

بررسی تاثیر نوع توزیع احتمال پارامترها در قابلیت اعتماد سازه های خرابایی

الهام عباسی

کوثر یزدان نجاد

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد صفادشت، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

samira.shahi.87@gmail.com

yazdannejadk@yahoo.com

محمود میناوند

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد صفادشت، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

minavand_m@yahoo.com

چکیده

تئوری قابلیت اعتماد روشی نوین برای بررسی میزان ایمنی یک سازه در برابر نیروهای وارد بر آن می باشد. در این روش سعی می شود تا حد امکان پارامترهای موجود در روند تحلیل و طراحی سازه به واقعیت نزدیک تر شوند. برای این منظور، فضای تحلیل و طراحی از حالت معین خارج شده و به فضای احتمالاتی وارد می شود. در مطالعه حاضر از روش های بر مبنای شاخص قابلیت اطمینان و شبیه سازی در محاسبه احتمال خرابی و برآورد نقطه طراحی سازه های خرابایی استفاده شده است. بدین منظور چندین سازه خرابایی ساده و پیچیده در نظر گرفته شده و عملکرد آنها شبیه سازی شده است. برای بررسی تاثیر توزیع احتمال در ایمنی سازه های خرابایی به روش احتمالی از توزیع های احتمال مختلف برای پارامترهای تصادفی از جمله بار و مقاومت استفاده شده و شبیه سازی و محاسبات آماری با نرم افزار MATLAB انجام گرفت. برای سنجش کارایی مدل ها از معیار اطلاعاتی آکائیک استفاده شده است. نتایج بدست آمده نشان می دهد که روش های تحلیلی برای بسیاری از مسائل کاربردی سازه کارایی لازم را نداشته و روش های بر مبنای شبیه سازی بسیار موثرتر می باشند. به ویژه، برخی از روش های شبیه ساز باعث صرفه جویی بسیار در زمان تحلیل می شوند که باعث کاهش چشمگیر هزینه ها می گردد. از طرفی دیگر، نتایج بیانگر نقش قابل توجه توزیع های احتمالی پارامترهای نامعین در تحلیل قابلیت اعتماد سازه ها می باشد.

واژه های کلیدی : شاخص قابلیت اعتماد، عدم قطعیت، توزیع های احتمال، سازه های خرابایی

Investigation the effect of probability distribution type of parameters on the reliability of truss structures

Elham Abbasi, Kowsar yazdannejad*, Mahmood Minavand

ABSTRACT

Reliability theory is a new method to evaluate the safety of a structure against the forces acting on it. In this method, the parameters of the analysis and design process of the structure are tried to be as close to reality as possible. For this purpose, the analysis and design space is taken out of a certain state and enters the probabilistic space. In the present study, methods based on reliability index and simulation have been used in calculating the probability of failure and estimating the design point of truss structures. For this purpose, several simple and complex truss structures have been considered and their performance has been simulated. To investigate the effect of probability distribution on the safety of truss structures by probabilistic method, different probability distributions for random parameters such as load and strength were used and simulations and statistical calculations were performed with MATLAB software. Akaike information criterion has been used to measure the performance of the models. The results show that analytical methods are not efficient for many structural problems and simulation-based methods are much more effective. In particular, some simulation methods save a lot of analysis time, which significantly reduces costs. On the other hand, the results indicate the significant role of probability distributions of uncertain parameters in the reliability analysis of structures.

KEYWORDS Reliability Index, Uncertainty, Probability Distributions, Truss Structures

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۰/۱۲/۰۸

تاریخ آخرین اصلاحات : ۱۴۰۰/۱۲/۰۸

تاریخ دریافت : ۱۳۹۷/۱۰/۲۰

۱- مقدمه

گسسته می‌باشد که دامنه کاربرد این روش‌ها را نیز در موارد عملی محدود می‌سازد [۶].

با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی می‌توان تخمین دقیقی از احتمال خرابی سازه بدست آورد. در این روشها نکته مهم، تولید نمونه‌هایی از متغیرهای تصادفی به منظور تخمین احتمال خرابی سازه می‌باشد. روش‌های شبیه‌سازی متنوعی در برآورد احتمال خرابی یک پدیده ارائه شده که متد مونت کارلو همانطور که ذکر شد یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین روش‌ها در این زمینه است [۶-۷]. احتمال خرابی یک سیستم با استفاده از این روش، با تقسیم تعداد نقاطی که در ناحیه خرابی قرار می‌گیرند بر تعداد تمامی نمونه‌های شبیه‌سازی شده، بدست می‌آید [۷]. این نمونه‌ها با استفاده از معکوس تابع توزیع تجمعی احتمال بدست می‌آیند. با این وجود، مشکل اصلی در استفاده از روش مونت کارلو حجم بالای محاسبات مربوط به ارزیابی قیدهای احتمالاتی می‌باشد که برای حل این مسئله نیز روش‌های کارآ و قدرتمندی مانند WSM ، IS^4 ، SS^5 و LS^6 ارائه شده‌اند [۸].

تغییر نوع توزیع احتمالاتی پارامترهای مهندسی (بار مرده و زنده، مقاومت فشاری بتن، تنش حد تسلیم فولاد) و مقاومت نیز می‌تواند موجب تغییر ضریب اطمینان سازه شود. توزیعات احتمال متعددی وجود دارند که در مسائل مهندسی برای بررسی متغیرهای تصادفی استفاده می‌شوند. برای توزیعات احتمال معمولاً یک تابع چگالی احتمال pdf^7 و تابع چگالی تجمعی احتمال cdf^8 تعریف می‌شود [۱]. تعدادی از توزیعات احتمال متداول که برای برخی از مشخصه‌های مقاومت و بارها در مطالعات پیشین استفاده شده، توزیع‌های نرمال، لگ نرمال، گاما، بتا و حالات حدی می‌باشند [۱].

سازه‌های خرابی از جمله سازه‌های مهم تلقی می‌شوند که بررسی رفتار لرزه‌ای آنها با در نظر گرفتن عدم قطعیت (با توجه به وجود درجات نامعینی زیاد) امری ضروری می‌باشد. لذا در این پژوهش قابلیت اعتمادپذیری سازه‌های خرابی با کمک روش‌های مختلف احتمالاتی ($SORM$, $FORM$, MSC , SS , IC) به منظور تعیین بهترین روش که از دقت کافی برخوردار بوده و در عین حال اقتصادی باشد، مورد توجه قرار می‌گیرد. در قابلیت اعتماد سیستم‌های خرابی مهمترین بحث گسیختگی اتفاق افتاده در یک جزء بوده و امکان گسیختگی کلی سازه را دارد (گسیختگی در یک عضو، بدین صورت است که بار مؤثر بیشتر از مقاومت عضو گردد). در نتیجه قابلیت اعتماد عضو امکان دارد نشان دهنده سیستم کل سازه باشد. سازه‌های خرابی به صورت یک سیستم سری، موازی یا مختلط مدل سازی شده

تحلیل قابلیت اعتماد سازه‌ها از شاخه‌های جدید علوم در مهندسی عمران می‌باشد. در تحلیل قابلیت اعتماد عملکرد صحیح سیستم سازه‌ای به پارامترهای متعددی مانند متغیرهای تصادفی و غیر تصادفی مرتبط است و بصورت تئوری احتمالاتی نشان داده می‌شوند. از طرفی در طراحی سازه‌ها ایمنی از عوامل مهم محسوب می‌شود. لذا مطالعه دقیق متغیرهایی که به نحوی روی سازه تأثیر می‌گذارند و نیز پارامترهایی از سازه که در مقابل این متغیرها مقاومت نشان می‌دهند از اهمیت زیادی برخوردار هستند [۱]. از آنجایی که متغیرها دارای عدم قطعیت می‌باشند، بایستی در یک ارزیابی دقیق از سیستم سازه‌ای عدم قطعیتها لحاظ گردند. در ارزیابی قابلیت اعتماد سازه‌ها سعی می‌گردد، تا با اعمال متغیرهای بارگذاری، متغیرهای سیستم سازه‌ای و همبستگی بین این متغیرها ارزیابی منطقی تری از سازه ارائه شود.

عدم قطعیتها از منابع مختلفی ایجاد می‌شوند و عموماً می‌توانند به دو دسته عدم قطعیت‌های آماری و یا ذاتی و عدم قطعیت‌های ناشی از کمبود دانش و یا شناختی دسته بندی شوند. عدم قطعیت‌های شناختی با جمع‌آوری داده‌های بیشتر و یا با پالایش اطلاعات موجود کاهش خواهند یافت. اما عدم قطعیت‌های آماری در طبیعت پدیده‌های تصادفی موجود بوده و با جمع‌آوری اطلاعات کاهش نمی‌یابند. روشهای قابلیت اعتماد به طور کلی تر می‌توان گفت که عدم قطعیت‌های مربوط به تحلیل یک مسئله مهندسی را در نظر می‌گیرند [۲].

از جمله ساده‌ترین روش‌ها برای محاسبه قابلیت اطمینان، روش‌های مرتبه اول^۱ و دوم^۲ قابلیت اعتماد ($FORM/SORM$) می‌باشد [۳-۴]. روش‌های مرتبه اول و دوم علاوه بر سادگی دارای این ویژگی هستند که نقطه با بیشترین احتمال وقوع و به عبارتی محتمل‌ترین حالت خرابی در مسائل سازه‌ای را در اختیار طراح قرار می‌دهند. در این روش‌های تقریبی، فاصله نقطه مزبور از مبدا در فضای نرمال استاندارد شاخص قابلیت اطمینان (β) نامیده می‌شود. برای حل مسائل با متغیرهای غیرنرمال، نیازمند استفاده از نگاشت و انتقال متغیرها به فضای نرمال استاندارد هستیم که پیچیدگی مسئله را بیشتر می‌نماید [۵].

بعلاوه، روش‌های مرتبه اول و دوم مبتنی بر شاخص، نیازمند استفاده از نگاشت جهت انتقال متغیرهای تصادفی با تابع توزیع غیرنرمال به فضای استاندارد نرمال می‌باشند که بر پیچیدگی و درجه غیرخطی قیدهای احتمالاتی می‌افزاید. مشکل دیگر این روش‌ها عدم دقت کافی در بررسی قیدهای احتمالاتی با توابع شرایط حدی^۳ (LSF) غیرخطی، مشتق ناپذیر و همچنین در مسائل با متغیرهای

⁴Importance Sampling (IS)

⁵Subset Simulation (SS)

⁶Line Sampling (LS)

⁷Probability Distribution Function

⁸Cumulative Distribution Function

¹ First Order Reliability Method (FORM)

² Second Order Reliability Method (SORM)

³ Weighted Simulation Method (WSM)

و با توجه به احتمال خرابی تک تک اعضا مورد ارزیابی قرار گیرند. با توجه به اینکه در بسیاری از مطالعات انجام شده توزیع احتمال پارامترهای تصادفی ثابت فرض می‌شود، لذا نقش توزیع احتمال بر آورد قابلیت اطمینان سازه‌ها در این پژوهش مورد توجه قرار می‌گیرد. از توزیع های احتمال مختلف با توجه به مطالعات پیشین برای متغیرهای تصادفی استفاده شده و میزان تاثیرگذاری نوع توزیع‌های احتمالی بر نتایج روش های مختلف مورد سنجش و ارزیابی قرار می‌گیرد.

۲- پیشینه تحقیق

با توجه به خاصیت غیرقطعی زلزله و فرضیات موجود در مدلسازی سازه های خرابی و عدم قطعیت موجود در تقاضا و ظرفیت از روشهای مبتنی بر قابلیت اطمینان برای بررسی این سازه ها بر اساس سطوح عملکردی استفاده می شود.

تحقیقات وسیعی در حل مسائل عدم قطعیت توسط گاردنی انجام گرفت [۹-۱۱]. یکی از تحقیقات گسترده او در زمینه ی توسعه ی یک مدل احتمالی برای ستون های بتن آرمه و پل های چند دهانه بوده است. او یک روش بیزین جامع برای فرمول بندی ظرفیت و تقاضا و مدل ها برای اجزای سازه ای و سیستم ها ارائه کرده و این روش برای توسعه ی مدل احتمالی ستون های بتن آرمه و پل های چند دهانه استفاده گردید. عدم قطعیت در مدل سازی و تاثیر آن در ارزیابی لرزه ای سازه های بتن آرمه توسط جلاپر و همکاران (۲۰۰۰) مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه تمرکز بر روی عدم قطعیت پارامترهای مربوط به مقاومت اعضا بوده است. یک سازه ی مدرسه در ایتالیا نظر گرفته شده و برای مقاومت فشاری بتن و تنش تسلیم فولاد آزمایشات مخرب و غیرمخرب انجام شد. توزیع احتمال تنش تسلیم فولاد در شکل ۲-۱۳ آورده شده است. ملاحظه می گردد که با انجام آزمایش میانگین تنش افزایش یافته و انحراف معیار کاهش یافته است [۱۲].

ساسانی و همکاران در سال ۲۰۰۲ شکندگی لرزه ای دیوارهای سازه ای بتنی مسلح با پرپود کوتاه تحت حرکات نزدیک به منبع زمین مورد بررسی قرار دادند در این کار عدم قطعیت در مدل تقاضا و ظرفیت مورد بررسی قرار گرفته و از تئوری بیزین برای آپدیت کردن نتایج استفاده شده است [۱۳]. زو در تز دکتری خود در سال ۲۰۰۵، طبقه بندی ستون ها ی بتن آرمه بر اساس مود های خرابی با فرض عدم قطعیت در مدل خرابی را مورد بررسی قرار داد [۱۴]. کومار در سال ۲۰۰۶ در رساله ی دکتری خود به تخمین شکندگی ساختمان‌های بتن آرمه مسلح برای ارزیابی آسیب پذیری لرزه ای در ناحیه امریکای مرکزی پرداخته است. او از تئوری بیزین برای توسعه مدل تقاضا استفاده کرده و پارامترهای مدل تقاضا با استفاده از داده‌های پاسخ شبیه سازی شده ی به دست آمده از تحلیل غیر خطی تاریخیچه زمانی و تجزیه و تحلیل مدل های سازه برای یک مجموعه از حرکات مصنوعی زمین برآورد شده است [۱۵].

ژائو و اونو استفاده از روش‌های مبتنی بر ممان را برای محاسبه قابلیت اعتماد سازه‌ها معرفی کردند. ایشان طی معرفی چند مسئله مهندسی، مشکلات موجود در روش فرم را بیان کردند [۱۶]. رحمان و وی در سال ۲۰۰۶ یک روش تک متغیره برای محاسبه احتمال خرابی سازه و همچنین یافتن نقطه طراحی برای سازه‌هایی که دارای تابع شرایط حدی با درجه بالا و بسیار غیرخطی هستند را بیان نمودند. در این مطالعه از ترکیب هوشمندانه چندین روش از جمله تولید یک تابع چند متغیره و کاهش تعداد متغیرها توسط روش سطح پاسخ و در آخر استفاده از روش مونت کارلو جهت تخمین احتمال خرابی و یافتن نقطه با بیشترین احتمال خرابی استفاده گردید [۱۷]. گونگ و یی در سال ۲۰۱۱ یک الگوریتم ساده در بدست آوردن شاخص قابلیت اعتماد برای توابع بسیار غیرخطی ارائه نمودند [۱۸]. شیاکسو هوآنگ و ژیانکیو چن در سال ۲۰۱۴ مدل قابلیت اعتماد رو به زوال وابسته به زمان سازه‌ها را بر مبنای یک فرآیند تصادفی روش‌های استنتاجی نظریه بیز، ارائه نمودند. برای این منظور ایشان سن سازه را به شکل یک پروسه گاما تشریح کردند و بطور موازی شوک‌ها و بارهای چشمگیر وارده بر سازه را به شکل یک فرآیند پواسون تشریح نمودند [۱۹].

کینگ لی و همکاران در سال ۲۰۱۵ روش نمونه‌های وزن دار آپدیت شده در روش مونت کارلو را برای محاسبه میزان شاخص قابلیت اعتماد پایداری خاک شیروانی شیبدار ارائه نمودند [۲۰]. کاستالدو و همکاران در سال ۲۰۱۷ تاثیرات اعمال ضریب کاهش مقاومت در میزان قابلیت اعتماد لرزه ای سازه‌ها را مورد ارزیابی قرار دادند. ایشان با در نظر گیری دو پارامتر کاهش مقاومت محوری و خمشی فولاد تحت شتاب‌های مختلف زلزله، سطح قابلیت اعتماد لرز ای سازه را ارائه نمودند [۲۱].

رامون و همکاران در سال ۲۰۱۷ [۲۲] نیز با ارائه تکنیکی نوین در محاسبه احتمال خرابی لرزه‌ای، طراحی بر اساس سطح عملکرد سازه‌های قاب فولادی را مورد مطالعه قرار دادند. در این متد، قابلیت اعتماد سازه توسط ترکیب دو روش فرم و سطح پاسخ و با در نظر گرفتن فرسایش و تغییرات بارگذاری در طول زمان، محاسبه می‌شود. در زمینه نقش توزیع احتمال متغیرهای تصادفی در برآورد اعتمادپذیری سازه نیز، مطالعاتی انجام شده که از آن جمله می توان به تحقیقات انجام گرفته توسط سرزن و نوآک و میرزا و مک گرگور اشاره کرد [۲۳-۲۴].

در این پژوهش سعی می‌شود تا روش‌های مختلف محاسبه قابلیت اطمینان برای ارزیابی احتمال خرابی سازه‌های خرابی مورد بررسی قرار گیرد و در این راستا گامی در جهت پیشبرد اهداف روش‌های محاسباتی برداشته شود. همچنین نقش توزیع احتمالی پارامتر در ارزیابی احتمال خرابی سنجیده می شود. این مهم با در نظر داشتن عدم کاهش دقت پاسخ با کاستن پیچیدگی‌های روش حل که خود بر عدم قطعیت‌های موجود می‌افزاید انجام می‌شود.

۳- روش‌های تحلیل قابلیت اعتماد در پژوهش حاضر

اصلی به دست آورد. برای حل این مشکل می توان از خطی سازی حاشیه ایمنی و استفاده از ترم خطی در بسط تیلور حول یک نقطه استفاده کرد. با خطی سازی حول نقطه میانگین خواهیم داشت:

$$M = \log(\mu_R) - \log(\mu_S) + \frac{R - \mu_R}{\mu_R} + \frac{S - \mu_S}{\mu_S} \quad (4)$$

شاخص قابلیت اعتماد برابر است با:

$$\beta = \frac{\log(\mu_R) - \log(\mu_S)}{\sqrt{V_R^2 + V_S^2}} \quad (5)$$

در رابطه فوق، V_R و V_S ضریب تغییرات مقاومت و اثرات ناشی از بارگذاری هستند. شاخص اعتماد به دست آمده از این روش متفاوت از روش کرنل می باشد.

۳-۲- روش مرتبه دوم قابلیت اعتماد (SORM)

در روش FORM نقطه میانگین در فضای متغیرهای اصلی به مبدا فضای نرمال استاندارد نگاشته می شود. در فضای نرمال استاندارد فاصله هر نقطه بر روی سطح تابع حالت حدی تبدیل یافته تا مبدا دستگاه مختصات، در واقع فاصله نقطه ای بر روی سطح گسیختگی تا نقطه میانگین بر حسب انحراف معیار در دستگاه مختصات غیر نگاشت شده می باشد. بنابراین هر نقطه بر روی سطح تابع حالت حدی تبدیل یافته تا مبدا متغیرهای نرمال استاندارد، شاخص قابلیت اعتماد در راستایی است که آن نقطه را به مبدا متصل می کند و لذا شاخص قابلیت اعتماد کل سازه می باشد. این نقطه بر روی سطح خرابی که کوتاهترین فاصله را دارد نقطه طراحی با محتمل ترین نقطه (MPP) نامیده می شود.

گام های روش FORM را به طور خلاصه می توان به صورت زیر بیان نمود:

- تبدیل متغیرهای مساله به متغیرهای نرمال استاندارد
- باز نویسی تابع حالت حدی با متغیرهای جدید
- انتخاب نقطه ی طراحی
- ارزیابی شاخص قابلیت اعتماد (به عنوان فاصله ی بین مرکز مختصات نرمال استاندارد و نقطه ی طراحی

این روش شامل ضرایب حساسیت می باشد که به ارزیابی تعیین اثر هر کدام از متغیرهای تصادفی کمک می کنند. بنابراین لزوم با اهمیت در نظر گرفتن هر کدام از متغیرها به وسیله ی این ضرایب تعیین می شود. یک ضریب حساسیت مثبت نشان دهنده ی این است که افزایش در مقدار آن متغیر تصادفی باعث افزایش ایمنی می شود و بالعکس یک ضریب حساسیت منفی نشان دهنده ی این است که افزایش در مقدار یک متغیر باعث کاهش ایمنی می گردد.

۳-۳- روش شبیه سازی مونت کارلو

روش مونت کارلو یک الگوریتم محاسباتی است که از نمونه گیری

مسئله قابلیت اعتماد شامل تابع عملکرد (g) می باشد که از سه بخش ایمن ($g > 0$)، خرابی ($g < 0$) و مرز ایمن و خرابی ($g = 0$) تشکیل شده است. در هر موقعیتی که مقدار تابع عملکرد از صفر کمتر شود، سازه را در موقعیت خرابی قرار می گیرد.

اگر متغیرهای یک مسئله با بردار $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ نشان داده شوند که در آن n نمایانگر تعداد ابعاد یک مسئله می باشد، هر کدام از متغیرهای تصادفی یک مسئله قابلیت اعتماد خود دارای یک تابع توزیع خاص هستند. در این حالت احتمال خرابی یک مسئله برابر خواهد بود با سطح زیر نمودار توابع توزیع متغیرهای تصادفی، در موقعیتی که تابع شرایط حدی کوچکتر از صفر می باشد. بنابراین:

$$P_f \equiv P\{g(\mathbf{X}) \leq 0\} = \int_{D_f = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n; g(\mathbf{x}) \leq 0\}} f_{\mathbf{X}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (1)$$

در رابطه فوق P_f احتمال خرابی مسئله، $P\{g(\mathbf{X}) \leq 0\}$ احتمال قرار گرفتن حالاتی از مسئله در ناحیه خرابی، $D_f = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n; g(\mathbf{x}) \leq 0\}$ دامنه حل مسئله و $f_{\mathbf{X}}(\mathbf{x})$ تابع توزیع متغیرهای تصادفی مسئله می باشد. به طور کلی روش های تعیین احتمال خرابی و حل انتگرال فوق به دو نوع روش های تحلیلی و روش های شبیه سازی تقسیم می شوند. روش های تحلیلی بسط یافته ی مطالعات کرنل و هاسوفر-لیند می باشند که از تقریب مرتبه اول بسط تیلور برای تابع حدی استفاده می کنند. در سال های اخیر، روش های شبیه سازی در محاسبه احتمال خرابی سازه ها از محبوبیت خاصی برخوردارند. از معروف ترین روش های شبیه سازی می توان به شبیه سازی مونت کارلو اشاره کرد. در روش های شبیه سازی، نمونه های تصادفی با توجه به تابع چگالی احتمال تولید می شوند. روش های ارزیابی قابلیت اعتماد سازه ها که در این پژوهش مد نظر قرار گرفته، در ادامه تشریح می شوند.

۳-۱- روش مرتبه اول قابلیت اعتماد (FORM)

برای بیان تابع حالت حدی، توابع ریاضی مختلفی می توان ارائه کرد. به عنوان مثال گاهی R و S فقط باید مقادیر مثبتی اختیار کنند. اگر R و S دارای توزیع لگ نرمال باشند، خواهیم داشت:

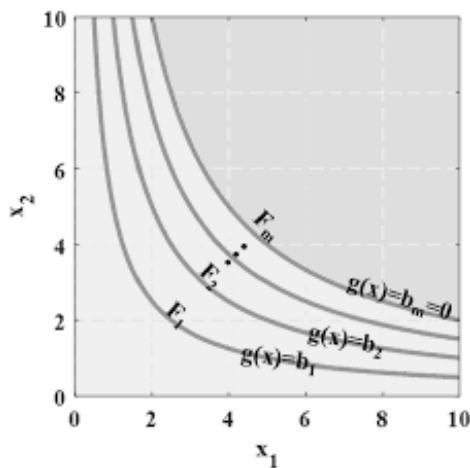
$$g(R, S) = \log\left(\frac{R}{S}\right) \quad (2)$$

در این صورت، شاخص اعتماد برابر است با:

$$\beta = \frac{E[\log(\frac{R}{S})]}{D[\log(\frac{R}{S})]} \quad (3)$$

حاشیه ایمنی $\log(R/S)$ یک تابع غیر خطی بر حسب R و S بوده و نمی توان مقدار میانگین و انحراف معیار را از ممان دوم متغیرهای

احتمالات خرابی کوچک در سیستم های مهندسی می باشد. در این روش با تعریف چند رخداد واسطه، احتمال خرابی به صورت حاصل ضرب مقادیر احتمالات شرطی بیان می شود. با کمک رخدادهای واسطه، مدل اصلی که دارای احتمال وقوع کم است، به یک توالی از احتمالات شرطی با احتمال وقوع بیشتر تبدیل می گردد. تولید این نمونه ها به وسیله الگوریتم هایی نظیر الگوریتم متروپلیس-هستینگز اصلاح شده و گیبس انجام می شود. این نمونه ها به تدریج با پر کردن نواحی خرابی واسطه، کل ناحیه خرابی را پوشش می دهند. در رخداد خرابی $F = \{\theta: g(\theta) \leq 0\}$ تابع حالت حدی متغیرهای تصادفی می باشد. تابع چگالی احتمال به واسطه $f_{\theta}(\theta)$ مشخص می گردد. فرض می شود $b_1 > b_2 > \dots > b_m = 0$ به عنوان یک توالی نزولی از مقادیر واسطه برای رخدادهای خرابی واسطه $F_k = \{\theta: g(\theta) \leq b_k\}$ که $k=1,2,\dots,m$ می باشد، در نظر گرفته شود. رخدادهای خرابی همانند شکل ۱ می باشد.



شکل (۱): رخداد های خرابی در روش شبیه سازی زیرمجموعه ای

۳-۵- روش نمونه گیری با اهمیت (IS)

روش نمونه گیری با اهمیت یکی از روش های کاهش واریانس می باشد که برای تعیین میزان احتمال خرابی مورد استفاده قرار می گیرد. در این روش توابع چگالی احتمال قادر به جداسازی نمونه های مهم از مجموعه متغیرهای تصادفی هستند. بر اساس نمونه ها، مقادیر آماری نظیر میانگین تخمین زده می شوند. احتمال گسیختگی در این روش به صورت زیر نوشته می شود:

$$P_f = \int \frac{f_X(x)}{h_X(x)} h_X(x) dx \quad (10)$$

در رابطه فوق $h_X(x)$ یک تابع چگالی نمونه برداری جدید می باشد. رابطه (۱۱) به صورت زیر قابل بازنویسی است:

$$P_f = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I(x_j) \left(\frac{f_X(x_j)}{h_X(x_j)} \right) \quad (11)$$

تصادفی برای محاسبه نتایج استفاده می کند. روش های مونت کارلو برای شبیه سازی سیستم ها استفاده می شوند. این روش ها برای محاسبه نتایج خود بر نمونه گیری های تکرار شونده تصادفی تکیه می کنند و اغلب نیازمند برنامه های کامپیوتری می باشد. استفاده از روش مونت کارلو در مواقعی که محاسبه پاسخ دقیق ناممکن باشد، کارایی بیشتری دارد. همچنین برای مدل های با متغیر زیاد با درجات نامعینی زیاد مفید هستند. تحلیل مونت کارلو یکی از قوی ترین روش ها برای تحلیل آماری عدم قطعیت های موجود در مسائل مهندسی می باشد. این روش بر اساس تولید مجموعه ای از اعداد تصادفی است که معمولاً توسط برنامه های کامپیوتری ایجاد می شوند. در فرآیند پیش بینی هر فرآیند ابتدا باید مشاهده سیستم صورت گیرد. سپس یک مدل فرضی از سیستم فیزیکی ایجاد شده و رفتار سازه بر اساس فرضیات پیش بینی می شود. در پایان ارزیابی نمونه ها برای آزمایش اعتبار مدل انجام می شود.

در بسیاری از مسائل سازه ای به دلیل ماهیت تصادفی پارامترهای طراحی و همچنین پیچیدگی تابع حدی، امکان بیان تابع حدی به صورت یک مسئله ساده ریاضی وجود نداشته و روش های شبیه سازی می توانند بسیار کارا باشند.

در آنالیز مونت کارلو هرچه تعداد نمونه ها بیشتر باشد، دقت پاسخ به دست آمده بیشتر خواهد بود. تعداد حداقل نمونه ها برای اینکه میانگین در بازه اعتماد $(1-\alpha)$ قرار گیرد، برابر است با:

$$\bar{X}_m = \Phi_{\alpha/2} \left(\frac{\bar{S}_x}{\sqrt{n}} \right) \quad (6)$$

در رابطه فوق \bar{X}_m میانگین، \bar{S}_x انحراف معیار X ، α ضریب اهمیت، n تعداد نمونه های مورد نیاز و $\Phi_{\alpha/2}$ مقدار متغیر نرمال استاندارد در احتمال تجمعی $\alpha/2$ می باشد. اگر e_m خطای قابل قبول در تخمین مقدار متوسط X باشد، آنگاه:

$$e_m = \Phi_{\alpha/2} \left(\frac{\bar{S}_x}{\sqrt{n}} \right) \quad (7)$$

در این شرایط تعداد نمونه های مورد نیاز به صورت زیر خواهد بود:

$$n = \Phi_{\alpha/2}^2 \left(\frac{\bar{S}_x}{\sqrt{n}} \right)^2 \quad (8)$$

اگر شبیه سازی مونت کارلو برای تخمین احتمال خرابی استفاده شود، رابطه زیر برای درصد خطای احتمال گسیختگی توسط شومان ارائه شده است:

$$\%error = 200 \left[\frac{1-nP_f}{nP_f} \right]^{1/2} \quad (9)$$

از رابطه فوق برای تعیین تعداد نمونه های مورد نیاز برای دستیابی به سطح دقت مشخص استفاده می شود.

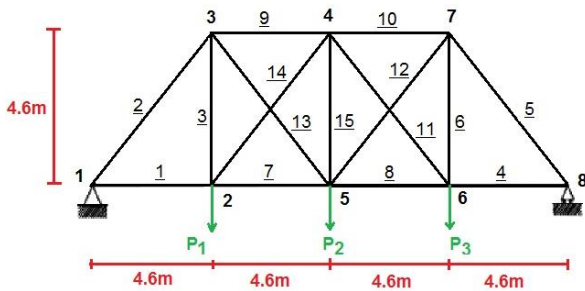
۳-۴- روش شبیه سازی زیرمجموعه ای (SS)

روش شبیه سازی زیرمجموعه ای، یک روش تصادفی برای محاسبه

در رابطه (۱۳)، $\Delta_2(P, E)$ جابجایی قائم نظیر گره ۲ می باشد.

۲-۴- مدل ۲ (خرپای ۱۵ عضوی)

مدل ۲ همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده، مربوط به یک خرپای ۱۵ عضوی می باشد. در مدل مطرح شده، سطح مقطع هر ۱۵ عضو و بارهای متمرکز گرهی به عنوان متغیرهای تصادفی مستقل در نظر گرفته شده اند. مدول الاستیسیته به عنوان یک کمیت غیر تصادفی برابر با 200 Gpa فرض شده و جابجایی مجاز گره میانی (گره ۵) بر اساس تحلیل الاستیک برابر 7.5 cm به دست آمده است.



شکل (۳): خرپای ۱۵ عضوی مدل ۲

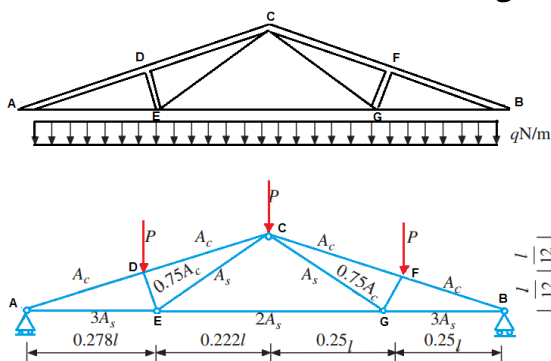
پارامترهای آماری مدل در جدول ۲ آورده شده است.

جدول (۲): پارامترهای آماری مدل ۲

متغیر	میانگین	انحراف معیار	واحد	تابع توزیع اولیه
A ₁ -A ₆	10.32	0.516	Cm2	N
A ₇ -A ₁₅	6.45	0.323	Cm2	N
Ln P ₁	4.483	0.09975	KN	LN
Ln P ₂	5.58	0.09975	KN	LN
Ln P ₃	4.483	0.09975	KN	LN

۳-۴- مدل ۳ (خرپای سقف)

در مدل ۳، تحلیل قابلیت اعتماد یک خرپای سقف مورد بررسی قرار می گیرد. مطابق شکل ۴ تیرک های بالایی و میلگردهای فشاری از بتن مسلح ساخته شده و تیرک های پایینی و میلگردهای کششی از فولاد می باشد.



شکل (۴): خرپای سقف مدل ۳

فرض می گردد که بار یکنواخت q بر خرپای سقف اعمال شده و می توان این بار را به بار گره ای تبدیل کرد. اگر شرط محدود کننده ای به صورت عدم تجاوز تغییر مکان گره c از 3 cm در نظر گرفته شود،

$I(X)$ به شرح زیر تعریف می شود:

$$I(x_j) = \begin{cases} 0 & \text{if } G(x_j) > 0 \\ 1 & \text{if } G(x_j) \leq 0 \end{cases} \quad (12)$$

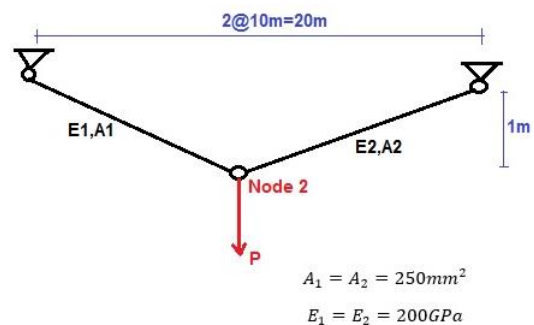
اگر گسیختگی رخ دهد، تابع I مقدار یک و در صورتی که شبیه سازی منجر به عدم گسیختگی شود، تابع I مقدار صفر را می گیرد. در این روش تلاش بر آن است که نقاط نمونه گیری بیشتر از مناطق با بیشترین سهم خرابی انتخاب شوند تا تعداد نمونه های مورد نیاز کاهش یابد. برای مسائل پیچیده ای که نیاز به تحلیل اجزای محدود دارند، این روش می تواند بسیار مناسب باشد.

۴- معرفی مدل های تحقیق حاضر

در این پژوهش به منظور بررسی نقش توزیع های احتمال در ارزیابی قابلیت اعتماد سازه های خرپایی، چندین مدل مختلف مورد بررسی قرار گرفت. جزئیات این مدل ها در ادامه تشریح شده است.

۴-۱- مدل ۱ (خرپای دو عضوی)

اولین مدل در نظر گرفته شده، یک خرپای دو عضوی با بار گرهی p همانند شکل ۲ می باشد. سطح مقطع عضوهای این خرپا به عنوان پارامتر معین و برابر 250mm^2 در نظر گرفته شده است. متغیرهای تصادفی این مدل بار و مدول الاستیسیته اعضا هستند که مشخصه های آماری آنها در جدول ۱ آورده شده است.



شکل (۲): خرپای دو عضوی مدل ۱

جدول (۱): پارامترهای آماری مدل ۱

متغیر	میانگین	انحراف معیار	واحد	تابع توزیع اولیه
P	18	10	KN	N
E ₁ , E ₂	200	10	GPA	N

تابع حالت حدی در نظر گرفته شده برای خرپا با فرض جابجایی قائم ماکزیمم گره میانی (برابر 0.25m) به صورت زیر می باشد:

$$g(P, E) = 0.25 - \Delta_2(P, E) \quad (13)$$

خواهیم داشت:

$$g = 0.03 - \Delta_c \quad (14)$$

Δ_c تابعی از تغییر مکان پارامترهای مسئله بوده و به شرح زیر محاسبه می گردد:

$$\Delta_c = \left(\frac{q l^2}{2}\right) \left(\frac{3.81}{A_s E_s} + \frac{1.13}{A_c E_c}\right) \quad (15)$$

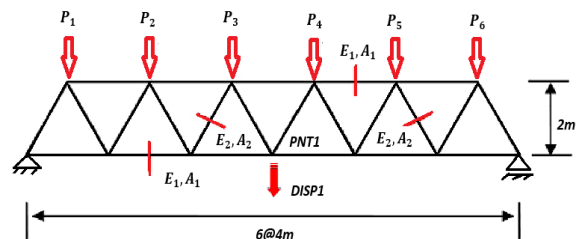
در رابطه فوق، A_s, E_s, A_c, E_c و l به ترتیب سطح مقطع اعضای فشاری و کششی، مدول الاستیسیته اعضای فشاری و کششی و طول اعضا می باشند. پارامترهای آماری متغیرهای مسئله در جدول ۳ آورده شده است.

جدول (۳): پارامترهای آماری مدل ۳

متغیر	میانگین	انحراف معیار	واحد	تابع توزیع اولیه
q	2000	0.07	N/m	N
l	12	0.01	m	N
A_s	0.000982	0.06	m ²	N
A_c	0.04	0.12	m ²	N
E_s	10^{11}	0.06	N/m ²	N
E_c	2×10^{10}	0.06	N/m ²	N

۴-۴ مدل ۴ (خرپای ۲۳ عضوی)

خرپای مدل ۴ یک خرپای ۲۳ عضوی با ۱۰ متغیر تصادفی می باشد. مدل این خرپا در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل (۵): خرپای ۲۳ عضوی مدل ۵

تابع حالت حدی برای مدل فوق بر حسب جابجایی گره مشخص شده به صورت رابطه ۱۶ می باشد:

$$g(x) = 1 - DISP1 \quad (16)$$

در رابطه فوق، X تابعی از متغیرهای تصادفی خرپا است. پارامترهای آماری متغیرهای تصادفی مدل در جدول ۳-۴ آورده شده است.

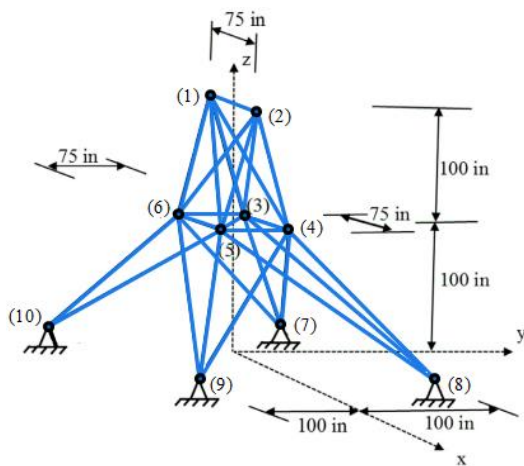
جدول (۴): پارامترهای آماری مدل ۴

متغیر	میانگین	انحراف معیار	واحد	تابع توزیع اولیه
E_1	2.1×10^{11}	2.1×10^{10}	N/m ²	LN
E_2	2.1×10^{11}	2.1×10^{10}	N/m ²	LN
A_1	2×10^{-3}	2×10^{-4}	m ²	LN
A_2	1×10^{-3}	1×10^{-4}	m ²	LN
P_1	5×10^4	7.5×10^3	N	Gumbel
P_2	5×10^4	7.5×10^3	N	Gumbel
P_3	5×10^4	7.5×10^3	N	Gumbel
P_4	5×10^4	7.5×10^3	N	Gumbel

P_5	5×10^4	7.5×10^3	N	Gumbel
P_6	5×10^4	7.5×10^3	N	Gumbel

۵-۴-۵ مدل ۵ (خرپای ۲۵ عضوی دکل برق)

مدل ۵، خرپای فضایی ۲۵ عضوی به ارتفاع ۵ متر به عنوان یک دکل انتقال برق فشار قوی است. این خرپا در پژوهش‌های پیشین، بارها به عنوان یک مسئله بنچمارک در ارزیابی روش‌های بهینه‌سازی و روش‌های بهینه‌سازی برمبنای قابلیت اعتماد مورد استفاده قرار گرفته است. مشخصات مدل در شکل ۶ و جدول ۵ آورده شده است. جرم مخصوص مواد برابر با $\rho = 0.1 \text{ lb/in}^3$ بوده و سطح مقطع المان‌ها در ۸ گروه تیپ بندی شده‌اند. همچنین، بارهای متمرکز گرهی (با مقادیر میانگین مطابق جدول ۵) و مدول الاستیسیته مصالح (با مقدار میانگین 10^4 ksi)، به صورت متغیر تصادفی نرمال در نظر گرفته شده‌اند. ضریب تغییرات کلیه متغیرهای تصادفی مسئله نیز برابر با ۵ درصد ($COV = 0.05\%$) می‌باشد.



شکل (۶): خرپای فضایی ۲۵ عضوی مدل ۵

جدول (۵): مشخصات بارهای گرهی

گره	بار در جهت x P_x (kips)	بار در جهت y P_y (kips)	بار در جهت z P_z (kips)
1	1.0	-10	-10
2	0.0	-10	-10
3	0.5	0	0
6	0.6	0	0

در این مدل، قابلیت اعتماد خرپا بر اساس تغییر مکان گره‌های ۱ و ۲ کنترل شده و حداکثر تغییر مکان گرهی نیز به 0.35 in محدود شده است. تابع شرایط حدی مسئله برای این خرپا مطابق رابطه زیر تعریف می شود:

$$g(X) = \begin{cases} 0.35 - \Delta_1 \\ 0.35 - \Delta_2 \end{cases} \quad (17)$$

این مسئله به صورت یک مسئله سیستم موازی تعریف شده که با بیشتر شدن تغییر مکان گرهی هر کدام از نقاط ۱ و ۲، سازه در ناحیه خرابی قرار می‌گیرد. حل این مسئله توسط روش اجزای محدود که با

استفاده از زبان متلب کدنویسی شده است، برای هر نمونه فراخوانی و تحلیل می‌شود. مقدار تغییرمکان در نقاط ۱ و ۲ در هر تحلیل محاسبه شده و در تابع شرایط حدی قرار داده شده و احتمال خرابی محاسبه می‌شود.

۵- توزیعات احتمال در نظر گرفته شده در تحقیق حاضر

همان طور که پیشتر اشاره شد، یکی از اهداف مهم تحقیق حاضر، بررسی تاثیر توزیع احتمال پارامترهای تصادفی در ایمنی سازه ها به روش احتمالی می باشد. توزیع های احتمال نرمال، لگ نرمال، گاما، بتا، حدی تعمیم یافته، نمایی و رابلی توزیع هایی هستند که برای پارامترهای هندسی از جمله بار و مقاومت استفاده می گردد. مشخصات کامل این توزیع های احتمالی در ادامه آورده شده است.

۶- تحلیل حساسیت

در این پژوهش برای بررسی عملکرد روش های قابلیت اعتماد و کارایی توزیع های احتمالی از تحلیل حساسیت استفاده شده است. این تحلیل حساسیت برای روش های شبیه سازی، جهت تعیین تعداد داده های لازم برای تعیین احتمال خرابی انجام می شود. بدین منظور برای هر سازه تعداد تحلیل های پیاپی بر اساس تعداد مختلفی از داده ها انجام می شود. برای هر تعداد از داده ها احتمال خرابی، انحراف معیار، دقت محاسبات و زمان تحلیل به دست آورده می شود. میزان احتمال خرابی به دست آمده میانگین مقادیر احتمال خرابی برای هر تحلیل می باشد.

برای تعیین خطای نسبی نیاز به میزان احتمال دقیق می باشد. برای تعیین میزان دقیق گاهی نیاز به تحلیل المان محدود سازه ها و تعیین احتمال خرابی بر اساس روش های شبیه سازی می باشد. در این پایان نامه برای برخی از مدل های سازه ای بر اساس تعداد مختلفی از نمونه ها تحلیل های المان محدود انجام شده است. با افزایش تعداد داده ها احتمال خرابی به مقدار دقیق نزدیک تر می شود. میزان خطای نسبی مقادیر احتمال خرابی به دست آمده از روش مونت کارلو MCS باید کمتر از ۱ درصد باشد، در غیر این صورت تعداد داده های نمونه برداری جهت رسیدن به خطای مورد نظر افزایش داده می شود.

برای تعیین خطای کل ناشی از مجموع خطای هر داده، از مجذور میانگین خطای مربعات (rmse) استفاده می شود:

$$rmse = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (g_i - y_i)^2}{N}} \quad (18)$$

در رابطه ی (۱۸)، g_i مقدار تابع اصلی به ازای داده های تست، y_i مقدار تابع رگرسیونی و N تعداد کل داده های تست می باشد. با افزایش تعداد داده های آموزشی مدل رگرسیونی ایجاد شده به تابع

اصلی نزدیک تر شده و با توجه به رابطه ی (۱۸) مقدار rmse کاهش می یابد.

۷- انتخاب بهترین توزیع احتمال با استفاده از معیار اطلاعاتی آکائیک

اغلب به منظور ارزیابی مدلی که برای پدیده های تصادفی ایجاد شده است از شاخص هایی استفاده می شود که براساس داده ها و توزیع مقدارهای آن پدیده تصادفی حاصل می شود. از طرفی اگر تعداد پارامترهای مدل زیاد باشد ممکن است مدل برای داده های موجود به خوبی برازش شده ولی برای داده های جدید مناسب نباشد که به این موضوع مسئله بیش برزش^۴ گفته می شود. با توجه به تاثیر تعداد پارامترها و تابع درستنمایی، معیار ارزیابی AIC یا معیار ارزیابی اطلاعات آکائیک یکی از این شاخص ها است که به هر دو معیار برای مناسب بودن مدل توجه داشته است. معیار ارزیابی AIC، نمایانگر میزان اطلاعاتی است که توسط مدل از دست رفته و در نتیجه هر چه مقدار معیار ارزیابی AIC کوچکتر باشد، مدل مورد نظر نسبت به بقیه مدل ها، بهتر و مناسب تر است.

اگر در یک مدل آماری k تعداد پارامترهای مدل باشد. اگر \bar{L} را حداکثر تابع درستنمایی برای مدل در نظر بگیریم، معیار ارزیابی AIC توسط رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$AIC = 2k - 2 \ln \bar{L} \quad (19)$$

بنابراین مناسب ترین مدل برحسب معیار اطلاع آکائیک، دارای کمترین مقدار AIC است.

۸- تحلیل نتایج

در این بخش قابلیت اعتماد مدل های خرابی مطرح شده در بخش قبل با روش های مختلف مورد بررسی قرار می گیرد. بدین منظور از روش های مختلف شبیه ساز و روش های بر مبنای قابلیت اعتماد استفاده شده است. برای بررسی عملکرد روش های مختلف تحلیل حساسیت انجام می شود. توزیع های احتمال مختلفی برای متغیرهای تصادفی مورد آزمایش قرار گرفته و برای کنترل کفایت نسبی آنها از معیار اطلاعاتی آکائیک استفاده می گردد.

۸-۱- تحلیل مدل ۱

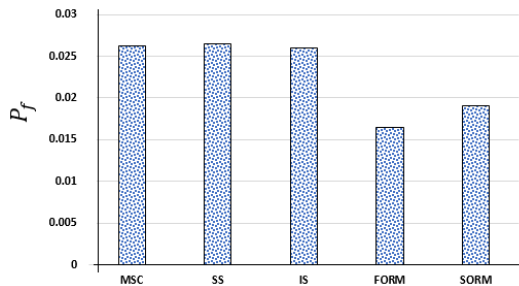
در این مسئله پارامترهای بار و مدول الاستیسیته به عنوان متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شده اند. همانطور که پیشتر اشاره شد، تعیین بهترین تابع توزیع احتمال منطبق بر پارامترهای متغیر ورودی بخش مهمی از آنالیز قابلیت اعتماد را تشکیل می دهد. توزیع در نظر گرفته شده برای پارامترهای تصادفی مسئله با توجه به مطالعات پیشین توزیع نوع ۱ بوده است. برای بررسی تاثیر توزیع های احتمالی پارامترها بر نتایج تحلیل، چندین مدل مختلف به شرح جدول ۶ در نظر گرفته شده است.

است.

جدول (۸): نتایج تحلیل مدل ۱ با روش های مختلف

روش	تعداد فراخوانی	میزان احتمال خرابی	انحراف معیار خرابی	خطای نسبی %	زمان
MSC	500000	0.0262	0.001	-	768.9
SS	2100	0.0265	0.003	1.1	6
IS	1200	0.02603	0.0035	-0.648	8.4
FORM	54	0.0165	-	-58.78	121
SORM	54	0.01911	-	-37.1	213

همانطور که ملاحظه می‌گردد، زمان تحلیل در روش‌های SS و IS به ترتیب برابر 6 و 8.4 ثانیه بوده که کاهش چشمگیری نسبت به روش دقیق مونت کارلو داشته است. انحراف معیار و خطای نسبی این دو روش در برآورد خرابی نیز تا حدودی قابل قبول بوده است. در دو روش تحلیلی FORM و SORM خطای نسبی زیاد بوده که بیانگر عملکرد نامناسب این روش‌ها در تخمین خرابی می‌باشد.



شکل (۷): تخمین احتمال خرابی مدل ۱ با روش های مختلف

در ادامه برای ارزیابی نقش توزیع های احتمالی متغیرها در برآورد احتمال خرابی، شبیه‌سازی مونت کارلو برای مدل ۱ با ۶ گروه توزیع‌های آماری متفاوت انجام شده و نتایج تحلیل در جدول ۹ نشان داده شده است.

جدول (۹): نتایج تحلیل مدل ۱ با توزیع های آماری مختلف

توزیع	میزان احتمال خرابی	انحراف معیار خرابی	زمان
نوع ۱	0.0262	0.001	768.9
نوع ۲	0.0270	0.00078	546.4
نوع ۳	0.0252	0.0034	944
نوع ۴	0.0250	0.0048	953.7
نوع ۵	0.0258	0.0021	886.2
نوع ۶	0.0264	0.00088	701

با توجه به جدول فوق ملاحظه می‌گردد که احتمال خرابی مدل تحت تاثیر توزیع های آماری متغیرهای تصادفی قرار می‌گیرد. توزیع گروه ۲ و ۶ در مدت زمان کمتری به انحراف معیار قابل قبولی رسیدند که تا حدودی بیانگر کارایی مناسب این دو نوع توزیع می‌باشد. در توزیع نوع ۲ برای بار و مدول الاستیسیته به ترتیب توزیع لگ نرمال و نرمال در نظر گرفته شد. متغیرهای بار و مدول الاستیسیته در توزیع ۶

جدول (۶): پارامترهای تصادفی و توزیع های احتمال مدل ۱

متغیر	p	E ₂ و E ₁
توزیع نوع ۱	نرمال	نرمال
توزیع نوع ۲	لگ نرمال	نرمال
توزیع نوع ۳	گاما	گاما
توزیع نوع ۴	حدی	گاما
توزیع نوع ۵	لگ نرمال	لگ نرمال
توزیع نوع ۶	گاما	نرمال

ابتدا احتمال خرابی خرپای فوق با روش‌های تحلیلی و شبیه‌سازی و برای گروه های مختلف از توزیع احتمال تخمین زده شد. در روش های شبیه‌سازی برای دستیابی به بهترین تعداد نمونه ها تحلیل حساسیت انجام شده است. حداکثر ضریب تغییرات قابل قبول در این پژوهش 0.1 فرض شده است.

برای تعیین دقیق مقدار خرابی تحلیل حساسیت برای روش شبیه‌سازی مونت کارلو انجام گرفت. نتایج تحلیل حساسیت در جدول ۷ نشان داده شده است.

جدول (۷): تحلیل حساسیت داده های نمونه برداری مدل ۱ با روش

MSC

روش	تعداد نمونه	میزان احتمال خرابی	انحراف معیار خرابی	ضریب تغییرات	زمان ثانیه
MSC	1000	0.036	0.0049	0.136	0.78
	5000	0.031	0.0042	0.135	3.23
	10000	0.029	0.0036	0.124	7.26
	50000	0.0283	0.0035	0.123	34.2
	100000	0.028	0.0032	0.114	83.22
	500000	0.028	0.003	0.107	347.2
	1000000	0.0262	0.001	0.038	768.9

با توجه به نتایج جدول، مقدار ضریب تغییرات برای 1000000 نمونه به روش مونت کارلو برابر ۱۰۰ می‌باشد. تعداد 1000000 نمونه اولین تعداد نمونه ای است که ضریب تغییرات کمتر از 0.1 شده است. احتمال خرابی نظیر این حالت برابر 0.0262 می‌باشد. میانگین زمان تحلیل خرپا برابر 768.9 ثانیه می‌باشد. به طور مشابه تحلیل حساسیت بر روی سایر روش های شبیه سازی نیز انجام شده است. با در نظر گرفتن بازه مناسب برای میزان خطا و ضریب تغییرات، تعداد نمونه های لازم برای تخمین با دقت سایر روش ها تعیین شده است. مقایسه روش‌های مختلف در برآورد خرابی در جدول ۸ آورده شده

حدی	حدی	حدی	حدی	حدی	حدی
بتا	بتا	بتا	نرمال	نرمال	توزیع نوع ۵
بتا	بتا	نرمال	نرمال	نرمال	توزیع نوع ۶

برای تعیین دقیق مقدار خرابی تحلیل حساسیت برای روش شبیه‌سازی مونت کارلو انجام گرفت. نتایج تحلیل حساسیت در جدول ۱۲ نشان داده شده است.

جدول (۱۲): تحلیل حساسیت داده‌های نمونه برداری با روش MSC

روش	تعداد نمونه	میزان احتمال خرابی	انحراف معیار خرابی	ضریب تغییرات	زمان ثانیه
MSC	1000	0	0	0	5
	5000	0	0	0	9.8
	10000	0	0	0	23.6
	50000	0.0008	0.0003	0.375	226.87
	100000	0.0008	0.0003	0.375	457.8
	500000	0.001	0.0003	0.3	2536.3
	1000000	0.0014	0.0001	0.071	5110

با توجه به نتایج جدول ۱۲، مقدار ضریب تغییرات برای 1000000 نمونه به روش مونت کارلو برابر 0.071 می‌باشد. لذا این تعداد نمونه اولین تعدادی است که ضریب تغییرات کمتر از 0.1 شده است. احتمال خرابی نظیر این حالت برابر 0.0014 می‌باشد. میانگین زمان تحلیل خرپا برابر 5110 ثانیه می‌باشد. تحلیل حساسیت بر روی سایر روش‌های شبیه‌سازی نیز انجام شده است. با در نظر گرفتن بازه مناسب برای میزان خطا و ضریب تغییرات، تعداد نمونه‌های لازم برای تخمین با دقت سایر روش‌ها تعیین شده است. مقایسه روش‌های مختلف در برآورد خرابی در جدول ۱۳ آورده شده است.

جدول (۱۳): نتایج تحلیل مدل ۲ با روش‌های مختلف

روش	تعداد فراخوانی	میزان احتمال خرابی	انحراف معیار خرابی	خطای نسبی	زمان
MSC	500000	0.00141	0.0001	-	5110
SS	3100	0.00148	0.00021	4.72	48
IS	3420	0.00145	0.00037	2.75	59
FORM	61	0.00069	-	-104.34	1820
SORM	61	0.00085	-	-65.88	1996

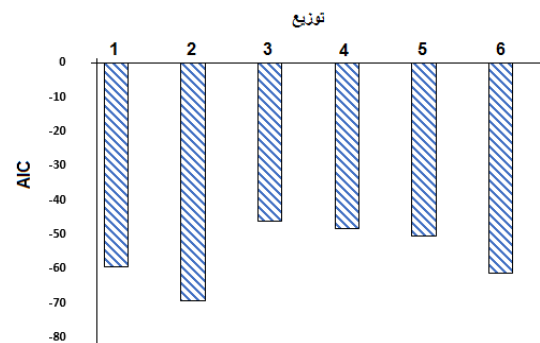
در روش IS خطای نسبی در برآورد خرابی نسبت به سایر مدل‌ها کمتر بوده است. میزان انحراف معیار در روش‌های IS و SS مقدار قابل قبولی می‌باشد. در هر دو روش زمان انجام تحلیل کاهش قابل توجهی داشته که با توجه به خطای نسبی و انحراف معیار خرابی می‌تواند نشانگر عملکرد مناسب این روش‌ها باشد. در دو روش تحلیلی FORM و SORM خطای نسبی چشمگیر می‌باشد. میزان احتمالی خرابی برای گروه‌های مختلف توزیع‌های احتمالی در شکل ۹ نشان داده شده است.

به ترتیب با توزیع‌های گاما و نرمال مشخص شدند. در ادامه برای سنجش بهتر کارایی مدل‌ها از مشخصه آماری ضریب تبیین (R^2) استفاده شده است. ضریب تبیین برای توزیع‌های مختلف در جدول ۱۰ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، ضریب تبیین نظیر توزیع‌های ۲ و ۶ از بقیه مدل‌ها بالاتر بوده و به ترتیب برابر 0.98 و 0.966 می‌باشد که نشان دهنده برازش مناسب داده‌ها در این گروه‌ها می‌باشد.

جدول (۱۰): ارزیابی توزیع‌های انتخابی مدل ۱ بر اساس ضریب تبیین

توزیع	R^2
نوع ۱	0.93
نوع ۲	0.98
نوع ۳	0.81
نوع ۴	0.832
نوع ۵	0.843
نوع ۶	0.966

معیار اطلاعات آکائیکه (AIC) معیار دیگری است که برای برای سنجش مناسب بودن توزیع‌ها استفاده شده است. این معیار نشان می‌دهد که استفاده از یک مدل آماری به چه میزان باعث از دست رفتن اطلاعات می‌شود. مطابق این معیار، مناسب‌ترین مدل دارای مینیمم AIC می‌باشد. مقادیر AIC برای توزیع‌های مختلف شکل ۸ خلاصه شده است. با توجه به شکل ۸، توزیع گروه ۲ با معیار اطلاعاتی 69.4- عملکرد مناسب‌تری نسبت به بقیه گروه‌ها داشته است.



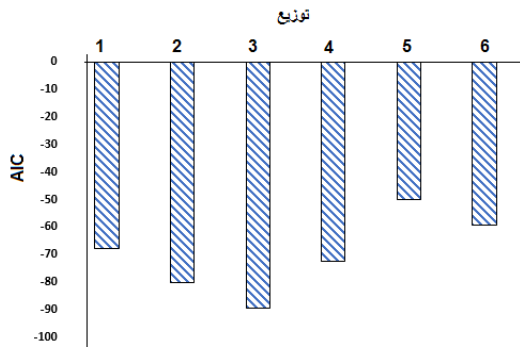
شکل (۸): مقادیر AIC برای گروه‌های مختلف توزیع‌های احتمالی در مدل ۱

۲-۸- تحلیل مدل ۲

برای ارزیابی تاثیر توزیع‌های احتمالی پارامترها بر تحلیل قابلیت اعتماد، چندین مدل مختلف به شرح جدول ۱۱ در نظر گرفته شده است.

جدول (۱۱): پارامترهای تصادفی و توزیع‌های احتمال مدل ۲

متغیر	A ₁ -A ₆	A ₇ -A ₁₅	P ₁	P ₂	P ₃
توزیع نوع ۱	نرمال	نرمال	نرمال	نرمال	نرمال
توزیع نوع ۲	نرمال	نرمال	لگ نرمال	لگ نرمال	لگ نرمال
توزیع نوع ۳	نرمال	نرمال	گاما	گاما	گاما
توزیع نوع ۴	نرمال	نرمال	حدی	حدی	حدی



شکل (۱۰): مقادیر AIC برای گروه های مختلف توزیع های احتمالی در مدل ۲

۸-۳- تحلیل مدل ۳

برای ارزیابی تاثیر توزیع های احتمالی پارامترها بر تحلیل قابلیت اعتماد مدل ۳، چندین مدل مختلف به شرح جدول ۱۶ در نظر گرفته شده است.

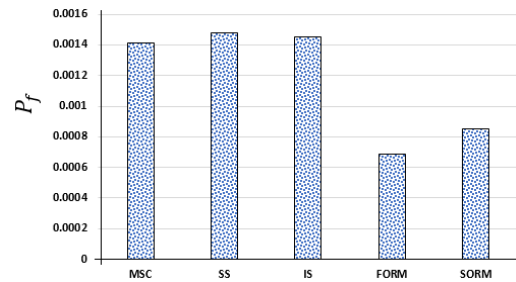
جدول (۱۶): پارامترهای تصادفی و توزیع های احتمال مدل ۳

متغیر	q	l	A _s	A _c	E _s	E _c
توزیع نوع ۱	نرمال	نرمال	نرمال	نرمال	نرمال	نرمال
توزیع نوع ۲	لگ نرمال	نرمال	نرمال	نرمال	نرمال	نرمال
توزیع نوع ۳	لگ نرمال	نرمال	نرمال	نرمال	لگ نرمال	لگ نرمال
توزیع نوع ۴	گاما	حدی	حدی	حدی	حدی	حدی
توزیع نوع ۵	حدی	نرمال	نرمال	نرمال	لگ نرمال	لگ نرمال
توزیع نوع ۶	بتا	حدی	حدی	حدی	نرمال	نرمال
توزیع نوع ۷	گاما	نرمال	نرمال	نرمال	گاما	گاما
توزیع نوع ۸	رایلی	حدی	حدی	حدی	لگ نرمال	لگ نرمال

احتمال خرابی مدل ذکر شده با روش های تحلیلی و شبیه ساز و برای گروه های مختلف از توزیع احتمال تخمین زده شد. برای تعیین دقیق مقدار خرابی تحلیل حساسیت برای روش شبیه سازی مونت کارلو مشابه مدل های ۱ و ۲ انجام گرفت. به طور مشابه تحلیل حساسیت بر روی سایر روش های شبیه سازی نیز انجام شده است. با در نظر گرفتن بازه مناسب برای میزان خطا و ضریب تغییرات، تعداد نمونه های لازم برای تخمین با دقت سایر روش ها تعیین شده است. مقایسه روش های مختلف در برآورد خرابی در جدول ۱۷ آورده شده است.

جدول (۱۷): نتایج تحلیل مدل ۳ با روش های مختلف

زمان	خطای نسبی	انحراف معیار	میزان احتمال	تعداد فراخوانی	روش



شکل (۹): تخمین احتمال خرابی مدل ۲ با روش های مختلف

در ادامه برای ارزیابی نقش توزیع های احتمالی متغیرهای تصادفی در برآورد احتمال خرابی، شبیه سازی مونت کارلو برای مدل با ۶ گروه توزیع های آماری متفاوت انجام شده و نتایج تحلیل در جدول ۱۴ خلاصه شده است.

جدول (۱۴): نتایج تحلیل مدل ۲ با توزیع های آماری مختلف

توزیع	میزان احتمال خرابی	انحراف معیار خرابی	زمان
نوع ۱	0.00141	0.0001	5110
نوع ۲	0.0019	0.000094	4860
نوع ۳	0.0022	0.000068	3880
نوع ۴	0.00144	0.000096	5032
نوع ۵	0.00119	0.0075	5630
نوع ۶	0.00139	0.0087	5236

با توجه به جدول فوق مشاهده می شود که احتمال خرابی مدل تحت توزیع های آماری گروه ۳ از سایر مدل ها بیشتر می باشد. توزیع ۲ و ۳ در مدت زمان کمتری به انحراف معیار قابل قبولی رسیدند. در توزیع ۲، سطح مقطع اعضا دارای توزیع نرمال و بارها دارای توزیع لگ نرمال بودند. در توزیع ۳ برای بارها توزیع گاما فرض شده بود.

در ادامه برای سنجش کارایی مدل ها از مشخصه های آماری میانگین مربعات خطاها (RMSE) و ضریب تبیین (R²) استفاده شده است. ضریب تبیین توزیع های مختلف در جدول ۱۵ خلاصه شده است. همبستگی بالای داده ها در مدل ۳ به وضوح مشاهده می گردد.

جدول (۱۵): ارزیابی توزیع های انتخابی مدل ۲ بر اساس ضریب تبیین

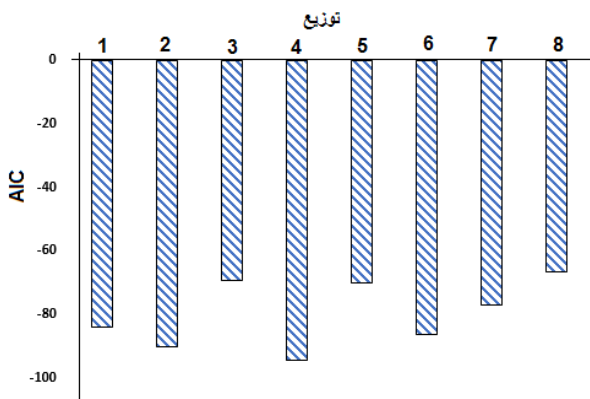
توزیع	R ²
نوع ۱	0.86
نوع ۲	0.91
نوع ۳	0.96
نوع ۴	0.9
نوع ۵	0.69
نوع ۶	0.81

مقادیر AIC برای توزیع های مختلف در شکل ۱۰ خلاصه شده است. با توجه به شکل ۱۰، توزیع گروه ۳ با کمترین AIC مناسب ترین عملکرد را داشته است.

است. ضریب تبیین توزیع‌های مختلف در جدول ۱۹ خلاصه شده است. همبستگی بالای داده‌ها در مدل ۲ و ۴ به وضوح مشاهده می‌گردد. جدول (۱۹): ارزیابی توزیع‌های انتخابی مدل ۳ بر اساس ضریب تبیین

توزیع	R ²
نوع ۱	0.84
نوع ۲	0.924
نوع ۳	0.792
نوع ۴	0.93
نوع ۵	0.80
نوع ۶	0.863
نوع ۷	0.803
نوع ۸	0.72

مقادیر AIC برای توزیع‌های مختلف در شکل ۱۲ خلاصه شده است. با توجه به شکل ۱۲، توزیع گروه ۴ با کمترین AIC مناسب‌ترین عملکرد را داشته است.



شکل (۱۲): مقادیر AIC برای گروه‌های مختلف توزیع‌های احتمالی در مدل ۳

۴-۸- تحلیل مدل ۴

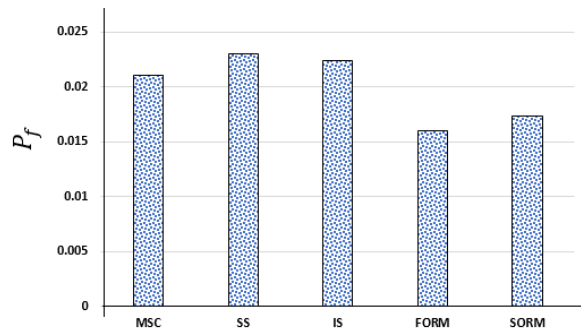
برای ارزیابی تاثیر توزیع‌های احتمالی پارامترها بر تحلیل قابلیت اعتماد در مدل ۴، چندین مدل مختلف به شرح جدول ۲۰ در نظر گرفته شده است.

جدول (۲۰): پارامترهای تصادفی و توزیع‌های احتمال مدل ۴

متغیر	E ₁	E ₂	A ₁	A ₂	P ₁ , P ₂ , P ₃ , P ₄ , P ₅ , P ₆
توزیع نوع ۱	لگ نرمال	لگ نرمال	لگ نرمال	لگ نرمال	گامبل
توزیع نوع ۲	نرمال	نرمال	نرمال	نرمال	گامبل
توزیع نوع ۳	لگ نرمال	لگ نرمال	نرمال	نرمال	لگ نرمال
توزیع نوع ۴	گاما	گاما	نرمال	نرمال	گاما
توزیع نوع ۵	حدی	حدی	حدی	حدی	حدی

		خرابی	خرابی		
MSC	500000	0.021	0.0018	-	4716
SS	4125	0.023	0.002	8.6	46
IS	4238	0.0224	0.0023	6.25	78
FORM	73	0.016	-	-31.25	530
SORM	73	0.0173	-	-21.38	526

با توجه به نتایج جدول فوق، روش SS عملکرد بسیار مناسبی به ویژه در کاهش زمان تحلیل داشته است. در روش IS اگر چه زمان تحلیل افزایش یافته، ولی خطای نسبی نسبت به سایر روش‌ها کمتر بوده است. روش‌های تحلیلی FORM و SORM در مقایسه با روش‌های شبیه‌سازی کارایی قابل قبولی نشان نداده‌اند. میزان احتمالی خرابی برای گروه‌های مختلف توزیع‌های احتمالی در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل (۱۱): تخمین احتمال خرابی مدل ۳ با روش‌های مختلف

در ادامه برای ارزیابی نقش توزیع‌های احتمالی متغیرها در برآورد احتمال خرابی، شبیه‌سازی مونت کارلو برای مدل با ۸ گروه توزیع‌های آماری متفاوت انجام شده و نتایج تحلیل با توزیع‌های آماری متفاوت در جدول ۱۸ آورده شده است.

جدول (۱۸): نتایج تحلیل مدل ۳ با توزیع‌های آماری مختلف

توزیع	میزان احتمال خرابی	انحراف معیار خرابی	زمان
نوع ۱	0.021	0.001	4716
نوع ۲	0.0223	0.00086	4529
نوع ۳	0.0194	0.0014	4862
نوع ۴	0.0238	0.00075	4588
نوع ۵	0.019	0.0013	4854
نوع ۶	0.022	0.00089	4550
نوع ۷	0.020	0.0012	4800
نوع ۸	0.0183	0.0017	4888

با توجه به جدول فوق ملاحظه می‌گردد توزیع‌های ۲ و ۴ کمترین زمان تحلیل و کمترین انحراف معیار خرابی را داشته است. در توزیع ۲، برای بار توزیع لگ نرمال و برای ممان اینرسی، سطح مقطع و مدول الاستیسیته توزیع نرمال فرض شده است. توزیع گروه ۸، نسبت به سایر توزیع‌ها دقت کمتری داشته است.

در ادامه برای سنجش کارایی مدل‌ها از مشخصه‌های آماری میانگین مربعات خطاها (RMSE) و ضریب تبیین (R²) استفاده شده

نوع ۲	0.0079	0.00036	794.1
نوع ۳	0.0088	0.0003	763
نوع ۴	0.0077	0.00038	803
نوع ۵	0.0089	0.00028	777
نوع ۶	0.009	0.00024	770
نوع ۷	0.0095	0.00018	621
نوع ۸	0.008	0.00039	796

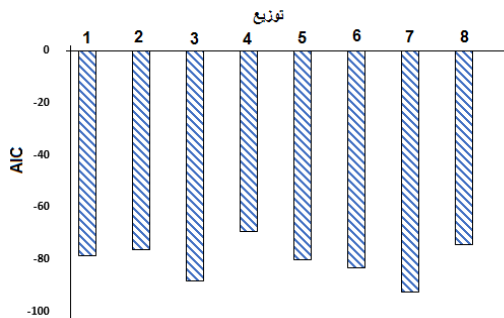
با توجه به جدول فوق ملاحظه می گردد که توزیع ۷ در مدت زمان کمتری به انحراف معیار قابل قبولی رسیده و کارایی بهتری داشته است.

برای سنجش کارایی مدل‌ها از مشخصه‌های آماری میانگین مربعات خطاها (RMSE) و ضریب تبیین (R^2) نیز استفاده شده است. ضریب تبیین برای توزیع‌های مختلف در جدول ۲۳ نشان داده شد. ملاحظه می گردد که ضریب تبیین نظیر توزیع ۷ از بقیه مدل‌ها بالاتر بوده و برابر 0.899 می باشد که نشان دهنده برازش مناسب داده‌ها در این گروه‌ها می باشد.

جدول (۲۳): ارزیابی توزیع‌های انتخابی مدل ۴ بر اساس ضریب تبیین

توزیع	R^2
نوع ۱	0.81
نوع ۲	0.77
نوع ۳	0.87
نوع ۴	0.736
نوع ۵	0.826
نوع ۶	0.84
نوع ۷	0.899
نوع ۸	0.76

مقادیر AIC برای توزیع‌های مختلف در شکل ۱۴ خلاصه شده است. با توجه به شکل، توزیع گروه ۷ با کمترین معیار اطلاعاتی آکائیک مناسب‌تر از سایر گروه‌ها عمل کرده است.



شکل (۱۴): مقادیر AIC برای گروه‌های مختلف توزیع‌های احتمالی در مدل ۴

۵-۴- تحلیل مدل

برای ارزیابی تاثیر توزیع‌های احتمالی پارامترها بر تحلیل قابلیت اعتماد در مدل ۵، چندین مدل مختلف به شرح جدول ۲۴ در نظر گرفته شده است.

جدول (۲۴): پارامترهای تصادفی و توزیع‌های احتمالی مدل ۵

متغیر	E	P_{x1}	P_{x2}	P_{x3}	P_{x6}	$P_{y1}, P_{y2}, P_{y3}, P_{y6}$
نوع ۱						

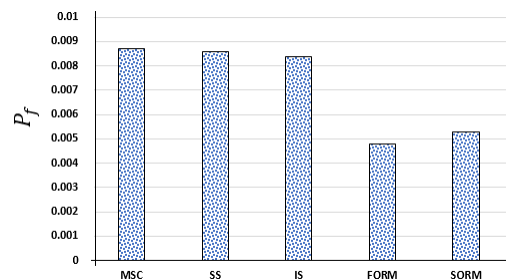
توزیع نوع ۶	نرمال	نرمال	حدی	حدی	بتا
توزیع نوع ۷	لگ نرمال	لگ نرمال	حدی	حدی	گامبل
توزیع نوع ۸	لگ نرمال	لگ نرمال	حدی	حدی	لگ نرمال

احتمال خرابی قاب بتنی مدل ۴ با روش‌های تحلیلی و شبیه‌سازی برای گروه‌های مختلف از توزیع احتمال تخمین زده شد. برای تعیین دقیق مقدار خرابی تحلیل حساسیت برای روش شبیه‌سازی مونت کارلو مشابه مدل‌های قبل انجام گرفت. به طور مشابه تحلیل حساسیت بر روی سایر روش‌های شبیه‌سازی نیز انجام شده است. با در نظر گرفتن بازه مناسب برای میزان خطا و ضریب تغییرات، تعداد نمونه‌های لازم برای تخمین با دقت سایر روش‌ها تعیین شده است. مقایسه روش‌های مختلف در برآورد خرابی در جدول ۲۱ آورده شده است.

جدول (۲۱): نتایج تحلیل مدل ۴

روش	تعداد فراخوانی	میزان احتمال خرابی	انحراف معیار خرابی	خطای نسبی	زمان
MSC		0.0087	0.0003	-	783.4
SS	1380	0.0086	0.00033	-0.011	18.2
IS	1110	0.00838	0.00039	-0.0381	9
FORM	59	0.0048	-	-0.81	150
SORM	66	0.0053	-	-0.641	177

با توجه به جدول ۲۱، کاهش بسیار زمان انجام تحلیل در روش‌های SS و LS مشهود است. همچنین خطای نسبی اندک و انحراف معیار پایین کارایی مناسب این روش‌ها را نشان می‌دهد. تخمین احتمال خرابی مدل ۴ با روش‌های مختلف در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود.



شکل (۱۳): تخمین احتمال خرابی مدل ۴ با روش‌های مختلف

در ادامه برای ارزیابی نقش توزیع‌های احتمالی متغیرها در برآورد احتمال خرابی، شبیه‌سازی مونت کارلو برای مدل با ۸ گروه توزیع‌های آماری متفاوت انجام شده و نتایج تحلیل با توزیع‌های آماری متفاوت در جدول ۲۲ آورده شده است.

جدول (۲۲): نتایج تحلیل مدل ۴ با توزیع‌های آماری مختلف

توزیع	میزان احتمال خرابی	انحراف معیار خرابی	زمان
نوع ۱	0.0087	0.0003	783.4

آماري متفاوت انجام شده و نتايج تحليل با توزيع هاي آماری متفاوت در جدول ۲۶ آورده شده است. با توجه به جدول فوق ملاحظه می‌گردد که توزيع ۴ در مدت زمان کمتری به انحراف معیار قابل قبولی رسیده و کارایی بهتری داشته است.

جدول (۲۶): نتایج تحلیل مدل ۵ با توزیع های آماری مختلف

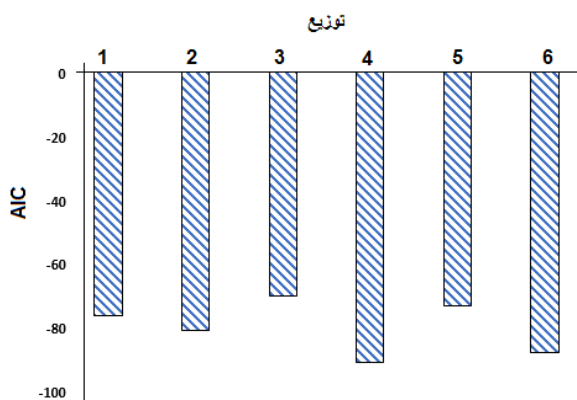
توزیع	میزان احتمال خرابی	انحراف معیار خرابی	زمان
نوع ۱	0.0014	0.00006	3240.23
نوع ۲	0.0016	0.000053	3200
نوع ۳	0.0012	0.000067	3498
نوع ۴	0.0021	0.000032	2380
نوع ۵	0.0011	0.000064	3450
نوع ۶	0.0018	0.000048	3010

ضریب تبیین برای توزیع های مختلف در جدول ۲۷ نشان داده شد. ملاحظه می‌گردد که ضریب تبیین نظیر توزیع ۴ از بقیه مدل‌ها بالاتر بوده و برابر 0.94 می‌باشد که نشان دهنده برازش مناسب داده‌ها در این گروه‌ها می‌باشد.

جدول ۲۷: ارزیابی توزیع های انتخابی مدل ۵ بر اساس ضریب تبیین

توزیع	R ²
نوع ۱	0.864
نوع ۲	0.88
نوع ۳	0.786
نوع ۴	0.94
نوع ۵	0.812
نوع ۶	0.912

مقادیر AIC برای توزیع های مختلف در شکل ۱۶ خلاصه شده است. با توجه به شکل، توزیع گروه ۴ با کمترین معیار اطلاعاتی آکائیک مناسب‌تر از سایر گروه‌ها عمل کرده است.



شکل (۱۶): مقادیر AIC برای گروه های مختلف توزیع های احتمالی در مدل ۵

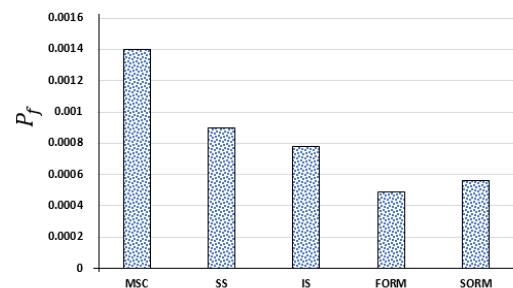
						P ₂₁ , P ₂₂ , P ₂₃ , P ₂₆
توزیع نوع ۱	نرمال	نرمال	نرمال	نرمال	نرمال	نرمال
توزیع نوع ۲	نرمال	لگ	لگ	لگ	لگ	لگ نرمال
توزیع نوع ۳	حدی	حدی	حدی	حدی	حدی	حدی
توزیع نوع ۴	نرمال	گاما	گاما	گاما	گاما	گاما
توزیع نوع ۵	لگ	گاما	گاما	گاما	گاما	گاما
توزیع نوع ۶	نرمال	حدی	حدی	حدی	حدی	حدی

احتمال خرابی قاب بتنی مدل ۵ با روش های تحلیلی و شبیه ساز برای گروه های مختلف از توزیع احتمال تخمین زده شد. برای تعیین دقیق مقدار خرابی تحلیل حساسیت برای روش شبیه سازی مونت کارلو مشابه مدل های قبل انجام گرفت. به طور مشابه تحلیل حساسیت بر روی سایر روش های شبیه سازی نیز انجام شده است. با در نظر گرفتن بازه مناسب برای میزان خطا و ضریب تغییرات، تعداد نمونه های لازم برای تخمین با دقت سایر روش ها تعیین شده است. مقایسه روش های مختلف در برآورد خرابی در جدول ۲۵ آورده شده است.

جدول (۲۵): نتایج تحلیل مدل ۵

روش	تعداد فراخوانی	میزان احتمال خرابی	انحراف معیار خرابی	خطای نسبی	زمان
MSC	5000000	0.0014	0.00006	-	3240.23
SS	6238	0.0009	0.00012	-0.55	34
IS	5820	0.00078	0.00017	-0.79	38
FORM	54	0.00049	-	-1.85	320
SORM	54	0.00056	-	-1.5	474

با توجه به جدول ۲۵، خطای نسبی روش های مختلف تا حدودی زیاد بوده است. همچنین انحراف معیار خرابی هم در مقایسه با روش شبیه سازی مونت کارلو تا حدودی افزایش نشان می‌دهد. روش های تحلیلی در این مدل خطای چشمگیری از خود نشان دادند. مقایسه احتمال خرابی مدل‌ها در شکل ۱۵ نمایش داده شده است.



شکل (۱۵): تخمین احتمال خرابی مدل ۵ با روش های مختلف

در ادامه برای ارزیابی نقش توزیع های احتمالی متغیرها در برآورد احتمال خرابی، شبیه‌سازی مونت کارلو برای مدل با ۶ گروه توزیع های

۹- نتیجه گیری

نتایج کلی به دست آمده از این تحقیق را می توان به شرح زیر

بیان کرد:

- ۵ مثال مختلف در این مطالعه توسط چندین روش مورد ارزیابی قرار داده شدند. نتایج نشان دادند که روش مرتبه اول (FORM) ساده ترین و کم دقت ترین روش برآورد ایمنی و روش های شبیه سازی، دقیق ترین روش ها با پیچیدگی مفهومی هستند. تمایل پژوهشگران به سمت روش های ساده محاسباتی (با پذیرفتن خطاهای احتمالی) می تواند ناشی از عدم آشنایی با مفاهیم قابلیت اعتماد و مفاهیم آماری باشد.
- نتایج روش های متداول محاسبات قابلیت اعتماد برای مثال های ارائه شده در این پژوهش نشان داد که این روش ها با وجود سادگی، برای بسیاری از مسائل طراحی قابل استفاده نیستند و لازم است در چنین مسائلی روش های بر پایه شبیه سازی استفاده نمود.
- نتایج تحلیل مثال های فصل چهارم نشان داد که روش شبیه سازی زیرمجموعه ای SS دارای دقت بالا با انحراف معیار کم و زمان تحلیل بسیار کوتاه بوده است. توسط این ویژگی، طراح این فرصت را دارد تا در نهایت روشی را انتخاب کند که مناسب ترین نسبت ایمنی به هزینه (زمان انجام تحلیل) را دارا باشد. روش شبیه سازی IS نیز دقت مناسبی از خود نشان داده و مشابه روش SS زمان انجام تحلیل را کاهش داد. در مجموع در مثال های ارائه شده، روش های شبیه ساز SS و IS با توجه به زمان تحلیل بسیار کوتاه تر نسبت به MSC به ویژه در مسائل با ابعاد بالا پیشنهاد می شود.
- در توابع بسیار ساده و مسائل با درجه نامعینی بسیار کم، زمان توسط روش مونت کارلو به طور قابل ملاحظه ای ذخیره شده و استفاده از روش های شبیه ساز SS و IS توصیه نمی شود.
- نتایج بدست آمده از آنالیز خرابیها با استفاده از روش های شبیه ساز و روش های بر مبنای شاخص قابلیت اعتماد، بیانگر پایداری پاسخ بدست آمده از روش های شبیه ساز در محاسبه احتمال خرابی با مقایسه پارامترهای میانگین و واریانس نتایج بوده است. به طوری که با اعمال این روش ها می توان افزایش چشمگیری در حل انواع مسائل مهندسی در فضاهای بسیار غیرخطی و ابعاد بالا ایجاد نمود. اما روش های بر مبنای شاخص قابلیت اعتماد می تواند برای توابع خطی نتایج مناسبی داشته باشد.
- نتایج تحلیل مدل های تحقیق حاضر نشان می دهد که توزیع احتمال متغیرهای تصادفی تاثیر بسزایی در برآورد احتمال خرابی و قابلیت اعتماد پذیری سازه ها دارد. در بسیاری از مسائل توزیع احتمال پارامترهای تصادفی برای سادگی، توزیع نرمال فرض می گردد. نتایج نشان می دهد که در بسیاری از مواقع توزیع نرمال به

مراجع

- خوبی بیانگر عدم قطعیت متغیر تصادفی نبوده و نیاز به توزیع احتمال جایگزین می باشد.
- [1] Ranganathan, R. Reliability Analysis & Design of Structures, Bombay, (1987).
- [2] Ditlevsen, O. and Madsen, O.H. Structural Reliability Methods, Department of Mechanical Engineering, University of Denmark, (2007).
- [3] Keshtegara, B and Kisi, O. M5 model tree and Monte Carlo simulation for efficient structural reliability analysis, Applied Mathematical Modelling, Volume 48, August (2017), pp. 899-910.
- [4] Cornell, C. A., A Probability-Based Structural Code, Journal of the American Concrete Institute, (1969) Vol. 66, No. 12, pp. 974-985.
- [5] David Y. Yang, J.G. Teng, Dan M. Frangopol, Cross-entropy-based adaptive importance sampling for time-dependent reliability analysis of deteriorating structures, Structural Safety, (2017) 66, pp.38-50.
- [6] Li, B., et al., Reliability analysis based on a novel density estimation method for structures with correlations. (2017) Chinese Journal of Aeronautics.
- [7] Metropolis, N., and Ulam, S., The Monte Carlo Method, Journal of the American Statistical Association, (1949) 44(247), pp. 335-341.
- [8] Jin-Xin. Gong, Ping. Yi., A robust iterative algorithm for structural reliability analysis, Struct Multidisc Optim (2011) 43, pp.519-527.
- [9] Gardoni, P., Mosalam, KH-M. and Kiureghian, A-D. Probabilistic seismic demand models and fragility estimates for R.C. bridges, Journal of Earthquake Engineering 7:1, (2003) 79-106.
- [10] Gardoni, P., Mosalam, KH-M. and Kiureghian, A-D. Probabilistic models and fragility estimates for bridge components and systems, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley, (2002).
- [11] Gardoni, P., Der Kiureghian, A. and Mosalam K.M. Probabilistic Capacity Models and Fragility Estimates for Reinforced Concrete Columns based on Experimental Observations, Journal of Engineering Mechanics, 128, (2002), 1024-1038.
- [12] Jalayer, F., Iervolino, I. and Manfredi, G. (2013) Structural modeling uncertainties and their influence on

- [20] Li, D.-Q., et al., Efficient reliability updating of slope stability by reweighting failure samples generated by Monte Carlo simulation. *Computers and Geotechnics*, 2015. 69: p. 588-600.
- [21] Castaldo, P., et al., Influence of the strength reduction factor on the seismic reliability of structures with FPS considering intermediate PGA/PGV ratios. *Composites Part B: Engineering*, 2017. 115: p. 308-315.
- [22] J. Ramon Gaxiola-Camacho, Hamoon Azizsoltani, Francisco J. Villegas-Mercado, Achintya Haldar, A novel reliability technique for implementation of Performance-Based Seismic Design of structures, *Engineering Structures* 142 (2017) 137–147.
- [23] Szerszen, M., and Nowak, A. S., Calibration Of Design code for Building (ACI 318): Part 2- Reliability Analysis and Resistance Factors; *ACI Structural Journal*, 100(3)(2003).
- [24] Madsen, H. O. and Krenk, S. and Lind, N. C., *Methods of structure safety*. Englewood Cliffs (NJ): Prentice-Hall; (1986).
- seismic assessment of existing RC structures, *Structural Safety*, 32, 220–228.
- [13] Sasani, M., Der Kiureghian, A. and Bertero, V. Seismic fragility of short period reinforced concrete structural walls under near-source ground motions, *Structural Safety*, 24, (2002) 123–138.
- [14] Zhu, L. (2005) Probabilistic drift capacity models for reinforced concrete columns, Master Thesis, University of Columbia.
- [15] Ramamoorthy SK. (2006) Seismic Fragility Estimates For Reinforced Concrete Framed Buildings, PhD Thesis, Texas A&M University.
- [16] Zhao, Y. G., Ono, T., Moment methods for structural reliability, *Struct Safety*, 23, (2001) pp. 47-75.
- [17] D. Wei, S. Rahman., A multi-point univariate decomposition method for structural reliability analysis, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 87 (2010) 220-229.
- [18] Jin-Xin. Gong, Ping. Yi., A robust iterative algorithm for structural reliability analysis, *Struct Multidisc Optim* (2011) 43:519–527.
- [19] Huang, X. and J. Chen, Time-dependent reliability model of deteriorating structures based on stochastic processes and bayesian inference methods. *Journal of Engineering Mechanics*, 2014. 141(3): p. 04014123