



Available in:  
Journal.isrc.ac.ir

Journal of  
Space Science, Technology  
& Applications (Persian)

Vol. 2, No. 2, pp.: 158-170  
2022

DOI:

10.22034/jsssta.2023.374805.1101

### Article Info

Received: 2023-2-5  
Accepted: 2022-1-11

### Keywords

Space capsule shell,  
Sensitivity analysis, Response  
surface method, Two-  
objective optimization,  
Genetic algorithm.

### How to Cite this article

Hassan Naseh, Hadiseh ,  
Karimaei, Mohammad Lesani,  
“Two-Objective Structural  
Optimization of Space Capsule  
with Thin-Walled Cylindrical  
Approximation”  
*Journal of Space Science,  
Technology and Applications,*  
vol 2 (2), p.: 158-170, 2023.

## Two-Objective Structural Optimization of Space Capsule with Thin-Walled Cylindrical Approximation

Hassan Naseh<sup>1</sup>, Hadiseh Karimaei<sup>2\*</sup>, Mohammad Lesani<sup>3</sup>

1. Assistant Professor, Aerospace Research Institute, Tehran, Iran, , hnaseh@ari.ac.ir
- 2, \*. Assistant Professor, Aerospace Research Institute, Tehran, Iran, karimaei@ari.ac.ir,  
Corresponding author
3. Ph.D student, Aerospace Research Institute, Tehran, Iran, lesani\_mohammad@yahoo.com

### Abstract

In this paper, the structural optimization of a space capsule has been discussed by approximating a thin-walled cylindrical shell with a certain length under the axial compression force and constant lateral pressure. Design variables include the outer diameter and cylinder thickness. The purpose of optimization is to minimize the mass and maximize the frequency of the first vibration shape mode of the cylinder. The design constraints include the buckling load multiplier (buckling safety factor) above 1.5 and Von Mises stress below 100 MPa. In this article, first, according to the permissible limits of the design variables, a design of experiment (DOE) and then a sensitivity analysis was carried out to check the sensitivity of the objective functions and constraints to the design variables. After numerically solving the output values with the help of Ansys software and preparing the response surface, the optimal design point has been identified with the help of the two objectives optimization Genetic algorithm. Then, with the numerical simulation of the optimal point, the accuracy of the values obtained from the response surface method was checked and their accuracy was confirmed. The results show that at the selected design point, Von Mises stress becomes less than its allowed value, i.e. 100 MPa, and also the buckling load factor is more than twice its minimum allowed value. However, this point has the smallest distance from the origin and the optimum point has been chosen as the knee point.

## بهینه‌سازی دوهدفه سازه‌های کپسول فضایی با تقریب استوانه جدار نازک

حسن ناصح<sup>۱</sup>، حدیثه کریمایی<sup>۲\*</sup>، محمد لسانی<sup>۳</sup>

۱. استادیار پژوهشگاه هوافضا، تهران، ایران، hnaseh@ari.ac.ir

۲.\* استادیار پژوهشگاه هوافضا، تهران، ایران، karimaei@ari.ac.ir (نویسنده مسئول)

۳. دانشجوی دکتری پژوهشگاه هوافضا، تهران، ایران، lesani\_mohammad@yahoo.com



دسترس پذیر در نشانی:  
Journal.isrc.ac.ir

دو فصلنامه  
علوم، فناوری و  
کاربردهای فضایی

سال دوم، شماره ۲، صفحه ۱۷۰-۱۵۸  
پاییز و زمستان ۱۴۰۱

DOI:  
10.22034/jsst.2023.374805.1101

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۰۸

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۶

واژه‌های کلیدی

پوسته کپسول فضایی، تحلیل  
حساسیت، روش سطح پاسخ،  
بهینه‌سازی دوهدفه، الگوریتم ژنتیک

نحوه استناد به این مقاله

حسن ناصح، حدیثه کریمایی، محمد  
لسانی، "بهینه‌سازی دوهدفه سازه‌های  
کپسول فضایی با تقریب استوانه جدار  
نازک". دو فصلنامه علوم، فناوری و  
کاربردهای فضایی، جلد دوم، شماره  
دوم، صفحات ۱۷۰-۱۵۸، ۱۴۰۱.

### چکیده

در این مقاله به بهینه‌سازی سازه‌های کپسول فضایی با تقریب یک پوسته استوانه‌ای جدار نازک با طول مشخص و تحت نیروی محوری فشاری و فشار جانبی ثابت پرداخته شده است. متغیرهای طراحی شامل قطر بیرونی و ضخامت استوانه است. اهداف بهینه‌سازی، کمینه‌سازی جرم و بیشینه‌سازی فرکانس مود اول ارتعاشاتی استوانه است. قیود طراحی شامل ضریب بار کمانش (ضریب اطمینان کمانش) بالای ۱.۵ و تنش فون میسز زیر ۱۰۰ مگاپاسکال است. در این مقاله، ابتدا با توجه به حدود مجاز متغیرهای طراحی، یک طراحی آزمایش و سپس تحلیل حساسیت صورت پذیرفته تا میزان حساسیت توابع هدف و قیود نسبت به متغیرهای طراحی بررسی شود. بعد از حل عددی مقادیر خروجی به کمک نرم‌افزار انسیس و تهیه سطح پاسخ، نقطه بهینه طراحی به کمک الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک دو هدفه شناسایی شده است. در ادامه، با شبیه‌سازی عددی نقطه بهینه، صحت مقادیر به دست آمده از روش سطح پاسخ بررسی شده و دقت آن‌ها تایید شده است. نتایج نشان می‌دهد که در نقطه طراحی انتخاب شده، تنش فون میسز کم‌تر از مقدار مجاز خود یعنی ۱۰۰ مگاپاسکال می‌شود. هم‌چنین ضریب بار کمانشی بیش از دو برابر مقدار حداقلی مجاز خود به دست می‌آید. با این وجود، این نقطه کم‌ترین فاصله از مبدا را داشته و نقطه زانویی به عنوان نقطه بهینه انتخاب شده است.

قسمت‌های مساوی تقسیم و سپس ضخامت هر بخش برای رسیدن به فرکانس طبیعی مورد نظر بهینه‌سازی شده است. تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول و روش اجزای محدود برای تخمین فرکانس‌های طبیعی و از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی کسر حجمی مواد استفاده شده است. برای نشان دادن روش پیشنهادی، دو مسئله بهینه‌سازی ارائه شده است. هدف اولی، به حداکثر رساندن فرکانس اساسی یک پوسته استوانه‌ای با بهینه‌سازی کسر حجمی مواد است. در مسئله دوم، سعی شده توزیع مواد بهینه را پیدا کند که فاصله بین دو فرکانس طبیعی مجاور را به حداکثر برساند. مثال‌های بهینه‌سازی نشان می‌دهند که ساخت پوسته‌های استوانه‌ای یک تکنیک مفید برای بهینه‌سازی فرکانس‌های طبیعی آن‌ها است. ناصرخانی<sup>۶</sup> و همکاران [۳] به تاثیر تغییر ضخامت پیوسته در طول یک پوسته استوانه‌ای، بر روی اولین فرکانس طبیعی متقارن محوری پرداختند. معادله حرکت برای پوسته با ضخامت ثابت بر اساس تئوری پوسته کلاسیک با استفاده از اصل همیلتون<sup>۷</sup> استخراج شده است. فرکانس طبیعی برای پوسته‌های استوانه‌ای با ضخامت متغیر با استفاده از روش اجزای محدود با استفاده از نرم‌افزار انسیس تعیین می‌شود. نتایج مقایسه شده و تأثیر پارامترهای هندسی مختلف مانند طول، ضخامت و شعاع بر فرکانس طبیعی مورد بحث قرار گرفته است. محدوده خاصی برای پارامترهای هندسی تعیین شده که در آنها تفاوت معناداری بین پوسته‌های با ضخامت ثابت یا متغیر وجود ندارد. پوسته‌های استوانه‌ای با ضخامت متغیر، توزیع تنش و کرنش و وزن بهینه‌تری در مقایسه با پوسته‌های با ضخامت ثابت دارند.

باقری<sup>۸</sup> [۴] و همکاران یک مساله چندهدفی به منظور بهینه‌سازی فرکانس اصلی و کمینه‌سازی وزن پوسته استوانه‌ای با استفاده از رینگ‌های تقویت‌کننده را بررسی کردند. در مقاله وی، از روش الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی چند هدفه پوسته‌های استوانه‌ای تقویت شده استفاده شده است. توابع هدف حداکثر فرکانس اساسی و حداقل وزن ساختاری پوسته را تحت چهار محدودیت شامل فرکانس اساسی، وزن سازه، بار کمانش

پوسته استوانه‌ای جدار نازک یکی از سازه‌های پرکاربرد در علوم مهندسی به خصوص در مهندسی هوافضا است. برای مثال، بدنه حامل‌های ماهواره‌بر و حامل‌های فضایی از این نوع سازه‌ها هستند. کپسول‌های فضایی سرنشین‌دار نیز از سازه‌های جدار نازک تقویت شده ساخته می‌شوند. در طراحی سازه‌ها، اغلب مهندسان به دنبال کم کردن وزن سازه هستند چراکه کاهش وزن هزینه‌های عملکردی محصولات را کاهش خواهد داد. برای مثال، هر چه وزن سازه بدنه یک حامل فضایی سبک‌تر باشد، هزینه ارسال به فضا کم‌تر خواهد شد. از طرفی، طراحان سازه علاقه‌مند هستند که فرکانس‌های سازه و به ویژه فرکانس مود اول ارتعاشاتی بیشینه باشد تا سازه در محیط‌های کاری ارتعاشاتی دچار تشدید نشود. از طرفی، سازه طراحی شده باید توانایی تحمل بارهای وارده را نیز داشته باشد. به عبارتی هیچ نقطه از سازه نباید به نقطه تسلیم برسد. در سازه‌های تحت نیروی فشاری، یکی از پدیده‌های مهم، پدیده کمانش است که باعث ناپایداری سازه شده و عملکرد سازه را مختل می‌کند. پس معیار کمانش نیز باید به عنوان یک معیار طراحی برای این سازه‌ها بررسی شود. در ادامه، به مروری از تحقیقات گذشته در این حوزه پرداخته می‌شود.

نعیم<sup>۱</sup> و شارما<sup>۲</sup> [۱] به پیش‌بینی فرکانس‌های طبیعی برای پوسته‌های استوانه‌ای دایره‌ای جدار نازک پرداختند. در مقاله آنها یک روش تحلیلی برای مطالعه ویژگی‌های ارتعاشات آزاد پوسته‌های استوانه‌ای دایره‌ای نازک ارائه شده است. برای مدل‌سازی وابستگی مودال محوری، توابع چندجمله‌ای ریتز<sup>۳</sup> در نظر گرفته شده و از رویکرد تغییرریلی-ریتز<sup>۴</sup> برای فرمول‌بندی مسئله استفاده شده است. تأثیر برخی از شرایط مرزی رایج، نظیر تکیه‌گاه گیردار و غیرگیردار و هم‌چنین اثرات تغییرات پارامترهای پوسته بر فرکانس‌های ارتعاشات مورد بررسی قرار گرفته و توافق بسیار خوبی بین نتایج تحلیلی و نتایج تجربی موجود به دست آمده است. الذهبی<sup>۵</sup> [۲] فرکانس‌های طبیعی بدنه زیردریایی را به وسیله ضخامت محلی کنترل کرد. در این مقاله، طول بدنه به

5 Alzahabi  
6 Nasrekani  
7 Hamilton's principle  
8 Bagheri

1 Naeem  
2 Sharma  
3 Ritz polynomial functions  
4 Rayleigh Ritz

از این رویکرد می‌پردازد. الگوریتم کلونی مورچه‌ها در پلتفرم متلب پیاده‌سازی شد و برای محاسبه پاسخ ساختاری به نسخه آکادمیک آباکوس متصل شد. تریاس<sup>۹</sup> و همکاران [۱۰] به بررسی بیشینه-سازی فرکانس اصلی با استفاده از فرمول‌بندی کران پرداختند. میلر<sup>۱۰</sup> و زیمناسکی<sup>۱۱</sup> [۱۱-۱۲] به بیشینه‌سازی فرکانس اصلی و فاصله بین دو فرکانس طبیعی متوالی با استفاده از الگوریتم ژنتیک<sup>۱۲</sup> در ترکیب با شبکه‌های عصبی پرداختند. آن‌ها همچنین به بهینه‌سازی رفتار دینامیکی پوسته‌های استوانه‌ای جدار نازک با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک و شبکه‌های عصبی عمیق با پشتیبانی شناسایی شکل مودها پرداختند. جینگ<sup>۱۳</sup> [۱۳] از الگوریتم جستجوی جایگشت متوالی برای بیشینه‌سازی فرکانس اصلی استفاده کرد. با استفاده از چندجمله‌ای متعامد در توابع مجاز، روش ریتز برای انجام تحلیل ارتعاشات برای پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیت چندلایه توسعه داده شده است. همچنین همگرایی و دقت روش ریتز با نتایج قبلی قابل مقایسه و تأیید است. رویکردهای متفاوت بهینه‌سازی نظیر الگوریتم ژنتیک و غیره را نیز با هم مقایسه نمود.

با توجه به بررسی پژوهش‌های قبلی، در طراحی سازه، به منظور پیش‌بینی تحمل سازه در برابر بارهای کمانشی و همچنین تخمین اولین فرکانس‌های سازه، بهره‌گیری از تقریب استوانه جدار نازک و مدل‌سازی و تحلیل آن در فرایند طراحی، امری رایج است. در مقاله حاضر، یک استوانه جدار نازک آلومینیومی به عنوان تقریبی از سازه یک کپسول فضایی بررسی شده است. کپسول‌های فضایی طی حرکت خود در مسیر ماموریت تحت بارگذاری‌های مختلف سازه‌ای قرار می‌گیرند. این بارگذاری‌ها شامل فشار آیرودینامیک، شتاب‌های اینرسی و غیره است. در این مقاله سعی شده تا نیروهای مذکور در قالب دو نیروی محوری و فشار عرضی به سازه وارد شود. طول استوانه ۲ متر در نظر گرفته شده تا تقریب مناسبی از کپسول‌های فضایی باشد. قطر و ضخامت پوسته استوانه‌ای نیز به‌عنوان متغیر طراحی لحاظ شده است. صورت

محوری و بار کمانش شعاعی جستجو می‌کنند. فرایند بهینه‌سازی شامل شش متغیر طراحی شامل ضخامت پوسته، تعداد تقویت‌کننده‌ها، عرض و ارتفاع تقویت‌کننده‌ها، ترتیب توزیع خارج از مرکز تقویت‌کننده‌ها و ترتیب توزیع فاصله آنها است. نتایج نشان می‌دهد که کاهش شدید و افزایش در وزن سازه و فرکانس اساسی را می‌توان با انتخاب پارامترها و توزیع‌های هندسی مناسب تقویت‌کننده‌ها به طور هم‌زمان به دست آورد. علاوه بر این، مقادیر مرزی متغیرهای طراحی تأثیر زیادی بر نتایج بهینه دارند. مهربانی<sup>۱</sup> و همکاران [۵] به بیشینه‌سازی نسبت فرکانس اصلی به وزن پوسته استوانه‌ای با استفاده از رینگ‌ها و تقویت‌کننده‌های طولی پرداختند. توافق خوبی در انواع مختلف نتایج از جمله پوسته‌های همسان‌گرد، پوسته‌های چندلایه دورانی، پوسته‌های همسان‌گرد تقویت‌شده و پوسته‌های چندلایه تقویت‌شده مشاهده شده است. سپس، بهینه‌سازی پارامترهای ناشی از پوسته و تقویت‌کننده‌ها با روش الگوریتم ژنتیک تحت محدودیت وزن و فرکانس انجام شده است. صادقی‌فر<sup>۲</sup> و همکاران [۶] به مطالعه بیشینه‌سازی بار کمانش بحرانی و کمینه‌سازی وزن پوسته‌های استوانه‌ای تقویت شده متعامد پرداختند. بلرادی<sup>۳</sup> و همکاران [۷] از سازه‌های شبکه کامپوزیتی ناهمگن در ساخت پوسته‌های استوانه‌ای مدور به منظور بهینه‌سازی بار کمانش بحرانی با قیود استحکام و سختی استفاده کردند. هو<sup>۴</sup> و تسای<sup>۵</sup> [۸] به بیشینه-سازی فرکانس اصلی برای پوسته‌های استوانه‌ای با و بدون برش پرداختند که مساله بهینه‌سازی با استفاده از روش مقطع طلایی حل شد. اثرات قابل توجه ضخامت پوسته، طول پوسته، برش و شرایط انتهایی بر روی حداکثر فرکانس‌های اساسی و جهت‌گیری‌های فیبر بهینه مرتبط نشان داده شد.

کوید<sup>۶</sup> و لوئرسون<sup>۷</sup> [۹] از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه-ها<sup>۸</sup> برای بیشینه‌کردن فرکانس اصلی استفاده کردند. این مقاله به دنبال توالی بهینه انباشتگی پوسته‌های کامپوزیت استوانه‌ای چندلایه با هدف به حداکثر رساندن فرکانس اساسی آنها با استفاده

8 Ant colony optimization algorithm (ACO)

9 Trias

10 Miller

11 Ziemianski

12 Genetic Algorithm

13 Jing

1 Mehrabani

2 Sadeghifar

3 Belradi

4 Hu

5 Tsi

6 Koide

7 Luersen

$$\text{Find } X = \begin{Bmatrix} D \\ t \end{Bmatrix} \text{ which minimize } M(X), -f(x)$$

$$\text{s.t } S(X) \leq 100MPa, LM \geq 1.5 \quad (1)$$

$$400 \leq D \leq 1200 \text{ mm}, t = \{3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\} \text{ mm}$$

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2)]} \quad (2)$$

### ۳- مدل هندسی

در شکل (۱)، هندسه استوانه جدار نازک تحت نیروی محوری فشاری ۱۲۰ کیلو نیوتنی و فشار جانبی ۰.۸ باری با تکیه‌گاه یک-سرگیردار نشان داده شده است. این بارگذاری نوعی است و بیانگر فشار آیرودینامیکی و نیروهای محوری کپسول سرنشین‌دار فضایی ساده‌سازی شده در فاز برگشت است. طول استوانه ۲ متر در نظر گرفته شده است. مشخصات جنس استوانه در جدول (۱) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که چون فرایند تولید استوانه‌های جدار نازک فلزی به دلیل کاهش هزینه ساخت، عموماً نورد است، جنس انتخاب شده برای ورق بایستی قابلیت انجام این فرایند را داشته باشد. از این رو، جنس انتخاب شده، آلومینیوم ۵۰۸۳ است. اطلاعات ورودی برای حل مسئله بهینه‌سازی مذکور به کمک روش اجزای محدود استخراج شده است. المان در نظر گرفته شده برای مش‌بندی هندسه، المان پوسته<sup>۱۰</sup> است که به صورت چهارضلعی<sup>۱۱</sup> استفاده شده است. تعداد کل المان‌ها ۱۰۰۶۵۱ عدد و تعداد گره-ها<sup>۱۲</sup> ۵۰۴۵۱ در نظر گرفته شده است. همچنین، نوع حل‌گر تحلیل تنش، کمانش و مودال از نوع مستقیم<sup>۱۳</sup> و نوع تحلیل سه-بعدی است.

مسئله بهینه‌سازی عبارت است از، پیدا کردن قطر و ضخامت پوسته به نحوی که تابع جرم کل سازه، کمینه و تابع فرکانس اول ارتعاشاتی آن بیشینه شود. از طرفی، قیود مسئله شامل بیشینه تنش معادل فون‌میسز سازه کمتر از ۱۰۰ مگاپاسکال (با فرض لحاظ ضریب اطمینان حداقل ۲.۵ برای جنس مذکور) و ضریب بار کمانشی سازه حداقل ۱.۵ است. در این پژوهش، توابع هدف و قیود مسئله با استفاده از روش سطح پاسخ<sup>۱</sup> تعیین شده‌اند. همچنین سطح پاسخ با استفاده از روش طراحی آزمایش<sup>۲</sup> و حل مسئله در تعداد محدودی از نقاط با روش اجزای محدود صورت پذیرفته است. استفاده از این روش و توابع هدف و قیود هم‌زمان در نظر گرفته شده در این مقاله، وجه تمایز پژوهش حاضر با پژوهش‌های پیشین است.

### ۲- فرمول‌ها و روابط

مسئله بهینه‌سازی مورد نظر عبارت است از پیدا کردن قطر بیرونی<sup>۳</sup>  $D^3$  و ضخامت پوسته استوانه‌ای<sup>۴</sup>  $t^4$  به نحوی که تابع جرم  $M(X)^5$  کمینه و تابع فرکانس<sup>۶</sup>  $f(X)^6$  بیشینه شود. ضمناً بیشینه مقدار تابع تنش معادل فون‌میسز<sup>۷</sup>  $S(X)^7$  کمتر از ۱۰۰ مگاپاسکال باشد. ضریب بار کمانشی<sup>۸</sup>  $LM^8$  سازه نیز بیش‌تر از ۱.۵ باشد. فرم ریاضی مسئله بهینه‌سازی مذکور در رابطه (۱) نشان داده شده است. رابطه تنش فون‌میسز<sup>۹</sup> با مولفه‌های تانسور تنش نیز در رابطه (۲) آمده است. با توجه به چالش قابلیت ساخت استوانه مذکور که از طریق فرایند نورد ورقه آلومینیومی ۵۰۸۳ انجام می‌شود، ضخامت ورق فقط می‌تواند اعداد صحیح مثبت را به خود بگیرد. از این رو، متغیر ضخامت یک متغیر گسسته در مسئله بهینه‌سازی مذکور است. لازم به ذکر است که با ضرب یک منفی در تابع فرکانس، مسئله از بیشینه‌سازی به کمینه‌سازی تبدیل شده است.

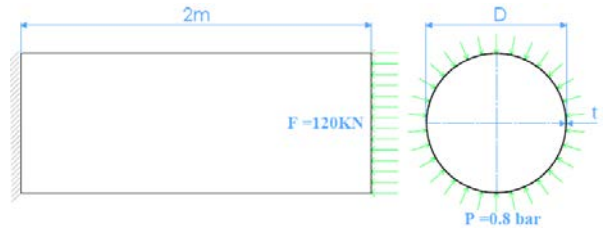
8 Load Multiplier  
9 Von Mises stress  
10 Shell  
11 Quadrilaterals  
12 Nodes  
13 Direct

1 Response Surface  
2 Design of Experiment  
3 Diameter  
4 Thickness  
5 Mass  
6 Frequency  
7 Von Mises Stress

#### ۴- طراحی آزمایش، تحلیل حساسیت<sup>۱</sup> و ماتریس همبستگی<sup>۲</sup>

طراحی آزمایش یک رویکرد علمی است که به محققان اجازه کسب دانش برای فهم بهتر یک فرایند و همچنین تعیین چگونگی تاثیر ورودی‌ها بر روی خروجی‌ها را می‌دهد و تعیین می‌کند که کدام ورودی‌ها بیش‌ترین تاثیر را بر روی خروجی‌ها دارند و چه مقدار از هر ورودی بهترین تاثیر را حاصل می‌کند. یکی از روش‌های طراحی آزمایش، روش طراحی مرکب مرکزی<sup>۳</sup> CCD است که در این مقاله از این روش برای طراحی آزمایشات استفاده شده است.

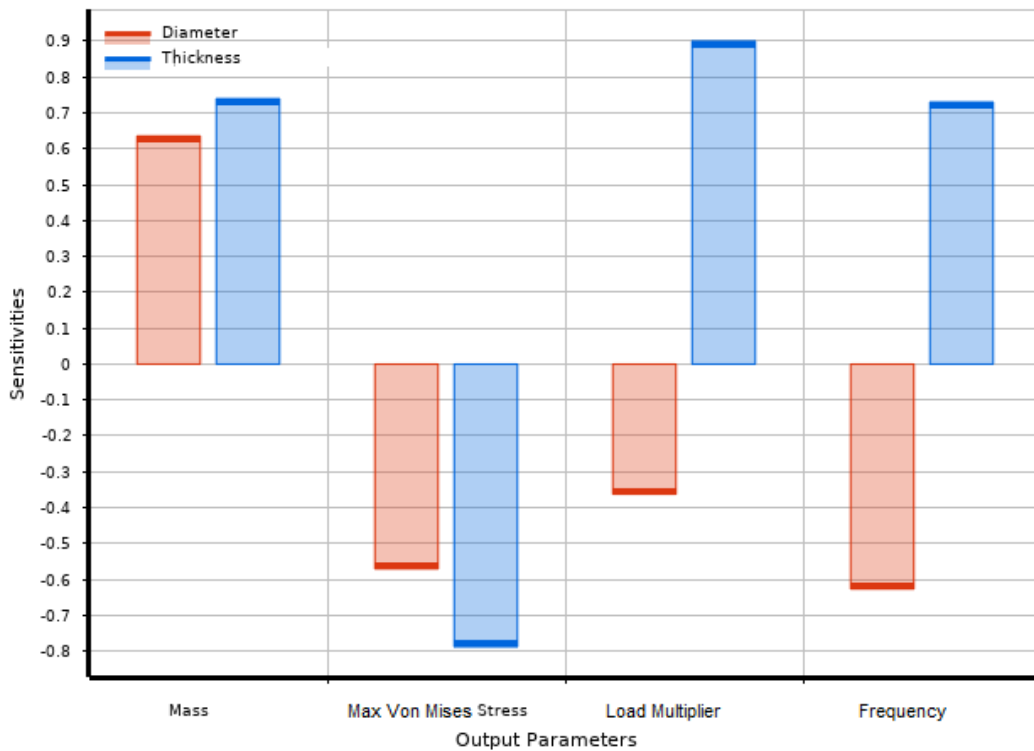
در تحلیل حساسیت، میزان حساسیت یک تابع نسبت به متغیرهای ورودی (طراحی) بررسی می‌شود. مقدار حساسیت می‌تواند عددی بین -۱ تا +۱ را اتخاذ کند. مقدار مثبت، نشان دهنده رابطه مستقیم متغیر با تابع و مقدار منفی، نشان دهنده رابطه عکس است.



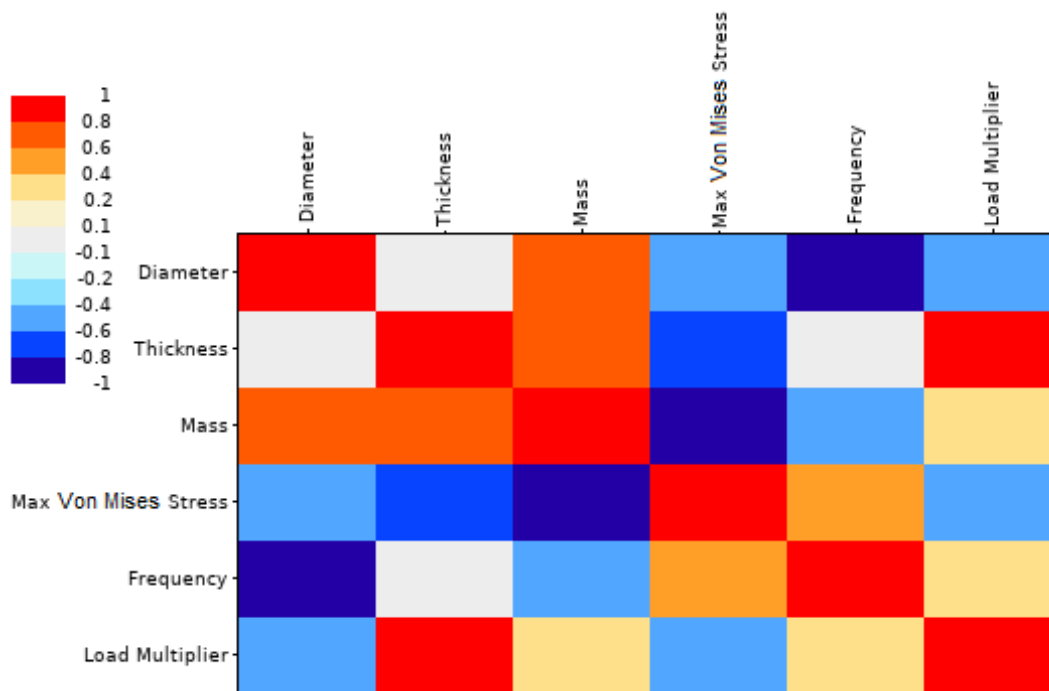
شکل ۱. هندسه استوانه مورد بررسی شامل شرایط مرزی و بارگذاری

جدول ۱. مشخصات مکانیکی جنس استوانه

جنس	چگالی kg/m <sup>3</sup>	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته GPa	تنش تسلیم MPa
Al 5083	۲۶۵۰	۰/۳۳	۷۲	۲۵۹



شکل ۲. تحلیل حساسیت توابع هدف و قیود بر حسب متغیرهای طراحی



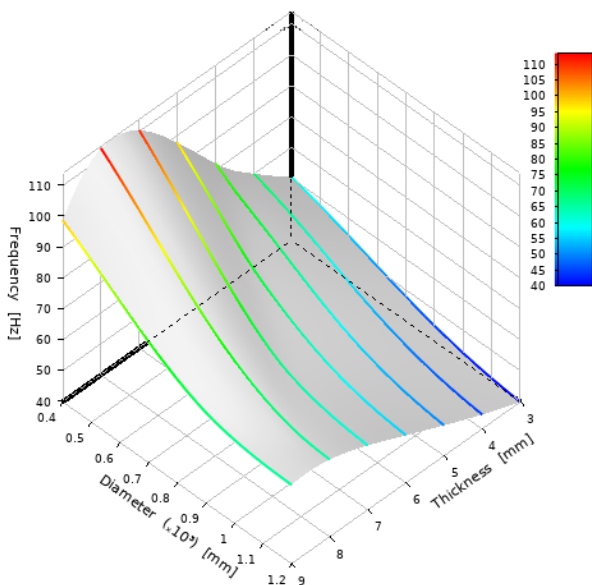
شکل ۳. ماتریس همبستگی ورودی‌ها و خروجی‌ها

۱ قرار دارند. اعداد منفی (کانتور آبی رنگ)، نشان‌دهنده رابطه معکوس و اعداد مثبت (کانتور قرمز رنگ)، نشان‌دهنده رابطه مستقیم هستند. هر چه این عدد کم‌تر باشد به این معنی است که دو متغیر به همدیگر وابستگی کم‌تری دارند و هر چه قدر این عدد بزرگ‌تر باشد، یعنی دو متغیر به همدیگر وابستگی بیش‌تری دارند. قطر این ماتریس برابر ۱ است زیرا هر متغیر با خودش طبیعتاً همبستگی حداکثری دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، متغیر ضخامت بیش‌ترین تاثیر را بر روی فرکانس و جرم استوانه دارد.

#### ۵- استخراج سطح پاسخ

روش سطح پاسخ مجموعه‌ای از روش‌های ریاضی است که رابطه بین یک یا چند متغیر پاسخ را با چندین متغیر مستقل (ورودی) تعیین می‌کند. هدف از ایجاد سطح پاسخ، بهینه‌سازی پاسخ است. در این مقاله، برای حل مسئله بهینه‌سازی ابتدا با توجه به حدود متغیرهای طراحی یعنی قطر و ضخامت استوانه، به انجام طراحی آزمایشات و همچنین تحلیل حساسیت پرداخته شده است. سپس، سطح پاسخ هر یک از توابع و قیود نسبت به

شکل (۲)، تحلیل حساسیت توابع هدف و قید نسبت به متغیرهای طراحی یعنی قطر و ضخامت پوسته استوانه‌ای را نشان می‌دهد. تحلیل حساسیت برای دو تابع هدف جرم و فرکانس، و دو تابع قید تنش فون میسز و ضریب بار کمانش نسبت به دو متغیر طراحی قطر و ضخامت استوانه بررسی شده است. با توجه به شکل (۲) مشخص است که دو متغیر ضخامت و قطر استوانه تاثیر تقریباً یکسانی بر روی تابع هدف جرم دارند. تابع هدف فرکانس با ضخامت پوسته رابطه مستقیم و با قطر استوانه رابطه عکس دارد. همچنین مشهود است که تابع قید تنش فون میسز با هر دو متغیر نسبت معکوس دارد. از طرفی، تابع قید ضریب بار کمانش نیز با ضخامت پوسته رابطه مستقیم و با قطر استوانه رابطه عکس دارد و مقدار ضریب بار بسیار متاثر از ضخامت پوسته است. شکل (۳)، ماتریس همبستگی ورودی و خروجی‌های تحلیل را نشان می‌دهد. ماتریس همبستگی یک ماتریس متقارن است که در این مسئله شامل ۶ سطر و ۶ ستون است. مشاهده می‌شود که تعداد سطر و ستون‌ها برابر مجموع تعداد متغیرها و توابع است. هر کدام از خانه‌ها با عددی مشخص شده‌اند که در بازه منفی ۱ تا مثبت



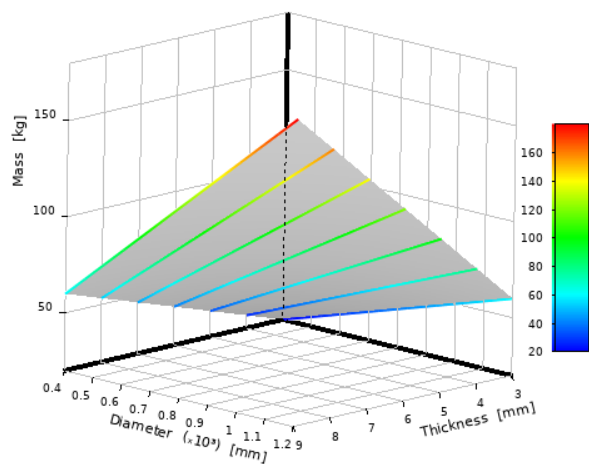
شکل ۵. سطح پاسخ مود اول ارتعاشاتی بر حسب قطر و ضخامت

همان‌طور که از شکل (۵) مشهود است، نمودار سطح پاسخ فرکانس مود اول ارتعاشاتی استوانه با قطر استوانه رابطه معکوس دارد، یعنی با افزایش قطر، فرکانس کاهش می‌یابد. از طرفی، فرکانس با افزایش ضخامت از حدود ۳ تا ۷ میلی‌متر افزایش و بعد از آن ثابت یا کاهشی است. با توجه به سطح پاسخ نشان داده شده، فرکانس مذکور می‌تواند از حدود ۴۰ تا حدود ۱۱۰ هرتز افزایش پیدا کند.

با توجه به نمودار سطح پاسخ شکل (۶)، مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت و قطر استوانه، مقدار تنش معادل فون میسز کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که سطح پاسخ تنش فون میسز در کم‌ترین مقدار ضخامت و کم‌ترین قطر استوانه به بیشینه خود یعنی حدود ۱۰۵ مگاپاسکال می‌رسد که این نیز یک پدیده بدیهی برای تنش است.

متغیرهای طراحی به‌دست آمده است. در ادامه، شکل (۴) سطح پاسخ جرم بر حسب قطر و ضخامت، شکل (۵) سطح پاسخ فرکانس اول ارتعاشاتی بر حسب قطر و ضخامت، شکل (۶) نمودار سطح پاسخ تنش معادل فون میسز بر حسب قطر و ضخامت و شکل (۷) نمودار سطح پاسخ ضریب بار کمانش بر حسب قطر و ضخامت استوانه را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل (۴) مشهود است، تغییرات تابع جرم نسبت به دو متغیر طراحی خطی است که این امری بدیهی است، زیرا رابطه جرم استوانه نسبت به طول استوانه و  $\rho$  چگالی استوانه است. طول و چگالی استوانه ثابت هستند، پس رابطه مذکور خطی است و با افزایش هر کدام از متغیرهای طراحی، جرم استوانه افزایش پیدا می‌کند. با توجه به نمودار مشاهده می‌شود که جرم می‌تواند از حدود ۲۵ تا حدود ۱۶۰ کیلوگرم افزایش پیدا کند.

$$M = \rho \pi D t L \quad (3)$$



شکل ۴. سطح پاسخ جرم بر حسب قطر و ضخامت

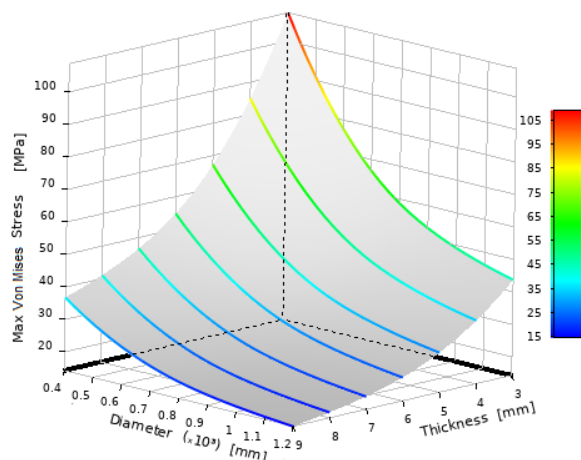


## ۶- بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک دوهدفه

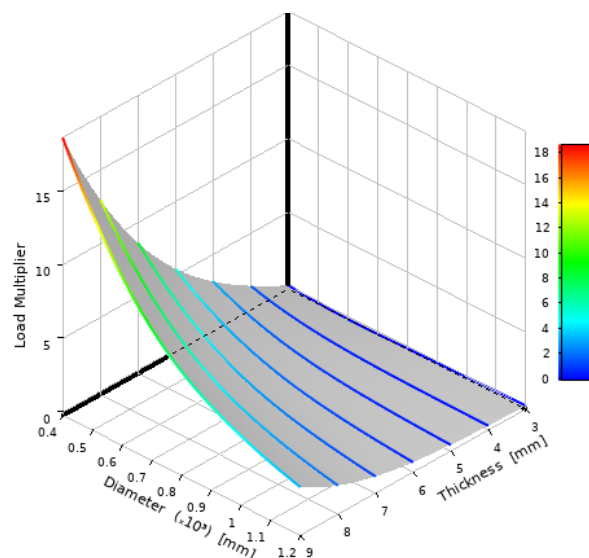
الگوریتم ژنتیک، خانواده‌ای از مدل‌های محاسباتی است که از مفهوم تکامل الهام گرفته شده است. الگوریتم‌های ژنتیک، الگوریتم‌های جستجو هستند که بر پایه مفاهیم انتخاب طبیعی و ژنتیک موجودات زنده بنا نهاده شده و پدید آمده‌اند تا برخی از فرآیندهای مشاهده شده در تکامل طبیعی را از طریق الگوریتم‌های کامپیوتری شبیه‌سازی کنند. مهم‌ترین گام‌های لازم برای پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک و انواع مختلف آن عبارتند از تولید جمعیت (اولیه) از جواب‌های یک مسئله، مشخص کردن تابع هدف، تابع برازندگی<sup>۱</sup> و به کار گرفتن عملگرهای ژنتیک<sup>۲</sup> برای ایجاد تغییرات در جمعیت جواب‌های مسئله. ارتباط تابع برازندگی با تابع هدف در رابطه (۴) بیان شده است.  $F(x)$  تابع برازندگی و  $f(x)$  تابع هدف در مسائل کمینه‌سازی است. عملگرهای ژنتیک شامل عملگرهای انتخاب<sup>۳</sup>، ترکیب<sup>۴</sup> و جهش<sup>۵</sup> هستند. فلوجارت الگوریتم ژنتیک در شکل (۸) ارائه شده است.

$$F(x) = \frac{1}{1+f(x)} \quad (4)$$

برای بهینه‌سازی استوانه مذکور و پیدا کردن نقاط بهینه طراحی از الگوریتم ژنتیک دوهدفه استفاده شده است. در الگوریتم ژنتیک مذکور تعداد جمعیت اولیه ۲۰ عدد و تعداد نسل‌ها نیز ۲۰ عدد فرض شده است. همچنین تعداد والدین ۱۰ عدد در نظر گرفته شده است. پارامتر احتمال ترکیب<sup>۶</sup> ۵۰ درصد و نرخ جهش ۶۸ درصد در نظر گرفته شده است. تعداد کل نقاط بررسی شده در الگوریتم ۲۱۰ نقطه بوده است که ۱۷۷ عدد آن عملی بوده و در نهایت ۱۴ نقطه آن به صورت جبهه پارتو انتخاب شده است. همچنین نمودار هم‌گرایی الگوریتم ژنتیک در شکل (۹) نشان داده شده است. در این نمودار، محور عمودی بهترین مقدار برازندگی در جمعیت را نشان می‌دهد و محور افقی شماره نسل را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بهترین مقدار برازندگی در جمعیت در طی گذشت نسل‌ها به صفر رسیده و در نتیجه الگوریتم پس از گذشت ۲۰ نسل کاملاً هم‌گرا شده است. همچنین جبهه پارتو حاصل شده که شامل ۱۴ نقطه طراحی بهینه است،



شکل ۶. سطح پاسخ تنش فون میسز بر حسب قطر و ضخامت

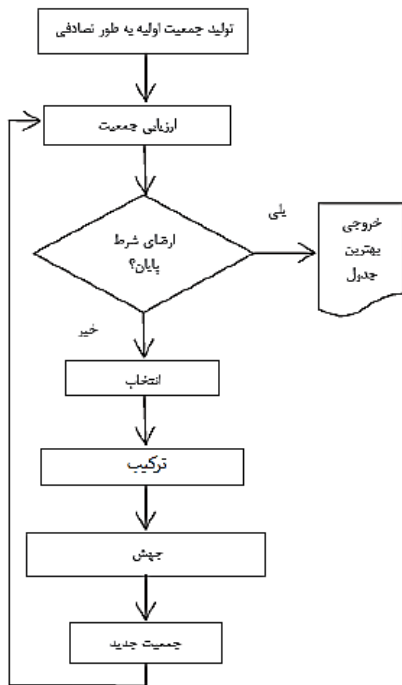


شکل ۷. سطح پاسخ ضریب بار کمانش بر حسب قطر و ضخامت

شکل (۷)، سطح پاسخ تغییرات مقدار ضریب بار کمانشی با دو متغیر طراحی یعنی قطر و ضخامت استوانه را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که ضخامت با ضریب بار کمانشی رابطه مستقیم دارد، یعنی با افزایش ضخامت، مقدار ضریب بار کمانشی افزایش پیدا می‌کند. همچنین قطر استوانه با ضریب بار کمانشی آن رابطه معکوس دارد، به طوری که با افزایش قطر استوانه، ضریب بار کمانشی کاهش پیدا می‌کند.

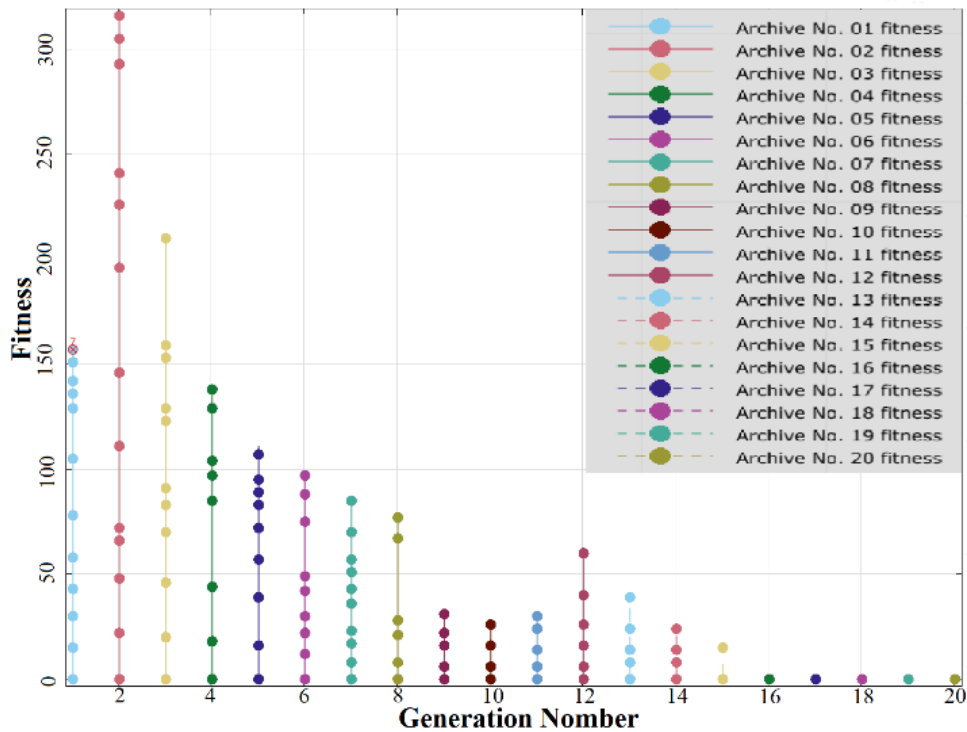
4 Crossover  
5 Mutation  
6 Crossover Probability

1 Fitness  
2 Genetic Operators  
3 Selection

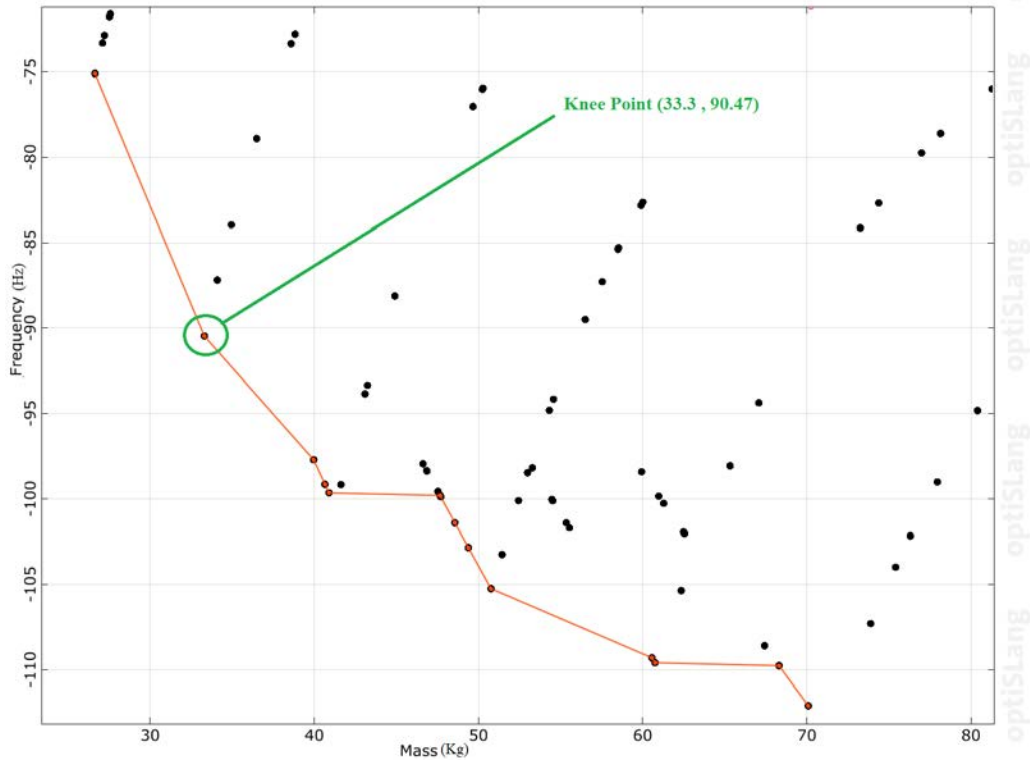


شکل ۸. فلوجارت الگوریتم ژنتیک

در نمودار شکل (۱۰) نشان داده شده است. مشخصات نقاط واقع بر این جبهه در جدول (۲) ارائه شده است. چنانچه بیان شد، در این مسئله بهینه‌سازی، هدف کمینه‌سازی جرم و بیشینه‌سازی فرکانس مود اول ارتعاشی سازه استوانه است. همان‌طور که از شکل (۱۰) مشخص است، جبهه پارتوی تشکیل شده شامل تمامی نقاطی است که به وسیله خطوط قرمز رنگ به هم متصل شده‌اند. تمامی این نقاط بهینه هستند و هیچ‌کدام بر دیگری برتری ندارند و هر کدام با توجه به صلاح‌دید طراح می‌توانند به عنوان نقطه طراحی انتخاب شوند. در نمودار مذکور، نقطه طراحی با کم‌ترین فاصله از مبدا می‌تواند به عنوان نقطه زانویی<sup>۱</sup> و همچنین به عنوان نقطه بهینه طراحی در نظر گرفته شود. مشخصات این نقطه در جدول (۳) ارائه شده است.



شکل ۹. نمودار هم‌گرایی الگوریتم ژنتیک طی گذشت ۲۰ نسل

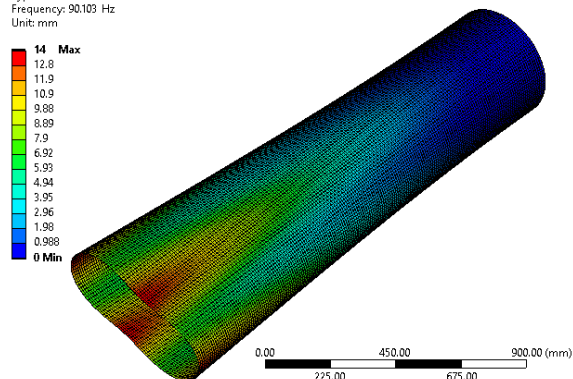


شکل ۱۰. جبهه بهینه پارتو طراحی

جدول ۲. نقاط واقع بر جبهه پارتو

ردیف	شماره نقطه (از ۲۱۰ نقطه کل)	جرم (Kg)	فرکانس (Hz)	قطر استوانه (mm)	ضخامت استوانه (mm)	تنش فون میسز (MPa)	ضریب بار کمانش
۱	۲۰۴	۲۶.۶۴	۷۵.۱۱	۴۰۰	۴	۸۰.۱۷	۲.۱۸
۲	۱۷۰	۳۳.۳	۹۰.۴۷	۴۰۰	۵	۶۴.۷۸	۳.۹۴
۳	۱۷۹	۳۹.۹۶	۹۷.۷۱	۴۰۰	۶	۵۴.۳۶	۶.۴۶
۴	۴۴	۴۰.۶۵	۹۹.۱۵	۴۰۶.۹	۶	۵۳.۴۹	۶.۲۲
۵	۱۹۸	۴۰.۸۹	۹۹.۶۵	۴۰۹.۳	۶	۵۳.۱۹	۶.۱۴
۶	۹۷	۴۷.۶۶	۹۹.۸۱	۴۰۸.۹	۷	۴۵.۸۶	۹.۳۸
۷	۹۵	۴۷.۷۱	۹۹.۸۸	۴۰۹.۳۲	۷	۴۵.۸۲	۹.۳۶
۸	۱۴۳	۴۸.۵۶	۱۰۱.۴۱	۴۱۶.۶۶	۷	۴۵.۰۶	۸.۹۸
۹	۱۳۴	۴۹.۳۸	۱۰۲.۸۴	۴۲۳.۶۸	۷	۴۴.۳۵	۸.۶۵
۱۰	۱۵	۵۰.۷۶	۱۰۵.۲۵	۴۳۵.۵	۷	۴۳.۲۱	۸.۱۴
۱۱	۸۱	۶۰.۵۶	۱۰۹.۳۱	۴۵۴.۶۵	۸	۳۶.۴۴	۱۰.۶۳
۱۲	۱۱۴	۶۰.۷۶	۱۰۹.۶	۴۵۶.۱۳	۸	۳۶.۲۳	۱۰.۵۶
۱۳	۱۸۸	۶۸.۳۱	۱۰۹.۷۷	۴۵۵.۸۲	۹	۳۲.۴	۱۴.۵۶
۱۴	۱۸۵	۷۰.۰۹	۱۱۲.۱	۴۶۷.۶۹	۹	۳۱.۶۲	۱۳.۷۵

Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Frequency: 90.103 Hz  
Unit: mm



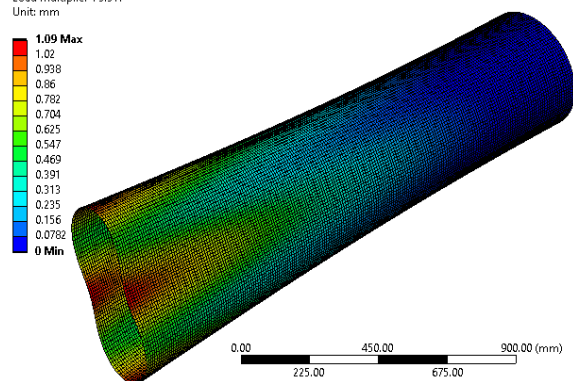
شکل ۱۲. فرکانس و مود اول ارتعاشاتی در استوانه طراحی شده

تحلیل عددی نقطه زانویی در نرم‌افزار انسیس برای تنش فون-میسز در شکل (۱۱)، فرکانس مود اول ارتعاشاتی در شکل (۱۲) و ضریب بار کمانش در شکل (۱۳) نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل (۱۱) مشهود است، در نقطه طراحی انتخاب شده، بیشینه تنش فون‌میسز معادل با ۶۷.۷۲ مگاپاسکال است که در محل دهانه جلویی پوسته استوانه‌ای رخ داده است. این مقدار با مقدار تنش به دست آمده از روش سطح پاسخ یعنی ۶۴.۷۸ مگاپاسکال با دقت مطلوبی سازگار است. در نتیجه، این بررسی صحت مقدار به دست آمده از روش سطح پاسخ را تصدیق می‌کند.

جدول ۳. مشخصات نقطه بهینه زانویی

پارامتر	نقطه طراحی
D(mm)	۴۰۰
t(mm)	۵
M(kg)	۳۳.۳
F(Hz)	۹۰.۴۷
S(Mpa)	۶۴.۷۸
Load Multiplier	۳.۹۴

Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Load Multiplier: 3.911  
Unit: mm



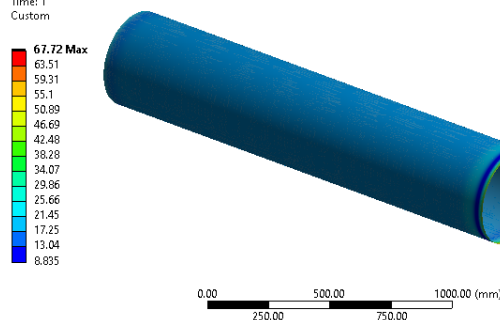
شکل ۱۳. ضریب بار مود اول کمانشی در استوانه طراحی شده

با توجه به شکل (۱۲)، مشاهده می‌شود که فرکانس مود اول ارتعاشاتی پوسته استوانه‌ای معادل ۹۰.۱۰ هرتز است که این بررسی صحت مقدار به دست آمده از روش سطح پاسخ یعنی ۹۰.۴۷ هرتز را تصدیق می‌کند. با توجه به شکل (۱۳)، مشاهده می‌شود که ضریب بار مود اول کمانشی در استوانه طراحی شده معادل ۳.۹۱ است که مقدار آن با مقدار پیش‌بینی شده با روش سطح پاسخ یعنی ۳.۹۴ هم‌خوانی دارد و دقت سطح پاسخ را تصدیق می‌کند.

## ۷- نتیجه‌گیری

یک استوانه جدار نازک آلومینیومی به‌عنوان تقریبی از سازه یک کپسول فضایی بررسی شده است. با توجه به تحلیل حساسیت و نمودارهای سطح پاسخ، وابستگی دو تابع هدف و قیود مسئله بهینه‌سازی به متغیرهای طراحی در نظر گرفته شده که همان قطر و ضخامت پوسته استوانه‌ای است، مشهود است. مشخص شد که دو متغیر ضخامت و قطر استوانه تأثیر تقریباً یکسانی بر روی جرم دارند. مشخص شد که فرکانس اول با ضخامت پوسته رابطه مستقیم و با قطر استوانه رابطه عکس دارد. همچنین، مشخص شد که تنش فون‌میسز با هر دو متغیر نسبت عکس دارد. همچنین نشان داده شد که ضریب بار کمانش با ضخامت پوسته رابطه

Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa  
Time: 1  
Custom



شکل ۱۱. تنش فون‌میسز در استوانه طراحی شده

- axial buckling load,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 48, pp. 979–988, 2010.
- [7] V.G. Belardi, P. Fanelli, F. Vivio, “Structural analysis and optimization of an isogrid composite lattice cylindrical shells,” *Compos. B Eng.*, vol. 139, pp. 203–215, 2018.
- [8] H. Hu, J. Tsai, “Maximization of the fundamental frequencies of laminated cylindrical shells with respect to fiber orientations,” *J. Sound Vib.*, vol. 225, pp. 723–740, 1999.
- [9] R.M. Koide, M.A. Luersen, “Maximization of fundamental frequency of laminated composite cylindrical shells by ant colony algorithm,” *J. Aerosp. Technol. Manag.*, vol. 5, pp. 75–82, 2013.
- [10] D. Trias, P. Maimí, N. Blanco, “Maximization of the fundamental frequency of plates and cylinders,” *Compos. Struct.*, vol. 156, pp. 375–384, 2016.
- [11] B. Miller, L. Ziemiański, “Maximization of eigenfrequency gaps in a composite cylindrical shell using Genetic algorithms and neural networks,” *Appl. Sci.*, vol. 9, pp. 27-54, 2019.
- [12] B. Miller, L. Ziemiański, “Optimization of dynamic behavior of thin-walled laminated cylindrical shells by Genetic algorithms and deep neural networks supported by modal shape identification,” *Adv. Eng. Softw.*, vol. 147, pp. 102830, 2020.
- [13] Z. Jing, “Optimal design of laminated composite cylindrical shells for maximum fundamental frequency using sequential permutation search with mode identification,” *Compos. Struct.*, vol. 279, pp. 114736, 2022.
- مستقیم و با قطر استوانه رابطه عکس دارد. این نتایج نشان می‌دهند که روش استفاده شده برای مدل‌سازی مسئله که همان روش سطح پاسخ است به درستی رفتار سازه را پیش‌بینی کرده و در نتیجه صحت و دقت سطح پاسخ‌های به دست آمده برای ادامه فرایند بهینه‌سازی را نشان می‌دهند. پس از استخراج سطح پاسخ-ها و بهینه‌سازی، مشاهده شد که نقطه بهینه طراحی (نقطه ۱۷۰ جدول ۲) دارای تنش فون میسز کم‌تری از مقدار حد مجاز خود یعنی ۱۰۰ مگاپاسکال است و هم‌چنین ضریب بار کم‌ناش نیز بیش از دو برابر مقدار مجاز خود یعنی ۱.۵ است. این مقادیر ممکن است از دید طراحان سازه‌ای (از منظر جانمایی و ابعاد و...) کاملاً مطلوب به نظر نرسد، ولی در عوض، این نقطه یکی از نقاط بهینه از لحاظ جرمی و فرکانسی است که دارای کم‌ترین فاصله از مبدا است و طراحان می‌توانند نقطه مطلوب طراحی خود را نزدیک به این نقطه در نظر بگیرند.

### تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

### مراجع

- [1] M.N. Naeem, C.B. Sharma, “Prediction of natural frequencies for thin circular cylindrical shells,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 214, pp. 1313–1328, 2000.
- [2] B. Alzahabi, *Modal Vibration Control of Submarine hulls*, WIT Trans. Built Environ. 2004, 76, pp. 515–525.
- [3] F. Nasrekani, S. Kumar, S. Narayan, “Structural Dynamic Modification of Cylindrical Shells with Variable Thickness,” *In Proceedings of the Pressure Vessels and Piping Conference*, Virtual, Online, 3 August 2020.
- [4] M. Bagheri, A. Jafari, M. Sadeghifar, “Multi-objective optimization of ring stiffened cylindrical shells using a Genetic algorithm,” *J. Sound Vib.*, vol. 330, pp. 374–384, 2011.
- [5] M. Mehrabani, A. Jafari, M. Azadi, “Multidisciplinary optimization of a stiffened shell by Genetic algorithm,” *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 26, pp. 517–530, 2012.
- [6] M. Sadeghifar, M. Bagheri, A.A. Jafari, “Multi-objective optimization of orthogonally stiffened cylindrical shells for minimum weight and maximum



### COPYRIGHTS

© 2023 by the authors. Licensee Iranian Space Research Center of Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)