«مجله علمی پژوهشی علوم و فنون سازندگی»
سال چهارم.، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۲؛ ص ۴۵ الی ۵۱

بهینه‌سازی ابعادی سازه های فضاکار با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری بهبودیافته TLBO

علیرضا صالحی

چکیده

در انجام تمامی پروژه‌ها زمان و هزینه جز اصلی‌ترین مسائل در مدیریت پروژه به شمار می‌رود. بهبود هر یک از این دو مولفه میزان بازدهی پروژه را افزایش می‌دهد. در پروژه‌های عمرانی نیز صرفه‌جویی در زمان و هزینه از ضرورت‌های اولیه مدیریت پروژه می‌باشد. امروزه استفاده از سازه‌های فضاکار به دلیل صرفه در زمان، بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است و با توجه به اینکه این نوع سازه‌ها توانایی اجرا در دهانه بلند را دارند، دارای کاربرد فراوانی می‌باشند. بنابراین بهینه‌سازی وزن در این سازه‌ها می‌تواند توجیه اقتصادی پروژه را بهبود ببخشد. در این مقاله یک روش بهینه‌سازی فرا ابتکاری بر اساس الگوریتم TLBO پایه‌گذاری شده که روش بهبود الگوریتم با استفاده از افزودن عملگر پیوند در فاز معلم الگوریتم TLBO انجام شده است و این روش روی چندین مسئله بهینه‌سازی مختلف بنچمارک و یک مسئله واقعی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که این روش نسبت به الگوریتم پایه خود از لحاظ دقت همگرایی و سرعت همگرایی دارای کیفیت بالاتری است. پیاده‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی بر روی مسئله واقعی نیز نشان می‌دهد که استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری می‌تواند باعث کاهش قابل توجه هزینه‌های اجرایی سازه‌های فضاکار شود.

کلید واژه‌ها: سازه‌های فضاکار، الگوریتم فرا ابتکاری، بهینه‌سازی

Improved TLBO in sizing optimization of space frame structures using metaheuristic algorithm

Abstract

Space frame structures are made up of a large number of members and nodes that transfer the incoming loads by the internal axial forces. Given that these structures are often used on a large scale; their accurate evaluation is important to achieve the optimal design. In construction projects, saving time and money is one of the basic necessities of project management. So, improving each of these two components increases project efficiency. Today, the use of space structures has become more popular due to time savings. In this paper, we have tried to improve this algorithm. Algorithm improvement is created by adding a crossover operation between the new solution and the best solution in the teacher phase. This work always causes a sudden movement and escape from the local minima for the algorithm. Improved algorithm results show that convergence speed and optimal response quality have improved.

Keywords: space frame structures, *metaheuristic algorithm, sizing optimization*

۱. مقدمه

سازه‌های فضایی از اوایل قرن ۲۰ میلادی همواره با فرم‌های متنوع تاکنون مورد استفاده قرار گرفته اند. رفتار سه بعدی، پیش ساخته بودن و امکان تولید انبوه آن سبب شد شبکه‌های فضایی به عنوان یکی از موثرترین روش‌ها برای پوشش سقف‌ها و اجرای ساختمان‌های با دهانه‌های زیاد، مورد توجه معماران و مهندسان باشد. در دهه ۶۰ میلادی بود که این نوع سازه‌ها به صورت موضوعی بین المللی و قابل بحث مطرح شد به طوری که اولین کنفرانس بین المللی سازه‌های فضایی در سال ۱۹۶۶ برگزار شد و تکنولوژی سازه‌های فضاکار جنبه جهانی پیدا کرد.

به دلیل تعداد زیاد المان‌های این نوع سازه‌ها، انتخاب صحیح هر عضو می‌تواند تاثیر بسزایی در وزن و هزینه اجرای آن داشته باشد. تحقیقات در مورد بهینه‌یابی در سازه‌های فضاکار از بهینه-یابی در سطح مقطع اعضای آن شروع شده است. تابع هدف در این قبیل از مسائل، کمینه کردن وزن سازه فضاکار بوده است و از حدود سال ۲۰۰۰ تا امروز محققان بر روی بهینه‌سازی این نوع سازه‌ها تحقیق کرده و تلاش در بهبود رفتار الگوریتم‌ها برای رسیدن به این هدف را داشته‌اند.

الگوریتم‌های بهینه‌یابی فرا ابتکاری اغلب از طبیعت الهام می‌گیرند و این نوع الگوریتم‌ها بسته به نوع منبع الهام به چند دسته تقسیم می‌شوند. دسته اصلی این الگوریتم‌ها از علوم زیست شناسی الهام گرفته‌اند و از حیوانات به عنوان یک مدل بهینه‌یابی استفاده می‌کنند. علوم منبع دیگری برای الهام در الگوریتم‌های بهینه‌یابی است. الگوریتم‌های این دسته عموما از علوم فیزیک و شیمی الهام می‌گیرند. دسته الگوریتم‌های الهام گیرنده از هنر در بهینه‌یابی کلی بسیار موفقیت داشته‌اند. این دسته از خلاقیت موجود در رفتار هنرمندان مانند موسیقیدانان و معماران الهام می‌گیرد. رفتار اجتماعی از دیگر منابع الهام در بهینه‌یابی است که از رفتارهای اجتماعی برای حل مسائل بهینه‌یابی استفاده می‌کند.

یکی از اقدامات مهم در مسائل بهینه‌سازی، تلاش برای بهبود الگوریتم‌های بهینه‌سازی است، زیرا این نوع مسائل به دلیل ماهیتشان شامل مجموعه‌ای از محاسبات تکراری بوده که هرچه قدر عملکرد الگوریتم سریعتر و دقیقتر باشد در کیفیت استفاده از آن موثر خواهد بود. همچنین مسائل بهینه‌سازی عموما اهمیت خود را در مسائل بزرگ مقیاس که دارای چندین متغیر هستند و قیدهای پیچیده‌ای دارند نشان می‌دهد. در این شرایط استفاده از الگوریتم‌های کارآمد بسیار مورد اقبال خواهد بود. در سال‌های اخیر و در تحقیقات مختلف تلاش شده است تا به روش‌های گوناگون الگوریتم‌های بهینه‌سازی بهبود یابند. یکی از روش‌های بهبود الگوریتم‌ها، ترکیب دو یا چند الگوریتم است تا با عملکرد مشترک آن‌ها بهبود در کارآیی الگوریتم به وجود آید [۱-۴].

روش دیگر استفاده از یک الگوریتم پایه توانمند در ترکیب با یک یا چند عملگر مختلف است. در این حالت رفتار الگوریتم عموما مشابه الگوریتم پایه بوده اما عملگرهای کمکی باعث بهبود در سرعت و دقت نتایج می‌شوند [۵-۷].

در این مقاله با استفاده از عملگرهای موثر در الگوریتم‌ها تلاش شده است، رفتار الگوریتم معلم و دانش آموز TLBO بهبود داده شود و سپس این الگوریتم برای بهینه‌سازی سازه فضاکار تنظیم گردد.

۲. روش تحقیق

در این پژوهش به منظور پیاده‌سازی الگوریتم‌ها از برنامه Matlab استفاده شده است. با توجه به اینکه روند الگوریتم‌های بهینه‌سازی به صورت محاسبات برداری و ماتریسی است، استفاده از برنامه Matlab باعث افزایش سرعت تحلیل و سهولت در برنامه‌نویسی می‌شود. در این مقاله بر اساس الگوریتم پایه TLBO یک الگوریتم بهبود یافته توسعه داده شده است.

الگوریتم TLBO یک الگوریتم فرا ابتکاری فاقد پارامتر کنترلی است که بر اساس روابط تعاملی در کلاس درس بین دانش‌آموزان و معلم پایه‌ریزی شده است. در این الگوریتم روند رشد تحصیل با استفاده از تعاملات بین دانش‌آموزان و همچنین رشد تحصیلی با استفاده از تعامل با معلم شکل گرفته است. بنابراین دو فاز حرکت در نظر گرفته شده است، فاز اول بر اساس حرکت به سمت معلم است (فاز معلم) و فاز دوم حرکت بر اساس تعامل دانش‌آموزان است (فاز یادگیری). روند گام به گام ساده شده این الگوریتم به صورت زیر است [۸].

۱) انتخاب جمعیت اولیه

۲) انجام فاز معلم و حرکت جمعیت به راستای بهترین پاسخ (موقعیت معلم)

۳) بررسی بهبود پاسخ و در صورت رشد جایگزینی آن

۴) انجام فاز یادگیری و انتخاب تصادفی دو عضو و حرکت به سمت پاسخ بهتر

۵) تنظیم جمعیت در انتهای گام

۶) تکرار مرحله ۲ به بعد تا رسیدن به پایان اجرا

برای بهبود الگوریتم لازم است نقاط ضعف الگوریتم پایه ارزیابی شده و راهکار بهبود آن تنظیم گردد. بر اساس تجربیات حاصل از ارزیابی‌های اولیه مشخص است که الگوریتم‌هایی که جمعیت خود را به سرعت همگرا می‌کنند ممکن است در معرض درگیر شدن با مینیمم‌های محلی قرار گرفته و در نهایت الگوریتم به بهترین جواب ممکن دستیابی پیدا نکند. برای جلوگیری از این

موضوع باید سعی کرد کـه شـانس‌هـای جدیـدی بـرای عبـور از مینیمم‌های محلی در الگوریتم ایجـاد شـود. یکـی از عملگرهـای کاربردی برای خروج از مینیمم‌های محلی، عملگر پیوند است که هم در الگوریتم GA و هم در الگوریتم DE دیده می‌شود. بنابراین برای بهبود رفتار الگوریتم استفاده از عملگـر پیونـد در الگـوریتم TLBO می‌تواند موثر باشد. گـام‌هـای مـورد اسـتفاده در تنظـیم الگوریتم بهبود یافته به شرح زیر می‌باشد.

۱) انتخاب جمعیت اولیه

۲) انجام فاز معلم و حرکت جمعیت بـه راسـتای بهتـرین پاسخ

۳) پیوند بین پاسخ جدید و پاسخ متناظر با معلم (بهترین پاسخ)

۴) بررسی بهبود پاسخ و در صورت رشد جایگزینی آن

۵) انجام فاز یادگیری و انتخاب تصادفی دو عضو و حرکت به سمت پاسخ بهتر

۶) تنظیم جمعیت در انتهای گام

۷) تکرار مرحله ۲ به بعد تا رسیدن به پایان اجرا

در ادامه مقاله الگوریتم بهبود یافته با نـام ImTLBO معرفـی خواهد شد.

به منظور بررسی عملکرد الگوریتم مسـائل‌هـای متعـددی در مراجع معتبر پیشنهاد شده است تا عیار هر الگوریتم در حل ایـن مسائل مشخص شود که در تحقیقات علمی به مسـائل بنچمـارک معروف هستند. برای صحت سنجی رفتار از دو مسئله بهینه‌یـابی مقید مهندسی و یک مثال سازه‌ای استفاده شده است. از آنجـایی که ارزیابی این الگوریتم‌ها می‌بایست در مسائل مقید انجـام شـود که دارای تیپ‌های رفتاری مختلفی هستند، لازم است معیارهـای مناسبی برای ارزیابی آنها تعیین شود. بر اساس بررسی‌های انجام شده در بیشتر تحقیقات از معیارهای زیر استفاده شده است.

الف) بهتـرین پاسـخ: ایـن معیـار تنهـا پاسـخ بهینـه نهـایی الگوریتم‌ها را با هم مقایسه می‌کند و الگوریتم برتر را تنها با پاسخ نهایی آن می‌سنجد.

ب) متوسط پاسخ: از آنجایی که در مسائل بهینه‌سـازی فـرا-ابتکاری لازم است با جمعیت اولیه فرآیند بهینـه‌سـازی را انجـام داد، بنابراین متوسط پاسخ می‌تواند معیار مناسبی از رفتـار کلـی الگوریتم باشد.

پ) انحراف معیار پاسخ‌ها: این معیار نشان‌دهنـده پراکنـدگی نتایج حاصل از جمعیت در هر الگوریتم است.

۳. نتایج و بحث

پـس از پیـاده‌سـازی الگـوریتم، انتخـاب معیارهـای ارزابـی الگوریتم، تحلیل رفتار الگوریتم در مسائل بنچمـارک قابـل انجـام خواهد بود. در ادامه این بخش ابتدا نتایج بررسی رفتـار الگـوریتم پایه TLBO با الگوریتم بهبودیافتـه ImTLBO تحـت مسـائل بنچمارک انجام شده و یک مسئله بهینه‌یابی واقعی بزرگ مقیاس با روش جدید پیشنهادی تحلیل و ارزیابی می‌شود.

۳-۱. ارزیـابی رفتـار الگـوریتم جدیـد در مسـائل بنچمارک

همانطور که اشاره شد مقایسه رفتار الگوریتم جدیـد و الگـوریتم پایه در دو مسئله مهندسی و یک مسئله سازه‌ای بنچمارک انجـام شده است که در ادامه به ارائه نتایج آن پرداخته می‌شود.

۳-۱-۱. مسئله بهینه سازی فنر تحت کشش/ فشار

این مسئله یکـی از مسـائل پرکـاربرد در ارزیـابی الگـوریتم‌هـای بهینه‌سازی است. در این مسئله علاوه بر قیـدهای مـرزی، چهـار قید تحلیلی وجود دارد که باعث پیچیده‌تر شدن فضای پـذیرفتی خواهد بود.

شکل (۱). نمای هندسی مسئله فنر تحت کشش/فشار

تابع هدف این مسئله به صورت زیر فرمول بندی شده است

$$f(x) = (x_3 + 2)x_2x_1^2 \qquad (1)$$

قیدهای اصلی این مسئله به صورت زیر می باشد.

$$g_1(x) = 1 - (\frac{x_2^3 x_3}{71.785x_1^4}) \leq 0 \qquad (2)$$

$$g_2(x) = 4x_2^2 - \frac{x_1x_2}{12.566(x_1^3x_2 - x_1^4)} + \left(\frac{1}{5108x_1^2}\right) - 1 \leq 0$$

$$g_3(x) = 1 - (\frac{140.45x_1}{x_2^2x_3}) \leq 0$$

$$g_4(x) = \frac{x_1+x_2}{1.5} - 1 \leq 0$$

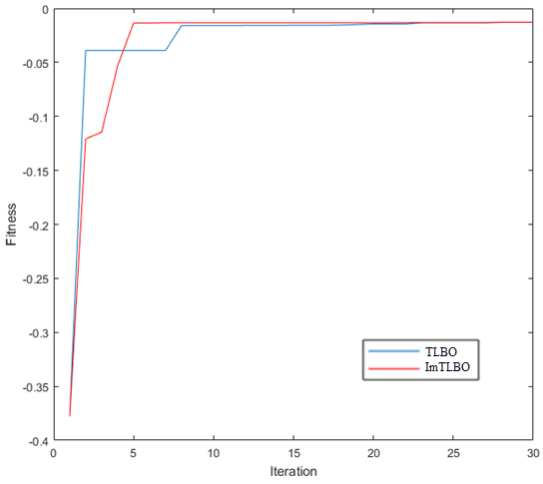
$$0.05 \leq x_1 \leq 2.00$$

$$0.25 \leq x_2 \leq 1.30$$

جدول (۱). نتایج ارزیابی مسئله فنر تحت کشش/فشار

	TLBO	ImTLBO
X_1	0.0510	0.0500
X_2	0.3396	0.3170
X_3	12.5560	14.1004
بهترین پاسخ	0.01284	0.0127609
میانگین پاسخ	0.01324	0.01314
انحراف معیار	0.0008	0.0811

در جدول (۱) نتایج حل مسئله فنر برای دو الگوریتم پایه و بهبودیافته نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود الگوریتم بهبود یافته هم از نظر بهترین پاسخ و هم از نظر میانگین پاسخ‌ها شرایط بهتری را نشان می‌دهد. اما از نظر انحراف معیار نتایج کمی ضعیفتر از الگوریتم پایه است.

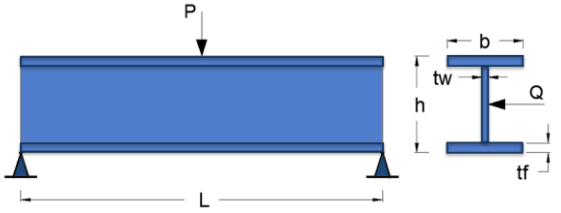


شکل (۲). روند تغییرات برازندگی در مثال فنر

روند همگرایی دو الگوریتم در این مثال در شکل (۳) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود. الگوریتم بهبود یافته هم دقت همگرایی بالاتری دارد و هم زودتر از الگوریتم پایه خود به پاسخ بهینه رسیده است.

۳-۱-۲. مسئله بهینه سازی تغییرشکل تیر I شکل

مسئله تغییرشکل تیر I شکل یکی دیگر از مسائل مشهور در بهینه‌سازی می‌باشد. در این مسئله علاوه بر قیدهای مرزی، دو قید تحلیلی وجود دارد که باعث پیچیده‌تر شدن فضای پذیرفتی خواهد بود.



شکل (۳). نمای هندسی مسئله تغییرشکل تیر I شکل

تابع هدف این مسئله به صورت زیر فرمول بندی شده است:

$$f(b.h.t_w.t_f) = \frac{5000}{\frac{t_w(h-2t_f)^3}{12}+\frac{bt_f^3}{6}+2bt_f\left(\frac{h-t_f}{2}\right)^2} \quad (3)$$

قیدهای اصلی این مسئله به صورت زیر می باشد.

$$g_1 = bt_w + t_w(h-2t_f) \le 300 \quad (4)$$

$$g_2 = \frac{18h\times 10^4}{t_w(h-2t_f)^3 + 2bt_w\left(4{t_f}^2 + 3h(h-2t_f)\right)} + \frac{15b\times 10^3}{(h-2t_f){t_w}^3 + 2t_w b^3} \le 6$$

$$10 \le b \le 50$$

$$10 \le h \le 80$$

$$0.9 \le t_w \le 5$$

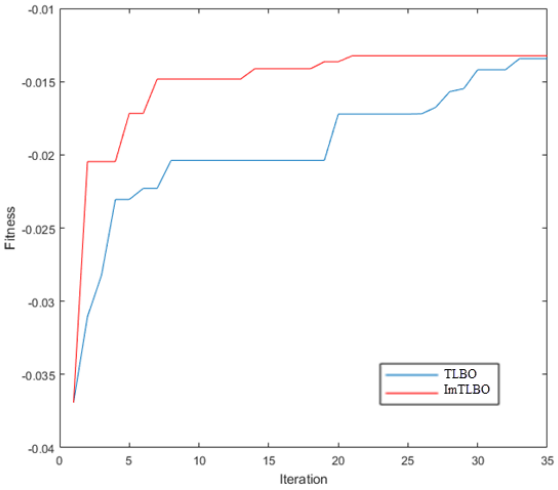
$$0.9 \le t_f \le 5$$

جدول (۲). نتایج ارزیابی مسئله تغییرشکل تیر I شکل

	TLBO	ImTLBO
X_1	80.0000	80.0000
X_2	50.0000	50.0000
X_3	0.9875	0.9606
X4	2.2440	2.2728
بهترین پاسخ	0.013344	**0.0132357**
میانگین پاسخ	0.014118	0.0143
انحراف معیار	0.0006	0.0015

همانطور از نتایج قابل مشاهده است پاسخ حاصل از الگوریتم بهبود یافته در این مسئله نیز از الگوریتم پایه خود بهتر بوده است. روند همگرایی در الگوریتم جدید و الگوریتم پایه که در نمودار زیر قابل مشاهده است، گویای عملکرد بهبود در سرعت همگرایی و بهبود کیفیت پاسخ در الگوریتم جدید است. در اغلب مسائل مقدار شاخص انحراف معیار در الگوریتم بهبود یافته ImTLBO بیشتر از الگوریتم پایه TLBO است زیرا در این الگوریتم پراکندگی جمعیت بیشتر از الگوریتم پایه بوده و علت آن حضور عملگر پیوند است که باعث می‌شود جمعیت در

مینیمم‌های محلی محبوس نشود.



شکل (۳). روند تغییرات برازندگی در مثال تغییرشکل تیر I شکل

۳-۱-۱. مسئله بهینه سازی سازه ای خرپای ۱۵ عضوی

خرپای ۱۵ عضوی نیز یکی دیگر از مثال‌های مهم در ارزیابی الگوریتم‌ها می‌باشد. مشخصات هندسی این مثال در شکل زیر نشان داده شده است. همچنین مقدار مشخصات فنی مورد استفاده در این مثال به شرح ذیل معرفی می‌گردد.

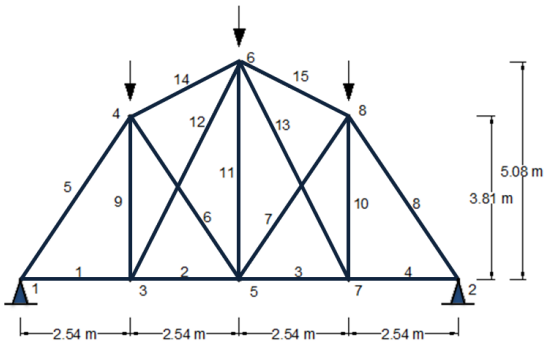
چگالی مصالح مصرفی: $7800\ kg/m^3$

مدول الاستیسیته مصالح: $E=200\ MPa$

تنش تسلیم در فشار و کشش: $120\ MPa$

ماکزیمم تغییرشکل گره ها: $10\ mm$

بارگذاری وارد بر سازه در سه گره شماره ۴ و ۶ و ۸ به صورت متمرکز برابر ۳۵ kN به صورت قائم و مطابق شکل می باشد.

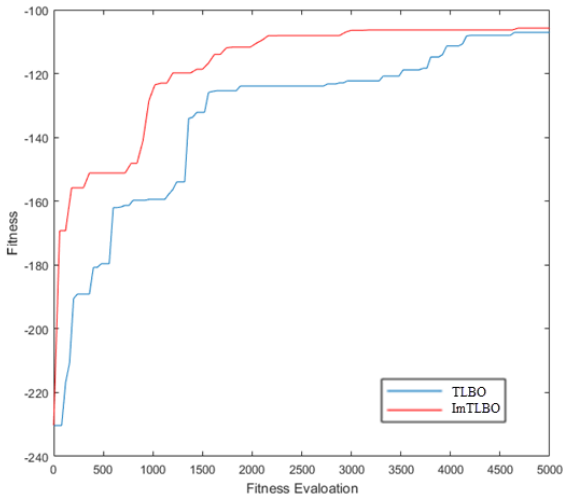


شکل (۵). نمای هندسی مسئله خرپای ۱۵ عضوی

نتایج تحلیل خرپای ۱۵ عضوی در جدول (۳) نشان داده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که الگوریتم ImTLBO با کیفیت بالایی به پاسخ بهینه نزدیک شده و با انحراف معیار بهتری نسبت به الگوریتم پایه به پاسخ بهینه دست یافته است. روند همگرایی در این مثال نیز نشان دهنده سرعت همگرایی بالا در الگوریتم بهبود یافته است. با توجه به اینکه در مسائل سازه‌ای به دلیل تعداد بالای متغیرها، سرعت همگرایی بالا در الگوریتم بهینه‌یابی یک شاخص بسیار کارآمد خواهد بود. این موضوع خود را در مسائل بزرگ مقیاس بهتر نشان می‌دهد و باعث کاهش در هزینه‌های محاسباتی و زمان اجرا خواهد شد.

جدول (۳). نتایج ارزیابی مسئله خرپای ۱۵ عضوی

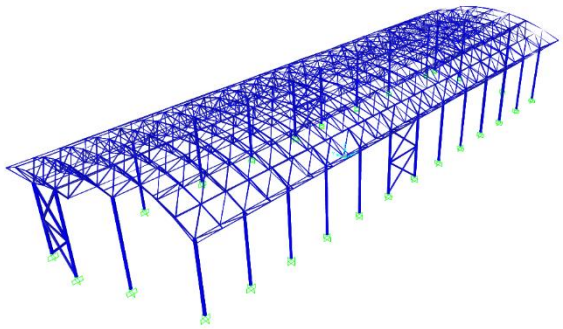
متغیر (mm^2)	TLBO	ImTLBO
A1	113.2	113.2
A2	113.2	113.2
A3	113.2	113.2
A4	113.2	113.2
A5	736.7	185.9
A6	113.2	113.2
A7	113.2	113.2
A8	736.7	185.9
A9	113.2	113.2
A10	113.2	113.2
A11	113.2	113.2
A12	113.2	113.2
A13	113.2	113.2
A14	334.3	334.3
A15	334.3	334.3
وزن بهینه (kg)	105.735	105.735
انحراف معیار پاسخ ها	10.79	0.5316



شکل (۶). روند تغییرات برازندگی در مسئله خرپای ۱۵ عضوی

۳-۲. بهینه یابی سازه فضاکار واقعی

در این بخش یک پروژه واقعی به عنوان مطالعه موردی برای تخمین میزان اثرگذاری روش بهینه‌سازی در کاهش هزینه‌های پروژه سازه‌های فضاکار مد نظر قرار گرفته است. پروژه مورد نظر سازه فضاکار یک سردرب می‌باشد. این سازه دارای ۱۶۷۲ المان میله‌ای در بخش سقف خود بوده و با مجموعه‌ای از ستون‌ها و مهاربندها بارهای وارده را به فونداسیون انتقال می‌دهد. بر این اساس به طور کلی مجموع المان‌های سقف سازه فضاکار و پایه-های این سازه ۱۷۲۷ المان می‌باشد. در شکل زیر نمای سه بعدی از مدلسازی این سازه در نرم افزار SAP2000 نشان داده شده است.

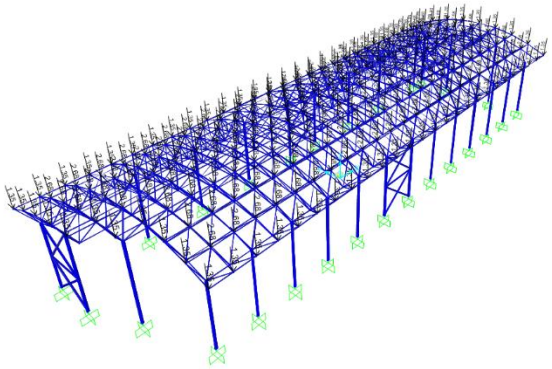


شکل (۷). نمای سه بعدی مدل سردرب

جهت هماهنگی کامل بین مدلسازی اصلی و تحلیل بهینه‌سازی، بارگذاری و روش طراحی و کنترل مقاطع کاملا یکسان در نظر گرفته شده است. همچنین مشخصات مقاطع سازه‌ای و پارامترهای مقاومت مصالح نیز کاملا مشابه مقادیر در نظر گرفته در مدلسازی اصلی لحاظ شده است.

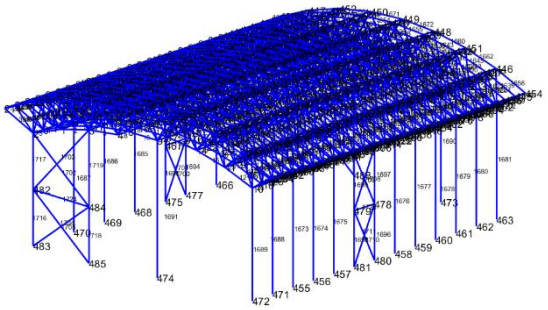
مجموعه بارهای مرده، زنده، باد و زلزله به صورت بارهای گره‌ای در تحلیل در نظر گرفته شده است. در شکل (۸) عنوان نمونه بارگذاری بار مرده روی سازه فضاکار در مدلسازی نشان داده شده است. آیین‌نامه مورد استفاده در طراحی سازه با روش LRFD بوده که به همین منظور در برنامه‌نویسی روش بهینه‌سازی نیز از همین روش استفاده شده است.

در این مسئله که دارای ۱۶۷۲ عضو بهینه‌یابی بوده است از یک کامپیوتر با پردازنده Core i5-7400 @3.00GHz و حافظه داخلی ۸ گیگابایت استفاده شده است که برای هر اجرای برنامه با ۵۰ عضو جمعیتی و ۱۰۰۰۰ تکرار بهینه، ۵۰۷۹ ثانیه (حدود یکساعت و بیست و پنج دقیقه) زمان سپری شده است. با توجه به تعداد حداقل ۵ بار اجرای برنامه برای تضمین روند بهینه‌یابی، مجموعا زمان تقریبی ۷ ساعت برای تکمیل فرآیند بهینه‌یابی طی شده است.



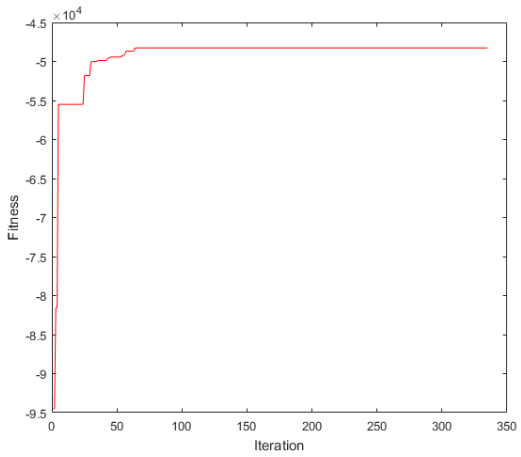
شکل (۸). بارگذاری بار مرده گره ای بر روی سازه فضاکار

پس از مدلسازی سازه فضاکار در برنامه بهینه‌سازی، امکان انجام فرآیند بهینه‌سازی میسر خواهد بود و در این سازه از الگوریتم بهبود یافته ImTLBO برای بهینه‌سازی استفاده شده است. به منظور اطمینان از مدلسازی صحیح، هندسه مدلسازی در برنامه بهینه‌سازی ترسیم شده که در شکل زیر هندسه مدل شامل شماره گره‌ها و المان‌ها که در برنامه مدلسازی شده است نمایش داده می‌شود.



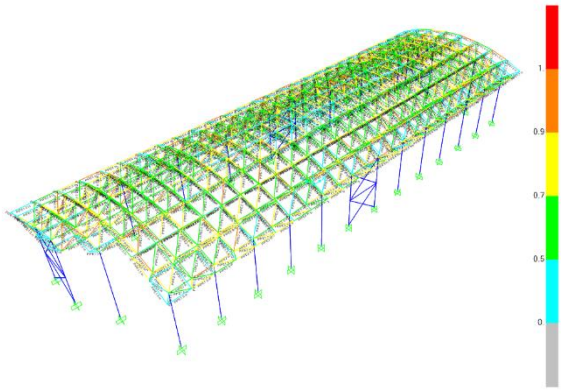
شکل (۹). نمای سه بعدی از مدلسازی سازه در برنامه بهینه سازی

پس از اتمام تحلیل بهینه نتایج حاصل از بهینه‌سازی سازه‌فضاکار مطابق شکل (۱۰) به دست آمده است. همانطور که مشاهده می-شود، همگرایی الگوریتم به دست آمده است و نتایج پس از گذشت تکرارها به صورت ثابت حاصل شده است. برای اطمینان از نتایج تحلیل، نتایج به دست آمده از بهینه‌سازی در برنامه SAP2000 مجددا بارگذاری شده تا نتایج نهایی با تحلیل اولیه مقایسه شود.



شکل (۱۰). نمودار پیشرفت فرآیند بهینه سازی بر اساس تکرارهای مختلف

در شکل (۱۱) نتیجه طراحی مدل بهینه سازی شده سازه فضاکار در برنامه SAP2000 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تمامی المان‌های سازه جوابگوی بارهای وارده بوده است. به منظور مقایسه دقیق نتایج قبل و بعد از تحلیل بهینه‌سازی، وزن سقف سازه فضاکار با تعداد المان ۱۶۷۲ عضو در دو حالت قبل و بعد از تحلیل بهینه مقایسه شده است.



شکل (۱۱). نسبت تنش مقاطع سازه ای سقف سازه فضاکار

مقایسه نتایج حاصل از مدلسازی اصلی و مدلسازی بهینه در این مسئله نشان می‌دهد که وزن آهن آلات مصرفی در سازه فضاکار از مقدار ۲۸/۳۲۸ تن در مدل اصلی به مقدار ۲۴/۶۳۷ در مدل بهینه‌سازی کاهش یافته است به عبارت دیگر در مدلسازی بهینه به میزان ۳/۹۶۱ تن در آهن آلات مصرفی در سازه فضاکار صرفه-جویی شده است که این مقدار معادل ۱۳ درصد از هزینه اسکلت می‌باشد.

۴. نتیجه گیری

در این مقاله الگوریتم بهینه‌سازی ImTLBO بر پایه الگوریتم TLBO پایه‌ریزی شد و با افزودن عملگر پیوند به این الگوریتم، کارایی آن افزایش داده شده است. مقایسه نتایج الگوریتم بهبود یافته با الگوریتم پایه خود در حل مسائل بنچمارک نشان می‌دهد که الگوریتم بهبود یافته در دقت و سرعت همگرایی نتایج مطلوبتری از الگوریتم پایه خود ارائه می-دهد. نتایج الگوریتم بهبود یافته که با نام ImTLBO معرفی شده است، نشان می‌دهد که سرعت و دقت در همگرایی را به خوبی افزایش داده و می‌تواند به عنوان یک الگوریتم کارآمد در بهینه‌سازی سازه‌های فضاکار بزرگ مقیاس مورد استفاده قرار گیرد.

پیاده‌سازی الگوریتم بهبود یافته بر روی یک مسئله واقعی نیز نشان می‌دهد که بهینه‌سازی این سازه‌ها می‌تواند باعث کاهش قابل توجهی در هزینه‌های اجرایی گردد. نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که در یک سازه فضاکار با ۱۶۷۲ عضو که تحت ترکیبات بارگذاری متعددی مشابه مدلسازی اصلی خود قرار گرفته است، هزینه‌های ساخت اسکلت حدود ۱۳ درصد کاهش یافت است. این کاهش در هزینه ساخت دو تاثیر اساسی خواهد داشت. اولین تاثیر آن کاهش هزینه‌های پروژه بوده که باعث ایجاد ارزش افزوده قابل توجهی خواهد شد و دومین تاثیر آن، کاهش مصرف مصالح بوده که خود باعث کاهش مرحله به مرحله مخاطرات زیست محیطی ناشی از تولید مصالح می‌شود.

۵. مراجع

[1] Shojaee S, Arjomand M, Khatibinia M, a Hybrid Algorithm for Sizing and Layout Optimization of Truss Structures Combining Discrete Pso and Convex Approximation. Int J Optim Civ Eng Int J Optim Civ Eng 3:57–83,2013.

[2] Omidinasab F, Goodarzimehr V, A hybrid particle swarm optimization and genetic algorithm for truss structures with discrete variables. J Appl Comput Mech 6:593–604, 2020.

[3] Yeh I, Hybrid Genetic Algorithms for Optimization of Truss Structures. Comput Civ Infrastruct Eng 14:199–206, 1999.

[4] Zuo W, Bai J, Li B, A hybrid OC–GA approach for fast and global truss optimization with frequency constraints. Appl Soft Comput 14:528–535, 2014.

[5] Li Y, Peng Y, Zhou S, Improved PSO algorithm for shape and sizing optimization of truss structure. J Civ Eng Manag 19:542–549, 2013.

[6] Degertekin SO, Improved harmony search algorithms for sizing optimization of truss structures. Comput Struct 92–93:229–241, 2012.

[7] Kaveh A, Ghazaan MI, Enhanced whale optimization algorithm for sizing optimization of skeletal structures. Mech Based Des. Struct Mach 45:345–362, 2017.

[8] Rao RV, Savsani VJ, Vakharia DP. Teaching–learning-based optimization: A novel method for constrained mechanical design optimization problems, Comput Des; 43: 303–15, 2011.