JSST
Journal of Space Science and Technology

P-ISSN: 2008-4560
E-ISSN: 2423-4516

Journal of Space Science and Technology

Vol. 17, No. 2, pp. 29-40, 2024
https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1472
Journal Homepage: https://www.jsstpub.com

Original Research Paper

Identification and Prioritization of Satellite Electrical Power Subsystem Technologies for National Development Based on Multiple Criteria Decision-Making

Reza Amjadifard*, Ehsan Mousivand, Farhad Bagheroskuei, Shahab Karbasian, and Ehsan Kosari

Satellite Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received 09 January 2024
Revised 02 April 2024
Accepted 9 April 2024
Available Online 9 April 2024

Keywords:

Electrical power subsystem
Space technologies
Prioritization
Multiple decision making
Simple additive weighting

ABSTRACT

The prioritization and validation of emerging space technologies involve a multi-step, iterative process that necessitates the integration of collective intelligence from all stakeholders alongside analytical methods to identify requirements. This process begins with identifying specialists with sufficient knowledge and experience regarding each technology, extracting and evaluating essential data, prioritizing technology options, identifying challenging technologies, determining essential acquisition strategies, and finally, prioritizing these technologies. This article presents a method to identify and prioritize certain space technologies suitable for a satellite's electrical power subsystem (EPS). Based on the results, it is possible to determine the most effective method to acquire the necessary technology through national development or by leveraging existing technologies available in the market. The power subsystem components are categorized into three groups to evaluate the proposed method: electrical power generation sources, energy storage sources, and power electronic circuits. The results indicate that among all studied technologies, GaAs solar cells, lithium-ion batteries, and electronic circuits constructed with military and industrial components should be prioritized for national development. Additionally, the proposed method demonstrates that the selected technologies are those recently employed in space applications. This methodology can also be extended to other subsystems.

*Corresponding Author's E-mail: ramjadif@yahoo.com

How to Cite this Article:
R. Amjadifard, E. Mousivand, F. Bagheroskuei, Sh. Karbasian, and E Kosari, "Identification and prioritization of satellite electrical power subsystem technologies for national development based on multiple criteria decision making," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 17, No. 2, pp. 29-40, 2024, (in Persian), https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1472.

COPYRIGHTS
© 2024 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of The Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

OPEN ACCESS

JSST
علوم و فناوری فضایی

شاپای چاپی: ۴۵۶۰-۲۰۰۸
شاپای الکترونیکی: ۴۵۱۶-۲۴۲۳

علوم و فناوری فضایی

سال ۱۴۰۳، دوره ۱۷، شماره ۲، صفحه ۲۹-۴۰
https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1472
Journal Homepage: https://www.jsstpub.com

مقاله پژوهشی

شناسایی و اولویت‌بندی فناوری‌های زیرسیستم توان الکتریکی ماهواره‌ها به‌منظور توسعه بومی بر اساس روش تصمیم‌گیری چند معیاره

رضا امجدی فرد[۱*]، احسان موسیوند[۲]، فرهاد باقراسکوئی[۳]، شهاب کرباسیان[۴]، و احسان کوثری[۵]

۱- استادیار، پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران
۲- کارشناسی ارشد، پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران
۳ و ۴- مربی، پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران
۵- دانشجوی دکتری، پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۹ دی ۱۴۰۲
بازنگری ۱۴ فروردین ۱۴۰۳
پذیرش ۲۱ فروردین ۱۴۰۳
اولین انتشار ۲۱ فروردین ۱۴۰۳

واژه‌های کلیدی:

زیرسیستم توان الکتریکی
فناوری‌های فضایی
اولویت‌بندی
تصمیم‌گیری چند معیاره
روش جمع وزنی

چکیده

فرآیند شناسایی و اولویت‌بندی فناوری‌های چالشی در توسعه فناوری‌های کلیدی در ساخت یک ماهواره به‌منظور توسعه بومی، یک فرآیند چند مرحله‌ای و رفت و برگشتی خواهد بود که نیازمند استفاده از خرد جمعی و دخیل کردن نظرات کلیه ذینفعان در کنار استفاده از روش‌های تحلیلی به‌منظور شناسایی الزامات و ارزیابی گزینه‌ها است. این فرآیند با شناسایی افراد خبره در هر حوزه تخصصی شروع شده و در ادامه با استخراج داده‌های مورد نیاز و ارزیابی آن‌ها به اولویت‌بندی گزینه‌های فناوری، شناسایی فناوری‌های چالشی و استراتژی اکتساب مورد نیاز و در نهایت اولویت‌بندی آن‌ها ختم می‌گردد. در این مقاله روشی به‌منظور شناسایی و اولویت‌بندی فناوری‌های اساسی زیرسیستم توان الکتریکی در یک ماهواره پیاده‌سازی شده تا به کمک نتایج آن درخصوص توسعه بومی فناوری‌های ضروری زیرسیستم فوق تصمیم‌گیری و اقدام نمود. به‌منظور ارزیابی بهتر نتایج، اجزای زیرسیستم توان الکتریکی به سه دسته که شامل منابع تولید انرژی، منابع ذخیره‌ساز انرژی و نهایتا مدارهای الکترونیکی می‌باشند، تقسیم‌بندی شده‌اند. نتایج حاصل از اجرای روش پیشنهادی نشان میدهدکه فناوری های سلول‌های خورشیدی گالیوم-آرسنایدِ، باتری لیتیوم یون، مدارهای الکترونیکی بر پایه قطعات نظامی و تجاری مناسب برای توسعه در داخل کشور بوده که با برنامه فضایی کشور نیز تطابق دارد. علاوه بر این می‌توان از این روش برای سایر زیرسیستم‌ها یا در سطوح پایین‌تر نیز استفاده نمود.

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: ramjadif@yahoo.com

How to Cite this Article:
R. Amjadifard, E. Mousivand, F. Bagheroskuei, Sh. Karbasian, and E Kosari, "Identification and prioritization of satellite electrical power subsystem technologies for national development based on multiple criteria decision making," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 17, No. 2, pp. 29-40, 2024, (in Persian), https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1472.

COPYRIGHTS
© 2024 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of The Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).
OPEN ACCESS

علائم و اختصارات

تعداد شاخص‌ها	k
میانگین کوواریانس های تمامی شاخص‌ها	$\bar{c}$
میانگین واریانس هر شاخص	$\bar{v}$
آلفای کرونباخ	α
متوسط عناصر بردار سازگاری	λ
امتیاز نهایی شاخص i ام	P_i
مقادیر نرمال‌شده عناصر ماتریس تصمیم	r_{ij}
وزن شاخص i ام	w_i
مقدار ویژه j امین شاخص برای جایگزین i ام	d_{ij}

مقدمه

راهبرد فضایی کشور دربرگیرنده چندین برنامه فضایی شامل حوزه ماهواره‌های مخابراتی، سنجش از دور، ناوبری و اکتشافات فضایی است. در این مقاله دو برنامه فضایی درخصوص رسیدن به یک ماهواره مخابراتی در مدار GEO و یک ماهواره سنجشی با دقت بهتر از یک متر در مدار LEO مد نظر قرار گرفته است. هر یک از این برنامه‌ها شامل تعداد زیادی ماهواره نظیر ماهواره‌های مخابراتی سری ناهید و ماهواره‌های سنجشی سری پارس با مشخصات متفاوت از نظر طول عمر، مدار، محموله و غیره می‌باشند . از این رو برنامه‌ریزی در خصوص چگونگی تامین تجهیزات مورد نیاز، از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. استفاده از باس‌های مشابه (پلتفرم) به دلیل یکسان بودن فناوری‌ها در پروژه‌های متفاوت، به کاهش هزینه‌های طراحی، ساخت و آزمون منجر خواهد شد. از سوی دیگر عوامل متعددی نظیر دانش فنی، زیرساخت‌ها، قیود هزینه‌ای و زمانی و غیره مجریان پروژه‌ها را به تصمیم‌گیری بر تهیه فناوری بر اساس یکی از دو راهکارِ خرید خارج یا توسعه بومی، وادار می‌سازند. این تصمیم‌گیری باید با پشتوانه کافی علمی صورت پذیرد.

سیستم‌های پشتیبانی از تصمیم‌گیری[1] در علوم مرتبط با فناوری، دارای جایگاه میانی در بین سیستم‌های اطلاعاتی[2] و سیستم‌های هوشمند[3] می‌باشند [۱]. در فرآیند تصمیم‌گیری، سیستم پشتیبانی نیازمند معیارها و وزن‌هایی است که در فرآیند محاسبات، استفاده می‌شود [۲]. در حال حاضر، توسعه فناوری اطلاعات در حمایت از تولید داده، در شرایط مختلف زندگی قابل توجه است. از طریق استفاده از این فناوری می‌توان تصمیم سریع و دقیق‌تری نسبت به انتخاب یک موضوع گرفت. این امر به دلیل نوآوری‌های تکنولوژیکی و توانایی ترکیب روش‌های تصمیم‌گیری چندگانه[4] امکان‌پذیر است [۳].

صرف‌نظر از تنوع مسائل تصمیم‌گیری، این مسائل را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد. مسائل تصمیم‌گیری چندهدفه[5] که تصمیم‌گیرنده باید با درنظر گرفتن منابع محدود یکی از گزینه‌ها را انتخاب کند و دیگری تجزیه وتحلیل مسائل تصمیم‌گیری چند معیاره[6] است که تصمیم‌گیرنده باید رویکردی را طراحی کند تا بیشترین کاربرد را داشته باشد. طبیعتاً برای انتخاب یک گزینه، باید چند ویژگی و اغلب بخش‌های متضاد را در نظر بگیریم. مدل‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه[7]، مدل‌های انتخابی هستند و برای ارزیابی، رتبه‌بندی و انتخاب مناسب‌ترین گزینه از بین گزینه‌ها استفاده می‌شوند [۴].

هر رتبه‌بندی از گزینه‌های تصمیم‌گیری توسط یک تابع امتیازدهی تعیین می‌شود. از آنجا که گزینه‌های تصمیم‌گیری اغلب با چندین معیار متناقض مشخص می‌شوند، روش‌های چندمعیاره، برای این گزینه‌ها مناسب هستند [۵]. تجزیه وتحلیل تصمیم‌گیری چند معیاره، به‌طور گسترده‌ای برای حل مسائل تصمیم‌گیری مختلف از طریق ارزیابی جایگزین، استفاده می‌شود. با این حال، یافتن روش مناسب می‌تواند نتایج را تحت‌تاثیر قرار دهد. تجزیه وتحلیل تصمیم‌گیری چند معیاره، یک فرآیند چند مرحله‌ای است که شامل مجموعه‌ای از روش‌ها برای ساختارمندی و رسمی کردن فرآیندهای تصمیم‌گیری به شیوه‌ای شفاف و سازگار است. تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره، طی سالیان متمادی، روش‌ها و نرم‌افزارهای زیادی را برای رفع مسائل تعریف شده توسعه داده است. روش‌های زیادی برای حل مسائل وجود دارد و می‌توان آن‌ها را بر اساس پارامترهای مختلف مرتب کرد. هر یک از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، روش محاسباتی خود را دارد که به وسیله آن گزینه‌های جایگزین در رتبه‌بندی قرار می‌گیرند و نمی‌توان ادعا کرد که استفاده از روش‌های خاص با داده‌های ورودی یکسان منجر به نتیجه نهایی یکسان خواهد شد [۶].

در این مقاله سعی شده است تا با روش خبرگی نسبت به شناسایی فناوری‌های مورد نیاز زیرسیستم توان الکتریکی ماهواره‌های تعریف شده در برنامه راهبرد فضایی کشور اقدام شود. در ادامه معیارهایی برای اولویت‌بندی آن‌ها تعریف و سپس رتبه‌بندی می‌شوند. در نهایت نیز در خصوص چگونگی تامین آن‌ها از طریق توسعه بومی یا خرید خارج تصمیم‌سازی شده است.

1. Decision Support Systems
2. Information Systems
3. Intelligent Systems
4. Multiple Decision-Making Techniques (MDMT)
5. Multi Objective Decision Making (MODM)
6. Multiple Criteria Decision Analysis (MCDA)
7. Multi-Attribute Decision Making Models (MADM)

روش‌شناسی

در روش تصمیم‌گیری چند معیاری، محبوب‌ترین روش‌های مورد استفاده برای حمایت از یک فرآیند تصمیم‌گیری عبارتند از:

- روش جمع وزنی[1]/ روش رتبه‌بندی چند هدفه ساده[2]
- روش تحلیل سلسله مراتبی[3]
- روش اولویت‌بندی بر اساس شباهت به راه‌حل ایده‌آل (تاپسیس)[4]

هر یک از این روش‌ها مزایا و معایب خود را دارند، بنابراین انتخاب مناسب‌ترین روش برای یک مساله خاص کار بسیار دشواری است. انتخاب یکی از روش‌های ذکر شده به مسئله تصمیم‌گیری، نوع معیارها، اطلاعات موجود، توانایی‌های شناختی تصمیم‌گیرنده و ویژگی‌های روش چند معیاره بستگی دارد. در مسائل تصمیم‌گیری واقعی، گزینه‌ها را نمی‌توان به‌صورت کمی ارزیابی کرد اما قابلیت ارزیابی به‌صورت کیفی وجود دارد [۵]. از بین روش‌های فوق، روش جمع وزنی پرکاربردترین و پرتعدادترین روش در مسائل تصمیم‌گیری چندهدفه است. اساس این روش بر یافتن جمع وزنی برای نشان دادن نرخ کارآمدی یکایک گزینه‌های موجود است [۷]. از آنجا که در این روش فرآیند محاسبات با سریع‌ترین زمان به نتیجه می‌رسد و نتایج تجزیه و تحلیل به‌دست آمده نیز برای کمک به فرآیند تصمیم‌گیری، کارآمد و موثر است، لذا پرکاربردترین روش‌های مورد استفاده در تصمیم‌گیری چند هدفه کلاسیک بوده و از محبوبیت بسیاری برخوردار است [۵].

باید خاطر نشان ساخت که هدف از مسایل چندهدفه، در چهارچوب برنامه‌نویسی ریاضی، بهینه‌سازی تعدادی تابع هدف مختلف، با موضوعیت مجموعه محدودیت‌های سیستم است [۸]. مدل تصمیم‌گیری چند معیاره کلاسیک، فرض می‌کند که هنگام تصمیم‌گیری، تصمیم‌گیرنده مجموعه ثابتی از معیارها را تعریف کرده و مساله با تصویر واضحی از همه گزینه‌های موجود ارائه شده است. سپس این کار با محاسبه امتیاز هر گزینه پیش می‌رود. در ادامه با رتبه‌بندی و انتخاب گزینه‌ای که بیشترین امتیاز را دارد به پایان می‌رسد [۹]. اکثر مسائل تصمیم‌گیری در دنیای واقعی، پویا هستند به این معنا که تصمیم نهایی تنها در پایان یک فرآیند اکتشافی گرفته می‌شود که طی آن گزینه‌ها و معیارها، ممکن است متفاوت باشند. با این حال مدل کلاسیک تصمیم‌گیری چند معیاره قادر به درک این پویایی نیست، زیرا فرض می‌کند که قبل از ادامه رتبه‌بندی، تصمیم‌گیرنده باید مجموعه‌های ثابتی از معیارها و گزینه‌ها را شناسایی کرده باشد [۹]. در جدول (۱) مقایسه‌ای بین سه روش پرکاربرد تاپسیس، تحلیل سلسله مراتبی و جمع وزنی ارائه شده است [۶،۱۰].

روش‌های دیگری نیز مانند مالتی‌مورا[5]، ویکور[6]، کاپراس[7]، پرومسه[8] و الکتره[9] وجود دارند. روش‌ها را بر اساس نوع نتیجه می‌توان انتخاب کرد. اگر نتیجه با عنوان مقایسه مقادیر مورد نیاز باشد، می‌توان از روش‌های تحلیل سلسله مراتبی، مالتی‌مورا، روش جمع وزنی، روش ضرب وزنی[10] یا روش‌های دیگر استفاده کرد. با استفاده از روش‌های تحلیل سلسله مراتبی، تاپسیس، ویکور، کاپراس و سایر روش‌ها می‌توان برای رسیدن به هدف تعریف شده و یافتن بهترین جایگزین از میان گزینه‌های ارائه شده استفاده کرد. روش‌های پرومسه و الکترا مبتنی بر مقایسه زوجی و ارزیابی انطباق برای هدف مورد نظر هستند [۶، ۱۱-۱۲].

جدول ۱- مقایسه روش‌های MCDA.

Table 1. MCDA methods comparison.

Method	TOPSIS [6]	AHP [6]	SAW [10]
Normalization Type	Vector (square root of sum normalization)	Vector (sum normalization)	Vector (sum normalization)
Suitable for	Selection problems, ranking problems	Selection problems, ranking problems	Selection problems, ranking problems
Input	Weighted coefficients of ideal and non-ideal options	Pairwise comparison on a 1 to 9 ratio scale	Pairwise comparison on a 1 to 9 ratio scale
Output	Complete ranking with the score close to the ideal state and distance from the non-ideal state.	Complete ranking with scores	Complete ranking with scores
Approach	Qualitative/Quantitative	Qualitative	Quantitative
Ranking Scale	0 to 1	0 to 1	Variable depending on the type of problem
Best Alternative	Highest value	Highest value	Highest value
Consistency Levels	No restriction	9	Less than 0.1

1. Simple Additive Weighting (SAW)
2. Simple Multi Attribute Rating Technique (SMART)
3. Analytic Hierarchy Process (AHP)
4. Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solutions (TOPSIS)
5. Multi-Objctive Optimization on the Basis of Ratio Analysis (MOORA)
6. Vikor
7. Complex Proportional Assessment (COPRAS)
8. Preference Ranking Organization Method for the Enrichment of Evaluations (PROMETHEE)
9. Elimination and Choice Translating Reality (ELECTRE)
10. Weighted Product Method

روش جمع وزنی، ساده‌ترین و پرکاربردترین روش در میان روش‌های MCDM[1] است [۲، ۱۳-۱۵]. در این روش، به‌هر معیار؛ وزنی تخصیص داده می‌شود به نحوی‌که مجموع وزن تمامی معیارها برابر یک شود. هر گزینه می‌تواند با همه معیارها مرتبط باشد. لذا امتیاز کارآمدی برای هر گزینه به راحتی قابل محاسبه خواهد بود. در این روش وزن هر ویژگی باید مشخص باشد که این کار توسط تصمیم‌گیرندگان با استفاده از ماتریس مقایسه زوجی در نظر گرفته می‌شود و در نهایت امتیاز کلی با استفاده از مجموع حاصل‌ضرب معیارها و وزن هر ویژگی تعیین می‌شود [۲].

به‌طور کلی، تمام مسائل مدل‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه را می‌توان به شکل یک ماتریس نشان داد. هر ردیف از این ماتریس نشان‌دهنده یک جایگزین و هر ستون نشان‌دهنده یک ویژگی است و عناصر آن کارایی گزینه‌ها در برابر ویژگی‌ها است. ویژگی‌هایی که برای تصمیم‌گیری انتخاب می‌شوند معمولا متناقض هستند. همچنین با توجه به اهمیت نسبی ویژگی‌ها می‌توان برای آن‌ها وزن قائل شد. با فرض بردار وزنی برای ویژگی‌ها و عناصر ماتریس تصمیم‌گیری، می‌توان مسائل مدل‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه را با تکنیک‌های موجود حل کرد و بهترین جایگزین را انتخاب کرد یا آن‌ها را رتبه‌بندی کرد. در روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه کلاسیک، اغلب فرض بر این است که تمام داده‌های مورد استفاده (مانند وزن ویژگی‌ها، کارایی گزینه‌ها در برابر ویژگی‌ها و غیره) قطعی هستند. سپس نمره نهایی یا سودمندی گزینه‌ها با حل مدل‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه به‌دست می‌آید. پس از حل مسائل تصمیم‌گیری، معمولا باید یک تحلیل حساسیت انجام شود. تحلیل حساسیت این ویژگی را دارد که کمترین تغییر در وزن آن نسبت به سایرین، منجر به تغییر در رتبه‌بندی گزینه‌ها می‌شود. آنالیز حساسیت را می‌توان در نرم‌افزارهای مرتبط با مدل‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه برای حل مسائل تصمیم‌گیری به‌کار برد. مهم‌ترین مسئله در مدل‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه این است که داده‌های استفاده شده در آن‌ها ناپایدار و قابل تغییر هستند، بنابراین تحلیل حساسیت پس از حل مسئله می‌تواند به‌طور موثر به تصمیم‌گیری دقیق کمک کند. تحلیل حساسیت مدل‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه یکی از موضوعات مورد بحث در زمینه مدل‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه است و در دهه‌های اخیر تحقیقات زیادی در مورد آن انجام شده است [۴].

روش جمع وزنی، روشی است که در این پژوهش با هدف اولویت‌بندی فناوری‌های زیرسامانه تامین توان الکتریکی ماهواره‌های برنامه راهبرد فضایی کشور، مورد استفاده قرار گرفته است. این روش به این دلیل انتخاب شد که معمولا برای ارتقای تصمیم‌گیری استفاده می‌شود. همچنین با شرایط ساده‌تری می‌توان به اولویت‌بندی جهت اخذ تصمیم مناسب دست یافت.

پیاده‌سازی طرح

زیرسیستم توان الکتریکی در هر ماهواره وظیفه تامین انرژی الکتریکی مورد نیاز کلیه اجزای ماهواره را طی عمر ماموریت و نیز کلیه مودهای عملکردی آن به عهده دارد. این زیر سیستم غالباً شامل منبع تولید انرژی، منبع ذخیره‌سازی انرژی (برای تامین انرژی طی زمان‌هایی که منبع تولید فعال نبوده و یا توانایی پشتیبانی بیشینه توان مصرفی را ندارد)، انواع مبدل‌های سطوح ولتاژ، رگولاتورهای سری یا موازی و نهایتاً مجموعه مدارهای توزیع توان به مصرف‌کننده‌ها (سایر زیرسیستم‌ها و محموله‌های ماهواره) می‌باشد.

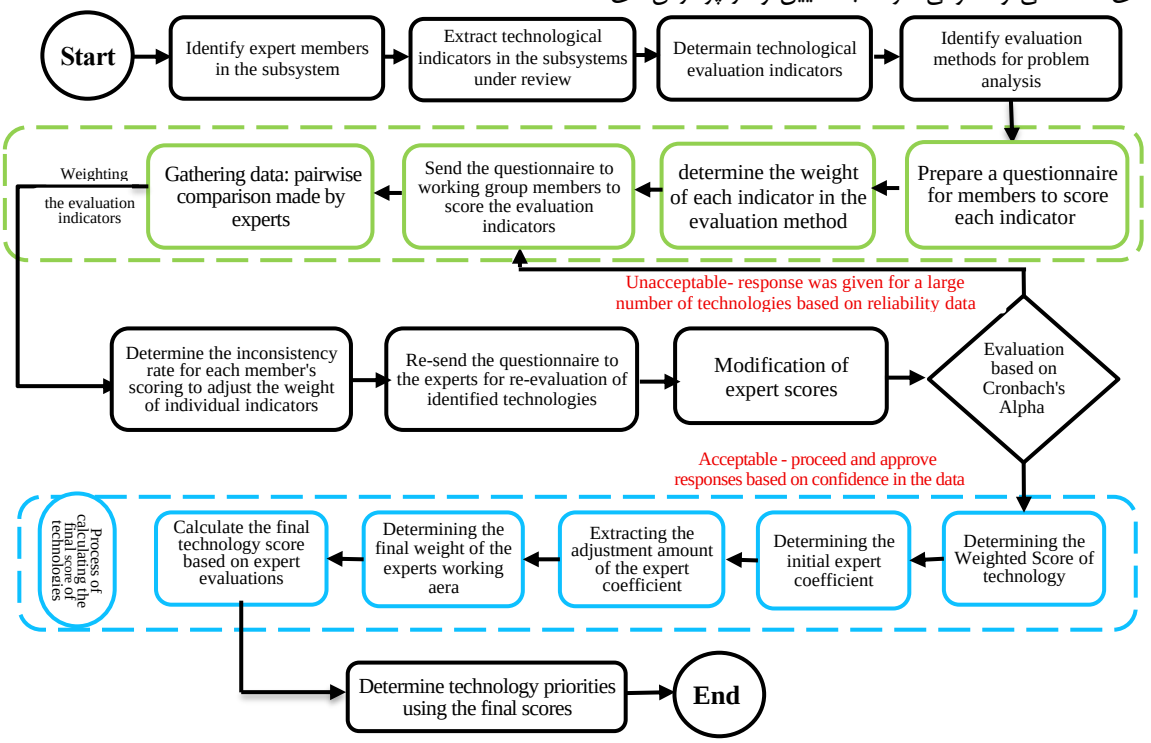
فرایند شناسایی و اولویت‌بندی فناوری‌های مرتبط با زیرسیستم توان الکتریکی مطابق با روند نمای نشان داده شده در شکل (۱) اجرا شده است. در ادامه جزئیات پیاده‌سازی فعالیت‌های معرفی شده در روند نمای شکل (۱)، تشریح شده است.

تعیین خبرگان و شناسایی فناوری‌ها

گام نخست از اجرای طرح، شناسایی فناوری‌های مرتبط با زیرسیستم توان یک ماهواره می‌باشد. برای این منظور پرسشنامه‌هایی تنظیم و در اختیار تعدادی از خبرگان این حوزه که تجربه عملی در طراحی، ساخت و آزمون اجزای این زیرسیستم را داشته‌اند قرار گرفت تا فناوری‌های به روز و پرکاربرد را مشخص و معرفی کنند. در این پژوهش از تجربه ۵ نفر خبره با سابقه ۱۱ تا ۲۱ سال کار تخصصی در زمینه طراحی، ساخت و آزمون زیرسیستم توان الکتریکی تعدادی از پروژه‌های ماهواره‌ای اجرا شده در داخل کشور استفاده شده است. از آنجا که درخت محصول برای این زیرسیستم شامل سه بخش «تولید» [۱۶]، "ذخیره‌سازی" و "تبدیل و توزیع" می‌باشد، فناوری‌های این زیرسیستم نیز به تفکیک بخش‌های معرفی شده، بر اساس نظر خبرگان مشخص گردید که نتیجه آن در جدول (۲) نمایش داده شده است. شایان ذکر است که بخش "تبدیل و توزیع" شامل مجموعه‌ای از مدارهای الکترونیکی با عملکردهای متنوع می‌باشد. این مدارهای الکترونیکی به کمک قطعاتی طراحی و ساخته می‌شود که می‌توانند دارای سطوح کیفی متفاوت باشند. به همین دلیل فناوری‌های این بخش براساس نوع و تکنولوژی قطعات استفاده شده در آن‌ها بیان شده است. لازم به‌ذکر است که در این

1. Multi-Criteria Decision-Making

تحقیق به‌منظور افزایش اعتبار داده‌های اخذ شده از خبرگان، بر اساس سوابق علمی و تجربی ایشان، ضرایبی برای داده‌های مرتبط با حوزه‌های تخصصی و عمومی هر نخبه تعیین و در پردازش‌های آتی استفاده شده است. جدول (۳) نمونه‌ای از قالب به‌کار گرفته شده برای این منظور را نشان می‌دهد.



شکل ۱– روندنمای اولویت‌بندی فناوری‌های زیرسیستم توان الکتریکی ماهواره.

Fig. 1. The prioritizing flowchart for satellite EPS technologies.

جدول ۲– فناوری‌های زیرسیستم توان الکتریکی.

Table 2. EPS technologies.

Section	Technology Name
Energy Generation	Silicon Panel
	Gallium Arsenide Panel
	Panel with Concentrator
	Panel with Reflector
	RTG (Radioisotope Thermoelectric Generator)
	Tether
Energy Storage	Nickel-Cadmium Battery
	Nickel-Hydrogen Battery
	Lithium-Ion Battery
	Advanced Lithium Battery
	Supercapacitor
Type of Components	COTS (Commercial Off-The-Shelf)
	MIL (Military-grade)
	Space/RadHard (Radiation-Hardened for Space)
Component Technology	Si (Silicon)
	SiC (Silicon Carbide)
	GaN (Gallium Nitride)

جدول ۳– قالب شناسایی و ارزیابی افراد خبره.

Table 3. Registration form for experts working aera.

Name	Specialized Fields	General Fields	Specialized Field Score	General Field Score
Expert 2	Energy Conversion and Distribution, Space Radiation	All subsystem components	1.5	0.75

شاخص‌های ارزیابی

در این پژوهش ۵ شاخص طبق جلسات کارشناسی با خبرگان تعیین گردید که در جدول (۴) ارائه شده‌اند. از آنجا که تاثیرگذاری شاخص‌های معرفی شده، در تعیین ارزش هر فناوری متفاوت است لذا باید برای هر شاخص، وزنی در نظر گرفته شود. بر این اساس روش مقایسه زوجی انتخاب و از خبرگان شرکت‌کننده در این پژوهش خواسته شد تا اهمیت شاخص‌های تعیین شده را با هم مقایسه کنند. برای این منظور از اعداد ۱ تا ۹ و با تعاریف مشخص شده در جدول (۵) برای مقایسه شاخص‌ها نسبت به یکدیگر

استفاده شده است. جدول (۶) نمونه‌ای از جداول تکمیل شده توسط خبرگان برای تعیین وزن معیارها می‌باشد. در این جدول به‌عنوان مثال اگر میزان اهمیت شاخص C1 (میزان همسویی با ماهواره‌های راهبرد) نسبت به شاخص C4 (هزینه و زمان مورد نیاز با فرض توسعه داخل) برابر عدد ۵ باشد، میزان اهمیت شاخص C4 نسبت به شاخص C1 برابر ۰/۲خواهد بود.

جدول ۴- شاخص‌های ارزیابی فناوری‌ها.

Table 4. Definition of criteria.

Criteria	Definition
C1	Alignment with strategic satellites
C2	Technology maturity timeline
C3	Technical risks in achieving the technology
C4	Cost and time required assuming domestic development
C5	Technology spillover to other domains

جدول ۵- تعیین اعداد تخصیص داده شده برای معیارها.

Table 5. Scale values for criteria.

Preferences (Verbal Judgment)	Intensity of Importance
Fully preferred or much more important	9
Strong preference or importance	7
Moderate preference or importance	5
Slight preference or importance	3
Equal preference or importance	1

جدول ۶- مقایسه زوجی اهمیت شاخص‌ها نسبت به یکدیگر.

Table 6. Weight of criteria based on comparison matrix.

Criteria	C1	C2	C3	C4	C5	Weight (W)
C1	1	3	0.333	5	0.333	0.170
C2	0.333	1	0.333	1	0.2	0.072
C3	3	3	1	3	0.333	0.239
C4	0.2	1	0.333	1	0.2	0.065
C5	3	5	3	5	1	0.454
Total	7.533	13	5	15	2.066	1

در ستون آخر از جدول (۶) وزن شاخص‌ها (W) به روش میانگین هندسی، محاسبه شده است. این پارامتر حاصل تقسیم میانگین هندسی اعداد هر ردیف بر مقدار متوسط میانگین‌های هندسی است. پارامتر فوق در آزمون سازگاری و برای ارزیابی امتیازهای دریافت شده از خبرگان استفاده خواهد شد.

آزمون سازگاری

برای اجرای آزمون سازگاری در گام اول باید بردار جمع وزنی شاخص‌ها[1] (WSM) را مطابق جدول (۷) محاسبه نمود.

جدول ۷- محاسبه بردار جمع وزنی شاخص‌ها.

Table 7. Computing WSM (Weighted Sum Model).

WSM		W		C5	C4	C3	C2	C1
0.941		0.170		0.33	5	0.33	3	1
0.363		0.072		0.2	1	0.33	1	0.33
1.311	=	0.239	×	0.33	3	1	3	3
0.341		0.065		0.2	1	0.33	1	0.2
2.364		0.454		1	5	3	5	3

در گام دوم باید بردار سازگاری را مطابق جدول (۸) محاسبه نمود.

جدول ۸- محاسبه بردار جمع وزنی شاخص‌ها.

Table 8. Consistency index based on WSM.

Consistency Vector (CV)		W		WSM
5.525		0.170		0.941
5.066	=	0.072	/	0.363
5.494		0.239		1.311
5.261		0.065		0.341
5.205		0.454		2.364

گام سوم محاسبه متوسط عناصر بردار سازگاری است که λ نام‌گذاری شده است (رابطه ۱).

$$\lambda = \frac{5.525 + 5.066 + 5.494 + 5.526 + 5.205}{5} = 5.31 \qquad (۱)$$

در گام چهارم شاخص سازگاری به کمک رابطه ۲ به‌دست می‌آید. در این رابطه n سایز ماترس است.

$$\text{شاخص سازگاری} = \frac{\lambda - n}{n - 1} \qquad (۲)$$

مقدار به‌دست آمده برای شاخص سازگاری برابر ۰/۰۷۷۵ خواهد

1. Weighted Sum Vector

بود. در گام چهارم نرخ سازگاری[1] محاسبه می‌شود. برای این منظور از رابطه ۳ استفاده می‌کنیم.

$$\text{نرخ سازگاری} = \frac{\text{شاخص سازگاری}}{\text{شاخص تصادفی}} \qquad (۳)$$

شاخص تصادفی، وابسته به سایز ماتریس (n) بوده و برای ماتریسی با سایز ۵ برابر با ۱/۱۲ می‌باشد [۱۰]. بر این اساس مقدار نرخ سازگاری برابر ۰/۰۶۵ محاسبه شده و چون این مقدار کمتر از ۰/۱ است، داده‌های دریافت شده از خبره، قابل اتکا می‌باشد [۱۷].

تعیین امتیاز و اولویت‌بندی فناوری‌ها

پس از مشخص شدن وزن معیارها، نوبت به تعیین امتیاز هر فناوری است. برای این منظور جداولی تهیه و در اختیار خبرگان قرار گرفت تا خبرگان به‌طور مستقل به معیارهای پنج‌گانه که برای هر فناوری در نظر گرفته شده است، امتیازی تخصیص دهند. این امتیازات در ادامه و پس از انجام پردازش‌های لازم منجر به تعیین امتیاز نهایی فناوری‌ها خواهد شد. جدول (۹) قسمتی از یک جدول تکمیل شده می‌باشد.

جدول ۹- قالب دریافت امتیاز فناوری‌ها از خبرگان.

Table 9. The template for gathering score of technologies.

Expert	Technology	Technology Evaluation Criteria				
		Compliance in strategic satellites	Duration of technology implementation	Application of technology in other field	Acquisition cost based on domestic development	Technical risks associated with the development program
		Score (0-5)	**Score (0-5)**	**Score (0-5)**	**Score (0 --5)**	**Score (0--5)**
Expert 1	Silicon Panel	2	4	3	-1	1
Expert 1	GaAs Panel	5	5	2	-2	1
Expert 1	Panel + Concentrator	1	3	1	-4	-2
Expert 1	…	…	…	…	…	…
Expert 1	GaN	2	3	4	-1	-2

پس از جمع‌آوری نظرات خبرگان لازم است صحت داده‌های جمع‌آوری شده مورد تأیید قرار گیرد. برای این منظور از آزمون آلفای کرونباخ[2] بهره خواهیم گرفت. آلفای کرونباخ، معیاری است که برای ارزیابی پایایی یا سازگاری درونی مجموعه‌ای از مقیاس‌ها یا آیتم‌های آزمایشی استفاده می‌شود. ضریب آلفای کرونباخ برای سنجش میزان تک بعدی بودن نگرش‌ها، قضاوت‌ها و یا به تعبیر دیگر تعیین میزان هم‌راستایی نظرات خبرگان به یکدیگر استفاده می‌شود. این معیار به کمک رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\alpha = \frac{k \times \bar{c}}{\bar{v} + (k-1)\bar{c}} \qquad (۴)$$

در رابطه فوق، k به تعداد شاخص‌ها، $\bar{c}$ به میانگین تمام کوواریانس‌های بین شاخص‌ها و $\bar{v}$ به میانگین واریانس هر شاخص اشاره دارد. بنابراین، آلفای کرونباخ تابعی از تعداد شاخص‌های یک آزمون، میانگین کوواریانس بین جفت شاخص‌ها و واریانس امتیاز کل است. مقدار این معیار در محدوده صفر تا ۱ متغیر است. اگر همه شاخص‌ها کاملاً مستقل از یکدیگر باشند (یعنی همبستگی یا هیچ کوواریانسی نداشته باشند)، آنگاه مقدار این ضریب برابر عدد صفر است و اگر همه شاخص‌ها، کوواریانس بالایی داشته باشند، با نزدیک شدن تعداد شاخص‌ها به بی‌نهایت، مقدار این ضریب به عدد ۱ نزدیک می‌شود. به عبارت دیگر، هر چه ضریب بالاتر باشد، شاخص‌ها دارای کوواریانس مشترک بیشتری بوده و احتمالاً همان مفهوم اساسی را می‌سنجند [۱۸].

با اعمال رابطه فوق بر داده‌های دریافتی از خبرگان، برای فناوری‌هایی که مقدار α کمتر از ۰/۷ به‌دست آید، داده‌ها برای بازنگری به خبرگان بازگردانده می‌شوند.

همانطورکه پیش‌تر نیز اشاره شد، جمع وزنی ساده (برمبنای میانگین وزنی) یکی از پرکاربردترین روش‌های مدل‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه است. این روش ساده بوده و مبنای اکثر تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه مانند تحلیل سلسله مراتبی و پرومسه است که از خاصیت افزایشی برای محاسبه امتیاز نهایی گزینه‌ها بهره می‌برد. در روش جمع وزنی ساده، امتیاز نهایی هر گزینه به‌کمک رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$P_i = \sum_{j=1}^{k} w_i . r_{ij} \; ; \qquad i = 1.2 \ldots . m \qquad (۵)$$

1. Consistency Ratio (CR)

2. Cronbach's Alpha

در رابطه (۵)، پارامتر r_{ij}، مقادیر نرمال‌شده عناصر ماتریس تصمیم بوده (بهره[1] شاخص ها) و به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند.

$$r_{ij} = \frac{d_{ij}}{d_j^{Max}};\ d_j^{Max} = \underset{1 \le i \le m}{Max}\ d_{ij};\ j = 1.2 \dots . k \qquad (۶)$$

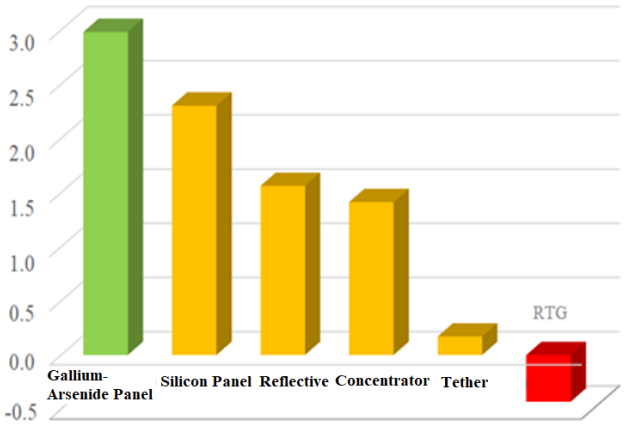
در رابطه (۶) پارامتر d_{ij} مقدار ویژه j امین شاخص برای جایگزین i ام است، به عبارت دیگر کارایی جایگزین i ام در برابر شاخص j ام را بیان می‌کند. به‌منظور تعیین هزینه[2] شاخص‌ها از رابطه (۷) استفاده می‌کنیم.

$$r_{ij} = \frac{d_j^{Min}}{d_{ij}};\ d_j^{Min} = \underset{1 \le i \le m}{Max}\ d_{ij};\ j = 1.2 \dots . k \qquad (۷)$$

شایان ذکر است در مواردی که ویژگی‌های کیفی وجود داشته باشد، می‌توان از روش‌های دیگر برای تبدیل متغیرهای کیفی به کمی استفاده کرد [۴].

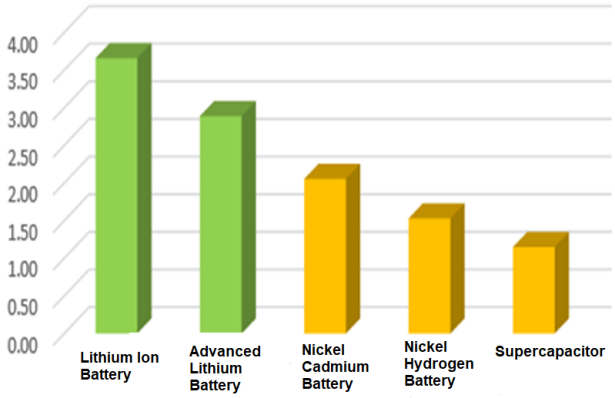
اما مطابق با روندنمای ارائه شده در شکل (۱)، برای تعیین امتیاز نهایی هر فناوری، گام‌های زیر اجرا شده است.

در گام نخست امتیاز موزون هر فناوری محاسبه می‌شود بدین ترتیب که امتیاز داده شده برای هر فناوری برای هر شاخص را در وزن آن شاخص ضرب نموده تا امتیاز موزون فناوری به‌دست آید. لازم به‌ذکر است که به ازای هر خبره یک امتیاز جداگانه برای هر فناوری حاصل خواهد شد. در گام دوم میزان تعدیل ضریب خبره را محاسبه می‌کنیم. بدین‌ترتیب که برای تعیین این ضریب کافی است ضریب خبره (جدول ۳) در هر حوزه را در بزرگترین مقدار مجموع ضریب خبرگان (در میان تمام فناوری‌های) ضرب و بر مقدار مجموع ضریب خبره آن فناوری، تقسیم کنیم. به عبارت دیگر ضرایب برای مقایسه متناسب‌سازی می‌شوند. گام سوم تعیین وزن نهایی خبره می‌باشد که طی آن مقدار ضریب تعدیل شده خبره را بر بزرگترین مجموع ضریب خبره (جدول ۳) تقسیم می‌کنیم. در گام چهارم برای محاسبه امتیاز نهایی فناوری و بر اساس وزن خبره، کافی است که امتیاز موزون فناوری در وزن خبره (برای تمام خبرگان) ضرب شده و آن‌ها را در نهایت با هم جمع کنیم. در گام آخر پس از تعیین امتیاز هر یک از فناوری‌ها در هر زیرسامانه، فناوری‌ها بر اساس امتیاز از بزرگترین مقدار به کم‌ترین مقدار مرتب شده و در نهایت به سه دسته اولویت بالا، متوسط و پایین تقسیم بندی می‌شوند. نتیجه نهایی برای سه دسته فناوری مشخص شده در شکل‌های (۲) تا (۵) ارائه شده است.



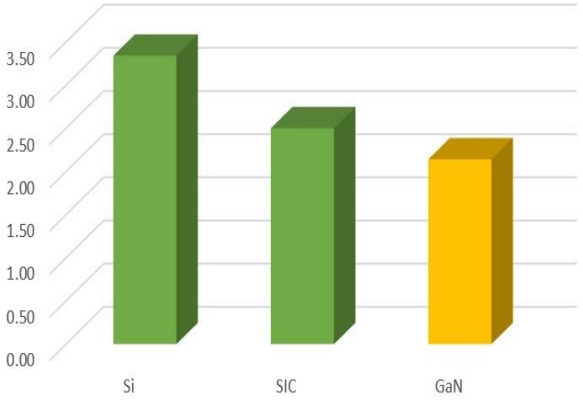
شکل ۲– امتیاز و اولویت فناوری‌های بخش تولید توان.

Fig. 2. Rank of electrical power source technologies.



شکل ۳– امتیاز و اولویت‌بندی فناوری‌های بخش ذخیره توان.

Fig. 3. Rank of electrical power storage technologies.



شکل ۴– امتیاز و اولویت‌بندی تکنولوژی قطعات.

Fig. 4. Rank of electronic components technologies.

1. Profit

2. Cost

شکل ۵– امتیاز و اولویت‌بندی نوع قطعات.

Fig. 5. Rank of electronic components type.

مقایسه کلی تمامی فناوری‌های مشخص شده در جدول (۲) نیز در جدول (۱۰) نشان داده شده است.

جدول ۱۰– امتیاز و اولویت کلیه فناوری‌ها.

Table 10. Final score of EPS technologies.

Technology Name	Final Score	Priority Type
Lithium-Ion Battery	3.66	High
Silicon Components	3.34	High
Military Components	3.15	High
TJ-GaAs Panel	2.98	High
COTS Components	2.93	High
Advanced Lithium-Ion Battery	2.89	High
SiC Components	2.50	High
Rad-Hard Components	2.50	Medium
Silicon Panel	2.45	Medium
GaN Components	2.30	Medium
Nickel-Cadmium Battery	2.14	Medium
Solar Panel with Reflector	2.06	Medium
Nickel-Hydrogen Battery	1.56	Medium
Solar Panel with Concentrator	1.41	Low
Supercapacitor	1.15	Low
Tether	0.17	Low
RTG	-0.42	Low

مطابق شکل (۲)، در میان فناوری‌های بخش تولید انرژی الکتریکی، پنل‌های خورشیدی که از سلول‌های گالیم آرسناید سه پیوندی بهره می‌گیرند، بیشترین اولویت و مولدهای حرارتی که از رادیوایزوتوپ به‌عنوان منبع انرژی بهره می‌گیرند از کمترین اولویت برخوردار هستند. خاطر نشان می‌شود که این اولویت‌بندی بر اساس مشخصات ماهواره‌های مورد نیاز در برنامه راهبرد فضایی کشور حاصل شده است. این نتیجه نیز برای متخصصین این حوزه دور از انتظار نبود زیرا غالب ماهواره‌های موجود در مدار LEO با ماموریت‌های مشابه مخابراتی و سنجشی و طول عمر ماموریتی در مرتبه چند سال، از پنل‌های خورشیدی به‌عنوان منبع تولید توان بهره می‌گیرند. منابع RTG نیز غالبا در ماموریت‌های خاص به‌ویژه بین سیاره‌ای یا کاوشگرهای خاص مورد استفاده قرار می‌گیرند. استفاده از پنل‌های سیلیکانی یا پنل‌های دارای متمرکز کننده یا منعکس کننده و حتی تتر نیز در موارد خاص مشاهده می‌شود. به همین ترتیب در ارتباط با منابع ذخیره‌ساز توان (شکل۳)، باتری‌های لیتیوم یون بیشترین و سوپر خازن‌ها کمترین اولویت را دارند. مناسب بودن دانسیته جرمی و توانی این نوع باتری در مقایسه با سایر منابع و نیز سابقه مناسب کاربرد آن در پروژه‌های اجرا شده در کشور، خود گواه امتیاز بالای این نوع باتری در مقایسه با سایر منابع ذخیره‌ساز می‌باشد. مطابق شکل (۴) هرچند اخیرا با توسعه تکنولوژی GaN امکان افزایش فرکانس سوئیچینگ و به تبع آن کاهش ابعاد مبدل‌ها ممکن شده است اما همچنان استفاده از قطعات سیلیکانی به دلیل سابقه و تنوع آن‌ها مقبولیت بیشتری دارد. از نظر نوع قطعات، بیشترین امتیاز را قطعات نظامی (و تجاری با فاصله اندک) به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۵) و در مقابل قطعات مقاوم شده در برابر تشعشع از اولویت کمی برخوردار هستند که این می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی نظیر، عدم تنوع، دسترسی کم، هزینه بالا و نهایتا وجود راه‌کارهای کم هزینه دیگر برای مقاوم‌سازی مدارهای الکترونیکی در برابر تشعشعات فضایی باشد. امروزه قطعات GaN به دلیل قابلیت پیاده‌سازی مدارهای پرسرعت مورد توجه می‌باشند، لیکن محدودیت‌هایی نظیر تنوع، هزینه و غیره می‌تواند از جمله دلایلی باشد که اولویت آن‌ها را در میان قطعات الکترونیکی کاهش داده است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک روش سیستماتیک برای شناسایی و اولویت‌بندی فناورهای مرتبط با زیرسیستم توان الکتریکی فضاپیماها به‌منظور توسعه در داخل کشور مطرح شده است. این روش بر اساس پردازش داده‌های

دریافت شده از نخبگان حوزه مشخص شده است. تعریف و وزن‌دهی شاخص‌های ارزیابی با کمک روش مقایسه زوجی و نیز پردازش نهایی داده‌ها بر اساس روش جمع‌وزنی اجرا شده است. فناوری‌های مورد مطالعه به سه دسته منابع تولید انرژی، منابع ذخیره‌سازی انرژی و نهایتا، نوع و قطعات مورد استفاده در مدارهای الکترونیکی تقسیم‌بندی شده‌اند. بر اساس نتایج به‌دست آمده، در این میان پنل‌های خورشیدی گالیم آرسنایدی، در میان فناوری‌های منابع تولید انرژی، باتری‌های لیتیوم یونی در میان فناوری‌های ذخیره‌سازهای انرژی و قطعات نظامی و تجاری بر پایه سیلیکان، در میان قطعات الکترونیک از بالاترین اولویت برخوردار هستند. روش پیشنهادی قابل پیاده‌سازی برای بسیاری دیگر از زیرسیستم‌های فضایی و یا حوزه‌های دیگری از صنایع می‌باشد.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

مراجع

[1] M. Puspa, "Decision support system for supplementary food recipients (PMT) by using the simple additive weighting (SAW) method," *Journal Teknik Informatika C.I.T, Medicom*, vol. 11, no. 2, pp. 37-44, 2019, https://doi.org/10.35335/cit.Vol11.2019.11.pp37-44.

[2] D. W. T. Putra and A. A. Punggra, "Comparison analysis of simple additive weighting (SAW) and weigthed product (WP) in decision support systems, " in *2nd International Conference on Technology, Innovation, Society and Science-to-Business (ICTIS)*, 2018, vol. 215, no. MATEC Web Conf., Art. no. 01003, https://doi.org/10.1051/matecconf/201821501003.

[3] V. Sihombing, V. M. M. Siregar, W. S. Tampubolon, M. Jannah, and A. Hakim, "Implementation of simple additive weighting algorithm in decision support system," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Medan, Indonesia, 2020, vol. 1088, Art. no. 012014, https://doi.org/10.1088/1757-899X/1088/1/012014.

[4] A. Memariani, A. Amini, and A. Alinezhad, "Sensitivity analysis of simple additive weighting method (SAW): the results of change in the weight of one attribute on the final ranking of alternatives," *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, vol. 2, no. 4, pp 13-18, 2009.

[5] K. Piasecki, E. Roszkowaka, and A. L. Hanckowiak, "Simple additive weighting method equipped with fuzzy ranking of evaluated alternatives," *Symmetry*, vol. 11, no. 4, 2019, Art. no. 482, https://doi.org/10.3390/sym11040482.

[6] B. Zlaugotne, L. Zihare, L. Balode, A. Kalnbalkite, A. Khabdullin, and D. Blumberga, "Multi- criteria decision analysis methods comparison," *Environmental and Climate Technologies*, vol. 24, no. 1, pp 454-471, 2020, https://doi.org/10.2478/rtuect-2020-0028.

[7] S. Wulandari and A. P. Wibowo, "Development of SAW (simple additive weighting) method for decision support system of sembako price control (Case study of the office of agriculture, fisheries and forestry, sleman regional government)," *International Journal of Engineering, Technology and Natural Sciences*, vol. 1, no. 1. pp. 34-41, 2019, https://doi.org/10.46923/ijets.v1i1.23.

[8] S. J. Sadjadi, M. Habibian, and V. Khaledi, "A multi-objective decision making approach for solving quadratic multiple response surface problems," *International Journal of Contemporary Mathematical Sciences*, vol. 3, no. 32, pp. 1595-1606, 2008.

[9] G. Campanella and R. A. Ribeiro, "A framework for dynamic multiple-criteria decision making," *Decision Support Systems*, vol. 52, no. 1, pp. 52-60, 2011, https://doi.org/10.1016/j.dss.2011.05.003.

[10] A. Afshari, M. Mojahed, and R. M. Yusuff, "Simple additive weighting approach to personal selection problem," *International Journal of Innovation, Management and Technology*, vol. 1, no. 5, pp. 511-515, 2010.

[11] L. Fei, J. Xia, Y. Feng, and L. Liu, "An ELECTRE-based multiple criteria decision making method for supplier selection using Dempster-Shafer theory," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 84701-84716, 2019, https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2924945.

[12] X. Yu, S. Zhang, X. Liao, and X. Qi, "ELECTRE methods in prioritized MCDM environment," *Information Science*, vol. 424, pp. 301-316, 2018, https://doi.org/10.1016/j.ins.2017.09.061.

[13] K. Savitha and C. Chandrasekar, "Vertical handover decision schemes using SAW and WPM for network selection in heterogeneous wireless networks," *arXiv:1109.4490*, 2011, https://doi.org/10.48550/arXiv.1109.4490.

[14] D. Anggraini and H. T. Sihotang, "Decision support system for choosing the best class guardian with simple additive weighting method," *Jurnal Mantik*, vol. 3, no. 3, pp. 1-9, 2019.

[15] A. Ibrahim and R. A. Surya, "The implementation of simple additive weighting (SAW) method in decision support system for the best school selection in jambi," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1338, 2019, Art. no. 012054, http://doi.org/10.1088/1742-6596/1338/1/012054.

[16] O. Shekoofa, F. Bagheroskouei, and R. Amjadifard, "System-level evaluation of the operation of

different solar array structures for various CubeSat configurations," *Journal of Space Science and Technology*, vol. 15, no. 3, pp. 93-108, 2022, (in Persian), https://doi.org/10.30699/jsst.2022.1371.

[17] S. Pant, A. Kumar, M. Ram, Y. Klochkov, and H. K. Sharma, "Consistency indices in analytic hierarchy process: A review," *Mathematics*, vol. 10, no. 8, 2022, Art. no. 1206, https://doi.org/10.3390/math10081206.

[18] "Using and Interpreting Cronbachs Alpha." University of Virginia Library, 2015. [Online]. Available:https://library.virginia.edu/data/articles/using-and-interpreting-cronbachs-alpha