



## طراحی بهینه نامعین یک کپسول زیستی تحت عدم قطعیت‌های تolerانس‌های هندسی ساخت و مونتاژ

حسن ناصح، حدیثه کریمایی\*، محمد لسانی فدافن

پژوهشگاه هوافضای وزارت عتف، تهران، ایران

\* ایمیل نویسنده مسئول: karimaei@ari.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۳۰ تیر ۱۴۰۴

پذیرش: ۲۷ آبان ۱۴۰۴

کلیدواژگان:

طراحی بهینه نامعین

کپسول زیستی

عدم قطعیت‌های هندسی

ارزیابی بهینگی واریانس‌محور

در این مقاله، یک روش طراحی بهینه نامعین برای کمینه‌سازی جرم کل یک کپسول فضایی بازگشتی تحت تأثیر عدم قطعیت‌های تolerانس‌های هندسی ساخت و مونتاژ ارائه شده است. طراحی بهینه نامعین یعنی بهینه‌سازی طراحی با لحاظ کردن اثر عدم قطعیت‌ها، به طوری که طراحی نهایی مقاوم و پایدار باشد. رویکرد پیشنهادی مبتنی بر ترکیب طراحی بهینه چندهدفی و ارزیابی بهینگی نامعین واریانس‌محور می‌باشد. ابتدا نقطه بهینه اولیه با استفاده از الگوریتم ژنتیک در شرایط معین تعیین می‌شود. سپس، ارزیابی بهینگی نامعین این طراحی در برابر تغییرات احتمالی تحت تأثیر پارامترهای عدم قطعیت از طریق یک فرایند تکراری انجام می‌گردد. چنانچه طراحی به دست‌آمده معیارهای بهینگی نامعین را برآورده نکند، الگوریتم با تعدیل قیود طراحی و جست‌وجوی نقطه بهینه جدید، این فرایند را تا دستیابی به یک طراحی بهینه نامعین تکرار می‌کند. چارچوب طراحی بهینه چندموضوعی به روش همه در یک مرحله (AAO) پیاده‌سازی شده است. از نمونه‌برداری ابرمکعب لاتین (LHS) در فضای عدم قطعیت‌های هندسی استفاده شده و سطوح پاسخ توابع هدف و قیود استخراج گردیده است. سپس، با به‌کارگیری روش تحلیل واریانس، تأثیر عدم قطعیت‌های هندسی بر پاسخ‌های بهینه کمی‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهد که کپسول بهینه‌شده نامعین، ۱۰/۷ درصد سبک‌تر از طراحی پایه است، در حالی که حاشیه پایداری استاتیکی آن نیز بهبود یافته است. این کاهش جرم از طریق بازطراحی هوشمندانه شامل آیرودینامیکی کپسول و حذف نیاز به جرم تعادلی محقق شده است. همچنین، ارزیابی بهینگی نامعین تأیید می‌کند که توابع بحرانی طراحی دارای حداقل حاشیه ایمنی ۲ سیگما در برابر عدم قطعیت‌های هندسی هستند که گواهی بر قابلیت اطمینان طرح پیشنهادی است.

## Uncertain optimal design of a bio-capsule considering manufacturing and assembly tolerances uncertainty

Hassan Naseh, Hadiseh Karimaei\*, Mohammad Lesani Fadafan

Aerospace Research Institute of the Ministry of Science, Research and Technology, Tehran, Iran

\* Corresponding Author's Email: karimaei@ari.ac.ir

Article Information

Abstract

Original Research Paper

Received: 21 July 2025

Accepted: 18 November 2025

Keywords:

Uncertainty-Based Design Optimization

Bio-Capsule

Geometric Uncertainties

Variance-Based Robustness Analysis

This paper presents an uncertain optimal design methodology for minimizing the total mass of a re-entry space capsule, taking into account geometric manufacturing and assembly tolerance uncertainties. Uncertain optimal design refers to the process of optimizing a design while considering the effects of uncertainties, ensuring that the final solution is both robust and stable. The proposed approach integrates multi-objective optimization with variance-based robustness analysis. Initially, the optimal design point is determined under deterministic conditions using a genetic algorithm. Subsequently, the design's robustness against potential parameter variations is assessed through an iterative process. If the initial design does not satisfy the robustness criteria, the algorithm iteratively updates the design constraints to identify a new optimal point until a robust solution is achieved. The multi-objective optimization framework is implemented using the All-At-Once (AAO) approach, and Latin Hypercube Sampling (LHS) is employed to explore the geometric uncertainty space and construct response surfaces for objective functions and constraints. Variance analysis quantifies the influence of geometric uncertainties on the optimal responses. Results show that the robust optimized capsule is 10.7% lighter than the baseline design, while exhibiting improved static stability margins. This mass reduction is accomplished through intelligent aerodynamic reshaping and the elimination of the need for balancing mass. Robustness evaluation confirms that all critical design functions maintain a minimum  $2\sigma$  safety margin against geometric uncertainties, validating the reliability of the proposed design. The methodology effectively balances mass minimization with stability requirements, demonstrating particular relevance for aerospace applications where both performance and safety are paramount.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Naseh H, Karimaei H, Lesani Fadafan M. Uncertain optimal design of a bio-capsule considering manufacturing and assembly tolerances uncertainty. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2025 Sep 23;12(7):64-80. doi: 10.22034/ijme.2025.536106.2111 [In Persian]

## ۱- مقدمه

طرح‌های بهینه‌شده معمولاً از حساسیت بالایی نسبت به تغییرات پارامترهای طراحی برخوردارند و ممکن است در شرایط واقعی عملکرد مطلوبی نداشته باشند. این مسئله به ویژه در مورد کپسول‌های فضایی که تحت تأثیر تغییرات هندسی ناشی از ترانس‌های ساخت و مونتاژ قرار می‌گیرند، دارای اهمیت است. نقاط بهینه قطعی اغلب در مرزهای فضای طراحی قرار گرفته و در برابر تغییرات هندسی و ترانس‌های ساخت آسیب‌پذیر هستند [۱]. در طراحی کپسول‌های فضایی، تغییرات هندسی می‌تواند منجر به انحراف قابل توجهی در عملکرد سازه شود. بنابراین، علاوه بر یافتن نقطه بهینه، ارزیابی بهینگی نامعین طرح در برابر این تغییرات از اهمیت حیاتی برخوردار است [۲]. ارزیابی بهینگی نامعین با هدف کاهش حساسیت سیستم به تغییرات پارامترهای دارای عدم قطعیت و بهبود قابلیت اطمینان محصول نهایی انجام می‌شود. رویکرد پیشنهادی در این مقاله بر پایه روش‌های واریانس‌محور استوار است که امکان ارزیابی تأثیر عدم قطعیت‌ها بر عملکرد کپسول فضایی را فراهم می‌کند. در این روش، تغییرپذیری پارامترهای هندسی به عنوان متغیرهای تصادفی با توزیع‌های مشخص، مدل‌سازی می‌شوند [۳]. تحلیل واریانس<sup>۱</sup> به عنوان ابزاری کارآمد برای سنجش میزان بهینگی نامعین طرح در برابر این تغییرات به کار گرفته می‌شود. مزیت اصلی این روش در توانایی آن برای کمی‌سازی تأثیر تغییرات هندسی بر عملکرد کپسول، شناسایی طرح‌هایی که کمترین حساسیت را به تغییرات ترانس‌های هندسی دارند و تضمین عملکرد قابل اطمینان در شرایط واقعی عملیاتی می‌باشد [۴]. این رویکرد به ویژه برای سیستم‌های چندموضوعی مانند کپسول‌های فضایی که نیازمند تعادل بین معیارهای مختلف عملکردی هستند، مناسب است.

سومیت و همکاران [۵] روش نوآورانه‌ای تحت عنوان بهینه‌سازی همزمان زیرفضای ژنتیک چندهدفه نامعین (R-MOGACSSO) ارائه نمودند. این روش توسعه‌یافته‌ای از الگوریتم MOGACSSO کلاسیک است که قابلیت تولید راه‌حل‌های پارتو-بهینه نامعین را برای مسائل طراحی چندموضوعی پیچیده دارا می‌باشد. مکانیزم اصلی این روش، در نظر گرفتن میانگین و انحراف معیار عملکرد نقاط طراحی مجاور به عنوان اهداف اضافی است که منجر به هدایت فرایند طراحی بهینه به سمت طراحی‌های با بهینگی نامعین می‌گردد. شولر و همکاران [۶] در مطالعه پیشگامانه خود، یک چارچوب تحلیلی پیشرفته مبتنی بر روش المان محدود در مقیاس بزرگ توسعه دادند. آن‌ها به طور سیستماتیک تأثیرات همزمان عدم قطعیت‌های خواص مواد و تغییرات هندسی را بر رفتار سازه‌های ماهواره مورد بررسی قرار دادند. یافته‌های این پژوهش نشان داد که تغییرپذیری پارامترهای مدل می‌تواند منجر به نوسانات قابل توجهی در شاخص‌های عملکرد سازه شود. نوآوری کلیدی این تحقیق، بکارگیری یک نسخه بهینه‌سازی شده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو بود که امکان انجام تحلیل عدم قطعیت بر روی مدل‌های پیچیده المان محدود را با کارایی محاسباتی بالا فراهم می‌ساخت. لی و همکاران [۷] در پژوهش خود، یک چارچوب نوآورانه برای طراحی بهینه نامعین چندموضوعی (RMDO) در کاربردهای هوافضایی توسعه دادند. این روش ترکیبی از تحلیل‌های دینامیک سیالات محاسباتی و الگوریتم‌های تکاملی پیشرفته بود که امکان ارزیابی همزمان عدم قطعیت‌های پارامترهای طراحی و شرایط عملیاتی پرواز را فراهم می‌ساخت. در راستای مشابه، مینیسکی و همکاران [۸] یک روش بهینه‌سازی چنددقتی<sup>۲</sup> نامعین برای وسایل فضایی کوچک در مرحله بازگشت به جو ارائه نمودند. این محققان با تلفیق الگوریتم‌های چندهدفه تکاملی و روش‌های رونویسی مستقیم<sup>۳</sup>، موفق به توسعه سیستمی شدند که قادر به مدیریت همزمان پارامترهای شکل و مسیر پرواز تحت شرایط عدم قطعیت بود. عدم قطعیت‌های مورد بررسی در این تحقیق شامل تغییرات نیروهای آیرودینامیکی و خواص مواد سیستم حفاظت حرارتی بود که با دقت بالایی مدلسازی و تحلیل شدند.

شیا و همکاران [۹] به چالش‌های مسائل طراحی بهینه چندموضوعی (MDO) پرداختند و یک رویکرد طراحی بهینه نامعین چندموضوعی متوالی<sup>۴</sup> را برای مقابله با این چالش‌ها پیشنهاد دادند. رویکرد RS-MDO بر اساس یک چارچوب MDO متوالی بود و هدفش دستیابی به یک راه‌حل بهینه نامعین با قابلیت بهینه‌سازی مستقل هر موضوع بود. این رویکرد از یک الگوریتم ژنتیک (GA) به عنوان حل‌کننده در هر مرحله بهینه‌سازی استفاده می‌کرد و به گونه‌ای طراحی شده بود که از طریق پردازش موازی، هزینه محاسباتی را کاهش دهد. جینجینگ و همکاران [۱۰] یک رویکرد بهینه‌گی نامعین شش سیگما مبتنی بر روش سطح پاسخ متوالی<sup>۵</sup>

<sup>1</sup> ANOVA

<sup>2</sup> Multi-Fidelity

<sup>3</sup> Direct Transcription Method

<sup>4</sup> Robust Sequential MDO (RS-MDO)

<sup>5</sup> Successive Response Surface Method (SRSM)

برای سیستم حفاظت حرارتی وسایل ماوراء صوت با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های هندسی و مشخصات مواد ارائه دادند. هدف آن‌ها کاهش وزن سازه و افزایش قابلیت اطمینان با رویکرد بهینگی نامعین طراحی بود. طراحی بهینه نامعین شش سیگما به طور قابل توجهی قابلیت اطمینان و بهینگی نامعین طراحی را نسبت به بهینه‌سازی‌های معین و مبتنی بر قابلیت اطمینان افزایش داد. ننگ و همکاران [۱۱] روشی برای بهینه‌سازی آیرودینامیک با استفاده از مدل جایگزین کریگینگ چندسطحی ارائه دادند. برای کاهش هزینه‌های محاسباتی و همچنین برای کمی‌سازی عدم قطعیت‌ها، از شبیه‌سازی مونت-کارلو استفاده نمودند. آن‌ها یک مدل جایگزین کریگینگ دوسطحی برای کمی‌سازی عدم قطعیت در طراحی بهینه نامعین آیرودینامیکی به کار گرفتند. نتایج نشان داد که راه‌حل‌های بهینه به خطاهای جزئی در تولید، حساسیت کمتری دارند.

مبیدی و همکاران [۱۲] چارچوبی برای بهینه‌سازی طراحی بهینه نامعین چندهدفه-چندموضوعی (MOMRDO) معرفی کردند. روش آن‌ها از سنتز سیستم یکپارچه دوسطحی<sup>۱</sup> به عنوان ابزاری سریع برای طراحی بهینه چندموضوعی (MDO) استفاده می‌نمود. این روش از نمونه‌برداری ابرمکعب لاتین پیشرفته (PLHS) برای طراحی آزمایش‌ها (DOE) در تحلیل عدم قطعیت بهره می‌برد. این چارچوب به طور خاص برای طراحی بهینه نامعین (RDO) سیستم‌های پیچیده به طور کارآمد و سازگار طراحی شده بود. علی محمدی و همکاران [۱۳] یک روش برای طراحی بهینه چندموضوعی مبتنی بر قابلیت اطمینان (RBMDO) را بررسی و به یک موتور الکتروپمپ با سوخت LOX-kerosene اعمال کردند. آن‌ها با این روش، یک مدل سطح پاسخ تطبیقی-نمونه‌برداری مستقیم (ARSM-DS) را معرفی کردند تا کارایی بهینه‌سازی را بهبود بخشند و احتمال شکست را ارزیابی کنند. فتحی و مجیبی [۱۴] یک چارچوب طراحی برای بهینه‌سازی مسیر بازگشت یک وسیله پرتابی فضایی قابل استفاده مجدد<sup>۲</sup> با استفاده از الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب<sup>۳</sup> معرفی کردند. هدف این مطالعه شناسایی یک مسیر بهینه بود که الزامات و محدودیت‌های کنترلی و سازه‌ای را ارضا و ضخامت ایده‌آل پوسته بدنه و سیستم حفاظت حرارتی را تعیین می‌نمود. علاوه بر این، قابلیت اطمینان قیود تحت تأثیر عدم قطعیت‌ها ارزیابی شد. یئو و همکاران [۱۵] یک چارچوب طراحی بهینه چندهدفه برای کپسول بازگشتی توسعه دادند که در آن از یک برنامه تحلیل سریع به منظور پیش‌بینی عملکرد پروازی استفاده شده است. رویکرد پیشنهادی آن‌ها امکان ارزیابی همزمان معیارهای مختلف طراحی را فراهم می‌ساخت. رویکرد آن‌ها نشان می‌دهد که بهینه‌سازی چندهدفه می‌تواند نقش مهمی در بهبود عملکرد آیرودینامیکی و پایداری کپسول‌های فضایی ایفا کند. این پژوهش، زمینه‌ساز توسعه روش‌های پیشرفته‌تر در حوزه طراحی بهینه نامعین می‌باشد. یانگ و همکاران [۱۶] یک روش طراحی بهینه نامعین یکپارچه ارائه کردند که در آن هم‌زمان پیکربندی و کنترل ارتعاش-وضعیت در سازه‌های با اجزای سخت و انعطاف‌پذیر در نظر گرفته شده است. در این روش، عدم قطعیت‌های بازه‌ای از طریق چارچوب طراحی بهینه نامعین مدل‌سازی شده و در نتیجه، عملکرد سازه‌ای و کارایی کنترل در شرایط نامعین بهبود یافته است.

مسئله اصلی این پژوهش آن است که بتوان با بهره‌گیری از یک رویکرد مبتنی بر واریانس در چارچوب طراحی بهینه چندموضوعی همه در یک مرحله (AAO-MDO)، طراحی بهینه نامعین یک کپسول فضایی بازگشتی از نوع پیکره کره مخروطی را به دست آورد. در عین حال علاوه بر کمینه‌سازی جرم، پایداری عملکرد تحت عدم قطعیت‌های ناشی از تلورانس‌های ابعادی نیز تضمین شود. فرضیه اصلی بر این است که ادغام یک حلقه ارزیابی بهینگی نامعین مبتنی بر واریانس در چارچوب AAO-MDO، همراه با تعدیل تطبیقی قیود طراحی باشد. این فرایند می‌تواند منجر به دستیابی به طرحی شود که ضمن کمینه‌سازی جرم کپسول فضایی، در برابر عدم قطعیت‌های ناشی از تلرانس‌های هندسی ساخت و مونتاژ نیز از پایداری و عملکرد قابل اعتماد برخوردار باشد. از این‌رو در این مقاله، یک روش طراحی بهینه نامعین برای کمینه‌سازی جرم کپسول فضایی کره-مخروطی شکل تحت تأثیر عدم قطعیت‌های هندسی ساخت و مونتاژ ارائه می‌شود. رویکرد پیشنهادی مبتنی بر ترکیب بهینه‌سازی چندموضوعی و ارزیابی بهینگی نامعین واریانس‌محور است که در دو مرحله اصلی اجرا می‌گردد. ابتدا تعیین نقطه بهینه جرمی اولیه با استفاده از چارچوب AAO و الگوریتم ژنتیک در شرایط معین، و سپس ارزیابی بهینگی نامعین طراحی در برابر تغییرات هندسی از طریق تحلیل واریانس. در صورت عدم تأمین معیارهای ارزیابی بهینگی نامعین، الگوریتم به صورت تکراری با تعدیل قیود طراحی و جستجوی نقطه بهینه جدید، فرایند را تا دستیابی به طراحی با حداقل حساسیت به تغییرات هندسی ادامه می‌دهد. این روش تضمین می‌کند که طراحی نهایی نه تنها از نظر جرم بهینه باشد، بلکه

<sup>1</sup> Bi-Level Integrated System Synthesis (BLISS)

<sup>2</sup> Reusable Flexible Space Launch Vehicle (RFSLV)

<sup>3</sup> Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II)

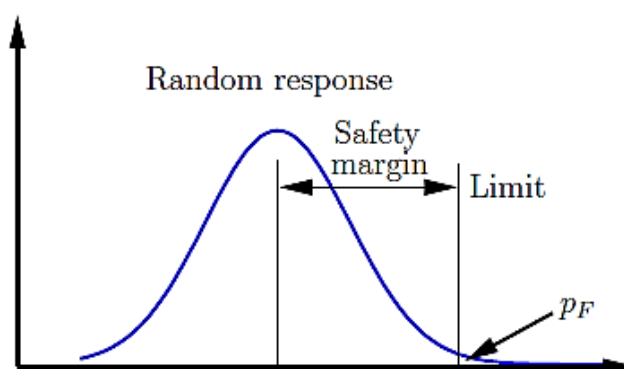
در شرایط واقعی عملیاتی با وجود تغییرات احتمالی در مشخصات هندسی ناشی از ترانس‌های ساخت و مونتاژ، عملکرد قابل اطمینانی از خود نشان دهد. نوآوری اصلی این پژوهش در ترکیب روش‌های بهینه‌سازی چندموضوعی با ارزیابی بهینگی نامعین واریانس‌محور برای مدیریت عدم قطعیت‌های هندسی ساخت و مونتاژ در طراحی کپسول‌های فضایی است. تمایز روش پیشنهادی نسبت به پژوهش‌های پیشین در سه محور اصلی است: یکپارچه‌سازی حلقه ارزیابی بهینگی نامعین واریانس‌محور با چارچوب AAO-MDO برای کپسول‌های بازگشتی؛ جداسازی حلقه بهینه‌سازی و حلقه ارزیابی بهینگی نامعین واریانس‌محور با چارچوب AAO-MDO برای توسعه یک چارچوب در طراحی بهینه نامعین که امکان دستیابی همزمان به سرعت محاسباتی و دقت در سطح هوافضا را فراهم می‌سازد.

## ۲- ارزیابی بهینگی نامعین واریانس‌محور

در ارزیابی بهینگی نامعین مبتنی بر واریانس، تغییرپذیری پاسخ‌های بحرانی سیستم مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای این منظور، از روش‌های نمونه‌برداری تصادفی مانند LHS استفاده می‌شود که با تولید نمونه‌های متناظر با توزیع احتمالی متغیرهای ورودی، امکان ارزیابی کمی اثرات عدم قطعیت‌ها را فراهم می‌سازد [۱۷]. یکی از معیارهای پرکاربرد در این تحلیل، شاخص انحراف معیار است که میزان حساسیت پاسخ‌های سیستم را نسبت به تغییرات متغیرهای ورودی نشان می‌دهد. در ارزیابی بهینگی نامعین واریانس‌محور، حاشیه ایمنی (رابطه ۱) را می‌توان به عنوان فاصله بین مقدار میانگین پاسخ و حد مجاز تعیین کرد (شکل ۱). مقدار حاشیه ایمنی ( $a\sigma$ ) باید توسط طراح تعریف شده و برای همه پاسخ‌ها و قيود برقرار باشد.

$$\left\| Y_{\text{limit}} - \bar{Y} \right\| \geq a\sigma \quad (1)$$

در ادامه، خواص آماری پاسخ‌های مدل یعنی میانگین و انحراف استاندارد استخراج شده و حاشیه ایمنی با استفاده از معادله ۱ برای پاسخ و قيود محاسبه می‌شود. معیار بعدی معیار ضریب تغییرات<sup>۱</sup> است به گونه‌ای که در یک طراحی بهینه نامعین، ضریب تغییرات پاسخ و قيود بایستی از بیشترین ضریب تغییرات متغیرهای ورودی کمتر باشد. علاوه بر تغییرات پاسخ، مقدار میانگین می‌تواند شاخصی در مورد بهینگی نامعین یک طراحی باشد. اگر مقدار میانگین تخمینی توسط نمونه‌ها با مقدار مرجع قطعی اختلاف زیادی داشته باشد، به این معنی است که تأثیر عدم قطعیت‌های ورودی قابل توجه است [۱۸].



شکل ۱ پاسخ مدل تصادفی با مقدار حدی داده شده و حاشیه ایمنی مربوطه و احتمال شکست PF

در چارچوب RMDO، قيود به منظور سوق دادن فرایند بهینه‌سازی بعدی به یک منطقه امن‌تر، سخت‌تر می‌شوند. با سخت‌تر کردن قيود ذکر شده در رابطه ۲، بهینه‌ساز با قيود جدید، نقطه بهینه جدیدی را جستجو می‌کند که هم حاشیه ایمنی مورد نیاز را تأمین کرده و هم معیارهای بهینگی نامعین را برآورده سازد. شاخص‌های حساسیت مشخص می‌کنند که کدام متغیرهای ورودی بیشترین تأثیر را در کاهش عدم قطعیت پاسخ‌های مدل دارند. هدف، شناسایی نواحی از فضای طراحی است که رابطه ۳ در آن‌ها برقرار باشد و نه

<sup>1</sup> Coefficient of Variation

کمینه‌سازی  $\sigma$ . مطابق رابطه ۲، اگر دو گام تکراری کافی نباشد، مقادیر قید می‌توانند در تکرار سوم و تکرارهای بعدی به صورت خطی بین مراحل قبلی میان‌یابی شوند، به گونه‌ای که هم حاشیه ایمنی حاصل شده و هم حاشیه ایمنی لازم در نظر گرفته شود. این فرایند تا یافتن نقطه بهینه نامعین ادامه می‌یابد.

$$g_{allow}^{step2} = g_{allow}^{step1} - \alpha_0 \times \sigma_{g-step1} \quad (2)$$

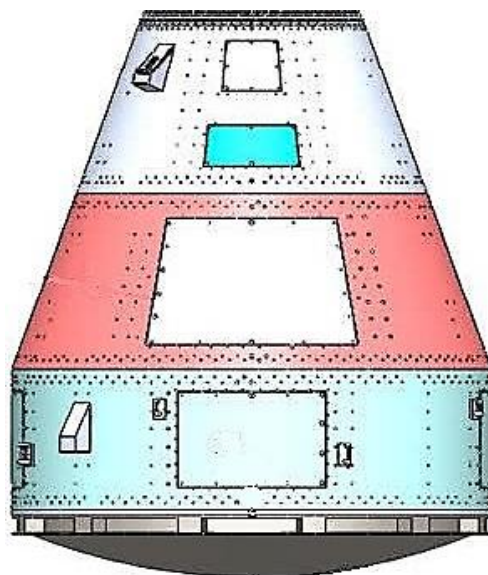
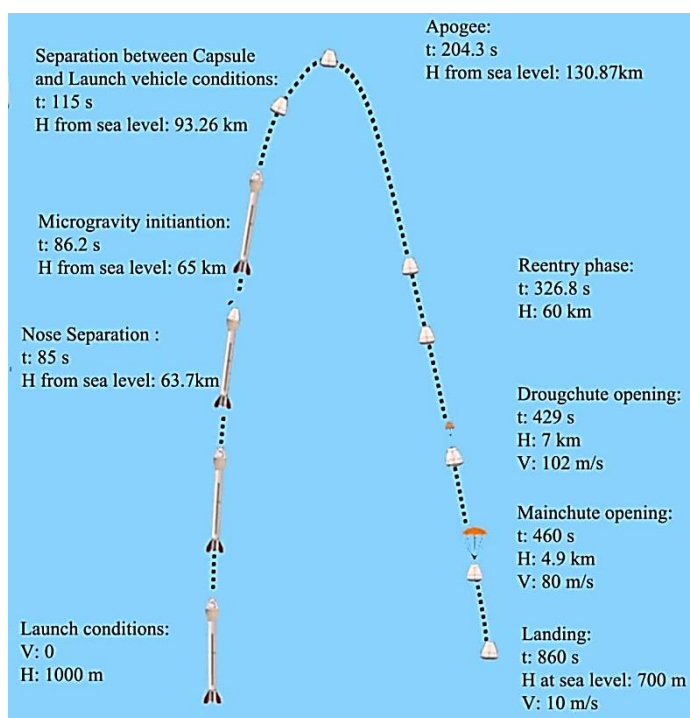
که  $g_{allow}^{step2}$  مقدار قید مجاز در تکرار ۲،  $g_{allow}^{step1}$  مقدار قید مجاز در تکرار ۱،  $\sigma_{g-step1}$  انحراف معیار قید  $g$  در تکرار ۱ و  $\alpha_0$  ضریب قابلیت اطمینان است.

$$CV_{responces} \leq \max(CV_{inputs}) \quad (3)$$

که  $CV_{responces}$  ضریب تغییرات پاسخ‌ها (شامل تابع هدف و قیود) و  $CV_{inputs}$  ضریب تغییرات ورودی‌هاست.

### ۳- فرایند طراحی بهینه نامعین

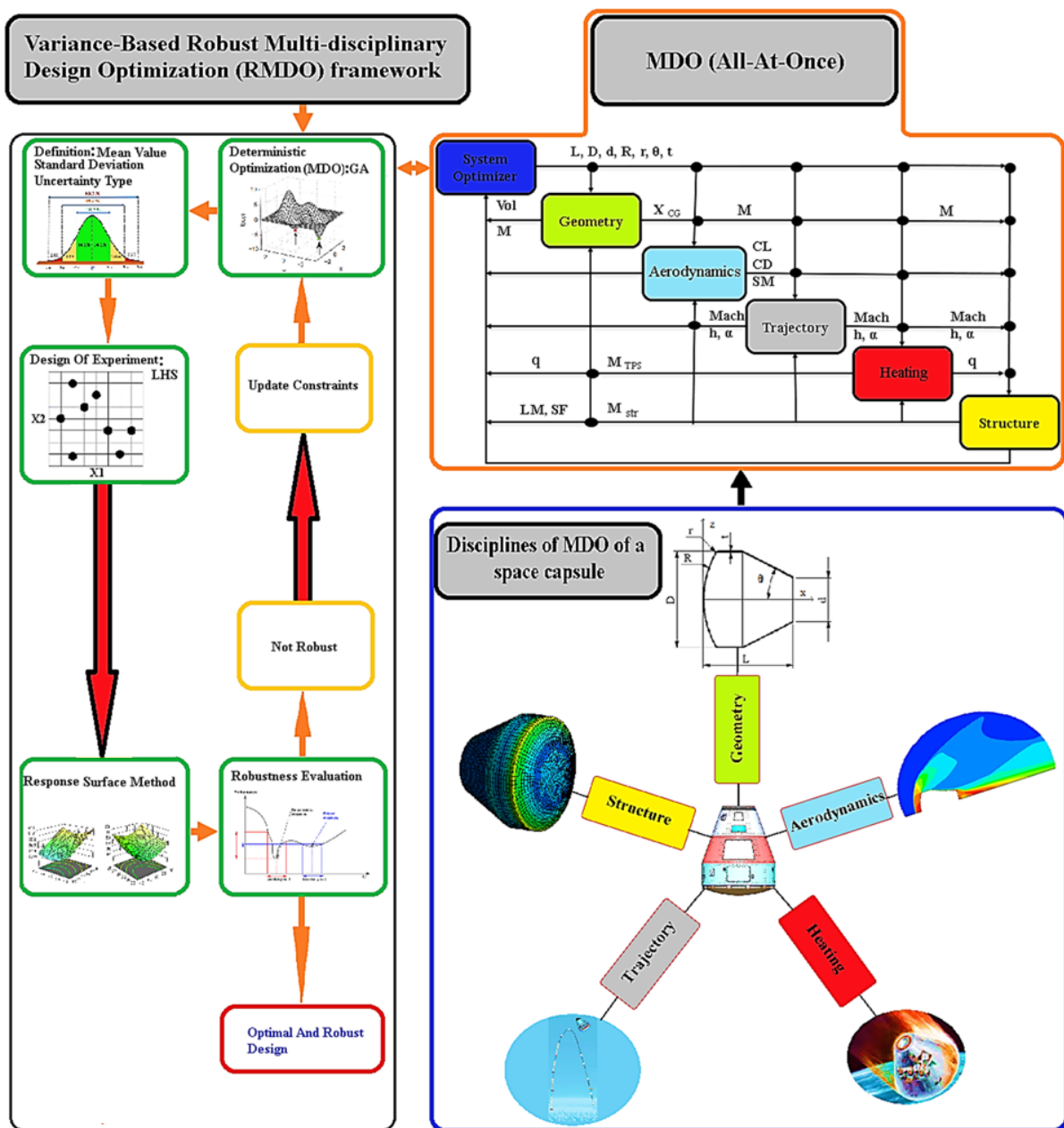
طراحی کپسول‌های فضایی یک مسئله چندموضوعی است که موضوعات دخیل در آن در تحقیق حاضر شامل هندسه، آیرودینامیک، گرمایش، مسیر و سازه در نظر گرفته شده است. بنابراین برای رسیدن به نقطه بهینه بایستی از روش‌های طراحی بهینه چندموضوعی [۱۹] بهره گرفت. از طرفی یک نقطه بهینه عملیاتی بایستی نسبت به عدم قطعیت ورودی‌های طراحی، مقاوم و پایدار باشد، بنابراین رسیدن به یک نقطه بهینه در طراحی بهینه نامعین بسیار حائز اهمیت است. شکل ۲ پروفایل ماموریت زیرمداری کپسول بومی ۵۰۰ کیلوگرمی که تست پروازی آن انجام شده را نشان می‌دهد. این کپسول پس از جدایش از حامل تا ارتفاع حدود ۱۳۰ کیلومتری اوج گرفته و سپس طی یک مسیر سهمی به جو زمین باز می‌گردد و نهایتاً توسط چتر، بازیابی می‌شود. هدف از پژوهش حاضر، طراحی بهینه نامعین جرمی این کپسول بومی، تحت عدم قطعیت‌های هندسی ساخت و مونتاژ، با روش پیشنهادی طراحی بهینه نامعین چندموضوعی واریانس محور است.



شکل ۲ پروفایل مسیر پروازی زیرمداری کپسول بومی

شکل ۳ فلوچارت پیاده‌سازی طراحی بهینه نامعین چندموضوعی کپسول بومی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، ابتدا با استفاده از طراحی بهینه چندموضوعی با کمک الگوریتم ژنتیک، نقطه بهینه‌ی معین جرمی کپسول شناسایی می‌شود. سپس این

نقطه به عنوان مینا برای ارزیابی بهینگی نامعین در نظر گرفته شده و عدم قطعیت‌ها به این نقطه اعمال می‌شود. در ادامه به وسیله روش طراحی آزمایش به کمک نمونه‌برداری ابرمکعب لاتین در فضای عدم قطعیت، سطوح پاسخ تابع هدف و قیود به دست می‌آید. سپس خواص آماری پاسخ‌های مدل شامل مقدار میانگین و انحراف معیار تابع هدف و قیود استخراج می‌گردند. نهایتاً معیارهای ارزیابی بهینگی نامعین برای نقطه بهینه با روش واریانس محور بررسی می‌شوند. در صورتی که شروط طراحی بهینه نامعین ارضا شود، الگوریتم به پایان می‌رسد، در غیر این صورت با تغییر مجاز قیود طراحی، نقطه بهینه جدید توسط الگوریتم بهینه‌ساز چندموضوعی شناسایی می‌شود. این فرایند تا رسیدن به نقطه بهینه نامعین تکرار می‌شود. این شکل، شماتیک موضوعات دخیل در طراحی چندموضوعی کپسول فضایی و نیز چارچوب طراحی بهینه چندموضوعی همه در یک مرحله برای رسیدن به جرم کل بهینه را دربر دارد. این چارچوب شامل پنج موضوع اصلی طراحی و هفت متغیر هندسی طراحی است که این متغیرها عبارتند از طول کل کپسول ( $L$ )، قطر بزرگ کپسول ( $D$ )، قطر کوچک کپسول ( $d$ )، شعاع سپر حرارتی ( $R$ )، شعاع جانبی ( $r$ )، زاویه نیم‌مخروطی ( $\theta$ ) و ضخامت پوسته فلزی ( $t$ ) سازه کپسول است.

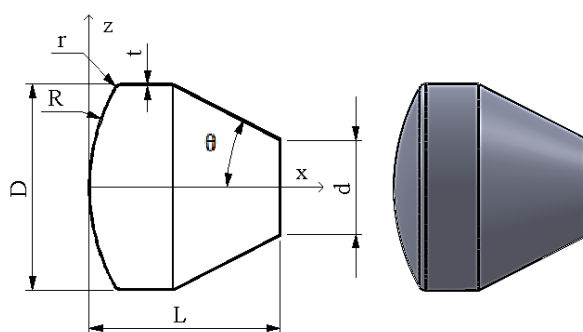


شکل ۳ فلوچارت دستیابی به نقطه طراحی بهینه نامعین

## ۴- پیاده‌سازی بهینه‌سازی چندموضوعی

شکل ۴ هندسه کپسول بومی مورد پژوهش را نشان می‌دهد که توسط پارامترهای هندسی شامل طول کل، قطر بزرگ، قطر کوچک، زاویه نیم‌مخروطی، شعاع سپر حرارتی، شعاع جانبی و ضخامت پوسته فلزی بدنه تعریف شده است. شایان ذکر است که شرط داشتن یک هندسه کره-مخروطی معنادار، برقراری رابطه ۴ بین این پارامترها می‌باشد. مشخصات کپسول بومی و حدود پارامترهای هندسی که معرف فضای طراحی هستند، به عنوان متغیرهای طراحی بهینه چندموضوعی برای استخراج نقطه بهینه با هدف کمینه‌سازی جرم کل کپسول در جدول ۱ معرفی و ارائه شده‌اند. در جدول ۲ قیود مسئله بهینه‌سازی جرم کل کپسول ارائه شده است. بازه متغیرهای طراحی جدول ۱ بر اساس الزامات هندسی، آیرودینامیکی و محدودیت‌های ساخت تعیین شده تا شکل کپسول حفظ شود و طراحی از نظر عملی و مأموریتی امکان‌پذیر باشد.

$$L - R - \frac{D-d}{2 \tan \theta} + \sqrt{R^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2} \geq r \quad (4)$$



شکل ۴ مدل پارامتریک هندسه کپسول بومی مورد پژوهش

جدول ۱ متغیرهای بهینه‌سازی طراحی چندموضوعی و مشخصات کپسول بومی

ردیف	متغیر طراحی	حداکثر مقدار	حداقل مقدار	کپسول بومی
۱	L (mm)	۲۴۰۰	۱۰۰۰	۱۳۵۰
۲	D (mm)	۲۰۰۰	۱۰۰۰	۱۴۰۰
۳	$\theta$ (°)	۸۰	۵	۲۵
۴	R (mm)	۲۰۰۰	۱۰۰۰	۱۷۰۰
۵	d (mm)	۸۰۰	۴۰۰	۷۰۰
۶	r (mm)	۱۰۰	۱۰	۲۰
۷	t (mm)	۱۲	۳	۵

جدول ۲ قیود مسئله کمینه‌سازی جرم کپسول زیستی

ردیف	قیود	مقدار	واحد
۱	حجم، Vol	$1.35 \leq Vol$	$m^3$
۲	حاشیه اطمینان استاتیکی، SM	$SM \geq 0.1$	-
۳	ضریب اطمینان، SF	$SF \geq 2$	-
۴	ضریب بار کماتش، LM	$LM \geq 2$	-
۵	دمای پوسته فلزی، T	$373 \leq T$	K
۶	ضریب بار (جی‌لود)، n	$n \leq 5$	-
۷	شار حرارتی نقطه سکون، q	$q \leq 100$	$kw/m^2$

برای متامدل‌سازی آیرودینامیکی کپسول از کد MD استفاده شده است که نتایج آن با نتایج تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی و تست پروازی اعتبارسنجی شده است. توابع سطح پاسخ آیرودینامیکی با استفاده از تعداد ۱۰۹ نقطه نمونه تولید شده است که جدول ۳ خطای آماری مربوط به این توابع را نشان می‌دهد.

جدول ۳ خطای آماری توابع آیرودینامیکی

ضریب تعیین، $R^2$	خطای جذر میانگین مربعات نسبی، RRMSE (%)	تابع
۰/۹۸۷	۳/۹۰	CL (ضریب برآ)
۰/۹۷۵	۷/۴۱	CD (ضریب پسا)

برای شبیه‌سازی مسیر، یک کد سه درجه آزادی در متلب توسعه داده شده است. شبیه‌سازی‌ها و تحلیل‌های حرارتی و سازه‌ای در نرم‌افزار انسیس ورک‌بنچ انجام شده است. از کامپوزیت سیلیکا فنولیک به عنوان سیستم حفاظت حرارتی استفاده گردیده است. برای محاسبه شار حرارتی نقطه سکون از رابطه ۵ استفاده شده است. ضریب بار وارد بر کپسول در طی مسیر حرکت، مطابق با رابطه ۶ محاسبه شده است. برای محاسبه مقدار ضریب اطمینان استاتیکی سازه‌ای که بر مبنای تنش فون میسر (رابطه ۷) محاسبه می‌شود، از رابطه ۸ استفاده شده است. برای محاسبه حاشیه پایداری استاتیکی طولی کپسول از رابطه ۹ استفاده شده و در نهایت ضریب اطمینان کمانشی سازه از رابطه ۱۰ محاسبه شده و جرم کل کپسول از رابطه ۱۱ به دست آورده شده است.

$$q = 1.83 \times 10^{-4} \times V^3 \times \left(1 - \frac{T_w}{T_{aw}}\right) \sqrt{\frac{\rho}{R}} \quad (5)$$

$$n = \frac{\sqrt{F_D^2 + F_L^2}}{Mg} \quad (6)$$

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

$$SF = \frac{\sigma_{Yield}}{\sigma_{von-mises}} \quad (8)$$

$$SM = \frac{X_{CP} - X_{CG}}{L} \quad (9)$$

$$LM = \frac{F_{critical}}{F_{applied}} \quad (10)$$

$$M = M_{equipment} + M_{str} + M_{TPS} \quad (11)$$

بدنه کپسول فضایی بومی از مونتاژ سه زیرمجموعه اصلی شامل سپر حرارتی، بخش استوانه‌ای و بخش مخروطی تشکیل شده است. با توجه به اینکه روش ساخت بدنه کپسول، نورد<sup>۱</sup> ورق آلومینیومی بوده است، ترانس‌های ساخت و مونتاژ مجموعه نهایی، ناگزیر زیاد بوده است. از سوی دیگر، کاهش خطای ساخت و محدود کردن ترانس‌های آن با توجه به روش ساخت مذکور، بسیار سخت و پرهزینه است. لذا خطاهای ساخت برای این محصول، اجتناب ناپذیر بوده است، بنابراین جهت اطمینان از عملکرد مناسب محصول نهایی تحت این عدم قطعیت‌ها (یعنی ترانس‌های ساخت و مونتاژ)، مطالعه و بررسی در این باره توجیه پیدا کرده و ضروری است.

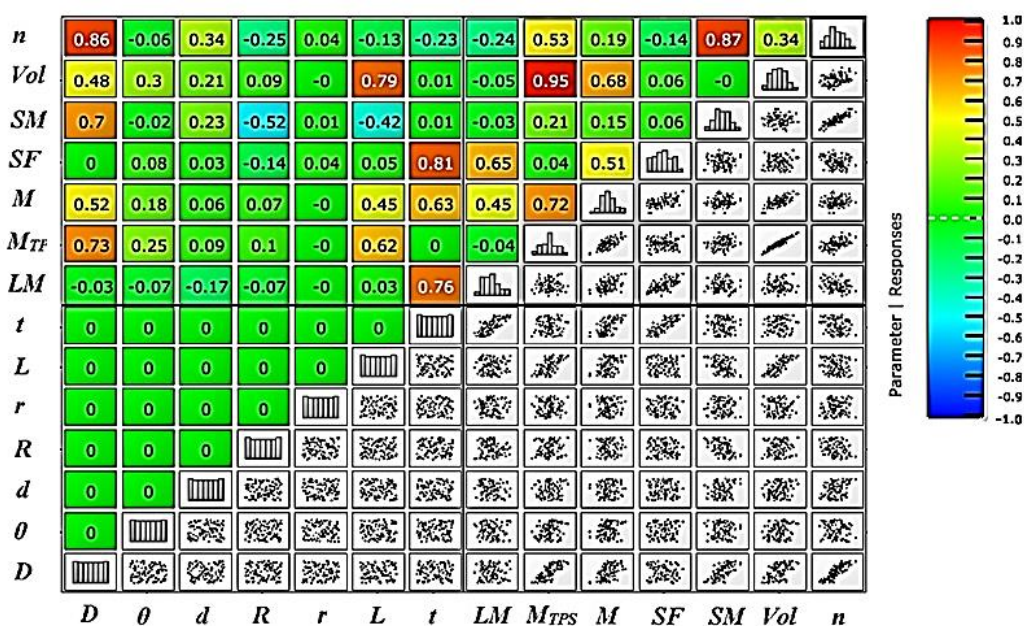
پس از استخراج نقطه بهینه طراحی چندموضوعی معین، ۷ پارامتر هندسی کپسول به عنوان پارامترهای دارای عدم قطعیت برای استخراج نقطه بهینه نامعین در نظر گرفته شدند. در جدول ۴ مشخصات آماری این پارامترها برای ارزیابی نقطه طراحی بهینه نامعین (از منظر کمینه‌سازی جرم) کپسول ارائه شده که این مقادیر شامل مقدار میانگین، انحراف استاندارد، ضریب تغییرات و غیره می‌باشند. در شکل ۵ ماتریس همبستگی متغیرها و توابع پاسخ مسئله رسم شده است. این ماتریس شامل ۷ متغیر و ۷ تابع پاسخ می‌باشد که وابستگی توابع پاسخ به متغیرها را نشان می‌دهد. ضرایب همبستگی داخل هر آرایه ماتریس نشان داده شده است. این ضریب می‌تواند مقادیر بین -۱ تا +۱ را اختیار کند. مقدار +۱ نشان‌دهنده بیشترین همبستگی خطی مستقیم بین دو متغیر و مقدار -۱

<sup>1</sup> Rolling

نشان‌دهنده بیشترین همبستگی خطی معکوس است. عدد 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. همانطور که مشاهده می‌شود ضریب بار، حاشیه پایداری استاتیکی و جرم سیستم حفاظت حرارتی قوی‌ترین ارتباط مستقیم را با قطر بزرگ کپسول دارند. ضریب اطمینان استاتیکی، ضریب اطمینان کمانشی و جرم کل کپسول قوی‌ترین ارتباط مستقیم را با ضخامت سازه دارند؛ همچنین حجم داخلی کپسول قوی‌ترین ارتباط مستقیم را با طول کپسول دارد.

جدول ۴ پارامترهای دارای عدم قطعیت

ردیف	متغیر	مقدار میانگین	انحراف استاندارد	ضریب تغییرات (CV)	نوع توزیع متغیرها	نوع عدم قطعیت	واحد
۱	L	۱۱۴۰	۱۱/۴۰	۱٪	پیوسته	نرمال	mm
۲	D/2	۷۹۲	۳/۹۶	٪۰/۵	پیوسته	نرمال	mm
۳	$\theta$	۴۵	۰/۹۰	۲٪	پیوسته	نرمال	Deg
۴	R	۱۷۲۰	۱۷/۲۰	۱٪	پیوسته	نرمال	mm
۵	d/2	۲۱۰	۲/۱۰	۱٪	پیوسته	نرمال	mm
۶	r	۱۵	۰/۷۵	۵٪	پیوسته	نرمال	mm
۷	t	۵	۰/۱۰	۲٪	پیوسته	نرمال	mm

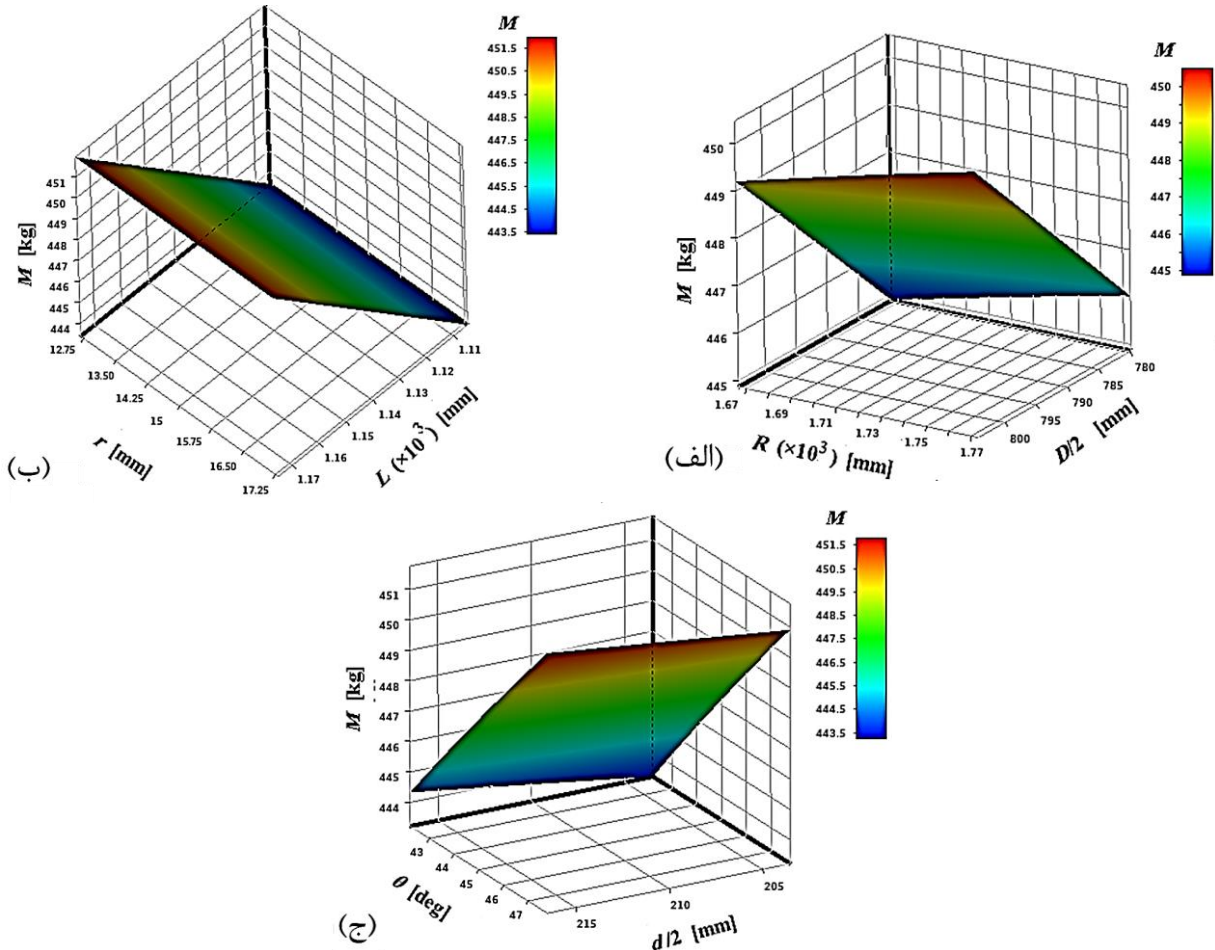


شکل ۵ ماتریس همبستگی متغیرها و پاسخ‌ها

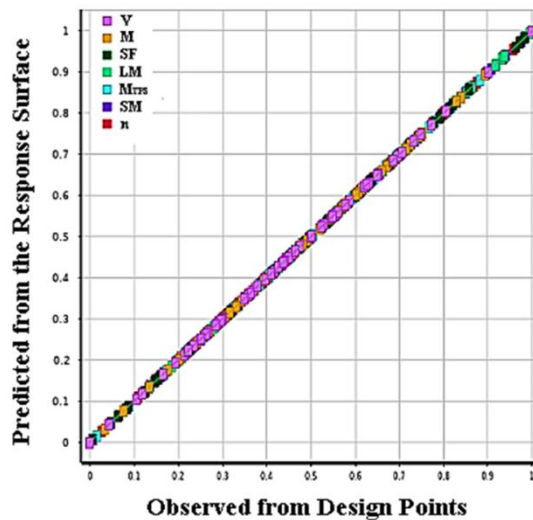
## ۵- نتایج و بحث

شکل ۶ و شکل ۷ نمودار سطح پاسخ تابع جرم کل بر حسب متغیرهای غیرقطعی کپسول و دقت برازش سطح پاسخ‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۶-الف رابطه برای نیم‌قطر بزرگ، به صورت مستقیم خطی است. همچنین تغییرات تolerانس شعاع سپر حرارتی، تاثیر کمتری نسبت به نیم‌قطر بزرگ بر روی مقدار جرم کل دارد. تغییرات تolerانس ناشی از این دو پارامتر حدود ۵ کیلوگرم بر روی جرم کل تاثیرگذار است. با توجه به شکل ۶-ب رابطه برای طول کل، به صورت مستقیم خطی است و تغییرات تolerانس شعاع جانبی، تاثیر کمتری نسبت به طول بر روی مقدار جرم کل دارد. از طرفی تغییرات تolerانس این دو پارامتر، حدود ۸ کیلوگرم بر روی جرم کل تاثیرگذار است. با توجه به شکل ۶-ج رابطه برای نیم‌زاویه مخروطی، به صورت مستقیم خطی است و تغییرات تolerانس نیم‌قطر کوچک، تاثیر کمتری نسبت به نیم‌زاویه مخروطی بر روی مقدار جرم کل کپسول دارد. تغییرات تolerانس این دو پارامتر حدود ۸

کیلوگرم بر روی جرم کل تاثیرگذار هستند. رابطه برای ضخامت پوسته نیز به صورت مستقیم خطی است. تغییرات تolerانس این پارامتر کمتر از ۸ کیلوگرم بر روی جرم کل تاثیرگذار است. شکل ۷ دقت برازش سطح پاسخ‌ها را نشان می‌دهد. هر چه نقاط مربوط به پاسخ‌ها بر روی نیمساز ربع اول مثلثاتی متمرکزتر باشند، دقت و کیفیت برازش سطح پاسخ‌ها بهتر می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود، نقاط پاسخ‌ها بر روی این نیمساز متمرکز هستند و بنابراین دقت سطوح پاسخ، مطلوب ارزیابی می‌شود.



شکل ۶ سطح پاسخ تابع جرم کل بر حسب متغیرهای مسئله



شکل ۷ دقت برازش سطح پاسخ‌های تابع جرم کل

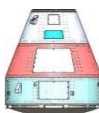


جدول ۵ شاخص‌های کمی دقت مدل را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، خطای نسبی استاندارد (RRMSE) این مدل‌ها کمتر از  $0.3/45\%$  و  $R^2 > 0.97$  برای تمام خروجی‌ها است. صحت این نتایج با داده‌های پروازی و شبیه‌سازی‌های با دقت بالا تأیید شده است.

جدول ۵ شاخص‌های کمی دقت مدل‌ها

ضریب تعیین $R^2$	خطای جذر میانگین مربعات نسبی، RRMSE (%)	تابع
۰/۹۸۸	۲/۰۴	M (kg)
۰/۹۷۱	۳/۴۵	SM
۰/۹۸۴	۲/۴۹	$M_{TPS}$ (kg)
۰/۹۹۲	۱/۶۵	Vol ( $m^3$ )
۰/۹۷۵	۳/۱۲	n
۰/۹۷۸	۳/۰۱	SF
۰/۹۷۵	۳/۲۳	LM

در جدول ۶ مشخصات هندسه کپسول بومی، کپسول حاصل از طراحی بهینه معین چندموضوعی (MDO) و نامعین (RMDO) ارائه شده است که توسط الگوریتم ژنتیک به دست آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کپسول بهینه معین، در سه قید حاشیه پایداری استاتیکی طولی، حجم داخلی و ضریب اطمینان سازه‌ای در مرز طراحی قرار دارد که باعث عدم بهینگی نامعین طراحی شده است. از طرفی این کپسول ۲۰ کیلوگرم از کپسول بهینه نامعین سبک‌تر است، پس لزوماً سبک‌تر بودن دلیلی بر یک بهینگی مناسب نیست.

جدول ۶ مشخصات کپسول‌های بومی، بهینه معین و نامعین

پارامترها	کپسول بومی	MDO (معین)	RMDO (نامعین)
D/2 (mm)	۷۰۰	۷۴۱	۷۹۲
$\theta$ (deg)	۲۵	۴۰	۴۵
d/2 (mm)	۳۵۰	۲۲۲	۲۱۰
R (mm)	۱۷۰۰	۱۵۳۳	۱۷۲۰
r (mm)	۲۰	۲۴	۱۵
L (mm)	۱۳۵۰	۱۲۱۴	۱۱۴۰
t (mm)	۵	۴	۵
M (kg)	۵۰۰	۴۲۶/۴	۴۴۶/۴
SM	۰/۱۰۱	۰/۱۰۴	۰/۱۲۱
$M_{TPS}$	۶۹/۸۰	۶۵/۰۲	۶۷/۷۰
Vol	۱/۴۴۰	۱/۳۶۰	۱/۴۲۴
n	۴/۷۵	۴/۷۰	۴/۷۷
SF	۲/۹۵	۲/۰۸	۲/۴۳
LM	۳/۵۳	۲/۳۰	۳/۶۴
شماایل			

جدول ۷ ویژگی‌های آماری کپسول‌هایی را نشان می‌دهد که با استفاده از روش‌های MDO و RMDO ایجاد شده‌اند. نتایج ارزیابی بهینگی نامعین برای کپسول MDO نشان می‌دهد که ضریب تغییرات برای سه پاسخ شامل SF, SM و LM بیشتر از بیشینه ضریب تغییرات ورودی‌ها است. همچنین، عوامل قابلیت اطمینان چهار پاسخ شامل SM, Vol, SF و LM کمتر از ۲ هستند. علاوه بر این، سه پاسخ M, MTPS و n تقریباً یک انحراف معیار از مقادیر میانگین خود فاصله دارند. بنابراین، کپسول طراحی شده با روش MDO معیارهای بهینگی نامعین را برآورده نمی‌کند. نتایج ارزیابی بهینگی نامعین برای کپسول RMDO نشان می‌دهد که ضریب تغییرات تمام پاسخ‌ها کمتر از بیشینه ضریب تغییرات ورودی‌ها (کمتر از ۰.۵٪) است. علاوه بر این، عوامل قابلیت اطمینان تمام پاسخ‌ها بیشتر از ۲ هستند که نشان‌دهنده احتمال خطای کمتر از ۰.۲۲۸٪ می‌باشد. بیشینه فاصله پاسخ از مقدار میانگین آن ۰.۳۱ سیگما است که مربوط به پاسخ n می‌باشد. بنابراین، کپسول طراحی شده با روش RMDO معیارهای بهینگی نامعین را برآورده می‌کند و به‌عنوان یک طراحی بهینه نامعین در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۷ مقایسه ویژگی‌های آماری روش‌های MDO و RMDO

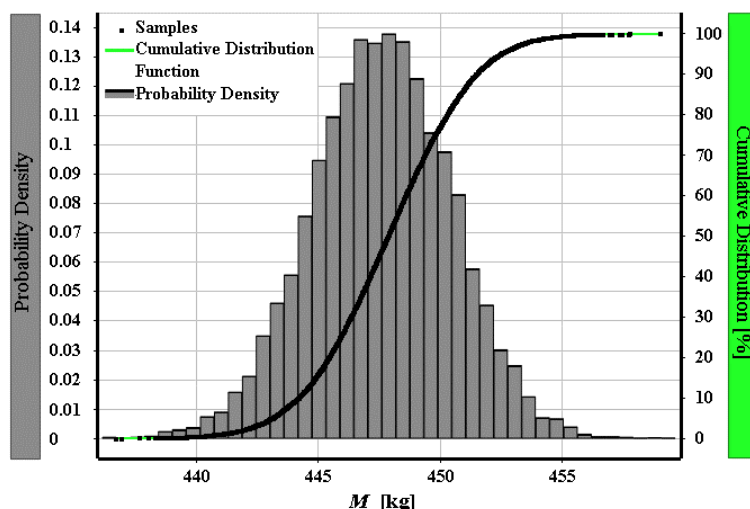
مشخصات آماری کپسول MDO								
پارامترها	مقدار نامی, $Y_{Nom}$	میانگین, $\bar{Y}$	$\sigma$	CV (%)	$a_0$	$p_F$ (%)	$\frac{ Y_{Nom} - \bar{Y} }{\sigma}$	حد مجاز
M (kg)	۴۲۶/۴۰	۴۲۸/۹۸	۳/۸۵	۰/۹۰	-	-	۰/۶۷	-
SM	۰/۱۰۴	۰/۱۰۶	۰/۰۰۷	۶/۶۰۴	۰/۸۵۷	۱۹/۵۷	۰/۲۸۶	۰/۱۰۰
$M_{TPS}$ (kg)	۶۵/۰۲	۶۶/۰۳	۱/۱۹	۱/۸۰	۳/۳۴	۰/۰۴	۰/۸۵	۷۰/۰۰
Vol ( $m^3$ )	۱/۳۶	۱/۳۸	۰/۰۴	۲/۹۰	۰/۷۵	۲۲/۶۶	۰/۵۰	۱/۳۵
n	۴/۷۰	۴/۷۹	۰/۰۹	۱/۹۴	۲/۲۶	۱/۱۹	۰/۹۷	۵/۰۰
SF	۲/۰۸	۲/۰۲	۰/۱۴	۶/۸۸	۰/۱۴	۴۴/۴۳	۰/۴۳	۲/۰۰
LM	۲/۳۰	۲/۱۹	۰/۱۸	۸/۲۲	۱/۰۶	۱۴/۴۶	۰/۶۱	۲/۰۰

مشخصات آماری کپسول RMDO								
پارامترها	مقدار نامی, $Y_{Nom}$	میانگین, $\bar{Y}$	$\sigma$	CV (%)	$a_0$	$p_F$ (%)	$\frac{ Y_{Nom} - \bar{Y} }{\sigma}$	حد مجاز
M (kg)	۴۴۶/۴۰	۴۴۷/۰۲	۲/۸۶	۰/۶۴	-	-	۰/۲۱۷	-
SM	۰/۱۲۱	۰/۱۲۰	۰/۰۰۵	۴/۱۶۷	۴/۰۰	۳/۱۶۷۱۲E-۰۳	۰/۲۰۰	۰/۱۰۰
$M_{TPS}$ (kg)	۶۷/۷۰	۶۷/۷۸	۰/۸۵	۱/۲۵	۲/۶۰	۰/۴۶۶۱۱۸۸	۰/۰۹	۷۰/۰۰
Vol ( $m^3$ )	۱/۴۲	۱/۴۲	۰/۰۳	۲/۱۱	۲/۳۰	۱/۰۷۲۴۱۱	۰/۱۳	۱/۳۵
n	۴/۷۷	۴/۷۹	۰/۰۶	۱/۳۴	۳/۲۸	۰/۰۵۱۹۰۳۵	۰/۳۱	۵/۰۰
SF	۲/۴۳	۲/۴۲	۰/۰۹	۳/۸۴	۴/۵۰	۳/۳۹۷۶۷E-۰۴	۰/۱۱	۲/۰۰
LM	۳/۶۴	۳/۶۰	۰/۱۶	۴/۴۴	۱۰/۰۰	۷/۶۱۹۸۵E-۲۲	۰/۲۵	۲/۰۰

روش RMDO نسبت به MDO حدود ۵۰ تا ۱۰۰ درصد هزینه محاسباتی بیشتر دارد، اما در مقابل، پایداری نتایج تحت عدم قطعیت‌ها چند برابر بیشتر است (حدود ۲ تا ۱۰ سیگما فاصله از قیود در برابر صفر در MDO). طراحی RMDO کمتر از ۵ درصد جرم بیشتر از MDO دارد، ولی ایمنی و اطمینان آماری بسیار بالاتری ایجاد می‌کند. بنابراین، از دیدگاه کارایی و قابلیت اطمینان، RMDO دارای مصالحه بهینه بین هزینه محاسباتی و حاشیه ایمنی است.

شکل ۸ تابع چگالی احتمال و تابع توزیع تجمعی جرم کل کپسول را نشان می‌دهد. تابع چگالی احتمال جرم کل کپسول دارای توزیع نرمال با مقدار میانگین ۴۴۷/۰۲ و مقدار انحراف معیار ۲/۸۶ کیلوگرم است. همچنین مقدار ضریب تغییرات ۰/۶۴ درصد است که از مقدار ضریب تغییرات ورودی‌های غیرقطعی مسئله (۵ درصد) کوچکتر است. همچنین مقدار میانگین جرم کل از مقدار نامی (۴۴۶/۴ کیلوگرم) تقریباً ۰/۲۲ سیگما (۰/۶۲ کیلوگرم) فاصله دارد که بسیار به آن نزدیک است. بنابراین مقدار جرمی نسبت به عدم قطعیت‌های اعمال شده به مسئله، مقاوم و پایدار است.



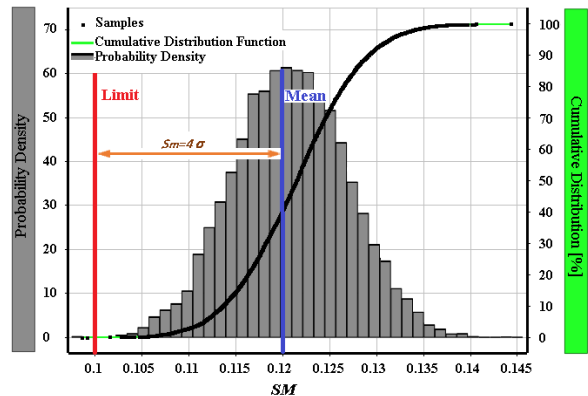
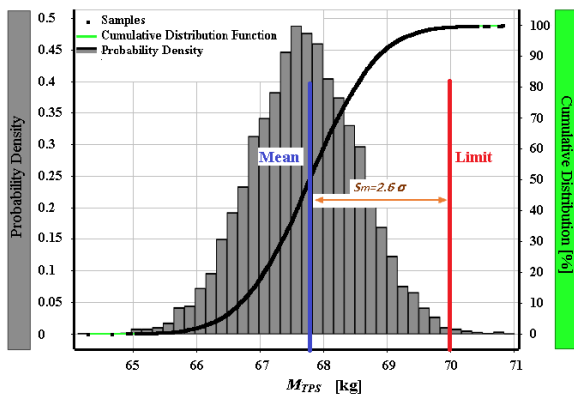
شکل ۸ نتایج ارزیابی طراحی بهینه نامعین (از منظر جرم کپسول)

شکل ۹ نتایج ارزیابی بهینگی نامعین قیود مختلف کپسول تحت تاثیر عدم قطعیت‌ها را ارائه می‌کند. شکل اول تابع چگالی احتمال و تابع توزیع تجمعی حاشیه پایداری استاتیکی طولی کپسول را نشان می‌دهد. تابع چگالی احتمال آن دارای توزیع نرمال با مقدار میانگین ۰/۱۲ و مقدار انحراف معیار ۰/۰۰۵ است که مقدار میانگین از مقدار نامی (۰/۱۲۱) تقریباً ۰/۲ سیگما (۰/۱۱) فاصله دارد که بسیار به آن نزدیک است. همچنین مقدار ضریب تغییرات ۴/۱۶ درصد است که از حداکثر مقدار ضریب تغییرات ورودی‌های غیرقطعی مسئله (۵ درصد) کوچکتر است. از طرفی مقدار میانگین حاشیه پایداری طولی کپسول از مقدار مجاز یعنی ۰/۱ به میزان ۴ سیگما فاصله دارد. بنابراین با توجه به سه معیار فوق، مقدار حاشیه پایداری استاتیکی طولی کپسول نسبت به عدم قطعیت‌های اعمال شده به مسئله، مقاوم و پایدار است. با توجه به ارزیابی بهینگی نامعین جرم سیستم حفاظت حرارتی کپسول، تابع چگالی احتمال آن، دارای توزیع نرمال با مقدار میانگین ۶۷/۷۸ کیلوگرم و مقدار انحراف معیار ۰/۸۵ کیلوگرم است. مقدار میانگین جرم سیستم حفاظت حرارتی از مقدار نامی (۶۷/۷۰ کیلوگرم) تقریباً ۰/۱ سیگما (۰/۰۸ کیلوگرم) فاصله دارد که بسیار به آن نزدیک است. همچنین مقدار ضریب تغییرات ۱/۳ درصد است که از حداکثر مقدار ضریب تغییرات ورودی‌های غیرقطعی مسئله (۵ درصد) کوچکتر است. از طرفی مقدار میانگین جرم سیستم حفاظت حرارتی از مقدار مجاز یعنی ۷۰ کیلوگرم که از بودجه‌بندی جرمی به دست آمده است، به میزان ۲/۶ سیگما فاصله دارد. بنابراین مقدار جرم سیستم حفاظت حرارتی نسبت به عدم قطعیت‌های اعمال شده به مسئله، مقاوم و پایدار است.

در ادامه از نتایج ارائه شده در شکل ۹، از بررسی تابع چگالی احتمال و تابع توزیع تجمعی حجم داخلی کپسول مشخص است که تابع چگالی احتمال دارای توزیع نرمال با مقدار میانگین ۱/۴۲ مترمکعب و مقدار انحراف معیار ۰/۰۳ مترمکعب است. مقدار میانگین حجم داخلی کپسول از مقدار نامی (۱/۴۲۴ مترمکعب) تقریباً ۰/۱۳ سیگما (۰/۰۴ کیلوگرم) فاصله دارد که بسیار به آن نزدیک است. همچنین مقدار ضریب تغییرات ۲/۱ درصد است که از حداکثر مقدار ضریب تغییرات ورودی‌های غیرقطعی مسئله (۵ درصد) کوچکتر است. از طرفی مقدار میانگین حجم داخلی از مقدار مجاز یعنی ۱/۳۵ مترمکعب به میزان ۲/۳ سیگما فاصله دارد. بنابراین مقدار حجم داخلی کپسول نسبت به عدم قطعیت‌های اعمال شده به مسئله، مقاوم و پایدار است. تابع چگالی احتمال ضریب بار کپسول دارای توزیع نرمال با مقدار میانگین ۴/۷۹ و مقدار انحراف معیار ۰/۰۶۴ است. مقدار میانگین ضریب بار کپسول از مقدار نامی (۴/۷۷) تقریباً ۰/۳ سیگما (۰/۰۲) فاصله دارد که بسیار به آن نزدیک است. مقدار ضریب تغییرات ۱/۳ درصد است که از حداکثر مقدار ضریب تغییرات ورودی‌های غیرقطعی مسئله (۵ درصد) کوچکتر است. از طرفی مقدار میانگین ضریب بار از مقدار حداکثر مجاز ۵ واحد، به میزان ۳/۲۸ سیگما فاصله دارد. بنابراین مقدار ضریب بار نسبت به عدم قطعیت‌های اعمال شده به مسئله، مقاوم و پایدار است.

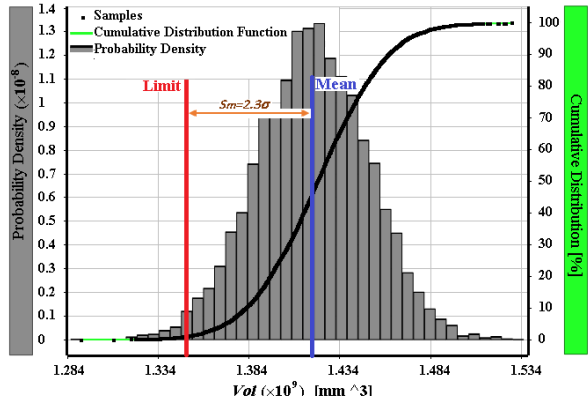
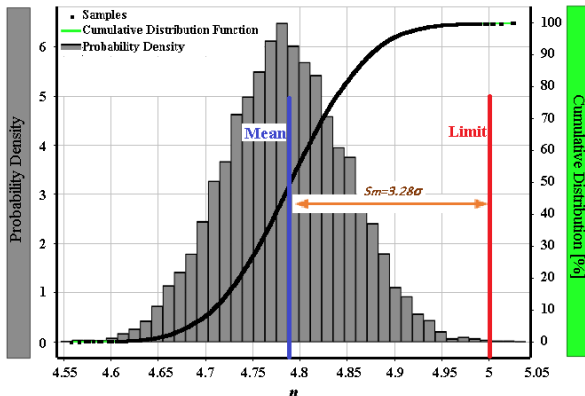
تابع چگالی احتمال و تابع توزیع تجمعی ضریب اطمینان سازه‌ای استاتیکی کپسول نیز در این نشان ارائه شده است. تابع چگالی احتمال دارای توزیع نرمال با مقدار میانگین ۲/۴۲ و مقدار انحراف معیار ۰/۰۹۳ است. مقدار میانگین ضریب اطمینان سازه‌ای استاتیکی کپسول از مقدار نامی (۲/۴۳) تقریباً ۰/۱۱ سیگما (۰/۰۱) فاصله دارد که بسیار به آن نزدیک است. همچنین مقدار ضریب تغییرات ۳/۸ درصد است که از حداکثر مقدار ضریب تغییرات ورودی‌های غیرقطعی مسئله (۵ درصد) کوچکتر است. از طرفی مقدار میانگین ضریب

اطمینان سازه‌ای از مقدار حداقل مجاز ۲ واحد به میزان ۴/۵ سیگما فاصله دارد. بنابراین مقدار ضریب اطمینان سازه‌ای نسبت به عدم قطعیت‌های اعمال شده به مسئله، مقاوم و پایدار است. آخرین نمودار موجود در شکل ۹ نیز تابع چگالی احتمال و تابع توزیع تجمعی ضریب اطمینان کمانشی کپسول را نمایش می‌دهد. تابع چگالی احتمال دارای توزیع نرمال با مقدار میانگین ۳/۶۰ و مقدار انحراف معیار ۰/۱۶ است. مقدار میانگین ضریب اطمینان کمانشی کپسول از مقدار نامی (۳/۶۴) تقریباً ۰/۲۵ سیگما (۰/۰۴) فاصله دارد که بسیار به آن نزدیک است. همچنین مقدار ضریب تغییرات ۴/۴ درصد است که از حداکثر مقدار ضریب تغییرات ورودی‌های غیرقطعی مسئله کوچکتر است. از طرفی مقدار میانگین ضریب اطمینان کمانشی از مقدار مجاز یعنی ۲ به میزان ۱۰ سیگما فاصله دارد. بنابراین مقدار ضریب اطمینان کمانشی نسبت به عدم قطعیت‌های اعمال شده به مسئله، مقاوم و پایدار است. بنابراین با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته و ارزیابی معیارهای طراحی بهینه نامعین واریانس محور برای نقطه طراحی (شامل مقادیر هدف و قیود مسئله)، مشخص شد که کلیه این معیارها برای نقطه طراحی ارضا می‌شوند. لذا نقطه طراحی بهینه انتخاب شده توسط الگوریتم توسعه داده شده، دارای بهینگی نامعین است که نشان‌دهنده صحت عملکرد الگوریتم پیشنهادی برای طراحی بهینه نامعین در این پژوهش است.



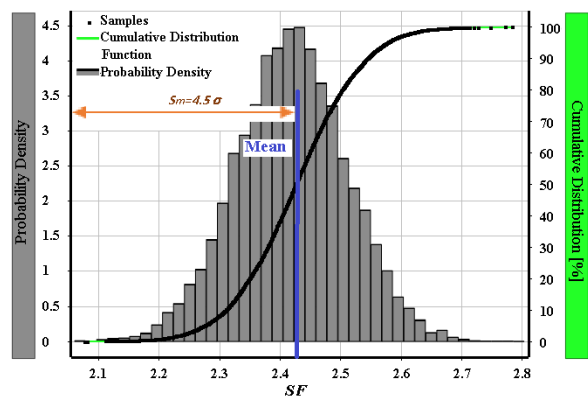
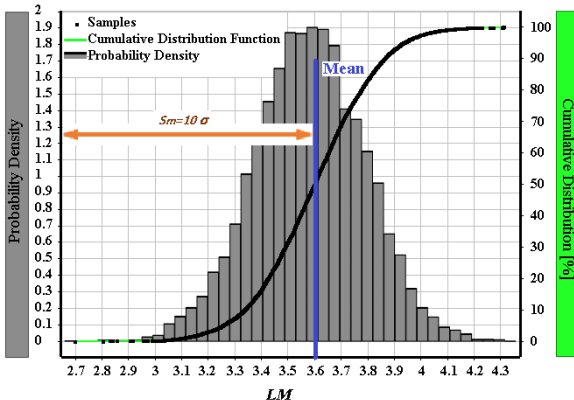
نتایج ارزیابی بهینگی نامعین جرم سیستم حفاظت حرارتی کپسول

نتایج ارزیابی بهینگی نامعین حاشیه پایداری کپسول



نتایج ارزیابی بهینگی نامعین ضریب بار کپسول

نتایج ارزیابی بهینگی نامعین حجم داخلی کپسول



نتایج ارزیابی بهینگی نامعین ضریب اطمینان کمانش کپسول

نتایج ارزیابی بهینگی نامعین ضریب اطمینان سازه‌ای کپسول

شکل ۹ نتایج ارزیابی بهینگی نامعین قیود مختلف کپسول تحت تاثیر عدم قطعیت‌ها

نتایج نشان دادند که کاهش جرم حدود ۱۰/۷ درصدی نسبت به کپسول مینا، از طریق بازطراحی آیرودینامیکی هندسه و حذف جرم تعادلی حاصل شده است. این کاهش جرم در حالی صورت گرفته که تمامی قیود مقاومتی سازه‌ای (شامل حاشیه پایداری استاتیکی، ضریب اطمینان استاتیکی و ضریب اطمینان کمانشی) همچنان با حاشیه ایمنی حداقل دو سیگما برآورده شده‌اند. به‌ویژه، تغییرات در قطر بزرگ و طول کپسول بیشترین اثر را بر کاهش جرم داشته‌اند و در عین حال موجب بهبود حاشیه پایداری استاتیکی شده‌اند. در مقابل، پارامترهایی مانند ضخامت پوسته فلزی نقش مستقیم‌تری در حفظ ضریب اطمینان کمانشی داشته‌اند و نشان‌دهنده وجود مصالحه‌ی طبیعی میان سبک‌سازی و مقاومت مکانیکی/سازه‌ای هستند. بنابراین، نتایج نه تنها بیانگر یک طراحی سبک‌تر هستند، بلکه نشان می‌دهند که رویکرد پیشنهادی توانسته است تعادلی پایدار میان جرم و مقاومت سازه‌ای ایجاد کند. در عین حال عملکرد کپسول در برابر عدم قطعیت‌های ساخت و مونتاژ نیز تضمین می‌شود.

در مقایسه با پژوهش‌های اخیر، روش RMDO ارائه شده در این تحقیق رویکردی کارا تر از مدل‌های متوالی<sup>۱</sup> یا چنددقتی پیشین ارائه می‌دهد. به‌عنوان نمونه، در مطالعه‌ی شیا و همکاران [۹]، روش RS-MDO با وجود کاهش هزینه‌ی محاسباتی، نیازمند اجرای چندمرحله‌ای مجزا برای هر موضوع بود، در حالی که در این پژوهش، چارچوب همه در یک مرحله موجب یکپارچگی کامل بین موضوعات شده و همگرایی سریع‌تری حاصل گردید. همچنین، نسبت به پژوهش جینجینگ و همکاران [۱۰] که از بهینه‌سازی شش سیگما برای افزایش قابلیت اطمینان استفاده کردند، روش حاضر با تکیه بر تحلیل واریانسی، حاشیه ایمنی ۲ تا ۱۰ سیگما را بدون افزایش چشمگیر جرم یا هزینه محاسباتی فراهم ساخته است. از سوی دیگر، در مقایسه با چارچوب MOMRDO معرفی شده توسط میبیدی و همکاران [۱۲]، الگوریتم حاضر ضمن بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک و مدل‌سازی پاسخ سطحی، توانسته است با تکرار تطبیقی قیود و تحلیل حساسیت واریانسی، طراحی سبک‌تر و در عین حال پایدارتر ارائه دهد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که روش پیشنهادی، در قیاس با اغلب رویکردهای RMDO اخیر، مصالحه بهتری بین هزینه محاسباتی و ایمنی طراحی برقرار کرده است.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک روش طراحی بهینه نامعین برای کمینه‌سازی جرم کل یک کپسول فضایی بومی با شکل کره-مخروطی در مأموریت‌های زیرمداری ارائه شده است. عدم قطعیت‌های مورد نظر شامل ترانس‌های هندسی ناشی از فرایند ساخت و مونتاژ می‌باشد. روش پیشنهادی به این صورت عمل می‌کند که در هر تکرار، ابتدا نقطه بهینه با کمترین جرم به‌صورت معین (با استفاده از الگوریتم ژنتیک) محاسبه می‌شود. سپس، بهینگی نامعین این نقطه در برابر عدم قطعیت‌ها بررسی می‌شود. اگر شرایط بهینگی نامعین برقرار باشند، فرایند طراحی بهینه پایان می‌یابد؛ در غیر این صورت، با تعدیل قیود (و دور شدن از نقطه بهینه مرزی)، نقطه بهینه جدیدی یافت شده و مجدداً بهینگی نامعین آن ارزیابی می‌شود. این چرخه تا دستیابی به یک طراحی بهینه نامعین (مقاوم و پایدار) ادامه می‌یابد. مسئله طراحی بهینه با هفت متغیر هندسی نامعین برای کپسول تعریف شد. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی منجر به طراحی کپسولی با ابعاد جدید و مقاوم و پایدار نسبت به عدم قطعیت‌ها شد که ۱۰/۷ درصد سبک‌تر از نمونه بومی اولیه است. این کاهش جرم، از طریق تغییر شمایل آیرودینامیکی کپسول و بهبود حاشیه پایداری استاتیکی حاصل شد. در طراحی اولیه، به دلیل ناکافی بودن حاشیه پایداری، از جرم اضافه برای جابه‌جایی مرکز جرم استفاده شده بود. در حالی که در طراحی جدید، این مشکل با طراحی بهینه هندسی برطرف گردید.

ارزیابی بهینگی نامعین طراحی کپسول نشان می‌دهد که تمام پارامترهای کلیدی شامل جرم کل، حاشیه پایداری استاتیکی، جرم سیستم حفاظت حرارتی، حجم داخلی، ضریب بار، ضریب اطمینان سازه‌ای و ضریب اطمینان کمانشی همگی دارای توزیع نرمال با ضریب تغییرات کمتر از ۵ درصد (بین ۰/۶۴ تا ۴/۴ درصد) هستند. آن‌ها با حاشیه ایمنی قابل توجهی از مرزهای طراحی فاصله دارند، که نشان‌دهنده قویاً بهینگی نامعین طرح در برابر عدم قطعیت‌های ۵ درصد ورودی می‌باشد. تحلیل‌های طراحی بهینه نامعین تأیید کردند که مقادیر قیود طراحی دارای حداقل دو سیگما حاشیه ایمنی نسبت به عدم قطعیت‌های مسئله هستند که این تأییدکننده بهینگی نامعین طراحی است.

<sup>1</sup> Sequential

## فهرست علائم

$L$	طول
$D$	قطر بزرگ
$C_D$	ضریب درگ
$C_L$	ضریب لیفت
$CV$	ضریب تغییرات
$d$	قطر کوچک
$F_{applied}$	نیروی اعمالی
$F_{critical}$	نیروی کمانش بحرانی
$F_D$	نیروی درگ
$F_L$	نیروی لیفت
$g$	شتاب گرانش
$LM$	ضریب اطمینان کمانشی
$M$	جرم کل
$M_{equipment}$	جرم تجهیزات
$M_{str}$	جرم سازه کپسول
$M_{TPS}$	جرم سپر حرارتی
$n$	ضریب بار
$p_F$	توزیع احتمال
$q$	شار حرارتی نقطه سکون
$R$	شعاع سپر حرارتی
$r$	شعاع جانبی
$SF$	ضریب اطمینان
$SM$	حاشیه پایداری استاتیکی
$S_m$	حاشیه ایمنی
$t$	ضخامت پوسته فلزی
$T_{aw}$	دمای آدیاباتیک دیواره
$T_w$	دمای دیواره
$V$	سرعت
$Vol$	حجم داخلی کپسول
$X_{CG}$	مختصات طولی مرکز جرم
$X_{CP}$	مختصات طولی مرکز فشار
$\theta$	نیم‌زاویه مخروط
$\sigma$	انحراف استاندارد
$\sigma_{ij}$	مولفه تانسور تنش
$\sigma_{UTS}$	استحکام کششی نهایی
$\sigma_{von-mises}$	تنش معادل فون میسز
$\sigma_{Yield}$	تنش تسلیم

$$\sigma^2 \text{ واریانس}$$

$$\bar{Y} \text{ مقدار میانگین}$$

## References

- [1] Allen JK, Seepersad CC, Choi H, Mistree F. Robust design for multiscale and multidisciplinary applications. *Journal of Mechanical Design*. 2006;128:832-843. doi: [10.1115/1.2202880](https://doi.org/10.1115/1.2202880)
- [2] Picheral L, Hadj-Hamou K, Bigeon J. Robust optimization based on the Propagation of Variance method for analytic design models. *International Journal of Production Research*. 2014 Dec 17;52(24):7324-38. doi: [10.1080/00207543.2014.926597](https://doi.org/10.1080/00207543.2014.926597)
- [3] Pagone E, Haddad Y, Barsotti L, Dini G, Salonitis K. A stochastic evaluation framework to improve the robustness of manufacturing systems. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2023 Jul 3;36(7):966-84. doi: [10.1080/0951192X.2022.2162592](https://doi.org/10.1080/0951192X.2022.2162592)
- [4] Liu Y, Ju Y, Qin R, Jiang W, Spence S, Zhang C. Collaborative robust design optimization of blade geometry and manufacturing tolerance for a transonic centrifugal impeller. *Journal of Turbomachinery*. 2023 Jul 1;145(7):071001. doi: [10.1115/1.4056680](https://doi.org/10.1115/1.4056680)
- [5] Parashar S, Bloebaum C. Robust multi-objective genetic algorithm concurrent subspace optimization (R-MOGACSSO) for multidisciplinary design. 2006. doi: [10.2514/6.2006-2047](https://doi.org/10.2514/6.2006-2047)
- [6] Schuëller GI, Calvi A, Pellissetti MF, Pradlwarter HJ, Fransen SH, Kreis A. Uncertainty analysis of a large-scale satellite finite element model. *Journal of Spacecraft and Rockets*. 2009 Jan;46(1):191-202. doi: [10.2514/1.32205](https://doi.org/10.2514/1.32205)
- [7] Lee D, Srinivas K, Gonzalez LF, Periaux J, Obayashi S. Robust multidisciplinary design optimisation using CFD and advanced evolutionary algorithms. In: *Computational Fluid Dynamics Review 2010*. 2010;469-491. doi: [10.1142/9789814313377\\_0019](https://doi.org/10.1142/9789814313377_0019)
- [8] Minisci E, Vasile M, Liqiang H. Robust multi-fidelity design of a micro re-entry unmanned space vehicle. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*. 2011 Nov;225(11):1195-209. doi: [10.1177/0954410011410124](https://doi.org/10.1177/0954410011410124)
- [9] Xia T, Li M, Zhou J. A sequential robust optimization approach for multidisciplinary design optimization with uncertainty. *Journal of Mechanical Design*. 2016 Nov 1;138(11):111406. doi: [10.1115/1.4034113](https://doi.org/10.1115/1.4034113)
- [10] Jingjing ZH, Xiaojun WA, Yuwen LI, Ruixing WA, Zhiping QI. Six sigma robust design optimization for thermal protection system of hypersonic vehicles based on successive response surface method. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2019 Sep 1;32(9):2095-108. doi: [10.1016/j.cja.2019.04.009](https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.04.009)
- [11] Xiong N, Tao Y, Lin J, Liu XQ. Multi-levels Kriging surrogate model-based robust aerodynamics optimization design method. *International Journal of Modern Physics B*. 2020 Jun 30;34(14n16):2040115. doi: [10.1142/S0217979220401153](https://doi.org/10.1142/S0217979220401153)
- [12] Meibody MN, Naseh H, Ommi F. Developing a multi-objective multi-disciplinary robust design optimization framework. *Scientia Iranica*. 2021 Aug 1;28(4):2150-63. doi: [10.24200/sci.2021.55306.4159](https://doi.org/10.24200/sci.2021.55306.4159)
- [13] Alimohammadi HR, Naseh H, Ommi F. An integrated methodology applied for reliability based multi-disciplinary design optimization in EPFE with LOX/kerosene. *Reliability Engineering & System Safety*. 2023 Dec 1;240:109570. doi: [10.1016/j.res.2023.109570](https://doi.org/10.1016/j.res.2023.109570)
- [14] Fathi Jegarkandi M, Mojibi M. Reliability-Based Multidisciplinary Design Optimization Under Uncertainty for Reusable Flexible Space Launcher utilizing NSGA-II. *Sharif Journal of Mechanical Engineering*. 2024 Jun 20;40(1):61-74. doi: [10.24200/j40.2023.61713.1667](https://doi.org/10.24200/j40.2023.61713.1667)
- [15] Yeo H, Lee M, Kim D, Kim KH. Multi-objective optimization design framework and flight performance prediction for reentry module using a rapid analysis program. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*. 2024 Oct 25;1-3. doi: [10.1007/s42405-024-00837-y](https://doi.org/10.1007/s42405-024-00837-y)
- [16] Yang C, Wang Q, Lu W, Li Y. Integrated uncertain optimal design strategy for truss configuration and attitude-vibration control in rigid-flexible coupling structure with interval uncertainties. *Nonlinear Dynamics*. 2025 Feb;113(3):2215-2238. doi: [10.1007/s11071-024-10291-w](https://doi.org/10.1007/s11071-024-10291-w)
- [17] Audouze C, Klein A, Butscher A, Morris N, Nair P, Yano M. Robust Level-Set-Based Topology Optimization Under Uncertainties Using Anchored ANOVA Petrov-Galerkin Method. *SIAM/ASA Journal on Uncertainty Quantification*. 2023 Sep 30;11(3):877-905. doi: [10.1137/22M1524722](https://doi.org/10.1137/22M1524722)
- [18] Most T, Will J. Robust design optimization in industrial virtual product development. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Reliable Engineering Computing*. 2012;247-262. Brno, Czech Republic.
- [19] Gramegna N, Corte ED, Poles S. Manufacturing process simulation for product design chain optimization. *Materials and Manufacturing Processes*. 2011 Apr 11;26(3):527-33. doi: [10.1080/10426914.2011.564248](https://doi.org/10.1080/10426914.2011.564248)