Downloaded from journalisss.ir at 10:38 +0430 on Tuesday August 8th 2017

بهینه سازی وزن خرپای فولادی توسط الگوریتم بهینه سازی مبتنی بر آموزش–یادگیری

سید مجتبی سیدزاده اطاقسرائی[1*]، مجتبی جعفری صمیمی[2]، سید رضا سیدزاده اطاقسرائی[3]

۱– دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی عمران–سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز، تهران

۲– استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز، تهران

۳– دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران–سازه، دانشگاه شمال آمل، آمل

* تهران، صندوق پستی ۱٤٦۹٦٦۹۱۹۱، smso.civil@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۳/۲۲، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۵/۱۰)

چکیده

مرور اجمالی ضوابط طراحی‌های مهندسی نشانگر این مهم است که موضوع اقتصاد و هزینه ساخت سازه‌ها از محورهای اصلی این ضوابط است. در دهه‌های اخیر استفاده از الگوریتم‌های بهینه سازی برای دستیابی به محاسبات بهینه به علوم مهندسی ورود کرده است. الگوریتم‌های بهینه سازی و در راس آنها الگوریتم‌های مبتنی بر پدیده‌های بر گرفته از طبیعت، کارایی خوبی در محاسبه بهینه سازه‌ها از خود نشان داده‌اند. خرپاها از جمله سازه‌های پر کاربرد در عمران هستند. در این پژوهش الگوریتم مبتنی بر آموزش – یادگیری جهت بهینه سازی خرپاهای فولادی استفاده شده است. الگوریتم مبتنی بر آموزش – یادگیری به دلیل دارا بودن پارامترهای کنترلی محدود چون محاسبه مقدار میانگین داده‌ها در هر تکرار دارای قدرت بالایی در دستیابی به جواب بهینه است. بررسی‌های انجام شده بر روی چهار نمونه خرپای فولادی متفاوت، نشان داد که این روش بهینه سازی با حجم محاسباتی کمتر نسبت به سایر روش‌ها، با کارایی خوبی پاسخ بهینه را ارائه می‌کند.

واژگان کلیدی

بهینه سازی سازه‌ها، الگوریتم آموزش–یادگیری، بهینه سازی وزن، خرپای فولادی، خرپای دو بعدی، خرپای فضایی

Weight Optimization of Steel Truss with Teaching-Learning Based Optimization Algorithm

S.M. Seyedzadeh Otaghsaraei, M. Jafari Samimi, S.R. Seyedzadeh Otaghsaraei

Abstract

Making inexpensive and efficient is one of the main requirements in the structural design process. In recent decades, the optimization algorithms have been developed for use in the engineering sciences. Optimization algorithms based on the natural phenomena are most useful criteria in structural design. In engineering, truss is commonly used in steel structures. In this paper, Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO) algorithm has been used to optimize the steel truss. TLBO can calculate accurate and optimum value of a functions, using only the common controlling parameters such as the mean value in each iteration. Four steel trusses have been analyzed to investigate how TLBO improves designing process of the steel trusses. The results shown that TLBO algorithm has satisfactory performance with less calculation than other optimization algorithms.

Keywords

Optimization of structures, Teaching-learning based algorithm, Optimization of weight, Steel truss, Tow dimensional truss, Space truss

Archive of SID

www.SID.ir

Downloaded from journalisss.ir at 10:38 +0430 on Tuesday August 8th 2017

۱- مقدمه

با مروری بر سیر طراحی‌های مهندسی در طول دهه‌های اخیر تاثیر موضوع اقتصاد و هزینه ساخت سازه‌ها پوشیده نیست. در یک طرح مهندسی ابعاد عضوهای سازه‌ای و در نتیجه آن وزن کل مصالح مصرفی سازه از پارامترهای مهم منتج از آن بوده و از طرفی تعیین کننده هزینه ساخت سازه می‌باشند، لذا استفاده از یک طرح مهندسی که در حین رعایت ضوابط موجود جهت طراحی، هزینه تمام شده بهینه‌ای هم داشته باشد، حائز اهمیت است.

به جهت پیشرفت روز افزون علم بهینه سازی استفاده از روش‌های بهینه سازی به منظور بهینه ساختن سازه‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد. روش‌های جدید بهینه سازی الهام گرفته شده از طبیعت زنده یا طبیعت بی جان به جهت دقت بالا در یافتن پاسخ بهینه مسئله بهینه سازی در این پژوهش مورد توجه است. از جمله روش‌های بهینه سازی محبوب عبارتند از: الگوریتم بهینه سازی تجمع ذرات[1] که مبتنی بر الگوی شکار گروهی پرندگان و تعامل اعضای گروه جهت یافت منبع غذایی است [۱]، الگوریتم بهینه سازی ژنتیک[2] که مبتنی بر تکنیک های زیست‌شناسی مانند وراثت و جهش بوده و برای اولین بار در سال ۱۹۷۵ در دانشگاه میشیگان معرفی شد [۲]، الگوریتم بهینه سازی مورچه‌ها[3] که این روش مبتنی بر الگوی یافتن غذا توسط گروه مورچه‌ها بوده و بر اساس یک سری الگوهای رفتاری مورچه‌ها توسعه یافته است [۳].

برخی محققین جهت بهبود کارایی یک الگوریتم و نیز پوشش ضعف‌های آن (به عبارتی هوشمند سازی الگوریتم و تسریع روند بهینه سازی)، دو روش بهینه سازی را با یکدیگر ترکیب نمودند، به عنوان مثال می‌توان به ترکیب روش‌های بهینه سازی تجمع ذرات و الگوریتم تجمع پرستو[4] اشاره نمود [٤]. برخی روش‌های بهینه سازی مبتنی بر استفاده از مقادیر میانگین اطلاعات یک جامعه آماری یا اعضای مدل جهت استخراج پاسخ بهینه می‌باشد که اولین بار استفاده از مقادیر میانگین توسط Gellatly و همکارانش [٥] پیشنهاد گردید که توسط Hirschberg [٦] توسعه داده شد. در نهایت این پژوهش‌ها، منجر به ارائه روش‌های بهینه سازی مبتنی بر محاسبه مقادیر میانگین شد. به طور مثال می‌توان به الگوریتم انفجار بزرگ[5] اشاره نمود [۷] که با بهره گیری از مقدار میانگین داده‌ها، ارائه شده است.

یکی از جدیدترین روش‌های مبتنی بر استفاده از مقادیر میانگین در روند بهینه سازی، الگوریتم بهینه سازی مبتنی بر آموزش-یادگیری[6] است [۸]. این روش بر اساس تاثیر آموزش معلم بر یادگیری دانش آموزان کلاس و همچنین اصل تعامل دانش آموزان با یکدیگر در مورد موضوع درسی و نهایتا افزایش سطح علم آنها است. در این روش معلم در هر تکرار درسی تلاش می‌کند با آموزش دانش آموزان سطح درسی آنها را بالا برده و به سطح خود سوق دهد. روش مبتنی بر آموزش و یادگیری در دو فاز فرایند آموزش را تکمیل می‌کند. در فاز اول معلم به دانش آموزان درس را ارئه نموده و لذا تاثیر آموزش بر دانش آموز اعمال می‌شود. در فاز بعدی، یعنی فاز دانش آموز، دانش آموزان پس از درس گرفتن از معلم با یکدیگر در مورد درس تعامل کرده و لذا این تعامل باعث بهبود وضعیت آنها می‌شود.

۲- تعریف مسئله بهینه سازی

یک مسئله بهینه سازی ابعاد بر یافتن مقطعی که وزن خرپا را کمینه کند و در عین حال قیود طراحی چون محدودیت‌های تنش و جابجایی را ارضاء نماید، تمرکز دارد. لذا مسئله جهت بهینه سازی خرپا به شکل رابطه (۱) مطرح می‌شود:

$$\begin{aligned} &Minimize\ w = \sum_{i=1}^{N_V} \gamma_i L_i A_i, \\ &Subject\ to:\ \sigma^L \le \sigma_i \le \sigma^U, \\ &A^L \le A_i \le A^U, \\ &\delta^L \le \delta_i \le \delta^U \end{aligned} \qquad (۱)$$

که N_V تعداد المان، i شماره المان از ۱ تا N_V، γ_i وزن واحد مصالح خرپا (kg/cm^3)، L_i طول المان (m)، A_i سطح مقطع هر المان (cm^2)، A^L و A^U به ترتیب محدودیت سطح مقطع‌های حد پایین و بالای المان (cm^2)، σ_i تنش هر المان (kg/cm^2)، σ^L و σ^U به ترتیب محدودیت تنش‌های حد پایین و بالای المان (kg/cm^2)، δ_i محدودیت جابجایی المان (cm)، δ^L و δ^U به ترتیب محدودیت جابجایی‌های حد پایین و بالا (cm) است.

در این مسئله برای محاسبه تابع شبه هدف جهت اعمال محدودیت‌ها، از تابع جریمه ای طبق پیشنهاد Camp [۹] استفاده شده است که برای تنش‌های در محدوده محدودیت‌ها مقدار

[1] Particle Swarm Optimization Algorithm (PSO)
[2] Genetic Algorithm (GA)
[3] Ant Colony Optimization (ACO)
[4] Swallow Swarm Optimization (SSO)

[5] Big Bang-Big Crunch Optimization (BB_BC)
[6] Teaching Learning Based Optimization (TLBO)

www.SID.ir
Arhive of SID

Downloaded from journalisss.ir at 10:38 +0430 on Tuesday August 8th 2017

تابع جریمه صفر شده و مقادیر توابع هدف و شبه هدف برابر می‌شوند و برای تنش‌های خارج از محدوده محدودیت‌ها مقدار آن برابر مقادیر رابطه (۲) می‌شود:

$$\phi_i,\ \sigma = \frac{\sigma_i - \sigma^L}{\sigma^L} \leftrightarrow \sigma_i < \sigma^L,$$
$$\phi_i,\ \sigma = \frac{\sigma_i - \sigma^U}{\sigma^U} \leftrightarrow \sigma_i < \sigma^U \quad (۲)$$

همچنین برای جابجایی‌های در جهات x، y و z که در محدوده محدودیت‌ها هستند مقدار تابع جریمه ϕ_i برابر صفر می‌شود لذا تابع شبه هدف با تابع هدف برابر می‌شود و برای جابجایی‌های در جهات x، y و z که خارج از محدوده محدودیت‌ها هستند مقادیر رابطه (۳) اعمال می‌شود:

$$\phi_i,\ \delta_{i,x} = \frac{\delta_{i,x} - \delta^L}{\delta^L} \leftrightarrow \delta_{i,x} < \delta^L,$$
$$\phi_i,\ \sigma = \frac{\delta_{i,x} - \delta^U}{\delta^U} \leftrightarrow \delta_{i,x} > \delta^U \quad (۳)$$

که $\delta_{i,x}$ محدودیت جابجایی المان شماره i در جهت محور x است. و به همین صورت برای $\delta_{i,y}$ و $\delta_{i,z}$ ، ϕ_i، $\delta_{i,y}$ و ϕ_i، $\delta_{i,z}$ تعریف می‌شود. جمع تمام مقادیر جریمه (ϕ_i) طبق رابطه (٤) بدست می‌آید:

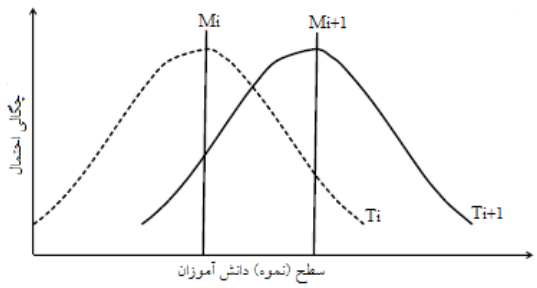
$$\phi_i = \sum_{i=1}^{N_V} (1 + \phi_i, \sigma + \phi_i, \delta_{i,x} + \phi_i, \delta_{i,y} + \phi_i, \delta_{i,z})^{\varepsilon} \quad (٤)$$

که ε مقدار مثبتی برای جریمه می‌باشد. لذا تابع شبه هدف φ_i با مقادیر تابع شبه هدف ϕ_i برابر رابطه (٥) می‌شود:

$$\varphi_i = w * \phi_i \quad (٥)$$

۳- مراحل روش مبتنی بر آموزش-یادگیری

روش یادگیری و آموزش با نام اختصاری TLBO بر پایه دو فاز است: (۱) فاز معلم و (۲) فاز دانش آموز. با توجه به شکل (۱)، در یک تکرار i معلم (T_i) تلاش می‌کند سطح دانش دانش‌آموزان را افزایش دهد و به سطح خود سوق دهد، که این تلاش را می‌توان با بهبود میانگین دانش آموزان از مقدار (M_i) به مقدار (M_{i+1}) در تکرار بعد نشان داد. از آنجا که دانش آموزان در تکرار اول سطح شان با آموزش معلم افزایش یافت لذا در این روش برای تکرار بعدی معلم جدیدی گزینش می‌شود تا آموزش‌های بعدی را به دانش آموزان جهت پیشبرد روند آموزش ارائه دهد. این معلم جدید در تکرار جدید (i+1) از بین دانش آموزان در تکرار حاضر (جدید) به صورت گزینش بین بهترین عضو انتخاب می‌شود (T_{i+1}).



شکل ۱- توزیع نمرات دانش آموزان در دو تکرار متوالی [۸]

در مسئله حاضر مراحل بهینه سازی با استفاده از این روش بدین صورت است که، ابتدا یک جمعیت اولیه با تعداد جمعیت N_P و تعداد متغییر طراحی N_V برابر تعداد المان‌های سازه تعیین می‌شود. اگر این جمعیت به صورت ماتریسی در نظر گرفته شود، جمعیت کلاس، ماتریسی با N_P سطر و N_V ستون است [۸]، که در آن N_P بیانگر تعداد دانش آموز و N_V تعداد متغییر طراحی همان تعداد موضوعات درسی است طبق رابطه (٦) این جمعیت تعریف می‌شود:

$$Population = \begin{bmatrix} X_{1,1} & X_{1,2} & \cdots & X_{1,N_V-1} & X_{1,N_V} \\ X_{2,1} & X_{2,2} & \cdots & X_{2,N_V-1} & X_{2,N_V} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ X_{N_P-1,1} & X_{N_P-1,2} & \cdots & X_{N_P-1,N_V-1} & X_{N_P-1,N_V} \\ X_{N_P,1} & X_{N_P,2} & \cdots & X_{N_P,N_V-1} & X_{N_P,N_V} \end{bmatrix} \quad (٦)$$

۳-۱- فاز معلم (آموزش)

در این فاز از بین جمعیت ساخته شده عضوی که بهترین مقدار (کمترین مقدار پاسخ برای وزن) را می‌دهد به عنوان معلم انتخاب شده و سپس فرمول معلم، رابطه (۷) به هر یک از اعضا اعمال می‌شود:

$$X_{new,N_V} = X_{old,N_V} + Difference_mean_{,N_V} \quad (۷)$$

$$Difference_mean_{,N_V} = r * (M_{new,N_V} - T_F * M_{,N_V}) \quad (۸)$$

$$M_{new,N_V} = X_{Teacher} \quad (۹)$$

$$M_{,N_V} = [m_1 \quad m_2 \quad \cdots \quad m_{N_V-1} \quad m_{N_V}] \quad (۱۰)$$

روابط (۸) تا (۱۰) نحوه محاسبه پارامترهای مورد نیاز رابطه (۷) را شرح می‌دهد. که X_{new,N_V} مقدار متغییر طراحی جدید (سطح مقطع المان) برای دانش آموز N_V، X_{old,N_V} مقدار متغییر طراحی برای دانش آموز N_V از تکرار قبل، M_{new,N_V} مقدار میانگین جدید که برابر با مقدار معلم است (این بدان معناست که معلم تلاش می‌کند مقدار میانگین کلاس را به مقدار خود سوق دهد)، $M_{,N_V}$ مقدار میانگین هر موضوع درسی (میانگین

Arhive of SID

www.SID.ir

Downloaded from journalisss.ir at 10:38 +0430 on Tuesday August 8th 2017

حاصل برای هر ستون از جمعیت رابطه (٦)) و r عدد تصادفی بین ۰ و ۱ است. در این بخش بعد از تشکیل مقادیر متغییرهای طراحی (تعیین سطح مقطع المان‌ها)، تابع هدف و تابع شبه هدف به اعضای سازه اعمال می‌شود.

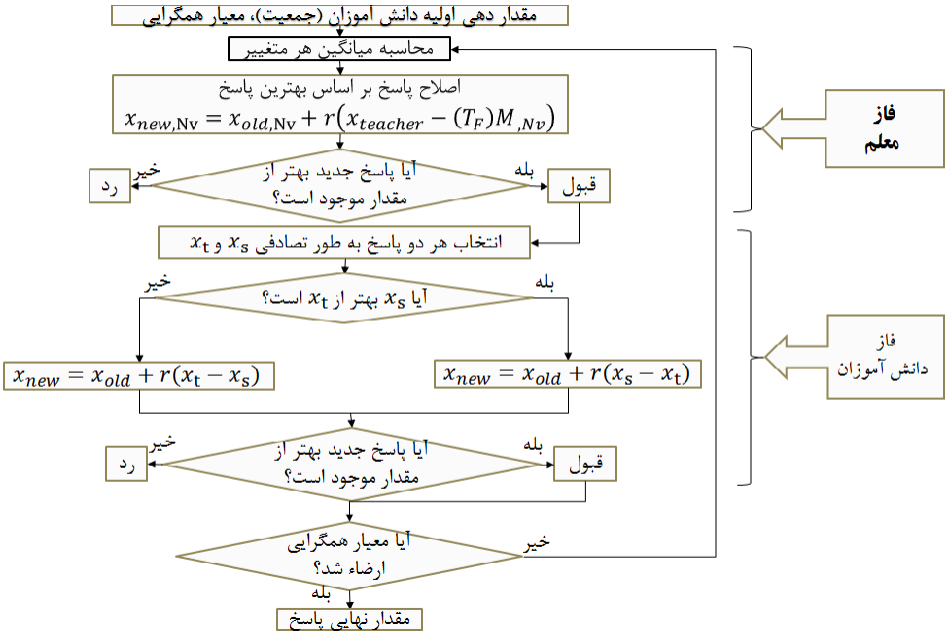
۳-۲- فاز دانش آموز (یادگیری)

در این فاز دانش‌آموزان با هم تعامل درسی داشته و لذا سطح یادگیری را بین خود افزایش می‌دهند. این تاثیر در افزایش سطح یادگیری به طریق زیر برای آنها اعمال می‌شود:

از هر دو دانش آموز s و t انتخاب شده به طور تصادفی (طوریکه مقادیر s و t با هم برابر نباشند)، مقدار تابع هدف و شبه هدف آنها مقایسه شده و دانش آموزی که مقدار تابع هدف یا شبه هدف بهتری دارد (وزن سازه کمتر باشد) مشخص می‌شود و طبق رابطه (۱۱) تاثیر تعامل درسی در آموزش اعمال می‌شود:

$$\begin{aligned} &If\ w(X_{,s}) < w(X_{,t})\ \ ; \\ &X_{new,N_V} = X_{old,N_V} + r * (X_{,s} - X_{,t}) \\ &If\ w(X_{,s}) > w(X_{,t})\ \ ; \\ &X_{new,N_V} = X_{old,N_V} + r * (X_{,t} - X_{,s}) \end{aligned} \qquad (۱۱)$$

اگر در این بخش مقدار جدید X_{new,N_V} بهتر از مقدار قبل نظیر (X_{old,N_V}) باشد، لذا مقدار جدید انتخاب می‌شود. می‌توان مراحل کلی الگوریتم را به صورت شکل (۲) نشان داد.



شکل ۲- چارت کلی الگوریتم TLBO [۸]

٤- بررسی عددی

جهت ارزیابی کارایی الگوریتم، چند مثال کاربردی مهندسی با استفاده از الگوریتم مورد تحلیل قرار گرفته و نتایج آن با روش‌های دیگر بهینه سازی مقایسه می‌شود. در این بررسی چند بار از الگوریتم پاسخ گرفته شد تا کارایی الگوریتم ارزیابی شود. مسائل تحت بررسی در این بخش شامل ٤ نمونه خرپا که عبارتند از خرپا با ۱۰ المان، خرپا با ۱۵ المان، خرپا با ۲۲ المان و نهایتا نمونه خرپا دارای ۲۵ المان است. برای هر سازه ابتدا تعدادی بررسی عددی انجام شد تا کارایی الگوریتم مشخص شده و از سویی مقادیر بهترین پاسخ‌ها مشخص شود. تعداد جمعیت (N_P) برای تمام سازه‌ها در این مطالعه برابر ۷۵ در نظر گرفته شده است. تعداد تکرار الگوریتم برای هر سازه به طور مجزا در زیر بخش‌های بخش بررسی عددی ذکر شده است. تعداد متغییر طراحی (N_V) برای هر مورد سازه برابر تعداد المان همان سازه است.

٤-۱- خرپای ده المانی

اولین سازه مورد بررسی، خرپای طره‌ای شکل (٤) است. این سازه در تحقیقات پیشین با دیگر روش‌های بهینه سازی از قبیل الگوریتم ژنتیک [۱۰]، الگوریتم زنبور عسل[1] [۱۱]، الگوریتم

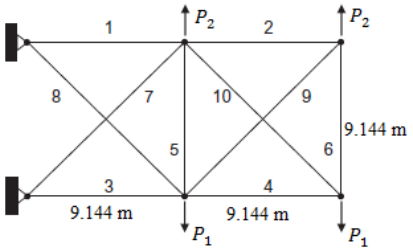
[1] Artificial Bee Colony (ABC)

www.SID.ir

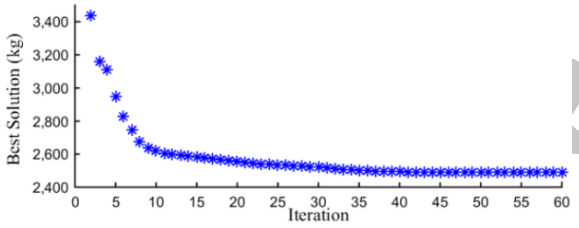
مورچگان [۱۲]، الگوریتم تجمع ذرات و الگوریتم تجمع ذرات با اعضای کم شونده[1] و الگوریتم ابتکاری تجمع ذرات[2] [۱۳]، الگوریتم شبیه‌سازی زیر مجموعه[3] [۱٤]، مورد بررسی قرار گرفته و بهینه شده است.

خرپای شکل (۳) دارای ۱۰ عضو بدون گروه بندی است، مشخصات هندسی اعضا در شکل آمده است، نیروهای P_1 و P_2 به این خرپا وارد می‌شوند که نیروی P_1 برابر ۴۵/۳۵۹ ton و نیروی رو به بالای P_2 برابر ton در نظر گرفته شده است. محدودیت جابجایی قائم و افقی ±۵/۰۸ cm و محدودیت حد تنش برابر ±۱۷۵۷/۶۷٤ kg/cm است، وزن مخصوص مصالح خرپا برابر $۲/۷۶۸\times۱۰^{-۳}$ kg/cm^3 بوده و مدول الاستیسیته مصالح ۷۰۳۰۷۰ kg/cm^3 است. متغییرهای طراحی گسسته یا مجزا برای خرپای حاضر در نظر گرفته شده است. محدودیت سطح مقطع (متغییرهای طراحی) مجزا برابر (۱۰/٤۵، ۱۱/۶۱، ۱۲/۸٤، ۳۵/۷٤، ۱۵/۱۳، ۱۶/۹۰، ۱۶/۹۷، ۱۸/۵۸، ۱۸/۹۰، ۱۹/۹۳، ۲۰/۱۹، ۲۱/۸۱، ۲۲/۳۹، ۲۲/۹۰، ۲۳/٤۲، ۲٤/۷۷، ۲۵/۰۳، ۲۶/۹۷، ۲۷/۲۳، ۲۸/۹۷، ۳۰/۹۷، ۳۲/۰۶، ۳۳/۰۳، ۳۷/۰۳، ٤۶/۵۸، ۵۱/٤۲، ۷٤/۱۹، ۸۷/۱۰، ۸۹/۶۸، ۹۱/۶۱، ۱۰۰/۰۰، ۱۰۳/۲۳، ۱۰۹/۰۳، ۱۲۱/۲۹، ۱۲۷/۷٤، ۱٤۱/۹۳، ۱٤۷/۷٤، ۱۷۰/۹۷، ۱۹۳/۵۵، ۲۱۶/۱۳) (cm^2) بر این سازه اعمال شده است. این سازه تحت ۶۰ تکرار الگوریتم مورد تحلیل قرار گرفت و ۱۰ دسته از نتایج حاصل از بررسی‌های عددی بهینه سازی با استفاده از الگوریتم TLBO گرد آوری شده و در جدول (۱) ارائه شده است. از بین ۱۰ دسته پاسخ ارائه شده در جدول (۱) بهترین پاسخ انتخاب شده و در جدول (۲) با نتایج بهینه سازی حاصل از بررسی انجام شده توسط دیگر پژوهشگران با روش‌های مختلف بر روی این سازه مقایسه شده است. جدول (۲) و نمودار شکل (٤) کارایی الگوریتم حاضر نسبت به دیگر روش‌های بهینه سازی را ارائه می‌کند.

همانطور که از جدول (۲) و نمودار شکل (٤) قابل مشاهده است، الگوریتم TLBO در تکرار ۲۱ مقدار بهینه ۲٤۸۹/۹۷۵ kg را پس از ۹۵۷۶ تحلیل سازه ای ارائه کرده است، این در حالی است که روش SSA [۱٤] با ۵۰۰۰۰ تحلیل سازه ای، وزن بهینه ۲٤۹۰/۵۵۸ kg را ارائه می‌کند. دیگر روش‌های موجود در این بخش با تعداد تحلیل بیشتر نسبت به الگوریتم حاضر، وزن بهینه بالاتری را برای سازه حاضر محاسبه کردند و تنها روش GA [۱۰] با ٤۰۰۰۰ تحلیل سازه ای به عدد بهینه ۱۹۸۵/۰۱۱ kg رسید. بررسی‌ها نشان می‌دهد که پاسخ بهینه الگوریتم TLBO با ۰/۰۲۳ ٪ وزن کمتر نسبت به روش SSA [۱٤] و همچنین با ۸۰/۸٤۸ ٪ تحلیل کمتر است و نسبت به روش GA [۱۰] با ۲۰/۲۷۹ ٪ وزن بهینه بیشتر با ۷۶/۰۶ ٪ تحلیل کمتر کارایی خود را نشان می دهد. ولی نسبت به میانگین وزن‌های بهینه حاصل از روش‌های حاضر در این بخش، با ۲/۲۶۵ ٪ افزایش با ۷۵/۶۹۵٪ تحلیل کمتر پاسخ بهینه را ارائه می‌کند که نشانگر کارایی خوب الگوریتم TLBO نسبت به سایر روش‌های موجود در این بخش است.



شکل ۳- خرپای ۱۰ المانی طره‌ای



شکل ٤- نمودار بهترین پاسخ در هر تکرار (خرپای ده المانی)

٤-۲- خرپای پانزده المانی

دومین مسئله بر تحلیل خرپای مسطح شکل (۵) تمرکز دارد. این سازه نیز توسط پژوهشگران بسیاری با روش‌های بهینه سازی دیگر از جمله، الگوریتم ژنتیک ترکیبی پیشرفته[4] [۱۵]، روش تجمع ذرات [۱۳]، الگوریتم انفجار معدن[5] [۱۶] و الگوریتم بهینه سازی وال[6] [۱۷]، مورد بررسی قرار گرفته و بهینه شده است.

[1] Particle Swarm Optimization with Passive Convergence (PSOPC)
[2] Heuristic Particle Swarm Optimization (HPSO)
[3] Subset Simulation Algorithm (SSA)
[4] Improved Hybrid Genetic Algorithm (IHGA)
[5] Mine Blast Algorithm (MBA)
[6] Wale Optimization Algorithm (WOA)

Downloaded from journalisss.ir at 10:38 +0430 on Tuesday August 8th 2017

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۱- نتایج ۱۰ مورد از بهینه سازی‌های انجام شده بر روی خرپای ۱۰ المانی

شماره عضو	سطح مقطع (cm^2)									
	بررسی ۱	بررسی ۲	بررسی ۳	بررسی ٤	بررسی ٥	بررسی ٦	بررسی ۷	بررسی ۸	بررسی ۹	بررسی ۱۰
۱	۱۹۰/۱٥	۱۹۹/۰٤	۲۰۰/۰۳	۲۰۳/۷٦	۲۰۳/۷۰	۱۹۸/٤۱	۱۹٦/٥٤	۲۰٦/۹۹	۲۰۷/۰۷	۲۱٥/۰۲
۲	۱۰/٤٥	۱۰/٤٥	۱۱/۹٥	۱۰/٤٦	۱۰/٥۰	۱۰/٥٤	۱۰/٤٥	۱۰/٤۷	۱۰/٤۷	۱۰/٤٥
۳	۱٦٥/۷۷	۱٦۹/۱۹	۱٥٥/۷۹	۱٥۹/۱۱	۱٥٥/۸٥	۱٦۳/٥۸	۱٥۳/۲٤	۱٤٦/۷۹	۱٤٦/۸۱	۱٥٤/٤۱
٤	۹۸/٦۰	۹۷/٥٤	۱۰۲/٥٦	۹۹/۷۲	۹٦/٥۲	۹۷/٤۳	۹۸/٤۸	۹٤/۸۱	۹٤/۷۷	۹۸/۱٤
٥	۱۰/٤٥	۱۰/٥۰	۱۰/٤٥	۱۰/٤٥	۱۰/٤٥	۱۰/٤٦	۱۰/٤۸	۱۰/٤٥	۱۰/٤٥	۱۰/٤٦
٦	۱۰/٤٥	۱۰/٤٥	۱۰/۸٤	۱۰/۷۳	۱۰/٤٦	۱۰/٥۹	۱۰/٤۹	۱۰/٤٥	۱۰/٤٥	۱۰/٤٥
۷	۱٤۰/٦٦	۱۳۸/۳۹	۱٤٤/۷۰	۱۳۳/۸۷	۱٤۷/۹۲	۱٤۲/۰٥	۱٤۱/۱٦	۱٤۷/٦۸	۱٤۷/٦٦	۱٤٥/۲٦
۸	٦٥/۲۳	٦۱/٦٦	٥۳/٦٤	٦۲/۷۲	٦۱/٦٤	٥۹/۰۷	٦۰/۷۰	٦۱/۱۳	٦۱/۰۳	٥٤/۱۰
۹	۱۰/٤۸	۱۰/٤٥	۱۰/٦۸	۱۰/٤٦	۱۰/٤٥	۱۰/٤٥	۱۰/٤۸	۱۰/٤٥	۱۰/٤٥	۱۰/٤٦
۱۰	۱۳۷/٤۱	۱۳٤/۸۱	۱٤۰/۰٤	۱۳۹/۸۳	۱۳۱/٤٦	۱۳۷/۲۱	۱٤٤/۳۹	۱۳۷/۱٦	۱۳۷/۱٤	۱۳۲/۷٥
وزن (kg)	۲٤۹٦/۱٤٦	۲٤۹٤/۳۹۸	۲٤۹۳/۷۷٤	۲٤۹۲/۷٦٤	۲٤۹۱/۹۸۳	۲٤۹۱/۲۱۸	۲٤۹۱/۰۲۳	۲٤۹۰/٥٤۲	۲٤۹۰/۲٦۱	۲٤۸۹/۹۷٥
وزن میانگین (kg)	۲٤۹۲/۲۰۸									
تعداد تحلیل	۸۸۹۲	۸۸۹۲	۸۸۹۲	۸۸۹۲	۸۸۹۲	۸۸۹۲	۸۸۹۲	۸۸۹۲	۸۸۹۲	۹٥۷٦

جدول ۲- مقایسه نتایج الگوریتم TLBO با دیگر روش‌ها بر روی خرپای ۱۰ المانی

شماره عضو	سطح مقطع (cm^2)							
	[۱۰] GA	[۱۱] ABC	[۱۲] ACO	[۱۳] PSO	[۱۳] PSOPC	[۱۳] HPSO	[۱٤] SSA	الگوریتم TLBO
۱	۱۷۰/۹۷	۲۱٦/۱۳	۲۱٦/۱۳	۱۹۳/٥٥	۱۹۳/٥٥	۱۹۳/٥٥	۲۱٦/۱۳	۲۱٥/۰۲
۲	۱۰/٤٥	۱۰/٤٥	۱۰/٤٥	۱۰/٤٥	۱۱/٦۱	۱۰/٤٥	۱۰/٤٥	۱۰/٤٥
۳	۱۰۳/۲۳	۱٤۷/۷٤	۱٤۷/۷٤	۱۹۳/٥٥	۱۷۰/۹۷	۱٤۷/۷٤	۱٤۷/۷٤	۱٥٤/٤۱
٤	۹۱/٦۱	۹۱/٦۱	۹۱/٦۱	۸۷/۱۰	۸۷/۱۰	۸۷/۱۰	۹۱/٦۱	۹۸/۱٤
٥	۱۱/٦۱	۱۰/٤٥	۱۰/٤٥	۱۰/٤٥	۱۰/٤٥	۱۰/٤٥	۱۰/٤٥	۱۰/٤٦
٦	۱۰/٤٥	۱۰/٤٥	۱۰/٤٥	۱۱/٦۱	۱۱/٦۱	۱۰/٤٥	۱۰/٤٥	۱۰/٤٥
۷	۱۰۳/۲۳	۱٤۷/۷٤	۱٤۷/۷٤	۱۱۹/۸۷	۱۲۱/۲۹	۱۷۰/۹۷	۱٤۷/۷٤	۱٤٥/۲٦
۸	۳۳/۰۳	٥۱/٤۲	٥۱/٤۲	۷٤/۱۹	۷٤/۱۹	٥۱/٤۲	٥۱/٤۲	٥٤/۱۰
۹	۱٥/۳٥	۱۰/٤٥	۱۰/٤٥	۱۱/٦۱	۱۱/٦۱	۱۱/٦۱	۱۰/٤٥	۱۰/٤٦
۱۰	۱۲۱/۲۹	۱٤۱/۹٤	۱٤۱/۹٤	۱٤۱/۹٤	۱٤۱/۹٤	۱٤۱/۹٤	۱٤۱/۹٤	۱۳۲/۷٥
وزن (kg)	۱۹۸٥/۰۱۱	۲٤۹۰/٥٥۸	۲٤۹۰/٥٥۸	۲٥۳۱/۸٤٤	۲٥۳۷/۱٤۲	۲٥۰۹/۲٦٤	۲٤۹۰/٥٥۸	۲٤۸۹/۹۷٥
تعداد تحلیل	٤۰۰۰۰	۲٥۸۰۰	۱۰۰۰۰	٥۰۰۰۰	٥۰۰۰۰	٥۰۰۰۰	٥۰۰۰۰	۹٥۷٦

خرپای شکل (٥) دارای ۱٥ عضو بدون گروه بندی المانی و مشخصات هندسی ارائه شده در شکل است. جزئیات بار گذاری نیروهای وارده بر سازه در جدول (۳) ارائه شده است. ترکیب بار گذاری حالت اول در این مسئله بررسی شده است. محدودیت جابجایی قائم و افقی ۱± cm و محدودیت حد تنش برابر kg/cm^2 ۱۲۷٤/۲۱± است، وزن مخصوص مصالح خرپا برابر kg/cm^3 ۷/۸ و مدول الاستیسیته مصالح kg/cm^3 ۲۰۳۸۷۳٦ است.

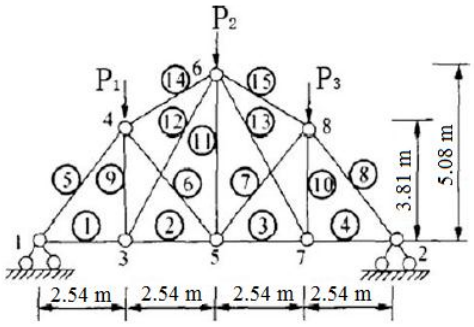
www.SID.ir
Downloaded from journalisss.ir at 10:38 +0430 on Tuesday August 8th 2017

Downloaded from journalisss.ir at 10:38 +0430 on Tuesday August 8th 2017

شده و در جدول (۵) با نتایج بهینه سازی حاصل از بررسی انجام شده بر روی این سازه توسط دیگر پژوهشگران با روش‌های مختلف مقایسه شده است. نتایج حاصل از بررسی سازه فوق در جدول (۵) و نمودار شکل (٦) قابل مشاهده است.

جدول ۳- ترکیب بار گذاری وارده به خرپای ۱۵ المانی فضایی

حالت بارگذاری	شماره گره	محور x	محور y	محور z
حالت اول	۱	۰/۰۰۰	۳/۵٦۸	۰/۰۰۰
	۲	۰/۰۰۰	۳/۵٦۸	۰/۰۰۰
	۳	۰/۰۰۰	۳/۵٦۸	۰/۰۰۰
حالت دوم	۱	۰/۰۰۰	۳/۵٦۸	۰/۰۰۰
	۲	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
	۳	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
حالت سوم	۱	۰/۰۰۰	۳/۵٦۸	۰/۰۰۰
	۲	۰/۰۰۰	۳/۵٦۸	۰/۰۰۰
	۳	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰



شکل ۵- خرپای ۱۵ المانی صفحه‌ای

محدودیت سطح مقطع(متغییرهای طراحی) مجزا برابر (۱/۱۳، ۱/٤۳، ۱/٤٦، ۱/۷۵، ۱/۸٦، ۲/۳٦، ۲/٦٦، ۲/۹۷، ۳/۰۹، ۳/۳٤، ۳/۳۸، ٤/۹۸، ۷/۳۷، ۷/۹۱، ۸/۰۸، ۱۰/٦٤) (cm^2) بر این سازه اعمال شده است. سازه حاضر تحت ۳۰ تکرار الگوریتم مورد تحلیل قرار گرفته است. ۱۰ دسته از نتایج حاصل از بررسی‌های عددی بهینه سازی انجام شده با استفاده از الگوریتم TLBO گرد آوری شده و در جدول (٤) ارائه شده است. از بین ۱۰ دسته پاسخ ارائه شده در جدول (٤) بهترین پاسخ انتخاب

جدول ٤- نتایج ۱۰ مورد از بهینه سازی‌های انجام شده بر روی خرپای ۱۵ المانی

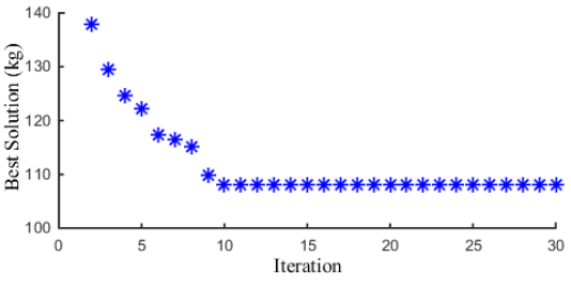
شماره عضو	سطح مقطع (cm^2)									
	بررسی ۱	بررسی ۲	بررسی ۳	بررسی ٤	بررسی ۵	بررسی ٦	بررسی ۷	بررسی ۸	بررسی ۹	بررسی ۱۰
۱	٦/٤۲	۲/۷۲	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳
۲	۲/۲۲	۳/۲۲	۲/۲۹	۱/۱۳	۲/۵۹	۲/۱۰	۱/۱۳	۱/۱۵	۱/۱۳	۱/۱۳
۳	۵/۱۷	۲/۳۲	۳/۱۲	۱/۱۵	۱/۱٤	۱/۵۵	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱٤
٤	۱/۸۸	۲/۹٤	۲/۱٤	۱/۵۸	۱/۱٤	۳/٤۲	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳
۵	۱/۱۸	۱/۸٤	۷/۳۷	۷/۳۷	۷/۳۷	۷/۳۷	۷/۳۷	۷/۳۷	۷/۳۷	۷/۳۷
٦	۲/۷۵	۱/۳۰	۱/۳۷	۲/۸٦	۱/۱٦	۱/۷۰	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳
۷	۳/۹٦	۳/۵۳	۱/۲۵	۱/۱۳	۲/۹٤	۱/۱۳	۱/۱٤	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳
۸	۱/٤۳	۳/٦۹	۷/۳۷	۷/۳۷	۷/۳۷	۷/۳۷	۷/۳۷	۷/۳۷	۷/۳۷	۷/۳۷
۹	۱/٤٦	۱/۹۸	۱/۱۷	۳/۹۵	۱/۱٤	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳
۱۰	۳/۰۲	۱/۸۸	۱/۷۹	۱/۱۸	۲/۰۰	۱/۳۸	۲/۸۱	۱/٦۱	۱/۹۱	۱/۱۳
۱۱	۱/۲٦	٦/۱٦	۲/۰٦	۱/۱۳	۱/۲۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۲۱	۱/۱۳	۱/۱۳
۱۲	۵/۵۸	۳/۹٦	۱/۱٤	۱/۳٦	۱/۱۵	۱/۱٤	۱/۲٤	۱/۲۹	۱/۱۳	۱/۱۳
۱۳	۳/۰۷	۳/۹۹	۱/۱٤	۱/۱۳	۱/۳۸	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/٦۲	۱/۱۳	۱/۱۳
۱٤	۲/٦۷	۲/۸۳	۳/۳٤	۳/۳٤	۳/۳٤	۳/۳٤	۳/۳٤	۳/۳٤	۳/۳٤	۳/۳٤
۱۵	۵/۲٤	۱/۷٦	۳/۳٤	۳/۳٤	۳/۳٤	۳/۳٤	۳/۳٤	۳/۳٤	۳/۳٤	۳/۳٤
وزن (kg)	۱٤۵/۸۱٤	۱٤٤/۳۷۱	۱۲٦/۹۳۵	۱۲٤/۸۵۰	۱۲۱/٤٦۸	۱۱۹/٤٦۵	۱۱۳/۵۷۷	۱۱۲/٦۲۵	۱۱۰/۳۸۰	۱۰۸/۰۹٤
وزن میانگین (kg)	۱۲۲/۷۵۸									
تعداد تحلیل	۲۰۵٤	۲۰۵٤	۲۰۵٤	۲۰۵٤	۲۰۵٤	۲۰۵٤	۲۰۵٤	۲۰۵٤	۲۰۵٤	۲۰۵٤

www.SID.ir

Downloaded from journalisss.ir at 10:38 +0430 on Tuesday August 8th 2017

جدول ۵- مقایسه نتایج الگوریتم TLBO با دیگر روش‌ها بر روی خرپای ۱۵ المانی

شماره عضو	سطح مقطع (cm^2)						
	[۱۵] IHGA	[۱۳] PSO	[۱۳] PSOPC	[۱٤] HPSO	[۱٦] MBA	[۱۷] WOA	الگوریتم TLBO
۱	۳/۰۹	۱/۸٦	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳
۲	۱/۷۵	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳
۳	۳/۳۸	۱/٤۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱٤
٤	۱/٤۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳
۵	۷/۳۷	۷/۳۷	۷/۳۷	۷/۳۷	۷/۳۷	۷/۳۷	۷/۳۷
٦	۱/۸٦	۱/٤۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳
۷	۲/٦٦	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳
۸	۵/۰۸	۷/۳۷	۷/۳۷	۷/۳۷	۷/۳۷	۷/۳۷	۷/۳۷
۹	۱/٤۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳
۱۰	۵/۰۸	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳
۱۱	۲/۷۹	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳
۱۲	۱/۷۵	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳
۱۳	۲/۹۷	۱/۱۳	۱/۸٦	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳
۱٤	۲/۳٦	۳/۳٤	۳/۳٤	۳/۳٤	۳/۳٤	۳/۳٤	۳/۳٤
	۲/٦٦	۳/۳٤	۳/۳٤	۳/۳٤	۳/۳٤	۳/۳٤	۳/۳٤
وزن (kg)	۱٤۲/۱۱۷	۱۰۸/۸٤۰	۱۰۸/۹٦۰	۱۰۵/۷۳۵	۱۰۵/۷۳۵	۱۰۵/۷۳۵	۱۰۸/۰۹٤
تعداد تحلیل	٤۰۰۰۰	۲۵۰۵۰	۲۵۰۵۰	۲۵۰۵۰	۳۳۰۰	٤۰۰۰	۲۰۵٤



شکل ٦- نمودار بهترین پاسخ در هر تکرار (خرپای پانزده المانی)

بررسی جدول (۵) و نمودار شکل (٦) نشان می‌دهد که الگوریتم در تکرار ۱۰ پس از ۲۰۵٤ تحلیل سازه ای عدد بهینه ۱۰۸/۰۹٤ kg را برای وزن این سازه ارائه می‌کند. مقاطع بهینه ارائه شده توسط الگوریتم TLBO در بازه بسیار نزدیکی از مقاطع پیشنهادی بهینه توسط دیگر روش‌های حاضر در این بخش است. الگوریتم TLBO با ۲/۱۸۲ ٪ وزن بهینه کمتر کارایی خود را به ترتیب با درصد تحلیل کمتر معادل ۳۷/۷۵۷ ٪ و ٤۸/٦۵ ٪ نسبت به روشهای MBA [۱٦] و WOA [۱۷] نشان می‌دهد. از سویی الگوریتم TLBO نسبت به میانگین وزن‌های بهینه محاسبه شده توسط روش‌های موجود در این بخش، با ٤/۲۱۷ ٪ وزن بهینه کمتر عملکرد خود را با ۸۹/۹۳۵ ٪ تحلیل کمتر نشان می‌دهد.

٤-۳- خرپای بیست و دو المانی فضایی

سومین مورد بر تحلیل خرپای فضایی شکل (۷) تمرکز دارد. خرپای فوق توسط پژوهشگران بسیاری با استفاده از روش‌های دیگر از قبیل، روش‌های ریاضی [۱۸] و [۱۹] ، روش جستجوی هارمونی [۲۰]، الگوریتم‌های تجمع ذرات و تجمع ذرات با اعضای کاهنده و تجمع ذرات ابتکاری [۲۱]، مورد بررسی و بهینه سازی قرار گرفته است.

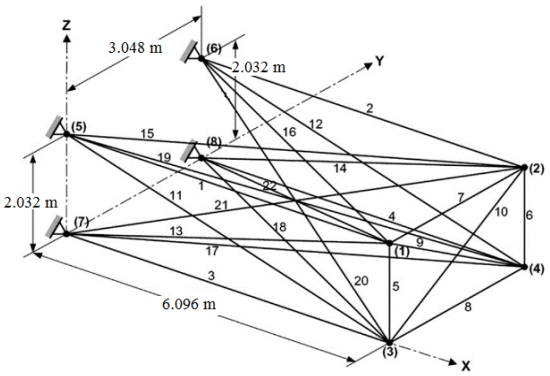
خرپای فضایی شکل (۷) دارای ۲۲ عضو با ترکیب بار گذاری خلاصه شده در جدول (٦) است که مشخصات هندسی سازه در شکل (۷) ارائه شده است. بر اساس جدول (۷) هفت گروه المانی برای این خرپا در نظر گرفته شده است. محدودیت جابجایی در جهات x، y و z برابر ۵/۰۸ cm± و محدودیت حد

Arhive

www.SID.ir

Downloaded from journalisss.ir at 10:38 +0430 on Tuesday August 8th 2017

تنش برابر $\pm$۲۵۳۱/۰۵ kg/cm^2 بر سازه اعمال است، وزن مخصوص مصالح خرپا برابر ۲/۷۶۸×۱۰$^{-۳}$ kg/cm^3 بوده و مدول الاستیسیته مصالح ۷۰۳۰۷۰ kg/cm^2 است.



شکل ۷- خرپای ۲۲ المانی فضایی

جدول ٦- ترکیب بار گذاری وارده به خرپای ۲۲ المانی فضایی

حالت بارگذاری	شماره گره	محور x	محور y	محور z
حالت اول	۱	-۹/۰۷۲	۰/۰۰۰	-۲/۲٦۸
	۲	-۹/۰۷۲	۰/۰۰۰	-۲/۲٦۸
	۳	-۹/۰۷۲	۰/۰۰۰	-۱۳/٦۰۸
	٤	-۹/۰۷۲	۰/۰۰۰	-۱۳/٦۰۸
حالت دوم	۱	-۹/۰۷۲	-۲/۲٦۸	۰/۰۰۰
	۲	-۹/۰۷۲	-۲/۲٦۸	۰/۰۰۰
	۳	-۹/۰۷۲	-۲/۲٦۸	۰/۰۰۰
	٤	-۹/۰۷۲	-۲/۲٦۸	۰/۰۰۰
حالت سوم	۱	-۹/۰۷۲	۰/۰۰۰	۱۵/۸۷٦
	۲	-۹/۰۷۲	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
	۳	-۹/۰۷۲	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
	٤	-۹/۰۷۲	۰/۰۰۰	-۱۵/۸۷٦

جدول ۷- گروه بندی المانی خرپای ۲۲ المانی فضایی

شماره گروه المانی	شماره المان	شماره گروه المانی	شماره المان
۱	۱،۲ ۳،٤	۵	۱۲،۱۱ ۱٤،۱۳
۲	٦،۵	٦	۱٦،۱۵ ۱۸،۱۷
۳	۸،۷	۷	۲۰،۱۹ ۲۲،۲۱
٤	۱۰،۹		

محدودیت سطح مقطع عرضی بین ۰/٦٤۵ cm^2 تا ۱۹۳/۵٤۸ cm^2 برای هر گروه المانی اعمال شده است. سازه حاضر تحت ٤۰ تکرار الگوریتم مورد بررسی قرار گرفته است. ۱۰ دسته از نتایج حاصل از بررسی‌های عددی بهینه سازی با استفاده از الگوریتم گرد آوری شده و در جدول (۸) ارائه شده است. از بین ۱۰ دسته پاسخ ارائه شده در جدول (۸) بهترین پاسخ انتخاب شده و در جدول (۹) با نتایج بهینه سازی حاصل از بررسی انجام شده توسط دیگر پژوهشگران با روش‌های مختلف بر روی این سازه مقایسه شده است. نتایج حاصل از بررسی سازه حاضر در جدول (۹) و نمودار شکل (۸) قابل مشاهده است.

نمودار شکل (۸) نشان می‌دهد که از تکرار ۱۱ به بعد نتایج همگرا می‌شود، لذا الگوریتم TLBO در تکرار ۱۱ پس از ۲۲۸۰ تحلیل سازه ای مقدار بهینه وزن برابر ٤٤٤/۰۰٦ kg را برای خرپای حاضر ارائه می‌کند. در مقایسه با روش‌های PSOPC و HPSO [۲۱]، الگوریتم TLBO به ترتیب با ۰/۱۰۹٪ و ۰/۱۰۸٪ وزن بهینه بیشتر ولی با ۹۰/۸۹۸٪ و ۱۰/۵۸۸٪ تعداد تحلیل سازه‌ای کمتر به پاسخ بهینه رسیده است. از جهتی در مقایسه با میانگین مقادیر محاسباتی حاصل از روش HS [۲۰] و روش‌های PSO و PSOPC و HPSO [۲۱] الگوریتم TLBO با ۲/۹٦٪ وزن بهینه پایین تر و همچنین ۹۰/۱۵٦٪ تعداد تحلیل سازه‌ای کمتر کارایی خود را نشان می‌دهد.

٤-٤- خرپای بیست و پنج المانی

چهارمین مورد بر تحلیل خرپای فضایی شکل (۹) تمرکز دارد. این سازه نیز توسط پژوهشگران بسیاری با روش‌های بهینه سازی دیگر از جمله، الگوریتم ژنتیک [۱۰]، الگوریتم تجمع ذرات و الگوریتم‌های ابتکاری تجمع ذرات [۱۳]، الگوریتم جستجوی هماهنگ ابتکاری [۲۲]، الگوریتم زنبور عسل [۲۳]، ترکیب الگوریتم تجمع ذرات و الگوریتم تجمع پرستو [٤]، مورد بررسی قرار گرفته و بهینه شده است.

[1] Harmony Search Heuristic Algorithm (HSHA)

Archive of SID

www.SID.ir

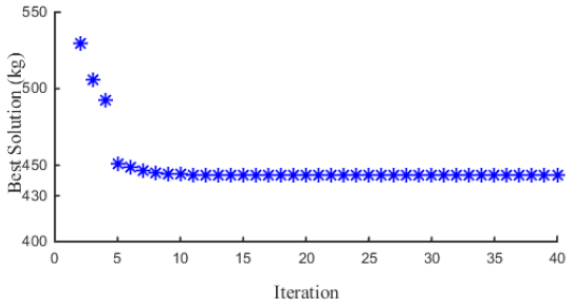
Downloaded from journalisss.ir at 10:38 +0430 on Tuesday August 8th 2017

جدول ۸- نتایج ۱۰ مورد از بهینه سازی‌های انجام شده بر روی خرپای ۲۲ المانی فضایی

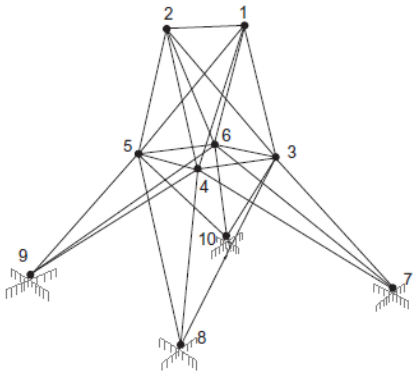
گروه المانی	شماره عضو	سطح مقطع (cm^2)									
		بررسی ۱	بررسی ۲	بررسی ۳	بررسی ٤	بررسی ٥	بررسی ٦	بررسی ۷	بررسی ۸	بررسی ۹	بررسی ۱۰
۱	۱-٤	۲٤/٥۸	۲٤/٥۰	۲۲/٥۹	۲٤/۷۲	۲٥/٤۲	۲٤/۷۹	۲۳/٤٥	۲٤/۷٤	۲۳/۹۷	۲۳/٤٥
۲	٥-٦	۱/۷۷	۳/۱۲	۳/۹۱	۱/٥۲	۰/٦٥	۱/۳۰	۳/۲۸	۰/۷٤	۳/۱۸	۲/۹۷
۳	۷-۸	۰/۹۰	۲/۳٥	۳/۳٥	۱/۳٥	۰/٦٥	۰/٦٥	۱/۷۹	۰/۷٤	۱/۲۸	۱/٤۱
٤	۹-۱۰	۰/٦٥	۱/۲۸	۱/٥٤	۰/۹۰	۰/٦٥	۰/٦٥	۰/٦٥	۰/٦٥	۰/٦٥	۰/٦٥
٥	۱۱-۱٤	۲٦/٦۳	۲٥/۷٦	۲٥/۷۷	۲٦/۰۱	۲٥/۹۸	۲۷/۷۸	۲٥/۷٤	۲٥/۹٤	۲٥/٥٥	۲٥/۱۳
٦	۱٥-۱۸	۱۷/۰٤	۱٤/۸٦	۱٥/۸۳	۱۷/۲٤	۱۷/۸۹	۱۷/٦۸	۱٥/۲٤	۱٥/۲٤	۱۷/٤۱	۱۷/۰٦
۷	۱۹-۲۲	۸/۷۹	٥/۱۹	۹/۹٤	۲/۱۰	٥/۷۲	۹/٥۲	٥/۲۳	۹/۷۷	۳/۹۷	٦/۷۸
وزن (kg)		٤٥۷/٦٥۱	٤٥۱/۷۷۹	٤٥۱/٤٦۹	٤٤۸/۸۰۹	٤٤۷/۸۸۰	٤٤٦/٦۸۹	٤٤٦/۰۳۹	٤٤٤/٤٦۸	٤٤٤/۳۷٤	٤٤٤/۰۰٦
وزن میانگین (kg)		٤٤۸/۳٥٦									
تعداد تحلیل		۲۰٥۲	۲۰٥۲	۲۰٥۲	۲۰٥۲	۲۰٥۲	۲۰٥۲	۲۰٥۲	۲۰٥۲	۲۰٥۲	۲۲۸۰

جدول ۹- مقایسه نتایج الگوریتم TLBO با دیگر روش‌ها بر روی خرپای ۲۲ المانی فضایی

گروه المانی	شماره عضو	سطح مقطع (cm^2)						
		[۱۸] روش‌های ریاضی	[۱۹] روش‌های ریاضی	[۲۰] HS	[۲۱] PSO	[۲۱] PSOPC	[۲۱] HPSO	الگوریتم TLBO
۱	۱-٤	۱٦/۹٦	۱٦/٥٤	۱٦/۷۰	۱۰/٦۹	۱۹/٦۲	۲۰/۳۷	۲۳/٤٥
۲	٥-٦	۷/٥۰	۱۰/۰۲	٦/۹۹	٤/٦۲	۷/٦۸	۸/۱۹	۲/۹۷
۳	۷-۸	۲/۲۱	۱/۸۱	۲/۳٤	٥/۹۳	٦/۳٥	٦/۳۲	۱/٤۱
٤	۹-۱۰	۲/۷۳	۳/۳۰	۲/۷۲	۱/۱۳	۰/٦۸	۰/٦٥	۰/٦٥
٥	۱۱-۱٤	۱۷/۹٥	۱٦/۹٤	۱۸/۲٤	۲۹/٥۲	۲۲/۱۳	۲۱/۱٦	۲٥/۱۳
٦	۱٥-۱۸	۱٤/۰۲	۱۳/۷٥	۱۳/۲٦	۲۰/۸۰	۹/۹٥	۹/۰٥	۱۷/۰٦
۷	۱۹-۲۲	۱۲/٥۹	۱٤/۲۸	۱۳/۱۹	۲/۹۰	۷/۳٤	۸/۳۹	٦/۷۸
وزن (kg)		٤٦٤/۸٤۱	٤٦۹/۳٥۰	٤٦۳/٦۷٦	٥۱۱/٤۷۹	٤٤۳/٥۲۳	٤٤۳/٥۲۷	٤٤٤/۰۰٦
تعداد تحلیل		---	---	۱٥۰۰۰	٥۰۰٥۰	۲٥۰٥۰	۲٥٥۰	۲۲۸۰



شکل ۸- نمودار بهترین پاسخ در هر تکرار (خرپای بیست و دو المانی)



شکل ۹- خرپای ۲۵ المانی فضایی

www.SID.ir

Downloaded from journalisss.ir at 10:38 +0430 on Tuesday August 8th 2017

خرپای فضایی شکل (۹) دارای ۲۵ عضو با مشخصات هندسی سازه خلاصه شده در جدول (۱۰) است که گروه بندی المانی سازه در جدول (۱۱) ارائه شده است. به گره ۱ نیروی ton ۰/٤٥٤ در جهت مثبت محور x و نیروهای ton ٤/٥٤- در جهات y و z به گره‌های ۱ و ۲ و نیروهای ton ۰/۲۲۷ و ton ۰/۲۷۲ در جهت محور x به ترتیب به گره‌های ۳ و ٦ این خرپا وارد می‌شوند. محدودیت جابجایی در جهات x، y و z برابر cm ±۰/۸۸۹ و محدودیت حد تنش برابر $\pm$۲۸۱۲/۲۷۸ kg/cm^2 در نظر گرفته شده است، وزن مخصوص مصالح خرپا برابر $۲/۷٦۸\times۱۰^{-۳}$ kg/cm^3 بوده و مدول الاستیک مصالح ۷۰۳۰۷۰ kg/cm^2 است. محدودیت سطح مقطع عرضی بین ۰/۰٦ cm^2 تا ۳۸/۷۱ cm^2 برای هر گروه المانی اعمال شده است. سازه حاضر تحت ٤۰ تکرار الگوریتم TLBO مورد بررسی قرار گرفت. برای این سازه ۱۰ دسته از نتایج حاصل از بررسی‌های عددی بهینه سازی گردآوری شده و در جدول (۱۲) ارائه شده است. از بین ۱۰ دسته پاسخ ارائه شده در جدول (۱۲) بهترین پاسخ انتخاب شده و در جدول (۱۳) با نتایج بهینه سازی حاصل از بررسی انجام شده با روش‌های مختلف بر روی این سازه مقایسه شده است. جهت بررسی کارایی الگوریتم جدول (۱۳) و نمودار شکل (۱۰) ارائه شده است.

جدول ۱۰- مشخصات هندسی خرپای ۲۵ المانی فضایی

شماره گروه	مختصات گرهی گره‌ها (m)		
	محور x	محور y	محور z
۱	-۰/۹۵۳	۰/۰۰	۵/۰۸
۲	۰/۹۵۳	۰/۰۰	۵/۰۸
۳	-۰/۹۵۳	۰/۹۵۳	۲/٥٤
٤	۰/۹۵۳	۰/۹۵۳	۲/٥٤
٥	۰/۹۵۳	-۰/۹۵۳	۲/٥٤
٦	-۰/۹۵۳	-۰/۹۵۳	۲/٥٤
۷	- ۲/٥٤	۲/٥٤	۰/۰۰
۸	۲/٥٤	۲/٥٤	۰/۰۰
۹	۲/٥٤	- ۲/٥٤	۰/۰۰
۱۰	- ۲/٥٤	- ۲/٥٤	۰/۰۰

جدول ۱۱- گروه بندی المانی خرپای ۲۵ المانی فضایی

شماره گروه المانی	(شماره المان: گره ابتدایی، گره انتهایی)	شماره گروه المانی	(شماره المان: گره ابتدایی، گره انتهایی)
۱	(۱: ۱، ۲)	٥	(۱۲: ۳، ٤) (۱۳: ٦، ٥)
۲	(۲: ۱، ٤) ، (۳: ۲، ۳) ، (٤: ۱، ٥) ، (٥: ۲، ٦)	٦	(۱٤: ۳، ۱۰) ، (۱٥: ٦، ۷) ، (۱٦: ٤، ۹) ، (۱۷: ٥، ۸)
۳	(٦: ۲، ٤) ، (۷: ۲، ٥) ، (۸: ۱، ۳) ، (۹: ۱، ٦)	۷	(۱۸: ٤، ۷) ، (۱۹: ۳، ۸) ، (۲۰: ٥، ۱۰) ، (۲۱: ٦، ۹)
٤	(۱۰: ٦، ۳) ، (۱۱: ٥، ٤)	۸	(۲۲: ٦، ۱۰) ، (۲۳: ۳، ۷) ، (۲٤: ٤، ۸) ، (۲٥: ٥، ۹)

جدول ۱۲- نتایج ۱۰ مورد از بهینه سازی‌های انجام شده بر روی خرپای ۲۵ المانی فضایی

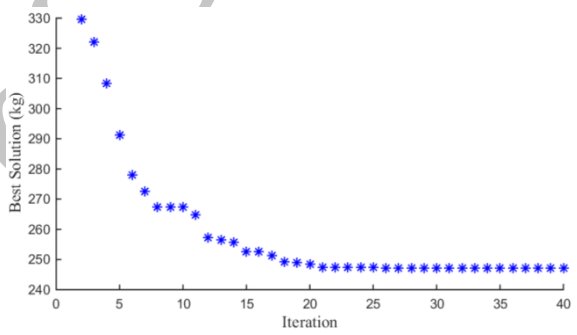
گروه المانی	شماره عضو	سطح مقطع (cm^2)									
		بررسی ۱	بررسی ۲	بررسی ۳	بررسی ٤	بررسی ٥	بررسی ٦	بررسی ۷	بررسی ۸	بررسی ۹	بررسی ۱۰
۱	۱	۰/۰٦	۰/۰٦	۰/۰٦	۰/۰٦	۰/۱۲	۰/۰٦	۰/۰٦	۰/۰٦	۰/۰٦	۰/۰٦
۲	۲-٥	۱۳/۰۱	۱۳/۱۹	۱۲/۸٦	۱۲/٤۸	۱۲/۰٦	۱۲/۳۳	۱۲/۸٥	۱۱/۹٦	۱۲/۸٥	۱۲/۸۸
۳	٦-۹	۱۹/۳٥	۱۹/۳٦	۱۹/۳٥	۱۹/٥۳	۱۱/۸٦	۱۹/۳۷	۱۹/٤٦	۲۰/۰۸	۱۹/۳۱	۱۹/۲۹
٤	۱۰-۱۱	۰/۰٦	۰/۰٦	۰/۰٦	۰/۰٦	۰/۱۲	۰/۰٦	۰/۰٦	۰/۰٦	۰/۰٦	۰/۰٦
٥	۱۲-۱۳	۰/۰٦	۰/۰٦	۰/۰٦	۰/۰٦	۰/۱۲	۰/۰٦	۰/۰٦	۰/۰٦	۰/۰٦	۰/۰٦
٦	۱٤-۱۷	٤/٥۲	٤/۳٦	٤/۳۸	٤/٤۱	٥/۱٦	٤/٤٦	٤/۳٦	٤/۳٦	٤/٤۳	٤/٤۳
۷	۱۸-۲۱	۱۱/٦۷	۱۱/٥۸	۱۱/٥۸	۱۱/٦٤	۹/۲۲	۱۱/۷٥	۱۱/۳۲	۱۱/۳۳	۱۰/۸۳	۱۰/۸۳
۸	۲۲-۲٥	۱۸/۱٦	۱۸/۱٦	۱۸/۲۱	۱۸/۰۲	۲۲/۰٥	۱۷/۷۰	۱۷/٦۱	۱۷/٥۸	۱۷/۱۳	۱۷/۱۱
وزن (kg)		۲٥٦/۷۰٦	۲٥٦/۰۸٥	۲٥٥/۱۷۷	۲٥٤/۱۱۰	۲٥۲/۹۱۱	۲٥۲/٦۰٦	۲٥۱/۷۳۷	۲٥۰/۳۰۲	۲٤۷/۳۷۲	۲٤۷/۳۳٥
وزن میانگین (kg)		۲٥۲/٤۳٤									
تعداد تحلیل		٤۳۳۲	٤۳۳۲	٤۳۳۲	٤۳۳۲	٤۳۳۲	٤۳۳۲	٤۳۳۲	٤۳۳۲	٤٥٦۰	٤٥٦۰

www.SID.ir
Archive of SID

Downloaded from journalisss.ir at 10:38 +0430 on Tuesday August 8th 2017

جدول ۱۳- مقایسه نتایج الگوریتم TLBO با دیگر روش‌ها بر روی خرپای ۲۵ المانی فضایی

گروه المانی	شماره عضو	[۱۰] GA	[۲۲] HSHA	[۱۳] PSO	[۱۳] PSOPC	[۱۳] HPSO	[۲۳] ABC	[٤] ترکیب PSO و SSO	الگوریتم TLBO
۱	۱	۲/۵۸	۰/۰٦	۰/۰٦	۰/۰٦	۰/۰٦	۰.۰۷	۰/۰٦	۰/۰٦
۲	۲-۵	۱۲/۹۰	۱۲/۹۰	۱۲/۹۰	۱۲/۹۰	۱۲/۹۰	۱۲/۷۷	۱۲/۸٤	۱۲/۸۸
۳	٦-۹	۲۳/۲۳	۲۳/۲۳	۲۳/۲۳	۲۳/۲۳	۲۳/۲۳	۱۹/۳۷	۱۹/۲۸	۱۹/۲۹
٤	۱۰-۱۱	۰/۰٦	۰/۰٦	۰/۰٦	۰/۰٦	۰/۰٦	۰/۰٦	۰/۰٦	۰/۰٦
٥	۱۲-۱۳	۰/۰٦	۰/۰٦	۲/۵۸	۰/۰٦	۰/۰٦	۰/۰٦	۰/۰٦	۰/۰٦
٦	۱٤-۱۷	٥/۱٦	٥/۱٦	٥/۱٦	٥/۱٦	٥/۱٦	٤/٤٥	٤/٤٠	٤/٤۳
۷	۱۸-۲۱	۱۲/۹۰	۱۰/۳۲	۱۰/۳۲	۱۰/۳۲	۱۰/۳۲	۱۰/۸۳	۱۰/۸۲	۱۰/۸۳
۸	۲۲-۲٥	۱٥/٤۸	۱٥/٤۸	۱٥/٤۸	۱٥/٤۸	۱٥/٤۸	۱۷/۱۱	۱۷/۲۰	۱۷/۱۱
وزن (kg)		۲٦۸/۷٥۳	۲٥٤/۲۷۹	۲٥٤/۲۷۹	۲٥٤/۲۷۹	۲٥٤/۲۷۹	۲٤۷/۲۹٤	۲٤۷/۲۸۲	۲٤۷/۳۳٥
تعداد تحلیل		٤۰۰۰۰	۲۷۳٤۳ و ۷۱۳۰	۲٥۰۰۰	۲٥۰۰۰	۲٥۰۰۰	٥۰۰۰۰۰	۱۳۳۲٦	٤٥٦۰



شکل ۱۰- نمودار بهترین پاسخ در هر تکرار (خرپای بیست و پنج المانی)

از جدول (۱۳) و نمودار شکل (۱۰) قابل مشاهده است که الگوریتم در تکرار ۲۱ پس از ٤٥٦۰ تحلیل سازه ای، وزن بهینه ۲٤۷/۳۳٥ kg را محاسبه می‌کند. در مقایسه با روش ABC [۲۳] و روش ترکیب روش‌های PSO و SSO [٤] به ترتیب با ۰/۰۱٦ ٪ و ۰/۰۲۱ ٪ وزن بهینه بیشتر و همچنین با ۹۰/۸۸۰ ٪ و ٦٥/۷۸۱ ٪ تعداد تحلیل سازه ای کمتر پاسخ بهینه را محاسبه می‌کند. از سویی با مقایسه نتایج الگوریتم حاضر با مقادیر میانگین حاصل از نتایج روش‌های موجود در مسئله حاضر مشخص می‌گردد که الگوریتم TLBO با ۲/۷٥۷ ٪ وزن بهینه کمتر و ۹٤/۷٦۳ ٪ تعداد تحلیل سازه ای کمتر به پاسخ بهینه می‌رسد که نشانگر کارایی خوب این الگوریتم است.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از نسخه‌ای از الگوریتم TLBO مبنی بر الگوریتم TLBO اصلاح شده، بر اساس روش پیشنهادی توسط Rao [۸]، بهینه سازی وزن سازه‌های فولادی انجام شد. سازه‌های مورد بررسی شامل چهار خرپای فولادی دارای ۱۰ تا ۲۵ المان بود که دو مورد از آنها خرپای صفحه‌ای و دو مورد دیگر خرپای فضایی بود. نتایج بررسی حاصل از الگوریتم TLBO با دیگر روش‌های بهینه سازی موجود در این پژوهش مقایسه شد. با توجه به بررسی انجام شده الگوریتم TLBO نسبت به روش‌های SSA [۱٤] و GA [۱۰] به ترتیب با ۰/۰۲۳ ٪ وزن کمتر و ۲۰/۲۷۹ ٪ وزن بیشتر، با ۸۰/۸٤۸ ٪ و ۷٦/۰٦ ٪ تعداد تحلیل کمتر و با ۲/۲٦٥ ٪ وزن بهینه کمتر و ۷٥/٦۹٥ ٪ تعداد تحلیل کمتر نسبت به میانگین مقادیر محاسباتی حاصل از دیگر روش‌های بهینه سازی خرپای ۱۰ المانی را بهینه می‌کند. همچنین خرپای ۱٥ المانی را نسبت به روش‌های MBA [۱٦] و WOA [۱۷] با ۲/۱۸۲٪ وزن بهینه کمتر، به ترتیب با ۳۷/۷٥۷٪ و ٤۸/٦٥٪ تعداد تحلیل سازه‌ای کمتر بهینه می‌کند. از طرفی الگوریتم TLBO نسبت به روش های PSOPC و HPSO [۲۱] به ترتیب با ۰/۱۰۹٪ و ۰/۱۰۸٪ وزن بهینه بیشتر اما با ۹۰/۸۹۸٪ و ۱۰/٥۸۸٪ تعداد تحلیل کمتر و همچنین با ۲/۹٦٪ وزن کمتر و ۹۰/۱٥٦٪ تعداد تحلیل کمتر نسبت به میانگین

www.SID.ir

مقادیر محاسباتی حاصل از دیگر روش های بهینه سازی بررسی شده، خرپای ۲۲ المانی را بهینه می‌کند. و همانطور که از نتایج قابل مشاهده است الگوریتم TLBO خرپای ۲۵ المانی را نسبت به روش ABC [۲۳] و نسبت به روش ترکیب روش های PSO و SSO [٤]، به ترتیب با ۰/۰۱٦٪ و ۰/۰۲۱٪ وزن بهینه کمتر و همچنین به ترتیب با ۹۰/۸۸٪ و ٦٥/۷۸۱٪ تعداد تحلیل سازه‌ای کمتر، بهینه می‌کند. همچنین الگوریتم TLBO نسبت به میانگین مقادیر محاسباتی روش های بهینه سازی ارائه شده توسط دیگر پژوهشگران جهت بهینه سازی خرپای ۲۵ المانی، با ۲/۷۵۷٪ وزن بهینه کمتر و همچنین ۹٤/۷٦۳٪ تعداد تحلیل سازه‌ای کمتر خرپای مورد نظر را بهینه می‌کند. نتایج نشان داد که الگوریتم TLBO با کارایی خوبی عمل می‌کند و نسبت به سایر روش‌ها عملکرد خوبی در محاسبه وزن بهینه دارد. در بیشتر موارد این الگوریتم وزن بهینه محاسباتی بهتر (کمتر) از نتایج دیگر پژوهشگران داشته یا در برخی موارد در مقایسه با دیگر روش‌ها پاسخ بهینه با اختلاف کمی بیشتر از آنها داشت، این در حالی است که تعداد محاسبات سازه ای الگوریتم TLBO جهت دستیابی به بهترین پاسخ از تمامی روش‌های دیگر که در این پژوهش ذکر شده است، کمتر است. یک خواننده تیز بین در نظر دارد که به جهت آنکه الگوریتم TLBO دارای دو فاز محاسباتی است (فاز معلم و فاز دانش آموز) لذا تعداد محاسبات انجام شده در هر تکرار دو برابر دیگر الگوریتم‌های بهینه سازی است. الگوریتم حاضر به جهت پارامترهای کنترلی کم، چون بررسی میانگین داده‌ها و تعداد جمعیت و تعداد متغییر طراحی (بهینه سازی)، سرعت بالایی در محاسبه مقادیر بهینه دارد که مبین این ادعا، تعداد کم تکرار محاسبات سازه‌ای آن جهت محاسبه پاسخ بهینه است.

٦- مراجع

[1] Adeli, H. and Kamal, O. (1986), "Efficient Optimization of Space Trusses", International Journal of Computer and Structures, Vol. 24, No. 3, pp. 501-511.

[2] Holland, J. (1975), "Adaptation in Natural and Artificial Systems: an Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence", The University of Michigan Press, pp. 183.

[3] Dorigo, M. (1992), "Optimization, Learning and Natural Algorithms", PhD Thesis, Dip. Electronica e Informazione Politecnico di Milano, Italy.

[4] Kaveh, A., Bakhshpoori, T. and Afshari, E. (2014), "An Efficient Hybrid Particle Swarm and Swallow Swarm Optimization Algorithm", International Journal of Computer and Structures, Vol. 143, pp. 40-59.

[5] Gellatly, R., Berke, L. and Gibson, W. (1971), "The Use of Optimality Criteria in Automated Structural Design", In: AFFDL, Proceedings of 3rd Conference on Matrix Methods in Structural Analysis.

[6] Hirschberg, O.H., (1967), "Analysis of the Future: the Delphi Method", Rand Corp, Santa Monica, Calif, pp. 3558-3560

[7] Erol, O.K. and Eksin, I. (2006), "A New Optimization Method: Big Bang-Big Crunch", Journal of Advances in Engineering Software, Vol. 37, pp. 106-111.

[8] Rao, V.R., Savsani, J.V. and Vakharia, P.V. (2011), "Teaching-Learning-based Optimization: a Novel Method for Constrained Mechanical Design Optimization Problems", Journal of Computer-Aided Design, Vol. 43, No. 3, pp. 303-315.

[9] Camp, C.V. (2007), "Design of Space Trusses Using Big Bang-Big Crunch Optimization", International Journal of Structural Engineering, Vol. 133, No. 7, pp. 999-1008.

[10] Wu, S.J. and Chow, P.T. (1995), "Steady-State Genetic Algorithms for Discrete Optimization of Trusses", International Journal of Computer and Structures, Vol. 56, No. 6, pp. 979-991.

[11] Sonmez, M. (2011), "Discrete Optimum Design of Truss Structures Using Artificial Bee Colony Algorithm", Journal of Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol. 43, No. 1, pp. 85-97.

[12] Camp, C.V. and Bichon, B.J. (2004), "Design of Space Trusses Using Ant Colony Optimization", International Journal of Structural Engineering, Vol. 130, No. 5, pp. 741-751.

[13] Li, L. J., Huang, Z. B. and Liu, F. (2009), "A Heuristic Particle Swarm Optimization Method for Truss Structures with Discrete Variables", International Journal of Computer and Structures, Vol. 87, No. 7-8, pp. 435-443.

[14] Li, H.S. and Ma, Y.Z. (2015), "Discrete Optimum Design for Truss Structures by Subset Simulation Algorithm", Journal of Aerospace Engineering, Vol. 28, No. 4, pp. 1414-1425.

[15] Zhang, Y.N., Liu, J.P., Liu, B., Zhu, C.Y. and Li, Y.(2003), "Application of Improved Hybrid Genetic Algorithm to Optimize", Journal of South China University Technology, Vol. 33, No. 3, pp. 69-72.

[16] Sadollah, A., Bahreininejad, A., Eskandar, H. and Hamdi, M. (2012), "Mine Blast Algorithm for Optimization of Truss Structures with Discrete Variables", International Journal of Computer and Structures, Vols. 102-103, pp. 49-61.

[17] Mirjalili, S.A. and Lewis, A. (2016), "The Whale Optimization Algorithm", Journal of Advances in Engineering Software, Vol. 95, pp. 51-67.

[18] Sheu, C. and Schmit, J.L. (1972), "Minimum weight Design of Elastic Redundant Trusses under Multiple Static Load Conditions", AIAA Journal, Vol. 10, No. 2, pp. 155-162.

[19] Khan, M., Willmert, K. and Thornton, W. (1979), "An Optimality Criterion Method for Large-Scale Structures", AIAA Journal, Vol. 17, No. 7, pp. 753-761.

[20] Lee, K.S. and Geem, Z.W. (2004), "A New Structural Optimization Method Based on the Harmony Search Algorithm", International Journal of Computer and Structures, Vol. 82, No. 9-10, pp. 781-798.

[21] Li, L.J., Huang, Z.B., Liu, F. and Wu, Q.H.(2007), "A Heuristic Particle Swarm Optimizer for Optimization of Pin Connected Structures", International Journal of Computer and Structures, Vol. 85, No. 7-8, pp. 340-349.

[22] Lee, K.S., Geem, Z.W., Lee, S.H. and Bae, K.W. (2005), "The Harmony Search Heuristic Algorithm for Discrete Structural Optimization", Journal of Engineering Optimization, Vol. 37, No. 7, pp. 663-684.

[23] Sonmez, M. (2011), "Artificial Bee Colony Algorithm for Optimization of Truss Structures", Journal of Applied Soft Computing, Vol. 11, No. 2, pp. 2406-2418.

Downloaded from journalisss.ir at 10:38 +0430 on Tuesday August 8th 2017

Archive of SID

www.SID.ir