



## مقایسه تکنالوژی‌های ذخیره و تولید انرژی برقی: باتری‌های لیتیم-

## آیونی، باتری‌های هستوی رادیوایزوتوپی پلوتونیم-238 و باتری‌های

## الماس هستوی NDB

پوهنیار نجیب‌الله بلوچ<sup>۱</sup>، پوهنمل حسیب الله ایازی<sup>۲</sup>، پوهنمل مسلم حلیمی<sup>۳</sup>،

نامزدپوهنیار عبدالغفار مظلومیار<sup>۴</sup>

رشته کیمیا، پوهنځی تعلیم و تربیه، پوهنتون فراه

ایمیل: [baloochnajib65@yahoo.com](mailto:baloochnajib65@yahoo.com)

## چکیده

این تحقیق یک تحلیل (Meta-Analysis) مروری بر سه تکنالوژی متفاوت تولید و ذخیره انرژی برقی است: باتری‌های لیتیم-آیونی به‌عنوان رایج‌ترین تکنالوژی الکتروکیمیای قابل چارچ، باتری‌های هستوی رادیوایزوتوپی مبتنی بر  $^{238}\text{Pu}$  که در ماموریت‌های فضایی بلندمدت به کار می‌روند، و باتری‌های الماسی هستوی (Nuclear Diamond Batteries) نسل جدید موسوم به NDB که از ایزوتوپ  $^{14}\text{C}$  محصور در الماس مصنوعی بهره می‌گیرند. با جمع‌آوری و تطبیق اطلاعات کمی از منابع علمی، گزارش‌های فنی سازمان‌های فضایی و اسناد ثبت اختراع، خصوصیات فیزیکی و کیمیای این سه تکنالوژی از جمله کثافت انرژی، ولتاژ اسمی، نیمه‌عمر، مکانیزم تبدیل انرژی و سطح ایمنی اشعه‌زایی به‌صورت مقایسه‌ای ارائه شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که هر یک از این تکنالوژی‌ها در محور متفاوتی از عملکرد برتری دارند: باتری‌های لیتیمی در کثافت توان لحظه‌ای و قابلیت چارچ مجدد، باتری‌های پلوتونیمی در پایداری توان میان‌مدت (دهه‌ها) برای ماموریت‌های فضایی، و باتری‌های الماسی (NDB) در طول عمر بی‌سابقه (هزاران سال) با توان خروجی بسیار پایین. نتیجه‌گیری تحقیق این است که این سه تکنالوژی رقیب یک‌دیگر نیستند، بلکه برای دامنه‌های کاربردی کاملاً متمایزی طراحی شده‌اند.

**کلمات کلیدی:** باتری لیتیم-آیونی؛ باتری هستوی؛ پلوتونیم-238؛ باتری الماسی؛ کاربن-14



## Comparison of Electrical Energy Storage and Generation Technologies: Lithium-Ion Batteries, Plutonium-238 Radioisotope Nuclear Batteries, and NDB Nuclear Diamond Batteries

Najibullah Balooch<sup>1\*</sup>, Haseebullah Ayazi<sup>2</sup>, Muslim Halimi<sup>3</sup>, Abdul Ghafar Mazlomyar<sup>4</sup>

### Abstract

This study is a meta-analysis reviewing three different technologies for the generation and storage of electrical energy: lithium-ion batteries as the most common rechargeable electrochemical technology,  $^{238}\text{Pu}$  based radioisotope nuclear batteries used in long-term space missions, and a new generation of nuclear diamond batteries known as NDB, which utilize the isotope  $^{14}\text{C}$  encapsulated in synthetic diamond. By collecting and comparing quantitative data from scientific sources, technical reports of space organizations, and patent documents, the physical and chemical characteristics of these three technologies, including energy density, nominal voltage, half-life, energy conversion mechanism, and level of radiological safety, are comparatively presented. The findings indicate that each of these technologies excels in a different performance dimension: lithium batteries in instantaneous power density and recharging capability, plutonium batteries in medium-term power stability (decades) for space missions, and nuclear diamond batteries (NDB) in unprecedented service life (thousands of years) with very low power output. The study concludes that these three technologies are not competitors; rather, they are designed for entirely distinct application ranges.

**Keywords:** Lithium-ion battery; nuclear battery; Plutonium-238; diamond battery; Carbon-14



## مقدمه

الحمد لله رب العالمين و الصلاة و السلام على سيدنا محمد و على آله و صحبه اجمعين .  
 حمد و سپاس بی پایان خداوند متعال را سزااست که انسان را به دانش و اندیشه گرامی داشت و راه شناخت و آبادانی جهان را برای او گشود. درود و سلام بر حضرت محمد مصطفی (ص) پیام آور علم، هدایت و رحمت و برخاندان و یاران گرامی ایشان باد.  
 تأمین پایدار و بلندمدت انرژی برقی یکی از مشکلات بنیادین تکنالوژی های جدید است؛ از وسایل برقی قابل حمل و موترهای برقی گرفته تا ماموریت های فضایی دوربرد، سیستم های میکروالکترومکانیکی در محیط های سخت (اعماق دریا، فضا) و تجهیزات طبی هر یک از این کاربردها الگوی مصرف انرژی متفاوتی دارد و به همین دلیل، مقایسه تکنالوژی های تولید و ذخیره انرژی برقی باید فراتر از یک شاخص واحد (مانند کثافت انرژی وزنی) صورت گیرد. باتری های لیتیم- آیونی در حال حاضر، به دلیل رشد صنعتی، هزینه پایین تولید و کثافت انرژی نسبتاً بالا، مسلط ترین تکنالوژی ذخیره سازی انرژی الکتروکیمیای محسوب می شوند. با این حال، تحقیقات اخیر بر یک عدم انطباق بنیادین در این تکنالوژی تأکید می کند: هرگونه تلاش برای افزایش ولتاژ کاری و در نتیجه کثافت انرژی، به طور مستقیم خطر فرار حرارتی (Thermal Runaway) را افزایش می دهد (Mauger & Julien, 2017). برای نمونه، انرژی ذخیره شده در یک باتری 50-kWh موتر برقی، از نظر مقدار، با انرژی حدود ۱۸ عدد دینامیت قابل مقایسه است (Mauger & Julien, 2017). مطالعات نشان می دهند که فشار جزئی اکسیجن در ترکیبات کتودی لایه ای مانند<sup>۳۶</sup>NMC،<sup>۳۷</sup>NCA و<sup>۳۸</sup>LCO به صورت نمایی با ولتاژ کاری افزایش می یابد و در ولتاژ ۴ ولت به بیش از 50atm می رسد؛ همین پدیده عامل اصلی آتش سوزی های گزارش شده در موترهای مجهز به کتود NCA و اختلال ایمنی طیاره های مجهز به باتری NMC بوده است (Mauger & Julien, 2017). در مقابل، کتود LiFePO<sub>4</sub> (LFP) با ساختار اولیوینی و روابط کووالانسی

<sup>۳۶</sup> Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide<sup>۳۷</sup> Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide<sup>۳۸</sup> Lithium Cobalt Oxide

قوی P-O، اکسیجن را حتی در درجه حرارت بالا در خود نگه می‌دارد و ایمن‌ترین گزینه کتودی شناخته می‌شود، هرچند ولتاژ کاری پایین‌تر آن (~۳.۲ ولت) به بهای کاهش کثافت انرژی تمام می‌شود (Mauger & Julien, 2017). این مصالحه اجتناب‌ناپذیر میان کثافت انرژی و ایمنی، همراه با محدودیت‌های ذاتی دیگر لیتیم-آیون افت ظرفیت طی چرخه‌های چارج/دیس‌چارج، عمر محدود (معمولاً چند سال) و وابستگی به چارج مجدد دوره‌ای این تکنالوژی را برای کاربردهایی که نیاز به منبع انرژی مستقل، بسیار بادوام و عاری از خطر آتش‌سوزی دارند، نامناسب می‌سازد.

در مقابل این محدودیت‌های ذاتی تکنالوژی الکتروکیمیای، باتری‌های هستوی که انرژی را از واپاشی طبیعی یک ایزوتوپ رادیواکتیو استخراج می‌کنند، مسیر توسعه‌ای کاملاً متفاوت و طولانی‌تری را طی کرده‌اند. نخستین تلاش‌های عملی برای ساخت باتری اتمی به دهه ۱۹۶۰ بازمی‌گردد، جایی که محققان با استفاده از ایزوتوپ پرومیتیم  $^{147}\text{Pr}$  و رابطه نیمه‌هادی سیلیکونی نوع n/p، نمونه‌ای با توان خروجی حدود 1mW و کارایی تبدیل تنها 0.77% ساختند (Flicker et al., 1964b)؛ نمونه‌ای که اگرچه کارایی پایینی داشت، اما مفاهیم بنیادین این بخش از جمله اهمیت طول انتشار حامل‌های چارج و آسیب‌های تابشی به نیمه‌هادی را برای نخستین بار مطرح کرد (Flicker et al., 1964). در کنار این مسیر لابراتواری، از دهه ۱۹۶۰ میلادی، باتری‌های هستوی رادیوایزوتوپی در مقیاس بزرگ‌تر و در قالب ژنراتورهای ترموالکتریک رادیوایزوتوپی (RTG) در برنامه‌های فضایی ناسا و آژانس فضایی اروپا به کار گرفته شدند و از آغاز عصر فضا تاکنون یک راه‌حل فناورانه کلیدی و موفق برای مأموریت‌های علوم سیاره‌ای بوده‌اند (Terranova, 2022). این تکنالوژی با تبدیل گرمای حاصل از واپاشی آل‌فای  $^{238}\text{Pu}$  به جریان برقی از طریق اثر زیبک، توانسته فضایی‌هایی مانند ویجر ۱ و ۲ را برای بیش از چهار دهه تغذیه کند و همچنان تنها گزینه اثبات‌شده برای تأمین انرژی پایدار در مأموریت‌های فضای عمیق است. نسل جدیدتری از باتری‌های هستوی بتالوتائیک، که در آن ذرات بتای حاصل از واپاشی مستقیماً در یک رابطه نیمه‌هادی به جریان برقی تبدیل می‌شوند، اخیراً با استفاده از نیمه‌هادی‌های فوق‌پهن‌بند به پیشرفت چشم‌گیری دست یافته است. طراحی‌های نوین

مبتنی بر رابطه ناهم جنس پشته‌ای الماس نوع p و اکساید گالیم نوع n، با بهره‌گیری از منبع رادیواکتیو  $^{63}\text{Ni}$  یک پارچه‌شده با الکتروُد، توانسته‌اند به ولتاژ مدار باز 3.06 V، کارایی تبدیل 12% و کثافت توان  $354 \mu\text{W}/\text{cm}^3$  برسند؛ رقمی که بالاترین مقدار گزارش شده در میان باتری‌های هستوی مبتنی بر نیمه‌هادی‌های Band Gap است (Chen et al., 2025). مطالعات کتاب‌سنجی و سیستماتیک اخیر نیز نشان می‌دهند تحقیق در بخش باتری‌های بتاولتائیک با نرخ رشد سالانه 8.76% در حال گسترش است (Agyekum, 2025) و منابع ایزوتوپی، از نظر کثافت انرژی، می‌توانند تا حدود یک میلیون برابر باتری‌های لیتیم-آیونی انرژی ذخیره کنند (Agyekum, 2025)؛ هرچند مشکلات فنی (توان خروجی پایین)، مدیریتی (دسترسی محدود به ایزوتوپ‌های مناسب)، اقتصادی (هزینه بالای تولید) و اجتماعی (بی‌اعتمادی عمومی به تکنالوژی هستوی) هنوز مانع تجاری‌سازی گسترده این تکنالوژی‌اند (Agyekum, 2025). در همین راستا، نسل جدیدی از مواد پیشرفته مانند هالاید‌های پروسکایت فلزی و کالکوژنیدهای فلزی نیز به‌عنوان مبدل‌های غیرحرارتی نسل آینده مطرح شده‌اند که با حساسیتی در حد نانو-گری و کارایی نوری تا ۱۰۰ فوتون به ازای هر کیلوالکترون‌ولت، امکان کوچک‌سازی و افزایش کثافت توان باتری‌های هستوی را نوید می‌دهند (Kowal et al., 2025).

در امتداد همین مسیر تکاملی از نمونه اولیه کم‌کارایی پرومیتیومی دهه ۱۹۶۰ (Flicker et al., 1964b) تا معماری‌های پیشرفته  $\text{Dimond}/\text{Ga}_2\text{O}_3$  امروزی (Chen et al., 2025) باتری‌های الماسی موسوم به NDB (Nano Diamond Battery) به‌عنوان یکی از نویدبخش‌ترین مفاهیم نسل آینده مطرح شده‌اند. این تکنالوژی از ایزوتوپ  $^{14}\text{C}$  که از گرافیت بازیافتی ریکتورهای هستوی به دست می‌آید استفاده کرده و آن را در ساختار الماس مصنوعی محصور می‌کند تا الماس هم‌زمان نقش منبع تابش بتا، نیمه‌هادی مبدل انرژی (بتاولتائیک) و پوشش محافظ در برابر اشعه را ایفا کند. با توجه به نیمه‌عمر بسیار طولانی  $^{14}\text{C}$  (حدود ۵۷۳۰ سال)، این تکنالوژی نویدبخش منابع انرژی با طول عمر نظری تا ۲۸۰۰۰ سال است، هرچند همچون سایر باتری‌های بتاولتائیک، هنوز با محدودیت توان خروجی بسیار پایین و مرحله توسعه لابراتواری پیش تجاری مواجه است.

با توجه به این پیشینه، مقایسه باتری‌های لیتیم-آیونی، باتری‌های هستوی رادیوایزوتوپی پلوتونیومی (RTG) و باتری‌های الماسی هستوی NDB نه یک رقابت میان بدیل‌های معادل، بلکه مقایسه سه راه‌حل مکمل برای سه دسته متفاوت از نیاز انرژی است. هدف این تحقیق، انجام یک فراتحلیل تطبیقی بر روی اطلاعات فیزیکی و کیمیاوی منتشرشده درباره این سه تکنالوژی است تا با در نظر گرفتن محورهای چندگانه کثافت انرژی، ایمنی، طول عمر و رشد تکنالوژی، تصویری روشن و چندبعدی از نقاط قوت، محدودیت‌ها و بخش‌های کاربردی بهینه هر یک ارائه شود.

### روش تحقیق

این مطالعه با روش تحلیل متاآنالیز کیفی-کمی (Narrative-Quantitative Meta-Analysis) و بر پایه مرور منظمی از منابع علمی، فنی و صنعتی منتشرشده در محدوده ۱۹۶۴ تا ۲۰۲۶ انجام شده است. روش جست‌وجو، معیارهای ورود و خروج و منابع اصلی داده در جدول زیر خلاصه شده‌اند:

جدول (۱). روش جست‌وجو، معیارهای ورود و خروج و منابع

| مرحله فراتحلیل | شرح                                                                                                                           |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| پایگاه‌های     | Web of Science, Scopus, ScienceDirect, NASA Science, arXiv, پایگاه‌های                                                        |
| جستجو شده      | اسناد ثبت اختراع (USPTO) و منابع فنی معتبر شرکتی/تحقیقاتی                                                                     |
| محدوده زمانی   | ۱۹۶۴ تا ۲۰۲۶ (با تمرکز خاص بر منابع جدید برای تکنالوژی NDB که هنوز در مرحله توسعه منابع                                       |
| منابع          | است)                                                                                                                          |
| کلمات کلیدی    | lithium-ion battery energy density, plutonium-۲۳۸ RTG specifications, NDB nano diamond battery carbon-۱۴, betavoltaic battery |
| جستجو          | گزارش اطلاعات کمی فیزیکی یا کیمیاوی قابل استناد (کثافت انرژی، ولتاژ، نیمه‌عمر، توان                                           |
| معیار ورود     | خروجی)                                                                                                                        |
| معیار خروج     | منابع بدون داده کمی، تبلیغاتی صرف، یا فاقد ارجاع فنی/علمی                                                                     |

پس از جمع‌آوری منابع، اطلاعات کمی مرتبط با هر تکنالوژی (کثافت انرژی، ولتاژ، نیمه‌عمر، مکانیزم تبدیل انرژی، توان خروجی نمونه) استخراج و در جداول استاندارد ثبت شد. در مواردی که مقادیر گزارش شده در منابع مختلف دارای محدوده بودند (مانند کثافت انرژی باتری‌های لیتیمی که بسته به خواص کیمیاوی کتود متفاوت است)، محدوده کامل گزارش شده حفظ شد تا از ساده‌سازی نادرست جلوگیری شود. از آن‌جا که تکنالوژی



NDB هنوز به مرحله تجاری سازی کامل نرسیده، بخشی از اطلاعات آن بر پایه گزارش های تحقیقاتی پوهنتون بریستول و برآوردهای نظری منتشر شده در منابع فنی است و نه مشخصات نهایی محصول تجاری.

## یافته ها و نتایج

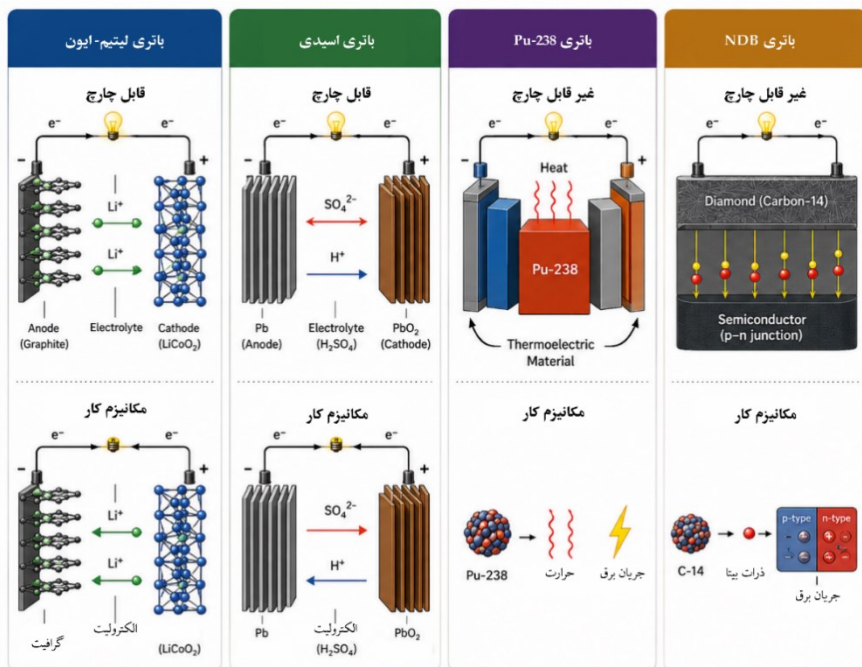
جدول (۲). مقایسه ویژگی های فنی، عملکردی و محدودیت های تکنالوژی های

### مختلف ذخیره سازی و تبدیل انرژی

| تکنالوژی            | نوع تبدیل انرژی | ولتاژ (V)     | طول عمر         | کثافت انرژی/توان       | مزیت کلیدی       | محدودی ت اصلی | منابع                                                                                 |
|---------------------|-----------------|---------------|-----------------|------------------------|------------------|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Lead-acid           | الکتروکیمیای    | 2.04          | 200-1000 چرخه   | 30-50 Wh/kg            | قیمت کم          | عمر کوتاه     | (Barelli et al., 2015; Gao, 2024; Zhu et al., 2011)                                   |
| NiCd                | الکتروکیمیای    | 1.2-1.3       | 1500-3000       | $\approx 50$ Wh/kg     | دوام زیاد        | خودتخلیه بالا | (Bullich-Massagué et al., 2020; Hadjipaschalis et al., 2009; Symeonidou et al., 2021) |
| NiMH                | الکتروکیمیای    | $\approx 1.2$ | 300-8000        | 60-120 Wh/kg           | ظرفیت بیشتر      | خودتخلیه زیاد | (Hariprakash et al., 2025; Shahzad & Iqbal Cheema, 2024; Symeonidou et al., 2021)     |
| Li-ion              | الکتروکیمیای    | 3.6-3.9       | 1500-5000       | 170-280 Wh/kg          | کارایی بالا      | کاهش ظرفیت    | (Gargiulo et al., 2026; Kotarela et al., 2026; Liu et al., 2022)                      |
| Li-metal            | الکتروکیمیای    | 4-5           | $\approx 200$ + | بسیار زیاد             | انرژی مخصوص بالا | ایمنی پایین   | (Ban et al., 2023; Karimi et al., 2025; Wang & Sheng, 2026; Zhang et al., 2026)       |
| Li/SOC <sub>2</sub> | الکتروکیمیای    | —             | >20 سال         | بالا                   | عمر انبساطی      | غیرقابل چارچ  | (Flicker et al., 1964a)                                                               |
| RTG (Pu-238)        | رادیوایزوتوپ    | —             | 87.7 سال        | 0.55 W g <sup>-1</sup> | بسیار زیاد       | عمر مخصوص کم  | (Artun, 2022; Bennett, 2003; Meseguer et                                              |

|                                                                                                      |                    |                       |                              |             |                |            |                         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------------------|------------------------------|-------------|----------------|------------|-------------------------|
| al., 2012;<br>Ritz &<br>Peterson,<br>2004)                                                           |                    |                       |                              |             |                |            |                         |
| (Eiting et al.,<br>2006)                                                                             | توان بسیار<br>کم   | بدون نیاز<br>به چارج  | $\mu\text{W-nW}$             | ماه‌ها      | 0.128<br>-0.72 | بتاولتائیک | Betavoltaic<br>(Si/SiC) |
| (Bauer et al.,<br>1995; Kim et<br>al., 2025;<br>Pomorski et<br>al., 2005;<br>Shokri et al.,<br>2025) | تکنالوژی<br>نوظهور | فوق‌العاد<br>ه پایدار | nW-354<br>$\mu\text{W/cm}^3$ | 5000<br>سال | 3.7-<br>mV     | بتاولتائیک | Diamond<br>(C-14)       |

جدول (۲)، ویژگی‌های اصلی تکنالوژی‌های مختلف شامل باتری‌های الکتروکیماوی، سیستم‌های رادیوایزوتوبی و تکنالوژی‌های بتاولتائیک را از نظر نوع تبدیل انرژی، ولتاژ، طول عمر، کثافت انرژی/توان، مزیت کلیدی و محدودیت اصلی نشان می‌دهد. نتایج بیانگر تفاوت قابل توجه میان تکنالوژی‌ها از نظر عمر عملیاتی و کثافت انرژی/توان است؛ به طوری که باتری‌های لیتیم آیونی و لیتیم فلزی کثافت انرژی بالاتری دارند، درحالی که تکنالوژی‌های RTG و الماس  $^{14}\text{C}$  به دلیل عمر بسیار طولانی، برای کاربردهای بلندمدت و کم‌نیاز به نگهداری مناسب‌تر هستند. با این حال، محدودیت‌هایی مانند توان مخصوصه پایین، ایمنی، خودتخلیه و غیرقابل چارج بودن، انتخاب تکنالوژی مناسب را به شرایط کاربرد وابسته می‌سازد.



شکل (۱). مکانیزم کار انواع باتری‌ها

جدول (۳). ارزیابی مقایسه‌ای رشد تکنالوژی، توان خروجی، دوام و چشم‌انداز آینده

### تکنالوژی‌های مختلف انرژی

| تکنالوژی  | رشد تکنالوژی | توان خروجی | دوام | قابلیت کار چار   | وضعیت کاربردی | منابع                                                                                 |
|-----------|--------------|------------|------|------------------|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Lead-acid | زیاد         | متوسط      | دارد | موتورها          | رو به کاهش    | (Barelli et al., 2015; Gao, 2024; Zhu et al., 2011)                                   |
| NiCd      | متوسط        | زیاد       | دارد | صنعتی            | محدود         | (Bullich-Massagué et al., 2020; Hadjipaschalis et al., 2009; Symeonidou et al., 2021) |
| NiMH      | متوسط        | زیاد       | دارد | موتورهای هابیرید | پایدار        | (Hariprakash et al., 2025;                                                            |

|                                                                                    |                      |                   |       |                 |          |                                                                                     |                      |
|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-------------------|-------|-----------------|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Shahzad & Iqbal, Cheema, 2024; Symeonidou et al., 2021)                            | تجهیزات قابل حمل، EV | تکنالوژی          | دارد  | زیاد            | زیاد     |    | Li-ion               |
| (Gargiulo et al., 2026; Kotarela et al., 2026; Liu et al., 2022)                   | در حال توسعه         | نسل بعدی EV       | دارد  | متوسط           | زیاد     |    | Li-metal             |
| (Ban et al., 2023; Karimi et al., 2025; Wang & Sheng, 2026; Zhang et al., 2026)    | کاربرد خاص           | تجهیزات نظامی     | ندارد | بسیار زیاد      | کم       |    | Li/SOCl <sub>2</sub> |
| (Flicker et al., 1964a)                                                            | بسیار تخصصی          | فضاپیما           | ندارد | فوق العاده زیاد | کم       |    | RTG                  |
| (Artun, 2022; Bennett, 2003; Meseguer et al., 2012; Ritz & Peterson, 2004)         | تحقیقی               | MEM.S حسگرها      | ندارد | زیاد            | بسیار کم |  | Betavoltaic (Si/SiC) |
| (Eiting et al., 2006)                                                              | آینده دار            | ایمپلنت، فضا، IoT | ندارد | فوق العاده زیاد | بسیار کم |  | Diamond (C-14)       |
| (Bauer et al., 1995; Kim et al., 2025; Pomorski et al., 2005; Shokri et al., 2025) |                      |                   |       |                 |          |                                                                                     |                      |

جدول (۳)، تکنالوژی‌های مختلف تولید و ذخیره انرژی را بر اساس رشد تکنالوژی، توان خروجی، دوام، قابلیت چارژ، کاربردهای شاخص و وضعیت آینده مقایسه می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که باتری‌های لیتیم آیونی در حال حاضر به‌عنوان تکنالوژی غالب در کاربردهای قابل حمل و موتوره‌ای برقی شناخته می‌شوند، درحالی‌که تکنالوژی‌های لیتیم‌فلزی و الماس <sup>14</sup>C دارای چشم‌انداز توسعه‌ای و آینده‌دار هستند. در مقابل،



تکنالوژی‌هایی مانند RTG و باتری‌های بتاولتاژیک به دلیل کاربردهای تخصصی، توانایی عملکرد طولانی‌مدت و نیاز کم به نگهداری، بیشتر در حوزه‌های خاص مانند فضا، حسگرها و سیستم‌های کم‌توان مورد استفاده قرار می‌گیرند.

جدول (۴). مقایسه عمر چرخه و کارایی تکنالوژی‌های مختلف باتری و منابع توان

#### الکتروکیمیای

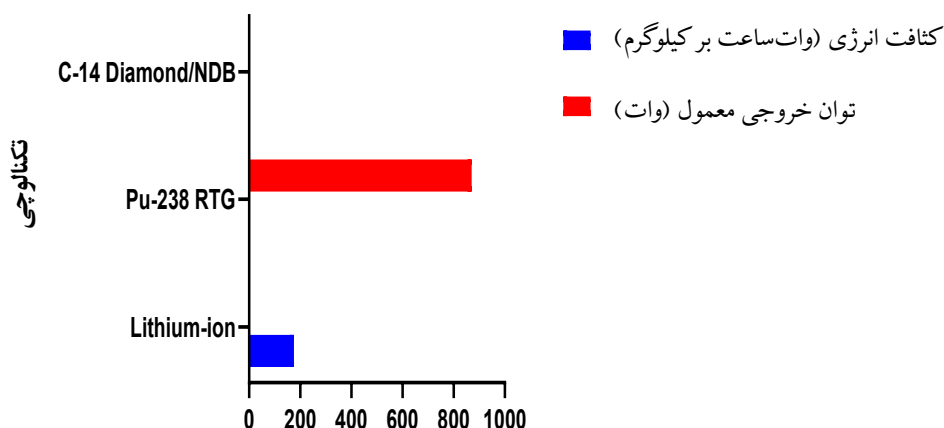
| تکنالوژی                      | تعداد داده (n) | عمر چرخه (Cycle life) (Mean $\pm$ SD) | کارایی (%) (Mean $\pm$ SD) | محدوده کارایی (%) |
|-------------------------------|----------------|---------------------------------------|----------------------------|-------------------|
| Lead-acid                     | 1              | (SD: NA) 600                          | —                          | —                 |
| NiCd                          | 2              | 2250 $\pm$ 530                        | —                          | —                 |
| NiMH                          | 3              | 3283 $\pm$ 3512                       | —                          | —                 |
| Lithium-ion                   | 3              | 2833 $\pm$ 1759                       | 97.0 $\pm$ 6.36            | 90–99             |
| Lithium-metal                 | 1              | (SD: NA)200                           | (SD: NA)99.4               | 99.4              |
| Carbon-14 diamond betavoltaic | 3              | —                                     | 6.42 $\pm$ 6.04            | 0.07–12.8         |
| کل داده‌ها                    | 13             | —                                     | —                          | —                 |

جدول (۴)، خلاصه‌ای از اطلاعات استخراج شده از مطالعات مختلف درباره عمر چرخه و کارایی تکنالوژی‌های منتخب ذخیره‌سازی و تولید توان را ارائه می‌کند. مقادیر به صورت میانگین  $\pm$  انحراف معیار گزارش شده‌اند و در مواردی که تعداد داده‌ها کافی نبوده است، انحراف معیار به عنوان NA مشخص شده است.

#### کثافت انرژی و توان

داده‌ها نشان می‌دهد باتری‌های لیتیوم-آیونی با کثافت انرژی مخصوصه 100-250 Wh kg<sup>-1</sup>، به مراتب بالاترین کثافت انرژی لحظه‌ای را در میان سه تکنالوژی دارند و به همین دلیل برای کاربردهایی که نیاز به توان بالا در حجم و وزن محدود دارند (موتورهای برقی، الکترونیک مصرفی) گزینه برتر باقی می‌مانند. در مقابل، باتری‌های پلوتونیومی از نظر توان لحظه‌ای پایین‌تر عمل می‌کنند، اما به دلیل واپاشی پیوسته و پایدار هستوی، می‌توانند توان ثابتی (مانند 870 W در فضاییمای کاسینی) را برای دهه‌ها بدون افت ناگهانی فراهم کنند. باتری‌های الماسی NDB در پایین‌ترین سطح توان خروجی قرار دارند (در

حد میکرووات تا میلی‌وات) و این محدودیت اصلی‌ترین مانع تجاری‌سازی گسترده آن‌ها محسوب می‌شود (Bennett, 2003; Gao, 2024; Kim et al., 2025; Shokri et al., 2025).



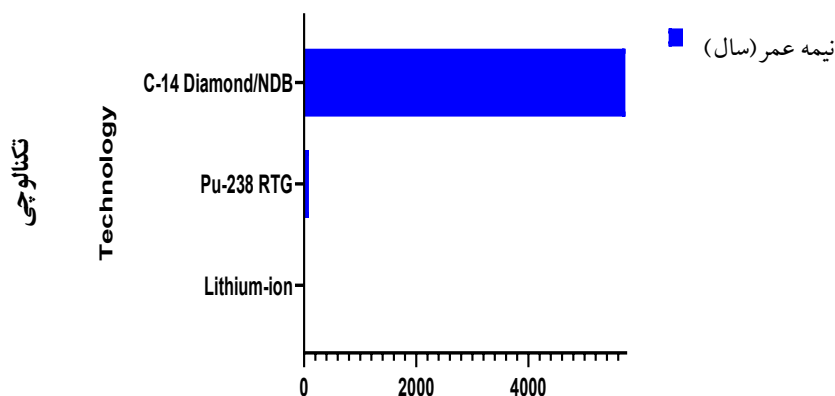
شکل (۲). مقایسه کثافت انرژی و توان خروجی

در شکل (۲) تفاوت بنیادین میان یک سامانه ذخیره‌سازی الکتروکیمیای و دو منبع تولید توان ایزوتوپی را نشان می‌دهد. باتری لیتیم-آیون با کثافت انرژی 175 Wh/kg بر اساس ذخیره انرژی عمل می‌کند، درحالی‌که  $^{238}\text{Pu}$  و باتری بتاولتائیک الماس- $^{14}\text{C}$  به‌جای ذخیره‌سازی، توان الکتریکی را به‌طور پیوسته از واپاشی رادیواکتیو تولید می‌کنند؛ به همین دلیل شاخص کثافت انرژی برای این دو معنادار نیست. در عوض، RTG توانی در حد 870 W و باتری  $^{14}\text{C}$  توانی در حد 0.001 W ارائه می‌دهد، اما در ازای طول عمر عملیاتی به‌مراتب طولانی‌تر (Agyekum, 2025).

### طول عمر

از نظر طول عمر، ترتیب برتری کاملاً معکوس کثافت توان است. باتری‌های لیتیومی معمولاً بین ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ سیکل چارج (در حدود ۲ تا ۵ سال کاربرد واقعی) دوام می‌آورند. باتری‌های پلوتونیومی به دلیل نیمه‌عمر حدود ۸۸ ساله  $^{238}\text{Pu}$  می‌توانند تا چندین دهه انرژی تولید کنند. باتری‌های الماسی NDB، به دلیل نیمه‌عمر بسیار طولانی  $^{14}\text{C}$  (تقریباً ۵۷۳۰ سال)، از نظر نظری می‌توانند هزاران سال بدون افت محسوس عمل کنند؛ برخی گزارش‌ها

عمر نظری تا ۲۸'۰۰۰ سال را برای این تکنالوژی مطرح کرده‌اند (Bennett, 2003; Karimi et al., 2025).

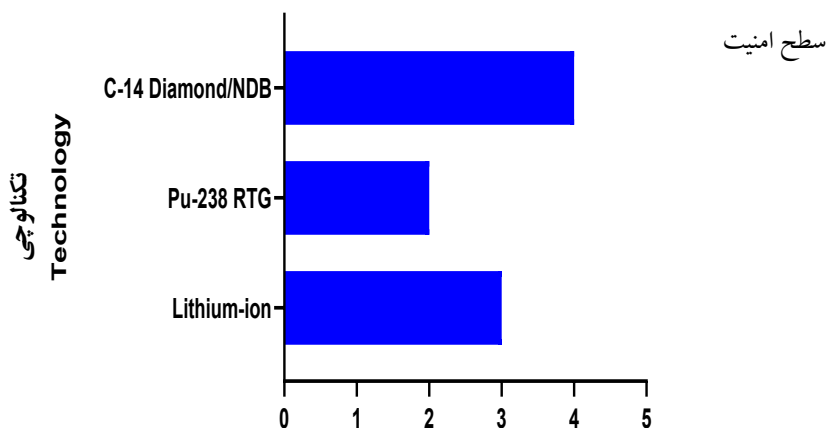


شکل (۳). مقایسه طول عمر باتری‌ها

در شکل (۳) مقایسه طول عمر سه تکنالوژی نشان داده شده است. باتری  $^{14}\text{C}$  علی‌رغم توان بسیار پایین، به دلیل بی‌نیازی از نگهداری، مقاومت به تابش و طول عمر فوق‌العاده (متناسب با نیمه‌عمر ۵۷۳۰ ساله  $^{14}\text{C}$ )، بهترین گزینه برای IoT/ حسگرها و تأمین توان بلندمدت است.

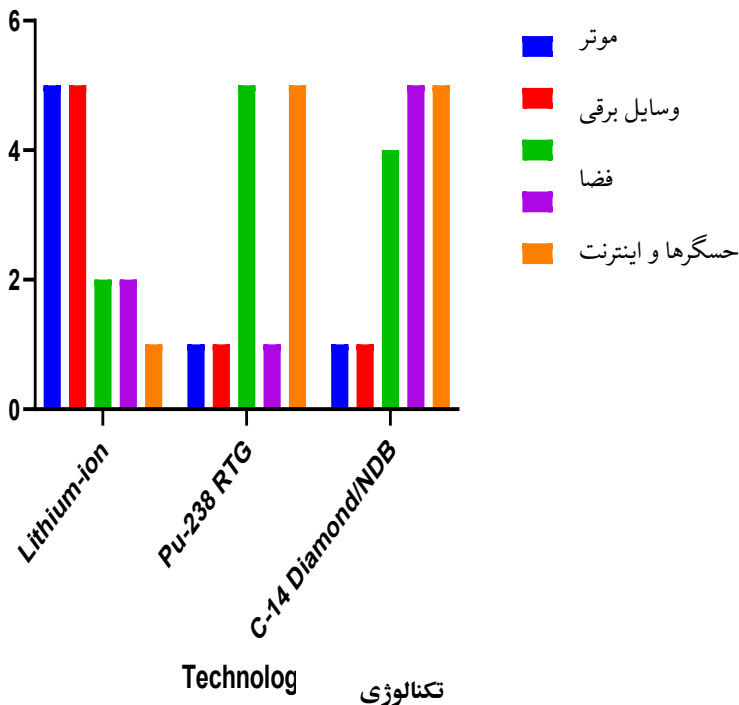
### ایمنی باتری‌ها

باتری‌های لیتیومی اشعه‌زا نیستند اما خطرات ایمنی آن‌ها عمدتاً کیمیاوی و حرارتی (احتمال آتش‌سوزی در اثر فرار حرارتی) است. باتری‌های پلوتونیومی ذرات آلفا تولید می‌کنند که به‌سادگی توسط پوسته فلزی مسدود می‌شوند و عملاً تابش گامای قابل‌توجهی ندارند، اما نگرانی اصلی آن‌ها احتمال پراکندگی رادیواکتیو در صورت آسیب فیزیکی شدید (مانند سانحه پرتاب فضایی) است. باتری‌های الماسی NDB ذرات بتا با انرژی نسبتاً پایین تولید می‌کنند که توسط خود ساختار الماس محصور و مهار می‌شوند؛ طراحان این تکنالوژی ادعا می‌کنند که الماس به دلیل سختی و پایداری کیمیاوی بالا، یک محفظه ایمن طبیعی برای ماده رادیواکتیو فراهم می‌کند (Hariprakash et al., 2025; Wang & Sheng, 2026).



شکل (۴). مقایسه ایمنی

شکل (۴) مقایسه‌ای از نظر ایمنی باتری‌ها را نشان می‌دهد که لیتیم-آیون از نظر خطر گرمادگی حرارتی، آتش‌سوزی و انفجار در صورت آسیب فیزیکی یا چارچ بیش‌ازحد در سطح متوسط و باتری RTG به دلیل رادیوتوکسیک بودن ماده هستوی و الزامات نگهداری پوشش خاص آن، پایین‌ترین سطح ایمنی را در این مقایسه دارد. باتری  $^{14}\text{C}$  به دلیل جذب تقریباً کامل ذرات بتای کم‌انرژی درون بستر الماس و نبود خطر کیمیاوی یا آتش‌سوزی، بالاترین سطح ایمنی را کسب کرده است (Agyekum, 2025; Mauger & Julien, 2017)



شکل (۵). مقایسه کاربرد تکنالوژی‌ها

در شکل (۵) باتری لیتیم-آیون به دلیل توان و کثافت انرژی بالا برای EV و برق مصرفی مناسب‌ترین گزینه است، اما افت تدریجی عملکرد و نیاز به چارژ مجدد آن را برای فضا، حسگرهای IoT و تأمین توان بلندمدت نامناسب می‌کند. باتری  $^{238}\text{Pu}$  با توان پایدار و اثبات شده در دهه‌ها مأموریت فضایی، بالاترین سطح را در فضا و توان بلندمدت دارد، هرچند وزن، هزینه و ملاحظات ایمنی - تنظیمی آن را از کاربردهای مصرفی خارج می‌سازد. باتری  $^{14}\text{C}$  نیز علی‌رغم توان بسیار پایین، به دلیل بی‌نیازی از نگهداری، مقاومت به تابش و طول عمر بالا بهترین گزینه برای IoT/ حسگرها و تأمین توان بلندمدت است (Terranova, 2022).

## بحث

نتایج این تحلیل مقایسه‌ای نشان می‌دهد که ارزیابی تکنالوژی‌های ذخیره و تولید انرژی شامل باتری‌های لیتیم‌آیونی، باتری‌های هسته‌ای مبتنی بر  $^{238}\text{Pu}$  و باتری‌های الماس هسته‌ای NDB تنها بر اساس یک شاخص منفرد، مانند کثافت انرژی وزنی یا عمر کاری، می‌تواند به برداشت نادرست از جایگاه واقعی هر تکنالوژی منجر شود. در واقع، این تکنالوژی‌ها برای الگوهای کاملاً متفاوت مصرف انرژی و نیازهای عملیاتی توسعه یافته‌اند. باتری‌های لیتیم‌آیونی عمدتاً برای کاربردهایی طراحی شده‌اند که در آنها توان خروجی نسبتاً بالا، تخلیه سریع انرژی و امکان چارچ مجدد مکرر اهمیت دارد؛ درحالی‌که باتری‌های مبتنی بر  $^{238}\text{Pu}$  برای مأموریت‌های فضایی و سیستم‌هایی مناسب هستند که در آنها دسترسی به نور خورشید یا امکان چارچ مجدد عملاً وجود ندارد و تأمین توان پایدار در محدوده‌های زمانی چندین ساله یک نیاز اساسی محسوب می‌شود. در مقابل، تکنالوژی NDB با هدف تأمین توان بسیار کم اما فوق‌العاده پایدار و طولانی‌مدت برای کاربردهایی مانند حسگرهای دورافتاده، تجهیزات طبی و سیستم‌هایی توسعه یافته است که تعویض یا چارچ مجدد منبع تغذیه در آنها دشوار، پرهزینه یا غیرممکن است. بنابراین، نتایج حاضر نشان می‌دهد که برتری یک تکنالوژی نسبت به تکنالوژی دیگر باید در چارچوب تناسب تکنالوژی با نیاز کاربردی تفسیر شود، نه بر اساس مقایسه مطلق شاخص‌های عملکردی.

از دیدگاه توسعه تکنالوژی و هزینه نیز تفاوت میان این سه سیستم بسیار قابل توجه است. باتری‌های لیتیم‌آیونی به دلیل تولید انبوه، زنجیره تأمین توسعه‌یافته و رشد صنعتی، در حال حاضر از نظر هزینه به ازای واحد انرژی، گزینه‌ای اقتصادی‌تر محسوب می‌شوند. در مقابل، باتری‌های  $^{238}\text{Pu}$  به علت محدودیت منابع، هزینه بالای تولید و دسترسی بسیار محدود به ایزوتوپ  $^{238}\text{Pu}$ ، عمدتاً به کاربردهای فضایی و راهبردی اختصاص یافته‌اند. باتری‌های الماسی NDB اگرچه از نظر مفهومی می‌توانند از کاربن حاصل از پسماندهای گرافیتی راکتورهای هسته‌ای بهره ببرند، اما پروسه‌های خلص‌سازی، تبدیل کاربن به ساختار الماسی و ساخت دقیق ساختارهای نانومقیاس، همچنان هزینه‌بر و پیچیده است.

افزون بر این، ناهمخوانی اطلاعات منتشرشده درباره NDB یکی از محدودیت‌های مهم مقایسه حاضر محسوب می‌شود؛ زیرا بخشی از ارقام مربوط به توان، طول عمر و عملکرد این تکنالوژی هنوز به صورت مستقل و گسترده در مقالات داوری شده تأیید نشده و برخی برآوردها بر اساس اطلاعات نظری یا اطلاعات ارائه شده توسط شرکت‌های توسعه‌دهنده این تکنالوژی انجام شده است. از این رو، نتایج مربوط به NDB باید با احتیاط بیشتری نسبت به دو تکنالوژی بالغ‌تر تفسیر شود.

در کنار عملکرد الکتریکی و اقتصادی، ایمنی حرارتی نیز یکی از عوامل تعیین‌کننده در ارزیابی تکنالوژی‌های ذخیره انرژی، به ویژه سیستم‌های مبتنی بر لیتیوم، است. بررسی راهبردهای ایمنی حرارتی نشان می‌دهد که ایمنی باتری‌های لیتیومی نمی‌تواند تنها از طریق بهبود یک جزء منفرد تأمین شود، بلکه نیازمند یک رویکرد چندلایه و یکپارچه است. اصلاح مواد کتود، انود و الکترولیت به عنوان نخستین خط دفاعی، می‌تواند تعامل‌پذیری مواد، ناپایداری الکتروکیمیایی و احتمال آغاز پروسه‌های منتهی به فرار حرارتی را کاهش دهد. با این حال، افزایش کثافت انرژی و توان بالا در باتری‌های لیتیومی سبب می‌شود که حتی در صورت بهبود پایداری مواد، خطر گسترش فرار حرارتی همچنان یک مشکل جدی باقی بماند. در این زمینه، عایق‌های حرارتی مانند آئروجل‌ها، مواد تغییر فاز و هایدروجل‌ها با محدودکردن انتقال گرما میان سلول‌ها، در کنار روش‌های دفع حرارت نظیر خنک‌کاری مایع، گازی و استفاده از لوله‌های حرارتی، می‌توانند به کنترل انتشار حرارتی کمک کنند. این موضوع نشان می‌دهد که عایق‌کاری و دفع حرارت راهبردهای رقیب نیستند، بلکه به عنوان اجزای مکمل یک معماری ایمنی چندلایه عمل می‌کنند.

هم‌چنین، سیستم مدیریت باتری با پایش مستمر درجه حرارت، ولتاژ و جریان، امکان شناسایی شرایط غیرعادی را پیش از رسیدن سیستم به مرحله بحرانی فراهم می‌سازد؛ درحالی‌که مواد خاموش‌کننده و سیستم‌های اطفای حریق به عنوان آخرین لایه دفاعی در برابر آتش‌سوزی و حوادث شدید حرارتی عمل می‌کنند. از این نظر، تفاوت اساسی میان سه تکنالوژی مورد بررسی آشکارتر می‌شود: باتری‌های لیتیومی با وجود برتری در توان و قابلیت چارج مجدد، با مشکلات پیچیده‌تری در زمینه مدیریت حرارتی و ایمنی مواجه‌اند؛

درحالی‌که باتری‌های  $^{238}\text{Pu}$  و NDB به دلیل ماهیت تولید انرژی رادیوایزوتوپی، الگوی متفاوتی از ریسک، کنترل و مدیریت سیستم دارند. بنابراین، ارزیابی تکنالوژی‌های مورد مطالعه باید علاوه بر شاخص‌های عملکردی، هزینه و رشد تکنالوژی، معیارهای ایمنی و پیچیدگی مدیریت سیستم را نیز دربرگیرد.

در مجموع، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که هیچ‌یک از تکنالوژی‌های بررسی‌شده به‌طور مطلق جایگزین دیگری نیستند. باتری‌های لیتیومی در کاربردهای متحرک و سیستم‌های نیازمند توان بالا و چارچ مجدد مکرر مزیت آشکاری دارند؛ باتری‌های پلوتونیومی برای مأموریت‌های فضایی طولانی‌مدت و محیط‌های فاقد زیرساخت چارچ، همچنان جایگاه منحصربه‌فردی دارند؛ و باتری‌های الماسی NDB، با وجود عدم قطعیت‌های موجود در اطلاعات عملکردی و مرحله نسبتاً اولیه توسعه، ظرفیت بالقوه‌ای برای کاربردهای بسیار کم‌مصرف و فوق‌العاده بلندمدت نشان می‌دهند. از این‌رو، مسیر آینده توسعه سیستم‌های انرژی به سمت تنوع تکنالوژی و انتخاب کاربردمحور پیش خواهد رفت؛ به‌گونه‌ای که ترکیب بهینه عملکرد، طول عمر، هزینه، ایمنی و الزامات محیط عملیاتی، معیار اصلی انتخاب تکنالوژی باشد. به‌طور کلی، این مقایسه نشان می‌دهد که آینده سیستم‌های انرژی نه در برتری مطلق یک تکنالوژی، بلکه در هم‌زیستی و تکامل موازی تکنالوژی‌های مختلف برای پاسخ‌گویی به نیازهای متفاوت انرژی نهفته است.

### نتیجه‌گیری

این تحلیل نشان داد که باتری‌های لیتیومی، باتری‌های هستوی رادیوایزوتوپی پلوتونیومی و باتری‌های الماسی هستوی NDB، به‌جای رقابت مستقیم، مکمل یک‌دیگر در طیف گسترده‌ای از نیازهای انرژی هستند. باتری‌های لیتیومی برترین گزینه از نظر کثافت توان و هزینه برای کاربردهای روزمره باقی می‌مانند. باتری‌های پلوتونیومی همچنان تنها گزینه اثبات‌شده برای تأمین انرژی پایدار در مأموریت‌های فضای عمیق هستند. باتری‌های الماسی NDB، در صورت غلبه بر مشکل کثافت توان پایین و هزینه تولید، پتانسیل ایجاد تحول در بخش منابع انرژی بسیار کم‌مصرف و بلندمدت مانند تجهیزات طبی کاشتنی و حسگرهای بدون نیاز به نگهداری را دارند. پیشنهاد می‌شود تحقیق‌های آینده بر بهبود



بازده تبدیل انرژی در تکنالوژی بتاولتائیک الماسی و کاهش هزینه تولید ایزوتوپ‌های  
مورد استفاده متمرکز شود.

## منابع

- Agyekum, E. B. (2025). Beta-voltaic nuclear batteries – review of recent developments, challenges and future research directions. *Journal of Energy Storage*. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.116701>
- Artun, O. (2022). A new production route of Gadolinium-148 for use in Radioisotope Thermoelectric Generators. *Applied Radiation and Isotopes*, 185, 110222. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2022.110222>
- Ban, A.-H., Pyo, S.-J., Jin Bae, W., Woo, H.-S., Moon, J., & Kim, D.-W. (2023). Dual-type gel polymer electrolyte for high-voltage lithium metal batteries with excellent cycle life. *Chemical Engineering Journal*, 475, 146266. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.146266>
- Barelli, L., Desideri, U., & Ottaviano, A. (2015). Challenges in load balance due to renewable energy sources penetration: The possible role of energy storage technologies relative to the Italian case. *Energy*, 93, 393–405. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.09.057>
- Bauer, C., Baumann, I., Colledani, C., Conway, J., Delpierre, P., Djama, F., Dulinski, W., Fallou, A., Gan, K. K., & Gilmore, R. S. (1995). Radiation hardness studies of CVD diamond detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 367(1–3), 207–211.
- Bennett, G. L. (2003). Space Nuclear Power. *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, 537–553. <https://doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00715-8>
- Bullich-Massagué, E., Cifuentes-García, F.-J., Glenny-Crende, I., Cheah-Mañé, M., Aragüés-Peñalba, M., Díaz-González, F., & Gomis-Bellmunt, O. (2020). A review of energy storage technologies for large scale photovoltaic power plants. *Applied Energy*, 274, 115213. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115213>
- Chen, Z., Liu, B., Zhang, W., Dai, B., & Zhu, J. (2025). High open-circuit voltage nuclear batteries enabled by integrated stacked p-diamond/n-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> heterojunction. *Journal of Energy Storage*. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.118454>
- Eiting, C. J., Krishnamoorthy, V., Rodgers, S., George, T., Robertson, J. D., & Brockman, J. (2006). Demonstration of a radiation resistant, high efficiency SiC betavoltaic. *Applied Physics Letters*, 88(6). <https://doi.org/10.1063/1.2172411>
- Flicker, H., Loferski, J. J., & Elleman, T. S. (1964a). Construction of a promethium-147 atomic battery. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 11(1), 2–8. <https://doi.org/10.1109/T-ED.1964.15271>
- Flicker, H., Loferski, J. J., & Elleman, T. S. (1964b). Construction of a Promethium-147 Atomic Battery. *IEEE Transactions on Electron Devices*. <https://doi.org/10.1109/T-ED.1964.15271>
- Gao, B. (2024). Electrification and hydrogenation in integrated building-transportation systems for sustainability. In *Advances in Digitalization and*



- Machine Learning for Integrated Building-Transportation Energy Systems* (pp. 63–89). Elsevier.
- Gargiulo, P., Gaele, M. F., Costantini, A., & Di Palma, T. M. (2026). Batteries for wearable and implantable biomedical devices: a comprehensive review. *Biosensors and Bioelectronics*, *X*, 28, 100723. <https://doi.org/10.1016/j.biosx.2025.100723>
- Hadjipaschalis, I., Poullikkas, A., & Efthimiou, V. (2009). Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *13*(6–7), 1513–1522.
- Hariprakash, B., Shukla, A. K., & Venugoplan, S. (2025). *Batteries–Battery Types–Nickel Batteries| Nickel-Metal Hydride: Overview*.
- Karimi, E., Iglauer, S., & Azhar, M. R. (2025). Interface engineering and safety in solid-state batteries: Advancing from human-centered insights to AI-driven innovations. *Advances in Colloid and Interface Science*, 103686.
- Kim, C. H., Naseem, M. B., Lee, J., Kim, H. S., Lee, S., & In, S.-I. (2025). Novel perovskite-based betavoltaic cell: dual additive strategy for enhanced FAPbI 3  $\alpha$ -phase stability and performance. *Chemical Communications*, *61*(32), 5930–5933.
- Kotarela, F., Kyritsis, A., & Papanikolaou, N. (2026). *Introduction to energy storage technology*.
- Kowal, D., Mahato, S., Makowski, M., Arramel, A., & Birowosuto, M. D. (2025). Current trends in material research for nuclear batteries: Harnessing metal perovskite halides and other chalcogenides for greater compactness and efficiency. *Applied Physics Reviews*. <https://doi.org/10.1063/5.0236524>
- Liu, C., Sun, J., Zheng, P., Jiang, L., Liu, H., Chai, J., Liu, Q., Liu, Z., Zheng, Y., & Rui, X. (2022). Recent advances of non-lithium metal anode materials for solid-state lithium-ion batteries. *Journal of Materials Chemistry A*, *10*(32), 16761–16778. <https://doi.org/10.1039/D2TA03905B>
- Mauger, A., & Julien, C. M. (2017). Critical review on lithium-ion batteries: are they safe? Sustainable? *Ionics*. <https://doi.org/10.1007/s11581-017-2177-8>
- Meseguer, J., Pérez-Grande, I., & Sanz-Andrés, A. (2012). *Spacecraft thermal control*. Elsevier.
- Pomorski, M., Berdermann, E., Ciobanu, M., Martemyanov, A., Moritz, P., Rebisz, M., & Marczewska, B. (2005). Characterisation of single crystal CVD diamond particle detectors for hadron physics experiments. *Physica Status Solidi (a)*, *202*(11), 2199–2205. <https://doi.org/10.1002/pssa.200561929>
- Ritz, F., & Peterson, C. E. (2004). Multi-mission radioisotope thermoelectric generator (MMRTG) program overview. *2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings (IEEE Cat. No. 04TH8720)*, *5*, 2950–2957.
- Shahzad, K., & Iqbal Cheema, I. (2024). Low-carbon technologies in automotive industry and decarbonizing transport. *Journal of Power Sources*, *591*, 233888. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233888>
- Shokri, A., Amirmazlaghani, M., Fathi, H., & Farahani, N. D. (2025). Betavoltaic cells based on Si/wide-bandgap material heterojunctions: A hybrid MCNP-

- TCAD approach for radioisotope devices. *Nuclear Engineering and Technology*, 103825.
- Symeonidou, M. M., Zioga, C., & Papadopoulos, A. M. (2021). Life cycle cost optimization analysis of battery storage system for residential photovoltaic panels. *Journal of Cleaner Production*, 309, 127234. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127234>
- Terranova, M. L. (2022). Nuclear batteries: Current context and near-term expectations. *International Journal of Energy Research*. <https://doi.org/10.1002/er.8539>
- Wang, J., & Sheng, Z. (2026). Diluent-regulated structural design and interfacial stabilization mechanisms of locally high-concentration electrolytes for lithium metal batteries. *Sustainable Materials and Technologies*, 49, e02144. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2026.e02144>
- Zhang, W., Fang, Z., Yang, T., Han, Z., Cao, M., Zhang, C., Li, J., Liao, X., & Zhao, Y. (2026). Unlocking solvation configuration in non-flammable fluorinated electrolytes enables aggressive high-voltage chemistries in lithium-metal batteries. *Electrochimica Acta*, 574, 149371. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2026.149371>
- Zhu, W. H., Zhu, Y., & Tatarchuk, B. J. (2011). A simplified equivalent circuit model for simulation of Pb-acid batteries at load for energy storage application. *Energy Conversion and Management*, 52(8-9), 2794-2799. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.02.013>