Journal of Structural and Construction Engineering, 8(Special Issue 1), 2021, pp. 333-344

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

Reliability-Based Design Optimization of Structures using Firefly Algorithm

Ali Khodam [1]*, Muhammad Saeid Farajzadeh [2], Mohsenali Shayanfar[3]

1- Assistant Professor, Department of Civil and Geomatics Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran
2 -Graduate Student, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
3 -Associate Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT

In structural engineering, it is vital to design structures by providing pre-defined performance objectives economically. Reliability-based design optimization (RBDO) is looking for the best balance between safety and cost, by considering uncertainties in structural parameters and loading conditions. In recent decades, several methods have been used to solve RBDO problem. However, most of these methods suffer from high computational cost of solving the problem as a big challenge. In this paper, weighted simulation method, one of the newest and most effective methods for simulation-based reliability assessment methods, has been used for reliability analysis and evaluation of probabilistic constraints. The advantages of this method are a significant reduction in the computational cost and the proper accuracy of the final results. For minimizing the objective function, which is the weight of structure in this paper, Firefly algorithm (FA) is utilized. The FA is a stochastic metaheuristic approach based on the idealized behavior of the flashing characteristics of fireflies. In FA, the flashing light can be formulated in way that it is associated with the objective function to be minimized. Results of the numerical examples including a reinforced concrete beam and a cantilever beam indicate that using the proposed method leads to the optimum design solutions slightly better (1%) than other methods in the literature without violating reliability constraints.

ARTICLE INFO

Receive Date: 04 October 2019
Revise Date: 24 March 2020
Accept Date: 02 April 2020

Keywords:
Structural Reliability
Reliability-Based Design Optimization
Firefly Algorithm
Weighted Average Simulation Method
Probability of failure of structures

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.203929.1962

*Corresponding author: Ali Khodam
Email address: khoddam@arakut.ac.ir

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)
www.jsce.ir

طراحی بهینه بر مبنای قابلیت اعتماد سازه ها با استفاده از الگوریتم کرم شب تاب

علی خدام[1*]، محمدسعید فرج زاده[2]، محسنعلی شایانفر[3]

۱-استادیار، گروه عمران-نقشه برداری، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

۲- کارشناسی ارشد عمران گرایش زلزله، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۳- دانشیار، گروه عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

چکیده

در مهندسی سازه تامین ایمنی سازه ها با رعایت ملاحظات اقتصادی از اهداف بسیار حیاتی می باشد. طراحی بهینه بر مبنای قابلیت اعتماد سازه در جستجوی یافتن بهترین توازن ما بین ایمنی و هزینه – با درنظر گرفتن عدم قطعیت های سازه و بار– می باشد. در دهه های اخیر روش های متعددی برای حل این نوع مسایل مورد استفاده قرار گرفته، که هزینه‌ی محاسباتی بالا و فرآیند دشوار یافتن پاسخ، بزرگترین چالش پیش روی این روش ها می باشد. در این پژوهش روش شبیه سازی وزنی که یکی از روش های نوین و موثر برای محاسبه شاخص قابلیت اطمینان و احتمال خرابی سازه می باشد، برای تحلیل قابلیت اعتماد مورد استفاده قرار گرفته است. از مزایای این روش کاهش قابل توجه هزینه‌ی محاسباتی در عین دقت مناسب نتایج نهایی می باشد. برای بهینه سازی نیز با در نظر گرفتن حداقل شاخص قابلیت اعتماد به عنوان یک قید، به منظور کمینه کردن تابع هدف که در این پژوهش میزان مصالح مصرفی (وزن سازه) در نظر گرفته شده، از الگوریتم کرم شب تاب استفاده شده است. الگوریتم کرم شب تاب از جمله الگوریتم های فراابتکاری تصادفی پرکاربرد و الهام گرفته شده از طبیعت می باشد که در آن شدت نور متصاعد شده از حشرات شب تاب با تابع هدف ارتباط داده می شود. نتایج مثال های عددی شامل طراحی بهینه مبتنی بر قابلیت اعتماد یک تیر بتن مسلح و یک تیر طره فولادی و مقایسه آنها با نتایج سایر روش های متناظر گویای این است که با استفاده از این روش ضمن حفظ سطح قابلیت اعتماد مورد نظر، به نسبت سایر روش های مقایسه شده وزن سازه و میزان مصالح مصرفی نیز (حدود ۱٪) کاهش پیدا کرده است.

کلمات کلیدی: قابلیت اعتماد سازه ها، طراحی بهینه بر مبنای قابلیت اعتماد سازه ها، الگوریتم کرم شب تاب، شبیه سازی وزنی، احتمال خرابی سازه ها

سابقه مقاله:					
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	شناسه دیجیتال:
۱۳۹۸/۰۷/۱۲	۱۳۹۹/۰۱/۰۵	۱۳۹۹/۰۱/۱۴	۱۳۹۹/۰۱/۱۴	۱۴۰۰/۰۳/۳۰	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.203929.1962
					doi: 10.22065/jsce.2020.203929.1962

*نویسنده مسئول: علی خدام

پست الکترونیکی: khoddam@arakut.ac.ir

۱- مقدمه

در سالهای اخیر، تحلیل قابلیت اعتماد سازه‌ها به علت توانایی در نظر گرفتن عدم قطعیت ها در روند تحلیل و طراحی سازه‌ها مورد توجه زیادی قرار گرفته است. آیین نامه های طراحی مهندسی با برخی روشهای ساده تحلیل قابلیت اعتماد از مدت ها قبل تنظیم و کالیبره شده اند. بر همین اساس طراحان به صورت ضمنی عدم قطعیت در پارامترها و متغیرهای طراحی را با استفاده از ضرایب ایمنی کالیبره شده حاصل از تحلیل قابلیت اعتماد در نظر می گیرند. در تعدادی از تحقیقات اخیر تلاش شده است بیشتر به سمت یکپارچه سازی قابلیت اعتماد سازه در برابر مکانیزم‌های مختلف خرابی در فرایند طراحی حرکت کنند. برخی از این رویکردها هنوز از محدوده‌ی تحقیقات فراتر نرفته اند با این وجود پیشرفت هایی در این حوزه صورت گرفته است.

در نظر گرفتن عدم قطعیت ها در روند طراحی سازه‌ها نیازمند توسعه‌ی روش های موثر محاسباتی است تا مهندسین را برای رسیدن به طراحی های بهینه و قابل اعتماد یاری کند[۱].

حل مسایل طراحی بهینه سازه‌ها مبتنی بر قابلیت اعتماد یک روند پیچیده دارد که نیازمند اعمال روش های کارآمد محاسباتی موثر قابلیت اعتماد می باشد. روش مرتبه اول قابلیت اعتماد یکی از روش های بسیار پرکاربرد تحلیل قابلیت اعتماد تا به امروز است که بصورت گسترده استفاده می شود[۲]. این روش تابع عملکرد را با یک خط یا صفحه مماس بر سطح گسیختگی در محتمل ترین نقطه خرابی (نقطه طراحی) که نقطه ای با بیشترین میزان احتمال خرابی است، تخمین می زند. دقت روش مرتبه اول قابلیت اعتماد در مواردی که تابع عملکرد در اطراف نقطه طراحی خطی نیست، زیر سوال می رود[۳] . برای ارتقا دقت روش مرتبه اول قابلیت اعتماد، فیسلر و همکاران [۴] روش مرتبه دوم قابلیت اعتماد را معرفی کردند که تابع عملکرد را با سطح درجه دوم در همسایگی محتمل ترین نقطه تخمین می زند. اگرچه روش مرتبه دوم قابلیت اعتماد شناخته شده ترین روش ارتقا یافته‌ی مرتبه اول قابلیت اعتماد است، با این حال روش های متعدد دیگری نیز در دهه های گذشته پیشنهاد شده اند. هر کدام از این روش ها دارای محدودیت هایی هستند. به عنوان مثال دقت روش مرتبه دوم قابلیت اعتماد در مواردی که تابع عملکرد دارای درجه غیرخطی بالا باشد و یا زمانی که در مساله تعداد زیادی متغیرهای تصادفی وجود دارد و نیز در مواردی که احتمال خرابی بسیار کوچک است، قابل قبول نخواهد بود [۵].

روش های مبتنی بر نمونه گیری مانند شبیه سازی مونت کارلو و نمونه گیری با اهمیت می‌توانند برای ارزیابی قابلیت اعتماد مورد استفاده قرار گیرد. با این وجود اگر ارزیابی تابع عملکرد زمان بر بوده و یا اگر احتمال خرابی خیلی کوچک باشد، نمونه گیری نیز غیرعملی یا بسیار زمانبر می‌باشد[۶].

بسیاری از کاربردهای مهندسی عملی دارای توابع عملکردی هستند که محاسبات پیچیده و زمان‌بری دارند. از آنجاییکه باید برای تمام نمونه های تولید شده تابع عملکرد ارزیابی شود، هزینه محاسباتی روش های مبتنی بر نمونه گیری باعث عدم استفاده آنها در بسیاری از کاربردهای مهندسی می‌شوند[۷].

راشکی و همکاران [۸] یک روش حل تقریبی بر پایه شبیه‌سازی را برای محاسبه احتمال خرابی و یافتن محتمل‌ترین نقطه خرابی پیشنهاد کرده‌اند. در مقاله حاضر، این روش به عنوان روش شبیه سازی وزنی معرفی می شود. فرضیه‌ی این روش آن است که نمونه های یکنواخت توزیع شده ابتدا در یک فضای طراحی برای تمام متغیرهای تصادفی تولید می‌شوند و احتمال ارزش تراکم به عنوان شاخص وزن در هر نمونه اعمال می‌شود. سپس با تقسیم مجموع شاخص های وزنی نمونه های واقع شده در ناحیه‌ی خرابی بر مجموع شاخص های وزنی تمامی نمونه ها، احتمال خرابی بدست می‌آید. این روش در تخمین مقدارهای کوچک احتمال خرابی بسیار موثر بوده و به نمونه های بسیار کمی برای بدست آوردن مقدار شاخص قابلیت اعتماد نیازمند است [۱۱-۹].

هدف یک طراحی مهندسی رسیدن به ایمنی کافی با حداقل هزینه و همچنین بدست آوردن کامل الزمات عملکردی مورد نیاز است[۱۲] . به‌وسیله بهینه‌سازی می توان با تامین سطح ایمنی از پیش تعیین شده و ارضای محدودیت‌های عملکردی به اقتصادی‌ترین سیستم دست یافت[۱۳]. استفاده از الگوریتم های فراابتکاری یکی از روش های پرکاربرد برای حل مسایل مهندسی با هدف کمینه کردن

تابع هدف است. در این پژوهش از الگوریتم کرم شب‌تاب برای حداقل کردن تابع هدف (وزن سازه) استفاده شده است. الگوریتم کرم شب تاب از جمله الگوریتم‌های فراابتکاری پرکاربرد در مهندسی می باشد که با هدف حل مسائل بهینه‌سازی ریاضی طراحی شده است و نخستین‌بار این الگوریتم توسط ژین‌شه یانگ معرفی شد [۱۴]. این الگوریتم در ردیف الگوریتم های فراابتکاری و مبتنی بر روش‌های هوش جمعی ذرات می‌باشد که با الهام از طبیعت آفرینش این موجود، اقدام به پیاده‌سازی آن در بهینه‌سازی نموده که با توجه به اساس این روش‌ها جواب‌های قابل قبول و بهینه‌ای بدست می‌دهد. کرم‌های شب‌تاب در طبیعت بصورت دسته‌جمعی زندگی می‌کنند و همواره کرم کم نورتر به سمت کرم پرنورتر حرکت می‌کند.

روش‌های بهینه‌سازی معمولا با شناسایی یک توازن مناسب بین ایمنی و اقتصاد، برای انجام این کار استفاده می شوند [۱۵]. در روش های بهینه سازی قطعی عدم قطعیت ها در روند بهینه‌سازی در نظر گرفته نمی‌شوند. بنابراین ممکن است این روش ها به طراحی های غیر قابل اعتماد منجر شود [۱۶].

بهینه‌سازی بر مبنای قابلیت اعتماد یک ساختار مناسب برای طراحی بهینه‌ی سازه‌ها با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها توسط ضوابط قابلیت اعتماد در فرایند بهینه‌سازی است. در بهینه‌سازی مبتنی بر قابلیت اعتماد معمولا یک تعدادی از قیدهای مساله و یا تابع هدف شامل پارامترهای احتمالاتی می‌باشند[۱۷].

ادغام روش های قابلیت اعتماد بر مبنای شبیه‌سازی در روند حل مسایل طراحی بهینه سازه‌ها مبتنی بر قابلیت اعتماد بطور قابل‌توجهی هزینه محاسبات برای حل مساله را افزایش می‌دهد. این مسئله زمانی که این روش‌ها برای مسایل مهندسی واقعی با مقیاس بزرگ مورد استفاده قرار می‌گیرند-در جاییکه ارزیابی تابع عملکرد خیلی زمانبر است- معمولا دارای کارائی مناسبی نمی‌باشند. طبق توضیحات ارائه شده، اصلی‌ترین چالش روش‌های موجود شامل پیچیدگی محاسبات و یا هزینه‌ی محاسباتی بالا می‌باشد. راشکی و همکاران [۸] روش موثر شبیه‌سازی وزنی را برای مواجه با این چالش‌ها معرفی کردند. این روش علاوه بر توانمندی بالا در ارزیابی قیدهای احتمالاتی غیرخطی، قادر به تخمین محتمل‌ترین نقطه خرابی نیز می‌باشد. همچنین به‌علت استفاده از تعداد کم نمونه‌ها (نقاط) شبیه‌سازی برای محاسبه احتمال خرابی، به نسبت روش‌های دیگر از هزینه‌ی محاسباتی پایینی برخوردار می‌باشد. از این رو در این مقاله، با ترکیب روش شبیه‌سازی وزنی و روش بهینه‌سازی کرم شب‌تاب، یک روش کارا برای حل مساله طراحی مبتنی بر قابلیت اعتماد ارائه شده است. کارایی و دقت روش پیشنهادی توسط دو مثال عددی مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته است.

۲- روش شبیه سازی وزنی

روش شبیه سازی میانگین وزنی یکی از جدیدترین روش‌های توانمند در حل مسایل قابلیت اعتماد سازه است[۱۸]. راشکی و همکاران [۸] این روش مبتنی بر شبیه‌سازی را برای تخمین احتمال خرابی و محتمل‌ترین نقطه خرابی، با عنوان روش شبیه‌سازی وزنی پیشنهاد کردند. روش شبیه سازی وزنی یک روش بر مبنای شبیه‌سازی برای تعیین احتمال خرابی با استفاده از شاخص وزن برای نمونه‌های تولید شده است. در این روش، برای مجزا کردن نمونه‌های موجود در ناحیه‌ی خرابی از نمونه‌های واقع در ناحیه امن، از یک تابع شاخص استفاده می‌کنند. فرضیه‌ی روش این است که نمونه‌های یکنواخت توزیع شده ابتدا در یک فضای طراحی برای تمام متغیرهای تصادفی تولید می‌شوند و مقدار تابع چگالی احتمال به عنوان شاخص وزن در هر نمونه اعمال می‌شود و در نهایت با تقسیم مجموع شاخص‌های وزن برای نمونه‌های واقع شده در ناحیه‌ی خرابی بر مجموع شاخص‌های وزن برای همه‌ی نمونه‌ها، احتمال خرابی بدست می‌آید. این روش در تخمین مقادیر کوچک احتمال شکست، بسیار موثر است و با تولید تعداد کمی از نمونه‌های تصادفی تولید شده قادر به تخمین میزان احتمال خرابی یا شاخص قابلیت اعتماد می‌باشد. گام‌های عملی برای انجام شبیه‌سازی وزنی، به شرح زیر می‌باشد.

اولین گام در روش شبیه‌سازی وزنی تعیین بازه مناسب برای هر متغیر تصادفی در مساله است. یکی از روش‌های پیشنهاد شده تعیین این بازه‌ها در مقاله راشکی و همکاران[۸] استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو برای تولید نمونه‌ها از هر متغیر تصادفی است. حداقل و حداکثر مقادیر نمونه‌های تولید شده از یک متغیر تصادفی به ترتیب به عنوان نقاط پایینی و بالایی برای بازه‌های متغیر تصادفی استفاده می‌شود. تعداد نمونه‌های مورد نیاز تولید شده در روش مونت کارلو می‌تواند با فرض اولیه‌ی یک احتمال خرابی و تعداد نمونه‌های مورد نیاز

برای تعیین این احتمال خرابی فرض شده، تعیین شود. راشکی نشان داد که روش شبیه‌سازی وزنی می‌تواند همان نتایج را حتی اگر فاصله نمونه‌ی تولید شده تغییر کند بدست آورد. توجه به این شرط ضروریست که افزایش طول فاصله نیازمند تولید تعداد بیشتری از نمونه های تصادفی برای پوشش فضای طراحی و رسیدن به نتایج دقیق می‌باشد.

گام دوم تولید نمونه‌ها در یک فضای متغیر تصادفی برای همه‌ی متغیرهای دارای عدم‌قطعیت است. برای تولید نمونه‌های تصادفی در فاصله‌های معین از توزیع یکنواخت استفاده می‌شود. سپس شاخص وزن برای هر نمونه تولید شده، تعیین می‌شود. تولید تابع‌های چگالی احتمال متغیرها برای محاسبه شاخص وزن نمونه‌ها به صورت زیر اعمال می‌شود.

$$W(i) = \prod_{j=1}^{s} f_j(i) \qquad (۱)$$

در اینجا، W(i) شاخص وزن نمونه iام ، s تعداد متغیرهای تصادفی، و f_j تابع چگالی احتمال برای j امین متغیر تصادفی می‌باشد. معادله (۱) تنها برای متغیرهای تصادفی مستقل قابل کاربرد است. برای مواردی که متغیرهای تصادفی وابسته هستند، می‌توان از تابع چگالی احتمال توأم برای محاسبه شاخص وزن نمونه i ام استفاده کرد.

سپس یک تابع شاخص I(i) برای نمونه i ، با توجه به مقدار تابع عملکرد g_i (با هدف جداسازی و شمارش نمونه‌های واقع در ناحیه خرابی و ناحیه سلامت) به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\text{I(i)=} \begin{cases} 1 & \text{if} \quad g_i < 0 \\ 0 & \text{if} \quad g_i \geq 0 \end{cases} \qquad (۲)$$

در نهایت، احتمال شکست Pf بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_f = \frac{\sum_{i=1}^{N} I(i) \cdot W(i)}{\sum_{i=1}^{N} W(i)} \qquad (۳)$$

که در آن N تعداد نمونه‌ها است.

۳- الگوریتم کرم شب تاب

الگوریتم کرم شب‌تاب بر مبنای جذب شدن حشرات به حشرات پرنورتر کار می‌کند. به عبارت دیگر، این الگوریتم با استفاده از هوش جمعی حشرات (با فرض اینکه حشرات مستقر در نقاط بهتر، درخشش و جذابیت بیشتری دارند) در جستجوی یافتن نقطه بهینه می‌باشد.

سه قانون برای ساده‌سازی و فرمول‌بندی این الگوریتم به کار می‌رود. که به صورت خلاصه در زیر آورده شده است:

قانون اول بیانگر این است که هر کرم شب تاب باید به سمت حشره‌ی پرنورتر حرکت نماید. قانون دوم تناسب جذابیت با روشنی را بیان می‌کند. از سوی دیگر شدت نور با مجذور عکس فاصله از منبع متناسب است، این بدان معنی است که حشره‌ی با نور کمتر به سوی حشره با نور بیشتر حرکت می‌نماید. اگر یک عنصر مخصوص در میان سایر عناصر پرنورترین عضو باشد، بصورت تصادفی حرکت می‌کند. سومین قانون بیانگر تناسب شدت نور یک کرم شب تاب با تابع هدف می‌باشد.

در مورد این الگوریتم باید تابع هدفی برای کد نمودن میزان جذابیت عناصر در نظر گرفته شود که بدین منظور ما از سه تابع ارزیابی معروف برای بررسی کیفیت الگوریتم FA استفاده نموده‌ایم. این توابع هدف در واقع بیانگر شدت و میزان نور یک عنصر در یک نقطه‌ی مشخص در فضای جستجو می‌باشند((F(x)=I(x)) . در پیاده سازی این الگوریتم در مورد شدت نور یعنی مقدار تابع باید در نظر داشته باشیم که محیط قادر به جذب مقداری از نور می‌باشد، یعنی اینکه مقدار نور در منبع بیشتر از مقدار نور در نقطه ای با فاصله از منبع به نظر می‌رسد، در نتیجه میزان جذابیت یک عنصر یک کمیت نسبی است که در فرمول با مقدار β در نظر گرفته شده است. می دانیم که

شدت نور متناسب با معکوس فاصله است که بصورت (۴) آورده شده است.

$$I(r) = \frac{I_0}{1+r^2} \quad (۴)$$

که در اینجا I_0بیانگر میزان نور در منبع می باشد. ثابت ۱ در مخرج به دلیل جلوگیری از بوجود آمدن مقدار بینهایت در مقدار نور صفر در منبع اضافه شده است. حال می توانیم جذابیت را به عنوان تابعی از شدت در نظر بگیریم که معادله آن به صورت معادله (۵) خلاصه می‌شود.

$$\beta(r) = \frac{\beta_0}{1+r^2} \quad (۵)$$

معادله (۵) را می توان به صورت معادله گوسی (۶) نوشت:

$$\beta(r) = \beta_0 e^{-r^2} \quad (۶)$$

حرکت عناصر بر اساس جذابیت صورت می‌پذیرد: هنگامی که عنصر j از عنصر i جذاب تر است حرکت با فرمول (۷) انجام می‌پذیرد.

$$X_i = X_i + \beta_0 exp^{-r2}(X_j - X_i) + \propto(\text{rand} - \frac{1}{2}) \quad (۷)$$

قسمت سوم این فرمول مربوط به حرکت تصادفی می باشد که عددی که در این قسمت قرار می‌گیرد ما بین صفر و یک خواهد بود. فاصله‌ی میان عناصر برای حرکت به صورت فاصله‌ی اقلیدسی اندازه‌گیری می‌شود.

۴- مثال ها و بررسی نتایج

مثال ۱: طرح بهینه یک تیر بتنی مسلح

در این مثال تحلیل قابلیت اعتماد برای یک تیر بتنی مسلح با انجام می‌شود [۷] تابع حالت حدی تیر به صورت رابطه (۸) ارایه شده است.

$$G(A_S,F_Y,F_C,Q)=A_S \cdot F_Y \cdot d - 0.59\frac{(As.Fy)}{Fc.b} - Q \quad (۸)$$

که A_S ، F_Y ، F_c و Q به ترتیب مساحت سطح مقطع تیر بتنی، مقاومت تسلیم فولاد، مقاومت فشاری بتن و لنگر کلی تولید شده بوسیله‌ی بار می‌باشد. در این مثال مساله طراحی بهینه مبتنی بر قابلیت اعتماد به صورت رابطه (۹) تعریف شده است.

$$\begin{aligned} &\text{Find} && W=\{b.d\} \\ &\text{Minimize:} && C=b*d \\ &\text{Subjected to: } Pf\,[G_i(w) \geq 0] \leq \Phi(-\beta^T); && \beta^T=2.40 \end{aligned} \quad (۹)$$

پارامترهای آماری این متغیر ها در جدول ۱ آورده شده است.

جدول۱ : پارامترهای متغیرهای تصادفی در مثال۱

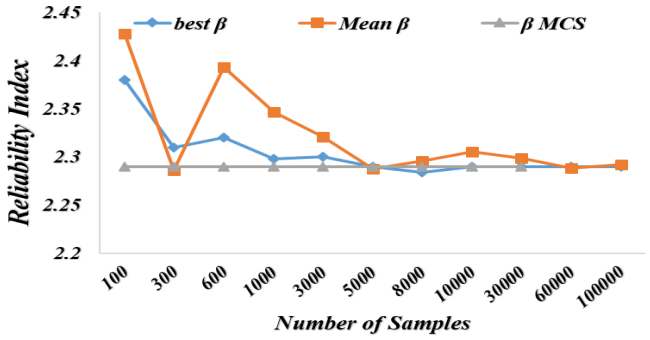
Random Variable	Distribution	Mean	C.O.V
A_s	Normal	4.08	0.02
F_Y	Normal	44	0.105
F_c	Normal	3.12	0.14
Q	Normal	2052	0.12

همچنین نتایج تحلیل قابلیت اعتماد با روشهای FORM ، SORM ، MCS و روش پیشنهادی WASM در جدول ۲ ارایه شده است.

جدول۲ : نتایج قابلیت اعتماد مثال ۱

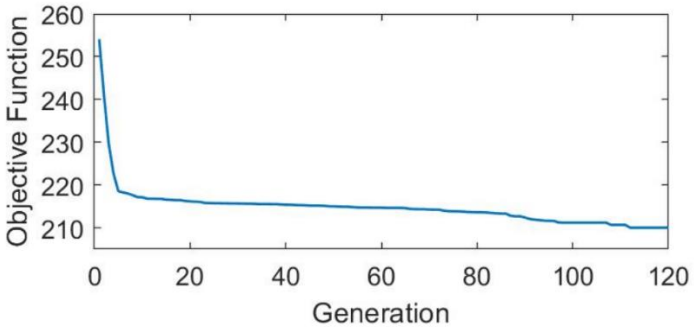
Method	Reliability index	Number of samples
FORM	2.43	-
SORM	2.39	-
MCS	2.40	10^7
WASM	2.41	10^4

در این مثال برای صحت سنجی و بررسی دقت پاسخ به دست آمده توسط روش پیشنهادی، از روش مونت کارلو با ۱۰^۷ نمونه استفاده شده و نتایج روش مونت کارلو با روش شبیه سازی وزنی مقایسه شده است. در شکل (۱) جزئیات بهترین پاسخ و میانگین پاسخ برای روش شبیه سازی وزنی در مقایسه با پاسخ نهایی روش مونت کارلو نشان داده شده است. طبق اطلاعات آورده شده در جدول (۲) و همچنین شکل (۱)، در روش مونت کارلو با استفاده از ۱۰^۷ نمونه به شاخص قابلیت اعتماد ۲/۴۰ دست پیدا کرده ایم در حالیکه در روش شبیه سازی وزنی در بهترین حالت با ۱۰۰۰۰ نمونه و در حالت میانگین با استفاده از ۶۰۰۰۰ نمونه به مقدار ۲/۴۱ برای قابلیت اعتماد هدف دست پیدا کرده‌ایم.



شکل۱ : نتایج شبیه سازی روش شبیه سازی وزنی با تعداد نمونه‌های متفاوت برای مثال۱.

شکل ۲ نشان دهنده سرعت همگرایی در فرآیند بهینه سازی می باشد که کمترین مقدار برای تابع هدف پس از بهینه‌سازی در این مثال مقدار ۲۱۰/۰۱ به ازای مقادیر متغیرهای طراحی برابر (۱۹/۵و۱۰/۷۷)=(b,d) با شاخص قابلیت اعتماد ۲/۴۱ بدست آمده است.



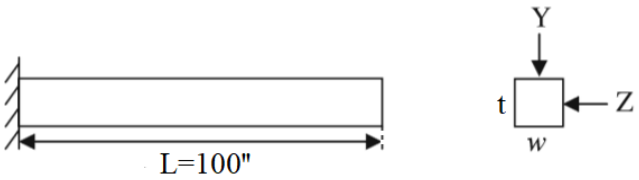
شکل۲ : نمودار همگرایی بهینه‌سازی مبتنی بر قابلیت اعتماد برای مثال۱.

مثال۲ : طراحی بهینه یک تیر طره

در اینجا برای اثبات دقت روش پیشنهادی یک تیر طره در شکل (۳) به طول "L=۱۰۰ و عرض (w) و ارتفاع (t) مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین توابع حالت حدی این مثال به صورت (۱۰) و (۱۱) تعریف می‌شوند:

$$G_1(w,t,X,Y,Z) = \left(\frac{600}{wt^2}Y + \frac{600}{w^2t}Z\right) - X_0 \qquad (۱۰)$$

$$G_2(w,t,Y,Z,E) = \frac{2L^3}{Ewt}\sqrt{\left(\frac{Y}{t}\right)^2 + \left(\frac{Z}{w}\right)^2} - D_0 \qquad (۱۱)$$



شکل۳ : تیر طره تحت بارگذاری عرضی.

تعریف مساله بهینه‌سازی مبتنی بر قابلیت اعتماد برای تیر طره در شکل(۳) به صورت رابطه زیر می‌باشد:

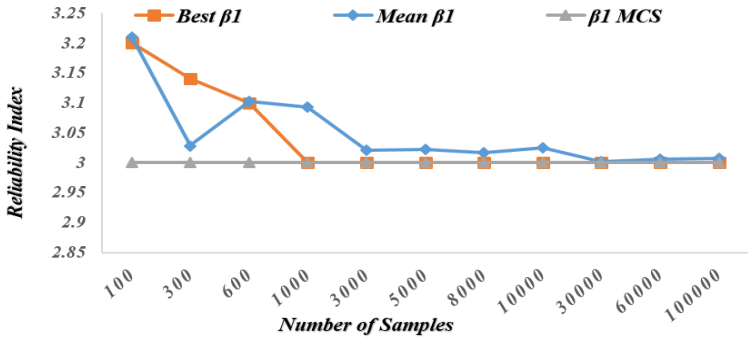
$$\begin{aligned} &\text{Find} && d=\{w.t\} \\ &\text{Minimize:} && C=w.t \\ &\text{Subjected to: } Pf\,[G_i(d) \geq 0] \leq \Phi(-\beta^T);\ i=1,2;\ \beta^T=3 && (۱۲) \end{aligned}$$

که در رابطه فوق C تابع هدف مساله بهینه‌سازی است که در واقع برابر با سطح مقطع تیر می‌باشد و عرض (w) و ارتفاع (t) تیر نیز متغیرهای طراحی مساله بهینه‌سازی می‌باشند. مساله دارای چهار متغیر تصادفی شامل مقاومت تسلیم (X)، بار قائم (Y)، بار افقی (Z) و مدول الاستیسیته (E) با مشخصات آماری مطابق جدول (۳) می‌باشد.

جدول۳ : پارامترهای آماری متغیرهای تصادفی مثال ۲

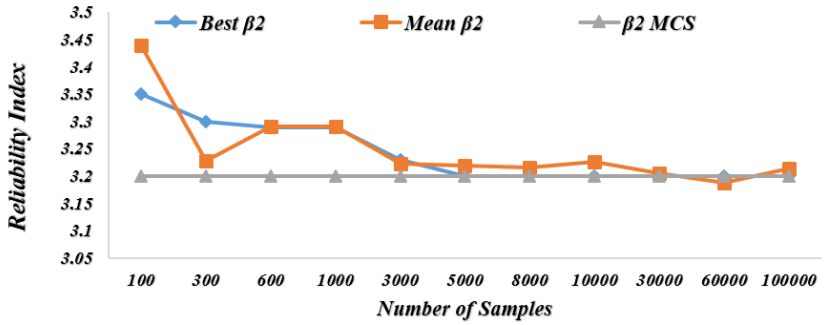
Standard deviation	Mean	Distribution	Random variable
2000	40000	Normal	X(psi)
100	1000	Normal	Y(lb)
100	500	Normal	Y(lb)
$1.45x10^6$	$29x10^6$	Normal	E(psi)

پس از حل مساله بهینه‌سازی به روش پیشنهادی، مقادیر شاخص قابلیت اعتماد ($\beta1$ و $\beta2$) برای جواب بهینه طراحی متناظر با توابع حالت حدی G1 و G2 با استفاده از روش شبیه سازی وزنی با تعداد نمونه‌های مختلف در مقایسه با روش شبیه سازی مونت کارلو با 10^7 نمونه، به ترتیب در شکل های ۴ و ۵ نمایش داده شده است.



شکل۴ : نتایج شبیه‌سازی روش شبیه سازی وزنی با تعداد نمونه‌های متفاوت برای تابع G_1 مثال۲.

در این مثال نیز برای صحت سنجی و بررسی دقت پاسخ به دست آمده از روش پیشنهادی، از روش مونت کارلو با 10^7 نمونه استفاده شده و نتایج روش مونت کارلو با روش شبیه سازی وزنی مقایسه شده است. همانطور که در شکل ۴ قابل مشاهده است مقدار $\beta1$ برای تابع حالت حدی G1 با استفاده از روش شبیه سازی مونت کارلو با 10^7 نمونه به مقدار ۳ رسیده است. در شکل ۴ بهترین و میانگین پاسخ ها برای شاخص قابلیت اعتماد با استفاده از روش پیشنهادی رسم شده که مشاهده می‌شود در حالت میانگین پاسخ ها با ۳۰۰۰ نمونه با اختلاف بسیار کمی پاسخ نهایی قابل تخمین است و با ۳۰۰۰۰ نمونه مقدار شاخص قابلیت اعتماد کاملا به مقدار پاسخ نهایی مونت کارلو منطبق شده است. همچنین برای حالت بهترین پاسخ با استفاده روش شبیه سازی وزنی با تعداد ۱۰۰۰ نمونه پاسخ به مقدار دقیق و نهایی روش مونت کارلو منطبق شده است.



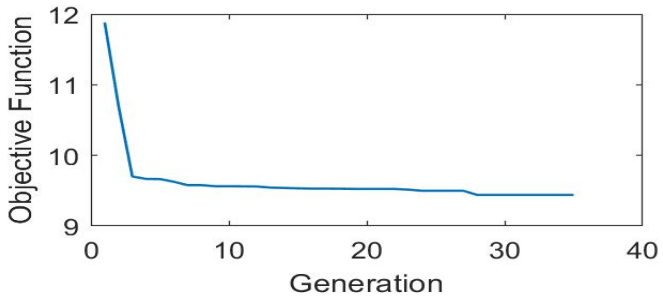
شکل۵ : نتایج شبیه‌سازی روش شبیه‌سازی وزنی با تعداد نمونه‌های متفاوت برای تابع G_2 مثال ۲.

همچنین در شکل ۵ نتایج روش شبیه‌سازی وزنی با نتایج روش مونت کارلو برای تابع حالت حدی G2 مقایسه شده است. برای تابع G2 در روش مونت کارلو با استفاده از $۱۰^۷$ نمونه به مقدار شاخص قابلیت اعتماد ۳/۲ دست پیدا کرده ایم که با استفاده از روش شبیه سازی وزنی این مقدار برای بهترین و میانگین پاسخ ها با استفاده از به ترتیب ۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ نمونه بدست آمده است که با توجه به خطای بسیار کم در یافتن پاسخ نهایی و همچنین کاهش قابل توجه در زمان شبیه‌سازی نشان دهنده‌ی مزیت این روش برای تخمین مقدار شاخص قابلیت اعتماد می‌باشد.

در شکل ۶ به منظور بررسی سرعت همگرایی در فرآیند بهینه سازی با استفاده از الگوریتم کرم شب تاب تغییر مقادیر تابع هدف با افزایش تعداد نسل‌ها نمایش داده شده است. شکل ۶ نشان دهنده سرعت همگرایی بالا در رسیدن به تابع هدف می باشد همچنین مقادیر نهایی متغیرهای طراحی، تابع هدف و شاخص قابلیت اعتماد در جدول ۴ آورده شده و با روش‌های مشابه مقایسه شده است.

جدول۴ : مقایسه تابع هدف و شاخص قابلیت اعتماد برای روش‌های مختلف طراحی بهینه مبتنی بر قابلیت اعتماد

Reliability (β_1, β_2) Index	Objective function	Random variable	Method
(3,3.9)	C=9.5203	d=(2.4573,3.8743)	وو و همکاران [۲۰]
(2.31,2.82)	C=9.5156	d=(2.1812,4.3625)	لی و همکاران [۱۳]
(3.52,2.82)	C=9.5233	d=(2.4575,3.8752)	صفائیان و همکاران [۱۹]
(3.10,3.29)	C=9.4346	d=(3.4485,2.7373)	روش پیشنهادی



شکل۶ : نمودار همگرایی بهینه‌سازی بر مبنای قابلیت اعتماد برای مثال۲.

در جدول ۴ خلاصه نتایج بهینه سازی برای شاخص قابلیت اعتماد هدف $\beta^T=$ ۳ و"D0= ۲/۵ نمایش داده شده است. برای این مثال در مرجع [۱۳] مقادیر (w،t)=(۲/۱۸۱۲، ۴/۳۶۲۵) برای نقاط طراحی و مقدار تابع هدف برابر C=۹/۵۱۵۶ بدست آمده است. در جدول ۴ قابل مشاهده است که اگرچه این روش باعث کاهش تابع هدف به نسبت مرجع [۲۰] شده است ولی سطح ایمنی هدف را ارضا نکرده است. همچنین در مرجع [۱۹] با بهبود سطح ایمنی و ارضای مقدار شاخص قابلیت اعتماد هدف به مقادیر (۳/۸۷۵۲، w،t)=(۲/۴۵۷۵) برای نقاط طراحی و مقدار بهینه تابع هدف C=۹/۵۲۳۳ دست یافته است. اما در پژوهش حاضر با استفاده از روش شبیه سازی وزنی و همچنین استفاده از الگوریتم کرم شب تاب به مقادیر (w،t)=(۳/۴۴۸۵، ۲/۷۳۷۳) برای نقاط طراحی و مقدار تابع بهینه برابر C=۹/۴۳۹۶ دست پیدا کرده‌ایم، درحالیکه مقادیر β_1=۳/۰۱۰۰ و β_2=۳/۲۹۹۷ برای شاخص قابلیت اعتماد این مثال بدست آمده که هر دو مقدار شاخص قابلیت اعتماد هدف را ارضا کرده است.

پس از شرح روش‌های استفاده شده برای بهینه‌سازی و همچنین تحلیل قابلیت اعتماد با ارائه مثال های عددی و بررسی و بحث بر روی نتایج آنها، کارایی روش معرفی شده را بررسی کردیم که نتایج مثال‌های عددی و مقایسه‌ی آنها با سایر روش‌ها نشان دهنده‌ی کارایی و دقت مناسب و همچنین استفاده از تعداد نمونه های به مراتب کمتر در فرآیند شبیه سازی برای تخمین شاخص قابلیت اعتماد می باشد که تاثیر قابل توجهی در افزایش سرعت در فرآیند محاسبات و در نتیجه کاهش زمان در روند طراحی با روش پیشنهادی می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله برای بهینه‌سازی سازه از الگوریتم کرم شب‌تاب، که از الگوریتم‌های الهام گرفته شده از طبیعت می‌باشد استفاده شده است. این الگوریتم برای یافتن نقاط بهینه، از هوش جمعی حشرات (با فرض اینکه حشرات مستقر در نقاط بهتر، درخشش و جذابیت بیشتری دارند) استفاده می‌کند. از مزایای عمده‌ی این الگوریتم بهینه‌سازی، سرعت همگرایی بالا بوده که می‌تواند باعث کاهش زمان فرآیند بهینه‌سازی شود. همچنین برای تحلیل قابلیت اعتماد روش شبیه‌سازی وزنی مورد استفاده قرار گرفته است. این روش علی‌رغم هزینه محاسباتی پایین دقت مناسبی در تخمین شاخص قابلیت اعتماد دارد. به نسبت روش شبیه سازی مونت کارلو، روش شبیه سازی وزنی با وجود استفاده از تعداد نمونه‌های شبیه‌سازی کمتر قادر به محاسبه میزان شاخص قابلیت اعتماد مورد نیاز در مساله می باشد.

در مقاله‌ی حاضر با ترکیب روش شبیه‌سازی وزنی با الگوریتم کرم شب‌تاب یک روش جدید به منظور بررسی و حل مسایل بهینه‌سازی طراحی بر مبنای قابلیت اعتماد ارائه شده است. در این روش ضمن حداقل کردن تابع هدف (در اینجا وزن سازه) حداقل سطح ایمنی قابل قبول (شاخص قابلیت اعتماد هدف) نیز با در نظر گرفتن عدم قطعیت ها تأمین شده است. برای اثبات دقت و کارایی این روش دو مثال عددی در این مقاله مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نهایی شاخص قابلیت اعتماد با روش شبیه سازی مونت کارلو مقایسه شد.

پس از مقایسه نتایج دو مثال بررسی شده با روش های مشابه، نشان داده شد که با ترکیب این دو روش با هدف انجام طراحی بهینه مبتنی بر قابلیت اعتماد، با وجود رعایت سطح ایمنی تعیین شده (شاخص قابلیت اعتماد هدف) به مقدار تابع هدف مطلوب‌تری نسبت به روش‌های مقایسه شده دست یافته‌ایم. همچنین به علت استفاده از روش شبیه‌سازی وزنی با توجه به استفاده از تعداد نمونه‌های کمتر برای محاسبه شاخص قابلیت اعتماد در این روش به نسبت روش مونت کارلو، حجم محاسبات و در نتیجه زمان نهایی مورد نیاز برای طراحی بهینه مبتنی بر قابلیت اعتماد کاهش قابل توجه‌ای پیدا کرده است.

مراجع

[1] Li, F., Wu, T., Badiru, A., Hu, M.and Soni, S. (2013). A single-loop deterministic method for reliability-based design optimization. *Engineering Optimization*,45,435–58

[2] Ditlevsen, O.and Madsen, H. (1996). *Structural reliability methods*. New York: Wiley.

[3] Choi, S.K., Grandhi, R. and Canfield, R.A. (2006). *Reliability-based structural design*. Springer Science & Business Media.

[4] Fiessler, B., Neumann, HJ. and Rackwitz, R. (1979). Quadratic limit states in structural reliability. *Journal of Engineering Mechanics*,105, 661–76.
[5] Zhao, YG. and Lu, ZH. (2007). Fourth-moment standardization for structural reliability assessment. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 133,916–24
[6] Melchers, RE. (1999). *Structural reliability analysis and prediction*. Chichester. John Wiley and Sons.
[7] Nowak, AS. and Collins, KR. (2000). *Reliability of structures*. New York: McGraw-Hill.
[8] Rashki, M., Miri, M. and Moghaddam, MA. (2012). A new efficient simulation method to approximate the probability of failure and most probable point. *Structural Safety*, 39, 22–29.
[9] Rashki, M., Miri, M. and Moghaddam, MA. (2014). Closure to A new efficient simulation method to approximate the probability of failure and most probable point. *Structural Safety*, 46, 15–6.
[10] Luo, X., Lu, Z. and Xu, X. (2014). A new efficient simulation method to approximate the probability of failure and most probable point. *Structural Safety*, 46,13–4.
[11] Pu, Y., Das, PK. and Faulkner, D. (1997). A strategy for reliability-based optimization. *Engineering Structures*, 19, 276–82.
[12] Arora, JS. (2004). *Introduction to optimum design*. 2nd ed. New York: Elsevier Academic Press.
[13] Li, F., Wu, T., Hu, M. and Dong, J. (2010). An Accurate Penalty-Based Approach for Reliability-Based Design Optimization. *Research in Engineering Design*, 21, 87-98.
[14] Yang, XS. (2008). *Nature-inspired metaheuristic algorithm.* UK.Luniver Press.
[15] Youn, B.and Choi, K. (2004). An investigation of nonlinearity of reliability-based design optimization approaches. *Journal of Mechanical Design*, 126, 403–411.
[16] Shayanfar, M., Abbasnia, R. and Khodam, A. (2014). 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*, 90, 61-73.
[17] Abbasnia, R., Shayanfar, M. and Khodam, A. (2014). Reliability-based design optimization of structural systems using a hybrid genetic algorithm. *Structural Engineering and Mechanics*, 52(6), 1099-1120.
[18] Okasha, N. (2016). An improved weighted average simulation approach for solving reliability-based analysis and design optimization problems. *Structural Safety*, 47-55
[19] Safaeian Hamzeh Kolaei, N., Miri, M .and Rashki, M. (2017). Reliability-Based Design Optimization of Structures using Modified Weighted Simulation Method. *Journal of Coastal and Marine Engineering*, 35 (2) ,1-22
[20] Wu, Y. T., Shin, Y., Sues, R .and Cesare, M. (2001). Safety-Factor Based Approach for Probability Based Design Optimization. In:*19th AIAA Applied Aerodynamics Conference, Fluid Dynamics and Collocated Conferences: Anaheim*, CA, U.S.A; 1522.