

Nonlinear Dynamic Modeling and Form-finding of Class1 Three-Bar Tensegrity in Random Structures: Genetic Algorithm Approach

Morteza Jahan¹, Milad Azimi ^{2*}

¹ Ph.D. Student, Department of Astronautic, Aerospace Research Institute (Ministry of Science, Research and Technology), Tehran, Iran

² Assistant Professor, Department of Astronautic, Aerospace Research Institute (Ministry of Science, Research and Technology), Tehran, Iran

HIGHLIGHTS

- Free vibration analysis of sandwich conical shells is presented based on the semi-analytical and numerical methods.
- The closed-form solution of natural frequencies is developed for various boundary conditions.
- A comparison between the results of closed-form solution and ABAQUS FEM simulations is presented.

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 13 June 2024

Received in revised form: 24 August 2024

Accepted: 1 September 2024

Available online: 5 September 2024

*Correspondence: azimi.m@ari.ac.ir

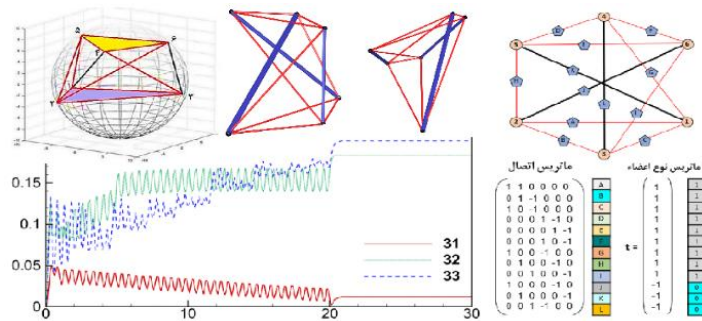
How to cite this article:

M. Jahan, M. Azimi. Nonlinear dynamic modeling and form-finding of class1 three-bar tensegrity in random structures: Genetic Algorithm approach. Journal of Aerospace Mechanics. 2024; 20 (3):87-107.

Keywords:

Tensegrity structure
Intelligent form finding
Genetic algorithm
Force Density
Vibrations Analysis

GRAPHICAL ABSTRACT



ABSTRACT

This article focuses on the derivation of nonlinear dynamic equations and form-finding using genetic algorithms for class 1 tensegrity structure. The structures under consideration feature a triangular cross-section, with a sphere enclosing them. The nonlinear dynamic equations of the system are obtained by applying the Lagrangian approach and the finite element method, considering the nodal positions as the generalized coordinates. The proposed approach illustrates how to develop large-scale, detailed dynamic models with different tensegrity structures. The form-finding approach employs a simple framework capable of identifying both regular and irregular tensegrity configurations without limitation on dimensions. Stable tensegrity structures are created by applying specific restrictions to random configurations. The genetic algorithm and multi-objective functions are used to determine the fitness function and create these structures. Three separate scenarios with both defined and random connection matrices and member types—bars and cables—evaluate the performance of the proposed method for arbitrary architectures. The resulting models are validated with regard to force density. The vibration behavior of the final models under harmonic loads is investigated via modal analysis. The simulation results demonstrate the efficacy of the proposed method in precisely determining the vibration characteristics of tensegrity structures through the application of an intelligent form-finding methodology.



مدل سازی دینامیک غیرخطی و فرمیابی سازه تنسگریتی سه میله ای نوع اول در ساختارهای تصادفی: رویکرد الگوریتم ژنتیک

مرتضی جهان^۱، میلاد عظیمی^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری، پژوهشکده سامانه های فضانوردی، پژوهشگاه هوافضا (وزارت علوم، تحقیقات و فناوری)، تهران، ایران

^۲ استادیار، پژوهشکده سامانه های فضانوردی، پژوهشگاه هوافضا (وزارت علوم، تحقیقات و فناوری)، تهران، ایران

برجسته ها

- فرمیابی سازه تنسگریتی با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک.
- استخراج معادلات دینامیک غیرخطی سیستم تنسگریتی.
- تجزیه و تحلیل نتایج در سه حالت با ماتریس اتصال و نوع اعضای (میله / ریسمان) شناخته شده یا تصادفی.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۲۴

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۰۳

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۱

ارائه برخط: ۱۴۰۳/۰۶/۱۵

* نویسنده مسئول: azimi.m@ari.ac.ir

کلیدواژه ها:

سازه تنسگریتی

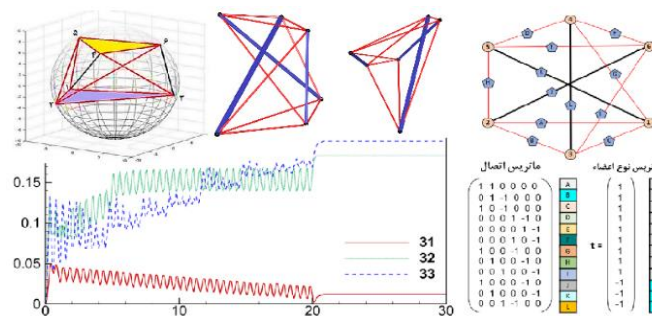
فرمیابی هوشمند

الگوریتم ژنتیک

چگالی نیرو

تحلیل ارتعاشات

چکیده گرافیکی



چکیده

در این مقاله به استخراج معادلات دینامیک غیرخطی و فرمیابی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک یک سازه تنسگریتی کلاس یک در ساختارهای تصادفی با مقطع مثلثی و محاط در کره پرداخته شده است. معادلات دینامیک غیرخطی سیستم با استفاده از روش لاگرانژ و روش المان محدود و با در نظر گرفتن مختصات گره ها به عنوان مختصات تعمیم یافته استخراج شده است. رویکرد پیشنهادی قابلیت مدل سازی دینامیکی جامع و گسترده ای را برای انواع سازه های تنسگریتی دارا می باشد. فرآیند فرمیابی پیشنهادی با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک، با ساختاری ساده قابلیت تعیین اشکال منظم یا نامنظم تنسگریتی بدون محدودیت های ابعادی را دارا می باشد. سازه های تنسگریتی پایدار از میان پیکربندی های تصادفی و بر اساس قیود تعریف شده، تولید و با استفاده از تابع تناسب الگوریتم ژنتیک و اهداف چند موضوعی فرمیابی می شوند. عملکرد الگوریتم فرمیابی پیشنهادی برای سازه های با ساختارهای نامشخص، در سه حالت مختلف با ماتریس اتصال و نوع عضوهای (میله / ریسمان) مشخص و تصادفی بررسی و با روش چگالی نیرو صحنه گذاری شده است. رفتار ارتعاشی مدل های نهایی استخراج شده از فرایند فرمیابی، با تحلیل مودال و تحت بارگذاری هارمونیک مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از شبیه سازی ها، قابلیت روش پیشنهادی با ملاحظات مشخصه های ارتعاشی سازه های تنسگریتی را نمایش می دهد.



۱- مقدمه

سازه‌های تنسگریتی سازه‌هایی خربایی با اتصال پینی هستند که از ریسمان‌های در کشش و میله‌های در فشار تشکیل شده‌اند. استفاده از سازه‌های تنسگریتی علیرغم نسبت سفتی به جرم بالا، قابلیت تغییر شکل و همگام‌سازی هندسه سازه متناسب با نیازهای عملیاتی را فراهم می‌کنند. امروزه این ساختارهای پایدار و درعین حال انعطاف‌پذیر برای پیاده‌سازی تکنولوژی‌های جدید به‌ویژه در حوزه روباتیک و سامانه‌های فضایی، مکانیک، بیومکانیک، معماری و عمران مورد نیاز است [۱-۵].

دینامیک سازه‌های تنسگریتی را می‌توان به دودسته طبقه‌بندی کرد. دسته اول متعلق به دینامیک صلب میله‌ها است که بر اساس اصل نیوتن اول یا دینامیک تحلیلی با فرض صلب بودن میله‌ها و رفتار کشسانی خطی ریسمان‌ها، به دست می‌آید. دسته دوم، دینامیک غیر صلب میله‌ها است که توسط روش‌های المان محدود با فرض الاستیک/پلاستیک بودن تمام اعضای سازه استخراج می‌شود [۶]. موراکی معادلات استاتیکی و دینامیکی تنسگریتی با تغییر شکل‌های بزرگ را به روش‌های اولیری و لاگرانژی مطالعه کرد [۷]. فاروقی و همکاران تحلیل دینامیک غیرخطی سازه‌های خربایی فضایی را بر اساس میله‌های سه‌بعدی هم‌چرخشی ارائه کرد [۸]. ریمولی یک مدل کاهش مرتبه یافته را برای بررسی رفتار کمانش و پس‌کمانش میله‌ها در ساختار تنسگریتی توسعه داد [۹]. کان و همکاران تحلیل دینامیکی سازه‌های تنسگریتی خوشه‌ای را به روش المان محدود با روابط موقعیتی به دست آوردند. تمام روش‌های فوق از استخراج معادلات یک عضو و در کنار هم قرار دادن تمام عضوهای سازه در یک ماتریس مونتاژ شده یا فرم برداری به دست می‌آیند.

تحلیل کامل دینامیک سازه تنسگریتی به دو بخش فرم‌یابی و تحلیل رفتار ارتعاشی تقسیم می‌شود. فرم‌یابی فرآیندی است که در آن بر اساس یک توپولوژی مشخص، هندسه پایدار سازه ایجاد می‌شود. اهمیت یافتن پیکربندی مناسب سازه در این است که اطمینان حاصل شود، سازه به‌صورت ایستا در تعادل است و می‌تواند مأموریت خود را به‌طور کامل

محقق کند. محققان روش‌های فرم‌یابی مختلفی شامل روش چگالی نیرو [۵، ۱۰]، المان محدود [۱۱، ۱۲]، آرام‌سازی دینامیکی [۱۳، ۱۴]، الگوریتم ژنتیک [۱۵] و مونت کارلو [۱۶، ۱۷] را پیشنهاد کرده‌اند. تیرت و پلگرینو روش‌های فرم‌یابی را به دو روش سینماتیکی و استاتیکی طبقه‌بندی کردند [۱۸]. هدف هر دو دسته، یافتن پیکربندی سازه مناسب در شرایط خودتنیده است.

روش‌های سینماتیکی بدون در نظر گرفتن پیش‌تیندگی در میله‌ها و ریسمان‌ها و با بیشینه و کمینه کردن طول اعضاء، هندسه سازه را استخراج می‌کنند. این روش‌ها ریسمان‌ها را در شرایط پیش‌تینده (همانند روش‌های عمومی برای ساخت سازه‌های تنسگریتی) در نظر نمی‌گیرند. روش‌های سینماتیکی رایج عبارت‌اند از روش آرام‌سازی دینامیکی، روش المان محدود و روش مونت کارلو. روش آرام‌سازی دینامیکی برای سازه‌هایی با مقیاس کوچک توسط موترو معرفی شد [۱۹]. در این روش از معادلات تعادل غیرخطی در حضور میرایی برای فرم‌یابی سازه‌های تنسگریتی استفاده می‌شود [۲۰]. حلقه فرم‌یابی در یک فرآیند تکرار که شامل محاسبه سرعت‌ها و نیروهای گره‌ها در هر لحظه و بررسی شرایط تعادل می‌باشد، از یک پیکربندی اولیه تا زمانی که شرایط تعادل ایجاد شود، صورت می‌پذیرد [۱۶]. این روش توسط موترو و ژانگ و او‌هساکا به‌عنوان یک روش فرم‌یابی برای اشکال نامنظم سازه‌های تنسگریتی استفاده شده است [۲۱]. باین‌حال، این روش برای سازه‌های مقیاس بزرگ روش مناسبی نیست. روش المان محدود برای تعیین پیکربندی ساختار تنسگریتی خودایستا توسط پگیتز و تور ارائه شد [۴]. این روش تضمین می‌کند که عضوهای سازه تنسگریتی در شرایط تعادلی هستند.

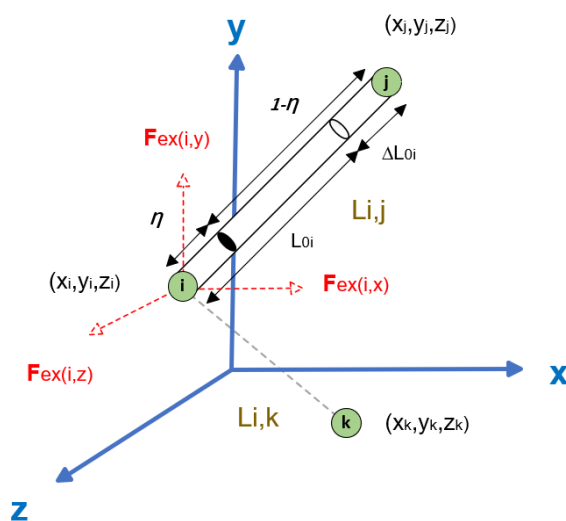
روش‌های فرم‌یابی رایج، پاسخگوی سازه‌های بزرگ، پیچیده و در حال تغییر نمی‌باشد و قابلیت استفاده هم‌زمان در الگوریتم‌های تغییر شکل و فرم‌یابی را ندارند. لذا استفاده از روش‌های فرم‌یابی هوشمند برای حل سریع مسائل پیچیده بیش‌ازپیش مورد نیاز است. عدم تقارن، پیچیدگی ساختار و تعداد زیاد عضوهای سازه‌ها، فرم‌یابی به روش‌های رایج را دشوار می‌کند. روش‌های هوشمند با استفاده از الگوریتم‌های مختلف، قابلیت فرم‌یابی سازه‌های نامشخص را دارند. در

- استفاده از توابع چند موضوعی در کنار بررسی تعادل سازه موجب بهینه سازی ساختار تنسگریتی در فرایند فرمیابی شده است.
- تحلیل همزمان ارتعاشات و فرمیابی سازه از رویکردهای ویژه این پژوهش می باشد که امکان بررسی پایداری سازه را در تمام مراحل بارگذاری دینامیکی فراهم می کند.

ساختار این مقاله به این صورت می باشد که در بخش دوم، مدل سازی دینامیکی سازه های تنسگریتی تشریح می شود. در بخش سوم، الگوریتم ژنتیک جهت فرمیابی سازه های تنسگریتی تشریح شده است. در این بخش معادلات تعادل سازه تنسگریتی بر مبنای قوانین نیوتن استخراج شده است. در بخش چهارم، نتایج حاصل از شبیه سازی سازه های تنسگریتی یک طبقه در سه حالت مختلف با ماتریس اتصال و نوع عضوهای (میله یا ریسمان) مشخص یا تصادفی ارائه شده است. مقاله در بخش آخر با نتیجه گیری جمع بندی شده است.

۲- مدل سازی دینامیک غیرخطی

در این بخش، معادلات دینامیک غیرخطی سازه تنسگریتی با استفاده از رویکرد لاگرانژ و روش المان محدود استخراج شده است. در شکل ۱ مشخصات در نظر گرفته شده برای هر المان از سیستم تنسگریتی نمایش داده شده است.



شکل (۱): مشخصات المان های سازه تنسگریتی.

سال های اخیر، روش های فرمیابی عددی مبتنی بر الگوریتم های هوشمند، از جمله الگوریتم جستجوی تصادفی [۲۲]، الگوریتم های زیستی و ژنتیک [۲۳، ۲۴]، روش های یادگیری ماشین [۲۵، ۲۶]، شبکه عصبی [۲۷، ۲۸] و یا ترکیبی از روش های فوق برای فرمیابی و تعیین ساختار تنسگریتی های پیچیده و نامنظم استفاده شده است. پائول و همکاران [۲۹] و ریفل و همکاران [۳۰] از الگوریتم های تکاملی برای تعیین ساختارهای تنسگریتی با اشکال غیرمنظم استفاده کردند. زو و لئو فرمیابی سازه های تنسگریتی بر پایه الگوریتم های زیستی را ابداع کردند [۳۱]. آن ها از الگوریتم ژنتیک به عنوان بخشی از فرمیابی که نوید ساخت یک ساختار فوق پایدار را می دهد، استفاده کردند. هالند [۳۲]، پل و همکاران [۳۳] الگوریتم ژنتیک را برای تبدیل یک پیکربندی اولیه سازه تنسگریتی به ساختاری پایدار توسعه دادند. کوهستانی و گست روش فرمیابی الگوریتم ژنتیک را بر اساس کمینه سازی مقادیر ویژه ماتریس چگالی نیرو پیشنهاد کردند و روش های فرمیابی عددی و تحلیلی را توسعه دادند [۳۴].

در این مقاله به مدل سازی دینامیک غیرخطی و پیاده سازی الگوریتم ژنتیک در فرمیابی هوشمند سازه تنسگریتی نوع اول در ساختارهای تصادفی با مقطع مثلثی محاط در کره و لحاظ محدودیت های هندسی پرداخته شده است. از جمله نکات بدیع در نظر گرفته شده در این پژوهش عبارت است از:

- کوتاه کردن معادلات حرکت سیستم و استخراج فرم بسته معادلات. این روش حجم محاسبات را در مراحل فرمیابی و تحلیل ارتعاشات کاهش می دهد. همچنین قابلیت بررسی تغییر شکل های الاستیک یا پلاستیکی و انواع مختلف شرایط مرزی و بارگذاری در هر کره و در هر جهت، قابل پیاده سازی خواهد بود.
- روش فرمیابی هوشمند توسعه داده شده با دانش حداقلی از پیکربندی سازه، شامل اطلاعات ترتیب اتصال اعضا و فشاری یا کششی بودن هر عضو، سازه های پیچیده را بدون محدودیت ابعادی فرمیابی می کند.

که در آن $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{3n_n \times 3n_n}$ ماتریس جرم کل سازه می‌باشد و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{M} = \frac{1}{6}(|\mathbf{C}|^T \hat{\mathbf{m}} |\mathbf{C}| + [|\mathbf{C}|^T \hat{\mathbf{m}} |\mathbf{C}|]) \otimes \mathbf{I}_3 \quad (۸)$$

توجه: $(\hat{})$ ماتریس قطری از المان‌های ماتریس می‌باشد که درایه‌های ماتریس سطری (یا ستونی) به ترتیب روی قطر اصلی ماتریس $(\hat{})$ قرار گرفته و سایر عضوهای ماتریس صفر می‌باشند.

ماتریس جرم اعضای سازه ($\mathbf{m}$) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{m} = [m_1 \ m_2 \ \dots \ m_\gamma \ \dots \ m_{n_e}]^T \quad (۹)$$

انرژی پتانسیل کل سازه ($\mathbf{V}$)، مجموع انرژی پتانسیل کرنشی و گرانشی سیستم می‌باشد و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_e + \mathbf{V}_g \quad (۱۰)$$

که در آن $\mathbf{V}_e$ انرژی پتانسیل کرنشی بوده و با توجه به تغییر شکل کرنشی اعضای سازه تنسگریتی در راستای طول اعضاء به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_e &= \sum_{\gamma}^{n_e} \int_{l_{0\gamma}}^{l_{\gamma}} t_{\gamma} dl \\ &= \sum_{\gamma}^{n_e} \int_{l_{0\gamma}}^{l_{\gamma}} \frac{E_{\gamma} A_{\gamma} (l - l_{0\gamma})}{l_{0\gamma}} dl \end{aligned} \quad (۱۱)$$

که در آن t_{γ} ، E_{γ} ، A_{γ} و $l_{0\gamma}$ به ترتیب نیروی داخلی، مدول الاستیسیته، سطح مقطع، طول نهایی و اولیه هر عضو سازه می‌باشند. با توجه به تأثیر جاذبه زمین بر روی کلیه اعضای سازه، انرژی پتانسیل گرانشی سازه ($\mathbf{V}_g$) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_g &= \sum_{\gamma}^{n_e} \frac{m_{\gamma} g}{2} (z_j + z_i) \\ &= \frac{g}{2} \mathbf{m}^T |\mathbf{C}| \otimes [0 \ 0 \ 1] \mathbf{n} \end{aligned} \quad (۱۲)$$

که در آن g ضریب نیروی گرانشی و z_i و z_j به ترتیب مختصات راستای Z برای گره‌های n_i و n_j می‌باشند. رابطه لاگرانژ برای استخراج دینامیک سیستم به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \dot{\mathbf{q}}} - \frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \mathbf{q}} = \mathbf{F}_{np} \quad \text{و} \quad \mathbf{L} = \mathbf{T} - \mathbf{V} \quad (۱۳)$$

مختصات گره‌های سازه به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\mathbf{N} = [\mathbf{n}_1 \ \mathbf{n}_2 \ \dots \ \mathbf{n}_{n_n}] \quad \text{و} \quad \mathbf{N} \in \mathbb{R}^{3 \times n_n} \quad (۱)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{n}_{\gamma}^e &= \begin{bmatrix} n_i \\ n_j \end{bmatrix} \\ &= [x_i \ y_i \ z_i \ x_j \ y_j \ z_j]^T \bar{\mathbf{C}}_{\gamma} \otimes \mathbf{I}_3 \mathbf{n} \end{aligned} \quad (۲)$$

که در آن $\mathbf{N}$ بردار مختصات تمامی گره‌های سازه و $\mathbf{n}_{\gamma}^e$ بردار مختصات عضو γ می‌باشد که از گره i شروع و تا گره j امتداد می‌یابد و $n_n = \lambda$ تعداد گره‌های سازه می‌باشد. $\bar{\mathbf{C}}_{\gamma}$ ماتریس تبدیل خود-تعریف از ماتریس اتصال سازه می‌باشد، که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\bar{\mathbf{C}}_{\gamma}(:, \lambda) = \begin{cases} [1 \ 0]^T, & \lambda = i \\ [0 \ 1]^T, & \lambda = j \\ [0 \ 0]^T, & \lambda = \text{else} \end{cases} \quad (۳)$$

ماتریس اتصال سازه $\mathbf{C}$ نحوه ارتباط بین اعضای سازه را مشخص می‌کند و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{C} = [\mathbf{C}]_{\gamma\lambda} = \begin{cases} -1, & \lambda = i \\ 1, & \lambda = j \\ 0, & \lambda = \text{else} \end{cases} \quad (۴)$$

از آنجاکه اعضای سازه تحت بارگذاری محوری قرار می‌گیرند، جابجایی سازه در راستای میله‌ها و ریسمان‌های سازه می‌باشد. جابجایی نقطه فرضی P_{γ} روی هر عضو دلخواه از سازه تنسگریتی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{P}_{\gamma} = [1 - \eta \quad \eta] \otimes \mathbf{I}_3 \begin{bmatrix} n_i \\ n_j \end{bmatrix} = \mathbf{N}(\varphi) \mathbf{n}_{\gamma}^e \quad (۵)$$

که در آن $\mathbf{N}(\varphi) = [1 - \eta \quad \eta] \otimes \mathbf{I}_3 \in \mathbb{R}^{3 \times 6}$ تابع شکل اعضای سازه و η ضریب بدون بعد فاصله نقطه P_{γ} از یکسر عضو می‌باشد. انرژی جنبشی کل که ترکیبی از انرژی کلیه ذرات در تمام اعضای سازه تنسگریتی می‌باشد، به صورت زیر تعریف می‌شود:

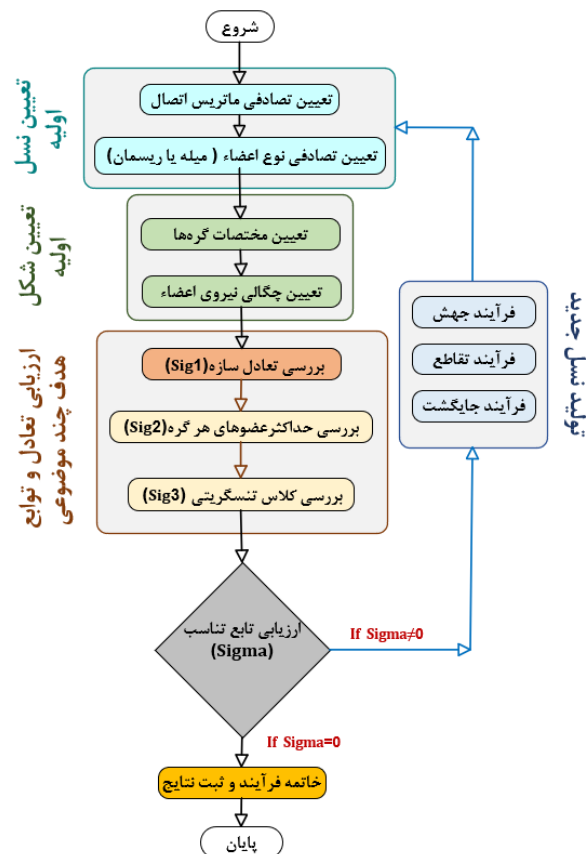
$$\mathbf{T} = \sum_{\gamma=1}^{n_e} 0.5 \int_0^1 m_{\gamma} \|\dot{\mathbf{P}}_{\gamma}\|^2 d\eta \quad (۶)$$

که در آن m_{γ} و $\dot{\mathbf{P}}_{\gamma}$ به ترتیب جرم و سرعت ذرات روی هر عضو می‌باشد. با جایگذاری روابط (۲) و (۵) در معادله (۶) خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \mathbf{T} &= \frac{1}{12} \dot{\mathbf{n}}^T (|\mathbf{C}|^T \hat{\mathbf{m}} |\mathbf{C}| + [|\mathbf{C}|^T \hat{\mathbf{m}} |\mathbf{C}|]) \otimes \mathbf{I}_3 \dot{\mathbf{n}} \\ &= 0.5 \dot{\mathbf{n}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{n}} \end{aligned} \quad (۷)$$

شود. این فرآیند تا زمانی که پیکره بندی پایدار تنسگریتی یافت شود، جمعیت جدید تولید می کند.

هدف اصلی الگوریتم ژنتیک، یافتن یک حالت تعادل خودتنش برای سازه تنسگریتی نامنظم می باشد. علاوه بر تابع هدف اصلی، محدودیت های متعددی به عنوان توابع هدف چند موضوعی اعمال می شوند تا پیکره بندی سازه تنسگریتی صحه گذاری شود. توابع هدف در طول فرآیند فرمیایی برای به دست آوردن حالت تعادل خودتنش سازه، ارزیابی می شوند. فرآیند فرمیایی برای ساختار تنسگریتی در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل (۲): فلوچارت الگوریتم ژنتیک برای فرمیایی سازه.

در این پژوهش، استخراج حالت تعادل خودتنیده برای سازه تنسگریتی در کنار اهداف چند موضوعی، شامل تعیین تعداد عضوهای هر گره و کلاس تنسگریتی در نظر گرفته شده است. بنابراین، در طول فرآیند فرمیایی تمام توابع تناسب برای استخراج یک سازه که تمام محدودیت های اعمال شده را برآورده کند، ارزیابی می شوند. تمام ارتباطات ممکن میان اعضای سازه استخراج و ماتریس اتصال اولیه به صورت

که در آن L تابع لاگرانژ، T و V به ترتیب انرژی جنبشی و پتانسیل سیستم، q مختصات تعمیم یافته و F_{np} بردار نیروهای غیر پایستار می باشد و به صورت زیر تعریف می شود:

$$F_{np} = -D\dot{n} + F_{ex} \quad (14)$$

که در آن F_{ex} بردار نیروهای خارجی وارد بر گره های سازه و D ماتریس میرایی سازه می باشد.

با جایگذاری روابط ۶، ۱۰ و ۱۴ در رابطه ۱۳، معادله دینامیک غیرخطی سازه تنسگریتی به صورت زیر استخراج می شود:

$$M\ddot{n} - D\dot{n} + Kn = F_{ex} \quad (15)$$

که در آن K ماتریس سفتی سازه و به صورت زیر تعریف می شود:

$$K = (C^T \hat{f} C) \otimes I_3 \quad (16)$$

۳- فرمیایی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک

پیکربندی مناسب سازه تنسگریتی در حفظ تعادل و اطمینان از پایداری سازه در مأموریت های مختلف مؤثر است. فرمیایی فرآیندی است که در آن بر اساس یک توپولوژی مشخص، هندسه پایدار سازه ایجاد می شود. برای پیاده سازی فرآیند فرمیایی پیشنهادی با الگوریتم ژنتیک در سازه های تنسگریتی یک طبقه با سطح مقطع مثلثی، تعداد گره ها زوج و تعداد میل ها نصف تعداد گره ها تعریف می شود تا اطمینان حاصل شود که هیچ جفتی از میل ها به یکدیگر متصل نمی شوند. الگوریتم پیشنهادی، یک ایده جدید برای فرمیایی هوشمند سازه های تنسگریتی با دانش حداقلی از پیکربندی سازه می باشد. بر اساس این ایده، ماتریس اتصال بردار چگالی نیروی اولیه را می توان بر اساس اطلاعات گره ها تولید کرد. حین فرآیند فرمیایی، با اطمینان از اینکه هیچ عضوی با نحوه اتصال یکسان وجود ندارد، حدس اولیه از ماتریس اتصال ایجاد می شود. بردار چگالی نیروی اولیه، با توجه به فشاری یا کششی بودن عضوهای سازه به طور تصادفی در نظر گرفته می شود. ماتریس های اتصال و بردار چگالی نیروی اولیه در دو کروموزوم مختلف کدگذاری می شوند تا جمعیت اولیه با اطلاعات ژنتیکی متفاوت تشکیل

مطلوب، به صفر به عنوان بهترین ارزیابی و در غیر این صورت از صفر فاصله می گیرد. از این رو مقدار تابع هدف کل به یک مقدار نزدیک به صفر به عنوان بهترین هدف در الگوریتم ژنتیک منجر خواهد شد. برای هر دسته نقاط تصادفی سازه روی محیط کره، توابع هدف محاسبه و در صورت همگرایی مقدار تابع هدف کل به صفر، آن دسته از نقاط به عنوان نقاط نهایی برای ایجاد سازه تنسگریتی در نظر گرفته می شوند. در صورت عدم همگرایی، ماتریس اتصال و تعیین نوع اعضای جدید با ترکیبی از فرآیندهای جهش، تقاطع و جایگشت تولید می شود و الگوریتم برای نقاط تصادفی جدید مجدداً محاسبه می شود. این فرآیند تا همگرایی توابع هدف ادامه می یابد.

معادلات مربوط به تعادل استاتیکی گره مرجع i که به ترتیب توسط اعضای L_{ij} و L_{ik} به گره های j و k متصل است، در رابطه زیر نشان داده می شود (شکل ۱):

$$\begin{aligned}(t_{ij} + t_{ik})x_i - t_{ij}x_j - t_{ik}x_k &= F_{ex(i,x)} \\ (t_{ij} + t_{ik})y_i - t_{ij}y_j - t_{ik}y_k &= F_{ex(i,y)} \\ (t_{ij} + t_{ik})z_i - t_{ij}z_j - t_{ik}z_k &= F_{ex(i,z)}\end{aligned}\quad (18)$$

با بازنویسی رابطه فوق داریم:

$$\mathbf{A} \mathbf{t} = \mathbf{F}_{ex} \quad (19)$$

که در آن $\mathbf{t}$ بردار چگالی نیرو و $\mathbf{A}$ ماتریس تعادل سازه است و به صورت زیر تعریف می شود:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}^T \text{diag}(\mathbf{C} \mathbf{x}) \\ \mathbf{C}^T \text{diag}(\mathbf{C} \mathbf{y}) \\ \mathbf{C}^T \text{diag}(\mathbf{C} \mathbf{z}) \end{bmatrix} \quad (20)$$

با تجزیه ماتریس تعادل به ماتریس های منفرد خواهیم داشت:

$$\mathbf{A} = \mathbf{Q} \mathbf{Z} \mathbf{R}^T \quad (21)$$

که در رابطه فوق $\mathbf{Q}$ و $\mathbf{R}$ به ترتیب ماتریس های منفرد راست و چپ و $\mathbf{Z}$ ماتریس مقادیر ویژه حاصل از تجزیه می باشند. تابع هدف Sig_1 از رابطه زیر استخراج می شود:

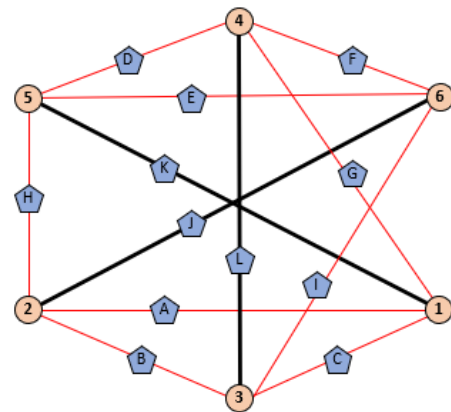
$$\text{Sig}_1 = \mathbb{Z}_{d \times n_n, n_b} \quad (22)$$

درایه های ماتریس قطری $\mathbb{Z}$ به صورت کاهشی در رابطه زیر منظم می شوند:

$$\mathbb{Z} = \text{diag}(z_{1,1} \dots z_{d \times n_n, n_b}) \quad (23)$$

تصادفی انتخاب و به همراه ضرایب تنش تصادفی در دو کروموزوم مختلف کدگذاری می شوند تا جمعیت با اطلاعات ژنتیکی متفاوت را تشکیل دهند.

کروموزوم ماتریس اتصال با استفاده از حروف الفبایی برای هر ارتباط به طور جداگانه کدگذاری می شوند. بردار ضرایب تنش اعضا به صورت باینری تعریف می شود که در آن ۱ نشان دهنده ریسمان، جایگزین عضوهای کششی با ضریب تنش ۱ و ۰ نشان دهنده میله، جایگزین عضو فشاری با ضریب تنش ۱- می شوند (شکل ۳).



ماتریس اتصال

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

ماتریس نوع اعضا

$$\mathbf{t} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix}$$

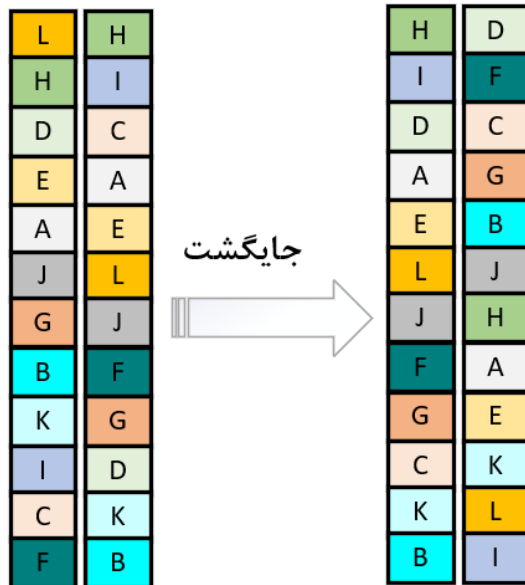
شکل (۳): کدگذاری ماتریس اتصال و بردار ضریب تنش.

برای ارزیابی روش فرمیابی ارائه شده، تابع هدف کل Sigma به صورت مجموع توابع هدف چندگانه، توسط رابطه زیر تعریف می شود:

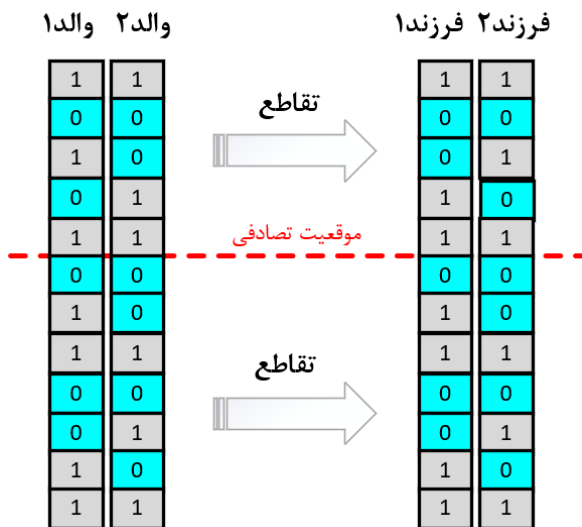
$$\text{Sigma} = \text{Sig}_1 + \text{Sig}_2 + \text{Sig}_3 \quad (17)$$

که در آن Sig_1 ، Sig_2 و Sig_3 به ترتیب توابع هدف برای ارزیابی تعادل سازه، تعداد عضوهای هر گره و شاخص تعیین تنسگریتی کلاس ۱ می باشند. هر کدام از توابع در حالت

والد ۱ والد ۲ فرزندان ۱ فرزندان ۲



شکل (۴): تولید ماتریس اتصال جدید به روش جایگشت.



شکل (۵): تولید بردار ضریب تنش جدید به روش تقاطع.

۴- شبیه سازی و تحلیل نتایج

سازه تنسگریتی موردنظر یک طبقه با ارتفاع ۰/۵ متر و محاط در کره ای به شعاع ۰/۵ متر در سه حالت مختلف (جدول ۱) در نظر گرفته شده است.

گره های ۱ تا ۳ و ۵ تا ۶ به ترتیب مثلث های موازی و عمود بر محور Z را ایجاد می کنند به طوری که مساحت سطح مثلث بالایی (زرد) کمتر از سطح مثلث پایینی (بنفش) در نظر

تعداد عضوهای صفر یا نزدیک صفر ماتریس $\mathbb{Z}$ ، بیانگر مرتبه ماتریس A و تعداد حالات خودتعادلی در سازه می باشند. به منظور کاهش عملیات محاسباتی، تنها درایه انتهایی ماتریس $\mathbb{Z}$ بررسی می شود. اگر آخرین درایه ماتریس $\mathbb{Z}$ برابر صفر باشد، حداقل یک نقص رتبه وجود داشته و سازه حداقل یک حالت خودتعادلی دارد. برای جلوگیری از تشکیل سازه های تنسگریتی ناقص با تعداد عضوهای کم در هر گره، تابع هدف Sig_2 به صورت زیر تعریف می شود:

$$Sig_2 = \sum_{j=1}^{n_n} \left(n_{v,max} - \sum_{i=1}^{n_b} c(i,j) \right) \quad (24)$$

که در آن $n_{v,max}$ تعداد اعضای تعریف شده هر گره می باشد. اگر تعداد اعضای هر گره در سازه تنسگریتی برابر با ۴ ($n_{v,max} = 4$) باشد، رابطه فوق به مقدار صفر به عنوان بهترین ارزیابی منجر خواهد شد. در غیر این صورت، مقدار تابع بزرگ تر از صفر خواهد بود.

برای تضمین اینکه تمام میله ها در حالت فشاری هستند، می بایست تمام اعضای فشاری مستقل و جدا از یکدیگر باشند. تابع هدف Sig_3 به منظور اطمینان از عدم ارتباط بین دو میله، تعریف می شود:

$$Sig_3 = \sum_{j=1}^{n_n} \left(n_w - \sum_{i=1}^{n_b} (t)^T \times |C| \right) \quad (25)$$

که در آن $n_w = n_{v,max} - 2$ می باشد. در رابطه فوق، بهترین مقدار ارزیابی، صفر تنها در حالتی که دو عضو میله ای به یک گره متصل نباشند، ایجاد می شود که بیانگر سازه تنسگریتی کلاس ۱ می باشد. در غیر این صورت مقدار آن بزرگ تر از صفر خواهد بود.

برای تولید نسل جدید، از فرآیند جایگشت و تقاطع در الگوریتم ژنتیک استفاده می شود. کروموزوم های ماتریس اتصال با روش جایگشت تولید شده تا اطمینان حاصل شود که هیچ عضوی با اتصال یکسان وجود ندارد (شکل ۴). کروموزوم های ضرایب تنش نیز با روش تقاطع از کروموزوم های والد تولید می شوند (شکل ۵).

در این حالت، ماتریس اتصال و نوع عضوها (میله یا ریسمان) ثابت در نظر گرفته شده است. نقاط مختلف سازه به صورت تصادفی انتخاب و به روش الگوریتم ژنتیک فرم می‌شوند. در جداول ۲ تا ۴ سه نمونه سازه تنسگریتی فرم شده حالت اول به همراه مشخصات اعضاء و گره‌های سازه، طول و چگالی نیروی اعضاء، نشان داده شده است. میله‌های سازه با رنگ مشکی و در جدول با حرف اختصاری «م» و ریسمان‌ها با رنگ قرمز نشان داده شده‌اند.

حالت دوم:

در حالت دوم ماتریس اتصال ثابت و برای گسترش محدوده جستجو، موقعیت اعضای سازه (میله یا ریسمان) به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند؛ مانند حالت اول موقعیت گره‌ها به صورت تصادفی و در نمونه‌های مختلف متفاوت می‌باشد. در جداول ۵ تا ۷ نمونه‌های سازه تنسگریتی حالت دوم نشان داده شده است.

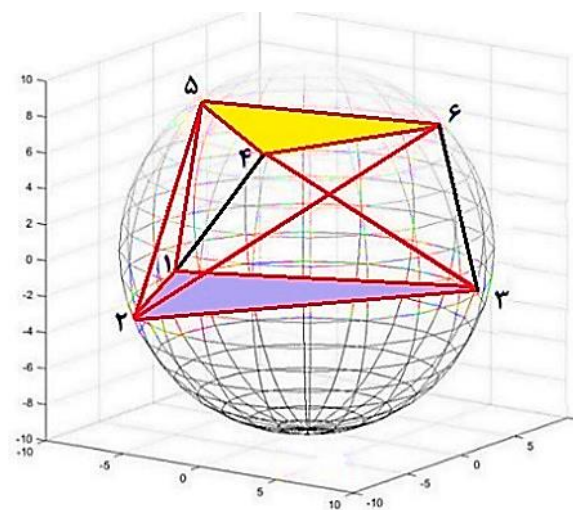
حالت سوم:

در حالت سوم، ماتریس اتصال و موقعیت اعضای سازه (میله یا ریسمان) هر دو به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند. در جداول ۸ تا ۱۰ نمونه‌های سازه تنسگریتی حالت سوم نشان داده شده است.

گرفته شود. اعضای تنسگریتی ارتباط میان گره‌های محاط بر دیواره داخلی کره را برقرار می‌سازند. میله‌ها با خطوط مشکی و ریسمان‌ها با خطوط قرمز نمایش داده شده است (شکل ۶).

جدول (۱): محدودیت‌های مدل‌سازی حالات مختلف.

مختصات گره‌ها	ماتریس اتصال	نوع عضوها
تصادفی	ثابت	ثابت
تصادفی	ثابت	تصادفی
تصادفی	تصادفی	تصادفی



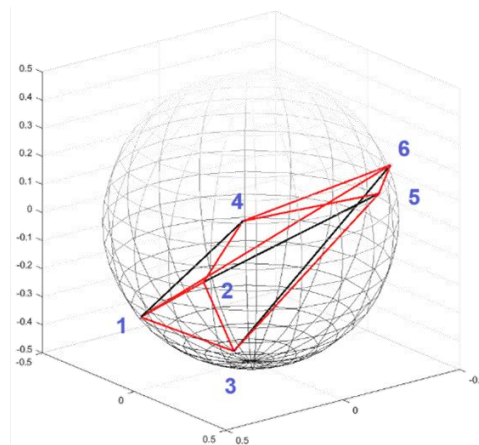
شکل (۶): تنسگریتی منشوری با شش گره و محاط بر کره.

حالت اول:

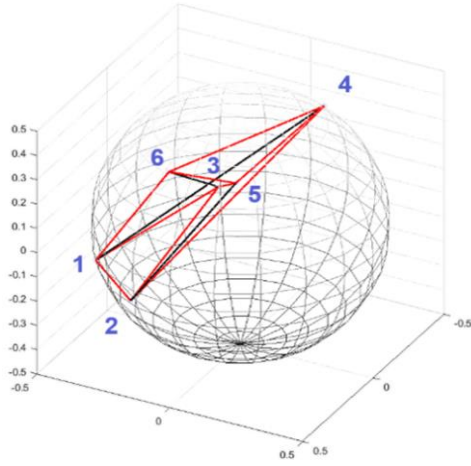
جدول (۲): مشخصات سازه نمونه اول حالت اول (۱۱).

نمونه اول از حالت اول (۱۱)	تعداد نسل	اعضاء گره	طول اعضاء (m)	چگالی نیرو (N/m)
	۱ م	۴-۱	۰/۷۵۵۶	-۱/۰۶۱۹
	۲ م	۵-۲	۰/۹۳۶۲	-۰/۶۳۹۰
	۳ م	۶-۳	۰/۸۶۱۷	-۱/۶۲۸۲
	۴	۲-۱	۰/۴۱۳۶	۰/۸۰۲۷
	۵	۳-۲	۰/۷۰۷۹	۰/۴۰۵۸
	۶	۱-۳	۰/۴۶۶۰	۰/۹۳۵۹
	۷	۵-۴	۰/۵۳۷۲	۰/۸۲۲۸
	۸	۶-۵	۰/۲۹۱۸	۰/۹۰۸۹
	۹	۴-۶	۰/۷۵۵۸	۰/۱۶۰۸
	۱۰	۶-۱	۰/۹۸۵۴	۰/۸۶۵۴
	۱۱	۴-۲	۰/۹۵۷۹	۰/۱۸۱۱
	۱۲	۵-۳	۰/۷۲۰۲	۰/۱۹۲۸

۷

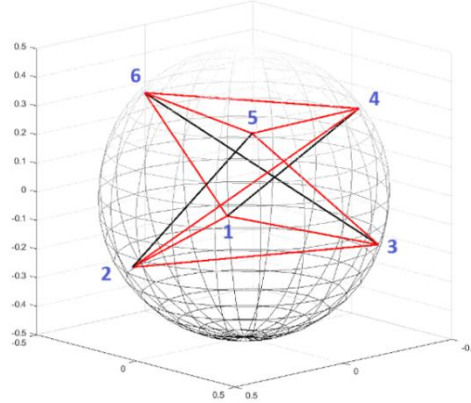


جدول (۳): مشخصات سازه نمونه دوم حالت اول (۱۲).

نمونه دوم از حالت اول (۱۲)	تعداد نسل	اعضاء گره	طول اعضاء (m)	چگالی نیرو (N/m)
	۱ م	۱-۴	۰/۹۳۸۱	-۰/۹۴۷۸
	۲ م	۲-۵	۰/۶۱۰۵	-۰/۷۰۹۲
	۳ م	۳-۶	۰/۹۰۵۵	-۱/۰۴۳۵
	۴	۱-۲	۰/۳۰۴۰	۰/۹۷۳۶
	۵	۲-۳	۰/۸۴۱۳	۰/۰۸۶۸
	۶	۳-۱	۰/۶۵۱۹	۰/۶۱۰۸
	۷	۴-۵	۰/۶۱۱۶	۰/۲۷۴۲
	۸	۵-۶	۰/۲۳۵۶	۰/۹۴۲۷
	۹	۶-۴	۰/۶۸۹۷	۰/۴۸۵۴
	۱۰	۱-۶	۰/۶۰۱۳	۱/۸۲۱۱
	۱۱	۲-۴	۰/۹۶۱۲	۰/۳۰۵۴
	۱۲	۳-۵	۰/۹۵۸۴	۰/۳۴۹۰

۱۴

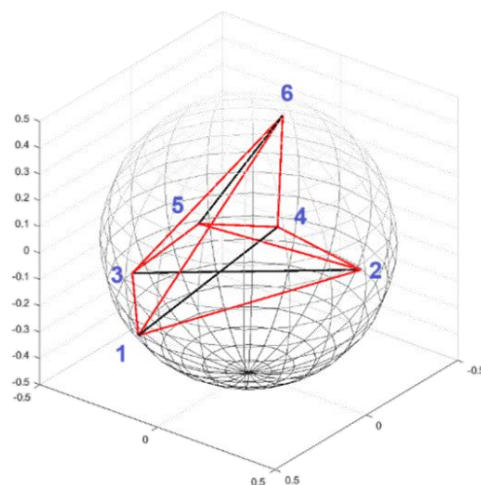
جدول (۴): مشخصات سازه نمونه سوم حالت اول (۱۳).

نمونه سوم از حالت اول (۱۳)	تعداد نسل	اعضاء گره	طول اعضاء (m)	چگالی نیرو (N/m)
	۱ م	۱-۴	۸۳۷۶۰	-۰/۹۳۳۶
	۲ م	۲-۵	۰/۶۵۸۵	-۱/۰۲۳۰
	۳ م	۳-۶	۰/۹۴۹۳	-۱/۲۴۲۸
	۴	۱-۲	۰/۷۹۰۰	۰/۰۳۷۷
	۵	۲-۳	۰/۸۹۶۲	۰/۳۷۳۳
	۶	۳-۱	۰/۶۵۴۹	۱/۵۶۸۴
	۷	۴-۵	۰/۵۰۶۹	۰/۳۸۸۴
	۸	۵-۶	۰/۶۸۲۲	۱/۰۲۸۴
	۹	۶-۴	۰/۷۶۳۶	۰/۶۲۱۰
	۱۰	۱-۶	۰/۶۳۷۴	۰/۴۴۱۸
	۱۱	۲-۴	۰/۹۴۵۷	۰/۰۷۷۵
	۱۲	۳-۵	۰/۹۵۸۴	۰/۳۴۹۰

۲۸

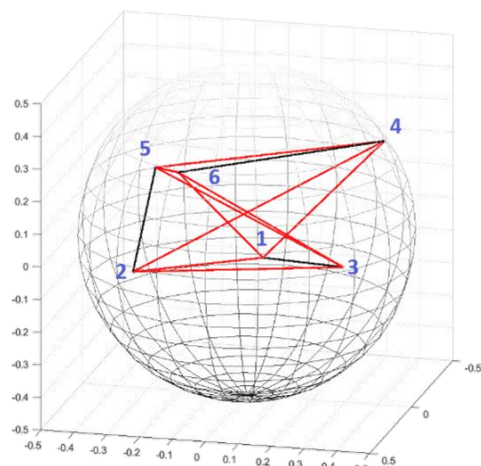
جدول (۵): مشخصات سازه نمونه اول حالت دوم (۲۱).

نمونه اول از حالت دوم (۲۱)	تعداد نسل	اعضاء گره	طول اعضاء (m)	چگالی نیرو (N/m)
۲	۱ م	۲-۳	۰/۷۶۸۴	-۱/۲۱۹۶
	۲ م	۵-۶	۰/۸۳۱۱	-۱/۳۵۴۶
	۳ م	۱-۴	۰/۷۰۵۲	-۱/۶۰۱۱
	۴	۱-۲	۰/۸۸۴۸	۰/۳۳۴۴
	۵	۳-۱	۰/۴۵۰۱	۰/۷۸۳۵
	۶	۴-۵	۰/۲۶۶۲	۰/۹۹۰۴
	۷	۶-۴	۰/۸۰۵۰	۰/۵۶۳۳
	۸	۱-۶	۰/۹۴۴۷	۰/۳۳۸۹
	۹	۲-۴	۰/۸۵۸۸	۰/۲۷۰۵
	۱۰	۳-۵	۰/۸۰۷۶	۰/۳۵۷۳
	۱۱	۲-۵	۰/۹۶۲۹	۰/۳۵۸۸
	۱۲	۳-۵	۰/۹۵۸۴	۰/۳۴۹۰

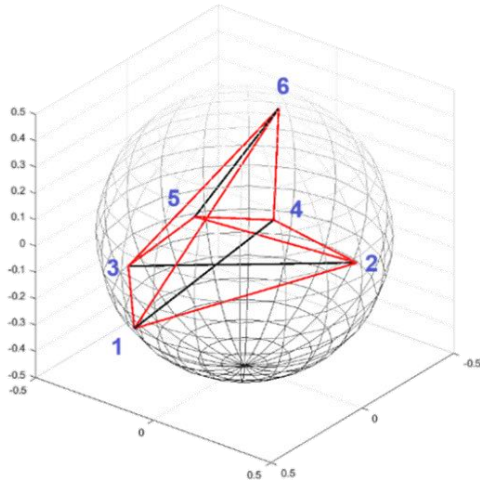


جدول (۶): مشخصات سازه نمونه دوم حالت دوم (۲۲).

نمونه دوم از حالت دوم (۲۲)	تعداد نسل	اعضاء گره	طول اعضاء (m)	چگالی نیرو (N/m)
۱۱	۱ م	۳-۱	۰/۲۵۷۰	-۱/۰۸۰۳
	۲ م	۴-۶	۰/۶۹۰۴	-۱/۳۳۳۱
	۳ م	۲-۵	۰/۷۹۲۴	-۱/۴۴۵۶
	۴	۱-۲	۰/۴۱۰۹	۰/۸۵۱۴
	۵	۲-۳	۰/۶۲۲۵	۰/۶۲۹۵
	۶	۴-۵	۰/۷۲۸۷	۰/۸۰۷۸
	۷	۵-۶	۰/۰۸۴۸	۰/۹۹۸۴
	۸	۱-۶	۰/۹۸۵۰	۰/۰۱۳۰
	۹	۲-۴	۰/۹۵۵۶	۰/۱۸۶۹
	۱۰	۳-۵	۰/۹۹۶۱	۰/۳۴۱۱
	۱۱	۱-۴	۰/۷۸۲۶	۰/۳۱۸۵
	۱۲	۳-۶	۰/۹۹۷۱	۰/۰۵۴۷

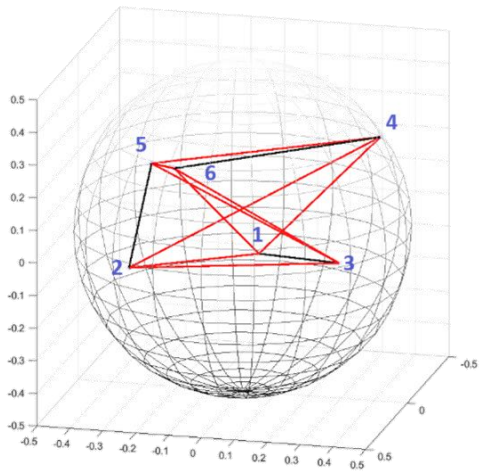


جدول (۷): مشخصات سازه نمونه سوم حالت دوم (۲۳).

نمونه سوم از حالت دوم (۲۱)	تعداد نسل	اعضاء گره	طول اعضاء (m)	چگالی نیرو (N/m)
	۱ م	۳-۱	۰/۸۱۸۶	-۱/۰۵۱۲
	۲ م	۵-۶	۰/۸۲۶۶	-۸۴۵۵۰
	۳ م	۲-۴	۰/۹۹۷۱	-۰/۸۷۲۲
	۴	۱-۲	۰/۵۰۷۶	۱/۲۷۷۵
	۵	۲-۳	۰/۵۸۷۳	۱/۳۸۲۴
	۶	۴-۵	۰/۷۰۷۸	۰/۹۸۷۲
	۷	۶-۴	۰/۲۱۵۰	۱/۱۱۶۶
	۸	۱-۶	۰/۹۳۴۱	۰/۴۳۴۲
	۹	۳-۵	۰/۹۹۲۰	۰/۰۲۳۸
	۱۰	۱-۴	۰/۸۳۹۳	۰/۲۰۹۲
	۱۱	۲-۵	۰/۷۲۷۳	۰/۲۵۶۱
	۱۲	۳-۶	۰/۶۷۶۸	۰/۲۵۰۳

۱۲

جدول (۸): مشخصات سازه نمونه اول حالت سوم (۳۱).

نمونه اول از حالت سوم (۲۲)	تعداد نسل	اعضاء گره	طول اعضاء (m)	چگالی نیرو (N/m)
	۱ م	۲-۶	۰/۹۰۱۳	-۱/۲۱۸۸
	۲ م	۳-۵	۰/۵۴۱۳	-۱/۲۶۵۶
	۳ م	۱-۴	۰/۹۲۷۱	-۱/۲۶۰۵
	۴	۱-۶	۰/۸۴۸۴	۰/۷۶۴۰
	۵	۴-۵	۰/۴۹۵۸	۱/۰۷۵۹
	۶	۲-۴	۰/۹۱۱۴	۰/۸۲۸۶
	۷	۴-۶	۰/۲۷۸۸	۰/۹۹۶۹
	۸	۱-۵	۰/۶۶۶۹	۰/۴۵۶۵
	۹	۱-۳	۰/۵۶۶۴	۰/۳۱۵۸
	۱۰	۲-۳	۰/۷۳۷۹	۰/۰۴۱۳
	۱۱	۲-۵	۰/۷۵۷۸	۰/۴۰۵۲
	۱۲	۳-۶	۰/۶۳۱۵	۱/۰۵۴۵

۷۰

جدول (۹): مشخصات سازه نمونه دوم حالت سوم (۳۲).

نمونه دوم از حالت سوم (۳۲)

تعداد نسل

اعضاء گره طول اعضاء (m)

چگالی نیرو (N/m)

۲۹۵

۱ م ۴-۵ ۰/۲۴۴۰ -۱/۰۴۲۵

۲ م ۱-۳ ۰/۶۴۴۰ -۱/۴۰۲۳

۳ م ۲-۶ ۰/۸۳۳ -۱/۱۹۸۵

۴ ۵-۶ ۰/۴۲۵۷ ۱/۰۵۰۴

۵ ۳-۵ ۰/۵۴۴۵ ۰/۳۸۹۳

۶ ۴-۶ ۰/۵۴۰۱ ۱/۲۳۸۷

۷ ۱-۶ ۰/۹۱۶۹ ۰/۳۶۹۴

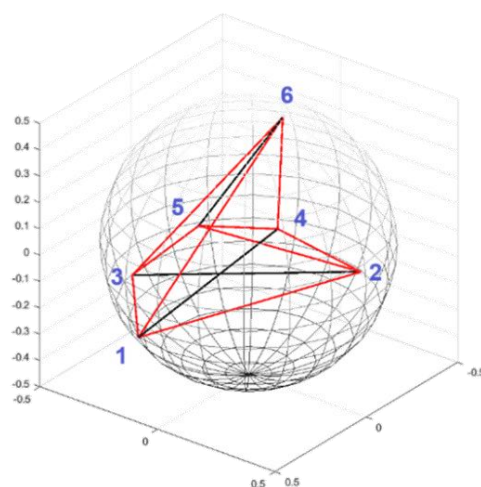
۸ ۲-۵ ۰/۸۶۷۳ ۰/۱۹۵۸

۹ ۱-۲ ۰/۳۶۴۲ ۰/۹۴۸۷

۱۰ ۲-۳ ۰/۸۷۴۶ ۰/۶۹۴۰

۱۱ ۱-۴ ۰/۵۸۹۱ ۰/۱۲۲۷

۱۲ ۳-۴ ۰/۶۱۵۷ ۰/۲۷۲۲



جدول (۱۰): مشخصات سازه نمونه سوم حالت سوم (۳۳).

نمونه سوم از حالت سوم (۳۳)

تعداد نسل

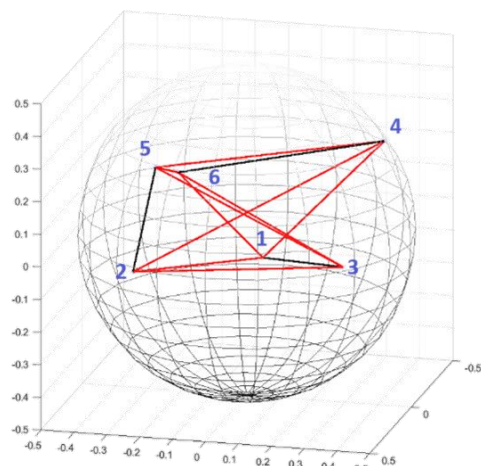
اعضاء گره طول اعضاء (m)

چگالی نیرو (N/m)

۴۰۶

A 3D plot showing a spherical structure with a grid of lines. Six points are marked on the sphere's surface and labeled with blue numbers 1 through 6. These points are connected by red lines, forming a complex geometric shape. The axes are labeled from -0.5 to 0.5.

۱ م	۴-۶	۰/۵۷۳۱	-۱/۲۴۵۶
۲ م	۳-۵	۰/۵۳۱۱	-۱/۳۶۲۵
۳ م	۱-۲	۰/۸۰۱۱	-۱/۲۳۶۷
۴	۲-۵	۰/۹۷۷۹	۰/۲۳۳۴
۵	۱-۴	۰/۶۸۶۸	۰/۰۵۵۷
۶	۳-۴	۰/۷۷۱۲	۰/۴۹۹۱
۷	۱-۵	۰/۵۰۱۹	۰/۳۲۲۰
۸	۵-۶	۰/۱۳۱۳	۰/۹۷۹۶
۹	۱-۶	۰/۵۱۰۹	۰/۳۶۷۲
۱۰	۲-۳	۰/۷۵۱۳	۱/۰۹۹۷
۱۱	۲-۴	۰/۹۶۴۵	۰/۰۳۷۶
۱۲	۳-۶	۰/۵۰۴۳	۰/۶۸۹۸



نمونه‌های حالت اول به ترتیب بعد از تولید ۷، ۱۴ و ۲۸ نسل فرم شده‌اند و مقدار تابع تناسب کل Sigma به مقدار مطلوب (صفر) رسیده است. قابل ذکر است در صورت تغییر فرضیات مسئله، امکان محدود کردن هدفمند فضای انتخاب نقاط و امکان همگرایی سریع‌تر مقادیر تابع تناسب به صفر مهیا می‌باشد. همان‌طور که در جداول ۵ الی ۷ مشاهده می‌شود، با توجه به ترتیب شماره‌گذاری میله‌ها، سطرهای ابتدایی ماتریس اتصال مربوط به میله‌ها می‌باشد و علیرغم

همان‌طور که در جداول ۲ تا ۴ مشاهده می‌شود، در نمونه‌های حالت اول، ماتریس اتصال و نحوه ارتباط اعضای سازه ثابت در نظر گرفته شده است. تنها تفاوت در مختصات تصادفی نقاط محاط بر کره می‌باشد. از این‌رو شماره اعضاء و گره‌های نمونه‌های ۱ تا ۳ با هم مشترک و به واسطه نقاط تصادفی، طول اعضاء و چگالی نیرو هر عضو متفاوت می‌باشد. مسیر همگرایی تابع تناسب نمونه‌های حالت اول در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود،

نکته قابل ذکر این است که تغییرات در فرآیند همگرایی در حالت های ۱ تا ۳ به واسطه انتخاب تصادفی مختصات گره ها می باشد. به منظور صحت گذاری فرمیابی هوشمند ارائه شده، سازه های نهایی با روش رایج چگالی نیرو [۳۵، ۳۶] که الگوریتم آن در شکل ۹ نمایش داده شده است، فرمیابی شده اند (جدول ۱۱).

همان طور که مشاهده می شود، تمامی نمونه های فرم شده توسط الگوریتم پیشنهادی، توسط روش چگالی نیرو نیز فرم و صحت گذاری شده است. روش چگالی نیرو در سه حلقه متوالی با بررسی مشخصات ماتریس تعادل، پایداری سازه را تعیین می کنند. نتایج مربوط به تحلیل مودال و فرکانس های طبیعی نمونه های مختلف در هر سه حالت تعریف شده در جداول ۱۲ الی ۱۴ ارائه شده است.

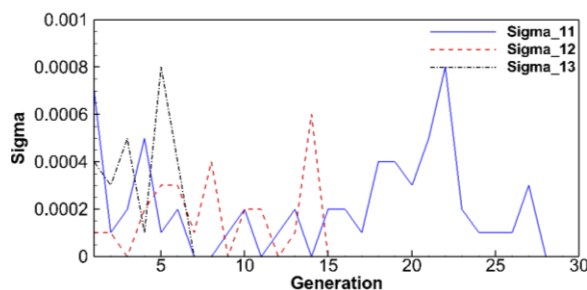
جدول (۱۱): جدول صحت گذاری روش فرمیابی پیشنهادی.

نمونه	الگوریتم ژنتیک پیشنهادی	چگالی نیرو
حالت ۱	فرم ۱۱	فرم ۷ نسل
	فرم ۱۲	فرم ۱۴ نسل
	فرم ۱۳	فرم ۲۸ نسل
حالت ۲	فرم ۲۱	فرم ۲ نسل
	فرم ۲۲	فرم ۱۱ نسل
	فرم ۲۳	فرم ۱۲ نسل
حالت ۳	فرم ۳۱	فرم ۷۰ نسل
	فرم ۳۲	فرم ۲۹۵ نسل
	فرم ۳۳	فرم ۴۰۶ نسل

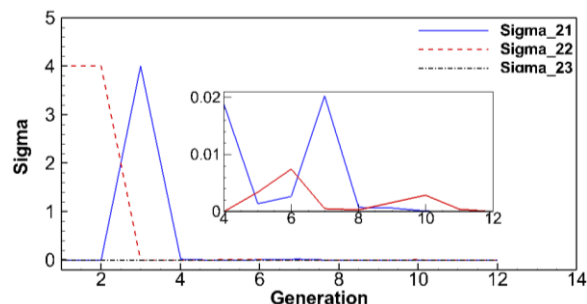
جدول (۱۲): فرکانس طبیعی نمونه های حالت اول (Hz).

مود	نمونه ۱۱	نمونه ۱۲	نمونه ۱۳
مود ۱	۱/۰۳۲۴	۳/۰۳۲۴	۵/۰۳۳۶
مود ۲	۴/۹۴۱۱	۶/۰۰۶۳	۱۱/۶۸۶۹
مود ۳	۱۳/۴۵۹۴	۱۴/۷۰۰۵	۲۱/۳۸۹۸
مود ۴	۶۷/۳۶۱۹	۹۸/۸۱۱۲	۹۴/۶۶۷۵
مود ۵	۱۵۹/۴۳۷۵	۱۷۹/۲۱۱۰	۱۵۸/۴۴۴۷
مود ۶	۲۲۸/۴۷۲۱	۲۳۵/۱۲۰۱	۲۲۶/۸۷۸۴
مود ۷	۲۶۲/۱۹۱۲	۲۶۳/۷۰۶۵	۲۵۹/۸۳۰۳
مود ۸	۲۹۹/۷۶۵۷	۳۲۰/۸۸۰۰	۳۱۲/۰۳۲۰
مود ۹	۴۵۰/۹۹۹۴	۴۵۰/۹۹۹۴	۳۳۱/۴۷۲۱

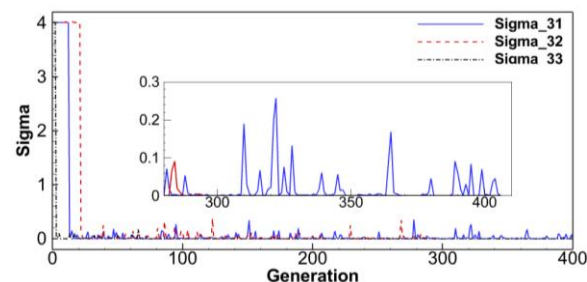
ثابت بودن ارتباط بین گره ها، به واسطه انتخاب تصادفی میله یا ریسمان، ترتیب سطرها و ماتریس اتصال متفاوت می باشد و این موضوع در تفاوت ستون مربوط به گره ها مشاهده می شود. طول اعضا و چگالی نیروی هر عضو بعد از فرم شدن با الگوریتم ژنتیک استخراج شده است. در شکل ۸ مسیر همگرایی نمونه های حالت دوم که به ترتیب با ۱۱، ۱۲ و ۱۳ نسل همگرا شده اند، نشان داده شده است. در نمونه های حالت سوم با توجه به تصادفی بودن نوع اعضا و ماتریس اتصال، تعداد نسل های تولید شده برای فرم شدن بیشتر می باشد و به ترتیب با ۲۹۵، ۷۰ و ۴۰۶ نسل فرم شده اند (شکل ۹).



شکل (۷): همگرایی فرایند فرمیابی با اهداف چند موضوعی نمونه های حالت اول.

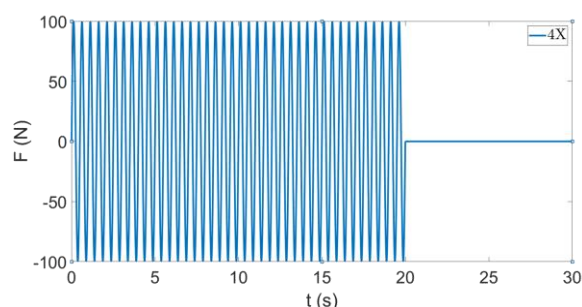


شکل (۸): همگرایی فرایند فرمیابی با اهداف چند موضوعی نمونه های حالت دوم.



شکل (۹): همگرایی فرایند فرمیابی با اهداف چند موضوعی نمونه های حالت سوم.

گرفته شده است. بارگذاری ارتعاشی روی گره شماره ۴ و در راستای محور X به مدت ۳۰ ثانیه با رابطه $F = 100 \sin(2t)$ اعمال (شکل ۱۰) و نتایج در بازه زمانی ۳۰ ثانیه استخراج شده است. مشخصات اعضای سازه تنسگریتی در جدول ۱۸ ارائه شده است.



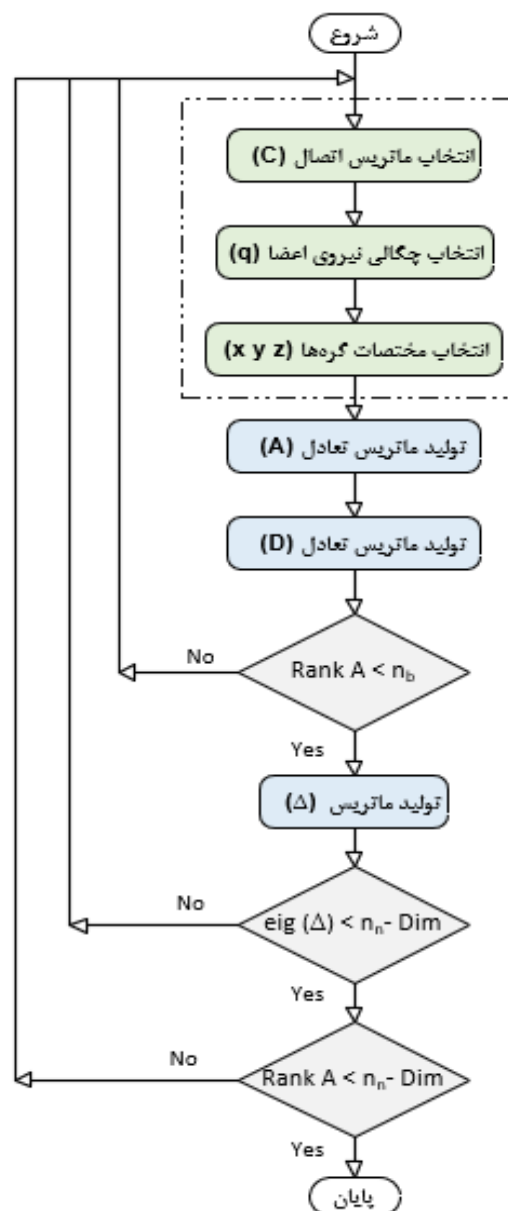
شکل (۱۰): بارگذاری هارمونیک روی گره شماره ۴.

جدول (۱۳): فرکانس طبیعی نمونه‌های حالت دوم (Hz).

مُد	نمونه ۲۱	نمونه ۲۲	نمونه ۲۳
مُد ۱	۳/۱۶۲۴	۱/۰۲۵۴	۲/۰۱۳۴
مُد ۲	۶/۶۲۴۵	۲/۲۵۶۱	۶/۰۷۵۴
مُد ۳	۲۰/۰۱۰۹	۲/۲۵۶۱	۱۸/۷۳۴۴
مُد ۴	۸۷/۵۴۴۲	۷۹/۲۷۹۱	۶۳/۳۸۱۰
مُد ۵	۱۰۹/۸۱۶۳	۱۱۷/۶۳۸۰	۸۵/۷۳۲۰
مُد ۶	۱۶۶/۵۷۰۵	۲۰۰/۰۳۹۵	۱۴۴/۲۸۷۱
مُد ۷	۲۶۴/۲۳۹۴	۲۴۵/۱۴۴۶	۲۲۶/۵۳۶۵
مُد ۸	۴۱۷/۴۲۹۰	۵۵۹/۳۲۱۸	۳۶۲/۱۴۰۸
مُد ۹	۵۱۴/۸۲۳۰	۷۶۴/۲۵۷۳	۵۶۰/۹۹۳۹

جدول (۱۴): فرکانس طبیعی نمونه‌های حالت سوم (Hz).

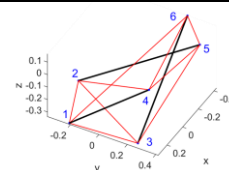
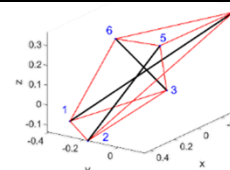
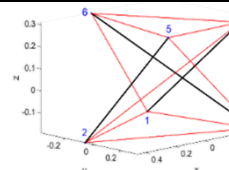
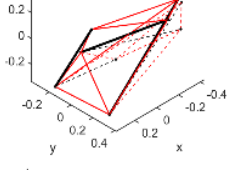
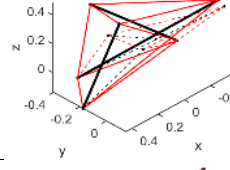
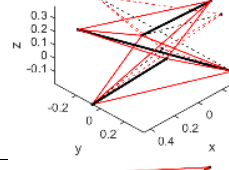
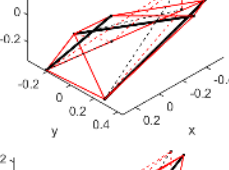
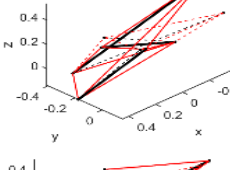
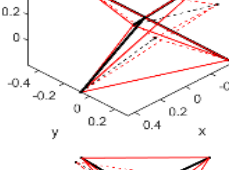
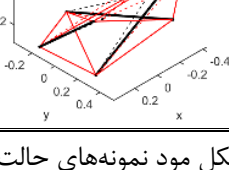
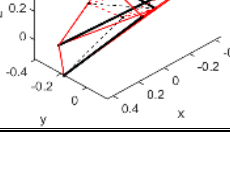
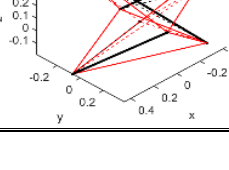
مُد	نمونه ۳۱	نمونه ۳۲	نمونه ۳۳
مُد ۱	۳/۱۰۷۱	۴/۰۴۲۳	۶/۹۶۱۶
مُد ۲	۱۱/۵۵۲۶	۳۶/۶۳۷۷	۲۵/۷۲۸۶
مُد ۳	۲۹/۳۰۸۶	۶۰/۶۲۲۸	۳۲/۷۲۰۵
مُد ۴	۱۵۳/۱۱۷۰	۱۰۳/۵۷۹۲	۱۲۲/۰۹۷۲
مُد ۵	۱۹۶/۵۷۸۸	۲۲۹/۳۸۷۲	۱۶۶/۹۶۵۱
مُد ۶	۲۵۱/۷۰۷۷	۳۵۲/۱۹۵۶	۲۸۵/۵۷۰۶
مُد ۷	۲۵۹/۳۰۰۹	۳۷۲/۳۶۹۴	۴۰۶/۵۳۱۵
مُد ۸	۳۷۰/۴۴۶۹	۴۷۱/۶۹۷۴	۴۹۲/۵۳۰۰
مُد ۹	۴۰۴/۴۵۳۲	۱۵۲۲/۰۰۷۹	۸۵۴/۶۹۷۸



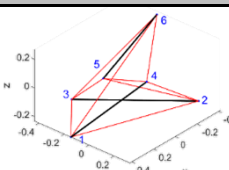
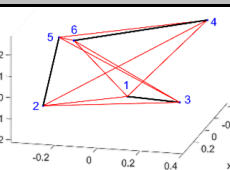
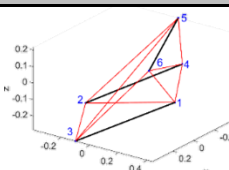
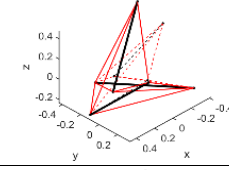
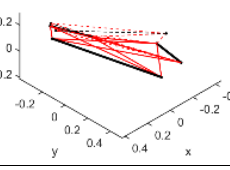
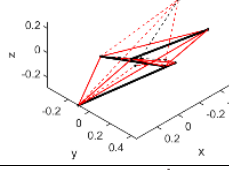
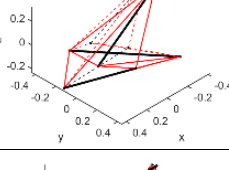
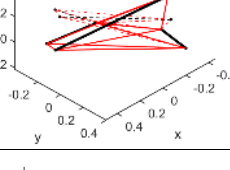
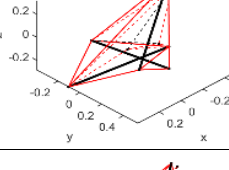
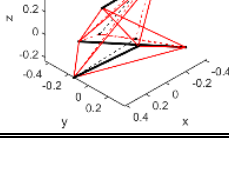
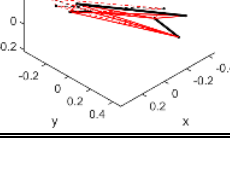
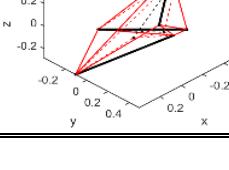
شکل (۹): الگوریتم روش چگالی نیرو.

با توجه به تصادفی بودن نمونه‌های تعریف شده، مقادیر فرکانس طبیعی حالات مختلف مستقل از هم می‌باشند. فرکانس‌های اولیه نزدیک صفر و متناسب با ساختار تصادفی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. شکل سه مود اول ارتعاشی نمونه‌های مختلف حالت‌های اول تا سوم در جداول ۱۵ الی ۱۷ ارائه شده است. در جداول مذکور، خطوط ممتد حالت اولیه و خطوط خط‌چین بیانگر فرم نهایی سازه می‌باشد. به‌منظور بررسی و تحلیل ارتعاشات سازه تنسگریتی فرم شده، گره‌های شماره ۱ تا ۳ به‌صورت گیردار در نظر

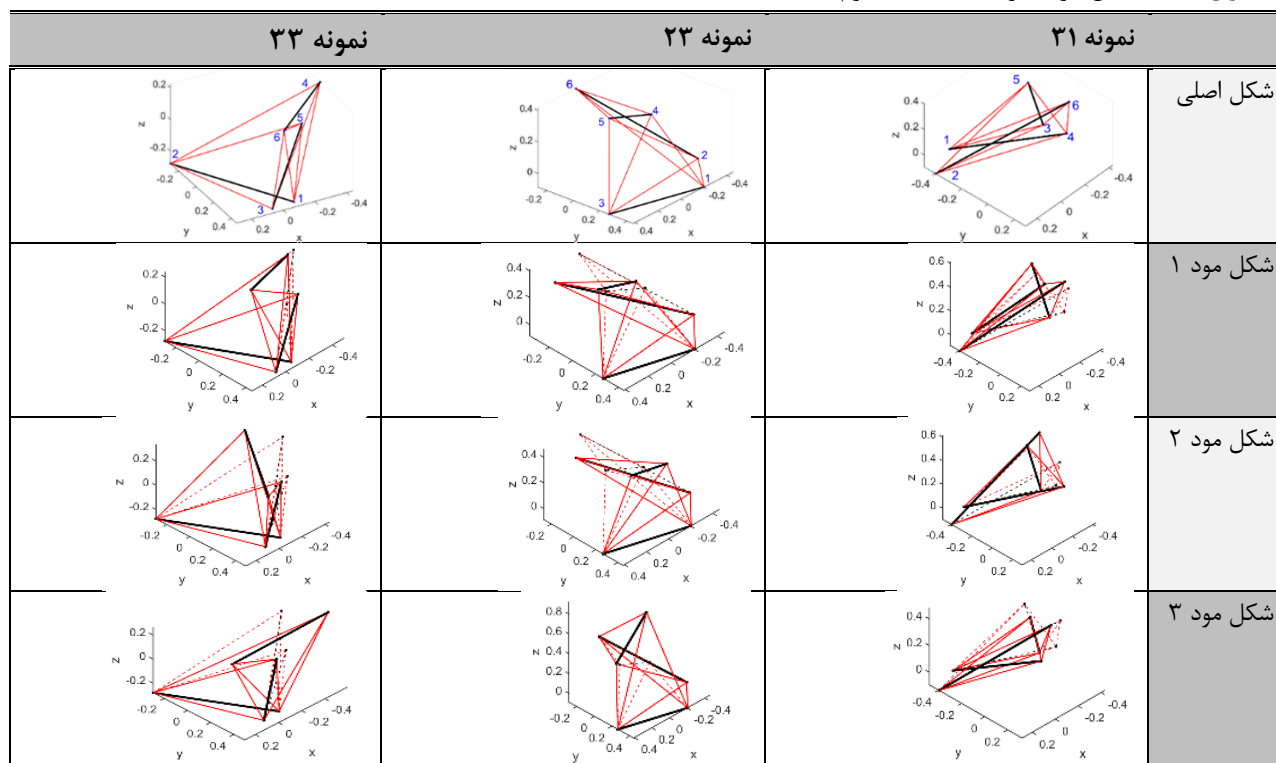
جدول (۱۵): شکل مود نمونه های حالت اول (Hz).

نمونه ۱۱	نمونه ۱۲	نمونه ۱۳	شکل اصلی
			
			شکل مود ۱
			شکل مود ۲
			شکل مود ۳

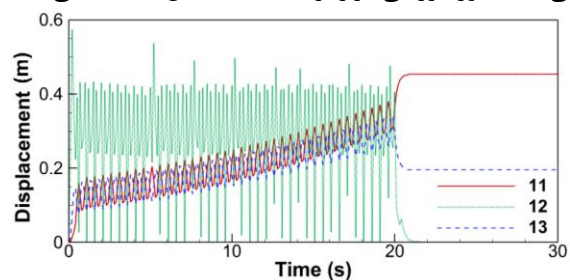
جدول (۱۶): شکل مود نمونه های حالت دوم (Hz).

نمونه ۲۱	نمونه ۲۲	نمونه ۲۳	شکل اصلی
			
			شکل مود ۱
			شکل مود ۲
			شکل مود ۳

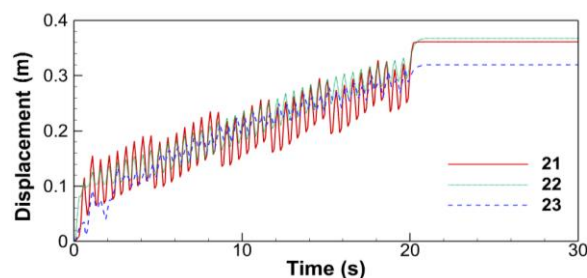
جدول (۱۷): شکل مود نمونه‌های حالت سوم (Hz).



نمودار تغییرات طول و نیروی داخلی عضو شماره ۱ که یک طرف آن گیردار و طرف دیگر محل اعمال بار ارتعاشی می‌باشد، مورد بررسی قرار گرفته است (شکل‌های ۱۴ الی ۱۹).



شکل (۱۱): جابجایی مطلق گره ۴ در نمونه‌های حالت اول.

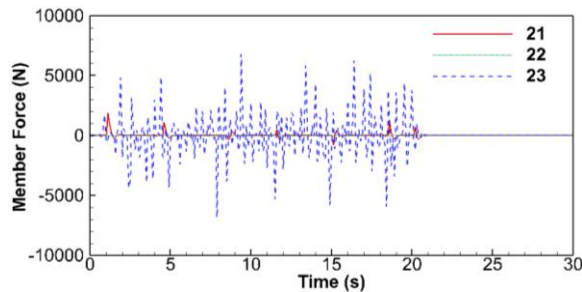


شکل (۱۲): جابجایی مطلق گره ۴ در نمونه‌های حالت دوم.

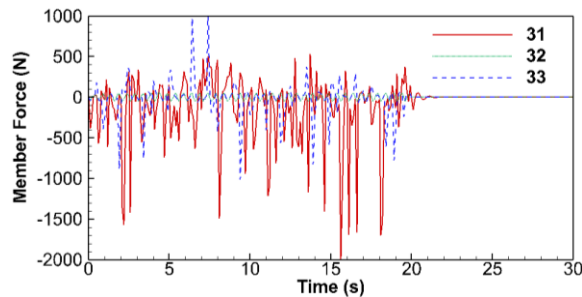
جدول (۱۸): مشخصات مواد اعضای سازه.

تنش تسلیم	ضریب کشسانی	چگالی	جنس	عضو
(MPa)	(GPa)	(kg/m ³)	-	-
۳۰۰	۲۰۶	۷۹۳۰	Steel_Q345	میله
۱۲۲۳	۷۶	۷۸۷۰	Steel String	ریسمان

در شکل‌های ۱۱ تا ۱۳، جابجایی مطلق گره شماره ۴ که بار خارجی به آن اعمال می‌شود، برای نمونه‌های مختلف حالت‌های اول تا سوم ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، جابجایی مطلق گره شماره ۴ با اعمال بار خارجی، به صورت نوسانی در حال تغییر می‌باشد و بعد از برداشتن بار، جابجایی ثابت شده است. تغییرات موقعیت گره شماره ۴ نسبت به حالت اولیه بیانگر تغییر شکل و جابجایی گره‌های سازه می‌باشد که در نمونه‌های حالت اول تا سوم (شکل‌های ۱۱ تا ۱۳) نشان داده شده است. با توجه به انتخاب تصادفی گره‌های سازه و موقعیت متفاوت گره‌ها نسبت به محورهای مختصات در نمونه‌های مختلف، میزان نوسانات در نمونه‌های مختلف متفاوت می‌باشد. به منظور بررسی اثرات بارگذاری دینامیکی بر شکل و رفتار سازه‌های نمونه‌های مختلف،



شکل (۱۸): تغییرات نیروی عضو ۱ نمونه های حالت دوم.

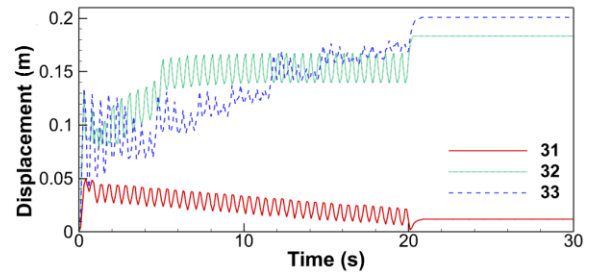


شکل (۱۹): تغییرات نیروی عضو ۱ نمونه های حالت سوم.

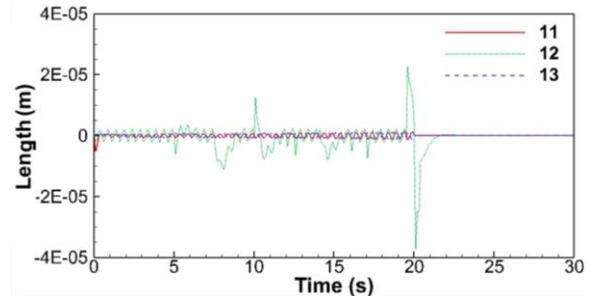
همان طور که مشاهده می شود، تغییرات نیروی داخلی اعضا منطبق بر نمودار تغییرات طول می باشد و به صورت نوسانی در ۲۰ ثانیه ابتدایی ادامه داشته و سپس متناسب با بارگذاری به صفر میل می کند. تفاوت در مقادیر نمودارها به واسطه تفاوت در ساختار سازه و امتداد شکل گیری آنها نسبت به محورهای مختصات است. با توجه به تصادفی بودن موقعیت گره ها، نظم شماره گذاری و موقعیت اعضا متفاوت می باشند.

۵- نتیجه گیری

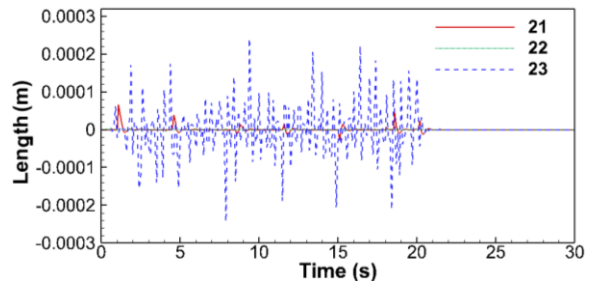
در این مقاله معادلات دینامیک غیرخطی سازه تنسگریتی به روش المان محدود استخراج و روابط تعادل سازه تشریح شد. سازه تنسگریتی منشوری با ۶ گره محاط بر سطح داخلی کره، باحالت های مختلف تولید و فرآیند فرمیابی با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام شده است. تعریف ماتریس اتصال سازه های تنسگریتی به روش الفبایی و ضریب تنش اعضاء به صورت باینری از موارد بدیع در نظر گرفته شده در این پژوهش می باشد که امکان فرمیابی هوشمند سازه های تنسگریتی با حداقل اطلاعات سازه و با انتخاب نقاط تصادفی را میسر می کند. همچنین ارزیابی سازه با توابع چند موضوعی، در کنار بررسی تعادل سازه نیز در هوشمندسازی



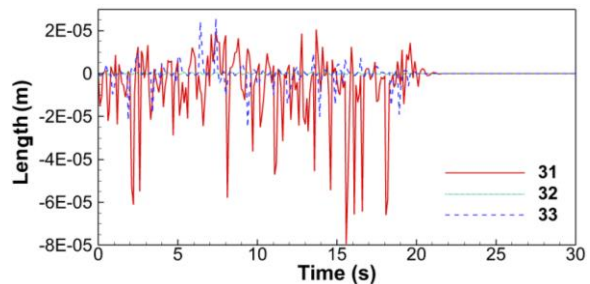
شکل (۱۳): جابجایی مطلق گره ۴ در نمونه های حالت سوم.



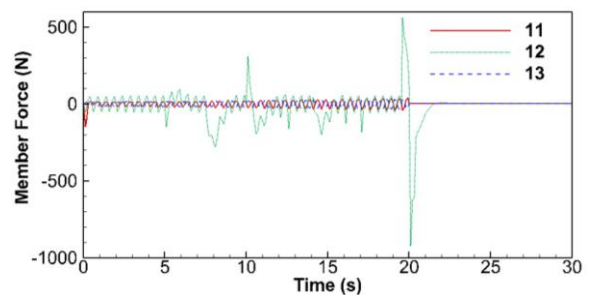
شکل (۱۴): تغییرات طول عضو ۱ نمونه های حالت اول.



شکل (۱۵): تغییرات طول عضو ۱ نمونه های حالت دوم.



شکل (۱۶): تغییرات طول عضو ۱ نمونه های حالت سوم.



شکل (۱۷): تغییرات نیروی عضو ۱ نمونه های حالت اول

[5] Zhang L-Y, Zhu S-X, Li S-X, Xu G-K. Analytical form-finding of tensegrities using determinant of force-density matrix. *Composite Structures*. 2018;189:87-98.

DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.01.054>.

[6] Kan Z, Peng H, Chen B, Zhong W. Nonlinear dynamic and deployment analysis of clustered tensegrity structures using a positional formulation FEM. *Composite Structures*. 2018;187:241-58.

DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.050>.

[7] Murakami H. Static and dynamic analyses of tensegrity structures. Part II. Quasi-static analysis. *International Journal of Solids and Structures*. 2001;38(20):3615-29.

DOI:

[https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(00\)00233-X](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(00)00233-X).

[8] Faroughi S, Khodaparast HH, Friswell MI. Non-linear dynamic analysis of tensegrity structures using a co-rotational method. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2015;69:55-65.

DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2014.11.021>.

[9] Rimoli JJ. A reduced-order model for the dynamic and post-buckling behavior of tensegrity structures. *Mechanics of Materials*. 2018;116:146-57.

DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2017.01.009>.

[10] Wang Y, Xu X, Luo Y. Form-finding of tensegrity structures via rank minimization of force density matrix. *Engineering Structures*. 2021;227:111419.

DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111419>.

[11] Pagitz M, Tur JM. Finite element based form-finding algorithm for tensegrity structures. *International Journal of Solids and Structures*. 2009;46(17):3235-40.

DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2009.04.018>.

[12] Gasparini D, Klinka KK, Arcaro VF. A finite element for form-finding and static analysis of tensegrity structures. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*. 2012;6(9):1239-54.

DOI:

<https://dx.doi.org/10.2140/jomms.2011.6.1239>.

[13] Lu C, Zhu H, Li S. Initial form-finding design of deployable tensegrity structures with dynamic relaxation method. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*. 2017;33(5):2861-8.

DOI:

<https://doi.org/10.3233/JIFS-169335>.

این روش و افزایش قابلیت‌های کاربردی آن می‌افزاید. الگوریتم فرمیابی پیشنهادی، قابلیت بهینه‌سازی سازه با افزودن اهداف جدید شامل حجم، فضای اشغال‌شده و جرم را داراست. استخراج نمودارهای مسیر ارزیابی پارامترهای فرمیابی در نسل‌های مختلف به بهبود فرآیند و بهینه‌سازی آن در راستای کاهش حجم محاسباتی کمک می‌کند. روش هوشمند پیشنهادی با حداقل اطلاعات از پیکربندی سازه می‌تواند در فرمیابی سازه‌های متقارن، نامتقارن، بدون محدودیت در ابعاد سازه استفاده و منجر به خلق سازه‌های پیچیده با قابلیت‌های متفاوت شود. تحلیل ارتعاشات سازه‌های نهایی نیز در اثر بارگذاری خارجی در بازه زمانی ۳۰ ثانیه موردبررسی قرار گرفت و نتایج مربوط به تحلیل مودال، جابجایی مطلق گره‌ها، طول و نیروهای داخلی اعضاء ارائه شد. موقعیت گره‌های سازه بعد از باربرداری نسبت به حالت اولیه متفاوت و بیانگر تغییرشکل سازه می‌باشد. نمودار تغییر طول اعضا متناسب با تغییر نیروی داخلی، در زمان بارگذاری نوسانی و بعدازآن ثابت‌شده است. بررسی نمودارهای ارتعاشات در کنار فرمیابی سازه این امکان را فراهم می‌سازد تا پایداری سازه در طول مرحله بارگذاری بررسی و از ناپایداری و فروپاشی سازه در این مرحله جلوگیری شود.

۶- مراجع

[1] Wen L, PFan F, Ding X. Tensegrity metamaterials for soft robotics. *Science Robotics*. 2020;5(45):eabd9158.

DOI:

<https://doi.org/10.1126/scirobotics.abd9158>.

[2] Kahla NB, Ouni MHE, Ali NBH, Khan RA. Nonlinear dynamic response and stability analysis of a tensegrity bridge to selected cable rupture. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2020;17:e253.

DOI:

<https://doi.org/10.1590/1679-78255907>.

[3] Motro R. Tensegrity: structural systems for the future: Elsevier; 2003.

[4] Tibert A, Pellegrino S. Review of form-finding methods for tensegrity structures. *International Journal of Space Structures*. 2011;26(3):241-55.

DOI:

<https://doi.org/10.1260/0266-3511.26.3.241>.

- tensegrity structure. *Procedia Engineering*. 2011;14:2949-56.
- [25] Perera NS. A machine learning application for form-finding of tensegrity structures: Queen's University (Canada); 2018.
- [26] Zalyaev E, Savin S, Vorochaeva L, editors. Machine learning approach for tensegrity form finding: Feature extraction problem. 2020 4th Scientific School on Dynamics of Complex Networks and their Application in Intellectual Robotics (DCNAIR); 2020: IEEE. DOI: <https://doi.org/10.1109/DCNAIR50402.2020.9216799>.
- [27] Lee S, Lieu QX, Vo TP, Lee J. Deep neural networks for form-finding of tensegrity structures. *Mathematics*. 2022;10(11):1822. DOI: <https://doi.org/10.3390/math10111822>.
- [28] Zhao L, Sun Z, Liu K, Zhang J. The dynamic relaxation form finding method aided with advanced recurrent neural network. *CAAI Transactions on Intelligence Technology*. 2023;8(3):635-44. DOI: <https://doi.org/10.1049/cit2.12177>.
- [29] Paul C, Lipson H, Cuevas FJV, editors. Evolutionary form-finding of tensegrity structures. Proceedings of the 7th annual conference on Genetic and evolutionary computation; 2005. DOI: <https://doi.org/10.1145/1068009.1068011>.
- [30] Rieffel J, Valero-Cuevas F, Lipson H. Automated discovery and optimization of large irregular tensegrity structures. *Computers & Structures*. 2009;87(5-6):368-79. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2008.11.010>.
- [31] Xu X, Luo Y. Form-finding of nonregular tensegrities using a genetic algorithm. *Mechanics Research Communications*. 2010;37(1):85-91. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2009.09.003>.
- [32] Holland JH. Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence: MIT press; 1992.
- [33] Lobo D, Vico FJ. Evolutionary development of tensegrity structures. *Biosystems*. 2010;101(3):167-76. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2010.06.005>.
- [34] Koohestani K, Guest S. A new approach to the analytical and numerical form-finding of
- [14] Barnes MR. Form finding and analysis of tension structures by dynamic relaxation. *International Journal of Space Structures*. 1999;14(2):89-104. DOI: <https://doi.org/10.1260/0266351991494722>.
- [15] Ma S, Yuan X-F, Xie S-D. A new genetic algorithm-based topology optimization method of tensegrity tori. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2019;23:2136-47. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12205-019-1700-z>.
- [16] Li Y, Feng X-Q, Cao Y-P, Gao H. A Monte Carlo form-finding method for large scale regular and irregular tensegrity structures. *International Journal of Solids and Structures*. 2010;47(14-15):1888-98. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2010.03.026>.
- [17] Brökemeier F, Hengstenberg SM, Keeble JW, Robin CE, Rocco F, Savage MJ. Quantum Magic and Multi-Partite Entanglement in the Structure of Nuclei. arXiv preprint arXiv:2409.12064. 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.12064>.
- [18] Scolamiero LG, Zolesi V, Ganga PL, Podio-Guidugli P, Tibert G, Micheletti A, inventors; Agence Spatiale Europeenne, assignee. Deployable tensegrity structure, especially for space applications. United States patent US 9,815,574. 2017.
- [19] Motro R. Tensegrity systems: the state of the art. *International journal of space structures*. 1992;7(2):75-83. DOI: <https://doi.org/10.1177/026635119200700201>.
- [20] Małek M, Łasica W, Kadela M, Kluczyński J, Dudek D. Physical and mechanical properties of polypropylene fibre-reinforced cement-glass composite. *Materials*. 2021;14(3):637. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14030637>.
- [21] Zhang J, Ohsaki M. Form-finding of complex tensegrity structures by dynamic relaxation method. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 2016;81(719):71-7.
- [22] Domer B. Performance enhancement of active structures during service lives. EPFL; 2003. DOI: <https://doi.org/10.5075/epfl-thesis-2750>.
- [23] Lee S, Lee J, Kang J. A genetic algorithm based form-finding of tensegrity structures with multiple self-stress states. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. 2017;16(1):155-62. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.371>.
- [24] Yamamoto M, Gan B, Fujita K, Kurokawa J. A genetic algorithm based form-finding for

tensegrity structures. International Journal of Solids and Structures. 2013;50(19):2995-3007.

DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2013.05.014>.

[35] Yu X, Yang Y, Ji Y. Automatic Form-finding of N-4 Type Tensegrity Structures. Latin American Journal of Solids and Structures. 2022;19:e419.

DOI: <https://doi.org/10.1590/1679-78256735>.

[36] Harichandran A, Sreevalli IY. Form-finding of tensegrity structures based on force density method. Indian Journal of Science and Technology. 2016.

DOI:

<https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i24/93145>, June 2016.

[37] Azimi M, Dezh ME, Alikhani A. Integral sliding mode fault-tolerant control and active vibration suppression of a flexible spacecraft in the presence of external disturbances. Journal of Aerospace Mechanics. 2023; 19(1):137-151. **DOR:**

<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455323.1402.19.1.10.5>.

[38] Azimi M. Robust stabilization and active vibration control of a rigid-flexible multibody system using time-varying sliding mode algorithm. Journal of Aerospace Mechanics. 2022; 18(4):49-63. **DOR:**

<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455323.1401.18.4.4.8>.