

ارزیابی و مقایسه الگوریتم‌های فراابتکاری چندهدفه برای حل مسئله بهینه‌سازی طراحی محصولات (مورد مطالعه: طراحی بهینه تجهیزات نظامی)

دکتر فرهاد هادی‌نژاد^۱، علی رمزی^۲، مصطفی خواجه^۳

چکیده

در دنیای پرتنش و پرآشوب امروزی، وجود نیروی نظامی قوی و کارآمد از سرمایه‌های راهبردی هر ملت محسوب می‌شود. در این میان، طراحی و به‌روزرسانی تجهیزات نظامی و افزایش قابلیت اطمینان و ماندگاری آنها اهمیت ویژه‌ای دارد. مدل ریاضی بهینه‌سازی تجهیزات نظامی در مرحله طراحی، از یک سو به دلیل پیچیدگی و حجم بالای محاسبات در گروه مسائل Np-hard قرار داشته و برای حل نیازمند روش‌های فراابتکاری است و از سوی دیگر در گروه مسائل چندهدفه قرار داشته، در نتیجه مستلزم بهره‌گیری از روش‌های چندهدفه است. اما توسعه روزافزون و تنوع زیاد روش‌های فراابتکاری چندهدفه، انتخاب الگوریتم مناسب را در حل مدل مذکور با چالش مواجه کرده است. لذا تحقیق حاضر تلاش دارد ضمن مرور الگوریتم‌های مدرن و پرکاربرد، با کمک نمونه مطالعاتی روشی مناسب برای حل مسئله بهینه‌سازی تجهیزات نظامی ارائه دهد. بنابراین ضرورت مدل‌سازی ریاضی در مسئله بهینه‌سازی طراحی تجهیزات نظامی و بررسی و انتخاب روش حل مناسب، انگیزه و هدف اصلی این تحقیق را شکل می‌دهد. تحقیق حاضر از منظر هدف در گروه تحقیقات کاربردی و از منظر روش در گروه تحقیقات آزمایشی قرار دارد. در این پژوهش چهار الگوریتم: MOPSO، NSGA-II، PESA-II و MALO بررسی شد و با کمک شش شاخص مختلف به تحلیل و ارزیابی نتایج پرداخته شده است. ضمن آنکه برای وزن‌دهی شاخص‌ها از رویکرد ترکیبی فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و آنتروپی (AHP-Entropy) و برای ارزیابی الگوریتم‌ها از روش پرامیتی (PROMETHEE) استفاده شده است. نتایج حاصل ضمن تأکید بر اهمیت بالای شاخص‌های «زمان اجرا» و «تعداد پاسخ‌های پارتو»، بر اولویت الگوریتم «MOPSO» در حل مسئله تحقیق تأکید دارد.

واژگان کلیدی: بهینه‌سازی، روش‌های فراابتکاری، طراحی تجهیزات نظامی، قابلیت اطمینان.

۱. دکتری مدیریت تحقیق در عملیات، دانشگاه علامه طباطبائی، مدرس دانشگاه امام علی^(ع)، (نویسنده مسئول)

Farhad_hdng@yahoo.com ✉

۲. عضو هیئت علمی گروه علوم کامپیوتر، دانشگاه قم

۳. عضو هیئت علمی گروه مدیریت صنعتی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قم

مقدمه

به طور کلی قابلیت اطمینان، احتمال آن است که یک وسیله اهداف کارکردی خود را در دوره مطلوبی از زمان، به درستی و تحت شرایط عملیاتی مشخص انجام دهد (امیری، ۱۳۹۳). در علم مهندسی قابلیت اطمینان، مؤلفه‌ای کمی مختلفی به عنوان معیارهای نشانگر وضعیت سیستم تعریف می‌شوند. در سیستم‌های تعمیرپذیر که اجزا قابلیت تعمیرپذیری دارند، مؤلفه‌های دیگری مانند دسترس‌پذیری و متوسط زمان ماندگاری سیستم، جایگزین شاخص قابلیت اطمینان می‌شود. بهینه‌سازی طراحی بر مبنای قابلیت اطمینان، یکی از مراحل اصلی در طراحی و تولید سیستم‌های نوین محسوب می‌شود و اهمیت آن در تجهیزات نظامی، به دلیل تأثیر مستقیمی که بر نتایج جنگ‌ها و سرنوشت ملت‌ها دارد، از اهمیت بیشتری برخوردار است. سازمان‌های نظامی و صنعتی پیوسته در پی افزایش سطح قابلیت اطمینان و دسترس‌پذیری تجهیزات خود هستند (رمضانی و معینی، ۱۳۹۵).

استفاده از اجزای مازاد یکی از رویکردهای معمول در بهینه‌سازی قابلیت اطمینان است که به مسئله تخصیص افزونگی^۱ شهرت دارد. استفاده از افزونگی به این معنی است که در مرحله طراحی سیستم برای هر یک از زیرسیستم‌ها یا اجزای سیستم چند جزء کمکی در نظر گرفته شود تا در صورت خرابی زیرسیستم مزبور، اجزای کمکی یا به عبارت دیگر اجزای مازاد مانع از کارافتادگی کل سیستم شود. لذا هدف از مسئله بهینه‌سازی، پیدا کردن تعداد بهینه قطعات مازادی است که باید جهت ارضای اهداف مهندس قابلیت اطمینان در سیستم مورد استفاده قرار گیرند، اما معمولاً بهبود در قابلیت اطمینان منجر به تغییر در مؤلفه‌هایی مانند هزینه، حجم و وزن سیستم می‌شود که این مفاهیم نیز در طراحی تجهیزات نظامی برای جنگ‌های مدرن حیاتی است و در نتیجه لزوم برقراری تعادل میان منابع ذکر شده با کمک مدل‌های ریاضی ضروری خواهد بود.

به طور کلی در بهینه‌سازی یک پدیده همواره دو گام اساسی وجود دارد: ۱- مدل‌سازی؛ ۲- حل مدل جهت دستیابی به جواب مسئله بهینه‌سازی؛ بدون انجام هر یک از این دو گام، مقوله بهینه‌سازی ناقص انجام شده است (آذر، ۱۳۹۳). بنابراین ضرورت مدل‌سازی ریاضی در مسئله

بهینه‌سازی طراحی تجهیزات نظامی از یک سو و بررسی و انتخاب روش حل مناسب از سوی دیگر، انگیزه اصلی تحقیق حاضر را شکل می‌دهد.

بیان مسئله

در دنیای پیچیده و پر آشوب امروزی، وجود نیروی نظامی قوی و کارآمد، در کنار تجهیزات به روز با پایایی و قابلیت اطمینان بالا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اما معمولاً بهبود در قابلیت اطمینان منجر به تغییر در متغیرهایی مانند هزینه، حجم و وزن سیستم می‌شود و در نتیجه لزوم برقراری تعادل میان منابع ذکر شده با کمک مدل‌های ریاضی ضروری خواهد بود.

مدل ریاضی بهینه‌سازی تجهیزات نظامی در مرحله طراحی، از یک سو به دلیل پیچیدگی و حجم بالای محاسبات در گروه مسائل Np-hard قرار دارد و برای حل نیازمند روش‌های فرا ابتکاری است و از سوی دیگر در گروه مسائل چندهدفه قرار داشته، در نتیجه مستلزم بهره‌گیری از روش‌های چندهدفه می‌باشد. اما توسعه روزافزون و تنوع زیاد روش‌های فرا ابتکاری چندهدفه، انتخاب الگوریتم مناسب را در حل مدل مذکور با چالش مواجه کرده است. این موضوع مسئله و دغدغه اصلی تحقیق حاضر بوده است. ضمن آنکه الگوریتم‌های فراابتکاری روش‌های تقریبی هستند که جواب‌های متنوعی ارائه می‌دهند و ممکن است روش‌های مختلف برای یک مسئله خاص پاسخ‌های متفاوتی ارائه دهند که در نتیجه شاخص‌های مقایسه و روش‌های ارزیابی آنها نیز چالشی جدی خواهد بود.

اهداف و سؤالات تحقیق

تحقیق حاضر تلاش دارد ضمن بررسی و مرور الگوریتم‌های فرا ابتکاری مدرن و پرکاربرد، مناسب‌ترین روش را برای حل مسئله تخصیص افزونگی تجهیزات نظامی با کمک نمونه مطالعاتی شناسایی و تحلیل نماید. لذا هدف اصلی تحقیق ارائه رهیافت مناسب برای طراحی بهینه محصولات نظامی است. در این مسیر پس از مدل‌سازی مسئله با اهداف، محدودیت‌ها و متغیرهای کاربردی و عملیاتی، از چهار روش: الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب-۱۲ (NSGA-II)، الگوریتم چندهدفه بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۲ (MOPSO)، الگوریتم انتخاب

1. Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-I
2. Multi-Objective Particle Swarm Optimization

مبتنی بر الگوی پارتو-۱۲ (PESA-II)، الگوریتم چندهدفه بهینه‌سازی شیرمورچه^۲ (MALO) برای حل مدل نمونه مطالعاتی استفاده نموده و نتایج حاصل را با کمک شش شاخص: تعداد جواب‌های پارتو^۳ (NPS)، شاخص کیفیت^۴ (QM)، شاخص متوسط فاصله از نقطه ایده‌آل^۵ (MID)، شاخص فاصله^۶ (SM)، شاخص گوناگونی^۷ (DM) و شاخص زمان اجرای الگوریتم^۸ (Time) مقایسه و تحلیل خواهیم نمود. در این مسیر از دو تکنیک آنتروپی^۹ و تحلیل سلسله مراتبی^{۱۰} برای وزن‌دهی شاخص‌ها و از تکنیک پرامیتی^{۱۱} برای ارزیابی و رتبه‌بندی الگوریتم‌ها استفاده خواهد شد.

به طور کلی سؤالات تحقیق را می‌توان به شکل زیر ارائه نمود:

سؤال اصلی

رهیافت مناسب برای حل مسئله تخصیص افزونگی در تجهیزات نظامی کدام است؟

سؤالات فرعی

- مدل مناسب برای بهینه‌سازی طراحی تجهیزات نظامی کدام است؟
- مناسب‌ترین روش‌های فرا ابتکاری برای حل مسئله چندهدفه تخصیص افزونگی کدامند؟
- شاخص‌های ارزیابی روش‌های فرا ابتکاری چندهدفه کدامند؟
- روش‌های مناسب برای وزن‌دهی و رتبه‌بندی روش‌های فرا ابتکاری چندهدفه کدامند؟

اهمیت و ضرورت تحقیق

قابلیت اطمینان بالا نگرانی استفاده از محصول را در طول زمان کاهش می‌دهد و به این علت همواره دغدغه صنایع حساس، پیچیده و مهمی مانند صنایع نظامی بوده است (کرباسیان و

1. Pareto Envelope-based Selection Algorithm-II
2. Multi-Objective Ant Lion Optimizer
3. Number of Pareto Solution (NPS)
4. Quality Metric (QM)
5. Mean Ideal Distance (MID)
6. Spacing Metric (SM)
7. Diversification Metric (DM)
8. CPU Time
9. Entropy
10. Analytic Hierarchy Process (AHP)
11. Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation (PROMETHEE)

قوچانی، ۱۳۹۰). از جمله عواملی که به دشمن متصور، جرأت اقدام به تجاوز به حریم کشور را می‌دهند، احتمال پایین بودن سطح قابلیت اطمینان سامانه‌های دفاعی و قابلیت آمادگی عملیاتی تسلیحات نظامی است (پیروی، ۲۰۰۲).

در نسل جدید نبردها و جنگ‌های شهری، کاربرد تجهیزات و تسلیحات با قابلیت اطمینان بالا ضمن در نظر گرفتن متغیرهایی مانند هزینه، حجم و وزن کل از عوامل اصلی موفقیت و پیروزی محسوب می‌شود (امیری و همکاران، ۱۳۹۵). در سالیان اخیر کاربست مدل‌سازی ریاضی برای بهینه‌سازی این متغیرها و بهره‌گیری از روش‌های نوین فرا ابتکاری برای حل مدل‌های مذکور، مورد توجه دانشمندان و محققان علوم دفاعی و نظامی قرار گرفته است.

با توجه به مؤلفه‌ها و متغیرهای تأثیرگذار در طراحی بهینه تجهیزات نظامی (متناسب با جنگ‌های امروزی و نبردهای نوین)، مدل ریاضی مسئله در تحقیق حاضر شامل اهدافی مانند بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان و ماندگاری سیستم و کمینه‌سازی هزینه کل سیستم خواهد بود و محدودیت‌هایی مانند حجم کل و وزن کل نیز در مدل مسئله لحاظ خواهد شد. بنابراین مسئله تحقیق در گروه مدل‌های چندهدفه قرار داشته و ناگزیر به استفاده از روش‌های حل چندهدفه خواهیم بود. از سوی دیگر مسئله تخصیص افزونگی از گروه مسائل با کلاس Np -hard (چرن^۱، ۱۹۹۲) است و حل بهینه آن در زمان محاسباتی معقول با روش‌های سنتی و ابزارهای بهینه‌یابی متداول امکان‌پذیر نخواهد بود و برای حل این گونه مسائل نیازمند استفاده از روش‌های تقریبی و فراابتکاری هستیم. بنابراین در حل مسئله تخصیص افزونگی تجهیزات نظامی، بهره‌گیری از الگوریتم‌های فراابتکاری چندهدفه، رهیافتی منطقی و علمی محسوب شده که در تحقیق حاضر نیز به بررسی و ارزیابی این روش‌ها پرداخته خواهد شد.

اما با گسترش استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری (به دلیل پیشرفت‌های مربوط به سخت‌افزار و نرم‌افزار رایانه‌ها)، کاربرد این الگوریتم‌ها جهت حل مسائل بهینه‌سازی تخصیص افزونگی نسبت به سایر روش‌ها بیشتر شده است (کو و ون^۲، ۲۰۰۷). ولی از آنجا که این روش‌ها، الگوریتم‌های تخمینی برای حل مسائل بهینه‌سازی محسوب شده و ماهیتی تصادفی دارند، حل یک مسئله با روش‌های مختلف ممکن است به پاسخ‌های مختلف منجر شود. لذا

ارزیابی مطلوبیت و کیفیت جواب‌های ارائه‌شده از طریق الگوریتم‌های مختلف، گامی مؤثر در استفاده بهینه از روش‌های مذکور محسوب می‌شود.

پیشینه تحقیق

در حوزه بهینه‌سازی طراحی تجهیزات نظامی، پیشینه مطالعاتی قابل توجهی وجود ندارد، اما در سال‌های اخیر در زمینه کاربردهای خاص پس از مرحله طراحی مطالعات محدودی انجام پذیرفته که از جمله آنها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

علوی و همکاران در دو پژوهش مجزا به بررسی استانداردهای قابلیت اطمینان قطعات الکترونیکی در حوزه نظامی و ارزیابی قابلیت اطمینان مبدل باک توان بالا برای کاربرد در صنایع نظامی دریایی پرداخته‌اند (علوی و همکاران، ۱۳۹۵ الف و ب). در پژوهشی دیگر حسینی و همکاران (۱۳۹۲) بر اهمیت استفاده از فیلترهای هارمونیک در سیستم‌های قدرت حساس مانند سیستم قدرت کشتی‌های نظامی که دارای محدودیت در ابعاد و وزن و نیازمند قابلیت اطمینان بالا هستند، تأکید نموده‌اند. همچنین حکمت (۱۳۸۲) در تحقیقی با عنوان ویژگی‌ها و الزامات طراحی و اجرای سیستم‌های مکانیزه نگهداری و تعمیرات بر اهمیت نت مبتنی بر قابلیت اطمینان در آماده به کاری تجهیزات نظامی و غیرنظامی تأکید کرده است. پیروی (۲۰۰۲) نیز به بررسی عوامل کاهش قابلیت اطمینان و آمادگی عملیاتی تسلیحات پرداخته است. همچنین امیری و همکارانش (۱۳۹۵) در پژوهشی با عنوان بهینه‌سازی قابلیت اطمینان تجهیزات و تسلیحات نظامی با رویکرد ترکیبی شبیه‌سازی و الگوریتم‌های فرا ابتکاری به مدل‌سازی مسئله مذکور پرداخته و با کمک روش NSGA-II مدل نهایی را حل نمودند.

از سوی دیگر قرار گرفتن مسئله تخصیص افزونگی در گروه مسائل Np-hard، ضرورت استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری را انکارناپذیر جلوه داده و محققان و پژوهشگران صنایع مختلف، طیف گسترده‌ای از این روش‌ها را در تحلیل مسئله چندهدفه تخصیص افزونگی در کاربردهای مختلف به کار گرفته‌اند. جدول ۱ به برخی از این تحقیقات به تفکیک الگوریتم‌های مورد استفاده اشاره نموده است.

جدول ۱: کاربرد الگوریتم‌های فرا ابتکاری در حل مسئله تخصیص افزونگی

محققان	الگوریتم استفاده شده
امیری ^۱ و خواجه ^۲ (۲۰۱۶)، ابوئی ^۳ و همکاران (۲۰۱۵)، کشاورز قرابی ^۴ و همکاران (۲۰۱۵)، صفری ^۵ (۲۰۱۲)، چمبری ^۶ و همکاران (۲۰۱۲)، امیری و همکاران (۱۳۹۵)، سیاه مرزگویی (۱۳۹۵)، ارادنه (۱۳۹۴)، صادقی (۱۳۹۲)، شقاقی (۱۳۹۲).	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II)
ژانگ ^۷ و چن ^۸ (۲۰۱۶)، دولتشاهی زند ^۹ و خلیلی دامغانی ^{۱۰} (۲۰۱۵)، ژانگ ^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۴)، خلیلی دامغانی و همکاران (۲۰۱۳)، ابراهیم پور و همکاران (۲۰۱۲)، چمبری و همکاران (۲۰۱۲).	Multi Objective Particle Swarm (MOPSO) Optimization
موسوی و همکاران (۲۰۱۵)، سیاه مرزگویی (۱۳۹۵)، شقاقی (۱۳۹۲).	Non-dominated Ranked Genetic Algorithm (NRGA)
زارع طلب ^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۵)، ابراهیمی ارjestan ^{۱۳} و پسندیده ^{۱۴} (۲۰۱۳)، صادقی (۱۳۹۲).	SA (Simulated Annealing)
امیری و همکاران (۲۰۱۴)، عزیزمحمدی ^{۱۵} و همکاران (۲۰۱۳).	Imperialist Competitive (ICA) Algorithm
خلیلی دامغانی و امیری (۲۰۱۲)	Epsilon-constraint & DEA
جیان‌شنگ ^{۱۶} و همکاران (۲۰۱۴)	Multi Objective Artificial Bee (MOABC) Colony
عظیمی و هادی‌نژاد (۱۳۹۵)	PROMETHEE&Simulation

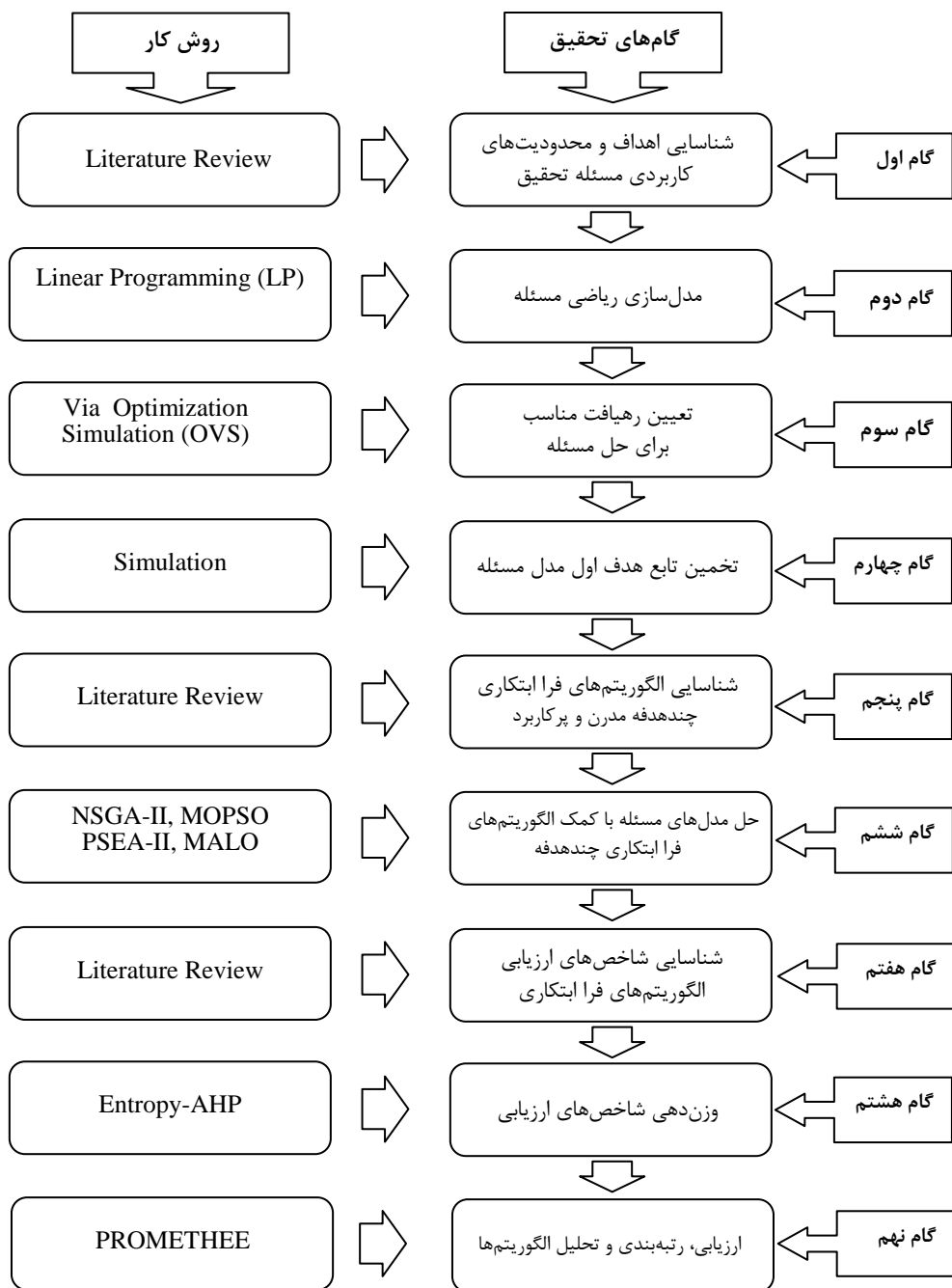
مرور مطالعات پیشین نشان‌دهنده مقبولیت و کاربرد گسترده دو الگوریتم NSGA-II و MOPSO در مسئله چندهدفه تخصیص افزونگی می‌باشد که در نتیجه در تحقیق حاضر نیز

1. Amiri
2. Khajeh
3. Abouei Ardakan
4. Keshavarz Ghorabae
5. Safari
6. Chambari
7. Zhang
8. Chen
9. Dolatshahi-Zand
10. Khalili-Damghan
11. Zhang
12. Zaretalab
13. Ebrahimi Arjestan
14. Pasandideh
15. Azizmohammadi
16. Jiansheng

مورد تحلیل قرار خواهند گرفت. علاوه بر این روش‌ها، با هدف اطمینان از پایایی و اعتبارسنجی نتایج، از دو الگوریتم جدید که اخیراً مطرح گردیده با نام‌های PESAs-II (۲۰۰۱) و MALO (۲۰۱۶) نیز استفاده خواهد شد و نتایج حاصل از حل مسئله نمونه مطالعاتی در هر چهار الگوریتم مذکور مورد تحلیل و ارزیابی قرار خواهد گرفت.

روش و گام‌های تحقیق

تحقیق حاضر با توجه به اهداف و گزاره‌های اشاره شده در گروه تحقیقات کاربردی قرار داشته و از منظر روش نیز به دلیل سنجش روابط بین متغیرها در گروه تحقیقات آزمایشی قرار دارد. شکل ۱ الگوی مفهومی و گام‌های نه‌گانه تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل ۱: الگوی مفهومی تحقیق

مدل ریاضی مسئله تحقیق

در مطالعات گذشته با هدف ساده‌سازی و امکان‌پذیری محاسبات ریاضی، مفروضاتی مانند عدم امکان تعمیر قطعات، نرخ خرابی ثابت و ساده (مانند تابع توزیع نمایی) و یا تک‌هدفه بودن، به مدل مسئله تخصیص افزونگی تحمیل می‌گردید. اما در تحقیق حاضر ضمن حذف مفروضات پیش‌گفته به دلیل امکان تعمیر قطعات مختلف تجهیزات نظامی، نرخ خرابی و تعمیر متفاوت اجزا و همچنین وجود اهداف مختلف، سعی در طراحی مدلی کاربردی متناسب با شرایط محیط عملیاتی و جنگ‌های نوین شده است. با توجه به اهمیت مفاهیم «قابلیت اطمینان» سیستم و «هزینه» سیستم در طراحی تجهیزات نظامی، این دو مفهوم در تابع هدف مدل ریاضی مورد تأکید قرار گرفته و محدودیت‌های محیط عملیاتی در جنگ‌های شهری و نبردهای نوین مانند حجم و وزن کل سیستم به عنوان محدودیت‌های مدل خطی مورد توجه قرار گرفته است. در نتیجه مدل ریاضی پیشنهادی بدین شکل خواهد بود:

$$\text{Max } Z = \text{Min}_i (\text{MTTFF}_i); \quad i=1, 2, \dots, k \quad (1)$$

$$\text{Min } C_s = \sum_{i=1}^k C_i X_i; \quad (2)$$

St:

$$\sum_{i=1}^k W_i X_i \leq W_s; \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^k V_i X_i \leq V_s; \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^k X_i \leq N_s; \quad (5)$$

$$L_i \leq X_i \leq M_i \quad i=1, 2, \dots, k \quad (6)$$

$$X_i : \text{integer.} \quad i=1, 2, \dots, k \quad (7)$$

علائم و نمادهای مربوط به این مدل عبارتند از:

- X_i : تعداد قطعه (مؤلفه) در زیرسیستم i ام (متغیر تصمیم)

- i : اندیس نشانگر زیرسیستم‌ها

- k : تعداد زیرسیستم‌ها
- C_i : هزینه هر واحد قطعه در زیرسیستم i ام
- W_i : وزن هر واحد قطعه در زیرسیستم i ام
- V_i : حجم هر واحد قطعه در زیرسیستم i ام
- L_i : حداقل تعداد قطعه در زیرسیستم i ام
- M_i : حداکثر تعداد قطعه در زیرسیستم i ام
- C_s : هزینه کل سیستم
- W_s : حداکثر وزن کل سیستم
- V_s : حداکثر حجم کل سیستم
- N_s : حداکثر تعداد قطعات کل سیستم
- $MTTFF_i$: میانگین زمان تا اولین خرابی زیرسیستم i ام

در مدل مذکور تابع هدف اول (رابطه شماره ۱) به منظور پیشینه‌سازی متوسط زمان ماندگاری سیستم مورد توجه قرار گرفته است. طبیعی است در سیستم‌های سری- موازی، زمانی که هر یک از زیرسیستم‌ها خراب شود، کل سیستم از کار می‌افتد و بدین ترتیب می‌توان برای ماکزیمم کردن ماندگاری کل سیستم، کمترین ماندگاری زیرسیستم‌ها را ماکزیمم کرد. همچنین از آنجا که سیستم تعمیرپذیر است، در تابع هدف به جای قابلیت اطمینان از مفهوم ماندگاری استفاده شده است. تابع هدف دوم (رابطه شماره ۲) نیز کمینه کردن هزینه کل سیستم را لحاظ کرده است. روابط شماره ۳ و ۴ محدودیت‌های مربوط به حد بالای حجم و وزن سیستم را تعیین کرده که در طراحی تسلیحات نظامی اهمیت ویژه‌ای دارد. بدیهی است سلاح و تجهیزات با حجم و وزن کمتر تأثیر فراوانی در بهبود اثربخشی و کارایی آنها در جنگ‌های امروزی خواهد داشت. رابطه شماره ۵ محدودیت احتمالی مربوط به حداکثر تعداد مجاز اجزا در کل سیستم و رابطه شماره ۶ بازه مجاز تعداد قطعات در هر زیرسیستم را مورد توجه قرار داده است. در نهایت رابطه شماره ۷ بر این نکته تأکید دارد که متغیر تصمیم (تعداد اجزا) تنها می‌تواند اعداد صحیح را بپذیرد.

تشریح مدل و روش حل با کمک نمونه مطالعاتی

برای تشریح مدل ریاضی و فرآیند حل و در نهایت ارزیابی و تحلیل روش‌های حل، از داده‌های یک سیستم ارتباطی نظامی به عنوان نمونه مطالعاتی استفاده می‌گردد. اهمیت ارتباطات ایمن

و با قابلیت اطمینان بالا در جنگ‌های نوین از یک سو و تأثیرگذاری متغیرهای حجم و وزن در تحرک نیروهای درگیر از سوی دیگر از مهم‌ترین دلایل انتخاب نمونه مطالعاتی بوده است. سیستم‌های ارتباطی به دلیل تأثیر مستقیمی که در سرنوشت جنگ‌ها دارند و هرگونه وقفه و عدم کارکرد مطلوب آنها می‌تواند تأثیر فراوان و غیرقابل جبرانی بر نتایج نبردها و سرنوشت ملت‌ها داشته باشد، از اهمیت ویژه‌ای در صنایع نظامی برخوردارند. سیستم ارتباطی مورد مطالعه شامل چهار زیرسیستم بوده که با تخصیص قطعات مازاد به هر زیرسیستم و تبدیل سیستم به یک مدار سری- موازی سعی در بهبود قابلیت اطمینان و متوسط زمان ماندگاری آن با توجه به محدودیت‌های مختلف خواهیم نمود. هدف پیدا کردن تعداد بهینه قطعات مازاد، ضمن برآورده کردن اهداف (ماندگاری و هزینه) و محدودیت‌های (حجم و وزن کل، تعداد مجاز قطعات) مدل مسئله تحقیق می‌باشد. جدول ۲ ویژگی‌های قطعات هر زیرسیستم را نشان می‌دهد.

جدول ۲: داده‌های مسئله در نمونه مطالعاتی

زیرسیستم (i)	حداقل تعداد قطعه مورد نیاز (L_i)	حداکثر قطعات مجاز (M_i)	نرخ خرابی	نرخ تعمیر	هزینه قطعه (C_i)	وزن قطعه (W_i)	حجم قطعه (V_i)
۱	۱	۶	Erlang (10,2)	Normal(100,15)	۱۳۵	۲۵۰	۳۲۰
۲	۲	۸	Weibull(10,2)	Normal(200,10)	۱۱۰	۱۵۰	۱۸۰
۳	۲	۱۰	Erlang (5,1)	Uniform (150,200)	۹۰	۱۰۰	۱۲۰
۴	۱	۸	Weibull(5,1)	Uniform (100,150)	۱۴۵	۳۵۰	۴۲۰
وزن کل مجاز	۵۲۰۰	حجم کل مجاز	۶۴۰۰	تعداد کل قطعات مجاز	۲۲		

در ادامه به تشریح گام‌های نه‌گانه، تعریف مسئله تحقیق، روش حل و ارزیابی پاسخ‌ها پرداخته می‌شود.

گام اول: شناسایی اهداف و محدودیت‌های کاربردی مسئله تحقیق

همان‌طور که در بخش قبلی اشاره گردید؛ مفروضات غیرکاربردی که در مطالعات مشابه و به منظور ساده‌سازی مدل‌های ریاضی به مسئله تخصیص افزونگی تحمیل می‌گردید، در این

تحقیق حذف گردیده و تلاش گردیده اهداف و محدودیت‌های مسئله به شرایط واقعی و محیط عملیاتی نزدیک شوند. برای این منظور امکان تعمیرپذیری قطعات و لحاظ نمودن نرخ‌های خرابی و تعمیر مختلف (متناسب با نوع قطعه) در مدل مسئله اعمال گردیده و دو مفهوم «قابلیت اطمینان یا ماندگاری سیستم» و «هزینه کل» به دلیل اهمیت فراوانی که در طراحی تجهیزات نظامی دارند، به عنوان تابع هدف و محدودیت‌هایی مانند «هزینه کل» و «حجم کل» به دلیل اهمیتی که در جنگ‌های نوین دارند، به عنوان محدودیت‌های مسئله مورد تأکید قرار خواهند گرفت.

گام دوم: مدل‌سازی ریاضی مسئله

با توجه به توابع هدف و محدودیت‌های مورد نظر و همچنین داده‌های مسئله نمونه مطالعاتی (جدول ۲)، مدل ریاضی مسئله تحقیق بدین شکل خواهد بود:

$$\text{Max } Z = \text{Min} (MTTFF_1, MTTFF_2, MTTFF_3, MTTFF_4) \quad (۸)$$

$$\text{Min } C_s = C_1X_1 + C_2X_2 + C_3X_3 + C_4X_4 \quad (۹)$$

St:

$$W_1X_1 + W_2X_2 + W_3X_3 + W_4X_4 \leq 5200; \quad (۱۰)$$

$$V_1X_1 + V_2X_2 + V_3X_3 + V_4X_4 \leq 6400; \quad (۱۱)$$

$$X_1 + X_2 + X_3 + X_4 \leq 22; \quad (۱۲)$$

$$1 \leq X_1 \leq 6, 2 \leq X_2 \leq 8, 2 \leq X_3 \leq 10, 1 \leq X_4 \leq 8; \quad (۱۳)$$

$$X_1, X_2, X_3, X_4 : \text{integer}. \quad (۱۴)$$

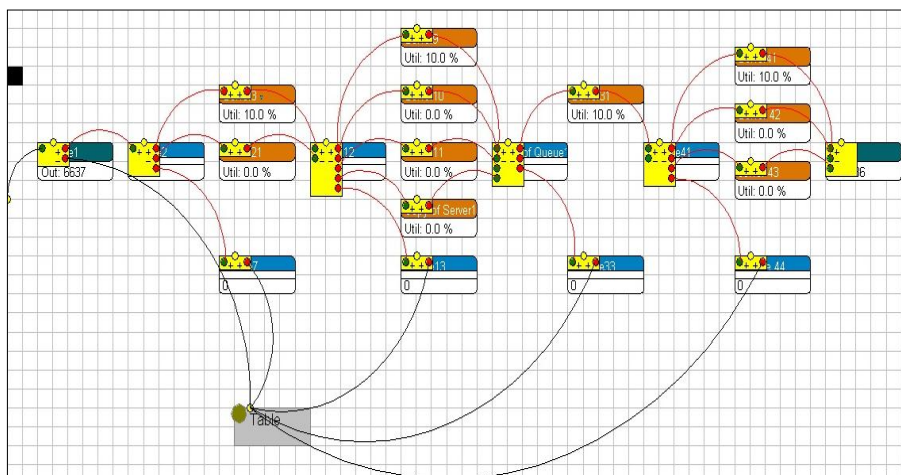
گام سوم: تعیین رهیافت مناسب برای حل مسئله

به دلیل ناتوانی روش‌های ریاضی برای برآورد تابع هدف اول (متوسط زمان ماندگاری سیستم)، در این تحقیق ناگزیر به استفاده از روش شبیه‌سازی خواهیم بود. همچنین به دلیل Np-hard بودن مسئله تخصیص افزونگی (چرن، ۱۹۹۲)، ناچار به استفاده از روش‌های فرا ابتکاری برای حل مدل خواهیم بود. در نتیجه رهیافت پیشنهادی برای حل مدل تحقیق، رویکرد ترکیبی

بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی^۱ (OVS) خواهد بود. به طور کلی ضعف تکنیک‌های تحقیق در عملیات در مدل‌سازی مسائل تصادفی و نرخ‌های خرابی و تعمیر متنوع از یک طرف و ضعف تکنیک شبیه‌سازی در بهینه‌سازی مسائل از طرف دیگر، موجب ارائه رویکرد ترکیبی بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی گردیده که در تحقیق حاضر نیز از آن استفاده شد تا علاوه بر هم‌افزایی ناشی از مزایای هر یک، نقاط ضعف آنها نیز مرتفع گردد (هادی‌نژاد، ۱۳۹۶).

گام چهارم: تخمین تابع هدف اول مدل مسئله

همان طور که در بخش قبل عنوان گردید، برای برآورد تابع هدف اول و اعمال نرخ خرابی و تعمیر دلخواه در مسئله تحقیق، نیازمند استفاده از تکنیک شبیه‌سازی خواهیم بود. برای این منظور در تحقیق حاضر از نرم‌افزار شبیه‌سازی ED^۲، به عنوان یکی از پرکاربردترین نرم‌افزارهای به‌کاررفته در زمینه مدل‌سازی و شبیه‌سازی استفاده می‌گردد. پس از طراحی مسئله در محیط نرم‌افزار و اجرای مکرر مدل و ثبت زمان توقف سیستم به دلیل خرابی، به راحتی می‌توان متوسط زمان ماندگاری سیستم (تابع هدف اول) را محاسبه نمود. شکل ۲ طراحی کل سیستم نمونه مطالعاتی را در محیط نرم‌افزار نشان می‌دهد.



شکل ۲: شبیه‌سازی نمونه مطالعاتی با چهار زیرسیستم و نرخ خرابی و تعمیر متفاوت

1. Optimization Via Simulation (OVS)
2. Enterprise Dynamic Simulation Software

گام پنجم: شناسایی الگوریتم‌های فرا ابتکاری چندهدفه مناسب

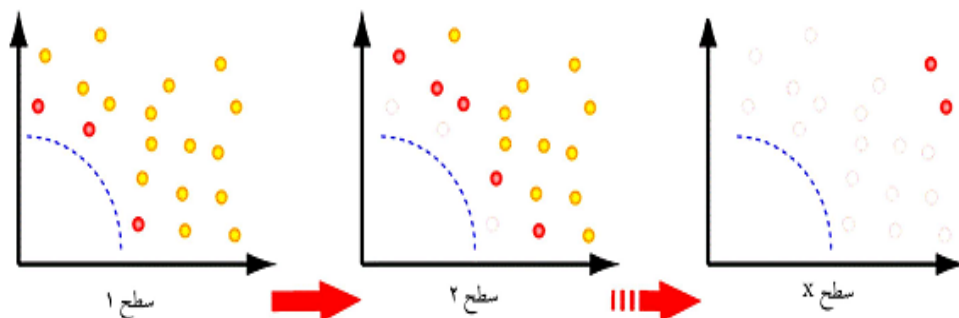
با مرور مطالعات مشابه، دو روش پرکاربرد الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب-۲ (NSGA-II)، الگوریتم چندهدفه بهینه‌سازی ازدحام ذرات (MOPSO) که بیشترین فراوانی را در تحقیقات پیشین داشته به همراه دو روش نوین الگوریتم انتخاب مبتنی بر الگوی پارتو-۲ (PESA-II) و الگوریتم چندهدفه بهینه‌سازی شیرمورچه (MALO) که اخیراً مطرح گردیده به‌عنوان روش‌های حل مسئله تحقیق انتخاب گردید که در ادامه مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

گام ششم: حل مدل‌های مسئله با الگوریتم‌های فرا ابتکاری چندهدفه

در این مرحله باید مدل ریاضی ارائه شده با کمک چهار روش انتخابی حل گردند. در ادامه ضمن مرور مختصر روش‌های مذکور، نتایج حل مدل به تفکیک الگوریتم‌ها ارائه خواهد شد.

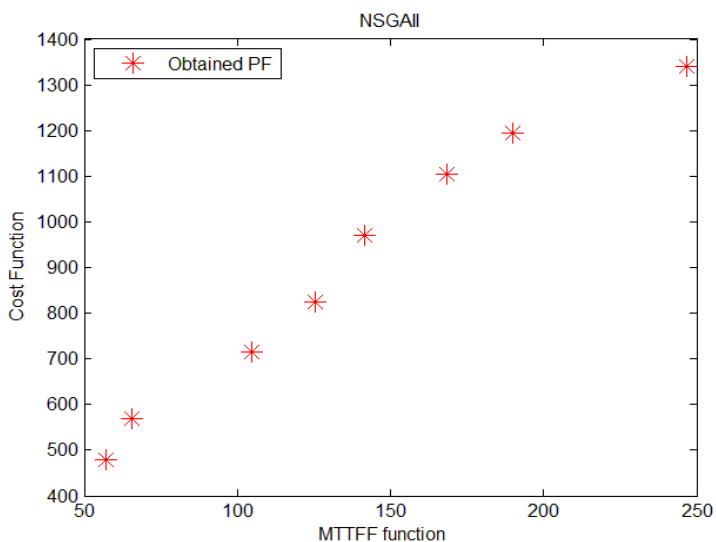
حل مدل مسئله با روش الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب-۲ (NSGA-II)

روش الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب ۲ محبوب‌ترین و پرکاربردترین روش ژنتیک برای بهینه‌سازی مسائل چندهدفه است (بشیری و جلیلی، ۱۳۹۳). این الگوریتم از اصول انتخاب طبیعی داروین برای یافتن فرمول یا جواب بهینه به منظور پیش‌بینی یا تطبیق الگو استفاده می‌کند (البرزی، ۱۳۸۸: ۱۳-۱۴). مزیت اصلی این الگوریتم دارا بودن یک رویکرد روشن برای فراهم آوردن چگالی در بین جواب‌های بهینه پارتو می‌باشد (دب، ۱۳۸۷). تفاوت این الگوریتم با الگوریتم ژنتیک تک هدفه، در روش مرتب‌سازی پاسخ‌ها است. در واقع در حالت چندهدفه، پاسخ‌ها ابتدا بر اساس غلبه رتبه‌بندی شده و سپس بر اساس فاصله ازدحامی^۱ مرتب می‌شوند. شکل ۳ نحوه مرتب‌سازی جواب‌های نامغلوب یک جمعیت را نشان می‌دهد.



شکل ۳: مرتب‌سازی جواب‌های نامغلوب یک جمعیت در الگوریتم NSGA-II

نتایج حل مدل مسئله با کمک الگوریتم NSGA-II در شکل ۴ و جدول ۳ نشان داده شده است.



شکل ۴: مجموعه پارتو حاصل از الگوریتم NSGA-II در حل مسئله تحقیق

جدول ۳: نتایج حاصل از اجرای الگوریتم NSGA-II در حل مسئله تحقیق

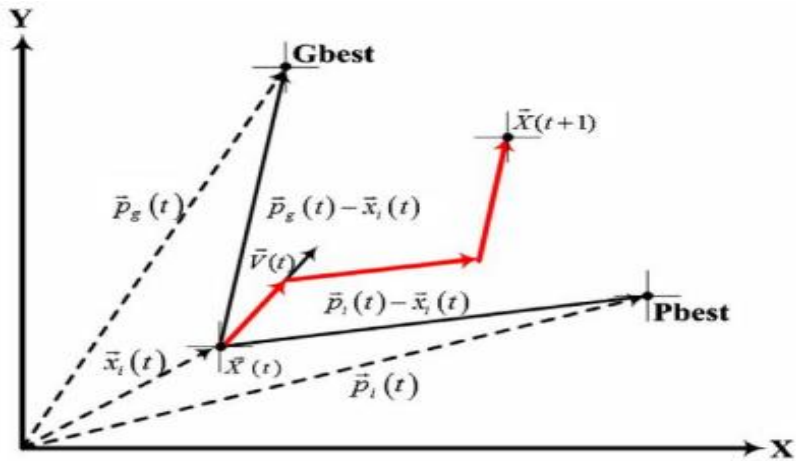
X_1	X_2	X_3	X_4	MTFF	Cost
1	1	1	1	57.01507	480
1	1	2	1	65.70778	570
1	1	2	2	104.6966	715
1	2	2	2	125.302	825
1	2	2	3	141.5521	970
2	2	2	3	168.2386	1105
2	2	3	3	189.7397	1195
2	2	3	4	246.7744	1340

نتایج نشان‌دهنده هشت نقطه پارتو غیر مغلوب برای توابع هدف ماندگاری و هزینه کل سیستم می‌باشد که جزئیات ساختار زیرسیستم‌ها و تعداد مؤلفه‌ها در جدول فوق نشان داده شده است.

حل مدل مسئله با روش الگوریتم چندهدفه بهینه‌سازی ازدحام ذرات (MOPSO)

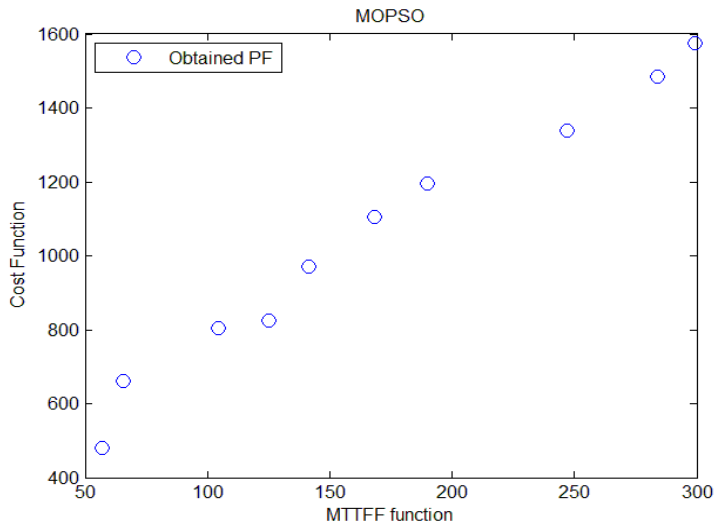
الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات به وسیله کوئلو و همکاران^۱ (۲۰۰۴) معرفی گردید. در الگوریتم MOPSO مفهومی به نام آرشیو یا مخزن^۲ نسبت به الگوریتم PSO مزید گردیده که به تالار مشاهیر^۳ نیز معروف است. انتخاب بهترین جواب کلی و بهترین خاطره شخصی برای هر ذره گام مهم و اساسی در این الگوریتم محسوب می‌شود. هنگامی که ذرات می‌خواهند حرکتی انجام دهند، یک عضو از مخزن را به عنوان لیدر یا رهبر انتخاب می‌کنند. این لیدر حتماً باید عضو مخزن و نامغلوب باشد. شکل ۵ نحوه عملکرد الگوریتم را نشان می‌دهد.

-
1. Coello et al
 2. Repository
 3. Hall of fame



شکل ۵: نحوه عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

نتایج حل مدل مسئله با کمک الگوریتم MOPSO در شکل ۶ و جدول ۴ نشان داده شده است.



شکل ۶: مجموعه پارتو حاصل از اجرای الگوریتم MOPSO در حل مسئله تحقیق

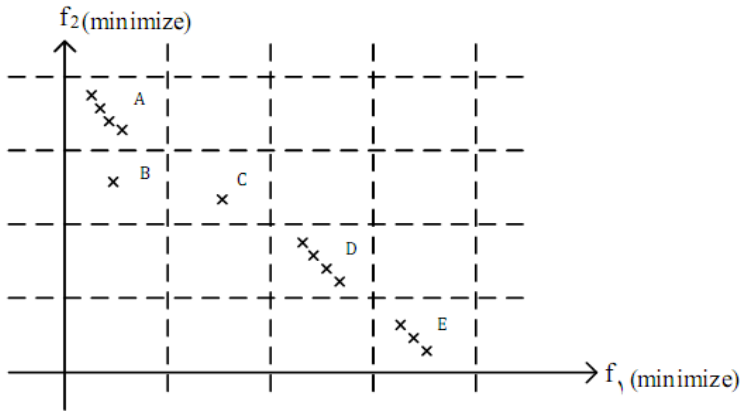
جدول ۴: نتایج حاصل از اجرای الگوریتم MOPSO در حل مسئله تحقیق

X_1	X_2	X_3	X_4	MTTFF	Cost
1	1	1	1	57.01507	480
1	1	3	1	65.70778	660
1	1	3	2	104.6966	805
1	2	2	2	125.302	825
1	2	2	3	141.5521	970
2	2	2	3	168.2386	1105
2	2	3	3	189.7397	1195
2	2	3	4	246.7744	1340
2	2	3	5	283.8185	1485
2	2	4	5	299.3986	1575

نتایج این الگوریتم ۱۰ نقطه پارتو غیرمغلوب را نشان می‌دهد که معماری آن در جدول فوق نشان داده شده است.

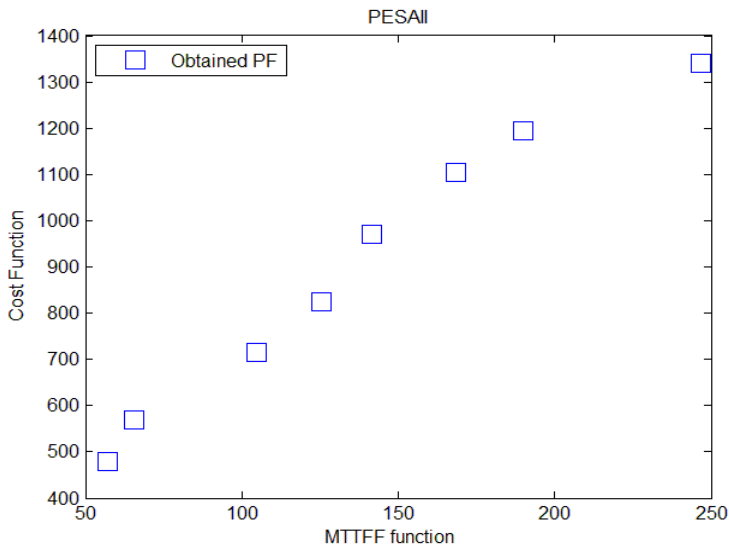
حل مدل مسئله با روش الگوریتم انتخاب مبتنی بر الگوی پارتو-۲ (PESA-II)

الگوریتم انتخاب بر مبنای الگوی پارتو-۲ نسخه تجدید نظر شده از روش PESA است که به وسیله کورن^۱ و همکاران (۲۰۰۱) معرفی گردید. در این تکنیک، به جای اختصاص یک تناسب انتخابی به یک فرد، این تناسب به هایپرباکس‌هایی در فضای واقعی اختصاص داده می‌شود که در حال حاضر به وسیله حداقل یک فرد در فضای کنونی از مرز پارتو اشغال شده‌اند؛ بنابراین یک هایپرباکس انتخاب می‌شود و فردی که در نتیجه این کار انتخاب شده است، به صورت تصادفی از این هایپرباکس برگزیده خواهد شد. این روش انتخاب در مقایسه با روش‌های انتخابی فردمحور، به حصول اطمینان از یک پراکندگی خوب از توسعه در طول مرز پارتو حساس‌تر است. شکل ۷ مفهوم تقسیم‌بندی فضای پارتو را در فضای هدف دو تابع مینیمم سازی نشان می‌دهد.



شکل ۷: تقسیم‌بندی فضای پارتو در الگوریتم PESAI-II

نتایج حل مدل مسئله با کمک الگوریتم PESAI-II در شکل ۸ و جدول ۵ نشان داده شده است.



شکل ۸: مجموعه پارتو حاصل از اجرای الگوریتم PESAI-II در حل مسئله تحقیق

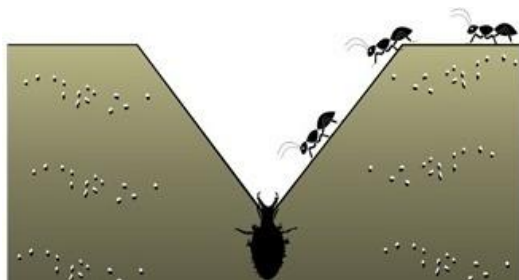
جدول ۵: نتایج حاصل از اجرای الگوریتم PESA-II در حل مسئله تحقیق

X_1	X_2	X_3	X_4	MTTFF	Cost
1	1	1	1	57.01507	480
1	1	2	1	65.70778	570
1	1	2	2	104.6966	715
1	2	2	2	125.302	825
1	2	2	3	141.5521	970
2	2	2	3	168.2386	1105
2	2	3	3	189.7397	1195
2	2	3	4	246.7744	1340

نتایج این الگوریتم نشان‌دهنده هشت نقطه پارتو غیرمغلوب برای توابع هدف ماندگاری و هزینه کل سیستم می‌باشد که جزئیات ساختار زیرسیستم‌ها و تعداد مؤلفه‌ها در جدول فوق نشان داده شده است.

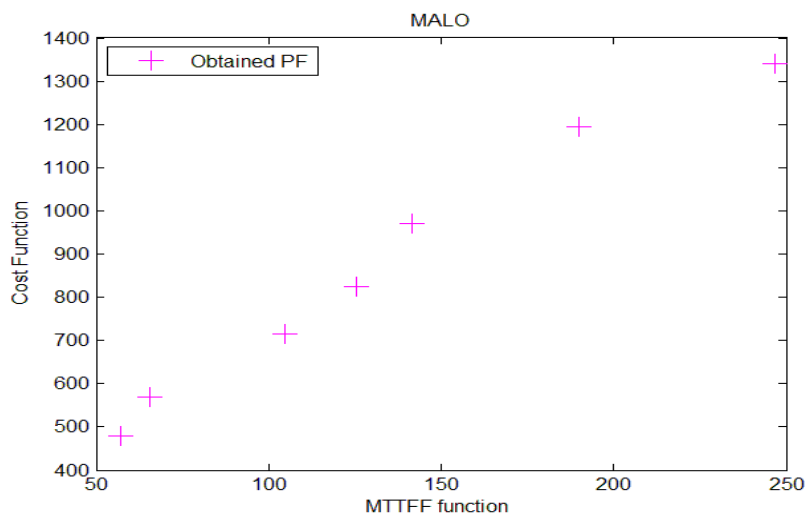
حل مدل مسئله با روش الگوریتم چندهدفه بهینه‌سازی شیرمورچه (MALO)

الگوریتم چندهدفه بهینه‌سازی شیرمورچه، الگوریتمی جدید و الهام گرفته از طبیعت است که برای اولین بار به وسیله میرجلیلی^۱ (۲۰۱۶) مطرح گردید. این الگوریتم نسخه چندهدفه روش بهینه‌سازی شیرمورچه (ALO) است که این روش تقلید از مکانیسم شکار شیرمورها در طبیعت است که بر اساس پنج مرحله اصلی شکار کردن: یعنی راه رفتن تصادفی مورچه‌ها، ساختن تله، به دام افتادن مورچه‌ها در تله، جذب طعمه و بازسازی تله پیاده‌سازی می‌شوند. در طی فرآیند شکار، شیرمورچه گودال مخروطی شکلی در شن و ماسه‌های نرم می‌سازد (مانند شکل ۹) و در پایین گودال صبورانه منتظر طعمه (مورچه‌ها و سایر حشرات) می‌ماند. در صورت لغزش طعمه به پایین گودال، به سرعت به وسیله شیرمورچه شکار می‌شود و اگر تلاش به فرار از تله کند، شیرمورچه با پرتاب شن و ماسه به سمت لبه گودال منجر به لغزش سطح و در نهایت پایین افتادن طعمه به پایین گودال و شکار آن می‌گردد.



شکل ۹: رفتار شکار شیرمورچه‌ها در الگوریتم MALO

نتایج حل مدل مسئله با کمک الگوریتم MALO در شکل ۱۰ و جدول ۶ نشان داده شده است.



شکل ۱۰: مجموعه پارتو حاصل از اجرای الگوریتم MALO در حل مسئله تحقیق

جدول ۶: نتایج حاصل از اجرای الگوریتم MALO در حل مسئله تحقیق

X_1	X_2	X_3	X_4	MTTF	Cost
1	1	1	1	57.01507	480
1	1	2	1	65.70778	570
1	1	2	2	104.6966	715
1	2	2	2	125.302	825
1	2	2	3	141.5521	970
2	2	3	3	189.7397	1195
2	2	3	4	246.7744	1340

نتایج این الگوریتم نشان‌دهنده ۷ نقطه پارتو غیرمغلوب می‌باشد که جزئیات ساختار زیرسیستم‌ها و تعداد مؤلفه‌ها در جدول فوق نشان داده شده است.

گام هفتم: شناسایی شاخص‌های ارزیابی الگوریتم‌های فرا ابتکاری

با توجه به اینکه روش‌های فرا ابتکاری، الگوریتم‌های تخمینی برای حل مسائل بهینه‌سازی محسوب شده و ماهیتی تصادفی دارند؛ حل یک مسئله از طریق روش‌های مختلف ممکن است به پاسخ‌های مختلف منجر شود، لذا ارزیابی الگوریتم‌ها و انتخاب الگوریتم مناسب با کمک شاخص‌های متنوع مورد توجه محققان علوم مختلف قرار گرفته است؛ اما همگرایی در پاسخ‌های پارتو و فراهم نمودن چگالی و تنوع در میان مجموعه پاسخ‌ها، دو هدف مجزا و تا حدودی متضاد در الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه محسوب می‌شوند، لذا معیار مطلقى که بتواند در مورد عملکرد الگوریتم‌ها تصمیم بگیرد، وجود ندارد. در نهایت پس از بررسی ادبیات موضوع، شش شاخص زیر به عنوان شاخص‌های ارزیابی عملکرد الگوریتم‌ها در این تحقیق شناسایی و معرفی شده‌اند.

- شاخص تعداد جواب‌های پارتو^۱ (NPS)

این شاخص نشانگر تعداد پاسخ‌های پارتو یافت شده از طریق الگوریتم می‌باشد و هر چه این تعداد بیشتر باشد، نشان‌دهنده کارایی بهتر الگوریتم مورد نظر است (اردانه، ۱۳۹۴).

- شاخص کیفیت^۱ (QM)

این شاخص نشان‌دهنده سهم الگوریتم در مجموعه پاسخ‌های پارتو حاصل از ترکیب پاسخ‌های پارتو ارائه شده از طریق کلیه الگوریتم‌های مورد مقایسه است (محمدی^۲ و همکاران، ۲۰۱۱). هر چه مقدار این شاخص بیشتر باشد، نشانه کارایی بهتر الگوریتم است.

- شاخص متوسط فاصله از نقطه ایده آل^۳ (MID)

این شاخص نشان‌دهنده میانگین فاصله نقاط پارتو از جواب ایده آل است. مقدار ایده آل برابر با بهترین مقدار ممکن برای هر یک از توابع هدف در تمامی الگوریتم‌های به کار رفته است (زایزاگ^۴ و جاسکیویگ^۵، ۱۹۹۸). کمتر بودن مقدار این شاخص به معنای بهتر بودن کارایی الگوریتم می‌باشد.

- شاخص فاصله^۶ (SM)

این شاخص نشان‌دهنده انحراف معیار فاصله پاسخ‌های نامغلوب می‌باشد. به عبارت دیگر میزان فاصله نسبی پاسخ‌های متوالی پارتو را محاسبه می‌نماید (چمبری و همکاران، ۲۰۱۲). هر چه مقدار این شاخص بیشتر باشد، نشان کارایی بهتر الگوریتم است.

- شاخص گوناگونی^۷ (DM)

این شاخص فاصله اقلیدسی بین جواب ابتدایی و انتهایی مجموعه پاسخ پارتو را نشان می‌دهد (زیتلر^۸ و سیله^۹، ۱۹۹۸). این شاخص طول قطر مکعب فضایی را که به وسیله مقادیر انتهایی اهداف برای مجموعه پاسخ‌های نامغلوب به کار می‌رود، اندازه می‌گیرد. هر چه مقدار این شاخص مقادیر بزرگ‌تری اختیار کند، الگوریتم مربوطه کارایی بالاتری خواهد داشت.

- شاخص زمان اجرای الگوریتم^{۱۰} (Time)

این شاخص بر زمان اجرای الگوریتم تأکید کرده و از مهمترین شاخص‌ها در مقایسه

1. Quality Metric (QM)
2. Mohammadi
3. Mean Ideal Distance (MID)
4. Czyzak
5. Jaskiewicz
6. Spacing Metric (SM)
7. Diversification Metric (DM)
8. Zitzler
9. Thiele
10. CPU Time

الگوریتم‌های مختلف است و هر چه مقدار آن کمتر باشد (در صورت برابر بودن سایر شاخص‌ها)، الگوریتم مورد نظر کارتر خواهد بود (اردانه، ۱۳۹۴).

پس از شناسایی شاخص‌ها، در ادامه می‌بایست مقادیر هر شاخص در الگوریتم‌ها محاسبه و ارائه گردد. جدول ۷ مقادیر مورد نظر را (ماتریس تصمیم نهایی) نشان می‌دهد.

جدول ۷: نتایج ارزیابی الگوریتم‌ها در شش شاخص شناسایی شده

		C ₁ NPS	C ₂ QM	C ₃ MID	C ₄ SM	C ₅ DM	C ₆ TIME
A ₁	MOPSO	10	0.8	0.750978	55.21009	4.626988	17.47344
A ₂	NSGAI	8	0.8	0.688733	35.47239	3.633442	20.15
A ₃	PESAI	8	0.8	0.688733	35.47239	3.633442	14.97344
A ₄	MALO	7	0.7	0.693362	43.70693	3.633442	20.79375

گام هشتم: وزن دهی شاخص‌های ارزیابی

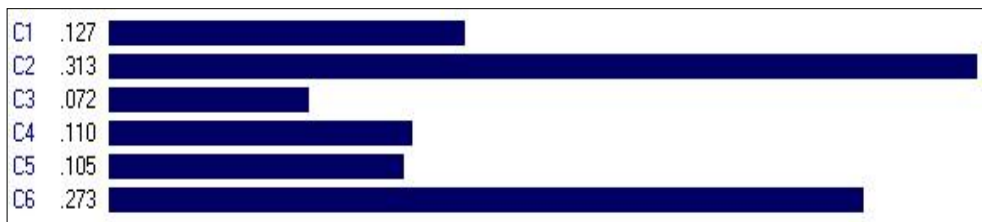
در تحقیق حاضر برای تعیین اوزان و میزان اهمیت شاخص‌ها از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره^۱ استفاده می‌گردد. این روش‌ها به سهولت کاربرد معروف هستند و رویه‌های ترکیبی آنها (چنانچه به درستی ترکیب شوند)، می‌توانند این نقطه قوت را حفظ کنند و منابع چندگانه ای از دانش و تجربه ایجاد نمایند (شیه^۲ و همکاران، ۲۰۰۷). تکنیک تحلیل سلسله مراتبی به دلیل سهولت کاربرد و دقت مناسب از مؤثرترین و پرکاربردترین فنون مطرح در تصمیم‌گیری است که به صورت نظری و تجربی در دامنه وسیعی از وضعیت‌های تصمیم‌گیری آزمایش شده است (ژو^۳ و همکاران، ۲۰۰۶). تکنیک آنتروپی شانون نیز یکی از معروف‌ترین روشهای محاسبه اوزان شاخص‌ها است (منگ^۴ و همکاران، ۲۰۱۰). در نتیجه در این پژوهش ضمن ترکیب تکنیک‌های آنتروپی و تحلیل سلسله مراتبی در مرحله وزن‌دهی تلاش می‌گردد ضمن هم‌افزایی، نقاط ضعف هر روش با کمک نقاط قوت روش دیگر پوشش داده شود. به طور کلی تکنیک آنتروپی از ماتریس تصمیم برای

1. MCDM
2. Shih
3. Zhou
4. Meng

وزن‌دهی به شاخص‌ها استفاده کرده و شاخصی که بیشترین پراکندگی را در گزینه‌ها ایجاد کند، دارای وزن بیشتری خواهد شد؛ اما تکنیک تحلیل سلسله‌مراتبی از قضاوت‌های ذهنی تصمیم‌گیرنده یا کارشناسان استفاده کرده و با مقایسه‌های زوجی پیاپی، وزن شاخص‌ها را احصا می‌کند. در این پژوهش برای بهره‌مندی از هر دو منبع اطلاعات، از هر دو تکنیک مذکور استفاده خواهد شد.

وزن‌دهی شاخص‌ها با کمک تکنیک تحلیل سلسله‌مراتبی^۱ (AHP)

برای تعیین اوزان شاخص‌ها با کمک تکنیک AHP، مقایسات زوجی به وسیله ده نفر از خبرگان دانشگاهی که با مفاهیم مربوطه آشنا بوده انجام و به وسیله نرم‌افزار Expert Choice تحلیل گردید. نتایج مقایسات با نرخ ناسازگاری قابل قبول ۰/۰۴ در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱: تعیین اوزان شاخص‌ها با کمک تکنیک تحلیل سلسله‌مراتبی

وزن‌دهی شاخص‌ها با کمک تکنیک آنترופی^۲

برای تعیین اوزان معیارها از طریق تکنیک آنترופی، از ماتریس تصمیم (جدول ۷) استفاده نموده و گام‌های تکنیک آنترופی را برابر الگوریتم مربوطه محاسبه می‌نماییم. جدول ۸ نتایج اوزان به دست آمده با این روش را نشان می‌دهد.

1. Analytic Hierarchy Process (AHP)

2. Entropy

جدول ۸: تعیین اوزان شاخص‌ها با کمک تکنیک آنتروپی

C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆
0.2011	0.0376	0.0162	0.4145	0.1393	0.1911

محاسبه اوزان نهایی شاخص‌ها

اوزان نهایی شاخص‌ها، با ترکیب وزنی نتایج به دست آمده از دو تکنیک تحلیل سلسله مراتبی و آنتروپی به دست می‌آید. جدول ۹ اوزان نهایی شاخص‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۹: اوزان نهایی شاخص‌ها

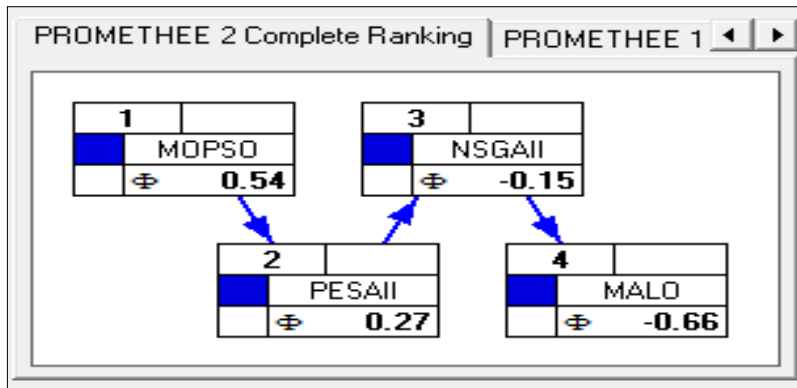
W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	W ₅	W ₆
0.2258	0.1036	0.0699	0.0098	0.1294	0.4615

نتیجه حاصله بر اهمیت شاخص‌های «زمان اجرای الگوریتم» (C₆) و «تعداد جواب‌های پارتو» (C₁) تأکید دارد.

گام نهم: ارزیابی، رتبه‌بندی و تحلیل الگوریتم‌ها

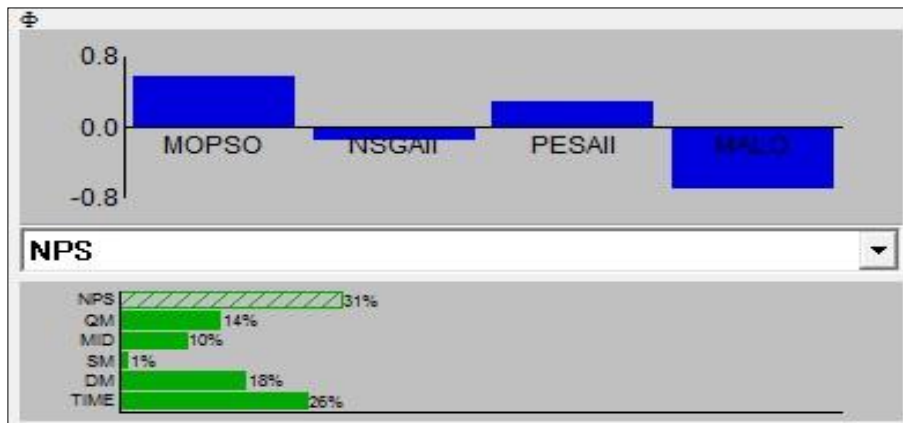
در این مرحله برای ارزیابی نهایی و رتبه‌بندی الگوریتم‌ها و تحلیل نتایج از تکنیک پرامیتی استفاده خواهیم نمود. تکنیک پرامیتی به دلیل سهولت استفاده و شهرت فراوان در گستره وسیعی از علوم مختلف مانند مدیریت مالی و بازرگانی، مدیریت انرژی، لجستیک و حمل و نقل، کشاورزی، آموزش و پرورش، پزشکی، ورزشی و ... مورد استفاده قرار گرفته است (بهزادیان^۱ و همکاران، ۲۰۱۰). مزیت اصلی این تکنیک، قابلیت استفاده در مسائلی است که مانند تحقیق حاضر شاخص‌های مسئله تصمیم با یکدیگر وابستگی دارند (امیری و هادی‌نژاد، ۱۳۹۴). ضمن آنکه وجود نرم‌افزار قوی Visual PROMETHEE با قابلیت‌های منحصربه‌فردی مانند GAIA، Walking weight و امکان تحلیل حساسیت از دیگر عوامل انتخاب این تکنیک در مسئله حاضر می‌باشد.

شکل ۱۲ نتایج مقایسه و رتبه‌بندی الگوریتم‌ها را در حل مسئله تحقیق با کمک تکنیک



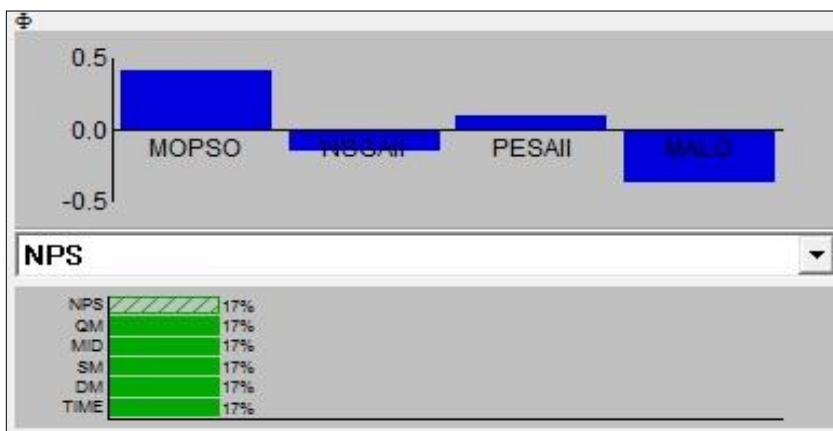
شکل ۱۲: مقایسه و رتبه‌بندی الگوریتم‌ها در حل مدل مسئله تحقیق

نتایج نشان‌دهنده برتری روش MOPSO در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها در حل مسئله تحقیق می‌باشد. در ادامه به تحلیل، اعتبار سنجی و آنالیز حساسیت الگوریتم‌ها پرداخته می‌شود. برای این منظور شکل ۱۳ مقادیر جریان خالص گزینه‌ها را با توجه به اوزان به‌دست‌آمده نشان می‌دهد. این مقادیر در فرآیند پرامیتی، عامل اصلی اولویت‌دهی گزینه‌ها محسوب می‌شوند.



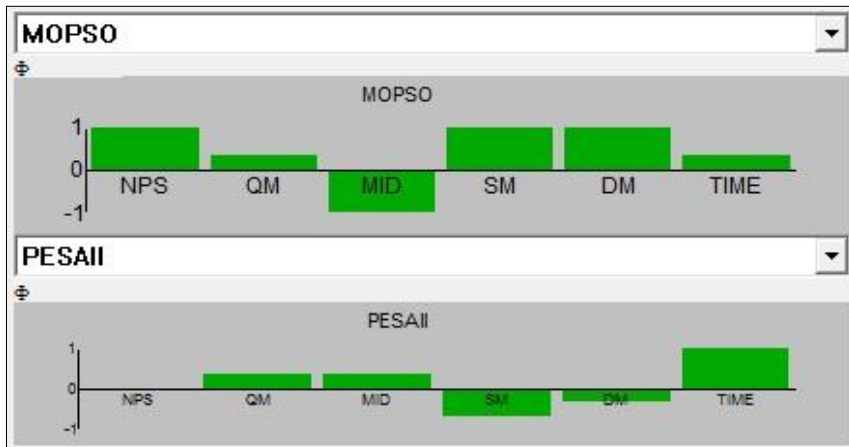
شکل ۱۳: مقایسه الگوریتم‌ها در اوزان به‌دست‌آمده

شکل ۱۴ نیز وضعیت گزینه‌ها را در صورت اوزان برابر شاخص‌ها نشان می‌دهد.



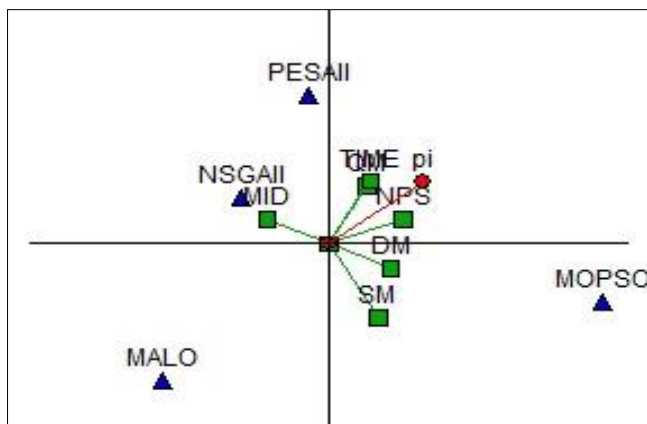
شکل ۱۴: مقایسه الگوریتم‌ها با اوزان برابر

بررسی دو شکل فوق نشان‌دهنده عدم تغییر در رتبه‌بندی الگوریتم‌ها در صورت اوزان مساوی شاخص‌ها است که این موضوع بر مطلوبیت مناسب و اولویت روش MOPSO در شرایط مختلف تأکید دارد. شکل ۱۵ وضعیت شاخص‌ها در دو الگوریتم برتر حل مدل نمونه مطالعاتی را نشان می‌دهد. مقایسه شاخص‌ها در این روش‌ها نشان‌دهنده علل ارجحیت و نقاط قوت روش انتخابی است. بر این اساس شاخص‌های NPS، SM و DM از علل اولویت روش MOPSO نسبت به روش NSGA-II محسوب می‌شوند.



شکل ۱۵: مقایسه شاخص‌ها در دو الگوریتم برتر حل مدل مسئله تحقیق

شکل ۱۶ نیز نشان‌دهنده موقعیت هندسی گزینه‌ها با توجه به شاخص‌ها و اوزان آن‌ها در حل مدل مسئله تحقیق می‌باشد. با بررسی مکان گرافیکی و فاصله شاخص‌ها نسبت به روش‌ها، می‌توان به نقاط ضعف و قوت هر روش و علل اولویت‌بندی نهایی به دست آمده پی برد. تمرکز شاخص‌ها در نزدیکی الگوریتم MOPSO بر ارجحیت این روش در حل مدل مسئله تحقیق تأکید دارد.



شکل ۱۶: موقعیت هندسی گزینه‌ها با توجه به شاخص‌ها (GAIA)

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

سازمان‌های نظامی و صنعتی پیوسته در پی افزایش سطح قابلیت اطمینان و دسترس‌پذیری تجهیزات خود هستند (رمضانی و معینی، ۱۳۹۵). از ویژگی‌های مهم و اثرگذار در نتیجه‌نبردهای امروزی و جنگ‌های شهری، وجود تجهیزات و تسلیحات نظامی با قابلیت اطمینان و پایایی بالا است که اگر مشخصه‌هایی مانند هزینه، حجم و وزن آنها نیز در حالت بهینه و پایدار قرار داشته باشد، بر اثربخشی و کارایی آن افزوده خواهد شد (امیری و همکاران، ۱۳۹۵). مسئله بهبود قابلیت اطمینان تجهیزات نظامی در مرحله طراحی، از گروه مسائل بهینه‌سازی تخصیص افزونگی است که در دسته مدل‌های سخت طبقه‌بندی شده و در نتیجه برای حل نیازمند روش‌های فراابتکاری می‌باشند؛ اما توسعه روزافزون روش‌های فرا ابتکاری از یک سو و ماهیت تصادفی این روش‌ها (که منجر به تولید جواب‌های متفاوت در یک مسئله خاص می‌شود) از سوی دیگر، لزوم تحلیل و ارزیابی این روش‌ها در حل مسائل بهینه‌سازی طراحی تجهیزات نظامی را مهم جلوه می‌دهد.

بنابراین تحقیق حاضر با هدف ارزیابی و تحلیل الگوریتم‌های فرا ابتکاری پرکاربرد و مدرن در مسئله بهینه‌سازی طراحی تجهیزات نظامی انجام پذیرفته و با استفاده از روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چندمعیاره سعی در معرفی روش مناسب برای تحلیل مسئله مذکور نموده است. برای این منظور در ابتدا مدل ریاضی یک سیستم ارتباطی نظامی به عنوان نمونه مطالعاتی (با اهداف و محدودیت‌های کاربردی و متناسب با شرایط عملیاتی) فرموله گردید و سپس با کمک تکنیک شبیه‌سازی تابع هدف آن برآورد گردید. در ادامه مدل مسئله با کمک چهار الگوریتم NSGA-II، MOPSO، PESA-II و MALO حل گردید و نتایج حاصل مورد تحلیل قرار گرفت.

برای تحلیل الگوریتم‌های حل با توجه به شش شاخص عملکردی موجود در ادبیات، از رویکرد ترکیبی فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و آنتروپی در مرحله وزن‌دهی و تکنیک پرامیتی در مرحله ارزیابی و رتبه‌بندی (با توجه به مزایای ذکر شده برای هر کدام از یک سو و هم‌افزایی ناشی از رویکردهای ترکیبی از سوی دیگر) استفاده گردید. بررسی نتایج ضمن تأکید بر اهمیت شاخص‌های «زمان اجرای الگوریتم» و «تعداد جواب‌های پارتو» بر اولویت روش الگوریتم چندهدفه بهینه‌سازی ازدحام ذرات (MOPSO) در حل مسئله تحقیق تأکید نموده است.

همچنین کاربردی‌ترین الگوریتم MOPSO در سایر مسائل گروه Np-hard نظامی، بررسی نتایج

سایر الگوریتم‌های فرا ابتکاری در تحلیل مدل مسئله تحقیق، توسعه شاخص‌های عملکردی الگوریتم‌ها و بهره‌گیری از منطق فازی در روش‌های ارزیابی الگوریتم‌ها می‌تواند نقشه راه مناسبی برای محققان آینده محسوب شود.

فهرست منابع

- آذر، عادل (۱۳۹۳) تحقیق در عملیات (۱)، تهران: انتشارات دانشگاه پیام نور.
- اردانه، علی (۱۳۹۴) بهینه‌سازی دسترس‌پذیری سیستم‌های سری- موازی با اجزای سه‌حالته تعمیرپذیر، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، مؤسسه آموزش عالی رجا، دانشکده فنی و مهندسی.
- امیری، مقصود (۱۳۹۳) قابلیت اطمینان، تهران: انتشارات آن.
- امیری، مقصود و عظیمی، پرهام و زندیه، مصطفی و هادی‌نژاد، فرهاد (۱۳۹۵) بهینه‌سازی قابلیت اطمینان تسلیحات نظامی با رویکرد ترکیبی شبیه‌سازی و الگوریتم‌های فرا ابتکاری، فصلنامه مدیریت نظامی، ۱۶(۴)، ۱۲۵-۱۶۴
- امیری، مقصود و هادی‌نژاد، فرهاد (۱۳۹۴) ارزیابی و تحلیل شاخص‌های بهره‌وری در صنایع تولیدی با استفاده از تکنیک پرامیتی، مدیریت بهره‌وری، شماره ۳۵، ۷-۳۸.
- البرزی، محمود (۱۳۸۸) الگوریتم ژنتیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران: مؤسسه انتشارات علمی.
- بشیری، مهدی و جلیلی، مجید (۱۳۹۳) الگوریتم ژنتیک در فضای تک و چندهدفه (مفاهیم و ابزارها)، تهران: انتشارات دانشگاه شاهد.
- پیروی، علی (۲۰۰۲) نقش قابلیت اطمینان در سیستم‌های دفاعی هوشمند و نحوه ارتقای قابلیت آمادگی عملیاتی تسلیحات نظامی، اولین همایش سیستم‌های دفاعی هوشمند، تهران.
- حسینی، سیدمحسن. خانزاده، محمدحسین و علی‌نژاد برمی، یوسف (۱۳۹۲) افزایش کیفیت توان و قابلیت اطمینان سیستم قدرت کشتی‌های نظامی با استفاده از فیلتر هیبرید بهینه‌سازی شده با الگوریتم ژنتیک، فصلنامه پدافند الکترونیکی و سایبری، ۱(۴)، ۹-۲۲.
- حکمت، کاظم (۱۳۸۲). ویژگی‌ها و الزامات طراحی و اجرای سیستم‌های مکانیزه نگهداری و تعمیرات. فصلنامه لجستیک، ۵(۱۸)، ۱-۱۴.
- دب، کالیموی (۱۳۸۷) الگوریتم‌های ژنتیک با رویکرد بهینه‌یابی چندهدفه، ترجمه جعفر رضایی و منصور داودی منفرد، تهران: انتشارات پلک.
- رمضانی، سعید و معینی، علیرضا (۱۳۹۵) تخمین عمر مفید باقیمانده تجهیزات دفاعی با استفاده از مدل مدیریت سلامت تجهیزات و پیش‌بینی عیوب (PHM)، (مطالعه موردی: سامانه راداری). فصلنامه مدیریت زنجیره تأمین، ۱۸(۵۱)، ۴-۱۴.

رضانی، سعید. طاهری، محسن. یوسفی، مصطفی و نوجوان، مجید (۱۳۹۰) طراحی مدلی برای سنجش آمادگی تجهیزات نظامی با رویکرد سلسله‌مراتبی، فصلنامه مدیریت زنجیره تأمین، ۱۳ (۳۲)، ۶۶-۷۷.

سیاه مرزگویی، سمانه (۱۳۹۵) طراحی سیستم‌های پایایی با اهداف ماکزیمم کردن میانگین زمان خرابی و مینیمم کردن هزینه کل سیستم با رویکرد انتخاب استراتژی افزونگی به کمک الگوریتم‌های فرا/ابتکاری، پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین.

شقایق، فریبا (۱۳۹۲) بهینه‌سازی مسئله چندهدفه قابلیت اطمینان با اجزای تعمیرپذیر با رویکرد الگوریتم‌های فرا/ابتکاری و شبیه‌سازی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات قزوین.

صادقی، محمدرضا (۱۳۹۲) بهینه‌سازی تخصیص افزونگی در سیستم‌های سری موازی تعمیرپذیر، رساله دکترای رشته مدیریت صنعتی گرایش تولید و عملیات، دانشگاه علامه طباطبایی.

عظیمی، پرهام و هادی‌نژاد، فرهاد (۱۳۹۵) ارائه مدل بهینه‌سازی چندهدفه در مسئله تخصیص افزونگی سیستم‌های تعمیرپذیر با بهره‌گیری از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، طراحی آزمایش‌ها و شبیه‌سازی، فصلنامه مطالعات مدیریت صنعتی، ۱۴ (۴۱)، ۱۳۷-۱۶۲.

علوی، امید. مرادپور، رضا و گودرزی املشی، علی (۱۳۹۵) الف) بررسی و ارزیابی قابلیت اطمینان مبدل باک توان بالا برای کاربرد در صنایع نظامی دریایی با استفاده از تحلیل و مدل‌سازی حرارتی، دومین همایش ملی فناوری‌های نوین دریایی، نوشهر: دانشگاه علوم دریایی امام خمینی^(۵)

علوی، امید. مرادپور، رضا و گودرزی املشی، علی (۱۳۹۵) ب) بررسی و ارزیابی استانداردهای قابلیت اطمینان قطعات الکترونیکی در حوزه نظامی، دومین همایش ملی فناوری‌های نوین دریایی، نوشهر: دانشگاه علوم دریایی امام خمینی^(۵)

کرباسیان، مهدی و قوچانی، محمدمهدی (۱۳۹۰) تخصیص قابلیت اطمینان، تهران: انتشارات ناقوس.

هادی‌نژاد، فرهاد (۱۳۹۶) طراحی مدل بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی در مسئله چندهدفه تخصیص افزونگی سیستم‌های تعمیرپذیر، رساله دکترای رشته مدیریت تحقیق در عملیات، دانشکده مدیریت و حسابداری، تهران: دانشگاه علامه طباطبایی

Abouei Ardakan, M., Hamadani, A. Z., & Alinaghian, M. (2015). Optimizing bi-objective redundancy allocation problem with a mixed redundancy strategy. *ISA Transactions*, 55, 116-128.

Alborzi, M. (2009). *Genetic Algorithm*. Tehran: Sharif university.[In Persian].

Amiri, M., & Khajeh, M. (2016). Developing a bi-objective optimization model for solving the availability allocation problem in repairable series-parallel systems

- by NSGA II. *Journal of Industrial Engineering International*, 12(1), 61–69.
- Amiri, M., Sadeghi, M. R., Khatami Firoozabadi, A., & Mikaeili, F. (2014). A multi objective optimization model for redundancy allocation problems in series-parallel systems with repairable components. *International Journal of Industrial Engineering & Production Research*, 25(1), 71-81.
- Azizmohammadi, R., Amiri, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Mohammadi, M (2013). Solving a Redundancy Allocation Problem by a Hybrid Multi-objective Imperialist Competitive Algorithm, *IJE TRANSACTIONS C: Aspects*, 26, 9, 1031-1042.
- Behzadian, M., Kazemzadeh, R.B., Albadvi, A., Aghdasi, M. (2010). PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications, *European Journal of operational research*, 200, 1, 198-215.
- Behzadian, M., Kazemzadeh, R.B., Albadvi, A., Aghdasi, M. (2010). PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications, *European Journal of operational research*, 200, 1, 198-215.
- Chambari, A., Rahmati, S. H. A., & Najafi, A. A. (2012). A bi-objective model to optimize reliability and cost of system with a choice of redundancy strategies, *Computers & Industrial Engineering*, 63, 1, 109- 119.
- Chern, M. S. (1992). On the computational complexity of reliability redundancy allocation in a series system. *Operations Research Letters*, 309-315.
- Coelho, L.D.S. (2009). Reliability-redundancy optimization by means of a chaotic differential evolution approach, *Chaos, Solitons and Fractal*, 594-602.
- Corne, D. W., Jerram, N.R., Knowles, J. D., Oates, M. J. (2001). PESA-II: Region-based Selection in Evolutionary Multiobjective Optimization. *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO'2001)*, pages 283-290, San Francisco, California, Morgan Kaufmann Publishers.
- Czyzak, P., Jaskiewicz, A. (1998). Pareto simulated annealing a metaheuristic for multiobjective combinatorial optimization. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 7, 1, 34– 47.
- Dolatshahi-Zand, A., & Khalili-Damghan, K. (2015). Design of SCADA water resource management control center by a bi-objective redundancy allocation problem and particle swarm optimization. *Reliability Engineering and System Safety*, 133, 11–21.
- Ebrahimi Arjestan, M., Pasandideh, S.H. (2013). Applying Meta-heuristic in a multi-objective reliability problem with weight and space constraints, *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, 7 (4), pp. 185-195.
- Ebrahimipour, V., Haeri, A., Sheikhalishahi, M., Asadzadeh S.M. (2012). Application of Multi-Objective Particle Swarm Optimization to Solve a Fuzzy

- Multi-Objective Reliability Redundancy Allocation Problem, *Journal of Safety Engineering*, 1(2), 26-38.
- Jiansheng, G., Zutong, W., Mingfa, Z., & Ying, W. (2014). Uncertain multi objective redundancy allocation problem of repairable systems based on artificial bee colony algorithm. *Chinese Journal of Aeronautics*, 27(6), 1477–1487.
- Keshavarz Ghorabae, M., Amiri, M., & Azimi, P. (2015). Genetic algorithm for solving bi-objective redundancy allocation problem with k-out-of-n subsystems. *Applied Mathematical Modelling*, 39 (20), 6396-6409.
- Khalili-Damghani, K., Abtahi, A.R., Tavana, M. (2013). A new multi-objective particle swarm optimization method for solving reliability redundancy allocation problems, *Reliability Engineering and System Safety*, 111, 58–75.
- Khalili-Damghani, K., Amiri, M. (2012). Solving binary-state multi-objective reliability redundancy allocation series-parallel problem using efficient epsilon-constraint, multi-start partial bound enumeration algorithm, and DEA, *Reliability Engineering and System Safety*, 103, 35–44.
- Kuo, W., & Wan, R. (2007). Recent Advances in Optimal Reliability Allocation. *IEEE Transaction on system, man and cybernetics-part a: System and humans*, 143-156.
- Meng, Zhiao., Wan, Hua., Qiu, Bei., Shang, Liu. (2010). Relative entropy evaluation method for multiple attribute decision making. *School of Economics and Management*, Beihang University, Beijing, p.3.
- Mirjalili, S.A., Jangir, P., Saremi, S.H. (2016). Multi-objective ant lion optimizer: a multi-objective optimization algorithm for solving engineering problems, *Applied Intelligence*, 46, 1, 79–95.
- Mohammadi, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Rostami, H. (2011). A multi-objective imperialist competitive algorithm for a capacitated hub covering location Problem. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 2, 671– 688.
- Mousavi, S.M., Alikar, N., Akhavan Niaki, S. T., & Bahreininejad, A. (2015). Two tuned multi-objective meta-heuristic algorithms for solving a fuzzy multi-state redundancy allocation problem under discount strategies. *Applied Mathematical Modelling*, In Press.
- Safari J. (2012). Multi-objective reliability optimization of series-parallel systems with a choice of redundancy strategies. *Reliab Eng Syst Saf*, 108, 10 – 20.
- Shih, H.Sh., Shyur, H.J., Lee, E.S. (2007). An Extension of TOPSIS for Group Decision Making, *Mathematical and Computer Modeling*, 45, 801-813.
- Zaretalab, A., Hajipour, V., Sharifi, M., Shahriari, M.R. (2015). A knowledge-based archive multi-objective simulated annealing algorithm to optimize series-parallel system with choice of redundancy strategies, *Computers & Industrial*

Engineering, 80, 33–44.

- Zhang, E., & Chen, Q. (2016). Multi-objective reliability redundancy allocation in an interval environment using particle swarm optimization. *Reliability Engineering and System Safety*, 145, 83–92.
- Zhang, E., Wu, Y., & Chen, Q. (2014). A practical approach for solving multi-objective reliability redundancy allocation problems using extended bare-bones particle swarm optimization. *Reliability Engineering and System Safety*, 127, 65–76.
- Zhou, P., B.W, A., K.L, poh. (2006). Decision Analysis in Energy and Environmental Modeling, *National university in Singapore*.
- Zitzler, E., & Thiele, L. (1998). Multiobjective optimization using evolutionary algorithms a comparative case study. In Parallel problem solving from nature PPSN V, *Springer Berlin Heidelberg*, 292-301.
- Zoulfaghari, H., Zeinal Hamadani, A., & Abouei Ardakan, M. (2014). Bi-objective redundancy allocation problem for a system with mixed repairable and non-repairable components. *ISA Transactions*, 53, 17-24.