



ارزیابی سختی نخستین پیوندهای سخت از پیش تاییدشده آیین نامه فولاد ایران و اثر عدم قطعیت آن بر قابلیت اعتماد قاب‌های فولادی

محسن بمبائی‌چی^{۱*}، میلاد غفاری^۲

۱- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه مهندسی فناوری‌های نوین قوچان، قوچان

۲- دانشجوی کارشناس ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه مهندسی فناوری‌های نوین قوچان، قوچان

* قوچان، صندوق پستی ۶۷۳۳۵-۹۴۷۷۱، m.bambaechee@qiet.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۴/۱۰، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۶/۰۴)

چکیده

عامل‌های گوناگونی در تحلیل و طرح قاب‌های فولادی وجود دارند که تصادفی پنداشتن هر یک از آن‌ها می‌تواند اثر قابل توجهی در ایمنی سازه داشته باشد. در این میان، سختی نخستین پیوند تیر به ستون، می‌تواند به عنوان یکی از این عامل‌ها پنداشته شود. بر این پایه، در این مقاله، اثر عدم قطعیت در سختی نخستین پیوندهای BUEEP، WFP و BSEEP، از میان پیوندهای سخت (اتصالات گیردار) از پیش تاییدشده آیین‌نامه فولاد ایران، بر جابه‌جایی نسبی یک قاب فولادی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در آغاز، سختی نخستین پیوندها با روش مکانیکی آیین‌نامه اروپایی (EC3) و راهکار عددی جزءهای محدود، بر پایه نرم‌افزار تجاری ABAQUS الگوسازی می‌شود. با سنجش پاسخ‌های دو روش با یافته‌های آزمایشگاهی، سختی به دست آمده از راهکار جزءهای محدود به عنوان سختی‌های مناسب‌تر اختیار می‌گردند. در ادامه، برای انجام تحلیل احتمالاتی، روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو به کار می‌رود. باید افزود، برای سختی هر یک از پیوندها، توزیع‌های یکنواخت، نرمال و لگ‌نرمال با ضریب‌های پراکندگی ۵ تا ۲۰ درصد در نظر گرفته می‌شود و جابه‌جایی نسبی قاب برای هزار نمونه شبیه‌سازی در دسترس قرار می‌گیرد. پاسخ‌هایی که مقدار آن‌ها از جابه‌جایی نسبی مجاز آیین‌نامه بیشتر باشد، بیانگر شمار شکست در سازه است. بر این پایه، سازه ۷۲۰۰۰ مرتبه تحلیل می‌گردد و به ارزیابی احتمال شکست آن پرداخته خواهد شد. در ادامه، قابلیت اعتماد قاب از نمودارهای تابع توزیع تجمعی پاسخ‌ها (CDF)، به دست می‌آید. همچنین، یک ضریب کاهنده برای دستیابی به قابلیت اعتماد ۱۰۰ درصد و هماهنگی تغییرمکان جانبی قاب با مقدار مجاز آیین‌نامه ایران در دسترس قرار می‌گیرد.

واژگان کلیدی

تحلیل احتمالاتی، روش مکانیکی، سختی نخستین پیوند، شبیه‌سازی مونت‌کارلو، ABAQUS

Evaluation of Initial Stiffness of Iran Prequalified Rigid Connections and It's Effects on Reliability of Steel Frames

M. Bambaechee, M. Ghaffari

Abstract

There are various factors in the analysis and design of steel frames that uncertainty of them can have a significant effect on the structural safety. Accordingly, study of these factors to understand the actual behavior of the structure are important. Meanwhile, the initial stiffness of beam-to-column connection, can be considered as one of these variable. Therefore, in this paper, the effects of uncertainty in the initial stiffness of BUEEP, WFP and BSEEP connections, from rigid connections pre-qualified of Iran steel codes, on drift of simple steel frame are evaluated. In the firstly, the initial stiffness of mentioned connections based on the mechanical method of the European Code (EC3) and numerical method based on the finite element method by using of the commercial software ABAQUS obtained. By evaluating the responses of the two methods with experimental findings, stiffness obtained from finite element method selected as appropriate stiffness. Then, the probabilistic analysis performed by using of the Monte Carlo simulation method. It should be added, for stiffness of any connections, uniform distribution, normal distribution and lognormal distribution with coefficient of variation from 5 up to 20 percent are considered and drift of frames for thousands simulation are calculated. Results that exceed the allowable drift of Iran code, indicating count of failure of structure. Accordingly, the structure analysis performed 72000 times and probability of the failure will be evaluated. For all connections, the probability of failure for different distributions and coefficients of variation graphically displayed. In the following, reliability of the frame obtained from graphs of cumulative distribution function (CDF). Moreover, for any of the connections and in all investigated cases, a reduction coefficient to achieve 100% reliability and coordination of lateral displacement of with allowable drift with Iran codes becomes available.

Keywords

Probability analysis, Mechanical method, Initial stiffness connection, Monte-Carlo simulation, ABAQUS

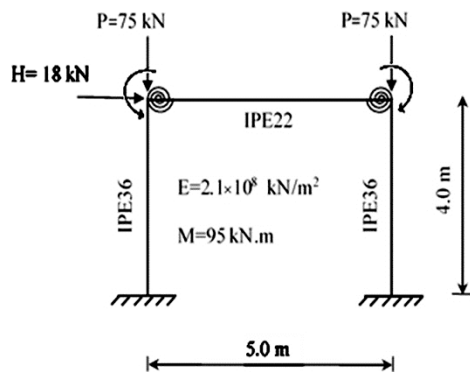
نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد / ۱۵



آن گونه که آمد، عامل‌های گوناگونی در تحلیل و طرح قاب‌های فولادی وجود دارند که تصادفی پنداشتن هر یک از آن‌ها می‌تواند اثر قابل توجهی در ایمنی سازه داشته باشد. در این میان، سختی نخستین پیوند تیر به ستون، می‌تواند به عنوان یکی از عامل‌ها پنداشته شود. بر این پایه، پژوهش کنونی، با تصادفی پنداشتن سختی نخستین پیوند، در آغاز، سختی نخستین شش نمونه از پیوندهای WFP، BUEEP و BSEEP، از میان پیوندهای از پیش تاییدشده آیین‌نامه ایران را در دسترس قرار می‌دهد. سپس، با بهره‌جویی از رابطه‌سازی پیشنهادی و روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو به تحلیل احتمالاتی^۴ اثر سختی این پیوندها بر جابه‌جایی نسبی قاب ساده پرداخته می‌شود. در ادامه، پاسخ‌های هر یک از پیوندها بررسی خواهد گردید. افزون بر این، قابلیت اعتماد سازه برای هر پیوند با توزیع‌های متفاوت ارزیابی می‌شود. باید افزود، برای پیوندهایی که قابلیت اعتماد در آن‌ها پایین است، یک ضریب کاهش برای دستیابی به قابلیت اعتماد ۱۰۰ درصد در دسترس قرار می‌گیرد.

۲- معرفی قاب و پیوندهای تیر به ستون

پژوهش کنونی، بر روی یک قاب ساده فولادی یک طبقه و یک دهانه انجام می‌پذیرد. مشخصه‌های هندسی و بارگذاری این سازه در شکل (۱) آمده است.



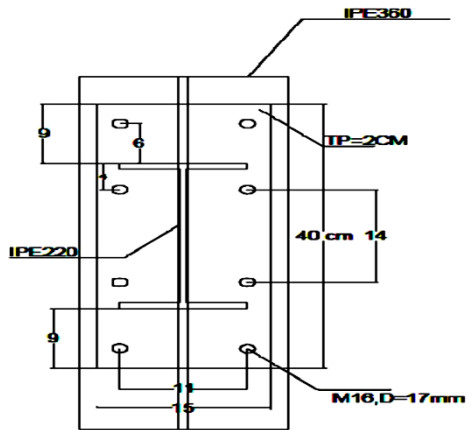
شکل ۱- مشخصه‌های هندسی و بارگذاری قاب فولادی

بار قائم در ستون‌ها به مقدار ۷۵ کیلو نیوتن و لنگر گره‌ها برابر ۹۵ کیلو نیوتن در متر می‌باشند. نیروی جانبی نیز به صورت متمرکز برابر ۱۸ کیلو نیوتن پنداشته می‌شود. بر این پایه، مقطع تیر و ستون‌ها طرح شده‌اند که مقطع ستون‌ها از نوع IPE36 و تیر IPE22 می‌باشند. سپس، سه گونه از پیوندهای سخت از پیش تاییدشده آیین‌نامه ایران (WFP، BUEEP و BSEEP) با ویژگی‌های متفاوت، برای این قاب و بر پایه بارهای وارده با

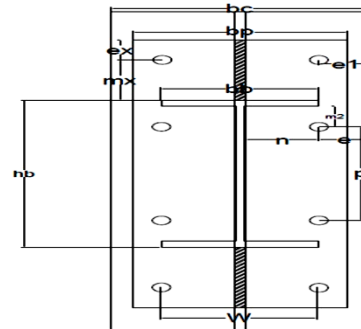
به سبب وجود عدم قطعیت‌های فراوان در سازه‌ها، استفاده از روش‌های مبتنی بر دانش آمار و احتمال کاربرد گسترده‌ای در فرآیندهای تحلیل و طراحی و تعیین احتمال خرابی سازه‌ها پیدا کرده است. در سال‌های کنونی، مطالعه رفتار سازه‌ها در فضای عدم قطعیت و تصادفی پنداشتن سختی پیوندها (اتصالات)، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. از آن میان، Gao و Haldar به بررسی برآورد ایمنی سازه‌های قابی با پیوندهای نرم پرداخته‌اند [۱]. عدم قطعیت مشخصه‌های مواد در پایداری سازه‌ها به وسیله Zhang و Ellingwood مورد ارزیابی قرار گرفت [۲]. Zhang و Ellingwood الگویی برای برآورد قابلیت اطمینان^۱ قاب‌های فولادی خمشی با پیوندهای جوشی ارائه نمودند. آن‌ها قابلیت اطمینان لرزه‌ای و احتمال شکست این گونه قاب‌ها را نیز مورد بررسی قرار دادند [۳ و ۴]. Sakurai و همکارانش به تحلیل جزء‌های محدود احتمال اندیشه‌های قاب‌های فولادی با پیوندهای نرم پرداختند. آن‌ها با تصادفی پنداشتن سختی نخستین پیوند^۲، احتمال شکست شش سیستم قابی را بر پایه سه معیار ظرفیت لنگر خمشی کشسان، بیشینه جابه‌جایی افقی و بیشینه نسبت تغییر مکان طبقه برآورد نمودند [۵]. راهکار نوینی برای تحلیل قابلیت اطمینان لرزه‌ای قاب‌های با پیوند نرم، به وسیله Huh و Haldar پیشنهاد گردید [۶]. Hadianfard و Razani رفتار نرمی پیوندها را در تحلیل قابلیت اطمینان قاب‌های فولادی وارد نمودند. آن‌ها با بهره‌گیری از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو^۳، احتمال گسیختگی قاب‌های فولادی با پیوندهای نیمه‌سخت را بررسی نمودند [۷]. Duan و همکارانش با بهره‌جویی از راهکار شبیه‌سازی مونت‌کارلو، به بررسی اثر نقص نخستین، بر قابلیت اعتماد قاب‌های فولادی ساده با پیوندهای نرم پیچی پرداختند [۸]. طرح قاب‌های فولادی با عضوهای نامنشوری، بر پایه قابلیت اطمینان و برآورد احتمال شکست سازه، به وسیله Chen و Lui معرفی گردید [۹]. با به کارگیری فن مونت‌کارلو، قابلیت اعتماد پایداری قاب‌های فولادی با پیوندها و تکیه‌گاه‌های نرم به وسیله Rezaiee-Pajand و همکارانش مورد بررسی قرار گرفت [۱۰]. Kala تحلیل حساسیت پایداری قاب‌های فولادی ساده را واکاوی نمود [۱۱]. Negin و Lotfolahi-Yaghin به بررسی اثر انحنای اولیه اعضا بر قابلیت اعتماد قاب‌های فولادی پرداختند [۱۲]. آن‌ها با بهره‌گیری از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو، احتمال شکست این گونه قاب‌ها را به دست آوردند.

اندازه ورق‌ها، مشخصات پیچ‌ها و ...، بر پایه بارهای وارد به پیوند، طرح شده‌اند.

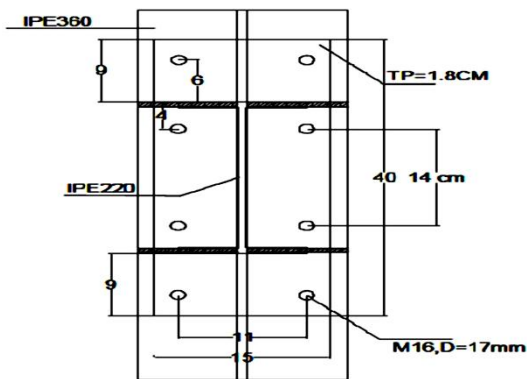
روش تنش مجاز طرح شده‌اند. شکل‌های (۲) تا (۸) هر یک از این پیوندها را به همراه جزءهایشان نشان می‌دهند. یادآوری می‌کند، تمامی مشخصه‌های پیوندهای مورد بررسی (ضخامت و



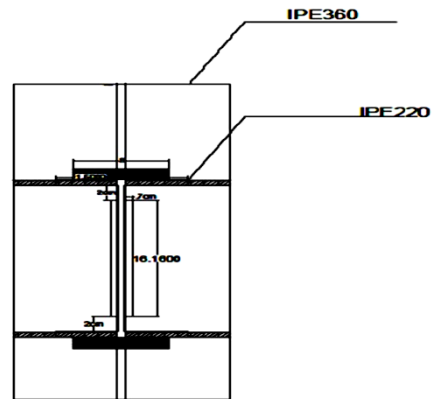
شکل ۳- پیوند گیردار فلنجی چهار پیچی بدون لچکی (BUEEP) با ورق انتهایی ۲ سانتی متر و پیچ ۱۶ میلیمتر - پیوند شماره ۱



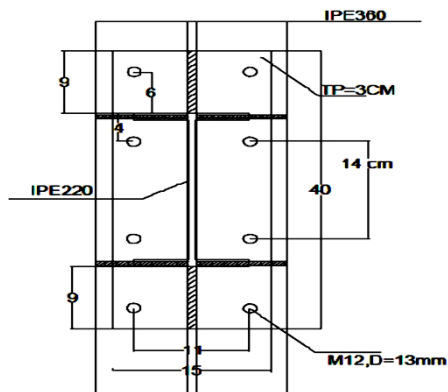
شکل ۲- عامل‌های پیوندها



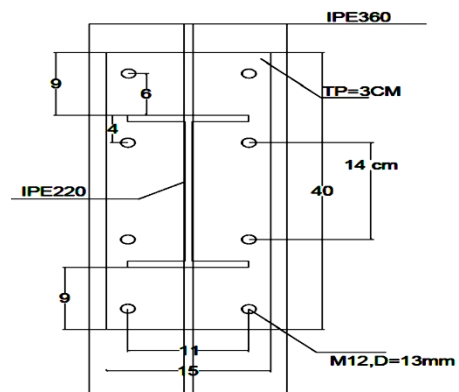
شکل ۵- پیوند گیردار فلنجی چهار پیچی بدون لچکی (BUEEP) با سخت‌کننده جان ستون - پیوند شماره ۳



شکل ۴- پیوند با ورق زیرسری و روسری جوشی (WFP) - پیوند شماره ۲



شکل ۷- پیوند گیردار فلنجی چهار پیچی با ورق لچکی (BSEEP) - پیوند شماره ۵

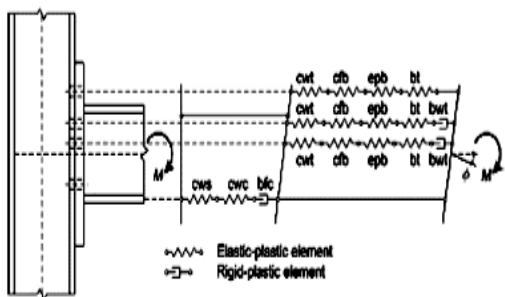


شکل ۶- پیوند گیردار فلنجی چهار پیچی بدون لچکی (BUEEP) با ورق انتهایی ۳ سانتی متر و پیچ ۱۲ میلیمتر - پیوند شماره ۴

یافتن رفتار پیوندها وجود دارد، که از آن میان می‌توان به روش‌های تحلیلی، تجربی، آزمایشگاهی، مکانیکی، داده‌ای (اطلاعاتی) و عددی اشاره نمود.

۳-۱- روش مکانیکی آیین‌نامه اروپایی (EC3)

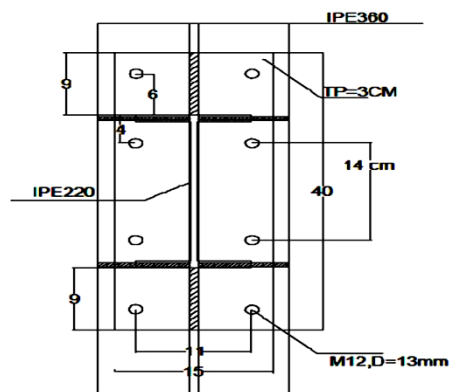
الگوی مکانیکی یا فنر، یک پیوند را با استفاده از ترکیب جزءهای شکل‌پذیر و سخت، بیان می‌کند. این جزءها به وسیله مقدارهای سختی و مقاومت به دست آمده از رابطه‌های تجربی در دسترس قرار می‌گیرند. در این روش به وسیله قانون‌های بنیادی که برای جزءهای فنر استفاده می‌شوند، پاسخ‌ها به دست می‌آیند. شکل (۹)، الگوی مکانیکی Faella و همکارانش را برای پیوند تیر به ستون با ورق انتهایی نشان می‌دهد [۱۵].



شکل ۸- الگوی فنر Faella و همکارانش [۱۵]

برای ایجاد یک الگوی مکانیکی سه گام بنیادی مورد نیاز است. نخست، شناسایی آن دسته از جزءهای اصلی پیوند که نقش مهمی در تغییرشکل و شکست پیوند دارد. دوم، تعیین رفتار هر جزء با استفاده از روش‌های عددی، آزمایشگاهی و تحلیلی و سوم، روی هم‌گذاری اثر همه جزءها، برای یافتن نمودار لنگر- دوران.

روش فنر، بسیار گسترده است، به طوری که می‌تواند به گونه‌های متفاوتی از پیوندهای جوشی یا پیچی اختصاص پیدا کند. سبب گستردگی این شیوه آن است که تنها چیزی که نیاز دارد، رفتار جزءهای پیوند است. روش مولفه‌ها یک فنر مکانیکی است [۱۶]. این شیوه، یک پیوند را با استفاده از فنرها و جزءهای سخت الگوسازی می‌نماید که هر فنر نماینده یک قسمت از پیوند با همان مقاومت و سختی است. در نتیجه، در این راهکار، رفتار یک پیوند به وسیله شناخت ویژگی‌های هندسی و مکانیکی جزءهای تشکیل دهنده آن به دست می‌آید. باید افزود، این روش نتیجه‌های بسیار خوبی، به ویژه هنگامی که پیوند تحت اثر لنگر خالص با حداقل نیروی محوری باشد، به دست می‌دهد. از این رو، آیین‌نامه اروپایی (EC3) این شیوه را



شکل ۸- پیوند گیردار فلنجی هشت پیچی با ورق لچکی (BSEEP) - پیوند شماره ۶

۳- روش‌های الگوسازی و یافتن سختی نخستین پیوند

قاب‌های فولادی در گذشته با پنداشتن اینکه پیوند تیر به ستون یا به طور کامل ساده و یا به صورت کامل گیردار بوده‌اند، طراحی می‌گردید. پنداشت پیوند به طور کامل ساده، یعنی هیچ لنگری نمی‌تواند از تیر به ستون انتقال پیدا کند. به سخن دیگر، پیوند، هیچ سختی دورانی ندارد، اگر چه می‌تواند نیروی محوری و برشی را به عضوهای پیوند شده منتقل کند. از سوی دیگر، پیوند به طور کامل گیردار یا سخت، دارای قابلیت دوران است؛ بنابراین، تمام حالت‌های بار را بین تیر و ستون منتقل می‌کند. ویژگی مهم در تحلیل این پیوندها این است که رفتار آن‌ها جدا از تحلیل سازه است. اگرچه این مسئله، فرآیند تحلیل و طراحی پیوند را آسان می‌کند اما این هزینه را نیز در بر دارد که نمی‌توان درک درستی از رفتار پیوند به دست آورد. به سخن دیگر، همه پیوندها دارای سختی دورانی مشخصی می‌باشند، بنابراین، به نوعی نیمه‌سخت هستند. در قرن کنونی، روش‌های تحلیل پیوندهای نیمه‌سخت به صورت قابل توجهی گسترش پیدا کرده است تا پاسخ درست سازه‌ای را به دست آورند. این فرآیند، در سال ۱۹۳۰، با رابطه شیب-تغییرمکان و روش‌های پخش لنگر آغاز شد [۱۳]، در سال ۱۹۶۰، با راهکارهای ماتریس سختی ادامه پیدا کرد و این روزها با شیوه‌های پیچیده تحلیل تکراری که تحلیل سازه را با پیوندها مرتبط می‌سازد، ادامه دارد [۱۴]. رفتار درست یک پیوند می‌تواند به وسیله نمودار لنگر- دوران به تحلیل کلی سازه وابسته شود. نمودار لنگر- دوران با تعیین ویژگی‌های مکانیکی پیوند مانند سختی دورانی، لنگر مقاوم و ظرفیت دورانی که از ویژگی‌های مکانیکی و هندسی آن هستند، به دست می‌آید. راهکارهای متفاوتی برای

برای دست یافتن به سختی نخستین پیوندهای فولادی در دسترس قرار داده است [۱۷]. برای به دست آوردن سختی نخستین پیوندها با این فن، در آغاز، باید یک الگو برای پیوند مورد نظر ایجاد نمود که فنرهای موازی و سری تشکیل دهنده این الگو هستند. به سخن دیگر، هر یک از فنرها نماینده یک جزء از پیوند می‌باشند. سپس، سختی هر فنر با روش ارائه شده به وسیله آیین‌نامه اروپایی (EC3) به دست می‌آید. سرانجام، سختی نخستین پیوند از جمع سختی این فنرها و با بهره‌جویی از رابطه (۱) در دسترس قرار می‌گیرد.

$$S_{j,ini} = \frac{EZ^2}{\sum \frac{1}{K_i}} \quad (1)$$

در این رابطه، $S_{j,ini}$ سختی نخستین پیوند، E ضریب کشسانی فولاد، Z بازوی لنگر و K_i سختی هر جزء پیوند هستند که بر پایه رابطه‌های آیین‌نامه اروپایی به دست می‌آیند.

۲-۳- روش عددی جزءهای محدود

تحلیل جزءهای محدود به صورت مطلوب به منظور تعیین دوران در پیوند مناسب است [۱۸]. در این تحلیل، نمودار لنگر-دوران، نتیجه فرآیندهای پیچیده میان جزءهای یک پیوند می‌باشد. در نتیجه این راهکار از نگاه محاسباتی بسیار زمان‌بر است. تحلیل پیوندهای فولادی نیازمند معرفی درست هندسه و ناخطی بودن مواد جزءهای یک پیوند، پیش بارگذاری پیچ‌ها و پاسخ آن‌ها تحت اثر توزیع تنش‌های کلی و برهم‌کنش‌های میان پیچ‌ها و جزءهای صفحه‌ای، مانند: پیچ و پایه آن، ارتباط پیچ و مهره، تنش‌های فشاری و مقاومت مالشی، خطا در چفت شدن پیچ و سوراخ و مانند آن‌ها است. به طور معمول، روش جزءهای محدود مقدمه‌ای بر الگوسازی موردی‌مانند: تغییر شکل‌های بزرگ، جاری شدن، سخت‌شدگی کرنش، اثرهای ناپایداری، معرفی کرنش‌های بزرگ، ارتباط بین ورق‌ها و پیچ‌ها با پیش‌تنش خواهد بود. در سال ۱۹۷۲، Bose و همکارانش نخستین مطالعه را بر روی پیوند تیر به ستون جوشی با روش جزءهای محدود انجام دادند که دربرگیرنده جاری شدن، سخت‌شدگی کرنش و کماتش بود [۱۹]. پاسخ‌ها با یافته‌های به دست آمده از آزمایش‌ها سنجیده شدند و هم‌خوانی خوبی داشتند. از این رو، برای انجام تحلیل جزءهای محدود در این مقاله از نرم‌افزار تجاری ABAQUS بهره‌جویی شده است. خاطر نشان می‌کند، پنداشت‌های زیر برای الگوسازی پیوندها در نرم‌افزار به کار رفته‌اند:

- طول تیر طره، برابر ۴۰ سانتی متر پنداشته می‌شود.

- ضریب اصطکاک کلمب برابر ۰/۳ است.

- برای معیار شکست از معیار فون-میزس بهره‌جویی می‌گردد و شکست زمانی رخ می‌دهد که فون-میزس از ۰/۰۱ تجاوز کند.

- برای الگوسازی تیر، ستون، پیچ، ورق انتهایی و سخت‌کننده‌ها از جزءهای سخت سه بعدی بهره‌گیری می‌شود. این جزءها، عضوهای ۸ گره‌ای با سه درجه آزادی هستند (C3D8).

- برای ارتباط بین جزءهایی که نسبت به هم دارای حرکت هستند، مانند ورق انتهایی و تیر، پیچ‌ها و ورق انتهایی و ستون، ستون و سخت‌کننده‌ها و نظیر آن، جزءهای تماسی (Contact Elements) اختیار می‌شوند.

- برای الگوسازی ارتباط بین جزءهایی که نسبت به هم حرکت ندارند، مانند تیر و ورق انتهایی، از جزءهای سخت (Restraint) بهره‌جویی شده است.

- از پیش بارگذاری پیچ‌ها چشم‌پوشی می‌گردد.

- برای وارد نمودن بار، یک جابه‌جایی به انتهای تیر وارد شده و مقدار لنگر و دوران در وسط محور ستون اندازه‌گیری خواهد شد.

- کل زمان بارگذاری ۱۰ ثانیه است و بار در بازه‌های زمانی ۰/۱ به پیوند وارد می‌شود.

۴- تحلیل احتمالاتی

راهکارهای گوناگونی برای برآورد احتمال شکست سازه‌ها وجود دارد که یکی از ساده‌ترین و پرکاربردترین آن‌ها، روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو می‌باشد. این شیوه، با وجود سادگی، یکی از قوی‌ترین روش‌ها در تحلیل‌های احتمال اندیشانه است. بر پایه راهکار مونت‌کارلو، احتمال شکست سازه از رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$P_f = \frac{n_f}{n_i} \quad (2)$$

در این رابطه، n_i شمار کل شبیه‌سازی‌ها و n_f شمار حالت‌هایی است که در یک شبیه‌سازی، سازه نتواند هدف‌های طرح را برآورده سازد. باید افزود، هدف طرح در اینجا جابه‌جایی نسبی مجاز آیین‌نامه است. بر این پایه، n_f شمار حالت‌هایی است که تغییر مکان جانبی سازه از مقدار مجاز بیشتر شود. در این بخش، نخست، برنامه رایانه‌ای منبع [۲۰] گسترش داده می‌شود. این برنامه برای تحلیل مرتبه دوم قاب‌های فولادی با پیوندهای نیمه سخت به کار می‌رود. باید افزود، بر پایه این برنامه، اثرهای مرتبه دوم نیروی محوری و نرمی پیوندها در ماتریس سختی عضوها



وارد و در نظر گرفته می‌شوند. سپس، بر پایه فن مونت کارلو، برای هر یک از پیوندها با سه توزیع احتمال نرمال، لگ نرمال و یکنواخت و ضریب‌های پراکندگی ۵ تا ۲۰ درصد، شبیه‌سازی و تحلیل قاب انجام می‌شود. به دنبال آن، برای هر یک از شبیه‌سازی‌ها با توجه به معیار پاسخ سازه، شمار شکست‌ها و به دنبال آن، احتمال شکست قاب (P_f)، در دسترس قرار می‌گیرد.

۵- معیار شکست

پس از تحلیل، یکی از مهمترین عامل‌های واریاسی سختی سازه، جابه‌جایی نسبی طبقه (دریفت) در سازه است. از این رو، بر پایه آیین‌نامه بارگذاری (مبحث ششم)، یک سازه پس از تحلیل باید برای جابه‌جایی نسبی بیشینه طبقه واریاسی شود. در این میان، آیین‌نامه بارگذاری، جابه‌جایی نسبی سازه برای قاب‌های فولادی که زمان تناوب اصلی نوسان (T) در آن‌ها کمتر از عدد 0.7 است را بر پایه رابطه (۳) بیان می‌کند.

$$T = 0.08H^{0.75} = 0.08 \times 4^{0.75} = 0.226 < 0.7; \quad (3)$$

$$DRIFT = \frac{0.0357}{R}$$

در رابطه بالا، R ، ضریب رفتار سازه است که با توجه به پنداشت قاب خمشی متوسط، بر پایه جدول (۶-۷-۶) مبحث ششم، برابر ۷ اختیار گردد. از آنجا که، قاب یاد شده در این مقاله، قاب فولادی یک طبقه است، جابه‌جایی نسبی طبقه همان جابه‌جایی نسبی بیشینه سازه (دریفت)، در نظر گرفته می‌شود. بر این پایه، معیار تغییر مکان جانبی قاب به دست می‌آید.

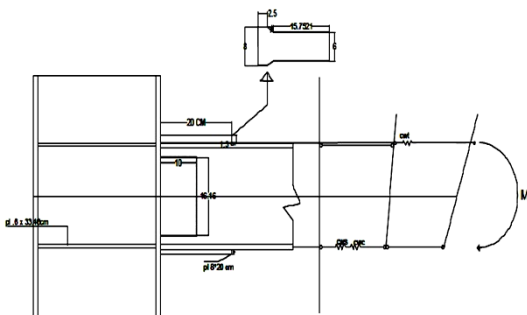
$$DRIFT_{all} = \frac{0.0357}{7} = 0.0051 \text{ m} \quad (4)$$

این عدد، همان مقدار مجاز آیین‌نامه برای جابه‌جایی نسبی

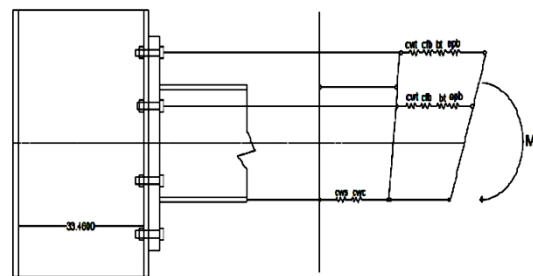
قاب است؛ در نتیجه، پاسخ‌های به دست آمده از تحلیل احتمالاتی با این مقدار مجاز سنجیده خواهد شد. باید افزود، بر پایه آیین‌نامه بارگذاری، بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقه باید از 0.25% ارتفاع ساختمان کمتر باشد. از این رو، در قاب شکل (۱)، با توجه به اینکه معیار جابه‌جایی نسبی، عدد کمتری را به دست می‌دهد، در نتیجه، همین معیار برای تعیین احتمال شکست سازه به کار گرفته می‌شود.

۶- نتیجه‌های عددی

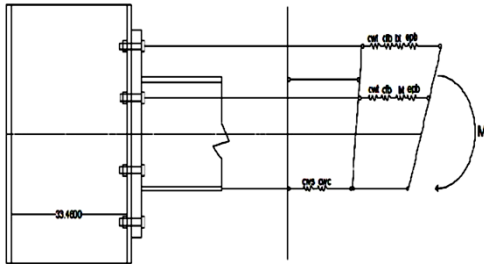
۶-۱- یافتن سختی نخستین پیوند با روش آیین‌نامه اروپایی همان‌گونه که آمد، آیین‌نامه اروپایی (EC3) روشی را به نام راهکار مکانیکی یا شیوه فنرها (چند مولفه‌ای) برای یافتن سختی نخستین پیوندهای فولادی معرفی می‌نماید. برای به دست آوردن سختی نخستین پیوندها با این شیوه، نخست، باید یک الگو برای پیوند مورد نظر ایجاد شود. فنرهای موازی و سری دربرگیرنده این الگو هستند. به سخن دیگر، هر یک از فنرها، نماینده یک جزء از پیوند می‌باشند. شکل‌های (۱۰) تا (۱۵)، الگوهای فنر پیوندهای یاد شده را نشان می‌دهد. در این شکل‌ها، فنر cwt ، کشش در جان ستون، فنر cfb ، خمش در بال ستون، فنر bt ، کشش در پیچ‌ها، فنر epb ، خمش در ورق انتهایی، فنر cws ، برش در جان ستون و فنر cwc ، فشار در جان ستون را نشان می‌دهند. براین پایه، سختی هر فنر با رابطه‌های پیشنهادی آیین‌نامه اروپایی به دست می‌آیند. سرانجام، سختی نخستین پیوند از جمع سختی این فنرها و با بهره‌جویی از رابطه (۱)، در دسترس قرار می‌گیرند. سختی‌های نخستین پیوندهای مورد ارزیابی با روش چند مولفه‌ای در جدول (۱) آمده است.



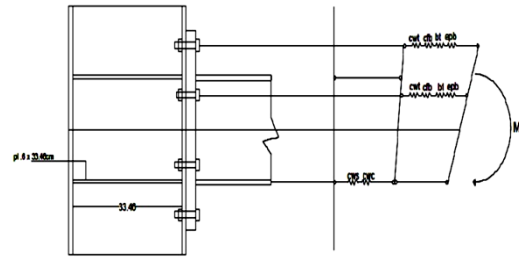
شکل ۱۱- الگوی فنر پیوند شماره ۲



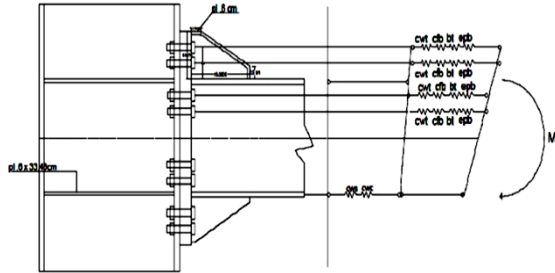
شکل ۱۰- الگوی فنر پیوند شماره ۱



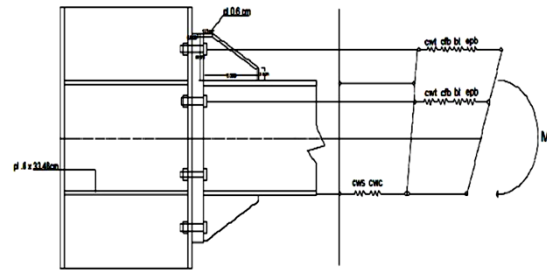
شکل ۱۳- الگوی فنر پیوند شماره ۴



شکل ۱۲- الگوی فنر پیوند شماره ۳



شکل ۱۵- الگوی فنر پیوند شماره ۶



شکل ۱۴- الگوی فنر پیوند شماره ۵

جدول ۲- سختی نخستین پیوندهای گوناگون با روش جزءهای

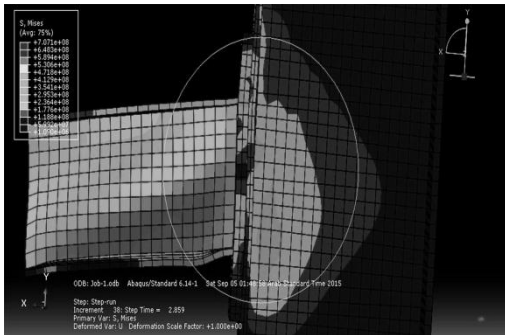
محدود بر حسب کیلونیوتن در متر بر میلی رادیان

شماره پیوند	۱	۲	۳	۴	۵	۶
$S_{f,ini}$ (kN.m/mrad)	۱۱/۲	۱۲/۶	۱۴/۲	۱۴/۷	۱۸/۱	۱۸/۳

جدول ۱- سختی نخستین پیوندهای گوناگون با روش آیین نامه

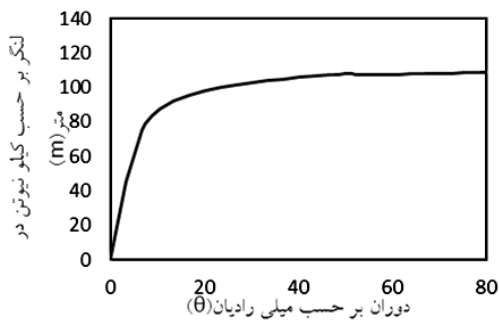
اروپایی (EC3) بر حسب کیلونیوتن در متر بر میلی رادیان

شماره پیوند	۱	۲	۳	۴	۵	۶
$S_{f,ini}$ (kN.m/mrad)	۸/۷	۹/۶	۱۰/۴	۹/۱	۲۱/۲	۲۳/۶



شکل ۱۶- نمودار مرزهای هم تنش (کانتور تنش) و تغییر شکل

پیوند شماره ۱



شکل ۱۷- نمودار لنگر-دوران پیوند شماره ۱

۲-۶- یافتن سختی نخستین پیوند با روش عددی جزءهای

محدود

همان گونه که پیش تر آمد، یکی از راهکارها برای یافتن سختی نخستین پیوند، بهره جویی از روش های عددی جزءهای محدود است. در این بخش، با به کارگیری نرم افزار تجاری ABAQUS، شش پیوند یاد شده، الگوسازی می شوند و نمودار لنگر-دوران آن ها در دسترس قرار خواهد گرفت. در ادامه، سختی نخستین پیوند از روی نمودار لنگر- دوران آن به دست می آید. برای نمونه، تغییر شکل یافته پیوند شماره ۱ در شکل (۱۶) آمده است. سپس، نمودار لنگر دوران در شکل (۱۷) رسم می گردد و با یافتن شیب خط در ناحیه خطی، همانند شکل (۱۸)، سختی نخستین در دسترس قرار می گیرد.

بر پایه شکل (۱۸)، سختی نخستین پیوند شماره ۱ به قرار زیر خواهد بود:

$$S_{aj,ini} = 11.24 \text{ k.m/mrad} \quad (۵)$$

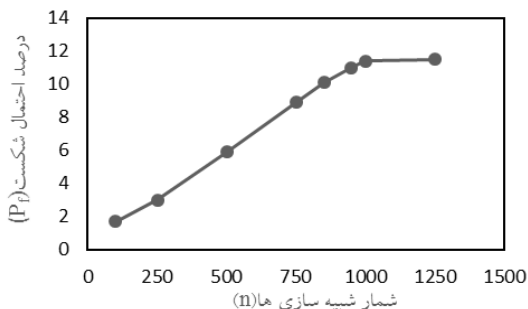
جدول (۲)، سختی نخستین هر یک از پیوندها را بر پایه راهکار چند مولفه ای نشان می دهد.

جدول ۴- سنجش پژوهش کنونی برپایه روش عددی جزءهای محدود با روش آزمایشگاهی و روش عددی جزءهای محدود Baei و همکارانش [۲۱]

روش آزمایشگاهی	پژوهش کنونی بر پایه ABAQUS	Baei و همکارانش [۲۱]
۲۰/۲۹	۱۶/۴۳	۱۸/۰۲۸

۶-۴- تحلیل احتمالاتی

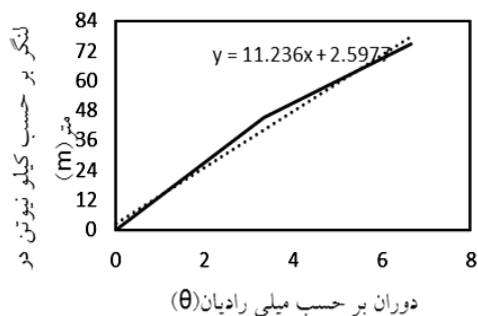
در این بخش، نخست، با گسترش برنامه منبع [۲۰] تحلیل مرتبه دوم بر پایه فن شبیه‌سازی مونت کارلو، برای هر یک از پیوندها و برای سه توزیع احتمال نرمال، لگ نرمال و یکنواخت، با ضریب‌های پراکندگی ۵ تا ۲۰ درصد بر روی قاب شکل (۱) انجام می‌شود. سپس، برای هر یک از پیوندها با توجه به معیار پاسخ سازه، شمار شکست‌ها و به دنبال آن، احتمال شکست قاب (P_f)، در دسترس قرار می‌گیرد. باید افزود، برای بررسی کفایت شمار شبیه‌سازی، نمودار احتمال شکست قاب در برابر شمار شبیه‌سازی‌ها برای توزیع نرمال با ضریب پراکندگی ۲۰ درصد برای پیوند شماره ۱، در شکل (۱۹) آمده است. می‌توان دید، هنگامی که شمار شبیه‌سازی هزار نمونه باشد، احتمال شکست از دقت کافی برخوردار خواهد بود. بر این پایه، برای هر بار تحلیل، از هزار نمونه شبیه‌سازی بهره‌جویی می‌گردد.



شکل ۱۹- نمودار درصد احتمال شکست در برابر شمار شبیه‌سازی‌ها برای پیوند شماره ۱ با ضریب پراکندگی ۲۰ درصد و توزیع نرمال

برای نمونه، شکل‌های (۲۰) تا (۲۲)، به ترتیب، نمودار توزیع پاسخ‌های به دست آمده برای پیوند شماره ۱ با توزیع‌های احتمال نرمال، لگ‌نرمال و یکنواخت با ضریب پراکندگی ۲۰ درصد را نشان می‌هند. می‌توان دید، توزیع پاسخ‌ها برای هر سه توزیع به طور تقریبی به شکل تابع لگ‌نرمال می‌باشد.

همان‌گونه که در شکل‌های (۲۳) تا (۲۸) دیده می‌شود، در تمامی پیوندها، توزیع نرمال، بیشترین و توزیع یکنواخت، کمترین احتمال شکست را دارند. همچنین، برای ضریب



شکل ۱۸- نمودار لنگر-دوران پیوند شماره ۱ در ناحیه خطی

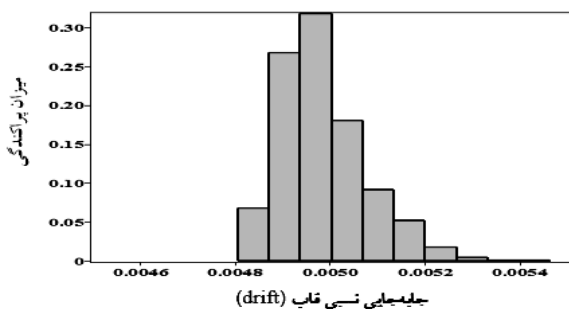
۶-۳- سنجش پاسخ‌های EC3 و ABAQUS با یافته‌های آزمایشگاهی

همان‌گونه که از جدول‌های (۱) و (۲) دیده می‌شود، نتیجه‌های به دست آمده از روش عددی و روش مکانیکی تفاوت‌های زیادی با یکدیگر دارند، نکته قابل توجه این است که این تفاوت‌ها با یکدیگر نسبت مستقیم ندارند. برای نمونه در پیوندهای شماره ۱ و ۲، سختی به دست آمده از راهکار عددی نسبت به روش مکانیکی، مقدارهای بیشتری دارد در حالی که این نسبت در پیوندهای شماره ۵ و ۶ وارونه شده است و سختی به دست آمده از روش عددی در سنجش با سختی به دست آمده از فن مکانیکی، مقدارهای کمتری دارند. همانند این نتیجه‌ها را می‌توان در منبع [۱۸]، دید. باید افزود، در آیین‌نامه اروپایی در برخی از پیوندها اثر برخی عامل‌ها در الگوسازی وارد نمی‌شوند که می‌تواند یکی از سبب‌های عدم همخوانی نتیجه‌ها با پاسخ‌های روش جزءهای محدود باشد. از سوی دیگر، بر پایه سنجش پاسخ منبع‌های [۱۸] و [۲۱] با راهکارهای پژوهش کنونی که به ترتیب، در جدول‌های (۳) و (۴) آمده‌اند، می‌توان دریافت که سختی‌های به دست آمده از روش عددی نسبت به روش مکانیکی هم‌خوانی بهتری با نتیجه‌های آزمایشگاهی دارند. از این رو، می‌توان بیان کرد که سختی‌های به دست آمده از روش عددی جزءهای محدود، درست‌تر هستند. بر این پایه، در تحلیل‌های قطعی و احتمالاتی، از سختی‌های نخستین به دست آمده از روش عددی جزءهای محدود بهره‌جویی خواهد شد.

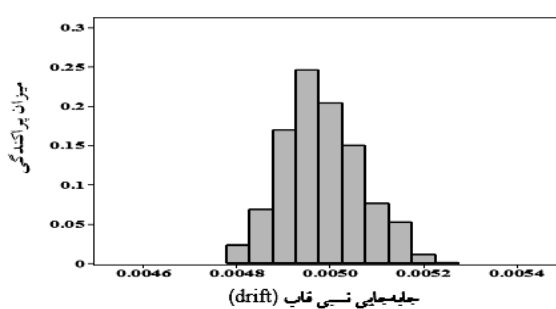
جدول ۳- سنجش پژوهش کنونی برپایه روش آیین‌نامه اروپایی با روش آزمایشگاهی و روش مکانیکی Mofid و Shooreh [۱۸]

روش آزمایشگاهی	پژوهش کنونی بر پایه EC3	Mofid و Shooreh [۱۸]
۶۶/۰۲	۳۴/۳۶	۳۳/۳

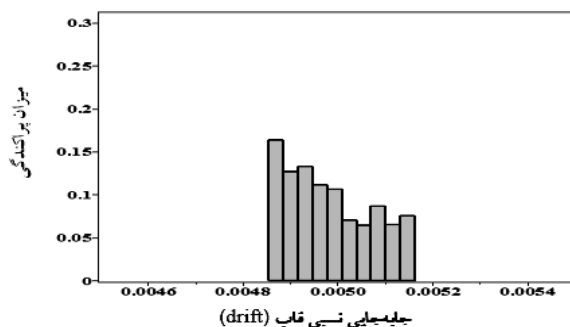




شکل ۲۱- نمودار توزیع پاسخها، برای توزیع لگ نرمال سختی نخستین با ضریب ۲۰ درصد برای پیوند شماره ۱



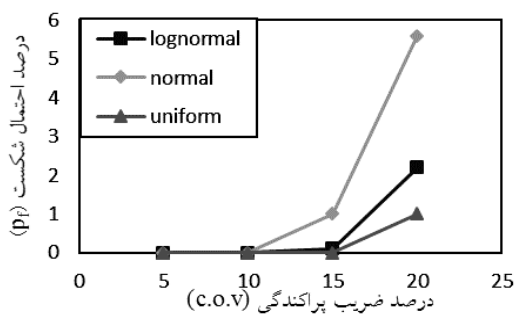
شکل ۲۰- نمودار توزیع پاسخها، برای توزیع نرمال سختی نخستین با ضریب ۲۰ درصد برای پیوند شماره ۱



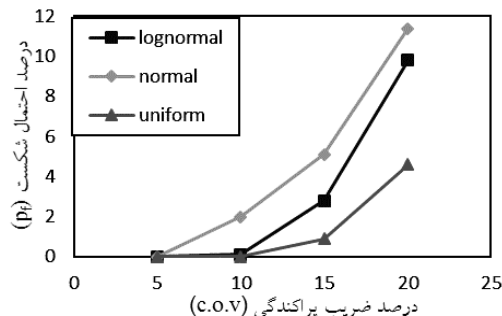
شکل ۲۲- نمودار توزیع پاسخها، برای توزیع یکنواخت سختی نخستین با ضریب ۲۰ درصد برای پیوند شماره ۱

ضریب ۲۰ درصد با شیب تندی افزایش پیدا می‌کند. همچنین، در همه پیوندها، به جز پیوند شماره ۳، شیب نمودار برای حالت نرمال همیشه از حالت لگ نرمال بیشتر است. به سخن دیگر، این پیوندها نسبت به توزیع احتمال نرمال از حساسیت بیشتری برخوردار هستند؛ در حالی که، سختی پیوند شماره ۳ نسبت به توزیع لگ نرمال حساس تر است.

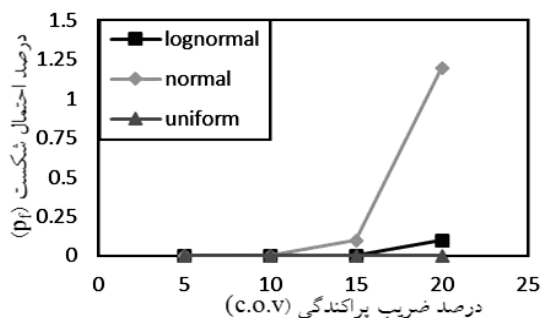
پراکندگی‌های کم، احتمال شکست ناچیز است، ولی با زیاد شدن مقدار ضریب پراکندگی سختی پیوند، احتمال شکست سازه افزایش می‌یابد. از طرفی، می‌توان دید که با افزایش ضریب پراکندگی، درصد احتمال شکست در پیوندهای شماره ۲ و ۳ و ۴ تا ضریب ۱۰ درصد ناچیز، و پس از آن با شیب بیشتری افزایش پیدا می‌کند. باید افزود، در پیوندهای شماره ۵ و ۶ احتمال شکست برای توزیع نرمال، تا ضریب ۱۵ درصد صفر است و در



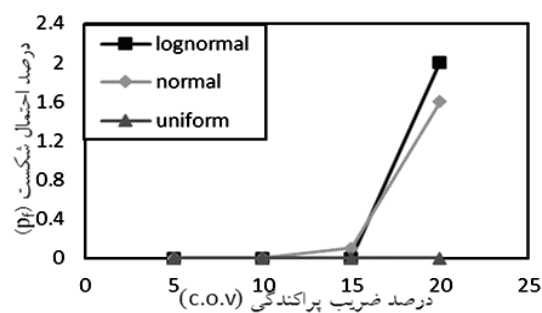
شکل ۲۴- نمودار درصد احتمال شکست در برابر ضریب‌های پراکندگی سختی پیوند شماره ۲



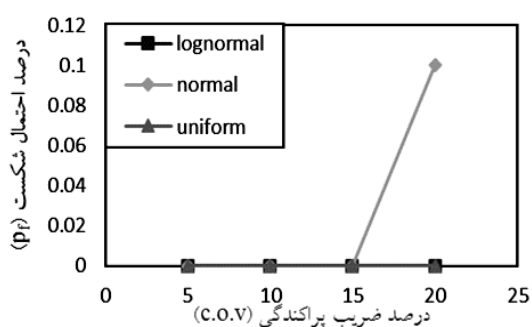
شکل ۲۳- نمودار درصد احتمال شکست در برابر ضریب‌های پراکندگی سختی پیوند شماره ۱



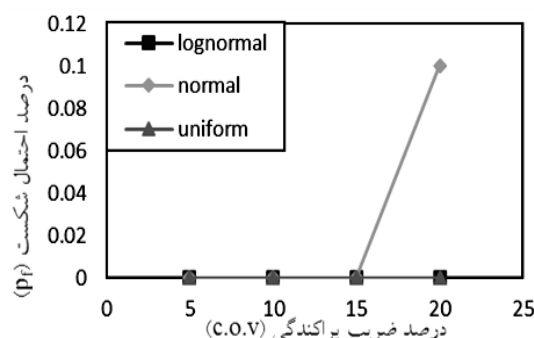
شکل ۲۶- نمودار درصد احتمال شکست در برابر ضریب‌های پراکندگی سختی پیوند شماره ۴



شکل ۲۵- نمودار درصد احتمال شکست در برابر ضریب‌های پراکندگی سختی پیوند شماره ۳



شکل ۲۸- نمودار درصد احتمال شکست در برابر ضریب‌های پراکندگی سختی پیوند شماره ۶



شکل ۲۷- نمودار درصد احتمال شکست در برابر ضریب‌های پراکندگی سختی پیوند شماره ۵

شکل‌های (۲۹) تا (۳۴)، نمودار تابع توزیع تجمعی پاسخ‌ها (CDF) را برای پیوندهای یاد شده با توزیع‌های نرمال، نشان می‌دهد. باید افزود، عدد فراوانی نسبی برای نسبت $\frac{DRIFIT_i}{DRIFT_{all}}=1$ در نمودار تابع توزیع تجمعی پاسخ‌ها، قابلیت اعتماد سازه (Re) را نشان می‌دهد. برای نمونه و همانند شکل (۳۵)، این مقدار برای توزیع نرمال با ضریب ۲۰ درصد در پیوند شماره ۱، برابر با $Re=0.887$ خواهد بود. همچنین، قابلیت اعتماد با در اختیار داشتن احتمال شکست (P_f)، از رابطه (۶) به دست می‌آید.

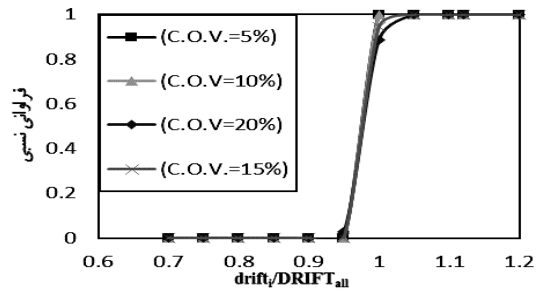
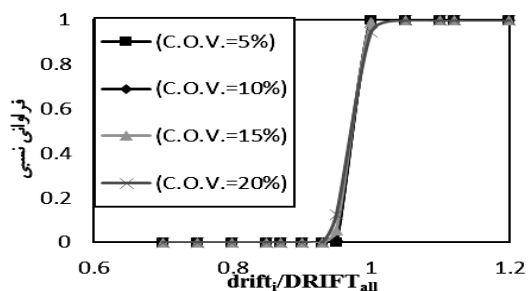
$$Re = 1 - P_f \quad (6)$$

در ادامه، درصد قابلیت اعتماد نمونه‌های یکم تا ششم، برای توزیع‌ها و ضریب‌های پراکندگی متفاوت در جدول (۵) آمده است. با سنجش پاسخ‌ها می‌توان دید، افزایش سختی نخستین پیوند، قابلیت اعتماد قاب را افزایش می‌دهد. می‌توان دید، پیوندهای شماره ۵ و ۶ بیشترین درصد قابلیت اعتماد را دارند. به سخن دیگر، به جز در توزیع نرمال با ضریب پراکندگی ۲۰ درصد، در تمامی حالت‌ها، درصد قابلیت اعتماد ۱۰۰ درصد می‌باشد. از سوی دیگر، پیوند شماره ۱، همواره کمترین قابلیت اعتماد را دارد.

باید افزود، پیوند شماره ۱ که کمترین سختی را دارد، به هر سه توزیع تصادفی حساس می‌باشد. از سوی دیگر، پیوندهای شماره ۵ و ۶ که دارای بیشترین سختی هستند، رفتار همانندی دارند و دارای کمترین احتمال شکست می‌باشند. یادآوری می‌کند، پیوندهای شماره ۱ و ۴ از نوع (BUEEP) و بدون سخت کننده هستند، با این تفاوت که در پیوند شماره ۴ ضخامت ورق انتهایی افزایش یافته و قطر پیچ‌ها کاهش پیدا کرده است. می‌توان دید، این تفاوت، با افزایش سختی پیوند، احتمال شکست را برای همه ضریب‌ها و توزیع‌های متفاوت، کاهش می‌دهد.

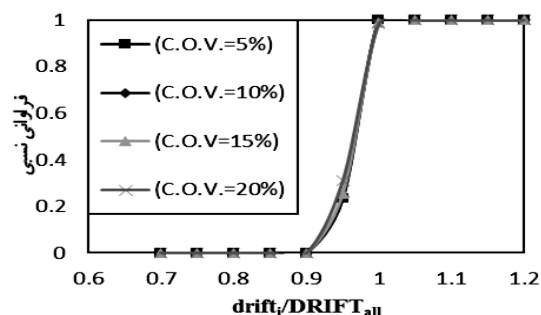
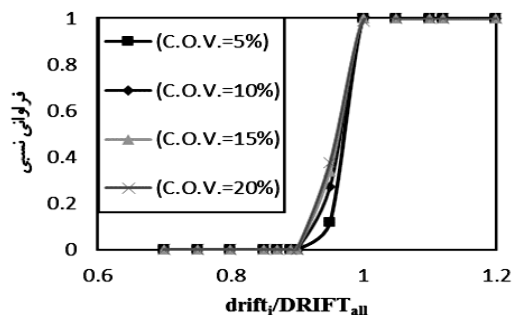
سه توزیع تصادفی حساس می‌باشد. از سوی دیگر، پیوندهای شماره ۵ و ۶ که دارای بیشترین سختی هستند، رفتار همانندی دارند و دارای کمترین احتمال شکست می‌باشند. یادآوری می‌کند، پیوندهای شماره ۱ و ۴ از نوع (BUEEP) و بدون سخت کننده هستند، با این تفاوت که در پیوند شماره ۴ ضخامت ورق انتهایی افزایش یافته و قطر پیچ‌ها کاهش پیدا کرده است. می‌توان دید، این تفاوت، با افزایش سختی پیوند، احتمال شکست را برای همه ضریب‌ها و توزیع‌های متفاوت، کاهش می‌دهد.





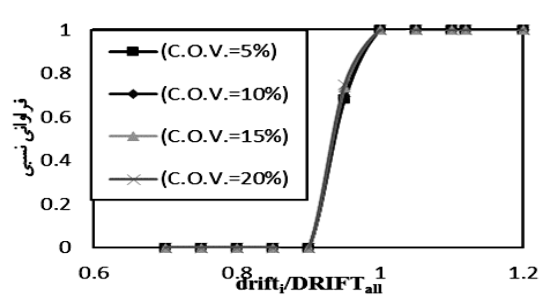
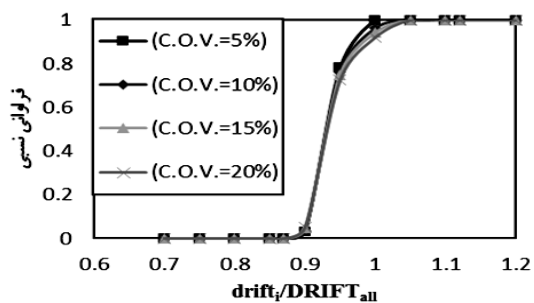
شکل ۲۹- نمودار تجمعی پاسخ‌های قاب ساده فولادی برای توزیع نرمال در پیوند شماره ۱

شکل ۳۰- نمودار تجمعی پاسخ‌های قاب ساده فولادی برای توزیع نرمال در پیوند شماره ۲



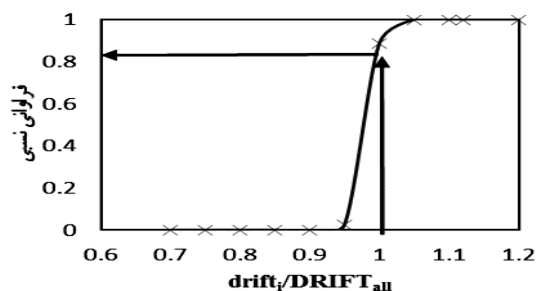
شکل ۳۱- نمودار تجمعی پاسخ‌های قاب ساده فولادی برای توزیع نرمال در پیوند شماره ۳

شکل ۳۲- نمودار تجمعی پاسخ‌های قاب ساده فولادی برای توزیع نرمال در پیوند شماره ۴



شکل ۳۳- نمودار تجمعی پاسخ‌های قاب ساده فولادی برای توزیع نرمال در پیوند شماره ۵

شکل ۳۴- نمودار تجمعی پاسخ‌های قاب ساده فولادی برای توزیع نرمال در پیوند شماره ۶



شکل ۳۵- نمودار تجمعی پاسخ‌های (CDF) برای توزیع نرمال با ضریب ۲۰ درصد برای پیوند شماره ۱

جدول ۵- درصد قابلیت اعتماد برای همه پیوندها با توزیع‌ها و

ضریب‌های پراکندگی متفاوت

توزیع احتمال (PDF)	ضریب پراکندگی (C.O.V)	پیوند شماره ۱	پیوند شماره ۲	پیوند شماره ۳	پیوند شماره ۴	پیوند شماره ۵	پیوند شماره ۶
یکنواخت	%۱۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
	%۱۵	۹۹/۱	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
	%۲۰	۹۵/۴	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
نرمال	%۱۰	۹۹/۸	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
	%۱۵	۹۴/۴	۹۹/۸	۹۹/۹	۹۹/۹	۱۰۰	۱۰۰
	%۲۰	۸۸/۷	۹۴/۴	۹۸/۴	۹۸/۸	۹۹/۹	۹۹/۹
لگ‌نرمال	%۱۰	۹۹/۱	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
	%۱۵	۹۷/۳	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
	%۲۰	۹۰/۳	۹۹/۰	۹۹/۸	۹۹/۹	۱۰۰	۱۰۰

جدول ۶- ضریب کاهنده تغییرمکان جانبی برای همه پیوندها با

توزیع‌ها و ضریب‌های پراکندگی متفاوت

توزیع احتمال (PDF)	ضریب پراکندگی (C.O.V)	پیوند شماره ۱	پیوند شماره ۲	پیوند شماره ۳	پیوند شماره ۴	پیوند شماره ۵	پیوند شماره ۶
یکنواخت	%۱۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱
	%۱۵	۰/۹۹	۱	۱	۱	۱	۱
	%۲۰	۰/۹۸	۰/۹۹	۱	۱	۱	۱
نرمال	%۱۰	۰/۹۹	۰/۹۶	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۹	۱
	%۱۵	۰/۹۶	۰/۹۳	۰/۹۴	۰/۹۵	۰/۹۷	۰/۹۸
	%۲۰	۰/۹۳	۰/۹۰	۰/۹۱	۰/۹۲	۰/۹۴	۰/۹۵
لگ‌نرمال	%۱۰	۰/۹۹	۰/۹۸	۱	۱	۱	۱
	%۱۵	۰/۹۸	۰/۹۶	۱	۱	۱	۱
	%۲۰	۰/۹۶	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۹	۱	۱

۶-۵- ضریب کاهنده تغییرمکان جانبی قاب

در این بخش، برای هریک از پیوندها و در همه حالت‌های بررسی شده، یک ضریب کاهنده برای دستیابی به قابلیت اعتماد ۱۰۰ درصد و هماهنگی تغییرمکان جانبی قاب با مقدار مجاز آیین‌نامه ایران در دسترس قرار می‌گیرد. ضریب مورد نظر، در پیوندهایی که جابه‌جایی نسبی آن‌ها از مقدار مجاز بیشتر است، با تقسیم تغییرمکان مجاز به مقدار بیشترین جابه‌جایی و همانند رابطه (۷) به دست می‌آید. بر این پایه، احتمال شکست برابر صفر خواهد گردید. به سخن دیگر، این ضریب، بیشینه تغییرمکان نسبی را به جابه‌جایی نسبی مجاز تبدیل می‌نماید. جدول (۶)، مقدارهای این ضریب را برای شش پیوند بررسی شده در قاب شکل (۱) نشان می‌دهد.

$$\alpha = \frac{DRIFT_{all}}{(DRIFT_i)_{max}} \quad (7)$$

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، نخست، شش پیوند، از میان سه گروه از پیوندهای از پیش تایید شده آیین‌نامه فولاد ایران (BUEEP, WFP و BSEEP) طرح گردید و سختی هر یک از آن‌ها با دو روش مکانیکی فنرها و عددی جزءهای محدود به دست آمد. در ادامه، با اختیار جابه‌جایی نسبی مجاز قاب ساده فولادی به عنوان معیار شکست و با به کارگیری فن شبیه‌سازی مونت‌کارلو، قاب یادشده، ۷۲۰۰۰ بار برای پیوندهای متفاوت با ضریب‌ها و توزیع‌های گوناگون تحلیل شد. با بررسی پاسخ‌های نمونه‌های مورد مطالعه، یافته‌های زیر در دسترس قرار گرفت:

۱- سختی‌های نخستین به دست آمده از روش عددی جزءهای محدود (ABAQUS)، نسبت به روش پیشنهادی آیین‌نامه اروپایی (EC3)، با نتیجه‌های آزمایشگاهی هم‌خوانی مناسب‌تری دارند.

۲- سختی نخستین پیوند به عنوان یکی از عامل‌های عدم قطعیت، در تحلیل سازه‌های فولادی بایستی وارد شود. پاسخ‌ها نشان می‌دهند، کاهش سختی نخستین یک پیوند، احتمال شکست در قاب ساده فولادی را افزایش می‌دهد.

۳- برای توزیع‌های یکنواخت، نرمال و لگ‌نرمال سختی نخستین پیوند، جابه‌جایی نسبی قاب به طور تقریبی، دارای توزیعی به شکل لگ‌نرمال می‌باشد.

۴- برای همه پیوندها، به جز پیوند شماره ۳، شیب نمودار احتمال شکست در برابر ضریب پراکندگی سختی پیوند، برای حالت نرمال، همواره بیشتر از حالت لگ‌نرمال می‌باشد. به سخن دیگر، پیوند شماره ۳ نسبت به توزیع لگ‌نرمال حساس‌تر است و درصد احتمال شکست برای این پیوند در توزیع لگ‌نرمال مقدارهای بیشتری دارد.

۵- پیوندهای شماره ۱ و ۲، به ترتیب در گروه‌های BUEEP و WFP، با توزیع نرمال و ضریب پراکندگی ۲۰ درصد، دارای بالاترین احتمال شکست می‌باشند که مقدار آن‌ها، به ترتیب، برابر با ۱۱/۳ و ۵/۶ درصد است.

۶- پیوندهای شماره ۵ و ۶، در گروه BSEEP، بیشترین درصد قابلیت اعتماد را دارند. به بیان دیگر، به جز توزیع نرمال با ضریب پراکندگی ۲۰ درصد، در تمام حالت‌ها، درصد قابلیت اعتماد آن‌ها ۱۰۰ می‌باشد.



[9] Chen, W.F. and Lui, E.M., (1991), "Stability Design of Steel Frames", Boca Raton: CRC Press.

[۱۰] رضایی پزند، م.، شهاییان، ف. و بمبائی چی، م. (۱۳۹۳)، "تحلیل احتمالاتی پایداری قاب‌های فولادی ساده و دروازه‌ای با پیوندها و تکیه‌گاه‌های نرم"، نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد، سال دهم، شماره‌ی شانزده، ص. ۵۱-۷۹.

[11] Kala, Z. (2011), "Sensitivity Analysis of Stability Problems of Steel Plane Frames", Thin-Walled Structures, Vol. 49, No. 5, pp. 645-651.

[۱۲] لطف‌اللهی یقین، م.ع. و نگین، م. (۱۳۸۹)، "مطالعه اثر اتحنای اولیه تصادفی اعضا بر قابلیت اعتماد قاب‌های فولادی"، مجله علمی پژوهشی مدرس عمران، دوره‌ی دهم، ص. ۵۷-۶۹.

[13] Young, C.R. and Jackson, K.B. (1934), "The Relative Rigidity of Welded and Riveted Connections", Canadian Journal of Research, Vol. 11, No. 1-2, pp. 62-134.

[14] Concepcion, D., Pascual, M., Mariano, V. and Osvaldo, M.Q. (2011), "Review on the Modelling of Joint Behaviour in Steel Frames", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 67, pp.741-758.

[15] Faella, C., Piluso, V. and Rizzano, G. (2000), "Elastic Structural Steel Semirigid Connections: Theory, Design and Software", Boca Raton: CRC Press.

[16] Liew, J.Y., White, D.W. and Chen, W.F. (1993), "Limit States Design of Semi-rigid Frames Using Advanced Analysis: Part 1: Connection Modeling and Classification", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 26, No. 1, pp. 1-27.

[17] European Committee for Standardisation (CEN), (1998), Eurocode 3: Annex J: Joints in Building Frames (ENV 1993-1-1:1992/A2), Brussels.

[18] Mohamadi-shooreh, M.R. and Mofid, M. (2008), "Parametric Analyses on the Initial Stiffness of Flush End-Plate Splice Connections Using FEM", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 64, No. 10, pp. 1129-1141.

[19] Bose, S.K., McNeice, G.M. and Sherbourne, A.N. (1972), "Column Webs in Steel Beam to Column Connections Part I: Formulation and Verification", Computers and Structures, Vol. 2, No. 1, pp.253-279.

[20] Rezaiee-Pajand, M., Bambaeechee, M. and Sarafrazi, S.R. (2011), "Static and Dynamic Nonlinear Analysis of Steel Frame with Semi-rigid Connections", International Journal of Engineering, Vol. 24, No. 3, pp. 203-220.

[21] Baei, M., Ghassemieh, M. and Goudarzi, A. (2012), "Numerical Modeling of End-Plate Moment Connection Subjected to Bending and Axial Forces", Journal of Mathematics and Computer Science, Vol. 4, No. 3, pp. 3463-3472.

۷- برای قاب یک طبقه و یک دهانه مورد مطالعه و در میان پیوندهای بررسی شده، کوچک‌ترین ضریب‌های کاهنده پیشنهادی به پیوندهای شماره ۱ و ۲ تعلق دارد. بر این پایه، برای توزیع نرمال و ضریب پراکندگی ۲۰ درصد، ضریب کاهنده برای این پیوندها، به ترتیب، ۰/۹۳ و ۰/۹۴ می‌باشد. به سخن دیگر، طرح قاب مورد مطالعه با پیوندهای شماره ۱ و ۲، به ترتیب در گروه‌های BUEEP و WFP، بر پایه معیار تغییرمکان جانبی، کمترین قابلیت اعتماد را دارد. شایان توجه است، تعیین ضریب کاهنده و قابلیت اعتماد قاب با تغییر عامل‌هایی همچون شمار دهانه‌ها و طبقه‌ها نیازمند بررسی بیشتری خواهد بود.

۸- مراجع

[1] Gao, L. and Haldar, A. (1995), "Safety Evaluation of Frames with PR Connections", Journal of Structural Engineering, Vol. 121, No. 7, pp. 1101-1109.

[2] Zhang, J. and Ellingwood, B. (1995), "Effects of Uncertain Material Properties on Structural Stability", Journal of Structural Engineering, Vol. 121, No. 4, pp. 705-716.

[3] Song, J. and Ellingwood, B. (1999), "Seismic Reliability of Special Moment Steel Frames with Welded Connections: I", Journal of Structural Engineering, Vol. 125, No. 4, pp. 357-371.

[4] Song, J. and Ellingwood, B. (1999), "Seismic Reliability of Special Moment Steel Frames with Welded Connections: II", Journal of Structural Engineering, Vol. 125, No. 4, pp. 372-384.

[5] Sakurai, S., Ellingwood, B.R., and Kushiya, S. (2001), "Probabilistic Study of the Behavior of Steel Frames with Partially Restrained Connections", Journal of Structural Engineering, Vol. 23, No. 11, pp. 1410-1417.

[6] Huh, J. and Haldar, A. (2002), "Seismic Reliability of Non-Linear Frames with PR Connections Using Systematic RSM", Probabilistic Journal of Engineering Mechanics, Vol. 17, No. 2, pp. 177-190.

[7] 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, No. 2, pp. 123-138.

[8] 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", Procedia Engineering, Vol. 14, pp. 2164-2171.

پی نوشت

¹ Reliability

² Initial stiffness of connection

³ Monte-Carlo simulation method

⁴ Probabilistic analysis