بهبود عملکرد الگوریتم ژنتیک در بهینه یابی سازه های خرپایی با استفاده از ایده پیشنهادی مش بندی فضای جستجو

وحید رضا کلات جاری[۱]، محمد حسین طالب پور[۲]

۱- استادیار، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- دانشجوی دکترا سازه، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه صنعتی شاهرود

M.H.Talebpour@gmail.com

خلاصه

در طول چند دهه اخیر، الگوریتم ژنتیک (GA) به عنوان یکی از روش‌های فراابتکاری در بهینه یابی سازه ها مطرح شده است. این روش نیز همانند سایر الگوریتم های فراابتکاری وابسته به پارامترها و عوامل مختلفی در روند بهینه یابی می باشد. در GA با افزایش لیست مقاطع و گسترش فضای طراحی، طول هر زیررشته و بدنبال آن طول هر رشته افزایش می یابد. این مسئله سبب کاهش سرعت فرآیند بهینه یابی در نیل به نقطه بهینه خواهد شد. بنابراین در این مقاله سعی شده است تا سرعت فرآیند بهینه یابی از طریق GA با افراز فضای طراحی افزایش یابد. برای این منظور با الهام از فرآیند مش بندی در روش اجزای محدود، لیست مقاطع به تعداد مشخصی زیرمجموعه تقسیم می شود. سپس یکی از اعضای هر زیرمجموعه (در سه حالت با اتخاذ بزرگترین، میانگین و کمترین سطح مقطع) به عنوان نماینده زیرمجموعه، در لیستی جدید تعریف می شود. فرآیند بهینه یابی براساس لیست جدید مقاطع که متشکل از نمایندگان زیرمجموعه ها است، آغاز می شود (جستجوی سراسری). در ادامه با گذشت تعداد مشخصی از نسل سازی، محدوده طرح بهینه برای هر زیررشته تعیین می شود. سپس لیست مقاطع برای هر متغیر طراحی متناسب با نتیجه فرآیند مرحله پیش و براساس زیرمجموعه متغیر مربوطه مجدداً تعریف می شود. در نهایت عملیات بهینه یابی براساس لیست مقاطع جدید برای هر متغیر طراحی تا تکمیل نسل سازی ها ادامه می یابد (جستجوی محلی). ایده پیشنهادی در سه حالت به همراه شیوه مرسوم GA با استفاده از مثال های بهینه یابی خرپا مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج دلالت بر افزایش سرعت عملیات بهینه یابی براساس ایده اتخاذ روش میانگین سطح مقطع دارد.

کلمات کلیدی: بهینه یابی، الگوریتم ژنتیک، سازه های خرپایی، مش بندی فضای طراحی.

۱. مقدمه

الگوریتم ژنتیک (GA) یکی از روش های فراابتکاری است که از قوانین بیولوژیکی طبیعت پیروی می کند. این الگوریتم یک روش جستجوی هوشمند است که براساس ساختار ژن ها و کروموزوم ها شکل گرفته است. GA نخستین بار توسط جان هولند در سال ۱۹۷۵ در دانشگاه میشیگان مطرح شد [۱] و پس از وی توسط جمعی از دانشجویانش مثل گلدبرگ و آنن آربور توسعه یافت [۲]. بسیاری دیگر از محققین مقالات متنوعی درباره بسط دامنه کاربرد GA ، بهبود نتایج و افزایش سرعت محاسبات ارائه نموده اند [۳، ۴]. الگوریتم ژنتیک براساس اصل ادامه حیات بهترین ها و تکثیر نوع برتر پی ریزی شده است. این روش هوشمند بطور موفقیت آمیزی طرح بهینه عمومی را بدون در نظر گرفتن فرضیات محدود کننده ای از قبیل پیوسته بودن فضای جستجو و یا وجود مشتقات پیدا می کند. الگوریتم GA در ابتدا با مجموعه ای از جواب های تصادفی (رشته ها) که به آن جمعیت گفته می شود، آغاز می گردد. از این جواب ها برای ساخت جمعیت بعدی استفاده می شود، به این امید که جمعیت های جدید بهتر از جمعیت قدیم باشند. روش هایی که برای ایجاد جمعیت جدید مطرح می شوند، براساس انتخاب رشته های مناسب بنا نهاده شده اند. بنابراین بهترین ها شانس بیشتری برای تولیدمثل و ادامه حیات خواهند داشت. این فرآیند آنقدر تکرار می شود تا براساس معیار همگرایی طرح نزدیک به بهینه حاصل شود. بطور خلاصه فرآیند بهینه یابی سازه ها از طریق GA را می توان در چهار مرحله بشرح زیر بیان نمود [۵]:

[۱] استادیار، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه صنعتی شاهرود، پست الکترونیکی: V_Kalatjari@shahroodut.ac.ir

[۲] دانشجوی دکتری سازه، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه صنعتی شاهرود، پست الکترونیکی: M.H.Talebpour@gmail.com

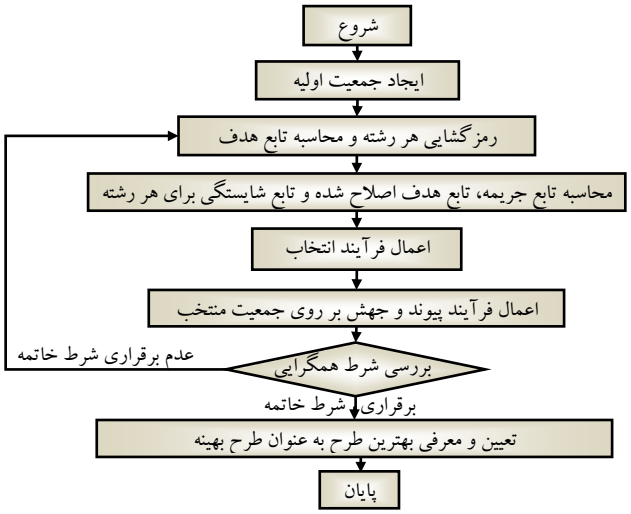
۱) تولید تصادفی مجموعه ای از طرح ها، که بدان جمعیت اولیه گفته می شود. هر عضو این جمعیت یک کروموزوم می باشد که بصورت کد بوده و رشته نامیده می شود. هر رشته متناسب با تعداد متغیرهای طراحی، به چندین زیررشته تقسیم می شود. زیررشته مجموعه ای از بیت ها است که در کنار هم چیده می شوند. هر بیت هم ارز با یک ژن در الفبای ژنتیک می باشد. تعداد بیت های هر زیررشته به نحوی تعیین می شود که بتوان کلیه اطلاعات متغیرهای طراحی را مابین حدود بالا و پایین در مرحله رمز گشایی بدست آورد. بنابراین در بهینه یابی سازه ها با مقاطع منفصل، با افزایش تعداد اعضای لیست مقاطع، تعداد بیت های هر زیررشته افزایش و بدنبال آن طول هر رشته افزایش خواهد یافت.

۲) پس از تولید تصادفی جمعیت اولیه، با رمز گشایی، مقدار متغیرهای طراحی در هر رشته ارزیابی و به ازای آن مقادیر تابع هدف، تنش اعضا، تغیرمکان های گرهی و میزان نقض قیود در ارتباط با پاسخ سازه به بارهای خارجی تعیین می گردد.

۳) مسئله بهینه یابی مقید با تعریف تابع پنالتی و ترکیب آن با تابع هدف و ایجاد تابع هدف اصلاح شده، به یک مسئله بهینه یابی نامقید تبدیل می شود. در ادامه با تعریف تابع شایستگی، به هر رشته یک مقدار شایستگی اختصاص داده می شود. سپس با استفاده از فرآیند تکثیر که الهام گرفته شده ازقوانین تکامل طبیعی است، سعی می شود بهترین رشته ها بر مبنای میزان شایستگی انتخاب شوند. بدین ترتیب یک رشته (طرح) خیلی خوب شانس آن را می یابد تا چندین بار در جمعیت منتخب تکرار شود.

۴) در نهایت با استفاده از اپراتورهای GA جمعیت جدید (فرزندان) که کیفیت اعضای آن نسبت به جمعیت منتخب بهبود یافته است، ایجاد می گردد. پس از آنکه جمعیت فرزندان تولید گردید، این جمعیت برای نسل بعد مورد استفاده قرار می گیرد. این مراحل تا برقراری شرط خاتمه و یا به تعداد نسل های پیش بینی شده برای کسب بهینه عمومی تکرار می شود.

براساس مراحل فوق می توان فلوچارت بهینه یابی سازه ها از طریق الگوریتم ژنتیک را بصورت شکل ۱ نمایش داد.



شکل ۱- فلوچارت بهینه یابی سازه ها توسط الگوریتم ژنتیک

در این تحقیق نخست به ارائه شیوه بهینه یابی سازه های خرپایی براساس الگوریتم ژنتیک پرداخته شده است. در GA با افزایش تعداد اعضای لیست مقاطع، طول هر رشته افزایش می یابد. این مسئله سبب کاهش سرعت همگرایی خواهد شد. بنابراین در این مقاله سعی شده است تا با ارائه ایده پیشنهادی مش بندی فضای طراحی، طول هر رشته کاهش یابد. این مهم سبب افزایش سرعت همگرایی بهینه یابی بواسطه الگوریتم ژنتیک می شود. ایده پیشنهادی در سه حالت ارائه و با حالت مرسوم GA مقایسه شده است. برای مقایسه از مثال های سازه های خرپایی استفاده شده و برای هر حالت ۴۰ اجرای مستقل و متوالی انجام شده است. در نهایت میانگین ۴۰ اجرا برای هر حالت، به عنوان نماینده سیر همگرایی برای حالت مورد نظر رسم شده است. نتایج دلالت بر افزایش سرعت همگرایی بواسطه حالات ایده پیشنهادی دارد.

۲. فرمولبندی مسئله بهینه یابی سازه ها

در این بخش نحوه فرمولبندی ریاضی یک مسئله بهینه یابی سطح مقطع سازه ارائه شده است. براین اساس در یک مسئله بهینه یابی می بایست بردار سطح مقطع اعضا $[A]$، به نحوی تعیین شود که تابع هدف وزن $W(A)$ کمینه شود.

$$W(A)=\sum_{j=1}^{Ne}\rho a_j L_j \qquad (1)$$

$$[A]=[a_1,a_2,\ldots,a_{Nos}]^T \quad ; \quad a_i \in S \quad ; \quad i=1,\ldots,Nos \qquad (2)$$

معمولاً در بهینه یابی سازه ها برای کمینه سازی تابع $W(A)$ قیود زیر در نظر گرفته می شود [۶].

$$G1=\begin{cases} g_{i1}(A)=0 \quad if \quad \left|\frac{\sigma_i}{\sigma_{all}}\right|-1\le 0 \quad ; \quad i=1,\ldots,Ne \\ g_{i1}(A)=\left|\frac{\sigma_i}{\sigma_{all}}\right|-1 \quad if \quad \left|\frac{\sigma_i}{\sigma_{all}}\right|-1>0 \quad ; \quad i=1,\ldots,Ne \end{cases} \qquad (3)$$

$$G2=\begin{cases} g_{i2}(A)=0 \quad if \quad \left|\frac{\Delta_i}{\Delta_i^{all}}\right|-1\le 0 \quad ; \quad i=1,\ldots,Ndof \\ g_{i2}(A)=\left|\frac{\Delta_i}{\Delta_i^{all}}\right|-1 \quad if \quad \left|\frac{\Delta_i}{\Delta_i^{all}}\right|-1>0 \quad ; \quad i=1,\ldots,Ndof \end{cases} \qquad (4)$$

در روابط (۱) و (۲)، Ne تعداد اعضای سازه، L_i طول هر عضو از سازه و a_i سطح مقطع هر عضو یا مجموعه ای منتخب از اعضای سازه است. Nos تعداد مقاطع بهینه که بایستی یافته شود و متناسب با گروه بندی اعضای سازه مشخص می شود. S مجموعه پروفیل های موجود است که مقاطع بهینه از آن انتخاب می شوند و تعداد این مجموعه برابر با Ns می باشد.

قید G1 : در یک سازه، تنش تمامی اعضا ناشی از ترکیبات بارگذاری می بایست در محدوده مجاز و قابل قبول قرار داشته باشد. این مقدار مجاز براساس آیین نامه های طراحی تعیین می شود. در روند بهینه یابی تنش تک تک اعضای سازه محاسبه می شود. در صورت نقض قیود براساس رابطه (۳) جریمه ای به طرح مربوطه اعمال می شود. در این رابطه $g_{i1}(A)$ میزان نقض قید تنش اعضای سازه، σ_i تنش عضو iام، σ_{all} تنش مجاز، Ne تعداد اعضای سازه است.

قید G2 : پس از تحلیل سازه و محاسبه مقادیر تنش، میزان تغییرمکان گره های فعال سازه محاسبه می شود. در صورتی که تغییرمکان درجه آزادی iام، در محدوده مجاز باشد، جریمه ای به طرح موردنظر تعلق نمی گیرد. اما در غیر این صورت، طرح مربوطه متناسب با میزان تخطی جریمه خواهد شد. میزان نقض قید تغییرمکان، بر اساس روابط (۴) بدست می آید. در این روابط $g_{i2}(A)$ میزان نقض قید تغییر مکان گره های فعال سازه، $Ndof$ تعداد درجات آزادی فعال گره های سازه، Δ_i مقدار تغییرمکان درجه آزادی iام و Δ_i^{all} مقدار تغییرمکان مجاز درجه آزادی iام است.

حال با داشتن تمامی اطلاعات طراحی برای مسئله، فرآیند بهینه یابی از طریق روش GA قابل اجرا می باشد. برای این منظور فرآیند بهینه یابی بشرح زیر پیاده سازی می شود.

۳. بهینه یابی از طریق GA

GA نیز همانند سایر الگوریتم های فراابتکاری با یک جمعیت اولیه تصادفی شروع می شود. از آنجاکه این روش با متغیرهای طراحی رمز شده کار می کند، لذا ضروری است متغیرهای طراحی بصورت یک رشته رمز شده بیان شوند. در میان شیوه های متنوع رمز کردن، در این مقاله از شیوه رمز کردن دودویی استفاده شده است. بنابراین برای تولید جمعیت اولیه، به تعداد زیررشته های متناظر با متغیرهای طراحی، اعداد تصادفی دودویی تولید می شود. در بهینه یابی مقاطع منفصل سازه های خرپایی، متغیرهای طراحی سطح مقطع اعضای گروه بندی شده می باشند که می بایست از لیست پروفیل های موجود یعنی مجموعه S انتخاب شوند. به بیان دیگر هر متغیر طراحی می تواند یکی از اعضای لیست مقاطع را انتخاب نماید.

پس از تولید جمعیت اولیه، می بایست مقدار تابع هدف به ازای هر طرح تولیدی محاسبه شود. هر رشته بیانگر طرحی در فضای جستجو و هر زیررشته بیانگر مقطعی از لیست مقاطع است، بنابراین با توجه به آنکه یک زیررشته LS بیتی اعداد صفر تا 2^{LS}-1 را کد می نماید، مقدار صحیح متناظر با زیررشته سطح مقطع iام بشرح زیر محاسبه می شود [۷].

$$b_{LS-1}\ldots b_2 b_1 b_0 \qquad \Leftrightarrow \qquad IR_i=\sum_{j=0}^{LS-1}2^j b_j \qquad (5)$$

در رابطه فوق هر بیت b می تواند اعداد صفر تا یک را اختیار نماید و به صورت رشته نمایش داده شود. IR_i عدد صحیح متناظر با زیر رشته iام است. حال برای آن که IR_i به شماره مقطع قرار گرفته در لیست پروفیل های S یعنی IS_i ارتباط داده شود، از رابطه کلی زیر استفاده می شود:

$$IS_i = Int\left(IR_i * \frac{(Nos-1)}{(2^{LS}-1)} \right) \qquad 1 \le IS_i \le Nos \quad ; \quad 0 \le IR_i \le 2^{LS}-1 \tag{6}$$

براساس رابطه فوق مقادیر رمز گشایی شده هر زیررشته متناظر با یکی از اعضای مجموعه S قرار می گیرد.

پس از مشخص شدن مقدار سطح مقطع هر عضو، می بایست میزان تابع هدف ارزیابی شود. برای این منظور از رابطه (۱) استفاده می شود. سپس با توجه به آنکه GA برای مسائل بهینه یابی نامقید بسیار مناسب می باشد، ضروری است مسئله بهینه یابی مقید به یک مساله بهینه یابی نامقید تبدیل شود. این عمل با استفاده از تابع پنالتی و تابع هدف اصلاح شده صورت می پذیرد. در این تحقیق از تابع پنالتی به صورت زیر استفاده شده است [۴].

$$f_{penalty} = W(A) \times K \times C \qquad C = \sum_{q=1}^{nlc} \sum^{Q} \max[0, Gq] \tag{7}$$

در رابطه فوق $f_{penalty}$ تابع جریمه، $W(A)$ تابع هدف که وزن سازه است، G_q میزان نقض سازه در ارتباط با هر یک از قیود، A بردار متغیرهای طراحی و Q تعداد کل قیود حاکم بر مسئله می باشد. nlc تعداد حالات بارگذاری و ثابت K نیز برابر ۱۰ پیشنهاد شده است. حال با در نظر گرفتن مقادیر تابع پنالتی، تابع هدف اصلاح شده و تابع شایستگی تعریف می گردد تا به هر عضو از جمعیت یک مقدار شایستگی اختصاص یابد. برای این منظور از تابع هدف اصلاح شده و تابع شایستگی زیر استفاده شده است [۵].

$$F_{fitness}(X) = [\varphi_{\max}(X) + \varphi_{\min}(X)] - \varphi(X) \qquad \varphi(X) = W(X) + f_{penalty} \tag{8}$$

در رابطه فوق $F_{fitness}$ و $\varphi(A)$ به ترتیب مقادیر شایستگی و تابع هدف اصلاح شده هر عضو از جمعیت و $\varphi_{max}(X)$ و $\varphi_{min}(X)$ به ترتیب حداکثر و حداقل مقدار تابع هدف اصلاح شده در جمعیت جاری می باشد.

پس از محاسبه میزان شایستگی هر طرح، می بایست فرآیند انتخاب اجرا شود. در فرآیند انتخاب، رشته های شایسته از میان جمعیت به عنوان والد انتخاب می شوند. روش های متنوعی در GA برای انتخاب رشته های شایسته وجود دارد [۵]، اما هدف اصلی در همه آن ها انتخاب رشته هایی (طرح هایی) با میزان شایستگی بالا از جمعیت جاری و تکثیر آن ها، طی قرارگیری در مکانی به نام استخر تولید مثل است. در این تحقیق از روش مسابقه‌ای جهت انجام فرآیند انتخاب استفاده شده است [۸]. مفهوم شایسته سالاری نیز در طی فرآیند انتخاب در نظر گرفته شده است.

پس از تکمیل فرآیند انتخاب، نوبت به اعمال فرآیند پیوند بر روی جمعیت منتخب جهت تولید جمعیت فرزندان می رسد. در این تحقیق از پیوند دو نقطه ای استفاده شده است. برای اعمال فرآیند پیوند دو نقطه ای بایستی مجموعه ای از پارامترها بطور تصادفی تولید شوند. این پارامترها به یافتن زوج ها و دو نقطه قطع جهت اعمال فرآیند پیوند مربوط می شوند [۷].

از دیگر مراحل رایج در عملیات GA که تکامل جمعیت برای نسل بعد را به دنبال خواهد داشت، استفاده از اپراتور جهش است. هدف از بکارگیری اپراتور جهش، کاوش بهتر فضای جستجو و ایجاد پراکندگی بیشتر در محدوده کاوش فضای طراحی است. در غیاب عملکرد اپراتور جهش در صورتی که فقط از اپراتور پیوند استفاده شود، پس از طی چندین نسل، رشته برتر به تعداد اعضای جمعیت تکثیر یافته و فرآیند پیوند دیگر نمی تواند هیچگونه تغییری در کیفیت جمعیت فرزندان یا به عبارت دیگر نتایج طرح بهینه ایجاد کند [۹].

در نهایت شرط خاتمه ارزیابی می شود. در صورت برقراری شرط خاتمه، الگوریتم بهترین رشته را به عنوان طرح بهینه معرفی می نماید، در غیر این صورت فرآیند فوق تا برقراری شرط خاتمه ادامه می یابد. در این تحقیق، شرط خاتمه با تکمیل تعداد مراحل تکرار کنترل می شود [۱۰]. به عبارت دیگر الگوریتم مراحل فوق را تا تکمیل تعداد دفعات پیش بینی شده تکرار می کند. زمانی که شرط خاتمه محقق شود، الگوریتم بهترین طرح را به عنوان طرح بهینه معرفی می نماید.

۴. ایده پیشنهادی

همان طور که در بخش پیش مشاهده شد، با افزایش تعداد اعضای لیست مقاطع، طول هر زیررشته افزایش می یابد. به دنبال افزایش طول هر زیررشته، طول هر رشته نیز افزایش خواهد یافت. این مسئله سبب کاهش سرعت همگرایی در عملیات بهینه یابی بواسطه الگوریتم ژنتیک خواهد شد. در این مقاله سعی شده است تا با الهام از فرآیند مش بندی در روش اجزای محدود، فضای طراحی به نحوی منفصل تجزیه گردد و مقدار هر متغیر طراحی در محدوده مناسب فضای طراحی مورد کاوش قرار گیرد. برای این منظور در ابتدا لیست مقاطع به تعدادی زیر مجموعه تقسیم می شود. تعداد این زیر مجموعه ها و تعداد اعضای هر زیرمجموعه براساس انتخاب کاربر و متناسب با لیست مقاطع و شرایط مسئله و سازه مشخص می شود. سپس یک عضو از

زیرمجموعه به عنوان نماینده برگزیده خواهد شد. برای این منظور در این مقاله سه حالت در نظر گرفته شده است. در حالت اول بزرگترین سطح مقطع، در حالت دوم کمترین سطح مقطع و در حالت سوم عضو میانی زیرمجموعه ها به عنوان نماینده برگزیده خواهد شد. در هر صورت پس از مشخص شدن نمایندگان هر زیر مجموعه، لیست مقاطع جدید برای تمامی متغیرهای طراحی شکل می گیرد. این لیست شامل نمایندگان هر زیر مجموعه می باشد. بدین ترتیب هر زیررشته از لیست مقاطع جدید برای انتخاب سطح مقطع استفاده می نماید. این لیست اعضای کمتری نسبت به لیست اولیه مسئله دارد. بنابراین طول هر زیررشته بطور چشمگیری کاهش می یابد. با کاهش طول هر زیررشته، طول هر رشته که بیانگر طرحی در فضای جستجو است، نیز کاهش می یابد.

با مشخص شدن لیست مقاطع، فرآیند بهینه یابی براساس GA بشرح بخش ۳ آغاز می شود. از آنجاکه در این مرحله لیست مقاطع فقط شامل نمایندگان هر زیر مجموعه است، عملیات بهینه یابی با تعبیر جستجوی سراسری انجام خواهد شد. به عبارت دیگر در این مرحله محدوده طرح بهینه برای هر متغیر طراحی بواسطه جستجوی سراسری مبتنی بر لیست مقاطع جدید مشخص خواهد شد. عملیات بهینه یابی در این مرحله به تعداد مشخصی که از قبل تعیین شده ادامه می یابد. این معیار در مقاله حاضر برابر نصف تعداد کل نسل سازی ها در نظر گرفته شده است. این مسئله سبب می شود تا الگوریتم زمان کافی برای انجام فرآیند جستجوی سراسری داشته باشد. شایان ذکر است که این معیار متناسب با شرایط مسئله و سازه قابل تغییر می باشد.

پس از پایان تعداد نسل سازی های مرتبط با جستجوی سراسری، نوبت به اعمال فرآیند جستجوی محلی براساس GA می رسد. برای این منظور لیست مقاطع برای هر زیررشته متناسب با نتیجه طرح بهینه حاصل از فرآیند جستجوی سراسری تغییر خواهد کرد. به بیان دیگر مقادیر طرح بهینه حاصل از جستجوی سراسری برای هر متغیر طراحی، بیانگر زیرمجموعه ای از لیست مقاطع است. بنابراین در این مرحله، زیرمجموعه مربوطه به عنوان لیست مقاطع جدید برای متغیر طراحی مورد نظر منظور می شود. بدین ترتیب هر متغیر طراحی فقط از لیست مقاطع جدید استفاده می نماید. شایان ذکر است که در این مرحله، لیست مقاطع برای هر متغیرطراحی متفاوت است. از سوی دیگر در این مرحله نیز با توجه به آنکه تعداد مقاطع لیست جدید برای هر زیررشته بمراتب کمتر از تعداد مقاطع لیست اولیه (S) می باشد. لذا طول هر زیررشته و بالطبع هر رشته همچنان کوچکتر از حالت ساده الگوریتم ژنتیک می باشد. در هر صورت پس از مشخص شدن لیست مقاطع برای هر متغیر طراحی، فرآیند بهینه یابی براساس روند بخش ۳ ادامه می یابد. بدین سان در این مرحله حوالی طرح بهینه حاصل از مرحله قبل جستجو صورت می پذیرد. به بیان دیگر فضای طراحی براساس الگوریتم ژنتیک در دو مرحله با ایجاد توازنی منطقی بین فرآیند جستجوی سراسری و جستجوی محلی مورد کاوش قرار می گیرد.

۵. مثال های عددی

برای بررسی عملکرد ایده پیشنهادی دو مثال بهینه‌یابی سازه‌های خرپایی مورد بررسی قرار گرفته است. در هر دو مثال لیست مقاطع بشرح جدول ۱ است.

جدول ۱ لیست مقاطع موجود براساس AISC

شماره	in^2	mm^2	شماره	in^2	mm^2	شماره	in^2	mm^2	شماره	in^2	mm^2
1	0.111	71.613	17	1.563	1008.385	33	3.840	2477.414	49	11.500	7419.430
2	0.141	90.968	18	1.620	1045.159	34	3.870	2496.769	50	13.500	8709.660
3	0.196	126.451	19	1.800	1161.288	35	3.880	2503.221	51	13.900	8967.724
4	0.250	161.290	20	1.990	1283.868	36	4.180	2696.769	52	14.200	9161.272
5	0.307	198.064	21	2.130	1374.191	37	4.220	2722.575	53	15.500	9999.980
6	0.391	252.258	22	2.380	1535.481	38	4.490	2896.768	54	16.000	10322.560
7	0.442	285.161	23	2.620	1690.319	39	4.590	2961.284	55	16.900	10903.204
8	0.563	363.225	24	2.630	1696.771	40	4.800	3096.768	56	18.800	12129.008
9	0.602	388.386	25	2.880	1858.061	41	4.970	3206.445	57	19.900	12838.684
10	0.766	494.193	26	2.930	1890.319	42	5.120	3303.219	58	22.000	14193.520
11	0.785	506.451	27	3.090	1993.544	43	5.740	3703.218	59	22.900	14774.164
12	0.994	641.289	28	1.130	729.031	44	7.220	4658.055	60	24.500	15806.420
13	1.000	645.160	29	3.380	2180.641	45	7.970	5141.925	61	26.500	17096.740
14	1.228	792.256	30	3.470	2238.705	46	8.530	5503.215	62	28.000	18064.480
15	1.266	816.773	31	3.550	2290.318	47	9.300	5999.988	63	30.000	19354.800
16	1.457	939.998	32	3.630	2341.931	48	10.850	6999.986	64	33.500	21612.860

براساس تعداد اعضای لیست مقاطع در جدول ۱ طول هر زیررشته در فرآیند بهینه یابی براساس الگوریتم ژنتیک، برابر شش بیت است. بنابراین طول هر رشته براساس تعداد متغیرهای طراحی برابر $6Nos$ خواهد بود که Nos تعداد متغیرهای طراحی مسئله می باشد.

در این مقاله براساس ایده پیشنهادی، لیست مقاطع موجود به هشت زیر مجموعه هشت عضوی بشرح جدول ۲ تقسیم می شود. شایان ذکر است که این تقسیم بندی متناسب با شرایط مسئله و لیست مقاطع با نظر کاربر قابل تغییر است. نکته حائز اهمیت دیگر در این فرآیند مرتب سازی لیست مقاطع (جدول ۱) از کمترین سطح مقطع تا بیشترین سطح مقطع می باشد. به بیان دیگر قبل از تقسیم بندی لیست مقاطع، می بایست اعضای مجموعه اصلی بصورت صعودی مرتب شوند.

جدول ۲ اعضای لیست مقاطع برای هر زیرمجموعه

مجموعه شماره (۱) S1			مجموعه شماره (۳) S3			مجموعه شماره (۵) S5			مجموعه شماره (۷) S7		
شماره	in^2	mm^2	شماره	in^2	mm^2	شماره	in^2	mm^2	شماره	in^2	mm^2
1	0.111	71.613	1	1.457	939.998	1	3.840	2477.414	1	11.500	7419.430
2	0.141	90.968	2	1.563	1008.385	2	3.870	2496.769	2	13.500	8709.660
3	0.196	126.451	3	1.620	1045.159	3	3.880	2503.221	3	13.900	8967.724
4	0.250	161.290	4	1.800	1161.288	4	4.180	2696.769	4	14.200	9161.272
5	0.307	198.064	5	1.990	1283.868	5	4.220	2722.575	5	15.500	9999.980
6	0.391	252.258	6	2.130	1374.191	6	4.490	2896.768	6	16.000	10322.560
7	0.442	285.161	7	2.380	1535.481	7	4.590	2961.284	7	16.900	10903.204
8	0.563	363.225	8	2.620	1690.319	8	4.800	3096.768	8	18.800	12129.008
مجموعه شماره (۲) S2			مجموعه شماره (۴) S4			مجموعه شماره (۶) S6			مجموعه شماره (۸) S8		
شماره	in^2	mm^2	شماره	in^2	mm^2	شماره	in^2	mm^2	شماره	in^2	mm^2
1	0.602	388.386	1	2.630	1696.771	1	4.970	3206.445	1	19.900	12838.684
2	0.766	494.193	2	2.880	1858.061	2	5.120	3303.219	2	22.000	14193.520
3	0.785	506.451	3	2.930	1890.319	3	5.740	3703.218	3	22.900	14774.164
4	0.994	641.289	4	3.090	1993.544	4	7.220	4658.055	4	24.500	15806.420
5	1.000	645.160	5	3.380	2180.641	5	7.970	5141.925	5	26.500	17096.740
6	1.130	729.031	6	3.470	2238.705	6	8.530	5503.215	6	28.000	18064.480
7	1.228	792.256	7	3.550	2290.318	7	9.300	5999.988	7	30.000	19354.800
8	1.266	816.773	8	3.630	2341.931	8	10.850	6999.986	8	33.500	21612.860

در ادامه براساس حالات پیشنهادی و مشروح در بخش ۳ در هر حالت لیست مقاطع اولیه برای تمامی متغیرهای طراحی براساس نمایندگان هر زیرمجموعه شکل می گیرد. بدین ترتیب لیست مقاطع در ابتدای عملیات بهینه یابی برای هر یک از حالات پیشنهادی بشرح جداول ۳، ۴ و ۵ می باشد.

جدول ۳ اعضای لیست مقاطع برای حالت ۱

شماره	in^2	mm^2	شماره	in^2	mm^2	شماره	in^2	mm^2	شماره	in^2	mm^2
1	0.563	363.225	3	2.620	1690.319	5	4.800	3096.768	7	18.800	12129.008
2	1.266	816.773	4	3.630	2341.931	6	10.850	6999.986	8	33.500	21612.860

جدول ٤ اعضای لیست مقاطع برای حالت ۲

شماره	in^2	mm^2	شماره	in^2	mm^2	شماره	in^2	mm^2	شماره	in^2	mm^2
1	0.111	71.613	3	1.457	939.998	5	3.840	2477.414	7	11.500	7419.430
2	0.602	388.386	4	2.630	1696.771	6	4.970	3206.445	8	19.900	12838.684

جدول ٥ اعضای لیست مقاطع برای حالت ۳

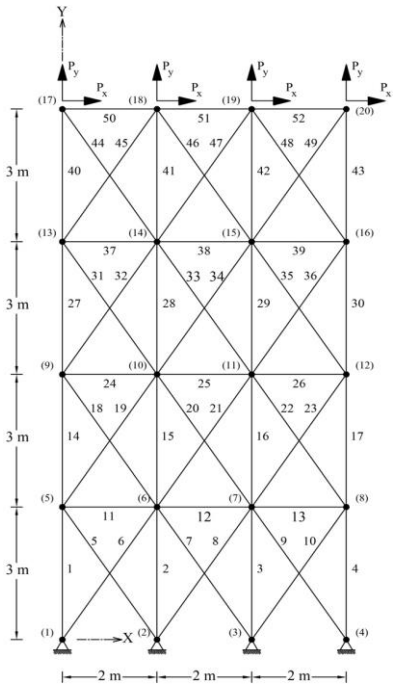
شماره	in^2	mm^2	شماره	in^2	mm^2	شماره	in^2	mm^2	شماره	in^2	mm^2
1	0.307	198.064	3	1.990	1283.868	5	4.220	2722.575	7	15.500	9999.980
2	1.000	645.160	4	3.380	2180.641	6	7.970	5141.925	8	26.500	17096.740

با تغییر لیست مقاطع در هر حالت براساس جداول فوق، طول هر زیررشته در فرآیند بهینه یابی براساس الگوریتم ژنتیک به سه بیت کاهش می یابد و بدین ترتیب طول هر رشته برابر $3Nos$ خواهد بود. به عبارت دیگر براساس ایده پیشنهادی طول هر زیررشته و رشته در فرآیند بهینه یابی براساس GA نصف حالت مرسوم شده است. این کاهش طول هر رشته تأثیر فراوانی در سرعت همگرایی GA خواهد داشت.

در ادامه همان طور که در بخش ۳ شرح داده شد، پس از پایان فرآیند جستجوی سراسری، لیست مقاطع برای هر متغیر طراحی متناسب با نتیجه حاصل و براساس جدول ۲ تغییر می یابد و بدین ترتیب فرآیند جستجوی محلی در پیش گرفته خواهد شد. از آنجاکه در مرحله جستجوی محلی نیز تعداد اعضای لیست مقاطع برای هر متغیر طراحی برابر هشت می باشد، لذا در مرحله جستجوی محلی نیز طول هر زیررشته برابر سه بیت و طول هر رشته برابر $3Nos$ می باشد. مثال های زیر تأثیر ایده پیشنهادی در حالات مذکور را به همراه حالت ساده الگوریتم ژنتیک مورد بررسی قرار داده است. لازم به ذکر است، برای گریز از تأثیر پارامترهای تصادفی در روند بهینه یابی، برای هر حالت در هر مثال ۴۰ اجرای مستقل انجام شده است. سپس میانگین اجراهای متوالی در هر حالت به عنوان سیر همگرایی حالت موردنظر رسم شده است.

۱,۵ خرپای ۵۲ میله ای

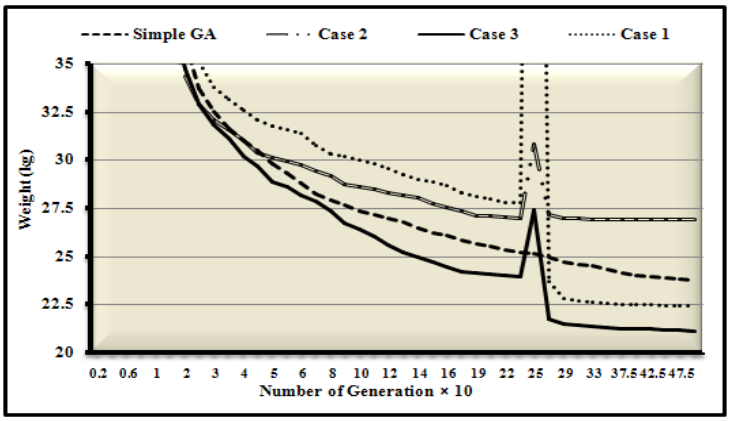
در اولین مثال به ارزیابی خرپای ۵۲ میله ای پرداخته شده است. شکل ۲ خرپای مورد نظر را نمایش می دهد. در خرپای حاضر E و ρ بترتیب برابر $2.07\times10^5 MPa$ و $7860 kg/m^3$ فرض می شود [۱۰].



شکل ۲ خرپای ۵۲ میله ای

در شکل ۲ مقادیر P_x و P_y بترتیب برابر $100\ kN$ و $200\ kN$ در نظر گرفته شده است. از سوی دیگر اعضای خرپا در ۱۲ گروه دسته بندی شده و تنها قید تنش با محدوده مجاز $\pm180\ MPa$ برای اعضای خرپا لحاظ شده است. این مثال توسط حالات مختلف پیشنهادی و نیز حالت ساده الگوریتم ژنتیک مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به تعداد متغیرهای طراحی طول هر رشته در حالت ساده GA برابر ۶۸ بیت است. این در حالی است که طول هر رشته براساس ایده پیشنهادی در مراحل جستجوی سراسری و محلی برابر ۳۴ بیت می باشد. کاهش طول هر رشته تأثیر فراوانی در افزایش سرعت همگرایی دارد.

شکل ۳ میانگین سیر همگرایی حاصل از ۴۰ اجرای مستقل را برای هر حالت نشان می دهد. بدین ترتیب برای رسم نمودارهای شکل ۳ در مجموع ۱۶۰ اجرای مستقل انجام شده است. شایان ذکر است که بهترین طرح در مجموع ۱۶۰ اجرای فرآیند بهینه یابی برای مثال حاضر، در حالت پیشنهادی ۳ با مقدار ۱۹۰۴/۹۳۷ kg حاصل شده است.

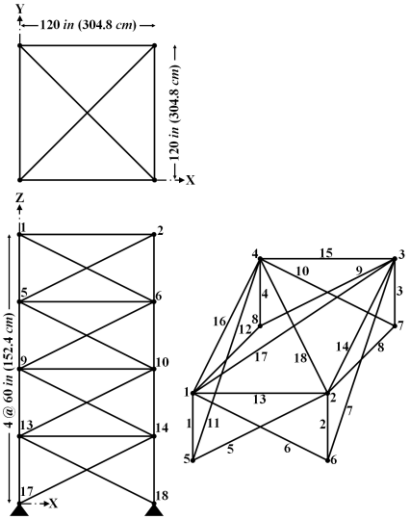


شکل ۳ سیر همگرایی برای حالات مختلف پیشنهادی و حالت ساده الگوریتم ژنتیک

همان طور که در شکل ۳ مشاهده می شود، حالت پیشنهادی ۳ سیر همگرایی مناسب تری نسبت به دیگر حالات دارد. در این حالت نماینده هر زیرمجموعه، عضو میانی مجموعه است. پس از حالت ۳، حالت ۱ نیز در مرحله جستجوی محلی، سیر همگرایی مناسب تری نسبت به حالت ۲ و حالت ساده الگوریتم ژنتیک دارد. نمودارهای حالات ۳ و ۱ توازن منطقی بین فرآیند جستجوی سراسری و محلی را بر اساس ایده پیشنهادی نشان می دهد. همان طور که در شکل مشاهده می شود، سیر همگرایی در مرحله جستجوی محلی سریعاً به سمت نقطه بهینه حرکت می نماید. لازم به ذکر است، تغییر ناگهانی که در سیر همگرایی حالات پیشنهادی مشاهده می شود، مربوط به مرز جستجوی سراسری و محلی است. به عبارت دیگر پس از آن که فرآیند جستجوی سراسری (مرحله اول) به پایان رسید و لیست مقاطع برای هر متغیر طراحی مشخص شد، در مرحله جستجوی محلی (مرحله دوم) مقادیر اولیه برای هر زیررشته بطور تصادفی از لیست مقاطع مربوطه انتخاب می شود. این فرآیند براساس تولید جمعیت اولیه تصادفی شکل می گیرد. به بیان دیگر در ابتدای هر یک از مراحل موجود (جستجوی سراسری و محلی) جمعیت اولیه متناسب با لیست مقاطع بصورت تصادفی تولید می شود. به همین سبب در سیر همگرایی حالات پیشنهادی تغییر ناگهانی در مرز بین مرحله جستجوی سراسری و محلی وجود دارد. البته بایستی توجه داشت که نقطه شروع در مرحله جستجوی محلی، بسیار نزدیک تر به طرح بهینه نسبت به مرحله جستجوی سراسری و یا حالت ساده GA می باشد. این مهم در حالت ۳ ایده پیشنهادی واضح تر می باشد. به همین سبب حالت ۳ دارای رفتار مناسب تری است.

۲,۵ خرپای ۷۲ میله ای

در این مثال به بهینه یابی خرپای ۷۲ میله ای مطابق شکل ۴ پرداخته شده است [۶].



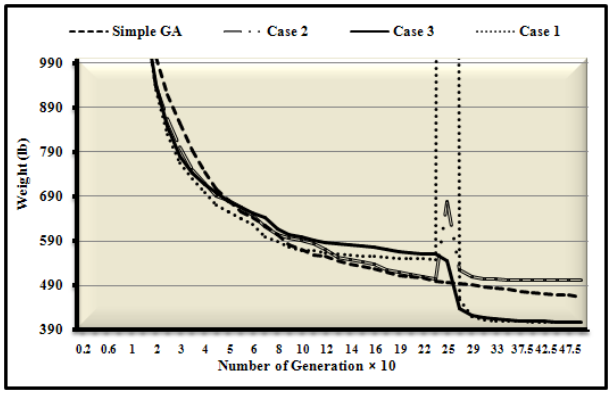
شکل ٤ خرپای ۷۲ میله ای

برای خرپای حاضر، E و ρ به ترتیب برابر $10000\ Ksi$ و $0.1\ lb/in^3$ در نظر گرفته شده است. محدوده تنش برای اعضای خرپا برابر $\pm 25\ Ksi$ و حداکثر تغییرمکان گرهی برابر $\pm 0.25\ in$ فرض شده است. بارهای مؤثر بر سازه در دو وضعیت بشرح جدول ۶ در نظر گرفته شده است [۶].

جدول ٦ بارهای موثر بر خرپای ۷۲ میله ای

وضعیت بارگذاری	شماره گره	P_X (*Kips*)	P_Y (*Kips*)	P_Z (*Kips*)	وضعیت بارگذاری	شماره گره	P_X (*Kips*)	P_Y (*Kips*)	P_Z (*Kips*)
۱	۱۷	۵	۵	-۵	۲	۱۷	--	--	-۵
	۱۸	--	--	--		۱۸	--	--	-۵
	۱۹	--	--	--		۱۹	--	--	-۵
	۲۰	--	--	--		۲۰	--	--	-۵

۷۲ عضو خرپای فضایی در ۱۶ گروه دسته بندی می شوند. بدین ترتیب طول هر رشته در حالت ساده GA برابر ۹۶ بیت خواهد بود. این در حالی است که طول هر رشته براساس ایده پیشنهادی در هر دو مرحله جستجوی محلی و سراسری برابر ۴۸ بیت است. شکل ۵ میانگین سیر همگرایی را برای حالات مختلف پیشنهادی و حالت ساده الگوریتم ژنتیک به ازای ۴۰ اجرای مستقل (برای هر حالت) نشان می دهد. شایان ذکر است که بهترین طرح در مجموع ۱۶۰ اجرای فرآیند بهینه یابی برای مثال حاضر، در حالت پیشنهادی ۳ با مقدار $389/334\ lb$ حاصل شده است.



شکل ۵ سیر همگرایی برای حالات مختلف پیشنهادی و حالت ساده الگوریتم ژنتیک

همان طور که در شکل ۵ مشاهده می شود، در این مثال نیز سیر همگرایی برای حالت ۳ مناسب تر از سایر حالات و حالت ساده الگوریتم ژنتیک می باشد. حالت ۱ نیز همانند مثال پیش دارای سیر همگرایی مناسبی است. برتری ایده پیشنهادی در دو حالت ۱ و ۳ برای سیر همگرایی در مرحله جستجوی محلی خودنمایی بیشتری می نماید. به بیان دیگر بواسطه ایده پیشنهادی فضای کاوش در ابتدا براساس فرآیند جستجوی سراسری مورد کاوش قرار گرفته و پس از آن در فاز دوم براساس فرآیند جستجوی محلی اطراف طرح بهینه حاصل از مرحله قبل جستجو می شود. این شیوه در مجموع سبب شده تا کارآیی الگوریتم ژنتیک بواسطه ایده پیشنهادی افزایش یابد.

۶. نتیجه گیری

در این مقاله با الهام از شیوه مش بندی در روش اجزای محدود، فضای طراحی تقسیم بندی شد. برای این منظور لیست مقاطع موجود به چندین زیرمجموعه تقسیم شده و نماینده هر زیرمجموعه به عنوان لیست جدید مقاطع برای مسئله بهینه یابی تعریف گردید. بدین ترتیب فضای طراحی براساس لیست جدید مقاطع شکل گرفت. برای نیل به این هدف، لیست جدید مقاطع با اتخاذ نماینده هر زیرمجموعه در سه حالت تشکیل شد. در حالت ۱، بزرگترین سطح مقطع هر زیرمجموعه، در حالت ۲ کوچکترین سطح مقطع هر زیرمجموعه و در حالت ۳ سطح مقطع میانی به عنوان نماینده زیرمجموعه

انتخاب گردید. پس از تشکیل لیست مقاطع جدید فرآیند بهینه یابی تا برقراری شرط پایانی جستجوی سراسری (مرحله اول) ادامه یافت و پس از آن متناسب با نتایج مرحله جستجوی سراسری، لیست مقاطع برای هر متغیر طراحی مشخص و فرآیند بهینه یابی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک ادامه یافت. بدین ترتیب مرحله دوم بیانگر فرآیند جستجوی محلی در اطراف طرح بهینه حاصل از مرحله قبل می باشد. این ایده در فرآیند بهینه یابی براساس الگوریتم ژنتیک سبب کاهش طول هر رشته می شود. کاهش طول رشته در GA افزایش سرعت همگرایی را در پی دارد. این مهم در اشکال ۳ و ۵ که هر کدام نتیجه ۱۶۰ اجرای مستقل فرآیند بهینه یابی می باشد، قابل مشاهده است. همانطور که در این اشکال مشاهده شد، حالات ۱ و ۳ با استفاده از ایده پیشنهادی، توازنی منطقی بین فرآیند جستجوی سراسری و محلی پدید می آورد. نهایتاً توصیه می شود فرآیند بهینه یابی براساس الگوریتم ژنتیک براساس ایده پیشنهادی در حالت ۳ می تواند برای مسائلی که دارای لیست مقاطع بسیار بزرگ می باشند، مفید باشد.

۷. مراجع

1. Holland, J. H., (1992), "*Adaptation in Natural and Artificial System*", The University of Michigan (1975) and MIT Press, Cambridge, MA.
2. Goldberg, D. E., (1989), "*Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning*", Addison-Wesley, Reading, MA.
3. Jenkins, W. M., (1991), "Towards structural optimization via the Genetic algorithm" Computer and Structures **40**, pp. 1321-1327.
4. Rajeev, S., Krishnamoorthy, C. S., (1992), "Discrete Optimization Of Structures Using Genetic Algorithms" ASCE, Journal of Structural Engineering. **118** (5), pp. 1233-1250.

۵. کلات جاری، و. ر. طالب پور، م. ح. (۱۳۹۰)، "بهینه یابی سطح مقطع و توپولوژی سازه ها از طریق الگوریتم ژنتیک و بررسی روش های گوناگون فرآیند انتخاب درروند بهینه یابی" مجموعه مقالات ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، ۷-۶ اردیبهشت.

۶. کلات جاری، و. ر. طالب پور، م. ح. (۱۳۹۰)، " بهینه یابی سطح مقطع و توپولوژی سازه های خرپایی توسط روش اصلاحی جستجوی چندمنظوره،" نشریه تخصصی مهندسی عمران - نقشه برداری - دانشکده فنی، دوره ۴۵، شماره ۳.

۷. کلات جاری، و. ر. طالب پور، م. ح. رحیمی، و. (۱۳۹۰)، "بهینه یابی سطح مقطع و توپولوژی سازه ها از طریق الگوریتم ژنتیک و بررسی تأثیر اپراتورهای ادغام در روند بهینه یابی،" مجموعه مقالات ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، ۷-۶ اردیبهشت.

8. Yang, J., Soh,, C. K., (1997), "Structural Optimization by Genetic Algorithms With Tournament Selection", ASCE, Journal of Computing in Civil Engineering. **11**(3), pp 195-200.

۹. کلات جاری، و. ر. طالب پور، م. ح. ترکمان زاده، ج. (۱۳۹۱)، " بهینه یابی سطح مقطع و توپولوژی سازه ها از طریق الگوریتم ژنتیک و بررسی تأثیر روش های گوناگون اپراتور جهش در روند بهینه یابی،" نهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، ۱۹-۲۱ اردیبهشت.

10. Kochenberger, G. A., Glover, F., (2003), "*Handbook of metaheuristics*", Kluwer Academic Publishers.
11. Kaveh, A., Talatahari, S., (2010), "A charged system search with a fly to boundary method for discrete optimization design of truss structures", Asian Journal Civil Engineering (Building and Housing), **11**(3), pp. 277-293.