

بهینه‌سازی طراحی چندهدفه یک کپسول زیستی بازگشتی بر اساس تحلیل حساسیت پارامترهای اصلی پیکربندی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۳

حسن ناصح^۱، حدیثه کریمائی^{۲*}، محمد لسانی فدافان^۳

۱ - استادیار پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

۲ - استادیار پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، karimaei@ari.ac.ir

۳ - دانشجوی دکتری پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

چکیده

این مقاله از تحلیل حساسیت پارامترهای اصلی پیکربندی، برای انجام بهینه‌سازی طراحی چند هدفه یک کپسول زیستی بازگشتی استفاده می‌کند. در این راستا، با توجه به فضای طراحی تعریف شده توسط حدود مجاز (حد بالا و پایین) متغیرهای هندسی کپسول، ابتدا به تحلیل حساسیت با روش طراحی آزمایش (DOE) به کمک نمونه‌برداری ابرمکعب لاتین (LHS) پرداخته می‌شود. سپس با مدل‌سازی پیکربندی طراحی، نقاط طراحی بهینه به کمک الگوریتم ژنتیک چندهدفه (MOGA) شناسایی می‌شود. بهینه‌سازی سه هدفه، جبهه‌های پارتو سه بعدی و نامغلوب ایجاد می‌کند که می‌تواند به طراح به خصوص در مرحله طراحی مفهومی در تصمیم‌گیری کمک کند. در ادامه مهم‌ترین جبهه‌های پارتو سه‌بعدی که نتایج و روند آنها از همدیگر مستقل هستند، ارائه شده‌اند. برای صحت‌گذاری نتایج، از مقایسه با نتایج یک نمونه تجربی از پیکربندی کپسول بومی بهره برده شده است. در صورتیکه پارامترهای این کپسول بومی در بازه بهینه پارتو قرار گیرد، در جبهه نشان داده شده است.

واژگان کلیدی: کپسول بازگشتی، بهینه‌سازی طراحی، چندهدفه، تحلیل حساسیت، طراحی آزمایش، الگوریتم ژنتیک چند هدفه.

۸۱

سال ۱۳ - شماره ۲

پاییز و زمستان ۱۴۰۳

نشریه علمی

دانش و فناوری هوافضا



Multi-objective design optimization of a re-entry bio-capsule based on sensitivity analysis of the main configuration parameters

Hassan Naseh¹, Hadiseh Karimaei^{2*}, Mohammad Lesani Fadafan³

1- Assistant Professor of Aerospace Research Institute, Ministry of Science, Research and Technology, Tehran, Iran

2- Assistant Professor of Aerospace Research Institute, Ministry of Science, Research and Technology, Tehran, Iran, karimaei@ari.ac.ir

3- Ph.D. Student of Aerospace Research Institute, Ministry of Science, Research and Technology, Tehran, Iran

Abstract

This paper uses a sensitivity analysis of the main configuration parameters to perform multi-objective, design optimization of a re-entry bio-capsule. In this regard, according to the design space defined by the allowable ranges (upper and lower band limits) of the geometrical variables of the capsule, first, the Sensitivity Analysis (SA) is done using the Design of Experiment (DOE) method with the help of Latin Hypercube Sampling (LHS). Then, by configuration modeling, the optimal design points are identified with the help of a Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA). Triple-objective optimization creates three-dimensional, non-dominant Pareto fronts, which can help the designer's decision-making, especially in the conceptual design phase. The following are the most important three-dimensional Pareto fronts, whose independent results and trends are created and presented. For results verification, the experiment results of the native capsule configuration are utilized. If the native capsule's parameters are placed in the optimal ranges of Pareto, they are shown on the Pareto front.

Keywords: Re-entry capsule, Multi-objective, Design optimization, Sensitivity analysis, DOE, Multi-objective Genetic algorithm (MOGA).

۱. مقدمه

با توجه به تعریف مفهوم عملیات (کاناپس) ماموریتی کپسول‌های زیرمداری، یکی از چالش‌های مهم در طراحی کپسول‌های فضایی مربوط به فاز بازگشت به جو زمین است که هزینه‌های محاسباتی بالایی به سیستم تحمیل می‌نماید. دلیل این اهمیت، الزام ایجاد پایداری ذاتی کپسول در جو غلیظ به منظور ایجاد شرایط مناسب برای باز شدن چترهای ترمزی و اصلی و همچنین شرایط مناسب شتاب‌های وارده به سرنشین می‌باشد. تاکنون تحقیقات زیادی بر روی بهینه‌سازی کپسول‌های بازگشتی انجام شده است. هدف نهایی این تحقیقات، کاهش هزینه‌ها و ارتقای کلی محصول بوده است.

تنگ و همکاران [۱] مطالعه‌ای در مورد بهینه‌سازی آیرودینامیکی کپسول‌های واردشونده به جو انجام دادند. آنها به رویکردهای مختلفی از جمله رویکرد چندهدفه با اهداف بهینه‌سازی نسبت برآ به پسا، راندمان حجمی و پایداری کپسول پرداختند. برای بهبود دقت تقریب‌ها، آنها از یک روش مبتنی بر نظریه غیرخطی با تکیه بر تجربه استفاده کردند. این رویکرد به‌طور قابل توجهی چرخه طراحی را کوتاه نمود. تاوا و سوزوکی [۲] به بهینه‌سازی طراحی چندموضوعی پیکربندی و مسیر یک وسیله واردشونده به جو با موضوعات آیرودینامیک، مسیر و وزن پرداختند. این تحقیق با هدف بهینه‌سازی برد عرضی^۱ و کمینه‌سازی بار حرارتی کل انجام شد. بهینه‌سازی با استفاده از روش هم‌سازی مستقیم^۲ (DC) و یک الگوریتم برنامه‌نویسی درجه دوم متوالی^۳ (SQP) انجام شد. نتایج آنها اهداف مسئله را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشید. آرورا و کومار [۳] از الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای

بهینه‌سازی آیرودینامیکی پیکربندی یک کپسول واردشونده به جو استفاده کردند. آنها به‌طور همزمان به کمینه‌سازی سطح پسای کپسول فضایی و بهینه‌سازی پایداری طولی آن به کمک بهینه‌سازی موقعیت مرکز فشار پرداختند. در نهایت، مجموعه‌ای از پاسخ‌های نامغلوب^۴ ارائه شد و توزیع فشار بر روی بدنه فرموله گردید. دیزینگر و همکاران [۴] بهینه‌سازی آیرودینامیکی چندهدفه پیکربندی کپسول واردشونده به جو را با استفاده از الگوریتم ژنتیک و با در نظر گرفتن اهداف بهینه‌سازی پارامتر پسا (C_DA)، پایداری و راندمان حجمی انجام دادند. در نهایت، پاسخ‌های بهینه پارتو برای بیان اهمیت مصالحه اساسی بین سطح درگ، پایداری و راندمان حجمی استفاده شد. نصرت‌اللهی و همکاران [۵] به بهینه‌سازی طراحی چندموضوعی پیکربندی وسیله واردشونده به جو با هدف کمینه‌سازی جرم سازه کپسول و گرمای جذب شده کل و بهینه‌سازی ضریب پسا پرداختند. موضوعات شامل سازه، آیرودینامیک و حرارت بود. آنها از الگوریتم‌های ژنتیک تک‌هدفه^۵ (GA) و چندهدفه^۶ (MOGA) به‌عنوان بهینه‌ساز استفاده کردند. پری‌بارداشی و میتال [۶] بهینه‌سازی چندموضوعی چندهدفه پیکربندی کپسول نیمه‌بالستیک واردشونده به جو را برای هدف کمینه‌سازی جرم کل و بهینه‌سازی برد متقاطع انجام دادند. موضوعات شامل آیرودینامیک، مسیر، انتقال حرارت همرفتی با طراحی سیستم حفاظت حرارتی^۷ (TPS) و تخمین وزن سازه بود. نتایج نشان داد که دقت موضوع آیرودینامیک به‌طور قابل ملاحظه‌ای بر تنظیمات پیکربندی بهینه تأثیر می‌گذارد.

آدمی و همکاران [۷] به بهینه‌سازی طراحی

4 Nondominated solutions

5 Genetic Algorithms

6 Multi-Objective Genetic Algorithms

7 Thermal Protection System

1 Cross-range

2 Direct Collocation

3 Sequential Quadratic Programming



چندموضوعی پیکربندی کپسول واردشونده به جو با هدف کمینه‌سازی هزینه ماموریت پرداختند. موضوعات طراحی شامل مسیر، حرارت، آیرودینامیک، سازه، سیستم حفاظت حرارتی و نیروی جلوبرنده مداری^۱ برای بهینه‌سازی پیکربندی کپسول فضایی دو مخروطی^۲ بود. چهارچوب^۳ چندموضوعی همه در یک مرحله^۴ (AAO) توسعه داده شد و از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی استفاده شد. دریکس و موجی [۸] پیکربندی یک کپسول فضایی و یک وسیله بالدار^۵ را در فاز طراحی مفهومی بهینه کردند. موضوعات شامل آیرودینامیک، حرارت، مسیر، هدایت و کنترل بود. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه^۶ (MOPSO) برای بهینه‌سازی شکل و با در نظر گرفتن اهداف کمینه‌سازی جرم، بیشینه‌سازی حجم و برد استفاده شد. نتایج نشان داد که جبهه پارتو غالباً مناطق غیرخطی قوی متغیر^۷ را نسبت به فضای هدف نشان می‌دهد. در این مناطق، یک بهبود کم در یک هدف منجر به تغییر نسبتاً زیادی در پارامترها و قیود شکل می‌شود. بونسکیو و همکاران [۹] به بهینه‌سازی آیرودینامیک-حرارتی پیکربندی کپسول واردشونده به جو با موضوعات هندسه، آیرودینامیک و حرارت پرداختند. اهداف شامل کمینه‌سازی شار حرارتی، بیشینه‌سازی پایداری و ضریب پسا بود. آنها برای بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک استفاده کردند. نتایج نشان داد که روش حل ایشان برای بهینه‌سازی آیرودینامیکی-حرارتی مناسب است. برشنلوا و همکاران [۱۰] پیکربندی یک وسیله واردشونده به جو را با روش متقارن محوری آنالوگ^۸ و تکنیک اصلاح

شده نیوتن^۹ بهینه کردند. موضوعات شامل هندسه، آیرودینامیک، حرارت و مسیر بود. روش بهینه‌سازی شامل روش طراحی آزمایش و روش سطح پاسخ بود. آنها محدودیت‌های روش فعلی را شناسایی و زمینه‌های بهبود تکنیک را مشخص نمودند. ناصح و همکاران [۱۱] بهینه‌سازی دوهدفه سازه‌ای کپسول فضایی با تقریب استوانه جدار نازک با طول مشخص و تحت نیروی محوری فشاری و فشار جانبی ثابت را انجام دادند. اهداف بهینه‌سازی، کمینه‌سازی جرم و بیشینه‌سازی فرکانس مود اول ارتعاشاتی استوانه بود. آنها به کمک نرم‌افزار انسیس و تهیه سطح پاسخ، نقطه بهینه طراحی به کمک الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک دو هدفه را شناسایی نمودند. کبگانیان و همکاران [۱۲] طراحی چندموضوعی فضاپیما آپولو را با استفاده از روش شبه‌طیفی رادو^{۱۰} و با هدف کاهش جرم، بهینه کردند. موضوعات شامل مسیر، هندسه، آیرودینامیک و حرارت بود. آنها ابعاد بهینه فضاپیما را ارائه نمودند که منجر به کاهش قابل ملاحظه جرم در مقایسه با جرم اصلی آپولو شد.

هدف از تحقیق حاضر، طراحی چندموضوعی-چندهدفه کپسول واردشونده به جو در فاز طراحی مفهومی بر اساس تحلیل حساسیت پارامترهای اصلی پیکربندی است. موضوعات طراحی شامل هندسه، آیرودینامیک، گرمایش، مسیر و سازه است. آنچه که این تحقیق را از کارهای انجام شده پیشین متمایز می‌کند، تمرکز بر موضوع و اهداف سازه‌ای در مسئله چندموضوعی طراحی کپسول فضایی می‌باشد. این اهداف سازه‌ای که در تحقیقات پیشین مورد بررسی قرار نگرفته‌اند، عبارتند از کمینه‌سازی تغییر شکل سازه، بیشینه‌سازی فرکانس طبیعی اول سازه و بیشینه‌سازی ضریب بار کماتشی سازه. در این تحقیق با توجه به

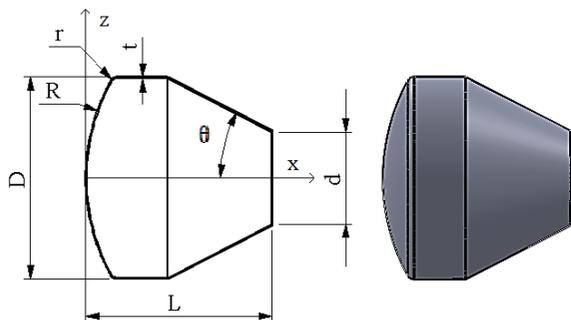
- 1 Deorbit Propulsion
- 2 Bi-conic
- 3 Framework
- 4 All At Once
- 5 Winged vehicle
- 6 Multi-Objective Particle Swarm Optimization
- 7 Regions of strong non-linearity
- 8 Axisymmetric Analogue Method

9 Modified Newtonian Technique
10 Rado pseudo-spectral method



راندمان حجمی به‌عنوان یکی از توابع هدف موضوع هندسه در قالب معادله (۱) تعریف می‌شود. بیشینه‌سازی راندمان حجمی می‌تواند منجر به بهترین چیدمان تجهیزات در داخل کپسول زیستی شود.

$$\eta_v = \frac{6 \times V \sqrt{\pi}}{S^{3/2}} \quad (1)$$



شکل ۱. هندسه کپسول بازگشتی

جدول (۱) حدود مجاز متغیرهای طراحی را بر اساس الزامات مأموریت و پایگاه داده کپسول بومی موجود نشان می‌دهد. این حدود در واقع فضای طراحی را تعریف می‌کنند.

جدول ۱. حدود مجاز متغیرهای طراحی

No.	Design variable	Minimum value	Maximum value
1	(mm) L	1000	2400
2	(mm) D	1000	2000
3	θ°	5	80
4	(mm) R	1000	2000
5	(mm) d	400	800
6	(mm) r	20	100
7	(mm) t	3	12

۲-۲- آیرودینامیک

برای مدل‌سازی موضوع آیرودینامیک و استخراج ضرایب آیرودینامیکی و مشتقات پایداری، از کد MD^2 [۱۳] استفاده شده است. فرض شده است که مختصات طولی مرکز جرم کپسول زیستی با مرکز حجم کپسول

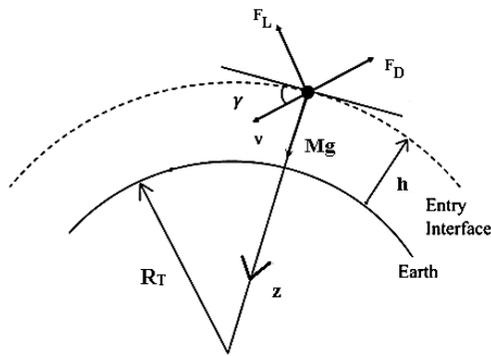
فضای طراحی متشکل از متغیرهای هندسی کپسول، تحلیل حساسیت^۱ با استفاده از روش طراحی آزمایش با نمونه‌برداری ابرمکعب لاتین انجام می‌شود. سپس بهینه‌سازی با رویکرد سه‌هدفه مورد بررسی قرار گرفته است و از الگوریتم ژنتیک چندهدفه استفاده شده است. مهمترین جنبه‌های پارتو سه‌بعدی که نتیجه و روند آنها از همدیگر مستقل هستند، ایجاد و ارائه شده‌اند و جایگاه پیکربندی کپسول بومی در صورتی که بهینه پارتو بوده باشد، در جبهه نشان داده شده است.

۲. موضوعات طراحی و قیود متغیرهای بهینه‌سازی

در ابتدا با توجه به حدود مجاز متغیرهای طراحی (یعنی همان متغیرهای هندسی تعیین‌کننده پیکربندی کپسول)، به تحلیل حساسیت به روش طراحی آزمایش با نمونه‌برداری ابرمکعب لاتین پرداخته می‌شود. هدف از این تحلیل، مشخص نمودن تاثیر متغیرهای طراحی انتخاب شده بر روی توابع هدف و قیود بهینه‌سازی می‌باشد. سپس بهینه‌سازی به کمک الگوریتم ژنتیک چندهدفه انجام می‌گیرد. موضوعات طراحی شامل هندسه، آیرودینامیک، مسیر، گرمایش و سازه می‌باشد. در بخش‌های بعدی به اختصار، متغیرهای انتخابی در این بهینه‌سازی در هر یک از موضوعات طراحی ارائه شده است.

۲-۱- هندسه

شکل ۱ هندسه کپسول زیستی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، این هندسه با هفت پارامتر هندسی شامل طول کل کپسول، قطر بزرگ کپسول، زاویه نیم‌مخروطی، شعاع سپر حرارتی، قطر کوچک، شعاع جانبی و ضخامت پوسته فلزی (یکنواخت فرض شده است) تعریف می‌شود. تابع



شکل ۲. دیاگرام آزاد کپسول در ورود به جو [۱۵] [15]

۲-۴- گرمایش

استفاده از شکل سازه کره-مخروط برای وسایل واردشونده به جو به عنوان نظریه بدنه بلانت شناخته می‌شود [۱۶]. برای محاسبه شار حرارتی نقطه سکون [۱۲] از رابطه (۶) استفاده شده است. ضمناً از کامپوزیت سیلیکا- فنولیک به‌عنوان عایق حرارتی استفاده شده است.

$$q = 1.83 \times 10^{-4} \times V^3 \times \left(1 - \frac{T_w}{T_{aw}}\right) \sqrt{\frac{\rho}{R}} \quad (6)$$

۲-۵- سازه

برای مدل‌سازی موضوع سازه کپسول زیستی از روش اجزای محدود در نرم‌افزار انسیس ورک‌بنچ^۲ استفاده شده است. این تحلیل‌ها شامل تحلیل استاتیکی سازه، کمانش و مودال است که تنش معادل فون میسز (رابطه (۷))، حداکثر تغییر شکل سازه‌ای، اولین فرکانس طبیعی پوسته و ضریب بار کمانشی کپسول (رابطه (۸)) را محاسبه می‌کنند. جنس پوسته بدنه کپسول، آلومینیوم T6-۶۰۶۱ در نظر گرفته شده است.

منطبق است. این فرض در فاز طراحی مفهومی و استخراج شمایل خارجی پیکره، با عنایت به در دسترس نبودن جانمایی تجهیزات داخلی و جرم آنها، در نظر گرفته می‌شود. مختصات عرضی مرکز جرم (آفست) را نیز می‌توان تا ۵ درصد قطر بزرگ کپسول در نظر گرفت. توابع حاشیه پایداری طولی^۱ و ضریب بالستیکی که به ترتیب در روابط (۲) و (۳) تعریف شده‌اند، به‌عنوان موضوع آیرودینامیک مدل‌سازی شده‌اند.

$$S.M = \frac{X_{CP} - X_{CG}}{L} \quad (2)$$

$$B.C = \frac{M}{C_D A} \quad (3)$$

۲-۳- مسیر

برای شبیه‌سازی فاز بازگشت به جو کپسول، یک کد سه درجه آزادی در نرم‌افزار متلب توسعه داده شده است. معادلات فاز ورود به جو در رابطه (۴) [۱۴] نشان داده شده است. شکل ۲ شماتیک مختصات کپسول در بازگشت به جو را نشان می‌دهد.

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{z} \\ \dot{V} \\ \dot{\gamma} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V \cdot \cos(\gamma) \\ V \cdot \sin(\gamma) \\ \frac{F_D}{M} - (g + Acc_{ct}) \cdot \sin(\gamma) \\ \frac{1}{V} \left(-\frac{F_L}{M} + (g + Acc_{ct}) \cdot \cos(\gamma) \right) \end{pmatrix} \quad (4)$$

ضریب بار وارد بر کپسول طبق رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$n = \frac{\sqrt{F_D^2 + F_L^2}}{Mg} \quad (5)$$



$$\sigma_{\text{von-mises}} = \sqrt{0.5[(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2] + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{13}^2)} \quad (7)$$

$$L.M = \frac{F_{\text{critical}}}{F_{\text{applied}}} \quad (8)$$

همچنین فرض شده است که جرم کل کپسول متشکل از جرم تجهیزات ثابت به علاوه جرم سازه و جرم عایق حرارتی است.

۲-۶- قیود طراحی

برای مسئله بهینه‌سازی با استفاده از الزامات طراحی، قیود متغیرهای طراحی به صورت جدول (۲) مشخص می‌شوند. لازم به ذکر است که این قیود به صورت کلی برای حل مسئله کمینه‌سازی جرم بیان شده است. لذا، هر یک از این قیود می‌تواند به یک هدف تبدیل شده و یک مسئله بهینه‌سازی جدید را تشکیل دهد. در ادامه، بهینه‌سازی با توابع هدف مختلف مورد بحث قرار خواهد گرفت.

جدول ۲. قیود مسئله کمینه‌سازی جرم کپسول

ردیف	قیود	مقدار
۱	شار حرارتی نقطه سکون	$q \leq 100 \text{ kw/m}^2$
۲	ضریب بار	$n \leq 5$
۳	حجم کپسول	$\text{Vol} \geq 1.88 \text{m}^3$
۴	دمای پوسته فلزی	$373 \text{ K} \leq T$
۵	ضریب اطمینان سازه‌ای	$S.F \geq 2$
۶	حاشیه پایداری طولی	$S.M \geq 0.1$
۷	ضریب اطمینان کمانشی	$L.M \geq 2$

۳. طراحی آزمایش، تحلیل حساسیت و ماتریس همبستگی^۱

در این بخش، طراحی آزمایش، تحلیل حساسیت و ماتریس همبستگی ارائه می‌شود.

۳-۱- طراحی آزمایش مبتنی بر روش نمونه‌برداری ابرمکعب لاتین

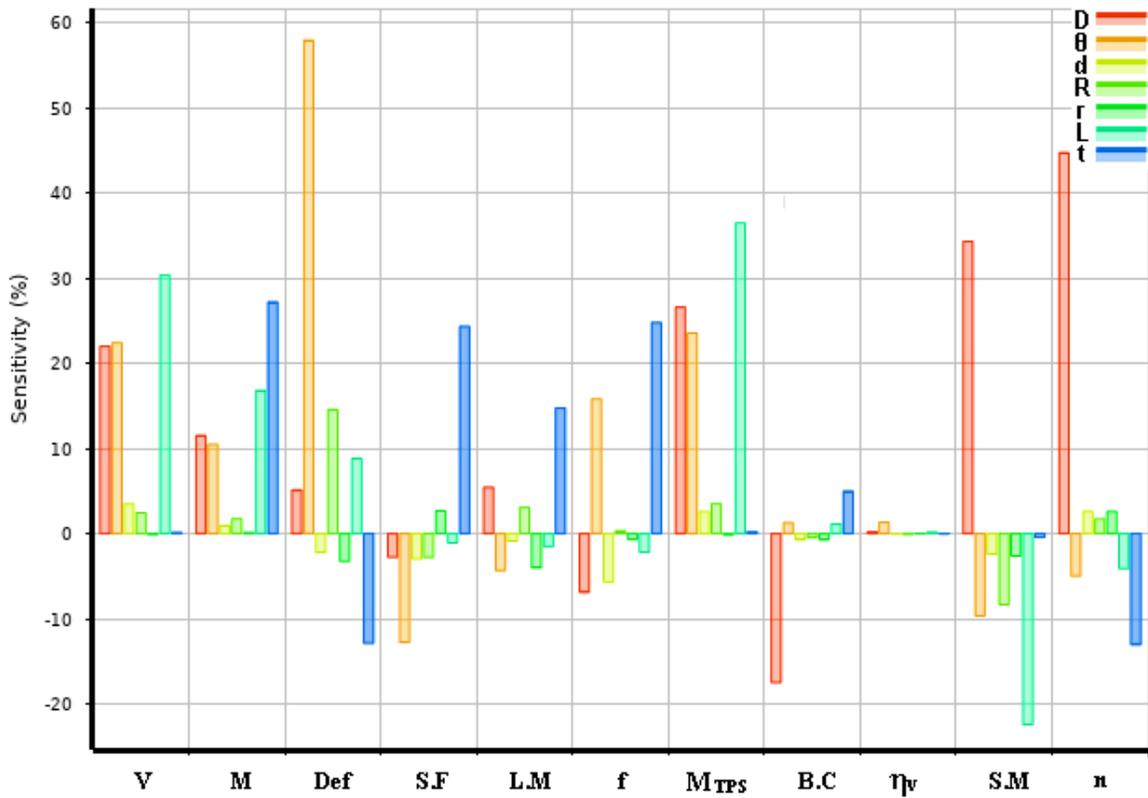
محققان از طراحی آزمایش به عنوان یک روش علمی برای درک فرآیندها و تعیین تأثیر ورودی‌ها بر خروجی‌ها استفاده می‌کنند. در طراحی آزمایش از تکنیک‌های مختلفی نظیر طراحی‌های تصادفی^۲، طراحی‌های کلاسیک و طراحی‌های پوشش فضا^۳ می‌توان استفاده نمود [۱۷]. در این مقاله از روش نمونه‌برداری ابر مکعب لاتین که ذیل تکنیک طراحی پوشش فضا می‌باشد، استفاده شده است، زیرا برای شبیه‌سازی‌های عددی با خطای معین مناسب می‌باشد. با انتخاب این روش، تعداد صد و نه نقطه طراحی برای پوشش موثر فضای طراحی استفاده شده است.

۳-۲- تحلیل حساسیت

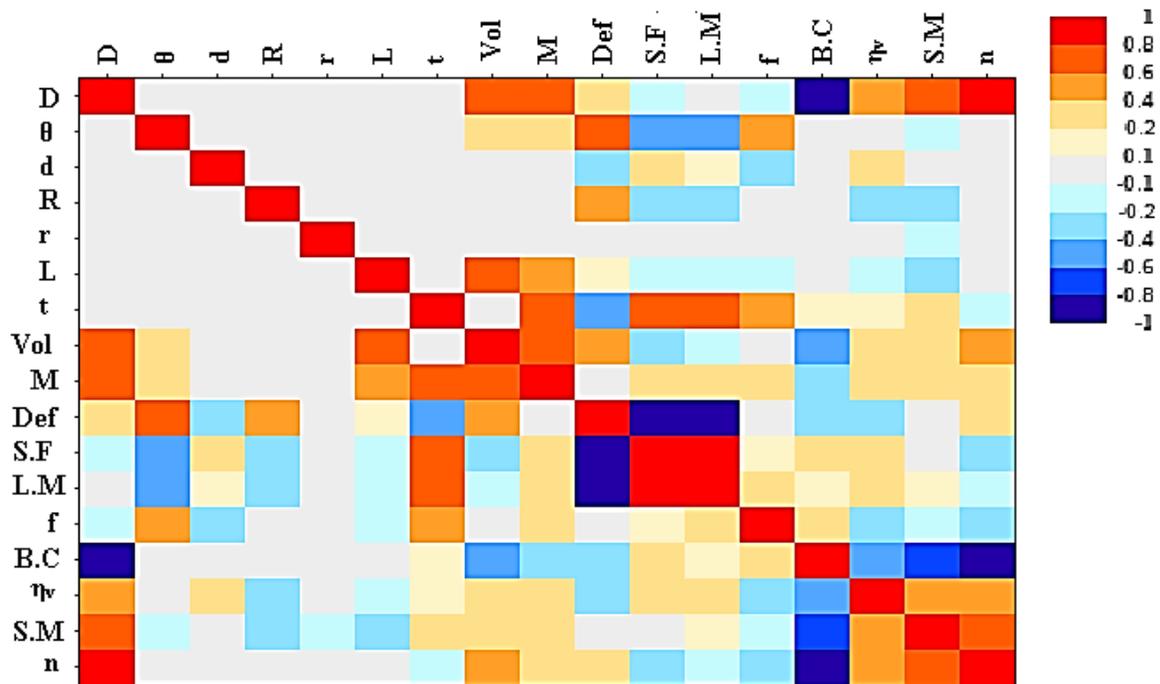
تحلیل حساسیت به مطالعه تأثیرپذیری متغیرهای خروجی از متغیرهای ورودی یک مدل آماری گفته می‌شود. به عبارت دیگر روشی برای تغییر دادن در ورودی‌های یک مدل آماری به صورت سازمان‌یافته (سیستماتیک) است که بتوان تأثیرات این تغییرها را در خروجی مدل پیش‌بینی کرد [۱۸]. تحلیل حساسیت در واقع چگونگی تأثیر یک تابع از متغیرهای ورودی را ارزیابی می‌کند. دامنه حساسیت از منهای ۱۰۰٪ تا مثبت ۱۰۰٪ است که رابطه بین متغیرها و توابع را نشان می‌دهد. مقادیر مثبت نشان‌دهنده رابطه مستقیم بین متغیرها و مقادیر منفی نشان‌دهنده رابطه معکوس است. شکل ۳ نتایج تحلیل حساسیت در پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که تمامی متغیرهای طراحی انتخاب‌شده بر روی توابع مسئله تأثیرگذار هستند، پس قابل حذف نمی‌باشند. میزان کمی تأثیرگذاری آنها در ماتریس همبستگی آشکار است.

2 Randomized Designs
3 Space-Filling Designs

1 Correlation Matrix



شکل ۳. تحلیل حساسیت توابع بر حسب متغیرهای طراحی



شکل ۴. ماتریس همبستگی ورودی‌ها و خروجی‌ها

۳-۳- ماتریس همبستگی

ماتریس همبستگی نشان می‌دهد که هر دو متغیر با هم چه تعاملی دارند و چگونه در مجموعه داده رفتار می‌کنند. این تعامل با ضرایب همبستگی بین متغیرهای مختلف در یک مجموعه داده نشان داده می‌شوند که معیاری از ارتباط خطی بین دو متغیر هستند و مقداری بین ۱- تا ۱+ می‌گیرند. اعداد منفی نشان‌دهنده همبستگی خطی معکوس بین دو متغیر و اعداد مثبت نشان‌دهنده همبستگی خطی مستقیم بین دو متغیر هستند. صفر نشان‌دهنده عدم همبستگی خطی بین دو متغیر است. هر چه این ضریب به ۱ نزدیکتر باشد، متغیرها وابسته‌تر هستند یعنی رابطه آنها قوی‌تر است، زیرا هر متغیر طبیعتاً حداکثر همبستگی را با خود دارد. شکل ۴ مربوط به تحلیل مسئله حاضر با یک ماتریس همبستگی 17×17 ورودی و خروجی است که متشکل از متغیرها و توابع است. همانطور که مشاهده می‌شود تمامی متغیرهای طراحی انتخاب‌شده، بر روی توابع هدف و قیود مسئله بهینه‌سازی تاثیر دارند و نمی‌توان هیچ کدام را نادیده گرفت. شایان ذکر است که ممکن است یک یا چند متغیر تاثیر چندانی بر یک تابع نداشته باشند، اما بر سایر توابع تاثیرگذار باشند، بنابراین نمی‌توان آنها را نادیده گرفت.

۴. پیاده‌سازی چارچوب بهینه‌سازی

چندهدفه

در این بخش، به منظور پیاده‌سازی روش طراحی بهینه‌سازی چندهدفه پیکربندی کپسول زیستی با در نظر گرفتن کلیه موضوعات طراحی (پنج موضوع طراحی که قبلاً عنوان گردید)، در یک

چارچوب بهینه‌سازی صورت می‌پذیرد. برای دستیابی به هندسه‌های بهینه کپسول، تعداد ۹ هدف در نظر گرفته شده است که شامل کمینه‌سازی جرم، ضریب بالستیک، تغییر شکل سازه‌ای و بیشینه‌سازی پارامتر CDA، پایداری طولی، حجم داخلی، فرکانس طبیعی اول سازه‌ای، ضریب بار کمانشی و راندمان حجمی است. جدول (۳) پارامترهای الگوریتم ژنتیک چندهدفه (مشخصات بهینه‌ساز) مورد استفاده برای مسائل بهینه‌سازی این مقاله را نشان می‌دهد [۱۹-۲۰].

جدول ۳. پارامترهای بهینه‌ساز (الگوریتم ژنتیک چندهدفه)

ردیف	پارامتر	مقدار
۱	اندازه جمعیت	۴۰
۲	هاتعداد نسل	۸۰۰
۳	تعداد والدین	۲۰
۴	احتمال ترکیب	٪۵۰
۵	نرخ جهش	٪۱۴

در جدول (۴) نتایج این بهینه‌سازی‌ها (هر بار بر اساس تک هدف خاص) ارائه شده است. حال در ادامه، هر بار سه هدف از این اهداف به صورت همزمان برای ایجاد جبهه سه‌بعدی پارتو در نظر گرفته می‌شوند.

شکل ۵ جبهه پارتو سه‌بعدی ناشی از بهینه‌سازی همزمان سه هدفه شامل کمینه‌سازی جرم کل، تغییر شکل سازه‌ای و بیشینه‌سازی راندمان حجمی را نشان می‌دهد. این جبهه شامل ۱۵ رنگ^{۲۵} است، که رنگ شماره ۱ (نقاط آبی رنگ) حاوی نقاط بهینه نامغلوب هستند. سه عدد کپسول بهینه بر روی جبهه پارتو و با رنگ یک (در نقاط امکان‌پذیر) انتخاب شده‌اند که این‌ها



شماره ۱ مربوط به بیشینه راندمان حجمی با رنک یک است.

نسبت به سایرین با رنک یک، هیچ برتری ندارند و صرفاً با هدف ارائه روند تغییرات شکل کپسول بر روی جبهه پارتو انتخاب شده‌اند. کپسول

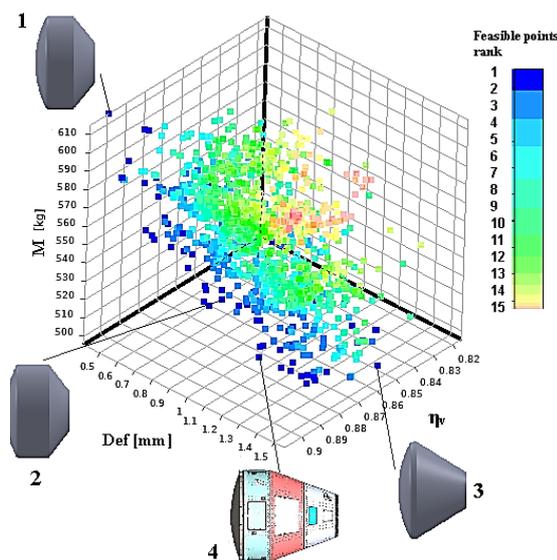
جدول ۴. مشخصات پیکربندی‌های بینه

No.	Objective	(mm) D	(Deg) θ	d (mm)	R (mm)	(mm) r	(mm) L	(mm) t
1	Min M	1834	46	714	1970	50	1100	3
2	Max S.M	1996	41	798	1985	98.5	1084	7
3	Min B.C	1986	36	796	1965	87	1286	3
4	Max $C_D A$	1997	39	790	1998	96	1370	3
5	Max η_v	1790	47	790	1970	70	1280	5
6	Max Vol	2000	57	800	1962	22	1544	5
7	Min Def	1832	41	797	1995	97	1286	12
8	Max f	1882	73	540	1970	47	1039	12
9	Max L.M	1782	28	800	1970	50	1279	12
10	Experiment test	1400	25	700	1700	20	1350	4

کل (مربوط به کپسول شماره ۳ در شکل ۵) در الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک چندهدفه به عنوان نمونه ارائه شده است. برای همه اهداف این مساله بهینه‌سازی، همگرایی چک شده است. شکل ۷ جبهه پارتو سه‌بعدی برای بهینه‌سازی همزمان سه هدفه شامل کمینه‌سازی جرم کل، بیشینه‌سازی حاشیه پایداری طولی و راندمان حجمی را نشان می‌دهد. کپسول شماره ۱ مربوط به بیشینه راندمان حجمی با رنک یک است. کپسول شماره ۲ مربوط به کمینه جرم با رنک یک است و کپسول شماره ۳ مربوط به بیشینه حاشیه پایداری طولی با رنک یک است. همچنین مشاهده می‌شود که کپسول بومی (کپسول شماره ۴) در رنک ۱۲ قرار دارد.

شکل ۸ جبهه پارتو سه‌بعدی را برای بهینه‌سازی همزمان سه‌هدفه از جمله کمینه‌سازی ضریب بالستیک، بیشینه‌سازی حاشیه پایداری طولی و راندمان حجمی نشان می‌دهد. کپسول شماره ۱ دارای بیشینه راندمان حجمی واقع در رنک یک است. کپسول شماره ۲ دارای کمینه ضریب بالستیکی واقع در رنک یک است.

کپسول شماره ۲ دارای کمینه تغییر شکل سازه‌ای با رنک یک و کپسول شماره ۳ دارای کمینه جرم با رنک یک است. همچنین مشاهده می‌شود که کپسول بومی (کپسول شماره ۴) نیز در رنک یک واقع شده است و با توجه به سه هدف مذکور، در زمره نقاط بهینه پارتو می‌باشد.

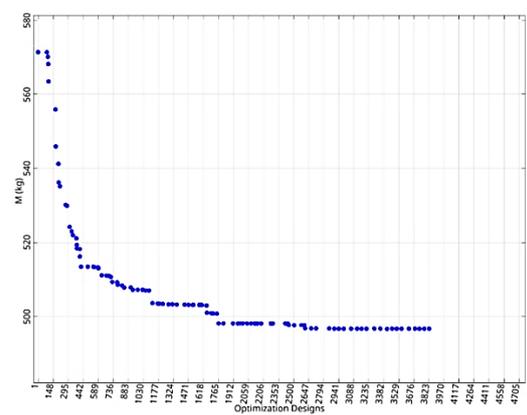


شکل ۵. جبهه پارتو سه‌هدفه جرم، راندمان حجمی و تغییر شکل سازه‌ای

در شکل ۶، نمودار همگرایی تابع هدف جرم

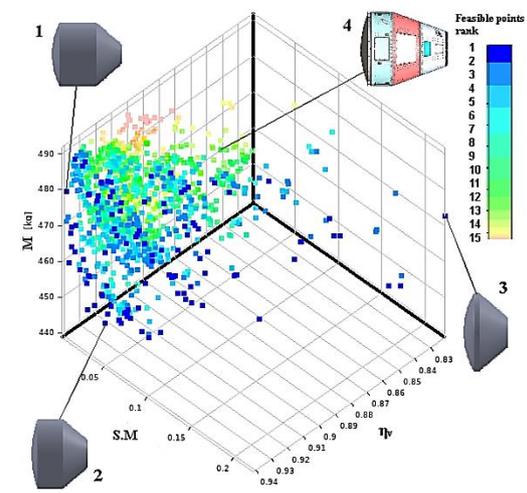


همچنین کپسول شماره ۳ دارای بیشینه حاشیه پایداری طولی واقع در رنگ یک است. از آنجا که کپسول تست شده بومی در ۱۵ رنگ اول این بهینه‌سازی واقع نشده است، در شکل مذکور نشان داده نشده است. از این رو کپسول بومی (نمونه تجربی) نسبت به اهداف فوق، نقطه بهینه پارتو نمی‌باشد.



شکل ۶: نمودار همگرایی تابع هدف جرم کل در الگوریتم

بهینه‌سازی ژنتیک چندهدفه

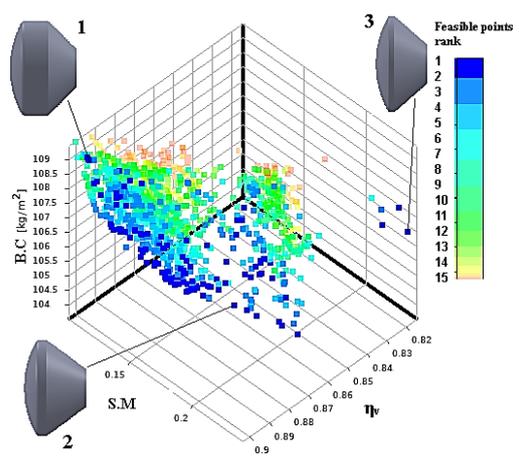


شکل ۷: جبهه پارتو سه هدفه شامل جرم، راندمان

حجمی و پایداری طولی

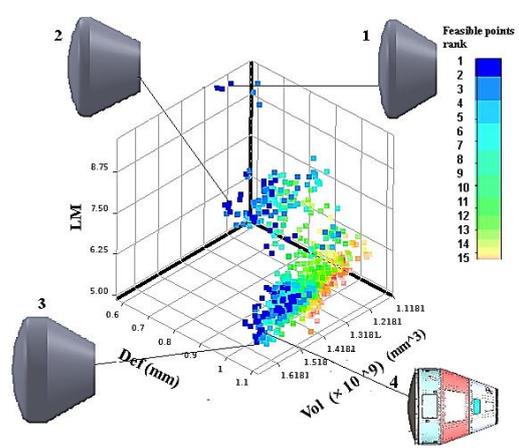
شکل ۹ جبهه پارتو سه‌بعدی برای بهینه‌سازی همزمان سه هدف شامل بیشینه‌سازی حجم داخلی کپسول، کمینه‌سازی تغییر شکل سازه‌ای و بیشینه‌سازی ضریب اطمینان کمانشی کپسول را نشان می‌دهد. کپسول ۱ دارای بیشترین ضریب

اطمینان کمانشی است (یعنی بیشترین مقاومت در برابر کمانش). کپسول ۲ دارای کمترین تغییر شکل سازه‌ای (یعنی بیشترین صلابت سازه‌ای) است و کپسول شماره ۳ دارای بیشترین حجم داخلی در جبهه پارتو می‌باشد. این کپسول‌ها جهت نشان دادن روند تغییرات شکل کپسول بر روی رنگ ۱ می‌باشند و هیچ کدام بر دیگری برتری ندارند و با توجه به ضریب اهمیت هر هدف، با نظر طراح می‌توانند انتخاب شوند. همچنین کپسول شماره ۴ که کپسول بومی تحت مطالعه این مقاله است، بر روی رنگ ۱ واقع است که یعنی این کپسول نسبت به سه هدف مذکور، نقطه بهینه پارتو محسوب می‌شود.



شکل ۸: جبهه پارتو سه هدفه شامل ضریب بالستیکی،

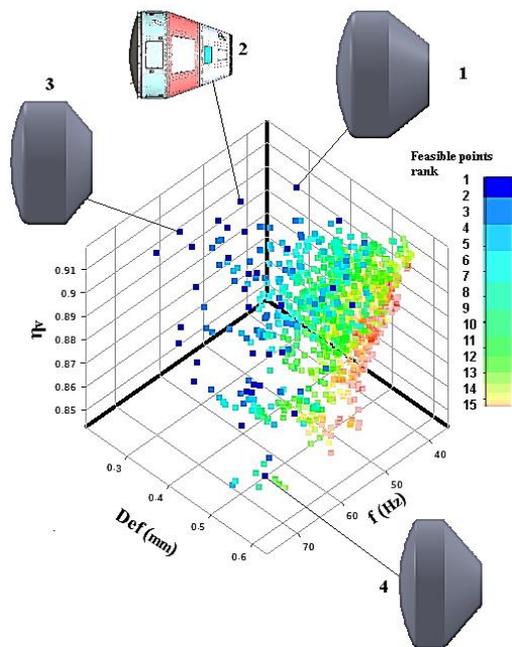
پایداری و راندمان حجمی



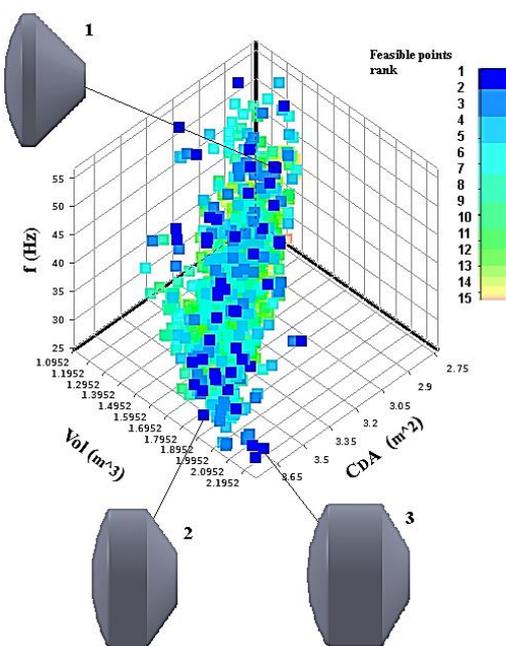
نشان می‌دهد. کپسول ۱ دارای بیشترین ضریب

شکل ۹. جبهه پارتو سه هدفه شامل ضریب اطمینان کمانشی، تغییر شکل سازه‌ای و حجم داخلی

دیگری برتری ندارند و با توجه به ضریب اهمیت هر هدف، با نظر طراح می‌توانند انتخاب شوند. همچنین لازم به ذکر است که کپسول بومی در این رنکینگ قرار نگرفته است، پس نسبت به این سه هدف همزمان، نقطه بهینه پارتو نمی‌باشد.



شکل ۱۰. جبهه پارتو سه هدفه شامل ضریب راندمان حجمی، تغییر شکل سازه‌ای و فرکانس اول ارتعاشی بدنه فلزی



شکل ۱۰ جبهه پارتو سه بعدی برای بهینه‌سازی همزمان سه هدف شامل بیشینه‌سازی ضریب راندمان حجمی، کمینه‌سازی تغییر شکل سازه‌ای و بیشینه‌سازی فرکانس اول ارتعاشی کپسول‌ها را نشان می‌دهد. این جبهه شامل ۱۵ رنک است که رنک شماره ۱ (نقاط آبی رنگ) حاوی نقاط بهینه نامغلوب هستند. کپسول ۱ واقع بر رنک ۱ دارای بیشترین ضریب راندمان حجمی است. همچنین کپسول ۲ که یک کپسول بومی است بر روی رنک ۱ واقع است، پس نسبت به این سه هدف، نقطه بهینه پارتو است. کپسول شماره ۳ واقع بر رنک ۱ دارای کمترین تغییر شکل سازه‌ای در جبهه پارتو است و همچنین کپسول شماره ۴ دارای بیشترین فرکانس اول سازه است. این کپسول‌ها جهت نشان دادن روند تغییرات شکل کپسول بر روی رنک ۱ می‌باشند و هیچ کدام بر دیگری ارجحیت ندارند که با توجه به ضریب اهمیت هر هدف، با نظر طراح می‌توانند انتخاب شوند.

شکل ۱۱ جبهه پارتو سه بعدی برای بهینه‌سازی کپسول با سه هدف به صورت همزمان از جمله بیشینه‌سازی فرکانس اول سازه‌ای، حجم داخلی و پارامتر پسای (CDA) کپسول را نشان می‌دهد. کپسول شماره ۱ دارای بیشترین فرکانس اول سازه‌ای، کپسول شماره ۲ در شکل دارای بیشترین پارامتر پسای و کپسول شماره ۳ دارای بیشترین حجم داخلی در میان نقاط بهینه موجود در جبهه پارتو می‌باشند. این کپسول‌ها جهت نشان دادن روند تغییرات شکل کپسول بر روی رنک ۱ مشخص شده‌اند و هیچ کدام بر

R	Heat shield radius
d	Minimum diameter
r	Corner radius
t	Metal shell thickness
η_v	Volumetric efficiency
X_{CG}	Longitudinal coordinate of the center of mass
X_{CP}	Longitudinal coordinate of the center of pressure
S.M	Static stability margin
M	Total mass
M_{TPS}	Heat shield mass
M_{str}	Structure mass
$M_{equipment}$	Equipment mass
C_D	Drag coefficient
A_{ref}	Drag reference area
Vol	The internal volume of the capsule
S	Capsule surface area
ρ	Air density
ϵ	Poisson's ratio
q	Stagnation points heat flux
T_w	Wall temperature
T_{aw}	Adiabatic wall temperature
Def	Maximum structural deformation
f	The first natural frequency of the structure
C_L	Lift coefficient
B.C	Ballistic coefficient
F_D	Drag force
F_L	Lift force
V	Velocity
γ	Flight path angle
g	Acceleration of gravity
$\mu=398600$ $km^3.S^{-2}$	Earth's standard gravity parameter
R_E $=6378.139Km$	Radius of the earth
h	Altitude
Acc_{ct}	Centrifugal acceleration
n	Load factor
$\sigma_{von-mises}$	Von-Mises equivalent stress
σ_{ij}	Stress tensor components
S.F	Safety factor
σ_{Yield}	Yield stress
L.M	Buckling load multiplier
$F_{critical}$	Critical buckling force
$F_{applied}$	Applied buckling force
Mach	Mach number
α	Angle of attack
z	Altitude coordinate

شکل ۱۱. جبهه پارتو سه هدفه شامل فرکانس اول سازه‌ای، حجم داخلی و پارامتر پسا

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، بهینه‌سازی طراحی چندهدفه یک کپسول واردشونده به جو بر اساس تحلیل حساسیت پارامترهای اصلی پیکربندی با رویکرد سه‌هدفه انجام پذیرفت. در این بهینه‌سازی، موضوعات مهم طراحی از قبیل هندسه، آیرودینامیک، مسیر، گرمایش و سازه در نظر گرفته شدند و بهینه‌سازی از منظر اهداف سازه‌ای نیز مورد توجه ویژه قرار گرفت. تحلیل حساسیت با استفاده از طراحی آزمایش به کمک نمونه‌برداری ابرمکعب لاتین انجام شد. سپس نقاط طراحی بهینه با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه، شناسایی شدند. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که کلیه متغیرهای طراحی انتخاب شده، برای بهینه‌سازی پیکربندی (شمایل) کپسول ضروری هستند. در این رویکرد بهینه‌سازی سه‌هدفه، تعدادی جبهه پارتو سه‌بعدی ایجاد شدند. مشخصات پیکربندی‌های مختلف در جدول ۴ ارائه شد. در این جدول، ۹ پیکربندی بهینه به همراه مشخصات کپسول زیستی بومی (نمونه تجربی) آورده شده است. سپس جایگاه هر یک از این ۹ پیکربندی و کپسول بومی در جبهه‌های پارتو نیز جهت مقایسه مشخص شدند. چنانچه ملاحظه می‌شود، با تغییرات اهداف بهینه‌سازی، بهینه‌گی هر یک از پیکربندی‌های نه‌گانه، متفاوت خواهد بود.

۶. فهرست علائم

L	Length
D	Maximum diameter
θ	Half-cone angle



for Re-entry Capsule Using Genetic Algorithms. INCAS.

- [10] Brchnelova, Michaela & Mooij, Erwin. (2021). Re-entry Shape Optimisation Using the Axisymmetric Analogue Method with Modified Newtonian Technique Resolved Inviscid Flowfield. 10.2514/6.2021-0171.
- [11] Naseh H., Karimaei H., Lesani M. "Two-Objective Structural Optimization of Space Capsule with Thin-Walled Cylindrical Approximation." *Journal of Space Science, Technology & Applications (Persian)* 2.2 (2022): 158-170.
- [12] Kabganian, Masoud, Seyed M. Hashemi, and Jafar Roshanian. "Multidisciplinary Design Optimization of a Re-Entry Spacecraft via Radau Pseudospectral Method." *Applied Mechanics* 3.4 (2022): 1176-1189.
- [13] T. J. Sooy, R. Z. Schmidt, Aerodynamic Predictions, Comparisons, and Validations Using Missile DATCOM (97) and Aeroprediction 98 (AP98), *Journal of Spacecraft and Rockets*, 42 (2005) 257-265.
- [14] Thibault, Cantou & Merlinge, Nicolas & Wuilbercq, Romain. (2019). 3DoF simulation model and specific aerodynamic control capabilities for SpaceX's Starship-like atmospheric reentry vehicle.
- [15] Aproxvitoa, A., Montella, N., Iuspa, L., Pezzella, G., & Viviani, A. (2021). An optimal heat-flux targeting procedure for LEO re-entry of reusable vehicles. *Aerospace Science and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.106608>
- [16] Vincenti, W. G., Boyd, J. W., & Bugos, G. E. (2007). H. Julian Allen: an appreciation. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 39, 1-17.
- [17] Montgomery, Douglas (2013). *Design and analysis of experiments* (8th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.
- [18] Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D. Saisana, M., and Tarantola, S., (2008), *Global Sensitivity Analysis. The Primer*, John Wiley & Sons.
- [19] Sobieszczanski-Sobieski J. (1991). AIAA Technical Committee on Multidisciplinary Design Optimization (MDO), White Paper on Current State of the Art.
- [20] Zentner, John. (2006). A Design Space Exploration Process for Large Scale,
- [1] Tang, Wei & Orlowski, Marcus & Longo, Jose & Giese, Peter. (2001). Aerodynamic optimization of re-entry capsules. *Aerospace Science and Technology*. 5. 15-25. 10.1016/S1270-9638(00)01085-3.
- [2] Tava, Marcello & Suzuki, Shinji. (2002). Multidisciplinary Design Optimization of the Shape and Trajectory of a Reentry Vehicle. *Transactions of The Japan Society for Aeronautical and Space Sciences - TRANS JPN SOC AERON SPACE SCI*. 45. 10-19. 10.2322/tjsass.45.10.
- [3] Arora, Rajesh & Kumar, Pradeep. (2003). Aerodynamic Shape Optimization of a Re-entry Capsule. 10.2514/6.2003-5394.
- [4] Theisinger, John & Braun, Robert & Clark, Ian. (2010). Aerothermodynamic Shape Optimization of Hypersonic Entry Aeroshells. 13th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference 2010. 10.2514/6.2010-9200.
- [5] Mehran, Nosratollahi & Mortazavi, Mohammadreza & Adami, Amir & Hosseini, Majid. (2010). Multidisciplinary design optimization of a reentry vehicle using genetic algorithm. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. 82. 194-203. 10.1108/00022661011075928.
- [6] Priyadarshi, Pankaj & Mittal, Sanjay. (2010). Multi-objective Multi-disciplinary Design Optimization of a Semi-Ballistic Reentry Module. 13th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference 2010. 10.2514/6.2010-9127.
- [7] Adami, Amir & Mehran, Nosratollahi & Mortazavi, Mohammadreza & Hosseini, Majid. (2011). Multidisciplinary design optimization of a manned reentry mission considering trajectory and aerodynamic configuration. 10.1109/RAST.2011.5966908.
- [8] Dirxx, Dominic & Mooij, Erwin. (2014). Optimization of entry-vehicle shapes during conceptual design. *Acta Astronautica*. 94. 198-214. 10.1016/j.actaastro.2013.08.006.
- [9] Bunescu, Ionut & Pricop, Mihai & Mihaita Gilbert, Stoican & DINA, Adrian. (2019). Aero thermodynamic Shape Optimization



