

شناسایی رفتار عملکرد انواع فنرهای نواری و مارپیچ و بشقابی در شرایط فضایی

استادیار، پژوهشگاه فضایی ایران، پژوهشکده رانشگرهای فضایی، تبریز، ایران، m.shameli@isrc.ac.ir
 دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، mobinrahmani7447@gmail.com
 استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، keighobadi@tabrizu.ac.ir
 دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، h_mohammadian96@ms.tabrizu.ac.ir

محرم شاملی*
مبین رحمانی
جعفر کیقبادی
هادی محمدیان خلفانصار

چکیده

موضوع فنرهای مارپیچ، که قطعات حیاتی و پرکاربرد در صنایع مختلف هستند، به خصوص در صنایع فضایی به مراتب اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. از فنرهای مارپیچ به منظور ذخیره‌سازی انرژی در کاربردهای گوناگون، به‌ویژه در مکانیزم‌های جداکننده فضاییما، استفاده می‌شود. اما یکی از چالش‌های مهم در طراحی این قطعات، کاهش جرم آن‌هاست. به‌ویژه در کاربردهای فضایی که هر گرم بار زیادی دارد. در این مقاله، به بررسی بهینه‌سازی جرم فنرهای مارپیچ مورد استفاده در مکانیزم‌های جداکننده فضاییما پرداخته می‌شود. ابتدا، مسئله بهینه‌سازی جرم فنرهای مارپیچ با استفاده از روابط ریاضی معمول و الگوریتم ژنتیک حل می‌شوند. سپس، با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، یک مدل جدید برای فنرها طراحی شده و بهینه‌سازی با این مدل جدید انجام خواهد شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که استفاده از مدل پیشنهادی شبکه‌های عصبی مصنوعی، مزایای قابل توجهی نسبت به روش ابتدایی دارد. این بهینه‌سازی با استفاده از مدل پیشنهادی، باعث افزایش دقت طراحی فنرهای مارپیچ می‌شود و نتایج به صورت عددی و رقمی نشان می‌دهد خروجی در شبکه‌ی عصبی مربوط به تنش برشی ۵۴۵/۸۸ است که ۰/۸۳٪ با روش المان محدود اختلاف دارد و همچنین خروجی در شبکه‌ی عصبی مربوط به تغییر شکل ۷۶/۴۱ است که ۰/۵۸٪ با روش المان محدود اختلاف دارد که نشان می‌دهد مدل پیشنهادی به صورت قابل ملاحظه‌ای عملکرد بهتری نسبت به روش‌های قبلی دارد.

واژه‌های کلیدی: فنر مارپیچ، انرژی پتانسیل فنرها، بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک، شبکه‌های عصبی مصنوعی، پرسپترون.

Analysis of behavior of helical, disk and tape spring types in space conditions

M. Shameli	Iran Space Research Institute, Tabriz, Iran.
M. Rahmani	Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
J. Keighobadi	Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
H. Mohammadian KhalafAnsar	Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Abstract

The subject of helical springs, which are vital and widely used components in various industries, particularly gains significantly more importance in the aerospace industry. Helical springs are utilized for energy storage purposes in various applications, notably in spacecraft separator mechanisms. However, one of the major challenges in designing these components is reducing their mass, especially in space applications where every gram carries substantial significance. This paper delves into optimizing the mass of helical springs used in spacecraft separator mechanisms. Initially, we solve the mass optimization problem of helical springs using conventional mathematical equations and the genetic algorithm. Subsequently, we design a new model for the springs using artificial neural networks and conduct optimization using this new model. The obtained results demonstrate that using the proposed artificial neural network model offers considerable advantages over the initial method. This optimization using the proposed model enhances the accuracy of helical spring designs. Numerical results indicate that the output in the neural network related to shear stress is 88.545, differing by 0.83% from the finite element method, and the output related to deformation in the neural network is 41.76, differing by 0.58% from the finite element method. These findings underscore the significantly improved performance of the proposed model compared to previous methods.

Keywords: Helical spring, Potential Energy Of Springs, Optimization, Genetic Algorithm, Artificial Neural Networks, Perceptron.

بدلیل محدودیت در قدرت و حجم پرتابگرهای فضاییما، مسئله‌ی بهینه کردن تجهیزات برای استفاده حداکثری از ظرفیت پرتابگرها اهمیت دوچندان دارد. به همین دلیل قطعات فضایی با ضریب اطمینان نزدیک به یک ساخته می‌شوند و همین امر مستلزم تحلیل‌های دقیق و روش‌های کارآمدتر در زمینه‌ی طراحی و ساخت این قطعات است.

۱- مقدمه و تاریخچه تحقیقات

طراحی فضاییما الزاماتی را شامل می‌شود که متفاوت و سخت‌گیرانه‌تر از طراحی وسایل در سطح زمین است. نکته‌ای که در حیطه‌ی ساخت تجهیزات فضایی بسیار اهمیت دارد، مسئله‌ی بهینه‌سازی قطعات از لحاظ جرم و فضای اشغال شده توسط آن‌هاست.

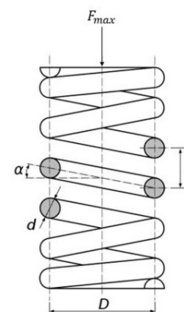
* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: m.shameli@isrc.ac.ir

تاریخ دریافت: ۲۰/۹/۱۴

تاریخ پذیرش: ۲۰/۱۲/۲۱

از جمله قطعات به کار رفته در پرتاب‌گرهای فضاپیما، فنر مارپیچ است. از این قطعه معمولاً به منظور ذخیره‌ی انرژی و آزادسازی آن استفاده می‌کنند. در نتیجه معمولاً در مواردی که نیاز به جذب کردن شوک‌های مکانیکی و یا ایجاد نیرویی مشخص بین دو صفحه احساس می‌شود، از این نوع فنرها استفاده می‌کنند. این فنرها جزئی اصلی از دستگاه جداکننده‌ی ماهواره از ماهواره‌بر هستند و انرژی پتانسیل ذخیره شده در فنر مارپیچ است که انرژی جنبشی مورد نیاز ماهواره را برای جدا شدن تامین می‌کند. هدف این مقاله طراحی مجموعه فنرهای مارپیچ است به گونه‌ای که انرژی مورد نیاز فرآیند جدایش را تامین کند، الزامات هندسی را برآورده سازد، شرایط کاری را تحمل کند و در عین حال کمترین جرم ممکن را داشته باشد.

از آنجایی که یکی از فاکتورهای مهم در طراحی قطعات فضایی جرم آن‌هاست، کاهش هر چه بیشتر جرم فنرهای مارپیچ توجه محققان را بسیار به خود جلب کرده است. البته باید در نظر داشت که همزمان با این کاهش جرم، فنر باید بتواند الزامات طراحی از جمله حداکثر تنش و انرژی پتانسیل ذخیره شده و... را برقرار کند. شمای کلی یک فنر مارپیچ در شکل ۱ آورده شده است. پارامترهای معرفی شده در آن به ترتیب d قطر سیم فنر، D قطر میانگین مارپیچ، p گام فنر، α زاویه‌ی گام و F_{max} بیشترین نیروی وارد شده به فنر (متناظر با بیشترین فشردگی فنر) است. همچنین n را بعنوان تعداد دور فعال فنر تعریف می‌کنیم.



شکل ۱- طرحواره فنر مارپیچ و پارامترهای هندسی آن که در طراحی اهمیت دارند

اولین تحقیقات منتشر شده راجع به فنر مارپیچ فشاری به بیش از ۳۰۰ سال پیش برمی‌گردد. هنگامی که رابرت هوک در ۱۶۷۸ قانون خود را در مورد فنرها منتشر کرد:

$$F = k\lambda \quad (1)$$

این معادله نیروی فنر و تغییر شکل آن λ را به شکل ساده‌ای به هم مرتبط می‌کند. ضریب k را سفتی^۱ می‌گویند. علاوه بر آن زمانی که شکل فنر ساده باشد و تحت بارگذاری استاتیکی قرار گیرد، از دقت خوبی برخوردار است. وال یک ضریب تصحیح برای تنش ارائه نمود که تأثیرات برش مستقیم و انحنای سیم فنر را در نظر می‌گرفت [۱]. در مطالعه‌ی الاستیسیته‌ی تیر خمیده تیموشنکو مقاومت برشی اصلاح شد

و با استفاده از ضریب تصحیح وال، تأثیرات انحنای و برش مستقیم در آن لحاظ گردید [۲]. وال در ۱۹۶۳ یکی از مهم‌ترین کتاب‌ها در رابطه با فنرها را منتشر کرد که حاصل کارهای او از دهه‌ی ۳۰ تا ۵۰ قرن بیستم بود [۳].

۱-۱- الگوریتم‌های فرا-ابتکاری و کاربردهای آن‌ها

الگوریتم‌های ابتکاری روش‌هایی هستند که به منظور مواجهه با مسائل بهینه‌سازی پیچیده و کاهش زمان حل آن‌ها توسعه داده شده‌اند [۴]. عملکرد روش‌های ابتکاری اساساً وابسته به توانایی جستجو^۲ و استخراج^۳ جواب‌های باکیفیت در فضای طراحی است. آن دسته از روش‌های ابتکاری که مؤلفه‌های جستجو و استخراج را به صورت هوشمند با هم ترکیب می‌کنند، روش‌های فرا-ابتکاری نامیده می‌شوند. پاکوتا و همکاران از یک الگوریتم ژنتیک تک هدفه برای حل مسئله‌ی غیر خطی کمینه‌سازی جرم فنر مارپیچ استفاده کردند. مدل به کار رفته از فنر شامل رابطه‌ی تنش بیشینه به همراه قیود هندسی طراحی بوده که در آن جرم فنر تابع هدف مسئله بوده است. در این مسئله الگوریتم ژنتیک توانسته بود که با رعایت قیود تعریف شده، حل بهینه‌ای ارائه دهد [۵]. هوانگ و همکاران مسئله‌ی بهینه‌سازی فنر مارپیچ را با روشی که از ترکیب الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید ابداع کرده بودند، حل کردند. در روش پیشنهادی آنان از مزیت‌های هر دو روش برای یافتن جواب بهینه‌ی مسئله بهره برده شده است [۶]. همچنین زبیدی و همکاران روشی نوین برای طراحی بهینه‌ی فنرهای مارپیچ کامپوزیتی که از الیاف تقویت‌شده‌ی فیبری ساخته شده بودند، ابداع کردند. در آن مقاله الگوریتم تکاملی چند هدفه برای بهینه‌سازی دو هدف متضاد (کمینه کردن جرم و بیشینه کردن سفتی) پیاده‌سازی شده است [۷].

۲-۱- کاربرد آنالیز اجزای محدود در طراحی فنر

آنالیز اجزای محدود (FEA)^۴ یک تکنیک شبیه‌سازی رایانه‌ای و یکی از رویکردهای استاندارد برای صحت‌سنجی طراحی است. تکنیک و همکاران یک روش اجزای محدود برای تحلیل دینامیکی فنر مارپیچ ارائه دادند. آن‌ها پس از تشکیل ماتریس‌های سفتی و جرم فنر، به حل معادلات دینامیکی فنر پرداختند و با استفاده از آن فرکانس‌های طبیعی و پاسخ دینامیکی فنر را به دست آوردند [۸]. روش‌های عددی برای بهینه‌سازی متغیرهای طراحی در فنر مارپیچ کامپوزیتی بررسی شده‌اند و از آنالیز اجزای محدود برای شناسایی بهتر ماده‌ی کامپوزیتی استفاده شده است [۹]. پاوار و همکاران تحلیل استاتیکی فنر مارپیچی به کار رفته در سیستم تعلیق سه چرخه را ارائه داده‌اند. آن‌ها به این وسیله رابطه‌ی نیرو-تغییر شکل فنر طراحی شده با ماده‌ی IS 4454 را به صورت دقیق‌تری ارزیابی کرده‌اند [۱۰]. ابزارهای محاسباتی جدید این امکان را فراهم آورده‌اند که شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای، جایگزین آزمایشات تجربی شوند. با این حال به دلیل طولانی مدت بودن تحلیل

² Exploration

³ Exploitation

⁴ Finite Element Analysis

¹ Stiffness

۲-۲- قید تنش برشی

هنگامی که یک فنر مارپیچ توسط نیروی محوری F بارگذاری می‌شود تنش برشی در سیم فنر ایجاد می‌شود. با استفاده از اصل برهم‌نهی، تنش برشی در سطح مقطع داخلی فنر با استفاده از رابطه‌ی (۵) محاسبه می‌شود:

$$\tau = \frac{8FD_2}{\pi d^3} + \frac{4F}{\pi d^2} \quad (۵)$$

با تعریف شاخص فنر $C = \frac{D_2}{d}$ به‌عنوان معیار انحنا سیم‌پیچ، معادله‌ی (۵) را می‌توان به‌صورت معادله‌ی (۶) بازنویسی کرد:

$$\tau = \frac{8FD_2(1 + \frac{0.5}{C})}{\pi d^3} \quad (۶)$$

با تعریف $K_s = 1 + \frac{0.5}{C}$ ، خواهیم داشت:

$$\tau = K_s \frac{8FD_2}{\pi d^3} \quad (۷)$$

که K_s فاکتور ضریب برشی نامیده می‌شود. برای اکثر فنرها، C بین ۶ تا ۱۲ متغیر است. معادله‌ی (۷) کلی بوده و برای بارهای استاتیکی و دینامیکی اعمال می‌شود. لذا معادله تنش را می‌توان به‌عنوان معادله‌ی (۸) ارائه کرد:

$$\tau = K \frac{8FD_2}{\pi d^3} \quad (۸)$$

که K ضریب تصحیح وال^۲ نامیده می‌شود. این فاکتور شامل برش مستقیم، همراه با اثر دیگری به دلیل خمیدگی سیم فنر است. خمیدگی سیم باعث افزایش تنش در داخل سطح مقطع فنر می‌شود اما در قسمت بیرونی تنش را اندکی کاهش می‌دهد. مقدار K از معادله‌ی (۹) به‌دست می‌آید:

$$K = \frac{4C - 1}{4C - 4} + \frac{0.615}{C} \quad (۹)$$

لذا حداکثر تنش برشی (τ_{max}) نباید بیشتر از تنش برشی مجاز $[\tau]$ باشد. یعنی

$$\tau_{max} = \frac{8KF_{max}D_2}{\pi d^3} \leq [\tau] \quad (۱۰)$$

که F_{max} حداکثر بار محوری است. قید تنش برشی را می‌توان به‌صورت معادله‌ی (۱۱) بیان نمود:

$$g_1(\vec{x}) = -[\tau] + \frac{8Kx_6x_3}{\pi x_1^3} \leq 0 \quad (۱۱)$$

تنش برشی مجاز به ماده‌ی ساخت فنر بستگی دارد. تنوع مواد برای ساخت فنر بسیار بالا است. از فولادهای آلیاژی یا ضد خوردگی گرفته تا آلیاژهای غیر آهنی.

۳-۲- قید انرژی پتانسیل فنرها

معادله‌ی (۱۲) برای محاسبه‌ی انرژی مورد نیاز در هنگام جدا شدن ماهواره از فاز نهایی ماهواره، هنگامی که سرعت انفصال مشخص است، به کار می‌رود:

$$E = \frac{(mM)v^2}{2(m+M)} \quad (۱۲)$$

که در آن m جرم ماهواره، M جرم ماهواره‌بر در فاز نهایی و v سرعت انفصال است. تامین این انرژی بر عهده‌ی مجموعه‌ی فنرها است. بنابراین در اینجا با یک قید تساوی روبرو هستیم و فنرها باید این مقدار

آزمایشات در رایانه، تلفیق مستقیم این تحلیل‌ها با مراحل دیگر فرآیند مورد بررسی، مقدور نیست. به همین دلیل محققان به استفاده از مدل‌های ساده‌تر که تقریبی از پدیده‌ی مورد نظر هستند و مدل جایگزین^۱ نامیده می‌شود، روی آوردند. یکی از کاربردهای این روش، بهینه‌سازی بر پایه‌ی مدل جایگزین است [۱۱ و ۱۲]. یکی از روش‌های بدست آوردن مدل جایگزین استفاده از شبکه‌ی عصبی است. ونگ و همکاران از مدل جایگزین بر پایه‌ی شبکه‌ی عصبی برای این منظور استفاده کردند. هدف آن‌ها محاسبه‌ی مقدار تنش بیشینه در شرایط مختلف کاری بود. نتایج نشان داد که مدل پیشنهاد شده توانایی پیش‌بینی نتایج آنالیز اجزای محدود را با دقت ۹۸٫۷۹٪ دارا بود [۱۳].

با توجه به توضیحات ارائه شده، در مقاله حاضر به تحلیل فنر مارپیچ با استفاده از FEA پرداخته شده است و پس از حل مسئله‌ی بهینه‌سازی و مشخص شدن متغیرهای طراحی، تحلیل فنر در محیط نرم‌افزار ABAQUS انجام می‌گیرد. همچنین داده‌های به‌دست‌آمده از این روش مبنای ساخت مدلی دقیق از فنر مارپیچ قرار گرفته‌اند. در این مقاله از روش شبکه‌های عصبی برای تقریب رفتار فنر مارپیچ در بازه‌ی طراحی بهره برده می‌شود و داده‌های به‌دست‌آمده از تحلیل اجزای محدود را برای این منظور استفاده خواهند شد. در پایان به مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده از این روش با نتایج حاصل از معادلات کلاسیک فنر مارپیچ پرداخته می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مدلسازی ریاضی فنر مارپیچ

هندسه‌ی فنر مارپیچ را می‌توان با تعداد مشخصی از پارامترها توضیح داد. با استفاده از این پارامترها نیز می‌توان ویژگی‌های دیگر فنر را به صورت ریاضی بیان نمود. لازم به یادآوری است که هدف طراحی مجموعه‌ای از فنرها می‌باشد، به صورتی که در مکانیزم جداکننده‌ی ماهواره استفاده شوند. جرم فنر مارپیچ را می‌توان به عنوان تابع هزینه در طراحی فنر در نظر گرفت. بدین وسیله هم جرم کلی مکانیزم جداکننده کاهش می‌یابد و هم با طراحی فنرهای کوچکتر، هزینه‌ی ساخت کمتر می‌شود. جرم فنرها را می‌توان از معادله‌ی (۲) ارائه شده در زیر به دست آورد [۱۴]:

$$W = (n+2)\pi D_2 \left(\frac{\pi d^2 \rho}{4}\right) = 0.25\rho\pi^2 d^2 D_2 (n+2) N_s \quad (۲)$$

که W جرم مجموعه‌ی فنرها، n تعداد سیم‌پیچ‌های فعال، D_2 قطر متوسط فنر، d قطر سیم، ρ چگالی ماده سیم فنر و N_s تعداد فنرهای مارپیچ است. لذا جرم فنرها به وسیله‌ی پارامترهای d ، N_s و D_2 n تعیین می‌شود. هم‌چنین زاویه‌ی گام فنر α نیز بر روی مشخصات دیگر فنر تاثیرگذار است. علاوه بر آن بیشترین نیروی اعمال شده به هر یک از فنرها F_{max} نیز به‌صورت مجهول در نظر گرفته می‌شود. در نهایت متغیرهای طراحی را می‌توان به‌صورت معادله‌ی (۳) بیان نمود.

$$\vec{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)^T = (d, N_s, D_2, n, \alpha, F_{max})^T \quad (۳)$$

در نتیجه تابع هزینه را می‌توان به‌صورت معادله‌ی (۴) بیان کرد.

$$W(\vec{x}) = 0.25\rho\pi^2 x_1^2 x_3 (x_4 + 2)x_2 \quad (۴)$$

² Wahl

¹Surrogate model

انرژی را تامین کنند. از طرف دیگر انرژی پتانسیل ذخیره شده در فنرها برابر است با (۱۳):

$$E_s = \frac{1}{2} k \lambda^2 N_s = \frac{1}{2} F_{max} \lambda N_s \quad (13)$$

که در آن λ از معادله‌ی (۱۴) به دست می‌آید:

$$\lambda = \frac{8 F_{max} D_2^3 n}{d^4 G} \quad (14)$$

G مدول برشی سیم فنر است. در نهایت این قید به صورت یک قید تساوی نوشته می‌شود:

$$E_s = E \rightarrow h_1(\vec{x}) = \frac{8}{2G} \frac{x_6^2 x_3^3 x_4}{x_1^4} x_2 - E = 0 \quad (15)$$

۴-۲- قید طول فنر در حالت فشرده

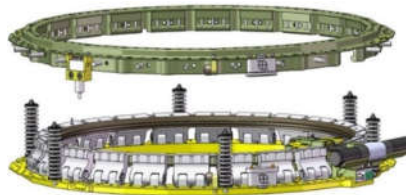
بدنه‌ی اصلی سیستم جداکننده‌ی ماهواره از دو قسمت حلقوی تشکیل شده است که یکی به ماهواره‌بر و دیگری به ماهواره متصل است. این دو قسمت به وسیله‌ی فنرها روی همدیگر سوار می‌شوند. فنرها باید به حدی فشرده گردند که این دو قسمت با یکدیگر تماس یابند (شکل ۲). با توجه به توضیحات بالا، طول فنر در حالت فشرده L_c باید برابر با یک مقدار ثابت باشد. این مقدار برابر است با طولی که دو حلقه با هم تماس پیدا می‌کنند. طول مذکور را L_p می‌نامند. در حالت فشرده، طول فنر برابر است با:

$$L_c = L_0 - \lambda = (pn + 2d) - \lambda, \quad p = \pi D_2 \tan \alpha \quad (16)$$

در این معادله p گام فنر است. عبارت $2d$ در حالتی است که انتهای فنر از نوع بسته و سنگ زده شده باشد. بنابراین:

$$L_c = L_p \rightarrow h_2(\vec{x}) = (\pi x_3 \tan(x_5) x_4 + 2x_1) - \frac{8 x_6^2 x_3^3 x_4}{G x_1^4} - L_p = 0 \quad (17)$$

که در آن L_p را خواسته‌ی مسئله تعیین می‌کند.



شکل ۲- بدنه‌ی یک سیستم جداکننده‌ی ماهواره

۵-۲- قید عدم تماس بین سیم‌پیچ

هنگامی که فنر مارپیچ به طور کامل فشرده شود و سیم‌پیچ‌ها با هم تماس پیدا کنند، فنر دارای طول صلب L_s است. پس از رسیدن به این طول، فنر در عمل خاصیت خود را از دست می‌دهد و دیگر تغییر شکل و توانایی ذخیره‌ی انرژی مناسبی ندارد. لذا یکی از قیودی که انتظار می‌رود برآورده شود عدم تماس مابین سیم‌پیچ‌ها است. در فتری با انتهای بسته و سنگ زده شده $L_s = d(n + 2)$ می‌باشد. این قید در معادله‌ی (۱۸) آمده است:

$$L_0 - \lambda \geq L_s \rightarrow g_2(\vec{x}) = -(\pi x_3 \tan(x_5) x_4 + 2x_1) + \frac{8 x_6^2 x_3^3 x_4}{G x_1^4} + x_1(x_4 + 2) \leq 0 \quad (18)$$

¹Solid length

۶-۲- قید شاخص فنر

با هر چه بیشتر شدن شاخص، امکان در هم گره خوردن فنرها بیشتر می‌شود. به همین دلیل نیازمند این هستیم که جداگانه بسته‌بندی شوند که هزینه‌ها را بالاتر می‌برد. به همین دلیل توصیه می‌شود که شاخص فنر در محدوده‌ی ۴ تا ۱۲ قرار گیرد [۱۴].

$$4 \leq C \leq 12 \quad (19)$$

واضح است که شاخص فنر یک حد بالا و یک حد پایین دارد. هر کدام از این حدود یک قید را بر مسئله اعمال می‌کنند:

$$g_3(\vec{x}) = 4 - \frac{x_2}{x_1} \leq 0 \quad (20)$$

$$g_4(\vec{x}) = \frac{x_2}{x_1} - 12 \leq 0$$

۷-۲- تعریف مسئله‌ی بهینه‌سازی

با توجه به آنچه که گفته شد مسئله‌ی حاضر شامل کمینه کردن جرم مجموعه‌ی فنرها به عنوان تابع برزندگی با برقرار شدن قیود تعریف شده است. بنابراین مسئله به شکل زیر بیان می‌شود:

$$\begin{cases} \min_{\vec{x}} F(\vec{x}) = 0.25 \rho \pi^2 x_1^2 x_3 (x_4 + 2) x_2 \\ s.t. \quad g_i(\vec{x}) \leq 0, \quad i = 1, 2, 3, 4 \\ h_j(\vec{x}) \leq 0, \quad j = 1, 2 \\ \vec{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)^T = (d, N_s, D_2, n, \alpha, F_{max})^T \end{cases} \quad (21)$$

همچنین با توجه به الزامات طراحی، شش متغیر طراحی انتخاب شده باید از دامنه‌ی خاصی انتخاب شوند. به بیان دیگر فضای طراحی نیز محدود خواهد بود و الگوریتم نمی‌تواند مقادیر دلخواه را برگزیند. علاوه بر آن تعدادی از متغیرها پیوسته و تعدادی گسسته هستند. این داده‌ها در جدول ۱ گردآوری گردیده‌اند.

جدول ۱- دامنه و نوع متغیرها

متغیر	محدوده	واحد	نوع
d	۴-۱	میلی‌متر	گسسته
N_s	۲۴-۲	-	گسسته
D_2	۳۵-۲۵	میلی‌متر	پیوسته
n	۱۰۰-۴	-	پیوسته
α	< ۰/۶۲	رادیان	پیوسته
F_{max}	۵۰۰۰	نیوتن	پیوسته

با توجه به شرایط کاری فنرها در بیرون از جو زمین و گزینه‌های در دسترس که امکان سفارش‌دهی و ساخت را دارند، فولادهای ضد زنگ برای ساخت فنر انتخاب شده‌اند. فولادهای ضد زنگ آستنیتی انواع گوناگونی دارند که اختلاف‌های اندکی در ویژگی‌ها (مقاومت نهایی، مقاومت در برابر خوردگی و ...) دارند. از این بین نوع AISI 302 به صورت گسترده در صنعت و از جمله ساخت فنرهای مارپیچ به کار می‌رود. همانگونه که اشاره شد، سازندگان مواد سیم فنر، اطلاعات مربوط به مقاومت نهایی و ... را در اختیار مشتریان قرار می‌دهند. مقاومت کششی نهایی به عنوان متغیری از قطر سیم در زیر آمده است [۱۵]. همچنین تنش برشی مجاز نیز که در قید تنش برشی مورد نیاز بود، $0.35 S_{ut}$ پیشنهاد شده است.

چگونگی انتخاب والدین در الگوریتم ژنتیک توسط روشهای زیر است:

- ارزیابی تناسب: قبل از انتخاب والدین، باید تناسب هر فرد (راه حل) در جمعیت ارزیابی شود. در زمینه تحلیل رفتار فترها در شرایط فضایی، تناسب می‌تواند بر اساس معیارهایی مانند پایداری، مقاومت، کارایی یا سایر معیارهای عملکرد مرتبط باشد.
- روش‌های انتخاب:

- **انتخاب متناسب (انتخاب چرخ رولت)**: در انتخاب متناسب، افراد با ارزش‌های متناسب بالاتر احتمال بالاتری برای انتخاب به عنوان والدین دارند. این روش مفهوم انتخاب طبیعی را شبیه‌سازی می‌کند، جایی که افراد با تناسب بالاتر احتمال بالاتری برای انتقال ژن‌های خود به نسل بعدی دارند.

- **انتخاب دوره مسابقات**: انتخاب دوره مسابقات شامل انتخاب تصادفی یک زیرمجموعه از افراد جمعیت و سپس انتخاب بهترین فرد (بر اساس تناسب) از آن زیرمجموعه به عنوان والدین است. این فرآیند تا انتخاب تعداد کافی از والدین تکرار می‌شود.

- **انتخاب بر اساس رتبه**: انتخاب بر اساس رتبه، افراد را بر اساس امتیازهای متناسب خود رتبه‌بندی می‌کند و والدین را به طور احتمالی بر اساس ترتیب رتبه آن‌ها به جای تناسب مطلق خود انتخاب می‌کند.

- حفظ تنوع: اطمینان از تنوع بین والدین انتخاب شده برای حفظ تغییرات ژنتیکی در جمعیت بسیار حائز اهمیت است. این اقدام از همگرایی زود هنگام جلوگیری می‌کند و امکان کاوش فضای حل را فراهم می‌کند. روش‌هایی مانند نخبه‌گرایی (حفظ بهترین افراد از نسل یکی به نسل بعدی) و مکانیزم‌های حفظ تنوع می‌توانند در این زمینه کمک کنند.

- تبادل و جهش: هنگامی که والدین انتخاب شده‌اند، عملگرهای تبادل و جهش برای ایجاد فرزندان جدید اعمال می‌شوند. تبادل شامل مبادله مواد ژنتیکی بین والدین است، در حالی که جهش تغییرات تصادفی در کروموزوم‌های فرزندان را معرفی می‌کند تا فضای حل را بیشتر کاوش کند.

با انتخاب دقیق والدین بر اساس تناسب و استفاده از روش‌های انتخاب مناسب، می‌توان الگوریتم ژنتیک را به سمت رسیدن به حل‌های بهینه یا نزدیک به بهینه برای تحلیل رفتار انواع فترهای پیچیده، دیسکی و نواری در شرایط فضایی هدایت کرد.

۹-۲- کار با قیدها در الگوریتم ژنتیک

در روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک، کار با قیود را می‌توان به دو دسته تقسیم‌بندی کرد [۱۷]:

- روش‌های عمومی که در ساختار قیود (خطی یا غیرخطی) تغییری ایجاد نمی‌کنند.
- روش‌های خاص که تنها بر روی دسته‌ی خاصی از قیود قابل اعمال هستند. روش‌های عمومی مانند روش تابع برازندگی، روش ضریب لاگرانژ و روش جستجو-جوی مختلط بسیار مشهور هستند [۱۸]. از طرف دیگر روش‌های خاص مانند روش صفحه‌ی برش، روش کاهش گرادیان و روش تصویر گرادیان فقط بر روی دسته‌ی خاصی از مسائل قابل اعمالند. از آنجا که الگوریتم ژنتیک یک روش عمومی است، در بیشتر موارد به منظور برخورد با قید از روش تابع برازندگی استفاده می‌کنند. در روش تابع برازندگی ابتدا مسئله‌ی مقید به مسئله‌ی نامقید تبدیل می‌شود. قیود را می‌توان به

$$S_{ut} = \frac{1000d^{0.7055} + 267440}{2.0256d^{0.7055} + 0.76398}, \quad d < 12 \text{ mm} \quad (22)$$

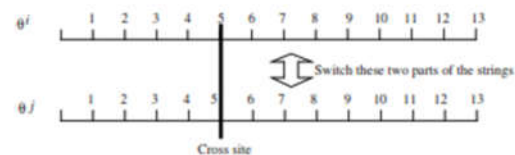
در هر بار تغییر قطر فتر، برای تعیین تنش برشی مجاز از معادله‌ی (۲۲) بهره برده خواهد شد.

۸-۲- بهینه‌سازی و الگوریتم ژنتیک

الگوریتم‌های ژنتیک، به خاطر قدرت و کاربرد بسیار در مسائل گوناگون، احتمالاً شناخته‌شده‌ترین روش در محاسبات تکاملی می‌باشند. بطور کلی الگوریتم ژنتیک از پنج جزء تشکیل شده است [۱۶]:

- یک بیان ژنتیکی از مسئله
- راهی برای ساخت جمعیت اولیه‌ای از جواب‌ها
- تابع ارزیابی که جواب‌ها را بر اساس برازندگیشان رتبه‌بندی کند
- اپراتورهای ژنتیکی که تولید نوزاد در فرآیند تولید مثل را بازنمایی کند
- مقادیر پارامترهای یک الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک در هر تکرار t ، جمعیتی از افراد $P(t)$ را نگهداری می‌کند. هر فرد یک جواب بالقوه برای مسئله را ارائه می‌کند. تمام افراد با معیاری از برازندگی ارزیابی می‌شوند. تعدادی از این افراد به وسیله‌ی اپراتورهای ژنتیکی دچار تغییرات احتمالاتی می‌شوند و از آن‌ها افراد جدیدی به وجود می‌آیند. این تغییرات دو نوع هستند: جهش، که افراد جدیدی را از تغییر در یک فرد ایجاد می‌کند. ترکیب، که افراد جدیدی را از ترکیب قسمت‌هایی از دو فرد موجود (والدین) به دست می‌آورد. افراد جدید، یا همان فرزندان که با $C(t)$ نمایش داده می‌شوند، را دوباره ارزیابی می‌کنند. جمعیت جدیدی با انتخاب افراد برانده‌تر از بین والدین و فرزندان تشکیل می‌شود. پس از تکرارهای بسیار الگوریتم به بهترین فرد (جواب) همگرا می‌شود که امیدوارانه همان جواب بهینه یا بهینه‌ی محلی مسئله می‌باشد. ساختار عمومی یک کروموزوم در الگوریتم ژنتیک در شکل ۳ آمده است.



شکل ۳- ساختار کروموزوم و ترکیب در الگوریتم ژنتیک

همانطور که گفته شد هدف یافتن جواب بهینه (کمینه) برای مسئله‌ی بهینه‌سازی بر حسب متغیرهای آن است. نمایش استاندارد برای هر جواب آرایه‌ای از متغیرهای مسئله است که به آن کروموزوم گفته می‌شود. اگر کروموزوم به تعداد N_{var} متغیر به نام‌های $x_1, x_2, \dots, x_{N_{var}}$ داشته باشد، بنابراین کروموزوم به صورت آرایه‌ای $1 \times N_{var}$ المانی نوشته می‌شود.

در یک الگوریتم ژنتیک که برای تحلیل رفتار انواع فترهای پیچیده، دیسکی و نواری در شرایط فضایی استفاده می‌شود، انتخاب والدین یک مرحله حیاتی است که بر تحول و کارایی الگوریتم تأثیر می‌گذارد.

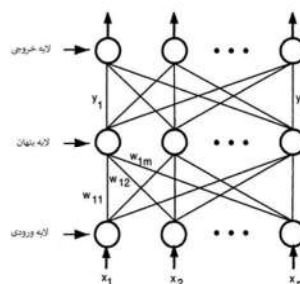
راحتی از روش تابع برازندگی به این تابع اضافه کرد. به این معنی که هرگونه تخلفی از قیود با یک ضریب (که اغلب عدد بزرگی است) به تابع برازندگی اضافه می‌شود و اینگونه تابع برازندگی جدیدی تعریف خواهد شد [۱۹]:

$$F = \begin{cases} f(\vec{x}) & \vec{x} \in \text{feasible region} \\ f(\vec{x}) + \text{penalty}(\vec{x}) & \vec{x} \notin \text{feasible region} \end{cases} \quad (23)$$

الگوریتم به گونه‌ای پیش خواهد رفت که تا حد امکان تخطی از قیود، و در نتیجه مقدار تابع برازندگی جدید، کاهش یابد و با این کار قیود برآورده می‌شوند.

۲-۱۰- شبکه‌های عصبی مصنوعی - پرسپترون چند لایه (MLP)

MLPها را شاید بتوان شناخته‌شده‌ترین شبکه‌های پیش‌خور دانست. شکل ۴ یک MLP با سه لایه را نمایش می‌دهد: لایه ورودی، لایه خروجی و یک لایه میانی یا به اصطلاح پنهان.



شکل ۴- یک پرسپترون چند لایه

نورون‌های لایه ورودی در واقع توزیع‌کننده‌هایی هستند که سیگنال‌های ورودی x_i را به نورون‌های لایه پنهان منتقل می‌کنند. هر نورون z در لایه پنهان سیگنال‌های ورودی x_i را بعد از اعمال وزن‌های ارتباطات مربوطه w_{ji} با هم جمع می‌بندد و خروجی z_j را به وسیله تابعی از این حاصل جمع محاسبه می‌کند:

$$y_j = f\left(\sum w_{ji}x_i\right) \quad (24)$$

تابع f می‌تواند هر یک از توابع فعال‌ساز باشد. خروجی لایه پنهان به شکل مشابه محاسبه می‌شود.

یکی از روش‌های پرکاربرد در زمینه آموزش این شبکه‌ها الگوریتم لونیبرگ-مارکوارت^۱ است که در مراجع [۲۰ و ۲۱] معرفی شده است. این الگوریتم که از روش نیوتن الگوبرداری شده است، به منظور کمینه کردن تابع‌هایی که خود مجذور توابع غیرخطی دیگری هستند، طراحی شده است. این مشخصه آن‌ها را برای آموزش شبکه‌های عصبی (که تابع کارایی، میانگین مجذور خطا است)، بسیار مناسب می‌کند [۲۲]. اولین بار کاربرد این روش در آموزش یک شبکه‌ی عصبی در [۲۳] پیشنهاد شده است. الگوریتم لونیبرگ-مارکوارت ترکیبی از الگوریتم گاوس-نیوتن و روش کاهش گرادیان می‌باشد. زمانی که جواب الگوریتم از جواب مسئله فاصله‌ی بسیاری دارد، این روش به مانند روش کاهش

^۱ Levenberg-Marquardt Algorithm

گرادیان عمل خواهد کرد که علی‌رغم سرعت پایین، همگرایی در آن تضمین شده است. زمانی که جواب‌ها به نقطه‌ی کمینه نزدیک می‌شوند، الگوریتم به مانند الگوریتم گاوس-نیوتن عمل خواهد کرد که سرعت رسیدن به جواب در آن بالاتر است. فرض کنید تابع $F(x)$ که هدف کمینه کردن آن است، خود مجموعی از توابع مجذور است:

$$F(x) = \sum_{i=1}^N v_i^2(x) = \vec{v}^T(x)\vec{v}(x) \quad (25)$$

که $\vec{v}(x)$ تابعی برداری با N مولفه می‌باشد. $J(x)$ ماتریس ژاکوبین تابع $\vec{v}(x)$ است که به شکل زیر محاسبه می‌گردد:

$$J(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial v_1(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial v_1(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial v_1(x)}{\partial x_n} \\ \frac{\partial v_2(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial v_2(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial v_2(x)}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial v_N(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial v_N(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial v_N(x)}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (26)$$

بر اساس روش لونیبرگ-مارکوارت مقدار بردار متغیرها \vec{x}_k در گام بعدی از رابطه‌ی (۲۷) به دست می‌آید.

$$\vec{x}_{k+1} = \vec{x}_k - [J^T(\vec{x}_k)J(\vec{x}_k) + \mu_k I]^{-1} J^T(\vec{x}_k)\vec{v}(\vec{x}_k) \quad (27)$$

μ_k همان عاملی است که باعث می‌شود این الگوریتم بتواند به دو روش اشاره شده‌ی دیگر تبدیل شود. در ابتدا μ_k را برابر عددی کوچک (برای مثال $\mu_k = 0.01$) در نظر می‌گیرند. اگر در گام‌های بعدی میزان تابع مورد نظر کاهش پیدا نکرد، μ_k در عددی (مانند $\rho > 1$) ضرب خواهد شد تا زمانی که مقدار تابع کاهش می‌یابد. اگر این عمل منجر به کاهش مقدار تابع شود، در گام بعدی μ_k را بر ضریب ρ تقسیم خواهند کرد. جدول ۲ پارامترهای این شبکه را نشان می‌دهند.

۳- نتایج و بحث

تئوری‌های مسئله که در دو بخش قبل گردآوری شده، در اینجا به کار گرفته شده‌اند تا مسئله‌ی بهینه‌سازی فنر مارپیچ حل گردد. ابتدا در نرم‌افزار MATLAB با استفاده از روابط کلاسیک، فرآیند بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک انجام گرفته و نتایج آن آورده شده است.

جدول ۲- پارامترهای تعیین شبکه عصبی

تعداد ورودی	۵
تعداد خروجی	۱
ابعاد وزنه‌های لایه اول	۱۹*۵
ابعاد وزن‌های لایه آخر	۱*۱۹
تابع فعال‌ساز لایه اول	relu
تابع فعال‌ساز لایه آخر	tanh
تابع هزینه	Levenberg-Marquardt Algorithm

در ادامه به شبیه‌سازی فنر در نرم‌افزار تحلیل اجزای محدود ABAQUS پرداخته شده است. در نرم‌افزار MATLAB الگوریتم ژنتیک موجود است و از آن می‌توان جهت حل طیف وسیعی از مسائل بهینه‌سازی استفاده کرد؛ اما یکی از نقاط ضعف تابع موجود در MATLAB این است که قابلیت کار با داده‌های گسسته را ندارد و حداکثر می‌تواند با اعداد صحیح محاسبات را انجام دهد. همچنین معمولاً اعمال تغییرات در پارامترهای توابع پیش‌ساخته‌ی MATLAB کار دشوار و گاه

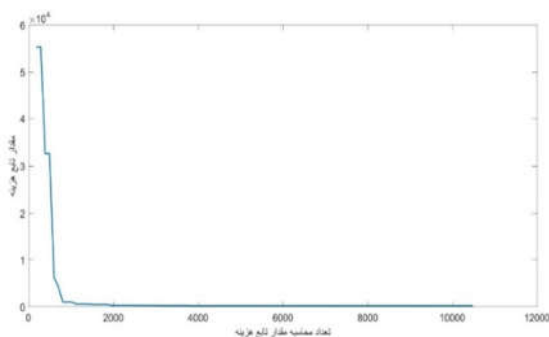
جدول ۴- پارامترهای الگوریتم ژنتیک پیاده‌سازی شده

مقدار	توضیحات	پارامتر
۱۰۰	این پارامتر شرط پایان حلقه‌ی الگوریتم است.	حداکثر تعداد تکرار
۸۰	تعداد جمعیت انتخاب شده که هر کدام متشکل از مقدار متغیرها هستند.	اندازه‌ی جمعیت
۰/۸	تعداد اعضای جمعیت که در فرآیند ترکیب و ساخت جمعیت فرزندان شرکت می‌کنند.	ضریب ترکیب
۰/۵	تعداد اعضای جمعیت که در فرآیند جهش شرکت می‌کنند.	ضریب جهش
۰/۰۵	عضوی که برای جهش انتخاب شده، از متغیرهای طراحی تشکیل گردیده است. این پارامتر تعداد متغیرهایی را که در فرآیند جهش تغییر می‌کنند، تعیین می‌کند.	نرخ جهش

ابتدا به منظور مقایسه‌ی عملکرد جواب خروجی از الگوریتم بهینه‌سازی با فنرهای به کار رفته در سیستم‌های جدایش فضاپیما، یکی از نمونه‌های موجود، محصول شرکت Planetary Systems به نام Mark II Lightband Motorized انتخاب می‌شود. در برگه داده این محصول [۲۴] محاسبات مربوط به تعداد فنرها در حالتی که سرعت جدایش $v = 0.356 \frac{m}{s}$ است، صورت گرفته است. در این رابطه $m = 200 \text{ kg}$ و $M = 3000 \text{ kg}$ جایگذاری شده است. در نتیجه:

$$E = \frac{(200 \times 3000)(0.356)^2}{2(200 + 3000)} = 11.9 \text{ j} \quad (30)$$

سازندگان برای تامین این میزان از انرژی توسط فنرهای مکانیزم، ۱۴ عدد فنر که هر کدام جرمی معادل با $14/5$ گرم دارند، پیشنهاد داده‌اند. در حالت اول همین مقدار انرژی در الگوریتم بهینه‌سازی جایگذاری می‌شود. نمودار مربوط به مقدار تابع برازندگی بر حسب تعداد محاسبه‌ی مقدار تابع برازندگی در شکل ۵ آمده است. تعداد محاسبه‌ی مقدار تابع (number of function evaluation)، تعداد ارزیابی مقدار تابع در یک حلقه، ضرب در تعداد تکرار حلقه می‌باشد؛ بنابراین متناظر با تعداد تکرار حلقه است. بدین دلیل مشخصه‌ای از هزینه‌ی محاسباتی الگوریتم به دست می‌دهد.



شکل ۵- نحوه‌ی تغییر تابع برازندگی در حالت استفاده از روابط

$$E = 11.9 \text{ j کلاسیک}$$

پاسخ مسئله‌ی بهینه‌سازی نیز در جدول ۵ آمده است. در این حالت الگوریتم توانسته است که تمام قیود مسئله را برقرار نماید.

غیرممکنی است. این ملاحظات باعث شد که الگوریتم ژنتیک از صفر پیاده‌سازی شود. مراحل انجام برنامه به قرار زیر می‌باشد:

تعریف مسئله: تابع برازندگی، قیود و دامنه‌ی متغیرها به الگوریتم معرفی می‌شوند. روابط ریاضی مربوط به هزینه و قیود که در بخش قبل معرفی شدند در معادله‌ی (۲۸) به صورت یکپارچه نوشته شده‌اند.

$$W(\bar{x}) = 0.25 \rho \pi^2 x_1^2 x_3 (x_4 + 2) x_5,$$

$$g_1(\bar{x}) = -[\tau] + \frac{8Kx_6x_3}{\pi x_1^3} \leq 0,$$

$$g_2(\bar{x}) = -(\pi x_3 \tan(x_3) x_4 + 2x_1) + \frac{8}{G} \frac{x_6 x_3^3 x_4}{x_1^4} + x_7 (x_4 + 2) \leq 0,$$

$$g_3(\bar{x}) = 4 - \frac{x_2}{x_1} \leq 0, \quad (28)$$

$$g_4(\bar{x}) = \frac{x_2}{x_1} - 12 \leq 0,$$

$$h_1(\bar{x}) = \frac{8}{2G} \frac{x_6^2 x_3^2 x_4}{x_1^4} x_2 - E = 0,$$

$$h_2(\bar{x}) = (\pi x_3 \tan(x_3) x_4 + 2x_1) - \frac{8}{G} \frac{x_6 x_3^3 x_4}{x_1^4} - L_p = 0$$

لازم است که روابط بالا را با استفاده از روش تابع جریمه به صورت یک تابع برازندگی جدید درآورد. بنابراین:

$$F(\bar{x}) = W(\bar{x}) + 10^5 \times \left(\sum_{i=1}^4 g_i(\bar{x}) + \sum_{j=1}^2 h_j(\bar{x}) \right) \times \text{sign}(W(\bar{x})) \quad (29)$$

همچنین دامنه‌ی متغیرهای طراحی را در جدول ۳ مشخص کرده‌ایم. این جدول بیانگر فضای جست‌وجو برای الگوریتم ژنتیک است. در قیود مسئله تعدادی ثابت $L_p = 74 \text{ mm}$ و E وجود دارند که خواسته‌های طراحی را تعیین می‌کنند. ثابت دوم که بیانگر انرژی ذخیره شده در فنر است به سرعت جدایش بستگی دارد. مسئله‌ی بهینه‌سازی برای چند حالت که هر یک انرژی ذخیره شده‌ی متفاوتی دارند، حل می‌شود.

جدول ۳- دامنه‌ی متغیرها

متغیر	دامنه
$x_1 = d$	{1, 1/1, 1/2, 1/4, 1/5, 1/6, 1/8, 2, 2/2, 2/5, 2/8, 3, 3/2, 3/5, 3/8, 4}
$x_2 = N_s$	{2, 3, 4, ..., 24}
$x_3 = D_2$	[25, 35]
$x_4 = n$	[4, 100]
$x_5 = \alpha$	[0/35, 26]
$x_6 = F_{max}$	[0, 500]

تنظیم پارامترها: این پارامترها و مقادیرشان در جدول ۴ مشخص شده‌اند. اغلب این مقادیر را با توجه به هر مسئله و فرآیند سعی و خطا تنظیم می‌کنند.

جدول ۵- پاسخ مسئلهی بهینه‌سازی در حالت استفاده از روابط

کلاسیک و $E = 11.9 j$

مقدار بردار متغیرها	[۲/۸, ۲, ۲۶/۶۱۶, ۱۴/۸۴۲۶, ۰/۱۱۸۹, ۱۵۰/۳۴۰۱, ۲/۳۱۴, ۲۴]
جرم مجموعه‌ی فنرها (جرم هر فنر)	۱۳۷/۲۹۱۷ (۶۸/۶۴۵۸) g
درصد کاهش جرم نسبت به محصول تجاری	۳۰/۶۶

همانگونه که در جدول ۵ مشخص شده است، مجموعه فنر پیشنهاد شده توسط الگوریتم، کاهش جرم قابل توجهی نسبت به نمونه‌های تجاری داشته است. به منظور بررسی بیشتر عملکرد فنر، مسئله برای حالت‌هایی که سرعت جدایش $v = 1 \frac{m}{s}$ و $v = 2 \frac{m}{s}$ است نیز حل می‌شود. این حالت‌ها بترتیب معادل با $E = 93.75 j$ و $E = 375 j$ هستند. جداول ۶ و ۷ پاسخ‌های این دو حالت را نمایش می‌دهند. در حالت دوم نیز الگوریتم تمام قیود مسئله را برقرار نمود. اما در حالت سوم به دلیل مقدار بسیار زیاد انرژی که برای ایجاد سرعت $v = 2 \frac{m}{s}$ مورد نیاز است، الگوریتم در دامنه‌ی تعریف شده برای متغیرها توانایی یافتن فتری که تمام قیود را برقرار نماید، نداشت. در این حالت شاهد تخطی از قید مربوط به تنش برشی به اندازه‌ی ۸/۲٪ مقدار مجاز بودیم. در نتیجه در حالت دوم مسئله جواب ندارد.

جدول ۶- پاسخ مسئلهی بهینه‌سازی در حالت استفاده از روابط

کلاسیک و $E = 93.75 j$

مقدار بردار متغیرها	[۲/۵, ۱۵, ۲۹/۱۷۷۹, ۱۶/۱۱۰۲, ۰/۱۲۹۸, ۱۰۳/۷۱۵۲]
جرم مجموعه‌ی فنرها (جرم هر فنر)	۹۶۷/۵۷۴۲ (۶۴/۵۰۴۹) g

جدول ۷- پاسخ مسئلهی بهینه‌سازی در حالت استفاده از روابط

کلاسیک و $E = 375 j$

مقدار بردار متغیرها	[۳/۲, ۲۴, ۲۳/۸۴۶۲, ۲۰/۱۸۹۹, ۰/۱۰۷۹, ۱۸۹/۵۱۶۹]
جرم مجموعه‌ی فنرها (جرم هر فنر)	۳۶۰۵/۱ (۱۵۰/۲۱۲۵) g

به منظور مقایسه و صحت‌سنجی جواب‌های به‌دست‌آمده از الگوریتم ژنتیک، فرآیند بهینه‌سازی با تابع بهینه‌سازی $fmincon()$ در MATLAB نیز انجام می‌شود. جدول ۸ نتایج بهینه‌سازی از این روش را نمایش می‌دهند.

جدول ۸- نتیجهی بهینه‌سازی با روش تحلیلی و حالت $E = 11.9 j$

مقدار بردار متغیرها	[۲/۰۸۳, ۲, ۲۵, ۳۳/۵۲, ۰/۰۹۸, ۶۰/۶۳۲]
جرم مجموعه‌ی فنرها (جرم هر فنر)	۱۵۰/۵۵۸۸ (۷۵/۲۷۹۴) g

جواب به‌دست‌آمده از روش تحلیلی نزدیک به جواب الگوریتم ژنتیک است. با این تفاوت که الگوریتم ژنتیک مجموعه فتری با جرم کمتر یافته است. بنابراین به درستی جواب‌های الگوریتم ژنتیک و عملکرد بهتر این روش بی‌می‌بریم. مشابه با فرضیات مربوط به روابط ریاضی، انتهای فنر از نوع تخت و سنگ زده شده می‌باشد. برای

جلوگیری از وقوع پدیده‌ی کماتش در فنر، استوانه‌ای در داخل آن قرار گرفته است. این استوانه از نوع rigid می‌باشد و بنابراین تغییرشکلی در آن اتفاق نمی‌افتد و تنها از کماتش جلوگیری می‌کند. در منوی Step تنظیمات روی حلگر Dynamic Implicit قرار داده شده است. به دلیل وجود تغییرشکل‌های بزرگ نیز گزینه‌ی Nlgeom فعال شده است. دو نقطه‌ی مرجع به نام‌های RP-Spring-Top و RP-Spring-Base تعریف شده‌اند. شرایط مرزی و نیرو در این نقاط اعمال خواهند شد. این کار سبب می‌شود که نرم‌افزار تحلیل‌های بهتری انجام دهد و اعمال این مشخصات نیز در برنامه‌نویسی راحت‌تر گردند. شرایط مرزی در نقطه‌ی RP-Spring-Base از نوع ENCASTRE است. در نقطه‌ی RP-Spring-Top فقط در دو جهت x و z بر روی قطعه قید اعمال شده است. حرکت در جهت y و دوران‌ها آزاد گذاشته شده‌اند. نیروی اعمالی به فنر که همان متغیر F_{max} است، در جهت -y اعمال شده است. جدول ۹ به مقایسه‌ی مقادیر حاصل از روابط ریاضی با تحلیل اجزای محدود پرداخته است.

جدول ۹- مقادیر تنش برشی و تغییر شکل فنرهای جداول ۵، ۶ و ۷ در

روابط کلاسیک و تحلیل ABAQUS

مقدار تغییر شکل با جایگذاری در رابطه‌ی ۱۴ (درصد اختلاف با FEA)	مقدار تغییر شکل در تحلیل ABAQUS **	مقدار تنش برشی با جایگذاری در رابطه‌ی ۸ (درصد اختلاف با FEA)	مقدار تنش برشی در تحلیل ABAQUS * S
۷۵/۹۷	٪(۱۲)۷۹/۸۶	٪(۱۶)۵۲۵/۱۳	۵۴۱/۴۱
۱۲۳/۷۳	٪(۱۲)۱۲۴/۳۵	٪(۱۹)۵۵۳/۸۴	۶۰۹/۸۴
۱۶۴/۸۸	٪(۰)۱۶۴/۸۹	٪(۲)۵۶۶/۵۰	۶۳۷/۹۲

* واحد تنش MPa هستند.

** مقادیر تغییر شکل بر حسب میلی‌متر هستند.

به منظور تولید نمونه‌ها، که از فضای طراحی انتخاب می‌شوند، از نرم‌افزار MATLAB بهره برده شده است. روش LHS به‌صورت تابع در نرم‌افزار MATLAB تعبیه شده است و با استفاده از آن، نمونه‌های طراحی (۳۰۰ نمونه) تولید شدند. سپس این نمونه‌ها در برنامه‌ی مربوط به نرم‌افزار ABAQUS وارد گردیده و رایانه تحلیل اجزای محدود را بترتیب روی تک‌تک این نمونه‌ها انجام داد. در پایان تحلیل‌ها، داده‌های مربوط به بیشینه‌ی تنش برشی و بیشینه‌ی تغییر شکل مربوط به هر یک از نمونه‌ها به‌دست‌آمدند. ورودی‌های شبکه عبارتند از $d, D_2, n, \alpha, F_{max}$. هدف تقریب مقدار تنش برشی و تغییر شکل فنر توسط شبکه‌ی عصبی است. برای هر یک از این خروجی‌ها، به‌طور جداگانه یک شبکه‌ی عصبی تشکیل می‌شود که یک شبکه‌ی پنج ورودی/یک خروجی می‌باشد. در حالتی که خروجی تغییر شکل است، لایه‌ی پنهان فقط از یک لایه با ۱۹ نورون ساخته شده است. در حالتی که خروجی تنش برشی است نیز، لایه‌ی پنهان از دو لایه بترتیب با ۱۵

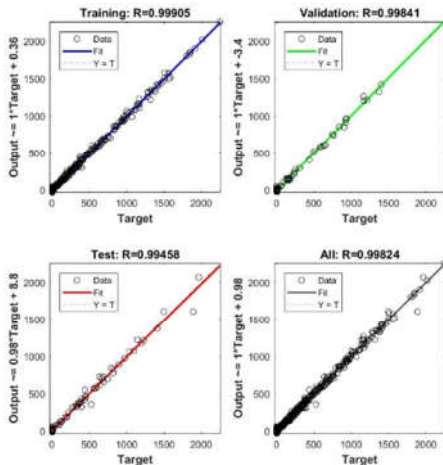
جدول ۱۰- مقادیر تنش برشی و تغییر شکل فنرهای جداول ۵، ۶ و ۷

در خروجی دو شبکه‌ی عصبی و تحلیل ABAQUS

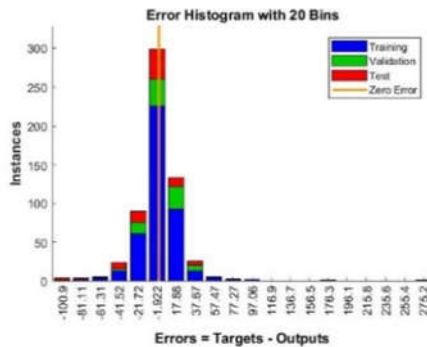
مقدار تنش برشی در تحلیل ABAQUS * US	مقدار تنش برشی در شبکه‌ی عصبی مربوط به تنش برشی (درصد اختلاف با FEA)	مقدار تغییر شکل در تحلیل ABAQUS *	مقدار تغییر شکل در شبکه‌ی عصبی مربوط به تغییر شکل (درصد اختلاف با FEA)
حالت اول	۵۴۱/۴۱	(۰/۱۸۳)۵۴۵/۸۸	۷۵/۹۷
حالت دوم	۶۰۹/۸۴	(۱/۵۵)۶۰۰/۳۵	۱۲۳/۷۳
حالت سوم	۶۳۷/۹۲	(۱/۵۲)۶۴۷/۶۳	۱۶۴/۸۸

* واحد تنش MPa هستند.

** مقادیر تغییر شکل بر حسب میلی‌متر هستند.



شکل ۸- نمودارهای مقایسه‌ی تنش برشی نمونه‌ها با خروجی شبکه‌ی عصبی. R رگرسیون می‌باشد.

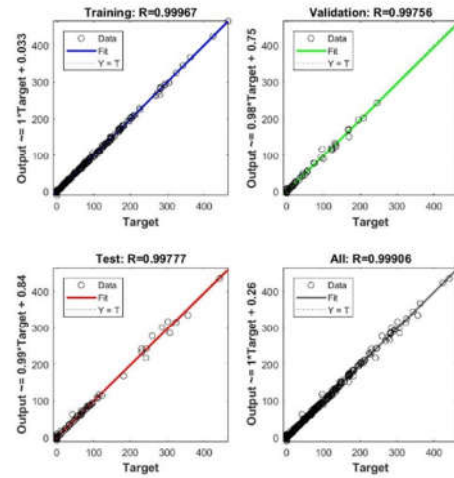


شکل ۹- نمودار هیستوگرام خطا در شبکه‌ی عصبی مربوط به خروجی تنش برشی

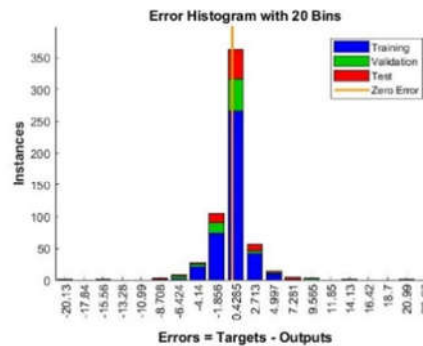
۴- خلاصه و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر مسئله‌ی طراحی بهینه‌ی فنرهای مارپیچ که در سامانه‌های جداکننده‌ی فضاپیما به کار می‌روند، مورد بررسی قرار

و ۶ نورون شکل گرفته است. شکل‌های ۶ تا ۹ عملکرد دو شبکه‌ی عصبی تربیت شده جهت تقریب رفتار ورودی/خروجی فنر را به نمایش می‌گذارند.



شکل ۶- نمودارهای مقایسه‌ی تغییر شکل نمونه‌ها با خروجی شبکه‌ی عصبی. R رگرسیون می‌باشد.



شکل ۷- نمودار هیستوگرام خطا در شبکه‌ی عصبی مربوط به خروجی تغییر شکل

همانطور که در شکل‌های ۶ و ۸ مشاهده می‌شود، شبکه‌های عصبی طراحی شده توانایی بالایی در تقریب رفتار مدل اصلی دارند و انطباق مناسبی بین تنش برشی و تغییر شکل نمونه‌ها با خروجی شبکه‌های عصبی وجود دارد. نمودارهای هیستوگرام شکل‌های ۷ و ۹ نیز بیانگر این هستند که خطای دو شبکه‌ی عصبی با انحراف معیار پایینی در همسایگی نقطه‌ی صفر قرار دارد. مشاهده می‌شود که شبکه‌های عصبی طراحی شده توانایی تقریب رفتار نمونه‌های تحلیل شده در نرم‌افزار ABAQUS را دارند؛ ولی آیا در مورد فنرهایی با متغیرهای طراحی دیگر نیز این دقت را دارا می‌باشند؟ به منظور پاسخگویی به این سوال، فنرهای بررسی شده در جدول ۸ این بار با مدل جایگزین طراحی شده از روش شبکه‌های عصبی مقایسه می‌شود. این مقایسه در جدول ۱۰ انجام داده شده است.

گرفت. ابتدا از روابط رایج فنر ماریچ در جهت بیان ریاضی مسئلهی بهینه‌سازی بهره برده شد. این بیان ریاضی با الگوریتم ژنتیکی که در نرم‌افزار MATLAB پیاده‌سازی گردید، تلفیق داده شد. الگوریتم توانست که جوابی بهینه برای مسئله بیاید و نسبت به نمونه‌ی تجاری کاهش جرم مشهود بود. با تحلیل فنرها در نرم‌افزار ABAQUS و انجام تحلیل اجزای محدود بر روی آن‌ها این حقیقت که مقادیر تغییر شکل و تنش برشی به‌دست‌آمده از روابط ریاضی، با نتایج حاصل از FEA خطای قابل توجهی دارند، تصدیق گردید. به منظور کاهش خطا در محاسبات، با استفاده از شبکه‌های عصبی پرسپترون چندلایه، مدل جایگزینی برای پیش‌بینی رفتار فنرهای ماریچ طراحی شد. دو شبکه‌ی عصبی جدا از هم برای تقریب مقدار تنش برشی و تغییر شکل ارائه شده‌اند. مسئله این بار با توجه به توابع منتج‌شده از این شبکه‌های عصبی بیان گردید و با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی انجام داده شد. با این رویه خطاهای مربوط به محاسبه‌ی تغییر شکل و تنش برشی به طور ملموسی کاهش داده شد که بدین وسیله دقت طراحی افزایش یافت. به علاوه نتیجه بر آن شد که شبکه‌ی عصبی پرسپترون چند لایه قابلیت بالایی در استفاده به عنوان مدل جایگزین دارد و می‌تواند رفتار فنر ماریچ را با دقت بالایی مدل کند. همچنین تلفیق الگوریتم ژنتیک و مدل جایگزین بر اساس شبکه‌ی عصبی نیز انجام پذیرفت و توانایی این روش در طراحی بهینه‌ی فنر ماریچ اثبات گردید.

۵- مراجع

- [11] Williams BA, S. Cremaschi. Surrogate Model Selection for Design Space Approximation And Surrogate-based Optimization. Computer-aided chemical engineering. 2019 Jan 1;353-8.
- [12] H. Mohammadian KhalafAnsara, J. Keighobadi. Deep Reinforcement Learning with Immersion- and Invariance-based State Observer Control of Wave Energy Converters. International journal of engineering Transactions C: Aspects. 2024 Jan 1;37(6):1085-97.
- [13] Wang T, Shao M, Guo R, Tao F, Zhang G, Hichem Snoussi, et al. Surrogate Model via Artificial Intelligence Method for Accelerating Screening Materials and Performance Prediction. Advanced Functional Materials. 2020 Dec 1;31(8).
- [14] Budynas RG, J Keith Nisbett, Joseph Edward Shigley. Shigley's mechanical engineering design. 11th ed. New York, Ny: McGraw-Hill Education; 2020.
- [15] Standards U, AISI Type 302 Stainless Steel Properties E. AISI Type 302 Stainless Steel Properties, SS302 Composition, Magnetic, Density, Hardness, Equivalent [Internet]. 2022. Available from: Theworldmaterial.com.
- [16] Friedman JH. Multivariate adaptive regression splines. The annals of statistics. 1991 Mar;19(1):1-67.
- [17] Deb K. An efficient constraint handling method for genetic algorithms. Computer methods in applied mechanics and engineering. 2000 Jun 9;186(2-4):311-38.
- [18] Reklaitis GV, Ravindran A, Ragsdell KM. Engineering optimization: Methods and applications. New York: Wiley; 1983 Aug.
- [19] Yeniay Ö. Penalty Function Methods for Constrained Optimization with Genetic Algorithms. Mathematical and Computational Applications. 2005 Apr 1;10(1):45-56.
- [۲۰] رفعت نیا ص، فرجی ج، کیقبادی ج. طراحی و اجرای مدل بدیع خطای حسگرهای اینرسی در فیلتر کالمن توسعه‌یافته بر اساس الگوریتم ژنتیک. مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۱۳۹۹، د. ۵۰، ش. ۳، ص. ۹۷-۱۰۶.
- [21] Marquardt DW. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics. 1963 Jun;11(2):431-41.
- [22] Jafar Keighobadi, Hadi Mohammadian KhalafAnsara, Peiman Naseradinmousavi. Adaptive neural dynamic surface control for uniform energy exploitation of floating wind turbine. Applied Energy. 2022 Jun 1;316:119132-2.
- [23] Hadi Mohammadian KhalafAnsara, Jafar Keighobadi. Adaptive Inverse Deep Reinforcement Lyapunov learning control for a floating wind turbine. Scientia Iranica. 2023 Jun 28;0(0).
- [24] 2000785F MkII MLB User Manual, Planetary System Corporation, 2019 Nov.
- [1] Wahl AM. Helical Compression and Tension Springs. Journal of Applied Mechanics. 1935 Mar 1;2(1):A35-7.
- [2] Timoshenko S. Theory of elasticity. Auckland; London: McGraw-Hill; 1970.
- [3] Arthur Munzenmaier Wahl. Mechanical Springs. New York McGraw-Hill; 1963.
- [4] Rahul MS, Rameshkumar K. Multi-objective optimization and numerical modelling of helical coil spring for automotive application. Materials Today: Proceedings. 2020 Nov; 46:4847-4853.
- [5] Yokota T, Taguchi T, Gen M. A solution method for optimal weight design problem of helical spring using genetic algorithms. Computers & Industrial Engineering. 1997 Oct;33(1-2):71-6.
- [6] Hwang SF, He RS. Improving real-parameter genetic algorithm with simulated annealing for engineering problems. Advances in Engineering Software. 2006 Jun;37(6):406-18.
- [7] Zebdi O, Boukhili R, Trochu F. Optimum Design of a Composite Helical Spring by Multi-criteria Optimization. Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2008 Jul 11;28(14):1713-32.
- [8] Taktak M, Dammak F, Abid S, Haddar M. A finite element for dynamic analysis of a cylindrical isotropic helical spring. Journal of Mechanics of Materials and Structures. 2008 Jun 1;3(4):641-58.
- [9] Choi BL, Choi BH. Numerical method for optimizing design variables of carbon-fiber-reinforced epoxy composite coil springs. Composites Part B: Engineering. 2015 Dec; 82:42-9.
- [10] Pawar HB, Desale DD. Optimization of Three Wheeler Front Suspension Coil Spring. Procedia Manufacturing. 2018;20:428-33.