

تحلیل ارتعاشات و فرمیابی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک سازه‌های تسگریتی منشوری محاط در کره

مرتضی جهان
دانشجوی دکتری
پژوهشگاه هوافضا
jahan@sun.ari.ac.ir

میلاذ عظیمی*
استادیار
پژوهشگاه هوافضا
azimi.m@ari.ac.ir

۱۴۰۳/۰۵/۱۷

۱۴۰۳/۰۱/۲۲

چکیده

در این مقاله به فرمیابی هوشمند و ارزیابی توابع چند موضوعی با هدف ایجاد تعادل و بهینه‌سازی سازه تسگریتی^۱ منشوری با مقطع مثلثی بر پایه الگوریتم ژنتیک و تحلیل رفتار ارتعاشات آزاد و اجباری سازه پرداخته شده است. معادلات دینامیک غیرخطی سیستم با استفاده از روش لاگرانژ و اجزا محدود استخراج شده است. فرایند فرمیابی پیشنهادی قابلیت تعیین اشکال پیچیده بدون محدودیت‌های ابعادی را دارا می‌باشد. سازه‌های تسگریتی پایدار از میان پیکربندی‌های تصادفی و بر اساس محدودیت‌های تعریف شده (گره‌های محاط بر سطح خارجی کره، توازی و مساحت سطوح بالایی و پایینی) تولید و با استفاده از تابع تناسب فرمیابی می‌شوند. فرمیابی، در دو حالت مختلف با ماتریس اتصال مشخص و موقعیت مشخص و تصادفی اعضا (میله‌ها و ریسمان‌ها) بررسی شده است. عملکرد الگوریتم ژنتیک پیشنهادی و فرم‌های استخراج شده با روش چگالی نیرو صحه‌گذاری و رفتار ارتعاشی آنها در قالب بررسی فرکانس‌های طبیعی و شکل‌مادهای مربوطه همچنین بارگذاری خارجی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از تحلیل‌ها در قالب یک مطالعه مقایسه‌ای، قابلیت روش فرمیابی پیشنهادی و استخراج پیکربندی‌های سازه‌های تسگریتی از منظر مشخصه‌های ارتعاشی را نمایش می‌دهد.

واژگان کلیدی: الگوریتم ژنتیک، تحلیل ارتعاشات، سازه تسگریتی، فرکانس طبیعی، فرمیابی هوشمند

۱. مقدمه

این سازه‌ها را می‌توان به‌عنوان سازه‌های پیش‌تنیده با اتصالات پینی طبقه‌بندی کرد، که ماهیت آن مبتنی بر تعادل میان اعضای کششی و فشاری است [۱]. اعضای

منشاء سازه‌های تسگریتی به سال ۱۹۲۱ و ساخت سازه‌ای با مفهوم تعادل توسط یوگانسون^۲ باز می‌گردد.

فشاری (میله) سازه تنسگریتی بوسیله اعضای کششی (ریسمان) به هم متصل شده‌اند. وجود پیش‌تنش منجر به کشش ریسمان‌ها و فشار در میله‌ها می‌شود که به سازه اجازه می‌دهد در حالت خودتعادلی قرار گیرد [۲]. به عبارت دیگر این سازه‌ها به عنوان سیستم‌های ترکیبی صلب-انعطاف‌پذیر شناخته می‌شوند [۳].

مزیت اصلی استفاده از سازه‌های تنسگریتی که آن‌ها را از سایر سازه‌ها متمایز می‌کند، قابلیت تغییر شکل‌پذیری، سازگاری با محیط، مقاومت در برابر ضربه [۴]، سبکی، تاشونگی، مدولار بودن [۵]، نسبت سختی به جرم بالا، چابکی و انعطاف‌پذیری [۶]، کنترل‌پذیری، قابلیت اطمینان [۷] و جذب انرژی بالا [۸] می‌باشد. این ویژگی‌ها سبب کاربرد گسترده این سازه در اکتشافات فضایی در کنار سایر زمینه‌های مهندسی مانند مکانیک، بیومکانیک، رباتیک، معماری و عمران شده است [۹-۱۲]. قابل ذکر است، پیکربندی مناسب در حفظ تعادل و اطمینان از پایداری این سازه‌ها در ماموریت‌های مختلف موثر است.

تحلیل کامل سازه تنسگریتی به دو بخش فرمیابی و بررسی رفتار دینامیکی سازه تنسگریتی تحت بارهای خارجی تقسیم می‌شود. فرمیابی فرایندی است که در آن براساس یک توپولوژی مشخص، هندسه پایدار سازه ایجاد می‌شود [۱۳]. محققان روش‌های رایج فرمیابی را به دو دسته سینماتیکی و استاتیکی طبقه‌بندی کرده‌اند [۱۴]. هدف هر دو روش، یافتن پیکربندی مناسب در شرایط خودتنیدگی^۳ است. روش‌های سینماتیکی بدون در نظر گرفتن پیش‌تنیدگی در میله‌ها و ریسمان‌ها و با بیشینه و کمینه کردن طول اعضاء هندسه سازه را استخراج می‌کنند [۱۱]. روش‌های سینماتیکی رایج شامل روش‌های تحلیلی، برنامه‌نویسی غیرخطی،

آرام‌سازی دینامیکی، اجزای محدود و روش مونت‌کارلو می‌باشند. روش‌های استاتیکی پیکربندی پایدار سازه تنسگریتی را با استخراج هندسه و نیروهای وارد بر سازه تعیین می‌کنند. روش‌های استاتیکی رایج شامل روش تحلیلی، روش چگالی نیرو [۱۲، ۱۵]، روش انرژی و روش مختصات کاهش‌یافته می‌باشند. روش‌های فرمیابی رایج پاسخگوی سازه‌های بزرگ، پیچیده و در حال تغییر نبوده و قابلیت استفاده همزمان در الگوریتم‌های تغییر شکل و فرمیابی را ندارند. لذا استفاده از روش‌های فرمیابی هوشمند بیش از پیش احساس می‌شود. استفاده از الگوریتم ژنتیک [۱۶، ۱۷]، شبکه عصبی^۴ [۱۸] و یادگیری ماشین^۵ [۱۹، ۲۰] در کنار بهینه‌سازی با توابع هدف چند موضوعی، بهترین روش برای فرمیابی و تعادل سازه‌های تنسگریتی می‌باشد. این روش‌ها از الگوریتم‌های بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک، روش‌های یادگیری ماشین، شبکه عصبی و یا ترکیبی از روش‌های فوق در فرایند فرمیابی سازه‌های تنسگریتی استفاده می‌کنند.

الگوریتم ژنتیک یک الگوریتم بهینه‌سازی عددی محبوب است که برای پرداختن به مسائل، با الهام از روش‌های انتخاب طبیعی و ژنتیک استفاده می‌کند. یادگیری ماشین در زمینه‌های مختلف مهندسی توسعه پیدا کرده است. این روش یک رویکرد جدید برای دستیابی سریع به شکل و هندسه سازه‌های تنسگریتی می‌باشد [۲۱-۲۳]. از کاربردهای این روش استفاده در فرمیابی و حرکت ربات‌های تنسگریتی می‌باشد. این روش امکان استفاده از داده‌های واقعی بجای مدل، در رفتار واقعی ربات‌ها را می‌دهد [۲۴-۲۶] و در مواردی که مدل‌سازی ویژگی عضوهای تنسگریتی دشوار است، بسیار کاربردی است.

شبکه عصبی شکل جدیدی از محاسبات هستند که از ساختار بیولوژیکی نورون و عملکرد درونی مغز انسان الهام گرفته شده است. این روش به عنوان مدل ریاضی متشکل از تعداد زیادی عناصر پردازشی است که در لایه‌های سازماندهی شده، قرار دارند. شبکه‌های عصبی در دامنه وسیعی از کاربردها از جمله طبقه‌بندی، فشرده‌سازی، کاهش نویز، بهینه‌سازی، استفاده می‌شوند. شبکه عصبی به تنهایی یا ترکیب با الگوریتم ژنتیک [۱۸] یا روش آرام‌سازی دینامیکی^۶ [۲۷، ۲۸] برای فرم‌یابی سازه‌های تنسگریتی استفاده شده است. سازه‌های تنسگریتی دارای میرایی سازه‌ای پایین و پیش‌تندگی محوری می‌باشند که می‌تواند مشخصه‌های دینامیکی سیستم را به طور جدی متأثر سازند. این سازه‌ها در معرض بارگذاری‌های دینامیکی می‌تواند دچار ناپایداری یا شکست شوند. لذا پیش‌بینی رفتار و استخراج مشخصه‌های دینامیکی این سازه‌ها برای دستیابی به یک طراحی ایمن، مهم و حیاتی است. اولین بار موترو^۷ نشان داد که برای تحلیل غیرخطی رفتار سازه تنسگریتی در نزدیکی نقطه تعادل، مدل دینامیکی خطی شده دارای دقت مناسبی است [۳]. بن و همکاران^۸ یک مدل غیرخطی برای تحلیل رفتار دینامیک سازه تیر تنسگریتی پنج طبقه ارائه دادند [۲۹]. سلطان^۹ با استفاده از مدل دینامیک خطی شده نشان داد مودهای دینامیکی سازه تنسگریتی منشوری دو طبقه با افزایش پیش‌تنش افزایش می‌یابد [۳۰]. تحلیل مودال روش مفیدی برای درک مناسب ویژگی‌های ارتعاشی این سیستم‌ها است. بل حاج علی و همکاران^{۱۰} با تحلیل مودال سازه‌های تنسگریتی، فرکانس‌های طبیعی سازه تنسگریتی منشوری را با اصلاح مرتبه خود-تنشی افزایش دادند [۳۱]. ارتباط

میان مودهای پایین و مرتبه پیش‌تندگی تیرهای تنسگریتی توسط اشویر و همکاران^{۱۱} مورد بررسی قرار گرفت [۳۲]. به منظور استخراج پاسخ‌های دقیق دینامیکی این سیستم‌ها نیاز است که تمام مودهای فرکانس بالای سیستم نیز در تحلیل‌ها در نظر گرفته شوند [۳۳، ۳۴].

در این مقاله به فرم‌یابی هوشمند سازه تنسگریتی منشوری محاط در کره با شعاع معین و لحاظ محدودیت‌های هندسی با هدف تحلیل و استخراج مشخصه‌های ارتعاشی پیکربندی‌های خروجی از الگوریتم فرم‌یابی، پرداخته شده است [۳۵]. از ویژگی‌های پژوهش حاضر، استخراج فرم بسته^{۱۲} و کوتاه شده معادلات حرکت سیستم می‌باشد. این روش حجم محاسبات را در مراحل فرم‌یابی و تحلیل ارتعاشات کاهش می‌دهد. همچنین الگوریتم توسعه داده شده با دانش حداقلی، شامل اطلاعات ترتیب اتصال اعضاء و فشاری یا کششی بودن هر عضو، سازه‌های پیچیده را فرم‌یابی می‌کند. همچنین تحلیل همزمان ارتعاشات در کنار فرم‌یابی سازه از رویکردهای منحصر به فرد این مقاله می‌باشد، که امکان بررسی پایداری سازه را در تمام مراحل بارگذاری دینامیکی فراهم می‌کند. ساختار این مقاله به این صورت می‌باشد که در بخش دوم، معادلات حرکت سیستم مبتنی بر دینامیک غیرخطی و با استفاده از روابط لاگرانژ استخراج می‌شود. در بخش سوم الگوریتم ژنتیک جهت فرم‌یابی سازه‌های تنسگریتی معرفی و ارزیابی حالت تعادل و توابع چند موضوعی شامل کلاس تنسگریتی و تعداد اعضاء هر گره صورت پذیرفته است. در بخش چهارم، سازه تنسگریتی با شش گره محاط بر سطح داخلی کره در دو حالت مختلف با ماتریس اتصال ثابت

$$\mathbf{n}_\lambda = [x_\lambda \ y_\lambda \ z_\lambda]^T \quad (2)$$

مختصات گره‌های عضو سازه بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{n}_\gamma^e = \begin{bmatrix} \mathbf{n}_i \\ \mathbf{n}_j \end{bmatrix} = [x_i \ y_i \ z_i \ x_j \ y_j \ z_j]^T = \bar{\mathbf{C}}_\gamma \otimes \mathbf{I}_3 \mathbf{n} \quad (3)$$

که در آن بردار مختصات عضو γ می‌باشد که از گره i شروع و تا گره j امتداد می‌یابد (شکل ۱). $[\mathbf{C}]_{\gamma\lambda}$ ماتریس اتصال سازه می‌باشد و نحوه ارتباط بین گره‌ها و اعضای سازه را مشخص می‌کند:

$$[\mathbf{C}]_{\gamma\lambda} = \begin{cases} -1, & \lambda = i \\ 1, & \lambda = j \\ 0, & \lambda = \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

با تفکیک ماتریس اتصال به دو بخش، میله‌ها $\mathbf{C}_b \in \mathbb{R}^{\alpha \times n_n}$ و ریسمان‌ها $\mathbf{C}_s \in \mathbb{R}^{\beta \times n_n}$ ، ماتریس اتصال بصورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\begin{aligned} \mathbf{C} &= [\mathbf{C}_b \ \mathbf{C}_s]^T \mathbf{C} \\ &= [\mathbf{C}_1^T \ \mathbf{C}_2^T \ \dots \ \mathbf{C}_\lambda^T \ \dots \ \mathbf{C}_{n_n}^T] \text{ و } n_n \quad (5) \\ &= \alpha + \beta \end{aligned}$$

که در آن \mathbf{C}_λ ستون متناظر با گره λ در ماتریس اتصال و پارامترهای α و β به ترتیب بیانگر تعداد میله‌ها و ریسمان‌های سازه تنسگریتی می‌باشند. بردار اعضای کل سازه تنسگریتی \mathbf{B} بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{B} = [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_\gamma \ \dots \ b_{n_e}] = \mathbf{N} \mathbf{C}^T \quad (6)$$

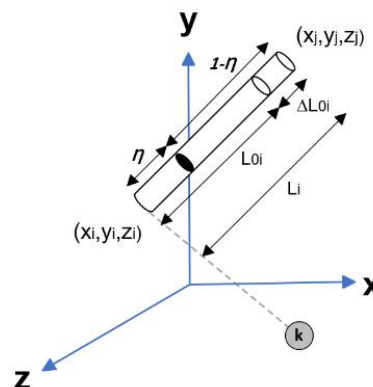
که در آن n_e تعداد کل عضوهای سازه و b_γ بردار متناظر با هر عضو سازه می‌باشد و بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$b_\gamma = \mathbf{n}_j - \mathbf{n}_i = \mathbf{C}_\gamma \otimes \mathbf{I}_3 \mathbf{n} \quad (7)$$

و نوع عضوهای (میله یا ریسمان) مشخص یا تصادفی شبیه‌سازی و با استفاده از الگوریتم ژنتیک فرم‌یابی می‌شود. در انتها، رفتار ارتعاشی پیکربندی‌های تنسگریتی منتخب نهایی، در قالب تحلیل مودال، و پاسخ‌های زمانی تغییرات طول و نیروهای داخلی اعضای تحت بارگذاری هارمونیک بررسی و مقایسه شده است.

۲. مدل‌سازی دینامیک غیرخطی و استخراج معادلات تعادل

در این بخش، معادلات دینامیک غیرخطی سازه تنسگریتی منشوری با استفاده از رویکرد لاگرانژ و روش اجزا محدود استخراج شده است. در شکل ۱ عضو ij که از گره i تا گره j امتداد می‌یابد در مختصات کلی به نمایش در آمده است.



شکل ۱. عضو (ij) سازه تنسگریتی در مختصات کلی

مختصات گره‌های سازه تنسگریتی بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\mathbf{N} = [\mathbf{n}_1 \ \mathbf{n}_2 \ \dots \ \mathbf{n}_\lambda \ \dots \ \mathbf{n}_{n_n}] \quad (1)$$

که در آن $\mathbf{N} \in \mathbb{R}^{3 \times n_n}$ بردار مختصات گره‌های کل سازه، n_n تعداد گره‌های سازه و \mathbf{n}_λ مختصات گره λ می‌باشد و بصورت زیر تعریف می‌شود:

توجه: عملگر \otimes ضرب کرونگر بین دو بردار می باشد. بردار طول کل عضوهای سازه تنسگریتی \mathbf{L} بصورت زیر تعریف می شود:

$$\mathbf{L} = [l_1 \ l_2 \ \dots \ l_\gamma \ \dots \ l_{n_e}]^T \text{ و } \mathbf{L} \in \mathbb{R}^{n_e} \quad (۸)$$

که در آن که l_γ طول هریک از عضوهای سازه می باشد و بصورت زیر تعریف می شود:

$$l_\gamma = \|\mathbf{b}_\gamma\| = (\mathbf{n}^T (\mathbf{C}_\gamma^T \mathbf{C}_\gamma) \otimes \mathbf{I}_3 \mathbf{n})^{0.5} \quad (۹)$$

بردار طول اولیه (طول هر عضو، بدون نیروی داخلی کششی یا فشاری و قبل از اعمال بار خارجی و پیش تنش در سازه) بصورت زیر تعریف می شود:

$$\mathbf{L}_0 = [l_{01} \ l_{02} \ \dots \ l_{0n_e}]^T \text{ و } \mathbf{L}_0 \in \mathbb{R}^{n_e} \quad (۱۰)$$

بردارهای سطح مقطع \mathbf{A} ، جرم \mathbf{m} و مدول الاستیسیته \mathbf{E} کل اعضای سازه تنسگریتی بترتیب بصورت زیر تعریف می شوند:

$$\mathbf{A} = [A_1 \ A_2 \ \dots \ A_\gamma \ \dots \ A_{n_e}]^T \quad (۱۱)$$

$$\mathbf{m} = [m_1 \ m_2 \ \dots \ m_\gamma \ \dots \ m_{n_e}]^T = \rho \widehat{\mathbf{A}} \mathbf{L}_0 \quad (۱۲)$$

$$\mathbf{E} = [E_1 \ E_2 \ \dots \ E_\gamma \ \dots \ E_{n_e}]^T \quad (۱۳)$$

که در روابط فوق A_γ سطح مقطع عرضی، m_γ جرم، E_γ مدول الاستیسیته، و ρ چگالی عضوهای سازه می باشند.

توجه: $(\hat{\otimes})$ ماتریس قطری از المانهای ماتریس می باشد، که درایه های ماتریس سطری (یا ستونی) بترتیب روی قطر اصلی ماتریس $(\hat{\otimes})$ قرار گرفته و سایر عضوهای ماتریس صفر می باشند.

بردار نیروی داخلی کل اعضای سازه \mathbf{f} به صورت زیر تعریف می شود:

$$\mathbf{f} = [f_1 \ f_2 \ \dots \ f_\gamma \ \dots \ f_{n_e}]^T = \widehat{\mathbf{E}} \widehat{\mathbf{A}} \widehat{\mathbf{L}}_0^{-1} (\mathbf{L} - \mathbf{L}_0) \quad (۱۴)$$

که در آن f_γ نیروی داخلی هر عضو می باشد و بصورت زیر تعریف می شود:

$$f_\gamma = A_\gamma \sigma_\gamma = E_\gamma A_\gamma (l_\gamma - l_{0\gamma}) \quad (۱۵)$$

بردار چگالی نیرو \mathbf{t} برای کل اعضای سازه بصورت زیر تعریف می شود:

$$\mathbf{t} = \widehat{\mathbf{L}}^{-1} \mathbf{f} = \widehat{\mathbf{E}} \widehat{\mathbf{A}} (\mathbf{L}_0^{-1} - \mathbf{L}^{-1}) \quad (۱۶)$$

چگالی نیروی داخلی هر عضو سازه نیز بصورت زیر تعریف می شود:

$$t_\gamma = f_\gamma / l_\gamma \quad (۱۷)$$

از آنجاکه اعضای سازه تحت بارگذاری محوری قرار می گیرند، جابجایی سازه در راستای میله ها و ریسمان های سازه می باشد. برای تعریف جابجایی نقطه فرضی P_γ روی هر عضو دلخواه سازه تنسگریتی، ضریب عددی η در نظر گرفته شده است؛ بطوریکه:

$$P_\gamma = [1 - \eta \ \eta] \otimes \mathbf{I}_3 \begin{bmatrix} m_i \\ n_j \end{bmatrix} = N(\varphi) \mathbf{n}_\gamma^e \quad (۱۸)$$

که در آن $N(\varphi) = [1 - \eta \ \eta] \otimes \mathbf{I}_3 \in \mathbb{R}^{3 \times 6}$ تابع شکل اعضای سازه می باشند. انرژی جنبشی کل بصورت زیر تعریف می شود:

$$T = \sum_{\gamma=1}^{n_e} 0.5 \int_0^1 m_\gamma \|\dot{P}_\gamma\|^2 d\eta \quad (۱۹)$$

که در آن \dot{P}_γ سرعت نقطه فرضی روی هر عضو

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_e + \mathbf{V}_g \quad (23)$$

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

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_e &= \sum_{\gamma}^{n_e} \int_{l_{0\gamma}}^{l_{\gamma}} t_{\gamma} dl \\ &= \sum_{\gamma}^{n_e} \int_{l_{0\gamma}}^{l_{\gamma}} \frac{E_{\gamma} A_{\gamma} (m_{\gamma} - l_{0\gamma})}{l_{0\gamma}} dl \end{aligned} \quad (24)$$

در معادله فوق dl بیانگر تغییرات طول اعضای سازه تنسگریتی می‌باشد. مشتق انرژی پتانسیل کرنشی \mathbf{V}_e نسبت به بردار مختصات گره‌ها \mathbf{n} بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{V}_e}{\partial \mathbf{n}} &= \sum_{\gamma}^{n_e} \frac{\partial V_{e\gamma}}{\partial l_{\gamma}} \frac{\partial l_{\gamma}}{\partial \mathbf{n}} \\ &= \sum_{\gamma}^{n_e} \frac{E_{\gamma} A_{\gamma} (l_{\gamma} - l_{0\gamma})}{l_{0\gamma}} \frac{\partial l_{\gamma}}{\partial \mathbf{n}} = \sum_{\gamma}^{n_e} f_{\gamma} \frac{\partial l_{\gamma}}{\partial \mathbf{n}} \end{aligned} \quad (25)$$

مشتق طول هر عضو l_{γ} نسبت به بردار مختصات گره‌ها (\mathbf{n}) با استفاده از معادله ۲۶ بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{\partial l_{\gamma}}{\partial \mathbf{n}} = \frac{(\mathbf{C}_{\gamma}^T \mathbf{C}_{\gamma}) \otimes \mathbf{I}_3 \mathbf{n}}{l_{\gamma}} \quad (26)$$

با جایگذاری رابطه ۲۶ در ۲۵ خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{V}_e}{\partial \mathbf{n}} &= \sum_{\gamma}^{n_e} f_{\gamma} \frac{\partial l_{\gamma}}{\partial \mathbf{n}} \\ &= \sum_{\gamma}^{n_e} t_{\gamma} (\mathbf{C}_{\gamma}^T \mathbf{C}_{\gamma}) \otimes \mathbf{I}_3 \mathbf{n} \\ &= (\mathbf{C}^T \hat{\mathbf{t}} \mathbf{C}) \otimes \mathbf{I}_3 \mathbf{n} \\ &= \mathbf{K} \mathbf{n} \end{aligned} \quad (27)$$

می‌باشد و با جایگذاری روابط ۳ و ۱۸ در رابطه ۱۹ خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \mathbf{T} &= \sum_{\gamma=1}^{n_e} 0.5 \int_0^1 m_{\gamma} (N(\varphi) \bar{\mathbf{C}}_{\gamma} \otimes \mathbf{I}_3 \dot{\mathbf{n}})^2 d\eta \\ &= \sum_{\gamma=1}^{n_e} \frac{m_{\gamma}}{12} \dot{\mathbf{n}}^T (\bar{\mathbf{C}}_{\gamma}^T \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \bar{\mathbf{C}}_{\gamma}) \otimes \mathbf{I}_3 \dot{\mathbf{n}} \\ &= \sum_{\gamma=1}^{n_e} \frac{m_{\gamma}}{12} \dot{\mathbf{n}}^T (\bar{\mathbf{C}}_{\gamma}^T \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} [1 \quad 1] \\ &\quad + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} [1 \quad 1]) \bar{\mathbf{C}}_{\gamma}) \otimes \mathbf{I}_3 \dot{\mathbf{n}} \\ &= \sum_{\gamma=1}^{n_e} \frac{1}{12} \dot{\mathbf{n}}^T (|\mathbf{C}|_{\gamma}^T m_{\gamma} |\mathbf{C}|_{\gamma} \\ &\quad + [|\mathbf{C}|_{\gamma}^T m_{\gamma} |\mathbf{C}|_{\gamma}]) \otimes \mathbf{I}_3 \dot{\mathbf{n}} \\ &= \frac{1}{12} \dot{\mathbf{n}}^T (|\mathbf{C}|^T \hat{\mathbf{m}} |\mathbf{C}| \\ &\quad + [|\mathbf{C}|^T \hat{\mathbf{m}} |\mathbf{C}|]) \otimes \mathbf{I}_3 \dot{\mathbf{n}} = 0.5 \dot{\mathbf{n}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{n}} \end{aligned} \quad (20)$$

توجه: $|\mathbf{C}|$ عملگری است که قدر مطلق هر المان ماتریس را جایگزین می‌کند و $[|\mathbf{C}|]$ عملگری است که عناصر خارج از قطر اصلی یک ماتریس را صفر می‌کند. در رابطه فوق $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{3n_n \times 3n_n}$ ماتریس جرم سازه تنسگریتی می‌باشد و بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{M} = \frac{1}{6} (|\mathbf{C}|^T \hat{\mathbf{m}} |\mathbf{C}| + [|\mathbf{C}|^T \hat{\mathbf{m}} |\mathbf{C}|]) \otimes \mathbf{I}_3 \quad (21)$$

با مشتق‌گیری از رابطه ۲۰ نسبت به بردار $\dot{\mathbf{n}}$ ، با توجه به قطری بودن ماتریس \mathbf{M} ، معادله بصورت زیر ساده می‌شود:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \dot{\mathbf{n}}} = \mathbf{M} \ddot{\mathbf{n}} \quad (22)$$

انرژی پتانسیل کل \mathbf{V} ، مجموع انرژی پتانسیل کرنشی و گرانشی سیستم بصورت زیر تعریف شده است:

در معادله فوق $K(n) \in \mathbb{R}^{3n_n \times 3n_n}$ ماتریس سفتی سازه تنسگریتی می باشد و بصورت زیر تعریف می شود:

$$K(n) = (C^T \hat{t} C) \otimes I_3 \quad (28)$$

با توجه به تاثیر جاذبه زمین، انرژی پتانسیل گرانشی سازه بصورت زیر تعریف می شود:

$$V_g = \sum_{\gamma}^{n_e} \frac{m_{\gamma} g}{2} (z_j + z_i) \quad (29)$$

$$= \frac{g}{2} m^T |C| \otimes [0 \ 0 \ 1] n$$

که در آن g ضریب نیروی گرانشی و z_j و z_i به ترتیب مختصات راستای Z برای گره های n_j و n_i می باشند. استخراج روابط دینامیک غیرخطی سازه های تنسگریتی در حضور نیروی گرانش به روش اجزا محدود و با استفاده از رابطه لاگرانژ بصورت زیر تعریف می شود:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = F_{np} \quad \text{و} \quad L = T - V \quad (30)$$

که در آن L تابع لاگرانژ، q مختصات تعمیم یافته می باشد و بصورت زیر تعریف می شود:

$$q = \begin{bmatrix} n \\ \dot{n} \end{bmatrix} \rightarrow n, \dot{n} \in \mathbb{R}^{3n_n} \quad (31)$$

در معادله ۳۰، بردار نیروهای غیرپایستار می باشد و بصورت زیر تعریف می شود:

$$F_{np} = -D\dot{n} + F_{ex} \quad (32)$$

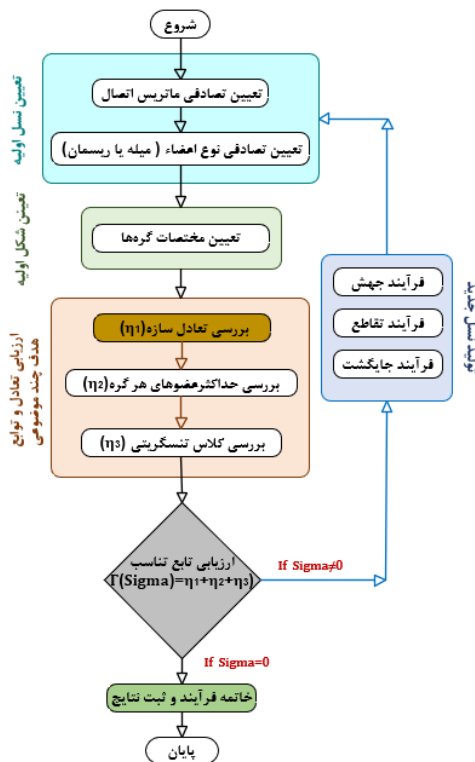
که در آن F_{ex} بردار نیروهای خارجی وارد بر گره های سازه و D ماتریس میرایی سازه تنسگریتی می باشد. با جایگذاری روابط ۱۹، ۲۳ و ۳۲ در رابطه لاگرانژ

(۳۰)، معادله دینامیک غیرخطی سیستم بصورت زیر استخراج می شود:

$$M\ddot{n} + D\dot{n} + K(n)n = F_{ex} \quad (33)$$

۳. فرمیابی هوشمند مبتنی بر الگوریتم ژنتیک

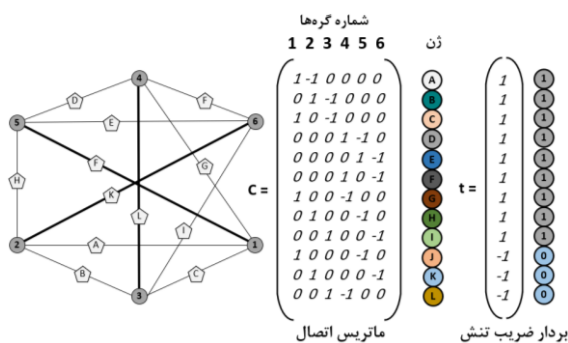
الگوریتم پیشنهادی، یک ایده جدید برای فرمیابی هوشمند سازه های تنسگریتی با دانش حداقلی از پیکربندی سازه می باشد. در این روش تنها ماتریس اتصال و ضرایب تنش که بیانگر نوع (میله یا ریسمان) هر عضو می باشد، نیاز است. اطلاعات نسل اولیه برای تشکیل جمعیت در الگوریتم ژنتیک کدگذاری می شوند. برای اطمینان از اینکه هیچ جفتی از میله ها به یکدیگر متصل نمی شوند، تعداد گره ها زوج و تعداد میله ها نصف تعداد گره ها در نظر گرفته شده است.



شکل ۲. فلوجارت الگوریتم ژنتیک برای فرمیابی سازه

فرایند فرمیابی برای یک ساختار تنسگریتی بر اساس تعداد از پیش تعریف شده گره‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. در این فرایند تا زمانی که پیکره‌بندی پایدار تنسگریتی یافت شود، جمعیت جدید تولید می‌شود. هدف اصلی الگوریتم ژنتیک در این پژوهش استخراج حالت تعادل خودتنیده برای سازه تنسگریتی در کنار اهداف چند موضوعی، شامل تعیین تعداد عضوهای هر گره و کلاس تنسگریتی می‌باشد، بنابراین، در طول فرایند فرمیابی تمام توابع تناسب برای استخراج یک سازه تنسگریتی که تمام محدودیت‌های اعمال شده را برآورده کند، ارزیابی می‌شوند.

تمام ارتباطات ممکن میان اعضای سازه استخراج و ماتریس اتصال اولیه بصورت تصادفی انتخاب و به همراه ضرایب تنش تصادفی در دو کروموزوم مختلف کدگذاری می‌شوند، تا جمعیت با اطلاعات ژنتیکی متفاوت را تشکیل دهند. کروموزوم ماتریس اتصال با استفاده از حروف الفبایی برای هر ارتباط بطور جداگانه کدگذاری می‌شوند. بردار ضرایب تنش اعضاء بصورت باینری تعریف می‌شود، که در آن ۱ نشان دهنده ریسمان جایگزین عضوهای کششی با ضریب تنش ۱ و ۰ نشان‌دهنده میله جایگزین عضو فشاری با ضریب تنش ۱- می‌باشند (شکل ۳).



شکل ۳. کدگذاری ماتریس اتصال و بردار ضریب تنش سازه

برای تولید نسل جدید، از فرایند جایگشت و تقاطع در الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود. کروموزوم‌های ماتریس اتصال با روش جایگشت تولید می‌شود. کروموزوم‌های ضرایب تنش نیز با روش تقاطع از کروموزوم‌های والد تولید می‌شوند.

برای ارزیابی روش فرمیابی ارائه شده، تابع تناسب کل Γ بصورت مجموع توابع تناسب با اهداف چندگانه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Gamma = \eta_1 + \eta_2 + \eta_3 \quad (34)$$

که در آن η_1 ، η_2 و η_3 به ترتیب توابع تناسب ارزیابی تعادل سازه، تعداد عضوهای هر گره و شاخص تعیین تنسگریتی کلاس ۱ می‌باشند. هر کدام از توابع در حالت مطلوب، به صفر به عنوان بهترین تناسب میل کرده و در غیر اینصورت از صفر فاصله می‌گیرد. ازین‌رو مقدار تابع تناسب کل به یک مقدار نزدیک به صفر به عنوان بهترین هدف در الگوریتم ژنتیک منجر خواهد شد. تابع تناسب η_1 از رابطه زیر استخراج می‌شود:

$$\eta_1 = S_{d \times n_n, n_b} \quad (35)$$

که در آن n_n و n_b به ترتیب تعداد عضوهای سازه و تعداد میله‌ها و S ماتریس مقادیر ویژه حاصل از تجزیه ماتریس تعادل سازه به ماتریس‌های منفرد می‌باشند. به منظور بررسی تعادل عضوهای سازه تنسگریتی، درایه‌های ماتریس قطری S استخراج و بصورت کاهش منظم می‌شوند:

$$S = \text{diag}(s_{1,1} \dots s_{d \times n_n, n_b}) \quad (36)$$

۴. شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

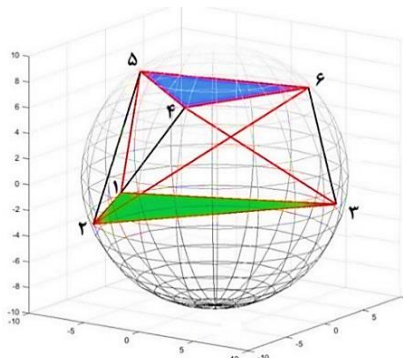
سازه تنسگریتی سه‌وجهی یک‌طبقه با ارتفاع ۱۰ متر و محاط در کره‌ای به شعاع ۱۰ متر با ماتریس اتصال ثابت در دو حالت مختلف با مشخصات اعضای ارائه شده در جدول ۱ در نظر گرفته شده است.

در حالت اول علاوه بر مشخص بودن ماتریس اتصال، موقعیت میله‌ها و ریسمان‌ها در سازه مشخص است و در حالت دوم موقعیت میله‌ها و ریسمان‌ها در سازه بصورت تصادفی انتخاب شده است.

جدول ۱. مشخصات مواد اعضای سازه

عضو	جنس	چگالی (kg/m ³)	ضریب کشسانی (GPa)	تنش تسلیم (MPa)
میله	Steel_Q345	۷۸۰۰	۲۰۶	۳۰۰
ریسمان	Steel String (30W4Cr2VA)	۷۸۷۰	۱۹۶	۱۳۲۳

در هر دو حالت، شش گره سازه روی محیط کره با محدودیت‌های تعریف شده در نظر گرفته می‌شوند. جدا از قیود تعریف شده در حالت‌های اول و دوم، ارتفاع مثلث پایین و بالای سازه با هم برابر و سطح مثلث بالا کمتر از سطح مثلث پایین در نظر گرفته شده است (شکل ۴). همانطور که مشاهده می‌شود، خطوط مشکی، میله‌ها و خطوط قرمز، ریسمان‌های سازه می‌باشند. سطوح مثلثی بالا (آبی) و پایین (سبز) موازی و ارتفاع گره‌های آن یکسان می‌باشند.



شکل ۴. تنسگریتی منشوری با شش گره و محاط بر کره

تعداد عضوهای صفر یا نزدیک صفر ماتریس S ، بیانگر مرتبه ماتریس تعادل سازه و تعداد حالات خودتعدالی در سازه می‌باشند. اگر آخرین درایه ماتریس S برابر صفر باشد حداقل یک نقص رتبه^{۱۴} وجود داشته و سازه حداقل یک حالت خودتعدالی دارد.

برای جلوگیری از تشکیل سازه‌های تنسگریتی ناقص با تعداد عضوهای کم در هر گره، تابع تناسب η_2 ، بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta_2 = \sum_{j=1}^{n_n} \left| \left(n_c - \sum_{i=1}^{n_b} C(i, j) \right) \right| \quad (37)$$

که در آن n_c تعداد اعضای تعریف شده هر گره می‌باشد. اگر تعداد اعضای هر گره در سازه تنسگریتی برابر با ۴ باشد ($n_c = 4$)، معادله ۳۷ به مقدار صفر به عنوان بهترین تناسب منجر خواهد شد.

برای تضمین اینکه تمام میله‌ها در حالت فشرده‌سازی هستند (تنش)، می‌بایست تمام اعضای فشاری مستقل و جدا از یکدیگر باشند. تابع تناسب η_3 به منظور اطمینان از عدم ارتباط میان دو میله، تعریف می‌شود:

$$\eta_3 = \sum_{j=1}^{n_n} \left| \left(n_{sc} - \sum_{i=1}^{n_b} (\mathbf{t})^T \times |\mathbf{C}| \right) \right| \quad (38)$$

که در آن $n_{sc} = n_c - 2$ تعریف می‌شود. در رابطه فوق بهترین مقدار تناسب (صفر) تنها در حالتی که دو عضو میله‌ای به یک گره متصل نباشند، ایجاد می‌شود که بیانگر سازه تنسگریتی با کلاس ۱ می‌باشد. در غیر این صورت مقدار آن بزرگ‌تر از صفر خواهد بود.

حالت اول:

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. این نقاط بطور تصادفی انتخاب و در صورت تایید توابع ارزیابی، شکل سازه نهایی می‌شود. نمونه‌های حالت اول به ترتیب بعد از تولید ۱، ۵۹ و ۷۰۸ نسل، فرم شده‌اند. در جدول ۲ شکل نمونه‌های مختلف فرم شده حالت اول نشان داده شده است. میله‌های سازه با رنگ مشکی و ریسمان‌ها با رنگ قرمز نشان داده شده‌اند.

جدول ۲. مشخصات نمونه‌های فرم‌شده حالت اول

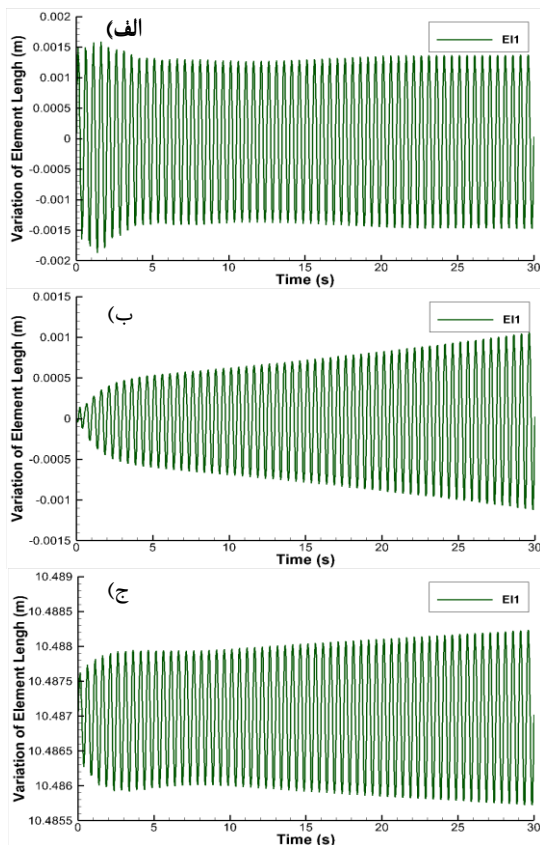
شماره نسل همگرایی	شکل
نمونه (۱۱) نسل ۱	
نمونه (۱۲) نسل ۵۹	
نمونه (۱۳) نسل ۷۰۸	

جدول ۳. شکل مود و فرکانس‌های نمونه‌های فرم‌شده حالت اول

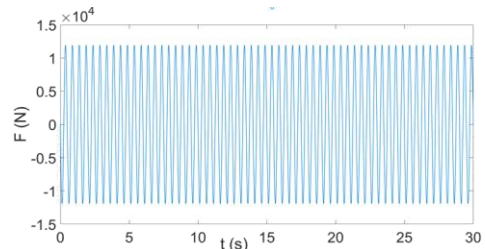
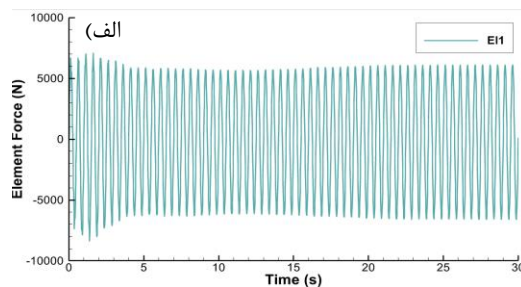
نمونه (۱۱)	۰/۵۶ HZ	۰/۲۸ HZ	۰/۰۴ HZ
نمونه (۱۲)	۰/۶۹ HZ	۰/۳۴ HZ	۰/۰۲ HZ
نمونه (۱۳)	۱/۰۴ HZ	۰/۰۹ HZ	۰/۰۶ HZ

در جدول ۳ شکل مود و فرکانس طبیعی نمونه‌های فرم شده حالت ۱ نشان داده شده است. خطوط مشکی و قرمز به ترتیب میله و ریسمان‌های سازه در حالت تغییرشکل یافته و خطوط مشکی و قرمز خط‌چین می‌باشد. تحلیل همزمان ارتعاشات و تحلیل مودال در کنار تعیین ساختار و فرم سازه از ویژگی‌های این مقاله می‌باشد. به منظور بررسی و تحلیل ارتعاشی سازه تنسگریتی منشوری فرم شده، گره‌های شماره ۱ تا ۳ بصورت گیردار در نظر گرفته شده است. بارگذاری ارتعاشی $F = 1.2E4 \sin(2t)$ بر روی گره شماره ۴ و در راستای محور X، بمدت ۳۰ ثانیه اعمال (شکل ۵) و نتایج ارتعاشی مربوط به گره شماره ۴ و عضو شماره ۱ که نیروی هارمونیک به یک طرف آن وارد می‌شود، نشان داده شده است.

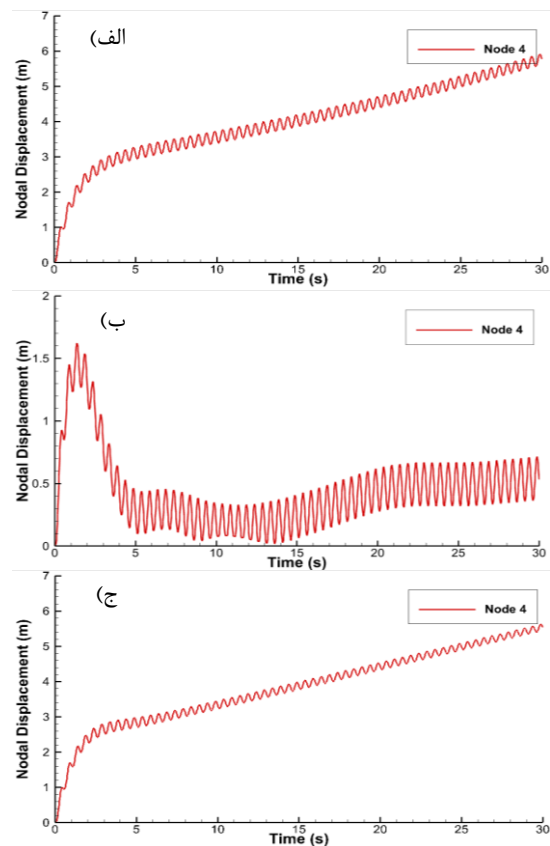
تغییرات نیروی داخلی عضوها منطبق بر نمودار تغییرات طول بوده و بصورت نوسانی در کل بازه قابل رویت می‌باشند (شکل‌های ۷ و ۸). تفاوت در مقادیر نمودارها بواسطه تفاوت در ساختار سازه و راستای شکل‌گیری آن‌ها نسبت به محورهای مختصات است. با توجه به تصادفی بودن موقعیت گره‌ها، نظم شماره‌گذاری و موقعیت عضوها متفاوت می‌باشند.



شکل ۷. تغییرات طول اعضای نمونه‌های حالت اول الف) نمونه (۱۱)، ب) نمونه (۱۲) و ج) نمونه (۱۳)



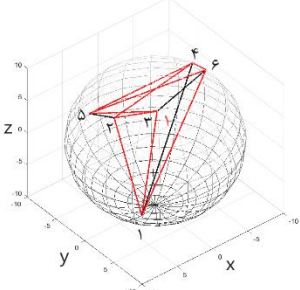
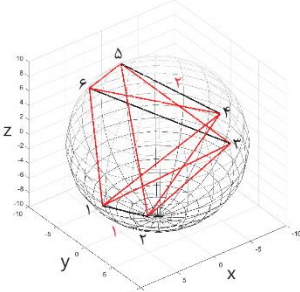
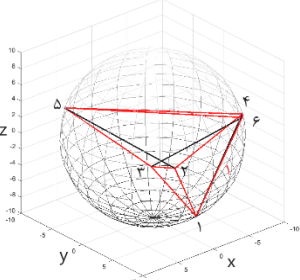
شکل ۵. مشخصات نیروی ارتعاشی وارد بر گره شماره ۴ با توجه به انتخاب تصادفی گره‌های سازه و موقعیت متفاوت آن‌ها نسبت به محورهای مختصات، جابجایی مطلق گره شماره ۴ (گره اعمال بار ارتعاشی) در نمونه‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد.



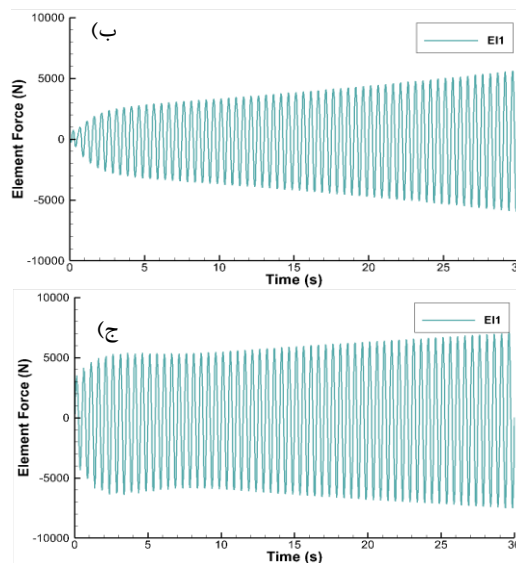
شکل ۶. جابجایی مطلق گره ۴ نمونه‌های حالت اول الف) نمونه (۱۱)، ب) نمونه (۱۲) و ج) نمونه (۱۳)

همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، بواسطه بارگذاری ارتعاشی، جابجایی گره ۴ نمونه‌های (۱۱) و (۱۳) بصورت نوسانی با شیب ملایم و صعودی در کل زمان بارگذاری ادامه دارد. این در حالیست که رفتار و پاسخ نمونه (۱۲) به بارگذاری خارجی متفاوت است.

مشخص می‌باشد و در نمونه‌های (۲۱) و (۲۳) بصورت تصادفی ثابت و با نمونه‌های حالت اول مشابه می‌باشند. جدول ۴. مشخصات نمونه‌های فرم‌شده حالت دوم

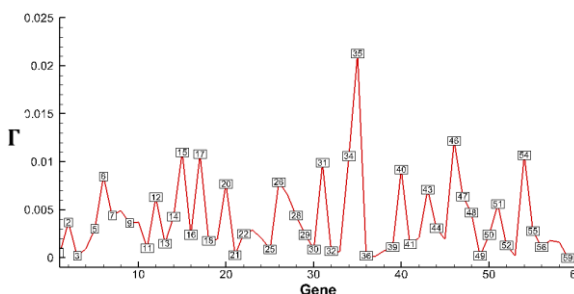
شماره نسل همگرایی	شکل
نمونه (۲۱) ۱۶ نسل	
نمونه (۲۲) ۳۴۵ نسل	
نمونه (۲۳) ۶۱۳ نسل	

همانطور که می‌توان مشاهده کرد، نمونه‌های حالت دوم به ترتیب با ۱۶، ۳۴۵ و ۶۱۳ نسل همگرا شده‌اند. این نشان می‌دهد که با کاهش قیود و افزایش دامنه انتخاب‌ها نمونه‌های بیشتری در مسیر فرمیابی قرار گرفته و نسل‌های بیشتری برای همگرا شدن تولید می‌شود. این موضوع زمان و هزینه تحلیل‌ها را افزایش خواهد داد (جدول ۴). در جدول ۵ شکل مود و فرکانس طبیعی سه مود اول ارتعاشی نمونه‌های حالت دوم نشان داده شده است.



شکل ۸. نیروی داخلی اعضای نمونه‌های حالت اول الف) نمونه (۱۱)، ب) نمونه (۱۲) و ج) نمونه (۱۳)

همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، نمونه (۱۳) بعد از ۵۹ نسل همگرا شده است و مقدار تابع تناسب کل Γ به مقدار مطلوب به صفر رسیده است. در صورت تغییر فرضیات مسئله، امکان محدود کردن فضای انتخاب نقاط و میل مقادیر تابع تناسب به صفر مهیا می‌باشد.



شکل ۹. تغییرات مقدار تابع ارزیابی نمونه (۱۳)

حالت دوم:

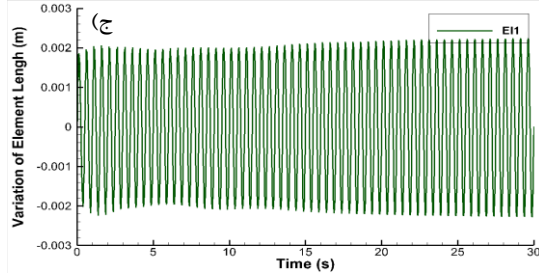
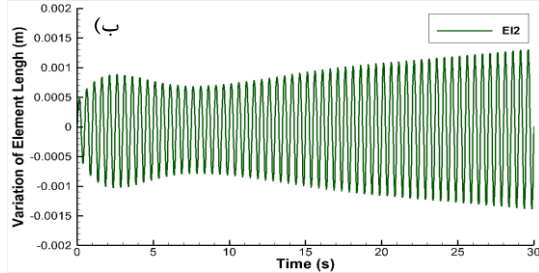
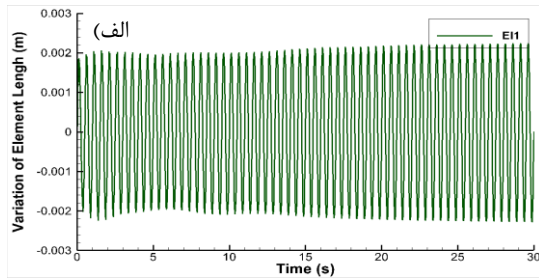
در حالت دوم ماتریس اتصال ثابت و برای گسترش محدوده جستجوی نقاط، موقعیت اعضای سازه (میله یا ریسمان) بصورت تصادفی انتخاب می‌شوند. موقعیت گره‌ها بصورت تصادفی و در نمونه‌های مختلف متفاوت می‌باشد. این موضوع در نمونه دوم حالت دوم (۲۲)

جدول ۵. شکل مود و فرکانس‌های نمونه‌های فرم‌شده حالت

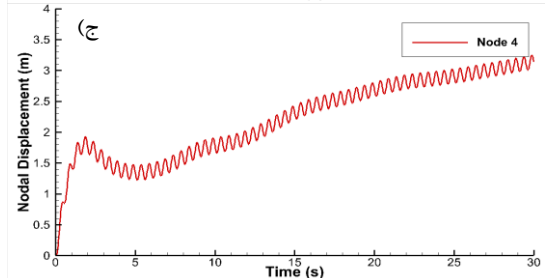
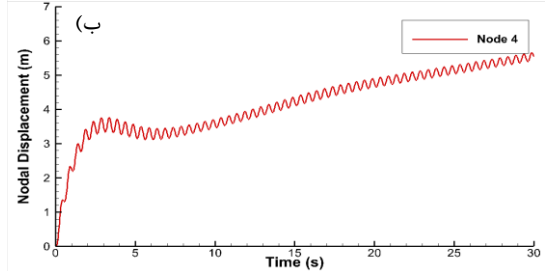
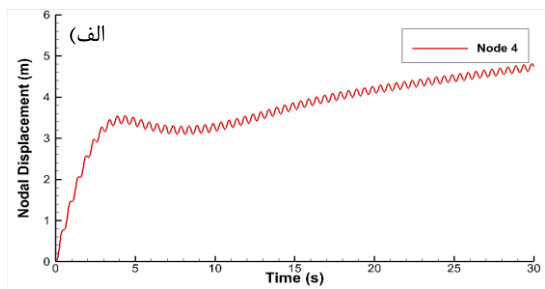
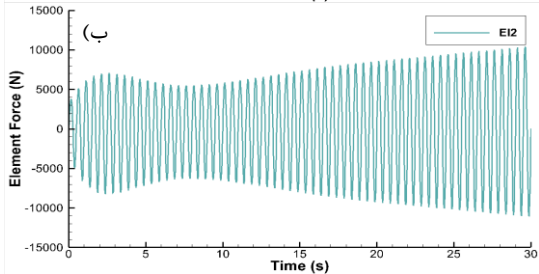
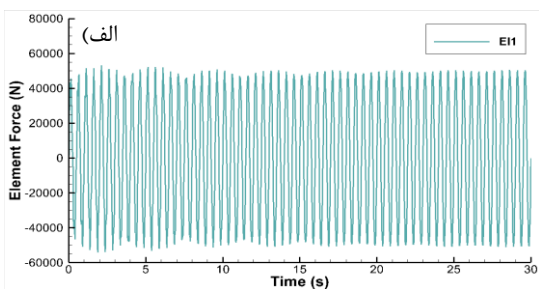
دوم

شماره	فرکانس طبیعی اول	فرکانس طبیعی دوم	فرکانس طبیعی سوم	نمونه
	۰/۰۲ HZ	۰/۱۰ HZ	۰/۸۲ HZ	(۲۱)
	۰/۰۱ HZ	۰/۰۵ HZ	۰/۵۲ HZ	(۲۲)
	۰/۰۲ HZ	۰/۰۹ HZ	۰/۴۲ HZ	(۲۳)

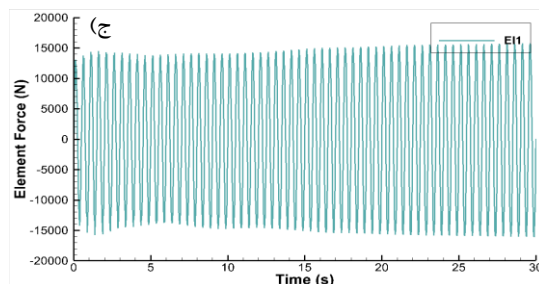
رفتار ارتعاشی گره شماره ۴ در نمونه‌های حالت دوم مشابه حالت اول می‌باشد و بصورت نوسانی با شیب ملایم در بازه بارگذاری بصورت صعودی ادامه می‌یابد (شکل ۱۰).



شکل ۱۱. تغییرات طول اعضای نمونه‌های حالت دوم (الف) نمونه (۲۱)، (ب) نمونه (۲۲) و (ج) نمونه (۲۳)



شکل ۱۰. جابجایی مطلق گره ۴ نمونه‌های حالت دوم (الف) نمونه (۲۱)، (ب) نمونه (۲۲) و (ج) نمونه (۲۳)



شکل ۱۲. نیروی داخلی اعضای نمونه‌های حالت دوم الف) نمونه (۲۱)، ب) نمونه (۲۲) و ج) نمونه (۲۳)

نمودار تغییرات طول و نیروی داخلی اعضای فرم‌شده حالت دوم در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، تغییرات طول اعضای سازه منطبق بر نیروی داخلی می‌باشد و این موضوع در نمونه‌های حالت اول (شکل‌های ۷ و ۸) نیز قابل مشاهده بود.

فرکانس‌های طبیعی پنج مود اول ارتعاشی نمونه‌های حالت‌های اول و دوم به ترتیب در جدول ۶ مقایسه شده است. با توجه به اینکه نمونه‌های حالت اول و دوم بصورت تصادفی با محدودیت‌های تعریف شده فرم شده‌اند، الگوی مشخصی در تغییر مقادیر فرکانس‌های طبیعی مشاهده نمی‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود نمونه سوم حالت اول (۱۳) و همچنین نمونه دوم حالت دوم (۲۲) به ترتیب دارای بالاترین و پایین‌ترین مقادیر فرکانس‌های طبیعی بوده که می‌تواند طراح را در انتخاب سازه راهنمایی نماید.

جدول ۶. فرکانس‌های طبیعی سازه‌های حالت اول و دوم (Hz)

شماره	مود اول	مود دوم	مود سوم	مود چهارم	مود پنجم
(۱۱)	۰/۰۴	۰/۲۸	۰/۵۶	۰/۹۹	۱/۳۴
(۱۲)	۰/۰۲	۰/۳۴	۰/۶۹	۰/۹۵	۱/۳۶
(۱۳)	۰/۰۶	۰/۰۹	۱/۰۴	۱/۵۶	۲/۱۴
(۲۱)	۰/۰۲	۰/۱۰	۰/۸۲	۰/۹۶	۱/۲۹
(۲۲)	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۵۲	۰/۵۸	۰/۷۹
(۲۳)	۰/۰۲	۰/۰۹	۰/۴۲	۰/۷۹	۰/۹۲

به منظور صحت‌گذاری الگوریتم فرم‌یابی هوشمند پیشنهادی، سازه‌های نهایی با روش رایج چگالی نیرو [۳۶] فرم‌یابی و مقایسه شده است. روش چگالی نیرو در سه حلقه متوالی با بررسی مشخصات ماتریس تعادل، پایداری سازه را مشخص می‌کند. در جدول ۷، صحت‌گذاری الگوریتم ژنتیک پیشنهادی با روش چگالی نیرو ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تمامی نمونه‌های فرم‌شده توسط الگوریتم پیشنهادی، توسط روش چگالی نیرو نیز فرم و صحت‌گذاری شده است.

جدول ۷. جدول صحت‌گذاری روش فرم‌یابی پیشنهادی

نمونه	الگوریتم ژنتیک پیشنهادی	چگالی نیرو
(۱۱)	فرم ۱ نسل	فرم
(۱۲)	فرم ۵۹ نسل	فرم
(۱۳)	فرم ۷۰۸ نسل	فرم
(۲۱)	فرم ۱۶ نسل	فرم
(۲۲)	فرم ۳۴۵ نسل	فرم
(۲۳)	فرم ۶۱۳ نسل	فرم

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله معادلات تعادل و دینامیک غیرخطی سازه تنسگریتی استخراج و فرم‌یابی سازه‌های تنسگریتی با استفاده از الگوریتم ژنتیک پیاده‌سازی شده است. تعریف ماتریس اتصال سازه‌های تنسگریتی به روش الفبایی و ضریب تنش اعضاء بصورت باینری از ابتکارات این پژوهش می‌باشد که امکان فرم‌یابی هوشمند سازه‌های تنسگریتی با حداقل اطلاعات سازه و با انتخاب نقاط تصادفی میسر می‌کند. همچنین ارزیابی سازه با توابع چند موضوعی در کنار بررسی تعادل سازه نیز در هوشمندسازی این روش و افزایش قابلیت‌های کاربردی آن می‌افزاید. الگوریتم فرم‌یابی پیشنهادی، قابلیت بهینه‌سازی سازه با افزودن اهداف

جدید شامل حجم، فضای اشغال شده و جرم را دارا می‌باشد. استخراج نمودارهای مسیر ارزیابی پارامترهای فرمیابی در نسل‌های مختلف به بهبود فرایند و بهینه‌سازی آن در راستای کاهش حجم محاسباتی کمک می‌کند. روش هوشمند پیشنهادی با حداقل اطلاعات از پیکربندی سازه می‌توانند 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 (تحلیل مودال و بررسی اثر بارگذاری هارمونیک خارجی) مورد بررسی قرار گرفت و نتایج

مربوطه در قالب پاسخ‌های زمانی جابجایی مطلق گره‌ها، طول و نیروهای داخلی اعضاء ارائه شد. تحلیل همزمان 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 شده و امکان استفاده از خروجی‌های ارتعاشات به منظور انتخاب مناسب فرم‌های استخراج شده از فرایند فرمیابی از منظر عملکرد، را فراهم سازد.

۶. منابع

- [1] Guacheta-Alba, Juan C., Angie J. Valencia-Castaneda, Max Suell Dutra, Oscar F. Aviles, and Mauricio Mauledoux. "New Approaches and Recent Applications of Tensegrity Structures." *Journal of Engineering Science & Technology Review* 16, no. 5 (2023).
- [2] Gómez-Jauregui, Valentín, Ángela Carrillo-Rodríguez, Cristina Manchado, and Pedro Lastra-González. "Tensegrity Applications to Architecture, Engineering and Robotics: A Review." *Applied Sciences* 13, no. 15 (2023): 8669.
- [3] Motro, Rene. *Tensegrity: structural systems for the future*. Elsevier, 2003.
- [4] Sun, Jianwei, Guangsheng Song, Jinkui Chu, and Luquan Ren. "An adaptive bioinspired foot mechanism based on tensegrity structures." *Soft Robotics* 6, no. 6 (2019): 778-789.
- [5] Hrazmi, Issam, Julien Averseng, Jérôme Quirant, and Frédéric Jamin. "Deployable double layer tensegrity grid platforms for sea accessibility." *Engineering Structures* 231 (2021): 111706.
- [6] Shah, Dylan S., Joran W. Booth, Robert L. Baines, Kun Wang, Massimo Vespignani, Kostas Bekris, and Rebecca Kramer-Bottiglio. "Tensegrity robotics." *Soft robotics* 9, no. 4 (2022): 639-656.
- [7] Lee, Hajun, Yeonwoo Jang, Jun Kyu Choe, Suwoo Lee, Hyeonsoo Song, Jin Pyo Lee, Nasreena Lone, and Jiyun Kim. "3D-printed programmable tensegrity for soft robotics." *Science Robotics* 5, no. 45 (2020): eaay9024.
- [8] Yin, Xu, Zhi-Ying Gao, Shuai Zhang, Li-Yuan Zhang, and Guang-Kui Xu. "Truncated regular octahedral tensegrity-based mechanical metamaterial with tunable and programmable Poisson's ratio." *International Journal of Mechanical Sciences* 167 (2020): 105285.
- [9] Wen, Li, Fei Pan, and Xilun Ding. "Tensegrity metamaterials for soft robotics." *Science Robotics* 5, no. 45 (2020): eabd9158.
- [10] Kahla, Nabil Ben, Mohamed Hechmi El Ouni, Nizar Bel Hadj Ali, and Roohul Abad Khan. "Nonlinear dynamic response and stability analysis of a tensegrity bridge to selected cable rupture." *Latin American Journal of Solids and Structures* 17, no. 02 (2020): e253.

- [11] Tibert, A. G., and Sergio Pellegrino. "Review of form-finding methods for tensegrity structures." *International Journal of Space Structures* 26, no. 3 (2011): 241-255.
- [12] Zhang, Li-Yuan, Shi-Xin Zhu, Song-Xue Li, and Guang-Kui Xu. "Analytical form-finding of tensegrities using determinant of force-density matrix." *Composite Structures* 189 (2018): 87-98.
- [13] Azimi, Milad, and Samad Moradi. "Form-Finding and Free Vibration Analysis of a Class-One Triplex Tensegrity Prism." *Space Science and Technology* 16, no. 3 (2023): 15-26.
- [14] Tibert, A. G., and Sergio Pellegrino. "Review of form-finding methods for tensegrity structures." *International Journal of Space Structures* 26, no. 3 (2011): 241-255.
- [15] Wang, Yafeng, Xian Xu, and Yaozhi Luo. "Form-finding of tensegrity structures via rank minimization of force density matrix." *Engineering Structures* 227 (2021): 111419.
- [16] Xu, Xian, and Yaozhi Luo. "Form-finding of nonregular tensegrities using a genetic algorithm." *Mechanics Research Communications* 37, no. 1 (2010): 85-91.
- [17] Koohestani, K. "Form-finding of tensegrity structures via genetic algorithm." *International Journal of Solids and Structures* 49, no. 5 (2012): 739-747.
- [18] Lee, Seunghye, Qui X. Lieu, Thuc P. Vo, and Jaehong Lee. "Deep neural networks for form-finding of tensegrity structures." *Mathematics* 10, no. 11 (2022): 1822.
- [19] Zalyaev, Eduard, Sergei Savin, and Lyudmila Vorochaeva. "Machine learning approach for tensegrity form finding: feature extraction problem." In *2020 4th Scientific School on Dynamics of Complex Networks and their Application in Intellectual Robotics (DCNAIR)*, pp. 265-268. IEEE, 2020.
- [20] Kim, Kyunam, Adrian K. Agogino, Aliakbar Toghyan, Deaho Moon, Laqshya Taneja, and Alice M. Agogino. "Robust learning of tensegrity robot control for locomotion through form-finding." In *2015 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS)*, pp. 5824-5831. IEEE, 2015.
- [21] Shi, Miao, Chao Wang, Xian-Zhe Li, Ming-Qiang Li, Lu Wang, and Neng-Gang Xie. "EEG signal classification based on SVM with improved squirrel search algorithm." *Biomedical Engineering/Biomedizinische Technik* 66, no. 2 (2021): 137-152.
- [22] Shi, Miao, Chao Wang, Wei Zhao, Xinshi Zhang, Ye Ye, and Nenggang Xie. "Removal of ocular artifacts from electroencephalo-graph by improving variational mode decomposition." *China Communications* 19, no. 2 (2022): 47-61.
- [23] Wang, Bingzhu, Chao Wang, L. U. Wang, Nenggang Xie, and W. E. I. Wei. "Recognition of semg hand actions based on cloud adaptive quantum chaos ions motion algorithm optimized svm." *Journal of Mechanics in Medicine and Biology* 19, no. 06 (2019): 1950047.
- [24] Cera, Brian, and Alice M. Agogino. "Multi-cable rolling locomotion with spherical tensegrities using model predictive control and deep learning." In *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 1-9. IEEE, 2018.
- [25] Zhang, Marvin, Xinyang Geng, Jonathan Bruce, Ken Caluwaerts, Massimo Vespignani, Vytas SunSpiral, Pieter Abbeel, and Sergey Levine. "Deep reinforcement learning for tensegrity robot locomotion." In *2017 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA)*, pp. 634-641. IEEE, 2017.
- [26] Luo, Jianlan, Riley Edmunds, Franklin Rice, and Alice M. Agogino. "Tensegrity robot locomotion under limited sensory inputs via deep reinforcement learning." In *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 6260-6267. IEEE, 2018.

- [27] Zhao, Liming, Zhongbo Sun, Keping Liu, and Jiliang Zhang. "The dynamic relaxation form finding method aided with advanced recurrent neural network." *CAAI Transactions on Intelligence Technology* 8, no. 3 (2023): 635-644.
- [28] Domer, Bernd, Etienne Fest, Vikram Lalit, and Ian FC Smith. "Combining dynamic relaxation method with artificial neural networks to enhance simulation of tensegrity structures." *Journal of Structural Engineering* 129, no. 5 (2003): 672-681.
- [29] Kahla, Nabil Ben, and K. Kebiche. "Nonlinear elastoplastic analysis of tensegrity systems." *Engineering Structures* 22, no. 11 (2000): 1552-1566.
- [30] Sultan, Cornel, Martin Corless, and Robert E. Skelton. "Linear dynamics of tensegrity structures." *Engineering Structures* 24, no. 6 (2002): 671-685.
- [31] Ali, N. Bel Hadj, and I. F. C. Smith. "Dynamic behavior and vibration control of a tensegrity structure." *International Journal of Solids and Structures* 47, no. 9 (2010): 1285-1296.
- [32] Ashwear, Nasseradeen, and Anders Eriksson. "Natural frequencies describe the pre-stress in tensegrity structures." *Computers & Structures* 138 (2014): 162-171.
- [33] Yang, Shu, and Cornel Sultan. "Free vibration and modal analysis of a tensegrity-membrane system." In *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, vol. 50183, p. V006T09A023. American Society of Mechanical Engineers, 2016.
- [34] Kan, Ziyun, Haijun Peng, Biaoshong Chen, and Wanxie Zhong. "Nonlinear dynamic and deployment analysis of clustered tensegrity structures using a positional formulation FEM." *Composite Structures* 187 (2018): 241-258.
- [35] Loghman, Ehsan, Ali Kamali, Firooz Bakhtiari-Nejad, and Mostafa Abbaszadeh. "Analysis of free and forced vibrations of a viscoelastic micro-beam, using Kelvin-Voigt fractional viscoelastic model." *Journal of Vibration and Sound* 9, no. 17 (2020): 27-38.
- [36] Yu, Xiaoming, Yinghua Yang, and Yanxia Ji. "Automatic Form-finding of N-4 Type Tensegrity Structures." *Latin American Journal of Solids and Structures* 19, no. 1 (2022): e419.

پی نوشت

-
- ¹ Tensegrity Structure
² Ioganson
³ Self-Stress
⁴ Neural Networks
⁵ Machine Learning
⁶ Dynamic Relaxation
⁷ Motro
⁸ Ben *et al.*
⁹ Sultan
¹⁰ Bel Hadj Ali *et al.*
¹¹ Ashwear *et al.*
¹² Closed-Form
¹³ Force Density
¹⁴ Rank Deficiency