

# ISAV2023

## سیزدهمین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات

تهران - ایران

۲۹ و ۳۰ آذر ماه ۱۴۰۲



## فرمیابی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و تحلیل ارتعاشات اجباری سازه تنسگریتی چندوجهی محاط در کره

مرتضی جهان<sup>آ</sup> و میلاد عظیمی<sup>\*</sup>

ایران، تهران، شهرک غرب، خیابان مهستان، خیابان هوافضا، پژوهشگاه هوافضا، ۱۴۶۵۷۷۴۱۱۱، استادیار

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [azimi.m@ari.ac.ir](mailto:azimi.m@ari.ac.ir)

### چکیده

در این مقاله به فرمیابی و تحلیل ارتعاشات یک سازه تنسگریتی چندوجهی با مقطع مثلثی یک طبقه محاط در کره در معرض بارگذاری خارجی پرداخته شده است. معادلات دینامیک غیرخطی سیستم با استفاده از رویکرد لاگرانژ و روش المان محدود استخراج شده است. فرایند فرمیابی پیشنهادی بر پایه الگوریتم ژنتیک و با ساختاری ساده قابلیت تعیین اشکال منظم یا نامنظم تنسگریتی بدون محدودیت‌های ابعادی را دارا می‌باشد. این روش سازه‌های تنسگریتی پایداری را که از میان پیکربندی‌های تصادفی و بر اساس قیود تعریف شده (گره‌های مستقر بر روی کره، توازی سطوح بالایی و پایینی، کوچکتر بودن سطح بالایی از سطح پایینی) و فرایند فرمیابی تولید می‌شوند، با استفاده از تابع تناسب مشخص می‌کند. عملکرد الگوریتم ژنتیک در فرایند فرمیابی سازه‌های با پیکربندی نامشخص، در دو حالت مختلف با ماتریس اتصال مشخص و موقعیت مشخص و تصادفی عضوها (میله‌ها و ریسمان‌ها) در نظر بررسی شده است. همچنین فرم‌های استخراج شده از الگوریتم ژنتیک پس از تحلیل مودال (فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها) در معرض بارگذاری هارمونیک قرار گرفته و رفتار ارتعاشی آنها در هر دو حالت مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از تحلیل‌ها در قالب یک مطالعه مقایسه‌ای، قابلیت روش پیشنهادی در تعیین مشخصه‌های ارتعاشی بر اساس فرمیابی هوشمند پیشنهادی را نمایش می‌دهد.

کلمات کلیدی: تنسگریتی؛ فرمیابی؛ الگوریتم ژنتیک؛ ارتعاشات اجباری.

### ۱ - مقدمه

امروزه ساختاری پایدار و انعطاف‌پذیر برای پیاده‌سازی تکنولوژی‌های جدید به ویژه در حوزه رباتیک و سامانه‌های فضایی مورد نیاز است. سازه‌های تنسگریتی سیستم‌های با ماهیت مبتنی بر تعادل میان اعضای کششی و فشاری می‌باشند. اعضای ای سیستم بواسطه پیش‌تنیدگی ریسمان و میله‌ها در حالت خودتعدالی قرار می‌گیرند. تحلیل کامل سازه تنسگریتی به دو بخش کلی تقسیم

می‌شود. بخش اول شامل فرمیابی است. فرمیابی فرآیندی است که در آن براساس یک توپولوژی مشخص، هندسه پایدار سازه ایجاد می‌شود. قسمت دوم شامل تحلیل رفتار ارتعاشی سازه تنسگریتی تحت بارگذاری‌های داخلی و خارجی است.

اهمیت تعیین پیکربندی مناسب سازه در حصول اطمینان از تعادل ایستای سازه و تحقق کامل ماموریت تعریف شده می‌باشد. تا کنون روش‌های فرمیابی مختلفی از جمله روش چگالی نیرو، روش چگالی نیرو پیشرو، روش المان محدود، روش آرام‌سازی دینامیکی، الگوریتم ژنتیک و روش مونت‌کارلو را پیشنهاد شده است. تیبرت و پلگرینو<sup>۲</sup> روش‌های فرمیابی را به دو روش سینماتیکی (آرام‌سازی دینامیکی، المان محدود و مونت‌کارلو) و استاتیکی (چگالی نیرو و چگالی نیروی پیشرو) طبقه‌بندی کرده‌اند [۱]. هدف هر دو دسته تعیین پیکربندی مناسب سازه در شرایط خودتنش است. روش‌های سینماتیکی هندسه سازه را با حداکثر کردن طول میله (و طول ریسمان ثابت) یا به حداقل رساندن طول ریسمان (و طول میله ثابت) تعیین می‌کنند. این روش‌ها ریسمان‌ها را در شرایط پیش‌تنش همانند روش‌های عمومی برای ساخت سازه‌های تنسگریتی در نظر نمی‌گیرند. روش آرام‌سازی دینامیکی برای سازه‌هایی با مقیاس کوچک توسط موترو<sup>۳</sup> معرفی شد [۲]. در این روش از معادلات تعادل غیرخطی در حضور میرایی برای فرمیابی سازه‌های تنسگریتی استفاده می‌شود [۳]. حلقه تکرار فرمیابی در روش آرام‌سازی دینامیکی که شامل محاسبه مکرر سرعت‌ها و نیروهای گره‌ها در هر حلقه و بررسی شرایط تعادل می‌باشد، از یک پیکربندی اولیه تا زمانی که شرایط تعادل ایجاد شود انجام می‌شود [۴]. روش آرام‌سازی دینامیکی را تنها می‌توان برای پیکربندی شناخته شده با در نظر گرفتن حالت تعادل و نیروهای خارجی وارد بر سازه‌ها به کار برد. این روش توسط موترو و ژانگ و اوهاساکي<sup>۴</sup> [۵] به عنوان یک روش فرمیابی برای اشکال نامنظم سازه‌های تنسگریتی استفاده شده است. با این حال، این روش برای سازه‌های مقیاس بزرگ روش مناسبی نیست.

روش المان محدود نیز برای تعیین پیکربندی یک ساختار تنسگریتی خودمتعاد مناسب است. این روش که توسط پگیتز و میتراز تور<sup>۵</sup> ارائه شده است، تضمین می‌کند که عضوهای سازه‌های تنسگریتی در شرایط تعادل هستند. آنها همچنین بیان کردند که روش المان محدود فرض فضای متقارن برای پیکربندی را در نظر می‌گیرد و از فرآیند تکرار برای نشان دادن بهترین پیکربندی استفاده می‌کنند [۶]. هالند<sup>۶</sup> [۷]، پل<sup>۷</sup> و همکاران [۸] الگوریتم‌های ژنتیک را برای تبدیل یک پیکربندی اولیه به ساختاری پایدار را توسعه دادند. شو و لیو<sup>۸</sup> از الگوریتم ژنتیک بعنوان بخشی از روش فرمیابی که نوید ساخت یک ساختار فوق‌العاده پایدار را می‌دهد، استفاده کردند [۹].

در این مقاله ابتدا معادلات حرکت و تعادل سازه تنسگریتی استخراج و به روش الگوریتم ژنتیک فرمیابی شده است. سپس سازه تحت تحلیل‌های ارتعاشی قرار گرفته و نتایج تشریح شده است. از جمله نکات بدیع مقاله حاضر استفاده از روش هوشمند فرمیابی می‌باشد که به دانش حداقلی از پیکربندی سازه شامل اطلاعات اتصال اعضا و فشاری یا کششی بودن هر عضو نیاز داشته (میله یا ریسمان) و برای فرمیابی سازه‌های متقارن، نامتقارن و بدون محدودیت در ابعاد سازه استفاده می‌شود. همچنین تحلیل همزمان ارتعاشات در کنار فرمیابی سازه از رویکردهای ویژه این مقاله می‌باشد، که این امکان را می‌دهد در پژوهش‌های آتی از خروجی‌های ارتعاشات علاوه بر کنترل ارتعاشات سازه بمنظور فرمیابی سازه‌های تنسگریتی استفاده شود.

ساختار مقاله به این صورت می‌باشد که در بخش دوم، مدل‌سازی دینامیکی و معادلات تعادل سازه‌های تنسگریتی تشریح می‌شود. معادلات دینامیک غیرخطی سیستم با استفاده از رویکرد لاگرانژ و روش المان محدود و معادلات تعادل سازه تنسگریتی بر مبنای قوانین نیوتن استخراج شده است. در بخش سوم پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک جهت فرمیابی سازه‌های تنسگریتی تشریح و مراحل کدگذاری جمعیت و نحوه ارزیابی حالت تعادل سازه نشان داده شده است. در بخش چهارم سازه تنسگریتی یک طبقه با ۶ گره محاط بر سطح داخلی کره با شعاع معین و با ارتفاع یکسان در دو حالت مختلف با ماتریس اتصال ثابت و نوع عضوهای (میله یا

<sup>1</sup> Dynamic Relaxation

<sup>2</sup> Tibert and Pellegrino

<sup>3</sup> Motro

<sup>4</sup> Zhang and Ohsaki

<sup>5</sup> Pagitz and Mirats Tur

<sup>6</sup> Holland

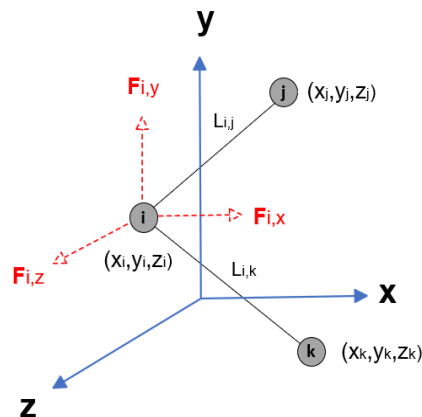
<sup>7</sup> Paul et. al.

<sup>8</sup> Xu and Luo

ریسمان) مشخص و تصادفی، شبیه‌سازی و با استفاده از الگوریتم ژنتیک فرمیابی شده است. در انتها فرکانس‌های طبیعی و شکل‌مدهای سازه‌های حاصل از فرایند فرمیابی استخراج و پیکربندی‌های منتخب در معرض بارگذاری هارمونیک قرار گرفته و تحلیل‌های ارتعاشی بر حسب جابجایی گره‌ها، تغییرات طول و نیروهای داخلی اعضا در قالب یک مطالعه مقایسه‌ای نمایش داده شده است.

## ۲ - مدلسازی دینامیکی و استخراج معادلات تعادل

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



شکل ۱. مشخصات المان‌های سازه تنسگریتی

بردار مختصات گره‌ها به صورت زیر تعریف شده است:

$$\mathbf{N} = [\mathbf{n}_1 \quad \mathbf{n}_2 \quad \dots \quad \mathbf{n}_{n_n}] \in \mathbf{R}^{3 \times n_n} \quad (1)$$

$$\mathbf{n}_i = [x_i \quad y_i \quad z_i]^T \quad (2)$$

که در آن  $\mathbf{n}$  بردار مختصات هر گره،  $n_n$  تعداد گره‌ها و  $x, y, z$  مختصات گره‌های سازه می‌باشند. ماتریس اتصال  $\mathbf{C}$ ، بیانگر توپولوژی سازه است و نحوه ارتباط گره‌های مختلف توسط میله‌ها  $\mathbf{C}_b \in \mathbf{R}^{3 \times n_n}$  و ریسمان‌ها  $\mathbf{C}_s \in \mathbf{R}^{3 \times n_n}$  را نمایش می‌دهد:

$$\mathbf{C} = [\mathbf{C}_b \quad \mathbf{C}_s]^T \in \mathbf{R}^{n_e \times n_n} \quad (3)$$

$$[\mathbf{C}_{ij}] = \begin{cases} -1 & \text{at node } i \\ 1 & \text{at node } j \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

که در آن  $n_e$  تعداد عضوهای سیستم می‌باشد. معادله دینامیک سازه تنسگریتی با استفاده از روش لاگرانژ و المان محدود به صورت زیر استخراج می‌شود [۱۰]:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} - \mathbf{D}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{F} \quad (5)$$

که در آن  $\mathbf{M}$ ،  $\mathbf{D}$  و  $\mathbf{K}$  بترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سازه و  $\mathbf{F}$  بردار اغتشاشات خارجی وارد شده به گره‌های سازه می‌باشد. معادلات مربوط به تعادل استاتیکی گره مرجع  $i$  که به ترتیب توسط اعضای  $L_{i,j}$  و  $L_{i,k}$  به گره‌های  $j$  و  $k$  متصل است شکل (۱)، در رابطه زیر ارائه شده است:

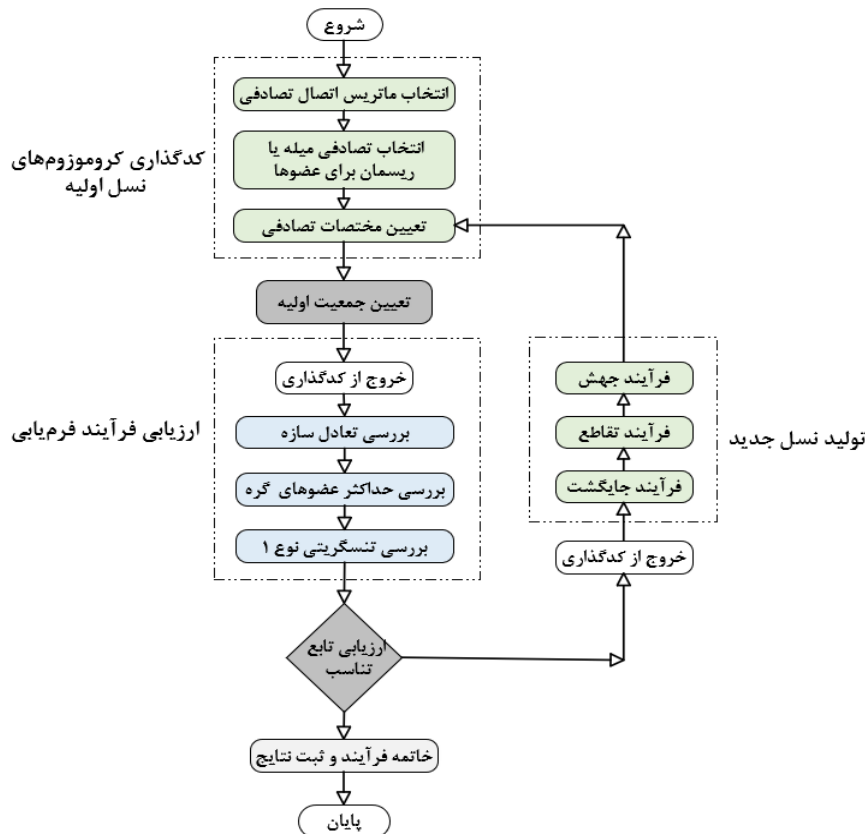
$$\left. \begin{aligned} (q_{i,j}+q_{i,k}) x_i - q_{i,j} x_j - q_{i,k} x_i &= F_{i,x} \\ (q_{i,j}+q_{i,k}) y_i - q_{i,j} y_j - q_{i,k} y_i &= F_{i,y} \\ (q_{i,j}+q_{i,k}) z_i - q_{i,j} z_j - q_{i,k} z_k &= F_{i,z} \end{aligned} \right\} \rightarrow \mathbf{A} \cdot \mathbf{q} = \mathbf{F} \quad (6)$$

که در آن  $q$  چگالی نیروی (نیرو در واحد طول) عضوهای سازه می‌باشد. در سازه تنسگریتی خودتنش فرض  $\mathbf{F}=\mathbf{0}$  در نظر گرفته شده است. بنابراین از بازنویسی معادله تعادل، ماتریس تعادل سازه  $\mathbf{A}$  به صورت زیر استخراج می‌شود:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{q} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}^T \text{diag}(\mathbf{C} x) \\ \mathbf{C}^T \text{diag}(\mathbf{C} y) \\ \mathbf{C}^T \text{diag}(\mathbf{C} z) \end{bmatrix} \cdot \mathbf{q} = \mathbf{0} \rightarrow \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}^T \text{diag}(\mathbf{C} x) \\ \mathbf{C}^T \text{diag}(\mathbf{C} y) \\ \mathbf{C}^T \text{diag}(\mathbf{C} z) \end{bmatrix} \quad (7)$$

### ۳ - پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک جهت فرمیابی

مهم‌ترین مسئله در فرمیابی سازه‌های تنسگریتی، چگونگی تعریف پارامترهای ورودی است که در ژن‌ها کدگذاری شده و کروموزوم یک جمعیت را تشکیل دهند. برای پیاده‌سازی مبانی الگوریتم در فرمیابی سازه‌های تنسگریتی نوع ۱، تعداد گره‌ها زوج و تعداد میله‌ها نصف تعداد گره‌ها در نظر گرفته می‌شود تا اطمینان حاصل شود که هیچ جفتی از میله‌ها به یکدیگر متصل نمی‌شوند. به این ترتیب، ماتریس اتصال و بردار چگالی نیروی نمونه اولیه را می‌توان براساس اطلاعات تعداد گره‌ها تولید کرد. حین پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک، با اطمینان از اینکه هیچ عضوی با نحوه اتصال یکسان وجود ندارد، یک حدس اولیه از ماتریس اتصال ایجاد می‌شود.



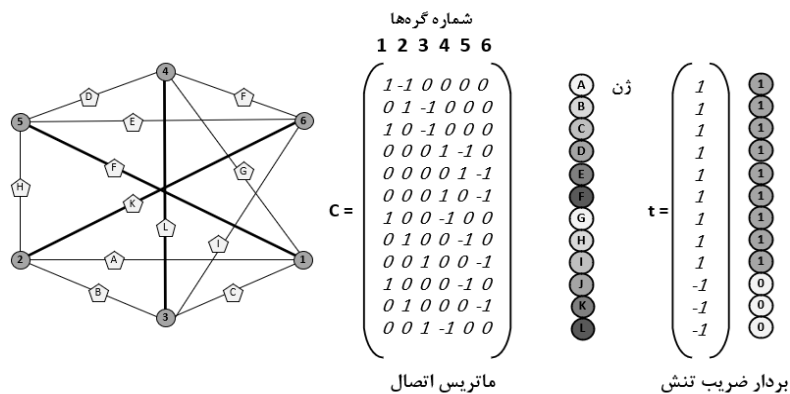
شکل ۲. فلوجارت الگوریتم ژنتیک برای فرمیابی سازه‌های تنسگریتی

در مورد بردار چگالی نیروی نمونه اولیه، یک حدس اولیه به طور تصادفی از فشاری یا کششی بودن عضوهای سازه در نظر گرفته می‌شود. ماتریس‌های اتصال و بردار چگالی نیروی اولیه در دو کروموزوم مختلف کدگذاری می‌شوند تا یک جمعیت با اطلاعات ژنتیکی متفاوت را تشکیل دهند. شکل (۲) فلوجارت کلی از فرآیند فرمیابی را برای ساختار تنسگریتی بر اساس تعداد از پیش تعریف شده

گره‌ها نشان می‌دهد. این فرآیند تا زمانیکه پیکره‌بندی پایدار تنسگریتی یافت شود، جمعیت جدید تولید می‌کند. در این مقاله، یک حالت تعادل خودتنش برای سازه تنسگریتی به عنوان هدف اصلی الگوریتم ژنتیک در نظر گرفته می‌شود، بنابراین، تمام توابع تناسب در طول فرآیند فرم‌یابی برای تعیین یک حالت تعادل خودتنش برای سازه تنسگریتی که تمام محدودیت‌های اعمال شده را برآورده می‌کند، ارزیابی می‌شوند.

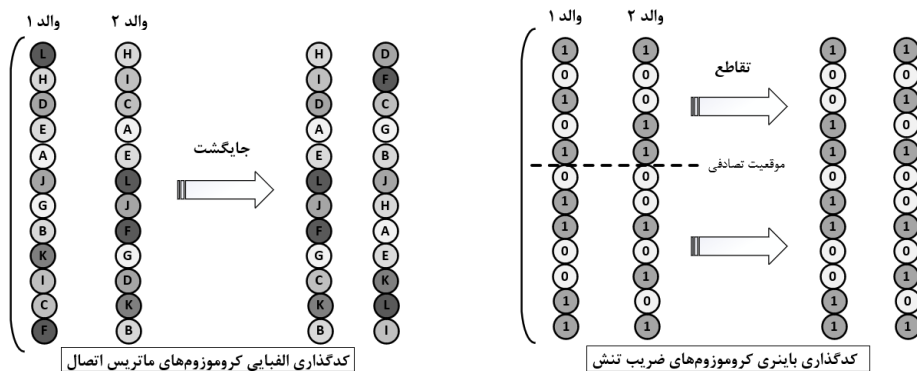
### ۳-۱- کدگذاری جمعیت

در این بخش یک ساختار تنسگریتی سه‌وجهی با شش گره برای فرم‌یابی مورد استفاده قرار خواهد گرفت. شکل (۳) کدگذاری سازه تنسگریتی سه‌وجهی را به عنوان یک جمعیت نشان می‌دهد که اطلاعات ژنتیکی توسط دو کروموزوم، شامل ماتریس اتصال و تنش داخلی اعضا را نشان می‌دهد. کروموزوم ماتریس اتصال با استفاده از حروف الفبای لاتین و کدگذاری بردار نیرو داخلی بصورت باینری تعریف می‌شود که در آن مقدار 1 نشان دهنده عضو کششی و مقدار 0 نشان دهنده عضو فشاری است.



شکل ۳. کدگذاری ماتریس اتصال و بردار ضریب تنش سازه تنسگریتی

فرآیند جایگشت در تولید کروموزوم‌های ماتریس اتصال استفاده می‌شود تا اطمینان حاصل شود که هیچ عضوی با اتصال یکسان وجود ندارد. در تولید کروموزوم‌های ضرایب تنش از فرآیند تقاطع استفاده می‌شود شکل (۴).



شکل ۴. فرآیند جایگشت در کروموزوم‌های والد ماتریس اتصال و تقاطع در کروموزوم‌های والد ضریب تنش

### ۳-۲- ارزیابی حالت تعادل سازه تنسگریتی

برای ارزیابی حالت خودتعدالی سازه تنسگریتی از رابطه زیر که در آن مقدار تناسب کل  $\Gamma$  به یک مقدار نزدیک به صفر به عنوان بهترین هدف تناسب در الگوریتم ژنتیک منجر خواهد شد، استفاده می‌شود:

$$\Gamma = \eta_1 + \eta_2 + \eta_3 \quad (8)$$

که در آن  $\eta_1$ ،  $\eta_2$  و  $\eta_3$  به ترتیب توابع ارزیابی تعادل سازه، تعداد عضوهای هر گره و تعیین تنسگریتی نوع ۱ می‌باشد. هر کدام از توابع در حالت مطلوب به صفر به عنوان بهترین تناسب همگرا و در غیر اینصورت از صفر فاصله می‌گیرد. تابع  $\eta_1$  از رابطه زیر استخراج می‌شود:

$$\eta_1 = \mathbf{S}_{d \times n_n, n_b} \quad (9)$$

که در آن  $n_b$  تعداد میله‌ها می‌باشند. با تجزیه ماتریس تعادل  $\mathbf{A}$  به ماتریس‌های تکین خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \mathbf{U} \mathbf{S} \mathbf{V}^T \\ \mathbf{U} &= [u_1 \quad u_2 \quad \dots \quad u_r \quad | \quad m_1 \quad m_2 \quad \dots \quad m_k], \quad k = d \times n_n - r. \\ \mathbf{V} &= [v_1 \quad v_2 \quad \dots \quad v_r \quad | \quad q_1 \quad q_2 \quad \dots \quad q_s], \quad s = n_b - r \end{aligned} \quad (10)$$

که در آن ماتریس‌های  $\mathbf{U}$  و  $\mathbf{V}$  دارای فضای پوچی  $m_i$  بردار جابجایی‌های بینهایت کوچک،  $r$  رنک ماتریس  $\mathbf{A}$  و  $d$  ابعاد مدل فیزیکی مسئله می‌باشد. بمنظور بررسی تعادل عضوهای سازه تنسگریتی، درایه‌های ماتریس قطری  $\mathbf{S}$  بصورت کاهشی منظم می‌شوند:

$$\mathbf{S} = \text{diag}(s_{1,1} \quad \dots \quad s_{d \times n_n, n_b}). \quad (11)$$

تعداد عضوهای صفر یا نزدیک صفر ماتریس  $\mathbf{S}$ ، بیانگر مرتبه ماتریس  $\mathbf{A}$  و تعداد حالات خودتعدالی در سازه می‌باشد. بمنظور کاهش عملیات محاسباتی تنها درایه انتهایی ماتریس  $\mathbf{S}$  برای بررسی حالات خودتعدالی سازه تنسگریتی بررسی می‌شود. اگر آخرین درایه ماتریس  $\mathbf{S}$  برابر صفر باشد حداقل یک نقص رنک وجود داشته و سازه حالت خودتعدالی دارد. برای حذف سازه‌های تنسگریتی با کمینه تعداد عضوهای وارد بر یک گره، تابع تناسب  $\eta_2$  بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta_2 = \sum_{j=1}^{n_n} \left( N_C - \sum C_{ij} \right). \quad (12)$$

که در آن  $N_C$  تعداد اعضای تعریف شده هر گره می‌باشد. اگر تعداد اعضای هر گره در سازه تنسگریتی برابر با  $N_C$  باشد، رابطه (۱۲) به یک مقدار صفر به عنوان بهترین تناسب منجر خواهد شد. در غیر این صورت، مقدار تناسب بزرگتر از صفر خواهد بود. برای تضمین آنکه تمام میله‌ها در حالت فشار هستند می‌بایست تمام اعضای فشاری مستقل و جدا از یکدیگر باشند. به منظور اطمینان از عدم ارتباط میان دو میله (قید نوع ۱ بودن سازه تنسگریتی)، تابع ارزیابی  $\eta_3$  در نظر گرفته می‌شود. در معادله زیر بهترین مقدار تناسب صفر تنها در حالیکه دو عضو میله‌ای به یک گره متصل نباشند، ایجاد می‌شود و در غیر این صورت مقدار آن بزرگتر از صفر خواهد بود:

$$\eta_3 = \sum_{j=1}^{n_n} \left( N_S - \sum C_{ij}^T \right), \quad N_S = N_C - 2. \quad (13)$$

#### ۴ - شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

سازه تنسگریتی چند وجهی یک طبقه با ارتفاع ۱۰ متر و محاط با سطح داخلی کره به شعاع ۱۰ متر با ماتریس اتصال ثابت شکل (۳)، در دو حالت در نظر گرفته شده است. حالت اول، موقعیت میله‌ها و ریسمان‌ها در سازه مشخص است و حالت دوم موقعیت میله‌ها و ریسمان‌ها در سازه بصورت تصادفی انتخاب شده است.

جدول ۱. مشخصات اعضای سازه

شماره عضو	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
نوع عضو	میله			ریسمان								
گره ابتدایی	۱	۲	۳	۱	۲	۱	۴	۵	۴	۱	۲	۳
گره انتهایی	۴	۵	۶	۲	۳	۳	۵	۶	۶	۶	۴	۵

<sup>1</sup> Singular Value Decomposition

<sup>2</sup> Null Space

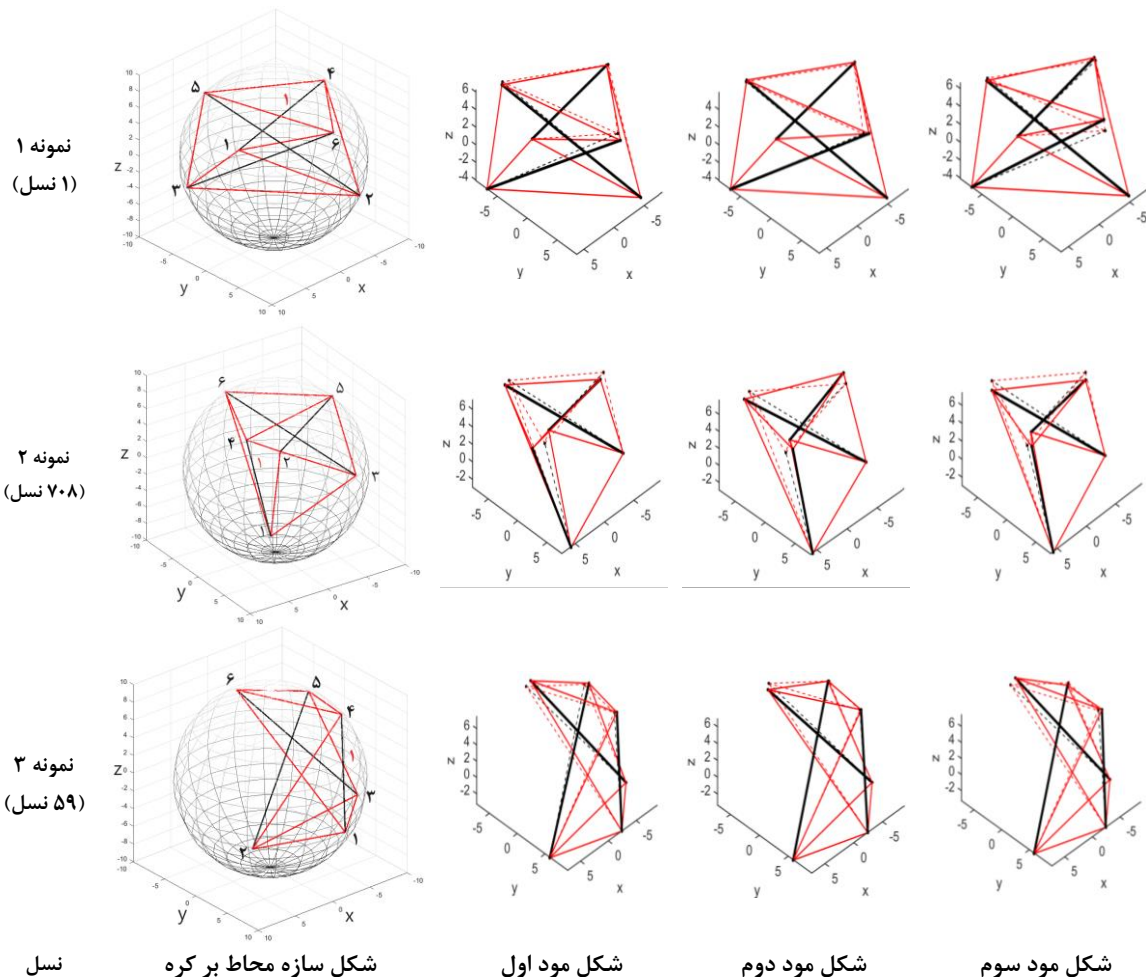
در هر دو حالت، ۶ گره سازه تنسگریتی روی محیط کره و گره‌های مثلث پایین و بالا به ترتیب هم ارتفاع و در صفحه موازی و عمود بر محور Z قرار می‌گیرند. شماره‌گذاری و مشخصات مکانیکی اعضای سازه تنسگریتی به ترتیب در جداول (۱) و (۲) ارائه شده است.

جدول ۲. مشخصات مواد اعضای سازه

عضو	جنس	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	ضریب کشسانی (GPa)	تنش تسلیم (MPa)	حاشیه اطمینان تنش تسلیم
میله	Steel_Q345	۷۹۳۰	۲۰۶	۳۰۰	۰/۱
ریسمان	Steel String	۷۸۷۰	۷۶	۱۲۲۳	۰/۱

### حالت اول:

در حالت اول ماتریس اتصال و موقعیت اعضای سازه ثابت می‌باشد و تنها طول اعضاء و موقعیت گره‌ها در نمونه‌های مختلف جابجا می‌شوند. در شکل (۵) نمونه‌های سازه‌های تنسگریتی فرم شده حالت اول به همراه سه مود اول ارتعاشی نمایش داده شده است.



شکل ۵. فرم سازه و سه مود اول ارتعاشی نمونه‌های حالت اول

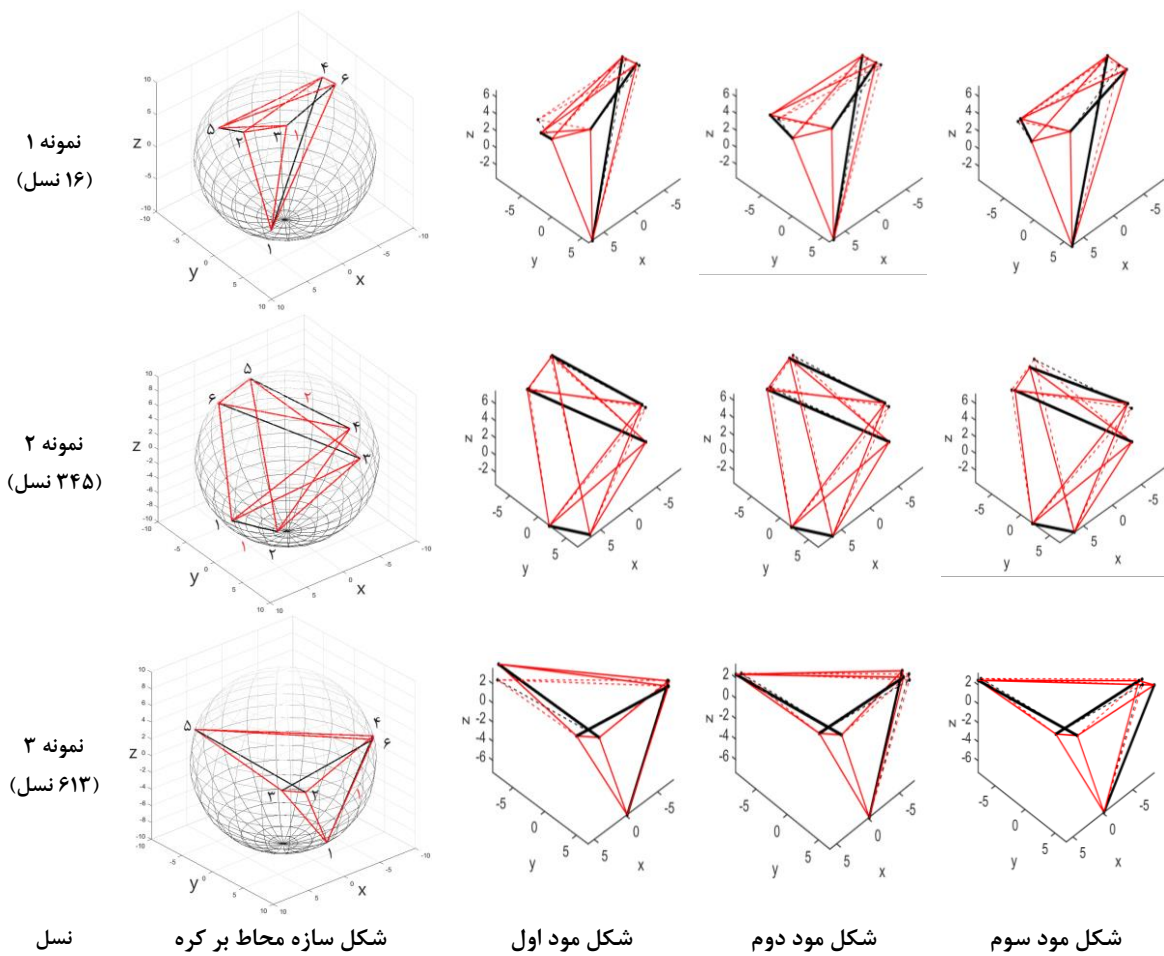
در اشکال فوق، خطوط مشکی و قرمز به ترتیب میله‌ها و ریسمان‌های سازه در حالت انتهایی و خط‌چین‌های مشکی و قرمز به ترتیب میله‌ها و ریسمان‌های سازه در حالت اولیه می‌باشند. در هر ردیف به ترتیب از چپ به راست تعداد نسل‌های بررسی شده برای همگرایی حل و ارزیابی توابع تناسب، فرم اولیه سازه پیش از بارگذاری و محاط بر کره و سه شکل مود اول ارتعاشی نمایش داده می‌شود. در جدول (۳) نه فرکانس اول ارتعاشی نمونه‌های تنسگریتی حالت اول ارائه شده است.

جدول ۳. فرکانس نه مود اول سازه‌های حالت اول (Hz)

شماره/تعداد نسل	مود ۱	مود ۲	مود ۳	مود ۴	مود ۵	مود ۶	مود ۷	مود ۸	مود ۹
۱ (۱۶ نسل)	۰,۰۰۳۶	۰,۰۲۸۳	۰,۰۵۶۱	۰,۰۹۹۴	۰,۱۳۴۰	۰,۱۸۳۲	۱۰,۱۲۲۳	۱۰,۴۱۶۵	۱۴,۶۲۱۸
۲ (۷ نسل)	۰,۰۰۰۶	۰,۰۰۹۷	۰,۰۴۷۴	۰,۰۷۰۱	۰,۱۷۷۲	۰,۱۸۱۶	۱۰,۶۲۷۹	۱۰,۶۶۵۸	۱۲,۹۱۶۶
۳ (۵۹ نسل)	۰,۰۰۲۰	۰,۰۳۴۲	۰,۰۶۹۵	۰,۰۹۵۳	۰,۱۳۵۵	۰,۲۱۰۳	۱۰,۳۰۳۰	۱۲,۱۷۷	۱۶,۶۸۰۲

### حالت دوم:

در شبیه‌سازی سازه‌های حالت دوم ماتریس اتصال و نحوه اتصالات عضوهای سازه ثابت ولی نوع عضوها (میله یا ریسمان) بصورت تصادفی انتخاب می‌شود. نمونه‌های سازه‌های تنسگریتی فرم شده حالت دوم به‌همراه سه شکل مود اول ارتعاشی در شکل (۶) نمایش داده شده است.



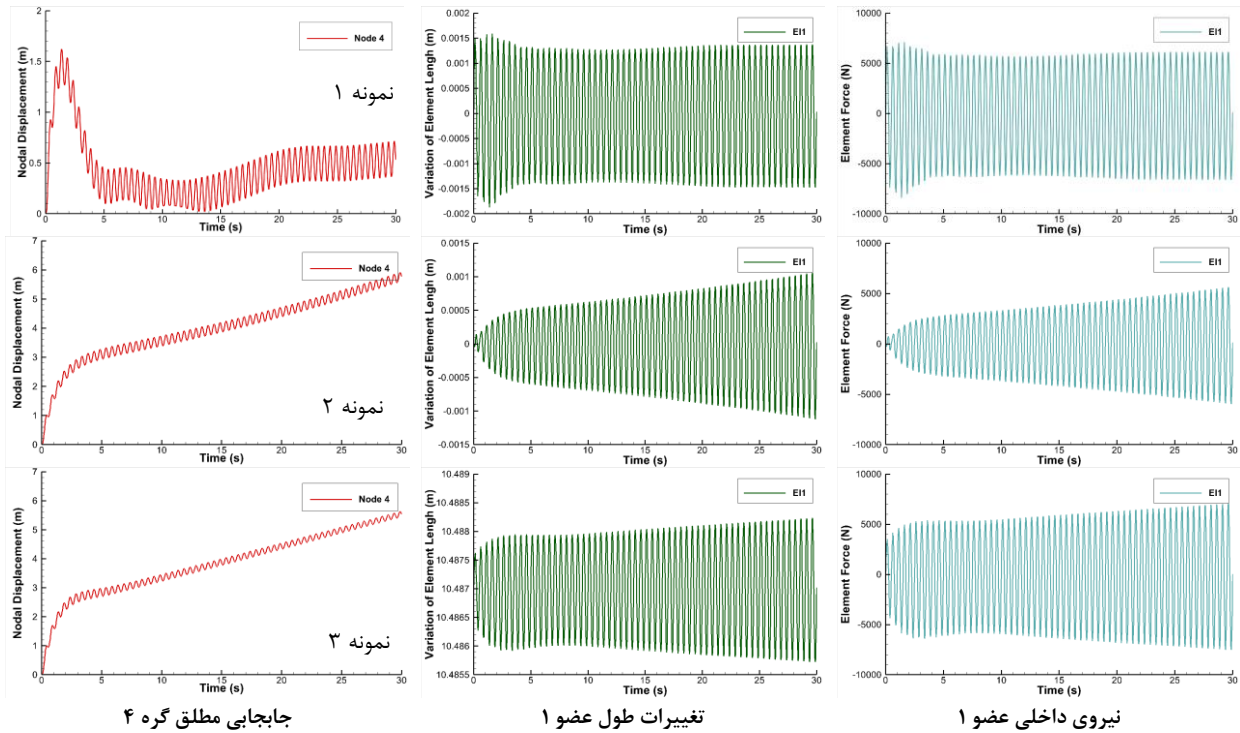
شکل ۶. شکل سازه و سه مود اول ارتعاشی نمونه‌های حالت دوم

جدول ۴. فرکانس نه مود اول سازه‌های حالت دوم (Hz)

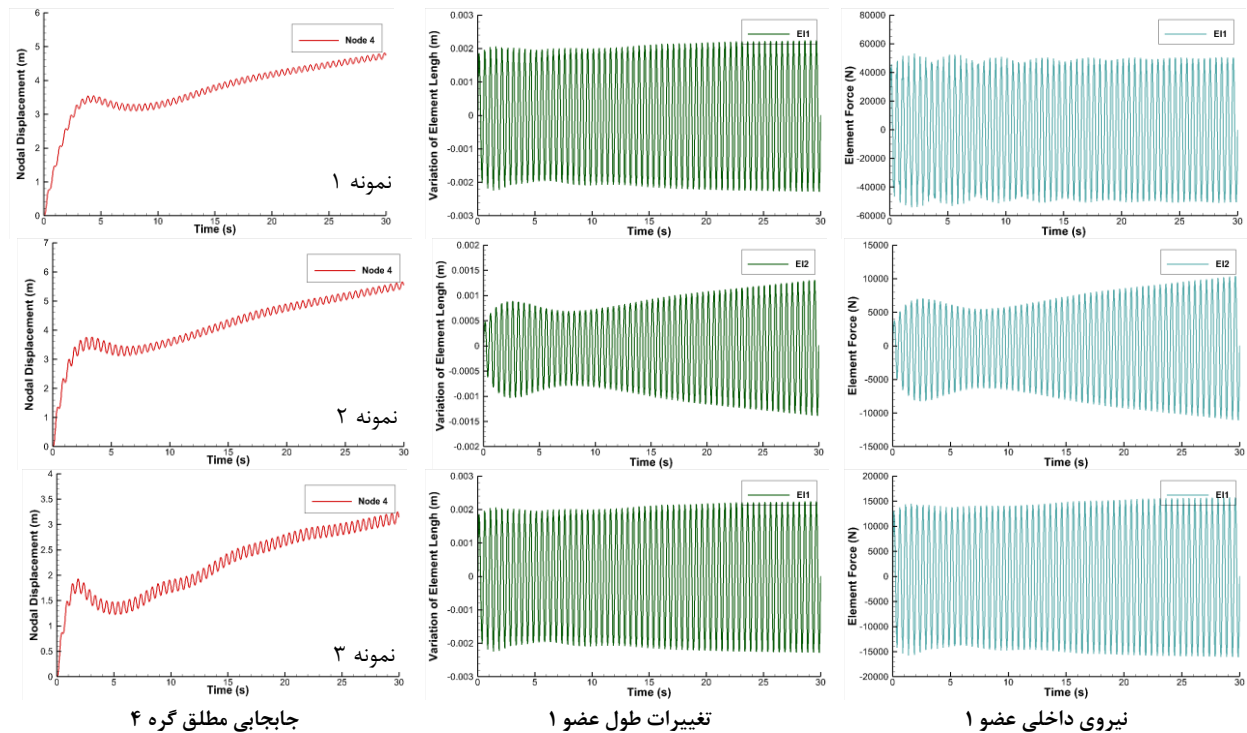
شماره/تعداد نسل	مود ۱	مود ۲	مود ۳	مود ۴	مود ۵	مود ۶	مود ۷	مود ۸	مود ۹
۱ (۱۶ نسل)	۰,۰۰۲۱	۰,۰۱۰۲	۰,۰۸۲۰	۰,۰۹۶۳	۰,۱۲۹۰	۰,۱۷۷۸	۱۰,۲۶۴۰	۱۳,۴۱۴۱	۱۶,۵۶۳۱
۲ (۳۴۵ نسل)	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۵۵	۰,۰۵۱۷	۰,۰۵۸۰	۰,۰۷۹۳	۰,۱۰۳۰	۰,۱۶۸۱	۱۰,۷۰۹۴	۲۷,۳۳۰۷
۳ (۶۱۳ نسل)	۰,۰۰۲۱	۰,۰۰۹۵	۰,۰۴۱۶	۰,۰۷۸۹	۰,۰۹۱۶	۰,۱۸۸۹	۱۲,۳۱۲۷	۱۲,۵۸۰۸	۱۶,۱۲۴۲



در جدول (۴) نه فرکانس اول ارتعاشی نمونه‌های تنسگریتی حالت دوم ارائه می‌گردد. بمنظور بررسی و تحلیل ارتعاشی سازه، گره‌های شماره ۱ تا ۳ بصورت گیردار در نظر گرفته شد. بارگذاری ارتعاشی روی گره شماره ۴ بمدت ۳۰ ثانیه اعمال و نتایج استخراج شد. در شکل (۷) نتایج مربوط به جابجایی مطلق گره شماره ۴، تغییرات طول و نیروی داخلی عضو ۱ نمونه‌های حالت اول مشاهده می‌شود.



شکل ۷. جابجایی مطلق گره ۴، تغییرات طول و نیروی داخلی عضو ۱ تنسگریتی حالت اول



شکل ۸. جابجایی مطلق گره ۴، تغییرات طول و نیروی داخلی عضو ۱ تنسگریتی حالت دوم

همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، جابجایی مطلق، تغییرات طول و نیروهای داخلی عضو ۱ برای نمونه‌های حالت ۱ نمایش داده شده است. بواسطه بارگذاری ارتعاشی، جابجایی گره ۴ بصورت نوسانی در کل بازه ادامه دارد. در نمونه ۱ جابجایی گره ۴ در ثانیه ۲ بیشینه مقدار خود را داشته و از ثانیه ۱۰ به بعد افزایش می‌یابد که این روند در نمودار تغییرات طول عضو ۱ و نیروی داخلی آن نیز قابل مشاهده است. روند جابجایی نمونه‌های ۲ و ۳ مشابه هم و بصورت صعودی می‌باشد. این موضوع باعث شده است تغییرات طول عضو ۱ و به تبع آن نیروهای داخلی آن بصورت نوسانی افزایش یابد. تغییرات نیروی داخلی اعضا منطبق بر نمودار تغییرات طول می‌باشد و بصورت نوسانی در کل بازه زمانی قابل رویت می‌باشد. در نمونه‌های مختلف با توجه به تصادفی بودن موقعیت گره‌ها، نظم شماره‌گذاری و موقعیت اعضا متفاوت می‌باشد.

در شکل (۸) نتایج نمونه‌های حالت دوم نشان داده می‌شود. در نمونه‌های حالت دوم نیز با توجه به تصادفی بودن موقعیت گره‌ها و نوع اعضا (میله یا ریسمان)، نظم شماره‌گذاری و موقعیت اعضا متفاوت از هم و حالت اول می‌باشد. ازینرو نمی‌توان نتایج ارتعاشی نمونه‌های مختلف حالت‌های اول و دوم را نسبت بهم مقایسه نمود. ولی روند بارگذاری ارتعاشی و انطباق نمودار جابجایی گره ۴، تغییرات طول و نیروی داخلی قابل صحنه‌گذاری می‌باشد. در نمونه ۲ با توجه به قرارگیری عضو ۱ در بین دو گره گیردار، تغییرات طول و نیروهای داخلی عضو ۱ برابر صفر می‌باشد، ازینرو نتایج تغییرات طول و نیروی عضو شماره ۲ نمایش داده شده است شکل (۶).

## ۵ - نتیجه‌گیری

در این مقاله معادلات تعادل و دینامیک غیرخطی سازه تنسگریتی با استفاده از روابط لاگرانژ استخراج، فرمیابی سازه تنسگریتی با استفاده از الگوریتم ژنتیک پیاده‌سازی و تحلیل ارتعاشات صورت پذیرفته است. سازه‌های تنسگریتی یک طبقه با ۶ گره محاط بر سطح داخلی کره در دو حالت مختلف با استفاده از الگوریتم ژنتیک فرمیابی و تحلیل ارتعاشات سازه‌های نهایی در قالب ۹ فرکانس طبیعی، شکل مودهای مربوطه و همچنین رفتار سیستم در اثر بارگذاری خارجی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها در قالب تغییر طول گره‌ها و نیروهای داخلی اعضا ارائه شده است. قابل ذکر است، روش هوشمند پیشنهادی با حداقل اطلاعات از پیکربندی سازه می‌تواند در فرمیابی سازه‌های متقارن، نامتقارن، بدون محدودیت در ابعاد سازه استفاده شده و منجر به خلق سازه‌های با پیکربندی مختلف و قابلیت‌های متفاوت شوند. با توجه به تصادفی بودن پیکربندی‌های پیشنهادی، از مطالعه رفتار ارتعاشی آنها می‌توان پیکربندی مناسب را متناسب با کاربرد و ماموریت مورد نظر انتخاب کرد. همچنین تحلیل همزمان ارتعاشات در کنار فرمیابی سازه از رویکردهای ویژه این مقاله می‌باشد، که این امکان را می‌دهد در پژوهش‌های آتی از خروجی‌های ارتعاشات جهت اصلاح فرایند فرمیابی سازه‌های تنسگریتی استفاده شود.

## ۶ - فهرست مراجع

1. A. Tibert and S. Pellegrino, "Review of form-finding methods for tensegrity structures", *International Journal of Space Structures* 18(4), 209-223, (2003).
2. R. Motro, "Tensegrity systems: the state of the art", *International journal of space structures* 7(2), 75-83, (1992).
3. A. Szcześniak and A. Stolarski, "Dynamic Relaxation Method with Critical Damping for Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Elements".
4. Y. Li, X.-Q. Feng, Y.-P. Cao, and H. Gao, "A Monte Carlo form-finding method for large scale regular and irregular tensegrity structures", *International Journal of Solids and Structures* 47(14-15), 1888-1898, (2010).
5. J. Zhang and M. Ohsaki, "Form-finding of complex tensegrity structures by dynamic relaxation method", *J Struct Constr Eng* 81(719), 71-77, (2016).
6. M. Pagitz and J.M. Tur, "Finite element based form-finding algorithm for tensegrity structures", *International Journal of Solids and Structures* 46(17), 3235-3240, (2009).
7. J.H. Holland, *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*, MIT press, (1992).
8. D. Lobo and F.J. Vico, "Evolutionary development of tensegrity structures", *Biosystems* 101(3), 167-176, (2010).
9. X. Xu and Y. Luo, "Form-finding of nonregular tensegrities using a genetic algorithm", *Mechanics Research Communications* 37(1), 85-91, (2010).
10. D. Martins, F. Moraes, and P. Gonçalves, "Investigation of the dynamic characteristics of a smart tensegrity structure", in *Proc. of the VI Symposium of Intelligent Materials and Control, Ilha Solteira, SP, Brazil*. 2018.