

تحلیل حساسیت قابلیت اعتماد فازی سازه‌ها بر اساس روش انتقال پایداری تطبیقی*

بهروز کشته‌گر^(۱) منصور باقری^(۲)

چکیده در این مقاله با مدل سازی عدم قطعیت شناختی متغیرهای تصادفی در مسئله تعیین شاخص قابلیت اعتماد با استفاده از روش انتقال پایداری تطبیقی و با به کارگیری یک روش بهینه سازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک، شاخص قابلیت اعتماد فازی تعیین شده است. در روند تحلیل قابلیت اعتماد فازی از یک رویه تطبیق دینامیکی مبتنی بر روش انتقال پایداری استفاده شده است که ضریب کنترل این روش توانایی خودتطبیقی را در هر تکرار دارد. هم چنین به منظور بررسی میزان اهمیت عدم قطعیت شناختی بر شاخص قابلیت اعتماد فازی، تحلیل حساسیت با استفاده از معیار اصلاح شده آنتروپی شانون انجام شده است. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت سه مثال سازه‌ای نشان می‌دهند که روش قابلیت اعتماد به کار گرفته شده به درستی با سرعت مناسبی همگرا می‌گردد. حساسیت احتمال خرابی سازه‌ها به عدم قطعیت شناختی بسیار حائز اهمیت است و در برخی مسائل تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر شاخص قابلیت اعتماد سازه می‌گذارد.

واژه‌های کلیدی تحلیل قابلیت اعتماد فازی، تحلیل حساسیت آنتروپی شانون، روش انتقال پایداری تطبیقی.

Sensitivity Analysis of Fuzzy Structural Reliability Using Adaptive Stability Transformation Method

B. Keshtegar

M. Bagheri

Abstract In this paper epistemic uncertainty of random variables in the reliability analysis of Adjusted Stability Transformation Method has been modeled and fuzzy structural reliability index has been determined using GA. In the reliability analysis process, a dynamic adaptive approach based on stability transformation method has been applied which the control coefficient is self-adapted at each iteration. Moreover in order to investigate the importance of epistemic uncertainty in the fuzzy structural reliability index, sensitivity analysis using Entropy-Shannon has been done. Survey results of three structural examples indicate that the proposed reliability method provides stable results with suitable computational efficiency. The sensitivity of failure probability to epistemic uncertainty has shown a considerable effect on the structural reliability in some problems.

Key Words Fuzzy Reliability Analysis, Entropy-Shannon Sensitivity Analysis, Adaptive Stability Transformation Method.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۶/۲/۶ و تاریخ پذیرش آن ۹۶/۹/۲۹ می‌باشد.

Email: bkeshtegar@uoz.ac.ir

(۱) نویسنده مسئول، دانشیار، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه زابل.

(۲) استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی بیرجند.

مقدمه

دسترسی به اطلاعات آماری واضح و دقیق متغیرها شامل ترکیبی از دو نوع عدم قطعیت معرفی شده می‌باشند. این ابهام آماری می‌تواند ناشی از محدودیت تعداد نمونه‌ها و بروز خطاهای انسانی در فرایند نمونه‌گیری و اندازه‌گیری این خواص باشد. مثلاً به دلیل متفاوت بودن کیفیت ساخت و اجرای بتن در ارتفاع یک مقطع بتن مسلح، مقاومت فشاری بتن در ارتفاع مقطع یکسان نیست. ضمن این‌که نوع آرماتورها، قطر و نحوه چیدمان آنها در یک مقطع بتنی، مثال‌هایی دیگر از این مقوله‌اند.

در سال‌های اخیر، اثر عدم قطعیت شناختی متغیرهای تصادفی در قالب مجموعه‌های فازی در مدل‌های احتمالاتی به منظور برآورد پاسخ‌های فازی سازه لحاظ شده‌است. در این مطالعات علاوه بر اصل گسترش [8] که پیاده‌سازی آن در مسائل مهندسی مستلزم محاسبات طولانی و وقت‌گیر است، از روش‌های دیگری نظیر نمونه‌گیری [9]، ورتکس [10] و روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر گسسته‌سازی اعداد فازی [11] نیز استفاده شده‌است. از این میان، روش‌های بهینه‌سازی به دلیل عدم محدودیت در پوشش دادن اکثر مسائل کاربردی مهندسی از مقبولیت بیشتری نسبت به دیگر روش‌ها برخوردار است. روش‌های بهینه‌سازی ارائه شده در این زمینه، عمدتاً مبتنی بر گرادیان هستند که با چالش‌هایی نظیر وجود مشکل مشتق‌گیری به‌ویژه زمانی که تعداد متغیرها زیاد شود، ناپیوسته بودن بعضی از توابع و افتادن در نقاط بهینه محلی به جای مطلق، مواجه‌اند [12] که از آن جمله می‌توان به تحقیقات مولر و همکاران [11]، فارکاس و همکاران [13]، سرافینسکا و همکاران [14] و ژانگ و همکاران [15] اشاره نمود.

لذا در مسائلی که با تعداد زیادی از متغیرها یا توابع با درجه غیرخطی زیاد مواجهیم، استفاده از این روش‌ها منجر به حجم بالایی از محاسبات زمان‌بر می‌گردد؛ بنابراین ناگزیر به استفاده از روش‌های بهینه‌سازی کارا، قدرتمند و مشتق‌گریز به منظور دستیابی به بهترین جواب در کوتاه‌ترین زمان ممکن هستیم.

برآورد واقعی از قابلیت اعتماد سازه‌ها، مستلزم به‌کارگیری مدل‌های شبیه‌سازی رفتار سازه در معیار خرابی مورد نظر است. این مدل‌ها شامل متغیرهایی هستند که دارای مقادیر معین نیستند و ماهیت تصادفی و نادقیق دارند، لذا در این مدل‌ها با نوعی عدم قطعیت مواجهیم. عدم قطعیت‌ها را می‌توان در قالب دو گروه تصادفی و شناختی تقسیم‌بندی نمود. عدم قطعیت تصادفی از منابع غیرشناختی و کمبود اطلاعات از سیستم ناشی می‌شود که از این جمله می‌توان به عدم قطعیت‌های فیزیکی و مدل‌سازی اشاره نمود [1]. عدم قطعیت فیزیکی از بارهای اعمالی به سیستم و مشخصات مصالح ناشی می‌شود درحالی‌که عدم قطعیت مدل‌سازی نیز به دلیل استفاده از فرضیات ساده‌کننده در ایجاد مدل و ایدئال‌سازی مدل‌های واقعی ایجاد می‌شود. این نوع عدم قطعیت با استفاده از متغیرهای تصادفی به همراه تابع چگالی احتمال با توزیع آماری مشخص، قابل مدل‌سازی است.

برخلاف عدم قطعیت تصادفی، عدم قطعیت شناختی به منابع شناختی ارتباط دارد و از فلسفه‌های طراحی و رفتاری ناشی می‌شود. از جمله این نوع عدم قطعیت‌ها می‌توان به چگونگی تعریف برخی متغیرها نظیر ایمنی و خرابی عملکرد سازه و کیفیت آن، خطاهای انسانی و چگونگی تعریف ارتباط میان متغیرها به‌ویژه در سازه‌های پیچیده اشاره نمود [2].

اصولاً دو رویکرد مجزا در مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها وجود دارد. در رویکرد اول، پارامترهای مشمول عدم قطعیت در قالب متغیرهای تصادفی تعریف می‌شوند و با استفاده از روش‌های متداول قابلیت اعتماد به حل مسئله پرداخته می‌شود [3-5]. در رویکرد دوم متغیرهایی که عدم قطعیت آنها از نوع شناختی است، به شکل بازه‌ها، مجموعه‌های کوژ، مجموعه‌های فازی و متغیرهای تصادفی فازی تعریف می‌شوند [6، 7].

عموماً مسائل قابلیت اعتماد سازه‌ای به دلیل عدم

مرتبه اول بر مبنای انتقال پایدار تطبیقی برای تعیین شاخص قابلیت اعتماد فازی سه مثال سازه‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌است. نتایج عددی مثال‌های سازه‌ای حاکی از آن است که روش به کار گرفته شده تحلیل قابلیت اعتماد فازی توانایی محاسبه صحیح شاخص قابلیت اعتماد فازی را دارد و نیز می‌تواند برای تحلیل حساسیت عدم قطعیت شناختی مورد استفاده قرار گیرد. از طرفی، شاخص قابلیت اعتماد مسائل سازه‌ای تأثیرپذیری چشم‌گیری نسبت به عدم قطعیت شناختی از خود نشان می‌دهد، لذا می‌توان نتیجه گرفت در نظر گرفتن عدم قطعیت شناختی می‌تواند نسبت به تحلیل متداول قابلیت اعتماد، پاسخ‌های واقع‌گرایانه‌تری را ارائه دهد.

مفاهیم اساسی مجموعه‌های فازی

مجموعه فازی

مجموعه فازی \tilde{A} با تابع عضویت آن تعریف می‌شود. تابع عضویت، عناصر مجموعه مرجع U را با انتخاب درجه‌ای از بازه $[0,1]$ به مجموعه فازی $\tilde{A} = \{x, \mu_A(x)\}$ ، به صورت $U \rightarrow [0,1]$ $\mu_A(x)$ منتسب می‌کند [8]. تابع عضویت $\mu_A(x)$ درجه تعلق x به مجموعه‌ای از اعضا را نشان می‌دهد. درجه عضویت به طور پیوسته بین صفر و یک انتخاب می‌گردد و به وسیله آن می‌توان خواص مجموعه‌های معمولی را به مجموعه‌های فازی تعمیم داد.

عدد فازی مثلثی

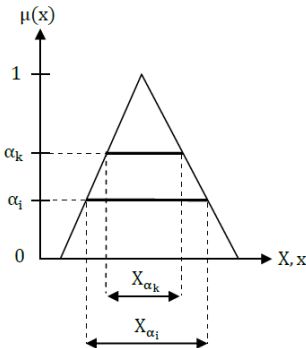
اعداد فازی مثلثی عمدتاً به دلیل خطی بودن و سادگی محاسبات با آن، برای حل مسائل مهندسی همواره مورد توجه بوده‌اند. این اعداد معمولاً به صورت $\tilde{X} = \langle a, b, c \rangle_{TFN}$ (Triangular Fuzzy Number) نشان داده می‌شوند [24]. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده‌است، a کران پایین، b مقدار میانه و c کران بالای عدد مثلثی فازی است. با توجه به این‌که در مسائل مربوط به ارزیابی قابلیت اعتماد سازه‌ها، مدل‌سازی عدم قطعیت

در این مطالعه از الگوریتم ژنتیک به عنوان یک روش بهینه‌سازی فرا اکتشافی، برای گریز از مشکلات روش گرادیان استفاده شده‌است. با توجه به حجم بسیار زیاد محاسبات تحلیل قابلیت اعتماد فازی، در این تحقیق به منظور افزایش کارایی از یک عملگر انتخاب نخبه‌گرا در روش پیشنهادی استفاده شده‌است، به طوری که، در هر نسل بهترین فرد تعیین می‌شود و با بهترین فردهای نسل‌های قبلی مقایسه می‌شود و چنانچه از آنها ضعیف‌تر باشد، بهترین قبلی جایگزین بهترین فعلی می‌شود. عملگر نخبه‌گرا موجب می‌شود تا ضمن کاهش حجم محاسبات، نتایج دقیق‌تری حاصل شود.

از طرفی، برآورد شاخص قابلیت اعتماد فازی منوط به انتخاب یک تحلیل توانمند قابلیت اعتماد می‌باشد. روش‌های مبنی بر تندترین امتداد جستجو مانند روش هاسوفر-لیند و رکویتز-فسلر (HL-RF)، روش انتقال پایدار [16] و روش حداکثر طول گام [17] می‌توانند برای برآورد شاخص قابلیت اعتماد مورد استفاده قرار گیرند. روش HL-RF سرعت تحلیل بالایی دارد، اما در مسائل غیرخطی مهندسی ممکن است ناپایداری به صورت همگرایی نوسانی به چندین شاخص قابلیت اعتماد داشته باشد [۱۸ و ۱۹]. روش‌های انتقال پایدار و حداکثر طول گام مشکلات همگرایی روش HL-RF را ندارند اما در مسائل مهندسی بسیار کند همگرا می‌شوند [20,21]. در این مقاله، تحلیل فازی قابلیت اعتماد سازه‌ها بر مبنای روش اولین مرتبه قابلیت اعتماد با استفاده از یک روش خودتطبیقی انتقال پایدار (ASTM) صورت گرفته‌است. روش انتقال پایدار توانمندی لازم را برای تطبیق مناسب طول گام برای روش اولین مرتبه به صورت دینامیکی فراهم می‌کند تا ضمن تضمین پایداری عددی، الگوریتم قابلیت اعتماد از کارایی مناسبی نیز برخوردار باشد [۲۲ و ۲۳].

در این تحقیق، مدل‌سازی عدم قطعیت شناختی در روند تحلیل قابلیت اعتماد با استفاده از دو رویه بهینه‌سازی بر مبنای عملگر نخبه‌گرا و روش قابلیت اعتماد

مجموعه‌های α -برش یک عدد فازی مثلثی در شکل (۳) نشان داده شده‌اند.



شکل ۳ مجموعه‌های α -برش یک عدد فازی مثلثی

اصل گسترش

اصل گسترش یکی از مفاهیم اساسی در نظریه مجموعه‌های فازی است. این اصل، روش گسترش توابع و عملگرهای متداول در ریاضیات معمولی را برای اعداد فازی بیان می‌کند [8]. اگر f تابعی یک به یک از فضای X به فضای Y باشد، یعنی $f: X \rightarrow Y$ و $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ آن‌گاه نتیجه عمل f بر n مجموعه فازی A_1, A_2, \dots, A_n به صورت یک زیرمجموعه فازی B در فضای Y می‌باشد که با رابطه زیر نشان داده می‌شود:

$$B = f(A_1, A_2, \dots, A_n) =$$

$$\left\{ (y, \mu_B(y)) \mid \begin{array}{l} y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ x_1 \in X_1, x_2 \in X_2, \dots, x_n \in X_n \end{array} \right\} \quad (1)$$

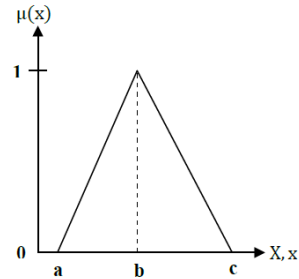
که در آن:

$$\mu_B(y) = \begin{cases} \max[\min(\mu_{A_i}(x_i))] & \text{if } f^{-1}(y) \neq \emptyset \\ 0 & \text{if } f^{-1}(y) = \emptyset \end{cases} \quad (2)$$

در این جا $f^{-1}(y)$ معکوس y و $\mu_B(y)$ تابع عضویت $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ است.

برای به کارگیری اصل گسترش لازم است که اعداد فازی با توابع عضویت پیوسته، گسسته شوند. هدف این گسسته‌سازی، تقریب یک عدد فازی پیوسته به تعدادی محدود از نقاط است، به شکلی که عملیات جبری به جای

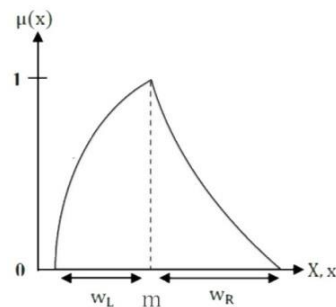
شناختی موجود در پارامترهای سازه‌ای با اعداد فازی مثلثی بیشتر به واقعیت نزدیک است [25] در این مقاله متغیرهای سازه‌ای نظیر بار و مشخصات مکانیکی و ابعاد با اعداد مثلثی فازی مدل‌سازی شده‌اند.



شکل ۱ کران‌های بالا، پایین و میانه عدد فازی مثلثی

عدد فازی LR (Left-Right)

این اعداد توسط دبو و پراد [26] معرفی شده‌اند. اعداد فازی LR به صورت $\tilde{X} = \langle m, w_L, w_R \rangle_{LR}$ نمایش داده می‌شوند. همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، مقدار میانه تابع که حداکثر درجه عضویت را در تابع دارا می‌باشد، w_L و w_R به ترتیب پهنای چپ و راست عدد فازی نامیده می‌شوند. شاخص قابلیت اعتماد فازی این تحقیق در قالب اعداد فازی LR ارائه شده است.



شکل ۲ عدد فازی LR

α -برش عدد فازی

α -برش عدد فازی \tilde{X} که با X_α نمایش داده می‌شود، یک مجموعه معمولی غیرفازی است و عناصری را دربرمی‌گیرد که مقدار عضویت آنها در عدد فازی \tilde{X} بیشتر از α باشد، یعنی: $X_\alpha = \{x \in \tilde{X} \mid \mu_X(x) \geq \alpha\}$ [24].

که به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\alpha_k = - \frac{\nabla g(U_k)}{\|\nabla g(U_k)\|} \quad (5)$$

که در آن $\nabla g(U) = [\partial g / \partial u_1, \partial g / \partial u_2, \dots, \partial g / \partial u_n]^T$ بردار گرادیان تابع شرایط حدی در نقطه U_k می‌باشد.

نگاشت فوق به پارامترهای آماری متغیرهای تصادفی وابسته است [27]. که در آن نیاز به انتقال متغیرهای تصادفی پایه از فضای حقیقی به فضای نرمال استاندارد به صورت زیر هست:

$$U = \frac{(X - \mu_x^e)}{\sigma_x^e} \quad (6)$$

که در آن، X بردار متغیرهای تصادفی مستقل با میانگین و انحراف معیار معادل به ترتیب برابر μ_x^e و σ_x^e می‌باشد که طبق روابط زیر به دست می‌آیند:

$$\sigma_x^e = \frac{1}{f_X(x)} \varphi[\Phi^{-1}\{F_X(x)\}] \quad (7)$$

$$\mu_x^e = x - \sigma_x^e \Phi^{-1}\{F_X(x)\} \quad (8)$$

به طوری که ϕ تابع چگالی احتمال نرمال می‌باشد. ضمن این که $f_X(x)$ و $F_X(x)$ به ترتیب تابع چگالی احتمال حاشیه‌ای و تابع توزیع تجمعی احتمال حاشیه‌ای متغیر تصادفی x می‌باشند.

تابع شرایط حدی و نیز ماهیت آماری متغیرهای تصادفی ممکن است نگاشت گسسته رابطه (۴) را دچار ناپایداری حل مانند دوشاخه‌ای شدن، اغتشاش و یا همگرایی به صورت تناوبی کند [27-29]؛ از این رو، می‌توان روش انتقال پایدار را به عنوان یک روش مناسب برای کنترل ناپایداری عددی روش اولین مرتبه قابلیت اعتماد به صورت نگاشت غیرخطی گسسته زیر در نظر گرفت [16]:

$$U_{k+1} = f(U_k, p) \quad U \in R^n, p \in R^m, k = 1, 2, 3, \dots \quad (9)$$

که در آن $f(U_k, p)$ مقدار نقطه طراحی بر مبنای نگاشت غیرخطی می‌باشد، $U \in R^n$ بردار متغیرهای

تمام نقاط روی برخی نقاط انجام شوند و پاسخ نهایی با درون‌یابی از نقاط حاصله تعیین گردد. این گسسته‌سازی با استفاده از مجموعه‌های α - برش اعداد فازی انجام می‌شود. با استفاده از مجموعه‌های منفک شده X_α ، عملیات جبری به صورت جداگانه برای هر یک از عناصر درجه عضویت α انجام می‌شود. از میان ترکیبات ممکن میان این عناصر، ترکیب قابل قبول که در نهایت به نتیجه می‌رسد، با استفاده از اصل گسترش تعیین می‌گردد.

روش قابلیت اعتماد انتقال پایداری تطبیقی

به منظور تعیین شاخص قابلیت اعتماد فازی نیاز به استفاده از یک روش قابلیت اعتماد کارا و توانمند می‌باشد که بر اساس مقادیر مختلف خصوصیات آماری متغیرهای تصادفی توانایی محاسبه شاخص قابلیت اعتماد (β) را مطابق رابطه زیر داشته باشد:

$$P_f = \int_{g(X) \leq 0} \dots \int f_X(x_1, \dots, x_n) dx_1 \dots dx_n \approx \Phi(-\beta) \quad (3)$$

که در آن $g(X)$ تابع شرایط حدی است که $g(X) \leq 0$ ناحیه خرابی را نشان می‌دهد و f_X تابع چگالی احتمال توأم متغیرهای تصادفی X می‌باشد. Φ تابع چگالی توزیع تجمعی نرمال استاندارد است.

عمدتاً روش اولین مرتبه قابلیت اعتماد به دلیل تعادل در برآورد احتمال خرابی و نیز همگرایی صریح با تعداد تکرار کمتر می‌تواند به عنوان یک روش کارآمد در تحلیل قابلیت اعتماد سازه‌ها مورد استفاده قرار گیرد. مهم‌ترین چالش در روش‌های اولین مرتبه قابلیت اعتماد سازه‌ها محاسبه شاخص قابلیت اعتماد است که بر اساس نقطه حداکثر محتمل (U^*) قابل محاسبه است ($\beta = \|U^*\|$). به طور معمول با استفاده از امتداد جستجوی تندترین شیب به صورت نگاشت غیرخطی زیر می‌توان نقطه حداکثر محتمل را محاسبه نمود.

$$f(U) = \frac{\nabla^T g(U_k) U_k - g(U_k)}{\nabla^T g(U_k) \alpha_k} \alpha_k \quad (4)$$

که در آن، α بردار نرمال واحد در نقطه U_k می‌باشد

نمود:

$$U_{k+1} = U_k + \lambda_k [f(U_k) - U_k] \quad (11)$$

که در آن، λ_k ضریب کنترل پایدار در تکرار k ام است که براساس یک الگوی تطبیقی مطابق تابع کنترل زیر می‌تواند محاسبه گردد:

$$f_C(k) = \|f(U_k) - U_k\| \quad (12)$$

و به طریق مشابه می‌توان نتیجه گرفت که رابطه $f_C(k) = \|U_k - U_{k-1}\|$ برقرار است. تابع کنترل $f_C(k)$ در صورتی می‌تواند یک تکرار موفق را برای روش انتقال پایدار نتیجه دهد که رابطه $f_C(k) < f_C(k-1)$ صادق باشد. این بدان معنا است که در تکرارهای نهایی مقدار تابع کنترل به سمت صفر میل می‌کند (یعنی: $\lim_{k \rightarrow \infty} f_C(k) \approx 0$). از این رو می‌توان نتیجه گرفت که رابطه $U_{k+1} \approx U_k$ برقرار می‌باشد؛ لذا یک نقطه ثابت و بدون تکرار بر مبنای این تابع کنترل برای روش انتقال پایدار حاصل شده است و همگرایی این روش در تکرارهای نهایی به نتایج پایداری منتج می‌گردد. با استفاده از تابع کنترل ارائه شده فوق می‌توان یک الگوی مناسب برای تطبیق ضریب کنترل برای عمده مسائل مهندسی فراهم نمود؛ لذا براساس رویه تکرار انتقال پایدار خودتطبیقی و نیز تابع کنترل در تکرارهای جدید و نهایی داریم که:

$$\lambda_k \|f(U_k) - U_k\| = \|U_k - U_{k-1}\| \quad (13)$$

ضریب کنترل بر مبنای رابطه فوق می‌تواند به صورت زیر در هر تکرار تنظیم گردد:

$$\lambda_k = \frac{\|U_k - U_{k-1}\|}{\|f(U_k) - U_k\|} \quad (14)$$

باتوجه به این که در اکثر مسائل مهندسی فرض بر آن است که رویه تکرار اولین مرتبه قابلیت اعتماد بدون کنترل براساس ضریب برابر با واحد انجام می‌شود و نیز ضریب فوق ممکن است در برخی از مسائل ایجاد یک عدد نامتناهی کند، به عنوان مثال اگر $f_C(k) \approx 0$ ، لذا فرض بر آن است که ضریب کنترل پایداری تطبیقی به

تصادفی در فضای استاندارد نرمال با n عضو، و p بردار کنترل سیستم دینامیکی است. اصولاً تعیین پارامتر کنترل برای سیستم‌های پیچیده دینامیکی مشکل می‌باشد [16]، لذا به دست آوردن اطلاعات در مورد نقطه U_{k+1} مشکل می‌نماید. ملچر و دیاکونوس [30] یک سیستم مناسب دینامیکی را برای پایداریسازی رابطه (۹) به صورت زیر ارائه نمودند:

$$U_{k+1} = U_k + \lambda C [f(U_k) - U_k] \quad (10)$$

که در آن λ و C به ترتیب ضریب انتقال پایدار و یک ماتریس دلخواه به نحوی که یک عضو در سطر و ستون آن یک و بقیه اعضای آن صفر هستند، انتخاب می‌گردد. معمولاً ماتریس C در تحلیل قابلیت اعتماد مرتبه اول، واحد در نظر گرفته می‌شود [16]. ضریب انتقال پایدار نقش اساسی در سرعت همگرایی و نیز کنترل ناپایداری ایفا می‌کند.

یانگ [16] و منگ و همکاران [31, 32] این ضریب را برابر با یک عدد کوچک برای تضمین پایداری در نظر گرفته‌اند، اما اخیراً کشته‌گر و همکاران [28, 29] نشان داده‌اند که ممکن است این روش در مسائل غیرخطی قابلیت اعتماد همگرایی حل را تضمین نکند و یا در مسائل با درجه غیرخطی پایین نیاز به تعداد تکرار زیادی برای همگرایی داشته باشد، لذا روش‌های بهبودیافته انتقال پایداری بر مبنای کنترل اغتشاشات مورد توجه محققان بوده است که از آن جمله می‌توان به روش تطبیقی اغتشاشات [31]، روش ترکیبی اغتشاشات [32]، روش خودتطبیقی اغتشاشات [33] و روش بهبودیافته اغتشاشات [34] اشاره کرد. این روش‌ها بیشتر در جهت تحلیل مسائل معکوس قابلیت اعتماد مورد استفاده قرار گرفته‌اند که در تحلیل بهینه بر مبنای قابلیت اعتماد براساس الگوی دوحلقه‌ای استفاده می‌شوند؛ از این رو می‌توان یک الگوی خودتطبیقی را برای محاسبه ضریب کنترل در تحلیل قابلیت اعتماد سازه‌ها برای بهبود کارایی روش انتقال پایدار مطابق با نگاهت گسسته زیر پیشنهاد

روش‌های جستجوگر قرار دارند. اصول این روش‌ها محاسبه مقدار تابع به‌ازای مقدار عددی متغیرهاست. در این روش‌ها، ارزیابی با مقایسه مقدار عددی تابع هدف و یافتن مسیر جستجو در راستای یافتن مقدار بهینه صورت می‌گیرد. در مقایسه روش‌های مشتق‌گریز، الگوریتم ژنتیک به‌طور عمومی مورد اقبال محققان قرار گرفته‌است، در این تحقیق از الگوریتم ژنتیک به‌عنوان یک الگوریتم فرا اکتشافی در محاسبات تعیین شاخص قابلیت اعتماد فازی استفاده شده‌است. در این تحقیق، به‌منظور افزایش کارایی از یک عملگر انتخاب نخبه‌گرا در روش پیشنهادی استفاده شده‌است، به‌طوری‌که در هر نسل بهترین فرد (Pbest) تعیین می‌شود و با بهترین فردهای نسل‌های قبلی (Gbest) مقایسه می‌گردد و چنان‌چه از آنها ضعیف‌تر باشد بهترین قبلی جایگزین بهترین فعلی می‌شود. در الگوریتم ژنتیک این تحقیق مقادیر جمعیت اولیه برابر با ۴۰، تعداد تکرار بیشینه الگوریتم برابر ۲۰۰، احتمال جهش P_m برابر ۰/۱ و احتمال تقاطع P_c برابر ۰/۸ در نظر گرفته شده‌است.

در روش پیشنهادی، ابتدا متغیرهای تصادفی به فضای نرمال استاندارد انتقال داده می‌شوند و فرم تابع شرایط حدی در این فضا تعیین می‌گردد. سپس میانگین و انحراف معیار متغیرهای تصادفی با استفاده از رویکرد گسسته‌سازی، به α -برش‌های خود منفک می‌شوند. پس از تعیین برش‌های α_k متناظر تمامی متغیرها، زیرفضای قطعی X_{α_k} متناظر هر برش، تشکیل می‌گردد. در صورتی‌که مسئله قابلیت اعتماد انتقال پایداری تطبیقی، به‌ترتیب شامل دو، سه و n متغیر تصادفی فازی باشد، این زیرفضا به‌ترتیب به‌شکل مستطیل، مکعب‌مستطیل و یک ابر مکعب n بعدی خواهد بود. همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده‌است. از مجموعه نقاط این زیرفضا به‌عنوان نقاط ورودی به الگوریتم آنالیز پیشنهادی به‌منظور تعیین نقاط روی برش α_k شاخص قابلیت اعتماد فازی β_{α_k} استفاده می‌شود. روی هم‌گذاری این مقادیر، شاخص قابلیت اعتماد فازی را به‌دست می‌دهد.

از طرفی به‌منظور تعیین بازه β_{α_k} کافی است کوچک‌ترین عضو $\beta_{\alpha_{k1}}$ و بزرگ‌ترین عضو $\beta_{\alpha_{kr}}$ آن

یک مقدار متناهی بر مبنای تطبیق ارائه‌شده تنظیم گردد، لذا داریم:

$$\lambda_k = \min \left\{ \delta \lambda_{k-1}, \frac{\|U_k - U_{k-1}\|}{\|f(U_k) - U_k\|} \right\} \quad (15)$$

که در آن δ یک عدد مثبت است که به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\delta = \max \left\{ (0.25, 0.25 \frac{\|U_k - U_{k-1}\|}{\|f(U_k) - U_k\|}) \right\} \quad (16)$$

ضریب فوق این امکان را فراهم می‌کند که در مسائل غیرخطی یک مقدار کوچک برای ضریب کنترل تطبیقی انتخاب گردد و در مسائل خطی حتی ممکن است ضریب کنترل ارائه‌شده به عددی بزرگ‌تر از واحد همگرا گردد؛ لذا روش ارائه‌شده به‌صورت ذاتی توانمندی لازم را برای همگرایی مسائل پیچیده مهندسی دارد و حتی در مسائل خطی نرخ همگرایی بالاتری را برای روش اولین مرتبه قابلیت اعتماد ممکن است فراهم آورد. ضریب کنترل ارائه‌شده برخلاف روش‌های کنترل اغتشاشات می‌تواند به عددی مثبت و حتی بزرگ‌تر از واحد تمایل یابد درحالی‌که این ضریب در روش تطبیقی اغتشاشات [31] عددی بین ۰/۱ تا ۱ و در روش خودتطبیقی و روش اغتشاشات [33]، عددی مثبت و کمتر از واحد می‌باشد.

روش پیشنهادی فازی قابلیت اعتماد انتقال

پایداری تطبیقی

روش‌های مبتنی بر اصل گسترش نیز محدودیت‌هایی دربر دارند، به‌طوری‌که صرفاً برای حالات خاصی از توابع قابل استفاده هستند و یا این‌که از تکنیک‌های بهینه‌سازی مرکب گرادیانی استفاده می‌نمایند [11]. پیاده‌سازی کاربرد این روش‌ها نیز به‌دلیل پیچیدگی به‌سختی امکان‌پذیر می‌باشد، ضمن این‌که وجود مشکل مشتق‌گیری به‌ویژه زمانی که تعداد متغیرها زیاد شوند، ناپیوسته بودن بعضی از توابع و افتادن در نقاط بهینه محلی به‌جای مطلق، از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی این روش‌ها است. در مقابل روش‌های مبتنی بر گرادیان،

۳. انتقال متغیرهای تصادفی از فضای حقیقی به فضای نرمال استاندارد مطابق با نگاشت غیرخطی رابطه (۶).
 ۴. اعمال عملگرهای الگوریتم ژنتیک و تعیین Pbest برای نسل فعلی و بررسی لزوم جایگزینی با Gbest.
 ۵. تولید نسل جدید با استفاده از عملگرهای تقاطع و جهش.

۶. برآورد بردار گرادیان و نیز مقدار تابع شرایط حدی در

$$U_k$$

۷. تعیین نقطه جدید بدون کنترل مطابق با نگاشت گسسته اولین مرتبه قابلیت اعتماد با استفاده از رابطه زیر:

$$f(U_{k+1}) = \frac{\nabla^T g(U_k) U_k - g(U_k)}{\nabla^T g(U_k) \alpha_k} \alpha_k$$

۸. تطبیق ضریب کنترل براساس رابطه زیر:

$$\lambda_k = \min \left\{ \delta \lambda_{k-1}, \frac{\|U_k - U_{k-1}\|}{\|f(U_k) - U_k\|} \right\}$$

۹. محاسبه نقطه جدید براساس روش انتقال پایدار تطبیقی مطابق رابطه زیر:

$$U_{k+1} = U_k + \lambda_k [f(U_k) - U_k]$$

۱۰. انتقال متغیرهای تصادفی از فضای نرمال استاندارد به

$$X = \sigma_X^e U + \mu_X^e$$

۱۱. کنترل همگرایی: در صورت همگرا شدن توقف تکرار و در غیر این صورت $k=k+1$

$$\beta_{\alpha_{k+1}} \text{ و } \beta_{\alpha_k}$$

۱۲. ذخیره مقادیر $\beta_{\alpha_{k+1}}$ و β_{α_k}
 ۱۳. $\alpha = \alpha + 1$ و تکرار از مرحله ۲ تا زمانی که $\alpha \leq 1$ شود.

۱۴. تشکیل تابع درجه عضویت شاخص قابلیت اعتماد فازی.

شماتیک روش پیشنهادی در شکل (۵) به صورت شماتیک نشان داده شده است.

تعیین شوند. نظر به این که به ازای هر یک از برش‌های α_k ، در زیرفضای قطعی X_{α_k} تنها دو نقطه بهینه وجود دارند که کمترین و بیشترین پاسخ فازی مورد نظر در برش α_k را به دست می‌دهند. بنابراین تعیین کوچک‌ترین و بزرگ‌ترین عضو بازه β_{α_k} ، به جستجوی دو نقطه بهینه در زیرفضای قطعی تبدیل می‌گردد که در شکل (۴) مشخص شده‌اند. با توجه به حجم زیاد محاسبات در تحلیل قابلیت اعتماد فازی، در این مطالعه جستجوی نقاط فوق به یک الگوریتم ژنتیک نخبه‌گرا واگذار شده است.

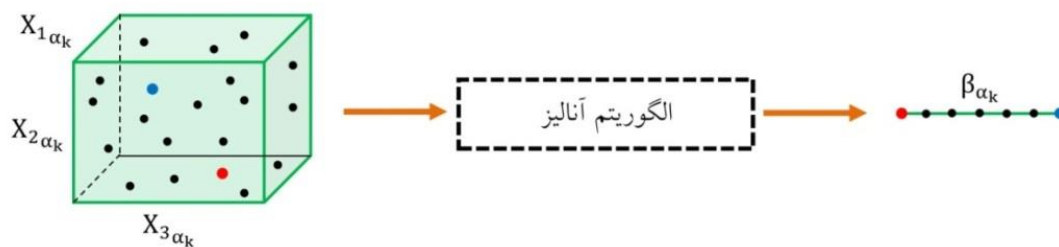
از طرفی روش قابلیت اعتماد براساس الگوی خودتطبیقی می‌تواند موجب محاسبه شاخص قابلیت اعتماد پایدار با تعداد مناسب تکرار گردد. دو چرخه تحلیل فازی و تحلیل قابلیت اعتماد، نقش اساسی را در روند محاسبه شاخص قابلیت اعتماد فازی ایفا می‌کنند. ضریب کنترل دینامیکی نه تنها منجر به کنترل ناپایداری حل می‌گردد بلکه در مواردی ممکن است نسبت به روش‌های معمول قابلیت اعتماد نرخ همگرایی بالاتری داشته باشند. در روش پیشنهادی انتقال پایدار تطبیقی، ضریب کنترل به صورت دینامیکی عددی بزرگ‌تر از صفر محاسبه می‌گردد که ممکن است در برخی از تکرارها مقدار بزرگ‌تر از واحد را نیز اتخاذ نماید؛ لذا این روش می‌تواند کارایی روش اولین مرتبه قابلیت اعتماد را بهبود بخشد.

پیاده‌سازی روش پیشنهادی در تحلیل قابلیت اعتماد فازی در این تحقیق برای محاسبه شاخص قابلیت اعتماد، مطابق با گام‌های ذیل آزمون شده است:

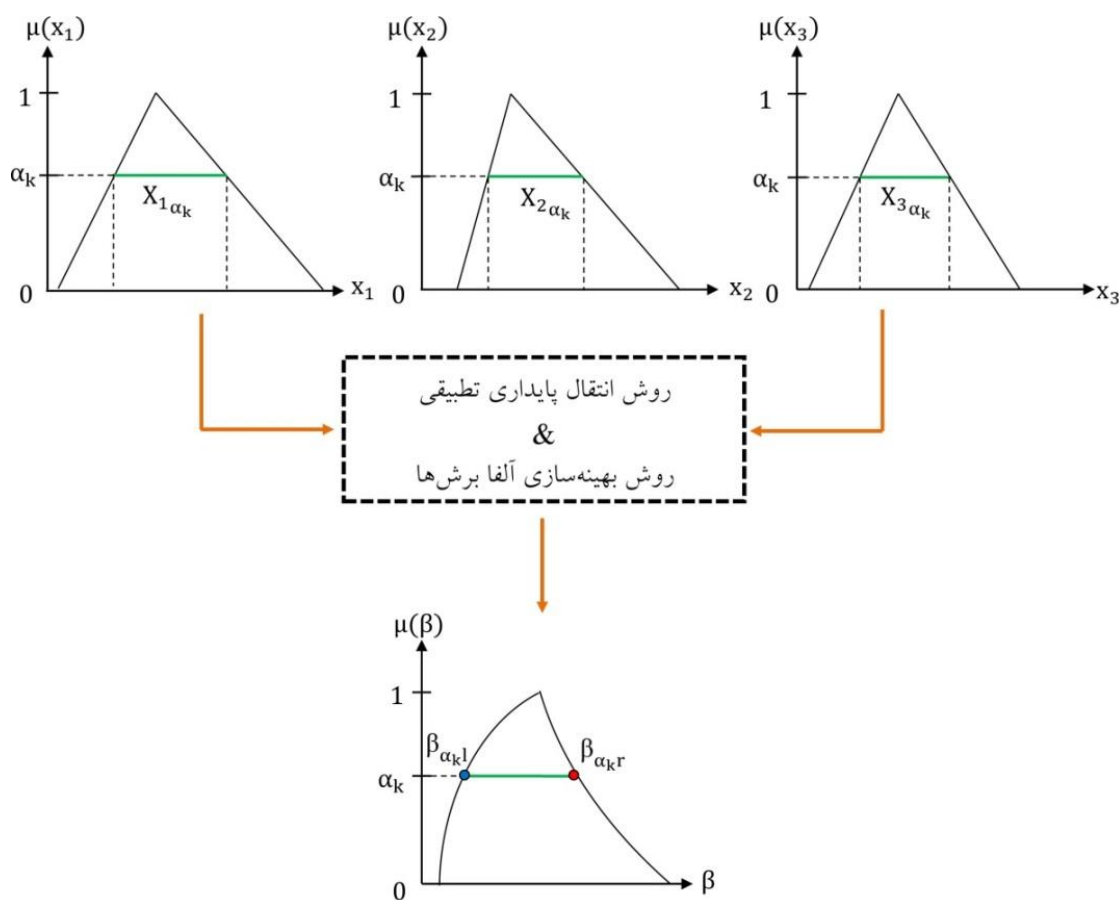
۱. تعریف تابع شرایط حدی، تعیین متغیرهای تصادفی فازی و تنظیم پارامترهای اولیه الگوریتم: ضریب انتقال اولیه برابر با یک، معیار همگرایی الگوریتم قابلیت اعتماد به صورت $\|U_{k+1} - U_k\| \leq 10^{-4}$ و معیار همگرایی

$$\varepsilon = 10^{-5}$$

۲. تشکیل زیرفضای قطعی X_{α} متاثر برش با ایجاد آلفا برش‌های یکسان روی متغیرهای تصادفی فازی.



شکل ۴ زیرفضای قطعی X_{α_k} و بازه β_{α_k}



شکل ۵ شماتیک روش قابلیت اعتماد انتقال پایداری تطبیقی فازی

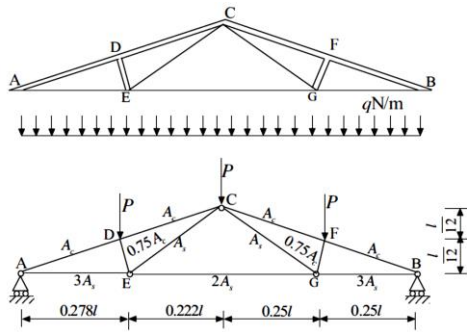
این حساسیت، از معیار اصلاح‌شده اندازه‌گیری عدم قطعیت آنتروپی شانون [25] استفاده شده است. با به‌کارگیری این معیار، میزان عدم قطعیت شاخص قابلیت اعتماد مطابق رابطه (۱۷) اندازه‌گیری می‌شود.

$$H_u(\beta) = -k \int_{\beta_{\alpha_0l}}^{\beta_{\alpha_0r}} [\mu(\beta) \cdot \log(\mu(\beta)) + (1 - \mu(\beta)) \cdot \log(1 - \mu(\beta))] d\beta \quad (17)$$

تحلیل حساسیت شاخص قابلیت اعتماد فازی

شاخص قابلیت اعتماد فازی محاسبه‌شده، نشان‌دهنده تأثیر لحاظ نمودن عدم قطعیت شناختی در پروسه ارزیابی قابلیت اعتماد سازه می‌باشد. به بیان دیگر، این شاخص میزان حساسیت شاخص قابلیت اعتماد سازه به عدم قطعیت شناختی معرفی‌شده در پروسه ارزیابی آن را منعکس می‌نماید. در این تحقیق به‌منظور برآورد میزان

جدول (۱) ارائه شده است.



شکل ۶ خرپای سقفی مثال ۱

در این مثال زیرفضای قطعی یک ابرفضای شش‌بُعدی است که جستجوی نقاط بهینه با استفاده از روش انتقال پایداری تطبیقی فازی بر پایه الگوریتم ژنتیک در آن انجام شده است. پیاده‌سازی تحلیل قابلیت اعتماد فازی در این مثال با استفاده از روش پیشنهادی، تابع درجه عضویت شاخص قابلیت اعتماد فازی را مطابق شکل (۷) نتیجه داده است. نتایج حاصل از تحلیل قابلیت اعتماد فازی با استفاده از روش انتقال پایداری تطبیقی فازی منجر به ۵۴۱۰۶ تکرار (برآورد تابع گرایان) با ۷۵۷۹۰۸ بار فراخوانی تابع شرایط حدی شده است. هم‌چنین مدت زمان رسیدن به همگرایی در روند تحلیل قابلیت اعتماد برابر ۳۵۰۲ ثانیه می‌باشد. ضمن این‌که مقدار عددی شاخص قابلیت اعتماد فازی به دست آمده به ازای درجه عضویت یک (۲/۴۲۱۲)، با مقدار ارائه شده در مرجع [21] مطابقت دارد. این بدان معنا است شاخص قابلیت به‌ازای مقادیر درجه عضویت یک برای تمامی متغیرها، همانند روش کلاسیک انتقال پایداری تطبیقی حاصل می‌گردد؛ اما شاخص قابلیت اعتماد در برش صفر ($\alpha = 0$) تغییرات زیادی از خود نشان داده و در بازه $[-0.249, 4.477]$ قرار گرفته است که نشان‌دهنده حساسیت شاخص قابلیت اعتماد مسئله به عدم قطعیت شناختی است. شاخص قابلیت اعتماد به‌ازای مقادیر مختلف بازه عدم قطعیت برای میانگین و انحراف معیار متغیرهای تصادفی به صورت اعداد فازی $\mu - \sigma < \tilde{\mu} < \mu + \sigma$ و $\mu - S\mu, \mu, \mu + S\mu$ و $\sigma - S\sigma, \sigma, \sigma + S\sigma$ که در آن S مبین ضریب عدم قطعیت شناختی، محاسبه و میزان

که در آن $\beta_{\alpha 0l}$ و $\beta_{\alpha 0r}$ به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار شاخص قابلیت اعتماد فازی در برش $\alpha = 0$ است و $k = \frac{1}{\log 2}$ می‌باشد. هرچه حاصل رابطه فوق بیشتر باشد، شاخص قابلیت اعتماد فازی بازه بزرگ‌تری از عدم قطعیت را شامل می‌شود و میزان حساسیت آن نسبت به عدم قطعیت شناختی لحاظ شده در فرایند تحلیل قابلیت اعتماد سازه بیشتر است. معیار آنتروپی شانون هم‌چنین امکان مقایسه میزان عدم قطعیت پاسخ‌های فازی را در معیارهای مختلف خرابی سازه نظیر مقاومت یا تغییر شکل فراهم می‌آورد و شناسایی معیار خرابی با اهمیت بیشتر را ممکن می‌سازد.

مثال‌های عددی

در این بخش با مدل‌سازی عدم قطعیت شناختی در روند تحلیل قابلیت اعتماد فازی براساس روش انتقال پایداری خودتطبیقی، شاخص قابلیت اعتماد فازی محاسبه شده و با استفاده از معیار آنتروپی شانون میزان حساسیت آن نسبت به عدم قطعیت شناختی مورد سنجش قرار گرفته است. کلیه مراحل انجام ارزیابی قابلیت اعتماد فازی و تحلیل حساسیت فازی توسط برنامه کامپیوتری در محیط نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی و توسط یک لپ‌تاپ با رم ۴ گیگا بایت اجرا شده است.

مثال اول: سازه خرپای سقفی. تغییر مکان قائم خرپای سقفی شکل (۶) براساس تحلیل سازه، به‌عنوان تابع شرایط حدی به صورت زیر در نظر گرفته شده است [21]:

$$g = 0.03 - \left(\frac{ql^2}{2} \right) \left(\frac{3.81}{A_c E_c} + \frac{1.13}{A_s E_s} \right) \quad (18)$$

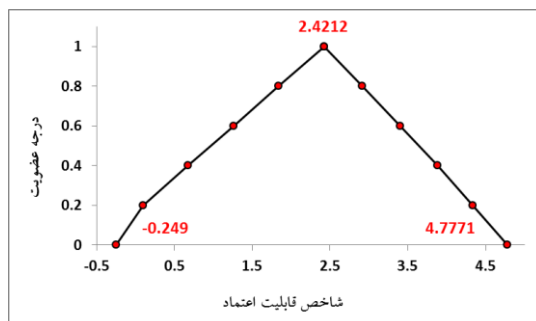
که در آن q بار گسترده، l طول دهانه، A_c و A_s به ترتیب سطح مقطع‌های اعضای بتنی و فولادی با مدول‌های الاستیسیته به ترتیب E_c و E_s می‌باشند. خصوصیات آماری متغیرهای نرمال تصادفی فازی در

هم‌چنین به‌منظور بررسی میزان تغییرات معیار آنتروپی شانون $H_u(\tilde{\beta})$ با افزایش بازه تغییرات، نتایج حاصل به‌ازای پنج مقدار $0/1$ ، $0/15$ ، $0/2$ ، $0/25$ و $0/3$ در شکل (۸) نشان داده شده‌است. بررسی مقادیر ارائه‌شده نشان می‌دهد که میزان تغییرات معیار آنتروپی شانون در بازه $0/1$ تا $0/25$ ، تقریباً به‌اندازه $1/6$ واحد است که با تغییرات بازه $0/25$ تا $0/3$ برابری می‌نماید، لذا بیشترین میزان حساسیت شاخص قابلیت اعتماد نسبت به عدم قطعیت شناختی به‌ازای مقدار $S = 0/3$ حاصل شده‌است.

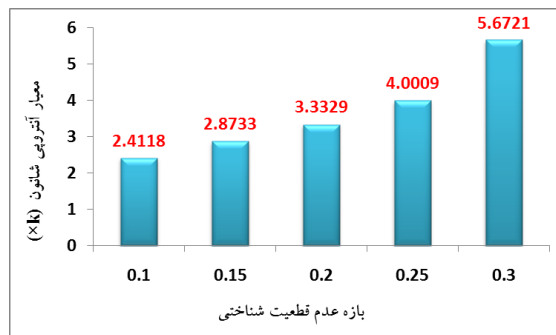
حساسیت آن با استفاده از رابطه (۱۷) محاسبه شده‌است. میزان حساسیت مقدار $H_u(\tilde{\beta}) = 2.411k$ را به‌دست می‌دهد که نشان‌دهنده حساسیت بسیار زیاد شاخص قابلیت اعتماد نسبت به عدم قطعیت شناختی می‌باشد. این مسئله با بررسی مقادیر شکل (۷) نیز قابل مشاهده است. لذا مدل‌سازی عدم قطعیت شناختی در این مثال بسیار حائز اهمیت است و به‌منظور در اختیار داشتن یک برآورد نزدیک به واقعیت از میزان ایمنی سازه، مدل‌سازی آن در روند ارزیابی قابلیت اعتماد اجتناب‌ناپذیر می‌نماید.

جدول ۱ متغیرهای تصادفی فازی خرابی سقفی

متغیر فازی	میانگین	انحراف معیار
$\tilde{q}(N/m)$	<۱۸۰۰، ۲۰۰۰، ۲۲۰۰>	<۱۲۶۰، ۱۴۰۰، ۱۵۴۰>
$\tilde{l}(m)$	<۱۰/۸، ۱۲، ۱۳/۲>	<۰/۱۰۸، ۰/۱۲، ۰/۱۳۲>
$\tilde{A}_s(m^2) \times 10^{-4}$	<۸/۸۳، ۹/۸۲، ۱۰/۸>	<۰/۵۳۸۳، ۰/۵۹۸۲، ۰/۶۵۸۰>
$\tilde{A}_c(m^2) \times 10^{-4}$	<۳۶، ۴۰، ۴۴>	<۴۳/۲، ۴۸، ۵۲/۸>
$\tilde{E}_s(Pa) \times 10^9$	<۹۰، ۱۰۰، ۱۱۰>	<۵/۴، ۶، ۶/۶>
$\tilde{E}_c(Pa) \times 10^9$	<۱۸، ۲۰، ۲۲>	<۱/۰۸، ۱/۲، ۱/۳۲>



شکل ۷ شاخص قابلیت اعتماد فازی مثال ۱



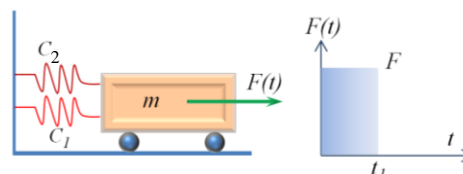
شکل ۸ معیار آنتروپی شانون به‌ازای مقادیر مختلف بازه عدم قطعیت مثال ۱

تحلیل حساسیت بر روی نتایج به دست آمده به منظور بررسی میزان تأثیرپذیری شاخص قابلیت اعتماد فازی از عدم قطعیت شناختی اجتناب‌ناپذیر می‌نماید. به بیان دیگر انجام تحلیل حساسیت فازی، لزوم یا عدم لزوم مدل‌سازی عدم قطعیت شناختی در روند انجام محاسبات را تا حدود زیادی مشخص می‌کند. سنجش میزان حساسیت شاخص قابلیت اعتماد فازی نسبت به عدم قطعیت شناختی با استفاده از معیار آنتروپی شانون در این مثال، نتیجه $H_u(\beta) = 0.807k$ را به دست می‌دهد که نشان‌دهنده حساسیت پایین شاخص قابلیت اعتماد نسبت به عدم قطعیت شناختی می‌باشد. با توجه به شکل (۱۰)، تغییرات شاخص قابلیت اعتماد در بازه [1.1221, 2.7369] قرار دارد که نسبتاً زیاد نیست؛ لذا در یک دیدگاه کلی می‌توان نتیجه گرفت، متغیرهای تصادفی در این مثال به عدم قطعیت شناختی حساسیت زیادی ندارند و روش‌های معمول ارزیابی قابلیت اعتماد، تخمین مناسبی از ایمنی این سیستم ارائه می‌دهند. هم‌چنین به منظور بررسی میزان تأثیرپذیری حساسیت شاخص قابلیت اعتماد نسبت به تغییرات بازه عدم قطعیت میانگین و انحراف معیار متغیرهای تصادفی به ازای پنج مقدار ۰/۱، ۰/۱۵، ۰/۲، ۰/۲۵ و ۰/۳، نتایج حاصل از تحلیل حساسیت در شکل (۱۱) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که بیشترین میزان تغییرات معیار آنتروپی شانون در بازه ۰/۱۵ تا ۰/۲، اتفاق افتاده و به ازای بقیه مقادیر میزان تغییرات شاخص $H_u(\beta)$ مشابه می‌باشد.

مثال سوم: مقطع بتن مسلح. در این مثال یک مقطع بتن مسلح تحت خمش مطابق شکل (۱۲) از مرجع [35] انتخاب شده است. تابع شرایط حدی این مقطع به صورت رابطه (۲۰) در نظر گرفته شده است.

$$g = BA_s f_y (d - 0.59 \frac{A_s f_y}{b f_c}) - M_D - M_L \quad (20)$$

مثال دوم: سیستم دینامیکی غیرخطی. در این مثال سیستم جرم و فنر یک درجه آزادی غیرخطی شکل (۹) تحت بار ضربه‌ای مستطیلی که دامنه و زمان آن تصادفی هستند، مورد ارزیابی قرار گرفته است [29].



شکل ۹ شماتیک نوسانگر غیرخطی

تابع شرایط حدی این سیستم شامل شش متغیر تصادفی است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$g = 3r - \left| \frac{2F}{mW^2} \sin\left(\frac{Wt_1}{2}\right) \right| \quad (19)$$

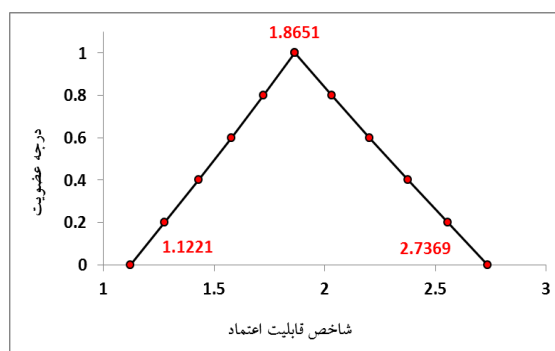
$$W^2 = \frac{C_1 + C_2}{m}$$

کلیه متغیرهای تصادفی این مثال دارای توزیع نرمال هستند که خصوصیات آماری آنها در جدول (۲) گزارش شده است.

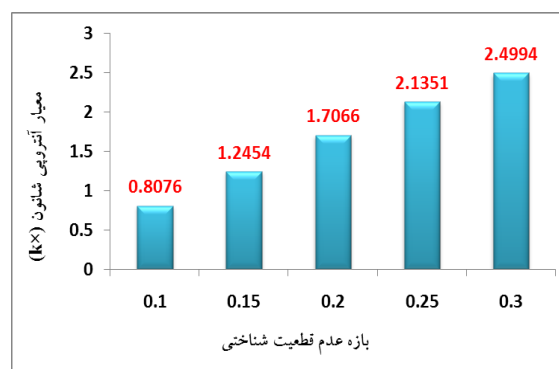
پیاپی روش حساسیت اعتماد انتقال پایداری تطبیقی فازی در این مثال شاخص قابلیت اعتماد فازی را مطابق شکل (۱۰) نتیجه داده است. در این روند، تعداد برآورد تابع گرادیان برابر ۴۸۸۶۸ بار است که منجر به ۶۳۵۲۸۴ بار فراخوانی تابع شرایط حدی گردیده، ضمن این که مدت زمان انجام تحلیل برابر ۲۹۰۳ ثانیه بوده است. در این مثال مقدار شاخص قابلیت اعتماد فازی به دست آمده به ازای $\alpha = 1$ ، دقیقاً با مقدار مرجع [29] که براساس روش کلاسیک انتقال پایداری تطبیقی به دست آمده، هم‌خوانی دارد؛ لذا می‌توان بیان نمود نتایج روش پیشنهادی از اعتبار لازم برخوردار می‌باشند. با توجه به حجم بالای محاسبات تحلیل قابلیت اعتماد فازی و مدت زمان زیادی که صرف انجام این محاسبات می‌شود، انجام

جدول ۲ خصوصیات آماری متغیرهای تصادفی فازی نوسانگر

متغیر فازی	میانگین	انحراف معیار
\tilde{m}	$\langle 0/9, 1, 1/1 \rangle$	$\langle 0/045, 0/05, 0/055 \rangle$
\tilde{c}_1	$\langle 0/9, 1, 1/1 \rangle$	$\langle 0/09, 0/1, 0/11 \rangle$
\tilde{c}_2	$\langle 0/09, 0/1, 0/11 \rangle$	$\langle 0/009, 0/01, 0/011 \rangle$
\tilde{r}	$\langle 0/45, 0/5, 0/55 \rangle$	$\langle 0/045, 0/05, 0/055 \rangle$
\tilde{F}	$\langle 0/9, 1, 1/1 \rangle$	$\langle 0/18, 0/2, 0/22 \rangle$
\tilde{t}_1	$\langle 0/9, 1, 1/1 \rangle$	$\langle 0/18, 0/2, 0/22 \rangle$



شکل ۱۰ شاخص قابلیت اعتماد فازی مثال ۲

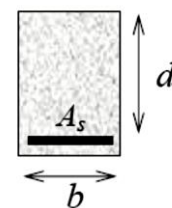


شکل ۱۱ معیار آنتروپی شانون به‌ازای مقادیر مختلف بازه عدم قطعیت

مثال ۲

مقطع میلگردهای مسلح‌کننده مقطع و f_y تنش تسلیم می‌باشد.

باتوجه به شکل (۱۳) مشخص می‌شود که میزان تغییرات شاخص قابلیت اعتماد در این مثال برابر $1/548$ است که در بازه $[2.602, 4.186]$ قرار دارد. به‌منظور سنجش میزان حساسیت شاخص ایمنی سازه نسبت به عدم قطعیت شناختی، تحلیل حساسیت با استفاده از رابطه (۱۷) انجام



شکل ۱۲ مقطع تیر بتن مسلح مثال ۳

که در آن B پارامتر عدم قطعیت مدل، A_s سطح

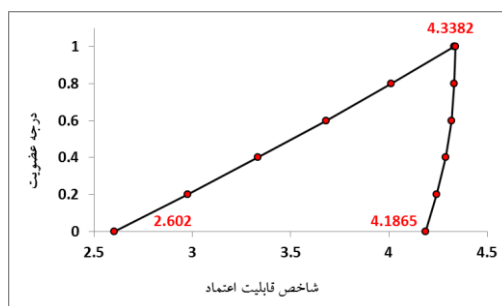
قطعیت، روند افزایشی داشته‌است. فولاد b و d به ترتیب عرض و ارتفاع مؤثر مقطع می‌باشد. ضمن این که M_D و M_L به ترتیب لنگرهای خمشی ناشی از بارهای مرده و زنده وارد بر مقطع می‌باشند. این مثال دارای ۸ متغیر تصادفی است که خصوصیات آماری آنها در جدول (۳) گزارش شده‌است.

زیرفضای قطعی در این مثال یک ابرفضای ۹ بُعدی می‌باشد که جستجوی نقاط بهینه‌ای که مقادیر β_{α_R} و β_{α_F} را نتیجه می‌دهند، با استفاده از روش پیشنهادی در آن انجام شده‌است. مدت زمان تعیین شاخص قابلیت اعتماد فازی این مثال ۹۵۸۰ ثانیه است که در این روند تابع شرایط حدی ۳۴۳۳۵۱۶ بار فراخوانی شده و تعداد برآورد تابع گرادیان ۵۴۴۶۷ بار بوده‌است. تابع درجه عضویت شاخص قابلیت اعتماد فازی در شکل (۱۱) نشان داده شده‌است.

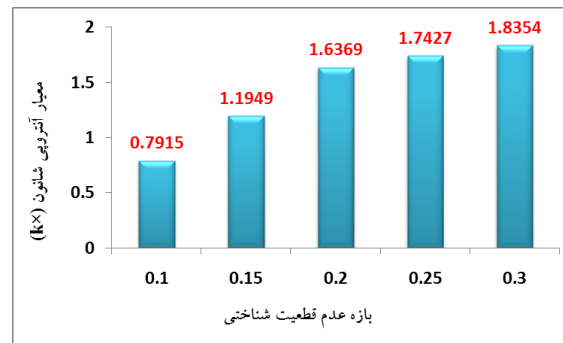
شده که مقدار $H_u(\beta) = 0.791k$ را نتیجه داده‌است. این مقدار نشان‌دهنده حساسیت پایین شاخص قابلیت اعتماد نسبت به عدم قطعیت شناختی است. از طرفی باتوجه به متفاوت بودن کیفیت ساخت و اجرای بتن در ارتفاع مقاطع بتن مسلح، انتظار می‌رود شاخص قابلیت اعتماد حساسیت زیادی نسبت به عدم قطعیت شناختی ناشی از ابهام آماری متغیرها از خود نشان دهد و به عبارتی رابطه (۱۷) مقدار بزرگ‌تری را نتیجه دهد [12] که در این مثال به دلیل این که در تابع شرایط حدی از پارامتر عدم قطعیت در مدل B استفاده شده، میزان حساسیت مسئله نسبت به عدم قطعیت شناختی کاهش یافته‌است. هم‌چنین نتایج تحلیل حساسیت شاخص قابلیت اعتماد فازی نسبت به مقادیر مختلف عدم قطعیت در شکل (۱۴) نشان داده شده‌است. بررسی مقادیر $H_u(\beta)$ نشان می‌دهد که در این مثال هم حساسیت شاخص قابلیت اعتماد نسبت به عدم قطعیت شناختی با بیشتر شدن بازه عدم

جدول ۳ خصوصیات آماری متغیرهای تصادفی فازی مقطع بتن مسلح

متغیر فازی	میانگین	انحراف معیار	توزیع آماری
\tilde{f}_y (MPa)	<۳۶۰، ۴۰۰، ۴۴۰>	<۳۶، ۴۰، ۴۴>	لوگ نرمال
\tilde{f}_c (MPa)	<۲۷، ۳۰، ۳۳>	<۴/۸۶، ۵/۴۰، ۵/۹۴>	نرمال
\tilde{B}	<۰/۹۰۹، ۱/۰۱، ۱/۱۱>	<۰/۰۵۴، ۰/۰۶۰، ۰/۰۶۶>	نرمال
\tilde{M}_D (kN-m)	<۸۶/۲۸، ۹۵/۱۰۵، ۱۰۵/۴۵>	<۸/۶۲۸، ۹/۵۸۷، ۱۰/۵۴۵>	نرمال
\tilde{M}_L (kN-m)	<۶۰/۳۹، ۶۷/۷۳، ۱۱/۸۲>	<۱۵/۰۹، ۱۶/۷۷، ۱۸/۴۴>	گامبل
\tilde{A}_s (mm ²)	<۲۰۲۵، ۲۲۵۰، ۲۴۷۵>	<۲۰۲/۵، ۲۲۵، ۲۴۷/۵>	نرمال
\tilde{b} (mm)	<۳۲۴، ۳۶۰، ۳۹۶>	<۳۸/۸۸، ۴۳/۲، ۵۲/۴۷>	نرمال
\tilde{d} (mm)	<۴۹۵، ۵۵۰، ۶۰۵>	<۵۹/۴، ۶۶، ۷۲/۶>	نرمال



شکل ۱۳ شاخص قابلیت اعتماد فازی مثال ۳



شکل ۱۴ معیار آنتروپی شانون به‌ازای مقادیر مختلف بازه عدم قطعیت مثال ۳

را انجام داده‌است و به مشتق‌گیری و یا هرگونه اطلاعات کمکی نیاز ندارد و با تابع هدف بهینه مورد جستجو را مشخص می‌کند. پیاده‌سازی روش پیشنهادی منجر به تعریف باندهایی برای شاخص قابلیت اعتماد می‌گردد که موجب در اختیار داشتن مقادیر واقع‌بینانه‌تری از سطح ایمنی سازه نسبت به روش‌های کلاسیک شده‌است. هم‌چنین نتایج حاصل از تحلیل حساسیت قابلیت اعتماد فازی با استفاده از معیار آنتروپی شانون نشان‌دهنده میزان حساسیت بالای شاخص قابلیت اعتماد نسبت به ابهام آماری متغیرهای تصادفی در برخی از مسائل می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تحلیل حساسیت قابلیت اعتماد فازی نسبت به عدم قطعیت شناختی ناشی از ابهام آماری متغیرهای تصادفی، در قالب اعداد فازی مثلثی با به‌کارگیری روش انتقال پایدار تطبیقی مورد توجه قرار گرفته‌است. توابع شرایط حدی غیرخطی با توزیع‌های آماری مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته و شاخص‌های قابلیت اعتماد فازی تعیین شده‌اند. به‌منظور غلبه بر مشکل حجم زیاد محاسبات تعیین نقاط بهینه، یک الگوریتم ژنتیک نخبه‌گرا به‌کار گرفته شده‌است. روش پیشنهادی با پیروی از قوانین طبیعی با یک مجموعه از نقاط، جستجو

مراجع

1. Nowak, A. S., Collins, K. R., "Reliability of Structures", McGraw-Hill, (2000).
2. William, M. Bulleit, M., "Uncertainty in Structural Engineering", *Journal of Practice Periodical on Structural Design and Construction*, Vol. 13, Issue. 1, Pp. 24-30, (2008).
3. Grooteman, F., "Adaptive Radial-based Importance Sampling Method for Structural Reliability", *Structural Safety*, Vol. 30, Pp. 533-542, (2008).
4. Chakraborty, S., Chowdhury, R., "A Semi-analytical Framework for Structural Reliability Analysis", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 289, Pp. 475-497, (2015).
5. Keshtegar, B., "A Hybrid Conjugate Finite-step Length Method for Robust and Efficient Reliability Analysis", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 45, Pp. 226-237, (2017).
6. Bagheri, M., Miri, M., Shabakhty, N., "Fuzzy Reliability Analysis Using a New Alpha Level Set Optimization Approach Based on Particle Swarm Optimization", *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, Vol. 30, Pp. 235-244, (2015).

۷. باقری، منصور، میری، محمود، شایختی، ناصر، «محاسبه شاخص قابلیت اعتماد فازی سازه‌ها با استفاده از تکنیک بهینه سازی آلفا برش‌ها»، مجله مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، دوره ۴۳، ۴۴، ش. ۷۳، صص. ۱-۱۲، (۱۳۹۲).
8. Zadeh Lotfi, A., "Fuzzy Sets", *Journal of Information Control*, Vol. 8, Issue. 3, Pp.338-553, (1965).
9. Hurtado, J. E, Alvarez, D. A, Ramirez, J., "Fuzzy Structural Analysis Based on Fundamental Reliability Concepts", *Journal of Computers and Structures*, Vol. 112-113, Pp. 183-192, (2012).
10. Dong, W, Shah, H., "Vertex Method for Computing Functions on Fuzzy Variables", *Journal of Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 24, Issue. 1, Pp. 65-78, (1987).
11. Möller, B., Graf, W., Beer, M., "Fuzzy Structural Analysis Using α -level Optimization", *Computational Mechanics*, Vol. 26, Pp. 547-565, (2000).
12. Bagheri, M., Miri, M., Shabakhty, N., "Modeling of Epistemic Uncertainty in Reliability Analysis of Structures Using a Robust Genetic Algorithm", *Iranian Journal of Fuzzy Systems*, Vol. 12, Pp. 23-40, (2015).
13. Farkas, L., Moens, D., Vandepitte, D., Desmet, D., "Fuzzy Finite Element Analysis Based on Reanalysis Technique", *Structural Safety*, Vol. 32, No. 6, Pp. 442-448, (2010).
14. Serafinska, A., Kaliske, M., Zopf, C., Graf, M., "A Multi-objective Optimization Approach with Consideration of Fuzzy Variables Applied to Structural Tire Design", *Computers and Structures*, Vol. 116, Pp. 9-17, (2013).
15. Zhang, M. Q., Beer, M., Quek, S. T., Choo, Y. S., "Comparison of Uncertainty Models in Reliability Analysis of Offshore Structures under Marine Corrosion", *Structural Safety*, Vol. 32, Pp. 425-432, (2010).
16. Yang, D., "Chaos Control for Numerical Instability of First Order Reliability Method", *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Vol. 15, No. 10, Pp. 3131-3141, (2010).
17. Gong, J. X., Yi, P., "A Robust Iterative Algorithm for Structural Reliability Analysis", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 43, No. 4, Pp. 519-527, (2011).
۱۸. کشته‌گر، بهروز، «تحلیل قابلیت اعتماد مرتبه اول سازه‌ها به کمک روش بهینه‌سازی بهبود یافته جستجوی هارمونی»، مدل‌سازی در مهندسی، ۱۵(۵۱)، ۱-۱۲، doi: 10.22075/jme.2017.2687، (۱۳۹۶).
۱۹. کشته‌گر، بهروز، «نقش طول گام بر همگرایی روش مرتبه اول قابلیت اعتماد سازه‌ها»، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۴۵، ۳(۸۰)، صص. ۱۰۷-۱۱۶، (۱۳۹۴).
20. Keshtegar, B., "A Hybrid Conjugate Finite-step Length Method for Robust and Efficient Reliability Analysis", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 45, Pp. 226-237, (2017).
21. Keshtegar, B., Meng, Z., "A Hybrid Relaxed First-order Reliability Method for Efficient Structural Reliability Analysis", *Structural Safety*, Vol. 66, Pp. 84-93, (2017).
۲۲. کشته‌گر، بهروز، «بهبود روش انتقال پایدار جهت تحلیل قابلیت اعتماد مرتبه اول»، علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک، ۲۸(۲)، (۱۳۹۵).

۲۳. کشته‌گر، بهروز، میری، محمود، شایختی، ناصر، «ارائه الگوریتمی اصلاحی برای روش‌های گرادیان مزدوج غیرخطی به منظور محاسبه شاخص قابلیت اعتماد سازه‌ها»، فصلنامه مهندسی عمران فردوسی، ۲۴(۲)، ۱۴، (۱۳۹۲).
24. Timothy J. Ross., "Fuzzy Logic with Engineering Applications", Third Edition Publisher: Wiley, 3th edition, (2010).
25. Möller, B., Beer, M., "Fuzzy Randomness- uncertainty in Civil Engineering and Computational Mechanics", Springer Verlag, Berlin, (2004).
26. Dubois, D., Prade, H., "Operations on Fuzzy Numbers", *International Journal of Systems Science*, Vol. 9, No. 6, Pp. 613-626, (1978).
27. Keshtegar, B., Meng, Z., "A Hybrid Relaxed First-order Reliability Method for Efficient Structural Reliability Analysis", *Structural Safety*, Vol. 66, Pp. 84-93, (2017).
28. Keshtegar, B., "Chaotic Conjugate Stability Transformation Method for Structural Reliability Analysis", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 310, Pp. 866-885, (2016).
29. Keshtegar, B., "Limited Conjugate Gradient Method for Structural Reliability Analysis", *Engineering with Computers*, Vol. 1-9, (2016).
30. Schmelcher, P., Diakonou, F. K., "Detecting Unstable Periodic Orbits of Chaotic Dynamical Systems", *Physical Review Letters*, Vol. 78, No. 25, Pp. 4733-4736, (1997).
31. Li, G., Meng, Z., Hu, H., "An Adaptive Hybrid Approach for Reliability-based Design Optimization", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 51, No. 5, Pp.1051-1065, (2015).
32. Meng, Z., Li, G., Wang, B.P., Hao, P., "A Hybrid Chaos Control Approach of the Performance Measure Functions for Reliability-based Design Optimization", *Computers & Structures*, Vol. 146, Pp. 32-43, (2015).
33. Keshtegar, B., Hao, P., Meng, Z., "A Self-adaptive Modified Chaos Control Method for Reliability-Based Design Optimization", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 55, No. 51, Pp. 63-75, (2017).
34. Hao, P., Wang, Y., Liu, C., Wang, B., Wu, H., "A Novel Non-probabilistic Reliability-based Design Optimization Algorithm Using Enhanced Chaos Control Method", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 318, Pp. 572-593, (2017).
35. Keshtegar, B., "A Modified Mean Value of Performance Measure Approach for Reliability-based Design Optimization", *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 42, Pp. 1093-1101, (2017).

