



مکان‌یابی بهینه بادبندها در قابهای فولادی

با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک

امیر مقدم تبریزی^۱

(دریافت ۹۰/۶/۱۷، پذیرش ۹۱/۱۰/۲۴)

چکیده

در طراحی لرزه‌ای سازه‌های فولادی، برای مقاومت در برابر بارهای جانبی، معمولاً از سیستم مهاربندی فولادی استفاده می‌شود. در چنین قابهایی امکان قرارگیری بادبندها در مکانهای متعددی وجود دارد. طراح بایستی قبل از تصمیم‌گیری، تمامی حالت‌های ممکن برای قرارگیری بادبندها در مکانهای مختلف را مورد توجه و بررسی قرار دهد. محل بهینه بادبندها، غالباً به روش آزمون و خطا تعیین می‌شود. این فرآیند عملاً غیرممکن می‌باشد؛ ولوآنکه طراح باتجربه باشد. در این مقاله مکان‌یابی بهینه بادبندها، در قابهای فولادی دو بعدی، با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک مورد بررسی قرار گرفته است. در روش الگوریتم ژنتیک استفاده شده، از یک تابع شایستگی غیرخطی چند جمله‌ای با در نظر گرفتن وزن قاب، جابجایی نسبی طبقات و نسبت تنش‌های اندرکنشی اعضای قاب، استفاده شده است. در این مقاله از دو روش انتخاب چرخ گردان و رقابتی، دو تعداد بیت و دو نوع اتصال تیر به ستون (گیردار و مفصلی) استفاده شده است. قابها در پنج حالت مختلف بهینه‌سازی شده‌اند. برای تحلیل قابها از تحلیل‌های استاتیکی خطی، مودال و طیف پاسخ استفاده شده است. برای تحلیل، طراحی و بهینه‌سازی قابها از برنامه‌های نوشته شده به زبان نرم افزار MATLAB بهره گرفته شده است. در انتها، تاثیر نوع روش انتخاب، تعداد بیتها و نوع اتصال تیر به ستون در روند بهینه‌سازی قابها مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین نشان داده شده است که در مکان‌یابی بهینه بادبندها، استفاده از تعداد بیتهای کمتر، منجر به نتایج بهتری خواهد شد و کارایی دو روش انتخاب چرخ گردان و رقابتی، بسیار نزدیک به هم است.

کلمات کلیدی

بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک، قاب مهاربندی، تحلیل طیف پاسخ

Topology Optimization of Bracing in Steel Frames by Genetic Algorithm

A. Moghadam Tabrizi

ABSTRACT

In seismic design of steel structures, steel bracing is commonly adopted to resist the lateral forces. There are lots of possible for positions of the braces. The designer should consider all possible positions before deciding. The optimum positions of the braces are generally determined by trial and error. This process is practically impossible, even if the designer is experienced. In this paper, topology optimization of steel braces in 2-D steel frames is carried out using Genetic Algorithm. A multiple nonlinear segment fitness function is used considering the weight, stories drift, and combined stresses in the frames. Roulette Wheel and Tournament selections, two number of bits, and two kind of connections (Fully Restrained & Unrestrained) have been used. The frames have been optimized in five various cases. To analyze the frames, linear static, modal, and response spectrum analysis have been used. To analyze, design, and optimize the frame elements, the programs written in MATLAB software have been used. Finally, effect of selection methods, number of bits, and kind of connections is carried out. It is shown that in topology optimization of bracing, using fewer bits causes better results and ability of Roulette Wheel and Tournament selections are the same.

Keywords

Optimization, Genetic Algorithm, Braced Frame, Response Spectrum Analysis

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد عمران-سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، civil_amt@yahoo.com (نویسنده مسئول)



در سازه های فولادی، استفاده از سیستم مهاربندی یکی از روشهای متداول برای مقاوم سازی در برابر بارهای جانبی می باشد. اما در چنین سیستم هایی تعیین محل بهینه بادبندها کار بسیار دشواری می باشد. از طرفی استفاده از روش آزمون و خطا بسیار پرحمت و زمان بر بوده و در بسیاری از مواقع غیرممکن می باشد؛ لذا نیاز به روشی می باشد که فرآیند بهینه سازی را با دقت و سرعت مناسبی انجام دهد. در چند دهه اخیر، پیشرفت سریع کامپیوتر، تمامی رشته های مهندسی را تحت تاثیر قرار داده است. این پیشرفت باعث توسعه استفاده از روشهای جستجوی ابتکاری، نظیر روشهای الگوریتم ژنتیک [۱]، الگوریتم ذوب شبیه سازی شده [۲]، الگوریتم جستجوی تابو [۳] و ... شده است. اما بایستی به محدودیت زمانی در استفاده از روشهای فوق، توجه بسیاری کرد؛ چرا که این روشها بعد از تعداد تکرار نسبتاً زیاد به جواب بهینه خواهند رسید. هر چند که نباید بخاطر دسترسی به همگرایی سریعتر، از دقت روش کاسته شود.

بهینه سازی سازه ها را می توان به چهار دسته اصلی، بهینه سازی اندازه اعضای سازه، بهینه سازی شکل سازه، بهینه سازی مصالح و بهینه سازی مکان یابی اعضای سازه تقسیم کرد. در بهینه سازی اندازه اعضای سازه، اندازه اعضای سازه، نظیر سطح مقطع و یا ممان اینرسی اعضای سازه بعنوان متغیر در نظر گرفته می شوند [۴، ۵، ۶، ۷]. در بهینه سازی شکل سازه، مشخصات گره ها و یا طول اعضا بعنوان متغیرهای مسئله می باشند. در بهینه سازی مصالح، مشخصات مصالح، همان متغیرهای مسئله می باشند. در بهینه سازی مکان یابی اعضای سازه، مکان اعضای سازه، نظیر محل بادبندها یا دیوارهای برشی و یا وجود یا عدم وجود بعضی از اعضا، بعنوان متغیرهای فرآیند بهینه سازی می باشند [۸، ۹، ۱۴]. در این مقاله از بهینه سازی مکان یابی اعضای سازه، برای بهینه سازی، استفاده شده است.

از جمله دلایل انتخاب روش الگوریتم ژنتیک، جهت بهینه سازی، می توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. عدم نیاز به مشتق تابع هدف.
 ۲. توانایی بهینه سازی توابع بسیار پیچیده و مسائل با توابع گسسته و پیوسته.
 ۳. توانایی در همگرایی به جواب بهینه برای مسائل با تعداد متغیرهای زیاد.
 ۴. این الگوریتم، پیش از این، در بهینه سازی سازه ها، توسط افرادی بطور موفقیت آمیز مورد استفاده قرار گرفته است [۴، ۶، ۸، ۹، ۱۰، ۱۴].
- در این مقاله، هدف از بهینه سازی، حداقل کردن وزن قاب می باشد؛ بطوریکه با کاهش وزن قاب، تنشها در محدوده تنش مجاز باقی بمانند، توزیع تنشها بصورت یکنواخت تر باشند و تغییر مکان نسبی طبقات در محدوده مجاز باقی بمانند.

در این مقاله، چهار قاب با تعداد دهانه ها و طبقات مختلف در پنج حالت مختلف مورد بهینه سازی قرار گرفته اند. تفاوت این پنج حالت در نوع اتصال تیر به ستون، روش انتخاب کروموزوم های والد و تعداد بیتها در روش الگوریتم ژنتیک می باشد.

۲ - حالت های مورد بررسی

همانطور که اشاره شد، قاب ها در پنج حالت مورد بهینه سازی قرار گرفته اند؛ که مشخصات این پنج حالت در جدول (۱) ارائه شده است.

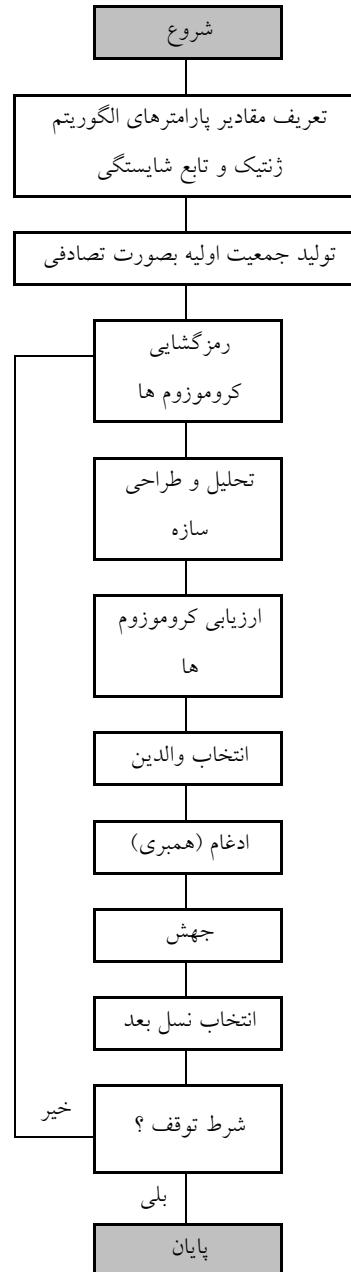
جدول (۱): حالت های مورد مطالعه

تعداد بیتها	روش انتخاب	نوع اتصال تیر به ستون	حالت
۵	چرخ گردان	گیردار	FRRW1
۵	رقابتی	گیردار	FRT1
۱	چرخ گردان	گیردار	FRRW2
۱	رقابتی	گیردار	FRT2
۱	چرخ گردان	مفصلی	URW



۳ - ساختار کلی الگوریتم مورد استفاده

شکل (۱)، ساختار کلی الگوریتم ژنتیک استفاده شده در مقاله را نشان می دهد. الگوریتم نشان داده شده در قالب برنامه هایی به زبان نرم افزار MATLAB [۱۱] توسط نویسندگان تهیه شده است.



شکل (۱): ساختار کلی الگوریتم ژنتیک

در شروع الگوریتم ژنتیک، بایستی مقادیر پارامترهای الگوریتم مقداردهی شوند. در کلیه حالتها، تعداد اعضای جمعیت برابر ۱۰ می باشد. تعداد متغیرها (بادبندها) در قابهای شماره ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب برابر ۱۸، ۳۰، ۴۸ و

۶۴ می باشد. نرخ ادغام در تمامی حالتها برابر ۱ می باشد. نرخ جهش در حالتهای FRRW1 و FRT1 برابر ۰/۰۰۳ و در حالتهای FRRW2، FRT2 و URW برابر ۰/۰۱۲ می باشد. در حالتهای FRRW1 و FRT1، شرط توقف الگوریتم، یکسان بودن بیش از ۹۰٪ از ستونهای ماتریس جمعیت و در حالتهای FRRW2، FRT2 و URW، یکسان بودن بیش از ۸۰٪ از ستونهای ماتریس جمعیت می باشد. در این مقاله برای کدگذاری متغیرها، از روش کدگذاری باینری استفاده شده است. همچنین تمامی جمعیت های اولیه بطور تصادفی و با تابع توزیع یکنواخت توسط برنامه ای که به زبان نرم افزار MATLAB توسط نویسندگان نوشته شده است، ایجاد شده اند. جمعیت اولیه ایجاد شده، یک ماتریس $NP \times LC$ از صفر و یک می باشد؛ که NP ، همان تعداد اعضای جمعیت و LC ، طول هر کروموزوم می باشد.

برای هر مسئله بهینه سازی باید یک تابع شایستگی طراحی و ابداع گردد. این تابع باید به ازای هر کروموزوم، یک مقدار مثبت برگرداند که نشان دهنده کارایی یا توانایی آن کروموزوم در حل آن مسئله است. در این مقاله تابع شایستگی، با توجه به تابع هدف (وزن قاب)، بصورت رابطه (۴) تعریف شده است.

کروموزوم های والد (کروموزوم های قبل از اعمال عملگرهای ادغام و جهش) از بین خواهند رفت .

۴ - مدل سازی

در این مقاله چهار قاب با ارتفاع طبقات ۳ متر و طول دهانه ۴ متر، که بارهای مرده و زنده گسترده یکنواخت، بترتیب، به شدت 3500 kg/m و 1500 kg/m به آنها وارد می شود، انتخاب و مورد مطالعه قرار گرفته اند. سایر مشخصات قابها در جدول (۲) ارائه شده است .

جدول (۲) : تعداد طبقات و دهانه های قابها

شماره قاب	تعداد دهانه	تعداد طبقه
۱	۳	۳
۲	۳	۵
۳	۴	۶
۴	۴	۸

قابها بر اساس مفروضات زیر تحلیل و طراحی شده اند :

۱. رفتار مصالح الاستیک خطی فرض شده است .
۲. فولاد مصرفی دارای وزن مخصوص 7850 kg/m^3 مدول الاستیسیته 200000 kg/cm^2 ، تنش تسلیم 3700 kg/cm^2 و مقاومت کششی 2400 kg/cm^2 می باشد .
۳. مشخصات لرزه ای قابها عبارتند از : منطقه با خطر نسبی خیلی زیاد، ضریب اهمیت یک، ضریب رفتار ۶ و زمین نوع ۲ (بر اساس استاندارد ۲۸۰۰) .
۴. اتصالات بادبندها مفصلی می باشند .
۵. برای طراحی المانها، از ۳۴ مقطع ستون (I شکل)، ۸ مقطع تیر (I شکل) و ۳۲ مقطع بادبند (ناودانی زوج)، بعنوان مقاطع اولیه استفاده شده است .
۶. قابها تحت تحلیل های استاتیکی خطی، مودال و طیف پاسخ مورد بررسی قرار گرفته اند .
۷. تحلیل و طراحی قابها، بر اساس روش حالات حدی انجام گرفته است .
۸. جهت تحلیل و طراحی قاب ها، از آیین نامه AISC360-5 [۱۲] و آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) [۱۳] استفاده شده است .

$$F_W = (R^{0.75}) \times \frac{10^9}{W^2} \quad (1)$$

$$F_D = \sum_{i=1}^{NS} \frac{10^{-5}}{(D)_i} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} r \geq 0.95 &\rightarrow pmr = 3 \times r \\ 0.90 \leq r < 0.95 &\rightarrow pmr = 2.5 \times r \\ 0.85 \leq r < 0.90 &\rightarrow pmr = 2 \times r \\ 0.80 \leq r < 0.85 &\rightarrow pmr = 1.5 \times r \\ 0.70 \leq r < 0.80 &\rightarrow pmr = 1 \times r \\ r < 0.70 &\rightarrow pmr = 0.5 \times r \end{aligned} \right\} \rightarrow$$

$$F_{PMR} = \frac{0.1 \times \left(\sum_{i=1}^{NE} (pmr)_i \right)}{NE} \quad (3)$$

$$F = F_W \times (1 + ((1.2 \times F_{PMR}) + F_D)) \quad (4)$$

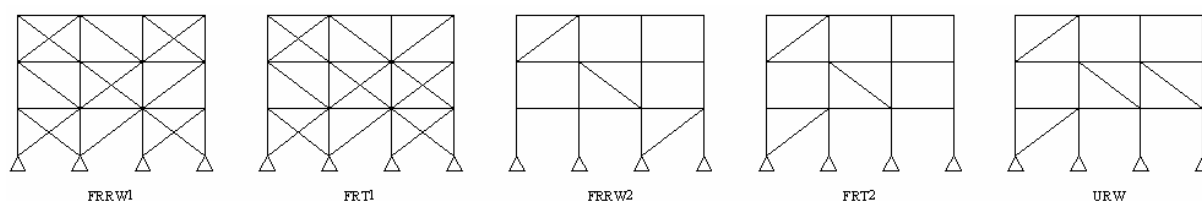
که در روابط فوق F_W ، امتیاز مربوط به وزن قاب، R ، رتبه قاب از لحاظ وزن در آن نسل (مقدار آن بین یک و تعداد اعضای جمعیت است. برای قابی که کمترین وزن را دارد، مقدار آن برابر تعداد اعضای جمعیت و برای قابی که بیشترین وزن را دارد، مقدار آن برابر یک می باشد)، W ، وزن قاب، F_D ، امتیاز مربوط به تغییر مکان نسبی طبقات قاب، D ، تغییر مکان نسبی هر طبقه، NS ، تعداد طبقات قاب، r ، نسبت تنشهای محوری و خمشی هر عضو، pmr ، امتیاز مربوط به نسبت تنشهای محوری و خمشی هر عضو، F_{PMR} ، امتیاز مربوط به نسبت تنشهای محوری و خمشی کل اعضای قاب، NE ، تعداد اعضای قاب و F ، مقدار شایستگی قاب (کروموزوم) می باشند .

در روش انتخاب رقابتی، هر بار دو کروموزوم، برای رقابت با یکدیگر، بصورت تصادفی انتخاب می شوند. در مورد عملگر ادغام، از عملگر ادغام دو نقطه ای استفاده شده است. در مورد انتخاب نسل بعد، کروموزوم های فرزند (کروموزوم های بدست آمده بعد از اعمال عملگرهای ادغام و جهش)، جمعیت نسل بعد را تشکیل می دهند و

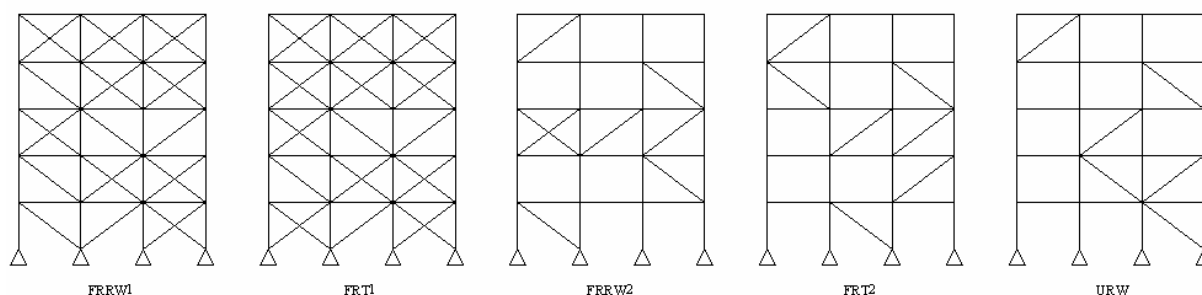


URW، که تعداد بیتها برابر ۱ می باشد، فقط امکان انتخاب وجود یا عدم وجود بادبند، توسط الگوریتم وجود دارد. در حالت‌های FRRW2، FRT2 و URW، عدد یک، بیانگر وجود بادبند و عدد صفر، بیانگر عدم وجود بادبند می‌باشد نحوه آرایش بادبندها در قابهای مورد مطالعه، پس از بهینه سازی، در اشکال ۱-۲ الی ۴-۲ نشان داده شده است.

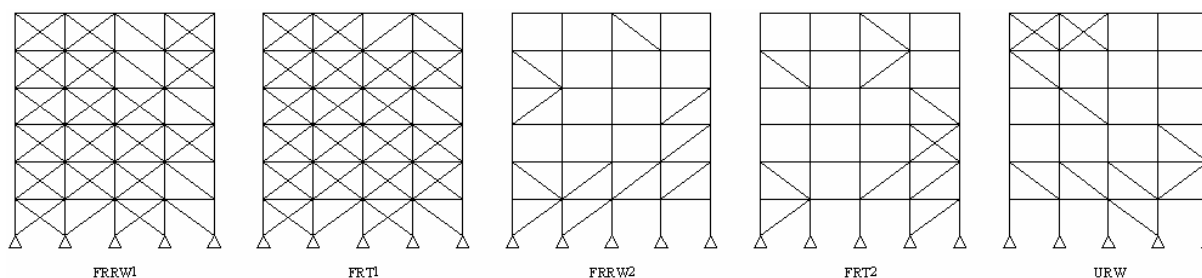
تحلیل و طراحی قابها توسط برنامه TDSAP2011، که به زبان نرم افزار MATLAB، توسط نویسندگان تهیه شده، انجام شده است. برنامه مذکور تمامی محدودیت های آیین نامه های فوق را کنترل کرده و طراحی قابها را تا زمان ارضای تمامی این محدودیتها، تکرار می کند. در حالت‌های FRRW1 و FRT1، که تعداد بیتها برابر ۵ می باشد، امکان انتخاب یکی از ۳۲ مقطع بادبند، توسط الگوریتم وجود دارد. ولی در حالت‌های FRRW2، FRT2 و



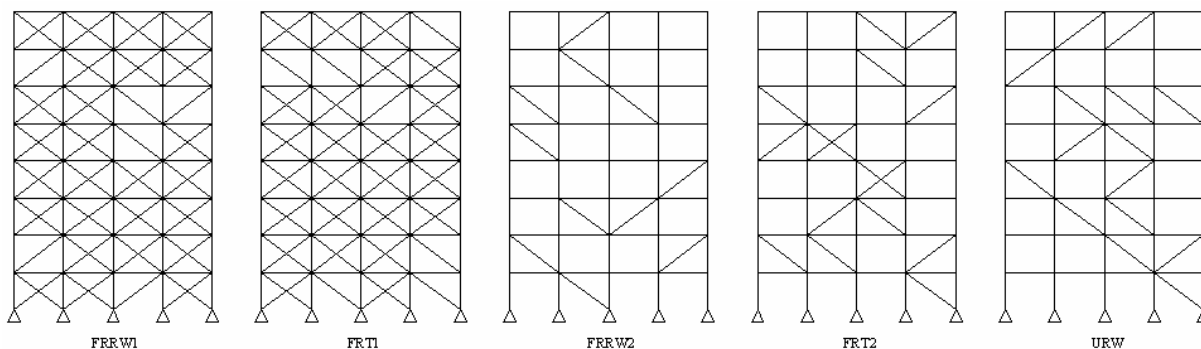
شکل ۱-۲: نحوه آرایش بادبندها پس از بهینه سازی در قاب شماره ۱



شکل ۲-۲: نحوه آرایش بادبندها پس از بهینه سازی در قاب شماره ۲



شکل ۲-۳: نحوه آرایش بادبندها پس از بهینه سازی در قاب شماره ۳



شکل ۴-۲: نحوه آرایش بادبندها پس از بهینه سازی در قاب شماره ۴

با توجه به جدول (۳)، ملاحظه می شود که بهترین جواب، برای قاب ۱، در حالت FRT2، برای قاب ۲، در حالت FRT2، برای قاب ۳، در حالت FRRW2 و برای قاب ۴، در حالت FRRW2 بدست آمده است؛ که این موضوع بیانگر این است که در صورت استفاده از یک بیت، در مقایسه با پنج بیت، به جوابهای بهینه بهتری خواهیم رسید. همچنین در صورت استفاده از اتصالات تیر به ستون گیردار، در مقایسه با اتصالات تیر به ستون مفصلی، قاب دارای وزن کمتری خواهد بود.

در حالت‌های FRRW2، FRT2 و URW، تعداد تکرار الگوریتم ژنتیک، همانطور که انتظار می رود، با افزایش تعداد متغیرها، افزایش می یابد؛ ولی در حالت‌های FRRW1 و FRT1، ملاحظه می شود که تعداد تکرار الگوریتم ژنتیک با تعداد متغیرها رابطه منطقی ندارد. بعنوان مثال، روند الگوریتم ژنتیک در حالت FRRW1، در قاب شماره ۳ که دارای ۴۸ متغیر می باشد، بعد از ۹ بار تکرار همگرا می شود؛ ولی در قاب شماره ۱ که دارای ۱۸ متغیر می باشد، بعد از ۱۴ بار تکرار و در قاب شماره ۲ که دارای ۳۰ متغیر می باشد، بعد از ۲۸ بار تکرار همگرا می شود. دلیل این موضوع، گیر افتادن الگوریتم در نقاط بهینه محلی بدلیل استفاده از تعداد بیت‌های زیاد می باشد. این موضوع را می توان یکی از ایرادهای استفاده از تعداد بیت‌های زیاد در تعیین محل بهینه بادبندها در قابهای فولادی دانست.

نتایج حاصل از بهینه سازی قابهای مورد مطالعه، در پنج حالت مختلف در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول (۳): نتایج بهینه سازی قابها

حالت	شماره قاب	تعداد تکرار الگوریتم	جواب همگرا شده (وزن) (کیلوگرم)
FRRW1	۱	۱۴	۳۲۳۱
	۲	۲۸	۶۰۹۱
	۳	۹	۱۰۳۹۱
	۴	۲۱	۱۴۹۸۰
FRT1	۱	۱۶	۳۲۶۳
	۲	۱۵	۶۲۴۳
	۳	۷	۱۰۴۴۸
	۴	۱۴	۱۴۸۹۱
FRRW2	۱	۲۰	۲۵۲۹
	۲	۲۳	۴۹۱۵
	۳	۴۴	۷۹۱۷
	۴	۷۷	۱۱۳۳۹
FRT2	۱	۱۸	۲۵۱۹
	۲	۲۶	۴۸۳۴
	۳	۱۹	۸۰۰۱
	۴	۸۲	۱۱۶۴۶
URW	۱	۱۰	۲۶۹۰
	۲	۳۳	۴۹۲۷
	۳	۴۷	۸۲۹۸
	۴	۹۱	۱۲۰۷۵



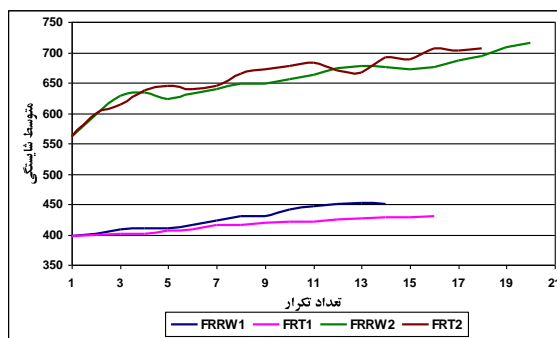
برخی از نتایج بدست آمده از تحلیل و طراحی قابهای بهینه شده در جدول (۴) ارائه شده است.

همانطور که ملاحظه می شود، در تمامی قابها، محدودیت تغییر مکان نسبی طبقات (بر اساس محدودیتهای استاندارد ۲۸۰۰)، ارضاء شده است. همچنین بدلیل بهینه سازی قابها و در نظر گرفتن نسبت تنشهای محوری و خمشی در تابع شایستگی، از حداکثر ظرفیت مقاطع در قابها استفاده شده است.

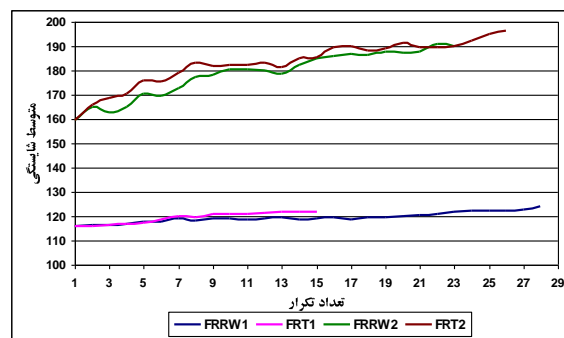
جدول (۴) : نتایج قابهای بهینه شده

شماره قاب	متوسط تنش در ستونها	متوسط تنش در تیرها	متوسط تنش در بادبندها	حداکثر تغییر مکان نسبی طبقه
۱	۰/۹۲۱	۰/۹۷۴	۰/۸۷۷	۰/۰۰۱۶
۲	۰/۹۳۵	۰/۹۶۸	۰/۷۹۳	۰/۰۰۲۰
۳	۰/۹۳۷	۰/۹۶۹	۰/۸۲۴	۰/۰۰۲۷
۴	۰/۹۴۵	۰/۹۷۲	۰/۸۲۵	۰/۰۰۲۷

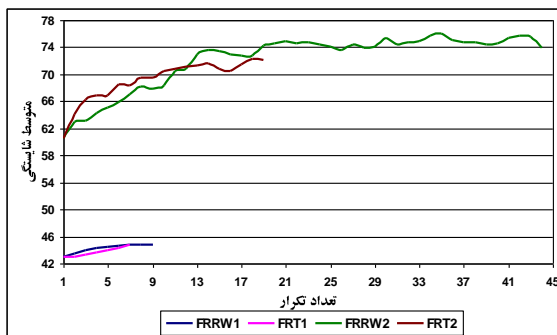
در اشکال ۳ و ۴، به ترتیب، متوسط مقدار تابع شایستگی در هر نسل و متوسط مقدار وزن قابها در هر نسل، در قابهای مورد بررسی، برای چهار حالت FRRW1, FRT1, FRRW2 و FRT2 نشان داده شده است.



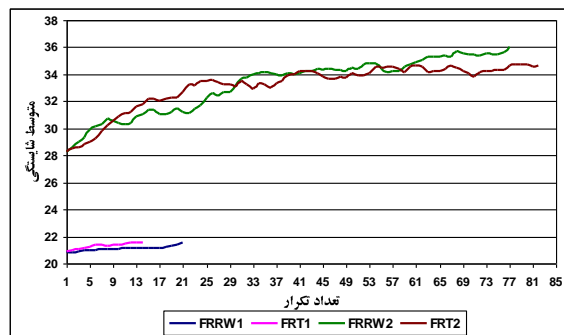
قاب ۱



قاب ۲

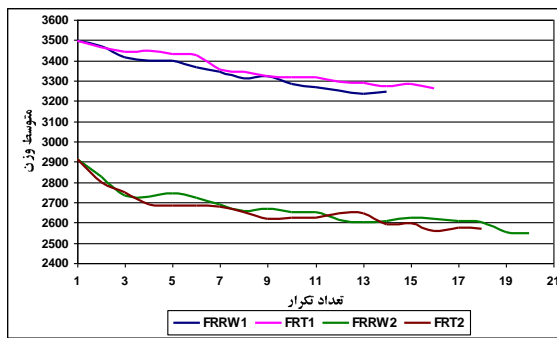


قاب ۳

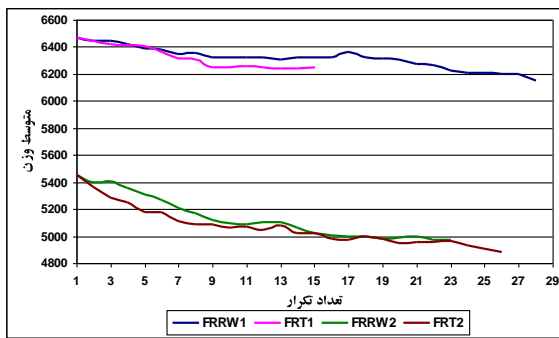


قاب ۴

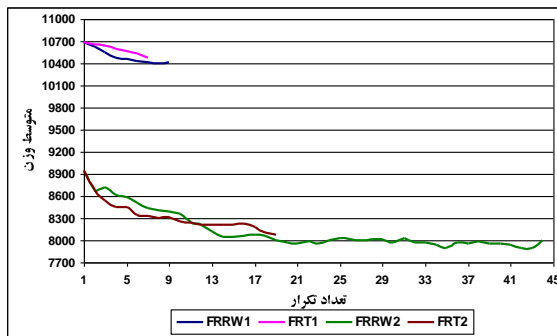
شکل (۳) : نمودار تغییرات متوسط مقدار تابع شایستگی در هر نسل



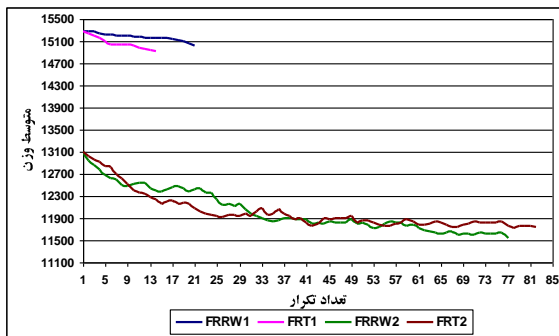
قاب ۱



قاب ۲



قاب ۳



قاب ۴

شکل (۴): نمودار تغییرات متوسط مقدار وزن قابها در هر نسل

و نتیجه نهایی خواهد داشت. همانطور که ملاحظه شد، الگوریتم در حالت‌های FRRW2 و FRT2، در مقایسه با حالت‌های FRRW1 و FRT1، به نتایج بسیار بهتری (وزن کمتری) همگرا شده است.

۲. در روش الگوریتم ژنتیک برای تعیین محل بهینه بادبندها در قابهای فولادی، میزان کارایی روشهای انتخاب چرخ گردان و رقابتی، تقریباً یکسان بوده و نتایج بدست آمده، تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند. برای مثال، در مورد قاب شماره ۱، وزن قاب بهینه شده در حالت FRRW2، ۲۵۲۹ کیلوگرم و در حالت FRT2، برابر ۲۵۱۹ کیلوگرم می باشد؛ و یا در مورد قاب شماره ۳، وزن قاب بهینه شده در حالت FRRW2، برابر ۷۹۱۷ کیلوگرم و در حالت FRT2، برابر ۸۰۰۱ کیلوگرم می باشد.

۳. برای تعیین محل بهینه بادبندها در قابهای فولادی، به منظور کاهش وزن قاب، استفاده از تعداد بیت‌های حداقل (کمتر) در مقایسه با تعداد بیت‌های بیشتر، بسیار کاراتر و موثرتر خواهد بود. همانطور که ملاحظه می شود، در هر چهار قاب، وزن های بهینه بدست آمده در حالت‌های

همانطور که ملاحظه می شود، تابع شایستگی تعریف شده در این مقاله، مناسب می باشد؛ چرا که نمودارهای مربوط به متوسط مقدار تابع شایستگی در هر نسل، بخصوص در مراحل تکرار ابتدایی و میانی، از روند صعودی مناسبی برخوردار است. از طرف دیگر، همانطور که در نمودارهای مربوط به متوسط مقدار وزن قابها در هر نسل مشاهده می شود، وزن متوسط قابها در هر نسل، بطور مناسبی کاهش می یابد؛ که این موضوع بیانگر رابطه مناسب بین تابع شایستگی و تابع هدف تعریف شده در این مقاله می باشد.

نتیجه گیری

با توجه به نتایج بدست آمده از تحلیل و طراحی قابهای فولادی و بهینه سازی قابها توسط روش الگوریتم ژنتیک و نیز جداول و نمودارها، نتایج بدست آمده، بصورت زیر ارائه می شوند:

۱. طراحی درست الگوریتم ژنتیک و تعیین مناسب پارامترهای آن (نظیر تعداد اعضای جمعیت، تعداد بیت‌ها، عملگرهای ادغام و جهش، نرخ ادغام، نرخ جهش، روش انتخاب، تابع شایستگی)، تاثیر بسیاری در روند بهینه سازی



11. MATLAB, The Language of Technical Computing, Version 7.8, The Mathworks, Inc., Natick, Mass, 2009.

12. Specification for Structural Steel Buildings (AISC), March 9, 2005.

۱۳. آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰)، ویرایش ۳، ۱۳۸۴.

۱۴. مقدم تیریزی، امیر، "تعیین محل بهینه بادبندهای ضربدری در قابهای فولادی با اتصالات نیمه صلب به روش الگوریتم ژنتیک"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، گروه عمران، ۱۳۹۰.

FRRW2 و FRT2 در مقایسه با وزنهای بهینه بدست آمده در حالت های FRRW1 و FRT1، کمتر می باشند.

۴. در قابهای فولادی مهاربندی شده، در صورت استفاده از اتصالات تیر به ستون صلب، در مقایسه با اتصالات تیر به ستون مفصلی، به نتایج بهتری، از لحاظ کاهش وزن، خواهیم رسید. همانطور که مشاهده می شود، در هر چهار قاب مورد مطالعه، وزن بهینه در حالت استفاده از اتصالات تیر به ستون گیردار بدست آمده است.

مراجع

1. Goldberg, D.E., "Genetic algorithms in search, optimization and machine learning", Addison - Wesley, 1989.
2. Park, H.S. and Sung, C.W., "Optimization of steel structures using distributed simulated annealing algorithm on a cluster of personal computers", Pergamon, Computers & Structures, 2002, 80, 1305-1316.
3. Pham, D.T. and Karaboga, D., "Intelligent optimization techniques", Springer, 2000.
4. Rajeev, S and Krishnamoorthy, C.S., "Discrete optimization of structures using genetic algorithms", J.Struct.Engrg., ASCE, 118(5), 1233-1250, 1992.
5. Adeli, H and Cheng, N.T., "Integrated genetic algorithm for optimization of space structures", J.Aero.Engrg., 6(4), 315-328, 1993.
6. Camp, C.V. and Pezeshk, S and Cao, G., "Optimized design of two dimensional structures using a genetic algorithm", Journal of Structural Engineering, ASCE, No.5, 124, 1998.
7. Toropov, V.V. and Mahfouz, S.Y. and Westbrook, R.K., "Discrete design optimization of three dimensional steel structures using a genetic algorithm", Short paper proceedings of the 3rd world congress of structural and multidisciplinary optimization, Buffalo, NY, May, 269-271, 1999.
8. Rajan, S.D., "Sizing, shape, and topology design optimization of trusses using genetic algorithm", J.Struct.Engrg., ASCE, 121(10), 1480-1487, 1995.
9. Kameshki, E.S. and Saka, M.P., "Genetic algorithm based optimum bracing design of non-swaying tall plane frames", J.Constructional Steel Research, 57(10), 1081-1097, 2001.
10. Shrestha, S.M. and Ghaboussi, J., "Evolution of optimum structural shapes using genetic algorithm", J.Struct.Engrg., ASCE, 124(11), 1331-1338, 1998.

