

## بهینه‌سازی سازه‌های هایپربولیک با استفاده از روش جستجوی ذرات باردار (CSS)

زهرا نوری

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران - سازه، موسسه آموزش عالی سراج، دانشگاه تبریز، تبریز،

ایران

سیامک طلعت اهری\*

دانشیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

بهمن فرهمندآذر

دانشیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۳/۱۷ تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۶/۰۳

### چکیده:

سازه‌های هایپربولیک نوعی از سازه‌های فضاکار شبکه‌ای می‌باشند. شکل این سازه‌ها مانند یک شکل مربعی می‌باشد که گوشه‌های آن خم شده است. وقتی وسط اضلاع مربع را در جهات  $X$  و  $Y$  بهم وصل می‌کنیم، این اضلاع وسطی (که مانند علامت جمع  $+$  می‌باشد) با خم شدن گوشه‌ها ثابت در جای خود باقی می‌مانند و  $Z$  آنها تغییر نمی‌کند. ولی بقیه نقاط، مختصات  $Z$  آنها تغییر می‌کند و سازه‌ی هایپربولیک را تشکیل می‌دهد. از این نوع سازه‌ها برای پوشش دهانه‌های طولانی استفاده می‌شود. در این مقاله، سازه‌ی مورد نظر به طور همزمان از لحاظ شکل و اندازه بهینه‌سازی می‌شود. برای بهینه‌سازی سازه‌ی هایپربولیک از الگوریتم جستجوی ذرات باردار استفاده شده است. و نتایج حاصل از آن با نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک مقایسه شده است.

**کلید واژگان:** سازه‌های هایپربولیک، بهینه‌سازی، الگوریتم جستجوی ذرات باردار، الگوریتم ژنتیک

## ۱- مقدمه

خرپاهای فضایی سازه‌های سه بعدی هستند که از اتصال عناصر کششی و فشاری تشکیل شده‌اند. این عناصر در گره‌هایی که معمولاً به صورت مفصل بوده و لنگر تحمل نمی‌کنند به یکدیگر متصل می‌شوند. امروزه این نوع سازه‌ها به دلیل اشکال بسیار متنوع، ظاهر زیبا، وزن سبک، تولید صنعتی انبوه و صلیبیت زیاد به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. به طور کلی این نوع سازه‌ها برای پوشش فضاهایی مانند نمایشگاه‌ها، مراکز فرهنگی، سالن‌های اجتماعات، مراکز خرید یا سایر فضاهای مشابه که نیاز به محیط وسیع بدون موانعی مانند ستون و دیوارهای میانی دارند و نیز ایستگاه‌های قطار، آشیانه‌های هواپیماها، مراکز تفریحی، برجهای رادیویی و ... به کار می‌روند. با توجه به معمول بودن و فراوانی استفاده از این سازه‌ها بهینه‌سازی آنها شامل مینیمم کردن وزن آنها می‌تواند نقش قابل ملاحظه‌ای در پایین آوردن هزینه‌ها ایفا کند.

در سه دهه‌ی اخیر، ارائه‌ی بسیاری از الگوریتم‌های فراابتکاری، یک فرآیند تکاملی مداوم در زمینه بهینه‌سازی سازه می‌باشد. بنابراین بهینه‌سازی سازه‌های فضاکار با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری می‌تواند یک مسئله‌ی بسیار موثر در طراحی مهندسی این سازه‌ها باشد. بسیاری از الگوریتم‌های فراابتکاری از پدیده‌های طبیعی الهام گرفته شده است. الگوریتم تکاملی توسط فوگل و همکارانش [۱]، دی یونگ [۲] و کوزا [۳] پیشنهاد داده شده است. و الگوریتم ژنتیک توسط هالند [۴] و گلدبرگ [۵] از روند تکاملی بیولوژیکی الهام گرفته شده است. مطالعات روی رفتار حیوانات منجر به روش جستجوی ممنوع شد که توسط گلوور [۶] ارائه شده است، بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها توسط دوریگو و همکارانش [۷] پیشنهاد شده است، و توده ذرات توسط ابرهارت و کندی [۸] فرمول‌بندی شده است. و بهینه‌سازی سازه‌های خرپایی با قیده‌های دینامیکی با استفاده از این روش مورد مطالعه قرار گرفته است [۹]. همچنین، روش شبیه‌سازی آنیلینگ توسط پاتریک و همکارانش [۱۰] پیشنهاد شده، الگوریتم انفجار بزرگ تراکم بزرگ توسط ارول و اکسین [۱۱] پیشنهاد شده است، و توسط کاوه و طلعت اهری [۱۲] بهبود یافته است. و کاوه و افتخار با استفاده از این روش قاب‌های سازه چلیکی را بهینه‌سازی کردند [۱۳]. الگوریتم جستجوی گرانشی توسط راشدی و همکارانش [۱۴] پیشنهاد شده که با استفاده از پدیده‌های فیزیکی معرفی شده است. یکی از جدیدترین الگوریتم‌های فراابتکاری الگوریتم جستجوی ذرات باردار می‌باشد که توسط کاوه و طلعت اهری ارائه شده است. این روش بر اساس بعضی اصل‌ها از فیزیک و مکانیک می‌باشد. برای رسیدن به روش جستجوی ذرات باردار از قوانین کولمب و گاوس از فیزیک الکترواستاتیسیته و قوانین نیوتن از مکانیک استفاده کرده‌اند. روش جستجوی ذرات باردار یک رویکرد چند عاملی می‌باشد که هر عامل یک ذره‌ی باردار می‌باشد. این ذرات می‌توانند بر یکدیگر بر اساس میزان تابع شایستگی و فاصله‌شان تاثیر بگذارند. روش جستجوی ذرات باردار در همه‌ی زمینه‌های بهینه‌سازی می‌تواند استفاده شود، به ویژه در زمینه‌ی مسائل غیرمحدب و پیچیده مناسب می‌باشد [۱۵]. بعد از ارائه‌ی این روش بهینه‌سازی توسط طلعت اهری و کاوه، بهینه‌سازی سازه‌های مختلف توسط این روش مورد مطالعه قرار گرفت. از جمله

بهینه‌سازی سازه‌های اسکلتی [۱۶] و طراحی سیستم‌های شبکه‌ای [۱۷] به وسیله‌ی طلعت اهری و کاوه انجام شد. طلعت اهری و کاوه با استفاده از روش جستجوی ذرات باردار طرح بهینه‌ی سازه‌های قاب را مورد مطالعه قرار دادند [۱۸]. کاوه و همکارانش دو سازه‌ی چلیکی تک لایه را با استفاده از روشهای مختلف جستجوی ذرات باردار بهینه کردند [۱۹]. همچنین با استفاده از روش جستجوی ذرات باردار سازه‌های چلیکی یک لایه و چندلایه بهینه شدند [۲۰].

در این مقاله، طرح بهینه‌ی سازه‌های فضاکارهای پربولیک فرمول بندی می‌شود و توسط روش جستجوی ذرات باردار بهینه‌سازی می‌شود و نتایج حاصل از روش جستجوی ذرات باردار با الگوریتم ژنتیک مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

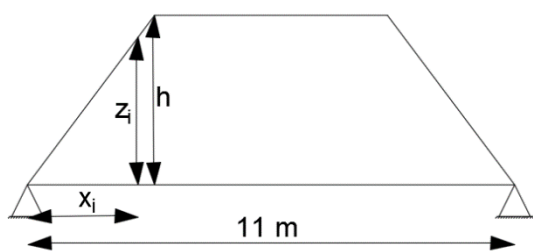
## ۲- بیان مسئله بهینه‌سازی برای سازه‌ی هایپربولیک

هدف از بهینه‌سازی شکل سازه‌های هایپربولیک این است که بهترین حالت مختصات گرهی به منظور کمینه کردن وزن سازه پیدا شود. از سوی دیگر همه‌ی مختصات گره‌های سازه‌های هایپربولیک وابسته به نسبت ارتفاع به دهانه هستند. بنابراین، همه مختصات گره‌ها می‌توانند با توجه به ارتفاع، در دهانه ثابت سازه هایپربولیک بطور اتوماتیک محاسبه شوند. در این فرآیند مختصات  $X$  و  $Y$  مفصل‌ها ثابت باقی خواهد ماند و مختصات  $Z$  گره‌ها به صورت زیر جابجا می‌شود:

$$Z_i = \frac{h \cdot |x_i|}{5.5} \dots \dots \dots (1)$$

اینجا  $x_i$  مختصات  $X$  گره  $i$  می‌باشد و  $h$  ارتفاع سازه هایپربولیک می‌باشد.

ارتباط بین مختصات گرهی و ارتفاع برای نسبت دهانه برای این نوع سازه‌های فضاکار در شکل (۱) نشان داده شده است:



شکل ۱- ارتباط بین مختصات گرهی و ارتفاع سازه

هدف از بهینه‌سازی اندازه سازه‌های هایپربولیک به حداقل رساندن وزن آن از طریق پیدا کردن مساحت مقاطع عرضی بهینه اعضا می‌باشد.

با توجه به ملاحظات ذکر شده، مسئله‌ی بهینه‌سازی همزمان شکل و اندازه سازه هایپربولیک می‌تواند به صورت زیر فرموله شود:

$$X = [X_1, X_2, \dots, X_n], h \quad (2)$$

متغیرهای گسسته

$$X_i \in D_i \quad (3)$$

$$h_{min} < h < h_{max}$$

مقاومت فشاری اسمی اعضا کوچکترین مقدار می باشد که از حالت حدی کمناش خمشی، کمناش پیچشی و کمناش خمشی-پیچشی بدست می آید. برای اجزای متراکم یا غیرمتراکم، مقاومت فشاری اسمی اعضا برای حالت حدی کمناش خمشی به صورت زیر می باشد:

$$P_n = F_{cr} A_g \quad (۱۲)$$

$F_{cr}$  تنش بحرانی، وابسته به کمناش خمشی اعضا می باشد و به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\begin{cases} \text{برای } \lambda_c = \frac{kL}{r\pi} \sqrt{\frac{F_y}{E}} \leq 1.5 & F_{cr} = (0.658\lambda_c^2) F_y \\ \text{برای } \lambda_c = \frac{kL}{r\pi} \sqrt{\frac{F_y}{E}} > 1.5 & F_{cr} = \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2}\right) F_y \end{cases}$$

$L$  طول مهارنشده جانی اعضا،  $k$  ضریب طول موثر،  $r$  شعاع ژیراسیون مربوط به کمناش محور،  $E$  مدول الاستیسیته،  $F_y$  حداقل تنش تسلیم مشخص.

### ۳- بارهای طراحی

شرایط بارگذاری استاتیکی: برخی از ملاحظات خاص برای شرایط بارگذاری سازه های فضاکار وجود دارد. در این تحقیق سه شرایط بارگذاری استاتیکی برای بهینه سازی این سازه ها در نظر گرفته شده که به صورت زیر بیان می شود [۲۱]:

#### بار مرده

بارمرده یکنواخت برای تخمین وزن ورق، قاب فضایی و گره های سازه هایپربولیک ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمربع در نظر گرفته شده است.

#### بار برف

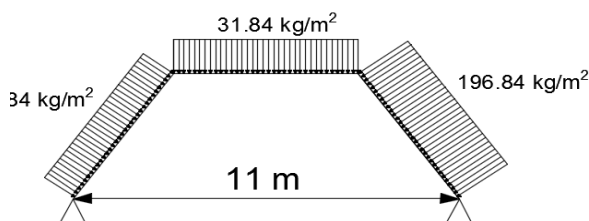
بار برف بر روی بام، با توجه به شیب و دمای بام، برف گیری و اهمیت سازه، برای هر مترمربع تصویر افقی سطح آن، به کمک رابطه زیر تعیین می شود:

$$P_r = 0.7 C_s C_t C_e I_s P_g \quad (۱۴)$$

$I_s$  ضریب اهمیت،  $C_e$  ضریب برف گیری،  $C_t$  ضریب شرایط دمایی،  $C_s$  ضریب شیب می باشند. بار برف  $P_r$  بیانگر بار برف متوازن می باشد که به عنوان یک امکان بارگذاری برف در نظر گرفته می شود. ضریب شیب برای بام های شیب دار بر حسب زاویه شیب به صورت زیر تعیین می شود:

$$\left\{ \begin{array}{ll} C_s = 1 & \alpha \leq 5^\circ \\ C_s = 1 - \frac{\alpha - 5^\circ}{65^\circ} & 5^\circ < \alpha < 70^\circ \\ C_s = 0 & \alpha \geq 70^\circ \end{array} \right. \quad (۱۵)$$

بار برف در ارتفاع ۵ متری به صورت شکل (۲) می باشد



شکل ۲- بار برف وارد بر سازه هایپربولیک در ارتفاع ۵ متری

برای کمینه کردن

$$Mer(X) = f_{penalty}(X) * \quad (۴)$$

$$W(X) \quad (۵)$$

$X$  برداری است که شامل متغیرهای طراحی می باشد، برای مسئله طراحی بهینه گسسته، متغیرهای  $X_i$  از یک مجموعه مجاز از مقادیر گسسته انتخاب شده اند،  $n$  تعداد اعضای گروه،  $h$  ارتفاع سازه هایپربولیک به عنوان تنها متغیر شکل شناخته شده است،  $D_i$  مقدار گسسته مجاز برای متغیرهای طراحی است،  $h_{min}$  و  $h_{max}$  مقادیر حداقل و حداکثر ارتفاع مجاز هستند که به ترتیب  $\frac{S}{20}$  و  $\frac{S}{2}$  گرفته شده اند.  $S$  طول دهانه سازه هایپربولیک می باشد، تابع  $Mer(X)$  شایستگی می باشد،  $W(X)$  تابع هدف می باشد، که به عنوان وزن سازه در نظر گرفته می شود،  $f_{penalty}(X)$  تابع پناستی می باشد که از نقض قیدهای مربوط به پاسخ سازه منتج می شود.

تابع هدف سازه هایپربولیک به منظور کمینه کردن وزن سازه به صورت زیر تعریف می شود:

$$W(X) = \sum_{i=1}^{nm} \gamma_i X_i L_i \quad (۶)$$

$\gamma_i$  چگالی عضو  $i$ ،  $L_i$  طول عضو  $i$ ،  $X_i$  مساحت مقطع عرضی عضو  $i$ ، به عنوان متغیر طراحی است.

تابع پناستی می تواند به صورت زیر تعریف شود:

$$f_{penalty}(X) = (1 + \varepsilon_1 \cdot \sum_{j=1}^{np} U_j^k)^{\varepsilon_2} \quad (۷)$$

اینجا  $np$  تعداد شرایط بارگذاری چندگانه، در این تحقیق  $\varepsilon_1$ ، یک در نظر گرفته می شود و  $\varepsilon_2$  در تکرار اول از فرآیند جستجو  $1/5$  در نظر گرفته می شود، و به تدریج تا ۳ افزایش می یابد.  $U^k$  جمع پناستی ها برای همه ی قیدهای اعمال شده برای ذره باردار  $k$ th می باشد که به صورت ریاضی به شکل زیر بیان می شود:

$$U^k = \sum_{i=1}^{nm} \max(u_i^d, 0) + \sum_{i=1}^{nm} \max(g_i, 0) \quad (۸)$$

اینجا  $u_i^d$  و  $g_i$  جمع جابجایی و تنش فرمول پناستی ها که توسط معادلات زیر محاسبه می شوند.

می توان قید تنش را که برای عضو  $i$ ام با  $g_i$  نشان داده می شود، به صورت رابطه زیر بیان کرد:

$$g_i = \frac{f_i}{F_i} - 1 \quad (۹)$$

$f_i$  تنش موجود در عضو  $i$ ام،  $F_i$  تنش مجاز عضو  $i$ ام.

$$u_i^d = \left| \frac{\delta_i}{\delta_i^0} \right| - 1 \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, nm \quad (۱۰)$$

$nm$  تعداد اعضای گره ها می باشد،  $\delta_i$  جابجایی گره ها و  $\delta_i^0$  جابجایی مجاز می باشند.

مطابق با آیین نامه Lrfd، مقاومت اسمی کششی اعضا برابر است

با:

$$P_n = F_y A_g \quad (۱۱)$$

$A_g$  سطح مقطع ناخالص اعضا می باشد.

### فیزیک الکتروسیسته

در فیزیک الکتروسیسته، ذرات باردار در فضای اطراف خود یک میدان الکتریکی<sup>۱</sup> ایجاد می‌کنند که می‌تواند به سایر ذرات موجود در این میدان نیرو وارد کند. میدان الکتریکی ناشی از یک ذره باردار از قانون کولمب تبعیت می‌کند. قانون کولمب بیان می‌کند که، نیروی الکتریکی بین دو ذره باردار کروی کوچک، با مجذور فاصله‌ی آن‌ها رابطه عکس دارد.

$$f_{ij} = k_e \frac{q_i q_j}{r_{ij}^2} \quad (۱۸)$$

که در آن  $f_{ij}$  نشان دهنده‌ی نیروی الکتریکی بین دو ذره  $i$  و  $j$  می‌باشند که در فیزیک به نیروی کولمب شناخته می‌شود.  $Q_j$  و  $Q_i$  مقدار بار هر یک از ذرات هستند،  $r_{ij}$  فاصله‌ی بین ذرات بار می‌باشد،  $K_e$  ضریب ثابت به نام ضریب کولمب است [۲۲].

طبق تعریف، میدان الکتریکی برای یک ذره باردار مانند  $i$  با قراردادن یک ذره مثبت با مقدار بار واحد در نقطه  $j$  در رابطه زیر بدست می‌آید:

$$E_{ij} = k_e \frac{q_i}{r_{ij}^2} \quad (۱۹)$$

این رابطه برای یک کره به شعاع  $a$  که به طور یکنواخت باردار شده و مقدار کل بار آن برابر  $Q_i$  است، در کلیه نقاط خارج از کره همچنان برقرار است ولی برای نقاط داخل کره میدان الکتریکی مطابق قانون گاوس به صورت زیر بیان می‌شود:

$$E_{ij} = k_e \frac{q_i}{a^3} r_{ij} \quad (۲۰)$$

طبق این رابطه مقدار میدان الکتریکی یک کره باردار در یک نقطه داخل آن با فاصله آن نقطه تا مرکز کره رابطه مستقیم دارد.

برای محاسبه میدان الکتریکی معادل ناشی از یک گروه بارهای الکتریکی در یک نقطه از فضا قانون جمع آثار به تبعیت از جمع آثار نیروها، برقرار خواهد بود و می‌توان آن را به صورت زیر بیان کرد [۲۲]:

$$E_j = \sum_{i=1 \neq j}^N E_{ij} \quad (۲۱)$$

که در آن  $N$  نشان دهنده تعداد ذرات باردار موجود و  $E_{ij}$  برابر است با:

$$E_{ij} = \begin{cases} \frac{k_e q_i}{a^3} r_{ij} & \text{if } r_{ij} < a \\ \frac{k_e q_i}{r_{ij}^2} & \text{if } r_{ij} \geq a \end{cases} \quad (۲۲)$$

برای داشتن جهت و مقدار نیروی برآیند الکتریکی ناشی از این گروه ذرات باردار، کافی است تا روابط فوق به صورت برداری بازنویسی شوند،

$$f_j = E_j q_j \frac{r_i - r_j}{\|r_i - r_j\|} \quad (۲۳)$$

### بار باد

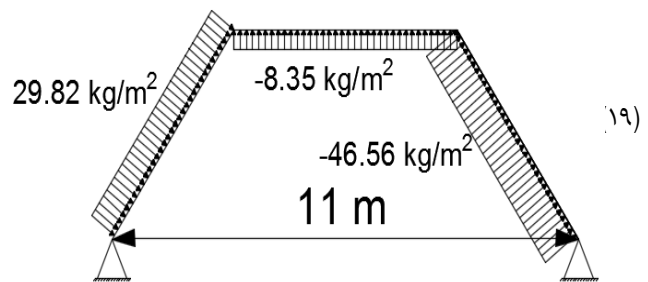
فشار خارجی یا مکش تحت باد بر روی جز یا کل سطح یک ساختمان باید با استفاده از رابطه ذیل بدست آید:

$$P = I_w q C_e C_g C_p \quad (۱۶)$$

در این رابطه  $P$  فشار خارجی که به صورت استاتیکی در جهت عمود بر سطح چه در حالت فشار وارد بر سطح یا مکش به سمت خارج از سطح، عمل می‌کند،  $I_w$  ضریب اهمیت برای بار باد،  $q$  فشار مبنای باد،  $C_e$  ضریب بادگیری،  $C_g$  ضریب اثر جهشی باد،  $C_p$  ضریب فشار خارجی که بر مساحت وجه مورد نظر میانگین‌گیری شده باشد. فشار مبنای باد با استفاده از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$q = 0.0000613V^2(۱۷)$$

بار باد در ارتفاع ۵ متری به صورت شکل (۳) می‌باشد



شکل ۳- بار باد وارد بر سازه هایپرپولیک در ارتفاع ۵ متری

### ۴- الگوریتم جستجوی ذرات باردار

روش جستجوی ذرات باردار در سال ۲۰۰۹ توسط کاوه و طلعت اهری ابداع و ثبت گردید [۱۵]. این روش از جمله جدیدترین الگوریتم‌های فراکاوشی است که با استفاده از قوانین فیزیک اقدام به جستجوی مسئله می‌کند. برای ارائه این روش از قانون کولمب حاکم از الکترواستاتیک و قوانین نیوتن از مکانیک استفاده شده است. روش جستجوی ذرات باردار یک روش چند عاملی است که در آن هر عامل یک ذره بار می‌باشد. ذرات بار می‌توانند بر اساس میزان شایستگی و فاصله‌ی بین شان بر یکدیگر تاثیر بگذارند. مقدار نیروی برآیند با استفاده از قوانین الکترواستاتیک محاسبه می‌شود و میزان حرکت با استفاده از قوانین مکانیک نیوتن محاسبه می‌شود. روش جستجوی ذرات باردار می‌تواند در همه‌ی زمینه‌های بهینه‌سازی استفاده شود. مخصوصاً برای ناحیه‌ی غیرصاف یا غیر محدب مناسب است. روش جستجوی ذرات باردار نه به اطلاعات گرادیان و نه پیوستگی فضای جستجو نیاز دارد. روش جستجوی ذرات باردار مانند اکثر الگوریتم‌های فراکاوشی دیگر، مبتنی بر جمعیت بوده که جمعیتی از المان‌ها فضای جستجو را برای یافتن بهترین جواب جستجو می‌کنند.

<sup>1</sup>electric field

و آن را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

$$f_j = k_e q_j \sum_{i,i \neq j} \left( \frac{q_i}{a^3} r_{ij} i_1 + \left( \frac{q_i}{r_{ij}^2} i_2 \right) \frac{r_i - r_j}{\|r_i - r_j\|} \right) \begin{cases} i_1 = 1 \text{ و } i_2 = 0 \Leftrightarrow r_{ij} < a \\ i_1 = 0 \text{ و } i_2 = 1 \Leftrightarrow r_{ij} \geq a \end{cases} \quad (24)$$

این معادله رابطه نهایی خواهد بود که در روش جستجوی ذرات باردار برای تعیین میزان و مقدار حرکت یک ذره فرضی تحت تاثیر سایر ذرات مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

تعدادی CP را تعیین کن.

- رتبه‌بندی: توابع شایستگی هر CP را محاسبه و با توجه به آن به صورت صعودی مرتب کن، بطوریکه بهترین ذره دارای مرتبه اول و بدترین ذره دارای مرتبه آخر باشد.
- تولید حافظه سیستم: تعدادی CMS ذره اول (بهترین CPها) را در ماتریس حافظه سیستم (CM) ذخیره کن.

### مرحله دوم: جستجو

- تعیین نیروهای الکتریکی: با استفاده از قوانین سه تا پنج، نوع و مقدار نیروی برآیند الکتریکی وارد بر هر ذره را محاسبه کن.
- تولید جواب جدید: هر ذره را با استفاده از قانون شش به موقعیت جدیدش حرکت بده و سرعت آن را پیدا کن.
- تصحیح موقعیت ذرات: اگر ذره‌ای از فضای مسئله خارج شد، مطابق قانون هشت موقعیت آن را تصحیح کن.
- رتبه‌بندی: توابع شایستگی هر CP را محاسبه و با توجه به آن به صورت صعودی مرتب کن.
- به روز رسانی حافظه سیستم: اگر ذراتی بهتر از ذرات ذخیره شده در حافظه سیستم (CM) باشند آن‌ها را مطابق قانون هفت در حافظه سیستم ذخیره کن.

### مرحله سوم: توقف

- مرحله جستجو را آنقدر تکرار کن تا این که یکی از ضوابط از پیش تعیین شده قانون نهم برآورد شود.
- نمودار گردش کار الگوریتم جستجوی سیستم ذرات در شکل (۴) خلاصه شده است.

### مکانیک نیوتونی

مکانیک نیوتنی یا مکانیک کلاسیک، حرکت اجسام را مورد مطالعه قرار می‌دهد. در این علم، اجسام بدون توجه به اندازه آن‌ها مانند یک ذره فرض می‌شوند که دارای جرم بوده و اندازه‌ی آن‌ها بسیار کوچک است. مطابق مکانیک نیوتنی حرکت یک ذره وقتی کاملاً مشخص است که موقعیت آن در فضا در تمامی زمان‌ها معلوم باشد. تغییر مکان ذره به صورت تغییر در موقعیت آن در فضا تعریف می‌شود. وقتی یک ذره از نقطه شروع  $r_{old}$  به نقطه نهایی  $r_{new}$  می‌رود تغییر مکان آن برابر خواهد بود با:

$$\Delta r = r_{new} - r_{old} \quad (25)$$

شیب خط مماس مربوط به موقعیت ذره، سرعت آنرا مشخص می‌کند:

$$V = \frac{r_{new} - r_{old}}{r_{new} - r_{old}} = \frac{r_{new} - r_{old}}{\Delta t} \quad (26)$$

وقتی سرعت ذره با زمان تغییر می‌کند، ذره دارای شتاب خواهد بود که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$a = \frac{v_{new} - v_{old}}{\Delta t} \quad (27)$$

بنابراین طبق قانون دوم نیوتن داریم:

$$F = ma \quad (28)$$

$$(29)$$

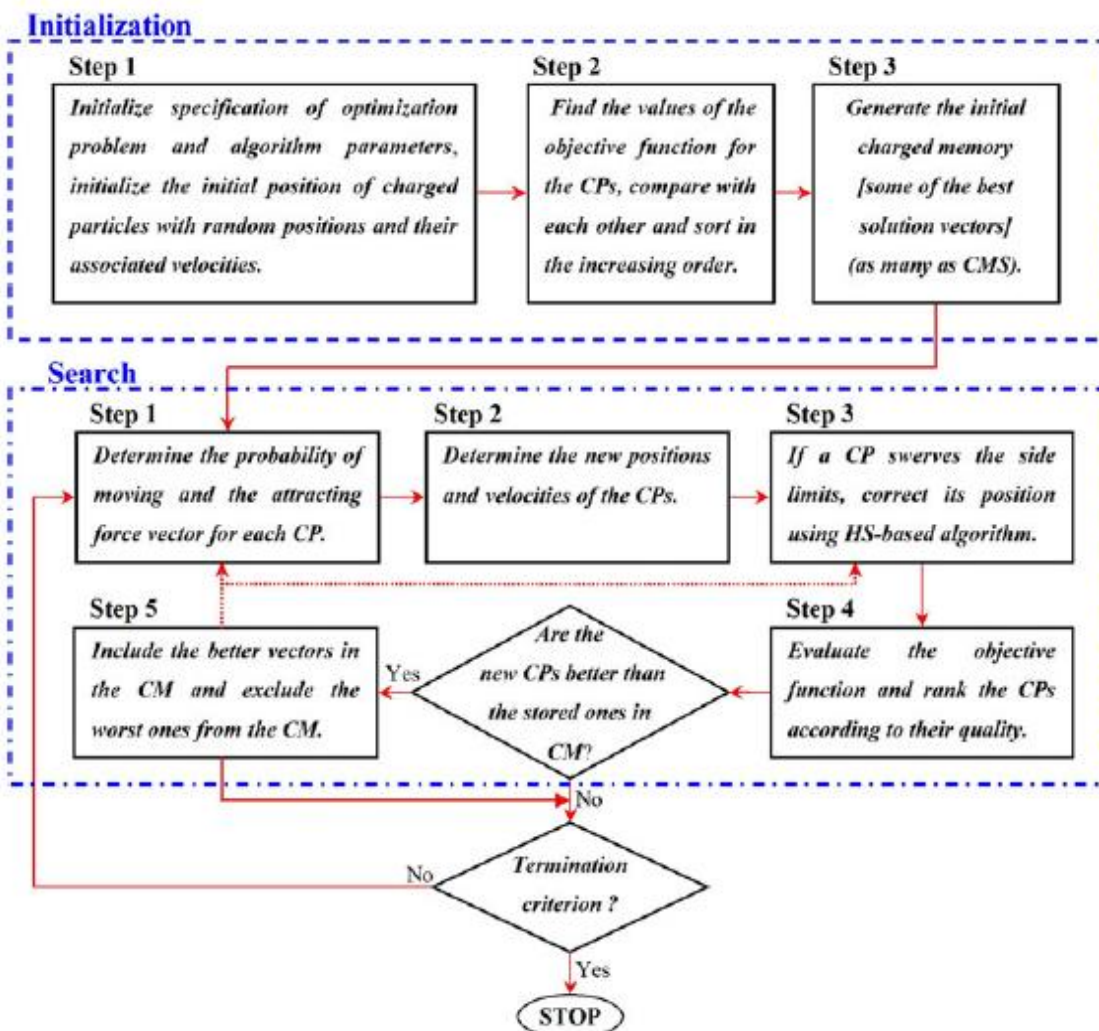
$$r_{new} = \frac{1}{2} f \Delta t^2 + v_{old} \cdot \Delta t + r_{old}$$

### قوانین الگوریتم جستجوی ذرات باردار

قوانین الگوریتم جستجوی ذرات باردار به طور خلاصه در زیر ارائه شده است [۱۵]:

### مرحله اول: معرفی

- مقدار دهی اولیه: پارامترهای ثابت الگوریتم را تعیین کن. با استفاده از قوانین اول و دوم، موقعیت و سرعت اولیه



شکل ۴- نمودار گردش کار الگوریتم جستجوی سیستم ذرات باردار [۱۵]

بهینه گسسته می‌باشد و متغیرهای سطح مقطع از مجموعه مقاطع لوله ای شکل مطابق آیین‌نامه LRFD [۲۳] انتخاب می‌شوند. این مقاطع در جدول (۱) نشان داده شده است.

### ۵- مثال‌های عددی

در این تحقیق، سازه‌ی هاپربولیک دو لایه با استفاده از روش جستجوی ذرات باردار بهینه شده است و نتایج آن با دیگر روشهای بهینه‌سازی از جمله الگوریتم ژنتیک مقایسه شده است. این مثال طرح

جدول ۱- مقاطع مجاز لوله ای شکل مطابق آیین نامه LRFD

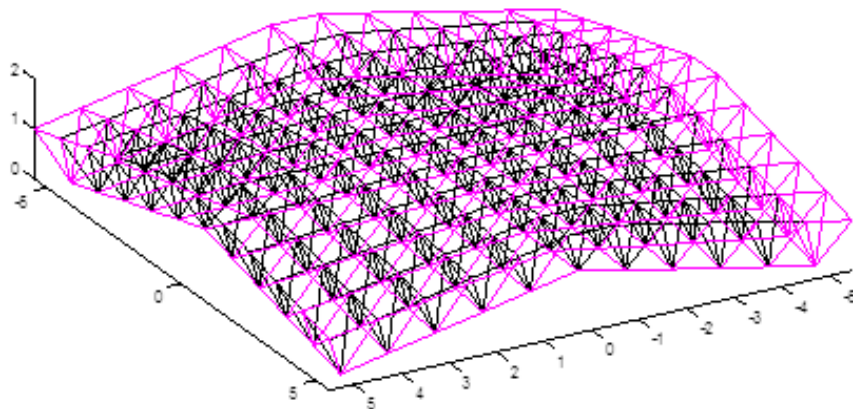
	Type	Nominal diameter(in)	Weight per ft	Area(in <sup>2</sup> )	Area (cm <sup>2</sup> )	Gyration radius (in)	J(in <sup>4</sup> )
۱	ST	۱/۲	۰/۸۵	۰/۲۵	۱/۶۱	۰/۲۶۱	۰/۰۸۲
۲	EST	۱/۲	۱/۰۹	۰/۳۲	۲/۰۶	۰/۲۵	۰/۰۹۶
۳	ST	۳/۴	۱/۱۳	۰/۳۳۳	۲/۱۴	۰/۳۳۴	۰/۱۴۲
۴	EST	۳/۴	۱/۴۷	۰/۴۳۳	۲/۷۹	۰/۳۲۱	۰/۱۷
۵	ST	۱	۱/۶۸	۰/۴۹۴	۳/۱۸	۰/۴۲۱	۰/۳۶۶
۶	EST	۱	۲/۱۷	۰/۶۳۹	۴/۱۲	۰/۴۰۷	۰/۳۲۲
۷	ST	۱ ۱/۴	۲/۲۷	۰/۶۶۹	۴/۳۱	۰/۵۴	۰/۴۷
۸	ST	۱ ۱/۲	۲/۷۲	۰/۷۹۹	۵/۱۵	۰/۶۲۳	۰/۶۵۲
۹	EST	۱ ۱/۴	۳	۰/۸۸۱	۵/۶۸	۰/۵۲۴	۰/۵۸۲
۱۰	EST	۱ ۱/۲	۳/۶۳	۱/۰۷	۶/۹۰	۰/۷۸۷	۱/۱۲۲
۱۱	ST	۲	۲/۶۵	۱/۰۷	۶/۹۰	۰/۶۰۵	۰/۸۲۴
۱۲	EST	۲	۵/۰۲	۱/۴۸	۹/۵۴	۰/۷۶۶	۱/۴۶۲
۱۳	ST	۲ ۱/۲	۵/۷۹	۱/۷	۱۰/۹۶	۰/۹۴۷	۲/۱۲
۱۴	ST	۳	۷/۵۸	۲/۲۳	۱۴/۳۸	۱/۱۶	۳/۴۴
۱۵	EST	۲ ۱/۲	۷/۶۶	۲/۲۵	۱۴/۵۱	۰/۹۲۴	۲/۶۸
۱۶	DEST	۲	۹/۰۳	۲/۶۶	۱۷/۱۶	۰/۷۰۳	۲/۲
۱۷	ST	۳ ۱/۲	۹/۱۱	۲/۶۸	۱۷/۲۹	۱/۳۴	۴/۷۸
۱۸	EST	۳	۱۰/۲۵	۳/۰۲	۱۹/۴۸	۱/۱۴	۴/۴۶
۱۹	ST	۴	۱۰/۷۹	۳/۱۷	۲۰/۴۵	۱/۵۱	۶/۴۲
۲۰	EST	۳ ۱/۲	۱۲/۵	۳/۶۸	۲۳/۷۴	۱/۳۱	۶/۲۸
۲۱	DEST	۲ ۱/۲	۱۳/۶۹	۴/۰۳	۲۵/۹۹	۰/۸۴۴	۴
۲۲	EST	۵	۱۴/۶۲	۴/۳	۲۷/۷۴	۱/۸۸	۱۰/۹
۲۳	EST	۴	۱۴/۹۸	۴/۴۱	۲۸/۴۵	۱/۴۸	۸/۵۴
۲۴	DEST	۳	۱۸/۵۸	۵/۴۷	۳۵/۲۹	۱/۰۵	۶/۸۴
۲۵	ST	۶	۱۸/۹۷	۵/۵۸	۳۵/۹۹	۲/۲۵	۱۷
۲۶	EST	۵	۲۰/۷۸	۶/۱۱	۳۹/۴۱	۱/۸۴	۱۴/۸۶
۲۷	DEST	۴	۲۷/۵۴	۸/۱	۵۲/۲۵	۱/۳۷	۱۳/۵۸
۲۸	ST	۸	۲۸/۵۵	۸/۴	۵۴/۱۹	۲/۹۴	۳۳/۶
۲۹	EST	۶	۲۸/۵۷	۸/۴	۵۴/۱۹	۲/۱۹	۲۴/۴
۳۰	DEST	۵	۳۸/۵۹	۱۱/۳	۷۲/۹۰	۱/۷۲	۲۴/۲
۳۱	ST	۱۰	۴۰/۴۸	۱۱/۹	۷۶/۷۷	۳/۶۷	۵۹/۸
۳۲	EST	۸	۴۳/۳۹	۱۲/۸	۸۲/۵۸	۲/۸۸	۴۹
۳۳	ST	۱۲	۴۹/۵۶	۱۴/۶	۹۴/۱۹	۴/۳۸	۸۷/۶
۳۴	DEST	۶	۵۳/۱۶	۱۵/۶	۱۰۰/۶۴	۲/۰۶	۴۰
۳۵	EST	۱۰	۵۴/۷۴	۱۶/۱	۱۰۳/۸۷	۳/۶۳	۷۸/۸
۳۶	EST	۱۲	۶۵/۴۲	۱۹/۲	۱۲۳/۸۷	۴/۳۳	۱۱۳/۴
۳۷	DEST	۸	۷۲/۴۲	۲۱/۳	۱۳۷/۴۲	۲/۷۶	۷۵/۲

ST=standard weight, EST=extra strong, DEST=double extra strong

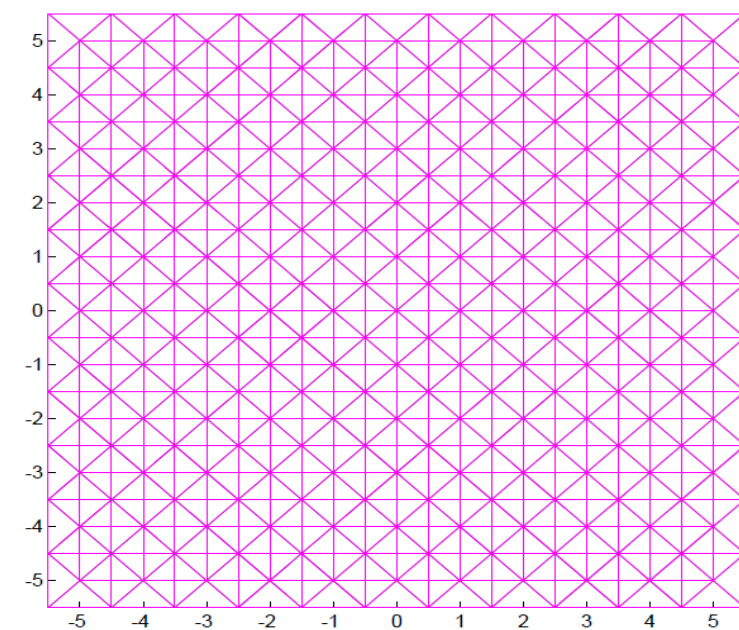
### سازه‌های پربولیک دو لایه ۹۶۸ عضوی

سازه‌های پربولیک دو لایه‌ی ۹۶۸ عضوی در شکل (۵) نشان داده شده است. این سازه شامل ۲۶۵ گره و دارای ۹۶۸ عضو می‌باشد. ۶ متغیر طراحی در این مسئله وجود دارد که شامل متغیرهای شکل و اندازه می‌باشد. برای مراحل بهینه‌سازی اندازه، تمامی اعضای سازه به ۵ گروه طبقه‌بندی شده است که در شکل (۶) نشان داده شده است. به

علاوه برای مسائل بهینه‌سازی شکل، بیشترین مقدار ارتفاع ۱۲ و کمترین مقدار آن ۲ می‌باشد. حداقل مقدار مجاز سطح مقطع عرضی برای هر عضو  $ST1/2$  با مساحت  $1/61$  سانتی‌متر مربع می‌باشد و حداکثر مقدار مجاز سطح مقطع عرضی برای هر عضو  $ST10$  با مساحت  $76/7$  سانتی‌متر مربع می‌باشد.



(الف)



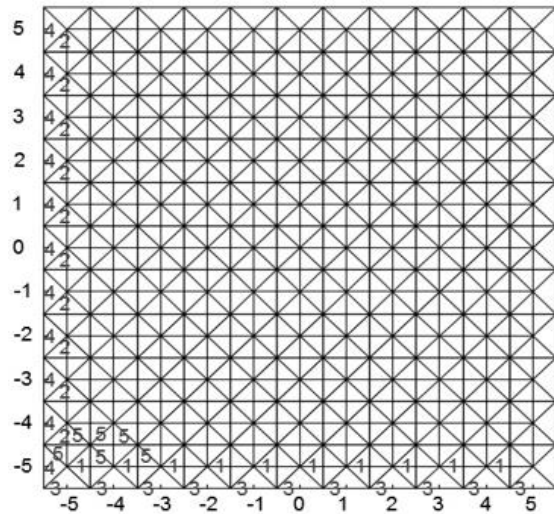
(ب)

شکل ۵- سازه‌های پربولیک مدل شده در برنامه متلب، الف) تصویر از پهلو، ب) تصویر از بالا



جدول ۲- مقادیر حاصل از آنالیز سازه به کمک الگوریتم های CSS و ga

run	css(kg)	ga(kg)
۱	۴۰۵۸/۰۷	۴۲۱۳/۳۰
۲	۴۰۴۳/۳۲	۴۱۱۶/۸۵
۳	۴۰۵۸/۳۳	۵۰۳۳/۱۳
۴	۴۰۵۰/۶۰	۴۲۸۸/۵۱
۵	۴۰۵۴/۶۸	۸۹۰۵/۸۵
۶	۴۱۰۰/۶۴	۴۶۴۶/۲۹
۷	۴۰۶۷/۵۹	۵۹۷۳/۸۲
۸	۳۹۸۰/۷۹	۴۱۶۴/۵۶
۹	۴۲۵۹/۰۱	۵۳۹۸/۲۲
۱۰	۴۰۰۳/۰۹	۵۴۴۹/۸۳
۱۱	۳۹۶۳/۷۵	۵۸۷۹/۵۸
۱۲	۴۰۳۲/۳۵	۸۷۴۸/۸۸
۱۳	۴۰۴۸/۵۲	۵۳۳۶/۷۳
۱۴	۴۰۱۴/۱۷	۳۹۹۴/۱۵
۱۵	۴۰۶۷/۹۲	۷۰۴۲/۶۴
۱۶	۴۱۷۴/۸۲	۸۷۵۰/۶۱
۱۷	۴۰۷۸/۶۸	۴۲۵۲/۴۵
۱۸	۴۰۵۴/۱۸	۷۰۶۰/۰۲
۱۹	۳۹۴۲/۲۵	۵۶۷۰/۲۹
۲۰	۴۰۹۳/۴۰	۶۱۵۸/۹۷
۲۱	۳۹۵۲/۸۳	۶۳۲۵/۲۲
۲۲	۴۰۱۰/۱۷	۳۹۳۸/۴۸
۲۳	۳۹۸۸/۶۱	۴۶۶۹/۱۸
۲۴	۴۰۵۶/۵۷	۴۵۱۶
۲۵	۴۰۳۴/۹۳	۷۱۶۳/۹۴
۲۶	۳۹۶۹/۳۳	۴۴۰۹/۵۸
۲۷	۳۹۷۹/۵۸	۷۱۹۴/۲۶
۲۸	۴۰۶۷/۸۲	۴۱۵۹/۸۰
۲۹	۳۹۵۸/۲۹	۵۴۲۸/۱۱
۳۰	۴۰۰۶/۰۸	۵۷۰۵/۰۲
انحراف معیار	۶۴/۹۵	۱۴۴۹/۳۱



شکل ۶- گروه بندی سازه های پربولیک

ترکیب سازه های پربولیک ۹۶۸ عضوی به صورت زیر می باشد:

- طول دهنه: ۱۰ متر
- ارتفاع: متغیر بین ۲ تا ۱۲ متر
- طول: ۱۰ متر

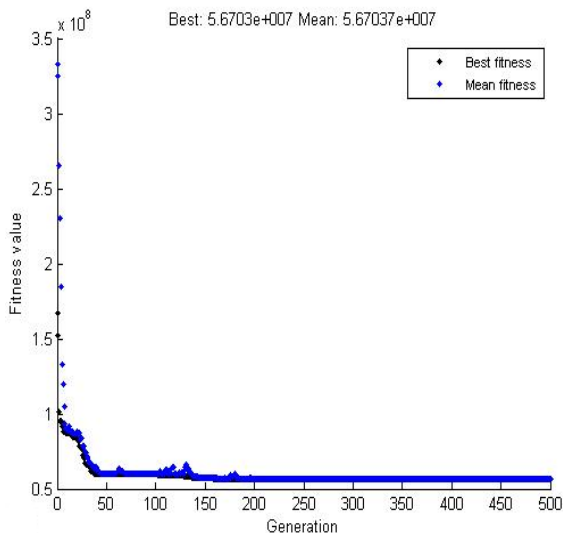
در این مثال، چگالی اعضا برابر ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمربع، مدول الاستیسیته  $10^6 * 2/1$  کیلوگرم بر سانتیمتر مربع و تنش تسلیم ۲۴۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع در نظر گرفته شده است.

در این تحقیق، سطح مقطع و ارتفاع، متغیرهای طراحی ما می باشند، برای اینکه به وزن مینیمم سازه دست پیدا کنیم. سازه مورد نظر، به کمک الگوریتم جستجوی ذرات باردار ۳۰ بار، با دوره‌ی تکرار ۵۰۰ مورد آنالیز واقع شده، و برای مقایسه‌ی نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک، ۳۰ بار با دوره‌ی تکرار ۵۰۰، مورد آنالیز واقع شده است. نتایج حاصل در جدول (۲) نشان داده شده است.

با استفاده از الگوریتم ژنتیک، سازه در ارتفاع ۶/۷ متری به کمترین مقدار وزن خود رسیده است، در این وزن بهینه سطح مقطع اعضا در جدول (۴) نشان داده شده است. نمودار تاریخچه همگرایی این الگوریتم، برای بهترین مقدار وزن سازه به صورت شکل (۸) می باشد.

جدول ۴- سطح مقطع بهینه اعضا با استفاده از روش ga در بهترین حالت مربوط به آنالیز ۲۲

متغیرهای طراحی	ga
A1(cm)	۴/۰۷
A2(cm)	۴/۱
A3(cm)	۲/۸
A4(cm)	۳/۶۳
A5(cm)	۵/۲۷
ارتفاع(m)	۶/۷
وزن(kg)	۳۹۳۸/۴۸



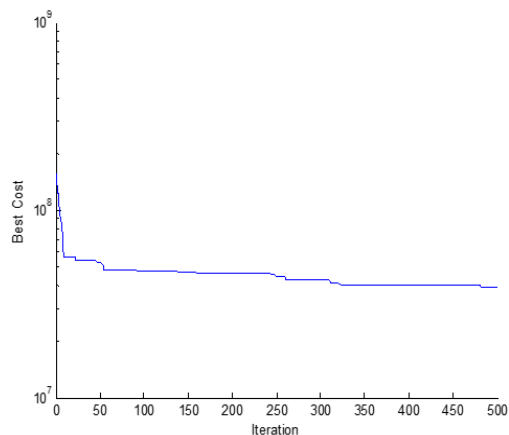
شکل ۸- نمودار همگرایی الگوریتم ga در بهترین حالت مربوط به آنالیز ۲۲

بر اساس نتایج به دست آمده، بهترین مقدار بدست آمده برای تابع هدف از الگوریتم جستجوی ذرات باردار ۳۹۴۲/۲۵ می باشد، و بهترین مقدار بدست آمده برای تابع هدف از الگوریتم ژنتیک ۳۹۳۸/۴۸ می باشد. همانطور که مشاهده می شود وزن بهینه بدست آمده از الگوریتم ژنتیک بهتر از الگوریتم جستجوی ذرات باردار می باشد، اما احتمال رسیدن به جواب بهینه توسط الگوریتم ژنتیک خیلی کمتر می باشد. با توجه به انحراف معیار محاسبه شده، انحراف معیار الگوریتم ژنتیک خیلی بیشتر از انحراف معیار الگوریتم جستجوی ذرات باردار می باشد. وزن های به دست آمده از الگوریتم ژنتیک دارای پراکندگی زیادی می باشد، و انحراف از مقدار متوسط بیشتر است. بنابراین قابلیت اعتماد به الگوریتم جستجوی ذرات باردار بیشتر می باشد.

با استفاده از روش جستجوی ذرات باردار، سازه در ارتفاع ۶/۵ متری به کمترین مقدار وزن خود رسیده است، در این وزن بهینه سطح مقطع اعضا در جدول (۳) نشان داده شده است. نمودار تاریخچه همگرایی این الگوریتم، برای بهترین مقدار وزن سازه به صورت شکل (۷) می باشد.

جدول ۳- سطح مقطع بهینه اعضا با استفاده از روش CSS در بهترین حالت مربوط به آنالیز ۱۹

متغیرهای طراحی	CSS
A1(cm)	۴/۱۶
A2(cm)	۴/۳۹
A3(cm)	۲/۷۷
A4(cm)	۲/۹۱
A5(cm)	۵/۲۷
ارتفاع(m)	۶/۵
وزن(kg)	۳۹۴۲/۲۵



شکل ۷- نمودار همگرایی الگوریتم CSS در بهترین حالت مربوط به

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله از روش جستجوی ذرات باردار برای بهینه سازی سازه های هاپیروبولیک دو لایه استفاده شده است، ارتفاع و سطح مقطع به منظور کاهش وزن سازه، به عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته شده است و از الگوریتم ژنتیک برای مقایسه ی نتایج استفاده شده است. برای بهبود عملکرد الگوریتم های مورد نظر، سازه ی ۹۶۸ عضوی، به پنج گروه طبقه بندی شده که باعث افزایش سرعت الگوریتم های مورد نظر شده است.

نتیجه نشان می دهد که الگوریتم جستجوی ذرات باردار بهتر از الگوریتم ژنتیک عمل می کند. همچنین، قابلیت همگرایی روش جستجوی ذرات باردار عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک دارد. نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک دارای پراکندگی زیادی نسبت به الگوریتم جستجوی ذرات باردار می باشد. بنابراین، قابلیت اعتماد به الگوریتم جستجوی ذرات باردار بیشتر از الگوریتم ژنتیک می باشد. استفاده از الگوریتم جستجوی ذرات باردار فقط به سازه های فضاکار محدود نمی شود، همچنین می تواند به انواع دیگر مشکلات بهینه سازی مانند سازه های خریابی، سازه های قاب و ... استفاده شود.

## منابع

- [9] Gomes HM. Truss optimization with dynamic constraints using a particle swarm algorithm, *Expert Systems and Applications*, 2011, Vol. 38, pp. 957-968.
- [10] Kirkpatrick, S., Gelatt, C., Vecchi, M.: Optimization by simulated annealing. *Science* 220(4598), 671-680 (1983).
- [11] Erol, O.K., Eksin, I.: New optimization method: Big Bang-Big Crunch. *Adv. Eng. Softw.* 37, 106-111 (2006).
- [12] Kaveh, A., Talatahari, S.: Size optimization of space trusses using Big Bang-Big Crunch algorithm. *Comput. Struct.* 87(17-18), 1129-1140 (2009).
- [13] Kaveh A, Eftekhar B. Improved big bang big crunch to optimize barrel vault frames, *Proceeding of the 9th International Congress on Civil Engineering*, Isfahan University of Technology (IUT), Isfahan, Iran, 2012.
- [14] Rashedi, E., Nezamabadi-pour, H., Saryazdi, S.: GSA: a gravitational search algorithm. *Inf. Sci.* 179, 2232-2248 (2009).
- [15] Kaveh A, Talatahari S. A novel heuristic optimization method: charged system search, *ActaMechanica*, Nos. 3-4, 213(2010) 267-89.
- [16] Kaveh A, Talatahari S. Optimal design of skeletal structures via the charged system search algorithm, *Structural and Multidisciplinary optimization*, 41(2010) 893-911.
- [17] Kaveh A, Talatahari S. Charged system search for optimum grillage systems design using the LRFD-AISC code, *Journal of Constructional Steel Research* 66 (6) (2010) 767-771.
- [18] Kaveh A, Talatahari S. Charged system search for optimal design of frame structures, *Applied Soft Computing*, 12(2012) 382-393.
- [19] Kaveh A, Mirzaei B, Jafarvand A. Optimal design of single-layer barrel vault frames using improved magnetic charged system search, *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, No. 4, 3(2013) 575-600.
- [20] Kaveh A, Farahani M, Shojaei N. Optimal design of barrel vaults using charged system search, *International Journal of Civil Engineering*, No. 4, 10(2012) 301-8.
- [۲۱] مبحث ششم مقررات ملی ساختمان
- [22] Halliday, D., Resnick, R., Walker, J., "Fundamentals of Physics", 8th edn. (2008) Wiley, New York.
- [1] Fogel, L.J., Owens, A.J., Walsh, M.J.: *Artificial Intelligence Through Simulated Evolution*. Wiley, Chichester (1966).
- [2] De Jong, K.: *Analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems*. Ph.D. Thesis, University of Michigan, Ann Arbor, MI (1975).
- [3] Koza, J.R.: *Genetic programming: a paradigm for genetically breeding populations of computer programs to solve problems*. Report No. STAN-CS-90-1314, Stanford University, Stanford, CA (1990).
- [4] Holland, J., *An introduction with application to biology, control and artificial intelligence adaptation in Natural and Artificial System*. MIT Press, Cambridge, MA, 1975a.
- [5] Goldberg, D.E.: *Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley, Boston (1989).
- [6] Glover, F.: *Heuristic for integer programming using surrogate constraints*. *Decis. Sci.* 8(1), 156-166 (1977).
- [7] Dorigo, M., Maniezzo, V., Colomi, A.: *The ant system: optimization by a colony of cooperating agents*. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. B* 26(1), 29-41 (1996).
- [8] Eberhart RC, Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory. In *Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science*, Nagoya, Japan; 1995;6:39-43.

[23] American Institute of Steel Construction (AISC), Manual of Steel Construction-Load & Resistance Factor Design (AISC-LRFD), 2nd edition, Chicago,USA, 1994.

## Optimization of Hyperbolic Structures Using the Charged System Search (CSS) Algorithm

Zahra Noori

Master of Science in Structural Engineering, Seraj Higher Education Institute, Tabriz, Iran  
Siamak Talaat Ahari\*

Associate Professor, Department of Civil Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran  
Bahman Farahmand Azar

Associate Professor, Department of Civil Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran

### Abstract:

Hyperbolic structures are grid-based space structures. The shape of the structures is similar to a square with fillet edges. If the mid-point of the square sides is connected in orthogonal x and y directions, the “+” shaped configuration remains at its position if the edges become even more curved and their elevation (z coordinates) do not change. Nonetheless, the elevation of the remaining points changes and form the hyperbolic structure. The application of hyperbolic structures is in covering long-span. In this study, a particular hyperbolic structure is optimized both in terms of shape and size. The Charged System Search (CSS) algorithm is used to carry out the optimization. Subsequently, optimization results are compared with corresponding results from the genetic algorithm method.

**Keywords:** Hyperbolic structures; Optimization; Charged System Search (CSS) algorithm; Genetic algorithm