

کمینه سازی وزن سازه های خرابی تحت قیود احتمال اندیشانه

محمد رضا مستخدمین حسینی^{۱*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۷/۱۴ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۲۹	هدف اصلی نظریه قابلیت اعتماد سیستم‌های سازه‌ای، طرح بهینه براساس مفهوم قابلیت اعتماد است. امروزه خرابیها و سازه‌های فضاکار به صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند و بنابراین هزینه تمام شده این سازه‌ها از یکسو و تأمین ایمنی لازم برای آنها از سوی دیگر حائز اهمیت می‌باشد. بنابراین در این پژوهش به بهینه‌یابی وزن این سازه‌ها براساس نظریه قابلیت اعتماد (بهینه‌یابی احتمال اندیشانه) پرداخته تا هر دو هدف فوق تأمین گردد. باتوجه به اینکه الگوریتم ژنتیک از جمله روشهای بسیار مناسب در امر بهینه سازی می‌باشد، در تحقیق حاضر جهت بهینه‌یابی مورد استفاده قرار گرفته است. در فرآیند بهینه‌یابی احتمال اندیشانه، تابع هدف کمینه‌سازی وزن سازه و قیود آن احتمال خرابی مجاز اعضا، گره‌ها و یا سیستم سازه می‌باشند. در این تحقیق، از شکل احتمال اندیشانه روابط کماتش ارائه شده در آیین‌نامه‌های معتبر استفاده گردیده تا دقت محاسبات ایمنی سازه افزایش یابد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش احتمال خرابی مجاز سیستم خرابی، وزن بهینه آن کاهش می‌یابد. روند این کاهش وزن در ابتدا با شیب بسیار سریع و سپس با شیب ملایم رخ داده و به تدریج به مقدار ثابتی میل می‌کند. وزن بهینه حساسیت بالاتری به تغییرات ضریب پراکندگی در مقایسه با تغییرات احتمال خرابی مجاز دارد. وزن بهینه در حالت یقین اندیشانه و حالت احتمال اندیشانه با ضرایب پراکندگی و احتمال خرابی مجاز نزدیک به صفر اختلاف کمی دارد. البته سرعت همگرایی در حالت یقین اندیشانه به مراتب بیشتر است.
واژگان کلیدی: قیود احتمال اندیشانه، بهینه یابی وزن، خرپا، الگوریتم ژنتیک.	

۱-مقدمه

در نظر گرفته نشوند، می‌توان از واژه بهینه‌سازی یقین اندیشانه (Deterministic Optimization) برای این منظور استفاده نمود. در صورتیکه انحراف از معیار پارامترهای دخیل در فرآیند بهینه‌سازی و اثرات آن مدنظر قرار گیرد، بهینه‌سازی از نوع احتمال اندیشانه (Reliability-based Optimization) می‌باشد و براساس نظریه قابلیت اعتماد پایه گذاری می‌گردد. براساس این نظریه باتوجه به طبیعت آماری متغیرهای احتمال اندیشانه می‌توان پارامتری به نام احتمال خرابی را تعریف نموده و در فرآیند بهینه‌سازی به صورت تابع هدف یا بخشی

سازه‌های خرابی و فضاکار امروزه به صورت گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. به دلیل ساختار مثلث گونه و توزیع نیروهای محوری بین اعضا و نیز بدلیل عدم وجود لنگر خمشی یا ناچیز بودن آن، اتصالات در این سازه‌ها مفصلی در نظر گرفته می‌شوند. باتوجه به اهمیت بعد اقتصادی در طراحی این سازه‌ها، بهینه‌سازی روش مناسبی برای تحقق این امر می‌باشد. اگر متغیرهای مورد استفاده در فرآیند بهینه‌سازی این سازه‌ها هیچگونه انحراف از معیاری نداشته باشند و یا به عبارتی عدم قطعیتها

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: hoseini_engineer@yahoo.com

۱. استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد مهدیشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، مهدیشهر، ایران

پارامتر احتمال خرابی و ضرایب پراکندگی متغیرهای تصادفی بر روی وزن سازه تأثیرگذار بودند، اگرچه ضرایب پراکندگی تأثیر بیشتری بر روی وزن داشتند.

بیابانی همدانی و کلات جاری [۱۴]، روشی جهت تحلیل قابلیت اعتماد و بهینه سازی همزمان هندسه و مقاطع سازه های خرابی ارائه دادند. در این پژوهش کمینه سازی وزن تحت محدودیت قابلیت اعتماد سیستم سازه به کمک GA انجام شد. جهت تحلیل قابلیت اعتماد سیستم خرابی از روش شاخه و کرانه استفاده گردید. برنامه کامپیوتری به نام RBO-S>S مورد استفاده قرار گرفت و روش اصلاح شده شاخه و کرانه را ارائه داد. از جمله قابلیت های این روش می توان به کاهش قابل ملاحظه زمان لازم جهت تحلیل قابلیت اعتماد و در نتیجه کاهش زمان بهینه سازی و دقت بالاتر در محاسبه احتمال خرابی اشاره نمود.

طراحی بهینه سازه های فضاکار مبتنی بر نظریه قابلیت اطمینان با استفاده از GA توسط حدیدی و چیت ساز [۱۵] انجام گردید. آنها جهت رفع مشکل هم گرایی موضعی و کم کردن زمان بهینه یابی، با در نظر گرفتن شاخص قابلیت اطمینان به عنوان محدودیت طراحی، توانستند محاسبات بهینه سازی احتمال اندیشانه برای سازه های بزرگ را در محدوده زمانی بهینه سازی یقین اندیشانه قرار دهند. نتایج نشان داد که روش مورد استفاده جهت بهینه سازی خرابی های متقارن با بارگذاری متقارن عملکرد بسیار مناسبی از خود نشان می دهد.

هو و همکاران [۴] یک روش مبتنی بر ترکیب جدیدی از بهینه سازی تکاملی چند هدفه و تحلیل قابلیت اطمینان ارائه دادند. روش پیشنهادی از دو مرحله مجزا تشکیل یافته بود. ابتدا، یک مسئله بهینه سازی چند هدفه توسط الگوریتم بهینه سازی تکاملی حل گردید. در مرحله دوم تحلیل قابلیت اطمینان جهت ارزیابی تمام راه حل های به دست آمده در مرحله اول انجام گردید. از جمله مزایای این روش اینکه: اولاً توانست مجموعه ای از راه حل های بهینه با سطوح مختلف اطمینان را تنها با یک بار اجرا ارائه دهد، ثانیاً به راحتی توانست مشکلات بهینه سازی طراحی سازه های خرابی با متغیرهای پیوسته، گسسته یا ترکیبی از پیوسته و گسسته را مدیریت کند.

از آن و یا به عنوان محدودیت استفاده نمود [۴-۱]. جهت تحلیل قابلیت اعتماد سازه ها از روش های مختلفی می توان استفاده نمود که شامل: روش گرادیان مزدوج غیرخطی [۵]، تحلیل قابلیت اعتماد مرتبه اول (FORM) [۶ و ۷]، روش قابلیت اطمینان مرتبه دوم (SORM) [۸] و روش قابلیت هدف تطبیقی [۹] می باشد.

روش های مختلفی که معمولاً در بهینه سازی سازه های خرابی مورد استفاده قرار می گیرند شامل: الگوریتم مثلث بهینه گر در بهینه سازی اندازه و شکل [۱۰]، استفاده از الگوریتم فراکتشافی در بهینه سازی گسسته [۱۱]، روش های برنامه ریزی متوالی درجه دوم (SQP) [۱۱]، روش استراتژی تکاملی (EVOL) [۱۲]، الگوریتم ژنتیک (GA) [۱۳-۱۵] و الگوریتم تکاملی دیفرانسیلی در بهینه سازی چند هدفه [۱۶] می باشند.

بهینه سازی براساس نظریه قابلیت اعتماد در سازه های بتن آرمه [۹]، قاب های فلزی [۶ و ۲] و خرابی ها [۱۵-۱۲] با استفاده از روش های ذکر شده فوق انجام گرفته است. قاسمی و یوسفی [۲]، بر روی بهینه سازی براساس نظریه قابلیت اعتماد قاب های دو و سه بعدی مطالعه کردند. بار وارده و تنش تسلیم به عنوان متغیرهای احتمال اندیشانه در نظر گرفته شدند و نقض نیروهای داخلی در حالت نهایی به عنوان ضابطه خرابی فرض شد. برای هر یک از عکس العمل های محوری، برشی، خمشی و پیچشی، احتمال خرابی محاسبه و در فرآیند بهینه سازی منظور گردید. در پروسه بهینه سازی با استفاده از GA، قیود شامل احتمال خرابی و تابع هدف شامل کمینه سازی وزن سازه در نظر گرفته شد.

توگان و دالوگو [۱۲]، فرمول بندی در مورد ارزیابی ایمنی سازه ها و روش های مرتبط با تحلیل آنها مورد بررسی قرار دادند. یک سیستم خرابی دوبعدی به وسیله روش های SQP، EVOL و GA مورد بهینه سازی قرار گرفت. نتایج نشان دهنده طرح مناسبی از این سازه در بهینه یابی مبتنی بر نظریه قابلیت اعتماد (RBDO) با قیود احتمال اندیشانه اعضا و با استفاده از تمامی الگوریتم های فوق بود. در حالت استفاده از متغیرهای پیوسته، وزن سازه با استفاده از روش های GA و EVOL یکسان محاسبه گردید. هر دو

⁴ Evolution Strategy

⁵ Genetic Algorithms

⁶ Reliability Based Design Optimization

¹ First Order Reliability Method

² Second Order Reliability Method

³ Sequential Quadratic Programming

بهترین نتایج قابل حصول با شرایط موجود را ارائه می‌دهد. طرح بهینه یقین‌اندیشانه سازه‌های خرپایی غالباً به فرم عمومی زیر بیان می‌گردد:

کمینه‌سازی وزن تحت محدودیت تنش و تغییر مکان مجاز جهت کمینه‌سازی وزن W سازه‌ای با اعضایی به سطح مقطع A_1, A_2, \dots, A_n تابع هدف به صورت زیر می‌باشد:

$$W(A_1, A_2, \dots, A_n) \quad (1)$$

به گونه‌ای که تحت محدودیت‌های زیر قرار گیرد:

$$\begin{aligned} \sigma_i &\leq \sigma_a \quad i = 1, n & (2) \\ \delta_i &\leq \delta_a \quad i = 1, m \\ A_i^l &\leq A_i \leq A_i^u \quad i = 1, n \end{aligned}$$

در روابط فوق A_i^l, A_i و A_i^u به ترتیب مقادیر متغیر طراحی سطح مقطع عضو و کرانه‌های تحتانی و فوقانی آن می‌باشند. σ_a و σ_i به ترتیب مقادیر تنش موجود و تنش مجاز عضو i ام، δ_a و δ_i به ترتیب مقادیر جابجایی موجود و جابجایی مجاز گره i ام می‌باشند. n و m نیز به ترتیب تعداد اعضاء و گره‌های سازه می‌باشند.

بهینه‌سازی یقین‌اندیشانه سازه‌های خرپایی مطابق با آخرین ویرایش آیین‌نامه طراحی سازه‌های فولادی AISC [۱۷] و آیین‌نامه طراحی سازه‌های آلومینیومی ADM [۱۸] انجام شده است.

در این آیین‌نامه‌ها از دو روش تنش مجاز (ASD) و روش ضرایب بار و مقاومت (LRFD) جهت طراحی سازه‌ها استفاده می‌گردد. باتوجه تطابق مناسب فرمول‌های طراحی به روش تنش مجاز در فرآیند بهینه‌یابی سازه‌ها، در مطالعات مختلف انجام شده در بهینه‌سازی براساس نظریه قابلیت اعتماد [۳، ۱۵، ۱۶، ۱۹، ۲۳] از این روش جهت طراحی استفاده گردیده، و در تحقیق حاضر نیز از آن استفاده گردیده است.

باتوجه به اینکه در این پژوهش، بارهای وارده فقط به صورت متمرکز به گره‌ها اعمال شده و اعضای سازه‌های خرپایی در طول عضو بارگذاری نشده‌اند و اتصالات سازه مفصلی‌اند، بنابراین تنها تنش ناشی از نیروی محوری اعضا محاسبه می‌گردد و از تنش خمشی ناشی از وزن اعضا به دلیل ناچیز بودن در برابر تنش‌های محوری صرف نظر گردیده است.

منگ و همکاران [۸] روش SORM را برای ارزیابی قیود احتمال‌اندیشانه در بهینه‌سازی RBDO مورد استفاده قرار دادند. باتوجه به اینکه استفاده از SORM در RBDO حجم محاسباتی را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد، به منظور دستیابی به کارایی برابر با رویکرد RBDO مبتنی بر روش FORM، برنامه‌نویسی تقریبی متوالی (ESAP) توسط آنها پیشنهاد گردید. روش ESAP پیشنهادی نتایج بهتری در مقایسه با سایر روشهای RBDO، از جمله روش شاخص قابلیت اطمینان، روش اندازه‌گیری عملکرد، بهینه‌سازی متوالی و روش ارزیابی قابلیت اطمینان نشان داد.

لمونزه و همکاران [۱۶] روشهایی را در جهت حل مشکلات موجود در بهینه‌سازی چند هدفه خرپاهای مسطح و فضایی با ترکیبی از قیود و توابع هدف متضاد، مانند فرکانس‌های طبیعی لرزش و ضرایب بار مربوط به پایداری کلی سازه ارائه دادند. مسائل تحلیل شده در کار آنها مرتبط با متغیرهای طراحی گسسته و پیوسته ابعاد، شکل و چیدمان بود. الگوریتم جستجوی مورد استفاده یک نسخه اصلاح شده از الگوریتم تکامل دیفرانسیلی به نام GDE3 بود و نتایج قابل قبولی ارائه داد.

باتوجه به اهمیت بحث کمانش در سازه‌های خرپایی و فضاکار و خلاء مشاهده شده در تحقیقات قبلی، در این پژوهش از شکل احتمال‌اندیشانه روابط مربوط به کمانش در بهینه‌یابی مبتنی بر نظریه قابلیت اعتماد به کمک الگوریتم ژنتیک استفاده گردید و نتایج آن با بهینه‌یابی یقین‌اندیشانه سازه که تحت قیود کمانش موجود در آیین‌نامه قرار می‌گیرند مقایسه شد. همچنین بهینه‌یابی احتمال‌اندیشانه با روش ذکر شده فوق با استفاده از متغیرهای گسسته و نیمه گسسته انجام شد و تأثیر پارامترهای کلیدی نظریه قابلیت اعتماد در وزن بهینه سازه نیز ارزیابی گردید.

۲- روش تحقیق

۲-۱- بهینه‌یابی یقین‌اندیشانه خرپا

در بهینه‌یابی یقین‌اندیشانه سازه‌ها، ضوابط آیین‌نامه‌ای ایمنی کافی را برای سازه فراهم می‌کند. کنترل ایمنی در آیین‌نامه‌ها معمولاً توسط ضرایب اطمینانی صورت می‌گیرد که با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و روابط تئوریک برای اعضا به دست آمده‌اند. بهینه‌یابی سازه‌ها با این روشها،

³ Load and Resistance Factor Design

¹ Enhanced Sequential Approximate Programming

² Allowable Strength Design

مبتنی بر نظریه قابلیت اعتماد به سه صورت بررسی می‌گردد که شامل کمینه‌سازی وزن تحت محدودیت احتمال خرابی اعضای سازه، کمینه‌سازی وزن تحت محدودیت احتمال خرابی گره‌ها و کمینه‌سازی وزن تحت محدودیت احتمال خرابی سیستم سازه می‌باشد.

کمینه‌سازی وزن تحت محدودیت احتمال خرابی اعضا

جهت کمینه‌سازی وزن تابع هدف به صورت زیر است:

$$W(\bar{A}_1, \bar{A}_2, \dots, \bar{A}_n) \quad (6)$$

به گونه‌ای که:

$$P_{fi} \leq P_{fai} \quad i = 1, n \quad (7)$$

$$\bar{A}_i^l \leq \bar{A}_i \leq \bar{A}_i^u \quad i = 1, n$$

در روابط فوق \bar{A}_i^l ، \bar{A}_i و \bar{A}_i^u به ترتیب مقادیر میانگین سطح مقطع عضو و کرانه های تحتانی و فوقانی آن می‌باشند. P_{fi} و P_{fai} به ترتیب مقادیر احتمال خرابی موجود و احتمال خرابی مجاز عضو i ام می‌باشند.

در یک سازه خرابایی با فرض اینکه تنشهای مجاز و بارهای وارده به سازه متغیرهای احتمال اندیشانه بوده که از نظر آماری مستقل از یکدیگر و دارای تابع توزیع نرمال باشند، احتمال خرابی موجود عضو i ام از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$P_{fi} = \Phi\left(-\frac{\bar{M}_i}{\sigma_{M_i}}\right) \quad (8)$$

در رابطه فوق، Φ تابع توزیع احتمال نرمال استاندارد و \bar{M}_i و σ_{M_i} به ترتیب میانگین و انحراف از معیارحاشیه ایمنی عضو i ام می‌باشند که به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\bar{M}_i = \bar{C}_{yi}A_i - \sum_{j=1}^l b_{ij}(A_i)\bar{L}_j \quad (9)$$

$$\sigma_{M_i}^2 = \sigma_{C_{yi}}^2 A_i^2 + \sum_{j=1}^l b_{ij}^2 (A_i)^2 \sigma_{L_j}^2 = (10)$$

$$\left(\bar{C}_{yi} CV_{C_{yi}} A_i\right)^2 + \sum_{j=1}^l \left[b_{ij}(A_i)\bar{L}_j CV_{L_j}\right]^2$$

که در روابط فوق، $b_{ij}(A_i)$ ضریب بار عضو i ام در اثر بار وارده L_j و l تعداد کل بارهای وارده است. \bar{C}_{yi} و \bar{L}_j به ترتیب میانگین تنش مجاز عضو i ام و بار وارده j ام، $\sigma_{C_{yi}}^2$ و $\sigma_{L_j}^2$ به ترتیب واریانس متغیرهای احتمال اندیشانه تنش مجاز و بار وارده می‌باشند. همچنین CV_{L_j} و $CV_{C_{yi}}$ به ترتیب ضرایب پراکندگی تنش مجاز و بار می‌باشند. لازم به ذکر است که $\sigma_{M_i}^2$ واریانس حاشیه ایمنی عضو i ام می‌باشد. اگر تنش عضو کششی باشد، میانگین و ضریب پراکندگی تنش مجاز از مقدار $0.6F_y$ در مقطع کل و برابر با $0.5F_u$

فرمولهای ارائه شده در این تحقیق با فرض استفاده از مقاطع میل‌های و توپر برای اعضا ارائه می‌گردد. بر اساس آیین‌نامه AISC تنش مجاز کششی اعضا برابر $0.6F_y$ (F_y تنش تسلیم مصالح می‌باشد) در مقطع کل در نظر گرفته می‌شود. اگر در اتصال عضو کششی از پیچ و پرچ استفاده گردد، به علت تعبیه سوراخهای لازم، از سطح مقطع عضو کاسته می‌گردد و تنش مجاز کششی اعضا در مقطع مؤثر خالص برابر با $0.5F_u$ (F_u تنش نهایی مصالح می‌باشد) در نظر گرفته می‌شود. سطح مقطع مؤثر خالص از حاصلضرب ضریب کاهش در سطح مقطع عضو پس از کسر سطح سوراخها بدست می‌آید. تنش مجاز فشاری اعضا F_{cr} ، از روابط (۳) و (۴) محاسبه می‌گردد:

$$\frac{L_c}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \rightarrow F_{cr} = (0.658 \frac{F_y}{F_e}) F_y \quad (3)$$

$$\frac{L_c}{r} > 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \rightarrow F_{cr} = 0.877 F_e \quad (4)$$

که در آن F_y و E به ترتیب تنش تسلیم و مدول الاستیسیته فولاد بر حسب $\frac{kg}{cm^2}$ بوده و F_e تنش کمناش الاستیک می‌باشد که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_c}{r}\right)^2} \quad (5)$$

در روابط فوق، طول مؤثر اعضا $L_c = KL$ می‌باشد که در آن L طول عضو برحسب mm ، K ضریب طول مؤثر عضو (برای اعضای سازه‌های خرابایی و فضاکار $K = 1$ می‌باشد) و r شعاع ژیراسیون مقطع عضو، برحسب mm می‌باشد. در آیین‌نامه AISC، حداکثر مقدار $\frac{L_c}{r}$ برای اعضای کششی و فشاری به ترتیب به ۳۰۰ و ۲۰۰ محدود شده است.

۲-۲- بهینه یابی احتمال اندیشانه خرابا

در بهینه‌یابی احتمال اندیشانه سازه‌ها، پارامترهایی از جمله بارهای وارده به سازه و مقاومت عضو (تنش تسلیم) به صورت متغیرهای احتمال اندیشانه در نظر گرفته می‌شوند. در این حالت به کمک مفاهیم اساسی نظریه قابلیت اعتماد می‌توان احتمال خرابی را در محاسبات ایمنی سازه در نظر گرفت. و با ملاحظه احتمال خرابی عضو و سیستم سازه‌ای در روند بهینه‌سازی، علاوه بر کمترین وزن، بیشترین قابلیت اعتماد را برای سازه و اعضای تشکیل دهنده آن بدست آورد. بدین منظور در فرآیند بهینه‌یابی، احتمال خرابی به صورت تابع هدف یا بخشی از آن و یا به عنوان محدودیت مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق بهینه‌سازی سازه‌ها

$$P_f \leq P_{fa} \quad (۱۷)$$

$$\bar{A}_i^l \leq \bar{A}_i \leq \bar{A}_i^u \quad i = 1, n$$

در روابط فوق P_f و P_{fa} به ترتیب احتمال خرابی موجود و احتمال خرابی مجاز کل سازه می‌باشند.

کرنل احتمال خرابی یک سیستم سازه‌ای برحسب کرانه‌های فوقانی و تحتانی را به صورت زیر پیشنهاد می‌کند [۲۰]:

$$\max^n P_{f_i} \leq P_f \leq 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{f_i}) = 1 - (1 - P_{f_1})(1 - P_{f_2}) \dots (1 - P_{f_n})(1 - P_{f_n}) \quad (۱۸)$$

۲-۳- بهینه یابی توسط الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک نسبت به سایر روش‌های بهینه‌سازی عددی تفاوت‌های زیادی داشته و ویژگی‌های خاص خود را دارد. مهمترین ویژگی‌های آن شامل موارد زیر می‌باشد: الگوریتم ژنتیک بر خلاف سایر روش‌های بهینه‌سازی که عملیات جستجو را از یک نقطه آغاز می‌کنند، از چندین نقطه در فضای پاسخ به جستجوی طرح بهینه می‌پردازد. بنابراین مشکلی که در روش‌های بهینه‌سازی عددی معمول، مبنی بر احتمال زیاد درگیر شدن الگوریتم به بهینه محلی وجود دارد، در روش الگوریتم ژنتیک به شدت کاهش یافته و بنابراین جواب حاصل از آن به احتمال بیشتری نزدیک به بهینه کلی می‌باشد. روش‌های بهینه‌سازی معمول، اکثراً با متغیرهای پیوسته کار می‌کنند. الگوریتم ژنتیک بر خلاف این روش‌ها با مقادیر گسسته کار می‌کند که این خصوصیت برای مسائل مهندسی بسیار مفید است. البته مسائل با متغیرهای پیوسته و حتی تلفیقی از متغیرهای پیوسته و گسسته را نیز به راحتی می‌توان با آن حل نمود. این الگوریتم بر خلاف سایر روش‌های بهینه‌سازی عددی، از مقادیر کدگذاری شده به جای استفاده از مقادیر واقعی متغیرها استفاده می‌کند که همین ویژگی توانایی کار بر روی متغیرهای گسسته را به آن داده است. الگوریتم ژنتیک جهت بهینه‌سازی توابع مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین در مواردی که نیاز به کمیته‌سازی تابع هدف می‌باشد باید با اعمال تصحیحاتی مسئله را به مسئله بهینه‌سازی تبدیل نمود. همچنین این الگوریتم برای حل مسائل نامقید استفاده می‌شود، بنابراین در مورد مسائل مقید باید ابتدا آنها را به مسائل نامقید تبدیل کرد [۲۱ و ۲۲].

در مقطع مؤثر خالص در نظر گرفته می‌شود و در حالت تنش فشاری، انحراف از معیار رابطه تنش مجاز فشاری برای نخستین بار در این تحقیق براساس رابطه (۳) به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$\frac{L_c}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \rightarrow \sigma_{F_{cr}} = (0.658 \frac{F_y}{F_e}) \sigma_{F_y} \quad (۱۱)$$

باتوجه به اینکه رابطه (۴) مستقل از تنش تسلیم می‌باشد بنابراین در این حالت، انحراف از معیار تنش مجاز کششی طبق رابطه (۱۲) صفر بوده و بخش اول از رابطه (۱۰) حذف می‌گردد.

$$\frac{L_c}{r} > 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \rightarrow \sigma_{F_{cr}} = 0 \quad (۱۲)$$

احتمال خرابی مجاز عضو طبق نظر کاربر مشخص می‌گردد. به عنوان مثال اگر طراحی سازه‌ای موردنظر باشد که قابلیت اعتماد هریک از اعضای آن ۰.۹۹ باشد، یعنی احتمال خرابی مجاز آن $1 - 0.99 = 0.01$ خواهد بود. براساس کاوه و کلات جاری [۱۹]، احتمال خرابی عضو برابر با 10^{-4} معادل خرابی از نظر مقاومت و 10^{-2} خرابی از نظر قابلیت بهره بردار می‌باشد.

کمیته‌سازی وزن تحت محدودیت احتمال خرابی گره‌ها
کمیته‌سازی وزن سازه به گونه‌ای که:

$$P_{fk} \leq P_{fak} \quad i = 1, m \quad (۱۳)$$

$$\bar{A}_i^l \leq \bar{A}_i \leq \bar{A}_i^u \quad i = 1, n$$

در روابط فوق P_{fak} و P_{fk} به ترتیب مقادیر احتمال خرابی موجود و احتمال خرابی مجاز گره k ام می‌باشند. احتمال خرابی موجود گره k ام از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$P_{fk} = \Phi\left(-\frac{\bar{M}_k}{\sigma_{M_k}}\right) \quad (۱۴)$$

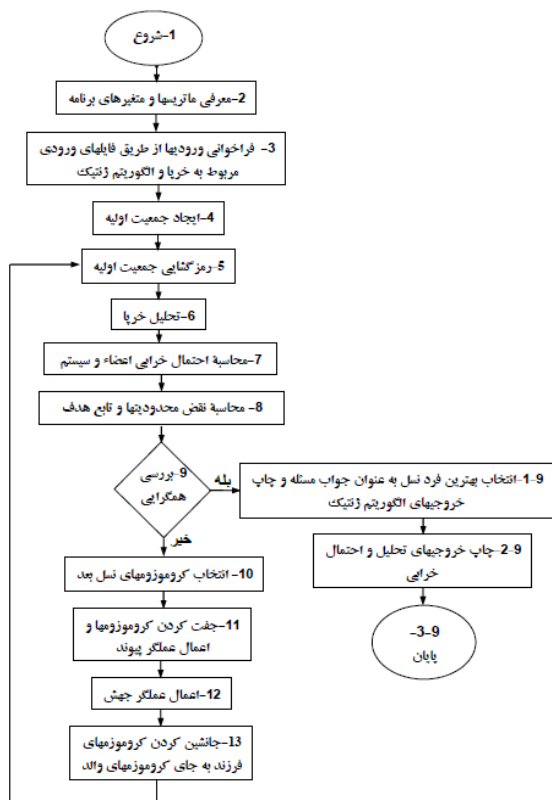
در رابطه فوق، Φ تابع توزیع احتمال نرمال استاندارد و \bar{M}_k و σ_{M_k} به ترتیب میانگین و انحراف از معیارحاشیه ایمنی گره k ام می‌باشند که به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\bar{M}_k = Y_k - \sum_{j=1}^l D_{kj} \bar{L}_j \quad (۱۵)$$

$$\sigma_{M_k}^2 = \sum_{j=1}^l D_{kj}^2 \sigma_{L_j}^2 = \sum_{j=1}^l [D_{kj} \bar{L}_j CV_{L_j}]^2 \quad (۱۶)$$

که در روابط فوق، Y_k تغییر مکان مجاز گره k ام، D_{kj} ضریب بار تغییر مکان گره k ام در اثر بار وارده L_j و $\sigma_{M_i}^2$ واریانس حاشیه ایمنی عضو i ام می‌باشد.

کمیته‌سازی وزن تحت محدودیت احتمال خرابی سیستم سازه
کمیته‌سازی وزن سازه به گونه‌ای که:



شکل ۱- فلوجارت الگوریتم ژنتیک مورد استفاده

به تعداد قیود بهینه سازی بستگی دارد که می تواند از مقدار یک در حالت قید سیستم تا مجموع اعضا در حالت قیود احتمال خرابی اعضا و یا مجموع اعضا و گره ها در حالت قیود تنش و تغییر مکان تغییر نماید. سپس با بکارگیری روش تابع جریمه خارجی، تابع هدف (وزن) اصلاح شده G_i از کروموزوم (فرد) i ام به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$G_i = W[1 + C.R_1(1 - 0.2(V - 1))] \quad (23)$$

که در آن V شمارنده نسلها و R_1 ضریب تابع جریمه در نسل اول می باشد که با توجه به شرایط سازه انتخاب می گردد. از آنجا که الگوریتم ژنتیک برای بیشینه سازی مسائل کاربرد دارد، لذا برای تبدیل کمینه سازی تابع هدف به بیشینه سازی از تابع برازندگی مطابق قاسمی و مستخدمین حسینی [۲۳] به صورت زیر عمل نموده ایم.

$$F_i = G_{max} + G_{min} - G_i \quad (24)$$

که F_i تابع برازندگی طرح i ام، G_{max} و G_{min} به ترتیب بزرگترین و کوچکترین مقدار تابع هدف اصلاح شده می باشد. پس از محاسبه تابع برازندگی، شروط همگرایی بررسی شده و در صورت برآورده شدن، الگوریتم ژنتیک پایان می پذیرد و در غیر این صورت عملگرهای الگوریتم ژنتیک که شامل انتخاب، جفت گیری، پیوند، جهش و

شکل (۱) فلوجارت الگوریتم ژنتیک مورد استفاده در این بررسی را نشان می دهد.

تابع هدف در این تحقیق وزن سازه W می باشد که بصورت زیر تعریف می گردد.

$$W = \gamma \cdot \sum_{i=1}^n A_i \cdot Le_i \quad (19)$$

در رابطه فوق Le_i طول عضو i ام و γ وزن مخصوص مصالح می باشد.

مقاطع اعضا، از نوع متغیرهای طراحی نیمه گسسته می باشند. تعداد متغیرهای مسئله برابر تعداد اعضای سازه بوده و در صورت گروه بندی اعضا، هر گروه به عنوان یک متغیر طراحی در نظر گرفته می شود. طول زیر رشته مربوط به مقطع عرضی اعضا، وابسته به تعداد متغیرهای انتخاب شده است، به طوری که اگر بتوان مقطع عرضی عضو i ام را از بین N متغیر (پروفیل) انتخاب نمود آنگاه طول زیر رشته (ژن) مربوط به سطح مقطع عضو i ام، La_i از رابطه (۲۰) محاسبه شده و سپس زیررشته های مربوط به مقطع عرضی عضو i ام، به کمک رابطه (۲۱) به عددی در مبنای ده و بدون علامت I رمزگشایی می گردد:

$$2La_i \geq N \quad (20)$$

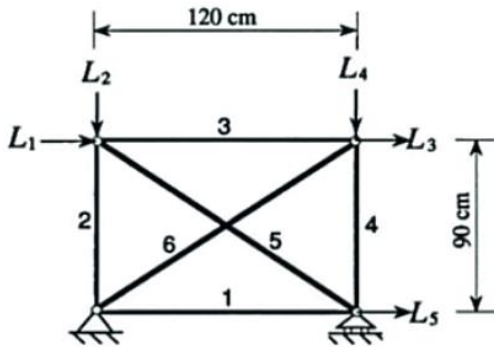
$$I = \sum_{k=1}^{La_i} C(k) \cdot 2^{(La_i-k)} + 1 \quad (21)$$

در روابط فوق، $C(k)$ مقدار عددی بیت k ام است که مقدار آن صفر یا یک می باشد. پس از رمزگشایی با ایجاد تناظر یک به یک از I به مجموعه پروفیل های موجود، مشخصات مقطع عرضی هر عضو تعیین می گردد. در مورد متغیرهای نیمه گسسته نیز، تنها تعداد تقسیمات در بازه مورد نظر برابر با N متغیر در نظر گرفته می شود. در این تحقیق، قیود مسئله براساس روابط (۲)، (۷)، (۱۳) و (۱۷) محاسبه می گردد. با توجه به اینکه الگوریتم ژنتیک برای بهینه سازی مسائل نامقید کاربرد دارد، لذا برای تبدیل تابع مقید به نامقید، از روش تابع جریمه خارجی استفاده می گردد. برای این منظور ابتدا ضریب نقض محدودیت کل سازه، C از رابطه (۲۲) محاسبه می گردد.

$$C = \sum_{i=1}^{ne} \max\left(\frac{\text{موجود}}{\text{مجاز}} - 1\right) \quad (22)$$

در رابطه فوق، مقادیر موجود و مجاز مطابق روابط (۲)، (۷)، (۱۳) و (۱۷) در حالت یقین اندیشانه از مقادیر تنش و تغییر مکان موجود و مجاز و در حالت احتمال اندیشانه از احتمال خرابی موجود و مجاز استفاده می گردد.

$\bar{L}_1 = 0.5$ ، میانگین بارهای وارده به خرپا مساوی با $\bar{L}_3 = \bar{L}_5 = 20 \text{ kN}$ و $\bar{L}_2 = \bar{L}_4 = 30 \text{ kN}$ و 50 kN و ضرایب پراکندگی کلیه بارهای وارده به خرپا برابر با $CV_L = 0.2$ می باشد. در این بررسی، احتمال خرابی مجاز تمامی اعضاء یکسان و احتمال خرابی مجاز کل سازه برابر مجموع آنها فرض می شود. چگالی و مدول الاستیسیته مصالح به ترتیب برابر 0.0027 kg/cm^3 و 0.0027 kg/cm^2 و 10.9×10^5 می باشد. پارامترهای کنترل الگوریتم ژنتیک شامل: تعداد جمعیت برابر ۱۰۰، احتمال جهش مساوی 0.004 و احتمال پیوند برابر ۱ در نظر گرفته شدند.



شکل ۲- خرپای نامعین ۶ عضوی

انتخاب نخبه گرا می باشند، برای ایجاد نسل بعد وارد عمل می شوند.

۳- مثالهای عددی

۱-۳- خرپای ۶ عضوی

خرپای شش عضوی از جنس آلومینیوم ۶۰۶۱ جهت فرآیند بهینه یابی در شکل (۲) نشان داده شده است. در این مثال، ابتدا صحت مدل مورد استفاده در این تحقیق با نتایج تحقیقات قبلی مقایسه شده است. و سپس به بررسی تغییرات وزن بهینه سازه برحسب احتمال خرابی مجاز سیستم پرداخته شده و در ادامه بهینه سازی در حالت های گسسته و پیوسته بررسی می گردد. همچنین مقایسه بهینه یابی در حالت های یقین اندیشانه و احتمال اندیشانه نیز در این مثال بررسی می گردد. متغیرهای احتمال اندیشانه شامل تنش تسلیم اعضاء و بارهای وارده به سازه است. با فرض اینکه متغیرها دارای تابع چگالی احتمال نرمال بوده و از نظر آماری مستقل از یکدیگر باشند، خصوصیات آماری آنها به شرح زیر می باشد: میانگین و ضرایب پراکندگی تنش مجاز تمام اعضاء به ترتیب برابر با 27.6 kN/cm^2 و

جدول ۱- نتایج بهینه یابی و مقایسه با کاوه و کلات جاری [۱۹]

شماره عضو	10^{-1}		10^{-2}		10^{-3}		10^{-4}		10^{-5}	
	مرجع [۱۹]	تحقیق حاضر	مرجع [۱۹]	تحقیق حاضر	مرجع [۱۹]	تحقیق حاضر	مرجع [۱۹]	تحقیق حاضر	مرجع [۱۹]	تحقیق حاضر
۱	۲,۹۱	۲,۷۹	۳,۱۴	۳,۲۴	۳,۳۳	۳,۰	۳,۵۱	۳,۵۰	۳,۶۶	۳,۵۹
۲	۰,۶۱	۰,۵۰	۰,۸۰	۱,۰۰	۰,۹۶	۰,۷۵	۱,۱۰	۱,۲۱	۱,۲۳	۱,۱۹
۳	۰,۶۰	۰,۷۶	۰,۷۶	۰,۶۹	۰,۸۹	۱,۰۱	۱,۰۱	۱,۰۵	۱,۱۲	۱,۵۰
۴	۲,۴۲	۲,۳۷	۲,۶۸	۲,۵۰	۲,۹۰	۲,۷۲	۳,۰۹	۲,۸۷	۳,۲۷	۳,۱۵
۵	۲,۶۰	۲,۴۴	۲,۸۳	۲,۷۶	۳,۰۲	۳,۲۱	۳,۱۹	۳,۲۵	۳,۳۵	۳,۱۲
۶	۱,۷۶	۲,۰۰	۲,۰۰	۲,۰۶	۲,۲۰	۲,۳۰	۲,۳۸	۲,۱۵	۲,۵۵	۲,۵۰
وزن (kg)	۳,۶۴	۳,۵	۴,۰۷	۴,۰۲	۴,۴۲	۴,۲۵	۴,۷۴	۴,۶۶	۵,۰۳	۴,۹۹

^۱ احتمال خرابی مجاز عضو

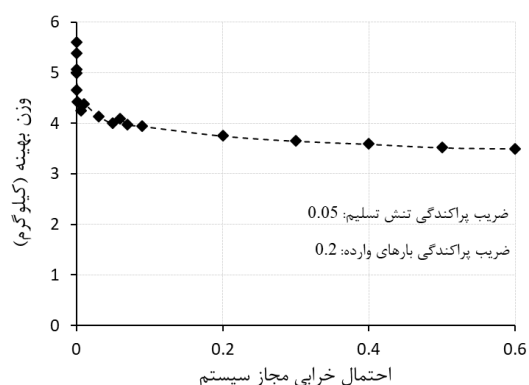
جدول ۲- وزن بهینه سازه برحسب احتمال خرابی مجاز سیستم

$P_{F sys}^1$	10^{-6}	10^{-5}	6×10^{-5}	10^{-4}	6×10^{-4}	10^{-3}	6×10^{-3}	۰,۰۱	۰,۰۳
وزن (kg)	۵,۶	۵,۳۹	۴,۹۹	۵,۰۶	۴,۶۶	۴,۴۲	۴,۲۵	۴,۳۸	۴,۱۴
$P_{F sys}$	۰,۰۵	۰,۰۶	۰,۰۷	۰,۰۹	۰,۲	۰,۳	۰,۴	۰,۵	۰,۶
وزن (kg)	۴	۴,۰۹	۳,۹۷	۳,۹۴	۳,۷۵	۳,۶۵	۳,۵۹	۳,۵۲	۳,۵

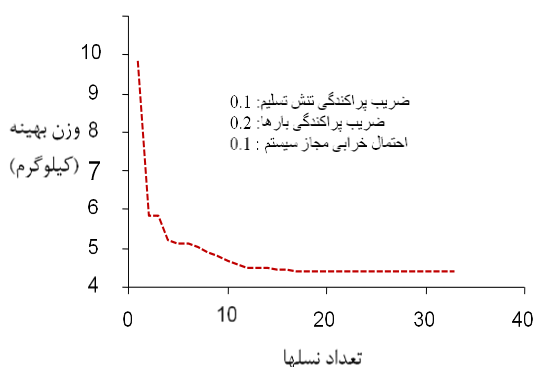
^۱ احتمال خرابی مجاز سیستم

در این مثال بهینه سازی با متغیرهای گسسته نیز انجام گرفته است. پروفیل های استاندارد در نظر گرفته شده که برای بهینه نمودن این سازه در نظر گرفته شدند، همگی از نیمرخ دایره و توپر بوده و در جدول ۳ ارائه شده اند.

مقادیر بهینه سطح مقطع و وزن سازه تحت محدودیت احتمال خرابی کل سازه محاسبه شده و در جدول ۴ بیان گردیده است. احتمال خرابی مجاز اعضا در این حالت 10^{-5} در نظر گرفته شده است. مقایسه وزن بهینه در حالت گسسته از جدول ۴ ($5,15 \text{ kg}$) با مقدار متناظر آن در حالت نیمه گسسته از جدول ۱ ($4,99 \text{ kg}$) نشان دهنده اختلاف ۳٪ می باشد. این مقدار اختلاف نشان می دهد که اگر تعداد مقاطع در حالت گسسته به تعداد کافی و به مقدار مناسبی انتخاب گردند، نتایج در حالت گسسته با دقت بالایی قابل اتکا می باشد. اگر احتمال خرابی مجاز سیستم مقدار ثابت 10^{-1} را داشته و ضرایب پراکندگی تغییر نمایند، مقادیر بهینه وزن مطابق جدول ۵ حاصل می گردد. براساس جدول فوق، با افزایش ضرایب پراکندگی بار و تنش تسلیم، وزن بهینه نیز افزایش می یابد.



شکل ۳- منحنی تغییرات وزن بهینه خرابا برحسب احتمال خرابی مجاز سیستم سازه



شکل ۴- تاریخچه تعداد نسلها بر حسب وزن سازه

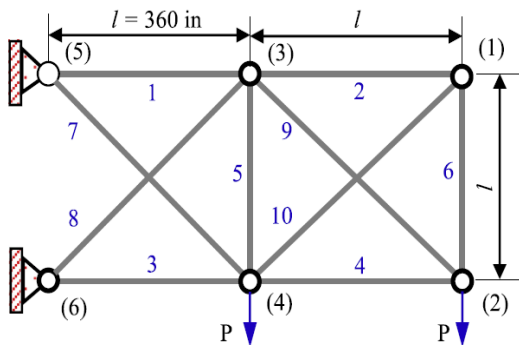
متغیرهای طراحی در این مثال سطح مقاطع اعضا می باشند که در ابتدای این تحقیق از نوع نیمه گسسته با دامنه تغییرات بین ۰.۰۱ و ۵ سانتی متر مربع فرض شدند. طول کروموزوم طراحی برای این روش برابر با ۱۰ منظور گردید. گروه بندی اعضای سازه در شکل (۲) مشخص گردیده است. به ازای مقادیر مختلف احتمال خرابی مجاز اعضا، مقادیر بهینه سطح مقاطع و وزن خرابا تحت محدودیت احتمال خرابی مجاز کل سازه محاسبه و نتایج آن در جدول ۱ بیان شده است. همچنین نتایج بررسی انجام شده توسط کاوه و کلات جاری [۱۹] نیز جهت مقایسه در این جدول ذکر گردیده است. همانطور که نتایج نشان می دهد، مقادیر وزن بهینه در این تحقیق نسبت به مرجع [۱۹] مقداری بهبود یافته است. مثال اخیر صحت و دقت تحقیق انجام شده را تأیید می نماید.

همچنین به ازای مقادیر مختلف احتمال خرابی مجاز سیستم، وزن بهینه سازه محاسبه و در جدول ۲ نشان داده شده است. تغییرات وزن بهینه خرابا برحسب احتمال خرابی مجاز سیستم در شکل (۳) نشان داده شده است. شکل (۳) بیانگر این مطلب می باشد که با افزایش احتمال خرابی مجاز سیستم خرابا، وزن بهینه آن کاهش می یابد. این کاهش وزن در ابتدای نمودار با شیب بسیار سریعی رخ داده (تا احتمال خرابی سیستم برابر 10^{-3} ، جدول ۲) و سپس روند کاهش با شیب کند ادامه یافته و به تدریج میل به همگرایی یافته است. براساس نتایج ارائه شده در جدول ۲، تغییرات وزن از $5,6 \text{ kg}$ در احتمال خرابی سیستم معادل 10^{-5} به مقدار $3,5 \text{ kg}$ در احتمال خرابی سیستم برابر با $0,6$ کاهش می یابد. با درونیابی نمودار فوق به ازای هر مقدار احتمال خرابی مجاز، می توان وزن بهینه متناظر با آن را محاسبه نمود. همچنین شکل (۴) تاریخچه تعداد نسلها بر حسب وزن سازه را نشان می دهد. در این شکل ضرایب پراکندگی تنش تسلیم اعضا و ضرایب پراکندگی کلیه بارهای وارده به خرابا به ترتیب ۰.۱ و ۰.۲ و احتمال خرابی مجاز 10^{-1} برای کل سازه در نظر گرفته شد. همانگونه که شکل (۴) نشان می دهد، این سازه پس از ۲۰ نسل به میزان وزن بهینه خود یعنی $4,3 \text{ kg}$ می رسد. سرعت بالای همگرایی در این مثال نشان دهنده کارایی الگوریتم به کار گرفته شده در این تحقیق دارد که زمان بهینه سازی مبتنی بر نظریه قابلیت اعتماد را به طور قابل ملاحظه ای کاهش داده است.

است. اما در حالت قیود احتمال اندیشانه این همگرایی به تدریج و پس از ۱۰۰ نسل حاصل شده است.

۳-۲-خرپای ۱۰ عضوی

خرپای ۱۰ عضوی آلومینیومی در شکل (۶) نشان داده شده است. این مثال به صورت گسترده‌ای در تحقیقات پیشین مورد مطالعه قرار گرفته است. تابع هدف در این مثال کمینه سازی وزن سازه است درحالیکه قید احتمال اندیشانه تغییرمکان قائم در گره ۲ تحت حداکثر جابجایی ۲ اینچ می‌باشد. سطح مقاطع اعضای خرپا به عنوان متغیرهای طراحی نرمال تصادفی و مقادیر میانگین آنها به عنوان مقادیر متغیرهای طراحی در نظر گرفته شده است. محدوده تغییرات سطح مقاطع اعضا در بازه $40-0.1 \text{ in}^2$ می‌باشد. مدول الاستیسیته و بار P نیز به عنوان متغیرهای تصادفی به ترتیب با مقادیر میانگین 10^5 lb و 10^7 psi می‌باشند. چگالی مصالح برابر با 0.1 lb/in^3 فرض می‌شود. همه متغیرهای تصادفی دارای توزیع نرمال با ضریب پراکندگی 0.05 و از نظر آماری مستقل فرض می‌گردند. احتمال خرابی مجاز در این مثال برابر با 0.00135 می‌باشد. نتایج بهینه‌سازی این مثال با مراجع مختلف در جدول ۲ مقایسه گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که تحقیق اخیر کاملاً در راستای تحقیقات قبلی بوده و از دقت قابل قبولی برخوردار می‌باشد.



شکل ۶- خرپای ۱۰ عضوی

۳-۳-خرپای ۲۵ عضوی

در این مثال بهینه سازی سطح مقطع اعضای خرپای سه بعدی فولادی (شکل (۷)) با در نظر گرفتن تنش تسلیم اعضا و بارهای اعمال شده به سازه به عنوان متغیرهای احتمال اندیشانه، انجام شده است. هدف از این مثال بررسی حساسیت وزن بهینه سازه نسبت به ضرایب پراکندگی و همچنین احتمال خرابی مجاز می‌باشد. مقادیر بارهای اعمالی برای این سازه در جدول ۶ نشان داده شده‌اند.

جدول ۳- کد گذاری مقاطع

کد وابسته	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
قطر پروفیل (mm)	۱۱,۵	۱۲,۵	۱۳,۵	۱۴	۱۵,۵	۱۶,۵	۱۷	۱۷,۵
کد وابسته	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
قطر پروفیل (mm)	۱۸	۱۸,۵	۱۹	۱۹,۵	۲۰	۲۰,۵	۲۱	۲۱,۵
کد وابسته	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
قطر پروفیل (mm)	۱۸	۱۸,۵	۱۹	۱۹,۵	۲۰	۲۰,۵	۲۱	۲۱,۵

جدول ۴- مقادیر بهینه اعضا

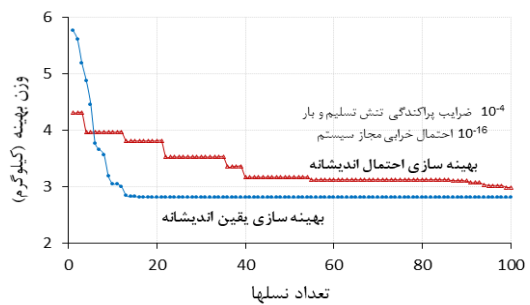
وزن (kg)	۱	۲	۳	۴	۵	۶
شماره عضو	۱۶	۲	۱	۱۴	۱۵	۹
شماره کد بهینه						

جدول ۵- وزن بهینه برحسب ضرایب پراکندگی در حالت

احتمال خرابی مجاز سیستم برابر ۰,۱

ضرایب پراکندگی بار و تنش تسلیم	10^{-4}	۰,۰۵	۰,۹
وزن بهینه (kg)	۲,۷۹	۲,۹۴	۴,۷۸

اگر احتمال خرابی مجاز سیستم و ضرایب پراکندگی متغیرهای احتمال اندیشانه به ترتیب برابر با 10^{-6} و 10^{-4} در نظر گرفته شوند، یعنی با در نظر گرفتن مقادیر نزدیک به صفر، حالت احتمال اندیشانه به سمت حالت یقین اندیشانه نزدیک شود، وزن بهینه 3 kg محاسبه می‌گردد. در این شرایط از آنجائی که طبق نتایج این تحقیق، این دو عامل اثرات مخالف هم بر وزن سازه دارند، بنابراین با کاهش آنها به سمت صفر، اولی باعث افزایش و دومی باعث کاهش وزن شده و وزن در این حالت به تدریج به همگرایی میل می‌نماید. جهت مقایسه، بهینه یابی با قیود یقین اندیشانه تنش اعضا نیز انجام گرفته است. در این حالت مقدار وزن بهینه 2.8 kg محاسبه گردید. اختلاف وزن بهینه در دو حالت فوق برابر با 0.7% می‌باشد. شکل (۵) نمودارهای همگرایی را در این دو حالت نشان می‌دهد.



شکل ۵- تاریخچه تعداد نسلیها برحسب وزن سازه

براساس این نمودارها درحالت بهینه یابی با قیود یقین اندیشانه، همگرایی به سرعت و بعد از ۱۳ نسل رخ داده

جدول ۹ بیانگر این مطلب است که اگر برای ضرایب پراکندگی بار و تنش تسلیم مقادیر پایین اختیار شود (حالت‌های A و B)، حاصل محاسبه وزن بهینه نیز مقدار کوچکی می‌گردد و بالعکس اگر برای ضرایب پراکندگی بار و تنش تسلیم مقادیر بالا در نظر گرفته شود (حالت‌های D و C)، حاصل وزن بهینه نیز مقدار بزرگی خواهد بود بنابراین ضرایب پراکندگی رابطه مستقیم با وزن بهینه خواهند داشت. همچنین جدول فوق این مسئله را تأیید می‌نماید که در حالت احتمال خرابی مجاز برابر با 10^{-4} (خرابی از نظر مقاومت) (حالت‌های B و D)، وزن بهینه بیشتر از حالت احتمال خرابی مجاز برابر با 10^{-2} (خرابی از نظر قابلیت بهره بردار) (حالت‌های A و C) می‌باشد بنابراین احتمال خرابی مجاز رابطه معکوس با وزن بهینه سازه دارد.

جدول ۶- بارگذاری سازه (واحد بار نیوتن می باشد)

گره	F_x	F_y	F_z
۱	۲۲۶۰۰	-۸۸۹۰۰	-۲۲۶۰۰
۲	-۲۲۶۰۰	۸۸۹۰۰	-۲۲۶۰۰
۳	-۲۲۶۰۰	۲۲۶۰۰	.
۵	۲۲۶۰۰	-۲۲۶۰۰	.

جدول ۷- حالت‌های احتمال اندیشانه

حالت احتمال اندیشانه	احتمال خرابی مجاز عضو	ضریب پراکندگی تنش تسلیم	ضریب پراکندگی بار
A	10^{-2}	۰,۰۳	۰,۱
B	10^{-4}	۰,۰۳	۰,۱
C	10^{-2}	۰,۱	۰,۴
D	10^{-4}	۰,۱	۰,۴

جدول ۸- گروه‌بندی اعضا

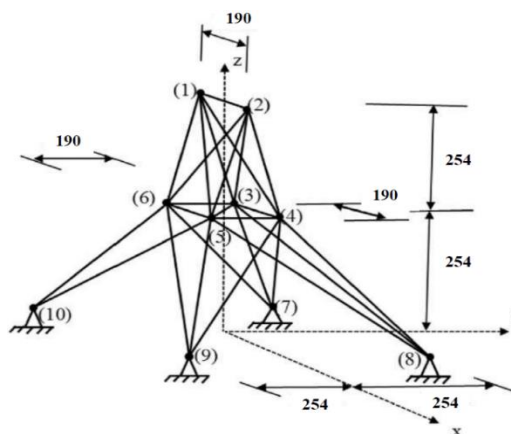
شماره گروه	اعضا	گره‌های انتهایی اعضا	شماره گروه	اعضا	گره‌های انتهایی اعضا
۱	۱	۱-۲	۸	۱۴,۱۷	۳-۱۰, ۵-۸
۲	۲,۵	۲-۴, ۱-۶	۹	۱۵,۱۶	۶-۷, ۴-۹
۳	۳,۴	۱-۳, ۲-۵	۱۰	۱۸,۲۱	۴-۷, ۶-۹
۴	۶,۹	۱-۴, ۲-۶	۱۱	۱۹,۲۰	۳-۸, ۵-۱۰
۵	۷,۸	۱-۵, ۲-۳	۱۲	۲۲,۲۵	۶-۱۰, ۴-۸
۶	۱۰,۱۱	۳-۶, ۴-۵	۱۳	۲۳,۲۴	۳-۷, ۵-۹
۷	۱۲,۱۳	۳-۴, ۵-۶			

جدول ۱۰ و ۱۱ تغییرات وزن را به ترتیب برحسب احتمال خرابی مجاز و ضرایب پراکندگی نشان می‌دهند. جدول ۱۰ نشان می‌دهد که با 100 برابر شدن احتمال خرابی مجاز، وزن بهینه سازه ۱۸ تا ۲۷ درصد کاهش می‌یابد.

جدول ۴- مقایسه نتایج خرابی ۱۰ عضوی با مراجع مختلف

تحقیق حاضر	هو و همکاران (۲۰۱۸) [۴]	شایانفر و همکاران (۲۰۱۴) [۱۳]	هو و همکاران (۲۰۱۶) [۳]	سطح مقطع (in ²)
A ₁	۳۹,۶۸	۳۴,۳۵	۳۹,۳۹	
A ₂	۰,۱۰	۰,۱۰	۰,۱۰	
A ₃	۲۸,۰۲	۲۹,۶۸	۲۷,۰۳	
A ₄	۱۷,۰۰	۲۶,۲۷	۱۸,۹۹	
A ₅	۰,۱۰	۰,۱۰	۰,۱۰	
A ₆	۰,۱۰	۰,۱۰	۰,۱۰	
A ₇	۳,۴۴	۳,۳۳	۳,۱۹	
A ₈	۲۹,۶۵	۲۸,۳۵	۲۸,۲۲	
A ₉	۲۶,۶۴	۲۶,۱۳	۲۷,۲۴	
A ₁₀	۰,۱۰	۰,۱۰	۰,۱۰	
وزن (lb)	۶۱۰۷,۴۹	۶۲۱۱,۲۲	۶۰۷۶,۶۲	

چگالی و مدول الاستیسیته مصالح به ترتیب برابر kg/cm^3 و $0,0078$ و $2,1 \times 10^6$ می‌باشند. پارامترهای کنترل الگوریتم ژنتیک شامل تعداد جمعیت برابر 100 ، احتمال جهش مساوی $0,004$ و احتمال پیوند برابر 1 ، فرض گردیدند. تنش مجاز فشاری و کششی به ترتیب برابر با 1242 kg/cm^2 و 1656 kg/cm^2 در نظر گرفته شد. بهینه‌یابی در دو حالت احتمال خرابی مجاز برابر با 10^{-4} (خرابی از نظر مقاومت) و 10^{-2} (خرابی از نظر قابلیت بهره بردار) [۱۹] و دو حالت مختلف برای ضرایب پراکندگی بار و نیز تنش تسلیم (چهار حالت ذکر شده در جدول ۷) محاسبه گردید. گروه‌بندی اعضای سازه در جدول ۸ نشان داده شده است. پس از بهینه نمودن، مقادیر بهینه سطح مقطع و وزن در جدول ۹ بیان شده است.



شکل ۷- خرابی ۲۵ عضوی سه بعدی (اندازه‌ها برحسب سانتیمتر می‌باشند)

جدول ۹- مقادیر بهینه اعضاء (واحد سطح مقطع cm^2 می باشد)

وزن بهینه (kg)	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	عضو
۱۱۸.۹	۱.۰	۰.۵	۲.۵	۱.۸	۰.۷	۰.۱	۰.۸	۱.۴	۴.۰	۳.۰	۲.۹	۳.۷	۲.۷	A
۱۴۵.۰	۱.۵	۱.۳	۳.۶	۱.۵	۰.۶	۰.۵	۱.۰	۰.۵	۴.۵	۴.۱	۳.۳	۳.۶	۳.۰	B
۳۴۸.۰	۱۱.۴	۶.۱	۷.۱	۱.۹	۲.۸۳	۲.۱	۱.۱	۲.۴	۹.۱	۷.۰	۶.۱	۵.۳	۹.۹	C
۴۷۸.۵	۱۵.۲	۹.۸	۷.۳	۲.۸	۴.۴	۳.۹	۲.۰	۳.۰	۱۰.۴	۷.۷	۸.۱	۱۱.۹	۱۰.۵	D

این چلیک 9.62 m بوده و در تمامی گره‌های آزاد خود بار 10 ton را در جهت Z تحمل می‌نماید. همانطور که در شکل (۷) ملاحظه می‌شود، این سازه چلیکی فاقد هر نوع تکیه گاه میانی است و تنها در امتداد لبه‌ها روی تکیه گاه قرار دارد. با توجه به اصول تحلیل سازه‌های متقارن، تنها یک چهارم این سازه تحت فرآیند بهینه‌سازی قرار می‌گیرد. این نتایج به راحتی قابل تعمیم به کل سازه می‌باشد. موقعیت اعضاء سازه یک چهارم در شکل (۸) نشان داده شده است. در این بررسی، متغیرهای احتمال اندیشانه شامل تنش تسلیم و بارهای وارده در نظر گرفته شدند. این متغیرها دارای تابع چگالی احتمال نرمال و از نظر آماری مستقل از یکدیگر می‌باشند. خصوصیات آماری این متغیرها به شرح زیر می‌باشد: میانگین و ضریب پراکندگی تنش تسلیم اعضاء به ترتیب برابر با 2400 kg/cm^2 و 0.1 و میانگین و ضریب پراکندگی تنش نهایی اعضاء به ترتیب برابر با 3700 kg/cm^2 و 0.1 می‌باشد. میانگین و ضریب پراکندگی تمامی بارهای وارده به خرپا برابر با 1000 kg و 0.1 می‌باشد. احتمال خرابی مجاز کل سازه در این بررسی 10^{-5} است. در این مثال، متغیرهای طراحی (سطح مقاطع اعضاء) از نوع نیمه گسسته فرض شدند و طول کروموزوم طراحی برای این روش برابر با 12 منظور گردیده است. پارامترهای کنترل الگوریتم ژنتیک شامل تعداد جمعیت برابر 100 ، احتمال جهش مساوی 0.04 و احتمال پیوند برابر 1 ، فرض گردیدند. چگالی و مدول الاستیسیته مصالح به ترتیب برابر $7.84 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^3$ و $2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ می‌باشد.

گروه بندی اعضاء سازه در شکل (۷) و جدول ۱۲ مشخص گردیده است. از آنجا که نیروی محوری اعضاء ۱، ۲ و ۳ برابر صفر می‌باشد، این اعضاء در جدول ۱۲ درج نگردیدند. مقادیر بهینه سطح مقطع اعضاء نیز در جدول ۱۲ بیان شده است. وزن بهینه سازه تحت محدودیت احتمال خرابی کل سازه 4846 kg محاسبه گردیده است.

براساس جدول ۱۱، با 3.3 تا 4 برابر شدن ضرایب پراکندگی، وزن بهینه سازه 193 تا 230 درصد افزایش می‌یابد. بررسی انجام شده نشان می‌دهد که وزن بهینه سازه حساسیت بسیار بیشتری نسبت به تغییرات ضریب پراکندگی در مقایسه با احتمال خرابی مجاز دارد.

جدول ۱۰- تغییرات وزن برحسب نسبت احتمال خرابی مجاز

حالت	نسبت احتمال خرابی	کاهش وزن (%)
B	۱۰۰	۱۸
A		
D	۱۰۰	۲۷
C		

$$\frac{W_C - W_D}{W_D} * 100 \text{ یا } \frac{W_A - W_B}{W_B} * 100 \quad -2 \quad \frac{P_{FC}}{P_{FD}} \text{ یا } \frac{P_{FA}}{P_{FB}} \quad -1$$

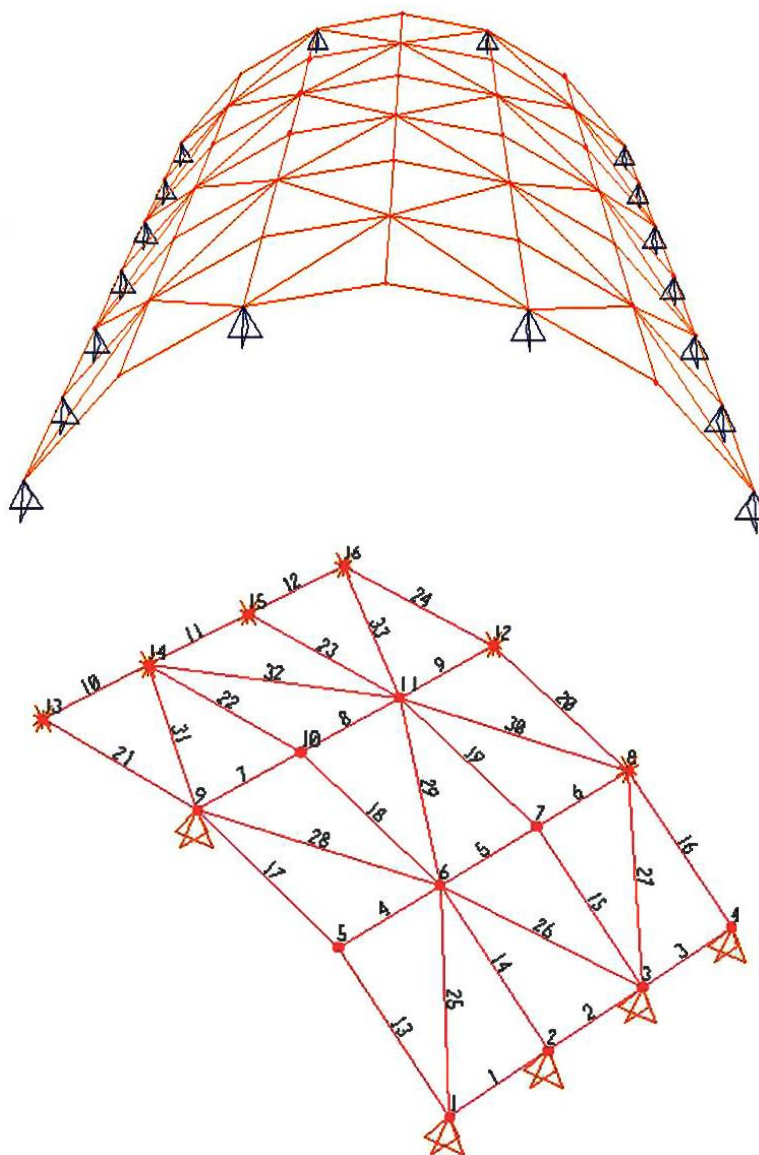
جدول ۱۱- تغییرات وزن برحسب نسبت ضرایب پراکندگی

حالت	نسبت ضریب پراکندگی تنش تسلیم	نسبت ضریب پراکندگی بار	افزایش وزن (%)
A			۱۹۳
C	۳.۳	۴	
B			۲۳۰
D	۳.۳	۴	

$$\frac{W_D - W_B}{W_B} * 100 \text{ یا } \frac{W_C - W_A}{W_A} * 100 \quad -2 \quad \frac{CV_D}{CV_B} \text{ یا } \frac{CV_C}{CV_A} \quad -1$$

۳-۳- سازه فضاکار چلیکی ۱۲۰ عضوی

در این مثال سازه فضاکار چلیکی 120 عضوی فولادی بهینه شده و وزن کمینه سازه تحت محدودیت احتمال خرابی کل سازه (که مجموع احتمال خرابی اعضاء فرض می‌شود) محاسبه می‌گردد. همچنین مقایسه بین دو روش بهینه‌یابی احتمال اندیشانه و یقین اندیشانه در سازه‌های فضاکار نیز در این مثال بررسی می‌شود. تمامی اتصالات این سازه، مفصلی هستند. این چلیک در امتداد محور X دارای ۷ تکیه گاه ساده در هر لبه بوده و در این راستا، سازه دارای بعد 42 m می‌باشد. در جهت Y نیز هر لبه دارای دو تکیه گاه و بعد سازه در این راستا 51.65 m می‌باشد. همچنین ارتفاع



شکل ۸- سازه فضاکار از نوع چلیکی با ۱۲۰ عضو و موقعیت سازه یک چهارم

نزدیک شود، وزن بهینه 3500 kg محاسبه می گردد در این شرایط از آنجائی که طبق نتایج این تحقیق، این دو عامل اثرات مخالف هم بر وزن سازه دارند بنابراین با کاهش آنها به سمت صفر، اولی باعث افزایش و دومی باعث کاهش وزن شده و به تدریج وزن در این حالت به همگرایی میل می نماید. جهت مقایسه، بهینه یابی با قیود یقین اندیشانه تنش در اعضا نیز انجام گرفته است. در این حالت وزن بهینه 3200 kg محاسبه می گردد. اختلاف وزن بهینه در دو حالت فوق حدود ۹٪ می باشد. شکل (۸) نمودارهای همگرایی سازه یک چهارم را در حالت های فوق نشان می دهد. براساس این شکل در حالت بهینه یابی با قیود یقین اندیشانه، همگرایی به سرعت و پس از ۲۰ نسل رخ داده است، در حالی که در حالت قیود احتمال اندیشانه همگرایی به تدریج و

جدول ۱۲- نتایج بهینه یابی سازه فضاکار چلیکی ۱۲۰ عضوی (واحد سطح مقطع cm^2 می باشد)

اعضاء	۷,۶,۵,۴	۱۱,۱۰,۹,۸	۲۱,۱۳	۲۳,۲۲,۱۹, ۱۸,۱۴
سطح مقطع	۱۳,۵	۱۶,۶	۳,۱۶	۰,۵
اعضاء	۲۴,۲۰,۱۷, ۱۶,۱۵	۳۳,۳۱,۲۹, ۲۷,۲۵	۲۸,۲۶	۳۲,۳۰,۱۲
سطح مقطع	۰,۵	۳,۱۳	۳,۶۵	۱۲,۹

اگر احتمال خرابی مجاز سیستم و ضرایب پراکندگی متغیرهای احتمال اندیشانه به ترتیب برابر با 10^{-16} و 10^{-4} در نظر گرفته شوند، یعنی با در نظر گرفتن مقادیر نزدیک به صفر، حالت احتمال اندیشانه به سمت حالت یقین اندیشانه

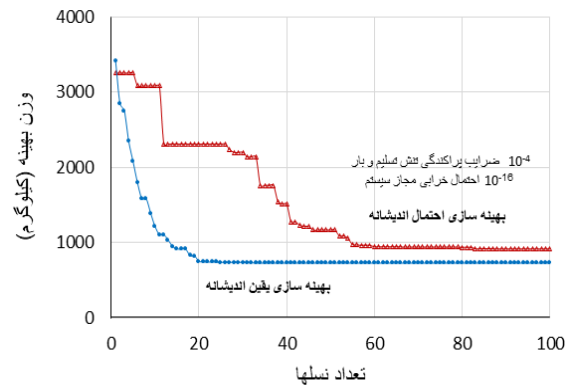
فرمولهای پیشنهادی این تحقیق نتایج قابل قبولی ارائه داده است.

- در حالت بهینه یابی یقین اندیشانه، طی فرآیند بهینه یابی مقدار مشخصی برای وزن بهینه بدست آمد ولی در بهینه یابی احتمال اندیشانه با افزایش ضرایب پراکندگی و یا کاهش احتمال خرابی مجاز وزن بهینه سازه افزایش می یابد. مطابق نتایج حاصله وزن بهینه حساسیت بسیار بیشتری نسبت به تغییرات ضریب پراکندگی در مقایسه با احتمال خرابی مجاز دارد.
- با افزایش احتمال خرابی مجاز سیستم خراب، وزن بهینه آن کاهش می یابد. این کاهش وزن در ابتدا با شیب بسیار سریعی رخ داده و سپس روند آن به کندی کاهش می گردد و به تدریج میل به همگرایی پیدا می کند.
- اگر احتمال خرابی مجاز سیستم و ضرایب پراکندگی بار و تنش تسلیم مقادیر نزدیک به صفر در نظر گرفته شوند، یعنی حالت احتمال اندیشانه به سمت حالت یقین اندیشانه میل نماید، از آنجائی که طبق نتایج این تحقیق، این دو عامل اثرات مخالف هم بر وزن سازه دارند بنابراین با کاهش آنها به سمت صفر، اولی باعث افزایش و دومی باعث کاهش وزن شده و به تدریج وزن در این حالت به همگرایی میل می نماید. اگر حالت ذکر شده فوق با بهینه یابی با قیود یقین اندیشانه تنش در اعضا مقایسه گردد، اختلاف وزن بهینه در این دو حالت اختلاف چندانی نخواهد داشت. البته در حالت بهینه یابی با قیود یقین اندیشانه، همگرایی به سرعت و در بهینه یابی با قیود احتمال اندیشانه همگرایی به تدریج رخ می دهد.

پس از ۸۵ نسل حاصل گردید. جدول ۱۳ سطح مقاطع بهینه را در دو حالت نشان می دهد.

جدول ۱۳- سطح مقاطع بهینه در حالت یقین اندیشانه (حالت ۱) و احتمال اندیشانه (حالت ۲) در سازه فضاکار چلیکی ۱۲۰ عضوی (واحد سطح مقطع cm^2 می باشد)

گروه بندی	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
حالت ۱	۸,۴	۱۰,۵	۲,۴	۰,۹	۰,۴	۰,۲	۰,۴	۱۲
حالت ۲	۹,۶	۱۲,۵	۳,۹	۰,۵	۰,۴	۰,۲	۰,۸	۱۲,۹



شکل ۸- تاریخچه تعداد نسلها برحسب وزن سازه

۴-نتایج

در این تحقیق بهینه یابی مبتنی بر نظریه قابلیت اعتماد در سازه های خرابایی و فضاکار به کمک الگوریتم ژنتیک انجام شد. مهمترین نتایج حاصل از این تحقیق به شرح ذیل می باشد:

- باتوجه به اهمیت بحث کمانش در سازه های خرابایی و فضاکار، در این پژوهش از شکل احتمال اندیشانه روابط مربوط به کمانش در بهینه یابی مبتنی بر نظریه قابلیت اعتماد استفاده گردید. مقایسه نتایج این تحقیق با سایر پژوهشهای انجام شده در این حوزه نشان می دهد که

مراجع

- [1] A. S. Nowak, and K. R. Collins, "Reliability of structures", Taylor and Francis Group, 2nd Edition, 2012.
- [2] M. R. Ghasemi, and M. Yousefi, "Reliability-based optimization of steel frame structures using modified genetic algorithms", Asian journal of civil engineering (Building and housing), Vol. 12, No.4, 2011, pp.449-475.
- [3] V. Ho-Huu, T. Nguyen-Thoi, L. Le-Anh, and T. Nguyen-Trang, "An effective reliability-based improved constrained differential evolution for reliability-based design optimization of truss structures", Advances in Engineering Software, Vol. 92, 2016, pp. 48-56.
- [4] V. Ho-Huu, D. Duong-Gia, T. Vo-Duy, T. Le-Duc, and T. Nguyen-Thoi, "An efficient combination of multi-objective evolutionary optimization and reliability analysis for reliability-based design optimization of truss structures", Expert Systems With Applications, Vol. 102, 2018, pp. 262-272.

- [۵] بهروز کشته گر و محمود میری، "ارائه روشی جدید برای ارزیابی قابلیت اعتماد سازه ها"، نشریه مدلسازی در مهندسی، دوره ۱۲، شماره ۳۶، بهار ۱۳۹۳، صفحه ۲۹-۴۲.
- [6] H. Karadeniz, V. Toğan, and T. Vrouwenvelder, "An integrated reliability-based design optimization of offshore towers", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 94, 2009, pp. 1510-1516.
- [7] M. Zaeimi, and A. Ghoddosain, "System reliability based design optimization of truss structures with interval variables", *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, Vol. 64, No. 1, 2020, pp. 42-59.
- [8] Z. Meng, H. Zhou, H. Hu, and B. Keshtegar, "Enhanced sequential approximate programming using second order reliability method for accurate and efficient structural reliability-based design optimization", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 62, 2018, pp. 562-579.
- [9] Y. Aoues, and A. Chateauneuf, "Reliability-based optimization of structural systems by adaptive target safety - Application to RC frames", *Structural Safety*, Vol. 30, 2008, pp. 144-161.
- [۱۰] علی قدوسیان، امین نیکوبین و مجتبی ریاحی وزواری، "بهینه سازی اندازه و شکل سازه های خرابا با روش بهینه سازی الگوریتم مثلث بهینه گر"، نشریه مدلسازی در مهندسی، دوره ۱۴، شماره ۴۶، پاییز ۱۳۹۵، صفحه ۵۱-۶۰.
- [۱۱] سید روح الله موسوی، محمد رضا قاسمی و سعید فراهی شهری، "بهینه سازی گسسته سازه های خرابایی توسط روش مبتنی بر حساسیت سنجی، تقسیم بندی و تجدید حیات"، نشریه مدلسازی در مهندسی، دوره ۱۷، شماره ۵۷، تابستان ۱۳۹۸، صفحه ۱۲۷-۱۴۶.
- [12] V. Toğan, and A. Daloglu, "Reliability and reliability-based design optimization", *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, Vol. 30, 2006, pp. 237-249.
- [13] M. Shayanfar, R. Abbasnia, and A. Khodam, "Development of a GA-based method for reliability-based optimization of structures with discrete and continuous design variables using OpenSees and Tcl", *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 90, 2014, pp. 61-73.
- [14] K. B. Hamedani, and V. R. Kalatjari, "Structural system reliability-based optimization of truss structures using genetic algorithm", *International journal of optimization in civil engineering*, Vol. 8, No. 4, 2018, pp. 565-586.
- [۱۵] علی حدیدی و سیمین چیت ساز، "طراحی بهینه سازه های فضاکار مبتنی بر نظریه قابلیت اطمینان با استفاده از الگوریتم ژنتیک"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، جلد ۴۸، شماره ۱، بهار ۱۳۹۷، صفحه ۱۳-۲۲.
- [16] A. C. C. Lemonge, J. P. G. Carvalho, P. H. Hallak, and D. E. C. Vargas, "Multi-objective truss structural optimization considering natural frequencies of vibration and global stability", *Expert Systems With Applications*, Vol. 165, 2021.
- [17] ANSI/AISC 360-16, "Specification for Structural Steel Buildings", American Institute of Steel Construction, Chicago, IL, 16th Edition, 2019.
- [18] Aluminum Association, *Aluminum Design Manual*, Washington D.C, 2020.
- [۱۹] علی کاوه و وحیدرضا کلات جاری، "نظریه قابلیت اعتماد و کاربرد آن در مهندسی سازه"، ۱۳۷۳، دانشگاه علم و صنعت ایران.
- [20] C. A. Cornell, "Bounds on the reliability of structural systems", *Journal of Structural Division, ASCE*, Vol. 93, No. 1, 1967, pp 171-200.
- [21] S. N. Sivanandan, and S. N. Deepa, "Introduction to genetic algorithms", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [22] L. Sahoo, A. K. Bhunia, and P.K. Kapur, "Genetic algorithm based multi-objective reliability optimization in interval environment", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 62, 2012, pp 152-160.
- [۲۳] محمدرضا قاسمی و محمدرضا مستخدمین حسینی، "بهینه سازی سازه های فضاکار با در نظر گرفتن احتمال خرابی اعضا و گره ها به کمک الگوریتم وراثتی اصلاح شده"، نشریه دانشکده فنی، دوره ۴۲، شماره ۴، مرداد ۱۳۸۷، صفحه ۴۷۷-۴۸۵.