

بهینه‌سازی چندین هدفه طراحی مفهومی سیستم‌های پیچیده با رویکردهای DFX و الگوریتم NSGA-III (مطالعه موردی صنعت کشتی سازی)

سید مهدی ابراهیمی

دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه یزد، یزد، ایران s.mahdi.ebrahimi@stu.yazd.ac.ir

مهدی نخعی نژاد^۱

دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه یزد، یزد، ایران m.nakhaeinejad@yazd.ac.ir

احمد صادقیه

استاد گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه یزد، یزد، ایران sadegheih@yazd.ac.ir

حسن حسینی نسب

استاد گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه یزد، یزد، ایران hnn@yazd.ac.ir

چکیده

طراحی مفهومی سیستم‌های پیچیده با چالش ایجاد تعادل میان اهداف متضادی همچون هزینه، کارایی، ریسک و قابلیت اطمینان همراه است. در این پژوهش، با بهره‌گیری از رویکرد «طراحی برای تعالی»، یک مدل ریاضی چندین هدفه برای بهبود تصمیم‌گیری در مرحله طراحی مفهومی توسعه داده شد. مدل پیشنهادی با استفاده از الگوریتم تکاملی NSGA-III حل شده و مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه پارتو را ارائه می‌دهد که ضمن ایجاد توازن میان اهداف طراحی، امکان لحاظ محدودیت‌های ناسازگاری و همبستگی میان فناوری‌ها را فراهم می‌کند. نتایج حاصل از مطالعه موردی در صنعت کشتی‌سازی حاکی از آن است که جواب‌های استخراج‌شده، از سطح بالایی از توازن در میان اهداف متضاد برخوردارند. همچنین نشان داده شد که الگوریتم NSGA-III در سه هدف از چهار هدف، یعنی OMOE، Reliability و Risk، نسبت به رویکردهای حل MOEA/D و Epsilon Constraint برتر است. در حل مساله رویکرد NSGA-III در مقایسه با MOEA/D و Epsilon Constraint، به ترتیب ۷۷.۷۵٪ و ۳۵.۲۰٪ در شاخص Hypervolume، ۱۷.۳۵٪ و ۴۰.۸۸٪ در شاخص Spacing، ۲۲.۵۴٪ و ۴۱.۷۶٪، در تعداد پاسخ‌های پارتو و ۳۱.۲۵٪ و ۷۲.۷۳٪، در IGD عملکرد بهتری داشته است؛ هرچند در زمان اجرا نسبت به MOEA/D حدود ۳۱.۴۷٪ کندتر و نسبت به Epsilon Constraint حدود ۴۴.۱۲٪ سریع‌تر عمل کرده است. این یافته‌ها اثربخشی مدل پیشنهادی را تأیید کرده و آن را به ابزاری کارآمد برای تصمیم‌گیری مهندسی تبدیل می‌کنند.

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی چندین هدفه، NSGA-III، طراحی مفهومی، طراحی برای قابلیت اطمینان (DFR)، کشتی‌سازی.

^۱ نویسنده مسئول

Many-objective optimization of complex systems conceptual design with DFX approaches and NSGA-III algorithm (case study: shipbuilding industry)

Seyed Mahdi Ebrahimi, s.mahdi.ebrahimi@stu.yazd.ac.ir

PhD Student in Industrial Engineering, Faculty of Industrial Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

Mahdi Nakhaeinejad (corresponding author), m.nakhaeinejad@yazd.ac.ir

Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

Ahmad Sadegheih, sadegheih@yazd.ac.ir

Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

Hassan Hosseini Nasab, hnn@yazd.ac.ir

Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

Abstract

The conceptual design of complex systems presents significant challenges due to their large scale, multidisciplinary nature, and dependence on technical, economic, and environmental factors. Such systems require advanced design methodologies capable of addressing multiple, often conflicting objectives. In response to these challenges, this research introduces a comprehensive framework for multi-objective modeling in the conceptual design of complex systems, with a focused application in the shipbuilding industry. The primary objective is to establish a systematic approach for achieving Design for Excellence (DfX) through the simultaneous optimization of diverse performance criteria. The proposed mathematical model is rooted in the DfX principles and incorporates key indicators such as cost, performance efficiency, system reliability, and technology and manufacturing maturity. A distinctive contribution of this study is the integration of DfX principles with the multi-objective evolutionary optimization algorithm NSGA-III, enabling the generation of Pareto-optimal solutions that balance conflicting objectives while accounting for incompatibility and correlation constraints among available technologies. The model is also highly flexible, allowing it to be adapted to various types of vessels with different operational requirements. A case study in the shipbuilding industry demonstrates the practical effectiveness of the proposed framework. The obtained solutions exhibit a high degree of balance among the competing objectives. Quantitative comparisons show that NSGA-III outperforms MOEA/D and the Epsilon-Constraint method in three of the four objectives (OMOE, reliability, and risk). Relative to MOEA/D and the Epsilon-Constraint method, NSGA-III achieves improvements of 7.75% and 35.20% in Hypervolume, 17.35% and 40.88% in Spacing, 22.54% and 411.76% in the number of Pareto solutions, and 31.25% and 72.73% in Inverted Generational Distance (IGD), respectively. Although NSGA-III requires approximately 31.47% more computational time than MOEA/D, it is 44.12% faster than the Epsilon-Constraint approach. These results confirm the efficacy of the proposed model and establish it as a practical decision-support tool for engineering design of complex systems.

Keywords: Many-objective optimization, NSGA-III, conceptual design, design for reliability (DFR), shipbuilding.

۱. مقدمه

در ادامه در این پژوهش در ابتدا به تبیین مفهوم و رویکردهای طراحی برای تعالی (DFX)، به‌ویژه طراحی برای هزینه (DFC) و طراحی برای قابلیت اطمینان (DFR) و شاخص اثربخشی عملیاتی پرداخته می‌شود. در بخش پیشینه پژوهش بررسی جامعی در خصوص پیشینه پژوهش‌های مرتبط با طراحی برای قابلیت اطمینان، سایر رویکردهای طراحی مفهومی و روش‌های بهینه‌سازی چندین هدفه انجام شده است. در ادامه در بخش مدل ریاضی، مدل ریاضی ترکیبی چهار-هدفه پیشنهادی (MOMINLP)، همراه با توابع هدف و قیود ساختاری آن، با جزئیات در جهت بهینه‌سازی طراحی مفهومی ارائه شده و همچنین در بخش حل، حل مدل با استفاده از الگوریتم NSGA-III در قالب یک مطالعه موردی در صنعت کشتی‌سازی و تحلیل حساسیت نتایج مورد بررسی قرار خواهد گرفت و پس از بررسی کلیت مدل ارائه شده به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری از یافته‌ها و ارائه پیشنهادهایی جهت پژوهش‌های آتی پرداخته می‌شود.

۲. مبانی نظری تحقیق

۲-۱. مفهوم طراحی برای تعالی (DFX)

طراحی برای تعالی یا DFX مستلزم طیف گسترده‌ای از روش‌های طراحی هدف خاص است. اولین روش‌های DFX قابلیت ساخت محصولات را هدف قرار دادند و پس از جنگ جهانی دوم با هدف کمک به شیوه‌های طراحی همزمان در حال ظهور توسعه یافتند. سه نوع روش محبوب در این دوره عبارتند از طراحی برای ساخت، طراحی برای مونتاژ و طراحی برای دمونتاز سیستم‌ها و تجهیزات. از آن زمان، بیشتر مراحل چرخه عمر محصولات هدف چنین روش‌هایی بوده است. به عنوان مثال، طراحی برای نگهداری، طراحی برای پایداری، طراحی برای منسوخ شدن، طراحی برای زنجیره تامین، طراحی برای لجستیک، طراحی برای شبکه، طراحی برای بازیافت و بسیاری دیگر. ویژگی روش‌های DFX این است که

مرحله طراحی مفهومی، یکی از مهم‌ترین و حساس‌ترین مراحل دستیابی به محصولات، به‌ویژه محصولات با سطح پیچیدگی بالا، به شمار می‌رود [1]. در این مرحله، تصمیماتی گرفته می‌شوند که تا پایان عمر یک تجهیز یا شناور، عملکرد، هزینه و قابلیت اطمینان آن را رقم خواهند زد. امروزه، طراحان ملزم به بهینه‌سازی همزمان اهدافی متعارض هستند. از جمله کاهش هزینه‌ها، بهبود کارایی، افزایش قابلیت اطمینان، پایین نگه داشتن هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری و رعایت استانداردهای سختگیرانه زیست‌محیطی. این موضوعات مسأله طراحی را مسأله‌ای با تعداد اهداف متعدد تبدیل کرده است و این سوال را مطرح کرده که چگونه می‌توان اهداف متناقض طراحی را در مراحل طراحی مفهومی بهینه کرد. این پژوهش با در نظر گرفتن خلاء موجود در ادغام رویکرد قابلیت اطمینان محور با روش‌های پیشرفته بهینه‌سازی چندین هدفه در مرحله طراحی مفهومی صنایع پیچیده، به مدل‌سازی و بهینه‌سازی چندین هدفه طراحی مفهومی یک مطالعه موردی در صنعت کشتی‌سازی می‌پردازد. اهداف اصلی این پژوهش عبارتند از: (۱) ارائه یک چارچوب مدلسازی مفهومی که معیار قابلیت اطمینان را به طور کمی در کنار سایر اهداف مهم (مانند هزینه و کارایی) ادغام کند.

(۲) به کارگیری الگوریتم NSGA-III برای یافتن مجموعه جواب‌های بهینه پرتو برای این مسأله چندین هدفه

(۳) تحلیل نتایج و ارائه بینشی کاربردی برای طراحان در صنعت کشتی‌سازی جهت اتخاذ تصمیم‌های بهینه بر اساس اولویت‌های مختلف. در نهایت، این مطالعه موردی، کارایی و اثربخشی رویکرد پیشنهادی را در حل یک مسأله مهندسی واقعی به نمایش خواهد گذاشت. چارچوب مدلسازی ارائه شده قابل تعمیم به هر سیستم سرمایه‌بر و با قابلیت اطمینان بالا مانند پروژه‌های نیروگاهی، هواپیما سازی و پالایشگاهی است.

۱ Design for Excellence

هدف، عملکرد مربوط به عملکرد خود محصول نیست، بلکه جنبه‌های توسعه محصول با هدف تحقق رقابتی‌تر است [1].

۲-۲. رویکرد طراحی برای هزینه (DFC)^۱

طراحی برای هزینه یک روش طراحی و یکی از ابزارهای پشتیبانی و بخش مهمی از DFX برای مهندسی همزمان (CE)^۲ است که تأکید مساوی بر قیمت و کیفیت دارد. DFC با استفاده از ابزارهای طراحی و حفظ کیفیت محصول و تأثیر بر روی تمام فعالیت‌ها در بخش‌های مختلف یک سازمان به گونه‌ای محصول را طراحی می‌کند که کمترین هزینه و بیشترین سطح رضایت مشتری را در پی داشته باشد [2]. طراحی برای هزینه یک اصل توسعه‌ی محصول است که هدف آن بهینه‌سازی هزینه کلی محصول و فرآیندهای چرخه عمر آن از جمله هزینه‌های مواد، زنجیره تأمین، ساخت، نگهداری محصول و گارانتی، هزینه طراحی و توسعه و زمان عرضه به بازار است [3].

۲-۳. مفهوم طراحی برای قابلیت اطمینان (DFR)^۳

سیستم‌ها معمولاً بر اساس مجموعه‌هایی از زیر سیستم‌ها طراحی می‌شوند که هر کدام قابلیت اطمینان مربوطه به خود را دارند. روی هم رفته قابلیت اطمینان سیستم‌ها تابعی از معیار قابلیت اطمینان زیر سیستم‌هاست. تخصیص قابلیت اطمینان مهمترین فاکتور برای بررسی قابلیت اطمینان و رقابت‌پذیری یک محصول و همچنین یک ابزار تحلیلی مهم است که می‌تواند در بهبود قابلیت اطمینان سیستم کمک کند. در محصولات مهندسی مدرن از تک‌تک قطعات تا سامانه‌های بزرگ باید بگونه‌ای طراحی و تولید شوند که در طول مدت زمان ماموریت خود از قابلیت اطمینان لازم برخوردار باشند. قابلیت اطمینان به عنوان احتمال اینکه یک سیستم یا جزء وظایف مورد نیاز خود را در شرایط اعلام شده برای یک دوره مشخص انجام دهد تعریف می‌شود. این تعریف

جنبه کمی قابلیت اطمینان را که برای مهندسان و طراحان ضروری است، برجسته می‌کند [4]. مهندسی قابلیت اطمینان مانند سایر رشته‌های مهندسی، به سرعت در حال تکامل و تحول است، که هدف آن توسعه روش‌ها و ابزار مناسب برای مدل‌سازی، پیش‌بینی و ارزیابی برای نشان دادن قابل اعتماد بودن، تعمیرپذیری و در دسترس بودن قطعات، تجهیزات و سیستم‌ها است.

۲-۴. شاخص OMOE^۴ و ضرورت استفاده در طراحی مفهومی

به طور کلی اگر طراح بتواند فرآیند طراحی مفهومی را از حالت بررسی کیفی خارج کند و با استفاده از مدل‌های ریاضی و آماری آن را به بررسی کمی سوق دهد، می‌تواند تصویر واضح تری از طرح را ارائه دهد. از جمله روش‌هایی که بر پایه استفاده از مدل‌های ریاضی و آماری می‌باشد، روش OMOE است که می‌تواند در مرحله طراحی مفهومی به صورت دقیق، طراح را به شناور مورد نظر بر اساس نیاز مشتری برساند. OMOE یک شناور در واقع عددی است بین صفر و یک که نشان دهنده این است که شناور انتخاب شده تا چه اندازه به آستانه و هدف مورد نظر در طراحی نزدیک می‌باشد. اگر شناور انتخاب شده دارای OMOE یک باشد نشان دهنده این است که این شناور به تمامی هدف‌های در نظر گرفته شده در طراحی (نیازمندیهای نهایی) رسیده و به همین ترتیب اگر شناور دارای OMOE صفر باشد نشان دهنده این است که شناور به اهداف مورد نظر در طراحی (نیازمندیهای اولیه) نرسیده است. به عبارتی این شاخص بیان کننده میزان تحقق خواسته‌های مشتری می‌باشد.

۳. مرور ادبیات

با توجه به حجم بالای مقالات و پژوهش‌های مرتبط، در این بخش ابتدا پژوهش‌های حوزه طراحی برای قابلیت اطمینان و

^۳ Design for reliability

^۴ Overall Measure of Effectiveness

^۱ Design for cost

^۲ Concurrent Engineering

سایر رویکردهای طراحی مفهومی، و سپس مطالعات مرتبط با مدل‌سازی و بهینه‌سازی چندین هدفه بررسی شده است. دیمان^۱ (۲۰۲۵) طراحی برای تعالی (DfX) را به عنوان یک رویکرد سیستماتیک برای بهینه‌سازی جنبه‌های مختلف توسعه محصول شامل قابلیت تولید، هزینه، قابلیت اطمینان، مونتاژ و پایداری معرفی کرده است. ایشان در مطالعه خود، اصول DfX را با تمرکز بر طراحی برای تولید، مونتاژ و هزینه مورد بررسی قرار داده و چالش‌های پیاده‌سازی آن شامل هزینه بالا، پیچیدگی تولید، راندمان پایین مونتاژ و مسائل کیفی را تحلیل کرده است [5].

اسمیت^۲ (۱۹۷۶) تأکید می‌کند که قابلیت اطمینان برای تضمین عملکرد پایدار محصولات در طول زمان و تحت شرایط عملیاتی متنوع، از اهمیت اساسی برخوردار است. وی معتقد است که قابلیت اطمینان نه تنها یک ویژگی مطلوب، بلکه یک نیاز اساسی در طراحی مهندسی است که بر رضایت مشتری، ایمنی و موفقیت تجاری محصول تأثیر مستقیم دارد. در کتاب ایشان، روش‌های متعددی برای ارزیابی و بهبود قابلیت اطمینان در مراحل طراحی معرفی شده است. این روش‌ها شامل تحلیل آماری، تحلیل اثرات و حالت‌های شکست (FMEA^۳) و آزمون‌های قابلیت اطمینان هستند که در شناسایی خرابی‌های بالقوه و افزایش دوام محصول نقش کلیدی دارند [4]. واسیلکوف و همکاران^۴ (۲۰۱۹) مدلی برای مدل‌سازی قابلیت اطمینان سیستم‌های پیچیده بر اساس حداقل‌سازی ریسک ارائه کردند که امکان در نظر گرفتن احتمال وقوع خرابی‌های تصادفی را فراهم می‌کند [6]. بارکر و همکاران^۵ (۲۰۲۲) نیز مدلی برای ارزیابی قابلیت اطمینان در مرحله طراحی مفهومی اولیه توسعه دادند و آن را بر روی یک وسیله نقلیه بدون سرنشین اعمال کردند [7]. کاتلانی^۶

سیانی^۷ و پاتریزی^۸ (۲۰۲۲) طراحی برای قابلیت اطمینان را روشی جامع دانسته‌اند که از مرحله طراحی مفهومی تا طراحی نهایی را پوشش می‌دهد این رویکرد اطمینان می‌دهد که الزامات قابلیت اطمینان، ایمنی و هزینه به طور موثر برآورده شوند [8]. با بررسی پژوهش‌های صورت پذیرفته نکته‌ای که به نظر مغفول مانده عدم بهره‌گیری همزمان از رویکردهای کارایی و قابلیت اطمینان در مرحله اولیه طراحی مفهومی می‌باشد که پژوهش پیش‌رو در تلاش برای رفع آن است. موتار^۹ (۲۰۲۴) به مروری مختصر از تحقیقات انجام شده در مورد تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان در سیستم‌های پیچیده پرداخته است. این مقاله ساختار تابعی را به عنوان یک نمایش ریاضی مورد استفاده در تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان مورد بحث قرار می‌دهد. این چارچوب به درک چگونگی تعامل اجزای یک سیستم و مجاسبه قابلیت اطمینان کلی سیستم کمک می‌کند. این پژوهش همچنین بیان می‌کند که شکست یک جزء خاص در یک سیستم می‌تواند منجر به شکست کل سیستم شود و این مفهوم برای ارزیابی عملکرد سیستم بسیار مهم است. هدف اصلی این پژوهش ارائه درک جامعی از چگونگی ارزیابی عملکرد دو سیستم پیچیده برای تعیین طراحی بهینه برای سیستم‌های ارتباطی است [9]. هاتفیلد و هانکر^{۱۰} (۲۰۲۵) در پژوهشی درس‌های آموخته‌شده از رویکرد طراحی برای قابلیت اطمینان در صنعت هوافضا را به اشتراک گذاشته‌اند [10]. مقیاس سطح آمادگی فناوری (TRL) در سازمان ملی هوانوردی و فضایی (ناسا) در دهه ۱۹۷۰ به عنوان یک ابزار استاندارد ارزیابی بلوغ فناوری برای استفاده در توسعه سیستم پیچیده توسعه یافت. امروزه، ارزیابی‌های TRL برای تصمیم‌گیری‌های چند میلیون دلاری در ناسا و فراتر از آن مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما شواهد نشان می‌دهند که چالش‌هایی مرتبط با استفاده از TRL در عمل وجود

^۶ Catelani

^۷ Ciani

^۸ Patrizi

^۹ Mutar

^{۱۰} Hatfield & Honecker

^۱ Dhiman

^۲ Smith

^۳ Failure Mode and Effects Analysis

^۴ Vasilkov et al.

^۵ Barker et al.

دارد [11]. مالون و همکاران^۱ (۲۰۱۱) نشان دادند که سطوح پایین TRL می‌تواند هزینه توسعه را به طور قابل توجهی افزایش دهد [12]. اولچوفسکی و همکاران^۲ (۲۰۲۰) چالش‌های پیاده‌سازی TRL در پروژه‌های واقعی را بررسی کرده و پیشنهادهایی برای بهبود دقت ارزیابی آن ارائه کردند [11]. باوجود پژوهش‌هایی که بررسی شد یکسری از پژوهش‌ها سایر موارد مرتبط با زیرمجموعه‌های موضوع طراحی برای تعالی را مورد بررسی قرار داده‌اند. به عنوان نمونه اولیا و همکاران^۳ (۱۳۹۵) با هدف دستیابی به چارچوبی جامع در مرحله طراحی یک رویکرد مدل‌سازی ریاضی چندهدفه را توسعه می‌دهد. هدف اصلی این مطالعه، ایجاد موازنه‌ای دقیق میان شاخص‌های متضاد از جمله هزینه، کارایی عملیاتی و قابلیت اطمینان است تا از این طریق، فرآیند تصمیم‌گیری در مراحل اولیه طراحی صنعتی بهبود یابد [13].

بیشتر مسائل بهینه‌سازی طبیعتاً چندین هدف دارند که معمولاً با یکدیگر در تضاد هستند. مسائل با دو یا سه تابع هدف به عنوان مسائل چند هدفه (MOP^۴) شناخته می‌شوند. با این حال، بسیاری از مسائل کاربردی دنیای واقعی اغلب شامل چهار یا چند هدف هستند که معمولاً به عنوان مسائل بهینه‌سازی چند هدفه (MaOP^۵) شناخته می‌شوند [14]. یکی از ویژگی‌های مهم MOP ها این است که معمولاً یک جواب بهینه قابل انتظار نیست. بلکه مجموعه کاملی از جواب‌ها وجود دارد [15]. بهینه‌سازی با اهداف چندگانه چالش‌هایی را به همراه دارد با این حال رویکردهایی نیز در جهت مقایسه هر الگوریتم چند هدفه با دیگری وجود دارد. یارقلی و همکاران (۱۳۹۵) در پژوهش خود معیارهای بیشترین گسترش، فاصله‌گذاری، تعداد جواب‌های پارتو، فاصله از جواب ایده‌آل و زمان اجرای الگوریتم را بررسی کرده است [16].

باتیستا و همکاران^۶ (۲۰۱۱) چهار معیار تسلط را از نظر توانایی آنها برای مرتب کردن کافی مجموعه نقاط در مسائل بهینه‌سازی چند هدفه و دارای اهداف متعدد تحلیل کرده است [17].

کوپادو مندز و همکاران^۷ (۲۰۱۲) بیان می‌کند که محدودیت اصلی بهینه‌سازی چند هدفه این است که بار محاسباتی آن با تعداد اهداف افزایش می‌یابد. با هدف غلبه بر این مانع محاسباتی، این پژوهش الگوریتم جدیدی را برای کاهش تعداد اهداف در چندهدفه معرفی می‌کند [18]. آنتونیو و همکاران (۲۰۱۸)^۸ بیان می‌کند که به طور کلی، در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه یک جواب واحد ندارند، بلکه مجموعه‌ای از جواب‌ها را دارند که نشان‌دهنده بهترین مبادلات ممکن در بین تمام عملکردهای هدف مسأله است. مکانیسم‌های انتخابی که معمولاً توسط الگوریتم‌های تکاملی چند هدفه اتخاذ می‌شوند، بر اساس بهینه‌سازی پارتو هستند [19].

کرمی و داریان^۹ (۲۰۲۲) به بررسی کامل و به روز شده ادبیات برای مسائل چندهدفه و چندین هدفه پرداخته که در آن ۳۲ الگوریتم مهم‌تر به تفصیل مورد بحث قرار گرفته است همچنین در انتهای این مقاله، معیارهای مربوط به تست مسائل چندهدفه مورد بررسی قرار گرفته است [14]. لیو و همکاران^{۱۰} (۲۰۲۳) در پژوهشی برای مقابله با چالش‌های مرتبط با مسائل چند هدفه، یک الگوریتم تکاملی بهینه‌سازی چند هدفه بر اساس درجه تسلط بیش از حد در این مقاله پیشنهاد دادند. نتایج تجربی روی مسائل مختلف معیار با حداکثر ۲۰ هدف تأیید می‌کند که الگوریتم پیشنهادی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه پیشرفته برتری دارد [20].

^۶ Batista et al.

^۷ Copado-Méndez et al.

^۸ Antonio et al.

^۹ Karami & Dariane

^{۱۰} Liu et al.

^۱ Malone et al.

^۲ Olechowski et al.

^۳ Owlia et al.

^۴ Multi-Objective Problems

^۵ Many-objective optimization problems

جدول ۱. بررسی کلیت پژوهش‌ها و شکاف تحقیقات

Researchers (Year)	Research Domain	Research Gap (Identified Limitations)
Smith (1976), Vasilkov et al. (2019), Mutar (2024)	Reliability and Risk	Absence of a mathematical model for the interaction and dependency between component failures and overall system reliability in the early design stage
Copado-Méndez (2012), Li et al. (2024)	Optimization Algorithms	Performance degradation and reduced population diversity in traditional algorithms (e.g., NSGA-II) for problems with more than three objectives
Karami & Dariane (2022), Kalita et al. (2024)	Problem-Solving Methods	Critical need for more advanced algorithms (such as NSGA-III) to effectively solve high-dimensional complex problems (MaOPs)
Dhiman (2025), Catelani et al. (2022)	DFX Design Approaches	Focus on isolated aspects and lack of an integrated model covering all dimensions (cost, reliability, efficiency)
Hatfield & Honecker (2025), Oliya (1395)	Technology Maturity Management (TRL)	Failure to account for technology incompatibility and dependency constraints in early industrial decision-making
Present Study	Design for Excellence (DFX) & System-Level Optimization	Limited exploration of trade-offs between system effectiveness (OMOE), total cost, reliability, and technological maturity in previous multi-objective models

کیوت^۱ و شوتز^۲ (۲۰۲۰) بیان می‌کند که برای حل مسائل چندهدفه، دیگر امکان محاسبه تقریب اندازه محدود که به طور مناسب کل مجموعه جواب را نشان می‌دهد، وجود ندارد. این پژوهش ابزار کاوش جهانی/محلی پارتو را برای تشخیص جواب‌های حل مسائل چندین هدفه مورد بررسی قرار داده است همچنین مزیت این رویکرد را در چندین مثال مورد بررسی قرار داده است [15]. لی و همکاران^۳ (۲۰۲۴) در پژوهش خود بیان می‌کند که در دنیای واقعی، بسیاری از مسائل عینی با ابعاد بالا وجود دارد که باید حل شوند. با افزایش تعداد اهداف، سرعت همگرایی آهسته، پیچیدگی محاسباتی بالا و کاهش تنوع جمعیت در الگوریتم‌های چند وظیفه‌ای چند هدفه موجود رخ می‌دهد. براین اساس نیاز روزافزونی به مطالعه الگوریتم‌های هدف با ابعاد بالا در محیط چندوظیفه‌ای وجود دارد. ایشان برای برآورده کردن این شکاف تحقیقاتی، یک الگوریتم تکاملی چندوظیفه‌ای جدید در مقاله خود ارائه کرده‌اند [21]. با توجه به موارد بررسی شده الگوریتم‌های تکاملی چند هدفه موجود در پرداختن به MaOPs مؤثر نیستند. محدودیت‌های آن نیاز به توسعه الگوریتمی را ایجاد می‌کند که MaOPs را به طور مؤثر حل کند [۲].

کالیتا و همکاران^۴ (۲۰۲۴) روش MaOWOA^۵ را برای حل مسائل چندهدفه پیشنهاد می‌کند، که یک الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه جدید که همگرایی را تسریع می‌کند، می‌توان اینگونه گفت که این مقاله به جزئیات توسعه MaOWOA، مبنای نظری و اثربخشی آن می‌پردازد، که مسیر امیدوارکننده‌ای را برای تحقیقات آینده در میان پیچیدگی مسائل رو به رشد است [23]. در جدول ۱ شکاف تحقیقاتی پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است.

^۴ Kalita

^۵ Many-Objective Whale Optimization Algorithm

^۱ Cuate

^۲ Schütze

^۳ Li et al.

با وجود حجم قابل توجه پژوهش‌ها در زمینه DfR، DfX، TRL و بهینه‌سازی چندهدفه، همچنان شکاف‌های مهمی مشاهده می‌شود:

- عدم ادغام همزمان چندین بعد DfX (هزینه، کارایی، قابلیت اطمینان و بلوغ فناوری) در یک مدل واحد در مرحله طراحی مفهومی.

- نادیده گرفتن محدودیت‌های وابستگی و ناسازگاری میان فناوری‌ها در اکثر مدل‌های موجود.

- استفاده غالب از الگوریتم NSGA-II که در مسائل چندین هدفه (بیش از سه هدف) کارایی کمتری دارد.

نوآوری اصلی این پژوهش از دو منظر قابل بیان است: اول، ارائه مدل چهار هدفه بر پایه رویکرد DfX که چهار هدف متعارض را همزمان در نظر می‌گیرد و محدودیت‌های وابستگی و ناسازگاری فناوری‌ها را صراحتاً مدل‌سازی می‌کند. دوم، به‌کارگیری الگوریتم NSGA-III برای حل مدل چهار هدفه طراحی مفهومی کشتی، که تناسب بیشتری با ماهیت چندین هدفه مسأله دارد.

۴. روش تحقیق

در ادامه، با توجه به توضیحات ارائه‌شده در بخش‌های قبلی، مدل ریاضی چهار هدفه‌ای که قابلیت بررسی موارد مذکور را در مرحله طراحی مفهومی دارد، ارائه می‌شود. این مدل یک ابزار قدرتمند برای مدیران فناوری است تا به جای تصمیم‌گیری شهودی، با یک چارچوب کمی، استراتژی توسعه محصول خود را بهینه کنند. مدل یک MOMINLP است که با NSGA-III حل شده تا جبهه پارتو پیدا شود. در خصوص دلایل استفاده از این رویکرد مقالات مرتبط با موضوعات چند هدفه مورد بررسی قرار گرفت و با توجه به اینکه در مدل پژوهش از ۴ تابع هدف استفاده شده و با توجه به مفاهیم مقالات این حوزه الگوریتم NSGA-III نسبت به

بقیه موارد از برتری برخوردار بود. به عنوان نمونه لی و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهش خود بیان می‌کند که رویکرد مرتب‌سازی غیرغالب مبتنی بر نقطه مرجع که در اصل در الگوریتم NSGA-III پیشنهاد شد، به دلیل اثربخشی آن در حفظ تنوع جواب‌ها در فضای هدف بزرگ، همچنان یک جزء اصلی در مقابله با MaOPs است [21]. در این پژوهش، مسأله‌ی طراحی مفهومی یک سیستم پیچیده به‌صورت یک مدل ریاضی چندهدفه فرموله شده است. این مدل با هدف همزمان کمینه‌سازی هزینه و ریسک، و بیشینه‌سازی اثربخشی عملیاتی، قابلیت اطمینان، و سطح بلوغ فناوری/ساخت، توسعه یافته است.

مفروضات مدل ریاضی مسأله بدین شرح است: (۱) داده‌های مرتبط با شاخص OMOE با توجه به نظر خبرگان و به صورت قطعی مشخص شده است. (۲) داده‌های مرتبط با شاخصهای MRL، TRL با توجه به مصاحبه با خبرگان به صورت قطعی و در بازه مشخصی که برای هر یک وجود دارد مشخص شده است (۳) پارامترها قطعی و مشخص هستند (۴) در جهت بررسی مفهوم طراحی برای قابلیت اطمینان سیستم‌های پیچیده (مانند کشتی) به عنوان ترکیب زیرسیستم‌های سری مدل‌سازی شده است. (۵) داده‌های تاریخی یا مهندسی برای تخمین نرخ‌های خرابی هر یک از المان‌ها یا سیستم‌های مورد بررسی وجود دارد. (۶) فرض بر این است که قابلیت اطمینان هر المان از توزیع نمایی^۱ پیروی می‌کند و همچنین شاخص-های MRL، TRL بر نرخ خرابی محاسبه شده توسط سیستم تاثیرگذار هستند این موضوع از آن جهت قابل بررسی است که معمولاً قطعاتی که TRL بالاتری دارند معمولاً بیشتر آزمایش و مورد بررسی قرار گرفته اند و براین اساس نرخ خرابی کمتری دارند و همچنین تکنولوژی‌های با MRL پایین ممکن است تولید ناپایدار داشته باشند. در ادامه علائم و نمادهای ریاضی مورد استفاده برای مدل مسأله نمایش و توضیحات مرتبط ارائه شده است.

^۱ Exponential Distribution

نماد	
$MRL_{i,max}$	حداکثر سطح قابل قبول شاخص بلوغ فناوری
$i \in I$	مجموعه قطعات و تجهیزات مورد نیاز کشتی به عنوان مثال، هر آ می تواند شامل موتورها، سیستم های رانش، تجهیزات الکترونیکی و غیره باشد. به صورت کلی هر قطعه با آ نشان داده می شود تا بتوانیم روی آن محاسبات انجام داده و مسأله را کمی کنیم.
$j \in J$	نوع تکنولوژی به کار رفته در ساخت تجهیز آام هر کشتی که می تواند بر شاخصهای MRL, TRL قطعات تاثیر گذار باشد.
D_{dep}	مجموعه جفت های وابستگی تکنولوژی ها (Dependency pairs)
D_{inc}	مجموعه جفت های ناسازگاری تکنولوژی ها (Incompatibility pairs)
	پارامترها
OMO_{ij}	شاخص اثربخشی قطعه آام که با تکنولوژی زام طراحی، تولید و یاساخته شده برای محاسبه شاخص اثربخشی نیاز به آستانه طراحی، هدف طراحی، وزن پارامتر میباشد.
$Cost_{ij}^{cons}$	هزینه طراحی قطعه آام با تکنولوژی زام
$Cost_{ij}^{sup}$	هزینه تامین قطعه آام با تکنولوژی زام
$Cost_{ij}^{assem}$	هزینه مونتاژ قطعه آام با تکنولوژی زام
$Cost_{ij}^{risk}$	هزینه ای که تحت عنوان ریسک استفاده از قطعه آام با تکنولوژی زام در نظر گرفته شده است.
Rel_{ij}	قابلیت اطمینان قطعه آام با تکنولوژی زام
MRL_{ij}	شاخص بلوغ قابلیت ساخت برای قطعه آام با تکنولوژی زام
TRL_{ij}	شاخص بلوغ تکنولوژی برای قطعه آام با تکنولوژی زام
	و عددی بین ۹ تا ۱۰
$TRL_{i,min}$	حداقل سطح قابل قبول شاخص بلوغ تکنولوژی برای قطعه آ و عددی بین ۱۰ تا ۱۰
$TRL_{i,max}$	حداکثر سطح قابل قبول شاخص بلوغ تکنولوژی برای قطعه آ
$MRL_{i,min}$	حداقل سطح قابل قبول شاخص بلوغ فناوری ساخت برای قطعه آ

ساخت برای قطعه آ

C_{ij} : هزینه قطعه آام که با تکنولوژی زام طراحی، تولید و یاساخته شده

B : هزینه کل یا بودجه کل در دسترس

R_{min} : حداقل قابلیت اطمینان

T_{ij} : زمان توسعه مورد نیاز جهت قطعه آ با تکنولوژی ز

D : مدت زمانی که پروژه میبایست به اتمام برسد

متغیرهای تصمیم گیری

X_{ij} : مجموعه متغیرهای طراحی با دامنه $\{0,1\}$ نوع باینری که بیان کننده انتخاب تکنولوژی ل برای قطعه آ است (به عنوان مثال یک کشتی یا تجهیز پیچیده می تواند چندین نوع سیستم با عملکرد متفاوت داشته باشد به عنوان مثال سیستم های تاسیساتی، رانش یا سیستم های مکانیزمی و ... که هر کدام می تواند با تکنولوژی های متعددی ساخته شود.

n_i : یک متغیر تصمیم گیری عدد صحیح است که نشان دهنده تعداد واحدها (یا افزودنیها) یک قطعه یا زیرسیستم خاص آ است.

قابلیت اطمینان سیستم بر اساس نرخ خرابی اجزای تشکیل دهنده و با فرض تبعیت آن ها از توزیع نمایی محاسبه می شود؛ به طوری که برای هر جزء با نرخ خرابی λ_i ، قابلیت اطمینان در زمان t برابر در نظر گرفته می شود. با فرض ساختار سری برای زیرسیستم های سیستم پیچیده، قابلیت اطمینان کل سیستم از حاصل ضرب قابلیت اطمینان اجزا به دست می آید و نرخ خرابی مؤثر با توجه به سطح بلوغ فناوری و ساخت (TRL/MRL) و داده های تاریخی تنظیم می شود و در مدل چندهدفه برای بیشینه سازی قابلیت اطمینان به کار می رود.

با توجه به بررسی های انجام گرفته، شرایط عمومی مسأله به این صورت است که پس از مشخص نمودن ساختار شکست محصول و مشخص شدن زیرسیستم های تشکیل دهنده محصول نهایی، گزینه های موجود برای هر یک از این زیر سیستم ها تعیین می گردد. اطلاعات مربوط به شاخص های بهینه سازی مدل که شامل هزینه و قابلیت های حوزه بلوغ

سیستماتیک تکنولوژیکی و ساخت، قابلیت اطمینان و میزان اثر بخشی هر یک از گزینه‌ها توسط خبرگان مسأله تعیین می‌گردد. در این پژوهش، مدل ریاضی پیشنهادی شامل چهار تابع هدف است که به‌طور هم‌زمان اثربخشی، هزینه، ریسک حوزه‌های بلوغ فناوری و ساخت و همچنین قابلیت اطمینان را در طراحی محصول بهینه می‌کند. مدل کمک می‌کند تا گزینه‌های طراحی اولیه ارزیابی شود و تصمیم‌گیری شود که آیا افزونگی ارزش هزینه اضافی را دارد یا نه. اگر هزینه شکست بالا باشد (مثل از دست رفتن مأموریت کشتی)، افزونگی ضروری است؛ در غیر این صورت، ممکن است غیراقتصادی بوده و هزینه زیادی را به طراحان یا سازندگان تحمیل کند. افزونگی یک سیستم شاید قابلیت اطمینان را مثلاً ۹۰٪ به ۹۹٪ افزایش می‌دهد، اما هزینه را ۲ تا ۴ برابر می‌کند (بسته به نوع) و تصمیم بهینه بر اساس تعادل بین هزینه شکست و هزینه افزونگی است.

$$Max (OMOE) = \sum_i \sum_j OMOE_{ij} * X_{ij} \quad (1)$$

$$Min (CoST) = \sum_i \sum_j \left[(C_{ij}^{cons} * X_{ij}) + (C_{ij}^{supplier} * X_{ij}) + (C_{ij}^{assum} * X_{ij}) + (C_{ij}^{risk} * X_{ij}) \right] \quad (2)$$

$$Min (Risk) = \sum_i \sum_j \left[\frac{(TRL_{max} - TRL_{ij})}{(MRL_{max} - MRL_{ij})} \right] * X_{ij} \quad (3)$$

$$Max REL = \prod_{i,j} \left[1 - \left(1 - \sum_i Rel_{i,j} \right)^{n_i} \right] \forall i \quad (4)$$

تابع هدف (۱): این تابع هدف بر ضرورت بیشینه‌سازی OMOE به عنوان شاخص اثربخشی کلی سیستم اشاره دارد. در واقع هدف این است که محصول نهایی با انتخاب مناسب زیرسیستم‌ها و تکنولوژی‌ها، بیشترین اثربخشی را در مبحث طراحی داشته باشد. ذکر این نکته ضروری است که فرمول اصلی OMOE در صورت وجود پارامترهای نرمال شده، می‌تواند به عنوان یک عبارت جایگزین استفاده شود. این شاخص از طریق جمع وزنی معیارهای نرمال‌سازی شده

محاسبه می‌شود. در این روش، ابتدا هر یک از شاخصهای موثر طراحی با استفاده از روش‌های نرمال‌سازی به بازه [۰، ۱] نگاشت می‌شوند تا تفاوت واحدها خنثی گردد. سپس، با اعمال وزن‌های مشخص که بیانگر اولویت‌های طراحی در صنعت کشتی‌سازی است، حاصل ضرب هر معیار در وزن آن محاسبه و مجموع آن‌ها به عنوان نمره نهایی عملکرد (OMOE) برای ارزیابی و مقایسه طرح‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد.

تابع هدف (۲): این تابع هدف به دنبال کمینه‌سازی هزینه‌ها است. این تابع هدف به دنبال کمینه‌سازی هزینه‌های تأمین، لجستیک، ساخت و ریسک است که در صورت استفاده از هر سیستم به کل هزینه سیستم تحمیل می‌گردد. تابع هدف (۳): این تابع به دنبال این است ریسک حوزه شاخص‌های بلوغ فناوری و ساخت را در فناوری‌های منتخب به حداقل رساند. انتخاب تکنولوژی با TRL, MRL پایین‌تر، به نابالغی و در نتیجه ریسک بالاتر در مراحل توسعه و تولید منجر می‌شود، که در این پژوهش هدف این است که این مجموع تا حد امکان کاهش یابد. این دو شاخص با توجه به جدول مرجع مرتبط با هر یک از شاخص‌ها و نظر خبرگان محاسبه می‌شود. شاخص TRL مقیاس ۹ مرحله‌ای ناسا است که از ۱ (اصول اولیه) تا ۹ (سیستم عملیاتی موفق) رتبه‌بندی می‌شود و شاخص MRL مقیاس ۱۰ مرحله‌ای است که از ۱ (شناسایی مفاهیم تولید) تا ۱۰ (تولید انبوه و بهبود مستمر) را پوشش می‌دهد. تابع هدف (۴): این تابع هدف به دنبال بیشترین میزان قابلیت اطمینان در قطعات با فرض توزیع نمایی برای نرخ خرابی و ادغام مفهوم DFR در مسأله و مدل‌سازی طراحی مفهومی است. همچنین در این پژوهش مدل با فرض افزونگی فعال در نظر گرفته شده و در حالت استندبای این موضوع متفاوت خواهد بود.

$$\sum_j x_{ij} = 1 \forall i \in I \quad (5)$$

$$\prod_{i,j} \left[1 - \left(1 - \sum_i \text{Rel}_{i,j} \right)^{n_i} \right] \geq R_{\min} \quad (6)$$

$$\sum_i \sum_j \left(C_{ij}^{\text{cons}} * X_{ij} \right) + \left(C_{ij}^{\text{supplier}} * X_{ij} \right) + \left(C_{ij}^{\text{assum}} * X_{ij} \right) + \left(C_{ij}^{\text{risk}} * X_{ij} \right) \leq B \quad (7)$$

$$\sum_i \sum_j T_{i,j} * X_{i,j} \leq D \quad (8)$$

$$\sum_j \text{TRL}_{i,j} * X_{i,j} \geq \text{TRL}_{i,\min} \forall i \quad (9)$$

$$\sum_j \text{MRL}_{i,j} * X_{i,j} \geq \text{MRL}_{i,\min} \forall i \quad (10)$$

$$\sum_j X_{i,j} \geq 1 \forall i \quad (11)$$

$$X_{i,j} \geq X_{k,l} \Rightarrow \forall (i,j) \rightarrow (k,l) \in D_{\text{dep}} \quad (12)$$

$$X_{p,q} + X_{r,s} \geq 1 \Rightarrow \forall (p,q) \leftrightarrow (r,s) \in D_{\text{inc}} \quad (13)$$

$$X_{i,j} \in \{0,1\} \forall i,j \quad (14)$$

مدل ریاضی پیشنهادی تحت مجموعه‌ای از محدودیت‌های ساختاری، فنی و اجرایی تعریف شده است که دامنه تصمیم‌گیری در انتخاب تکنولوژی‌ها را مشخص می‌کند. این محدودیت‌ها به صورت زیر بیان می‌شوند:

محدودیت (۵) (انتخاب یکتا برای هر قطعه): برای هر قطعه از سیستم یا یک سیستم از کل مجموعه در نظر گرفته شده، تنها یک تکنولوژی باید انتخاب شود. این محدودیت تضمین می‌کند که هر جزء سیستم دارای تخصیص مشخص و غیرتکراری باشد. محدودیت (۶) (حداقل قابلیت اطمینان سیستم): قابلیت اطمینان کل سیستم نباید از مقدار حداقل تعیین شده کمتر باشد. این قید تضمین می‌کند که عملکرد نهایی محصول در محدوده قابل قبول باقی بماند.

محدودیت (۷) (محدودیت بودجه): مجموع هزینه‌های تأمین، لجستیک، ساخت و ریسک نباید از بودجه در دسترس پروژه تجاوز کند. محدودیت (۸) (محدودیت زمان توسعه) مجموع زمان توسعه موردنیاز برای تکنولوژی‌های منتخب نباید از حداکثر زمان مجاز پروژه (D) بیشتر شود. محدودیت (۹) (حداقل سطح بلوغ فناوری (TRL)): سطح آمادگی فناوری انتخاب شده برای هر قطعه باید بزرگ‌تر یا مساوی حداقل سطح قابل قبول تعیین شده باشد تا از ریسک‌های بحرانی

جلوگیری شود. محدودیت (۱۰) (حداقل سطح بلوغ ساخت (MRL)): سطح آمادگی ساخت برای هر قطعه باید بزرگ‌تر یا مساوی حداقل سطح تعیین شده باشد تا ریسک‌های تولید کاهش یابد. محدودیت (۱۱) (الزام انتخاب حداقل یک تکنولوژی برای هر سیستم): برای هر سیستم، حداقل یک تکنولوژی از میان گزینه‌های موجود باید انتخاب شود؛ به گونه‌ای که هیچ سیستم بدون تخصیص تکنولوژی باقی نماند. محدودیت (۱۲): در طراحی مفهومی سیستم‌های پیچیده، انتخاب برخی فناوری‌ها به یکدیگر وابسته است و یا با یکدیگر تضاد عملیاتی دارند. این قیود به دو دسته قیود وابستگی و قیود ناسازگاری تقسیم‌بندی می‌شوند. اگر انتخاب فناوری J برای زیرسیستم i (مثلا سیستم ناوبری خودران) نیازمند استقرار سیستم 1 در زیرسیستم K (مثلا سیستم پردازش سریع) باشد این وابستگی به صورت محدودیت (۱۲) مدل‌سازی می‌شود. در این رابطه D_{dep} مجموعه فناوری‌های وابسته است. این نامساوی تضمین می‌کند که در صورت انتخاب یک فناوری پیش‌نیازدار فناوری پشتیبان نیز حتما انتخاب شود. محدودیت (۱۳): در مواردی که دو فناوری از نظر فیزیکی یا عملیاتی قابلیت تجمیع ندارند (مانند موتور توربین گازی و پروانه داکت‌دار در این مطالعه، قید ناسازگاری به صورت این محدودیت اعمال می‌شود در این رابطه D_{inc} مجموعه جفت فناوری‌های ناسازگار است. این معادله تضمین می‌کند که این دو فناوری هرگز نمی‌توانند به طور همزمان مقدار ۱ بگیرند و حداکثر یکی از آنها انتخاب خواهد شد. محدودیت (۱۴): محدودیت عدد صحیح بودن متغیر X است بدین معنی که این متغیر فقط می‌تواند عدد صفر یا یک باشد.

۵. تجزیه و تحلیل

در جهت حل مدل کدنویسی در نرم افزار پایتون داده‌های یک شناور که براساس مشاوره با خبرگان و شبیه‌سازی‌های موجود جمع‌آوری شده برای ۱۰ قطعه و ۳ تکنولوژی حل شده است. پارامترها کلی در جدول ۲ و نمونه‌ای از هزینه، شاخص اثربخشی و نرخ خرابی برای یکی از تجهیزات در جدول ۳ قابل

مشاهده است. همچنین سطوح آمادگی فناوری و تولید در جدول ۴ قابل مشاهده است.

جدول ۲. اعداد اختصاص داده شده به پارامترهای مورد استفاده در مدل و توضیحات مرتبط

Parameter	Value	Description	Parameter	Value	Description
NCOMPONENTS	10	The total number of components or subsystems under investigation.	D	700	Maximum development time allowed
NTECHNOLOGIES	3	Number of alternative technologies for each piece (values 0, 1, 2).	TRLmin	40	Minimum acceptable total TRL for the entire system.
T	8760	Mission time .	MRLmin	40	Minimum acceptable total MRL for the entire system.
Rmin	0.9	Minimum overall reliability required for the system	Tmax,Mmax	9	Maximum reference level of maturity indicators for risk calculation.
B	4500000	Maximum total project budget			

جدول ۳. نرخ خرابی قطعات و تجهیزات، هزینه ها براساس دلار و شاخص اثربخشی در مدل مورد بررسی برای هر تکنولوژی

Equipment (i)	Failure rate				Cost		effectiveness index		
	T(0)	T(1)	T(2)	T(0)	T(1)	T(2)	T(0)	T(1)	T(2)
1	2.60E-05	1.20E-05	2.90E-06	163000	275000	188000	68	67	92

جدول ۵. نمایش قیود سازگاری و ناسازگاری

Incompatibility Constraints	Dependency Constraints
$(X_{1,1})_{Gas\ Turbine\ Engine}$	$(X_{5,1})_{Fast\ processing\ system}$
$(X_{2,3})_{Shipboard\ ducted\ propeller}$	$(X_{4,2})_{Autonomous\ system}$
$(X_{1,1} + X_{2,3} \leq 1)$	$(X_{5,1} \leq X_{4,2})$

جدول ۴. نمایش سطوح آمادگی فناوری و تولید برای تجهیز ۱

Equipment (i)	TRL		MRL		MRL	
	0	1	2	0	1	2
1	3	5	8	4	5	7

دو قید ساختاری بر اساس متغیرهای باینری X_i, j تعریف می شوند. این قیود، قید ناسازگاری و قید وابستگی است که با توجه به نوع سیستم های کشتی قید ناسازگاری بین موتور توربین گازی و پروانه داکت دار تعریف می شود این موضوع به دلیل این است که توربین گازی برای رانده شدن بهینه به سیستم های رانش با سرعت بالا نیاز دارد، در حالی که پروانه داکت دار برای افزایش نیروی یدک کشی در سرعت های پایین طراحی شده و ناسازگاری عملیاتی دارند. قید وابستگی انتخاب سیستم ناورانی خودران مستلزم انتخاب سیستم پردازش سریع است. به عبارتی سیستم خودران بودن بدون پردازش سریع امکان پذیر نیست. موارد بیان شده در جدول ۵ نمایش داده شده است.

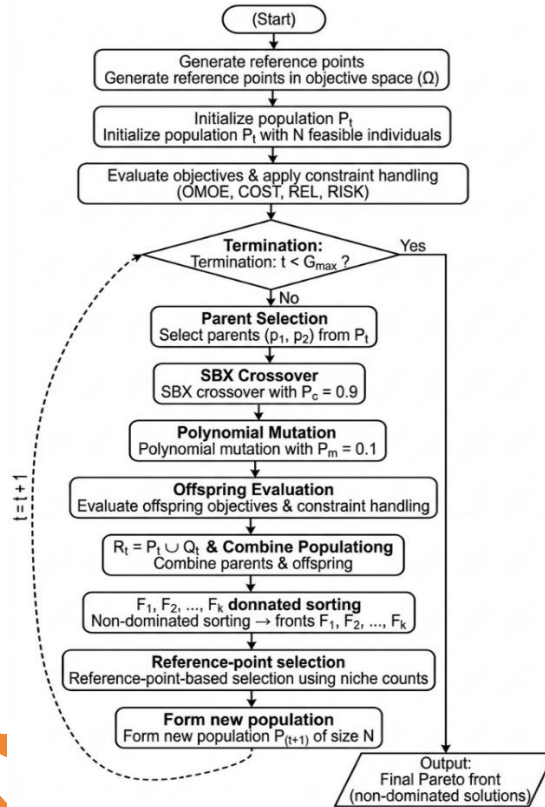
با توجه به ماهیت مسأله طراحی مفهومی که شامل چهار هدف متضاد است، این پژوهش در حوزه بهینه سازی چندین-هدفه قرار می گیرد. الگوریتم های چندهدفه نظیر NSGA-II در مواجهه با مسائلی با بیش از سه هدف، در حفظ تنوع در جبهه پارتو دچار افت کارایی می شوند. به همین دلیل، برای حل مدل ریاضی ترکیبی چهار-هدفه پیشنهادی، از الگوریتم تکاملی NSGA-III استفاده شد. در شکل ۱ فلوچارت مرتبط با این الگوریتم نمایش داده شده است.

می‌شود. هر عنصر این بردار، شاخص تکنولوژی انتخابی (۰، ۱ یا ۲) برای یکی از ۱۰ قطعه اصلی سیستم را نشان می‌دهد.

عملگرهای ژنتیک: تقاطع (Crossover): از عملگر Simulated Binary Crossover (SBX) با احتمال وقوع ۰.۹ و شاخص توزیع $\eta = 20$ استفاده شد.

جهش (Mutation): از عملگر Polynomial Mutation با احتمال وقوع ۰.۱ و شاخص توزیع ۲۰ بهره گرفته شد.

مکانیزم اصلاح جواب‌های ناموجه (Repair Mechanism): به دلیل وجود قیود سخت (بودجه، حداقل قابلیت اطمینان، ناسازگاری و وابستگی فناوری‌ها)، پس از اعمال عملگرهای تقاطع و جهش، اگر جوابی قیود را نقض کند، از یک مکانیزم تعمیر استفاده می‌شود. در این مکانیزم، ابتدا قیود ناسازگاری و وابستگی بررسی و اصلاح می‌شوند و سپس در صورت لزوم، تکنولوژی‌های جایگزین با TRL/MRL بالاتر انتخاب می‌شوند تا جواب به ناحیه مجاز بازگردانده شود.



شکل ۱. فلوچارت الگوریتم NSGAIII

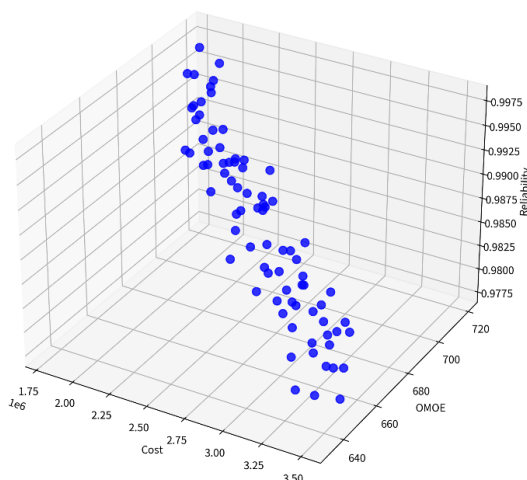
جزئیات پیاده‌سازی الگوریتم و جواب نهایی مسأله به ترتیب در جدول ۶ و جدول ۷ نمایش داده شده‌است. منظور از «جواب نهایی» در این پژوهش، مجموعه جواب‌های غیرمغلوب (جبهه پارتو) است. از میان این جواب‌ها، یک جواب compromise می‌تواند با روش‌هایی مانند TOPSIS^۱ یا بر اساس اولویت‌های تصمیم‌گیرنده انتخاب شود. جدول ۷ بهترین مقادیر یافت‌شده برای هر هدف را در کل جبهه پارتو نشان می‌دهد. همچنین پس از بررسی جواب‌ها مشخص شده که هیچ یک از اهداف همبستگی و ناسازگاری نیز نقض نشده است. در فرایند حل، NSGA-III از رویکردهای زیر استفاده می‌کند.

نمایندگی کروموزوم (Chromosome Representation): هر فرد در جمعیت به صورت یک بردار صحیح به طول ۱۰ تعریف

جدول ۶. جزئیات پیاده‌سازی الگوریتم NSGAIII

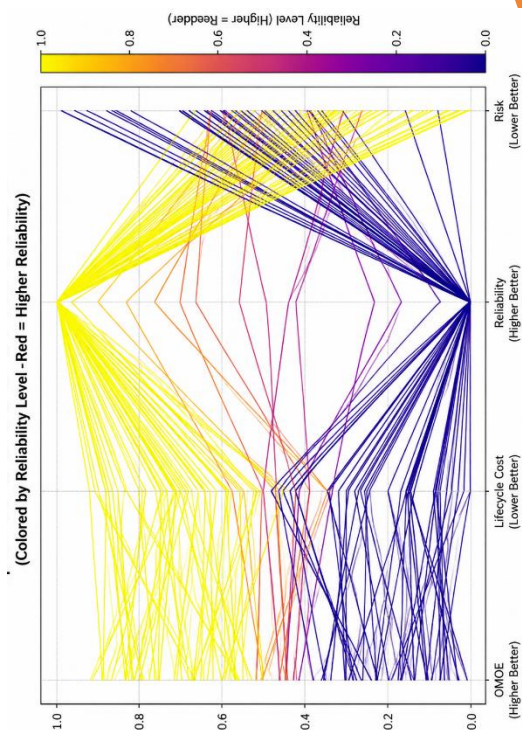
Parameter	Value Used	Explanation and Justification
Population size (pop_size)	92	For 4-objective problems, a population size close to 100 provides a good balance between diversity and computational efficiency
Number of reference points	Das-Dennis method with n_partitions=12	Generates approximately 91 reference points in 4-dimensional objective space. This is a standard configuration for many-objective optimization problems (MaOPs).
Number of generations (n_gen)	150	Primary stopping criterion. Sufficient to achieve good convergence without excessive computational time.
Genetic operators	SBX + Polynomial Mutation	Default operators in pymoo, well-suited for mixed-variable

^۱ Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution



شکل ۳. جبهه پارتو سه‌بعدی (Cost - OMOE - Reliability)

همان‌طور که در شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود، بین اهداف هزینه و اثربخشی (OMOE)، و همچنین بین هزینه و قابلیت اطمینان، رابطه معکوس و متعارض وجود دارد. افزایش شاخص OMOE و قابلیت اطمینان معمولاً با افزایش هزینه چرخه عمر همراه است. این تضاد، لزوم استفاده از رویکرد بهینه‌سازی چندین هدفه را توجیه می‌کند، زیرا یافتن یک جواب بهینه واحد که همزمان همه اهداف را به بهترین شکل برآورده کند، غیرممکن است.



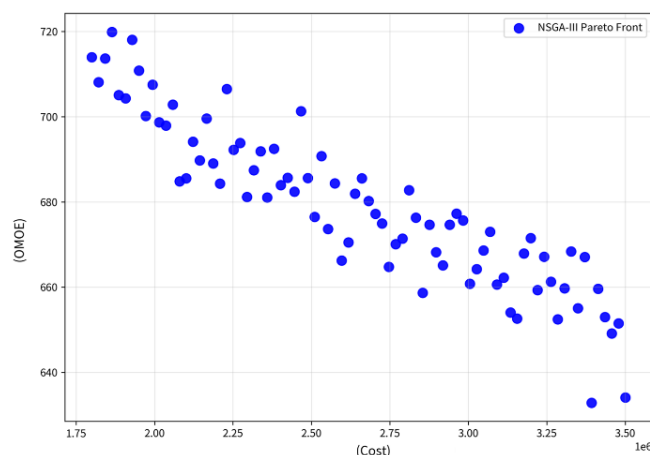
شکل ۴. (Parallel Coordinates Plot)

Parameter	Value Used	Explanation and Justification
Crossover Probability	0.9	Standard value commonly used in evolutionary algorithms.
Mutation Probability	0.1	Standard value commonly used in evolutionary algorithms.
Seed	42	Ensures reproducibility of the results
Reference point generation method	Das-Dennis	The most effective method for achieving uniform distribution of reference points in NSGA-III.

جدول ۷. نمایش جواب هر یک از توابع هدف

Objective	Direction	Best Value Found
OMOE	Max	701
COST	Min	2,104,000
REL	Max	0.9926
RISK	Min	58

یکی از ویژگی‌های مهم مسائل چندهدفه، وجود تضاد و تعارض میان اهداف است. برای بررسی این موضوع، جبهه پارتو حاصل از الگوریتم NSGA-III در فضاهای دوبعدی و سه‌بعدی مورد تحلیل قرار گرفت.



شکل ۲. جبهه پارتو الگوریتم NSGA-III در فضای دوبعدی هزینه-اثربخشی (Cost-OMOE)

همانگونه که در جدول ۹ نمایش داده شده در تمامی معیارها به جز معیار زمان حل روش NSGAIII برتر بوده است. عملکرد الگوریتم به صورت جدول ۱۰ نمایش داده شده است.

جدول ۱۰. مقایسه کمی عملکرد الگوریتم NSGA-III نسبت به روش‌های MOEA/D و Epsilon Constraint بر اساس شاخص‌های ارزیابی

Performance Status	Improvement over Epsilon Constraint	Improvement over MOEA/D	NSGA-III	Criterion
Better than both methods	35.20%	7.75%	0.918	(Hypervolume)
Better than both methods	40.88%	17.35%	0.081	(Spacing)
Better than both methods	411.76%	22.54%	87	Number of Pareto Solutions
Better than both methods	72.73%	31.25%	0.033	Inverted Generational Distance (IGD)
Worse than MOEA/D, better than Epsilon Constraint	44.12% Faster	31.47% Worse	51.8	Execution Time (seconds)

۵-۱. تحلیل حساسیت مدل مورد بررسی

در جهت تحلیل حساسیت مدل پیشنهادی تأثیر تغییرات $\pm 50\%$ در پارامترهای اصلی را بر روی معیارهای خروجی مورد بررسی قرار گرفت و با توجه به جدول ۱۱ موارد زیر قابل بررسی است.

جدول ۱۱. بررسی تغییرات هر تابع هدف نسبت به افزایش و کاهش ۵۰ درصدی پارامترها

Parameter	Change	Max OMOE	Min COST	Min RISK	Min COST (K)
BASE	Base	701 ^۱	2104	58	-
BUDGET	-50%	701 ^۱	-	58	2104
BUDGET	+50%	-	-	-	-
TIME_MAX	-50%	-	-	-	-
TIME_MAX	+50%	-	-	-	-
TRL_MIN_SUM	-50%	-	-	-	-
TRL_MIN_SUM	+50%	-	-	-	-
R_MIN	-50%	701	-	68	2028
R_MIN	+50%	-	-	-	-

علاوه بر این، شکل ۴ نمایش همزمان چهار هدف را ارائه می‌دهد که خطوط متقاطع بین محورها، شدت تعارض میان اهداف را به خوبی نشان می‌دهد. همبستگی مثبت قوی بین OMOE و Reliability (خطوط تقریباً موازی) و همبستگی منفی (تعارض) بین Reliability و Cost به وضوح در این شکل مشخص است. با توجه به رویکرد حل مساله در این پژوهش روش حل انتخابی با دو روش دیگر یعنی روش حل دقیق اپسیلون محدود و روش MOEA/D^۱ نیز حل شد که نتایج در جدول ۸ مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته است.

جدول ۸. بررسی عملکرد الگوریتم NSGA-III و MOEA/D و Epsilon Constraint

Method	OMOE (Max)	Cost (Min)	Reliability	Risk (Min)
NSGA-III	701	2,104,000	0.9926	58
MOEA/D	698	2,098,000	0.9923	59
Epsilon Constraint	699	2,095,000	0.9917	60

همچنین در خصوص معیارهای موثر در حل روشهای چند هدفه در جدول ۹ مقایسه انجام شده است.

جدول ۹. جدول مقایسه سه روش NSGA-III، MOEA/D، Epsilon Constraint

Indicator	NSGA-III	MOEA/D	Epsilon Constraint	Best Performance
(Hypervolume)	0.918	0.852	0.679	NSGA-III
(Spacing)	0.081	0.098	0.137	NSGA-III
Number of Pareto Solutions	87	71	17	NSGA-III
Inverted Generational Distance (IGD)	0.033	0.048	0.121	NSGA-III
Execution Time (seconds)	51.8	39.4	92.7	MOEA/D

^۱ Multi-objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition

۱. حساسیت تابع اثربخشی: این تابع هدف بیشترین حساسیت به پارامتر بودجه و حداکثر زمان دارد. کاهش بودجه (مانند ۵۰٪-) معمولاً منجر به کاهش شدید بیشترین میزان شاخص اثربخشی تجهیز می‌شود، زیرا انتخاب تکنولوژی‌های با عملکرد بالا که گران یا زمان‌بر هستند را غیرممکن می‌کند.

۲. حساسیت تابع حداقل هزینه: این معیار بیشترین حساسیت را به حداقل قابلیت اطمینان نشان می‌دهد. افزایش حداقل قابلیت اطمینان باعث می‌شود که حتی ارزان‌ترین جواب نیز برای برآورده کردن قید قابلیت اطمینان، مجبور به استفاده از افزونگی بیشتری شده و هزینه کمینه را افزایش دهد.

۳. حساسیت تابع ریسک بلوغ فناوری و ساخت: این معیار مستقیماً تحت تأثیر حداقل شاخص بلوغ فناوری و بودجه قرار دارد. کاهش بودجه باعث افزایش حداقل ریسک می‌شود. بدین دلیل که هزینه کمتری برای خرید تکنولوژی‌های بالغ با TRL/MRL بالا وجود دارد، در حالی که افزایش حداقل شاخص بلوغ ریسک را به صورت اجباری کاهش می‌دهد.

با توجه به تحلیل حساسیت صورت گرفته و معقول بودن نسبت های محاسبه شده می‌توان کارایی مدل را تصدیق کرد.

۶. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

این پژوهش با موفقیت نشان داد که ادغام اصول DFX با الگوریتم NSGA-III می‌تواند ابزاری قدرتمند برای بهینه‌سازی طراحی مفهومی سیستم‌های پیچیده دریایی باشد. چارچوب پیشنهادی نه تنها جبهه پارتوی متنوعی ارائه می‌دهد، بلکه بینش‌های عملی ارزشمندی برای مدیران صنعت کشتی‌سازی فراهم می‌کند. همچنین نتایج حاصل از این مدلسازی و بهینه‌سازی چندهدفه، فراتر از یک جواب ریاضی، ابزاری استراتژیک برای مدیران ارشد و تصمیم‌گیرندگان در صنعت کشتی‌سازی و سایر صنایع سیستم‌های پیچیده فراهم می‌آورد. این بینش‌ها به مدیران کمک می‌کند تا تصمیمات آگاهانه‌تر و هدفمندتری در مراحل حیاتی طراحی اتخاذ نمایند این موارد می‌تواند به صورت ادامه مورد بررسی قرار گیرد.

۱- مدیریت ریسک در مراحل اولیه طراحی: مدل ارائه شده به مدیران این امکان را می‌دهد که پیامدهای مالی و عملیاتی ناشی از

انتخاب‌های طراحی را در مرحله مفهومی شناسایی و ارزیابی کنند. از آنجایی که ۷۰ تا ۸۰ درصد هزینه‌های چرخه عمر یک شناور در این مرحله تعیین می‌شود، استفاده از جبهه پارتو به مدیران کمک می‌کند تا موازنه دقیق میان اهداف متضاد نظیر "کاهش هزینه" و "افزایش قابلیت اطمینان عملیاتی" را پیش از تخصیص منابع عظیم انجام دهند.

۲- تصمیم‌گیری استراتژیک بر اساس جبهه پارتو: به جای اتکا به یک جواب تک‌هدفه، جبهه پارتو، طیف وسیعی از گزینه‌های بهینه (Non-Dominated) را در اختیار مدیران قرار می‌دهد. ۳- بهره‌گیری از رویکردهای طراحی برای تعالی: این چارچوب، رویکردهای کیفی مدیریتی (مانند طراحی برای قابلیت اطمینان و طراحی برای هزینه را به سنج‌های کمی قابل اندازه‌گیری و قابل ادغام در مدل ریاضی تبدیل می‌کند.

۴- ارائه توجیهی عملی و فنی: این رویکرد با گنجاندن شاخص بلوغ فناوری و ساخت در اهداف بهینه‌سازی، مدیران ابزاری کارآمد برای ارزیابی ریسک به‌کارگیری فناوری‌های جدید در مقابل هزینه‌های اولیه و ریسک‌های عملیاتی بعدی خواهند داشت. پژوهش حاضر مسیرهای متعددی را در جهت توسعه و تعمیق مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده در فاز طراحی مفهومی نمایان می‌سازد. در ادامه پیشنهاد تحقیقات آتی ارائه شده است.

۱. ادغام عدم قطعیت و مدل‌های تصادفی: پیشنهاد می‌شود از رویکردهای بهینه‌سازی تصادفی^۱ یا بهینه‌سازی قوی^۲ برای بررسی عدم قطعیت‌های موجود در برآوردهای هزینه، شاخص‌های حوزه بلوغ فناوری و ساخت استفاده شود.

۲. پیشنهاد می‌شود مدل مورد بررسی از مرحله طراحی مفهومی فراتر رفته و چرخه حیات پروژه‌ها را مورد بررسی قرار دهد.

۳. بهره‌گیری از سایر رویکردهای تصمیم‌گیری همچون تاپسیس و تحلیل سلسله مراتبی با توجه به پیچیدگی مدل‌های این حوزه می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان نتایج ملموسی ارائه دهد.

^۲ Robust Optimization

^۱ Stochastic Optimization

9. Mutar, E.K., 2024. Determining the optimal design for complex systems using a reliability signature. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 46(1), pp.2999-3011. <https://doi.org/10.3233/JIFS-234456>

10. Hatfield, D.L. and Honecker, S.L., 2025, January. Lessons Learned in an Aerospace Design for Reliability Program. In *2025 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, pp. 1-6. IEEE. <https://doi.org/10.1109/RAMS48127.2025.10935225>

11. Olechowski, A.L., Eppinger, S.D., Joglekar, N. and Tomaschek, K., 2020. Technology readiness levels: Shortcomings and improvement opportunities. *Systems Engineering*, 23(4), pp.395-408. <https://doi.org/10.1002/sys.21533>

12. Malone, P., Smoker, R., Apgar, H. and Wolfarth, L., 2011, March. The application of TRL metrics to existing cost prediction models. In *2011 Aerospace Conference*. pp. 1-12. IEEE. <https://doi.org/10.1109/AERO.2011.5747301>

13. Owlia, M.S., Shakouhi, F., Yazdi, M.H. and Fallahnezhad, M., 2014. Using design for 6σ to optimize the mixing parameters of lightweight concrete block. *Sharif Journal of Industrial Engineering (SJIE)*, pp. 123–131. Available at: https://sjie.journals.sharif.edu/article_5396.html. [In Persian]

14. Karami, F. and Dariane, A.B., 2022. A review and evaluation of multi and many-objective optimization: Methods and algorithms. *Global Journal of Ecology*, 7(2), pp.104-119. <https://doi.org/10.17352/gje.000070>

15. Cuate, O. and Schütze, O., 2020. Pareto explorer for finding the knee for many objective optimization problems. *Mathematics*, 8(10), p.1651. <https://doi.org/10.3390/math8101651>

16. Yari Qoli, H. and Kazemi, A., 2015. Presenting a multi-objective model for selecting suppliers while considering minimum travel distance, discounts, and payment delays. *Sharif Journal of Industrial Engineering (SJIE)*, pp. 47–65. Available at: https://sjie.journals.sharif.edu/article_5559.html [In Persian]

17. Batista, L.S., Campelo, F., Guimarães, F.G. and Ramírez, J.A., 2011, June. A comparison of

۴. با توجه به اثرگذاری یکسری از شاخص‌ها بر یکدیگر به نظر می‌رسد بهره‌گیری از روش‌های تکاملی دینامیکی می‌تواند نتایج را به واقعیت نزدیک سازد.

۷. منابع

1. Becker, J.M.J. and Wits, W.W., 2013, March. A template for design for eXcellence (DfX) methods. In *Smart Product Engineering*, pp. 33-42. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30817-8_4

2. Xiaochuan, C., Jianguo, Y., Beizhi, L. and Xin-An, F., 2004, June. Methodology and technology of design for cost (DFC). In *Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation*, Vol. 3, pp. 2834-2840. IEEE. <https://doi.org/10.1109/wcica.2004.1342117>

3. Moroson, B., 2022. Design for excellence (DFX). NeuronicWorks Inc. <https://neuronicworks.com/blog/dfx/>

4. Smith, C.O., 1976. Introduction to reliability in design. McGraw-Hill. New York

5. Dhiman, J.S., 2025. Design for excellence: A review and practical guide. *IJLRP-International Journal of Leading Research Publication*, 6(3). <https://doi.org/10.5281/zenodo.15026292>

6. Vasilkov, Y., Sovetov, V., Ignatiev, S. and Timoshenko, A., 2019. Concept of Modeling and Optimization of Reliability of Complex System by Minimum Risk Criterion. In *2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, pp.1-5. IEEE. <https://doi.org/10.1109/fareastcon.2019.8934368>

7. Barker, T., Parnell, G.S., Pohl, E., Specking, E., Goerger, S.R. and Buchanan, R.K., 2022. Impact of reliability in conceptual design—An illustrative trade-off analysis. *Systems*, 10(6), p.227. <https://doi.org/10.3390/systems10060227>

8. Catelani, M., Ciani, L. and Patrizi, G., 2022, October. A first proposal of a data-driven reliability life cycle for complex systems. In *2022 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*, pp. 1-6. IEEE. <https://doi.org/10.1109/isse54508.2022.10005326>

dominance criteria in many-objective optimization problems. In *2011 IEEE Congress of evolutionary computation (CEC)*.pp 2359-2366. IEEE. <https://doi.org/10.1109/cec.2011.5949880>

18.Copado-Méndez, P.J., Guillén-Gosálbez, G. and Jiménez, L., 2012. Rigorous computational methods for dimensionality reduction in multi-objective optimization. In *Computer Aided Chemical Engineering*. Vol. 30, pp. 1292-1296. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59520-1.50117-2>

19.Antonio, L.M., Berenguer, J.A.M. and Coello, C.A.C., 2018. Evolutionary many-objective optimization based on linear assignment problem transformations. *Soft Computing*, 22(16), pp.5491-5512. <https://doi.org/10.1007/s00500-018-3164-3>

20.Liu, Z., Han, F., Ling, Q., Han, H. and Jiang, J., 2023. A many-objective optimization evolutionary algorithm based on hyper-dominance degree. *Swarm and Evolutionary Computation*, 83, p.101411. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2023.101411>

21.Li, L., Chai, Z., Li, Y., Cheng, Y. and Nie, Y., 2024. Many-objective multi-tasking optimization using adaptive differential evolutionary and reference-point based nondominated sorting. *Expert Systems with Applications*, 248, p.123336. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.123336>

22.Mane, S.U. and Rao, M.N., 2021. A non-dominated sorting based evolutionary algorithm for many-objective optimization problems. *Sci. Iran*, 28, pp.3293-3314. <https://doi.org/10.24200/sci.2018.20617>

23.Kalita, K., Ramesh, J.V.N., Čep, R., Jangir, P., Pandya, S.B., Ghadai, R.K. and Abualigah, L., 2024. Many-objective whale optimization algorithm for engineering design and large-scale many-objective optimization problems. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 17(1), p.171. <https://doi.org/10.1007/s44196-024-00562-0>