

بهینه‌سازی قابلیت اطمینان تجهیزات و تسلیحات نظامی با رویکرد ترکیبی شبیه‌سازی و الگوریتم‌های فراابتکاری

دکتر مقصود امیری^۱، دکتر پرهام عظیمی^۲، دکتر مصطفی زندیه^۳، فرهاد هادی‌نژاد^۴

چکیده

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. این تحقیق تلاش دارد مدلی ریاضی برای بهینه‌سازی طراحی تجهیزات و تسلیحات نظامی ارائه دهد که اهداف آن افزایش قابلیت اطمینان و کاهش هزینه بوده و محدودیت‌هایی مانند حجم و وزن کل را نیز لحاظ کرده باشد. یکی از رویکردهای نوین در بهبود قابلیت اطمینان سیستم‌ها بهره‌گیری از قطعات مازاد (تخصیص افزونگی) است؛ اما در تحقیقات 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 تحمیل می‌گردید. حال آنکه تحقیق حاضر ضمن حذف مفروضات پیش‌گفته به دلیل امکان تعمیر قطعات مختلف تجهیزات نظامی، نرخ خرابی و تعمیر متفاوت اجزاء و همچنین وجود اهداف مختلف؛ سعی در طراحی مدلی کاربردی متناسب با شرایط محیط عملیاتی نموده است. پژوهش حاضر از منظر هدف در گروه تحقیقات توسعه‌ای و از منظر روش در گروه تحقیقات آزمایشی قرار دارد. ضمن آنکه با توجه به گزاره‌های تحقیق و به دلیل آنکه مسئله تخصیص افزونگی در گروه مسائل سخت (NP-Hard) قرار دارد، برای حل مدل از یک تکنیک فراابتکاری بهینه‌سازی چندهدفه (الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب ۲- NSGAI) و به منظور امکان بررسی نرخ خرابی و تعمیر مختلف از تکنیک شبیه‌سازی استفاده شده است. در انتهای تحقیق نیز با کمک یک نمونه مطالعاتی نظامی و داده‌های واقعی به تشریح کامل مدل و روش حل پیشنهادی پرداخته شده است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب، بهینه‌سازی چندهدفه، تجهیزات و تسلیحات نظامی، شبیه‌سازی، قابلیت اطمینان

۱. استاد دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی (نویسنده مسئول)، mg_amiri@yahoo.com

۲. استادیار دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین

۳. دانشیار دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی

۴. دانشجوی دکتری مدیریت تحقیق در عملیات، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی

مقدمه

امروزه با پیشرفت بشر در حوزه‌های مختلف دانش، نیازهای صنایع دچار تغییر شده و مفاهیم پایایی و قابلیت اطمینان جایگاه ویژه‌ای در طراحی و تولید قطعات و سیستم‌های صنعتی به ویژه در صنایع پیچیده و حساسی مانند صنایع نظامی، هسته‌ای، هوافضا و الکترونیک پیدا کرده است (امیری، ۱۳۹۳). 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 نتیجه نبردهای امروزی و جنگ‌های شهری؛ وجود تجهیزات و تسلیحات نظامی با قابلیت اطمینان و پایایی بالاست 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. لذا تحقیق حاضر تلاش دارد با توجه به متغیرهای محیطی و شرایط واقعی، مدلی ریاضی برای طراحی محصولات نظامی ارائه دهد که اهداف آن بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان و کمینه‌سازی هزینه کل بوده و محدودیت‌هایی مانند وزن کل، حجم کل و حداکثر تعداد اجزای مازاد را نیز برآورده نماید.

تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که دلیل اصلی مشکلات زنجیره تأمین نظامی شامل فرسودگی ماشین‌آلات، قابلیت اطمینان تجهیزات، چرخه عمر سلاح و ناکارایی سازمانی می‌باشد (یان فان^۱ و همکاران، ۲۰۱۰). قابلیت اطمینان و آمادگی عملیاتی تسلیحات نظامی نقش برجسته‌ای در دفاع از تمامیت ارضی و کیان میهن اسلامی داشته و می‌توانند به عنوان عوامل بازدارنده نیز به کار آیند. 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).

به طور کلی قابلیت اطمینان را می‌توان کیفیت در درازمدت و یا احتمال عملکرد مطلوب یک وسیله در شرایط عملیاتی مشخص در یک دوره زمانی معین تعریف کرد؛ لذا به عنوان یکی از ابعاد مهم در کیفیت محصول شناخته می‌شود که طبیعتاً لزوم تحلیل و بهینه‌سازی آن در محصولات و تسلیحات نظامی با توجه به مأموریت‌ها و نقشی که در سرنوشت ملت‌ها و حکومت‌ها دارد، از اهمیت بالاتری برخوردار خواهد بود.

در ادبیات تحقیق دو راهکار عمده به منظور افزایش قابلیت اطمینان سیستم‌ها وجود دارد؛ راهکار اول، بالا بردن قابلیت اطمینان اجزای سیستم و دیگری استفاده از اجزای مازاد در کنار اجزای اصلی سامانه به صورت موازی است. به علت محدودیت‌های اقتصادی و فناوری، بهترین و کاربردی‌ترین روش جهت افزایش قابلیت اطمینان سیستم، راهکار دوم یعنی استفاده از اجزای مازاد در کنار اجزای اصلی است (کو^۱ و پراساد^۲، ۲۰۱۰). استفاده از اجزای افزونه در طرح بهبودسازی سیستم‌های سری موازی به منظور افزایش پایداری، مسئله تخصیص افزونگی نامیده می‌شود که هدف اصلی آن افزایش مفاهیم و مؤلفه‌های قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن محدودیت‌هایی مانند حجم و وزن کل سیستم می‌باشد. ساختار سری- موازی یکی از انواع ساختارهای سیستم است که با تخصیص اجزای مازاد به صورت موازی به اجزای یک سیستم با ساختار سری، طراحی شده است (یه^۳، ۲۰۰۹). زمانی که یک سیستم تعمیرپذیر باشد، از واژه «دسترس‌پذیری» به جای قابلیت اطمینان استفاده می‌شود. دسترس‌پذیری به معنای درصدی از زمان است که سامانه تعمیرپذیر به صورتی صحیح وظایف تعریف شده را انجام می‌دهد (کو و وان^۴، ۲۰۰۷). اما منظور از ماندگاری سیستم، دسترس‌پذیری سامانه تا اولین خرابی است، بنابراین متوسط زمان ماندگاری سیستم، میانگین زمانی است که سامانه برای اولین بار از کار می‌افتد.

در حال حاضر بهبودسازی طراحی بر مبنای افزایش قابلیت اطمینان، یکی از مراحل اصلی در طراحی و تولید سیستم‌های نوین محسوب می‌شود؛ اما عموماً بهبود در قابلیت اطمینان منجر به افزایش هزینه‌های سیستم و تغییر در مؤلفه‌هایی مانند حجم و وزن می‌شود که در نتیجه لزوم برقراری تعادل میان قابلیت اطمینان و سایر منابع ذکر شده را ضروری جلوه می‌دهد (عظیمی و هادی‌نژاد، ۱۳۹۵). در اغلب مطالعات انجام شده در مسئله تخصیص افزونگی، این‌طور فرض می‌شود که نرخ‌های شکست اجزای سیستم از توزیع‌های نمایی یا ارلانگ پیروی می‌کنند. اما در مسئله‌های جهان واقعی سیستم‌های زیادی هستند که اجزایی با نرخ‌های شکست افزایشی دارند (پورکریم گیلانی و همکاران، ۲۰۱۷). همچنین ثابت شده است که مسئله تخصیص اجزای مازاد، یک مسئله بهبودسازی چندجمله‌ای غیرخطی است که در

-
1. Kuo
 2. Prasad
 3. Yeh
 4. Van

گروه مسائل سخت (NP-hard) قرار دارد (چرن^۱، ۱۹۹۲) و از طریق تکنیک‌ها و روش‌های مختلفی مورد تحلیل قرار گرفته که عموماً یا مسئله را به صورت تک‌هدفه بررسی نموده، یا اجزا را غیر قابل تعمیر در نظر گرفته و یا نرخ خرابی را صرفاً دارای توزیع نمایی فرض نموده‌اند تا انجام محاسبات ریاضی و مدل‌سازی و حل مدل به صورت تحلیلی و با روش‌های ریاضی معمول انجام‌پذیر باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که این مفروضات در شرایط واقعی جنگ‌های امروزی و در مورد تجهیزات، قطعات و سیستم‌های نظامی قابل‌تعمیم نخواهد بود؛ زیرا عموماً قطعات تعمیرپذیر بوده و نرخ خرابی قطعات می‌تواند از توابع توزیع مختلف مانند نمایی، ارلانگ، نرمال، و به‌ویژه وایبل پیروی نماید و همچنین اهداف مختلفی مانند بیشینه‌سازی زمان ماندگاری سیستم و کمینه‌سازی هزینه کل را به صورت هم‌زمان مورد تأکید می‌باشند. لذا تحقیق حاضر از نقطه نظر مدل‌سازی ریاضی، یک مسئله بهینه‌سازی فرض می‌شود که تابع هدف آن بیشینه‌سازی متوسط زمان ماندگاری سامانه و کمینه‌سازی هزینه بوده و دارای محدودیت‌های حجم کل، وزن کل و تعداد اجزای افزونه می‌باشد. برای حل مدل ریاضی پیشنهادی نیز از تکنیک شبیه‌سازی به منظور بررسی و تحلیل رفتارهای متفاوت خرابی و تعمیر قطعات مختلف استفاده نموده و از تکنیک الگوریتم ژنتیک چندهدفه (NSGAI) به منظور یافتن پاسخ نهایی تعداد و نوع اجزای افزونه استفاده می‌شود.

در ادامه تحقیق ضمن تعریف متغیرها و مؤلفه‌ها، به مرور پیشینه تحقیق پرداخته و پس از ارائه مدل ریاضی پیشنهادی، با کمک داده‌های یک نمونه مطالعاتی به تشریح روش حل ذکر شده با کمک رویکرد ترکیبی شبیه‌سازی و الگوریتم ژنتیک چندهدفه می‌پردازیم.

مبانی نظری و تعاریف متغیرهای تحقیق

جنگ آینده: جنگ آینده از اوایل قرن بیست و یکم وارد ادبیات نظامی شده است، به رویارویی دو قدرت ناهم‌تراز اشاره دارد که یک‌طرف ضمن اجتناب از مواجهه شدن با نقاط قوت طرف مقابل، در چارچوبی خارج از قواعد قابل‌هضم بری دشمن، نقاط ضعف او را مورد حمله قرار می‌دهد (حیدری، قمری و کلانتری، ۱۳۹۳: ۶۷).

قابلیت اطمینان^۱: قابلیت اطمینان را می‌توان کیفیت در درازمدت و یا احتمال عملکرد مطلوب یک وسیله در شرایط عملیاتی مشخص در یک دوره زمانی معین تعریف کرد (امیری، ۱۳۹۳).

قابلیت اطمینان سیستم‌های نظامی: قابلیت اطمینان سیستم‌های دفاعی از مهم‌ترین مباحث در کلیه مراحل از طراحی تا ساخت و تولید و بهره‌برداری و انبارداری و تعمیر و نگهداری و به کارگیری می‌باشد (پیروی، ۲۰۰۲).

تجهیزات و تسلیحات نظامی: هرگونه سلاح، جنگ‌افزار و تجهیزاتی که به فرد نظامی در فرایند عملیات کمک می‌کند مورد نظر تحقیق حاضر می‌باشد.

ماندگاری^۲: احتمال آن است که تولید، محصول و یا خدمتی برای یک دوره زمانی خاص به‌طور سالم و مناسب کار نماید و در این فاصله زمانی خرابی نداشته باشد.

مسئله تخصیص افزونگی^۳: استفاده از اجزای افزونه در طرح بهبودسازی سیستم‌های سری موازی به منظور افزایش پایایی، مسئله تخصیص افزونگی نامیده می‌شود که هدف اصلی آن افزایش مفاهیم و مؤلفه‌های قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن محدودیت‌هایی مانند حجم و وزن کل سیستم می‌باشد (عظیمی و هادی‌نژاد، ۱۳۹۵).

بهبودسازی^۴: فرایند بهبودسازی در جستجوی یافتن مقادیری برای متغیرهاست که هدف را در بهترین وضعیت قرار دهد. این متغیرها معمولاً محدود یا مقید هستند (نوكدال^۵ و رایت^۶، ۱۹۹۹).

شبیه‌سازی^۷: شبیه‌سازی را می‌توان مجموعه‌ای از روش‌ها، برای تقلید رفتار یک سیستم واقعی با کمک رایانه اطلاق کرد (چانگ^۸، ۲۰۰۴).

-
1. reliability
 2. survivability
 3. Redundancy Allocation Problem (RAP)
 4. optimization
 5. Nokedal, J.
 6. Wright, S.
 7. simulation
 8. Chung

بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی^۱: تلفیق گسترده مفاهیم اساسی در تکنیک شبیه‌سازی (غیرقطعی بودن وقوع رویدادها) با سایر رویکردهای نوین در حوزه برنامه‌ریزی و تحلیل سیستم‌ها نظیر انواع الگوریتم‌های فراابتکاری، مسائل برنامه‌ریزی ریاضی، مسائل تصمیم‌گیری چندمعیاره و غیره است (عظیمی و همکاران، ۱۳۹۲).

بهینه‌سازی چندهدفه^۲: در بهینه‌سازی چندهدفه، هدف یافتن پاسخی است که بتواند میان توابع متضاد، نوعی تبادل برقرار کند. یافتن پاسخ‌های غیر مسلط^۳ (یعنی پاسخی دیگر نمی‌تواند بر آن مسلط شود) و ترسیم منحنی تشکیل شده از آنها (منحنی بهینه پارتو)^۴ هدف حل هر مسئله بهینه‌سازی با اهداف چندگانه است (بشیری و جلیلی، ۱۳۹۳).

الگوریتم‌های فراابتکاری^۵: الگوریتم‌هایی که بر هدایت هیوریستیک یک الگوریتم سازنده یا جستجوی محلی متمرکز می‌شوند؛ به گونه‌ای که آن الگوریتم بتواند بر شرایط حساس (مانند فرار از بهینه محلی) غلبه کند فراابتکاری نامیده می‌شوند (عالم تبریز و همکاران، ۱۳۹۲). در این روش‌ها با آنکه جستجوی جواب بهینه، به‌صورت تصادفی و بدون منطق جزئی انجام می‌شود، جستجو دارای منطقی کلان و جهت‌دار بوده، احتمال یافتن پاسخ نزدیک بهینه سراسری، بسیار بالا و زمان حل نیز نسبت به سایر روش‌های جستجو مناسب‌تر است (بشیری و کریمی، ۱۳۹۲). روش‌هایی مانند الگوریتم ژنتیک^۶، الگوریتم ازدحام ذرات^۷، جستجوی پراکنده^۸ شبیه‌سازی تبرید^۹، الگوریتم مورچگان^{۱۰} و جستجوی ممنوع^{۱۱} از این جمله‌اند.

الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب II^{۱۲}: این روش محبوب‌ترین و پرکاربردترین روش

1. Optimization Via Simulation (OVS)
2. Multi Objective Optimization (MOO)
3. Non Dominated Solution (NDS)
4. Pareto Optimal
5. metaheuristic algorithm
6. genetic algorithm (GA)
7. particle swarm (PS)
8. scatter search (SS)
9. simulated annealing (SA)
10. ant colony optimization (ACO)
11. tabu search (TS)
12. non-dominated sorting genetic algorithm (NSGAI)

ژنتیک برای بهینه‌سازی مسائل چندهدفه است (بشیری و جلیلی، ۱۳۹۳) که از مدل‌سازی زیستی جمعیت جانداران به وجود آمده است. در این الگوریتم، خصوصیات نسل جانداران به مقدار توابع هدف و بهبود در خصوصیات نسلی در پی گذشت زمان تشبیه و ظهور نسل‌های جدید از آمیزش نسل‌های قبلی به بهبود در مقدار توابع هدف مانند شده است (بنت و همکاران^۱، ۱۹۹۹: ۵۳).

مروری بر تحقیقات پیشین

در این بخش به مرور مطالعات مشابه و بررسی تحقیقات پیشین در دو قسمت مجزا با عناوین تحقیقات مرتبط با مسئله تخصیص افزونگی و تحقیقات مرتبط با قابلیت اطمینان تجهیزات و تسلیحات نظامی می‌پردازیم.

تحقیقات مرتبط با مسئله تخصیص افزونگی

مسئله تخصیص افزونگی مورد توجه محققان زیادی قرار داشته که با اعمال تفاوت‌هایی در ساختار مسئله، مفروضات آن، مدل‌سازی ریاضی، توابع هدف و محدودیت‌ها و به‌ویژه روش‌های حل متنوع، مسئله را از زوایای مختلف و در کاربردهای گوناگون بررسی نموده‌اند. به طور مثال برخی محققان از روش برنامه‌ریزی خطی (کویت^۲، ۲۰۰۳)، برخی دیگر از روش برنامه‌ریزی پویا و عدد صحیح (بولفین و لیو^۳، ۱۹۸۵؛ فیفه و همکاران^۴، ۱۹۶۸؛ جن و همکاران^۵، ۱۹۹۰؛ ان جی و سانچو^۶، ۲۰۰۱)، و برخی از روش‌های ابتکاری (رامیرز و کویت^۷، ۲۰۰۴) و فرا ابتکاری (کویت و اسمیت^۸، ۱۹۹۶؛ بوساکا و همکاران^۹، ۲۰۰۱؛ کوناک و همکاران^{۱۰}، ۲۰۰۳؛ لیانگ و چن^{۱۱}، ۲۰۰۷؛ ناهاس و همکاران^۱، ۲۰۰۷؛ اوزینب و همکاران^۲،

-
1. Bennett et al
 2. Coit
 3. Bulfin & Liu
 4. Fyffe et al
 5. Gen et al
 6. Ng & Sancho
 7. Ramirez & Coit
 8. Coit & Smith
 9. Busacca et al
 10. Konak et al
 11. Liang & Chen

همکاران^۲، ۲۰۰۸؛ کومار و میشر^۳، ۲۰۰۸؛ لی و همکاران^۴، ۲۰۰۹؛ بجی و همکاران^۵، (۲۰۱۰)، بهره جسته‌اند. در سالیان اخیر نیز محققان فراوانی به بررسی مسئله تخصیص افزونگی در حالات مختلف پرداخته‌اند که عمدتاً دارای نوآوری‌هایی در مدل‌سازی و روش حل مسئله می‌باشند. جدول ۱ تلاش نموده ضمن مرور مطالعات مشابه از سال ۲۰۱۱ تاکنون، جایگاه تحقیق حاضر را در قیاس با این مطالعات نشان دهد.

-
1. Nahas et al
 2. Ouzineb et al
 3. Kumar & Mishra
 4. Li et al
 5. Beji et al

جدول ۱: جایگاه تحقیق حاضر در مقایسه با مطالعات سالیان اخیر در مسئله تخصیص افزونگی

ردیف	نویسندگان	تعداد تابع هدف	توابع هدف	محدودیت‌ها	الگوریتم حل	تعمیرپذیری	تابع توزیع غیرنمایی	کاربرد نظامی
۱	سید اصفهانی و همکاران، ۱۳۹۲	تک‌هدفه	بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان	هزینه کل وزن کل	Simulated Annealing (SA)	-	-	-
۲	صادقی، ۱۳۹۲	چندهدفه	بیشینه‌سازی متوسط زمان ماندگاری سیستم کمینه‌سازی هزینه کل	وزن کل تعداد اجزاء مجاز	SA & PAES & ICA & NSGA & PSA	+	-	-
۳	اردانه، ۱۳۹۴	چندهدفه	بیشینه‌سازی دسترس‌پذیری و متوسط زمان ماندگاری سیستم و کمینه‌سازی هزینه	-	NSGA-II	+	-	-
۴	سیاه مرزگویی، ۱۳۹۵	چندهدفه	بیشینه‌سازی میانگین زمان تا اولین خرابی کمینه‌سازی هزینه کل	وزن کل	NSGA-II & NREGA	+	+	-
۵	هوشمند، ۱۳۹۵	تک‌هدفه	بیشینه‌سازی دسترس‌پذیری کل سیستم	هزینه کل وزن کل	Simulation & Genetic Algorithm	+	+	-
۶	عظیمی و هادی‌نژاد، ۱۳۹۵	چندهدفه	بیشینه‌سازی میانگین زمان قبل از اولین خرابی	حجم کل و وزن کل	Simulation & PROMETHEE	+	+	-

ردیف	نویسندگان	تعداد تابع هدف	توابع هدف	محدودیت‌ها	الگوریتم حل	تعمیر پذیری	تابع توزیع غیر نمایی	کاربرد نظامی
			کمینه‌سازی هزینه کمینه‌سازی واریانس					
۷	کی و همکاران ^۱ ، ۲۰۱۴	چندهدفه	بیشینه‌سازی دسترس‌پذیری کمینه‌سازی هزینه	حجم کل وزن کل تعداد اجزاء مجاز	Genetic Algorithm	+	-	-
۸	ابوئی اردکان و همدانی، ۲۰۱۴	تک‌هدفه	بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان	هزینه کل وزن کل حجم کل	Genetic Algorithm	-	-	-
۹	ذوالفقاری و همکاران ^۲ ، ۲۰۱۴	چندهدفه	بیشینه‌سازی دسترس‌پذیری کمینه‌سازی هزینه	حجم کل وزن کل تعداد اجزاء مجاز	Genetic Algorithm	+	-	-

1. Xie et al
2. Zoulfaghari et al

ردیف	نویسندگان	تعداد تابع هدف	توابع هدف	محدودیت‌ها	الگوریتم حل	تعمیر پذیری	تابع توزیع غیر نمایی	کاربرد نظامی
۱۰	جیان شنگ و همکاران ^۱ ، ۲۰۱۴	چندهدفه	بیشینه‌سازی دسترس‌پذیری کمینه‌سازی هزینه	تعداد اجزاء مجاز	Multi Objective Artificial Bee Colony (MOABC)	+	-	-
۱۱	لی و پنگ ^۲ ، ۲۰۱۴	تک‌هدفه	کمینه‌سازی هزینه	دسترس‌پذیری	Genetic Algorithm	+	-	-
۱۲	سلطانی و همکاران ^۳ ، ۲۰۱۴	تک‌هدفه	بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان	هزینه کل وزن کل	Designing heuristics and metaheuristics methods	+	-	-
۱۳	ژانگ و همکاران ^۴ ، ۲۰۱۴	چندهدفه	بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان کمینه‌سازی هزینه کمینه‌سازی وزن	تعداد اجزاء مجاز	Bare-Bones Particle Swarm Optimization (BBMOPSO)	-	-	-
۱۴	امیری و همکاران ^۵ ، ۲۰۱۴	چندهدفه	بیشینه‌سازی میانگین زمان تا اولین خرابی سیستم کمینه‌سازی هزینه کل	وزن کل تعداد اجزاء مجاز	Imperialist Competitive Algorithm (ICA)	+	-	-

1. Jiansheng et al
2. Li & Peng
3. Soltani et al
4. Zhang et al
5. Amiri et al

ردیف	نویسندگان	تعداد تابع هدف	توابع هدف	محدودیت‌ها	الگوریتم حل	تعمیر پذیری	تابع توزیع غیر نمائی	کاربرد نظامی
۱۵	کشاورز قرابی و همکاران ^۱ ، ۲۰۱۵	چندهدفه	بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان کمینه‌سازی هزینه	وزن کل تعداد اجزاء مجاز	NSGA-II	-	-	-
۱۶	دولت‌شاهی زند و خلیلی دامغانی ^۲ ، ۲۰۱۵	چندهدفه	بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان کمینه‌سازی هزینه	هزینه کل وزن کل تعداد اجزاء مجاز	MOPSO & TOPSIS	-	-	-
۱۷	زارع‌طلب و همکاران ^۳ ، ۲۰۱۵	چندهدفه	بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان کمینه‌سازی هزینه	وزن کل	knowledge-based archive MOSA	-	-	-
۱۸	سعیدی و سلطانی ^۴ ، ۲۰۱۵	تک‌هدفه	بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان	هزینه کل وزن کل حجم کل	Enumeration Method & Benders' Decomposition Method	-	-	-

1. Keshavarz Ghorabae et al
2. Dolatshahi-Zand & Khalili-Damghan
3. Zaretalab et al
4. Sajadi & Soltani

ردیف	نویسندگان	تعداد تابع هدف	توابع هدف	محدودیت‌ها	الگوریتم حل	تعمیر پذیری	تابع توزیع غیر نمائی	کاربرد نظامی
۱۹	موسوی و همکاران ^۱ ، ۲۰۱۵	چندهدفه	کمینه‌سازی هزینه بیشینه‌سازی دسترس‌پذیری	وزن کل هزینه کل	controlled elitism non-dominated ranked GA (CE-NRGA)	+	-	-
۲۰	ابوئی اردکان و همکاران ^۲ ، ۲۰۱۵	چندهدفه	بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان کمینه‌سازی هزینه	وزن کل تعداد اجزاء مجاز	NSGA-II	-	-	-
۲۱	کونگ و همکاران ^۳ ، ۲۰۱۵	تک‌هدفه	بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان	هزینه کل وزن کل	simplified version of particle swarm optimization (SPSO)	-	-	-
۲۲	ژانگ و چن ^۴ ، ۲۰۱۶	چندهدفه	بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان کمینه‌سازی هزینه	-	MOPSO	-	-	-
۲۳	پورکریم گیلانی و همکاران ^۵ ، ۲۰۱۶	تک‌هدفه	بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان	هزینه کل وزن کل حجم کل	Simulation & Genetic Algorithm	-	-	-

1. Mousavi et al
2. Abouei Ardakan et al
3. Kong et al
4. Zhang & Chen
5. Pourkarim Guilani et al

ردیف	نویسندگان	تعداد تابع هدف	توابع هدف	محدودیت‌ها	الگوریتم حل	تعمیر پذیری	تابع توزیع غیر نمائی	کاربرد نظامی
۲۴	تیموری و همکاران ^۱ ، ۲۰۱۶	تک‌هدفه	بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان	هزینه کل وزن کل تعداد اجزاء مجاز	Memory-Based Electromagnetism-like Mechanism (MBEM)	-	-	-
۲۵	امیری و خواجه ^۲ ، ۲۰۱۶	چندهدفه	بیشینه‌سازی دسترس‌پذیری کمینه‌سازی هزینه	وزن کل تعداد اجزاء مجاز	NSGA-II	+	-	-
	تحقیق حاضر	چندهدفه	بیشینه‌سازی مینیمم مقدار میانگین زمان تا اولین خرابی زیرسیستم‌ها (MTTFi) کمینه‌سازی هزینه	حجم و وزن کل تعداد اجزاء مجاز استراتژی تخفیف	Optimization Via Simulation (OVS)	+	+	+

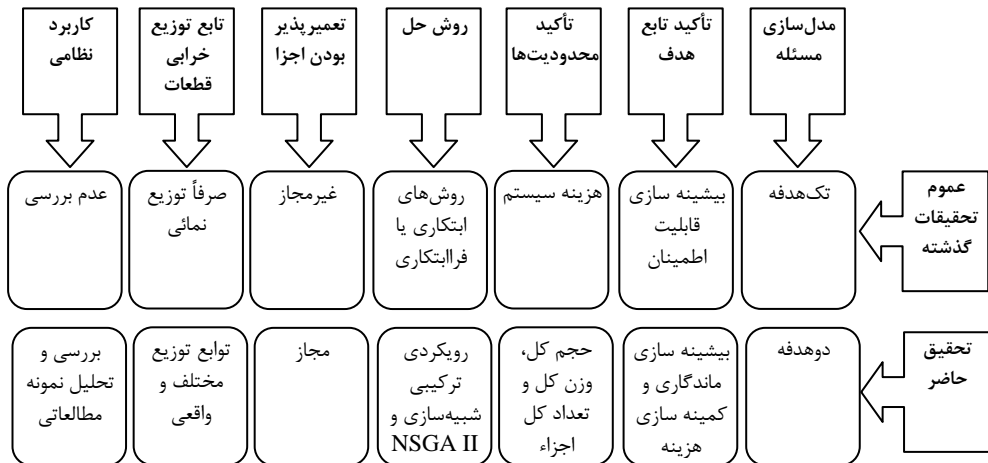
1. Teimouri et al
2. Amiri & Khajeh

تحقیقات مرتبط با قابلیت اطمینان تجهیزات و تسلیحات نظامی

بررسی و بهینه‌سازی قابلیت اطمینان و مؤلفه‌های مرتبط با آن در حوزه طراحی تسلیحات و تجهیزات نظامی فاقد پیشینه مطالعاتی خاص و قابل توجه است. اما در سال‌های اخیر در بخش‌ها و کاربردهای خاص پس از مرحله طراحی مانند سنجش آمادگی و یا حوزه‌های نگهداری و تعمیرات مطالعات مرتبطی انجام پذیرفته که در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌شود. پیروی در پژوهشی با عنوان نقش قابلیت اطمینان در سیستم‌های دفاعی هوشمند و نحوه ارتقای قابلیت آمادگی عملیاتی تسلیحات نظامی، فرسودگی ناشی از گذشت زمان چه در حالت بهره‌برداری و چه در حالت اقامت تسلیحات در انبار، منسوخ شدن برخی فناوری‌ها در جهان و خروج قطعات مصرف‌شده در تسلیحات دفاعی کشور از خط پشتیبانی و تولید کارخانجات سازنده و عدم دسترسی به قطعات یدکی برای تسلیحات موجود بنا به دلایل متعدد سیاسی را باید از جمله عواملی دانست که می‌توانند منجر به کاهش قابلیت اطمینان و آمادگی عملیاتی تسلیحات شوند (پیروی، ۲۰۰۲). همچنین حکمت در تحقیقی با عنوان ویژگی‌ها و الزامات طراحی و اجرای سیستم‌های مکانیزه نگهداری و تعمیرات بر اهمیت نت مبتنی بر قابلیت اطمینان در آماده‌سازی تجهیزات نظامی و غیرنظامی تأکید کرده است (حکمت، ۱۳۸۲). یان فان^۱ و همکارانش در مطالعه‌ای به ارائه روش مدل‌سازی پویای سیستم برای تأمین نت تسلیحات نظامی پرداخته و راه‌حلی برای بهبود عملکرد سیستم پیشنهاد نموده‌اند (یان فان و همکاران، ۲۰۱۰). رضانی و همکارانش در تحقیقی با عنوان طراحی مدلی برای سنجش آمادگی تجهیزات نظامی با رویکرد سلسله‌مراتبی، با کمک نظرات خبرگان در زمینه عمر، قابلیت پشتیبانی و جایگزینی و کیفیت تعمیرات، یک سیستم خبره فازی برای سنجش آمادگی تجهیزات ارائه نموده‌اند (رضانی و همکاران، ۱۳۹۰). حسینی و همکارانش نیز در مطالعه‌ای با عنوان افزایش کیفیت توان و قابلیت اطمینان سیستم قدرت کشتی‌های نظامی با استفاده از فیلتر هیبرید بهینه‌سازی شده با الگوریتم ژنتیک 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 (حسینی و همکاران، ۱۳۹۲). همچنین رضانی و معینی در مطالعه‌ای با عنوان تخمین عمر مفید باقیمانده تجهیزات دفاعی

با استفاده از مدل مدیریت سلامت تجهیزات و پیش‌بینی عیوب، به بررسی و تحلیل سامانه اداری با کمک مدل مذکور پرداخته‌اند (رضائی و معینی، ۱۳۹۵). علوی و همکارانش 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).

پس از مرور تحقیقات مرتبط از زوایای مختلف در این بخش، شکل ۱ تلاش نموده جایگاه و نوآوری‌های تحقیق حاضر را در قیاس با مطالعات پیشین نشان دهد.



شکل ۱: جایگاه و نوآوری‌های تحقیق حاضر در مقایسه با مطالعات پیشین

به‌طور کلی بررسی و تحلیل مطالعات پیشین در هر دو بخش «مسئله تخصیص افزونگی» و «قابلیت اطمینان تسلیحات و تجهیزات نظامی» نشان می‌دهد که نوآوری‌های مورد ادعای تحقیق در بخش‌های مدل‌سازی ریاضی مسئله تحقیق و روش حل آن (با تابع هدف: بیشینه‌سازی مینیمم مقدار میانگین زمان تا اولین خرابی زیرسیستم‌ها و کمیته‌سازی هزینه؛ تحت محدودیت‌های: حجم و وزن کل، تعداد اجزای مجاز) به شکلی که تعمیر مجاز بوده و نرخ خرابی و تعمیر نیز بتواند از توزیع غیر نمایی پیروی نماید، تاکنون مورد توجه نبوده و بررسی نمونه مطالعاتی نظامی هم فاقد پیشینه مشابه می‌باشد. لذا تحقیق حاضر هم در بخش

مدل‌سازی، هم در بخش روش حل و هم در بخش کاربرد مدل دارای نوآوری خواهد بود.

روش‌شناسی پژوهش

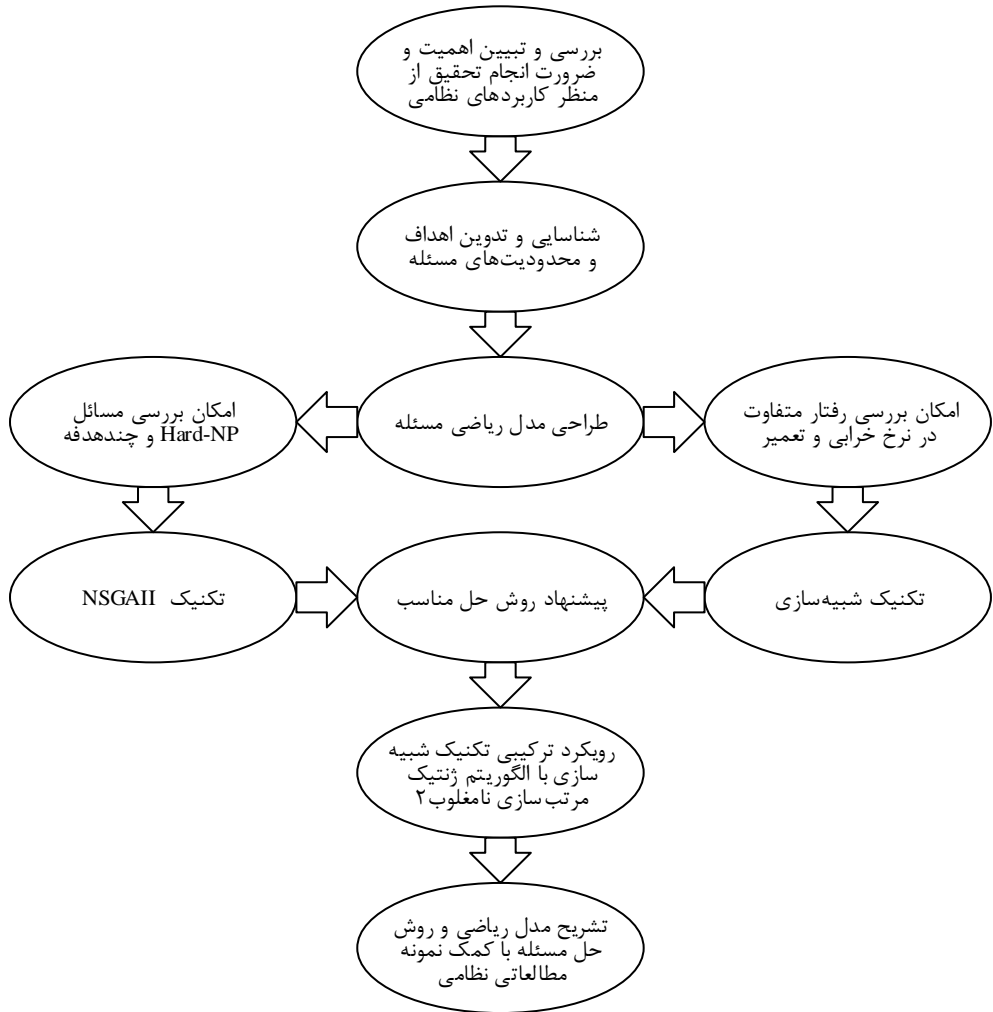
از آنجا که تحقیق حاضر از یک سو به دنبال توسعه مدل‌های گذشته و گسترش مرزهای دانش بوده و از سوی دیگر به کاربردی کردن مدل‌ها و الگوهای موجود در مسئله تحقیق می‌پردازد، از نظر هدف در گروه تحقیقات بنیادی- کاربردی (توسعه‌ای) قرار می‌گیرد. از منظر روش نیز به دلیل مشخصه اصلی تحقیق یعنی سنجش روابط بین متغیرها و همچنین تأثیری که در تسهیل دستیابی به قوانین و قضایای کلی می‌نماید، در گروه تحقیقات آزمایشی قرار می‌گیرد.

روش‌های گردآوری داده‌ها و ابزار مورد استفاده

در این مطالعه بررسی ادبیات و مبانی نظری تحقیق، شناسایی متغیرها، اهداف و محدودیت‌های مسئله با کمک مطالعات کتابخانه‌ای و با توجه به شرایط محیطی انجام خواهد پذیرفت. همچنین در مرحله روش حل، از تکنیک فراابتکاری چندهدفه (NSGAII) و نرم‌افزار مطلب و تکنیک شبیه‌سازی و نرم‌افزار ED^۱ استفاده می‌گردد.

الگوی مفهومی تحقیق

شکل ۲: فرایند انجام و الگوی مفهومی تحقیق را نشان می‌دهد.

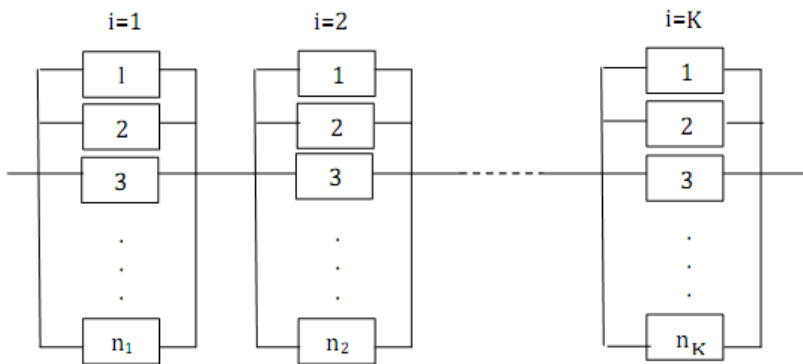


شکل ۲: الگوی مفهومی تحقیق

مدل‌سازی ریاضی مسئله تحقیق

از آنجایی که ساختار سری موازی (شکل ۳) به واقعیت نزدیک‌تر است، مهم‌ترین و پرکاربردترین ساختار در بین تحقیقات مختلف بوده است (عظیمی و هادی‌نژاد، ۱۳۹۵). در این

ساختار یک سیستم با تعداد k زیرسیستم به صورت سری در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند و در هر کدام از این زیرسیستم‌ها N_i جزء به صورت موازی کار می‌کنند. در مسئله تخصیص افزونگی عموماً متغیر تصمیم، تعیین تعداد و نوع اجزاء افزونه در هر زیرسیستم به منظور بهبودسازی توأم اهداف مورد نظر، ضمن برآورده کردن محدودیت‌های موجود در مسئله است. در ادامه این بخش، ابتدا مؤلفه‌ها و فرضیات مورد استفاده در مدل معرفی می‌گردد، سپس اهداف مورد نظر فرایند بهبودسازی معرفی می‌گردد و در نهایت مدل ریاضی ارائه می‌گردد.



شکل ۳: ساختار سیستم سری - موازی

علائم و نمادهای مدل مسئله

علائم و نمادهای مربوط به مدل مسئله تحقیق عبارت‌اند از:

- i : اندیس زیرسیستم‌ها
- j : اندیس نوع قطعه
- k : تعداد زیرسیستم‌ها
- X_{ij} : تعداد قطعه (مؤلفه) نوع j ام در زیرسیستم i ام (متغیر تصمیم)
- n_i : تعداد نوع قطعات موجود در زیرسیستم i ام
- C_{ij} : هزینه هر واحد قطعه نوع j ام در زیرسیستم i ام
- W_{ij} : وزن هر واحد قطعه نوع j ام در زیرسیستم i ام

- V_{ij} : حجم هر واحد قطعه نوع j ام در زیرسیستم i ام
- Z_{ij} : استفاده یا عدم استفاده از قطعه نوع j ام در زیرسیستم i ام (متغیر صفر و یک)
- L_{ij} : حداقل تعداد قطعه نوع j ام در زیرسیستم i ام
- M_{ij} : حداکثر تعداد قطعه نوع j ام در زیرسیستم i ام
- C_s : هزینه کل سیستم
- W_s : وزن کل سیستم
- V_s : حجم کل سیستم
- S : حداکثر تعداد قطعه در کل سیستم
- $MTTFF_i$: میانگین زمان تا اولین خرابی زیرسیستم i ام

مدل ریاضی مسئله تحقیق

با توجه به گزاره‌ها و اهداف تحقیق و همچنین مفروضات مسئله، مدل ریاضی مسئله تحقیق بدین شکل خواهد بود:

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

$$\text{Min } C_s = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} C_{ij} X_{ij}; \quad (2)$$

St:

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} W_{ij} X_{ij} \leq W_s; \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} V_{ij} X_{ij} \leq V_s; \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} X_{ij} \leq S; \quad (5)$$

$$L_{ij} Z_{ij} \leq X_{ij} \leq M_{ij} Z_{ij} \quad i=1, 2, \dots, k \quad j=1, 2, \dots, n_i \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^{n_i} Z_{ij} = 1; \quad i=1, 2, \dots, k \quad (7)$$

$$Z_{ij} \in \{0,1\}; \quad i=1, 2, \dots, k \quad j=1, 2, \dots, n_i \quad (8)$$

$$X_{ij} : \text{integer.} \quad i=1, 2, \dots, k \quad j=1, 2, \dots, n_i \quad (9)$$

مفروضات مسئله

مفروضات مسئله فوق بدین شرح است:

- هر کدام از اجزا در هر زیرسیستم، دارای هزینه، حجم و وزن مشخص می‌باشند؛
- نرخ خرابی قطعات در هر زیرسیستم می‌تواند از توابع توزیع مختلف پیروی نماید؛
- اجزای تعمیر پذیر بوده و نرخ تعمیر آنها در هر زیرسیستم می‌تواند از توابع توزیع مختلف پیروی نماید؛

- از کارافتادگی اجزا مستقل از یکدیگر می‌باشد؛
 - اجزای سیستم تنها دو وضعیت سالم و خراب دارند؛
 - هر تعمیرکار در هر لحظه فقط بر روی یک جزء کار می‌کند؛
 - در هر زیرسیستم قطعات متنوعی برای انتخاب وجود دارد؛
 - در هر زیرسیستم فقط یک نوع قطعه را می‌توان انتخاب کرد؛
 - در هر زیرسیستم از تعداد مشخصی از قطعات می‌توان استفاده کرد؛
 - سیستم زمانی از کار می‌افتد که یک زیرسیستم به طور کامل از کار بیافتد.
- قابل ذکر است از آنجا که افزایش قابلیت اطمینان و ماندگاری سیستم از دغدغه‌ها و چالش‌های اصلی مدیران و اندیشمندان حوزه نظامی است، در نتیجه تابع هدف اول (رابطه شماره ۱) با این منظور وارد مدل شده است. در این تابع بیشینه‌سازی میانگین زمان قبل از اولین خرابی کل سیستم مورد توجه قرار گرفته است. طبیعی است در سیستم‌های سری، زمانی که هر کدام از زیرسیستم‌ها خراب شود کل سیستم از کار می‌افتد و بدین ترتیب می‌توان به جای ماکزیمم کردن ماندگاری کل سیستم، کمترین ماندگاری زیرسیستم‌ها را ماکزیمم کرد. همچنین از آنجا که سیستم تعمیرپذیر است، برابر توضیحات بخش مقدمه 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 مدل کرده که همواره در طراحی تجهیزات نظامی مورد تأکید بوده است. رابطه شماره ۳ و ۴ محدودیت‌های مربوط به حد بالای حجم و وزن سیستم را تعیین کرده است 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 مربوط به حداکثر تعداد مجاز اجزاء افزونه در کل سیستم را مورد تأکید قرار داده است. همچنین با کمک رابطه شماره ۶ حداقل و حداکثر تعداد قطعه در هر زیرسیستم در صورت استفاده از نوع قطعه مورد نظر قابل تعریف خواهد بود. رابطه شماره ۷ نیز با کمک متغیر صفر و یک (Z_{ij}) نشان می‌دهد که برابر مفروضات مسئله، در هر زیرسیستم تنها از یک نوع قطعه می‌توان استفاده نمود. در نهایت روابط شماره ۸ و ۹ جنس متغیرها را مورد تأکید قرار داده که بر مبنای آن متغیر Z می‌تواند اعداد صفر و یک و متغیر X می‌تواند اعداد صحیح را بپذیرد.

روش حل مسئله

از آنجا که مسئله تخصیص افزونگی در گروه مسائل سخت قرار دارد (چرن، ۱۹۹۲)، نیازمند بهره‌گیری از تکنیکی مناسب از گروه مدل‌های فراابتکاری بوده که با توجه به چندهدفه بودن مدل مسئله از تکنیک الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب ۲ (NSGAI) استفاده خواهد شد. همچنین به منظور امکان‌پذیری بررسی نرخ خرابی مختلف، از روش‌های ریاضی و تحلیلی نمی‌توان بهره جست و در نتیجه تکنیک شبیه‌سازی روش پیشنهادی تحقیق حاضر خواهد بود. در ادامه به تشریح کلی این دو تکنیک پرداخته می‌شود.

الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب ۲ (NSGAI)

الگوریتم ژنتیک یکی از مؤثرترین روش‌های فراابتکاری برای حل مسائل سخت (NP-HARD) است که برای نخستین بار توسط جان هالند در سال ۱۹۷۵ در دانشگاه میشیگان مطرح شد. الگوریتم ژنتیک بر خلاف روش‌های جستجوی متداول، با یک مجموعه از جواب‌های تصادفی که جمعیت نامیده می‌شوند که حدود یا محدودیت‌های مسئله را ارضا می‌کنند، شروع به کار می‌کند. هر یک از افراد این جمعیت کروموزوم نامیده می‌شود که بیانگر یک حل از مسئله در حال بررسی است. کروموزوم یک رشته‌ای از نمادهاست که از تکرارهای متوالی که نسل نامیده می‌شود، استنتاج می‌شوند. در طول هر نسل، کروموزوم با استفاده از روش‌های برازندگی، تکامل می‌یابد. برای تولید نسل بعدی، کروموزوم‌های جدید که فرزند^۱ نامیده می‌شوند، از طریق پیوند دو کروموزوم از نسل کنونی با استفاده از عملگر تقاطع^۲ و اصلاح کروموزوم با استفاده از یکی دیگر از انواع عملگرهای ژنتیکی به نام عملگر جهش^۳ ایجاد می‌شوند. نسل جدید به وسیله عملگر انتخاب و بر اساس مقادیر برازندگی بعضی از والدین و فرزندان و حذف بقیه آنها به منظور ثابت نگه داشتن اندازه جمعیت ایجاد می‌شود.

روش الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب ۲ محبوب‌ترین و پرکاربردترین روش ژنتیک برای بهبودسازی مسائل چندهدفه است (بشیری و جلیلی، ۱۳۹۳). این الگوریتم از اصول

1. offspring
2. crossover operator
3. mutation operator

انتخاب طبیعی داروین برای یافتن فرمول یا جواب بهینه به منظور پیش‌بینی یا تطبیق الگو استفاده می‌کند (البرزی، ۲۰۰۹: ۱۳-۱۴).

روش کار و الگوریتم کلی این تکنیک بدین شرح است:

۱- جمعیت والدین (P_t) و جمعیت فرزندان (Q_t) با هم ادغام‌شده و جمعیت R_t را پدید می‌آورند. اکنون باید N جواب برتر R_t انتخاب‌شده و جمعیت والدین جدید یعنی P_{t+1} را تشکیل دهند.

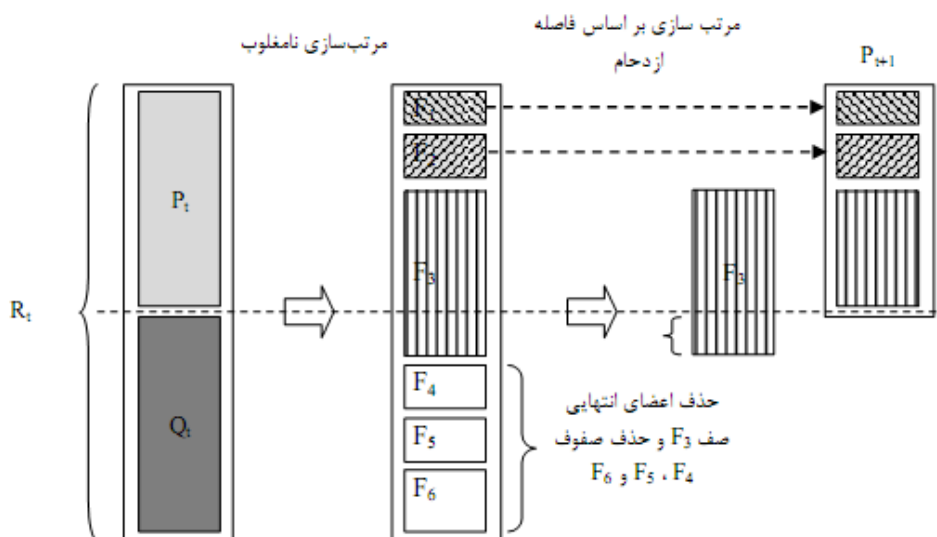
۲- عملیات مرتب‌سازی ناچیره روی R_t و تعیین مرزهای مختلف آن که با $(F_i; i=1,2,\dots)$ نشان داده می‌شود، تعیین می‌گردند.

۳- روند قرار گرفتن جواب‌ها در جمعیت، از جواب‌های متعلق به مرز نخست یعنی F_1 آغاز می‌شود و تا زمانی که با اضافه شدن اعضای هر مرز، تعداد اعضای جمعیت همچنان از N کمتر باشد، این روند ادامه می‌یابد.

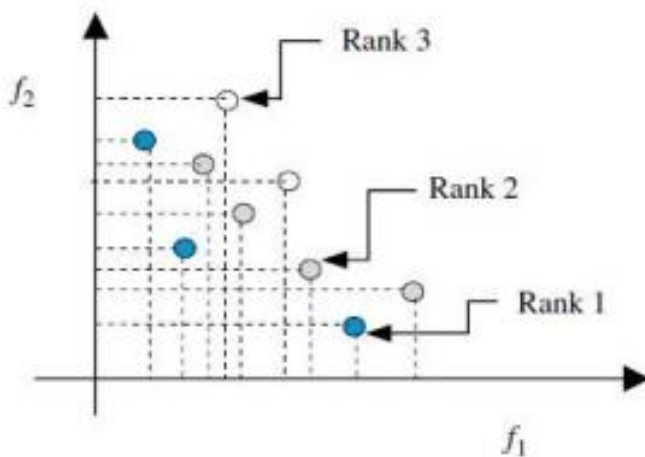
۴- اگر مجموع اعضای مرز λ ام با تعداد اعضای کنونی جمعیت از N بیشتر شود؛ یعنی: $|F_\lambda| + N > |P_{t+1}|$ فاصله تراکم هر جواب محاسبه می‌شود و تعداد $(N - |P_{t+1}|)$ تا از جواب‌ها که دارای بالاترین فاصله تراکم هستند، به جمعیت افزوده می‌شوند.

۵- جمعیت فرزندان جدید (Q_{t+1}) با به کارگیری عملگرهای گزینش رقابتی تراکم‌محور، تقاطع و جهش روی P_{t+1} پدید می‌آیند.

روش کار الگوریتم در شکل ۴ و مرتب‌سازی جواب‌های نامغلوب در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۴: روش کار الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب



شکل ۵: مرتب‌سازی جواب‌های نامغلوب برای دو تابع هدف مینیمم‌سازی

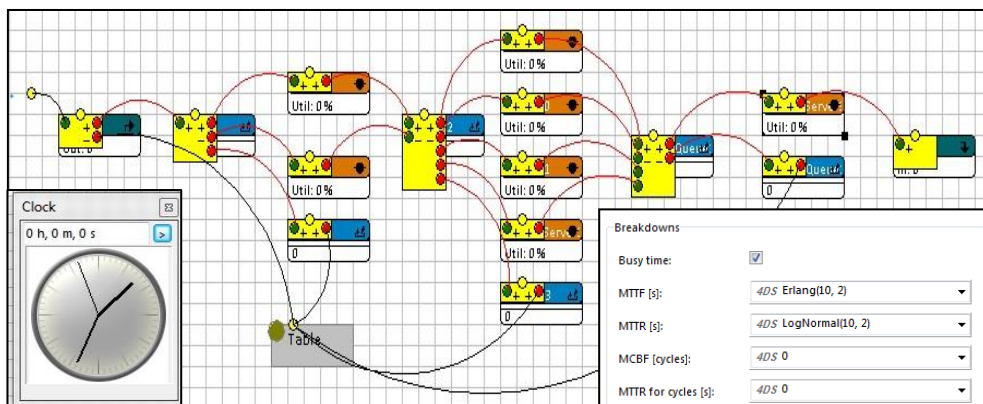
تکنیک شبیه‌سازی

شبیه‌سازی علم و هنر ساختن مدلی از یک پروسه یا سیستم، به منظور ارزیابی و آزمایش راهبردها است، یا به عبارت دیگر روشی برای آگاهی از نتایج ایده‌های پیشنهادی قبل از اجرای آنها^۱ محسوب می‌شود. شبیه‌سازی تقلیدی از عملکرد فرایند با سیستم واقعی با گذشت زمان است. برخی مدل‌ها چنان ساده‌اند (یا با مفروضاتی ساده فرض می‌شوند) که با روش‌های ریاضی قابل حل می‌باشند. اما بسیاری سیستم‌های واقعی چنان پیچیده‌اند که حل ریاضی مدل‌هایشان در عمل ناممکن است، در این‌گونه موارد به منظور تقلید رفتار سیستم با گذشت زمان می‌توان از شبیه‌سازی عددی رایانه استفاده کرد. شبیه‌سازی داده‌هایی را فراهم می‌آورد گویی که سیستم واقعی را مشاهده می‌کنیم. از داده‌های به وجود آمده از شبیه‌سازی برای برآورده کردن معیارهای سنجش عملکرد سیستم استفاده می‌شود.

در مسئله تخصیص افزونگی در اکثر تحقیقات گذشته اجزای تعمیرناپذیر و یا دارای نرخ خرابی با توزیع نمایی فرض گردیده که در نتیجه با کمک روش‌های ریاضی و تحلیلی قابل بررسی و تحلیل بودند. اما در تحقیق حاضر که اجزای تعمیرپذیر و دارای نرخ خرابی غیرنمایی می‌باشند، استفاده از روش‌های ریاضی و تحلیلی امکان‌پذیر نبوده و در نتیجه استفاده از تکنیک شبیه‌سازی راهگشا خواهد بود. بنابراین در این نوشتار با کمک این تکنیک سعی در برآورد و تحلیل نتایج حاصل از آرایش‌های مختلف عناصر مزاد در سیستم سری موازی خواهیم نمود. برای این منظور از نرم‌افزار ED^۲، به عنوان یکی از پرکاربردترین نرم‌افزارهای به کار رفته در زمینه مدل‌سازی و شبیه‌سازی استفاده می‌گردد.

شکل ۶ مدل شبیه‌سازی یک سیستم شامل سه زیرسیستم با تابع خرابی ارلانگ و تابع تعمیر نرمال لگاریتمی را نشان می‌دهد.

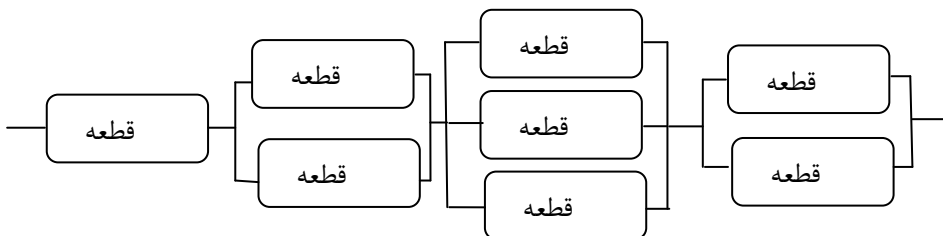
-
1. simulation is seeing before being
 2. Enterprise Dynamic Simulation Software



شکل ۶: شبیه‌سازی یک سیستم با تابع توزیع خرابی ارلانگ و تابع توزیع تعمیر نرمال لگاریتمی

نمونه مطالعاتی نظامی

برای تشریح کامل مدل و روش حل پیشنهادی، آرایش سری موازی قطعه‌ای از یک بی‌سیم نظامی در شکل ۷ نمایش داده شده است. 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.



شکل ۷: آرایش سری - موازی قطعه‌ای از بی‌سیم نظامی

برای بهبود قابلیت اطمینان قطعه مذکور در مرحله طراحی محصول، به دنبال یافتن تعداد و نوع بهینه اجزای افزونه در هر زیرسیستم با در نظر گرفتن متغیرهایی مانند هزینه کل، حجم کل و وزن کل می‌باشیم.

مدل ریاضی مسئله برای نمونه مطالعاتی به شکل زیر فرموله شده است:

$$\text{Max } Z = \text{Min} (MTTFF_1, MTTFF_2, MTTFF_3, MTTFF_4) \quad (10)$$

$$\text{Min } C_s = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^{n_i} C_{ij} X_{ij}; \quad (11)$$

St:

$$\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^{n_i} W_{ij} X_{ij} \leq W_s; \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^{n_i} V_{ij} X_{ij} \leq V_s; \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^{n_i} X_{ij} \leq S; \quad (14)$$

$$L_{ij} Z_{ij} \leq X_{ij} \leq M_{ij} Z_{ij} \quad i=1, 2, 3, 4 \quad j=1, 2, \dots, n_i \quad (15)$$

$$\sum_{j=1}^{n_i} Z_{ij} = 1; \quad i=1, 2, 3, 4 \quad (16)$$

$$Z_{ij} \in \{0, 1\}; \quad i=1, 2, 3, 4 \quad j=1, 2, \dots, n_i \quad (17)$$

$$X_{ij} : \text{integer.} \quad i=1, 2, 3, 4 \quad j=1, 2, \dots, n_i \quad (18)$$

مشخصات مربوط به قطعات موجود برای انتخاب در هر زیرسیستم به تفکیک در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲: مشخصات قطعات مختلف در هر زیرسیستم

حجم	وزن	هزینه	نرخ تعمیر	نرخ خرابی	نوع	حداکثر تعداد	حداقل تعداد	زیرسیستم
قطعه	قطعه	قطعه			قطعه	قطعه	قطعه	
۳۲۰	۲۵۰	۱۳۵	LogNormal(10,3)	Erlang (10,2)	۱			
۳۹۰	۳۰۰	۱۲۰	LogNormal(10,4)	Erlang (10,3)	۲	۳	۱	۱
۳۴۰	۲۷۰	۱۳۰	LogNormal(6,2)	Erlang (8,1)	۳			
۱۸۰	۱۵۰	۱۱۰	LogNormal(5,1)	Weibull(10,2)	۱			
۲۵۰	۲۰۰	۸۵	LogNormal(5,2)	Weibull(10,1)	۲	۴	۱	۲
۲۲۰	۱۸۰	۹۸	LogNormal(5,1)	Weibull(10,3)	۳			
۳۰۰	۲۵۰	۷۵	LogNormal(10,3)	Weibull(10,2)	۴			
۱۲۰	۱۰۰	۹۰	Uniform (5,15)	Erlang (10,1)	۱			
۱۸۰	۱۵۰	۷۰	Uniform (3,12)	Erlang (10,2)	۲	۵	۱	۳
۲۰۰	۱۷۰	۶۵	Uniform (4,10)	Erlang (10,2)	۳			
۱۷۰	۱۳۰	۸۰	Uniform (5,10)	Erlang (10,3)	۴			
۴۲۰	۳۵۰	۱۴۵	LogNormal(10,2)	NegExp(10)	۱			
۴۵۰	۴۰۰	۱۳۰	LogNormal(10,3)	NegExp(9)	۲	۴	۱	۴
۳۵۰	۲۸۰	۱۵۵	LogNormal(10,3)	NegExp(10)	۳			
۱۱	تعداد مجاز کل قطعات افزونه			۳۲۰۰	حجم کل مجاز	۲۵۰۰		وزن کل مجاز

برای حل مسئله در ابتدا مدل مسئله را در نرم افزار ED شبیه سازی کرده و پس از اجرای ۱۰ تکرار در مدت زمان ۱۰۰۰ ساعت، متوسط زمان ماندگاری زیرسیستم ها را محاسبه می نماییم. سپس با کمک الگوریتم NSGAI تعداد و نوع بهینه قطعات مازاد را با توجه به مشخصه های ارائه شده در جدول ۲ تعیین می کنیم. برای این منظور می بایست در مرحله اول سطوح بهینه پارامترهای الگوریتم ژنتیک را با کمک روش طراحی آزمایش های تاگوچی محاسبه کنیم. هدف این روش به دست آوردن نتایج قابل اطمینان و مناسب بر مبنای تعداد

محدودی مشاهده است (دادج^۱، ۲۰۰۸). نتایج حاصل از طراحی آزمایشات تاگوچی برای سطوح بهینه پارامترهای الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب ۲ در جدول ۳ ارائه گردیده است.

جدول ۳: سطوح بهینه پارامترهای الگوریتم NSGAII

سطوح بهینه	نمادها	پارامترها
۲۰۰	Max-It	تعداد دفعات اجرا
۱۰۰	N-pop	تعداد اعضای جمعیت
۰٫۸۵	P-Crossover	احتمال تقاطع
۰٫۱۵	P-Mutation	احتمال جهش

در ادامه و پس از حل مدل در نرم‌افزار مطلب و تعیین جواب‌های بهینه نامغلوب (مجموعه پارتو)، می‌بایست مناسب‌ترین جواب را انتخاب نماییم. چند روش برای انتخاب بهترین جواب روی جبهه کارایی وجود دارد. یکی از پرکاربردترین روش‌ها که به وسیله اشناور و همکاران^۲ در سال ۱۹۹۰ ارائه شد، روش L_p norm می‌باشد. این روش برای یافتن بهترین جواب، فاصله نقاط روی جبهه کارایی را از جواب ایده‌آل مینیمم می‌کند. برای یافتن بهترین جواب با کمک این روش رابطه شماره ۱۳ پیشنهاد گردیده است (کاسپرزاک و لوییز^۳، ۲۰۰۰).

$$\text{Min} \left(\sum_{i=1}^m \left(\frac{f_i(x) - f_i^{\min}}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} \right)^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad (13)$$

که در این رابطه f_i^{\max} و f_i^{\min} کمترین و بیشترین ارزش تابع هدف i ام در نقاط بهینه پارتو را نشان داده و m نیز تعداد اهداف مسئله را نشان می‌دهد.

1. Dodge
2. Eschenauer et al
3. Kasprzak and Lewis

در این تحقیق با توجه به دو تابع هدف مفروض، از روش L_2 norm ($p=2$) استفاده می‌شود. بر مبنای این روش، نقطه‌ای از جبهه کارایی بهترین جواب است که از نظر هندسی کمترین فاصله را با نقطه ایده‌آل دارد (کاسپرزاک و لوییز، ۲۰۰۱). برای استفاده از این رابطه در ابتدا می‌بایست تابع هدف ماکزیمم‌سازی به مینیمم‌سازی تبدیل شود و سپس مقدار L_2 برای حالات مختلف محاسبه تا کمترین مقدار به عنوان گزینه برتر انتخاب شود.

جدول ۴ مجموعه جواب‌های نامغلوب به دست آمده (مجموعه پارتو) از حل مدل را به همراه مشخصه‌های سیستمی و مقدار L_2 هر جواب نشان می‌دهد.

جدول ۴: مجموعه جواب‌های به دست آمده از الگوریتم NSGAII

L_2	مشخصه‌های سیستم					توابع هدف		شماره پاسخ‌ها (مجموعه پارتو)
	زیرسیستم‌ها				متغیر تصمیم	هزینه کل سیستم	متوسط زمان ماندگاری سیستم	
	شماره ۴	شماره ۳	شماره ۲	شماره ۱				
۰٫۸۵۹۸۱	۳	۳	۲	۳	نوع قطعه	۱۵۵۰	۲۴۲٫۷۶	۱
	۱	۳	۲	۱	تعداد قطعه			
۰٫۷۷۲۹۹	۳	۱	۱	۲	نوع قطعه	۱۶۱۰	۲۵۳٫۰۶	۲
	۲	۳	۳	۲	تعداد قطعه			
۰٫۸۷۰۵۲	۳	۲	۳	۱	نوع قطعه	۱۸۲۰	۲۹۴٫۴۵	۳
	۴	۴	۴	۳	تعداد قطعه			
۱	۳	۴	۲	۳	نوع قطعه	۱۴۹۰	۲۳۱٫۲۵	۴
	۱	۲	۱	۱	تعداد قطعه			
۰٫۷۳۶۵۵	۲	۴	۴	۲	نوع قطعه	۱۷۲۰	۲۷۳٫۶۷	۵
	۳	۴	۲	۲	تعداد قطعه			
۱	۱	۱	۲	۳	نوع قطعه	۱۸۷۵	۳۰۵٫۷۸	۶
	۴	۵	۴	۳	تعداد قطعه			
۰٫۷۲۶۸۱	۳	۴	۳	۱	نوع قطعه	۱۶۵۰	۲۶۱٫۳۴	۷
	۳	۲	۳	۲	تعداد قطعه			

۰/۸۰۱۸۵	۲	۳	۳	۲	نوع قطعه	۱۷۸۰	۲۸۵/۲۹	۸
	۴	۴	۳	۲	تعداد قطعه			
۰/۷۲۱۶۳	۲	۲	۴	۳	نوع قطعه	۱۶۸۰	۲۶۶/۵۴	۹
	۲	۴	۳	۲	تعداد قطعه			
۰/۸۳۲۶۹	۲	۱	۲	۲	نوع قطعه	۱۶۰۵	۲۴۷/۸۵	۱۰
	۲	۳	۲	۲	تعداد قطعه			
۰/۷۵۹۹۸	۲	۳	۴	۱	نوع قطعه	۱۷۵۰	۲۷۹/۸	۱۱
	۳	۴	۳	۲	تعداد قطعه			
۰/۸۳۶۶۵	۳	۳	۳	۲	نوع قطعه	۱۸۰۵	۲۹۲/۷۵	۱۲
	۴	۵	۳	۳	تعداد قطعه			
۰/۹۴۲۹۳	۳	۲	۱	۳	نوع قطعه	۱۵۱۵	۲۳۵/۶۷	۱۳
	۱	۲	۲	۱	تعداد قطعه			

همان‌طور که در جدول فوق مشخص است جواب شماره ۹ با متوسط زمان ماندگاری ۲۶۶/۵۴ و هزینه کل ۱۶۸۰ و تعداد و نوع قطعه مشخص شده به دلیل داشتن کمترین مقدار L_2 به عنوان بهترین پاسخ انتخاب می‌شود. ضمن آنکه محدودیت‌های حجم کل، وزن کل و تعداد مجاز اجزای افزونه را نیز رعایت نموده است. در نتیجه برای رسیدن به بیشترین قابلیت اطمینان (بالاترین زمان ماندگاری سیستم) با کمترین هزینه می‌بایست در زیرسیستم اول ۲ قطعه نوع سوم، در زیرسیستم دوم ۳ قطعه نوع چهارم، در زیرسیستم سوم ۴ قطعه نوع دوم و در زیرسیستم چهارم ۲ قطعه نوع دوم استفاده شود. قابل ذکر است هر ۱۳ پاسخ ارائه شده به وسیله الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب ۲ در جدول ۴، جواب‌های موجهی هستند که نسبت به سایر جواب‌ها در یک هدف بهتر و در یک هدف ضعیف‌تر بوده و مجموعه‌ای از جواب‌های نامغلوب را تشکیل داده‌اند. اما جواب شماره ۹ بر مبنای منطق L_2 norm از نظر هندسی کمترین فاصله را با نقطه ایده‌آل داشته و در نتیجه به عنوان بهترین جواب انتخاب می‌شود.

لازم به ذکر است که تمامی محاسبات از طریق یک PC با چهار گیگابایت RAM و پردازشگر Core 2 duo انجام شده است. همچنین برای تنظیم مؤلفه‌های الگوریتم از نرم‌افزار

Minitab 17.1 و برای عملیات شبیه‌سازی از نرم‌افزار ED 8.1 و برای اجرای کدهای الگوریتم ژنتیک از نرم‌افزار Matlab (R2009a) استفاده گردیده است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

قابلیت اطمینان بالا نگرانی استفاده از محصول را در طول زمان کاهش می‌دهد و به این علت قابلیت اطمینان همواره دغدغه صنایع حساس، پیچیده و مهمی مانند صنایع نظامی بوده است (کرباسیان و قوچانی، ۱۳۹۰). لذا طراحی تجهیزات و تسلیحات با قابلیت اطمینان بالا یکی از اهداف و چالش‌های اصلی مهندسان و اندیشمندان حوزه‌های نظامی و دفاعی بوده و در سالیان اخیر تلاش‌های زیادی برای بهبود پارامترهای مرتبط با آن پیشنهاد گردیده است. یکی از روش‌های متداول در صنایع مختلف، استفاده از اجزای مازاد در کنار قطعات اصلی سیستم‌ها به شکل موازی است که این تخصیص افزونگی همواره با محدودیت‌های منابع مالی، وزن و فضای استقرار مواجه خواهد شد و نیازمند برقراری تعادلی مناسب و بهینه میان مؤلفه‌های موجود می‌باشد. بررسی مطالعات گذشته نشان می‌دهد که تحلیل مسئله تخصیص افزونگی در حالت دوهدفه (بیشینه‌سازی ماندگاری سیستم و کمینه‌سازی هزینه سیستم) به شکلی که تعمیر مجاز بوده و امکان بررسی نرخ خرابی و تعمیر با توابع توزیع غیرنمایی فراهم باشد، مورد توجه و تأکید قرار نگرفته است. حال آنکه در محیط عملیاتی و شرایط نظامی اعمال مفروضاتی مانند تعمیرپذیر نبودن قطعات و سیستم‌ها و یا نرخ خرابی ثابت و نمایی برای قطعات، توجیه‌پذیر نبوده و مسئله را از شرایط واقعی و کاربردی دور می‌کند. لذا در این تحقیق تلاش گردید مفروضات پیش‌گفته را حذف و ضمن ارائه مدلی کاربردی و نزدیک به شرایط واقعی، راه‌حلی مناسب و علمی نیز شناسایی و معرفی گردد. در نتیجه تحقیق حاضر ضمن نوآوری در مدل‌سازی مسئله تخصیص افزونگی، با کمک روش‌های فراابتکاری چندهدفه و تکنیک شبیه‌سازی، رویکرد ترکیبی جدید برای حل مسئله نیز پیشنهاد نموده است. برای این منظور در ابتدا مسئله را با نرخ خرابی و تعمیر دلخواه شبیه‌سازی نموده و پس از تعیین متوسط زمان ماندگاری زیرسیستم‌ها، با کمک تکنیک الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب ۲ که مختص مسائل NP-Hard چندهدفه است، مدل را حل نموده و پاسخ بهینه را با کمک منطق Lp norm شناسایی و معرفی نمودیم. ضمن آنکه برای تشریح کامل مدل و روش حل پیشنهادی،

نمونه مطالعاتی از یک بی‌سیم نظامی مدل گردیده و با تکنیک‌های مذکور حل و تعداد و نوع بهینه اجزای مازاد شناسایی و معرفی گردیده است.

نتایج حاصل از تحقیق حاضر و نمونه مطالعاتی مورد بررسی نشان می‌دهد رویکرد ترکیبی تکنیک‌های شبیه‌سازی و الگوریتم‌های فراابتکاری با توجه به توانایی حل هم‌زمان مسائل سخت با نرخ‌های خرابی و تعمیر مختلف راهگشا بوده و جواب‌های بهینه در شرایط واقعی و عملیاتی پیشنهاد می‌دهد. لذا کاربرد رویکردهای ترکیبی مشابه در تجهیزات و تسلیحاتی که نیازمند قابلیت اطمینان بالا، ضمن در نظر گرفتن متغیرهایی مانند هزینه، حجم و وزن می‌باشند، مثر ثمر بوده و تأثیر بسزایی در بهبود طراحی قطعات و تجهیزات نظامی خواهد داشت. همچنین مباحثی از قبیل بررسی و مقایسه نتایج سایر الگوریتم‌های فراابتکاری، بررسی مفاهیم عدم قطعیت با کمک مؤلفه‌های فازی، استفاده هم‌زمان از دو نوع مؤلفه مازاد فعال و آماده به کار می‌تواند بستری مناسب برای تحقیقات آتی محسوب شود.

فهرست منابع

- اردانه، علی (۱۳۹۴). بهینه‌سازی دسترس‌پذیری سیستم‌های سری- موازی با اجزای سه‌حالتی تعمیرپذیر. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، مؤسسه آموزش عالی رجا، دانشکده فنی و مهندسی.
- امیری، مقصود (۱۳۹۳). *قابلیت اطمینان*. تهران: انتشارات آن.
- بشیری، مهدی و جلیلی، مجید (۱۳۹۳). *الگوریتم ژنتیک در فضای تک و چندهدفه (مفاهیم و ابزارها)*. تهران: انتشارات دانشگاه شاهد.
- بشیری، مهدی و کریمی، حسین (۱۳۹۲). *کاربرد الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری در طراحی سیستم‌های صنعتی و استفاده از نرم‌افزار مطلب در به‌کارگیری آنها*. تهران: 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. خازنده، 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، ۱۸ (۵)، ۱-۱۴.

حیدری، کیومرث. قمری، موسی‌الرضا و کلانتری، فتح‌الله (۱۳۹۳). راهبردشناسی جنگ‌های آینده (با نگاهی به بیانات مقام معظم رهبری). تهران: سازمان عقیدتی سیاسی ارتش جمهوری اسلامی ایران، نشر آجا.

رمضانی، 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.

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.

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 فراابتکاری. پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین.

سید اصفهانی، میرمه‌دی. حاجیان حیدری، مجتبی و جابری، سعید (۱۳۹۲). ارائه الگوریتم شبیه‌سازی تیرید به منظور بهبودسازی قابلیت اطمینان سیستم‌های سری موازی، k از n و جانشینی با پارامترهای فازی. نشریه بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، ۲۴ (۴)، ۴۱۴-۴۲۲.

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

عالم تبریز، اکبر. زندیه، مصطفی و محمدرحیمی، علیرضا (۱۳۹۲). الگوریتم‌های فراابتکاری در بهینه‌سازی ترکیبی، چاپ سوم. تهران: انتشارات صفار.

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.

عظیمی، پرهام و همکاران (۱۳۹۲). بهینه‌سازی از طریق شبیه‌سازی و آموزش نرم‌افزار شبیه‌سازی ED. قزوین: دانشگاه آزاد اسلامی.

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 مدل سازی حرارتی. دومین همایش ملی فناوری های نوین دریایی، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی.

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

کرباسیان، مهدی و طباطبائیان، لیلیا (۱۳۸۸). آشنایی با قابلیت اطمینان. اصفهان: انتشارات ارکان دانش.

کرباسیان، مهدی و قوچانی، محمدمهدی (۱۳۹۰). تخصیص قابلیت اطمینان. تهران: انتشارات ناقوس. مهرگان، محمدرضا (۱۳۸۲). مدل سازی ریاضی، چاپ اول. تهران: دانشکده مدیریت دانشگاه تهران و سازمان مطالعه و تدوین کتب دانشگاهی (سمت).

هوشمند، مهرناز (۱۳۹۵). طراحی سیستم های پایایی با رویکرد دسترس پذیری و انتخاب استراتژی افزونگی در هر زیرسیستم با اجزای تعمیرپذیر به کمک الگوریتم های فراابتکاری. پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین.

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.

Abouei Ardakan, M., & Hamadani, A. Z. (2014). Reliability–redundancy allocation problem with cold-standby redundancy strategy. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 42, 107–118.

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

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.

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.

Beji, N., Jarbouli, B., Eddaly, M., & Chanchoub, H. (2010). A hybrid particle swarm optimization algorithm for the redundancy allocation problem. *Journal of Computational Science*, 1, 159–166.

- Bennett, D. A., Wade, G. A., & Armstrong, M. P. (1999). Exploring the Solution Space of Semi-structured Geographical Problems Using Genetic Algorithms. *Transactions in GIS*, 3(1), 51-71.
- Bulfin, R. L., & Liu, C. Y. (1985). Optimal allocation of redundant components for large systems. *IEEE Transactions on Reliability*, 34, 241-248.
- Busacca, P. G., Marseguerra, M., & Zio, E. (2001). Multi objective Optimization by Genetic Algorithms: Application to Safety Systems. *Reliability Engineering and System Safety*, 72, 59-74.
- Chern, M. S. (1992). On the computational complexity of reliability redundancy allocation in a series system. *Operations Research Letters*, 309-315.
- Chung, C. A. (2004). *Simulation Modelling handbook: A practical approach*. CRC press.
- Coit, D. W., & Smith, A. E. (1996). Reliability Optimization of Series-Parallel Systems Using a Genetic Algorithm. *IEEE Transactions on Reliability*, 2, 1-5.
- Coit, D. W. (2003). Maximization of System Reliability with a Choice of redundancy Strategies. *IIE Transactions*, 35(6), 535-543.
- Dolatzshahi-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.
- Eschenauer, H., Koski, J., & Osyczka, A. E. (1990). *Multicriteria design optimization: procedures and applications*. New York: Springer-Verlag.
- Fyffe, D. E., Hines, W. W., & Lee, N. K. (1968). System reliability allocation and a computational algorithm. *IEEE Transaction on Reliability*, 64-69.
- Gen, M., Ida, K., & Lee, J. U. (1990). A computational algorithm for solving 0-1 goal programming with GUB structures and its application for optimization problems in system reliability. *Electronics and Communications in Japan*, 73(3), 88-98.
- Jiansheng, G., Zutong, W., Mingfa, Z., & Ying, W. (2014). Uncertain multiobjective redundancy allocation problem of repairable systems based on artificial bee colony algorithm. *Chinese Journal of Aeronautics*, 27(6), 1477-1487.
- Kasprzak, E. M., & Lewis, K. E. (2000). An approach to facilitate decision trade-offs in Pareto solution sets. *Journal of Engineering Valuation and Cost Analysis*, 3(1), 173-87.
- Kasprzak, E. M., & Lewis, K. E. (2001). Pareto Analysis in Multi objective Optimization Using the Colinearity Theorem and Scaling Method. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 22(3), 208-218.

- 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*, in Press.
- Konak, S. k., Smith, A. E., & Coit, D. W. (2003). Efficiently Solving the Redundancy Allocation Problem Using Tabu Search. *IIE Transaction*, 35, 515-526.
- Kong X., Gao, L., & Ouyang, H. Li. S. (2015). Solving the redundancy allocation problem with multiple strategy choices using a new simplified particle swarm optimization. *Reliability Engineering and System Safety*, 144, 147-58.
- Kumar, V., & Mishra, S. (2008). *Application of Genetic Algorithm in Reliability Optimization*. XXXII National Systems Conference, NSC 2008.
- Kuo, W., & Prasad, V. R. (2000). An annotated overview of system-reliability optimization. *IEEE Transaction on Reliability*, 2(49), 176-187.
- 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.
- Li, Y. F., & Peng, R. (2014). Availability modeling and optimization of dynamic multi-state series-parallel systems with random reconfiguration. *Reliability Engineering and System Safety*, 127, 47-57.
- Li, Z., Liao, H., & Coit, D. W. (2009). A two Stage Approach for Multi-Objective Decision Making with Applications to System Reliability Optimization. *Reliability Engineering and System Safety*, 94, 1585-1592.
- Liang, Y. C., & Chen, Y. C. (2007). Redundancy allocation of series-parallel systems using variable neighborhood search algorithms. *Reliability Engineering and System Safety*, 92, 323-331.
- 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.
- Nahas, N., Nourelfath, M., & Ait-Kadi, D. (2007). Coupling ant colony and the degraded ceiling algorithm for the redundancy allocation problem of series-parallel systems. *Reliability Engineering and System Safety*, 211-222.
- Ng, K. Y. K., & Sancho, N. G. F. (2001). A hybrid dynamic programming/depth-first search algorithm, with an application to redundancy allocation. *IIE Transactions*, 33(12), 1047-1058.
- Nocedal, J., & Wright, S. (1999). *Numerical Optimization*, 1st edition. New York: Springer.

- Ouzineb, M., Nourelfath, M., & Gendreau, M. (2008). Tabu search for the redundancy allocation problem of homogenous series-parallel multi-state systems. *Reliability Engineering and System Safety*, 93, 1257–1272.
- Pourkarim Guilani, P., Azimi, P., Niaki, S. T. A., & Niaki, S. A. A. (2016). Redundancy allocation problem of a system with increasing failure rates of components based on Weibull distribution: A simulation-based optimization approach. *Reliability Engineering and System Safety*, 15(2), 187-196.
- Ramirez-Marquez, J. E., & Coit, D. W. (2004). A heuristic for solving the redundancy allocation problem for multi-state series-parallel system. *Reliability Engineering and System Safety*, 83, 341-349.
- Sajadi, S. J., & Soltani, R. (2015). Minimum–Maximum regret redundancy allocation with the choice of redundancy strategy and multiple choice of component type under Uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*, 79, 204–213.
- Soltani, R., Sajadi, S. J., & Tofigh, A. A. (2014). A model to enhance the reliability of the serial parallel systems with component mixing. *Applied Mathematical Modelling*, 38, 1064–1076.
- Teimouri M., Zaretalab A., Niaki S. T. A., & Sharifi M. (2016). An efficient memory-based electromagnetism-like mechanism for the redundancy allocation problem. *Applied Soft Computing*, 38, 423–36.
- Xie, W., Liao, H., & Jin, T. (2014). Maximizing system availability through joint decision on component redundancy and spares inventory. *European Journal of Operational Research*, 237, 164–176.
- Yeh, W. (2009). A two-stage discrete particle swarm optimization for the problem of multiple multi-level redundancy allocation in series systems. *Expert System with Applications*, 9192-9200.
- Yuan Fan, C., Shu Fan, P., & Chann Chang, P. (2010). A system dynamics modeling approach for a military weapon maintenance supply system. *International Journal of Production Economics International Journal of Production Economics*, 128, 457–469.
- Zaretalab, A., Hajjipour, 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.

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.