

بررسی اثر انحنای اولیه تصادفی اعضا در قابلیت اعتماد قاب‌های فولادی

محمدعلی لطف‌اللهی یقین^{۱*}، مسعود نگین^۲

۱- دانشیار دانشکده عمران، دانشگاه تبریز

۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران- سازه

* تبریز، صندوق پستی ۱۶۴۷۱-۵۱۶۶۴

lotfollahi@tabrizu.ac.ir

(دریافت مقاله: اسفند ۱۳۸۵، پذیرش مقاله: بهمن ۱۳۸۷)

چکیده- در این مقاله اثر ناکاملی‌های هندسی اولیه در قاب‌های فولادی به دو شکل یعنی ناکاملی هندسی موجود در مختصات گره‌های اتصالی اعضای سازه به یکدیگر و ناکاملی هندسی ناشی از وجود انحنا در راستای اولیه و تئوری اعضای مختلف سازه - که کمتر در مطالعات گذشته به صورت متغیرهایی تصادفی در تحلیل‌های وارد شده - ظرفیت باربری و قابلیت اعتماد این سیستم‌ها مطالعه شده است. به این منظور با انجام تحلیل استاتیکی و غیرخطی پوش‌آور و با استفاده از روش‌های مرتبه اول قابلیت اعتماد و شبیه‌سازی مونت‌کارلو قابلیت اعتماد سیستم‌های مورد نظر محاسبه می‌شوند. علاوه بر این با به‌کارگیری تحلیل حساسیت به روش مشتق‌گیری مستقیم که در ساختار شیء‌گرای نرم‌افزار OpenSees پیاده‌سازی شده، اهمیت هر یک از متغیرهای تصادفی مذکور از نظر میزان تأثیری که در رفتار سیستم دارند ارزیابی می‌شود. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهند که برخی از ناکاملی‌های هندسی مذکور از اهمیت ویژه‌ای در قابلیت اعتماد این سیستم‌ها برخوردارند که این نشان‌دهنده اهمیت تغییرات هرچند کوچک این پارامترها در احتمال خرابی قاب‌های فولادی است.

کلید واژگان: قاب‌های فولادی، ناکاملی‌های هندسی، قابلیت اعتماد، حساسیت، نرم افزار OpenSees.

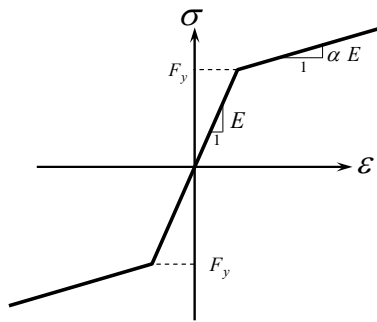
۱- مقدمه

رفتار واقعی سازه‌ها این عدم قطعیت در پارامترهای سیستم در نظر گرفته شود.

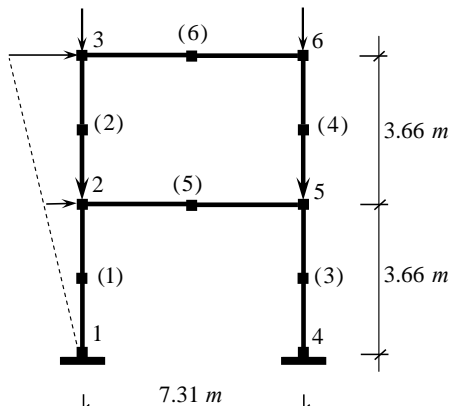
از طرفی در سال‌های اخیر با توسعه و پیشرفت سریع کامپیوترهای دیجیتالی روشهای بهینه سازی متنوعی در مسائل مهندسی برای دست یافتن به طراحی بهینه سازه‌ها به کار رفته است. در این میان روش المان محدود ابزار موفقی در تحلیل مسائل مهندسی در زمینه‌های مختلف بوده است. ترکیب این روش با شیوه‌های جدید و پیشرفته تحلیل، قابلیت اعتماد سازه‌ای باعث ایجاد روش المان محدود مبتنی بر قابلیت اعتماد^۲ RFEM شده است. در این روش در واقع سعی می‌شود که تراز ایمنی تعیین شده برای

در دو دهه اخیر نظریه قابلیت اعتماد سازه‌ای^۱ مقالات و تحقیقات بسیاری را به خود اختصاص داده است. در حقیقت توصیف رفتار سیستم‌های سازه‌ای واقعی به‌طور اجتناب‌ناپذیری وابسته به برخی منابع عدم قطعیت یا پارامترهای تصادفی است. به‌ویژه در مورد سازه‌های مهندسی این عدم قطعیت‌ها ممکن است به‌صورت تغییرات و پراکندگی در نیروهای خارجی، شرایط محیطی، شرایط مرزی، پارامترهای هندسی یا مشخصات مصالح ظاهر شوند. در نتیجه واکنش سازه‌ها نیز اساساً رفتاری تصادفی خواهد بود. بنابراین ضروری است در برآورد

فولادی در نرم‌افزار OpenSees به صورت المانی غیرخطی از نوع تیر - ستون در نظر گرفته شده که در چهار نقطه انتگرال‌گیری می‌شود. انتگرال‌گیری در طول عضو براساس قانون گوس - لاگرانژ انجام شده و فرضیات تیر برنولی برقرار است [۱]. سطح مقطع ستون‌های طبقه اول و دوم به ترتیب از پروفیل‌های فولادی بال‌پهن W14x53 و W14x43 و سطح مقطع تیرهای طبقه اول و دوم نیز به ترتیب از پروفیل‌های فولادی بال‌پهن W21x50 و W18x40 انتخاب شده است.



شکل ۱ نمودار تنش - کرنش فولاد مصرفی



شکل ۲ مشخصات هندسی و شماره‌گذاری مربوط به گره‌ها و اعضای قاب فولادی مورد مطالعه

بار قائم وارد به گره‌های اتصالی اعضا در طبقات اول و دوم به ترتیب برابر ۱۰۰kN و ۵۰kN در نظر گرفته شده است. نیروهای متمرکز جانبی به صورت خطی در ارتفاع قاب از مقدار صفر در تراز پایه شروع شده و تا مقدار بیشینه آن برابر ۲۰۰kN در تراز بام تغییر می‌کند.

سازه مورد نظر برحسب تابع عملکرد مربوط به دست‌آید. در این زمینه برای نمونه می‌توان به روش‌های بسیار متداول و شناخته‌شده تحلیل قابلیت اعتماد سازه‌ها، یعنی روش مرتبه اول قابلیت اعتماد^۱ FORM و یا روش‌های دقیق‌تری مانند روش شبیه‌سازی مونت کارلو^۲ MC اشاره کرد. در این راستا در مقاله حاضر نیز که در زمینه تحلیل سازه‌ای سیستم قاب فولادی است، مشخصات مصالح فولادی مصرفی و نیروهای جانبی وارد شده به سازه و همچنین ناکاملی‌های هندسی اولیه به‌عنوان متغیرهایی تصادفی در نظر گرفته شده است. لازم است ذکر شود این ناکاملی‌ها به دو شکل یعنی ناکاملی هندسی موجود در مشخصات گره‌های اتصالی اعضای سازه به یکدیگر و ناکاملی هندسی ناشی از وجود انحنا در راستای اولیه و تئوریک اعضای مختلف سازه - که در مطالعات گذشته کمتر به صورت متغیرهایی تصادفی در تحلیل اعمال شده‌اند - مدل‌سازی گردیده است. برای محاسبه قابلیت اعتماد سیستم مذکور نیز از تحلیل استاتیکی و غیرخطی پوش‌آور در قالب تحلیل‌های مرتبه اول قابلیت اعتماد و شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شده است. علاوه بر این میزان حساسیت این سیستم‌ها نسبت به پراکنندگی‌های موجود در هر یک از متغیرهای تصادفی مسأله و تأثیر آن در رفتار سازه ارزیابی شده است.

۲- مدل تحلیلی

مطالعات ما روی قاب فولادی دو طبقه‌ای با یک دهانه انجام شده است. رفتار تنش - کرنش فولاد مصرفی مطابق شکل (۱) با سه پارامتر؛ مدول الاستیسیته E ، تنش تسلیم F_y و ضریب سختی ثانویه α فولاد مشخص شده است. مشخصات هندسی این قاب در شکل (۲) نشان داده شده است. شماره گره‌های اتصالی اعضا و همچنین شماره مربوط به هر یک از تیرها و ستون‌های قاب که در تحلیل‌های سازه‌ای استفاده شده در شکل مشخص شده است. لازم است ذکر شود که هر یک از اعضای قاب

۳- روش المان محدود مبتنی بر قابلیت اعتماد

در میان شیوه‌های امروزی تحلیل سازه‌ای بدون شک روش المان محدود یکی از قوی‌ترین و موفق‌ترین ابزارهای به‌وجود آمده در زمینه حل مسائل گوناگون مهندسی با دقت لازم و از جمله در مهندسی سازه بوده است. با وجود روش مزبور محدودیت‌هایی در زمینه اعمال پارامترهای تصادفی مسئله از جمله تغییرات و پراکندگی موجود در مقاومت‌های مصالح مصرفی یا شکل و ابعاد هندسی سازه‌ها یا ناکاملی‌های موجود در آن‌ها و نیز طبیعت تصادفی بارهایی نظیر بار باد یا زلزله و بارهای زنده دارد. از این رو روش‌های جدیدتری برای غلبه بر این محدودیت‌ها گسترش پیدا کرده‌اند. این روش‌ها که بیشتر با عنوان روش‌های المان محدود تصادفی^۱ SFEM شناخته شده‌اند، با به‌کارگیری تئوری احتمالات و ملحوظ کردن طبیعت تصادفی متغیرهای مسئله در تحلیل‌ها و پیش‌گویی رفتار واقعی سازه‌ها، افق‌های جدیدتری را پیش روی مهندسان و محققان قرار داده است. در این میان ترکیب روش‌های المان محدود با الگوریتم‌های پیشرفته تحلیل قابلیت اعتماد، به پیدایش روش المان‌های محدود تصادفی مبتنی بر قابلیت اعتماد منجر شده است. به بیان دیگر اصطلاح المان محدود مبتنی بر قابلیت اعتماد به روش‌هایی گفته می‌شود که با ایجاد ارتباط متقابل بین روش‌های پیشرفته تحلیل قابلیت اعتماد مانند روش‌های مرتبه اول قابلیت اعتماد یا روش‌های شبیه‌سازی، با روش‌های تحلیل المان محدود، به پیش‌بینی رفتار تصادفی سیستم‌های سازه‌ای واقعی می‌پردازند. لازم است ذکر شود که چون خرابی سازه‌ها بیشتر در محدوده رفتار غیرخطی آن‌ها اتفاق می‌افتد، لذا ضروری است رفتار غیرالاستیک مصالح و اثر غیرخطی هندسی مسئله در این تحلیل‌ها در نظر گرفته شود. برای نخستین بار پیوند بین روش تحلیل المان محدود و روش تحلیل قابلیت اعتماد مرتبه اول FORM در سال ۱۹۸۳ توسط دورکیورگیان و تیلور به‌وجود آمده است [۲]. از آن زمان به بعد به‌طور پیوسته روش‌های جدیدتر و پیشرفته‌تری توسط محققان مختلف و بیشتر توسط خود

دورکیورگیان و همکاران توسعه یافته‌است [۳].

در حالت کلی هدف اصلی انواع مختلف تحلیل‌های قابلیت اعتماد، برآورد احتمال خرابی سیستم‌های سازه‌ای از طریق حل انتگرال زیر است:

$$P_f = \iint_{g(X) \leq 0} \dots \int f_X(x) dx \quad (1)$$

که در آن X بردار متغیرهای تصادفی و $g(X)$ تابع خرابی یا تابع حالت حدی سیستم موردنظر است. بنابراین $g(X) \leq 0$ ناحیه خرابی را مشخص می‌کند. همچنین $f_X(x)$ تابع چگالی توأم متغیرهای تصادفی فوق است [۴]. نکته بسیار مهمی که لازم است در این قسمت به آن اشاره شود آن است که در حالت کلی تابع خرابی نه فقط برحسب متغیرهای اصلی مسئله بلکه ممکن است برحسب کمیت‌های واکنش سیستم مورد مطالعه تعریف شده باشد. این کمیت‌ها شامل کمیت‌هایی مانند کرنش‌ها، تنش‌ها، تغییر مکان‌های گرهی یا عکس‌العمل‌های سازه موردنظر است که از تحلیل المان محدود انجام شده به‌دست آمده‌اند. این گفته به این معنا است که در هر مرحله برای ارزیابی تابع خرابی سیستم لازم است که یک تحلیل المان محدود انجام شود، از طرفی در تحلیل المان‌های محدود در هر مرحله نیز باید مقادیر متغیرهای تصادفی به‌روز شده مورد استفاده قرار گیرند. در واقع در این روش همواره تقابل دوطرفه‌ای بین قسمت تحلیل المان محدود و ارزیابی قابلیت اعتماد وجود دارد و به همین دلیل به آن روش المان محدود مبتنی بر قابلیت اعتماد گفته شده است.

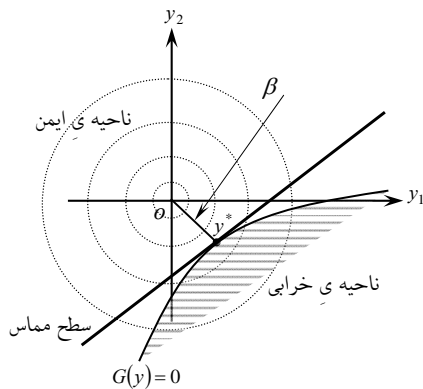
۳-۱ روش‌های تقریبی

توابع خرابی در عمل معمولاً به‌صورت غیرخطی ظاهر می‌شوند. در این وضعیت‌ها مسئله به‌سادگی حالت خطی نبوده و محققان اغلب به استفاده از روش‌های تقریبی مجبور می‌شوند. برای این منظور می‌توان از سری تیلور استفاده کرده و تابع غیرخطی خرابی را به‌عنوان مثال در نقطه میانگین متغیرهای تصادفی بسط داد. در مباحث

استاندارد را به‌عنوان شاخص قابلیت اعتماد β تعریف کرده و پیشنهاد کردند که از تقریب خطی تابع خرابی در نقطه طراحی استفاده شود [۷]. نقطه طراحی که با y^* نشان داده می‌شود، روی سطح خرابی قرار گرفته و با کوتاه‌ترین فاصله از مبدأ مختصات نشان‌دهنده محتمل‌ترین نقطه خرابی سیستم مورد نظر است. شکل (۳) این تقریب‌سازی خطی را در نقطه طراحی و فضای نرمال استاندارد را برای حالتی نشان می‌دهد که فقط دو متغیر تصادفی وجود دارد. در این روش متداول است که بردار α به‌صورت زیر از نرمالیزه کردن بردار گرادینان‌های تابع خرابی در نقطه طراحی محاسبه شود:

$$\alpha = -\frac{\nabla G}{\|\nabla G\|} \quad (۷)$$

که در آن $\nabla G = \left[\frac{\partial G}{\partial y_1} \quad \frac{\partial G}{\partial y_2} \quad \dots \quad \frac{\partial G}{\partial y_n} \right]$. در این صورت شاخص قابلیت اعتماد از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\beta = \alpha \cdot y^* \quad (۸)$$


شکل ۳ تقریب خطی تابع خرابی در روش هاسوفر-لیند

در نتیجه این روش به نوعی مسأله کمینه‌سازی ریاضی تقلیل می‌یابد:

$$y^* = \min \{ \|y\| \mid G(y) \leq 0 \} \quad (۹)$$

در این حالت نیز در صورت لزوم می‌توان احتمال خرابی سیستم را از رابطه تقریبی $P_f \approx \Phi(-\beta)$ به‌دست آورد. این روش با عنوان روش مرتبه اول قابلیت اعتماد FORM در مباحث آنالیزهای قابلیت اعتماد شناخته می‌شود [۳].

تحلیل‌های قابلیت اعتماد این روش معمولاً روش مرتبه اول - لنگر دوم^۱ FOSM نامیده می‌شود. برای این منظور اگر فرض شود X بردار متغیرهای تصادفی و اصلی مسأله و $g(X)$ تابع حالت حدی یا تابع خرابی سیستم مورد مطالعه باشند، با استفاده از بسط سری تیلور در نقطه میانگین متغیرهای تصادفی تابع خرابی غیرخطی به‌صورت زیر تقریب زده می‌شود:

$$g(X) \approx g(\mu) + \nabla g(X - \mu) \quad (۲)$$

که μ و ∇g به‌ترتیب بردار میانگین و بردار ردیفی گرادینان‌های تابع خرابی سیستم نسبت به متغیرهای تصادفی اصلی مسأله است. یعنی $\nabla g = \left[\frac{\partial g}{\partial x_1} \quad \frac{\partial g}{\partial x_2} \quad \dots \quad \frac{\partial g}{\partial x_n} \right]$. در نتیجه امید ریاضی و واریانس تابع خرابی نیز به‌ترتیب با استفاده از روابط زیر قابل محاسبه می‌شوند.

$$E[g] = \mu_g \approx g(\mu) \quad (۳)$$

$$Var[g] = \sigma_g^2 \approx \nabla g \cdot \Sigma \cdot \nabla g^T \quad (۴)$$

که در آن Σ ماتریس کوواریانس متغیرهای تصادفی است. در نتیجه شاخص قابلیت اعتماد β برای این حالت از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\beta = \frac{g(\mu)}{\sqrt{\nabla g \cdot \Sigma \cdot \nabla g^T}} \quad (۵)$$

لذا احتمال خرابی متناظر را می‌توان همواره از رابطه زیر محاسبه کرد [۵].

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (۶)$$

این روش با وجود سادگی معایب مهمی نیز دارد. برای مثال وقتی تابع خرابی حول نقطه میانگین متغیرهای تصادفی خطی‌سازی می‌شود، این روش می‌تواند برحسب انتخاب توابع مختلف، مقادیر متفاوتی را برای شاخص قابلیت اعتماد برای همان مسأله نتیجه دهد [۶]. برای حل این مشکل هاسوفر و لیند کوتاه‌ترین فاصله بین مبدأ مختصات تا سطح خرابی در دستگاه مختصات نرمال

۲-۳ روش شبیه‌سازی مونت کارلو

در روند پیش‌گویی رفتار پدیده‌های فیزیکی یا سیستم‌های سازه‌ای موقعیت‌هایی وجود دارند که به دلیل طبیعت تصادفی و پیچیدگی فرمول‌بندی مسأله، توصیف رفتار مورد مطالعه را نمی‌توان به صورت ریاضی ارائه کرد، یا اگر مدلی ریاضی بتواند رفتار سیستم مورد نظر را توصیف کند، به دست آوردن راه تحلیلی مستقیم برای مدل ریاضی مربوطه ممکن نیست. در چنین حالت‌هایی به علت دشواری فرمول‌بندی ریاضی مسأله، شبیه‌سازی تنها ابزاری است که برای به دست آوردن جواب‌های مورد نظر به کار می‌رود. شبیه‌سازی در واقع روشی ویژه است که با استفاده از آن می‌توان برخی از نتایج عددی مربوط به رفتار فیزیکی مورد مطالعه را بدون انجام آزمایش‌های لازم به دست آورد. در میان روش‌هایی که در شبیه‌سازی مطرح است روش شبیه‌سازی مونت کارلو یکی از متداول‌ترین و پرکاربردترین روش‌ها در حل مسائل مهندسی پیچیده در زمینه‌های مختلف به شمار می‌رود.

در روش مونت کارلو در حالت کلی با ایجاد اعدادی تصادفی با توزیع مورد نظر و با انجام تعداد تحلیل تعیین شده برای حالتی که تابع خرابی $g(X) \leq 0$ باشد، احتمال خرابی سیستم محاسبه می‌شود. این مطلب از نظر ریاضی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$P_f = \int_{-\infty}^{+\infty} I[g(X) \leq 0] f_X(x) dx \quad (10)$$

که در آن $I[g(X) \leq 0]$ تابع مشخصه سیستم است که مقدار آن برای زمانی که آرگومان مربوط درست باشد برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. در عمل احتمال خرابی با ایجاد تعداد محدودی اعداد تصادفی به دست می‌آید، لذا احتمال خرابی محاسبه شده تنها برآوردی از احتمال خرابی واقعی است. در نتیجه احتمال خرابی در عمل از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۸]:

$$\bar{P}_f \approx E[P_f] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I[g(X_i) \leq 0] \quad (11)$$

البته با افزایش تعداد دفعات شبیه‌سازی، این برآورد به

مقدار واقعی نزدیک‌تر می‌شود. اگرچه این روش در حالت کلی پرهزینه و وقت‌گیر است، با وجود این با توجه به افزایش سریع ظرفیت محاسباتی رایانه و نیز بهبود الگوریتم‌های تحلیلی در روش‌های شبیه‌سازی به‌خاطر ویژگی‌ها و قابلیت‌های خاص آن‌ها کاربرد گسترده‌ای در حل مسائل مهندسی دارد.

۴- مفاهیم اساسی

۴-۱ تابع خرابی

در آنالیزهای قابلیت اعتماد از مفهوم حالت حدی برای تعریف خرابی سیستم استفاده می‌شود. به بیان دیگر حالت حدی مرز بین عملکرد مطلوب و نامطلوب سازه را مشخص می‌سازد. این مرز اغلب به صورت ریاضی با تابع حالت حدی^۱ یا تابع خرابی نشان داده می‌شود. تأکید می‌شود که عبارت خرابی یا شکست در این جا ممکن است به معنای خرابی کلی سازه یا سیستم مورد نظر نباشد. در واقع چنانچه سازه عملکرد مورد نظر مسأله را نداشته باشد اصطلاح خرابی به کار برده می‌شود.

در حالت کلی در مباحث آنالیزهای تصادفی دو نوع تابع حالت حدی شامل توابع حالت حدی بهره‌بردار^۲ و توابع حالت حدی استحکام^۳ سازه‌ها متداول است. هر گروه از حالت‌های حدی مذکور باید به‌طور جداگانه در نظر گرفته شود، زیرا برای مثال یک سازه ممکن است بر اثر خیز جانبی کلی یا رانش نسبی طبقات آن خراب شود یا ممکن است تشکیل مفصل پلاستیک و ایجاد سازوکارهای گسیختگی مختلف، باعث شکست کلی یا موضعی آن شوند [۹]. اما از آنجاکه در این مقاله ظرفیت باربری نهایی قاب‌های فولادی مورد نظر است فقط گروه دوم یعنی توابع حالت حدی استحکام استفاده خواهد شد.

امروزه در طراحی‌های پیشرفته مهندسی زلزله تأکید می‌شود که سازه‌های ساختمانی باید در مقابل زلزله‌هایی با شدت متوسط بدون آسیب‌دیدگی کلی باقی بمانند.

1. Limit State Function
2. Serviceability Limit State Functions
3. Strength Limit State Functions

خرابی سیستم مورد مطالعه را که در نقطه طراحی خطی سازی شده نشان می‌دهند [۳]. لازم است ذکر شود که بردار α فقط برای متغیرهای تصادفی غیرهمبسته اعتبار داشته و کاربرد محدودتری دارد؛ لذا در سیستم قاب فولادی مورد بحث نیز که متغیرهای تصادفی در آن به صورت همبسته تعریف شده‌اند از این بردار استفاده نمی‌شود. دومین بردار یا معیار اهمیت بردار γ است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\gamma = \frac{\alpha J_{y,x} \hat{D}}{\|\alpha J_{y,x} \hat{D}\|} \quad (12)$$

که \hat{D} نشان‌دهنده ماتریس قطری انحراف معیارهای استاندارد بوده و $J_{y,x}$ ژاکوبین تبدیل در نقطه طراحی است. عناصر بردار γ نیز مانند بردار α مقدار تأثیر یا میزان مشارکت متغیرهای تصادفی اصلی را در واریانس تابع خرابی خطی سازی شده اما در فضای اصلی متغیرهای مذکور نشان می‌دهند. همچنین ثابت می‌شود که چنانچه متغیرهای تصادفی مسأله مستقل باشند بردار γ برابر با بردار α خواهد شد [۳].

سومین بردار که δ نامیده می‌شود به صورت زیر تعریف شده است:

$$\delta = \nabla_{\mu} \beta \hat{D} \quad (13)$$

که \hat{D} ماتریس قطری انحراف معیار استاندارد و $\nabla_{\mu} \beta$ بردار ردیفی گرادیان‌های شاخص قابلیت اعتماد β نسبت به میانگین متغیرهای تصادفی مسأله با انحراف معیارهای ثابت است. عناصر بدون بُعد این بردار در واقع حساسیت شاخص قابلیت اعتماد β را نسبت به مقدار میانگین متغیرهای تصادفی نشان می‌دهند.

چهارمین و آخرین بردار، η است که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\eta = \nabla_{\sigma} \beta \hat{D} \quad (14)$$

در این رابطه $\nabla_{\sigma} \beta$ بردار ردیفی گرادیان‌های شاخص قابلیت اعتماد β نسبت به انحراف معیار متغیرهای

همچنین در مقابل زلزله‌هایی با شدت زیاد، سازه‌ها باید از شکل‌پذیری و نرمی کافی برای جذب و مستهلک کردن انرژی برخورددار باشند؛ به طوری که از خرابی و فروریزی ساختمان جلوگیری شود. بدین ترتیب در آنالیزهای قابلیت اعتماد نیز ضروری است که حالت‌های حدی یا در واقع معیارهای آسیب و خرابی سازه‌های مورد بحث به طور روشن تعریف شوند. در این میان اگرچه مباحث استهلاک انرژی و آسیب‌های ساختمانی مقوله بسیار مفصل و پیچیده‌ای است، با وجود این برای مقاصد آنالیزهای قابلیت اعتماد، تعریف حالت‌های حدی برحسب تغییر شکل‌های غیرالاستیک سازه‌ها نظیر حداکثر رانش نسبی طبقات یا خیز کلی سیستم‌های ساختمانی، کافی و مورد پذیرش در بسیاری از آیین‌نامه‌های مهندسی است. برخی از مراجع به عنوان نمونه شرایط حدی استحکام سازه‌های ساختمانی را برای رانش نسبی طبقات و همچنین خیز جانبی کلی در ساختمان به ترتیب برابر ۲ درصد ارتفاع طبقات متوالی ساختمان و ۲ درصد ارتفاع کلی سازه توصیه کرده‌اند [۱۰].

۴-۲ شاخص‌های اهمیت^۱

نرم‌افزار OpenSees همچنین می‌تواند در قالب آنالیز مرتبه اول FORM گرادیان‌های واکنش یا پاسخ سیستم را نسبت به پارامترها یا متغیرهای تصادفی مسأله محاسبه کند. پیامد بسیار مهم این محاسبات، معرفی شاخص‌هایی برای اندازه‌گیری میزان اهمیت متغیرهای تصادفی سیستم مورد مطالعه است که در نتیجه آن، امکان آرایش این پارامترها برحسب شدت اثری که بر رفتار یا واکنش سیستم و نهایتاً در قابلیت اعتماد آن خواهند داشت، فراهم می‌شود.

برای این منظور نرم‌افزار OpenSees به طور استاندارد چهار بردار اهمیت متغیرهای تصادفی را معرفی می‌کند. اولین بردار، α نامیده می‌شود که در رابطه (۷) تعریف شد. هوکاس نشان داده که عناصر این بردار میزان تأثیر متغیرهای تصادفی نرمال استاندارد شده در واریانس تابع

اول ناکاملی‌های هندسی ایجاد شده در مختصات گره‌های اتصالی اعضای مختلف به یکدیگر است که معمولاً به علت خطا در عملیات ساخت و نصب سازه‌ها به وجود می‌آیند. نوع دوم ناکاملی‌های هندسی، ناکاملی‌های ایجاد شده بر اثر وجود انحنا در راستای اولیه و تئوری اعضای مختلف سازه است. برای مدل‌سازی ناکاملی هندسی نوع اول هر کدام از مختصات x و y هر یک از گره‌های اتصالی اعضای مختلف قاب فولادی به صورت متغیرهایی تصادفی غیرهمبسته با توزیع نرمال در نظر گرفته می‌شوند. انحراف معیار مختصات عمودی گره‌ها برابر 10mm فرض شده است. در حالی که انحراف معیار مختصات افقی هر یک از گره‌ها به دلیل احتمال ایجاد خطاهای زیادتری در جهت افقی در طبقات بالاتر بر اثر حرکت جانبی سازه، از مقدار 10mm در تراز پایه شروع و تا مقدار 20mm در تراز بام تغییر می‌کند. از طرف دیگر برای مدل‌سازی ناکاملی‌های نوع دوم یعنی ناکاملی‌های هندسی موجود بر اثر وجود انحنا در راستای اولیه اعضا - همان‌طور که در شکل (۲) نیز دیده می‌شود - در وسط تمامی ستون‌ها و تیرهای قاب یک گره در نظر گرفته شده است. هر یک از مختصات x این گره‌ها در ستون‌ها و نیز هر یک از مختصات y این گره‌ها در تیرهای قاب فولادی به صورت متغیرهایی تصادفی غیرهمبسته با توزیع نرمال با انحراف معیار 10mm در نظر گرفته شده است. همچنین برای مطالعه اهمیت و اثر احتمالاتی ناکاملی‌های هندسی و مصالح مصرفی در رفتار قاب‌های فولادی نسبت به سایر پارامترهای تصادفی یا عدم قطعیت‌های سازه‌ای موجود، نیروهای قائم وارد شده به سازه به صورت مقادیر معین و ثابتی در نظر گرفته شده در حالی که نیروهای جانبی به صورت متغیرهای تصادفی با توزیع لوگ - نرمال و با ضریب تغییراتی برابر 20% مدل‌سازی شده است به طوری که ضریب همبستگی بین نیروهای جانبی در طبقات اول و دوم قاب فولادی مذکور برابر $0/6$ فرض می‌شود. قابلیت اعتماد سیستم با در نظر گرفتن فرض‌های فوق بر اساس توابع حالت حدی یا توابع خرابی زیر ارزیابی خواهد شد:

تصادفی مسأله با میانگین ثابت است. به طوری که ملاحظه می‌شود درحالی‌که عناصر بردار δ اهمیت نسبی متغیرهای تصادفی مسأله را نسبت به تغییرات موجود در میانگین آن‌ها نشان می‌دهند، عناصر بردار η نیز اهمیت نسبی آن‌ها را نسبت به تغییرات موجود در انحراف معیار متغیرهای تصادفی اصلی مسأله آشکار می‌سازد [۳].

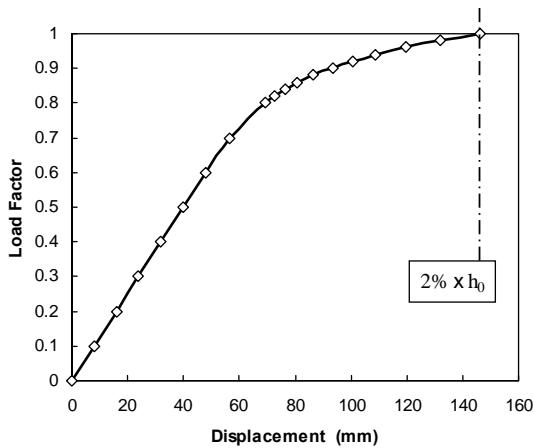
بدین ترتیب سه بردار γ و δ و η تعریف شد که دیدگاه‌های با ارزش و تعبیر فیزیکی مهمی را در مسائل قابلیت اعتماد مطرح می‌کنند. در ادامه مطالعه نیز این شاخص‌ها برای ارزیابی اهمیت متغیرهای تصادفی مسأله استفاده خواهند شد.

۵- نتایج عددی

برای بررسی ظرفیت نهایی قاب فولادی فوق از آنالیز استاتیکی غیرخطی پوش‌آور استفاده شده و تمامی پارامترهای مربوط به مصالح و هندسه سازه و نیز نیروهای جانبی به صورت متغیرهایی تصادفی در نظر گرفته می‌شوند. مدول الاستیسیته E برای هر یک از اعضا به صورت متغیری تصادفی با توزیع لوگ - نرمال با میانگین 210000MPa و ضریب تغییرات 5% مدل‌سازی می‌شود به طوری که ضریب همبستگی اعضای مختلف برابر $0/3$ فرض می‌شود. تنش تسلیم فولاد F_y هر یک از اعضا به صورت متغیری تصادفی با توزیع لوگ - نرمال با میانگین 240MPa و ضریب تغییرات 10% و با ضریب همبستگی بین اعضای $0/3$ فرض می‌شود. ضریب سختی ثانویه α برای هر یک از اعضا به صورت متغیری تصادفی با توزیع لوگ - نرمال با میانگین و ضریب تغییرات و ضریب همبستگی بین اعضای مختلف به ترتیب برابر $0/2$ و 10% و $0/3$ در نظر گرفته می‌شود.

ناکاملی‌های هندسی اولیه در قاب فولادی مورد بحث به صورت تغییراتی تصادفی اعمال شده در مختصات گرهی در دو جهت افقی و عمودی مدل‌سازی می‌شوند. لازم است ذکر شود که ناکاملی‌های هندسی اولیه در حالت کلی ممکن است به دو شکل مختلف به وجود آمده باشند. نوع

متغیرهای تصادفی استفاده شده است.



شکل ۴ رفتار بار-جابجایی قاب فولادی در نقطه طراحی

مشخصات آماری کمیت‌های واکنش سیستم مورد مطالعه برای قاب فولادی مذکور که عملکرد آن با تابع خرابی فوق تعریف شده، شامل میانگین و انحراف معیار کمیت‌های واکنش سیستم - که در این جا به صورت تغییر مکان افقی گره شماره ۳ یعنی خیز جانبی قاب فولادی در تراز بام تعریف شده - به ترتیب برابر $\mu=56/7\text{mm}$ و $\sigma=12/5\text{mm}$ از طریق آنالیز FOSM به دست آمده است.

همان‌طور که اشاره شد یکی از مهمترین قابلیت‌های آنالیز قابلیت اعتماد که در قالب نرم‌افزار OpenSees پیاده‌سازی شده، به دست آوردن معیارهایی برای ارزیابی اهمیت هر یک از متغیرهای تصادفی مسأله در رفتار سیستم مورد نظر است. سه بردار γ و δ و η مهمترین این شاخص‌ها بودند که همراه با سایر نتایج و اطلاعات خروجی آنالیز FORM ایجاد می‌شود. مقادیر این شاخص‌ها برای هر یک از متغیرهای تصادفی قاب فولادی مورد بحث محاسبه شده و جدول (۲) ۲۰ پارامتر تصادفی مهم مسأله را به ترتیب اهمیت آن‌ها در رفتار سیستم برحسب مقادیر γ و δ و η مربوط نشان می‌دهد.

همان‌طور که جدول (۲) نشان می‌دهد، پارامترهای تصادفی مربوط به تغییرات موجود در نیروهای جانبی وارد شده به سیستم که در جدول با P مشخص شده و همچنین تغییرات موجود در پارامترهای تصادفی مربوط به

$$g_1 = 2\% \times h_0 - u_3 \quad (15)$$

$$g_2 = 2\% \times h - (u_3 - u_2) \quad (16)$$

$$g_3 = 2\% \times h - u_2 \quad (17)$$

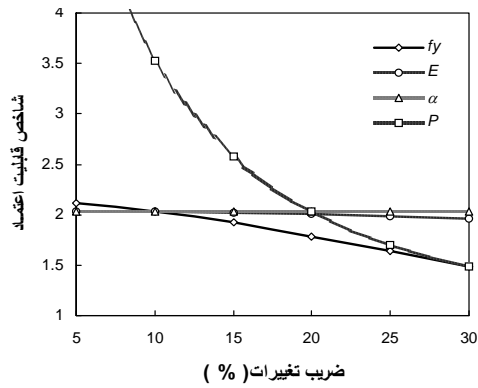
در تابع اول h_0 ارتفاع کل قاب در این جا برابر ۷/۳۱ متر و u_3 نیز تغییر مکان افقی سازه در گره شماره ۳ یا در تراز بام را نشان می‌دهد. در توابع دوم و سوم h ارتفاع طبقات قاب فولادی در این جا برابر ۳/۶۶ متر و داخل پارانتزها نیز به ترتیب رانش نسبی طبقات قاب را از بالا به پایین نشان می‌دهند. شاخص قابلیت اعتماد و احتمال خرابی متناظر آن برای هر یک از توابع خرابی فوق با استفاده از آنالیز قابلیت اعتماد مرتبه اول FORM و با انجام ۱۰۰۰۰ شبیه‌سازی مونت کارلو MC محاسبه شده است. جدول (۱) خلاصه نتایج به دست آمده را برای تمامی حالات بالا نشان می‌دهد.

جدول ۱ شاخص قابلیت اعتماد و احتمال خرابی متناظر برای قاب فولادی فرضی

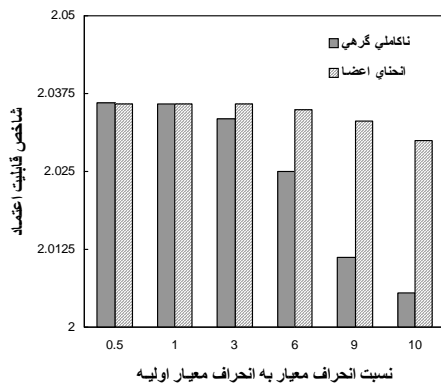
| | MC | | FORM | | |
|--|--------|---------|---------|---------|-------|
| | P_f | β | P_f | β | |
| | ۰/۰۲۱۹ | ۲/۰۱۶۳ | ۰/۰۲۰۸۸ | ۲/۰۳۵۹ | g_1 |
| | ۰/۰۲۱۵ | ۲/۰۲۳۷ | ۰/۰۲۰۶۹ | ۲/۰۳۹۶۱ | g_2 |
| | ۰/۰۲۱۸ | ۲/۰۱۷۹ | ۰/۰۲۰۷۳ | ۲/۰۳۸۹ | g_3 |

همان‌طور که ملاحظه می‌شود تابع خرابی اول در این سازه، شاخص قابلیت اعتماد کمتری داشته و از وضعیت بحرانی تری نسبت به سایر توابع خرابی برخوردار است.

در واقع این تابع احتمال خرابی سیستم را برای حالتی که تغییر مکان افقی سازه در تراز بام از ۲ درصد ارتفاع کل سازه بیشتر شود، ارائه می‌کند. لذا در ادامه مطالعه این تابع را به عنوان تابع خرابی سیستم در نظر خواهیم گرفت. رفتار بار-جابجایی غیرخطی سیستم برحسب تغییر مکان افقی گره شماره ۳ در تراز بام به دست آمده از طریق آنالیز مرتبه اول FORM مانند منحنی نشان داده شده در شکل (۴) است. همان‌طور که گفته شد در این آنالیز از نقطه طراحی یعنی محتمل‌ترین نقطه خرابی به جای نقطه میانگین



شکل ۵ حساسیت سیستم نسبت به متغیرهای تصادفی مربوط به نیروهای جانبی و مصالح مصرفی



شکل ۶ حساسیت سیستم نسبت به متغیرهای تصادفی مربوط به ناکاملی‌های هندسی

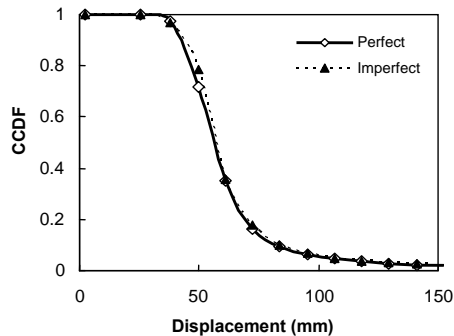
نکته قابل توجه دیگر آن است که تغییرات تصادفی مربوط به گره‌های تکیه‌گاهی یعنی تغییر مکان‌های افقی و عمودی گره‌های ۱ و ۴ نیز جزو این مهم‌ترین پارامترها هستند. به بیان دیگر ناکاملی‌های هندسی موجود در تکیه‌گاه‌های سیستم، اهمیت زیادی در قابلیت اعتماد آن دارند. برای بررسی‌های کامل‌تر می‌توان میزان حساسیت قاب فولادی مذکور را نسبت به تغییرات هر یک از پارامترهای تصادفی مسأله برحسب تأثیر آن‌ها در قابلیت اعتماد سیستم نیز، به‌دست آورد. این کار از طریق آنالیزهای قابلیت اعتماد مربوط برای مقادیر مختلف ضریب تغییرات پارامترهای تصادفی یا مقادیر مختلف ناکاملی‌های هندسی اولیه امکان‌پذیر است. نتایج حاصل در شکل‌های (۵) و (۶) نمایش داده شده است. در واقع برای هر یک از نقاط نشان داده شده در روی منحنی‌های مذکور بر حسب مقادیر مختلف ضرایب تغییرات متغیرهای تصادفی

مشخصات مصالح سیستم و بیشتر تنش تسلیم فولاد از نظر اهمیت، جزو اولین پارامترهای مهم در این سیستم مطرح هستند. پارامترهای تصادفی مربوط به ناکاملی‌های هندسی اولیه موجود در قاب فولادی نیز - که به صورت تغییرات اعمال شده در مختصات گره‌های اتصالی اعضا و انحنای اولیه در وسط آن‌ها مدل‌سازی شد - از اهمیت قابل ملاحظه‌ای در قابلیت اعتماد این سیستم برخوردارند و بسیاری از این پارامترها جزء پارامترهای مهم و اولیه سیستم محسوب می‌شوند در این میان تغییر مکان‌های افقی گره‌های شماره ۵ و ۴ و ۶ و ۲ و نیز تغییر مکان‌های عمودی گره‌های شماره ۴ و ۱ و ۳ و ۶ در بین این ۲۰ پارامتر مهم سیستم قرار دارند.

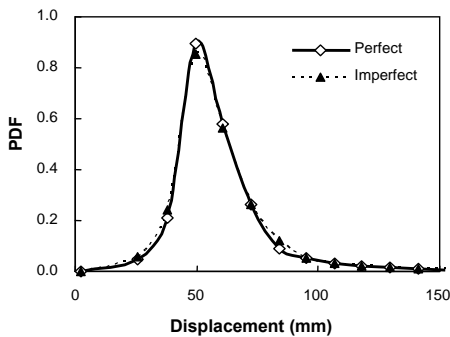
جدول ۲ بیست پارامتر مهم اول برای قاب فولادی

| FORM | | | | | | |
|----------|--------|----|----------|----|----------|----|
| | η | | δ | | γ | |
| P | گره ۳ | P | گره ۳ | P | گره ۳ | ۱ |
| P | گره ۲ | P | گره ۲ | P | گره ۲ | ۲ |
| Fy | عضو ۵ | Fy | عضو ۵ | Fy | عضو ۵ | ۳ |
| Fy | عضو ۱ | Fy | عضو ۱ | Fy | عضو ۱ | ۴ |
| Fy | عضو ۳ | Fy | عضو ۳ | Fy | عضو ۳ | ۵ |
| Fy | عضو ۲ | Fy | عضو ۲ | Fy | عضو ۲ | ۶ |
| Fy | عضو ۴ | Fy | عضو ۴ | Fy | عضو ۴ | ۷ |
| Fy | عضو ۶ | x | گره ۵ | x | گره ۵ | ۸ |
| E | عضو ۵ | E | عضو ۵ | E | عضو ۵ | ۹ |
| E | عضو ۳ | x | گره ۴ | x | گره ۴ | ۱۰ |
| E | عضو ۱ | x | گره ۶ | x | گره ۶ | ۱۱ |
| E | عضو ۴ | E | عضو ۳ | E | عضو ۳ | ۱۲ |
| α | عضو ۵ | y | گره ۴ | y | گره ۴ | ۱۳ |
| α | عضو ۱ | y | گره ۱ | y | گره ۱ | ۱۴ |
| α | عضو ۳ | E | عضو ۱ | E | عضو ۱ | ۱۵ |
| E | عضو ۲ | E | عضو ۴ | E | عضو ۴ | ۱۶ |
| E | عضو ۶ | Fy | عضو ۶ | Fy | عضو ۶ | ۱۷ |
| x | گره ۵ | x | گره ۲ | x | گره ۲ | ۱۸ |
| x | گره ۴ | y | گره ۳ | y | گره ۳ | ۱۹ |
| α | عضو ۳ | E | عضو ۲ | y | گره ۶ | ۲۰ |

ویژه‌ای در طراحی برخوردار است - ارائه می‌کنند. برای نمونه این تغییرمکان با احتمال ۷۴ درصد همواره بزرگتر از ۴۰mm است؛ یا با احتمال ۶۱ درصد بین دو مقدار ۴۰mm و ۶۰mm قرار خواهد داشت. همچنین این اطلاعات آماری به شکل کامل‌تری شامل میانگین و انحراف معیار جابجایی افقی سازه در ترازهای مختلف قاب در شکل (۸) آورده شده است.



الف



ب

شکل ۷ متمم توزیع تجمعی (الف) و چگالی احتمال (ب) برای تغییرمکان افقی سازه در تراز بام

به بیان دیگر این شکل میانگین و انحراف معیار خیز جانبی سازه را به ترتیب در ترازهای طبقه اول و دوم قاب - که از طریق ۱۰۰۰۰ شبیه‌سازی به روش آنالیز مونت کارلو به دست آمده - در دو حالت مختلف یعنی برای حالتی که سازه از نظر هندسی به صورت کامل در نظر گرفته شده است و سپس در حضور ناکاملی‌های هندسی اولیه به طور شماتیک نشان می‌دهد. شکل (۹) تأثیر مقدار ناکاملی‌های هندسی را بر رفتار مورد نظر سیستم مذکور نشان می‌دهد. این شکل در واقع تغییرات میانگین جابجایی جانبی سازه در تراز بام با افزایش ناکاملی‌های هندسی نشان می‌دهد.

مسئله یا ناکاملی‌های هندسی اولیه، یک آنالیز FORM انجام شده است.

این شکل‌ها نشان می‌دهند که قاب‌های فولادی نسبت به تغییرات تصادفی موجود در نیروهای جانبی و تنش تسلیم فولاد حساسیت بسیاری داشته و قابلیت اعتماد آن‌ها به صورت غیرخطی با افزایش تغییرات این پارامترها کاهش پیدا می‌کند. لیکن قابلیت اعتماد این قاب‌ها نسبت به تغییرات تصادفی موجود در مدول الاستیسیته و نیز ضریب سختی ثانویه فولاد از حساسیت کمتری برخوردار بوده و به صورت تقریباً خطی کاهش پیدا می‌کند. ضمناً ناکاملی‌های هندسی از نوع تغییرات موجود در مختصات گرهی از ناکاملی‌های هندسی به صورت انحنای اولیه در راستای اعضا تأثیر بیشتری در ظرفیت و نهایتاً در قابلیت اعتماد آن دارند.

همچنین برای تکمیل اطلاعات آماری واکنش سیستم، توزیع احتمال خیز جانبی قاب فولادی در تراز بام را - که مربوط به تغییرمکان افقی گره ۳ است می‌توان از طریق آنالیزهای پی‌درپی مرتبه اول قابلیت اعتماد FORM یا با انجام مطالعات پارامتری سیستم به دست آورد. در این راستا برای ارزیابی تأثیر جداگانه متغیرهای تصادفی مربوط به ناکاملی‌های هندسی، قابلیت اعتماد سیستم یک بار با وجود ناکاملی‌های هندسی و بار دیگر بدون وجود این ناکاملی‌ها محاسبه می‌شود.

برای این منظور دو حالت زیر در نظر گرفته می‌شود: الف) تمامی متغیرهای سیستم به صورت تصادفی در نظر گرفته می‌شوند. ب) تمامی متغیرها به جز متغیرهای مربوط به ناکاملی‌های هندسی به صورت تصادفی در نظر گرفته می‌شوند. نتایج حاصل در شکل (۷) به صورت نمودارهای چگالی احتمال PDF و متمم توزیع تجمعی CCDF مربوط برای تغییرمکان جانبی سازه در تراز بام ترسیم شده است. در واقع برای هر نقطه از منحنی CCDF یک آنالیز قابلیت اعتماد انجام شده است.

این نمودارها اطلاعات کاملی را درباره از نحوه توزیع احتمال تغییرمکان جانبی سازه در تراز بام - که از اهمیت

۶- نتیجه گیری

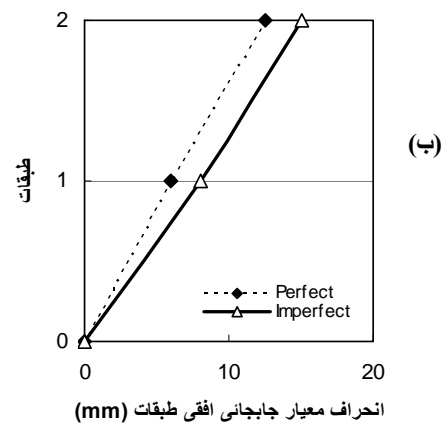
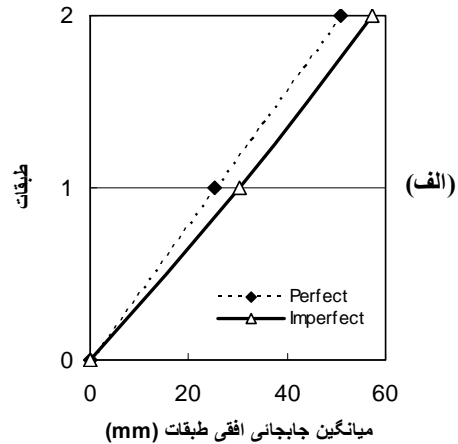
در این مقاله اثر ناکاملی‌های هندسی اولیه در قاب‌های فولادی به صورت تغییرات موجود در مختصات گره‌های اتصالی اعضای سازه به یکدیگر و ناکاملی هندسی ناشی از وجود انحنای راستای اولیه اعضای مختلف سازه - که به صورت متغیرهای تصادفی در آنالیزهای مربوط اعمال شده - بر قابلیت اعتماد این سیستم‌ها مطالعه شده است. نتایج زیر استخراج می‌شود:

۱- پارامترهای تصادفی مربوط به ناکاملی‌های هندسی موجود در قاب‌های فولادی از اهمیت قابل توجهی در قابلیت اعتماد این سیستم‌ها برخوردار بوده و بسیاری از این پارامترها جزء پارامترهای مهم و اولیه این سیستم‌ها بودند. در این میان تغییرات تصادفی موجود در مختصات گره‌های تکیه‌گاهی سازه نیز نقش مهمی دارند.

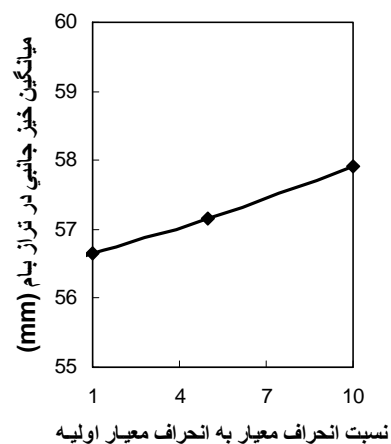
۲- پارامترهای تصادفی مربوط به ناکاملی‌های هندسی اولیه از نوع تغییرات موجود در مختصات گرهی سازه تأثیر و اهمیت بیشتری نسبت به پارامترهای تصادفی مربوط به ناکاملی‌های هندسی - به صورت انحنای اولیه در راستای اعضای آن در ظرفیت باربری نهایی سازه و نیز در قابلیت اعتماد آن - دارند.

۳- پارامترهای تصادفی مربوط به تغییرات موجود در نیروهای جانبی از نظر اهمیت، جزو اولین پارامترهای مهم سیستم‌های قاب فولادی بوده و لذا با توجه به طبیعت تصادفی ذاتی و تغییرات گسترده و غیرقابل پیش‌بینی موجود در نیروهای جانبی وارد - مانند نیروهای زلزله یا نیروی باد - این پارامترها نقش مهمی در ارزیابی قابلیت اعتماد قاب‌های فولادی دارند.

۴- قاب‌های فولادی نسبت به تغییرات موجود در متغیرهای تصادفی تنش تسلیم فولاد و نیروهای جانبی حساسیت بسیاری داشته و قابلیت اعتماد آن‌ها بلافاصله به صورت غیرخطی با افزایش تغییرات این پارامترها کاهش پیدا می‌کند. لیکن تأثیر پارامترهای تصادفی مربوط به مدول الاستیسیته و ضریب سختی ثانویه فولاد به صورت تقریباً خطی بوده و نسبتاً از حساسیت کمتری برخوردار است.



شکل ۸. میانگین (الف) و انحراف معیار (ب) خیز افقی سازه در ترازهای مختلف قاب



شکل ۹. تأثیر ناکاملی هندسی اولیه در خیز جانبی قاب

۷- منابع

- [1] Mazzoni S., McKenna F., Fenves G. L., "The OpenSees Command Language Manual", Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley, 2005.
- [2] Der Kiureghian A., Taylor R. L., "Numerical methods in structural reliability", Proceedings of the ICASP4, Florence, Italy, 1983.
- [3] Haukaas T., "Finite Element Reliability and Sensitivity Methods for Performance-Based Engineering", Ph.D. thesis, University of California, Berkeley, 2003.
- [4] Haukaas T., Der Kiureghian A., "A Computer Program for Nonlinear Finite Element Reliability Analysis", 8th International Conference on Structural Safety and Reliability, California, USA, 2001.
- [5] Sudret B., Der Kiureghian A., "Stochastic Finite Element Methods and Reliability", A State-of-the-Art Report, <http://opensees.berkeley.edu>.
- [6] Nowak A. S., Collins K. R., "Reliability of Structures", McGrawHill, 2000.
- [7] Hasofer A. M., Lind N. C., "Basic Notes on Load Models", The Joint Committee on Structural Safety, 2000.
- [8] Schueremans L., "Structural Reliability in Design and Analysis", State of the Art Report, Katholieke Universiteit Leuven, 2003.
- [9] Jungwon H., Achintya H., "Seismic reliability of non-linear frames with PR connections using systematic RSM", Probabilistic Engineering Mechanics, 17, 2002, pp 177-190.
- [10] Ellingwood B. R., "Earthquake risk assessment of building structures", Reliability Engineering and System Safety, 74, 2001, pp 251-262.