فصلنامه فناوری در مهندسی هوافضا
دوره: ۷ / شماره: ۲ / تابستان ۱۴۰۲/ صفحه ۳۷-۲۹
DOI: 10.30699/jtae.2023.7.2.4
علمی- پژوهشی/ تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۳ / تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۰۹

تخصیص بهینه فناوری در زیرسامانه پشتیبان حیات با بیشینه قابلیت اطمینان

میلاد محمودی[۱]، علیرضا باصحبت نوین زاده[۲*]، فرشاد پازوکی[۳]

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی هوافضا، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران

۲*- دانشیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی هوافضا، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران

*** نویسنده مخاطب: novinzadeh@kntu.ac.ir**

در مقاله حاضر یک روش هوشمند برای انتخاب فناوری از میان مجموعه‌ای معلوم از فناوری‌های با هدف بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان زیر سامانه پشتیبان حیات ارائه می‌شود. این رویکرد بر مدل‌سازی مسئله تخصیص بهینه به صورت بهینه‌سازی ترکیباتی و حل آن به روش بهینه‌سازی وال متکی است. به این منظور، لازم است تا تغییراتی بر این روش اعمال شود تا از قابلیت پذیرش قیود بودجه جرمی، توانی و حجمی و نیز پذیرش متغیرهای دودویی برخوردار شود. روش پیشنهادی پس از صحه‌گذاری بر یک مسئله نمونه، اجرا شده و نتایج نشان می‌دهد که روش پایدار است و به ترکیبی از فناوری‌ها با قابلیت اطمینان بیشینه ضمن رعایت قیود مسئله منجر می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تخصیص بهینه، قابلیت اطمینان، زیرسامانه پشتیبان حیات، فضاپیمای سرنشین‌دار

Optimal Technology Allocation of in the Life Support Subsystem with Maximum Reliability

M. Mahmoudi[1], A. Basohbat Novinzadeh[2*], F. Pazuki[3]

1 PhD Student, Department of Aerospace Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University Science and Research Branch, Tehran, Iran

2* Associate Professor, Department of Aerospace, Aerospace Engineering Faculty, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

3 Assistant Professor Department of Aerospace Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University Science and Research Branch, Tehran, Iran

***Corresponding Author: novinzadeh@kntu.ac.ir**

The atmosphere of the Red Planet or Mars contains 95% of carbon dioxide, 3% of nitrogen, 1.6% of argon and only a small amount of oxygen, and in terms of concentration is about one percent of the planet's atmosphere, which makes it virtually impossible for humans to live and survive on Mars. Therefore, it is necessary to find a solution that can provide the necessary oxygen for the survival of living organisms, especially humans, in the Martian atmosphere. Photosynthesis is the most important biochemical reaction on which almost all life depends. This complex process occurs in higher plants, algae and some bacteria such as cyanobacteria. Due to the very low percentage of oxygen in the Martian atmosphere, it seems that the use of photosynthetic species that are anaerobic and tolerant of adverse ecological conditions such as cyanobacteria can provide the oxygen needed by the Red Planet.

Keywords: Optimal assignment, Reliability, Life Support System, Manned Spacecraft

۱ مقدمه

صنایع به طور مستمر از بهینه‌سازی برای کاهش هزینه و افزایش کارایی محصولات خود استفاده می‌کنند. صنعت فضایی نیز به عنوان یک صنعت پیشرو در لبه فناوری در این مسیر قرار دارد. علاوه بر این، سامانه‌های فضایی به دلیل هزینه بالای توسعه و عملیات، محدودیت‌ها و بودجه‌بندی‌های هندسی- فیزیکی، مدت زمان مورد انتظار بالای ماموریت و عدم دسترسی مستقیم پس از پرتاب به فضا نیازمند توجه بیشتری به طراحی بهینه هستند. طراحی این سامانه‌ها با یک یا چند هدف مشخص صورت می‌گیرد. کمینه جرم، کمینه توان الکتریکی مورد نیاز، بیشینه ایمنی سرنسین، کمینه هزینه می‌توانند چنین اهدافی تلقی شوند. به طور کلّی، کارهایی که تاکنون در زمینه بهینه‌سازی طراحی فضاپیماها صورت گرفته را می‌توان به چهار دسته طراحی آیرودینامیکی و هندسی [۱]، بهینه‌سازی‌های سازه‌ای [۲]، جانمایی و چیدمان اجزاء [۳] و انتخاب فناوری [۴] تقسیم کرد.

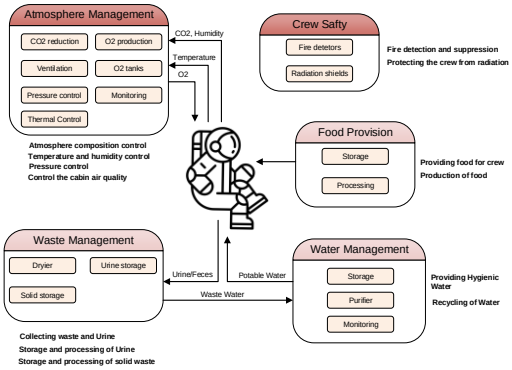
هدف از مقاله حاضر تخصیص فناوری با هدف بیشینه کردن قابلیت اطمینان یک زیرسامانه پشتیبان حیات است. در فضاپیماهای سرنشین‌دار و ایستگاه‌های فضایی، وظیفه تامین شرایط محیطی برای حیات و فعالیت فضانوردان بر عهده زیرسامانه پشتیبان حیات است. به این دلیل، قابلیت اطمینان این زیرسامانه دارای اهمیت زیادی بوده و با ایمنی سرنشینان در ارتباط است. از جمله کارهایی که تاکنون در زمینه بهینه‌سازی بر مبنای قابلیت اطمینان انجام شده می‌توان به [۵] اشاره کرد که در آن، مسئله جانمایی افزونگی برای یک سامانه سریال موازی به کمک الگوریتم ژنتیک حل شده است. در این مسئله، تعدادی مشخص زیرسامانه وجود دارد و برای هر یک امکان انتخاب چند جزء موازی وجود دارد. هدف انتخاب ترکیب اجزاء و سطوح افزونگی است به نحوی که قابلیت اطمینان سامانه بیشینه شود. در [۶] موضوع بهینه‌سازی قابلیت اطمینان در حضور عدم قطعیت پرداخته شده و روش‌هایی تکاملی برای حل مسائل با قیدهای احتمالی پیشنهاد شده است. در [۷] جانمایی بهینه سامانه‌های تولید برق پراکنده مطرح شده است. هدف از بهینه‌سازی، کمینه کردن اتلاف الکتریکی شبکه بوده در عین اینکه پروفایل ولتاژ و قابلیت اطمینان در سطح قابل قبولی باشد. در این حالت، قابلیت اطمینان به صورت یک قید در مسئله بهینه‌سازی لحاظ شده است. در این مقاله نیز از الگوریتم ژنتیک برای حل استفاده شده است. به عنوان یک نمونه دیگر از پژوهش‌هایی که در آن قابلیت اطمینان در قالب قید مسئله مطرح شده و به طور مستقیم در تابع هدف ظاهر نشده است، می‌توان به [۸] اشاره کرد. در این مقاله، مسئله تخصیص بهینه وظایف به ماشین‌های موازی با درنظر گرفتن تعمیر و نگهداری بر مبنای قابلیت اطمینان و اثرات وخامت شغل، مدل‌سازی و پس از خطی‌سازی حل شده است. نتایج یکی دیگر از پژوهش‌هایی که در آن از روش‌های بهینه‌سازی در بحث قابلیت اطمینان استفاده شده در [۹] گزارش شده است. البته این مرجع به بحث تخصیص قابلیت اطمینان پرداخته و از روش گرگ خاکستری برای بهینه‌سازی مسئله استفاده کرده است. همچنین مسئله رسیدن به یک سطح قابلیت اطمینان معین با کمینه هزینه برای سامانه‌های چند مرحله‌ای در [۱۰] مطرح شده که در بخش بهینه‌سازی آن الگوریتم ژنتیک به‌کار رفته است. بهینه‌سازی بر اساس معیارهای اهمیت که تاثیر یک جزء سامانه بر بر عملکرد کلّ آن سامانه را مشخص می‌کنند، در [۱۱] بیان شده است. در این مرجع مدل‌سازی و روش سامانه‌های دودویی، چند مرحله‌ای و زمان پیوسته مرور شده است. از جمله سایر مقالاتی که به موضوع مدل‌سازی و حل مسائل بهینه‌سازی قابلیت اطمینان پرداخته‌اند، می‌توان به [۱۲-۱۴] اشاره کرد.

در مقاله حاضر، مسئله تخصیص فناوری به اجزاء یک زیرسامانه پشتیبان حیات با هدف بیشینه قابلیت اطمینان ترکیب نهایی مطرح می‌شود. نخست، مسئله در قالب یک مسئله تخصیص بهینه غیرخطی با متغیرهای دودویی مدل‌سازی و سپس برای حل آن نسخه‌ای از الگوریتم بهینه‌سازی وال توسعه داده می‌شود. در نهایت الگوریتم روی دو مسئله نمونه، اجرا و ارزیابی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که این روش از کارایی، سرعت و دقت لازم در حل چنین مسائلی که از نوع مسائل ترکیبیاتی پیچیده هستند، برخوردار است.

ساختار مقاله به این صورت تنظیم شده است که در بخش نخست مسئله تخصیص بهینه فناوری بیان می‌شود. سپس مسئله به صورت یک مسئله تخصیص بهینه با متغیرهای دودویی مدل‌سازی می‌شود. در ادامه، روش حل بیان شده و پس از صحه‌سنجی، بر یک مسئله نمونه پیاده‌سازی و تحلیل می‌شود. مقاله در نهایت با بخش نتیجه‌گیری خاتمه می‌یابد.

۲ بیان مسئله

زیرسامانه پشتیبان حیات در فضاپیماهای سرنشین‌دار یکی از اصلی‌ترین بخش‌هاست و وظیفه حفظ حیات و راحتی سرنشینان را بر عهده دارد. تامین شرایط اتمسفری محیط داخل کپسول زیستی یعنی تامین اکسیژن و حذف دی اکسید کربن مازاد، تامین آب آشامیدنی و آب جهت شست و شو، تامین غذا، حذف زباله‌ها و تشخیص و مهار آتش‌سوزی از جمله وظایف این زیرسامانه است. به دلیل تنوع این وظایف، این زیرسامانه به اجزاء مختلفی تقسیم شده که در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.



شکل ۱– اجزای زیرسامانه پشتیبان حیات در یک فضاپیمای سرنشین‌دار [۴]

به عنوان مثال، در شکل ۱ بخش مدیریت اتمسفر دارای ۶ جزء است. برای هر یک از اجزاء طراح در زمان طراحی مفهومی با مجموعه‌ای از فناوری‌های مختلف مواجه است که باید از بین آنها بهترین فناوری را با توجه به الزامات فنی، عملیاتی و حیاتی مرتبط با سرنشین انتخاب کند. هر یک از این فناوری‌ها دارای ویژگی‌های خاص خود است از جمله جرم، حجم، توان الکتریکی مورد نیاز، سطح بلوغ فناوری، هزینه و قابلیت اطمینان. در نتیجه، طراح با در نظر گرفتن اهداف طراحی، باید بهترین ترکیب ممکن از فناوری‌ها را انتخاب کند. به عنوان مثال، سه فناوری تولید اکسیژن را در نظر بگیرید که عبارتند از الکترولیز آب با خوراک ثابت (SFWE)، فناوری الکترولیز بخار آب (WVE[2]) و فناوری رآکتور گرانولی (GBR[3]). همان‌طور که در جدول ۱ مشخص است، این فناوری‌ها مشخصات فنی متفاوتی دارند. به عنوان مثال، فناوری WVE بیشترین میزان اکسیژن را تولید می‌کند ولی از طرف دیگر، توان مصرفی و جرم آن نیز بیشتر است. یا فناوری GBR جرم کمتری دارد ولی تاثیر بیشتری هم بر فشار داخل کپسول دارد.

جدول ۱– مقایسه مشخصات سه فناوری برای تولید اکسیژن مورد نیاز فضانوردان [۴]

فناوری / مشخصه فنی	SFWE	WVE	GBR
جرم (کیلوگرم)	۲۵/۰۶	۴۵/۰	۹/۰
حجم (متر معکب)	۰/۰۰۹	۰/۱۱	۰/۰۰۲
توان مصرفی (وات)	۲۴۳	۶۰۰	۱۵
افزایش فشار کپسول (کیلوپاسکال در روز)	۷۹/۹۹	–	۱۱۲
افزایش دمای کپسول (درجه سانتی گراد در روز)	۰	۰	۱۰۸
میزان اکسیژن تولید (کیلوگرم در روز)	۰/۹۰۷	۲/۵۱	۰/۰۰۰۴

در چنین شرایطی، طراح در پیِ یافتن بهترین ترکیب از فناوری‌هاست که ضمن رعایت الزامات و قیود طراحی، از منظر یک یا چند تابع هدف، طرح نهایی بهینه باشد. با توجه به اهمیت زیرسامانه پشتیبان حیات در سلامت و ایمنی سرنشینان، انتخاب فناوری‌های با قابلیت اطمینان بالاو نرخ خرابی پایین در ماموریت‌های سرنشین‌دار حائز اهمیت است. بنابراین، مسئله مورد بحث در این مقاله تعیین بهترین طراحی از منظر قابلیت اطمینان است. یعنی ترکیبی از میان مجموعه‌ای از فناوری‌های موجود برای زیرسامانه پشتیبان حیات به نحوی انتخاب شود که قابلیت اطمینان کلّ زیرسامانه بیشترین مقدار ممکن باشد. در بخش بعد، این مسئله به صورت یک مسئله برنامه‌ریزی ریاضی از نوع ترکیبیاتی مدل‌سازی می‌شود.

۳ مدل‌سازی مسئله

زیرسامانه پشتیبان حیات یک فضاپیمای سرنشین‌دار مطابق شکل ۱ با ۵ مجموعه‌ی مجزا دارای ۱۷ جزء است. ممکن است در یک ماموریت برخی اجزاء با توجه به طول مدت ماموریت غیرفعال باشند. در حالت کلّی، فرض کنید N_set تعداد مجموعه‌ها باشد و هر مجموعه‌ی i، N_comp (i) جزء دارد و هر جزء j از مجموعه‌ی i دارای N_tech (i,j) فناوریِ در دسترس باشد. جهت مدل‌سازی مسئله به صورت تخصیص بهینه‌ی فناوری‌ها به اجزاء، متغیرهای تصمیم‌گیری زیر به شکل دودویی تعریف می‌شوند:

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{اگر فناوری } k \text{ به جزء } j \text{ از مجموعه } i \text{ تخصیص یابد} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad (۱)$$

که در اینجا

i=1,2, ⋯, N_set, j=1,2, N_comp(i),
k=1,2, ⋯, N_tech (i, j)

مقادیر این متغیرها بیان می‌کنند که کدام فناوری به کدام جزء تخصیص یابد. به عنوان مثال، وقتی مقدار متغیر x_{123} برابر ۱ است یعنی سومین فناوری به دومین جزء از مجموعه شماره ۱ تخصیص یافته است. هر متغیری هم که مقدار آن صفر شود، حاکی از عدم تخصیص فناوری است. لذا هدف مسئله تعیین مقادیر بهینه برای این متغیرهاست که تعداد کلّ آنها برابر است با $\sum_{i=1}^{N_{set}} \sum_{j=1}^{N_{comp(i)}} N_{tech}(i,j)$ گام بعدی تعریف تابع هدف است. در تعیین تابع هدف مسئله یعنی قابلیت اطمینان کل زیرسامانه، ماموریت زیرسامانه پشتیبان حیات، تامین شرایط محیطی برای سلامت و تداوم فعالیت‌های تعریف شده فضانوردان است و فناوری هر جزء با این شرط انتخاب می‌شود. لذا، اجزاء از دید قابلیت اطمینان حالت سری دارند و خرابی هر یک منجر به شکست وظیفه‌ی کل زیرسامانه می‌شود. در نتیجه، قابلیت اطمینان کل زیرسامانه به قابلیت اطمینان هر جزء وابسته است. فرض کنید r_{ijk} عدد قابلیت

1. Static Feed Water Electrolysis
2. Water Vapor Electrolysis
3. Ganoule Based Reactor

اطمینان فناوری k ام برای جزء j ام از مجموعه‌ی i ام باشد که عددی بین ۰ و ۱ است و با تابع بقای آن فناوری تعریف می‌شود. در این صورت، قابلیت اطمینان کلّ این زیرسامانه با ساختار سریال، برابر است با حاصلضرب اعداد قابلیت اطمینان تمام اجزاء ([15]). یعنی باید حاصلضرب شرطی زیر بیشینه شود:

$$J=\prod_{i=1}^{N_{set}}\prod_{j=1}^{N_{comp}(i)}\prod_{k=1}^{N_{tech}(i,j)}\left(r_{ijk}|x_{ijk}=1\right) \qquad (۲)$$

امّا در این تعریف عبارت داخل ضرب شرطی است و باید آن را به گونه‌ای بر حسب متغیرها نوشت که هرگاه $x_{ijk}=1$، عبارت داخلی ضرب برابر r_{ijk} شده و هرگاه $x_{ijk}=0$، عبارت داخل ضرب برابر ۱ شده و اثر فناوری‌های انتخاب نشده از بین می‌رود. به این منظور تابع هدف زیر پیشنهاد می‌شود که این شرط را برآورده می‌سازد.

$$J=\prod_{i=1}^{N_{set}}\prod_{j=1}^{N_{comp}(i)}\prod_{k=1}^{N_{tech}(i,j)}{r_{ijk}}^{x_{ijk}} \qquad (۳)$$

اکنون در بیشینه‌سازی این تابع هدف، آن متغییر x_{ijk} ای ۱ می‌شود که r_{ijk} بیشتری دارد یعنی فناوری‌های با بیشترین قابلیت اطمینان انتخاب می‌شوند.

امّا مسئله حاضر قیدهایی نیز دارد که به دو دسته تقسیم می‌شوند. دسته اوّل قیدها به ماهیت تخصیص باز می‌گردند به این معنی که به هر جز حداقل یک فناوری تخصیص یابد. این قید به صورت زیر بیان می‌شود و رعایت آن، الگوریتم بهینه‌ساز را مجبور می‌کند برای هر جزء j از مجموعه i حداقل یکی از x_{ijk}ها غیرصفر باشد یعنی یک فناوری یا بیشتر انتخاب شود.

$$\sum_{-}(k=1)\hat{}(N_tech\ (i,j))\blacksquare x_ijk\ \geq 1,\quad i=1,2,\cdots,N_set,j=1,2,\cdots,N_comp\ (i) \qquad (۴)$$

دسته دوّم قیود بودجه‌بندی هستند و به الزامات بودجه بندی جرم، توان و حجم باز می‌گردند. به عنوان مثال، اگر حداکثر جرم مجاز برای کلّ زیرسامانه، M_{max} تعریف شده باشد و هر فناوری (i,j,k) دارای جرم m_{ijk} معلوم باشد، قید رعایت جرم زیرسامانه به شکل زیر بیان می‌شود:

$$\sum_{i=1}^{N_{set}}\sum_{j=1}^{N_{comp}(i)}\sum_{k=1}^{N_{tech}(i,j)}x_{ijk}m_{ijk}\leq M_{max} \qquad (۵)$$

همچنین اگر P_max حداکثر توان مصرفی مجاز زیرسامانه و V_max حداکثر مجاز حجم فناوری‌ها باشد و p_ijk و v_ijk به ترتیب توان مصرفی و حجم فناوری‌ها را نشان دهند، قیود مربوطه به شکل زیر خواهند بود:

$$\sum_{i=1}^{N_{set}}\sum_{j=1}^{N_{comp}(i)}\sum_{k=1}^{N_{tech}(i,j)}x_{ijk}p_{ijk}\leq P_{max} \qquad (۶)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{set}}\sum_{j=1}^{N_{comp}(i)}\sum_{k=1}^{N_{tech}(i,j)}x_{ijk}v_{ijk}\leq V_{max} \qquad (۷)$$

بنابراین، مسئله تخصیص فناوری‌ها با هدف بیشینه قابلیت اطمینان به صورت بیشینه‌سازی تابع هدف (۳) و قیود (۴)-(۷) و متغیرهای دودویی تعریف شده در (۱) بیان می‌شود. این مسئله دارای $\sum_{i=1}^{N_{set}}\sum_{j=1}^{N_{comp}(i)}N_{tech}(i,j)$ متغیر دودویی و $3+\sum_{i=1}^{N_{set}}N_{comp(i)}$ قید است و مسئله‌ای بزرگ محسوب می‌شود. به عنوان مثال، اگر آن را مشابه شکل ۱ در نظر بگیریم و فرض کنیم برای هر مجموعه ۳ فناوری موجود است، مسئله دارای ۵۱ متغیر و ۲۰ قید خواهد بود. لذا حل آن با روش‌های متداول مسائل برنامه‌ریزی ریاضی میسر نیست و استفاده از روش‌های فراابتکاری توصیه می‌شود. به این دلیل، در بخش بعد چنین الگوریتمی برای حل این مسئله ارائه می‌شود.

۴ الگوریتم وال در حل مسئله تخصیص

غیرخطی بودن تابع هدف (۲) و تعدد قیود و متغیرهای مسئله تخصیص بهینه که در بخش قبل مطرح شد، نشان می‌دهد که حل آن با روش‌های تحلیلی یا نیمه تحلیلی متداولِ برنامه‌ریزی ریاضی ممکن نیست یا خیلی زمان‌بر است. به عنوان مثال، اگر بخواهیم شمارش کامل را برای آن اجرا کنیم، 51^2 حالت برای متغیرهای مسئله داریم که در هر حالت یک تابع هدف و ۲۰ قید باید محاسبه و بررسی شوند که این تعداد، زیاد و زمان بر است. لذا استفاده از روش‌های فراابتکاری مانند الگوریتم ژنتیک، الگوریتم لانه مورچگان و الگوریتم زنبور عسل توصیه می‌شود. در مقاله حاضر، از روش بهینه‌سازی وال به عنوان یکی از روش‌های نسبتاً جدید و کارا، استفاده می‌شود. این الگوریتم بر اساس زندگی وال‌ها و نحوه تعقیب و شکار آنها توسط س.ع. میرجلیلی در سال ۲۰۱۶، توسعه یافته است [16]. این روش تاکنون بر مسائل مختلفی پیاده‌سازی شده و بر اساس مراجع [17–19]، نسبت به سایر روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری مانند الگوریتم ژنتیک، روش تجمعی ذرات، لانه

مورچگان، تکامل تفاضلی، الگوریتم شمع و شب پره و روش شیرمورچه به نتایج دقیق‌تر و همگرایی سریع‌تری منجر شده است. یکی از دلایل استفاده از این روش در حل مسئله حاضر، دقت و انعطاف‌پذیری آن در حل مسائل بهینه‌سازی با ساختار مختلف بوده است. سهولت پیاده‌سازی، استقلال از مشتق و توانایی این روش در رسیدن به پاسخ‌های بهینه سراسری از جمله دیگر ویژگی‌های این روش حاضر بوده است.

در ادامه مراحل اجرای الگوریتم شرح داده می‌شود. جهت اطلاعات بیشتر در مورد این روش، مطالعه‌ی مرجع [16] توصیه می‌شود.

(۱) تنظیمات اولیه: تعداد تکرارها ($MaxIter$) و تعداد وال‌های N () را انتخاب کنید.

(۲) آماده‌سازی N: در این مرحله وال یا عامل جستجو را در نظر بگیرید. هر یک از این وال‌ها یک پاسخ شخصی مانند $\mathbf{x}$ در اختیار دارند که $\mathbf{x}$ یک بردار سه اندیسه از متغیرهای دودویی است که در (۱) تعریف شده‌اند. جمعیت اولیه یا همان پاسخ‌هایی که در اختیار هر کدام از وال‌ها است، به صورت تصادفی انتخاب می‌شود. با توجه به این مرحله بین ۰ و ۱ هستند $\mathbf{x}$ این‌که مقدارهای مولفه‌های بردار ولی در اصل باید یا ۰ و یا ۱ باشند، باید به کمک یک عملگر آنها را

مقدار اولیه متغیر $\widehat{x}_{ijk}$ انجام دهد، عملگر زیگموئید است. فرض کنید x_{kji} باشد که بین ۰ و ۱ به صورت تصادفی انتخاب شده است. ابتدا انتخاب می‌شود. سپس بر اساس مقدار آن، p یک عدد تصادفی مانند به شکل زیر تعیین می‌شود: $\widehat{x}_{ijk}$ ارزش دودویی متغیر

$$x_{ijk} = \begin{cases} 0 & \text{اگر } p < \dfrac{1}{1+\exp(-\hat{x}_{ijk})} \\ 1 & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \qquad (۸)$$

در مرحله بعد، باید دید که پاسخ‌های ساخته شده قابل قبول هستند یا خیر؟ یعنی باید بررسی شود که آیا در قیود (۴) تا (۷) صدق می‌کنند؟ هر پاسخی که در این معادلات صدق نکند کنار گذاشته شده و یک پاسخ تصادفی دیگر ساخته می‌شود. این فرآیند تا زمانی که تمام پاسخ‌های اولیه قابل قبول باشند، تکرار می‌شود. این راهکار در واقع در مواجهه با پاسخ‌های غیرقابل قبول، روش حذفی است. در نهایت، انتهای مرحله آماده‌سازی، مجموعه پاسخ قابل قبول Nای از به صورت زیر در اختیار داریم:

$$\{\mathrm{x}_1, \mathrm{x}_2, \cdots, \mathrm{x}_N\} \qquad (۹)$$

(۳) ارزیابی: در این مرحله، کیفیت پاسخ‌ها تعیین می‌شود. بدین معنی که مقدار تابع هدف (۲) در ازای تمام پاسخ‌های (۹) ارزیابی نامیده می‌شوند. سپس، از میان J_1، J_2، ...، J_N شده و آنها به ترتیب و مقدار متغیر متناظرش با J^* را تعیین کرده، که با J_i آنها بیشترین $\mathbf{x}^*$ نمایش داده می‌شود.

(۴) به‌روز رسانی: در این مرحله از الگوریتم، مقادیر پاسخ‌ها با توجه به بهترین پاسخ تعیین شده در مرحله (۳) بروز رسانی می‌شوند. این مرحله دارای سه سازوکار است. برای انتخاب سازوکار به‌روز رسانی p در هر تکرار و برای هر وال ابتدا یک عدد تصادفی مانند انتخاب می‌شود. سپس پاسخ‌ها بر اساس مقدار این عدد تصادفی به شکل زیر بروز رسانی می‌شود. فرض کنید $\mathbf{x}_i$ پاسخ فعلی وال i است. در این صورت پاسخ بعدی (به‌روز شده) آن عبارت خواهد بود از $\hat{\mathbf{x}}_i^{new}$ به شکل زیر:

$$\hat{\mathbf{x}}_i^{new} = \begin{cases} \mathbf{x}^* - A|C\mathbf{x}^* - \mathbf{x}_i|, & p < 0.5, |A| \le 1 \\ \mathbf{x}^* + |\mathbf{x}^* - \mathbf{x}_i| e^{bl}\cos(2\pi l), & p \ge 0.5, |A| \le 1 \\ \mathbf{x}_{rand} - A|C\mathbf{x}_{rand} - \mathbf{x}_i|, & p < 0.5, |A| > 1 \end{cases} \qquad (۱۰)$$

که در آن،

$\mathbf{x}_{rand}$: بردار تصادفی است.

a : یک بردار از ثابت‌هایی است که به طور خطی بر اساس شماره تکرار الگوریتم از ۲ به ۰ می ام آن که i رسد. به عنوان مثال، مولفه است، می‌تواند به صورت زیر تعریف شود: i مربوط به تکرار شماره

$$a_i = 2\left(1 - \frac{i}{MaxIter}\right) \qquad (۱۱)$$

از این بردار برای تضمین همگرایی روش استفاده می‌شود.

r : یک بردار از اعداد تصادفی بین ۰ و ۱ است که طول آن برابر تعداد تکرارها است.

A : یک بردار به طول تعداد تکرارها است که بر اساس مقادیر r و a به صورت $A = 2a.r - r$ تعریف می‌شود. ضرب استفاده شده در این تعریف ضرب مولفه به مولفه بردارهاست.

C : یک بردار است که به صورت $C = 2.r$ تعریف می‌شود.

b : عدد ثابتی است که شکل مارپیچ لگاریتمی را تعیین می‌کند.

l: یک عدد تصادفی بین ۱− و ۱ است که گام حرکت روی مسیر مارپیچ از پاسخ فعلی تا پاسخ جدید را تعیین می‌کند.

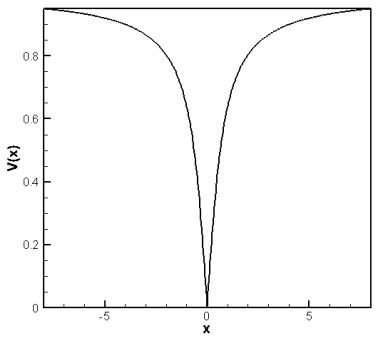
$\mathbf{x}_{rand}$: یک پاسخ از میان پاسخ‌های فعلی است که به تصادف انتخاب شده است.

در این مرحله، پاسخ‌های مربوط به متغیر $\mathbf{x}$ به روز می‌شوند ولی مقادیر حاصل از نوع حقیقی هستند و لازم است به صورت دودویی درآیند. بدین منظور، روش‌های مختلفی وجود دارد که عمده‌ی آنها بر تبدیلات اس− شکل و وی− شکل متکی هستند. در روش حاضر از یکی از تبدیلات وی− شکل استفاده شده است [20]. این تبدیل که

ضابطه آن به شکل زیر است، در اصل یک تابع است که مجموعه اعداد حقیقی را به بازهی $[0,1]$ می‌نگارد.

$$V(x) = \left|\frac{\pi}{2}\arctan\left(\frac{\pi}{2}x\right)\right| \qquad (۱۲)$$

همان‌طور که در شکل۲ ملاحظه می‌شود، نمودار این تبدیل شبیه حرف وی انگلیسی است به همین علت به آن تبدیل وی- شکل گفته می‌شود.



شکل ۲- نمودار تبدیل وی- شکل برای تبدیل اعداد حقیقی به دودویی

امّا، این تبدیل خروجی پیوسته دارد. برای این‌که آن را به صورت گسسته و با خروجی ۰ و ۱ استفاده کنیم، قاعده زیر را بر می‌گزینیم که بر اساس یک عدد تصادفی p تصمیم می‌گیرد که مقدار دودویی متناظر متغیر $\hat{x}_{ijk}^{new}$ صفر باشد یا یک:

$$x_{ijk}^{new} = \begin{cases} 0 & \text{اگر } p < \left|\frac{\pi}{2}\arctan\left(\frac{\pi}{2}\hat{x}_{ijk}^{new}\right)\right| \\ 1 & \text{در این غیر صورت} \end{cases} \qquad (۱۳)$$

این تبدیل، متغیرهای پیوسته‌ی $\hat{x}_{ijk}^{new}$ را به متغیرهای دودویی x_{ijk}^{new} تبدیل می‌کند.

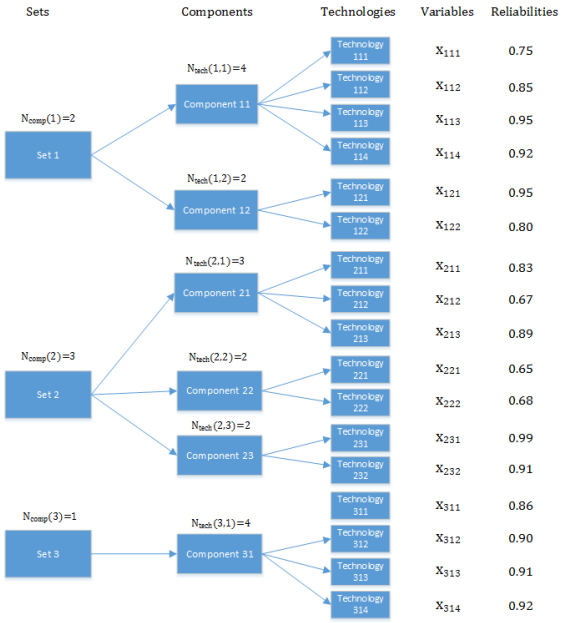
فرآیندهای ارزیابی و به‌روز رسانی تا زمانی که اجرای الگوریتم به انتهای حلقه (از نظر تعداد تکرار) برسد ادامه یافته و در نهایت پاسخ بهینه مسئله، $\mathbf{x}^*$ آخرین مرحله خواهد بود.

در بخش بعد، پیاده‌سازی روش روی یک مسئله نمونه مطرح شده و نتایج حاصل بررسی خواهد شد.

۵ صحه‌گذاری روش

در گام نخست روش پیشنهادی در حل یک مسئله نمونه که دارای پاسخ معلوم باشد اجرا شده و روش صحه‌گذاری می‌شود. بدین منظور مسئله نمونه طوری ساخته شده که دارای پاسخ مشخص باشد. ساختار این مسئله در شکل ۳ نشان داده شده است. در این مسئله یک زیرسامانه با ۳ مجموعه و کلاً ۶ جزء و ۱۷ فناوری تعریف شده است.

اعداد قابلیت اطمینان طوری انتخاب شده که برای هر جزء یک فناوری با قابلیت اطمینان بالاتر وجود داشته باشد تا در پاسخ بهینه انتخاب شود.



شکل ۳- ساختار مسئله نمونه

برای سادگی، محدودیت‌های جرم، توان و حجم را اعمال نمی‌شوند. همچنین فرض می‌شود که برای هر جزء فقط یک فناوری مورد نیاز است. هدف صرفاً ارزیابی روش در حل یک مسئله تخصیص فناوری است.

مدل ریاضی مسئله به شرح زیر است:

$$\text{Maximize } J = 0.75^{x_{111}}0.85^{x_{112}}0.95^{x_{113}}0.92^{x_{114}}0.95^{x_{121}}0.80^{x_{122}}0.83^{x_{211}}0.67^{x_{212}}0.89^{x_{213}}0.65^{x_{221}}0.68^{x_{222}}0.99^{x_{231}}0.91^{x_{232}}0.86^{x_{311}}0.90^{x_{312}}0.91^{x_{313}}0.92^{x_{314}}$$

Subject to:

$$x_{111}+x_{112}+x_{113}+x_{114}=1$$
$$x_{121}+x_{122}=1$$
$$x_{211}+x_{212}+x_{213}=1$$
$$x_{221}+x_{222}=1$$
$$x_{231}+x_{232}=1$$
$$x_{311}+x_{312}+x_{313}+x_{314}=1$$
$$x_{111},x_{111},\cdots x_{314}\in\{0,1\}$$

این مسئله دارای ۱۷ متغیر دودویی و ۶ قید مساوی است. مسئله طوری طراحی شده که در پاسخ بهینه آن فقط متغیرهای x_{113} ،x_{121} ،x_{213} ،x_{222} ،x_{231} و x_{314} برابر یک هستند و مقادیر سایر متغیرها صفر است. در نتیجه، مقدار بهینه تابع هدف با ۴ رقم اعشار برابر خواهد بود با:

$$J^* = 0.95 \times 95 \times 0.89 \times 0.68 \times 0.99 \times 0.92 = 0.4975$$

جهت اطمینان همین مسئله با نرم‌افزارِ تجاری LINGO 11/0 نیز حل شده که همین پاسخ در ۵ تکرار به دست آمد.

برنامه رایانه‌ایِ الگوریتم پیشنهادی به زبان c++ توسعه یافت و با کمک مفسر g++ نسخه ۵/۴/۰ در سیستم عامل لینوکس به برنامه اجرایی تبدیل شد. این برنامه روی یک رایانه با پردازنده ۲,۲ گیگاهرتزی اجرا شد. این برنامه مسئله را در ۱۰۰ تکرار با ۲۰۰ وال در زمان میانگین ۱۲۰ میلی‌ثانیه حل کرد. اجرا را ۲۰ بار تکرار شده که نتایج آن در جدول زیر مشخص شده است.

جدول ۲- خلاصه نتایج و مقایسه ۲۰ اجرای الگوریتم پیشنهادی بر مسئله نمونه

تفاوت فناوری با پاسخ بهینه	درصد خطا	تعداد مشاهده	مقدار تابع هدف به دست آمده
–	۰	۱۲	۰/۴۹۷۵
x_{313} به جای x_{314}	۱/۱٪	۳	۰/۴۹۲۰
x_{114} به جای x_{113}	۲/۱٪	۴	۰/۴۸۶۷
x_{113} به جای x_{114} و x_{313} به جای x_{314}	۵/۳٪	۱	۰/۴۷۱۳

بر اساس نتایج، در ۱۲ حالت پاسخ بهینه دقیق یعنی ۰/۴۹۷۵ به دست آمد و در ۸ حالت پاسخ‌هایی به‌دست آمد که در یک الی دو فناوری با پاسخ بهینه تفاوت داشتند. مقایسه ستون چهارم جدول با مقادیر قابلیت اطمینان نشان می‌دهد که فناوری‌های جایگزین عدد قابلیت اطمینان‌شان نزدیک به فناوری‌های بهینه بوده است. میانگین پاسخ‌های هر ۲۰ تکرار برابر شد با ۰/۴۹۳۲ که تا دو رقم اعشار پاسخ بهینه را تقریب می‌زند. در نتیجه، روش کارایی و دقت لازم در حل یک مسئله تخصیص بهینه را دارد.

۶ شبیه‌سازی

پس از صحه‌گذاری و اطمینان از عملکرد روش پیشنهادی، الگوریتم بر مسئله اصلی در تخصیص بهینه فناوری‌های یک زیرسامانه پشتیبان حیات آزموده شد. در این مسئله، فرض شده ۲ مجموعه‌ی مدیریت اتمسفر با ۳ جزء و مدیریت آب با ۲ جزء و کلاً ۱۳ فناوری وجود دارد. جدول زیر این اجزء و فناوری‌های موجودشان را همراه با جرم، توان مصرفی و حجم هر یک نشان می‌دهد. این اطلاعات از مرجع [21] اخذ شده‌است. برای اعداد قابلیت اطمینان چون مستندی وجود نداشت، اعداد فرضی استفاده شده است.

جدول ۳- مشخصات فناوری‌ها در مسئله شبیه‌سازی شده

مجموعه	جزء	فناوری	جرم (کیلوگرم)	توان مصرفی (وات)	حجم (متر مکعب)	قابلیت اطمینان*
مدیریت اتمسفر	تامین‌کننده اکسیژن	SFWE	۲۵/۱	۲۴۳	۰/۰۰۹	۰/۸۵
		WVE	۴۵/۰	۶۰۰	۰/۱۱	۰/۸۶
	تانک اکسیژن	High pressure	۱۰*	۱۰۰*	۰/۲*	۰/۹۰
		Cryogenic	۲۰*	۴۰*	۰/۴*	۰/۸۰
	حذف کننده دی اکسید کربن	2BMS[۴]	۴۸/۱	۲۳۰	۰/۲۶	۰/۹۳
		4BMS[۵]	۸۷/۹	۵۳۵	۰/۳۳	۰/۹۳
		Bosch	۱۰۲/۱	۲۳۹	۰/۵۷	۰/۸۷
		Sabatier	۱۷/۹	۵۰	۰/۲*	۰/۷۰
مدیریت آب	تامین آب	VCD[۶]	۱۰۱/۲	۱۱۵	۰/۵۱	۰/۸۵
		TIMES[۷]	۶۸	۱۷۰	۰/۲۳	۰/۹۵
		VAPCAR[۸]	۶۸	۱۰۰	۰/۲۴	۰/۷۵
	تصفیه آب	Reverse Osmosis	۸/۵	۲۰	۰/۰۶	۰/۹۵
		Multifiltration	۳/۹	۰/۴	۰	۰/۸۵

4. 2-bed Molecular Sieve
5. 4-bed Molecular Sieve
6. Vapor Compression Distillation
7. Thermoelectric Integrated Membrane Evaporation
8. Vapor Phase Catalytic Ammonia Removal

بیشینه مجاز جرم زیرسامانه برابر ۸۰۰ کیلوگرم، بودجه توان مصرفی ۱۰۰۰ وات و حجم مجاز آن ۱۰ متر مکعب فرض شده است. مدل ریاضی مسئله تخصیص بهینه با این داده‌ها به صورت زیر است:

$$\begin{aligned}\text{Maximize } J = {} & 0.85^{x_{111}} 0.86^{x_{112}} 0.90^{x_{121}} \\ & 0.82^{x_{122}} 0.93^{x_{131}} 0.93^{x_{132}} \\ & 0.87^{x_{133}} 0.70^{x_{134}} 0.85^{x_{213}} \\ & 0.95^{x_{212}} 0.75^{x_{213}} 0.95^{x_{221}} \\ & 0.85^{x_{222}}\end{aligned}$$

Subject to:

$$x_{111} + x_{112} = 1$$
$$x_{121} + x_{122} = 1$$
$$x_{131} + x_{132} + x_{133} + x_{134} = 1$$
$$x_{211} + x_{212} + x_{213} = 1$$
$$x_{221} + x_{222} = 1$$
$$\begin{aligned}25.1x_{111} + 45x_{112} + 10x_{121} + 20x_{122} & \\ + 48.1x_{131} + 87.9x_{132} & \\ + 102.1x_{133} + 17.9x_{134} & \\ + 101.2x_{211} + 68x_{212} + 68x_{213} & \\ + 8.5x_{221} + 3.9x_{222} \le 800 &\end{aligned}$$
$$\begin{aligned}243x_{111} + 600x_{112} + 100x_{121} + 40x_{122} & \\ + 230x_{131} + 535x_{132} + 239x_{133} & \\ + 50x_{134} + 115x_{211} + 170x_{212} & \\ + 100x_{213} + 20x_{221} + 0.4x_{222} & \\ \le 100 &\end{aligned}$$
$$\begin{aligned}0.009x_{111} + 0.21x_{112} + 0.2x_{121} + 0.4x_{122} & \\ + 0.26x_{131} + 0.33x_{132} + 0.57x_{133} & \\ + 0.2x_{134} + 0.51x_{211} + 0.23x_{212} & \\ + 0.24x_{213} + 0.06x_{221} \le 10 &\end{aligned}$$
$$x_{111}, x_{111}, \cdots x_{222} \in \{0,1\}$$

این مسئله دارای ۱۳ متغییر دودویی و ۸ قید است که با روش پیشنهادی ۲۰ بار حل شد و هر اجرا ۱۰۹ میلی ثانیه طول کشید. در ۱۸ اجرا پاسخ بهینه برابر $J^* = 0.6421$ به دست آمد و در دو مورد $J^* = 0.6007$ که این دو پاسخ فقط در یک فناوری تفادت داشتند. بنابراین، روش علی‌رغم اتکای آن بر فرآیند تصادفی، پایدار است. فناوری‌های انتخاب شده نیز برابرند با SFWE، High Pressure، 4BMS، TIMES و Reverse Osmosis. انتخاب فناوری SFWE با وجود قابلیت اطمینان پایین‌تر و فناوری 4BMS در مقایسه با 2BMS با قابلیت اطمینان یکسان نشان می‌دهد که روش به پاسخ بدیهی همگرا نشده و پاسخ بهینه را با رعایت قیود به دست آورده است.

۷ نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، یک روش هوشمند برای انتخاب فناوری از میان یک پایگاه داده بر مبنای بهینه‌سازی و افزایش قابلیت اطمینان کلّ زیرسامانه پیشنهاد شد. در گام نخست، مسئله به کمک متغیرهای دودویی به صورت تخصیص بهینه مدل‌سازی می‌شود. سپس روشی بر اساس شخصی‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی وال برای حل مسئله تخصیص بهینه به‌کار می‌رود. پس از صحه‌گذاری روش، بر روی یک مسئله نمونه برای انتخاب فناوری‌های دو مجموعه از زیرسامانه پشتیبان حیات اجرا شد. نتایج حاکی از پایداری روش و کارایی روش پیشنهادی است. این روش به مسئله تعریف شده محدود نیست و سایر قیودی که مورد نظر طراح است را می‌توان اضافه و مسئله جدید را حل کرد. مزیت روش پیشنهادی در عدم نیاز به مشتق، عدم وابستگی به پاسخ اولیه، توانایی پذیرش توابع هدف و قیود غیرخطی و همگرایی به پاسخ بهینه سراسری در زمان معقول است.

به عنوان تحقیقات آتی می‌توان مدل‌سازی و حل مسئله با درنظر گرفتن اجزاء و فناوری‌های موازی و پشتیبان و افزودن زمان کارکرد و تعمیرپذیری را پیشنهاد داد. همچنین بهینه‌سازی همزمان توابع هدف مختلف همراه با قابلیت اطمینان، در قالب یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه به تکمیل پژوهش حاضر کمک می‌کند.

۸ منابع

[1] A. Ghaedamini Harouni and H. H. Mehne, "Multidisciplinary optimization for configuration of a reentry capsule considering Uncertainty", J. Aerosp. Sci. Technol., 12:4, pp. 1-17, 2020.

[2] D. A. Burdette and J. R. R. A. Martins, "Design of a transonic wing with an adaptive morphing trailing edge via aerostructural optimization", Aerosp. Sci. Technol., 81, pp. 192- 203, 2018.

[3] A. P. C. Cuco, F. L. de Sousa, and A. J. Silva Neto, "A multi- objective methodology for spacecraft equipment layouts", Optim. Eng., 16, pp. 165–181, 2015.

[4] M. Mahmoudi, A. B. Novinzadeh and F. Pazooki, "Optimum conceptual design for the life support systems of manned spacecraft", Cogent Eng., 7:1, 2020.

[5] D. W. Coit and A. E. Smith, "Reliability Optimization of Series- Parallel Systems Using a Genetic Algorithm, IEEE Trans. Reliab., 45:2, pp. 254- 266, 1996.

[6] K. Deb, S. Gupta, D. Daum, J. Branke, A. K. Mall and D. Padmanabhan, "Reliability- Based Optimization Using Evolutionary Algorithms," in IEEE Trans. Evol. Comput., 13: 5, pp. 1054-1074, 2009.

[7] C. L. T. Borges and D. M. Falcão, "Optimal distributed generation allocation for reliability, losses, and voltage improvement", Int. J. Electr. Power Energy Syst., 28:6, pp. 413- 420, 2006.

[8] M. Sheikhalishahi and M. Zhalechian, "A Mixed Integer Model for Unrelated Parallel Machine Scheduling with Job Deteriorating Effect", International Journal of Reliability, Risk and Safety: Theory and Application, 5(1), pp. 77- 84, 2022.

[9] A. Kumar, S. Pant and M. Ram, "System Reliability Optimization Using Gray Wolf

Optimizer Algorithm", Qual. Reliab. Engng. Int., 33, pp. 1327– 1335, 2017.
[10] G. Levitin and A. Lisnianski, "A new approach to solving problems of multi- state system reliability optimization", Qual. Reliab. Engng. Int., 17, pp. 93- 104, 2001.
[11] S. Si, J. Zhao, Z. Cai and et al. "Recent advances in system reliability optimization driven by importance measures", Front. Eng. Manag. 7, pp. 335–358, 2020.
[12] E. Valian, S. Tavakoli, S. Mohanna and A. Haghi, "Improved cuckoo search for reliability optimization problems", Comput. Ind. Eng., 64(1), pp. 459- 468, 2013.
[13] D. W. Coit and E. Zio, "The Evolution of System Reliability Optimization", Reliab. Eng. Syst. Saf., 192, 106259, 2019.
[14] M. Gen and Y. S. Yun, "Soft computing approach for reliability optimization: State- of- the- art survey", Reliab. Eng. Syst. Saf., 91, pp. 1006- 1028, 259, 2006.
[15] M.A. Farsi, The Principles of Reliability Engineering, Simaye Danesh, 2016 (in Persian).
[16] S. Mirjalili and A. Lewis, A. "The whale optimization algorithm, Adv. Eng. Software", 95, pp. 51- 67, 2016.
[17] I. Aljarah, H. Faris, and S., Mirjalili, S., "Optimizing connection weights in neural networks using the whale optimization algorithm", Soft Comput. 22, pp. 1- 15, 2018.
[18] M. Abd El Aziz, A. A. Ahmed, A. Ewees, and A. E. Hassanien, "Whale optimization algorithm and moth- flame optimization for multilevel thresholding image segmentation", Expert Syst. Appl., 83, pp. 242- 256, 2017.
[19] H.H. Mehne and S. Mirjalili, "A parallel numerical method for solving optimal control problems based on whale optimization algorithm, Knowledge- Based Syst., 151, pp. 114- 123, 2018.
[20] S. Mirjalili and A., Lewis, "S- shaped versus V-shaped transfer functions for binary Particle Swarm Optimization", Swarm Evol. Comput., 9, pp. 1- 14, 2013.
[21] P. Eckart, "Spaceflight Life Support and Biospherics", springer, 1996.