

بهینه‌سازی طراحی بر پایه قابلیت اعتماد قاب بتن آرمه با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات و رویکرد سنجه عملکرد

محمدرضا سبقی اسگد شهر

گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران.
m_safiyi@aut.ac.ir

چکیده

با توجه به وجود عدم قطعیت در مشخصات سازه‌های بتن آرمه و همچنین بارهای وارد بر آنها، لازم است بهینه‌سازی طراحی آنها بر اساس تحلیل قابلیت اعتماد انجام شود. در این مقاله یک روش جدید طراحی بر اساس قابلیت اعتماد یک قاب بتن آرمه با استفاده از رویکرد سنجه عملکرد و الگوریتم ازدحام ذرات ارائه شده است. تابع هدف مسأله بهینه‌سازی کمینه کردن وزن یا هزینه ساخت قاب تحت قیود تمبیتی و احتمالاتی است. قیود تمبیتی شامل کنواپذ آیین‌نامه‌های مقاومتی و سرویس‌دهی هستند. قیود احتمالاتی نیز تضمین کننده حداقل شاخص قابلیت اعتماد است. در روش پیشنهادی، برای حل کلی مسأله بهینه‌سازی از الگوریتم ازدحام ذرات استفاده شده و برای کنترل قیود احتمالاتی از رویکرد سنجه عملکرد استفاده شده است. روش پیشنهاد شده با نتایج یک تحقیق دیگر در زمینه بهینه‌سازی طراحی لرزه‌ای بر اساس قابلیت اعتماد قاب بتن آرمه اعتبارسنجی شده است. نتایج تحلیل بر روی مطالعه موردی نشان داد که در مقایسه با رویکرد شاخص قابلیت اعتماد و الگوریتم ژنتیک، روش پیشنهاد شده در این مقاله با کاهش زمان تحلیل از ۱۰ ساعت به حدود نیم ساعت به نتایج بهینه مشابهی رسیده است که دلالت بر کارایی مناسب روش پیشنهادی دارد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی طراحی بر پایه قابلیت اعتماد، قاب بتن آرمه، رویکرد سنجه عملکرد، الگوریتم ازدحام ذرات.

Reliability-based Design Optimization of Reinforced Concrete Frame using Particle Swarm Algorithm and Performance Measure Approach

ABSTRACT

Due to the uncertainty in the characteristics of reinforced concrete (RC) structures as well as the loads on them, it is necessary to optimize their design based on reliability analysis. In this paper, a new reliability-based design optimization (RBDO) method is presented based on the performance measure approach (PMA) and particle swarm algorithm (PSA). The objective function of the optimization problem is to minimize the weight or construction cost under deterministic and probabilistic constraints. Deterministic constraints include the code rules of strength and serviceability. Probabilistic constraints guarantee a minimum reliability index. In the proposed method, PSA is used to solve the optimization problem and PMA is used to control the probabilistic constraint. The proposed method is validated by the results of another research in the field of RBDO. The results of the analysis on a case study showed that in comparison with the reliability index approach (RIA) and genetic algorithm (GA), the method proposed in this paper has reduced the analysis time from 10 hours to about half an hour, indicating the proper performance of the proposed method.

KEYWORDS

Reliability-based Design Optimization, Reinforced Concrete Frame, Performance Measure Approach, Particle Swarm Algorithm.

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۶

تاریخ آخرین اصلاحات: ۱۴۰۱/۰۵/۱۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۰۴

بهینه‌سازی سازه‌های بتنی می‌تواند بر اساس قیود ترکیبی تینسی و احتمالاتی انجام گیرد. قیود تینسی معمولاً شامل محدودیت‌های آیین‌نامه‌ای در زمینه نیروهای داخلی و تغییر مکان‌های جانبی سازه هستند. به علت وجود عدم قطعیت در پارامترهای سازه، قیود احتمالاتی در مساله بهینه‌سازی در نظر گرفته شده و تحلیل قابلیت اعتماد سازه حین فرآیند بهینه‌سازی انجام می‌گیرد. به این رویکرد بهینه‌سازی طراحی بر اساس قابلیت اعتماد گفته می‌شود که منجر به طراحی ایمن از سازه با ملاحظه عدم قطعیت‌های موجود می‌شود. در واقع هدف در این رویکرد تأمین یک شاخص قابلیت اعتماد حداقل است که متناظر با یک احتمال خرابی خواهد بود [۱].

در این راستا بهینه‌سازی طراحی بر اساس قابلیت اعتماد قاب‌های بتن‌آرمه با استفاده از اجسی هدف تطبیقی انجام یافته است [۲]. بهینه‌سازی طراحی عملکردی بر پایه قابلیت اعتماد برای مقاوم‌سازی ساختمان‌های بتن‌آرمه با کامپیوترهای پلگیری مسلح شده با الیاف فرمول‌بندی شده است [۳]. عدم قطعیت در پارامترهای سازه‌ای می‌تواند ناشی از روال در طول زمان مصالح و با پدیده‌های محیطی مانند خوردگی باشد. در این راستا بهینه‌سازی قاب بتن‌آرمه با در نظر گرفتن روال ناشی از خوردگی کلرایدی با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام یافته است [۴].

اخیراً روش‌های مختلفی برای حل مساله بهینه‌سازی طراحی بر اساس قابلیت اعتماد ارائه شده و در کاربردهای مختلف پکار گرفته شده‌اند. در این راستا یک روش مزه‌وج^۱ کارا برای بهینه‌سازی چند هدفه بر پایه قابلیت اعتماد سازه‌های خرابایی با قیود استاتیکی و دینامیکی پیشنهاد شده است [۵]. بهینه‌سازی طراحی بر اساس قابلیت اعتماد با استفاده از مدل‌های جایگزین تطبیقی^۲ و روش ارزیابی قابلیت اعتماد و بهینه‌سازی متوالی اصلاح شده^۳ بر پایه نمونه‌گیری اضمیت^۴ انجام شده است [۶]. مجموعه متغیرهای تلوری الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای طراحی بر اساس قابلیت اعتماد سیستمی سازه‌های خرابایی بررسی شده است [۷]. بهینه‌سازی طراحی بر اساس قابلیت اعتماد سازه‌های درشت بازبختی مورد استفاده در محیط‌های خورنده انجام یافته است [۸]. یک رویکرد برای بهینه‌سازی طراحی بر اساس قابلیت اعتماد سازه‌های ساخته شده با آلیاژ حافظه‌دار پیشنهاد شده است [۹]. در تحلیلی دیگر طراحی بهینه بر مبنای قابلیت اعتماد سازه‌ها با استفاده از الگوریتم نرم شب‌تاب انجام شده است [۱۰]. یک چارچوب جدید برای بهینه‌سازی طراحی بر اساس قابلیت اعتماد با استفاده از الگوریتم‌های فرانتالمنی^۵ ارائه شده است [۱۱]. مروری بر بهینه‌سازی طراحی بر اساس قابلیت اعتماد سیستم‌های سازه‌ای تحت

^۱Coupled^۲Adaptive Surrogate Model^۳Modified Sequential Optimization and Reliability Assessment^۴Importance Sampling^۵Metaheuristics

تحریک تصادفی نیز انجام شده است [۱۲].

رویکرد شاخص قابلیت اعتماد^۶ و رویکرد سنجه عملکرد^۷ به عنوان دو رویکرد متفاوت در ارزیابی قیود احتمالاتی در مساله بهینه‌سازی طراحی بر اساس قابلیت اعتماد شناخته می‌شوند [۱۳]. مطالعات نشان داده است که رویکرد سنجه عملکرد در ارزیابی قیود احتمالاتی غیرفعال کارا تر می‌باشد. در مقابل، رویکرد شاخص قابلیت اعتماد ممکن است که منجر به واگرایی و ایجاد نقطه تکین بخصوص در صورت استفاده از متغیرهای تصادفی با توزیع پکتواخت و گمبیل شده، اگرچه این رویکرد در ارزیابی قیود احتمالاتی فعال کارا تر خواهد بود. در کل می‌توان گفت که کارایی و پایداری در حل مساله بهینه‌سازی طراحی بر اساس قابلیت اعتماد می‌تواند با هر دو رویکرد سنجه عملکرد و شاخص قابلیت اعتماد بستند آید که بستگی به وضعیت حاشیه‌های تخمینی قیود احتمالاتی در تکرارهای متوالی مساله بهینه‌سازی طراحی بر اساس قابلیت اعتماد دارد [۱۴ و ۱۵]. در این راستا بهینه‌سازی طراحی بر اساس قابلیت اعتماد قاب بتن‌آرمه با استفاده از رویکرد شاخص قابلیت اعتماد و الگوریتم ژنتیک انجام شده است [۱۶]. با توجه به غیرفعال بودن قیود احتمالاتی در تحقیق فوق، روش شاخص قابلیت اعتماد کارایی مناسبی از نظر زمان تحلیل از خود نشان نداده است.

برای حل کلی مساله بهینه‌سازی طراحی بر اساس قابلیت اعتماد روش‌های مختلفی وجود دارد. روش‌های بر پایه گرادیان نیازمند تابع هدف تحلیلی صریح بوده و قیود مساله چند خصوصیات ریاضی مشخص مانند مشتق‌پذیری، بیوستگی و تحدب را بایستی ارضا نمایند. روش‌های بهینه‌سازی بر پایه گرادیان امکان دارد در نقاط بهینه محلی حین فرآیند بهینه‌سازی درگیر شوند و همچنین عملکرد آنها وابسته به مقادیر اولیه متغیرهای طراحی است [۱۷]. این در حالی است که روش‌های بهینه‌سازی تکاملی بر پایه جمعیت مانند الگوریتم ژنتیک و ازدحام جمعیت محدودیت‌های فوق را نداشته و قادر به یافتن نقاط بهینه کلی هستند [۱۸]. همچنین این روش‌ها در حالت متغیرهای طراحی گسسته به روش‌های بر پایه گرادیان ترجیح داده می‌شوند [۱۹]. با توجه به این که در مساله بهینه‌سازی قاب بتن‌آرمه مورد مطالعه در این مقاله، متغیرهای طراحی گسسته بوده و تابع هدف به صورت تابع تک‌متغی از آنها است، روش‌های تکاملی بر پایه جمعیت نسبت به روش‌های بر پایه گرادیان (رجحیت خواهند داشت.

در راستای توکنیجیات داده شده در مورد استفاده از الگوریتم‌های تکاملی بر پایه جمعیت برای حل مساله بهینه‌سازی طراحی بر اساس قابلیت اعتماد، یک روش بر پایه الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی طراحی بر اساس قابلیت اعتماد سازه‌ها با متغیرهای طراحی گسسته و بیوسته با استفاده از نرم‌افزار OpenSees و زبان برنامه‌نویسی TCL ارائه شده است [۲۰]. از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی طراحی بر اساس قابلیت اعتماد قاب‌های بتن‌آرمه استفاده شده است [۱۶]. از الگوریتم ازدحام ذرات نیز برای ارزیابی قابلیت اعتماد سازه‌ای استفاده شده است [۲۱]. رویکرد ترکیبی روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات و

^۶Reliability Index Approach^۷Performance Measure Approach

که در آن S مقاطع مورد انتخاب تیرها و ستون‌ها، W وزن قاب IX متغیرهای تصادفی، M_{max} و M_{min} ترتیب لنگر بیشینه و لنگر مقاوم تیر i ، V_{max} و V_{min} ترتیب برش بیشینه و مقاومت برشی تیر i ، N_{max} و N_{min} کشش تیرها، N_{max} و N_{min} کشش تیرهای محوری بیشینه و مقاومت محوری ستون i ، V_{max} و V_{min} ترتیب برش بیشینه و مقاومت برشی ستون i ، N_{max} کشش ستون‌ها، β شاخص قابلیت اعتماد قاب و β_{eq} شاخص قابلیت اعتماد مورد نیاز قاب است. در طول روند بهینه‌سازی ابعاد تیرها و ستون‌ها، مدول الاستیسیته فولاد و بتن، بارهای مرده، زنده و زلزله بارمترهای متغیر در روند بهینه‌سازی هستند. در مقابل مقاومت فشاری مشخصه بتن و مقاومت تسلیم آرماتور در طول روند بهینه‌سازی و در ارزیابی قیود تعیینی ثابت در نظر گرفته شده‌اند.

۱-۲- قیود تعیینی

در طول فرآیند بهینه‌سازی بر حسب مقاطع انتخاب شده برای تیرها و ستون‌ها، مقادیر ابعادی متغیرهای تصادفی و همچنین بر اساس نیروهای وارده به قاب، لنگر بیشینه تیرها (M_{max})، برش بیشینه تیرها (V_{max}) نیروی محوری بیشینه ستون‌ها (N_{max}) و برش بیشینه ستون‌ها (V_{max}) از تحلیل قاب بدست می‌آید. قیود تعیینی به گونه‌ای تنظیم شده‌اند که لنگر بیشینه هر یک از تیرها باستانی از لنگر مقاوم متناظر آنها (M_r) کمتر باشد و به همین ترتیب نیروی محوری بیشینه ستون‌ها باستانی از مقاومت محوری ستون‌ها (N_r) کمتر باشد. همچنین برش بیشینه در تیرها و ستون‌ها باستانی از مقاومت برشی متناظر با مقاطع تیرها (V_r) و ستون‌ها (V_r) کمتر باشند. در صورت انتخاب مقاطع مستطیلی برای تیرها و قرار دادن آرماتورها تنها در دو وجه بالایی و پایینی مقطع و طراحی مقاطع برای جاری شدن میلگردهای کششی و جاری نشدن میلگردهای فشاری، لنگر مقاوم تیرها از رابطه زیر قابل تعیین خواهد بود [۲۸]:

$$M_r = 0.85\phi_f f_y ab(d - \frac{a}{2}) + \phi_s A_s' f_y (d - d')$$

که در آن ϕ_f و ϕ_s به ترتیب ترتیب کاهش مقاومت بتن و فولاد، Ω مقاومت فشاری مشخصه بتن، Ω عمق بلوک فشاری، Ω عرض مقطع، M گشتاور دورترین تار فشاری به ترتیب از میلگردهای کششی و فشاری، A_s' سطح مقطع آرماتورهای فشاری و Ω کشش موجود در میلگردهای فشاری است. در ناحیه کنترل کشش ($\epsilon > \epsilon_y$) مقاومت محوری ستون‌ها نیز از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$N_r = 0.85\phi_f f_c A_g \left[\left(1 - \frac{\epsilon'}{\epsilon_c}\right) + \sqrt{\left(1 - \frac{\epsilon'}{\epsilon_c}\right)^2 + 2\rho m \left(1 - \frac{d'}{d}\right)} \right]$$

در ناحیه کنترل فشار ($\epsilon < \epsilon_y$) نیز مقاومت محوری ستون‌ها از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$N_r = \frac{\phi_f f_c A_g}{\frac{2.87\epsilon h}{d^2} + 1.18} + \frac{\phi_s A_s' f_y}{\frac{\epsilon}{d - d'} + 0.5}$$

که ϵ خروج از مرکزیت بار محوری، ϵ_y خروج از مرکزیت در حالت تعادل، ϵ' برابر با $\epsilon + d - h/2$ ، h ارتفاع کل مقطع، ρ درصد

برنامه‌ریزی دینامیکی برای طرح نگهداری و بهینه‌سازی طراحی بر اساس قابلیت اعتماد سازه‌های تحت زوال پیشنهاد شده است [۲۲] مقاطعات اشاره می‌دهد توانایی هر دو الگوریتم زنتیک و ازدحام ذرات در حل مساله بهینه‌سازی طراحی بر اساس قابلیت اعتماد سازه‌ها است.

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات یک تکنیک بهینه‌سازی تصادفی بر پایه جمعیت است [۲۳ و ۲۴] این الگوریتم رفتار اجتماعی حیوانات مانند پرندگان را شبیه‌سازی می‌کند. این الگوریتم به صورت قابل توجهی برای حل مسائل بهینه‌سازی مهندسی مورد استفاده قرار گرفته است که به دلیل یادگیری، کارایی و سادگی آن می‌باشد [۲۴] برای نمونه طراحی لرزه‌ای قاب‌های بتن‌آرمه در معرض بارگذاری تاریخیچه زمانی با استفاده از الگوریتم ترکیبی تصمیم‌گیری چند معیاری و بهینه‌سازی ازدحام ذرات انجام گرفته است [۲۵] رخداد خوردگی در سازه‌های بتن‌آرمه با استفاده از قابلیت اعتماد بر پایه الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات پیش‌بینی شده‌است [۲۶] نتایج مطالعات نشان دهنده آن است که در مقایسه با سایر الگوریتم‌های تکاملی مانند الگوریتم زنتیک، الگوریتم ازدحام ذرات نیازمند تلاش محاسباتی کمتری است [۲۴ و ۲۷]

با توجه به موارد توجیح داده شده و در راستای بهبود کارایی حل مساله بهینه‌سازی طراحی بر اساس قابلیت اعتماد قاب‌های بتن‌آرمه، این مقاله یک چارچوب جدید با بازگویی از رویکرد سنجح عملکرد و الگوریتم ازدحام ذرات به منظور بهینه‌سازی وزن قاب با ملاحظه قیود تعیینی و احتمالاتی را ارائه می‌دهد. تا به حال تحقیقی بر روی بهینه‌سازی طراحی بر اساس قابلیت اعتماد قاب‌های بتن‌آرمه با استفاده از رویکرد سنجح عملکرد و الگوریتم ازدحام ذرات انجام نگرفته است. نتایج بدست آمده از چارچوب جدید توسعه داده شده در این مقاله با نتایج تحقیق [۱۶] که از رویکرد شاخص قابلیت اعتماد و الگوریتم زنتیک استفاده کرده، از نظر کارایی مقایسه خواهد شد تا میزان برتری چارچوب جدید سنجیده شود.

۲- مساله قابلیت اعتماد قاب بتن‌آرمه

در مساله بهینه‌سازی طراحی بر اساس قابلیت اعتماد قاب بتن‌آرمه مورد مطالعه، تابع هدف یافتن مقاطع برای تیرها و ستون‌ها در راستای کمینه‌سازی وزن قاب تحت قیود تعیینی و احتمالاتی است. قیود تعیینی شامل محدودیت‌ها در مورد نیروهای داخلی تیرها و ستون‌ها و قیود احتمالاتی نیز تأمین کننده حداقل شاخص ایمنی مورد نیاز برای قاب است. مساله بهینه‌سازی طراحی بر اساس قابلیت اعتماد قاب بتن‌آرمه به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$\begin{aligned} & \text{find } S \\ & \text{min } W(S) \\ & \left\{ \begin{array}{l} M_{max,i}(S, X) \leq M_{ri}(S) \quad i = 1, 2, \dots, n_t \\ V_{max,i}(S, X) \leq V_{ri}(S) \quad i = 1, 2, \dots, n_t \\ N_{max,j}(S, X) \leq N_{rj}(S) \quad j = 1, 2, \dots, n_s \\ V_{max,j}(S, X) \leq V_{rj}(S) \quad j = 1, 2, \dots, n_s \\ \beta(S, X) = \beta_{eq} \end{array} \right. \quad (1) \end{aligned}$$

آرماتور کششی، m برابر با $(0.85\phi_s f_s) / (\phi_s f_s)$ ، f_s مقاومت تسلیم آرماتور و A_s سطح مقطع آرماتور کششی است. لازم به ذکر است که مقادیر مقاومت محوری بدست آمده از روابط (۳) و (۴) بایستی از مقاومت محوری پیشینه معرفی شده در رابطه زیر کمتر باشند [۲۸]:

$$N_{r,max} = 0.85[\alpha_s \phi_s f_s (A_g - A_s) + \phi_s f_s A_s] \quad (5)$$

که α_s برابر با $0.85 - 0.0015 f_s$ و A_g مساحت کلی مقطع ستون و A_s سطح مقطع کل آرماتورهای فولادی ستون هستند.

لازم به ذکر است که مقاومت برشی مقاطع بتن آرمه به صورت مجموع سهم مقاومت برشی بتن و آرماتور فولادی بر اساس نتایج محبت نهم مقررات ملی ساختمان [۲۸] محاسبه شده است. ■

۲-۲- قید احتمالاتی

به علت وجود عدم قطعیت در پارامترهای سازه، قید احتمالاتی در مسأله بهینه‌سازی در نظر گرفته شده و تحلیل قابلیت اعتماد سازه حین فرآیند بهینه‌سازی انجام می‌گیرد. به این رویکرد بهینه‌سازی طراحی بر اساس قابلیت اعتماد گفته می‌شود که منجر به طراحی ایمن از سازه با ملاحظه عدم قطعیت‌های موجود می‌شود. در واقع هدف در این رویکرد تأمین یک شاخص قابلیت اعتماد حداقل است که متناظر با یک احتمال خرابی خواهد بود. به این دلیل قید احتمالاتی در مسأله بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. در طول فرآیند بهینه‌سازی بر حسب مقاطع انتخاب شده برای تیرها و ستون‌ها، مقادیر متغیرهای تصادفی و همچنین بر اساس نیروهای وارده به قاب، تغییر مکان جانبی نسبی قاب محاسبه شده و تحلیل قابلیت اعتماد مرتبه اول [۲۹] قاب به منظور تعیین شاخص قابلیت اعتماد (β) آن انجام می‌شود. در واقع تابع حالت حدی (g) مورد استفاده در تحلیل قابلیت اعتماد مرتبه اول قاب بتن آرمه به صورت رابطه زیر خواهد بود:

$$g(S, X) = \text{Drift}_{max} - \text{Drift}(S, X) \quad (6)$$

که در آن Drift_{max} تغییر مکان نسبی پیشینه قاب است که بر اساس نتایج آیین‌نامه‌ای تعیین می‌شود و Drift تغییر مکان نسبی قاب بر حسب مقاطع انتخاب شده برای تیرها و ستون‌های قاب و مقدار متغیرهای تصادفی است. لازم به ذکر است که قید احتمالاتی مسأله بهینه‌سازی طراحی بر اساس قابلیت اعتماد قاب بتن آرمه به گونه‌ای تنظیم می‌شود که شاخص قابلیت اعتماد بدست آمده برای قاب از شاخص قابلیت اعتماد مورد نیاز (β_{req}) بیشتر باشد.

برای کنترل قید احتمالاتی در حین حل مسأله بهینه‌سازی طراحی بر اساس قابلیت اعتماد دو رویکرد شاخص قابلیت اعتماد و رویکرد سازه عملکرد وجود دارد [۱۲]. در رویکرد شاخص قابلیت اعتماد، مقدار شاخص قابلیت اعتماد با استفاده از روش قابلیت اعتماد مرتبه اول از طریق فرمول‌بندی مسأله بهینه‌سازی با یک قید تساوی در فضای انتقال یافته استاندارد نرمال نامعین Y بدست می‌آید که به عنوان تابع حالت حدی تعریف می‌شود [۱۴ و ۱۵]:

$$\begin{aligned} & \text{minimize } [Y] \\ & \text{s.t. } g(Y) = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

که نقطه بهینه بر روی سطح خرابی محتمل‌ترین نقطه $Y_{g(Y)=0}$

نامیده شده و بنابراین شاخص قابلیت اعتماد برابر با $[Y_{g(Y)=0}]$ خواهد بود. از سوی دیگر، تحلیل قابلیت اعتماد در رویکرد سازه عملکرد می‌تواند به صورت معکوس تحلیل قابلیت اعتماد در رویکرد شاخص قابلیت اعتماد فرمول‌بندی شود. سازه عملکرد g_p با استفاده از مسأله بهینه‌سازی غیرخطی در فضای Y بدست می‌آید که به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۴ و ۱۵]:

$$\begin{aligned} & \text{minimize } g(Y) \\ & \text{s.t. } [Y] = \beta_{req} \end{aligned} \quad (8)$$

که نقطه بهینه بر روی سطح قابلیت اعتماد مورد نیاز به عنوان محتمل‌ترین نقطه $Y_{g_p, \beta_{req}}$ شاخص قابلیت اعتماد از قبل مشخص $[Y_{g_p, \beta_{req}}]$ نامیده می‌شود.

تفاوت بین دو رویکرد شاخص قابلیت اعتماد و سازه عملکرد در نوع مسأله بهینه‌سازی حل شده در هر مورد است. کمیته کرن یک تابع پیچیده تحت قید ساده (رویکرد سازه عملکرد) راحت‌تر از کمیته کرن یک تابع ساده تحت قید پیچیده (رویکرد شاخص قابلیت اعتماد) است. ملاحظات نشان داده است که رویکرد سازه عملکرد برای مسأله بهینه‌سازی طراحی بر اساس قابلیت اعتماد یک روش پایدار بوده و در ارزیابی قید احتمالاتی غیرفعال کارا تر است. در مقابل، رویکرد شاخص قابلیت اعتماد در ارزیابی قید احتمالاتی فعال کارا تر است. بنابراین، کارایی و پایداری در حل مسائل بهینه‌سازی طراحی بر اساس قابلیت اعتماد می‌تواند بر حسب شرایط حاشیه‌ای تخمین زده شده از قید احتمالاتی در تکرارهای مختلف بدست آید [۱۵-۱۳]. سیفی اسکندری [۱۶] از رویکرد شاخص قابلیت اعتماد برای حل مسأله بهینه‌سازی طراحی بر اساس قابلیت اعتماد قاب بتن آرمه استفاده کرده و با توجه به غیرفعال بودن تابع حالت حدی تعریف شده بر حسب تغییر مکان نسبی قاب، زمان تحلیل زیاد بوده و رویکرد شاخص قابلیت اعتماد کارایی مناسبی نشان نداده است. بنابراین برای حل این مشکل و کاهش زمان تحلیل و در نتیجه افزایش کارایی روش، در این مقاله از رویکرد سازه عملکرد در حل مسأله بهینه‌سازی طراحی بر اساس قابلیت اعتماد قاب بتن آرمه استفاده خواهد شد. برای حل مسأله بهینه‌سازی در رویکرد سازه عملکرد نیز از روش مقدار میانگین پیشرفته [۳۰] استفاده می‌شود.

در صورتی که متغیرهای تصادفی درگیر در مسأله بهینه‌سازی طراحی بر اساس قابلیت اعتماد همبسته باشند، بایستی در فضای Y تبدیل به متغیرهای ناهمبسته شوند. در اکثریت مسائل مهندسی بخصوص در مسأله بهینه‌سازی قاب بتن آرمه این مطالعه، تابع چگالی احتمال توأم متغیرهای تصادفی موجود نبوده ولی توابع چگالی احتمال حاشیه‌ای و ماتریس همبستگی آنها موجود هستند. می‌توان از تبدیل نلف [۳۱] برای تبدیل متغیرهای همبسته به ناهمبسته استفاده کرد [۳۲]. با این حال این تبدیل نیازمند محاسبات زیاد و پیچیده برای حل معادلات انتگرالی غیرخطی است [۳۳]. به منظور دوری از این حجم محاسبات پیچیده در این مطالعه از روش مرجع [۲۹] استفاده

Drift

شده که در آن تابع حالت حدی بیان شده بر حسب متغیرهای تصادفی همبسته تبدیل به تابعی از متغیرهای ناهمبسته می‌شود.

۲-۲- حل مساله با الگوریتم ازدحام ذرات

در مساله بهینه‌سازی طراحی بر اساس قابلیت اعتماد اشاره شده در رابطه (۱)، متغیرهای تصمیم‌گیری گسسته بوده و تابع هدف و قیود ترکیبی تابع صریحی از متغیرهای تصمیم‌گیری نیستند. در قیود تبیینی و احتمالاتی احتمالی، تحلیل به روش اجزای محدود برای محاسبه پاسخ سازه بکار گرفته می‌شود. به این دلیل در این مقاله برای حل مساله بهینه‌سازی معرفی شده از روش تکاملی ازدحام ذرات [۲۱] و [۲۲] استفاده شده است. این روش که از حرکت دست جسمی ماهی‌ها یا پرندگان الهام گرفته شده است بدین صورت است که ابتدا به متغیرهای طراحی مساله یعنی مقاطع تیرها و ستون‌های قاب چند دسته عدد تصادفی اختصاص داده شده و مقدار تابع هدف به عنوان وزن قاب با استفاده از این اعداد و ملاحظه قیود تبیینی و احتمالاتی بدست می‌آید. پس از بدست آمدن نتایج، بهترین مقدار بدست آمده دست نخورده باقی مانده و در مرحله بعد اعداد اختصاص داده شده به متغیرهای سایر گروه‌ها با سرعت خاصی به مقادیر متغیرهای متناظر موجود در گروهی که جواب بهتر داده نزدیک می‌شوند. در واقع این الگوریتم مساله را با تلاش مکرر برای بهبود جواب‌های بالقوه و جستجو برای مقدار بهینه از گروهی از ذرات بهینه‌سازی می‌کند. این ذرات در فضای جستجو جایجا شده و جابجایی هر ذره متأثر از بهترین موقعیت معلوم محلی (P_{best}) آن است. با این حال همچنین این ذره به سمت بهترین موقعیت معلوم کلی (G_{best}) در فضای جستجو رانمایی می‌شود که به عنوان بهترین موقعیت پیدا شده توسط تمامی ذرات تا آن زمان بروز می‌شود [۲۱]. سرعت و موقعیت هر ذره بر اساس روابط زیر بروز می‌شوند:

$$V_{ij}^k = wJ_{ij}^{k-1} + c_1 rand_1 (P_{best_{ij}} - P_{ij}^{k-1}) + c_2 rand_2 (G_{best_{ij}} - P_{ij}^{k-1}) \quad (9)$$

$$P_{ij}^k = P_{ij}^{k-1} + V_{ij}^k \quad (10)$$

که در آنها برای مولفه i ذره j در k امین تکرار P_{ij}^k به ترتیب موقعیت و سرعت آن در تکرار k ام، c_1 و c_2 ضرایب تصادفی یادگیری، w و $rand_1$ اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه صفر تا یک هستند که به صورت تصادفی در هر تکرار k ام نمونه‌گیری می‌شوند. پارامتر Dw شاخص ایترسی بوده و دلالت بر مشارکت سرعت قبلی در مقدار فعلی دارد. مقدار این پارامتر در هر تکرار k ام با استفاده از رابطه زیر بروز می‌شود:

$$w = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{I_{max}} I \quad (11)$$

که I_{max} تعداد بیشینه تکرارها، w_{max} و w_{min} به ترتیب مقادیر ایترسی بیشینه و کمینه هستند. مقادیر بزرگتر Dw در جهت یافتن کلی فضای جستجو بوده در حالی که مقادیر کوچکتر تعادل به تسهیل جستجوی محلی دارند.

لازم به ذکر است که برای کنترل قیود در مساله بهینه‌سازی رابطه (۱) از روش تابع جریمه استفاده خواهد شد. مراحل کلی الگوریتم ازدحام ذرات مورد استفاده به شرح زیر خواهد بود:

مرحله ۱- تهیه پایگاه داده‌های مربوط به مقاطع تیرها و ستون‌ها، هر یک از مقاطع تیرها و ستون‌های تبیینی شده در واقع مؤلفه‌ای از یک ذره در الگوریتم خواهد بود.

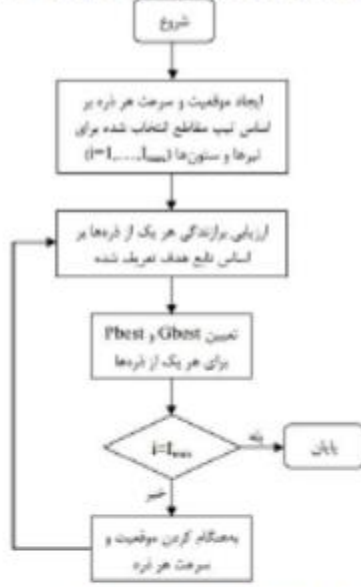
مرحله ۲- شروع از موقعیت و سرعت ذره مرتبط با فرض اولیه مقاطع برای قاب، تعداد تکرار در این مرحله واحد و حداکثر تعداد تکرارها فرض می‌شود.

مرحله ۳- مقدار برازندگی مربوط به ذره انتخاب شده در مرحله قبل با توجه به وزن قاب و عبارت مربوط به تابع جریمه برای کنترل قیود محاسبه می‌شود.

مرحله ۴- تعیین مقدار P_{best} و G_{best} برای ذره انتخاب شده.

مرحله ۵- در صورتی که حداکثر تعداد تکرارها بدست آید، ذره بهینه که شامل مقاطع تیرها و ستون‌ها است به همراه وزن قاب بهینه گزارش داده شده و در غیر این صورت موقعیت و سرعت ذره با توجه به روابط (۹) و (۱۰) بروز شده و مجدداً به مرحله ۴ مراجعه می‌شود.

روند کلی الگوریتم ازدحام ذرات در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل (۱): روند کلی الگوریتم ازدحام ذرات

۳- مطالعه موردی

قاب بتن آرمه مورد مطالعه در این مقاله یک قاب بتن آرمه متوسط ۵ طبقه با دهانه تیر برابر ۳ m و ارتفاع طبقات برابر ۳ m است (شکل ۲). این قاب در تحقیق [۱۶] برای بهینه‌سازی طراحی بر اساس قابلیت اعتماد قاب بتن آرمه با استفاده از الگوریتم ژنتیک و رویکرد شاخص قابلیت اعتماد استفاده شده است و در این مطالعه هدف آن است

بهینه‌سازی طراحی بر اساس قابلیت اعتماد همان قاب با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات و رویکرد سنج عمکرد انجام شده و کارایی چارچوب جدید مورد ارزیابی قرار گیرد.

مقاومت فشاری مشخصه بتن برابر 25 MPa و مقاومت مشخصه جزی شدن فولاد برابر 400 MPa هستند با توجه به قرارگیری سازه در منطقه با لرزه‌خیزی بسیار زیاد، بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ [۳۴] ترتیب زلزله در تحلیل استاتیکی معادل برابر $1/1502$ بدست آمده است. به منظور ملاحظه اثرات ترک‌خوردگی بر روی سختی مقاطع بتن‌آرمه، معادله ایبرسی تیرها و ستون‌ها به ترتیب با ضرایب 0.75 و 0.7 کاهش داده شده‌اند [۲۸]. همچنین بر پایه ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰، مقدار تغییرمکان نسبی بیشینه $\text{Drift}_{\text{max}}$ برابر 0.025 انتخاب شده است. مدول الاستیسیته بتن (E_c) ، مدول الاستیسیته فولاد (E_s) ، بار مرده (D) ، بار زنده (L) و بار زلزله (E) به عنوان متغیر تصادفی در تحلیل قابلیت اعتماد در نظر گرفته شده‌اند که مشخصات آنها در جدول ۱ گزارش شده است. لازم به ذکر است در انتخاب مقادیر اسمی بارها از اتوابط مبحث ششم مقررات ملی ساختمان استفاده شده است [۳۵].



شکل (۲): قاب بتن آرمه مورد مطالعه

جدول (۱): مشخصات متغیرهای تصادفی

متغیر تصادفی	توزیع	مقدار اسمی	فرم پراش	واحد
E_c	لگ نرمال	1.0×10^4	-1	Nmm^2
E_s	لگ نرمال	$1.0^6 \times 2.0$	-1.5	Nmm^2
D	لگ نرمال	18.000	-1.5	Nmm
L	لگ نرمال	6.000	-1.4	Nmm
E	لگ نرمال	22.0-18.1	-1.5	N

جدول (۲): مقاطع تیرها

شماره مقطع	عرض مقطع (mm)	معمق مقطع (mm)	آرماتورها
۱	۳۰۰	۳۰۰	۱۲-۲-۲
۲	۳۰۰	۳۰۰	۱۸-۲-۲
۳	۳۰۰	۳۰۰	۱۲-۲-۲
۴	۳۰۰	۳۰۰	۲۰-۲-۲
۵	۳۰۰	۳۰۰	۱۸-۲-۲
۶	۳۰۰	۳۰۰	۲۲-۲-۲
۷	۳۵۰	۳۰۰	۲۰-۲-۲
۸	۳۵۰	۳۰۰	۱۸-۲-۲
۹	۳۵۰	۳۰۰	۲۲-۲-۲
۱۰	۳۵۰	۳۰۰	۲۰-۲-۲
۱۱	۳۵۰	۳۵۰	۲۵-۲-۲
۱۲	۳۵۰	۳۵۰	۲۲-۲-۲
۱۳	۳۵۰	۳۵۰	۲۵-۲-۲
۱۴	۳۵۰	۳۵۰	۲۲-۲-۲

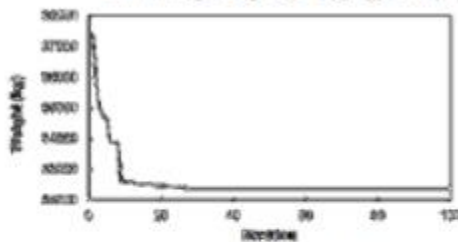
به منظور ملاحظه مسائل اجرایی، سه تیر (B1, B2, B3) و چهار تیر (C1, C2, C3, C4) در نظر گرفته شده‌اند (شکل ۲). بنابراین تعداد مؤلفه‌های هر ذره در الگوریتم ازدحام ذرات که مجموع تعداد تیرهای تیرها و ستون‌های قاب است، برابر ۷ خواهد بود. با توجه به ماهیت تصادفی الگوریتم ازدحام ذرات، پارامترهای آن بر حسب حساسیت‌سنجی پاسخ انتخاب شده‌اند. در این مطالعه پارامترهای $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6, \beta_7$ به ترتیب برابر ۲، ۲، ۰.۱۹، ۰.۱۴، ۱.۰۰، ۰.۴ و ۰.۶ انتخاب شده‌اند. در این فرآیند بهینه‌سازی، مقاطع احتمالی سازه‌ای بر اساس تیربندی انجام شده از پایگاه داده مربوط به مقاطع تهیه شده انتخاب می‌شود. مقاطع تیرها شامل ۱۷ مقطع و مقاطع ستون‌ها شامل ۳۷ مقطع است که به ترتیب در جدول ۲ و ۳ گزارش شده‌اند. آرماتورهای ذکر شده در این جدول در بالا و پایین مقاطع بکار گرفته شده‌اند.

تمامی محدودیت‌های هندسی در مورد ابعاد مقطع تیرها و ستون‌ها و تغییرات آنها در محل اتصال تیر به ستون و همچنین محدودیت‌های مربوط به مقدار حداقل و حداکثر آرماتورهای فولادی در مقاطع تیرها و ستون‌ها و آرایش آرماتورگذاری بر اساس اتوابط مبحث نهم مقررات ملی ساختمان برای قاب با شکل‌پذیری متوسط در انتخاب مقاطع در جدول ۲ و ۳ لحاظ شده‌اند. نحوه تیربندی مقاطع تیر و ستون در شکل ۲ و همچنین انتخاب مقاطع در جدول ۲ و ۳ به گونه‌ای انجام شده است که ابعاد ستون فوقانی از ستون تحتانی بزرگتر نباشد، تعداد آرماتورهای فولادی در ستون فوقانی بیشتر از ستون تحتانی نباشد و در هر طبقه عرض تیر از عرض ستون بیشتر نباشد.

در این تحقیق برای پیاده سازی الگوریتم ازدحام ذرات و همچنین پیاده‌سازی رویکرد سنج عمکرد با استفاده از روش مقدار میانگین پیشرفته از نرم‌افزار MATLAB [۳۶] استفاده شده است. همچنین در این فرآیند بهینه‌سازی، برای محاسبه پاسخ قاب از نرم‌افزار OpenSees [۳۷] استفاده شده است. دلیل اصلی انتخاب نرم‌افزارهای

وزن بهینه شماره تکراری از الگوریتم ازدحام ذرات است که کمترین وزن قاب در آن بدست آمده و تا تکرار آخر (Max) وزن کمتری از آن رخ ندهد. مورد مهم مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج تحقیق [۱۶] است که در آن از رویکرد شاخص قابلیت اعتماد و الگوریتم زنتیک در بهینه‌سازی طراحی بر اساس قابلیت اعتماد این قاب بتن‌ارمه استفاده شده بود. در آن تحلیلی وزن بهینه قاب همان $22292/66 \text{ kg}$ بدست آمده منتها با این تفاوت که جواب بهینه بعد از ۵۳ تکرار حاصل شده و زمان تحلیل حدود ۱۰ ساعت بوده است. مقایسه نتایج دلالت بر آن دارد که رویکرد سنجی عملکرد و الگوریتم ازدحام ذرات نسبت به رویکرد شاخص قابلیت اعتماد و الگوریتم زنتیک در حل مسأله بهینه‌سازی طراحی بر اساس قابلیت اعتماد قاب بتن‌ارمه کارایی بسیار بهتری دارد. دلیل این مسأله آن است که تابع حالت حدی مورد استفاده در تحلیل قابلیت اعتماد قاب بتن‌ارمه بر اساس رابطه (۴)، در اکثریت موارد حالت غیرفعال دارد که در این مورد رویکرد سنجی عملکرد نسبت به رویکرد شاخص قابلیت اعتماد کارایی بیشتری داشته و همچنین الگوریتم ازدحام ذرات نیز نسبت به الگوریتم زنتیک کارایی بهتری نشان داده شده است.

یکی از مسائل مهم پایش نحوه همگرایی قبود مسأله بهینه‌سازی طراحی بر اساس قابلیت اعتماد قاب بتن‌ارمه است. در مورد قبود تمیزی مسأله انتظار می‌رود تغییر مقاطع رخ داده حین تحلیل بهینه‌سازی تغییر در مقادیر بیشینه لنگر خمشی تیرها و نیروی محوری بیشینه ستون‌ها نداشته باشد ولی در عین حال این تغییر مقاطع تأثیر قابل توجهی می‌تواند در لنگر خمشی مقاوم تیرها و نیروی محوری مقاوم ستون‌ها داشته باشند. برای پایش این مسأله، تیر طبقه دوم ملین محوره‌های ۲ و ۳ و ستون طبقه اول از محور ۳ به عنوان نمونه در نظر گرفته شده‌اند. تاریخچه همگرایی لنگر خمشی بیشینه (M_{max}) و لنگر خمشی مقاوم (M_r) تیر مربوطه در شکل ۳ و تاریخچه همگرایی نیروی محوری بیشینه (N_{max}) و نیروی محوری مقاوم (N_r) ستون مربوطه در شکل ۵ نشان داده شده‌اند.



شکل (۳): تاریخچه همگرایی وزن قاب

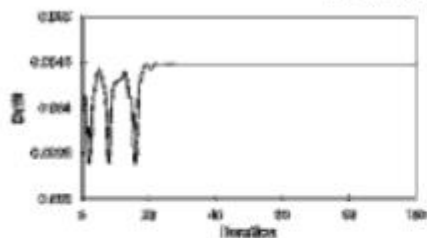
۱۵	۲۰۰	۲۰۰	۲۸۰۲
۱۶	۲۰۰	۲۰۰	۲۲۰۱۰
۱۷	۲۰۰	۲۰۰	۲۵۰۸

جدول (۳): مقاطع ستون‌ها			
شماره ستون	عرض ستون (mm)	مقطع ستون (mm)	آرماتورها
۱۸	۲۰۰	۲۰۰	۱۲۰۲
۱۹	۲۰۰	۲۰۰	۱۸۰۲
۲۰	۲۰۰	۲۰۰	۱۲۰۸
۲۱	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰۲
۲۲	۲۰۰	۲۰۰	۱۸۰۸
۲۳	۲۰۰	۲۰۰	۲۲۰۲
۲۴	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰۸
۲۵	۲۵۰	۲۵۰	۱۶۰۲
۲۶	۲۵۰	۲۵۰	۱۸۰۲
۲۷	۲۵۰	۲۵۰	۱۲۰۸
۲۸	۲۵۰	۲۵۰	۲۰۰۲
۲۹	۲۵۰	۲۵۰	۱۸۰۸
۳۰	۲۵۰	۲۵۰	۲۲۰۲
۳۱	۲۵۰	۲۵۰	۲۰۰۸
۳۲	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰۲
۳۳	۲۵۰	۲۵۰	۲۲۰۸
۳۴	۲۰۰	۲۰۰	۱۲۰۸
۳۵	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰۲
۳۶	۲۰۰	۲۰۰	۱۸۰۸
۳۷	۲۰۰	۲۰۰	۲۲۰۲
۳۸	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰۸
۳۹	۲۰۰	۲۰۰	۲۵۰۲
۴۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۲۰۸
۴۱	۲۰۰	۲۰۰	۲۸۰۲
۴۲	۲۰۰	۲۰۰	۲۵۰۸
۴۳	۲۵۰	۲۵۰	۲۲۰۲
۴۴	۲۵۰	۲۵۰	۲۰۰۸
۴۵	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰۲
۴۶	۲۵۰	۲۵۰	۲۲۰۸
۴۷	۲۵۰	۲۵۰	۲۸۰۲
۴۸	۲۵۰	۲۵۰	۲۲۰۱۰
۴۹	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰۸
۵۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰۲
۵۱	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰۱۰
۵۲	۲۵۰	۲۵۰	۲۸۰۸
۵۳	۲۵۰	۲۵۰	۲۰۰۸
۵۴	۲۵۰	۲۵۰	۲۸۰۱۰

۴- نتایج

با حل مسأله بهینه‌سازی، مقاطع بهینه برای تیب C1, C2, C3, B1, B2, B3 (مطابق شکل ۲) به ترتیب مقطع شماره ۲۱, ۲۱, ۱۸, ۲۶, ۱۹, ۱۰ و ۲ (مطلق) جداول ۲ و ۳ بدست آمده است که منجر به وزن بهینه قاب معادل $22292/66 \text{ kg}$ شده است. تاریخچه همگرایی وزن میانگین به عنوان تابع هدف بهینه‌سازی در شکل ۳ نشان داده شده است. جواب بهینه بعد از ۲۷ تکرار بدست آمده و مدت زمان تحلیل حدود ۳۰ دقیقه است. لازم به ذکر است که مبنای انتخاب

تتبیرومکان نسبی تمامی طبقات در هر تکرار از بهینه‌سازی در شکل ۶ نشان داده شده‌است.



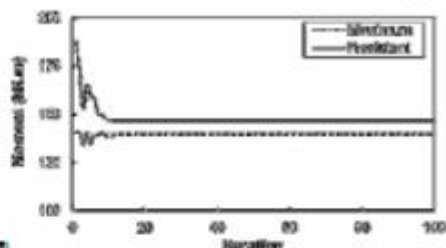
شکل (۶): تاریخچه همگرایی تتبیرومکان نسبی بیشینه قاب

۲-۱-۱- اعتبارسنجی

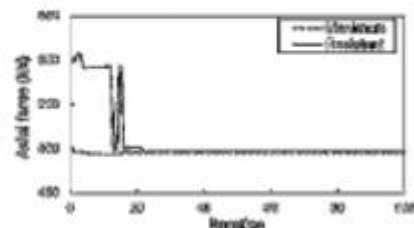
در این بخش برای اعتبارسنجی از روش پیشنهاد داده شده در این مقاله برای بهینه‌سازی طراحی بر اساس قابلیت اعتماد، از نتایج مقاله [۳۸] استفاده شده‌است. مطالعه موردی قاب بتن‌آرمه ۴ دهانه و ۹ طبقه است که هندسه قاب و تیب‌بندی مقاطع در شکل ۷ نشان داده شده‌است. در این مثال برخلاف مطالعه موردی قبلی، تحلیل مورد استفاده در روند بهینه‌سازی تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش‌آور) است. در مساله بهینه‌سازی طراحی بر اساس قابلیت اعتماد قاب بتن‌آرمه مورد مطالعه در این بخش، تابع هدف یافتن مقاطع برای تیرها و ستون‌ها در راستای کمینه‌سازی هزینه ساخت قاب تحت قیود تیبی و احتمالاتی است. مساله بهینه‌سازی طراحی بر اساس قابلیت اعتماد قاب بتن‌آرمه در این حالت به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$\begin{aligned} & \text{find } S \\ & \text{min } C(S) \\ & \text{s.t. } \begin{cases} g_1(S, X_p) \leq 0 \\ g_n(S, X_p) \leq 0 \quad i = \text{IO; LS; CP} \\ g_m(S, X_p) \leq 0 \quad j = \text{IO; LS; CP} \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

که در آن OS مقاطع مورد انتخاب برای تیرها و ستون‌ها، IC هزینه ساخت قاب، IO مستطی‌های طراحی قطعی، LS بردار مستطی‌های تصادفی، g_i تابع حالت حدی مربوط به قیود تیبی مربوط به مقاومت و سرویس‌دهی قاب، g_j تابع حالت حدی قید تیبی مربوط به تتبیرومکان نسبی جایی قاب (رابطه ۱۲) و g_m تابع حالت حدی قید احتمالاتی مربوط به تتبیرومکان نسبی جایی قاب (رابطه ۱۴) است. در قید تیبی g_i بررسی قیود مربوط به ترکیبات بازگداری غیرلزله‌ای انجام شده و مواردی دیگر از قبیل آنکه ایماستون فوقانی نباید از ستون تحتانی بزرگتر باشد، تعداد آرماتورهای فولادی در ستون فوقانی نباید بیشتر از ستون تحتانی باشد یا در هر طبقه عرض تیر نباید از عرض ستون بیشتر باشد، چک می‌شوند. قیود مربوط به g_j در g_i در سه سطح عملکرد استفاده می‌شوند (IO، اجتناب جانی (LS) و آستانه فروریزش (CP) بر اساس تعریف آیین‌نامه HAZUS [۳۹] در نظر گرفته شده‌اند. لازم به ذکر است که در ارزیابی قید g_i از تحلیل استاتیکی خطی و در ارزیابی قیود g_j و g_m از تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش‌آور) استفاده شده‌است.



شکل (۴): تاریخچه همگرایی لنگر خمشی بیشینه و مقاوم تیر طبقه دوم مابین محورهای ۲ و ۳



شکل (۵): تاریخچه همگرایی نیروی محوری بیشینه و مقاوم ستون طبقه اول محور ۳

همان‌گونه که در اشکال ۲ و ۵ قابل مشاهده است، تتبیرومکان در فرآیند بهینه‌سازی تتبیرومکان قابل توجهی در لنگر بیشینه تیر و نیروی محوری بیشینه ستون قاب نداشته است. در مقابل می‌توان مشاهده کرد که لنگر مقاوم تیر و نیروی محوری مقاوم ستون به صورت قابل توجهی متأثر از تتبیرومکان در فرآیند بهینه‌سازی هستند. این فرآیند در مورد سایر تیرها و ستون‌های قاب نیز وجود دارد البته با توجه به تیب‌بندی انجام شده، برای مثال اختلاف مقادیر نیروی محوری بیشینه و مقاوم در ستون‌های طبقه سوم به مراتب بیشتر از ستون طبقه اول خواهد بود که در اشکال ۲ و ۵ نشان داده شده، اما روند کاملاً مشابه بوده و به منظور اختصار گزارش نشده‌اند.

علاوه بر قیود تیبی مساله بهینه‌سازی که به آنها اشاره شد، قید احتمالاتی مساله نیز در حین فرآیند بهینه‌سازی بایستی مورد پایش قرار بگیرد. یکی از مزایای رویکرد شاخص قابلیت اعتماد نسبت به رویکرد سجه عملکرد در آن است که در رویکرد شاخص قابلیت اعتماد مقادیر شاخص قابلیت اعتماد سازه به صورت مستقیم در هر تکرار فرآیند بهینه‌سازی قابل ذخیره بوده و می‌توان تتبیرومکان شاخص قابلیت اعتماد سازه را به صورت مستقیم ناشی از تتبیرومکان در حین فرآیند بهینه‌سازی مورد بررسی قرار داد. اما در رویکرد سجه عملکرد مورد استفاده در این مطالعه، با وجود آن که بر اساس نتایج اشاره شده تکراری بیشتری نسبت به رویکرد شاخص قابلیت اعتماد دارد، چون مساله تابع هدف در واقع کمینه‌سازی تابع حالت حدی است (رابطه ۸)، در واقع تتبیرومکان پارامتر ظاهراتی مهندسی مورد استفاده در تعریف تابع حالت حدی در حین فرآیند بهینه‌سازی ثبت می‌شود که در این مطالعه بر اساس رابطه (۶) تتبیرومکان نسبی سازه انتخاب شده‌است. بنابراین تاریخچه همگرایی تتبیرومکان نسبی بیشینه قاب پستی حداکثر

Concrete01 برای مدلسازی بتن و از مصالح Steel01 برای مدلسازی فولاد استفاده شده است. کرنش متناظر با تنش بیشینه در بتن 0.002، کرنش نهایی آن 0.005 و مقدار سخت‌شوندگی کرنشی فولاد 0.1 در نظر گرفته شده است. سایر پارامترهای دخیل در تعریف مصالح به صورت متغیر تصادفی در نظر گرفته شده‌اند. مشخصات متغیرهای تصادفی در جدول 4 ارائه شده است. برای جزئیات بیشتر در مورد مساله بهینه‌سازی ارائه شده و مشخصات قاب مورد مطالعه به مرجع [38] مراجعه شود.

در مرجع [38] برای حل مساله بهینه‌سازی طراحی بر اساس قابلیت اعتماد اشاره شده در رابطه (12) از الگوریتم فرا ابتکاری بهینه‌سازی اجسام پرخوردکننده پیشرفته آنتوتاک* استفاده شده است. همچنین برای ارزیابی تابع حالت حدی احتمالاتی R_d از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو* و فرامدل‌نشده استفاده شد. در این مرحله برای نشان دادن توانایی روش پیشنهادی در این مقاله، مساله بهینه‌سازی داده شده در رابطه (12) با الگوریتم ازدحام فرات و رویکرد سنجی عملکرد حل شده و با نتایج مقاله مرجع مقایسه شده است. حل مساله بهینه‌سازی، مقاطع بهینه برای تیرها و ستون‌ها بدست آمده و نتایج در جدول 5 ارائه شده است. مقاطع بدست آمده متعجبانه هزینه ساخت بهینه قاب معادل با 766/79 میلیون تومان شده است. تاریخچه همگرایی هزینه ساخت قاب به عنوان تابع هدف بهینه‌سازی در شکل 8 نشان داده شده است. نتایج دلالت بر تطابق مناسب با نتایج مقاله مرجع [38] دارد که نشان دهنده توانایی روش پیشنهاد شده در این مقاله برای حل مساله بهینه‌سازی طراحی بر اساس قابلیت اعتماد قاب بتن‌ارمه است. اختلاف ناچیز به وجود آمده (حدود 7/9 میلیون تومان معادل 0.1) می‌تواند ناشی از تخمین پاسخ سازه در تحلیل غیرخطی پیش‌آور باشد. در این مقاله از نرم‌افزار OpenSees برای تخمین پاسخ سازه استفاده شده است که می‌تواند با توجه به فرقیات مورد استفاده در مدلسازی سازه، در ارزیابی قید احتمالاتی و در نتیجه هزینه بهینه قاب متعجبانه تفاوت با نتایج مقاله مرجع شود. مطابق شکل 8 جواب بهینه بند 37 تکرار بدست آمده است.

جدول (4): مشخصات متغیرهای تصادفی

متغیر تصادفی	توزیع	مقدار میانگین	ضریب تغییرات	واحد
E_c	نرمال	1.0×10^4	0.15	N/mm ²
f_c	نرمال	$1.0^2 \times 28$	0.15	N/mm ²
f_t	نرمال	$1.0^2 \times 2.0$	0.15	N/mm ²
Drift ^{max}	نرمال بر اساس [39]		0.15	-
β_1	لام-نرمال بر اساس [39]		0.15	mm ²

جدول (5): مشخصات مقاطع بدست آمده از بهینه‌سازی

تیر	عرض (mm)	عمق (mm)	مستطقی
B1	400	600	22 Ø 5 (در 76 و 80 پاس)
B2	400	600	22 Ø 5 (در 76 و 80 پاس)

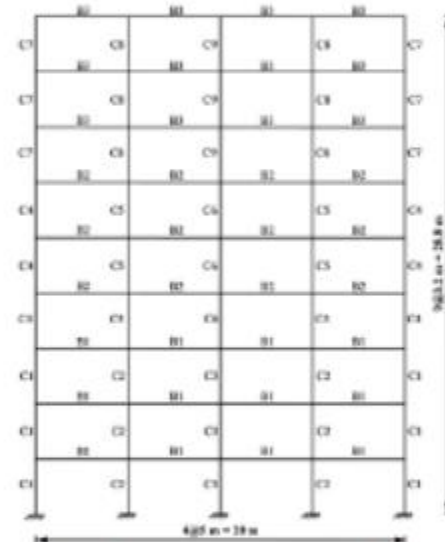
*Monte Carlo

*Metamodel

$$g_n(S, X_i) = \frac{\text{Drift}}{\text{Drift}_{max}} - 1 \leq 0 \quad i = \text{IO; LS; CP} \quad (12)$$

$$g_n(S, X_i) = \frac{P}{P_{max,i}} - 1 \leq 0 \quad i = \text{IO; LS; CP} \quad (13)$$

که در آنها Drift_{max} (تغییر مکان نسبی بیشینه مجاز قاب است که مقدار میانگین مجاز آنها به ترتیب برای سطوح عملکرد CP و LS JO به ترتیب 0.005، 0.015 و 0.02 هستند) Drift_{max} (تغییر مکان نسبی بیشینه قاب بر حسب مقاطع انتخاب شده برای تیرها و ستون‌های قاب و مقدار متغیرهای طراحی است) $P_{max,i}$ (احتمال خرابی بیشینه مجاز قاب است که برای سطوح عملکرد CP و LS JO به ترتیب 0.001، 0.001 و 0.001 هستند) P_i (احتمال خرابی قاب بر حسب مقاطع انتخاب شده برای تیرها و ستون‌های قاب و مقدار متغیرهای طراحی است).



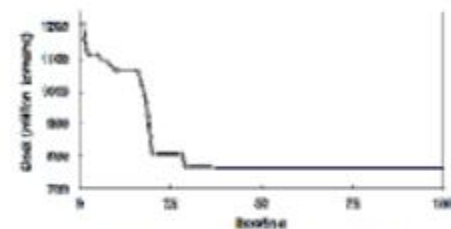
شکل (7): قاب بتن‌ارمه مورد مطالعه برای اعتبارسنجی [38]

در مقاطع تهیه شده برای تیرها از آرماتور فولادی با قطر 22 mm و مقاطع مستطیلی با نسبت عمق به عرض 1/5 تا 2 استفاده شده در حالی که برای ستون‌ها از آرماتور فولادی 25 mm و مقاطع مستطیلی با نسبت عمق به عرض 1 تا 2 استفاده شده است. در محاسبه هزینه ساخت قاب، هزینه برای ساخت بتن، آرماتور فولادی و شبکه‌بندی قاب به ترتیب 1105، 7065 و 1 میلیون تومان به ازای هر مترمکعب و 0/92 میلیون تومان به ازای هر مترمربع در نظر گرفته شده است. بار مرده وارد بر قاب 25 kN/m² و بار زنده وارد بر آن 10 kN/m² در نظر گرفته شده است. برای انتخاب مقادیر طیف پاسخ میانه (S_d) در تحلیل پیش‌آور متناظر با سطوح عملکرد مختلف از HAZUS [39] استفاده شده است. با توجه به فرقیات مطرح شده در مرجع [38] در مدلسازی غیرخطی قاب در نرم‌افزار OpenSees از مصالح سال بیست و چهارم / شماره 66 / تابستان 1401

و الگوریتم ازدحام ذرات برای بهینه‌سازی طراحی بر اساس قابلیت اعتماد قاب بتن‌ارمه پیشنهاد شده است. نتایج بدست آمده در این مطالعه نشان دهنده توانایی و کارایی مناسب این چارچوب جدید است. مقایسه نتایج این مطالعه با نتایج تحقیق قبلی که از رویکرد شاخص قابلیت اعتماد و الگوریتم زنتیک برای بهینه‌سازی طراحی بر اساس قابلیت اعتماد قاب بتن‌ارمه استفاده کرده است، نشان می‌دهد که نتیجه مشابهی برای وزن بهینه قاب و مقاطع انتخاب شده بدست آمده است با این تفاوت که چارچوب پیشنهادی این مقاله در تعداد تکرار و زمان کمتری به آن جواب دست یافته است. برای مطالعه موردی قاب بتن‌ارمه، زمان تحلیل از ۱۰ ساعت در تحقیق قبلی انجام شده که مبتنی بر رویکرد شاخص قابلیت اعتماد و الگوریتم زنتیک بود، به ۳۰ دقیقه در مطالعه حاضر که مبتنی بر رویکرد سنج عملمکرد و الگوریتم ازدحام ذرات است، کاهش یافته است که مؤید کارایی بسیار بهتر چارچوب پیشنهادی این مقاله است. دلیل اصلی برتری این چارچوب در غیرفعال بودن تابع حالت حدی در قید احتمالاتی مساله بهینه‌سازی است که ناشی از تنبلیت آیین‌نامه‌ای محافظه‌کارانه در رویه تحلیل الاستیک خطی سازه‌ها است. به منظور مقایسه بیشتر کارایی دو رویکرد شاخص قابلیت اعتماد و سنج عملمکرد، می‌توان از رویکرد تحلیل غیرخطی سازه استفاده کرد.

- 7- Kaveh, A.; Biabani Hamedani, K.; Kamalimejad, M.; "Set Theoretical Variants of Optimization Algorithms for System Reliability-based Design of Truss Structures", *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, vol. 65(3), p.p. 717-729, 2021.
- 8- Dehvari, A. G.; Miri, M.; Sohrabi, M. R.; "Reliability-Based Design Optimization of Recycled Coarse Aggregates Used in Corrosive Environment", *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 33(4), p.p. 04021042, 2021.
- 9- Abid, F.; Hami, A. E.; Mezrouki, T.; Walha, L.; Haddar, M.; "An Approach for the Reliability-based Design Optimization of Shape Memory Alloy Structure", *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, vol. 49(2), p.p. 155-171, 2021.
- 10- Khodam, A.; Farajzadeh, M. S.; Shayanfar, M. A.; "Reliability-based Design Optimization of Structures using Firefly Algorithm", *Journal of Structural and Construction Engineering*, vol. 8(1), p.p. 333-344, 2021. (in Persian)
- 11- Kaveh, A.; Zaerza, A.; "A New Framework for Reliability-based Design Optimization using Metaheuristic Algorithms", *Structures*, vol. 38, p.p. 1210-1225, 2022.
- 12- Jerez, D. J.; Jensen, H. A.; Beer, M.; "Reliability-based Design Optimization of Structural Systems under Stochastic Excitation: An Overview", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 166, p.p. 108397, 2022.
- 13- Tu, J.; Choi, K. K.; Park, Y. H.; "A New Study on Reliability-based Design Optimization", *Journal of*

۲۲۰۲ (در % و پاس)	۲۰۰	۲۵۰	B3
۲۵ @ ۲۰	۲۵۰	۲۵۰	C1
۲۵ @ ۲۰	۲۵۰	۲۵۰	C2
۲۵ @ ۱۸	۲۵۰	۲۵۰	C3
۲۵ @ ۱۸	۲۰۰	۲۰۰	C4
۲۵ @ ۱۶	۵۰۰	۵۰۰	C5
۲۵ @ ۱۶	۵۰۰	۵۰۰	C6
۲۵ @ ۱۶	۵۰۰	۵۰۰	C7
۲۵ @ ۱۶	۲۵۰	۲۵۰	C8
۲۵ @ ۱۰	۲۵۰	۲۵۰	C9



شکل (A): تاریخچه همگرایی هزینه ساخت قاب

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک چارچوب جدید مبتنی بر رویکرد سنج عملمکرد

مراجع

- 1- Nikolaidis, E.; Burduso, R.; "Reliability based Optimization: A Safety Index Approach", *Computers and Structures*, vol. 28(6), p.p. 781-788, 1988.
- 2- Aoues, Y.; Chateauxneuf, A.; "Reliability-based Optimization of Structural Systems by Adaptive Target Safety- Application to RC Frames", *Structural Safety*, vol. 30(2), p.p. 144-161, 2008.
- 3- Zou, X.; Wang, Q.; Wu, J.; "Reliability-based Performance Design Optimization for Seismic Retrofit of Reinforced Concrete Buildings with Fiber-Reinforced Polymer Composites", *Advances in Structural Engineering*, vol. 21(6), p.p. 838-851, 2018.
- 4- Saify Asghabahr, M. R.; "Design Optimization of Corroded Reinforced Concrete Frame using Genetic Algorithm", *Journal of Structural and Construction Engineering*, 2020. (in Persian)
doi:10.22065/JSCCE.2020.233940.2160
- 5- Vo-Duy, T.; Duong-Gia, D.; Ho-Huu, V.; Nguyen-Thoi, T.; "An Effective Couple Method for Reliability-based Multi-objective Optimization of Truss Structures with Static and Dynamic Constraints", *International Journal of Computational Methods*, vol. 17(06), p.p. 1950016, 2020.
- 6- Song, K.; Zhang, Y.; Zhuang, X.; Yu, X.; Song, B.; "Reliability-based Design Optimization using Adaptive Surrogate Model and Importance Sampling-based Modified SORA Method", *Engineering with Computers*, vol. 37(2), p.p. 1293-1314, 2021.

- Multidisciplinary Optimization, vol. 58, p.p. 2119-2134, 2018.
- 26- Shayanfar, M. A.; Barkhordari, M. A.; Ghanooni-Bagha, M.; "Estimation of Corrosion Occurrence in RC Structure Using Reliability Based PSO Optimization", Periodica Polytechnica Civil Engineering, vol. 59(4), p.p. 531-542, 2015.
- 27- Shabir, S.; Singla, R.; "A Comparative Study of Genetic Algorithm and the Particle Swarm Optimization", International Journal of Electrical Engineering, vol. 9(2), p.p. 215-223, 2016.
- 28- Ministry of Housing and Urban Development (MHUD); "Reinforced Concrete Structures, Part 9", Tehran, Iran, 2013. (in Persian)
- 29- Haldar, A.; Mahadevan, S.; "Probability, Reliability, and Statistical Methods in Engineering Design", John Wiley, New York, 2000.
- 30- Wu, Y. T.; "Computational Methods for Efficient Structural Reliability and Reliability Sensitivity Analysis", American Institute of Aeronautics and Astronautics, vol. 32(5), p.p. 1717-1723, 1994.
- 31- Nataf, A.; "Determination Des Distribution Donc Les Marges Sent Donnes", Comptes Rendus de l'Academie des Sciences, vol. 225, p.p. 42-43, 1962.
- 32- Der Kiureghian, A.; Liu, L. P.; "Structural Reliability under Incomplete Probability Information", Journal of Engineering Mechanics, vol. 112(1), p.p. 85-104, 1986.
- 33- Building and Housing Research Center (BHRC); "Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, Standard No. 2800, 4rd edn", Tehran, Iran, 2013. (in Persian)
- 34- Ministry of Housing and Urban Development (MHUD); "Loads on Buildings, Part 6", Tehran, Iran, 2013. (in Persian)
- 35- MATLAB; The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States, 2012.
- 36- McKenna, F.; "OpenSees: A Framework for Earthquake Engineering Simulation", Computing in Science and Engineering, vol. 13(4), p.p. 58-66, 2011.
- 37- Gholizadeh, S.; Aligholizadeh, V.; "Reliability-based optimum seismic design of RC frames by a metamodel and metaheuristics", The Structural Design of Tall and Special Buildings, vol. 28(1), p.p. e1552, 2019.
- 38- HAZUS; "Earthquake loss estimation methodology, Technical Manual", Washington, DC: National Institute of Building for the Federal Emergency Management Agency, 1997.
-
-
- Mechanical Design, vol. 121, p.p. 557-564, 1999.
- 14- Youn, B. D.; Choi, K. K.; Park, Y. H.; "Hybrid Analysis Method for Reliability-based Design Optimization", Journal of Mechanical Design, vol. 125(2), p.p. 221-232, 2003.
- 15- Lopez, R. H.; Beck, A. T.; "Reliability-based Design Optimization Strategies based on FORM: A Review", Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, vol. 34(4), p.p. 506-514, 2012.
- 16- Seify Asghabahr, M. R.; "Reliability based Design Optimization of Reinforced Concrete Frames Using Genetic Algorithm", Periodica Polytechnica Civil Engineering, vol. 65(2), p.p. 566-576, 2021.
- 17- Friedl, G.; Kuczmann, M.; "Population and Gradient Based Optimization Techniques, A Theoretical Overview", Acta Technica Jaurinensis, vol. 7(4), p.p. 378-387, 2014.
- 18- Haupt, R.; "Comparison between Genetic and Gradient-based Optimization Algorithms for Solving Electromagnetics Problems", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 31(3), p.p. 1932-1935, 1995.
- 19- Shayanfar, M.; Abbasnia, R.; Khodam, A.; "Development of a GA-based Method for Reliability-based Optimization of Structures with Discrete and Continuous Design Variables using OpenSees and Tcl", Finite Element in Analysis and Design, vol. 90, p.p. 61-73, 2014.
- 20- Elegbede, C.; "Structural Reliability Assessment based on Particles Swarm Optimization", Structural safety, vol. 27(2), p.p.171-186, 2005.
- 21- Chen, J.; Zhang, X.; Jing, Z.; "A Cooperative PSO-DP Approach for the Maintenance Planning and RBDO of Deteriorating Structures", Structural and Multidisciplinary Optimization, vol. 58(1), p.p. 95-113, 2018.
- 22- Eberhart, R. C.; Kennedy, J.; "A New Optimizer using Particle Swarm Theory", In: Proceedings of the 6th International Symposium on Micromachine and Human Science, p.p. 39-43, Nagoya, Japan, 1995.
- 23- Kennedy, J.; Eberhart, R. C.; "Particle Swarm Optimization" In: Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, p.p. 1942-1948, Perth, Australia, 1995.
- 24- Wang, D.; Tan, D.; Liu, L.; "Particle Swarm Optimization Algorithm: An Overview", Soft Computing, vol. 22(2), p.p. 387-408, 2018.
- 25- Esfandiari, M. J.; Urgessa, G. S.; Sheikholaefin, S.; Deghan Manshadi, S. H.; "Optimization of Reinforced Concrete Frames Subjected to Historical Time-history Loadings using DMPSO Algorithm", Structural and

□

□

□