



# ISAV2024

چهاردهمین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات  
۲۱ و ۲۲ آذر ماه ۱۴۰۳ کرج - ایران



## تحلیل ارتعاشات و فرمیابی بهینه هیبرید سازه پشتیبان آنتن صفحه‌ای تسنگریتی

میلاذ عظیمی<sup>۱\*</sup> و مرتضی جهان<sup>۲</sup>

<sup>۱\*</sup> ایران، تهران، شهرک غرب، خیابان مهستان، خیابان هوافضا، پژوهشگاه هوافضا، ۱۴۶۵۷۷۴۱۱۱، استادیار

<sup>۲</sup> ایران، تهران، شهرک غرب، خیابان مهستان، خیابان هوافضا، پژوهشگاه هوافضا، ۱۴۶۵۷۷۴۱۱۱، دانشجوی دکتری

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

### چکیده

سازه‌های تسنگریتی، علیرغم نسبت سختی به جرم بالا، قابلیت جمع‌شوندگی و توسعه را داشته و گزینه‌ای مناسب برای کاربردهایی مانند سازه‌های پشتیبان می‌باشند. در این مقاله به استخراج معادلات دینامیک، فرمیابی، بهینه‌سازی هندسی و بررسی ارتعاشات سازه تسنگریتی پشتیبان آنتن صفحه‌ای با یک حلقه مرکزی و شش گوشه پرداخته شده است. معادلات دینامیک غیرخطی سیستم با استفاده از روش لاگرانژ و فرمیابی سازه به روش چگالی نیرو انجام شده است. سازه‌های مختلف پشتیبان آنتن نمونه با ارتفاع و قطر ثابت و با حفظ انحنای سطح فوقانی و با تغییر در طول و موقعیت میله‌های عمودی میانی ایجاد و بهینه‌سازی هیبرید هندسه سازه پشتیبان با در نظر گرفتن کمینه جرم، بیشینه سفتی و بیشینه فرکانس طبیعی صورت پذیرفته است. فرایند بهینه‌سازی هیبرید، با به کارگیری الگوریتم‌های ژنتیک و بهینه‌سازی غیرخطی مقید در ایجاد ساختار سازه پشتیبان آنتن تسنگریتی نمونه، از جمله نکات بدیع این پژوهش به شمار می‌رود. جهت ارزیابی استحکام سازه پشتیبان آنتن با پیکربندی منتخب، شبیه‌سازی‌ها در قالب تحلیل مودال، جابجایی گره‌های آزاد، تغییر طول و نیروی داخلی اعضا ارائه شده است.

**کلمات کلیدی:** سازه پشتیبان آنتن؛ تسنگریتی؛ فرمیابی؛ بهینه‌سازی هیبرید

### ۱- مقدمه

رایج‌ترین نوع آنتن‌های موجود، آنتن‌های بازتابنده سهموی<sup>۱</sup> هستند که به دلیل بهره بالا، علاوه بر ارتباطات، در رصد زمین و مطالعات نجومی نیز استفاده می‌شوند [۱]. آنتن‌های با کاربردهای فضایی بسیار متنوع بوده و پژوهشگران مختلفی در این حوزه به پژوهش پرداخته‌اند [۲، ۳]. مکانیزم آنتن‌های بازتابنده دارای سه نوع اصلی شبکه‌ای<sup>۲</sup> آنتن‌های سطح جامد<sup>۳</sup> و آنتن‌های بادی<sup>۴</sup>

<sup>1</sup> Parabolic Reflector Antenna

<sup>2</sup> Mesh Antennas

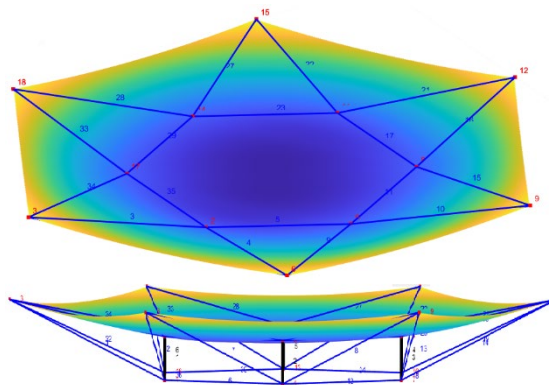
می‌باشند [۴]. تکامل فناوری آنتن به‌طور فزاینده‌ای نیاز به طراحی‌های نوآورانه را برجسته کرده است که عملکرد، وزن و سازگاری را به ویژه در محیط‌های چالش برانگیز متوازن کند. سازه‌های تنسگریتی، که با ترکیب منحصر به فرد المان‌های کششی و فشاری شناخته می‌شوند، به عنوان یک راهکار اساسی در سازه‌های پشتیبان آنتن‌ها در این حوزه ظهور کرده‌اند [۵]. پیکربندی‌های سبک و انعطاف‌پذیر این ساختارها نه تنها به تقویت یکپارچگی سازه‌ای کمک می‌کند، بلکه امکان باز پیکربندی دینامیکی را نیز فراهم می‌آورند که این ویژگی آن‌ها را برای کاربردهایی که در آن‌ها فضا و وزن عوامل بحرانی هستند، ایده‌آل می‌سازد.

با این حال، دستیابی به عملکرد بهینه در آنتن‌های تنسگریتی نیازمند بررسی و ایجاد تعادل‌های پیچیده میان پارامترهای مختلف طراحی، از جمله هندسه، انتخاب مواد و ویژگی‌های الکترومغناطیسی است. روش‌های بهینه‌سازی رایج ممکن است در مدیریت مؤثر این فضای طراحی چن دبعده ناکام بمانند [۶]. به این ترتیب است که رویکردهای بهینه‌سازی هیبرید وارد عمل شده، که نقاط قوت تکنیک‌های بهینه‌سازی هستند [7]. این مقاله به پیاده‌سازی کاربردی بهینه‌سازی هیبرید در طراحی و بهبود عملکرد آنتن‌های تنسگریتی می‌پردازد. هدف شناسایی پیکربندی‌های مؤثر برای حداکثر کردن معیارهای عملکردی همچون جرم کمینه، سفتی و استحکام سازه و ویژگی‌های ارتعاشی می‌باشد. این مطالعه نشان خواهد داد که چگونه بهینه‌سازی هیبرید می‌تواند به‌طور قابل توجهی فرآیند طراحی آنتن‌های تنسگریتی را بهبود بخشد و منجر به ایجاد سیستم‌های ارتباطی کارآمدتر و سازگارتر شود. نتایج این تحقیق به پیشرفت حوزه فناوری آنتن کمک کرده و راه را برای کاربردهای نوآورانه در بخش‌های مختلف، از جمله هوافضا و ارتباطات، هموار خواهد کرد.

ساختار مقاله به این صورت است که پس از مقدمه، معادلات دینامیک غیرخطی سازه تنسگریتی با استفاده از روابط المان محدود استخراج و روابط فرمیابی با استفاده از روش چگالی نیرو ارائه شده است. در ادامه تئوری بهینه‌سازی هیبریدی معرفی و روابط و فرآیند پیاده‌سازی آن تشریح شد. در بخش سوم شبیه‌سازی سازه‌های پشتیبان آنتن‌های تنسگریتی با قطر و ارتفاع ثابت مدل‌سازی و نمونه تک‌حلقه‌ای با شش گوشه به عنوان مینا قرار گرفت. موقعیت میله میانی سازه در یک فرآیند بهینه‌سازی هیبریدی، با ترکیب الگوریتم‌های ژنتیک و بهینه‌سازی غیرخطی مقید انجام و موقعیت بهینه میله میانی و هندسه سازه تنسگریتی استخراج شد. در ادامه به منظور قوام سازه، علاوه بر تحلیل مودال، بارگذاری هارمونیک بر روی گره‌های آزاد سازه اعمال و نتایج مربوط به جابجایی گره‌های منتخب و طول میله و نیروی داخلی اعضای منتخب نشان داده خواهد شد.

## ۲- مدل‌سازی ریاضی و استخراج روابط دینامیکی

در این بخش، معادلات دینامیک غیرخطی سازه آنتن تنسگریتی با استفاده از روش المان محدود استخراج شده است. شکل (۱) نمونه سازه تنسگریتی پشتیبان آنتن تنسگریتی با ۲ حلقه مرکزی را نمایش می‌دهد.

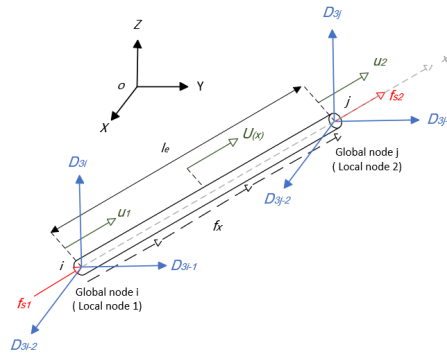


شکل ۱. سازه تنسگریتی پشتیبان آنتن و شماتیک آنتن

<sup>3</sup> Solid Surface Antennas

<sup>4</sup> Inflatable Antennas

بمنظور استخراج معادلات دینامیک غیر خطی یک المان از سازه مشابه شکل (۲) در نظر گرفته شده و معادلات بر مبنای آن استخراج و به کل سازه تامین داده خواهد شد.



شکل ۲. مشخصات یک المان سازه تنسگریتی

معادله دینامیک غیر خطی سازه تنسگریتی بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{n}} - \mathbf{C}\dot{\mathbf{n}} + \mathbf{K}\mathbf{n} = \mathbf{F}. \quad (1)$$

که در رابطه فوق  $\mathbf{M}$ ،  $\mathbf{C}$  و  $\mathbf{K}$  به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سفتی سازه تنسگریتی و  $\mathbf{F}$  بار خارجی وارد شده به گره‌های سازه تنسگریتی می‌باشد. بردار  $\mathbf{n}$  مختصات گره‌های سازه تنسگریتی و  $n$  تعداد گره‌های سازه می‌باشند و بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{n} = [\mathbf{n}_1^T \quad \mathbf{n}_2^T \quad \dots \quad \mathbf{n}_n^T]^T. \quad (2)$$

ماتریس جرم توزیع جرم در سازه را نشان می‌دهد و بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{M} = \frac{\rho AL}{6} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

که در رابطه فوق  $\mathbf{A}$  و  $\mathbf{L}$  به ترتیب بیانگر بردار طول و سطح مقطع عضوهای سازه می‌باشند و بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\mathbf{A} = [\mathbf{A}_1 \quad \mathbf{A}_2 \quad \dots \quad \mathbf{A}_{n_e}]^T, \quad \mathbf{L} = [\mathbf{L}_1 \quad \mathbf{L}_2 \quad \dots \quad \mathbf{L}_{n_e}]^T. \quad (4)$$

که در رابطه فوق  $n_e$  بیانگر تعداد عضوهای سازه می‌باشد. ماتریس سفتی یک ماتریس مربعی است که رابطه بین نیروها و جابجایی‌های گره‌های سازه را نشان می‌دهد و بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_L + \mathbf{K}_{NL}. \quad (5)$$

که در رابطه فوق  $\mathbf{K}_L$  و  $\mathbf{K}_{NL}$  به ترتیب سفتی خطی و سفتی هندسی می‌باشند و بصورت زیر تعریف می‌شوند:

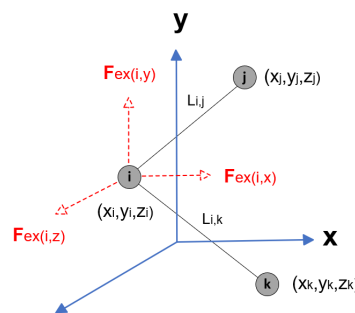
$$\mathbf{K}_L = \frac{AE}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}_{NL} = \frac{T}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

که در آن  $\mathbf{E}$  و  $\mathbf{T}$  به ترتیب بردار مدول یانگ و نیروی داخلی اعضای سازه می‌باشند.

$$\mathbf{E} = [\mathbf{E}_1 \quad \mathbf{E}_2 \quad \dots \quad \mathbf{E}_{n_e}]^T, \mathbf{T} = [\mathbf{T}_1 \quad \mathbf{T}_2 \quad \dots \quad \mathbf{T}_{n_e}]^T. \quad (7)$$

### ۳- فرمیابی آنتن تنسگریتی به روش چگالی نیرو

فرمیابی فرآیندی است که در آن بر اساس یک توپولوژی مشخص، هندسه پایدار سازه ایجاد می‌شود. در این پژوهش سازه پشتیبان یک آنتن در قالب یک ساختار تنسگریتی به روش چگالی نیرو فرم، و نیروهای داخلی آن‌ها استخراج شده است. این روش در سال ۱۹۷۱ توسط لینکیتز و شک<sup>۱</sup> برای تعیین مختصات گره‌های سازه تنسگریتی با در نظر گرفتن نیروهای داخلی اعضاء و هندسه سازه تنسگریتی پیشنهاد شده است [۸-۱۰]. در سازه تنسگریتی (شکل ۳) گره  $i$  توسط عضوهای  $ij$  و  $ik$  به گره‌های  $j$  و  $k$  متصل می‌باشد. نیروهای خارجی وارد بر گره  $i$  در راستای محوره‌های اصلی به ترتیب بصورت  $F_{ex(i,x)}$ ،  $F_{ex(i,y)}$  و  $F_{ex(i,z)}$  تعریف می‌شوند.



شکل ۳. سازه تنسگریتی نمونه با سه گره ( $i$  و  $j$  و  $k$ ) و دو عضو ( $ij$ ) و ( $ik$ )

برای استخراج روابط تعادل سازه تنسگریتی، روابط تعادل گره  $i$  بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} (x_i - x_j)q_{ij} + (x_i - x_k)q_{ik} &= \mathbf{F}_{ex(i,x)} \\ (y_i - y_j)q_{ij} + (y_i - y_k)q_{ik} &= \mathbf{F}_{ex(i,y)} \\ (z_i - z_j)q_{ij} + (z_i - z_k)q_{ik} &= \mathbf{F}_{ex(i,z)} \end{aligned} \quad (8)$$

که در آن  $\mathbf{q}$  بردار چگالی نیروی هر المان و بردارهای  $x$ ،  $y$  و  $z$  بردارهای مختصات گره‌های سازه می‌باشند. ماتریس تعادل سازه ( $\mathbf{A}$ ) بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}^T \text{diag}(\mathbf{C}_x) \\ \mathbf{C}^T \text{diag}(\mathbf{C}_y) \\ \mathbf{C}^T \text{diag}(\mathbf{C}_z) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

با بازنویسی معادله (۸) و جایگزینی رابطه (۹) در آن خواهیم داشت:

$$\mathbf{A}\mathbf{q} = \mathbf{F}_{ex}. \quad (10)$$

ماتریس  $\mathbf{D}$  ماتریس چگالی نیروی سازه می‌باشد و بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{D} = \mathbf{C}^T \text{diag}(\mathbf{q})\mathbf{C}. \quad (11)$$

با بازنویسی رابطه (۱۰) و جایگزینی رابطه (۱۱) در آن خواهیم داشت:

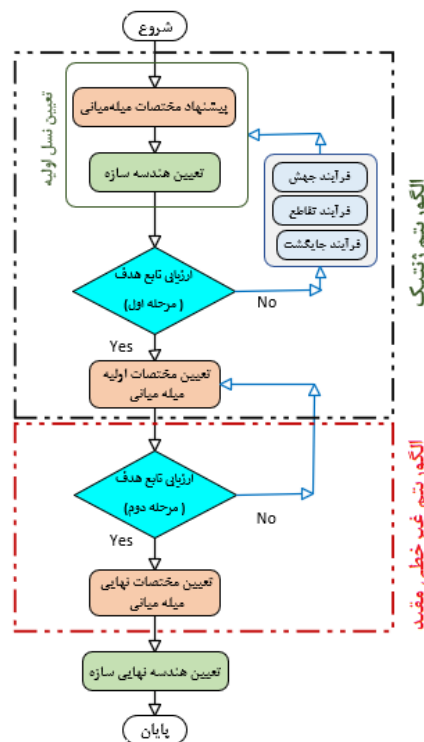
<sup>1</sup> Linkwitz and Schek

$$\mathbf{D}[x \ y \ z] = [\mathbf{f}_x \ \mathbf{f}_y \ \mathbf{f}_z]. \quad (12)$$

در سازه‌های تنسگریتی با شرایط پیش‌تنش، از نیروی خارجی وارد بر گره‌ها صرف نظر می‌شود و سمت راست رابطه (۹) برابر صفر خواهد شد.

#### ۴- الگوریتم بهینه‌سازی هیبرید

روش بهینه‌سازی هیبریدی ترکیبی از چندین تکنیک بهینه‌سازی است که به منظور دستیابی به نتایج بهینه‌تر و کارآمدتر در حل مسائل پیچیده استفاده می‌شود. این روش علاوه بر کاهش هزینه محاسباتی، منجر به افزایش دقت شده و قابلیت انعطاف‌پذیری در مسائل بهینه‌سازی را بالا برده و در بهینه‌سازی توابع چند هدفه بسیار کاربرد دارد. برای پیاده‌سازی روش بهینه‌سازی هیبرید، ابتدا از یک روش تصادفی؛ الگوریتم ژنتیک برای جستجوی سراسری و تعیین محدوده واریانت بهینه و حدس اولیه آن استفاده و سپس از یک روش گرادیانی؛ الگوریتم مبتنی بر مدل جایگزین برای جستجوی محل دقیق واریانت بهینه‌سازی استفاده می‌شود (شکل ۴).



شکل ۴. فرآیند بهینه‌سازی هیبرید

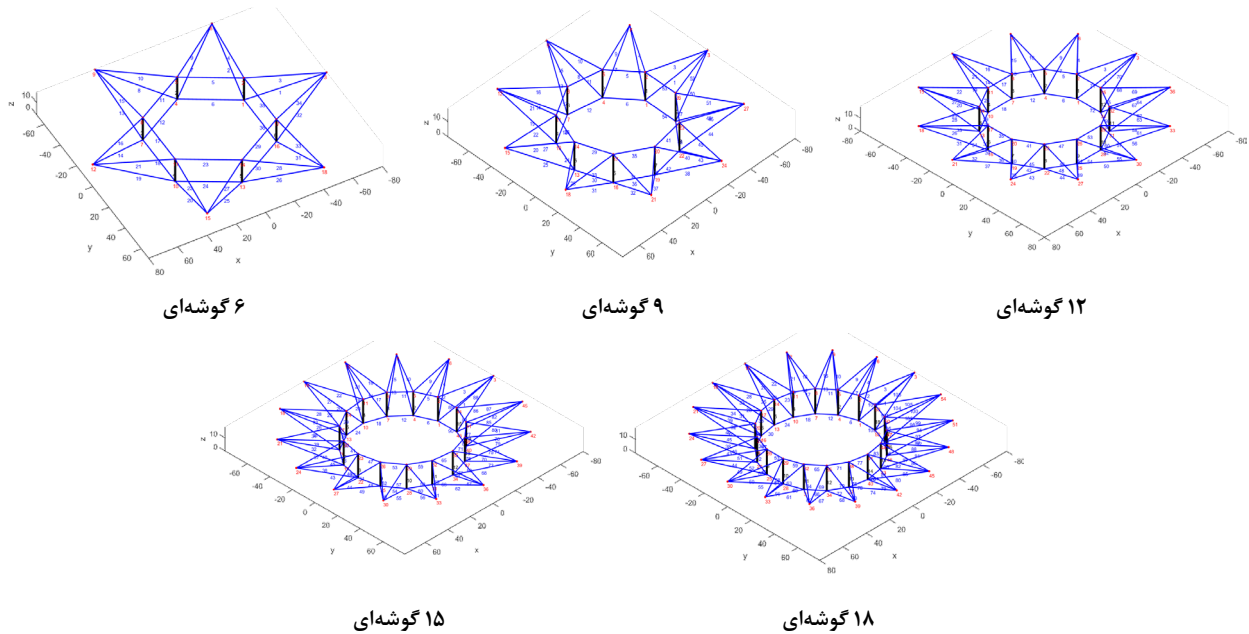
تابع هدف در بهینه‌سازی به منظور سنجش کیفیت و کارایی یک راه‌حل (پارامترها) تعریف می‌شود. در ادامه تابع هدف برای پارامترهای مربوط به ماتریس جرم، ماتریس سختی و فرکانس‌های طبیعی ارائه شده است:

$$\mathbf{F}(x) = \partial_M \frac{1}{M(x)/M_{ref}} + \partial_k \frac{K(x)}{K_{ref}} + \partial_F \left( \frac{W_{target} - W(x)}{W_{target}} \right)^2 \quad (13)$$

در رابطه فوق  $M(x)$ ،  $K(x)$ ،  $W(x)$  به ترتیب نرم ماتریس جرم، سفتی و فرکانس طبیعی سازه تنسگریتی به اضاء موقعیت میله میانی سازه  $(x)$  و  $M_{ref}$ ،  $K_{ref}$  به ترتیب جرم و سفتی سازه اولیه و  $W_{tar}$  فرکانس طبیعی مطلوب سازه می‌باشد.

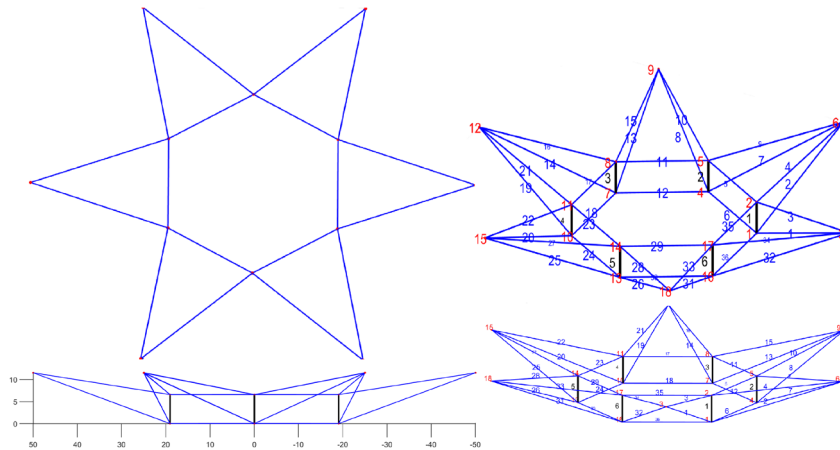
## ۵- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

سازه‌های پشتیبان آنتن‌های تنسگریتی تک‌حلقه‌ای با قطر و ارتفاع ثابت ۱۰۰ و ۱۵ متر و تعداد گوشه‌های (۶، ۹، ۱۲، ۱۵ و ۱۸) (۱۸) مدل‌سازی شده است (شکل ۵).



شکل ۵. نمونه‌های تنسگریتی پشتیبان آنتن با تک حلقه و تعداد گوشه‌های متفاوت (۶، ۹، ۱۲، ۱۵، ۱۸)

سازه آنتن تک‌حلقه‌ای با شش گوشه به عنوان نمونه مبناء انتخاب و الگوریتم بهینه‌سازی برای استخراج مناسب‌ترین پیکربندی سازه با جابجایی موقعیت میله‌های میانی و با قید حفظ انحناى فوقانی سازه در نظر گرفته شد.



شکل ۶. تنسگریتی پشتیبان آنتن با تک حلقه و شش گوشه

جدول ۱. نتایج بهینه‌سازی به روش هیبرید

مراحل الگوریتم هیبرید	روش بهینه‌سازی	موقعیت میله میانی	مقدار تابع هدف
مرحله اول بهینه‌سازی	روش الگوریتم ژنتیک	-۲۳	۱۲/۱۱۳۹
مرحله نهایی بهینه‌سازی	الگوریتم مبتنی بر مدل جایگزین	-۲۴/۱۸۵۳	۱۱/۷۳۳۱

فرآیند بهینه‌سازی هیبرید مطابق شکل (۴)، با استفاده از الگوریتم ژنتیک شروع و با روش بهینه‌سازی مبتنی بر مدل خاتمه می‌یابد. همانطور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود در مرحله اول بهینه‌سازی موقعیت میله میانی سازه در فاصله ۲۳ متری از محور مختصات محاسبه می‌شود. در مرحله بعدی، نتیجه الگوریتم ژنتیک به عنوان حدس اولیه الگوریتم مبتنی بر مدل جایگزین قرار گرفته

و مراحل بهینه‌سازی تا استخراج محل نهایی موقعیت میله تنسگریتی ادامه می‌یابد. نتایج مربوط به بهینه‌سازی هیبرید در جدول ۲(۲) نشان داده شده است.

به منظور بررسی رفتار ارتعاشی سازه پشتیبان آنتن تنسگریتی بهینه، تحلیل مودال انجام و نتایج در ادامه ارائه شده است. مشخصات اعضای سازه تنسگریتی نیز در جدول ۳(۳) ارائه شده است. در جدول ۴ نتایج مربوط به فرکانس‌های طبیعی سازه بهینه نشان داده شده است.

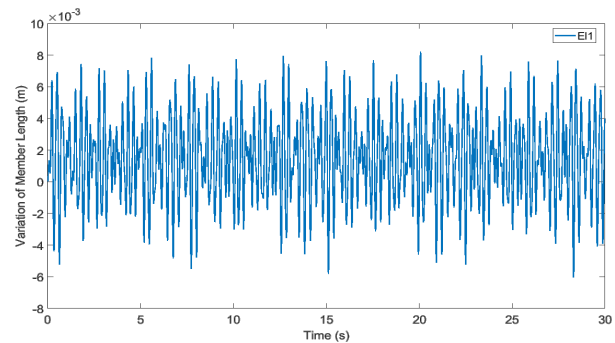
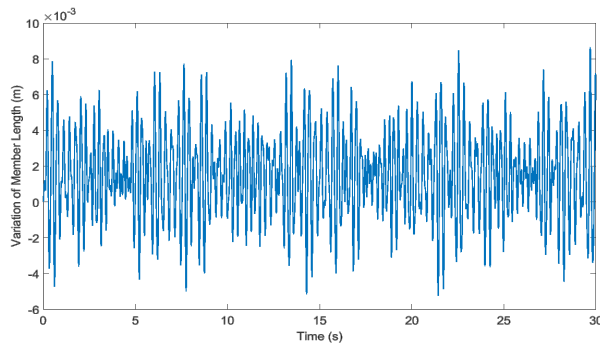
جدول ۳. مشخصات فیزیکی اعضای تنسگریتی

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

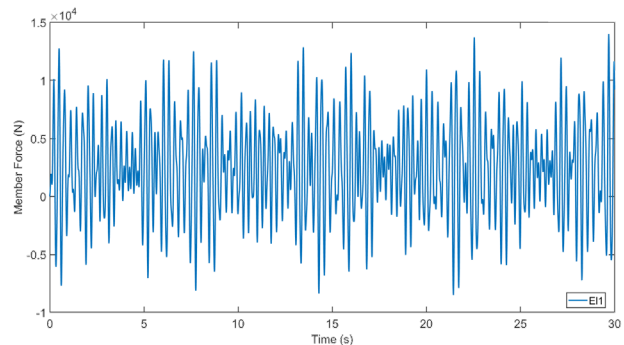
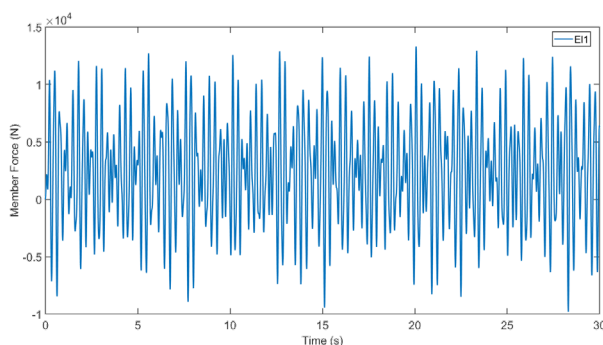
جدول ۴. فرکانس طبیعی ۸ مود اول ارتعاشی ازدهای پشتیبان بهینه (Hz)

سازه بهینه	مود ۸	مود ۷	مود ۶	مود ۵	مود ۴	مود ۳	مود ۲	مود ۱
اولیه	۱۳/۴۰	۱۲/۲۹	۱۰/۱۷	۶/۳۵	۴/۳۳	۳/۹۳	۳/۱۰	۲/۹۷
سازه بهینه	مود ۸	مود ۷	مود ۶	مود ۵	مود ۴	مود ۳	مود ۲	مود ۱
نهایی	۱۳/۹۱	۱۲/۸۶	۱۰/۷۷	۶/۷۱	۴/۳۰	۳/۹۴	۳/۲۱	۳/۰۸

همانطور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود فرکانس طبیعی سازه‌های پشتیبان بهینه اولیه و نهایی نزدیک به هم و با توجه به فرآیند بهینه‌سازی موضعی در مرحله نهایی، فرکانس‌ها مطلوبتر شده است. این روند در تمامی فرکانس‌ها مشاهده می‌شود. به منظور بررسی و تحلیل ارتعاشات آنتن تنسگریتی با هندسه بهینه، گره‌های سطح پایین سازه بصورت گیردار در نظر گرفته شده است. بارگذاری ارتعاشی روی گره آزاد و در راستای محور مثبت محور Z بمدت ۳۰ ثانیه با رابطه  $F = 100 \sin(2t)$  اعمال و نتایج استخراج شده است. با توجه به تقارن سازه و بارگذاری، نتایج ارتعاشی مربوط به میله شماره ۱ در شکل‌های ۸ تا ۱۰، نشان داده شده است.



شکل ۹. تغییرات طول میله شماره ۱ - سازه بهینه اولیه (سمت راست) - سازه بهینه نهایی (سمت چپ)



شکل ۱۰. تغییرات نیروی داخلی میله شماره ۱ - سازه بهینه اولیه (سمت راست) - سازه بهینه نهایی (سمت چپ)

همانطور که در شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌شود علی‌رغم تفاوت در طول اولیه میله شماره ۱ با توجه به تغییر موقعیت آن در سازه‌های بهینه، در بازه بارگذاری طول متناسب با میزان بار ارتعاشی، بصورت نوسانی تغییر می‌کند. در سازه بهینه نهایی تغییرات طول میله کمتر شده است، که بیانگر توزیع متناسب نیرو و کاهش جابجایی سازه بواسطه بهینه شدن می‌باشد. در شکل ۱۰ تغییرات نیروی داخلی میله شماره ۱ در حالت‌های بهینه مقایسه شده است. با توجه به نیروی نوسانی وارد شده در راستای طولی عضو شماره ۱، تغییرات نیروی داخلی میله بصورت فشاری و کششی در بازه بارگذاری بوده و رفتار نیروی داخلی میله شماره ۱ منطبق با طول میله و تغییرات طول آن در بازه بارگذاری می‌باشد. با توجه به رابطه خطی بین تغییرات طول میله و نیروی داخلی وارد شده به آن، نمودارهای مربوطه بصورت ارتعاشی و بر هم منطبق می‌باشند.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله معادلات تعادل و دینامیک غیرخطی سازه پشتیبان یک آنتن در قالب یک ساختار تنسگریتی با استفاده از روابط لاگرانژ استخراج و فرمیابی سازه‌های تنسگریتی با استفاده از روش چگالی نیرو صورت پذیرفت. سازه‌های مختلف پشتیبان تنسگریتی با قطر و ارتفاع ثابت مدل‌سازی و نمونه تک‌حلقه‌ای با شش گوشه به عنوان مبنا قرار گرفت. موقعیت میله میانی سازه در یک فرآیند بهینه‌سازی هیبرید، با ترکیب الگوریتم‌های ژنتیک و بهینه‌سازی غیرخطی مقید انجام و موقعیت بهینه میله‌های میانی و هندسه سازه تنسگریتی استخراج شد. به منظور بررسی قوام سازه، بار هارمونیک بر گره‌های آزاد سازه اعمال و علاوه بر تحلیل‌های مودال، نتایج مربوط به جابجایی گره‌های منتخب و طول میله و نیروی داخلی اعضای منتخب در دو حالت بهینه‌سازی مقایسه شد. نتایج حاصل از این تحلیل‌ها این امکان را ایجاد می‌کند که در ادامه، از سایر پاسخ‌های دینامیکی و همچنین سایر پارامترهای موثر در فرآیند فرمیابی سازه‌ها مانند کمینه انرژی مورد نیاز، در توابع هدف الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده گردد.

## مراجع

1. W.L. Stutzman and G.A. Thiele, *Antenna theory and design*, John Wiley & Sons, 2012.
2. R. Freeland, "Survey of deployable antenna concepts", (1983).
3. C. Rogers, W. Stutzman, T. Campbell, and J. Hedgepeth, "Technology assessment and development of large deployable antennas", *Journal of Aerospace Engineering* 6(1), 34-54, (1993).
4. A.G. Roederer, "Historical overview of the development of space antennas", *Space Antenna Handbook*, 250-313, (2012).
5. S. Krishnan and B. Li, "Design of lightweight deployable antennas using the tensegrity principle", in *16th Biennial International Conference on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments*. American Society of Civil Engineers Reston, VA, 2018.
6. P.L. Ganga, et al., "Tensegrity rings for deployable space antennas: concept, design, analysis, and prototype testing", *Variational analysis and aerospace engineering: Mathematical challenges for the aerospace of the future*, 269-304, (2016).
7. E. Balsa-Canto, et al., "Hybrid optimization method with general switching strategy for parameter estimation", *BMC systems biology* 2, 1-9, (2008).
8. K. Linkwitz and H.-J. Schek, "Einige bemerkungen zur berechnung von vorgespannten seilnetzkonstruktionen", *Ingenieur-archiv* 40, 145-158, (1971).
9. H.-J. Schek, "The force density method for form finding and computation of general networks", *Computer methods in applied mechanics and engineering* 3(1), 115-134, (1974).
10. K. Linkwitz, "Formfinding by the "direct approach" and pertinent strategies for the conceptual design of prestressed and hanging structures", *International Journal of Space Structures* 14(2), 73-87, (1999).