

## طرح بهینه سازه‌های قطری با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهبود یافته

محمد رضا برادران\*

گروه مهندسی عمران، مرکز میمند، دانشگاه آزاد اسلامی، میمند، ایران

مرتضی مدح خوان

گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

mr.baradaran@iau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۱۳ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۱۰/۱۰

### چکیده

یکی از سیستم‌های سازه‌ای جدید مورد استفاده در سازه‌های بلند مرتبه، سیستم‌های سازه‌ای قطری می باشد. در این نوع سیستم سازه‌ای، ستون‌ها حذف شده و اعضای قطری جایگزین آنها می‌شوند. به عبارت دیگر اعضای قطری علاوه بر تحمل بارهای ثقلی، بارهای جانبی را نیز کنترل می‌کنند و دیگر نیازی به طراحی سیستم باربر جانبی برای سازه نمی باشد. ساختمان‌های ساخته شده با این سیستم، علاوه بر نوآوری در سیستم سازه‌ای، طرح معماری زیبا و منحصر به فردی دارند. یکی از مهمترین و تاثیرگذارترین پارامتر طراحی در سازه‌های قطری، تعیین زاویه اعضای قطری می‌باشد. این زاویه به طور مستقیم بر روی وزن سازه تاثیرگذار است. در مقاله حاضر زاویه اعضای قطری در این نوع سیستم‌ها مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور یک ساختمان ۲۴ طبقه مورد تحلیل و بهینه‌سازی قرار گرفته است. جهت بهینه‌سازی سازه، از الگوریتم ژنتیک بهبود یافته استفاده شده است. با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهبود یافته وزن بهینه قاب تحت زاویه های مختلف برای سیستم‌های سازه‌ای قطری و همچنین سیستم‌های سازه‌ای با مهاربندی مگا تعیین و حالت بهینه ارائه شده است. جهت بررسی نتایج، وزن سازه با وزن سیستم مهاربندی مگا مقایسه شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد زاویه بهینه اعضای قطری در سیستم مهاربندی مگا حدود ۳۶ درجه می باشد در حالی که این زاویه برای سیستم قطری حدود ۶۵ درجه می باشد.

**کلید واژگان:** بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک بهبود یافته، سیستم‌های سازه‌ای قطری، مهاربندی مگا.

## ۱- مقدمه

با توجه به مشکلات مربوط به روش شمارش کامل، همواره بر ایجاد روش‌های مؤثرتر و کاراتر تأکید شده است. در این زمینه، الگوریتم‌های مختلفی به وجود آمده است به همین علت، اخیراً تمرکز بیشتری بر روش‌های ابتکاری یا فرا ابتکاری که جزء روش‌های جستجوی تصادفی می‌باشند صورت گرفته است. روش‌های جستجوی ابتکاری، روش‌هایی هستند که می‌توانند جواب مناسبی در زمان محدود برای یک مسئله ارائه کنند. روش‌های فرا ابتکاری شباهت‌هایی با سیستم‌های اجتماعی و یا طبیعی دارند. روش‌های فرا ابتکاری روز به روز در حال گسترش می‌باشند. برخی از این روش‌ها از طبیعت الهام گرفته شده است.

در بهینه‌سازی سازه‌ها، انتخاب نوع متغیرها و تصمیم‌گیری در مورد پیوسته یا گسسته بودن متغیرها، تاثیر بسیار زیادی بر روی حجم عملیات محاسباتی جهت رسیدن به جواب بهینه دارد. همچنین روش‌ها و الگوریتم‌های بسیار زیاد و متنوعی برای حل مسائل بهینه‌سازی وجود دارد و روز به روز در حال گسترش می‌باشند. با گسترش علم و پیشرفت تکنولوژی، روش‌های جدید جهت کاهش حجم عملیات محاسباتی و همچنین کاهش زمان انجام عملیات معرفی شده‌اند. هدف همه الگوریتم‌ها و روش‌ها، رسیدن به جواب بهینه در کوتاه‌ترین زمان ممکن با انجام حداقل حجم عملیات محاسباتی می‌باشد. تعداد بسیار زیاد روش‌های طراحی و بهینه‌سازی، گزینه‌های متنوعی را پیش روی محققین قرار داده است. انتخاب روش و نوع الگوریتم بهینه‌سازی به نوع مسئله و تعداد متغیرها بسیار وابسته است. الگوریتم‌های فرا ابتکاری از جمله الگوریتم‌های جدید بهینه‌سازی می‌باشد. الگوریتم ژنتیک از جمله الگوریتم‌های فرا ابتکاری می‌باشد که جهت حل مسائل با حجم عملیات بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مقاله حاضر از الگوریتم ژنتیک بهبود یافته جهت بهینه‌سازی سازه استفاده شده است [۱۱]. جهت تعیین زاویه بهینه اعضای قطری در سیستم سازه‌ای قطری و زاویه بهینه مهاربندها در سیستم مهاربندی مگا، وزن بهینه سازه تحت زاویه‌های مختلف تعیین شده است. در سیستم مهاربندی مگا بار جانبی توسط مهاربند های مگا در چندین طبقه کنترل می‌گردد [۱۲].

در سیستم مهاربندی مگا، مهاربندی‌ها بین چند طبقه همزمان با هم درگیر می‌شوند. در ساختمان‌های بلند مرتبه یک مهاربند مگا می‌تواند بین چندین طبقه اجرا گردد. این سیستم باربر جانبی با تغییر در آرایش مهاربندی‌های قطری باعث ایجاد یک سیستم مهاربندی بین چند طبقه می‌گردد و بار جانبی را چند طبقه به چند طبقه انتقال می‌دهد [۱۳].

شکل ۱ ساختمان سوئیس ری در لندن و ساختمان هرست در نیویورک را نشان می‌دهد که با استفاده از سیستم سازه ای قطری طراحی و اجرا شده اند [۱۴].

امروزه با ظهور سیستم‌های مختلف سازه‌ای در ساختمان‌های بلند مرتبه طرح معماری سازه‌ها نیز تغییر پیدا کرده است. از جمله سیستم‌های جدید سازه‌ای می‌توان به سیستم‌های سازه‌ای قطری، ابرمهاربندها، سیستم‌های کنسولی، سیستم‌های لوله‌ای و سیستم‌های با کمربندهای خرپایی اشاره کرد. با توجه به حجم عملیات سازه ای در ساختمان های بلند مرتبه، بهینه‌سازی این سازه‌ها منجر به کاهش قابل ملاحظه هزینه های ساخت می‌گردد. در سال های اخیر این نوع سیستم های سازه ای توسط محققین مختلف مورد بررسی و بهینه سازی قرار گرفته است [۳-۱]. سیستم های سازه ای قطری از جمله سیستم های سازه ای جدید می باشد. با معرفی این نوع سیستم سازه ای تحولی جدید در معماری ساختمان ها حاصل شده است. در این نوع سیستم سازه ای کنترل بار جانبی توسط اعضای قطری صورت می پذیرد. به عبارت دیگر اعضای قطری هم در نقش ستون ها و هم در نقش سیستم باربر جانبی عمل می کنند. مهمترین پارامتر تاثیرگذار در طراحی این نوع سیستم سازه ای تعیین زاویه اعضای قطری می باشد [۴]. موتواری و همکاران سیستم‌های مهاربندی ثانویه را برای سازه‌های قطری در ساختمان‌های بلند ارائه دادند [۵]. آن‌ها یک سیستم اصلی مهاربندی را برای سازه در نظر گرفتند که به عنوان سیستم باربر جانبی اصلی سازه عمل نماید و درون این سیستم را با یک سیستم ثانویه دیگر مهاربندی نمودند. همچنین محققین مختلف انواع سازه‌های بلند مرتبه ساخته شده با ستون‌های قطری و همچنین مهاربندی‌های قطری را از دیدگاه معماری مورد بررسی قرار دادند [۶]. در سال ۲۰۱۵ شادان به بررسی زاویه قطری بهینه برای مینیمم شدن جابجایی در ساختمان‌های فولادی بلند مرتبه در معرض بار باد پرداخت [۷]. یکی از الگوریتم‌های بسیار پرکاربرد در حل مسائل بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک می‌باشد [۸-۱۰].

برای حل مسائل مختلف بهینه‌سازی، تکنیک‌ها و الگوریتم‌های مختلفی جهت رسیدن به جواب بهینه وجود دارد. الگوریتم‌های جستجوی جواب بهینه را می‌توان به دو شاخه جستجوی قطعی و جستجوی تصادفی طبقه‌بندی کرد. از جمله روش‌های جستجوی قطعی می‌توان به برنامه‌ریزی خطی و غیرخطی اشاره کرد. روش‌های جستجوی تصادفی نیز شامل دو دسته روش‌های ابتکاری و روش‌های فراابتکاری هستند. روش‌های فراابتکاری نیز خود به دو گروه روش‌های مبتنی بر مسیر و روش‌های مبتنی بر جمعیت تقسیم بندی می‌شوند. یک روش نامناسب برای حل مسائل بهینه‌سازی این است که تمامی جواب‌های امکان‌پذیر در نظر گرفته شود و توابع هدف مربوط به آن محاسبه شود و در نهایت، بهترین جواب انتخاب گردد. روشن است که شیوه شمارش کامل، نهایتاً به جواب دقیق مسأله منتهی می‌شود؛ اما در عمل به دلیل زیاد بودن تعداد جواب‌های امکان‌پذیر، استفاده از آن غیرممکن است.

$$\delta_j \leq \delta_{\max} \quad (3)$$

در رابطه ۳،  $\delta_j$  تغییر مکان جانبی کلی طبقه زام نسبت به تراز پایه و  $\delta_{\max}$  حداکثر تغییر مکان مجاز می‌باشد که بر اساس آیین‌نامه AISC 360-16، مقدار آن بین  $H/100$  تا  $H/600$  محدود می‌گردد. ارتفاع طبقه مورد نظر از تراز پایه می‌باشد. محدودیت نیروهای کششی و فشاری مطابق روابط ۴ و ۵ و بر اساس بخش D و E آیین‌نامه AISC 341-16 تعیین می‌شوند.

$$P_u < \phi_t P_n \quad (4)$$

$$\frac{P_u}{\phi_c P_n} < 1 \quad (5)$$

در روابط فوق،  $P_u$  نیروی فشاری یا کششی ضریب‌دار عضو و  $P_n$  مقاومت فشاری یا کششی اسمی عضو می‌باشند.  $\phi_t$  ضریب کاهش مقاومت اعضای کششی است که برای تسلیم کششی ۰/۹ و برای گسیختگی کششی ۰/۷۵ می‌باشد و  $\phi_c$  ضریب کاهش مقاومت برابر ۰/۹ می‌باشد. مقدار  $P_n$  از رابطه ۶ تعیین می‌شود:

$$P_n = F_y A_g \quad \text{تسلیم کششی در مقطع کلی عضو}$$

$$P_n = F_u A_e \quad \text{گسیختگی کششی در مقطع خالص عضو}$$

$$P_n = F_{cr} A_g \quad (6) \quad \text{گسیختگی کششی در مقطع خالص موثر عضو}$$

در رابطه ۶،  $A_g$  سطح مقطع کلی عضو،  $A_e$  سطح مقطع موثر،  $F_y$  تنش تسلیم،  $F_u$  تنش نهایی و  $F_{cr}$  تنش فشاری ناشی از کماتش است که بر اساس بخش‌های E3 و E4 آیین‌نامه AISC 341-16 تعیین می‌شوند.

محدودیت‌های اعضای تحت اثر همزمان نیروی فشاری و لنگر خمشی از روابط ۷ و بر اساس بخش H آیین‌نامه AISC 341-16 تعیین می‌شود.

$$\frac{P_u}{P_c} + \frac{8}{9} \left( \frac{M_{ux}}{M_{cx}} + \frac{M_{uy}}{M_{cy}} \right) \leq 1. \quad \text{for } \frac{P_u}{P_c} \geq 0.2$$

$$\frac{P_u}{2P_c} + \left( \frac{M_{ux}}{M_{cx}} + \frac{M_{uy}}{M_{cy}} \right) \leq 1. \quad \text{for } \frac{P_u}{P_c} < 0.2 \quad (7)$$

در روابط ۷،  $P_u$  نیروی فشاری،  $P_c$  مقاومت فشاری طراحی عضو،  $\phi_c$  ضریب کاهش مقاومت در فشار برابر ۰/۹،  $M_{ux}$  لنگر خمشی نسبت به محور قوی  $x$ ،  $M_{uy}$  لنگر خمشی نسبت به محور ضعیف  $y$ ،  $M_{cx}$  مقاومت خمشی طراحی نسبت به محور قوی  $x$ ،  $M_{cy}$  مقاومت خمشی طراحی نسبت به محور ضعیف  $y$  می‌باشد. همچنین مقاومت فشاری طراحی اعضا برابر  $\phi_c P_n$  می‌باشد و مقاومت خمشی طراحی اعضا نسبت به محورهای  $x$  و  $y$  به ترتیب  $M_{nx}$  و  $M_{ny}$



شکل ۱- الف - ساختمان سوئیس ری ب - ساختمان هرست

## ۲- تابع هدف، محدودیت‌ها و متغیرهای تحقیق

تابع هدف مسئله، وزن قاب می‌باشد که با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌گردد.

$$W = \sum_{i=1}^n \rho_i A_i L_i \quad (1)$$

در رابطه ۱،  $\rho$  چگالی اعضا می‌باشد که برای اعضای فولادی  $76/8$  (kN/m<sup>3</sup>) در نظر گرفته می‌شود.  $A_i$  سطح مقطع عضو  $i$  می‌باشد که به عنوان متغیر مسئله در نظر گرفته می‌شود.  $L_i$  طول عضو  $i$  و  $n$  تعداد اعضای قاب می‌باشد. محدودیت‌های مجاز طراحی بر اساس روش بار نهایی و منطبق با آیین‌نامه AISC 341-16 و AISC 360-16 در نظر گرفته شده است [۱۶-۱۵]. محدودیت‌های مجاز طراحی شامل محدودیت‌های تغییر شکل جانبی بام و طبقات، مقاومت کششی، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، کماتش، لاغری و محدودیت‌های هندسی می‌باشند. متغیرهای مسئله، سطح مقطع اعضا در نظر گرفته می‌شود. محدودیت تغییر شکل جانبی طبقات، به دو صورت تغییر شکل جانبی کلی و تغییر شکل جانبی نسبی تقسیم می‌گردد. تغییر شکل جانبی کلی برای هر طبقه از تقسیم جابجایی جانبی هر طبقه بر ارتفاع همان طبقه از تراز پایه تعیین می‌گردد و تغییر شکل جانبی نسبی برای هر طبقه نسبت به طبقه زیرین همان طبقه محاسبه می‌گردد. محدودیت جابجایی نسبی برای هر طبقه از رابطه ۲ تعیین می‌گردد.

$$\delta_j - \delta_{j-1} \leq \delta_a, \quad j = 1, \dots, n_s \quad (2)$$

در رابطه ۲،  $\delta_j$  جابجایی طبقه زام،  $\delta_{j-1}$  جابجایی طبقه  $j-1$ ،  $\delta_a$  جابجایی مجاز طبقات و  $n_s$  تعداد طبقات ساختمان می‌باشد. این رابطه، تغییر مکان نسبی دو طبقه مجاور را به مقدار  $\delta_a$  محدود می‌کند. مقدار  $\delta_a$  بر اساس آیین‌نامه AISC 360-16 بین  $h/200$  تا  $h/600$  و بر اساس آیین‌نامه زلزله ایران مقدار  $\delta_a$  نباید برای ساختمان‌های تا پنج طبقه از  $h/400$  و برای ساختمان‌های بیشتر از پنج طبقه از  $h/500$  تجاوز نماید. ارتفاع طبقه زام می‌باشد. محدودیت جابجایی کلی برای هر طبقه از رابطه ۳ تعیین می‌گردد.

۳- فرمولاسیون مسئله بهینه‌سازی

با توجه به محدودیت‌های بیان شده، فرمولاسیون مسئله بهینه‌سازی به صورت زیر می‌باشد:

$$\text{Minimize: } W = \sum_{i=1}^N \rho_i A_i L_i \quad (12)$$

Subject to:

$$P_{ui} < \phi_c P_{ni} \quad \text{اعضای فشاری} \quad i = 1.2. \dots n$$

$$P_{ui} < \phi_t P_{ni} \quad \text{اعضای کششی} \quad i = 1.2. \dots n$$

$$\frac{P_{ui}}{P_c} + \frac{8}{9} \left( \frac{M_{uxi}}{M_{cx}} + \frac{M_{uyi}}{M_{cy}} \right) \leq 1. \quad \frac{P_{ui}}{P_c} \geq 0.2 \quad i = 1.2. \dots n$$

$$\frac{P_{ui}}{2P_c} + \left( \frac{M_{uxi}}{M_{cx}} + \frac{M_{uyi}}{M_{cy}} \right) \leq 1. \quad \frac{P_{ui}}{P_c} < 0.2 \quad i = 1.2. \dots n$$

$$V_{ui} < \phi_v V_n \quad i = 1.2. \dots n$$

$$\left( \frac{KL}{r} \right)_{i,max} < 200. \quad \text{اعضای فشاری} \quad i = 1.2. \dots n$$

$$\left( \frac{L}{r} \right)_{i,max} < 300. \quad \text{اعضای کششی} \quad i = 1.2. \dots n$$

$$A_L \leq A_i \leq A_u \quad i = 1.2. \dots n$$

$$A_s \leq A_{s-1} \quad s = 1.2. \dots n_s$$

$$\frac{\delta_j - \delta_{j-1}}{h_j} \leq \delta_{ju} \quad j = 1.2. \dots n_s$$

$$\delta_j \leq \delta_{max} \quad j = 1.2. \dots n_s$$

جهت بهینه‌سازی بر اساس فرمولاسیون بیان شده از الگوریتم ژنتیک بهبود یافته استفاده می‌شود.

۴- الگوریتم برنامه تحلیل و بهینه‌سازی

الگوریتم برنامه تحلیل بر اساس روش نیرو تغییر شکل نوشته شده است. در این روش با استفاده از روش تحلیل طیفی و تحلیل استاتیکی معادل، مقادیر نیروهای داخلی در هر عضو تعیین می‌شود. بعد از تعیین نیروهای داخلی، با استفاده از برنامه نوشته شده در محیط نرم‌افزار متلب، با داشتن نیروی داخلی هر عضو و در نظر گرفتن محدودیت‌های نیروی کششی، فشاری، خمشی، تغییر شکل‌ها، لاغری و محدودیت‌های جنبی، سطح مقطع بهینه با توجه به الگوریتم ژنتیک طراحی می‌گردد. برنامه نوشته شده جهت تحلیل، طراحی و بهینه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار متلب می‌باشد. الگوریتم برنامه تحلیل بر اساس روش نیرو تغییر شکل و با استفاده از برنامه ارائه شده با نرم‌افزار متلب نوشته شده است. شکل ۲ ارتباط بین اجزاء اصلی برنامه را نشان می‌دهد.

$M_{ny}$  و  $M_{nx}$  و  $M_{ny}$  مقاومت خمشی اسمی اعضا می‌باشند که مطابق بخش F آیین‌نامه 16 - AISC341 تعیین می‌شوند. محدودیت تنش برشی اعضا از رابطه ۸ و مطابق بخش E2 آیین‌نامه - AISC 341 16 تعیین می‌گردد.

$$V_u < \phi_v V_n \quad (8)$$

در رابطه ۸  $\phi_v$  ضریب کاهش مقاومت برشی و برابر ۰/۹ می‌باشد. به جز برای جان مقاطع I شکل مورد شده برای حالتی که  $\frac{h}{t_w} \leq 2.24 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$  باشد برابر یک فرض می‌گردد.  $V_n$  مقاومت برشی اسمی اعضا می‌باشد که باید برابر کوچکترین مقدار محاسبه شده بر اساس حالت‌های تسلیم برشی و کمانش برشی در نظر گرفته شود.

محدودیت لاغری اعضا برای اعضایی که تحت نیروی محوری فشاری قرار دارند، با رابطه ۹ بیان می‌گردد:

$$\left( \frac{KL}{r} \right)_{max} < 200 \quad (9)$$

در رابطه ۹، K ضریب طول موثر، L طول فاقد مهار جانبی عضو و شعاع ژیراسیون مقطع می‌باشد. این مقدار برای اعضای کششی، نباید از ۳۰۰ تجاوز نماید. ضریب طول موثر بر اساس رابطه دومانتیل [۱۴] و به صورت روابط ۱۰ تعیین می‌گردد.

$$K = \sqrt{\frac{1.6G_A G_B + 4(G_A + G_B) + 7.5}{G_A + G_B + 7.5}} \quad (10)$$

$$\begin{cases} G_A = \frac{\sum \left( \frac{EI}{L} \right) \cdot \text{Columns that connect to A node}}{\sum \left( \frac{EI}{L} \right) \cdot \text{Beams that connect to A node}} \\ G_B = \frac{\sum \left( \frac{EI}{L} \right) \cdot \text{Columns that connect to B node}}{\sum \left( \frac{EI}{L} \right) \cdot \text{Beams that connect to B node}} \end{cases}$$

در روابط ۱۰،  $G_A$  و  $G_B$  ضریب سختی گره‌های ابتدا و انتهای عضو، E مدول الاستیسیته، I گشتاور اینرسی و L طول عضو می‌باشد. محدودیت‌های هندسی که برای جلوگیری از صفر شدن سطح مقطع هر عضو، و همچنین قرار گرفتن سطح مقطع اعضا در محدوده‌ی نرمال می‌باشند با روابط ۱۱ بیان می‌شوند.

$$\begin{aligned} A_L &\leq A_i \leq A_u & i &= 1.2. \dots n \\ A_s &\leq A_{s-1} & s &= 1.2. \dots n_s \end{aligned} \quad (11)$$

در روابط ۱۱، n تعداد کل اعضا،  $A_i$  سطح مقطع هر عضو،  $A_L$  حداقل سطح مقطع و  $A_u$  حداکثر مجاز سطح مقطع هر عضو،  $A_s$  سطح مقطع ستون‌های طبقه بالاتر و  $A_{s-1}$  سطح مقطع ستون‌های مربوط به طبقه پایین‌تر و  $n_s$  تعداد طبقات می‌باشد.

الگوریتم بهینه‌سازی مسئله بر اساس الگوریتم ژنتیک بهبود یافته نوشته شده است. الگوریتم این روش در شکل ۳ نشان داده شده است. در این الگوریتم بعد از ورود اطلاعات اولیه مسئله، قاب مورد نظر تحلیل و بهینه‌سازی خواهد شد. اطلاعات اولیه مسئله در ماتریسی با نام دیتا ذخیره می‌شوند. در هر مرحله از بهینه‌سازی تحلیل قاب بر اساس مقاطع بهینه‌سازی شده جدید انجام می‌گیرد و نیروی داخلی اعضا و محدودیت‌های مسئله بر اساس سطح مقطع جدید تعیین می‌گردد. به عبارت دیگر تحلیل و بهینه‌سازی بصورت همزمان و در قالب یک برنامه انجام می‌گردد.

جهت بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک بهبود یافته (IGA) استفاده شده است. تفاوت روش جدید ارائه شده با الگوریتم ژنتیک در مرحله ارزیابی جمعیت می‌باشد؛ به این صورت که در هر مرحله از ارزیابی و کنترل محدودیت‌های آیین‌نامه‌ای در صورتی که هر محدودیت برای هر عضو از قاب نقض گردد در همان مرحله عضو مورد نظر با عضوی قوی‌تر از بین مجموعه مقاطع موجود جایگزین می‌شود و مجدداً تحلیل و ارزیابی مقاطع تکرار می‌گردد تا نهایتاً جمعیت انتخابی اولیه بهبود یابد و به جمعیتی تبدیل گردد که محدودیت‌های طراحی را نقض نکند. با استفاده از تغییراتی در مرحله ارزیابی الگوریتم ژنتیک، سرعت همگرایی به جواب بهینه بهبود می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است در مرحله ارزیابی جمعیت اولیه در صورتی که محدودیت‌های طراحی در محدوده مجاز قرار نگیرد مقطع مورد نظر از جمعیت انتخابی با مقطعی قوی‌تر جایگزین می‌گردد. به عبارت دیگر جمعیت اولیه انتخابی بهبود می‌یابد. اختلاف بین الگوریتم ژنتیک بهبود یافته IGA با الگوریتم ژنتیک GA در شکل ۳ با خط چین نشان داده شده است.

مقادیر  $g_1$  تا  $g_8$  در شکل ۴، با استفاده از روابط ۱۳ تا ۲۰ تعیین می‌گردند.

$$g_1 = P_{ui} - \phi_c P_{ni} \quad i = 1 \ 2 \ \dots \ n \quad (13)$$

$$g_2 = P_{ui} - \phi_t P_{ni} \quad (14)$$

$$g_3 = V_{ui} - \phi_v V_{ni} \quad (15)$$

$$g_4 = \begin{cases} \frac{P_{ui}}{P_c} + \frac{8}{9} \left( \frac{M_{uxi}}{M_{cx}} + \frac{M_{uyi}}{M_{cy}} \right) - 1. \text{ For } \frac{P_{ui}}{P_c} \geq 0.2 \\ \frac{P_{ui}}{2P_c} + \left( \frac{M_{uxi}}{M_{cx}} + \frac{M_{uyi}}{M_{cy}} \right) - 1. \text{ For } \frac{P_{ui}}{P_c} < 0.2 \end{cases} \quad (16)$$

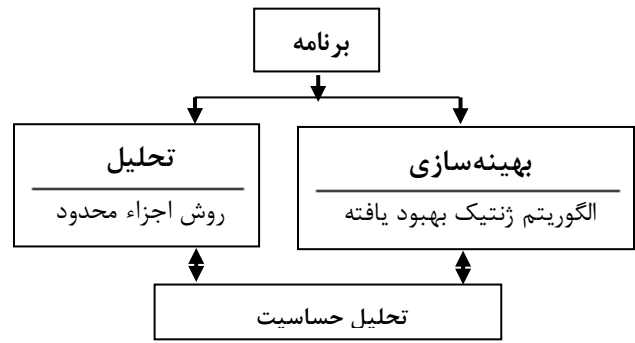
$$g_5 = \begin{cases} \left( \frac{KL}{r} \right)_{i,max} - 200. \\ \left( \frac{L}{r} \right)_{i,max} - 300. \end{cases} \quad (17)$$

$$g_6 = A_j - A_{j-1} \quad j = 2.3 \ \dots \ n_c \quad (18)$$

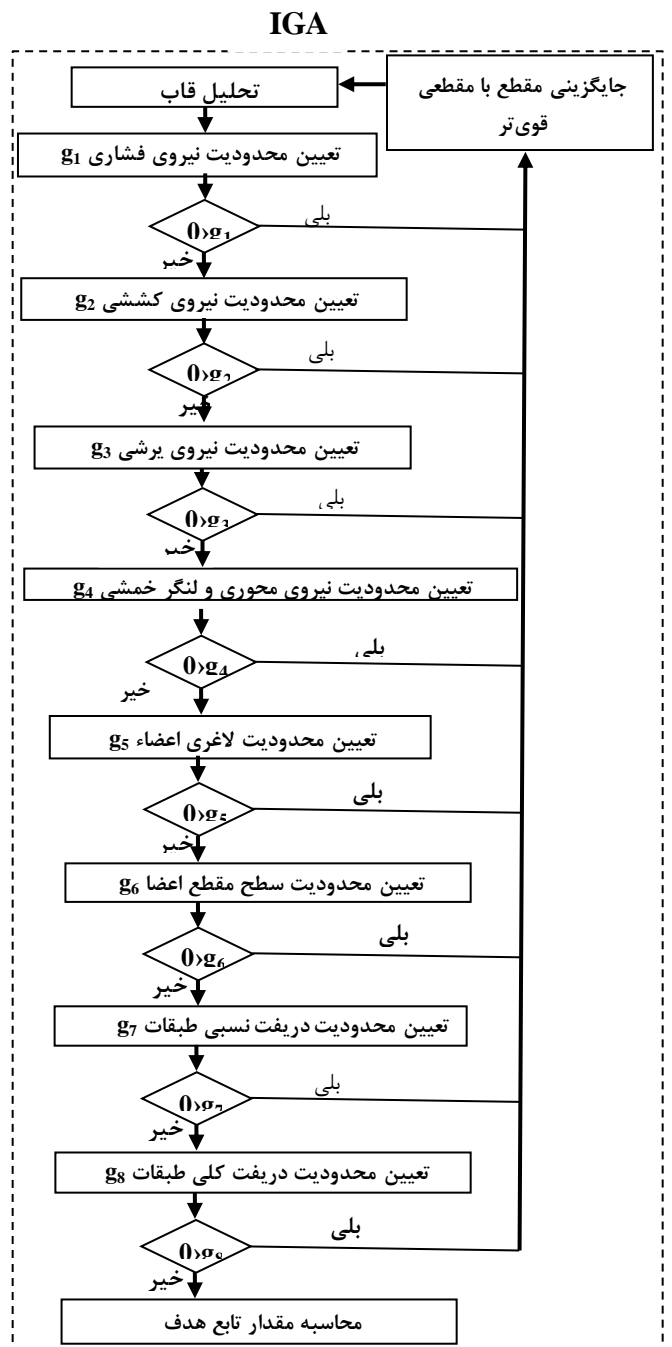
$$g_7 = \frac{\delta_j - \delta_{j-1}}{h_j} - \delta_{ju} \quad j = 1.2 \ \dots \ n_s \quad (19)$$

$$g_8 = \Delta_j - \Delta_{max} \quad j = 1.2 \ \dots \ n_s \quad (20)$$

مرحله بهبود جمعیت که در شکل ۳ نشان داده شده است به صورت الگوریتم نشان داده شده در شکل ۵ می‌باشد. مطابق شکل ۵ محدودیت‌های مسئله برای هر یک از اعضا به ترتیب محاسبه می‌گردد در صورتی که هر یک از محدودیت‌ها نقض گردد در همان مرحله مقطع انتخابی مورد نظر با مقطعی دیگر جایگزین گردیده و



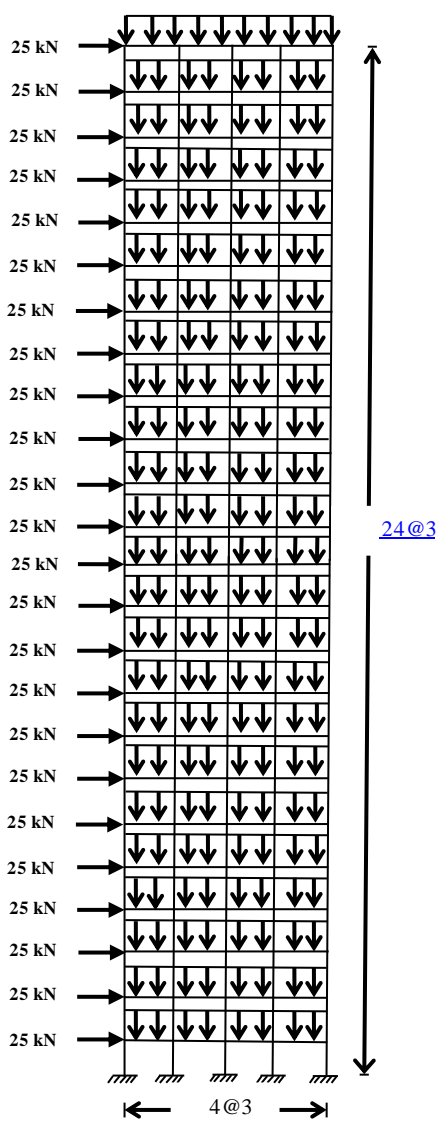
شکل ۲- ارتباط بین اجزاء برنامه



شکل ۳- الگوریتم ژنتیک بهبود یافته (IGA)

**۵- قاب ۲۴ طبقه با سیستم مهاربندی مگا**

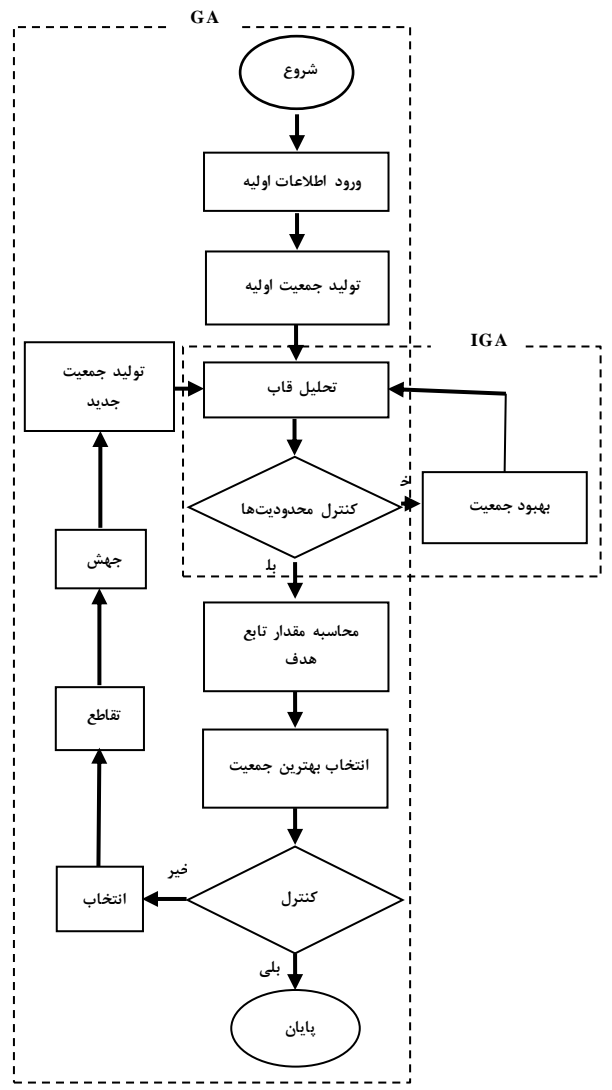
توپولوژی و بارگذاری قاب ۲۴ طبقه و ۴ دهانه در شکل ۵ نشان داده شده است. وزن بهینه قاب با استفاده از الگوریتم ژنتیک (kN) ۷۴۰ تعیین شده است. این قاب شامل ۲۱۶ عضو و ۱۲۵ گره می‌باشد.



شکل ۵- توپولوژی قاب چهار دهانه، بیست و چهار طبقه

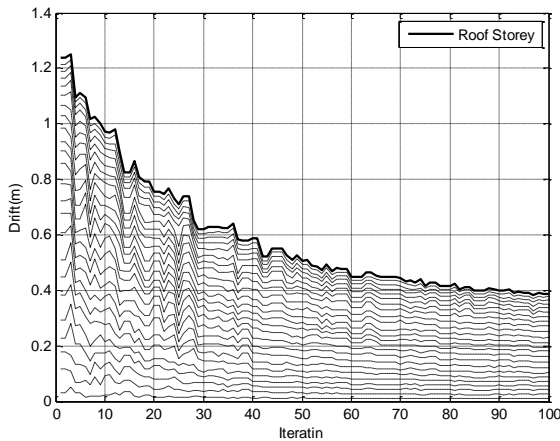
برای قاب نشان داده شده در شکل ۵ هفت حالت مختلف سیستم مهاربندی در نظر گرفته شده است. این هفت نوع در شکل ۶ نشان داده شده است. نتایج حاصل از بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهبود یافته برای این پنج حالت در جدول ۱ نشان داده شده است.

مجدداً محدودیت‌های مسئله کنترل می‌گردد تا نهایتاً مقطع انتخابی مورد نظر هیچ یک از محدودیت‌ها را نقض نکند. بنابر این می‌توان گفت جمعیت انتخابی در این مرحله بهبود می‌یابد. به عبارت دیگر با این عمل فضای جستجوی جواب‌ها از محدوده غیر قابل قبول به محدوده قابل قبول منتقل می‌گردد.

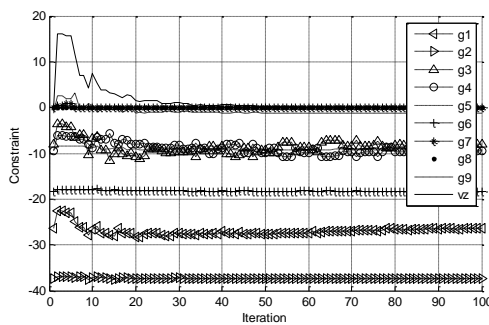


شکل ۴- بهبود جمعیت انتخابی در الگوریتم IGA

همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است کلیه محدودیت‌های طراحی برای جمعیت انتخابی اولیه کنترل می‌گردد، در صورتی که جمعیت انتخابی تمامی معیارهای طراحی را برآورده نماید. این جمعیت انتخاب و جهت اعمال ترکیب، تقاطع و جهش به مرحله بعد ارجاع می‌گردد. در صورتی که هر یک از محدودیت‌های طراحی برای هر یک از اعضا از حد مجاز مطابق آیین‌نامه AISC2016 فراتر رود در همان مرحله، همان مقطع اصلاح می‌شود.

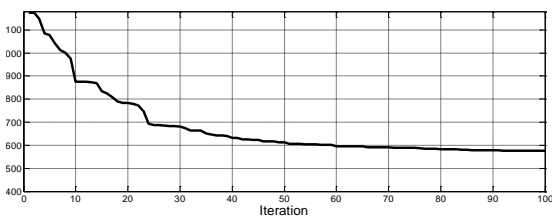


شکل ۷- دریفت طبقات



شکل ۸- محدودیت های مسئله

نمودار همگرایی به جواب بهینه برای قاب مهاربندی شده با زاویه  $36.87$  درجه در شکل ۹ نشان داده شده است. تفاوت الگوریتم ژنتیک بهبود یافته با الگوریتم ژنتیک در سرعت همگرایی به جواب بهینه می باشد. همان طور که در شکل ۹ مشاهده می شود بعد از ده تکرار جواب ها به جواب بهینه نزدیک شده اند. این موضوع نشان دهنده اصلاح جمعیت در تکرار های اول می باشد.

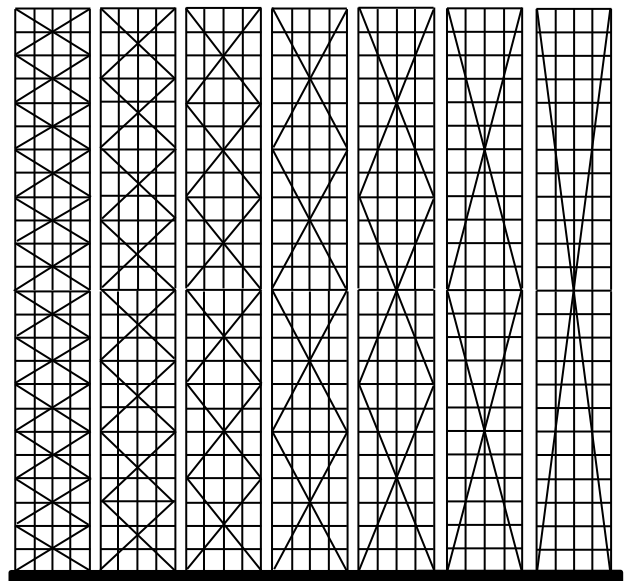


شکل ۹- نمودار همگرایی به جواب بهینه در قاب ۲۴ طبقه با مهاربندی مگا نتایج حاصل از وزن بهینه سیستم های مهاربندی مگا در شکل ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. باتوجه به این شکل زاویه بهینه مهاربندی های مگا برای قاب ۲۴ طبقه نشان داده شده در شکل ۶ حدود  $36$  درجه می باشد.

جدول ۱- وزن بهینه قاب چهار دهانه، بیست و چهار طبقه فولادی تحت الگوهای مختلف سیستم مهاربندی مگا

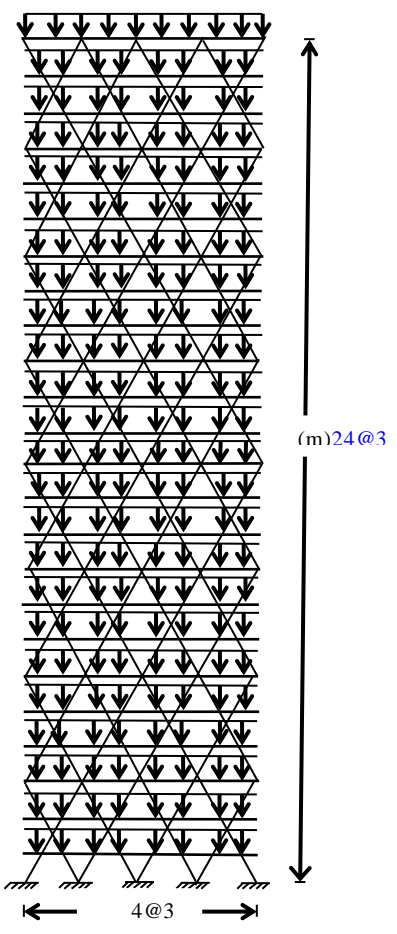
وزن بهینه (kN)	زاویه مهاربند (درجه)	تعداد اعضا	نوع
۷۲۵٫۶	۲۶٫۵۶	۲۴۰	۱
۵۸۷	۳۶٫۸۷	۲۳۲	۲
۶۳۹٫۵	۴۵	۲۲۸	۳
۷۳۷	۵۰٫۳۱	۲۲۴	۴
۱۱۰۰٫۶	۶۳٫۴	۲۲۲	۵
۱۲۵۴	۷۱٫۵۶	۲۲۰	۶
۱۹۹۳٫۶	۸۰٫۵۴	۲۱۸	۷

نوع ۱  $\alpha = 71.56$  نوع ۲  $\alpha = 63.4$  نوع ۳  $\alpha = 50.31$  نوع ۴  $\alpha = 45$  نوع ۵  $\alpha = 36.87$  نوع ۶  $\alpha = 26.57$  نوع ۷  $\alpha = 80.54$



شکل ۶- الگوهای مختلف قرارگیری سیستم مهاربندی مگا در قاب چهار دهانه، بیست و چهار طبقه فولادی

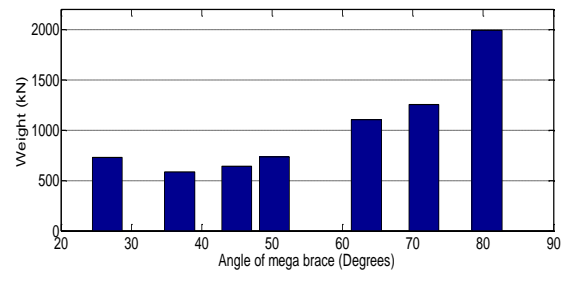
مقادیر دریفت طبقات در شکل ۷ و محدودیت های مسئله در شکل ۸ نشان داده شده است.



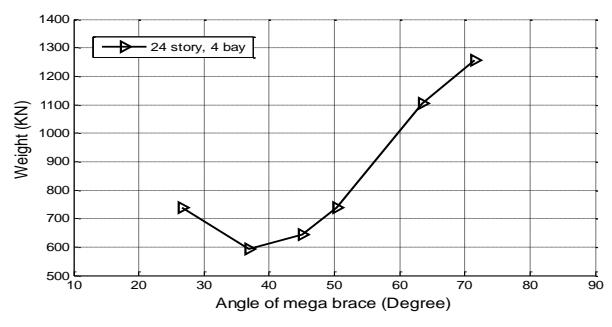
شکل ۱۲- توپولوژی قاب بیست و چهار طبقه با سیستم قطری

جدول ۲- وزن بهینه قاب چهار دهانه، بیست و چهار طبقه فولادی تحت الگوهای مختلف سیستم قطری

نوع	زاویه (درجه)	وزن بهینه (kN/m <sup>2</sup> )
۱	۶۰	۴۱،۸۳۱
۲	۶۵	۳۹،۲۳۱
۳	۷۰	۳۰،۸۲۳
۴	۷۵	۲۷،۲۳۵
۵	۸۰	۴۰،۸۲۹



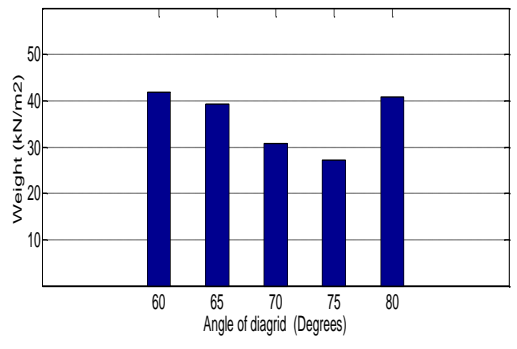
شکل ۱۰- وزن بهینه قاب چهار دهانه، بیست و چهار طبقه فولادی تحت زاویه‌های مختلف سیستم‌های مهاربندی مگا



شکل ۱۱- نمودار وزن بهینه قاب چهار دهانه، بیست و چهار طبقه فولادی تحت زاویه‌های مختلف سیستم مهاربندی مگا

۶- قاب ۲۴ طبقه چهار دهانه با سیستم سازه ای قطری

شکل هندسی قاب ۲۴ طبقه با سیستم سازه ای قطری در شکل ۱۲ نشان داده شده است. جهت تعیین زاویه بهینه اعضای قطری شش زاویه مختلف ۵۵، ۶۰، ۶۵، ۷۰، ۷۵ و ۸۰ درجه مورد ارزیابی قرار گرفته است. بهینه‌سازی قاب با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهبود یافته انجام گرفته است. برای قاب نشان داده شده در شکل ۱۲ شش حالت مختلف سیستم قطری با زاویه قطری ۵۵، ۶۰، ۶۵، ۷۰، ۷۵ و ۸۰ درجه در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از بهینه‌سازی این پنج حالت در جدول ۲ و نمودار شکل ۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۱۳- وزن بهینه قاب چهار دهانه، بیست و چهار طبقه



بارهای ثقلی و جانبی. آنالیز سازه و زلزله. دوره ۱۵، فصل ۳، ۱۳۹۷، صفحه ۱۹-۷.

[۹] خداینده لو، ا؛ آقاجانی، ر. طراحی بهینه سازه فولادی دیاگرید در ساختمان بلند. آنالیز سازه و زلزله. دوره ۱۵، فصل ۲، ۱۳۹۷، صفحه ۴۵-۳۹.

[10] Ashtari P, Karami R, Farahmand-Tabar. Optimum geometrical pattern and design of real-size diagrid structures using accelerated fuzzy-genetic algorithm with bilinear membership function. *Applied Soft Computing*. 2021; 110: 107646.

[11] Baradaran M, Madhkhan M. Application of an improved genetic algorithm for optimal design of planar steel frames. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2019; 63(1): 141-151.

[12] Baradaran M, Madhkhan M. Determination of optimal configuration for mega bracing systems in steel frames using genetic algorithm. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2019; 23: 3616-3627.

[13] Yu X, Ji T, Zheng T. Relationships between internal forces, bracing patterns and lateral stiffness's of a simple frame. *Journal of Engineering Structures*. 2015; 89: 147-161.

[14] Lacidogna G, Scaramozzino D, Carpinteri A. A matrix-based method for the structural analysis of diagrid systems. *Engineering Structures*. 2019; 193: 340-352.

[15] ANSI/AISC 360 An American National Standard. 360-16 Specification for Structural Steel Buildings. American Institute of Steel Construction. 130 East Randolph Street Suite 2000 Chicago, Illinois, 2016, 60601-6204.

[16] ANSI/AISC 341 An American National Standard. 341-16 Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction. 130 East Randolph Street Suite 2000 Chicago, Illinois. 2016, 60601-6204.

[17] Dumonteil P. Simple equations for effective length factors. *Engineering Journal (AISC)*. 1992; 29(3): 111-115.

الگوریتم ژنتیک یکی از الگوریتم های محبوب بهینه سازی می باشد. این الگوریتم از سالها قبل در علوم مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به حجم عملیات محاسباتی در سازه های بلند مرتبه از جمله سازه های قطری استفاده از الگوریتم ژنتیک حجم بسیار بالایی جهت محاسبه و بهینه سازی نیاز دارد. همچنین زمان بسیار زیادی جهت تحلیل اعضا مورد نیاز می باشد. استفاده از الگوریتم ژنتیک بهبود یافته با توجه به جایگزینی مقطعی قوی تر در مرحله بررسی محدودیت های مسئله، زمان مورد نیاز جهت رسیدن به جواب بهینه و همچنین حجم عملیات محاسباتی به شدت کاهش می یابد. نتایج حاصل از وزن بهینه سیستم های مهاربندی مگا و قطری نشان می دهد زاویه بهینه در سیستم های مهاربندی مگا نسبت به سیستم های قطری کمتر می باشد. زاویه بهینه برای سیستم های مهاربندی مگا حدود ۳۶ درجه و برای سیستم های سازه ای قطری حدود ۷۵ درجه می باشد. همچنین نتایج حاصل نشان می دهد با افزایش زاویه مهاربندها، وزن بهینه در سیستم های مهاربندی مگا به شدت افزایش می یابد اما در سیستم های سازه ای قطری با کاهش زاویه اعضای قطری، وزن بهینه افزایش می یابد.

#### مراجع

- [1] Heshmati M, Khatami A, Shakib H. Seismic performance assessment of tubular diagrid structures with varying angles in tall steel buildings. *Structures*. 2020; 25: 113-126.
- [2] Bhata KA, Danish P. Analyzing different configurations of variable angle diagrid structures. *Materials Today: Proceedings*. 2021; 42(2): 821-826.
- [3] Cascone F, Faiella D, Tomei V, Meled E. Stress lines inspired structural patterns for tall buildings. *Engineering Structures*. 2021; 229: 111546.
- [4] Tirkey N, Ramesh Kumar GB. Analysis on the diagrid structure with the conventional building frame using ETABS. *Materials Today: Proceedings*. 2020; 22: 514-518.
- [5] Montuori GM, Mele E, Brandonisio G, Luca A. Secondary bracing systems for diagrid structures in tall buildings. *Journal of Engineering Structures*. 2014; 75: 477-488.
- [6] Korsavi S, Maqhareh MR. The evolutionary process of diagrid structure towards architectural, structural and sustainability concepts: reviewing case studies. *Journal of Architectural Engineering Technology*. 2014; 3(2): 1000121.
- [7] Shadhan K. Optimal diagrid angle to minimize drift in high-rise steel buildings subjected to wind loads. *Journal of Civil Engineering and Technology*. 2015; 6(11): 1-10.

[۸] خداینده لو، ا؛ آقاجانی، ر. طراحی بهینه شبکه قطری سازه دیاگرید تک و دو لایه در ساختمان های بلند مرتبه تحت اثر

# Optimal Design of the Diagrid Structural Systems using Improved Genetic Algorithm

Mohammadreza Baradaran\*

Department of Civil Engineering, Meymand center, Islamic Azad University,  
Meymand, Iran.

Morteza Madhkhan

Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan 84156-83111,  
Iran.

mr.baradaran@iau.ac.ir

## Abstract:

One of the new structural systems utilized in high-rise structures is diagrid structural systems. In this type of structural system, the columns are removed and the diagrid members are replaced. In other words, in addition to carrying gravity loads, the diagrid members also control lateral loads and there is no need to design a lateral load-bearing system for the structure. The buildings built with this system, in addition to innovation in the structural system, have a beautiful and unique architectural design. One of the most important and effective design parameters in diagrid structures is determining the angle of diagrid members. This angle directly affects the weight of the structure. In the present research, the angle of diagrid members has been studied and evaluated. For this purpose, a 24-storey building has been analyzed and optimized. In order to optimize the structure, an improved genetic algorithm has been used. In this regard, using the genetic algorithm, the optimal weight of the frame at different angles for the diagrid structural system as well as the structural system with mega bracing is determined and the optimal weight is presented. The weight of the diagrid structure was compared with the weight of the mega bracing system. The results show that the optimal angle of the diagonal members in the mega bracing system is approximately 36 degrees, while this angle is approximately 65 degrees for the diagrid system.

**Keywords:** Optimization, Improved Genetic Algorithms, Diagrid Structure Systems, Mega Bracing.