

# تحلیل همگرایی جبهه‌های پارتو در بهینه‌سازی سه‌هدفه طراحی یک کپسول زیستی به روش شاخص آبر حجم نسبی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۵

حسن ناصح<sup>۱</sup>، حدیثه کریمائی<sup>۲</sup>، محمد لسانی فادافان<sup>۳</sup>

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 به بررسی روش شاخص آبر حجم نسبی (RHV) به‌عنوان ابزاری مؤثر برای ارزیابی همگرایی در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه می‌پردازد. اکثر مسائل مهندسی فاقد جبهه پارتوی واقعی هستند و ارزیابی همگرایی در آن‌ها با چالش مواجه می‌شود. برای این منظور، الگوریتم ژنتیک چندهدفه (MOGA) برای هر مسئله ۳۰ بار اجرا می‌شود تا ۳۰ جبهه پارتو تقریبی به دست آید. سپس تمامی راه‌حل‌های حاصل با هم ترکیب شده و یک فیلتر غلبه پارتو برای شناسایی راه‌حل‌های غیرمغلوب اعمال می‌شود تا جبهه پارتوی واقعی و ابرحجم مرتبط با آن تعیین گردد. این روش برای سه مسئله بهینه‌سازی سه‌هدفه در طراحی کپسول زیستی فضایی مورد استفاده قرار گرفته است. تحلیل حساسیت پارامترهای طراحی با روش نمونه‌برداری ابرمکعب لاتین (LHS) و اجرای MOGA نشان داد که هر سه مسئله در کمتر از ۳۷۳ نسل به همگرایی رضایت‌بخش رسیدند، که تعداد نسل مناسبی برای مسائل چندهدفه مقید محسوب می‌شود و کارآمدی روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از تولید جبهه‌های پارتو سه‌بعدی با کیفیت بالا (شاخص RHV بین ۰.۸۷ تا ۰.۹۳) است و مقایسه با داده‌های کپسول بومی نشان داد برخی پیکربندی‌ها بهینه بوده و برخی دیگر نیاز به بازنگری در پارامترها دارند.

واژگان کلیدی: کپسول زیستی، بهینه‌سازی طراحی، سه‌هدفه، آبرحجم نسبی، الگوریتم ژنتیک چند هدفه.

## Convergence analysis of pareto fronts in three-objective optimization of a bio-capsule design using relative hypervolume metric

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

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 examines the application of the Relative Hypervolume (RHV) metric as a powerful tool for assessing convergence in multi-objective optimization problems. Most engineering optimization problems lack a true Pareto front, which makes convergence assessment challenging. In this approach, the Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA) is executed 30 times for each problem, generating 30 approximate Pareto fronts. All solutions from these runs are then combined into a merged set, and a Pareto dominance filter is applied to identify the non-dominated solutions, allowing the determination of the true Pareto front along with its associated hypervolume. The method is applied to three three-objective optimization problems in the design of a space biocapsule. Sensitivity analysis using Latin Hypercube Sampling (LHS) and MOGA execution showed that all three problems achieved satisfactory convergence in fewer than 373 generations, which is appropriate for constrained multi-objective optimization problems and demonstrates the efficiency of the proposed approach. Results indicate that the method successfully generates high-quality three-dimensional Pareto fronts with RHV values ranging from 0.87 to 0.93. Comparison with native capsule data revealed that while some configurations were optimal, others required redesign of parameters.

**Keywords:** Bio-capsule, Design optimization, Tri-objective, Relative Hypervolume, Multi-Objective GA.

۱۰۷

سال ۱۴ - شماره ۱  
پاروتابستان ۱۴۰۴  
نشریه علمی  
دانش و فناوری هوافضا



تحلیل همگرایی جبهه‌های پارتو در بهینه‌سازی سه‌هدفه طراحی یک کپسول زیستی به روش شاخص آبرحجم نسبی

## ۱- مقدمه

در مسائل بهینه‌سازی تک‌هدفه، موضوع همگرایی واضح است چون راه‌حل‌ها به یک بهینه سراسری واحد نزدیک می‌شوند. با این حال، در بهینه‌سازی چندهدفه، راه‌حل‌ها باید به مجموعه نقاط بهینه (جبهه بهینه پارتو) همگرا شوند، به طوری که هیچ هدفی نمی‌تواند بدون بدتر شدن هدف دیگر بهبود یابد [۱]. در این مسائل، همگرایی با این معیار که مجموعه راه‌حل‌ها چقدر جبهه پارتو واقعی (مرجع) را پوشش می‌دهند، سنجیده می‌شود. در حالی که شاخص ابرحجم (HV) [۲] به طور جامع به این موضوع می‌پردازد، در عوض دچار پیچیدگی محاسباتی و حساسیت به نقطه مرجع است [۳-۴]. برای رفع این موارد، شاخص ابرحجم نسبی ( $RHV^1$ )، ابرحجم را نرمال و امکان مقایسه‌های مقیاس‌پذیر را فراهم می‌کند. معیار ابرحجم نسبی یک معیار کاربردی برای بررسی همگرایی مسائل چندهدفه است، که میزان نزدیک شدن جبهه پارتو به جبهه واقعی را نشان می‌دهد [۵]. یک چالش بزرگ در اکثر مسائل مهندسی این است که جبهه پارتو واقعی این مسائل، جهت مقایسه با جبهه پارتو حاصل از بهینه‌ساز به صورت تئوریک موجود نیست. برای حل این چالش، به ناچار بایستی اقدام به ساخت جبهه واقعی برای مسئله مورد نظر نمود. در این مقاله سعی شده است تا با استفاده از روش پیشنهادی، جبهه‌های پارتو واقعی برای سه مسئله بهینه‌سازی سه هدفه کپسول فضایی محاسبه شوند. این جبهه‌ها جهت بررسی همگرایی مسائل، با استفاده از شاخص ابرحجم نسبی با جبهه‌های پارتو حاصل از بهینه‌ساز مقایسه می‌شوند.

مطالعات متعددی در زمینه بهینه‌سازی کپسول‌های بازگشتی به جو انجام شده است. تاوا و سوزوکی [۶] با ترکیب روش هم‌سازی مستقیم<sup>۲</sup> و

الگوریتم برنامه‌نویسی درجه دوم متوالی<sup>۳</sup>، بهینه‌سازی چندموضوعی پیکربندی و مسیر پرواز را با اهداف بیشینه‌سازی برد عرضی<sup>۴</sup> و کمینه‌سازی بار حرارتی انجام دادند. آرورا و کومار [۷] از الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای بهینه‌سازی آیرودینامیکی استفاده کردند و به طور همزمان به کمینه‌سازی پسا و بیشینه‌سازی پایداری طولی از طریق تنظیم مرکز فشار پرداختند. دیزینگر و همکاران [۸] نیز با استفاده از الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی چندهدفه آیرودینامیکی را با در نظر گرفتن پارامترهای پسا، پایداری و راندمان حجمی انجام دادند. نصرت‌اللهی و همکاران [۹] با ترکیب الگوریتم‌های ژنتیک تک‌هدفه<sup>۵</sup> و چندهدفه<sup>۶</sup> (MOGA)، بهینه‌سازی چندموضوعی شامل سازه، آیرودینامیک و حرارت را بررسی کردند. مطالعات جدیدتر مانند کار آدمی و همکاران [۱۰] با استفاده از چهارچوب<sup>۷</sup> چندموضوعی همه در یک مرحله<sup>۸</sup> و الگوریتم‌های پیشرفته‌تری مانند ازدحام ذرات چندهدفه<sup>۹</sup> توسط دریکس و مویج [۱۱] انجام شده است. این مطالعات نشان داده‌اند که جبهه‌های پارتو اغلب مناطق غیرخطی قوی را نشان می‌دهند که در آنها تغییرات کوچک در اهداف می‌تواند منجر به تغییرات قابل توجه در پارامترهای طراحی شود. مطالعه استاندر و گوئل [۱۲] چهار معیار هندسی برای ارزیابی همگرایی در بهینه‌سازی چندهدفه ارائه کرد: (۱) فاصله متوسط جواب‌ها (۲) گستردگی جبهه (۳) یکنواختی توزیع (۴) ابرحجم. با آزمون روی مسائل تحلیلی و بهینه‌سازی سازه، نشان دادند که شاخص ابرحجم به دلیل پایداری و یکنواختی، معیار مناسبی است، در حالی که معیارهایی مانند گستردگی به ماهیت جبهه پارتو وابسته‌اند.

<sup>3</sup> Sequential Quadratic Programming

<sup>4</sup> Cross-range

<sup>5</sup> Genetic Algorithms (GA)

<sup>6</sup> Multi-Objective Genetic Algorithms

<sup>7</sup> Framework

<sup>8</sup> All At Once (AAO)

<sup>9</sup> Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO)

<sup>1</sup> Relative Hypervolume

<sup>2</sup> Direct Collocation

بونسکیو و همکاران [۱۳] در پژوهش خود به بررسی بهینه‌سازی آیرودینامیکی-حرارتی پیکربندی کپسول‌های بازگشتی پرداختند. این مطالعه با استفاده از الگوریتم ژنتیک، سه هدف اصلی شامل کمینه‌سازی شار حرارتی، بیشینه‌سازی پایداری و افزایش ضریب پسا را دنبال می‌کرد. نتایج این تحقیق نشان داد که روش پیشنهادی آنها برای مسائل بهینه‌سازی ترکیبی آیرودینامیک-حرارتی کارایی مناسبی دارد. در ادامه، برش‌نوا و همکاران [۱۴] با به کارگیری روش متقارن محوری محوری آنالوگ<sup>۱</sup> و تکنیک اصلاح شده نیوتن<sup>۲</sup>، بهینه‌سازی پیکربندی وسایل واردشونده به جو را انجام دادند. این پژوهش جامع که شامل موضوعات هندسه، آیرودینامیک، حرارت و مسیر بود، از ترکیب روش طراحی آزمایش و روش سطح پاسخ بهره برد. محققان در این مطالعه موفق به شناسایی محدودیت‌های روش‌های موجود و تعیین راهکارهای بهبود تکنیک‌های بهینه‌سازی شدند.

ناصح و همکاران [۱۵] در تحقیق خود بر روی بهینه‌سازی سازه‌ای کپسول‌های فضایی تمرکز کردند. آنها با استفاده از نرم‌افزار انسیس<sup>۳</sup> و روش سطح پاسخ، بهینه‌سازی دوهدفه شامل کمینه‌سازی جرم و بیشینه‌سازی فرکانس مود اول ارتعاشی را برای استوانه‌های جدار نازک تحت بارهای محوری و جانبی انجام دادند. این پژوهش با به کارگیری الگوریتم ژنتیک دوهدفه، نقاط بهینه طراحی را شناسایی نمود. کبگانیان و همکاران [۱۶] در مطالعه جامع خود به بهینه‌سازی چندموضوعی فضاپیمای آپولو پرداختند. این محققان با استفاده از روش شبه‌طیفی رادو<sup>۴</sup> و در نظر گرفتن موضوعات مسیر، هندسه، آیرودینامیک و حرارت، موفق به کاهش قابل توجه جرم فضاپیما در مقایسه با طراحی اولیه شدند. این پژوهش نشان داد که چگونه رویکردهای بهینه‌سازی پیشرفته می‌توانند

منجر به دستیابی به طراحی‌های کارآمدتر در صنعت هوافضا شوند.

آپرووی-تولا و همکاران [۱۷] یک روش بهینه‌سازی برای بیشینه‌سازی بازده آیرودینامیکی ایرفویل‌ها برای هواپیماهای بال ثابت در شرایط جوی مریخ پیشنهاد دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که افزایش بازده آیرودینامیکی رابطه‌ی نزدیکی با کاهش ضخامت و افزایش انحناى ایرفویل دارد. برای تحلیل عملکرد آیرودینامیکی این ایرفویل‌ها، از شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی استفاده شد و الگوریتم ژنتیک نیز به‌عنوان روش بهینه‌سازی به کار گرفته شد.

همچنین، آپرووی-تولا و همکاران [۱۸] مطالعه‌ای محاسباتی بر روی دو مقطع بال طراحی‌شده برای هواپیماهای اکتشافی مریخ انجام دادند و عملکرد آیرودینامیکی آنها را در اعداد رینولدز پایین بررسی کردند. در این مطالعه، نقش انحناى ایرفویل در افزایش بازدهی مورد تأکید قرار گرفت. نتایج نشان داد که جدایش جریان در محدوده لایه‌ی آرام رخ می‌دهد و انحناى ایرفویل باعث جبران خلأ مکشی ناشی از حباب جدایش آرام می‌شود که عامل کلیدی در بهینه‌سازی بازدهی ایرفویل به‌شمار می‌رود.

هدف این پژوهش ارائه یک چارچوب بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر شاخص همگرایی ابرحجم نسبی (RHV) برای طراحی کپسول فضایی بازگشتی است. در این چارچوب، RHV به‌عنوان معیار اصلی ارزیابی همگرایی و کیفیت جبهه پارتو در مسائل سه‌هدفه مختلف به کار گرفته شده است. ابتدا تحلیل حساسیت پارامترهای طراحی با روش نمونه‌برداری ابرمکعب لاتین انجام شده و سپس بهینه‌سازی چندهدفه با الگوریتم ژنتیک و اتکا بر شاخص RHV برای ارزیابی کیفیت راه‌حل‌ها اجرا گردیده است.

یکی از چالش‌های اساسی در بهینه‌سازی چندهدفه، نبود جبهه پارتوی واقعی برای بسیاری از

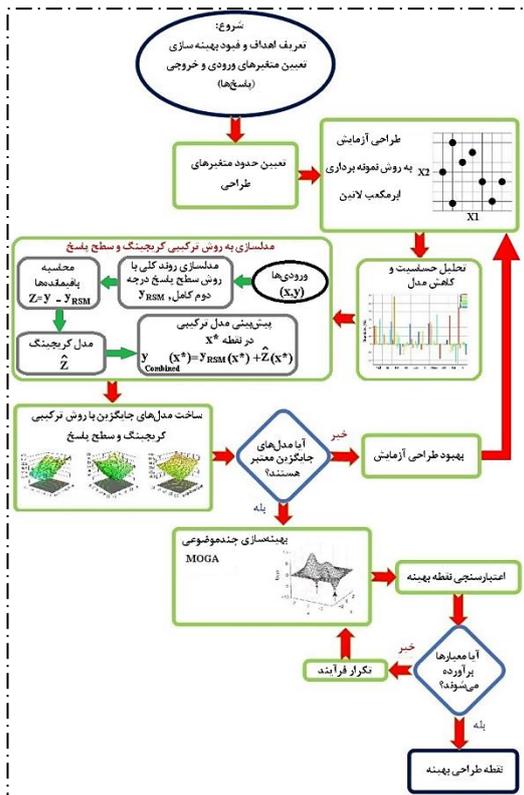


<sup>1</sup> Axisymmetric Analogue Method

<sup>2</sup> Modified Newtonian Technique

<sup>3</sup> ANSYS

<sup>4</sup> Rado pseudo-spectral method



شکل ۱. روندنمای فرآیند پیشنهادی برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی طراحی کپسول زیستی فضایی

## ۲-۱- موضوع هندسه

شکل ۲ هندسه کپسول زیستی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. این هندسه با هفت پارامتر 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 راندمان حجمی به‌عنوان یکی از توابع هدف موضوع هندسه در قالب معادله (۱) تعریف می‌شود که بیشینه‌سازی آن، بهترین چیدمان تجهیزات در داخل کپسول زیستی را به ارمغان می‌آورد.

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

مسائل است که ارزیابی عملکرد بهینه‌سازها را دشوار می‌کند؛ به همین دلیل، در این مطالعه جبهه‌های پارتوی مرجع برای سه مسئله طراحی کپسول فضایی تولید شده و با استفاده از RHV عملکرد الگوریتم‌ها مورد سنجش قرار گرفته است.

نوآوری اصلی پژوهش در استفاده از RHV به‌عنوان معیاری پایدار و کمی برای سنجش همگرایی و تعادل بین اهداف متضاد سازه‌ای است که امکان ارزیابی جامع طرح‌ها و انتخاب بهینه‌ترین پیکربندی را به‌طور همزمان فراهم می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که RHV ابزار مؤثری برای ارزیابی جامع عملکرد سازه‌ای کپسول‌ها و مقایسه روش‌های مختلف بهینه‌سازی در فازهای طراحی است.

## ۲- پیاده‌سازی فرآیند بهینه‌سازی

شکل ۱، روندنمای فرآیند پیشنهادی برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی طراحی یک کپسول فضایی بازگشتی را نمایش می‌دهد. در مرحله اول، با در نظر گرفتن محدوده‌های مجاز متغیرهای طراحی (که تعیین‌کننده پیکربندی هندسی کپسول هستند)، تحلیل حساسیت با استفاده از روش طراحی آزمایش و نمونه‌برداری ابرمکعب لاتین انجام می‌شود.

هدف این تحلیل، ارزیابی تأثیر متغیرهای طراحی انتخاب‌شده بر توابع هدف و قیود بهینه‌سازی است. در مرحله بعد، بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام می‌گیرد. موضوعات طراحی مورد بررسی شامل هندسه، آیرودینامیک، مسیر پرواز، گرمایش و سازه می‌باشند. در بخش‌های بعدی، متغیرهای طراحی انتخاب‌شده در هر یک از موضوعات ارائه شده‌اند.

مدل‌سازی شده‌اند.

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

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

## ۲-۳- موضوع مسیر

برای شبیه‌سازی فاز بازگشت به جو کپسول، یک کد سه درجه آزادی در نرم‌افزار متلب توسعه داده شده است که معادلات آن در روابط (۴) تا (۸) نشان داده شده است [۲۱]. شکل ۳ شماتیک مختصات کپسول در ورود به جو را نشان می‌دهد. ضریب بار وارد بر کپسول طبق رابطه (۹) محاسبه می‌شود:

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

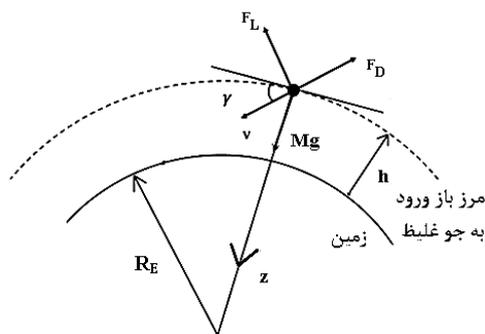
$$g = \frac{\mu}{(R_E + h)^2} \quad (5)$$

$$h = -z \quad (6)$$

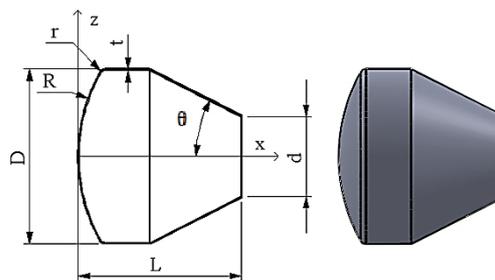
$$F_L = \frac{1}{2} \rho V^2 A_{ref} C_L \quad (7)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho V^2 A_{ref} C_D \quad (8)$$

$$n = \frac{\sqrt{F_D^2 + F_L^2}}{Mg} \quad (9)$$



شکل ۳. مختصات کپسول در ورود به جو [۲۲]



شکل ۲. هندسه کپسول زیستی [۱۹]

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

جدول ۱. حدود مجاز متغیرهای طراحی و مشخصات

پیکربندی کپسول بومی

مشخصات کپسول بومی	بازه تغییرات	متغیر طراحی	ردیف
۱۳۵۰	۲۴۰۰-۱۰۰۰	(mm) L	۱
۱۴۰۰	۲۰۰۰-۱۰۰۰	(mm) D	۲
۲۵	۸۰-۵	$\theta^\circ$	۳
۱۷۰۰	۲۰۰۰-۱۰۰۰	(mm) R	۴
۷۰۰	۸۰۰-۴۰۰	(mm) d	۵
۲۰	۱۰۰-۲۰	(mm) r	۶
۴	۱۲-۳	(mm) t	۷

## ۲-۲- موضوع آیرودینامیک

برای مدل‌سازی موضوع آیرودینامیک و استخراج ضرایب آیرودینامیکی و مشتقات پایداری، از کد  $MD^1$  [۲۰] استفاده شده است. فرض شده است که مختصات طولی مرکز جرم کپسول زیستی با مرکز حجم کپسول منطبق است که این فرض در فاز طراحی مفهومی رایج است. مختصات عرضی مرکز جرم (آفست) را نیز می‌توان تا ۵ درصد قطر بزرگ کپسول در نظر گرفت. توابع حاشیه پایداری طولی<sup>۲</sup> و ضریب بالستیکی که به ترتیب در روابط (۲) و (۳) تعریف شده‌اند، به‌عنوان موضوع آیرودینامیک

<sup>1</sup> Missile DATCOM

<sup>2</sup> Longitudinal stability margin

373 K ≤ T	دمای پوسته فلزی	۴
S.F ≥ 2	ضریب اطمینان سازه‌ای	۵
S.M ≥ 0.1	حاشیه پایداری طولی	۶
L.M ≥ 2	ضریب اطمینان کماتشی	۷

### ۳- تحلیل حساسیت

در این مقاله، طراحی آزمایش به روش نمونه‌برداری ابر مکعب لاتین انجام شده است، زیرا برای شبیه‌سازی‌های عددی با خطای معین مناسب می‌باشد. نمونه‌برداری ابر مکعب لاتین (LHS) یک تکنیک نمونه‌برداری طبقه‌بندی شده پیشرفته است که در طراحی آزمایشات برای جست و جوی کارآمد فضاهای پارامتری چندبعدی استفاده می‌شود. این تکنیک پوشش کامل هر متغیر ورودی را تضمین می‌کند و آن را برای شبیه‌سازی‌های پیچیده، تحلیل حساسیت و ... ایده‌آل می‌سازد. LHS در مقایسه با نمونه برداری تصادفی به ویژه در ابعاد بالا، کارایی و پوشش بهتری ارائه داده و با اعمال طبقه‌بندی و جایگشت تصادفی، تعداد آزمایشات را کاهش می‌دهد. این روش دامنه هر متغیر را به N (تعداد نمونه‌برداری) بازه (طبقه) مساوی تقسیم کرده و سپس به طور تصادفی یک مقدار از هر طبقه از هر متغیر انتخاب می‌کند و در نهایت مقادیر بین متغیرها را با استفاده از جایگشت‌های تصادفی ترکیب می‌کند [۲۴]. با انتخاب این روش، تعداد ۱۰۹ نقطه طراحی برای پوشش موثر فضای طراحی استفاده شده است. تحلیل حساسیت به مطالعه تاثیرپذیری متغیرهای خروجی از متغیرهای ورودی یک مدل آماری گفته می‌شود [۲۵]. ماتریس همبستگی<sup>۲</sup> جدول (۳) دربردارنده نتایج تحلیل حساسیت است که نشان می‌دهد تمامی متغیرهای طراحی انتخاب‌شده بر روی توابع مسئله تاثیرگذار هستند. میزان و شدت این تاثیرگذاری از اعداد درون ماتریس جدول (۳) قابل درک است. ماتریس همبستگی نشان می‌دهد که هر دو متغیر با هم چه تعاملی دارند و این تعامل با ضرایب همبستگی که

<sup>2</sup> Correlation Matrix

### ۴-۲- موضوع گرمایش

استفاده از شکل سازه کره-مخروط برای وسایل واردشونده به جو به عنوان نظریه بدنه بلانت شناخته می‌شود [۲۳]. برای محاسبه شار حرارتی نقطه سکون [۱۶] از رابطه (۱۰) استفاده شده است.

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

### ۵-۲- موضوع سازه

برای مدل‌سازی موضوع سازه آلومینیومی کپسول زیستی از روش اجزای محدود در نرم‌افزار انسیس ورک‌بنچ<sup>۱</sup> استفاده شده است. این تحلیل‌ها شامل تحلیل استاتیکی سازه و کماتش است که تنش معادل فون میسز (رابطه (۱۱))، حداکثر تغییر شکل سازه‌ای، اولین فرکانس طبیعی پوسته و ضریب بار کماتشی کپسول (رابطه (۱۲)) را محاسبه می‌کنند.

$\sigma_{von-mises}$

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

$$L.M = \frac{F_{critical}}{F_{applied}} \quad (12)$$

### ۶-۲- قیود طراحی

برای مسئله بهینه‌سازی جرم با استفاده از الزامات طراحی، قیود طراحی به صورت جدول (۲) مشخص می‌شوند. لذا، هر یک از این قیود می‌تواند به یک هدف تبدیل شده و یک مسئله بهینه‌سازی جدید را تشکیل دهد.

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	$Vol \geq 1.88 \text{ m}^3$

<sup>1</sup> Ansys Workbench

معیاری از ارتباط خطی بین دو متغیر بین ۱- تا ۱+ هستند، نشان داده می‌شود. 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. تمامی متغیرهای طراحی انتخاب‌شده، بر روی توابع هدف و قیود مسئله بهینه‌سازی تاثیر دارند و نمی‌توان از هیچ‌کدام صرف‌نظر کرد.

#### ۴- بهینه‌سازی چندهدفه و تحلیل همگرایی آن

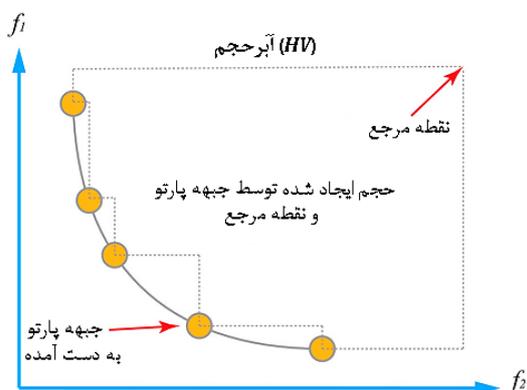
برای بررسی عملکرد روش همگرایی پیشنهادی، تحلیل همگرایی بر روی سه مسئله بهینه‌سازی سه هدفه صورت گرفته است. مسئله اول شامل اهداف کمینه‌سازی جرم، تغییر شکل سازه‌ای و بیشینه‌سازی راندمان حجمی است. مسئله دوم شامل اهداف کمینه‌سازی جرم و بیشینه‌سازی پایداری طولی و راندمان حجمی است. مسئله سوم شامل اهداف کمینه‌سازی ضریب بالستیکی و بیشینه‌سازی پایداری طولی و راندمان حجمی است. معیار ابرحجم، که با نام شاخص ابرحجم نیز شناخته می‌شود، یک شاخص عملکرد است که در بهینه‌سازی چندهدفه برای ارزیابی کیفیت مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها استفاده می‌شود. این معیار، حجم فضای تحت سلطه مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها را با استفاده از یک نقطه مرجع به عنوان مرز، کمی می‌کند. مقدار بزرگتر ابرحجم عموماً نشان‌دهنده یک مجموعه راه‌حل بهتر است که نشان‌دهنده نزدیکی به راه‌حل واقعی است. شکل ۴ به صورت شماتیک نمایی از معیار ابرحجم را برای مسئله کمینه‌سازی دو هدفه  $f_1$  و  $f_2$  نشان می‌دهد [۲۶].

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 پانزده

رنک<sup>۱</sup> است، که رنک شماره یک (نقاط آبی رنگ) حاوی نقاط بهینه نامغلوب هستند. در میان این نقاط، سه کپسول بهینه از میان نقاط دارای رنک یک انتخاب شده‌اند که نسبت به سایر نقاط رنک یک برتری مطلق ندارند. این سه نقطه صرفاً با هدف نمایش روند تغییر شکل ظاهری کپسول انتخاب شده‌اند. کپسول‌های ۱ تا ۳ به ترتیب با هدف بیشینه‌سازی راندمان حجمی، کمینه‌سازی تغییر شکل سازه‌ای، و کمینه‌سازی جرم انتخاب شده‌اند. کپسول بومی (شماره ۴) در میان نقاط قابل قبول رنک یک قرار دارد و از نظر هر سه هدف در مجموعه نقاط بهینه پارتو قرار دارد.

جدول ۳. ماتریس همبستگی ورودی‌ها و خروجی‌ها از تحلیل حساسیت توابع بر حسب متغیرهای طراحی

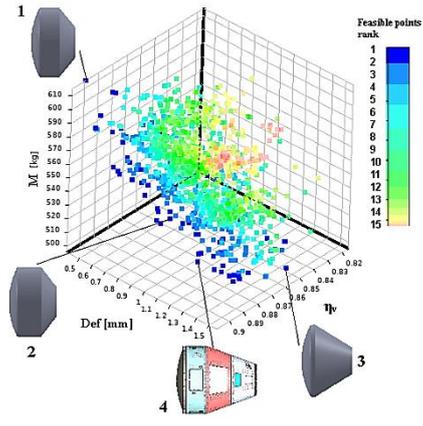
	D	$\theta$	d	R	r	L	r	Vol	M	Def	S.F.	LM	Bc	$n$	S.M	n
D	1.0	0	0	0	0	0	0	0.8	0.8	0.4	-0.2	0	-1.0	0.6	0.8	1.0
$\theta$	0	1.0	0	0	0	0	0	0.4	0.4	0.8	-0.6	-0.6	0	0	-0.2	0
d	0	0	1.0	0	0	0	0	0	0	-0.4	0.4	0.2	0	0.4	0	0
R	0	0	0	1.0	0	0	0	0	0	0.6	-0.4	-0.4	0	-0.4	-0.4	0
r	0	0	0	0	1.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.2	0
L	0	0	0	0	0	1.0	0	0.8	0.6	0.2	-0.2	-0.2	0	-0.2	-0.4	0
r	0	0	0	0	0	0	1.0	0	0.8	-0.6	0.8	0.8	0.2	0.2	0.4	-0.2
Vol	0.8	0.4	0	0	0	0.8	0	1.0	0.8	0.6	-0.4	-0.2	-0.6	0.4	0.4	0.6
M	0.8	0.4	0	0	0	0.6	0.8	0.8	1.0	0	0.4	0.4	-0.4	0.4	0.4	0.4
Def	0.4	0.8	-0.4	0.6	0	0.2	-0.6	0.6	0	1.0	-1.0	-1.0	-0.4	-0.4	0	0.4
S.F.	-0.2	-0.6	0.4	-0.4	0	-0.2	0.8	-0.4	0.4	-1.0	1.0	1.0	0.4	0.4	0	-0.4
LM	0	-0.6	0.2	-0.4	0	-0.2	0.8	-0.2	0.4	-1.0	1.0	1.0	0.2	0.4	0.2	-0.2
Bc	-1.0	0	0	0	0	0	0.2	-0.6	-0.4	-0.4	0.4	0.2	1.0	-0.6	-0.8	-1.0
$n$	0.6	0	0.4	-0.4	0	-0.2	0.2	0.4	0.4	-0.4	0.4	0.4	-0.6	1.0	0.6	0.6
S.M	0.8	-0.2	0	-0.4	-0.2	-0.4	0.4	0.4	0.4	0	0	0.2	-0.8	0.6	1.0	0.8
n	1.0	0	0	0	0	0	-0.2	0.60	0.4	0.4	-0.4	-0.2	-1.0	0.6	0.8	1.0



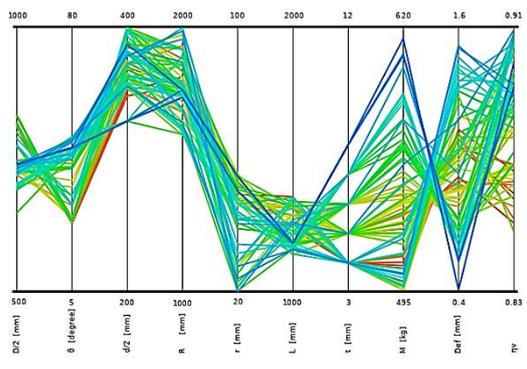
شکل ۴. نمای شماتیک از معیار ابرحجم (HV) برای مسئله دو هدفه کمینه‌سازی  $f_1$  و  $f_2$

<sup>1</sup> Rank

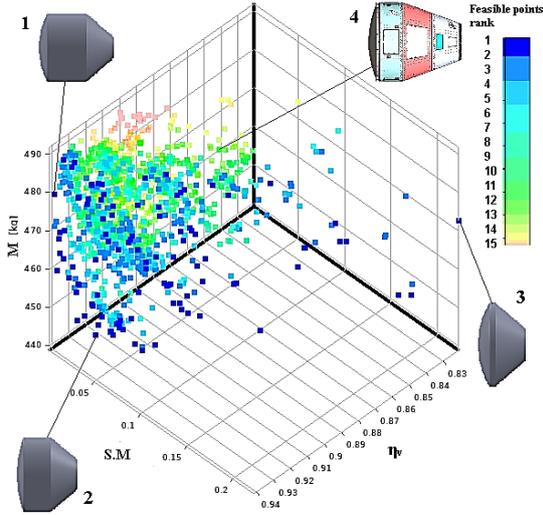
شکل ۸ نمودار مختصات موازی مربوط به ۷۸ نقطه دارای رنک اول از جبهه پارتوی سه‌هدفه را نشان می‌دهد. این نمودار برخلاف شکل ۶، الگوی متفاوتی از توزیع راه‌حل‌ها را نشان می‌دهد که حاکی از رابطه قوی‌تر بین پایداری طولی و راندمان حجمی است. خطوط بیشتر تمایل دارند در مناطق میانی محور پایداری تجمع کنند، که نشان می‌دهد دستیابی به سطوح بالاتر پایداری مستلزم مصالحه با راندمان حجمی است، به طوری که افزایش بیش از حد پارامترهای پایداری می‌تواند موجب افت عملکرد در شاخص راندمان حجمی گردد. این رفتار غیرخطی بیانگر نیاز به مصالحه دقیق بین این دو پارامتر در فرآیند طراحی بهینه است.



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



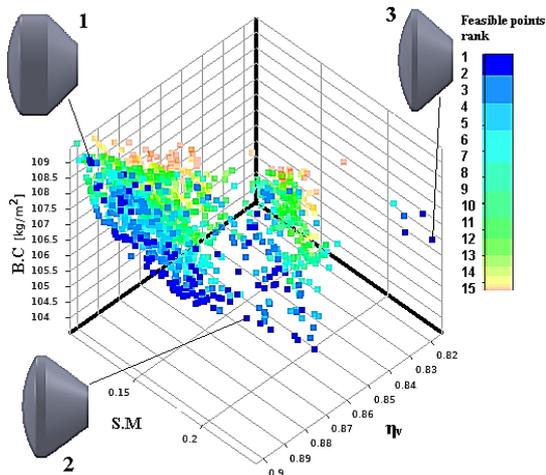
شکل ۶. نمودار مختصات موازی مربوط به نقاط رنک اول جبهه پارتوی سه‌هدفه، شامل کمینه‌سازی جرم ( $M$ ) و تغییر شکل ( $Def$ ) و بیشینه‌سازی راندمان حجمی ( $\eta_v$ )



شکل ۷. جبهه پارتو سه‌هدفه شامل جرم، راندمان حجمی و پایداری طولی

شکل ۶ نمودار مختصات موازی مربوط به ۵۹ نقطه از رنک اول جبهه پارتوی سه‌هدفه را نشان می‌دهد که در واقع ارتباط بین سه هدف بهینه‌سازی را به صورت کمی نمایش می‌دهد. محورهای عمودی مقادیر هر هدف را نشان می‌دهند، به طوری که مقادیر کمتر برای جرم و تغییر شکل (سمت پایین محور) و مقادیر بیشتر برای راندمان حجمی (سمت بالای محور) مطلوب هستند. خطوط رنگی مسیرهای مختلف طراحی را نشان می‌دهند که همگی در رنک یک (بهینه‌ترین جواب‌ها) قرار دارند. تراکم خطوط در برخی مناطق نشان‌دهنده ترجیح الگوریتم برای راه‌حل‌های متعادل است که تعامل پیچیده بین اهداف را تأیید می‌کند. 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، کپسول شماره ۲ مربوط به کمینه جرم با رنک یک و کپسول شماره ۳ مربوط به بیشینه حاشیه پایداری طولی با رنک یک است. کپسول بومی (کپسول شماره ۴) در میان نقاط قابل قبول در رنک دوازده قرار دارد که با توجه به اهداف ذکرشده، در میان نقاط بهینه پارتو قرار نمی‌گیرد. موقعیت کپسول بومی (نقطه ۴) نشان می‌دهد که طراحی موجود از نظر این سه هدف در سطح متوسطی قرار دارد.

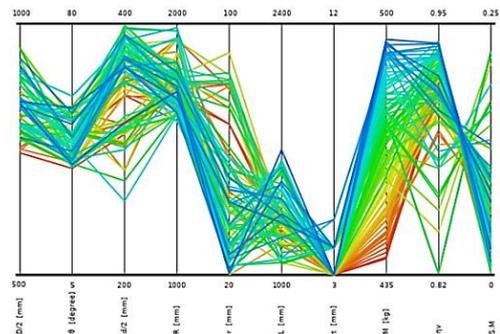
طراحی فعلی برای این ترکیب از اهداف بهینه نیست. پراکندگی خطوط نیز حاکی از چالش‌هایی در یافتن مصالحه خاص بین این سه هدف است.



شکل ۹. جبهه پارتو سه هدفه شامل ضریب بالستیکی، پایداری و راندمان حجمی

برای ارزیابی جبهه‌های پارتوی سه‌هدفه، از شاخص همگرایی ابرحجم نسبی (RHV) استفاده شده است. برای ساخت مجموعه مرجع<sup>۱</sup>، الگوریتم NSGA-II ۳۰ بار روی مسئله اجرا شده است تا ۳۰ تقریب جبهه پارتو ایجاد شود. سپس همه راه‌حل‌ها از هر ۳۰ اجرا با هم ترکیب تا یک مجموعه ادغام‌شده از راه‌حل‌ها ایجاد گردد. در نهایت فیلتر غلبه پارتو باید روی راه‌حل‌های غیرمغلوب اعمال شود تا جبهه مرجع حاصل گردد. ابرحجم، ناحیه‌ای است که تحت سلطه جواب‌ها قرار دارد و توسط نقطه مرجع محدود شده است. برای محاسبه مقدار ابرحجم نیاز به یک نقطه مرجع است که در این مقاله به وسیله نقطه نادیر محاسبه شده است. نقطه نادیر نشان‌دهنده بدترین مقادیر ممکن هر هدف در جبهه پارتو می‌باشد و به عنوان مرز پایانی فضای جواب‌های قابل قبول عمل می‌کند. نقطه نادیر در مسئله کمینه‌سازی طبق رابطه (۱۳) به دست می‌آید. نقطه مرجع باید از همه راه حل‌ها بدتر باشد، بنابراین برای محاسبه این نقطه ۱۰

<sup>1</sup> Reference set

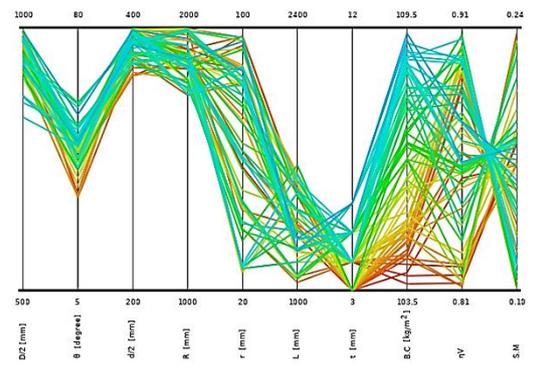


شکل ۸. نمودار مختصات موازی مربوط به نقاط رنک اول جبهه پارتوی سه‌هدفه، شامل کمینه‌سازی جرم ( $M$ ) و بیشینه‌سازی راندمان حجمی ( $\eta_v$ ) و حاشیه پایداری طولی ( $S.M.$ )

شکل ۹ 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 میان نقاط قابل قبول در رنک یک، کپسول شماره ۲ دارای کمینه ضریب بالستیکی واقع در رنک یک است. همچنین کپسول شماره ۳ دارای بیشینه حاشیه پایداری طولی واقع در رنک یک است. از آنجا که کپسول تست شده بومی در ۱۵ رنک اول این بهینه‌سازی واقع نشده است، در شکل مذکور نشان داده نشده است. از این رو کپسول بومی نسبت به اهداف فوق، نقطه بهینه پارتو نمی‌باشد. شکل ۱۰ نمودار مختصات موازی برای ۶۵ نقطه با رنک اول را نشان می‌دهد. این نمودار به وضوح نشان‌دهنده وجود رابطه غیرخطی بین سه هدف اصلی طراحی است. بهبود هر یک از پارامترهای ضریب بالستیک معمولاً منجر به کاهش عملکرد در دو پارامتر دیگر (پایداری و راندمان حجمی) می‌شود. این رفتار متضاد ناشی از وابستگی متقابل پارامترهای آیرودینامیکی و هندسی کپسول است. خطوط به سمت قطب‌های مخالف کشیده شده‌اند که نشان‌دهنده رابطه معکوس قوی بین بهبود ضریب بالستیک با پایداری و راندمان حجمی است. نبود کپسول بومی در رنک اول تأیید می‌کند که



درصد به نقطه نادیر اضافه می‌شود و از رابطه (۱۴) محاسبه می‌گردد. نقطه مرجع برای محاسبه ابرحجم جبهه مرجع (HV<sub>reference set</sub>) استفاده گردیده و در نهایت پارامتر RHV طبق رابطه (۱۵) در نسل‌های مختلف الگوریتم محاسبه می‌شود که HV<sub>current</sub> مقدار ابرحجم در هر نسل می‌باشد. شاخص RHV با مقایسه ابرحجم جبهه پارتو فعلی با ابرحجم مجموعه مرجع، کیفیت همگرایی را ارزیابی می‌کند.



شکل ۱۰. نمودار مختصات موازی مربوط به نقاط رنگ اول جبهه پارتوی سه‌هدفه، شامل کمینه‌سازی ضریب بالیستیکی (B.C) و بیشینه‌سازی راندمان حجمی ( $\eta_v$ ) و حاشیه پایداری طولی (S.M)

$$RH = \frac{HV_{current}}{HV_{reference\ set}} \quad (13)$$

$$Nadir = [\max(f_1), \max(f_2), \dots, \max(f_n)] \quad (14)$$

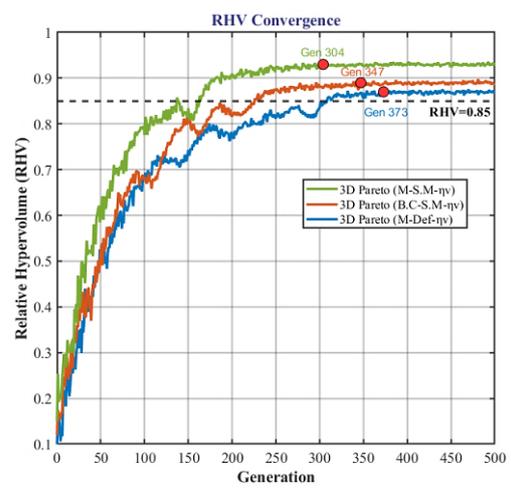
$$Reference\ point = [1.1\max(f_1), 1.1\max(f_2), \dots, 1.1\max(f_n)] \quad (15)$$

این شاخص با ارائه مقدار کمی بین ۰ تا ۱ (که مقادیر بالای ۰/۸۵ نشان‌دهنده همگرایی مطلوب هستند)، امکان ارزیابی عینی کیفیت جبهه پارتو و سنجش کارایی الگوریتم را فراهم می‌سازد.

شکل ۱۱ همگرایی موفق سه مسئله بهینه‌سازی مطرح‌شده را بر اساس شاخص RHV نشان می‌دهد. این شاخص معیاری کمی برای ارزیابی کیفیت و پوشش جبهه‌های پارتو تولید شده توسط الگوریتم ژنتیک چندهدفه (MOGA) ارائه می‌کند. هر سه منحنی در کمتر از حدود ۳۷۳ نسل به مقدار ثابتی از

RHV می‌رسند که نشان‌دهنده همگرایی موفق الگوریتم است. به ویژه، مسئله بهینه‌سازی جرم-پایداری-راندمان (منحنی آبی) به بالاترین مقدار RHV معادل ۰/۹۳ دست یافته است. منحنی مربوط به بهینه‌سازی جرم-تغییرشکل-راندمان (منحنی قرمز) در مقایسه با دو مورد دیگر با سرعت کمتری همگرا شده که احتمالاً به دلیل پیچیدگی بیشتر تعامل بین این اهداف است. تغییرات ناچیز RHV پس از نسل ۴۰۰ (طی ۵۰ نسل متوالی  $\Delta RHV < 0.5\%$ ) نشان‌دهنده پایداری جواب‌ها و عدم وجود بهبود معنادار در ادامه فرآیند است. مقادیر نهایی RHV برای هر سه مسئله بین ۰/۸۷ تا ۰/۹۳ است که همگی بالاتر از آستانه قابل قبول (۰/۸۵) قرار دارند و تأیید می‌کنند که الگوریتم توانسته است جبهه‌های پارتو با پوشش مناسبی تولید کند.

در نهایت، جدول (۴) نتایج همگرایی به‌دست‌آمده از روش RHV را برای این مسائل ارائه می‌کند. مسئله بهینه‌سازی جرم-پایداری-راندمان حجمی با همگرایی در بازه ۳۰۴ تا ۵۰۰ نسل، بهترین عملکرد را نشان می‌دهد، در حالی که مسئله جرم-تغییر شکل-راندمان حجمی با همگرایی در بازه ۳۷۳ تا ۵۰۰ نسل، پیچیدگی بیشتری در تعامل اهداف را نشان می‌دهد. روش پیشنهادی علی‌رغم تفاوت در سطح پیچیدگی مسائل، از کارایی و پایداری مناسبی در حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه در طراحی کپسول‌های فضایی برخوردار است.



شکل ۱۱. شاخص ابرحجم نسبی برای ارزیابی همگرایی جبهه‌های پارتوی بهینه‌سازی‌های سه‌هدفه

جدول ۴. نتایج همگرایی به دست آمده از روش RHV

برای سه مسئله بهینه سازی سه هدفه

ارزیابی	3D (B.C- S.M- $\eta_v$ )	3D (M-S.M- $\eta_v$ )	3D (M-Def- $\eta_v$ )	المان
$\Delta RHV$ <0.5% طی ۵۰ نسل متوالی	۵۰۰-۳۴۷	۵۰۰-۳۰۴	۵۰۰-۳۷۳	نسل های همگرایی
> ۰/۸۵ همگرایی مطلوب	۰/۸۹	۰/۹۳	۰/۸۷	مقدار نهایی RHV

تأیید نمود. مقایسه نتایج با داده های کپسول بومی نشان داد که برخی از پیکربندی های بهینه شده در جبهه پارتو قرار می گیرند، در حالی که برخی دیگر نیاز به بازنگری در پارامترهای طراحی دارند. این پژوهش گامی مهم در جهت طراحی چندهدفه سامانه های فضایی است و می تواند به عنوان الگویی برای مطالعات تکمیلی در این حوزه مورد استفاده قرار گیرد. یافته ها اثربخشی RHV را به عنوان معیاری دقیق برای ارزیابی همگرایی و پایداری فرآیند بهینه سازی چندهدفه در طراحی سامانه های فضایی تأیید می کند.

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله، بهینه سازی چندهدفه یک کپسول زیستی بازگشتی با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه (MOGA) و شاخص همگرایی ابرحجم نسبی (RHV) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی به طور مؤثری قادر به شناسایی جبهه های پارتو سه بعدی است که تعامل بین اهداف مختلف طراحی از جمله کمینه سازی جرم، تغییر شکل سازه ای، ضریب بالستیک و بیشینه سازی راندمان حجمی و حاشیه پایداری طولی را نشان می دهد. شاخص RHV با مقدار نهایی ۰/۸۷ تا ۰/۹۳، همگرایی مطلوب الگوریتم را تأیید نمود. هر سه مسئله سه هدفه با استفاده از این روش در کمتر از ۳۷۳ نسل به همگرایی رضایت بخشی دست یافتند که تعداد نسل مناسبی برای یک مسئله بهینه سازی چند هدفه مقید است و تأییدکننده کارآمد بودن روش پیشنهادی است. همچنین، تحلیل حساسیت مبتنی بر روش نمونه برداری ابرمکعب لاتین (LHS) تأثیر متغیرهای طراحی بر توابع هدف را به وضوح مشخص نمود و نشان داد که تمامی متغیرهای انتخاب شده در رسیدن به پاسخ های بهینه نقش کلیدی دارند. متغیرهای شعاع سپر حرارتی (R) و زاویه نیم مخروطی ( $\theta$ ) به ترتیب با تأثیر ۳۵٪ و ۲۸٪ بیشترین نقش را در توابع هدف دارند. استفاده از شاخص RHV به عنوان معیاری برای ارزیابی همگرایی، صحت و پایداری فرآیند بهینه سازی را

## ۶. فهرست علائم

$A_{ccct}$	شتاب گریز از مرکز
$A_{ref}$	سطح مبنا
B.C	ضریب بالستیک
$C_D$	ضریب پسا
$C_L$	ضریب برآ
D	قطر بزرگ
d	قطر کوچک
Def	تغییر شکل بیشینه
$F_{applied}$	نیروی کمانش اعمالی
$F_{critical}$	نیروی کمانش بحرانی
$F_D$	نیروی پسا
$F_L$	نیروی برآ
g	شتاب گرانش
h	ارتفاع
L	طول
L.M	ضریب اطمینان کمانشی
M	جرم کل
n	ضریب بار
q	شار حرارتی نقطه سکون
R	شعاع سپر حرارتی
r	شعاع جانبی
$R_E = 6378.139 Km$	شعاع زمین
S.F	ضریب ایمنی
S.M	حاشیه پایداری استاتیکی



[7] R. Arora and P. Kumar, "Aerodynamic shape optimization of a re-entry capsule," in AIAA Conference Proceedings, 2003.

[8] J. Theisinger, R. Braun, and I. Clark, "Aerothermodynamic shape optimization of hypersonic entry aeroshells," in 13th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, 2010.

[9] N. Mehran, M. Mortazavi, A. Adami, and M. Hosseini, "Multidisciplinary design optimization of a reentry vehicle using genetic algorithm," Aircraft Engineering and Aerospace Technology, vol. 82, pp. 194–203, 2010.

[10] A. Adami, N. Mehran, M. Mortazavi, and M. Hosseini, "Multidisciplinary design optimization of a manned reentry mission considering trajectory and aerodynamic configuration," in Proceedings of the 5th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST2011), pp. 598–603, 2011.

[11] D. Dirks and E. Mooij, "Optimization of entry-vehicle shapes during conceptual design," Acta Astronautica, vol. 94, pp. 198–214, 2014.

[12] N. Stander and T. Goel, "An assessment of geometry-based convergence metrics for multi-objective evolutionary algorithms," in 13th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, p. 9232, 2010.

[13] I. Bunesco, M. Pricop, G. Stoican, and A. Dina, "Aerothermodynamic shape optimization for re-entry capsule using genetic algorithms," INCAS Bulletin, 2019.

[14] M. Brchnelova and E. Mooij, "Re-entry shape optimisation using the axisymmetric analogue method with modified Newtonian technique resolved inviscid flowfield," in AIAA Conference Proceedings, 2021.

[15] H. Naseh, H. Karimaei, and M. Lesani, "Two-objective structural optimization of space capsule with thin-walled cylindrical approximation," Journal of Space Science, Technology & Applications (in Persian), vol. 2, no. 2, pp. 158–170, 2022.

[16] M. Kabganian, S. M. Hashemi, and J. Roshanian, "Multidisciplinary design optimization of a re-entry spacecraft via Radau pseudospectral method," Applied Mechanics, vol. 3, no. 4, pp. 1176–1189, 2022.

[17] A. Aprovitola, L. Iuspa, G. Pezzella, and A. Viviani, "Aerodynamic optimization of airfoils shape for atmospheric flight on Mars planet," Acta Astronautica, vol. 212, pp. 580–594, 2023.

[18] A. Aprovitola, L. Iuspa, G. Pezzella, and A. Viviani, "Flows past airfoils for the low-

$t$	ضخامت پوسته فلزی
$T_{aw}$	دمای دیواره بی دررو
$T_w$	دمای دیواره
$V$	سرعت
$Vol$	حجم داخلی
$z$	مختصه ارتفاع
$\gamma$	زاویه مسیر
$\eta_v$	راندمان حجمی
$\theta$	نیم زاویه مخروطی
$\rho$	چگالی هوا
$\sigma_{ij}$	مولفه های تانسور تنش
$\sigma_{von-mises}$	تنش ون میسز
$\sigma_{Yield}$	تنش تسلیم

## ۷- منابع

- [1] K. Deb, Multi-objective optimization using evolutionary algorithms. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [2] E. Zitzler and L. Thiele, "Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach," IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 3, no. 4, pp. 257–271, 2002.
- [3] H. Ishibuchi, R. Imada, Y. Setoguchi, and Y. Nojima, "Reference point specification in hypervolume calculation for fair comparison and efficient search," in Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference, pp. 585–592, July 2017.
- [4] N. Beume, C. M. Fonseca, M. Lopez-Ibanez, L. Paquete, and J. Vahrenhold, "On the complexity of computing the hypervolume indicator," IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 13, no. 5, pp. 1075–1082, 2009.
- [5] A. Liefoghe and B. Derbel, "A correlation analysis of set quality indicator values in multiobjective optimization," in Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO 2016), pp. 581–588, July 2016.
- [6] M. Tava and S. Suzuki, "Multidisciplinary design optimization of the shape and trajectory of a reentry vehicle," Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, vol. 45, pp. 10–19, 2002.



- [22] A. Arovitola, N. Montella, L. Iuspa, G. Pezzella, and A. Viviani, "An optimal heat-flux targeting procedure for LEO re-entry of reusable vehicles," *Aerospace Science and Technology*, 2021.
- [23] W. G. Vincenti, J. W. Boyd, and G. E. Bugos, "H. Julian Allen: an appreciation," *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 39, pp. 1–17, 2007.
- [24] D. Montgomery, *Design and analysis of experiments*, 8th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- [25] A. Saltelli, M. Ratto, T. Andres, F. Campolongo, J. Cariboni, D. Gatelli, M. Saisana, and S. Tarantola, *Global Sensitivity Analysis: The Primer*. Chichester: John Wiley & Sons, 2008.
- [26] X. Liu, F. Wang, Y. Liu, and L. Li, "A multi-objective black-winged kite algorithm for multi-UAV cooperative path planning," *Drones*, vol. 9, no. 2, p. 118, 2025.
- Reynolds number conditions of flying in Martian atmosphere," *Acta Astronautica*, vol. 221, pp. 94–107, 2024.
- [19] H. Naseh, H. Karimaei, and M. Lesani Fadafan, "Multi-objective design optimization of a re-entry bio-capsule based on sensitivity analysis of the main configuration parameters," *Aerospace Knowledge and Technology Journal*, vol. 13, no. 2, pp. 81–94, 2025.
- [20] T. J. Sooy and R. Z. Schmidt, "Aerodynamic predictions, comparisons, and validations using Missile DATCOM (97) and Aeroprediction 98 (AP98)," *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 42, pp. 257–265, 2005.
- [21] C. Thibault, N. Merlinge, and R. Wuilbercq, "3DoF simulation model and specific aerodynamic control capabilities for SpaceX's Starship-like atmospheric reentry vehicle," 2019. [Online preprint].

