



طراحی بهینه قاب‌های فولادی بر اساس عملکرد با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات اصلاح شده

محمد رضا قاسمی^۱، فاطمه السادات سیدیزدی^۲، علی صباغ زاده^۳

۱- دانشیار گروه مهندسی عمران دانشگاه سیستان و بلوچستان

mrghasemi@hamoon.usb.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران دانشگاه سیستان و بلوچستان

f.seyyedyazdi@gmail.com

۳- کارشناس ارشد گروه مهندسی عمران دانشگاه سیستان و بلوچستان

sabbaghzadehali@yahoo.com

چکیده

در این مقاله بهینه‌سازی طراحی سازه‌ای با هدف بهینه‌سازی مصرف مصالح در اسکلت سازه مورد توجه قرار گرفته است که طراحی بهینه قاب خمشی فولادی ۹ طبقه بر اساس عملکرد برای بارهای ثقلی و جانبی با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات اصلاح شده ارائه شده است. قیود مسئله بهینه‌سازی کنترل چرخش مفاصل پلاستیک و تغییر مکان نسبی طبقات برای سطوح عملکرد I-O، L-S و C-P بر اساس ضوابط آیین‌نامه FEMA-356 می‌باشد. کد بهینه‌سازی در محیط نرم‌افزار MATLAB نوشته شده و برای آنالیز استاتیکی غیرخطی سازه از نرم‌افزار OpenSees استفاده شده است. در بررسی انجام شده، توانایی‌های الگوریتم مورد استفاده برای انجام این کار نشان داده شده است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم اجتماع ذرات اصلاح شده، بهینه‌سازی، قاب فولادی، آنالیز استاتیکی غیرخطی (پوش آور)، طراحی بر اساس عملکرد

۱. مقدمه

قاب‌های ساختمانی رایج‌ترین سازه‌های عمرانی هستند، بنابراین اگر بتوان وزن این قاب‌ها را با حفظ مقاومت و عملکرد آن به نحوی کاهش داد تا در طی وقوع زلزله انرژی کمتری جذب کند، آنگاه خسارت‌های وارده کمتر شده و همزمان با تأمین اقتصاد طرح، ایمنی سازه نیز افزایش می‌یابد. در واقع هدف اصلی برقراری ارتباط بین دو مبحث اساسی علم مهندسی عمران، یعنی طراحی بر اساس عملکرد و بهینه‌سازی سازه‌ها است، تا ضمن بهبود عملکرد در سازه، بتوان وزن بهینه آن را نیز تعیین نمود.

در میان الگوریتم‌های مبتنی بر جستجوی تصادفی، الگوریتم اجتماع ذرات یکی از موثرترین روش‌های جستجوی تصادفی است. در این الگوریتم با بروزرسانی حرکت ذره‌ها در فضای جستجو، بر پایه اطلاعات مربوط



به موقعیت بهترین ذره، عمل جستجو انجام می‌شود. این الگوریتم در مقایسه با سایر الگوریتم‌های تصادفی به ویژه الگوریتم ژنتیک از نقطه نظر سرعت و حافظه مصرفی، بسیار کم هزینه تر و بهینه تر می‌باشد.

در سال‌های اخیر، روش‌های طراحی سازه‌ها در برابر زلزله دستخوش تغییرات زیادی شده‌است و مفهومی به نام عملکرد در مباحث طراحی مطرح شده‌است. در علم مهندسی سازه و زلزله با ورود و جایگزینی روش طراحی بر اساس عملکرد به جای روش قدیمی طراحی بر اساس نیرو، بسیاری از آیین‌نامه‌های طراحی، در حال گذر از یک سری تغییرات بنیادی هستند. هدف از طراحی لرزه‌ای بر اساس عملکرد، قادر ساختن مهندسان به طراحی سازه‌هایی است که عملکردشان قابل پیش‌بینی باشد یا در حقیقت هدف وارد کردن کارفرما در انتخاب میزان آسیب‌پذیری ساختمان در سطوح مختلف زمین‌لرزه است.

در گذشته محققین از جمله saka و همکاران [1]، lagaros و همکاران [2]، Kim و Choi [3] و Kaveh و همکاران [4] بهینه‌سازی قاب‌های فولادی را مورد بررسی قرار دادند.

در این مقاله طراحی بهینه قاب خمشی فولادی 9 طبقه بر اساس سطح عملکرد I-O، L-S و C-P برای بارهای ثقلی و جانبی با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات اصلاح شده ارائه شده است.

2. بهینه سازی

بهینه‌سازی سازه‌ها، یک فرآیند حل برای یافتن متغیرهای طراحی در چارچوب فرمول‌بندی زیر می‌باشد:

$$\begin{cases} \text{Find} & X; & X_j \in R^d; & j = 1, \dots, n \\ \text{to} & \text{Minimize} & \Phi(X) & \\ \text{Subject} & \text{to} & g_i(X, t); & i = 1, \dots, m \end{cases} \quad (1)$$

در روابط بالا n تعداد متغیرهای طرح و m تعداد قیود مسئله هستند. X ها متغیرهای ورودی و $\Phi(X)$ تابع هدف مساله می‌باشد. در این تحقیق متغیرهای ورودی، اعضا قاب هستند و تابع هدف، مجموع وزن اجزای سازه است که به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\Phi(X) = \sum_{i=1}^n (\rho A)_i \quad (2)$$

الگوریتم اجتماع پرندگان (PSO) حاصل همکاری دو دانشمند آمریکایی با نام‌های جیمز کندی (J.Kennedy) و راسل ابرهارت (R.Eberhart) به سال 1995 می‌باشد.

از آن پس این الگوریتم یکی از شاخه‌های مهم الگوریتم‌های تکاملی محسوب می‌شود و از زمان ظهور به واسطه ویژگی‌های متمایزی همچون اختیار تعداد کم پارامترهای تنظیمی، سادگی مفاهیم و کاربرد و به دور بودن از پیچیدگی‌های محاسباتی، مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است.

این الگوریتم از رفتار اجتماعی پرندگان و ماهی‌ها در جستجوی غذا الهام گرفته شده‌است. ذرات با به اشتراک گذاشتن اطلاعات خود موقعیت بهترین ذره را نسبت به منبع غذا پیدا می‌کنند و موقعیت خود را بر مبنای آن اصلاح می‌کنند.



این روند اصلاح ادامه پیدا می کند تا ذرات به هدف پیدا نمایند. این الگوریتم با یک دسته جوابهای تصادفی شروع به کار می کند، سپس برای یافتن جواب بهینه در فضای مسئله با بهنگام کردن سرعت و موقعیت ذرات به جستجو می پردازد. هر ذره با دو مقدار X و V که معرف سرعت و موقعیت آنها می باشد، قابل شناسایی است که موقعیت ذرات همان جوابهای مسئله هستند و با استفاده از روابط (3) و (4) بدست می آیند. [5].

$$\vec{v}_i(t) = \phi \vec{v}_i(t-1) + r_1 c_1 (\vec{x}_{pbest} - \vec{x}_i(t-1)) + r_2 c_2 (\vec{x}_{Gbest} - \vec{x}_i(t-1)) \quad (3)$$

$$\vec{x}_i(t) = \vec{x}_i(t-1) + \vec{v}_i(t) \quad (4)$$

که در آن c_1 ، c_2 عوامل یادگیری فردی و اجتماعی می باشند. r_1 ، r_2 از بازه (0 و 1) بصورت تصادفی انتخاب می شوند تا پایداری سیستم را متضمن شوند. t شماره تکرار و $\vec{x}_i(t)$ ، $\vec{v}_i(t)$ به ترتیب بردارهای مکان و سرعت برای i امین ذره می باشند. \vec{x}_{pbest} مین بردار مکان بهترین موقعیت در تاریخچه ذره i ام تاکنون می باشد. \vec{x}_{Gbest} بهترین موقعیت در بین کل ذرات تاکنون است که از همهی موقعیتها به جواب نزدیک تر بوده است [5].

مشخص گردیده است که سرعت ذرات به سرعت در روند تکرار الگوریتم افزایش می یابد که باعث از دست دادن بیشینه یا کمینه مورد نظر تابع هدف خواهد شد. بنابراین ضریب اینرسی Φ برای کاهش سرعت به معادله بروز رسانی افزوده می گردد. این ضریب که اولین بار توسط شی و ابرهارت (1999) برای کاهش دادن سرعت در طول زمان (یا در طول تکرارها) ارائه گردید، اجتماع¹ را قادر می سازد که در مقایسه با الگوریتم اجتماع ذرات اصلی به جواب دقیق تر و با کارایی بهتر همگرا شود.

بهتر است به جای استفاده از یک مقدار ثابت برای اینرسی از یک تابع متغیر با زمان استفاده شود که در ابتدا مقدار بزرگی برای آن در نظر گرفته شود و هر چه به پایان مسأله نزدیک می شویم، این مقدار کوچک تر گردد. این نوع انتخاب باعث می شود که در ابتدا فضای مسأله، به خوبی جستجو شود و سپس به جواب بهینه همگرا شود و در حین همگرایی نقاط همسایگی نقطه بهینه جستجو می شوند. بنابراین Φ از مقدار صفر تا 1 و یا زیر مجموعه ای از آن مثلاً 0.4 تا 0.9 به صورت خطی مطابق رابطه ی (5) در طی روند تکامل ذرات کاهش می یابد.

$$\Phi(t) = \Phi_{final} - \left(\frac{\Phi_{final} - \Phi_{initial}}{\max_t} \right) t \quad (5)$$

که در آن $\Phi_{initial}$ و Φ_{final} به ترتیب مقادیر ضریب اینرسی اولیه و نهایی می باشند. تعداد کل تکرارها نیز

\max_t می باشد.

¹- Swarm

3. مفهوم طراحی لرزه‌ای بر اساس عملکرد

در طراحی لرزه‌ای ساختمان‌ها، هدف این نیست که سازه در مقابل شدیدترین زلزله ممکن دچار هیچگونه خرابی نشود، زیرا این امر نه ضروری به نظر می‌رسد و نه از لحاظ اقتصادی منطقی می‌باشد. به عبارت دیگر در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها، طراح این واقعیت را می‌پذیرد که سازه در طول زلزله‌های بزرگ مقداری از عملکرد خود را از دست بدهد. با توجه به این واقعیت هدف اصلی در طراحی لرزه‌ای این است که خرابی یک سازه تحت زلزله‌های مختلف در حد قابل قبولی محدود شود.

در واقع هدف طراحی نشان‌دهنده سطح عملکرد مورد نیاز برای سازه تحت وقوع زلزله‌هایی با شدت‌های مختلف (دوره بازگشت مشخص) می‌باشد. اهداف طراحی باید بر اساس کاربری سازه، نوع سیستم و رفتار سازه، عوامل اقتصادی (شامل هزینه‌های ساخت و تعمیرات آتی) و عوامل اجتماعی-سیاسی انتخاب شود. سطح عملکردی نشان‌دهنده حداکثر خرابی مورد انتظار سازه است بطوریکه اگر خرابی از این حد افزایش پیدا کند، سطح عملکردی سازه نیز تغییر پیدا خواهد کرد. وضعیت کلیه اجزای سازه‌ای و غیر سازه‌ای در تعریف این سطوح عملکردی دخیل می‌باشند.

با ترکیب سطوح عملکرد سازه‌ای و غیرسازه‌ای سطح عملکرد ساختمان به منظور تشریح میزان خرابی مورد انتظار در ساختمان تعیین می‌شود. این سطوح شامل سطح عملکرد خدمت‌رسانی بی‌وقفه، سطح عملکرد قابلیت استفاده بی‌وقفه، سطح عملکرد ایمنی جانی، و سطح عملکرد آستانه فروریزش می‌باشند [6]. در این مقاله سطوح عملکرد L-S، I-O و C-P بر اساس ضوابط آیین نامه FEMA-356 برای قاب 9 طبقه بررسی شده است.

4. آنالیز استاتیکی غیر خطی²

تحلیل استاتیکی غیرخطی یا همان تحلیل پوش‌اور آخرین دستاورد در زمینه‌ی مهندسی سازه و زلزله است. در این روش بار جانبی تحت اثر یک الگوی خاص مرحله به مرحله افزایش می‌یابد و تغییر مکان جانبی یک نقطه-ی کنترلی در تراز بام با استفاده از نمودار برش پایه-تغییر مکان بام ارزیابی می‌شود. در تحلیل پوش‌اور نمو بار تا حد رسیدن تغییر مکان نقطه‌ی تحت کنترل به تغییر مکان هدف افزایش داده می‌شود مگر اینکه سازه ناپایدار شود یا برنامه در طی آنالیز با مشکلات همگرایی مواجه گردد. [6]

تحلیل در تغییر مکان هدف تعیین شده و با معیارهای پذیرش مورد بررسی قرار می‌گیرد. الگوی بارگذاری و رفتار اجزاء سازه دو پارامتر مؤثر در نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی می‌باشند.

²- Nonlinear Static Procedure

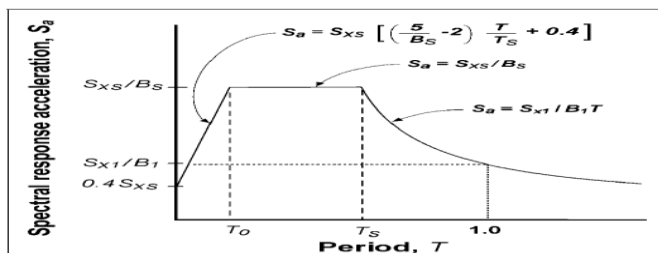
در روش آنالیز استاتیکی غیرخطی بار جانبی به صورت تک سو به سازه اعمال می شود تا سازه به تغییر مکان هدف برسد. تغییر مکان هدف بیانگر ماکزیمم تغییر مکان مورد انتظار در زلزله ی طرح می باشد لذا نیروهای تولید شده در سازه زمانی که سازه به تغییر مکان هدف می رسد باید تقریباً با نیروهای ایجاد شده در زلزله ی طرح در سازه برابر باشند. تغییر مکان هدف طبق رابطه (6) محاسبه می شود.

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad (6)$$

$$T_e = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} \quad (7)$$

که در آن T_e زمان تناوب اصلی موثر ساختمان، T_i زمان تناوب اولیه ی سازه، K_e سختی موثر سازه، K_i سختی اولیه سازه، S_a شتاب طیفی متناظر با زمان تناوب اصلی موثر ساختمان می باشد. $C_0 C_1 C_2 C_3$: ضرایب اصلاح جابجایی هستند که بر اساس یک سری آنالیزهای آماری بر روی نتایج حاصل از آنالیزهای تاریخیچه ی زمانی مدل های یک درجه آزادی استوارند [7].

شتاب طیفی FEMA-356:



شکل (1): شتاب طیفی FEMA-356

$$S_a^i = \begin{cases} F_a S_s^i (0.4 + 3T/T_0) & \text{if } 0 < T \leq 0.2T_0^i \\ F_a S_s^i & \text{if } 0.2T_0^i < T \leq T_0^i, i = IO, LS, CP \\ F_v S_1^i / T & \text{if } T > T_0^i \end{cases} \quad (8)$$

T_0 طبق رابطه زیر بدست می آید.

$$T_0 = \frac{F_v \cdot S_1}{F_a \cdot S_s} \quad (9)$$

که در روابط بالا S_s مقدار شتاب طیفی در پریود کوتاه 0.2 ثانیه و S_1 مقدار شتاب طیفی در پریود بلند 1 ثانیه در سطح خطر مورد نظر می باشد که بر اساس مرجع [8] بدست آمده است. F_a و F_v نیز پارامترهای مربوط به ساختگاه می باشند که با توجه به خاک منطقه از جداول موجود در آیین نامه FEMA-356، استخراج می شوند. مقادیر B_1 و B_s برای میرایی 5٪ برابر 1 می باشد. T پریود طبیعی تقریبی ساختمان مورد نظر است که برای سازه های فولادی طبق آیین نامه مذکور

مقدار آن برابر با $T=0.35^{0.8}$ می باشد. در این رابطه h بر حسب فوت می باشد. مقادیر این ضرایب براساس مشخصات منطقه‌ای در تهران و سطح خطر 1 مطابق جدول 2 می باشد.

جدول (1): پارامترهای محاسبه شتاب طیفی

سطح خطر-1	$S_S(g)$	$S_1(g)$	F_V	F_a
20% / 50 years	0.714	0.289	1.511	1.114

5. نتایج عددی

در این بخش، بهینه‌سازی قاب خمشی فولادی 9 طبقه برای سطوح عملکرد I-O، L-S و C-P و سطح خطر 1 (10 درصد احتمال رویداد در 50 سال) صورت گرفته است. به جهت ساده‌سازی المان‌ها تیپ‌بندی شده‌اند. تحلیل‌های پوش‌آور سازه مورد مطالعه با استفاده از نرم افزار OPENSEES و برای برنامه‌های کامپیوتری لازم از محیط برنامه‌نویسی MATLAB استفاده و بهینه‌سازی بوسیله الگوریتم اجتماع ذرات اصلاح شده صورت گرفته است. بار مرده در تمام طبقات برابر 30000 و بار زنده 10000 نیوتن بر متر می باشد. برای بارگذاری ثقلی از ترکیب بار زیر استفاده شده است.

(10)

$$W = 1.1(Q_{DL} + Q_{LL})$$

قیدهای مساله بهینه‌سازی کنترل چرخش مفاصل پلاستیک و تغییر مکان نسبی طبقات می باشد. که مقادیر مجاز این قیدها بر اساس FEMA-356 بصورت زیر می باشد [7].

جدول (2): مقادیر مجاز drift سطوح عملکردی

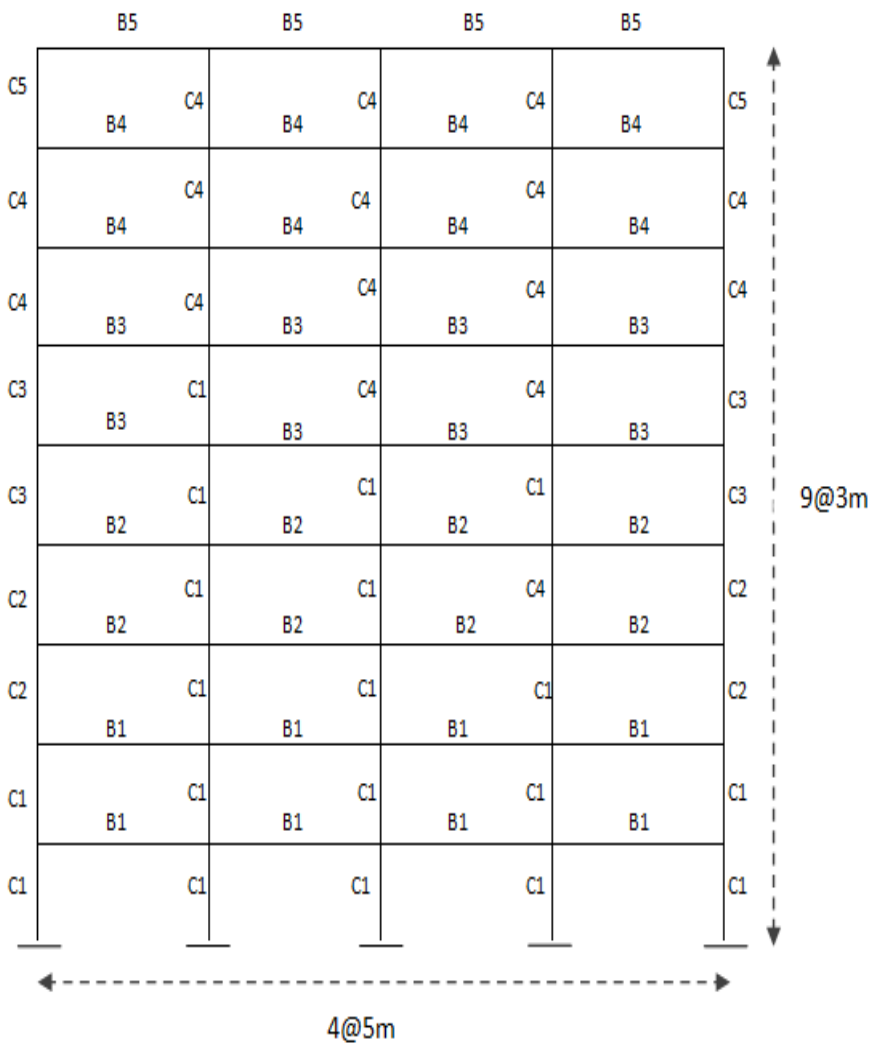
سطح عملکرد	دریفت طبقات
I-O	0.007
L-S	0.025
C-P	0.05

جدول (3): مقادیر مجاز چرخش مفاصل پلاستیک

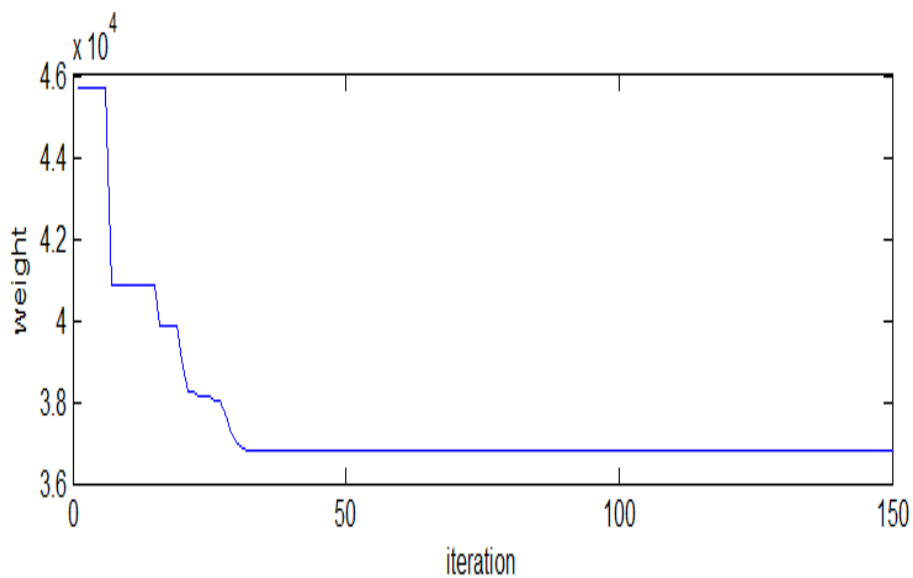
سطح عملکرد	تیر	ستون
I-O	θ_y	θ_y
L-S	$6\theta_y$	$6\theta_y$
C-P	$8\theta_y$	$8\theta_y$

مقاطع اعضا از بین 267 مقطع w-shape از AISC انتخاب شده‌اند. رفتار غیرخطی مصالح در نرم افزار OPENSEES با استفاده از مدل Steel01 و به صورت دو خطی در نظر گرفته شده است. برای تعریف مقاطع فولادی از مقطع fiber استفاده شده است و برای تعریف اعضا از المان nonlinearBeamColumn استفاده شده است. با استفاده از

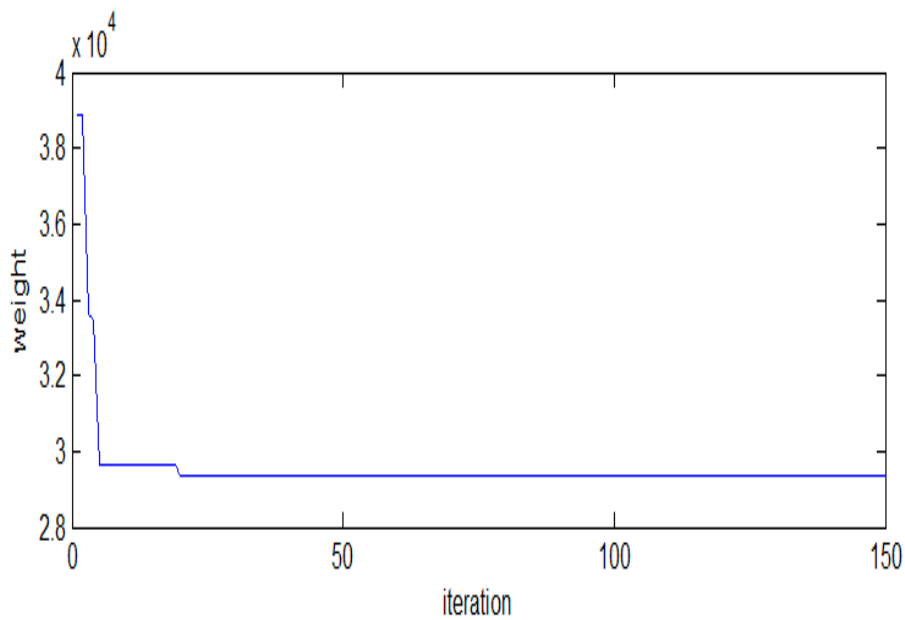
این المان غیرخطی بودن مصالح در کل طول عضو در نظر گرفته می شود. تنش تسلیم فولاد $F_y = 24e7 N/m^2$ و مدول الاستیسیته فولاد $E = 2e11 N/m^2$ می باشد. در شکل (2) تیپ بندی قاب 9 طبقه و در شکل های (3)، (4) و (5) به ترتیب نحوه همگرایی در فرآیند بهینه سازی در سطوح عملکرد I-O، L-S و C-P نشان داده شده است.



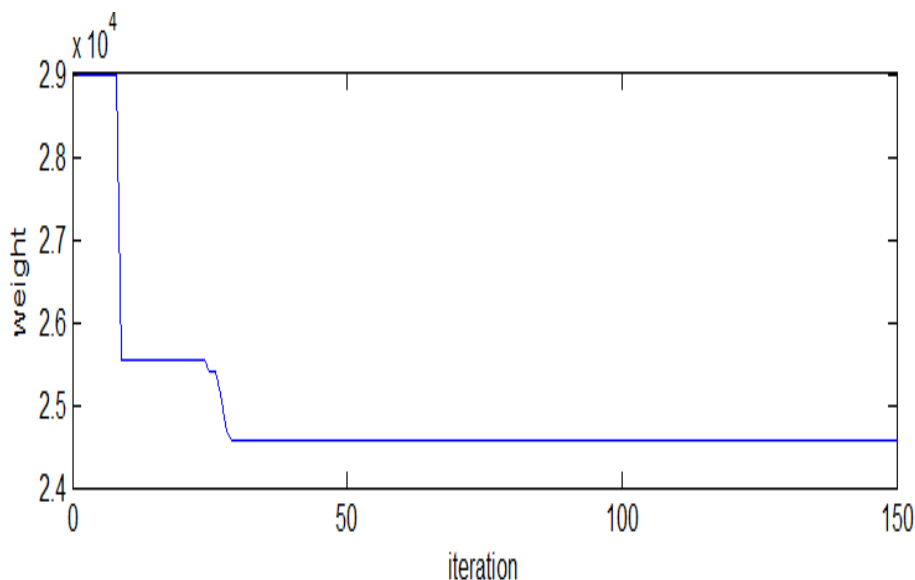
شکل (2): تیپ بندی اعضا قاب 9 طبقه



شکل (3): تاریخچه همگرایی فرایند بهینه سازی قاب 9 طبقه در سطح عملکرد IO



شکل (4): تاریخچه همگرایی فرایند بهینه سازی قاب 9 طبقه در سطح عملکرد LS



شکل (5): تاریخچه همگرایی فرایند بهینه سازی قاب 9 طبقه در سطح عملکرد CP

جدول (4): مقاطع بهینه قاب 9 طبقه در روش طراحی بر اساس عملکرد (آنالیز پوش آور)

تیپ بندی المان ها	مقاطع سطح عملکرد I-O	مقاطع سطح عملکرد L-S	مقاطع سطح عملکرد C-P
B1	W21x68	W14x455	W16x67
B2	W16x31	W14x145	W12x120
B3	W14x665	W14x120	W12x87
B4	W14x22	W14x120	W12x72
B5	W12x136	W14x48	W10x77
C1	W18x40	W21x111	W18x40
C2	W16x67	W14x82	W14x500
C3	W14x500	W14x43	W12x87
C4	W12x87	W12x210	W12x22
C5	W12x16	W12x50	W10x15
C6	W21x122	W16x67	W18x158
C7	W21x68	W14x426	W18x158
C8	W18x71	W14x193	W14x665
C9	W14x500	W10x54	W10x26
C10	W10x49	W8x40	W8x40
C11	W21x147	W21x50	W18x60
C12	W21x147	W18x76	W14x99
C13	W21x147	W16x31	W12x279
C14	W14x500	W12x152	W12x106
C15	W14x311	W12x19	W10x88
Weight(kg)	3.6779e4	2.9384e4	2.4566e4

6. خلاصه و نتیجه گیری

در این تحقیق طراحی بهینه قاب خمشی فولادی 9 طبقه بر اساس عملکرد برای بارهای ثقلی و جانبی با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات اصلاح شده ارائه شده است. قیود مسئله بهینه سازی کنترل چرخش مفاصل پلاستیک و تغییر مکان نسبی طبقات برای سطوح عملکرد I-O, L-S و C-P بر اساس ضوابط آیین نامه FEMA-356 می باشد. با توجه به نتایج بدست آمده از بهینه سازی قاب 9 طبقه در جدول (4) می توان نتیجه گرفت که وزن سازه در سطح عملکرد CP از وزن همان سازه در سطح عملکرد LS و IO کمتر می باشد. همچنین وزن سازه در سطح عملکرد LS از وزن همان سازه در سطح عملکرد IO کمتر می باشد. کمتر بودن وزن سازه در سطح عملکرد CP نسبت به سطح عملکرد IO و LS به دلیل بیشتر بودن مقدار مجاز تغییر مکان نسبی و چرخش مفاصل پلاستیک در این سطح عملکرد می باشد. در واقع سازه مقدار زیادی از نیروی زلزله را با جابجایی و تغییر شکل مستهلک می کند و بیشتر وارد فاز غیر خطی می شود و چون نیاز به تحمل نیروی کمتری دارد در نتیجه مقاطع کوچک تر می شوند و وزن سازه کمتر می شود.

7. مراجع

- [1] Kameshki. E.S, Saka. M.P, optimum design of nonlinear steel frames with semi-rigid connections using a genetic algorithm , computer and structures, 79, 1593-1604,2001
- [2] Lagaros. D, Fragidakis. M, Papadarakakis. M, Tsompanaki. Y, structural optimization Atool for evaluating seismic design procedures, 28, 1623-1633, 2006
- [3] Hyu Choi. Se, Eock Kim. Seung, optimal design of steel frame using practical nonlinear inelastic analysis, engineering structures, 24 ,1189-1201,2002
- [4] Kaveh. A, Talatahari .S An improved ant colony optimization for the design of planar steel frames ,engineering structures ,32, 864-873,2010.
- [5] Kennedy .J, Eberhart .RC, particle swarm optimization. in: proceedings of ieee international conference in neural networks. p. 1942-8; 1995
- [6] رامین تقی نژاد، طراحی و بهسازی لرزه ای سازه ها بر اساس سطح عملکرد، چاپ دوم، نشر کتاب دانشگاهی، 1389
- [7] Federal Emergency Management Agency. Fema-356, prestandard and commentary for seismic rehabilitation of buildings, Washington (DC); 2000.
- [8] <http://iranhazard.mporg.ir>