

## بهینه‌سازی چندهدفه قاب‌های خمشی بتن آرمه با استفاده از الگوریتم ژنتیک و روش جمع وزنی توابع هدف

مهدی بابائی<sup>۱\*</sup>، مسعود ملائی<sup>۲</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۵/۰۶	در چند دهه اخیر استفاده از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی سازه‌ها مورد توجه بسیاری بوده و سازه‌های فولادی و بتنی با هدف بهینه‌سازی وزن مورد بررسی قرار گرفته‌اند. اما بهینه‌سازی چند هدفه به منظور تعیین موازنه توابع هدف و استخراج جبهه پاراتو در سازه‌های فولادی و خصوصاً بتن آرمه چالش برانگیز بوده است. در این مقاله توابع هدف هزینه و جابه‌جایی برای بهینه‌سازی قاب‌های خمشی بتن آرمه معرفی شده‌اند. با استفاده از روش جمع وزنی توابع هدف (Weight Sum Approach) مساله بهینه‌سازی از حالت دو هدفه به حالت یک هدفه تبدیل شده و مدل‌های طراحی به صورت مجزا بهینه شده‌اند. مقطع تیرها و ستون‌ها به عنوان متغیرهای طراحی فرض شده‌اند و محدودیت‌های آیین‌نامه بتن آمریکا (ACI) به صورت قیود طراحی در نظر گرفته شده‌اند. قاب‌های خمشی بتن آرمه ۴، ۸ و ۱۲ طبقه (نماینده سازه‌های کوتاه، متوسط و بلند) به عنوان مدل‌های مطالعه معرفی شده و نسبت تنش در تیرها و ستون‌های جواب‌های بهینه برای تیپ‌های مختلف نشان داده شده‌اند. تاریخچه بهینه‌سازی و جبهه پاراتوی توابع هدف برای مدل‌ها ارائه شده‌اند. مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج الگوریتم کلونی مورچه‌ها مقایسه شده و کارایی الگوریتم اثبات شده است.
پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۲۶	
<b>واژگان کلیدی:</b> قاب‌های خمشی بتن آرمه، الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی چند هدفه، وزن، جابه‌جایی،	

### ۱- مقدمه

با توجه به اینکه سازه‌های بتن آرمه تنوع مصالح بیشتری در مقایسه با سازه‌های فولادی دارند، از این رو بهینه‌سازی سازه‌های بتن آرمه پیچیدگی‌های بیشتری نسبت به سازه‌های فولادی دارد. از جمله متغیرهای موجود در بهینه‌سازی سازه‌های بتن آرمه می‌توان به مقاومت فشاری بتن، مقاومت فولاد، ابعاد مقاطع، مقدار و درصد آرماتورها و غیره اشاره کرد.

در محاسبه هزینه سازه‌های بتن آرمه سه پارامتر حجم بتن مصرفی، وزن آرماتورهای بکار رفته در سازه و هزینه قالب بندی اهمیت دارند. لازم به ذکر است که هزینه نیروی انسانی را نیز باید به هزینه‌های فوق اضافه نمود ولی می‌توان، مانند آنچه در این مقاله فرض شده، هزینه نیروی انسانی در هزینه قالب‌بندی منظور شود.

بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک در چند دهه اخیر

مورد استقبال بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. از جمله پژوهش‌های انجام شده در این زمینه می‌توان به تحقیقات انجام شده توسط Hoit و همکارانش در سال ۱۹۹۱ اشاره کرد که به موضوع بهینه‌سازی برای حداقل کردن وزن سازه با روش لاگرانژی و تکنیک‌های غیر خطی اشاره کرد. Adamu و همکارانش در سال ۱۹۹۴ مقاله‌ای در مورد بهینه‌سازی هزینه تیرهای بتن آرمه منتشر نمودند. همچنین در سال ۱۹۹۷ Balling و Yao پژوهشی با موضوع بهینه‌سازی سه‌بعدی قاب‌ها با استفاده از روش‌های چند لایه انجام داده‌اند. در سال ۲۰۰۳ نیز Charles V.Camp و همکارانش مقاله‌ای در مورد بهینه‌سازی قاب‌های خمشی با استفاده از الگوریتم ژنتیک به چاپ رساندند [۱-۴].

ثنائی و بابائی برای بهینه‌سازی محیط‌های پیوسته روش اتوماتای سلولی را توسعه داده‌اند و نتایج جالبی ارائه داده

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mbabaei@znu.ac.ir

۱. استادیار، دانشکده مهندسی، گروه عمران، دانشگاه زنجان

۲. کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان

در این مقاله تلاش شده است تا ابتدا هزینه سازه حداقل شود و در مرحله دوم مقادیر جابه‌جایی کمینه شوند. متغیرهای طراحی مورد نظر شامل ابعاد مقاطع و میزان آرماتورها می‌باشند. همچنین باید به این نکته نیز توجه داشت که چیدمان آرماتورها و شماره آنها با توجه به محدودیت‌های مشخص شده در آیین‌نامه ACI و همچنین مقادیر آرماتورهای مورد نیاز محاسبه شوند. تیرها در برابر لنگر خمشی و ستون‌ها در برابر اثر توام لنگر خمشی و نیروی محوری به صورت همزمان مورد ارزیابی قرار گرفته اند. تابع هدف برای حداقل کردن مقادیر هزینه به صورت اولیه تعریف شده است ولی روابط (۲)، (۳) و (۴) به صورت جزئی و دقیق رابطه تابع هدف را بیان می‌کنند:

$$\text{Minimize } F_1 = f(P_s, P_c, P_f) \quad (2)$$

$$F_1 = \sum_{\text{element}} C_s L A_s + C_c L b h + C_f L p \quad (3)$$

$$\text{Minimize } F_2 = \min(\text{displacement}) \quad (4)$$

در رابطه فوق  $C_c$  برابر است با هزینه یک متر مکعب بتن،  $C_s$  هزینه یک متر مکعب فولاد،  $C_f$  هزینه قالب‌بندی بر حسب متر مربع می‌باشد. همچنین  $L$  طول بر حسب متر و  $p$  محیط بر حسب متر می‌باشد. با توجه به اینکه در این مقاله از روش مجموع وزنی استفاده شده است، تابع هدف اصلی ترکیبی از توابع هدف وزن و جابه‌جایی سازه می‌باشد که باید نرمال شوند تا امکان جمع وزنی معنی‌دار شود [۱۰] و [۱۱].

## ۲-۲-۲- نرمال کردن توابع هدف

با توجه به اینکه در این روش از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی استفاده می‌شود و الگوریتم ژنتیک یک الگوریتم بهینه‌سازی تک هدفه است لذا یک روش برای یک هدفه کردن مورد نیاز است. یکی از روش‌های معروف و معمول در بهینه‌سازی چند هدفه روش مجموع وزنی توابع هدف است. در این روش به هر کدام از توابع هدف یک ضریب اهمیت بین ۰ تا ۱ به گونه‌ای اختصاص داده می‌شود که مجموع ضرایب اهمیت (وزن) همه توابع هدف برابر واحد شود. بنابراین برای پیدا کردن جبهه پارتو دو تابع هدف وزن و جابجایی بام، تابع هدف مرکب را به گونه‌ای تعریف می‌کنیم که مجموع ضریب اهمیت توابع هدف برابر یک شود. در صورتی که تابع هدف اول را با  $f_1$  و تابع هدف دوم را با  $f_2$  نشان دهیم، مقدار تابع هدف به صورت رابطه (۵)

اند [۵ و ۶]. تأثیر شکل‌پذیری در هزینه قاب‌های خمشی بتن آرمه در سازه‌های ۵ تا ۱۵ طبقه توسط بابائی بررسی شده و اختلاف هزینه برای طبقات و انواع شکل‌پذیری گزارش شده است [۷]. بهینه‌سازی قاب‌های خمشی بتن آرمه با هدف تعیین توپولوژی و چیدمان بهینه ستون‌ها در سازه‌های ۵ تا ۱۰ طبقه انجام شده است [۸]. بهینه‌سازی چند هدفه برای یافتن توپولوژی و سازه بهینه قاب‌های فولادی توسط بابائی و ثنائی بررسی شده است [۹].

هدف این مقاله یافتن حداقل هزینه و حداقل جابه‌جایی سازه‌های بتن آرمه و موازنه این توابع هدف با استفاده از الگوریتم ژنتیک است که با توجه به محدودیت‌های آیین‌نامه ACI در تحلیل‌های مجزا بدست خواهند آمد. به این منظور مقادیر بدست آمده از این روش‌ها با استفاده از روش مجموع وزنی از دو هدفه به یک هدفه تبدیل شده که معیار و نماینده‌ای از تعداد بسیار زیادی از سازه‌هاست که هر کدام از آنها به دیگری غلبه نداشته و می‌توان با توجه به نیاز از هر کدام از آنها استفاده نمود.

شایان ذکر است که بهینه‌سازی سازه‌های بتن آرمه با الگوریتم‌های مختلفی به صورت تک هدفه انجام شده است ولی استفاده از روش مجموع میانگین وزنی برای بهینه‌سازی چند هدفه در سازه‌ها کمتر مورد توجه بوده است. از این رو پرداختن به این مساله جنبه‌ای جدید و نوظهور خواهد داشت.

## ۲- فرآیند بهینه‌سازی

### ۲-۱- تعریف تابع هدف

در این مقاله دو تابع هدف مختلف معرفی شده‌اند. تابع هدف اول هزینه سازه و تابع هدف دوم جابه‌جایی سازه می‌باشد. برای این منظور هزینه محاسبه شده بر مبنای سه پارامتر حجم بتن مصرفی، مقدار آرماتورهای مصرفی و هزینه قالب‌بندی و نیروی انسانی محاسبه شده است. لذا می‌توان تابع هدف اول را به صورت رابطه (۱) برای کیمنه سازی هزینه سازه معرفی کرد:

$$F_c = f(P_s, P_c, P_f) \quad (1)$$

در رابطه فوق  $F_c$  تابع هدف برای کمینه کردن هزینه سازه،  $P_s$  هزینه فولاد مصرفی،  $P_c$  هزینه بتن مصرفی و  $P_f$  هزینه قالب‌بندی و نیروی انسانی است. تابع هدف دوم به صورت حداقل کردن جابه‌جایی معرفی شده است.

$$C_i = \alpha_i V_i \quad (7)$$

$$\phi = \sum_{i=1}^n C_i \quad (8)$$

که در این روابط  $C_i$  تابع جریمه به ازای هر کدام از قیود،  $\alpha_i$  ضریب جریمه مربوط به هر کدام از قیود،  $V_i$  مقدار جریمه هر قید و  $\phi$  مجموع جریمه لحاظ شده می‌باشد. مقادیر ضریب جریمه با توجه به مدل و با استفاده از سعی و خطا بدست آمده است و برای هر کدام از سازه‌ها مقادیری منحصر به فرد است. [۱۲]

### ۳- معرفی الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یکی از الگوریتم‌های فرااکتشافی است که در دهه‌های اخیر مورد استقبال بسیاری از محققان قرار گرفته است. از این الگوریتم برای حل مسائل مختلف بهینه سازی در حوزه‌های مختلفی همچون مسائل اقتصادی، مسائل مهندسی و غیره استفاده شده است. از الگوریتم ژنتیک برای حل مسائل تک هدفه استفاده می‌شود حال آنکه در این مقاله تلاش شده است با ترکیب دو تابع هدف یک هدفه و انجام مکرر عملیات بهینه‌سازی، مساله تک هدفه به یک مساله دو هدفه تبدیل شده و حل شود.

در الگوریتم ژنتیک از روش‌های متفاوتی برای انتخاب شایسته‌ترین افراد و انتقال آن‌ها به نسل بعدی و تشکیل جمعیت بهتر استفاده می‌شود. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش‌های تلفیق و جهش اشاره کرد. در روش تلفیق تعدادی از اعضای جامعه انتخاب شده و دو به دو با یکدیگر تلفیق می‌شوند تا ویژگی‌های آن‌ها با یکدیگر ادغام گردد و فرزندان بهتری برای نسل بعدی ایجاد شود. در عملگر جهش هم تعدادی از افراد جامعه انتخاب می‌شوند و برخی از ویژگی‌های آن‌ها دستخوش تغییر می‌شود تا آن فرد، به فرد بهتری تبدیل گردد.

تعداد افراد جامعه که برای عملگر تلفیق و جهش انتخاب می‌شوند بستگی به نوع مساله و تعداد جمعیت خواهد داشت. از طرف دیگر نحوه انتخاب افراد برای تلفیق و جهش هم مهم است. از جمله روش‌هایی که می‌توان به آن‌ها برای انتخاب بهترین‌ها اشاره کرد روش‌های roulette wheel tournament selection و random است. با سعی و خطا می‌توان بهترین روش را با توجه به نوع مساله برای انتخاب بهترین‌ها اختیار نمود. در این مساله روش tournament selection بهترین عملکرد را نسبت به سایر

تعریف می‌شود:

$$F = \alpha \cdot f_1 + (1 - \alpha) \cdot f_2 \quad (5)$$

اما با توجه به اینکه در رابطه فوق کمیت‌های دو تابع، یعنی جابجایی و هزینه را نمی‌توان با یکدیگر جمع کرد باید توابع هدف بدون بعد شوند. بنابراین ابتدا مقادیر حداکثر و حداقل هزینه و جابجایی را محاسبه کرده و مقادیر بدست آمده به صورت زیر نرمال می‌شوند تا بتوان تاثیر واحدها را حذف کرد و توابع را با یکدیگر ترکیب نمود. بنابراین تابع هدف نهایی به صورت رابطه (۶) بدست می‌آید:

$$F = \alpha \left( \frac{f_1 - f_{1min}}{f_{1max} - f_{1min}} \right) + (1 - \alpha) \left( \frac{f_2 - f_{2min}}{f_{2max} - f_{2min}} \right) \quad (6)$$

در این رابطه حداقل تابع هدف اول ( $f_{1min}$ ) و حداکثر تابع هدف دوم ( $f_{2max}$ ) با تخصیص ضعیف‌ترین مقاطع برای اعضای سازه‌ای و حداکثر تابع هدف اول ( $f_{1max}$ ) و حداقل تابع هدف دوم ( $f_{2min}$ ) با در نظر گرفتن قوی‌ترین مقاطع برای اعضای سازه‌ای بدست می‌آیند. وقتی که مقادیر  $F$  کمینه شود بهترین حالت بر حسب وزن توابع هدف محاسبه می‌شود. برای یافتن جبهه پارتو باید مقادیر مختلفی برای  $\alpha$  انتخاب شود و پس از محاسبه نقاط مختلف با اتصال آنها به یکدیگر در فضای توابع هدف جبهه پارتو حاصل می‌شود.

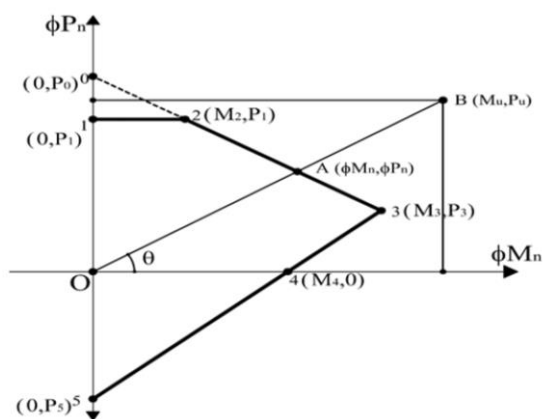
### ۲-۳- معرفی توابع جریمه

تابع هدف باید به گونه‌ای تعریف شود که همه قیود مانند تنش‌های موجود در هر یک از المان‌ها ارضاء شوند. از طرف دیگر باید محدودیت‌های مربوط به تغییر شکل سازه نیز رعایت گردد. از نظر اجرایی باید ستون‌های طبقات پایین ابعاد بزرگتری نسبت به ستون‌های طبقات بالا داشته باشند و همچنین قطر آرماتورها و تعداد آنها نیز در ستون‌های بالایی باید کمتر از تعداد آنها نسبت به ستون‌های پایینی باشد. سایر محدودیت‌های مربوط به آیین‌نامه ACI نیز باید ارضاء شوند. در صورتی که این قیود ارضا نگردند، توابع هدف (هزینه یا جابه‌جایی سازه) جریمه می‌شوند. با این روش علاوه بر ساده کردن تابع هدف، محدودیت‌های لازم به گونه‌ای اعمال می‌شوند که هزینه سازه و یا جابه‌جایی آن افزایش یابد و به صورت خودکار پاسخ‌های دارای جریمه به عنوان پاسخ بهینه انتخاب نشوند. روش‌های زیادی در معرفی تابع جریمه تا کنون ارائه شده است، اما در این مقاله از تابع جریمه به صورت روابط (۷) و (۸) استفاده شده است.

روش‌ها از خود نشان می‌دهد. در این مقاله با توجه به محدودیت‌های آیین‌نامه‌ای تعدادی مقطع برای تیرها و ستون‌ها معرفی شده است که الگوریتم تلاش می‌کند با انتخاب بهترین مقاطع جابجایی و هزینه را کمینه کند [۱۳-۱۵]. شکل (۱) نحوه عملکرد الگوریتم را نشان می‌دهد.

آرماتورهای به کار رفته و تعداد آنها و محل قرارگیری آرماتورها مطرح شده است با توجه به موارد ذکر شده محدودیت‌های مربوط به مقاومت ستون‌ها با توجه به نمودار اندرکنش همان ستون مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به این صورت که اگر محل قرارگیری نیروی محوری و لنگر خمشی داخل نمودار باشد، ستون مورد نظر توانایی تحمل بارهای وارده را خواهد داشت و در غیر این صورت باید از ستون‌های قوی‌تری برای این المان استفاده کرد. همچنین در صورتی که ستون نتواند بارهای وارده را تحمل کند باید به آن ستون جریمه تعلق گیرد. برای محاسبه جریمه روش‌های متفاوتی وجود دارد. در این مقاله از روش فاصله نقاط تا مبدا مختصات استفاده شده است. برای این منظور فاصله نقطه مورد نظر را تا مبدا مختصات محاسبه کرده و مقدار مجاز آن فاصله، یعنی محل برخورد خط واصل بین آن نقطه و مبدا مختصات با نمودار اندرکنش را نیز بدست می‌آوریم. در نهایت از فاصله بین نقطه مورد نظر و نقطه مجاز بر فاصله نقطه مجاز میزبان جریمه مورد نظر محاسبه خواهد شد. این مقادیر در شکل (۲) توضیح داده شده است.

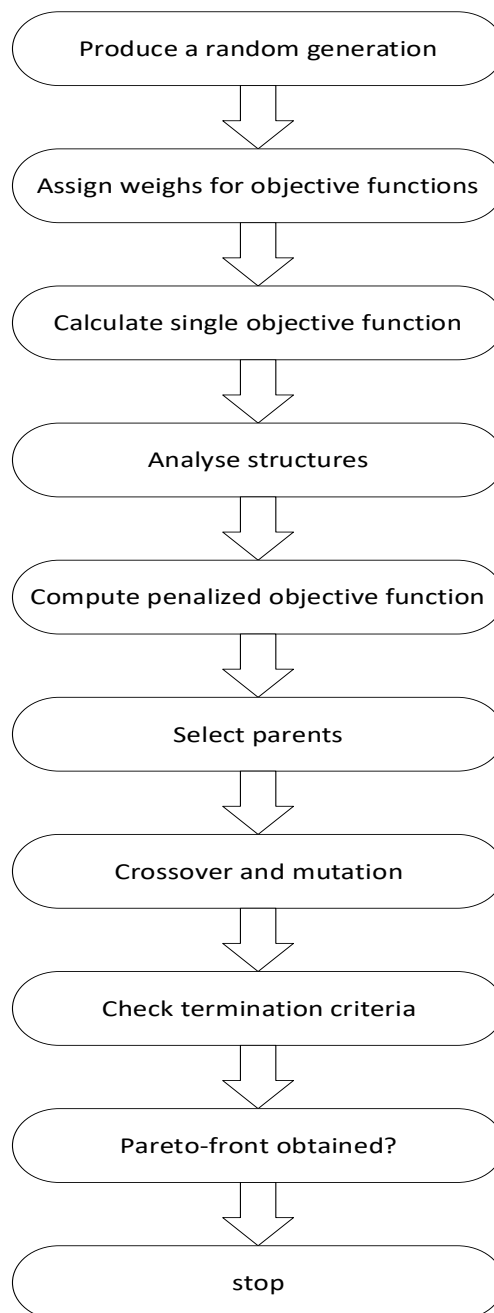
$$\text{column penalty} = \frac{BO - AO}{AO} \quad (9)$$



شکل ۲: نحوه محاسبه جریمه در ستون‌ها

برای تیرها نیز محدودیت‌های آیین‌نامه‌ای مانند ستون‌ها برقرار است. با این تفاوت که در تیرهای اندرکنش نیروهای محوری و لنگر وجود نداشته و لنگر خمشی تعیین‌کننده خواهد بود. در این حالت با توجه به ضرایب کاهش مقاومت لنگر مجاز محاسبه شده و در صورت عدم ارضای شرط فوق مقادیری به تابع هزینه به عنوان جریمه اضافه خواهد شد. از دیگر شرایطی که باید بر طبق آیین‌نامه باید رعایت شود

روش‌ها از خود نشان می‌دهد. در این مقاله با توجه به محدودیت‌های آیین‌نامه‌ای تعدادی مقطع برای تیرها و ستون‌ها معرفی شده است که الگوریتم تلاش می‌کند با انتخاب بهترین مقاطع جابجایی و هزینه را کمینه کند [۱۳-۱۵]. شکل (۱) نحوه عملکرد الگوریتم را نشان می‌دهد.



شکل ۱: چگونگی عملکرد الگوریتم

#### ۴- محدودیت‌های آیین‌نامه ACI

در آیین‌نامه ACI 318-11 محدودیت‌هایی برای مقاومت هر کدام از المان‌ها و همچنین محدودیت‌هایی برای درصد

همچنین بارهای مرده و زنده یکنواخت به ترتیب معادل  $Dl = 22.3 \text{ KN} / m$  و  $Ll = 10.7 \text{ KN} / m$  در نظر گرفته شده است. مقادیر مقاومت فشاری بتن معادل  $f'_c = 280 \text{ kg} / \text{cm}^2$  و مقاومت تسلیم فولاد برابر با  $f_y = 4200 \text{ kg} / \text{cm}^2$  در نظر گرفته شده است.

برای توقف الگوریتم می‌توان شرایط مختلفی را در نظر گرفت که از جمله آن‌ها می‌توان به شرط همگرایی و یا تعداد تکرار اشاره کرد. با توجه به سعی و خطاهای مختلف و انتخاب بهترین روش توقف، برای این الگوریتم شرط تعداد تکرار انتخاب شده است. برای یافتن بهترین جمعیت و بهترین تعداد تکرار جمعیت‌های مختلف با تکرارهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است و در نهایت جمعیت ۳۰ عضوی و تعداد تکرار ۱۰۰ موثرترین بوده است و مورد استفاده قرار گرفته است.

#### ۵-۱- نمونه اول

در این قاب ارتفاع طبقات معادل ۳٫۳ متر و طول دهانه‌ها معادل ۷٫۵ متر در نظر گرفته شده است. مقادیر بارهای ثقلی در قبل معرفی شده است و مقادیر بارهای جانبی هم در شکل (۳) نشان داده شده است. در این مثال دو تیپ برای تیرها و دو تیپ برای ستون‌ها منظور شده است. لازم به ذکر است که هزینه یک متر مکعب بتن معادل ۱۰۰ هزار تومان، قیمت یک کیلوگرم فولاد ۱۶۰۰ تومان و هزینه قالب‌بندی معادل ۱۵ هزار تومان برای یک متر مربع در نظر گرفته شده است.

در شکل شماره (۴) موازنه بین توابع هدف (جبهه پاراتو) برای دو جمعیت مختلف با تعداد تکرارهای مختلف نشان داده شده است. نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک با نتایج الگوریتم کلونی مورچه‌ها مقایسه شده است. جواب‌های بدست آمده در این شکل نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک جواب‌های بهتری را تولید می‌کند و تعداد جمعیت و تعداد تکرار فرض شده برای آن مناسب بوده و نیازی به افزایش ندارند. لازم به ذکر است که برای اطمینان از پاسخ‌های محاسبه شده، محاسبات برای بیست بار تکرار شده است و در نهایت نمودارهای مربوط به جابجایی و هزینه بدست آمده‌اند. شایان ذکر است که در مقایسه این روش با روش کلونی مورچگان، در این مدل الگوریتم ژنتیک سرعت همگرایی بیشتری داشته و جواب‌های به نسبت بهتری را بدست می‌آورد.

مقادیر آرماتورهای مورد استفاده در ستون‌هاست که باید در محدوده خاصی قرار بگیرد. به عبارت دیگر مقادیر درصد آرماتور مصرفی در ستون‌ها باید در محدوده  $0.01 \leq \rho \leq 0.08$  قرار بگیرد که این مقدار برای مناطق با احتمال لرزه‌ای زیاد به مقدار  $0.01 \leq \rho \leq 0.06$  تعدیل پیدا می‌کند. با توجه به اینکه مقادیر آرماتورها در محل اتصال ستون با ستون‌های طبقه بالا دوبرابر (به دلیل همپوشانی جهت رعایت فاصله طول گیرایی) شود بنابراین نصف مقادیر فوق باید به عنوان حداکثر مقادیر آرماتورهای مصرفی در ستون‌ها در نظر گرفته شود.

همچنین آرماتورهای طولی باید از کناره مقطع بر طبق آیین‌نامه فاصله‌ای داشته باشند که این فاصله به عنوان کاور تیرها و ستون‌ها در نظر گرفته می‌شود. این مقادیر با توجه به قطر آرماتورها و شرایط کارگاهی محاسبه خواهد شد. تعداد آرماتورها قابل استفاده در مقطع با توجه به این فاصله و فاصله بین آرماتورها محاسبه خواهد شد.

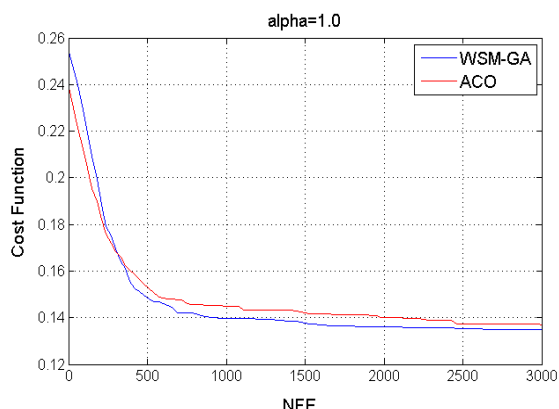
از موارد دیگری که بر طبق آیین‌نامه باید رعایت شود، ضرایبی است که برای ترک خوردگی مقاطع باید لحاظ شود. به عبارت دیگر با توجه به اینکه مقاطع بتنی در اثر لنگر و نیروی محوری ترک می‌خورند، آیین‌نامه برای مقادیر ممان اینرسی تیرها و ستون‌ها ضرایب کاهش را در نظر گرفته است. این ضرایب برای تیرها ۰٫۳۵ و برای ستون‌ها ۰٫۷ در نظر گرفته شده است.

#### ۵- معرفی نمونه‌های مطالعه

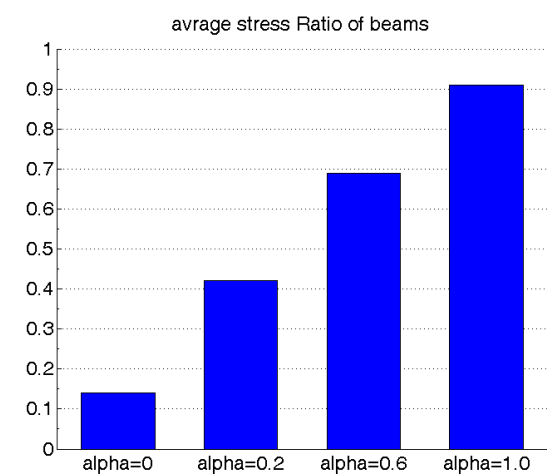
در این مقاله سه نمونه متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است تا عملکرد الگوریتم مورد سنجش قرار بگیرد. سه مدل مورد بررسی سازه‌های سه دهانه با چهار، هشت و دوازده طبقه در نظر گرفته شده است تا هر کدام از نمونه‌ها به عنوان نماینده از سازه‌های با ارتفاع کم، متوسط و بلند باشند. ارتفاع طبقات معادل ۳٫۳ متر و طول دهانه‌ها نیز ۷٫۵ متر لحاظ شده است. بارهای زنده و مرده طبقات به صورت گسترده به تیرهای طبقات و بارهای جانبی به صورت نقطه ای به محل اتصال تیرها و ستون‌ها اعمال شده‌اند. براساس آیین‌نامه ACI 318-11 سه ترکیب بار در (۱۰) برای سازه در نظر گرفته شده‌اند:

$$\begin{aligned} U &= 1.2D + 1.6L \\ U &= 1.2D + 1.0L \pm 1.0E \\ U &= 0.9D \pm 1.0E \end{aligned} \quad (10)$$

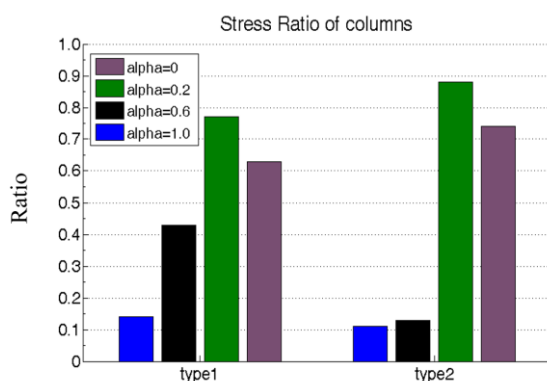
آورده شده است. در این شکل نمایندگانی با مقادیر مختلف نمایش داده شده است.



شکل ۵: تاریخچه بهینه‌سازی مدل اول

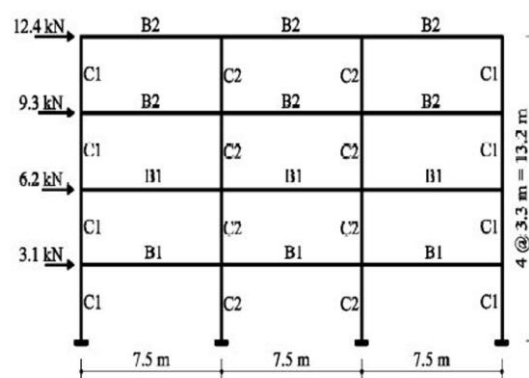


شکل ۶: نسبت تنش‌های ایجاد شده در تیرها



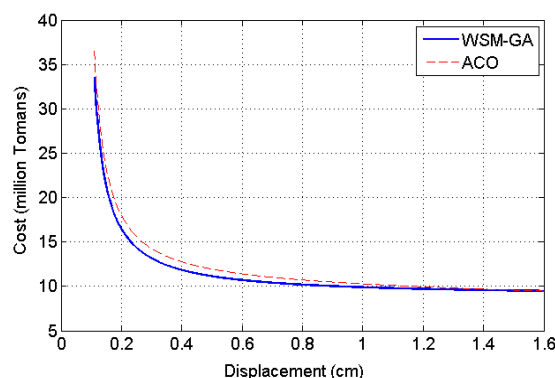
شکل ۷: نسبت تنش‌های ایجاد شده در ستون‌ها

همچنین حداکثر تنش‌های ایجاد شده در ستون‌ها در دو تیپ متفاوت در شکل (۷) نشان داده شده است. نکته قابل توجه کاهش تنش‌های دو تیپ ستون در حالی است که مقادیر اهمیت هزینه را معادل یک در نظر می‌گیریم. علت این امر را می‌توان به افزایش سختی تیرها و کاهش سهم ستون‌ها از نیروهای جانبی دانست.



شکل ۳: نمایش مدل اول مورد بررسی

مقاطع تیرهای مورد استفاده از مقطع  $30 \times 30$  به عنوان کوچکترین مقطع تا  $70 \times 70$  به عنوان بزرگترین عضو تشکیل شده است. همچنین برای ستون‌ها کوچکترین مقطع، شکل مربعی  $30 \times 30$  و بزرگترین آن مقطع مربعی  $70 \times 70$  در نظر شده است. همچنین با توجه به میزان مجاز فولاد در تیرها و ستون‌ها از آرماتورهای شماره ۱۲ تا ۳۰ به گونه‌ای استفاده شده است تا درصدی مختلف فولاد در تیرها و ستون‌ها منظور گردد.



شکل ۴: جبهه پاراتو جابجایی و هزینه قاب سه دهانه و چهار طبقه

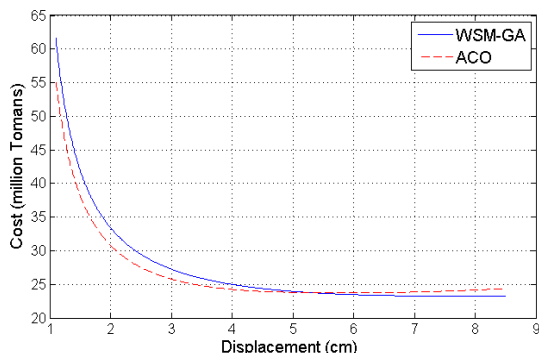
تاریخچه بهینه‌سازی پاسخ‌ها برای یک نمونه از جواب‌ها در شکل (۵) آورده شده است که روند بهینه‌سازی را برای حالتی که ضریب اهمیت هزینه ۱ و اهمیت جابجایی ۰ فرض شده را نشان می‌دهد. در این شکل نیز نتایج حاصل از هر دو الگوریتم ژنتیک و کلونی مورچه‌ها برای مقایسه نشان داده شده است.

برای مشخص شدن کارایی الگوریتم می‌توانیم به مقادیر نسبت تنش‌های موجود در مقاطع به تنش قابل تحمل آن‌ها توجه کرد. با توجه به اینکه در این مدل دوازده تیر با دو تیپ متفاوت در نظر گرفته شده است، میزان میانگین نسبت تنش موجود به تنش قابل تحمل تیرها در شکل (۶)

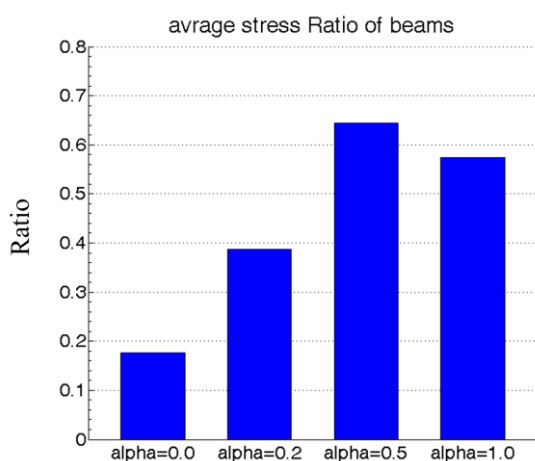
۵-۲- نمونه دوم

همانند مثال اول طول دهانه‌ها ۷٫۵ متر و ارتفاع طبقات ۳٫۳ متر برای این مثال نیز در نظر گرفته شده است. با توجه به تعداد تیرها و ستون‌ها سه تیر برای تیرها و چهار تیر برای ستون‌ها لحاظ شده است. بارهای ثقلی شامل بار زنده و بار مرده همانند مثال قبل بوده و هیچ تفاوتی نکرده است. مقادیر بارهای جانبی و نحوه تیربندی تیرها و ستون‌ها در شکل (۸) آورده شده است. مقادیر جابجایی و هزینه مربوط به این مدل که با استفاده از الگوریتم ژنتیک به روش مجموع وزنی و کلونی مورچه‌ها بهینه شده است در شکل (۹) قابل مشاهده است. برای مشخص شدن بهتر موضوع مقادیر تنش وارد بر تیرها و ستون‌ها نیز به صورت مجزا و در اشکال مختلف آورده شده است.

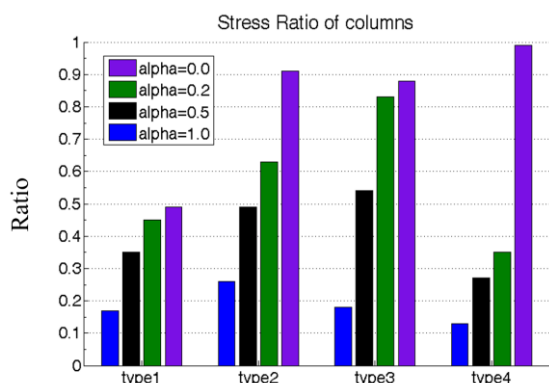
از  $\alpha = 0.5$  شده است. علت این امر را می‌توان در تنش ستون‌ها جستجو کرد. همان‌طور که در شکل شماره (۱۱) مشخص است، مقادیر تنش در ستون‌ها در حالت  $\alpha = 1$  بسیار بیشتر از سایر حالات است، بنابراین کاهش تنش در تیرهای این مدل عادی به نظر می‌رسد.



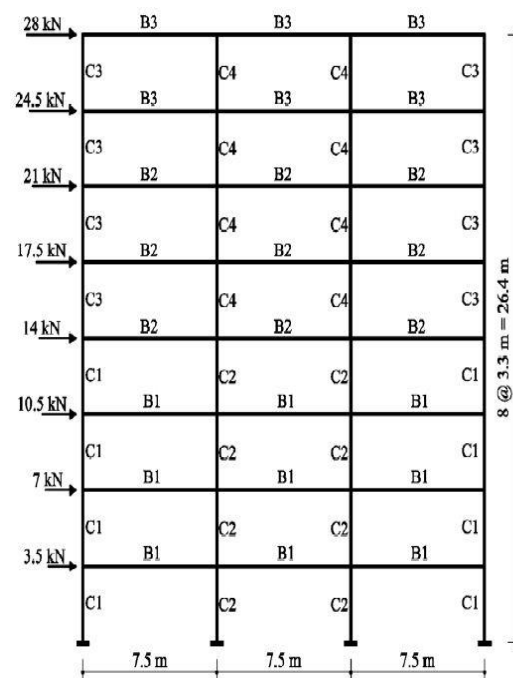
شکل ۹: جبهه پاراتو جابجایی و هزینه قاب سه دهانه و هشت طبقه



شکل ۱۰: نسبت تنش‌های ایجاد شده در تیرها



شکل ۱۱: نسبت تنش‌های ایجاد شده در ستون‌ها



شکل ۸: نمایش مدل دوم مورد بررسی

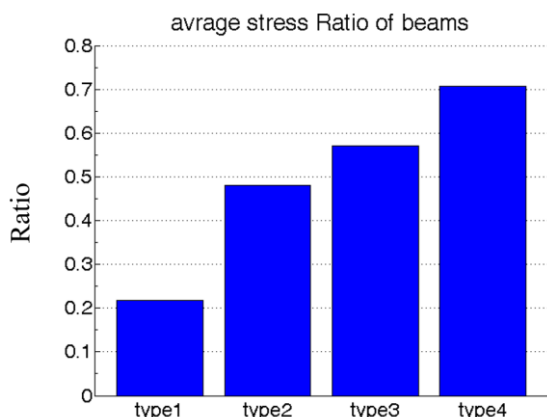
شایان ذکر است که مقادیر جابجایی محاسبه شده در این حالت مختص جابجایی بام می‌باشد. باید به این نکته نیز اشاره کرد که در این مدل الگوریتم کلونی مورچه‌ها در جابجایی‌های کمتر عملکرد بهتری داشته و الگوریتم ژنتیک در جابجایی‌های بزرگتر بهتر عمل کرده است.

در شکل (۱۰) مقادیر میانگین تنش‌های تیرها برای ارزش‌های مختلف هزینه و جابجایی معرفی شده است. انتظار می‌رود با افزایش ارزش هزینه و کاهش ارزش جابجایی میزان تنش‌ها در تیرها و ستون‌ها افزایش یابد. با این حال دیده می‌شود مقادیر میانگین تنش تیرها در  $\alpha = 1$  کمتر

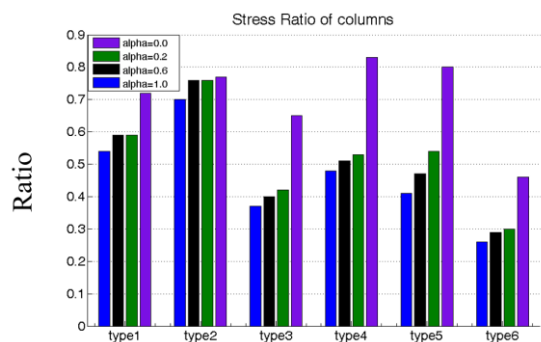
۵-۳- نمونه سوم

این مثال به عنوان یک سازه بلند در این مقاله در نظر گرفته شده است. این سازه از دوازده طبقه تشکیل شده است و

همانند مثال‌های قبلی مقادیر تنش‌های وارده بر تیرها و ستون‌ها به ترتیب در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) نمایش داده شده است.



شکل ۱۴: نسبت تنش‌های ایجاد شده در تیرها

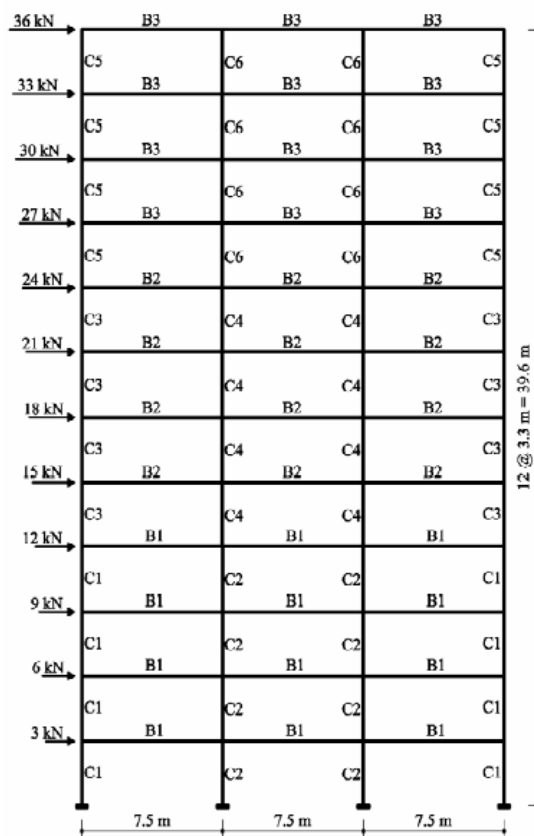


شکل ۱۵: نسبت تنش‌های ایجاد شده در ستون‌ها

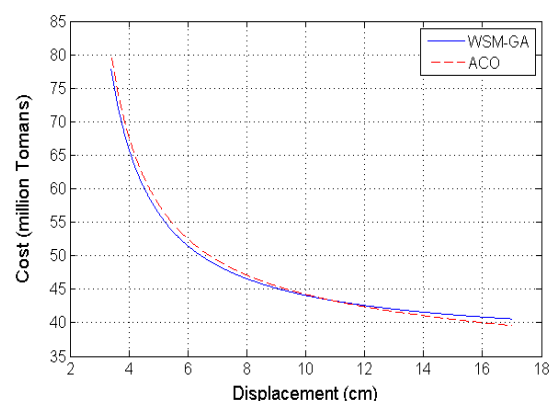
### ۶- نتایج

در این مقاله بهبودسازی دو هدفه قاب‌های خمشی بتن آرمه با استفاده از الگوریتم ژنتیک بررسی شده است. با توجه به اینکه الگوریتم ژنتیک تک هدفه استفاده شده، به منظور بهبودسازی دو هدفه توابع هدف با استفاده از روش جمع وزنی ترکیب شده‌اند. دو تابع هدف وزن ساز و جابجایی بام به عنوان توابع هدف بهبودسازی در نظر گرفته شده‌اند و پس از نرمال کردن با روش جمع وزنی توابع هدف ترکیب شده و یک تابع هدف مرکب تشکیل داده‌اند. ابعاد مقطع تیرها و ستون‌ها به عنوان متغیرهای طراحی فرض شده‌اند و بهبودسازی با متغیرهای گسسته با فرض تعداد محدودی مقطع برای اعضای سازه‌ای انجام شده است. برای بدست آوردن جبهه پاراتوی توابع هدف مقادیر مختلف با فاصله ۰.۱ برای ضرایب وزنی توابع هدف در نظر گرفته شده و موازنه توابع هدف بدست آمده‌اند. صحت و دقت روش ارائه شده با مقایسه نتایج این تحقیق با آنچه در ادبیات فنی

مقادیر طول دهانه‌ها و ارتفاع طبقات همانند مثال‌های قبلی است. تنها تفاوت این مثال با مثال قبلی تعداد طبقات است و بارهای ثقلی متشکل از بارهای زنده و مرده به صورت مشابه برای این مدل هم قرار گرفته است. مقادیر جابجایی‌ها و همچنین هزینه متناظر با آن برای هر دو الگوریتم در شکل شماره (۱۳) نشان داده شده است [۱۶ و ۱۷].



شکل ۱۲: نمایش مدل سوم مورد بررسی



شکل ۱۳: جبهه پاراتو جابجایی و هزینه قاب سه دهانه و دوازده طبقه

شایان ذکر است که مقادیر جابجایی محاسبه شده در این حالت مختص جابجایی بام می‌باشد.



معرفی مدل بسیار ساده‌تر از الگوریتم کلونی مورچه‌ها است و در نهایت پاسخ‌ها بیش از ده درصد با یکدیگر تفاوت نخواهند داشت.

موجود است توسط بررسی نمونه‌های طراحی انجام شده است. همچنین در مقایسه این روش با الگوریتم کلونی مورچه‌ها باید اشاره کرد که در این روش مدل‌سازی و

## ۷- مراجع

- [1] M. Hoit, A. Soeiro, F. Fagunda, "Probabilistic Design and Optimization of Reinforced Concrete Frames", journal of engineering optimization, Vol. 17, 1991, pp. 229-235.
- [2] A. Adamu, B.L. Karihaloo, G.I.N. Rozvany, "Minimum Cost Design of Reinforced Concrete Beams Using Continuum-Type Optimality", structural and multidisciplinary optimization, Vol. 7, 1994, pp. 91-102.
- [3] R.J. Baling, X. Yao, "Optimization of Reinforced Concrete Frames", Journal of structural engineering, Vol. 123, 1997, pp. 193-202.
- [4] Ch.V. Camp, Sh. Pezeshk, H. Hansson, "Flexural design of reinforced concrete frames using a genetic algorithm", Journal of structural engineering, Vol. 129, 2003, pp. 105-115.
- [5] E. Sanaei, & M. Babaei, "Topology Optimization of Structures using Cellular Automata with Constant Strain Triangles". International Journal of Civil Engineering, Vol. 10, 2012, pp. 179-188.
- [6] E. Sanaei, & M. Babaei, "Cellular Automata in Topology Optimization of Continuum Structures", International Journal of Engineering, Science and Technology, Vol. 3, 2011, pp. 27-41.
- [7] M. Babaei, "The Economical Effect of Ductility Levels on Reinforced Concrete Frames Design", American Journal of Civil and Structural Engineering, Vol. 2, 2015, pp. 1-6.
- [8] M. Babaei, "Exploring Practical Optimal Topology for Reinforced Concrete Moment Resisting Frame Structures", American Journal of Civil Engineering, Vol. 3, 2015, pp. 102-106.
- [9] M. Babaei M., E. Sanaei, "Multi-objective Optimal Design of Braced Frames using Hybrid Genetic and Ant Colony Optimization Algorithm", Frontiers of Structural and Civil Engineering, Vol. 10, 2016, pp. 472-480.
- [10] K.C. Sarama, H. Adeli, "Cost Optimization of Concrete Structures", Journal of structural engineering, Vol. 124, 1998, pp. 570-578.
- [11] R.T. Marler, J.S. Arora, "Survey of Multi-Objective Optimization Methods for Engineering", Structural and multidisciplinary optimization, Vol. 26, 2004, pp. 369-395.
- [12] V.M. Carrillo, H. Taboada, "A post-Pareto approach for multi-objective decision making using a non-uniform weight generator method", Procedia computer science, Vol. 12, 2012, pp. 16-121.
- [13] J. Anderson, "Multiobjective Optimization in Engineering Design", a dissertation submitted to the Institution of Technology Linköpings Universitet, 2001.
- [14] A. Ghosh, "Evolutionary Algorithms for Multi-Criterion Optimization: A survey", international journal of computing and information science, Vol. 2, 2004, pp. 38-57.
- [15] H.G. Kwak, J. Kim, "An Integrated Genetic Algorithm Complemented with Direct Optimum Design of RC Frame", Computer-Aided design, Vol. 41, 2009, pp. 490-500.
- [16] A. Kaveh, O. Sabzi, "A Comparative Study of Two Meta-Heuristic Algorithm for Optimum Design of Reinforce Concrete Frames", International journal of civil engineering, Vol. 9, 2010, pp. 193-206.
- [17] A. Kaveh, O. Sabzi, "Optimal design of reinforced concrete frames using big bang big crunch algorithm, Vol. 10, 2012, pp. 189-200.