

# بهینه‌یابی قاب‌های شیب‌دار غیرمنشوری با استفاده از ایده‌ی پیش‌تنیدگی اعضا و روش نوین جست‌وجوی چندمنظوره

Original Article

وحیدرضا کلات جاری (دانشیار)  
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه شاهرود  
محمدحسین طالب‌پور\* (استادیار)  
دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه دامغان  
ابوالفضل عسکری (کارشناس ارشد)  
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه شاهرود

در نوشتار حاضر، ابتدا به ارائه‌ی فرمول‌بندی فرایند طراحی بهینه‌ی سطح مقطع و هندسه‌ی اعضا قاب‌های شیب‌دار غیرمنشوری پرداخته شده است. بدین منظور فرایند بهینه‌یابی براساس روش نوین جست‌وجوی چندمنظوره انجام شده است. سپس سعی شده است تا با ارائه‌ی ایده‌ی پیشنهادی پیش‌تنیدگی اعضا سازه با مقداری بهینه، فرایند طراحی قاب‌های شیب‌دار غیرمنشوری بهبود یابد و بدین ترتیب طرحی سبک‌تر حاصل شود. برای این منظور، ایده‌ی پیشنهادی در طی فرایند بهینه‌یابی در ۳ حالت ارائه شده است: حالت اول، اعمال نیروی پیش‌تنیدگی در پایین ستون‌ها؛ حالت دوم، اعمال نیروی پیش‌تنیدگی در بالای ستون؛ و حالت سوم، منظور کردن نیروی پیش‌تنیدگی در بالا و پایین ستون. لازم به ذکر است که مقدار نیروی پیش‌تنیدگی در روند بهینه‌یابی به عنوان متغیرهای طراحی منظور شده است. بدین ترتیب در پایان فرایند بهینه‌یابی به ازاء حالت‌های پیشنهادی، میزان نیروی مناسب در طراحی بهینه‌ی قاب‌های شیب‌دار غیرمنشوری مشخص می‌شود. برای ارزیابی ایده‌ی پیشنهادی از مثال‌هایی با هندسه و دهانه‌های مختلف استفاده شده است. نتایج به دست آمده بیانگر بهبود طرح بهینه براساس ایده‌ی پیشنهادی به خصوص حالت سوم است.

واژگان کلیدی: بهینه‌یابی، قاب‌های شیب‌دار غیرمنشوری، روش جست‌وجوی چندمنظوره، پیش‌تنیدگی.

## ۱. مقدمه

بهینه‌یابی سازه‌ها، به ارائه‌ی شیوه و چگونگی طراحی بهینه‌ی قاب‌های شیب‌دار غیرمنشوری پرداخته‌اند. از پیشگامان مطالعات مذکور می‌توان به پژوهشی در سال ۱۹۸۴ اشاره کرد که در آن روش‌های معیار بهینه‌یابی در برخی از قاب‌های شیب‌دار با ویژگی‌های خاص بررسی شده است.<sup>[۱]</sup> سپس در سال ۱۹۸۷، فرایند طراحی بهینه‌ی قاب‌های غیرمنشوری براساس روند طراحی خمیری بررسی شد.<sup>[۲]</sup> بعد از آن در سال ۱۹۹۲، طراحی بهینه‌ی قاب‌های کشسان خمیری غیرخطی فولادی ارزیابی شد که در آن فرایند متغیرهای طراحی برای هر عضو، سطوح مقطع ابتدا و انتهای اعضا و نسبت آن‌ها لحاظ شده بود.<sup>[۳]</sup> همچنین در پژوهشی در سال ۱۹۹۷، مطالعات پیشین تکمیل شد و یک شیوه‌ی طراحی بهینه‌ی قاب‌های غیرمنشوری براساس الگوریتم OC مبتنی بر روش LRFD آیین‌نامه‌ی آمریکا ارائه شد و در آن فرایند فرضیات ساده‌شده‌ی بسیاری منظور و فقط قید مقاومت در برابر ترکیب نیروهای خمشی و محوری لحاظ شد.<sup>[۴]</sup>

در سال ۲۰۰۲، نیز فرایند طراحی بهینه‌ی قاب‌های شیب‌دار غیرمنشوری براساس

قاب‌های شیب‌دار از جمله سازه‌های مهم و پرکاربرد در صنعت هستند که برای احداث بنا و پوشش دهانه‌های بزرگی، همچون کارخانجات صنعتی، انبارهای کشاورزی، آشیانه‌ی هواپیما، سالن‌های ورزشی و ... استفاده می‌شوند. در این راستا، همواره طراحی بهینه‌ی سازه‌های مذکور از اهداف مهندسان و طراحان بوده است. بدین منظور استفاده از اعضایی با ممان اینرسی متغیر، گامی مهم و مؤثر در طراحی بهینه‌ی قاب‌های شیب‌دار است. این مهم در فرایند طراحی به‌طور متداول براساس اعضا I شکل با ابعاد ثابت در بال و ارتفاع و ضخامت متغیر جان برای هر عضو حاصل می‌شود. اما همواره انتخاب مناسب‌ترین مقدار ابعاد بال، ارتفاع و ضخامت جان و دیگر متغیرهای مؤثر در فرایند طراحی قاب‌های شیب‌دار غیرمنشوری، از جمله دغدغه‌های مهندسان طراح بوده است. به همین سبب برخی از پژوهشگران علم

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۲/۱۰، اصلاحیه ۱۳۹۶/۵/۲۴، پذیرش ۱۳۹۶/۶/۱۴.

DOI:10.24200/J30.2018.2122.2097

## Archive of SID

متغیر در فرایند بهینه‌یابی منظور شده است. در حالت اول، نیروی پیش‌تندگی فقط در پایین ستون‌های دو طرف قاب اعمال می‌شود. در حالت دوم، نیروی پیش‌تندگی در بالای ستون‌ها منظور خواهد شد. حالت سوم، ترکیبی از دو حالت فوق است و نیروی پیش‌تندگی به طور هم‌زمان به پایین و بالای ستون اعمال می‌شود. لازم به ذکر است که در طی فرایند طراحی بهینه، به قیود مقاومت به‌صورت نسبت تنش اعضاء سازه و نیز محدودیت‌های ابعادی برای اعضا براساس آیین‌نامه توجه شده است. نتایج دلالت بر تأثیر ایده‌ی پیشنهادی پیش‌تندگی در طراحی بهینه‌ی قاب‌های شیب‌دار غیرمنشوری دارد. بر این اساس استفاده از حالت سوم در اعمال پیش‌تندگی، سبب کاهش فولاد مصرفی در طی فرایند طراحی بهینه‌ی قاب‌های شیب‌دار غیرمنشوری شده است. این نتیجه در سازه‌های مختلف بررسی شده است.

## ۲. بهینه‌یابی قاب‌های شیب‌دار غیرمنشوری

همان‌طور که پیشتر بیان شد، همواره مسئله‌ی بهینه‌یابی قاب‌های شیب‌دار با توجه به جایگاه ویژه‌ی صنعتی، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران بوده است. در این راستا، استفاده از مقاطع I شکل با ممان اینرسی متغیرگامی مؤثر در جهت طراحی بهینه‌ی قاب‌های شیب‌دار بوده است. اما در این مسیر نیز قیود آیین‌نامه‌ی و انتخاب ابعاد مناسب برای مقاطع، نکته‌ی مهم در فرایند طراحی بهینه‌ی قاب‌های شیب‌دار است. استفاده از الگوریتمی کارآمد برای بهینه‌یابی و نیز چگونگی فرمول‌بندی طراحی و تحلیل سازه در روند بهینه‌یابی، نکات قابل توجه در بهینه‌یابی قاب‌های شیب‌دار غیرمنشوری است. بدین‌سان در بخش حاضر، ابتدا شیوه‌ی تحلیل و فرمول‌بندی طراحی قاب‌های شیب‌دار غیرمنشوری بررسی شده است. سپس در ادامه، شرح مختصری از الگوریتم نوین و کارآمد جستجوی چندمنظوره ارائه شده است.

### ۱.۲. تحلیل قاب‌های شیب‌دار غیرمنشوری

عموماً تحلیل قاب‌های شیب‌دار غیرمنشوری مستلزم محاسبات طولانی است که برای گریز از آن، جدول‌ها و گراف‌های مختلفی ارائه و استفاده می‌شود. جدول‌ها و گراف‌ها در مسائل بهینه‌یابی مبتنی بر  $GA$  که نیازمند تحلیل سازه به تعداد دفعات بسیار زیاد است، قابل استفاده نیست. یک روش جایگزین، تقسیم‌بندی عضو به بخش‌هایی با مقاطع ثابت است. روش مذکور سبب ساده‌سازی تحلیل مسئله می‌شود و با افزایش تقسیم‌بندی می‌توان خطاهای تحلیل را کاهش داد. اما راهکار ارائه شده نیز سبب افزایش چشم‌گیر حجم محاسبات شد و در مسائل بهینه‌یابی مبتنی بر  $GA$  توجیه‌پذیر نیست. شیوه‌ی دیگر برای تحلیل سازه‌هایی با اعضاء غیرمنشوری، استفاده از روش سختی براساس تشکیل ماتریس سختی سازه و حل معادله‌ی  $KU = P$  است، که در آن  $P$  بیانگر بردار نیروهای خارجی و  $U$  بردار تغییرمکان‌های گره‌ی است.  $K$  نیز ماتریس سختی سازه است که از سرهم‌بندی ماتریس سختی اعضا حاصل می‌شود. نکته‌ی حائز اهمیت در روش ذکر شده، تشکیل ماتریس سختی هر عضو با مقطع متغیر است. برای این منظور تئوری تیر برنولی - اولر برای حالتی با تغییرات متعارف، بسیار مناسب است. بدین منظور برای محاسبه‌ی ماتریس سختی هر عضو با مقطع متغیر، ابتدا عضو به  $n$  قسمت مساوی مشابه شکل ۱ تقسیم‌بندی می‌شود. مقدار  $n$  به ابعاد عضو و میزان دقت موردنیاز بستگی دارد. اما معمولاً در صورتی که تغییرات ابعادی مقطع شدید نباشد، برابر ۱۰ در نظر گرفته می‌شود.<sup>[۲۱]</sup>

روش عددی محاسبه‌ی درایه‌های ماتریس سختی اعضاء غیرمنشوری همانند

الگوریتم SQP مبتنی بر روش تنش مجاز آیین‌نامه‌ی آمریکا بررسی و در آن علاوه بر قیود تنش، به قیود ابعادی برای اعضاء سازه توجه شد.<sup>[۵]</sup> در سال ۲۰۰۳، نیز فرایند بهینه‌یابی قاب‌های شیب‌دار فولادی با ستون‌ها و تیرهای منشوری با ماهیچه براساس الگوریتم ژنتیک بررسی شد.<sup>[۶]</sup> همچنین در سال ۲۰۰۴، مقایسه‌ی جامعی بین سیستم‌های قاب غیرمنشوری و سیستم‌های خرپاهای سقفی از لحاظ هزینه انجام شد.<sup>[۷]</sup> برخی پژوهشگران (۲۰۰۵) نیز برنامه‌ی رایانه‌ی برای طراحی بهینه‌ی قاب‌های معمول فولادی شیب‌دار با مقاطع متغیر را با عنوان PADO ارائه کردند.<sup>[۸]</sup> همچنین در سال ۲۰۰۸، فرایند طراحی بهینه‌ی قاب‌های شیب‌دار با استفاده از الگوریتم ژنتیک (GA)<sup>۱</sup> بررسی شد.<sup>[۹]</sup> پژوهشگران دیگری نیز در سال ۲۰۱۰، ضمن ارائه‌ی فرمول‌بندی طراحی بهینه‌ی قاب‌های شیب‌دار براساس آیین‌نامه‌ی انگلستان، تأثیر اپراتور جهش را در روند بهینه‌یابی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک ارزیابی کردند.<sup>[۱۰]</sup> همچنین در یک فرایند مطالعاتی، به طراحی بهینه‌ی قاب‌های شیب‌دار براساس روش ترکیبی MINLP که بر پایه‌ی روش‌های کلاسیک بهینه‌یابی شکل گرفته بود، توجه شده است.<sup>[۱۱]</sup> در سال ۲۰۱۲، نیز بهینه‌یابی قاب‌های شیب‌دار صنعتی براساس روش تنش مجاز آیین‌نامه‌ی آمریکا مبتنی بر GA ارزیابی شد در ادامه‌ی مطالعات نیز در سال ۲۰۱۵، طراحی بهینه‌ی قاب‌های شیب‌دار با دهانه‌ی بزرگ بررسی شد.<sup>[۱۲]</sup>

از سوی دیگر، پیش‌تندگی سازه‌های مختلف با هدف افزایش کارایی سازه از دیرباز مورد توجه بسیاری از مهندسان و طراحان بوده است. قدیمی‌ترین سازه‌ی پیش‌تند، کشتی‌های بادبانی مصری با قدمت ۲۷۰۰ سال قبل از میلاد است، که پیش‌تندگی در آن با استفاده از طناب‌های سیمی انجام شده بود.<sup>[۱۳]</sup> پس از آن افراد مختلفی در طراحی سازه‌های گوناگون از علم پیش‌تندگی به‌طور ناخاسته استفاده کردند.<sup>[۱۴-۱۷]</sup> در این میان، مهندسان و طراحان فرانسوی نخستین افرادی بودند که در سال ۱۹۲۸ پیش‌تندگی را به‌وسیله‌ی کابل‌های پیش‌کشیده به‌عنوان یک روش ارائه و استفاده کردند.<sup>[۱۷]</sup> پس از آن مطالعات متنوعی در زمینه‌ی علم پیش‌تندگی توسط پژوهشگران مختلف انجام و بدین ترتیب به فرایند مقاوم‌سازی سازه‌های مختلفی به خصوص پل‌ها با استفاده از روش توجه شد. مطالعات در زمینه‌ی پیش‌تندگی گسترش بسیاری یافت، تا آنجا که در سال ۱۹۸۰ انجمن مهندسان عمران آمریکا نشریه‌ی در خصوص مقاوم‌سازی پل‌های فرسوده با استفاده از شیوه‌های پیش‌تندگی ارائه کرد. از آن پس کارایی سازه‌های مختلف براساس روش‌های پیش‌تندگی افزایش یافت. این علم امروزه در بسیاری از سازه‌های مهندسی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است و برای مقاوم‌سازی سازه‌های مختلف استفاده می‌شود.<sup>[۱۵]</sup>

همان‌طور که ملاحظه شد، علم پیش‌تندگی با هدف افزایش کارایی سازه براساس قابلیت‌های موجود بنا نهاده شده است. این مهم تا حد زیادی به اهداف علم بهینه‌یابی سازه‌ها نزدیک است. از سوی دیگر، طراحی بهینه‌ی قاب‌های شیب‌دار غیرمنشوری براساس بیشترین کارایی از اهداف مهم و ضروری صنعت و مهندسی عمران است. به همین سبب در نوشتار حاضر سعی شده است تا با ابتکاری نوین، بهینه‌یابی قاب‌های شیب‌دار غیرمنشوری با استفاده از پیش‌تندگی اعضاء سازه ارزیابی و بررسی شود. در این راستا، فرایند طراحی براساس روش تنش مجاز آیین‌نامه‌ی فولاد آمریکا،<sup>[۱۸]</sup> و آیین‌نامه‌ی بارگذاری ایران،<sup>[۱۹]</sup> انجام پذیرفته است. برای بهینه‌یابی نیز از روش نوین و کارآمد جست‌وجوی چندمنظوره،<sup>[۲۰]</sup> استفاده و در طی آن اعضاء سازه به‌صورت I شکل با ارتفاع متغیر (به‌صورت خطی) منظور شده است. بدین ترتیب در فرایند بهینه‌یابی، ۵ متغیر طراحی هندسی برای هر عضو با عنوان‌های ارتفاع ابتدا و انتهای مقطع، عرض و ضخامت بال و ضخامت جان تعریف می‌شود. اعمال پیش‌تندگی نیز در ۳ حالت بررسی شده است که میزان نیروی پیش‌تندگی در هر حالت به عنوان

$$(1) \begin{bmatrix} \frac{E}{\Delta x \sum_{i=1}^n (1/A_i)} & 0 & 0 & -\frac{E}{\Delta x \sum_{i=1}^n (1/A_i)} & 0 & 0 \\ 0 & -k_1 & -k_r & 0 & k_1 & k_r \\ 0 & [k_1 k_r - k_v^2] & [k_1 k_r - k_v^2] & 0 & [k_1 k_r - k_v^2] & [k_1 k_r - k_v^2] \\ 0 & -k_r & k_r & 0 & k_r & -k_r \\ 0 & [k_1 k_r - k_v^2] & [k_1 k_r - k_v^2] & 0 & [k_1 k_r - k_v^2] & [k_1 k_r - k_v^2] \\ -\frac{E}{\Delta x \sum_{i=1}^n (1/A_i)} & 0 & 0 & \frac{E}{\Delta x \sum_{i=1}^n (1/A_i)} & 0 & 0 \\ 0 & k_1 & k_r & 0 & -k_1 & -k_r \\ 0 & [k_1 k_r - k_v^2] & [k_1 k_r - k_v^2] & 0 & [k_1 k_r - k_v^2] & [k_1 k_r - k_v^2] \\ 0 & k_r & -k_r & 0 & -k_r & k_r \\ 0 & [k_1 k_r - k_v^2] & [k_1 k_r - k_v^2] & 0 & [k_1 k_r - k_v^2] & [k_1 k_r - k_v^2] \end{bmatrix}$$

با سرهم‌بندی ماتریس سختی اعضا تشکیل داد. در ادامه، بردار نیروهای خارجی تشکیل و سپس با حل معادله  $KU = P$ ، تغییرمکان‌های گره‌ی محاسبه می‌شود. روش‌های مختلفی برای حل دستگاه معادلات وجود دارد که در پژوهش حاضر از روش چولسکی، که سرعت عمل بالایی در محاسبات بهینه‌یابی سازه‌ها دارد، استفاده شده است.<sup>[۲۲]</sup>

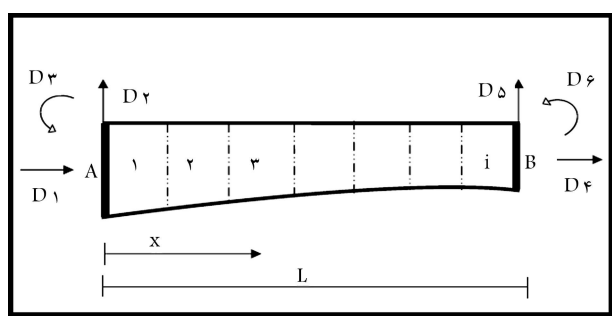
### ۲.۲. فرمول‌بندی مسئله‌ی طراحی بهینه‌ی قاب‌های شیب‌دار غیرمنشوری

همانند بیشتر مسائل بهینه‌یابی سازه‌ها، در مسئله‌ی طراحی بهینه‌ی قاب‌های شیب‌دار غیرمنشوری، هدف کمیته‌سازی وزن سازه است، که تابعی از متغیرهای طراحی مسئله است و به صورت رابطه‌ی ۷ تعریف می‌شود:

$$W = \rho \sum_{i=1}^{Ne} v_i \quad (7)$$

که در آن،  $W$  وزن سازه،  $\rho$  و  $v$  نیز به ترتیب بیانگر وزن مخصوص مصالح و حجم عضو  $i$ ام است.  $Ne$  نیز تعداد اعضا قاب است. این تذکر لازم است که مقادیر متغیرهای طراحی اعضا قاب در مقدار عددی حجم هر عضو مؤثر است.

متغیرهای طراحی برای مسئله‌ی بهینه‌یابی قاب‌های شیب‌دار غیرمنشوری، ابعاد مقاطع برای اعضا سازه است، که در حجم اعضا قاب مؤثر بوده و در نوشتار حاضر، ۵ متغیر در نظر گرفته شده است که عبارت‌اند از: ارتفاع جان در ابتدای مقطع، ارتفاع جان در انتهای مقطع، عرض بال، ضخامت بال و ضخامت جان هر عضو. به این ترتیب ارتفاع جان برای هر عضو متغیر و عرض و ضخامت بال و ضخامت جان در طول عضو ثابت هستند. لازم به ذکر است که متغیرهای مذکور براساس محدودیت‌های آیین‌نامه و براساس ابعاد ورق موجود در بازار سازمان‌دهی شده‌اند. از سوی دیگر، با توجه به آنکه در نوشتار حاضر، ایده‌ی پیشنهادی استفاده از حالت‌های مختلف پیش‌تندگی در فرایند بهینه‌یابی مطرح شده است، یعنی علاوه بر ۵ متغیر ابعادی، مقدار نیروی پیش‌تندگی نیز برای حالت‌های مختلف به‌عنوان متغیر طراحی لحاظ و متناسب با محدودی‌ مشخص براساس شیوه‌ی پیش‌تندگی مقداردهی می‌شود. باید توجه داشت که برای ساده‌سازی، نیروی پیش‌تندگی به‌عنوان یک بار خارجی در معادلات سازه منظور شده است. پس از مشخص شدن تابع هدف و متغیرهای طراحی مسئله‌ی بهینه‌یابی، نکته‌ی حائز اهمیت قیود طراحی هستند، که عموماً براساس آیین‌نامه تعریف می‌شوند. به این منظور در نوشتار حاضر، برای فرایند طراحی بهینه از آیین‌نامه‌ی فولاد آمریکا (AISC) استفاده شده است.<sup>[۱۸]</sup> در این راستا، با توجه به بررسی‌های مختلف برای قاب‌های شیب‌دار با هندسه و شکل‌های متفاوت مشخص شد که در فرایند طراحی، قید تغییرمکان حاکم نیست.



شکل ۱. درجه‌های آزادی در یک عضو غیرمنشوری.

اعضاء منشوری است. با این تفاوت که به‌جای محاسبه‌ی توابع انتگرالی، آن‌ها به توابع مجموع تبدیل می‌شوند. برای این منظور پس از تقسیم‌بندی عضو به  $n$  قسمت، یکی از درجه‌های آزادی به اندازه‌ی واحد تغییرمکان می‌یابد. این در حالی است که سایر درجه‌های آزادی مقید فرض می‌شوند. در ادامه، با استفاده از روابط و قضایای کاستلیانو، رابطه‌ی تغییرمکان درجه‌ی آزادی مرتبط تعیین و با تبدیل تابع انتگرالی به تابع مجموع، درایه‌ی مربوط به درجه‌ی آزادی موردنظر به‌دست می‌آید.<sup>[۲۱]</sup> این فرایند برای تمامی درجه‌های آزادی انجام و بدین ترتیب درایه‌های ماتریس سختی عضو با مقطع متغیر حاصل می‌شود. ماتریس مذکور بیانگر ماتریس سختی عضو غیرمنشوری براساس روش ذکرشده است (رابطه‌ی ۱).

که در آن، متغیرهای  $k_1$  تا  $k_5$  به‌صورت روابط ۲ الی ۶ تعریف می‌شوند:

$$k_1 = \frac{\Delta x}{E} \sum_{i=1}^n (1/I_i) \quad (2)$$

$$k_2 = -\frac{\Delta x^2}{E} \sum_{i=1}^n (i - 0.5/I_i) \quad (3)$$

$$k_3 = \frac{\Delta x^3}{E} \sum_{i=1}^n ((i/0.5)^2 / I_i) \quad (4)$$

$$k_4 = \frac{\Delta x^3}{E} \sum_{i=1}^n (n - i + 0.5/I_i) \quad (5)$$

$$k_5 = \frac{\Delta x^3}{E} \sum_{i=1}^n ((n - i + 0.5)^2 / I_i) \quad (6)$$

که در آن‌ها،  $i$  شماره‌ی هر بخش از عضو در تقسیم‌بندی،  $\Delta x$  طول هر بخش و  $E$  مدول ارتجاعی عضو است. همچنین  $A_i$  و  $I_i$  به ترتیب سطح مقطع و ممان اینرسی قسمت  $i$  هستند که در روند محاسبات، مقادیر وسط قسمت  $i$ ام برای روابط ۱ الی ۶ لحاظ می‌شود.

پس از تشکیل ماتریس سختی اعضا، می‌توان ماتریس سختی کل سازه را

## Archive of SID

می‌شود  $k$  ضریب طول مؤثر حول محور قوی  $x$  است که با توجه به تغییرات قابل توجه ممان اینرسی به این شرح محاسبه می‌شود.

روش‌های مختلفی برای محاسبه‌ی ضریب طول مؤثر در اعضای غیرمنشوری وجود دارد. دقیق‌ترین روش، حل کلاسیک مسئله براساس تئوری برنولی - اوپراست که به سبب زمان‌بر بودن در مسائل بهینه‌یابی استفاده نمی‌شود.<sup>[۲۳]</sup> از سوی دیگر، آیین‌نامه‌ی AISC آمریکا نیز گراف‌هایی برای محاسبه‌ی ضریب طول مؤثر ارائه داده است، که در روند عادی طراحی قاب‌های شیب‌دار استفاده می‌شود.<sup>[۱۸]</sup> اما روش مذکور نیز دقت کافی ندارد و نیازمند فرایند درون‌یابی برای تعیین ضریب طول مؤثر است و در مسائل بهینه‌یابی قابل استفاده نیست. در نوشتار حاضر، از روش ارائه شده در نوشتاری در سال ۲۰۰۶،<sup>[۲۴]</sup> برای محاسبه‌ی ضریب طول مؤثر اعضای غیرمنشوری شکل استفاده شده است. روش ذکر شده براساس تعیین بار بحرانی یک ستون غیرمنشوری با تغییرات خطی در ارتفاع جان با فرض ثابت بودن دیگر پارامترها (عرض و ضخامت بال و ضخامت جان) بنا شده و به صورت اساسی وابسته به نسبت  $H_2/H_1$  است.  $H_2$  ارتفاع مقطع جان در قسمت بزرگ‌تر عضو و  $H_1$  ارتفاع مقطع جان در قسمت کوچک‌تر عضو غیرمنشوری است. در روش مذکور، ۶ گراف با شرایط مرزی گوناگون به صورت بی‌بعد مبتنی بر روابط مشخص ارائه می‌شود که می‌توان براساس آن‌ها ضریب طول مؤثر عضو غیرمنشوری را محاسبه کرد. روابط لازم در نوشتار حاضر برای طراحی بهینه‌ی قاب‌های موجود براساس نوشتاری در سال ۲۰۰۶،<sup>[۲۴]</sup> به صورت رابطه‌های ۱۵ و ۱۶ هستند:

-- قاب با حرکت جانبی و شرایط تکیه‌گاهی دو سرگردان:

$$(X_{cr}/L) = 0.5012 (H_2/H_1)^{0.1281} \quad (15)$$

-- قاب با حرکت جانبی و شرایط تکیه‌گاهی یک سرگردان و یک سر مفصل:

$$(X_{cr}/L) = 0.5108 (H_2/H_1)^{-0.1989} \quad (16)$$

که در آن‌ها با توجه به نسبت  $H_2/H_1$ ، مقدار  $X_{cr}/L$  تعیین و سپس ارتفاع مقطع بحرانی جان ( $H_{cr}$ ) به شرح رابطه‌ی ۱۷ محاسبه می‌شود:

$$(X_{cr}/L) = (H_{cr} - H_1) / (H_2 - H_1) \quad (17)$$

در ادامه، براساس روابط ۱۸ الی ۲۰، ضریب طول مؤثر برای عضو غیرمنشوری ( $k_\gamma$ ) قابل محاسبه است:

$$I_{cr} = [bH_{cr}^2 - (b - t_w)(H_{cr} - 2t_f)^2] / 12 \quad (18)$$

$$P_{Cr} = (\pi^2 EI_{cr}) / (kL)^2 \quad (19)$$

$$k_\gamma = \sqrt{(\pi^2 EI_{ox}) / (P_{Cr} L^2)} \quad (20)$$

که در آن‌ها،  $b$  عرض بال،  $t_w$  ضخامت جان،  $t_f$  ضخامت بال و  $I_{cr}$  ممان اینرسی مقطع بحرانی هستند. همچنین  $k$  ضریب طول مؤثر برای عضو منشوری با شرایط مرزی معادل  $I_{ox}$  ممان اینرسی مقطع در قسمت کوچک‌تر هستند.

ب) تنش مجاز خمشی: تنش‌های مجاز خمشی در آیین‌نامه‌ی AISC برای اعضای غیرمنشوری با شبیه‌سازی عضو منشوری با طولی متفاوت و سطح

بنابراین، قیود مسئله‌ی بهینه‌یابی قاب‌های شیب‌دار غیرمنشوری در ۲ دسته‌ی کلی قیود تنش و قیود ابعادی مقطع تقسیم‌بندی و به این شرح ارزیابی می‌شوند.

### ۱.۲.۲. قیود تنش

در فرایند طراحی بهینه‌ی قاب‌های شیب‌دار غیرمنشوری، تمامی اعضا با نیروی داخلی برشی، محوری و خمشی هستند و به صورت تیر - ستون مدل می‌شوند. بنابراین در فرایند طراحی بهینه، همواره باید تنش ناشی از نیروی برشی و مقدار اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی در محدوده‌ی مجاز آیین‌نامه باشند. بدین ترتیب مقادیر مجاز آیین‌نامه‌ی برای نیروهای موجود به این شرح محاسبه و تعیین می‌شوند:

الف) تنش مجاز فشاری: برای محاسبه‌ی تنش مجاز فشاری بر طبق آیین‌نامه‌ی AISC، باید تغییرات ارتفاع مقطع به صورت متعارف و منطقی باشد. تغییرات ارتفاع مقطع براساس ضریب  $\gamma$  به شرح رابطه‌ی ۸ تعریف و به عنوان قید طراحی لحاظ می‌شود:

$$\gamma \leq \min(0.268(L/d_o), 6) \quad (8)$$

که در آن،  $\gamma$  ضریب تغییرات مقطع است و به شرح رابطه‌ی ۹ محاسبه می‌شود:

$$\gamma = (d_1 - d_o) / d_o \quad (9)$$

که در آن،  $d_o$  ارتفاع مقطع در انتهای کوچک‌تر و  $d_1$  ارتفاع مقطع در انتهای بزرگ‌تر است. در این صورت اگر  $\gamma$  در محدوده‌ی مجاز باشد، تنش مجاز فشاری برای اعضای غیرمنشوری براساس روابط ۱۰ و ۱۱ محاسبه می‌شود:

-- در صورتی که  $\lambda \leq C_c$  است:

$$F_{a\gamma} = (F_y / F.S) \left[ 1 - \left( \lambda^2 / 2C_c^2 \right) \right] \quad (10)$$

-- در صورتی که  $\lambda \geq C_c$  است:

$$F_{a\gamma} = (12\pi^2 E) / (23\lambda^2) \quad (11)$$

در رابطه‌ی ۱۰،  $F.S$  و  $C_c$  به ترتیب ضریب اطمینان و لاغری مرزی بین کماتش ارتجاعی و غیرارتجاعی هستند که با استفاده از روابط ۱۲ و ۱۳ محاسبه می‌شوند.

$$F.S = \frac{5}{3} + \frac{3\lambda}{\lambda C_c} - \frac{\lambda^2}{\lambda C_c^2} \quad (12)$$

$$C_c = \sqrt{(2\pi^2 E) / F_y} \quad (13)$$

که در آن‌ها،  $E$  مدول کشسانی فولاد و  $F_y$  تنش جاری شدن فولاد است.  $\lambda$  لاغری بیشینه است که برای عضو فشاری حول محورهای قوی و ضعیف از رابطه‌ی ۱۴ محاسبه می‌شود:

$$\lambda = \max((k_\gamma L) / r_{ox}, (kL) / r_{oy}) \quad (14)$$

که در آن،  $L$  طول واقعی مهارنشده‌ی عضو، و  $r_{ox}$  و  $r_{oy}$  به ترتیب شعاع ژیراسیون حول محور قوی و ضعیف مقطع هستند.  $k$  ضریب طول مؤثر حول محور ضعیف است که با توجه به تغییرات اندک ممان اینرسی حول محور ضعیف، براساس روابط ضریب طول مؤثر برای مقاطع منشوری محاسبه

-- در صورتی که  $f_{a\gamma}/F_{a\gamma} \leq 0.15$  باشد:

$$\frac{f_{a\gamma}}{F_{a\gamma}} + \frac{f_{b\gamma}}{F_{b\gamma}} \leq 1.0 \quad (30)$$

که در آن‌ها،  $f_{a\gamma}$  تنش فشاری در انتهای کوچک‌تر عضو یا تنش فشاری در انتهای کوچک‌تر قطعه‌ی مهار نشده متناسب با شرایط عضو است  $f_{b\gamma}$  نیز تنش خمشی در انتهای بزرگ‌تر عضو یا در انتهای بزرگ‌تر قطعه‌ی مهار نشده متناسب با شرایط عضو است. همچنین  $C_m$  ضریب میزان هم‌مکانی لنگر بیشینه است،<sup>[۲۵]</sup> و  $f_{e\gamma}$  تنش مجاز اوپلاست که با احتساب ضریب اطمینان و بر مبنای طول مؤثر عضو غیرممنشوری در صفحه‌ی خمش، با استفاده از رابطه‌ی ۳۱ تعیین می‌شود

$$F_{e\gamma} = \frac{12\pi^2 E}{23(k_\gamma L_b/r_{b\gamma})^2} \quad (31)$$

که در آن،  $r_{b\gamma}$  شعاع ژیراسیون در انتهای کوچک‌تر حول محور خمش است.

### ۲.۲.۲. قیود ابعادی اعضا

در روند طراحی بهینه‌ی قاب‌های شیب‌دار غیرممنشوری، طرح‌های مختلفی با ابعاد گوناگون برای اعضا تولید می‌شود که باید برای تأمین پایداری موضعی مقطع، کنترل‌های لازم صورت پذیرد. بدین منظور بر طبق آیین‌نامه، محدودیت‌هایی برای نسبت‌های عرض به ضخامت بال و ارتفاع جان به ضخامت جان برای کنترل کمانش موضعی بال فشاری و کمانش خمشی جان به شرح روابط ۳۲ و ۳۳ در نظر گرفته می‌شود

$$(b_f/2t_f) \leq (795/\sqrt{F_y}) \quad (32)$$

$$h_{max}/t_w \leq 6370/\sqrt{F_y} \quad (33)$$

که در رابطه‌ی ۳۳،  $h_{max}$  ارتفاع جان در انتهای بزرگ‌تر مقطع است. از سوی دیگر، در روند طراحی بهینه، کنترل کمانش قطری جان نیز به شرح روابط ۳۴ و ۳۵ انجام می‌شود

-- در صورتی که فاصله‌ی قطعات سخت‌کننده‌ی جان، بیشتر از  $1.5m$  باشد

$$h/t_w \leq 985 * 10^3 / \sqrt{F_y (F_y + 1160)} \quad (34)$$

-- در صورتی که فاصله‌ی قطعات سخت‌کننده‌ی جان، کمتر از  $1.5m$  باشد

$$h/t_w \leq 16770 / \sqrt{F_y} \quad (35)$$

### ۳.۲. الگوریتم جست‌وجوی چندمنظوره

در نوشتار حاضر، برای فرایند طراحی بهینه‌ی قاب‌های شیب‌دار غیرممنشوری براساس ایده‌ی پیشنهادی پیش‌تبدیلی از روش جست‌وجوی چندمنظوره استفاده شده است که روشی کارآمد برای افزایش سرعت عملیات بهینه‌یابی و کاهش تأثیر پارامترها و روابط حاکم بر الگوریتم‌های فراابتکاری همچون GA در فضا‌های طراحی بزرگ است. الگوریتم جست‌وجوی چندمنظوره نخستین بار در سال ۲۰۰۹ برای ترکیب روش‌های مختلف GA ارائه شد.<sup>[۲۶]</sup> سپس در سال ۲۰۱۱ به‌صورت اصلاح شده

مقطعی برابر انتهای کوچک‌تر عضو غیرممنشوری، مدل‌سازی و ارزیابی می‌شوند. روش تنش مجازی خمشی منجر به بروز ضریب اصلاحی  $h_s$  در طول عضو برای مقاومت نسبت به پیچش و ضریب اصلاحی  $h_w$  برای مقاومت نسبت به خمش جانبی تابیدگی می‌شود. بدین‌منظور  $h_s$  و  $h_w$  با استفاده از روابط ۲۱ و ۲۲ تعیین می‌شوند:

$$h_s = 1 + 0.1 * 23\gamma \sqrt{(L_b d_o) / A_f} \quad (21)$$

$$h_w = 1 + 0.1 * 0.385\gamma \sqrt{L_b / r_{T^0}} \quad (22)$$

که در آن‌ها،  $L_b$  فاصله‌ی بین مقاطعی از بال فشاری است که در مقابل پیچش یا حرکت جانبی مهار شده باشد.  $A_f$  مساحت بال فشاری و  $r_{T^0}$  شعاع ژیراسیون حول محور ضعیف مقطعی است که شامل بال فشاری و یک سوم منطقه‌ی فشاری جان است. براساس ضرایب روابط ۲۱ و ۲۲، آیین‌نامه‌ی AISC تنش خمشی مجاز برای اعضاء غیرممنشوری را به شرح روابط ۲۳ و ۲۴ ارائه داده است:<sup>[۲۵،۱۸]</sup>

$$F_{b\gamma} = B \sqrt{F_{s\gamma}^2 + F_{w\gamma}^2} \quad F_{b\gamma} \leq \frac{F_y}{3} \quad (23)$$

$$F_{b\gamma} = \frac{2}{3} \left[ 1 - \frac{F_y}{6B \sqrt{F_{s\gamma}^2 + F_{w\gamma}^2}} \right] F_y \leq 0.6F_y \quad (24)$$

$$F_{b\gamma} > \frac{F_y}{3} \quad (24)$$

که در آن‌ها،  $F_{s\gamma}$  و  $F_{w\gamma}$  به شرح روابط ۲۵ و ۲۶ تعیین می‌شوند:

$$F_{s\gamma} = \left[ \left( 84 * 10^4 / (h_s L_b d_o) / A_f \right) \right] \quad (25)$$

$$F_{w\gamma} = \left[ \left( 12 * 10^6 / (h_w L_b / r_{T^0}) \right) \right] \quad (26)$$

در روابط ۲۴،  $B$  ضریبی است که اثر تغییرات لنگر را در طول عضو غیرممنشوری لحاظ می‌کند. در تیر-ستون‌ها، مقدار  $B$  برابر ۱ و در خمش خالص، چنانچه مقدار تنش خمشی در انتهای کوچک‌تر عضو برابر ۰ باشد، به شرح رابطه‌ی ۲۷ محاسبه می‌شود:

$$B = 1.75 / (1 + 0.125\sqrt{\gamma}) \quad (27)$$

ج) تنش مجاز برشی: نیروی برشی در فرایند طراحی اعضاء غیرممنشوری تأثیر چندانی ندارد و عموماً کنترل‌کننده‌ی طرح نیست. بیشینه‌ی مقدار تنش مجاز برشی بر روی سطح مقطع مؤثر برای تحمل برش بر طبق آیین‌نامه برابر  $0.4F_y$  است و براساس نسبت ارتفاع به ضخامت جان، فاصله و شکل سخت‌کننده‌های جان کاهش می‌یابد. در نوشتار حاضر، با حفظ محدودیت نسبت ارتفاع به ضخامت جان، مقدار تنش مجاز برشی برابر  $0.4F_y$  در نظر گرفته شده است.<sup>[۱۸]</sup>

د) اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی: عموماً اعضاء قاب‌های شیب‌دار غیرممنشوری به‌طور هم‌زمان تحت تأثیر نیروی محوری و لنگر خمشی قرار دارند. روابط آیین‌نامه در این حالت به شرح روابط ۲۸ الی ۳۰ هستند:

-- در صورتی که  $f_{a\gamma}/F_{a\gamma} > 0.15$  باشد:

$$\frac{f_{a\gamma}}{F_{a\gamma}} + \frac{c_m f_{b\gamma}}{(1 - (f_{a\gamma}/F_{e\gamma})) F_{b\gamma}} \leq 1.0 \quad (28)$$

$$\frac{f_{a\gamma}}{0.6F_y} + \frac{f_{b\gamma}}{F_{b\gamma}} \leq 1.0 \quad (29)$$

دارد.<sup>[۱۵]</sup> در نوشتار حاضر، از شیوه‌ی پیش‌تندگی به‌وسیله‌ی کابل استفاده شده است که مزیتش در آن است که می‌توان نیروی موجود در کابل‌ها را که به واسطه‌ی تجهیزات پیش‌تندگی ایجاد می‌شود، به صورت بار خارجی در معادلات تعادل سازه منظور کرد. بدین ترتیب مقدار نیروی پیش‌تندگی در فرآیند مدل‌سازی براساس نیروی خارجی که در محل‌های مشخص به سازه وارد می‌شود، بیان خواهد شد. در این راستا، دو نقطه از سازه (بالا و پایین ستون‌ها) به عنوان محل‌های اعمال نیرو در نظر گرفته شده است. بنابراین همان‌طور که در بخش‌های پیشین بیان شد، ۳ حالت ممکن برای اعمال نیروی پیش‌تندگی به‌وجود می‌آید. لازم به ذکر است که مقدار نیروی پیش‌تندگی در روند بهینه‌یابی به‌عنوان متغیر طراحی است که مقدار آن قابل تغییر است. بنابراین در فرآیند بهینه‌یابی، مناسب‌ترین مقدار نیروی پیش‌تندگی برای کسب کمترین وزن در قاب‌های شیب‌دار غیرممنشوری مشخص می‌شود.

#### ۴. بررسی کارایی ایده‌ی پیشنهادی

در بخش کنونی، چند نمونه‌ی سازه‌ی در زمینه‌ی طراحی بهینه‌ی قاب‌های شیب‌دار غیرممنشوری براساس الگوریتم جست‌وجوی چندمنظوره و نیز فرمول‌بندی موجود ارائه و بررسی شده است. در این راستا، تأثیر ایده‌ی پیشنهادی پیش‌تندگی اعضاء سازه نیز در ۳ حالت مذکور ارزیابی شده است. این تذکر لازم است که قبل از استفاده از فرمول‌بندی موجود و نیز انجام فرآیند بهینه‌یابی، عملیات تحلیل سازه و نیز روند طراحی سازه در مثال‌های جداگانه بررسی شده است. سپس نتایج حاصل از تحلیل و طراحی سازه با مراجع مختلف و معتبر مقایسه و ارزیابی شد که حاکی از صحت عملیات تحلیل و طراحی سازه است.<sup>[۲۵]</sup> از سوی دیگر، در تمامی مثال‌ها تعداد اعضاء جمعیت اولیه برابر ۱۲۰ عضو لحاظ شده است، که با توجه به روش جست‌وجوی چندمنظوره، سهم هر جزیره برابر ۳۰ عضو است. لازم به ذکر است که تابع جریمه در فرآیند بهینه‌یابی برای تمام جزیره‌ها در همه‌ی مثال‌ها به‌صورت رابطه‌ی ۳۶ در نظر گرفته شده است.<sup>[۲۸]</sup>

$$f_i^{penalty} = W_i K C_i^{constraint} \quad (36)$$

که در آن،  $f_i^{penalty}$  و  $W_i$  به ترتیب مقدار جریمه و وزن اُمین سازه در جمعیت حاضر هستند.  $K$  ثابت جریمه است که برای جزیره‌های ۱ الی ۵ در روش جست‌وجوی چندمنظوره به ترتیب برابر ۱، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ در نظر گرفته شده است.  $C_i^{constraint}$  مقدار نقض قید اُمین سازه در جمعیت حاضر است که به‌شرح رابطه‌ی ۳۷ تعیین می‌شود.

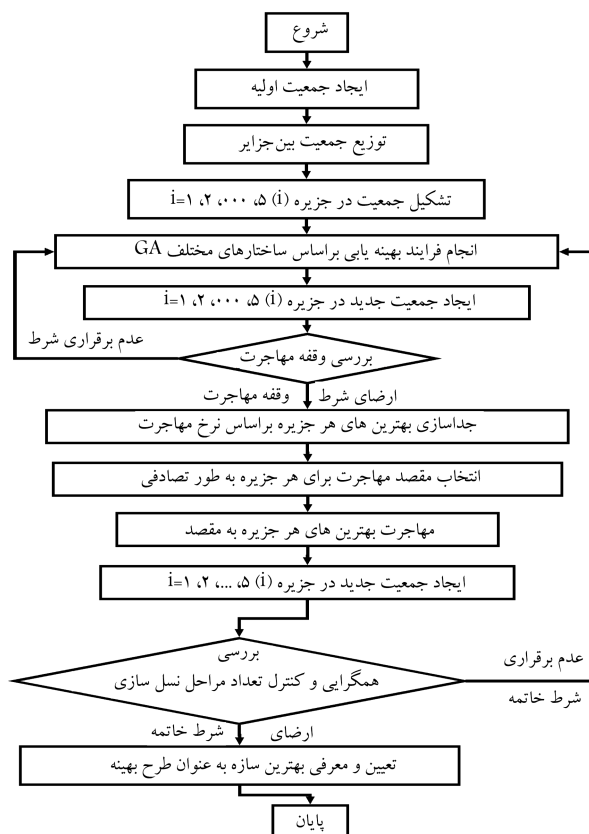
$$C_i^{constraint} = \sum_{q=1}^{nlc} \sum_{q=1}^Q \max [0, G_q] \quad (37)$$

که در آن،  $nlc$  تعداد حالت‌های بارگذاری و  $Q$  تعداد کل قیدهای حاکم بر مسئله است.  $G_q$  نیز میزان نقض سازه در ارتباط با هر یک از قیدهاست. در ادامه، با در نظر گرفتن مقدار تابع جریمه، تابع هدف اصلاح شده و تابع شایستگی به‌صورت روابط ۳۸ و ۳۹ در نظر گرفته می‌شوند.<sup>[۲۸]</sup>

$$\phi_i = W_i + f_i^{Penalty} \quad (38)$$

$$F_i^{Fitness} = [\phi^{max} + \phi^{min}] - \phi_i \quad (39)$$

که در آن‌ها،  $F_i^{Fitness}$  و  $\phi_i$  به ترتیب مقادیر شایستگی و تابع هدف اصلاح شده برای اُمین سازه در جمعیت جاری و  $\phi^{max}$  و  $\phi^{min}$  به ترتیب بیشینه و کمینه‌ی مقدار تابع هدف اصلاح شده در جمعیت جاری هستند.



شکل ۲. فلوجارت حالت پیشنهادی روش جست‌وجوی چندمنظوره.

در بهینه‌یابی سطح مقطع و توپولوژی سازه‌های خرپایی استفاده شد.<sup>[۲۰]</sup> روند تکاملی الگوریتم جست‌وجوی چندمنظوره ادامه یافت و در سال ۲۰۱۳، با ترکیب الگوریتم‌های مختلف فراابتکاری با عنوان روش جست‌وجوی چند فراابتکاری در بهینه‌یابی پیکربندی سازه‌های خرپایی استفاده شد.<sup>[۲۷]</sup>

ویژگی منحصر به فرد روش جست‌وجوی چندمنظوره، کاهش تأثیر پارامترها و روابط حاکم در GA و نیز افزایش سرعت عملیات بهینه‌یابی است. در روش جست‌وجوی چندمنظوره، جمعیت اولیه‌ی GA به بخش‌های مختلف (جزایر متنوع) تقسیم می‌شود. هر جزیره، روش بهینه‌یابی مبتنی بر GA با ساختاری متفاوت دارد. بنابراین، پارامترهای مختلف و نیز مراحل الگوریتم GA نظیر انتخاب، ادغام و ... در هر جزیره متفاوت است.<sup>[۲۰]</sup> این طریقه‌ی عمل سبب می‌شود تا فضای طراحی با روش‌ها و ساختارهای مختلف GA بررسی شود و بدین ترتیب جواب‌ها تنوع خوبی داشته باشند. در پایان چند تکرار معین و مشخص، با استفاده از وقفه‌ی مهاجرت و نرخ مهاجرت، بهترین‌ها بین جزایر جابه‌جا می‌شوند. با تکرار روند ذکر شده، نهایتاً الگوریتم به جواب‌های مناسب دست می‌یابد. در مسائلی که به دلیل زیاد بودن تعداد متغیرهای طراحی و بزرگ بودن فضای کاوش، تأثیر پارامترهای GA نقش اساسی ایفا می‌کند، روش جست‌وجوی چندمنظوره به‌طور مؤثر فضای طراحی را جست‌وجو می‌کند، و در نهایت جواب‌های مناسب را ارائه می‌دهد. شکل ۲، فلوجارت حالت پیشنهادی الگوریتم جست‌وجوی چندمنظوره را نشان می‌دهد.

#### ۳. پیش‌تندگی

روش‌های مختلفی برای اعمال نیروی پیش‌تندگی در اعضاء سازه‌های فولادی وجود

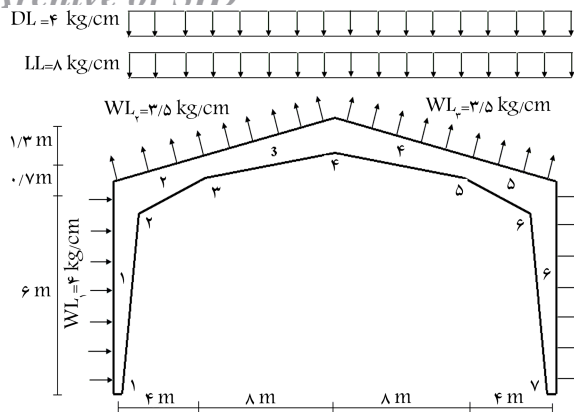
جدول ۱. نتایج طرح بهینه در حالت‌های مختلف اعمال نیروی پیش‌تنیدگی برای سازه اول.

شرح متغیر	حد		حالت		
	پایین	بالا	۱	۲	۳
ارتفاع جان در گره ۱ از عضو ۱	۱۰	۱۰۰	۳۸	۳۲	۴۶
ارتفاع جان در گره ۲ از عضو ۱	۱۰	۱۰۰	۶۷	۶۵	۵۴
$b$ در عضو ۱	۱۰	۱۰۰	۲۱	۲۳	۲۴
$t_w$ در عضو ۱	۰/۴	۳/۵	۰/۴	۰/۴	۰/۴
$t_f$ در عضو ۱	۰/۴	۳/۵	۱	۱	۱/۲
ارتفاع جان در گره ۲ از عضو ۲	۱۰	۱۰۰	۵۳	۷۸	۸۳
ارتفاع جان در گره ۳ از عضو ۲	۱۰	۱۰۰	۲۶	۳۲	۱۴
$b$ در عضو ۲	۱۰	۱۰۰	۱۷	۱۰	۱۵
$t_w$ در عضو ۲	۰/۴	۳/۵	۰/۴	۰/۶	۰/۶
$t_f$ در عضو ۲	۰/۴	۳/۵	۱/۵	۲/۵	۱/۲
ارتفاع جان در گره ۳ از عضو ۳	۱۰	۱۰۰	۴۴	۵۵	۲۱
ارتفاع جان در گره ۴ از عضو ۳	۱۰	۱۰۰	۸۳	۶۷	۵۳
$b$ در عضو ۳	۱۰	۱۰۰	۱۱	۱۲	۱۲
$t_w$ در عضو ۳	۰/۴	۳/۵	۰/۶	۰/۴	۰/۴
$t_f$ در عضو ۳	۰/۴	۳/۵	۱/۲	۱/۲	۱/۲
ارتفاع جان در گره ۴ از عضو ۴	۱۰	۱۰۰	۶۷	۶۶	۵۳
ارتفاع جان در گره ۵ از عضو ۴	۱۰	۱۰۰	۵۸	۱۶	۱۵
$b$ در عضو ۴	۱۰	۱۰۰	۱۵	۱۲	۱۲
$t_w$ در عضو ۴	۰/۴	۳/۵	۰/۴	۰/۴	۰/۴
$t_f$ در عضو ۴	۰/۴	۳/۵	۱	۱/۲	۱/۲
ارتفاع جان در گره ۵ از عضو ۵	۱۰	۱۰۰	۱۰	۱۵	۲۷
ارتفاع جان در گره ۶ از عضو ۵	۱۰	۱۰۰	۶۶	۶۹	۷۸
$b$ در عضو ۵	۱۰	۱۰۰	۱۵	۲۱	۲۱
$t_w$ در عضو ۵	۰/۴	۳/۵	۱/۲	۰/۸	۰/۶
$t_f$ در عضو ۵	۰/۴	۳/۵	۰/۸	۱	۱
ارتفاع جان در گره ۶ از عضو ۶	۱۰	۱۰۰	۵۲	۶۶	۷۶
ارتفاع جان در گره ۷ از عضو ۶	۱۰	۱۰۰	۳۱	۱۵	۳۲
$b$ در عضو ۶	۱۰	۱۰۰	۲۴	۱۸	۲۱
$t_w$ در عضو ۶	۰/۴	۳/۵	۰/۴	۰/۴	۰/۶
$t_f$ در عضو ۶	۰/۴	۳/۵	۱	۱/۵	۱
میزان نیروی پیش‌تنیدگی در پایین ستون‌ها ( $kg$ )	۵۰۰	۲۰۰۰	۷۵۰	-	۸۰۰
میزان نیروی پیش‌تنیدگی در بالای ستون‌ها ( $kg$ )	۵۰۰	۲۰۰۰	-	۹۵۰	۱۳۵۰
حجم فولاد مصرفی ( $cm^3$ )			۲۰۴۲۳۹/۴۹	۲۰۰۱۹۳/۶۳	۱۹۵۰۸۷/۳۸۸
وزن کل سازه ( $kg$ )			۱۶۰۳/۲۸	۱۵۷۱/۵۲	۱۵۳۱/۴۳۶

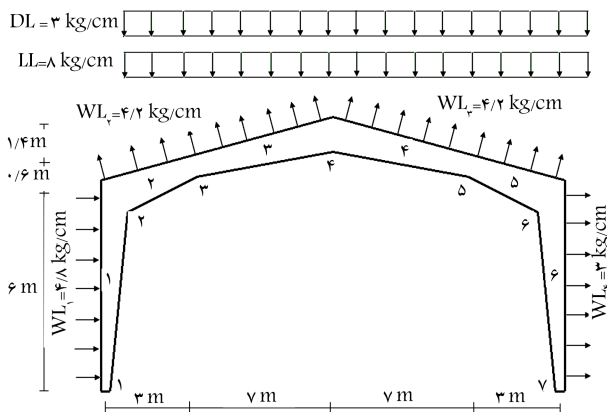
#### ۱.۴. سازه اول

دیگر، یک مهار طولی در فاصله  $400\text{ cm}$  از پایه ستون فرض شده است. لذا طول عضو مهارنشده حول محور ضعیف برابر  $400\text{ cm}$  فرض می‌شود. فاصله سینه‌بند‌های تیر نیز برابر  $200\text{ cm}$  انتخاب شده است. محدوده‌ی مجاز برای ابعاد تیر و ستون براساس ورق‌های موجود در بازار به شرح جدول ۱ دسته‌بندی شده‌اند. نتایج طرح بهینه براساس ۳ حالت پیشنهادی به شرح پیش‌تنیدگی با فرض عدم تقارن ابعادی سازه به شرح جدول ۱ ارائه شده است.

در بخش کنونی، به فرایند طراحی بهینه‌ی قابی با مشخصات هندسی و بارگذاری مطابق شکل ۳ توجه شده است. ترکیب‌های بارگذاری براساس آیین‌نامه‌ی بارگذاری (BHRC) [۱۹] در نظر گرفته شده است. در مثال کنونی  $\rho$  و  $E$  برای فولاد به ترتیب برابر  $2785\text{ kg/cm}^2$  و  $21000\text{ kg/cm}^2$  در نظر گرفته شده است. از سوی



شکل ۵. هندسه و بارگذاری قاب شیب‌دار غیرمنشوری در سازه‌ی سوم.



شکل ۳. هندسه و بارگذاری قاب شیب‌دار غیرمنشوری در سازه‌ی اول.

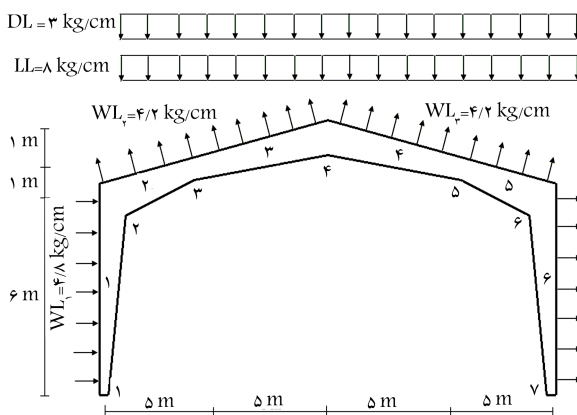
### ۳.۴. سازه‌ی سوم

در بخش حاضر، به بررسی قاب شیب‌داری مطابق شکل ۵ پرداخته شده است. مثال کنونی در مرجع دیگری ارائه نشده و برای اولین بار در نوشتار حاضر بررسی شده است. بدین منظور ضمن بررسی حالت‌های پیشنهادی برای اعمال نیروی پیش‌تندگی، به فرایند طراحی بهینه بدون اعمال نیروی پیش‌تندگی (حالت چهارم) نیز توجه شده است. بدین ترتیب مقایسه‌ی بین ایده‌ی پیشنهادی و حالت بدون اعمال نیروی پیش‌تندگی انجام شده است. لازم به ذکر است که جزئیات طراحی و ترکیب‌های بارگذاری مطابق مثال‌های پیشین براساس آیین‌نامه فرض شده است. تعداد تکرارهای فرایند بهینه‌یابی برای مثال حاضر برابر ۷۵۰۰ تکرار در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل برای ۴ حالت موجود به همراه محدوده‌ی مجاز متغیرهای طراحی در جدول ۳ دسته‌بندی شده‌اند. از سوی دیگر، در هر ۳ حالت از ایده‌ی پیشنهادی، طراحی سبک‌تر نسبت به حالت بدون اعمال نیروی پیش‌تندگی به دست آمده است.

### ۵. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، ضمن ارائه‌ی شیوه‌ی بهینه‌یابی قاب‌های شیب‌دار غیرمنشوری، ایده‌ی پیش‌تندگی اعضای سازه جهت کسب طراحی بهینه‌تر پیشنهاد شده است. در این راستا، فرایند بهینه‌یابی براساس الگوریتم نوین و کارآمد جست‌وجوی چندمنظوره صورت پذیرفت و ایده‌ی پیش‌تندگی اعضای سازه نیز در سه حالت بررسی شد. در حالت اول، نیروی پیش‌تندگی به پایین ستون‌ها وارد می‌شود. در حالت دوم، نیروی پیش‌تندگی در بالای ستون‌ها منظور شده است. حالت سوم، ترکیبی از حالت اول و دوم است و هم‌زمان نیروی پیش‌تندگی در پایین و بالای ستون‌ها وارد می‌شود.

برای ارزیابی ایده‌ی پیشنهادی، به سازه‌های مختلف با هندسه‌ی متفاوت توجه شده است. در تمامی سازه‌ها، حالت سوم برای ایده‌ی پیشنهادی در پیش‌تندگی اعضای سازه به طراحی مناسب‌تر از لحاظ وزن دست یافته است. به خصوص در سازه‌ی با دهانه‌ی بزرگ‌تر نسبت به سایر سازه‌های موجود، اختلاف طرح بهینه براساس حالت سوم پیشنهادی، خودنمایی بیشتری می‌کند. این مهم بیانگر آن است که برای قاب‌های شیب‌دار با دهانه‌ی بزرگ، استفاده از حالت سوم پیشنهادی، تأثیر بیشتری در کاهش حجم فولاد مصرفی دارد. بنابراین با توجه به امکانات و تجهیزات پیش‌تندگی و هزینه‌های مرتبط در قیاس با فولاد مصرفی، استفاده از



شکل ۴. هندسه و بارگذاری قاب شیب‌دار غیرمنشوری در سازه‌ی دوم.

در نوشتاری در سال ۲۰۰۱<sup>[۵]</sup>، برای مثال کنونی، مقدار  $21470.3 \text{ cm}^3$  به‌عنوان حجم فولاد مصرفی براساس فرضیات مشابه و عدم تقارن ابعادی سازه با استفاده از الگوریتم SQP ارائه شده است. بر این اساس همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، اعمال نیروی پیش‌تندگی سبب افزایش کارایی فرایند بهینه‌یابی و کسب طراحی مناسب‌تر از لحاظ وزن و حجم مصالح شده است. از سوی دیگر، در بین حالت‌های پیشنهادی برای اعمال نیرو، در حالت ۳ طراحی بهینه‌تر از لحاظ وزن ارائه شده است. این لازم به ذکر است که تعداد تکرارهای فرایند بهینه‌یابی برای مثال حاضر برابر ۵۰۰۰ تکرار در نظر گرفته شده است.

### ۲.۴. سازه‌ی دوم

در بخش حاضر به مدل‌سازی و بهینه‌یابی قاب شیب‌داری مطابق شکل ۴ پرداخته و مقادیر بارهای اعمالی در آن ارائه شده است. مقادیر پارامترهای بهینه‌یابی، فرضیات طراحی و فاصله‌ی مهاربندی در مثال کنونی، مشابه مثال اول است. در جدول ۲، نتایج حاصل برای طرح بهینه‌ی اعضای سازه در حالت‌های مختلف پیش‌تندگی، به همراه محدوده‌ی مجاز متغیرهای طراحی ابعادی ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در مثال دوم، نیز در حالت سوم، بهترین وزن برای سازه‌ی موردنظر نتیجه‌گیری شده است. لازم به ذکر است که مرجع اخیر<sup>[۵]</sup> حجم فولاد مصرفی را با فرضیات طراحی مشابه برابر  $242524 \text{ cm}^3$  ارائه داده است.



جدول ۲. نتایج طرح بهینه در حالت‌های مختلف اعمال نیروی پیش‌تنیدگی برای سازه‌ی دوم.

شرح متغیر	حد		حالت		
	پایین	بالا	۱	۲	۳
ارتفاع جان در گره ۱ از عضو ۱	۱۰	۱۰۰	۳۲	۵۳	۴۰
ارتفاع جان در گره ۲ از عضو ۱	۱۰	۱۰۰	۸۸	۶۴	۵۳
$b$ در عضو ۱	۱۰	۱۰۰	۱۸	۲۱	۲۲
$t_w$ در عضو ۱	۰٫۴	۳٫۵	۰٫۶	۰٫۴	۰٫۴
$t_f$ در عضو ۱	۰٫۴	۳٫۵	۱٫۲	۱٫۲	۱٫۵
ارتفاع جان در گره ۲ از عضو ۲	۱۰	۱۰۰	۲۳	۵۳	۷۸
ارتفاع جان در گره ۳ از عضو ۲	۱۰	۱۰۰	۹۵	۲۴	۱۲
$b$ در عضو ۲	۱۰	۱۰۰	۱۶	۲۲	۲۱
$t_w$ در عضو ۲	۰٫۴	۳٫۵	۰٫۶	۰٫۴	۰٫۶
$t_f$ در عضو ۲	۰٫۴	۳٫۵	۱	۱٫۲	۱٫۲
ارتفاع جان در گره ۳ از عضو ۳	۱۰	۱۰۰	۴۰	۶۷	۵۴
ارتفاع جان در گره ۴ از عضو ۳	۱۰	۱۰۰	۶۵	۵۴	۶۷
$b$ در عضو ۳	۱۰	۱۰۰	۱۰	۱۴	۱۲
$t_w$ در عضو ۳	۰٫۴	۳٫۵	۰٫۴	۰٫۴	۰٫۴
$t_f$ در عضو ۳	۰٫۴	۳٫۵	۲٫۵	۱٫۲	۰٫۸
ارتفاع جان در گره ۴ از عضو ۴	۱۰	۱۰۰	۹۵	۹۶	۵۳
ارتفاع جان در گره ۵ از عضو ۴	۱۰	۱۰۰	۳۹	۵۳	۲۹
$b$ در عضو ۴	۱۰	۱۰۰	۱۴	۱۰	۱۲
$t_w$ در عضو ۴	۰٫۴	۳٫۵	۰٫۶	۰٫۴	۰٫۴
$t_f$ در عضو ۴	۰٫۴	۳٫۵	۰٫۸	۲	۱٫۲
ارتفاع جان در گره ۵ از عضو ۵	۱۰	۱۰۰	۱۸	۴۷	۲۲
ارتفاع جان در گره ۶ از عضو ۵	۱۰	۱۰۰	۹۷	۳۱	۹۲
$b$ در عضو ۵	۱۰	۱۰۰	۱۸	۳۲	۱۵
$t_w$ در عضو ۵	۰٫۴	۳٫۵	۰٫۶	۰٫۴	۰٫۶
$t_f$ در عضو ۵	۰٫۴	۳٫۵	۱	۱٫۲	۱٫۲
ارتفاع جان در گره ۶ از عضو ۶	۱۰	۱۰۰	۸۲	۸۹	۵۴
ارتفاع جان در گره ۷ از عضو ۶	۱۰	۱۰۰	۱۲	۱۵	۳۹
$b$ در عضو ۶	۱۰	۱۰۰	۲۲	۱۵	۲۲
$t_w$ در عضو ۶	۰٫۴	۳٫۵	۰٫۶	۰٫۶	۰٫۴
$t_f$ در عضو ۶	۰٫۴	۳٫۵	۱	۱٫۲	۱٫۵
میزان نیروی پیش‌تنیدگی در پایین ستون‌ها ( $kg$ )	۵۰۰	۲۰۰۰	۶۵۰	-	۷۵۰
میزان نیروی پیش‌تنیدگی در بالای ستون‌ها ( $kg$ )	۵۰۰	۲۰۰۰	-	۱۴۵۰	۱۳۵۰
حجم فولاد مصرفی ( $cm^3$ )			۲۲۹۳۲۹٫۳	۲۲۸۵۱۲٫۳۵۷	۲۲۰۷۳۵٫۰۳۲
وزن کل سازه ( $kg$ )			۱۸۰۰٫۲۳۵	۱۷۹۳٫۸۲۲	۱۷۳۲٫۷۷

شرح متغیر	حد		حالت			
	پایین	بالا	۱	۲	۳	۴
ارتفاع جان در گره ۱ از عضو ۱	۱۰	۱۰۰	۳۶	۳۸	۲۳	۵۵
ارتفاع جان در گره ۲ از عضو ۱	۱۰	۱۰۰	۹۵	۱۰۰	۵۳	۹۷
$b$ در عضو ۱	۱۰	۱۰۰	۲۱	۱۹	۲۱	۲۴
$t_w$ در عضو ۱	۰٫۴	۳٫۵	۰٫۸	۰٫۶	۰٫۴	۰٫۶
$t_f$ در عضو ۱	۰٫۴	۳٫۵	۱٫۵	۲	۲٫۵	۱٫۵
ارتفاع جان در گره ۲ از عضو ۲	۱۰	۱۰۰	۲۱	۸۷	۸۲	۵۶
ارتفاع جان در گره ۳ از عضو ۲	۱۰	۱۰۰	۹۵	۵۵	۱۲	۱۰۰
$b$ در عضو ۲	۱۰	۱۰۰	۲۷	۳۲	۲۱	۲۷
$t_w$ در عضو ۲	۰٫۴	۳٫۵	۰٫۶	۰٫۶	۰٫۸	۰٫۶
$t_f$ در عضو ۲	۰٫۴	۳٫۵	۱٫۲	۱٫۵	۱٫۲	۱٫۲
ارتفاع جان در گره ۳ از عضو ۳	۱۰	۱۰۰	۱۸	۱۴	۱۶	۲۲
ارتفاع جان در گره ۴ از عضو ۳	۱۰	۱۰۰	۹۵	۹۷	۹۸	۹۷
$b$ در عضو ۳	۱۰	۱۰۰	۱۵	۱۵	۱۳	۱۴
$t_w$ در عضو ۳	۰٫۴	۳٫۵	۰٫۶	۰٫۶	۰٫۶	۰٫۶
$t_f$ در عضو ۳	۰٫۴	۳٫۵	۱٫۲	۱٫۲	۱٫۲	۱
ارتفاع جان در گره ۴ از عضو ۴	۱۰	۱۰۰	۸۹	۹۷	۷۸	۱۰۰
ارتفاع جان در گره ۵ از عضو ۴	۱۰	۱۰۰	۲۱	۲۱	۵۵	۳۲
$b$ در عضو ۴	۱۰	۱۰۰	۱۵	۱۶	۱۵	۱۵
$t_w$ در عضو ۴	۰٫۴	۳٫۵	۰٫۶	۰٫۶	۰٫۶	۰٫۶
$t_f$ در عضو ۴	۰٫۴	۳٫۵	۱٫۲	۰٫۸	۱٫۲	۰٫۸
ارتفاع جان در گره ۵ از عضو ۵	۱۰	۱۰۰	۱۱	۵۵	۹۱	۴۴
ارتفاع جان در گره ۶ از عضو ۵	۱۰	۱۰۰	۷۵	۹۷	۳۱	۹۷
$b$ در عضو ۵	۱۰	۱۰۰	۳۲	۲۱	۲۱	۱۵
$t_w$ در عضو ۵	۰٫۴	۳٫۵	۱٫۲	۰٫۸	۰٫۶	۰٫۶
$t_f$ در عضو ۵	۰٫۴	۳٫۵	۱٫۲	۱٫۵	۱٫۲	۲٫۵
ارتفاع جان در گره ۶ از عضو ۶	۱۰	۱۰۰	۸۴	۹۴	۹۵	۹۵
ارتفاع جان در گره ۷ از عضو ۶	۱۰	۱۰۰	۱۳	۳۲	۱۵	۳۲
$b$ در عضو ۶	۱۰	۱۰۰	۲۷	۲۰	۲۱	۳۲
$t_w$ در عضو ۶	۰٫۴	۳٫۵	۰٫۶	۰٫۶	۰٫۶	۰٫۶
$t_f$ در عضو ۶	۰٫۴	۳٫۵	۱٫۵	۱٫۲	۱٫۲	۱٫۵
میزان نیروی پیش‌تندگی در پایین ستون‌ها ( $k/g$ )	۵۰۰	۲۰۰۰	۱۴۵۰	-	۵۰۰	-
میزان نیروی پیش‌تندگی در بالای ستون‌ها ( $k/g$ )	۵۰۰	۲۰۰۰	-	۱۱۰۰	۱۳۵۰	-
حجم فولاد مصرفی ( $cm^3$ )			۳۴۰۷۰۶۶۲	۳۱۱۵۵۷۳۲	۳۰۷۸۶۸۴۱	۳۴۷۲۱۰۹۵
وزن کل سازه ( $kg$ )			۲۶۷۴۵۴۷	۲۴۴۵۷۲۵	۲۴۱۶۷۶۷	۲۷۲۵۶۰۶

اقتصادی نداشته باشد، حالت دوم پیشنهادی می‌تواند استفاده شود. در هر صورت مطابق مشخصات هندسی و موقعیت پروژه‌ی موردنظر، با مقایسه‌ی هزینه‌های اعمال نیروی پیش‌تندگی با هزینه‌ی تقلیل در فولاد مصرفی، می‌توان گامی مؤثر و مهم در طراحی بهینه‌ی قاب‌های شیب‌دار غیر منشوری برداشت. این مهم توسط تیم مهندسان قابل بررسی است و در صورت نیاز به‌طور کارآمدی قابل استفاده است.

فرایند پیش‌تندگی برای قاب‌های شیب‌دار با دهانه‌ی بزرگ توصیه می‌شود. این تذکر لازم است که در تمامی سازه‌های بررسی‌شده، پس از حالت سوم، حالت دوم از ایده‌ی پیشنهادی، طرحی بهینه‌تر نسبت سایر حالت‌ها دارد. اختلاف حجم فولاد مصرفی برای حالت دوم نسبت به حالت بهینه‌یابی ساده نیز در سازه‌هایی با دهانه‌ی بزرگ بیشتر است. بنابراین در صورتی که برای سازه‌ی، هزینه‌های تجهیزات و امکانات پیش‌تندگی مطابق حالت سوم نسبت به هزینه‌ی فولاد مصرفی توجیه

## پانویس

1. genetic algorithm

## منابع (References)

1. Khan, M.R. "Optimality criterion techniques applied to frames having general cross-sectional relationships", *AIAA J.*, **22**(5), pp. 669-676 (1984).
2. Tan, T.K.H. and Jennings, A. "Optimal plastic design of frames with tapered members In: Civil-Comp 87", *The Proceeding of 3rd International Conferences on Civil and Ctructural Engineering Computing*, London, pp. 265-271 (1987).
3. Hayalioğlu, M.S. and Saka, M.P. "Optimum design of geometrically nonlinear elastic-plastic steel frames with tapered members", *Comput. Struc.*, **44**(4), pp. 915-924 (1992).
4. Saka, M.P. "Optimum design of steel frames with tapered members", *Comput. Struc.*, **63**(4), pp. 797-811 (1997).
5. Hosseinzadeh, R. "Design optimization of gable frames with tapered web members", M.S. Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran (2001).
6. Saka, M.P. "Optimum Design of Pitched Roof Steel Frames with Haunched Rafters by Genetic algorithm", *Comput. Struc.*, **81**(18-19), pp. 1967-1978 (2003).
7. Montero, J., Galletero, P., Neumeister, C. and et al. "Comparative study between rigid frames and truss steel structures", *Agricultural Engineering International: The CIGR Journal of Scientific Research and Development*, **VI**, pp. 531-525 (2004).
8. Hernandez, S., Fontan, A.N., Perezzan, J.C. and et al. "Design optimization of steel portal frames", *Adv. Eng. Softw.*, **36**(9), pp. 626-633 (2005).
9. Chen, Y. and Hu, K. "Optimal design of steel portal frames based on genetic algorithm", *Front. Archit. Civ. Eng.*, **2**(4), pp. 318-322 (2008).
10. Issa, K.H. and Mohammad, F.A. "Effect of mutation schemes on convergence to optimum design of steel frames", *J. Constr. Steel. Res.*, **66**(7), pp. 954-961 (2010).
11. Kravanja, S. and Zula, T. "Cost optimization of industrial steel building structures", *Adv. Eng. Softw.*, **41**(3), pp. 442-450 (2010).
12. Kravanja, S., Turkalj, G., Silih, S. and et al. "Optimal design of single-story steel building structures based on parametric MINLP optimization", *J. Constr. Steel. Res.*, **81**, pp. 86-103 (Feb., 2013).
13. Nooryan, A., Kalatjari, V.R. and Talebpour, M.H. "Optimization of portal gable frame with tapered member by modified multi-search method", *Proceeding of 9th international Congress on Civil Engineering*, Isfahan, Iran (May 8-10, 2012).
14. Mckinstry, R., Lim, J.B.P., Tanyimboh, T.T. and et al. "Optimal design of long-span steel portal frames using fabricated beams", *J. Constr. Steel. Res.*, **104**, pp. 104-114 (Jan., 2015).
15. Troitsky, M.S. "Prestressed steel bridges theory and design", 1<sup>st</sup> Edition, Van Nostrand Company, New York (1990).
16. Bjorklund, A. and Hoglund, J. Strengthening of steel with bonded prestressed laminates", M.S. Thesis, in the International Master's Programme Structural Engineering, Chalmers University Teborg. Sweden (2007).
17. Masullo, A. and Nunziata, V. "Prestressed steel structures: historical and technological analysis", Studio Nunziata, Palma Campania, Napoli, Italy (2006).
18. American Institute of Steel Construction (AISC), "Manual of steel construction-allowable stress design", 9<sup>th</sup> edition, American Institute steel construction, Chicago (1989).
19. Building and housing research center (BHRC), "Iranian national building codes, Loads in buildings", 2<sup>ed</sup> edition, Tosseh Iran Publisher, Iran (2013).
20. Kalatjari, V.R. and Talebpour, M.H. "Sizing and topology optimization of truss structures by modified multi-search method", *J. Civil. Eng. Infrastruc.*, **45**(3), pp. 351-363 (2011).
21. RezaieePajand, M. "Theory of Matrix Structural analysis", 2<sup>ed</sup> Edition, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran (2008).
22. Chapra, S.C. and Canale, R.P. "Numerical Methods in Engineering with Software and Programming Applications", 4<sup>th</sup> Edition. McGraw-Hill, New York (2002).

23. Karabalis, D.L. and Beskos, D.E. "Static, dynamic and stability analysis of structures composed of tapered beams", *Comput. Struc.*, **16**(6), pp. 731-748 (1983).
24. Bazeos, N. and Karabalis, D.L. "Efficient computation of buckling loads for plane steel frames with tapered members", *Eng. Struct.*, **28**(5), pp. 771-775 (2006).
25. Azhari, M. and Mirghaderi, R. "Design of Steel Structure: Volume 2", 7<sup>th</sup> Edition, Arkan, Esfehan, Iran (2008).
26. Kalatjari, V.R. and Talebpour, M.H. "Educated reducing the effect of GA parameters on optimization of topology and cross section for truss structures using multi-search method", *J. Techn. Education*, **4**(1), pp. 57-72 (2009).
27. Kaveh, A., Kalatjari, V.R., Talebpour, M.H. and et al. "Configuration optimization of trusses using a multi heuristic based search method", *International J. Optim. Civil. Eng.*, **3**(1), pp. 151-178 (2013).
28. Rajeev, S. and Krishnamoorthy, C.S. "Discrete optimization of structures using genetic algorithms", *J. Struc. Eng.*, **118**(5), pp. 1233-1250 (1992).