

الگوریتم سیستم ذرات باردار مقیاس شده برای طراحی بهینه قاب‌های فولادی

حسین معز^۱، ناصر تقی‌زادیه^{۲*} و علی کاوه^۳

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی عمران- سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

^۳ استاد دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

(دریافت: ۹۴/۵/۱۵، پذیرش: ۹۴/۱۲/۳، نشر آنلاین: ۹۴/۱۲/۴)

چکیده

در این مقاله طراحی بهینه قاب‌های فولادی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور با اضافه نمودن دو مفهوم مقیاس کردن و متناسب نمودن به الگوریتم سیستم ذرات باردار (CSS)، الگوریتم سیستم ذرات باردار مقیاس شده (SCSS) به دست آمده است. الگوریتم جدید دارای جواب‌های قابل اعتمادی است. صحت و قدرت این الگوریتم به کمک یک مثال مبنای سازه‌ای و یک مثال کاربردی شناخته شده ارزیابی شده است. با بررسی نتایج حاصل از بهینه‌سازی مثال‌ها می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم تغییر یافته توانایی یافتن جواب‌های نزدیک به هم در اجراهای مختلف را دارد.

کلیدواژه‌ها: طراحی بهینه، سازه‌های قابی، سیستم ذرات باردار، مقیاس شده، الگوریتم فراکوشی

۱- مقدمه

مهندسی سازه تبدیل کرده‌اند. در این میان، استفاده از روش‌های فراکوشی، با توجه به خصوصیتی که دارند، به عنوان یک ابزار قوی در طراحی بهینه سازه‌ها رواج یافته است. در دهه‌های اخیر، روش‌های فراکوشی به وفور برای بهینه‌یابی مسائل سازه‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند که از جمله می‌توان به کاربرد الگوریتم ژنتیک (Erbatur و همکاران، ۲۰۰۰)، الگوریتم اجتماع ذرات (Behdian و Perez، ۲۰۰۷)، کلونی مورچگان (Camp و همکاران، ۲۰۰۵)، جستجوی هارمونی (Dogertekin، ۲۰۱۲) و انفجار بزرگ (Camp، ۲۰۰۷) در طراحی سازه‌های اسکلتی اشاره نمود. سیستم ذرات باردار (Talatahari و Kaveh، ۲۰۱۰) یکی از روش‌های فراکوشی است که از فیزیک الکتروسیسته و مکانیک نیوتنی الهام گرفته است. در فیزیک الکتروسیسته، بار الکتریکی هر ذره، باعث ایجاد میدان الکتریکی در اطراف آن می‌شود و این میدان می‌تواند سایر ذرات باردار را تحت تأثیر قرار دهد. خصوصیات میدان الکتریکی در اطراف ذره باردار توسط قوانین کولمب و گاوس مشخص می‌شود. با بهره‌گیری از این قوانین، الگوریتم CSS تعدادی کاندیدای بهینگی تعریف می‌نماید که هر کدام آن‌ها ذره باردار نامیده شده و هر ذره می‌تواند نیروی الکتریکی به ذرات دیگر اعمال کند. این نیرو، بر اساس قانون دوم نیوتن ذرات را وادار به حرکت نموده، مکان آن‌ها را تغییر خواهد داد.

امروزه روش‌های بهینه‌یابی فراکوشی به عنوان یک ابزار قوی برای حل مسائل بهینه‌یابی مطرح شده‌اند. در این روش‌ها معمولاً از قوانین حاکم بر پدیده‌های طبیعی یا رفتار دسته‌ای از جانداران الهام گرفته شده است و به بیانی دیگر، روش‌های تصادفی هدایت شده به وجود آمده‌اند. از جمله روش‌های فراکوشی، می‌توان به الگوریتم ژنتیک (Holland، ۱۹۷۵)، جستجوی تابو (Glover، ۱۹۸۶)، بهینه‌یابی کلونی مورچگان (Dorigo، ۱۹۹۲)، بهینه‌یابی اجتماع ذرات (Kennedy، ۲۰۱۰)، جستجوی هارمونی (Geem و همکاران، ۲۰۰۱)، انفجار بزرگ (Erol و Eksin، ۲۰۰۶)، جستجوی سیستم ذرات باردار (Talatahari و Kaveh، ۲۰۱۰ الف)، جستجوی سیستم ذرات باردار مغناطیسی (Kaveh و همکاران، ۲۰۱۳)، بهینه‌یابی پرتوی (Kaveh و Khayatazad، ۲۰۱۲)، بهینه‌یابی انتشار امواج دلفین (Kaveh و Farhoudi، ۲۰۱۳)، بهینه‌یابی تصادم اجسام (Kaveh و Mahdavi، ۲۰۱۴)، بهینه‌یاب شیر مورچه (Mirjalili، ۲۰۱۵) اشاره نمود.

افزایش روزافزون تقاضا برای مدل‌سازی سازه‌های پیچیده و بزرگ مقیاس در جامعه مهندسی از طرفی و مسائل اقتصادی و بحث‌های زیست‌محیطی در خصوص تأمین مصالح از طرفی دیگر، طراحی بهینه سازه‌ها را به یک موضوع مهم در مسائل

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۴۱-۳۳۳۹۲۵۱۵

آدرس ایمیل: hossein.moez@gmail.com (ح. معز)، ntaghiza@tabrizu.ac.ir (ن. تقی‌زادیه)، alikaveh@iust.ac.ir (ع. کاوه).

$q_i^{strength}$ ، q_j^{drift} و q^{disp} به ترتیب نشان دهنده تفاضل نسبت تنش حاصل از قیود مقاومتی، نسبت تغییر مکان نسبی طبقات به تغییر مکان نسبی مجاز و تغییر مکان کل سازه به تغییر مکان مجاز و عدد ۱ می‌باشند. n_s نشانگر تعداد طبقات سازه است. می‌توان این تفاضلهای را بر اساس آیین‌نامه ASD-AISC (۱۹۸۹) به شرح زیر تعریف نمود:

- برای اعضای که تحت اثر تنش‌های ناشی از ترکیب فشار محوری و خمشی قرار دارند:

$$if \frac{f_a}{F_a} < 0.15; q_i^{strength} = \left[\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \right] - 1.0 \quad (۴)$$

$$if \frac{f_a}{F_a} > 0.15; q_i^{strength} = \left[\frac{f_a}{F_a} + \frac{c_{mx}f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_a}{F_{ex}}\right)F_{bx}} + \frac{c_{my}f_{by}}{\left(1 - \frac{f_a}{F_{ey}}\right)F_{by}} \right] - 1.0 \quad (۵)$$

$$q_{i2}^{strength} = \left[\frac{f_a}{0.6F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \right] - 1.0 \quad (۶)$$

- برای اعضای که تحت اثر تنش‌های ناشی از ترکیب کشش محوری و خمشی قرار دارند:

$$q_i^{strength} = \left[\frac{f_a}{0.6F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \right] - 1.0 \quad (۷)$$

- قیود تغییر مکان نیز به شرح ذیل تعریف شده‌اند:

$$q_j^{drift} = \frac{\Delta_j^s}{h_j/400} - 1.0, j = 1, \dots, n_s \quad (۸)$$

$$q^{disp} = \frac{\Delta}{H/400} - 1.0 \quad (۹)$$

در روابط (۴) تا (۹) از نمادگذاری‌های زیر استفاده شده است:

- F_y : تنش جاری شدن مصالح
- f_a ، f_{bx} و f_{by} : تنش موجود محوری و تنش‌های موجود خمشی حول محورهای اصلی مقطع
- F_a ، F_{bx} و F_{by} : تنش مجاز محوری و تنش‌های مجاز خمشی حول محورهای اصلی مقطع
- F'_{ex} و F'_{ey} : تنش اویلر حول محورهای اصلی مقطع که به ضریب ایمنی $\frac{23}{12}$ تقسیم شده است.
- c_{mx} و c_{my} : ضرایب کاهنده که توسط آیین‌نامه ASD-AISC (۱۹۸۹) تعریف شده‌اند.
- H : کل ارتفاع قاب

الگوریتم CSS به تنهایی یا با کمی تغییر (Kaveh و Talatahari، ۲۰۱۰ ب و پ؛ Kaveh و همکاران، ۲۰۱۲؛ Kaveh و Talatahari، ۲۰۱۲؛ Kaveh و Nikaeen، ۲۰۱۳) با موفقیت در مسائل سازه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. مقاله حاضر نیز با افزودن دو مفهوم جدید به الگوریتم اولیه و استفاده از نتایج تحقیقات قبلی، مسئله طراحی بهینه قاب‌های بزرگ مقیاس را مورد بررسی قرار داده است. مفاهیم مورد استفاده در این مقاله شامل مقیاس کردن و متناسب نمودن کاندیداهای بهینگی در فضای مجاز مسئله است.

مقاله حاضر شامل شش بخش است. در بخش دوم به اختصار به فرمول‌بندی مسئله طراحی بهینه قاب‌ها پرداخته شده است. پس از ارائه الگوریتم CSS در بخش سوم، انگیزه اصلی جهت ارائه این مقاله در بخش چهارم تشریح شده و فرایند مقیاس کردن و متناسب نمودن در بخش پنجم مورد بحث قرار گرفته است. مثال‌های مربوط نیز در بخش ششم ارائه شده‌اند. در نهایت، جمع‌بندی مطالب در بخش هفتم بیان شده است.

۲- فرمول‌بندی مسئله طراحی بهینه قاب‌ها

طراحی بهینه یک قاب فلزی که شامل m عضو و ng گروه از اعضا است، به صورت زیر قابل بیان است:

$$\begin{aligned} & \text{Find } X = [x_1, x_2, \dots, x_{ng}] \\ & \text{to minimize} \\ & \text{Obj}(X) = \sum_{i=1}^m (\rho_i \cdot A_i(X) \cdot l_i) \cdot \text{Pen}(X) \end{aligned} \quad (۱)$$

X نشانگر بردار متغیرهای طراحی است که دربرگیرنده سطح مقطع اعضا در هر گروه است. $\text{Obj}(X)$ تابع هدف است که از حاصل ضرب وزن سازه در تابع جریمه به دست می‌آید. تابع جریمه جهت تبدیل مسئله بهینه‌سازی مقید به نامقید تعریف شده است. ρ_i ، l_i و A_i به ترتیب نشان دهنده وزن واحد حجم، طول و سطح مقطع عضو i ام سازه می‌باشند. تابع جریمه به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Pen}(X) = (1 + \varepsilon_1 \cdot q)^{\varepsilon_2} \quad (۲)$$

که در این مقاله $\varepsilon_1 = 1$ فرض شده است و $\varepsilon_2 = 1$ در تکرار اول است که به صورت خطی تا مقدار $\varepsilon_2 = 6$ در تکرار نهایی افزایش پیدا خواهد کرد. q برابر مجموع مقادیر نقض قیدهای مسئله است:

$$q = \sum_{i=1}^m \max(0, q_i^{strength}) + \sum_{j=1}^{n_s} \max(0, q_j^{drift}) + \max(0, q^{disp}) \quad (۳)$$

$$d_{ij} = \frac{\|X_i - X_j\|}{\|(X_i + X_j)/2 - X_{best}\| + \varepsilon} \quad (12)$$

در دو رابطه اخیر، X_i و X_j بردار موقعیت ذرات i ام و j ام هستند X_{best} و بردار موقعیت بهترین ذره موجود و ε یک عدد کوچک مثبت است. r شعاع بار هر ذره است که بر حسب ابعاد مسئله قابل تعریف است و معمولاً برابر واحد فرض می‌شود (Talatahari و Kaveh، ۲۰۱۰ الف) و به کمک ضرایب i_1 و i_2 رابطه مناسب برای تعیین نیرو بر حسب موقعیت ذرات و شعاع آن‌ها تعیین می‌گردد:

$$i_1 = 1, i_2 = 0 \Leftrightarrow d_{ij} < r \quad (13)$$

$$i_1 = 0, i_2 = 1 \Leftrightarrow d_{ij} \geq r \quad (14)$$

احتمال حرکت یک ذره به سوی ذرات دیگر با p_{ij} تعیین می‌شود:

$$p_{ij} = 1 \Leftrightarrow \frac{fit(i) - fitbest}{fit(j) - fit(i)} > rand \vee \frac{fit(j) - fit(i)}{fit(i)} > fit(i) \quad (15)$$

$$p_{ij} = 0 \text{ otherwise} \quad (16)$$

گام پنجم) موقعیت هر ذره جدید را با رابطه زیر تعیین نمایید:

$$X_{j,new} = rand_{j1} \cdot k_a \cdot \frac{F_j}{m_j} \cdot \Delta t^2 + rand_{j2} \cdot k_v \cdot V_{j,old} \cdot \Delta t + X_{j,old} \quad (17)$$

در این رابطه از کمیت‌های زیر استفاده شده است:

- $V_{j,old}$: سرعت ذره j ام (که در شروع الگوریتم برابر صفر فرض می‌شود).

- $rand_{j1}$ و $rand_{j2}$: دو مقدار تصادفی در بازه صفر تا یک
- Δt : بازه زمانی حرکت که به طور معمول برابر واحد فرض می‌شود.

- k_a و k_v : ضرایب شتاب و سرعت

- m_j : جرم ذره j ام که برابر مقدار بار آن ذره q_j فرض می‌شود.

ضرایب شتاب و سرعت در این الگوریتم جهت کنترل exploitation و exploration مورد استفاده قرار گرفته‌اند و در یک مسئله بهینه‌یابی گسسته ضرایب زیر جهت حصول به جواب بهینه کارساز خواهند بود (Glover، ۱۹۸۶):

$$k_v = 2; k_a = 0.5 \left(1 + \frac{iter}{itermax}\right) \quad (18)$$

- h_j : ارتفاع طبقه j ام

- Δ و Δ_j^s : جابجایی جانبی کل سازه و طبقه j ام

- n_s : تعداد طبقات سازه

۳- الگوریتم سیستم ذرات باردار

در این بخش الگوریتم سیستم ذرات باردار به اختصار تشریح خواهد شد و نحوه کاربرد آن در مسائل سازه‌ای مشخص خواهد شد:

گام اول) تعداد N_p ذره باردار فرض نمایید و موقعیت اولیه آن‌ها را در فضای جستجو تعیین نمایید.

بیان سازه‌ای: تعداد N_p سازه فرض نمایید که مقاطع اعضای آن‌ها به طور تصادفی انتخاب شده‌اند. اگر مسئله بهینه‌سازی گسسته باشد، مقاطع سازه را از لیست مقاطع موجود انتخاب نمایید.

گام دوم) میزان شایستگی هر ذره را مابین ذرات دیگر تعیین نمایید. این عملیات با تعیین مقدار تابع هدف برای هر ذره و سپس مرتب نمودن آن‌ها بر اساس شایستگی امکان‌پذیر است. جهت استفاده‌های بعدی، N_{CM} ذره را در حافظه بار (CM) ذخیره نمایید.

بیان سازه‌ای: هر سازه را تحلیل کنید و قیود را کنترل کنید و تابع هدف تعریف شده برای مسئله را تشکیل دهید. تابع هدف می‌تواند شامل ترکیبی از وزن سازه و مجموع توابع پنالتی کل سازه باشد. یکی از توابع هدف مناسب برای مسائل سازه‌ای در بخش قبلی تعریف شده‌اند.

گام سوم) با استفاده از رابطه زیر مقدار بار هر ذره را محاسبه نمایید:

$$q_i = \frac{fit(i) - fitworst}{fitbest - fitworst}, i = 1, 2, \dots, N_p \quad (10)$$

که $fitbest$ و $fitworst$ نشان دهنده بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار تابع شایستگی در بین تمامی ذرات باردار می‌باشند و $fit(i)$ بیانگر شایستگی ذره i ام است. تابع شایستگی به صورت عکس تابع هدف تعریف می‌گردد.

گام چهارم) برآیند نیروهای وارد بر هر ذره را تعیین کنید. نیروهای وارد شده بر ذره j ام با رابطه زیر قابل بیان است.

$$F_j = q_j \sum_{i, i \neq j} \left(\frac{q_i}{r^3} d_{ij} \cdot i_1 + \frac{q_i}{d_{ij}^2} \cdot i_2 \right) \cdot p_{ij} \cdot (X_i - X_j); j = 1, 2, \dots, N_p \quad (11)$$

d_{ij} که نشان دهنده فاصله بین ذرات است با رابطه زیر تعریف می‌شود:

روش، ذراتی که به خارج از فضای مسئله راه می‌یابند، با میانگین‌گیری به نزدیکی‌های مرزهای فضای قابل قبول هدایت می‌شوند. بدین ترتیب علاوه بر حل مسئله نقض قیود، حرکت جدید نیز انجام می‌شود و با توجه به احتمال وقوع جواب بهینه در مجاورت مرزها، احتمال نزدیک شدن به جواب نهایی مسئله نیز افزایش می‌یابد.

جهت جلوگیری از خروج متغیرها از مرزهای قیود و کنترل نقض قیود متغیر محور، یک فکر اولیه می‌تواند جلوگیری از نسبت دادن مقادیر خارج از مرزها به درایه‌های متغیرها باشد. با به کار بردن این روش در پژوهش حاضر، معمولاً فرایند بهینه‌یابی بدون نتیجه به اتمام رسید. دلیل این اتفاق را می‌توان در تغییر موردی بعضی از درایه‌ها بیان کرد. به عبارتی به علت از دست دادن ویژگی‌های متغیرها، فرایند بهینه‌یابی مسیر صحیح خود را در پیش نمی‌گیرد. با این توضیح روشی که مناسب به نظر می‌رسد، مقیاس کردن کل درایه‌های یک متغیر و متناسب کردن آن با بازه قابل قبول می‌تواند باشد. با استفاده از این عملیات، نتایج قابل قبول و یکنواختی در مسائل بهینه‌یابی به دست آمده است. به کمک مقیاس کردن متغیرها و متناسب نمودن آن‌ها با دامنه مجاز مسئله، تنظیم پارامترهای الگوریتم به صورت خودکار انجام می‌شود. به بیان دیگر، به طور ضمنی، پارامترهای مسئله در هر گام توسط خود الگوریتم تعیین خواهند شد و در نتیجه، کاربر نیازی به تغییر پارامترهای الگوریتم نخواهد داشت و جواب‌های تکرارهای مختلف به نحو چشم‌گیری به یکدیگر نزدیک خواهند شد.

۵- مقیاس کردن و متناسب نمودن متغیرها

جهت برطرف نمودن مسئله نقض قیود متغیر محور، در این بخش فرایند مقیاس کردن و متناسب نمودن تشریح خواهد شد. الگوریتم حاصل از اضافه نمودن این گام به الگوریتم اصلی، سیستم ذرات باردار مقیاس شده نامیده می‌شود. روش حاضر شامل یک نگاشت خطی است و اگر درایه‌های متغیر X_i از فضای قیدهای کناری خارج شود، تمامی بردار متغیر با ضریبی اصلاح خواهد شد و بر کران‌های قیود کناری منطبق خواهد شد. حالت‌های مختلف خروج متغیر از فضای مسئله به شرح زیر مرتب شده‌اند:

الف) در صورتی که متغیر به طور کامل از فضای مسئله خارج شود، آن را به موقعیت قبلی بازگردانید. به عبارتی دیگر:

$$\max(X_i) < A_{min,i} \text{ or } \min(X_i) > A_{max,i} \rightarrow X_{i,new} = X_{i,old} \quad (19)$$

نمادهای استفاده شده در روابط این بخش عبارتند از:

گام ششم) در صورتی که پس از اعمال گام پنجم، ذره‌ای از فضای تعریف شده مسئله خارج شود، موقعیت آن را به کمک فرایندی بر اساس جستجوی هارمونی تصحیح نمایید. به عنوان یک روش دیگر می‌توان ذره را به موقعیت قبلی آن برگرداند یا از روشی که در این مقاله ارائه شده است استفاده نمود.

گام هفتم) بهترین جواب‌ها را در حافظه بار ذخیره نمایید و جواب‌های نامناسب را از حافظه خارج کنید.

گام هشتم) گام‌های ۲ تا ۷ را تکرار کنید تا یکی از ملاک‌های پایان‌دهی تکرار، محقق شود. ملاک پایان‌دهی می‌تواند یکی از موارد زیر باشد:

- تعداد حداکثر تکرار پیش تعریف شده به اتمام رسیده است.
- تعداد حداکثر تکرار پیش تعریف شده، بدون به‌روز کردن حافظه بار، به اتمام رسیده است.

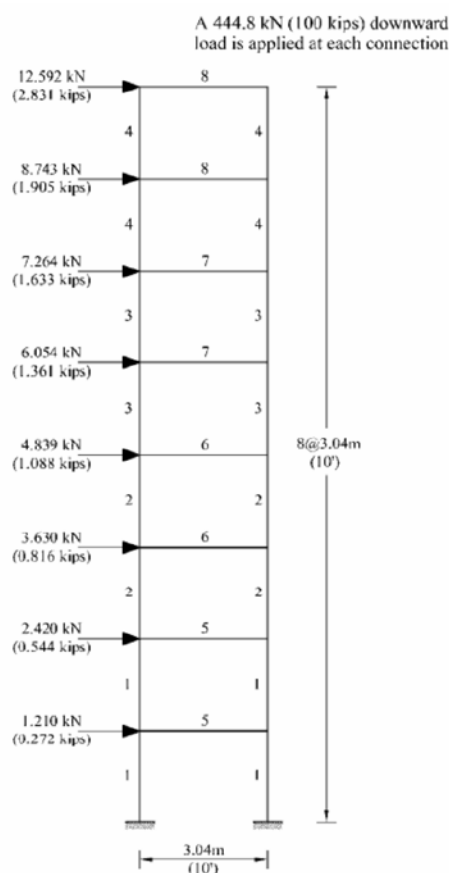
۴- ایده و انگیزه اولیه

تمامی الگوریتم‌های فراابتکاری دارای دو جنبه exploration و exploitation هستند (Črepinšek و همکاران، ۲۰۱۳). جنبه اول باعث می‌شود کل فضای مسئله مورد جستجو قرار بگیرد و جنبه دوم موجب نگهداری جواب‌های مناسب در هر مرحله و ادامه جستجو در اطراف آن‌ها می‌گردد. الگوریتم سیستم ذرات باردار نیز دارای کنترل‌هایی برای این موارد است. در مسائلی با متغیرهای گسسته، با از بین رفتن دقت متغیرها در حین گرد کردن آن‌ها به سمت مقادیر از پیش تعیین شده، لازم است جنبه exploration مسئله تقویت شود و در نتیجه امکان وقوع جواب‌های جدیدی خارج از فضای مسئله افزایش می‌یابد و در حقیقت قیود متغیر محور نقض می‌شوند.

نقض قیود می‌تواند مسئله محور یا متغیر محور باشد. بدین معنی که در صورت نقض قیود اصلی (به بیان سازه‌ای، طراحی سازه‌ای که جوابگوی محدودیت‌های آیین‌نامه‌ای نیست)، نقض مسئله محور پیش می‌آید و در صورتی که درایه‌های بردار مکان متغیرها، خارج از فضای مسئله باشد (به بیان سازه‌ای، سطح مقطع اعضا خارج از محدوده سطح مقطع‌های پیش تعریف شده باشد)، نقض متغیر محور اتفاق افتاده است. He و همکاران (۲۰۰۴) در الگوریتم اجتماع ذرات، جهت رفع نقض مسئله محور و متغیر محور، مکانیسم Fly-back را ارائه نموده‌اند. در این مکانیسم، هر ذره‌ای که خارج از فضای قابل قبول حرکت کند به مکان قبلی خود باز گردانده می‌شود. به عبارتی دیگر در چنین مواردی الگوریتم، حرکت جدیدی نخواهد داشت و همین مسئله باعث پایین آمدن کارایی الگوریتم می‌شود. کاوه و طلعت اهری مکانیسم مفید Fly-to-boundary را در الگوریتم سیستم ذرات باردار ارائه نموده‌اند (Talatahari و Kaveh، ۲۰۱۰، ب). در این

در این مثال، اعضای قاب در هشت گروه دسته‌بندی شده‌اند. تنها یک قید جهت محدود نمودن حرکت جانبی انتهای قاب به ۲ اینچ در نظر گرفته شده است و تمامی مقاطع شناخته شده توسط AISC-ASD (۱۹۸۹)، به عنوان مقاطع مجاز مسئله تعریف شده‌اند.

این مثال و الگوریتم بهینه‌یابی و تحلیل سازه در محیط فترن برنامه‌نویسی شده است و بر روی رایانه‌ای با پردازنده Dual Core 1.86 GHz اجرا شده است. جهت استفاده بهینه از توانایی پردازنده چند هسته‌ای، دستورات OMP به خدمت گرفته شده‌اند تا فرایند حل دستگاه معادلات سختی سازه مابین هسته‌های پردازشگر توزیع گردد (Chandra, ۲۰۰۱). بدین منظور از روش چولسکی بلوک‌بندی شده استفاده شده است (Rothberg و همکاران، ۱۹۹۴). مجموعاً ۲۰۰۰ تکرار کلی و ۱۰۰۰ تکرار بدون نتیجه باعث ختم فرایند بهینه‌یابی خواهد شد. شکل (۲) تاریخچه کاهش وزن سازه را در تکرارهای منتهی به بهترین جواب نمایش می‌دهد. شکل‌های (۳) و (۴) نتیجه حاصل از ۱۰۰ بار اجرای الگوریتم را به ترتیب با الگوریتم سیستم ذرات باردار و سیستم ذرات باردار مقیاس شده نمایش می‌دهند. نتایج شکل (۴) با استفاده از مکانیسم Fly-back به دست آمده‌اند.



شکل ۱- قاب هشت طبقه یک دهانه

$\max(X_i)$ و $\min(X_i)$: بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین درایه متغیر X_i

$A_{min,i}$ و $A_{max,i}$: کران بالا و پایین متغیر A بر اساس قیود کناری مسئله

ب) در صورتی که بزرگ‌ترین (کوچک‌ترین) درایه متغیر X_i اختلاف معنی‌داری با کران بالای مسئله (پایین مسئله) داشته باشد، در متغیر مورد نظر تغییری ایجاد نشود. این بند به کمک روابط زیر فرمول‌بندی شده است:

$$\begin{aligned} \max(X_i) &> A_{max,i} + \gamma(A_{max,i} - A_{min,i}) \\ \text{or} \\ \min(X_i) &< A_{min,i} + \gamma(A_{min,i} - A_{max,i}) \\ &\rightarrow X_{i,new} = X_{i,old} \end{aligned} \quad (20)$$

γ ضریبی است که توسط کاربر تعریف خواهد شد که در این مقاله برابر واحد فرض شده است. در مواردی که تعدادی از درایه‌های یک متغیر بسیار بزرگ هستند، فرایند مقیاس نمودن نتیجه مناسبی به دست نمی‌آورد؛ چرا که متغیرهای کوچک‌تر پس از مقیاس نمودن به یکدیگر نزدیک شده و چه‌بسا پس از گرد کردن، یکسان شوند و در نهایت متغیرهایی با درایه تکراری به دست بیاید. بدون ضابطه این بند، معمولاً نتایج بهینه‌یابی قابل قبول نخواهند بود.

ج) در صورتی که هیچ یک از بندهای (الف) و (ب) در مورد متغیر X_i صادق نبود، با دو رابطه زیر فرایند مقیاس کردن و متناسب نمودن را می‌توان بیان کرد:

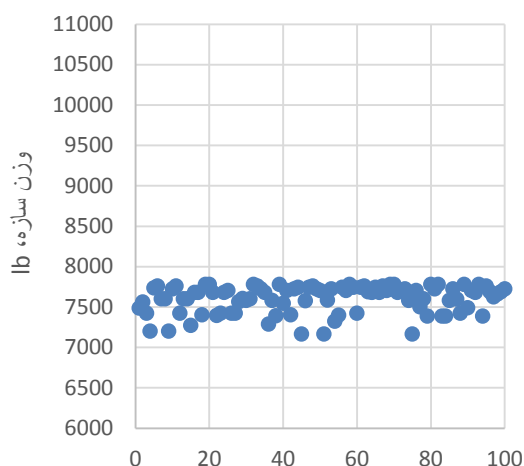
$$\begin{aligned} \max(X_i) &> A_{max,i} \rightarrow X_{i,new}(j) = \\ &\frac{A_{max,i} - \min(X_i)}{\max(X_i) - \min(X_i)} (X_{i,old}(j) - \min(X_i)) + \\ &\min(X_i), \quad j = 1, \dots, ng \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \min(X_i) &< A_{min,i} \rightarrow X_{i,new}(j) = \\ &\frac{\max(X_i) - A_{min,i}}{\max(X_i) - \min(X_i)} (X_{i,old}(j) - \min(X_i)) + \\ &A_{min,i}, \quad j = 1, \dots, ng \end{aligned} \quad (22)$$

۶- مثال‌های عددی

۶-۱- قاب هشت طبقه یک دهانه

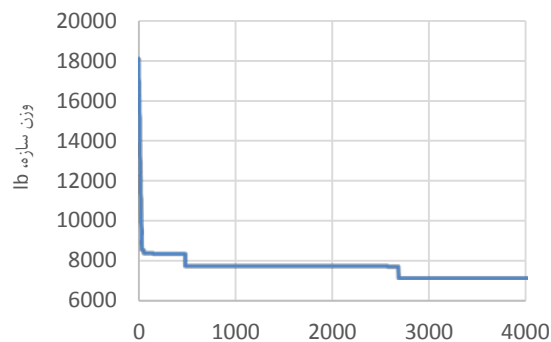
به عنوان اولین مثال، یک قاب هشت طبقه یک دهانه مورد بررسی قرار گرفته است (شکل (۱)). این مثال اولین بار توسط Khot و همکاران (۱۹۷۶) ارائه شده است و با استفاده از روش معیار بهینگی (OC) طراحی بهینه شده است. Camp و همکاران (۱۹۹۸) با الگوریتم ژنتیک و کاوه و همکارانش با استفاده از الگوریتم‌های متنوعی به حل این مسئله پرداخته‌اند (Kaveh و Malakouti Rad، ۲۰۱۰؛ Kaveh و Abbasgholiha، ۲۰۱۱؛ Kaveh و Talatahari، ۲۰۰۷). این مسئله یکی از مسائل مبنا در زمینه بهینه‌سازی قاب‌ها است.



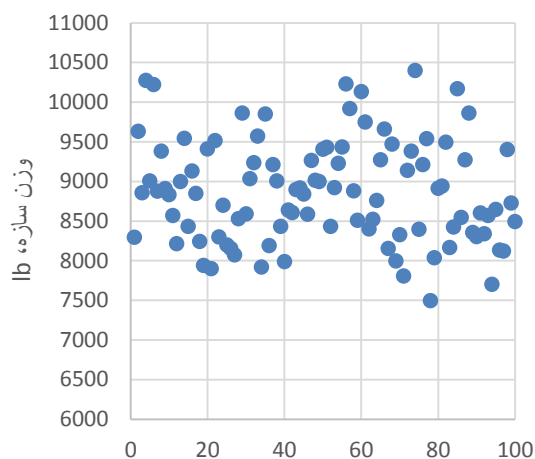
شکل ۴- وزن سازه در ۱۰۰ بار اجرای برنامه به روش SCSS

شایان ذکر است جهت جلوگیری از حذف جواب‌های نزدیک به بهینه، نقض قیود تا یک درصد قابل قبول فرض شده است و در نتیجه تغییر مکان جانبی حاصل از روش ارائه شده در مقاله حاضر اندکی با نقض قید مسئله همراه بوده است. با مطالعه جدول (۱) می‌توان نتیجه‌گیری نمود که علی‌رغم بیشتر بودن تعداد تکرار در الگوریتم حاضر، انحراف معیار در اجراهای مختلف به نحو چشم‌گیری پایین‌تر از الگوریتم اصلی است. بدین معنی که در صورت عدم امکان برای تکرار الگوریتم، به احتمال زیاد الگوریتم جدید جواب‌های بهتری به دست خواهد آورد.

در جدول (۱) مقایسه بین دو حالت ذکر شده ارائه شده است. مقایسه نتایج حاصل از پژوهش حاضر و مقالات منتشر شده قبلی در جدول (۲) ارائه شده است.



شکل ۲- تاریخچه وزن سازه در تکرارهای منتهی به بهترین جواب



شکل ۳- وزن سازه در ۱۰۰ بار اجرای برنامه به روش SCSS

جدول ۱- مقایسه آماری دو روش

کمترین وزن سازه (lb)	میانگین مقادیر تابع هدف (lb)	انحراف معیار	میانگین تعداد تکرارها	میانگین زمان کامپیوتری (s)	
۷۴۹۴/۳۳	۸۸۶۹/۹۱	۶۴۹/۴۹	۲۶۹۶	۱۵۹/۴	CSS
۷۱۶۵/۱۴	۷۶۰۴/۵۰	۱۶۸/۰۸	۵۹۹۲	۳۲۳/۸۲	SCSS

جدول ۲- مقایسه نتایج منتشر شده قبلی با مطالعه حاضر

روش‌ها	Khot و همکاران (۱۹۷۶) OC	Camp و همکاران (۱۹۹۸) GA	Shojaee و Kaveh (۲۰۰۷) ACO	مطالعه حاضر (SCSS)
۱	W 14×34	W 18×46	W 21×50	W16×31
۲	W 10×39	W 16×31	W 16×26	W16×31
۳	W10×33	W 16×26	W 16×26	W14×30
۴	W 8×18	W 12×16	W 12×14	W16×26
۵	W 21×68	W 18×35	W 16×26	W16×31
۶	W 24×55	W 18×35	W 18×40	W16×31
۷	W 21×50	W 18×35	W 18×35	W14×30
۸	W 12×40	W 16×26	W 14×22	W14×30
وزن kN (kips)	۴۱/۰۲(۹/۲۲)	۳۲/۸۳(۷/۳۸)	۳۱/۶۸(۷/۱۲)	۳۱/۸۴(۷/۱۶)
تغییر مکان جانبی cm (in.)	۵/۰۵۲۱۴۳(۱/۹۸۹۰۳)	۵/۲۶۵۳۸(۲/۰۷۲۹۸)	۵/۰۰۲۴۵(۱/۹۶۹۴۷)	۵/۱۲۸۵۱(۲/۰۱۹۱۰)

۲-۶- قاب فضایی با ۵۶۸ عضو

مثال دوم یک قاب ۱۰ طبقه بدون مهاربند، مطابق شکل (۵) است که توسط Hasançebi و همکاران (۲۰۱۰) معرفی و مورد مطالعه قرار گرفته است. در این قاب، ستون‌ها در سه گروه داخلی، کناری و گوشه و تیرها در دو دسته داخلی و خارجی دسته‌بندی شده‌اند. که در نتیجه ۲۵ گروه از اعضا به دست آمده‌اند که در شکل (۶) به نمایش درآمده‌اند.

قیود مقاومتی و تغییر مکانی مطابق مندرجات بخش (۲) در نظر گرفته شده‌اند. علاوه بر این قیود، دو قید هندسی برای قابل اجرا بودن سازه لحاظ شده است که با نمادگذاری شکل (۷)، با روابط زیر بیان می‌شوند:

$$\frac{b_{fb}}{b_{fc}} - 1.0 \leq 0 \quad (23)$$

$$\frac{b'_{fb}}{d_c - 2t_f} - 1.0 \leq 0 \quad (24)$$

بارگذاری ثقلی وارد بر تیرها، ناشی از بارهای مرده و زنده و برف که از دال‌ها منتقل می‌شوند در جدول (۳) و بارگذاری باد، مؤثر بر تیرها، در جدول (۴) ارائه شده است. در محاسبات باد، سرعت باد برابر 105 mph (46.94 m/s) لحاظ شده است. دو ترکیب بار برای اثر بار باد در جهت‌های X و Y به همراه بارهای ثقلی در نظر گرفته شده است. مصالح سازه دارای مدول الاستیسیته $E = 203893.6 \text{ MPa}$ (29000 ksi) و تنش جاری شدن $F_y = 253.1 \text{ MPa}$ (36 ksi) می‌باشند.

تاشه‌پردازی سازه به کمک نرم‌افزار Formian انجام شده است و خروجی این نرم‌افزار به عنوان ورودی برنامه تهیه شده موزد استفاده قرار گرفته است. این نرم‌افزار توسط Nooshin و

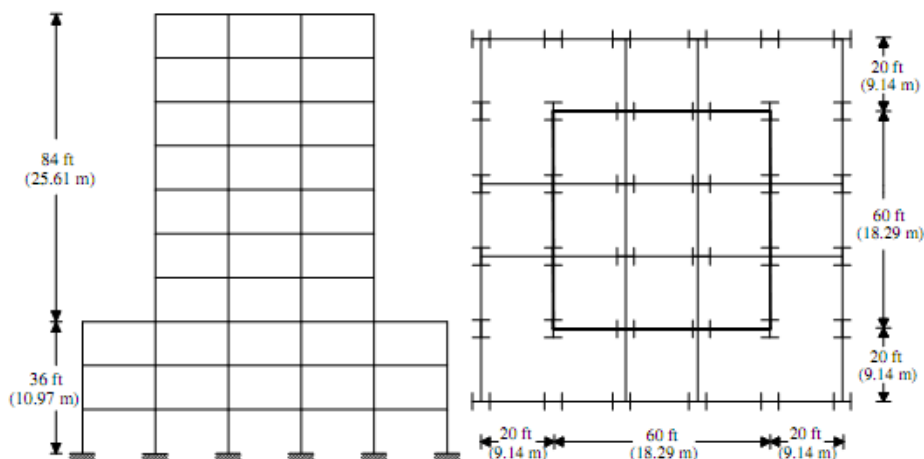
همکاران (۱۹۹۳) تهیه شده است. برنامه تهیه شده برای مثال قبلی، برای این مثال نیز مورد استفاده قرار گرفته ولی تعداد حداکثر تکرار به ۵۰۰۰۰ و تعداد تکرار بدون نتیجه به ۵۰۰۰ محدود شده است.

جدول ۳- بارگذاری ثقلی وارد بر تیرها

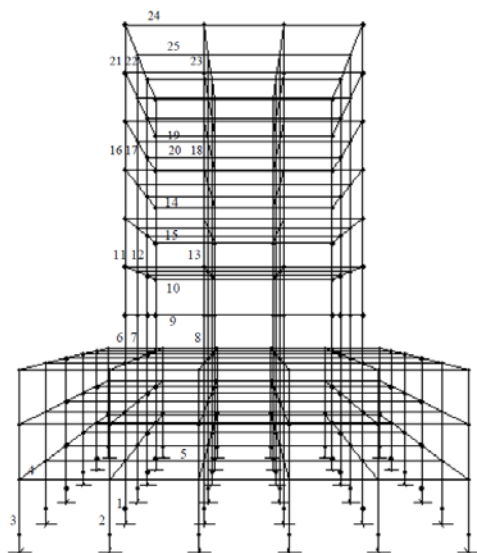
بارگذاری گسترده	
تیرهای داخلی	تیرهای پیرامونی
kN/m (lb/ft)	kN/m (lb/ft)
۷/۳۸(۵۰۵/۸۷۹)	۱۴/۷۷(۱۰۱۱/۷۴)
۱۰/۷۲(۷۳۴/۲۰)	۲۱/۴۴(۱۴۶۸/۴۰)

جدول ۴- بارگذاری باد

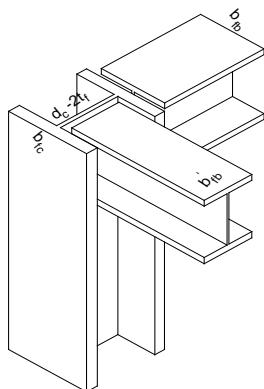
شماره طبقه	جهت رو به باد	جهت پشت به باد
	kN/m (lb/ft)	kN/m (lb/ft)
۱	۱/۶۴(۱۱۲/۵۱)	۱/۸۶(۱۲۷/۳۸)
۲	۱/۸۸(۱۲۸/۶۸)	۱/۸۶(۱۲۷/۳۸)
۳	۲/۱۰(۱۴۴/۶۸)	۱/۸۶(۱۲۷/۳۸)
۴	۲/۲۹(۱۵۶/۸۶)	۱/۸۶(۱۲۷/۳۸)
۵	۲/۴۴(۱۶۷/۱۹)	۱/۸۶(۱۲۷/۳۸)
۶	۲/۵۷(۱۷۶/۱۳)	۱/۸۶(۱۲۷/۳۸)
۷	۲/۶۹(۱۸۴/۰۶)	۱/۸۶(۱۲۷/۳۸)
۸	۲/۷۹(۱۹۱/۲۱)	۱/۸۶(۱۲۷/۳۸)
۹	۲/۸۹(۱۹۷/۷۶)	۱/۸۶(۱۲۷/۳۸)
۱۰	۱/۴۹(۱۰۱/۹۰)	۰/۹۳(۶۳/۶۹)



شکل ۵- پلان و نمای قاب فضایی فولادی با ۵۶۸ عضو



شکل ۶- گروه‌بندی اعضای قاب ۱۰ طبقه



شکل ۷- تناسب هندسی اعضای متصل به هم

جدول ۵- مقایسه نتایج مقاله حاضر و تحقیق قبلی

Hasançebi و همکاران (۲۰۱۰)	SCSS	گروه ها
W14X193	W14X159	۱
W8X48	W12X58	۲
W10X39	W14X48	۳
W10X22	W10X30	۴
W21X50	W21X48	۵
W10X54	W14X109	۶
W14X109	W14X99	۷
W14X176	W14X82	۸
W18X40	W16X40	۹
W18X40	W18X35	۱۰
W10X49	W12X87	۱۱
W14X90	W12X79	۱۲
W14X109	W12X65	۱۳
W14X30	W18X35	۱۴
W16X36	W16X36	۱۵
W12X45	W12X72	۱۶
W12X65	W12X58	۱۷
W10X22	W10X49	۱۸
W12X79	W14X34	۱۹
W14X30	W12X30	۲۰
W8X35	W10X33	۲۱
W10X39	W10X39	۲۲
W8X31	W10X39	۲۳
W8X18	W8X18	۲۴
W14X30	W10X26	۲۵
۵۰۳۹۵۳/۶۳ (۲۲۸۵۸۸/۳۳)	۴۹۵۵۳۸ (۲۲۴۷۷۱)	وزن lb (kg)

Hasançebia O, Çarbaş S, Doğanb E, Erdalb F, Saka MP "Comparison of non-deterministic search techniques in the optimum design of real size steel frames", *Computers & Structures*, 2010, 88 (17), 1033-1048.

He S, Prempain E, Wu Q, "An improved particle swarm optimizer for mechanical design optimization problems", *Engineering Optimization*, 2004, 36 (5), 585-605.

Holland JH, "Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology", *Control and Artificial Intelligence*, University of Michigan Press, US, 1975.

Kaveh A, Abbasgholiha H, "Optimum design of steel sway frames using big bang-big crunch algorithm", *Asian Journal of Civil Engineering*, 2011, 12 (3), 293-317.

Kaveh A, Farahani M, Shojaei N, "Optimal design of barrel vaults using charged search system", *International Journal of Civil Engineering*, 2012, 10 (4), 301-308.

Kaveh A, Farhoudi N, "A new optimization method: Dolphin echolocation", *Advances in Engineering Software*, 2013, 59, 53-70.

Kaveh A, Khayat azad M, "A new meta-heuristic method: Ray Optimization", *Computers & Structures*, 2012, 112, 283-294.

Kaveh A, Mahdavi V, "Colliding bodies optimization: A novel meta-heuristic method. *Computers & Structures*, 2014, 139, 18-27.

Kaveh A, Malakouti Rad S, "Hybrid genetic algorithm and particle swarm optimization for the force method-based simultaneous analysis and design", *Iranian Journal of Science and Technology, Transaction B: Engineering*, 2010, 34 (B1), 15-34.

Kaveh A, Nikaeen M, "Optimum design of irregular grillage systems using CSS and ECSS algorithms with different boundary conditions", *International Journal of Civil Engineering*, 2013, 11 (3), 143-153.

Kaveh A, Share MAM, Moslehi M, "Magnetic charged system search: A new meta-heuristic algorithm for optimization", *Acta Mechanica*, 2013, 224 (1), 85-107.

Kaveh A, Shojaei S, "Optimal design of skeletal structures using ant colony optimization", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2007, 70 (5), 563-581.

Kaveh A, Talatahari S, "A charged system search with a fly to boundary method for discrete optimum design of truss structures", *Asian Journal of Civil Engineering*, 2010, 11 (3), 277-293.

Kaveh A, Talatahari S, "A discrete particle swarm ant colony optimization for design of steel frames", *Asian Journal of Civil Engineering*, 2007, 9 (6), 563-575.

۷- نتیجه گیری

در برخی از مسائل طراحی بهینه گسسته، لازم است پارامترهای الگوریتم سیستم ذرات باردار توسط کاربر تعیین شوند. تعیین صحیح این پارامترها در کیفیت جواب الگوریتم تأثیر خواهد داشت. با استفاده از الگوریتم حاضر، تأثیر پارامترهای مورد نظر کاهش یافته، جواب‌های یکنواخت‌تری در تکرارهای مختلف به دست می‌آیند ولی تعداد تکرار و زمان کامپیوتری متوسط لازم برای حل مسئله افزایش می‌یابد که با توجه به کاهش انحراف معیار در تکرارهای مختلف و عدم لزوم تجدید بهینه‌یابی، این افزایش زمان قابل توجه خواهد بود. به ویژه در مسائل بهینه‌یابی بزرگ مقیاس، که امکان تجدید به راحتی فراهم نیست، الگوریتم حاضر دارای مزیت خواهد بود.

۸- مراجع

AISC, "Manual of Steel Construction, Allowable Stress Design", American Institute of Steel Construction, US, 1989.

Camp C, "Design of space trusses using big bang-big crunch optimization", *Journal of Structural Engineering*, 2007, 133 (7), 999-1008.

Camp C, Pezeshk S, Cao G, "Optimized design of two-dimensional structures using a genetic algorithm", *Journal of Structural Engineering*, 1998, 124 (5), 551-559.

Camp CV, Bichon BJ, Stovall SP, "Design of steel frames using ant colony optimization", *Journal of Structural Engineering*, 2005, 131 (3), 369-379.

Chandra R, "Parallel Programming in OpenMP", Morgan Kaufmann, 2001.

Črepinšek M, Liu SH, Mernik M, "Exploration and exploitation in evolutionary algorithms: A survey", *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 2013, 45 (3), 35.

Degertekin SO, "Improved harmony search algorithms for sizing optimization of truss structures", *Computers & Structures*, 2012, 92-93, 229-241.

Dorigo M, "Optimization, learning and natural algorithms", PhD Thesis, Politecnico di Milano, Italy, 1992.

Erbatur F, Hasançebici O, Tütüncü İ, Kılıç H, "Optimal design of planar and space structures with genetic algorithms", *Computers & Structures*, 2000, 75 (2), 209-224.

Erol OK, Eksin I, "A new optimization method: Big bang-big crunch", *Advances in Engineering Software*, 2006, 37 (2), 106-111.

Geem ZW, Kim JH, Loganathan G, "A new heuristic optimization algorithm: Harmony search", *Simulation*, 2001, 76 (2), 60-68.

Glover F, "Future paths for integer programming and links to artificial intelligence", *Computers & Operations Research*, 1986, 13 (5), 533-549.

- Journal for Numerical Methods in Engineering, 1976, 10 (5), 1097-1114.
- Mirjalili S, "The ant lion optimizer", Advances in Engineering Software, 2015, 83, 80-98.
- Nooshin H, Disney P, Yamamoto C, "Formian", Multi-Science, 1993.
- Perez RE, Behdinin K, "Particle swarm approach for structural design optimization", Computers & Structures, 2007, 85(19-20), 1579-1588.
- Rothberg E, Gupta A, "An efficient block-oriented approach to parallel sparse Cholesky factorization", SIAM Journal on Scientific Computing, 1994, 15 (6), 1413-1439.
- Kaveh A, Talatahari S, "Charged system search for optimal design of frame structures", Applied Soft Computing, 2012, 12 (1), 382-393.
- Kaveh A, Talatahari S, "Optimal design of skeletal structures via the charged system search algorithm", Structural and Multidisciplinary Optimization, 2010, 41 (6), 893-911.
- Kaveh A, Talatahari S. "A novel heuristic optimization method: Charged system search", Acta Mechanica, 2010, 213 (3-4), 267-289.
- Kennedy J, "Particle swarm optimization", Encyclopedia of Machine Learning, Springer, 2010, 760-766.
- Khot N, Venkayya V, Berke L, "Optimum structural design with stability constraints", International

EXTENDED ABSTRACT

Scaled Charged System Search Algorithm for Optimum Design of Steel Frames

Hossein Moez^a, Naser Taghizadieh^{a,*}, Ali Kaveh^b

^a Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

^b Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

Received: 06 August 2015; Accepted: 22 February 2016

Keywords:

Optimal design, Frame structures, scaled charged system search, meta-heuristic algorithm

1. Introduction

With increasing demand for large scale and complex structural models, optimum design has become a challenging and important issue in structural engineering and meta-heuristic algorithms have become powerful tools for optimal design of structures. Charged System Search (CSS) is one of the meta-heuristics, inspired by the governing laws of electrical physics and the Newtonian mechanics, Kaveh and Talatahari (2010). CSS based optimum design of structures needs adjustments for variable based and problem based constraints. The first adjustment guarantees to select from predefined cross sections and as a result, all specifications of sections will be ready to run the analysis and the second one helps to find the optimum design in fewer steps.

This is ideal to find a unique optimum design in a complicated discrete value large-scale structural problem. Most of the time the researches perform multiple runs and report the average of the results (Camp, 2007). CSS, like other meta-heuristic algorithms, do not guarantee to find the optimum design in a single run and sometimes multiple reiterations and modifications are needed to find the best answer. In other words for some optimization problems the exploration and exploitations controllers should be modified to find a stable answer for the problem. This characteristic of the optimum design problem motivated the authors to find a way to obtain reliable optimum results without modification of the control factors by a scaling and fitting procedure. Therefore the particles move effectively in the feasible region and there is no need to adjust the exploration factor separately.

In this paper optimum design of steel frames is performed. For this purpose a modified charged system search (CSS) algorithm, so-called Scaled charged system search (SCSS), is developed that has more reliable results compared to the standard CSS algorithm. The performance of the new algorithm is illustrated by some benchmark structural problems.

2. Methodology

Optimum design of a frame structure with m members and n_g groups of members can be formulated as:

$$\begin{aligned} \text{Find } X &= [x_1, x_2, \dots, x_{n_g}] \\ \text{to minimize } Obj(X) &= \sum_{i=1}^m (\rho_i \cdot A_i(X) \cdot l_i) \times Pen(X) \end{aligned} \quad (1)$$

* Corresponding Author

E-mail addresses: hossein.moez@gmail.com (Hossein Moez), ntaghiza@tabrizu.ac.ir (Naser Taghizadieh), alikaveh@iust.ac.ir (A. Kaveh).

Where X represents the vector of design variables, which includes cross section area of members in each group. $Obj(X)$ is the objective function, which consists of the weight of the structure multiplied by a penalty function, $Pen(X)$, to convert a constrained structural optimization problem into an unconstrained one. ρ_i , l_i and A_i are the material density, length and cross section area of each structural member, respectively.

Because of the complicated nature of this problem, mathematical methods of optimization rarely are used in practical structural optimization problems and heuristic, metaheuristic or evolutionary methods are used widely.

In electrical physics, the electric charge generates the electric field and can affect other electrically charged objects. The electric field surrounding a charged particle is specified by the laws of Coulomb and Gauss. Utilizing these principles, the CSS algorithm defines a number of solution candidates each one is called charged particle (CP) and is treated as a charged sphere. Each CP can exert an electrical force on the other agents (CPs). These forces can change the position of other CPs according to the Newton's second law of motion. Finally, considering the Newtonian mechanics, the new positions of CPs are determined.

With the purpose of solving the infeasible moves of particles in CSS, a modified algorithm, named Scaled Charged System Search (SCSS) is proposed here. This method contains a mapping function and if any of the entries of a design variable exceeds the limits; the whole vector will be adjusted by scaling and fitting the entries.

In order to show the efficiency of provided algorithm two benchmark structural optimization problem is investigated in this paper. An eight-story one-bay frame is considered as the first example. This frame is introduced by Khot et al. (1976) and is originally optimized with Optimality Criteria. This problem was optimized using GA by Camp et al. (1998).

Kaveh and Shojaee (2007), Kaveh and Malakouti Rad (2010), and Kaveh and Abbasgholiha (2011) optimized this frame by several algorithms. This example is a well-known benchmark problem in frame optimization (Gandomi and Yang, 2011). The second design example is a 10-story unbraced steel frame. This problem have been studied by Hasançebi et al. (2010) to evaluate the performance of several meta-heuristic search techniques. The examples are implemented by FORTRAN and in order to use the benefit of multithread processing, OMP instructions are utilized in solving the stiffness equation by blocked Cholesky Factorization.

3. Results and discussion

3.1. Eight-story one-bay frame

The results of 100 optimizations using standard CSS integrated with Fly-Back mechanism without HS based adjustment and SCSS are illustrated in Figs. 1 and 2 respectively, and a comparison between them is presented in Table 1. Although SCSS needs more computational time and a higher number of iterations are needed, but by comparing Fig. 3 with Fig. 4 and the standard deviation of objective function evaluation within 100 runs as in Table 1, it is clear that SCSS has more uniform results than CSS. This means that in a practical optimization, where time is limited and it is not possible to repeat the optimization procedure, SCSS has a higher chance to obtain the optimum value of the objective function.

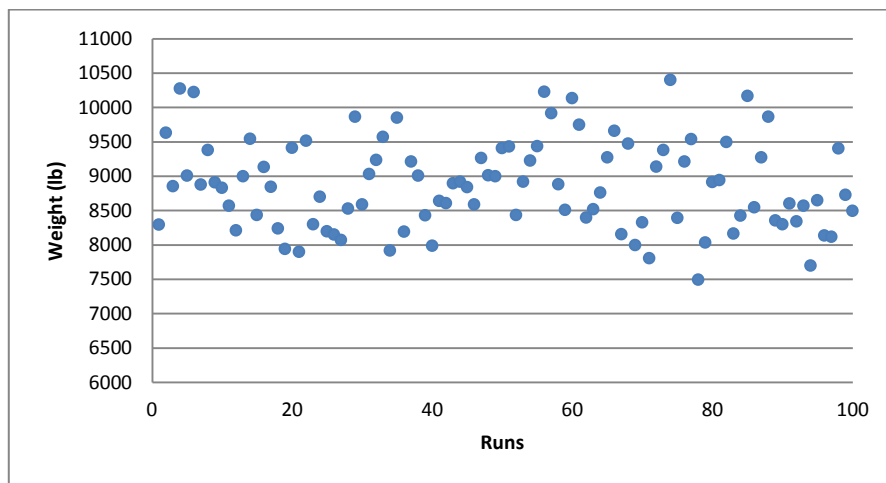


Fig. 1. Objective function evaluation in 100 runs of CSS with Fly-back Mechanism

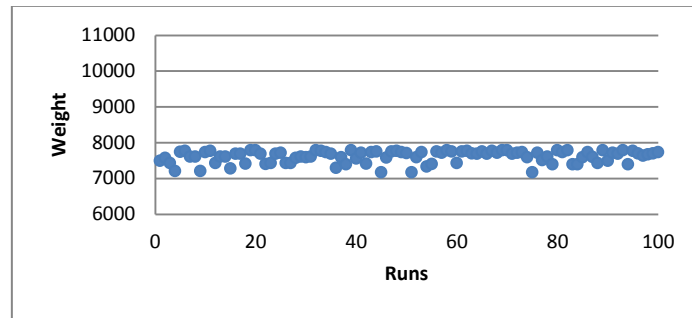


Fig. 2. Objective function evaluation in 100 runs of SCSS

Table 1. Comparison of two methods

	Min value of objective function (lb)	Average of objective functions (lb)	Standard deviation	Average number of Iterations	Average computational time (s)
CSS	7494.335	8869.918	649.492	2696	159.4
SCSS	7165.149	7604.508	168.086	5992	323.82

3.2. 568-member unbraced space steel frame

The comparison between the best results obtained from present study and previously published result shows that SCSS reached a better weight than the ESs.

4. Conclusions

In discrete optimum design problems, CSS needs to be tuned to produce feasible particles and to explore the design space. Sometimes this algorithm should be repeated to achieve better results. The proposed "Scaling and Fitting" procedure, makes the tuning automatically and produces more uniform results than the standard CSS. Standard deviations of the repeated optimizations with SCSS are lower than those of CSS and this method guarantees to find optimum results by fewer iterations and modifications. Although the SCSS needs more computational time in a single run, but in practical large scale optimum structural design problems, where the time is limited and no more modification of control factors is possible, the SCSS has more chance to find the optimum design in one single run or in limited number of runs.

5. References

- Camp C, "Design of space trusses using big bang–big crunch optimization", *Journal of Structural Engineering*, 2007, 133 (7), 999-1008.
- Camp C, Pezeshk S, Cao G, "Optimized design of two-dimensional structures using a genetic algorithm", *Journal of Structural Engineering*, 1998, 124 (5), 551-559.
- Gandomi AH, Yang XS, "Benchmark problems in structural optimization, computational optimization, methods and algorithms", Springer, 2011, 259-281.
- Hasançebia O, Çarbaş S, Doğanb E, Erdalb F, Saka MP, "Comparison of non-deterministic search techniques in the optimum design of real size steel frames", *Computers & Structures*, 2010, 88 (17), 1033-1048.
- Kaveh A, Abbasgholiha H, "Optimum design of steel sway frames using big bang-big crunch algorithm", *Asian Journal of Civil Engineering*, 2011, 12 (3), 293-317.
- Kaveh A, Malakouti Rad S, "Hybrid genetic algorithm and particle swarm optimization for the force method-based simultaneous analysis and design", *Iranian Journal of Science and Technology, Transaction B: Engineering*, 2010, 34 (B1), 15-34.
- Kaveh A, Shojaee S, "Optimal design of skeletal structures using ant colony optimization", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2007, 70 (5), 563-581.
- Kaveh A, Talatahari S, "A novel heuristic optimization method: Charged system search", *Acta Mechanica*, 2010, 213 (3-4), 267-289.
- Khot N, Venkayya V, Berke L, "Optimum structural design with stability constraints", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1976, 10 (5), 1097-1114.