه‌های مرتبه یکم، مرتبه دوم و شبیه‌سازی مونت‌کارلو (MCS)<sup>۲</sup> برای برآورد قابلیت اعتماد سازه‌های فولادی بهره گرفته‌اند. در ادامه، گزیده‌ای از کارهای انجام گرفته درباره قابلیت اطمینان قاب‌های فولادی می‌آید.

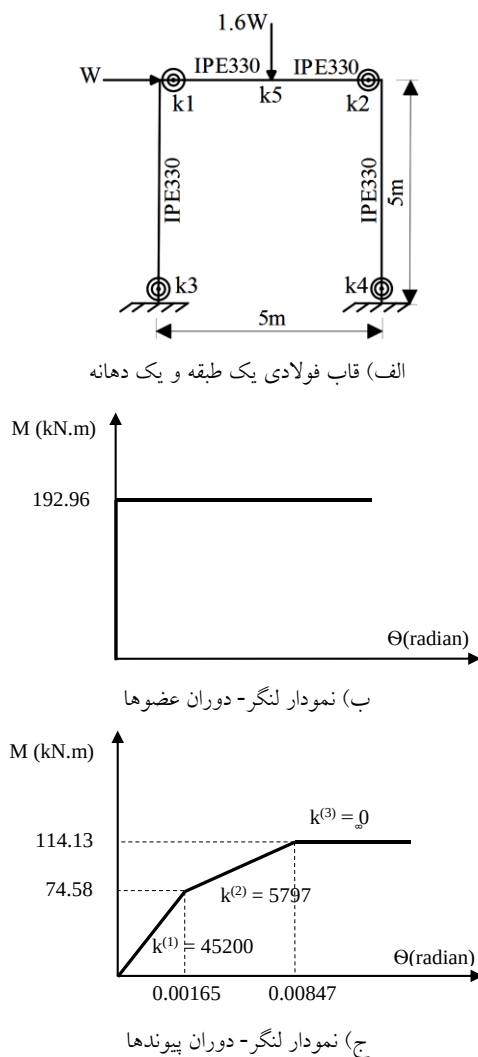
Hadianfard و Razani، با بهره‌جویی از تحلیل اجزای محدود به تحلیل قابلیت اعتماد قاب‌های فولادی با پیوندهای نیمه‌سخت پرداختند. آن‌ها بار و مقاومت عضوها را تصادفی پنداشتند و از شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای برآورد احتمال شکست سازه بهره جستند [۱]. Buonopane و Schafer، به بررسی قابلیت اطمینان و رفتار قاب فولادی در تحلیل مومسان پرداختند. این پژوهشگران، با تصادفی پنداشتن بار و مقاومت عضوها، احتمال خرابی سازه را با بهره‌گیری از شبیه‌سازی مونت‌کارلو و تشکیل مفصل‌های خمیری در دسترس قرار دادند [۲]. Cardoso و همکارانش، با تحلیل قابلیت اطمینان و بهره‌جویی از ترکیب روش‌های شبکه‌های عصبی و شبیه‌سازی مونت‌کارلو رفتار قاب‌های فولادی و احتمال شکست آن‌ها را بررسی نمودند [۳]. Duan و همکارانش، به ارزیابی اثر نقص نخستین پیوندهای نیمه‌سخت در قابلیت اعتماد قاب‌های فولادی شب‌دار زیر اثر بار باد پرداختند [۴]. Hu و Zhou، به مطالعه تحلیل کشسان- مومسان مرتبه دوم قاب فولادی با پیوندهای نیمه‌سخت پرداختند [۵]. Tang و همکارانش، برای ارزیابی قابلیت اطمینان قاب‌های فولادی ساده با پیوندهای نیمه‌سخت از نگره شواهد بهره جستند [۶]. Zhang و Zhou، به بررسی قابلیت اعتماد قاب‌های سه بعدی بر پایه شیوه LRFD پرداختند. آن‌ها تابع حدی را احتمال فروپاشی سازه، تحت بارگذاری مرده + زنده پنداشتند و با شیوه مرتبه‌ی یکم (FORM) احتمال خرابی سازه را یافتند [۷]. Zhang و همکاران، به تحلیل و طراحی خمیری قاب‌های فولادی خمشی با پیوندهای سخت (صلب) پرداختند. در ادامه، با تحلیل قابلیت اطمینان، اعتبار شیوه ناکشسان و مقاومت سازه را ارزیابی نمودند [۸]. Thai و Kim،

به تحلیل قابلیت اعتماد و تحلیل خمیری قاب فولادی با پیوندهای نیمه‌سخت پرداختند. این پژوهشگران، از شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای تعیین احتمال شکست و شاخص قابلیت اعتماد سازه بهره بردند [۹]. Tang و همکارانش، با بهره‌جویی از نظریه شواهد، راهکاری برای در نظر گرفتن کیفیت عدم قطعیت (UQ) در کمانش قاب‌های فولادی نیمه‌سخت در دسترس قرار دادند [۱۰]. Thai و همکارانش، به بررسی قابلیت اطمینان قاب‌های فولادی با پیوندهای نیمه‌سخت پرداختند. آن‌ها مقاومت نهایی قاب با تشکیل مفصل‌های مومسان را ارزیابی نمودند [۱۱]. Truong و همکارانش، یک روش کارآمد برای بهینه‌سازی قاب‌های فولادی با پیوندهای نیمه‌سخت و بهره‌جویی از تحلیل پیشرفته و الگوریتم میکرو- ژنتیک در دسترس قرار دادند [۱۲]. با به کارگیری فن مونت کارلو، قابلیت اعتماد پایداری قاب‌های فولادی با پیوندها و تکیه‌گاه‌های نرم به وسیله Rezaiee-Pajand و همکارانش مورد بررسی قرار گرفت [۱۳]. Rezaei و همکارانش، قابلیت اطمینان لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی بهسازی شده با مهاربندی‌های همگرا با مدل‌های احتمالاتی متفاوت را ارزیابی نمودند. سازه‌های مورد مطالعه، تحت منبع لرزه‌ای زیرپوسته‌ای با به کارگیری روش احتمالاتی نمونه‌گیری در نرم‌افزار آنالیز ریسک (Rt) تحلیل شدند [۱۴]. Mehdiadeh و Karamodin، تحلیل‌های دینامیکی افزاینده یک سازه ۵ طبقه با سیستم‌های قاب خمشی معمولی، متوسط را تحت ۵۰ زوج شتابنگاشت پیشنهادی دستورالعمل FEMA P695 انجام دادند. در این میان، نقش شکل‌پذیری در ظرفیت فروپاشی قاب‌های خمشی فولادی موردنظر به صورت احتمالاتی بررسی گردید. این پژوهشگران، از نرم‌افزار OpenSees برای تحلیل لرزه‌ای سازه بهره بردند [۱۵]. Bambaeechee و Ghaffari، سختی نخستین پیوندهای سخت از پیش تأیید شده آیین‌نامه فولاد ایران و اثر عدم قطعیت آن بر قابلیت اعتماد قاب‌های فولادی را در تحلیل مرتبه دوم بررسی نمودند [۱۶].

با توجه به گستره کارهای انجام شده درباره قابلیت اعتماد قاب‌های فولادی، داشتن یک دید کلی از رفتار خمیری سازه‌ها با غیرقطعی پنداشتن سختی دورانی پیوندها و تکیه‌گاه‌ها لازم به نظر می‌رسد. از این رو، در این پژوهش به بررسی اثر عدم قطعیت سختی دورانی و لنگر خمیری پیوندهای عضوی و تکیه‌گاهی در پاسخ خمیری قاب‌های دارای پیوندهای متفاوت پرداخته می‌شود. باید افزود، رفتار کشسان- مومسان پیوندها با فنرهای دورانی سه‌خطی الگوسازی می‌شوند. بر این پایه،



OpenSees تایید می‌گردد. افزون بر این، پاسخ‌ها نشان می‌دهند که سختی دورانی پیوندها بر مقدار بار فروریختگی، تغییر شکل‌ها و ترتیب شکل‌گیری مفصل‌های خمیری سازه اثر گذارند.



شکل ۱- قاب فولادی یک طبقه و یک دهانه و رفتار کشسان-مومسان عضوها و پیوندها [۱۸]

### ۳- معرفی قاب‌های مورد مطالعه

در این پژوهش، قاب یک طبقه- یک دهانه (F1) با پیوندهای متفاوت عضوی و تکیه‌گاهی، همانند شکل (۲) و همچنین، قاب یک طبقه- دو دهانه (F2) با پیوندهای متفاوت عضوی و تکیه‌گاهی، همانند شکل (۳) مورد مطالعه قرار می‌گیرند. بر پایه شکل‌های (۲) و (۳)، هر یک از قاب‌های فولادی در چهار گونه بررسی می‌شوند. در گونه یکم، همه پیوندها نیمه‌سخت، در گونه دوم، پیوندهای تیر به ستون، نیمه‌سخت، در گونه سوم،

نخست، تحلیل یقین‌اندیشانه دو قاب فولادی یک طبقه- یک دهانه (F1) و یک طبقه- دو دهانه (F2)، برای چهار گونه (حالت) متفاوت از پیوند میان عضوها و تکیه‌گاه‌ها انجام می‌پذیرد. در ادامه، برای شبیه‌سازی سختی دورانی پیوندهای تکیه‌گاهی و عضوی و همچنین، لنگر مومسان آن‌ها به عنوان متغیرهای تصادفی و انجام تحلیل احتمال‌اندیشانه از شبیه‌سازی مونت‌کارلو بهره‌جویی خواهد شد. در این راستا، متغیرهای تصادفی با توزیع‌های یکنواخت، نرمال و لگ‌نرمال و ضریب‌های پراکندگی ۵ تا ۲۰ درصد شبیه‌سازی می‌شوند و با انجام تحلیل خمیری در نرم‌افزار OpenSees، بار شکست قاب‌ها تعیین می‌گردد. بر این پایه، هر یک از قاب‌های F1 و F2، ۳۶۰۰۰۰ مرتبه برای متغیر تصادفی سختی پیوند و ۴۸۰۰۰۰ مرتبه برای متغیر تصادفی لنگر خمیری، شبیه‌سازی و تحلیل می‌شوند و احتمال خرابی سازه با به کارگیری فن مونت‌کارلو به دست می‌آید. در پایان، به ارزیابی پاسخ‌ها در دو حالت قطعی و احتمالاتی پرداخته می‌شود. درصد احتمال شکست و به دنبال آن، قابلیت اعتماد و شاخص قابلیت اطمینان برای توزیع‌های متفاوت و ضریب پراکندگی‌های گوناگون در جدول‌ها و نمودارهایی نمایش داده می‌شود. یافته‌ها، اثر چشم‌گیر سختی و لنگر خمیری پیوندهای عضوی و تکیه‌گاهی را بر پاسخ‌های تحلیل‌های یقین‌اندیشانه و احتمال‌اندیشانه نشان می‌دهند.

### ۲- صحت سنجی الگوسازی

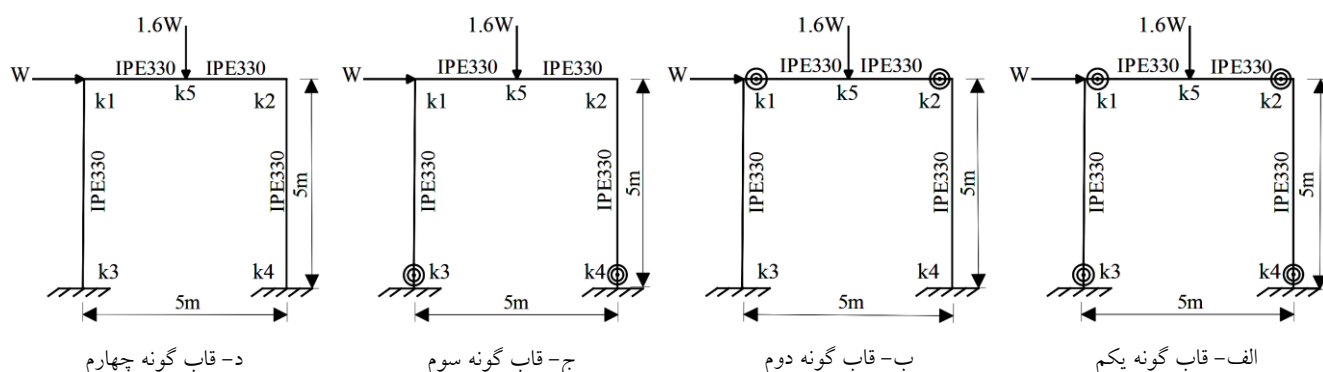
در این بخش، برای نشان دادن درستی الگوسازی پیشنهادی و پاسخ‌های نرم افزار OpenSees [۱۷]، تحلیل خمیری قاب فولادی یک طبقه و یک دهانه با کشسان-مومسان پنداشتن رفتار پیوندها و عضوها همانند شکل (۱) انجام می‌پذیرد. در این سازه، یک بار جانبی به مقدار  $W$  در تراز بام و یک بار قائم به مقدار  $1/6W$  در وسط دهانه تیر قاب وارد می‌گردد. مقطع تیر و ستون‌ها IPE330 در نظر گرفته شده است. ارتفاع ستون‌ها و طول دهانه تیر، ۵ متر می‌باشند. همچنین، ضریب کشسانی عضوها برابر  $2/05 \times 10^8$  کیلو نیوتن بر متر مربع پنداشته می‌شود. باید افزود، پیش از این، Ihaddoudene و همکارانش [۱۸]، با ارائه یک الگوی مکانیکی و بهره‌جویی از روش گام به گام، به تحلیل خمیری این قاب و ارزیابی اثر سختی پیوندهای عضوی و تکیه‌گاهی آن پرداختند. پاسخ‌های هر دو شیوه در جدول (۱) درج شده‌اند. بر پایه یافته‌های جدول (۱)، دقت و کارایی روش به کار گرفته شده با بهره‌جویی از نرم افزار

باید افزود، برای الگوسازی رفتار کشسان- مومسان پیوندها و عضوها از مرجع [۱۸] و نمودارهای لنگر- دوران شکل (۱) بهره‌جویی شده است. بر این پایه، ظرفیت نهایی لنگر خمیری پیوندها و عضوها به ترتیب،  $114/13$  کیلونیوتن متر و  $192/96$  کیلونیوتن متر می‌باشد. در ادامه، به واکاوی اثر سختی و لنگر مومسان پیوندهای عضو و تکیه‌گاهی در تحلیل‌های خمیری قطعی و احتمالاتی پرداخته می‌شود.

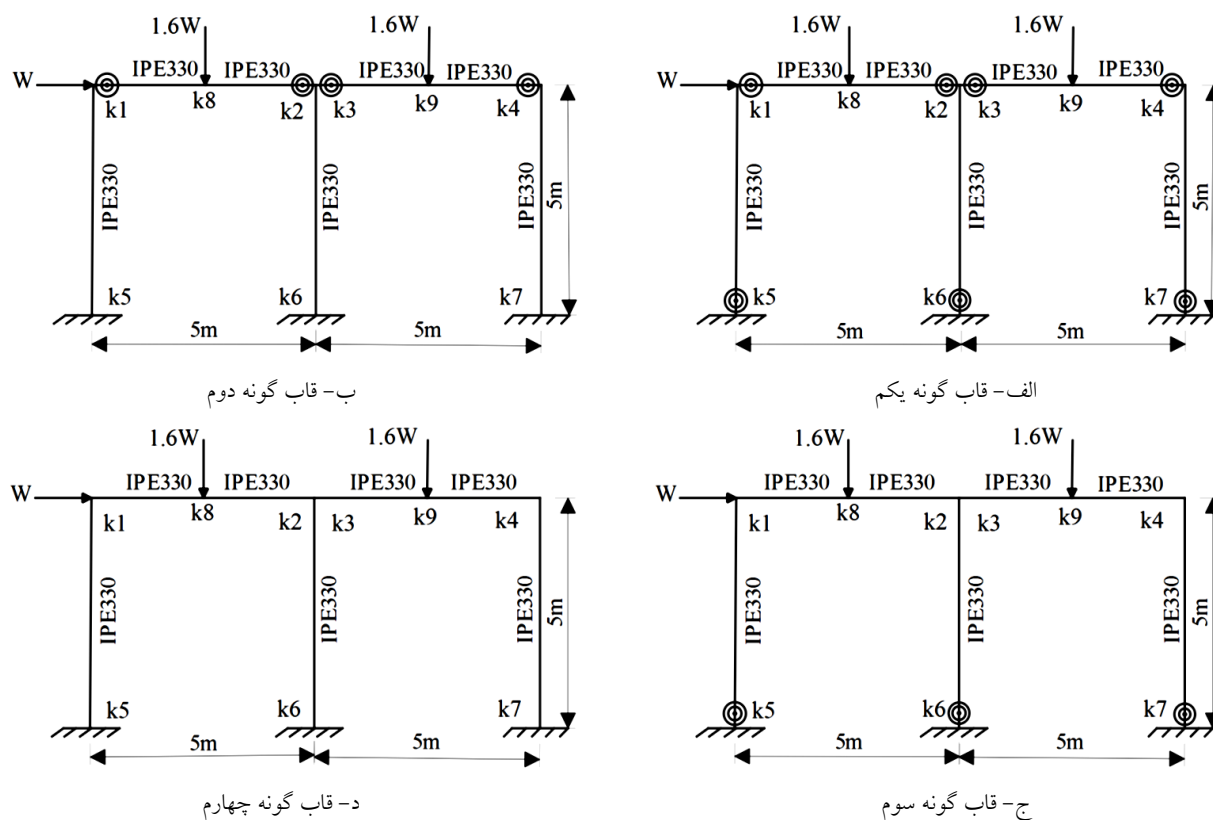
پیوندهای ستون به تکیه‌گاه، نیمه‌سخت و در گونه چهارم، همه پیوندها سخت هستند. در تمامی نمونه‌ها، یک بار جانبی به مقدار  $W$  در تراز بام و یک بار قائم به مقدار  $1.6W$  در وسط دهانه تیرها وارد می‌گردد. مقطع تیرها و ستون‌های قاب‌ها IPE330 در نظر گرفته شده است. ارتفاع ستون‌ها و طول دهانه تیرهای سازه‌ها ۵ متر می‌باشند. همچنین، ضریب کشسانی عضوها برابر  $2/05 \times 10^4$  کیلونیوتن بر متر مربع پنداشته می‌شود.

جدول ۱- مقایسه پاسخ‌های روش تحلیل گام به گام Ihaddoudene و همکارانش [۱۸] و روش تحلیل مفصل خمیری (OpenSees)

| قاب با پیوندهای متفاوت عضو و تکیه‌گاهی |         |         |         | روش تحلیل                   | پاسخ‌ها                                       |
|----------------------------------------|---------|---------|---------|-----------------------------|-----------------------------------------------|
|                                        |         |         |         |                             |                                               |
| ۹۱/۲۹۳                                 | ۱۱۱/۱۲۲ | -       | ۱۲۸/۶۴  | Ihaddoudene و همکارانش [۱۸] | بار شکست (kN)                                 |
| ۹۱/۳۲                                  | ۱۱۱/۱۵  | ۱۱۱/۱۵  | ۱۲۸/۷۰  | مفصل خمیری (OpenSees)       |                                               |
| ۰/۰۹۵۷                                 | ۰/۰۵۵۶  | -       | ۰/۰۵۴۲  | Ihaddoudene و همکارانش [۱۸] | تغییر مکان افقی گره ۱ (m)                     |
| ۰/۱۲۹۴                                 | ۰/۰۵۶۹۹ | ۰/۰۹۷۸۸ | ۰/۰۵۵۵  | مفصل خمیری (OpenSees)       |                                               |
| ۱-۳-۴-۲                                | ۳-۵-۴-۲ | -       | ۳-۵-۲-۴ | Ihaddoudene و همکارانش [۱۸] | ترتیب شکل‌گیری مفصل‌های خمیری (از راست به چپ) |
| ۱-۳-۴-۲                                | ۳-۵-۴-۲ | ۵-۳-۲-۴ | ۳-۵-۲-۴ | مفصل خمیری (OpenSees)       |                                               |



شکل ۲- قاب یک طبقه- یک دهانه (F1) با پیوندهای متفاوت عضو و تکیه‌گاهی



شکل ۳- قاب یک طبقه- دو دهانه (F2) با پیوندهای متفاوت عضوی و تکیه‌گاهی

#### ۴- تحلیل یقین‌اندیشانه

فروریختگی و تغییرمکان جانبی قاب‌های F1 و F2، به ترتیب، در جداول (۲) و (۳) در دسترس قرار گرفته‌اند. افزون بر این، ترتیب شکل‌گیری مفصل‌های مومسان گونه‌های یکم تا چهارم قاب‌های یک طبقه- یک دهانه (F1) و یک طبقه- دو دهانه (F2)، به ترتیب، در شکل‌های (۴) و (۵) می‌آیند.

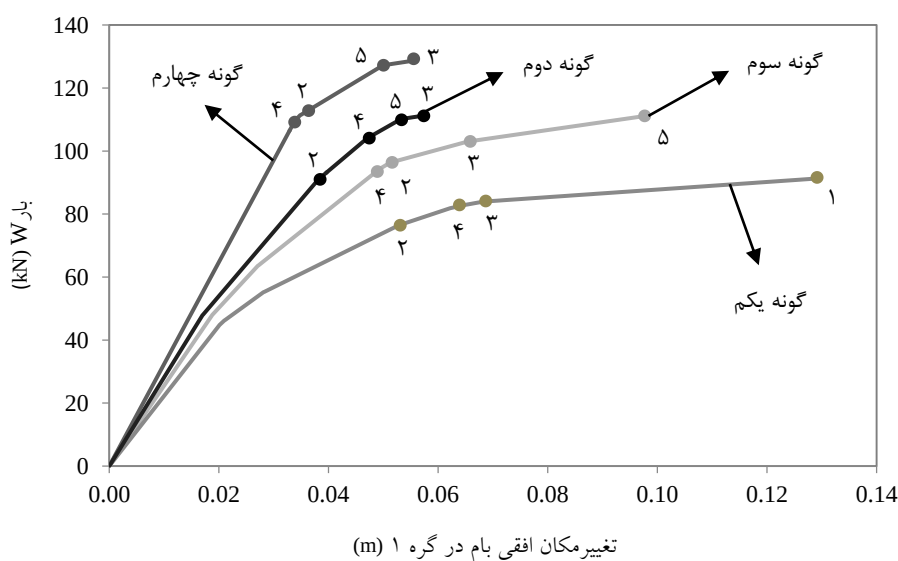
در این بخش، به منظور ارزیابی اثر سختی پیوندهای عضوی و تکیه‌گاهی در تحلیل قطعی، تحلیل خمیری یقین‌اندیشانه گونه‌های یکم تا چهارم قاب‌های F1 و F2 با بهره‌جویی از نرم‌افزار OpenSees انجام می‌پذیرد. بر این پایه، پاسخ‌های بار

جدول ۲- بار شکست و تغییرمکان افقی بام در قاب یک طبقه- یک دهانه (F1) با پیوندهای متفاوت عضوی و تکیه‌گاهی

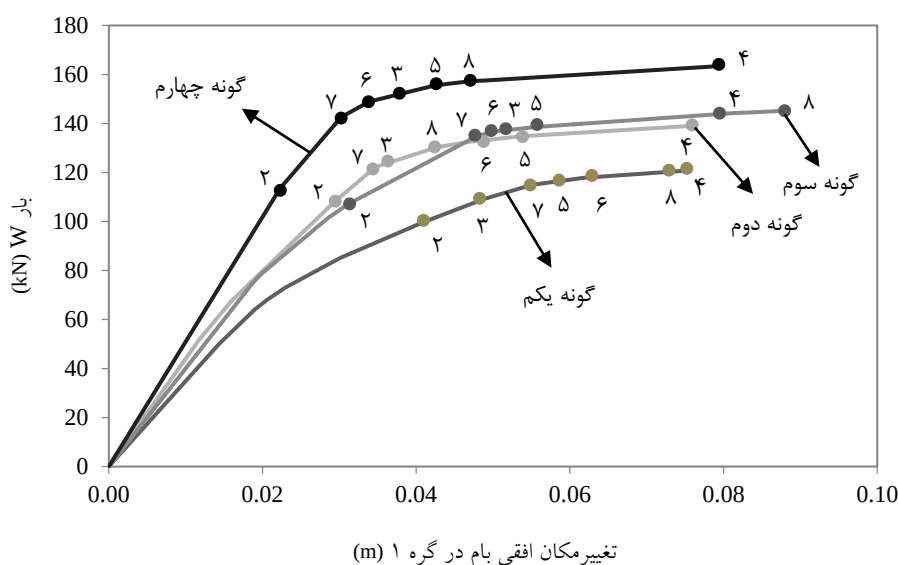
| پاسخ‌ها                         | گونه یکم<br>(پیوندهای عضوی و تکیه‌گاهی نیمه‌سخت) | گونه دوم<br>(پیوندهای عضوی نیمه‌سخت و پیوندهای تکیه‌گاهی سخت) | گونه سوم<br>(پیوندهای عضوی سخت و پیوندهای تکیه‌گاهی نیمه‌سخت) | گونه چهارم<br>(پیوندهای عضوی و تکیه‌گاهی سخت) |
|---------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| بار شکست (kN)                   | ۹۱/۳۲                                            | ۱۱۱/۱۵                                                        | ۱۱۱/۱۵                                                        | ۱۲۸/۷۰                                        |
| تغییرمکان افقی بام در گره ۱ (m) | ۰/۱۲۹۴                                           | ۰/۰۵۶۹۹                                                       | ۰/۰۹۷۸۸                                                       | ۰/۰۵۵۵                                        |
| نسبت بار شکست هنجار شده         | ۰/۷۱                                             | ۰/۸۶                                                          | ۰/۸۶                                                          | ۱/۰۰                                          |
| نسبت تغییرمکان افقی هنجار شده   | ۲/۳۳                                             | ۱/۰۳                                                          | ۱/۷۶                                                          | ۱/۰۰                                          |

جدول ۳- بار شکست و تغییر مکان افقی در قاب یک طبقه- دو دهانه (F2) با پیوندهای متفاوت عضوی و تکیه‌گاهی

| پاسخ‌ها                           | گونه یکم<br>(پیوندهای عضوی و تکیه‌گاهی نیمه‌سخت) | گونه دوم<br>(پیوندهای عضوی نیمه‌سخت و پیوندهای تکیه‌گاهی سخت) | گونه سوم<br>(پیوندهای عضوی سخت و پیوندهای تکیه‌گاهی نیمه‌سخت) | گونه چهارم<br>(پیوندهای عضوی و تکیه‌گاهی سخت) |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| بار شکست (kN)                     | ۱۲۰/۷۶                                           | ۱۳۹/۰۴                                                        | ۱۴۵/۱۵                                                        | ۱۶۳/۳۱                                        |
| تغییر مکان افقی بام در گرہ ۱ (m)  | ۰/۰۷۶۲۶                                          | ۰/۰۷۵۷۳                                                       | ۰/۰۸۷۶۰                                                       | ۰/۰۷۸۷۳                                       |
| نسبت بار شکست<br>هنجار شده        | ۰/۷۴                                             | ۰/۸۵                                                          | ۰/۸۹                                                          | ۱/۰۰                                          |
| نسبت تغییر مکان افقی<br>هنجار شده | ۰/۹۷                                             | ۰/۹۶                                                          | ۱/۱۱                                                          | ۱/۰۰                                          |



شکل ۴- نمودار بار- تغییر مکان و ترتیب شکل‌گیری مفصل‌های خمیری در گونه‌های متفاوت قاب یک طبقه- یک دهانه (F1)



شکل ۵- نمودار بار- تغییر مکان و ترتیب شکل‌گیری مفصل‌های خمیری در گونه‌های متفاوت قاب یک طبقه- دو دهانه (F2)



پاسخ‌های جدول (۲) نشان می‌دهند، کاهش سختی پیوندهای عضوی و تکیه‌گاهی، سبب کاهش بار فروریختگی قاب یک طبقه - یک دهانه می‌گردند؛ به طوری که، بار شکست در گونه‌های یکم، دوم و سوم قاب F1، نسبت به گونه چهارم آن، به ترتیب، ۲۹ درصد، ۱۴ درصد و ۱۴ درصد، کاهش خواهد داشت. افزون بر این‌ها، نرمی پیوندهای عضوی و تکیه‌گاهی، سبب افزایش تغییرمکان افقی بام قاب یک طبقه - یک دهانه می‌گردد؛ به طوری که، تغییرمکان جانبی گره ۱ در گونه‌های یکم، دوم و سوم قاب F1، نسبت به گونه چهارم آن، به ترتیب، ۱۳۳ درصد، ۳ درصد و ۷۶ درصد، افزایش دارد. از سوی دیگر، بر پایه نمودار شکل (۴)، تغییر سختی دورانی پیوندهای تیر به ستون و ستون‌ها به تکیه‌گاه، سبب جابجایی ترتیب شکل‌گیری مفصل‌های خمیری سازه خواهد شد.

بر پایه جدول (۳)، با کاهش سختی پیوندهای عضوی و تکیه‌گاهی، بار فروریختگی قاب یک طبقه - دو دهانه کاهش می‌یابد؛ به طوری که، بار شکست در گونه‌های یکم، دوم و سوم قاب F2، نسبت به گونه چهارم آن، به ترتیب، ۲۶ درصد، ۱۵ درصد و ۱۱ درصد، کاهش دارد. با وجود این، نرمی پیوندهای عضوی و تکیه‌گاهی، افزایش یا کاهش تغییرمکان افقی بام قاب یک طبقه - دو دهانه را در پی دارد؛ به طوری که، تغییرمکان جانبی گره ۱ در گونه‌های یکم و دوم قاب F2، نسبت به گونه چهارم آن، به ترتیب، ۳ درصد و ۴ درصد، کاهش و در گونه سوم، ۱۱ درصد، افزایش خواهد داشت. از سوی دیگر، نمودار شکل (۵) نشان می‌دهد، با تغییر سختی دورانی پیوندهای عضوی و تکیه‌گاهی، ترتیب شکل‌گیری مفصل‌های خمیری سازه تغییر می‌کند.

آن گونه که آمد، کاهش سختی دورانی پیوندهای تیرها به ستون‌ها و ستون‌ها به تکیه‌گاه، همواره سبب کاهش بار فروریختگی و جابجایی ترتیب شکل‌گیری مفصل‌های خمیری قاب‌های فولادی می‌شود. با وجود این، نرمی پیوندهای عضوی و تکیه‌گاهی می‌تواند سبب کاهش و یا افزایش تغییرمکان جانبی سازه گردد. به سخن دیگر، به سبب جابجایی مفصل‌های خمیری در پی کاهش سختی پیوندها، تغییر شکل جانبی قاب در پاره‌ای از حالت‌ها افزایش و در برخی گونه‌ها کاهش خواهد یافت. از این رو، اثر سختی دورانی پیوندهای عضوی و تکیه‌گاهی بایستی به درستی در تحلیل خمیری قاب‌های فولادی وارد شود.

## ۵- تحلیل احتمال‌اندیشانه

در این بخش، به منظور ارزیابی اثر سختی و لنگر مومسان پیوندهای عضوی و تکیه‌گاهی در تحلیل احتمالاتی، تحلیل خمیری احتمال‌اندیشانه گونه‌های متفاوت قاب‌های F1 و F2 با بهره‌جویی از نرم‌افزار OpenSees انجام می‌پذیرد. در این راستا، سختی دورانی و لنگر مومسان پیوندهای عضوی و تکیه‌گاهی به عنوان متغیرهای تصادفی اختیار می‌شوند. خاطر نشان می‌کند، بر پایه شکل (۱-ج)، هر سه مولفه سختی نمودار لنگر- دوران پیوندها تصادفی پنداشته می‌شوند. در تحلیل احتمال‌اندیشانه، ویژگی‌های آماری پاسخ‌ها از فرآیندهای شبیه‌سازی به دست می‌آیند. متداول‌ترین این نوع روش‌ها، فرآیند شبیه‌سازی مونت‌کارلو می‌باشد که در این پژوهش مورد استفاده قرار می‌گیرد.

روش مونت‌کارلو در یک سامانه، مشتمل بر تولید بردارهای تصادفی  $u$  بر اساس توزیع چگالی احتمالی بردار تصادفی  $x$ ، یعنی  $f_x(u)$  می‌باشد. بدین‌صورت که در این  $x$  ایجاد شده، مقدار تابع حالت حدی  $g$  بررسی می‌شود. به طوری که برای  $g(x) \leq 0$ ، شکست رخ خواهد داد و برای  $g(x) > 0$ ، حالت ایمن در این سیستم برقرار می‌گردد. احتمال شکست  $^3(g(x) \leq 0)$  در فن مونت‌کارلو از تقسیم تعداد نقطه‌هایی که سبب شکست می‌شوند به شمار کل نقاط به دست می‌آید. به سخن دیگر، به جای یافتن تابع اولیه رابطه (۱)، از رابطه تقریبی (۲)، برای برآورد احتمال شکست ( $P_f$ )، بهره می‌برند.

$$P_f = \int_{g(x) \leq 0} f_x(u) du \quad (1)$$

$$P_f = \frac{1}{N} \int_{i=1}^N I_g(x_i) = \frac{n_f}{N} \quad (2)$$

در این رابطه،  $N$ ، تعداد کل متغیرهای تصادفی ایجاد شده  $x$  می‌باشد و  $n_f$ ، شمار حالت‌هایی است که در آن‌ها  $g(x) \leq 0$  به دست می‌آید. همچنین،  $I_g(x_i)$  شاخص شکست می‌باشد و به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$I_g(x_i) = \begin{cases} 0 & g(x_i) > 0 \\ 1 & g(x_i) \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

پس از آن که احتمال شکست حساب گردید، با بهره‌جویی از رابطه (۴)، می‌توان قابلیت اعتماد سازه  $^4(R_e)$  را یافت:

$$R_e = 1 - P_f \quad (4)$$

از سوی دیگر، با در اختیار داشتن  $P_f$ ، شاخص قابلیت اعتماد  $^5(\beta)$ ، از رابطه زیر در دسترس قرار می‌گیرد:

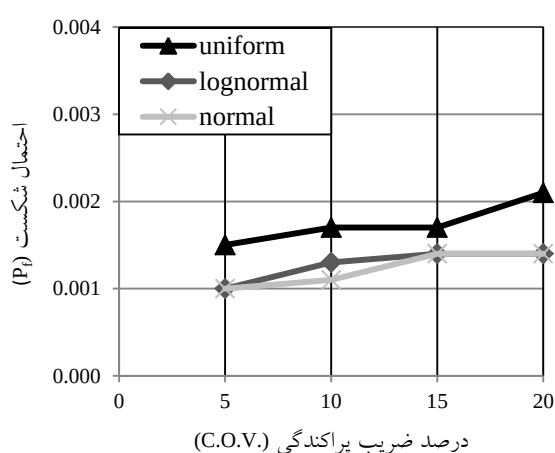
$$\beta = \phi^{-1}(1 - P_f) \quad (5)$$



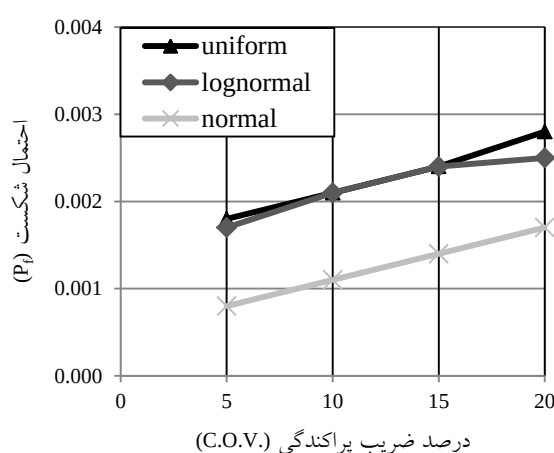
۴۸۰۰۰۰ مرتبه برای متغیر تصادفی لنگر خمیری، شبیه‌سازی و تحلیل خواهند شد. سپس، برای هر یک از پیوندها با توجه به بار فروریختگی سازه در تحلیل قطعی، شمار شکست‌ها و به دنبال آن، احتمال شکست قاب ( $P_f$ )، با بهره‌جویی از رابطه (۲) در دسترس قرار می‌گیرد. باید افزود، هدف طرح در اینجا، ظرفیت باربری قاب می‌باشد. بر این پایه،  $m_f$  شمار حالت‌هایی است که مقدار بار شکست در تحلیل احتمال‌اندیشانه از تحلیل یقین‌اندیشانه کمتر شده است. بر این پایه، نمودار احتمال شکست قاب‌های F1 و F2 در برابر ضریب پراکندگی و برای توزیع‌ها و گونه‌های متفاوت، به ترتیب، در شکل‌های (۶) و (۷) آمده است.

در این رابطه،  $\phi^{-1}(\bullet)$ ، وارون تابع چگالی تجمعی توزیع نرمال می‌باشد.

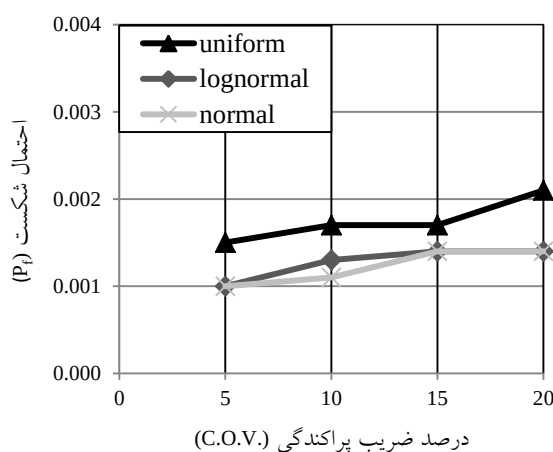
در ادامه، تحلیل خمیری احتمال‌اندیشانه بر پایه فن شبیه‌سازی مونت‌کارلو، برای هر یک از پیوندهای عضوی و تکیه‌گاهی و برای سه توزیع احتمالاتی نرمال<sup>۶</sup>، لگ‌نرمال<sup>۷</sup> و یکنواخت<sup>۸</sup>، با ضریب‌های پراکندگی ۵ تا ۲۰ درصد بر روی گونه‌های یکم تا سوم با متغیر تصادفی سختی پیوند و بر روی گونه‌های یکم تا چهارم با متغیر تصادفی لنگر خمیری قاب‌های شکل‌های (۲) و (۳) انجام می‌پذیرد. در این راستا، هر یک از قاب‌های یک طبقه- یک دهانه (F1) و یک طبقه- دو دهانه (F2)، مرتبه ۳۶۰۰۰۰ برای متغیر تصادفی سختی پیوند و



ب- قاب گونه دوم



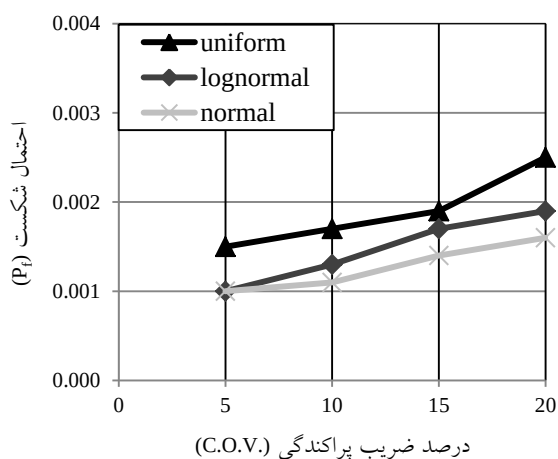
الف- قاب گونه یکم



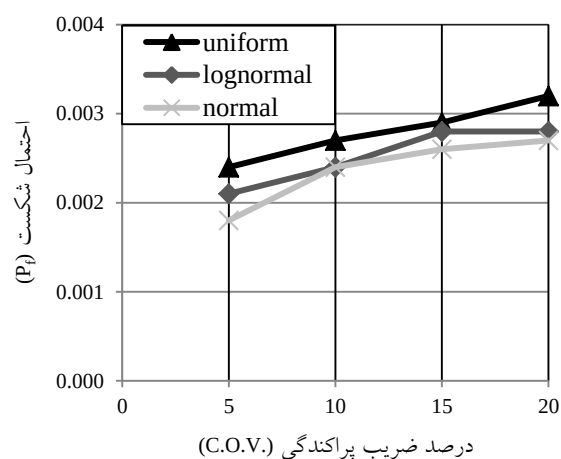
ج- قاب گونه سوم

شکل ۶- نمودار احتمال شکست قاب یک طبقه- یک دهانه (F1) در برابر ضریب پراکندگی برای توزیع‌های متفاوت با متغیر سختی پیوند

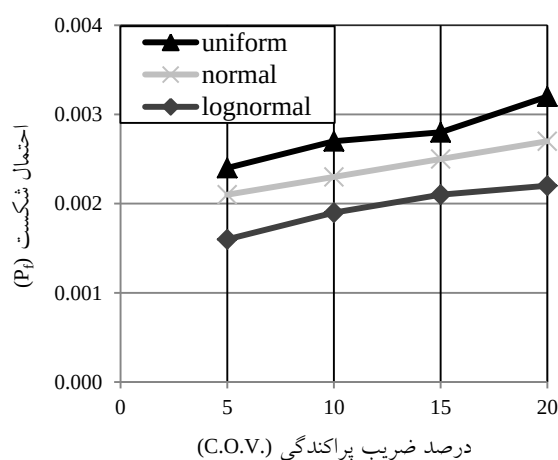




ب- قاب گونه دوم



الف- قاب گونه یکم



ج- قاب گونه سوم

شکل ۷- نمودار احتمال شکست قاب یک طبقه- دو دهانه (F2) در برابر ضریب پراکندگی برای توزیع‌های متفاوت با متغیر سختی پیوند

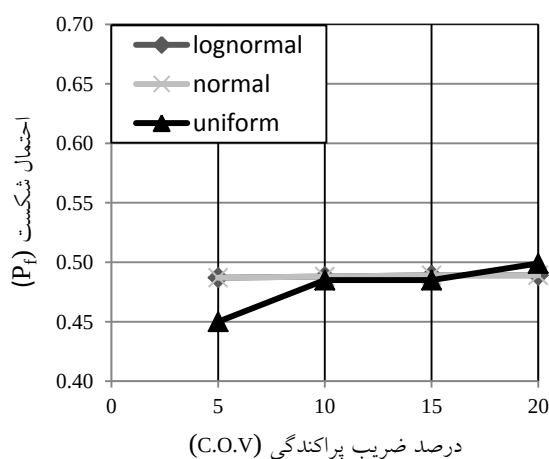
همواره کمتر از دیگر توزیع‌ها است. آشکار است که در هر سه نمونه از قاب F1، صرف نظر از توزیع احتمالاتی سختی پیوندها، افزایش ضریب پراکندگی، سبب افزایش احتمال شکست سازه می‌گردد.

نمودارهای شکل (۷) نشان می‌دهند، با پنداشتن سختی پیوندها به عنوان متغیر تصادفی با توزیع‌های احتمالاتی نرمال، لگ نرمال و یکنواخت، احتمال شکست قاب‌های گونه یکم، دوم و سوم قاب F2، بین  $0/001$  تا  $0/0032$  می‌باشد. به سخن دیگر، احتمال شکست بیشینه در گونه یکم قاب یک طبقه- دو دهانه، برابر با  $0/0032$  و در توزیع یکنواخت با ضریب پراکندگی ۲۰ درصد و احتمال شکست کمینه در گونه دوم قاب یک طبقه- دو دهانه، برابر با  $0/001$  که برای توزیع نرمال و ضریب پراکندگی

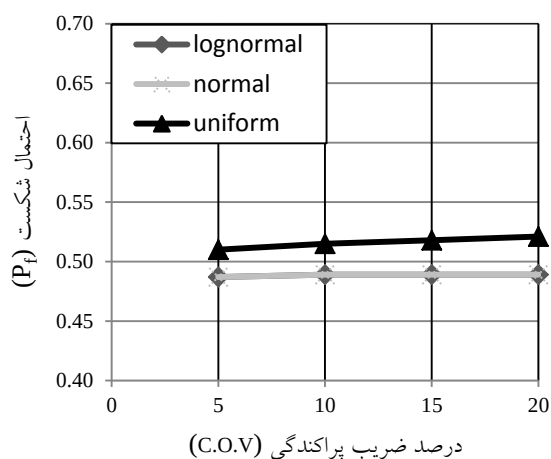
بر پایه نمودارهای شکل (۶)، با تصادفی پنداشتن سختی پیوندهای عضوی و تکیه‌گاهی و پیروی آن‌ها از توزیع‌های احتمالاتی نرمال، لگ نرمال و یکنواخت، احتمال شکست گونه‌های یکم، دوم و سوم قاب F1، بین  $0/0008$  تا  $0/0028$  متغیر می‌باشد. به سخن دیگر، احتمال شکست بیشینه در گونه یکم قاب یک طبقه- یک دهانه، برابر با  $0/0028$  و برای توزیع یکنواخت با ضریب پراکندگی ۲۰ درصد و احتمال شکست کمینه در گونه‌های دوم و سوم قاب یک طبقه- یک دهانه، برابر با  $0/0008$  که در توزیع نرمال با ضریب پراکندگی ۵ درصد رخ می‌دهند. همچنین، احتمال شکست برای توزیع یکنواخت، همواره بیشتر از دیگر توزیع‌ها می‌باشد. افزون بر این، احتمال شکست برای توزیع نرمال، در قاب‌های گونه یکم، دوم و سوم

در توزیع‌های نرمال و لگ‌نرمال برای قاب گونه‌های یکم تا چهارم با پنداشتن لنگر مومسان به عنوان متغیر تصادفی، مقدار احتمال شکست قاب، به طور تقریبی ثابت و نزدیک به ۴۹ درصد می‌باشد. با وجود این، با افزایش ضریب پراکندگی در توزیع یکنواخت، احتمال شکست قاب گونه یکم با شیب اندکی افزایش می‌یابد. همچنین، در قاب گونه دوم و سوم، احتمال شکست قاب در توزیع یکنواخت تا ضریب پراکندگی ۱۰ درصد با شیب ملایم افزایش می‌یابد. در ادامه، احتمال شکست به‌طور تقریبی ثابت می‌ماند. از سوی دیگر، در قاب گونه چهارم، با افزایش ضریب پراکندگی احتمال شکست قاب در توزیع یکنواخت با شیب بیشتری نسبت به گونه‌های دیگر افزایش می‌یابد.

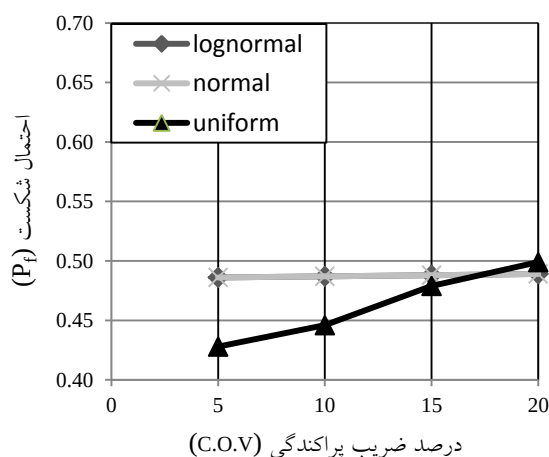
۵ درصد خواهند بود. افزون بر این، احتمال شکست برای توزیع یکنواخت، همواره بیشتر از دیگر توزیع‌ها است. همچنین، احتمال شکست برای توزیع نرمال، در قاب‌های گونه یکم و دوم، همواره کمتر از دیگر توزیع‌ها می‌باشد. در حالی که برای قاب گونه سوم، توزیع لگ‌نرمال، دارای کمترین احتمال شکست نسبت به دیگر توزیع‌ها است. روشن است که در هر سه نمونه از قاب F2، صرف نظر از توزیع احتمالاتی سختی پیوندها، با افزایش ضریب پراکندگی، احتمال شکست سازه، افزایش می‌یابد. در نمودارهای شکل (۸) دیده می‌شود که احتمال شکست بر پایه متغیر تصادفی لنگر خمیری برای توزیع یکنواخت به ترتیب در قاب گونه یکم، دوم، سوم و چهارم از حساسیت بالاتری برخوردار است. با افزایش ضریب پراکندگی



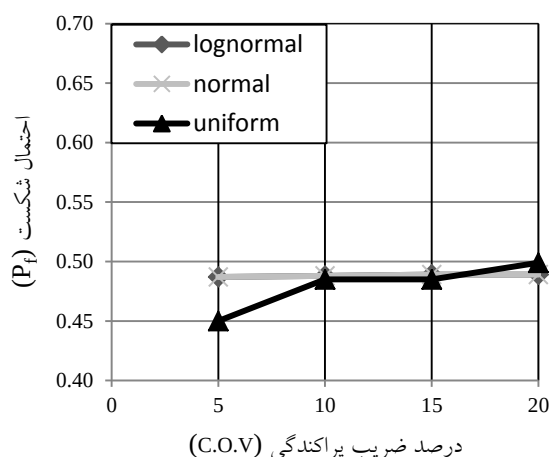
ب- قاب گونه دوم



الف- قاب گونه یکم



د- قاب گونه چهارم



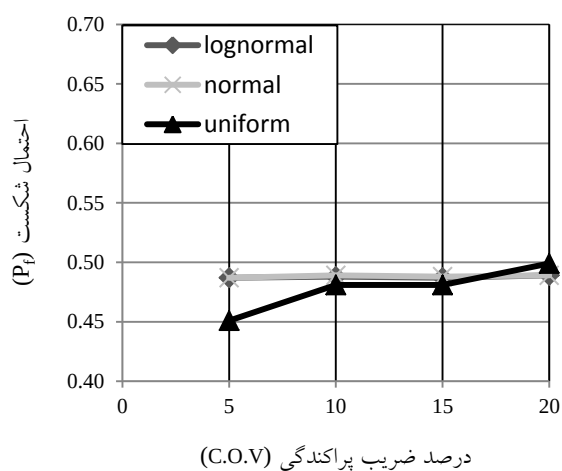
ج- قاب گونه سوم

شکل ۸- نمودار احتمال شکست قاب یک طبقه- یک دهانه (F1) در برابر ضریب پراکندگی برای توزیع‌های متفاوت با متغیر لنگر خمیری

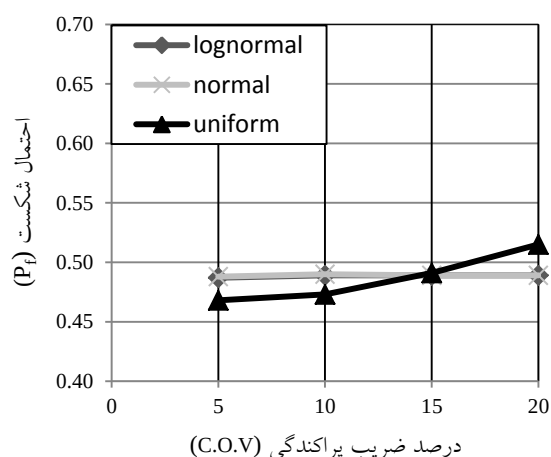


در نمودارهای شکل (۹) می‌توان دید که احتمال شکست بر پایه متغیر تصادفی لنگر خمیری برای توزیع‌های نرمال و لگ‌نرمال در قاب‌های مختلف، حدود ۵۰ درصد است. با وجود

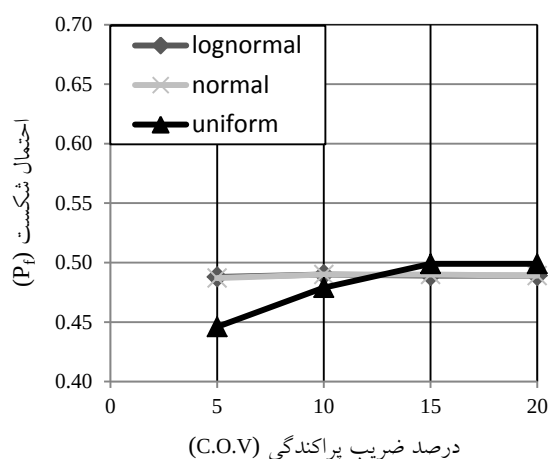
این، در توزیع یکنواخت، احتمال شکست قاب بین ۴۵ تا ۵۳ درصد متغیر می‌باشد



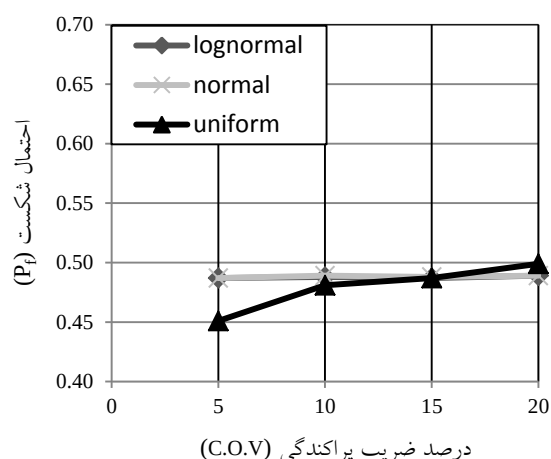
ب- قاب گونه دوم



الف- قاب گونه یکم



د- قاب گونه چهارم



ج- قاب گونه سوم

**شکل ۹- نمودار احتمال شکست قاب یک طبقه- یک دهانه (F2) در برابر ضریب پراکندگی برای توزیع‌های متفاوت با متغیر لنگر خمیری**

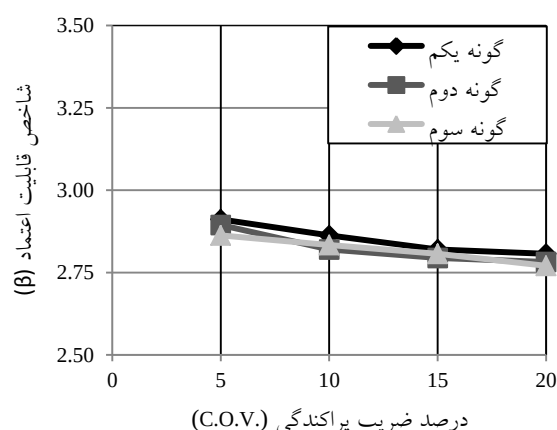
گونه‌های متفاوت قاب‌های یک طبقه- یک دهانه (F1) و یک طبقه- دو دهانه (F2) در برابر ضریب پراکندگی با نرمال پنداشتن توزیع سختی پیوندها در شکل (۱۰) برای متغیر تصادفی سختی پیوند و شکل (۱۱) برای متغیر تصادفی لنگر مومسان به نمایش در آمده است.

بر پایه جدول (۴) و برای متغیر تصادفی سختی پیوند، احتمال‌های شکست بیشینه و کمینه قاب F1 برای توزیع نرمال، به ترتیب، برابر با ۰/۰۰۱۷ و ۰/۰۰۰۸ می‌باشند که در گونه یکم

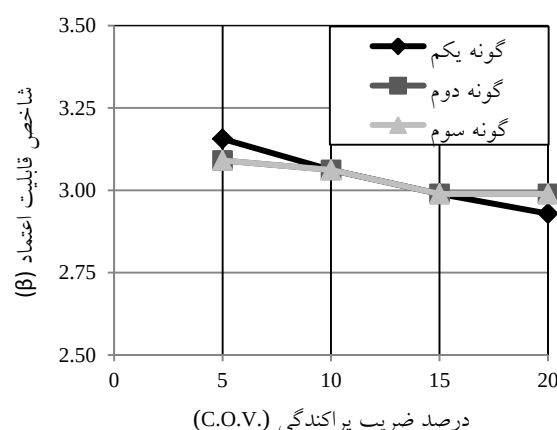
باید دانست، با در اختیار داشتن احتمال خرابی قاب ( $P_F$ )، و بهره‌جویی از رابطه‌های (۴) و (۵)، می‌توان قابلیت اطمینان ( $R_e$ ) و شاخص قابلیت اعتماد سازه ( $\beta$ ) را یافت. این کار برای توزیع نرمال با ضریب پراکندگی‌های ۵ تا ۲۰ درصد و گونه‌های یکم تا سوم قاب‌های F1 و F2 انجام پذیرفته است و پاسخ‌های هر یک از قاب‌ها، به ترتیب، در جداول (۴) و (۵) برای متغیر تصادفی سختی پیوند و متغیر تصادفی لنگر مومسان آمده‌اند. همچنین، برای آگاهی بیشتر، نمودار شاخص قابلیت اعتماد برای

بر پایه جدول (۴) و برای متغیر تصادفی لنگر خمیری، احتمال شکست بیشینه و کمینه قاب F1 برای توزیع نرمال، به ترتیب، برابر با  $0/489$  و  $0/486$  می‌باشند که در گونه چهارم رخ می‌دهند. افزون بر این، شاخص قابلیت اطمینان بیشینه قاب F1 برای توزیع نرمال، در گونه چهارم با ضریب پراکندگی ۵ درصد اتفاق می‌افتد که برابر با  $0/351$  است. همچنین شاخص قابلیت اعتماد کمینه برای گونه چهارم در ضریب پراکندگی ۲۰ درصد می‌باشد که برابر با  $0/25069$  خواهد بود. افزون بر این‌ها، قابلیت اطمینان بیشینه و کمینه در گونه چهارم روی می‌دهد که به ترتیب، برابر با  $0/40$  درصد و  $0/51$  درصد می‌باشد.

رخ می‌دهند. افزون بر این، شاخص قابلیت اطمینان بیشینه قاب F1 برای توزیع نرمال، در گونه یکم با ضریب پراکندگی ۵ درصد اتفاق می‌افتد که برابر با  $3/1559$  است. همچنین، شاخص قابلیت اعتماد کمینه برای گونه یکم در ضریب پراکندگی ۲۰ درصد می‌باشد که برابر با  $2/9291$  خواهد بود. افزون بر این‌ها، قابلیت اطمینان بیشینه و کمینه در گونه یکم روی می‌دهد که به ترتیب، برابر با  $99/92$  درصد و  $99/83$  درصد می‌باشد. آشکار است که در هر سه گونه یکم، دوم و سوم از قاب F1، افزایش ضریب پراکندگی، سبب کاهش قابلیت اعتماد و شاخص قابلیت اطمینان سازه می‌گردد.

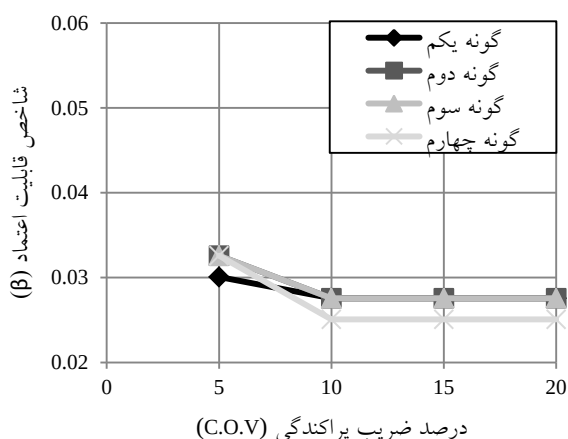


ب- قاب (F2)

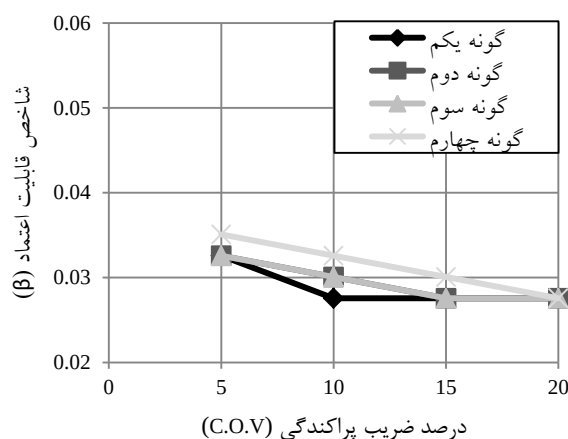


الف- قاب (F1)

شکل ۱۰- نمودار شاخص قابلیت اعتماد برای گونه‌های متفاوت قاب‌های یک طبقه- یک دهانه (F1) و یک طبقه- دو دهانه (F2) در برابر ضریب پراکندگی با متغیر سختی پیوند



ب- قاب (F2)



الف- قاب (F1)

شکل ۱۱- نمودار شاخص قابلیت اعتماد برای گونه‌های متفاوت قاب‌های یک طبقه- یک دهانه (F1) و یک طبقه- دو دهانه (F2) در برابر ضریب پراکندگی با متغیر لنگر خمیری

جدول ۴- احتمال خرابی، قابلیت اعتماد و شاخص قابلیت اطمینان در توزیع نرمال برای نمونه‌های متفاوت قاب یک طبقه - یک دهانه

| شاخص قابلیت اطمینان<br>( $\beta$ ) | قابلیت اعتماد<br>( $R_e$ ) | احتمال خرابی<br>( $P_f$ ) | ضریب پراکندگی<br>(C.O.V.) | متغیر تصادفی | گونه قاب F2                                                   |
|------------------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------|---------------------------------------------------------------|
| ۳/۱۵۵۹۰۷                           | ۹۹/۹۲٪                     | ۰/۰۰۰۸                    | ٪۵                        | سختی پیوند   | گونه یکم<br>(پیوندهای عضوی و تکیه‌گاهی نیمه‌سخت)              |
| ۳/۰۶۱۸۱۴۳                          | ۹۹/۸۹٪                     | ۰/۰۰۱۱                    | ٪۱۰                       |              |                                                               |
| ۲/۹۸۸۸۸۲                           | ۹۹/۸۶٪                     | ۰/۰۰۱۴                    | ٪۱۵                       |              |                                                               |
| ۲/۹۲۹۰۵۱۲                          | ۹۹/۸۳٪                     | ۰/۰۰۱۷                    | ٪۲۰                       |              |                                                               |
| ۰/۰۳۲۵۹۱۹                          | ۵۱/۳۰٪                     | ۰/۴۸۷                     | ٪۵                        | لنگر خمیری   |                                                               |
| ۰/۰۲۷۵۷۶۴                          | ۵۱/۱۰٪                     | ۰/۴۸۹                     | ٪۱۰                       |              |                                                               |
| ۰/۰۲۷۵۷۶۴                          | ۵۱/۱۰٪                     | ۰/۴۸۹                     | ٪۱۵                       |              |                                                               |
| ۰/۰۲۷۵۷۶۴                          | ۵۱/۱۰٪                     | ۰/۴۸۹                     | ٪۲۰                       |              |                                                               |
| ۳/۰۹۰۲۳۲                           | ۹۹/۹۰٪                     | ۰/۰۰۱۰                    | ٪۵                        | سختی پیوند   | گونه دوم<br>(پیوندهای عضوی نیمه‌سخت و پیوندهای تکیه‌گاهی سخت) |
| ۳/۰۶۱۸۱۴۳                          | ۹۹/۸۹٪                     | ۰/۰۰۱۱                    | ٪۱۰                       |              |                                                               |
| ۲/۹۸۸۸۸۲                           | ۹۹/۸۶٪                     | ۰/۰۰۱۴                    | ٪۱۵                       |              |                                                               |
| ۲/۹۸۸۸۸۲                           | ۹۹/۸۶٪                     | ۰/۰۰۱۴                    | ٪۲۰                       |              |                                                               |
| ۰/۰۳۲۵۹۲                           | ۵۱/۳۰٪                     | ۰/۴۸۷                     | ٪۵                        | لنگر خمیری   |                                                               |
| ۰/۰۳۰۰۸۴                           | ۵۱/۲۰٪                     | ۰/۴۸۸                     | ٪۱۰                       |              |                                                               |
| ۰/۰۲۷۵۷۶                           | ۵۱/۱۰٪                     | ۰/۴۸۹                     | ٪۱۵                       |              |                                                               |
| ۰/۰۲۷۵۷۶                           | ۵۱/۱۰٪                     | ۰/۴۸۹                     | ٪۲۰                       |              |                                                               |
| ۳/۰۹۰۲۳۲                           | ۹۹/۹۰٪                     | ۰/۰۰۱۰                    | ٪۵                        | سختی پیوند   | گونه سوم<br>(پیوندهای عضوی سخت و پیوندهای تکیه‌گاهی نیمه‌سخت) |
| ۳/۰۶۱۸۱۴                           | ۹۹/۸۹٪                     | ۰/۰۰۱۱                    | ٪۱۰                       |              |                                                               |
| ۲/۹۸۸۸۸۲                           | ۹۹/۸۶٪                     | ۰/۰۰۱۴                    | ٪۱۵                       |              |                                                               |
| ۲/۹۸۸۸۸۲                           | ۹۹/۸۶٪                     | ۰/۰۰۱۴                    | ٪۲۰                       |              |                                                               |
| ۰/۰۳۲۵۹۲                           | ۵۱/۳۰٪                     | ۰/۴۸۷                     | ٪۵                        | لنگر خمیری   |                                                               |
| ۰/۰۳۰۰۸۴                           | ۵۱/۲۰٪                     | ۰/۴۸۸                     | ٪۱۰                       |              |                                                               |
| ۰/۰۲۷۵۷۶                           | ۵۱/۱۰٪                     | ۰/۴۸۹                     | ٪۱۵                       |              |                                                               |
| ۰/۰۲۷۵۷۶                           | ۵۱/۱۰٪                     | ۰/۴۸۹                     | ٪۲۰                       |              |                                                               |
| ۰/۰۳۵۱۰۰                           | ۵۱/۴۰٪                     | ۰/۴۸۶                     | ٪۵                        | لنگر خمیری   | گونه چهارم<br>(پیوندهای عضوی و تکیه‌گاهی سخت)                 |
| ۰/۰۳۲۵۹۲                           | ۵۱/۳۰٪                     | ۰/۴۸۷                     | ٪۱۰                       |              |                                                               |
| ۰/۰۳۰۰۸۴                           | ۵۱/۲۰٪                     | ۰/۴۸۸                     | ٪۱۵                       |              |                                                               |
| ۰/۰۲۵۰۶۹                           | ۵۱/۰۰٪                     | ۰/۴۹۰                     | ٪۲۰                       |              |                                                               |

جدول (۵) و برای متغیر تصادفی سختی پیوند، نشان می‌دهد که احتمال خرابی بیشینه قاب F2 برای توزیع نرمال، برابر با ۰/۰۰۲۸ می‌باشد که در گونه سوم رخ می‌دهد. با وجود این، احتمال شکست کمینه قاب F2 برای توزیع نرمال، برابر با ۰/۰۰۱۸ است که در گونه یکم روی می‌دهد. همچنین، شاخص

قابلیت اطمینان بیشینه در ضریب پراکندگی ۵ درصد و برای گونه یکم، برابر با ۲/۹۱۱۲ و شاخص قابلیت اعتماد کمینه در ضریب پراکندگی ۲۰ درصد و برای گونه سوم، برابر با ۲/۷۷۰۳ می‌باشد. افزون بر این‌ها، قابلیت اطمینان بیشینه در گونه یکم، برابر با ۹۹/۸۲ درصد و قابلیت اعتماد کمینه برای گونه سوم،

برابر با ۹۹/۷۲ درصد خواهد بود. روشن است که در هر چهار گونه از قاب F2، افزایش ضریب پراکندگی، سبب کاهش قابلیت

جدول ۵- احتمال خرابی، قابلیت اعتماد و شاخص قابلیت اطمینان در توزیع نرمال برای نمونه‌های متفاوت قاب یک طبقه- دو دهانه

| گونه قاب F2                                                   | متغیر تصادفی | ضریب پراکندگی (C.O.V.) | احتمال خرابی ( $P_f$ ) | قابلیت اعتماد ( $R_e$ ) | شاخص قابلیت اطمینان ( $\beta$ ) |
|---------------------------------------------------------------|--------------|------------------------|------------------------|-------------------------|---------------------------------|
| گونه یکم<br>(پیوندهای عضوی و تکیه‌گاهی نیمه‌سخت)              | سختی پیوند   | ۰.۵٪                   | ۰/۰۰۱۸                 | ۹۹/۸۲٪                  | ۲/۹۱۱۲۳۸                        |
|                                                               |              | ۱۰٪                    | ۰/۰۰۲۱                 | ۹۹/۷۹٪                  | ۲/۸۶۲۷۳۶                        |
|                                                               |              | ۱۵٪                    | ۰/۰۰۲۴                 | ۹۹/۷۶٪                  | ۲/۸۲۰۱۵۸                        |
|                                                               |              | ۲۰٪                    | ۰/۰۰۲۵                 | ۹۹/۷۵٪                  | ۲/۸۰۷۰۳۴                        |
|                                                               | لنگر خمیری   | ۰.۵٪                   | ۰/۴۸۸                  | ۵۱/۲۰٪                  | ۰/۰۳۰۰۸۴۱                       |
|                                                               |              | ۱۰٪                    | ۰/۴۸۹                  | ۵۱/۱۰٪                  | ۰/۰۲۷۵۷۶۴                       |
|                                                               |              | ۱۵٪                    | ۰/۴۸۹                  | ۵۱/۱۰٪                  | ۰/۰۲۷۵۷۶۴                       |
|                                                               |              | ۲۰٪                    | ۰/۴۸۹                  | ۵۱/۱۰٪                  | ۰/۰۲۷۵۷۶۴                       |
| گونه دوم<br>(پیوندهای عضوی نیمه‌سخت و پیوندهای تکیه‌گاهی سخت) | سختی پیوند   | ۰.۵٪                   | ۰/۰۰۱۹                 | ۹۹/۸۱٪                  | ۲/۸۹۴۳۰۴                        |
|                                                               |              | ۱۰٪                    | ۰/۰۰۲۴                 | ۹۹/۷۶٪                  | ۲/۸۲۰۱۵۸                        |
|                                                               |              | ۱۵٪                    | ۰/۰۰۲۶                 | ۹۹/۷۴٪                  | ۲/۷۹۴۳۷۶                        |
|                                                               |              | ۲۰٪                    | ۰/۰۰۲۷                 | ۹۹/۷۳٪                  | ۲/۷۸۲۱۵۰                        |
|                                                               | لنگر خمیری   | ۰.۵٪                   | ۰/۴۸۷                  | ۵۱/۳۰٪                  | ۰/۰۳۲۵۹۱۹                       |
|                                                               |              | ۱۰٪                    | ۰/۴۸۹                  | ۵۱/۱۰٪                  | ۰/۰۲۷۵۷۶۴                       |
|                                                               |              | ۱۵٪                    | ۰/۴۸۹                  | ۵۱/۱۰٪                  | ۰/۰۲۷۵۷۶۴                       |
|                                                               |              | ۲۰٪                    | ۰/۴۸۹                  | ۵۱/۱۰٪                  | ۰/۰۲۷۵۷۶۴                       |
| گونه سوم<br>(پیوندهای عضوی سخت و پیوندهای تکیه‌گاهی نیمه‌سخت) | سختی پیوند   | ۰.۵٪                   | ۰/۰۰۲۱                 | ۹۹/۷۹٪                  | ۲/۸۶۲۷۳۶                        |
|                                                               |              | ۱۰٪                    | ۰/۰۰۲۳                 | ۹۹/۷۷٪                  | ۲/۸۳۳۷۸۷                        |
|                                                               |              | ۱۵٪                    | ۰/۰۰۲۵                 | ۹۹/۷۵٪                  | ۲/۸۰۷۰۳۴                        |
|                                                               |              | ۲۰٪                    | ۰/۰۰۲۸                 | ۹۹/۷۲٪                  | ۲/۷۷۰۳۲۷                        |
|                                                               | لنگر خمیری   | ۰.۵٪                   | ۰/۴۸۷                  | ۵۱/۳۰٪                  | ۰/۰۳۲۵۹۱۹                       |
|                                                               |              | ۱۰٪                    | ۰/۴۸۹                  | ۵۱/۱۰٪                  | ۰/۰۲۷۵۷۶۴                       |
|                                                               |              | ۱۵٪                    | ۰/۴۸۹                  | ۵۱/۱۰٪                  | ۰/۰۲۷۵۷۶۴                       |
|                                                               |              | ۲۰٪                    | ۰/۴۸۹                  | ۵۱/۱۰٪                  | ۰/۰۲۷۵۷۶۴                       |
| گونه چهارم<br>(پیوندهای عضوی و تکیه‌گاهی سخت)                 | لنگر خمیری   | ۰.۵٪                   | ۰/۴۸۶                  | ۵۱/۴۰٪                  | ۰/۰۳۵۱۰۰                        |
|                                                               |              | ۱۰٪                    | ۰/۴۹۰                  | ۵۱/۰۰٪                  | ۰/۰۲۵۰۶۸۹                       |
|                                                               |              | ۱۵٪                    | ۰/۴۹۰                  | ۵۱/۰۰٪                  | ۰/۰۲۵۰۶۸۹                       |
|                                                               |              | ۲۰٪                    | ۰/۴۹۱                  | ۵۰/۹۰٪                  | ۰/۰۲۲۵۶۲                        |

این، احتمال شکست کمینه قاب F2 برای توزیع نرمال، برابر با ۰/۴۸۶ است که در گونه چهارم روی می‌دهد. همچنین، شاخص قابلیت اطمینان بیشینه در ضریب پراکندگی ۵ درصد و برای

در جدول (۵) و برای متغیر تصادفی لنگر خمیری، دیده می‌شود که احتمال خرابی بیشینه قاب F2 برای توزیع نرمال، برابر با ۰/۴۹۱ می‌باشد که در گونه چهارم رخ می‌دهد. با وجود



گونه چهارم، برابر با  $0/351$  و شاخص قابلیت اعتماد کمینه در ضریب پراکندگی  $20$  درصد و برای گونه چهارم، برابر با  $0/22562$  خواهد بود. افزون بر این‌ها، قابلیت اطمینان بیشینه در گونه چهارم، برابر با  $51/40$  درصد و قابلیت اعتماد کمینه برای گونه چهارم، برابر با  $50/90$  درصد می‌باشد.

آن گونه که در شکل (۱۰) دیده می‌شود، در تمامی نمونه‌ها، با افزایش ضریب پراکندگی، شاخص قابلیت اطمینان سازه کاهش می‌یابد. افزون بر این‌ها، شاخص قابلیت اعتماد قاب یک طبقه- یک دهانه ( $F1$ )، همواره بیشتر از شاخص قابلیت اطمینان قاب یک طبقه- دو دهانه ( $F2$ ) است. بر این پایه، می‌توان گفت که افزایش شمار دهانه‌ها، سبب کاهش قابلیت اطمینان و شاخص قابلیت اعتماد سازه و به دنبال آن، سبب افزایش احتمال خرابی قاب خواهد شد. همچنین، شکل (۱۰) نشان می‌دهد، قاب‌های فولادی نسبت به تغییر سختی پیوندها حساس می‌باشند و شاخص قابلیت اطمینان آن‌ها با تغییر سختی، می‌تواند افزایش یا کاهش یابد.

در شکل (۱۱) می‌توان دید که با افزایش ضریب پراکندگی، شاخص قابلیت اطمینان بین  $0/351$  تا  $0/22562$  کاهش می‌یابد. بر پایه آنچه که آمد، کاهش سختی دورانی پیوندهای عضوی و تکیه‌گاهی، سبب تغییر احتمال شکست سازه ( $P_f$ ) و در نتیجه، تغییر قابلیت اطمینان ( $R_e$ ) و شاخص قابلیت اعتماد قاب ( $\beta$ ) می‌گردد. در میان نمونه‌های بررسی شده و با متغیر پنداشتن ضریب پراکندگی و سختی پیوندها، شاخص قابلیت اطمینان سازه بین  $3/1559$  و  $2/7703$  تغییر خواهد کرد. همچنین، قابلیت اعتماد قاب می‌تواند تا  $0/28$  درصد کاهش یابد. از این رو، سختی دورانی پیوندهای عضوی و تکیه‌گاهی را بایستی در تحلیل احتمالاتی وارد نمود.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به ارزیابی تحلیل خمیری قطعی و احتمالاتی قاب‌های فولادی یک طبقه- یک دهانه و یک طبقه- دو دهانه، در چهار گونه (گونه یکم: پیوندهای عضوی و تکیه‌گاهی نیمه‌سخت؛ گونه دوم: پیوندهای عضوی نیمه‌سخت و پیوندهای تکیه‌گاهی سخت؛ گونه سوم: پیوندهای عضوی سخت و پیوندهای تکیه‌گاهی نیمه‌سخت و گونه چهارم: پیوندهای عضوی و تکیه‌گاهی سخت) پرداخته شد. با بررسی پاسخ‌های یقین‌اندیشانه و احتمال‌اندیشانه نمونه‌های بررسی شده، نتیجه‌های زیر به دست آمد:

■ وارد نمودن اثر سختی پیوندهای عضوی و تکیه‌گاهی،

سبب جابجایی ترتیب شکل‌گیری مفصل‌های خمیری می‌شود. از این رو، سختی پیوندهای عضوی و تکیه‌گاهی را بایستی وارد تحلیل کرد.

■ در گونه‌های یکم، دوم و سوم قاب ( $F1$ )، با تصادفی پنداشتن سختی پیوندها در تحلیل خمیری، احتمال شکست قاب در توزیع‌های نرمال، یکنواخت و لگ‌نرمال، از  $0/0008$  تا  $0/0028$  تغییر می‌کند. احتمال شکست بیشینه در گونه یکم قاب ( $F1$ )، برابر با  $0/0028$  در توزیع یکنواخت و احتمال شکست کمینه در گونه‌های دوم و سوم قاب ( $F1$ )، برابر با  $0/0008$  و برای توزیع نرمال رخ می‌دهد.

■ بر پایه متغیر تصادفی لنگر خمیری در گونه‌های متفاوت قاب ( $F1$ )، احتمال شکست بیشینه در گونه یکم، برابر با  $0/521$  در توزیع یکنواخت و همچنین، احتمال شکست کمینه در گونه چهارم، برابر با  $0/428$  و برای توزیع یکنواخت اتفاق می‌افتد.

■ در قاب ( $F2$ ) با گونه‌های مختلف، احتمال شکست، بر پایه متغیر تصادفی لنگر خمیری برای توزیع‌های نرمال و لگ‌نرمال، حدود  $50$  درصد است. احتمال شکست، در توزیع یکنواخت، از  $45$  درصد تا  $52$  درصد متغیر می‌باشد. احتمال شکست بیشینه و کمینه، به ترتیب، در گونه‌های یکم و سوم برابر با  $0/515$  و  $0/446$  و در توزیع یکنواخت خواهد بود.

■ با پنداشتن متغیر تصادفی سختی پیوند در گونه‌های یکم، دوم و سوم قاب ( $F1$ ) برای توزیع نرمال، کمترین مقدار قابلیت اعتماد، به ترتیب، برابر  $99/83\%$ ،  $99/86\%$  و  $99/86\%$  می‌باشد.

■ با تصادفی پنداشتن لنگر خمیری، کمترین مقدار قابلیت اعتماد در گونه‌های یکم، دوم، سوم و چهارم قاب ( $F1$ ) برای توزیع نرمال، به ترتیب،  $51/10\%$ ،  $51/10\%$ ،  $51/10\%$  و  $51\%$  خواهد بود.

■ با پنداشتن متغیر تصادفی سختی پیوند در گونه‌های یکم، دوم و سوم قاب ( $F2$ ) برای توزیع نرمال، کمترین مقدار قابلیت اعتماد، به ترتیب، برابر  $99/75\%$ ،  $99/73\%$  و  $99/72\%$  خواهد بود.

■ در صورتی که لنگر خمیری متغیر تصادفی باشد، قابلیت اعتماد در گونه‌های یکم، دوم و سوم قاب ( $F2$ ) برای توزیع نرمال، به ترتیب،  $51/10\%$ ،  $51/10\%$ ،  $51/10\%$  و





connections", Journal of Thin-walled Structures, Vol. 94, pp. 120-128.

- [10] Tang, H., Su, Y. and Wang, J. (2015), "Evidence theory and differential evolution based uncertainty quantification for buckling load of semi-rigid jointed frames", Journal of Structural Engineering, Vol. 40, pp. 1611-1627.
- [11] Thai, H.T., Uy, B., Kang, W.H. and Hicks, S. (2016), "System reliability evaluation of steel frames with semi-rigid connections", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 121, pp. 29-39.
- [12] Truong, V.H., Nguyen, P.C. and Kim, S.E. (2017), "An efficient method for optimizing space steel frames with semi-rigid joints using practical advanced analysis and the micro-genetic algorithm", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 128, pp. 416-427.

[۱۳] رضایی پزند، م.، شهبان، ف. و بمبانی چی، م. (۱۳۹۳)، "تحلیل احتمالاتی پایداری قاب‌های فولادی ساده و دروازه‌ای با پیوندها و تکیه‌گاه‌های نرم"، نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد، دوره ۱۰، شماره ۱۶، ص. ۵۱-۷۹.

[۱۴] رضایی، ف.، گرامی، م. و نادرپور، ح. (۱۳۹۶)، "ارزیابی قابلیت اطمینان لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی بهسازی شده با مهاربندی‌های همگرا با مدل‌های احتمالاتی"، مجله علمی - پژوهشی مهندسی سازه و ساخت، دوره ۴، شماره ۲، ص. ۵-۱۸.

[۱۵] مهدی‌زاده، ک. و کرم‌الدین، ع. (۱۳۹۶)، "ارزیابی احتمالاتی فروریزش تدریجی قاب‌های خمشی فولادی (معمولی، متوسط و ویژه) تحت زلزله"، مجله علمی - پژوهشی مهندسی سازه و ساخت، دوره ۴، شماره ۳، ص. ۱۴۷-۱۲۹.

[۱۶] بمبانی چی، م. و غفاری، م. (۱۳۹۶)، "ارزیابی سختی نخستین پیوندهای سخت از پیش تائید شده آئین‌نامه فولاد ایران و اثر عدم قطعیت آن بر قابلیت اعتماد قاب‌های فولادی"، مجله علمی - پژوهشی سازه و فولاد، دوره ۱۴، شماره ۲۱، ص. ۲۸-۱۵.

- [17] Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M.H. and Fenves, G. L., (2006), OpenSEES command language manual.
- [18] Ihaddoudene, A.N.T., Saidani, M. and Chemrouk, M. (2009), "Mechanical model for the analysis of steel frames with semi rigid joints", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 65, pp. 631-640.

۵۰/۹۰٪ می‌باشد.

■ با توجه به گونه تحلیل اختیار شده (تحلیل خمیری)، با تصادفی پنداشتن سختی پیوند، احتمال شکست قاب‌ها ناچیز خواهد بود؛ در حالی که، تصادفی در نظر گرفتن لنگر خمیری، سبب کاهش ۵۰ درصدی قابلیت اعتماد قاب‌ها می‌گردد.

## ۷- مراجع

- [1] Hadianfard, M.A. and Razani, R. (2003), "Effects of semi-rigid behavior of connections in the reliability of steel frames", Journal of Structural Safety, Vol. 25, pp. 123-138.
- [2] Buonopane, S. and Schafer, B. (2006), "Reliability of steel frames designed with advanced analysis", Journal of Structural Engineering, Vol. 132, pp. 267-276.
- [3] Cardoso, J., Almeida, J., Dias, J. and Coelho, P. (2008), "Structural reliability analysis using Monte Carlo simulation and neural networks", Journal Advances in Engineering Software, Vol. 39, pp. 505-513.
- [4] Duan, H.J., Zhao, J.C. and Song, Z.S. (2011), "Effects of initial imperfection of bolted end-plate connections in the reliability of steel portal frames", Journal of Procedia Engineering, Vol. 14, pp. 2164-2171.
- [5] Hu, X. and Zhou, P. (2012), "The second order elastic-plastic analysis of plane steel frame structures with semi-rigid connections", Journal of Applied Mechanics and Materials, Vol. 166-169, pp. 454-458.
- [6] Tang, H., Wang, J., Su, Y. and Xue, S.T. (2013), "Evidence theory for uncertainty quantification of portal frames with semi-rigid connections", Journal of Advanced Materials, Vol. 663, pp. 130-136.
- [7] Zhang, S. and Zhou, W. (2013), "System reliability assessment of 3D steel frames designed per AISC LRFD Specifications", Journal of Advanced Steel Construction, Vol. 9, pp. 77-89.
- [8] Zhang, H., Ellingwood, B. and Rasmussen, K. (2014), "System reliabilities in steel structural frame design by inelastic analysis", Journal of Engineering Structures, Vol. 81, pp. 341-348.
- [9] Thai, H.T. and Kim, S.E. (2015), "Second-order distributed plasticity analysis of steel frames with semi-rigid

## پی نوشت

- <sup>1</sup> Probabilistic analysis
- <sup>2</sup> Monte Carlo simulation
- <sup>3</sup> Probability of failure
- <sup>4</sup> Reliability
- <sup>5</sup> Reliability index
- <sup>6</sup> Normal
- <sup>7</sup> Lognormal
- <sup>8</sup> Uniform

