



Geometric Optimization and Vibrational Analysis of Tensegrity-Based Support Structures for Planar Antennas

Morteza Jahan¹, Milad Azimi^{2*} 

¹ PhD Student, Aerospace Research Institute (Ministry of Science, Research and Technology), Tehran, Iran

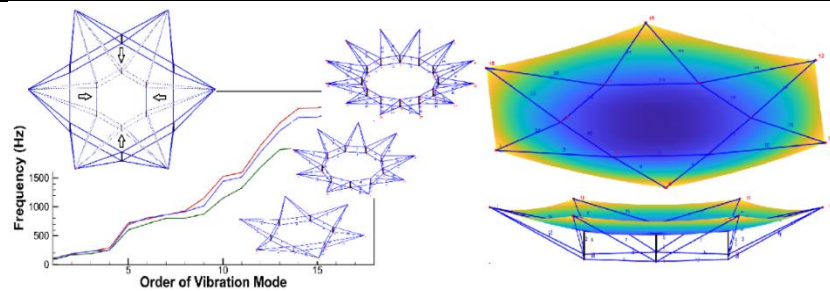
Email: Jahan@sun.ari.ac.ir

² Associate Professor, Aerospace Research Institute (Ministry of Science, Research and Technology), Tehran, Iran (*Correspondence: azimi.m@ari.ac.ir)

HIGHLIGHTS

- Nonlinear dynamic extraction and form-finding of a tensegrity support structure for planar antennas.
- Hybrid optimization of a tensegrity support structure
- Modal analysis and vibration behavior of a tensegrity support structure for planar antennas.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 25 October 2025

Received in revised form: 23 November 2025

Accepted: 10 January 2026

Available online: 21 January 2026

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

Keywords:

Planar Antenna

Tensegrity Structure

Force Density

Hybrid Optimization

Genetic Algorithm

Vibration Analysis

ABSTRACT

Tensegrity structures, characterized by their high stiffness-to-mass ratio and deployable capabilities, represent a promising solution for applications such as support structures. This paper explores the extraction of dynamic equations, form-finding, and geometric optimization of a tensegrity support structure designed for a planar antenna featuring a central ring and six petals. The nonlinear dynamic equations of the system were derived utilizing the Lagrangian approach and Finite Element Method, while the form-finding of the structure was achieved through a force density approach. For optimization, support structures with various configurations—maintaining a constant height and outer diameter while varying the curvature of the upper surface—were designed and optimized by altering the diameter of the middle ring. To enhance the accuracy of the optimization process, a hybrid optimization method was employed to finalize the geometry of the support structure, with the objectives of minimizing mass, increasing stiffness, and enhancing natural frequency. This hybrid optimization process, which integrates genetic algorithms with nonlinear constrained optimization algorithms, constitutes a novel contribution of this research. To assess the strength of the support structure, both free and forced vibrations of the system were analyzed regarding natural frequencies, mode shapes, deformation, nodal displacement, and internal member forces. The results affirm the improved vibrational performance of the structure following optimization and illustrate the advantages of utilizing feedback from vibrational analysis in finalizing the geometry, alongside a deeper understanding of dynamic behavior.

Cite this article: Jahan M., Azimi M[®]. Geometric Optimization and Vibrational Analysis of Tensegrity-Based Support Structures for Planar Antennas. Journal of Aerospace Mechanics. 2025; 21 (4): 79-90. DOI: <https://doi.org/10.47176/MAJ.2025.1510>

© Author(s) retain the copyright and full publishing rights

Publisher: Imam Hossein Comprehensive University.





بهینه‌سازی ساختار و تحلیل ارتعاشات سازه تنسگریتی پشتیبان آنتن‌های صفحه‌ای

مرتضی جهان^۱، میلاد عظیمی^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری، پژوهشگاه هوا فضا (وزارت علوم، تحقیقات و فناوری)، تهران، ایران (Jahan@sun.ari.ac.ir)

^۲ دانشیار، پژوهشگاه هوا فضا (وزارت علوم، تحقیقات و فناوری)، تهران، ایران (نویسنده مسئول: azimi.m@ari.ac.ir)

برجسته‌ها

- استخراج دینامیک غیرخطی و فرمیابی سازه تنسگریتی پشتیبان آنتن صفحه‌ای
- بهینه‌سازی هیبرید ساختار سازه تنسگریتی
- تحلیل مودال و بررسی رفتار ارتعاشی سازه تنسگریتی پشتیبان آنتن صفحه‌ای

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۰۳ آبان ۱۴۰۴

بازنگری: 02 آذر ۱۴۰۴

پذیرش: 20 دی ۱۴۰۴

ارائه آنلاین: 01 بهمن ۱۴۰۴

*نویسنده مسئول:

azimi.m@ari.ac.ir

کلید واژه‌ها:

آنتن صفحه‌ای

سازه تنسگریتی

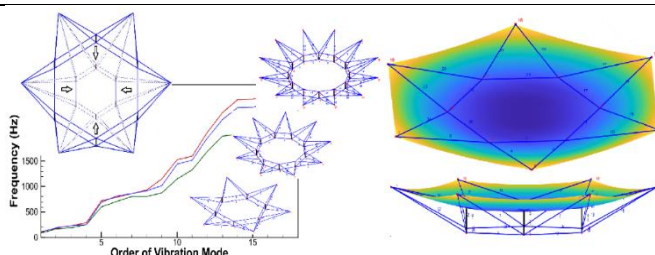
چگالی نیرو

بهینه‌سازی هیبرید

الگوریتم ژنتیک

تحلیل ارتعاشات

چکیده گرافیکی



چکیده

سازه‌های تنسگریتی با نسبت بالای سفتی به جرم، قابلیت جمع/بازشوندگی را دارا هستند و گزینه‌ای مناسب برای کاربردهایی نظیر سازه‌های پشتیبان به شمار می‌روند. این مقاله به استخراج معادلات دینامیک، فرمیابی و بهینه‌سازی هندسی سازه تنسگریتی پشتیبان آنتن صفحه‌ای با یک حلقه مرکزی و شش گوشه می‌پردازد. معادلات دینامیک غیرخطی دستگاه با استفاده از روش لاگرانژ و المان محدود استخراج و فرمیابی سازه به روش چگالی نیرو انجام شده است. برای بهینه‌سازی، سازه‌های با پیکربندی مختلف (با ارتفاع و قطر خارجی ثابت و حفظ انحنا سطح فوقانی) پشتیبان آنتن، با تغییر در قطر حلقه میانی طراحی و بهینه‌سازی شده‌اند. به منظور افزایش دقت، از روش بهینه‌سازی هیبرید جهت نهایی‌سازی هندسه سازه پشتیبان باهدف کاهش جرم، افزایش سفتی و فرکانس طبیعی استفاده شده است. فرایند بهینه‌سازی هیبرید با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک و الگوریتم بهینه‌سازی غیرخطی مقید در نهایی‌سازی ساختار سازه پشتیبان، از جمله نوآوری‌های این پژوهش محسوب می‌شود. به منظور ارزیابی استحکام سازه پشتیبان، ارتعاشات آزاد و اجباری دستگاه در قالب فرکانس‌های طبیعی، شکل مودها، تغییر طول، جابه‌جایی گره‌ها و نیروهای داخلی اعضا مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج، بهبود عملکرد ارتعاشی سازه پس از بهینه‌سازی را تأیید و نشان داد که استفاده از بازخورد تحلیل‌های ارتعاشی در نهایی‌سازی هندسه، علاوه بر درک بهتر از عملکرد دینامیکی سازه، راهکارهای نوینی در طراحی سازه‌های با ساختار پیچیده را ارائه می‌دهد.

استناد: جهان، مرتضی، عظیمی، میلاد. بهینه‌سازی ساختار و تحلیل ارتعاشات سازه تنسگریتی پشتیبان آنتن‌های صفحه‌ای. مکانیک هوا فضا.

(۱۴۰۴)؛ ۲۱ (۳): ۷۹-۹۰.

<https://doi.org/10.47176/MAJ.2025.1510>

© نویسنده(گان) حق نشر و حقوق کامل انتشار را برای خود محفوظ می‌دارند.

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع).



۱- مقدمه

سازه‌های تنسگریتی ساختارهای پیش‌تنیده با اتصالات پینی هستند که بر تعادل بین المان‌های کششی و فشاری استوارند [۱]. وجود پیش‌تنش منجر به کشش ریسمان‌ها و فشار در میله‌ها می‌شود که به سازه اجازه می‌دهد در حالت خود تعادلی قرار گیرد [۲]. مزیت اصلی استفاده از این سازه‌ها، قابلیت تغییرشکل‌پذیری، سبکی، تاشونگی و ماژولار بودن [۳] است که در سازگاری با محیط عملکردی نقش مؤثری دارد. همچنین نسبت سختی به جرم بالا، چابکی [۴]، کنترل‌پذیری، قابلیت اطمینان [۵]، جذب انرژی بالا [۶] و مقاومت در برابر ضربه [۷] از ویژگی‌های منحصربه‌فرد این نوع از سازه‌هاست که سبب کاربرد گسترده آن در علوم و اکتشافات فضایی در کنار سایر زمینه‌های مهندسی مانند مکانیک، بیومکانیک، روباتیک، معماری و عمران شده است [۸-۱۲].

آنتن‌های با ساختار تنسگریتی از ترکیب مواد سبک و طراحی‌های هوشمندانه‌ای بهره می‌برند که نه تنها وزن را کاهش داده؛ بلکه استحکام و پایداری آنها را نیز افزایش می‌دهد. آنتن‌های تنسگریتی به دلیل قابلیت جمع‌شوندگی و استقرار سریع، وزن کم، طراحی ماژولار برای نصب بر روی ماهواره‌ها و سیستم‌های ارتباطی در فضا بسیار مناسب هستند. این فناوری می‌تواند به پیشرفت‌های چشمگیری در حوزه ارتباطات و پژوهش‌های فضایی منجر شود [۱۳-۱۴]. رایج‌ترین نوع آنتن‌های تنسگریتی موجود، آنتن‌های بازتابنده سهموی^۱ هستند که به دلیل بهره بالا، علاوه بر ارتباطات، در رصد زمین و مطالعات نجومی نیز استفاده می‌شوند [۱۵]. مکانیزم آنتن‌های بازتابنده دارای سه نوع شبکه‌ای^۲، آنتن‌های سطح جامد^۳ و آنتن‌های بادی^۴ هستند [۱۶]. تکامل فناوری سازه‌های تنسگریتی که با ترکیب منحصربه‌فرد المان‌های کششی و فشاری شناخته می‌شوند، به عنوان یک راهکار اساسی در سازه‌های پشتیبان آنتن‌ها نیز ظهور کرده‌اند [۱۷]. پیکربندی‌های سبک و انعطاف‌پذیر این ساختارها نه تنها به تقویت یکپارچگی سازه‌ای کمک می‌کند، بلکه امکان بازپیکربندی را فراهم می‌کند. این ویژگی، آن‌ها را برای کاربردهایی که حجم و وزن محموله بحرانی هستند، ایدئال می‌سازد. باین‌حال، 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 چندبعدی ناکام باشند [۱۸]؛ لذا رویکردهای بهینه‌سازی هیبرید وارد عمل شده که نقاط قوت فن‌های

بهینه‌سازی هستند [۱۹]. سارکر و همکاران^۵ از روش‌های یادگیری عمیق و یادگیری ماشین برای تعیین بهترین ویژگی‌های هندسی آنتن‌ها شامل ابعاد، ساختار و محل قرارگیری اجزای مختلف آن استفاده کرده‌اند [۲۰]. صابونی و همکاران^۶ از الگوریتم ژنتیک برای طراحی و بهینه‌سازی آنتن‌های پچ میکروستریپ^۷ استفاده کرده‌اند.

در این پژوهش از الگوریتم ژنتیک برای یافتن بهترین ابعاد و ساختار آنتن جهت دستیابی به بازدهی بالا و افزایش دقت استفاده شده است [۲۱]. یانت^۸ از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی آنتن‌های صفحه‌ای^۹ و تعیین پارامترهای هندسی بهینه مانند ابعاد، ساختار و محل قرارگیری اجزای مختلف آنتن استفاده کرده است [۲۲]. سیلوا و همکاران^{۱۰} روش طراحی آنتن‌های میکروستریپ را با ترکیب الگوریتم ژنتیک و روش‌های یادگیری ماشین بهینه‌سازی کرده و علاوه بر کاهش زمان محاسبات، دقت طراحی آنتن را افزایش داده‌اند [۲۳]. شریف^{۱۱} از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی طراحی آنتن‌های باند پهن در کاربردهای ۵G، افزایش عملکرد باند فرکانسی و کاهش ابعاد آنتن استفاده کرده است [۲۴]. بیچارا و همکاران^{۱۲} از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی طراحی آنتن‌های فشرده در سیستم‌های اینترنت اشیا^{۱۳} استفاده و به چالش‌های طراحی آنتن‌های کوچک با کارایی بالا پرداخته‌اند [۲۵]. سلطان کریمی و همکاران^{۱۴} از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی آرایه‌های آنتن جهت کاهش سطح سیگنال‌های جانبی و بهبود عملکرد آنتن‌ها در کاربردهای راداری و ارتباطات پرداخته‌اند [۲۶]. سنگ و همکاران^{۱۵} به بهینه‌سازی طراحی آنتن‌های شکاف‌دار^{۱۶} با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداخته و باهدف بهبود کارایی و باند فرکانسی در سیستم‌های ارتباطی تحقیقات گسترده‌ای انجام داده‌اند [۲۷]. بینلو و همکاران^{۱۷} از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی طراحی آرایه‌های آنتن سیستم‌های چند ورودی چند خروجی^{۱۸} باهدف کاهش تداخل و بهبود بهره‌وری در انتقال داده‌ها استفاده کرده‌اند [۲۸]. پویان و همکاران^{۱۹} از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه برای بهینه‌سازی طراحی آنتن‌هایی با ویژگی‌های متعدد همچون بهره بالا و عملکرد در فرکانس‌های گسترده پرداخته‌اند [۲۹]. این مقاله به پیاده‌سازی روش بهینه‌سازی هیبرید در طراحی و بهبود

⁵ Sarker et al.⁶ Sabouni, A et al.⁷ Microstrip⁸ Wyant, A.⁹ Planar Antennas¹⁰ Silva, C.R¹¹ Sheriff, M. et al.¹² Bichara, R.M. et al.¹³ Internet of Things (IoT)¹⁴ Soltankarimi, F. et al.¹⁵ Tseng, L. et al.¹⁶ Slot Antennas¹⁷ Binelo, M.O. et al.¹⁸ Multiple-Input and Multiple-Output (MIMO)¹⁹ Poian, M. et al.¹ Parabolic Reflector Antenna² Mesh Antennas³ Solid Surface Antennas⁴ Inflatable Antennas

دارند [۱۷]، این روش با کاهش زمان محاسبات و افزایش دقت، امکان بهینه‌سازی کارآمد سازه‌های تنسگریتی را فراهم می‌کند. استفاده از روش چگالی نیرو برای فرمیابی و معادلات دینامیکی غیرخطی سازه با استفاده از روش لاگرانژ استخراج و به کمک رویکرد چگالی نیرو^۴ برای فرمیابی اولیه سازه به کار گرفته شده‌اند. این ترکیب از مدل‌سازی دینامیکی و فرمیابی، امکان تحلیل دقیق‌تر و بهینه‌تر رفتار سازه را فراهم ساخته است. این پژوهش با تمرکز بر یک پیکربندی تک‌حلقه‌ای شش‌گوشه، به بهینه‌سازی پارامترهای هندسی (مانند قطر حلقه میانی) پرداخته و از تحلیل‌های ارتعاشی برای اعتبارسنجی طراحی استفاده کرده است. نتایج نشان‌دهنده کاهش جرم، افزایش سختی و بهبود پایداری دینامیکی سازه است که راهکارهای نوینی برای طراحی سازه‌های پیچیده در کاربردهای حساس ارائه می‌دهد.

برجسته‌ترین دستاوردهای این پژوهش عبارت‌اند از:

- استخراج دینامیک غیرخطی سازه تنسگریتی با استفاده از روش لاگرانژ و المان محدود جهت افزایش دقت مدل‌سازی و رفتار سازه تنسگریتی با هندسه پیچیده
- پیاده‌سازی یک روش بهینه‌سازی هیبرید برای طراحی سازه‌های پشتیبان تنسگریتی؛ این روش با ترکیب نقاط قوت الگوریتم‌های بهینه‌سازی مختلف، فرایند طراحی مؤثرتری را ارائه می‌دهد. الگوریتم ژنتیک با یک الگوریتم بهینه‌سازی غیرخطی مقید ادغام شده و ضمن حفظ پایداری، جرم سازه را کاهش و سختی و فرکانس طبیعی سازه را افزایش می‌دهد.
- روش بهینه‌سازی هیبرید پیشنهادی، محدودیت‌های روش‌های تک الگوریتمی (مانند توقف در نقاط بهینه محلی یا زمان محاسباتی بالا) را برطرف کرده و باعث افزایش سرعت و دقت فرایند بهینه‌سازی می‌شود.
- استفاده از روش چگالی نیرو جهت فرمیابی حین فرایند بهینه‌سازی یک سازه با ساختار پیچیده [۳۰].
- بهینه‌سازی سازه با تغییر قطر حلقه میانی و حفظ سایر پارامترها (مانند ارتفاع و قطر بیرونی)؛ این رویکرد به بهینه‌سازی طراحی باهدف قراردادن یک پارامتر هندسی خاص برای تغییر و اصلاح می‌پردازد.
- استفاده از بازخورد تحلیل‌های ارتعاشی همچون خروجی‌های فرکانس طبیعی در کنار کاهش جرم و افزایش سختی در بهینه‌سازی ساختار و طراحی هندسه نهایی سازه؛ این رویکرد باتوجه به حساسیت عملکرد آنتن‌های تنسگریتی و ارتعاشات وارد شده به آن، در بهبود عملکرد سازه بسیار مؤثر است. رفتار دینامیکی نه‌تنها برای تجزیه و تحلیل، بلکه برای بهبود طراحی نیز موردتوجه قرار گرفته است.

ساختار مقاله به این صورت است که پس از مقدمه، معادلات دینامیک غیرخطی سازه تنسگریتی با استفاده از روابط المان

عملکرد سازه پشتیبان آنتن‌های تنسگریتی صفحه‌ای می‌پردازد. شناسایی پیکربندی‌های مؤثر برای بهینه‌سازی معیارهای عملکردی همچون کاهش جرم، افزایش سختی و استحکام سازه و بهبود ویژگی‌های ارتعاشی از اهداف این پژوهش است. همچنین، الگوریتم‌های بهینه‌سازی هیبریدی با ترکیب ویژگی‌های مثبت هر یک از الگوریتم‌های بهینه‌سازی و برطرف کردن محدودیت‌های آن‌ها، به دستیابی به نتایج بهینه کمک کرده و در حل مسائل پیچیده بهینه‌سازی کاربرد دارند. در این پژوهش الگوریتم ژنتیک با الگوریتم مقید غیرخطی ترکیب شده است. الگوریتم ژنتیک به دلیل توانایی جستجوی بهینه فضاهای جستجوی بزرگ، برای مسائل مختلف مهندسی با چندین پارامتر و قیود پیچیده مناسب است. در این روش ابتدا جمعیت اولیه^۱ که از مجموعه جواب‌های ممکن (کروموزوم یا فرد) تشکیل می‌شود، ساخته می‌شود. هر فرد در جمعیت با استفاده از یک تابع هدف^۲ ارزیابی می‌شود. این تابع میزان مطلوبیت یا برازندگی هر فرد را اندازه‌گیری می‌کند.

بهینه‌سازی غیرخطی مقید^۳ به فرایند جستجوی نقاط بهینه یک تابع غیرخطی تحت مجموعه‌ای از محدودیت‌ها اطلاق می‌شود. در این روش، فرایند بهینه‌سازی از یک حدس اولیه آغاز شده و هم‌زمان با بهینه‌سازی تابع هدف، محدودیت‌هایی برای متغیرهای هدف تعریف می‌شود یا از توابع خاص برای اعمال قیود غیرخطی استفاده می‌شود.

در بهینه‌سازی سازه‌های تنسگریتی، یکی از چالش‌های اصلی، پیچیدگی‌های هندسی و دینامیکی این سازه‌هاست که نیاز به استفاده از روش‌های بهینه‌سازی پیچیده و دقیق را ضروری می‌کند. الگوریتم‌های بهینه‌سازی مانند الگوریتم‌های ژنتیک، الگوریتم‌های تکاملی و روش‌های بهینه‌سازی غیرخطی مقید می‌توانند کاربردهای گسترده‌ای در این زمینه داشته باشند. بااین حال، در کاربرد مؤثر این الگوریتم‌ها برای بهینه‌سازی سازه‌های تنسگریتی، شکاف‌های علمی قابل توجهی وجود دارد. به‌ویژه، چالش‌هایی نظیر پیچیدگی مدل‌سازی رفتار این سازه‌ها تحت شرایط مختلف بارگذاری، دشواری در تعریف دقیق قیود غیرخطی و مسائل مربوط به بهینه‌سازی هم‌زمان چندین هدف (همچون کاهش جرم، افزایش سختی و بهینه‌سازی فرکانس طبیعی) از جمله مسائلی هستند که همچنان نیازمند تحقیقات بیشتر و توسعه روش‌های نوآورانه در این زمینه هستند.

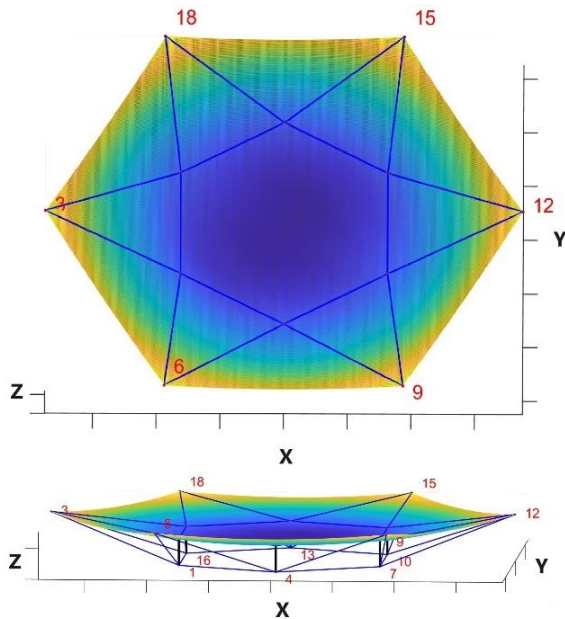
در این مقاله، رویکردی جامع برای طراحی و بهینه‌سازی سازه‌های تنسگریتی به‌عنوان سازه‌های پشتیبان آنتن‌های صفحه‌ای ارائه شده است. روش بهینه‌سازی هیبریدی، ترکیبی از الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی غیرخطی مقید بوده و به حل چالش‌های این سازه‌ها پرداخته است. برخلاف روش‌های تک الگوریتمی که در مدیریت فضاهای طراحی چندبعدی محدودیت

¹ Initial Population

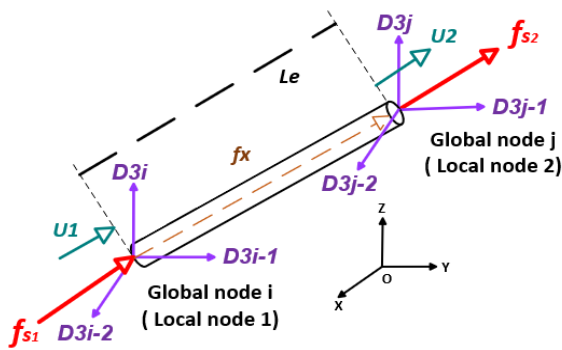
² Fitness Function

³ Nonlinear Constrained Optimization

⁴ Force Density Method



شکل ۱: شماتیک سازه تنسگریتی پشتیبان آنتن



شکل ۲: مشخصات یک المان سازه تنسگریتی

که در رابطه فوق K_L و K_{NL} به ترتیب بخش خطی و غیرخطی (سفتی هندسی) ماتریس سفتی بوده و به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$K_L = \frac{AE}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$K_{NL} = \frac{T}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

که در آن E و T به ترتیب بردار مدول یانگ و نیروی داخلی اعضای سازه هستند و به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$T = [T_1 \ T_2 \ \dots \ T_{n_e}]^T = \hat{E} \hat{A} \hat{L}_0^{-1} (L - L_0) \quad (9)$$

$$E = [E_1 \ E_2 \ \dots \ E_{n_e}]^T \quad (10)$$

توجه: $\hat{x}$ ماتریس قطری است که درایه‌های قطر اصلی آن شامل درایه‌های ماتریس x و سایر درایه‌های آن صفر است.

محدود استخراج و فرم‌یابی با استفاده از روش چگالی نیرو صورت پذیرفته است. در ادامه نظریه بهینه‌سازی هیبریدی معرفی و روابط و فرایند پیاده‌سازی آن تشریح می‌شود. در بخش سوم، شبیه‌سازی سازه تنسگریتی پشتیبان آنتن‌های صفحه‌ای با قطر و ارتفاع ثابت انجام و نمونه تک‌حلقه‌ای با شش گلبرگ به عنوان نمونه مبنا انتخاب شده است. قطر حلقه میانی سازه به عنوان پارامتر بهینه‌سازی در یک فرایند بهینه‌سازی هیبریدی، با ترکیب الگوریتم‌های ژنتیک و الگوریتم بهینه‌سازی غیرخطی مقید تعیین و موقعیت مکانی میله‌های میانی و هندسه سازه تنسگریتی استخراج می‌شود. در ادامه به منظور قوام سازه، علاوه بر تحلیل مودال، بارگذاری هارمونیک بر روی گره‌های آزاد سازه اعمال و رفتار ارتعاشی سازه‌های بهینه با ارائه نمودارهای جابه‌جایی، سرعت گره‌های منتخب، تغییرات طول و نیروهای داخلی اعضا بررسی و تأثیر فرایند بهینه‌سازی در بهبود پارامترهای ارتعاشی سازه نشان داده شده است.

۲- مدل‌سازی ریاضی و استخراج روابط دینامیکی

در این بخش، معادلات دینامیک غیرخطی سازه تنسگریتی با استفاده از روش المان محدود استخراج شده است [۳۱]. شکل ۱ نمونه سازه تنسگریتی با یک حلقه مرکزی و شش گوشه را نمایش می‌دهد. به منظور استخراج معادلات دینامیک غیرخطی، یک المان از سازه تنسگریتی مشابه شکل ۲ در نظر گرفته شده است. معادله دینامیک غیرخطی سازه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$M\ddot{n} + C\dot{n} + Kn = F_{ex} \quad (1)$$

که در آن M ، C و K به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سفتی سازه F_{ex} بار خارجی وارد شده به گره‌های سازه هستند. بردار n مختصات گره‌های سازه و n_n تعداد گره‌ها بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$n = [n_1^T \ n_2^T \ \dots \ n_{n_n}^T]^T \quad (2)$$

ماتریس جرم، به صورت زیر تعریف می‌شود:

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

که در آن ρ چگالی سازه و A و L به ترتیب بیانگر سطح مقطع و بردار طول عضوهای سازه بوده و به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$L = [l_1 \ l_2 \ \dots \ l_{n_e}]^T \text{ و } L \in \mathbb{R}^{n_e} \quad (4)$$

$$A = [A_1 \ A_2 \ \dots \ A_{n_e}]^T \quad (5)$$

که در آن n_e بیانگر تعداد عضوهای سازه است. ماتریس سفتی یک ماتریس مربعی است که رابطه بین نیروها و جابه‌جایی‌های گره‌های سازه را نشان می‌دهد و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$K = K_L + K_{NL} \quad (6)$$

ماتریس D ، ماتریس چگالی نیروی کل سازه است و به صورت زیر تعریف می شود:

$$D = C^T \text{diag} (q) C \quad (14)$$

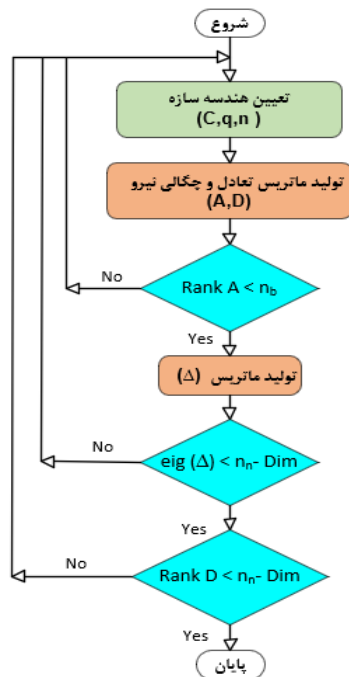
با بازنویسی معادله ۱۲ و جایگزینی معادلات ۱۳ و ۱۴ در آن داریم:

$$D [x \ y \ z] = [f_x \ f_y \ f_z] \quad (15)$$

که در آن f_x ، f_y و f_z به ترتیب بردارهای نیروهای خارجی هستند. در سازه های تنسگریتی با شرایط پیش تنیدگی، از نیروی خارجی وارد بر گره ها صرف نظر شده و سمت راست معادله ۱۲ برابر صفر در نظر گرفته می شود:

$$A q = 0 \quad (16)$$

در شکل ۴ الگوریتم فرمیابی به روش چگالی نیرو ارائه شده است. همان طور که در این فلوچارت نشان داده شده، پس از مشخص شدن شکل اولیه سازه، تغییر مختصات گره های سازه تا رسیدن سازه به پایداری و برقراری شرایط فرمیابی ادامه می یابد [۳۶].



شکل ۴: الگوریتم فرمیابی به روش چگالی نیرو

۳- بهینه سازی هندسی سازه تنسگریتی

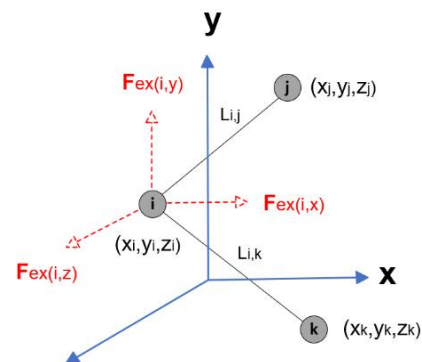
بهینه سازی در سازه های تنسگریتی برای اطمینان از اینکه طراحی ها نه تنها از نظر زیبایی جذاب، بلکه از نظر ساختار پایدار و بهینه باشند، حیاتی است. در این پژوهش از یک روش هیبرید برای بهینه سازی سازه متناسب با اهداف طراحی استفاده شده است. روش بهینه سازی هیبرید، ترکیبی از چندین فن بهینه سازی است که به منظور دستیابی به نتایج بهینه تر و کارآمدتر در حل مسائل پیچیده به کار می رود. این رویکرد علاوه

۳- فرمیابی به روش چگالی نیرو

فرمیابی فرایندی است که طی آن، هندسه مشخص و پایدار سازه ایجاد می شود. محققان، روش های رایج فرمیابی را به دودسته سینماتیکی و استاتیکی طبقه بندی کرده اند. هدف هر دو روش، یافتن پیکربندی مناسب در شرایط خود تنیدگی است. روش استاتیکی پیکربندی پایدار سازه تنسگریتی را با استخراج هندسه و نیروهای وارد بر سازه تعیین می کند [۳۲]. روش های استاتیکی رایج شامل روش تحلیلی، روش چگالی نیرو، روش انرژی و روش مختصات کاهش یافته هستند. در این پژوهش، سازه پشتیبان آنتن در قالب یک ساختار تنسگریتی به روش چگالی نیرو فرم و نیروهای داخلی آن ها استخراج شده است. این روش در سال ۱۹۷۱ توسط لینکویتز و شک^۱ برای تعیین مختصات گره های سازه تنسگریتی با در نظر گرفتن نیروهای داخلی اعضاء و هندسه سازه تنسگریتی پیشنهاد شده است [۳۳-۳۵].

برای استخراج روابط تعادل سازه، شکل ۳ را در نظر بگیرید. گره i توسط عضوهای ij و ik به گره های j و k متصل است. نیروهای خارجی وارد بر گره i در راستای محورهای اصلی محلی به ترتیب به صورت $F_{ex(i,x)}$ ، $F_{ex(i,y)}$ و $F_{ex(i,z)}$ تعریف می شوند. روابط تعادل گره i به صورت زیر تعریف می شوند:

$$\begin{aligned} (x_i - x_j)q_{ij} + (x_i - x_k)q_{ik} &= F_{ex(i,x)} \\ (y_i - y_j)q_{ij} + (y_i - y_k)q_{ik} &= F_{ex(i,y)} \\ (z_i - z_j)q_{ij} + (z_i - z_k)q_{ik} &= F_{ex(i,z)} \end{aligned} \quad (11)$$



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

که در آن q چگالی نیروی هر المان و بردارهای x ، y و z مختصات گره های سازه هستند. با بازنویسی معادله ۱۱ خواهیم داشت:

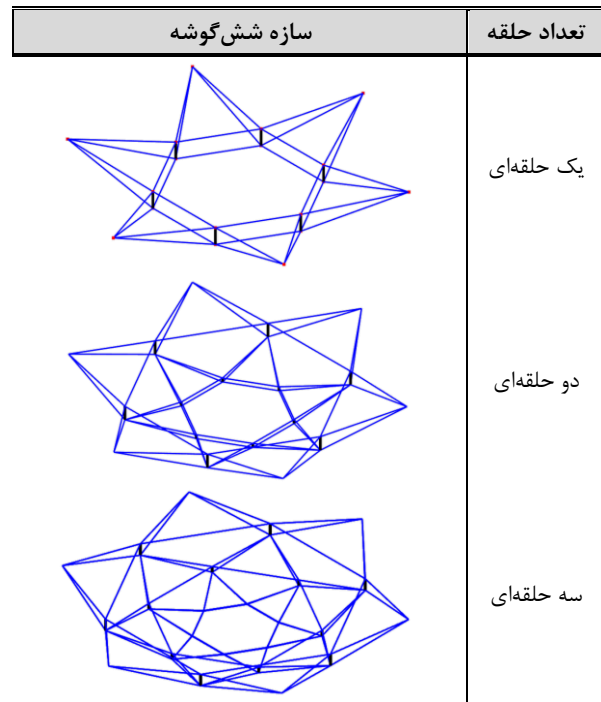
$$A q = F_{ex} \quad (12)$$

که در آن q ماتریس چگالی نیروی هر عضو سازه و A ماتریس تعادل کل سازه است و به صورت زیر تعریف می شود:

$$A = \begin{bmatrix} C^T \text{diag} (C x) \\ C^T \text{diag} (C y) \\ C^T \text{diag} (C z) \end{bmatrix} \quad (13)$$

¹ Linkwitz and Schek

بر کاهش هزینه‌های محاسباتی، دقت نتایج را افزایش می‌دهد و انعطاف‌پذیری بیشتری در حل مسائل بهینه‌سازی فراهم می‌آورد.



شکل ۵: سازه‌های یک تا سه حلقه‌ای شش‌گوشه

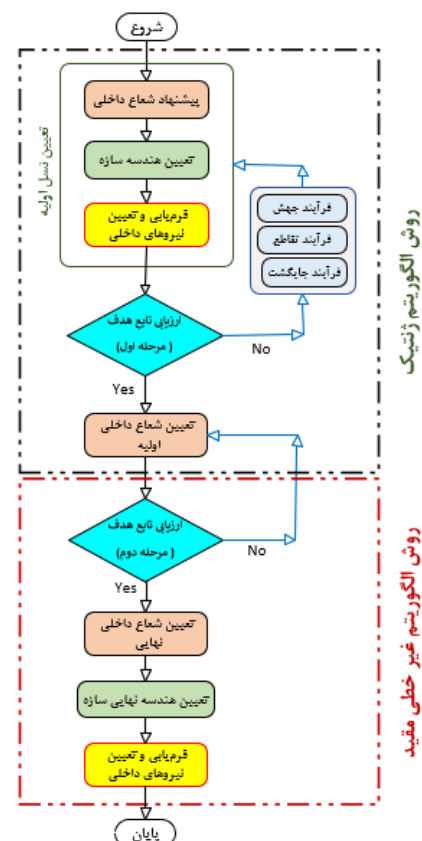
به‌ویژه، این روش در مسائل چندهدفه که نیاز به تعادل میان اهداف مختلف دارند، کاربرد بسیار زیادی دارد. در این پژوهش ترکیب الگوریتم‌های تکاملی با الگوریتم‌های بهینه‌سازی کلاسیک منجر به حل سریع‌تر و دقیق‌تر مسائل شده است. الگوریتم ژنتیک برای جستجوی اولیه در فضای حل مسئله استفاده می‌شود، سپس الگوریتم غیرخطی مقید برای محدود کردن فضای جستجو و پیدا کردن مقادیر دقیق‌تر به کار می‌رود. پیش از فرایند بهینه‌سازی، سازه‌های تنسگریتی یک، دو و سه حلقه‌ای با شش‌گوشه مدلسازی و سازه‌های تکاملی با الگوریتم ژنتیک به‌عنوان نمونه اصلی انتخاب گردید (شکل ۵). از الگوریتم ژنتیک برای جستجوی جامع و تعیین محدوده قطر حلقه میانی استفاده شده و سپس برای جستجوی قطر نهایی، از روش بهینه‌سازی غیرخطی مقید بهره گرفته شده است. در هر مرحله بعد از مشخص شدن هندسه سازه، فرایند فرم‌یابی تکرار و پایداری سازه با استخراج نیروهای داخلی تضمین می‌گردد. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شد، مرحله اول بهینه‌سازی برای تعیین محدوده قطر داخلی به روش الگوریتم ژنتیک و متناسب با جدول زیر انجام شده است.

جدول ۱: بهینه‌سازی به روش الگوریتم ژنتیک

متغیر بهینه	هزینه بهینه	محدوده پایین	محدوده بالا	تعداد متغیرهای مستقل	جمعیت
x	Fval	Lb	Ub	nVar	Population
۰/۳	۶/۷۳۲۵	۰/۱	۰/۶	۱	۱۰۰

فرایند بهینه‌سازی با تعیین متغیرهای بهینه‌سازی در محدوده مشخص شده و بر اساس جمعیت اولیه تعریف شده شروع می‌شود. پس از تشکیل تابع هزینه، در صورتی که مقدار آن بهینه نباشد، بهره‌گیری از سازوکارهای رایج در الگوریتم ژنتیک نظیر انتخاب، تقاطع^۱، جهش^۲ و جای‌گشت، اقدام به تولید نسل‌های جدید می‌نماید. این روند تا رسیدن به مقدار حداقلی تابع هزینه ادامه خواهد یافت (جدول ۱). لازم به ذکر است که تابع هزینه مورد استفاده در هر دو مرحله بهینه‌سازی یکسان بوده و در بخش تابع هدف (بخش ۳-۱) به تفصیل تشریح شده است.

از جمله دلایل اصلی علاقه پژوهشگران به این روش، مقاوم‌بودن، تطبیق‌پذیری و امکان حل مسائلی است که فن‌های بهینه‌سازی رایج برای آنها مؤثر نیستند [۳۷]. فرایند بهینه‌سازی با تغییر قطر داخلی سازه پشتیبان آنتن تنسگریتی تا رسیدن به شکل مطلوب ادامه می‌یابد (شکل ۷).

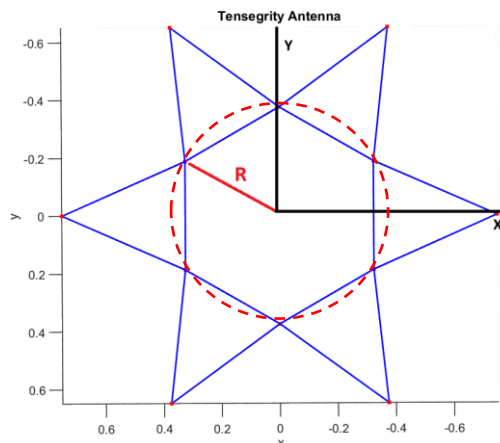


شکل ۶: الگوریتم بهینه‌سازی هیبرید و فرم‌یابی هم‌زمان سازه

تنسگریتی

^۱ Crossover

^۲ Mutation



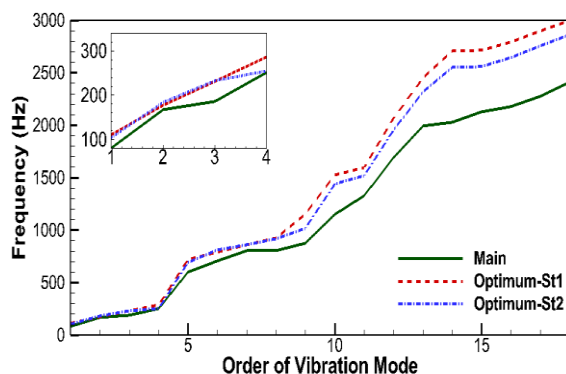
شکل ۸: شعاع حلقه داخلی (پارامتر بهینه‌سازی)

در مرحله اول بهینه‌سازی، شعاع حلقه داخلی و موقعیت میله میانی سازه با مقدار $0/2$ متر محاسبه می‌شود. در مرحله بعد، نتیجه الگوریتم ژنتیک به عنوان حدس اولیه برای الگوریتم بهینه‌سازی غیرخطی مقید در نظر گرفته شده و فرایند بهینه‌سازی تا استخراج شعاع نهایی حلقه و موقعیت دقیق میله‌های میانی سازه تنسگریتی ادامه می‌یابد. نتایج مربوط به فرایند بهینه‌سازی ترکیبی در دو مرحله در جدول ۳ نشان داده شده است.

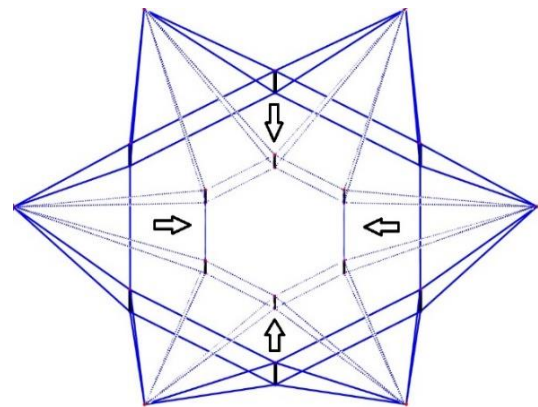
جدول ۳: نتایج بهینه‌سازی به روش هیبرید

مرحله نهایی بهینه‌سازی	مرحله اول بهینه‌سازی	مراحل الگوریتم هیبرید
الگوریتم غیرخطی مقید	الگوریتم ژنتیک	روش بهینه‌سازی
۰/۴۸	۰/۲	شعاع حلقه داخلی
۵/۳۹۷۶	۶/۷۲۲۵	مقدار تابع هدف

به منظور ارزیابی تأثیر فرایند بهینه‌سازی بر بهبود خواص ارتعاشی سازه پشتیبان آنتن، نتایج تحلیل مودال سازه اولیه و سازه بهینه شده در شکل ۹ نمایش داده شده است. تحلیل مودال به عنوان ابزاری برای بررسی اثرات تغییرات هندسی و پارامترهای مختلف بر رفتار دینامیکی سازه‌ها، نقش مهمی ایفا می‌کند.



شکل ۹: تحلیل مودال سازه



شکل ۱۰: تغییرات قطر داخلی سازه پشتیبان آنتن

۳-۱- تابع هدف بهینه‌سازی سازه

تابع هدف در بهینه‌سازی سازه به منظور ارزیابی کیفیت و کارایی یک راه حل (پارامترها) تعریف می‌شود. اهداف اصلی بهینه‌سازی شامل کاهش جرم سازه، افزایش سفتی و قرارگیری فرکانس طبیعی در محدوده مورد نظر هستند. به طور کلی، تابع هدف بهینه‌سازی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F(x) = \partial_M \frac{M(x)}{M_{ref}} + \partial_K \frac{1}{K(x)/K_{ref}} + \partial_F \left(\frac{W_{tar} - W(x)}{W_{tar}} \right)^2 \quad (17)$$

که در آن $M(x)$ ، $K(x)$ ، $W(x)$ به ترتیب نرم ماتریس جرم، نرم ماتریس سفتی و فرکانس طبیعی اول سازه تنسگریتی و ∂_M ، ∂_K و ∂_F به ترتیب ضرایب تصحیح جرم، سفتی و فرکانس سازه و M_{ref} ، K_{ref} و W_{tar} به ترتیب جرم، سفتی و فرکانس طبیعی اول مطلوب برای تابع بهینه‌سازی هستند.

۵- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

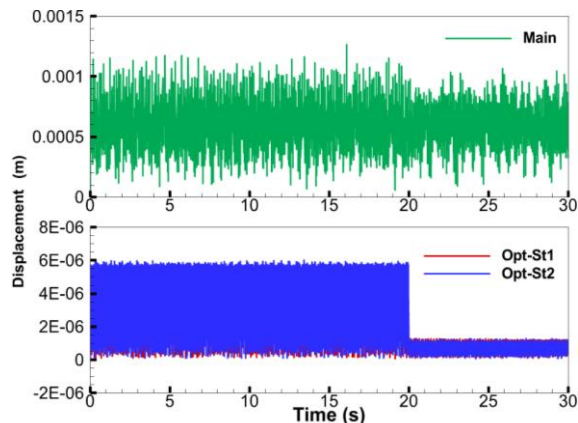
برای شبیه‌سازی‌ها، سازه‌های پشتیبان آنتن‌های تنسگریتی با پیکربندی یک حلقه‌ای شش گوشه، قطر $1/5$ متر و ارتفاع $0/2$ متر در نظر گرفته شده‌اند. پارامتر بهینه‌سازی، شعاع حلقه داخلی سازه است که موقعیت آن در شکل ۸ نشان داده شده است. هدف از بهینه‌سازی، کاهش جرم، افزایش سفتی و بهبود فرکانس سازه طبیعی سازه است. جدول ۲ پارامترهای تابع هدف بهینه‌سازی را نشان می‌دهد.

جدول ۲: ضرایب تصحیح و مقادیر بهینه تابع هدف

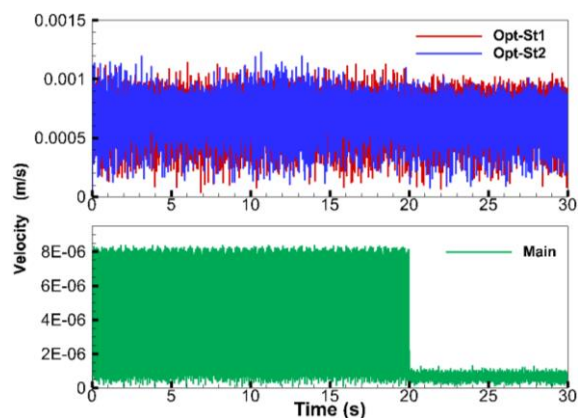
ضرایب تصحیح	مقادیر بهینه
∂_M	M_{ref}
∂_K	K_{ref}
∂_F	W_{tar}

در شکل ۸ شعاع حلقه داخلی و بازه تغییرات سازه به واسطه آن نشان داده شده است. تغییرات نقطه میانی به نحوی است که شیب منحنی فوقانی سازه که تکیه‌گاه آنتن است، ثابت بماند.

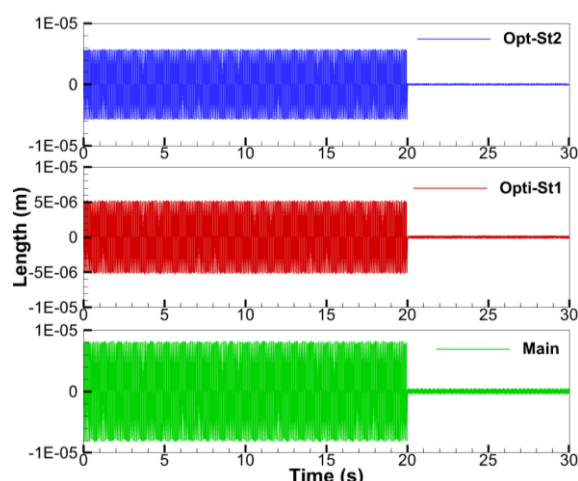
همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، در بخش بالایی نمودار، نتایج مربوط به سازه اولیه و در بخش پایینی، نتایج سازه بهینه شده ارائه شده است. در سازه بهینه شده، حداکثر جابه‌جایی گره فوقانی ۵/۸ میکرومتر تا ثانیه ۲۰ ادامه دارد. پس از پایان بارگذاری، به دلیل افزایش سفتی سازه، دامنه جابه‌جایی کاهش یافته و مقدار آن به ۰.۵ میکرومتر می‌رسد. این نتایج نشان می‌دهد که فرایند بهینه‌سازی موجب افزایش سفتی و پایداری دینامیکی سازه شده است.



شکل ۱۱: جابه‌جایی گره شماره ۲



شکل ۱۲: سرعت گره شماره ۲



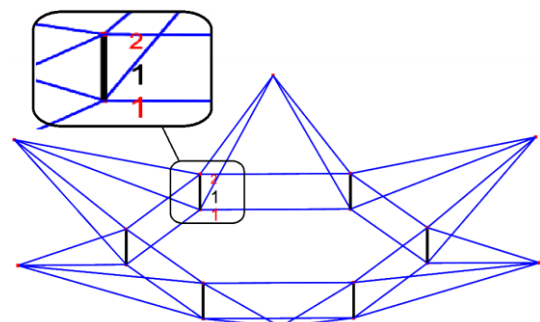
شکل ۱۳: طول میله شماره ۱

همان‌طور که مشاهده می‌شود سطح فرکانس طبیعی سازه‌های بهینه نسبت به سازه اولیه بیشتر بوده و این در تمامی مودها قابل مشاهده است. فرایند بهینه‌سازی منجر به تغییرات فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای ارتعاشی سازه‌ها شده که به‌وضوح در مقایسه نتایج تحلیل مودال قبل و بعد از بهینه‌سازی قابل مشاهده است. این تغییرات نشان‌دهنده توانمندی روش‌های بهینه‌سازی ترکیبی در بهبود ویژگی‌های دینامیکی و عملکرد سازه‌های پیچیده است.

جدول ۴: فرکانس و شکل مود اول طبیعی

سازه اصلی (Hz)	سازه بهینه اولیه (Hz)	سازه بهینه ترکیبی (Hz)	سه شکل مود اول (به ترتیب از بالا به پایین)
۸۰/۱۳	۱۱۱/۰۴	۱۰۳/۷۳	
۱۶۷/۹۸	۱۷۷/۳۳	۱۸۴/۶۳	
۱۸۶/۵۷	۲۳۱/۴۸	۲۳۱/۹۰	

در جدول ۴ شکل مودها و فرکانس‌های طبیعی اول سازه‌های اصلی و بهینه نشان داده شده است. به‌منظور بررسی و تحلیل ارتعاشات سازه پشتیبان آنتن تنسگریتی با هندسه بهینه، گره‌های سطح پایین سازه به‌صورت گیره‌دار در نظر گرفته شده‌اند. بار خارجی به مدت ۲۰ ثانیه با شدت $F=100 \sin(2t)$ بر روی گره‌های آزاد میانی و در راستای محور مثبت Z اعمال شده است. این روش به تحلیل دقیق‌تر رفتار دینامیکی سازه و ارزیابی تأثیر بارگذاری‌های دینامیکی بر ارتعاشات و پایداری سازه کمک می‌کند. باتوجه به تقارن سازه و بارگذاری، نتایج مربوط به میله شماره ۱ و گره شماره ۲ ارائه شده است (شکل ۱۰).



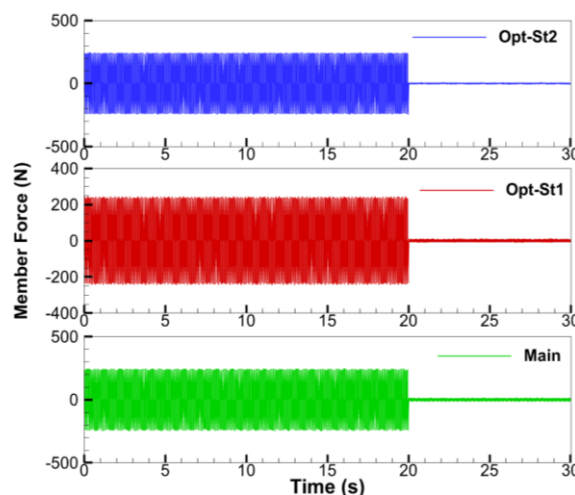
شکل ۱۰: موقعیت مکانی میله شماره ۱ و گره شماره ۲

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش یک تحلیل جامع و دقیق از سازه‌های تنسگریتی برای پشتیبانی آنتن‌های صفحه‌ای ارائه شد و به طور مؤثر کارایی فن‌های بهینه‌سازی هیبریدی را در بهبود عملکرد این سازه‌ها نشان داد. معادلات دینامیکی دستگاه با روش لاگرانژ استخراج و فرمیابی سازه با رویکرد چگالی نیرو انجام شد. بهینه‌سازی هندسی با تغییر قطر حلقه میانی و استفاده از روش بهینه‌سازی هیبریدی ترکیبی از الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی غیرخطی مقید، منجر به کاهش جرم، افزایش سفتی و فرکانس‌های طبیعی دستگاه شد. نتایج این تحقیق حاکی از آن است که به‌کارگیری روش بهینه‌سازی هیبرید پیشنهادی، به طور قابل توجهی بهبود در طراحی سازه‌های تنسگریتی فراهم آورده و در مقایسه با روش‌های کلاسیک، علاوه بر کاهش نیروهای داخلی اعضا، عملکرد کلی سازه از نظر پاسخ‌های دینامیکی نیز به طور چشمگیری بهبود یافته است. این رویکرد امکان تحلیل پارامترهای مؤثر در رفتار دینامیکی سازه‌ها مانند میزان ارتعاشات، تغییرات نیروهای داخلی و بهینه‌سازی انرژی موردنیاز را فراهم می‌آورد و راهکارهای نوینی برای طراحی بهینه در سازه‌های پیچیده به‌ویژه در کاربردهای حساس، ارائه می‌دهد. این الگوریتم قادر است با بهره‌گیری از معیارهای مشخصه‌های رفتار دینامیکی سازه به‌عنوان پارامترهای تابع هدف، ارتعاشات و میزان نیروهای داخلی در سازه را کاهش داده و به‌این‌ترتیب به ارتقای عملکرد کلی سازه کمک کند.

۷- مراجع

- [1] Guacheta-Alba, J.C., Valencia-Castaneda, A.J., Dutra, M.S., Aviles, O.F. and Mauleudoux, M. "New Approaches and Recent Applications of Tensegrity Structures", Journal of Engineering Science & Technology Review, Vol. 16, No. 5, 2023.
- [2] Gómez-Jauregui, V., Carrillo-Rodríguez, Á., Manchado, C. and Lastra-González, P. "Tensegrity Applications to Architecture, Engineering and Robotics: A Review", Applied Sciences, Vol. 13, No. 15, pp. 8669, 2023.
- [3] Hrazmi, I., Averseng, J., Quirant, J. and Jamin, F. "Deployable double layer tensegrity grid platforms for sea accessibility", Engineering Structures, Vol. 231, No., pp. 111706, 2021.
- [4] Shah, D.S., Booth, J.W., Baines, R.L., Wang, K., Vespignani, M., Bekris, K., and Kramer-Bottiglio, R. "Tensegrity robotics", Soft robotics, Vol. 9, No. 4, pp. 639-656, 2022.
- [5] Lee, H., Jang, Y., Choe, J.K., Lee, S., Song, H., Lee, J.P., Lone, N., and Kim, J. "3D-printed programmable tensegrity for soft robotics", Science Robotics, Vol. 5, No. 45, pp. eaay9024, 2020.
- [6] Yin, X., Gao, Z.-Y., Zhang, S., Zhang, L.-Y. and Xu, G.-K. "Truncated regular octahedral tensegrity-based mechanical metamaterial with tunable and



شکل ۱۴: نیروی داخلی میله شماره ۱

کاهش دامنه ارتعاشات و نرخ سریع‌تر استهلاک جابه‌جایی پس از اتمام بارگذاری بیانگر بهبود عملکرد دینامیکی سازه است. این بهینه‌سازی می‌تواند در کاربردهایی که کاهش ارتعاشات و پایداری بیشتر سازه اهمیت دارد، به‌ویژه در سازه‌های حساس مانند آنتن‌های فضایی، تأثیر قابل توجهی داشته باشد. در شکل ۱۲ تغییرات سرعت گره نمایش داده شده است.

در بخش پایینی، نتایج مربوط به سازه اولیه و در بخش فوقانی، نتایج سازه بهینه‌شده در دو مرحله ارائه شده است. در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب تغییرات طول و نیروی داخلی میله شماره ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، به دلیل افزایش سفتی سازه، میزان تغییرات طول میله‌ها بسیار محدود است.

در سازه اولیه، حداکثر تغییرات طول طی ۲۰ ثانیه نخست به مقدار ۸ میکرومتر می‌رسد و پس از حذف بار خارجی، این مقدار به ۱/۵ میکرومتر کاهش می‌یابد. در مقابل، در سازه بهینه شده، تغییرات طول به میزان قابل توجهی کاهش یافته و در محدوده ۵ میکرومتر است. این نتایج نشان‌دهنده تأثیر بهینه‌سازی در افزایش سختی و کاهش تغییر شکل‌های غیرضروری در سازه است که به بهبود عملکرد مکانیکی آن منجر می‌شود.

در شکل ۱۴، تغییرات نیروی محوری در میله شماره ۱ نمایش داده شده است. در سازه اصلی، نیروی داخلی در طول بازه بارگذاری به مقدار ۲۶۵ نیوتن می‌رسد و پس از آن تا ۵۰ نیوتن کاهش می‌یابد. در سازه‌های بهینه شده، نیروی داخلی در ۲۰ ثانیه اول به ۲۲۰ نیوتن می‌رسد و پس از باربرداری در محدوده ۲۵ نیوتن نوسان می‌کند. این کاهش در نیروی داخلی اعضای سازه‌های بهینه علاوه بر کاهش ارتعاشات، نشان‌دهنده بهبود کارایی و کاهش تنش‌های اضافی در سازه است. این تغییرات به طور مستقیم به افزایش پایداری و بهره‌وری سازه در برابر بارگذاری‌های دینامیکی کمک می‌کند.

- Optimization and Selection: A Review", IEEE Access, Vol., No., 2023.
- [21] Sabouni, A., Noghianian, S., Abrishamian, M. and Zahedi, M. Optimization of microstrip patch antenna using Genetic Algorithm method. in 11th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics [ANTEM 2005]. 2005. IEEE.
- [22] Wyant, A. "Genetic algorithm optimization applied to planar and wire antennas", No., 2007.
- [23] Silva, C.R. and Martins, S.R. "An adaptive evolutionary algorithm for uwb microstrip antennas optimization using a machine learning technique", Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 55, No. 8, pp. 1864-1868, 2013.
- [24] Sheriff, M. "Design and Optimization of Microstrip Antenna for 5G Wireless Applications using Genetic Algorithm", Journal of Engineering Research and Reports, Vol. 26, No. 9, pp. 323-337, 2024.
- [25] Bichara, R.M., Asadallah, F.A., Awad, M. and Costantine, J. "Quantum genetic algorithm for the design of miniaturized and reconfigurable IoT antennas", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 71, No. 5, pp. 3894-3904, 2023.
- [26] [26].Soltankarimi, F., Nourinia, J. and Ghobadi, C. Side lobe level optimization in phased array antennas using genetic algorithm. in Eighth IEEE International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications-Programme and Book of Abstracts (IEEE Cat. No. 04TH8738). 2004. IEEE.
- [27] Tseng, L.-Y. and Han, T.-Y. "An evolutionary design method using genetic local search algorithm to obtain broad/dual-band characteristics for circular polarization slot antennas", IEEE transactions on antennas and propagation, Vol. 58, No. 5, pp. 1449-1456, 2010.
- [28] Binelo, M.O., de Almeida, A.L. and Cavalcanti, F.R.P., A genetic algorithm for the optimization of MIMO antenna arrays, in Resource allocation and MIMO for 4G and beyond. 2013, Springer. p. 313-357.
- [29] Poian, M., Poles, S., Bernasconi, F., Leroux, E., Steffé, W., and Zolesi, M. Multi-objective optimization for antenna design. in 2008 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems. 2008. IEEE.
- [30] Azimi, M. and Moradi, S. "Form-Finding and Free Vibration Analysis of a Class-One Triplex Tensegrity Prism", Space Science and Technology, Vol. 16, No. 3, pp. 15-26, 2023.
- [31] Jahan, M. and Azimi, M. "Nonlinear Dynamic Modeling and Form-finding of Class1 Three-Bar Tensegrity in Random Structures: Genetic Algorithm Approach", Aerospace Mechanics, Vol. 20, No. 3, pp. 87-107, 2024.
- [32] Tibert, A. and Pellegrino, S. "Review of form-finding methods for tensegrity structures", International Journal of Space Structures, Vol. 18, No. 4, pp. 209-223, 2003.
- programmable Poisson's ratio", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 167, No., pp. 105285, 2020.
- [7] Sun, J., Song, G., Chu, J. and Ren, L. "An adaptive bioinspired foot mechanism based on tensegrity structures", Soft Robotics, Vol. 6, No. 6, pp. 778-789, 2019.
- [8] Wen, L., Pan, F. and Ding, X. "Tensegrity metamaterials for soft robotics", Science Robotics, Vol. 5, No. 45, pp. eabd9158, 2020.
- [9] Kahla, N.B., Ouni, M.H.E., Ali, N.B.H. and Khan, R.A. "Nonlinear dynamic response and stability analysis of a tensegrity bridge to selected cable rupture", Latin American Journal of Solids and Structures, Vol. 17, No., pp. e253, 2020.
- [10] Tibert, A. and Pellegrino, S. "Review of form-finding methods for tensegrity structures", International Journal of Space Structures, Vol. 26, No. 3, pp. 241-255, 2011.
- [11] Zhang, L.-Y., Zhu, S.-X., Li, S.-X. and Xu, G.-K. "Analytical form-finding of tensegrities using determinant of force-density matrix", Composite Structures, Vol. 189, No., pp. 87-98, 2018.
- [12] Navabi, M. and Ghanbari, H. "Attitude Control of Spacecraft Using L1 Adaptive Control in the Presence of Actuator and Disturbances", Journal of Space Science and Technology, Vol. 13, No. 2, pp. 79-86, 2020.
- [13] Freeland, R. "Survey of deployable antenna concepts", No., 1983.
- [14] Rogers, C., Stutzman, W., Campbell, T. and Hedgepeth, J. "Technology assessment and development of large deployable antennas", Journal of Aerospace Engineering, Vol. 6, No. 1, pp. 34-54, 1993.
- [15] Stutzman, W.L. and Thiele, G.A., Antenna theory and design. 2012: John Wiley & Sons.
- [16] Roederer, A.G. "Historical overview of the development of space antennas", Space Antenna Handbook, Vol., No., pp. 250-313, 2012.
- [17] Krishnan, S. and Li, B. Design of lightweight deployable antennas using the tensegrity principle. in 16th Biennial International Conference on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments. 2018. American Society of Civil Engineers Reston, VA.
- [18] Ganga, P.L., Micheletti, A., Podio-Guidugli, P., Scolamiero, L., Tibert, G., and Zolesi, V. "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, Vol., No., pp. 269-304, 2016.
- [19] Balsa-Canto, E., Peifer, M., Banga, J.R., Timmer, J. and Fleck, C. "Hybrid optimization method with general switching strategy for parameter estimation", BMC systems biology, Vol. 2, No., pp. 1-9, 2008.
- [20] Sarker, N., Podder, P., Mondal, M.R.H., Shafin, S.S. and Kamruzzaman, J. "Applications of Machine Learning and Deep Learning in Antenna Design,

- [36] Azimi, M. and Jahan, M. "Vibration Analysis and Genetic Algorithm-based Form Finding of Prismatic Tensegrity Structures Surrounded by a Sphere", *Journal of Vibration and Sound*, Vol. 13, No. 25, pp. 65-81, 2024.
- [37] Haupt, R.L. "An introduction to genetic algorithms for electromagnetics", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 37, No. 2, pp. 7-15, 1995.
- [33] Linkwitz, K. and Schek, H.-J. "Einige bemerkungen zur berechnung von vorgespannten seilnetzkonstruktionen", *Ingenieur-archiv*, Vol. 40, No., pp. 145-158, 1971.
- [34] Schek, H.-J. "The force density method for form finding and computation of general networks", *Computer methods in applied mechanics and engineering*, Vol. 3, No. 1, pp. 115-134, 1974.
- [35] Linkwitz, K. "Formfinding by the "direct approach" and pertinent strategies for the conceptual design of prestressed and hanging structures", *International Journal of Space Structures*, Vol. 14, No. 2, pp. 73-87, 1999.